

Article

영동대설 사례와 관련된 동해상의 현열속과 잠열속 분포 특성

김지언¹ · 권태영^{2*} · 이방용³

¹기상청 철원기상대
 (269-802) 강원도 철원군 갈말읍 군탄리
²강릉대학교 자연과학대학 대기환경과학과
 (210-702) 강원도 강릉시 지변동 123번지
³한국해양연구원 부설 극지연구소
 (425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29호

Characteristics of Sensible Heat and Latent Heat Fluxes over the East Sea Related with Yeongdong Heavy Snowfall Events

Ji-Eon Kim¹, Tae-Yong Kwon^{2*}, and Bang Yong Lee³

¹*Cheorwon Meteorological Observatory, KMA
 Cheorwon-gun, Gangwon-do 269-802, Korea*

²*Department of Atmospheric and Environmental Sciences College of Natural Sciences
 Kangnung National University, Gangneung 210-702, Korea*

³*Korea Polar Research Institute, KORDI
 Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea*

Abstract : To investigate the air mass modification related with Yeongdong heavy snowfall events, we examined sensible and latent heat fluxes on the East Sea, the energy exchange between atmosphere and ocean in this study. Sensible and latent heats were calculated by a bulk aerodynamic method, in which NCEP/NCAR reanalysis data and NOAA/AVHRR weekly SST data with high resolution were used. Among winter precipitation events in the Yeongdong region, 19 heavy precipitation events (1995~2001) were selected and classified into three types (mountain, cold-coastal, and warm types). Mountain-type precipitation shows highly positive anomalies of sensible and latent heats over the southwestern part of the East Sea. When separating them into the two components due to variability of wind and temperature/specific humidity, it is shown that the wind components are dominant. Cold-coastal-type precipitation also shows strong positive anomalies of sensible and latent heats over the northern part and over the central-northern part of the East Sea, respectively. It is shown that the sensible heat anomalies are caused mostly by the decrease of surface air temperature. So it can be explained that cold-coastal-type precipitation is closely related with the air mass modification due to cold air advection over warm ocean surface. But in warm-type precipitation, negative anomalies are found in the sensible and latent heat distributions. From this result, it may be postulated that warm-type precipitation is affected by the internal process of the atmosphere rather than the atmosphere-ocean interaction.

Key words : 영동지역(Yeongdong region), 강수형태(precipitation types), 에너지 교환(energy exchange), 기단변형(air mass modification), 잠열속과 현열속(latent heat flux and sensible heat flux)

*Corresponding author. E-mail : tykwon@kangnung.ac.kr

1. 서 론

영동지역의 대설현상(영동 대설)은 보통 동해의 상대적으로 따뜻한 해면을 통과하면서 변질된 공기 덩어리가 영동의 산악지형과 만나면서 형성되는 지형성 강수로 알려져 있다. 영동 대설의 강수 특성은 강수 영역이 좁고 지역에 따라 강한 강수 분포를 보인다는 것이다. 그러나 이러한 대설의 공간적 분포는 적설 관측의 어려움과 산악지역과 좁은 해안지역으로 구성되어 있는 영동지역의 복잡한 지형 때문에 자세한 관측에 어려움이 있다. 특히 영동 대설이 국지적인 현상이라는 점과 동해지역의 해상과 고층 관측 자료가 부족하다는 점 때문에 영동대설 연구에 제약이 따른다.

Moran et al.(1997)에 의하면 기단은 대륙이나 해양과 같은 표면의 성질이 균질한 넓은 지역에 공기가 오래 머물게 되면서, 온도와 습도가 거의 균일한 큰 공기 덩어리로 생성된다. 하지만 이러한 기단들은 생성된 지역에 무기한으로 남아있지 않고 다른 지역으로 이동하면서 지역 표면의 온도, 습도, 안정도 등에 의해 그 특성들이 변하게 된다. 기단의 변질에 영향을 주는 가장 큰 원인은 기단이 이동하는 곳의 표면에서의 열 교환과 습도이며, 그밖에 복사냉각이나 대규모의 수직 운동과도 관련되어 있다. Anderson and Nilson(1990)에 의하면 상대적으로 따뜻한 해수면 위를 통과해 오는 차가운 동풍기류가 지속될 때 스웨덴 동해에 폭설이 나타났다. 또한 Wilson(1997)은 온타리오 호수가 겨울철 강수패턴에 미치는 영향에 대한 연구에서 온타리오 호 동쪽의 강수량은 지형에 의해 발생한 성분이 있다고 밝혔다. 이들 연구의 결과는 바다나 호수 부근의 강수현상이 기단의 변질과 밀접하게 연관되어 있다는 것을 의미한다.

Jacobs(1942)는 대기와 해양간의 열교환이나 증발의 지역적인 차이가 국지적인 기상상태와 밀접한 연관성이 있다고 지적한 바 있다. Kocin and Uccellini(1990)는 대설현상이 넓은 지역에 걸쳐 상승운동이 일어나며 많은 눈을 만드는데 필요한 충분한 수분의 공급, 대기의 안정도 등 여러 가지 복잡한 물리적 과정들의 상호작용 결과이며, 대륙과 해양의 온도차, 바다 위에서의 기단의 변질, 산악효과, 바람장에 의한 수렴 등의 요소들이 대설의 발생에 커다란 영향을 미친다고 하였다. 또한 이러한 요소들의 결합으로 볼 때 해안에 인접한 지역은 많은 눈이 내리기에 좋은 조건을 가진 곳이며, 저기압 발달의 중요한 지역이라고 밝혔다. 한편, 이와 남(1991)은 남극 세종기지에서 발생하는 강한 바람에 동반되는 폭설 현상인 블리저드가 남극반도의 높은 지형적인 영향으로 저기압계의 이동이 저지되어 강화된 저기압과 남극반도쪽으로 장출한 극고기압과의 상호작용과 함께, 남극해협으로부터 유입되는 관성류와

골이 깊은 이동성 저기압의 영향을 받아 발생한다고 보고하였다. Nuss and Kamikawa(1990)는 또한 대기와 해양의 상호작용의 중요한 결과로 해상의 현·잠열속에 의하여 저기압이 급격히 발달할 수 있음을 밝힌 바 있다.

우리나라에서도 이러한 기단 변질과 대설과의 관련성을 밝힌 많은 연구 결과들이 있으며, 이와 이(1994)는 수치모의 결과를 통해 대설의 원인을 하층류의 방향과 속도, 기단의 변질 효과, 지형의 높이 그리고 중관 기압 배치의 지속성에 의한 것으로 분석하였다. 또한 강수 강도를 결정하는 한 요인이 되는 기단 변질의 정도는 지표 기온과 해수면 온도 차이, 습도, 풍속 등에 의해 결정된다고 하였다. 이(1999)는 대관령과 강릉지역의 강설량 차이를 일으키는 중관구조를 알아보기 위하여 대설사례의 비교·분석을 수행하였다. 이 연구는 영동지역 대설 사례를 강릉과 대관령의 강설량에 따라 산악대설형(대관령이 강릉보다 강설량이 많은 경우)와 해안대설형(강릉이 대관령보다 강설량이 많은 경우)으로 나누고, 각 유형에 따른 역전층의 고도, 상승·하강구역, 그리고 저기압의 발달보다 하층에 나타나는 상승운동과 관련이 있다고 보고하였다. 천(1993)은 Jacobs의 관계식에 의해 산출된 울릉도 해상의 증발량 및 현열 방출량이 대관령 및 강릉의 강설량과 비교적 잘 대응되고 있음을 보였다. 그리고 박 등(1979)은 속초 연안의 해수 온도 및 대관령의 풍속과 적설량의 관계를 분석하여 동해 해수면 온도와 850 hPa 고도 기온 사이의 차이가 크고 풍속이 증가함에 따라 대관령의 강설량이 증가한다고 보고하였다.

유사한 연구로 박과 정(1984)은 한파 내습시 황해상에서의 공기의 변질에 관한 연구에서 우리나라 서해안에서 자주 발생하는 소낙눈은 한랭 건조한 시베리아 기단이 황해상에서 변질된 것에 기인한다고 보고하였다. 서와 전(1991)은 대설 기간동안 대륙권 하층의 안정도는 거의 중립상태에 있고, 바다와 그 위 공기의 큰 온도차에 의한 많은 현열로 대기 경계층의 안정도가 감소하며, 하층에서의 상승 운동은 고온 다습한 공기를 경계층 위로 수송하여 경계층 위의 안정도를 감소시킨다고 보고하였다. 또한 최(1994)는 영동지방의 대설이 동해상의 상층 한기 남하에 따른 대기 불안정이 크게 작용한 것으로 분석하였고, 이때 해상에서 수증기 공급이 충분하고 해수온도가 높아 대기 불안정이 증가하였다고 규명하였다.

영동지역의 겨울철 강수량과 하층 대륙권 바람의 관계성을 분석한 정 등(2004)은 영동지역 겨울철 강수가 대부분 대관령 동풍, 즉 중관규모의 동풍과 관련되어 있다고 보고하였다. 또한 하층 대륙권의 바람장에 근거하여 강수를 세 가지(산악형, 한기-해안형, 난기형) 형태로 분류하였다. 강수형태를 살펴보면, 해안지역보다 산악지역에 강수가 많은 산악형 강수의 경우 지상관측 바람과 하층 대륙

권의 바람이 모두 북동풍이고 상대적으로 풍속이 강하며, 특히 상층보다 하층의 강한 풍속과 관련되어 있다. 반면 해안지역에 강수가 많은 한기-해안형 강수는 지상관측 바람에서 대관령과 강릉은 각각 북동풍과 북서풍을 보이고 하층 대류권 바람에서는 하층과 상층에서 각각 북동풍과 북서풍-북북동풍과 관련되어 있으며, 대체적으로 풍속이 약한 바람과 관련되었다. 그리고 난기형 강수는 지상관측 바람에서 대관령과 강릉은 각각 북동-남동풍과 남서풍을 보이고 하층 대류권 바람에서는 하층과 상층에서 각각 동풍-남동풍과 남동풍-남서풍과 관련되어 있으며, 대체적으로 풍속이 약하고 상·하층의 풍속이 비슷한 바람과 관련 된다고 보고하였다.

그리고 조 등(2004)은 기단의 특성을 분석하여 영동지역 겨울철 강수와 중관 기상 패턴과의 연관성을 보이고, 특징적인 중관 기상요소를 지수화 하였다. 위의 결과에 의하면 산악형 강수는 한반도의 남북 방향에 위치한 강한 저기압과 고기압의 영향을 동시에 받으며 기압중심 부근에서 기압, 기온, 비습의 편차는 대관령 강수와 밀접한 관계성을 보인다. 한기-해안형 강수는 만주 지역의 고기압에 의한 동해 북부 지역으로의 한기 이류와 연관되며 만주지역의 기압 편차와 연해주 및 화중지역의 기온 편차는 강릉 강수와 밀접한 관계성을 보인다. 세 번째 형태인 난기형 강수는 한반도 남쪽의 저기압과 한반도 남동해상의 난기 이류와 연관될 수 있다고 추측하였으며, 한반도 남쪽지역의 기압 편차와 한반도 남동해상의 기온편차는 강릉과 대관령의 강수량과 뚜렷한 관계성을 나타내지 않았다.

이 연구에서는 정 등(2004)과 조 등(2004)의 강수유형 분류 방법에 따라 1995년부터 2001년까지 19개의 영동지역 겨울철 강수 Event를 세 가지 유형으로 분류하였다. 그리고 각 강수유형과 관련된 동해상(32.5~45°N, 125~142.5°E)에서의 해양과 대기사이의 에너지와 수분 교환을 이해하기 위하여 해상에서의 현열속과 잠열속을 벌크공기역학법(Bulk Aerodynamic Method)으로 계산하였다. 여기서 현열속과 잠열속 계산에 사용한 기상요소 자료는 강수 Event 내에 6시간 누적강수량이 최대값을 보이는 시각의 NCEP/NCAR 재분석 자료와 고해상도 NOAA/AVHRR weekly SST (Sea Surface Temperature) 자료이다. 기존의 연구는 연안이나 지점에서의 현열속과 잠열속 값을 분석하였으나 이 연구에서는 영동대설과 관련된 한랭 건조한 특징을 가진 cP 기단이 남쪽으로 이동하면서 일어나는 변질에 대해 살펴보기 위해 동해 전역의 현열속과 잠열속 분포를 분석하였다. 특히 이 연구에서는 영동지역 겨울철 강수특성을 이해하기 위해 강수유형에 따른 현열·잠열속 편차장의 합성도(composite map)를 분석하였다. 또한 각각의 강수 유형에 대해 현열속과 잠열속 편차를 기상 성분별(바람, 온도, 비습) 편차값으로 나누어 분석함으로써

강수유형과 관련된 기상 성분의 특성을 조사하였다.

2. 자료와 방법

이 연구에서는 영동지역 겨울철 강수 Event 기간을 선정하기 위하여 상대적으로 관측기간이 길고 같은 위도 상에 위치하여 있으며, 산악과 해안지형을 대표할 수 있는 대관령과 강릉에서 관측한 3시간 누적강수량, 적설량과 매시간 풍향자료를 이용하였다. 이렇게 얻어진 자료를 이용하여 대관령과 강릉에서 관측된 각각의 Event 기간 중 총 누적 강수량이 5 mm 이상인 사례를 선정하였다. 그리고 정 등(2004)과 조 등(2004)에 의한 강수유형 분류방법에 따라 1995년부터 2001년까지 약 7년 동안 52개의 겨울철 강수 Event를 분류하였다. 그리고 이와 같이 분류한 강수 Event를 GMS-5 IR1 영상의 밝기 온도를 이용하여 구름의 형태와 특성에 따라 세 가지 강수유형(산악형 강수와 한기-해안형 강수, 난기형 강수)으로 재분류하고 비교하였다. 이 연구에서는 난기-해안형을 난기형이라 하였으며, 연구 기간동안 산악형 강수의 경우 8개 사례, 한기-해안형 강수의 경우 15사례, 그리고 난기형의 경우 14사례를 선택하였다. 또한, 기타 유형으로써 우리나라에 전반적으로 영향을 미치지 않거나 강수가 약하며, 중부지방을 통과하는 저기압에 의해 유발되는 강수유형의 경우도 15건이나 타났다. 하지만 본 연구에서는 52개 강수 Event 가운데 NOAA/AVHRR weekly SST 자료가 부족한 (SST 관측 자료가 10% 이하인 경우) 사례를 제외하고 결과적으로 19개의 강수 사례를 분류하고, 각각의 사례에 대한 현열·잠열속을 분석하였다. 19개 강수 사례는 산악형 강수, 한기-해안형 강수, 난기형 강수로 각각 2개, 9개, 8개로 분류되었다.

각각의 강수유형과 관련된 현열속과 잠열속 분포를 분석하기 위하여 T62 수평 해상도와 28 σ 연직 층을 갖고 있으며, 지표근처와 표준기압 층에서 2.5°×2.5°의 전구 해상도를 갖는 NCEP/NCAR 재분석 자료를 사용하였다. 이 NCEP/NCAR 재분석 자료 동화의 방법은 Kalnay *et al.*(1996)과 Kistler *et al.*(2001)에 의해 자세히 설명되었으며, 이 연구에서는 간단히 사용된 재분석 자료만 언급하였다. 겨울철 영동지역 강수형태와의 비교를 위하여 사용된 재분석 자료는 32.5°~45°N, 125°~142.5°E 격자 범위내의 6시간 간격(00 UTC, 06 UTC, 12 UTC, 18 UTC) 자료이고, 이들은 해면기압(Sea Level Pressure) 자료와 지상의 바람(U-wind, V-wind), 기온, 상대습도이다. 이를 이용하여 잠열속과 현열속을 계산하였으며, 각 사례와 관련된 현열속과 잠열속의 분포 특성을 분석하였다.

또한 현열속과 잠열속 계산을 위하여 NOAA/AVHRR weekly SST 자료를 사용하였다. 이 자료는 JPL PODAAC

(Jet Propulsion Laboratory의 Physical Oceanography Distributed Active Archive Center)에서 인터넷 웹사이트 (<http://podaac.jpl.nasa.gov>)를 통하여 제공하는 MCSST (Multi-Channel Sea Surface Temperature) 자료이다. 또한 이 자료는 약 $0.18^\circ \times 0.18^\circ$ 해상도를 갖는 1981년 11월 11일부터 2001년 2월 20일까지 약 19년 동안의 전구($60^\circ\text{S} \sim 60^\circ\text{N}$) 자료이다. 권 등(2001)은 위와 같이 높은 해상도 자료를 사용하여 비교적 좁은 동해 지역에서 나타나는 국지적 SST 변동에 대한 분석을 시도한 바 있다. 또한 동해의 울릉도 연안 수온(Sea Water Temperature)과 NOAA/AVHRR weekly SST의 비교를 통하여 연구에 사용된 SST 자료를 검증하였다. 이 연구에 쓰인 자료는 분류된 19개의 강수유형 Event에 맞추어 분석하기 위하여 1995년부터 2001년까지 겨울철(12월, 1월, 2월) 자료를 사용하였다.

분석영역은 동해 전역에 대한 분석을 위해 사용된 NCEP/NCAR 재분석 자료의 영역인 $32.5^\circ \sim 45^\circ\text{N}$, $125^\circ \sim 142.5^\circ\text{E}$ 안에 포함되는 해양지역을 영역으로 60×70 의 총 4200개의 격자점을 사용하였다. 이중 2734개의 격자가 바다이다. 자료는 8일 동안의 SST 평균값이며, 평균을 취하는 마지막 8일 하루가 다음 기간과 겹치게 되어 매 주 간격으로 자료가 나누어져 있다. 그리고 낮과 밤으로 분리되어 있으며, 단지 관측자료가 있는 격자에서의 주평균 SST 값과 내삽 과정을 통하여 결측 격자를 포함하는 모든 격자의 주평균 SST 값으로 나누어 제공한다. NOAA/NESDIS Global Retrieval Tapes로부터 밤과 낮으로 분류된 SST 값을 받아 격자 평균값을 구하고 반복적인 내삽을 통하여 결측 격자를 채우는 과정은 UM/RSMAS (University of Miami, Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science)가 수행하였다.

대기-해양간의 현·잠열속 계산을 위하여 NCEP/NCAR 재분석 지상 바람, 상대습도, 기온, 해면기압 자료와 NOAA/AVHRR weekly SST 자료를 사용하였다. 현·잠열속은 벌크공기역학법(Bulk Aerodynamic Method)을 사용하여 계산하였으며, 현열속(F_S)과 잠열속(F_L)을 구하는 식은 다음과 같다.

$$F_S = \rho c_p C_H V_a (T_o - T_a) \quad (1)$$

$$F_L = \rho L C_E V_a (q_o - q_a) \quad (2)$$

여기서 아래 첨자 o 와 a 는 각각 해양과 대기를 나타낸다. 변수 T_o 와 q_o 는 각각 해수면 온도와 해수면에서의 공기의 포화 비습이다. 그리고 V_a , q_a , T_a 는 각각 지표 바람의 풍속과 해수면 위의 공기의 비습(보통 10 m 고도에서의 비습)과 기온을 나타낸다. 또한 C_H , C_E , ρ , c_p , L 은 각각 열

교환계수, 수증기 교환계수, 공기 밀도, 건조 공기의 정압 비열 그리고 증발잠열을 나타낸다. 해수면에서의 포화 비습(q_o)은 Clausius-Clapeyron 관계식(Rogers and Yau 1989)인 식 (3)과 (4)를 사용하여 구하였으며, 해수면 위의 공기의 비습(q_a)은 식 (3)과 상대습도를 이용하여 구해진 수증기압을 식 (4)에 적용하여 구하였다.

$$e_s(T) = A e^{-B/T} \quad (3)$$

$$q = 0.622 \times \left(\frac{e_s}{p} \right) \quad (4)$$

여기서 $A=2.53 \times 10^8$ kPa ($=2.53 \times 10^9$ hPa)이며, $B=5.42 \times 10^3$ K이다.

이러한 벌크공기역학법을 이용한 현·잠열속 추정에 관한 연구는 많은 연구자들에 의해 수행되었으며, 이 연구에서 이들은 조금씩 다른 열 교환계수와 수증기 교환계수 값을 사용하였다. 김과 木村龍治(1995)는 북서 태평양 해상에서 벌크공기역학법 오차평가에서 Bunker의 교환계수 값(C_H : 1.66×10^{-3} 과 C_E : 1.66×10^{-3})과 Kondo의 교환계수 값(C_H : 1.40×10^{-3} 과 C_E : 1.44×10^{-3})을 비교하였으며, 이 연구에서 현·잠열속 계산에서 Kondo(1975)가 제안한 교환계수 값을 사용하는 것이 상대적으로 보다 정확하다고 밝힌 바 있다. 또한 김과 木村龍治(1999)는 Kondo의 교환계수 값을 사용하여 한반도 주변해역의 대기-해양간의 열교환량을 추정하는 바 있다. 이 연구에서는 Kondo의 교환계수 값에 따라 C_H (열교환 계수)와 C_E (수증기 교환 계수)는 1.5×10^{-3} 이며, 공기 밀도(ρ)는 1.27 kg/m^3 를 사용하였다.

또한 위의 방법으로 계산한 현·잠열속 값을 사용하여 영동지역 겨울철 강수와 관련된 현·잠열속의 편차를 구하고, 이 편차 값을 선형으로 전개 분리하여 기상 성분, 예를 들어 풍속, 온도, 비습에 기인하는 성분을 분석하였다. 이를 위하여 현열의 편차 식 (5)를 선형으로 전개하여 주된 성분으로 나누어 나타내면 식 (6)과 같다. 여기서 식 (6)의 첫 번째 항은 풍속의 편차에 기인하는 항이고, 두 번째 항은 해양과 대기의 온도 차이의 편차에 기인하는 항이다. 또한 이와 같은 과정을 잠열식에도 적용하였다.

$$F'_S = F_S - \bar{F}_S \quad (5)$$

$$F'_S \approx C_S V' (\bar{T}_o - \bar{T}_a) + C_S \bar{V} (T'_o - T'_a) \quad (6)$$

여기서 \bar{F}_S , \bar{T}_o , \bar{T}_a 는 평균값이고 F'_S , T'_o , T'_a 는 편차값을 나타낸다. 또한 $C_S = \rho c_p C_H$ 이며, 잠열식에서는 $C_L = \rho L C_E$ 를 나타낸다.

NCEP/NCAR 재분석 자료의 격자 간격과 NOAA/

AVHRR weekly SST자료의 격자 간격이 서로 다르기 때문에 2.5°×2.5° NCEP/NCAR 재분석 자료를 약 0.18°×0.18° 해상도인 NOAA/AVHRR weekly SST자료의 격자점에 맞추어 내삽하였다. NCEP/NCAR 재분석 자료의 지상 바람, 기온, 해면기압 자료를 모두 NOAA/AVHRR weekly SST자료 격자점에 맞추어 선형 내삽을 수행하였으며, 바람자료는 U-wind(동서성분의 바람)와 V-wind(남북성분의 바람) 자료를 각각 선형 내삽하여, 이로부터 풍속을 계산하였다. 이들 값을 사용하여 계산한 현열속과 잠열속 값을 이용하여 영동대설과 관련된 동해상에서의 현열속과 잠열속 분포의 특성을 분석하였다. 이 연구에 사용된 현열속과 잠열속은 절대값으로 해석될 수는 없으며, 상대적인 비교를 위하여 사용하였다.

3. 현열속과 잠열속의 평균장

해양으로부터의 열손실은 해양으로부터 대기로의 역복사(Back Radiation), 대기로의 열방출(Sensible Heat), 해수의 증발에 의한 열손실(Latent Heat) 등으로 인해 해양이 냉각된다. 해면에서 대기와 해양의 열교환은 매우 중요하며, 일반적인 해양에서의 현열속은 태양복사에너지의 영향으로 봄에서 여름까지는 대기로부터 해양으로 열이 공급되며 가을과 겨울에는 반대의 경우가 된다. 현열속과 잠열속은 겨울철에 그 크기가 크고 기단의 변질이나 해양 혼합층의 성장에 중요하다. 이러한 열속의 변화는 해수면 온도분포, 대기의 상태, 풍속, 비습, 해면기압, 태양 복사에너지 등에 따라 결정된다.

이 연구에서는 영동지역 겨울철 강수특성을 이해하기 위해 기단의 변질에 큰 영향을 주는 현열속과 잠열속의 분포를 분석하였다. 연구에 사용된 자료는 7년(1995년~2001년) 동안 동해상의 현열속과 잠열속으로 겨울철의 특성, 특히 월별 특성을 고려하여 각 월(12월, 1월, 2월)에 대한 7년 평균장을 분석하였다. 월별 평균 현열속과 잠열속은 먼저 6시간(00 UTC, 06 UTC, 12 UTC, 18 UTC) 간격의 기상 자료로부터 관련된 기상변수의 평균값을 구하고 이들 값을 사용하여 벌크공기역학법으로 계산하였다. 이 연구에서는 고해상도의 SST 자료를 사용함으로써 지역적인 특성을 좀더 자세히 분석하였다.

월별 평균 SST 자료는 실제 위성 관측에서 구름 때문에 관측량이 10% 이하인 때는 제외하고 선형 내삽으로 계산된 NOAA/AVHRR weekly SST를 이용하여 월별 평균을 구하였다. 겨울철 월별 동해 SST의 분포를 살펴보면 모두 상당한 남북의 온도 경도를 보인다. 예를 들어 1월 평균 분포에서 SST는 동해 전역에서 양의 값을 보이며, 동해 북부 지역과 남서부 지역에서 각각 2°C와 14°C로 남북 방향으로 큰 온도 변화를 보인다(Fig. 1a). 그리고 1월

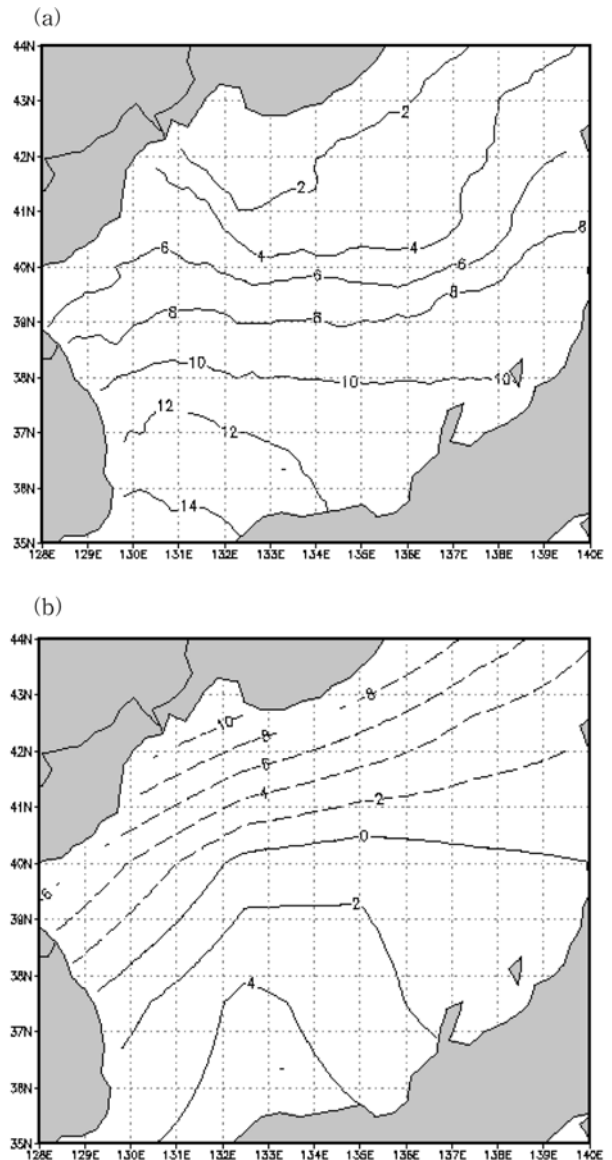


Fig. 1. Distribution of (a) mean NOAA/AVHRR weekly SST data and (b) mean NCEP/NCAR reanalysis surface air temperature data for January. Contour interval is 2°C.

평균 지표 기온은 동해 북부 지역에서 음의 값을 보이고 동해 남부 지역에서는 양의 값을 보이며 SST 분포와 비슷하게 남북 방향의 큰 온도 경도를 보인다(Fig. 1b). 특히 이들 분포에서 SST가 지표 기온 보다 전체적으로 약 8~12°C 높음을 알 수 있고 따라서 동해 전역의 큰 현열속 분포를 예상할 수 있다. 그리고 이러한 결과는 영동 지역에 유입되는 공기의 이류 경로와 속도 등이 현열속을 결정하는 하나의 중요한 인자가 될 수 있음을 의미한다. 다음은 현열속·잠열속의 겨울철 월별 평균 분포를 살펴본다.

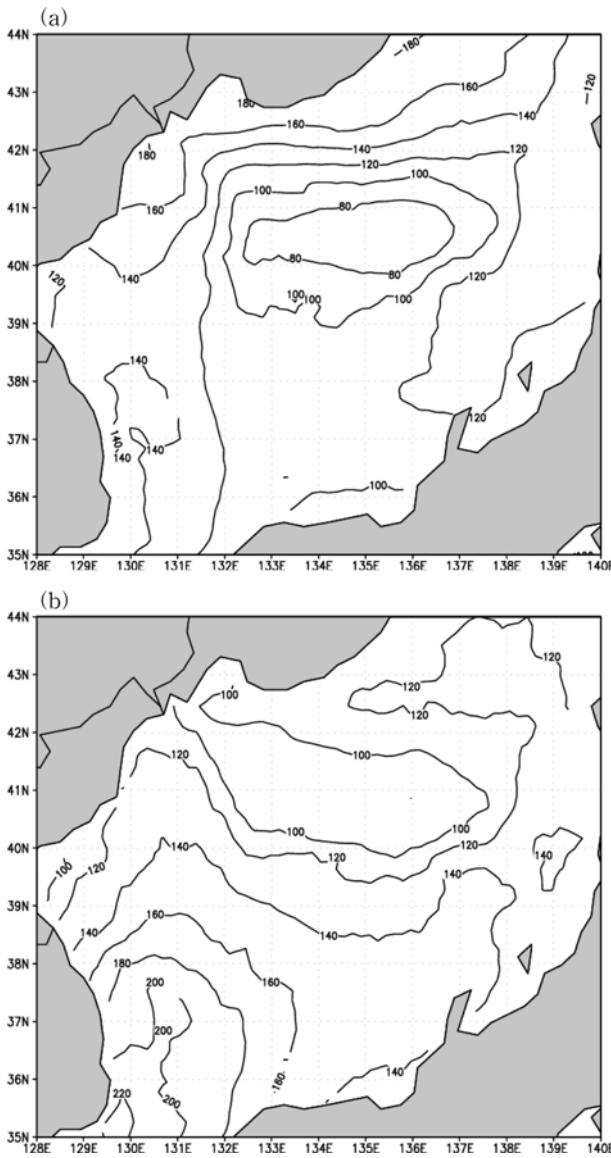


Fig. 2. Distribution of (a) mean sensible heat flux and (b) mean latent heat flux for January. Contour interval is 20 W/m².

먼저 현열속은 겨울철에 가장 큰 값을 나타내는 특징이 있으며, 모두 한반도 주변에서 가장 큰 값을 보였다. 겨울철 현열속의 평균 분포를 월별로 분석하여 그 결과를 살펴보면 동해 전역에서 현열속은 1월에는 약 80~180 W/m²로 가장 큰 값을 보였고(Fig. 2a), 2월은 가장 작은 약 20~100 W/m² (Fig. 3a), 12월에는 약 60~140 W/m² 정도의 값을 보였다(Fig. 4a). 이와 같은 분포는 겨울철 현열속 계산에 사용한 SST 월평균 값과 NCEP/NCAR 재분석 자료인 지표 기온의 월평균 값의 차이가 1월에 최대라는 점과 반면에 2월에 그 차이 값이 가장 작다는 점과 잘 일치하고 있다. 따라서 이러한 결과는 1월에 cP 기단의 남하로

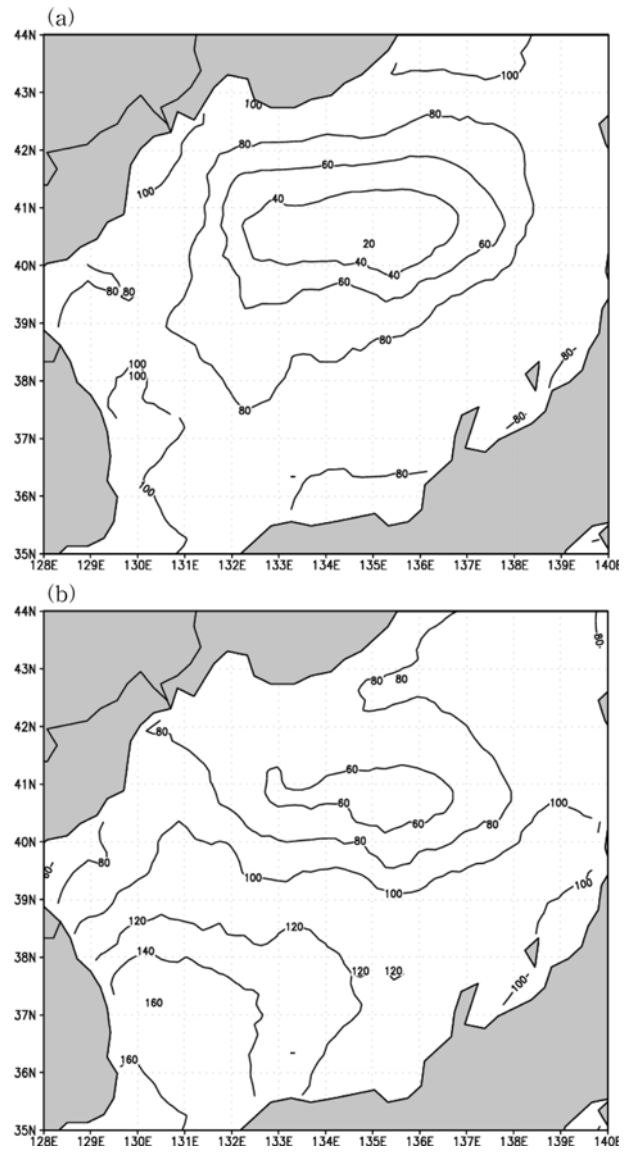


Fig. 3. Distribution of (a) mean sensible heat flux and (b) mean latent heat flux for February. Contour interval is 20 W/m².

인한 지표 기온의 하강이 주된 원인인 것으로 추정할 수 있다. 한편 이 연구에서 계산한 현열속의 월별 평균 분포를 과거의 다른 연구 결과들과 비교해 봤을 때 전체적으로 작은 값을 나타냈다. 이것은 이 연구에 사용된 NCEP/NCAR 재분석 자료의 지표 기온 값에 기인한다고 설명할 수 있다. 몇몇 연구에서는 현열속의 계산에서 10 m 고도에서의 기온 값을 사용하였지만 이 연구에서는 지표에서의 기온 값을 사용하였다.

다음으로 동해 전역에서 겨울철 각 월에 대한 잠열속 평균 분포를 살펴보면, 모두 비슷한 형태의 공간 분포를 보였으며, 또한 계절별로도 비슷한 공간 분포를 나타낸

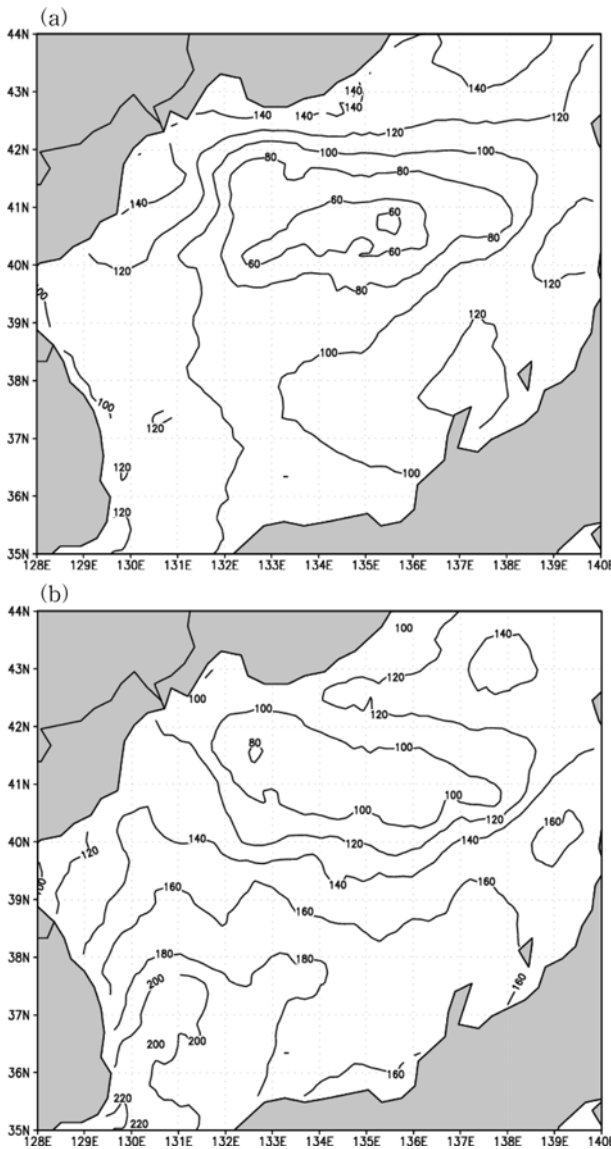


Fig. 4. Distribution of (a) mean sensible heat flux and (b) mean latent heat flux for December. Contour interval is 20 W/m².

다. 이러한 사실은 강 등(1994)에 의한 연구 결과와도 일치한다. 연구 영역의 잠열속은 겨울철 각 월에 대하여 각각 1월에는 100~220 W/m² 정도의 값을 보였으며(Fig. 2b), 2월에는 가장 작은 약 60~160 W/m²(Fig. 3b), 마지막으로 12월에는 약 80~220 W/m² 이상으로 가장 큰 값을 나타낸다 (Fig. 4b). 겨울철 모두 상대적으로 동해 남서부지역에서 큰 값을 보였으며, 특히 12월에 월등히 높은 값을 보였다. 이러한 잠열속 월 평균값의 차이는 1~2월과 비교하여 상대적으로 12월에 큰 값을 보이는 해상에서의 포화 비습에 기인하는 것으로 이해된다. 즉 SST는 1~2월과 비교하여 상대적으로 12월에 높은 값을 보

인다. 결과적으로 겨울철 동해상에서 잠열속은 동해 지역의 전체 평균에서 현열속 보다 크고 지역적으로는 동해 남서부 지역에서 잠열속이 현열속 보다 월등히 큰 값을 보인다.

4. 강수유형별 현열속과 잠열속의 편차 분포

산악형 강수, 한기-해안형 강수, 난기형 강수의 3가지 강수 유형별로 Event 기간 동안의 현열·잠열속의 특징을 살펴보았다. 정 등(2004)의 분류 방법에 따라 52개 강수 Event 가운데 NOAA/AVHRR weekly SST 자료가 부족한

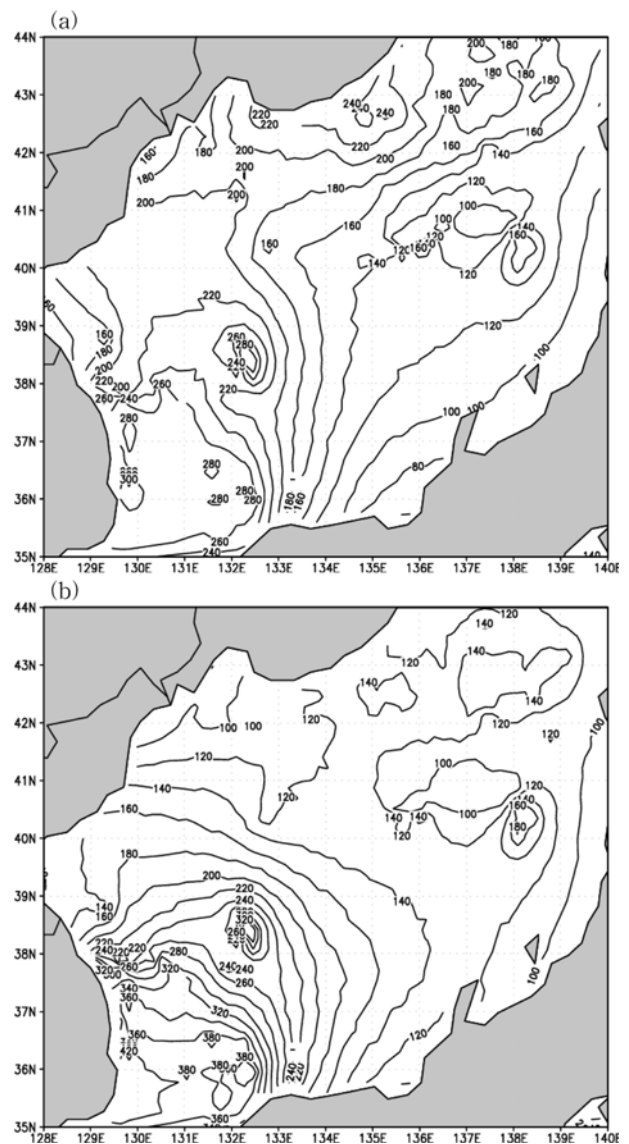


Fig. 5. Distribution of (a) mean sensible heat flux and (b) mean latent heat flux for 2 precipitation events classified into the mountain type. Contour interval is 20 W/m².

(SST 관측 자료가 10% 이하인 경우) 사례를 제외하고 19 개의 강수 사례를 분류하고, 각각의 사례에 대한 현열·잠열속을 분석하였다. 19개 강수 사례는 산악형 강수, 한기-해안형 강수, 난기형 강수로 각각 2개, 9개, 8개로 분류되었다.

산악형 강수에 대한 현열속과 잠열속을 살펴보면, 현열속은 동해 전역에서 약 100~300 W/m²의 분포를 보이며, 이때 동해 남서부지역에서 중심 최대값이 300 W/m² 이상으로 매우 높은 값을 보인다(Fig. 5a). 특히 현열속의 경우 해상의 북동쪽에서 남서쪽으로 향하는 대각선 방향을 중심으로 강한 양의 편차 분포를 보인다. 잠열속의 경우에도

동해 남서부 지역에서 최대값이 나타났으며, 그 값이 420 W/m² 이상을 나타낸다 (Fig. 5b). 또한 잠열속의 경우 현열속의 편차 분포와 같은 패턴의 분포로 해상의 북동쪽에서 남서쪽으로 향하는 대각선을 중심으로 큰 양의 편차를 나타낸다. 따라서 이러한 산악형 강수의 현·잠열속 분포는 해상의 북동쪽에서 남서쪽으로 큰 양의 편차 값이 형성되며, 이것은 한반도 남북에 위치한 강한 저기압과 고기압에 의해 강한 동풍류의 형성과 기온 차에 의해 영동 지역에서 나타나는 폭설 현상과 연관되어 있다고 볼 수 있다.

한기-해안형 강수에 해당하는 사례의 평균 현열·잠열

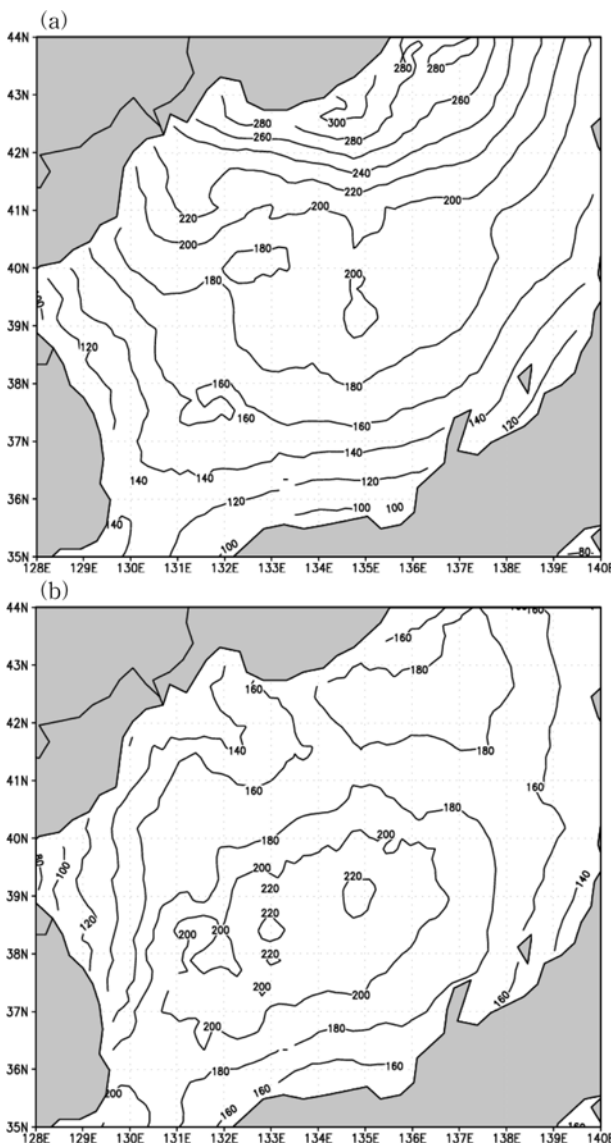


Fig. 6. Distribution of (a) mean sensible heat flux and (b) mean latent heat flux for 9 precipitation events classified into the cold-coast precipitation type. Contour interval is 20 W/m².

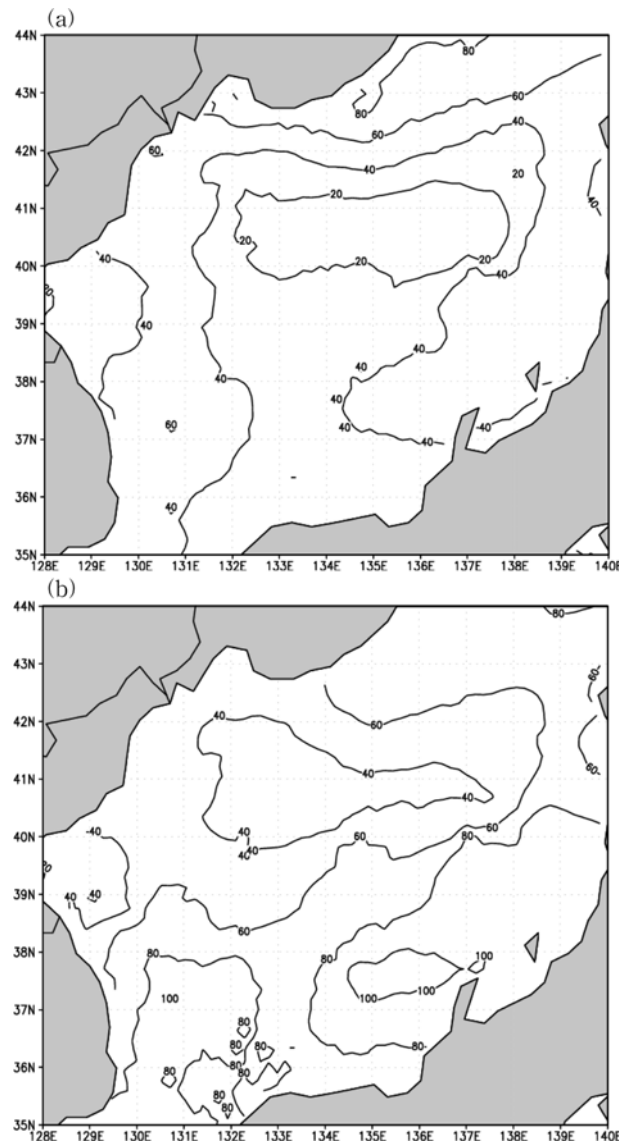


Fig. 7. Distribution of (a) mean sensible heat flux and (b) mean latent heat flux for 8 precipitation events classified into the warm precipitation type. Contour interval is 20 W/m².

속의 분포를 보면, 먼저 현열속은 동해 전역에서 약 $100\sim 300\text{ W/m}^2$ 의 분포를 보이며(Fig. 6a), 특히 동해 북부 해상에서 300 W/m^2 이상으로 가장 큰 값을 보인다. 반대로 동해 남부에서는 가장 작은 값인 100 W/m^2 이하의 값을 나타낸다. 잠열속의 평균분포는 약 $80\sim 220\text{ W/m}^2$ 사이 나타나며, 동해 중남부 해상에서 220 W/m^2 이상으로 가장 강하게 나타난다(Fig. 6b). 따라서 한기-해안형 강수의 경우 북부 해상에서 현열속이 매우 강하게 나타나고 있으며, 잠열속은 동해 중남부 해상에서 다른 지역 보다 큰 값을 나타낸다. 이러한 패턴은 현열·잠열속의 분포 특징이 만주지역으로 진출하는 고기압에 의한 동해 북부지역으로

의 한기이류와 연관되어 있음을 의미한다.

반면, 난기형 강수에 해당하는 사례의 평균 현열·잠열속의 분포를 보면, 현열속은 약 $20\sim 80\text{ W/m}^2$ 사이에 분포한다. 지역적으로는 동해 북부 먼 곳에서 80 W/m^2 이상의 값이 나타나며, 동해 중부에서는 이와 반대로 작은 값인 약 20 W/m^2 정도를 보인다(Fig. 7a). 평균 잠열속은 전체적으로 약 $20\sim 100\text{ W/m}^2$ 에서 분포하며, 동해 남부에서 약 $80\sim 100\text{ W/m}^2$ 값을 보인다(Fig. 7b). 난기형 강수의 경우 비록 그 값의 크기는 산악형이나 한기-해안형에 비해 매우 작으나 현열속은 동해 북부에서 그리고 잠열속은 동해 남부지역에서 상대적으로 큰 값을 보인다.

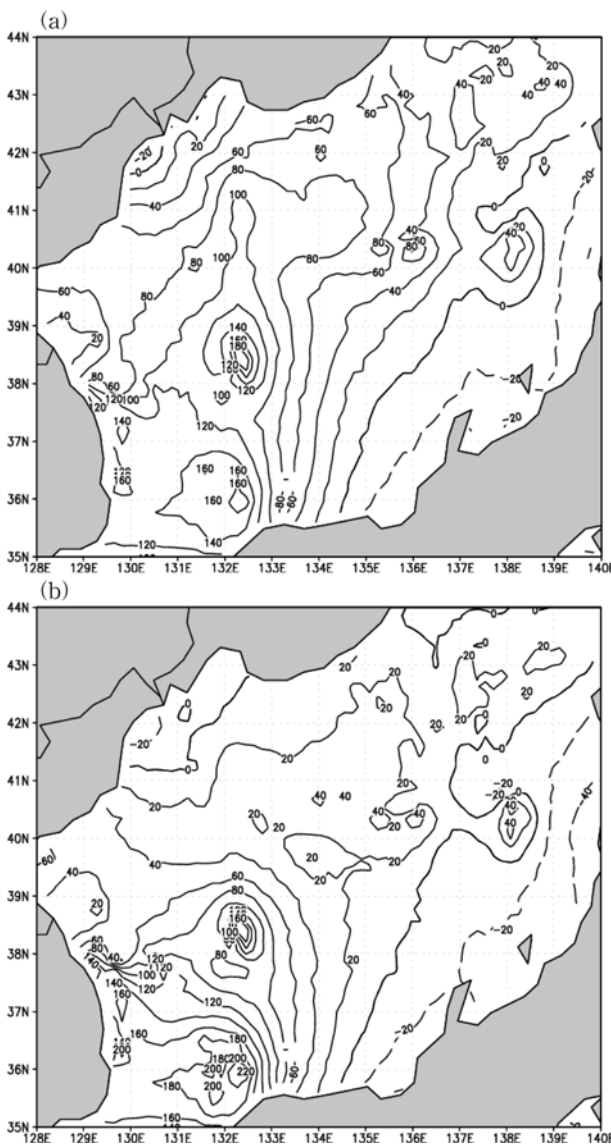


Fig. 8. Distribution anomalies mean of (a) sensible heat flux and (b) latent heat flux for 2 precipitation events classified into the mountain type. Contour interval is 20 W/m^2 .

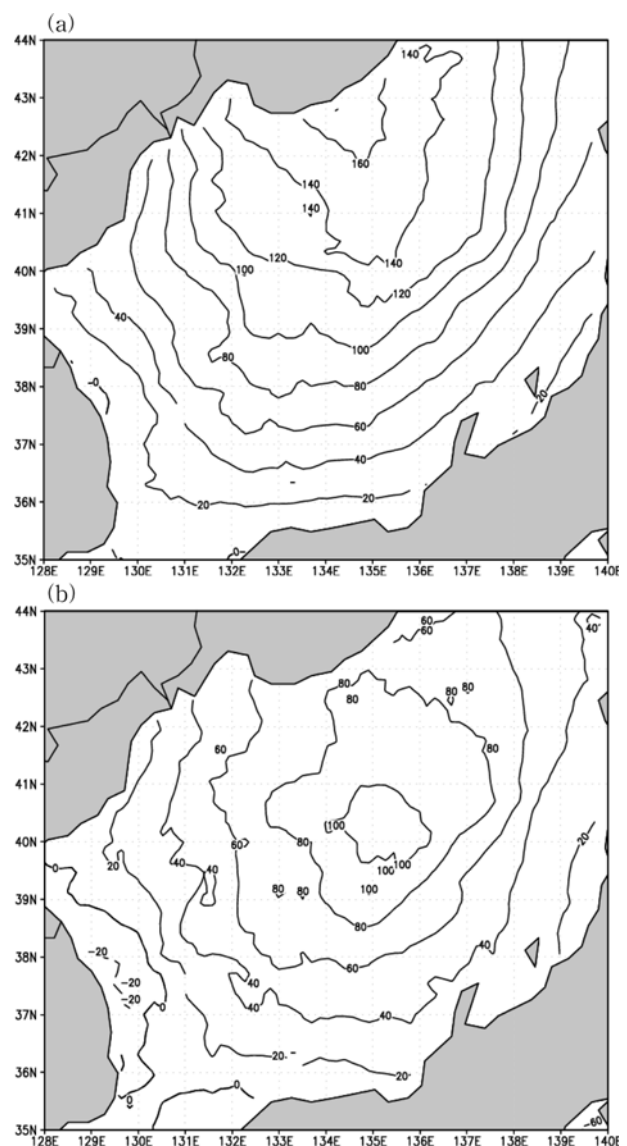


Fig. 9. Distribution anomalies mean of (a) sensible heat flux and (b) latent heat flux for 9 precipitation events classified into the cold-coast precipitation type. Contour interval is 20 W/m^2 .

강수 유형에 따른 현열속과 잠열속 분포 특성을 분석하기 위하여 강수 유형별 편차 값을 계산하였고, 이때 편차 값은 겨울철 월별 평균값으로부터의 차이이다. 먼저 산악형 강수에 대한 편차 분포를 살펴보면, 현열속에서 약 $-20\sim 180\text{ W/m}^2$ 이상의 편차 분포를 보였으며, 동해 남서부지역에서 180 W/m^2 이상의 강한 양의 편차 값을 나타냈다(Fig. 8a). 잠열속에서는 약 $-40\sim 220\text{ W/m}^2$ 이상의 편차 분포를 보이며, 동해 남서부지역에서 220 W/m^2 이상의 강한 양의 편차 값을 나타내고 있다(Fig. 8b). 산악형 강수의 경우 현·잠열속 분포는 모두 해상의 북동쪽에서 남서쪽으로 큰 양의 편차 값이 형성되며, 이러한 특징은

한반도 남북에 위치한 강한 저기압과 고기압 분포와 밀접하게 연관될 것이다.

한기-해안형 강수의 경우에 현열속의 평균 편차 분포는 약 $0\sim 160\text{ W/m}^2$ 이상을 나타내며, 동해 북부 해상에 160 W/m^2 이상의 강한 평균 편차 값을 보인다(Fig. 9a). 잠열속의 경우에는 약 $-20\sim 100\text{ W/m}^2$ 이상의 평균 편차 분포를 보였으며, 동해 북부해상에서 상대적으로 약 100 W/m^2 이상의 강한 편차 값을 나타내고 있다(Fig. 9b). 따라서 한기-해안형의 경우 현열속과 잠열속 분포에 나타난 특징은 각각 동해 북부 해상과 동해 중북부 해상에서의 높은 편차이다. 그리고 한기-해안형의 경우 동해 북부 해상에서 남부 해상으로 내려오면서 값이 감소하는 경향을 보여준다. 따라서 이러한 패턴은 현·잠열속 편차의 특징이 한기이류와 연관되어 있음을 의미한다.

난기형 강수의 경우에는 현열속에서 약 $-80\sim -60\text{ W/m}^2$ 이상의 평균 편차 분포를 보이며(Fig. 10a), 잠열속에서는 약 $-120\sim -40\text{ W/m}^2$ 이상의 평균 편차 분포를 보인다(Fig. 10b). 따라서 난기형 강수는 전체적으로 음의 현열속과 잠열속 편차를 보이며, 이것은 난기형의 경우 평균 현열속과 잠열속이 겨울철 평균값 보다 작다는 것을 의미한다. 즉 난기형 강수의 경우 해양에서 대기로 이동하는 에너지가 겨울철 평균값 보다 작다는 것을 의미하며, 따라서 대기-해양의 에너지 교환이 기단의 변질에 기여하는 역할 또한 크지 않음을 알 수 있다. 난기형 강수의 경우 대기과 해양의 상호작용에 의한 기단의 변질 보다는 대기의 내부적 과정에 의한 현상일 것으로 사료된다.

5. 성분별 분포 특성

강수 유형에 따라 뚜렷한 차이를 보이는 평균 편차를 강수 유형에 따라 풍속, 온도, 비습의 변화에 기인하는 성분으로 나누어 살펴보았다. 먼저 산악형 강수의 경우 풍속의 변화에 기인하는 현열속 편차는 한반도 주변 동해안에서 약 $120\sim 200\text{ W/m}^2$ 이상의 값을 보이며(Fig. 11a), 온도, 특히 기온의 변화에 기인하는 현열속 편차는 한반도 주변 동해안에서 작은 값을 나타낸다. 또한 같은 연구영역에서 풍속의 변화에 기인하는 잠열속 편차는 약 $120\sim 300\text{ W/m}^2$ 이상의 값을 보였으며(Fig. 12a), 비습의 변화에 기인하는 잠열속 편차는 현열속과 마찬가지로 작은 값을 나타낸다(Fig. 12b). 이때 풍속의 변화에 기인하는 현열속과 잠열속은 모두 한반도 주변 동해에서 강한 양의 편차 값을 보인다. 이것은 산악형 강수의 경우 현열속과 잠열속의 편차가 대부분 풍속의 증가에 기인한다는 것을 의미한다. 그리고 이러한 동해 지역 풍속의 증가는 산악형 강수의 전형적인 기압배치에 의해서 설명될 수 있다. 조 등(2004)의 기단특성 분석의 결과에 의하면, 산악형 강수는 북해도

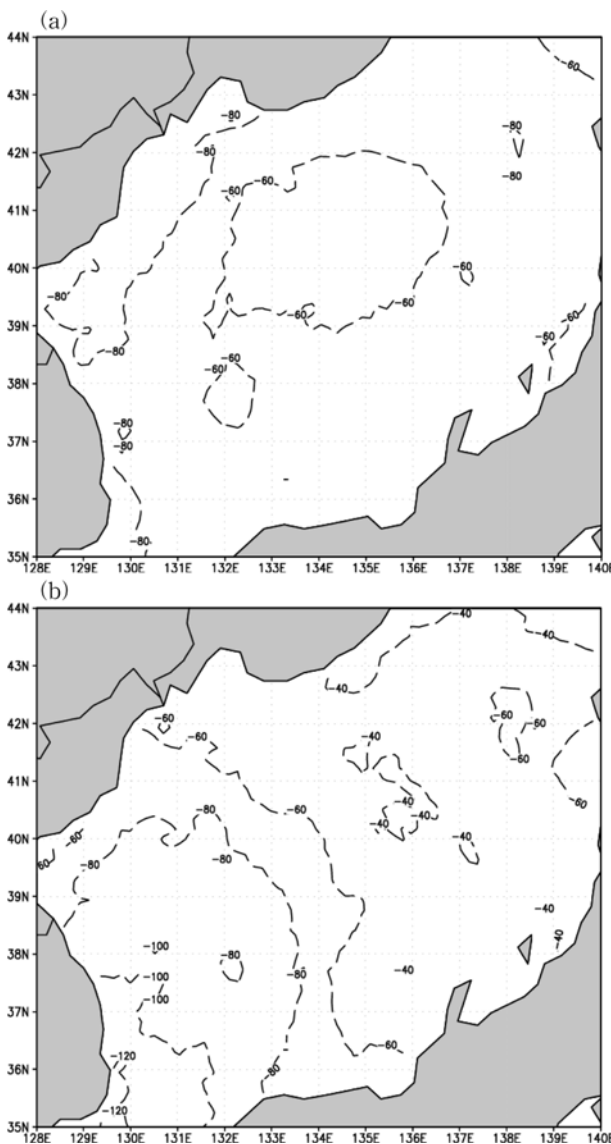


Fig. 10. Distribution anomalies mean of (a) sensible heat flux and (b) latent heat flux for 8 precipitation events classified into the warm precipitation type. Contour interval is 20 W/m^2 .

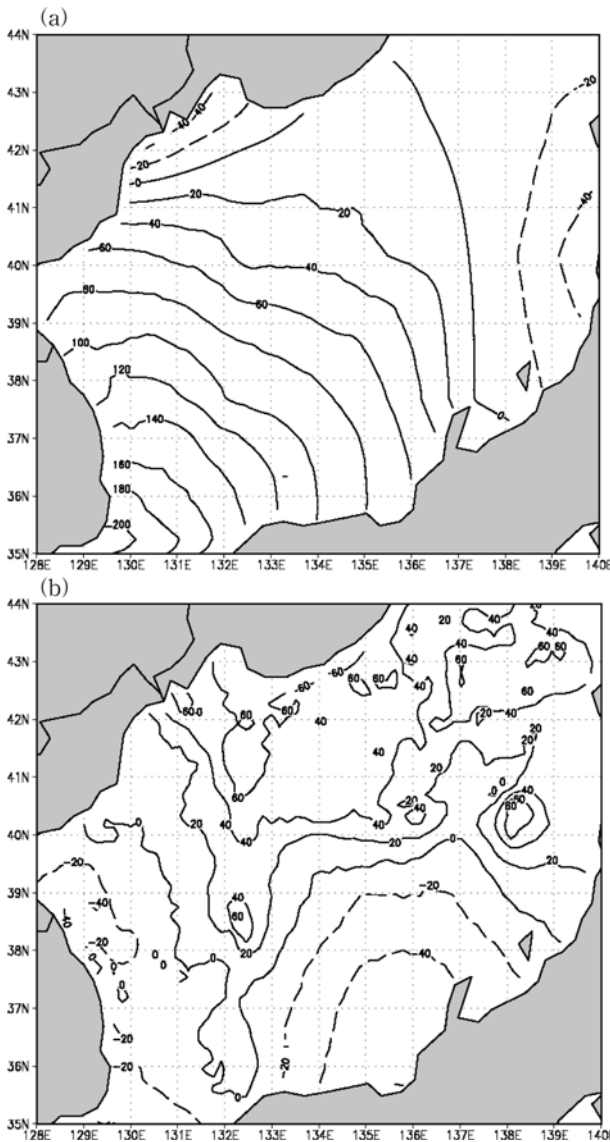


Fig. 11. Distribution of wind component, $C_S V'(\bar{T}_o - \bar{T}_a)$ (a) and temperature component, $C_S \bar{V}(T'_o - T'_a)$ (b) of the sensible heat anomaly for the mountain precipitation type. Contour interval is 20 W/m^2 .

지역에 강한 양의 기압 편차와 일본 남쪽지역에 강한 음의 기압편차를 보이는 기압배치에서 발생한다. 따라서 동해를 중심으로 남쪽과 북쪽에 위치한 음과 양의 기압 편차는 동해 지역에 큰 기압경도를 나타나게 하고, 이러한 큰 기압경도는 결과적으로 강한 바람으로 나타날 것이다. 그리고 또한 북해도 지역에서의 한기 이류와 일본 남쪽 지역에서의 습윤한 난기 이류는 기단의 불안정을 가속화시키는 역할을 할 것이다.

한기-해안형 강수의 경우 풍속의 변화에 기인하는 현열속과 잠열속의 편차는 동해안에서 약 0~30 W/m^2 이상으

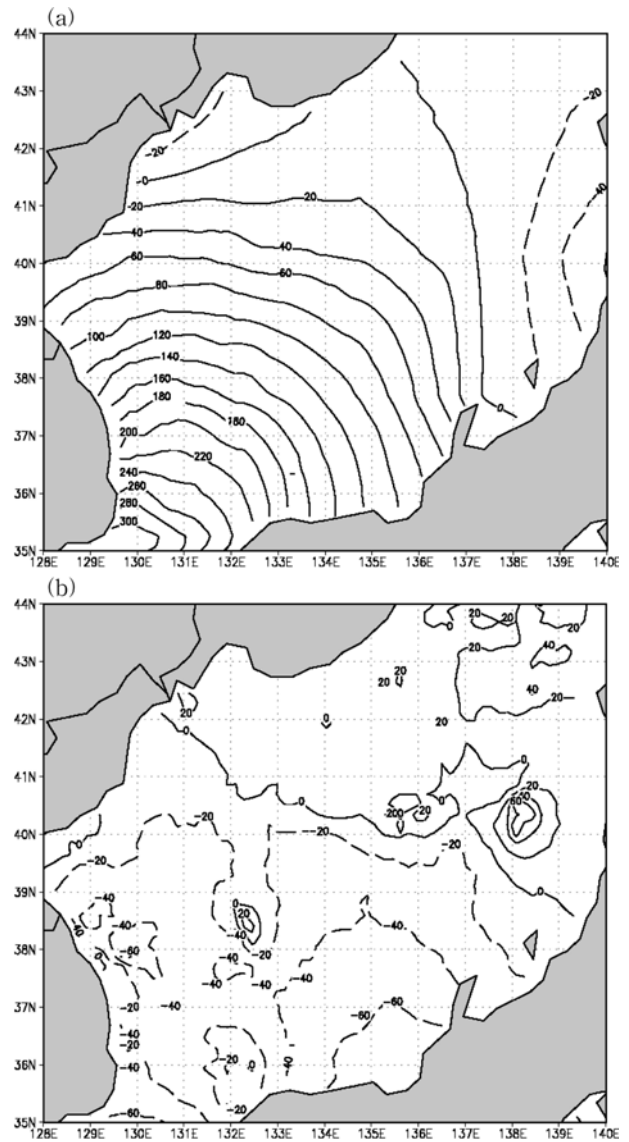


Fig. 12. Distribution of wind component, $C_L V'(\bar{q}_o - \bar{q}_a)$ (a) and humidity component, $C_L \bar{V}(q'_o - q'_a)$ (b) of the latent heat anomaly for the mountain precipitation type. Contour interval is 20 W/m^2 .

로 나타나며, 이때 현열속과 잠열속은 모두 지역적으로 동해 남부지역에서 강한 양의 편차 값을 보인다(Fig. 13a, 14a). 기온의 변화에 의해 발생하는 현열속 편차는 동해전역에서 약 0~80 W/m^2 이상의 값을 보이며, 특히 동해 북부지역에서 약 80 W/m^2 이상으로 최대값을 보인다(Fig. 13b). 또한 같은 연구영역에서 비습의 변화에 의해 발생하는 잠열속 편차는 약 -20~40 W/m^2 이상의 값을 보이며, 이때 동해 중부부 해상에서 상대적으로 강한 양의 편차 값을 나타낸다(Fig. 14b). 이것은 한기-해안형 강수의 경우 현열속과 잠열속 편차가 대부분 기온과 비습의 감소에 기인한다는 것을 의미한다. 즉 만주지역에 위치한 cP 기단

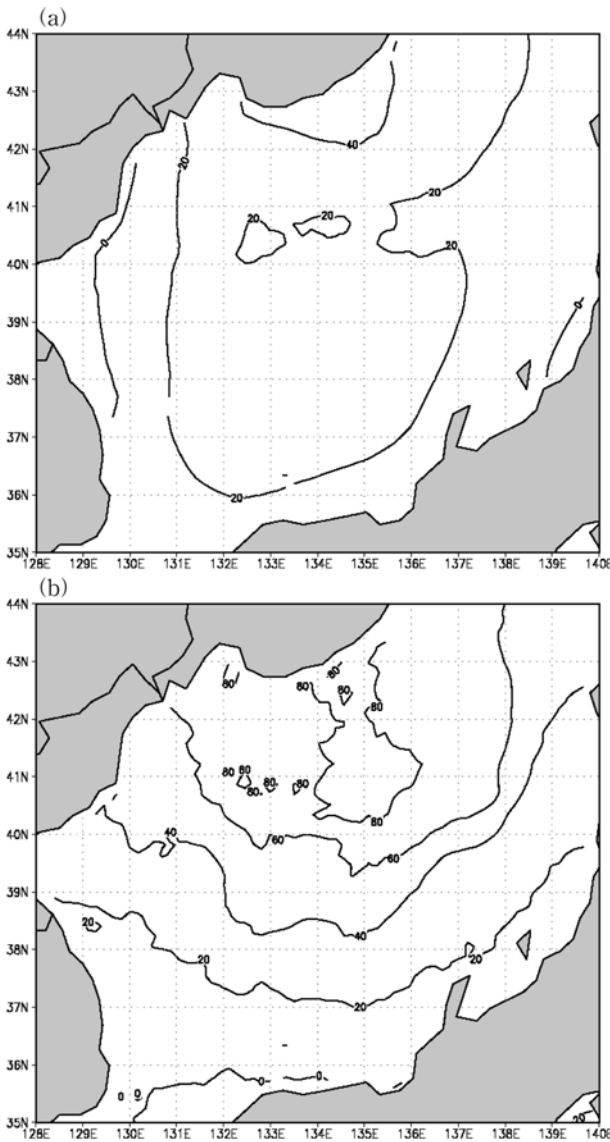


Fig. 13. Distribution of wind component, $C_S V'(\bar{T}_o - \bar{T}_a)$ (a) and temperature component, $C_S \bar{V}(T'_o - T'_a)$ (b) of the sensible heat anomaly for the cold-coast precipitation type. Contour interval is 20 W/m^2 .

이 동해 북부 해상으로 진출하면서 동해상으로 건조한 한기가 이루어짐에 따라 이 지역에 큰 양의 현열속과 잠열속 편차가 나타난다고 설명할 수 있다. 이러한 결과는 조 등 (2004)의 기단특성 분석에서 나타난 한기-해안형 강수와 관련된 기압과 기온 분포의 특성과 잘 일치하고 있다. 양의 기압 편차가 만주지역에 크게 나타나고 큰 음의 기온 편차가 연해주 지역에 위치한다. 또한 한기-해안형 강수와 관련된 동해 북부 해상으로의 한기 이류는 GMS IR1 구름영상에서도 쉽게 확인된다. 한기-해안형 강수의 대부분의 경우 동해상에 운정온도가 상대적으로 높은, 즉 낮은

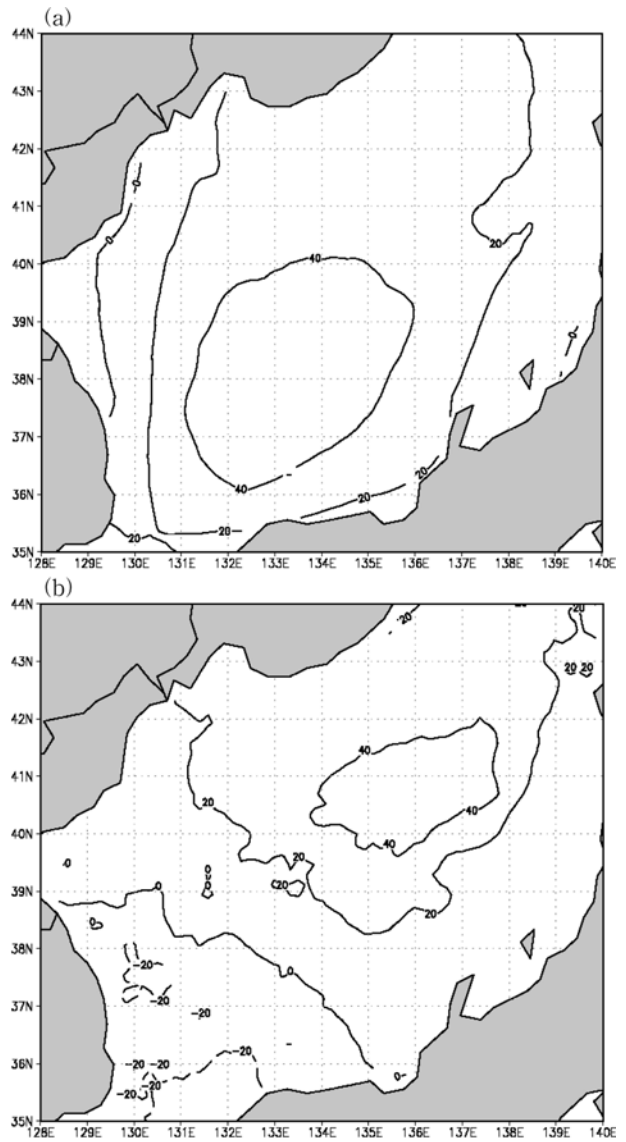


Fig. 14. Distribution of wind component, $C_L V'(\bar{q}_o - \bar{q}_a)$ (a) and humidity component, $C_L \bar{V}(q'_o - q'_a)$ (b) of the latent heat anomaly for the cold-coast precipitation type. Contour interval is 20 W/m^2 .

구름이 균질하게 분포한다.

반면 난기형 강수의 경우 기단의 변질 특징을 분명히 분석하기 어려웠다. 또한 연구에 사용된 겨울철 월별 평균한 강수 유형별 평균 편차는 앞에서 NOAA/AVHRR weekly SST 자료를 사용할 때 실제 위성 관측에서 구름 때문에 관측량이 10% 이하인 때는 제외하고 선형 내삽하여 월별 평균을 구하였기 때문에 완전한 값이라고는 할 수 없다. 또한, 산악형 강수의 경우 단지 2개 사례만을 사용하여 현열·잠열속 편차장의 합성도를 계산하고 분석하였기 때문에 위의 결과는 앞으로 더 많은 사례에 대해서 분석·보완될 필요가 있다.

6. 결 론

이 연구에서는 정 등(2004)과 조 등(2004)의 강수 분류 방법에 따라 영동지역 겨울철 강수를 산악형, 한기-해안형, 난기형으로 분류하고 각각의 강수유형과 관련된 현열·잠열속의 분포를 분석하였다. 이를 위하여 7년(1995~2001) 동안에 관측된 영동지역 겨울철 강수 가운데 19개 강수 Event를 선택하고 이와 관련된 현열속과 잠열속의 분포를 분석하였다. 해양지역에 있어서 기단의 변질은 주로 차가운 공기가 상대적으로 따뜻한 해수면을 통과하면서 발생하게 되는데 이때 해양표면에 의해서 따뜻하게 데워지고 습윤해져 그것의 안정도는 감소하게 된다. 따라서 이러한 에너지와 수증기가 대기로 이동하면서 생기는 기단의 변질을 나타내 주는 요소들이 현열속과 잠열속으로 표현될 수 있다. 이 연구의 분석을 위해서는 NCEP/NCAR 재분석 자료와 고해상도 NOAA/AVHRR weekly SST 자료를 이용하여 벌크공기역학법으로 계산한 동해(32.5~45°N, 125~142.5°E) 해상에서의 현열속과 잠열속을 분석하였다. 요약된 연구 결과는 다음과 같다.

1) 산악형 강수: 현열속과 잠열속의 분포가 모두 동해 남서부지역에서 뚜렷한 양의 편차 분포를 보이며, 이들 값은 현열속과 잠열속에서 각각 약 120~180 W/m², 140~220 W/m²이다. 또한 이들 편차를 바람, 기온, 그리고 비습의 편차에 기인하는 성분으로 나누어 볼 때 상대적으로 바람성분에서 강한 양의 편차 분포를 나타내며, 이것은 북해도 북쪽지역의 강한 고기압과 일본 남부지역을 통과하는 저기압의 큰 기압경도력에 기인하는 것으로 볼 수 있다.

2) 한기-해안형 강수: 동해 북부 해상에서 현열속이 뚜렷이 높게 나타나며, 동해 중북부 해상에서 상대적으로 잠열속이 높게 나타난다. 여기서 현열속과 잠열속 편차는 각각 약 160 W/m², 80~100 W/m²이며, 각각 기온과 비습성분에서 동해상의 북부지역에 강한 양의 편차가 나타난다. 특히 현열 편차의 대부분은 기온의 하강에 기인하는 것으로 나타나며, 그 분포가 동해 북부 해상에서 남부 해상으로 내려오면서 값이 감소하는 경향을 보여준다. 이러한 결과는 한기의 장출에 관련되어 있다고 설명할 수 있다.

3) 난기형 강수: 현열속과 잠열속은 대체로 음의 편차를 보였다. 이것은 난기형 강수와 관련된 현열속과 잠열속이 겨울철 평균 보다 낮다는 것을 의미하며, 또한 난기형 강수의 경우 해양으로부터 대기로 이동하는 에너지와 수분의 양이 겨울철 평균값 보다 낮다는 것을 의미한다. 따라서 난기형 강수는 해양과 대기의 상호작용 보다는 대기의 내부적 과정에 기인한다고 볼 수 있다.

이 연구에서 현열속과 잠열속의 분포를 분석해 본 결과 이들 분포가 강수유형에 따라 뚜렷한 특징을 보이는 것

로 나타났으며, 이러한 결과는 영동지역 대설 메카니즘에 대한 이해에 도움이 될 것이다. 그러나 현열·잠열속 편차장의 합성도를 분석하는데 있어서 충분하지 못한 강수 사례를 사용했다는 점에서 보다 신뢰할 수 있는 결론을 얻기 위해 앞으로 장기간의 보다 많은 강수사례에 대한 분석이 요구된다.

사 사

이 연구는 기상청에서 수행하는 기상지진기술개발사업의 하나인 “국지기상 예측기술 개발/강원지방 폭설 예측 기술 개발” 과제에서 수행된 것이며, 일부는 “북극 환경특성 연구(PE05007)” 사업의 지원을 받아 수행되었다. 이 논문의 향상을 위해 조언해 주시고 심사하여 주신 심사위원들께 감사드린다.

참고문헌

- 강인식, 김맹기, 심태보. 1994. 한반도주위 해양에서의 해면 열수지와 응력의 계절변화. *J. Oceanogr. Soc. Kor.*, 29(4), 325-337.
- 권태영, 이방용, 이정순. 2001. 동해지역 NOAA/AVHRR 고해상도 주평균 해수면 온도의 통계적 분석: 지역적 변동성과 엘니뇨/남방진동과의 관계성. *Ocean and Polar Res.*, 23(4), 361-376.
- 김영섭, 木村龍治. 1995. 해상의 열속 추정에서 벌크공기역학법의 오차평가. *한국기상학회지*, 31(4), 399-413.
- 김영섭, 木村龍治. 1999. 한반도 주변 해역의 대기-해양간의 열교환 추정. *한국기상학회지*, 35(4), 501-510.
- 박순용, 정창희. 1984. 동계한파내습시 황해상에서의 공기의 변질에 관하여. *한국기상학회지*, 20, 35-50.
- 박용대, 성학중, 박종탁. 1979. 영동고속도로 기상 특성. 기상연구소 MR-79-7, 79-88.
- 서은경, 전종갑. 1991. 1990년 1월 29일-2월 1일 한반도에서 발생한 대설에 관한 연구. *한국기상학회지*, 27(2), 165-179.
- 이방용, 남재철. 1991. 세종기지에서의 기상요소 특성에 관한 연구. *한국기상학회지*, 2(2), 3-27.
- 이재규, 1999. 대관령과 강릉지역의 강설량 차이를 일으키는 종관 구조 : 사례연구. *한국기상학회지*, 35(3), 319-334.
- 이 훈, 이태영. 1994. 영동지역의 폭설 요인. *한국기상학회지*, 30(2), 197-218.
- 정광범, 김지연, 권태영. 2004. 영동지역 겨울철 강수와 관련된 하층 바람의 특성. *한국기상학회지*, 40(4), 369-380.
- 조구희, 조영준, 권태영. 2004. 겨울철 영동지역 강수 사례와 관련된 기단의 특성. *한국기상학회지*, 40(4), 381-393.
- 천광인. 1993. 대관령지방의 객관적 강설량 예보에 관하여. 강원기상특성집 제IV권.

- 최만규. 1994. 동해상의 한기남하에 따른 영동지방의 대설. 강원기상청, 1-4.
- Anderson, T. and S. Nilson. 1990. Topographically induced convective snowbands over the Baltic Sea and their precipitation distribution. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 5, 299-312.
- Jacobs, W.C. 1942. On the energy exchange between sea and atmosphere. *J. Mar. Res.*, 5, 37-66.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K.C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetma, R. Reynolds, R. Jenne, and D. Joseph. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 77, 437-471.
- Kistler, R., E. Kalnay, W. Collins, S. Saha, G. White, J. Woollen, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, M. Kanamitsu, V. Kousky, H. van den Dool, R. Jenne, and M. Fiorino. 2001. The NCEP/NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 82, 247-267.
- Kocin, P.J. and L.W. Uccellini. 1990. Snowstorms along northeastern coast of the United States; 1955 to 1985. American Meteorological Society. 280 p.
- Kondo, J. 1975. Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic condition. *Bound.-Layer Meteorol.*, 9, 91-112.
- Moran, J.M., M.D. Morgan, and P.M. Pauley. 1997. *Meteorology*. Prentice Hall. 530 p.
- Nuss, W.A. and S.I. Kamikawa. 1990. Dynamics and boundary layer processes in two Asian cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, 118, 775-771.
- Rogers, R.R. and M.K. Yau. 1989. *A short course in cloud physics*. Pergamon Press. 293 p.
- Wilson, J.W. 1977. Effect of Lake Ontario on precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, 105, 207-214.

Received Apr. 28, 2005

Accepted Sep. 2, 2005