

論文

활주로 폐쇄를 야기한 대설 사례 연구

김영철*

A Study of Heavy Snow event caused Runway closed

Young-Chul Kim*

Abstract

The heavy snow event occurred on JAN 4, 2010 brought huge disaster such as Gimpo International Airport runway closed, heavy delays of other airport, and property damage of 16 billion won.

Though this heavy snow event is involved in the general synoptic scale heavy snow forecast, it recorded too much snow amount and longer duration than expected. To explain this unusual event, we used the conveyor belt theory. By combining the synoptic scale heavy snow forecast and the conveyor belt theory, the characteristics of heavy snow event was well explained.

Key Words : Heavy snow(대설), synoptic scale heavy snow forecast(중관규모 대설예보칙), Conveyor Belt Theory(수송대 이론), Runway Closed(활주로 폐쇄)

1. 서론

우리나라는 아시아 대륙의 북동쪽에 위치한 반도로서 삼면이 바다로 둘러싸여 봄, 여름, 가을, 겨울 4계절의 변화가 뚜렷하게 나타나고, 여름의 집중호우, 태풍, 겨울의 대설이 가장 뚜렷한 기상 현상으로, 그로 인한 인명 및 재산피해가 매우 크다. 특히 겨울철 발생하는 가장 뚜렷한 기상현상은 차고 건조한 대륙성 기단인 시베리아 기단의 영향으로, 시베리아 고기압의 발달로 인해 한국의 서해안 지역과 일본 열도 동안 지역에는 강설 현상이 자주 발생하는 것으로 알려져 있다. 항공 분야를 보면, 기상이 항공기 결항과 지연에 유의한 영향[1]을 주고 있으며, 특히 강설은 항공기 안전에 많은 영향을 미칠 뿐만 아니라 공항 운영의 효율성을 저해하는 가장 중요한 기상 요소라 할 수 있다.

겨울철 강설 현상을 보다 정확히 예보하고 대처하기 위해서 우리나라 강설 현상에 대한 이해가 선행

되어야 한다. 우리나라 강설 현상에 대한 연구는 크게 유형 분류 연구, 발생 기구 연구로 나눌 수 있다. 먼저 유형 분류 연구는 강설 발생에 주요한 역할을 하는 중관 규모 기상 환경에 대한 연구로, 김성삼[2]은 강설 빈도에 따라 우리나라를 영동, 내륙, 울릉도 지역으로 구분하였고, 전종갑 등[3]은 대관령 중심 영동 지역, 울릉도, 군산 중심 서해안 지역으로 나누어서 수치 모델을 기반으로 대설 연구를 수행하였다. 정관영 등[4]은 주성분 분석 기법을 사용하여 동해안 지역, 서해안 지역, 중부 내륙 지역, 영남 중동부 지역, 영남 남부 지역의 5개 지역으로 구분하여 각 지역별로 대표적인 중관 기압계 유형을 제시했다. 또한, 송병현[5]은 강설량은 동해안이, 강설빈도는 서해안 지역이 많으며, 서고동저형의 기압배치에서 서해에 대설이, 동해나 남동해의 저기압 배치에서는 동해안 지역에 강설이 많다는 것을 밝혔다.

이러한 유형 분류 연구 외에도 강설 발생 기구에 대한 연구로 Park and Joung[6]은 기단 변질에 대해서, 이훈 등[7]은 영동 지역 대설 사례를 분석했고, Lee and Park[8]은 한반도에 중규모 기압골의 발달 기구를 제시했으며, 안중배 등[9]은 대설의 발생과 강도가 지형 조건, 중관 기상 상태뿐만 아니라 해수면 온도와 연관되어 있음을 밝혔다. 서은경[10]은 시베리아 고기압의 확장고 저기압의 한반도 남쪽 통과가 같은 시점에 일어날 때의 강설 현상에 대해서 설

2013년 11월 28일 접수 ~ 2013년 12월 18일 심사완료
논문심사일 (2013.11.29, 1차), (2013.12.11, 2차)

* 한서대학교 항공운항학과 부교수

연락처, E-mail : yckim@hanseo.ac.kr

충남 태안군 남면 신은리 산105 한서대학교 태안비행장

명하였다.

이와 같은 한반도 강설에 대한 유형 분류 연구, 발생 기구 연구 등이 주로 수행되어 왔으나, 집중호우에 비해서 연구가 많이 부족하고, 또한 현업 강설 예보 기법에서도 많은 발전의 여지가 있는 것도 사실이다. 실제로 강설은 시정 저하, 미끄러짐 등으로 인해서 항공기, 선박 운영 및 교통사고 발생, 교통 체증 유발 등 사회기반 시설 운영 전체에 영향을 미쳐 큰 사회적 비용을 발생시킨다. 강설에 의한 피해를 최소화하기 위해서 방재 대책이 잘 구축되어있어야 함은 물론이거니와 기본적으로 강설 현상에 대한 정확한 예측 능력에 따라 피해 정도가 매우 크게 달라질 수 있다는 것도 익히 알려진 사실이다.

따라서 본 연구는 활주로를 눈에 덮이면서 김포국제공항의 항공기 운항이 9년 만에 중단되고, 인천국제공항과 김해국제공항에서도 무더기 결항 사태를 빚은 2010년 1월 4일 대설 사례를 수송대(Conveyor Belt) 이론을 적용하여 분석하고, 이를 적용한 대설 예보칙(則)을 검토하여 안전하고 효율적인 항공기 운항 및 공항 운영을 도모하고자 한다.

2. 대설 사례(2010.1.4.) 특성 분석

2.1. 일기도/레이더/위성 영상 분석

2010년 1월 4일 대설 사례는 Fig. 1의 1월 4일 09시 지상 및 상층(850hPa, 700hPa, 500hPa) 일기도에서 볼 수 있듯이, 지상에 전선을 동반한 저기압이 중국으로부터 이동해 오고, 상층에도 분리 저기압과 기압골이 지상 기압골의 서쪽으로 기울어져 강한 경압불안정을 형성한 저기압계가 한반도를 통과하면서 형성된 눈구름에 의한 것으로 분석된다.

레이더 영상(Fig. 2)과 위성 영상 자료(Fig. 3)를 보면, 강설을 포함한 구름 밴드가 해안선 부근에서 급격하게 발달하고 있고, 한랭전선 후면에 해당하는 서해안에는 한기의 이류에 의한 층운형 구름이 주로 분포하고 있다. 반면에 내륙으로는 선형 대류성 구름이 불규칙적으로 분포하고 있는 것으로 나타나고 있어 중관규모 경압불안정과 중규모 대류활동에 의한 강설 현상이 발생되고 있음을 알 수 있다.

이 대설 사례 시의 기상청과 공군 기상단의 관측값(Table 1)을 살펴보면, 강설은 주로 우리나라 수도권과 강원도에 집중되어 서울 25.8cm, 인천공항 23.0cm, 김포공항 24.0cm 등 평균 20cm 안팎의 적설량/강설량이 관측되었으며, 경기도와 인접한 충남 지역에는 상대적으로 강설량이 적었으며, 전라도와 경상도의 남부지역으로는 강설이

거의 없는 특징을 보였다.

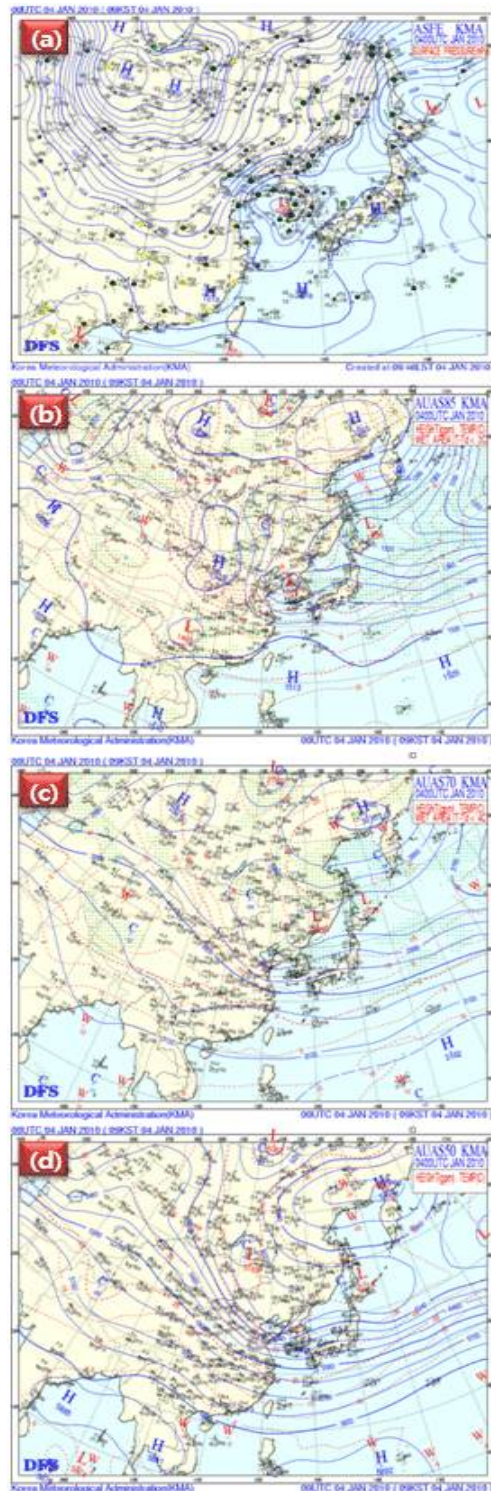


Fig. 1 The Weather map (a) surface, (b) 850hPa, (c) 700hPa, (d) 500hPa.

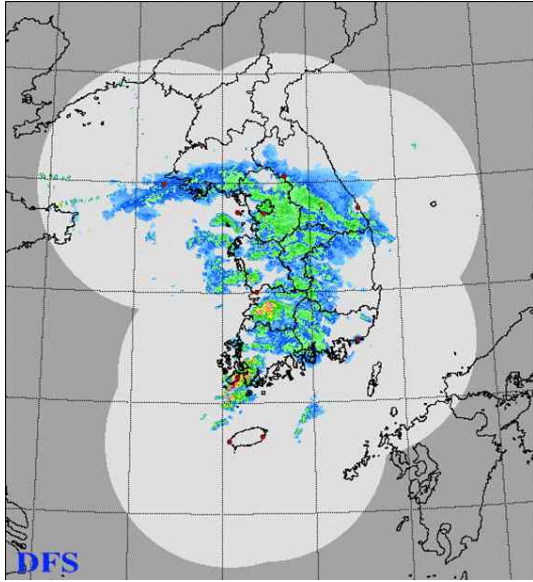


Fig. 2 The radar image at 00UTC 4 Jan 2010

한반도 남부지방을 통과하는 것으로, 지난 30년 동안 중부지방에 20cm 이상의 대설을 가져왔던 사례에 모두 나타난 형태이다.

Table 1. 2010년 1월 4일 기상청/기상단 관측값

기상청 관측소	신적설량 (cm)	기상단 관측소	강설량 (cm)
서울	25.8	성남	22.4
인천공항	23.0	수원	19.3
김포공항	24.0	원주	22.1
수원	19.5	강릉	25.4
강릉	24.5	청주	11.4
청주	7.5	계룡대	4.8
대전	5.3	대구	2.5
대구	0.0	광주	1.5
광주	3.3	사천	0.0

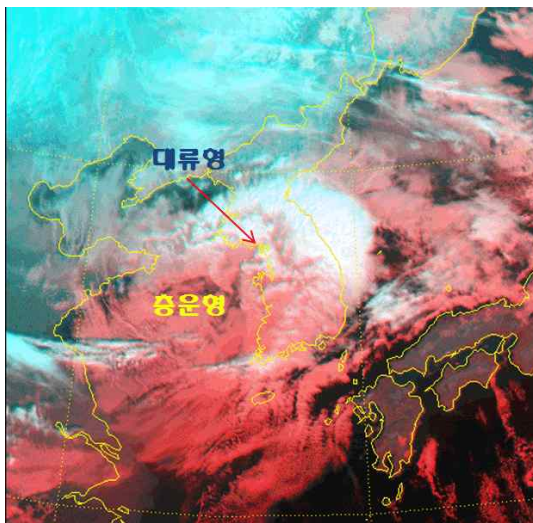


Fig. 3 The satellite image at 00UTC 4 Jan 2010

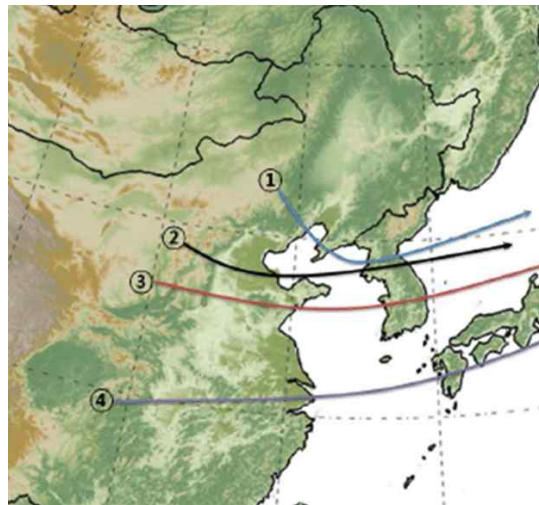


Fig. 4 The four typical heavy snow pattern in Korea peninsula.

2.2. 대설 사례 유형별 분석

본 사례는 기상청에서 기압골의 발생 지역과 통과지역을 중심으로 분류한 대설 사례의 4가지 형태 중에서 3번째에 해당(Fig. 4)하는 것으로, 중국 내륙에서 형성된 기압골이 상층 한기의 이동과 함께 서진하여, 서울 남쪽으로 통과하는 형태에 해당한다. 이 형태는 지상부터 상층까지 잘 조직화된 중관규모 경압불안정이 큰 저기압계가

이 형태에서 나타나는 구름 모식도는 Fig. 5와 같고, 그 특징은 지속적인 강설 현상이 온난전선 북쪽 지역에 발생하고, 지상저기압 중심과 거리가 멀어도 강설 현상이 발생하는 것이다. 보통 이 형태는 저기압 중심이 다가올수록 강수강도가 증가하고, 저기압 중심이 통과한 이후에도 강수가 일정기간 지속됨에 따라 대설을 유도하는 것으로 알려져 있다.

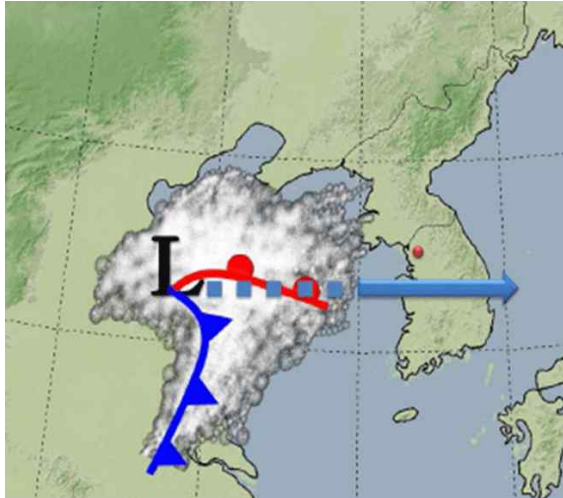


Fig. 5 The schematic diagram of third typical heavy snow pattern in Korea peninsula.

3. 수송대 이론을 통한 사례 분석

3.1. 수송대 이론

수송대(Conveyor Belt) 이론은 중위도 저기압의 발생과 이동 과정에서 등온위면을 따라 움직이는 기압계에 상대적인 기류의 3차원 흐름을 통해 기압계의 발달을 규명하기 위해 1980년 Carlson[11] 등이 처음으로 제시한 것으로, 기존의 비야크니스 이론, Shapiro와 Keyser 이론 등이 가진 한계를 극복하고자 제안된 이론이다. 즉, 고전적인 중위도 저기압 이론의 관측자의 시각을 탈피하여, 기압계의 시각에서 본 상대기류의 이동을 분석함으로써 중위도 고/저기압 구조 및 발달 과정을 더욱 사실적으로 설명하고 있는 이론이다.

Fig. 6은 수송대 이론의 일반적인 모식도로, 발달하는 기압계 주변의 구름과 함께 두께 1~3km, 넓이 200~300km, 수천 km의 길이를 가지는 온난, 한랭, 건조 3개의 수송대의 모습을 나타낸다.

온난 수송대는 기압계의 관점에서 볼 때, 하층에서 한랭전선과 나란한 방향으로 유입되어 온난전선을 가로질러 대기 상층으로 빠져나가는 상대적인 기류로, 따뜻한 공기를 극지방으로 수송하면서 온난전선면에서의 상승 운동을 유도하는 역할을 수행한다. 한랭 수송대는 기압계 이동 방향에 반대 방향으로 온난전선과 나란히 이동하여 한랭전선을 가로질러 극지방 쪽으로 이동하고,

한랭전선 후면에서의 대류형 구름의 형성에 기여한다. 건조 수송대는 한랭전선의 뒤를 따라 대기 중층에서 하층으로 이동하면서 한랭전선 후면의 구름 소산에 기여하는데, 이동속도가 빠른 경우에는 한랭전선을 추월하여 새로운 대류 활동을 유도하는 역할을 한다.

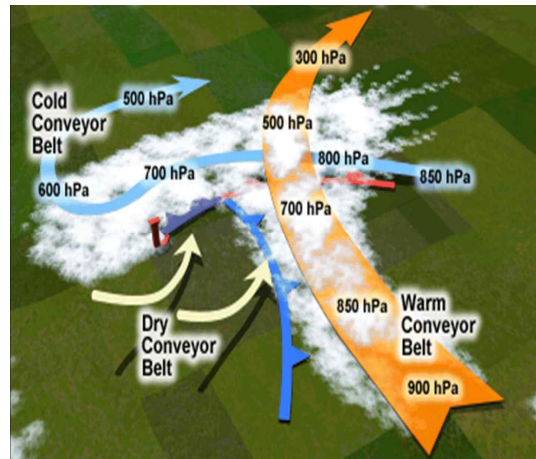


Fig. 6 Conveyor Belt associated with cyclogenesis.

3.2. 수송대이론을 적용한 사례 분석

Fig. 7은 2010년 1월 4일 대설 사례를 수송대 이론으로 분석한 모식도이다. 850hPa 일기도에 지상 기압골, 850hPa와 500hPa의 기압골의 위치, 500hPa 건조 기류의 이류(넓은 shading), 상층 제트(얇은 화살표)의 위치를 동시에 표현한 것인데, 850hPa의 Stream Line을 따라 이동하는 기류가 바로 기압계의 입장에서 보면 온난 수송대에 해당하고, 이 온난 수송대는 한랭전선과 나란하게 유입되어 온난전선을 가로질러 상승하는 형태를 가지게 된다. 이러한 500hPa 한랭 기류의 유입과 온난 수송대의 상승운동에 따른 대류성 구름이 발달하는 것을 위성영상을 통해서 확인할 수 있다.

또한 대류운 발달구역과 수증기 영상의 건조 구역, 지상 기압계와 상층 분류 구역의 위치 등의 위치와 온난 수송대의 전방상승 모식도가 정확하게 잘 표현되고 있으며, 지상기압계 발달 구역과 500hPa의 분류 구역이 잘 일치하고 있는데 이는 상대적으로 강한 연직시어운동과 대류형 구름 발달을 유도하는 역할을 했음을 알 수 있으며

레이더 영상의 강한 강설 에코 지역과 매우 잘 일치하고 있다. 또한 280K 등온위면 분석(Fig. 8)을 통해, 고기압에서 저기압으로 이동하는 온난 기류가 약 400km를 이동하는 동안 200hPa의 기압 상승구역을 이동하여 온난전선의 기울기에 해당하는 강제단열상승이 이루어짐을 알 수 있다.

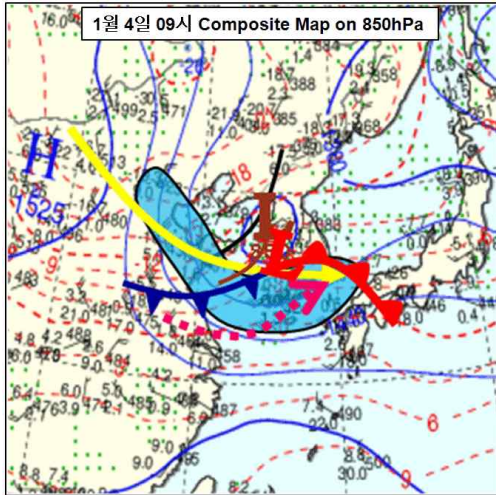


Fig. 7 The analysis of heavy snow case at 4 Jan 2010 from Conveyor Belt Theory viewpoint.

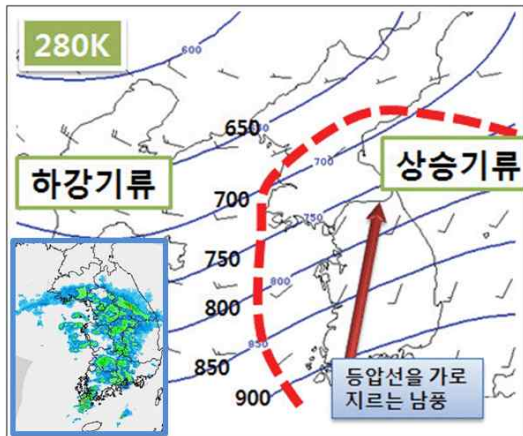


Fig. 8 The 280K isentropic chart and radar image at 00Z 4 Jan 2010.

4일 00UTC 오산 단열선도(Fig. 9)에서 전 시간에 비해서 850hPa을 중심으로 강한 온난 이류에

의해서 지상에서 부터 850hPa 고도까지 강한 역전층이 형성되어 있어, 상승하는 남서 기류에 의한 역전층은 층운형 구름의 발달에 유리하고, 전방상승 온난 수송대는 대류형 구름 발달에 유리하므로 층운형, 대류형 복합 구름대의 발달에 유리한 조건을 제공했음을 알 수 있다.

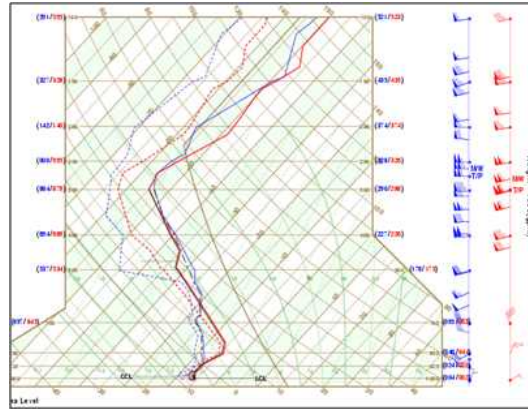


Fig. 9 The Skew-T Diagram at 00Z 4 Jan 2010 in Osan.

3.3. 종관규모 기압계에 의한 대설 예보척 적용

Table 2는 현재 많이 활용하고 있는 대설 예보척을 보인 것이다. 이번 대설 사례에서도 700hPa, 850hPa, 지상 분석에서 지표면 0℃ 등온선의 이동이 강설이 지속되는 동안 거의 없고, 저기압 북서쪽의 노점온도가 -4℃ ~ 0℃를 지속 유지하고 있었다, 또한 700hPa의 온도-노점 차가 3℃이하 구역이 지속적으로 분포하고, 700hPa의 노점 온도가 -10℃~-5℃인 상태로 700hPa 이하의 대기 전체에서 습윤 상태가 유지되고 있어 남서기류와 한랭 북서기류가 700hPa 고도에서 수렴되는 모습을 보였다. 그리고 500hPa 고도에 한기가 유입되고 지상에서 500hPa까지 상대습도가 높았으며, 500hPa 골과 대설구역이 보통 600km에서 1300km 떨어져 있다는 점도 종관규모 대설 예보척과 잘 일치하고 있다. 즉, 2010년 1월 4일 대설 사례는 종관 규모 기압계에 동반한 일반적인 대설 예보척을 잘 따르는 모습을 보여주었다. 그러나 많은 시간당 강설량을 보이면서 지속 시간이 길었던 이번 사례를 충분히 설명한다고 보기에는 많은 어려움이 있다.

즉, 종관 규모 기압계의 영향 아래에서 수증기와 열에너지의 공급, 강제 상승 운동 등 온난 수

송대에 의한 효과가 동시 복합적으로 영향을 주
어 예상하기 어려운 많은 강설이 내린 것이다.

참고문헌

Table 2. 대설 예보칙

850hPa과 지상 분석	- 강설시, 지표면 0℃ 등온선 이동 없음 - 850hPa 고도까지 거의 포화 - 지상저기압 북서쪽의 노점온도가 -4℃ ~ 0℃를 보일 때
700hPa	- 강한 강설은 중심이 분리된 700hPa 기압골 중심을 따라 발생 - 강설은 기압골이 통과한 후 종료 - 강한 강설은 700hPa 노점온도가 -10℃~-5℃사이인 습윤 공기에서 발생 - 대설은 700hPa에서 온난한 남서기류와 한랭한 북서 기류가 수렴 시 강해짐. - 한랭 이류의 중심 이동 지역
500hPa	- 기압골에 동반되는 공기의 온도가 -20℃이하 일 때. - 대설은 보통 500hPa 기압골 축에서 600~1300km 정도 떨어진 곳에서 자주 발생
평균 상대습도	- 지상에서 500hPa까지 평균 상대 습도가 80% 이상일 때.

4. 결 론

강설은 한반도 겨울철의 가장 뚜렷한 기상 현
상으로 인명과 재산 피해가 매우 크다. 특히 항공
분야에서 강설은 항공기 안전과 공항 운영의 효율성
을 저해하는 가장 중요한 기상 요소라 할 수 있다.

2010년 1월 4일 대설 사례는 기존의 강설 예보 이
론과 예보칙으로 예상하기 어려운 많은 강설이 내려
김포국제공항의 활주로나 폐쇄되고, 다른 공항에서
도 무더기 결항 사태가 발생했을 뿐만 아니라, 전국
적으로 160억 원의 재산피해를 입은 대표적인 겨울
철 강설 피해 사례라고 할 수 있다.

이 사례는 기압계의 시각에서 본 상대기류의 이
동을 적용한 수송대 이론을 적용하여 분석하면,
한랭전선과 나란한 대류형 구름대의 발달, 기압
계 이동과 하층제트의 상대적인 흐름에 의한 온
난전선면 상의 대류형 구름대 발달 등은 온난 수
송대의 전방 상승에 의한 대류성 구름 발달이 중
요한 것으로 나타났다. 즉, 일반적인 대설보다 많
은 강설량을 보이면서 지속 시간이 길었던 것은
기존의 종관 규모 기압계에 의한 대설 예보칙에 온
난 수송대 효과를 접목함으로써 설명할 수 있을 것
으로 판단되며 앞으로의 대설 예보에 이런 부분의
검토가 수행되어야 할 것이다.

[1] 이중우, 고평근, 권태순, 이기광, 2011 : 국내
항공운항에서 기상현상이 결항 및 지연에 미치는
영향 분석. 한국항공우항학회지, 19(1), 29-37.

[2] 김성삼, 1979 : 남한의 10cm 이상 강설의 기
상 조건. 한국기상학회지, 15(1), 1-10.

[3] 전종갑, 이동규, 이현아, 1994 : 우리나라에서
발생한 대설에 관한 연구, 한국기상학회지, 30(1),
97-117.

[4] 정관영, 정영선, 황병준, 1999: 주성분 분석을
이용한 한반도 강설 지역 구분. 한국기상학회지,
35, 466-473.

[5] 송병현, 1993 : 우리나라 동해안 지역과 서해
안 지역의 강설 특성 비교 연구, 서울대학교 대
학원 석사학위논문, 32pp.

[6] Park, S. U. and C. H. Joung, 1984: Air
modification over the Yellow Sea during
cold-air outbreaks in winter. J. Korean Meteor.
Soc., 20, 35-50.

[7] 이훈, 이태영, 1994: 영동 지역의 폭설 요인.
한국기상학회지, 30, 197-217.

[8] Lee, T.-Y., and Y.-Y. Park, 1996: Formation
of a mesoscale trough over the Korean
Peninsula during an excursion of the Siberian
High. J. Meteor. Soc. Japan, 74, 299-323.

[9] 안중배, 조익현, 1998: 한반도 주변 해수면 온
도에 따른 중규모 대기 모형 반응. 한국기상학회
지, 34, 643-651.

[10] 서은경, 전종갑, 1991: 1990년 1월 29일-2월
1일 한반도에서 발생한 대설에 관한 연구. 한국
기상학회지, 27, 165-179.

[11] Carlson, T.N., 1980: Airflow through
midlatitude cyclones and the common cloud
patterns. Monthly Weather Review, 108, 10,
1498-1509.