

우리 나라 수자원의 근원-몬순

차은정 (기상연구소 예보연구실 기상연구사)

우리 나라는 전통적인 농업국가로서 예로부터 治水의 중요성이 강조되어 왔다. 근대 산업국가로 눈부시게 발전한 현재에도 수자원은 여러 분야에서 필수 자원이다 이렇게 중요한 수자원의 근원인 몬순과 우리 나라의 장마, 그리고 몬순과 밀접한 관련이 있는 엘니뇨 현상, 몬순의 예측에 대하여 소개한다.

1. 몬순의 정의와 인류사회에서 몬순이 차지하는 중요성 인식

몬순(monsoon)의 어원(語源)은 아라비아어의 계절을 뜻하는 'mausim' 또는 말레이시아의 'mosin'에서 유래된 것이고, 아라비아해에서 대략 6개월을 주기로 부는 북동풍과 남서풍을 뜻하였다. 그 후 대륙과 해양 사이에서 계절적으로 풍향을 달리하는 바람의 통칭으로 사용하게 되었다. 몬순의 정의는 여러 가지로 표현할 수 있으나, 한마디로 표현하면 계절에 따른 바람방향의 역전이라고 할 수 있다.

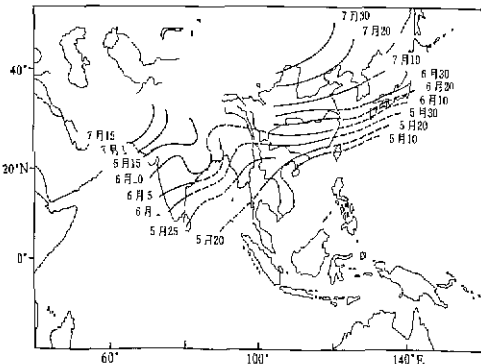


그림 1. 아시아 각국의 몬순 시작 시기

몬순에서 가장 중요한 것은 몬순 강수가 시작되는 시기와 강수량을 예상하는 것이다 왜냐하면 몬순 시작이 농업사회에서 파종시기와 밀접한 관계가 있기 때문이다. 몬순 시작은 갑자기 일어나는 것이 아니라서 특정 지역에서 몬순이 몇 월 몇 일에 시작되는가를 정확히 결정하기는 무척 어려운 일이다 그러나 긴 시간규모에서 보면, 계절변동이 뚜렷하게 나타난다. 또 강수량 변화만으로는 몬순 시작을 알기 어렵기 때문에, 일반적으로 바람의 변화, 기온, 강수량, 일조시간 그리고 운량 변화 등 여러 가지 기상요소를 종합하여 결정한다. 또한 몬순 시작은 지역에 따라 변동성이 대단히 크다 그림 1은 아시아 몬순지역의 몬순시작 시기로서 보통 인도차이나 반도는 5월 20일 경에, 인도 중부와 일본은 6월 중순경, 그리고 우리나라는 6월 하순경에 시작된다

몬순계(monsoon system)는 상호 작용하는 해양-대기-육지 결합계(coupled system)가 태양의 연변화에 따라 반응하는 거대한 순환체계라고 볼 수 있다. 몬순계를 결정하는 물리과정은 상당히 복잡하지만, 다음의 5개 요소가 몬순계를 지배하는 기본요소이다.

- ① 육지와 해양의 차등가열로 인한 기압경도력이 기본 힘이다.
- ② 지구자전효과 : 몬순은 지구 자전의 영향을 받을 정도로 큰 지구규모의 해풍이다.
- ③ 습윤과정에 따라 강수량과 강수대의 위치가 결정된다.
- ④ 지표면 특성 · 지표면 구성물질에 따라 수분함유량이 달라진다

- ⑤ 태양의 연변화와 바람에 의한 해양으로의 열전달 때문에 발생하는 적도 해수면의 변화가 중요한 요소이다.

문순지역의 인구는 전세계 인구의 60% 이상을 차지하고 있다. 이들의 삶은 문순의 변화에 의해 좌우된다고 해도 과언이 아니다. 문순 지역(아시아-호주, 서아프리카, 북남미 등지)은 세계 최대의 인구 밀집지역이며 가장 빠르게 인구가 증가하는 지역이기도 하다(그림 2.에 인구 밀도와 문순지역을 사각형으로 표시). 또한 문순지역은 대표적인 농업지대이다. 그러므로 신뢰할 만한 문순 예보는 이 지역뿐만 아니라 전세계의 경제에 매우 중요하다. 문순은 기상학자, 기후학자 그리고 해양학자들에게 흥미 있는 연구주제이고, 문순 예측 능력은 다음과 같은 이유에서 사회·경제 분야에 막대한 영향을 준다.

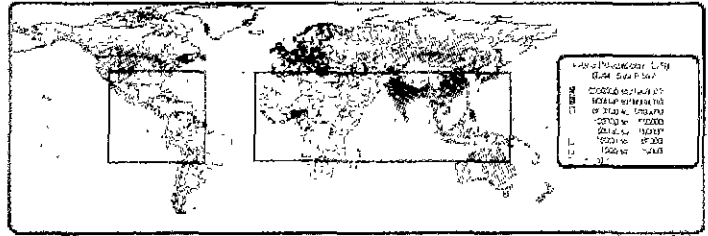


그림 2. 문순지역과 인구 밀도 분포 (붉은 색 : 높은 지역, 푸른 색 : 낮은 지역)

하고자 하는 것이 최대의 목표이고, 이 예측 결과를 문순과 관련된 정책 결정자와 예보 이용자가 이용할 수 있다. 예를 들면 문순이 평년보다 약할 경우 곡물 수입량과 수출량 예상, 홍수와 가뭄 통제, 질병 예방 등과 같은 문제에 대해 문순에 의한 피해를 최대한 완화시킬 수 있는 조치를 취할 수 있게 된다.

2. 우리 나라의 장마

아시아-호주, 서아프리카, 북남미 등 대표적인 문순지역에서 계절풍과 동반하여 주로 나타나는 현상은 건기와 우기의 변동이다. 건기는 겨울철 대륙 중앙으로부터 차고 건조하고 공기가, 우기는 여름철 해

- ① 충분한 태양복사와 강수량의 계절 변화는 문순 지역 농업의 성패에 중요한 요소이다.
- ② 농경사회는 문순지역에서 발전되었는데, 이는 농업의 필수요소인 일조시간과 강수량이 문순 지역에서 풍부하였기 때문이다.
- ③ 특정 해의 전체적인 문순 강도뿐만 아니라, 한 계절내의 문순 변동성을 예측하는 것도 중요하다.
- ④ 문순이 평년보다 빨리 또는 늦게 발생하거나, 강수량이 필요한 시기에 부족하게 되면 연강수량이 평년과 비슷하더라도 농사에 치명적인 영향을 줄 수 있다.
- ⑤ 홍수 또는 가뭄이 얼마나 오래 지속되는가 여부는 대단히 중요하며, 이는 지역사회에 직접적으로 영향을 준다. 문순이 늦게 시작되면 파종시기에 심각한 타격을 줄 수 있으며, 수확기의 지나친 강수량은 곡물수확에 대한 피해를 초래한다.

충분한 시간을 가지고 신뢰성이 높게 문순을 예측

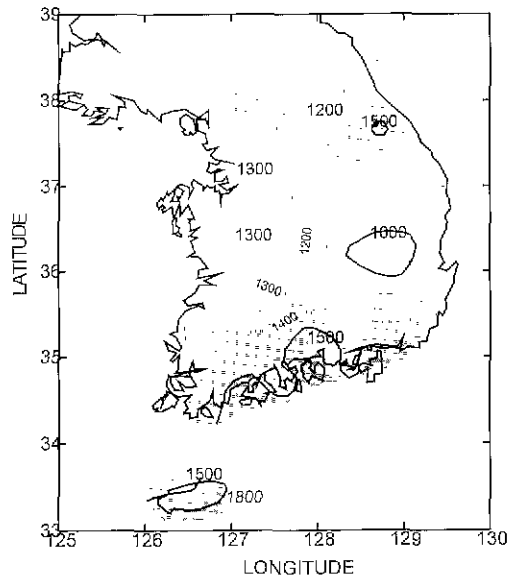


그림 3. 연강수량 분포도

표 1. 여름철, 겨울철 강수량(mm)과 연강수량에 대한 비율(%)

지점	6월	7월	8월	여름철	비율	12월	1월	2월	겨울철	비율
강릉	110.7	217.4	261.7	589.8	43	31.4	58.2	61.1	150.7	11
서울	133.8	369.1	293.9	796.8	58	17.7	22.9	24.6	65.2	4
대구	128.6	233.5	193.0	555.1	53	12.6	20.5	28.8	61.9	6
광주	182.6	283.3	235.9	701.8	51	26.5	38.6	46.6	111.7	8

표 2. 평년 장마 시작, 종료 시기 및 장마 기간 지속 일수와 장마 기간 강수량

지역	시작시기	종료시기	장마기간 지속일수	장마기간 강수량
제주	6월 20일	7월 18일	29	383.9
남부	6월 23일	7월 23일	31	337.1
중부	6월 26일	7월 25일	30	341.8

양으로부터 온난하고 습윤한 공기가 유입되는 것과 밀접한 관련이 있다. 아시아의 여름 및 겨울 몬순은 지구로 공급되는 태양 에너지의 분배 과정 중 발생하는 에너지와 물 순환에 매우 중요한 역할을 한다. 습윤 공기가 유입되어 일정 기간 동안 집중적으로 발생하는 동아시아의 여름 몬순을 우리 나라에서는 장마, 일본에서는 바이우(梅雨, Baiu), 중국에서는 메이유(梅雨, Meiyu)라고 한다.

우리 나라 강수 기록 중에서 가장 오래된 서울의 강수량 기록은, 1552년 이전은 승정원일기의 소설로 지금까지 전해지지 않지만 1770년 이후의 강수량 기록은 승정원일기에 충실히 기록되어 있어 세계에서 가장 우수한 관측 자료로 인정받고 있다. 서울의 225년간(1770~1994) 강수량을 분석해보면 1년간 강수량은 1257.2mm이며 표준편차가 369.5mm(한상복, 1996)이지만, 30년간(1961~1990) 강수량 평년값은 1년간 1369.8mm이며 표준편차가 343.5mm(기상청, 1991)이다. 그림 3.은 우리 나라 연강수량 분포도이다. 다우지역은 제주도, 남부 해안 지방, 강원도 산악지방 그리고 서울·경기지방이고 소우지역은 경상도 지방이다.

장마는 6월~8월 사이에 항상 존재하는 우리 나라 여름철 기후특성 중 하나이다 지역별로 차이는 있으나 이 기간내 강수량이 연강수량의 50% 정도를 차지하고(표 1.) 있고 연 강수량의 많고 적음을 좌우하기 때문에 우리 나라의 물순환에 중요한 역할을 한다

그러나 해에 따라 장마 시작과 종료 시기, 기간 및 강수량이 해마다 변동성이 크기 때문에 예측하기가 대단히 어렵다. 표 2.에 30년간(1961~1990년) 통계 처

리하여 구한 각 지역의 장마 시작, 종료, 기간 및 강수량이다. 연구자에 따라 차이는 있으나, 장마 시작은 6~7월에 강수현상이 3~4일간 계속될 때, 장마 종료는 장마 종료 후 7~8월에 강수현상이 3~4일간 멈추었을 때라고 정하는 데 이는 강수량보다는 강수현상의 연속성을 중요시하기 때문이다. 이것을 보다 자세하게 설명하면, 지역을 대표하는 9개 지점을 선정하고 이 지점을 제주도(제주, 서귀포), 남부지방(목포, 부산, 광주, 대구), 중부지방(대전, 서울, 강릉)으로 나누었다.

- ① 선정된 9개 지점에서 5일 이동평균 일조시간이 평년 이하로 감소 또는 평년 이상으로 증가할 때를 기준으로 장마 시작 또는 종료라고 볼 수 있는 5일 정도의 기간을 결정한다(일본에서는 12개 지점에 대하여 위의 기준을 적용한다)
- ② 이 기간에서 흐리고 비가 계속된 날로부터 장마 시작일을 결정하고, 맑은 날이 계속된 날로부터 장마 종료일을 결정한다
- ③ 이 기간내의 날씨 상황, 전국의 AWS(Automatic Weather Station, 자동기상관측장비, 일본에서는 AMeDAS 자료를 사용한다) 자료, 강수량 분포 등을 참고한다.
- ④ 이 요소들로써 결정하지 못할 때에는 1일 일조시간이 5시간 이하이고 1일 평균 운량이 8.5이상일 때를 장마 시작이라 하고, 일조시간이 5시간 이상이고 1일 평균 운량이 8.4이하일 때를 장마 종료라고 결정한다.

3. 몬순과 엘니뇨

집중호우에 의한 재해는 가장 빈번하게 발생하는

돌발적인 기상재해의 하나로서 인류 생존 뿐 만이 아니라 사회발전에 심각한 피해를 준다 매년 우리나라 각 지역에서도 호우에 의한 재해가 발생하여 큰 피해를 초래한다. 특히 1998년 7월 31일~8월 18일까지 기록적인 호우가 계속되었다. 삼성경제연구소에서 발간한 「기상재해의 경제학」에 의하면, 약 8조원(직접피해 1조 5,000여억원, 간접피해 6조원) 가량 7월말과 8월에 걸쳐 거의 20여일 동안 전국을 돌며 쏟아 부은 집중호우로 인한 경제적 손실이 발생하였다. 또한 1999년에도 7월 31일~8월 3일까지 집중호우로 인한 경기북부지역의 홍수 피해가 발생하였다.

1998년과 1999년은 전세계적으로 이상기상현상이 많이 발생하였는데, 이 원인을 '97/98년에 발생한 급세기 최고의 엘니뇨와 엘니뇨 소멸 후 연이어 발생한 1998년 라니냐 현상의 영향으로 보고 있다. 즉, 엘니뇨와 라니냐 발생에 의한 대기순환 변화에 의한 것으로 추측하고 있으나 아직까지도 역학과정과 물리과정으로 명쾌하게 설명되어지지 않고 있지만 현재 이에 대한 연구가 활발히 진행중이다.

관측 결과에 의하면 엘니뇨와 몬순은 서로 상호작용을 하는 것으로 알려져 있다. 많은 기상학자들은 특히 아시아 몬순 변동과 엘니뇨는 밀접한 관계를 맺고 있는 것을 지적하였다. 예를 들면, Mooley와 Shukla(1987), Yasunari(1990) 등은 여름철 인도의 강수량이 적은 해에 엘니뇨가 주로 발생한다고 하였고, Kodera와 Chiba(1989) 등은 엘니뇨의 시작을 의미하는 열대 서태평양의 혼합층 내의 수온 증가가 유라시아 대륙의 적설과 관련됨을 보였다. 또한 Meehl(1989)은 해양-대기 결합 모델을 이용하여 몬순의 준 2년 주기 진동과 엘니뇨와 관련성을 제시하였다. Tomita와 Yasunari(1993)은 몬순의 활동강도가 엘니뇨의 소멸과 관련됨을 보였다. 이 연구들은 아시아 여름 몬순 활동의 계절 순환과 경년 변동이 열대 태평양의 대기-해양 결합 시스템에 대하여 능동적인 역할을 한다고 보고되었다. 즉, 아시아 여

름 몬순이 평균 상태보다 약하면(강하면), 적도 동태평양에 아마도 인도양과 태평양 부분의 적도대를 따라서 동서 대기 순환의 조절을 통해 엘니뇨 형성에 좋은 일종의 비정상적인 대기-해양 시스템 상태가 유도되는 것 같다. 비록 이 엘니뇨-몬순 연결에서 강조된 물리 과정이 충분히 이해되지 않았지만, 유라시아 대륙과 주위의 두 해양(태평양과 인도양) 사이에서 이루어지는 열 대비의 계절적 연간 조절이 이 문제를 해결하는 실마리가 되는 것 같다.

전세계적으로 엘니뇨와 몬순 강수량에 대한 연구를 보면 아래와 같이 정리할 수 있다.

- ① 엘니뇨가 발생하면, 인도네시아와 뉴우기니아에서는 비가 적게 오고, 중부열대태평양에서 비가 많이 온다.
- ② 인도에서는 가뭄이 자주 발생하고 스리랑카에서는 홍수가 자주 발생한다.
- ③ 필리핀에서는 가뭄 발생 확률이 높다.
- ④ 중국은 1982년 양자강에서 큰 홍수가 발생하였는데, 이는 1982/83년 엘 니뇨에 의해 발생된 대기대순환의 변화 때문이라고 설명하였다.
- ⑤ 엘니뇨 해에 일본부근은 운량이 많아지고 강수량은 증가한다 또한 바이우 종료가 평년에 비

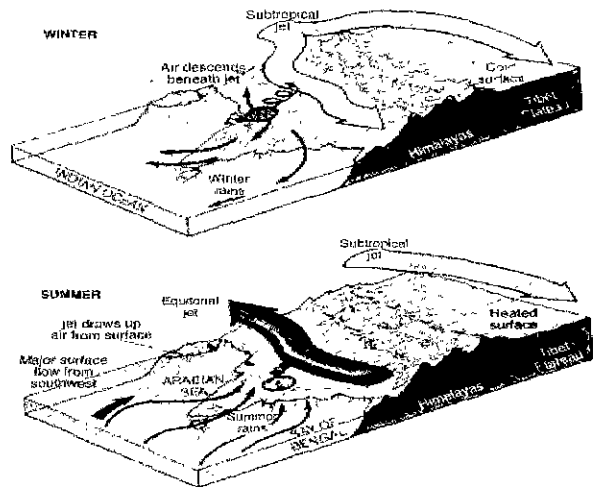


그림 4. 여름철, 겨울철 몬순 개념도

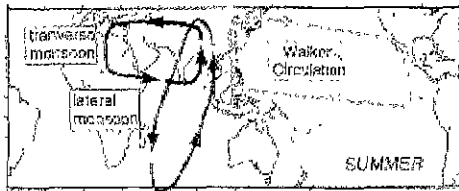
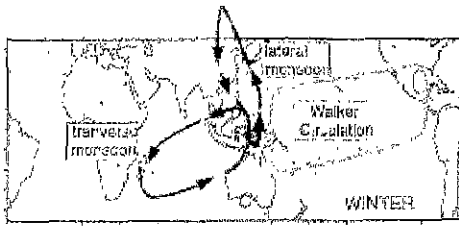


그림 5. 횡단 몬순-종단몬순-워커순환 관련 모식도 (엘니뇨 발생에 의하여 이순환들도 변화됨)

하여 상대적으로 늦어지고 집중호우 발생빈도가 증가하는 것으로 알려져 있다. 그 예로 1957년 7월과 1982년 7월에 일본의 각 지역에서 장기간 호우가 발생하였다고 보고하였다.

- ⑥ 엘니뇨 해에 우리 나라 강수량에 대해서는 계절별로 뚜렷한 경향성을 찾기 어렵지만, 장마 시작과 종료는 평년보다 늦어지고 강수량은 증가하는 경향이 있다.

광범위한 유라시아 대륙의 적설 역시 몬순-엘니뇨에 중요한 역할을 하는 요소이다. 유라시아의 적설과 인도의 여름철 강수 사이에 음의 상관성이 있다고 보고되었으며(Hahn과 Shukla, 1976), 티벳 고원에 평균보다 적설이 많은 경우, 인도의 몬순이 더 지연되고 약화되는 것이 발견되었다(Chen과 Yan). 또 유라시아 봄의 적설과 인도의 몬순 강수가 인도 남쪽 끝에서 북쪽까지 통과하는 몬순 기간과 관련성이 있다는 것이 밝혀졌다(Dey와 Kumar, 1982). 유라시아의 적설이 더 많아질수록 인도의 여름 몬순 기간이 더 길어지며 적설이 적으며 몬순 기간은 따라서 감소한다. 이러한 상호 관련성의 이유는 적설에 의한 지표 냉각 과정에서 찾을 수 있다. 적설이 많은 경우에는 기온이 낮아지고 평균 해면 기압을 증가시키며, 남아시아 지역에 형성된 고기압은 몬순 순환을 억제

한다. 반대로 유라시아의 적설이 빠르게 녹으면, 이 지역이 일사에 노출되어 지표가 가열된다 이에 따른 기온 상승과 풍부한 수증기는 몬순 순환을 더 강화시킨다.

4. 몬순의 모델링과 예측

수자원의 주요 원천인 몬순을 예측하고 몬순계를 모델링 하는 것은 기상학에서 아주 중요한 과제이다. 몬순 예측을 위하여 여러 가지 방법이 사용되었는데 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 그중 하나는 장기간 경험과 관측에서 얻은 관계식을 기본으로 한 통계적 방법이고 다른 하나는 수치모델에 의한 것이다. 이 두 가지 방법을 적절하게 병행하는 것이 효과적이다.

몬순은 과연 예측될 수 있는가? 예측할 수 있다면 예측정확도는 얼마나 될까? 간단히 말하면 현재까지는 통계적 방법이든 수치모델을 이용한 역학적 방법이든 몬순예측이 어렵다. 그 이유는 다음과 같은 점들이다

- (1) 몬순에 대하여 아직도 모르는 부분이 많다.

몬순은 해양-대기-지표의 결합계가 상호작용함에 따라 변화하는 시스템으로서 각각의 요소에 대한 지식이 절대 부족하다. 또한 엘니뇨/라니냐-몬순이 상호작용하는 것을 알고 있지만, 어떤 과정을 거쳐 얼마정도인지 정확히 밝혀지지 않고 있다.

- ① 몬순계는 무질서하며 예측에는 내재하는 한계성이 있다고 믿어진다. 몬순계에 내재하는 불안정성 때문에 몬순 예보 기간이 항상 열대해수면 온도 변화 기간보다 짧게 설정한다.
- ② 몬순계 자체의 변동성이 크다. 즉 해마다 몬순 시작-종료-강수량에 큰 차이가 있다.

- (2) 아직까지도 모델이 불완전하다.

- ① 몬순 모델링의 어려운 점은 남아시아 지역의 복잡한 지형 특성과 이로 인한 큰 가열차이 때문일 수 있다. 몬순지역의 이러한 특성은 현재 모델의 능력에 장애가 될 수 있다. 그 증거로 전

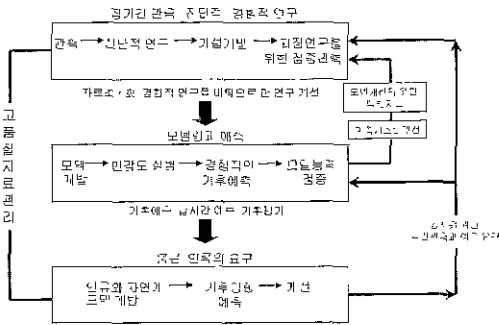


그림 6. 효과적인 문순예측시스템

지구 기후 모델에 들어 있는 고분해능(격자 간격이 작은) 모델이 저분해능 전구 모델에 비하여 남아시아 강수를 더 잘 모사하고 있다.

- ② 또한 아시아 여름 문순에는 적도상의 다른 지역보다 본질적으로 예측이 어려울 수밖에 없는 무엇이 내재되어 있어서, 문순지역이 적도의 다른 지역에 비하여 본질적으로 수치모델링 자체가 어려울 수도 있다.

(3) 문순지역의 자료가 절대적으로 부족하다.

적도 인도양의 자료 관측은 전 지구에서 가장 적고, 자료에 대한 신뢰도도 낮으며, 정기적으로 관측되지 않는다. 이러한 문제점은 문순지역에 위치한 국가들의 경제수준과 직결된다.

- ① 열대 태평양에서 실시한 집중관측프로그램 (Tropical Atmosphere Ocean : TAO

Array)이 인도양에는 없다.

- ② 문순을 연구하기 위해서는 해양-대기-지표 모두의 자료가 필요하다.

종합적인 문순 예측 시스템은 기후 예측을 하는 기상학자와 그 예측을 경제활동에 실제로 응용 및 적용하는 인류 공동체의 능동적인 상호작용을 필요하다. 그림 6은 이러한 상호작용을 도식적으로 보여준다.

- ① 문순 지역내의 중요 지점에서 장기간 시계열을 생산하기 위해 고품질의 관측이 이루어져야 하고, 이 관측자료는 네트워크를 통하여 전세계에서 수집된 자료와 조합하여 데이터베이스화한다.
- ② 문순계를 적절하게 예보하기 위하여 ①의 자료를 이용한 진단적, 경험적 연구를 한다.
- ③ 문순계의 물리과정을 이해하고, 예측 모델 성능을 개선하기 위한 문순 시스템의 특정 현상들을 조사하는 과정 (process)을 연구한다.
- ④ 해양-대기-육지 결합시스템을 수치모델링한다.
- ⑤ 전체적인 문순시스템 자료 관리-예측망을 구축하여 사용자에게 실시간으로 공급한다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부 지원으로 수행하는 중점국가연구개발사업(온실가스저감기술연구)의 일환으로 수행되었습니다. 🌐

〈참고 문헌〉

기상청(1991), 한국기후표 I, II.
 차은정, 전종갑, 정효상(1999), 엘니뇨/라니냐 해의 우리나라 기후 특성에 관한 연구, 한국기상학회지, Vol. 35, PP.98-117.
 차은정, 최명진, 오재호(2000), 1998년 여름철 이상기상 분석과 1997/98년 엘니뇨, 한국기상학회지(인쇄중).
 한상복(1996), 흑우기의 발명과 국가 관측망, 한수당 자연 환경 연구원, 부산, P.374.

村上多喜雄(1986), 몬soon(季節をもたらす風と雨), 東京堂出版, P.198
 P. J. Webster, V. O. Magaña, T. N. Palmer, J. Shukla, R. A. Tomas, M. Yanai, and T. Yasunari (1998). Monsoons' Processes, predictability, and the prospects for prediction. Journal of Geophysical Research, Vol. 103. PP.451-510.