論文

항공기 안전 운항에 영향을 미치는 중규모 대류계 사례 연구(I)

김영철*

A study of Mesoscale Convective Systems(MCSs) event impacts
on the safe operation of aircraft(I)

Young-Chul Kim*

ABSTRACT

Heavy Rainfall event accompanying with Mesoscale Convective Systems(MCSs) inducing flash flooding and Gimpo and Incheon International Airport closing over Seoul metropolitan area was investigated this study. This heavy rainfall event was occurred through the synoptic scale boundary of North Pacific Subtropical high, Typhoon and also can predicted by proper analysis of various forecasting parameters such as abundant moisture, instabilities, and synoptic/mesoscale forcing.

Key Words : Mesoscale Convective Systems(중규모대류계), Heavy Rainfall(집중호우), Boundary(경계), Forecasting Parameters(예보 매개변수들), Flash Flooding(돌발홍수), 공항 폐쇄(Airport Closing)

1. 서 론

항공기는 기본적으로 대기 중을 운항하기 때문에 거의 모든 기상 요소에 의해서 영향을 받게 되는데, 미국 연방항공국(FAA) 항공 안전 정보 분석 및 공유(ASIAS) 보고서[1]에 따르면, 2003년부터 2007년까지 발생한 8,657건의 항공기 사고들 중에서 약 20.1%인 1,740건의 사고가 기상 요소와 관련되어 있는 것으로 알려져 있다. 1994년에서 2003년까지 기상 관련 항공기 사고의 비율이 21.8%였다는 점을 감안하면 기상에 의한 항공기 사고는 항공기상 정보의 전파 체계 개선, 레이더 등 관측 장비의 확충 등으로 조금씩 감소

되고 있는 것을 알 수 있다. 그렇지만 항공기상 요소 점유율이 단일 요소로서 20%를 여전히 넘고 있다는 것은 항공 안전과 기상 요소가 직접적으로 관련되어 있다는 것이 통계적으로 증명되고 있다. 항공기상청의 우리나라 항공기 사고와 기상 관련 연구에 의하면[2], 2006년 6월 9일 아시아나 항공 여객기가 대류성 구름 속에서 우박에 충돌하여 기체 전방의 레이돔이 이탈하고 조종실 유리창이 깨진 채 착륙한 사고, 2007년 8월 8일 제주항공과 대한항공 여객기가 낙뢰를 맞은 사고, 2007년 9월 1일 제주항공 여객기가 낙뢰로 프로펠러가 손상되는 사고 등 다양한 기상 관련 피해가 보고되고 있다. 항공기 사고에 직·간접적으로 영향을 미치는 기상요소들은 바람, 시정, 실링, 높은 밀도고도, 난류, 착빙, 강수, 상승/하강 기류, 뇌우, 바람시어, 열적 상승, 고온, 낙뢰 등으로 거의 모든 항공기상 요소들이 관련되어 있는 것으로 나타났다. 또한 겨울철에는 폭설로 인한 활주로 폐쇄로 항공기 운항 자체를 불가능하

2014년 01월 14일 접수 ~ 2014년 03월 19일 심사완료
논문심사일 (2014.01.17, 1차), (2014.03.05, 2차)

* 한서대학교 항공운항학과 교수

연락처, E-mail : yckim@hanseo.ac.kr

충남 태안군 남면 신온리 산105 한서대학교 태안비행장

게 하기도 한다. 김영철[3]은 폭설로 인한 활주로 폐쇄 사례를 연구한 바 있다.

위에서 언급된 위험기상 요소들은 독립적으로 발생하기도 하지만 대부분의 경우에는 대류성 스톱과 관련되어 발생한다. 여름철 기간 동안 한반도에서 발생하는 기상 현상들 중에서 거의 모든 항공기상 장애 요소들을 포함하고 있는 것이 중규모대류계(MCSs; Mesoscale Convective Systems)[4]이다. 중규모대류계란 어느 한 방향으로 100km 이상의 수평적 규모를 가지는 구름계로 뇌우와 지속적인 강수를 포함하고 있는 강한 대류현상으로 정의된다. 중규모대류계는 중규모 수직 순환을 통해서 깊고 습윤한 대류활동을 발달시키기 때문에 오랜 기간 동안 생애를 유지하게 되고 뇌우, 집중호우, 돌풍, 저-시정 및 저-실랑과 같은 항공기상 장애요소들을 일정한 지역에서 지속적으로 발생시켜 결국은 항공기 운항을 지연시키거나 낙뢰, 착빙 등으로 인해 항공기에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 그러나 이러한 위험기상 현상들을 야기하는 중규모대류계는 그 공간 규모가 수십km~수백km에 불과하고 시간 규모도 6시간에서 12시간에 불과하기 때문에 일반적인 중관규모 자료를 활용한 항공기상 예보를 통해서 정확한 발생 시간과 위치를 규명하는 것은 매우 어려운 것이 현실이다. 따라서 중규모대류계와 관련된 집중호우와 뇌우를 보다 정확하게 예보하기 위해서는 중규모대류계와 관련된 중관규모에서 중규모 환경을 정확하게 이해하고, 발생한 대류성 스톱들이 중규모대류계로 발달할지 여부를 결정하기 위한 명확한 예보책을 수립해야 할 필요가 있다.

중규모대류계에 동반된 집중호우와 뇌우 사례들은 뚜렷한 경압불안정, 열적 불안정과 같은 강한 중관규모 강제력을 동반하는 중위도 저기압 혹은 장마전선의 직접적인 한반도 영향, 태풍과 같은 열대성 저압부의 한반도 직·간접 영향, 장마 종료 이후 북태평양 고기압 가장자리에서 발생하는 열적 불안정 혹은 대류 잠재 불안정 등에 의해서 주로 발생한다. 본 연구는 여름철 중규모대류계에 의한 집중호우와 뇌우 사례들 중에서 한랭 건조한 대륙성 기단과 온난 습윤한 북태평양 기단 사이의 대류 잠재 불안정 사례(I)와 북태평양 고기압 가장자리에서 발생한 열적 불안정에 의한 사례(II) 분석과 정확한 예보를 위한 매개변수 분석을 통해 항공 안전에 악영향을 미칠 수 있는 위험기상 현상에 대한 적절한 예보척도를 제시하고자 한다.

2. 기단경계에서 발생한 수도권 집중호우 사례 개관

2.1 강수량 분포와 중규모대류계 발달 특성

2010년 추석 연휴 시작일인 9월 21일 서울·경기도에 집중호우가 발생하여 광화문 일대가 잠기고 지하철 운행이 중단되었으며, 중심가 도로 및 주택 침수 등 큰 피해가 발생하였으며, 김포공항과 인천공항의 항공기 운항이 집중호우와 뇌우경보로 인해서 오전 11시 경부터 오후 17시 경까지 제한을 받았다. 이날 서울에 내린 259.5mm의 비는 서울의 9월 평균 강수량인 170mm의 1.5배에 이르는 정도로서, 9월 하순 일 강수량으로는 1907년 관측 시작 이래 가장 많은 비가 내린 것으로 기록되었다(Fig. 1).

Fig. 1 Radar Image at 1300(L) and Temporal Distribution of 1hour Rainfall at Seoul.

이번 호우는 대부분의 강수가 오후시간에만(12~18시) 집중되어 강수강도가 매우 강해 도심의 돌발홍수로 인해 많은 피해가 발생하였는데, 소방방재청에 보고된 피해는 사망 2명, 재산피해 593억 원으로 집계되었다.

서울 관측소에선 21일 259.5mm를 기록하여 관측 이래 9월 일 최대 강수량 2위 기록을 경신하였으며, 영월(153.0mm)은 관측 이래 9월 일 최대 강수량 1위 기록을 경신하였다. 경기도 이천은 1시간 최대 강수량 98.0mm를 기록하여 관측 이래 최고 기록을 경신하였다. 서울의 경우 도심과 공항의 경우 배수로를 설계할 때에 일반적으로 하수처리 능력은 시간당 75mm 정도로 결정하게 되는데, 단시간에 하수배수관이 감당할 수 없는 양의 비가 내릴 때 발생하는 도심 홍수의 특징을 잘 보여준 사례로서 단시간 집중호우의 사전 예측의 중요성을 보여준 사례였다.

Fig. 2는 중규모대류계가 발생하여 유지되는 동안의 위성 영상과 레이더 영상을 보여주고 있

다. 9월 21일 06시경 레이더 영상에서 경기만 부근에 독립적인 뇌우들이 발생하기 시작하고 있다. 이 독립적인 뇌우들은 08시에 접어들면서 점차 병합되기 시작하여 수 십 km^2 정도의 규모를 가지는 중규모대류계로 발달하기 시작한다. 위성 영상에서도 중규모대류계 A에 의해서 발달된 모루구름들이 점차 관측되기 시작한다. 중규모대류계 A는 3시간 동안 제자리에 머물면서 발달하여 그 규모가 100km^2 를 넘어서기 시작하고 레이더 에코가 영역형에서 점차 선형으로 발달하기 시작한다. 그리고 11시부터는 중규모대류계 A의 서쪽 서해상에서 새로운 중규모대류계 B가 발생하여 빠르게 동진한다. 이 중규모대류계 A와 B는 12시 이후 병합되어 서해상에서 한반도 중부지방을 가로질러 동해까지 좁은 지역에 동서로 누운

Fig. 2 Radar Image at 1300(L) and Temporal Distribution of 1hour Rainfall at Seoul.

선형 중규모대류계로 발달하기 시작한다. 14시를 넘어서면서 중규모대류계 A와 B는 서로 병합되어 하나의 중규모대류계로 발달하고, 15시 이후에는 바로 그 후방에 새로운 중규모대류계 C가 발생하여 기존 중규모대류계 지역으로 유입되고 19시까지 지속적으로 수도권 지역에 집중호우와 뇌우를 생성하고 있다. 동일한 지역에서 선행하는 중규모대류계의 풍상측(upstream)지역에서 새로운 중규모대류계가 연속적으로 발생하여 100km 이상의 지속적인 선형구름 밴드를 형성함으로써 동일한 지역에 집중호우와 뇌우를 연속적으로 야기하는 현상을 후방-형성 중규모대류계(Back-building MCSs)[5]라고 부르는데, 위성영상

의 형태를 볼 때 이번 집중호우와 뇌우 사례가 전형적인 후방-형성 중규모대류계에 의한 것이라는 것을 명확하게 보여준다. 레이더 영상은 중규모대류계에서 발생하는 다양한 형태학적 특성들을[6] 잘 보여준다. 06시 레이더 영상에서 단일 영역형-세포(areal cell) 형태로 발달한 중규모대류계는 09시에 전형적인 보우-에코(bow-echo)를 보유한 중규모대류계로 발달하였고, 12시를 넘어서면서 강풍과 집중호우를 만들어내는데 아주 유리한 형태인, 파형선형에코(LEWP; Line-Echo-Wave-Pattern)으로 발달한다. 뚜렷한 선형에코 즉 스콜선(Squall-line)을 가지는 다중세포 선형(Multi-Cell Line) 중규모대류계는 종관규모 강제력뿐만 아니라 대류계 내부의 역학적인 수직 운동과 에너지 교환 과정을 통해서 오랜 기간 동안 동일한 장소에서 지속적으로 발달하는 특성을 갖는다.

2.2 수도권 집중호우와 경계의 역할

집중호우를 유도하기 위해서는 아주 특수한 경우를 제외하고 일반적으로는 깊은 대류활동을 동반하는 중규모대류계를 동반하고 있어야 하는데, 중규모대류계를 유도하기 위해서 필요한 3대 조건은 풍부한 수증기, 불안정한 환경, 그리고 상승운동이다. 강수현상이 발생하기 위해서는 반드시 수증기의 응결작용이 있어야 하기 때문에 풍부한 수증기의 존재는 필요불가결한 요소라고 할 때, 불안정한 환경과 대기의 상승운동을 유도하는 것은 종관규모에서 중규모 그리고 스톰 규모까지 다양한 규모를 가지는 경계(Boundary)들[7]이다. 경계는 물리적인 성질을 달리하는 주변과 뚜렷하게 구분되는 특정한 영역을 의미하며 집중호우나 대설을 야기하는 중규모대류계나 저기압계의 발생과 유지에 중요한 역할을 한다. Fig. 3은 전선, 일반적으로 종관 규모에서 스톰 규모까지 쉽게 찾아볼 수 있는 전선, 다양한 지형, 돌풍전선 그리고 중규모 고기압(Mesohigh)과 중규모 저기압(Mesolow)을 보여주고 있다. 일반적으로 예보관들에게 가장 익숙한 경계는 분석 일기도에서 쉽게 볼 수 있는 두 개의 물리적 성질이 다른 기단의 경계면에서 발생하는 한랭전선과 온난 전선일 것이다. 종관 규모 전선은 중규모대류계의 발생과 유지에 매우 중요한 대규모 강제력을 제공한다는 점에서 매우 중요한 역할을 수행하므로 예보관들이 기상예보 단계에서 기상분석을 할 때 가장 먼저 그리고 가장 신중하게 분석해 내야 하는 요소라고 할 수 있다. 그리고 중규모대류계를 구성하는 뇌우가 발달하여 강수와 함께 강한 하

Fig. 3 Examples of boundaries on various horizontal scale.

강기류가 형성되면 이 하강기류는 지표면을 따라 빠르게 사방으로 퍼져나가면서 돌풍전선을 형성하여 새로운 스톰이 연속적으로 발생하는데 중요한 방아쇠 작용을 하게 된다. 아울러 강한 강수 현상은 상대적으로 밀도가 높은 하강기류를 유도하여 그 지역에서 국지적인 스톰 규모의 중규모 고기압(meso-high)을 형성하고 그 주변에 상대적인 중규모저기압(meso-low)을 형성하기도 한다. 이러한 중규모 고저기압은 스톰 주변에서 2차 순환을 형성하여 스톰의 생명을 연장시키고 동시에 중규모 운동과 상호 작용하여 중규모 기압계의 발달에도 영향을 미친다. 이러한 명시적인 경계들 이외에도 육지와 해양 차이, 평지와 산악지역, 강수 지역과 비강수 지역, 구름이 덮인 지역과 일사 지역 등과 같은 요소들도 중규모 기압계의 발달에 중요한 경계로 작용한다. 특히 집중호우와 대설 사례와 같이 중규모 강제력과 메조 베타 혹은 메조 감마 규모의 중규모 역학이 결합되어 나타나는 경우에는 중규모(전선/기압골), 중규모(강수-비강수, 구름경계, 육지-물 분포), 스톰규모(돌풍전선, 중규모 고저기압 등) 경계를 명확하게 구분하고 그 역할이 무엇인지 인지하고 있어야 한다. 또한 일기도나 지역규모 수치모델 자료만으로는 중규모 혹은 스톰규모 경계 분석에 제한을 받기 때문에 중규모에서 뚜렷한 강제력이 무엇인지 조사한 이후에는 국지분석, 위성 및 레이더 자료 분석 등을 통해서 정확한 경계의 위치와 형태를 찾아내는 것이 중규모대류계의 발생과 발달 그리고 이동 및 전파를 예측하는데 매우 중요하다. 본 연구에서 다루어진 집중호우 사례들에서 중규모 전선만큼 중요한 역할을 한 것은 북태평양 고기압과 dry slot에 의한 상승 운동과 태풍이었다.

Fig. 4 Summer season 10 year averaged Geopotential height at 500hPa (a), Geopotential height at 850hPa, Frequency of precipitation(c), and Daily precipitation (d)

Fig. 4는 10년 평균 북반구 아열대 고기압의 분포와 강수빈도 및 일 강수량 분포를 보여주고 있다[8]. 북태평양고기압(A/A^*)은 여름철에 거의 반영구적인 형태로 태평양 지역을 지배하고 있으며, 5880gpm으로 대표되는 북태평양 고기압의 확장과 축소에 따라 그 연변에서 강한 강수가 발생하는데 그 강수는 대부분 북태평양 고기압 중심의 하강기류를 보상하기 위한 상승운동과 북태평양 고기압 연변에서 발생하는 조건부 대류잠재 불안정의 결과라고 알려져 있다. Fig. 4 (c)에서 볼 수 있듯이 한반도를 포함한 아시아 지역의 강수 빈도는 북태평양 고기압으로 갈수록 급격하게 줄어들고 북태평양 고기압과 대륙 고기압의 사이에서 점진적으로 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 4 (d)의 형태를 주목할 필요가 있다. 북태평양 고기압의 연변을 따라 강한 강수 강도가 나타나는데 특히 일본 남해에서 한반도에 이르는 지역에서 일강수량의 강도가 강수 빈도의 증가에 비해서 크게 강화되고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 여름철 한반도에서의 집중호우의 중요한 기작으로 작동하는 것이 북태평양 고기압 연변에서의 상승운동과 조건부 불안정에 의한 중규모대류계였던 것임을 통계적으로 잘 보여주고 있다. Fig. 5는 2010년 9월 21일 00UTC 위성영상에 500hPa 5880gpm 선을 합성한 것이다. 특징적

인 것이 북태평양 고기압 중심으로는 강한 하강 기류와 함께 구름이 없는 지역이 나타나고 북태평양 고기압 가장자리와 북쪽의 Dry Slow(암역)의 사이에서 집중호우와 직접 관련된 강한 중규모대류계가 발달하고 있는 모습을 보여준다는 것이다. 이는 북태평양 고기압의 가장자리가 한반도 집중호우 발생이 중요한 경계로 작용한다는 것을 보여주고 있다. 여기에서 간과하지 말아야 할 중요한 경계가 바로 북태평양 고기압 가장자리 북쪽에 위치한 Dry Slot의 유입이다. Dry Slot은 상대적으로 건조한 하강기류로 Dry Slot의 침입과 함께 발생하는 강한 하강운동이 북태평양 고기압 주변의 상승운동과 조건부 잠재불안정을 더욱 강화시켜 특정한 방아쇠 작용에 의해서 발생한 중규모대류계가 급격하게 발달하는데

Fig. 5 Satellite image and Geopotential Height at 500hPa on 00UTC 21 Sep. 2010

기여했다는 것을 의미한다. 또 하나 흥미로운 사실은 태풍의 역할이다. 수도권 집중호우 사례에서는 중국에 상륙한 태풍 한반도 남서쪽에 위치하면서 강한 수증기와 열을 한반도 남쪽으로 공급하고 있으며, 전북지역 집중호우 사례(Part II)에서는 전날 서해상을 통과하여 한만 국경 부근에서 열대성 저압부로 약화된 태풍에 의해서 한반도 주변에 많은 수증기와 열이 공급되고 있다는 점이다. 태풍은 적도지방에서 발원해서 북상하기 때문에 적도의 열과 수증기를 그대로 중위도 지역까지 수송함과 동시에 중위도 지역에 형성되어 있던 기압배치를 교란하는 역할을 한다. 안정된 기압배치를 깨뜨림과 동시에 주변과 확실하게 구분되는 수증기와 열의 경계를 형성하여 상대적으로 건조하고 차가운 대륙 고기압과의 사

이에 수증기와 온도 경도를 강화시켜 전선 발생과 조건부 대류불안정을 강화시키는데 중요한 역할을 한 것을 알 수 있다. 북태평양 고기압 가장자리와 태풍이라는 중요한 종관규모 및 중규모 경계를 적절하게 탐지하고 이동 경향을 추적한다면 집중호우가 발생할 수 있는 지역과 강도를 예보하는데 큰 도움을 줄 것이다.

3. 수치예보 일기도를 활용한 집중호우 사례 매개변수 분석

3.1 집중호우를 유도하는 매개 변수들

수도권 집중호우 특징은 집중호우를 야기한 중규모대류계를 구성하고 있는 대류성 스톱의 규모가 Meso- β 와 Meso- γ 규모이고 그 생애가 10시간 이내로 24시간 혹은 12시간 전에 중규모대류계의 발생 시기와 위치 그리고 그 강도를 정확하게 예보한다는 것은 현실적으로 불가능에 가까운 일이다. 수치예보 모델에서 적절히 모의하지 못했기 때문에 예보관들은 큰 어려움을 겪었을 것이다. 그렇지만 한반도에서 발생하는 중규모대류계의 3가지 패턴 하계 전선(장마) 및 경압불안정에 동반된 중규모대류계, 하계 태풍 동반 중규모대류계, 장마 후 북태평양 고기압 가장자리의 불안정에 의한 중규모대류계의 패턴과 특성을 충분히 이해하고, 연속적인 추적과 지속적인 감시를 통해 종관규모 환경과 중규모 환경 변화에 실시간 대응한다면 자연재해로 인한 피해를 최소화하는데 도움을 줄 것이다. 종관규모 환경과 중규모대류계 내부의 역학에 대한 지식 함양은 집중호우 예보의 필수 조건이라고 할 수 있다. 집중호우분석과 예보를 위해서는 사전 시그널에 대한 이해가 필요한데, 정확한 시그널을 잡아내기 위해서는 집중호우를 야기한 기존 사례들에 대한 통계학적 기후학적 패턴들에 대한 이해, 언제, 어디서, 얼마나 많은 비가 내릴 것인가에 대한 판단력, 집중호우 발생 지역, 규모, 강도와 관련된 물리과정과 종관규모-중규모-스톱규모 상호작용 이해, 예보에 활용하고 있는 수치예보 모델의 장단점 이해, 중규모대류계 발생 전/중 집중호우 관련성을 결정하기 위한 종관-중규모-스톱규모 분석 기술 그리고 정해진 지역에서의 강수량 결정을 위한 중규모대류계 운동 및 전파에 대한 충분한 이해가 필요하다. 예보자의 집중호우 예측 능력은 정확한 패턴 인식에서 시작되며, 단계별

규모분석, 그리고 사례의 자기화를 통해 집중호우를 야기한 매개변수들에 대한 이해를 통해서 완성된다고 할 수 있다. 패턴인식과 규모분석은 집중호우 가능성 판단에 있어서 매우 중요한 절차이다. 먼저 큰 그림 차원에서 중규모 분석을 실시하는데, 이 과정에서는 관측 및 모델 자료를 통해 기압골, 상층제트, 하층제트 등과 같은 중규모 강제력과 불안정도, 수증기 공급과 상승운동, 대기 상하층 온도 및 수증기 분포 등과 같은 중규모-스톱규모 대류활동의 상관관계 분석이 중요하다[9]. 좀 더 세부적인 그림을 그리는 과정인 중규모 분석 과정에서는 국지일기도, 단열선도, 중규모 수치모델 자료, 위성/레이더 자료를 통해서 중규모대류계 발달 가능성과 집중호우로의 발전 가능성을 분석하여야 한다. 이 과정에서는 특히 하층 경계, 상하층 전선들 간의 상호작용, 유입/유출기류 흐름, 수증기와 불안정도의 시간변화에 주목해야 한다. 마지막으로 실제로 대류활동이 발생한 이후에는 위성/레이더 자료를 활용하여 중규모대류계의 수평 및 연직 구조변화, 돌풍전선과 경계발달에 의한 새로운 스톱 발생, 스톱 병합과 스톱 이동 및 전파 경향 등에 대한 상세한 분석이 필요하다. 결국 집중호우 예보에 있어서 예보관은 단계별 규모분석을 통해 집중호우 발생 가능성을 탐지하고 실시간 예보를 동시에 진행할 수 있는 역량을 구비하고 있어야 한다.

일반적으로 한 지역에서의 강수량 결정요소[10]는 상대습도, 가강수량, 하층 습수 등 가용한 수증기량, 수증기의 연직분포, 하층제트와 상층 기압골에 의한 지속적인 에너지 공급과 관련된 대기 하층과 중층의 수증기 수송 정도, CAPE, LI, KI 등과 같은 불안정도, 중규모대류계 시스템의 무게중심, 충돌-병합 강수과정, Back-Building 과정 등 강수 강도(효율)와 국지적인 집중 정도 분석, 시스템 전체의 이동 속도와 후방전과 벡터의 지속 여부를 포함하는 중규모대류계의 이동과 전파 경향 등을 들 수 있다. 집중호우를 유도하기 위해서는 강한 중규모대류계가 발생해서 큰 강수 효율을 가지고 상대적으로 긴 시간 동안 일정한 장소에 머물러 있어야 한다. 그러기 위해서는 먼저 풍부한 수증기의 공급이 중요한데 풍부한 수증기의 공급을 위해서는 (1) 850hPa 고도에서의 높은 Moisture Flux, (2) 지상에서 500hPa까지의 높은 상대습도, (3) 40mm 이상의 가강수량, (4) 장시간 동일 지역으로 수증기 공급 지속의 조건이 필요하다. 중규모대류계의 발달과 지속을 위해서는 강한 대기 불안정이 필요한데 가장 많이 사용되는 불안정도 지수가 대류가용잠재

에너지(CAPE)이다. 한반도 집중호우에 있어서 CAPE는 중위도 전선이나 태풍 등의 매우 강한 중규모 강제력이 존재하는 경우에는 비교적 낮게 나타나며, 게릴라성 집중호우가 자주 발생하는 장마 종료 후에서 8월 말까지는 대부분의 경우 1,500J/kg을 넘고 강한 경우에는 4,000J/kg에 달하는 경우도 있다. 이번 집중호우 사례의 경우에는 CAPE의 값이 유의미한 수준에 도달하지 못했는데 이는 집중호우를 유도한 중규모대류계가 강한 열적 불안정이 아닌 중규모 환경에 의한 조건부 대류불안정에 의한 것이었음을 알 수 있다. CAPE의 값이 낮은 경우 주로 사용되는 것이 LI와 KI 인데, (1) 하층 제트를 동반한 가운데 LI가 음의 값을 보이거나, (2) KI 값이 30을 넘는 경우 수증기가 풍부하면 충분히 강하게 연직 운동을 유도할 수 있다.

3.2 기단경계에서 발생한 수도권 호우의 매개변수 분석

RDAPS 모델 예측장을 이용한 수도권 집중호우 사례에 대한 매개변수 분석은 24시간, 12시간 전에 모의한 자료들을 통해서 사전 예측을 위한 시그널들을 분석하고자 하였으나, 적절하게 모의된 매개변수들을 찾는데 실패하였다. 따라서 여기에서는 집중호우가 발생하기 약 3시간 전에 모의된 2010년 9월 21일 분석장을 통해서 매개변수를 분석하도록 하겠다. Fig. 6은 850hPa 습윤 속과 수렴 그리고 850hPa 온도와 700hPa 연직 속도를 보인 것이다. 앞에서 언급했듯이 많은 강수량을 기록하기 위해서는 하층 수증기의 공급이 중요한데 850hPa 습윤 속을 보면 태풍의 상륙으로 상대적으로 습윤한 중국 남부로부터 남서기류를 타고 수증기들이 공급되고 있으며 특히 경기만 부

Fig. 6 850hPa Moisture Flux and Convergence(left) at 850hPa Temperature and 700hPa P-velocity(right)

근으로 많은 수증기가 공급되고 있음을 알 수 있다. 그리고 한만 국경 부근에 습윤 속이 집중된

것은 대륙 고기압과 북태평양 고기압의 수렴에 의한 것임을 알 수 있다. 850hPa 등온선은 양자강 부근에 온난 핵을 두고 남서기류를 따라 남서기류가 형성되어 온난 이류와 함께 수증기가 한반도 중부지방으로 유입되고 있음을 알 수 있다. 그리고 700hPa에서의 강한 연직 운동이 경기만 부근에서 발생하여 강한 대류활동이 발생과 유지에 도움을 준 모습을 잘 보여주고 있다. 풍부한 수증기가 온난 이류를 통해서 집중되는 구역에 집중호우가 발생한다는 것을 잘 설명해 주는 것이라고 할 수 있다.

Fig. 7 Precipitable Water on MSLP at 00UTC 21st Sep 2010

Fig. 7은 지표면에서 대기 상단까지의 총 가강수량의 수평분포를 보여주고 있다. 단열선도 분석에서 지상에서 700hPa 고도까지의 평균 상대습도가 90% 이상이고, 500hPa 까지 평균 상대습도가 70% 이상이었음을 고려했을 때, 50mm 이상의 높은 가강수량을 가진 공기가 한반도 상에 위치하고 있다는 것은 많은 강수량이 발생할 수 있었음을 의미한다. 관측 값 기준으로 40mm가 집중호우를 야기할 수 있는 가강수량의 기준이라고 보았을 때 모델 예측에서 50mm는 매우 높은 값으로 하층의 수증기 공급과 온난 이류가 지속되는 상태이기 때문에 지속적으로 강한 비가 내릴 수 있는 충분한 조건을 제공하고 있다.

Fig. 8은 RDAPS에서 모의된 불안정도 지수 LI와 KI의 수평 분포를 보여주고 있다. LI가 3 이하인 구역이 한반도 중부지방에 위치하고 LI가 0보다 작은 구역이 한반도 남쪽에 위치하고 있다. 이 지역에 강한 남서기류가 존재하고 있다는 점을 감안하면 불안정한 공기가 한반도 중부지방으로 유입되어 대기가 불안정 구역에 놓일 가능

Fig. 8 Instability Indices of LI(left) and KI(right)

성이 높음을 보여주고 있다. 단열선도 관측자료 분석과 마찬가지로 강한 대류가 발생하고 있는 지역에서 KI 값이 최대 35를 보이고 있음으로 미루어 한반도 중부지방에 지속적으로 강한 대류 불안정이 발생할 수 있음을 알 수 있다.

하층제트는 집중호우 발생에 필수적인 요소인 풍부한 수증기, 불안정도, 상승운동에 모두 관여하는 중규모대류계의 발달과 유지과정에서 절대적인 영향력을 가지는 매개변수라고 할 수 있다. 850hPa 유선함수(Fig. 9)에서 고기압성 회전의 중심이 일본 남서쪽에 위치하고 한반도는 고기압능에 위치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9 Stream Line and Isotachs > 25kts at 850hPa(left), 1000-700Thickness and EPT at 850hPa(right)

그리고 풍속 25kts(12.5m/s) 이상의 하층제트가 경기만 부근에 위치하고 있다. 집중호우를 동반한 중규모대류계가 발생하는데 유리한 지역이 850hPa 하층제트가 축이나 출구 지역이라는 점과 잘 일치하고 있다. 또한 대륙의 상대적으로 한랭건조한 공기와 구별되는 330K 이상의 온난 습윤한 공기가 좁은 지역에 위치하면서 이 지역을 중심으로 중규모 조건부 대류잠재 불안정이 존재하고 있었음을 보여준다. 700hPa 층후선도를 보면 서해안을 중심으로 발해만 부근에는 좁은 층후지역 즉 기온의 변화가 큰 지역이 위치하고 한반도 부근에서 일본까지는 층후의 간격이 급격하게 넓혀진다. 이러한 층후의 분류(Defluence)는

한반도 중부지방에서의 전선 발생에 도움을 주고 좁고 강한 중규모대류계의 지속적인 발달에 좋은 조건을 제공한다.

대기하층의 매개변수들 중에서 수증기의 수송벡터의 형태와 위치도 매우 중요하다. Fig. 10은 대기하층의 온난 이류 구역과 강도, 그리고 이류된 온난공기가 얼마나 불안정한 대기 중층 구역인 등온위면 상승구역으로 유입되는지를 보여주었다. Fig. 10에서 925hPa의 온난이류 구역이 한반도 남서쪽에서 한반도를 가로질러 흘러가고 있는 반면 북한 북부와 동해 쪽에 중심을 둔 한랭축이 분포하고 있다. 그리고 이 기류는 700hPa 고도의 상당온위 경도가 큰 구역으로 유입되고 있다. 상당온위의 남북 경도가 크다는 의미는 서해상에서 한반도 내륙까지는 강제 단열상승 구역이, 한반도 동북부 지역은 강제 단열하강 구역이 존재한다는 것을 의미하며, 이러한 환경에서는 대기 하층에서 유입되는 온난한 남서기류가 상대적으로 한랭한 공기를 타고 강제 상승하여 조건부 대기불안정 조건에 놓이기 때문에 강한 중규모대류계를 발달시키는데 매우 적합한 환경을 제공한다. 남서쪽으로부터 많은 수증기를 함유한 수송 벡터의 중심이 한반도로 지속적으로 유입될

Fig. 10 Height, Temperature and Winds at 850hPa (left), and Height, Temperature, and EPT at 700hPa(right)

것으로 예상되기 때문에 한번 발생한 중규모대류계는 후방에서 지속적으로 새로운 스톱들이 발생해서 오랜 시간 동안 세력을 유지할 수 있을 것으로 보인다.

Fig. 11은 중규모대류계의 발달에 적합한 대기의 흐름을 추적하기 위해서 500hPa 유선향수와 200hPa 제트기류 및 발산 구역을 분석한 것이다. 중규모대류계의 발달과 유지를 예측하기 위한 대기 중층 및 상층 매개변수는 500hPa에 약한 상층 기압골을 동반하면서 그 전면에서 남서에서 서풍기류가 지속적으로 유입되고, 200hPa 혹은 300hPa 고도 제트기류의 출구에 놓이면서, 놓이면서 동시에 상층 발산 구역과 일치하는 것이다.

Fig. 11 Stream Line and Isotachs > 25kts at 500hPa(left), and Divergence and Isotachs > 50kts at 200hPa (right)

그림에서 볼 수 있듯이 500hPa에서 약한 기압골이 몽고부근에 위치하고 있고 그 전면에서 유선향수를 따라 남서풍에서 서풍 계열의 기류가 지속해서 유입되고 있다. 대기 중층에서의 지속적인 남서에서 서풍기류의 유입은 대기 중층에서의 양의 와도 영역을 강화시키게 된다. 200hPa 고도의 제트기류 중심축이 북위 45°N에 위치하고 한반도 주변에서는 동서 성분이 크게 나타나고 있으며 한반도 상공에 약하지만 발산 구역이 발견되고 있다. 대기 중층과 상층의 기류와 발산역의 위치와 대기 하층의 저기압 발생구역, 온난 이류 및 강제 상승구역과 잘 일치하기 때문에 이 지역에서 중규모대류계가 발생하면 그 내부의 대류성 스톱들이 빠른 시간 내에 대류권계면까지 발달할 수 있기 때문에 상대적으로 오랜 시간 동안 그 세력이 유지되고 국지적인 집중호우를 야기하는데 매우 유리한 조건을 제공한다는 사실을 잘 예측할 수 있다.

4. 결 론

집중호우를 유도하는 중규모대류계가 강하게 발달하기 위해서 필요한 대기의 하층변수들을 정리하면, (1) 하층제트의 축이나 출구에 집중호우 구역이 위치하여야 하고, (2) 상당온위의 값이 높고 수평경도가 큰 상당온위가 좁은 지역으로 유입되며, (3) 수증기 수송 벡터의 풍하측과 수증기 수렴 구역에 집중호우 지역이 일치하여야 하고, (4) 강한 온난 이류와 등온위 상승 구역이 존재해야 한다. 대기 중층 변수들로는 (1) 500hPa 고도에서는 약한 상층 기압골을 동반하고 기압능을 따라 중층에 남서에서 서풍 기류가 형성될 필요가 있으며, (2) 상층 제트 기류의 입구와 출구 혹은 최대 상층 발산 구역이나 그 남쪽에 집중호우 구역이 위치하여야 한다. 이러한 집중호우를 유

도하는 매개변수들의 시간적인 변화를 적절하게 분석하고 판단하는 능력이 예보관들의 예보 능력과 직결된다고 할 수 있다. 예보관들이 예보를 결정할 때는 수치예보 모델에서 제공되는 누적 강수량과 강수 구역 유입시간만을 토대로 강수량과 강수 시작 및 종료 시간을 예보하는데 이는 돌발적인 집중호우와 같은 특이한 기상현상들을 놓치는 결과를 초래할 수 도 있다. 따라서 예보관들은 수치예보 모델에서 제공되는 다양한 예측 자료들을 토대로 적절하게 집중호우와 관련된 매개변수들을 찾아내고 이를 분석하여 예보에 반영할 필요가 있다. 본 사례의 경우 중관규모 강제력을 일반 일기도에서 찾기가 힘들기 때문에 24시간 혹은 12시간 전에 집중호우 발생 가능성을 예측하는 것은 현실적으로 불가능한 것이었다. 그러나 수치예보 분석 자료와 위성, 레이더 자료에서 실제로 강한 중규모대류계가 발생하기 시작한 시점인 9월 21일 11시에 발표된 기상청 예보에서도 수도권 지역에서의 집중호우 발생 가능성을 예보하고 있지 못하였다. 그 이유는 태풍의 발달과 함께 북태평양 고기압이 매우 강하게 발달하여 한반도 부근까지 확장되어 있었고, 시베리아 고기압이 충분히 발달하고 있었기 때문에 강한 중규모대류계가 발달할 충분한 중관환경을 가지고 있었음에도 불구하고 9월 말에 발생하는 저기압의 경우에는 강수량이 비교적 적다는 통계적이고 주관적인 예보치를 통해 강수량 예보한 것과 중규모대류계의 발달, 이동에 영향을 미치는 요소들에 대한 정확한 초단기 예보능력이 부족했기 때문으로 보인다. 따라서 항공기 운항에 있어서 중규모 대류성 스톰들에 의해서 심각한 장애 요소들이 발생할 가능성이 매우 높기 때문에 적절한 예측 매개변수를 활용하여 항공기상 예보 능력을 향상시킬 필요가 있다.

참고문헌

- [1] NTSB, 2010 : Weather-related Aviation Accident Study 2003 - 2007, *Federal Aviation Administration(FAA) Aviation Safety Information Analysis and Sharing(ASIAS)*, pp 71
- [2] 항공기상청, 2010 : 항공기 사고사례 기상분석, *항공기상청*
- [3] 김영철, 2013: 활주로 폐쇄를 야기한 대설사례 연구. *한국항공운학학회지*, 21(4), 106-111
- [4] 김형우, 2010: 한반도 집중호우를 야기하는 MCS 내부의 대류성 스톰들의 발달기구 연구,

서울대학교 대학원 박사학위 논문

- [5] Doswell, C.A. III, H.E. Brooks and R.A. Maddox (1995): Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology. *Preprints, 5th CMOS Workshop on Operational Meteorology (Edmonton, Alberta, Canada, 28 Feb-3 Mar)*, Canadian Meteor. and Oceanogr. Soc., 149-156
- [6] NOAA, 2004: COMET program, Severe Convection II: Mesoscale Convective Systems. <<https://www.meted.ucar.edu/mesoprim/severe2/>>
- [7] Ted Funk, 2003: Heavy Convective Rainfall Forecasting: A Comprehensive Look at Parameters, Processes, Patterns, and Rules of Thumb
- [8] FENG Sha, LIU Qi, and FU Yun-Fei, 2009: Precipitation under Subtropical High Conditions: Evidence and Implications, *ATMOSPHERIC AND OCEANIC SCIENCE LETTERS*, 2009, VOL. 2, NO. 4, p. 244-249
- [9] Doswell, C.A. III, H.E. Brooks and R.A. Maddox (1995): Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology. *Preprints, 5th CMOS Workshop on Operational Meteorology (Edmonton, Alberta, Canada, 28 Feb-3 Mar)*, Canadian Meteor. and Oceanogr. Soc., p.149-156
- [10] Davis, R., 2001, Flash Flood forecast and detection methods, Severe Convective Storms, *Meteor. Monogr.*, 28, No. 50, Amer. Meteor. Soc., 481-525.