

우량계 강우 자료에 따른 레이더 강우의 지상보정 결과 검토

Evaluation of Ground-Truth Results of Radar Rainfall Depending on Rain-Gauge Data

김 병 수* / 김 경 준** / 유 철 상***

Kim, Byoungsoo / Kim, Kyoungjun / Yoo, Chulsang

Abstract

This study compares various ground-truth designs of radar rainfall using rain-gauge data sets from Korea Meteorological Administration (KMA), AWS and Ministry of Construction and Transportation (MOCT). These Rain-gauge data sets and the Mt. Gwanak radar rainfall data for the same period were compared, and then the differences between two observed rainfall were evaluated with respect to the amount of bias. Additionally this study investigated possible differences in bias due to different storm characteristics. The application results showed no distinct differences between biases from three rain-gauge data sets, but some differences in their statistical characteristics. In overall, the design bias from MOCT was estimated to be the smallest among the three rain-gauge data sets. Among three storm events considered, the jangma with the highest spatial intermittency showed the smallest bias.

key words : radar rainfall, ground-truth, design bias, retrieval bias

요 지

본 연구에서는 레이더 강우의 지상보정(ground-truth)을 위해 사용가능한 기상청(KMA), AWS 및 건설교통부(MOCT) 강우 자료를 다양한 지상보정 설계에 적용하여 비교·평가하였다. 본 연구에서는 동일 기간의 KMA, MOCT, AWS의 우량계 자료와 관악산 레이더 강우 자료를 이용하였으며, 각각 두 관측방법 사이의 차이(오차)를 편의(bias)의 유무 및 크기의 관점에서 평가하였다. 추가로 호우 사상의 특성에 따른 차이도 함께 검토하였다. 그 적용 결과 지상우량계 자료별 편의의 차이는 확연하게 부각되지는 않았으나, 통계 특성치에서는 어느 정도의 차이가 존재함을 확인하였다. 전체적으로 보면 MOCT 우량계 자료를 이용하는 경우가 다른 강우 자료를 이용하는 경우에 비해 편의의 규모가 가장 작은 것으로 파악되었다. 호우 사상별로는 강우의 공간적 간헐성이 가장 큰 장마 기간의 경우가 태풍이나 대류성 강우에 비해 설계편의가 작게 나타나는 것으로 확인되었다.

핵심용어 : 레이더 강우, Ground-Truth, 설계편의, 보정편의

* 정회원 · 고려대학교 사회환경시스템공학과 석사과정 (E-mail : keslo99@korea.ac.kr)

** 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정

*** 정회원 · 고려대학교 사회환경시스템공학과 공학박사 · 교수

1. 서론

레이더는 넓은 지역에 걸쳐 실시간으로 강수현상을 감시하고 지상우량계로는 파악이 불가능한 우량계 틈새로 통과하는 국지적인 호우나 강우 이동 및 강우 상황 등의 파악도 가능한 장점이 있다(엄원근 1995 ; 건설교통부, 2003 ; 2004a ; Ha and North, 1994 ; Ha et al., 2002). 우리나라에서도 강우를 실시간으로 감시할 뿐만 아니라 정량적으로 예측할 목적으로 5대강, 7대 중소하천 및 7개 주요 도시지천에 대하여 전국 강우레이더 설치 기본 계획을 3개년에 걸쳐 수립한 바 있으며(건설교통부, 2002 ; 2003 ; 2004a), 이에 따라 현재 5대강 홍수통제소에서는 강우레이더의 설치에 관한 계획을 수립중이다. 특히, 낙동강과 영산강 수계에 강우레이더 설치 기본 및 실시설계가 수행중이다.

그러나 레이더 관측은 정확도의 확보 측면에서 많은 문제점을 가지고 있다. 이는 레이더가 지상으로부터 일정한 높이의 대기 중에서 전자기파의 반사 및 감쇄 특성을 이용하여 강우강도를 간접적으로 추정하기 때문이다. 레이더가 측정한 전자기파의 반사 강도는 강우량과는 직접적인 선형관계를 보이지 않는다(Jessen et al., 2005). 특히 강우특성과 지형적인 특성에 따라 다르게 나타나는 이들 관계의 비선형성으로 인해 지상우량계 자료 수준의 강우자료 제공은 어려운 것이 현실이다(Wilson and Brandes, 1979 ; Barnston and Thomas, 1983). 즉, 강우레이더 자체만으로 강우를 정량화하고, 수문학적 유출해석을 수행하기에는 한계가 있다. 따라서 레이더 강우의 지상보정과 관련된 연구(Ha and North, 1999 ; Ha et al., 2002 ; Yoo et al., 2006) 및 레이더 강우와 지상우량계와의 합성을 통해 지상우량계 수준의 레이더 강우를 얻고자 하는 연구(Seo, 1998a ; Seo, 1998b) 등은 중요한 의미를 갖는다.

이러한 연구들 중 본 연구에서 다루고자 하는 내용은 소위 ground-truth라 불리는 지상보정 문제이다. 레이더 강우의 지상보정은 근본적으로 레이더 강우의 평균을 보정하는 것에서 출발한다. 즉, 관측방법에 따른 편의(bias)를 어떻게 찾아서 제거하느냐가 일차적으로 중요한 문제이다. 이 문제가 해결되어야만 강우장의 시·공간적 공분산 구조의 보정을 수행할 수 있다. 궁극적으로 평균 및 시·공간적 공분산 구조를 일치시킨 두 자료를 이용함으로써 강우의 공간적인 분포를 포괄적으로 측정할 수 있는 레이더의 장점과 한 지

점에 대해 실제 강우에 가까운 자료를 생산해내는 지상우량계의 장점이 서로 잘 융합될 수 있다(Wilson and Brandes, 1979 ; Barnston, 1990).

현재 레이더 강우가 갖는 편의를 제거하기 위한 다양한 방법론이 제시되고 있다. 이들 방법은 크게 3가지로 구분할 수 있는데, 첫째로 레이더 방정식의 매개변수 조정을 이용한 보정(Calheiros and Zawadzki, 1987 ; Fulton et al., 1998 ; Li and Lai, 2004), 둘째는 지상우량계를 이용한 보정(김진극과 안상진, 2006 ; Kitchen and Blackall, 1992 ; Creutin et al., 1997 ; Anagnostou et al., 1998 ; Seo et al., 1999 ; Steiner et al., 1999), 마지막으로 종합적인 기상관측자료를 이용한 보정(건설교통부, 2003) 등이다. 그러나 보다 근본적인 연구에 해당하는 편위의 자체의 존재를 확인하고 그 특성을 정량화하는 연구는 레이더 수문학 분야에서 많지 않다. Ha and North (1999), Ha et al.(2002), Yoo et al.(2006) 등의 연구를 이 분야의 연구로 분류할 수 있는데, 모두 인공위성을 이용하여 강우를 관측할 경우 발생하는 편위의 제거와 관련된 연구들이다. 아울러 국내·외에서는 대부분의 연구가 편위의 자체에 초점을 맞추기 보다는 편의를 사용하여 실시간으로 레이더 강우량을 보정하기 위한 여러 알고리즘을 개발하려는 연구가 주류를 이루고 있다.

레이더 강우 자료가 가지는 편위의 제거문제는 기본적으로 참값이라고 가정되는 지상우량계 자료가 사용된다. 지상우량계는 여러 개의 지점 우량계가 모여 강우관측망(rain-gauge network)을 형성하는데, 통상 경제 개발과 환경 문제에 균형을 맞출 수 있을 정도의 규모로 설계할 뿐만 아니라 수자원을 개발하고 관리하는데 심각한 결함이 발생하지 않도록 분포시킨다(한국수자원학회, 2000). 그러나 우리나라에 설치된 강우관측망은 우량계의 종류 및 관할 기관별로 다른 관측 성능 및 공간분포를 나타낸다. 레이더 강우의 지상보정 결과는 지상우량계 자료의 절대적인 영향을 받기 때문에 어떤 우량계 자료를 쓰느냐에 따라 그 결과에 차이가 발생한다. 따라서 지상우량계 수준의 보정된 레이더 강우를 얻기 위해서는 양질의 우량계 자료를 사용해야 한다(Steiner et al., 1999).

국내의 강우량 측정은 자기우량관측소와 무인 관측소인 T/M(telemeter) 관측소 등이 혼재해 있고, 주로 기상청과 건설교통부, 한국수자원공사, 농업기반공사 등에서 측정을 하고 있다. 본 연구에서 고려한 지상우량계 자료는 기상청, 건설교통부, AWS에서 측정된 자료이다. 이 세 가지 우량 자료는 관측 단위, 측정

시간 등이 모두 달라 상이한 특성을 가진다. 예를 들어, 기상청 자료는 0.1 mm 단위까지 측정되고, 건설교통부 자료는 1 mm, AWS 자료는 0.5 mm 단위로 강우를 측정한다. 이외에도 측정목적과 측정기기의 종류, 감보정의 유무에 따라 강우값의 질적 또는 양적인 차이가 발생한다.

지상우량계의 관측값은 바람의 영향, 관측기기의 오작동, 사람의 보정 실수 등으로 인해 실질적인 강우량에 비해 과소 측정된다(Legates, 2000). 하지만 본 연구에서는 레이더 강우의 지상보정을 위한 비교 방법(본 연구에서는 설계(design)라 칭함)을 검토하는 경우 기상청, 건설교통부, AWS의 세 가지 우량계 자료를 참값으로 가정하였다. 레이더 강우와 우량계 강우를 비교하는 형태는 모두 세 가지이다. 먼저 design 1은 무강우를 포함한 모든 자료를 사용하는 경우이며, design 2는 레이더 강우가 양(+인 경우만을, design 3은 레이더 및 지상강우가 모두 양(+인 경우만을 고려한다. 모의 강우를 이용하는 경우에는 관측방법에 따른 편이가 없어 설계편의(design bias)의 존재가 잘 부각된다. 그러나 실측자료를 사용하게 되면 설계편의뿐만 아니라 보정편의(retrieval bias)가 동시에 존재하게 되어 레이더 강우와 우량계 강우 사이의 정량적인 차이를 파악하기 어려워진다. 이에 본 연구에서는 지상보정 설계 및 사용되는 지상우량계별로 편이를 포함한 여러 통계적 특성치를 각각 측정하여 비교-평가하고자 한다.

2. 지상보정의 배경이론

x, y 평면에서의 위치 벡터 $\mathbf{r}=(x,y)$ 과 시간 t 에서 무작위 강우장을 $\psi(\mathbf{r},t)$ 라 할 때, $\psi(\mathbf{r},t)$ 의 앙상블 평균은 $\langle\psi(\mathbf{r},t)\rangle$, 그리고 공간상 한 점에서의 분산은 σ^2 라 정의한다. 여기서 무작위 변수인 $\psi(\mathbf{r},t)$ 는 시-공간적으로 약한 통계학적 등질성(homogeneous) 가진다고 가정한다. 먼저, 레이더가 그 대상 지역을 측정할 경우에 레이더 측정치는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Psi_r = \frac{1}{A} \int_R \psi(\mathbf{r},t) d^2\mathbf{r} \quad (1)$$

여기서 R 은 레이더의 관측구역(FOV: Field of View)를 나타내며 A 는 FOV의 면적이다. 반대로 지상 우량계 지점에서의 순간적인 강우량을 관측함으로써 FOV에 대한 대푯값은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Psi_g = \psi(\mathbf{r}_g,t) = \frac{1}{A} \int_R \psi(\mathbf{r},t) K(\mathbf{r}) d^2\mathbf{r} \quad (2)$$

여기서 $K(\mathbf{r})=A\delta(\mathbf{r}-\mathbf{r}_g)$ 이다. 아울러 Eqs. (1) and (2)에서 아래첨자는 각각 레이더와 지상강우관측소를 나타낸다. 또한 총 관측이 n 번 수행되는 경우 각각을 Ψ_r^n 와 Ψ_g^n 라고 표현한다.

본 연구에서 고려하는 3개의 지상보정 설계 중 design 1은 (Ψ_r^n, Ψ_g^n) 의 모든 경우를 고려하며 design 2는 $\Psi_r^n > 0$ 인 경우만을, 그리고 design 3은 $\Psi_r^n > 0, \Psi_g^n > 0$ 인 경우를 고려한다. 각각의 설계에 대한 두개의 측정치는 $(\Psi_{ri}^n, \Psi_{gi}^n)$ 로 나타내며 여기서 $i=1, 2, 3$ 이다.

n 번째 데이터 쌍에 대한 오차 ϵ_{di}^n 는 $\epsilon_{di}^n = \Psi_{ri}^n - \Psi_{gi}^n$ 으로 나타낼 수 있다. 그리고 일반적으로 지상관측치와 레이더 관측치 간의 정확도를 비교하는데 하나의 지표로 사용되는 평균제곱오차(MSE, mean-square error)는 Eq. (3)과 같이 정의된다.

$$\langle\epsilon_{di}^n\rangle^2 = \langle(\Psi_{ri}^n - \Psi_{gi}^n)^2\rangle \quad (3)$$

지상보정 설계의 목적은 소위 ‘보정편의’를 찾아내기 위한 목적으로 이용된다. 이를 위해서는 다음 두 가지 조건을 만족해야 한다. 첫 번째는 오차 $\epsilon_{di} = \Psi_{ri} - \Psi_{gi}$ 에 편이가 없어야 한다는 것이다. 즉, $\langle\epsilon_{di}\rangle = \langle\Psi_{ri} - \Psi_{gi}\rangle = 0$ 을 의미한다. 두 번째는, $\langle\epsilon_{di}\rangle = 0$ 을 만족하는 지상보정 설계에 대하여 지상 우량계 강우와 레이더 강우 차이의 평균제곱오차 $\langle\epsilon_{di}^2\rangle$ 가 레이더 강우의 보정편의보다 최소한 작거나 같아야 한다는 점이다. 그렇지 않은 경우 보정편의의 유의한 추정 어렵게 된다(Yoo et al., 2006; 유철상 등, 2007).

Ha and North(1999), Ha et al.(2002)과 Yoo et al.(2006)은 지상보정 설계에서 통계치들 사이의 관계를 구명하고, 특히 design 1의 통계치를 이용하여 design 2와 design 3에 대한 통계치를 계산하는 방법을 제시하였다. 그 결과에 따르면 design 1과 2는 편이가 발생하지 않고, design 3의 경우에만 음(-)의 설계편의를 가지게 되는데, 지상 우량계 강우가 ‘0’ (무강우)인 경우를 제외시키는 design 3은 심각한 설계편의를 야기시킬 수 있음을 이론적으로 제시하였다. 이에 관한 자세한 배경이론은 Ha and North(1999), Ha et al.(2002), Yoo et al.(2006), 유철상 등(2007) 등의 연구에 기술되어 있다.

3. 레이더 및 지상우량계의 강우량 특성

지상우량계는 실제 강우에 가까운 지점(point) 자료를 제공하지만, 일반적으로 성긴 강우관측망으로 인하여 강우의 공간적 특성을 파악하는데 한계가 있다. 반면 레이더는 넓은 관측 영역에 걸쳐 공간적 해상도가 높은 자료를 생산할 수 있는 장점이 있지만, 대기 중의 강우입자를 통해 강우량을 측정하기 때문에 지상에서의 실제 강우량을 정확히 구현하지 못하는 단점이 있다(Gjertsen et al., 2003 ; Jessen et al., 2005). 따라서 실제 강우량과 근접하고 고분해능인 강우 자료를 얻기 위해서는 레이더와 지상우량계를 이용하여 합성하거나 레이더 강우를 지상우량계 강우로 보정하여 측정방법에 따른 단점을 극복해야 한다(정성화 등, 2005 ; Kitchen and Blackall, 1992 ; Anagnostou et al., 1998 ; Seo, 1998a).

레이더 강우의 지상보정은 레이더 강우량과 우량관측소 강우량에 따라 상이한 결과를 나타내는데, 기본적으로 레이더와 우량계의 관측 자료 특성이 서로 다르기 때문이다. 레이더와 지상우량계가 산출하는 강우량은 관측기기의 종류와 제원, 반사도-강우강도 관계 ($Z-R$ relationship, $Z=AR^b$), 관측 단위, 관측시간, 자료의 전송방식, 대기와 강우에 의한 감쇄효과 등 무수한 원인에 의해 영향을 받는다(Austin 1987 ; Smith and Krajewski, 1993 ; Legates, 2000 ; Holleman, 2006). 따라서 레이더 지상 보정의 결과 만큼이나 중요한 것이 사용된 자료 자체이며 또한 처리과정이다. 본 절에서는 레이더의 지상보정에 사용된 레이더 및 지상우량계 자료의 특성과 처리과정에 대해 설명하고, 우량계 자료별 강우량을 비교·분석하고자 한다.

3.1 레이더 강우량

본 연구에서 사용한 레이더 자료는 2003년도 관악산 레이더 자료(C band, $R=240$ km)이다. 관악산 레이더 강우 자료는 일관된 반사도-강우강도 관계가 적용되었으며, 이에 사용된 매개변수는 Marshall-Palmer(1948)가 제안한 $A=200$ 과 $b=1.6$ 으로써, 현재 우리나라 기상청과 공군에서는 $Z=200R^{1.6}$ 의 관계를 모든 강우 현상에 적용하고 있다(정성화 등, 2005). 본 연구에서는 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 의 공간해상도로 481×481 개의 격자를 이루고 있고, 1.5 km의 유효 고도를 갖는 10분 간격의 2차원 평면 면적강우량을 사용하였다. 그러나 가용한 지상 우량계 자료는

한 시간 단위이므로 레이더 강우 자료를 누가하여 한 시간 단위의 격자별 강우량으로 산정하였고, 이를 그 격자에 대한 레이더 관측값으로 간주하였다(Fig. 1). 만일 하나의 레이더 강우의 격자에 대응하는 지상우량 관측소의 수가 2개 이상일 경우에 이들 지상우량계 강우량을 산술평균하여 지상에서 측정된 강우량으로 간주하였다. 2003년의 관악산 레이더 제원은 Table 1과 같다(엄원근 등, 1988).

Table 1. Characteristics of Mt. Gwanak radar (2003)

Radar site		Seoul(Mt. Gwanak)
Launch date		1970. 2
Location		LAT : 37° 26' 38" LON : 126° 57' 50"
Manufacturer		EEC (USA)
System		DWSR-88C
Transmitter	Type	Magnetron
	Band	C band
	Frequency	5,340 MHz
	Peak Power	250 kW
	Wave length	5.6 cm
	Pulse Recurrence Frequency	250, 1180 Hz
Receiver	Pulse Width	0.83, 2.0 μs
	Dynamic range	95 dB
Antenna	Beams width	1.2 °
	Antenna diameter	3.6 m
Signal processor	Gate size	1,000 m
	Nyquist velocity	3.51 m/s

Time averaging process

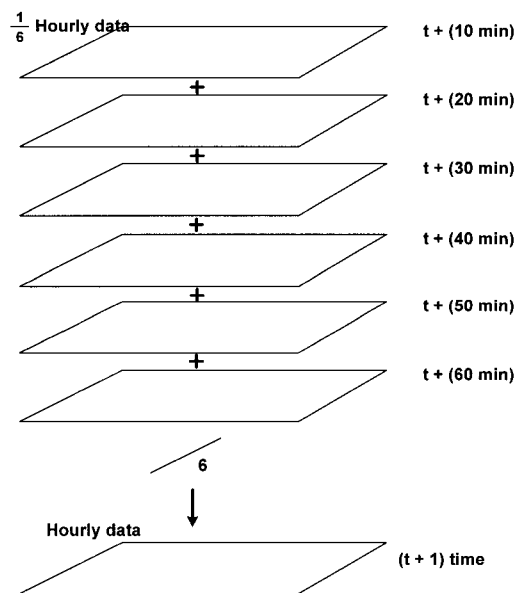


Fig. 1. Schematic diagram of time averaging

3.2 지상우량계 강우량

Fig. 2는 남한 내 우량계 자료별 관측소의 공간분포와 관악산 레이더의 관측반경 범위를 나타낸 것이다. 먼저 기상청(이하 KMA, Korea Meteorological Administration) 지상우량계의 경우 인구 밀집 지역인 주요 도시 및 일기의 변화가 심한 해안지역과 산간지역에 대부분이 배치되어 있다(건설교통부, 2004b). 하지만 강우관측망 분포는 다른 강우관측망에 비해 성긴 편이다. 본 연구에 사용된 KMA의 76개소 관측소들은 모두 자동화되어 있으나 담당자들이 직접 관측치를 확인하는 운영방식을 채택하고 있다. KMA 관측소의 우량계는 모두 0.1 mm의 관측단위까지 측정을 하고 있으며, 수집된 T/M 기록 자료를 모아 결측치에 대한 보정 및 검정을 수행함으로써 가장 신뢰도가 높은 자료라 할 수 있다.

반면에 AWS(Automatic Weather Station)는 0.5 mm 단위까지 관측을 하고 있다. 448개 지점의 자료를 연구에 사용하였으며, 지점 수가 많아 공간적으로 조밀한 강우관측망 분포를 가지고 있다. AWS에서 수집된 자료는 종합 자기기록의 실시간 영상표출로 일변화 경향 감시 및 분석이 가능하며, 소규모의 돌발성 악기상을 연속 감시하는 역할을 하고 있어, 방재차원의 활용도가 높은 편이다(건설교통부, 2004b).

건설교통부(이하 MOCT, Ministry of Construction and Transportation) 우량관측소는 5대강 홍수통제소에서 운영하고 있으며 주로 하천 유역의 상류부에 배치되어 있다. 이 중에 자기관측소는 실시간으로 자료를 수집할 수 없는 관측소이며, 대부분 텔레미터링을 통한 통신이 곤란한 관측소들이다(건설교통부,

2004b). 연구에 사용된 MOCT 303개소는 T/M 관측소와 자기관측소가 각각 290개소, 13개소이다. MOCT의 자기 관측소는 2005년 집계 전체 434개소 중 약 88개소(한강 29개소, 낙동강 33개소, 기타 26개소)가 운영 중에 있다(한강홍수통제소 홈페이지). 아울러 자동으로 수집된 T/M 자료는 보정을 거쳐 매 시간 자동으로 전산기에 입력되어 홍수예경보의 입력 자료로 활용된다. 강우 자료의 단위는 가장 큰 1 mm를 사용한다.

3.3 강우량 비교 및 분석

지상우량계 자료는 레이더 강우량의 편의를 분석하는데 이용되므로 레이더가 측정한 강우량과 비교하여 어떤 거동을 보이는지 살펴볼 필요가 있다. 레이더 및 지상우량계의 상이한 특성을 가지적으로 확인하기 위하여 2003/08/17/00:00부터 2003/08/25/00:00의 기간 동안 대구와 제천 지역 우량관측소에서 측정된 강우량을 우량계 자료별로 구분하여 Fig. 3에 시계열로 나타냈다. 이들 자료의 기본적인 특성은 Table 2에 정리하였다. 두 지역의 지상우량계는 위경도상 정확히 일치하지 않으며(Fig. 4 and Table 3), 레이더의 경우 레이더 중심으로 멀어질수록 커지는 전자기파의 감쇄효과로 인해 지상 강우량과의 차이가 커질 수 있다(엄원근, 1995 ; Wilson and Brandes, 1979). 따라서 정확한 강우량의 비교는 어렵지만 대구와 제천 지역의 각 관측소는 모두 동일한 지점이라고 가정하였다.

Fig. 3의 레이더 강우 자료에 대한 시계열은 세 가지 종류의 우량계를 포함하는 레이더 격자망에서 산술 평균하여 얻은 면적 강우이다(Fig. 4). 대구의 경우 4 km × 4 km, 제천은 5 km × 5 km 범위의 레이더

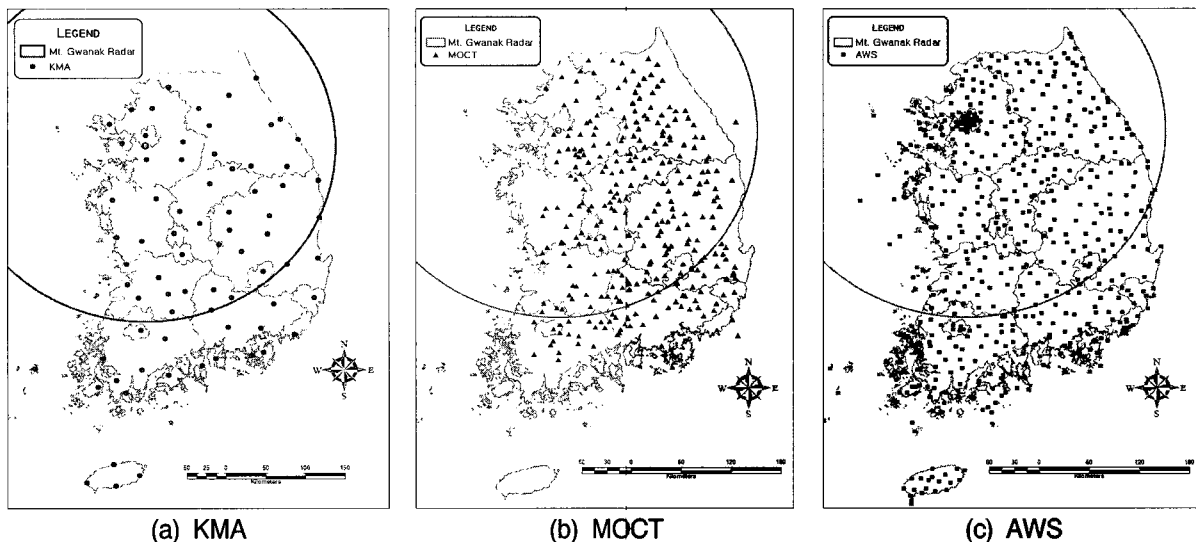


Fig. 2. Location of rain-gauges and the range of Mt. Gwanak radar

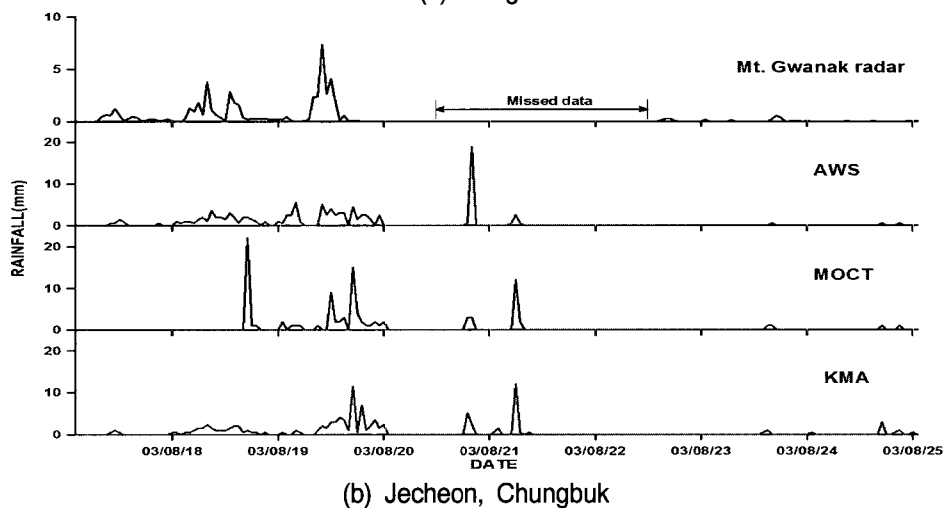
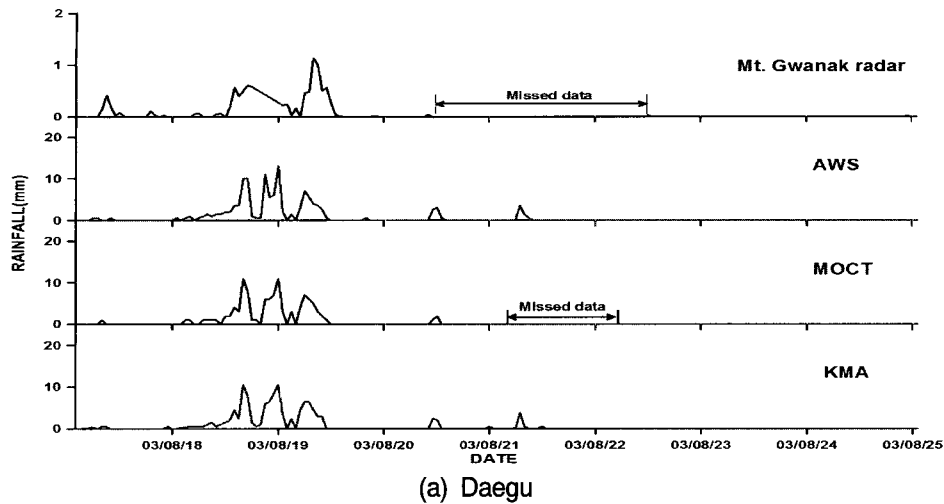


Fig. 3. The time series of radar and rainfall (top: radar, upper-middle: AWS, lower-middle: MOCT, bottom: KMA)

Table 2. Rainfall characteristics of Daegu and Jecheon area

Type of Data	Daegu				Jecheon, Chungbuk			
	KMA	MOCT	AWS	RADAR	KMA	MOCT	AWS	RADAR
Average (mm/hr)	0.604	0.667	0.628	0.069	0.539	0.510	0.557	0.347
Variance (mm ²)	3.117	3.553	3.590	0.035	2.248	5.068	2.785	0.860
Maximum (mm/hr)	10.5	11	13.0	1.121	12.0	22	19.0	7.350
Minimum (mm/hr)	0.0	0	0.0	0.000	0.0	0	0.0	0.000
Total period (hr)	192	159	192	192	192	192	192	137
Rain (hr)	44	30	41	79	56	28	51	70
No rain (hr)	148	129	151	113	136	164	141	67

평균 강우를 가지며 1시간 간격으로 나타낸 것이다. 두 지역을 선정한 이유는 세 가지 종류의 우량계가 가장 집중되어 분포하고 있어 지상우량계간의 공간적 변동성이 크지 않을 거라고 가정하였기 때문이다. 두 지역 모두 레이더 강우량과 우량계 강우량이 큰 차이를 나타내고 있으며, 레이더 강우량이 실제 강우량에 비해 과소 측정되는 경향을 보인다. 먼저, 대구 지점의 경우는 강우발생 및 종료 시점, 강우량의 첨두부(peak) 발생 시점과 강우량이 모든 지상우량계 자료

에서 일치하는 모습을 볼 수 있다. 반면에 제천 지점의 경우 강우의 발생 주기는 대체적으로 일관성이 있으나 지상우량계 자료별 강우량 차이가 대구 지점에 비해 크게 나타났다. 또한 지상우량계 강우량은 각 자료별로 일치하지 않음을 알 수 있다. 이렇게 제천 지점의 우량계 자료별 강우량 차이는 기상요소나 고도 차이 또는 지형학적인 영향 등과 같은 원인에 의한 것으로 판단된다(건설기술연구원, 2003; 김동필 등, 2003).

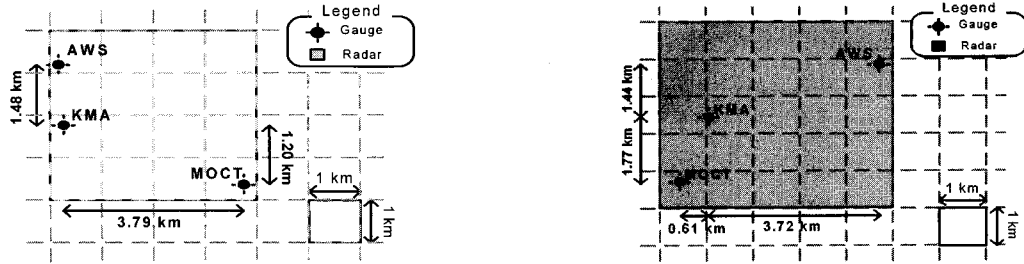


Fig. 4. The distance between rain-gauge stations(left: Daegu, right: Jecheon, Chungbuk)

Table 3. TM coordinates of Daegu and Jecheon

Area Station	Daegu			Jecheon, Chungbuk		
	TM_X (m)	TM_Y (m)	Station code	TM_X (m)	TM_Y (m)	Station code
KMA	345706.718	266327.548	No. 143	306336.446	406340.826	No. 221
MOCT	347477.786	266942.777	No. 24220	307545.425	402529.474	No. 17670
AWS	344262.194	262604.232	No. 845	304855.927	406322.276	No. 638

※ TM : Transverse Mercator

4. 레이더 강우의 지상보정 결과

4.1 지상우량계 자료에 따른 지상보정 결과 비교

레이더 강우량과 지상우량계 강우량간의 지상보정 결과 비교는 관악산 레이더의 실제 관측해상도인 1 km × 1 km에서 수행하였다. 본 연구에서 고려한 호우사상 및 자료기간은 아래 Table 4와 같다. 그러나 본 절에서는 호우사상별로 구분하지 않고, Table 4의 세 가지 호우사상에 해당하는 자료 기간 전체에 대해 적용하였다. 아울러 레이더 강우의 지상 보정 결과 비

교시 각 지상우량계 자료에 따른 설계편의의 변화 양상을 살펴보았다.

먼저 우량계 자료별 지상보정 특성을 파악해 보기 위해 각각의 지상보정 설계에 대한 편의 및 평균제공 오차를 추정하였다. 평균제공오차의 개념은 인공위성에서 관측한 강우를 시공간 축상에서 포괄적으로 관측할 때 발생하는 오차를 추정하는데 유용하게 사용된 바 있다(North and Nakamoto, 1989). 대상 자료를 이용하여 적용한 결과는 Table 5와 같다.

Table 5에 나타난 바와 같이 지상우량계 자료에 따라 오차의 편의 $\langle \xi_{di} \rangle$ 에 대한 확연한 차이는 없지만,

Table 4. Period of data used in this study

Types of rainfall	Period	Duration (hr)	Remarks
Convective storm	2003/06/27/00:00 ~ 2003/06/27/23:00	31	
Jangma	2003/08/17/06:00 ~ 2003/08/20/10:00	76	
	2003/08/22/10:00 ~ 2003/08/25/00:00	50	
Typhoon	2003/09/12/00:00 ~ 2003/09/13/07:00	23	Maemi

Table 5. Statistics of radar measurements $\langle \psi_{ri} \rangle$, ground measurements $\langle \psi_{gi} \rangle$, errors $\langle \xi_{di} \rangle$ and MSE

Station	G-T Design STATIC RESOL.	Design 1				Design 2				Design 3			
		$\langle \psi_{r1} \rangle$	$\langle \psi_{g1} \rangle$	$\langle \xi_{d1} \rangle$	MSE	$\langle \psi_{r2} \rangle$	$\langle \psi_{g2} \rangle$	$\langle \xi_{d2} \rangle$	MSE	$\langle \psi_{r3} \rangle$	$\langle \psi_{g3} \rangle$	$\langle \xi_{d3} \rangle$	MSE
KMA	1 km	0.469	1.780	-1.312	12.471	0.901	3.127	-2.225	21.658	1.19	4.446	-3.255	30.066
MOCT	1 km	0.434	1.569	-1.135	28.335	0.857	2.545	-1.688	26.840	1.167	4.922	-3.755	46.518
AWS	1 km	0.508	1.792	-1.284	24.372	0.966	2.954	-1.988	24.396	1.339	4.671	-3.332	44.947
All	1 km	0.473	1.692	-1.218	18.449	0.916	2.796	-1.880	45.164	1.264	4.728	-3.464	55.405

※ () : number of station ALL : KMA+MOCT+AWS

평균제곱오차의 차이는 뚜렷하게 나타난다. 첫 번째로 평균제곱오차를 기준으로 자료별 특징을 살펴보면, KMA가 다른 우량계 자료에 비해 평균제곱오차가 가장 작고, 특히 design 1에서 가장 작게 나타난다. 즉, design 1이 레이더 강우와 우량계 강우간 관계를 가장 뚜렷하게 나타낸다고 판단할 수 있다. 이와 같이 design 1에서 평균제곱오차가 가장 작은 것은 레이더 강우에 '0' 이 포함된 비율이 높기 때문이다. 두 번째, 편의 $\langle \epsilon_{di} \rangle$ 을 고려하면 모든 관측소에서 design 3의 편의가 design 1, 2보다 크게 나타난다. 즉, design 3은 design 1, 2에 비해 레이더 강우의 지상보정에 심각한 왜곡을 초래할 수 있는 것으로 해석할 수 있다. 결국 레이더 강우의 지상보정에는 설계편의가 가장 작은 design 1이나 2를 선택하여 사용해야 한다. 그런 면에서 MOCT는 다른 자료보다 design 1, 2에서의 편의가 가장 작은 장점이 있다. 결론적으로 레이더 강우의 지상보정에 적절한 지상우량계 자료를 선택할 때 평균제곱오차가 미치는 영향을 기준으로 삼는다면 KMA의 design 1이 가장 적절하고, 편의를 우선으로 삼는다면 MOCT의 design 1을 선택할 수 있다. 하지만 이와 같은 비교·형태별 통계적 특성과 강우관측망의 분포 등을 고려할 때 KMA 보다는 악기상에 대한 실시간 홍수예경보의 방재 활용성이 높은 MOCT의 강우량 자료를 이용하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

4.2 호우사상별 Ground-Truth 결과의 비교 및 평가

Table 6은 가용한 지상우량계 자료에 대하여 호우

사상별로 지상보정을 수행한 결과를 보여주고 있다. 호우사상별 자료기간은 Table 4와 동일하다. Table 6에 나타난 가장 큰 특징은 모든 우량계 자료에서 장마기간 동안 오차의 편의가 태풍, 대류성 강우 기간의 편의보다 작고, 아울러 design 1에서의 편의가 가장 작게 나타난 점이다. 장마는 강우장이 대부분 횡방향으로 긴 형태를 가지기 때문에 횡방향뿐만 아니라 종방향으로 넓게 퍼진 형태의 태풍보다 무강우를 반영한 비율이 높다. 따라서 장마에 해당하는 모든 설계에서 편이의 규모가 작게 나타나게 된다. 다시 말해, 장마는 태풍보다 강우의 공간적 간헐성이 잘 부각되어 설계별 차이가 크게 나타난 것이다. Fig. 5는 우량계 자료별로 design 1의 방법에 대한 레이더 강우와 지상우량계 강우간의 산포도를 세 가지 강우사상으로 구분하여 보여주고 있으며, 상관계수(CC, correlation coefficient)도 함께 나타내었다. Fig. 5에서 살펴볼 수 있는 것처럼 강우의 공간적 간헐성으로 인해 장마기간의 상관계수가 태풍, 대류성 강우에 비해 높게 나타난다.

우량계 자료별로 분석해보면 KMA와 AWS는 소수점 단위(mm)로 강우를 측정하므로 1 mm 단위로 측정하는 MOCT보다 지상보정에 더 유리하게 작용할 것으로 추측할 수 있다. 그러나 Table 6은 이와 상반된 결과를 보여준다. 즉, MOCT의 편의와 평균제곱오차가 다른 관측소에 비해 가장 작은 경향을 나타낸다. 이러한 결과의 원인은 근본적으로 자료에 포함된 무강우의 비율에서 찾을 수 있다. 즉, MOCT 우량계에 '0' 으로 측정된 강우량이 KMA 및 AWS의 경우보다 많아 통계적 특성에 영향을 준 것이다. 이상과 같

Table 6. Statistics of radar measurements $\langle \psi_{ri} \rangle$, ground measurements $\langle \psi_{gi} \rangle$, errors $\langle \xi_{di} \rangle$ and MSE for the type of rainfall

Station / Type of Rainfall		G-T Design	Design 1				Design 2				Design 3			
		STATIC RESOL.	$\langle \psi_{r1} \rangle$	$\langle \psi_{g1} \rangle$	$\langle \xi_{d1} \rangle$	MSE	$\langle \psi_{r2} \rangle$	$\langle \psi_{g2} \rangle$	$\langle \xi_{d2} \rangle$	MSE	$\langle \psi_{r3} \rangle$	$\langle \psi_{g3} \rangle$	$\langle \xi_{d3} \rangle$	MSE
KMA	Typhoon	1 km	0.897	3.374	-2.476	15.851	1.199	3.953	-2.754	13.565	1.358	4.615	-3.257	15.367
	Jangma	1 km	0.402	1.097	-0.695	8.278	0.883	2.249	-1.366	13.856	1.327	3.755	-2.428	20.435
	Convective	1 km	0.249	3.303	-3.055	20.046	0.437	5.376	-4.939	48.218	0.483	6.115	-5.632	52.738
MOCT	Typhoon	1 km	0.931	2.576	-1.645	7.111	1.247	2.763	-1.516	5.947	1.508	4.281	-2.773	15.598
	Jangma	1 km	0.340	1.017	-0.677	0.340	0.787	1.895	-1.108	0.862	1.256	4.750	-3.494	33.252
	Convective	1 km	0.242	3.108	-2.866	0.007	0.433	4.831	-4.397	9.998	0.481	6.363	-5.882	37.187
AWS	Typhoon	1 km	0.770	3.089	-2.319	10.088	1.072	3.310	-2.238	6.171	1.299	4.438	-3.139	15.411
	Jangma	1 km	0.456	1.307	-0.851	0.359	1.029	2.366	-1.337	1.117	1.392	3.631	-2.239	3.195
	Convective	1 km	0.272	3.046	-2.774	0.003	0.486	4.854	-4.368	13.624	0.563	6.171	-5.608	46.540

() : number of station

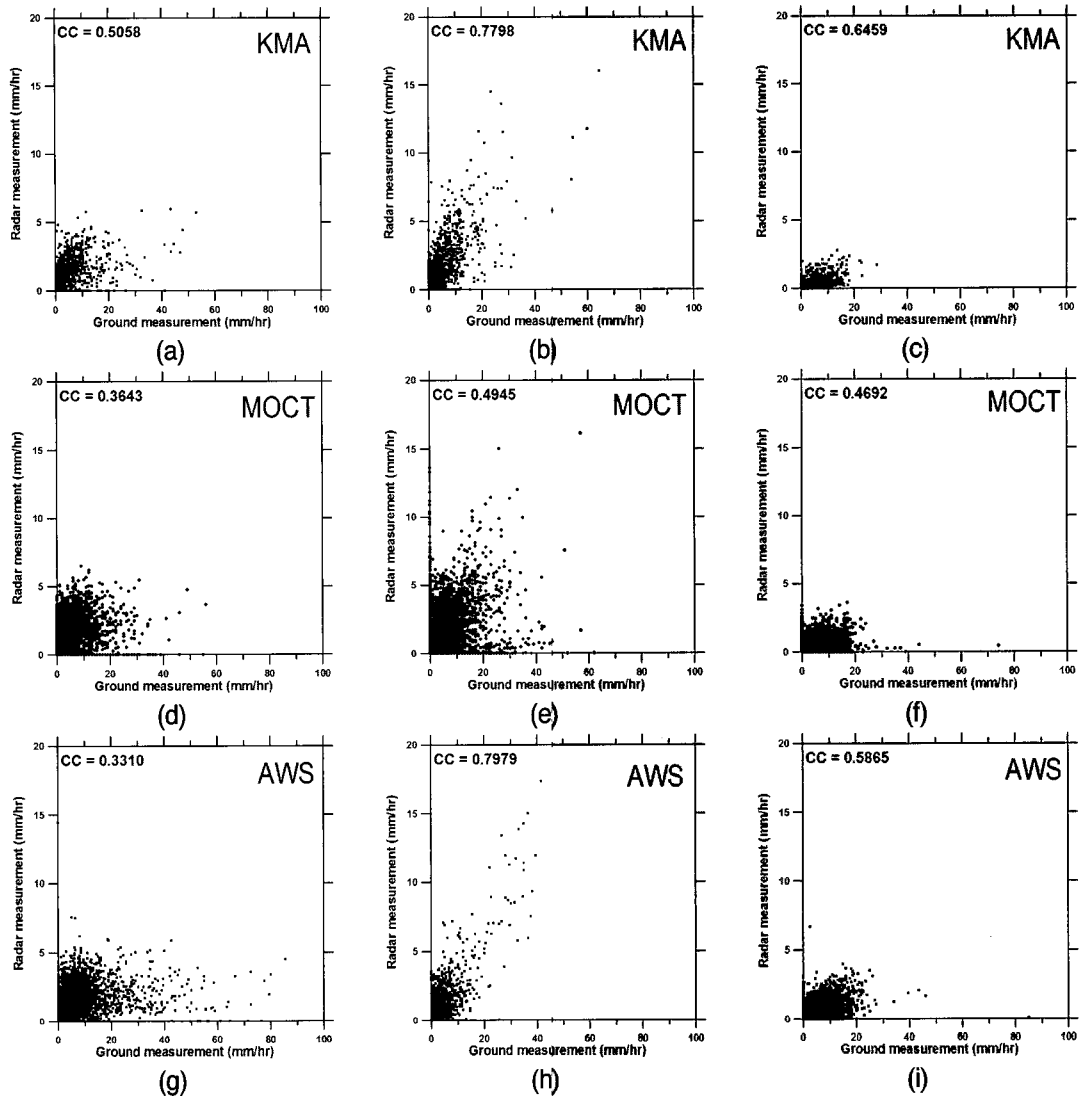


Fig. 5. Scatter diagrams of hourly rainfall : radar measurements vs rain-gauge data for design 1 (left: typhoon(Maemi), middle: jangma, right: convective storm)

이 호우사상별로 지상보정 결과를 비교하였을 경우에도 실시간 홍수에경보 이용이라는 측면과 강우관측망 등을 고려할 때 다른 강우 자료에 비해 편의가 작은 MOCT design 1의 방법이 레이더 강우의 지상보정 목적에 더 적합하다고 판단할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 레이더 강우의 지상보정을 위해 가능한 3가지 비교 방법, 즉 지상보정 설계를 실측자료에 적용하여 평가하였다. 동일 기간의 KMA, MOCT, AWS의 우량계 자료와 관악산 레이더 강우 자료와의 차이(오차)를 살펴보고 각 우량계 자료에 따른 통계적 특성을 비교하였다. 추가로 호우 사상의 특성에 따른 차이도 함께 검토하였다.

이상과 같은 우량계 자료를 가지고 레이더 강우의 지상보정을 비교·형태별로 구분하여 살펴본 결과 우량계 자료에 따른 지상보정 설계편의의 확연한 차이는 잘 부각되어 나타나지 않았다. 이는 실측 강우의 경우 보정편의 및 설계편의가 동시에 존재하여 명백하게 구분되지 않기 때문이다. 그러나 각 우량계 자료에 따른 지상보정 결과에는 약간의 차이를 보여 주었다. 호우사상별로 그리고 전체 자료 기간의 두 가지 형태로 레이더 강우의 지상보정을 수행한 결과, 모든 우량계 자료에서 장마 기간의 설계편의가 다른 호우사상에 비해 작게 나타났다. 이는 장마가 태풍이나 대류성 강우에 비해 강우의 공간적 간헐성을 크게 반영하고 있기 때문이다. 또한 MOCT의 design 1의 방법이 다른 자료의 비교 방법에 비해 설계편의가 작은 것으로 확인되었다.

결론적으로 보면 본 연구에서 고려한 세 가지 지상 우량계 자료의 본질적인 특성 차이는 뚜렷하지만, 비교·형태별로 구분한 지상보정 결과를 살펴보면 우량계 자료별로 통계적 특성치의 차이는 크지 않은 것으로 확인되었다. 다만 실시간 홍수예경보의 목적으로는 무강우의 비율이 높고, 강우관측망 분포가 조밀한 MOCT의 우량계 자료가 레이더 강우의 지상보정 목적에 가장 유리한 결과를 나타내는 것으로 판단할 수 있었다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 (2002) 전국 강우레이더 설치 및 홍수에 경보시스템 개선 기본계획 수립.
- 건설교통부 (2003) 전국 강우레이더 설치 및 홍수에 경보시스템 개선 기본계획 수립 2차년도.
- 건설교통부 (2004a) 전국 강우레이더 설치 및 홍수 예경보시스템 개선 기본계획 수립 3차년도.
- 건설교통부 (2004b) 한강유역조사 제 3권 수리·수문 조사 보고서 - 1편 수문관측망 조사.
- 건설기술연구원 (2003) 시험유역의 운영 및 수문특성 조사, 연구(연구, 9차년도).
- 김동필, 황석환, 정성원, 한명선 (2003) 2003년 설마천 시험유역의 운영. 한국수자원학회 04 학술발표회, 한국수자원학회, pp. 573-577.
- 김진국, 안상진 (2006) 기상레이더 강우량 산정법을 이용한 유출해석. 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제26권, 제1B호, pp. 7-14.
- 엄원근 (1995) 레이더 기상학. 영재사.
- 엄원근, 홍윤, 조찬환 (1988) DWSR-88C 기상레이더와 자료의 활용, 중앙기상대, pp. 15-16.
- 유철상, 김병수, 김경준, 최정호 (2007) 우량계 강우를 이용한 레이더 강우의 Ground-Truth 방법 검토. 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제40권, 제9호, pp. 743-754.
- 정성화, 김경익, 하경자 (2005) 지상 우량계의 강우강도를 이용한 개선된 레이더 강우강도의 실시간 추정. 한국기상학회지, 한국기상학회, 제41권, 제5호, pp. 751-762.
- 한강홍수통제소 홈페이지. http://www.hrfco.go.kr/YearCD/2005/rain/station/RO01_0.html, (2007. 1).
- 한국수자원학회 (2000) 하천설계기준, 건설교통부 승인, 한국수자원학회.
- Anagnostou, E.N., Krajewski, W.F., Seo, D.J., and Johnson, E.R. (1998) Mean-field rainfall bias studies for WSR-88D. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 3, No. 3, pp. 149-159.
- Austin, P.M. (1987) Relation between measured radar reflectivity and surface rainfall. *Monthly Weather Review*, Vol. 115, pp. 1053-1070.
- Barnston A.G. (1990) An empirical method of estimating raingage and radar rainfall measurement bias and resolution. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 30, pp. 282-296.
- Barnston, A.G., and Thomas, J.L. (1983) Rainfall measurement accuracy in FACE: A comparison of gage and radar rainfalls. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 22, pp. 2038-2052.
- Calheiros, R.V., and Zawadzki, I. (1987) Reflectivity-rain rate relationships for radar hydrology in Brazil. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 26, pp. 118-132.
- Creutin, J.D., Andrieu, H., Faure, D. (1997) Use of a weather radar for the hydrology of a mountainous area. Part II: radar measurement validation. *Journal of Hydrology*, Vol. 193, pp. 26-44.
- Fulton, R.A., Breidenbach, J.P., Seo, D.-J., and Miller, D.A. (1998) The WSR-88D rainfall algorithm. *Weather and Forecasting*, Vol. 13, pp. 375-395.
- Gjertsen, U., Salek, M., and Michelson, D.B. (2003) *Gauge-adjustment of radar-based precipitation estimates - a review*. COST 717 Working Document WDD_02_200310_1, Available at <<http://www.smhi.se/cost717>>.
- Ha, E., and North, G.R. (1994) Use of Multiple gauges and microwave attenuation of precipitation for satellite verification. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 11, pp. 629-636.
- Ha, E., and North, G.R. (1999) Error Analysis for Some Ground Validation Designs for Satellite Observations of precipitation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 16, pp. 1949-1957.
- Ha, E., North, G.R., Yoo, C., and Ha, K.

- (2002) Evaluation of some ground truth designs for satellite estimates of rain rate. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 19, pp. 65-73.
- Holleman, I. (2006) *Bias adjustment of radar-based 3-hour precipitation accumulations*. Technical report TR-290, Royal Netherlands Meteorological Institute(KNMI).
- Jessen, M., Einfalt, T., Stoffer, A., and Mehlig, B. (2005) Analysis of heavy rainfall events in North Rhine-Westphalia with radar and raingauge data. *Atmospheric Research*, Vol. 77, pp. 337-346.
- Kitchen, M., and Blackall, R.M. (1992) Representativeness errors in comparisons between radar and gauge measurements of rainfall. *Journal of Hydrology*, Vol. 134, pp. 13-33.
- Legates, D.R. (2000) Real-time calibration of radar precipitation estimates. *Professional Geographer*, Vol. 52, No. 2, pp. 235-246.
- Li, P.W., and Lai, S.T.E. (2004) Short-range quantitative precipitation forecasting in Hong Kong. *Journal of Hydrology*, Vol. 288, pp. 189-209.
- Marshall, J.S., and Palmer, W.McK. (1948) The distribution of raindrops with size. *Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 5, pp. 165-166.
- North, G.R., and Nakamoto, S. (1989) Formalism for comparing rain estimation designs. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 6, pp. 985-992.
- Seo, D.J. (1998a) Real-time estimation of rainfall fields using rain gage data under fractional coverage conditions. *Journal of Hydrology*, Vol. 208, pp. 25-36.
- Seo, D.J. (1998b) Real-time estimation of rainfall fields using radar rainfall and rain gage data. *Journal of Hydrology*, Vol. 208, pp. 37-52.
- Seo, D.J., Breidenbach, J.P., and Johnson, E.R. (1999) Real-time estimation of mean field bias in radar rainfall. *Journal of Hydrology*, Vol. 223, pp. 131-147.
- Smith, J.A., and Krajewski, W.F. (1993) A modeling study of rainfall rate-reflectivity relationships. *Water Resources Research*, Vol. 29, pp. 2505-2514.
- Steiner, M., Smith, J.A., Burges, S.J., Alonso, C.V., and Darden, R.W. (1999) Effect of bias adjustment and rain gauge data quality control on radar rainfall estimation. *Water Resources Research*, Vol. 35, No. 8, pp. 2487-2503.
- Wilson, J.W., and Brandes, E.A. (1979) Radar Measurement of Rainfall: A Summary. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 60, pp. 1048-1058.
- Yoo, C., Ha, E., Kim, S., and North, G.R. (2006) Evaluation of several Ground-Truth designs for satellite estimates of rainfall in a temperate region. Manuscript submitted.

© 논문접수일 : 2007년 03월 30일
 © 심사의뢰일 : 2007년 04월 06일
 © 심사완료일 : 2007년 08월 20일