

도시홍수와 강수생성모형

Water
for future
학술/기술 기사
03



박정하

홍익대학교
토목공학과 박사수로
jungha1122@mail.hongik.ac.kr



김동균

홍익대학교
건설환경공학과 부교수
kim.dongkyun@hongik.ac.kr

1. 머리말

2011년 우면산 산사태, 2020년 부산 지하철도 침수의 사례에서 알 수 있듯이 인구가 밀집된 도시지역에서 짧은 시간 동안에 발생하는 집중호우는 개인과 사회에 잊을 수 없는 상처를 남긴다. 이러한 집중호우는 기후변화와 함께 더욱 자주 강하게 발생할 것으로 예상되어(O'Gorman, 2015) 그 피해는 더욱 증가할 것이다.

강수생성모형(Precipitation Generation Model)은 관측강수와 유사한 통계적 특성을 가진 강수자료를 생성하는 모형(www.letitrain.info 참조)으로, 홍수/가뭄/산사태 등 물관련 재난의 위험도 분석에 활발히 사용되어 왔다. 그러나 앞서 언급된 도시지역의 수재해에 큰 영향을 미치는 단기간 집중 호우를 강수생성모형으로 정확히 모사하는 것은 연구자들에게 도전적인 과제로 여겨져 왔다. 단기간 집중호우와 밀접한 연관성을 가진 중규모 대류현상의 모의가 가능한 물리기반의 모형들은 결과 산출에 많은 시간과 비용이 소모되며, 모의결과가 관측자료 대비 뚜렷한 편향성을 가지고 있어 재난위험도의 정밀한 산출이 주 목적인 재난모형의 입력자료로는 적합하지 않다. 또한, 강수현상을 수학적으 로 개념화하여 자료를 생성하는 통계기반모형의 경우 알고리즘의 단순

성으로 인하여 시단위보다 더 정밀한 시간대에서의 극한값을 정확히 모사하지 못한다 (Park et al., 2019, Kim and Onof, 2020).

포아송 클러스터 강우 모형은 통계기반 강수생성모형으로, 무작위적인 강우강도와 지속기간을 가진 여러개의 강우 셀을 포함한 폭풍우가 포아송 과정에 의해 발생한다는 가정하에 강우자료를 생성한다 (그림 1.a-c 참조). 이 모형에서 강우 셀은 수학적 편의성을 확보하기 위해 그림 1c와 같이 주로 직사각형 형태로 표현되었다.

1980년대에 모형의 기본 구조가 정립된 이후 (Rodriguez-Iturbe et al., 1987), 포아송 클러스터 모형의 개선 방향은 대류성 및 층운형 강수 현상의 재현(Cowpertwait, 1994); 장단기 강우 변동성 재현(Park et al., 2019, Kim and Onof, 2020); 시공간 모형으로 확장(Cowpertwait, 1995) 등에 초점이 맞춰져 있었다. 앞서 언급하였듯이, 포아송 클러스터 강우 모형 또한 시단위 이하의 미세한 시간대에서 극한 강우량을 과소평가하는 경향을 보여(Cowpertwait et al., 1996, Onof et al., 2000) 도시 수재해 위험도 산정에 한계를 나타냈다 (Park et al., 2015).

2. 포아송 클러스터 강우 모형의 극한강수 재현 성능 개선 사례

관측 강우의 극한 특성을 재현하기 위해서는 강우의 극한값들에 의해 형성되는 강수량 분포의 꼬리부분을 잘 재현해야한다. 이러한 관점에서 Cowpertwait(1998)는 모형 교정에 강수량 분포의 3차 모멘트를 포함하는 방법을 제시하였고, Cameron et al.(2000)은 더 두꺼운 꼬리를 갖는 분포를 적용하여 강우 셀을 모의하였다.

Kaczmarzka et al.(2014)는 강우 셀의 평균 강우 강도를 강우 셀의 지속시간을 고려하여 무작위화하는 시도를 통해 시단위 이하 시간대에서 극한 추정 성능을 개선했지만, 아주 작은 시간대(5분)에서는 여전히 극한값을 과소추정하였다. Kim and Onof(2020)는 이변수 감마분포를 사용하여 강우 강도를 모의하여 5분 내외의 작은 시간대에서의 극한값을 매우 정확히 모사하였다. 그러나 이 연구는 모형 교정에 시단위 이하의 관측 강우 자료를 필요로 하여 시단위 이하의 강수량자료가 없는 경우에는 적용성이 저하된다.

강우 셀의 형태에 대한 다수의 연구가 진행되었지만(Zawadzki, 1973, Schleiss et al., 2014) 포아송 클러스터 모형에 적용한 사례는 거의 없었다. 강우 셀 모양을 정의하기 어려운 이유는 관측 강우 자료는 강우 셀의 중첩으로 표현된 자료일 뿐, 강우 셀에 대한 정보는 관측되지 않기 때문이다. Ramesh et al. (2018)은 강우 셀이 시간에 따라 지수적으로 감소하는 모형을 개발하여 극한 재현 성능을 개선하였다. Northrop and Stone(2005)에서는 강우 셀 모양으로 Gaussian pulse를 가정하였다. 이 모형은 기본 모형(직사각형 강우 셀 가정 모형)과 비슷한 성능을 가지지만 매개변수가 많아져 모형의 간결성이 떨어져 모형의 교정이 어렵다는 한계를 보였다.

3. 강우 셀 모양의 간단한 변형을 통한 극한 성능 개선 방안

본 연구에서는 포아송 클러스터 강우 모형에서 가정한 직사각형 강우 셀 형태(그림 1c)를 변경하여 강우 셀 내부 구조를 더욱 정확히 모사하고자 하였다. 레이더 강수 및 폭풍 추적 알고리즘에 대

한 여러 연구(Han et al., 2009, Kim et al., 2019)에서는 강우 셀 공간 구조가 종 모양 곡선과 유사함을 보고하였다. 이러한 강우 셀이 이동하면 시간에 따른 강우의 곡선 또한 종 모양으로 변환되므로 직사각형 강우 셀의 모양을 사인 제곱 함수($y = a \sin^2 bx$)로 대체할 것을 제안하였다(그림 1d). 여기에서 사인 제곱 함수의 매개변수 a, b는 사인 제곱 함수 아래의 면적이 직사각형의 면적과 동일하게 되도록 정하였다.

모형의 성능을 평가하기 위해 독일 Bochum 관측소의 1931년부터 1999년까지 69년 길이의 5분 강우 자료를 이용하였다. 시단위 이상 통계 자료를 활용하여 모형을 교정하고 500년 길이의 5분단위 합성 강우 시계열을 생성한 후 그 통계를 관측 자료의 통계와 비교하였다. 비교 결과는 그림 2와 같다. 모의된 강우 셀의 지속 시간이 대부분 1시간 이하이기 때문에 시단위 이상에서의 통계는 강우 셀의 모양과는 관계없이 동일한 통계를 나타냈으나, 시단위 이하에서는 사인 제곱 모형이 관측 강

우의 왜도를 직사각형 모형보다 잘 모의하는 것으로 나타났다. 이는 곧 강우의 극한을 재현하는 성능과도 연결된다. 그림 3은 관측 및 모의 강우의 연최대 강우 깊이를 재현기간에 따라 나타낸 그림이다. 위에서 언급한 것과 마찬가지로 1시간 이상 단위에서는 직사각형 및 사인 제곱 펄스 모형이 거의 동일한 극한 특성을 재현하는 것으로 나타났다. 그러나 시단위 이하에서는 사인 제곱 펄스 모형이 직사각형 펄스 모형보다 확연히 개선되어 관측자료의 극한 값을 정확하게 재현하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 모형 개선이 수문분석 결과에 미치는 영향을 알아보기 위해 단기간 집중호우에 큰 영향을 받는 도시 유역에 대해 내수침수 분석을 수행하였다. 그림 4는 서울 신월 배수분구에 대해 XP-SWMM모형을 구축한 뒤 70년 재현 기간을 갖는 관측 및 모의 강우를 입력자료로 활용하여 이에 따른 침수면적을 산정한 결과이다. 직사각형 펄스 모형은 관측 강우로 인해 발생한 침수 영역을 상당히 과소 추정하는 것으로 나타났으나, 사

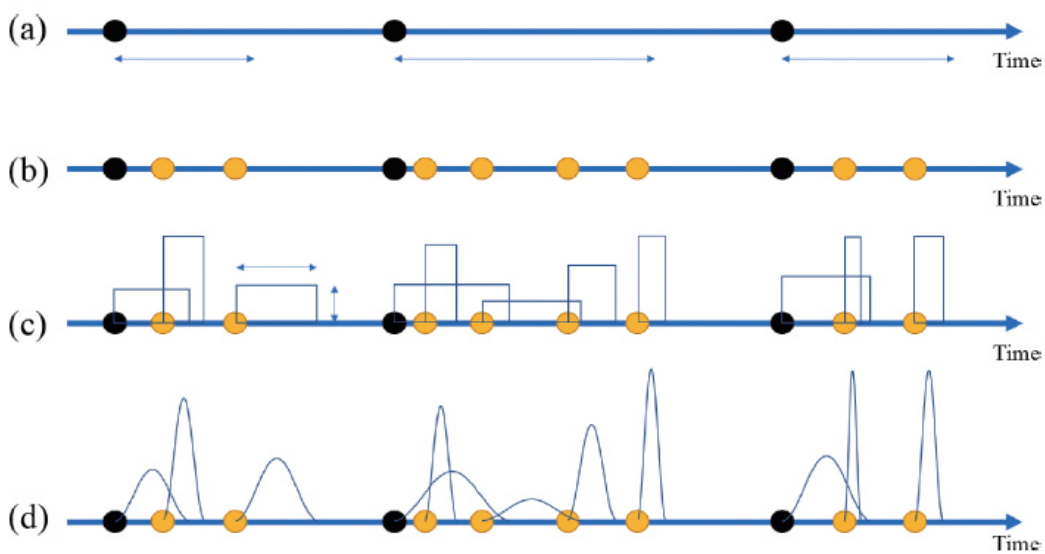


그림 1. (a)-(c) Randomized Bartlett-Lewis Rectangular Pulse 모형의 강우 생성 과정. (d) 직사각형의 강우 셀 모양을 사인 제곱 함수($y = a \sin^2 bx$)로 대체한 모형. (출처 : Park et al., 2021)

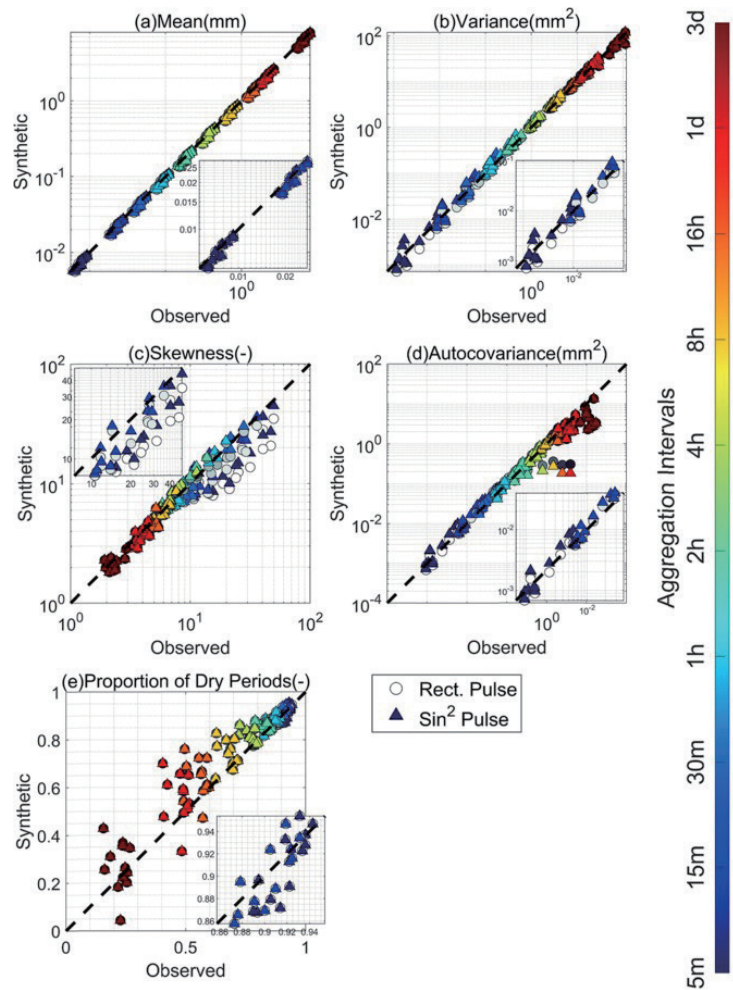


그림 2. 5분에서 3일 범위의 시간대에서 관측(x) 대 합성(y) 강우의 표준 통계 비교. (출처 : Park et al., 2021)

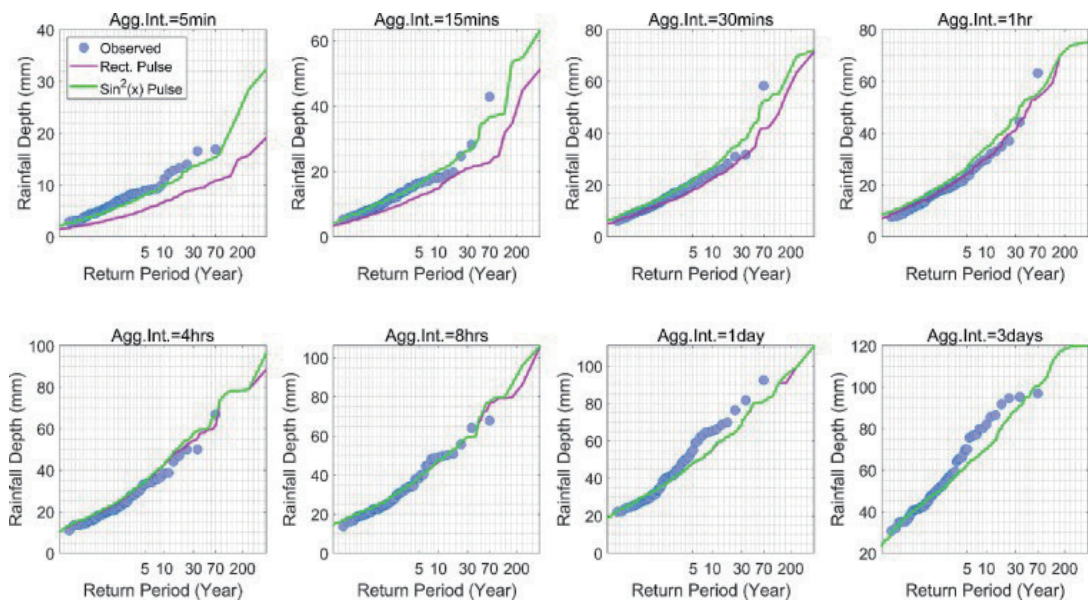


그림 3. 5분에서 3일 사이의 시간대에서 재현기간에 따른 연최대 강우 깊이 (출처 : Park et al., 2021)

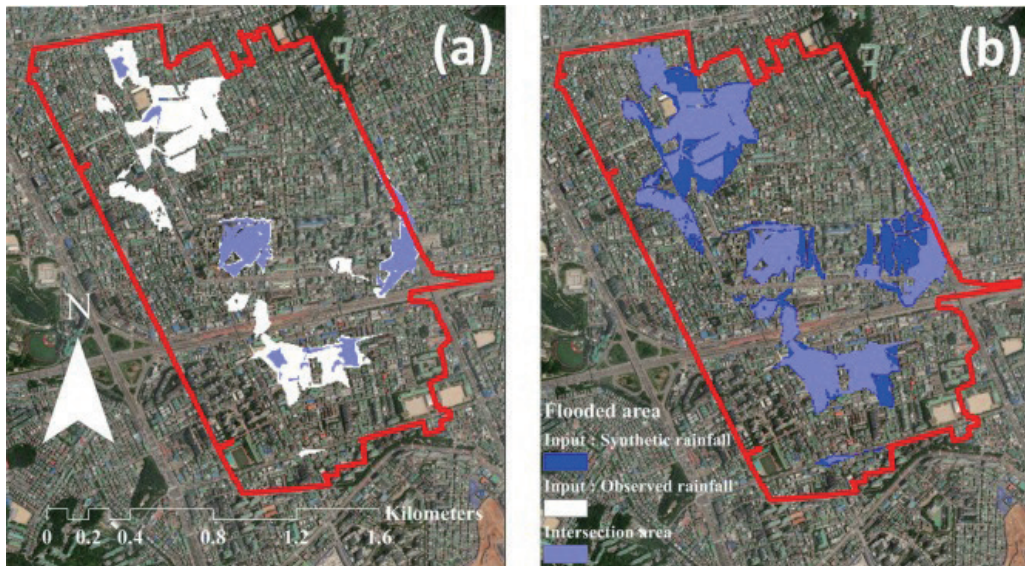


그림 4. 70년 재현 기간의 합성 및 관측 강우를 XP-SWMM 모형에 입력하여 모의된 최대 침수 지역 비교. (a) 직사각형 및 (b) 사인 제곱 펄스 모델의 결과 (출처 : Park et al., 2021)

인 제곱 펄스 모형은 이를 매우 유사하게 모사함을 확인할 수 있다.

4. 맺음말

기후변화로 인하여 집중호우의 빈도와 강도가 증가하고, 이에 따른 피해가 증가함에 따라 단기 집중 강우를 모의할 수 있는 모형의 개발이 요구되고 있다. 본 기사에서는 단기 극한강우 생성에 한계를 보인 포아송 클러스터 강수생성모형을 개선하기 위한 선행 연구들을 살펴보고, 모형의 간단한 변형으로 시단위 이하의 특성 재현 성능을 개선한 사례를 소개하였다. 개발된 모형은 추가적인 매개변수 없이 시단위 이하에서 극한 강수의

특성과 이에 따른 도시침수면적을 잘 재현하였다. 본 모형이 인구가 밀집되어 홍수 피해의 위험도가 크지만 강수자료가 존재하지 않아 재난분석이 불가능한 개발도상국의 치수대책 수립에 널리 활용되기를 기대하며 본고를 끝맺고자 한다.

* 본고는 저자들이 주저자로 집필한 다음의 논문을 국문으로 요약한 것입니다.

Park, J., Cross, D., Onof, C., Chen, Y., & Kim, D. (2021). A simple scheme to adjust Poisson cluster rectangular pulse rainfall models for improved performance at sub-hourly timescales. *Journal of Hydrology*, 598, 126296.

참고문헌

- Cameron, D., Beven, K., & Tawn, J. (2000). An evaluation of three stochastic rainfall models. *Journal of Hydrology*, 228(1-2), 130-149.
- Cowpertwait, P. S. (1998). A Poisson-cluster model of rainfall: some high-order moments and extreme values. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 454(1971), 885-898.
- Cowpertwait, P. S. (1995). A generalized spatial-temporal model of rainfall based on a clustered point process. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 450(1938), 163-175.
- Cowpertwait, P. S. (1994). A generalized point process model for rainfall. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 447(1929), 23-37.
- Cowpertwait, P. S. P., O'Connell, P. E., Metcalfe, A. V., & Mawdsley, J. A. (1996). Stochastic point process modelling of rainfall. I. Single-site fitting and validation. *Journal of Hydrology*, 175(1-4), 17-46.
- Han, L., Fu, S., Zhao, L., Zheng, Y., Wang, H., & Lin, Y. (2009). 3D convective storm identification, tracking, and forecasting—An enhanced TITAN algorithm. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26(4), 719-732.
- Kaczmarska, J., Isham, V., & Onof, C. (2014). Point process models for fine-resolution rainfall. *Hydrological Sciences Journal*, 59(11), 1972-1991.
- Kim, D., & Onof, C. (2020). A stochastic rainfall model that can reproduce important rainfall properties across the timescales from several minutes to a decade. *Journal of Hydrology*, 589, 125150.
- Kim, J., Lee, J., Kim, D., & Kang, B. (2019). The role of rainfall spatial variability in estimating areal reduction factors. *Journal of Hydrology*, 568, 416-426.
- Northrop, P. J., & Stone, T. M. (2005). A point process model for rainfall with truncated Gaussian rain cells. Department of Statistical Science, University College London, London, 1-15.
- O'Gorman, P. A. (2015). Precipitation extremes under climate change. *Current climate change reports*, 1(2), 49-59.
- Onof, C., Chandler, R. E., Kakou, A., Northrop, P., Wheeler, H. S., & Isham, V. (2000). Rainfall modelling using Poisson-cluster processes: a review of developments. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 14(6), 384-411.

Park, H., Yang, J., Han, J., & Kim, D. (2015). Application of the poisson cluster rainfall generation model to the urban flood analysis. *Journal of Korea Water Resources Association*, 48(9), 729-741.

Park, J., Onof, C., & Kim, D. (2019). A hybrid stochastic rainfall model that reproduces some important rainfall characteristics at hourly to yearly timescales. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(2), 989-1014.

Park, J., Cross, D., Onof, C., Chen, Y., & Kim, D. (2021). A simple scheme to adjust Poisson cluster rectangular pulse rainfall models for improved performance at sub-hourly timescales. *Journal of Hydrology*, 598, 126296.

Ramesh, N. I., Garthwaite, A. P., & Onof, C. (2018). A doubly stochastic rainfall model with exponentially decaying pulses. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 32(6), 1645-1664.

Rodriguez-Iturbe, I., Cox, D. R., & Isham, V. (1987). Some models for rainfall based on stochastic point processes. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 410(1839), 269-288.

Schleiss, M., Chamoun, S., & Berne, A. (2014). Nonstationarity in intermittent rainfall: The “dry drift”. *Journal of Hydrometeorology*, 15(3), 1189-1204.

Zawadzki, I. I. (1973). Statistical properties of precipitation patterns. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 12(3), 459-472.
