

論文

항공기 안전 운항에 영향을 미치는 중규모 대류계 사례 연구(II)

김영철*

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

Young-Chul Kim*

ABSTRACT

Heavy Rainfall event accompanying with Mesoscale Convective Systems(MCSs) inducing flash flooding and Muan and Kunsan Airport closing over Jeollabuk-do area was investigated this study. Comparing to previous study(I), this heavy rainfall event was characterized by much abundant moisture from Typhoon, strong conditional convective instability, and cluster type MCSs. It almost impossible to make accurate forecasting of precipitation amounts and life cycle of MCSs unless proper analysis.

Key Words : Mesoscale Convective Systems(중규모대류계), Heavy Rainfall(집중호우), Typhoon(태풍), Conditional Convective Potential Instability(조건부 대류 잠재 불안정), Cluster Type MCSs(무리형 중규모대류계), 공항폐쇄(Airport Closing)

1. 서 론

구름은 항공기의 운항에 장애를 일으키는 기상 현상으로 알려져 있다. 특히 대류성 구름은 항공기 안전 운항에 가장 위험한 구름으로 인식되며 안전성뿐만 아니라 지연운항이나 결항을 초래하여 항공기 운항의 경제성, 효율성 면에서도 심각한 문제를 야기한다.

미국의 경우 항공기 지연에 관여되는 요소 중 70%는 기상요소가 기여하는 것으로 알려져 있으며 2005~2006 분석에 의하면 지연과 관련된 기상 요소 중 %는 대류성 사례가 차지하고 있는 것으로 분석되었다[1]. 우리나라도 1990년대 후반부터 여름철 대류성스톱에 의한 피해가 점차로

증가하고 있어서 항공기 안전 운항에 영향을 미치는 중규모 대류계에 대한 정확한 예측의 필요성이 대두되고 있다.

2011년 8월 9일 새벽부터 오후까지 전라북도 지방을 중심으로 최대 420mm의 기록적인 누적 강수량을 기록한 집중호우 사례가 발생하였다. 전날인 8월 8일 제9호 태풍 무이파(MUIFA)가 서해안을 따라 북상하여 옹진반도 부근으로 상륙한 이후 북태평양 고기압이 한반도로 확장하기 시작하면서 한반도 남부지방에 불안정이 형성되어 남부지방을 중심으로 30~50mm의 뇌우를 동반한 소나기가 내릴 것으로 예상하였다. 그러나 실제로는 기상 관측 이래 가장 많은 강수량이 아주 좁은 지역에 집중되는 집중호우가 발생하였고, 이로 인해 이를 연속 전라남북도 지방의 공항들의 항공기 운항이 제한되는 결과를 초래하였다. 뚜렷한 지상이나 상층의 저기압이 동반되지 않은 상태에서 태풍의 북상과 함께 확장하는 북태평양 고기압의 가장자리에서 발생했다는 점에

2014년 01월 17일 접수 ~ 2014년 06월 20일 심사완료
논문심사일 (2014.03.13, 1차)

* 한서대학교 항공운항학과 교수

연락처, E-mail : yckim@hanseo.ac.kr

충남 태안군 남면 신온리 산105 한서대학교 태안비행장

서 사실상 예측이 거의 불가능한 사례였다고 할 수 있다. 8월 8일 당시에 기상을예보를 총괄하는 예보관의 입장으로 돌아가서 태풍이 통과된 다음 날인 9일 예보를 결정하는 상황을 가정해 보면, 8월 8일 오전 전국에 태풍 경보가 발령되어 있는 상황에서 2010년 수도권에 막대한 피해를 입혔던 태풍 곤과스와 비슷한 경로를 따라 북상하고 있는 제 9호 태풍 무이파의 경로와 강도를 추적하고 있는 예보관의 모든 신경은 태풍의 진로가 어떻게 결정될 것인가에 집중될 수밖에 없었을 것이다. 그리고 기상청 RDAPS를 비롯한 대부분의 외국 수치예보 모델들은 태풍이 북상하고 난 이후에는 한반도 주변에는 확장하는 북태평양 고기압의 가장자리가 한반도 남부까지 확장하면서 발생한 대류불안정으로 인해 곳에 따라 소나기가 내리는 것으로 모의하고 있었다. 따라서 8월 9일에는 중부지방은 대체로 맑은 날씨를 남부지방은 곳에 따라 뇌우를 동반한 강한 소나기 정도를 예보하고 강수량은 많아야 50mm를 넘지 않을 것으로 예상하는 것은(물론 산악지방의 경우 국지적으로 시간당 30mm 이상의 강한 소나기가 내릴 수도 있을 것이라는 것은 심정적으로 의심할 수 있었겠지만) 어떻게 보면 거의 모든 예보관들의 공통된 예보였을 것이라는 것은 쉽게 짐작할 수 있다.

김영철 등[2]은 불안정 지수를 이용하여 이런 집중호우예측을 시도한바 있지만 본 연구에서는 일반적인 예보척을 통해서 찾아내지 못한 아주 좁은 지역에 연속적으로 중규모대류계가 유지되면서 집중호우가 발생할 수 있게 만들었던 아주 작지만 중요한 시그널들이 무엇이었는지를 중규모와 중규모 환경과 불안정 분석을 통해서 찾는데 중점을 두었다.

2. 전라북도 지역 집중호우 사례 분석

2.1 전라북도 지역 집중호우의 위성영상 분석

Fig. 1은 집중호우가 시작되기 24시간 전인 8일 09시부터 실제로 중규모대류계가 발생하기 시작한 9일 06시까지의 위성영상을 3시간 간격으로 보인 것이다. 태풍 무이파가 서해상을 따라 북상함에 따라 그 후방으로 북서쪽에서 유입되고 있는 강한 Dry Slot[3]의 헤드 부분을 따라 수증기 영상의 암역(하강기류)이 뚜렷하게 강화되고 있는 동시에 북태평양 고기압의 가장자리를 따라서도 암역이 점차 뚜렷해지고 있는 것을 볼 수 있다.

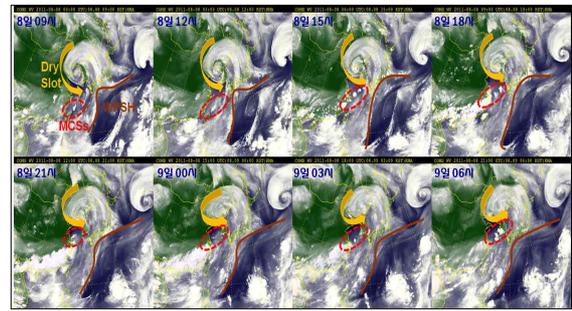


Fig. 1 Water Vapor Images from 09(L) 8th to 06(L) Aug 2011 with 3hour intervals respectively, Dry Slot(Yellow Arrow), NP-High(Brown Solid Line), MCSs(Red Dotted Line) are also showed

수도권 집중호우 사례(Part I)에서도 일부 언급했듯이 이러한 하강운동이 북서쪽과 남서쪽에 형성되는 경우 그 사이에서는 상대적으로 강한 상승운동이 발생할 가능성이 높다는 사실을 대부분의 예보관들은 인지할 수 있었겠고 실제로 수증기 영상에서도 강한 대류 활동(붉은 점선)들이 발생하는 것에서 이들 대류활동 영역이 북상할 경우 강한 중규모대류계로 발달할 수 있을 것이라는 시그널을 어느 정도 제공하고 있었던 것이 분명하지만, 주 관심사가 태풍이었던 상황과 수증기 영상에서 발생한 대류 대류활동들의 생존시간이 3시간을 넘지 않는다는 사실 등을 종합해 볼 때 향후 24시간 후에 그 대류활동에 동반된 중규모대류계가 한반도 남부 그것도 특정적으로 전라북도 지방에 유입되면서 정체될 것이라는 것을 예측하는 것은 현실적으로 불가능에 가까운 도전이었을 수도 있었다. 8일 09시 수증기 영상에서 태풍의 중심이 백령도 부근을 지나가고 있는 시점에서 Dry Slot의 헤드 부분에서 발생한 하강 영역과 북태평양 고기압의 연변의 하강 영역 사이인 북위 25°N 부근에서 작지만 강하게 발달한 대류성 구름 열들이 발생하기 시작하였고, 6시간 후인 8일 15시에는 태풍의 빠른 북상과 함께 상승 구역이 북쪽으로 이동하면서 북위 30°N 부근에서 대한해협까지 이어지는 대류 활동 구역이 뚜렷하게 관측되고 있다. 이러한 대류 활동 지역의 북상은 태풍의 북상과 함께 계속해서 유지되었는데, 9일 새벽 03시에는 한반도 남서해안 부근까지 북상하였고 06시에는 좀 더 북상하여 전라북도 지역에서 폭발적으로 성장하는 모습을 볼 수 있다. 위성 영상을 통해 대륙으로

부터의 건조한 공기가 만들어 낸 하강기류에 의해서 상대적으로 형성된 상승운동이 북태평양 고기압의 연변에 형성되는 상승운동과 결합되어 더욱 강력한 대류잠재불안정을 형성하게 되고 이 대류잠재불안정 구역을 따라 집중호우가 발생한다는 것은 Feng 등[4]이 북태평양 고기압 주변에서 더욱 강한 대류성 강수현상이 발생하는 원인으로 제시되었던 종관규모 강제력과 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다.

2.2 전라북도 지역 집중호우의 강제력 분석

전라북도 집중호우 사례의 지상일기도(Fig. 2)는 수도권 집중호우와 한반도 주변에 전선을 동반하지 않고 다만 태풍 무이파와 그 후면을 따라 북태평양 고기압이 느리게 확장하고 있는 것이 외에는 기압 배치에서 특별한 강제력을 발견하기 힘들다. 다만, 태풍 무이파가 많은 수증기를

는 점이 특징이다. 세부적으로 살펴보면 한반도 남부 특히 전라북도와 남부 지역으로 아주 좁은 지역에서만 뇌우를 포함한 강수 현상이 집중되고 있다는 사실이다. 새벽부터 강하게 발달한 중규모대류계에 동반된 모루구름이 한반도 남부지역을 덮으면서 일사가 시작된 이후에도 남부지방 대부분이 22℃ 내외의 기온 분포를 보이고 있는 반면 제주도를 포함한 일본 지역으로는 기온이 빠르게 오르면서 30℃ 근처까지 기온이 상승하면서 좁은 지역에서 큰 남북 온도 경도가 발생함에 따라 강한 대류잠재 불안정이 형성되고 있었다. 지상 일기도 분석만으로는 소나기 정도의 가능성은 충분히 예상되고 있지만 왜 그렇게 많은 양의 집중호우가 발생하였는지 설명하기에는 분명한 한계를 가지고 있다[5].

850hPa(Fig. 3)에서 태풍 무이파에 동반된 강한 남서기류와 함께 남서쪽으로부터 강한 온난기류가 한반도를 향해서 지속적으로 유입되고 있는 것이 잘 보여지고 있다. 비록 태풍은 신의주 부근으로 상륙했지만 그 후면으로 상대적으로 한랭 건조한 대륙 고기압과 북태평양 고기압 사이에 남서쪽에서 북동쪽으로 향하는 온난 습윤한 공기의 통로가 850hPa 고도에서 형성되어 지속적으로 한반도 남부지방으로 강한 대류 에너지를 공급하고 있음을 알 수 있다. 남서기류가 지속적으로 한반도 남부지방으로 수증기와 열을 수송하고 있음을 잘 보여주고 있다. 또한 주목해야 할 것은 태풍이 열대성 저압부로 약화되면서 상대적으로 한랭한 오호츠크 기단 세력 방향으로 이동하면서 열대성 저압부 중심부에 약하지만 주변과 확실히 구분되는 한랭 핵을 동반하면서 한반도 중부와 북부지방으로 약한 온도 골(Thermal Trough)을 형성하고 있다는 점이다. 이는 한반도 남쪽에는 남서쪽으로부터 온난 이류가 발생하면서 강제 상승하는 운동이 존재하고 북동쪽에는 상대적으로 강제 하강하는 운동이 존재하고 있음을 의미한다. 결국 이러한 상승 구역과 하강 구역의 확연한 구분은 중규모대류계의 전체 시스템의 이동을 제한하고 동일한 지역에서의 정체와 발달에 기여하였다는 것을 의미한다. 지상에서 850hPa 고도까지 대기 하층의 기압배치를 보면 전라북도 집중호우는 일반적인 종관규모 강제력은 뚜렷하게 제공되고 있지 않지만 태풍과 그 후방에 남겨진 수증기와 온난 기류의 연속적인 수송에 의해서 대류 활동이 대류계 내부의 역학에 의해서 연속적으로 발달하는 이른바 깊은 습윤 대류(DMC; Deep Moist Convection) 형[6]에 동반된 무리형 중규모대류계로 형태로 유지되면서

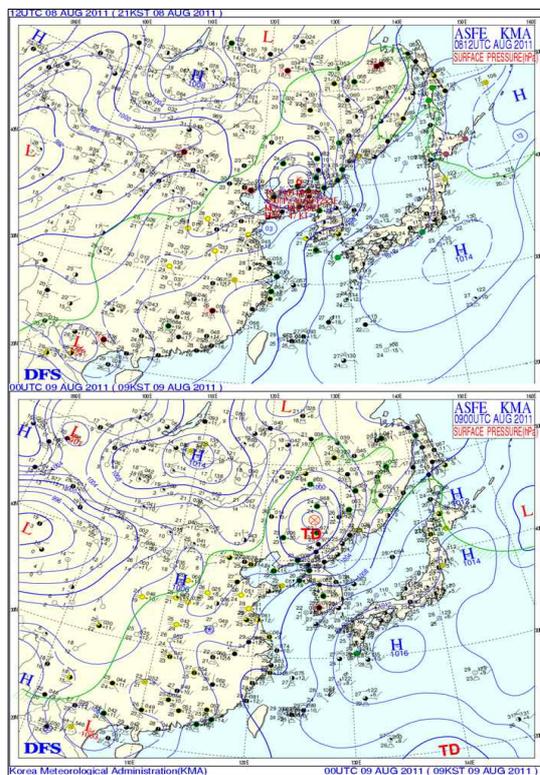


Fig. 2 Surface Chart on 12UTC 8th(upper) and 00UTC 9th(Lower) Aug 2011

남긴 채 북상하여 신의주 부근으로 상륙하면서 한반도와 그 주변에 지상에서 기온과 노점 온도 차이가 1℃ 내외인 습윤한 지역이 자리 잡고 있

지속적이고 강한 집중호우가 매우 좁은 지역에서 유지되었다는 것을 보여주고 있다.

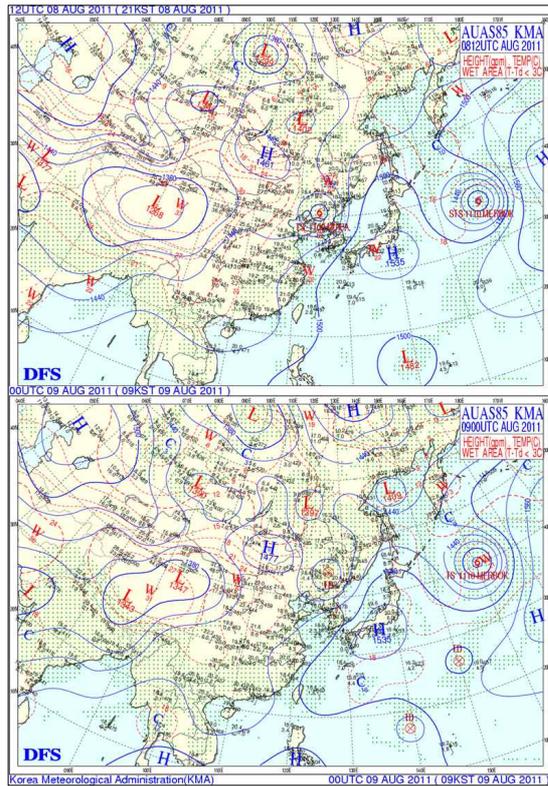


Fig. 3 850hPa Chart on 12UTC 8th(upper) and 00UTC 9th(Lower) Aug 2011

700hPa(Fig. 4) 고도의 기압배치가 하층과 뚜렷하게 구별되는 특성은 습윤 구역이 한반도 북부 지방을 경계로 집중호우가 발생하는 남부지방과 만주 지방으로 뚜렷하게 분리된 모습이 나타난다는 것이다. 이러한 습윤 구역의 분리는 상층에서 대기 하층으로 강하게 하강하는 Dry Slot의 존재와 무관하지 않다고 할 수 있다. Dry Slot이 존재하는 지역의 바로 남쪽에서 이에 대응되는 상대적인 상승 운동이 존재하게 된다. 전라북도 지방의 북서쪽에서는 Dry Slot의 침강에 의한 하강기류가 존재하고, 한반도 내륙 중북부 지방에는 온도 골에 의한 하강기류가 동시에 존재하면서 상대적으로 강한 상승 운동이 전라북도 지방을 중심으로 발생하면서 조건부 잠재 불안정을 형성하고 이러한 기압 배치가 유지되는 동안 중규모대류계에 의한 집중호우가 유지되었다고 할 수 있다.

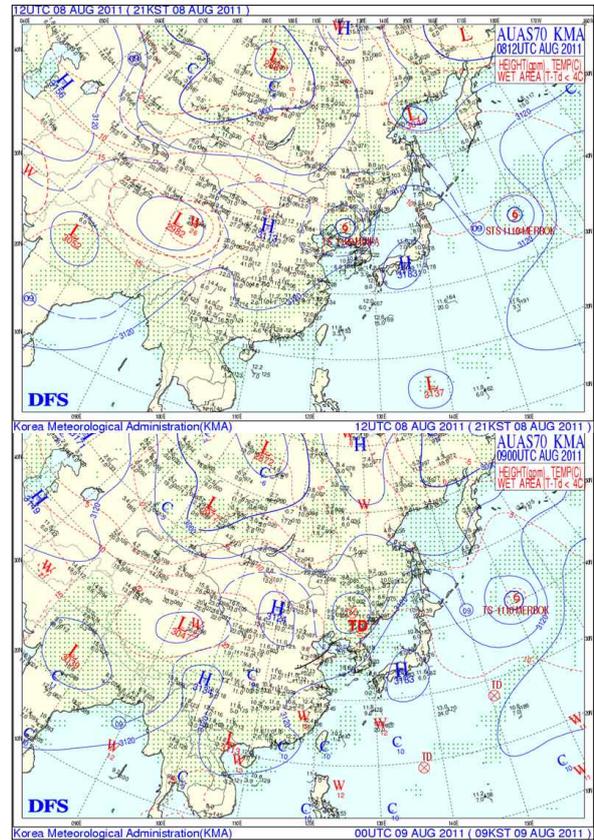


Fig. 4 700hPa Chart on 12UTC 8th(upper) and 00UTC 9th(Lower) Aug 2011

500hPa(Fig. 5)에서 500hPa 고도의 5880gam 선과 5820gam 선은 북태평양 고기압의 가장자리 경계 불안정 영역과 비교적 잘 일치하는 것이 특징으로 일반적으로 예보를 생산하는 과정에서 아주 건조한 경우를 제외하고는 이 지역에서 뇌우를 동반한 강한 소나기 발생 가능성을 예보하는 것이 보통이다. 열대성 저압부로 약화되기는 하지만 여전히 적도 기단의 특성을 유지하고 있는 태풍으로 인해서 대륙으로 부터의 대륙성 고기압의 확장이나 남쪽으로 부터의 북태평양 고기압의 확장이 제한되어 경압불안정이나 중규모 강제력을 유도할 만한 기압배치를 만들어 내지 못하고 있는 가운데, Dry Slot의 유입과 관련되어 있는 것으로 보이는 약한 단파 기압골이 발해만이 기압골이 형성되면서 한반도 상공 기류가 좀 더 많은 동서 성분을 가지게 되어 한반도 남부 지방으로 대기 하층에서 대기 중층고도까지 풍부한 수증기가 온난 이류를 통해 지속적으로 공급되고 있음을 보여주고 있다. 500hPa 분석 일기도에서도 Dry Slot의 전면과 북태평양 고기압이 가장자

리 전면이 전라북도 지역으로 위치하면서 상대적 인 강제 상승운동에 의한 조건부 대류잠재 불안정이 상태가 지속 유지되고 있음을 잘 보여주고 있다.

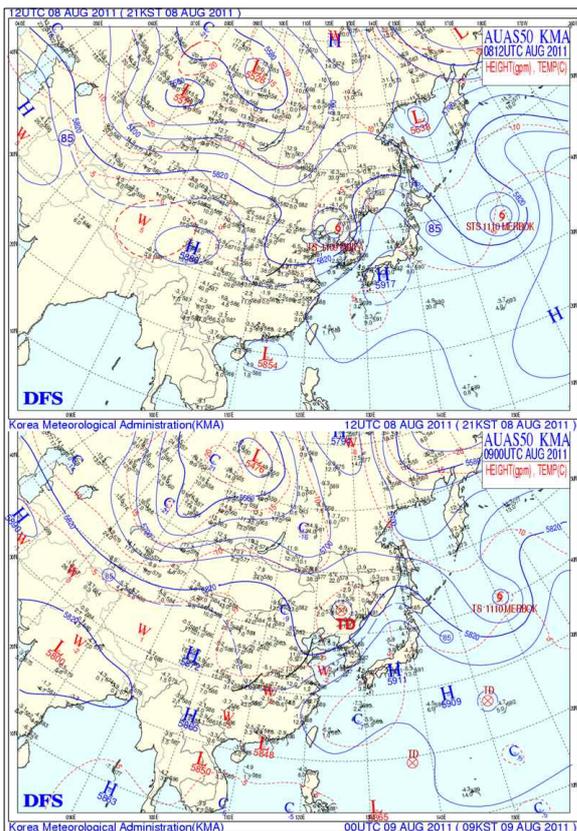


Fig. 5 500hPa Chart on 12UTC 8th(upper) and 00UTC 9th(Lower) Aug 2011

200hPa(Fig. 6)에서 서해상 부근에 북태평양 기단으로부터 동해를 지나 연해주로 확장되어 있는 기압능에 상대적인 기압골이 형성되기 시작하고 있으며 50kts(25m/s) 이상의 상대적으로 강한 풍속대가 아주 좁게 이 기압골의 후면에서 발생하기 하면서 대기 하층과 중층의 온난 이류, 상승 운동 구역과 상호작용하여 한반도 서쪽에는 상승 운동(상층 발산) 구역이 한반도 동부와 동해안 지역으로는 하강 운동(상층 수렴) 구역이 형성되어 전라북도와 서해안 지역에서는 중규모대류계가 대류권 상층까지 발달하고 한반도 북동쪽에서는 급격한 경계를 가지면서 더 이상 발달하지 못하는 현상을 초래한 것을 볼 수 있다.

전라북도 지역 중규모대류계에 의한 집중호우를 일기도를 통해서 분석한 결과 이 사례는 강한 중관규모 강제력이 존재하지 않는 상태에서 순수

하게 태풍으로부터 공급된 풍부한 수증기가 대기 하층에서 대기 중층까지 위치하면서 깊은 대류활동을 유도하였고, 850hPa 고도 이후부터는 한반도 서쪽과 남서쪽에는 상승 운동이 한반도 북동부 지역에는 하강 운동이 존재하며, 중규모대류계에 의한 강수 집중구역과 비 강수 구역이 뚜렷하게 구분되어 무리형 중규모대류계 내에서 연속적으로 스톱이 발생하여 집중호우를 야기했다는 위성과 레이더 분석 결과와도 잘 일치할 것으로 보인다.

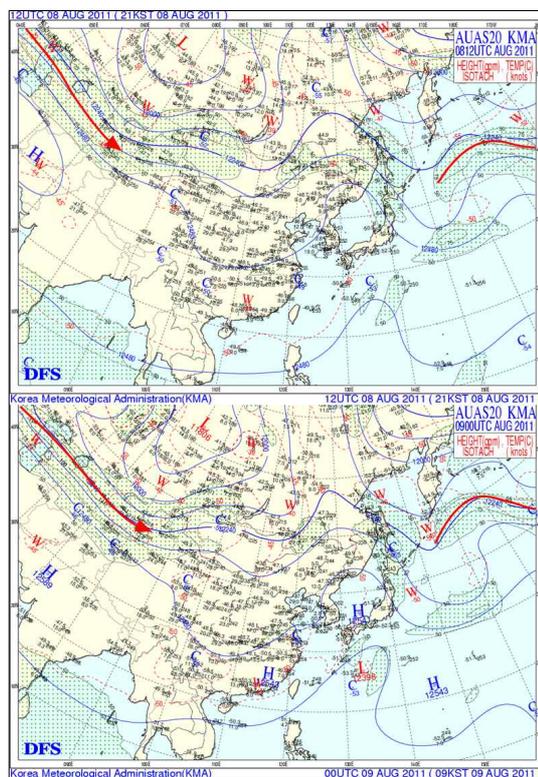


Fig. 6 200hPa Chart on 12UTC 8th(upper) and 00UTC 9th(Lower) Aug 2011

2.3 전라북도 지역 집중호우의 불안정 분석

Fig. 7은 전라북도 지역 집중호우 사례가 발생한 시점에서 인근 광주에서 관측된 단열선도를 보인 것이다. 단열선도에서 가장 먼저 눈에 띄는 특성은 지상에서 대기 상층부에 해당되는 350hPa 고도까지 약 8km의 두께를 가지는 거의 상대습도 100%에 가까운 포화 공기 구역이 유지되고 있다. 대기 하층에서 대기 중상층 까지 깊은 온난 습윤한 공기층이 존재한다는 것은 아주 높은 가강수량(PW)[기]을 가지고 있으며, 아울러

어떠한 방아쇠 작용에 의해서 강제 상승이 시작되는 공기 덩어리에 지속적으로 연직 운동에너지를 공급해 줄 수 있음을 의미한다. 지상에서 깊은 습윤층(Deep Moist Layer)이 끝나는 고도 이상 전체적으로 대류권 내에서 상하층의 바람 시어가 거의 존재하지 않고 특히 상층에도 바람이 30kts(15m/s)를 넘는 곳이 없다는 것은 한번 발생한 일면으로는 연직 시어에 의한 스톱 내부의 상승운동을 만들어 낼만한 역학적 에너지는 충분히 공급하지 못해서 넓은 지역으로 강한 대류성 밴드형 구름을 가지는 중규모대류계는 발달시키지 못하는 한계를 가지지만 한편으로는 중규모대류계 내부에서 먼저 생성된 스톱들의 진행 속도를 아주 느리게 만들어 새로운 스톱들이 그 후방에서 지속적으로 발생해서 무리형 중규모대류계(Cluster Type MCSs)[8]를 만들어 좁은 지역에만 긴 시간 동안 집중호우를 유도하는데 매우 유리한 조건을 제공하고 있다. 가강수량 값이 40mm를 넘으면 집중호우를 유도하는데 충분한 것으로 알려져 있는데, 전라북도 지역 집중호우의 경우에는 가강수량 값이 65mm에서 70mm 분포를 보여 다른 집중호우 사례들에서는 좀처럼 찾아볼 수 없을 만큼의 높은 값을 보여주고 있다. LI 값은 -2.8과 -1.8을 KI 값이 40과 39를 기록하고 있어 한번 응결되어 상승하는 공기는 대류권 상부까지 충분한 상승 운동을 가지고 발달할 수 있는 유리한 조건을 제공하고 있었다는 것을 잘 보여주고 있다. 집중호우 사례들은 그 종관 환경을 완전히 다르다고 하더라도 대기하층의 풍부한 수증기 공급, 대류불안정, 강한 상승운동 유도 등 집중호우를 유도하는 중규모대류계 발달에 충분한 불안정한 환경을 가지고 있었다.

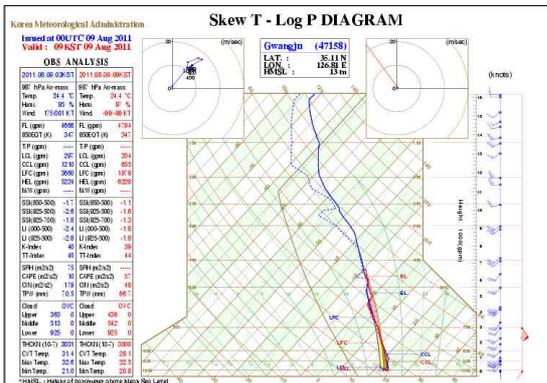


Fig. 7 Skew-T log-p Chart on 12UTC(blue) 8th and 00UTC(red) 9th Aug 2011 at Kwangju

2.4 전라북도 지역 집중호우의 매개변수 분석

전라북도 지역 집중호우 사례도 24시간 전, 12시간 전 수치예보 모델 자료를 통해 발생 지역과 강도에 대한 정확한 시그널들을 탐지하는데 실패하였다. 따라서 여기에서는 집중호우가 발생하는 단계에서 모의된 2011년 8월 9일 분석장을 통해서 매개변수를 분석을 통해 향후 예보에 이들 자료를 어떻게 활용할 수 있을 것인지에 대한 정보를 제공하도록 하겠다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 850hPa 고도에서 열대성 저압부 방으로부터 강한 Moisture Flux가 대류활동이 시작된 남서해안으로 유입되고 있으며 습윤 구역이 중국 동해안까지 연장되어 있어 지속적인 수증기 공급이 이루어질 수 있을 것임을 예측할 수 있다. 또한 925hPa의 남서기류를 타고 온난한 공기가 중규모대류계가 발달하고 있는 지역으로 공급되고 있는 것을 알 수 있다. 집중호우를 발생하는데 필수적인 요소인 풍부한 수증기(습설)와 온난 이류가 더해지게 되면 대류 잠재불안정이 증가하여 강한 대류활동의 발생을 유도하고, 발생한 중규모대류계가 지속적으로 그 강도를 유지하는데 큰 도움을 준다는 사실을 잘 인지할 수 있다.

Fig. 9은 집중호우 발생에 필수적인 요소인 풍부한 수증기 공급을 좀 더 확인하기 위해서 가강수량과 지상기압배치 그리고 500hPa 바람장을 합성한 그림이다. 앞에서 여러 차례 언급했듯이 가강수량이 40mm 이상이고, 지상에서 대기 중층까지 상대습도가 거의 포화에 가깝게 분포하고 있는 상태가 집중호우를 예측하는데 매우 중요한 매개변수가 될 수 있는데 그림에서 볼 수 있듯이 한반도 남부지방으로 60mm 이상의 가강수량 구역이 습설 형태로 중국 남동해안으로부터 한반도 남부지방으로 좁고 길게 연결되어 유입되고 있다.

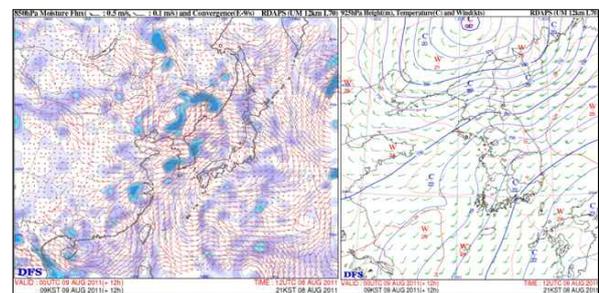


Fig. 8 850hPa Moisture Flux and Convergence(left) and 925hPa Height, Temperature, and Winds(right) at 00UTC 9th Aug 2011

따라서 한반도 남부지방에서 발생한 중규모대류계는 아주 높은 강수효율로 인해서 시간당 강수량이 매우 높게 나타나고 지속적으로 동일한 지역으로 강한 수증기와 온난 이류가 유지됨에 따라 집중호우를 유도하는 중규모대류계의 발달에 최적의 조건이었음을 쉽게 예측할 수 있다. 수도권 집중호우(I)에서 보였던 집중호우 매개변수들은 전라북도 집중호우 사례에도 그대로 적용된다. 여기에서 2개의 분석장을 통해 새로운 매개변수를 제시하고자 한다. 850hPa 고도에서의 하층제트는 더 이상 강조할 필요가 없는 집중호우의 필요불가결한 매개변수라고 할 수 있다. 이 하층제트가 대기 중 상층의 온위나 연직운동과 연관되면 더욱 강한 대류활동으로 발전할 수 있다. 보통의 경우 집중호우 구역은 1000-500층후선이 조밀했다가 넓어지는 구역 내에서 높은 가강수량을 함유한 공기가 하층제트와 연결되어 온난한 남서쪽에서 유입되고 대기 중층에 강한 연직운동이 존재하는 지역이 된다.

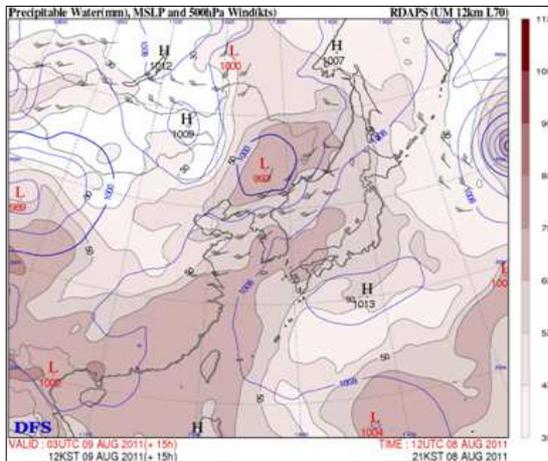


Fig. 9 Precipitable Water, MSLP, and 500hPa Winds at 00UTC 9th AUG 2011

Fig. 10 에서 305K 등온위면에서 붉은색 파선으로 표시된 남서류는 약 900hPa 등압선이 제주 남서 해상부터 850hPa 등압선이 놓인 서해안까지 나타난다. 이 상승류는 높은 가강수량 (Precipitable Water : PW)지역을 통과하는데, 레이더 영상에서 강한 강수대가 위치한 지역과 상승기류가 나타나는 지역, 그리고 높은 가강수량 지역은 일치한다. 파란색 파선 내에 위치한 우리나라 동쪽과 동해상은 남서류의 바람이 부는데도 불구하고 이동하는 기류는 약 840hPa부터 920hPa로 향하는 하강기류다. 이 지역은 상대적

으로 적은 가강수량을 보이며 레이더 영상에서도 뚜렷한 강수예고 없다. 등온위면 분석을 통해 동일한 남서류라 할지라도 상승과 하강운동 지역을 구분할 수 있다. 와도와 온위의 변수로 구성된 잠재와도량 PVU(Potential Vorticity Unit)는 등온위면에서 와도의 변화에 따라 그 값도 변한다. 따라서, PVU가 높다는 것은 저기압성 와도가 크다고 할 수 있으며, 저기압성 순환이나 수렴에 의한 강수대는 그림 1과 같이 PVU 값이 큰 지역에 위치한다. 따라서 그림 1의 2011년 8월 9일에 발생한 전라북도 호우의 경우 등온위면 분석을 통해 상승운동, 높은 가강수량, 상대적으로 높은 PVU, 이 세 가지 요소가 모두 일치하는 지역을 호우구역으로 판단할 수 있다.

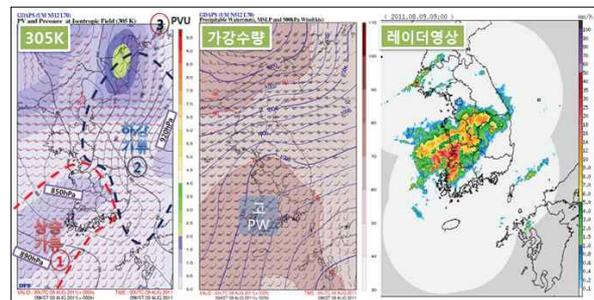


Fig. 10 Potential Vorticity, Pressure and Winds(left), Pressure, MSLP, and 500hPa Winds(middle) on 305K Isentropic surface, and Radar Image(right) at 00UTC 9th Aug 2011

3. 결 론

본 집중호우 사례에서는 클러스터 형의 강수계가 발생하여 장시간 유지될 만한 뚜렷한 종관적 특징이 없는 가운데 전북 전 지역에서 지속적 호우가 발생한 사례였으며, 오히려 중-a 규모의 기압능이 남한을 덮고 있어 호우 발생 예측이 매우 어려운 경우로 판단된다. 호우 발생 과정과 발생 원인으로는 약한 중규모 기압골이 전북 해안지역에서 정체하면서 강화되었고, 강화된 기압골 풍하측 부분에서 조직화된 클러스터형 호우시스템이 정체하면서 전북지역에 지속적 호우가 발생한 것으로 보여 진다. 종관 규모 강제력이 약한 종관 규모 환경에서 약한 기압골만으로는 클러스터가 형성되기 어려웠을 가능성이 크고, 만들어졌더라도 빠르게 북동진하여 누적 강수량이 피해가 클

만한 양은 아니었을 것으로 판단된다. 따라서 내륙의 중규모 기압능 발달이 호우 시스템의 발달과 정체에 기여한 것으로 추정되는 매우 특이한 사례이다. 본 연구 I, II에서 다룬 두 호우 사례는 모두 독특한 환경에서 독특한 조건들로 인해 호우 시스템이 발달한 경우들이어서 이들과 같은 호우의 발생을 적절히 예보하기 위해서는 이들 호우의 발생 과정과 역학에 대한 이해를 갖추어야겠다. 먼저 중규모 기압골과 클러스터 형 강수계 발달의 관계 이해 개선이 요구되며, 전북 호우 사례에서 중규모 기압골을 정체하게 한 원인에 대한 분명한 파악이 필요하다. 사례 연구에서 핵심 원인으로 지목된 기압능의 발생 원인으로 보이는데 이에 대한 명확한 규명이 필요하다. 본 사례는 수도권 집중호우 사례에 비해서 종관규모 강제력을 뚜렷하게 규명하기 힘들기 때문에 등온위면 분석과 단열선도 분석을 통해서 그 특성을 분석하는데 주력할 수밖에 없었다. 항공기상 예보 측면에서 볼 때 전라북도 지방 집중호우 사례도 초단기예측 부분에서 매우 많은 아쉬움을 남긴 사례라고 할 수 있다. 종관규모나 수치예보에서 예보를 위한 강제력을 찾지 못했다고 하더라도 적절한 위성, 레이더 분석을 통해 3시간에서 6시간 이후의 중규모대류계 발생과 발달에 관한 초단기 예보를 위한 예보척의 개발이 필요하겠다.

참고문헌

- 1) Research, Engineering and Development Advisory committee, "Report of The Weather-ATM Integration Working Group", FAA 2007.
- 2) 김영철, 함숙정, "대류성 불안정 지수를 이용한 집중호우 예측", 한국항공운항학회지, 제 17권 제 1호, 2009, pp.17-23.
- 3) Carlson, T.N., "Airflow through midlatitude cyclones and the common cloud patterns.", *Mon. Wea. Rev.*, 1980, 제 108권 제 10호, pp. 1498-1509.
- 4) FENG Sha, LIU Qi, and FU Yun-Fei, "Precipitation under Subtropical High Conditions: Evidence and Implications", *ATMOSPHERIC AND OCEANIC SCIENCE LETTERS*, 2009, 제 2권 제 4호, pp. 244-249.
- 5) 홍성길, "기상 분석과 일기예보", 교학연구사, 서울, 2003, pp.417-429.

6) Doswell, C.A. III, H.E. Brooks and R.A. Maddox, "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., 1995, pp.149-156.

7) NOAA, "COMET program, Skew-T Mastery<<http://www.meted.ucar.edu/mesoprim/skewt/>>", NOAA, 2006.

8) NOAA, "COMET program, Severe Convection II: Mesoscale Convective Systems, <<https://www.meted.ucar.edu/mesoprim/severe2/>>", NOAA, 2004.