

위성자료를 이용한 동아시아 지역의 에너지와 수문학적  
순환 연구

Satellite Study on Energy and Hydrological Cycle  
over East Asia

서울대학교

과학기술부

## 제 출 문

과학기술부 장관 귀하

본 보고서를 “위성자료를 이용한 동아시아 지역의 에너지와 수문학적 순환 연구”과제의 보고서로 제출합니다.

2003 . 7 .

주관연구기관명 : 서울대학교

주관연구책임자 : 손병주

연 구 원 : 서울대학교

김혜영 오현중 박성찬 정의석

기상연구소

정효상 신도식 국세정

동국대학교

김태황

보고서 초록

과제관리번호	M6-0011-00-0048	해당단계 연구기간	2000.9.1-2003.6.30	단계 구분	1단계(해당단계) / 1단계(총단계)
연구사업명	중 사업명	국제공동연구사업			
	세부사업명				
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	위성자료를 이용한 동아시아 지역의 에너지와 수문학적 순환 연구			
연구책임자	손 병 주	해당단계 참여연구원수	총 : 15 명 내부 : 6 명 외부 : 9 명	해당단계 연구비	정부: 124,000 천원 기업: 천원 계: 124,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	서울대학교 지구환경과학부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 미국	상대국연구기관명 : NASA Goddard Space Flight Center			
위탁연구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약				보고서 면수	83
<p>본 연구의 목표는 위성관측에서 얻어진 대기 물/에너지 수지 자료를 복원 또는 확보하며 이를 이용하여 수증기 수송벡터를 추출하는 알고리즘을 개발하고, 결과를 동아시아 몬순 지역에 적용하여 동아시아 몬순에 미치는 수증기원을 규명하는데 있다.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 적외자료와 마이크로파 자료를 이용하여 수문학적 파라미터를 복원하여 총수증기량 <math>\pm 4\text{kg/m}^2</math>, 강수량 <math>\pm 10\%</math>, 증발량 <math>\pm 15\text{W/m}^2</math> 이내의 복원자료를 확보하였다.</li> <li>• 물수지 자료를 이용한 수증기 수송 계산 알고리즘을 개발하였으며 관측에 근거한 수증기 수송 벡터를 얻었다.</li> <li>• 수증기 수송 전달 모델의 입력자료에 대한 민감도 조사와 모델특성을 파악하였다. 강수량과 증발량의 오차에 따른 수증기 수송량의 민감도를 파악하였으며, 10% 오차도에 의한 민감도를 조사하였다.</li> <li>• 주간(1주일) 규모의 수증기 수송 진단을 위해 모델을 개량하였다. 특히 주간 단위에서의 수증기 저장량의 크기를 비교하여 수송진단모델의 특성을 파악하고 모델을 재정립하였다.</li> <li>• 동아시아 몬순의 에너지 및 수문학적 특성을 규명하였다. 최소 7일 평균 수증기 수송장을 계산하여 30-60일 주기와 동아시아 몬순 관계를 규명하였다.</li> </ul>					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	위성, 강수량, 증발량, 수증기 수송, 동아시아 몬순			
	영 어	satellite, precipitation, evaporation, water vapor transport, East Asia monsoon			

## 요 약 문

### I. 제 목

위성자료를 이용한 동아시아 지역의 에너지와 수문학적 순환 연구

### II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 바람장의 3차원 분포자료 없이 수증기 저장항과 수증기속 발산항을 포함하는 전 지구 해양에서의 대기 물수지 복원에 이용할 수 있도록 위성자료만을 이용한 수증기 수송계산 알고리즘을 개발
2. ENSO 기간 중의 대기 물순환의 이상값 유지와 관련된 SST 강제역의 역할 및 이와 관련된 수증기 source 와 sink 에 대한 진단
3. 동아시아 지역 몬순 강수대의 형성에 필요한 수증기원 조사
4. 몬순의 진행과 관련하여 나타나는 수증기 수송장의 계절내 시그널을 조사하며, 얻어진 결과를 역학 및 열역학 변수와 관련지어 해석

### III. 연구개발의 내용 및 범위

1. 적외자료와 마이크로파 자료를 이용한 수문학적 파라미터 복원
2. 순수 위성 관측에 근거한 수증기 수송 계산 알고리즘 개발
3. 동아시아 여름철 몬순과 관련된 에너지와 수문학적 순환의 특성 조사
4. 수증기 수송장에 나타난 계절내 변화의 이해

### IV. 연구개발결과

1. 순수 위성 관측에 근거한 물수지 파라미터를 이용하여 전구 해양지역에서의 수증기 수송을 추출하는 알고리즘을 개발하였다.
2. 수증기 수송의 형태는 증발량의 공간적 분포보다는 국지성 경향이 짙은 강수량 자료에서 주로 결정되었다.
3. 98년 1-3월 엘니뇨기간과 99년 1-3월 라니냐기간 동안에 나타나는 수증기 수송의 주요 차이점은 전자가 남북으로 정렬된 순환인 반면 후자는 동서로 정렬된 수증기 순환이 나타났다.

4. 서태평양과 남중국해에서 강한 수증기 수렴대가 형성되는데, 이는 각각 인도양과 호주 북부 지역으로부터의 수증기 수송에 기인한 것으로 판단된다. 이러한 결과로부터 이 두 지역이 동아시아 여름 몬순을 유지하는 주요 수증기 공급 지역임을 확인하였다.
5. 수증기 수송장의 EOF 분석을 통한 공간 구조와 시계열의 결과로부터, 인도지역에서 서태평양으로 동진하는 계절내 진동을 확인하였다. 이는 수증기 수렴대의 중심이 동쪽으로 이동하는 것과 일치한다.
6. 기후학적 분석에서 나타난 수증기 수송의 주요 특징은 동아시아 몬순 지역에서의 북동진하는 진동이다. 이러한 북쪽 수송은 북태평양 고기압의 계절내 변화와 관련이 있음을 제시하였다.

#### V. 연구개발결과의 활용계획

1. 본 연구에서 얻어진 결과는 더 짧은 시간 주기와 고해상도의 자료를 얻을 수 있는 전구강우관측(GPM) 프로그램의 시작으로 더 자세한 수증기 수송 진단 목적을 위해 사용할 수 있다. 이러한 점에서 이 결과는 일기 예보 능력을 향상시키는데 활용될 수 있다.
2. 서울대학교 CES 모델에서 사용하는 수문학적 과정에 대한 더 나은 이해를 목적으로, 본 연구에서 얻어진 결과는 다양한 위성 및 지상 관측 자료와 함께 사용될 것이다. 모델 진단으로부터 얻어진 결과는 대기 대순환 모델의 향상에 공헌할 것이다.

# S U M M A R Y

## I. Title

Satellite study on energy and hydrological cycle over East Asia

## II. Objectives

1. Develop a purely satellite-based retrieval system using satellite derived water budget parameters, along with satellite-derived evaporation data that can be used to retrieve the atmospheric water budget over the global oceans, including the water vapor storage terms and the water vapor flux divergence term without requiring measurements of the vertical wind flux.
2. Diagnose the role of SST forcing in maintaining the anomalous atmospheric hydrological cycle during the ENSO period, and associated moisture source-sink conversion.
3. Examine water vapor source needed for forming the monsoon rainbelt over the East Asia.
4. Examine in the context of monsoonal progress, the intraseasonal signal imbedded on the water vapor transport field and interpret the obtaining results in conjunction with dynamic and thermodynamic variables.

## III. Contents and scope

1. Retrieval of hydrological parameters from infrared and microwave measurements
2. Algorithm development for water vapor transport calculation purely based on satellite measurements
3. Examination of characteristics of energy and hydrological cycle related to East Asian summer monsoon
4. Understanding of intraseasonal signal shown in the water vapor transport field.

#### IV. Results

1. We developed an algorithm to determine water vapor transport over the global oceans purely based on satellite observations of water budget parameters.
2. It is the difference properties of current precipitation data, more so than evaporation datasets, that largely control the difference properties of the final moisture transport solutions.
3. The main difference in water vapor transports between the '98 and '99 JFM El Niño and La Niña periods, is the former's largely meridionally-aligned circulation and the latter's largely zonally-aligned circulation.
4. There is a strong moisture convergence over the western Pacific and the South China Sea induced by water vapor transports from the Indian ocean and from the north of Australia, indicating that two regions are major water vapor source region for maintaining East Asian summer monsoon.
5. The spatial structures and the corresponding time-dependent amplitudes in the EOF analysis of water vapor transport field show an intraseasonal oscillation feature propagating eastward from the Indian to the western Pacific. This corresponds to the eastward moving moisture convergence center.
6. The main feature of moisture transports found in climatological analysis is the northeastward propagating oscillation in the East Asian monsoon region. It is suggested that such a northward transport is also related to the intraseasonal variation of the North Pacific high.

#### V. Future utilization of the results

1. The obtained results can further be used for diagnosing more detailed water vapor transport field when Global Precipitation Measurement (GPM)

program is launched because more frequent and higher resolution data can be obtained from the GPM mission. In that way, the results can be utilized for enhancing weather forecasting capability.

2. Aiming at better understanding of hydrological processes of the CES model at the Seoul National University, the obtained results will be used in conjunction with various satellite and in-situ measurements. Then, obtained results from model diagnosis will be actively incorporated into a general circulation model to improve the model performance.



# C O N T E N T S

Chapter 1. Synopsis of the study .....	17
Chapter 2. The state of the art .....	19
Chapter 3. Contents and results of the study .....	23
Section 1. Derived over-ocean water vapor transports from satellite-retrieved E-P datasets .....	23
1. Introduction .....	23
2. Methodology .....	25
3. Description of datasets .....	26
4. Properties of 7-year water vapor transport solution .....	27
5. Sensitivity of transport solutions to different E-P datasets .....	30
6. Differences between El Niño and La Niña transports .....	31
7. Conclusions .....	34
Section 2. Climatological intraseasonal variations of satellite-derived water vapor transports over the Asian summer monsoon area .....	48
1. Introduction .....	48
2. Methodology .....	49
3. Datasets .....	50
4. Climatology of water vapor transports .....	51
5. Validation of satellite-derived water vapor flux .....	53
6. Principal modes of intraseasonal variations of water vapor transport potential function and rainfall .....	53
7. Intraseasonal variations over the Indian and East Asian monsoon area .....	55
8. Conclusions .....	56

Chapter 4. Achievement and contribution to related fields .....66

Chapter 5. Future utilization of the obtained results .....72

Chapter 6. Science and technology information collected during the research .....73

Chapter 7. References .....74

## 목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요 .....	17
제 2 장 국내외 기술개발 현황 .....	19
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 .....	23
1 절. 위성-복원 E-P 자료로부터 유도된 해양에서의 수증기 수송 .....	23
1. 서론 .....	23
2. 방법 .....	25
3. 자료 .....	26
4. 7년 수증기 수송 결과 .....	27
5. 여러 E-P 자료들에 대한 수증기 수송 민감도 .....	30
6. 엘니뇨와 라니냐 기간의 수증기 수송의 차이 .....	31
7. 결론 .....	34
2 절. 위성자료를 이용한 아시아 몬순 지역 수증기 수송의 기후학적 계절내 변화 .....	48
1. 서론 .....	48
2. 방법 .....	49
3. 자료 .....	50
4. 13년 여름 기후 평균장 .....	51
5. 위성 자료로 유도된 수증기 플럭스 검증 .....	53
6. 주성분 모드 분석에 나타난 수증기 잠재 함수 및 강수량의 계절내 변화 .....	53
7. 인도 몬순 및 동아시아 몬순 지역에 나타난 기후학적 계절내 변화 .....	55
8. 결론 .....	56
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도 .....	66

제 5 장 연구개발결과의 활용계획 ..... 72

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 ..... 73

제 7 장 참고문헌 ..... 74

표 목차

Table 1. The global mean [E-P] biases. Units are  $W m^{-2}$ . ..... 36

그림 목차

Fig. 1: SSM/I-derived seven-year (1988–94) January–March mean (a) precipitation [P], (b) evaporation [E], (c) evaporation minus precipitation [E–P], and (d) divergent water vapor transport [ $Q_D$ , arrow] embedded with water vapor transport potential function [solid line] and water vapor flux divergence [div  $Q_D$ , shaded area]. The contour intervals of [P], [E], [E–P], and [ $\Phi$ ] are in  $2 \text{ mm day}^{-1}$ ,  $2 \text{ mm day}^{-1}$ ,  $3 \text{ mm day}^{-1}$ , and  $5.0 \times 10^7 \text{ kg s}^{-1}$ , respectively. In (d), heavily shaded and lightly shaded areas represent water vapor flux convergence and divergence greater than  $3.5 \text{ mm day}^{-1}$ , respectively. .... 37

Fig. 2: Same as in Fig. 1 but derived from NCEP reanalysis. The contour intervals of [P], [E], [E–P], and [ $\Phi$ ] are in  $2 \text{ mm day}^{-1}$ ,  $2 \text{ mm day}^{-1}$ ,  $3 \text{ mm day}^{-1}$ , and  $3.0 \times 10^7 \text{ kg s}^{-1}$ , respectively. In (d), heavily shaded and lightly shaded areas represent water vapor flux convergence and divergence greater than  $2.5 \text{ mm day}^{-1}$ , respectively. .... 39

Fig. 3: Seven-year (1988–94) January–March mean (a) meridional component of water vapor flux over the global oceans, and (b) zonal component averaged over the  $10^\circ\text{N}$ – $10^\circ\text{S}$  latitude band over ocean, obtained from 20 combinations from 4 sets of precipitation data (SSM/I, GPCP, NCEP, and ECMWF) and 5 sets of evaporation data (SSM/I, COADS, HOAPS, NCEP, and ECMWF). Symbols for the twenty combinations are given in the right side of the figure. .... 41

Fig. 4: Satellite-derived (a) evaporation minus precipitation [E–P], and (b) divergent water vapor transport [ $Q_D$ ] (arrow) with potential function of water vapor transport [ $\Phi$ ] (contour) for El Niño (JFM 1998). (c) and (d)

are the same as in (a) and (b) except but for La Niña (JFM 1999). The contour intervals of  $[E-P]$ , and  $[\Phi]$  are in  $3 \text{ mm day}^{-1}$ , and  $5.0 \times 10^7 \text{ kg s}^{-1}$ , respectively. In (b) and (d), heavily and lightly shaded areas represent water vapor flux convergence and divergence greater than  $3.5 \text{ mm day}^{-1}$ , respectively. .... 43

Fig. 5: Anomalies of divergent water vapor transport (arrow) with potential function anomalies (contour) derived from satellite measurements for (a) El Niño (JFM 1998) and (b) La Niña (JFM 1999). Contour The contour intervals of potential function anomalies are  $5.0 \times 10^7 \text{ kg s}^{-1}$ . Heavily and lightly shaded areas represent water vapor flux convergence and divergence greater than  $3.5 \text{ mm day}^{-1}$  for (a) El Niño, and greater than  $2 \text{ mm day}^{-1}$  for (b) La Niña. .... 45

Fig. 6: Sea surface temperature (SST) anomalies for (a) El Niño (JFM 1998) and (b) La Niña (JFM 1999). The contour interval is  $1^\circ\text{C}$  and shaded areas represent negative SST anomalies. .... 46

Fig. 7: Same as in Fig. 5 except derived from NCEP reanalysis. The contour intervals of potential function anomalies are  $2.0 \times 10^7 \text{ kg s}^{-1}$ . Heavily and lightly shaded areas represent water vapor flux convergence and divergence greater than  $2 \text{ mm day}^{-1}$  for both (a) El Niño, and (b) La Niña. .... 47

Fig. 8: SSM/I-derived thirteen-year (1988–2000) May–September mean (a) precipitation  $[P]$ , (b) evaporation  $[E]$ , (c) divergent water vapor transport  $[Q_D, \text{streamline}]$ , water vapor flux divergence  $[\text{div } Q_D, \text{shaded area}]$ , and magnitudes of  $Q_D$   $[|Q_D|, \text{contour}]$ . The contour intervals of  $[P]$ , and  $[E]$  are in  $2 \text{ mm day}^{-1}$ . In (c), heavily shaded and lightly

shaded areas represent water vapor flux convergence and divergence greater than  $5 \text{ mm day}^{-1}$ , respectively. ....58

Fig. 9: An inventory of sounding data during the GAME/SCSMEX IOPs. The Intensive Observing Period (IOP) of the South China Sea Monsoon Experiment (SCSMEX) is May 1 to July 31, in 1998. ....59

Fig. 10: Comparison between satellite-derived  $[E-P]$  and RAOB-derived  $[\text{div } Q_D]$  over NESA and SESA. (daily averaged data) ....60

Fig. 11: First two leading eigenvectors ((a), and (b)) and accompanying timeseries (c) obtained from the EOF analysis of 35–95 day bandpassed water vapor transport potential function  $[\Phi]$ . In (a) and (b), positive and negative values are denoted by solid and dashed lines, respectively. Units are arbitrary. ....61

Fig. 12: First modes of the EEOF of (a) 35–95 day bandpassed,  $10^\circ\text{S}$ – $10^\circ\text{N}$  averaged water vapor transport potential function  $[\Phi]$ , and (b) rainfall from an ensemble with 15 time-lagged pentads. In (a) and (b), positive and negative values are denoted by solid and dashed lines, respectively. (c) The timeseries associated with  $[\Phi]$  and rainfall, denoted by solid and dashed lines, respectively. Units are arbitrary. ....62

Fig. 13: The  $y$ - $t$  diagram of latitudinal locations of evaporation minus precipitation  $[E-P, \text{contour}]$ , and divergent water vapor transport  $[Q_D, \text{arrow}]$  averaged between (a)  $80^\circ\text{E}$  and  $90^\circ\text{E}$ , and (b)  $125^\circ\text{E}$  and  $135^\circ\text{E}$ . The contour interval of  $[E-P]$  is in  $0.5 \text{ mm day}^{-1}$ . ....63

Fig. 14: Same as in Fig. 13 except for NCEP 850hPa geopotential heights, and a



contour interval in 1 hPa. ....64

Fig. 15: Same as in Fig. 14 except for NCEP 850hPa wind fields (streamline). 65

## 제 1 장 연구개발과제의 개요

현재 지구상의 악기상 감시 및 예보는 주로 종관 기상 관측체계를 이용한 기상관측 및 이를 이용한 예보 시스템에 의존하고 있다. 종관기상 관측체계에 의존하는 기상감시 및 예보는 정확한 예보에 의한 기상재해 예방에는 관측의 한계로 상당한 어려움과 한계를 보이고 있다. 위성자료는 이러한 한계를 극복할 수 있는 균질한 공간적 관측과 좀더 조밀한 시간의 관측을 제공하고 있다. 특히 최근 위성 탑재 센서의 다양화와 공간 분해능의 개선, 자료추출 알고리즘의 개발로 위성자료의 활용은 날로 증가하고 있다. 위성 관측자료는 태풍, 집중호우, 홍수 등의 악기상 현상 감시 및 예측과 기상재해의 경감에 충분히 활용될 것이며, 한반도 기상/기후 변화에 영향을 미칠 것으로 추정되는 적도의 엘니뇨현상, 티벳지역 빙하의 변화, 중국북부의 사막화, 동북아 지역의 복사에너지, 물 수지와 구름 분포 등의 다방면에 걸쳐 대기감시에 유용하게 활용될 것이다. 이러한 위성자료의 예보 및 기후감시에의 활용은 궁극적으로 기상재해 저감을 가져와 국가의 경쟁력과 복지 증진으로 연결될 것이다.

어느 국지지역의 대기환경변화를 전체 지구-대기계와 연관된 현상으로 볼 때 한반도 지역에서의 변화는 전구 규모의 기후 및 환경 변화 (예를 들어 지구온난화, 엘니뇨현상, 티벳 지역 빙하의 변화, 중국북부의 사막화 등)와 밀접하게 연관되어 나타난다고 할 수 있다. 따라서 한반도 기후변화를 이해하고 예측하기 위해서는 전지구적 기후 및 환경변화에 대한 감시 및 분석이 요구된다. 특히 우주관측 응용분야는 선진국이나 개발도상국 모두 전구변화 관측으로 향하고 있다. 베를린 기후협약 다자간 회의에서도 나타났듯이 전지구 기후변화 관측은 위성관측 기술의 핵심이 되어야 할 부분이다.

지구온난화 등과 같은 원인에 의해 발생하는 기후변화는 이상기상을 일으킬 뿐만 아니라 수자원 이용에도 심각한 변화를 야기하고 있다. 이를 반영하여 21세기는 종종 "물의 세기 (Century of Water)"라고 일컬어진다. 이러한 기후변화는 지역적 특성이 강한 동아시아 지역에서의 집중호우, 가뭄과 같은 기후 변화를 유발 할 수 있으며, 에너지 순환의 변화는 수자원의 원천이 되는 수문학적 순환의 변화에도 지대한 영향을 미친다. 시공간적으로 동아시아 지역, 특히 해양지역에서 유일한 관측의 대안인 지구 관측 위성과 기상위성 관측으로부터 에너지 순환과 수문학적 순환을 밝히고 이들 순환 변화에 따라 나타나는 기상과 기후 특성을 진단하며, 결과를 이들 순환 예측에 응용하여 기상재해 경감과 국제적 기후변화 대책에 기여하는데 그 필요성이 대두되고 있다.

위성자료를 이용한 기상분석 능력 향상, 기후변화에 의한 식생상태 등에 미치는 영향 파악, 악기상 예보에의 응용 등, 우리 나라의 자체 기술에 의한 기상정보 및 기후예측 기술 축

적은 전지구 대기, 해양 및 수문 연구에 크게 공헌할 것이다. 또한 위성관측은 지구기후 변화와 관련되어 나타날 수 있는 생태계 변화 및 수자원 위기에 대한 장기적인 대책 수립을 위한 기본자료를 제공 할 수 있다. 1999년 12월 발사된 다목적 실용위성(KOMPSAT)으로 위성 탐사 자료 응용기술 개발과 자료 및 활용 기반 구축이 더없이 절실하다. 지구 환경 재해, 자원고갈 등의 심각한 환경파괴로 지구시스템 연구에 원격탐사 기술을 응용한 재해 방지 및 감시 시스템의 필요성이 대두되고 있기 때문이다. 지구관측 위성정보 이용 기술은 2000년대의 최첨단 핵심 국민복지 기술로 인식되고 있으며, 각국의 산업생산성/국제 경쟁력 제고를 위한 정보수집·의사결정 시스템의 자동화 기술 개발이 치열하다. 다목적 실용위성 계열 국내 위성사업의 추진에 따라 위성 탐사 자료의 실질적 이용 기술 개발을 위한 위성 원격탐사 연구기반 확보가 시급하다.

위성분야의 연구는 경제산업적 가치 창출에서도 기여하는바가 크다. 정확한 일기예보, 특히 대규모 기상현상인 장마와 연관되어 나타나는 악기상 예보의 직·간접적인 가치는 엄청난 화폐단위로 환산하기 어렵다. 예를 들어 1998년의 집중호우로 인해 1,022명의 인명과 1조 1,825억원의 재산피해가 발생했다. 위성자료를 이용한 동아시아 몬순과 같은 대규모 기상현상의 이해는 보다 나은 기상예측 시스템 구축을 유도하고 이를 통해 기상재해에 의한 인명과 경제 손실을 경감시킬 수 있을 것이다. 따라서 국내 정보산업 분야 첨단 기술이 선진국 수준으로 급부상하고 있는 만큼 컴퓨터 응용 기술의 복합체인 원격탐사 기술의 국제 수준으로의 향상에 대한 전망은 밝다. 국내 우주과학기술은 국민 복지에 직접적으로 기여하는 첨단 미래 산업의 핵심분야로 부각되고 선진국과 경쟁 가능한 수준에 도달하게 될 것이다.

또한 근년에는 지구온난화 또는 전 세계적 기후변화가 단지 기상만의 문제가 아니라 세계무역기구나 환경단체를 통해 경제적인 압력으로까지 확대되고 있는 실정이다. 그러므로 국내 기술에 의해 한반도를 포함한 동아시아 에너지 및 수문학적 순환연구 감시가 이루어진다면 지구환경변화에 따른 국제적 압력에 우리의 의견을 과학적으로 입증하고 대처하는데 크게 이바지 할 것이며, 산업과 무역분야에서도 국가 경쟁력을 향상시킬 것이다.

이 연구에서는 미 군사기상위성프로그램 (DMSP)에 탑재된 마이크로파 관측센서인 SSM/I (Special Sensor for Microwave/Imager) 자료를 이용하여 동아시아 지역에서 동아시아 지역에서 대기 물수지 성분인 총수증기량, 강수량, 증발량을 복원하며, 이들 자료로부터 동아시아 수증기원을 규명할 수 있는 수증기 수송벡터 산출 알고리즘을 개발한다. 계산된 수증기 수송벡터 장을 사용하여 물수지에 나타나는 북태평양 고기압의 팽창/수축과 장마와의 관계 파악, 동아시아 몬순지역에서 물수지와 복사수지 사이의 상호작용, 20-30일, 40-50일 주기의 변동성과 물/에너지 수지와 몬순순환 사이의 관계를 규명한다.

## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

### 1절. 위성관련연구

#### 국 내

- 1999년 12월 다목적 위성 아리랑 1호 발사로 우리나라는 위성 보유국이 되었음.
- 기상청은 극궤도 위성 및 정지위성 관측자료 수신 및 처리분석 시스템을 가동하고 기상예보를 위해 각종 위성 영상 자료 지원.
- 위성자료를 이용한 동아시아 지역의 에너지 및 수문학적 순환 연구는 동아시아 지역에서 발생하는 이상기상과 관련하여 주요 관심사의 하나임.
- 최근 이 분야에서 연구활동이 활발해지고 있으나, 위성 관측 자료 확보의 곤란과 인식 부족으로 매우 미흡한 실정임.
- 동아시아 몬순의 수증기원 규명은 대기과학 분야의 오랜 관심사임.
- 2008년 통신해양기상위성 발사예정이며 기상분야의 원격탐사연구가 활발히 진행중임. 본격적인 기상위성시대에 진입예정.

#### 국 외

- 유럽 공동체가 발사한 ERS-1과 MSG (Meteosat Second Generation)의 지구관측자료를 이용하여 기상관측분석과 예보에 사용하고 있으며, 특히 NOAA위성을 이용한 대기의 수직구조 및 수치예보의 응용에 현재 연구를 집중하고 있음.
- 1998년 NASA와 일본의 합작에 의한 TRMM (Tropical Rainfall Measurement Mission)위성의 발사로 강수량을 포함한 대기 수분 변수의 보다 정교한 관측이 이루어짐.
- NASA의 전지구관측시스템 (Earth Observing System) 위성 Terra가 2000년 1월 발사되어 지구 관측을 수행하고 있으며 일본은 '96년도에 선진 지구관측시스템 (Advanced Earth Observing System)을 발사했음.
- Aqua 발사  
NASA의 최신의 전지구관측시스템 (Earth Observing System, EOS) 위성 Aqua는 2002년 5월 4일 토요일 아침에 성공적으로 발사되었다. Aqua는 지구의 물 순환과 그 환경을 보다 과학적으로 이해하려고 제작되었다. Aqua 위성의 발사로 지구를 이해하

고 보호하는데 도움을 주는 NASA의 계획을 지원하는데 매우 중요한 역할을 담당하게 됨.

- ADEOS II 발사

ADEOS II는 전 지구환경을 관측하는 위성으로 전 지구적 관측 자료를 제공할 것이다. ADEOS II 위성은 2002년 12월 14일에 다네가시마 우주센터에서 발사되었다. 발사후에, ADEOS II 위성은 “Midori II”라는 별칭을 얻게 되었다. 이 위성의 무게는 3.7톤이며, 3년에서 5년 정도의 운행계획을 가지고 있다.

- 2008년 발사예정인 GPM (Global Precipitation Measurements) 위성은 1대의 핵심위성과 8대의 함대위성으로 구성되어 전 지구에서 마이크로파를 사용한 회도 3시간 간격의 정확한 강수량 추정이 가능. 이의 예보에의 이용효과는 매우 지대할 것으로 예측됨.
- 일본과 중국은 최근 동아시아 지역에서의 에너지 및 물수지에 많은 관심을 가지고 GAME과 같은 실험을 직접 주도하고 있음.
- 미국과 ECMWF는 전세계 에너지 및 물 순환에 관심을 갖고 있으나, 동아시아문제에 대해서는 상대적으로 일본과 중국에 비해 관심도가 낮음. 일본과 중국은 동아시아 몬순과 관련한 Baiu, Mei-yu에 관심이 있으나 우리 나라의 장마의 특성에 대해서는 상대적으로 관심이 부족함.

## 2절. 강수량관측 연구동향

강수량관련연구 특히 전구강우관측 (GPM) 계획에 대해 요약 보고한다.

### 국 내

- GMS 정지기상위성을 이용한 강수지수 산출 (기상청, 서울대), 기상연구소 중심의 TRMM 자료의 활용연구수행.
- 기상연구소를 중심으로 마이크로파 위성관측 (TRMM, AMSR)을 이용한 태풍 중심결정 연구 등의 활용연구수행.
- 최근 마이크로파 관측 자료로부터 추정 강수량의 자료동화가 많은 예보분야의 많은 관심을 불러일으키나 시공간 해상도의 부족 등으로 시도가 거의 없는 편임. 반면 레이더 자료 동화의 노력이 있었으나 이의 결과는 검증이 되지 않은 상태임.
- 강수량 추정은 물 부족 국가로 전략한 우리나라에서 수자원활용측면에서 매우 중요한 관심사의 하나임.

국내의 관심을 반영하는 강수관측 및 활용, 특히 GPM에 관한 국내의 발전상황은 다음과 같다.

- 관측범위가 확장된 GPM 사업을 2001년 가을기상학회 초청강연에서 국내 소개 (NASA/GSFC E. Smith).
- 2002년 NASA/GPM 팀의 방한 및 이에 따른 공동연구에 대한 필요성 제기.
- 국내학자의 GPM 국제 Workshop 참석과 국제적 공동연구를 위한 적극적인 의견 개진.
- 2002년 10월 한미과학기술협의회 NASA 측 의제로 한국의 GPM 사업 참가를 3분야 (우연: 탑재체 개발참여, 기상청: 검보정 및 자료 활용, 대학: 기초연구)에 공식 요청하였으며 이에 근거한 한-미간 MOU 체결.
- 2002년 11월 한미과학기술협의회 회의 결과에 따른 과학기술부의 후속조치 파악.
- 2002년 11월 항공우주연구소 - NASA 간 발사체 제공 및 공동개발 합의.
- 2003년 6월 NASA 기술자 항우연 방문 위성본체 시험

## 국 외

국외에서는 1990년대 초반부터 DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) 위성에 탑재한 SSM/I 마이크로파 관측을 이용한 강수량 추정과 이를 이용한 수문변화 연구, 나아가 수치모델에 입력 자료로 사용하는 자료동화 등 일기/기후분야에서 지난 10년간 눈부신 발전이 있었다. 이후 TRMM 위성의 성공적인 발사와 훌륭한 업적을 연장하고 확대하는 GPM에 대한 계획이 2002년에 수립되었다. 2008년도에 발사할 GPM 프로그램은 지구에서 3시간 간격의 TRMM 관측치에 상응 또는 우월한 수준의 강수추정을 계획하고 있으며, 현재 formulation 단계에 있다. 또한 Aqua, ADEOS-II (Advanced Earth Observing Satellite II) 위성들과 같은 마이크로파 복사계를 탑재한 여러 위성들의 조합 관측이 실시될 것이다. 현재부터 2008년까지의 기간은 GPM 시대로 가는 교량 역할을 할 것이며 공간과 시간영역에서 좀더 세밀한 해상도를 갖는 자료를 제공하게 된다. 각국의 발전상황은 다음과 같다.

- 1997년 NASA와 일본에 의한 TRMM 위성의 발사로 강수량을 포함한 대기 수문 변수의 관측이 이루어짐.
- NASA의 전지구관측시스템 (Earth Observing System) 위성 Aqua의 발사와 마이크로파에 의한 대기 수문변수 추정.

- 2002년 마이크로파를 사용한 3시간 간격의 강수량 추정을 목적으로 한 GPM 위성계 획을 확정하였으며, 현재는 formulation 단계임.

## 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

### 1 절. 위성-복원 E-P 자료로부터 유도된 해양에서의 수증기 수송

#### 1. 서론

대기의 물수지 연구에 있어서 가장 중요한 문제 중의 하나는, 대기 순환계에서 잠열 방출을 통한 열의 공간적인 분포를 결정짓는 수렴/발산과 관련된 수증기 수송의 역할이다. 그러한 열의 공간적인 분포는 특히, 적도지역에서 대기 순환을 유도하는 가장 주된 힘이며, 수증기 수송에 대한 우리의 지식은 기후 시스템을 더 잘 이해하게 할 것이다. 그러나 우리의 지식은 수증기 수송의 편차 또는 오차에 의해 만들어지는 평균적인 또는 극한 기후, 특히, 대규모의 가뭄, 홍수와 관련된 기후에 대한 범위를 측정하는 데 있어서 만족스러운 단계가 아니다. 그런 극한 기후의 중요한 예로서는 적도 지역에서 강수량(P)뿐만 아니라 증발량(E)의 경년변동을 가지는 엘니뇨와 남방진동(ENSO)이다. 본 연구에서는 물균형 가정을 기본으로 하여 수증기 수송에 대한 Chen et al. (1988)과 열 수송 계산에 대한 Sohn and Smith (1992, 1993)의 방법을 적용하고 위성에서 유도된 [E-P] 장으로부터 수증기 수송을 진단하고자 한다.

전 지구적인 수문학적 순환에서 수증기 수송의 역할에 대한 우리의 이해는 대기의 수문학적 자료 관측의 부재 특히, 전통적으로 관측이 부족한 해양지역 때문에 폭넓게 완성되지 않았다. 전통적인 관측이 수증기 수송의 특징과 거기에 관계된 물수지를 진단하는데 매우 유용함에도 불구하고(예를 들어, McBride et al., 1989), 지금까지 전 지구적으로 경년 오차를 일으키는 특별한 기후 사건에 대한 수증기 수송을 측정하는데 있어서는 매우 많은 불확실성이 존재한다. 전 지구적인 수증기 수송에 대한 장기간의 통계 대신에, 역학적이고 수문학적인 변수의 전통적인 측정에 기초하여 단지 기후학적인 의미에서 문서들은 기록하고 있다(Rosen et al., 1979; Peixoto and Oort, 1983). 그러므로 SST와 대류 사이의 관계를 설명한 연구(예를 들어, Webster, 1981; Lindzen and Nigam, 1987)에서 언급된 것처럼 따뜻한 SST 지역에서 수증기 수렴을 기대할 수 있음에도 불구하고 엘니뇨 기간 동안에 따뜻한 SST에 관계된 수증기 수송의 특징을 정량적으로 조사하는 것은 불가능 할지도 모른다. 게다가 라니냐 기간 동안에 찬 바다로부터 그 주위로 발생하는 수증기 수송을 평가하는데 라디오존데 관측자료를 사용하는 것은 더욱 문제가 된다. 그러므로 우리의 연구 동기는 시공간적으로 균일한 위성 자료를 이용하여 해양에서의 수증기 수송의 질을 개량하는 것이다.

반면, 대기의 수증기 수송에 대한 여러 연구는 연직으로 적분된 총 평균 수분 플럭스에



의해 관측된 수증기 자료의 동화로부터 전 지구적인 분석을 수행하였다(예를 들어, Trenberth and Guillemot, 1995; Mo and Higgins, 1996; Trenberth and Guillemot, 1998; Cohen et al., 2000; Roads et al., 2002). 이에 얻어진 결과들이 잘 알려진 기후 특징을 설명한다 할지라도, 이 방법은 모델에서 사용된 수분 역학이 현실적이고 정확하다는 가정에 기초해야 한다. Chen and Pfaendtner (1993)는 위성에서 유도된 강수량과 모델 분석으로부터 수증기 플럭스 발산을 조합하여 증발량을 나머지로 추정했다. 기후학적으로 알려진 증발량과 일반적으로 비슷한 형태를 보임에도 불구하고, 상당한 차이점들이 존재한다. 전 지구적인 수문학적 순환에서 불확실성을 줄이기 위해 모델 접근 개량이 필요함을 나타내주는 그들의 그림 1과 2를 보라. 이러한 결과들은 NCAR CCM2 모델에서 두 가지 다른 수증기 수송 방법에 의해 유도된 물수지에서도 상당한 차이가 있음을 보여주었고, 재분석 자료로부터 얻어진 대기의 수송은 미국의 강 유역에 대해 유속 자료로부터 유추한 물 균형을 분석하는데 부족함을 보여주는 강 유역에 대한 물 수지 연구(Roads et al., 1994; Gutowski et al., 1997; Roads et al., 2002)를 포함하는 Nanjundiah (2000)의 최근 연구와 일치한다.

위에서 언급된 차이들은 위성으로부터 유도된 물수지 자료로부터 수증기의 수평적인 발산을 유도하는 간접적인 계산 방법을 사용하는 동기가 된다. 전통적인 관측과 모델 재분석 접근과는 달리, DMSP 위성에 탑재된 SSM/I와 TMI 같은 수동 마이크로파 관측을 이용하는 최근의 방법은 수증기 수송을 포함하는 대기의 물수지를 연구하는데 좋은 기회를 제공한다. 이것은 위성이 현재 전 지구적인 영역에서 지표 근처의 바람장과 지표 습도, 잠열속을 계산하는데 필수적인 해수면온도 뿐 아니라 수증기, 강수량 같은 다양한 물수지 변수들을 일정한 질과 높은 시간 주기를 가지고 측정할 수 있기 때문이다. 이러한 것들 중에 몇몇은 전통적인 선박 관측으로부터는 얻기 힘들다. 그러므로 전 지구적인 해양지역에서 순수하게 위성에 기초한 물수지를 얻을 수 있고, 본질적으로 수증기 수송을 포함하는 중요한 물수지 요소들의 대부분을 얻을 수 있다. 하지만, 위성을 이용한 물수지 자료의 정확도는 물수지를 정량적으로 이해하는데 있어서 여전히 문제가 될지도 모른다. 예를 들어 마이크로파에 기초한 강수 추정에 있어서 상당한 불일치의 경우이다(Smith et al. (1998), and Kummerow et al. (2000)). P와 E의 불확실한 값에 의해 영향을 받을 가능성은 5장의 민감도 조사에서 언급될 것이다.

본 연구에서 우리는 바람과 습도의 3차원 정보 없이 위에서 언급한 위성으로부터 유도된 물수지 변수들을 사용하여 전 지구적인 해양지역에 대한 수증기 수송을 진단하는 방법을 개량시킨다. 개량된 방법은 대규모 수증기 수송의 장기간 특징의 진단에 적용될 것이다(본 연구에서는 7년간(1988-94) 1-3월 평균 기후값 사용). 그때 얻어진 7년 평균 기후값은 적도지

역에 대한 극한 기후, 특히 엘니뇨와 라니냐에서 형성된 수송의 특징을 조사하기 위한 비교 수송장으로 사용될 것이다. 이것을 하는데 있어서 우리는 1997/98 엘니뇨와 1999/2000 라니냐를 나타내기 위해서 1998년과 1999년의 1월-3월의 기간을 조사하였다.

본 연구의 2장은 수증기 수송을 풀기 위한 방법을 설명하고, 3장은 연구에 사용된 자료들을 설명한다. 4장은 NCEP 재분석자료의 결과와 함께 SSM/I로부터 유도된 강수와 증발량으로부터 추정된 수증기 수송의 7년 1-3월 평균 기후값을 구성하는 연구 결과를 보여준다. 선택된 [E-P] 장에 대한 수증기 수송의 민감도는 5장에서 논의되고, ENSO 시기에 대한 수송장과 거기에 수반된 SST 편차 사이의 관계를 포함하는 논의가 6장에, 끝으로 결론이 있다.

## 2. 방법

주어진 공기 기둥에 대해 얻어지는 수분의 평형은 다음의 방정식으로 표현될 수 있다. :

$$\frac{\partial(W+W_c)}{\partial t} + \text{div}(\mathbf{Q} + \mathbf{Q}_c) = E - P \quad (1)$$

여기서의  $W+W_c$  와  $\mathbf{Q}+\mathbf{Q}_c$  는 기둥에서 적분된 총 수분 함유량과 수평 수분속 벡터로써, 다음과 같이 주어진다. :

$$W + W_c = \int_0^{p_0} (q + q_l) \frac{dp}{g} \quad (2)$$

$$\mathbf{Q} + \mathbf{Q}_c = \int_0^{p_0} (q + q_l) \mathbf{V} \frac{dp}{g} \quad (3)$$

여기서의  $q$ 는 비습,  $q_l$ 는 액체상 물의 혼합비,  $\mathbf{V}$ 는 수평 바람 벡터이다. 식 (1)에서  $E$  와  $P$  는 증발량과 강수량을 나타내며, 아래 첨자 'c' 는 수증기가 액체와 얼음으로 응결된 상태를 나타낸다.

보통 응결로 인해 나타나는 항은 작으며, 응결한 구름의 수평 발산은 무시될 수 있다. 따라서 식 (1)은 특정 시간 간격에 대해 다음과 같이 간단하게 표현될 수 있다. :

$$\left\langle \frac{\partial(W+W_c)}{\partial t} \right\rangle + \langle \text{div}\mathbf{Q} \rangle = \langle E - P \rangle \quad (4)$$

식 (4)가 관심을 갖고 있는 특정 영역에 대해 적분되면, 시공간으로 평균된 수분 평형 방정식이 얻어진다. 즉 :

$$\left[ \frac{\partial(W+W_c)}{\partial t} \right] + [\text{div}\mathbf{Q}] = [E - P] \quad (5)$$

여기서의 괄호는 주어진 면적  $A$ 에 대한 공간 평균을 나타내는 기호이다. :

$$[X] = \frac{1}{A} \int \langle X \rangle dA \quad (6)$$

지금까지 일반적으로, 큰 규모의 수증기 수송량  $[Q]$ 는 평균 운동과 에디 운동으로 표현되는 수송과정에서의 대기 순환 통계로부터 직접 구해진다. 따라서 전 지구에서의 삼차원적 평균, 에디 수송항에 대한 자세하고 정확한 계산이 필요하다. 특히, 해양에서의 체계적으로 분포된 기상 변수 관측의 부족은, 물 순환에서의 수증기 수송과 관련된 사실과 결과들에 대한 이해를 어렵게 한다. 이러한 이유로, 우리는 가강수량과 응결량의 변화율이 충분히 긴 시간에 대해 작다고 가정하여, 수평 수증기 발산이 증발량에서 강수량을 뺀  $[E-P]$  와 평형을 이룬다는 간접적 계산 방법을 이용한다. 즉 :

$$[divQ] = [E-P] \quad (7)$$

본 연구에서는 Rosen et al. (1979), Chen (1985), 그리고 Sohn and Smith (1992) 에서와 같이, 수증기 수송 잠재 함수( $\Phi$ )를 도입하고, 수증기 수송을 회전성분( $Q_R$ )과 발산성분( $Q_D$ )으로 나눔으로써, 수증기 수송량에 대해 풀게 된다. 즉 :

$$divQ = [E-P] = -\nabla^2\Phi \quad (8)$$

$$[Q_D] = -\nabla\Phi \quad (9)$$

식 (8)과 (9)는 스펙트럼 방법을 사용하여 전구의 영역에 대해 푼 것이다. 큰 규모의 대기 순환은 본질적으로 비발산이고, 따라서 큰 규모의 수증기 수송은 수증기 수송의 비발산성분에 의해 주로 설명되므로, 식 (8)과 (9)를 사용하는 접근 방식이 생성과 소멸 지역을 직접적으로 연결시키는 물 순환을 살펴보는 데 좀 더 알맞을 것이다. 예를 들어, 이러한 접근으로부터 얻어진 수송 패턴은 국지적 해들리 순환, 워커 순환과 관련된 수증기 수송, 그리고 그것들의 경년 변화를 잘 표현 할 수 있다.

### 3. 자료

식 (8)과 (9)를 잠재 함수와 그것과 관련된 발산 수송 벡터에 대해 풀기 위해서는 증발량에서 강수량을 뺀,  $[E-P]$ 의 전구 분포가 필요하다. 우리는 목적에 따라, 다양한 위성자료와 재분석 자료를 사용한다.

첫 번째로, 평균 수송의 기후학적인 면에 대해 살펴보기 위해서, SSM/I 관측(Wentz and Spencer, 1998) 으로부터 7년간의(1988-94) 1-3월 강수 자료를 사용하였다(자료에 대한 자세한 설명은 <http://www.ssmi.com> 사이트를 참고). 증발량의 자료는 S. Chou에 의해 개발된, 부피 공기 역학 공식에 대해 잠열, 현열, 운동량속과 함께 반복적으로 안정도에 의존하는 수송 계수를 푸는 알고리즘에 기초하여 얻어진 S. Chou의 산출물이다. SSM/I 자료가 주로 증

발량 복원에 이용되기 때문에, Chou의 산출물을 SSM/I 증발량으로 선택하였다. 또한, 위성으로부터 구해진 7년 평균 수송량을 재분석 자료로부터 구해진 것과 비교하기 위해, 강수량과 증발량 자료는 NCEP 재분석으로부터 얻어진 것을 사용하였다.

두 번째로, 계산된 수증기 수송량의 특성은 선택된 강수량과 증발량 자료에 민감한데, 이 자료들에는 SSM/I와 NCEP의 P, E자료와 함께 둘 이상의 7년 강수량 자료 집합과 셋 이상의 증발량 자료 집합이 포함된다. 그러한 것들은 GPCP(Global Precipitation Climatology Project, Huffman et al., 1997을 참고)의 7년 평균 (1988-94) 강수량 기후 자료와 ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)의 분석 산출물과, HOAPS(Hamburg Ocean Atmosphere Parameters and Fluxes from Satellite Data, Schulz et al., 1997)의 증발량 기후 자료, COADS(Comprehensive Ocean Atmosphere Data Set)에 기초한 해양속 자료집합 등이다. 그러므로 5장에서의 민감도 연구를 위해서는, 다섯 개의 증발량 자료 집합이 네 개의 서로 다른 강수량 기후 자료와 함께 결합되어, 20개의 각기 다른 수증기 수송장으로부터 얻어진, 총 20개의 증발량에서 강수량을 뺀 [E-P] 장을 형성하게 된다.

세 번째로, 엘니뇨였던 1998년의 1-3월과 라니냐였던 1999년의 1-3월 기간에 일어난 수증기 수송의 경년 변화를 살펴보기 위해서, TRMM 웹 사이트(<http://trmm.gsfc.nasa.gov>)에서 구한 강수 자료와 SSM/I 증발량을 결합한다. 사용된 TRMM 산출물들은 다양하게 사용 가능한 자료를 결합하여 생성된 것으로, 간략화 되지 않은 월평균 TMI 추정량, 월평균 SSM/I 추정량, 5일간의 정지위성 적외(IR) 추정량, 월별로 축적된 CAMS(Climate assessment and Monitoring System), 또는 GPCC(Global Precipitation Climatology Center)의 강우 측정 분석 자료 등이 그 자료들이다. 전체 해양을 분석하기 위해서는, 적외-마이크로파가 결합된 자료를 사용할 수 없는 남, 북반구의 위도 40 지역에서 SSM/I로부터 얻어진 강수 자료를 사용한다.

#### 4. 7년 수증기 수송 결과

이 장에서는 SSM/I 측정치로부터 구해진 7년(1988-94) 1-3월 평균 대기의 수문학적인 요소에 대해서 검토한다. 그리고 이러한 요소들은 1-3월 기후에 대한 기준 역할을 할 것이다. SSM/I로부터 구해진 E-P 자료는 단지 해상의 것만 유효하므로, 식(8)을 풀기 위해서는 대륙을 지나가는 수송 잠재 함수( $\Phi$ )의 명확한 경계조건을 위해 전구 영역의 E-P 장 자료가 필요하다. 구면조화함수 접근법(Spherical harmonics approach)을 사용함에 있어서 발생하는 경계치 문제를 해결하기 위해서, 대륙에 대한 잠재 함수의 명확하고 작위적인 값을 사용하

는 대신에, 우리는 완전한 전구 E-P 장을 얻기 위하여 육지지역에 대하여 NCEP E-P 자료를 사용하였다.

위성으로부터 측정된 7년 1-3월에 대하여 평균한 P, E, E-P, 그리고  $Q_D$ 와  $\Phi$ 에 대한 결과는 Fig. 1a-d에 나타나 있다. 강수량(Fig. 1a)에서 나타나는 주요한 특징으로 서태평양 대륙연안으로부터 동태평양까지 북반구 열대수렴대(ITCZ)지역, 대서양의 적도지역과 New Guinea 남동쪽에서 남위 40도, 서경 120도에 이르는 남태평양 수렴대(SPCZ)에서 국지적인 최대가 나타난다. 또한 북태평양과 대서양의 중위도 지방에 있는 북반구 storm track과 브라질을 제외한 남아메리카 수렴대(SACZ)를 따라 강한 강수 지역이 있다. 반면 북태평양 아열대지역과 서쪽 해안을 제외한 남반구 대륙 (남아프리카, 오스트레일리아, 남아메리카)의 차가운 해양 지역에서는 강수가 최소이다.

7년 1-3월 평균 증발량은 Fig. 1b에 나타나 있다. 동아시아를 제외한 북태평양과, 북아메리카를 제외한 북대서양 지역에서 6 mm/day 이상의 강한 증발이 일어나며 이는 1-3월 기간에 대륙으로부터 오는 건조하고 차가운 바람이 따뜻한 해상으로 자주 불기 때문이다. 또한 북태평양과 대서양의 무역풍 지대인 아열대 지역에서도 증발이 6 mm/day 이상 일어나고 있다. 열대 지역에서 강수가 최대로 일어나는 지역과 증발이 최소로 일어나는 지역이 서로 비슷한 양상을 보이는 것은 아주 흥미로운 일이다. 동서방향으로 확장된 형태가 남반구의 해양에서도 발견된다.

증발량과 강수량의 차이(E-P)는 Fig. 1c에 나타나 있다. 북태평양과 북대서양의 아열대 지역과, 남반구의 차가운 해양이 존재하는 세 지역에서 수증기의 공급(source)(E-P>0)이 이루어지는 반면, 적도 수렴대에서 부족(sink)(E-P<0)이 나타난다. 일반적인 형태는 강수의 것과 유사하며, 이러한 유사성은 강수가 특정지역에 강한 반면 증발은 대규모의 분포 성향을 보이기 때문이다. 이는 수증기속의 수렴 혹은 발산이 강수의 공간적인 분포에 의해서 조절된다는 것을 내포하고 있다. 극 지역이 식(8)의  $\text{div } Q$ 의 적분영역에서 제외되기 때문에 식(8)을 풀기 위해서는 E-P의 전 지구적인 평균값은 0이 되어야 한다. 식(8)에서 요구하는 대로 균형을 맞추기 위하여, E-P의 공간적인 기울기가 보존되는 동안 E-P장의 전 지구적 평균이 0이 되어야 하기 때문에 전 지구적인 평균 bias인  $15.5 \text{ Wm}^{-2}$  (0.54 mm/day와 동일한 양)를 E-P 장에서 빼준다.

수증기 수송 벡터( $Q_D$ )는 잠재함수( $\Phi$ )와 수증기 수렴/발산항( $\text{div } Q_D$ )과 함께 Fig. 1d에 나타나 있다. 잠재함수의 공간 기울기는 수증기 플럭스를 유발시키고, 플럭스 발산은 안정 상태에서 E-P값과 같아야 하기 때문에, 전체적인 잠재함수의 형태는 [E-P]와 유사하지만 라플라스 연산으로 인해 훨씬 완만한 모양을 나타낸다. 식 (9)에 의하면  $[\Phi]$ 의 단면 기울기는 수

송의 발산 성분과 같다. 그림에서 수송의 수렴대는 어두운 음영으로 표시되고 발산대는 밝은 음영으로 표시되며 이는 또한 수증기의 부족과 공급을 나타낸다.

태평양에서 잠재함수의 능은 동태평양에서 동지나해와 남동 태평양 까지 퍼져있는 반면, 골은 마다가스카르 섬에서부터 동부 뉴기니까지 분포한다. 능과 골의 분포는 적도부근의 인도양에서부터 연안을 따르는 남동 태평양과 중앙 태평양에 이르는 거대한 남향의 수송대를 만든다. 대서양에서는 서인도 제도의 동쪽에서 높고, 남중부의 대서양에서 국지적으로 높은 부분은 적도를 따라 상대적으로 강한 수송을 만든다.

결국 아열대지역인 북서 태평양으로부터 서태평양의 난기풀(warm pool)로의 수증기 남쪽 수송은 수증기속의 최대와 서태평양 지역에서의 강수 발생의 주요 기작으로 보인다. 게다가 수증기 수렴은 Walker 순환에 부응해서 열대 동태평양 서쪽 서경 120도로부터 서쪽으로 수송하는데 기여한다. 따라서 열대지역에서 수증기 수송의 분포와 수송과 관련된 수증기 수렴 혹은 발산이 기후학적으로 잘 알려진 Hadley 및 Walker 순환과 잘 일치한다. 결국 북반구 아열대 해양과 동태평양은 수증기의 공급 지역인 반면 Hadley 및 Walker 순환의 하층 대류권 부분에 의해 ITCZ와 SPCZ 같이 강한 수증기 부족 지역으로 증발된 수증기가 대부분 이동한다.

앞서 살펴본 위성에서 측정된 P, E, E-P와  $Q_D$  값에 상응하여 NCEP 재분석 자료로 측정된 값이 Fig. 2에 제시되어 있다. 전반적인 모양은 SSM/I 자료와 대체로 일치하지만 특정 지역에서는 상당히 다르게 나타난다. ITCZ를 따라서 강수 강도가 작고, 강한 강수지역 ( $>6\text{mm/day}$ )은 더 넓게 분포한다. SPCZ와 관련된 강수 지역 또한 더 넓고 동쪽으로 더 멀리 퍼져서 분포하고 있다. 그래서 남동태평양의 찬 해수 영역에서의 강수의 양이 위성에서 측정된 것보다 상당히 크게 나타나고 있다. 증발은 북태평양의 아열대 지역과 페루 해안을 제외한 남동 태평양 지역에서 위성 자료와 차이가 난다.

E-P 장과 수증기속 발산은 SSM/I 자료와 비슷한 형태로 나타난다. 즉 태평양의 서쪽 반과 인도양에서 적도를 가로지르는 수송이 강하게 나타나며, 동태평양으로부터 대륙연안으로 수증기의 서쪽 수송이 잘 나타나고 있다. 하지만, 수송 강도는 많이 달라서 SSM/I로부터 얻어진 최대 강도가  $132\text{ kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$  인데 비해 NCEP에서는  $95\text{ kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$  로 상당히 작은 값을 나타낸다. SPCZ도 상당히 다른 위치에서 나타나고 있다. SPCZ의 연평균 분포는 New Guinea 남동방향으로부터 남위 30도, 서경 120도 지점을 축으로 분포하고 있으며, 남반구가 여름일 때 남동쪽으로 가장 강하게 뻗어나간다(Vincent(1994), SPCZ review 참조). SSM/I E-P와 수증기 수송장에서 잘 발달된 SPCZ 축과는 대조적으로, NCEP 자료는 더욱더 동서 방향으로 길게 늘어진 모양의 SPCZ 형태를 보여준다. 이러한 지역적인 차이에 덧붙여서,

ENSO와 관련하여 열대지방의 주 순환의 변화가 일어난다면 그 차이가 더욱더 커질 것이라는 것을 추론할 수 있다. 엘니뇨와 라니냐 기간동안 일어나는 수증기 수송의 격년 변동은 6장에서 다루도록 하겠다.

## 5. 여러 E-P 자료들에 대한 수증기 수송 민감도

전 지구적인 E-P bias에서도 제시하였듯이, 위성에서 관측한 E-P에 대한 불확실성은 수증기 수송에 매우 큰 bias를 만든다. 입력 자료에서의 불확실성으로 인해 결과에 어떻게 영향을 미치는가에 대한 관심에 따라서, 우리는 주어진 기후값(4개의 강수량과 5개의 증발 자료를 결합한 것)에서의 수송 벡터의 민감도를 조사하였다. 20개의 총 수증기 수송량으로부터 위도 성분들의 10N-10S 평균들과, 전체 해양에서의 각 경도에 대한 위도 평균들을 구하였다. 이 계산에서, Table. 1에 주어진 평균 bias는 4장에서 기술되었던 각각의 E-P 값에서 제거된다.

강수와 수송 진행 사이에는 매우 유사한 점이 있다. 예를 들어 같은 강수 기후의 사용은 같은 증발 기후 사용으로 인한 결과보다 더 좋은 일치를 보이고 있다. HOAPS 증발 자료로부터 수송장을 제거함으로써, 수송장이 크게 4개의 범주로 수렴된다. 이것은 북반구와 비교해서 수송들 간의 일치의 정도가 낮은 남반구에서 특히 뚜렷하다. ECMWF 강수 자료에서의 결과는 수송의 경계를 형성한다. 예를 들어 거대한 적도 방향의 수송은 10N 부근에서 일어나고, 반면에 매우 작은 극 방향 수송은 남반구에서 발생한다. 이것은 ECMWF 모델이 따뜻한 SST 지역에서 많은 비를 산출하기 때문이며, 이는 특히 서태평양에서 강하다. 이는 수증기가 더 많이 수렴되는 지역을 말하며, 북반구에서 적도로 향하는 많은 수증기의 수송에 의해 이루어짐을 나타낸다. NCEP 강수 자료의 사용은 남반구에서의 ECMWF와 매우 유사한 수송 형태를 보인다.

남반구에서의 모델자료 결합장은 극으로의 수송이 매우 강하게 나타나는 위성자료 결합장과 구별된다. 사실, 모델자료 결합장은 거의 0 이거나, 혹은 매우 약한 북쪽 수송이 15S에서 발견된다. 뿐만 아니라, 모델자료 결합장은 남쪽 수송의 최소값이 나타나는 위도가 보다 남쪽으로 치우쳐져 나타난다. NCEP 재분석 자료 결과에서 나타난 것처럼, 이 같은 약한 남쪽 수송은 인도양에서 나타나는 북쪽 수송과, 15S에 걸친 중앙 태평양에서의 지배적인 서쪽 수송을 설명할 근거가 될 수도 있다. 위성에 의한 각 반구에서의 E-P의 관측적 오차들이 작다는 우리의 주장에 근거하여, 남반구에서 나타나는 현저한 차이는, 남반구 해양에서 수치 모델에 적용되는 관측 자료자료들의 시,공간적인 한계 때문이며, 따라서 남반구에서 나타나는 매우 작고, 미약한 북쪽 수송은 덜 신뢰할 만하다.

10N-10S에서 평균된 수증기 수송의 동서 성분은 Fig. 3b에 제시 하였다. 적도 부근 지역에서 동서 수송의 두드러진 특징은 대부분의 110W 서쪽 적도 태평양에서 나타나는 서쪽 수송이며, 이는 낮은 고도에서의 되돌아오는 Walker 순환에 의해서 상당한 양의 수증기가 서태평양으로 수송됨을 보여준다. ECMWF는 남북 수송의 경우와 마찬가지로, 중앙 태평양에서 훨씬 많은 강수를 나타내며, 이로 인해 더 많은 수증기 수렴대를 형성하고 있다. 또한, 이 같은 이례적인 경향은 HOAPS 증발 자료의 포함으로 인해 얻어진 결과이다. ECMWF와 HOAPS결과들을 배제하면, 계산된 결과는 적도 부근에서 비록  $20 \text{ kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$ 의 변동을 보이긴 하여도 매우 일치하는 모습을 나타내고 있다.

## 6. 엘니뇨와 라니냐 기간의 수증기 수송의 차이

Fig. 1에서 주어진 7년 평균 기후장으로부터, 열대지방에서의 수송 특징은 기후학적으로 알려진 열적으로 유도된 남북 해들리 순환과 동서 위커 순환에 의한 특징과 잘 일치한다. 그것은 서태평양과 인도양에서의 초과된 강수에 기인한 수분 침강(moisture sink)이 열대 순환의 하층 지류와 관련된 수증기 수렴과 균형을 이루어야 하기 때문이다. 따라서, 열대지방에서 나타나는 기후 형태의 주요 변화(예를 들어, 엘니뇨에서 라니냐로의 변화)가 수문학적인 순환, 특히 수증기 수송에 어떻게 영향을 주는가를 조사하는 것은 매우 흥미 있는 일이다. 이러한 목적으로, 위성 관측을 사용하여 엘니뇨와 라니냐의 구조에서 대기 물 수지의 연변동을 검사한다.

위성자료에 기초한 강수와 증발의 차[E-P]와, 엘니뇨 기간인 1998년 1-3월의 수증기 수송을 Fig. 4a와 4b에 나타내었다. 엘니뇨 기간의 강수 패턴은 중앙 태평양에서는 강수의 증가가, SPCZ와 열대 서태평양에서는 강수의 감소를 보인다. 반면에, 증발량의 분포는 아열대 해양, 특히 북태평양에서 대기로의 수증기 유입이 상당히 증가되었음을 보이고 있다. 증발량과 함께 주어진 강수, 즉 남북으로 정렬된 [E-P]장은 남반구에서는 적도 해양 대부분이 수분 침강(moisture sink)으로 작용하고, 반면에 북반구 무역풍 지대와 남반구의 찬 해양에서는 수분 발원(moisture source)으로 작용하는 뚜렷한 동서 패턴을 보여준다. 발원 지역과 침강 지역 사이의 강한 남북 경도는 Oort와 Yienger(1996)이 보여준 것처럼 적도지역에서 더욱 왕성해진 상승 운동이 북태평양에서 강화된 하강 운동과 관련되어 Hadley 형태의 순환이 강화됨을 암시한다.

[E-P] 분포에서 예상된 것처럼, 유도된 수송 벡터는 대부분의 열대 태평양에서 현저하고 강한 남쪽 수송을 묘사한다. Fig. 1d에서 주어진 7년 평균 기후장과 비교해 보라. 그래서, 아열대 북태평양은 주요한 수분의 발원 지역으로 간주되는 반면에 대부분의 남반구 적도 해양



는 수분 침강 지역으로 나타난다. 기후장에서 나타나는 가장 뚜렷한 차이는 발원 지역과 침강 지역을 연결하는 남쪽 수송이 1998년의 따뜻한 시기에 잘 확인되는 동태평양에서 발견된다. 또한 Fig. 1에서 보여진 것처럼 동태평양 찬 해양에서 발산되는 남쪽 방향의 수증기속이 훨씬 약화되어, 실제로 적도의 동태평양에서 약한 북쪽 수송을 일으키는 것이 주목된다. 중위도에서 발견되는 주목할 만한 특징은 북반구에서의 강화된 북쪽 수송으로, 극으로의 수증기를 수송하는 에디의 활동이 따뜻한 겨울에 북태평양에서 증가될 수 있음을 암시한다.

[E-P]분포와 1999년 1-3월(라니냐) 동안의 수증기 수송이 Fig. 4c와 4d에 주어져 있다. 엘니뇨(1998년 1-3월)와 대조적으로, 남북으로 정렬된 [E-P] 분포는 열대 서태평양에 위치한 수분 발원 지역과 동태평양에서의 수분 발원 지역이 대조를 보이면서, 동서로 결합된 형태로 바뀐다. 라니냐(Fig. 4d) 기간에 유도된 수증기 수송은 동태평양에서 서태평양의 난기풀(warm pool)로 수증기를 수송하게 되는데, 이는 강화된 Walker 순환에서 기인한 동서로 결합된 형태임을 명백하게 보여준다. 그러나, 일반적으로 수송 규모는 수문학적 순환이 강화되는 엘니뇨 기간에 발견된 것과 비교하여 더 작다.

엘니뇨와 라니냐 사이의 수송 형태의 현저한 차이에도 불구하고, 양 반구의 아열대 해양은 엘니뇨와 라니냐 동안에 발원 지역으로 간주된다. 엘니뇨 동안에 수송 잠재 함수가 큰 지역은 양 반구에서 아열대 지역에 위치하게 되나, 열대의 낮은 잠재 지역에 의해 분리된다. 대조적으로 라니냐 동안에는 양쪽의 아열대 해양의 높은 잠재 지역이 동태평양에서 병합되어, 동태평양에서는 높고 서태평양에서는 낮은 쌍극자 모양의 형태가 형성된다.

Fig. 5는 잠재 함수와 유도된 수송속 수렴 아노말리와 함께 수증기 수송 아노말리의 분포를 보여준다. 아노말리는 Fig. 1d에서 주어진 7년 1-3월 평균과의 차에 의해 얻어지고, 그 결과는 엘니뇨와 라니냐 사이에 수증기 수송 아노말리에서의 뚜렷한 차이가 있음을 보여준다. 아노말리의 규모는 엘니뇨 기간에 평균 장에서 발견된 것과 유사하고, 수송 아노말리는 날짜 변경선에서 적도 동태평양으로의 강한 동쪽으로의 수증기 수송과 양 반구 아열대에서 적도 쪽으로의 수송으로 열대 태평양의 동쪽 절반 영역에서 일어난다. 열대 동태평양에서 동서 수송 아노말리와 남북 수송 아노말리의 규모는 서로 유사하게 나타난다. 공간 구조와 Fig. 5에서 나타난 수증기 수송의 규모는 엘니뇨 즉, 강화된 Hadley 순환과 약화된 Walker 순환(Philander, 1990; Oort and Yienger, 1996)이 나타나는 기간에서 열대에서의 순환 변동성을 반영한다.

엘니뇨와는 다르게, 1999년 1,2,3월은 열대 중앙 태평양의 수증기 수송이 서태평양 난기풀(warm pool)에서 서쪽으로 향할 뿐만 아니라, 동태평양 ITCZ 지역에서 동쪽으로 향하는 이상 수증기 발원 지역으로 나타난다. 라니냐 기간에는 동태평양에서 매우 약화된 적도쪽으로

의 수송을 보이고 있는데, 이는 약화된 Hadley 순환을 반영하는 이전의 1,2,3월의 엘니뇨와 대조된다. 또한, 매우 약한 동쪽 수송이 동태평양에서 나타나고 있는데, 이는 강한 수분속과 수증기 수렴이 나타나는 지역이다.

SST 아노말리와 관련된 지표면 열 발원에 관한 대기-해양 상호작용 과정에 관한 이해가 시도되어 왔다. 예를 들어, Lindzen과 Nigam(1987)은 SST 경도는 기압 경도를 유발하며, 이어서 하층 바람을 유도하여 수분의 수렴을 일으키기 때문에, 서태평양과 중앙태평양에서의 ITCZ의 존재는 잠재 SST 경도 때문이라고 주장했다. 그들은 더욱이 최대 수분 수렴이 SST 경도가 가장 큰 곳에서 발생하는 경향이 있다고 진술했다. 이 점에서, SST가 가장 극적으로 변화하고, ENSO 기간에 대류가 발생하는 동태평양에서 어떻게 SST 아노말리가 관련이 되는지 조사하는 것에 관심 있게 된다.

가능한 관계를 조사하기 위해 1998년과 1999년의 1,2,3월의 SST 아노말리를 Fig. 6에 나타내었다. 1998년 1,2,3월의 SST 아노말리는 적도 동태평양에서 최대 3°C 까지 양의 아노말리를 보여주고, 서태평양과 양 반구의 근접한 아열대 지역에서 말굽 모양으로 양의 아노말리 주위를 음의 아노말리 지역이 둘러싸는 전형적인 ENSO SST 아노말리와 유사함을 나타낸다. 적도의 중앙 태평양에서 최대 속 수렴 지역이 양의 SST 아노말리의 능(ridge)(Fig. 5에서 어둡게 칠해진 지역과 동태평양에서 양의 SST 아노말리와 비교하라)과 거의 일치된다는 것이 주목된다. 다른 한편으로, 열대 지방에서 가장 높은 잠재 아노말리 지역(또는 수증기 발산 지역)이 음의 아노말리 지역과 유사한 경향을 보인다. 열대 지역에서 중요한 SST 변화를 보여주는 지역에서만 비교를 함에도 불구하고, 수분 수렴 지역과 높은 SST 아노말리 지역의 근접한 일치는 이 연구에서 얻어진 수송 결과가 Lindzen과 Nigam(1987)에 의해 제안된 이론을 강하게 지지함을 나타낸다.

라니냐 기간에는, 대부분의 열대 중앙 태평양으로부터 동태평양에 이르는 지역에서 음의 아노말리를 보이며, 날짜 변경선 근처에서는 최고 -2°C의 SST 아노말리를 보인다. Lindzen과 Nigam에 의해 제안된, 냉각 과정에 있는 지역에 대해서는 직접적으로 적용할 수 없다는 가정에도 불구하고, 최대 음의 SST 아노말리는 최고 잠재 아노말리 지역과 일치한다.

위성으로부터 얻어진 패턴과 NCEP 재분석 자료의 수송량 아노말리를 비교해 보면, 엘니뇨 기간 동안 대규모 패턴에서 서로 유사한 특징을 보인다. 즉, 적도 중앙 태평양과 동태평양 지역으로의 수증기속 수렴과 Fig. 7에서 보인 말굽 모양의 수증기속 발산 지역이 그것이다. 양의 SST 아노말리 능을 따라 수증기 수렴의 축이 나타나는 위성에 기초한 결과와는 달리, 좀 더 남쪽으로 내려간, 약 10S의 위도선을 따라 수렴의 축이 나타난다. 또한, SST 아노말리가 0에 가까운 값을 갖는 적도 지역의 날짜 변경선 서쪽에서는 적도를 향한 강한

수송을 볼 수 있다. 또, NCEP 재분석 자료로부터 구한 수송량 아노말리의 크기가 위성의 [E-P]로 구한 것보다 훨씬 작게 나오므로, NCEP 재분석에서의 물 순환이 더 약하다는 것을 보여준다.

라니냐 기간 동안의 NCEP 재분석 자료의 수송량 아노말리는, 인도양과 중앙 태평양은 수분 공급원의 역할을 하고, 서태평양과 남아메리카는 수렴 지역으로 작용하는 파수 2 패턴의 형태를 보여준다. 위성에 기초한 결과에서 보았던 북과 북서 방향의 강한 수송은 매우 약하게 나타나고 미약하며, 날짜 변경선에 걸친 최대 음의 SST 아노말리 지역은 최고 잠재 아노말리 지역과 더 이상 일치하지 않는다. 엘니뇨에서와 마찬가지로, 수송량의 규모에서도 뚜렷한 차이가 나타났다.

## 7. 결론

본 연구에서는 위성으로부터 복원된 해상 E-P 자료로부터 대기 수증기 수송장을 직접적으로 결정하는 방법을 제시하였고, 기후적으로 차이를 보이는 수증기 수송 상황에 대한 과정과 함의를 이해하기 위해 개발한 방법을 '98-'99 엘니뇨/라니뇨의 분석에 적용하였다. 본 연구에서 개발된 방법은 E-P 장의 잠재함수 해를 기반으로 하며, 필요한 대기-해양 에너지 수송을 결정하기 위해 Sohn and Smith (1992, 1993)에 의해 기술된 스펙트럼 해 기법을 이용한다. E-P와  $\text{div } Q$  사이에 근사적인 평형이 이루어져 있고, 해양-대륙 접촉면에서 적절한 경계 조건이 주어지는 경우에는 수증기 발산 과정과 수송에 대한 현실적인 해를 얻을 수 있다. '98-'99 엘니뇨/라니냐에 대한 아노말리 해가 얼마나 그리고 왜 다르게 나타나는지에 대해 분석하였다. 또한, 해가 얼마나 SST 아노말리 조건과 일관성 있게 나타나는가에 대해 조사하였다.

본 연구에서 개발된 방법의 주요한 장점은 바람 관측이 부족한 지역에 대해서도 적용할 수 있다는 것과 전 지구적인 영역을 연속적이고 일관성 있게 관측할 수 있는 위성의 장점을 이용하고 있다는 점이다. 수송 해는 E-P 장의 경도에 매우 민감하기 때문에 위성관측으로부터 복원된 강수와 증발 자료의 불확실성에 영향을 받는다. 실제로 경도 방향으로 평균된 수증기 수송이 다른 P와 E 조합에 얼마나 민감한지 5장의 민감도 분석에 예증되어 있고, E 자료보다는 P 자료의 차이에 의해 수송 해가 크게 변하는 결과가 제시되었다. 같은 이유로 왜 모델 자료로부터 얻어진 여러 결과와 비교하여 SSM/I와 TRMM을 결합하여 얻은 해가 신뢰할만한지를 설명하였다.

'98 엘니뇨와 '99 라니냐 사이의 1-3월 평균 수증기 수송의 주요한 차이점은 다음과 같다. 전자는 자오선 방향의 주순환을 보인 반면, 후자는 경도방향의 순환 양상을 보이는 것으

로, 차이는 대류의 중심이 진행중인 ENSO 동안에 서태평양과 중앙 태평양으로부터 동쪽으로 이동하는 것에 기인한다. 그러나, 강수와 증발 조건에 대한 직접적인 관계를 이해하지 않고서는 바로 분간하기 어려운 다수의 세부적인 성질이 두 수증기 수송 해에 존재한다. 하지만, 기존의 관측으로부터 계절 규모에 대해 연직 평균한  $Q+Q_c$  플럭스를 본질적으로 얻을 수 없기 때문에, E-P로부터 역학적 플럭스 항인  $Q_d$  해를 푸는 것이 원격탐사 관점에서 보다 간단하다. 이상적으로 위성에 탑재된 라이다로부터 바람을 복원할 수 있게 되면, 평형 방정식의 양쪽 항들이 관측을 통해서 얻어질 수 있기 때문에 P, E,  $V(p)$ 와  $q(p)+q_c(p)$  복원에 존재하는 불확실성과 관련된 오차를 조정할 수 있을 것이다.

한편, 전 지구적인 수문학적 순환에 포함된 다수의 과정을 이해하는 것이 중요하다. 특히 계절적 수증기 수송의 연변화가 대기 안정도, 운량, 강수, 복사 수지와 같은 기후 역학에 광범위한 영향을 주기 때문이다. 또한, 대기 대순환 모델에 들어있는 수문 과정의 신뢰성을 조사하고 GCM에 기술되어 있는 잘못된 점을 개선하기 위해 가능하고 신뢰할 수 있는 관측 수단을 사용하는 것이 중요하다. 아직까지 GCM은 관측과 비교할 때 부정확한 수증기 수송의 세부과정을 산출하고 있기 때문에 위성으로부터 복원된 강수와 증발 자료를 결합함으로써 GCM의 강점과 약점을 이해하는데 도움이 될 수 있다. 이러한 견지로 연구를 시작하게 되었고 결과를 해석하게 되었다.

Table 1. The global mean [E-P] biases. Units are  $W m^{-2}$ .

	<b>Evaporation</b>				
	HOAPS	SSM/I	COADS	NCEP	ECMWF
<b>Precipitation</b>					
ECMWF	-12.14	2.67	4.90	-4.79	-3.91
NCEP	-4.13	10.56	12.87	2.58	3.47
SSM/I	2.49	15.51	18.44	8.75	4.56
GPCP	-4.21	11.62	13.33	3.91	4.79

Seven Year. (1988–94) JFM Mean Climatology [SSM/I]

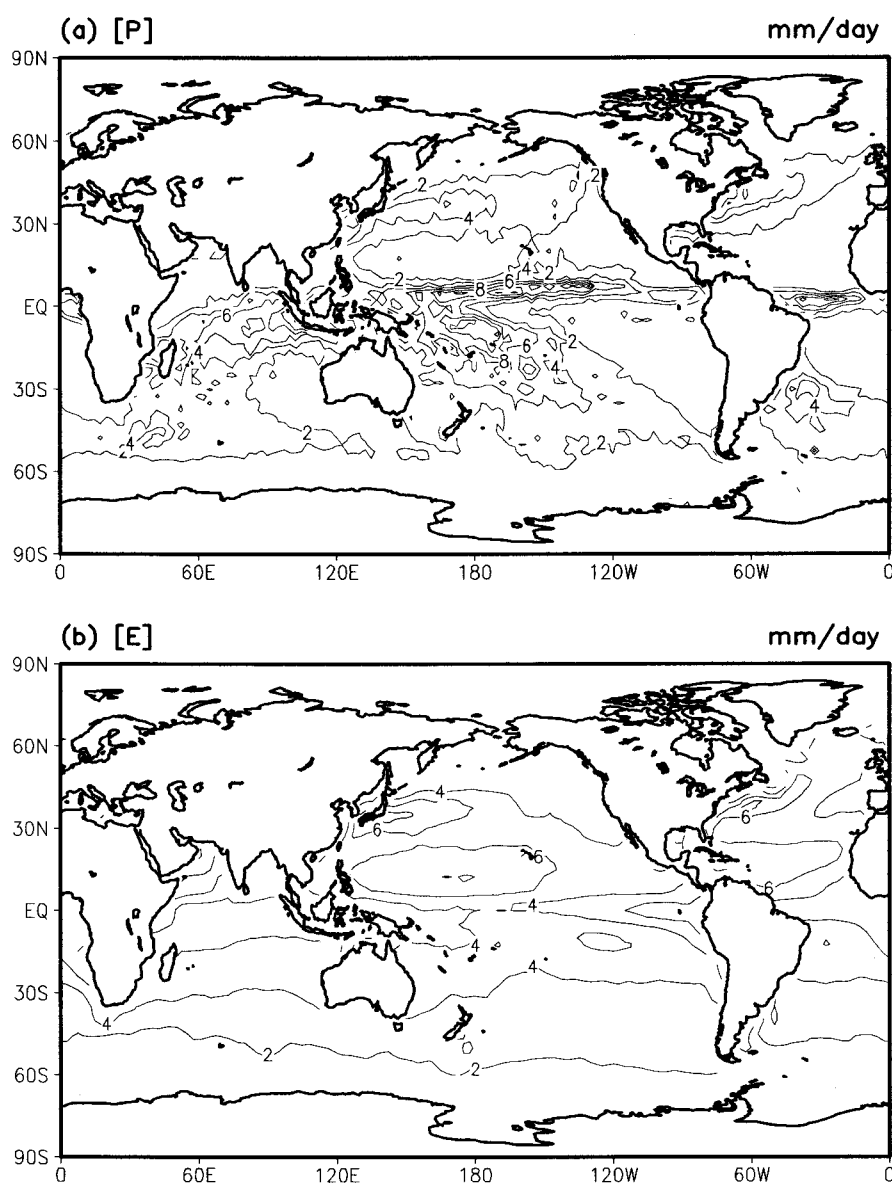


Fig. 1: SSM/I-derived seven-year (1988–94) January–March mean (a) precipitation [P], (b) evaporation [E], (c) evaporation minus precipitation [E-P], and (d) divergent water vapor transport [ $\mathbf{Q}_D$ , arrow] embedded with water vapor transport potential function [solid line] and water vapor flux divergence [ $\text{div } \mathbf{Q}_D$ , shaded area]. The contour intervals of [P], [E], [E-P], and [ $\Phi$ ] are in  $2 \text{ mm day}^{-1}$ ,  $2 \text{ mm day}^{-1}$ ,  $3 \text{ mm day}^{-1}$ , and  $5.0 \times 10^7 \text{ kg s}^{-1}$ , respectively. In (d), heavily shaded and lightly shaded areas represent water vapor flux convergence and divergence greater than  $3.5 \text{ mm day}^{-1}$ , respectively.

Seven Year (1988–94) JFM Mean Climatology [SSM/I]

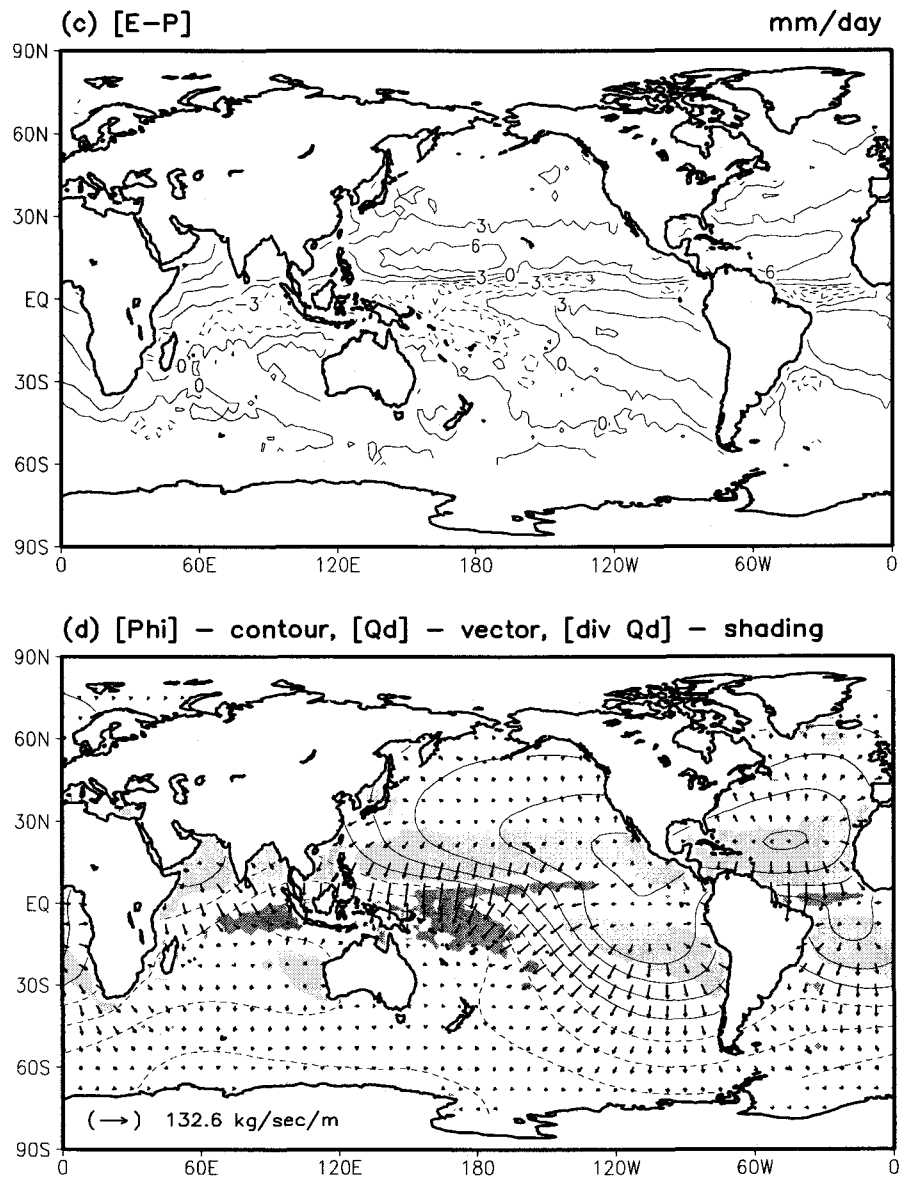


Fig. 1 (continued)

Seven Year (1988–94) JFM Mean Climatology [NCEP]

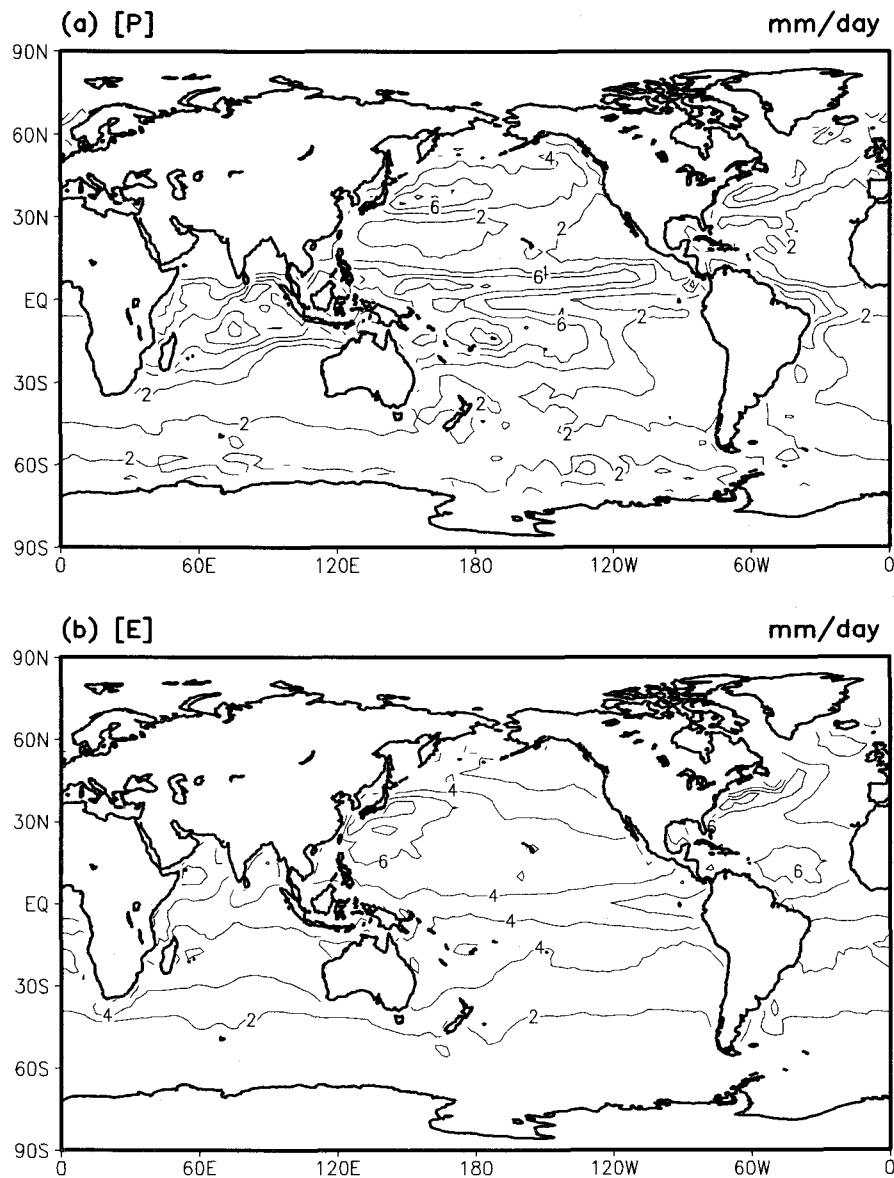


Fig. 2: Same as in Fig. 1 but derived from NCEP reanalysis. The contour intervals of [P], [E], [E-P], and [ $\Phi$ ] are in  $2 \text{ mm day}^{-1}$ ,  $2 \text{ mm day}^{-1}$ ,  $3 \text{ mm day}^{-1}$ , and  $3.0 \times 10^7 \text{ kg s}^{-1}$ , respectively. In (d), heavily shaded and lightly shaded areas represent water vapor flux convergence and divergence greater than  $2.5 \text{ mm day}^{-1}$ , respectively.



Seven Year (1988-94) JFM Mean Climatology [NCEP]

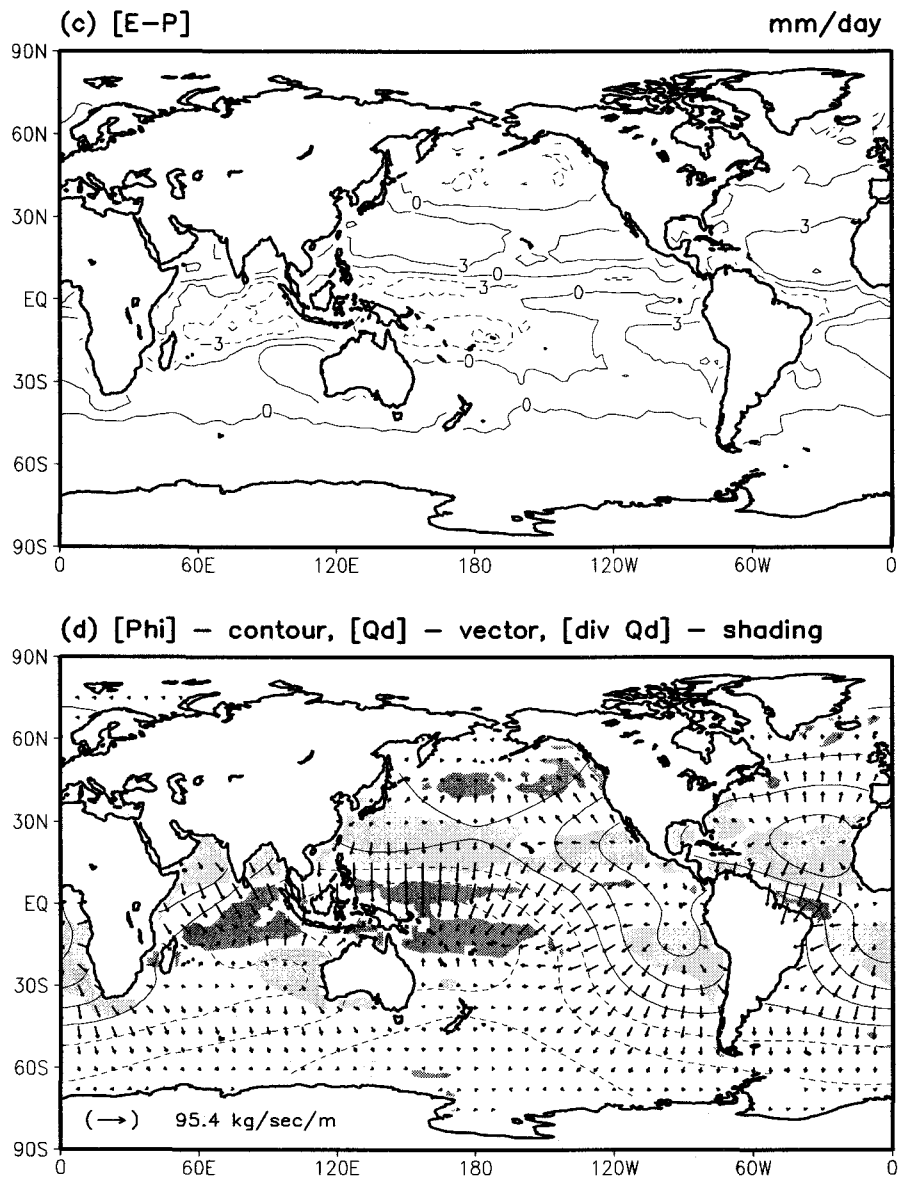


Fig. 2 (continued)

**Seven Year (1988-94) JFM Mean  
N - S Water Vapor Transport (Ocean Only)**

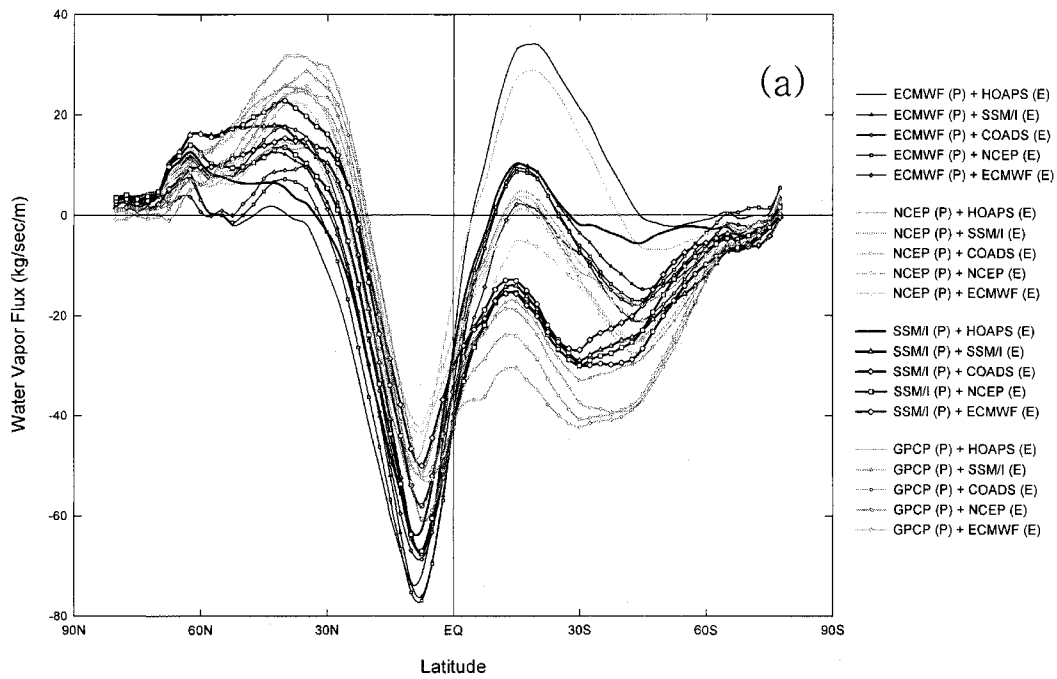


Fig. 3: Seven-year (1988-94) January-March mean (a) meridional component of water vapor flux over the global oceans, and (b) zonal component averaged over the 10°N-10°S latitude band over ocean, obtained from 20 combinations from 4 sets of precipitation data (SSM/I, GPCP, NCEP, and ECMWF) and 5 sets of evaporation data (SSM/I, COADS, HOAPS, NCEP, and ECMWF). Symbols for the twenty combinations are given in the right side of the figure.

**Seven Year (1988-94) JFM 10N - 10S Mean  
E - W Water Vapor Transport**

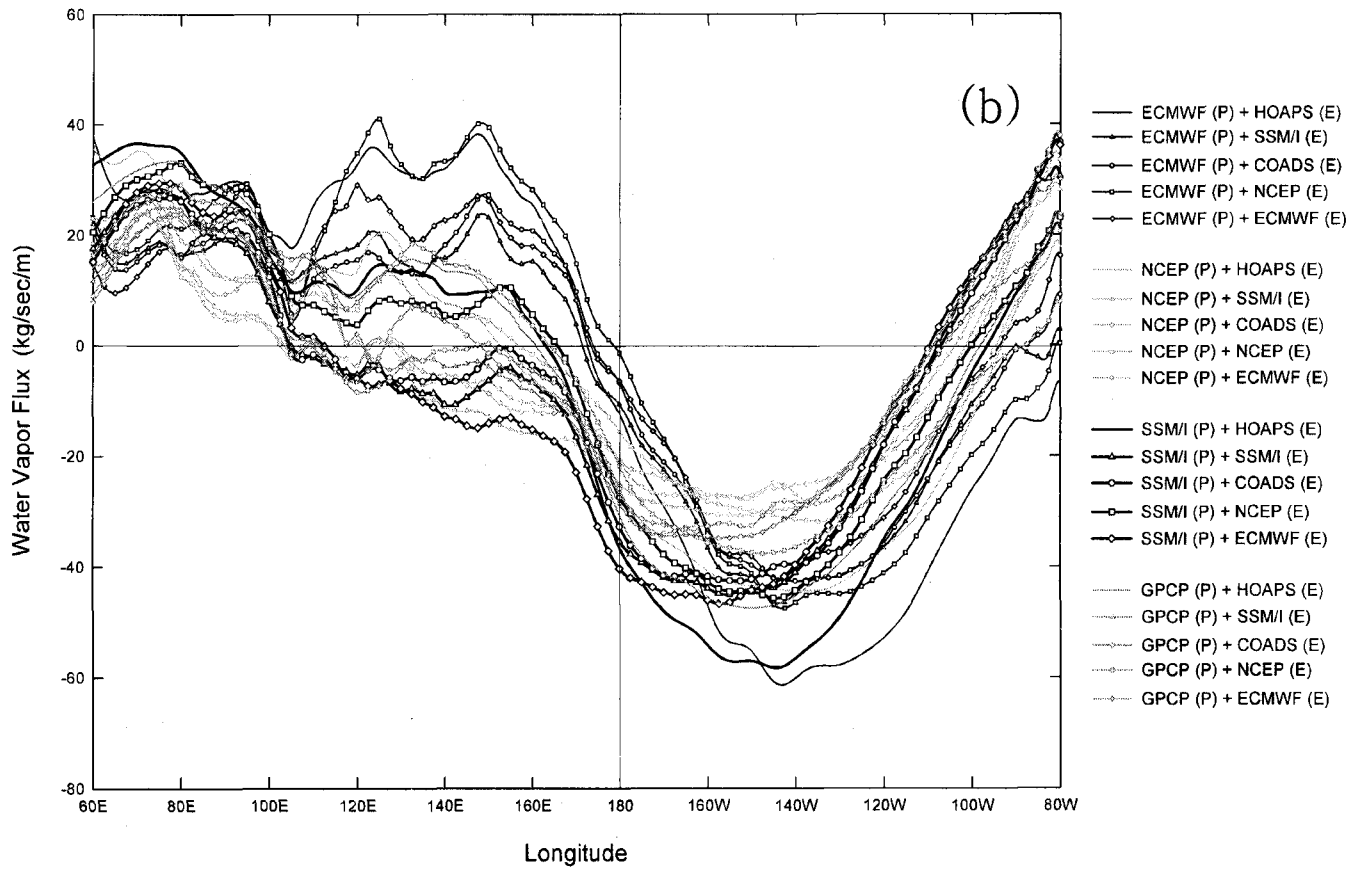


Fig. 3 (continued)

El Nino (JFM 1998) -- SAT

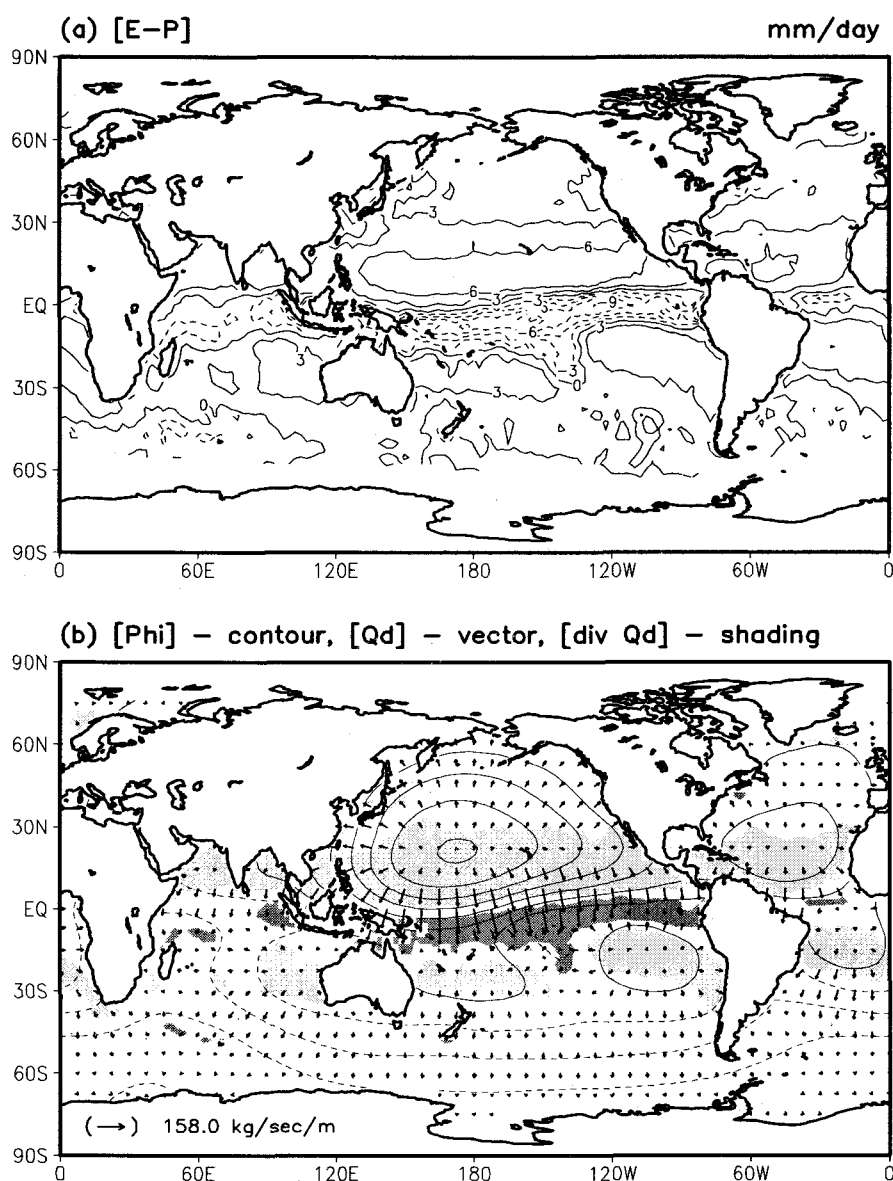


Fig. 4: Satellite-derived (a) evaporation minus precipitation  $[E-P]$ , and (b) divergent water vapor transport  $[Q_D]$  (arrow) with potential function of water vapor transport  $[\Phi]$  (contour) for El Niño (JFM 1998). (c) and (d) are the same as in (a) and (b) except but for La Niña (JFM 1999). The contour intervals of  $[E-P]$ , and  $[\Phi]$  are in  $3 \text{ mm day}^{-1}$ , and  $5.0 \times 10^7 \text{ kg s}^{-1}$ , respectively. In (b) and (d), heavily and lightly shaded areas represent water vapor flux convergence and divergence greater than  $3.5 \text{ mm day}^{-1}$ , respectively.

La Nina (JFM 1999) -- SAT

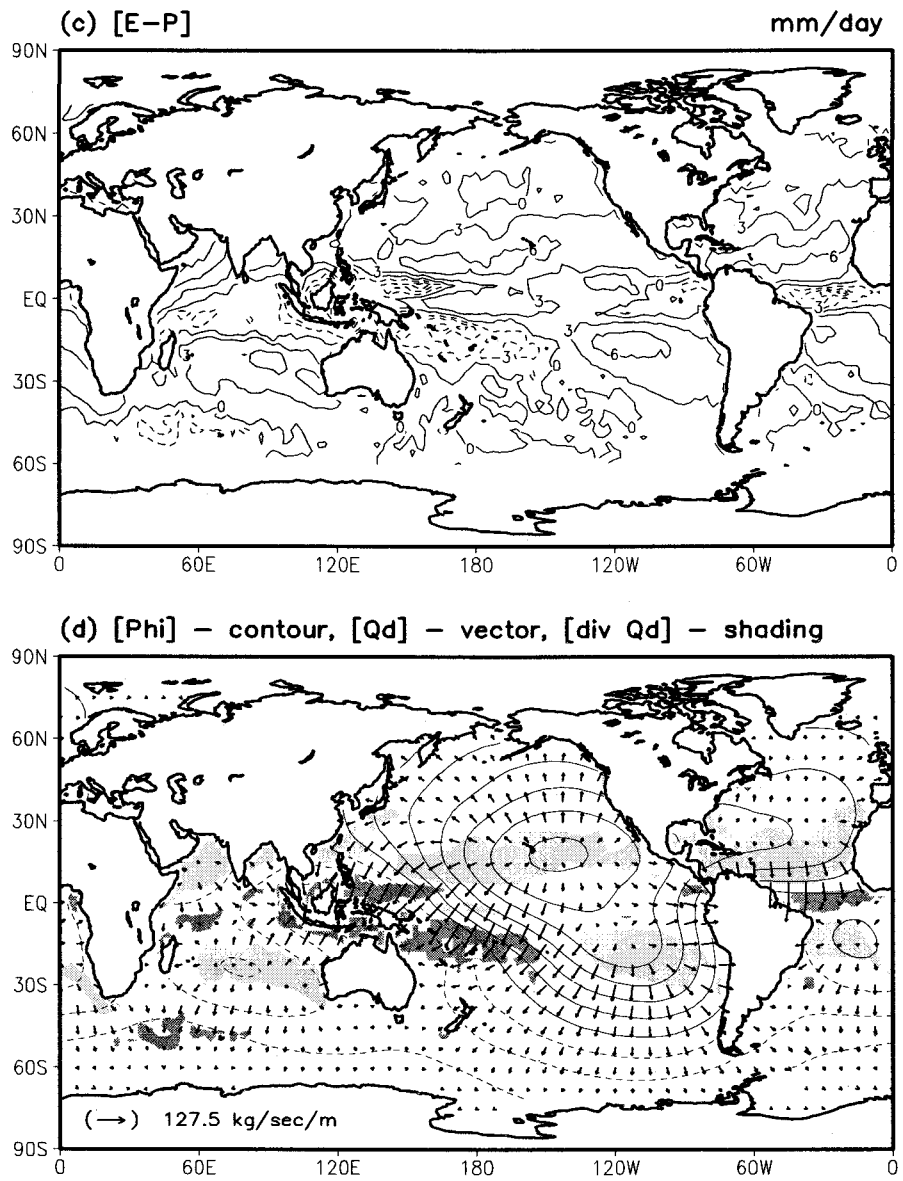


Fig. 4 (continued)

## SAT Anomaly

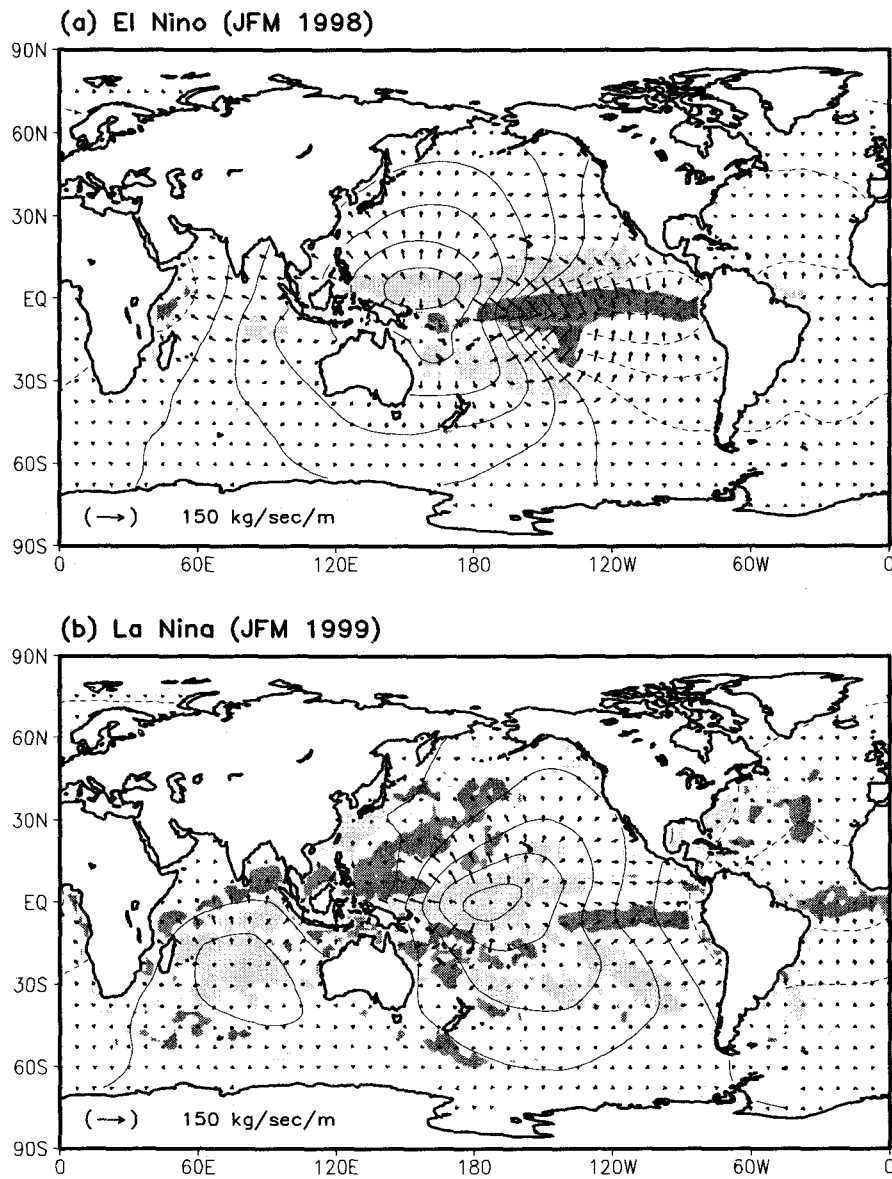


Fig. 5: Anomalies of divergent water vapor transport (arrow) with potential function anomalies (contour) derived from satellite measurements for (a) El Niño (JFM 1998) and (b) La Niña (JFM 1999). Contour The contour intervals of potential function anomalies are  $5.0 \times 10^7 \text{ kg s}^{-1}$ . Heavily and lightly shaded areas represent water vapor flux convergence and divergence greater than  $3.5 \text{ mm day}^{-1}$  for (a) El Niño, and greater than  $2 \text{ mm day}^{-1}$  for (b) La Niña.

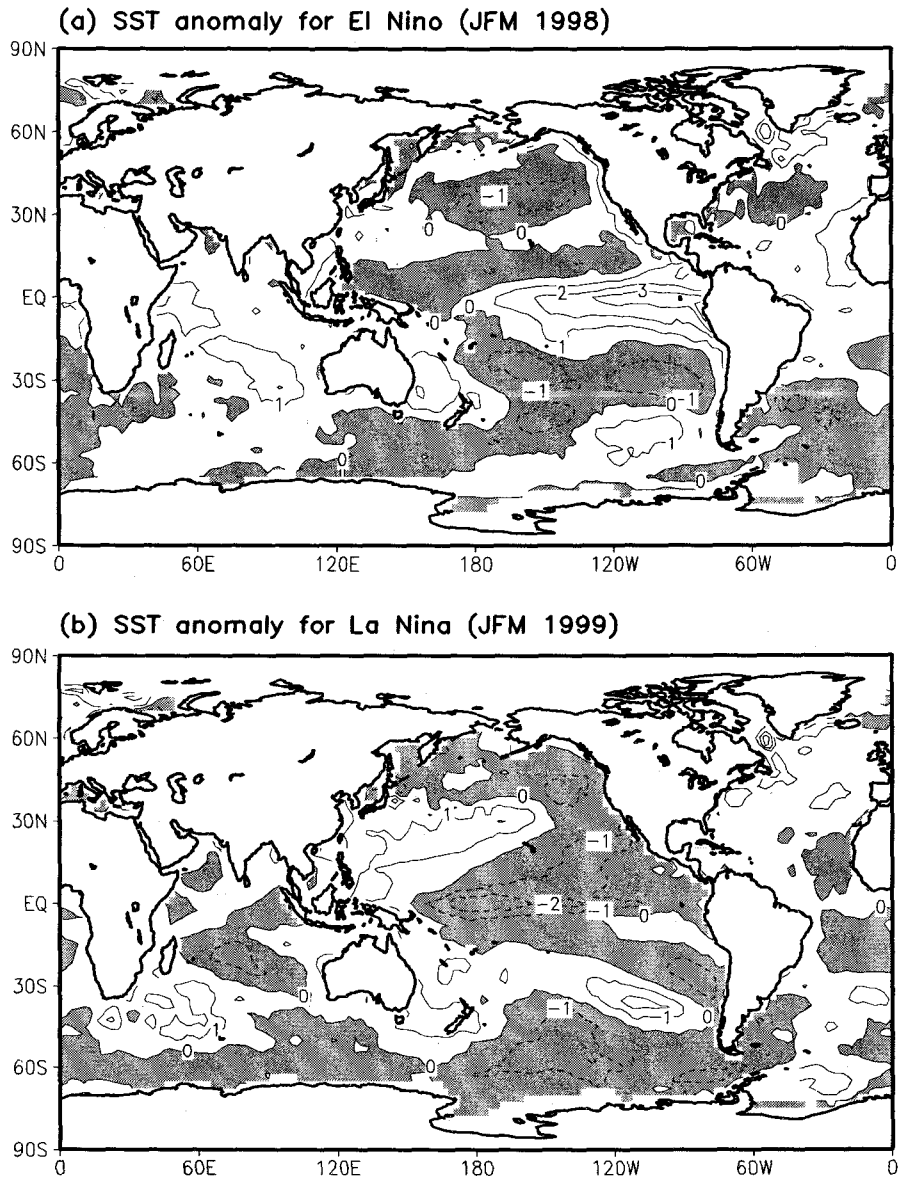


Fig. 6: Sea surface temperature (SST) anomalies for (a) El Niño (JFM 1998) and (b) La Niña (JFM 1999). The contour interval is 1°C and shaded areas represent negative SST anomalies.

## NCEP Anomaly

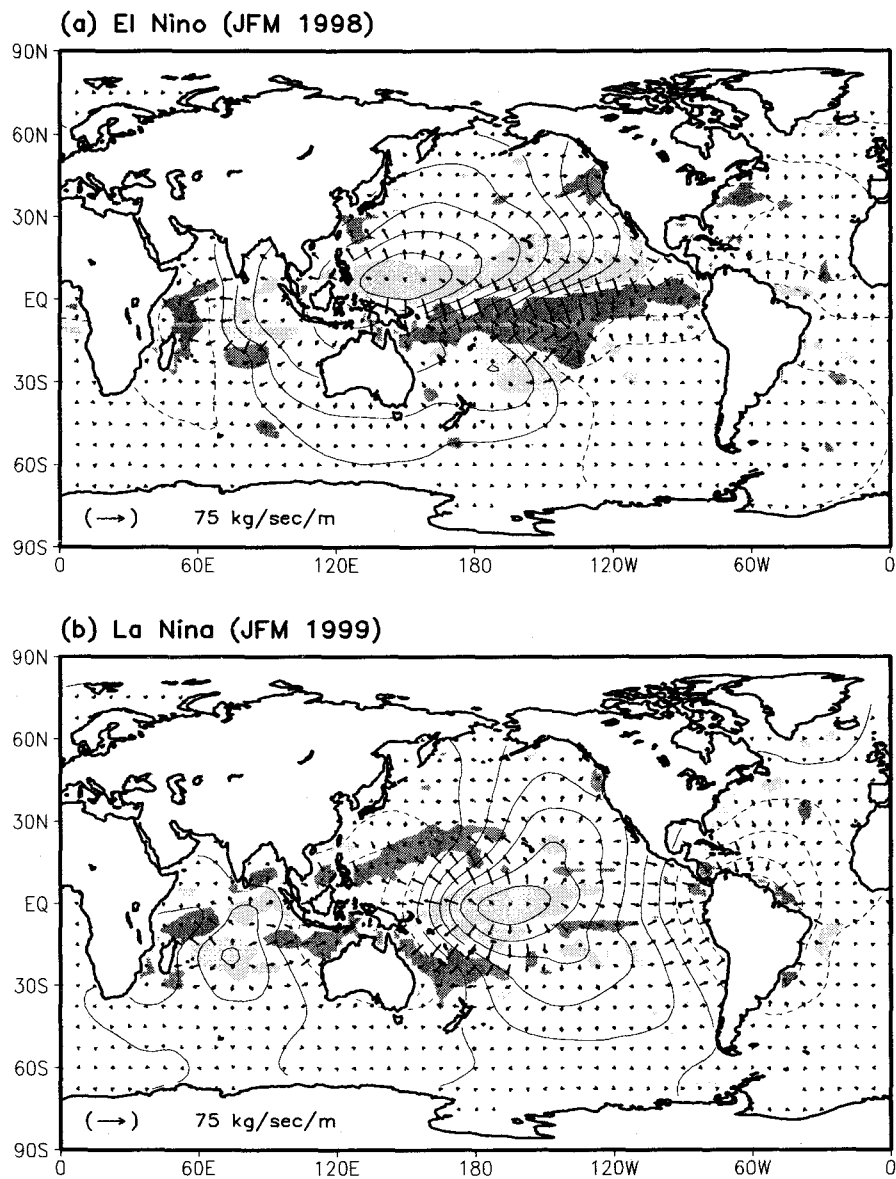


Fig. 7: Same as in Fig. 5 except derived from NCEP reanalysis. The contour intervals of potential function anomalies are  $2.0 \times 10^7 \text{ kg s}^{-1}$ . Heavily and lightly shaded areas represent water vapor flux convergence and divergence greater than  $2 \text{ mm day}^{-1}$  for both (a) El Niño, and (b) La Niña.



## 2 절. 위성자료를 이용한 아시아 몬순 지역 수증기 수송의 기후학적 계절내 변화

### 1. 서론

동아시아의 대표적인 대기순환은 남동방향으로 해양이, 북서방향으로 대륙이 위치한 지리적 특성과 태양고도의 계절변화에 기인한 몬순활동이다. 특히 하계동안 발생하는 장마에 의한 강수량은 연강수량의 약 60%에 해당하여 우리나라 수자원 공급원 중 가장 중요한 기상현상에 해당한다 (기상청, 1995). 따라서 몬순의 변동성은 한반도에서 자연재해를 유발하는 장마와 집중호우 또는 가뭄과 한발 등 이상기상과 직접적인 연관이 있다.

대륙규모의 몬순순환의 일부로 이해되는 장마현상은 집중호우 강수기구 등과 같은 중규모 순환의 특징도 갖고 있어 서로 다른 순환 규모가 혼재하는 기상현상으로 이해되고 있다 (박순웅, 1989). 몬순활동의 규명을 위해서는 이러한 순환기구에 대한 역학적 이해 뿐만 아니라 물리적 기구에 대한 이해 역시 필요하다. 특히 물 순환은 대기의 운동과 에너지 수지를 이해하기 위한 주요 요소로 파악되고 있다 (Peixoto and Oort, 1992). 이러한 이유는 수증기가 응결할 때 잠열을 방출할 뿐만 아니라, 수증기의 수직, 수평 이동이 열수송에 직접 기여하고 있기 때문이다. 또한 집중호우 기구는 수증기 수렴의 문제이므로 몬순순환의 정확한 이해와 예보를 위해서는 강수량과 증발량의 변화, 수증기의 수렴과 이동 등 물순환의 시간적, 공간적 변화에 대한 이해가 매우 중요하다.

아시아 몬순과 연관된 수증기원에 관한 점진적인 이해가 진행되고 있다. 예를 들어 동남아시아 및 중국의 몬순 수증기원은 아라비아 해로부터 중국 남서쪽 뻗어 있는 하층 서풍 흐름과 관계가 있다고 생각하였다. 그러나 이 흐름에 동반된 수증기는 이동 과정에서 강수로 소멸됨이 밝혀져 오히려 인도차이나 북부에 위치한 하층 강풍대에 수반된 수증기의 수송이 동아시아 몬순활동의 중요한 수증기원으로 이해되고 있다 (Lau and Li, 1984). 박순웅 등 (1986)은 장마 초기(남부 장마시기)에 영향을 주는 수증기원으로 북태평양 고기압 연변의 남동풍으로 인한 800 hPa이하 하층 수증기의 수렴을, 중기 이후의 수증기원으로 인도양과 인도네시아에 기원을 둔 남서 흐름에 의한 수증기 수렴을 제시하고 있다. 또한 박순웅 등 (1988)은 장마기의 특징적인 대기 순환으로 인도 몬순과 관련된 하층 강풍대가 동쪽으로 이동하여 태평양상의 아열대 고기압의 북서쪽 연변 하층류와 합류하여 습윤대를 형성함을 보고하고 있다.

Ninomiya and Kobayashi (1999)는 아시아 몬순 시스템을 8개의 주요 순환계로 나누어

이들이 아시아 몬순의 수증기 수지에 미치는 영향을 연구하였다. 인도 몬순, 인도차이나 몬순, 동아시아 몬순 지역에서의 수증기 공급은 각각 인도양 주변의 고기압성 흐름, 인도네시아 주변의 고기압성 흐름, 북태평양 고기압 주변의 순환에 의해 주로 이루어지고 있음을 보였다. 또한 이들 순환이 합류하는 지역에서 다량의 수분속 수렴이 이루어지고, 강수대가 생성되고 있음을 보였다.

그러나 이러한 기존의 연구는 대기순환모델의 출력자료나 분석자료에 근거한 것으로 특히 실측이 부족한 해양 지역에서 위성자료를 사용한 수증기원에 대한 해석이 흥미롭다.

본 연구에서는 인공위성 관측자료로부터 정확한 물수지를 추정하는 알고리즘 시스템을 구축하며 지구의 물순환과 에너지 순환의 형태와 변동성을 유도하는 물리적 과정의 이해를 위해 이를 응용하는데 그 주안점을 둔다. 이를 위해 미 군사기상위성인 DMSP 위성에 탑재되어 수동적 파이크로파를 관측하는 SSM/I 센서의 관측자료를 이용하여 대기 물수지 복원 시스템을 구축한 후, 이 시스템을 동아시아 몬순지역에 적용하여 동아시아 몬순의 수증기원을 연구한다.

## 2. 방법

주어진 공기 기둥에 대해 얻어지는 수분의 평형은 다음의 방정식으로 표현될 수 있다. :

$$\frac{\partial(W+W_c)}{\partial t} + \text{div}(\mathbf{Q} + \mathbf{Q}_c) = E - P \quad (1)$$

여기서의  $W+W_c$  와  $\mathbf{Q}+\mathbf{Q}_c$  는 기둥에서 적분된 총 수분 함유량과 수평 수분속 벡터로써, 다음과 같이 주어진다. :

$$W + W_c = \int_0^p (q + q_l) \frac{dp}{g} \quad (2)$$

$$\mathbf{Q} + \mathbf{Q}_c = \int_0^p (q + q_l) \mathbf{V} \frac{dp}{g} \quad (3)$$

여기서의  $q$ 는 비습,  $q_l$ 는 액체상 물의 혼합비,  $\mathbf{V}$ 는 수평 바람 벡터이다. 식 (1)에서  $E$  와  $P$  는 증발량과 강수량을 나타내며, 아래 첨자 'c' 는 수증기가 액체와 얼음으로 응결된 상태를 나타낸다.

보통 응결로 인해 나타나는 항은 작으며, 응결한 구름의 수평 발산은 무시될 수 있다. 따라서 식 (1)은 특정 시간 간격에 대해 다음과 같이 간단하게 표현될 수 있다. :

$$\left\langle \frac{\partial(W+W_c)}{\partial t} \right\rangle + \langle \text{div}\mathbf{Q} \rangle = \langle E - P \rangle \quad (4)$$

식 (4)가 관심을 갖고 있는 특정 영역에 대해 적분되면, 시공간으로 평균된 수분 평형 방정식이 얻어진다. 즉 :

$$\left[ \frac{\partial(W + W_c)}{\partial t} \right] + [divQ] = [E - P] \quad (5)$$

여기서의 괄호는 주어진 면적 A에 대한 공간 평균을 나타내는 기호이다. :

$$[X] = \frac{1}{A} \int \langle X \rangle dA \quad (6)$$

지금까지 일반적으로, 큰 규모의 수증기 수송량 [Q]는 평균 운동과 에디 운동으로 표현되는 수송과정에서의 대기 순환 통계로부터 직접 구해진다. 따라서 전 지구에서의 삼차원적 평균, 에디 수송항에 대한 자세하고 정확한 계산이 필요하다. 특히, 해양에서의 체계적으로 분포된 기상 변수 관측의 부족은, 물 순환에서의 수증기 수송과 관련된 사실과 결과들에 대한 이해를 어렵게 한다. 이러한 이유로, 우리는 가강수량과 응결량의 변화율이 충분히 긴 시간에 대해 작다고 가정하여, 수평 수증기 발산이 증발량에서 강수량을 뺀 [E-P] 와 평형을 이룬다는 간접적 계산 방법을 이용한다. 즉 :

$$[divQ] = [E - P] \quad (7)$$

본 연구에서는 Rosen et al. (1979), Chen (1985), 그리고 Sohn and Smith (1992) 에서와 같이, 수증기 수송 잠재 함수( $\Phi$ )를 도입하고, 수증기 수송을 회전성분( $Q_R$ )과 발산성분( $Q_D$ )으로 나눔으로써, 수증기 수송량에 대해 풀게 된다. 즉 :

$$divQ = [E - P] = -\nabla^2 \Phi \quad (8)$$

$$[Q_D] = -\nabla \Phi \quad (9)$$

식 (8)과 (9)는 스펙트럼 방법을 사용하여 전구의 영역에 대해 푼 것이다. 큰 규모의 대기 순환은 본질적으로 비발산이고, 따라서 큰 규모의 수증기 수송은 수증기 수송의 비발산성분에 의해 주로 설명되므로, 식 (8)과 (9)를 사용하는 접근 방식이 생성과 소멸 지역을 직접적으로 연결시키는 물 순환을 살펴보는 데 좀 더 알맞을 것이다. 예를 들어, 이러한 접근으로부터 얻어진 수송 패턴은 국지적 해들리 순환, 워커 순환과 관련된 수증기 수송, 그리고 그것들의 경년 변화를 잘 표현 할 수 있다.

### 3. 자료

평균 수송의 기후학적인 면에 대해 살펴보기 위해서, SSM/I 관측(Wentz and Spencer, 1998) 으로부터 13년간의(1988-2000) 5-9월 강수 자료를 사용하였다. SSM/I는 미국 DMSP 인공위성에 탑재된 마이크로파 복사계로서 1987년 6월에 처음으로 F-8 위성에 탑재

되어 발사된 이래로 1990년의 F-10, 1991년의 F-11 위성 등에 탑재되어 운행 중이며 현재는 F-14가 운행중이다. DMSP 위성은 약 830 km 상공에서 극궤도를 이루며 하루에 14.1회 지구 주위를 선회하여 동일 지역을 1일 2회 정도 통과한다. SSM/I는 직하점으로부터 53.1° 전방을 위성 진행 방향의 왼쪽에서 오른쪽으로 스캐닝하면서 지면과 대기에서 기원한 상향의 마이크로파를 4개의 주파수 영역 (19.35, 22.235, 37, 85.5 GHz)의 7개 채널에서 관측한다. 이들 중 19.35, 37.0, 85.5 GHz (이하 19, 37, 85 GHz)는 수평 (H)과 수직 (V)방향의 두 편광량을, 수증기의 약한 흡수 영역인 22.235 GHz (이하 22 GHz)에서는 수직 편광량만을 측정한다. 각 채널의 공간 분해능은 85 GHz에서 15×13 km로 가장 높고 19 GHz에서 69×43 km로 가장 낮다. SSM/I 센서와 관측에 대한 보다 자세한 정보는 Hollinger et al. (1987)에 기술되어 있다.

증발량의 자료는 S. Chou에 의해 개발된, 부피 공기 역학 공식에 대해 잠열, 현열, 운동량속과 함께 반복적으로 안정도에 의존하는 수송 계수를 푸는 알고리즘에 기초하여 얻어진 산출물이다. SSM/I에서 관측한 밝기온도자료로부터 해수면에서의 비습을 추출하고, SSM/I 자료에서 유도한 해상풍 자료가 사용되므로 이 연구에서는 Chou의 자료를 SSM/I 증발량으로 간주한다.

SSM/I로부터 구해진 E-P 자료는 단지 해상에서만 가능하므로, 식(8)을 풀기 위해서는 대륙에서 나타나는 수송 잠재 함수( $\Phi$ )의 명확한 경계조건을 필요로 한다. 이러한 경계치 문제를 해결하기 위해 전 영역의 E-P 장과 구면조화함수 접근법(Spherical harmonics approach)을 사용한다. 즉, 대륙에 대한 잠재 함수의 명확하고 작위적인 값을 사용하는 대신에, 완전한 전구 E-P 장 적용하여 경계치 문제를 극복하였다. 대륙에서의 E-P 장은 NCEP 재분석자료를 사용하였다.

동아시아 여름철에 나타나는 계절내 변화(intraseasonal variation)를 확인하기 위해서, 확보된 13년 5-9월 일평균 강수 및 증발량 자료로부터 각각 5일 평균 자료를 구축하였다. 기후학적인 계절내 변화는 열대지역에서의 주로 30-40일, 중위도 지역에서는 60-70일의 시간 규모에서 지배적이다 (Wang and Xu, 1997). 따라서, 본 연구에서는 강수량, 유도된 수증기 잠재 함수 및 수증기 수송 벡터에 대해서 35-95일 bandpass filter를 실시하여 계절내 변동을 조사하였다.

#### 4. 13년 여름 기후 평균장

기후 평균장에 나타난 수증기 수송의 특징을 살펴보기 위해 강수량, 증발량, 그리고 수증기 수송에 대한 13년평균 5개월 평균장을 구축하였다. 강수량(Fig. 8a)에 나타난 특징으로는,

겨울철 보다 폭넓게 서태평양 대륙연안으로부터 동태평양까지 북반구 열대수렴대(ITCZ)가 형성되고, 대서양의 적도지역과 중위도 한국 및 일본에 걸친 극전선대가 뚜렷하며, 겨울철에 발달한 남태평양 수렴대(SPCZ)는 매우 약한 형태를 취한다. 반면 동태평양과 대서양 양반구의 아열대지역에서는 약한 강수대가 형성된다.

증발량(Fig. 8b)에 나타난 특징으로는, 북태평양과 대서양의 무역풍 지대인 아열대 지역에서 강하게 나타난다. 특히 남반구 아열대 지역, 즉 아프리카 동안, 페루 근해, 그리고 남아메리카 대륙 동안의 대서양 지역에서 최대를 보인다. 또한, 겨울철 특징과 마찬가지로, 강수 최대 지역과 증발이 약하게 나타나는 지역이 서로 비슷한 양상을 보이고 있다.

Fig. 8c는 증발량과 강수량의 차이(E-P), 그리고 이로부터 계산된 수증기 수송 패턴을 보여준다. 수증기의 부족(E-P<0) 지역은 적도 태평양과 대서양의 적도 수렴대 지역, 그리고 뱅갈만에서 아열대 서태평양을 따라 폭넓게 분포한다. 반면 수증기의 공급(source)(E-P>0) 지역은 주로 남반구의 아프리카 동안, 동태평양 및 남아메리카 동안의 아열대 지역에서 형성된다. 이와 같은 형태는 겨울철 결과에서도 확인 했듯이 일반적인 강수의 형태와 유사하며, 이러한 유사성은 강수가 국지적으로 강하게 나타는 반면 증발은 비교적 완만한 공간적 분포 성향을 보이기 때문이다.

수증기 수송 벡터( $Q_D$ )를 유선으로 표시하였고, 수렴, 발산과 관련된 지역은 각각 흐린 음영과 밝은 음영으로 표시하였다. 수증기 수송 벡터를 계산하기 위해 E-P 장을 사용하는데, 전구 영역에서 E-P장의 전 지구적 평균은 0을 유지해야하기 때문에, 이와 관련된 평균 bias  $12.6\text{Wm}^{-2}$ (0.44 mm/day)를 E-P 값에서 제외하였다. 이 평균 bias는 겨울철에 나타난  $15.5\text{Wm}^{-2}$ (0.54 mm/day)의 값과 유사하다.

여름철 동아시아의 수증기 수송 패턴의 특징으로는, 인도 몬순 지역인 뱅갈만과 인도네시아, 동부 뉴기니섬 및 호주 북부 해안에 걸쳐 최대 수증기 수송이 일어난다. 이와 같은 강한 수증기 수송은 각각 강한 수증기 수렴대를 형성하게 되는데, 인도 몬순 지역으로부터의 수송에 의해서는 남중국해 지역이, 또한 호주 북부로부터의 수송은 적도 서태평양 지역에 걸친 강한 수증기의 수렴대를 형성하게 된다. 수증기의 발산 지역은 남반구 아열대 지역을 중심으로 인도양, 동태평양, 그리고 대서양 지역에서 형성되었다. 특히, 인도 몬순 지역과 태평양 고기압에 의한 수증기 수송과 관련해서 남중국해와 서태평양 지역에 강한 수증기 수렴대가 형성되었음을 알 수 있다. 따라서, 뱅갈만 지역에서 인도네시아, 동부 뉴기니섬 및 호주 북부에 걸쳐 최대 수증기 수송이 나타나며, 이러한 수송은 동아시아 지역에서의 여름철 수증기원으로 작용한다. 결국, 남반구 아열대 해양인 아프리카 동안과 동태평양 지역은 수증기 공급원이 되어, 서태평양 및 극전선대와 관련된 동아시아의 수증기 부족 지역으로의 북쪽

수송이 지배적이다. 즉, 여름철 동아시아 지역의 수증기는 인도 몬순 지역에서의 동쪽으로의 수증기 수송과 태평양 고기압의 순환과 관련된 적도 서태평양 지역으로부터의 북쪽 수송의 영향을 받는다.

## 5. 위성 자료로 유도된 수증기 플럭스 검증

위성자료로부터 유도된 결과의 검증을 위해 라디오존데 관측자료로부터 계산한 수증기 수송과 관련된 발산 값과 위성자료로부터 유도된 E-P 값을 비교하였다. 라디오존데 관측 자료는 아시아 몬순 관측실험(GEWEX Asian Monsoon Experiment, GAME)의 일환인 남중국해 몬순 관측실험(South China Sea Monsoon Experiment, SCSMEX)에서 얻어진 자료를 이용하였다. 특히, 본 연구에서 선택한 영역은 NES(Northern Enhanced Sounding Array) 지역과 SES(Southern Enhanced Sounding Array)지역으로, Fig. 9에 나타내었다. 관측 기간은 1998년 5월 1일부터 6월 30일까지 총 61일에 해당하며, 하루에 최대 4번의 관측 자료를 포함하고 있다.

수증기 플럭스 발산값을 계산하기 위해서, 본 연구에서는 Green 정리를 적용하여 NES 지역과 SES 지역에서 경계를 따라 선적분을 하였는데, 이는 식 (10)으로 표현된다.

$$\text{div } Q = \oint \left[ \int_{\text{sfc}}^{\text{top}} q \vec{V} dp/g \right] \cdot d\vec{l} = E - P \quad (10)$$

이와 같은 접근 방법은 McBride 등 (1989)에 의해 호주 북부 Carpentaria 만에서 적용되었는데, 그 결과 선적분 방법을 통해서 연직 적분된 물수지를 성공적으로 계산할 수 있었다.

Fig. 10은 위성으로부터 유도된 [E-P] 값과 라디오존데 자료로부터 계산된 수증기 플럭스 발산값[div Q]을 비교한 것이다. 그림의 자료는 모두 일평균 자료이며 NES 지역과 SES 지역에서 결과를 함께 나타내었다. 라디오존데 관측값이 0보다 큰 영역에서는 위성 복원값이 작거나 혹은 0보다 작은 특징을 보이고 있지만, 라디오존데 관측값이 0보다 작은 영역에서는 위성 복원값보다 상대적으로 작게 계산되었다. 결과적으로, 위성 자료로부터 유도된 [E-P]값과 라디오존데 자료로부터 계산된 [div Q]값은 서로 높은 상관관계(0.88)를 보이고 있다. 따라서, 시공간적으로 넓은 전구적인 수문학적 순환 연구를 위해 위성 자료로부터 유도된 [E-P]값을 이용하는 접근 방법은 매우 성공적이라 할 수 있다.

## 6. 주성분 모드 분석에 나타난 수증기 잠재 함수 및 강수량의 계절내 변화

아시아 몬순 지역에서 나타난 수증기 수송 특징 중 하나는, 인도 몬순 지역과 동아시아

몬순 지역간에 동쪽으로 진행되는 30-50일 주기의 진동과 관련된 상호작용이다 (Chen et al., 1988). 아시아 몬순 지역과 관련된 계절내 변화 분석을 위해서는 계절내 변화를 더욱 잘 나타낼 수 있는 방법이 필요하다. 이를 위해서 35-95일 대역 필터(bandpass filter)를 사용하여 E-P장으로부터 계산된 수증기 수송 잠재 함수( $\Phi$ ) 자료를 재구성하였다. 이 자료를 이용하여 아시아 몬순 지역에 대한 여름철 수증기 수송과 관련된 기후학적인 계절내 변동성의 주 모드를 살펴보기 위해서 경험직교함수(EOF)를 계산하였다. 첫 번째 모드(Fig. 11a)는 총 분산의 49%를 설명하고 있다. 공간 분포의 특징으로는 적도 인도양에서 가장 큰 양의 값이, 적도 서태평양 지역에서 음의 값이 나타나는 파수 1 형태의 분포를 보인다. 이와 관련한 principal component의 시계열(Fig. 11c)은, 5월 중순부터 6월 중순까지, 7월 중순부터 8월 중순, 그리고 8월 말에서 9월 초까지 양의 값이 나타난다. 이 기간 동안에 동아시아 및 서태평양 지역에서는 많은 강수의 영향으로 수증기 부족 지역의 특징을 갖는다 (즉, 이 같은 양의 값을 가지는 기간은 인도양에서는 수증기의 발산이, 동아시아 및 서태평양 지역은 수증기의 수렴 지역으로 작용하여 인도양에서 서태평양으로의 강한 수증기 수송이 발생한다.). 반면에 음의 값을 보이는 구간은 반대의 수송이 이루어진다. 이와 같은 변동은 약 30-60일의 주기를 가지고 있으며 이는 인도 몬순과 동아시아 몬순 사이의 저주파 주기 변동성을 보여주고 있다. 두 번째 모드(Fig. 11b)는 총 분산의 35.2%를 설명하고 있다. 공간 분포의 특징은 첫 번째 모드와 같이 파수 1 형태의 분포를 보이며, 특히 첫 번째 모드의 최대 양과 음의 값이 나타나는 지역이 동쪽으로 이동하여, 각각 적도 벵갈만 지역과 적도 멕시코 근처에서 최대의 양과 음의 값이 나타난다. 시계열에서도 약 10-15일 정도의 차이로 동쪽으로 이동된 형태를 확인할 수 있다. 위의 두 가지 주요 모드를 통해서 인도 몬순 지역과 동아시아 몬순 지역간에 동쪽으로 진행되는 30-60일 주기의 진동과 관련된 상호작용을 수증기 수송 측면에서 확인하였다.

아시아 몬순 지역에서 나타나는 30-60일 주기의 진동은 적도 수렴대를 중심으로 발생한다. 수증기 수송과 강수량과의 상호 관계를 조사하기 위해, 수증기 수송 잠재 함수( $\Phi$ )와 강수량 자료를 사용하여 연장 경험직교함수(EEOF) 분석을 하였다. 적도 지역에서의 변동성을 찾기 위해서, 먼저 자료를 10S에서 10N 사이에서 평균한 후 시간-경도 자료를 구축하였다. Fig. 12a와 12b는 수증기 수송 잠재 함수( $\Phi$ )와 강수량에 대한 첫 번째 주성분 모드를 나타내는데, 각각 총 분산의 30.5%, 9.3%를 설명하고 있다. 두 자료 모두 인도 몬순 지역과 동아시아 몬순 지역에 대해서 30-60일 주기의 뚜렷한 변동성을 보이고 있다. 이는 Myers and Waliser (2003)의 결과(1979년부터 1999년까지의 CMAP의 겨울철(11월-3월) 강수 자료의 결과)에서도 확인할 수 있다. 특히 수증기 발산(수렴) 지역과 강수 부족(공급) 지역이 거의 일

치하며, 동쪽으로 진행하는 진동을 확인할 수 있다. 이는 시계열 결과(Fig. 12c)에서도 뚜렷이 확인된다. 수증기의 수렴/발산 지역에 의해 수증기 수송이 결정되는데, 수증기의 수렴/발산은 전 구적으로 폭넓게 분포하는 증발량 보다는 국지적으로 강하게 나타나는 강수의 특성에 따라 결정된다. 따라서, 이에 나타난 결과는 적도 지역의 강수에서 보이는 변동성과 관련해서 수증기의 수송이 결정됨을 알 수 있다. 결국, 적도 지역을 중심으로 한 아시아 몬순 지역에서 나타나는 수증기 수송의 변동성은 강수량의 변동성에 가장 큰 영향을 받는다.

## 7. 인도 몬순 및 동아시아 몬순 지역에 나타난 기후학적 계절내 변화

Fig. 13은 인도 몬순 지역(80E-90E)과 서태평양 및 동아시아 지역(125E-135E)에서 경도 평균한 기후학적 계절내 변화와 관련된 수증기 수렴/발산 분포 및 수증기 수송 벡터를 시간-위도 그래프로 나타낸 것이다. 인도 몬순 지역(Fig. 13a)에서는, 10S-20N사이에서 수증기 발산/수렴과 관련된 계절내 변화가 잘 나타난다. 이와 같은 계절내 변화는 30-60일 주기의 북동진하는 형태를 보이고 있는데, 주로 5월에서 6월말까지 더 뚜렷하다. 이 지역에서의 수증기 수송 패턴은 수렴/발산 지역과 관련해 잘 나타난다. 특히 5월에는 10N-20N 지역으로부터 적도 지역으로의 남쪽 수송이, 6월에는 적도 지역으로부터의 북쪽 수송이 일어나며 그 결과 5월에서 6월 사이에 적도 지역에서부터 20N 지역에 걸쳐 북동진하는 형태의 강한 수증기 수렴대가 형성된다. 이러한 형태는 30-45일 주기로 형성되며, 특히 8월말에서 9월 사이에 다시 강한 수송이 발생한다.

한편, 서태평양 및 동아시아 지역(Fig. 13b)에서는 인도 몬순 지역보다 더 강하고 뚜렷한 계절내 변화를 보이고 있다. 특히 10N-40N 지역에서 수증기 수렴/발산과 관련된 30-60일 주기의 북동진 형태는 여름철 전 기간(5-8월)동안 매우 뚜렷하게 나타난다. 25N-35N 사이의 동아시아 지역에서 6월 중순경부터 7월초까지 나타나는 수증기 수렴대는, Ho and Kang (1988)이 밝혔듯이 Mei-Yu, Baiu와 관련된 초기 몬순 강수 밴드의 발달(6월 중순)과 우리나라의 장마와 관련된 기간(6월말)과 거의 일치함을 보인다. 이와 같이 강수 밴드가 시간적으로 차이를 두고 나타나는 것은 수증기 수렴대의 북동진 형태와 연관된다. 이 기간 중의 수증기는 대부분 아열대 서태평양 지역으로부터 북쪽으로 수송되고 있다.

Lau and Li (1984)에 의하면, Mei-Yu의 시작과 소멸은 서태평양에서 나타나는 아열대고기압의 발달 및 북진의 특성과 관련이 있다. 또한, 우리나라의 장마 기간은 북태평양 고기압의 한반도 남쪽으로의 진출과 관련이 있고, 장마가 끝나는 시기는 이 고기압 세력이 한반도 북쪽으로의 이동과 관련이 있음은 잘 알려져 있다. 따라서, 동아시아 지역에서의 강수 밴드의 변화는 북태평양 고기압의 변화와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 이러한 관계를



확인하기 위해서 본 연구에서는 NCEP 재분석 자료를 이용하여 하층에서의 기압장과 바람장을 분석하였다.

Fig. 14는 NCEP 재분석 자료로부터 계산된 850hPa 지오폠펠셜 고도(geopotential height)를 Fig. 13과 같은 형태로 나타낸 것이다. 두 지역 모두 Fig. 13의 수증기 수렴/발산 지역과 매우 유사한 결과를 보이고 있다. 수증기 수렴(발산) 지역과 관련해서 저기압성(고기압성) 형태의 기압장이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 특히, 동아시아 지역에서 나타나는 30-60일 주기의 동진하는 형태는 상당히 일치하고 있다. 이와 같은 결과는 NCEP 850hPa 바람장(Fig. 15)에서도 확인할 수 있다. 동아시아 지역의 20N-30N 사이에 나타나는 저기압성 흐름(고기압성 흐름)은 수증기 수렴(발산) 지역과 거의 일치한다. 따라서, 이 결과를 통해서 동아시아 지역에서 북동진하는 30-60일 주기 진동의 특성을 가지는 수증기 수송은 북태평양 고기압의 계절내 변화와 매우 밀접한 관계가 있음을 확인할 수 있다.

## 8. 결론

본 연구에서는 위성자료로부터 유도된 E-P 자료를 이용하여 1988년부터 2000년 총 13년 동안의 5월에서 9월까지의 여름철 수증기 수송장을 계산하였고, 이를 아시아 몬순 지역에서 분석하였다. 이를 위해 먼저, 13년 여름 동안의 기후 평균장(13년 5월-9월 평균)에 대해 조사하였다. 아시아 몬순 지역에 나타나는 주요 특징으로는 서태평양 지역과 남중국해에 나타난 강한 수증기 수렴대이다. 이는 주로 인도양과 호주 북부로부터의 수증기 수송에 의해서 유도되었음을 확인하였다.

위성자료로부터 유도된 결과의 검증을 위해서 GAME/SCSMEX 관측실험 기간동안 얻어진 라디오존데 자료로부터 수증기 발산항[div Q]을 계산하여 위성자료로부터 유도된 E-P 값을 비교하였다. 위성 자료로부터 유도된 [E-P]값과 라디오존데 자료로부터 계산된 [div Q]값은 0.88의 높은 상관관계를 보였으며, 이 결과를 통해서 전 지구적인 수문학적 순환 연구를 위해 위성 자료로부터 유도된 [E-P]값을 이용하는 접근 방법이 매우 타당함이 입증되었다.

기후 평균장으로부터 아시아 몬순 지역에 나타나는 계절내 변화를 조사하기 위해서 35-95일 대역 필터(bandpass filter)를 사용하여 E-P장으로부터 계산된 수증기 수송 잠재 함수( $\Phi$ ) 및 강수량 자료를 재구성하여 경험직교함수(EOF)와 연장 경험직교함수(EEOF) 분석을 실시하였다. 이를 통해 인도 몬순 지역에서 동아시아 몬순 지역으로의 동진하는 30-50일 주기의 진동과 관련된 계절내 변화를 확인하였고, 적도 지역을 중심으로 한 아시아 몬순 지역에서 강수량의 계절내 변동성이 수증기 수송의 계절내 변동성에 가장 큰 영향을 미치는

요인임을 알 수 있었다.

7장에서는 인도 몬순 지역과 서태평양 및 동아시아 지역에서의 기후학적 계절내 변화를 경도 평균한 시간-위도 함수로 조사하였다. 특히, 동아시아 지역의 수증기 수렴대에서 나타나는 30-60일 주기의 북동진 형태는 북태평양 고기압의 계절내 변동성과 일치함을 확인하였다.

본 연구에서는 SSM/I 위성 관측 자료를 이용하여 정확한 물수지를 추정하는 알고리즘 시스템을 구축하였으며, 지구의 물순환, 특히 아시아 몬순 지역에서의 물순환의 형태와 변동성에 대한 물리적 과정의 이해를 위해 이를 응용하였다. 하지만, 본 연구에서는 제시하지 못한 물수지 분석 결과의 역학적 해석을 위한 연구가 계속되어야 할 것이다.

13-Year(1988–2000) MJJAS Mean Climatology [SSM/I]

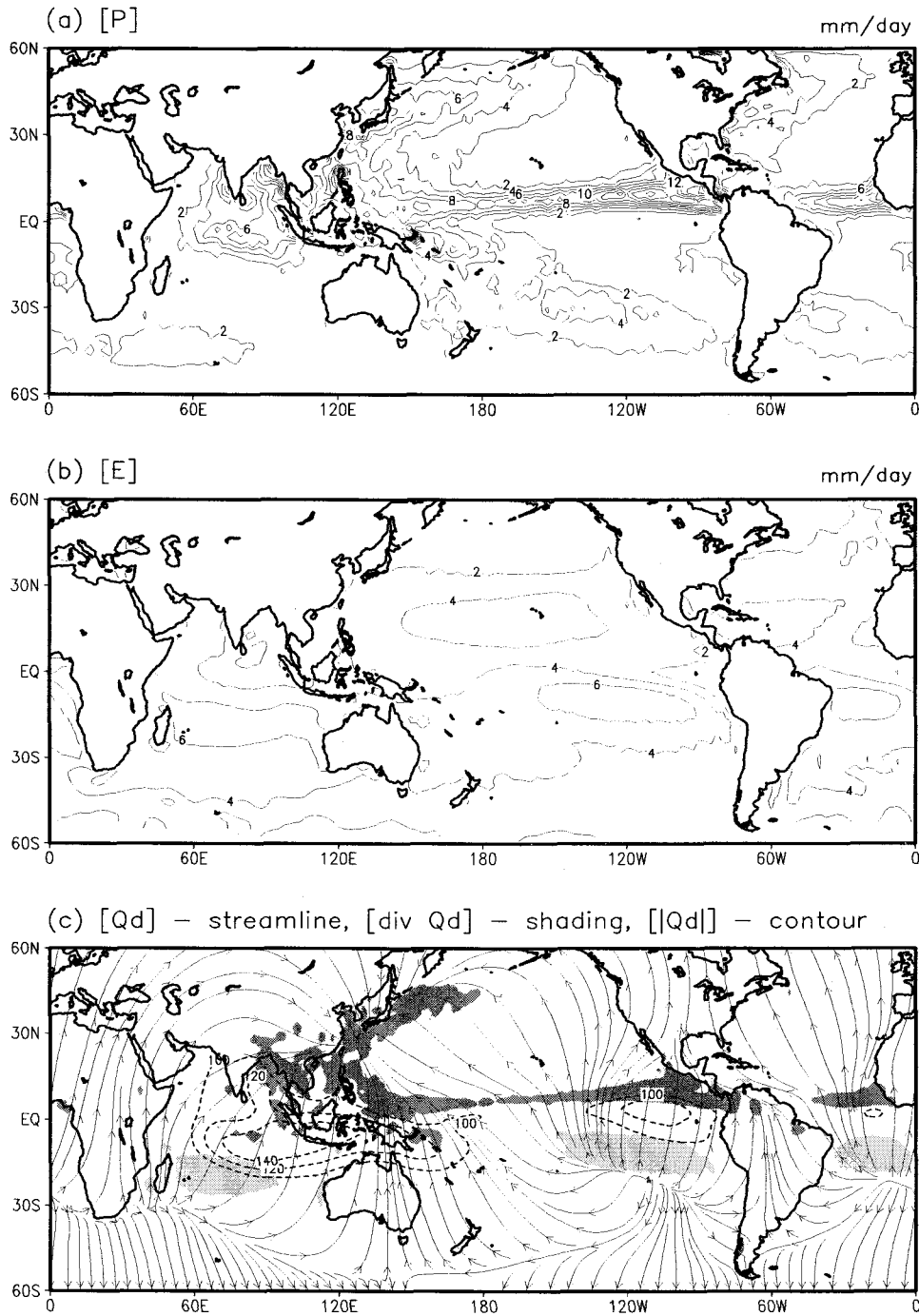


Fig. 8: SSM/I-derived thirteen-year (1988-2000) May-September mean (a) precipitation [P], (b) evaporation [E], (c) divergent water vapor transport [ $\mathbf{Q}_D$ , streamline], water vapor flux divergence [ $\text{div } \mathbf{Q}_D$ , shaded area], and magnitudes of  $\mathbf{Q}_D$  [ $|\mathbf{Q}_D|$ , contour]. The contour intervals of [P], and [E] are in  $2 \text{ mm day}^{-1}$ . In (c), heavily shaded and lightly shaded areas represent water vapor flux convergence and divergence greater than  $5 \text{ mm day}^{-1}$ , respectively.

# GAME/SCSMEX AREA (May - June 1998)

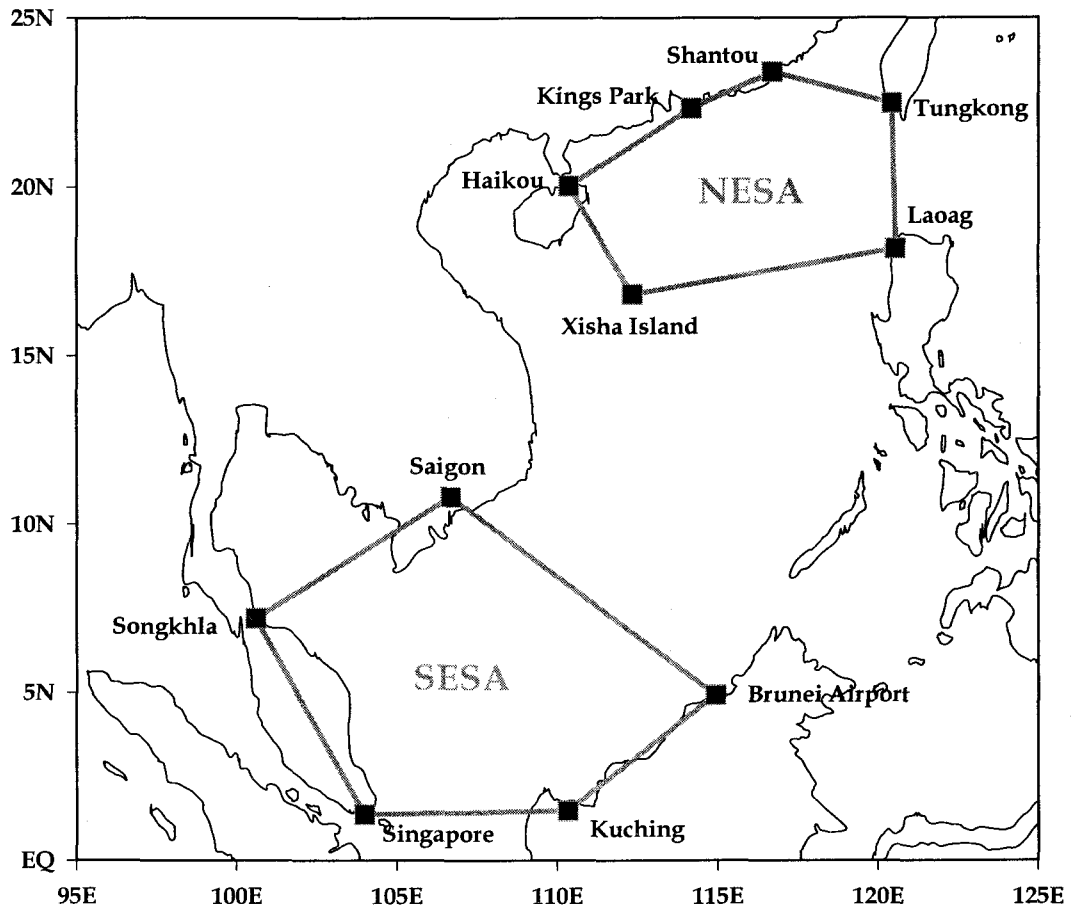


Fig. 9: An inventory of sounding data during the GAME/SCSMEX IOPs. The Intensive Observing Period (IOP) of the South China Sea Monsoon Experiment (SCSMEX) is May 1 to July 31, in 1998.

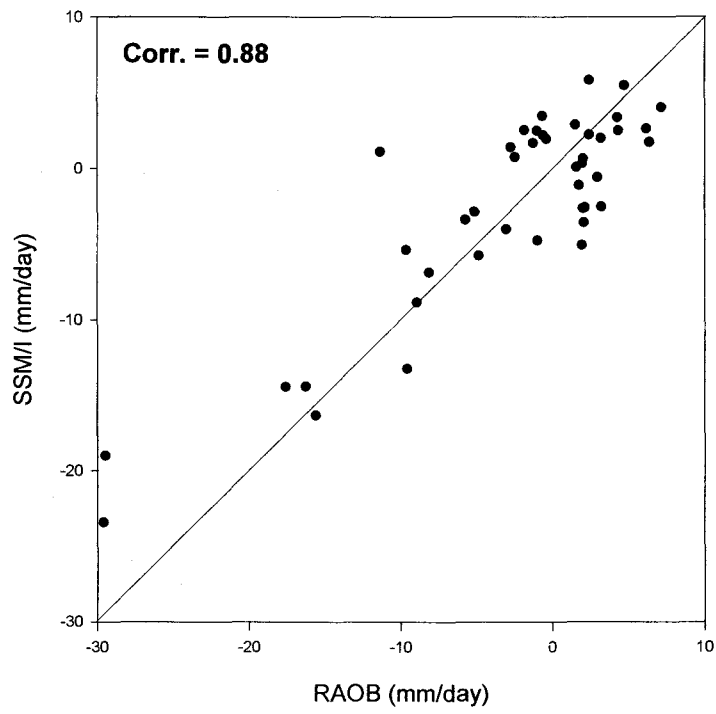


Fig. 10: Comparison between satellite-derived  $[E-P]$  and RAOB-derived  $[\text{div } Q_D]$  over NESAs and SESAs. (daily averaged data)

## EOF Eigenvector over 13-Year Summer

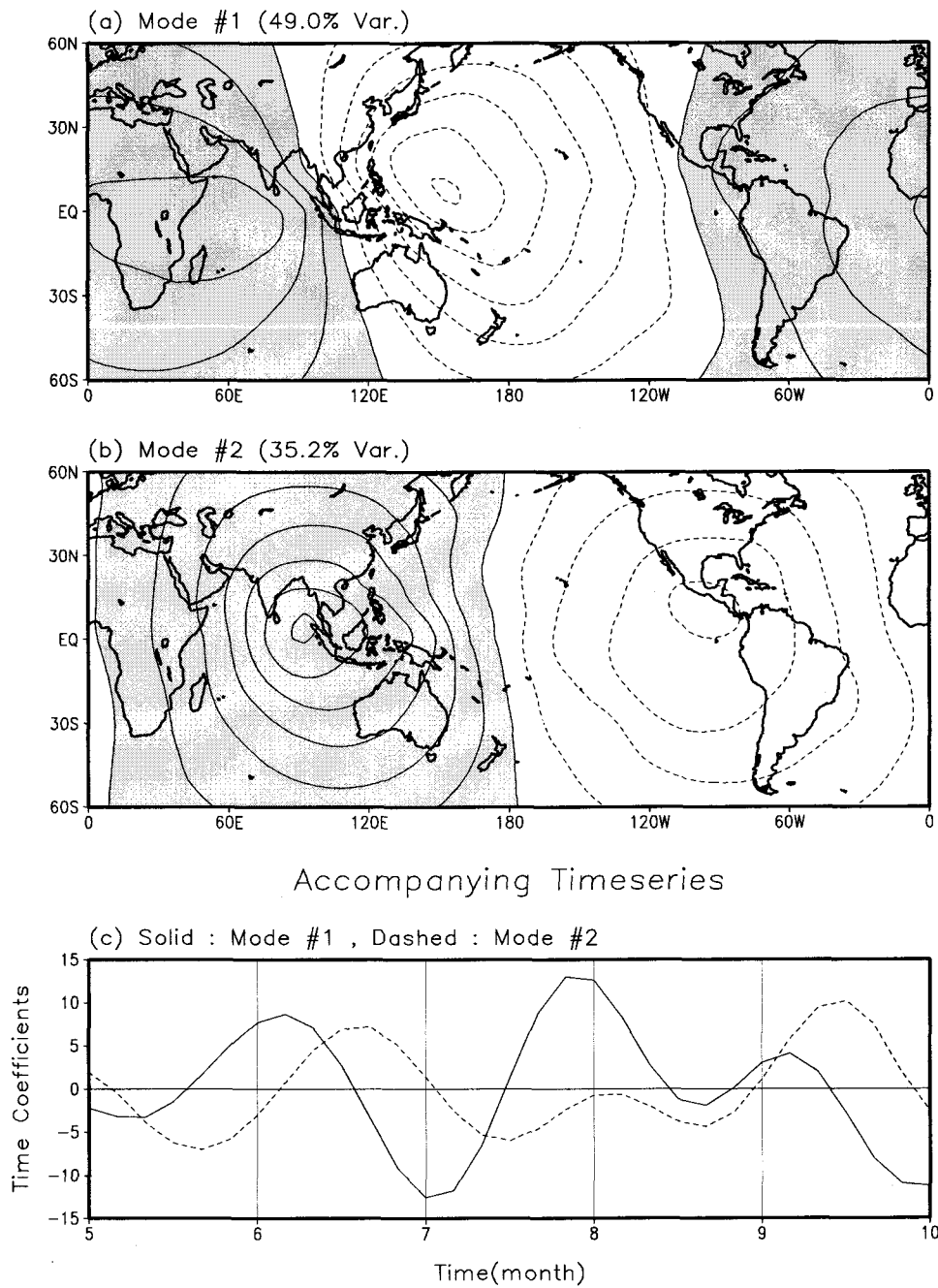
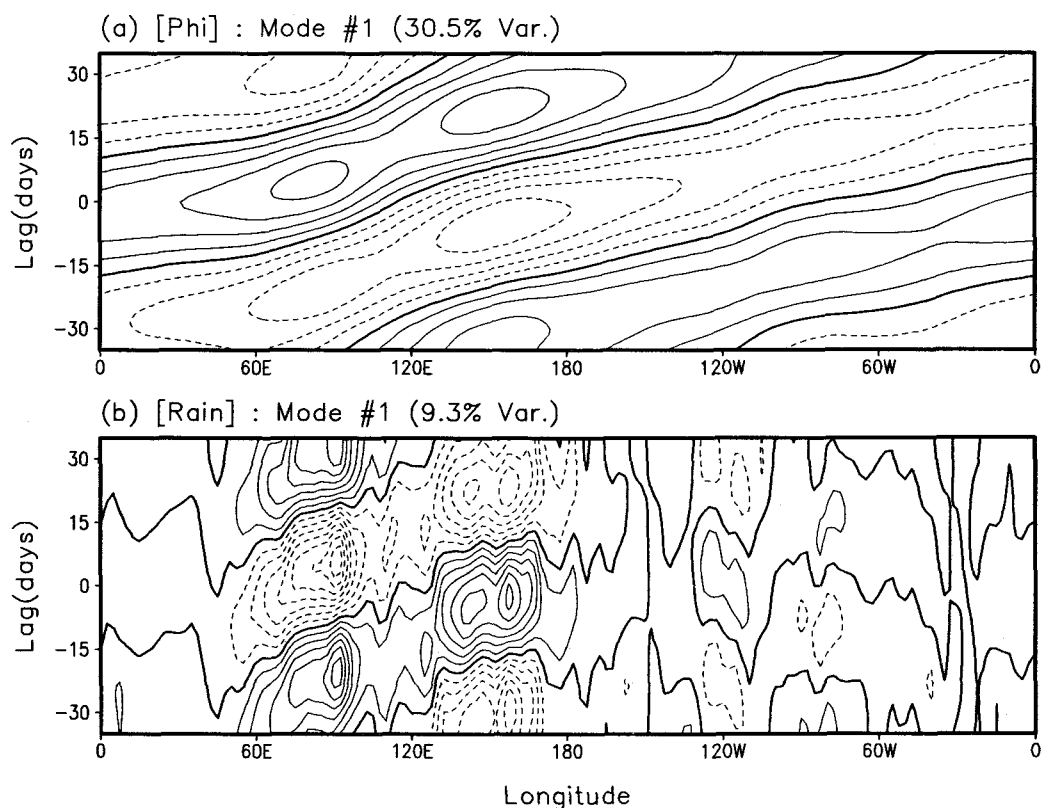


Fig. 11: First two leading eigenvectors ((a), and (b)) and accompanying timeseries (c) obtained from the EOF analysis of 35–95 day bandpassed water vapor transport potential function  $[\Phi]$ . In (a) and (b), positive and negative values are denoted by solid and dashed lines, respectively. Units are arbitrary.

## EEOF Eigenvector over 13-Year Summer



## Accompanying Timeseries

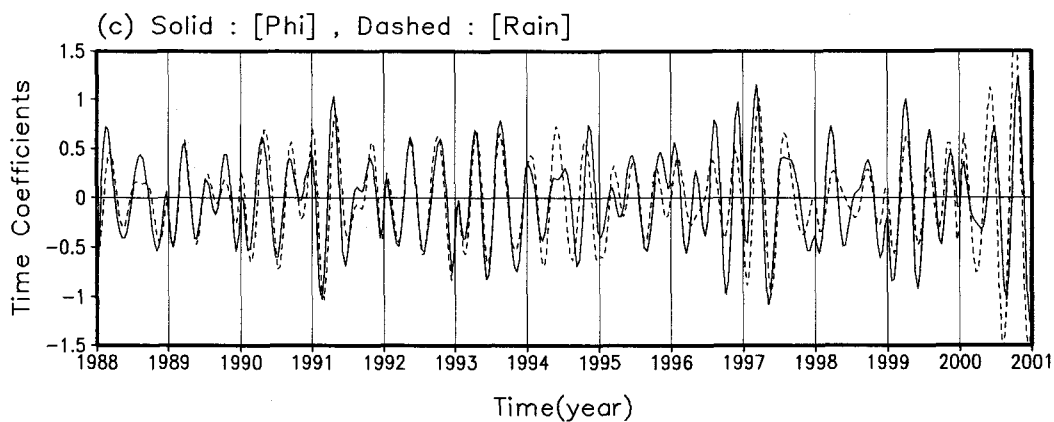


Fig. 12: First modes of the EEOF of (a) 35–95 day bandpassed,  $10^{\circ}\text{S}$ – $10^{\circ}\text{N}$  averaged water vapor transport potential function [ $\Phi$ ], and (b) rainfall from an ensemble with 15 time-lagged pentads. In (a) and (b), positive and negative values are denoted by solid and dashed lines, respectively. (c) The timeseries associated with [ $\Phi$ ] and rainfall, denoted by solid and dashed lines, respectively. Units are arbitrary.

Intraseasonal Moisture Transport over 13-Year Summer

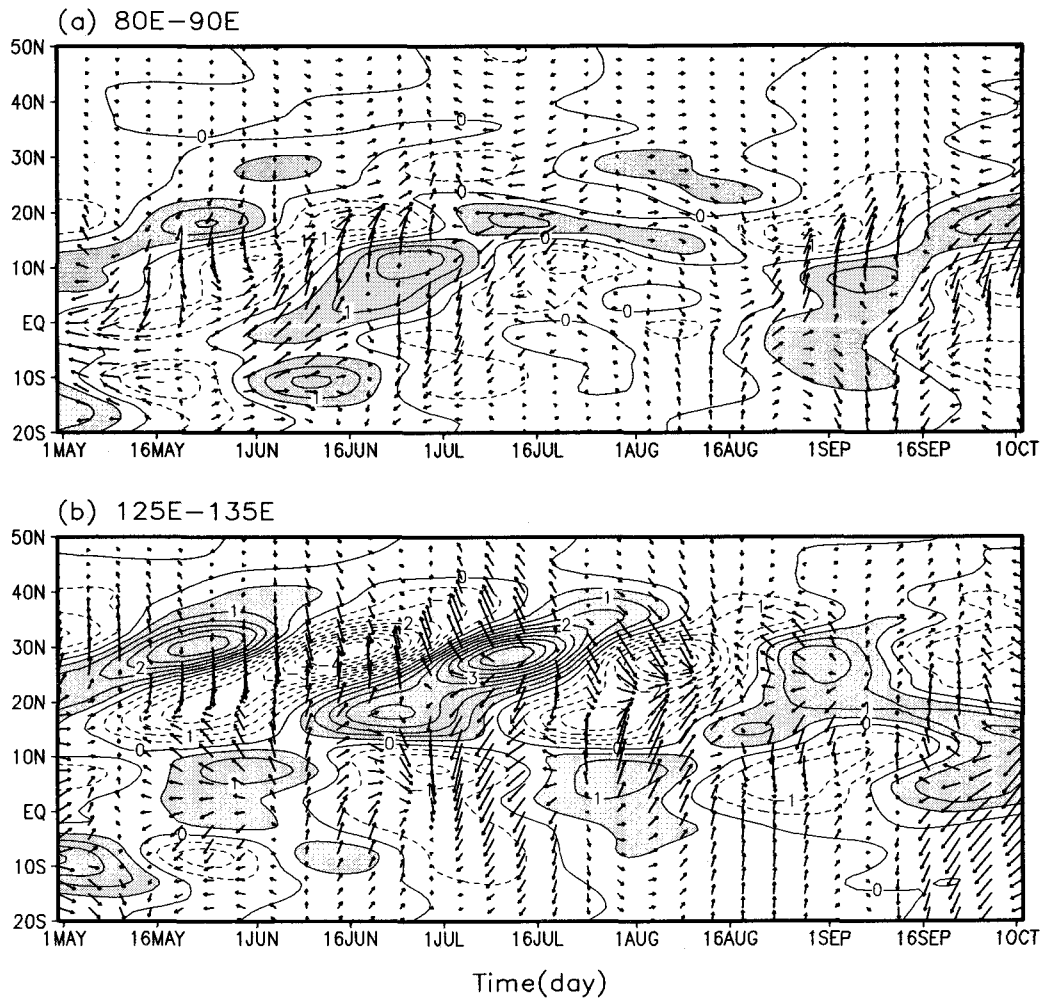


Fig. 13: The y-t diagram of latitudinal locations of evaporation minus precipitation [E-P, contour], and divergent water vapor transport [ $Q_D$ , arrow] averaged between (a) 80°E and 90°E, and (b) 125°E and 135°E. The contour interval of [E-P] is in  $0.5 \text{ mm day}^{-1}$ .



Intraseasonal 850hPa GPH over 13-Year Summer

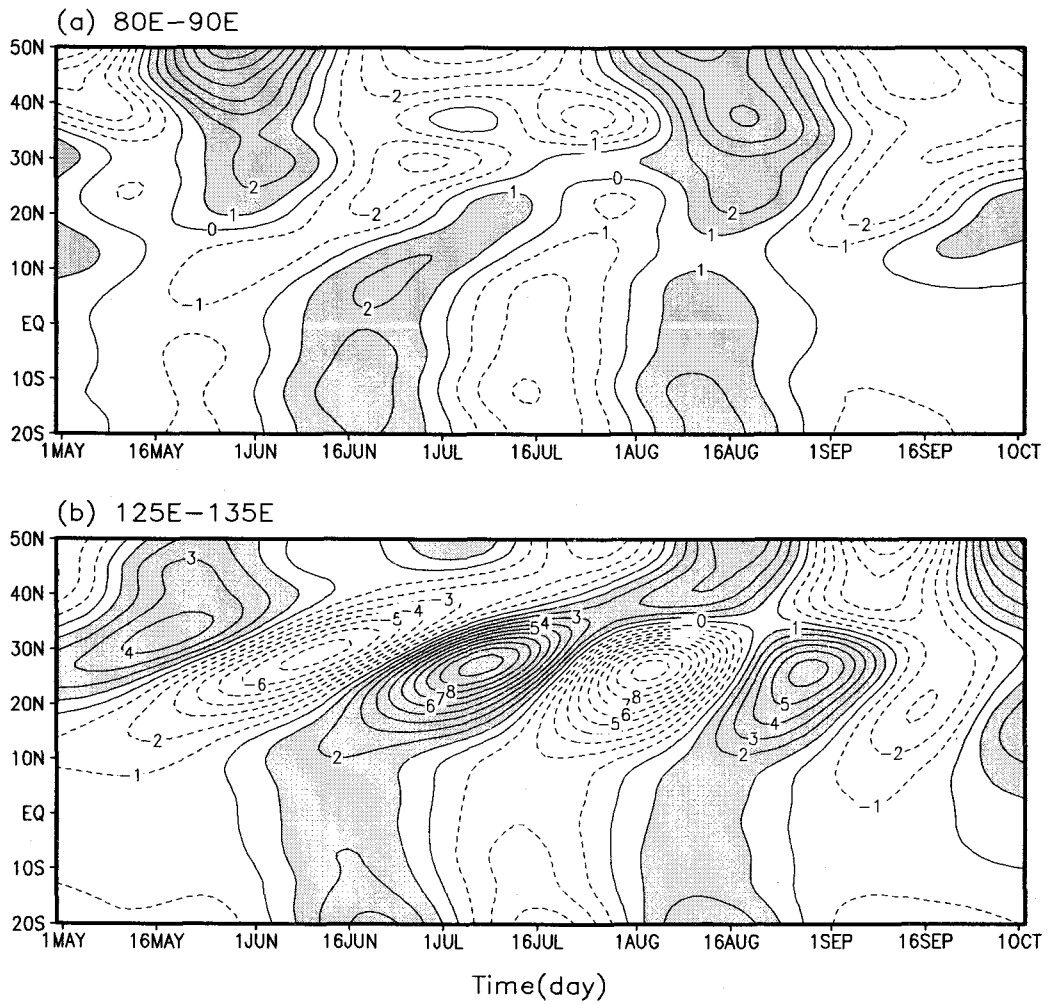


Fig. 14: Same as in Fig. 13 except for NCEP 850hPa geopotential heights, and a contour interval in 1 hPa.

Intraseasonal Moisture Transport over 13-Year Summer

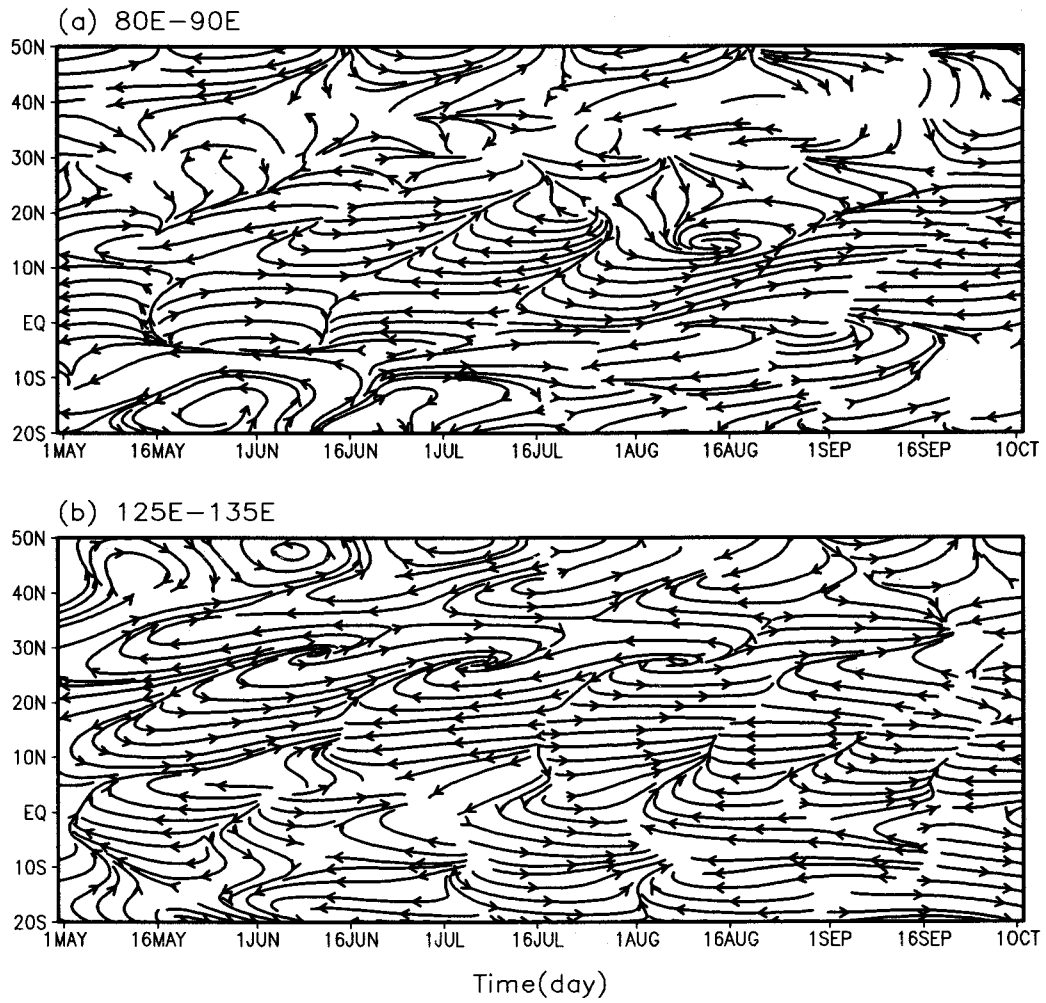


Fig. 15: Same as in Fig. 14 except for NCEP 850hPa wind fields (streamline)

## 제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

### 1절. 1차년도

#### 1. 연구개발 목표 및 평가의 착안점

##### 연구개발목표

- 대기 물수지 성분인 총수증기량, 강수량, 증발량을 포함한 물/에너지 수지의 도출
- 물수지 자료를 이용한 수송벡터 추출 알고리즘 개발
- 동아시아 몬순의 수증기원 규명

##### 평가의 착안점

- 물수지 알고리즘의 복원 또는 확보가 자료의 정확도에 근거하여 이루어졌는가?
- 수증기 수송알고리즘은 타당하게 개발되었는가?
- 동아시아 몬순의 수증기원은 규명되었는가?
- 기상예보에의 활용성 정도

#### 가. 당해년도 연구개발 목표

- (1) 위성자료 도출 총수증기량  $\pm 4\text{kg}/\text{m}^2$ , 강수량  $\pm 10\%$ , 증발량  $\pm 15\text{W}/\text{m}^2$  이내 자료 복원 및 확보
- (2) 수증기수송 알고리즘의 개발: 최소 1주일 이내의 시간규모 확보

#### 나. 평가의 착안점

- 세부연구목표 제시와 함께 세부연구목표별 가중치(100%중 몇 %)를 기재

년도	세부연구목표	가중치	평가의 착안점 및 척도
1차년도(2000)	○ 적외자료와 마이크로파 자료를 이용한 수문학적 파라메타 복원	70%	위성자료를 이용한 광역의 대기 에너지 및 물수지 도출을 위한 알고리즘 개발의 타당성과 성취도
	○ 수증기 수송항의 복원 방법 개발	30%	수증기수송 결과의 타당성 정도

2. 연구개발목표의 달성도 및 자체평가

가. 연구개발목표의 달성도

목 표	달 성 도 (%)	내 용
마이크로파 자료를 사용한 물수지 자료 복원 및 기준 자료 확보	100%	DMSP SSM/I 자료를 사용한 수증기, 증발량 복원, 복원알고리즘의 약점 파악과 개량 idea 확보. 다년간의 SSM/I 밝기온도 자료 확보, 강수량자료 확보
수증기수송 알고리즘 개발	95%	물수지 방정식과 potential function을 도입한 수증기수송 진단알고리즘 개발, 1998 El Niño 1999 La Niña 경우에 적용하여 인공위성자료에 근거한 수증기 수송량을 성공적으로 도출하였다.
적외자료를 사용한 복사수지 자료 생산	100%	NOAA 15&16에 탑재된 HIRS3 관측 자료에서 청천상향장파복사 및 청천냉각율을 계산하는 알고리즘의 개발과 이들로부터 산출물을 생산

나. 평가의 착안점에 따른 목표달성도에 대한 자체평가

평가의 착안점	자 체 평 가
위성자료를 이용한 광역의 대기 에너지 및 물수지 도출을 위한 알고리즘 개발의 타당성과 성취도	수증기 수송계산에서 요구되는 정확성을 갖는 물수지 변수를 복원 또는 확보하여 수증기수송 알고리즘 구축에 사용하였다. 알고리즘의 약점을 파악하여 개량방법을 도출하였으며 이 결과를 SCI 저널에 논문으로 제출하였다. NOAA 극궤도 위성자료 이용한 복사수지자료 생산이 연구되었고 성공적인 복사수지 자료 생산의 가능성을 얻었다. 따라서 이 분야의 목표는 성공적으로 달성되었다 사료된다.
수증기수송 결과의 타당성 정도	개발한 수증기수송 진단 알고리즘을 엘니뇨와 라니냐 경우에 적용하여 알고리즘이 성공적으로 수행됨을 파악하였다. 이의 결과는 논문투고를 위해 정리 중이며 민감도와 모델의 특성 파악은 2차년에도 계속할 예정이다. 현재 모델을 1주일 정도의 시간규모에 적용될 수 있는지의 여부에 대한 문제는 계속 연구하고 있으나 결과의 중요성에 비추어 볼 때 이 분야의 연구는 매우 성공적으로 이루어 졌다 판단된다.

## 2절. 2차년도

### 1. 연구개발 목표 및 평가의 착안점

#### 연구개발목표

- 대기 물수지 성분인 총수증기량, 강수량, 증발량을 포함한 물/에너지 수지의 도출
- 물수지 자료를 이용한 수송벡터 추출 알고리즘 개발
- 동아시아 몬순의 수증기원 규명

#### 평가의 착안점

- 물수지 알고리즘의 복원 또는 확보가 자료의 정확도에 근거하여 이루어졌는가?
- 수증기 수송알고리즘은 타당하게 개발되었는가?
- 동아시아 몬순의 수송기원은 규명되었는가?
- 기상예보에의 활용성 정도

#### 가. 당해연도 연구개발 목표

- (1) 수증기수송 진단 모델의 입력자료에 대한 민감도 조사와 모델특성과악
  - (가) 강수량 10% 에러가 수증기 수송에 주는 영향 및 아열대 고기압 지역에서의 증발량 오차가 10% 인 경우 수증기 수송의 민감도 조사
- (2) 주간 (1주일) 규모 수증기수송 진단을 위한 모델의 개량
  - (가) 수증기 시간 변화율 계산 및 주간 규모에서의 물수지항 규모분석
- (3) 동아시아 몬순 수증기원 조사를 위한 1주일 단위의 장기간 물수지 자료 생산 및 확보
  - (가) SSM/I 위성자료를 사용한 수증기, 증발량 및 해상풍 복원, 일평균 자료를 지향, 최소한 5일 평균자료 확보 및 interannual variation을 포함할 수 있는 장기간 자료 생산

#### 나. 평가의 착안점

- 세부연구목표 제시와 함께 세부연구목표별 가중치(100%중 몇 %)를 기재

년도	세부연구목표	가중치	평가의 착안점 및 척도
2차년도 (2001)	○ 모델 입력자료 민감도 조사와 모델 특성 파악	20%	○ 민감도 실험설정이 실제상황을 반영 여부 ○ 10 kg/sec/m 수송벡터의 정확도 유지와 비교한 에러의 파급은?
	○ 주간규모 수증기 수송 진단을 위한 모델의 개량	30%	○ 수증기 저장항 (시간변화율)의 규모분석 여부 ○ 시간규모에 따른 저장항의 규모분석은 시도여부 ○ 진단모델의 준비여부
	○ 장기간 물수지 자료 생산 및 확보	50%	○ 최종 목표 달성을 위한 필수조건장기간의 자료는 구축되었는가? ○ Interannual variation을 주사할 수 있는 자료의 확보여부 ○ 총수증기량 $\pm 4\text{kg/m}^2$ , 강수량 $\pm 10\%$ , 증발량 $\pm 15\text{W/m}^2$ 정확도를 갖는 자료를 구축하였는가?

2. 연구개발목표의 달성도 및 자체평가

가. 연구개발목표의 달성도

목 표	달 성 도(%)	내 용
강수량, 증발량 오차에 대한 수증기 수송 민감도	100%	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 1988-1994년 6년간의 1,2,3월 월평균 SSM/I E-P 자료 구축 및 분석</li> <li>○ 총 16종의 [E-P] 조합으로 <math>div Q_d = E - P</math> 관계로 부터 E-P 에러가 수송항에 미치는 영향 파악</li> <li>○ NCEP 자료를 사용하여 유닛에서의 10% 증발량 에러가 수증기 수송항에 미치는 영향을 potential function을 계산하여 파악</li> </ul>
주간 규모에서의 물수지항 규모분석	100%	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 구름수적량의 시간변화율은 수증기의 시간변화율과 비교하여 매우 작으며 무시할 수 있음. 또한 구름수적량의 발산항 또한 무시할 정도로 작음</li> <li>○ 물수지 방정식을 통한 수증기 수송항을 얻기 위해 수증기 시간변화율 자료의 구축 필요.</li> </ul>
장기간 물수지 자료 생산	100%	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 1992-1999년 (8년) 5~9월 동안 SSM/I 자료처리 및 해상풍, 수증기, 구름수적량, 증발량 복원</li> <li>○ 동기간의 강수량 자료 확보</li> </ul>

나. 평가의 착안점에 따른 목표달성도에 대한 자체평가

평가의 착안점	자 체 평 가
민감도 실험설정이 실제 상황을 반영하고 있는가?	양상불 기법을 사용하여 다양한 강수량, 증발량 자료를 확보하여 수증기 수송의 에러폭을 결정하였다. 따라서 목표달성
10 kg/sec/m 수송벡터의 정확도 유지와 비교한 에러의 파급은?	에러파급의 민감도를 조사하였다. 목표달성
수증기 저장항의 크기 계산 여부	계산하였으며 단기간에 있어 무시할 수 없음이 밝혀짐. 목표달성
물수지 방정식에 나타난 다른항과 비교한 크기 분석 수행 여부	구름수적량의 시간변화율을 계산하여 다른 항과 비교. 구름수적량의 시간변화율은 무시할 수 있음. 목표달성
장기간의 자료 구축은 최종 목표 달성을 위한 필수조건 이다.	8년 (1992-1999년) 동안의 일자료를 생산-- 목표달성
총수증기량 $\pm 4\text{kg/m}^2$ , 강수량 $\pm 10\%$ , 증발량 $\pm 15\text{W/m}^2$ 정확도를 갖는 자료를 구축 하였는가?	구축됨

### 3절. 3차년도

#### 1. 연구개발 목표 및 평가의 착안점

<p>연구개발목표</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 대기 물수지 성분인 총수증기량, 강수량, 증발량을 포함한 물/에너지 수지의 도출</li> <li>○ 물수지 자료를 이용한 수송벡터 추출 알고리즘 개발</li> <li>○ 동아시아 몬순의 수증기원 규명</li> </ul> <p>평가의 착안점</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 물수지 알고리즘의 복원 또는 확보가 자료의 정확도에 근거하여 이루어졌는가?</li> <li>○ 수증기 수송알고리즘은 타당하게 개발되었는가?</li> <li>○ 동아시아 몬순의 수송기원은 규명되었는가?</li> <li>○ 기상예보에의 활용성 정도</li> </ul>
---

#### 가. 당해연도 연구개발 목표

- (1) 동아시아 몬순의 수문학적 특성 규명
  - (가) 수증기 수송 특성 파악과 이가 에너지 수지에 미치는 영향 파악
  - (나) 장마의 진행에 따른 수증기원의 변화 파악
  - (다) 20-30일, 40-50일 주기와 관련된 동아시아 몬순 관계 규명

#### 나. 평가의 착안점

- 세부연구목표 제시와 함께 세부연구목표별 가중치(100%중 몇 %)를 기재

년도	세부연구목표	가중치	평가의 착안점 및 척도
3차년도 (2002)	○ 동아시아 몬순의 에너지 및 수문학적 특성 규명	100%	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 5-7일 간격의 수증기수송계산은 이루어졌는가?</li> <li>○ 몬순의 진행에 따른 수증기의 수송변화는 일어났는가?</li> <li>○ 동아시아 몬순의 수증기원은 규명되었는가?</li> </ul>

2. 연구개발목표의 달성도 및 자체평가  
 가. 연구개발목표의 달성도

목 표	달 성 도(%)	내 용
동아시아 몬순의 에너지 및 수문학적 특성 규명	100%	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 1988-2000년 13년간의 5월-9월 일평균 SSM/I E-P 자료 구축. 이로부터 5일 평균 수증기 수송 계산</li> <li>○ Potential function 계산을 통한 아시아 몬순의 진행과 수증기 수송 변화 관계 규명</li> <li>○ 장마와 관련된 동아시아 지역에서의 수증기원 규명</li> </ul>

나. 평가의 착안점에 따른 목표달성도에 대한 자체평가

평가의 착안점	자 체 평 가
5-7일 간격의 수증기수송 계산은 이루어졌는가?	1988-2000년 13년간의 5월-9월 일평균 SSM/I E-P 자료로부터 5일 평균 수증기 수송을 계산하였다. 목표 달성
Potential function 계산을 통한 아시아 몬순의 진행과 수증기 수송 변화 관계 규명	Potential function의 EOF 분석을 통해 30-60일 주기와 관련된 몬순과 수증기 수송 변화를 규명하였다. 목표 달성
장마와 관련된 동아시아 지역에서의 수증기원 규명	동아시아 지역에서 나타나는 20-30일, 40-50일 주기의 수증기 수렴대의 변화를 통해서 장마와 관련된 동아시아 수증기원을 규명하였다. 목표 달성



## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

인공위성 관측치를 이용한 물수지 연구는 몬순지역에서의 수증기-에너지 순환 과정의 이해에 도움을 줄 뿐 아니라 관측에 의한 현상의 이해를 통해 대기순환 기후모델을 검증하고 성능을 판단하는 연구로 이어질 수 있다. 자연스럽게 이 연구에서 얻어진 결과는 기후모델의 개선을 지향하는 모델분석에 이용될 수 있다. 더욱이 모델 분석에 자주 이용되는 재분석 자료는 강수량 등 물순환의 기술이 부정확하여 수증기 수송의 정확성은 약한 것으로 보고되고 있다. 따라서 다음의 활용계획을 설정하였다.

**CES 기후모델의 물순환 과정 이해와 검증:** 이 연구에서 얻은 결과를 CES (서울대 소재 기후환경연구센터) 기후모델 모의결과와 비교분석하여 CES 모델이 가지고 있는 물순환의 특징을 이해하며 검증을 통해 CES 기후모델의 정확도 증진에 활용한다.

## 제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

이 연구의 근간을 이루는 방법은 인공위성 원격탐사 기법이며 이 중에서도 마이크로파 관측을 이용한 물수지 요소 관측 기법이다. 물수지 요소로서는 대기중의 총 수증기량 (가장 수량), 강수량, 증발량을 들 수 있다. 미국을 비롯한 선진국가에서는 특히 강수량관측이 일기 및 기후 예보에 줄 수 있는 파급효과를 인지하고 전구규모에서 3시간 간격의 강수량을 얻고자 하는 노력을 경주하고 있다. 물론 타 물수지 요소인 총수증기량, 증발량도 동시에 얻을 수 있다. 이를 위해 미국 NASA에서는 일본과 공동으로 TRMM 후속위성인 GPM 핵심위성을 개발하고 있다. 핵심위성은 Non Sun Synchronous Orbit을 가지며 기울기 각도는 약 65도로 고위도를 포함하며 Ku & Ka 밴드의 2중 주파수 레이더를 탑재하며, 수평 분해능 ~ 4 km, 수직 분해능 ~ 250 m 분해능을 갖는다. 또한 10.7, 19, 22, 37, 85, 150 GHz V&H 다중채널 복사계를 탑재한다. GPM 사업은 또한 마이크로파 복사계를 탑재한 함대 위성을 구성하여 3시간 간격의 전구 강수량자료를 추출하고자 하는 노력이 가속화 되고 있다. 이에 대한 활용연구등 우리의 적극적인 대비가 필요하며 현재 진행 중인 GPM에 대한 세계적 노력은 다음과 같다.

- 1997년 첫 강수레이더가 탑재된 TRMM 위성 발사.
- 2001년 초기 4년 계획 사업을 7년 사업으로 연장 (TRMM 위성의 궤도를 350 km에서 500 km로 상승).
- 2000년 TRMM 사업의 성공에 바탕을 둔 후속사업의 필요성 제기.
- 2001년 미국 의회에서 GPM 사업의 추진을 위한 기초연구비 지원.
- 2001년 1차 추진회의가 20여 개국 250여명의 전문가가 참석하여 미국에서 개최됨.
- 2002년 NASA의 정식 사업으로 승인 (Formulation 단계).
- GPM 핵심위성 (Core Satellite) 탑재 이중채널 레이더 생산 중 (일본).
- 2002년 ESA (유럽): EGPM을 향후 ESA Mission으로 결정. (1-2개의 위성발사계획).
- 2002년 프랑스와 인도의 공동개발위성인 Megha-Torpiques의 GPM 참여.
- 2002년 NOAA의 GPM 사업에의 Partnership 관계 공식결정 (NPOESS 위성자료 활용 및 활용기술 개발).
- 2003년 6월 제 3회 국제 GPM workshop (ESTEC, Noordwijk, 네덜란드)

## 제 7 장 참고문헌

기상청, 1995: 장마백서, 기상청, 345 p.

김도형, 손병주, 1999: 1994-95년 동아시아 하계 몬순의 대기물수지 특성과 수증기원에 관한 연구. *한국기상학회지*, **20**, 232-241.

박순웅, 1986: 1978년 하계장마시 장마전선과 관련되어 나타난 열과 수증기의 원에 관하여. *한국기상학회지*, **22**, 1-27.

박순웅, 1988: 1985년 장마기간에 동부 아시아 지역의 대기순환의 시간적 변화. *한국기상학회지*, **24**, 22-43.

박순웅, 1989: 한반도 중부지방 장마전선상에 발생한 호우와 관련된 종관기상장의 변화. *한국기상학회지*, **25**, 168-191.

손병주, 김도형, 김혜영, 서애숙, 1998: SSM/I 대기물수지 변수를 이용한 1994-95년 하계 몬순의 특성 연구. *대한원격탐사학회지*, **14**, 1-16.

Cadet, D. L., and S. Greco, 1987: Water vapor transport over the Indian Ocean during the 1979 summer monsoon. Part I: Water vapor fluxes. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 653-663.

Cadet, D. L., and S. Greco, 1987: Water vapor transport over the Indian Ocean during the 1979 summer monsoon. Part II: Water vapor budgets. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 2358-2366.

Chen, T.-C., 1985: Global water vapor flux and maintenance during FGGE. *Mon. Wea. Rev.*, **113**, 1801-1919.

Chen, T.-C., M.-C. Yen, and M. Murakami, 1988: The water vapor transport associated with the 30-50 day oscillation over the Asian monsoon region during 1979 summer. *Mon. Wea. Rev.*, **116**, 1983-2002.

Chen, T.-C., and J. Pfaendtner, 1993: On the atmospheric branch of the hydrological cycle. *J. Clim.*, **6**, 161-167.

Chen, T.-C., M.-C. Yen, and S.-P. Weng, 2000: Interaction between the summer

- monsoon in East Asia and the South China Sea: Intraseasonal monsoon modes. *J. Atmos. Sci.*, **57**, 1373–1392.
- Chou, S.-H., 1993: A comparison of airborne eddy correlation and bulk aerodynamic methods for ocean–air turbulent fluxes during cold–air outbreaks. *Bound.-Layer Meteor.*, **64**, 75–100.
- Chou, S.-H., C.-L. Shie, R.M. Atlas, and J. Ardizzone, 1997: Air–sea fluxes retrieved from Special Sensor Microwave Imager data. *J. Geophys. Res.*, **102**, 10705–12726.
- Cohen, J.L., D.A. Salstein, and R.D. Rosen, 2000: Interannual variability in the meridional transport of water vapor. *J. Hydrometeor.*, **1**, 547–553.
- da Silva, A. M., C. C. Young and S. Levitus, 1994: *Atlas of Surface Marine Data 1994, Volume 1: Algorithms and Procedures*. NOAA Atlas NESDIS 6, U.S. Department of Commerce, NOAA, NESDIS, 83pp.
- Gutowski Jr., W.J., Y. Chen, and Z. tles, 1997: Atmospheric water vapor transport in NCEP–NCAR reanalyses: Comparison with river discharge in the Central United States. *Bull. Ameri. Meteor. Soc.*, **78**, 1957–1969.
- Ho, C.-H., and I.-S. Kang, 1988: The variability of precipitation in Korea. *J. Kor. Meteor. Soc.*, **24**, 38–48
- Huffman, G.J., R.F. Adler, P. Arkin, A. Chang, R. Ferraro, A. Gruber, J. Janowiak, A. McNab, B. Rudolph, and U. Schneider, 1997: The global precipitation climatology project (GPCP) combined precipitation dataset. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 5–20.
- Kang, I.-S., C.-H. Ho, Y.-K. Lim, and K.-M. Lau, 1999: Principal modes of climatological seasonal and intraseasonal variations of the Asian summer monsoon. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 322–340.
- Kummerow, C., and Coauthors, 2000: The status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after two years in orbit. *J. Appl. Meteor.*, **39**, 1965–1982.
- Lau, K.-M., G. J. Yang, and S. H. Shen, 1988: Seasonal and intraseasonal climatology of summer monsoon rainfall over East Asia. *Mon. Wea. Rev.*, **116**, 18–37.


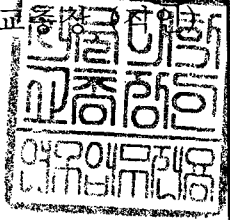
- Lau, K.M., and M.T. Li, 1984: The monsoon of East Asia and its global associations—A survey. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **65**, 114-125
- Lindzen, R.S., and S. Nigam, 1987: On the role of surface sea surface temperature gradients in forcing low-level winds and convergence in the Tropics. *J. Atmos. Sci.*, **44**, 2418-2435.
- McBride, J.L., B.W. Gunn, G.J. Holland, T.D. Keenan, N.E. Davidson, and W.M. Frank, 1989: Time series of total heating and moistening over the Gulf of Carpentaria radiosonde array during AMEX. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 2701-2713.
- Mo, K.C., and R.W. Higgins, 1996: Large-scale atmospheric moisture transport as evaluated in the NCEP/NCAR and the NASA/DAO reanalyses. *J. Clim.*, **9**, 1531-1545.
- Nanjundiah, R.S., 2000: Impact of the moisture transport formulation on the simulated tropical rainfall in a general circulation model. *Climate Dynamics*, **16**, 303-317.
- Myers, David S., Waliser, Duane E. 2003: Three-Dimensional Water Vapor and Cloud Variations Associated with the Madden - Julian Oscillation during Northern Hemisphere Winter. *J. Clim.*, **16**, 929 - 950.
- Ninomiya, K., and C. Kobayashi, 1998: Precipitation and moisture balance of the Asian summer monsoon in 1991. Part I: Precipitation and major circulation systems. *J. Meteor. Soc. Japan*, **76**, 855-877.
- Ninomiya, K., and C. Kobayashi, 1999: Precipitation and moisture balance of the Asian summer monsoon in 1991. Part II: Moisture transport and moisture balance. *J. Meteor. Soc. Japan*, **77**, 77-99.
- Oort, A.H., J. J. Yienger, 1996: Observed interannual variability in the Hadley circulation and its connection to ENSO. *J. Clim.*, **9**, 2751-2767.
- Peixoto, J.P., and A.H. Oort, 1983: The atmospheric branch of the hydrological cycle and climate. *Variation in the Global Water Budget*, A. Street-Perrott and Co-editors, Ed., Reidel, 5-65.
- Peixoto, J.P., and A.H. Oort, 1992: *Physics of Climate*. American Institute of Physics, New York, 520 pp.

- Philander, S.G., 1990: *El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation*. Academic Press, San Diego, 289pp.
- Roads, J.O., S.-C. Chen, A.K. Guetter, and K.P. Georgakakos, 1994: Large-scale aspects of the United States hydrological cycle. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **75**, 1589-1610.
- Roads, J., M. Kanamitsu, and R. Stewart, 2002: CSE Water and energy budgets in the NCEP-DOE reanalysis II, *J. Hydrometeorol.* **3**, 227-248.
- Rosen, R.D., D.A. Salstein, and J.P. Peixoto, 1979: Variability in the annual fields of large-scale atmospheric water vapor transport. *Mon. Wea. Rev.*, **107**, 26-37.
- Schulz, J., J.M. Meywerk, S. Ewald, and P. Schluessel, 1997: Evaluation of satellite-derived latent heat fluxes. *J. Clim.*, **10**, 2782-2795.
- Smith, E.A., and Coauthors, 1998: Results of WetNet PIP-2 Project, *J. Atmos. Sci.*, **55**, 1483-1536.
- Sohn, B.J., and E.A. Smith, 1992: Global energy transports and the influence of clouds on transport requirements: A satellite analysis. *J. Clim.*, **5**, 717-734.
- Sohn, B.J., and E.A. Smith, 1993: Energy transports by ocean and atmosphere based on an entropy extremum principle. Part 1: Zonal averaged transports. *J. Clim.*, **6**, 886-899.
- Trenberth, K.E., and C.J. Guillemot, 1995: Evaluation of the global moisture budget as seen from analyses. *J. Clim.*, **8**, 2255-2272.
- Trenberth, K.E., and C.J. Guillemot, 1998: Evaluation of the atmospheric moisture and hydrological cycle in the NCEP/NCAR reanalyses. *Climate Dynamics*, **14**, 213-231.
- Vincent, D.G., 1994: The South Pacific Convergence Zone (SPCZ): A review. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 1949-1970.
- Wang, B., and X. Xu, 1997: Northern Hemisphere summer monsoon singularities and climatological intraseasonal oscillation. *J. Clim.*, **10**, 1071-1085
- Webster, P.J., 1981: Mechanisms determining the atmospheric response to sea surface temperature anomalies. *J. Atmos. Sci.*, **38**, 554-571.

Wentz, F.J., 1992: Measurement of oceanic wind vector using satellite microwave radiometers. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **30**, 960-972.

Wentz, F.J., and R.W. Spencer, 1998: SSM/I rain retrievals within a unified all-weather ocean algorithm. *J. Atmos. Sci.*, **55**, 1613-1627.

## 특정연구개발사업 연구결과 활용계획서

사업명	중사업명	국제공동연구		
	세부사업명			
과제명	위성자료를 이용한 동아시아 지역의 에너지와 수문학적 순환 연구			
연구기관	서울대학교	연구책임자	손병주	
총연구기간	2000. 9. 1. ~ 2003. 6. 30. ( 34개월)			
총 연구비 (단위 : 천원)	정부출연금	민간부담금	합계	
	124,000		124,000	
기술분야				
참여기업				
공동연구기관	NASA/GSFC, NASA/MSFC			
위탁연구기관				
연구결과활용 (해당항목에(√) 표시)	1. 기업화 ( )	2. 기술이전 ( )	3. 후속연구추진(√)	4. 타사업에 활용 ( )
	5. 선행 및 기초연구(√)	6. 기타목적활용 (교육, 연구)(√)	7. 활용중단(미활용)( )	8. 기타 ( )
<p>특정연구개발사업 처리규정 제 31조(연구개발결과의 보고) 제 2항에 의거 연구결과 활용계획서를 제출합니다.</p> <p>첨부 : 1. 연구결과 활용계획서 1부.</p> <p style="text-align: right;">2003 년 7 월 8 일</p> <p style="text-align: right;">연구책임자 : 손 병 주</p> <p style="text-align: right;">연구기관장 : 서울대학교</p>				
<p>과학기술부장관 귀하</p> <div style="text-align: right; margin-top: 20px;">    </div>				



[첨부1]

## 연구결과 활용계획서

1. 연구목표 및 내용

동아시아 몬순 특히 장마의 수증기원을 밝히기 위해 미 군사위성 DMSP 에 탑재된 SSM/I 마이크로파 관측으로부터 대기 물수지 요소 (총수증기량, 강수량, 증발량)를 복원하고 이를 이용한 수증기 벡터수송 산출알고리즘을 개발한다. 수증기 수송알고리즘은 바람 정보를 요하지 않고 순전히 인공위성 관측에 기대는 방법이다. 개발한 알고리즘을 적용하여 얻은 수증기수송 벡터는 장마의 수증기원의 규명뿐 아니라 물수지에 나타나는 북태평양 고기압의 팽창/수축과 장마와의 관계, 20-30일, 40-50일 주기의 변동성과 물수지와 몬순순환 사이의 관계를 연구를 가능케 한다. 이를 위해 동아시아 지역에서 10% 오차 이내의 정확도를 갖는 대기 물수지 요소를 도출 또는 확보하며, 수증기 수송벡터는 최소한 평균장을 1주일 단위로 얻으며 이 때 10 kg/sec/m 오차내의 정확도를 갖도록 한다.

2. 연구수행결과 현황(연구종료시점까지)

가. 특허(실용신안) 등 자료목록

해당사항 없음

나. 프로그램 등록목록

해당사항 없음

다. 노하우 내역

해당사항 없음

라. 발생품 및 시작품 내역

해당사항 없음

마. 논문게재 및 발표 실적

○ 논문게재 실적(필요시 별지사용)

학술지 명칭	제목	게재 연월일	호	발행기관	국명	SCI 게재여부
Journal of Climate	Evaporation / SST sensitivity over the Tropical Oceans during ENSO events as estimated from the da Silva, Young, Levitus surface marine data sets.(수정중)			미국기상학회	미국	○
Journal of Climate	Derived over-ocean water vapor transports from satellite-retrieved E-P datasets.(투고중)			미국기상학회	미국	○
계: 2건수						

○ 학술회의 발표 실적(필요시 별지사용)

학술회의 명칭	제목	개재 연월일	호	발행기관	국명
한국기상학회	Westward propagating moisture pattern in the North Pacific subtropical high during 1995 summer	2000년 10월26일		한국기상학회	한국
11th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography	Water vapor transport over the tropical oceans during El Niño and La Niña and its implication for the tropical circulation: A satellite approach	2001년 10월16일		미국기상학회	미국
The 2nd world space congress	Use of satellite-derived rainfall data for diagnosing water vapor transport over the global oceans	2002년 10월		Committee on Space Research	미국
1st CCSR and CES Joint Workshop	Water vapor transport over the global oceans during El Niño and La Niña: A satellite approach	2002년 7월 16일		CCSR	일본
1st CCSR and CES Joint Workshop	A new look at cloud radiative forcing: Coupling with water vapor forcing	2002년 7월16일		CCSR	일본
한국기상학회	An evaluation of global water vapor transport from NCEP reanalysis	2002년 4월26일		한국기상학회	한국
13th Symposium on global change and climate variations	Sensitivity of the tropical atmospheric energy balance to ENSO-related SST change: How well can we quantify hydrologic and radiative responses?	2002년 1월		미국기상학회	미국
3rd International GPM workshop	Use of satellite-derived rainfall data for diagnosing water vapor transport over the global oceans	2003년 6월		GPM	네덜란드
The XXIII General Assembly of IUGG	Climatological intraseasonal variations of satellite-derived water vapor transports over the Asian summer monsoon area	2003년 6월30일		The International Union of Geodesy and Geophysics	일본
계: 9건수					

### 3. 연구성과

대기순환에 의한 잠열수송을 나타내는 수증기 수송은 주로 불완전한 라디오존데 관측이나 모델 재분석자료에 의존해왔다. 이 연구에서 순전히 인공위성 관측결과를 이용하는 알고리즘 개발과 이의 적용에서 얻은 수증기 수송 결과는 문순의 수증기원을 밝히는 관측 결과가 될 것이며 향후 대기순환모델의 검증과 이해를 위한 기본자료로 사용될 수 있다.

### 4. 기술이전 및 연구결과 활용계획

#### 가. 당해연도 활용계획(6하원칙에 따라 구체적으로 작성)

후속연구추진: 아시아 문순연구에서 세계적인 권위자로 알려진 미국 Iowa 주립대학의 Tsing-Chan Chen 교수와 ‘수증기 수송에 나타나는 대기 역학적 해석’ 제하의 후속 연구를 계획하고 있으며 이를 위해 이 연구의 연구조원으로 있었던 서울대 지구환경과학부 박사과정학생인 박성찬을 2003. 9.1-2004. 8. 31 동안 Chen 교수에게 파견하며 (서울대 BK21 지원) 파견기간 동안 후속연구를 계속할 예정이다.

#### 나. 활용방법

이 연구에서 얻어진 장기간의 5일 평균 수증기 수송장을 역학적으로 해석하며 얻어진 결과를 국제학술지에 발표한다.

#### 다. 차년도이후 활용계획(6하원칙에 따라 구체적으로 작성)

인공위성 관측치만을 이용한 수증기 수송 벡터장 계산 알고리즘은 향후 전구강우 관측 (GPM) 프로그램이 활성화 될 때, 더 작은 규모에서의 수증기 수송을 계산할 수 있는 도구를 제공한다. 따라서 인공위성 관측치로부터 현업용의 수송장이 얻어져 일기예보에 도움이 되도록 활용할 계획이다.

#### 라. 서울대 CES 대기순환 모델 검증과 이해에의 응용

### 5. 기대효과

향후 활용에 따른 기술적, 사회·경제적 파급효과(정량적 및 정성적으로 전문가입장에서 구체적으로 작성)

이 연구는 개발보다는 기초연구의 성격이 강하여 교육/연구 목적, 기초연구로서의 잠재적 파급효과가 있다. 즉, 일기예보모델 또는 기후모델의 정확도 향상과 모델 검증 등을 위해 이 연구에서 얻은 결과를 활용할 수 있고 이 과정에서 인력이 양성되는 효과를 거둘 수 있다.

### 6. 문제점 및 건의사항(연구성과의 제고를 위한 제도·규정 및 연구관리 등의 개선점을 기재)

기초 연구 특히 방대한 자료의 확보와 처리 그리고 분석을 요하는 본 연구와 같은 부류의 연구는 연구의 성과가 종료시점 이후에 발생할 수 있는 특징을 갖는다. 따라

서 현 과학재단에서 채용하고 있는 방법을 도입하여 연구의 성패를 판단하는 절대적인 평가를 2년후로 유예함을 건의한다. 이 것은 논문 집필에서 출판까지 약 2년이 소요되는 현실을 감안한 건의이다. 이 기간동안 출판된 논문도 사사가 있는 한 연구 성과로 인정해야 할 것이다.