

발 간 등 록 번 호
11-1480523-001095-01

NIER-SP2012-077

# 황사의 근원적 방지 대책 연구

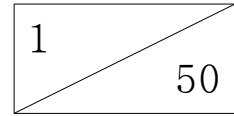
2012. 11

책임연구기관: 연세대학교



국립환경과학원





# 제 출 문

국립환경과학원장 귀하

본 보고서를 “황사의 근원적 방지 대책 연구” 영역의 최종보고서로 제출합니다.

2012년 11월

주 관 연 구 기 관 : 국립환경과학원

책 임 연 구 기 관 : 연세대학교

## ■ 연구진

소속기관	성명	전공	담당분야	비고
연세대학교	염성수	대기과학	총괄	연구책임자
연세대학교	신동빈	대기복사, 위성기상	위성 자료 분석	공동연구원
경희대학교	공우석	생물지리	생태	공동연구원
연세대학교	김종환	대기과학	기상조절자료분석, 현지답사, 문헌조사	연구보조원
연세대학교	박민수	대기과학	기상조절자료분석	연구보조원
연세대학교	최예지	대기과학	위성자료분석	연구보조원
연세대학교	반현주	대기과학	위성자료분석	연구보조원
경희대학교	신문현	생물지리	생태	연구보조원
경희대학교	박선욱	생물지리	생태	연구보조원
몽골기상청	에르덴델 게르		현지답사	연구보조원
연세대학교	염재민	대기과학	자료처리	보조원

# 목 차

<b>제 1 장 연구의 배경, 목적 및 필요성</b>	11
제 1 절 연구의 배경	11
제 2 절 연구목적 및 필요성	11
<b>제 2 장 황사 및 사막화 현황</b>	12
제 1 절 생태 개념 정의	12
1.1 사막화	12
1.2 황사	12
1.3 건조지	13
제 2 절 한반도 유입 황사 분석	14
제 3 절 몽골의 생태 환경	16
3.1 물리적 환경	16
3.2 생물 환경	21
제 4 절 몽골 사막화 분석	27
4.1 사막화 현황	27
4.2 스텝, 산림과 사막화	29
4.3 사막화 원인	34
<b>제 3 장 황사 및 사막화 방지대책</b>	54
제 1 절 몽골 현지 대책	54
1.1 몽골 기상청의 기상조절기술	54
1.2 몽골 정부의 사회경제적 대책	57
제 2 절 현재 한국의 몽골 사막화 방지 대책	59
2.1 정부	59
2.2 기업	60
2.3 민간단체	61
제 3 절 몽골 사막화 지역 조립	62
3.1 조립 방법에 따른 활착률	62
3.2 몽골 조립 성과 분석	65
제 4 절 선행연구	66
4.1 기상조절기술	66
4.2 그 외	67
제 5 절 기상조절기술 적용 검토	68
5.1 현지 조건	68

5.2 기상관측 자료 분석 .....	70
5.3 위성자료 분석 .....	79
5.4 한몽 인공증우 협력망 구축 .....	83
5.5 소결 .....	89
<b>제 4 장 결론</b> .....	90
제 1 절 기상조절기술 적용에 대한 고찰 .....	90
제 2 절 사회경제적 대응책 .....	94
<b>제 5 장 참고문헌</b> .....	97

## <표 목차>

표 1. 국가별 황사 정의 (환경부, 2008). .....	12
표 2. 국가 또는 국제기구별 황사 분류기준 (환경부, 2008). .....	13
표 3. 몽골의 자연경관 (Dorjgotov et al., 2004). .....	20
표 4. 몽골의 생태지형적 구분. ....	20
표 5. 몽골 토지 피복 분류 (MARCC, 2009). .....	22
표 6. 몽골의 주요 포유류 (Undarmaa., 2011). .....	23
표 7. 몽골 5대 가축수 변화 (NSOM, 2012a). .....	25
표 8. 몽골 목초지별 쇠퇴 정도. ....	30
표 9. 몽골 전략광산별 정보(광산명, 광물자원, 매장량). ....	45
표 10. 조립방법에 따른 수종별 활착률(울지자르갈, 2011). ....	64
표 11. 몽골 다섯 지역의 상대습도 월변동 (강조된 부분은 40% 이하인 경우). ....	72
표 12. 한몽 인공증우 전문가 네트워크. ....	88

## <그림 목차>

그림 1. 지난 40년(1965-2004년) 기간 동안 국내에 도달한 황사 경로 유형을 분류한 그림. ....	14
그림 2. 몽골의 식생 분포. ....	15
그림 3. 연중 몽골의 모래폭풍 발생 빈도 지역 분포. ....	15
그림 4. 몽골의 지세도(Batima et al., 2005). ....	16
그림 5. 몽골의 연강수량 분포. ....	18
그림 6. 쥬드에 의한 가축 피해. ....	18
그림 7. 몽골의 수계 구분 (Ochirbat, 2012). ....	19
그림 8. 스텝 지역의 양과 염소 (Kong, 2012). ....	26
그림 9. 스텝 지역의 양과 염소 (Kong, 2012). ....	26
그림 10. 몽골 사막화 진행 분포도 (파란 영역은 수계). ....	28
그림 11. 1982-1991 기간과 1992-2001 기간 사이 식생의 변화 (붉은색은 식생의 감	

소를, 녹색은 식생의 증가). .....	28
그림 12. 몽골 목초지의 가축수용용량 초과율 현황(2002년 기준) (추장민 외, 2003; Azzaya, 2003). .....	31
그림 13. 스텝지역의 토양침식에 따른 모래언덕의 확대 (Kong, 2012). .....	31
그림 14. 바양 우르기 지역 스텝식생 파괴 후 형성된 풍성사구에 의해 사막화가 진행 (Kong, 2012). .....	32
그림 15. 바양 우르기 지역의 스텝 식생 (Kong, 2012). .....	33
그림 16. 알타이 산맥의 이깔나무 (Kong, 2012). .....	33
그림 17. 몽골 테를지국립공원 내의 불법 벌목에 의한 산림 훼손(이수광, 2009). ·	34
그림 18. 1940년부터 2011년까지 몽골 연평균 (위) 기온 편차와 (아래) 강수량 편차의 변화. ....	35
그림 19. 1961년부터 2007년 사이에 강수량이 통계적으로 유의미하게( $p < 0.005$ ) 변화한 지역 분포. ....	36
그림 20. 과거 70년과 현재와의 강수량 변화 (Gomboluudev, 2011). ....	36
그림 21. 몽골 5대 가축 비율(2010년 기준) (NSOM, 2012a). ....	38
그림 22. 몽골 5대 가축 수와 비율 변화(단위 천) (NSOM, 2012a). ....	39
그림 23. 풍식이 빈번하게 발생하는 지역 (Ochirbat, 2012). ....	39
그림 24. 풍식으로 모래가 뒤덮여 황폐화된 지역 (Ochirbat, 2012). ....	40
그림 25. 염소에 의해 식생이 파괴된 스텝지역 (Ochirbat, 2012). ....	40
그림 26. 표침식이 빈번하게 발생하는 지역 (Ochirbat, 2012). ....	41
그림 27. 무식생대 상태에서 지표침식을 받은 건조 스텝지역 (Ochirbat, 2012). ···	41
그림 28. 스텝지역에서 나타나는 지표침식 (Ochirbat, 2012). ....	42
그림 29. 스텝지역에서 나타나는 지표침식 (Ochirbat, 2012). ....	42
그림 30. 몽골 울란바타르 농과학연구소에서 만난 목축 전문가. ....	43
그림 31. 몽골의 전략광산 위치. ....	44
그림 32. 몽골 광업투자액과 생산액(단위 백만 달러) (윤여필, 2008). ....	46
그림 33. 몽골의 대규모 노천광산. ....	47
그림 34. 몽골에서 운행 중인 차량의 수 변화 (NSOM, 2012b). ....	48
그림 35. 과도한 차량이동으로 인해 파괴된 지표식생 (Kong, 2012). ....	49
그림 36. 과도한 차량이동으로 인해 파괴된 지표식생 (Kong, 2012). ....	49
그림 37. 대형 트럭에 의해 발생하는 모래먼지 (Ochirbat, 2012). ....	50
그림 38. 모래먼지의 피해를 받은 차량 (Ochirbat, 2012). ....	50
그림 39. 몽골의 농경지 면적 변화(단위 천ha) (NSOM, 2012c). ....	51

그림 40. 몽골의 주요 작물 생산량 변화(단위 천 톤) (NSOM, 2012c).	52
그림 41. 연도별 몽골의 산불 피해 면적(단위: 1,000 ha).	53
그림 42. 산불과 불법벌목에 의해 파괴된 몽골 북부 산지.	53
그림 43. 몽골에서 사용 중인 (좌)지상연소기와 (우)로켓발사대.	55
그림 44. 인공증우 실험을 검증하기 위한 모바일 레이더.	55
그림 45. 2012년 7월 3일 오전 7시에 실시한 실험. 동심원의 중심부가 로켓 발사 지점이며, 왼쪽은 발사 직전, 오른쪽은 발사 9분 후.	56
그림 46. 달란자드가드에서 방목 중인 가축.	57
그림 47. 몽골 그린벨트 조성계획도 (김중관, 2009).	60
그림 48. 울지자르갈 연구지역 위치 (울지자르갈, 2011).	62
그림 49. 울지자르갈 연구지역 상세도 (울지자르갈, 2011).	62
그림 50. 저식조립방법 단면 모식도 (울지자르갈, 2011).	63
그림 51. 저식조립방법의 (좌)식재 과정, (우)식재된 지역 (울지자르갈, 2011).	63
그림 52. 일반조립방법 단면모식도 (울지자르갈, 2011).	63
그림 53. 일반조립방법의 (좌)식재 과정, (우)식재된 지역 (울지자르갈, 2011).	64
그림 54. 인공위성으로 측정한 NDVI 값 분포. (파란색이 0.07 이하, 노란색이 0.07 초과) (Natsagdorj, 2012).	69
그림 55. 여름철(7월 22일) 고비사막 황사발원지 부근(44.57°N, 103.78°E)의 식생과 토양 사진.	69
그림 56. 몽골 네 지역에서 관측한 운량 월변동.	70
그림 57. 몽골의 (위)1월과 (아래)7월 운량 분포. 검은색이 많을수록 운량이 많다.	71
그림 58. 모래폭풍이 발생할 당시의 습도 분포.	72
그림 59. 몽골 여러 지역의 상대습도 70%이상(좌), 80%이상(우) 기록 횟수(3시간 단위)의 연변동.	73
그림 60. 몽골 전체 지역 상위 300개 강수량 자료 분포.	74
그림 61. 몽골 여러 지역의 연강수량 연변동.	74
그림 62. 몽골 여러 지역의 강수 기록 횟수(3시간 단위) 연변동.	75
그림 63. 1990년 6월 러시아 과학자들이 몽골 상공에서 관측한 구름 내 빙정 입자 수농도의 수평 변동. (세로축 단위는 $m^{-3}$ ).	76
그림 64. 2012년 1월 평균 노점(흰색 원)과 기온(검은색 원)의 평균 연직 분포. (위)물란, (가운데)울란바타르, (아래)달란자드가드 (가로축은 섭씨 온도, 세로축은 기압(mb), 에러바는 표준편차).	77



그림 65. 2012년 6월, 나머지는 그림 22와 동일함. ....	78
그림 66. 몽골 지역별, (a) Muren, (b) Ulaanbaatar, (c) Altai, (d) Dalanzadgad 월평균 cloud coverage의 시간에 따른 변화량 (시계열) ....	80
그림 67. Cloud coverage의 공간 분포. (a)는 전 기간에 대한 Cloud coverage의 평균값이며, (b)는 봄(3,4,5월), (c)는 여름(6,7,8월), (d)는 가을(9,10,11월), (e)는 겨울(12,1,2월). ....	80
그림 68. 몽골 지역별 (a) 무렌, (b) 울란바타르, (c) 알타이, (d) 달란자드가드의 월 평균 NDVI의 시간에 따른 변화량 (시계열). ....	81
그림 69. NDVI의 공간 분포. (a)는 전 기간에 대한 NDVI의 평균값이며, (b)는 봄(3,4,5월), (c)는 여름(6,7,8월), (d)는 가을(9,10,11월), (e)는 겨울(12,1,2월). ....	82
그림 70. NDVI의 2003년과 2009년 차이 공간 분포. (a)는 봄(3,4,5월), (b)는 여름(6,7,8월), (c)는 가을(9,10,11월), (e)는 겨울(12,1,2월). ....	82
그림 71. 몽골 지역별 (a) 무렌, (b) 울란바타르, (c) 알타이, (d) 달란자드가드의 월 평균 TPW의 시간에 따른 변화량 (시계열). ....	83
그림 72. TPW의 공간 분포. (a)는 전 기간에 대한 TPW의 평균값이며, (b)는 봄(3,4,5월), (c)는 여름(6,7,8월), (d)는 가을(9,10,11월), (e)는 겨울(12,1,2월). ....	84
그림 73. 2012년 7월 23일 몽골 울란바타르에서 열린 1차 워크숍. ....	85
그림 74. 2012년 10월 4일 서울에서 열린 2차 워크숍. ....	87
그림 75. 2009-2010년 혹한기(zud) 동안 가축 피해의 상대적 분포 (질을수록 피해가 큼). ....	89
그림 76. 본 연구가 제시하는 2단계 기상조절기술 접근법. ....	93

## 요약

한반도로 유입되는 황사의 절반 이상은 몽골을 경유해서 온다. 따라서 황사의 근원적 방지를 위해서는 몽골 모래폭풍을 억제하는 것이 필요하다.

한편 몽골은 기후변화로 인한 자연적 원인과 과잉방목, 광산개발, 차량증가로 인해 사막화가 가속화되고 있다. 이런 사막화는 스텝을 황폐화해서 결국 지표침식이 가속화 되어 모래폭풍 횡수를 증가시키고 있다.

과거 한국 정부, 기업, 민간단체가 몽골의 황사방지 사업을 펼쳤지만 대부분 조림사업이고 프로젝트 초기 국면 이후 한국인들이 떠나면 더 이상 유지가 되지 않는 문제가 있었다. 본 연구에서는 조림사업이 아닌 기상조절 기술을 이용한 황사방지 가능성을 연구하였다.

몽골 정부는 현재 자체적으로 인공증우 실험을 진행 중이고 이를 위해 많은 인력과 재정, 장비를 투입하고 있지만 그 효과는 아직 검증하기 어렵다. 검증이 어려운 가장 큰 이유는 개별적 실험이 성공하더라도 그것이 전체적인 가용수 증대로 이어진다는 보장이 없기 때문이다.

따라서 현재 레이더 측정을 이용한 효과 검증은 근본적 한계를 가질 수밖에 없으며 통계적인 접근이 필요하다. 그러나 몽골 기상자료는 오류에 따른 불확실성이 높아서 이를 어렵게 만든다.

기상관측 자료와 위성 자료가 완벽하지는 않지만 일관성 있는 결과를 보이고 있다. 지상과 고층 기상자료를 분석해보면 여름철이 습도가 높고 구름이 많아서 인공증우 실험을 성공 가능성이 크고 실제로 그 지역 가용수를 증대시키기에 가장 좋을 듯하다.

그러나 이는 상대적으로 그렇다는 것뿐이며 운량이나 상대습도 연직구조를 살펴볼 때 몽골의 여름철도 절대적 인공증우 성공 가능성이 높지 않을 것으로 예상된다.

즉 매우 정교하게 몽골의 기상조건에 최적화된 인공증우 실험 전략을 수립해야 성공 가능성을 보장할 수 있을 것이다. 본 연구사업을 통해 구축한 한몽 전문가 네트워크를 활용해 실험 전략을 수립할 필요가 있다.

한편 기상조절기술 이외에도 국토의 약 26%에 해당하는 일반 스텝 지역을 보존하기 위한 노력도 필요하다. 이들 지역은 상대적으로 강수량이 풍부하기 때문에 자연적인 원인보다는 인위적인 요인에 의하여 사막화가 빠르게 진행될 위험을 안고 있다.

과잉방목, 광산 난개발, 무분별한 차량통행 등이 대표적인 인위적 사막화 요인이다. 이런 요인들을 제거하기 위한 정책적 노력이 필요하다.

## 제 1 장 연구개발과제의 개요

### 제 1 절 연구배경

황사는 몽골과 중국의 사막지역에서 발생하나 피해지는 한국과 일본지역 등 광범위하여 황사 발원지의 사막화를 방지하거나 경감하는 것이 필요하다.

동북아시아의 황사는 근본적으로 중국과 몽골의 사막화에 따른 문제이나, 중국과는 달리 제반 여건상 몽골은 자력으로 사막화 문제를 해결하기에 역량이 부족하여 외부의 지원이 필요한 실정이다.

몽골의 사막화는 UNDP, 스위스 등에서 오래 전부터 관심을 가지고 투자와 지원을 하고 있다. 한국 역시 정부(환경부, 산림청, 외교부 등)와 기업, 단체, NGO등이 사막화 해결을 위한 한·몽 그린벨트 프로젝트 등 조림, 태양광 발전, 지하수 개발 사업 등을 지원하고 있으나, 사업의 지속성, 조직과 사업간 연계가 부족하여 통합관리를 통한 효율의 제고가 필요하다.

그래서 몽골을 대상으로 황사의 근원적 방지 대책을 마련해야 한다. 몽골 황사 발원지의 사막화에 능동적으로 대응하는 방안의 하나로 기상조절기술 적용의 실현 가능성 등 다양한 방법을 타진해 볼 필요성이 제기되었다.

### 제 2 절 연구목적 및 필요성

기상조절기술을 적용하는 실험은 막대한 비용과 인력이 소요되므로 이를 위해서는 사전에 철저히 조사할 필요가 있으며 특히 기상조절기술 적용 대상 지역의 기상학적 조건, 지형적 조건, 구름 자원의 분포가 기상조절기술을 적용하여 강수량 증대를 도모하기에 적당한지에 대한 사전 조사가 요구된다.

우선적으로 몽골 황사 발원지와 그 주변의 기상학적 조건의 변화, 구름 및 수증기 자원의 변화, 식생변화 등과 같은 지표 상태의 변동 등 제반 환경의 변화에 대해 이해해야 한다. 이러한 이해를 바탕으로 과연 기상조절기술을 활용한 황사 발원지의 사막화 방지 혹은 경감이 가능한지에 대한 심층적 분석이 진행되어야 한다.

또한 사막화와 황사 문제 해소를 위한 방안의 하나로 조림을 통한 황사 발원지의 생태 복원 방안이 대두되고 있는데 이를 위해서는 사막화의 원인과 과정 그리고 관련 메카니즘을 생태적인 측면에서 파악하고, 가능한 대안을 모색할 필요가 있다.

## 제 2 장 황사 및 사막화 현황

### 제 1 절 생태 개념 정의

#### 1.1 사막화(Desertification)

UN의 [사막화 방지협약 제1조]에 의하면 사막화란 기후변화와 인간 활동 등 여러 가지 요인에 의해서 조성된 건조·반건조 및 반건조 습윤지역에서 토지가 황폐화되는 것을 뜻한다. 사전적 의미의 사막화는 기후 면에서 건조·반건조 지역 모두를 포함하여 인간의 행위에 의해 자연환경이 황무지로 변해가는 현상을 의미한다.

사막화(Desertification)란 용어를 처음 사용한 학자는 프랑스의 식물학자 오블레빌(A. Aubreville)로 알려져 있으며, 자신의 저서 ‘열대 아프리카의 기후와 산림과 사막화’에서 처음 사용한 것으로 알려져 있다(한국지리정보연구회, 2004).

#### 1.2 황사(Yellow Dust)

황사에 대한 정의는 국가 및 기관에 따라 차이가 있다(표 1, 2). 기상청에서는 황사를 주로 중국 북부나 몽골의 건조, 황토지대에서 바람에 날려 올라간 미세한 모래먼지가 대기 중에 퍼져서 하늘을 덮었다가 서서히 강하하는 현상 또는 강하하는 흙먼지로 정의한다(기상청 기상백과).

표 1. 국가별 황사 정의 (환경부, 2008).

국가 및 기관	황사에 대한 정의
한국	작은 모래나 황토가 공중에 부유하거나 상층바람을 타고 수송되어 지면 가까이 낙하하는 (일기)현상
중국	대량의 모래먼지 물질이 강풍에 의해 부유하여 공기를 혼탁하게 하는 재해성 일기현상
일본	다량의 모래와 먼지가 편서풍에 운반되어 서서히 강하하는 (일기)현상
WMO	바람에 의해 대기 중에 먼지나 모래가 부유하는 일기현상
UNEP	자연재해
ADB-GEP	지역차원의 심각한 장거리 대기오염문제
한.일 환경부문	각국의 대기오염을 악화시키는 장거리 대기오염문제

표 2. 국가 또는 국제기구별 황사 분류기준 (환경부, 2008).

국가 및 기관	분류기준
한국	미세먼지 농도를 기본으로 약한 황사, 강한 황사, 매우 강한 황사로 분류
중국	가시도(visibility)와 풍속을 기준으로 사진폭(沙塵暴, Sand and Duststorm, SDS), 강사진폭(强沙塵暴, strong Sand and Duststorm, SDS), 초강사진폭(超强沙塵暴, severe and strong Sand and Duststorm, SDS), 양사(揚沙, Blowing Sand, BS), 부진(浮塵, Floating Dust, FD), 매(霾, Dust Haze, DZ)로 분류
일본	특별한 분류기준 없이 누린 먼지(黃砂, Kosa)로 정의
세계기상기구 (WMO)	먼지모래 부유 또는 폭풍의 강도 및 지속되는 시간을 기준 분류하여 기상코드로 표시

### 1.3 건조지(Arid land)

강수량보다 증발량이 많아 식물분포 상태가 불량한 지역을 뜻하는 용어로 이 지역은 강수량이 부족하여 영구하천이 거의 없고 강우 시에만 물이 흐르는 와디(Wadi), 바다에 이르기 전에 강물이 증발하거나 지하로 침투하여 사라져 버리는 무미천(蕪尾川)이 존재하며, 바람에 의한 모래 사구인 바르한이 나타난다(한국지리정보연구회, 2004).

건조지역은 주로 유목, 오아시스 농업이 이루어지고 서남아시아의 카나트(qanat), 북아프리카의 포가라(foggara)등 적극적인 관개농업이 행해져 왔으며, 리비아 등은 대수로 공사를 통해 적극적인 관개농업을 실시하고 있다. 건조지의 구체적 구분은 한자에 따라 어떠한 자료로 하는가에 따라 그 경계가 약간의 차이가 있으며 대표적으로 쾨펜, 손스웨이트 메이그스 등이 제시한 구분법이 있다.

## 제 2 절 한반도 유입 황사 분석

지난 40년(1965-2004) 기간의 황사사례를 분석한 결과, 그 경로가 크게 5개의 유형으로 분류할 수 있다(Kim, 2008). 그림 1은 국내에 유입되는 황사의 경로를 분류한 것으로 5개의 경로(A-E)는 각각 전체 황사의 20.5%, 28.4%, 22.7%, 14.8%, 13.6%를 차지한다. 그림 1을 보면, E를 제외한 나머지 네 경로는 모두 중국-몽골 국경 사이의 내몽골 자치구나, 몽골 남쪽 고비사막에서 발생한 먼지폭풍(dust storm)에서 기원한다는 것을 알 수 있다.

몽골의 식생 분포를 보면(Zurag Züi KhKhK, 2004) 해당 지역들은 대부분 사막(Gobi/Desert)이고 일부는 건조한 스텝(Dry steppe)이다(그림 2). 스텝은 나무가 없이 초지만으로 이루어진 생태를 일컫는다.

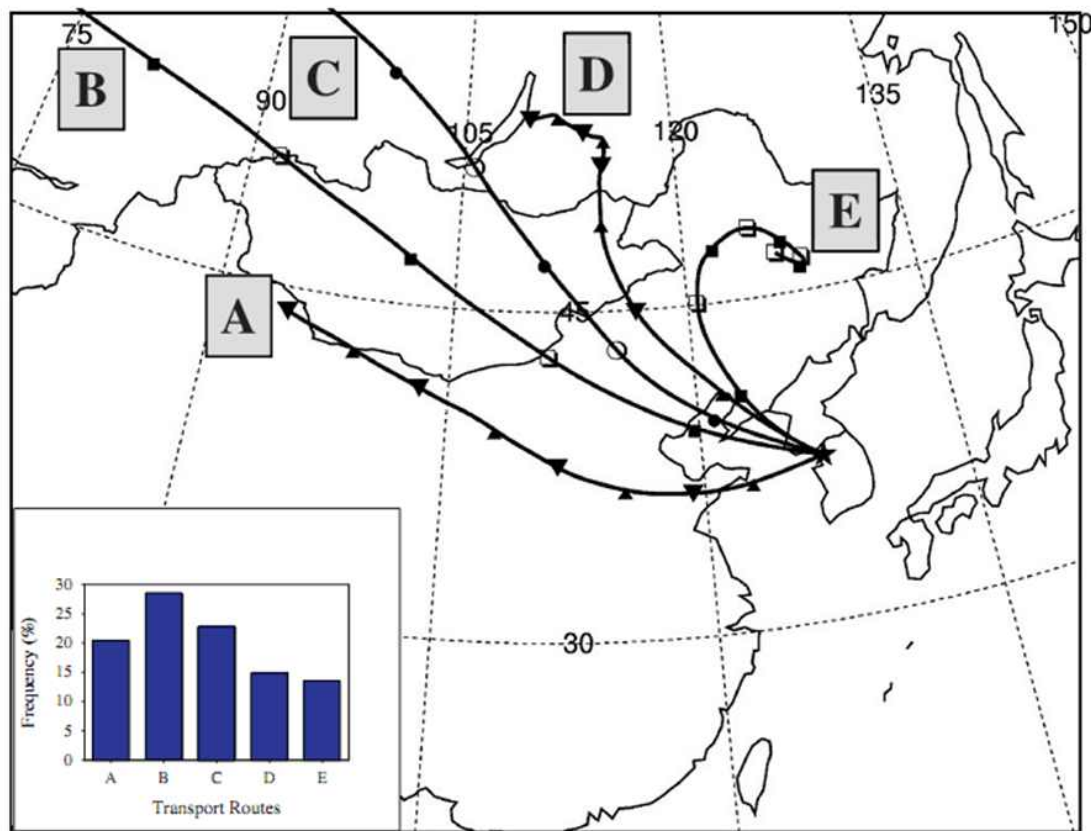


그림 1. 지난 40년(1965-2004년) 기간 동안 국내에 도달한 황사 경로 유형을 분류한 그림.

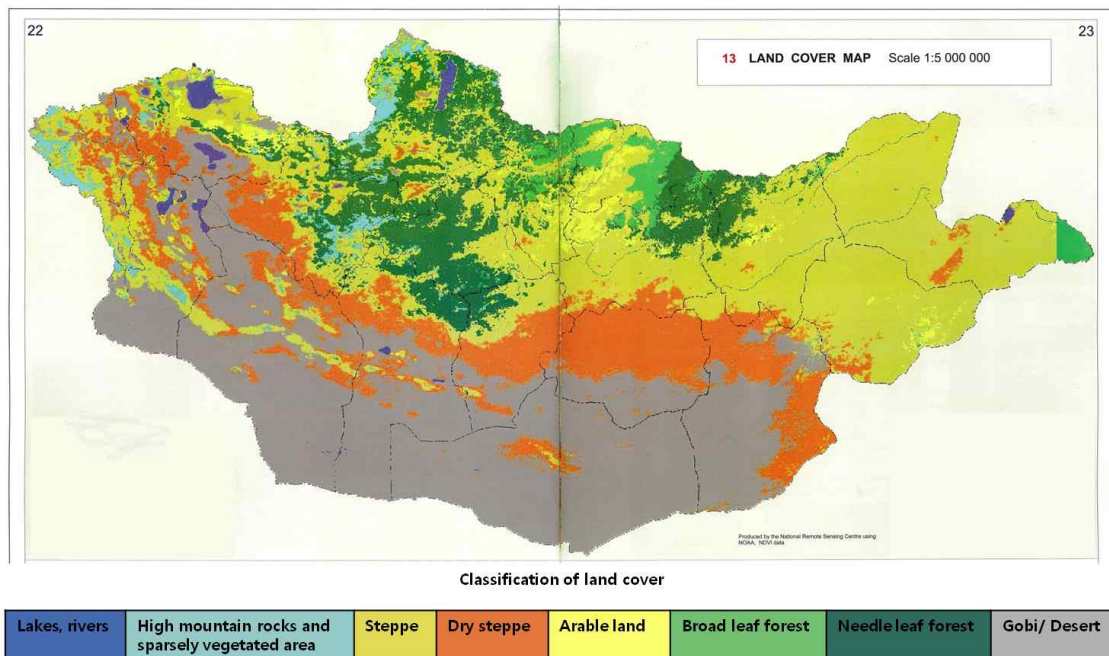


그림 2. 몽골의 식생 분포.

그림 3은 몽골에서 연중 발생하는 모래폭풍의 빈도수 분포를 나타낸 것이다(Natsagdorj et al., 2003). 국내에 유입되는 황사는 몽골 남쪽 사막 또는 건조 초지에서 발생하는 모래폭풍으로부터 발생한다는 것을 알 수 있다.

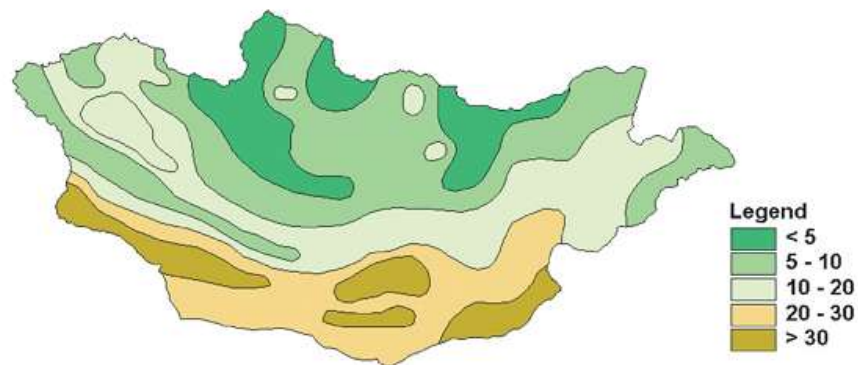


그림 3. 연중 몽골의 모래폭풍 발생 빈도 지역 분포.

따라서 황사를 근원적으로 방지하기 위해서는 몽골과 내몽골 지역의 사막에서 발생하는 모래폭풍을 제어해야 한다. 본 연구과제는 정치·사회적 여건상 중국에 속한 내몽골은 제외하고, 사막화 방지에 있어서 한국 정부와 긴밀한 교류 협력 관계에 있는 몽골로 연구 범위를 제한한다.

## 제 3 절 몽골의 생태 환경

### 3.1 물리적 환경

#### 3.1.1 지형

몽골은 중앙아시아에 위치한 국가로 총 면적은 1,564,116km<sup>2</sup>로 전 세계에서 18번째로 큰 나라이며 한반도의 약 7.3배에 달한다. 총 국경선은 8,162km이며 국경선은 북부는 러시아와 남부는 중국과 접해 있다. 국토의 동서 최대거리는 2,394km이며 남북 최대거리는 1,259km이다.

국경선이 모두 내륙으로 둘러싸여 있는 내륙국으로 전 국토의 평균 해발고도가 1,589m 이며 수도 울란바타르(Ulaanbaatar)의 해발고도는 1,350m, 해발고도가 제일 높은 지점은 후이텐(Huiten) 산으로 4,653m, 해발고도가 제일 낮은 지점은 Khukhnuur호수로 532m이다.

몽골은 전체적으로 서고동저(西高東低)지형을 나타내고 있다(그림 4). 서부는 해발고도가 4,374m에 이르며 정상부에는 만년설을 가지는 후이텐 산이 있다. 북부에는 타이가 산림지대, 동부에는 관목과 초본으로 이루어진 초원지대, 남부에는 고비사막과 건조스텝지대로 이루어져 있다.

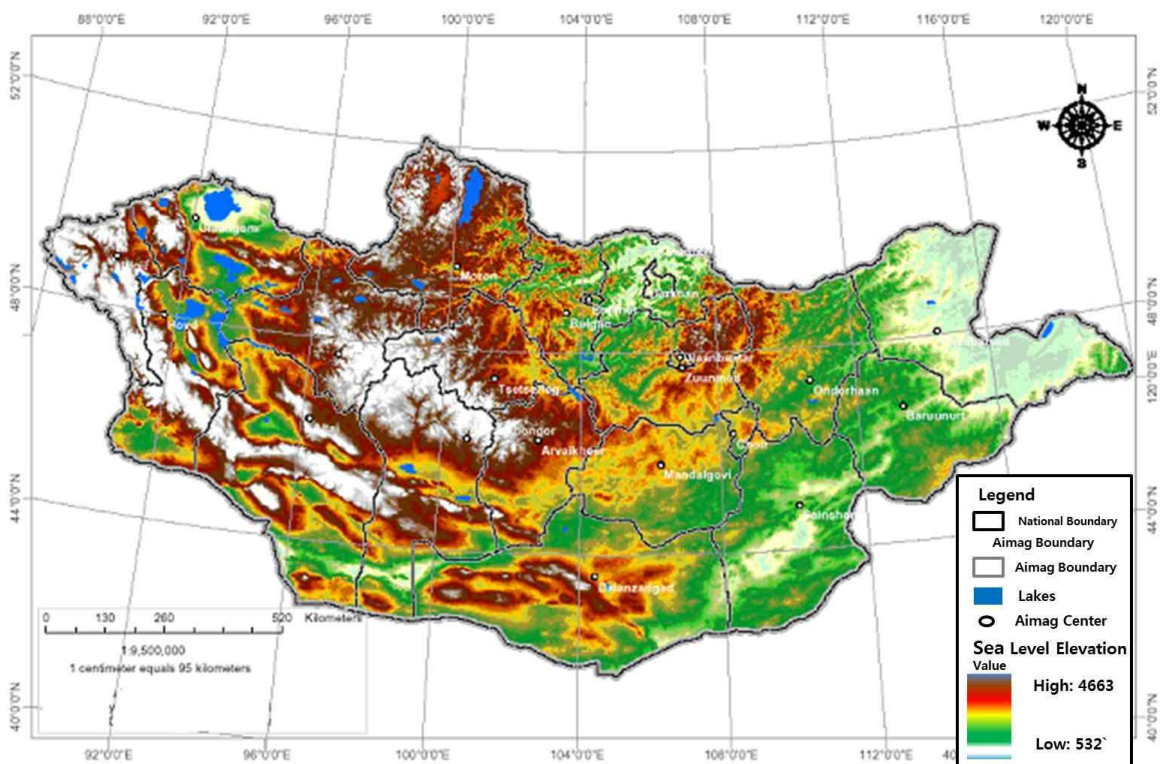


그림 4. 몽골의 지세도(Batima et al., 2005).



몽골의 사막화 피해는 남부 고비사막 일대를 중심으로 집중되고 있으나, 근래에는 남서부의 사막스텝지대뿐만 아니라 서부 스텝의 식생이 파괴되고 강풍이 불면서 풍성사구가 새로 만들어지기도 한다. 또한 서쪽 고산지대에서 산악빙하가 녹으면서 한랭한 지역에도 식생이 없는 황폐지가 나타나는 등 새로운 위협요인이 되고 있다.

### 3.1.2 기후

몽골의 기후는 사계절을 가지는 전형적인 대륙성기후로 중앙아시아고원 산맥이 습윤한 기류를 차단하여 전체적으로 강수량이 매우 적고 건조하며 기온변화가 잦고 기온의 차가 크다. 계절적으로 여름은 고온 건조하지만 그 기간이 길지 않고 연 강수량의 85%~90%가 여름철에 집중되며 겨울은 춥고 건조한 것이 특징이다.

겨울평균기온은  $-26^{\circ}\text{C} \sim -18^{\circ}\text{C}$ 이며, 여름평균기온은  $17^{\circ}\text{C} \sim 23^{\circ}\text{C}$ 이다. 1월 최저기온은 북부 흙스굴(Khuvsgul) 지역으로  $-45^{\circ}\text{C} \sim -52^{\circ}\text{C}$ 에 이른다. 구름이 없고 하늘이 맑은 쾌청일은 연 평균 257일 정도이다(Kruchkin *et al.*, 2003).

연간강수량은 지역별로 차이가 있으며 흙스굴, 헨티(Khentii), 향가이(Khangai), 몽골 알타이(Mongol-Altai), 고비 알타이(Gobi altai)등에 위치한 고산대에는 400mm 이하, khuvsgul, Khuntii 산지에 주로 발달하고, Tarvagatai, Khan KhuKhii 산지에서 부분적으로 출현하는 산지의 타이가대에는 300mm~400mm, Khentii, Khangai, Mongol-Altai의 낮은 산지에 발달하는 산림스텝지역에서는 250mm~300mm, 몽골 동부와 중부 Khalkh의 넓은 평원에 분포하며, 서쪽의 Khangai산맥의 산자락에서 좁아지고, khan Khukhii 남부의 대호수지역까지 발달하는 스텝지역에서는 125mm~250mm, 몽골 남부와 서남부의 스텝과 사막이 교차하는 곳에서 나타나는 사막스텝 지역은 100mm~125mm, 몽골 남부와 서남부에서 발달하는 사막지역은 100mm 이하이다(Tungalag, 2012). 그림 5는 몽골의 연간강수량 분포를 나타낸 것이다.

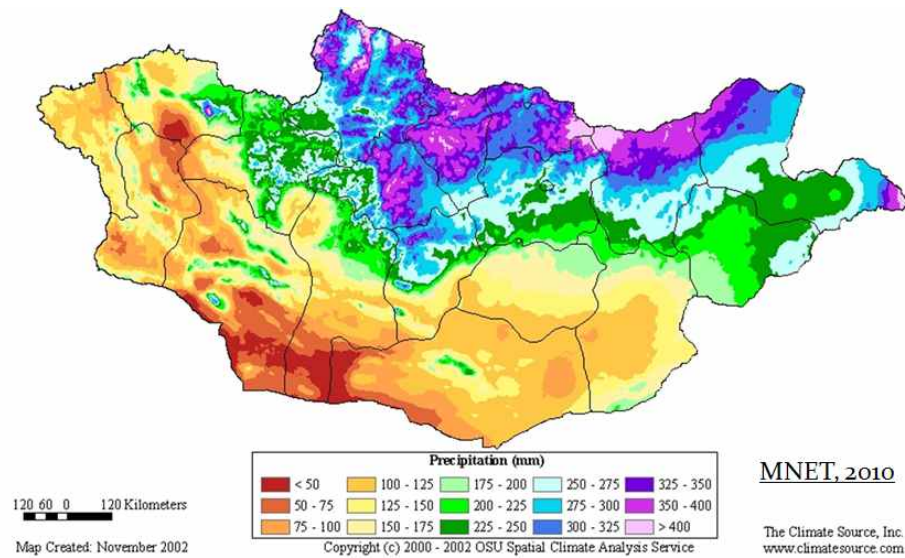


그림 5. 몽골의 연강수량 분포.

봄철에 강한 바람이 불며 고비, 스태프지역은 풍속이 15~25m/sec에 달한다. 이와 같은 강한 바람이 한국과 일본에 영향을 미치는 황사를 발생시킨다.

겨울철 강한 폭설과 혹한이 동시에 일어나는 이상기상현상인 쥬드(Dzud, 그림 6)는 1944년~1945년, 1967년~1968년, 1978년~1979년, 1999년~2002년에 나타났으며 쥬드가 발생한 해에는 많은 수의 가축이 폐사하며 유목민의 생계수단이 사라지는 등 사회적 문제도 발생한다(Batjargal, 2007).



그림 6. 쥬드에 의한 가축 피해.

봄철의 강한 바람과 건조화는 사막화를 부추기는 요인의 하나이고, 겨울  
 추위는 가축에 치명적인 피해를 주는 기상현상이다. 봄과 여름 지피식생을  
 파괴하고 가축의 먹이 부족을 가져오고 사막화를 부추기는 요인으로 작용한  
 다.

### 3.1.3 토양

몽골에 우점하는 토양형은 건조-스텝 흑색초원토(체르노젼 토양)으로 전체  
 면적의 40%를 차지한다. 건조-스텝 흑색초원토 이외에도 갈색사막-스텝토양  
 과 회색사막토 등이 나타난다.

경작에 적합한 토양은 진한 밤색토와 밤색토로 토양의 입자가 곱고 염분을  
 가지고 있는 토양이며, 20cm~30cm 깊이에 유기물 함량이 3~4%정도이다.

사막화와 기후변화에 따라 토양의 수분이 감소하고 지피식생이 쇠퇴하면서  
 유기물 공급 부족으로 토양의 비옥도가 낮아지고, 강풍에 의해 표토가 유실  
 되면서 지력이 저하되는 현상을 예상할 수 있다.

### 3.1.4 수문

몽골에는 약 3,800여개의 하천과 3,000여개의 크고 작은 호수가 있다. 몽골  
 의 수계는 북극해 유역과 태평양 유역, 배출구가 존재하지 않은 중앙아시아  
 유역으로 구분된다(그림 7).



그림 7. 몽골의 수계 구분 (Ochirbat, 2012).

몽골 중부는 물이 어느 정도 있는 편이지만, 남부, 서부, 동부는 물이 부족하고 염분과 광물질이 많이 섞여 있는 등 수질이 좋지 못하다. 몽골의 수자원은 599km<sup>3</sup>/년으로 호숫물(500km<sup>3</sup>/년), 빙하(62.9km<sup>3</sup>/년), 하천(32.6km<sup>3</sup>/년) 등이다. 재사용이 가능한 지하수는 10.8km<sup>3</sup>/년 정도로 추정된다(Batjargal, 2007).

2003년 수문조사에 따르면 5,565개 하천과 지천 가운데 683개, 9,600여개 샘물 가운데 1,481개가 말랐으며, 374개 광천수 가운데 10개가 고갈되었고, 4,193개 호수와 연못 가운데 760개가 마른 것으로 보고되었다(Batjargal, 2007). 지구온난화에 따라 증발산량이 많아지면서 건조한 지역을 중심으로 건록화 현상이 나타나고 산악빙하가 산정 쪽으로 후퇴하는 빙하퇴각현상이 확인되었다.

### 3.1.5 경관

몽골의 자연경관은 스텝, 고비사막, 삼림스텝, 산악타이가, 고산으로 구성되며 각각의 면적은 스텝 535,743km<sup>2</sup>(34.2%), 고비 366,561km<sup>2</sup>(23.4%), 고비사막 299,202km<sup>2</sup>(19.1%), 삼림스텝 238,108km<sup>2</sup>(15.2%), 산악타이가 70,493km<sup>2</sup>(4.5%), 고산 65,493km<sup>2</sup>(3.6%)이다(표 3).

표 3. 몽골의 자연경관 (Dorjgotov et al., 2004).

	스텝	고비	사막	삼림스텝	산악타이가	고산
면적(km <sup>2</sup> )	535,743	366,561	299,202	238,108	70,493	65,394
비율(%)	34.2	23.4	19.1	15.2	4.5	3.6

몽골의 생태지형적 구분은 사막, 사막 스텝, 스텝, 삼림스텝, 북부삼림, 고산으로 구분된다(표 4).

표 4. 몽골의 생태지형적 구분.

지역	식생 종류	면적(km <sup>2</sup> )	비율(%)
사막	식생이 거의 없음	297,000	19
사막스텝	키가 작은 초본과 흩어져있는 관목과 작은 목본	329,000	21
스텝	키가 큰 초본과 관목	407,000	26
삼림스텝	북사면에는 삼림이 남사면에는 초본	125,000	8
북부삼림	침엽수와 다양한 활엽수가 혼재	63,000	4
고산	고산 침엽수와 고산 툰드라가 혼재	344,000	22

몽골의 사막지대는 남부와 서남부지역에 발달하였다. 이들 지역은 수분이 부족하고 온도가 높으며 바람이 매우 강하다. 식물이 거의 나타나지 않는 식생을 보이며, 식물들은 흩어져 자라면서 키가 작다. 연강수량은 100mm 이하이며 오아시스는 Trans-Altai, Gobi와 중가리 고비(Dzungarian Gobi)에만 분포한다(Tungalag, 2012).

몽골의 사막스텝지대는 몽골 남부와 서남부의 스텝과 사막이 교차하는 곳에서 주로 나타나며 구체적으로 대호수 지역, 호수, 계곡, 고비 동쪽 저지, Gobi-Altai에서 볼 수 있다. 연강수량은 100mm~125mm이며 식물의 성장 가능한 날짜를 뜻하는 식물생장일수는 170일~190일 정도이나 대체적으로 건조하다(Tungalag, 2012).

몽골의 스텝지대는 몽골 동부와 중부 Khalkh의 넓은 평원에 분포하며, 서쪽의 Khangai산맥의 산자락에서 좁아지고 Khan Khukhii 남부의 대호수지역까지 발달한다. 식생은 건조성 초본이 우점을 하고 있으며 연강수량은 125mm~250mm이며 식물생장일수는 150일~170일 정도이다(Tungalag, 2012).

산림스텝지대는 Khentii, Khangai, Mongol-Altai의 낮은 산지에 발달한다. 식생은 스텝과 산지 식생이 공존하며 연강수량은 300mm~400mm이고 식물생장일수는 135일~150일 정도이다(Tungalag, 2012).

북부산지지대는 Khuvsugul, Khentii산지에 주로 발달하며 Tarvagatai, Khan Khukhii 산지에도 부분적으로 나타난다. 연강수량은 300mm~400mm이며 식물생장일수는 짧고, 식생은 시베리아낙엽송(*Larix sibirica*) 구주적송(*Pinus sylvestris*)와 같은 침엽수림이 우점한다. 자작나무(*Betula* spp.)와 포플러(*Populus* spp.) 등의 활엽수도 같이 나타난다(Tungalag, 2012).

고산지대는 Khuvsugul, Khentii, Khangai, Mongol-Altai, Gobi Altai에 분포하며 교목한계선 위에 고산초원을 형성한다. 연강수량은 400mm이하이며 식생은 고산타이가가 나타난다(Tungalag, 2012).

몽골에서는 사막화와 지구온난화에 따라 사막과 사막스텝이 넓어지는 직접적인 사막화 피해가 나타날 뿐만 아니라, 스텝이 줄어들면서 건조한 사막스텝으로 바뀌는 현상을 관찰할 수 있었다. 아울러 산악타이가가 후퇴하고 고산에 발달하는 빙하가 후퇴하는 현상을 알타이산지에서 확인할 수 있었다.

## 3.2 생물 환경

### 3.2.1 식생

국토의 총 면적 1,559,114km<sup>2</sup> 가운데 산림은 164,283km<sup>2</sup>이며 황무지는 148,808

km<sup>2</sup> 일반초지 948,904km<sup>2</sup>, 산림과 초지가 혼재된 지역 445,954km<sup>2</sup>, 산림이 황폐화된 초지 281,66km<sup>2</sup> 이다.

위성영상 분석을 통한 토지피복도 변화를 살펴보면 몽골의 산림 면적은 크게 감소(2006년 산림 면적은 1992년 산림면적 대비 26.6% 감소)하였고 사막 지역 등 황무지는 크게 증가(2006년 황무지 면적은 1992년 황무지 면적 대비 183% 증가)하였다(MARCC, 2009, 표 5).

표 5. 몽골 토지 피복 분류 (MARCC, 2009).

순번	토지 피복 분류	1992(km <sup>2</sup> )	2002(km <sup>2</sup> )	2006(km <sup>2</sup> )
1	수계(Water)	17,776	11,335	14,448
2	황무지(Barren)	52,593	76,700	148,808
3	초지1(Grassland1)	1,012,424	1,019,592	948,904
4	초지2(Grassland2)	251,261	250,672	281,661
5	산림(Forest)	223,904	205,534	164,293
6	초지2 + 산림	475,165	456,206	445,954
	총 면적	1,557,948	1,563,833	1,558,114

몽골에는 약 3,000여종의 식물이 자생하는 것으로 보고되었으며, 그 가운데 150종이 고유종인 것으로 보고되었다.

몽골에는 128과 662속 2,823종의 고등식물 종과 920종의 지의류, 417종의 이끼류, 520종의 균류, 728종 조류(말류)가 있는 것으로 보고되었다. 대표적으로 국화과(Asteraceae), 콩과(Fabaceae) 벼과(Poaceae), 장미과(Rosaceae)가 있으며 각각 407종, 312종, 250종, 140종을 포함하고 있다(Kruchkin *et al.*, 2003).

국토 면적의 10%를 차지하는 산림은 대부분이 몽골 북부 산림지대에 위치하며 시베리아낙엽송, 구주적송 등 침엽수가 분포하고, 활엽수 종류인 자작나무와 포플러도 상당부분 나타난다(MARCC, 2009).

몽골에서는 사막화 지역이 확대되면서 생물종의 다양성이 낮아지고 있으며, 이동성이 적은 수목의 피해가 크게 나타나는 것으로 추정되지만, 이를 입증할 구체적인 연구 성과는 부족하다.

### 3.2.2 야생동물

몽골에는 138종의 포유류와 13종의 식충동물(insectivore), 12종의 익수류

(chiropter), 6종의 토끼류(lagomorph), 69종의 설치류(rodent), 24종의 육식동물, 24종의 기체류(perissodactyl), 1종의 핵각류(tylopoda), 11종의 우제류(artiodactyl) 등이 서식하는 것으로 보고되었다(Puntsag, 2010).

#### ①포유류

포유류에는 8목과 138종이 서식하고 있다. 북부 침엽수로 이루어진 삼림지역에는 늑대, 멧돼지, 사슴, 순록, 아시아영양, 몽골리아 사이가 영양, 사향고양이, 고비곰, 유라시아 링스 등이 서식한다.

스텝지역에 서식하는 포유동물에는 산양, 아시아산양, 박트리안 낙타, 검정꼬리 가젤, 아시아 야생말, 아시아 야생 당나귀, 설표, 유라시아 링스, 붉은여우, 마못, 톨라이 산토끼, 산토끼 등이 있으며 삼림과 스텝지역에 서식하는 포유동물에 대한 자세한 특징은 표 6과 같다(Kruchkin *et al.*, 2003; Undarmaa, 2011).

몽골의 포유류의 다양성은 높지 않고 기후변화와 개발에 따른 자연생태계 파괴와 교란으로 쇠퇴의 길을 가고 있는 것으로 추정된다.

표 6. 몽골의 주요 포유류 (Undarmaa., 2011).

이름	학명	특징
산양	<i>Ovis ammon</i>	몽골알타이 산지에 서식
아시아산양	<i>Capra sibirica</i>	염소와 비슷하게 생겼으나 염소보다 는 다소 크고 목이 짧고 두꺼움
박트리안 낙타	<i>Camelus bactrians gerus</i>	지구상에 멸종위기에 처한 8번째 포 유동물로 450여 마리가 생존
몽골리아 사가 영양	<i>Saiga mongolica tatarica</i>	Shanrgyn gobi 서쪽과 남쪽의 길이 30km, 넓이 140km <sup>2</sup> 지역에 분포
검정꼬리 가젤	<i>Gazelle subgutturosa</i>	몽골 내에 1,978마리가 남음
아시아 야생말	<i>E q u u s Prezewalskii</i>	스텝지역에 서식하는 세계 유일의 야 생마
아시아 야생 당나귀	<i>Equus hemionus</i>	
고비곰	<i>Ursus arctos gobiensis</i>	깊은 산이나 계곡의 샘이나 숲이 있 는 곳의 근처에 서식
설표	<i>Urcua uncial</i>	몽골 내에 500~1,000마리 서식

유라시아 링스	<i>Lynx lynx</i>	삼림지대와 암석지대에 서식
붉은여우	<i>Vulpus vulpes</i>	장소에 따라 외관이 달라짐
마못	<i>M a r m o t a baibacina</i>	암컷이 한번에 5~12마리의 새끼를 낳음
톨라이 산토끼	<i>Lepus tolai</i>	몽골에 널리 분포하며 주요 천적은 늑대

## ②어류

몽골의 수계는 태평양유역분지(Pacific Drainage Basin), 북극해유역분지(Arctic Ocean Drainage Basin)와 중앙아시아유역분지(Central Asian Inland Basin)로 구성되어 있다.

몽골 전체 수계에 서식하는 어류는 14과 46속 76종이 보고되었으며 태평양 유역분지에는 29종, 북극해유역분지에는 43종, 중앙아시아유역분지에는 10종이 서식하는 것으로 보고되었다(Jagtuva, 2010).

유역면적은 중앙아시아유역분지, 북극해유역분지, 태평양유역분지 순으로 넓다. 가장 큰 유역면적을 나타내는 중앙아시아유역분지는 고비사막과 몽골 알타이산맥을 포함하여 몽골 서남부를 아우르며 몽골에서 가장 건조한 지역이다. 이 지역의 하천들은 주로 우기에만 강줄기가 발생하는 간헐 하천의 특성을 보이며 서식하는 어종의 수가 다른 유역에 비해 적은 것을 확인할 수 있다.

북극해유역분지는 몽골의 연 유출수량의 약 50%를 차지할 정도로 물이 풍부하며 서식하는 어종의 수도 가장 많다.

몽골의 어류상은 내륙국 특성상 민물고기를 중심으로 나타나고 하천도 간헐 하천이 많아 종수와 양이 많지는 않으나 호수를 중심으로 의미 있는 종류가 분포한다.

## ③조류

몽골의 조류는 총 19목, 61속, 472종이 보고되었으며, 그 가운데 81종이 텃새로 분류되고 391종이 철새로 분류된다(Jagtuva, 2010).

254종은 몽골에 번식을 목적으로 이동하고 10종은 겨울철새로 시베리아에서 몽골로 이동하며, 8종은 여름철새이고, 64종은 경로가 일정하지 않다(Jagtuva, 2010).

전 지구적인 철새 이동 경로 가운데 동아시아-오스트레일리아 경로, 중앙아시아 경로, 서부 태평양 경로, 아프리카-유라시아 경로가 몽골에서 확인



가능하며 특히 동아시아-오스트레일리아 경로, 중앙아시아 경로에서는 몽골이 조류의 주요한 서식지 역할을 한다(Jagtuva, 2010).

몽골 내 조류의 주요 서식지로는 스텝지역, 건조지역, 삼림스텝지역, 고산지역, 북부삼림지역, 습지와 하천 인근지역 등이 있다(Jagtuva, 2010). 몽골의 사막화가 진행됨에 따라 새들의 서식지가 교란되고 먹이망 등에 변화가 발생하며 대다수 조류 서식지들이 위협받고 있다.

### 3.2.3 가축

몽골은 국토의 많은 면적이 초지로 구성되어 가축의 방목과 유목생활에 적합한 환경을 가지고 있다. 이로 인해 목축업은 과거부터 몽골 경제의 기간산업으로써 그 중요성이 매우 높았다(그림 8, 9).

양, 염소, 야크, 말, 낙타 등이 몽골의 5대 가축으로 분류되며 연도별 변화 추세는 아래의 표 7과 같다.

표 7. 몽골 5대 가축수 변화 (NSOM, 2012a).

	2007	2008	2009	2010
양 (천 두)	16,990	18,362	19,274	14,480
염소 (천 두)	18,347	19,969	19,651	13,883
야크 (천 두)	2,425	2,503	2,599	2,176
말 (천 두)	2,239	2,186	2,221	1,920
낙타 (천 두)	260	2,66	277	269
합계 (천 두)	40,263	43,288	44,023	32,700

양모와 캐시미어를 통해 유목민들에게 직접적인 경제적 소득을 가져다주는 양과 염소의 비중이 가장 높게 나타나며, 그 밖에 야크, 말, 낙타 순으로 수가 많다.

몽골 정부에서 양모 1.5kg에 대하여 연 350~500투그릭에 보조금을 지급하고 있으며 추가적으로 2,000투그릭의 보조금을 지급하고 있다. 염소의 캐시미어 350~500g는 연 43,000투그릭의 수익을 얻을 수 있기 때문에 주민들이 과도한 목축을 포기하지 못하는 경제·사회적 구조가 만들어졌다.

양들은 풀과 관목의 지상부만을 뜯어먹기 때문에 초지의 재생과 사막화에 상대적으로 큰 위협이 되지 못하는 반면 염소는 식물의 지상부 뿐만 아니라 뿌리까지 모두 뜯어먹기 때문에 스텝지역 식생 파괴 및 사막화에 주요 원인으로 여겨지고 있다.

2010년과 같이 일시적으로 가축의 수가 감소하는 기간이 나타나는 것은 정부의 제재에 따른 결과가 아닌 줄드(Zdud)라 부르는 겨울철 혹한과 눈보라가 같이 나타나는 몽골의 기상현상에 의한 것이다.

근래 시장 가격이 높은 캐시미어를 생산하는 염소의 사육두수가 급격하게 늘어나면서 생태적 문제가 발생하고 있다. 염소는 먹이감이 부족하면 식물의 잎뿐만 아니라 가지, 줄기뿐만 아니라 뿌리까지 뽑아 먹으면서 목초지가 초토화 되는 심각한 문제가 나타나고 있다. 염소 등 가축에 의한 식생 파괴를 건조한 지역을 중심으로 사막화를 부추기는 결과를 낳고 있다.



그림 8. 스텝 지역의 양과 염소 (Kong, 2012).



그림 9. 스텝 지역의 양과 염소 (Kong, 2012).

## 제 4 절 몽골 사막화 분석

### 4.1 사막화 현황

몽골 국토 총 면적 1,564,116 km<sup>2</sup> 가운데 산림면적은 약 11.9%이며, 사막으로 구분되는 지역은 전 국토의 40% 달한다. 몽골은 전형적인 대륙성 기후로 연평균 기온은 -2.9℃이며, 강수량은 연간 230mm이다. 연 강수량의 약 70%가 여름철(6월~8월)에 집중되며, 산악지역(300-400mm) > 스텝(150-250mm) > 사막(50-150mm) 지역 순으로 강우량이 높다.

약 3,800여개의 하천과 3,000여개의 크고 작은 호수가 있는데, 몽골의 남서부에서 북부를 가로지르는 Selenge 강이 원류 역할을 한다. 1940년대의 문헌자료와 2002년 Landsat 위성 분석 결과를 대조한 연구에 따르면, 호수면적이 373 km<sup>2</sup> 감소하였으며, 특히 규모가 작은 호수가 감소폭의 대부분을 차지하였다. 빙하 면적 역시 지난 50-60년 동안 22% 감소한 것으로 보고되었다(Davaa et al., 2011).

이런 사막화의 결과로, 30년간 약 150만 ha의 산림이 파괴되었으며, 산림이 파괴되어 초지로 변화하고, 점차 사막 지형으로 변화하는 형태의 사막화가 발생하고 있다. 또한 지난 40년간 산림, 초원, 사막에 위치한 모든 형태의 목초지에서 식물종이 감소하고 있는 추세이다.

전반적인 몽골의 사막화 정도를 그림 10에 나타내었다(Mandakh et. al. 2007). 기존에 사막이었던 남쪽 지역뿐만 아니라 서쪽 알타이 산맥에서도 사막화 양상이 뚜렷하다. 사막화는 기존의 사막이 확장시킬 뿐만 아니라 당장은 모래폭풍이 많지 않은 지역도 점차 건조하게 만들고 있다는 것을 의미한다. 최근에는 고비사막에서 멀리 떨어진 남서부의 알타이고비와 알타이산맥 일대에서도 빙하가 후퇴하고 스텝의 식생이 건조화되면서 사막화 초기의 형태인 무식생대와 모래언덕(sand dune)이 형성되고 있다.

이런 추세는 위성관측으로도 확인되고 있다. 그림 11은 1982년부터 2001년까지 20년 기간에 전반 10년(1982-1991)과 후반 10년(1992-2001) 사이 위성에서 관측한 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index) 값의 변화를 나타낸 것이다. 붉은색은 식생의 감소를, 녹색은 식생의 증가를 나타낸다(Natsagdorj, 2012).

그림 10와 그림 11을 비교해봤을 때, 몽골 남쪽 사막 지역에서도 사막화가 상대적으로 더딘 남서쪽 지역에서는 상대적으로 식생이 증가한 반면, 사막화가 심각하거나 회복불가능한 정도(irreversible)로 진행된 남동쪽 지역은 식생 감소 역시 가장 컸다.

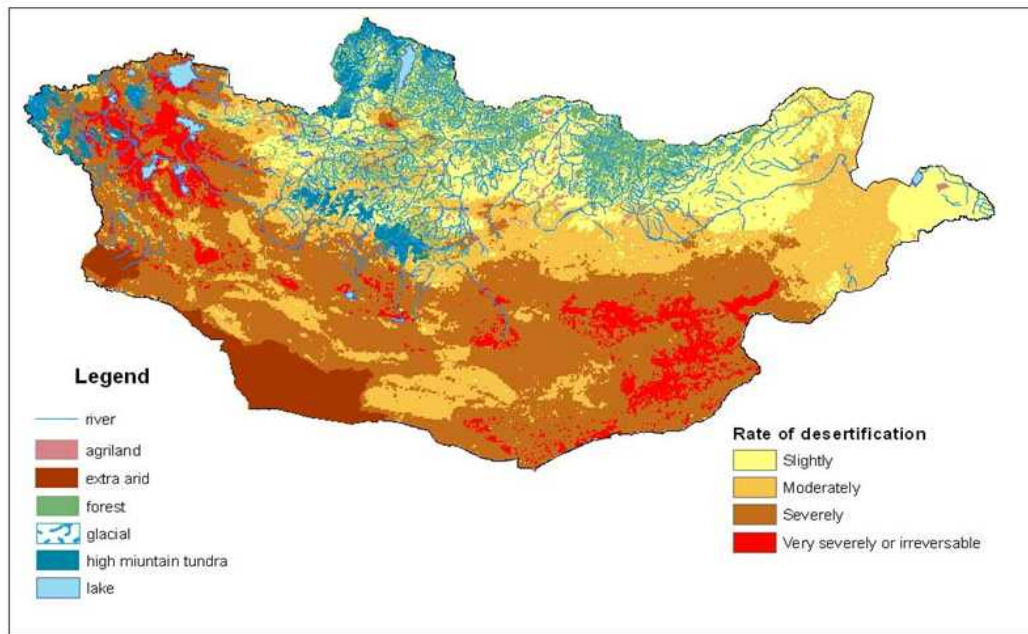


그림 10. 몽골 사막화 진행 분포도 (파란 영역은 수계).

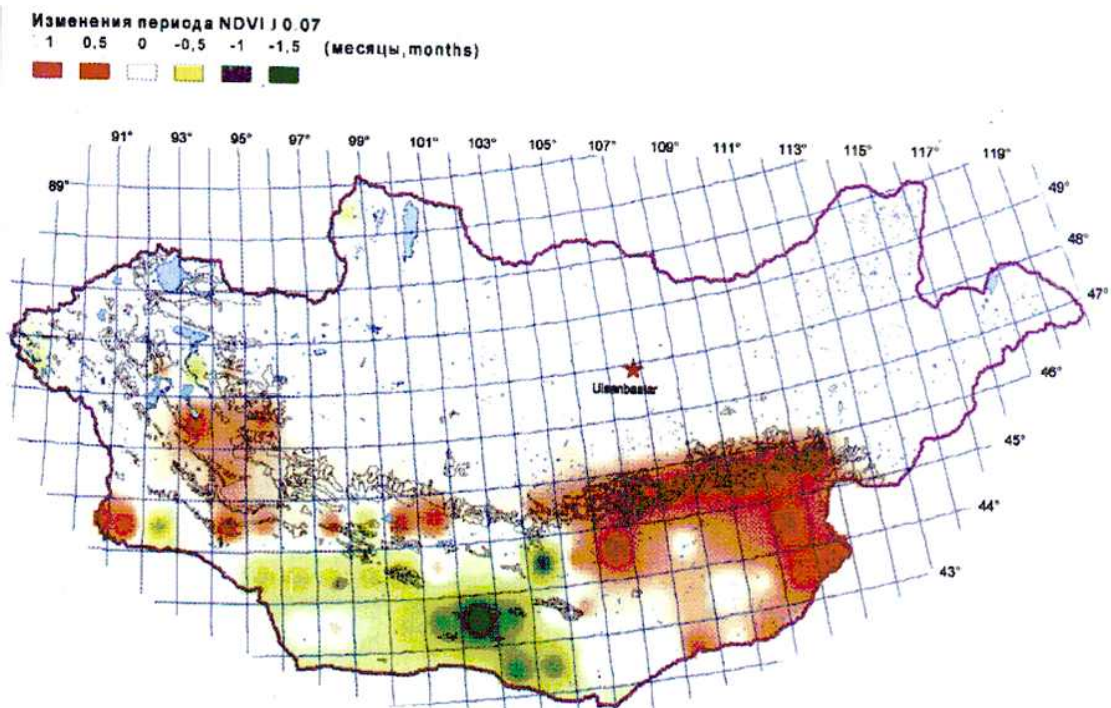


그림 11. 1982-1991 기간과 1992-2001 기간 사이 식생의 변화 (붉은색은 식생의 감소를, 녹색은 식생의 증가).

## 4.2 스텝, 산림과 사막화

위성영상 분석을 통한 토지피복도 변화를 살펴보면 몽골의 산림과 초지로 분류된 면적은 2006년 기준으로 각 164,293km<sup>2</sup>, 1,230,565km<sup>2</sup>이다. 산림과 초지는 자연적인 요인과 인위적인 요인에 의해 사막화가 진행되고 있지만 선행 보고에 따르면 지난 100년 동안 산불, 벌채 등 인위적인 영향이 산림면적 감소에 큰 영향을 준 것으로 나타났다.

약 68만ha의 산림지대가 산불피해 후 자연 재생되지 못했으며, 25만ha의 산림이 개벌 후 산림으로 회복되지 못하였다. 약 15만9천ha의 산림은 황폐화되어 대초원이나 사막지대로 바뀌었다고 보고되었다(MARCC, 2009).

선행 연구에서 몽골의 사막화는 자연적인 요인보다는 가축의 과잉 방목과 같은 인위적인 요인에 의해 그 속도가 더욱 가속화되고 있다고 보고 있다(Batjargal, 1997).

### 4.2.1 스텝

스텝기후로 구분되는 지역은 강수량이 적고 건조한 여름을 가지는 지역으로 목본이 살아갈 수 없는 환경적 요인을 가지기 때문에 초본이 우점하는 식생을 나타낸다. 이 지역은 사막의 주변부에 나타나기 때문에 기온의 상승, 강수량의 감소와 같은 자연적인 요인과 가축수의 증가와 같은 인위적인 요인에 의해 손쉽게 사막지역으로 변할 수 있는 위험성을 가지고 있다.

몽골의 스텝지역은 과거부터 가축의 목초지로 이용되어 왔으며 몽골의 생태 지형적 구분에 따르면 전체 몽골 면적의 47%에 이른다(Crisp *et al.*, 2004).

몽골의 가축수의 급격한 증가는 스텝지역 식생에 상당한 부담을 주고 있다. 1918년에 960만 마리였던 가축이 2000년대에 들어와 3,000만 마리로 급증하였고, 목초지의 가축수용용량을 초과하여 몽골의 목초지 퇴화 현상을 가져왔다(Batkhuu *et al.*, 2009).

몽골 목초지의 쇠퇴 정도는 쇠퇴 정도에 현상유지, 10% 쇠퇴, 20% 쇠퇴, 30% 쇠퇴, 50% 쇠퇴로 나누어 측정하였으며, 대부분의 목초지에서 쇠퇴 현상이 나타나는 것이 확인되었다(추장민 외, 2003; MNEM, 2000, 그림 12, 표 8).

표 8. 몽골 목초지별 쇄퇴 정도 (추장민 외, 2003; MNEM, 2000).

지역	목초지 쇄퇴 정도(면적, 천 ha)				
	현상 유지	쇄퇴/10%	쇄퇴/20%	쇄퇴/30%	쇄퇴> 50%
Arkhangai	134.8	988	2470.0	898.4	
Bayan-Ulgii	41.7	584.1	286.3	1251.7	208.6
Bayankhongor	238.2	1905.3	5716.1	1667.2	
Bulgan		824.4	2727.7	181.8	
Gobi-Altai	276.9	1846.2	5815.5	1292.3	
Dornod		2125.2	7332.0	1168.9	
East Gobi		3768.3	5092.0	1324.0	
Middle Gobi		2218.3	4436.7	517.7	221.8
Zavkhan		1031.0	3711.8	2130.8	
Uvurkhangai		598.2	2392.9	2692.0	299.1
Unmugobi		9097.0	4108.3	1467.0	
Sukhbaatar		772.6	6181.8	772.7	
Selenge	98.3	590.0	393.3	786.6	98.3
Central	180.1	660.3	2461.1	2401.1	300.2
Uvs	282.1	1410.5	1974.7	1974.7	
Khovd		604.0	3321.7	2114.0	
Khuvsgul	590.5	1181.2	2066.9	2066.9	
Khentii	305.5	1955.0	2016.1	1221.9	611.0
Darkhan				44.6	
Ulaanbaatar					75.5
Erdenet			- 53.0		
Choir					
총계	2,148.1 (1.7%)	32,062.9 (25.4%)	64,306.1 (50.8%)	26,027.4 (20.7%)	1,814.5 (1.4%)

지구온난화에 의해 고비사막에서 멀리 떨어진 서부의 알타이 고비와 알타이 산맥 일대에서 빙하가 후퇴가 나타났다. 지구온난화에 의해 스텝이 있던 지역이 건조화 되면서 사막화의 초기 형태인 무식생대와 모래언덕(Sand dune)이 형성되고 있다(그림 13, 14).



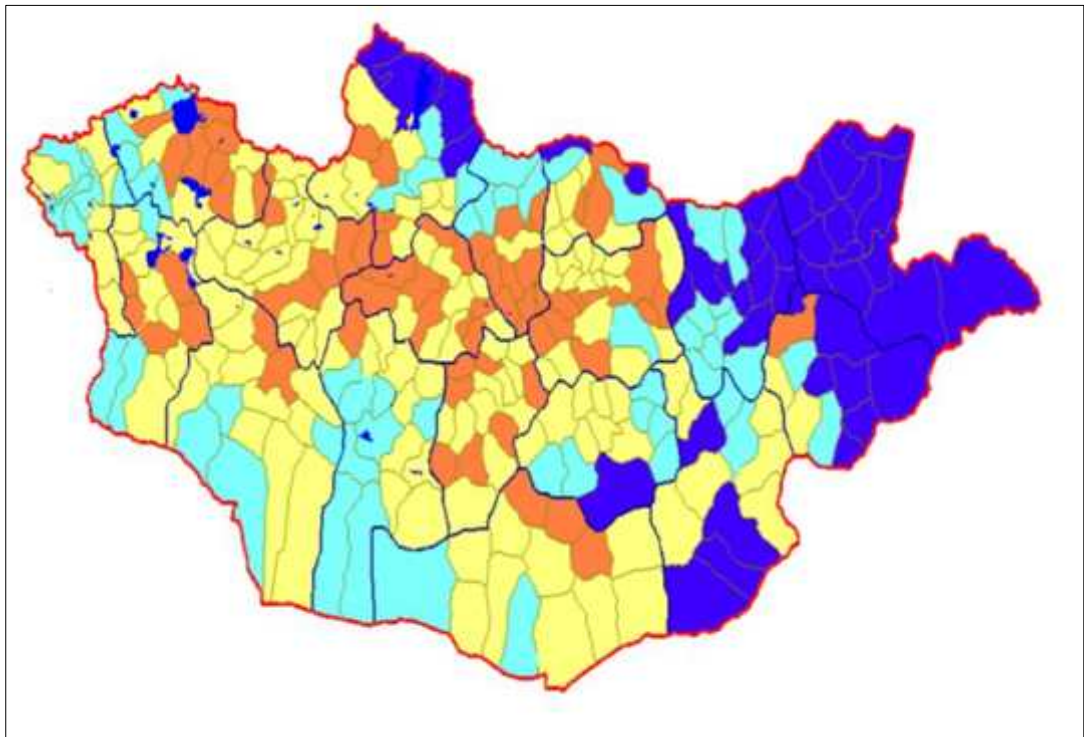


그림 12. 몽골 목초지의 가축수용용량 초과율 현황(2002년 기준) (추장민 외, 2003; Azzaya, 2003).



그림 13. 스텝지역의 토양침식에 따른 모래언덕의 확대 (Kong, 2012).



그림 14. 바양 우르기 지역 스텝식생 파괴 후 형성된 풍성사구에 의해 사막화가 진행 (Kong, 2012).

#### 4.2.2 산림

몽골의 북부에 위치한 산림지역은 시베리아낙엽송, 구주적송 등 침엽수가 우점하며 자작나무와 포플러의 활엽수가 자생한다. 침엽수의 우점은 이 지역의 겨울철 낮은 기온과 밀접한 관련이 있다.

남부 지역의 건조 산림지역에는 고비 등 건조지대에서 잘 자라는 관목류인 Saxaul이 숲을 이루고 있다. 이는 건조 산림지역의 낮은 강수량과 높은 기온과 관련이 있다. Saxaul 숲은 몽골 전체 산림 면적의 약 16%를 차지하고 있다(MARCC, 2009).

몽골의 생태 지형적 구분에 따르면 산림지역과 건조 산림지역을 합하면 전체 몽골 면적의 12% (188,000km<sup>2</sup>)에 이르는 것으로 나타난다(Crisp *et al.*, 2004).

산불, 불법 벌채 등의 무분별한 산림 파괴에 의해 몽골의 산림은 지속적으로 감소하고 있으며(그림 15, 16, 17) 위성영상 분석을 통한 토지 피복도 변화로 살펴보면 1992년 대비 2006년의 산림면적은 26.6% 감소한 것으로 확인되었다(MARCC, 2009).





그림 15. 바양 우르기 지역의 스텝 식생 (Kong, 2012).



그림 16. 알타이 산맥의 이깔나무 (Kong, 2012).



그림 17. 몽골 테를지국립공원 내의 불법 벌목에 의한 산림 훼손(이수광, 2009).

### 4.3 사막화 원인

사막화의 원인은 크게 전지구적 기후변화로 인한 자연적 원인과 사회·경제적 이유 때문에 초지가 훼손되고 가용수가 남용되는 인위적 원인으로 나눌 수 있다.

#### 4.3.1 자연적 원인

그림 18은 1940년부터 2011년까지 몽골 연평균 기온 편차(anomaly)의 변화를 나타낸 것으로 기온상승 추세가 뚜렷하다. 반면에 같은 기간 동안 강수량은 감소하는 추세를 보인다(Natsagdorj, 2012).

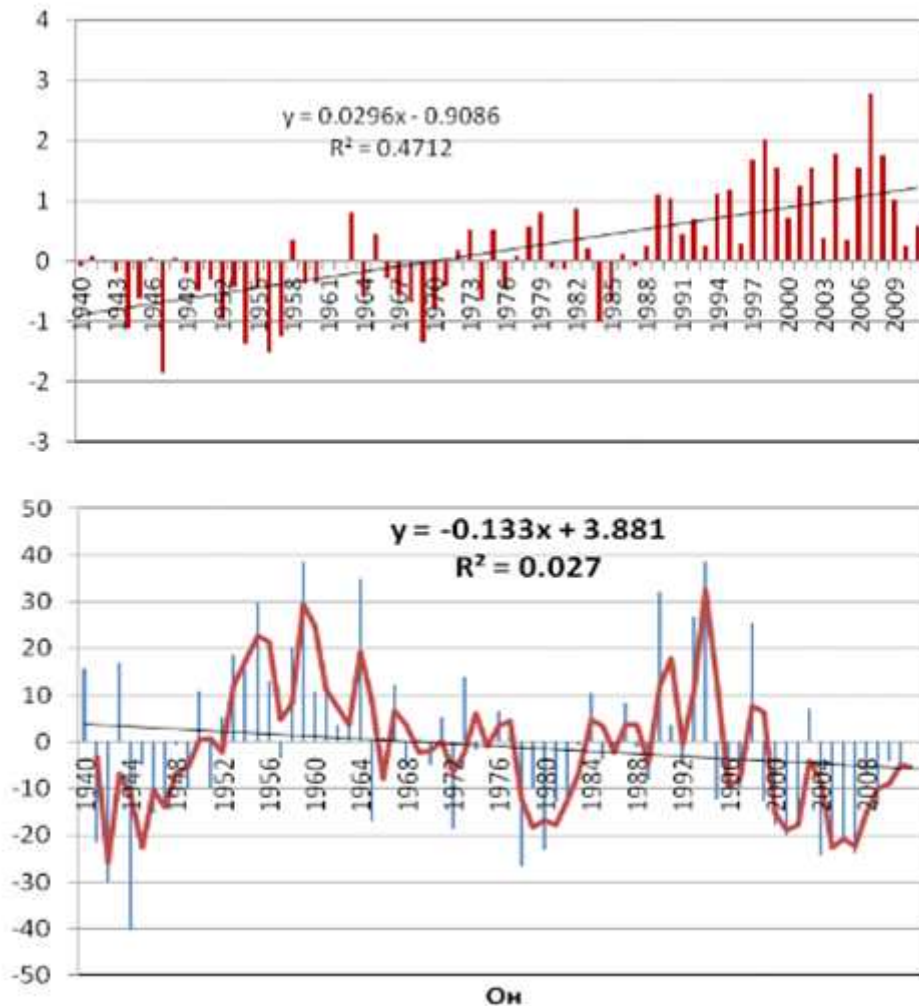


그림 18. 1940년부터 2011년까지 몽골 연평균 (위) 기온 편차와 (아래) 강수량 편차의 변화.

몽골의 기온은 과거 70년 전에 비해 동안 2.1℃ 상승하였다. 이는 전 지구적 평균 온도 상승(지구 평균 기온상승 0.7℃)과 비교하여 3배에 달하는 수치로 몽골에서 지구온난화의 변화폭이 다른 지역보다 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

기후변화가 몽골에 끼친 영향은 지역적으로 불균등했다. 1961년부터 2007년 사이에 강수량이 통계적으로 유의미하게( $p < 0.005$ ) 변화한 지역을 그림 19에 내부가 채워진 원으로 나타내었다.

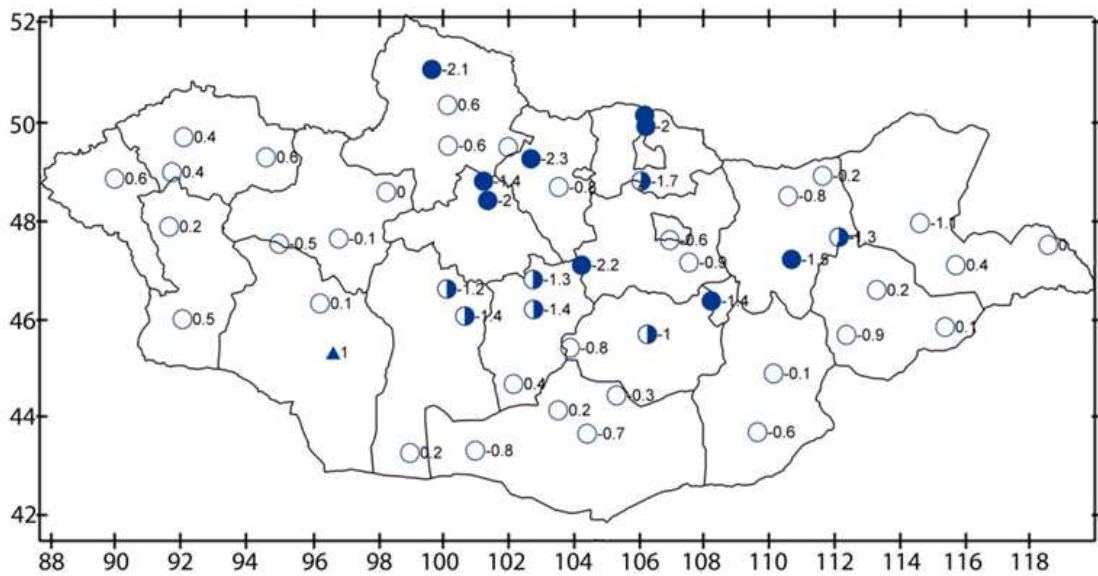


그림 19. 1961년부터 2007년 사이에 강수량이 통계적으로 유의미하게( $p < 0.005$ ) 변화한 지역 분포.

70년 전과 비교했을 때 몽골 남서부와 남동부 일부에서는 많게는 43mm에서 적게는 2mm 강수량이 상승한 것으로 관측되지만 대부분의 지역이 많게는 57mm에서 적게는 1mm감소하는 것으로 나타났다. 전체적으로 강수량이 10% 감소하였다(그림 20).

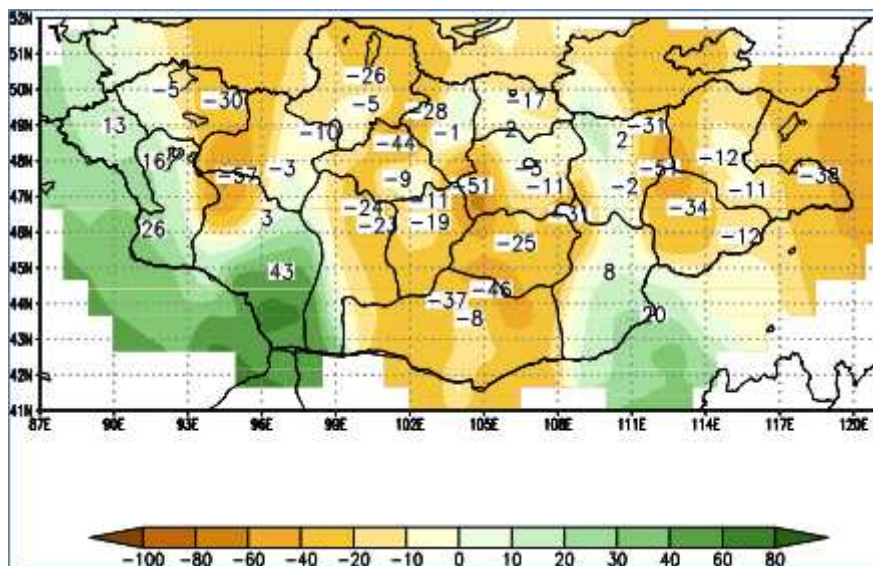


그림 20. 과거 70년과 현재와의 강수량 변화 (Gomboluudev, 2011).



그러나 강수량의 절대적 감소는 사막화를 부분적으로만 설명할 수 있을 따름이다. 위 그림에서 보듯이 강수량이 감소한 지역은 몽골 중북부 지역에 집중되었다. 그림 10을 보면 이 지역은 크고 작은 수계가 많은 지역이다. 수계가 많은 지역에서 강수량 감소가 가장 뚜렷했다는 사실은 미래의 사막화가 사막 이외의 지역까지 위협할 수 있다는 것을 뜻한다.

한편, 식생 감소는 남서쪽 지역에서 가장 컸는데(그림 11), 이 지역은 강수량 변화가 통계적으로 유의미한 수준이 아니었다. 아마도 원래부터 사막 지역이었기 때문에 적은 강수량 변동에도 취약성이 크기 때문이거나, 자연적 요인이 아닌 인위적 요인 때문인 듯하다.

#### 4.3.2 인위적 요인

인위적 요인들은 모두 이해당사자들 사이에 의견이 첨예하게 대립하고 있다.

##### ①가축 방목

인위적인 사막화 원인으로 가장 먼저 거론되는 것은 가축의 과잉방목이다. 2009년 기준으로 약 4천만 마리의 가축이 있으며 전체 인구의 몇 배에 이른다. 주되게 방목에 의존하기 때문에 혹한에 취약하며, 실제로 2009년 혹한 때문에 가축이 대규모 동사해서 1년 만에 25%가 감소하기도 했다(표 7). 겨울철 가축이 동사하는 문제는 인공강우 실험에 커다란 제약으로 작용하기도 한다. 이에 대해서는 다음 장에서 다시 다루겠다.

2010년 기준으로 양 44%, 염소 42%, 소 7%, 말 6%, 낙타 1%의 가축이 있으며 특히 5대 주요 가축 가운데 캐시미어를 생산하여 양모를 생산하는 양보다 훨씬 높은 소득을 얻을 수 있는 염소의 사육두수가 급증하고 있다. 염소는 식물의 잎, 가지, 줄기뿐만 아니라 뿌리까지도 먹어 치우면서 식생의 초토화를 야기한다고 알려져 있다.

몽골의 5대 가축에는 염소, 양, 야크, 말, 낙타가 있으며 2010년 기준으로 염소는 전체 가축수의 42%(1,388만 마리), 양은 44%(1,448만 마리), 야크는 6% (217만 마리), 말은 6%(192만 마리), 낙타는 1%(26만 마리)의 비율을 나타냈다(그림 21).

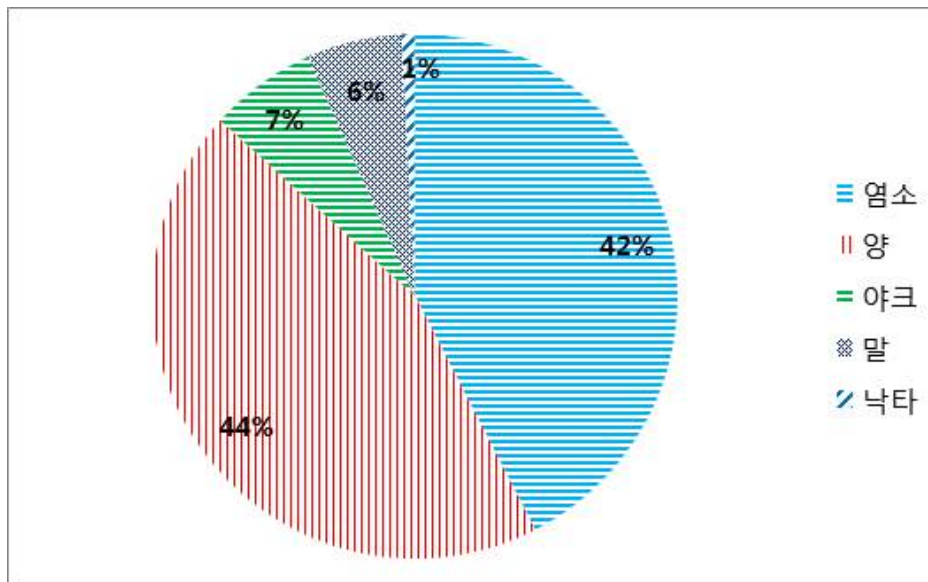


그림 21. 몽골 5대 가축 비율(2010년 기준) (NSOM, 2012a).

정부의 보조금 지급, 가축사육에 의한 수익의 증가 등과 같은 사회, 경제적인 이유로 가축의 수는 증가하는 추세를 보여 왔다. 1995년 대비 2010년에 5대 가축의 수는 114% 상승하였고 최근 15년 기간 중에 제일 많은 가축 수를 보였던 2009년에는 1995년 대비 154%의 높은 성장률을 보였다.

단기적으로 가축의 수가 감소하는 시기가 나타나지만 이는 겨울철 혹한과 눈보라에 따른 굶주림 피해 등과 같은 자연적인 영향으로 인위적인 간섭이 없을 경우에 증가 추세는 계속될 것으로 보인다.

가축 수의 증가 추세와 함께 1990년 가축의 사유화 허용 조치 이후, 양모를 생산하여 얻은 소득보다 훨씬 높은 소득을 얻을 수 있는 염소의 사육 두수가 급증하고 있으며 이는 1995년 전체 가축의 30%에서 2010년에는 42%까지 비중이 확대되어 가는 것을 확인 할 수 있다(그림 22).

염소는 식물의 잎, 가지, 줄기뿐만 아니라 뿌리까지도 먹어 치우면서 식생의 초토화를 야기하는 주요 생태적 위협요인으로 몽골의 전체 가축에서 염소 비중의 증가는 몽골 사막화 확대에 일정 부분 관여한 것으로 평가된다.

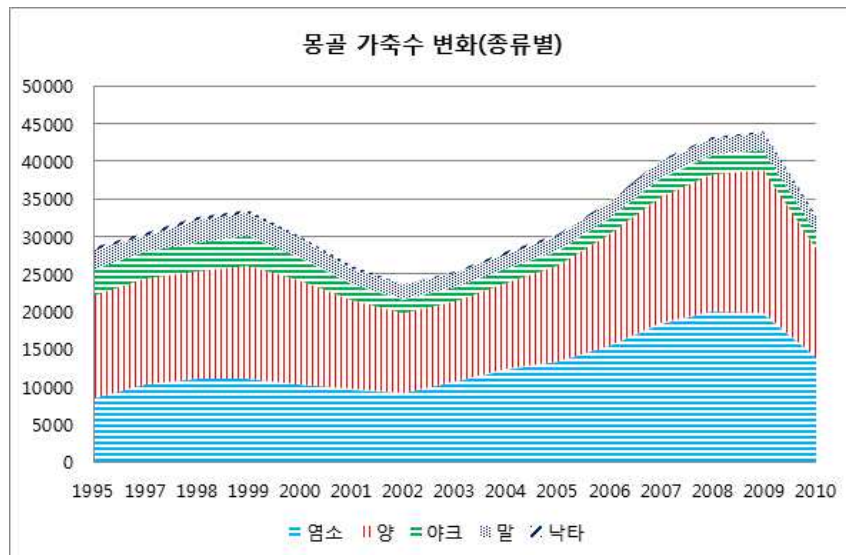


그림 22. 몽골 5대 가축 수와 비율 변화(단위 천) (NSOM, 2012a).

목초지 수용능력을 넘는 과잉방목은 몽골의 건조, 반건조 스텝 지역의 식물종의 다양성을 감소시켰고 식생의 파괴를 가져왔다. 그 결과 많은 지역이 사막화에 취약하고 전초 단계로 여겨지는 무식생대로 바뀌었고 현재 풍식(Wind Erosion)과 표토침식(Surface Erosion)에 의해 예전보다 더 빠르게 토양황폐화가 진행되고 있다(그림 23-29). 풍식과 표토침식은 가축의 과잉방목에 따른 식생 파괴, 광산개발에 따른 표토 유실 등 다양한 요인에 의하여 발생하며 한발이나 폭우가 병행될 경우 지역생태계에 치명적인 피해를 미치고, 중국에는 사막화를 부추기는 요인이 된다.



그림 23. 풍식이 빈번하게 발생하는 지역 (Ochirbat, 2012).



그림 24. 풍식으로 모래가 뒤덮여 황폐화된 지역 (Ochirbat, 2012).



그림 25. 염소에 의해 식생이 파괴된 스텝지역 (Ochirbat, 2012).







그림 28. 스텝지역에서 나타나는 지표침식 (Ochirbat, 2012).



그림 29. 스텝지역에서 나타나는 지표침식 (Ochirbat, 2012).

그러나 몽골 사막화에서 얼마나 많은 부분이 가축의 과잉 방목 때문인지에 대해서는 몽골 정부 내에서도 이견이 분분했다. 7월 23일 현지에서 직접 만난 몽골 기상수문환경연구소(Institute of Meteorology, Hydrology and Environment, IMHE)의 전임 소장이자 지금도 기후변화를 연구하는 Dr. Natsagdorj는 전체 사막화의 절반 정도가 과잉방목에 의한 것이라고 추정하였다. 이는 앞서 제기한 자료를 뒷받침하는 것이다.

그러나 다음날 농과학연구소(Mongolia Academy of Agricultural Sciences)의 목축 전문가(그림 30)는 비록 염소가 뿌리째 먹는다고 하더라도, 정부가 방목지를 단거리, 중거리, 장거리, 저장지로 나누어서 관리하기 때문에 겨울이 지나고 봄이 왔을 때 풀이 다시 못자라는 경우는 없다고 했다. 또한 가축을 방목하지 않는 러시아와 중국도 사막화가 진행되고 있기는 마찬가지라면서 염소 때문에 사막화가 진행된다는 주장의 상당부분이 과장되었을 수 있다고 지적했다.



그림 30. 몽골 울란바타르 농과학연구소에서 만난 목축 전문가.

## ②광산 개발

2006년 몽골 정부는 광업법을 개정하여 국가안보경제개발 및 사회 개발에



영향을 미치는 광산과 연간생산 규모가 몽골 국내총생산량의 5% 이상 되는 광산을 전략 광산으로 지정하였다(그림 31). 2011년 6월 기준으로 총 15개의 전략광산 중에 6개의 광산이 개발되고 있다.

몽골 정부는 자국의 풍부한 지하자원을 개발하기 위해 다양한 정책을 통해 외환 투자를 격려하고 있다. 이에 많은 외국 광산 개발기업들이 몽골 각지에 들어와 광산을 개발하고 있으며 대부분의 광산이 노천광산의 형태로 개발되고 있다.

현재 광업은 몽골 전체 수출의 95%, GDP의 22.5%를 차지할 정도로 활발하다. 미개발 광산 중 최대 규모의 구리 광산과 석탄의 일종인 점결탄 광산이 몽골에 있다. 미국 국립 지질조사국에 따르면 전세계 희토류(rare earth oxide, REO) 매장량의 16%가 몽골에 있는데 이는 중국 다음으로 많은 것이다(표 9). 중국, 러시아, 미국 기업들이 활발하게 투자하고 있으며 몽골 정부는 2015년에는 2010년 산출량의 4배, 시장 규모로는 115억 달러에 달할 것으로 보고 있다.



그림 31. 몽골의 전략광산 위치.

표 9. 몽골 전략광산별 정보 (외교통상부, 2011).

광산명	광물자원	매장량
타반톨고이 (TavanTolgoi)	석탄	65억 톤
오유톨고이 (OyuTolgoi)	석탄	광석 27억 톤 (동 2,540만톤/금 1,028톤)
투무르테이 (Tomortei)	동, 금	광석 2억 2,930만 톤 (철 51.2% 함유)
보로 (Boroo)	철	광석 2만 4,500톤 (1톤당 금 1.6g 함유)
도르너드 (Dornod)	금	광석 28,868톤 (산화우라늄 0.175% 함유)
나린 수카이트 (Nariin Sukhait)	우라늄	1억 2,550만 톤
바가누르 (Baganuur)	석탄	6억 톤
시베 어버 (Shivee Ovoo)	석탄	6억4,620만 톤
타간 수바르가 (Tsagaan Suvarga)	석탄	산화물 1,064만 톤 (동 0.42%, 몰리브덴 0.011% 함유)
에르데넷 (Erdenet)	동, 몰리브덴	광석 12억 톤 (동 0.51%, 몰리브덴 0.012% 함유)
마르다이 (Mardai)	동, 몰리브덴	광석 1,104톤 (산화우라늄 0.119% 함유)
구르반 부라그 (Gurvan Bulag)	우라늄	광석 16,073톤 (산화우라늄 0.152% 함유)
부렌칸 (Buren Khaan)	우라늄	광석 1억 9,224톤 (오산화인 21.2% 함유)
투무르테인 오보 (Tomortein Ovoo)	인	광석 7만 7,000톤 (아연 11.5% 함유)
아즈갓 (Asgat)	아연	광석 6만 4,000톤 (1톤당 은 351.08g 함유)

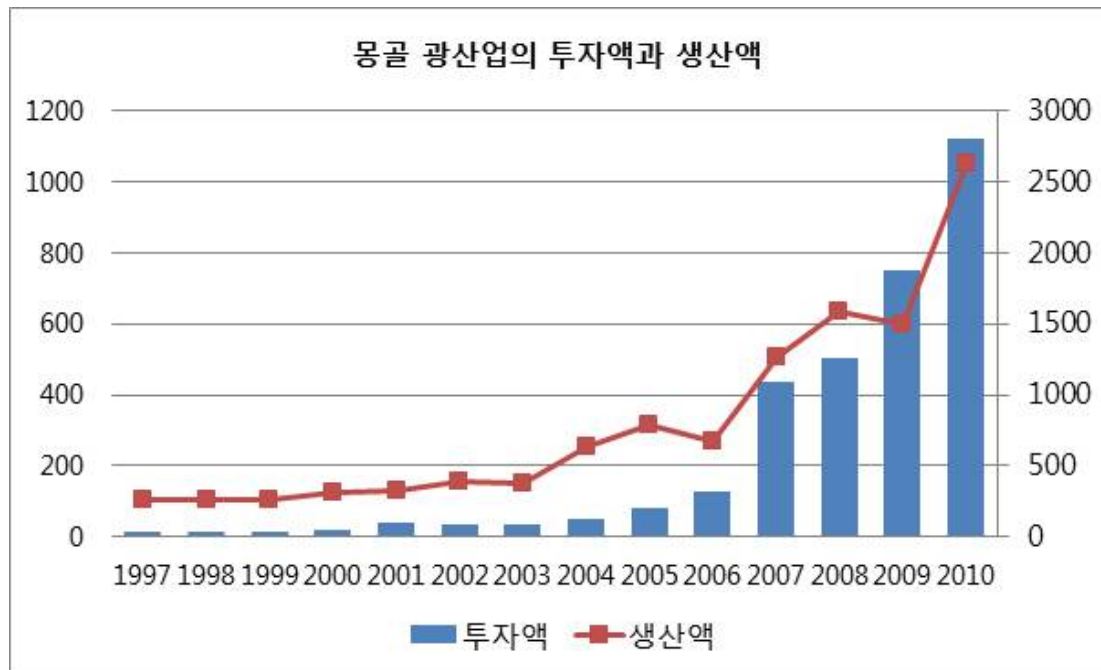


그림 32. 몽골 광업투자액과 생산액(단위: 백만 달러) (윤여필, 2008).

몽골 지하자원부의 보고에 따르면 2006년까지 투자와 생산이 미비했던 몽골 내의 광산업 투자와 생산액은 2006년 15개의 전략광산을 선정된 이후 급격히 상승한 것을 확인할 수 있다(그림 32). 구체적으로 전략광산 지정 이전인 2006년 대비 2010년 투자액은 889% 성장했으며 생산액도 388% 성장하였다.

노천광산 개발은 적은 비용으로 다량의 광물자원을 채취할 수 있는 장점이 있지만 광산 지역의 지표층을 뒤엎고 개발하기 때문에 기존 지표식생의 파괴를 유발하는 문제점을 가지고 있다(그림 33). 또한 광산개발로 발생하는 오수 및 폐석을 처리하기 위한 시설 및 복구 관리체계의 부족은 토양 황폐화의 심각한 원인으로 여겨진다.

몽골 환경부의 자료에 의하면 2009년과 2010년 사이에 약 2만ha의 대지가 광산으로 개발되면서 지표식생이 파괴되었지만 그중에서 4천ha만이 복구되었다(Bayarbat, 2011).

대규모 노천광산은 개발 과정에서 표토와 지표식생을 파괴하고, 광물의 채굴, 선별, 적치, 운반, 운송 과정에 분진을 발생하고 주변의 표토를 파괴하여 지역 규모의 인위적인 사막화를 야기한다. 아울러 광물을 채취하고 발생된 폐석은 적절하게 처리하지 않으면 지속적으로 지역의 토양생태계를 파괴하고 먼지를 발생시키고 수질을 오염시키는 오염원이 된다.



그림 33. 몽골의 대규모 노천광산.

특히 고비사막에서 구리와 금을 생산하는 오유톨고이(OyuTolgoi) 광산의 구리 매장량은 세계 최대인 것으로 알려졌다. 이 광산개발 사업은 몽골 최대의 외국인 투자사업이며 2020년까지 몽골 전체 GDP의 1/3을 벌어들일 것으로 예상될 만큼 규모가 엄청나다. 타반 톨고이(Tavan Tolgi) 광산 역시 세계 최대 규모급의 석탄을 보유하고 있는데 이 역시 고비 사막에 있다.

광업을 옹호하는 이들은 광산이 고비 사막에 있기 때문에 광산에서 사용하는 지하수가 주변에 초래하는 환경적 영향은 작다고 주장하고 있으나, 오유톨고이 광산 운영에서 사용하는 지하수가 대수층을 약화시키고 있다는 지적이 있다. 몽골 정부는 오유톨고이 광산이 향후 40년 동안 초당 870 리터의 물을 사용하도록 허가했다. 과학자들은 이 대수층이 복원되기 위해서는 1450년이 걸릴 것으로 예상하고 있다(Mine Watch Mongolia, 2010).

### ③기타

이 밖에도 도시 외의 지역에서 부실한 도로체계와 차량 증가로 인해 초원에 무수히 많은 차길이 생기는 것, 건조한 기후와 인위적인 방화로 인한 크고 작은 산불, 산림벌채, 작물 경작지역 증가와 폐경지의 방치 역시 인위적인 사막화 원인으로 지목되고 있다.

## -차량증가

몽골의 산업화, 도시화로 인해 차량의 수요가 증가하면서 몽골 전체 차량이 증가하였다(그림 34). 그러나 도시지역을 제외한 대부분의 농촌지역에서는 도로와 같은 교통시설의 설치되어 있지 않았고 대부분의 차량이 지표식생이 있는 초원을 밟으면서 이동하였다. 유목민들과 비도시 지역의 무분별한 차량 이동은 농촌 지역의 지표식생을 파괴하였다.

식생이 파괴된 지역과 사막지역에서의 차량이동은 보다 많은 모래먼지를 유발시키고 발생한 모래먼지는 식생이 아직 자생하고 있는 지역에 광합성을 저해하고, 토양침식을 야기하였고 결과적으로 사막지역을 확장하게 하는 부작용을 가져다주었다(그림 35-38).

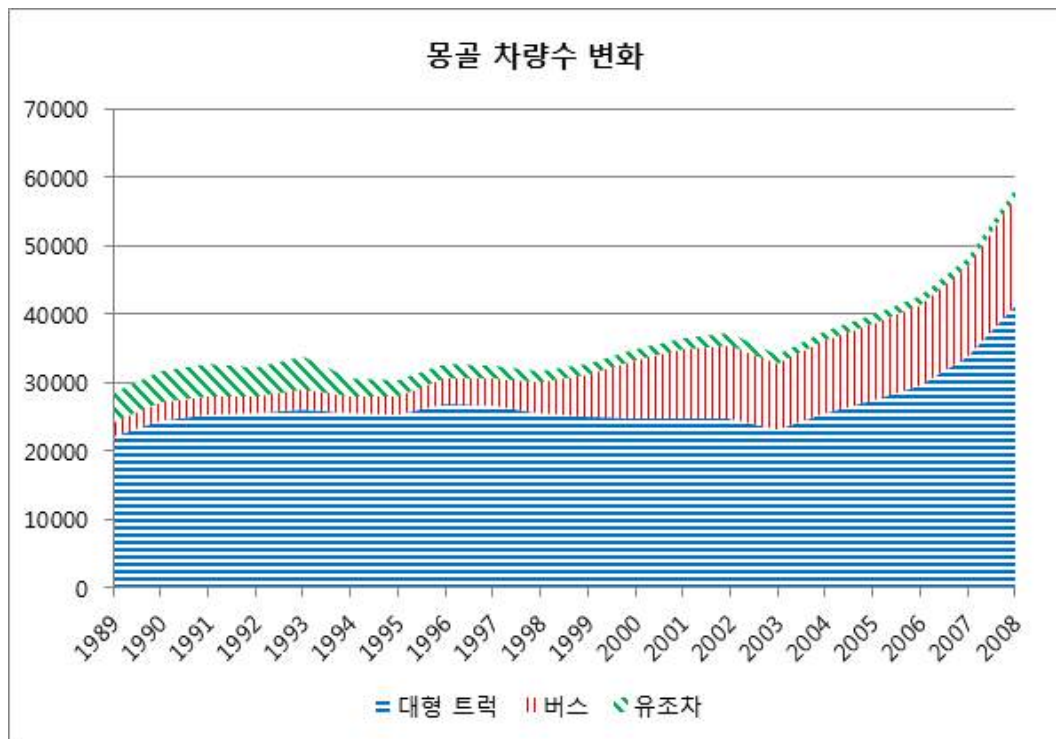


그림 34. 몽골에서 운행 중인 차량의 수 변화 (NSOM, 2012b).

몽골의 총 차량 수는 1989년과 비교하여 2008년에는 206% 성장하였다. 차량의 종류별 비율은 무게가 많이 나가서 지표식생의 파괴 정도가 심하고 모래먼지를 많이 유발하는 대형트럭의 비중이 가장 높았으며 버스, 유조차 순으로 나타났다. 가장 높은 성장률을 보인 것은 버스, 대형트럭이며, 유조차는 그 수가 감소하는 것으로 나타났다.





그림 35. 과도한 차량이동으로 인해 파괴된 지표식생 (Kong, 2012).



그림 36. 과도한 차량이동으로 인해 파괴된 지표식생 (Kong, 2012).



그림 37. 대형 트럭에 의해 발생하는 모래먼지 (Ochirbat, 2012).



그림 38. 모래먼지의 피해를 받은 차량 (Ochirbat, 2012).

### -과도한 농경

농업생산량의 증가를 위한 관개농업은 단기적으로 농업 가능면적을 증가시키면서 농업생산량의 증가를 가져왔다(그림 39). 하지만 관개농업으로 인한 지하수위의 증가와 수분의 증발에 따른 지표면의 염류의 집적은 토양 염류화를 발생시켰고 결과적으로 지표식물이 자랄 수 없는 토양 황폐화지역으로 만들었다.

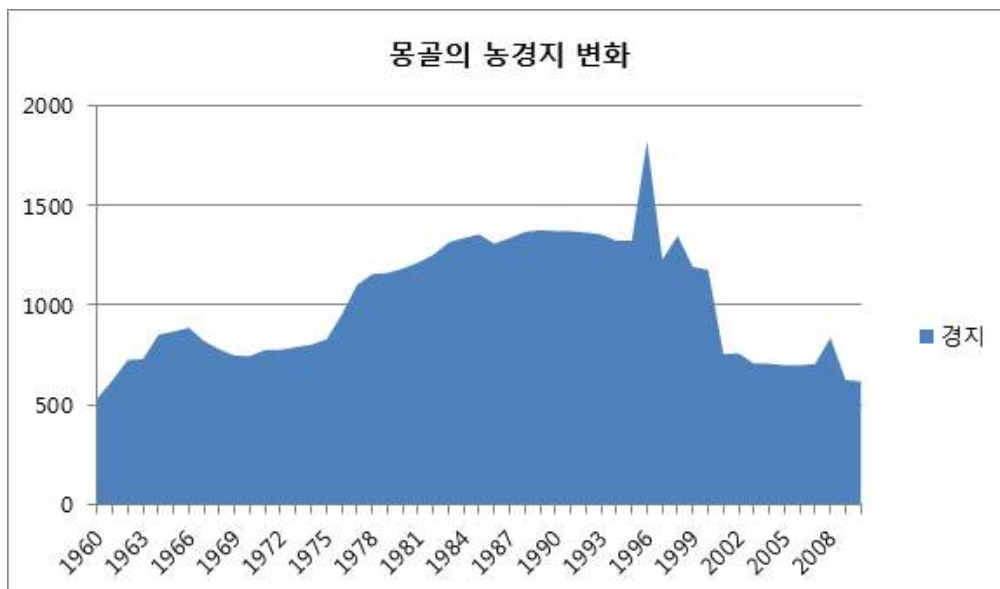


그림 39. 몽골의 농경지 면적 변화(단위 천ha) (NSOM, 2012c).

몽골 통계청에서 제공하는 농경지 변화 자료에 따르면 몽골의 농경지는 1960년부터 1998년까지 증가하는 경향을 보이지만 1998년 이후 감소하여 최근에는 50년 전 수준으로 되돌아간 것을 확인할 수 있다.

농경지 면적이 제일 높은 기간은 1996년으로 농경지는 1,822천ha에 이른 것으로 보고되었고 이는 1960년 농경지의 면적 532천ha에 비해 342% 증가한 것이다. 농경지 면적이 최고점을 찍은 1996년 이후 농경지의 면적은 꾸준히 감소하고 있으며 최근 2010년의 농경지 면적은 617천ha로 1960년대 초반의 농경지 면적과 비슷한 규모로 축소하였다.

농경을 하지 않고 토지가 과거 목초지로 돌아간 것으로 추측할 수 있지만 1960년 전체 농경 가능면적은 140,683천ha이며 2010년 전체 농경 가능면적은 115,525.8천ha으로 농경지에서 축소된 면적이 이전 초지로 돌아가지 못하고 폐경지로 방치된 것을 확인 할 수 있다.

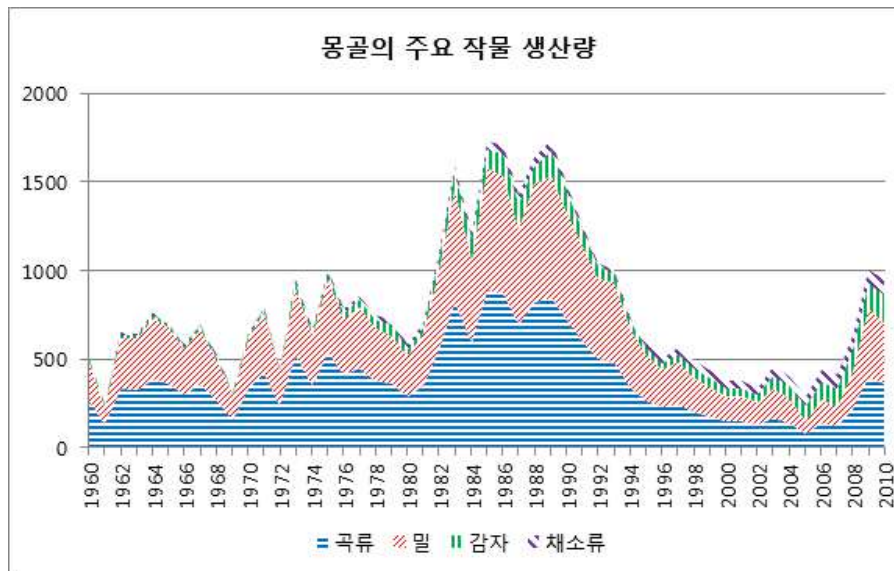


그림 40. 몽골의 주요 작물 생산량 변화(단위 천 톤) (NSOM, 2012c).

몽골에서 수확되는 주요 작물(곡류, 밀, 감자, 채소류) 생산량 통계를 통해서도 농경지의 확대와 축소 경향을 확인할 수 있다(그림 40). 농경지가 확대되어 가는 기간 중에 주요작물의 생산량은 빠르게 증가하였다.

하지만 농경지가 축소되어 가는 1998년보다 빠른 1990년도에 주요 작물생산량은 감소하기 시작한다. 이는 농작물을 생산하지 않고 버려지는 폐경지가 증가하는 것을 나타낸다.

### -산불과 벌채

최근 100년간의 인위적 영향에 따른 산림생태계 변화를 연구한 결과에 따르면 68만 ha의 산림이 산불 이후, 25만 ha의 산림이 벌채 이후 제대로 갱신되지 못하는 것으로 파악되었다(TsogtBaatar 2007).

몽골에서 침엽수는 경제적, 생태적으로 매우 중요한 역할을 담당하는데, 약 173만 헥타르의 침엽수림이 훼손되어 자작나무나 포플러와 같이 상대적으로 경제성이 떨어지는 활엽수나 관목림으로 바뀌었다. 또한 16만ha의 산림은 훼손 정도가 심해 초지나 사막으로 바뀐 것으로 나타났다(TsogtBaatar 2007).

1940년에서 2002년 사이에 총 32만 ha의 산림에서 45백만<sup>m</sup>의 목재가 수확되었다. 1990년 이후 목재 수확량은 점차 감소하는 추세를 보이며 2012년 해마다 600천~700천<sup>m</sup>의 목재가 내수용으로 벌채되고 있지만 정부가 허가한 벌채량보다 많은 1백만<sup>m</sup>가 불법적으로 벌채되는 것으로 추정된다(이돈구 등, 2012).

몽골은 겨울이 춥고 길기 때문에 땃감용 나무로 필요한 수요만 연간 약 1.5백만 $m^3$  정도로 추정되며 도시 건설 및 광산 개발용으로 이루어지는 불법 벌채도 매우 빈번하다(이돈구 등, 2012).

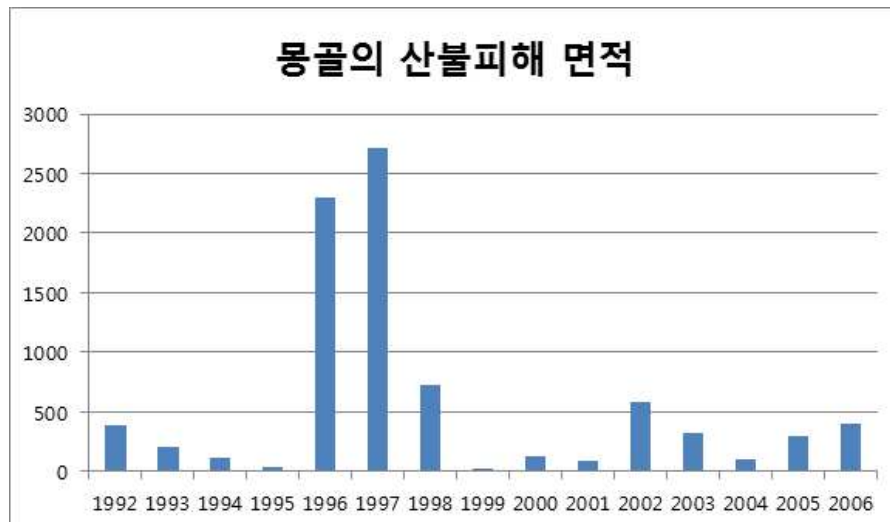


그림 41. 연도별 몽골의 산불 피해 면적(단위 천 ha) (Ykhanbai, 2010).

몽골은 전형적인 대륙성 기후로 적은 강우량으로 인해 매우 건조하여 몽골 전체 산림의 약 98%가 산불위험지역으로 분류된다.

몽골에서 산불은 주요한 산림 훼손 요인이며 지난 15년간 산불 피해 자료를 분석해 본 결과, 해마다 평균 56만ha씩, 총 8.4백만 ha의 산림이 산불 피해를 입었다(이돈구 등, 2012, 그림 41, 42).



그림 42. 산불과 불법벌목에 의해 파괴된 몽골 북부 산지.

## 제 3 장 황사 및 사막화 방지대책

### 제 1 절 몽골 현지 대책

#### 1.1 몽골 기상청의 기상조절기술

7월 현지조사를 통해 몽골에서 이미 광범위한 인공증우 실험이 진행 중이라는 것을 확인할 수 있었다.

몽골 정부는 1989-1990년에 시범적으로 실험을 했으나 한동안 중단되었던 듯하다. 1996년부터 2007년까지 다시 인공증우 실험이 시작되었으며 2008년부터 인공증우 실험에 대한 투자가 본격화되었다. 그 결과 2007년까지 전국에 단 2대이던 로켓발사대는 현재 35개로 늘어났다. 이 외에도 지상연소기 10대, 모바일 레이더 5대를 보유하고 있다. NAMEM은 Khuriin shim이라는 인공증우 담당 센터를 설치해서 전국의 인공증우 실험과 장비를 관리하고 있다. 이를 위해 전국의 21개 아이막(aimag, 우리나라 행정구역 중 도에 해당)에 상주 인력을 두고 있는데 이는 인공증우가 연구실험 목적을 넘어서 현업화 수준으로 인력과 재정을 투입하는 단계에 이르렀다는 것을 의미한다.

지상연소기(그림 43, 좌)는 서쪽 산악지형에 많이 배치했으며, 남쪽 고비사막과 그 이외 초지에는 로켓발사대(그림 43, 우)를 배치하였다. 이런 배치의 이유는 지상연소기에서 살포되는 구름씨 물질은 높은 고도로 상승하는데 제약이 있기 때문에 해발고도 2km 이상 지역에 배치해야 구름씨 물질이 구름 속에 들어가기에 적당하고, 로켓 발사대는 그러한 고도 제약이 덜하기 때문으로 설명된다. 인공증우 실험 검증에 사용하는 모바일 레이더(그림 44)는 전국적으로 고르게 배치했다.

2012년에만 지상연소기 18대, 모바일 레이더 4대를 추가로 도입하고 있는데 이는 지금도 몽골 정부가 인공증우 실험에 활발하게 투자하고 있다는 것을 의미한다.

인공증우 실험은 4월에서 10월 사이에만 실시하는데, 특히 겨울에는 폭설로 인한 가축 피해를 막기 위해 실험이 금지된다. 겨울에 대부분의 실험은 6월에서 8월 사이에 실시한다고 한다.

실험은 구름이 많은 날, 모바일 레이더를 켜 상태에서 목표 구름에 로켓을 발사하거나 지상연소기로 빙정핵 역할을 하는 요오드화은(AgI)을 목표 구름에 주입하는 방식으로 진행된다. 16번 실험하는데 대략 800만T가 필요하다.



지상연소기는 1번에 개당 9만8천 투그릭(약 8만원)인 연소탄 6개를 사용한다. 로켓 발사대는 개당 100 USD(약 12만원)인 로켓을 3개 정도 발사한다. 고비사막에 위치한 달란자드가드(Dalanzadgad) 기상관측소의 경우 1년에 약 10차례 정도 실험을 실시하며, 약 800만 투그릭(약 640만원)을 사용한다고 함.



그림 43. 몽골에서 사용 중인 (좌)지상연소기와 (우)로켓발사대.



그림 44. 인공증우 실험을 검증하기 위한 모바일 레이더.

모바일 레이더는 X밴드 파장을 사용하고 반경 75 km의 지역을 포착할 수 있기 때문에 구름씨 살포결과를 바로 확인할 수 있다고 한다(그림 45).

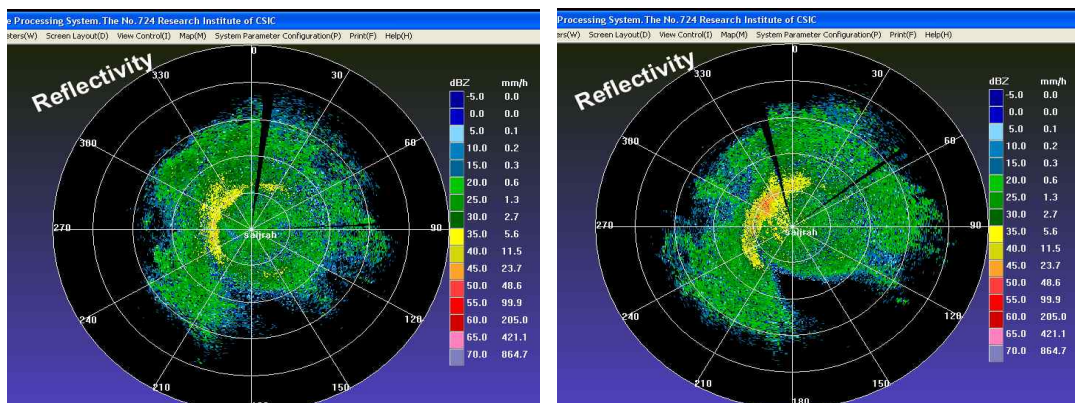


그림 45. 2012년 7월 3일 오전 7시에 실시한 실험. 동심원의 중심부가 로켓 발사 지점이며, 왼쪽은 발사 직전, 오른쪽은 발사 9분 후.

### -신뢰성 문제

이처럼 몽골 정부는 한국보다도 더 많은 장비와 인력을 갖추고 전국적인 인공증우실험을 실시하고 있지만 그 효과와 신뢰도에 대해서는 많은 의문이 제기된다.

실험을 관장하는 Khuriin Shim은 강수량의 20%가 증가했다고 주장한다. 울란바타르에서 가장 가까운 토호 아이막의 기상관측소장은 인공증우 실험 결과로 말라가던 하천이 다시 살아나고 있다는 말도 했다.

그러나 이런 주장에 대해서 같은 Khuriin Shim이 속한 NAMEM의 관계자들끼리도 의견이 불일치했다. 무엇보다도 수문학 연구자들은 몽골의 하천과 호수가 지속적으로 마르고 있다는 의견을 제기했으며 설령 효과가 있더라도 전체적인 사막화 흐름에는 유의미한 영향을 주지 못하고 있다고 증언했다. 개별적인 실험이 성공하더라도 그런 실험들이 종합적으로 몽골 기후에 끼치는 영향에 대한 분석이 없다는 것도 실험결과가 과장되었을 가능성을 제기한다.

또한 몽골의 강수량 자료는 AWS를 이용한 자동집록이 아니라 사람이 3시간마다 보고하는 형식이라 오류가 많다. 특히 전화기를 이용한 정보 입력 과정에서 오타는 치명적인데(2.0mm를 20mm로 입력하는 등) 신뢰할 자료가 없기 때문에 전국적으로 1년에 5백 회라는 많은 실험에도 불구하고 통계적·객관적 검증이 쉽지 않다.



## 1.2 몽골 정부의 사회경제적 대책

기상조절기술 이외에도 몽골 정부는 유목민 가축 통제, 조립 사업 등으로 사막화를 방지하려고 했다.

### ①가축 통제

앞에서 기술했듯이 몽골 정부는 목초지를 4등급(단거리, 중거리, 장거리, 저장지)으로 나눈 후 유목민 대표와 만나서 각 유목민들에게 그 해에는 어디에서 가축을 방목하라고 지정해준다고 한다(그림 46). 가축은 유목민들의 사유재산이기 때문에 정부가 이를 강제할 수는 없지만 유목민들은 이런 통제에 잘 따르는 편이라고 한다. 반면에 유목민들에 대한 통제를 강화하는 법률 제정 시도는 언제나 사회적 논란을 촉발시킨다고 한다.

한편, 염소가 초지를 훼손한다는 지적 때문에 염소 대 양의 비율을 낮추기 위해 노력하고 있다. 20세기 몽고 독립 직후인 1918년 시행된 조사에서는 양 3마리당 염소 1마리의 비율이었는데, 이 비율은 1990년까지 유지되었다. 그러나 시장경제가 도입된 후 유목민들이 스스로의 생계를 책임져야 하는 상황에 처했고, 캐시미어 원료로 사용되는 염소 사육이 급증해서 지금은 양 1마리당 염소 1.2마리로 그 비율이 역전되었다. 따라서 몽골 정부는 유목민들에게 캐시미어 이외의 수입원을 제공하거나, 염소의 양(量)보다는 질 향상을 유도하는 방법을 사용한다고 한다. 최근 몽골의 경제성장으로 유목민들의 수입이 늘어나자 염소의 비율이 조금 낮아지기도 했다고 한다.



그림 46. 달란자드가드에서 방목 중인 가축.

### ②조립사업

몽골 정부는 1996년 UN 사막화 방지 협약에 가입하여 사막화 현황을 조

사하고 국가적 사막화 방지노력을 시작했다. 우리나라도 한국국제협력단(KOICA)을 비롯하여 환경부, 산림청 등이 몽골 사막화 방지 지원사업을 실시하고 있으며, 대한항공은 2004-2007년까지 나무심기 행사를 통해 몽골에 ‘대한항공 숲’을 조성하였으며 동북아산림포럼과 푸른아시아 등의 NGO들 역시 조림사업 위주로 몽골지역 사막화 방지에 기여하고 있다.

조림사업은 대부분 사막 지역이 아닌 중북부의 초지에서 주되게 이뤄지고 있다. 그러나 이런 조림사업은 지하수 이용을 둘러싸고 지역주민과 마찰을 빚기도 하며, 한국인들이 떠난 뒤에는 기술적 재정적 이유로 계속 관리가 되지 않아서 결국 조성된 숲이 말라죽는 문제가 발생하고 있다. 예를 들어, 조림지에 공급하는 물로 지하수를 사용할 경우, 차가운 물의 온도를 적정 수준으로 높여주어야 하는데 이를 위해서는 많은 비용이 소모된다. 하지만 초창기 조림사업이 끝나고 나면 이것이 지속적으로 지원되지 않아서 결국 차가운 물 때문에 나무가 고사한다는 것이다.

이 때문에 제대로 된 조림사업을 위해서는 장기적이고 지속적인 재정적 기술적 지원이 필요하다는 비판이 제기된다.

## 제 2 절 현재 한국의 몽골 사막화 방지 대책

### 2.1 정부

몽골 정부는 1996년 UN 사막화 방지 협약에 가입하여 사막화 현황을 조사하고 국가적 사막화 방지노력을 시작하였다. 몽골 자연환경부(Ministry of Nature and Environment)에서는 사막화 방지 위원회(Committee to Combat Desertification)를 구성하고 사막화 방지를 위해 다음과 같은 목표를 설정하고 있다.

먼저 천연자원과 수자원에 대한 적절한 관리 및 복구가 이뤄지도록 국가정책과 법률문화를 개발하는 것이다. 이밖에 가뭄과 사막화에 관한 생물 및 사회·경제적 정보체계 구축, 사막화 방지에 대한 대중 인식 및 참여 증가, 사막화 방지를 위한 실질적인 접근방법 제시 등이 있으며, 가장 중요하게 여기는 사항으로 국가 사막화 방지 역량강화를 위한 개인 및 조직 체계 구축이 제시되고 있다(Tamir, 2002).

우리나라에서는 2000년도에 들어오면서 황사의 지속일수와 발생회수가 증가하면서 황사에 대한 대응 방안으로 황사의 발생지역인 몽골과 중국에 대한 정부 차원의 조림사업이 실행되었다(그림 47).

2001년부터 2009년까지 진행된 사막화 방지 조림사업은 총 10,548백만원의 예산이 투입하여, 11,230ha의 지역에 조림사업이 진행되었다. 몽골은 3,249백만원의 예산이 투입되었으며, 1,063ha의 지역에 조림사업이 진행되었다.

산림청은 2007년부터 10년간 3000ha 지역에 조림사업을 실행하는 몽골 그린벨트 조림사업을 진행하였으며 2009년까지 2,703백만원의 예산을 투입하여 423ha의 지역에 조림사업을 진행하였다. 나아가 몽골 자연환경관광부와 함께 한-몽 그린벨트사업단을 공동 설립하여 남고비 달란자드가드, 톱아이막 룬숨 등지에서 양묘장을 조성하였으며, 산림전문가를 파견하여 산림기술교육, 방풍림 조성 등의 산림기술을 직접 전수하는데 앞장서고 있다(그림 47).

경기도 안산시는 지난 2011년 몽골 투브 아이막의 대표 도시인 준모드시와 사막화 방지사업 협력 MOUT를 체결하였고, 이 지역에 ‘안산의 숲’을 조성하고 있다(한국일보, 2011).



그림 47. 몽골 그린벨트 조성계획도(김중관, 2009).

## 2.2 기업

대한항공은 지난 2004년부터 사회공헌 활동 ‘Global Planting Project’의 일환으로 몽골 사막화 지역에 ‘대한항공 숲’ 조성 사업을 실시하고 있다. 올해까지 약 9년간 32만m<sup>2</sup>에 6만여 그루의 수목을 식재하였으며, 최근에는 지난 봄 대한항공 신입직원과 대학생 등 335명이 사막지역에서 생존율이 높은 포플러, 버드나무, 비솔나무 등 1만그루의 수목을 식재하였다. 이와 같은 활동을 통해 지난 2009년에는 몽골 자연환경관광부로부터 ‘자연환경 최우수 훈장’을 수상하였으며, 2010년에는 바가노르 구청장으로부터 감사패를 수여 받았다(이규복, 2012).

유한킴벌리는 1999년부터 동북아산림포럼 등의 민간단체들과 함께 동북아시아 사막화 지역에 산림생태계의 황폐화와 사막화를 막고, 숲을 복원하기 위한 다양한 현지 조사 및 연구 활동에 대한 지원을 실시하고 있다. 2003년 5월에 토진나르스의 100ha 규모 땅에 유럽 적송 30만그루를 식재하였으며, 2012년까지 10년간 808만2000그루의 소나무를 식재하였다. 총 면적은 서울 여의도에 9배에 가까운 약 2610ha에 이르고 있으며, 매년 몽골지역 나무 심기 사업을 위해 1억원 이상의 지원을 하고 있다. 2009년부터는 알탄불락 지역에 5년간 총 2,000ha의 숲을 조성하는 계획을 수립하여 진행 중에 있다(홍중성, 2012).

대성 그룹은 2007년부터 지식경제부와 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 27억 원의 연구개발비를 투입해 ‘그린 에코 에너지 파크’(GEPP) 프로젝

트를 시작하였다. 이 프로젝트의 목표는 태양광과 풍력을 활용한 신재생에너지로 몽골의 사막화를 막는데 있다. 몽골 정부로부터 60년간 무상 임차한 330만<sup>2</sup> 부지에 태양광과 풍력을 이용할 수 있는 발전시설을 건설하여 전력을 생산하고, 이를 바탕으로 지하 100m 이상 깊이에서 지하수를 끌어올려 녹지를 조성하고 사막화에 대응하는 사업이다. 2009년부터 본격적으로 사업이 실행되어 몽골 랠아이히 지역에 저수 및 관개시설을 설치하고, 지하에서 공급된 물을 바탕으로 숲과 경작지를 조성하고 있다. 또한 울란바타르에서 동남쪽으로 500km 정도 떨어진 만다흐 마을에도 42억원을 투입하여 태양광 및 풍력 발전시설을 건설사업 진행하고 있다(정천기 외, 2009).

### 2.3 민간단체

푸른아시아, 로타리클럽, 동북아산림포럼을 중심으로 많은 수의 민간단체들이 조림사업 위주의 몽골 사막화 방지 활동에 동참하고 있다. 세부 성과를 살펴보면 푸른아시아는 지난 2000년부터 2009년까지 약 109ha에 대해 조림을 실시하였으며, 한국로타리클럽은 2005년부터 2009년까지 약 237ha를 조림하였다. 동북아산림포럼은 셀렝게아이막, 토진나르스 등지에서 2003년부터 2009년까지 1,776ha에 이르는 지역에 조림 사업을 완료하였다(김종관, 2009).

한국희망재단은 몽골에 방풍림을 조성하여 사막화와 더불어 황사로 인한 피해를 방지하는 조림사업을 원하고 있다. 지난 2007년 몽골 바양노르 군에 2,000그루의 ‘아시아 희망의숲’을 조성하였으며, 양묘 조림장 운영을 위한 지원을 계속하고 있다.

그린코리아포럼, 서울홍사단, 푸른아시아, 한국교원단체총연합회, 한국시민단체네트워크, 코리아몽골포럼 등의 민간단체는 지난 2009년 ‘몽골 바양노르 숲 호수살리기 시민연대’를 창립하여 기후변화와 사막화로 인해 빠르게 훼손되고 있는 몽골 바양노르지역의 호수와 수자원 보존을 위한 민간협력 활동을 추진하고 있다(뉴시스, 2009).

### 제 3 절 몽골 사막화 지역 조림

#### 3.1 조림 방법에 따른 활착률

조림 이후 심은 나무가 정상적으로 정착을 하는 정도를 알려주는 지표로 활착률이 주로 사용되는데 몽골 조림사업에서의 자세한 활착률이 공개되는 경우는 드물다. 울지자르갈 (2011) 은 울란바타르에서 서쪽으로 약 140km 떨어진 지역에서의 간략한 조림지의 활착률 수치를 밝히고 있다(그림 48, 49). 이 연구에서는 식재를 저식조림방법과 일반조림방법으로 구분하였다. 저식조림방법은 폭 100cm, 깊이 60cm의 고랑을 파고 다시 그 안에 폭 40cm, 깊이 40cm 크기의 식재 구덩이를 파낸 다음 식재한다(그림 50, 51).



그림 48. 울지자르갈 연구지역 위치 (울지자르갈, 2011).

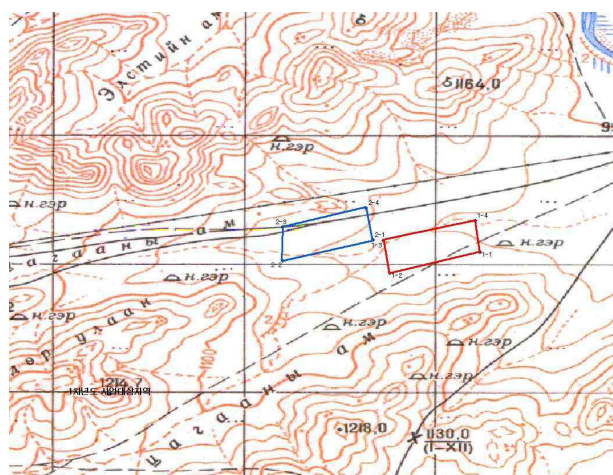


그림 49. 울지자르갈 연구지역 상세도 (울지자르갈, 2011).



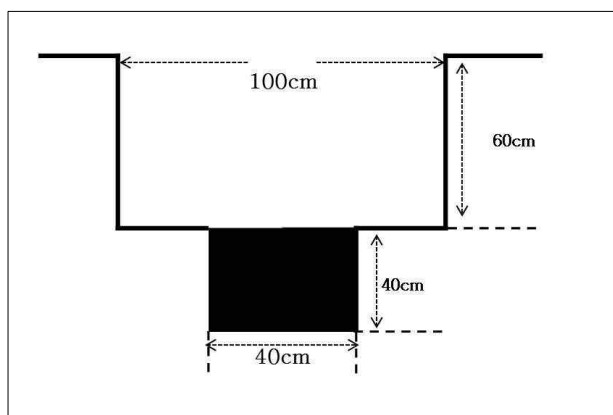


그림 50. 저식조림방법 단면 모식도 (울지자르갈, 2011).



그림 51. 저식조림방법의 (좌)식재 과정, (우)식재된 지역 (울지자르갈, 2011).

일반조림방법은 보통 관행적으로 조림하는 방법으로 지표면에 폭 40cm, 깊이 40cm 크기의 식재구덩이를 파낸 다음 식재한다(그림 52, 53).

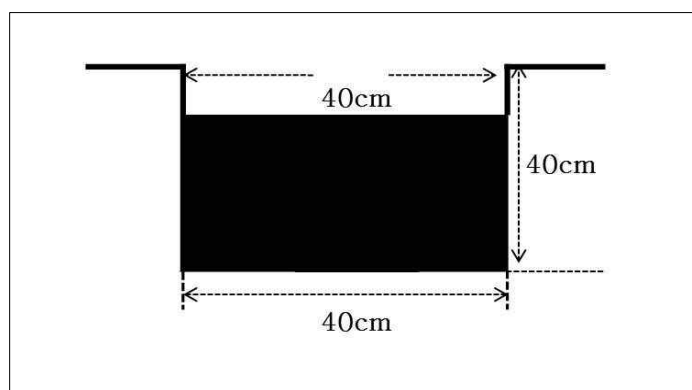


그림 52. 일반조림방법 단면모식도 (울지자르갈,2011).



그림 53. 일반조림방법의 (좌)식재 과정, (우)식재된 지역 (울지자르갈, 2011).

표 10은 조림 방법에 따른 나무의 활착률을 나타낸 것으로 식생의 종류에 따라 다양한 활착률을 보이는 것을 확인할 수 있으며, 전체 조사지에서의 저식조림방법의 활착률은 76.8%, 일반조림방법은 64%로 나타나 저식조림방법의 활착률이 더 높게 나타나는 것을 알 수 있다.

표 10. 조림방법에 따른 수종별 활착률 (울지자르갈, 2011).

학명	저식 조림			일반 조림		
	조림수	성장수	활착률 (%)	조림수	성장수	활착률 (%)
<i>Populus sibirica</i>	7,526	6,055	80.4	10,270	5,614	54.6
<i>Ulmus pumila</i>	8,270	6,675	80.7	8,117	7,048	86.8
<i>Caragana microphylla</i>	1,504	1,278	85.0	1,875	1,535	81.8
<i>Caragana arborescens</i>	9,869	4,805	70.0	121	96	79.3
<i>Hippophae rhamnoides</i>	1,163	749	64.4	161	97	60.2
<i>Salix spp.</i>	567	398	70.2			
<i>Populus tremula</i>	145	56	38.6			
<i>Armeniaca sibirica</i>				3,288	1,290	36.6
<i>Elaeagnus moorcroftii</i>				1,774	703	39.6
<i>Tamarix ramosissima</i>	89	57	64.0			
합계	26,133	20,073	76.8	25,606	16,383	64.0



### 3.2 몽골 조림 성과 분석

2010년 동국대학교 황사·사막화방지연구소에서 발표한 보고서에서는 룬숨과 투진나르지역에서의 연구결과를 나타내고 있다(강호덕 외, 2010). 룬숨은 토브주의 27개 군의 하나로 초원지대에 해당하며 연평균강수량은 250mm, 평균기온은  $-1^{\circ}\text{C} \sim 2.5^{\circ}\text{C}$ , 연간 15m/sec 이상의 강풍이 10회 이상 발생하는 극한 지역에 속한다. 주요 산업이 목축업으로 사막화의 위험이 큰 지역에 속한다. 현지 식생은 졸골담초와 좁은잎골담초가 주를 이룬다. 투진나르는 몽골 셀렝게주에 위치하고 있다. 투진나르는 소나무가 끝이 없다는 뜻을 지닌 곳으로 구주적송 천엽림이 넓게 분포하고 있는 지역이다.

보고서에 따르면 룬숨지역의 포플러는 조림지에서 90%의 생존율을 보여 생존율이 매우 높은 것으로 측정되었지만, 2008년 조림지에서 30% 정도의 보식을 시행하였기 때문에 정확한 생존율과 활착률을 측정할 수 없다.

투진나르 지역의 2003년 조림지에서는 80%, 2005년 조림지에서는 75%~80%의 생존율을 보였지만, 2008년 조림지의 경우 건조 피해를 입어 활착률이 0%에 가까웠다.

일본 시민단체인 GNC는 1998년부터 매년 여름에 몽골의 동부 초이발산 지역에 조림을 실시하였다. 1999년 버드나무 300본, 오리야스 300본을 식재하였으나 버드나무 60본 정도만 활착하고 오리야스는 거의 전멸할 정도로 성과가 좋지 않았다. 2000년부터는 울란바타르에서 남동부 30km 떨어진 곳에 있는 약 5ha의 농경지 주변에 3km에 걸쳐 방풍림으로 포플러와 아카시나무를 각 100본씩 식재하였다. 활착률은 평균 60%정도이고 고비사막 등 조건이 나쁜 곳은 이보다 떨어지며, 방풍림의 활착률은 50%정도 되는 것으로 알려져 있다(김세빈 외, 2006).

현재 몽골에서 이루어지고 있는 조림은 크게 황폐화된 산림을 복원하는 재식림과 숲이 없던 스텝 및 사막 기후 지역에 나무를 심는 조림으로 나뉠 수 있다.

사막과 스텝지역의 조림은 단순히 몇 년간의 활착률이나 성장률만을 가지고 평가할 수 없다. 자연적인 상태에서 숲이 조성되는 것이 불가능한 지역에 대한 조림은 결국은 교란에 대한 내성이 중요하기 때문이다. 즉 일정 수준의 교란에 대해서는 자연적인 회복이 가능해야 하며, 극단 기상현상이나 대규모 산불과 같은 치명적인 교란이 발생한 경우라도 인간의 도움을 통해 복원의 실마리를 찾을 수 있는 수준의 숲이 조성되어야 지속적으로 숲을 가꾸어나갈 수 있을 것이다.

## 제 4 절 선행연구

### 4.1 기상조절기술

현재 미국, 중국, 러시아, 일본 등 37개국에서 150여개 기상조절프로젝트가 수행 중이다.

미국은 매년 40개 이상의 인공강우 업무를 수행하고 있다. 캘리포니아, 네바다주 등에서는 겨울철 인공증설을 통해 수자원을 확보하고 있으며, 특히 텍사스 주에서는 수자원 확보를 위해 인공강우 실험을 하고 있는데 연평균 약 20%의 증수 효과를 봤다고 한다. 인공강우를 전문적으로 수행하는 용역회사도 다수 설립되어 있는데 이 용역회사들은 인공강우 실험에 필요한 장비들을 구비하고 있어서 미국 뿐 아니라 다른 나라에서도 용역을 맡아 인공강우 실험을 수행하고 있다(과학기술부, 2002).

호주의 경우 국토의 대부분이 강수 부족인 국가이기 때문에 오랜 인공강우 역사를 가지고 있다. 1955년부터 본격적인 인공강우 실험이 시작되었는데 첫째 해에는 30%의 증가를 보였으나 시간이 지날수록 강수 증가율이 감소하는 경향을 보여 실험 다섯 번째 해에는 증가율이 3%에 그쳤다고 한다. 따라서 인공강우 실험이 성공적이라고 보기는 어렵다. 호주에서는 인공강우 실험으로 확보한 수자원을 식수뿐만 아니라 수력발전에도 이용하고 있다고 한다.

중국은 길림성 등 각 성에 하나 이상의 인공강우센터를 운영하며 실험을 수행 중이고, 스스로 전국적으로 22% 강수증가 효과를 봤다고 주장한다. 그러나 이것이 곧바로 중국의 가용수가 22% 증대했다는 것은 아니다. 실험 수행의 결과로 국지적인 강수량이 늘었다고 하더라도 그것이 전체 면적/강수량에서 차지하는 비율, 지하수로 침투하지 못하고 증발하는 비율 등에 의해 확연히 줄어든다.

러시아에서도 항공기와 로켓을 사용해 가뭄 방지, 수자원 확보 및 강설 억제 등에 활용하고, 공군비행기를 이용하여 30년 동안 해마다 2차대전 전승기념일 행사장에 인위적으로 청천상태를 만든다고 하지만 국제적으로 실험결과를 보고한 사례는 거의 없다. 이하의 절에서 다루겠지만, 몽골도 자체적으로 많은 인공강우 실험을 하지만 연구자들 사이에서 그 효과에 대한 견해가 분분하다.

일본의 경우 2007년 1월부터 5개년 실험계획을 수립하여 통계적으로 유의미한 크기의 표본 데이터 확보에 주력하고 있다.

이처럼 기상조절기술은 실험 횟수에 비해서 과학 연구가 뒷받침되는 사례는 일부분이다. 따라서 본 연구에서는 신뢰할만한 연구문헌을 위주로 선행연구를 조사하였다.

1947년부터 1994년까지 오스트레일리아에서 수행된 기상조절실험을 분석한 Ryan and King (1997)에 따르면, 내륙 지역보다 해안 지역에서 그리고  $-10^{\circ}\text{C}$ 와  $-12^{\circ}\text{C}$  사이의 구름에서 통계적으로 유의미한 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 여름철에는 강수의 자연변동 때문에 실험결과를 통계적으로 분석하기가 어려웠다.

미국의 Breed (2012)는 구름씨 살포가 자연적 강수량을 초과하는 실질적인 강수 증가로 이어지는지 검증하기 위해 기상학 조건이 유사한 두 지점을 선정해서 한 지점에서 구름씨를 살포한 후 그 결과를 살펴보는 형태의 실험을 수차례 진행하여 통계적 유의미성을 얻었다.

따라서 기상조절실험의 효과를 검증하기 위해서는 구름 미세물리구조에 대한 정보, 실험을 통계적으로 검증할만한 조건(강수량 자연변동이 적거나 자연강수량 차이가 거의 없는 두 지점 확보)을 충족해야 한다는 것을 알 수 있다.

국내의 경우, 김창기 등 (2005)이 지상에서 살포한 구름씨가 실제로 구름 내부로 유입될 가능성을 극대화하고, 그것이 실제 강수증가로 이어질 수 있는 기상조건을 찾아 목표살포를 제안하였다. 그러나 당시에는 아직 실험자료가 누적되지 않아 정량적인 검증은 어려웠다.

## 4.2 그 외

기상조절기술 이외의 지구공학 기술은 대부분 공간적으로는 전구(全球) 규모이므로 몽골이라는 상대적으로 협소한 지역에는 부합하지 않는다.

예를 들어 가장 많이 언급되는 지구공학 기술은 성층권에 황(sulfate) 입자를 주입해서 화학반응 결과 성층권의 산란효율을 높여 지표에 도달하는 태양복사수지를 인위적으로 낮추는 것이다. 그러나 성층권의 경우 북반구에서 주로 배출된 프레온 가스가 남극 상공에서 오존구멍을 만드는 사례가 보여주듯이, 성층권의 아주 빠른 기류 때문에 최초 살포된 지역에 머무르지 않고 성층권 전체로 확산된다.

또 다른 대표적인 지구공학 기술은 대양에서 다량의 선박을 이용해 구름씨를 살포하는 것이다. 이런 구름씨 살포의 결과 대양을 상시적으로 덮고 있는 해양층적운의 알베도를 인위적으로 증가할 수 있다는 것인데 구름의 알베도는 구름씨 이외에도 다양한 구름물리과정과 상승기류, 바람 시어와 같은 구름물리이외의 기상학적 요인도 많이 관여하므로 효과가 불투명하다. 무엇보다 이 기술은 목적이 강수를 억제하려는 데 있을 뿐만 아니라 몽골은 해안을 갖고 있지 않기 때문에 해당사항이 없다.

화력발전소에 탄소포집 및 저장기술(CCS)을 도입해 이산화탄소 배출을 줄이는 것도 지구공학기술이지만, 아직 현업 수준으로 기술이 발달하지 않았다. 또한 기후변화의 ‘관성’ 때문에 배출된 이산화탄소가 기후변화에 기여하기까지는 50년 정도의 시간이 소요되는 만큼 현재 진행 중인 몽골의 사막화에 몽골 화력발전소에서 배출되는 이산화탄소가 기여한 부분은 극히 작을 것으로 예상된다. 따라서 몽골 사막화를 막기 위해 몽골 화력발전소에 CCS를 도입하는 것 역시 부적절하다.

지구공학 기술을 이용하는 것 자체에 대한 비판도 있다. 2011년 이란 대통령 아흐마디네자드는 자국에서 진행 중인 가뭄을 서방의 지구공학 기술 탓으로 돌린 바 있다. 물론 아직 전지구적으로 지구공학기술이 도입된 것이 아니기 때문에 이는 단순한 외교적 수사일 가능성이 높다.

그러나 지구공학 기술이 낡을 우려와 의심은 지금도 몽골에서는 이미 현실적이었다. 몽골인들은 중국이 내몽골 지역에서 진행하는 인공증우 실험 때문에 자국으로 들어올 비가 중국에 내리는 것 아닐까라는 의구심이 많다고 현지에서 만난 목축 전문가가 전했다.

또한 몽골 내에서도 지역 정치인들이 서로 자기네 선거구에서 인공증우 실험 실시를 공약으로 내세우는 경우가 많다. 앞서 살펴봤듯이 실제 효과는 미미함에도 물이 부족하다는 유권자들의 심리를 이용하기 위해 낭설을 퍼뜨리는 것이다. 이 때문에 수자원 부족으로 가장 고통 받는 유목민들이 인공증우 실험에 우호적이지 않은 것은 역설이다.

## 제 5 절 기상조절기술 적용 검토

### 5.1 현지 조건

몽골에서 식생이 가장 풍부한 1982년과 2005년 사이 8월 상순의 식생변화를 비교한 그림 54를 보면, 몽골의 사막화 즉 식생감소는 몽골의 서쪽과 남쪽에서 주되게 진행되고 있다는 것을 알 수 있다. 8월은 몽골에서 식생이 가장 많은 시기이다. 푸른색으로 칠해진 영역이  $NDVI \leq 0.07$ 를 나타내는데, 그 면적이 21% 증가하였다(Natsagdorj, 2012).

이런 건조지역의 확장에는 강수량 감소뿐만 아니라 증발량 증가도 아주 중요한 요소로 작용했다. 1961-1990년과 비교했을 때 1991-2010년에는 강수량은 35mm 감소했고, 잠재적 증발량은 122 mm나 증가했다(Natsagdorj, 2012). 강수량 감소뿐만 아니라 잠재적 증발량이 증가했다는 것은 인공증우로 뿌려진 강수가 지면에 도달해서 지하수계로 이어질 확률이 낮아진다는 것을 의미한다. 이 때문에 현지에서 만난 수문 전문가 Dr. Davaa는 인공증

우 실험 성공 못지않고 내린 비를 가두고 수송하는 과정이 중요하다고 강조했다.

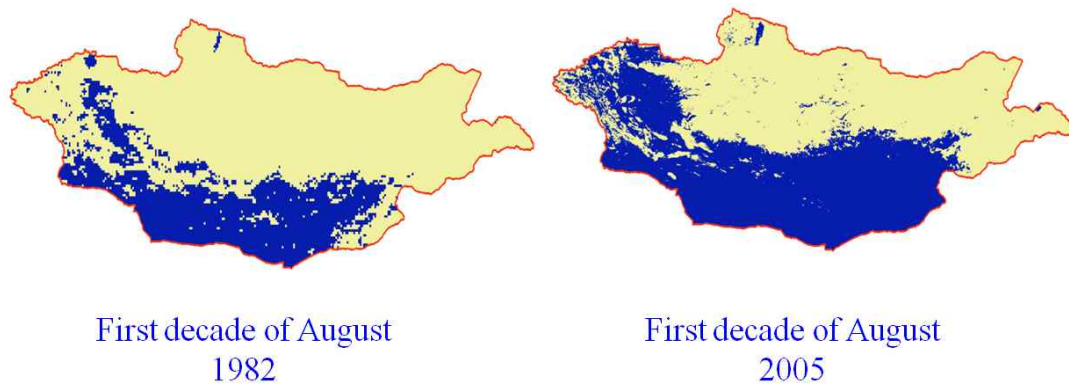


그림 54. 인공위성으로 측정한 NDVI 값 분포 (파란색이 0.07 이하, 노란색이 0.07 초과) (Natsagdorj, 2012).

한편, 현지답사 결과 황사발원지인 고비 사막은 여름철에 한시적으로 식생활동이 있었다(그림 55). 그러나 겨울을 지나면서 대부분의 식생이 말라 죽고 그 결과로 봄철 모래바람이 강해지면서 황사가 발원한다. 따라서 인공 증우로 황사를 방지하기 위해서는 식생이 유지될 수 있을만큼 물을 제공하는 것이 필요하다.



그림 55. 여름철(7월 22일) 고비사막 황사발원지 부근(44.57°N, 103.78°E)의 식생과 토양 사진.

## 5.2 기상관측 자료 분석

### 5.2.1 지상

몽골과 자료를 공유하는 한국 기상청으로부터 1995년부터 2011년까지 몽골 내 17곳의 기상 자료를 입수해서 분석하였다.

#### ①운량

월평균 운량을 지역별로 구해서 비교해본 결과, 전반적으로 고르게 여름에 구름이 많고 겨울에 구름이 적었다. 1996년부터 2011년까지 사이에는 뚜렷한 연변동이 나타나지는 않았다(그림 56). 한 가지 특이한 사항은 몽골과 러시아 서쪽 국경 사이인 울란곰(Ulaangom)의 경우 겨울철에 운량이 다른 지역보다 높다는 것이다. 그림 57에서도 울란곰은 상대적으로 주변 지역보다 운량이 많은 편에 속했다.

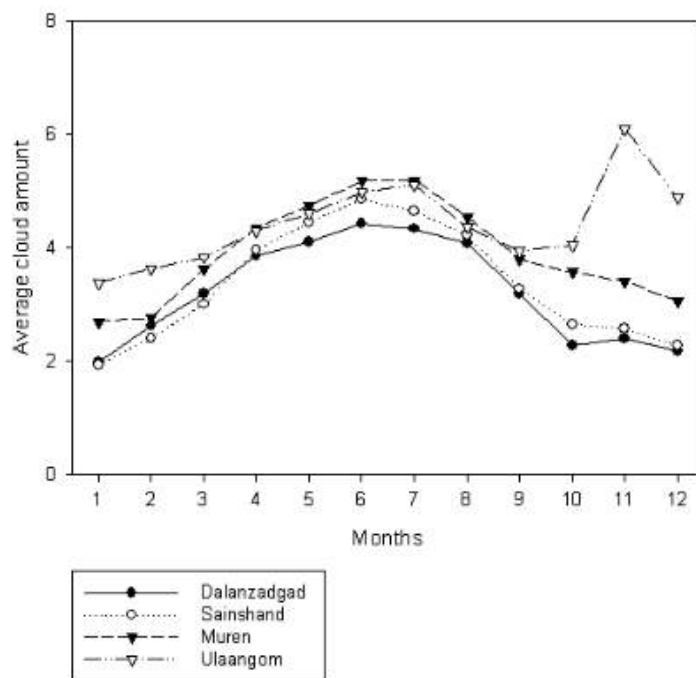


그림 56. 몽골 네 지역에서 관측한 운량 월변동.

#### ②습도

봄철의 낮은 습도는 지면의 토양이 바람에 의해 날려 모래폭풍이 생성되기에 유리한 조건을 만든다. 고비사막과 초지 모두 습도 40% 이하 조건에서 절반 이상의 모래폭풍이 발생하는 것으로 조사되었다(그림 58). 따라서 습도는 모래폭풍 생성에 중요한 조건으로 작용한다(Natsagdorj et al., 2003).

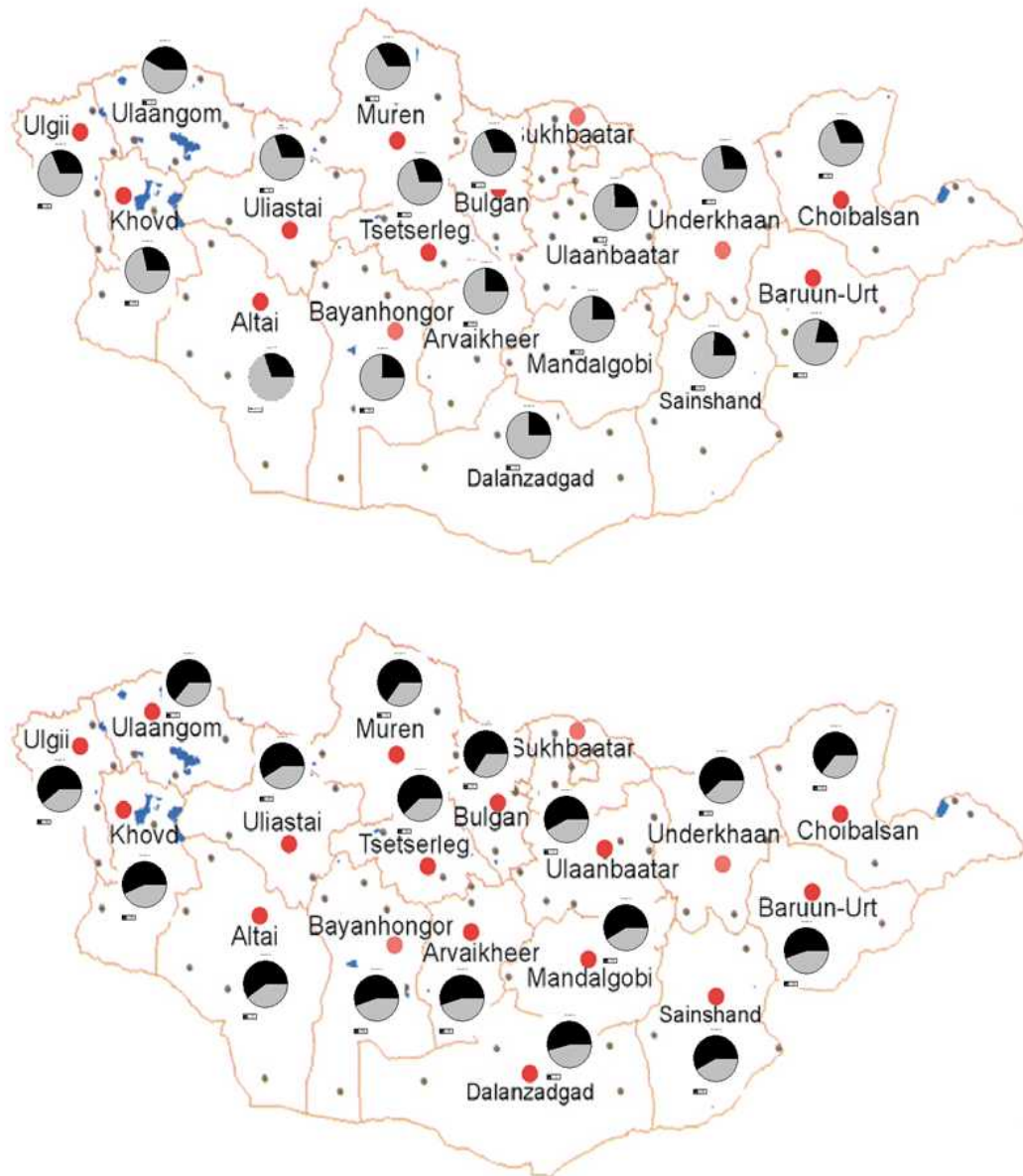


그림 57. 몽골의 (위)1월과 (아래)7월 운량 분포 (검은색이 많을수록 운량이 많음).

몽골의 다섯 지역의 습도를 나타낸 표 11에서도 이는 나타난다. 월평균 습도가 40% 이하인 경우를 강조했는데, 그 대부분이 고비 사막 근처인 달란자드가드에 3월과 10월 사이에 집중되어 있었다.

한편, 한국과 달리 몽골은 겨울철 습도가 일반적으로 여름철보다 높았다. 높은 습도는 비로 내린 강수가 증발하지 않고 지하수계에 침투할 확률을 높인다. 앞 절에서 운량이 많았던 울란곰의 경우는 겨울철 평균 습도가 70% 내외로 역시 비교한 대상들 중 가장 높은 편이었다. 한편 수도인 울란바타르



역시 겨울철 습도가 높았다.

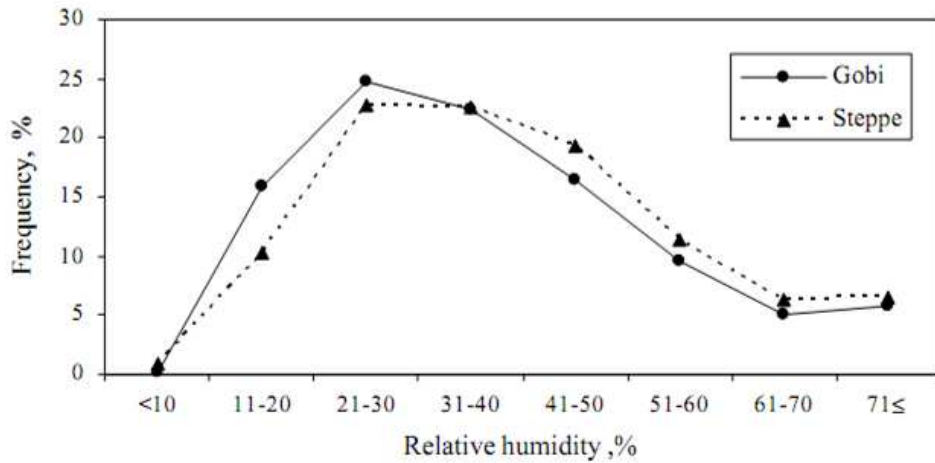


그림 58. 모래폭풍이 발생할 당시의 습도 분포.

표 11. 몽골 다섯 지역의 상대습도 월변동 (강조된 부분은 40% 이하인 경우).

	Ulaangom	Altai	Muren	Ulaanbaatar	Dalanzadgad
Jan.	68.4	50.7	65.2	75.5	60.4
Feb.	71.1	52.2	58.3	71.5	50.9
Mar.	75.5	54.0	47.6	58.2	<b>39.9</b>
Apr.	55.3	48.7	<b>39.2</b>	43.4	<b>31.3</b>
May	40.7	44.3	<b>39.5</b>	42.0	<b>31.9</b>
Jun.	44.9	48.7	47.8	47.5	<b>35.3</b>
Jul.	50.8	50.6	57.2	53.9	<b>38.7</b>
Aug.	54.3	46.7	57.7	56.4	<b>40.0</b>
Sep.	54.5	50.7	52.3	52.9	<b>38.7</b>
Oct.	64	53.2	44.7	56.1	<b>39.6</b>
Nov.	76.8	51.9	58.1	67.0	42.6
Dec.	74.4	54.5	63.5	75.0	58.7

그림 4를 보면 울란곰 역시 사막화가 진행 중이라는 것을 알 수 있는데, 울란곰의 이런 조건은 인공증우 실험을 하기에 유리한 조건을 제공한다.

그림 59는 여러 지역의 상대습도가 일정수치 이상을 기록할 때의 횟수를 나타낸 것이다. 무렌(Muren)과 달란자드가드에서는 상대습도가 높게 나타나는 경우가 적고 불간(Bulgan)과 알타이(Altai)에서는 상대습도가 높게 나타나는 경우가 빈번히 있는 것을 알 수 있다. 울란곰의 경우 상대습도가 80% 이상일 때가 약 600회 있었는데 울란곰이 인공증우 실험을 하기에 유리한

조건을 갖고 있음을 나타낸다.

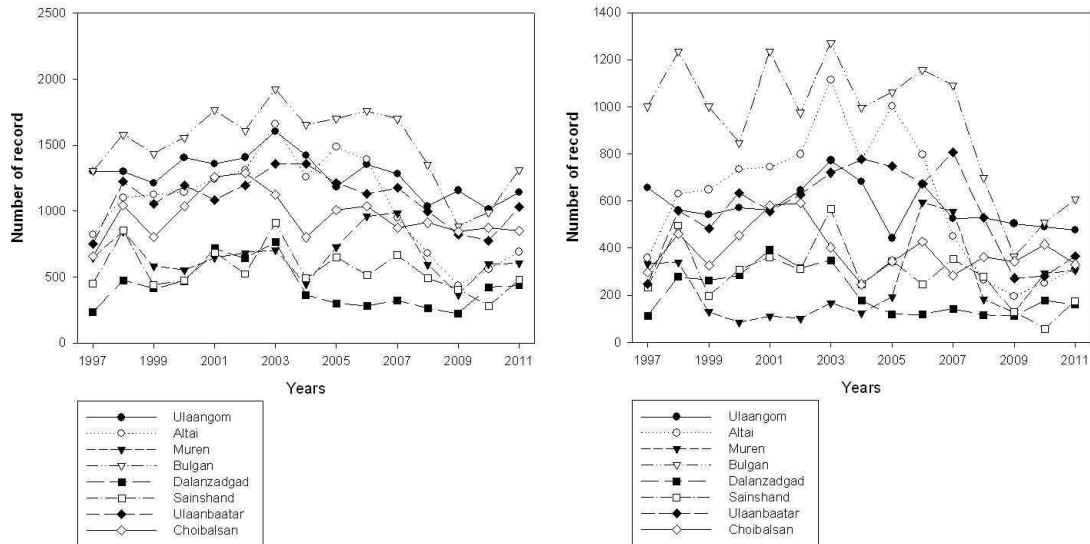


그림 59. 몽골 여러 지역의 상대습도 70%이상(좌), 80%이상(우) 기록 횟수(3시간 단위)의 연변동.

### ③강수기록

몽골의 강수량 자료는 앞서 언급했듯이 오타에 의한 불확실성이 매우 크다. 1996년부터 2011년까지 가장 값이 큰 300개의 3시간 강수자료를 나타낸 그림 60를 보면 200mm 이상의 자료가 50개나 되고, 가장 큰 것은 1000mm에 육박한다. 이는 명백히 오류이다.

비록 10만 개가 넘는 전체 자료 중에서 이들이 차지하는 비중은 작지만, 문제는 이런 오류가 보고자의 실수로부터 기인하기 때문에 무작위적이라는 것이다. 즉, 어느 것이 오류이고 어느 것이 오류가 아닌지를 사후적으로 판단하기가 매우 어렵다. 그림 61은 오류로 보이는 강수량 자료를 제거하고 연강수량을 나타낸 것이다. 지역별 연강수량의 특징을 나타내는 데에는 지장이 없지만 강수량 자료를 제거하는 기준이 주관적이었으므로 연강수량 값의 객관적인 정확도는 떨어질 것이다.

이 때문에 본 연구에서는 강수량이 아니라 강수가 관측된 횟수를 기준으로 자료를 분석하였다. 그림 62를 보면 강수횟수가 그림 61의 강수량과 시간적·공간적으로 유사한 특성을 나타낸다. 그리고 불간, 무렌, 울란바타르 지역의 강수가 자주 있다는 것을 알 수 있다. 이 지역들은 몽골의 주요 수계가 위치한 곳으로 사막화의 영향을 받지 않는 몇 안 되는 지역들이다.

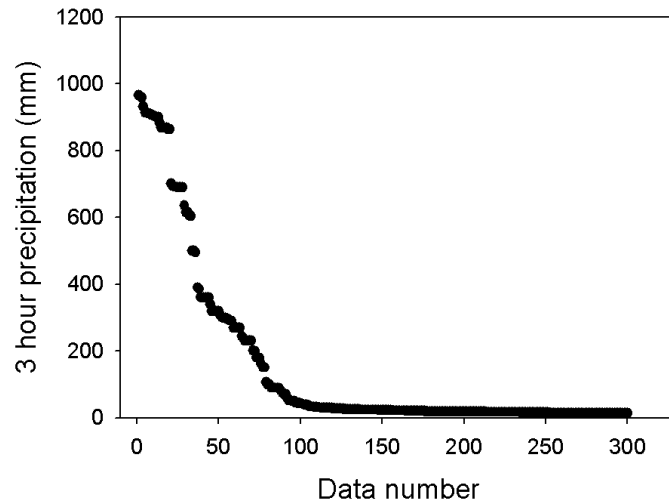


그림 60. 몽골 전체 지역 상위 300개 강수량 자료 분포.

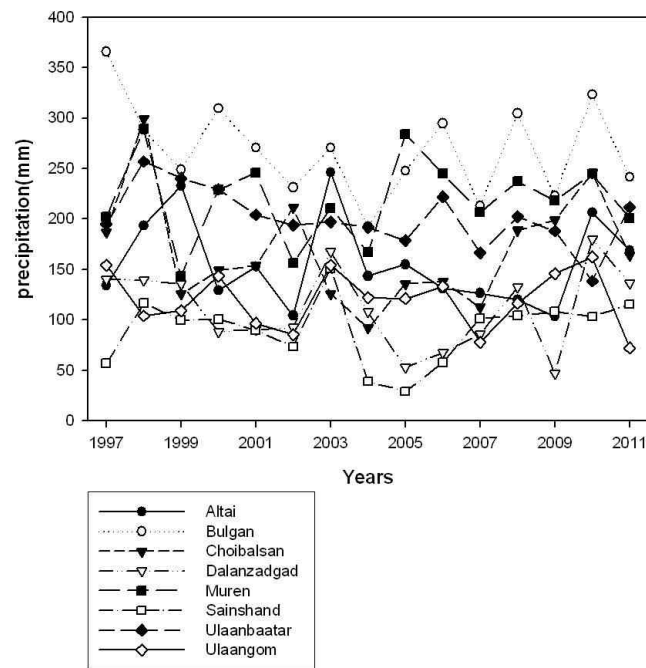


그림 61. 몽골 여러 지역의 연강수량 연변동.

그 다음으로 강수가 많은 곳은 최발산(Choibalsan)과 울란곰이다. 최발산은 몽골 동쪽 지역으로 상대적으로 아직까지는 사막화가 극심하지는 않은 곳이다. 강수 횟수가 많을수록 토양에 수분이 많아서 강수로 내린 빗물이 지하수 계에 침투할 확률이 높아진다. 한편 사인샨드(Sainshand)와 달란자드가드는 강수 횟수가 가장 적은 곳들이었다.

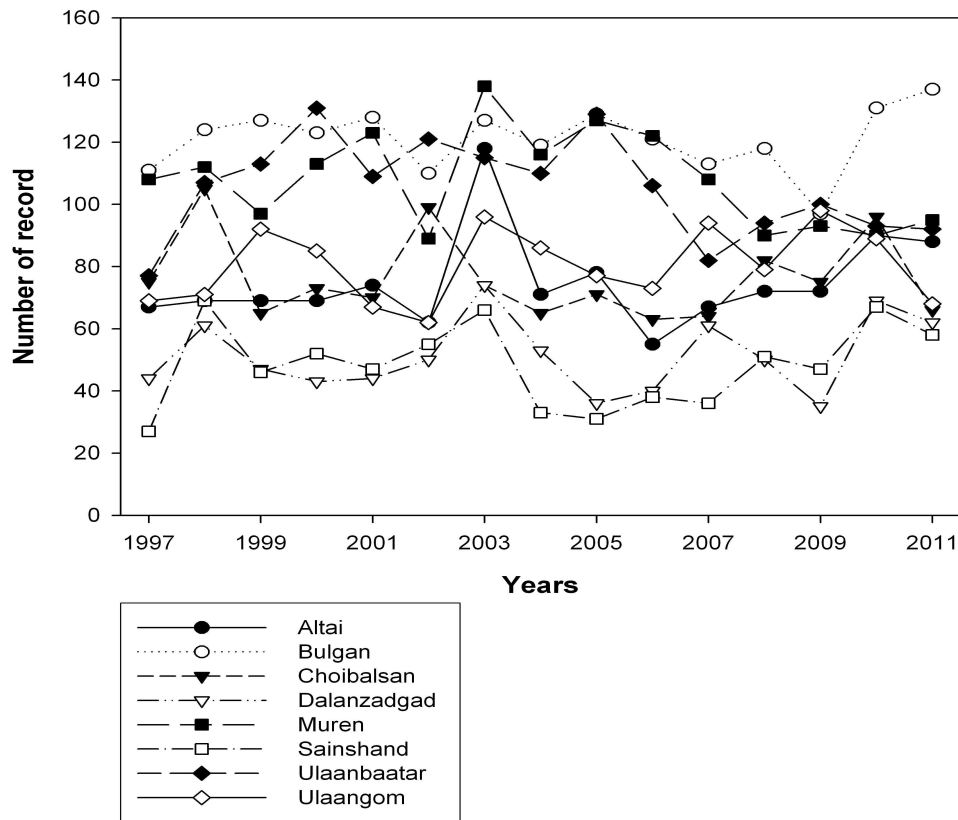


그림 62. 몽골 여러 지역의 강수 기록 횟수(3시간 단위) 연변동.

### 5.2.2 미세물리

1990년 6월 러시아 연구진이 대형 항공기를 이용해서 몽골에서 구름미세물리를 측정하였다. 이후 몽골에서는 항공기를 이용한 미세물리 관측은 이뤄지지 않았다. 몽골 방문을 통해 NAMEM으로부터 결과 보고서를 입수할 수 있었다.

인공증우 실험이 인위적으로 빙정핵을 살포함으로써 빙정 입자의 수농도를 증대시켜 강수과정을 촉진시키는 만큼 자연적으로 존재하는 빙정 입자의 수농도를 파악하는 것은 매우 중요하다. 1990년 당시 관측 결과 잘 발달한 적운과 난층운의 경우 빙정 입자 수농도가 약  $500\text{--}1000\text{ m}^{-3}$  사이라는 것을 알 수 있었다(그림 63). 온도의 경우 구름 종류에 따라 구분했는데,  $-5^{\circ}\text{C}$ 에서  $-25^{\circ}\text{C}$  사이의 값을 갖는 것으로 나타났다.

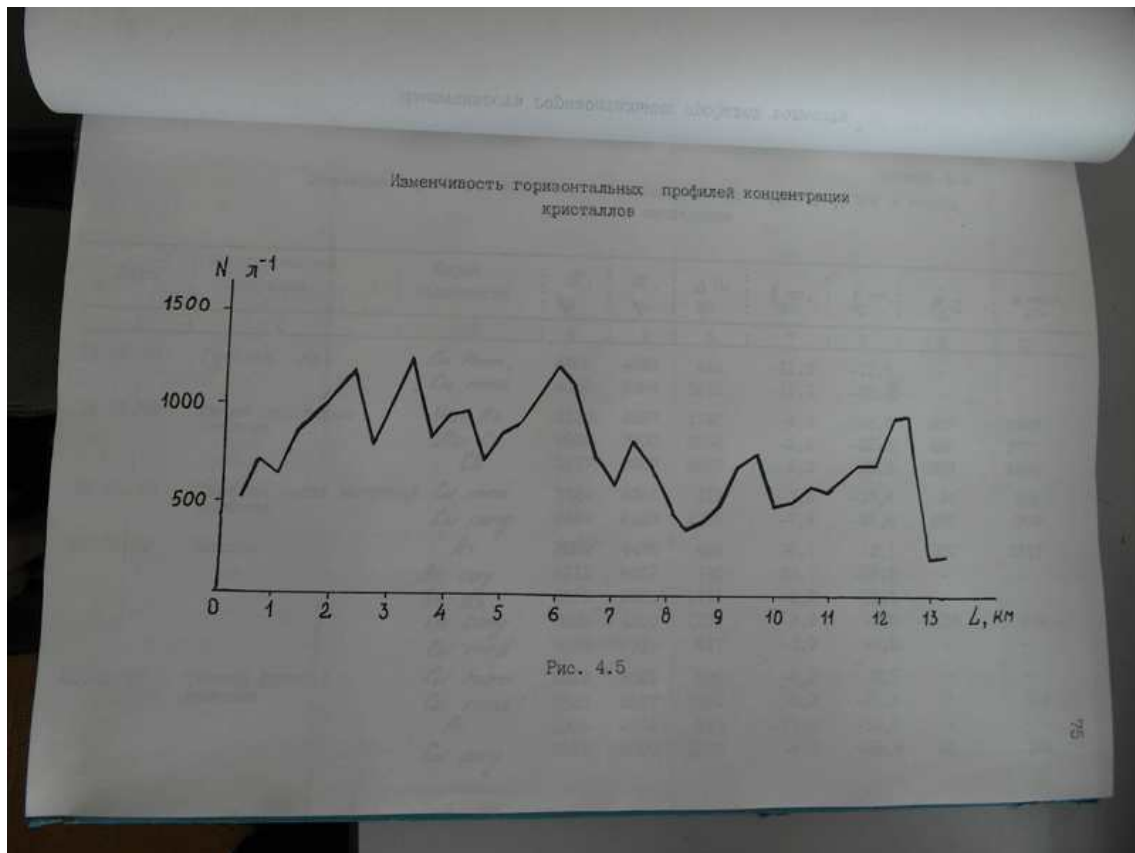


그림 63. 1990년 6월 러시아 과학자들이 몽골 상공에서 관측한 구름 내 빙정 입자 수농도의 수평 변동 (세로축 단위는  $\text{m}^{-3}$ ).

### 5.2.3 고층

고층 기상 자료가 제공하는 연직 온도와 습도 자료를 통해 해당 지역에서 구름이 발달할 가능성을 가늠해볼 수 있다. 다만 몽골에서 표준 고도에 대해서만 자료를 저장하고 있어서 더 자세한 라디오존데 자료를 구할 수가 없었다.

그림 64에서 강수가 상대적으로 풍부한 물란(Mulan)과 사막화가 진행 중인 울란바타르와 달란가드자드의 2012년 1월 평균 연직분포를 비교해봤다. 물란에서는 지면과 650mb까지 노점과 기온 사이의 표준편차가 서로 겹치는 것을 볼 수 있다. 이는 조건에 따라서는 노점선과 기온선이 만나서 구름이 생성될 수 있음을 뜻한다.

울란바타르에서는 노점선과 기온선 사이의 간격이 조금 더 넓어지지만 어느 정도 일치할 가능성이 있음을 알 수 있다. 그러나 달란가드자드에서는 지상을 벗어나면 곧바로 노점선과 기온선 사이의 평균값 차이가 표준편차 이상으로 벗어난다는 것을 알 수 있다. 이는 달란가드자드의 강수량이 가장 적다는 사실과도 일치한다.

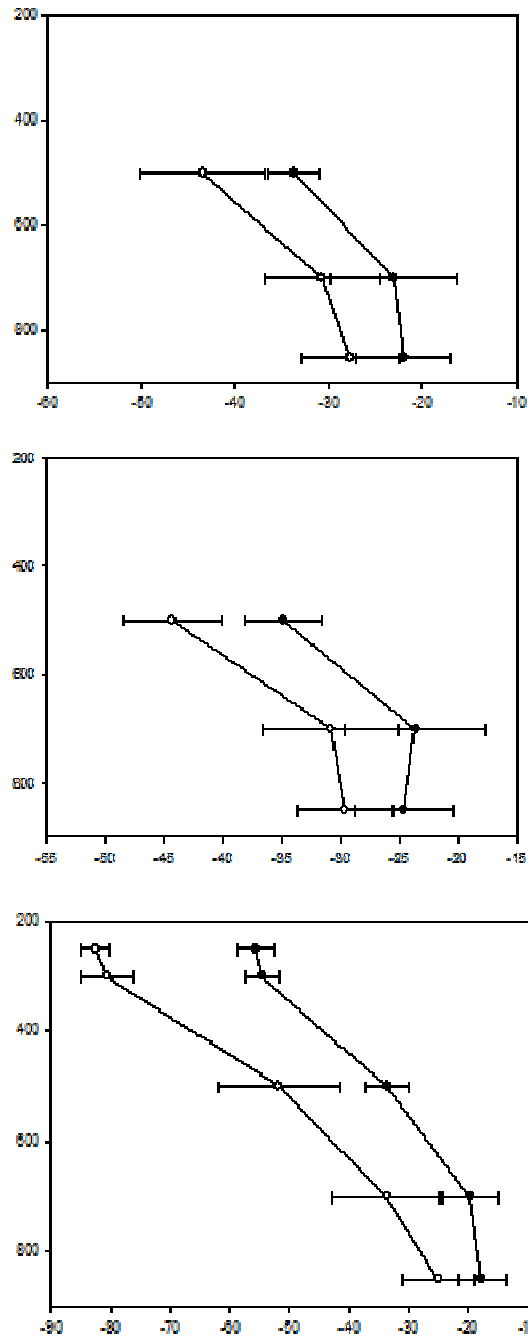


그림 64. 2012년 1월 평균 노점(흰색 원)과 기온(검은색 원)의 평균 연직 분포. (위)물란, (가운데)울란바타르, (아래)달란자드가드. (가로축은 섭씨 온도, 세로축은 기압(mb), 에러바는 표준편차)

인공증우 실험은 기본적으로 구름생성을 요구하므로 기온선과 노점선이 만나지 않는 달란자드가드 지역에서는 광범위한 지역에서 실험이 성공할 가능성이 매우 낮다는 것을 보여준다.

그림 65은 2012년 6월 여름철에 측정한 연직 노점과 기온 분포를 나타낸



것이다. 여름철에는 달랑가드자드뿐만 아니라 올란바타르 역시 기온선과 노점선 사이 간격이 표준편차 이상으로 떨어진다. 이는 여름이 겨울보다 더 건조하다는 앞 절의 내용과도 들어맞는다.

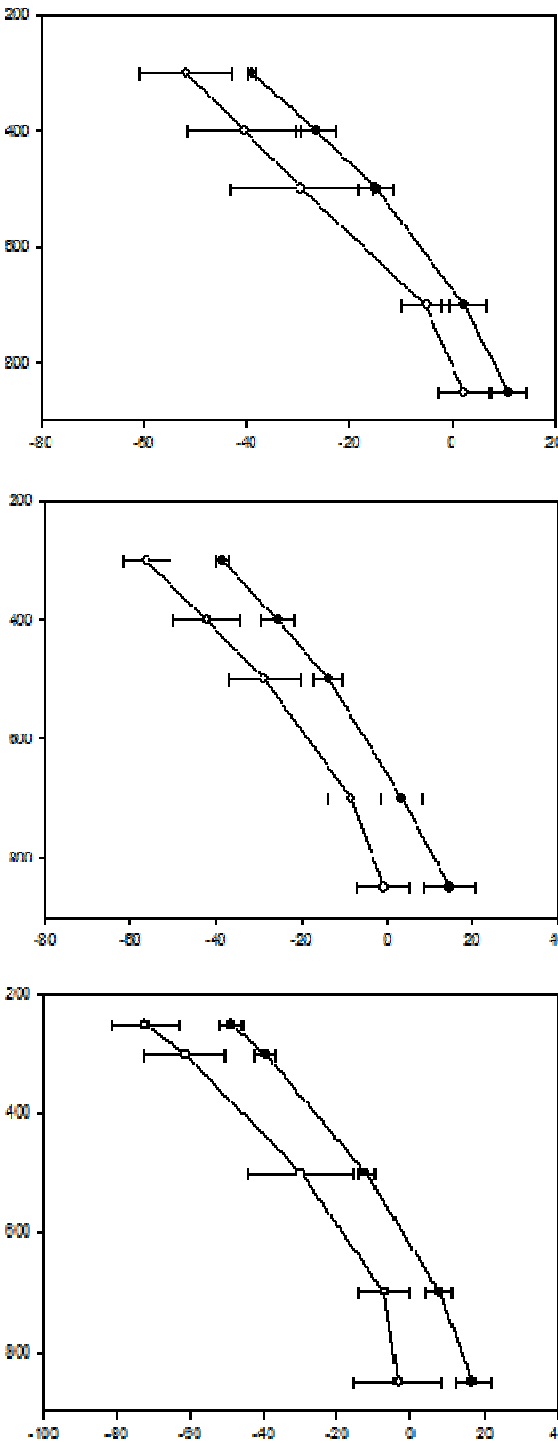


그림 65. 2012년 6월, 나머지는 그림 64와 동일.

### 5.3 위성자료 분석

몽골지역의 구름 특성을 분석 하기위해 The International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP)에서 배포한 Cloud Coverage (ISCCP\_D2) 자료를 사용하였다. ISCCP에서는 극궤도 위성 (NOAA)과 정지궤도 위성 (GMS, GOES, METEOSAT)의 가시광과 적외센서를 복합적으로 사용하여 구름 자료를 생산하고 있다. 본 과제에서는 1994년 1월부터 2008년 6월까지의 월평균자료( $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$  해상도)를 사용하였다.

식생분포와 가강수량의 시공간적 변화를 알아보기 위하여 Aqua위성에 탑재된 MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) 센서의 식생지수 (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index)와 가강수량 (TPW, Total Precipitable Water) 자료를 사용하였다. MODIS는 NASA의 Aqua, Terra 위성에 탑재된 센서로, Terra의 MODIS자료는 2004년 노후 되어 2007년까지 수정하였으나 그 이후의 자료는 정확도가 떨어지며, Aqua MODIS자료는 2009년까지 calibration(보정작업)을 하였기 때문에 2009년 이후 자료의 정확도가 떨어진다. 따라서 본 과제에서는 calibration된 최근 자료인 Aqua MODIS의 2002년 7월부터 2009년 12월까지의 월평균자료( $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  해상도)를 사용하였다.

#### 5.3.1 구름자료 분석

몽골 내 기상대가 분포해 있는 무렌(Muren), 울란바타르, 알타이, 달란자드가드 지역의 1994.01부터 2008.06까지의 월 평균 cloud coverage 시계열 자료를 그림 66에 제시하였다. 그림을 보면 몽골의 중앙에서 북동쪽에 위치하고 있는 울란바타르 지역이 60.7%로 14.5년 동안 cloud coverage가 가장 큰 것으로 알 수 있고, 달란자드가드 지역에서는 51.1%으로 가장 낮다. 무렌, 울란바타르, 알타이, 달란자드가드 지역에서의 cloud coverage의 최대값은 82%, 83.5%, 77%, 76%이며, 최소값은 각각 15.5%, 32%, 27%, 23%이다.

몽골 전체 지역을 대상으로 전 기간에 대해 각 격자 평균을 구해 공간에 대한 Cloud coverage 공간 분포를 조사하였다. 그림 67(a)는 전 기간에 대한 평균값이며, (b)는 봄(3,4,5월), (c)는 여름(6,7,8월), (d)는 가을(9,10,11월), (e)는 겨울(12,1,2월)을 나타낸다. 계절별로는 여름이 가장 Cloud coverage의 값이 큰 것을 알 수 있으며 겨울이 가장 작은 값을 갖는다. 공간적인 분포를 보면 북쪽의 중앙지역이 가장 큰 Cloud coverage 값을 가지고 있으며, 전체적으로 보면 북동쪽이 남서쪽보다 Cloud coverage값이 크다는 것을 알 수 있다.

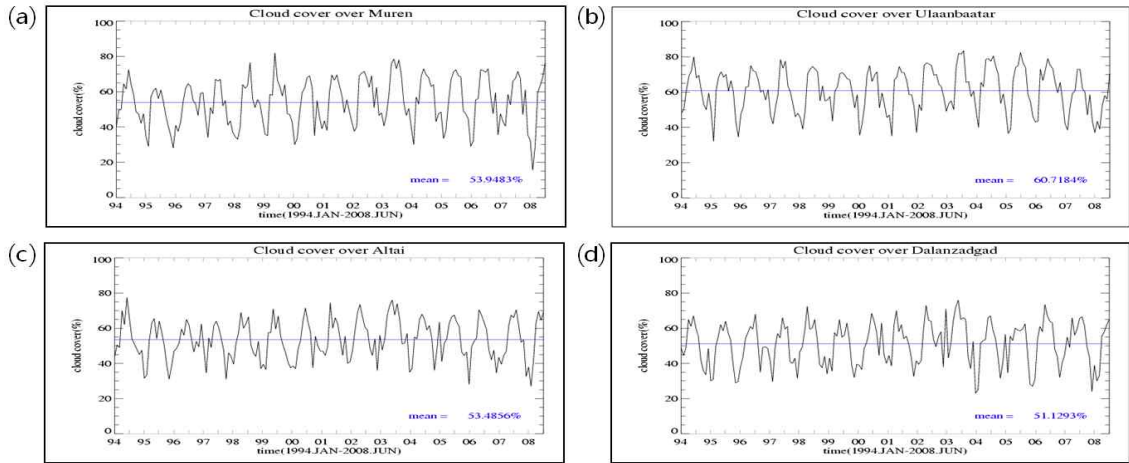


그림 66. 몽골 지역별, (a) Muren, (b) Ulaanbaatar, (c) Altai, (d) Dalanzadgad 월평균 cloud coverage의 시간에 따른 변화량 (시계열).

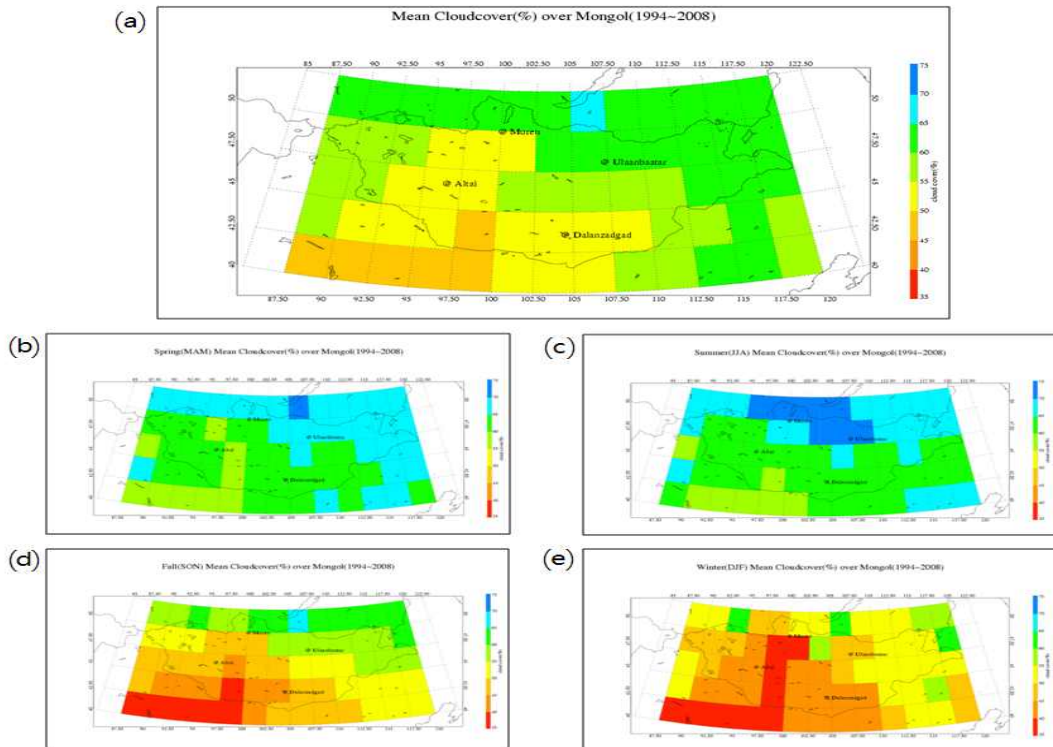


그림 67. Cloud coverage의 공간 분포. (a)는 전 기간에 대한 Cloud coverage의 평균값. (b)는 봄(3,4,5월), (c)는 여름(6,7,8월), (d)는 가을(9,10,11월), (e)는 겨울(12,1,2월).

### 5.3.2 식생지수 분석

식생지수 (NDVI)는 근적외 및 가시 위성영상을 이용하여 식생의 활성화를 나타내는 지수이며, 현재 식생분석을 위해 가장 보편적으로 사용되고 있다.

-1.0에서 +1.0까지의 범위를 가지며 음수 값은 물, 황무지, 얼음, 눈 혹은 구름과 같이 식생이 존재하지 않는 지역을 나타낸다. 반면 양수 값은 증가할수록 녹색 식물의 증가를 의미하므로 0에서 1값만을 이용하였다.

그림 68은 2002년 7월부터 2009년 12월까지의 몽골 4지점의 월 평균 NDVI 시계열 자료이다. 그림을 보면 무렌 지역이 0.27로 가장 크고 달란자드가드 지역이 0.096으로 가장 작음을 볼 수 있다. 무렌, 울란바타르, 알타이, 달란자드가드 지역의 NDVI 최소값은 각각 0.018, 0, 0.008, 0.005이고 최대값은 0.56, 0.45, 0.25, 0.22이다. 그림 68 (c) 알타이 지역의 월 평균 NDVI는 시간이 지남에 따라 값이 줄어드는 것을 그래프를 통해 볼 수 있다.

그림 69은 몽골 전체 지역에 대한 격자 간 평균 NDVI값의 공간 분포를 나타낸 것이다. 그림 69의 (a)는 전체 기간, (b)는 봄(3,4,5월), (c)는 여름(6,7,8월), (d)는 가을(9,10,11), (e)는 겨울(12,1,2월)의 격자 간 평균 NDVI 값으로 전체적으로 보면 몽골의 북쪽지역으로 갈수록 높은 값을 보이며 반면 남쪽 지역 특히 남서지역은 그 값이 낮음을 볼 수 있다.

그림 70은 몽골 전체 지역에 대한 격자 간 2003년과 2009년의 평균 NDVI 값의 차이를 공간분포로 나타낸 것이다. 그림 70의 (a)는 봄(3,4,5월), (b)는 여름(6,7,8월), (c)는 가을(9,10,11), (d)는 겨울(12,1,2월)이며, +값은 빨간색계열로 - 값은 파란색계열로 나타냈다. 전체적으로 보면 다른 계절에 비해 봄과 겨울에 +값이 더 많음을 알 수 있다. 즉 최근인 2009년의 봄과 겨울의 NDVI가 2003년에 비해 증가하고 가을에는 감소하였음을 볼 수 있다.

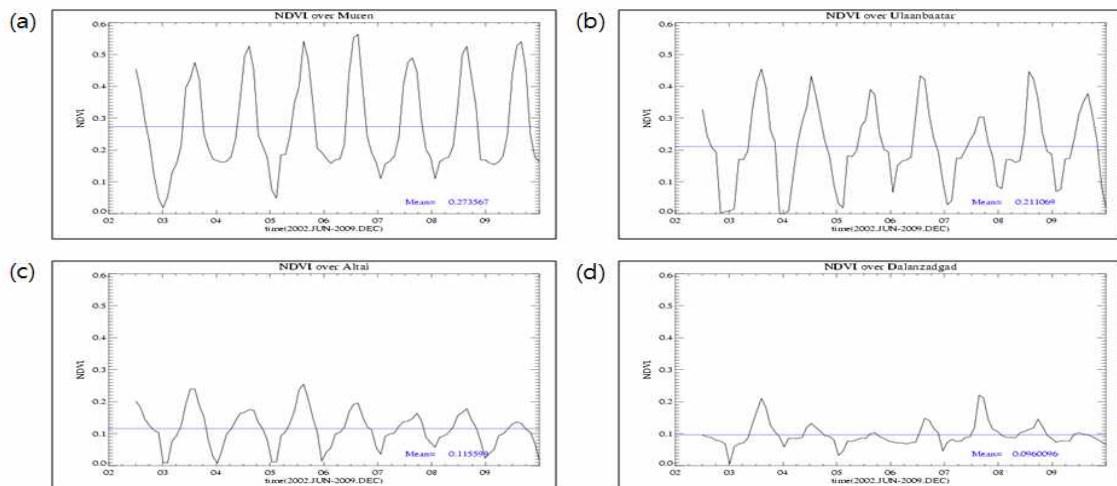


그림 68. 몽골 지역별 (a) 무렌, (b) 울란바타르, (c) 알타이, (d) 달란자드가드의 월평균 NDVI의 시간에 따른 변화량 (시계열).

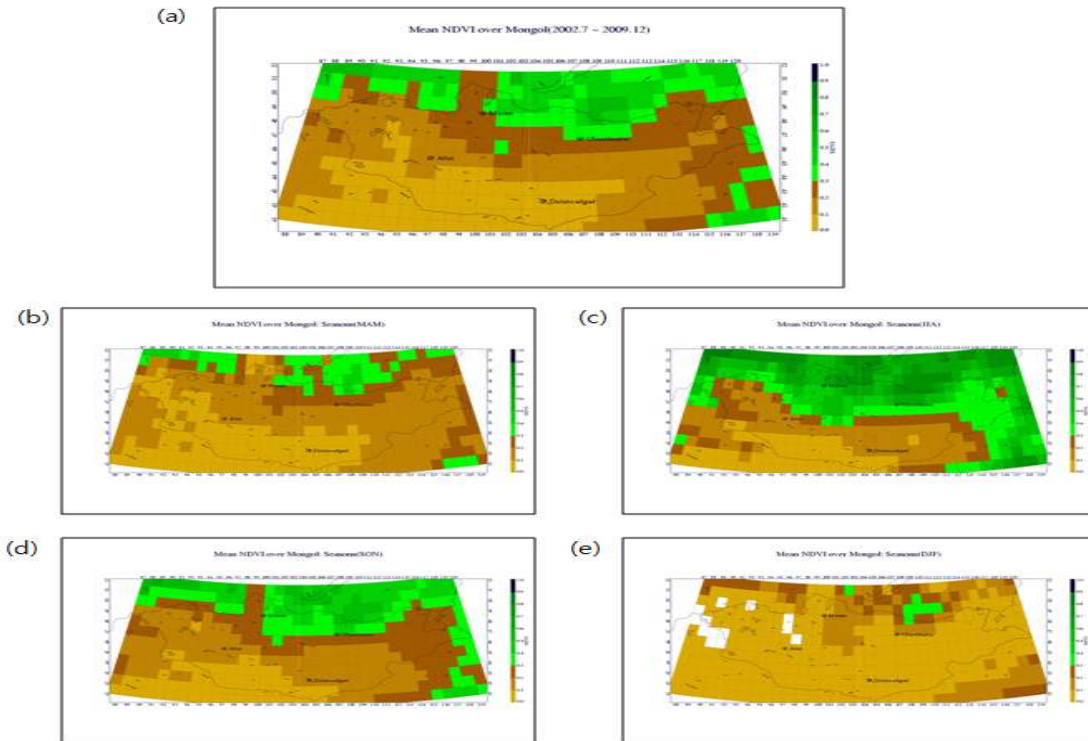


그림 69. NDVI의 공간 분포. (a)는 전 기간에 대한 NDVI의 평균값. (b)는 봄(3,4,5월), (c)는 여름(6,7,8월), (d)는 가을(9,10,11월), (e)는 겨울(12,1,2월).

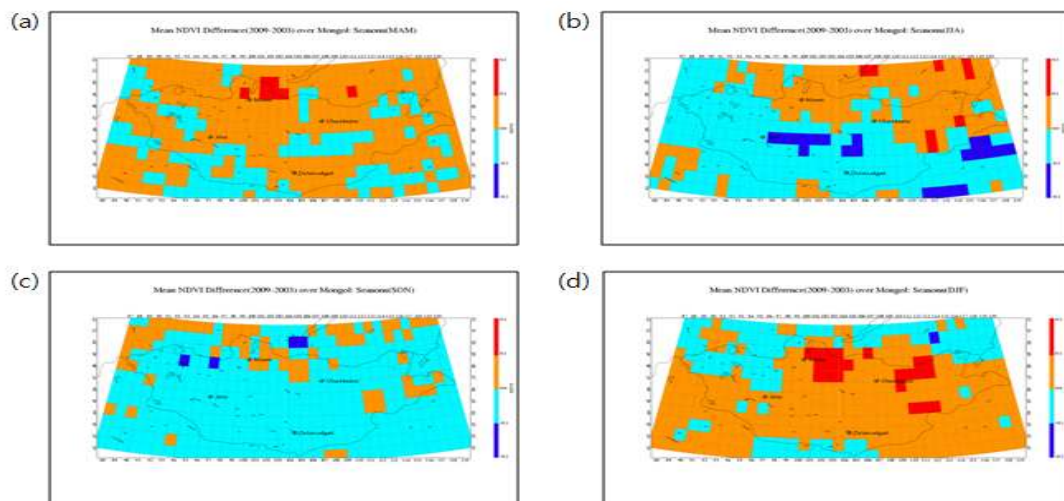


그림 70. NDVI의 2003년과 2009년 차이 공간 분포. (a)는 봄(3,4,5월), (b)는 여름(6,7,8월), (c)는 가을(9,10,11월), (e)는 겨울(12,1,2월).

### 5.3.3 가강수량 분석

그림 71은 2002년 7월부터 2009년 12월까지의 몽골 4지점의 월평균 가강수량 (TPW)의 시계열 자료이다. 달란자드가드 지역에서 7.73mm로 4지역 중 가장 큰 평균값을 보였으며, 계절에 따른 변동이 큼을 알 수 있다. 무렌, 울란바타르, 알타이, 달란자드가드 각 지역에서의 최소값은 각각 0.93mm, 1.02mm, 0.91mm, 1.47mm이고, 최대값은 각각 20.19mm, 21.77mm, 17.04mm, 21.92mm이다. 달란자드가드의 경우 최근인 2009년에서 TPW값이 줄어들음을 볼 수 있다.

그림 72는 몽골 전체 지역에 대해 격자 간 평균 TPW값의 공간 분포를 나타낸 것으로 (a)는 전체, (b), (c), (d), (e)는 각각 봄, 여름, 가을, 겨울 기간이다. 몽골 전체의 격자 간 평균 TPW값은 0~15mm 범위이며, 계절적 차이로 인하여 봄과 가을은 0~10mm, 여름은 5~30mm, 겨울은 0~5mm 값의 범위로 공간 분포를 나타내었다. 전체적으로 볼 때 북쪽지역에 비해 남쪽 특히 남서쪽 지역의 격자 간 평균 TPW값이 상대적으로 큼을 분석 해 볼 수 있다.

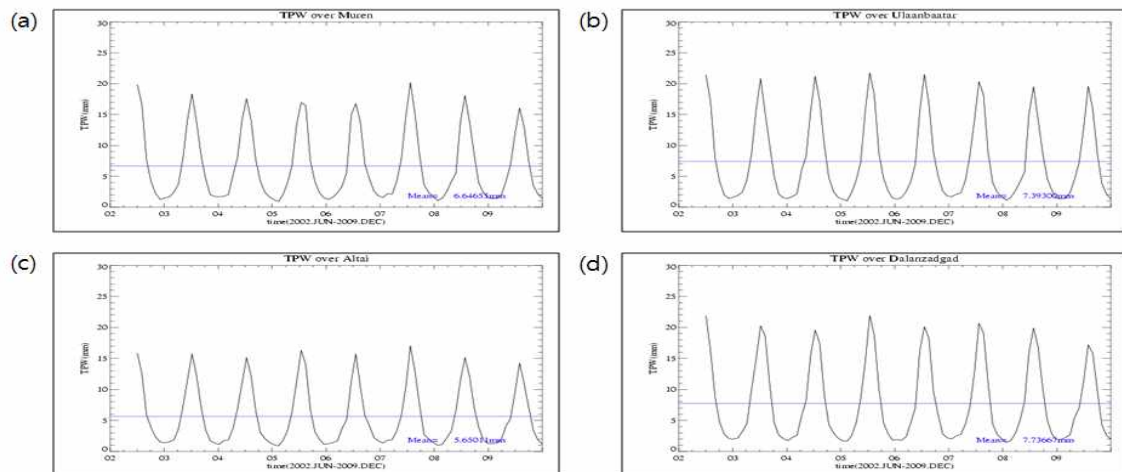


그림 71. 몽골 지역별 (a) 무렌, (b) 울란바타르, (c) 알타이, (d) 달란자드가드의 월평균 TPW의 시간에 따른 변화량 (시계열).

### 5.4 한몽 인공증우 협력망 구축

황사 방지를 위해서는 한몽 사이 협력이 필요하다. 기존 황사방지 노력은 많은 시간과 자원 그리고 노력에도 불구하고 비판적으로 평가할 부분이 많다. 특히 한국이 일방적으로 돈과 인력을 투입한 뒤 사업이 끝나면 모두 철수하면서 지속적이지 않았다. 이 때문에 한국 측은 낭비가 발생했고 몽골 측은 한국의 지원을 바탕으로 전문인력과 장기적 사업의 초석을 놓을 기회를 놓쳤다.



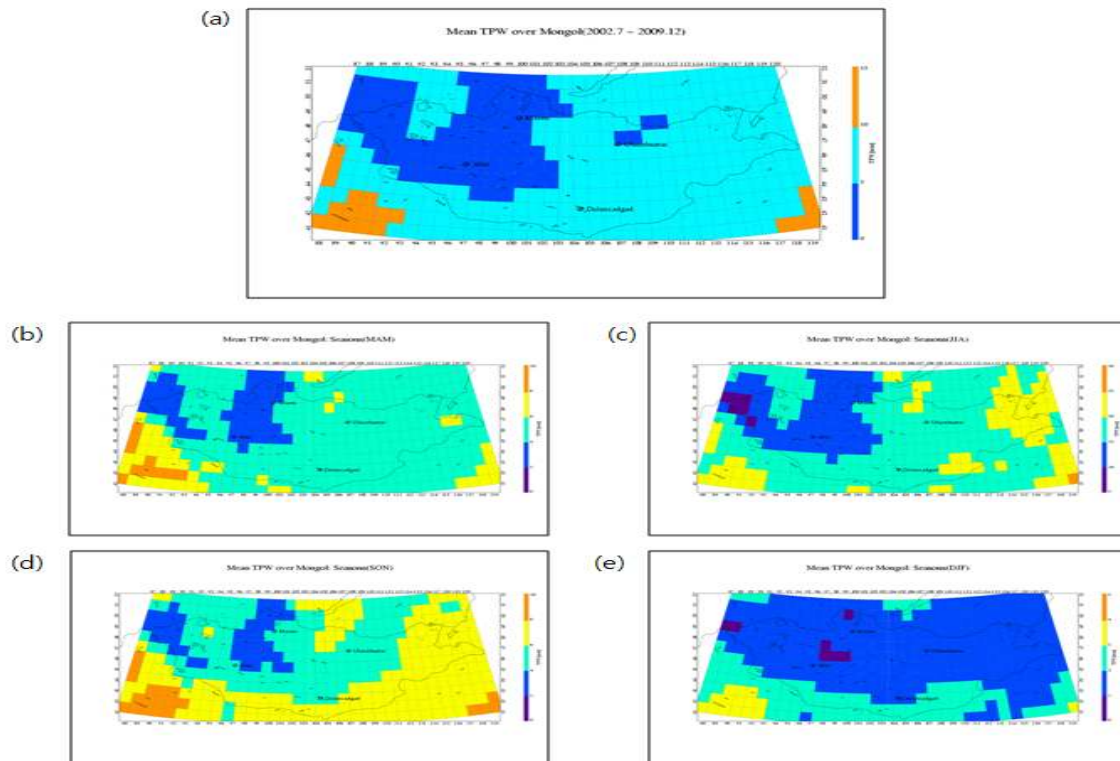


그림 72. TPW의 공간 분포. (a)는 전 기간에 대한 TPW의 평균값. (b)는 봄(3,4,5월), (c)는 여름(6,7,8월), (d)는 가을(9,10,11월), (e)는 겨울(12,1,2월).

따라서 본 연구에서는 몽골 현지 연구원들과의 교류를 극대화하기 위해 워크숍을 각각 몽골과 한국에서 한 차례씩 개최했다.

#### 5.4.1 1차 몽골 워크숍

2012년 7월 23일 몽골 현지에서 한국과 몽골 전문가들을 선별해 1차 워크숍을 개최하였다(그림 73).



그림 73. 2012년 7월 23일 몽골 울란바타르에서 열린 1차 워크숍.

가장 인상적이었던 발표는 수문학을 담당하는 Dr. Davaa와 몽골 모래폭풍에 대해 발표한 Dr. Jugder의 발표였다.

Dr. Davaa는 빙하의 고도가 점차 상승하고 있다는 것과 고비 사막 지역의 호수들이 많이 사라지고 있다는 것, 모든 연도와 계절에서 유량 감소가 관측되고 있다는 정량적인 자료를 들어서 몽골의 사막화가 진행 중이라는 것을 보였다. 또한 몽골의 수문 및 지하수 관측소 운영 상황을 발표하였는데, 몽골 전체의 가용수량 활용현황을 파악하는데 중요한 자료가 될 수 있다.

Dr. Jugder는 몽골의 PM10과 PM2.5 관측망 운영 상황과 그 결과를 발표하였다. 특히 황사발원지인 달란자드가드의 경우 겨울과 봄에 모래 폭풍 때문에 집중적으로 수치가 높아졌고, 라이다를 갖추고 있어서 중관기상 조건에 따른 미세먼지의 연직구조를 제시하였다. 몽골 내 모래폭풍이 어떻게 고층으로 유입되어 황사가 되는지를 파악하는데 중요한 자문을 구할 수 있을 듯하다.

한편, Dr. Natsagdorj는 현재 진행중인 몽골의 기후변화를 통계자료와 함께 제시하였는데, 몽골에서 진행 중인 사막화의 50% 정도는 목축에 의한 것이라는 의견과 몽골 사막화는 강수량 부족뿐만 아니라 증발량이 늘어난 것도 함께 봐야 한다는 의견을 제시하였다.

그 밖에도 Dr. Munkhsetseg는 야외 실험을 통해 모래폭풍이 발생하는 풍속 조건을 정량적으로 측정된 결과를, Mr. Jambajamts는 인공증우 실험을 수치적으로 모의할 수 있는 잠재력을, Mr.Chuluunbat은 몽골의 인공증우 실험 현황을 발표하였다.

Mr. Chuluunbat과 Dr. Natsagdorj를 제외한 참가자들은 영어가 유창하여 통역 없이 의사소통 하는데 문제가 없었다.

워크숍 공식 일정이 끝난 이후에는 개별적인 면담을 통해 워크숍에서 하기 힘든 이야기를 자유롭게 나눴는데 이 과정을 통해 공개적인 워크숍에서는 확인하기 힘들었던 인공증우에 대한 상반된 견해를 확인할 수 있었다.

한국에서 몽골 현지 전문가를 접촉하기에는 한계가 많은데 특히 몽골은 인터넷이 불안정하거나 영어 자료가 부족해서 더욱 그렇다. 워크숍은 한국에서 사전에 초대장을 보낸 전문가만을 대상으로 한다는 한계가 있어서 몽골 출장 중 황사발원지 방문, 몽골 현지 인공증우 실험 실태 파악 등을 하면서 현지에서 전문가와 접촉 역시 계속 시도했다.

그 결과 몽골에서 수치모형을 통한 기후변화를 연구하는 Dr. Gomboluudev를 2차 워크숍에 새로이 초대할 수 있었다. 농과학연구소 목축 전문가과도 몽골 출장 중 약속을 잡았는데 그에게 사회경제 정책에 대한 의견을 들을 수 있었다(그림 30).

#### 5.4.2 2차 워크숍

1차 워크숍 결과를 바탕으로 Dr. Davaa, Dr. Jugder, Mr. Chuluunbat를 2차 워크숍에도 초대했고, 현지에서 알게된 기후변화 전문가 Dr. Gomboluudev와 생태 문제 전공자인 Dr. Batkhishig를 새로이 추가했다.

또 한국에서 개최되는 이점을 극대화하기 위해 국립기상연구소 황사연구과, 국립기상연구소 응용기상연구과, 고려대 수문학 연구실 전문가를 추가로 초대하였다.

이런 노력의 결과로 10월 4일 개최된 2차 워크숍에는 1차 보다 더 많은 전문가를 모아서 진행할 수 있었다(그림 74).

Dr. Gomboluudev는 수치모형을 이용해 기후변화와 맞물려 현재 진행중인 사막화는 강수량 25 mm, 토양수분 50 mm를 감소시킬 것이라고 예상했다. Dr. Batkhishig는 사막화가 단순히 강수량 부족이 아니라 식생 파괴로 인해 토양 침식이 가속화시킨다는 것을 강조해서 생태와 사막화의 연계를 설명했다. Dr. Davaa는 몽골에서 물부족에 대처하기 위해 어떤 노력을 기울였는지를 여러 지역별로 제시하였고, Mr. Chuluunbat은 객관적 자료가 부족하다는

1차 워크숍의 지적을 반영해서 보다 통계적인 자료를 제시하려고 노력했다.

황사연구과 이은희 박사는 몽골의 모래폭풍빈도의 지역적 분포와 함께 한국에 황사가 도달하는 계절적 차이를 설명하였고, 고려대학교 유철상 교수는 시뮬레이션을 통해 식생 뿌리의 수분 공급을 위한 지하 저수조의 효과를 제시하였다. 응용기상연구과 이철규 박사는 국내에서 진행되는 인공증우 실험을 개괄하며 Mr. Chuluunbat과 의견을 교환하였다.

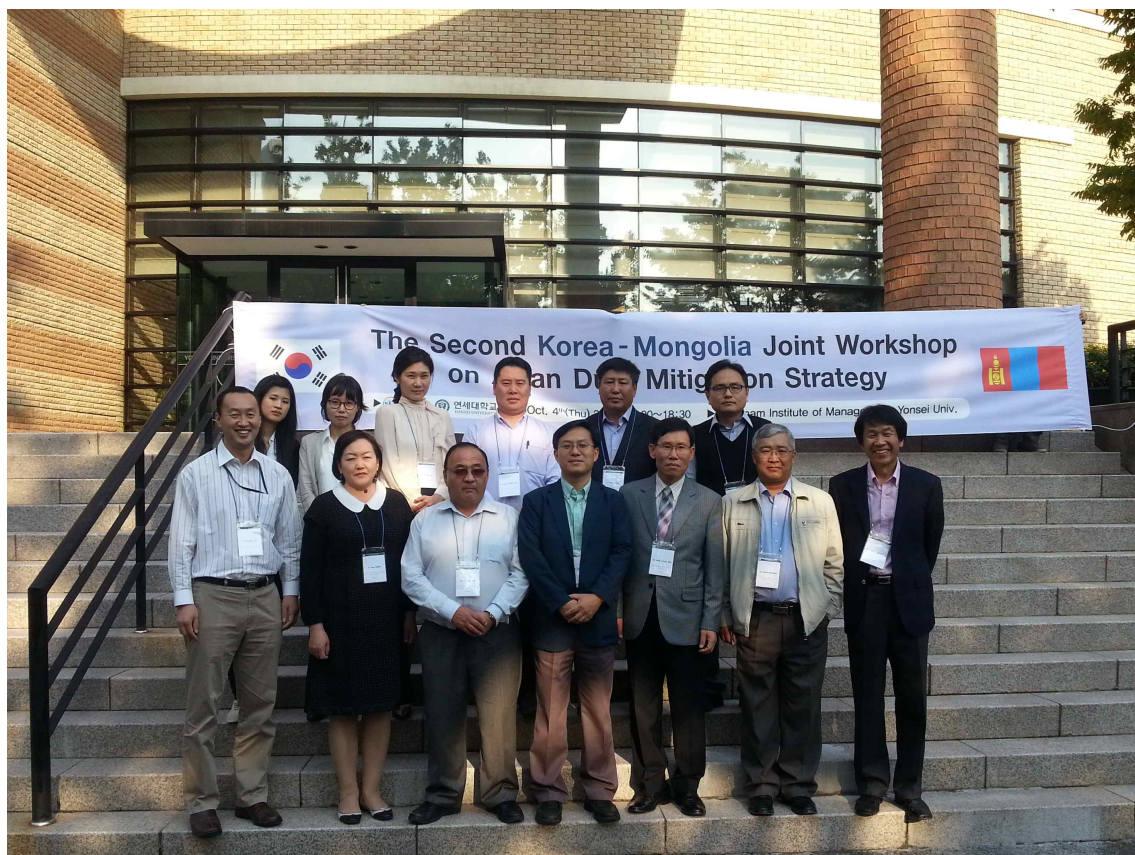


그림 74. 2012년 10월 4일 서울에서 열린 2차 워크숍.

이렇게 확보한 전문가 네트워크는 향후 황사방지 대책에 활용되어야 한다. 표 12는 본 연구에서 구성한 전문가 네트워크를 표로 나타낸 것이다.

표 12. 한몽 인공증우 전문가 네트워크.

이름	소속	직책	이메일	비고
<b>Dr. ERDENEBAT Eldev-Ochir</b>	National Agency for Meteorology and Environment Monitoring of Mongolia, Mongolia	Head, International Cooperation Division	<b>metcoagency@magicnet.mn</b>	몽골 국제협력정책 일반
<b>Ms. ERDENEDELGER Monkhoo</b>	National Agency for Meteorology and Environment Monitoring of Mongolia, Mongolia	International Cooperation Division	<b>margad_5@yahoo.com</b>	한-몽 교류지원
<b>Dr. Luvsan NATSAGDORJ</b>	Institute of Meteorology, Hydrology and Environment, Mongolia	Research Consultant, ex-Director	<b>natsag03@yahoo.com</b>	몽골 기후변화, 대화시 영어 통역 필요
<b>Dr. Dulam JUGDER</b>	Institute of Meteorology, Hydrology and Environment, Mongolia	Environmental Research Section	<b>jugderd@yahoo.com</b>	몽골 미세먼지 관측망
<b>Dr. Gombo DAVAA</b>	Institute of Meteorology, Hydrology and Environment, Mongolia	Head, Hydrology section	<b>watersect@yahoo.com</b>	몽골 수문 분포
<b>Dr. Purevjav GOMBOLUDEV</b>	Institute of Meteorology, Hydrology and Environment, Mongolia	Scientific Secretary	<b>p_gombo@yahoo.com</b>	몽골지역 수치모형
<b>Mr. D. CHULUUNBAT</b>	Institute of Meteorology, Hydrology and Environment, Mongolia	Head, Weather modification sector "Khuriin shim"	<b>spolechuka@yahoo.com</b>	몽골 인공증우 실험 총괄, 대화시 영어 통역 필요
<b>Dr. Erdenebayar MUNKHTSETSEG</b>	National University of Mongolia, Mongolia	Assitant professor, Faculty of Earth Sciences	<b>munkhuu0329@yahoo.com</b>	미세먼지 및 식생 관측
<b>Dr. Ochirbat BATKHISHIG</b>	Institute of Geography, Mongolian Academy of Sciences, Mongolia	Head, Soil Science Department	<b>batkhishig@gmail.com</b>	몽골 생태 변화
<b>Mr. JAMBAJAMTS Lkhamjav</b>	National University of Mongolia, Mongolia	Lecturer, Department of Meteorology and Hydrology	<b>jambajamts@num.edu.mn</b> <b>gurav3@yahoo.de</b>	레이더 및 수치예보
<b>Dr. Chulkyu LEE</b>	National Institute of Meteorological Research, Korea	Research Scientist, Applied Meteorology Research Division	<b>chulkyu.lee@korea.kr</b>	한국 인공증우
<b>Dr. Eun-Hee LEE</b>	National Institute of Meteorological Research, Korea	Researcher, Asian Dust Research Division	<b>eunheelee@korea.kr</b>	몽골 내 황사관측소 운영
<b>Dr. Chulsang YOO</b>	Korea University, Korea	Professor, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering	<b>envchul@korea.ac.kr</b>	수문 전문가



## 5.5 소결

기상관측 자료와 위성 자료가 완벽하지는 않지만 일관성 있는 결과를 보이고 있다. 지상과 고층 기상자료를 분석해보면 여름철이 습도가 높고 구름이 많아서 인공증우 실험의 성공 가능성이 크고 실제로 그 지역 가용수를 증대시키기에 가장 좋을 듯하다. 위성자료도 겨울철에 구름이 가장 적고 여름철에 구름이 가장 많기 때문에 인공증우 실험을 위해서는 겨울보다는 여름이 선호된다. 그러나 중요한 것은 여름철이 겨울철에 비해 상대적으로 인공증우 성공 가능성이 더 높다는 것을 의미할 뿐이며, 운량이나 상대습도 연직구조를 살펴볼 때 몽골의 여름철도 절대적 인공증우 성공 가능성이 높지 않을 것으로 예상된다. 즉 매우 정교하게 몽골의 기상조건에 최적화된 인공증우 실험 전략을 수립해야 성공 가능성을 보장할 수 있을 것이다. 특히 사막화가 이미 많이 진행된 달란자드가드를 비롯한 고비사막 지역은 적은 운량과 낮은 상대습도로 인해 여름철에도 인공증우 성공 가능성이 매우 낮을 것으로 사료된다.

한편 현재 몽고에서 겨울철 인공증우 실험은 금지되어 있다는 것도 염두에 두어야 한다. 겨울철 폭설과 혹한 때문에 가축들이 먹을 풀을 찾지 못해 동사하는 일이 빈번히 발생하고 있기 때문이다. 가축의 대규모 동사가 있었던 2009-2010 혹한기 주드의 피해분포를 보면(그림 75) 고비 사막 북쪽과 몽골 중부 지역에 가축 피해가 집중되었으며 울란곰 역시 주된 피해 지역에서는 벗어나 있지만, 일부 피해는 발생했던 것을 알 수 있다(Natsagdorj et al., 2011).

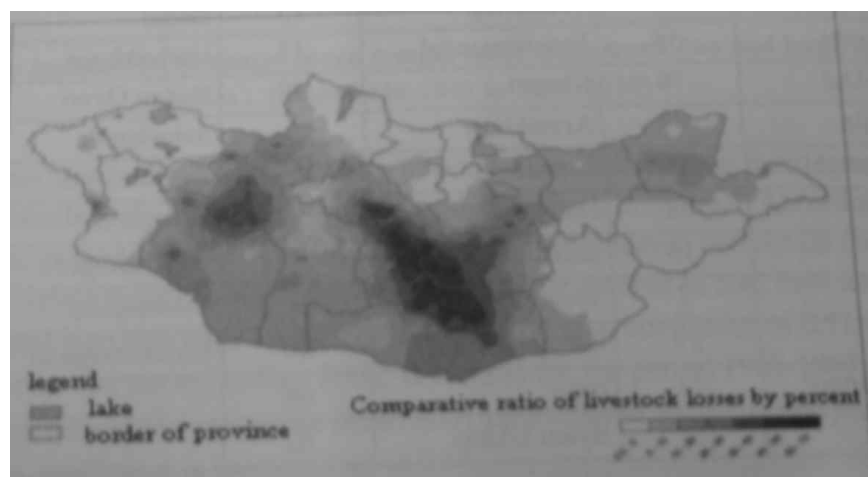


그림 75. 2009-2010년 혹한기 주드 동안 가축 피해의 상대적 분포 (질을수록 피해가 큼).



## 제 4 장 결론

국내에 유입되는 황사의 절반 이상이 몽골 고비 사막의 모래폭풍으로부터 기원한다. 최근 기후변화로 인한 증발량 증가 및 강수량 감소, 과잉방목, 광업 개발 등이 복합적으로 작용하여 이 지역의 사막화가 가속화하고 있다. 이는 국내에 황사 피해가 증증할 수 있음을 말해준다.

본 장에서는 이를 막기 위한 제언을 기상조절기술과 사회경제적 정책으로 나누어서 제시한다.

### 제 1 절 기상조절기술 적용에 대한 고찰

몽골 정부가 사막화를 막기 위해 기상조절기술에 많은 인력과 재정을 투입하고 있지만 이에 대한 신뢰도는 높지 않다. 특히 개별적인 구름씨 살포 실험의 성공여부가 전반적인 가용수 증대로 이어지는지에 대한 검증이 필요하다. 현재 몽골의 기상조절기술 현업화 정도는 세계에서 유례를 찾아보기 힘들 정도로 높은 수준이지만 그 정책을 뒷받침할만한 과학적 근거는 매우 적다.

강수량, 연직 온습도 분포와 같은 기초적인 기상 자료도 오류 때문에 불확실성이 크거나 제대로 보관되어 있지 않아서 객관적 통계적 검증이 쉽지 않다. 수많은 모바일 레이더를 보유하고 있지만 상시적인 고정 레이더 관측소가 울란바타르 한 곳 밖에 없다는 점 또한 지속적인 강수 감시를 어렵게 만든다. 이 때문에 개별적인 실험의 성공 여부가 실질적인 사막화 방지 여부를 판단하는 근거가 되고 있는데 이는 시급히 시정되어야 한다.

조림사업의 실패가 보여주듯이, 단기적이고 일회적인 지원은 한국인들이 떠나고 나면 대부분 실패로 끝난다. 따라서 단순히 로켓 발사대나 로켓탄과 같은 실험재료나 장비를 지원해주는 것으로는 제대로 된 가용수 증대 효과를 누릴 수 없는 것으로 판단된다.

현지에서 만난 몽골 기상청(NAMEM)과 국립대 관계자들은 한국인들이 떠나더라도 자신들이 사막화에 대처할 수 있는 연구와 교육 인프라 지원이 필요하다면서 몽골 학생들이 대학교 학부과정부터 한국에서 공부할 수 있는 기회를 제공해달라고 요구하였다. 장기적으로 가장 필요한 지원이라고 생각된다.

다음으로, 몽골은 사막화에 관한 상당한 연구인력을 보유하고 있지만 연구결과가 주요 학술저널에 공표되지 않고 몽골 내부 저널로만 발행되는 경우가 많았다. 이 때문에 본 연구진이 현지 방문 기간 중 자료입수에 상당히 많

은 시간을 할애해야만 했다. 주요 언어가 몽골어와 러시아어인 것이 외부 연구자들과의 교류를 가로막는 주요 요소로 사료된다. 따라서 몽골 연구자들과 교류협력을 통해 몽골사막화에 대한 연구를 세계 주요 저널에 적극 소개할 필요가 있다.

몽골 기상청의 기초 자료수집 과정보다 현대화할 필요가 있다. 강수량, 기온, 상대습도는 사막화 방지를 위해서 반드시 알아두어야 할 자료들이다. 몽골의 기상관측소가 전국에 100여개 정도 분포하고 있어 수가 적지 않지만 자동화 되어 있지 않기 때문에 보고자의 오차가 치명적인 문제를 일으키고 있다. 이 때문에 기후변화 및 사막화 경향을 판단하는데 필요한 통계적 분석이 어렵고, 이는 전반적인 자료의 가치를 떨어뜨리고 있다. 전국 중 몇 개의 중요한 지점만이라도 선별하여 신뢰할만한 자료를 생산하도록 하는 것이 필요하다.

수집된 기상자료의 분석을 바탕으로 판단할 때 기상조절기술의 활용이 가능한 경우는 다음과 같다. 이미 사막화가 진행된 지역에서는 구름자원의 절대적 부족으로 기상조절기술의 활용을 기대할 수 없지만 아직 사막화가 본격적으로 진행되지 않은 사막 경계지역은 기상조절기술의 성공 가능성이 남아 있을 것으로 예상된다. 이런 지역에 효율성 높은 기상조절실험을 수행한다면 사막화를 경감하거나 미리 예방할 수 있을 것이다. 상대적으로 몽골의 북부 지역은 강수량이 많고 따라서 기상조절 실험의 성공가능성이 높다. 이런 지역에 성공적인 기상조절 실험을 수행할 수 있다면 그리고 이렇게 확보된 수자원을 남부 지역으로 수송할 수 있다면 이 지역의 사막화 경감 혹은 방지에 기여할 수 있을 것이다. 그러나 이와 같은 제안의 실현 가능성에 대한 정량적인 평가는 이 연구의 범위를 벗어나며 이를 위해서는 보다 심층적이고 체계적인 연구가 필요하다.

끝으로, 몽골의 사막화는 단지 기후변화 때문만이 아니라 사회경제적 요인도 얹혀 있다는 것에 유의해야 한다. 경제성장을 위한 캐시미어 생산과 광산 개발은 기후의 자연적 변화 못지않게 몽골 사막화에 기여하는 것으로 알려져 있다. 특히 어마어마한 양의 물을 지하로부터 끌어올려서 광산을 개발하고 있는데 그 위에 기상조절기술로 소량의 비를 더 내리게 해서는 사막화 문제를 결코 해결할 수 없을 것이다.

이런 사회경제적 요인을 고려하려면 현지 연구 사정을 잘 알아야 한다. 본 연구에서 구축한 전문가 네트워크는 향후 연구에 도움이 될 것이다.

위 사항에 기초해서 본 연구과제는 기상조절기술 관련해서 다음과 같은 2단계 접근법을 제안한다(그림 76):

- 1) 몽골 정부가 자체적으로 진행 중인 인공증우 실험을 객관적으로 평가하

기 위한 집중관리 사이트를 울란곰에 설치한다.

울란곰을 선정한 까닭은 이미 구름이 많기 때문이다(그림 56, 57). 또한 겨울철 혹한에 의한 피해도 상대적으로 적기 때문에(그림 75) 여름뿐만 아니라 대조군을 위해 겨울에도 실험을 할 수 있다는 장점이 있다. 이 지역은 사막화 문제 해결이 시급하지 않지만 인공증우 기술 습득을 위한 예비단계 성격의 실험을 하기에 적당하다. 집중적으로 AWS와 레이더를 설치하고 인공증우 실험을 실시한 지역과 실시하지 않은 지역의 강수량을 비교함으로써 그 효과를 검증하며 이런 과정을 거쳐 기술을 습득하면 다른 지역에서 인공증우 실험을 실시할 과학적 토대가 마련될 것이다. 구체적인 기기의 수와 규모를 단정하기는 어려우나 50개소 가량의 AWS 측정소, 2개소 이상의 고층기상 관측소, 2대 이상의 레이더 등을 설치하고 다수의 지상연소기, 로켓 등의 구름씨 살포기를 동원하여 5-10년 정도 반복적인 실험을 수행해야 할 것이다. 이를 위한 관측소 설치, 장비 도입, 인력 수급 등을 위한 예산은 5년간 100억원 이상 소요될 것으로 예상된다. 그러나 이 과정을 통해 몽골인들 스스로 구름씨 살포기술뿐 아니라 검증을 위한 자료처리기술을 습득하도록 해야 한다.

2) 앞 단계로 확보한 인공증우 기술을 스텝지역인 최발산 지역(그림 2)에 실시하여 사막화 방지 효과를 평가한다. 최발산은 현재 사막화가 진행 중인 지역이며(그림 10), 그로 인한 풍식문제 또한 겪고 있다(그림 23). 또한 과잉 목축 문제가 적은 편에 속하기 때문에(그림 12) 인공증우 실험의 효과만을 떼어놓고 보기에 좋다. 그럼에도 남부 달란자드가드와 같은 고비사막 한가운데보다는 연중 강수 횟수가 2배 가량 많아서(그림 62) 인공증우 실험을 실시할 조건은 된다.

이 지역은 또한 몽골-만추리안 초지(Mongolia-Manchurian grassland)의 일부로 강이 흐르기 때문에 적절한 덮개수로가 갖춰지면 인공증우 결과로 내린 강수가 바로 증발하지 않고 해당 지역의 가용수로 쓰일 확률을 높일 수 있다. 강수의 증발을 막기 위한 덮개수로는 두 차례 위크샵에 참석한 몽골 수문 전문가 Dr.Davaa의 핵심 조언이기도 하다.

최발산 지역에서의 실험은 울란곰 지역의 실험이 가시화되는 시기인 5년 후부터 실시하는 것이 바람직할 것으로 사료되며, 같은 규모의 사업을 가정할 때 5년간 100억원 이상의 예산이 소요될 것으로 예상된다. 일반적으로 인공증우로 인한 강수증대 효과가 10%이면 성공이라고 간주하는데 체계적이고 과학적인 실험을 수행한다면 이 정도의 강수증대 효과를 기대할 수 있지 않을까 조심스럽게 기대해 본다. 이로 인한 경제적, 사회적 비용 절감 효과는

상상을 초월할 것이다. 만약 최발산 지역의 실험이 성공적으로 수행된다면 사막화의 영향이 좀 더 심각한 다른 지역으로 실험을 확대해야 할 것이며 이와 같이 실용화 단계에 이르게 되면 예산 규모도 훨씬 더 커져야 할 것이다.

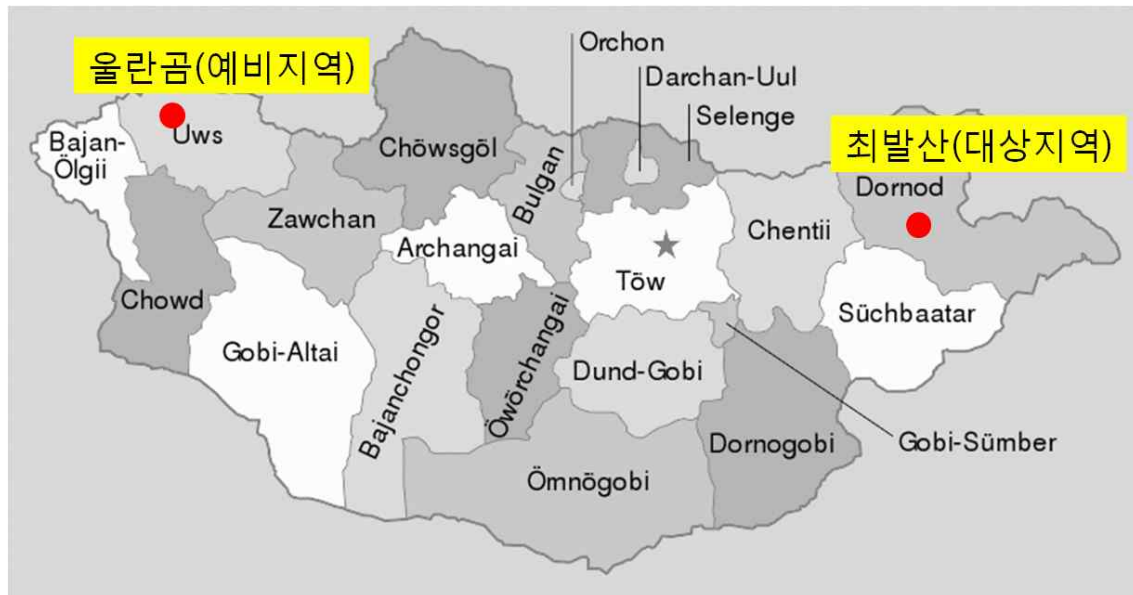


그림 76. 본 연구가 제시하는 2단계 기상조절기술 접근법.

## 제 2 절 사회경제적 대응책

목축은 스텝식생의 심각한 위협이며, 특히 통제되지 않은 가축수의 증가와 가축 구성의 변화이다. 특히 염소의 급증은 스텝의 식생을 초토화시키는 주요 요인으로 이를 해소하기 위한 정책적 노력이 필요하다.

그 외에도 광산개발, 산불, 초원의 자동차 통행, 자연자원 이용을 위한 사회경제 활동등도 몽골의 사막화를 부추기는 요인이다. 또한 기후변화는 사막화를 부추기는 자연적인 요인으로 적응과 극복방안이 동시에 마련되어야 한다.

몽골 사막화에 있어 가장 핵심이 되는 지역은 사막지역과 습윤지역의 접이지대에 위치한 스텝기후 지역이다. 매우 건조한 고비사막 중심부가 하루아침에 수목이 뺏뺏한 산림이 될 수 없듯이 비교적 습윤하고 강수량이 풍부한 몽골 내 산림지역들이 사막이 되기 위해서는 생태적으로 일련의 변화 과정을 거쳐야 한다. 자연적인 변화 과정에 있어 스텝기후 지역은 사막지역으로 구분되기 직전에 마지막으로 거쳐야 관문과도 같다. 스텝 지역의 특징을 거치지 않고 사막화가 이루어진 지역이 있다면 이는 인간의 직접적이고 강력한 영향이 있었음을 쉽게 인지할 수 있다.

몽골 사막화를 지연시키는 첫 단계는 스텝기후 지역을 마지노선으로 삼아 이들 지역에서 이뤄지는 사막화를 최소화 하는 것에서부터 시작되어야 한다. 비교적 강수량이 풍부한 북부 스텝 기후 지역에 비하여 몽골 고비 사막 주변부의 스텝 기후 지역은 사막과 비슷한 수준의 매우 낮은 강수량을 나타낸다. 이미 사막에 가까운 기후를 나타내고 있는 이들 지역은 스텝지역의 세부분류 가운데 사막스텝지역으로 구분되며 현재의 전 지구적 기후변화의 추세가 지속된다고 가정할 때 사막화를 막는 것이 쉽지 않다.

이들 지역을 방목이나 노천 광산 개발 등과 같은 인위적인 요인으로부터 보호한다고 하여도 쥬드(Dzud)나 여름철 극심한 가뭄과 같은 극단 기상현상(Extreme Meteorological Events)으로 인해 한번 파괴된 식생이 자연적인 과정을 통해 회복되기를 기대하는 것은 어렵다.

고비 사막 외곽의 사막스텝지역을 벗어나면 초지가 잘 발달한 몽골의 일반적인 스텝지역이 나타난다. 이들 지역은 사막스텝지역에 비해 비교적 높은 강수량을 가지고 있으며, 가축 방목에 이루어지는 몽골에서 가장 흔하게 나타나는 지역(국토의 약 26%)이다.

사막스텝 지역이 기후변화 등에 따라 잠재적으로 사막이 될 가능성이 매우 높은 지역이라면 일반적인 스텝지역은 자연적인 원인보다는 인위적인 요인에 의하여 사막화가 빠르게 진행될 수 있는 위험을 안고 있다. 앞서 언급된

과도한 방목이나 자동차 통행, 광산개발 등은 이들 지역을 사막스텝 지역과 같은 모습으로 변화시킬 수 있다. 따라서 사막화 방지를 위한 정부차원의 실질적인 규제안들은 일반적인 스텝 지역에서 집중적으로 이뤄져야 한다.

몽골의 산림과 산림스텝지역은 사막화에 직접적인 위협을 받는 지역은 아니지만 사막화 방지에 핵심이 되는 일반적인 스텝지역의 식생을 지지하는데 상당히 중요한 역할을 담당하고 있다. 녹색댐이라고 불리는 산림이 파괴됨에 따라 나타나는 수자원 함양 기능의 상실은 지하수면의 하강과 하천 및 호수의 고갈과도 관련되어 있다. 즉 산불이나 무분별한 벌채 등과 같은 산림 파괴 행위는 산림을 황폐화 시킬 뿐만 아니라 주변 스텝지역이 가지고 있는 사막화에 대한 생태적 저항력을 약화시킬 수 있다.

몽골에 비해 국민소득 높고, 사회 기반 시설이 잘 발달된 호주가 심각한 사막화 피해를 겪고 있는 것으로 볼 때 과도한 지하수 이용이나 양을 중심으로 하는 통제된 기업적 방목은 일시적으로는 몽골 사막화 방지에 효과를 나타낼 수 있으나 지속적인 해결책이 될 수 없어 보인다. 오히려 호주의 사례와 같이 지하수 고갈로 인한 보다 심각한 식생 훼손 문제에 직면하게 될 수 있다. 따라서 몽골 사막화에 대한 생태적 대책 방안은 사막을 숲으로 바꾸려는 것보다 현재의 산림과 초지에 대한 훼손을 막는 것이 우선이다.

환경 수용력을 바탕으로 한 방목 규제, 차량 통행 제한, 무분별한 광산 개발 금지 등의 스텝 지역 식생 보호 방안은 엄청난 비용과 노력이 필요할 것으로 예상되고 있다. 하지만 지난 10년간 식생파괴로 인해 사막화가 상당히 진전된 지역 대한 조림과 같은 적극적인 사막화 방지 사업에 투자된 비용 및 시간과 비교한다면 전자의 경우는 상대적으로 효율적이고 생태적인 사막화 방지 대책으로 볼 수 있다. 결국 스텝지역의 자연 환경 보전은 몽골 사막화 방지와 확산 지연에 있어 우선적으로 고려되어야 할 것이다.

위 사항에 기초해서 본 연구과제는 스텝지역(그림 2) 자연 환경 보전을 위한 사회 경제적 대응책으로 다음을 제안한다:

1) 유목민에 대한 적절한 경제적 지원을 바탕으로 방목을, 특히 사막스텝 지역이 아닌 일반적인 스텝지역에서 규제해야 한다. 몽골 경제성장으로 유목민들의 수입이 늘자 염소 방목이 줄어든 것(그림 22)은 이 방안의 잠재력을 보여준다.

2) 몽골에서 사실상 무제한적으로 진행되는 광산업은 장기적으로 호주처럼 물부족을 심화시킬 수 있다. 따라서 현재의 노천광산을 친환경적 광산으로 대체해야 한다. 희토류 생산으로 이득을 보는 선진국이 여기에 필요한 비용을 분담해야 한다.



3) 몽골 전역에는 국가 또는 개인이 마련한 우물이 많이 있는데, 고장이 나도 비용을 감당하지 못해 수리하지 못하는 경우가 많다. 전국 우물 관리 상태를 파악한 뒤, 이런 우물을 수리하기 위한 정부 대책이 필요하다.

4) 현재 민관차원에서 진행되는 사막화방지 지원사업은 몽골 사람들이 충분히 주체적으로 참여하고 있지 못하고 이 때문에 한국 지원이 끊기면 사실상 사업이 실패로 돌아가는 일이 빈번하다. 장기적으로 몽골이 자체적으로 기술을 확보할 수 있도록 대학과 연구소 교류를 넓혀야 한다.

몽골인들이 국내 대학과 연구기관들에서 교육 받기 위해서는 충분한 체류 기간과 그 기간 중 경제적 지원(등록금 포함)이 필수적이다. 정규 수학 기간 이외에도 어학 습득 기간을 고려해 5년 이상 장기간 체류비자를 발급할 필요가 있다.

최근에 몽골 출신 학생이 사소한 시비 끝에 경찰에 의해 국외 추방된 것이 언론에 보도될만큼 한국 정부는 몽골을 포함한 가난한 나라 외국인들에 적대적인데 시급히 개선돼야 한다. 특히 차세대 몽골의 기술 인프라를 담당할 대학생 지원이 필수적이다. 이들은 별도의 수입이 없기 때문에, 등록금을 면제해주고 생활비를 일부 지원하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 기상조절기술을 중심으로 황사를 근본적으로 방지하기 위한 방안에 대해 알아보았다. 기상조절기술만으로는 가용수를 늘려 사막화를 방지하는 것이 쉽지 않은 것을 연구결과를 통해 알 수 있다. 앞에서 기상조절 기술 이외의 방안에 대해서도 기술하였지만 본 연구만으로 다른 분야들에 대해 자세히 다루기에는 한계가 있었다. 따라서 수문학 등, 주어진 물을 활용하여 몽골의 사막화를 방지하는 분야에 대한 연구가 앞으로 더 이루어져야 한다.

## 제 5 장 참고문헌

- 강호덕 외, 2010, 사막화방지를 위한 동북아시아 조림지 평가 pp. 79~90.
- 과학기술부, 2002, 국가기술지도 - 비전Ⅲ 환경·에너지 프론티어 진흥 -제 1권-, pp. 542~546.
- 김세빈, 손요환, 박재현, 박동균, 광경호, 최경, 정용호, 윤호중, 이창우, 2006, 몽골 그린벨트사업마스터플랜 수립, pp. 18.
- 김종관, 2009, 몽골의 사막화 방지 - 그린벨트조성 조림사업-, 아시아 녹색동반성장실무협력 국제세미나, 충남대.
- 김창기, 염성수, 오성남, 남재철, 장기호, 2005: 한반도에서의 인공증우(설) 실험 성공 가능성에 대한 연구. 한국기상학회지, 41, 997-1014.
- 뉴시스, 2009. 11. 27, “몽골바양노르썸 호수살리기 시민연대 출범”.
- 외교통상부, 2011, 몽골개황 pp. 91~94.
- 울지자르갈 다바수렌, 2011, 몽골 사막화 지역 내 식재방법에 따른 조림수종의 활착률 및 생장특성, 경북대학교 대학원 석사논문.
- 윤여필, 2008, 몽골 환경산업 시장조사 연구, 환경부.
- 이규복, 2012. 5. 9, “한진그룹, 몽골에 ‘대한항공 숲’ 조성”, 뉴데일리.
- 이돈구 외, 2012, 숲의 생태적 관리, pp. 256~257.
- 정천기, 2009. 6. 12, “몽골에 그린에너지 테마파크 조성”, 연합뉴스.
- 추장민, 정희성, 강광규, 유난민, 김미숙, 2003, 동북아시아의 황사 피해 분석 및 피해 저감을 위한 지역 협력방안1, 한국환경정책평가연구원, ii.
- 환경부, 2008, 황사피해방지 종합대책, pp. 3~4.
- 한국지리정보연구회, 2004, 자연지리학사전, pp. 22~23.
- 환경일보, 2011. 6. 8, “안산시, 몽골 사막화 방지사업 협력 MOU 체결”.
- 홍종성, 2012. 5. 20, “몽골 나무심기 10년 ”몽골 강산 푸르게 푸르게”, 매일경제.
- Azzaya, 2003, Desertification. sand/dust storms and climate and anthropogenic correlation - case study in Mongolia.
- Batima P., Natsagdorj L., Gombluudev P., Erdenetsetseg B., 2005, Observed climate change in Mongolia, AIACC Working Paper No. 12.
- Batjargal Z., 2007, Fragile Environment, Vulnerable People and Sensitive Society, Kaihatusha, Japan.
- Batkhuu, Khaulenbek, Akhmed, Mandakh, Nyamtseren, 2009, State of Desertification and Combating Desertification Trails in Mongolia
- Bayarbat, 2011: The State of Desertification in Molgolia.

- Bayartaa Nyamjav, Johann Georg Goldammer, Holm Uibrig, 2007, The Forest Fire Situation in Mongolia, International Forest Fire News, No 36.
- Breed, D. W., 2012: The Wyoming project on winter orographic cloud seeding, 제5회 구름물리워크숍, 용평, 6월 14-15일.
- Crisp, N., J. Dick, and M. Mullins. 2004, Forestry Sector Review. Ulaanbaatar, The World Bank.
- Davaa, G., Batkuu, D., Soninbayar, J., Odgarav, J., 2011: Hydrology systems, specificity and their tendency of changes in Mongolia, Papers in Meteorology and Hydrology, No.32/8, 99-105.
- Dorjgotov, D.(Ed.), 2004, Geographic Atlas of Mongolia, Administration of Land Affairs, Geodesy and Cartography, Ulaanbatar, Mongolia.
- Gomboluudev, 2011, Studies of interactions between atmosphere and land cover using regional climate model (RegCM3), Synopsis of dissertation presented for the Ph. D Degree in Physical Sciences, NUM.
- Jagtuvaa T. P., 2010, Mongolia is rich in wildlife.
- Kim, J., 2008: Transport routes and source regions of Asian dust observed in Korea during the past 40 years(1965-2004), Atmospheric Environment, 42, 4778-4789.
- Kruchkin, Y. & M. Enkhbayar, 2003, Mongolia Tourist Guide, Libro, Ulaanbaatar, Mongolia.
- Mandakh, N., Dash, D., Khaulenbek, A., 2007: Present status of desertification in Mongolia, Geological Issues in Mongolia, 6, 63-73.
- MARCC, 2009, Mongolia: Assessment Report on Climate Change 2009, Ministry of Nature, Environment and Tourism, Mongolia.
- Mine Watch Mongolia, 2010: <http://en.minewatch.mn/issues/water/>
- MNEM, 2000, National Report on United Nations UN Convention to combat desertification. Fourth Conference of Parties 2000.
- Natsagdorj, L., Jugder, D., Chung Y. S., 2003: Analysis of dust storms observed in Mongolia during 1937-1999, Atmospheric Environment, 37, 1401-1411.
- Natsagdorj, L., 2012: Climate change and Desertification in Mongolia, Korea-Mongolia joint workshop on Asian dust mitigation strategy, Ulaanbaatar, July 23.

- NSOM, 2012a, Yearbook 1998–2008, Livestock 1997, 1999, 2002, 2003, 2006, 2009.
- NSOM, 2012b, Transport 1989–2008.
- NSOM, 2012c, Agriculture 1960–2010.
- Ochirbat, 2012, Soil erosion and Dust problem in Mongolia.
- Puntsag, J.T., 2010, Mongolia is rich in wildlife, Books in English, Ulaanbaatar, Mongolia.
- SDC, 2009, Coping with Desertification in Mongolia.
- Tamir Gaadamba, 2002, Combating Desertification in Mongolia, International Symposium on Combating Desertification Strategies for Yellow sand Prevention, Seoul, Korea.
- TsogtBaatar J, 2007, Forest rehabilitation in Mongolia, Lee D.K. (ed). Keep Asia Green Vol.2 Northeast Asia. IUFRO World Series Volume 20–2. Vienna.
- Tungalag R., 2012, A Field Guide to the Trees and Shrubs of Mongolia, Munkhiin Useg Publishing, Ulaanbaatar, Mongolia.
- Undarmaa L., 2011, Gobi–Altai Province, Guide book people head for Altai country, Ulaanbaatar.
- Ykhanbai H, 2010, Mongolia Forestry Outlook Study. Asia–Pacific Forestry Sector Outlook Study II, FAO, Bangkok
- Zambyn Batjargal, 1997, Desertification in Mongolia, RALA REPORT NO. 200.
- Zurag Züi KhKhK, 2004: Geographic Atlas of Mongolia, Administration of Land Affairs, Geodesy and Cartography, Ulaanbaatar.