

論文

대류성 불안정 지수를 이용한 집중호우 예측

김영철*, 함숙정**

Heavy Rainfall prediction using convective instability index

Young-Chul Kim*, Sook-Jung Ham**

ABSTRACT

The purpose of this study is possibility of the heavy rainfall prediction using instability index.

The convective instability index using this study is Convective Available Potential Energy(CAPE) concerned the growth energy of the storm, Bulk Richardson Number(BRN) concerned the type and strength of the storm, and Sotrm Relative Helicity(SRH) concerned maintenance of the storm.

To verify the instability index, the simulation of heavy rainfall case experiment by Numerical Weather Prediction(NWP) model(MM5) are designed.

The results of this study summarized that the heavy rainfall related to the high instability index and the proper combination of one more instability index made the higher heavy rainfall prediction.

Key Words : heavy rainfall(집중호우), instability index(불안정 지수), NWP(수치예보)

1. 서 론

일반적으로 호우란 연평균 강수량의 10%에 해당하는 비가 하루에 내리는 현상을 말한다. 이런 관점에서 볼 때 우리나라에서는 하루에 100~150mm의 비가 내리는 경우를 호우로 불러도 무리가 없겠지만 현재 기상청에서는 12시간 강수량이 80mm, 150mm 가량 예측되면 각각 호우 주의보와 경보를 발표하여 재해예방에 주의를 기울이도록 하고 있다.

우리나라에서 발생하는 호우는 주로 장마기간이나 태풍이 올 때 발생하였으나 최근에는 장마가 끝난 뒤나, 단시간에 국지적으로 발생하는 집

중호우 형태로 변화되어 많은 피해를 야기하고 예보 또한 어려워 많은 사회적인 이슈를 만들어 내고 있는 실정이다. 최근 20년간 강수량 및 강수일수 분석에 의하면[1], 최근 들어 강수일수의 변화가 크지 않으나 연강수량은 증가된 경향을 보인다. 이것은 한 번에 내리는 강수량이 증가되는 것을 의미하고, 곧 강수량상이 집중호우로 변화되고 있음을 나타내는 것이다. 또한 우리나라의 여름철 대기가 대단히 불안정 해져서 강수형태가 대류성 강수로 바뀌고 있다는 것을 보여준다.

이렇게 호우를 유발하는 악성 스톰(severe storm)의 주요 요소는, 어느 장소에 존재하거나 이루어지는 많은 수증기량, 강한 연직 상승류, 그리고 정적 불안정도이다[2]. 따라서 악성 스톰을 예보하기 위한 도구로서 대기의 불안정한 정도를 나타내는 불안정지수(instability index)를 개발하여 사용해왔다. Showalter Stability Index(SSI), K index(KI), Lifted index(LI) 등이 그 한 예이다.

† 2008년 11월 20일 접수 ~ 2009년 12월 22일 심사완료

* 정회원 한서대학교 항공운항학과 부교수

** 공주대학교 대기과학과

연락 저자 E-Mail : yckim@hanseo.ac.kr

충남 태안군 남면 신온리 산105

한편 강수는 항공기 운항에 있어서도 주요한 장애 요소이다. 비나 눈 등의 강수형태 자체가 문제이기도 하지만 동시에 발생하는 시정감소, 활주로상태의 악화, 저고도 바람시어, 난류 등 항공기 운항에 많은 장애를 가져와 지연 발착이나 치명적인 사고를 유발하고 있다. FAA의 ASIAS(Aviation Safety Information Analysis and Sharing) system에 소개된 NASDAC(National Aviation Safety Data Analysis Center)의 기상관련 사고 연구조사 자료(1994-2003)에 의하면 전체 항공기 사고에 기상요소가 차지하는 비율은 21.3%를 차지하고 있다. 기상요소별로는 바람 48.1%, 시정/시일링 20.5%, 난류 9.2%, 밀도고도 7.3%, 착빙 7%, 강수 4.7%, 뇌우 1.9%, 바람시어 1.2%의 순위로 나타났다(Fig. 1). 비록 강수자체만으로는 6번째 순위를 차지하고 있지만 전 기상요소가 강수와 관련되어 발생할 수 있는 현상이기 때문에 정확한 강수 예보는 항공기 운항에 있어서 대단히 중요한 의미를 갖는다. 특히 강한 바람, 난류, 착빙, 바람시어 등을 동반할 수 있는 대류성 강수 예보의 중요성은 아무리 강조하여도 지나치지 않다.

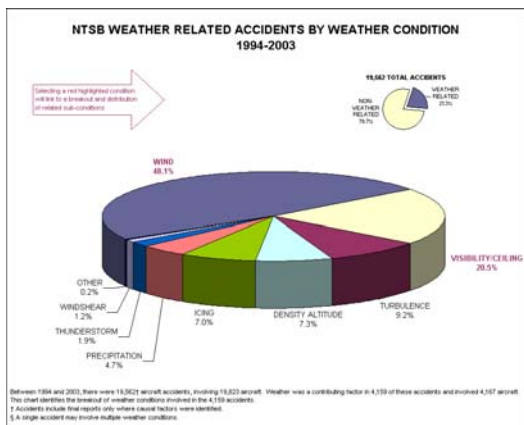


Fig. 1. FAA ASIAS NASDAC 기상 관련 항공기 사고 조사 통계 결과.

앞에서 언급한 바와 같이 최근 우리나라의 여름철 대기 불안정도가 증가함에 따라서 강한 대류성 호우가 증가하고 있는 실정이다. 따라서 그동안 주로 사용한 SSI, KI, LI 등은 변화된 대기의 불안정성을 잘 반영하지 못하기 때문에 점차 변화하고 있는 대기 불안정성을 잘 반영할 수 있는 불안정지수의 도입이 필요하다. 본 논문은 대기

불안정성을 잘 반영하는 대류성 불안정 지수로서 Convective Available Potential Energy(CAPE), Bulk Richardson Number(BRN) 등을 도입하여 집중호우 시 지수의 효용성을 분석하였다.

II. 연구 방법

2.1. 대류성 불안정 지수

스톰이 발생하기 좋은 조건으로는 강한 대류불안정과 대기 하층의 강한 연직바람시어(Vertical Wind Shear)가 있다. 대류불안정은 강한 스톰이 발생할 수 있는 가능성에 대한 정보를 제공하고 하층 연직 바람시어는 발생한 스톰의 형태와 스톰의 지속 시간을 결정하는데 주로 이용된다.

2.1.1 Convective Available Potential Energy(CAPE)

CAPE는 SkewT-logP선도에서 공기가 상승하여 뇌우활동이 시작되는 자유대류고도(Level of Free Convection; LFC)에서 뇌우활동이 멈추는 평형 고도(Equilibrium Level; EL)까지 온도선과 습윤단열선이 이루는 면적을 계산하여 에너지로 환산한 것이다(Fig. 2). 즉, CAPE는 스톰 성장에 필요한 양의 에너지로 정의된다.

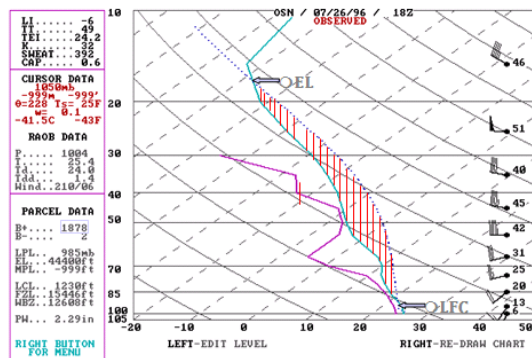


Fig. 2. SkewT-logP선도 상의 CAPE (붉은 빗금영역).

이것은 공기괴가 주위 환경보다 더 온난하여 상승에 필요한 양의 부력을 만들어 낼 가능성을 제시하는 것이다. 이것은 아래와 같이 주어진다.

$$CAPE = R \int_{p_{LFC}}^{p_{EL}} [T(p) - T_a(p)] d \ln p$$

악성 일기에서 CAPE값은 넓은 범위에서 나타나나 대략 $1000 m^2 s^{-2}$ 이하 값에서는 강한 대류 발생 가능성이 적고, 악성 스톰이 발달할 때는 $2000 m^2 s^{-2}$ 이상이다[3]. 이와 같이 CAPE는 뇌우와 집중호우를 야기할 수 있는 강한 상승운동의 발생 가능성을 제시한다.

2.1.2 Bulk Richardson Number(BRN)

BRN 계산식은 CAPE와 대기층 내 연직바람시어와 관련하여 계산되는 Richardson Number의 한 가지 형태로서 다음과 같이 쓰인다.

$$BRN = \frac{CAPE}{\frac{1}{2} U_z^2}$$

여기서 U_z 는 연직바람시어이고 대략 3km~6 km까지 하부 대류권의 층에서 평균된 값이다.

주변 환경이 불안정하고 뇌우 발생 가능성이 높을 때 BRN은 폭풍의 유형을 구별하는데 유용하다. 10이하 값에서는 악기상이 거의 나타나지 않으며 15~35값에서는 supercell storms이 발생하고, 50이상 값에서는 multicell storms이 발생하는 것으로 알려져 있다[4].

2.1.3 Storm Relative Helicity(SRH)

Helicity는 스톰으로 유입되는 저기압성 상승기류의 정도를 나타내는 것으로 속도와 와도 벡터의 스칼라 곱으로 표시된다[5].

Relative Helicity는 스톰의 상승 회전류 지속 가능성을 제시하는 것으로 다음과 같이 같다.

$$SRH = \frac{H}{Vw} \\ H = \vec{V} \cdot \vec{w} \quad , \quad \vec{w} = \nabla \times \vec{V}$$

Helicity는 속도와 와도 벡터의 스칼라 곱으로 표현된다. Helicity값은 양의 값과 음의 값을 가질 수 있는데 양의 값은 바람이 순전하고 스톰이 평균 바람에 비하여 오른쪽으로 이동하는 경우이며 스톰의 저기압성 회전과 관련되어 있다. 음의

경우는 반전하는 바람과 스톰 이동이 평균 바람에 비해 왼쪽으로 이동하며 보통 우박을 동반한다. Helicity값이 150~300 사이 값을 가지면 약한 강도 스톰, 300~500 사이 값은 강한 스톰, 450 이상이면 격렬한 스톰이 발생하는 것으로 알려져 있다[3].

2. 불안정 지수 비교

1998년 7월 31일 지리산 주위에서 발생한 호우는 우리나라 집중호우 발생 양상을 새롭게 조명할 수 있게 한 사례이다. 즉, 이 사례 이전까지 우리나라 여름철에는 장마기에 주로 강수가 많이 내리고 장마 이후에는 맑고 무더운 날씨를 보이는 가운데, 오후에 국지적인 소나기가 내리는 것이 전형적인 양상이었다. 그러나 지리산 호우 사건 이후에는 장마 종료 후에 대류불안정에 의한 집중호우가 잦고, 강수량도 오히려 장마기보다 더 많으며, 시간당 100mm 이상인 강수 사례가 증가하고 있는 실정이다.

따라서 우리나라 여름철 강수 발생 양상에 대한 새로운 연구 조사가 이루어지는 계기가 되었다. 또한 이것은 우리나라의 여름철의 대기가 대단히 불안정한 대기 상태로 바뀌어가고 있는 증거이기도 하다.

지리산 호우 사례를 현재 예보기관에서 주로 사용하는 불안정 지수와 CAPE, BRN, SRH와 비교하여 보았다. Fig. 3은 호우 발생시 지리산 인근 지역의 6시간 누적 강수량과 광주 고층관측 자료에서 계산된 CAPE의 변화를 보인 것으로, 강수가 시작되기 전에 CAPE가 크게 증가하고 있음을 보여준다.

Table. 1은 1998년 7월 31일 광주 고층 관측 자료에서 계산된 불안정 지수들의 6시간 간격 변화를 나타내었다. 현재 우리나라 예보기관에서 주로 사용중인 SSI, LI, KI는 야간으로 갈수록 대기가 안정되고 있는 상태를 나타내고 있어서 호우 예측에 실패하고 있다. 반면 CAPE, BRN, SRH는 시간이 지남에 따라 대기가 불안정해지고 있음을 잘 나타내주고 있다. 이것은 CAPE, BRN 등이 적어도 우리나라의 여름철 악성 스톰의 예보에 기존의 불안정 지수보다 더 좋은 예측 지수로 사용될 수 있음을 암시해주고 있다. 따라서 최근에 발생한 악성 스톰 사례에 대하여 수치예보 모형을 이용하여 대류성 불안정 지수의 효율성을 살펴보았다.

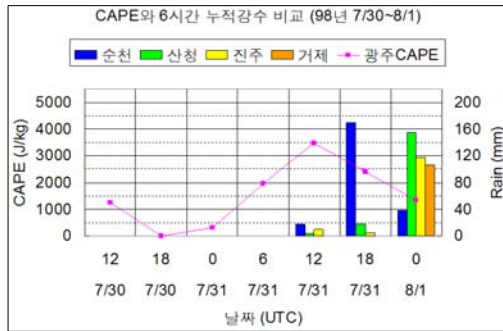


Fig. 3. 1998년 지리산 호우 시 지리산 인근 지역 6시간 누적 강수량과 광주 CAPE.

Table 1. 지리산 사례('98.7.31) 시 불안정지수

시간 (UTC)	불안정 지수					
	SSI	LI	KI	CAPE	BRN	SRH
00	-4	-3	40	320	16	107
06	0	-7	35	1969	54	113
12	3	-2	33	3481	74	258

III. 사례 실험

3.1 모델 구성

본 연구에서 불안정 지수 예측 자료를 산출하기 위하여 사용된 수치예보모델은 PSU/NCAR에서 개발된 MM5이며, 그 모델 구성은 Table. 2와 같다. 모델 영역은 동아시아 영역과 한반도 영역을 포함하고 있는 1개의 등지격자체계를 가진다. 모델에서 생산된 수치예보는 48시간예보자료를 생산한다.

3.2 자료

집중호우 발생 시 수치예보모델을 이용한 불안정 지수예보자료의 집중호우 모의 성능을 판단하기 위하여 집중호우 사례에 대한 실험을 실시하였다. 불안정 지수예보는 앞에서 제시한 수치예

보모델을 이용하여 산출하였다. 예측 성능 판단을 위하여 관측 자료는 지점별 누적강수량 자료를 이용하였고 사례일의 실제 대기의 상태에 대한 불안정 지수를 분석하기 위하여 Sharp 프로그램을 이용하였다.

Table. 2. 모델의 구성

	Domain1	Domain2
Version	MM5 Version 3.7	
Resolution	64×81(60km)	85×94 (20km)
Vertical layer	23 level(Top 100hPa)	
Forecast	48 hour	
Initial & boundary condition	GFS(0.5°×0.5°)	
SST	NCEP SST daily mean (0.5°×0.5°)	
Implicit Physics Scheme	Reisner	
Cumulus Parameterization	Grell	Kain-Fritsch
Planetary Boundary Layer	MRF	Blackadar
Radiation Parameterization	Cloud Radiation	

집중호우 사례일 중 2004년 8월 18일 뇌전을 통한 집중호우 사례와 2007년 6월 21일 국지적 집중호우 사례에 대해 분석하였다.

3.3 사례 분석

2004년 8월 18일은 Fig. 4와 같이 한반도 남쪽에서 15호 태풍 MEGI가 북상 중이었고 뇌우를 동반한 집중호우가 있었다. 이 사례의 관측 자료를 살펴보면, 8월 18일 14시부터 17시까지 광주에 뇌전 현상이 있었으며, 뇌우가 발생한 시간(14, 16, 17시)의 시간당 강수 25mm 이상의 집중호우를 나타냈다. 또 상주에서도 8월 18일 5시에 25mm이상의 강수와 함께 뇌우가 발생했다.

실제 뇌우가 있었던 광주에서의 안정도 지수를 구하고자 Sharp 프로그램이 이용하여 대기의 연직 상태를 살펴 본 결과, 광주지역의 CAPE는 1073J/kg으로 높을 값을 보였다.

이 사례에 대해서 수치예보모델 8월 17일 12UTC의 24시간 예보자료를 살펴보면 CAPE 가 광주를 포함한 남부지역에 3000J/kg의 높은 값을 보여 집중호우 및 뇌우 발생 가능성을 잘 모의한 것을 확인할 수 있다(Fig. 5).

실제 뇌전이 발생한 시간과 지역이 모델 예보 자료에서도 실제 뇌우 발생 지역과 동일한 지역에서 안정도지수를 높게 모의하였으며, 이 때 뇌전이 동반된 집중호우 예보도 좋은 모의 성능을 나타내었다.

두 번째 사례는 2007년 6월 21일이며, 잠재대류불안정 가능성이 낮더라도 스톱의 상승회전류의 지속적인 유지로 인해 호우가 발생한 경우이다.

Fig. 6을 보면, AWS의 24시간 누적 강수량이 군산에서 최고 60mm가 나타났고, AWS의 1시간 누적 강수량이 군산에서 최고 37mm가 기록되었다. 즉, 일 강수량은 적었으나, 단시간에 내린 집중호우가 발생했음을 알 수 있다.

이와 같은 집중호우의 발생 가능성은 Fig. 7을 통해 군산 지역에 걸친 대류 셀을 통해서도 분석할 수 있다.

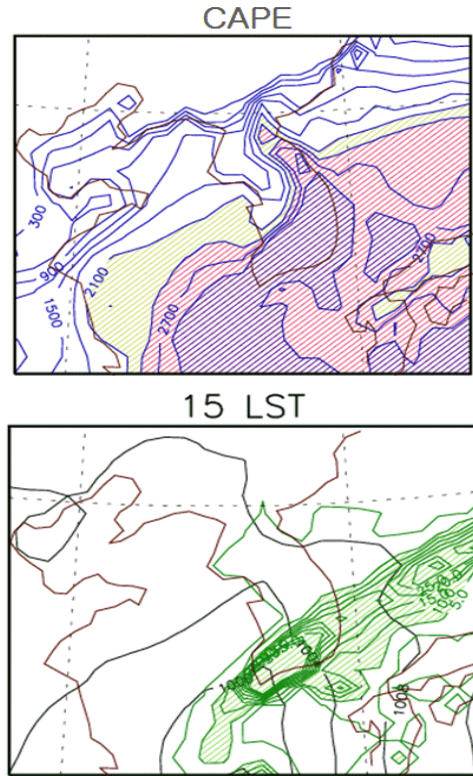


Fig. 5. 2004년 8월 18일 15LST CAPE (상) 및 3시간누적강수량(하) 24시간예보

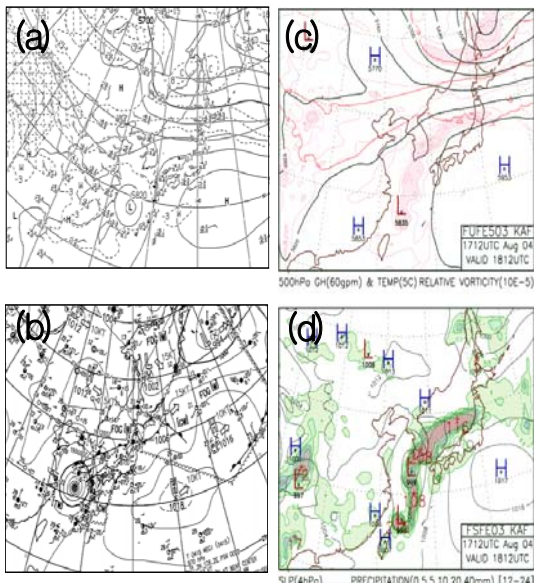


Fig. 4. 2004년 8월 18일 12UTC GTS_FAX 분석((a) 500hPa, (b)surface), 24시간예보 ((c)500hPa, (d) surface).

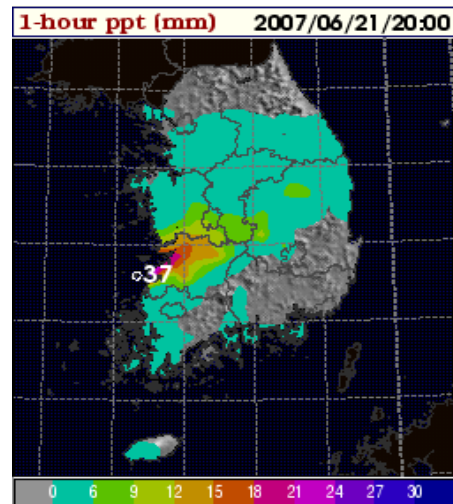


Fig. 6. 2007년 6월 21일11UTC 기상청 AWS 1시간 누적강수량.

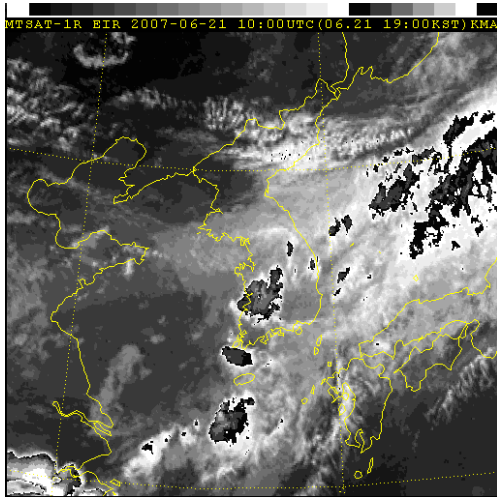


Fig. 7. 2007년 6월 21일 11UTC MTSAT 한반도 적외영상.

관측값을 이용하여 실제 대기에 대한 불안정 지수를 살펴보면, CAPE가 14J/kg로 낮게 분석되었다. 수치예보모델 결과에서 CAPE값은 분석보다는 높게 모의하나 149J/kg로 대류 발생 가능성을 낮게 모의하였다. 그러나 SRH는 500이상 값이 중부지방에 걸쳐 나타났다(Fig. 8).

이 사례를 통해 알 수 있는 것은 집중호우 발생 가능성을 판단하기 위해서는 대류의 불안정도 뿐만 아니라 연직 윈드 쉬어도 함께 고려해야 함을 증명하고 있다. 따라서 CAPE가 낮다하더라도 SRH를 함께 고려하여야 집중호우 발생 여부를 보다 정확하게 판단할 수 있다.

IV. 결론

본 연구는 우리나라 여름철 강한 대류성 호우가 증가하고 있는 최근의 경향에 맞추어, 대기 불안정을 잘 반영할 수 있는 불안정지수인 CAPE, BRN, SRH 등을 도입하고, 이를 이용한 집중호우의 발생 가능 사례와 비교 검증을 통해 그 활용성을 살펴보았다.

지리산 호우 사례 분석 결과, 현재 예보기관에서 주로 사용하고 있는 SSI, KI 등의 불안정지수보다 CAPE, BRN 등의 대류불안정 지수를 이용하는 것이 집중호우 예측에 호의적임을 보여주었다. 이는 우리나라 여름철 집중 호우가 점차 대기의 불안정도에 많은 영향을 받고 있다는 것을 보여주는 것이라 할 수 있다.

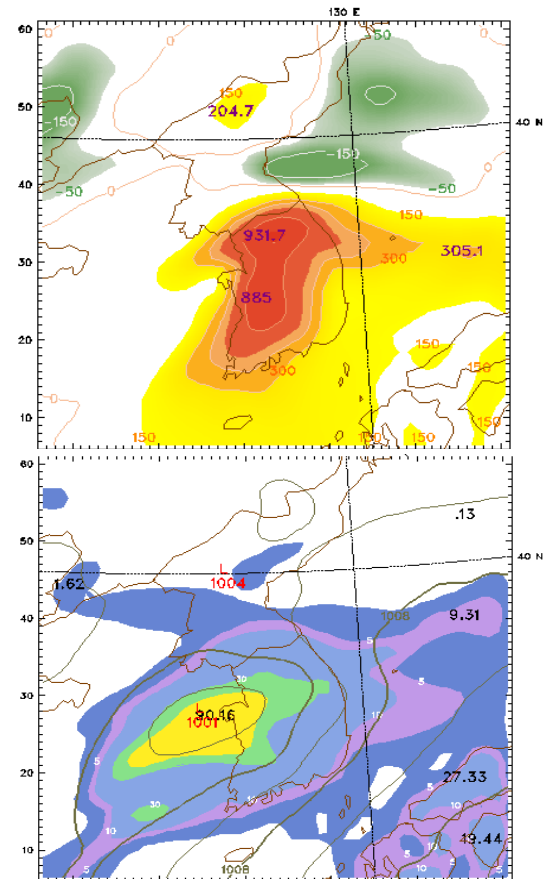


Fig. 8. 2007년 6월 21일 21UTC SRH(상) 및 12시간누적강수량(하)36시간예보

또한 최근의 호우 사례 수치실험에서 나타난 바와 같이 대류성 불안정 지수들도 각각의 사례에 적용할 때는 지수의 특성과 대기의 상태를 적절히 결합하여 적용하여야 함을 알 수 있었다.

따라서 한반도 관측 결과에서 얻은 불안정 지수와 뇌우, 집중호우, 돌풍, 우박 등의 상관 관계에 대한 연구와 수치예보모델에서 산출된 불안정 지수와의 지속적인 비교·분석을 통한 검증 연구가 필요하다고 판단된다.

최근 우리나라 상공의 악성 스톰 속을 운항하던 여객기가 동체 앞부분이 떨어져 나간 상태로 비상착륙을 한 사고가 있었다. 이것은 강하게 발달한 스톰 내부의 강한 상승, 하강류 그리고, 우박 등에 의해서 이런 파괴적인 결과를 초래한 것으로 판단된다. 점점 더 불안정해지는 우리나라 여름철 악성 스톰 예측 능력은 항공기 안전 운항에도 큰 영향을 미칠 수 있어서 본 논문에서 제시한 불안정 지수를 이용한 악성 스톰의 예보 체

계를 구축하는 것이 매우 필수적이라 할 수 있다.

참고 문헌

- [1] 김영철, 손명환, 김윤재, "한반도 기상자료 데이터 베이스 구축", 국방과학연구소, 1999, 85pp.
- [2] Maddox, R. A., "A methodology for forecasting heavy convective precipitation and flash flooding", *Natl. Wea. Dig.*, 4, 1979, 30-42.
- [3] Djuric, D., *Weather Analysis*, Prentice-Hall Inc., 1994, 304 pp.
- [4] Nastrom, D., "Using Hodographs in Thunderstorm Forecasting", *AWS Forcaster Memo*, 1992, 17pp.
- [5] Wan-Shu Wu and Douglas K. Lilly, "Helicity and Thermal Convection with Shear", *Journal of the Atmospheric Sciences*, 49, 1992, 1800-1809.