Water Engineering

ISSN 1015-6348 (Print) ISSN 2287-934X (Online) www.kscejournal.or.kr

수공학

호우 형태에 따른 호우중심형 면적감소계수 비교

이동주* · 현석훈** · 강부식***

Lee, Dongjoo*, Hyun, Sukhoon**, Kang, Boosik***

Comparative Study of the Storm Centered Areal Reduction Factors by Storm Types

ABSTRACT

The Fixed Area ARFs (Area Reduction Factors) method has limitations in providing exact information about spatial distribution due to the lack of enough density of rain gauge stations. In this study the storm-centered ARF was evaluated between frontal and typhoon storm events utilizing radar precipitation. In estimating storm-centered ARFs, in order to consider the horizontal advection, direction, and spatial distribution of rain cells, the rotational angle of rainfall of each rainfall event and the optimum areal rainfall within the spatial rain cell envelope was taken into account. Compared with the frontal storm, the ARF of typhoon storm shows narrow range of variability. It is noted that the ARFs of frontal storm increases with the rainfall duration, but those of typhoon storm shows opposite pattern. As a result the typhoon ARFs appear greater than frontal ARFs for 1~3 hours of duration, but less for more than 6 hours of duration.

Key words : Dual polarization radar, Radar rainfall, Areal reduction factor, Frontal rainfall, Typhoon sanba

초 록

면적고정형 ARF (Fixed Area ARFs)방법은 강우관측소의 지점강우를 활용하여 산정되고 있으며, 공간적 관측밀도의 제약이 정확한 ARF산정 에 제약조건이 되고 있다. 본 연구에서는 레이더 강우관측을 활용하여 호우중심형의 ARF를 제시하고자 한다. 호우중심형 ARF (Storm-centered ARFs)산정 시 강우의 이동성, 방향성, 공간분포를 고려하기 위하여 강우사상별 강우형상에 따른 타원 장축의 방향성 결정, 강우형상에 따른 면 적별 최적면적강우량을 산정하여 ARF를 제시하였다. 전선형에 비하여 태풍의 ARF값의 변동 폭이 작은 것을 알 수 있었고, 전선형은 지속시 간에 따라 ARF가 증가하지만, 태풍의 경우에는 오히려 ARF가 감소하는 모습을 볼 수 있었다. 이 결과 지속시간이 비교적 짧은 1~3시간에서 는 태풍 산바 사상의 ARF가 크게 산정되었으나, 지속시간이 긴 6~24시간에서는 ARF가 전선형 강우에 비해 작게 산정됨을 확인하였다.

검색어: 이중편파 레이더, 레이더 강우, 면적감소계수, 전선형 강우, 태풍 산바

1. 서론

설계홍수량 산정 시 지점강우량을 대상유역 내 소유역 단위의 면적강우량으로 환산하기 위하여 면적감소계수(Areal Reduction Factor; ARF)를 적용하고 있으며, ARF 산정 방법에는 크게 면적고정형(Fixed-Area) 방법과 호우중심형(Storm-Centered) 방법으로 분류되고 있다. 현재 확률강우량도 개선 및 보완연구(MLTM, 2011)에 제시되어 있는 ARF와 국내 많은 연구에서 산정되어 있는

Received June 25, 2015/ revised September 8, 2015/ accepted October 27, 2015

Copyright © 2015 by the Korean Society of Civil Engineers

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

^{*} 정회원·이피에스엔지니어링 대리 (EPS Engineering·good757@epseng.com)

^{**} 정회원·단국대학교 공과대학 토목환경공학과 석사과정 (Dankook University·sukhoon0911@naver.com)

^{***} 종신회원·교신저자·단국대학교 공과대학 토목환경공학과 교수 (Corresponding Author·Dankook University·bskang@dankook.ac.kr)

ARF (Lee, 1987; Kim et al., 1992; Lee, 2006; Lee, 2011 등)는 모두 지상강우관측소의 지점강우를 활용하여 산정된 면적고정 형 ARF이다. 이러한 면적고정형 ARF는 지점관측밀도가 낮을 경우 공간분포를 효과적으로 반영하기 어렵다. 또한 면적강우와 지점강우 가 각각 연 최댓값의 독립적 빈도분석을 통해서 ARF를 산정하므로 동시간회(Synchronized)되어 있지 않기 때문에 현실적 수치로 간주되 기 어렵다. 다시 말해 기준면적 내 모든 지점에서 특정빈도의 확률강수 량이 동시에 발생하는 경우를 가정한 ARF값이기 때문에 이는 실제 강우사상에 비하여 ARF의 과다산정 기능성을 내포하게 된다. 하지만 이를 실강우사상을 이용하여 비교 검토한 연구사례는 많지 않다.

최근 레이더 강우, 위성 영상 등 강우의 공간분포를 고해상도로 관측할 수 있는 수단이 가용하게 되었지만 레이더 강우의 정확성 및 누적된 관측자료의 제약 등의 어려움으로 인하여 호우중심형 ARF 연구사례가 많지 않았다. 하지만 고해상도의 원격탐사자료를 활용하게 되면 현실적인 공간분포를 효과적으로 반영할 수 있어, 개별 강우사상에 대하여 호우중심과 기준면적의 중심을 일치시켜 ARF산정을 수행하고, 면적강우와 지점강우를 동시간적으로 산정 하므로 현실적인 ARF를 산정할 수 있다. 국외의 경우 Bacchi and Ranzi (1996)는 지점강우를 활용하여 크로싱 계수(rate of crossing)을 산정한 다음 레이더 강우와 결합하여 ARF를 산정하였 으며. Overeem et al. (2009a; 2009b; 2010)은 1997~2007년 약 11년에 해당하는 레이더 강우를 활용하여 지점강우와의 보정 및 레이더 강우의 지점별 빈도해석을 실시하여 레이더 확률강우량을 생성한 후 ARF를 산정하였다. Olivera et al. (2008)는 면적강우량 산정 시 강우의 형상을 조금 더 고려하기 위하여 면적의 형태를 타원으로 설정하였고 타원의 장단축비는 1:1에서 5:1까지 변경시켜 면적강우량을 산정하였다. 최근에 국내에서는 레이더의 수문관측신뢰 도를 높이기 위하여 이중편파 레이더가 도입됨에 따라 기존의 단일편 파 레이더에 비해 강우 추정능력이 많이 향상되었다(Kang et al., 2005; Choi, 2012; Jeon et al., 2012; Jeong et al., 2014 등). 본 연구에서는 개별 사상에 대해 동시간의 면적강우와 지점강우를 산정할 수 있으며, 강우의 공간분포 특성을 효과적으로 반영할 수 있는 이중편파 레이더 강우를 활용하여 호우중심형 ARF를 산정하고 자 한다. 동일한 호우사상에 대해서 호우의 형태에 적합한 면적강우량 산정을 위해 기준면적의 장단축비와 장축의 방향을 설정하여 기준면 적 내 최적면적강우량을 산정하였다. 또한, 전선형 강우와 태풍 사상과 같이 호우의 형태가 다른 ARF의 변화 특성을 분석하고자 한다.

2. 레이더 강우를 이용한 호우중심형 ARF 산정 방법

2.1 이중편파 레이더

기존 레이더인 단일편파 레이더는 강수입자의 수평종단면의

후방산란신호를 수신하여 강수강도를 측정하기 때문에 목표물의 형상을 구분할 수 없으므로 목표강수의 반사강도만을 관측한다. 하지만 이중편파레이더는 반사강도뿐 아니라 강수유형을 분류할 수 있기 때문에 약가상시 강수 및 강설량의 추정, 구름의 물 함량분석 등의 연구에 유용하게 활용할 수 있다(Ryzhkov et al., 2003). 이중편 파 레이더를 통해 관측되는 변수는 수평·수직 반사도(Reflectivity, Z_H, Z_V), 차등반사도(Differential Reflectivity, Z_{DR}), 비차등위상 (Specific Phase Difference, K_{DP}), 차등위상(Differential Phase Difference, **Φ**_{DP}), 상호상관계수(Cross Correlation, *ρ*_{HV}), 수상체 구분(Hydro Class, HC) 등이 있으며, 수평편파와 수직편파를 동시 에 이용하여 강우를 추정하기 때문에 강수의 강도뿐 아니라 강수입 자의 종류도 구분할 수 있다. 이러한 관측변수를 이용하여 산정한 Z-R관계식은 다음과 같다(Bringi et al., 2001; Ryzhkov et al., 2005).

$$R(Z_H) = 1.70 \times 10^{-2} \times Z_H^{0.714} \tag{1}$$

$$R(Z_{H}, Z_{DR}) = 6.70 \times 10^{-3} \times Z_{H}^{0.927} \times Z_{DR}^{-3.43}$$
(2)

$$R(K_{DP}) = 44.0 |K_{DP}|^{0.822} sign(K_{DP})$$
(3)

여기서, R(Z_H)는 수평편파반사도, R(Z_{DR})는 차등반사도, R(K_{DP}) 는 비차등위상차를 활용하여 추출한 강우량이다.

레이더 영상을 생성하는 방법에는 PPI, CAPPI, LEMAP, BASE, CMAX 등이 있으며 레이더 영상을 생성하는 방법에 따라 강우량 값이 달라진다. 본 연구에서는 PPI, CAPPI, LEMAP 3가지로 구분하여 레이더 영상을 생성하였으며, 위에서 설명한 레이더 강우 추정방법과 조합하여 1개의 레이더 파일로부터 총 9개의 레이더 강우장을 생성하여 분석에 활용하였다.

2.2 면적감소계수(ARF) 산정절차

강우는 강우중심에서 가장 높은 강우강도를 가지며 중심으로부 터 멀어질수록 강우강도가 감소하는 특성을 가지고 있기 때문에 면적강우량은 기준면적이 증가할수록 작어지는 특성을 가지고 있 다. 강우중심에서의 최댓값과 면적대표값 간의 비를 ARF (Area Reduction Factor; 면적감소계수)라 하며, ARF는 기준면적의 형 상, 방향, 호우사상의 종류 등에 따라 변화하는 특성을 보인다. 일반적으로 면적감소계수 산정 방법은 크게 두 가지로 나누어져 있다. 첫 번째 방법은 국내 많은 연구에서 실시한 면적고정형 ARF 로 이는 강우사상과 독립적으로 면적을 고정시켜 해석하는 방법이 며, 두 번째 방법은 개개의 강우사상에 대하여 강우 중심이 면적 중심에 위치하도록 해석하는 호우중심형 ARF이다. 본 연구에서는



Fig. 1. Flow Chart of this Study



Frontal rainfall (2012.08.23. 07:00~08:00 1hr)



Typhoon SANBA (2012.09.17. 11:00~12:00 1hr)

Fig. 2. (a) Estimate of Areal Rainfall by Ellipse (Left), (b) Estimate of Areal Rainfall by Circle (Right)

개별강우사상의 레이더영상을 활용하여 호우중심형 ARF를 산정 하며, 지속시간, 기준면적(타원)의 크기, 장단축비, 장축의 방향에 따른 ARF의 변화를 호우형태에 따라 각각 산정하고자 한다. 전체적 인 분석절차는 Fig. 1과 같다.

2.3 강우형상에 따른 타원 장축의 방향성 결정

호우중심형 ARF산정 방법에서는 면적고정형 방법과 달리 강우 의 이동방향과 방향성을 고려하여 중심강우의 위치가 결정된다. 따라서 강우가 이동함에 따라 강우의 분포와 형상이 달라지기 때문에 각각의 중심강우 위치별 타원 장축의 방향성도 달라진다. 타원 장축의 방향성을 결정하기 위하여 중심강우 좌표로부터 각도 별 50km 길이의 직선을 작성하였다. 최적의 방향각을 결정하기 위하여 각도별 선상에 있는 레이더 강우값들을 추출하고 추출된 강우값으로부터 왜곡도 분석을 실시 하여, 음의 왜곡도값이 가장 클 때의 각도를 방향각으로 결정하였다. 음의 왜곡도는 분포의 꼬리가 좌로 긴 형상을 의미하며 강수강도가 큰 값에 모여 있음을 의미한다. 직선의 식은 다음과 같다.

$$y = \tan\theta(x - a) + b \tag{4}$$

여기서, θ는 타원 장축의 방향각이며, θ의 범위는 0°~175°이며 5°간격으로 증가시켰다. a는 중심강우의 x좌표, b는 중심강우의 y좌표이다.

2.4 강우형상에 따른 최적 면적강우량 산정

면적고정형 ARF 산정 방법에서는 면적강우량 산정 시 면적의 크기와 상관없이 면적의 형태를 원형으로 고정하여 중심으로부터 면적을 증가시키는 방법을 택하였지만, 이 방법은 전선형 강우사상 의 경우 강우 형상과 상이한 면적강우량을 산정하게 된다. 본 연구에 서는 강우의 형상에 따른 최적 면적강우량을 산정하기 위하여 면적의 형태를 원 또는 타원으로 설정하여 면적강우량을 산정하였 다. 타원의 회전 각도는 선행 절차에서 선정된 각도를 사용하였다. 면적의 크기는 30, 80, 150 300, 530, 700, 900, 1250, 2000km²로 설정하였으며, 원형 및 타원으로 호우 형태를 결정하기 위해 장단축 비는 1:1(원)~4:1(타원)까지는 장축을 0.5간격으로 변경시켜 면적 강우량을 산정하였으며, 4:1(타원)~15:1(타원)까지는 장축을 1간 격씩 변경시켜 면적별로 최대 면적강우량이 발생하는 타원의 장단 축비를 찾고 그때의 면적강우량을 최적 면적강우량으로 선정하였 다. 즉, 호우의 실제 형태에 가장 유사한 면적강우량을 산정하는 방법으로서, 전선형 강우는 강수영역이 좁고 긴 형상을 띄기 때문에 타원으로 설정하는 것이 타당하며, 태풍 사상은 주로 넓은 원형에 가까운 형태로 발생한다(Fig. 2). 따라서 면적의 형태를 원으로 고정하였을 때 산정한 면적강우량보다 본 연구에서 실시한 방법이 보다 합리적이라고 판단된다.

2.5 호우중심형 ARF 산정

위 절차에서 산정 된 중심강우량과 면적강우량을 이용하여 강우 사상별 지속시간 1, 2, 3, 6, 12, 18, 24시간에 해당하는 호우중심형 ARF를 산정하였다. ARF 산정을 위한 수식은 다음과 같다(Olivera et al., 2008).

$$ARF_{A_0} = \frac{\int \frac{1}{A_0} R_P dA}{R_{P_0}}$$
(5)

여기서, ARFA0는 면적 A0에 해당하는 ARF, A0는 원 또는 타원의 면적(km²), Rp는 원 또는 타원 내에 위치한 레이더 강우량(mm), Rp0는 중심강우의 강우량(mm)이다.

3. 호우중심형 ARF 산정 기법의 적용 및 결과

3.1 레이더 자료 수집 및 대상 지역

비슬산 이중편과 레이더는 경북 청도국 각분면 오산시 비슬산 조화봉에 설치되어 국토교통부 한강홍수통제소에서 운영하고 있으 며, 관측 유표반경은 약 100km이고 관측반경 내에는 약 70%가 낙동강 권역으로 낙동강, 태화강, 형상강 등의 유역이 포함되어



Fig. 3. Study Area and Location of the Rain Gauge Station

있다(Jeon et al., 2012). 레이더 강우 활용성 평가와 ARF산정을 위해 2012.08.23. 07:00~2012.08.24. 14:00(총 31시간) 전선형 강우사상과 2012.09.16. 03:00~2012.09.17. 15:00(총 36시간) 태풍 산바사상을 선정하였다. 레이더 강우는 한강홍수통제소에서 품질관리(Quality Control)를 거친 UF파일을 제공받았으며, 레이 더 강우의 활용성 평가를 위해 낙동강 유역 내에 지상관측소를 다음과 같이 선정하였다(Fig. 3).

3.2 레이더 강우 활용성 평가 결과

비슬산 이중편파 레이더의 영상 생성방법과 관측변수들의 조합 으로 총 9개 레이더 강우를 생성하였다. 전선형 강우는 11개의 지상 관측소, 태풍 산바 사상은 9개의 관측소를 선정하여 레이더 강우의 활용성 평가를 진행하였다. 각각의 지상 관측소에서 측정된 강우량과 동시간대의 레이더 강우 중 관측소에 위치에 해당하는 격자의 레이더 강우량을 비교 분석하였다. 두 강우 사상 모두 PPI의 R(K_{DP}) 레이더 강우의 시계열과 관측소 시계열의 패턴이 유사한 것을 확인할 수 있었고, 정량적 차이 또한 크지 않은 것으로 평가되었 다. 각 관측소 별 지상 강우량과 레이더 강우량의 절대오차 및 절대오차율 분석 결과는 Tables 1 and 2와 같다.

이중편과 관측변수를 활용하여 추정된 두 개의 강우사상에 대한 PPI의 R(K_{DP}) 경우 전선형 강우는 약 1.65mm, 태풍 산바는 약 1.92mm의 차이를 보였다. 단일편과 관측변수를 활용하여 추정된 PPI의 R(Z_H)는 전선형 강우 약 2.51mm, 태풍 산바 약 3.15mm의 차이를 보여 이중편파 관측변수를 활용하여 강우 추정 시 관측능력 이 항상된 결과를 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 PPI의 R(K_{DP}) 가 관측능력이 가장 우수하였기 때문에 PPI의 R(K_{DP})레이더 강우

	Average Absolute (Percentage) Error									
Frontal rainfall	PPI (mm)				CAPPI (mm)		LEMAP (mm)			
Gauge station	R(Z _H)	R(Z _{DR})	R(K _{DP})	R(Z _H)	R(Z _{DR})	R(K _{DP})	R(Z _H)	R(Z _{DR})	R(K _{DP})	
Hyeonpung	4.18	7.20	3.21	4.15	7.08	2.97	4.94	6.80	2.79	
	(22.6)	(52.5)	(20.3)	(23)	(52.1)	(16.7)	(28.4)	(51.1)	(17.7)	
	(23.4)*	(31.8)*	(10.3)*	(24)*	(25.1)*	(9.4)*	(27.4)*	(24.1)*	(14.8)*	
Daegu	5.49	1.04	1.20	5.79	1.98	2.67	5.61	1.58	1.69	
	(34.9)	(12)	(16.5)	(35.2)	(16.1)	(19.9)	(35.6)	(13.1)	(17.7)	
	(41.5)*	(0.5)*	(5.2)*	(43.8)*	(7.4)*	(16.9)*	(42.4)*	(2.8)*	(8.8)*	
Miryang	1.86	0.73	2.35	2.09	0.85	1.80	1.69	0.40	2.51	
	(34.5)	(12.7)	(41.9)	(40)	(15.2)	(31.5)	(31.9)	(7.1)	(44.8)	
	(39.2)*	(13.4)*	(39.7)*	(44)*	(17.9)*	(32.2)*	(35.6)*	(6.7)*	(42.6)*	
Yeongcheon	5.07	2.38	1.85	5.43	2.46	2.11	5.21	2.12	1.99	
	(45.3)	(25.4)	(17)	(49.7)	(21.9)	(19.1)	(48.4)	(20.6)	(17.1)	
	(48.3)*	(17.5)*	(9.0)*	(51.7)*	(22.3)*	(13.2)*	(49.6)*	(18.5)*	(7.3)*	
Jinju	2.14	2.78	1.61	2.31	2.22	1.65	2.14	2.78	1.61	
	(36.3)	(45.3)	(26.2)	(39.7)	(37.6)	(27.4)	(36.3)	(45.3)	(26.2)	
	(17.9)*	(29.6)*	(0)*	(22)*	(14.7)*	(3.7)*	(17.9)*	(29.6)*	(0)*	
Euiseong	1.08	0.84	1.37	0.87	1.05	1.33	0.87	1.05	1.33	
	(26.9)	(19.5)	(33.4)	(21.4)	(25.5)	(33.9)	(21.4)	(25.5)	(33.9)	
	(27.1)*	(21.1)*	(34.2)*	(21.7)*	(26.3)*	(33.3)*	(21.7)*	(26.3)*	(33.3)*	
Cheongsong	1.32	1.26	0.83	1.32	1.26	0.83	1.72	2.64	2.22	
	(29.2)	(28.8)	(18.5)	(29.2)	(28.8)	(18.5)	(39.8)	(64)	(53.9)	
	(23.5)*	(0.2)*	(1.5)*	(23.5)*	(0.2)*	(1.6)*	(1.1)*	(42.9)*	(42.9)*	
Andong	1.74	0.80	0.25	1.84	2.36	0.25	2.06	1.45	0.71	
	(58.1)	(26.7)	(8.4)	(61.3)	(78.5)	(18.4)	(68.8)	(48.2)	(23.7)	
	(58.1)*	(26.7)*	(8.4)*	(61.3)*	(78.5)*	(8.4)*	(68.8)*	(48.2)*	(23.7)*	
Bunam	2.21	1.60	1.22	2.22	1.54	1.22	1.62	1.51	0.81	
	(42.8)	(29.3)	(19.4)	(42.8)	(29.3)	(19.4)	(30.2)	(24)	(12.5)	
	(41.2)*	(13.2)*	(8.4)*	(41.2)*	(17.6)*	(8.4)*	(30.1)*	(5.2)*	(7)*	
Hapcheon	4.62	5.06	2.21	5.76	5.03	2.77	4.56	5.35	2.53	
	(28.6)	(39.4)	(16)	(36.8)	(34.4)	(19.1)	(26.6)	(43)	(24.1)	
	(30.5)*	(28.9)*	(6.8)*	(39)*	(21.7)*	(15.3)*	(28.4)*	(31.7)*	(1.2)*	
Sancheong	4.96	3.08	2.06	5.58	3.22	2.53	4.96	3.08	2.06	
	(41.3)	(32.3)	(20.5)	(48.4)	(32.2)	(22.9)	(41.3)	(32.3)	(20.5)	
	(43.5)*	(5.3)*	(4.9)*	(49.2)*	(11.1)*	(12.9)*	(43.5)*	(5.3)*	(4.9)*	
Average	3.15	2.43	1.65	3.39	2.64	1.83	3.22	2.61	1.84	
	(36.4)	(29.4)	(21.6)	(38.9)	(33.8)	(22.4)	(37.1)	(34)	(26.6)	
	(35.8)*	(17.1)*	(11.7)*	(38.3)*	(22.1)*	(14.1)*	(33.3)*	(21.9)*	(17)*	

 Table 1. Analysis of Average Absolute (Percentage) Error Comparison between Rain Gauge Stations and Radar Rainfall (Frontal Rainfall, 2012.8.23 07:00 ~ 2012.8.24 14:00, D=1hr) (unit : mm (%))

*Average absolute percentage error for maximum duration (Frontal rainfall D=31hr)

를 이용하여 전선형 강우사상과 태풍 산바사상에 대하여 호우중심 형 ARF를 산정하고자 한다.

3.3 강우형상에 따른 타원 장축의 방향성 결정 및 최적 면 적강우량 산정

지금까지 면적감소계수(ARF)를 산정하기 위한 사전절차로 비

슬산 이중편과 레이더 강우의 활용성 평가를 실시하였으며, 가장
좋은 결과를 보인 PPI의 R(K_{DP})레이더 강우를 이용하여 전선형
강우사상과 태풍 산바 사상에 대하여 호우중심형 ARF를 산정하고
자 한다. 먼저 레이더 영상의 타원면적 장축의 방향성을 결정하였다.
각 각도별 장축선상의 격자를 따라 추출된 강우값들을 이용하여
다음 Fig. 4와 같이 히스토그램을 작성하고 분포의 왜곡도 분석을

Turnhoon SANDA	Average Absolute (Percentage) Error									
Typhoon SAMBA	PPI (mm)				CAPPI (mm)		LEMAP (mm)			
Gauge station	R(Z _H)	R(Z _{DR})	R(K _{DP})	R(Z _H)	R(Z _{DR})	R(K _{DP})	R(Z _H) R(Z _{DR})		R(K _{DP})	
	2.15	3.46	1.18	2.39	3.03	1.30	2.24	2.95	1.56	
Hyeonpung	(47.9)	(76.1)	(25.5)	(48.6)	(72.3)	(24.1)	(41.7)	(75.3)	(29.1)	
	(13.4)*	(49.2)*	(12.7)*	(9.5)*	(43.5)*	(7.9)*	(14.2)*	(23.5)*	(16.1)*	
	2.28	2.65	1.80	2.40	2.26	1.67	3.99	4.26	3.98	
Daegu	(28.1)	(35.0)	(25.4)	(29.7)	(32.2)	(23.1)	(45.0)	(51.2)	(46.8)	
	(21.2)*	(14.8)*	(0.2)*	(27.6)*	(4.3)*	(8.2)*	(15.3)*	(8.3)*	(7.2)*	
	1.95	2.10	2.02	2.21	2.16	2.40	3.52	3.15	3.40	
Miryang	(23.4)	(29.2)	(23.3)	(26.0)	(29.2)	(27.1)	(32.5)	(35)	(34.8)	
	(4.2)*	(15.9)*	(0.6)*	(8.3)*	(10.6)*	(8.5)*	(15.8)*	(8.9)*	(24.5)*	
	2.77	3.48	2.57	3.8	3.21	3.34	3.94	4.39	4.12	
Yeongcheon	(43.1)	(48.3)	(36.3)	(55.7)	(50.9)	(48.7)	(58.4)	(65.9)	(59.7)	
	(28.4)*	(3.3)*	(15.4)*	(49.5)*	(32.9)*	(37.9)*	(14.9)*	(7.4)*	(28.6)*	
	2.95	2.50	1.86	3.89	2.63	3.01	4.99	5.57	4.66	
Gimcheon	(35.4)	(25.8)	(20.4)	(43.9)	(29.8)	(29.9)	(49.4)	(45.2)	(40.1)	
	(25.0)*	(4.7)*	(5.3)*	(35.5)*	(13.7)*	(19.9)*	(31.6)*	(2.4)*	(4.2)*	
	4.17	2.98	3.67	4.67	3.44	4.05	5.11	4.27	4.83	
Jinju	(34.5)	(29.4)	(35.0)	(41.0)	(31.3)	(37.6)	(43.3)	(36.7)	(40.4)	
	(40.7)*	(15.5)*	(24.4)*	(47.7)*	(28.4)*	(33.8)*	(37.7)*	(17.9)*	(25.1)*	
	1.67	1.27	1.10	1.90	1.36	1.20	3.30	3.24	3.12	
Euiseong	(30.9)	(24.7)	(22.6)	(35.4)	(25.8)	(22.8)	(70.4)	(70.5)	(68.1)	
	(25.3)*	(4.1)*	(9.4)*	(29.9)*	(9.7)*	(2.1)*	(13.2)*	(8.8)*	(16.5)*	
	1.59	1.2	0.76	1.59	1.20	0.76	2.53	2.52	2.46	
Cheongsong	(37.2)	(26.8)	(16.5)	(37.2)	(26.8)	(16.5)	(56.9)	(55.8)	(53.1)	
	(36.0)*	(21.5)*	(5.2)*	(36)*	(21.5)*	(36)*	(45.6)*	(40.5)*	(28.5)*	
	3.02	2.31	2.33	3.02	2.31	2.33	4.64	4.63	4.85	
Andong	(39.2)	(27.5)	(29.3)	(39.2)	(27.5)	(29.3)	(66.8)	(67.5)	(75.2)	
	(23.8)*	(6.1)*	(13.2)*	(23.8)*	(6.1)*	(13.2)*	(0.2)*	(14.8)*	(25.8)*	
	2.51	2.44	1.92	2.87	2.40	2.23	3.81	3.89	3.66	
Average	(35.5)	(35.9)	(26.0)	(39.6)	(36.2)	(28.8)	(51.6)	(55.9)	(49.7)	
	(24.2)*	(15.0)*	(9.6)*	(29.8)*	(19)*	(15.2)*	(23.4)*	(14.7)*	(17.1)*	

Table 2. Analysis of Average Absolute (Percentage) Error Comparison between Rain Gauge Stations and Radar Rainfall (Typhoon SANBA, 2012.9.16 03:00 ~ 2012.9.17 15:00, D=1hr) (unit : mm (%))

*Average absolute percentage error for maximum duration (Typhoon SANBA D=36hr)

실시하여 음의 왜곡이 가장 큰 축을 방향축으로 설정하였다. 이러한 방법은 면적강우를 최대로 만드는 장축의 방향성을 결정하는데 효과적으로 활용되었으며, 그 결과 45°일 때 음의 왜곡도 값이 가장 크게 산정되어 장축의 방향각으로 결정되었다.

강우사상별 최적 면적강우량의 면적 형상을 분석한 결과 전선형 강우사상에서는 타원일 때 최대 면적강우량이 발생한 사례가 약 73.2%로 지배적 이였으며, 태풍 산바의 경우에는 약 50.6%의 비율로 면적의 형태가 원일 최대 면적강우량이 발생한 것을 알 수 있었다. 호우중심형 면적감소계수 산정 시에는 강우의 형상에 따라 면적의 형태를 원과 타원으로 실시한 방법이 강우의 공간분포 를 적절히 반영 할 수 있는 방법이라 판단된다.



Fig. 4 Histogram According to Angle for Skewness Analysis

사상의 강우량을 0~1사이의 값으로 표준화하여 강수면적의 형태를 ARF 곡선과 비교하였다(Fig. 5). 전선형 호우사상은 강수영역이 좁고 긴 밴드형상을 보이는 것이 일반적이므로 타원형의 기준면적

3.4 호우중심형 ARF 산정 결과 및 토의

위 절차에서 산정 된 호우중심형 ARF를 각 지속시간(1, 2, 3, 6, 12, 24시간)에서 산정된 최대 ARF값의 ARF-Curve와 해당



Fig. 5. Result of Estimating ARF in Frontal Rainfall & Typhoon SANBA

이 적합하며 강수밴드의 공간적 이동이 시간에 따라 크게 나타나지 않는다. 태풍은 중심의 강한 저기압특성으로 인하여 태풍의 눈 부근에서 강우강도가 가장 높은 특징을 갖는다. 회전과 이류를 동시에 겪으면서 공간적으로 이동하기 때문에 지속시간을 길게 설정할수록 강수영역은 넓게 퍼져 나타나게 된다. 이러한 경우 호우의 중심이 명확하게 결정되기 어려운 경우가 종종 나타날 수도 있다. 이는 이동성이 강한 호우특성 및 지속시간의 변화에 따라 최대 지점강우량의 위치가 이동하기 때문이다. Fig. 5에 해당 하는 시간의 전선형 강우와 태풍 산바 사상의 중심강우량과 면적강 우량은 Table 3과 같다.

강우 형태에 따른 1~24시간사이의 지속시간별 ARF곡선을 비교 해보면 기준면적 1000km²에서 전선형강우의 경우 0.52~0.75의 값을 보이고, 태풍의 경우 0.64~0.75의 값을 보이고 있어 전선형 강우에 비하여 좁은 범위에서 ARF값이 형성되고 있음을 볼 수 있다(Fig. 6) 주목할 만한 부분은 전선형강우의 경우 지속시간이 길어질수록 ARF가 증가하는 반면, 태풍의 경우에는 지속시간이 길어짐에 따라 ARF는 오히려 감소하고 있다는 것이다. 따라서 비교적 짧은 1~3시간의 지속시간에서는 태풍사상의 ARF가 전선 형 강우에 비하여 크게 산정되는 경항을 보이고, 6~12시간의 긴 지속에서는 반대로 전선형 강우에 비해 작게 산정되는 모습을 확인할 수 있다. 이는 지속시간을 길게 설정할수록 이동과정에서의 시간대별 강수영역이 누적되어 넓은 공간적 분포가 ARF에 반영되 기 때문이다. 태풍 산바 사상도 역시 태풍의 일반적인 패턴을 그대로 보여주고 있다.

지속시간별 ARF에 대한 Box plot을 작성하여 전선형 강우와 태풍 산바 사상의 강우 형태에 따른 불확실성은 Fig. 7에 비교하였 다. 태풍과 전선형의 모든 강우사상에서 기준면적이 증가할수록 ARF가 작아지는 일반적인 패턴은 공통적으로 확인되었으나, 1~3 시간의 지속시간에서 전선형 강우에 비해 태풍 산바 사상의 ARF 불확실성이 크게 나타남을 확인하였다. 이는 태풍의 특성이 반영된 결과로 강우의 이동성이 강하여 최대 지점강우량의 위치가 변화하 며 강우의 형상이 집중되지 못하기 때문에 나타나는 결과로 판단된

	Tab	e 3. Pc	oint Rain	fall and <i>l</i>	Areal R	ainfall	of the	Maximum A	ARF Value
--	-----	---------	-----------	-------------------	---------	---------	--------	-----------	-----------

Areal	Dura-tion	Point Rainfall	Area (km ²)									
Rainfall	(hr)	(mm)	30	80	150	250	300	530	700	900	1250	2000
	1	53.1	46.5	41.6	38.1	35.8	34.2	32.2	29.6	26.9	25.3	22.4
	2	85.7	80.9	76.9	72.9	69.9	67.1	63.4	58.6	53.1	47.0	42.8
Frontal	3	117.7	111.3	105.3	98.2	92.5	88.8	84.3	78.6	72.3	68.1	63.6
(mm)	6	164.8	160.1	152.7	143.9	135.0	128.4	125.0	121.0	116.5	109.3	98.9
	12	177.8	173.5	168.3	160.5	151.3	143.0	139.8	137.8	135.1	130.7	122.3
	24	243.5	235.4	225.1	214.7	205.1	195.4	186.7	182.2	178.5	173.2	163.8
Typhoon SANBA (mm)	1	59.6	57.5	55.2	53.0	50.6	48.7	47.4	45.9	44.6	42.1	36.3
	2	100.6	97.6	92.6	86.9	81.8	77.6	74.6	72.2	69.8	66.5	61.0
	3	110.7	107.0	100.3	93.5	87.4	82.9	79.8	78.6	77.5	75.5	71.0
	6	146.0	138.2	129.4	120.6	112.4	106.7	102.8	100.6	99.0	96.3	89.1
	12	190.1	179.9	167.6	155.3	143.7	136.1	131.1	128.3	126.2	122.3	113.2
	24	244.1	230.2	212.9	197.2	183.9	174.2	167.7	163.8	160.9	156.4	145.8



Fig. 6. ARF-Curve of Frontal Rainfall & Typhoon SANBA



Fig. 7. Result of ARF Box Plot in Frontal Rainfall & Typhoon SANBA

다. 6시간이상의 지속시간은 단일 호우사상에서 취할 수 있는 샘플 이 적어 불확실실성분석의 의미가 없었다. 본 연구에서 산정한 ARF는 기존에 제시된 ARF보다 강우의 이동성, 방향성, 공간분포 를 더욱 더 정말하게 반영한 결과이며, ARF 산정함에 있어 강우의 크기뿐만 아니라 강우의 공간분포 및 형상에 맞는 ARF를 산정하는 것이 현실적인 ARF를 산정하는 방법이라 사료된다. 추후 설계빈도 에 가까운 높은 재현기간을 갖는 레이더 강우 사상을 추가로 확보하 여 ARF를 산정한다면, 설계강우 산정 시 활용할 수 있는 현실적인 ARF기준을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

기존에 제시되어 있는 ARF를 공간적으로 보완하는 방법을 제시 하고자 비슬산 이중편파 레이더 강우를 활용하여 낙동강 권역에 대한 호우중심형 ARF를 산정하였다. ARF 산정에 앞서 비슬산 이중편파 레이더의 강우추정능력을 확인하기 위하여 관측소의 지 점강우량과 비교 하였으며, 추정 된 레이더 강우 중 가장 정확도가 높은 레이더 강우를 활용하여 ARF를 산정하였다. ARF산정 시 강우의 형상 및 공간분포 특성을 더욱 더 반영하기 위해 강우의 회전각도 및 면적의 크기별 최적 면적강우량을 산정하여 적용하였 다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 비슬산 이중편파 레이더의 영상 생성방법과 관측변수들의 조합 으로 총 9개의 레이더 강우를 생성하였으며, 관측소 지점강우와 비교 결과 이중편파 관측변수를 활용하여 추정된 두 개의 강우사 상에 대한 PPI의 R(K_{DP})경우 절대평균오차량이 평균 1.65mm, 1.92mm의 차이를 보였으며, 단일편파 관측변수를 활용하여 추정된 PPI의 R(Z_H)의 경우는 약 2.51mm, 3.15mm의 차이를 보여 이중편파 관측변수를 활용하여 강우 추정 시 관측능력이 향상 된 것을 확인할 수 있었다.
- (2) 각 면적의 크기 별 강우의 형상에 따른 최적 면적강우량을 산정하기 위하여 면적의 형태를 원 또는 타원으로 설정하여 면적강우량을 산정하였으며, 강우사상별 면적의 형태를 분석 한 결과 전선형 강우사상에서는 타원의 형태가 지배적이였으 며, 태풍 산바사상의 경우 원의 형태가 지배적이였다. 따라서, 면적강우량 산정 시 강우형상에 맞는 적절한 기준면적의 형상 을 이용해야 강우의 형상 및 공간분포를 정확히 반영 할 수 있을 것이라 판단된다.
- (3) 강우의 중심강우 선정, 회전각도 결정, 최적 면적강우량 산정을 통해 강우의 이동성, 방향성, 공간분포를 고려한 호우중심형 ARF를 산정할 수 있었다. 그 결과 지속시간이 길어질수록 ARF값이 증가하고, 기준면적이 작아질수록 ARF값이 감소하 는 ARF의 일반적인 특성이 나타났다. 전선형 강우와 태풍 산바사상의 최대 ARF 분석 결과, 전선형에 비하여 태풍의

ARF값의 변동 폭이 작은 것을 알 수 있었고, 전선형은 지속시간 에 따라 ARF가 증가하지만, 태풍의 경우에는 오히려 ARF가 감소하는 모습을 볼 수 있었다. 이 결과 지속시간이 비교적 짧은 1~3시간에서는 태풍 산바 사상의 ARF가 크게 산정되었 으나, 지속시간이 긴 6~24시간에서는 ARF가 전선형 강우에 비해 작게 산정됨을 확인하였다.

(4) 본 연구에서 산정 한 ARF는 기존에 제시된 ARF보다 강우의 이동성, 방향성, 공간분포를 더욱 더 정밀하게 반영한 결과이며, ARF 산정함에 있어 강우의 크기뿐만 아니라 강우의 공간분포 및 형상에 맞는 ARF를 산정하는 것이 현실적인 ARF를 산정하는 방법이라 사료된다. 추후 높은 재현기간을 갖는 레이더 강우 사상을 추가로 확보하여 ARF를 산정한다면, 경제적인 수공구조물 설계를 위한 설계홍수량을 산정하는데 있어 호우중 심형 ARF가 좋은 대안이 될 수 있다고 판단된다.

본 연구에서 산정한 ARF는 비슬산 이중편파 레이더에 의해 관측되는 낙동강 권역을 중심으로 산정하였으며, 구축 된 관측자료 가 부족하여 빈도해석을 하지 못한 아쉬움이 존재한다. 하지만 향후 전국적으로 이중편파 레이더가 설치 될 예정이며, 관측자료가 충분해 진다면 본 연구에서 제시한 ARF 산정방법이 크게 활용될 수 있을 것이라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(11기술혁 신C06)에 의해 수행되었습니다.

References

- Bacchi, B. and Ranzi, R. (1996). "On the derivation of the areal reduction factor of storms." *Atmospheric Research*, Vol. 42, No. 1, pp. 123-135.
- Bringi, V. N. and Chandrasekar, V. (2001). *Polarimetric Doppler weather radar: principles and applications*, Cambridge University Press, United Kingdom.
- Choi, W. S. (2012). *Assessment of dual polarization radar on hydrology field*, Master's theses, Sejong University, Seoul, South Korea (in Korean).
- Jeon, B. G., Lee, C. K. and Kim, Y. S. (2012). "Evaluation of rainfall measurement capability of dual polarization radar." *Journal*

of Korea Society of Hazard Mitigation, Vol. 12, No. 2. pp. 215-224 (in Korean).

- Jeong, J. Y., Yu, M. S. and Yi, J. E. (2014). "Runoff analysis using dual polarization radar and distributed Model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, pp. 801-812 (in Korean).
- Kang, M. Y., Jang, M., Lee, D. I., Seo, K. J., Kim, K. I., Yoo, C. H. and Kim, J. H. (2005). "Quantitative rainfall estimation using dual polarization radar." *Journal of Korea Meteorological Society*, Vol. 2005, pp. 154-155 (in Korean).
- Lee, D. Y. and Choi, H. K. (2007). "Comparison and analysis of peak flow by areal reduction factor." *Journal of Industrial Technology*, Vol. 27, No. A, pp. 95-102 (in Korean).
- Lee, J. H., Kim, D. G., Koh, W. J. and Lee, Y. Y. (2006). "Estimation of areal reduction factor for the younsan river basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 10, pp. 813-822 (in Korean).
- Lombardo, F., Napolitano, F. and Russo, F. (2006). "On the use of radar reflectivity for estimation of the areal reduction factor." *Natural Hazards and Earth System Science*, Vol. 6, No. 3, pp. 377-386.
- Marshall, J. S. and Palmer, W. M. K. (1948). "The distribution of raindrops with size." *Journal of Meteorology*, Vol. 5, No. 4, pp. 165-166.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM) (2011). *Improvement and supplement of probability rainfall*, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Korea (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM) (2012). *Guideline of design flood estimation*, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Korea (in Korean).
- Olivera, F., Choi, J., Kim, D. and Li, M. H. (2008). "Estimation of average rainfall areal reduction factors in Texas using NEXRAD data." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 13, No. 6, pp. 438-448.
- Overeem, A., Buishand, T. A. and Holleman, I. (2009). "Extreme rainfall analysis and estimation of depth-duration-frequency curves using weather radar." *Water Resources Research*, Vol. 45, No. 10, W10424.
- Overeem, A., Buishand, T. A., Holleman, I. and Uijlenhoet, R. (2010). "Extreme value modeling of areal rainfall from weather radar." *Water Resources Research*, Vol. 46, No. 9, W09514.
- Ryzhkov, A. V., Giangrande, S. E. and Schuur, T. J. (2005). "Rainfall estimation with a polarimetric prototype of WSR-88D." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 44, No. 4, pp. 502-515.
- Yoo, C. S. and Kim, K. J. (2004). "Estimation of areal reduction factor using a mixed distribution" *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 37, No. 9, pp. 759-769 (in Korean).