KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research
Vol. 44, No. 6: 773-780/ December, 2024
DOI: https://doi.org/10.12652/Ksce.2024.44.6.0773

ISSN 1015-6348 (Print)
ISSN 2799-9629 (Online)
www.kscejournal.or.kr

Water Engineering **수공학**

자동 강우장 탐색 기법을 이용한 DAD 분석 결과 비교: Box-tracking, Point-tracking, Advanced Point-tracking

김용탁* · 김진영** · 한영천*** · 권현한****
Kim, Yong-Tak*, Kim, Jin-Young**, Han, Young-Chun***, Kwon, Hyun-Han****

Comparison of DAD Analysis Results Using Automated Rainfall Field Exploration Methods: Box-tracking, Point-tracking, and Advanced Point-tracking

ABSTRACT

This study presents an areal rainfall analysis conducted using three automated rainfall field exploration methods: Box-tracking, Point-tracking, and Advanced Point-tracking, with a focus on major storm events in South Korea. The characteristics of each method were compared, highlighting their ability to track rainfall distribution. The Box-tracking method allowed for the consideration of multiple storm centers through area expansion but showed limitations in accurately capturing storm shapes. In contrast, the Point-tracking method retained the storm center, enabling detailed representation of the storm shape but faced challenges in analyzing multiple storm centers. The Advanced Point-tracking method addressed these limitations by automatically identifying multiple storm centers and expanding the area to more accurately reflect the actual rainfall distribution. The differences in results provided by each method offered critical insights for understanding the intensity and distribution patterns of rainfall, which are essential for refining extreme rainfall predictions. These findings contribute valuable methodologies for more reliable Depth-Area-Duration (DAD) analysis of extreme rainfall events, particularly in the context of climate change, and provide crucial information for developing effective disaster mitigation strategies.

Keywords : Areal rainfall, Advanced point-tracking, Box-tracking, Point-tracking, DAD Analysis

초 록

본 연구에서는 국내 호우 사상을 대상으로 Box-tracking, Point-tracking, Advanced Point-tracking의 세 가지 자동 강우장 탐색 기법을 활용하여 면적강수량 분석을 수행하였다. 각 기법의 특성과 강우 분포 추적 결과를 비교하여, 각 기법이 강우 중심의 특성을 반영하는 방식과 그 한계를 분석하였다. Box-tracking 기법은 면적 확장을 통해 여러 호우 중심을 고려할 수 있지만, 호우 형태를 정밀하게 반영하기 어렵다는 한계를 보였다. Point-tracking 기법은 단일 호우 중심의 유지로 호우 형태를 반영할 수 있었으나 다중 호우 중심 분석에는 제한적이었다. 반면 Advanced Point-tracking 기법은 다중 호우 중심을 자동으로 탐색하고 면적을 확장함으로써 실제 강우 분포를 더 정확하게 반영할 수 있었다. 각 기법에 따른 분석 결과의 차이는 강우의 강도 및 분포 패턴을 보다 정밀하게 이해하는 데 중요한 정보를 제공하며, 기후 변화로 인한 극단적 강우에 대한 대응 전략을 세우는 데 필수적인 요소로 작용할 수 있다. 본 연구의 결과는 기후 변화로 인한 극한 강우 현상에 대한 보다 신뢰성 높은 DAD 분석과 자연재해 대응 대책 수립에 중요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

핵심용어 : 면적강수량, Advanced Point-Tracking, Box-Tracking, Point-Tracking, DAD 분석

* 환경부 한강홍수통제소 수자원정보센터 시설연구사, 공학박사 (Water Resources Information Center · kyongtak0225@korea.kr)
** 종신회원 · 세종대학교 건설환경공학과 연구교수, 공학박사 (Sejong University · redmadjy@gmail.com)
*** 전라북도 완주군 건설안전국 건설도시과, 팀장 (Wanju-gun County Official · han01000@korea.kr)
**** 종신회원 · 교신저자 · 세종대학교 건설환경공학과 교수, 공학박사 (**Corresponding Author** · Sejong University · hkwon@sejong.ac.kr)

Received October 11, 2024/ **revised** October 23, 2024/ **accepted** October 23, 2024

Copyright ⓒ 2024 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.

1. 서 론

지구온난화에 따른 기후변화는 기상이변뿐만 아니라 자연 생태계에 큰 영향을 미치며 수문순환체계에 복합적인 문제를 야기하고 있다. 탄소 배출량 증가로 전 지구 기온이 가속화되면서 이로 인한 물과 관련된 피해도 증가하는 추세를 보이고 있으며, 기후변화는 더욱 심화될 것으로 전망된다. 과거 자료를 토대로 하는 수자원 관리 체계는 이러한 위험에 더 취약해질 가능성이 크다.

기후변화로 인해 기상 변동성은 과거보다 커졌으며, 제한된 정보를 바탕으로 기상 현상을 예측하는 것이 점점 어려워졌다. 특히, 특정 지역에 짧은 시간 동안 많은 비를 내리는 게릴라성 호우와 같은 변화된 기상 패턴은 대비하기 어려워 큰 피해를 초래할 수 있다. 기상 변동성이란 기상 요소가 시간에 따라 증가하거나 감소하는 경향을 의미한다. IPCC 6차 평가보고서에 담긴 『전지구 기후변화 전망보고서(국립기상과학원, 2019)』에 따르면, 21세기 말(2081~2100년) 온실가스 배출 정도에 따라 전 지구 평균 기온은 현재(1995~2014년) 대비 +1.9~5.2°C 상승하고, 북반구 고위도 지역의 강수량은 7~17 % 증가할 것으로 전망된다.

우리나라는 계획 빈도를 초과하는 집중호우가 자주 발생하며, 도시화로 인한 불투수 면적 증가에 따른 도달시간 단축 등으로 인해 도심지역의 홍수 취약성이 증가하고 단위면적당 피해액도 증가하고 있다. 산간 지역에서는 게릴라성 집중호우와 급한 하천 경사가 맞물려 인명 및 재산 피해가 상대적으로 크게 발생하고 있으며, 과거 돌발 홍수(flash flood) 사례가 있어 향후 호우에 따른 재해 위험이 더욱 커질 것으로 예상된다.

우리나라에서 발생하는 호우는 진행 경로에 따른 해석의 어려움으로 인해 강우장을 정형화하여 평가하기 어렵고, 긴 지속시간에서는 한반도 전체를 포함한 누적 강우량으로 표현된다. 이러한 이유로 호우의 공간적 특성과 관련된 강우 자료가 부족하며, 지점 강우량을 면적으로 환산하더라도 호우 특성이 제대로 반영된 결과를 얻기 어렵다.

강우량의 불규칙한 변화는 홍수와 가뭄 등 자연재해를 초래할 수 있어 이를 정확하게 측정하고 예측하는 것이 중요하다. 강우량은 수자원 관리 및 홍수 예측 등 수문학에 여러 분야에서 중요한 변수로 간주된다. 특히, 설계수문량을 산정하는데 있어서 강수량에 시공간적 특성을 효과적으로 반영하는 과정은 매우 중요한 수문분석 중 하나이다. 이러한 목적을 위해서, 최근 몇 년간 자동 강우장 탐색 기법은 강우량 산정의 정확성을 높이기 위한 중요한 연구 주제로 부상해 왔다. 이러한 기법은 강우량을 추정하기 위해 자동으로 강우장의 위치를 식별하고 활용하고 있지만, 그 적합성과 정확성에 대한 연구는 여전히 필요하며, 특히 강우 깊이-면적-지속기간(depth-area-duration, DAD) 산정과 관련해 연구가 필요하다.

Kim and Won(2004)은 호우이동을 고려할 수 있는 호우중심 DAD 분석 방법과 유역중심 DAD 분석결과를 비교·검토하여 태풍과 같은 호우이동이 뚜렷한 경우에는 전자의 경우 더 신뢰할 수 있는 값을 제시한다고 기술하였다. DAD 해석을 위해서는 기본적으로 지점강우량 자료들의 내·외삽을 통해 공간분포 강우장을 작성할 필요가 있으며, 국외의 경우 레이더 강우자료를 이용하여 DAD 해석을 실시하는 기법들이 제시되고 있다(Durrans et al., 2002; Tarun, 2005). Patrick et al.(2019)는 말레이시아에 대한 DAD 석을 수행하기 위해 TRMM 위성 강우량을 사용하였으며, 특정 조건에서는 위성 자료를 통한 산정이 공간적 특성을 더 잘 반영한다고 기술한 바 있다. 반면, 국내의 경우 이러한 격자기반의 공간분포 강우장을 활용하여 호우중심의 DAD 분석을 실시한 연구는 미흡한 실정이다.

수문학적 관점에서 호우 평가는 강우의 유역 면적과 지속시간에 의해 결정되므로, 지점 강우량을 적절한 방법으로 면적 강우량으로 환산해야 한다(WMO, 1969). 특히, 수공구조물 설계를 위한 설계홍수량 산정을 위해서는 유역 면적별 최대 강우량의 산정이 필수적이며, 대규모 시설물의 경우 가능최대강수량(probable maximum precipittion, PMP)를 결정해야 한다. 이러한 설계 대상 유역의 최대 강우량은 일반적으로 DAD 분석을 통해 산정된다(Svensson and Jones, 2010). 기존 고정면적 중심에 DAD 분석 방법은 호우가 일정한 패턴으로 이동하거나 정체된 경우 강우를 빠르게 해석할 수 있는 장점이 있으나, 태풍과 같이 호우 이동이 뚜렷한 경우 기존 방법으로는 실제 호우 특성이 충분히 반영되지 않는다는 한계가 있다(Kim and Won, 2004).

본 연구에서는 강우장의 특성을 더욱 정밀하게 반영하는 DAD 분석 기법을 제안하고, 이를 통해 설계수문량 산정 절차를 개선시킬 수 있는 핵심 방법을 개발하고자 한다. 첫째, 지점 강수량을 격자화하는 방법으로 기존 Thiessen 방법이나 Kriging 기법보다 개선된 PRISM(Precipitation-elevation Regressions on Independent Slopes Model) 모델을 활용하였다. PRISM 모델은 지형 효과를 정밀하게 고려하여, 산지가 많은 우리나라에서 강우량 산정 시 높은 정확도를 보이는 장점이 있다. 둘째, 기존 DAD 기법의 한계를 보완하기 위해 PRISM을 이용해 산정한 격자 기반 강우장 시계열을 입력 자료로 사용하고, Box-tracking, Point-tracking, Advanced Point-Tracking 자동 탐색 기법을 적용하여 호우 중심의 지속시간별 면적 최대 강우량을 산정하는 방법을 제시하였다.

2. 방법론

2.1 적용 강우 자료

GIS 기반의 호우 탐색기법인 Box-tracking, Point-tracking

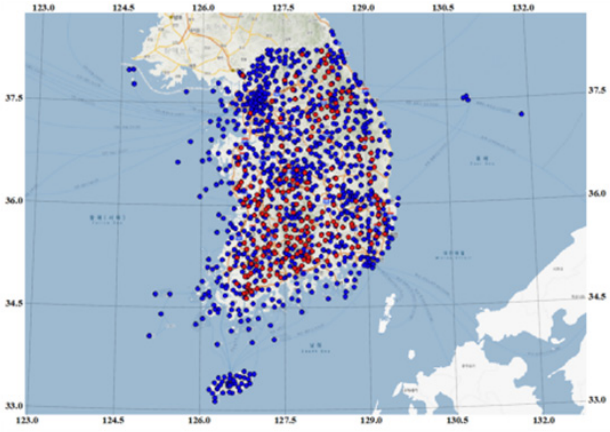

Fig. 1. Spatial Locations Used for DAD Calculation, where Blue Points Indicate Selected Locations and Red Points Indicate Excluded Ones

및 Advanced point-tracking을 이용한 DAD 분석을 수행하기 위하여 Fig. 1에 제시된 것과 같이 국내 기상청 산하 종관기상관측소(Automated Synoptic Observing System, ASOS) 95개, 방재기상관측소(Automatic Weather System, AWS) 508개, 환경부 447개 및 한국수자원공사 187개의 총 1,237개 강우관측소 자료를 구축하였으며, 결측 및 측정 오류가 있는 223개 지점을 제외한 1,014개 지점의 시단위 시계열 자료를 1 km × 1 km 고해상도 기반의 PRISM에 적용하여 신뢰할 수 있는 공간분포형 강우장을 생성하였다. 대표 호우 사상으로는 국토교통부(MOCT, 2000)의 '전국 PMP도 재작성 보고서'에 명시되어 있는 일강우량 130 mm 이상 호우를 기준으로 1973년부터 2020년까지 191개 사상을 선정하였다.

각 자동 강우장 탐색 기법의 적용을 위해 PRISM을 통해 산정된 결과를 바탕으로 지속시간별(1, 2, 4, 6, 8, 12, 18, 24, 48, 72시간) 누적 강우를 산정하였으며, 동일한 지속시간을 Sub-duration으로 하여 DAD 분석에 활용하였다. 예를 들어, 3일(72시간) 동안 발생한 강우사상의 경우, 1시간 지속시간은 72개의 Sub-duration이, 24시간 지속시간은 49개의 Sub-duration이 생성된다.

2.2 PRISM 모형

기상 현상 중 온도와 바람은 시·공간적인 연속성이 뚜렷하지만, 강수는 시·공간적 연속성이 뚜렷하지 않아 강수량의 공간 변이가 크다. 따라서 미계측 지역의 효율적 수자원 관리 및 자연재해 대응을 위해 관측 지점에서 얻은 자료를 기반으로 공간 강수량을 추정하거나, 규칙적인 격자점 값으로 변환하는 다양한 공간 보간법이 연구되고 있다. 기존에는 PMP 산출을 위해 Thiessen과 같은 면적 가중법, Kriging 기법, 역거리법(Inverse Distance Weighting, IDW) 등의 내삽 방법이 주로 사용되었으나, 최근에는 수치표고모델(Digital Elevation Model, DEM)과 산악 모형을 결합한 PRISM이 활용되는 추세이다.

PRISM을 통한 강우량 격자화를 위해서는 거리, 고도, 지향면, 해안으로부터의 거리에 따른 가중치 산정이 필수적이며, 이를 위해 강우 관측 지점과 DEM을 활용하여 관련 매개변수를 추정해야 한다(Daly et al., 2008). 본 연구에서는 종속변수로 강우량, 독립변수로 고도를 사용하여 가중최소자승법을 통한 격자별 회귀 모형 구축으로 고해상도 지형 정보 기반의 기상인자 공간분포 모형으로 PRISM을 확장하였다.

$$\hat{R}_a = \hat{\alpha}\hat{A}_l + \hat{\beta} \tag{1}$$

$$\hat{\alpha} = \frac{\sum w_t (A_{l_t} - \overline{A_l})(R_{a_t} - \overline{R_a})}{\sum w_t (A_{l_t} - \overline{A_l})^2} \qquad \hat{\beta} = \overline{R_a} - \hat{\alpha}\overline{A_l} \tag{2}$$

여기서, $\hat{R}_a$, $\hat{A}_l$은 각각 강우량, 고도, $\hat{\alpha}$, $\hat{\beta}$는 회귀계수를 나타내며, $\overline{A_l}$, $\overline{R_a}$, w_t는 격자별 가중치를 의미하며, 종합 격자별 가중치(w)는 Eq. (3)와 같이 산정할 수 있다.

$$w = [f_{Di} w_{Di}^2 + f_{At} w_{At}^2]^{1/2} w_{To} w_{Co} \tag{3}$$

여기서, f_{Di}, f_{At}는 거리, 고도 가중치 계수이며, w_{Di}, w_{At}, w_{To} 및 w_{Co}는 각각 거리, 고도, 지향면, 해안 가중치를 의미한다.

거리, 고도, 지향면, 해안 가중치와 관련 식은 Table 1에 요약하였다(Kim et al., 2020). 본 연구에서는 Kim et al.(2020)이 제시한 SCEM-UA(Shuffled Complex Evolution Metropolis-University of Arizona) 전역 최적화 기법을 활용하여 거리가중치 최소·최대영향반경, 해양가중치 고도기준, 최소거리 및 최대거리, 거리가중치계수를 최적화 수행 매개변수로 선정하고 PRISM 모형을 통한 모의와 관측 값의 통계적 검증을 통하여 목적 함수의 수렴 여부를 판단하였다. 만약 목적함수의 수렴이 확인되지 않으면 매개변수를 재선정하여 목적함수의 수렴이 확인될 때까지 반복 수행하여 수렴된 목적함수를 선정하였다.

거리가중치(w_D)에서 $R_{\max}, R_{\min}$은 각각 최대영향반경 및 최소영향반경을 나타낸다. a는 무차원 매개변수로 Thornton et al.(1997)에서 제시한 6.25로 적용하였다. 고도가중치(w_A)에서 $dA_{\max}, dA_{\min}$은 각각 최대, 최소고도차를 나타내고 b는 역거리가중법과 동일한 2를 반영하였다. 지향면가중치(w_T), 해안가중치(w_C)에서의 dT, dC는 군집화에 따른 결과 값을 나타내며, 군집화 기준은 Kim et al.(2020)에서 상세하게 확인할 수 있다.

2.3 자동강우장 탐색 기법

강우는 호우 사상의 지속 기간 동안 시·공간적으로 계속 변화하

Table 1. Equations and Conditions for Determining the Weights for Four Components: Distance, Altitude, Topographic Facet, and Coastal Proximity

Weighting Components	Equations
Distance w_D	$w_D = \begin{cases} 0 & \text{if } r > R_{\max} \\ 1 & \text{if } r < R_{\max} \\ \exp\left[-\left(\frac{r}{R_{\max}}\right)^2 \alpha\right] - \exp(-\alpha) & \text{if } R_{\min} < r \le R_{\max} \end{cases}$
Altitude w_A	$w_A = \begin{cases} 0 & \text{if } dA \ge dA_{\max} \\ 1 & \text{if } dA \le dA_{\min} \\ \frac{dA}{dA^b} & \text{if } dA_{\min} < dA < dA_{\max} \end{cases}$
Topographic facet w_T	$w_T = \begin{cases} 1 & \text{if } abs(dT) \le 1 \\ \frac{1}{dT} & \text{if } abs(dT) > 1 \end{cases}$
Coastal Proximity w_C	$w_C = \begin{cases} 1 & \text{if } abs(dC) \le 1 \\ \frac{1}{dC} & \text{if } abs(dC) > 1 \end{cases}$

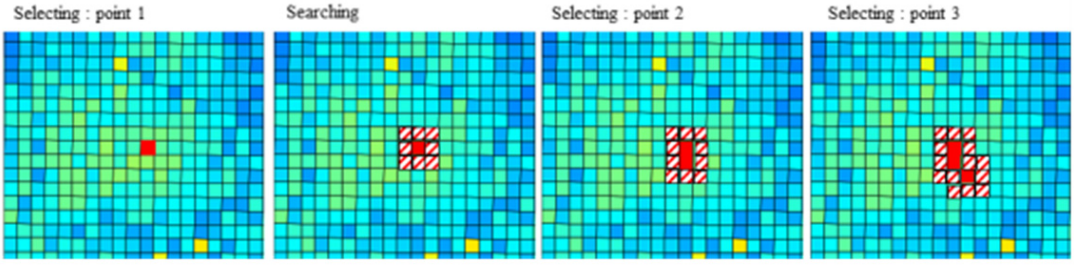

Fig. 2. Point-tracking Method for Expanding Rainfall Area by Fixing the Maximum Intensity Point as the Storm Center

므로 이러한 변동성을 고려할 수 있는 DAD 분석 기법이 필요하다. 기존 유역 중심 분석은 호우의 이동성이 크게 변화하거나 이동 특성을 보이는 경우 큰 오차를 발생시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 기존 유역 중심 기법의 단점을 보완하기 위해, PRISM 기반 격자 강우장 시계열을 입력 자료로 활용하여 GIS 기반 자동 강우장 탐색 기법인 Box-tracking, Point-tracking, Advanced Point-tracking을 적용한 DAD 분석을 실시하였다(Kim et al., 2014). 또한, 시간별 누적 강우의 연속적 분포 형상을 고려하기 위해 Sub-duration 개념을 도입하여 강우장의 분포 형상 및 이동 흐름을 반영하였다.

2.3.1 Box-tracking

Box-tracking은 강우장 탐색 기법 중 가장 간단한 방법으로, 대상 유역의 격자 기반 강우장의 시간적 변화를 고려하여 유역 전반에 걸쳐 격자 크기를 1 × 1, 2 × 2, ..., $n \times n$로 순차적으로 확대하며 지속시간별 면적 최대 강우량을 추적하는 기법이다.

2.3.2 Point-tracking

Point-tracking은 정방형으로 유역 면적을 증가시키는 Box-tracking과 달리, 전체 격자 중 최대값을 갖는 지점을 호우 중심으로 고정하고, 누적 강우 격자의 주변 값을 비교하여 면적을 확대하는 방식으로 실제 강우장의 형태를 고려해 면적 최대 강우량을 산정한다. Point-tracking은 면적을 증가시키더라도 호우 중심이 일정하기 때문에, 각 Sub-duration별로 하나의 호우 중심에 대한 강우 분포의 형상 변화만을 고려할 수 있다. Fig. 3은 Point-tracking 기법의 개념을 시각적으로 설명하고 있다.

2.3.3 Advanced Point-Tracking

Box-tracking은 다중 호우 중심을 고려할 수 있으나 호우 형태를 반영하기 어렵고, Point-tracking은 호우 형태를 고려할 수 있으나 다중 호우 분석에 적합하지 않다. Advanced Point-tracking은 이러한 단점을 보완한 자동 강우장 탐색 기법으로, 각 Sub-duration

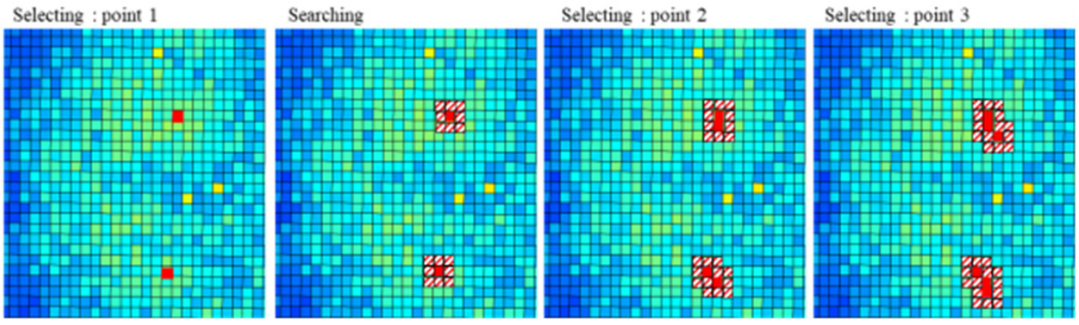

Fig. 3. Illustration of the Advanced Point-Tracking Process

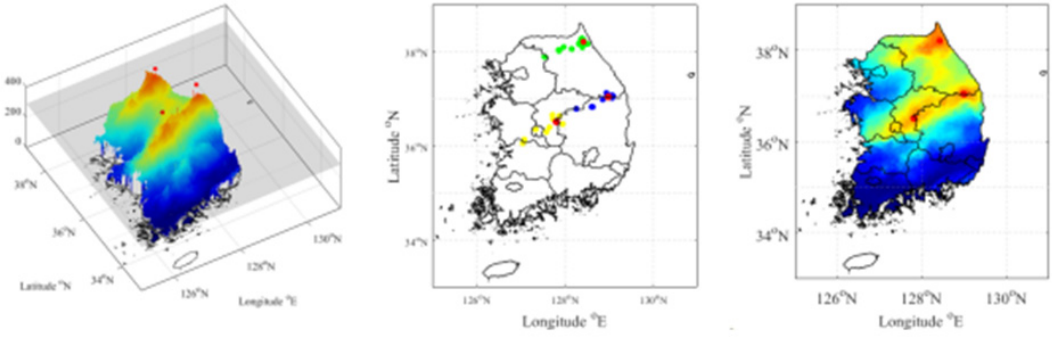

Fig. 4. Visualization of Storm Center Selection Through Clustering Methods

별로 여러 호우 중심을 선정하고 각 중심으로부터 면적 최대 강우량을 산정한다. 본 연구에서는 호우 중심을 선정하기 위해 강우 사상의 평균값 이상의 크기를 갖는 격자를 선택하고, 군집화를 통해 강우 사상을 분리하여 각 군집의 최대값을 나타내는 격자를 호우 중심으로 선정하였다.

Fig. 3은 Advanced Point-tracking 기법의 개념을 시각적으로 설명하고 있으며, 기존의 Box-tracking 및 Point-tracking 기법의 단점을 보완하는 방식을 보여주고 있다. Advanced Point-tracking은 각 Sub-duration(부분 기간)별로 다수의 호우 중심을 탐색하고 선정하여 각 중심으로부터 면적 최대 강우량을 산정하는 방법이다. 첫 번째 패널에서는 호우 중심을 선택하는 과정을 보여주며, 빨간색으로 표시된 격자가 첫 번째로 선정된 호우 중심이며, 이 격자는 강우강도가 가장 큰 위치를 나타낸다. 두 번째 패널에서는 첫 번째 호우 중심을 기준으로 주변 영역을 탐색하여 호우 중심에 대한 영향권을 설정하는 과정이 묘사되어 있다. 여기서 빨간색의 격자가 포함된 사선이 있는 Box 주변에 탐색 영역을 나타낸다. 세 번째 및 네 번째 패널에서는 추가적으로 두 번째, 세 번째 호우 중심을 선정하는 과정을 보여준다. 이러한 탐색과 선정 과정을 통해 각 Sub-duration별로 복수의 호우 중심을 파악할 수 있으며, 각 중심 주위의 면적에서 최대 강우량을 산정하여 호우의 전체적인 강우 분포를 분석할 수 있다. Advanced Point-tracking 기법은 Box-tracking의 문제인 호우 형태를 제대로 반영하지 못하는 한계를 극복하고, 또한 Point-tracking의 단점인 다중 호우 중심 분석의 어려움을 해결함으로써, 더욱 정밀하고 정확한 호우 중심 탐색과 강우량 분석을 가능하게 한다.

Fig. 4는 Clustering(군집화) 기법을 이용한 호우 중심 선정 과정을 시각적으로 설명하고 있다. Advanced Point-tracking에서는 다중 호우 중심을 선정하기 위해 군집화를 활용하는데, 각 군집의 최대 강우량을 가지는 지점을 호우 중심으로 선정한다. 첫 번째 패널은 3차원으로 표현된 강우 강도 분포를 보여주며, 각 위치에서의 강우량을 시각적으로 높은 강우강도를 가진 영역이 입체적으로 부각되어 나타내었다. 두 번째 및 세 번째 패널은 강우 강도 분포를 평면도로 나타낸 것으로, 군집화 결과를 통해 여러 호우 중심이 선정된 과정을 보여준다. 서로 다른 색으로 표시된 점들은 군집화 기법에 의해 구분된 개별 군집을 나타내며, 각 군집 내에서 가장 강우량이 높은 지점이 호우 중심으로 선정된다. 이러한 접근 방식은 강우 사상을 개별 군집으로 나누어 각 군집의 특성을 파악하고, 군집 내에서 최대 강우량을 가지는 격자를 중심으로 분석함으로써 강우의 시공간적 특성을 정밀하게 분석할 수 있도록 도와준다.

이를 통해 Advanced Point-tracking 기법은 복수의 호우 중심을 효율적으로 탐색하고, 각 중심 주위의 면적을 분석함으로써 다중 호우 현상을 보다 정확히 반영할 수 있게 되며, 강우장의 공간적

분포를 더욱 신뢰성 있게 파악할 수 있다. 군집화 기법을 활용한 이러한 호우 중심 선정 방식은 실제 강우 형태를 고려하여 강우 분포의 특징을 효과적으로 반영함으로써, 강우 예측 및 수문학적 분석의 정확성을 높이는 데 기여할 수 있다.

3. 강우추적 분석 결과

결과는 191개 모두를 나타내지 않았으며, Advanced Point-Tracking, Point-Tracking, Box-Tracking 기법 상호 비교를 위하여, 2012년 9월 13일부터 17일까지의 강우 이벤트를 선정하여 Fig. 5에 나타내었다. 서로 다른 면적 크기(1,024 km^2, 10,000 km^2, 20,164 km^2)를 기준으로 추적한 공간 강우장의 결과를 비교하여 나타낸 것이다.

Advanced Point-Tracking 기법은 각 Sub-duration별로 여러 호우 중심을 선정하고, 면적을 확장하여 강우량을 추적하는 방식으로, 이 기법은 면적이 증가함에 따라 호우 중심을 유지하면서 강우 형태를 정밀하게 반영하고 있다. 그림에서 빨간색 화살표로 표시된 부분은 주요 호우 중심을 나타내며, 이 기법을 통해 각 호우 중심에서 강우가 집중된 영역을 잘 포착하고 있음을 확인할 수 있다. 특히,

Table 2. Comparison of Analysis Results by Automated Rainfall Field Exploration Methods

Area (km^2)	Box-tracking	Point-tracking	Advanced point-tracking
25	135.8	142.9	142.9
49	134.6	141.8	141.8
100	130.9	137.5	137.5
196	127.7	131.8	131.8
529	117.4	121.0	121.0
1,024	109.1	113.0	113.0
2,025	100.7	105.1	106.4
5,041	91.1	100.2	101.8
10,000	85.1	99.5	99.5
20,164	83.3	91.9	91.9

면적이 커질수록 강우 분포를 정밀하게 반영하여 실제 강우장의 형태를 더욱 정확하게 표현하고 있다.

Point-Tracking 기법은 단일 호우 중심을 고정하고 주변 영역으로 면적을 확장하는 방식이다. 그림에서 빨간색 화살표는 Point-Tracking을 통해 선정된 호우 중심을 나타낸다. 이 기법은 호우의 중심이

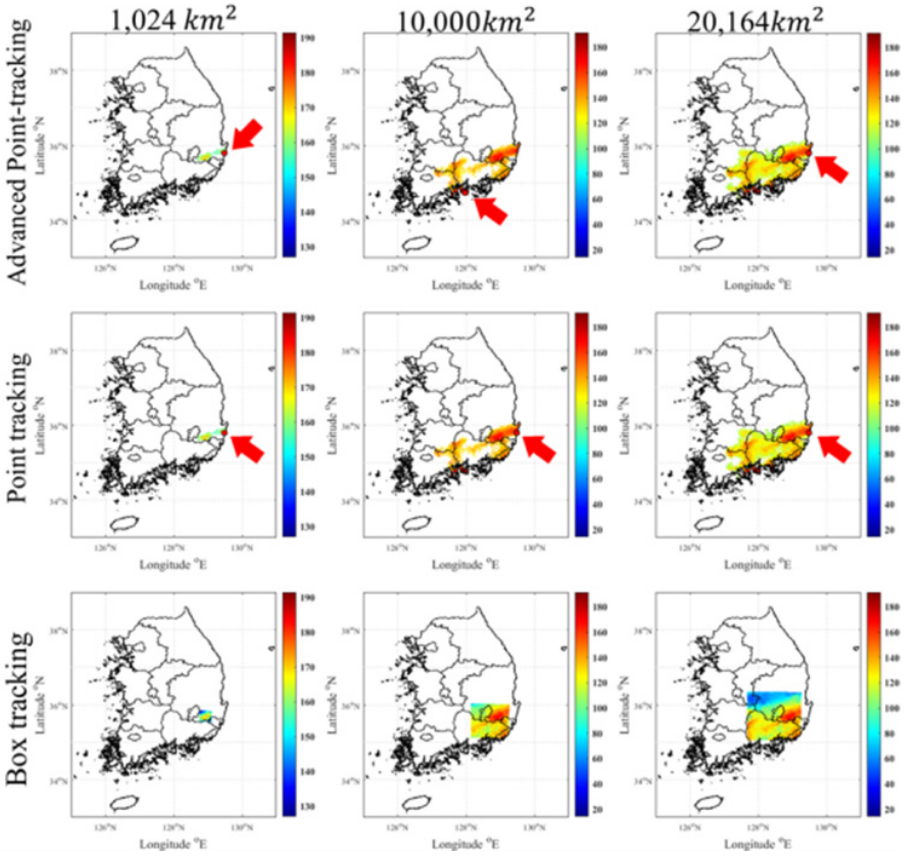

Fig. 5. Comparison of Tracking Results for Spatial Rainfall Field Using Advanced Point-Tracking, Point-Tracking, and Box-Tracking Methods

고정되어 있어 면적이 확장되더라도 동일한 중심에서 강우량을 분석할 수 있는 장점이 있지만, 복수의 호우 중심을 분석하기에는 한계가 있다. 면적이 증가함에 따라 중심 주변의 강우량만 고려하기 때문에, 다중 호우가 발생하는 상황에서는 실제 강우 형태를 완전히 반영하기 어려운 점이 있다.

Box-Tracking 기법은 고정된 정방형 영역을 이용하여 면적을 확장하는 방식으로, 그림에서는 면적이 증가할수록 강우 영역이 정방형으로 커지는 모습을 확인할 수 있다. 이 기법은 여러 호우 중심을 동시에 고려할 수 있는 장점이 있지만, 호우의 실제 형태를 정확히 반영하기 어렵다. 그림에서 볼 수 있듯이, 강우의 공간 분포가 고정된 박스 형태로 표현되어 호우의 비정형적인 강우 분포를 반영하지 못하는 한계를 보여주고 있다.

Table 2는 Box-tracking, Point-tracking, Advanced Point-tracking 세 가지 자동 강우장 탐색 기법을 적용하여 면적별 최대 강우량을 실제 비교한 결과를 나타낸다. Box-tracking은 면적이 증가함에 따라 강우량이 점차 감소하는 경향을 보인다. 이는 Box-tracking 기법이 정방형으로 면적을 확장함으로써, 중심에서 멀어질수록 상대적으로 낮은 강우량을 포함하게 되는 한계가 있음을 보여준다. 예를 들어, 25 km²의 경우 최대 강우량이 135.8 mm였지만, 20,164 km^{2}로 면적이 커질수록 최대 강우량은 83.3 mm로 감소폭이 상대적으로 크다.

Point-tracking 기법 또한 면적이 증가할수록 강우량이 감소하는 경향을 보이지만, Box-tracking에 비해 호우 중심의 강우 분포를 더 잘 반영하고 있다. 이는 동일한 호우 중심을 유지하면서 주변으로 면적을 확장하기 때문에, 중심의 강우 패턴을 보다 정밀하게 반영할 수 있기 때문이다. 예를 들어, 25 km²에서 최대 강우량이 142.9 mm였고, 20,164 km^{2}에서는 91.9 mm로 감소하고 있으며, Box-tracking 방법에 비해 감소폭이 상대적으로 작다.

Advanced Point-tracking 기법은 다중 호우 중심을 고려하고, 각 중심으로부터 면적을 확장하는 방식으로 다른 두 기법보다 더 높은 강우량을 유지하는 것을 볼 수 있습니다. 예를 들어, 25 km^{2}에서 142.9 mm로 Point-tracking과 동일한 값을 가지며, 면적이 5,041 km^{2}일 때에도 101.8 mm로, Box-tracking과 Point-tracking에 비해 상대적으로 높은 값을 유지하고 있다. 이는 Advanced Point-tracking이 실제 강우장의 분포를 효과적으로 반영하면서, 여러 호우 중심을 고려하여 면적 최대 강우량을 산정하는 데 있어 더 우수한 성능을 보임을 나타냅니다.

Fig. 5와 Table 2를 통해 Advanced Point-Tracking 기법이 다른 기법들에 비해 다중 호우 중심을 효과적으로 분석하고, 실제 강우 분포를 반영하는 데 있어 더욱 우수함을 확인할 수 있다. Advanced Point-tracking 방법 수행시 선정된 대표 호우 사상 기간중 강우장이 하나 발생한 경우에는 다중호우중심이 동일한 구역에서 선정되어 Point-tracking을 통하여 수행한 DAD 결과와 동일한 값이 제시되어 실제 단일호우가 발생한 경우도 유의하게 반영되고 있는 것을 확인하였다. 특히 면적이 커질수록 강우장의 형태를 유지하면서 중심을 확장해나가는 방식이 실제 강우 현상의 특성을 반영하는 데 유리하다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내에서 발생한 주요 호우 사상에 대해 Box-tracking, Point-tracking, Advanced Point-tracking의 세 가지 자동 강우장 탐색 기법을 활용하여 면적 강수량 분석을 수행하였으며, 각 기법의 강우장 추적 결과와 최대 강우량 산정 결과를 비교 분석하였다. 이를 통해 각 기법의 장단점과 실효성을 확인할 수 있었다. 본 연구를 통해 도출된 토의 사항 및 결론은 다음과 같다.

(1) Box-tracking 기법은 면적 확장을 정방형으로 수행하여 여러 호우 중심을 동시에 고려할 수 있는 장점이 있다. 그러나 이러한 방식은 실제 호우장의 형태를 제대로 반영하지 못하고, 중심에서 멀어질수록 강우량이 과소 산정되는 경향을 보였다. 예를 들어, 면적이 증가함에 따라 최대 강우량이 크게 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 강우의 불균일한 공간 분포를 반영하기 어려운 Box-tracking 기법의 한계를 보여준다.

(2) Point-tracking 기법은 고정된 호우 중심을 기준으로 주변의 강우량을 확장하여 면적 최대 강우량을 산정하는 방식이다. 이 기법은 호우 중심의 위치가 일정하기 때문에 강우 분포의 형태 변화를 정밀하게 반영할 수 있는 장점이 있다. 그러나 복수의 호우 중심을 분석하기에는 적합하지 않아, 다중 호우 사상이 발생하는 경우에는 전체 강우 분포를 충분히 고려하지 못하는 단점이 있다. 특히, 면적이 증가할수록 단일 중심을 유지함에 따라 강우 분포를 정확히 반영하기 어렵다는 한계가 있었다.

(3) Advanced Point-tracking 기법은 Box-tracking 및 Point-tracking의 단점을 보완한 방법으로, 각 Sub-duration별로 다중 호우 중심을 탐색하고 각 중심으로부터 면적 최대 강우량을 산정함으로써 더욱 신뢰성 높은 분석 결과를 도출할 수 있었다. 이를 통해 다중 호우 중심을 효과적으로 반영하고, 면적을 확장하면서도 각 호우 중심의 강우 분포를 정밀하게 분석할 수 있었다. 특히, 군집화(clustering) 기법을 통해 각 강우 사상을 구분하고, 각 군집 내 최대 강우량을 가진 지점을 호우 중심으로 선정하여 분석함으로써, 강우의 실제 공간적 분포를 효과적으로 반영할 수 있었다.

결론적으로, Advanced Point-tracking 기법이 Box-tracking과 Point-tracking에 비해 다중 호우 중심을 효과적으로 반영하고, 실제 강우장의 형태를 정밀하게 반영함으로써 최대 면적 강우량을 산정하는 데 있어 우수한 성능을 보임을 확인하였다. 특히, 면적이 커질수록 강우장의 형태를 유지하면서 중심을 확장해나가는 방식이 실제 강우 현상의 특성을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 이러한 Advanced Point-tracking 기법은 강우 예측 및 수문학적 분석에서 더욱 신뢰성 있는 결과를 제공할 수 있으며, 향후 수자원 관리 및 자연재해 대응에 있어 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

본 연구의 결과는 실제 강우장 특성을 반영한 다양한 공간적 강우 분석에 있어 중요한 기초 자료를 제공하며, 특히 PRISM 기반의 고해상도 강우 데이터를 활용하여 강우장의 시·공간적 변동성을 정밀하게 분석하여 수공구조물 설계와 같은 실무적 활용에 기여할 뿐만 아니라, 홍수 및 가뭄 예방을 위한 정책적 의사결정에 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 대규모 강우량 추정 및 홍수 위험 평가에 보다 정확한 접근법을 제공한다.

향후 연구에서는 Advanced Point-tracking 기법을 활용하여 기후 변화에 따른 극한 강우 사상의 DAD 분석을 수행하는 것이 필요하다. 이를 통해 기후 변화 시나리오별로 발생 가능한 극한 강우의 특성과 영향 범위를 평가하고, 이를 바탕으로 수자원 관리 및 재해 예방 대책을 마련할 수 있을 것이다.

Acknowledgements

This work was supported by Korea Environment Industry & Technology Institute(KEITI) through Water Management Program for Drought, funded by Korea Ministry of Environment(MOE)(2480000175).

ORCID

Yong-Tak Kim https://orcid.org/0000-0002-0159-917X
Jin-Young Kim https://orcid.org/0000-0002-2232-0692
Hyun-Han Kwon https://orcid.org/0000-0003-4465-2708

References

Daly, C., Halbleib, M., Smith, J. I., Gibson, W. P., Doggett, M. K., Taylor, G. H. and Pasteris, P. P. (2008). "Physiographically sensitive mapping of climatological temperature and precipitation across the conterminous United States." *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society,* Vol. 28, No. 15, pp. 2031-2064.

Durrans, S. R., Julian, L. T. and Yekta, M. (2002). "Estimation of depth area relationships using radar data." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 7, No. 5 pp. 356-367.

Kim, N. W. and Won, Y. S. (2004). "DAD analysis on storm movement." *Journal of Korea Water Resources Association,* Vol. 37, No. 5, pp. 437-448 (in Korean).

Kim, Y. S., Song, M. Y., Lee, G. H. and Jung, K. S. (2014). "Development and application of automatic rainfall field tracking methods for depth-area duration analysis." *Journal of Korea Water Resources Association,* Vol. 47, No. 4, pp. 357-370 (in Korean).

Kim, Y.-T., Park, M. H. and Kwon, H. H. (2020). "Optimization of PRISM parameters using the SCEM-UA algorithm for gridded daily time series precipitation." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 53, No. 10, pp. 903-915 (in Korean).

Ministry of Construction and Transportation (MOCT) (2000). Study on Water Resources Management Techniques for 1999, Vol. 2: Estimation of Probable Maximum Precipitation in Korea. National Institute of Meteorological Sciences (in Korean).

Patrick, M., Mah, D. Y. S., Putuhena, F. J., Wang, Y. C. and Selaman, O. S. (2019). Constructing depth-area-duration curves using public domain satellite-based precipitation data. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, Vol. 9, No. 3, pp. 281-302.

Svensson, C. and Jones, D. A. (2010). "Review of methods for deriving areal reduction factors." *Journal of Flood Risk Management*, Vol. 3, pp. 232-245.

Tarun, D. G. (2005). *Transformation of Point Rainfall to Areal Rainfall by Estimating Areal Reduction Factors, using Radar Data, For Texa*s. Master Thesis, Texas A&M University.

Thornton, P. E., Running, S. W. and White, M. A. (1997). "Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain." *Journal of Hydrology,* Vol. 190, No. 3-4, pp. 214-251.

WMO (1969). "Manual for Depth-Area-Duration Analysis of Storm Precitation." Technical Paper 129, Geneva.