

진해만 유량과 부하량 산정을 위한 기상레이더 시공간 강우 자료 적용 가능성 평가

조준모 · 박성은 · 김청숙 · 이지영* · 김종홍 · 이은주

국립수산과학원 해양환경연구과

Evaluation of the Applicability of Weather Radar-Based Spatiotemporal Rainfall Data for Freshwater Inflow and Pollutant Load Estimation in Jinhae Bay

Junmo Jo, Sung-Eun Park, Chungsook Kim, Jiyoung Lee*, Jong-Hong Kim and Eun-Joo Lee

Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Republic of Korea

This study evaluates the applicability of weather radar rainfall data as spatially distributed rainfall inputs for freshwater inflow and pollutant load estimation in coastal areas. Rain-gauge observations from three stations near Jinhae Bay were compared with weather radar rainfall data for the 2020 wet season. Radar rainfall intensity was estimated using the Marshall and Palmer Z-R relationship, and a mean field bias (MFB) correction was applied to reduce systematic underestimation resulting from indirect estimation and atmospheric attenuation. The radar rainfall data showed correlation coefficients greater than 0.8 at all stations, indicating that temporal variability of rainfall was reproduced. However, the bias was approximately -0.55, indicating underestimation relative to rain-gauge observations. After MFB correction, the bias approached 0, and the relative errors decreased from approximately 54% to 13%, while the correlation coefficients remained high. These results indicate that bias-corrected weather radar rainfall data can complement point-based rain-gauge observations by providing spatially distributed rainfall information. However, verification in this study was limited to improvements in radar rainfall estimates at rain-gauge locations and adjacent radar grids. Therefore, further verification using independent hydrological or offshore rainfall observations is required before any resulting improvements in the estimation of freshwater inflow and pollutant loads can be quantified.

Keywords: Jinhae Bay, Mean field bias, Rain-gauge, Weather radar, Rainfall intensity

서론

연안역은 육상과 해양이 교차하는 경계 공간으로 강우는 이 두 시스템의 물질 수송을 연결하는 핵심 기상 인자이다. 강우는 육상의 영양염, 유기물, 중금속 등 다양한 오염물질을 담수와 함께 연안으로 유출하며, 염분, 수온, 유동 구조 등 연안의 물리·화학적 구조를 급격히 변화시킨다. 특히 집중 호우에 의한 저염분 확산 및 급격한 오염부하는 연안 양식 환경에 악영향을 미쳐 수산물의 폐사 및 품질 저하, 양식장 운영 중단 등 직접적인 피해를 초래한다. GESAMP (1990)에 따르면 강우 기원 연안해역 오염 기여율은 약 77%로 선박(12%) 및 해양투기(10%) 등 여

타 오염원의 기여율에 비해 크게 높아, 강우가 연안 수질 관리의 핵심 인자임을 알 수 있다. 최근에는 육상기원 오염물질과 강우 유출이 연안 및 해양환경에 미치는 영향이 국제적으로도 중요하게 다루어지고 있어, 강우 입력자료의 정확한 산정 필요성이 더욱 강조되고 있다. 더불어 최근 기후변화로 인한 극한 강우와 국지성 호우의 빈도 증가는 강우가 연안 해양환경에 미치는 영향 이해의 필요성을 가중시키고 있다. 연안해양환경의 보전 및 관리를 위해서는 강우로 인해 연안으로 유출되는 유량과 오염부하량의 정확한 산정이 필수적이다. 오염부하량 계산에 필요한 유량은 주로 현장 관측 또는 유역모델에 의존하여 산정된다. 앞서 두 가지의 유량 산정 방식 중 현장 관측의 경우 비교적

*Corresponding author: Tel: +82. 51. 720. 2520 Fax: +82. 51. 720. 2515

E-mail address: jylee03@korea.kr



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.

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2026.0349>

Korean J Fish Aquat Sci 59(4), 349-357, August 2026

Received 26 May 2026; Revised 23 June 2026; Accepted 27 July 2026

저자 직위: 조준모(연구원), 박성은(연구관), 김청숙(연구원), 이지영(연구사), 김종홍(연구원), 이은주(연구원)

정확하고 직관적이지만 광역적인 강우의 영향 파악에 효율성이 떨어져, 주로 검증 데이터로 활용된다. 유역모델은 현장 관측에 비하여 장기간 및 광역의 유량 정보를 효율적으로 제공할 수 있다. 그러나 기존 유역모델은 우량계 강우 데이터를 입력자료로 사용하는 경우가 많기 때문에, 강우의 공간적 변동성을 충분히 반영하지 못하는 한계를 가진다. 이러한 강우 입력자료의 공간 대표성 부족은 유역 유출량 및 오염부하량 산정의 불확실성을 증가시킬 수 있으며, 연안해역 수질 관리 및 수치모델 입력자료 구축에도 영향을 미칠 수 있다.

우량계 기반 강우자료의 공간적 한계는 연안수치모델링 연구에서 반복적으로 지적되어 왔다. Lee (2003)와 Kong et al. (2005)은 우량계 자료를 Tank 모델에 적용하여 해역의 정량적 오염부하량을 산정하였으며, Kim et al. (2014) 또한 우량계 강우 자료를 활용하여 수질오염총량제에 대한 동적 모델의 적용 가능성을 검토하였다. 그러나 이들 연구는 공통적으로 우량계의 공간적 한계로 인해 강우의 국지적 변동을 충분히 반영하지 못하였다. Lee et al. (2019)의 연구에서도 연안 수질 관리를 위한 하천 유량 산정 시 4개 지점의 점 강우 자료만을 활용함으로써, 강우장의 비균질적 특성을 정밀하게 재현하는 데 한계가 있었다. 이처럼 기존 연구들은 가용 강우자료의 부족으로 인해 공간 내삽 과정에서 오차가 내포될 수밖에 없었으며, 이는 연안수치모델의 정확도를 저해하는 주요 요인으로 작용하였다. 우량계 밀도를 높이거나 하천 유량을 직접 관측함으로써 이러한 한계를 부분적으로 개선할 수 있으나(Kim et al., 2010), 이는 막대한 비용과 운영 자원을 요구하므로 광역적 적용에는 현실적 제약이 따른다.

이러한 한계를 극복하는 대안으로 다양한 분야에서 기상레이더를 활용한 연구가 활발하다. 우리나라에서는 1969년 기상레이더가 최초로 도입된 이후 관측망 확충과 강우 추정 기술 개발을 통해 한반도 전역의 면적 강우 관측 기반이 마련되었다. 기상레이더는 전자기파의 후방산란을 이용하여 광범위한 지역의 강우 분포를 고해상도의 시공간 자료로 제공한다. 이를 통해 우량계로는 관측이 곤란한 산간지역 및 해상 등 다양한 지형 조건에서도 일관된 강우 정보를 획득할 수 있으며, 강우의 공간적 변동성을 효과적으로 재현할 수 있다(MLTM, 2008). 실제로 Cho et al. (2020)은 기상레이더 강우자료를 수문모델에 적용하여 댐 유입량을 효율적으로 산정하였으며, Ahn et al. (2013)은 기상레이더가 우량계에 비해 공간적 활용성에서 우위에 있음을 확인하였다. 이 밖에도 Smith et al. (2007), Bae et al. (2010), Kim et al. (2011) 등 다수의 연구에서 기상레이더를 활용한 유량 산정 정확도 향상이 보고되고 있다. 그러나 이들 연구는 주로 내륙 수문 분야에 집중되어 있으며, 연안해양환경 분야에서 기상레이더 강우자료를 활용하여 유량 및 오염부하량을 산정하고 연안수치모델에 적용한 사례는 극히 제한적이다. 현재까지도 연안수치모델링 연구의 상당 부분이 우량계에 의존하고 있으며, 이는 연안 수질 모의 및 예측 정확도의 향상에 주요한 제약으로

작용하고 있다.

기상레이더 강우자료를 연안해양환경 연구에 본격적으로 활용하기 위해서는, 자료의 정확도 검증과 함께 전파 차폐 및 감쇄 등에 기인하는 강우량 과소추정 문제에 대한 보정이 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 연안해역에 인접한 3개 우량계 관측 정점 자료와 기상레이더 강우자료를 비교·분석함으로써, 기상레이더 강우자료의 시간적 재현성 및 정량적 편의를 평가하였다. 더불어, 레이더 고유의 과소추정 오차를 보정하는 알고리즘을 적용하여 자료의 정확도를 개선하고, 이를 진해만 유량 및 오염부하량 산정 정확도 개선을 위한 강우 입력자료로 활용할 수 있는지 평가하였다. 다만 본 연구의 검증은 우량계 관측 지점에 기반하므로, 보정 기상레이더 강우자료의 적용 가능성과 함께 향후 연안 유량·부하량 산정 및 수치모델 적용을 위한 추가 검증 필요성도 함께 검토하였다. 본 연구의 결과는 강우의 공간적 변동성을 정밀하게 반영한 연안수치모델링 체계 구축에 기여하고, 수산 재해 예방 및 연안 수질 관리를 위한 과학적 근거를 제공할 것으로 기대된다.

재료 및 방법

연구해역

연안 규모에서 기상레이더의 강우 추정 성능 검증을 위하여 과거부터 양식생산이 활발하며 해양환경문제가 빈번한 진해만을 연구해역으로 선정하였다. 진해만은 우리나라 남해안의 동쪽에 위치하며 만의 길이는 남북과 동서로 각각 약 25 km이며 넓이는 약 637 km²이다. 6개의 소내만 해역을 포함한 만 내에서의 흐름은 10 cm/s 이하로 미약하고 해수 순환은 제한적이며 수심이 비교적 깊은 동쪽 수로에서의 유속은 약 100 cm/s 정도이다(Kang, 1991).

진해만은 지난 50년간 굴(*Crassostrea gigas*)과 홍합(*Mytilus galloprovincialis*) 등 양식 생산이 활발하게 이루어진 대표적인 반폐쇄성 해역으로, 부영양화와 빈산소수괴 등 다양한 해양환경 문제가 지속적으로 보고되어 왔다(Lim and Shin, 2005; Lee et al., 2020). 반폐쇄성 해역인 진해만은 산업폐수 및 생활하수 등 오염물의 지속적 유입과 침강으로 유해 적조 및 패류 독성, 빈산소수괴 등 환경 문제가 꾸준히 발생한다(Kong et al., 2005). 진해만의 어장 환경의 보전 및 개선을 위해서 환경 개선을 위한 연구가 활발히 이뤄지고 개선되었으나 하계 기간 동안 발생하는 빈산소수괴와 유해 적조 등의 문제가 여전히 발생하고 있다. 양식 산업이 활발하고 약 40개의 하천을 통해 육상의 오염부하가 유입되는 진해만의 환경 분석과 예측을 위해서는 기상레이더와 같은 데이터를 활용한 입체적인 강우의 분석이 필수적이다.

우량계 강우자료 및 전처리

본 연구는 진해만 인근 방재기상관측소(automatic weather

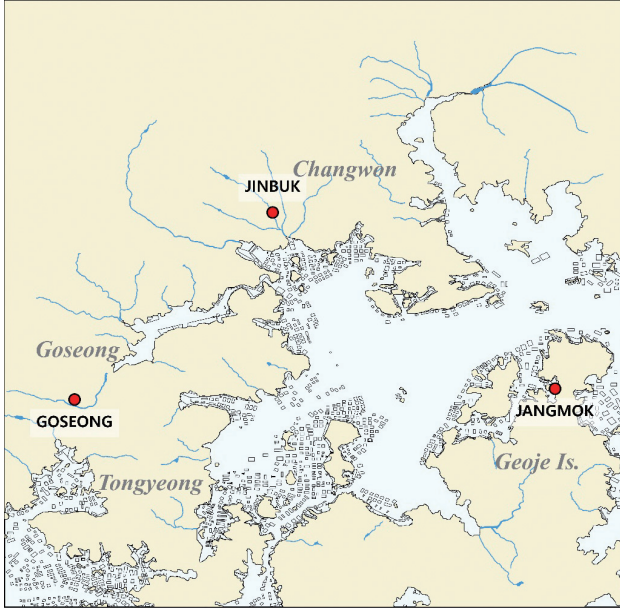


Fig. 1. Map of Jinhae Bay showing aquaculture farms, rivers, and rain-gauge stations. Red dots indicate rain-gauge stations and blue lines indicate rivers.

station)의 우량계(이하 우량계)와 기상레이더 자료를 비교하였다. 우량계와 기상레이더 자료는 기상청의 기상자료개방포털(www.data.kma.go.kr)에서 풍수기에 해당하는 2020년 7월과 8월의 자료를 사용하였다. 기상레이더의 검증에 위해 사용된 우량계 정점은 진해만을 중심으로 가장 인접한 고성(Goseong), 진북(Jinbuk), 장목(Jangmok) 3개 정점의 우량계 자료를 사용하였다(Fig. 1, Table 1).

기상청에서 운영하는 우량계는 1분 누적강우량을 최소단위로 제공한다. 비교에 사용된 우량계는 전도형 자기우량계(tipping-bucket rain gauge)로 0.5 mm 해상도로 강우를 관측하며 1분 누적강우량을 별도의 보정 없이 강우강도(mm/h)로 환산하였을 때 30 mm/h 간격의 강우강도를 산출하게 된다. 따라서 우량계 강우강도의 관측 해상도를 보정하기 위해 식(1)을 이용하여 15분 이동평균 기반 강우강도를 산출하였다.

$$R_i = \left(\frac{\sum_{i=7}^{i+7} r_i}{15} \right) \times 60 \dots\dots\dots (1)$$

여기서 R_i (mm/h)=강우강도, r_i (mm)=1분 강우량을 나타낸

Table 1. Information on the rain-gauge stations used in this study

Station name	Station code	Latitude (°N)	Longitude (°E)
Goseong	918	35.00	128.33
Jinbuk	926	35.13	128.47
Jangmok	953	35.00	128.68

다. 식(1)에서 $i-7$ 부터 $i+7$ 까지의 합은 해당 시점을 중심으로 전후 7분을 포함한 총 15분 누적강우량을 의미하며, 15는 평균 계산을 위한 시간 간격, 60은 분 단위 강우량을 시간당 강우강도(mm/h)로 환산하기 위한 계수이다.

기상레이더 강우자료 및 보정

연안 강우의 공간분포를 분석하기 위하여 기상레이더 자료를 활용하였다. 본 연구에서 사용한 기상레이더 자료는 수평적으로 약 500 m 해상도를 갖는 격자형 강우자료이다(Jo et al., 2020). 기상레이더는 반사도와 강우강도 사이의 경험적 관계식인 Z-R 관계식을 통해 강우강도를 추정한다. 본 연구에서는 강우입자 크기분포에 기반하여 제시된 대표적인 Z-R 관계식인 Marshall and Palmer (1948) 관계식(이하 M-P 관계식)을 적용하여 레이더 강우강도를 산출하였다. M-P 관계식은 기상레이더를 이용한 강우 추정에서 널리 사용되어 왔으며, 국내 기상레이더 강우 산정 연구에서도 일반적으로 적용되는 관계식 중 하나이다. 사용된 M-P 관계식은 식(2)와 같이 표현된다.

$$Z=200R^{1.6} \dots\dots\dots (2)$$

여기서 R (mm/h)=강우강도, Z (mm⁶ m⁻³)=반사도이다. M-P 관계식은 보편적으로 사용되는 장점이 있으나, 단일 Z-R 관계식이므로 강우 유형, 강우입자 크기분포, 계절적 특성, 지역적 대기 조건의 차이를 모두 반영하기에는 한계가 있다(Battan, 1973; Smith, 1993). 또한 기상레이더는 전파를 이용해 강우를 간접적으로 추정하므로 산악 지형, 대기 상태, 전파 감쇠 및 차폐 등에 의해 강우량을 과소 또는 과대 추정할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 M-P 관계식으로 산정된 원시 레이더 강우자료를 그대로 사용하지 않고, 우량계 관측자료와 비교하여 정량적 편의를 평가한 후 mean field bias (MFB) 보정을 적용하였다. MFB 보정법은 우량계 관측 강우량과 이에 대응하는 레이더 강우량의 총량 비를 이용하여 레이더 강우장의 평균적인 계통편의(systematic bias)를 보정하는 방법이다. 본 연구에서는 우량계 지점에서 확인되는 레이더 강우자료의 전반적인 과소추정을 완화하기 위해 MFB 보정을 적용하였다. MFB 보정은 식(3)과 같다.

$$C_{MFB} = \frac{\sum_{i=1}^N Gauge_i}{\sum_{i=1}^N Radar_i} \dots\dots\dots (3)$$

C_{MFB} =보정계수, $Gauge_i$ (mm/h)= i 번째 우량계 강우 자료, $Radar_i$ = i 번째 기상레이더 강우 자료를 뜻한다.

식(3)을 통해 산정된 MFB 보정계수는 우량계 정점에 대응하는 기상레이더 격자값과 우량계 관측값의 총량 비를 이용하여 계산되었으며, 보정 적용 시에는 동일 시간의 기상레이더 강우장 전체 격자에 일괄 적용하였다. 따라서 보정 기상레이더 강우자료는 우량계 지점의 값만을 수정한 자료가 아니라, 우량계 관측을 기준으로 원시 레이더 강우장의 평균적 정량 편의가 보정

된 격자형 강우장으로 해석할 수 있다. 다만 MFB 보정은 관측 지점에서 산정한 단일 보정계수를 레이더 강우장 전체에 적용하는 방법이므로, 강우의 국지적 공간 오차나 시간에 따라 달라지는 강우 유형별 오차를 모두 제거하는 데에는 한계가 있다. 또한 본 연구에서는 진해만 인근 3개 우량계 정점만을 이용하여 보정계수를 산정하였으므로, 보정 결과는 우량계가 위치한 육상 지점과 인접 레이더 격자의 정량적 편의 개선을 중심으로 해석하였다. 이후 보정 기상레이더 강우장의 공간적 특성을 평가하기 위해, 동일 기간의 우량계 누적강우량을 공간 내삽한 결과와 비교하였다.

MFB 보정과 더불어 지형으로 인한 전파 차폐 영향을 줄이기 위해 합성 hybrid surface rainfall (HSR) 기법이 적용된 기상레이더 자료를 사용하였다. HSR 자료는 빙 차폐가 50% 이하이고 지표에 가장 근접한 최적 고도각 자료를 선택 및 합성하여 산출된다(Joss et al., 1990; Westrick et al., 1999). 본 연구에서는 이 HSR 자료를 이용하여 진해만 주변의 레이더 강우강도를 산정하였다.

우량계-기상레이더 자료 비교 방법

우량계와 기상레이더 비교는 우량계에 대응하는 기상레이더 격자를 포함한 인근 자료를 평균하여 우량계와 비교하였다. 대기 중 기상레이더로 관측된 빗방울은 낙하하며 충돌, 산란되고 이로 인해 실제 낙하하는 강우와 기상레이더로 관측된 강우 정보가 상이하기 때문에 우량계 정점 인근의 격자 정보를 함께 활용하여 이를 고려하는 것이 바람직하다. 따라서 본 연구에서는 우량계 정점에 대응하는 기상레이더 격자를 중심으로 ± 1 에 해당하는 3×3 격자 자료를 평균하여 우량계 자료와 비교하였다(Fig. 2).

결 과

우량계 관측 강우의 공간적 변동성

기상레이더 강우자료의 검증에 앞서, 2020년 7월에서 8월까지 진해만 인근 우량계에서 관측된 강우를 비교하여 지역 간 강우 특성 차이를 파악하였다(Fig. 3). 비교 결과, 진해만을 중심으로 반경 약 20 km 이내에 위치한 우량계 정점들이지만 상관계수는 각 정점별로 0.33, 0.32, 0.20으로 낮게 나타났다. 각 우량계 정점 간 강우의 차이는 구름의 이동, 지형 변화, 수증기 공급 변동 등으로 인한 강우의 공간적 변동성에 기인한 것으로 사료된다. 이처럼 단일 지점에서 관측되는 우량계 자료는 진해만에서 발생하는 강우의 시공간 변동을 대표하기 어렵다. 따라서 우량계 기반 유량 및 부하량 산정 방식에서는 강우의 공간적 변동성이 입력자료에 충분히 반영되지 않을 수 있다.

강우의 시공간 변동과 유역 내 면적강우량을 정확히 파악하기 위해서는 바람을 따라 이동하는 강우의 중심을 포착하는 것이 중요하다. 우량계는 한 지점의 강우만을 관측하며 정점의 이동

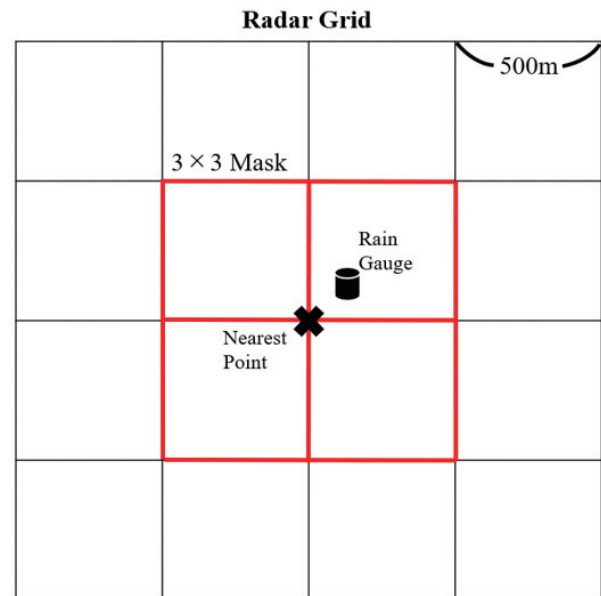


Fig. 2. Schematic diagram of the comparison method between rain-gauge and weather radar data. Black lines indicate the 500 m weather radar grid, the red square indicates the 3×3 mask used for averaging, the cross mark indicates the radar grid nearest to the rain-gauge, and the cylinder indicates the rain-gauge station.

이 불가하기에 우량계가 강우의 중심을 관측하지 못한 경우 면적강우량 산정에 오차가 내포될 수 있다. Fig. 4는 2020년 7월 29일과 8월 8일 진해만에서 발생한 강우의 강우강도 분포와 각 정점에서의 강우강도 시계열을 기상레이더 자료 기반으로 나타낸 것이다. Fig. 4와 같이 강우의 이동경로에 따라 각 우량계 정점에서 나타나는 강우의 세기가 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 강우 중심부의 위치에 따라 정점 간 약 40 mm/h의 강우강도 차이가 나타났다. 이처럼 강우의 중심부 위치에 따른 정점 간 강우강도 차이와 불규칙성은 수학적 내삽만으로 정확히 계산되기 어렵다. 이러한 결과는 진해만과 같은 연안역의 강우 분석에서 격자 형태의 공간 강우자료가 필요함을 보여준다.

기상레이더 강우의 재현성 및 MFB 보정 효과

Fig. 5는 2020년 7월 발생한 강우 이벤트의 일부를 시계열로 나타낸 것이며 각 시계열은 우량계와 기상레이더로 관측된 강우 정보를 나타낸다. 검은 실선으로 표시된 우량계 시계열의 경우 모든 정점에서 강우의 피크가 나타나는 시간은 유사하게 나타났다. 그러나 각 우량계 정점에서의 강우강도 증감 경향과 세기는 서로 상이하였으며, 특히 고성과 진북에서 9시 이후 나타나는 강우강도의 세기가 약 2배의 차이를 보였다. 파란색 실선으로 나타낸 보정 전 기상레이더 강우강도는 각 우량계 정점에서 나타나는 강우의 증감 경향 및 강우의 특성을 대체로 반영하였으나, 강우강도의 경우 세기가 강할수록 기상레이더의 과

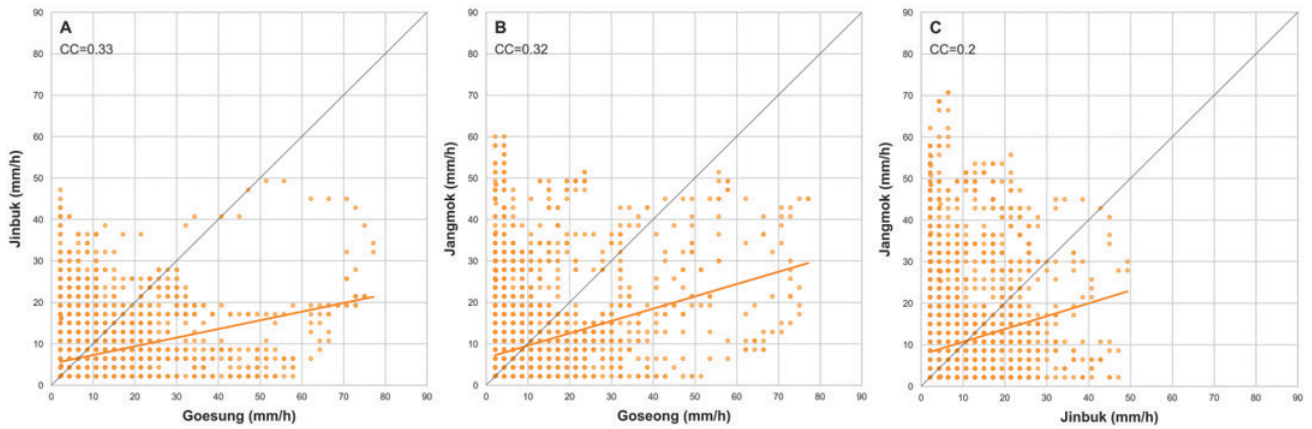


Fig. 3. Scatter plots showing correlations in rainfall among the three rain-gauge stations near Jinhae Bay. CC, correlation coefficient; A, Goseong vs. Jinbuk; B, Goseong vs. Jangmok; C, Jinbuk vs. Jangmok.

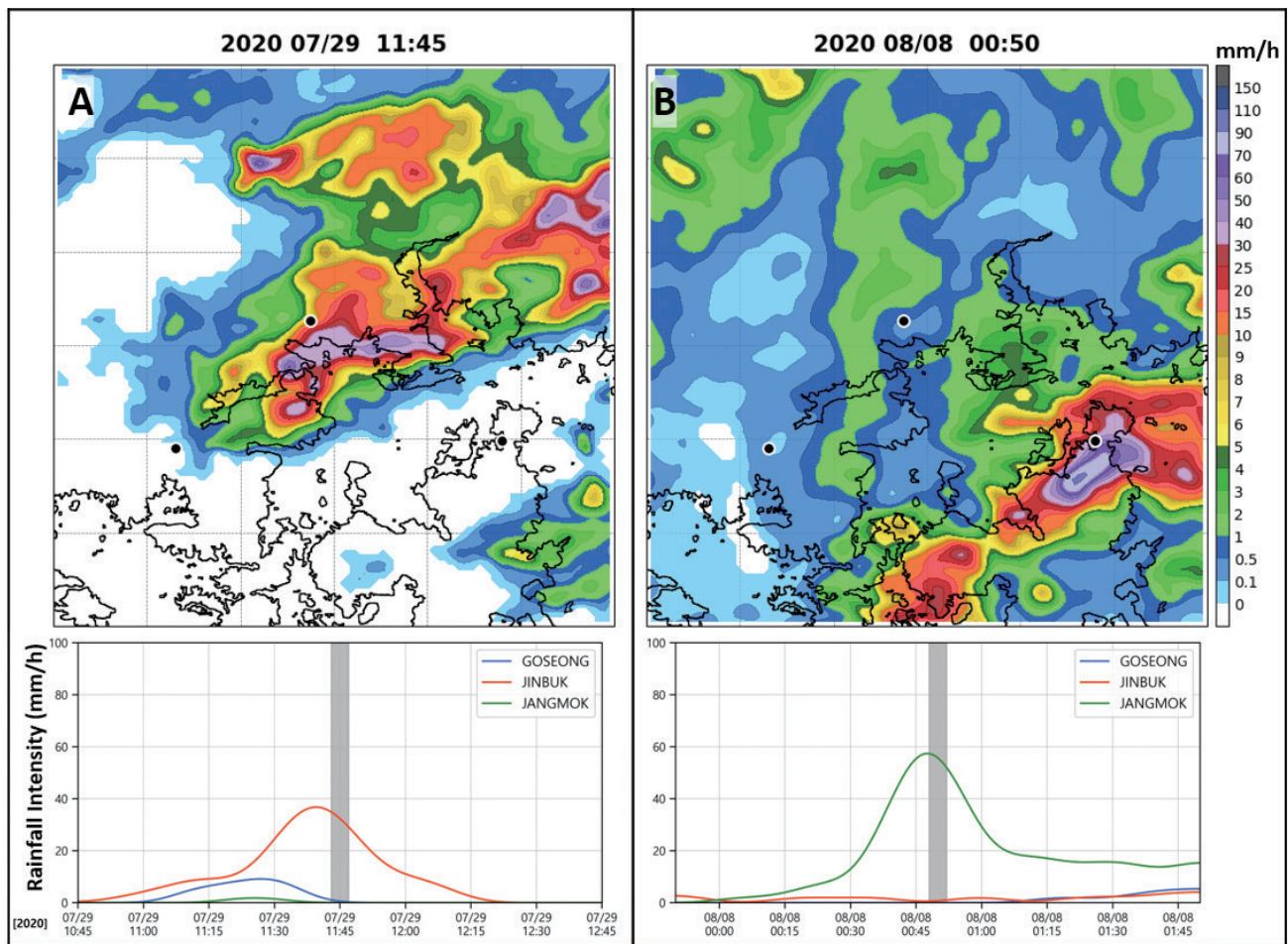


Fig. 4. Spatial distribution of radar rainfall intensity and rainfall intensity time series at the three rain-gauge stations during the rainfall events. A, July 29, 2020; B, August 8, 2020.

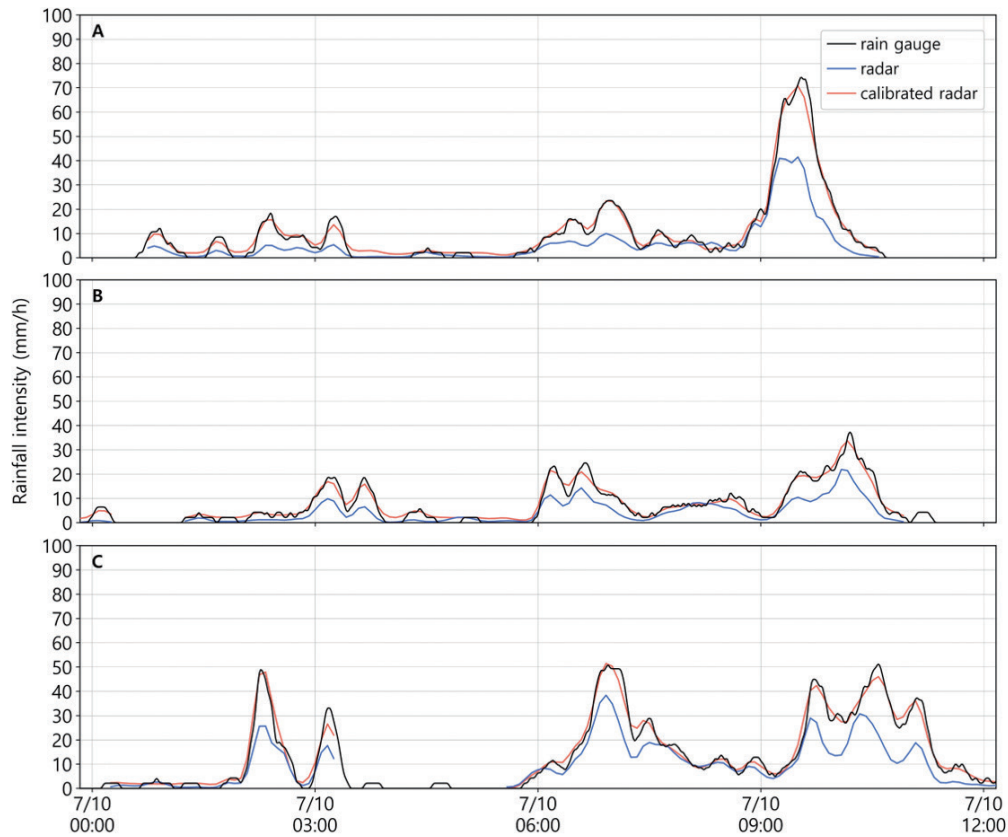


Fig. 5. Time series of rainfall intensity at each rain-gauge station. Black, blue, and red solid lines indicate rain-gauge, radar, and calibrated radar, respectively. A, Goseong; B, Jinbuk; C, Jangmok.

소추정이 두드러졌다. MFB 보정 후의 기상레이더 강우강도는 Fig. 5의 빨간 실선으로 표시하였다. 보정 후에는 강한 강우 구간에서 나타나던 과소추정이 완화되었으며, 우량계 관측 강우 강도에 보다 근접하여 개선을 확인하였다.

보정에 따른 기상레이더 강우자료의 개선 정도를 정량적으로 확인하기 위해 2020년 하계 기간의 우량계 관측 강우자료와 보정 전·후 기상레이더 강우자료를 비교하였다(Fig. 6). 보정 전 기상레이더 강우강도는 우량계 관측자료와의 상관관계수가 고성, 진북, 장목 각 정점에서 0.85, 0.82, 0.87로 나타나 강우 발생 시점과 시간적 증감 경향은 비교적 잘 재현하였다. 그러나 편의는 약 -0.55로 나타나 우량계 관측에 비해 강우강도를 전반적으로 과소추정하는 경향이 확인되었으며, 상대오차는 약 54% 수준으로 나타났다. MFB 보정 후에는 편의가 0에 가까워졌고, 상대오차는 약 13% 수준으로 감소하였다. 이는 보정 전 레이더 강우자료가 강우의 시간적 변동성은 재현하였으나 정량적 크기에서 평균적인 과소추정을 포함하고 있었으며, MFB 보정을 통해 이러한 평균적 정량 편의가 완화되었음을 의미한다(Table 2).

이러한 편의 개선은 MFB 보정의 산정 방식과 관련된다. MFB 보정은 우량계 관측 강우량과 이에 대응하는 레이더 강우

량의 총량 비를 이용하여 원시 레이더 강우량의 평균적인 systematic bias를 보정하는 방법이다. 따라서 보정 후 편의가 0에 가까워진 것은 레이더 강우자료가 우량계 관측값과 동일한 평균적 강우량 수준으로 조정되었음을 의미한다. 반면, 상관계수는 보정 전에도 이미 높게 나타났으며, 이는 레이더 강우자료가

Table 2. Comparison statistics between rain-gauge observations and radar rainfall before and after MFB correction

Station name	Calibration	CC	Bias (mm/h)	Relative error (%)	RMSE (mm/h)
Goseong	Before	0.85	-0.53	58.24	2.88
	After	0.98	0.07	11.94	1.20
Jinbuk	Before	0.82	-0.56	60.71	2.41
	After	0.97	0.08	12.18	1.15
Jangmok	Before	0.87	-0.57	51.78	2.82
	After	0.97	0.11	13.94	1.55
Total	Before	0.85	-0.55	54.41	2.71
	After	0.97	0.09	12.80	1.31

MFB, mean field bias.

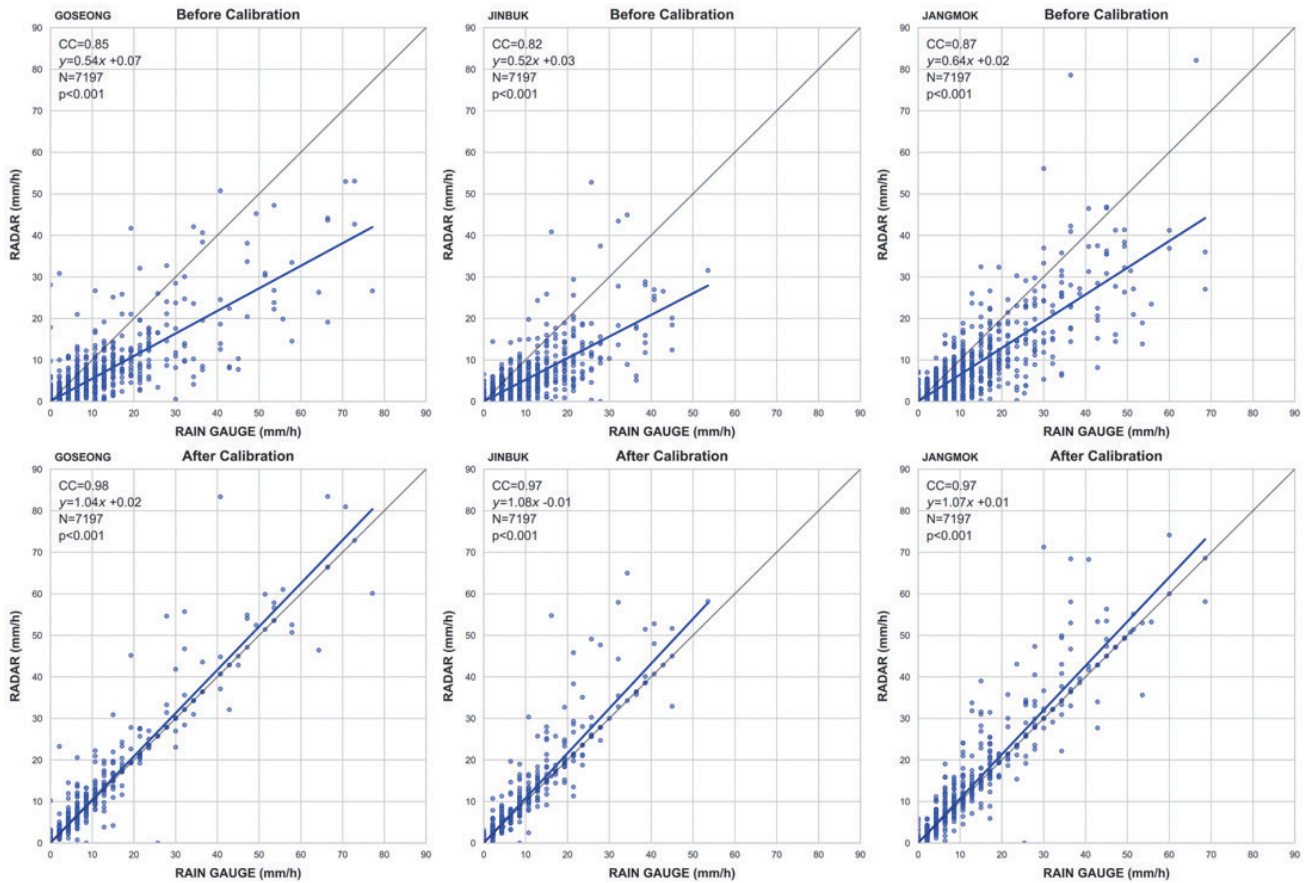


Fig. 6. Scatter plots between rain-gauge rainfall intensity and radar rainfall intensity before and after calibration. CC, correlation coefficient.

강우량의 절대 크기보다는 시간적 변동 특성을 상대적으로 잘 재현하고 있었기 때문으로 판단된다.

다만 MFB 보정 후 편의가 개선되었다는 것은 우량계 지점에서 확인된 평균적인 정량 편의가 완화되었음을 의미하며, 레이더 강우장 전체 격자의 국지 오차가 모두 제거되었음을 의미하지는 않는다. 특히 본 연구의 보정 및 검증은 진해만 인근 3개 우량계 정점과 2020년 7월과 8월의 강우 사례에 한정되므로, 다른 계절이나 강우 유형, 해상 격자에 대한 적용성은 추가 검증이 필요하다. 따라서 본 연구의 결과는 보정 기상레이더 강우자료가 연안 유량 및 오염부하량 산정을 위한 공간 강우 입력자료로 활용될 가능성을 제시한 것으로 해석하는 것이 타당하다.

보정 기상레이더 강우자료와 우량계 내삽 누적강우장의 공간분포 비교

Fig. 7은 2020년 7월과 8월의 누적강우량을 보정 기상레이더 강우자료와 우량계 기반 공간 내삽 자료로 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 7A는 우량계 관측값과 이에 대응하는 기상레이더 격자값으로부터 산정한 MFB 보정계수를 각 시간의 레이더 강우장 전체 격자에 적용한 후 누적한 보정 기상레이더 누적강우장

이다. Fig. 7B는 동일 기간 동안 3개 우량계 정점의 누적강우량을 공간 내삽하여 산정한 우량계 기반 누적강우장이다. 비교 결과, 두 자료 모두 장목 정점 인근과 진해만 동쪽에서 상대적으로 높은 누적강우량을 보였으나, 공간분포의 세부 양상은 뚜렷한 차이를 보였다. 우량계 기반 내삽 자료는 제한된 관측 정점의 위치와 값에 의해 비교적 단순하고 완만한 공간분포를 보인 반면, 보정 기상레이더 강우자료는 강우 중심의 이동과 국지적 강우 차이를 반영하여 보다 복잡한 누적강우 공간분포를 나타냈다. 또한 보정 기상레이더 누적강우장에서는 누적강우량의 최댓값과 최솟값이 반드시 우량계 정점 위치에서 나타나지 않았으며, 이는 제한된 우량계 자료의 단순 내삽만으로는 진해만 주변 강우의 공간적 변동성을 충분히 반영하기 어려움을 보여준다. 따라서 MFB 보정이 적용된 기상레이더 강우자료는 우량계 관측을 기준으로 평균적 정량 편의를 완화하면서도, 우량계 기반 내삽 자료보다 해상 및 연안 주변의 공간 강우분포를 세밀하게 제시할 수 있는 입력자료로 활용될 수 있다.

고 찰

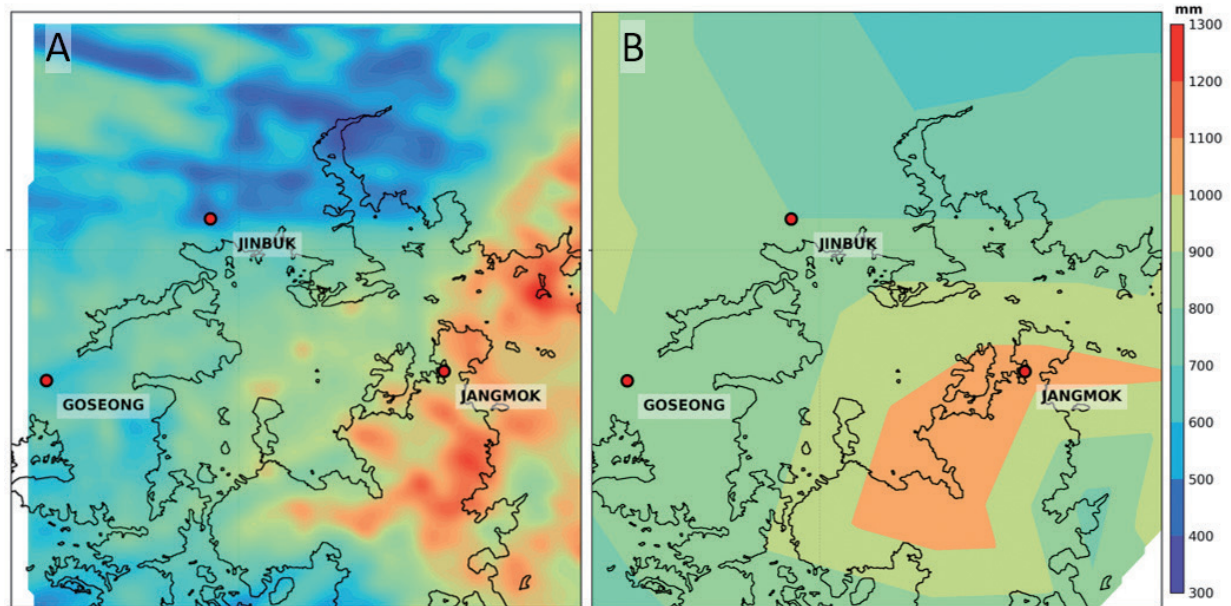


Fig. 7. Spatial distributions of cumulative rainfall over Jinhae Bay during July and August 2020. A, MFB-corrected weather radar rainfall; B, spatially interpolated rain-gauge rainfall. MFB, mean field bias.

본 연구에서는 2020년 7월과 8월을 대상으로 진해만 인근 우량계 3개 지점(고성, 진북, 장목)의 관측 강우와 기상레이더 강우자료를 비교하여, 기상레이더 자료의 정량적 특성과 연안 유량 및 오염부하량 산정 입력자료로서의 적용 가능성을 검토하였다. 비교 결과, 기상레이더 강우자료는 우량계 자료와의 상관계수가 0.8 이상으로 나타나 강우의 시간적 변동 특성은 비교적 잘 재현하는 것으로 확인되었다. 반면, 편차는 약 -0.55 수준으로 나타나 우량계에 비해 강우량을 전반적으로 과소추정하는 경향이 있었다.

이러한 한계를 보완하기 위해 우량계 자료를 이용한 MFB 보정을 적용한 결과, 상관계수와 편차가 전반적으로 개선되었고, 각 지점의 상대오차도 크게 감소하였다. 이는 기상레이더 강우자료가 강우의 변동 경향을 재현할 수 있을 뿐만 아니라, 적절한 보정 과정을 거칠 경우 우량계 지점에서의 정량적 강우량 산정에도 활용될 수 있음을 보여준다.

또한 보정된 기상레이더 강우자료는 우량계 기반 공간 내삽자료와 비교하여, 우량계만으로는 파악하기 어려운 해역의 강우 공간분포를 제시할 수 있었다. 본 연구에서 사용한 보정 기상레이더 강우자료는 우량계 관측값과 대응 레이더 격자값으로부터 산정한 MFB 보정계수를 레이더 강우장 전체 격자에 적용한 자료로, 원시 레이더 강우자료에서 나타나는 평균적 과소추정을 보완한 공간 강우장이다. 반면 우량계 기반 내삽 자료는 제한된 관측 정점의 위치와 값에 크게 의존하므로, 강우 중심의 이동이나 국지적 강우 차이를 세밀하게 반영하는 데 한계가 있었다. 특히 진해만과 같이 산악, 복잡한 해안선이 혼재한 연안

역에서는 강우의 공간적 편차가 크게 나타날 수 있으므로, 해상 강우를 포함한 공간분포 정보를 제공할 수 있다는 점에서 기상레이더 자료의 활용성이 크다. 다만 MFB 보정은 영역 평균적 편의를 보정하는 방법이므로, 격자별 국지 오차를 모두 제거하는 것은 아니며, 본 연구의 검증 역시 육상 우량계 정점과 이에 대응하는 인근 레이더 격자에 한정된다. 따라서 해상 전체 격자의 정확도가 독립적으로 검증되었다고 해석하기에는 한계가 있다. 향후에는 장기 및 다계절 자료와 추가 우량계 또는 해상 강우 관측자료를 이용하여 보정 기상레이더 강우자료의 공간적 정확도를 검증하고, 유역모델 및 연안수치모델에 직접 적용하여 유량, 오염부하량, 염분 분포 등에 대한 개선 효과를 정량적으로 평가할 필요가 있다.

사 사

이 논문은 2026년도 국립수산과학원 수산과학연구사업(R2026043)의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Ahn SR, Jang CH, Kim SH, Han MS, Kim JH and Kim SJ. 2013. Discussion for the effectiveness of radar data through distributed storm runoff modeling. J Korean Soc Agric Eng 55, 19-30. <https://doi.org/10.5389/KSAE.2013.55.6.019>.
- Bae YH, Kim BS and Kim HS. 2010. The study on flood runoff simulation using runoff model with gauge-adjusted radar data. J Wetlands Res 12, 51-61.

- Battan LJ. 1973. Radar observation of the atmosphere. University of Chicago Press, Chicago, IL, U.S.A., 1-324.
- Cho YH, Woo SM, Noh JW and Lee ER. 2020. Application of the weather radar-based quantitative precipitation estimations for flood runoff simulation in a dam watershed. *J Korea Water Resour Assoc* 53, 155-166. <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2020.53.3.155>.
- GESAMP (Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution). 1990. The state of the marine environment. *GESAMP Reports and Studies* 39, 128.
- Jo JM, Kwon BH and Yoon HJ. 2020. Simulation of radar network for observational gap filling as electromagnetic waves beam blockage in the Korean Peninsula. *J Korea Inst Electron Commun Sci* 15, 553-562. <https://doi.org/10.13067/JKIECS.2020.15.3.553>.
- Joss J, Waldvogel A and Collier CG. 1990. Precipitation measurement and hydrology. In: *Radar in Meteorology*. Atlas D, ed. American Meteorological Society, Boston, MA, U.S.A., 577-606.
- Kang SW. 1991. Circulation and pollutant dispersion in Masan-Jinhae Bay of Korea. *Mar Pollut Bull* 23, 37-40. [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(91\)90646-A](https://doi.org/10.1016/0025-326X(91)90646-A).
- Kim BS, Kim HS and Yang DM. 2010. Comparison of spatial distributions of rainfall derived from rain gages and a radar. *J Wetlands Res* 12, 63-73.
- Kim EJ, Park BK, Shin DS, Kim YS and Rhew DH. 2014. The study on methods for setting of water quality goal and estimation of allocation loads on TMDL system using a dynamic water quality model. *J Korean Soc Environ Eng* 36, 629-640. <https://doi.org/10.4491/KSEE.2014.36.9.629>.
- Kim YS, Chang KH, Kim BS and Kim HS. 2011. Decision of GIS optimum grid on applying distributed rainfall-runoff model with radar resolution. *J Wetlands Res* 13, 105-116.
- Kong HH, Lee IC and Ok K. 2005. Temporal and spatial variation of inflowing pollutant loads in Jinhae Bay. In: *Proceedings of the Korean Society for Marine Environmental Engineering Fall Meeting*. Korean Society for Marine Environmental Engineering, Korea, 15-19.
- Lee IC. 2003. Seasonal variation estimation of inflow pollutant loads of Yeong-il Bay by using tank model. *J Korean Soc Mar Environ Eng* 6, 63-71.
- Lee MO, Kim JK, Kim BK and Kim MW. 2020. Past, present, and future directions in the study of Jinhae Bay, Korea. *J Korean Soc Mar Environ Energy* 23, 57-69. <https://doi.org/10.7846/JKOSMEE.2020.23.2.57>.
- Lee TH, Cho HL, Park SE, Kim YM, Kim CS and Kim JH. 2019. Estimation of land-based pollution loads to Jaranman-Saryang Island areas for export using a watershed model. *J Korean Soc Mar Environ Energy* 22, 226-235. <https://doi.org/10.7846/JKOSMEE.2019.22.4.226>.
- Lim KH and Shin HC. 2005. Temporal and spatial distribution of benthic polychaetous community in the northern Jinhae Bay. *Korean J Environ Biol* 23, 238-249.
- Marshall JS and Palmer WMcK. 1948. The distribution of raindrops with size. *J Meteorol* 5, 165-166. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1948\)005<0165:TDORWS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1948)005<0165:TDORWS>2.0.CO;2).
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs). 2008. Supplementary report on the national rainfall radar master plan. Han River Flood Control Office, Seoul, Korea.
- Smith JA. 1993. Precipitation. In: *Handbook of Hydrology*. Maidment DR, ed. McGraw-Hill, New York, NY, U.S.A., 3.1-3.47.
- Smith JA, Baeck ML, Meierdiercks KL, Miller AJ and Krajewski WF. 2007. Radar rainfall estimation for flash flood forecasting in small urban watersheds. *Adv Water Resour* 30, 2087-2097. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2006.09.007>.
- Westrick KJ, Mass CF and Colle BA. 1999. The limitations of the WSR-88D radar network for quantitative precipitation measurement over the coastal western United States. *Bull Am Meteorol Soc* 80, 2289-2298. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1999\)080<2289:TLOTWR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1999)080<2289:TLOTWR>2.0.CO;2).