Korean Journal of Remote Sensing, Vol.22, No.6, 2006, pp.485~493

RADAR 추정 강수량과 AWS 강수량의 최적 결합 방법을 이용한 정량적 강수량 산출

오현미 · 하경자† · 허기영

부산대학교 대기과학과

Estimation of Quantitative Precipitation Rate Using an Optimal Weighting Method with RADAR Estimated Rainrate and AWS Rainrate

Hyun-Mi Oh, Kyung-Ja Ha†, and Ki-Young Heo

Division of Earth Environmental System, Pusan National University

Abstract : This study is to combine precipitation data with different spatial-temporal characteristics using an optimal weighting method. This optimal weighting method is designed for combination of AWS rain gage data and S-band RADAR-estimated rain data with weighting function in inverse proportion to own mean square error for the previous time step.

To decide the optimal weight coefficient for optimized precipitation according to different training time, the method has been performed on Changma case with a long spell of rainy hour for the training time from 1 hour to 10 hours. Horizontal field of optimized precipitation tends to be smoothed after 2 hours training time, and then optimized precipitation has a good agreement with synoptic station rainfall assumed as true value. This result suggests that this optimal weighting method can be used for production of high-resolution quantitative precipitation rate using various data sets.

Key Words : Optimal weighting method, optimal weight, RADAR-estimated rain, AWS rain gage.

요약 : 본 연구는 최적 결합 방법을 이용하여 다른 시공간 특징을 가진 강수량 자료를 통합하는 것이다. 최적 결합 방법은 AWS 우량계 자료와 S-band RADAR 추정 강수량을 전 시간대의 자신의 평균 제곱 오차에 반비례 하도록 디자인 하였다.

훈련시간에 따른 적절한 최적 가중치를 결정하기 위하여, 훈련시간을 1-10시간까지 실험하기 위하여 긴 기간 동안 비가 지속되었던 장마 사례에 적용하였다. 최적 결합 강수량의 수평장은 훈련시간 2시간 이후부터는 평탄화된 구조를 보여주었고, 최적 결합 강수량은 참값으로 가정한 종관관측 강수량과 수평 구조 및 값의 크기가 잘 일치하였다. 이러한 결과는 최적결합 방법이 다양한 자료들을 이용하여 고해상도의 강수량을 생산하는 데 사용할 수 있다는 것을 제시한다.

2006년 11월 23일 접수 ; 2006년 12월 22일 수리.

† 교신저자: 하경자(kjha@pusan.ac.kr)

1. 서 론

강수 현상은 국지적인 기상재해, 수문현상뿐만 아니라 큰 규모의 대기 순환의 주요한 변수인 잠열 방출 비율을 나타내므로 강수량의 정확한 파악은 기상 현상을 분석, 예측 시 매우 중요하다. 기상 RADAR (Radio Detection And Ranging)는 높은 공간 분해능으로 국지적인 강수 분포의 현황 파악에 유용한 자료를 제공한다. 우리나라는 기존에 C-band RADAR로 RADAR 네트워크를 구축하여 강수 분포를 관측하였지만 C-band RADAR는 파장이 5cm로 강수에 의한 감쇄의 영향을 받아 강수량이 과소 관측되는 단점이 있었다(하경자 등, 2002). 이러한 단점을 보완하기 위하여 기존의 RADAR를 파장이 긴 S-band RADAR로 지난 2001년 진도부터 교체하고 있다. 그러나 교체된 S-band RADAR도 현업 운영을 위하여 Z-R 관계식을 Marshall and Palmer(1948)가 제시한 층상형 강수(a=200, b=1.6)로 고정해서 사용하고 있어서 대류형 강수와 같은 강한 강도의 강수 현상 시 강수량이 과소 추정되는 단점을 그대로 가지고 있다. 이러한 RADAR 추정 강수량의 단점을 보완하기 위하여 다양한 시도가 있었다. 많은 연구자들이 층상형과 대류형으로 분류하여 새로운 Z-R 관계식을 찾기 위하여 연구를 하였으며(Atlas and Chmela, 1957; Woodley *et al.*, 1975 Gagin *et al.*, 1985; Steiner and Houze, 1993, Steiner *et al.*, 1995)과 Biggerstaff and Listemaa(2000)는 관측된 RADAR 에코를 층상형과 대류형으로 분리하는 연구를 하였다. 최근에는 지상 우량계의 강우강도를 이용하여 RADAR의 강우강도를 현업 보정하여 개선하는 연구도 있었다(정성화 등, 2005).

우리는 RADAR 추정 강수량을 개선하기 위하여 선행 연구들과 달리 다른 관측 강수량과의 통합하는 방법을 택하였다. 이를 위해서는 일정한 공간해상도의 격자로 균질화된 강수량의 분포들이 필요하다. 주어진 시 · 공간의 체적에 대하여 연속적인 강수 자료가 획득되어야 하지만 일반적으로 시간적 또는 공간적으로 비연속적인 관측이 이루어진다. 예를 들어, 지상의 우량계는 공간적으로 비균질하나 시간 적으로는 연속적인 관측이 이루어지며 RADAR 관측은 주기적인 관측이 공간적으로 균질하게 이루어진다. 이러한 RADAR 자료와 지상 지점 관측 자료의 결합을 위해 최적 결합 방법(optimal weighting method)이 제시될 수 있다(North *et al.*, 1991).

본 연구에서는 종관관측 강수량을 참값으로 두고 지상 RADAR 자료와 AWS (Automatic Weather System) 자료를 최적 결합하였으며, Z-R 관계식의 변화 없이 RADAR 자료가 AWS 자료와의 결합으로 그 정확도가 얼마나 개선될 수 있는지 알아 보고자 한다.

2. 최적 결합 방법의 적용

1) 최적 결합 및 최적 가중치의 계산

North and Nakamoto(1989)과 North *et al.*(1991)은 서로 다른 관측 디자인들을 비교하는 연구에 대해 기본 틀을 제시하였다. 그들은 강수장의 통계적인 특성을 이용하여 푸리에 변환으로 관측장의 균질성과 고유성을 가정하여 활용하였다. 이런 방법으로 강수장의 평균 제곱 에러에 대한 간단한 수식으로 만들 수 있다.

최적 가중치(optimal weight)는 아래의 식 (2), (3)와 같다. 식 (2)는 RADAR 추정 강수량의 의 최적 가중치이며 식 (3)는 지상 우량계 자료의 최적 가중치이다. 이 가중치는 자신의 평균제곱오차 (ε^2)에 반비례하게 고려되었다. 작은 제곱오차를 가지면 가중치로 적용될 땐 역으로 크게 가중되게 된다. 〈 〉은 앙상블 평균을 나타낸다.

$$\varepsilon_i^2 \equiv <(\Psi - \Psi_i)^2>, \mathrm{i} = \mathrm{R\,(RADAR)\ or\ i} = \mathrm{G\,(gages)} \quad (1)$$

$$\hat{\alpha}_R = \frac{\varepsilon_G^2}{\varepsilon_G^2 + \varepsilon_R^2} \quad (2)$$

$$\hat{\alpha}_G = \frac{\varepsilon_R^2}{\varepsilon_G^2 + \varepsilon_R^2} \quad (3)$$

구해진 최적 가중치는 식 (4)를 적용하여 최적화하여 통합할 수 있다. 식 (5)에서 Ψ_A는 최적으로 결합된 강수량이다. 본 연구 결과의 최종 결과도 식 (4)을 적용해서 도출된다.

$$\Psi_A = \alpha_R \Psi_R + \alpha_G \Psi_G \quad (4)$$

여기서 위에서 구한 식 (2)과 (3)의 가중치는 식 (5)와 같이 서로의 합이 1이 된다. 이러한 과정을 통하여 각 지역별, 시기별로 다른 최적 가중치를 산출해 낼 수 있다.

$$1 = \alpha_R + \alpha_G \quad (5)$$

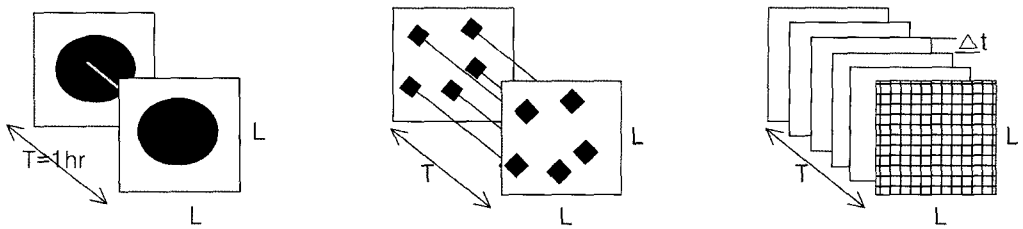

Fig. 1. Schematic diagram of (a) Synoptic, (b) AWS and (c) RADAR observations.

2) 최적 결합 방법을 적용하기 위한 자료 변환 과정

시 · 공간적으로 관측 특성이 다른 자료를 통합하기 위하여 우선적으로 통합하고자 하는 자료가 같은 시간, 공간 성질을 가질 수 있도록 자료의 변환이 이루어져야 한다. 자료 변환을 하기 전에 Fig. 1에 종관, AWS와 RADAR 관측의 다른 특성을 개념도로 나타내었다. 종관관측과 AWS는 공간적으로 불균일하게 분포하고 있다. (a)의 종관관측은 전국적으로 약 80여개의 관측소에서 관측이 되며 관측소 간 평균 거리는 약 60km이고 일누적 강수량이 1시간마다 관측된다. (b) AWS는 종관관측소보다 조밀하게 분포하며 관측소 간 평균 거리는 약 15km으로 1분마다 관측되며 1시간 누적 강수량과 일누적 강수량이 매분, 정시 분석 자료에서 제공된다. RADAR 관측은 공간적으로 균질하며 공간해상도는 1km이하이며, Δt는 10분으로 1시간 동안 6번 관측된다.

우선 참값으로 정의한 종관자료와 관측 시간 특성을 일치시켰다. 종관자료와 같이 1시간 누적으로 변환하기 위하여 10분에 한 번씩 관측되는 RADAR 강수량을 1시간 안에 관측되는 6번의 강수량을 모두 더한 값을 1시간 누적 강수량으로 가정하여 사용하였다. AWS는 1시간 누적 강수량이 나오므로 이를 그대로 사용하였다.

공간적으로 불균일한 종관자료, AWS와 극좌표로 관측된 RADAR 자료를 통합하기 위해서 Inverse Distance Weighted (IDW) 내삽 방법을 이용하였다. 일반적으로 균질한 격자의 값을 지점 값으로 변환할 때 사용되는 방법으로 내삽하고자 하는 지점의 값과 가까이 있는 값은 많은 영향을, 거리가 있으면 작은 영향을 주도록 거리의 역수에 비례하게 가중치를 주어서 내삽하는 방법이다.

3) 실험 영역 설정 및 자료

최적 결합을 적용하기 위하여 Fig. 2에 사각형으로 표시된 위도 34.0°-35.8°, 경도 125.8°-128.0° 지역을 선정하였으며 진도 RADAR 관측 영역 및 지상 관측소 분포 현황도 Fig. 2에 나타냈다. 종관관측소는 17개 지점 AWS는 113개 지점이 사례영역에 분포하고 있다. 진도 RADAR는 수평적으로 1km이하의 해상도를 가지고 연직적으로 12개의 고도각으로 관측된다. 최저 고도각 (0.19°)의 반사도를 Marshall and Palmer (1948)의 Z-R 계수로 변환한 강수량을 사용하였다. Table 1은 진도 RADAR의 거리에 따른 최저 고도각의 고도로 같은 고도각이라도 Table 1에서 보듯이 RADAR 관측소에서 수평적으로 멀어짐에 따라서 고도차가 많이 나기

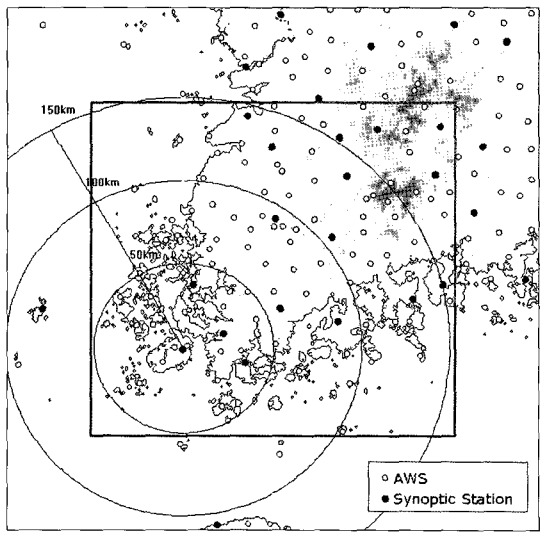

Fig. 2. The position of Jindo radar (center of circle) and the verification area (rectangle area). The black dots denote the synoptoc stations and the white dots denote the AWS stations.

Table 1. Altitude of Jindo RADAR PPI (0.19°).

distance from RADAR (km)	0	50	100	150	200	240
altitude (km)	0.49	0.72	1.23	2.05	3.13	4.26

때문에 되도록 반경 150km이내의 영역 이용하였다.

3. 사례 분석 및 결과

1) 사례 분석 및 실험 디자인

장마 전선이 한반도 남서부에 접근하는 2002년 6월 23일부터 6월 24일 오후의 사례에 대하여 최적 결합 방법을 적용하였다. 일본 남부 해상에 머물던 장마전선의 북상으로 전국이 흐리고 비가 내린 사례로 23일 오후부터 남부 지방을 중심으로 장마가 시작하였으며, Fig. 3에 그 기간 동안의 종관관측 지점들의 강수량 합계의 시계열을 보였다. 23일 오전 4시부터 군산지역에서 강수가 시작되었으며, 오후부터 사례영역에 대하여 본격적으로 강수 현상이 있었다. 총강수량은 24일 오전 6시에 98mm/h로 최대값을 보이며 오후부터는 총강수량이 10mm/h 이하로 감소하였다. 최적 결합을 적용한 실험 기간은 강수가 증가하기 시작해서 10시간 정도가 지난 23일 22시부터 24일 11시까지 14시간이다. 주어진 실험 기간에 대하여 훈련시간에 따라서 EXP1~EXP10로 실험을 디자인하였다. 최적결합 강수량을 구하고자 하는 시간의 바로 1시간 전 제곱오차까지 평균하여 가중치를 구하는데 사용하였다. 예를 들어 24일 5시의 경우, EXP1는 24일 4시의 제곱오차를 이용하여 가중치를 계산하며, EXP10은 23일 19시부터 24일 4시까지 10시간 동안의 평균제곱오차를 사용하여 최적 가중치가 산출된다.

2) 결과

Table 2는 훈련 시간에 따른 AWS의 최적 가중치와 RADAR의 최적 가중치의 평균 및 표준편차의 실험기간 평균을 나타내었다. EXP1에서 EXP10으로 훈련시간이 길어질수록 최적가중치의 표준편차가 작아지는 것을 알 수 있다.

Figure 4는 사례 영역의 2002년 6월 24일 5시의 종관관측, AWS와 RADAR 강수 분포이다. (a)는 종관관측 자료를 그린 것으로 광양과 여수지역에서 강한 강수량을 보인다. (b) AWS는 사례영역에서 종관관측지점보다 지점이 약 3배정도 많이 분포하여 상세한 분포를 보이며, 서해안의 영광에서 남해안의 여수까지 강수대를 잘 보여준다. RADAR 자료는 앞서 두 자료와 비교하여 해상도가 상당히 높으며 해상까지 관측이 가능하기 때문에 상세한 강수의 분포 형태에 대한 정보를 주고 있다. 육지의 분포는 AWS 강수량과 비슷하나 전체적으로 강도가 AWS 보다 작으며, 특히 여수지역에서 5mm/h 이상 작게 추정되었다. 종관관측소는 사례지역에 17지

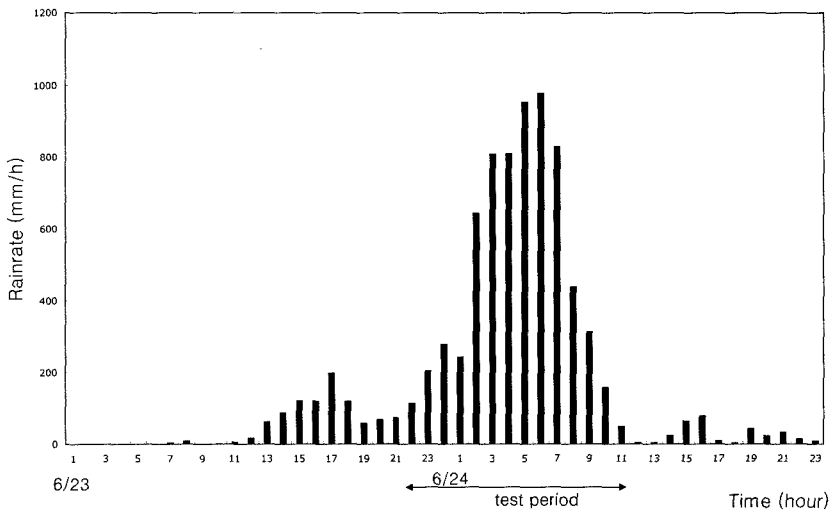

Fig. 3. Time series of synoptic rainrates summation in case region from 0010LST 23 to 2300LST 24 June 2002.

Table 2. Average of mean of αG and αR, standard deviation of αG and αR from 22LST 23 to 11LST 24 June 2002.

		EXP1	EXP2	EXP3	EXP4	EXP5	EXP6	EXP7	EXP8	EXP9	EXP10
mean	α_G	0.60	0.60	0.60	0.60	0.58	0.58	0.58	0.58	0.59	0.59
	α_R	0.40	0.40	0.40	0.40	0.42	0.42	0.42	0.42	0.41	0.41
stan. dev.	α_G	0.30	0.24	0.21	0.20	0.19	0.18	0.17	0.17	0.17	0.16
	α_R	0.30	0.24	0.21	0.20	0.19	0.18	0.17	0.17	0.17	0.16

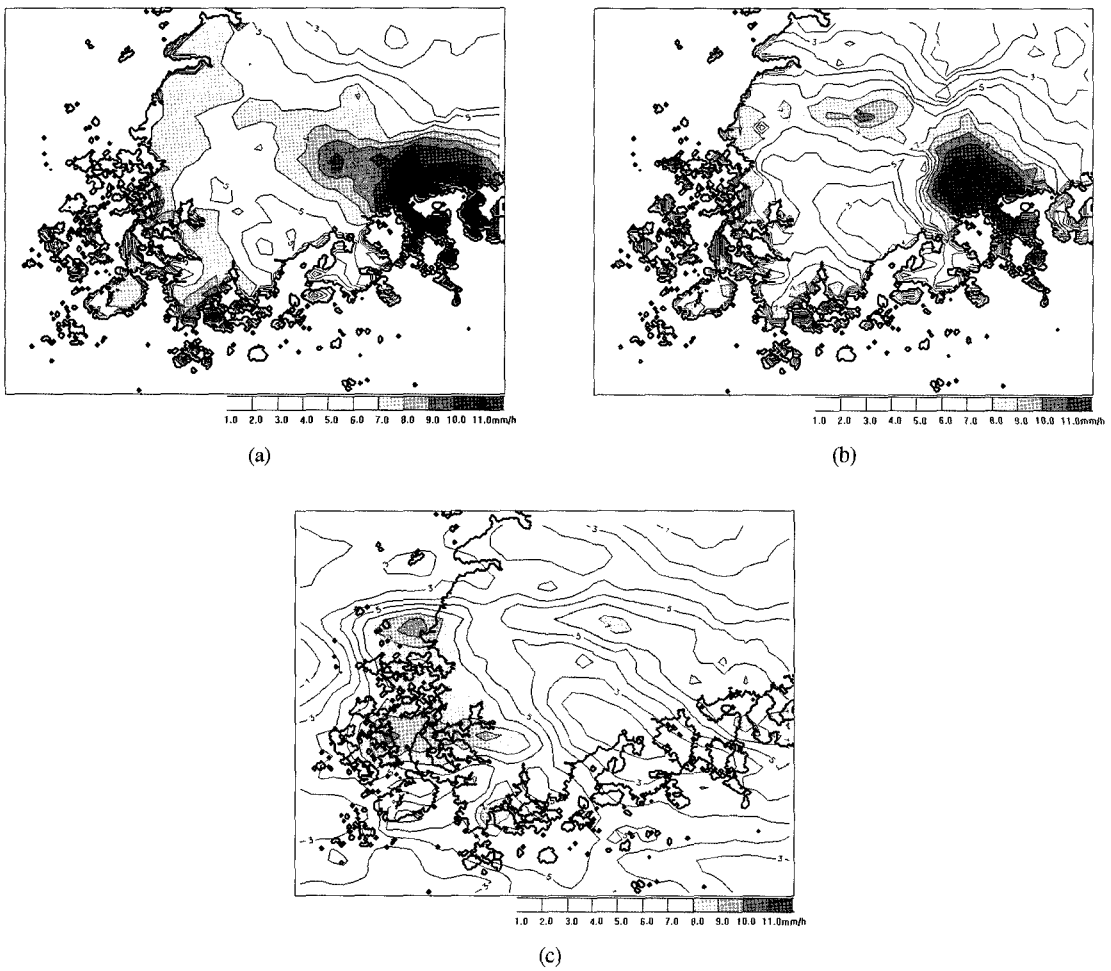

Fig. 4. (a) synoptic rainfall, (b) AWS rainfall and (c) RADAR estimated rainfall at 0500LST 24 June 2002.

점 밖에 분포하지 않아서 상세한 강수 형태를 보여주지는 못하고 있으나 매 시간 점검을 하여 기계적인 오차가 발생할 가능성이 적고, 0.1mm 단위까지 측정이 가능하기 때문에 종관관측 자료를 참값으로 보고 계산하였다.

훈련시간에 따른 최적가중치의 차이를 알아보기 위하여 24일 5시의 1시간, 2시간, 3시간, 10시간의 AWS의 최적가중치를 Fig. 5에 나타내었다. RADAR의 최적가중치는 AWS와 반대의 구조를 보이므로 나타내지 않았다.

AWS의 최적 가중치는 남서해안과 사례영역의 북쪽과 지리산 부근에서 크게 나타났다. Figure 5 (a)의 EXP1의 최적 가중치는 분포는 지역적으로 요철이 심하다. (b) 2시간 평균제곱오차로부터 구한 최적가중치는 (a)와 강한 피크를 보이는 지역은 비슷하나 좀 더 평탄

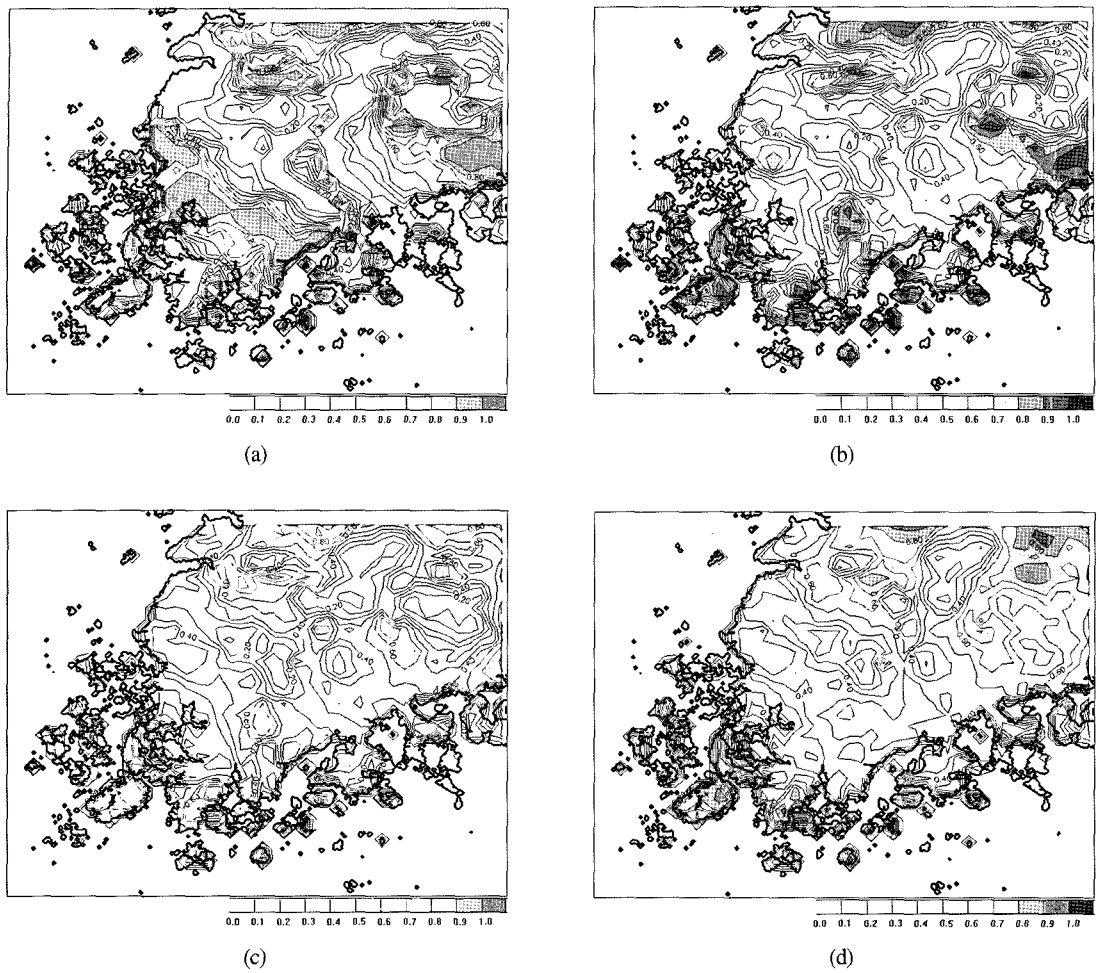

Fig. 5. Optimal weight of AWS (α_G) of (a) EXP1, (b) EXP2, (c) EXP3 and (d) EXP10 (0500LST 24 June 2002).

화된 구조를 보여준다. 훈련시간이 3시간, 10시간인 (c)와 (d) 역시 (b)와 거의 비슷한 분포를 보인다. 본 연구에서는 적정한 훈련시간을 찾기 위해서 긴 기간 동안 강수가 지속이 된 시간대를 정하여 실험을 하였으나, 훈련시간 2시간 이후부터는 가중치의 분포가 평탄화 되어서 큰 차이를 보이지 않았다.

Figure 6은 EXP1, EXP2, EXP3, EXP10에 따른 24일 5시의 최적 결합 강수량이다. 전체적인 분포는 Fig. 4의 RADAR 강수량과 거의 유사하나 종관관측 강수와 AWS 강수에서 10mm/h 이상의 강한 피크를 보이는 지리산 남부 및 광양 등지에서 2mm/h 이상 강수량이 증가하였다. 최적 가중치와 같이 훈련시간 1시간 이상의 최적 결합 강수량은 RADAR 강수량과 비슷한 분포를 보이며 최대값을 보이는 지역이 분포가 줄어드는 것을 알 수 있다.

종관관측 강수량과의 상세한 비교를 위하여 사례시간 전체의 AWS, RADAR, EXP1, EXP10의 최적 결합 강수량을 Fig. 7에 산포도로 나타내었다. Figure 7에서 보면 종관관측 강수량보다 AWS 강수량은 약간 높게, RADAR 강수량은 대체로 낮게 관측이 되었다. 특히 RADAR 강수량은 10mm/h 이상의 강한 강수를 거의 나타내지 못하고 있다. 이들을 통합한 최적 결합 강수량은 종관관측 강수보다 높은 AWS 값은 대부분 종관강수량과 유사하게 조절되었으나 RADAR 강수량에 존재하는 종관관측 강수량보다 작은 값은 여전히 존재하고 있다. AWS와 종관 강수량의 상관계수는 0.77, RADAR

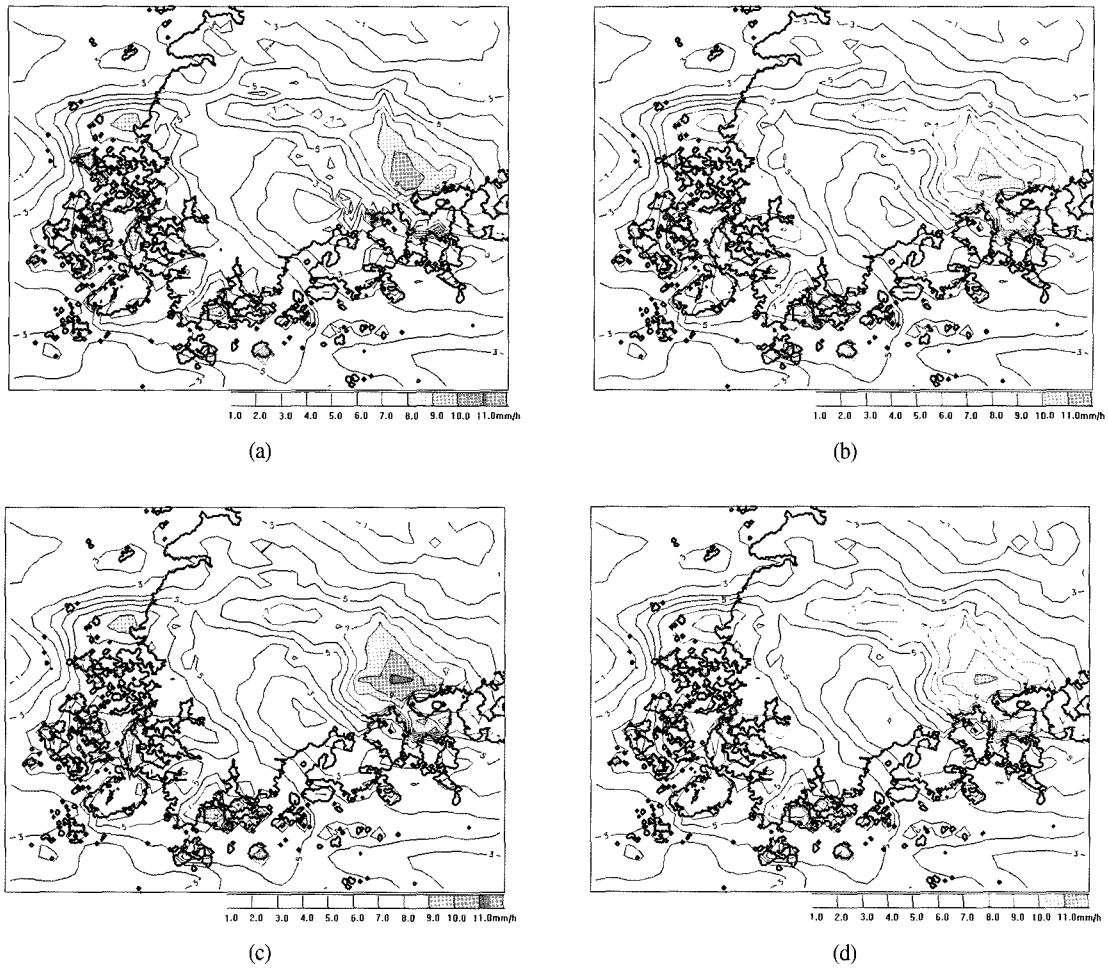

Fig. 6. Optimized precipitation of (a) EXP1, (b) EXP2, (c) EXP3 and (d) EXP10 at 0500LST 24 June 2002.

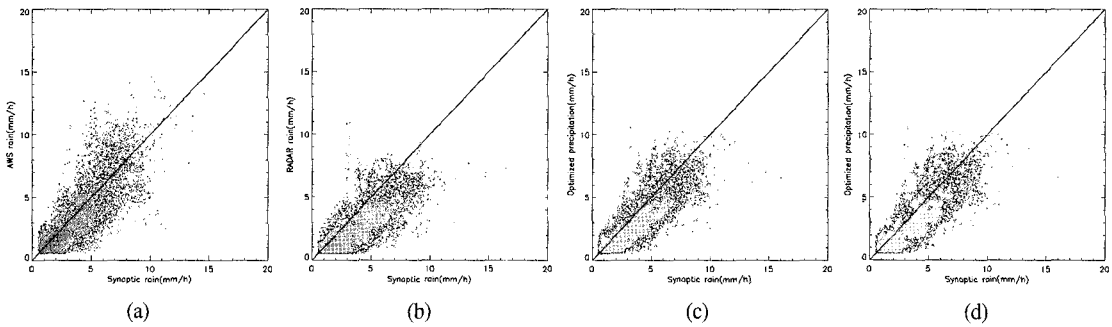

Fig. 7. Scattered diagram of synoptic rain and (a) AWS rain, (b) RADAR rain, (c) optimized precipitation of EXP1 and (d) optimized precipitation of EXP10.

와 종관 강수량은 0.74이며, 훈련시간 1시간의 최적 결합 강수량과 종관관측 강수량의 상관 계수는 0.77이며, 훈련시간 10시간의 최적 결합 강수량과 종관관측 강수량의 상관 계수는 0.80이다. 훈련시간 10시간의 상관계수가 약간 높은 것은 최적 가중치가 전체적으로 평탄화되면서 최적 결합 강수량도 평탄화되면서 17지점 밖

에 분포하지 않는 종관관측 강수량의 격자화된 평탄한 구조와 잘 일치하는 것처럼 나온 것으로 생각된다. 그러나 일반적으로 강수 현상은 10시간 이상 지속되기 힘들기 때문에 매번 강수 사례마다 10시간의 훈련시간을 가지긴 힘들며 국지적인 구조를 잘 보여주는 1시간 과거의 최적 결합값을 사용하는 것이 적합하다고 생각된다.

4. 결 론

강수량 정보는 악기상 시 매우 중요하여, 지점 관측, RADAR, 위성 등 여러 관측 방법으로 관측이 되고 있다. 그러나 각 관측 방법에 따른 강수량의 산출 간격 및 분포가 달라서 현황 분석 및 예보 시 어려움이 있다. 종관관측 강수량은 관측소에서 매시간 우량계의 강수량을 점검하여 오류를 보정하기 때문에 정확하나 관측소가 전국에 약 80개소 정도로 성글게 분포하고 있다. AWS는 전국에 약 600개소가 분포하고 있어 종관관측소에 비하여 조밀하게 분포하나 관리가 어려운 산악 지역이나 도서 지역에서는 관측이 잘 되지 않으며 해상의 강수량은 관측이 불가능하다. RADAR 관측 강수량은 공간적으로 균질하며 1km이하의 해상도로 관측이 되며, 또한 연직적인 강수량 정보를 제공하기 때문에 악기상시 매우 유용하다. 그러나 강수량을 지점관측보다 작게 관측하는 경향이 있으며 특히 강한 호우가 발생하는 지역에서 강수량이 작게 추정되는 경향이 있다.

본 연구에서는 이들 종관, AWS, RADAR로 관측된 강수량을 사용하여 각 관측의 장점을 살린 최적 결합 방법을 연구하였다. 최적 결합 방법은 2002년 장마 사례에 적용하였으며, 참값을 종관관측 강수량으로 두고 참값과 AWS와 RADAR 강수량의 각각의 평균제곱오차에 반비례하는 최적 가중치로부터 최적 결합 강수량을 계산하였다. 훈련시간에 따른 최적 가중치와 최적 결합 강수량을 차이를 보기 위하여 긴 기간동안 강수가 발생한 사례에 대하여 훈련시간을 1시간에서 10시간까지 실험해 본 결과 훈련시간 2시간 이후부터는 가중치의 분포가 평탄화 되어 비슷한 분포를 보였으며, 최적 결합 강수량 역시 2시간 이후는 비슷한 분포를 보였다. 매번 강수 사례마다 10시간의 훈련시간을 가지긴 힘들며 강수량 분포의 지역적인 구조가 잘 나타나는 1시간 과거의 최적 결합값을 사용하는 것이 적합하다고 생각된다.

최적 결합에 대한 연구는 관측 강수량 통합에 대한 하나의 예로 제시될 수 있으며, 이 방법을 사용하여 AWS나 RADAR 강수량 외의 위성, 수치예보 강수량들과의 조합 역시 가능하다. 각 자료의 시 · 공간적인 특성을 적절히 이용하면 더 짧은 시간, 더 높은 해상도로 강수량을 생산할 수 있으며 강수량 외의 다른 변수에도 적용이 가능하여 최적 결합 방법은 그 활용가능성이 매우 높다.

감사의 글

이 논문은 환경부의 "차세대핵심환경기술개발사업(Eco-technopia 21 project)"의 지원과 교육인적자원부의 'BK21 2단계 사업'의 지원으로 연구되었습니다.

참고문헌

하경자, 오현미, 서애숙, 김정희, 2002. TRMM/PR 자료와 지상 레이더와의 비교, 한국지리정보학회지, 5(4): 1-8.

Atlas, D. and A. C. Chmela, 1957. Physical-synoptic variations of drop size parameters. *Proc 6th Wea. Radar Conf.*, Boston, USA, Amer. Meteor. Soc., 21-29.

Biggersfaff, M. I. and S. A. Listemaa, 2000. An improved scheme for convective/stratiform echo classfication using radar reflectivity, *J. Appl, Meteor.*, 39: 2129-2150.

Gargin, A., D. Rosenfeld, and R. E. Lopez, 1985. The relationship between height and precitation characteristics of summertime convective cells in Florida, *J. Atmos. Sci.*, 43: 84-94.

Marshall, J. S. and W. Mck. Palmer, 1948. The distribution of raindrops size. *J. Atmos. Sci.*, 5: 165-166.

North, G. R. and S. Nakamoto, 1989. Formalism for comparing rain estimation designs, *J. of*

Atmospheric and Oceanic Technology, 6: 985-992.

North, G. R., Samuel S. P. Shen, and R. B. Upson, 1991. Combining rain gages with satellite measurements for optimal estimates of area-time averaged rain rates, *Water Resources Research*, 27: 2785-2790.

Steiner, M. and R. A. Houze Jr., 1993. Three dimensional validation at TRMM ground truth sites: some early results from Darwin, Australia. Preprints, *26th Inter. Conf. Radar Meteor.*, Norman, USA, Amer. Meteor. Soc., 417-420.

Steiner, M, R. A. Houze Jr, and S. E. Yuter, 1995. Climatological characterization of three-dimensional storm structure from operational radar and rain gage data, *J. Appl, Meteor.*, 34: 1978-2007.

Woodley, W. L., A. R. Olsen, A. Herndon, and V. Wigert, 1975. Comparison of gage and radar methods of convective rain measurement, *J. Appl. Meteor.*, 14: 909-928.