중규모 수치 모델을 이용한 대청 호수 주변의 국지 순환 모의

변재영* · 최영진 · 서범근

국립기상연구소, 기상청, 156-720, 서울특별시 동작구 신대방동 460-18

Numerical Simulation of Local Circulation Over the Daechung Lake Area by Using the Mesoscale Model

Jae-Young Byon*, Young-Jean Choi, and Beom-Keun Seo

National Institute of Meteorological Research, Korea Meteorological Administration, Seoul 156-720, Korea

Abstract: In this study, we examined the patterns of local circulation over the Daechung lake area through the numerical experiment designed to investigate the impact of lake on the local circulation. The results of numerical experiment showed that the surface temperature predicted by WRF model was lower than the observation, while the wind speed was stronger than the observation. The local circulation over the lake area was characterized by a lake breeze induced by a horizontal thermal contrast between the lake surface and the surrounding land. At Daechung Lake, a lake breeze formed at 09 LST and dissipated at 18 LST, with maximum intensity at 15 LST. The vertical extent of the simulated circulation was about 1,200 m. The specific humidity increased as the humid air above the lake moved landward due to the daytime circulation of the lake breeze. The numerical experiments of sensitivity to existence of the lake showed that the simulated surface temperature decreased in the experiment with the lake. Wind speed was more intense around the lake area when the actual land use was substituted by grassland land use. The results of numerical experiments suggest that the lake-induced lake breeze circulation has an effect on the meteorology of planetary boundary layer around the lake.

Keywords: Local circulation, lake-breeze, land-use, mesoscale model, planetary boundary layer

요 약: 호수에 의한 국지 순환의 영향을 조사하기 위하여 대청호수 주변에 대하여 수치 실험을 수행하고 국지 순환의 형태를 연구하였다. WRF 모델로부터 예보된 지상 기온은 관측보다 작으며, 풍속은 모델에서 관측보다 강하게 모의됨을 보였다. 호수 주변의 국지 순환은 호수와 주변 지면과의 열적 차이에 의해 발생하는 호수풍이 특징적이었다. 대청호수에서는 호수풍이 09 LST에 발생하며, 15 LST에 최대를 보이고 18 LST에 소멸하였다. 수치 모의된 연직 순환의 높이는 1,200 m를 나타냈다. 비습의 분포는 낮 시간동안 호수풍 순환에 의해 호수위의 습윤한 공기의 내륙 이동으로 주위 지면에서 증가함을 보였다. 호수를 제거한 민감도 실험에서 호수가 존재할 때 주위 지면 온도가 감소함을 보였다. 호수 지표이용도를 초원으로 변경하였을 때 호수 주변의 기상관측소에서 풍속은 증가하였다. 수치실험은 호수로부터 발생된 호수풍 순환이 주위 대기경계층 기상에 영향을 주고 있음을 지시한다.

주요어: 국지순환, 호수풍, 지표이용도, 중규모 모형, 대기경계층

서 론

대규모 국토 개발은 기상과 기후 변화에 큰 영향을 미칠 수 있다. 우리나라에서는 그 동안 다양한 국토 개발이 있어왔는데 그 대표적인 것의 하나가 댐

건설이다. 댐의 건설은 홍수 조절, 용수 공급, 전력 생산을 목적으로 하고 있다. 그러나, 댐 건설에 의해 지형, 토지 이용도가 변화하며, 이러한 변화에 의해 댐의 건설 취지와는 달리 국지적 기상, 기후 환경의 변화와 같은 역기능이 발생된다.

댐 건설에 의한 기상 변화는 인공호수에 의해 발생될 수 있다. 호수에 담수된 물은 토양에 비해 열용량이 매우 크고 저수량이 많으므로 댐 건설 전의 지표면 온도에 비하여 호수의 수면 온도의 연변화가

*Corresponding author: byonjy@kma.go.kr
Tel: 82-2-6712-0453
Fax: 82-2-846-2851

Fig. 1. Geographic map of the Daechung lake region showing the location of automatic weather stations (AWS) that are indicated by A, B, C. The inner circle covers the Daechung lake area.

지연되어 나타난다. 즉, 여름에는 대기보다 물의 온도가 낮으므로 냉원의 역할을 하여 기온이 하강하고 겨울에는 상반된 현상이 일어나 물이 열원의 역할을 하여 기온이 상승한다. 또한, 넓은 수면과 많은 저수량을 가진 호수 주변은 호수면에서의 증발과 현열 출입에 의해 내륙지역에 비해 특이한 기상이 나타난다(이종범, 1981; 홍성길, 1982; 박순웅 외, 1993; 남재철 외, 1995).

인공 댐이 주변 지역의 국지 기후변화에 주는 영향에 관한 연구로서, 댐건설에 따른 안개발생에 관한 연구를 이종범(1981)이 춘천지역의 의암댐과 소양댐, 소선섬 등(1993)이 충주댐을 대상으로 조사하였다. 윤진일 외(1997)은 주암댐을 대상으로 댐 건설이 농작물에 미치는 영향을 연구하였다.

선행의 연구들은 토지 이용도의 변화에 의해 국지적 기상, 기후 환경의 변화를 관측 자료를 이용하여 분석하였다. 토지 이용도 변화에 의한 국지 기상 변화의 공간적 분포 연구를 위해서는 상세 격자간격의 자료를 활용해야 한다. 고해상도 수치 모델은 시공간적으로 균질한 자료를 제공할 수 있으며 최근의 개선된 수치 모델의 물리과정과 고성능 컴퓨터는 1 km 이하 격자 간격의 예측을 가능하게 한다. 고분해능 기상 예측은 댐 주변에서의 국지 기상의 공간 분포 분석을 위한 자료를 제공한다. 또한 수치 모델은 댐

건설에 따라 생성된 호수에 의한 국지 기상 변화를 고찰하기 위한 민감도 실험을 위한 유용한 도구로 활용될 수 있다. 국지 기상 변화의 공간적 분포를 분석하기 위하여 상세한 관측 자료를 이용할 수 있다. 기상청의 자동기상 관측망(AWS)은 전국 600개 이상으로 고밀도의 관측자료를 제공하지만 평균 수평거리 10 km 이상으로써 1-2 km 범위내에서 발생하는 국지 기상을 분석하기에는 공간거리가 크다. 따라서 한반도에서의 토지 이용도 변화에 따른 기상현상의 변화를 고찰하기 위해서 고분해능 수치 모델은 적절한 활용 도구가 될 수 있다.

호수 주변의 국지 기상과 토지 이용도 변화에 의한 기상 변화를 고찰하기 위하여 본 연구에서는 대전에 위치한 대청호수(위도: 36.45°N, 경도: 127.5°E) 지역을 대상으로 분석하고자 한다. 호수길이 80 km인 대청호수는 우리나라에서 3번째 규모의 호수로서, 1975년에 착공하여 1980년에 공사가 완료 개발된 수력발전 댐 건설에 의해 형성되었다. Fig. 1에 대청호수의 지리적 위치를 제시하였다.

본 연구의 목적은 고해상도의 수치 모형을 이용하여 대청호 주변에서 호수에 의해 발생하는 국지 기상의 특성과 대기 경계층의 영향을 조사하고자 한다. 또한 수치 모델에서 토지 이용도 자료의 개선 효과를 조사하기 위하여 30초 토지 이용도 자료와 30m

Fig. 2. (a) Surface weather chart at 09 LST, 16 August 2007. (b) MTSAT 1km visible imagery at 09 LST, 16 August 2007. (c) Same as (a), except for 24 February 2008. (d) Same as (b), except for 24 February 2008.

토지 이용도 자료를 이용한 대청호 주변 수치 실험 결과를 비교하고자 한다. 2장에서는 수치 모델과 실험 방법을, 3장에서는 실험 결과를 제시하였으며 4장에서 결론을 맺었다.

수치 모델 및 실험방법

본 연구에서는 미국 NCAR(National Center for Atmospheric Research)에서 개발된 중규모 모형 WRF(Weather Research and Forecasting)를 이용한다. WRF는 비정역학 모형으로 미규모, 중규모 기상 현상을 모의하기에 적합하므로 호수 주변의 국지풍계를

모의하기 위하여 활용한다. WRF ARW(Advanced Research WRF) 버전 2.2를 이용하였으며 모의 사례는 호수 주변의 국지적 기상의 계절적 차이 조사를 위해서 여름철과 겨울철 사례를 분석하였다.

여름철 사례는 2007년 8월 16일 사례로써 북태평양 고기압의 중심이 한반도에 위치하고 있어 고온의 맑은 날씨를 보였다. 이 사례 일에 중부지방에는 폭염 주의보가 발령되었으며 대전에서 풍속은 2 m/s내 외로써 종관풍의 영향이 작았다. 겨울철 사례는 2008년 2월 23일 사례로, 시베리아 고기압이 확장되어 한반도에 고기압이 위치하였다. Fig. 2에 사례에 대한 일기도와 위성 사진을 제시하였다. 고기압이 위치하

Fig. 3. (a) Configuration of the 3 two-way-nested domains for the WRF model. Grid sizes of the domains are 10, 3.3, and 1.1 km. (b) Topography of the Daechung lake region. Terrain contour interval is 20m. (c) Land use distribution over the lake from USGS data. The Daechung lake is indicated by blue color. (d) Same as (c), except for the Korean Ministry of Environment.

여 풍속이 작고 맑은 날씨를 보인 위의 사례들은 종관풍이 약하여 호수에 의한 국지적인 순환을 잘 모의할 것으로 사료된다.

모델의 초기 자료는 NCEP FNL 1° 자료를 이용하여 10 km, 3.3 km, 그리고 1.1 km의 수평격자망을 갖는 3중 등지 격자계로 모의하였다. Fig. 3(a)에 모의 영역을 제시하였다. 이 연구에서는 1.1 km의 모델 영역에서 모의된 24시간 예측 결과를 이용하여 국지 규모 순환과 대기경계층 내의 기상 변수를 분석하였다. 1.1 km 격자의 영역은 대청호를 중심으로 동서방향으로 220 km, 남북 232 km이다. 연직은 27개 층으로 고도 약 22 km이다. 경계층 물리과정 모수화는 YSU 방법(Hong and Pan, 1996)을 이용하였다. 지면 온도와 수분 모수화는 Noah LSM 방법(Chen and Dudhia, 2001)이며, 아격자 규모 미세물리 모수화 방법은 WSM6 방법(Hong and Lim, 2006)이며, 적운 모수화는 10 km 격자영역에 대해서만 New Kain-Fritsch (Kain, 2004) 방법을 이용하였다. 장파복사는 RRTM 모수화 방법(Mlawer et al., 1997), 단파복사는 Dudhia(1989) 방법을 이용하였다.

고분해능 수치 모델을 이용하여 국지 기상을 모의하기 위하여 지표 경계 조건을 개선하였다. NCAR에서 제공하는 USGS(United States Geological Survey) 30초 지형 자료를 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission) 3초 지형자료로 개선하였다. 한반도 지역의 상세한 지표 이용도 자료의 모델 입력을 위해서 우리나라에서 만들어진 지표이용도 자료를 활용할 필요가 있다. 본 연구에서는 환경부에서 생산된 LandSat 위성 자료를 이용한 30 m 해상도의 지표이용도 자료를 입력한 실험과 미국 USGS 지표이용도 자료를 이용한 실험과 비교하였다. 호수 유무에 따른 국지적 기상 변화를 고찰하기 위하여 민감도 실험을 수행하였다. Fig. 3에 1.1 km 격자 간격의 대청호 주변에 대한 지형고도, USGS 30초 지표이용도, 환경부 지표이용도를 제시하였다. 대청호 주변의 지형은 호수의 동쪽에는 산악 지형으로 고도가 높으며 서쪽에서는 낮은 평지를 보인다. 지표이용도는 USGS 자료와 환경부 지표이용도를 비교했을 때 대청호의 면적이 USGS 지표이용도 자료에서 넓게 표현되었다.

Fig. 4. Time series of observed and simulated temperature and wind speed for a case of summer time (16 August 2007). The air temperature at 2 m and wind speed at 10 m are verified against AWS observation at A, B, and C which are indicated in Fig. 1.

Fig. 5. The simulated air temperature ($^{\circ}\text{C}$) at 2m above ground level for (a) 09, (b) 15, (c) 21, and (d) 03 LST at 16 August 2007 for the 1.1 km model domain.

결 과

대청호 주변에서 발생하는 국지 기상을 고찰하기 위하여 지상 2m 기온, 수증기와 지표면온도, 지상 10m 풍속을 분석한다. 여름철 사례에 대하여 수치 모의된 지상 2m 기온과 10m 풍속을 대청호 주변에 설치된 AWS로부터 관측된 지상 기온, 풍속에 대하여 비교, 검증하였다(Fig. 4). 지표이용도 개선에 따른 예보 결과 비교를 위하여 USGS와 환경부 지표이용도 자료를 이용한 실험에서 기온은 관측보다 예보가 더 낮은 값을 보여 과소 예보되고 있으며 풍속은 모델에서 과다 예보되었다. AWS 관측자료에 대한 비교는 Fig. 1에 표시된 호수 주변의 3개 지점에 대하여 실시하였다. A는 호수의 북쪽, B는 호수의 남쪽에 위치해 있으며, C는 호수의 서쪽이며 호수로부터 가장 먼 거리이다.

A 관측소의 기온은 USGS 지표이용도의 실험에서 관측보다 낮게 모의되었다. 오차의 크기는 20 LST 이후의 야간이나 이른 오전(09 LST 이전)보다 오후(15 LST)에 증가하였다. 관측된 최대 기온은 33°C 이며 모의된 결과는 28°C 로써 5°C 정도의 차이를 보였다. 환경부 지표이용도를 이용한 실험에서도 관측보다 과소 예보됨을 보였다. 그러나 오후 시간(15 LST)에 최대 기온이 32°C 를 보여 차이는 1°C 로써 예보가 개선되었다. 관측된 풍속의 분포는 14 LST와 20 LST에 최대 2m/s의 풍속을 나타냈고 21 LST 이후에는 감소하는 경향을 보였다. USGS 지표이용도 자료를 이용한 실험은 09-18 LST 풍속은 1m/s로써 관측보다 약화되었으나 야간(20-23 LST)에는 5m/s의 최대 풍속이 나타난다. 환경부 지표이용도 실험은 오전과 새벽(00-07 LST) 풍속은 1m/s 정도로써 과다 예보되었다. 환경부

Fig. 6. Same as Fig. 5, except for wind speed (m/s) at 10 m above ground level and surface skin temperature ($^{\circ}\text{C}$).

지표이용도를 적용한 실험에서는 USGS 지표이용도 실험보다 오차가 감소하였으며 최대 풍속 발생 시간과 경향이 관측과 일치함을 보인다.

대청호의 남쪽인 B 관측소의 기온은 USGS 지표이용도에서 대체로 과소 예보되고 있으나, 이른 오전(05-07 LST)은 관측보다 높게 예보되었다. 오후 시간(12-17 LST)은 환경부 지표이용도 자료 실험에서 개선되었음을 보인다. USGS 지표이용도와 환경부 지표이용도 실험은 유사하며 큰 차이는 존재하지 않았다. 관측된 최대 풍속은 오후와 야간(12, 18, 20 LST)에 1 m/s 크기 내외의 최대 풍속을 보인다. USGS 지표이용도 실험의 최대 풍속은 2.5 m/s이며, 20 LST에 풍속이 증가하는 경향은 관측과 일치한다. 환경부 지표이용도 실험의 최대 풍속은 2 m/s 이상을 보이며 관측보다는 과다 예보되고 있으나 USGS 자료를

이용한 실험보다는 개선됨을 보였다. 또한 최대 풍속이 20 LST에 모의되어 관측과 일치하였다.

호수에서 가장 먼 거리에 위치한 C 관측소의 기온은 USGS 지표이용도 실험이 관측보다 과소 예보됨을 보인다. 최대 기온 오차의 크기는 15 LST에 2°C 정도이며, 환경부 지표이용도 실험은 USGS와 유사하며 오후 시간(14-17 LST)에 기온이 증가하여 오차가 개선되었음을 보인다. 그러나 A 관측소보다 개선 효과가 작다. 이러한 이유는 USGS 지표이용도에서 호수의 면적이 넓게 표현되어 육지인 A 관측소의 위치를 몰로 판단하여 오차가 크며, 환경부 지표이용도 적용에 의한 오차의 개선이 크다. 반면, C 관측소는 USGS 지표이용도와 환경부 지표이용도 모두에서 육지로 표현하고 있다. 관측된 풍속의 분포는 0.5-2.0 m/s의 분포를 보이며 오후 시간(18 LST)에 2 m/s 최대

Fig. 7. Cross section along the Daechung lake (36.4°N) latitude for the zonal component of wind velocity (m/s) at (a) 09, (b) 15, (c) 21, and (d) 03 LST at 16 August 2007. The vertical lines shown in (b) indicate the lake area.

값을 나타냈다. 풍속의 크기 역시 USGS 지표이용도의 실험에서 환경부의 지표 이용도 실험보다 과다모의 뒀을 보였다. 최대 풍속은 20 LST 근처에서 모의되었다.

기온은 모델에서 과소 예보되고 있으며, 환경부 지표이용도 자료를 이용하였을 때 과소 예보된 기온은 개선됨을 보였다. 특히 대청호 북쪽 지점(A)에서는 기온의 차이가 가장 컸는데 이러한 원인은 USGS 지표이용도에서 호수의 면적이 환경부 지표이용도보다 넓게 나타나 관측 지점을 호수로 계산하여 기온이 보다 낮게 나타난 것으로 보인다. 풍속 예보는 지표이용도의 개선에 의한 예보 결과 개선의 효과가 기온만큼 뚜렷하지는 않으나 환경부 지표 이용도 자료를 이용한 실험에서 USGS 지표이용도 실험보다 풍속 오차가 감소하였다. 수치 모의된 기온은 관측보다 과소 예보, 풍속은 과다 예보 되는 경향이 존재하나 시간적인 경향은 대체로 유사하여 호수 주변에서의

국지 기상을 연구하는 자료로써 활용 가능할 것으로 판단된다.

Fig. 5는 모의된 여름 사례(2008. 8. 15) 지상 2m 기온의 수평 분포를 제시하였다. 09 LST에 호수와 지표온도의 차이가 뚜렷하지 않다. 이 시간은 지면과 호수의 기온은 25°C 근처이며, 시간이 증가함에 따라 기온이 상승하면서 주위 지면과 호수의 온도의 차가 커진다. 15 LST에 호수의 기온은 27°C이며 주위 지면 기온은 31°C로써 호수와 지면 기온이 큰 차이를 보인다. 21 LST에는 주위 지면은 냉각하여 28-29°C 분포를 보여 호수와 온도차가 작아진다. 03 LST가 되었을 때는 지면에서의 빠른 냉각에 의해 호수의 기온이 25°C 주위 지면 기온은 24°C로써 지면은 호수보다 더 큰 일 변화를 보인다.

호수와 지표면의 기온 차이에 의해 유도되는 국지 풍 순환을 조사하기 위해 Fig. 6에 여름철 지표면 온도와 10 m 풍속을 제시하였다. 지표면 온도의 일 변

Fig. 8. Time-height cross section of wind vector (m/s) (a) at the 36.4°N latitude and 127.44°E longitude which is over the western region of the lake and (b) at the 36.4°N latitude and 127.58°E longitude which is over the eastern region of the lake at 16 August 2007.

화는 지상 2 m 기온의 일 변화와 유사한 결과를 보인다. 09 LST에 호수의 온도가 15°C이며 주위 지면 온도는 17°C이며 15 LST에 호수온도가 27°C, 지면 온도는 39°C를 나타내어 호수와 지면의 온도 차가 증가한다. 풍향은 오전에는 모델 영역에서 대체로 남동풍이 우세하며, 오후에는 호수로부터 주위 지면으로 바람이 발산하는 형태의 호수풍이 발생함을 볼 수 있다. 이러한 호수풍은 야간에는 나타나지 않는다. 03 LST에 지면 온도는 24°C, 호수의 온도는 25°C를 나타내어 호수와 지면의 온도차가 호수풍을 발생하기에는 작다. 낮 시간 동안 호수와 주위 지면의 온도차가 10°C 이상의 큰 차이를 보여 호수풍이 발생하기 위하여서는 성질이 다른 지면의 온도 차이가 일정한 값 이상이 되어야 한다는 것을 알 수 있다. 호수풍은 경도 127.4°E 근처에서 수렴대가 존재함을 확인할 수 있어 호수풍의 수평 규모가 호수의 경계로부터 5 km 정도임을 알 수 있다.

호수풍의 고도에 따른 분포를 조사하기 위하여 동서 바람의 연직 단면을 Fig. 7에 제시하였다. 연직 분포는 위도 36.4°N의 동서 단면이다. 새벽(03 LST)과 오전(09 LST)은 서풍이 존재하며 호수 주변에서의 풍향의 변화는 거의 존재하지 않는다. 그러나, 오후 시간(15 LST)에는 호수의 서쪽 하층(0.3 km)에서는 동풍, 상층(0.9-1.2 km)에서는 서풍, 호수의 동쪽 하층(0.6 km)에서는 서풍, 상층(0.9-1.2 km)에서는 동풍이 존재한다. 호수를 중심으로 하층(0.3 km)과 상층(1.2 km)의 풍향이 반대로 나타나고 있다. 즉, 호수위

의 지표층에서는 발산, 상층 고도 1.2 km에서는 수렴하는 형태를 보인다.

여름철 사례에서 모의된 풍속의 시간에 따른 고도 분포를 조사하여 Fig. 8에 제시하였다. 호수의 서쪽 하층(고도 0.3 km)에서는 동풍, 호수의 동쪽 하층에서는 서풍을 보여 호수를 중심으로 하층에서 발산하는 형태를 보인다. 호수풍은 09 LST에 발생하며 18 LST에 소멸하고 있다. 호수 서쪽 상층의 서풍은 15 LST에 최대값이 모의되었고 연직 규모는 1.2 km에 이르는 것으로 분석되었다.

호수풍에 의한 하층의 발산과 상층 수렴의 영향은 비습 연직 분포에서도 나타난다(Fig. 9). 새벽(03 LST)의 비습 분포는 0.3-0.6 km 고도에서 18 g/kg을 보이며 고도에 따라 일정하다. 오전(09 LST) 호수의 서쪽(경도 127.45°E), 고도 0.6 km에서 비습이 18 g/kg, 호수의 동쪽에서는 17 g/kg 정도의 값을 모의하고 있어서, 09 LST에 호수의 동쪽에서 비습이 감소하고 있다. 15 LST에 호수의 서쪽에서 18 g/kg, 동쪽에서는 16-17 g/kg의 값으로 감소된 값을 모의하고 있다. 호수 동쪽에서 비습 감소의 형태는 고도 0.3-0.9 km에서 가장 크며 1.2 km 이상에서는 거의 일정하다. 이러한 형태는 상층에서는 호수풍의 수렴, 하층에서는 호수풍의 발산에 의해 수증기가 호수에서는 감소하고 주변 지면으로 수증기가 이루어져가는 형태의 결과로 생각된다.

대청호에서 발생하는 호수풍은 육지와 물의 비열 차이에 의해 발생하는 국지풍 순환이다. 호수의 큰

Fig. 9. Same as Fig. 7, except for specific humidity (g/kg).

열 용량에 의해 호수면 온도의 일 변화는 작다. 반면 육지는 낮은 토양의 열 용량에 의해 온도의 변화가 크다. 결과적으로 육지는 낮 동안은 호수보다 따뜻하고 밤동안은 차가워지며 이러한 형태는 호수풍 발생 환경을 조성한다. 오전 시간(대략 10 LST)에 육지의 기온이 증가함에 따라 따뜻해진 공기는 상승하고, 물 위의 차가운 공기는 육지로 이동한다. 육지와 호수에 의한 이러한 순환은 폭 1-2 km의 하층 수렴대를 형성하고 기온과 습도에서 큰 변화가 있다. 호수의 국지풍 연직 순환 규모는 500 m에서 2 km까지이며 상승 운동 속도는 0.5-2.5 m/s이다(Stull, 1988). 본 연구에서는 상승 운동의 속도는 조사하지 않았다. 그러나 1.2 km 고도까지 존재하는 연직 순환 규모와 09 LST 발생 시각, 하층 수렴대 생성 등의 결과는 Stull (1988)의 일반적인 국지풍 순환의 특징과 잘 일치하고 있으며 인위적인 개발에 의한 인공 호수에 의해 국지 기상이 변화할 수 있음을 시사한다.

호수에 의한 국지풍 순환의 계절적 차이를 조사하

기 위해 겨울철 사례에서 수치 모의된 지표면 온도를 Fig. 10에 제시하였다. 오전(09 LST)에는 호수면 위의 온도는 4°C, 주위 지표면 온도는 -6°C를 보여 호수에서 주위 지면보다 온도가 더 높으며, 낮(15 LST)동안 호수면 위의 온도는 6°C, 주위 지표면 온도는 12°C로써 호수에서 지면보다 더 낮아 지표면 온도 차이의 변화 경향은 여름철 사례와 유사한 결과를 보였다. 오후(15 LST)에는 호수풍이 발생함을 보이나 여름철보다 약화되었다. 야간과 새벽에는 호수의 온도가 주위 지면 온도보다 높게 나타나고 있다. 겨울철 사례에서 호수풍이 약화되는 것은 호수와 주위 지면 온도의 차이가 여름철 사례보다 작은 6°C 정도로 작게 나타나기 때문인 것으로 보인다.

국지풍 순환에 미치는 호수의 효과를 분석하기 위하여 여름철 사례에 대하여 지표이용도 민감도 실험을 수행하였다. Fig. 11의 왼쪽 패널은 환경부 지표이용도 자료를 이용한 기준 실험의 결과이며, 오른쪽 패널은 환경부 지표이용도 자료에서 호수로 분류된

Fig. 10. Same as Fig. 6, except for 24 February 2008.

대청호를 초원으로 지표이용도를 변경한 실험의 결과이다. 09 LST에는 호수위의 지면온도 변화가 거의 없다. 바람은 남동풍이며 풍속은 호수가 존재하는 경우와 유사하다. 15 LST에는 호수 지역에서 온도가 균일하게 나타나 호수 제거에 따른 지면온도의 변화가 뚜렷하다. 풍향은 오후 시간은 북서풍이다. 새벽(03 LST)에도 호수와 주위 지면간의 온도차는 존재하나 15 LST 만큼 크지는 않다. 민감도 실험에서 호수가 제거됨에 따라 지표면 온도는 균일하게 되고 호수풍은 발생하지 않게 된다. 시간적으로는 호수풍이 발생한 15 LST 시간의 기온과 풍속의 변화가 가장 뚜렷함을 알 수 있었다.

지표이용도 민감도 실험에서 수치 모의된 기온과 풍속을 관측 자료와 비교하여 Fig. 12에 제시하였다. 호수의 북쪽에 위치한 A 관측소의 기온은 낮 시간

(12-17 LST)은 호수가 없을 때 기온이 증가하였다. 풍속의 분포에서도 호수 제거시 대체로 낮 시간(16-18 LST)동안 증가하였다. 호수의 남쪽에서 관측된 B 지점은 오전(07 LST)과 야간(21 LST)에는 호수 효과에 의한 차이가 작다. 오후(16 LST)에는 호수가 존재하지 않는 경우에 기온이 증가함을 보인다. 풍속은 오전(09 LST)과 오후(16 LST)에 호수 제거시 감소하였음을 보이며 시간에 따라 불규칙하다. C 관측소는 호수 유무에 따른 기온의 차이가 없으며 풍속도 호수가 존재하는 경우와 민감도 실험이 거의 유사하였다. 호수에서 가장 멀리 떨어진 지점에서는 호수 효과가 작았음을 알 수 있다. 민감도 실험의 기온은 호수 제거에 따라 기온이 대체로 증가하며 호수에서 멀리 떨어진 관측소보다 호수 근처에서 기온 증가의 영향이 더 크게 나타난다. 호수의 존재 여부

Fig. 11. The simulated wind speed (m/s) at 10m and surface skin temperature ($^{\circ}\text{C}$) from 1.1 km WRF model experiment using the Korean Ministry of Environment land use data (left column) and the experiment without lake category (right column) at 16 August 2007.

에 대한 민감도 실험에서 호수가 존재하는 경우 수치모의된 기온은 감소하며, 풍속의 시간에 따른 변화는 크지 않으나 오후 시간대에 풍속이 감소함을 보였다.

결론

인위적인 국토 개발에 의해 지표이용도가 변화할 때의 기상변화를 고찰하고자 인공적으로 형성된 호수

Fig. 12. Same as Fig. 4, except for the experiment without lake category. Black line indicates observation, blue line indicates KME land use experiment, and red line indicates the experiment without lake category.

에서 국지 기상을 중규모 수치 모델을 이용하여 분석하였다. 실험 영역은 대전 대청호 주변이며, 모의 사례는 여름철 폭염과 겨울철 고기압이 위치한 맑은 날 사례이다. 실험 방법은 중규모 수치 모델 WRF를 이용하여 1.1 km 격자간격으로 24시간 모의하였다.

본 연구에서는 지표 이용도를 WRF 모델에서 기본적으로 제공하는 USGS 자료와 환경부 지표이용도 자료를 이용하여 개선하여 실험을 수행하였다.

수치 모의된 지상기온과 풍속값을 대청호 주변 관측 지점에서의 관측 자료에 대하여 검증하였다. 기온

은 대체로 과소 모의 되는 경향을 보였으며 풍속은 과다 모의 되었다. 수치모델에서 기온이 과소 모의되는 점은 환경부 지표 이용도 자료를 적용한 실험에서 기온의 과소 모의는 개선됨을 보였으며, 원거리보다 호수 근처에서 정확도가 더욱 개선되었다. 풍속의 시계열 분포는 풍속이 과다 예보되었으며 예보 시간에 따라 오차의 경향이 일정하지 않았으나 지표 이용도 자료의 적용에 의해 과다 예보된 풍속이 개선되었다. 풍속 시계열 분포의 오차는 향후 수치 모델의 개선에 의해 모의 결과의 개선이 필요하다.

수치 실험에서는 대형호수에서 여름철과 겨울철 낮 시간 동안 호수풍이 모의되었다. 모의된 호수풍은 호수와 주위 지표면과의 온도차이에 의해 발생하여 여름철 사례에서 호수와 주위 지면 온도가 낮 시간 동안 최고 10°C 이상의 차이를 나타낼 때 가장 크게 모의되었다. 겨울철 사례와 야간은 호수풍이 약하게 모의되었다. 호수풍은 여름철 낮 시간 동안 호수와 주위 지면 온도차가 최대가 되었을 때 가장 뚜렷하였다. 호수풍의 발생 시각은 09 LST이며 18 LST에 소멸하고 15 LST에 최대로 발달됨을 보였다. 호수풍은 고도 1.2 km까지 존재하며, 하층에서는 호수에서 주변 지역으로 발산, 상층에서는 주변 지역으로부터 호수로 수렴하는 형태이다. 이러한 상층 수렴과 하층의 발산 영향으로 비습의 분포에서 오후 시간에 호수의 동쪽 고도 0.3-0.9 km에서 비습이 감소하였다.

호수 유무에 따른 효과를 조사하기 위하여 호수를 제거한 민감도 실험을 수행하였다. 호수를 제거한 실험에서 오전과 새벽에는 호수의 효과가 크지 않았으나 오후 시간에 호수 효과는 최대였다. 호수에 의해 기온은 감소하며 호수 근처에서만 영향이 나타났다. 호수에 의해 풍속은 감소하는 경향을 보여 지표이용도 변화에 의해 국지 기상이 변화함을 보였다.

본 연구에서는 1.1 km 수평격자를 갖는 중규모 모델을 이용하여 대형호 지역의 국지규모 순환을 모의하였다. 수치모의된 기상 요소들은 관측 자료와 대체로 유사한 결과를 보이고 있어서 중규모 모델을 이용하여 국지기상 연구에 활용 가능성을 제시하였다. 또한, 인공적인 호수에 의해 기온과 바람이 국지적인 규모에서 변화할 수 있으며 지표 이용도의 변화에 의해 기상환경이 변화하므로 국토 개발 사업에서 국지 기상의 변화를 고려해야 할 것으로 보인다.

감 사

이 연구는 국립기상연구소 “신생활 산업기상 기술 개발”연구의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 남재철, 신만용, 윤진일, 1995, 매기상자료에 의한 안동지역 인공호 주변 안개발생판별. 한국기상학회지, 31, 393-398.
- 박순웅, 김준호, 이종범, 이태영, 1993, 수력발전소 건설전후의 미기상학적 기후변화연구. 한국전력공사 기술연구원, KRC-90C-T05, 589 p.
- 소선섭, 양문석, 1993, 충주댐 건설전후 충주지방의 안개변화 특성. 공주사범대학교학교육연구, 25, 179-199.
- 윤진일, 황규홍, 정현향, 신만용, 임준택, 신진철, 1997, 주암 다목적댐 건설에 따른 국지기후 변화가 농작물 생산성에 미치는 영향. 한국기상학회지, 33, 409-427.
- 이종범, 1981, 춘천지방의 인공호에 의한 안개 및 운량의 변화, 한국기상학회지, 17, 18-26.
- 홍성길, 1982, 안동댐 건설이후 안동지방의 안개증가. 한국기상학회지, 18, 26-32.
- Chen, F. and Dudhia, J., 2001, Coupling an advanced land-surface/hydrology model with the Penn State/NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. Monthly Weather Review, 129, 569-585.
- Dudhia, J., 1989, Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. Journal of Atmospheric Sciences, 46, 3077-3107.
- Hong, S.-Y. and Pan H.-L., 1996, Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. Monthly Weather Review, 124, 2322-2339.
- Hong, S.-Y. and Lim J.-O.J., 2006, The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). Journal of Korean Meteorological Society, 42, 129-151.
- Kain, J.S., 2004, The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. Journal of Applied Meteorology, 43, 170-181.
- Mlawer, E.J., Taubman S.J., Brown P.D., Iacono M.J., and Clough S.A., 1997, Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-K model for the longwave. Journal of Geophysical Research, 102, 16663-16682.
- Stull, R.B., 1988, An introduction to boundary layer meteorology. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 666 p.

2009년 7월 1일 접수
2009년 8월 4일 수정완료 접수
2009년 8월 12일 채택