

## 레이더 자료를 이용한 호우의 산지효과 특성 분석: 충주댐 유역을 대상으로

### Analysis on Characteristics of Orographic Effect about the Rainfall Using Radar Data: A Case Study on Chungju Dam Basin

구 정 모\* / 노 용 훈\*\* / 김 경 준\*\*\* / 유 철 상\*\*\*\*

Ku, Jung Mo / Ro, Yonghun / Kim, Kyoungjun / Yoo, Chulsang

#### Abstract

This study analyzed the characteristics of orographic effect using radar data for the Chungju dam basin. First, independent rainfall events were selected by applying the IETD (Interevent Time Definition) and rainfall threshold. Among those independent rainfall events, rather strong events were selected to decide the occurrence condition of orographic effect. Also, the average reflectivity was calculated for the entire period and for the period of storm center, and the change in reflectivity was analyzed by comparing the average reflectivity to that in the mountain area. Important rainfall factors were selected and applied to the logistic regression model to decide the occurrence condition of orographic effect. Summarizing the results is as follows. First, evaluation of the radar data along the passing line of a storm showed the increase of radar reflectivity in the mountain area. Second, the result of logistic regression analysis showed that the orographic effect in the Chungju Dam Basin mostly occurred when the rainfall intensity was higher than 4 mm/hr, the storm velocity was lower than 4 km/hr, and the approach angle was  $90^{\circ} \pm 5^{\circ}$ .

**Keywords** : Orographic effect, Radar data, Chungju dam basin, Independent rainfall Events, Runoff ratio, Logistic regression analysis

#### 요 지

본 연구에서는 충주댐 유역을 대상으로 레이더 자료를 이용하여 호우의 산지효과 특성을 분석하였다. 먼저 적절한 무강우 기간과 절단값을 결정하여 독립호우사상을 선정하였다. 이러한 독립호우사상으로부터 산지효과와 발현 여부를 판단할 주요호우사상을 선정하였다. 또 레이더 자료를 이용하여 전체 기간과 호우중심 기간의 평균반사도를 산정하고, 산지 부근의 반사도와 평균반사도를 비교하여 반사도의 변화를 분석하였다. 아울러 본 연구에서는 호우의 특성인자를 선정하고 로지스틱 회귀분석을 수행하여 충주댐 유역 호우의 산지효과 발현 조건을 확인하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다. 먼저 산악 지역을 통과하는 호우의 이동선상에서의 반사도 변화를 검토한 결과 호우의 시작 지점에 비하여 산악 지역에서의 반사도가 증가한 것으로 확인되었다. 둘째, 산지효과 발현 조건을 탐색하기 위해 로지스틱 회귀분석을 수행한 결과 충주댐 유역에서는 임계값이 호우의 이동속도 4 km/hr, 접근각도  $90^{\circ} \pm 5^{\circ}$ , 강우강도 4 mm/hr인 경우에 산지효과와 발현 여부 적중률이 가장 높은 것으로 확인되었다.

**핵심용어** : 산지효과, 레이더 자료, 충주댐 유역, 독립호우사상, 유출률, 로지스틱 회귀분석

\* 고려대학교 대학원 건축사회환경공학부 석박사통합과정 (e-mail: kjm1868@nate.com)

Ph.D. Course., School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

\*\* 고려대학교 대학원 건축사회환경공학부 박사과정 (e-mail: royh1@naver.com)

Ph.D. Course., School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

\*\*\* 국립재난안전연구원 재난원인조사실 DSI센터 연구원 (e-mail: guitar7746@gmail.com)

Ph.D., DSI Center, National Disaster Management Institute, Seoul 121-719, Korea

\*\*\*\* 교신저자, 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 교수 (e-mail: envchul@korea.ac.kr, Tel: 82-2-3290-3321)

Corresponding Author, Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

## 1. 서론

우리나라는 국토의 약 80%가 복잡한 산지 형태의 지형이어서 강우 예측의 개선을 위해서는 지형의 영향을 정확히 파악해야 한다. 지형은 대류계를 형성하여 강우 현상을 유발하기도 하며, 이미 존재하고 있던 대류계의 강우량을 증대시키는 역할도 한다(Lim and Lee, 1994). 산악 지역에서 상승기류에 따라 내리는 비는 산악형 강우, 또는 산지 효과(orographic-effect)에 따른 지형성 강우로 정의된다. 여러 연구에서 보고하고 있는 것처럼 강우는 산의 경사면에서 고도에 따라 증가하는 것으로 나타난다(Henry, 1919; Alter, 1919; Barrows, 1933; Spreen, 1947; Schermerhorn, 1967; Hutchinson, 1968). 이를 산지효과라고 하며 이러한 효과로 나타나는 강우 과정과 구름 발달 형태는 바람의 특성과 지형적 특징에 따라 크게 세 가지로 나누어 볼 수 있다. 이들은 안정된 대기상태에서 층운형 비구름의 형성 과정과 발달 과정을 설명해 주는 Seeder-feeder 과정, 불안정한 기류가 강제 상승 운동으로 적운형의 강우 현상을 일으키는 상승경사면의 응결 과정, 지형성대류 과정 등이다(Seo, 1996).

Seeder-Feeder 과정이란 지형적 하층운(층운형)에 상층운이 비를 뿌리면 하층운이 이를 받아 증우효과가 나타나는 과정이다(Kim, 2006). 상승 경사면의 응결 과정은 수평기류가 강제 상승 후 파과화에 이르러 강우가 발생하는 과정으로 산이 높고 가파르며 풍속이 강하고 경사면과 직각이며 습한 기류일 때 최대 효과가 나타난다. 마지막으로 지형성 대류 과정은 잠재 불안정한 대기가 초기 상승력에 따라 상승류가 급격히 발달하여 적운형의 강우를 유발하는 과정으로, 산사면의 상승류에 따라 발생한다. 이와 관련된 연구는 국외에서 활발히 수행되었다. 초기에는 표고에 따라 강우에 강한 작용이 일어날 것이라는 의문이 생겨 Donley and Mitchell (1939), Leopold (1951), Rodda (1951), Rumley (1965)는 각각 Southern Appalachian, Hawaii, England, Equadirain Andes 지역에서 강우와 표고 사이의 선형적인 관계를 연구하였다(Kim, 2003).

이후 Daly et al. (1994)은 지리 정보 등을 좀 더 적극적으로 활용한 새로운 개념의 통계적 규모축소법인 PRISM (Parameter-elevation Regressions an Independent Slopes Model)을 개발하였다. PRISM은 오리건 주립대학교에서 고해상도 격자형 기후 자료의 필요성을 인식하고, 북미 대륙을 대상으로 연구를 거듭해 개발한 격자형 기후 자료 생산 도구이다. Daly et al. (1994)은 PRISM을 적용하여 산악의 경사 방향, 거리, 고도, 해양도 등에 따른 기후의

변화를 파악할 수 있었다. 이들은 특히 북미 지역 기후 요소의 시·공간 변동과 지리 환경과의 관계를 분석하여 고도가 가장 크게 영향을 미친다는 것을 밝혔다.

최근에는 레이더 자료를 이용하여 산악 지역에서의 강우를 분석하는 연구가 수행되고 있다. Germann et al. (2006)은 산악지역에서 레이더 강우 관측의 문제점을 밝히고 스위스의 레이더 관측망으로 알프스 지역의 레이더 강우를 추정하고자 하였다. 또 Marios et al. (2009)은 복합적 지형에서 지면 클러터와 빙 차폐 등의 영향으로 반사도가 작게 관측되는 문제를 파악하고 해결하고자 하였다. 이들은 여름과 겨울에 발생한 호우사상을 고해상도 PPI 자료를 이용하여 누적강우량을 분석하였고 지형에 따른 반사도 감쇠를 방지하기 위해 VPR (Vertical Profile of Reflectivity)를 이용하였다.

국내에서는 강우의 공간분포를 분석하는 연구가 지속적으로 수행되고 있다. Kim (2003)과 Yoo et al. (2004)은 한강 유역에서 고도와 강우량과의 관계를 선형 및 비선형 회귀분석을 이용해 분석하고 강우와 고도와의 관계가 미미하다는 것을 보여준 바 있다. 또 Um et al. (2007)과 Yoon et al. (2009)은 제주도를 대상으로 다중 회귀분석 방법을 적용하여 지형요소와 강우량의 관계를 해석하였다. 이를 통해 고도보다 지속 기간이 강우량에 더 큰 영향을 미친다는 것을 확인하였다.

이후 Shin et al. (2008)은 지리산 주변 지역을 대상으로 PRISM을 적용하여 강우량을 분석하였다. 이를 통해 강우량은 단순히 고도 차에 따라 증가하지 않고 거리, 지향면, 해양도 등의 지리정보 특성이 유사해야 증가한다는 것을 파악하였다. 또 Park et al. (2012)은 PRISM을 이용하여 고도와 강우량 사이의 상관계수를 추정하였다.

상관계수를 추정된 값은 미국에서 추정된 값보다 작은 것으로 나타났다. 이는 국내에서 고도가 증가함에 따라 강우량 증가량이 미국보다 적다는 것을 의미한다. 국내에도 태백산맥 등이 있지만 그 규모가 미국보다 상대적으로 작아 상관계수가 미국보다 작게 추정되기 때문으로 보인다.

이와 같이 우리나라에서는 산의 고도가 낮아서 단순히 고도로만 산지효과를 고려하는 것은 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 산지효과에 영향을 미칠 것으로 추정되는 인자를 선정하고 충주댐 유역을 대상으로 레이더 자료를 이용하여 호우의 산지효과 특성을 분석하였다. 아울러 산지효과와 발현 조건을 탐색하기 위해 로지스틱 회귀분석을 수행하였다.

## 2. 산지효과가 발현된 호우사상의 선정

### 2.1 대상유역 및 강우-유출 자료

본 연구의 대상 지점으로 충주댐 유역을 선정하였다. 충주댐의 유역면적은 6,648 km<sup>2</sup>로서 충청북도의 3개 시·군(충주시, 제천시, 단양군)과 강원도의 8개 시·군(원주시, 태백시, 삼척시, 강릉시, 영월군, 평창군, 정선군, 횡성군) 그리고 경상북도의 3개 시·군(문경시, 영주시, 봉화군) 등 3도 8시 6군으로 구성되며, 전 국토(99,450 km<sup>2</sup>)의 6.7%에 해당한다(Lee, 2010).

충주댐 유역의 강우 및 유출 자료는 국토해양부의 한강홍수통제소에서 제공받았으며, 2002년부터 2013년까지 총 12년으로, 우기에 해당하는 6월에서 9월 자료를 이용하였다. 강우자료로는 충주댐 유역 내에 위치한 한국수자원공사 관할 강우관측소 34개소, 국토해양부 관할 강우관측소 21개소 등 총 55개소를 고려하였다. 충주댐 유역의 평균강우량은 산술평균법을 이용하여 산정하였다.

### 2.2 호우사상분리

#### 2.2.1 독립호우사상 선정

독립호우사상을 구분하기 위해서는 먼저 적절한 IETD (Interevent Time Definition) 및 절단값(threshold)을 결

정하여야 한다(Park and Yoo, 2012). IETD의 결정을 위해 Restrepo-Posada and Eagleson (1982)이 제안한 방법을 적용할 경우 국내에서는 10시간 또는 12시간의 IETD가 적절한 것으로 알려져 있다(Kim, 1998; Kwon et al., 2004; Park and Yoo, 2012;). 본 연구에서는 Park and Yoo (2012)를 참고하여 IETD는 12시간, 절단값은 0.5mm를 적용하였다. 이와 같은 방법으로 선정된 독립호우사상 중에서 지속시간이 6시간 이상이고, 유역의 총 강우량이 30mm 이상인 호우사상을 선정하여 산지효과 발현 여부 분석에 사용하였다. 총 강우량이 30mm 이하인 호우사상은 유출수문곡선이 명확하게 나타나지 않아 분석에서 제외하였다. 또 장마기간에 발생한 호우사상은 IETD에 따라서 2개 혹은 3개의 호우사상으로 분류되는 경우가 발생하였다. 이 경우에는 유출수문곡선이 복합적으로 나타나 직접유출량과 기저유출량을 분리하는 것이 간단하지 않다. 따라서 장마기간에 발생한 호우사상은 IETD를 12시간 이상으로 보완하여 하나의 호우사상으로 추가하였다. 본 연구에서 선정된 호우사상은 총 64개이며 연도별 호우사상 수는 다음 Table 1과 같다.

#### 2.2.2 산지효과의 발현 여부를 판단할 호우사상 선정

본 연구에서는 선정된 독립호우사상으로부터 산지효과

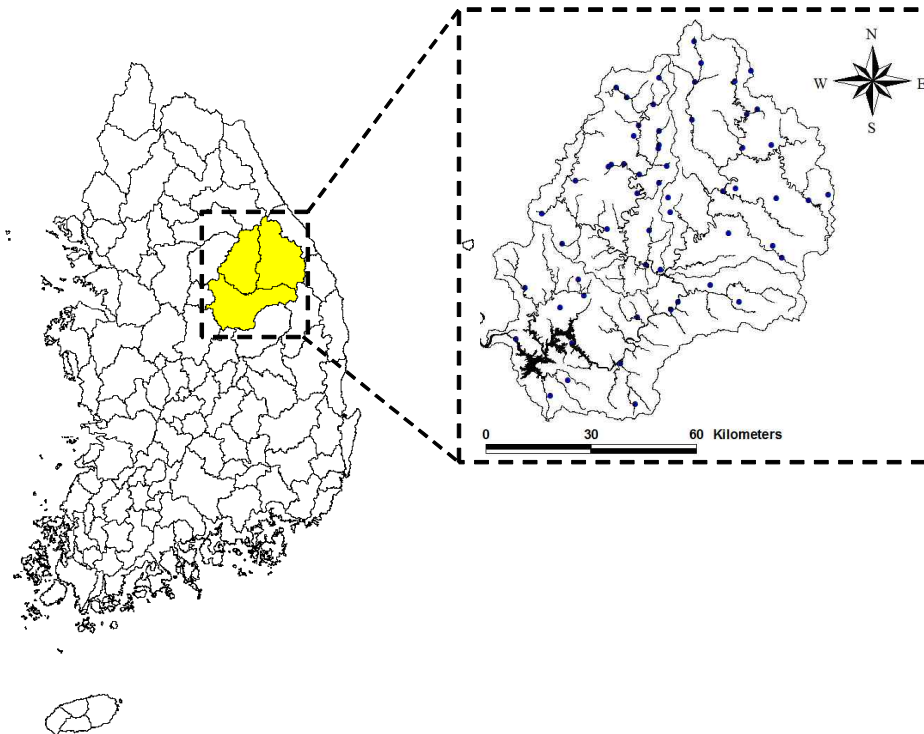


Fig. 1. The Chungju Dam Basin and Location Rain Gauges

의 발현 여부를 판단할 호우사상을 선정하기 위해 유출률을 조사하였다. 유출률이란 강우량과 하천이 하구에 물을 유출하는 양의 비율을 의미한다. 유출량을 산정하기 위해서는 직접유출량과 기저유출량을 분리하여야 한다. 수문곡선에서 직접유출량과 기저유출량을 분리하는 방법으로는 주 지하수 감수곡선법, 수평직선분리법, n-day법, 수정 n-day법 등이 있다. 본 연구에서는 직접유출량과 기저유출량을 분리하는 방법으로 수문곡선 분리의 간편성 때문에 실무에서 많이 사용되고 있는 수평직선 분리법을 선택하였다. 유출률을 산정하는 공식은 다음과 같다.

$$\text{RunoffRatio} = \frac{\text{DirectRunoff}}{\text{WatershedRainfall}} \quad (1)$$

본 연구에서는 Table 1과 같이 선정된 호우사상의 유출률을 산정하였으며, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 (a)는 선정된 호우사상의 유출률 산정 결과를 나타낸 것이고, (b)는 선정된 호우사상의 유출률 히스토그램을 나타낸 것이다. (a)의 수직축은 호우사상의 개수, 수직축은 유출률이고, (b)의 수직축은 유출률의 백분율, 수직축은 도수이다. Fig. 2에서 산정된 유출률의 최댓값은 0.94, 최솟값 0.11, 평균 0.48로 나타났다. 또 유출률의 최빈값은 40~50% 구간이고, 이 구간을 중심으로 히스토그램은 대칭 분포를 보이고 있다. 아울러 유출률이 0~10% 구간에서는 표본값이 존재하지 않는다. 이는 유역의 총 강우량이 30mm 이하인 호우사상을 제외하여 나타난 결과이다. 히스토그램을 통하여 구한 유출률의 최솟값은 10~20% 구간에 존재하며 최댓값은 90~100% 구간에 존재하는 것을 확인할 수 있다.

주요 호우사상의 유출률을 Fig. 3과 같이 박스도표로 나타내어 예외적인 호우사상을 선정하였다. 본 연구에서

선정된 64개 호우사상 유출률의 중앙값(50%)은 0.47, 1사분위수(25%)는 0.33, 3사분위수(75%)는 0.60으로 나타났다. 따라서 사분위 범위(IQR)는 1사분위수와 3사분위수의 차이인 0.27이 된다. Fig. 3에서는 IQR의 가중치로 각각 1.5, 1.0, 0.5를 적용하여 자료의 범위를 결정하고 아울러 이상점을 나타내었다. 여기서 IQR의 가중치를 정규분포의 확률밀도함수에 적용하면 신뢰수준이 각각 99.3%, 95.56%, 82.3%가 된다. 즉, 가중치를 작게 적용할수록 이상점의 판별기준은 엄격해진다. 또 이상점은 박스도표에서 꼬리 외에 위치한 유출률이 크게 나타난 호우사상을 의미한다.

1.5IQR의 경우에는 이상점이 없는 것으로 나타났으나

Table 1. Number of Rainfall Events each Year

Year	Rainfall events	
	Duration ≥ 6 hr, Total rainfall ≥ 5 mm	Duration ≥ 6 hr, Total rainfall ≥ 30 mm
2002	21	2
2003	26	7
2004	21	4
2005	25	7
2006	21	4
2007	25	8
2008	17	5
2009	30	5
2010	19	3
2011	20	8
2012	16	8
2013	19	3
Total	260	64

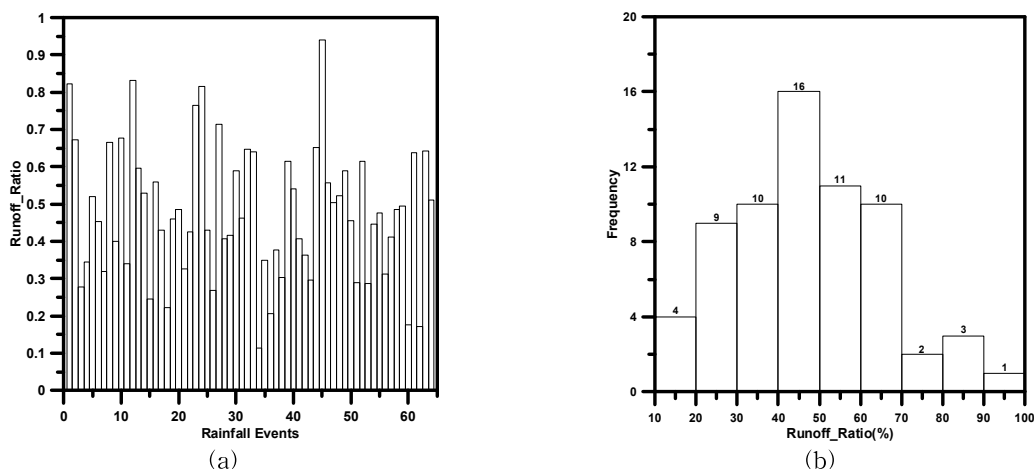


Fig. 2. Runoff Ratio of Selected Rainfall Events (a) and Their Histogram

1.0IQR의 경우에 1개, 0.5IQR의 경우 위쪽에서의 이상점은 5개, 아래쪽에서 4개로 총 9개로 나타났다. 본 연구에서는 이상점으로 나타난 9개의 호우사상 중에서 유출률이 크게 나타난 위쪽에서의 이상점을 고려하였다. 위쪽에서의 이상점 5개에 해당하는 호우사상 중에서 레이더 자료의 품질이 좋지 않은 2개의 호우사상은 분석에서 제외하였다. 또 본 연구에서는 선정된 64개의 호우사상 중에서 지속 시간에 비해 총 강우량이 크게 나타난 3개의 호우사상과 평균 강우강도에 비해 유출률이 크게 나타난 3개의 호우사상 등을 추가로 고려하였다. 따라서 본 연구에서 고려한 호우사상은 총 9개이며, Table 2와 같다.

### 3. 레이더 자료를 이용한 호우의 산지효과 확인

#### 3.1 호우 진행면에서의 반사도 변화 양상

본 연구에서는 먼저, 1.5 km CAPPI 반사도 자료를 이용하여 앞서 선정된 충주댐 유역에 해당되는 9개의 호우사상의 이동방향을 확인하였다. 본 연구에서 사용한 레이더 자료는 관악산 레이더 자료이다. 관악산 레이더 자료의 해상도는  $1 \times 1$  km이며  $480 \times 480$ 개의 격자로 구성되

어 있다. 또 충주댐 유역은 관악산 레이더의 180 km 반경 안에 위치하고 있다. 관악산 레이더와 충주댐 유역의 위치는 Fig. 4와 같다.

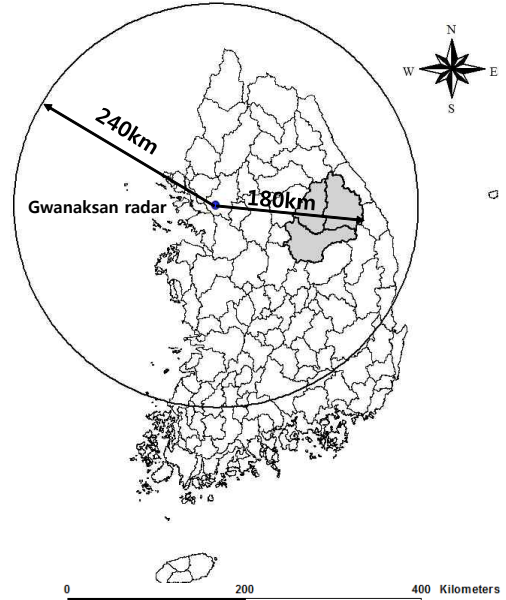


Fig. 4. Location of Gwanaksan Radar

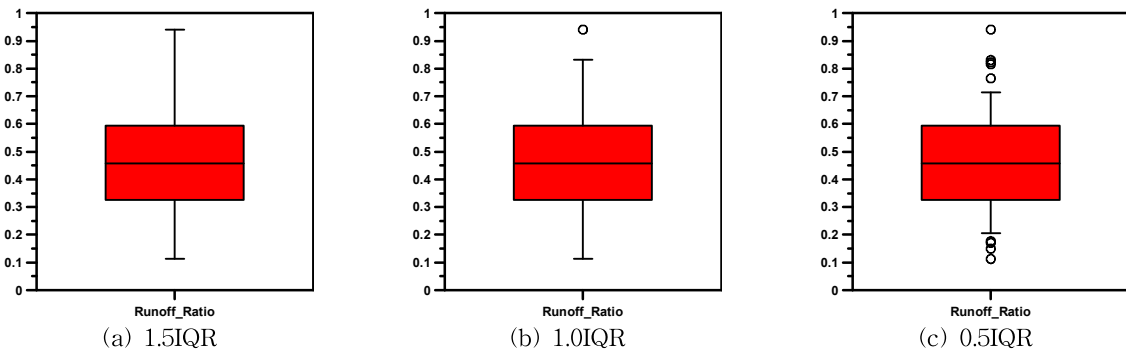


Fig. 3. Box Plots of Runoff Ratio of Selected Rainfall Events

Table 2. Rainfall Events which are Assumed to Show Orographic Effect

No	Rainfall events	Duration (hr)	Total rainfall (mm)	Runoff ratio	Average Rainfall intensity (mm/hr)
1	Aug, 05, 2002	84	367.9	0.82	4.38
2	Jul, 27, 2006	53	184.2	0.82	3.48
3	Sep, 01, 2007	27	45.1	0.59	1.67
4	Jul, 23, 2008	53	203.7	0.64	3.84
5	Sep, 21, 2010	37	104.6	0.94	2.83
6	Jun, 22, 2011	108	275.7	0.56	2.55
7	Jul, 03, 2011	18	139.4	0.52	7.74
8	Aug, 16, 2011	37	134.6	0.61	3.64
9	Sep, 16, 2012	33	75.7	0.64	2.29

본 연구에서는 호우의 유입 지점과 출구 지점까지의 연결 단면에 대해 반사도의 공간적 변화를 정량적으로 분석하였다. 이를 통해 산지효과가 발생하는 상태에서 호우의 이동방향과 이동속도 등이 어떻게 나타나는지를 확인하였다. 먼저 이들 호우사상에서 호우중심부를 관측한 레이더 반사도를 그림으로 나타내면 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 (a)는 시간의 변화에 따라 산악 지역에서의 반사도 변화가 뚜렷하게 나타나지 않는 호우사상이고 (b)는 산악 지역에서의 반사도 변화가 뚜렷하게 나타난 호우사상이다. 특히 Fig. 5에서 진하게 나타난 부분이 상대적으로 반사도 값이 큰 부분을 나타낸다.

다음으로 Fig. 5에서 나타낸 것과 같이 시간에 따른 반사도 변화 양상을 이용하여 각 호우사상의 방향성과 이동속도 등을 파악하여 Fig. 6의 (a)와 (b)에 나타내었다. (a)는 2007년 9월 1일 호우사상으로, 총 강우량과 평균 이동방향 및 이동속도는 52.4mm, 48.4°, 24.58 m/s으로 나타났으며 (b)는 2011년 8월 16일 호우사상으로, 각각 136.5 mm, 58.93°, 17.91 m/s이다. Fig. 6에서 각 호우사상의 방향성과 이동속도 등은 호우중심부에서만 고려하여 도시

하였다. 이를 이용하여 충주댐 유역의 대상호우 방향성을 증첩한 결과는 Fig. 6의 (c)와 같다. 그 결과 충주댐 유역에서 호우의 방향은 대략 서쪽에서 동쪽 또는 남서쪽에서 북동쪽인 것으로 나타났다. 본 연구에서는 분석 대상 호우사상의 호우 방향성을 고려하고, 아울러 산지효과가 발생할 것으로 추정되는 산악 지역을 통과하는 호우 이동선을 결정하였다. 대상 호우사상의 산악 지역을 통과하는 호우의 이동선은 Fig. 7과 같다. Fig. 7에서 타원으로 표시된 부분은 충주댐 유역 내의 산악 지역을 나타낸다.

마지막으로 본 연구에서는 앞서 결정한 산악 지역을 통과하는 호우의 이동선상을 대상으로 레이더 반사도 자료를 이용하여 반사도 변화를 검토하였다. 먼저 Fig. 8은 호우 이동선상에서의 레이더 반사도 변화를 나타낸다. Fig. 8에서 좌측은 호우중심 기간의 평균반사도이고 우측은 호우사상 전체 기간의 평균반사도를 나타낸다. 여기서 호우중심 기간은 강우가 많이 발생한 구간이며, 평균반사도는 호우이동선상의 반사도 평균을 의미한다. 또 호우 이동선상에서 산지효과가 발생할 것으로 추정되는 지역을 박스로 구분하여 나타내었다. 그림을 살펴보면 Fig. 8의 (a)에

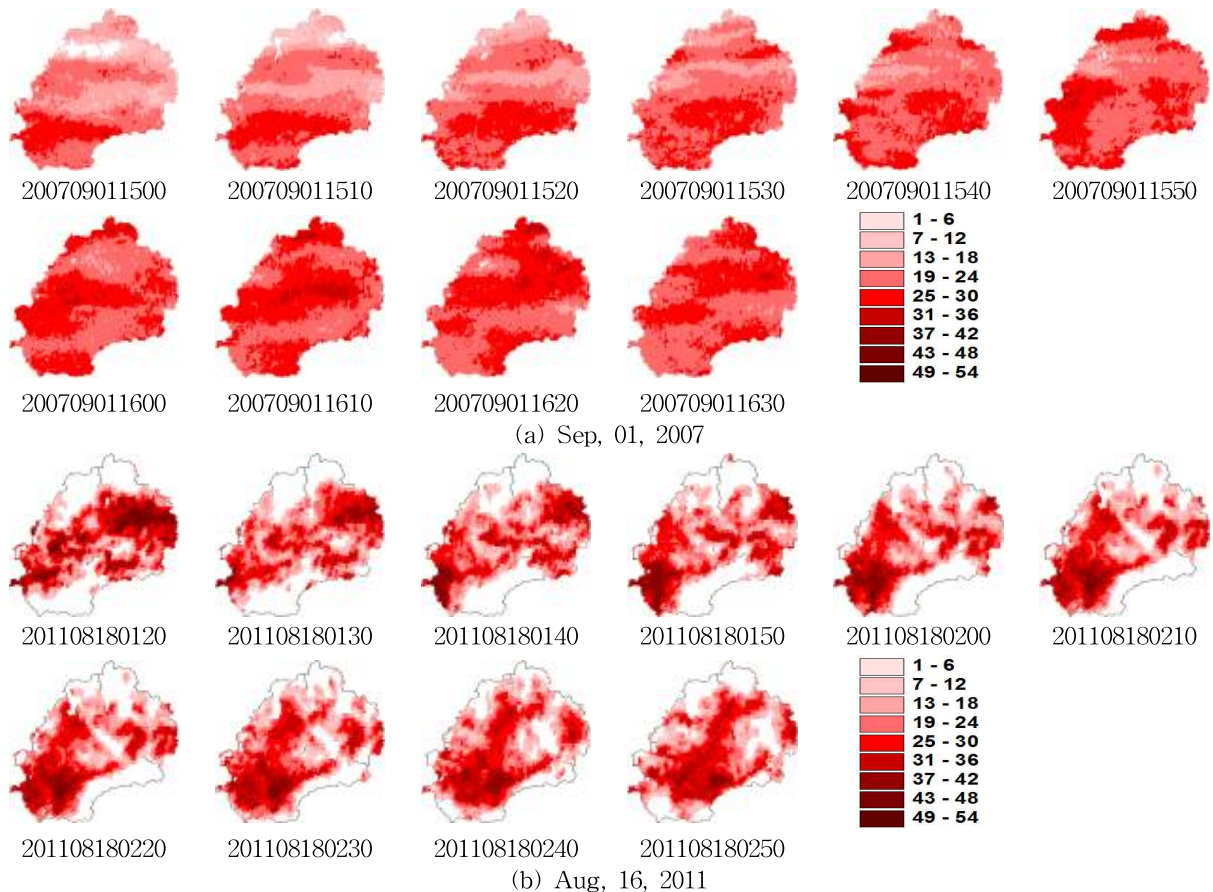
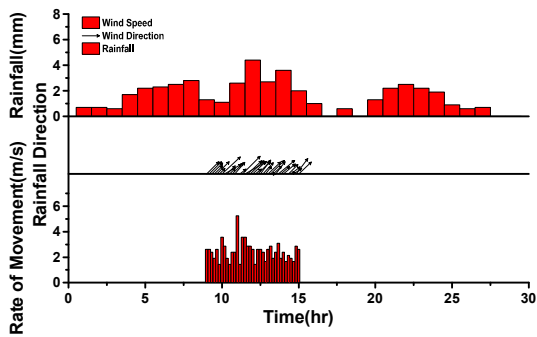
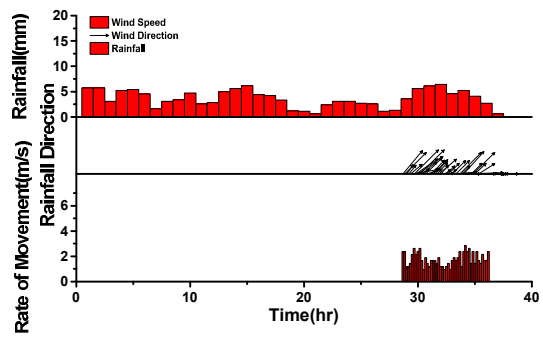


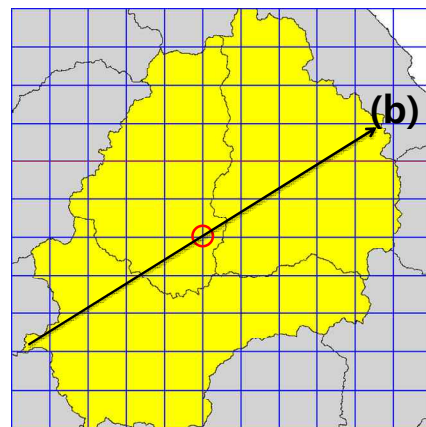
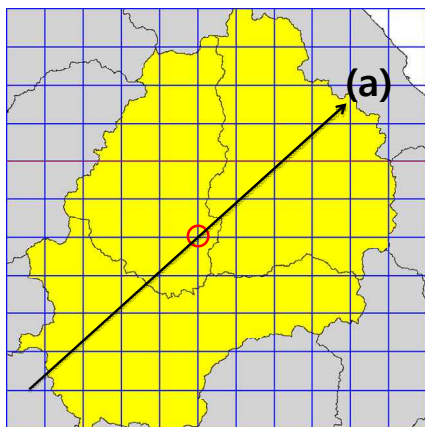
Fig. 5. Change of Radar Reflectivity Fields as the Storm Center Passed the Chungju Dam Basin



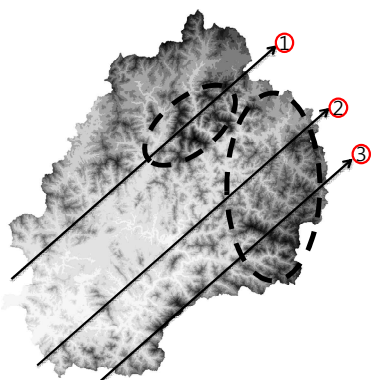
(a) Sep, 01, 2007



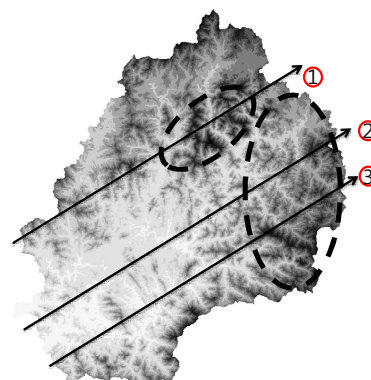
(b) Aug, 16, 2011



(c) Moving directions of selected rainfall events over the Chungju Dam Basin  
**Fig. 6. Rainfall Intensity, Moving Direction and Velocity of Each Rainfall Event**



(a) Sep, 01, 2007



(b) Aug, 16, 2011

**Fig. 7. Determination of Storm Passing Line over the Mountain Area**

서는 호우가 시작되는 지점과 박스로 구분한 지점 모두에서 반사도가 조금 변화한 것으로 보이나 전체적으로는 증감의 차이가 크게 나타나지 않는다. 따라서 호우의 이동에 따라 박스로 구분한 산악 지역에서 산지효과에 따른 호우의 증가가 미미한 것으로 판단된다. 하지만 Fig. 8의 (b)에서는 두 지점 간의 반사도 차이가 호우중심 기간만 고려한 반사도와 전체 기간을 고려한 반사도 모두에서 증

감의 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 특히 호우중심 기간에서의 평균반사도 1과 2에서는 호우의 시작 지점보다 증가한 것으로 나타나는데 이는 산지효과에 따라 반사도가 증가한 것으로 판단된다.

### 3.2 호우사상의 특성과 산지에서의 반사도 변화

본 연구에서는 앞서 호우가 산악 지역을 지날 때 반사

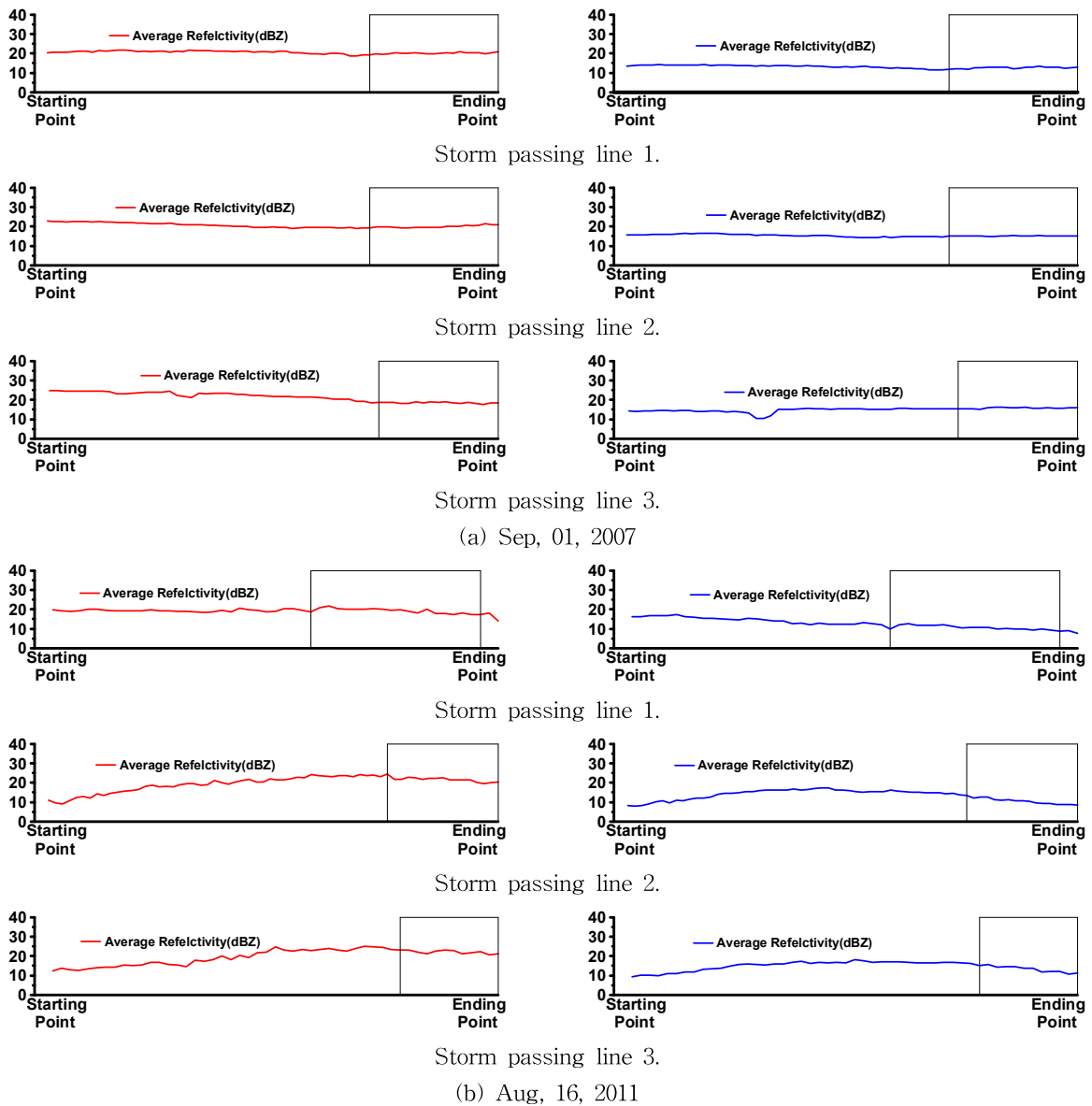


Fig. 8. Investigation of Average Radar Reflectivity along the Storm Passing Lines of the Storm Center (left) and over the Entire Storm Period (right)

도가 증감되는 정도를 분석하였다. 증감률은 호우사상별로 전체 기간과 호우중심 기간에서 반사도가 증감된 정도로 나타내었다. 이를 위해 전체 기간과 중심 기간의 평균 반사도를 산정하고 산지 부근의 반사도가 평균반사도와 비교하여 증감된 정도를 정리하였다. 평균반사도보다 반사도가 크게 나타나면 산지효과가 발생한 것으로 판단하였다. 호우사상별로 전체 기간과 중심 기간의 평균반사도, 산지 부근에서의 반사도 증감 여부, 호우사상의 특성을 Table 3에 정리하였다. 호우사상의 특성으로는 강우강도, 호우의 이동속도, 호우의 이동방향 및 접근각도를 고려하였다.

Table 3을 보면 호우사상별로 산지 부근에서의 반사도 값이 평균반사도보다 크거나 작은 경우가 있음을 확인할 수 있다. Table 3에서 2011년 8월 16일 호우사상에서는 반사도가 평균반사도보다 최대 25%까지 증가하였다. 하지만 2007년 9월 1일 호우사상을 보면 대체적으로 반사도가 평균보다 감소하였다. 이러한 경향을 통해 산지효과가 발현된 것도 있고 발현되지 않은 것도 있음을 파악할 수 있다. 문제는 어떤 조건하에서 반사도가 증감되는지를 파악하기 어렵다는 것이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 호우사상의 특성 중 산지효과에 영향을 미칠 것으로 추정되는 인자를 대상으로 로지스틱



**Table 3. Changes in the Radar Reflectivity and the Characteristic of Rainfall Events**

Storm period		Average radar reflectivity (dBZ)	Pcentage change (%)	Rainfall intensity (mm/hr)	Rainfall velocity (km/hr)	Moving directions	Angle (°)
2007.09.01	entire 1	13.1	-11.0	2.5	9.0	ENE	90
	entire 2	15.3	-1.7	2.5	9.0	ENE	90
	entire 3	14.9	+3.8	2.5	9.0	ENE	50
	center 1	20.6	-6.2	2.5	9.0	ENE	90
	center 2	20.6	-5.8	2.5	9.0	ENE	90
	center 3	21.5	-13.4	2.5	9.0	ENE	50
2011.08.16	entire 1	12.7	-21.3	3.6	9.8	NE	90
	entire 2	13.2	+1.8	3.6	9.8	NE	80
	entire 3	14.7	+3.6	3.6	9.8	NE	80
	storm 1	19.2	-3.1	3.6	9.8	NE	90
	storm 2	19.6	+25.0	3.6	9.8	NE	80
	storm 3	19.7	+17.4	3.6	9.8	NE	80

회귀분석을 수행하였다.

#### 4. 로지스틱 회귀분석을 이용한 산지효과 발현 조건 탐색

##### 4.1 배경 이론

본 연구에서는 호우사상의 특성 중 산지효과에 영향을 미칠 것으로 추정되는 인자를 대상으로 로지스틱 회귀분석(logistic regression)을 수행하였다. 로지스틱 회귀분석은 두 개의 값만을 가지는 종속변수와 다양한 값을 갖는 독립변수들 사이의 관련성을 분석하는 통계적 기법이다(Sung, 2001). 이는 종속변수가 어떤 사건의 발생 여부와 같은 이분변수일 때 종속변수와 독립변수의 인과관계를 추정하는 통계적 절차로 두 집단의 판별분석과 유사하다. 단, 판별분석은 자료가 판별을 위한 기본 가정을 충족하는 경우만 적용할 수 있지만 로지스틱 회귀분석은 별도의 기본 가정이 필요하지 않아 분석 자료의 특성에 제한되지 않는다.

로지스틱 회귀분석은 일반 회귀분석과 개념적으로 동일하나 종속변수가 양적변수가 아닌 이분변수라는 점이 다르다. 종속변수가 양적변수일 때 종속변수에 영향을 주는 변수를 찾아내는 방법이 회귀분석이며, 종속변수가 두 집단으로 나누어진 이분변수일 때 사용하는 통계적 방법이 로지스틱 회귀분석이다. 로지스틱 회귀분석은 종속변수가 이분변수로서 이항분포를 따르는 경우와 정규분포 가정을 충족하지 못할 경우 적용할 수 있다. 또 두 모집단 간의 등분산 가정을 충족하지 못할 경우에도 적용할 수 있다.

Park et al. (2009)은 로지스틱 회귀분석을 다음과 같이 정리하였다. 종속변수가 0, 1의 두 값만 갖는 경우, 기댓값  $y$ 를 나타내는 반응함수는 독립변수  $x$ 가 증가함에 따라 1로 수렴하는 양상을 보이는데 이와 같은 반응함수를 로지스틱 함수(logistic function)라고 한다. 이 때 단순회귀 모형식을  $z = \beta_0 + \beta_1 x$ 라고 하면 기댓값  $E(y)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E(y) = \frac{\exp(z)}{1 + \exp(z)} \quad \text{또는} \quad E(y) = \frac{1}{1 + \exp(-z)} \quad (2)$$

기댓값  $E(y)$ 는 어떤 사건이 발생할 확률로 해석될 수 있다. Eq. (2)의 로지스틱 반응함수는  $\beta_0$ 와  $\beta_1$ 에 대하여 비선형이나 이를 선형으로 변환시킬 수 있다. 기댓값  $E(y)$ 는 확률을 의미하므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E(y) = p_x \quad (3)$$

로지스틱 반응함수의 선형화는 Eqs. (2) and (3)을 연립하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln\left(\frac{p_x}{1 - p_x}\right) = z = \beta_0 + \beta_1 x \quad (4)$$

이와 같은 변환을 로지스틱 변환(logistic transformation)이라고 하고 이 식에서 좌변의 로그 안에 포함된 식을 다음과 같이 오즈(odds) 또는 승산비라고 한다.

$$\text{오즈(Odds)} = \frac{p_x}{1 - p_x} \quad (5)$$

오즈는 어떤 사건이 발생하지 않을 확률과 발생할 확률과의 비율을 나타낸다. 독립변수가 2개 이상인 경우에도 로지스틱 회귀모형이 가능하다. 이 경우 선형화된 로지스틱 함수는 다음과 같이 표현된다.

$$z = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_px_p \quad (6)$$

여기서  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ 는 로지스틱 함수의 회귀계수를 나타낸다. 선형 회귀분석에는 보통 최소자승법을 이용하여 회귀계수를 결정한다. 하지만 로지스틱 회귀분석에서는 최대우도추정법을 통하여 사건이 발생할 가능성(likelihood)을 최대화하는 값을 찾는다. 이때 추정된 회귀계수  $\beta_p$ 는 다른 독립변수의 수준을 일정하게 하였을 때, 해당 독립변수  $x_p$ 를 한 단위 증가시킬 때마다 어떤 사건이 발생할 확률이 발생하지 않을 확률보다  $\exp(\beta_p)$ 만큼 증가한다. 로지스틱 회귀계수의 검정은 Wald 통계값을 이용하며, 이는 회귀분석에서  $t$  검정을 하는 것과 유사하다. 보통 로지스틱 회귀분석에는 최적의 함수를 결정하기 위해 회귀분석과 같이 순차변수추가법(forward selection), 순차변수제거법(backward elimination), 단계별 변수선택법(stepwise selection) 등의 방법을 사용하고 있다.

로지스틱 회귀분석으로 Eq. (6)과 같이 로지스틱 함수가 결정되었다면  $z$  값을 Eq. (2)에 대입하여 기댓값  $E(y)$ 를 산정하여 사건이 발생할 확률을 나타낸다. 결정된 로지스틱 함수에서  $\beta_p$ 가 양의 값이면 독립변수  $x_p$ 가 종속변수  $z$  값에 긍정적인 영향을 미치고  $\beta_p$ 가 음의 값이면  $x_p$ 가  $z$  값의 부정적인 영향을 미친다는 것을 의미한다. 또한  $\beta_p$ 의 크기가 클수록 주어진 로지스틱 함수의 종속변수에 영향을 미치는 독립변수의 영향이 크다는 것을 의미한다. 로지스틱 회귀분석에서는 기댓값  $E(y)$ 가 0.5(50%) 이상으로 나타나면 종속변수에 해당하는 사건이 발생할 것으로, 기댓값이 0.5 미만으로 나타나면 발생하지 않는 것으로 분류한다. 이때 발생 여부는 0과 1의 두 가지 값으로만 나타나는데 0은 종속변수에 해당하는 사건이 발생하지 않는 것을 나타내고 1은 발생할 것을 나타낸다. 발생 여부가 0과 1의 두 가지 값으로 나타나기 때문에 다음과 같이 분류된 결과가 나타날 수 있다. 발생한 사건을 발생한 것으로 바르게 분류한 사상과 발생하지 않는 것으로 잘못 분류한 결과가 나타날 수 있다. 마찬가지로 발생하지 않는 사건을 발생하지 않는 것으로 바르게 분류한 사상과 발생할 것으로 잘못 분류된 결과가 나타날 수 있다. 로지스틱 회귀분석은 이러한 각 경우에서 분류의 정확성을 산정하여 이를 종합하여 최종적인 적중률을 나타낸다. 분류의 적중률이 클수록 로지스틱 함수를 통해 결정된 종

속변수가 나타내는 사건 발생 여부의 신뢰도가 높아진다. 일반적으로 로지스틱 회귀분석에서는 여러 개의 독립변수 집단의 적중확률이 가장 높게 나타난 경우에 해당하는 회귀식을 주어진 자료에 적합한 로지스틱 함수로 결정하게 된다.

#### 4.2 충주댐 유역의 산지효과 발현 조건 탐색

본 연구에서는 충주댐 유역의 산지효과 발현 조건을 탐색하기 위해 산지효과에 영향을 미칠 것으로 추정되는 인자의 로지스틱 회귀분석을 수행하였다. 산지효과 발현 조건을 탐색하는 방법을 정리하면 다음과 같다. 먼저 호우 특성인자를 대상으로 산지효과가 발현될 수 있는 조건의 한계를 나타내는 임계값을 설정하여 임계값 범위에 따라 산지효과가 발현될 호우사상과 그렇지 않을 사상을 분류한다. 분류된 호우사상을 종속변수로 하고 호우의 특성인자를 독립변수로 설정하여 로지스틱 회귀분석을 수행한다. 호우 특성인자의 임계값을 변화시키면서 회귀분석을 반복하여 분류된 결과의 적중률이 가장 높은 조건에 해당하는 호우 특성인자의 임계값을 결정한다. 이 임계값을 경계로 산지효과가 발현될 조건을 결정하는 것이다.

본 연구에서는 중심기간의 호우사상을 회귀분석하였다. 호우사상의 특성으로 고려한 인자는 강우강도(I) 호우의 이동속도(V), 접근각도(D) 등이다. 강우강도의 경우 4, 6, 8 mm/hr를 임계값으로, 호우의 이동속도는 4, 6, 8 km/hr를 임계값으로, 접근각도는 산지와 호우가 정면으로 만났을 때를 기준으로(90°), 산지와 호우가 이루는 각이 90°±5°, 90°±15°, 90°±25°일 때를 임계값으로 고려하였다. 즉, 로지스틱 회귀분석을 수행하기 위한 독립변수로서 강우강도와 호우의 이동속도는 임계값 이상인 경우를 '1'로, 임계값 미만인 경우를 '0'으로 정하였다. 접근각도는 주어진 범위 안에 들어가는 경우를 '1'로, 범위 안에 들어가지 않는 경우를 '0'으로 정하였다. 또한 종속변수로서, 관측된 산지효과의 발현여부 판단은 호우중심 기간 반사도가 평균반사도보다 5% 이상 증가한 경우를 기준으로 하였다.

로지스틱 회귀분석은 총 27개의 경우를 수행하였고, 각 경우의 조건을 Table 4에 정리하였다. Table 4에서 I는 강우강도, V는 호우의 이동속도, D는 접근각도를 나타낸다. 본 연구에서는 SPSS(Statistical Package for the Social Sciences)를 이용하여 산지효과에 영향을 주는 인자들의 로지스틱 회귀분석을 수행하였다.

Table 4와 같이 27개 경우의 독립변수를 이용하여 구축한 로지스틱 회귀분석의 입력자료 중 대표적으로 첫 번째 경우를 정리하면 Table 5와 같다. 입력 자료는 28개의

**Table 4. Cases with Different Independent Variables for Logistic Regression Analysis**

Case	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I (mm/hr)	4	4	4	4	4	4	4	4	4
V (km/hr)	4	4	4	6	6	6	8	8	8
D (°)	90±5	90±15	90±25	90±5	90±15	90±25	90±5	90±15	90±25
Case	10	11	12	13	14	15	16	17	18
I (mm/hr)	6	6	6	6	6	6	6	6	6
V (km/hr)	4	4	4	6	6	6	8	8	8
D (°)	90±5	90±15	90±25	90±5	90±15	90±25	90±5	90±15	90±25
Case	19	20	21	22	23	24	25	26	27
I (mm/hr)	8	8	8	8	8	8	8	8	8
V (km/hr)	4	4	4	6	6	6	8	8	8
D (°)	90±5	90±15	90±25	90±5	90±15	90±25	90±5	90±15	90±25

**Table 5. Input Data for Case 1**

Rainfall events	Dependent variable	Independent variable		
		I	V	D
1	0	0	1	1
2	1	0	1	0
3	1	0	1	0
4	0	1	1	1
5	0	1	1	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	0
8	0	1	1	1
9	0	1	1	1
10	1	1	1	0
11	0	1	1	0
12	1	1	1	0
13	0	1	1	0
14	0	1	1	1
15	0	1	1	0
16	1	1	1	0
17	1	1	0	1
18	1	1	0	0
19	1	1	0	0
20	1	1	1	0
21	0	1	1	0
22	1	1	1	0
23	0	0	1	1
24	0	0	1	1
25	0	0	1	0
26	1	1	1	0
27	0	1	1	0
28	0	1	1	0

호우사상을 3개의 독립변수와 이에 따라 산지효과의 발 여부를 분류한 종속변수로 되어 있다.

28개의 호우사상 중 산지효과가 발현된 경우는 11개, 발현되지 않은 경우는 17개로 나타났다. 로지스틱 회귀분석을 적용하여 27개 경우에 대해 산지효과 발현 여부를 분류한 결과는 Table 6과 같다.

Table 6에서 1은 산지효과가 발현된 호우사상을 맞게(발현되는 것으로) 분류된 것을 나타내고, 0은 산지효과가 발현되지 않은 호우사상을 맞게(발현되지 않은 것으로) 분류된 것을 나타낸다. 각 경우에서 괄호 안의 수치는 적중률(%)을 나타낸다. 27개의 경우 중 첫 번째에서 적중률이 75.0%로 가장 높게 나타났고 경우 8에서 적중률이 60.7%로 가장 낮게 나타났다. 또한 일부 경우에서 적중률이 동일하게 나타나는 현상을 파악할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 결과를 바탕으로 전체 적중률이 가장 높게 나타난 첫 번째 경우를 분석하여 산지효과가 발현될 수 있는 조건을 탐색하였다. 이 경우 강우강도는 임계값으로 4 mm/hr 이상, 이동속도는 4 km/hr 이상, 접근각도는 90°±5°를 나타낸다. 이 조건으로 로지스틱 회귀분석을 한 결과 산지효과가 발현된 사상 11개에 맞게(발현되는 것으로) 분류한 사상은 6개로 나타났다. 또한 발현되지 않을 사상 17에 맞게(발현되지 않은 것으로) 분류한 사상은 5개로 나타났다. 적중률은 산지효과가 발현된 사상에 맞게(발현되는 것으로) 분류한 사상이 45.5%, 발현되지 않은 사상에 맞게(발현되지 않은 것으로) 분류한 사상이 94.1%로 나타났다. 따라서 첫 번째 경우를 잘못 분류한 사상은 6개라는 것을 알 수 있다. 첫 번째 경우를 적합한 것으로 결정한 로지스틱 함수는 다음과 같다.

$$z = 41.791 - 0.981(I) - 41.098(V) - 21.064(D) \quad (7)$$

Table 6. Results of the Logistic Regression Analysis

Case	Result		Total accuracy rate (%)
	1	0	
1	5 (45.5)	16 (94.1)	75.0
2	3 (27.3)	17 (100.0)	71.4
3	3 (27.3)	17 (100.0)	71.4
4	5 (45.5)	15 (88.2)	71.4
5	4 (36.4)	15 (88.2)	67.9
6	4 (36.4)	14 (82.4)	64.3
7	6 (54.5)	13 (76.5)	67.9
8	0 (0.0)	17 (100.0)	60.7
9	3 (27.3)	16 (94.1)	67.9
10	9 (81.8)	11 (64.7)	71.4
11	3 (27.3)	17 (100.0)	71.4
12	3 (27.3)	17 (100.0)	71.4
13	3 (27.3)	16 (94.1)	67.9
14	4 (36.4)	15 (88.2)	67.9
15	4 (36.4)	15 (88.2)	67.9
16	8 (72.7)	11 (64.7)	67.9
17	4 (36.4)	12 (70.6)	57.1
18	6 (54.5)	13 (76.5)	67.9
19	7 (63.6)	13 (76.5)	71.4
20	3 (27.3)	17 (100.0)	71.4
21	3 (27.3)	17 (100.0)	71.4
22	6 (54.5)	13 (76.5)	67.9
23	5 (45.5)	14 (82.4)	67.9
24	6 (54.5)	13 (76.5)	67.9
25	6 (54.5)	13 (76.5)	67.9
26	7 (63.6)	12 (70.6)	67.9
27	7 (63.6)	12 (70.6)	67.9

Eq. (7)을 보면, 먼저, 산지효과의 강우강도, 호우의 이동속도 및 접근각도의 영향이 어떤 형태인지를 판단할 수 있다. 추정된 매개변수가 모두 음의 값을 가지는 것으로 나타나 강우강도, 이동속도 및 접근각도 모두 산지효과에 부정적인 영향을 가지는 것으로 나타났다. 특히 매개변수가 큰 이동속도 및 접근방향의 영향이 강우강도의 영향보다 월등히 큼을 판단할 수 있다. 강우강도의 경우 호우의 이동속도와 접근각도보다 산지효과 발현에 미치는 영향이 작게 나타났고 비교적 4mm/hr보다 크지 않은 호우사상에 산지효과가 발현될 가능성이 있다. 호우의 이동속도는 4km/hr보다 크지 않은 속도로 이동할 때 산지효과가 발현될 가능성이 있다. 또한 접근각도는 90°를 기준으로 하여 호우가 산지에서 ±5°보다 크게 비껴 진행할 때 산지

효과가 발현될 가능성이 있다.

위 식으로  $z$  값을 산정한 후 Eq. (2)를 통해 기댓값  $E(y)$ 를 계산할 수 있다. 기댓값을 통해 산지효과의 발현 여부를 예측하게 된다. SPSS를 이용하여 주어진 호우사상의 산지효과 발현 여부를 예측한 결과는 Table 7과 같다. 표에서 산지효과 관측 결과와 예측 결과에서 1로 나타난 것은 산지효과가 발현된 것을 나타내고 0으로 나타난 것은 발현되지 않은 것을 나타낸다. 첫 번째 경우에는 총 6개의 경우가 잘못 분류된 것으로 나타났다. 이는 Table 6에 나타난 결과와 동일하다. 산지효과는 기댓값  $E(y)$ 가 0.5 이상이면 발현된 것으로, 0.5보다 작으면 발현되지 않는 것으로 나타나 있다. 기댓값  $E(y)$ 는 Eq. (7)의 로지스틱 함수로 결정된  $z$  값을 Eq. (2)를 이용하여 산정된 값이다.

Table 7. Classification Results of Occurrence of the Orographic Effect Derived by Applying the Logistic Regression Analysis

Rainfall events	$z$	$E(y)$	Predicted results	Observed results	Residual	Residual ( $z$ )
1	-20.37	0.00	0	0	0.00	0.00
2	0.69	0.67	1	1	0.33	0.71
3	0.69	0.67	1	1	0.33	0.71
4	-21.35	0.00	0	0	0.00	0.00
5	-21.35	0.00	0	0	0.00	0.00
6	-0.29	0.43	0	0	-0.43	-0.87
7	-0.29	0.43	0	0	-0.43	-0.87
8	-21.35	0.00	0	0	0.00	0.00
9	-21.35	0.00	0	0	0.00	0.00
10	-0.29	0.43	0	1	0.57	1.16
11	-0.29	0.43	0	0	-0.43	-0.87
12	-0.29	0.43	0	1	0.57	1.16
13	-0.29	0.43	0	0	-0.43	-0.87
14	-21.35	0.00	0	0	0.00	0.00
15	-0.29	0.43	0	0	-0.43	-0.87
16	-0.29	0.43	0	1	0.57	1.16
17	19.75	1.00	1	1	0.00	0.00
18	40.81	1.00	1	1	0.00	0.00
19	40.81	1.00	1	1	0.00	0.00
20	-0.29	0.43	0	1	0.57	1.16
21	-0.29	0.43	0	0	-0.43	-0.87
22	-0.29	0.43	0	1	0.57	1.16
23	-20.37	0.00	0	0	0.00	0.00
24	-20.37	0.00	0	0	0.00	0.00
25	0.69	0.67	1	0	-0.67	-1.41
26	-0.29	0.43	0	1	0.57	1.16
27	-0.29	0.43	0	0	-0.43	-0.87
28	-0.29	0.43	0	0	-0.43	-0.87

이는 강우강도, 이동속도, 접근각도의 독립변수 자료를 Eq. (7)의 로지스틱 함수에 대입하여  $z$  값을 결정한 Eq. (2)를 통해 산정할 수 있다. 결과적으로 기댓값이 0.5보다 크게 나타난 호우사상은 산지효과가 발현된 것으로 분류되었고 기댓값이 0.5보다 작게 나타난 호우사상은 발현되지 않는 것으로 나타났다. 이를 원 자료의 관측 결과와 비교하면 잘못 분류된 사상을 제외하고 동일하다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 충주댐 유역을 대상으로 레이더 자료를 이용하여 호우의 산지효과 특성을 분석하였다. 먼저 독립

호우사상을 이용하여 산지효과의 발현 여부를 판단할 호우사상을 선정하고, 레이더 자료를 이용하여 시간에 따른 반사도 변화 양상을 파악하였다. 이를 통해 산지 부근의 전체 기간과 호우중심 기간에서 반사도가 증감되는 정도를 분석하였다. 아울러 산지효과에 영향을 미칠 것으로 추정되는 인자를 선정하고, 이를 로지스틱 회귀분석을 수행하여 산지효과의 발현 조건을 탐색하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 충주댐 유역의 2002년부터 2013년까지 총 12년으로 우기에 해당하는 6월에서 9월까지의 자료를 이용하여 독립호우사상을 선정하였다. 선정된 독립호우사상의 유출률을 IQR의 가중치로 각각 1.5, 1.0, 0.5를

적용하여 박스도표로 나타내어 예외적인 호우사상을 선정했다. 그 결과 1.5IQR의 경우에는 이상점이 없는 것으로 나타났으나 1.0IQR의 경우에 1개, 0.5IQR의 경우 위쪽에서의 이상점은 5개 아래쪽에서 4개, 총 9개로 나타났다.

- 2) 호우의 유입 지점과 출구 지점까지의 연결 단면 반사도의 공간적 변화를 분석한 결과 충주댐 유역에서의 호우 방향은 대략 서쪽에서 동쪽 또는 서남쪽에서 동북쪽인 것으로 나타났다. 또 산악 지역을 통과하는 호우의 이동선상에서의 반사도 변화를 호우중심 기간과 호우전체 기간의 평균반사도를 이용하여 확인하였다. 그 결과 호우중심 기간과 호우전체 기간 모두에서 호우의 시작하는 지점과 산악 지역 간의 반사도 증감의 차이가 발생하는 것을 확인하였다. 특히 호우중심 기간에서의 평균반사도가 호우의 시작 지점보다 산악 지역에서 반사도가 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 산지효과 때문에 반사도가 증가한 것으로 판단된다.
- 3) 산지효과에 영향을 미칠 것으로 추정되는 호우 특성 인자를 로지스틱 회귀분석하여 산지효과가 발현될 수 있는 조건을 탐색하였다. 호우 특성 인자로는 강우강도, 호우의 이동속도, 접근각도를 고려하였으며 임계값으로는 호우강도의 경우 4, 6, 8 mm/hr, 호우의 이동속도는 4, 6, 8 km/hr, 접근각도는  $90^{\circ} \pm 5^{\circ}$ ,  $90^{\circ} \pm 15^{\circ}$ ,  $90^{\circ} \pm 25^{\circ}$ 로 분류하였다. 그 결과 강우강도는 비교적 4 mm/hr보다 크지 않은 호우사상에서, 호우의 이동속도는 4 km/hr보다 크지 않은 속도로 호우가 이동할 때 산지효과가 발현될 가능성이 있는 것으로 나타났다. 또 호우와 산지의 접근각도는 정면으로 만났을 때( $90^{\circ}$ )를 기준으로 호우가 산지에서  $\pm 5^{\circ}$ 보다 크게 비껴 진행할 때 산지효과가 발현될 가능성이 있는 것으로 나타났다. 이를 통해 충주댐 유역에서는 호우의 이동속도 4 km/hr, 강우강도 4 mm/hr, 접근각도  $90^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 보다 큰 경우에 산지효과가 발현될 가능성이 높은 것으로 확인되었다.

## 감사의 글

본 연구는 안전행정부 국립재난안전연구원의 지원(원격탐사기반 선진형 홍수관리 및 가뭄대응 기반기술구축, NDMI-주요-2013-09-02) 및 교육부 한국연구재단의 지원(레이더 강우 활용측면에서의 요소기술 개발, NRF-2013R1A1A2011012)으로 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

## References

- Alter, J.C. (1919). "Normal precipitation in UTAH." *Monthly Weather Review*, Vol. 47, pp. 633-636.
- Barrows, H.K. (1933). "Precipitation and runoff and altitude relations for Connecticut River." *Transactions, American Geophysical Union*, Vol. 12, pp. 396-406.
- Daly, C., Neison, R.P., and Phillips, D.L. (1994). "A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 33, No. 2, pp. 140-158.
- Donley, D.E., and Mitchell, R.L. (1939). "The Relation of Rainfall to Elevation in the Southern Appalachian Region." *Transactions. American Geophysical Union*, Vol. 20, No. 4, pp. 711-721.
- Germann, U., Galli, G., Boscacci, M., and Bolliger, M. (2006). "Radar precipitation measurement in a mountainous region." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 132, pp. 1669-1692.
- Henry, A.J. (1919). "Increase of precipitation with altitude." *Monthly Weather Review*, Vol. 47, pp. 33-41.
- Hutchinson, P. (1968). "An analysis of the effect of topography on rainfall in the Taieri Catchment area, Otago." *Earth Science Journal*, Vol. 2, pp. 51-68.
- Kim, B.-G. (2006). *The synoptic characteristics of the heavy rain in chungchong Region*, Master of Science Thesis, Chosun University, Gwangju.
- Kim, K.-W. (2003). *Estimation of Orographic Effect on Precipitation in the Han River Basin*. Master of Science Thesis, SungKyunKwan University, Gyeong Gi-Do.
- Kim, N.W. (1998). *Spatial-temporal distribution of rainfall: parameter estimation of point rainfall model*, Korea Intsitute of Civil Engineering and Building Technology.
- Kwon, J.H., Park, M.J., and Kim, J.H. (2004). "Rain analysis to estimate the amount of non-point source pollution." Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference 2004, pp. 666-670.
- Lee, Y.K. (2010). *Recycling plan of lignocellulosic floating material in Chungju Dam*, Chungbuk Green Environment Center. pp. 13-14.
- Lim, E.-H., and Lee, T.-Y. (1994). "Two-dimensional numerical study of the terrain effects on the develop-

- ment of cloud and precipitation for the middle part of korea.” *Korean Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 30, No. 4, pp. 565-582.
- Marios N.A., John, K., Emmanouil. N.A., and Anastasios, P. (2009). “Experimental results on rainfall estimation in complex terrain with a mobile X-band polarimetric weather radar.” *Atmospheric Research*, Vol. 94, pp. 579-595.
- Park, C., and Yoo, C. (2012). “Review of parameter estimation procedure of freund bivariate exponential distribution.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 2, pp. 191-201.
- Park, J.-C., Jung, I.-W., Chang, H.-J., and Kim, M.-K. (2012). “Optimization of PRISM parameters and digital elevation model resolution for estimating the spatial distribution of precipitation in south korea.” *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 15, No. 3, pp. 36-51.
- Park, S.-H., Cho, S.-S., and Kim, S.S. (2009). *SPSS 17.0 understanding and application*, Hannarae publishing co., pp. 290-298.
- Restrepo-Posada, P.J., and Eagleson, P.S. (1982). “Identification of Independent Rainstorm.” *Journal of Hydrology*, Vol. 55, pp. 303-319.
- Rodda, J.C. (1951). “An objective Method for the Assessment of Areal Rainfall Amounts.” *Weather*, Vol. 17, pp. 54-59.
- Rumley, G.B. (1965). An Investigation of the Distribution of Rainfall with Elevation for Selected Stations in *Ecuador*. M.S. Thesis, Texas A&M University.
- Schermerhorn, V.P. (1967). “Relations between topography and annul precipitaion in western Oregon And Washington.” *Water Resources Research*, Vol. 3, No. 3, pp. 707-711.
- Seo, K.-H.(1996). *Analysis and simulation of orographic rain in the middle part of the korean peninsula*, Master of Science Thesis, Seoul National University, Seoul.
- Shin, S.-C., Kim, M.-K., Suh, M.-S., Rha, D.-K. Jang, D.-H., Kim, C.-S., Lee, W.-S., and Kim, Y.-H. (2008). “Estimation of High Resolution Gridded Precipitation Using GIS and PRISM.” *Korean Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 18, No. 1, pp. 71-81.
- Spreen, W.C. (1947). “A determination of the effect of topography upon precipitation.” *Transactions, American Geophysical Union*, Vol. 28, pp. 285-290.
- Stidd, C.K., and Leopold, L.B. (1951). “The Geographical Distribution of Average Monthly Rainfall, Hawaii.” *Meteorol Monogr*, Vol. 1, pp. 24-33.
- Sung, O.-H. (2001). *Applied logistic regression analsis-Theory, Methods, SAS Applications-*, Tamjin. pp. 39-87.
- Um, M.-J., Cho, W., and Rim, H.-W. (2007). “Rainfall adjustment on duration and topographic elevation.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 7, pp. 511-521.
- Yoo, C., Jun, K.-S., and Kim, K.-W. (2004). “Estimation of orographic effect on precipitation in the han river basin-I. regreession anaysis-.”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 24, No. 1, pp. 33-39.
- Yun, H., Um, M.-J., Cho, W., and Heo, J.-H. (2009). “Orographic Precipitation Analysis with Regional Frequency Analysis and Multiple Linear Regression.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 6, pp. 465-480.

paper number : 14-124  
 Received : 12 December 2014  
 Revised : 26 March 2015 / 6 April 2015  
 Accepted : 6 April 2015