

Veejet 노즐을 이용한 진동 강우 시뮬레이터: 토양 침식 및 붕괴 연구를 위한 이의 구성과 특성 측정*

김진관** · 김민석*** · 한민**** · 양동윤*****

Oscillating Rainfall Simulator Using Veejet Nozzle: Set-up and Calibration for Soil Erosion and Failure Studies*

Jin Kwan Kim** · Min Seok Kim*** · Min Han**** · Dong-Yoon Yang*****

요약 : 토양 침식과 붕괴에 대한 연구에서 적절한 실내 및 현장 실험을 수행할 때, 인공 강우 시뮬레이터의 강우 특성을 이해하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 Veejet 80150 노즐을 사용한 진동 강우 시뮬레이터를 대상으로 하여 적절한 운영 방법과 강우 강도의 분포, 그리고 강우 에너지의 특징에 대해 분석하였다. Optical laser disdrometer를 이용하여 강우 입자 분포와 속도를 측정하여 강우 시뮬레이터의 적절한 입력 수량을 확인하였고, 이를 기존 연구에서 확인한 자연 강우와 비교하였다. 강우 시뮬레이터는 실제 강우 강도가 매우 높은 호우 시의 강우 특성과 매우 유사한 것으로 나타났으며, 이러한 특성으로 본 강우 시뮬레이터는 호우 시의 토양 침식과 붕괴를 위한 모의 연구에 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

주요어 : 인공 강우 시뮬레이터, Veejet 노즐, 강우특성 보정, 강우에너지

Abstract : To perform appropriately indoor or field experiment for soil erosion and failure studies, the understanding characteristics of raindrops from a rainfall simulator is much important. The set-up and characterization of the portable oscillating rainfall simulator using Veejet nozzle 80150 are presented. The proper input current is suggested via the analysis of spatial rainfall intensity changes from input current changes. Size distributions and velocities of raindrops from the rainfall simulator within proper input current were measured by an optical laser disdrometer and compared with those of the natural rainfall from previous studies. Size distributions and velocities of raindrops from the rainfall simulator are similar to those of the natural heavy rain storm but rainfall intensities from the rainfall simulator exceed much those of the natural heavy rain storm. These differences in rainfall's physical characteristics between artificial and natural rainfall has to be considered when this rainfall simulator is applied to the experiment of soil erosion and soil failure. This study will contribute to the development of an erosion and failure experiment.

Key Words : Rainfall simulator, Veejet nozzle, Calibration of rainfall characteristics, Raindrop's kinetic energy

*이 연구는 국립문화재연구소의 보존과학 연구개발 사업의 '석조문화재 재해발생 예측시스템 개발' 과제의 일환으로 수행되었습니다.

**전남대학교 지리교육과 조교수(Assistant Professor, Department of Geography Education, Chonnam National University, jinkwankim77@gmail.com)

***충남대학교 국제수자원연구소 연구원(Researcher, International Water Resources Research Institute, Chungnam National University, varcgisv@gmail.com)

****서울대학교 지리교육과 박사과정(Doctoral Student, Department of Geography Education, Seoul National University, hmjiang1@snu.ac.kr)

*****한국지질자원연구원 제4기 지질연구실 책임연구원(Principal Researcher, Quaternary Geology Research Department, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, ydy@kigam.re.kr)

I. 서론

최근 급격한 기후 변화로 인해 집중 호우의 빈도 및 강도가 증가하고 있는 상황에서, 지형 변화에 큰 영향을 미칠 수 있는 토양 침식과 붕괴 프로세스에서의 강우의 역할을 이해하는 것은 매우 중요하다(김종연 등, 2012; 김민석, 2016). 토양 침식 연구에서는 강우의 역할을 강우 강도, 강우 에너지, 그리고 강우 모멘텀으로 토양 침식량과 연관지어 설명하여 왔다(김민석 등, 2011; 임영신 등, 2012; Lim *et al.*, 2015). 강우 강도는 침투능 및 지표 유출과 관계가 있으며, 지표 유출의 증가는 토양 침식에 크게 영향을 미친다(Abrahams *et al.*, 1995; Parsons *et al.*, 1996; Loch, 2000; Loch *et al.*, 2000). 침투능의 특성과 토양층의 특성에 따라 지표 아래 불포화대 내에서 수분의 흐름 특성이 달라지며, 이는 결국 토양층 붕괴의 양상을 달라지게 한다(김진관 등, 2009; Kim *et al.*, 2015). 이전의 토양 침식과 붕괴 연구들은 주로 야외에서 수행되었지만, 최근에는 실내외에서 인공 강우 시뮬레이터를 이용한 다양한 조건 하 혹은 조건들을 인위적으로 조절한 연구들이 많이 증가하였다.

토양 침식과 붕괴 연구에 있어 인공 강우 실험의 장점은 강우 사상의 특성을 조절할 수 있다는 것이다. 연구자가 원하는 강우 조건, 특히 강우 강도와 강우 지속 시간을 일정하게 유지할 수 있다는 점에서 강우 조건에 따른 실험도 시도되었다(Parsons and Stone, 2006). 즉, 강우 조건을 일정하게 유지시킬 수 있기 때문에 강우 시뮬레이터를 이용하여 다양한 조건의 토조 실험, 또는 현장 실험이 가능하다고 할 수 있다.

기존 인공 강우 실험에서의 가장 큰 문제점 중 하나는 인공 강우 시뮬레이터에서 분사되어 실험 토조에 떨어지는 강우 입자들이 실제 강우 사상에서의 강우 입자들의 특성, 즉 강우 입자들의 크기 분포와 이에 따른 속도 분포를 반영하는가에 대한 부분이다. 이와 관련하여 김진관 등(2016)의 연구에서는 국내 대학 실험실에 설치된 인공 강우 시뮬레이터의 특성을 분석한 결과, 실제 자연 상태의 강우에 비하여 직경이 큰 강우 입자의 부재를 발견하였고, 이를 통해 실제 자연 강우 사상에서의 강우 에너지에 비해 인공 강우 시뮬레이터로부터 살포된 강수가 턱없이 적은 강우 에너지를 나타내는 원인을 밝혔다. 또한, 외국에서 연구에 사용되었던 중소 규모의 인공 강우 시뮬레이터들의 특성들과 비교하면서, 이들 강

우 시뮬레이터들도 역시 자연 강우 사상에서의 특성과 큰 괴리가 존재하고 있음을 밝혔다. 인공 강우 실험의 또 다른 문제점 중 하나는 인공 강우 시뮬레이터로부터 살포된 강우가 공간적, 또는 시간적으로 균질한지에 대한 부분이다. 강우 사상의 시간적인 불균등과 관련하여서는 Parsons and Stone(2006)의 연구를 통하여 지표 유출의 특성 변화와 이로 인한 토양 침식의 차이가 나타날 수 있음을 유추할 수 있다.

그리하여 본 연구에서는 다량의 토양 침식과 붕괴를 야기할 수 있는 호우 사상을 대상으로 한 연구를 수행하기 위하여 호우 시의 강우 입자 및 에너지 특성과 가장 유사하다고 알려진 Veejet 80150 노즐이 사용된 Meyer and Harmon(1979)의 진동식 인공 강우 시뮬레이터에서 살포된 강우 입자의 특성을 분석하고자 하였다. 이와 같은 연구는 앞으로의 실내외 토양 침식 및 붕괴 연구 시, 보다 정확하고 정교한 실험 수행과 결과 도출에 기여할 것으로 여겨진다.

실제로 야외에서 인공 강우 시뮬레이터를 적용할 때에는 강우의 특성을 직접적으로 측정하는 것은 제한적이다. 실험 시 강우 특성 이외에도 동시적으로 다양한 측정 및 샘플링이 진행되기 때문에 실험구의 훼손 가능성이 크기 때문이다. 따라서 본 연구와 같이 인공 강우 시뮬레이터의 특성에 대한 사전 연구를 수행하는 것은 현장 실험 중 문제 상황 발생 시 즉각적인 대처 및 실험 중 상황 확인에 유리하다고 할 수 있다(Loch *et al.*, 2001). 또한, 인공 강우 실험 시 실험 도구, 즉 인공 강우 시뮬레이터에서 분사된 강우 입자들의 정확한 특성을 파악하는 것이 결과 해석에 있어 매우 중요하다는 점도 본 연구의 필요성을 대변한다고 할 수 있다(Aksoy *et al.*, 2012; Lassu *et al.*, 2015).

II. 연구 방법

1. 인공 강우 시뮬레이터 구성

토양 침식 관련 연구에서 인공 강우 시뮬레이터는 많은 연구에서 다양한 종류가 사용되어 왔다. 일반적으로 인공 강우 시뮬레이터는 크게 단일 입자 강우 시뮬레이터(single-drop rainulator)와 복합 입자 강우 시뮬레이터(multi-drop rainulator)로 나뉜다. 그리고 복합 입자 강



그림 1. 본 연구에서 사용된 인공 강우 시뮬레이터

우 시뮬레이터는 빗방울의 크기 분포와 관련하여 단일 크기(single-sized) 강우 시뮬레이터와 복합 크기(multi-sized) 강우 시뮬레이터로 나뉜다(김진관 등, 2007; Agassi and Bradford, 1999). 복합 크기 강우 시뮬레이터는 크게 복수 노즐 방식과 진자 방식이 있으며, 이들의 강우 크기 분포가 자연 강우에 가깝게 보인다는 점에서 많은 연구에서 이용되었다(김진관 등, 2007). 본 연구에서의 인공 강우 시뮬레이터는 Meyer and Harmon(1979)의 진동식 인공 강우 시뮬레이터를 기본으로 하여 제작하였다(그림 1). 사용된 노즐은 Veejet 80150(Spraying System Co. Ltd., USA)이며, 강우를 위한 물의 주입(input current)은 Sem-25L 펌프(Koshin Ltd., Japan)를 이용하였다. 펌프를 이용한 물 주입 시 일정 유량을 유지시키기 위하여 중간에 파이프 유속계인 LF10-PTN(Horiba, Japan)을 연결하여 조절하였다.

2. 강우 특성 분석을 위한 실험 설계

인공 강우 시뮬레이터에 의한 강우 특성을 파악하기 위하여, 그림 2와 같이 강우 대상 면적에 대한 공간적 강우 강도(RI: rainfall intensity, mm/h) 및 강우 에너지(KE: kinetic energy, J/m²) 측정을 실시하였다. 측정 범위의 면적은 1m × 1m(가로 × 세로)이며, 측정 범위 내에

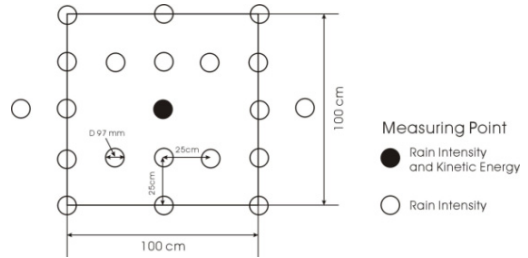


그림 2. 강우 강도와 강우 입자 크기 및 속도 분포의 측정 위치

지름 97mm의 플라스틱 원통을 25cm 간격으로 설치하였다. 측정 범위 외부에도 플라스틱 원통을 설치하였는데, 이는 실제 토양 침식 실험 시 실험구 외부에서 인공 강우의 특성을 보정하기 위한 용도이다. 측정 범위 내부 정중앙에는 optical laser discrometer(Parsivel, OIT Messtechnik GmbH & Co. KG, Germany)를 플라스틱 원통 상부 높이에 맞추어 설치하여 강우 입자의 크기 분포와 속도 분포를 30초 간격으로 누적 측정하였다. 강우 살포는 강우 시뮬레이터로의 입력 수량(input current)이 안정화 된 이후부터 5분 동안 지속시켰으며, 5분 이후 각각의 플라스틱 원통에 채워진 물의 깊이를 측정하여 단위 시간 당 강우 강도 값을 산정하였다. 강우 시뮬레이터에 사용된 Veejet 80150 노즐은 노즐을 중심으로 길쭉한 형태로 분사되기 때문에, 중심에서 멀어질수록 입사각이 작아지게 되어 강우가 살포되는 면적이 증가하는 특징이 있다. 그러므로 본 실험에서 같은 입력 수량 하에서의 강우 입자의 크기 분포(DSD: drop size distribution)는 측정 범위 내에서는 비교적 일정할 것이고, 입력 수량의 변화에 따라, 즉 강우 강도에 따라 일정하게 강우 입자 개수가 증가할 것으로 가정하였다.

III. 결과 및 토의

1. 인공 강우 시뮬레이터의 적정 입력 수량

인공 강우 시뮬레이터로 공급되는 입력 수량을 단계별로 조절하여 10단계의 강우 살포 시험을 실시하였다. 입력 수량은 강우 살포 중 지속적으로 확인 및 조절하였으며, 매 30초마다 이를 기록하였다. 각 실험 시 입력 수량은 평균값에서 0.2% 이상을 벗어나지 않았으며, 비교적 매우 일정하게 유지되었다. 이를 통해 단계별로 조

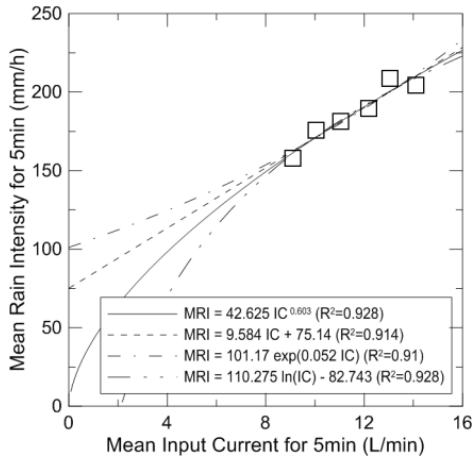


그림 3. 평균 입력 수량과 평균 강우 강도와와의 관계

절된 10단계의 실험 중 입력 수량의 5분 동안의 평균값에 대해 각각 9.1, 10.04, 11.05, 12.18, 13.05, 그리고 14.1(l/min)의 총 6단계 데이터를 획득하였다. 입력 수량이 9(l/min) 이하인 경우에는 강우가 제대로 발생하지 않았으며, 15(l/min)를 넘는 입력 수량 조건에서는 강우 시뮬레이터 노즐 설치부의 양쪽 아래에 설치된 물받이(catch tray)의 물이 넘치는 현상이 발생하여 정상적인

강우 모의가 거의 불가능하였다. 따라서 강우 모의가 가능한 입력 수량의 범위는 9~14.5(l/min) 범위에 해당되는 것으로 확정하였다(그림 3).

각각의 입력 수량으로 강우된 1m² 내의 실험 면적에서 각각의 강우 강도를 측정하여 이를 Suffer 12 소프트웨어(Scientific Software Corp., Sandy, UT, USA)를 이용하여 Kriging interpolation을 통한 1m² 내에서의 평균 강우 강도(MRI: Mean Rainfall Intensity, mm/h)를 산출하였다. 그리고 각각의 평균 입력 수량과 평균 강우 강도와의 관계를 도출하였다(그림 3). 강우 모의 가능 구간에서의 5분 동안의 평균 입력 수량과 평균 강우 강도와의 관계는 다양한 형태의 관계식이 도출되고 각각의 상관관계가 높다. 하지만 전체적인 양상과 시험 구간의 적합도를 고려하여 아래와 같은 식 (1)을 5분 동안의 평균 입력 수량(IC: l/min)과 평균 강우 강도(MRI: mm/h)와의 관계로 정하였다. 그리고 식 (1)은 이후의 강우 강도와 강우 에너지와의 관계를 이용하여 입력 수량만으로 강우 에너지를 추정할 때 사용하였다.

$$MRI = 42.625 IC^{0.603} (R^2 = 0.928) \quad (1)$$

그림 4는 입력 수량 별 강우 강도의 공간 분포를 나타

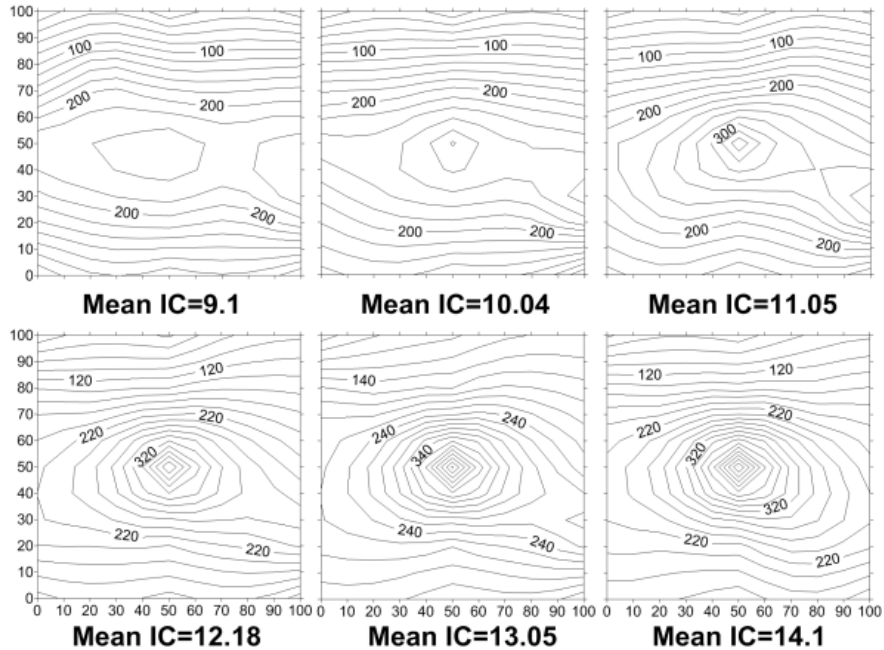


그림 4. 입력 수량(IC: l/min) 별 강우 시뮬레이터에서의 강우 강도 분포(mm/h)

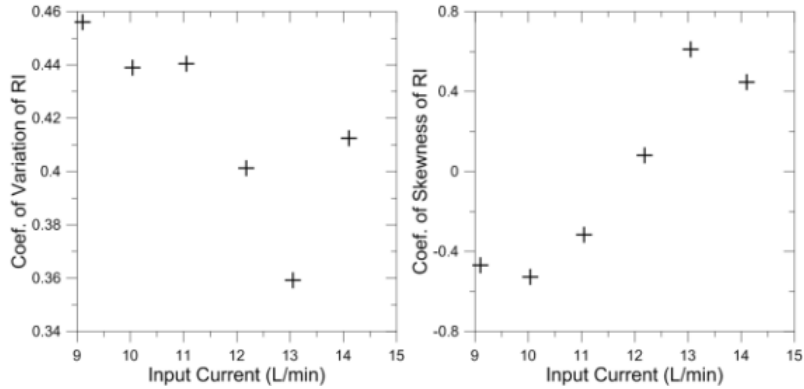


그림 5. 입력 수량 별 강우 강도 값의 분산율과 첨도율

낸 것이다. 입력 수량이 점차 증가함에 따라 강우 강도는 정중앙을 중심으로 동심원 형태로 증가하는 양상을 보였다. 이와 같은 공간상의 강우 강도의 분포 형태는 Meyer and Harmon(1979)이 Veejet 80150 노즐을 적용하였을 때와 유사하다. 하지만, 강우 강도의 크기는 Meyer and Harmon(1979)의 결과보다 더 크게 나타났다.

그림 5는 입력 수량 별 강우 강도 값(RI)들의 분산율과 첨도율을 각각 나타낸 것이다. 분산율(V)은 강우 강도 값들의 평균에 대한 분산 정도이며, 첨도율(S)의 경우는 그 값이 0에 근접할 때 강우 강도 값들의 분산이 정규 분포에 가까움을 의미한다. 분산율은 입력 수량이 13l/min에서 가장 낮게 나타났으며, 첨도율은 12l/min에서 가장 낮게 나타났다. 강우 강도 값들의 분산율과 첨도율을 고려하였을 시, 적정 강우 조건은 입력 수량(IC) 12~12.5l/min의 범위에 해당한다.

또한, Christiansen Uniformity coefficient(CU) 값은 강우의 공간적 동질성 또는 이질성을 평가하는데 주로 사용되어 왔다(김진관 등, 2016; Lassu *et al.*, 2015). CU 값을 구하기 위해 아래 식 (2)를 사용하였다.

$$CU = 100\% \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{x \times n} \right] \quad (2)$$

여기서 x_i 는 각각의 플라스틱 통에서의 강우 강도, \bar{x} 는 측정된 강우 강도 값들의 평균값, 그리고 n 은 강우 강도 값들의 개수이다. 각각의 입력 수량에 따른 CU 값은 표 1과 같다. 가장 높은 CU 값은 입력 수량이 13.05 l/min에서 70.3%로 나타났다. 입력 수량이 13.05l/min까지 증가하면서 CU 값이 점차 커지다가, 입력 수량이 그 이상으로 증가하면 작아지는 양상을 나타낸다. 그러므로 CU 값을 고려하였을 시, 적정 강우 조건은 입력 수량 약 13l/min 정도이다. 앞의 분산율과 첨도율까지 고려한다면, 약 12~13l/min 정도의 입력 수량이 적정할 것으로 판단된다.

2. 인공 강우의 강우 입자 크기 분포와 크기별 속도 특성

강우의 물리적 특성은 강우 입자의 형태, 강우 입자 크기, 강우 입자 크기의 분포, 강우 입자의 속도 등이다. 물리적 특성 자료를 이용하여 강우가 지표면에 가한 운동 에너지 KE를 산출할 수 있다. 특히, 토양 침식 예측에 있어 강우 강도와 강우의 운동 에너지와의 관계를 이해하는 것은 매우 중요하다(김진관 등, 2007; 2010). 따라서 토양 침식 연구를 위해서는 인공 강우 시뮬레이터로부터 살포된 강우 입자의 물리적 특성을 해명하는 것이 매우 중요하다. 인공 강우 시뮬레이터로부터 살포된 강

표 1. 입력 수량 별 Christiansen Uniformity coefficient (CU)

Mean Input Current (l/min)	9.1	10.04	11.05	12.18	13.05	14.1
CU (%)	50.1	56.7	57.4	64.7	70.3	67.2

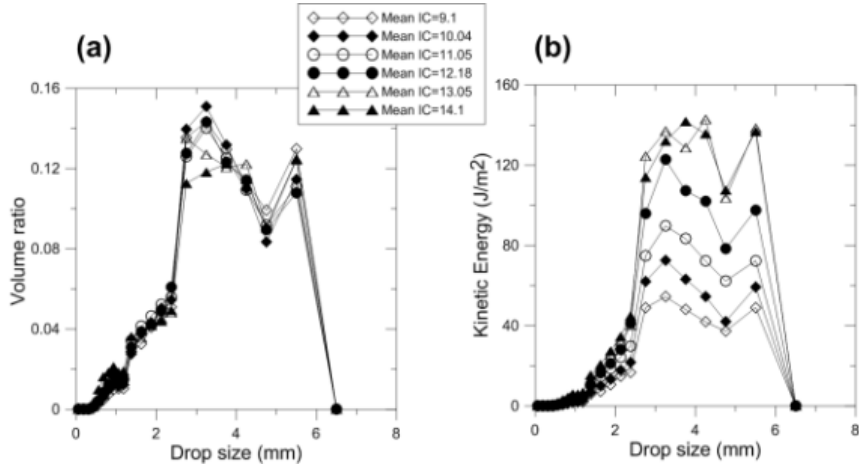


그림 6. 입력 수량 단계에 따른 강우 입자 크기 별 부피 비중 변화(a)와 강우 입자 크기 별 운동 에너지 변화(b)

우 입자들의 크기 분포, 강우 입자들의 개수, 그리고 각각의 강우 입자들의 속도를 측정하였다. 측정된 강우 입자들의 자료에 대해서는 식 (3)을 이용하여 개별 강우 입자의 운동 에너지(e)를 산출하였다.

$$e = \frac{1}{2} m V^2 = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{\pi}{6} D^3 \right) V_D^2 \quad (3)$$

여기서 m 은 강우 입자의 무게, ρ 은 강우 입자의 밀도 ($= 1 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^3$), 그리고 D 는 강우 입자의 지름(mm)이다. 개별 강우 입자의 운동 에너지(e)를 합하여 측정 단면적(S)으로 나누어 단위 면적당 총 강우 에너지(KE: J/m^2)를 아래의 식 (4)를 이용하여 산출하였다.

$$KE = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^n e_i \quad (4)$$

그림 6(a)는 입력 수량 단계에 따른 강우 입자 크기별 부피 비중의 변화를 나타낸 것이다. 강우 입자의 크기는 주로 비교적 크기가 큰 지름 3~6mm에서 많이 분포하고 있으며, 입력 수량이 증가하여도 그 크기 분포는 거의 일정하다. 또한, 그림 6(b)에서는 입력 수량 단계에 따른 강우 입자 크기 별 KE 분포 변화로 입력 수량이 증가함에 따라 비교적 일정하게 증가하는 양상을 나타내었다. 이는 측정 범위 내의 임의의 점의 측정이라 한다면 앞에서 제시한 가정, 즉 측정 범위 내의 강우 입자 크기 분포는 비교적 일정하고, 단지 입력 수량의 단계에 따라 강우

강도와 강우 입자 개수가 증가함을 의미하며, 이를 통해 KE가 증가하는 것이라고 할 수 있다.

Meyer and Harmon(1979)에서 McGregor and Mutchler(1977)의 강우 분포 자료와 비교한 25mm/h 이상의 자연 강우 분포가 유사하다고 밝힌 실험 결과 및 임영신(2012)이 국내 대전 지역에서 laser optical disdrometer로 측정 한 최대 강우 강도가 46mm/h 이상인 자연 강우 분포 결과에서, 약 3mm의 입자 크기가 가장 높은 비율을 갖는 단봉 형태의 강우 분포를 확인할 수 있다. 분포에서 가장 높은 비율의 부피비는 Meyer and Harmon(1979)에서는 약 8%, 임영신(2012)에서는 최고 20%로 각각 다르게 나타났다. 그리고 강우 강도가 증가하게 될 경우에 부피비가 변화하게 되는데, 임영신(2012)의 연구에서 강우 강도가 증가할수록 가장 높은 비율을 보인 약 3mm의 크기의 강우 입자의 부피비가 증가하는 것으로 나타났다. 본 연구의 인공 강우에서도 가장 높은 비율을 보이는 입자 크기는 약 3mm의 크기인 것으로 나타났으며, 강우 강도가 증가할수록 해당 강우 입자의 부피비가 약 11%에서 약 15%로 증가하였다. 이들의 연구 결과와 본 인공 강우 시뮬레이터의 강우 입자 크기 분포를 비교하면, 약 6mm 강우 입자 크기의 부피비가 기존 연구들에 비해 높게 나타났지만, 가장 높은 부피비를 보이는 강우 입자 크기인 3mm와 해당 입자 크기의 부피비의 변화는 이들 연구 결과와 유사한 것으로 보인다. 또한, 본 인공강우기의 강우 입자 크기 분포는 Nanko *et al.*(2004; 2006)의 연구 결과에서 식생 차단 효과 중 드립 작용(drip pro-

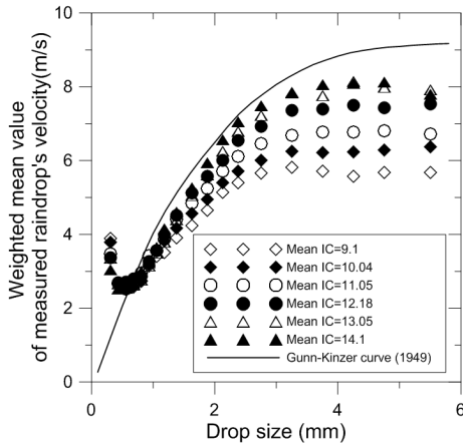


그림 7. 강우 입자 크기에 따른 속도 분포

cess)에 의해 커진 강우 입자 크기 범위와도 유사하다. 이와 같은 강우 입자 크기 분포 결과를 고려한다면, 본 연구에서 사용된 인공 강우 시뮬레이터는 시간당 강우 강도가 높고 요구되는 토양 침식 실험 및 임상에서의 침투능 실험에 적합할 것으로 판단된다.

그림 7은 강우 입자 크기에 따른 속도(m/s)의 분포를 나타낸 것이다. 그림 7에서 실선은 Gunn and Kinzer(1949)의 20°C, 1기압 상태에서의 강우 입자의 최종 속도 분포를 나타낸 것이며, 단계별 입력 수량에서 측정된 강우 입자 속도 값들을 강우 입자 크기별로 입자 개수로 가중 평균한 값들과 서로 비교하였다. 측정된 입자 속도는 강우 입자의 크기가 작을수록 입력 수량에 의한 속도의 차이는 크지 않지만, 강우 입자의 크기가 커질수록 입력 수량에 의한 속도의 차이가 점차 커지는 양상을 나타낸다.

강우 입자가 가장 작은 크기에서는 Gunn and Kinzer (1949)의 실험에 비해 속도가 조금 빠르게 나타났으며, 강우 입자의 크기가 커질수록 Gunn-Kinzer 곡선과의 차가 커지는 것으로 나타났다. 하지만, 입력 수량이 커지면서 그 폭은 점차적으로 줄어드는 양상을 나타내었다. 입력 수량에 따라 전체적으로 강우 입자 속도가 증가하는 경향은, 앞에서 가정한 강우 강도에 따라 일정하게 속도와 강우 입자 개수가 증가한다는 가설을 지지하는 결과로 해석된다.

앞선 절에서 적정 입력 수량으로 판단한 12~13l/min의 범위에서는 Gunn-Kinzer 곡선과의 속도 차이가 평균 약 1m/s 정도로 나타난다. 이와 같은 차이는 Meyer and Harmon(1979)의 실험에서는 노즐의 높이가 3m 이었으나, 본 실험에서는 2m 높이에서 강우를 살포하였기에 높이 차이가 반영된 결과로 해석된다. 그러나 Gunn-Kinzer 곡선은 가장 이상적인 상황을 나타내기 위해, 야외 실험 시 온도, 기압 및 바람에 의한 영향을 고려한다면 측정된 인공 강우의 입자 크기별 속도 값은 자연 강우에 매우 가까운 상황으로 보이며, 국내에서 측정된 자연 강우의 입자 크기별 속도 값(김진관 등, 2010)과 비교하면 그 차이는 더 작아진다.

3. 인공 강우의 입력 유량에 따른 적용 면적에 대한 강우의 운동 에너지

시간별 강우 강도(RI)와 운동 에너지(KE)와의 관계를 그림 8에 나타내었다. 그림 8(a)는 30초 동안 측정된 강우 강도와 강우 에너지의 관계로, 강우 강도가 증가함에

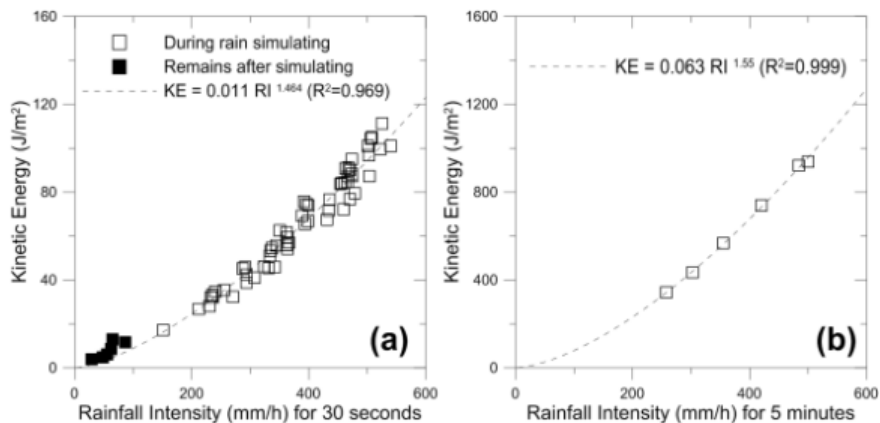


그림 8. 강우 강도와 강우 에너지 함유량(KE)과의 관계

따라 강우 에너지도 비례적으로 증가하고 있다. 이들 관계는 식 (5)와 같다.

$$KE = 0.011 * RI^{1.464} (R^2 = 0.969) \quad (5)$$

그림 8(a)에서 검정색으로 채워진 사각형은 강우 살포 실험이 끝난 이후의 입력 수량이 없는 상황에서 일부 남은 강우가 측정 범위에 떨어져 측정된 강우 입자들의 함으로, 이 또한 강우 강도에 따라 증가하고 있음을 보인다. 그림 8(b)는 5분 동안 측정된 강우 강도와 강우 에너지의 관계로, 강우 강도가 증가함에 따라 강우 에너지도 비례적으로 증가하고 있다. 5분 동안의 강우 강도와 강우 에너지와의 관계는 30초 동안의 관계보다 더 좋은 관계를 보이고 있으며, 그 관계는 식 (6)과 같다.

$$KE = 0.063 * RI^{1.55} (R^2 = 0.999) \quad (6)$$

식 (6)은 인공 강우에서의 강우 강도가 운동 에너지 산정에 직접적인 자료로 활용할 수 있으며, 또한 앞에서 가정한 강우 강도에 따라 일정하게 속도와 강우 입자 개수가 증가하는 것, 즉 강우 에너지와의 관계도 성립된 것으로 나타난다. 따라서 측정 공간 내의 강우 입자 크기분포는 비교적 일정하고, 단지 강우 강도에 따라 일정하게 속도와 강우 입자 개수가 증가할 것이라는 가정은 유효한 것으로 판단된다. 그러므로 앞서 제시한 입력 수량(IC)과 측정 면적 내의 평균 강우 강도(MRI)의 관계식(식 (1))과 강우 강도(RI)와 5분 동안의 강우의 운동 에너지(KE, J/m^2)와의 관계식(식 (6))을 조합하여 입력 수량(IC)과 운동 에너지(KE)와의 관계식(식 (7))을 도출하였다.

$$KE = 21.113 * IC^{0.934} \quad (7)$$

식 (7)은 Veejet 80150 노즐을 이용한 인공 강우 시뮬레이터를 이용할 때 입력 수량을 직접 강우 입자의 운동 에너지로 산정하는데 도움이 될 것으로 생각된다. 강우 에너지의 함유량($J/m^2/mm$) 측면에서 본 연구에 이용된 강우 시뮬레이터는 48mm/h의 강우 강도에서 약 $12 J/m^2/mm$ 에 달하고 있으며, 150mm/h까지의 강우 강도에서는 약 15~17 $J/m^2/mm$ 를 나타낸다. 이는 본 연구보다 더 높은 강우 강도 범위에서의 자연 강우에서 강우

에너지의 함유량을 제시한 임영신 등(2012)의 강우 강도-강우에너지 곡선에 근접하는 결과이다. 또한, 국내 실험실 규모로 설치된 인공 강우 시뮬레이터의 특성을 제시한 김진관 등(2016)과 국외의 중소 규모의 강우 시뮬레이터의 특성을 제시한 Iserloh *et al.*(2013)에서의 강우 에너지의 분포에 비해 상당히 큰 값을 보여, 본 연구의 결과는 인공 강우와 자연 강우의 사이에 위치하고 있는 것으로 확인된다. 이와 같은 결과를 통해, 본 연구에서 사용된 인공 강우 시뮬레이터는 30초~5분 정도의 시간에서 강우 강도가 50mm/h 이상이 나타나는(Lim *et al.*, 2015) 집중 호우 형태의 강우를 대상으로 한 토양 침식 또는 사면 붕괴 실험에 적합할 것으로 생각된다. 강우 에너지가 자연 강우에 비해 적은 값을 가지는 이유는 큰 강우 입자들의 속도가 자연 강우에 비해 상대적으로 적게 나타나는 것이 가장 큰 요인으로 추정된다. 이를 해결하기 위해서는 강우 살포 높이를 2m 이상으로 하는 것이 가장 좋은 방법일 것으로 판단된다.

IV. 결론

토양 침식과 붕괴 프로세스에서 강우의 역할은 매우 중요하기 때문에, 최근 인공 강우 시뮬레이터를 사용하여 실내외에서 다양한 조건 아래에서 토양 침식과 토양 붕괴를 연구한 사례들이 많이 증가하였다. 인공 강우 시뮬레이터는 연구자가 원하는 강우 조건을 모의할 수 있으나, 실제로는 많은 연구자들이 강우 강도에 대한 조건만을 고려하였다. 하지만, 인공 강우 시뮬레이터에서 분사되어 실험 토조에 떨어지는 강우 입자들이 실제 강우 사상에서의 강우 입자들의 특성을 제대로 반영하는지, 또는 얼마나 다른지에 대해서는 고려되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 Veejet 80150 노즐을 사용한 진동 강우 시뮬레이터를 대상으로 적절한 운영 방법과 강우 강도의 분포, 그리고 강우 에너지의 특징에 대해 분석하여 그 결과들을 제시하였다. 본 연구에서 분석된 강우 시뮬레이터는 실제 강우 강도가 매우 강한 호우 시의 강우 특성과 매우 유사한 것으로 나타났다. 이러한 특성을 통해 본 연구에서 분석된 강우 시뮬레이터는 호우 시의 토양 침식과 붕괴를 위한 모의 연구에 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

참고문헌

- 김민석, 2016, “GeoWEPP model을 이용한 화강암과 변성암 기반 두 소유역에서의 토사유출 특성 분석,” 한국지리학회지, 5(1), 61-70.
- 김민석·김진관·조용찬·김석우, 2011, “원격탐사와 수치모형을 이용한 2002년 태풍 “루사”에 의해 발생한 토석류 발생지점특성: 지리산 마천면 지역을 사례로,” 한국지형학회지, 18(4), 193-202.
- 김종연·이상현·김종욱, 2012, “오대천 수향 계곡의 산지 하천성 퇴적층 특성에 대한 연구,” 한국지리학회지, 1(1), 75-90.
- 김진관·김민석·백봉현·양동운, 2007, “점토함량, 경사, 그리고 토양수분변화가 우곡간 침식에 미치는 영향: 단일크기복합인공강우기를 이용하여,” 한국지형학회지, 14(3), 115-121.
- 김진관·양동운·김민석·김주용·신현모, 2009, “화강암지대 산사면에서의 구곡발달,” 한국지형학회지, 16(3), 87-100.
- 김진관·양동운·김민석, 2010, “강우입자의 물리적 특성평가: 경기도 안성시 지역을 사례로,” 한국지형학회지, 18(1), 49-57.
- 김진관·강재원·정관수·최훈·김민석, 2016, “인공 강우 시뮬레이터의 강우 특성 분석을 통한 최적 운영방법 제안,” 한국지리학회지, 5(1), 51-60.
- 임영신, 2012, “강우강도에 따른 강우에너지와 강우입자 크기분포 변화: 대전지역을 사례로,” 서울대학교 석사학위논문.
- 임영신·김종욱·김진관·박병익, 2012, “레이저-옵티컬 디스트로미터를 활용한 대전지역의 강우에너지 특성 평가,” 한국지형학회지, 19(2), 133-143.
- Abrahams, A.D., Parsons, A.J., and Wainwright, J., 1995, Effects of vegetation change on interrill runoff and erosion, Walnut Gulch, Southern Arizona, *Geomorphology*, 13, 37-48.
- Agassi, M. and Bradford, J.M., 1999, Methodologies for interrill soil erosion studies, *Soil and Tillage Research*, 49(4), 277-286.
- Aksoy H., Unal, N.E., Cokgor, S., Gedikli, A., Yoon, J., Koca, K., Inci, S.B., and Eris, E., 2012, A rainfall simulator for laboratory-scale assessment of rainfall-runoff-sediment transport processes over a two-dimensional flume, *Catena*, 98, 63-72.
- Günn, R. and Kinzer, G.D., 1949, The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air, *Journal of Meteorology*, 6, 243-248.
- Iserloh, T., Ries, J.B., Arnáez, J., Boiz-Fayos, C., Butzen, V., Cerdà, A., Echeverría, M.T., Fernández-Gálvez, J., Fister, W., Geißler, C., Gómez, J.A., Gómez-Macpherson, H., Kuhn, N.J., Lázaro, R., León, F.J., Martínez-Mena, M., Martínez-Murillo, J.F., Marzen, M., Mingorance, M.D., Ortigosa, L., Peters, P., Regüés, D., Ruiz-Sinoga, J.D., Scholten, T., Seeger, M., Solé-Benet, A., Wengel, R., and Wirtz, S., 2013, European small portable rainfall simulators: A comparison of rainfall characteristics, *Catena*, 110, 100-112.
- Kim, M.S., Onda, Y., Kim, J.K., and Kim, S.W., 2015, Effect of topography and soil parameterisation representing soil thicknesses on shallow landslide modelling, *Quaternary International*, 384, 91-106.
- Lassu, T., Seeger, M., Peters, P., and Keesstra, S.D., 2015, The wageningen rainfall simulator: Set-up and calibration of an indoor nozzle-type rainfall simulator for soil erosion studies, *Land Degradation & Development*, 26(6), 604-612.
- Lim, Y.S., Kim, J.K., Kim, J.W., Park, B.I., and Kim, M.S., 2015, Analysis of the relationship between the kinetic energy and intensity of rainfall in Daejeon, Korea, *Quaternary International*, 384, 107-117.
- Loch, R.J., 2000, Effects of vegetation cover on runoff and erosion under simulated rain and overland flow on a rehabilitated site on the Meandu Mine, Tarong, Queensland, *Australian Journal of Soil Research*, 38(2), 299-312.
- Loch, R.J., Connolly, R.D., and Littleboy, M., 2000, Using rainfall simulation to guide planning and management of rehabilitated areas: Part I. Experimental methods and results from a study at the northparkes mine, Australia, *Land Degradation & Development*, 11(3), 221-240.

- Loch, R.J., Robotham, B.G., Zeller, L., Masterman, N., Orange, D.N., Bridge, B.J., Sheridan, G., and Bourke, J.J., 2001, A multi-purpose rainfall simulator for field infiltration and erosion studies, *Australian Journal of Soil Research*, 39(3), 599-610.
- McGregor, K.C. and Mutchler, C.K., 1977, Status of the *R* factor in northern Mississippi. Soil erosion: Prediction and control, *Proceedings National Soil Erosion Conference at Purdue University*, May 24-26, 1976, Soil Conservation Society of America, Ankeny, Iowa, 135-142.
- Meyer, L.D. and Harmon, W.C., 1979, Multiple-intensity rainfall simulator for erosion research on row sideslopes, *Transactions of the ASAE*, 22(1), 100-103.
- Nanko, K., Hotta, N., and Suzuki, M., 2004, Assessing raindrop impact energy at the forest floor in a mature Japanese cypress plantation using continuous raindrop-sizing instruments, *Journal of Forest Research*, 9(2), 157-164.
- Nanko, K., Hotta, N., and Suzuki, M., 2006, Evaluation the influence of canopy species and meteorological factors on throughfall drop size distribution, *Journal of Hydrology*, 329(3-4), 422-431.
- Parsons, A.J., Abrahams, A.D., and Wainwright, J., 1996, Responses of interrill runoff and erosion rates to vegetation change in southern Arizona, *Geomorphology*, 14(4), 311-317.
- Parsons, A.J. and Stone, P.M., 2006, Effects of intra-storm variations in rainfall intensity on interrill runoff and erosion, *Catena*, 67(1), 68-78.
- 교신 : 양동윤, 34132, 대전광역시 유성구 과학로 124, 한국지질자원연구원 제4기질연구소 (이메일: ydy@kigam.re.kr)
- Correspondence : Dong-Yoon Yang, 34132, 124 Gwakak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Korea, Quaternary Geology Research Department, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (Email: ydy@kigam.re.kr)
- 투 고 일: 2016년 7월 14일
심사완료일: 2016년 7월 26일
투고확정일: 2016년 7월 29일