

고정식 노즐을 가진 대형 인공강우장치의 공간적 균질성과 강우에너지 분석*

최 훈** · 이찬주*** · 김진관****

Analysis on Rainfall Spatial Distribution and Rainfall Energy in a Large Rainfall Simulator with Fixed Nozzle Arrangement*

Hun Choi** · Chanjoo Lee*** · Jin Kwan Kim****

요약 : 최근 자연강우의 한계점을 극복하고자 많은 연구자들이 실내 인공강우기를 이용해 연구를 수행하고 있다. 기존의 연구들에서 인공강우기의 강우강도와 공간적 범위에 대한 특성을 제안하고 있으나, 강우의 침식력을 평가하는 지표인 강우에너지나 모멘텀에 대한 연구는 등한시되어 왔다. 이에 본 연구에서는 한국기술연구원에 설치된 대형 인공강우장치(KICT-ERS)가 분사하는 강우 입자의 공간적 균질성, 강우의 물리적 특성, 그리고 강우에너지에 대해 분석하고, 이를 통해 실험 목적에 적합한 운영 방법을 제안하였다. 입력 유량의 상승에 따라 강우강도도 상승하였으며, 입력 수량이 1.7kgf/cm²일 때 Christiansen's Coefficient of Uniformity(CU)값이 70.68%이었으나, 2.6kgf/cm², 2.9kgf/cm²일 때 82.29%, 81.11%로 각각 상승하였다. 반면에 강우 입자 크기의 중간값은 입력 수량이 상승할수록 작아지는 경향이 나타났다. 강우강도의 변화에 따른 강우 입자의 직경 변화는 강우의 운동에너지와 모멘텀에 영향을 미쳤으며, 강우의 운동에너지 함유량은 강우강도의 상승에 따라 오히려 감소하는 결과로 나타났다. 본 연구는 인공강우기를 이용한 이전 연구들과의 비교 및 KICT-ERS를 이용한 침식 및 붕괴 모의 실험 결과의 정확성과 이해를 돕는데 기여할 것이다.

주요어 : 토양침식, 인공강우기, 강우 입자 크기, 강우강도, 운동에너지, 모멘텀

Abstract : Many studies related to soil erosion and landslides have been conducted using artificial rainfall to overcome limits of an experiment using natural rainfall. Ranges of rainfall intensity and space from rainfall simulators were presented in the previous studies, but the study for raindrops' characteristics from a rainfall simulator is not sufficient. To more clarify and better understand the results from soil erosion and/or landslides experiments using rainfall simulator, the raindrops' characteristics from a large-sized rainfall simulator (KICT-ERS) installed in Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT) were measured under different conditions by a laser-optical disdrometer and Christiansen's Coefficient of Uniformity (CU) was calculated. Rainfall intensity

*국토교통부 R&D 물관리연구사업(수재해 피해 저감을 위한 전파강수계 및 측정시스템 개발(17AWMP-B114127-02))의 연구비와 2016년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2016S1A5A8018578)을 받아 수행된 연구임.

**전남대학교 사회교육학과 석사(Master, Department of Social Studies Education, Chonnam National University, genius_hun@naver.com)

***한국건설기술연구원 수자원·하천연구소 수석연구원(Senior Researcher, Hydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, c0gnitum@kict.re.kr)

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

and CU were increased as input current increased. When input current was 1.7 kgf/cm², CU was 70.68%, but when input current was 2.6 kgf/cm² and 2.9 kgf/cm², CU was 82.29% and 81.11%, respectively. Raindrops' size was decreased as input current increased. Changes of raindrops' size due to rainfall intensity affect to rainfall kinetic energy and momentum. This result can propose suitable operating conditions for soil erosion and/or landslide experiments. Therefore, this study may contribute to better understanding and more clarifying the results of the previous and future studies of erosion and/or landslide experiments using KICT-ERS.

Key Words : Soil erosion, Rainfall simulator, Raindrop size, Rainfall intensity, Kinetic energy, Momentum

I. 서론

최근 기후변화로 인한 강우 형태의 변화에 따라 홍수와 산사태의 빈도 및 규모도 변화하면서 이에 대한 많은 연구들(Jakob *et al.*, 2009; Gubathakurta *et al.*, 2011)이 진행되고 있다. 특히 강우 특성에 따른 산사태 및 토양 침식 데이터를 취득하기 위해 현장 모니터링을 수행하거나, 실내에서 사면 모형을 구축하여 인공강우를 이용한 연구(김진관 등, 2007; Kim *et al.*, 2018)를 수행하기도 한다. 현장 모니터링을 통해 취득하는 데이터는 현장의 실제 데이터를 얻을 수 있다는 큰 장점이 있는 반면에, 비교적 긴 시간과 많은 인력이 동원되고, 강우 사상의 불규칙성과 일회성 등과 같은 한계가 존재한다. 그리하여, 이러한 한계점을 극복하고자 많은 연구자들(김성수 등, 2005; 김진관 등, 2007; 신민환 등, 2009; Kim *et al.*, 2018)이 실내의 인공강우 실험을 수행하였다.

인공강우기의 강우강도 및 강우에너지에 대한 특성을 파악하는 것은 매우 중요하다. 인공강우기를 이용한 실험들의 결과를 해석하는 데 있어 강우 입자 특성들과 공간적 분포에 대한 일차적인 정보를 제공하고, 강우 시뮬레이터를 이용한 토양침식과 붕괴들의 수리적 프로세스들을 다룬 이전의 연구 결과들과 비교할 때 객관적인 기준으로 활용할 수 있다(김진관 등, 2016). 기존 연구에 사용된 대형화 인공강우실험장에서는 각각의 실험 조건에 따른 강우 특성이 정립되어 있는 상황이다. 그러나 이러한 특성들은 강우강도 값의 범위 및 공간적인 분포에 대한 것들이며, 인공강우기가 분사하는 강우 입자의 특성 및 강우에너지에 대한 평가는 등한시되어 왔다.

강우의 영향 중 하나는 낙하하는 지점의 토양 입단을 해체시키는 것이며, 해체된 토양은 지표유출에 의해 쉽게 이동된다. Laws(1940)의 연구에 따르면 동일한 강우강도 내에서 강우 입자의 크기를 조절한 토양 침식 실험

결과, 강우 입자가 큰 실험 조건에서 토양 입단 해체가 활발히 발생했으며 이는 토양 침식에 영향을 미쳤다. 강우 입자의 크기가 종말속도 및 강우에너지에 영향을 주며, 강한 강우에너지로 인해 토양이 해체되고 쉽게 침식된다. 그러므로 릴류(rill)나 우곡(gully)에 이르기 전 단계인 토양 해체를 야기하는 강우의 영향, 즉, 강우에너지가 더 중요한 문제이다(Rose, 1960).

최근 연구에서도 사면침식 및 토양 해체를 유발하는 주요인들은 강우의 운동에너지(rainfall kinetic energy: KE)¹⁾와 모멘텀(momentum: M)²⁾으로 파악하고 있다(Salles and Poesen, 2000; Salles *et al.*, 2002; Fornis *et al.*, 2005; Lim *et al.*, 2015; 김진관 등, 2016). 강우강도(rainfall intensity: I)³⁾는 일차적으로 주요한 요인이며, 강우에너지와 상관관계를 가지고 있으나, 릴류 간 침식(interrill erosion)에서는 강우에너지가 강우강도보다 더 직접적이고 높은 상관관계를 갖는 것으로 알려져 왔다(Kinnell, 1980; Lal and Soil and Water Conservation Society, 1994; Van Dijk *et al.*, 2002; Morgan, 2009; 김진관 등, 2016). 강우에너지의 중요성은 동일 강우강도 일지라도 강우 입자의 특성, 강우 입자의 크기분포와 그에 따른 속도분포에 따라 강우에너지가 크게 차이가 있을 수 있기 때문이다(Lim *et al.*, 2015). 즉, 사면 침식 및 토양 해체를 유발하는 강우의 침식력을 평가하기 위해서는 강우 입자의 특성과 강우에너지, 그리고 모멘텀에 대한 선행 분석이 필요하다.

본 연구에서 사용된 한국건설기술연구원의 고정식 노즐 대형 인공강우기(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology-Experimental Rainfall Simulator: KICT-ERS)에 대한 기존 연구(이찬주 등, 2015)는 인공강우기가 분사하는 강우강도와 공간적인 분포에 대해 초점을 맞추고 있다. 이를 통해 해당 인공강우기에 대한 전반적인 검증 및 유효성을 연구하였으나 강우 입자 크

기 및 에너지에 대해서는 연구되지 않았다. 이에 본 연구에서는 KICT-ERS가 분사하는 강우의 공간적 균질성에 대해 분석하고, 강우 입자의 크기분포와 속도분포를 파악하여 강우에너지에 대하여 분석하였다. 이를 통해 KICT-ERS를 이용한 침식 및 붕괴 실험 목적에 적합한 인공강우기의 운영 조건을 제안하였다.

II. 연구방법

본 연구에 사용된 KICT-ERS는 폭 12m, 길이 18m, 넓이 216m² 규모의 강우 분사 공간을 가진다. 또한 지상에서의 낙하속도가 자연 강우의 낙하속도를 최대한 재현할 수 있도록 함과 동시에 높은 시설물을 실험할 수 있도록 최대 지상고 11m, 유효 지상고 10m가 확보되어 있다(그림 1).

KICT-ERS의 강우강도의 공간적 분포와 분사된 강우의 물리적 특성을 파악하고자 펌프의 입력 유량(inflow current)을 조절하면서, 총 다섯 개의 사례(case)로 구분하여 측정하였다. Case 별로 Laser-optical Disdrometer의 위치를 옮기면서 각각 5회 반복측정하였다. 측정은 5분동안 진행되며, 데이터는 30초 간격으로 습득하여 case 당 30초 간격의 데이터 50개를 습득하였다.

KICT-ERS는 총 60개의 노즐로 구성되어 있으며, 단일 노즐(5-3번 노즐)로 직경 1.5φ의 노즐을 이용하여 실험을 진행하였다. 인공강우기 노즐 하부에 직경이 20cm인 원통형 비이커(rain gauge) 40개를 분사 노즐을 중심으로 50cm 간격으로 설치하고, 각각의 강우 실험이 끝난 후에 담긴 물의 양을 측정하여 강우강도(rainfall intensity)를 산정하였다(그림 2).

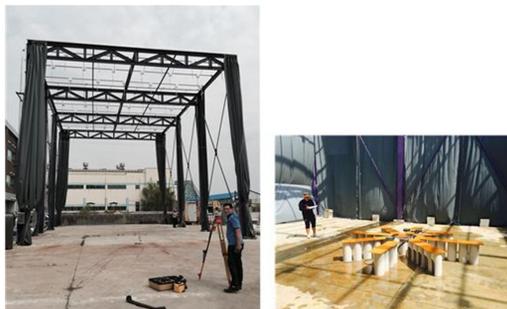


그림 1. KICT-ERS 전경(좌) 및 실험 셋팅(우)
출처: 2015년 7월 7일 필자 촬영(좌); 2015년 8월 11일 필자 촬영(우).

실제 측정된 강우강도 값을 550*550cm(가로*세로)의 5cm 간격의 격자공간 (nodes:12321)개에 입력하여 Point Kriging방법(linear type, slope=1)을 이용하여 공간보간을 하였다. 공간보간을 통해 생성된 raster 데이터를 ArcGIS10.3을 이용해 point로 변환하고, 노즐 위치를 중심으로 하는 반지름 225cm의 원을 기준으로 해당 범위에 포함되는 point 데이터를 추출하였다. 각각의 point 데이터는 공간보간을 통해 계산된 강우강도값을 각각 포함하고 있다. 강우강도의 공간적인 분포를 고려하기 위하여 추출된 데이터들의 평균(mean), 표준편차(Std.), 변동계수(Coef. of Variation), 왜도계수(Coef. of Skewness), Christiansen's Coefficient of Uniformity(CU)값을 산출하였다. CU값은 스프링클러나 노즐을 이용한 강우의 공간적 분포의 균질성을 평가하는데 보편적으로 이용되어 온 값으로, 이 CU값이 클수록 값의 공간적인 분포가 균질하다는 것을 의미한다(Christiansen, 1942; Kim *et al.*, 2016). CU값을 구하기 위해 아래 식 (1)을 사용하였다.

$$CU = 100 * \left[1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n |X_i - \bar{X}|}{\bar{X}} \right) \right] \quad (1)$$

여기서, \bar{X} 는 평균강우강도, n은 관측 수, $X_i (i=1,2,\dots,n)$ 는 개별적으로 관측된 강우강도이다.

강우의 운동에너지는 강우강도에 따른 강우 입자의

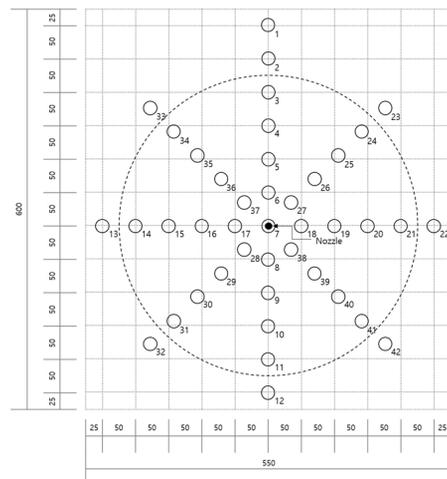


그림 2. 인공강우기의 노즐 위치와 하부 비이커의 위치

* 좌표 단위: cm

** 원 옆 숫자는 비이커 번호.

*** 7번 비이커는 노즐 중심에 위치.

크기분포와 강우 입자 크기에 따른 속도분포를 통해 구할 수 있다. Kinnell(1980)에 의하면 강우강도와 관계된 강우의 운동에너지는 두 가지 형태로 표현되는데, 하나는 KE로 표현되는 운동에너지 함유량($Jm^{-2}mm^{-1}$)이고, 다른 하나는 KE_R 로 표현되는 운동에너지 소비율($Jm^{-2}h^{-1}$)이다(Lim *et al.*, 2015; Kinnell, 1980). 또한 Rose (1960)에 의하면 강우의 모멘텀(M, Nm^{-2})이 강우의 운동에너지보다 강우의 침식력을 설명하는 인자로 적합하다고 제안하였으며(Rose, 1960), 최근 연구에서는 강우의 운동에너지와 모멘텀을 모두 제안하는 경우가 많다(Salles and Poesen, 2000; Sanchez-Moreno *et al.*, 2012; Lim *et al.*, 2015). 그러므로 본 연구에서는 disdrometer로 획득한 5분 간격의 자료를 이용하여 아래에 제시된 식에 따라 KE_R 식 (3), KE 식 (4) 그리고 M 식 (5)의 값을 구하였다.

$$e_i = \frac{1}{2} m V^2 = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{\pi}{6} D_i^3 \right) V_{D_i}^2 \quad (2)$$

$$KE_R = \frac{12}{S_a} \sum_{i=0}^n e_i \quad (3)$$

$$KE = \frac{KE_R}{I} \quad (4)$$

$$M = \left(\frac{\rho \pi}{6} \right) \left(\frac{1}{S_a S_t} \right) \sum_{i=1}^n D_i^3 V_{D_i} \quad (5)$$

여기서, e 는 강우 입자의 운동에너지, ρ 는 강우 입자의 밀도, D_i 는 강우 입자의 직경, V_{D_i} 는 직경 D_i 를 갖는 강우 입자의 종말속도, I 는 강우강도, S_a 는 disdrometer의 측정 면적, S_t 는 측정 시간을 의미한다.

강우 입자의 크기분포와 속도분포는 Laser-optical Disdrometer(Parsivel, OTT Messtechnik GmbH & Co. KG,

Germany) 2기를 (6, 7), (4, 10), (2, 12), (16, 18), (14, 22) 번 위치에 각각 배치하여 측정하였다(그림 2). Disdrometer는 ASDO 소프트웨어(Parsivel application software, OTT Messtechnik GmbH & Co. KG, Germany)가 설치된 노트북과 연결하여 30초간격으로 6분 동안의 강우자료를 획득하였다. Disdrometer는 측정면적이 $5,400mm^2$ (180×30 mm)이며, 강우 입자의 크기는 0.062-21.5mm, 속도는 0.05-20.8m/s의 범위 내에서 측정이 가능하다.

측정된 강우 입자의 크기분포와 속도분포, 강우에너지 및 모멘텀은 그래프로 도식하여 자연강우와 비교하였다. 강우 입자의 크기분포와 속도분포는 Günn-Kinzer (1949)가 제안한 자연강우의 강우 입자 특성과 비교하였다. Günn-Kinzer 그래프는 본 연구에서 사용된 ASDO 소프트웨어에서 자연강우의 특성을 보여주는 그래프로 이용하고 있으며, 김진관 등(2016)의 연구에서도 인공강우기의 강우특성과 자연강우의 비교에 이용된 바가 있다. 강우에너지와 모멘텀은 대전 지역 자연강우의 강우 입자 크기분포와 속도분포를 측정을 통해 강우에너지와 모멘텀을 분석한 Lim *et al.*(2015)의 연구에서 제안한 그래프와 비교하였다.

III. 연구결과

1. 공간적 균질성

노즐이 생산한 강우의 공간적 분포의 균질성을 평가하는 CU값은 Case 1($1.7kgf/cm^2$)이 70.68%로 5개의 case 중 가장 낮게 산출되었다. Case 4($2.6kgf/cm^2$), Case 5($2.9kgf/cm^2$)는 CU값은 각각 82.29, 81.11%로 입력 유량이 낮을 때에 비해 높게 산출되었다(표 1).

표 1. 인공강우기의 공간적 균질성 검증 결과 및 입력 유량별 강우강도

Input Current (kgf/cm^2)	CU (%)	Coef. of Variation of RI	Coef. Of Skewness of RI	Min RI	Median RI	Max RI
				(mm/h)		
1.7	70.68	0.35	-0.85	12.24	31.50	59.88
2.0	76.68	0.28	-0.75	15.07	33.03	54.68
2.3	79.67	0.24	-0.91	16.36	39.33	53.23
2.6	82.29	0.21	-0.70	16.85	37.85	54.05
2.9	81.11	0.23	-0.71	17.68	38.64	54.94

* RI: Rainfall Intensity.

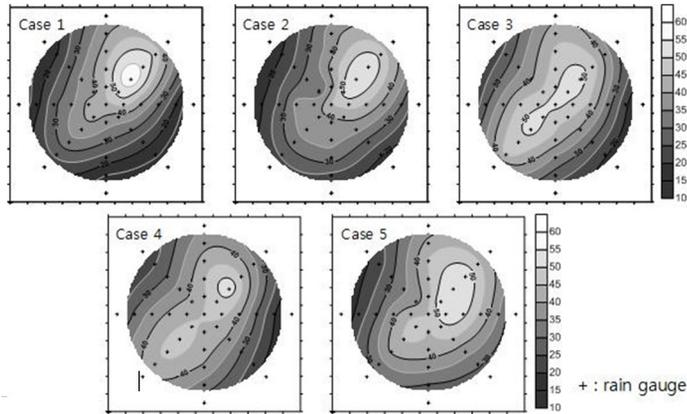


그림 3. 입력 유량 별 강우강도(mm/h)의 공간적 분포

변동계수는 낮을수록 균일함을 의미하는데, Case 1은 0.35로 5개의 case 중 가장 높게 산출되었으며, Case 4, Case 5는 각각 0.21, 0.23으로 산출되었다. 왜도계수는 음수로 산출되는 경우도 있어 절대값으로 계산하며 절대값이 낮을수록 균일하다. Case 1은 -0.85, Case 4, Case 5는 각각 -0.70, -0.71로 산출되었다.

그림 3은 입력 유량 별 강우강도의 공간 분포를 나타낸 것이다. 밝은 부분은 강우강도가 높은 부분이고 강우강도가 낮아질수록 어둡게 표현하였다. 입력 유량에 관계없이 노즐 위치에서 노즐 분사 범위의 가장자리로 갈수록 강우강도가 감소하는 양상을 보였다. 특히 Case 1(1.7kgf/cm²)은 노즐로부터 거리에 따른 강우강도의 감소 추세가 가장 뚜렷하게 나타났으며, 입력 유량이 상승할수록 노즐 분사 범위내에서의 격차는 줄어드는 경향을 보였다. 표 1에 입력 유량 별 최저 강우강도, 강우강도 중간값, 최대 강우강도가 제시되어 있다. Case 1(1.7kgf/cm²)은 최저-최대 강우강도의 차이가 47.64로 가장 높게 산출되었으며, Case 5(2.9kgf/cm²)는 37.26로 산출되어 다섯 Case 중에서 가장 낮게 산출되었다.

2. 강우 입자의 물리적 특성

그림 4는 KICT-ERS의 강우 입자 크기 별 속도 분포를 자연강우와 비교한 그래프이다. 자연강우는 표준 상태에서의 강우 입자 크기에 따른 강우 입자의 종말속도를 나타낸 Günn-Kinzer 곡선을 이용하였다(Günn-Kinzer, 1949). 강우 입자 크기 1mm 이하에서는 자연강우에 비

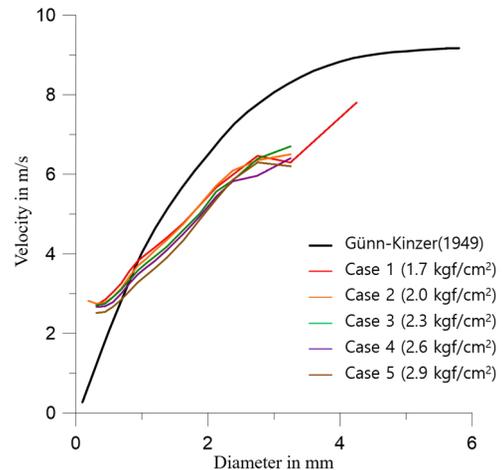


그림 4. 강우 입자 크기 별 속도 분포

해 낙하속도가 과대 추산되는 경향을 보이고 있다. 하지만 1mm 이상에서는 자연강우에 비해 낙하속도가 낮게 측정되었다. 압력별로 비교해보면 입력 유량이 높아질수록 강우 입자 크기 별 속도가 자연강우에 비해 낮게 산출되었다. Case 1(1.7kgf/cm²)과 Case 2(2.0kgf/cm²)의 강우 입자 크기 별 속도분포가 다섯 case 중 자연강우와 비교적 유사하게 측정되었다.

그림 5는 강우 입자 크기 별 구성비를 Laser-optical disdrometer 2대를 사용하여 강우 입자의 크기분포와 속도분포를 측정하여 산출하여 그래프화한 것이다. 2대가 모두 1mm이하의 구성비율이 평균 50% 이상이며, 입력 유량이 높은 Case 4, Case 5에서 60% 정도로

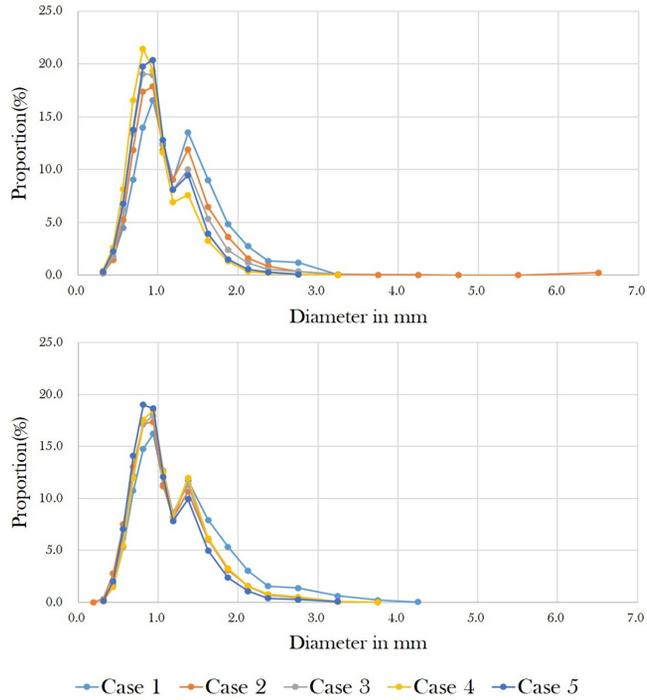


그림 5. 강우 입자 크기 별 구성 비율

표 2. 입력 유량 별 강우 입자 크기의 중간값

(단위: mm)

Inflow Current (kgf/cm ²)	Discrometer-1			Discrometer-2		
	D ₂₅	D ₅₀	D ₇₅	D ₂₅	D ₅₀	D ₇₅
1.7	0.78	0.98	1.29	0.74	0.95	1.29
2.0	0.73	0.91	1.19	0.57	0.75	1.02
2.3	0.71	0.88	1.11	0.72	0.90	1.16
2.6	0.67	0.81	1.01	0.73	0.91	1.18
2.9	0.70	0.86	1.05	0.7	0.86	1.09

산출되었다. 반대로 입력 유량이 낮은 Case 1과 Case 2에서 1mm이하 구성비가 50% 정도로 다른 case에 비해 낮고, 2mm 이상의 구성비는 높게 산출되었다.

표 2는 강우 입자 크기의 중간값들을 산출한 자료이다. 입력 유량이 높아질수록 강우 입자 크기의 중간값들이 감소하는 경향을 보였으며, Case 1(1.7kgf/cm²)이 다섯 case들 중 가장 강우 입자가 크게 산출되었다.

3. 강우 입자의 운동에너지 및 모멘텀

그림 6은 강우강도-운동에너지 소비율(KE_R)을 산출하여 그래프로 표현한 것이다. 검은 실선은 대전의 자연 강우(Lim et al., 2015) 데이터를 이용하여 추산된 추세선

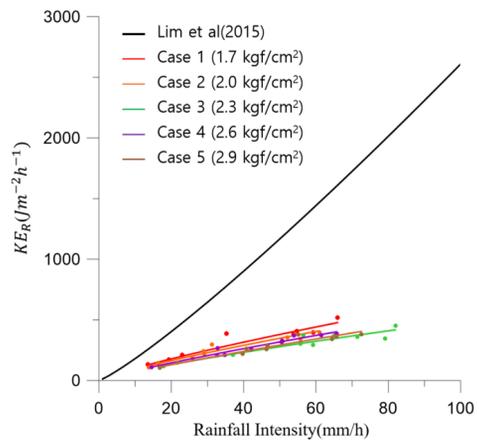


그림 6. 강우강도와 운동에너지 소비율의 관계

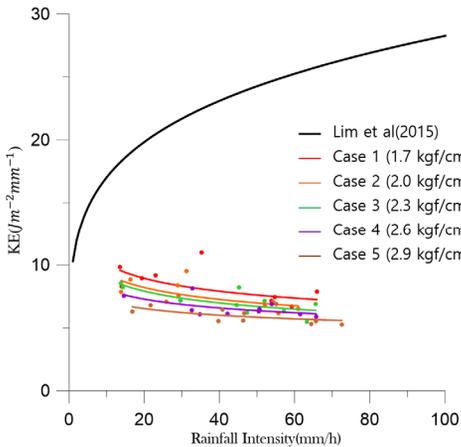


그림 7. 강우강도와 운동에너지함유량(KE) 관계

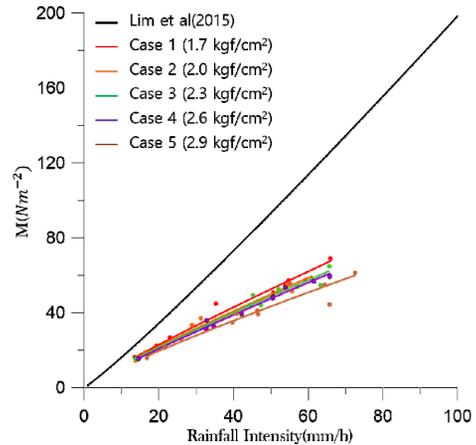


그림 8. 강우강도와 모멘텀(M)의 관계

이다. 자연강우에 비해 인공강우기가 분사한 강우의 운동에너지 소비율은 상당히 낮게 산출되었다. 다섯 case 중에서 가장 자연강우의 추세선과 가장 가까운 case는 Case 1(1.7kgf/cm²)으로, 입력 유량이 높아질수록 멀어졌다.

그림 7은 강우강도-운동에너지 함유량(KE) 관계를 산출하여 그래프로 표현한 것이다. 인공강우기가 생성한 강우의 운동에너지 함유량은 자연강우(검은 실선)에 비해 상당히 낮게 산출되었으며, 강우 강도가 상승할수록 오히려 감소하는 경향을 보였다. 다섯 case 중에서 입력 유량이 Case 1(1.7kgf/cm²)이 자연강우의 추세선과 가장 가까웠으며, 입력 유량이 높아질수록 멀어졌다.

그림 8은 강우강도-모멘텀(M) 관계를 산출하여 그래프로 표현한 것이다. KE_R 나 KE와 동일하게 강우의 모멘텀 값도 자연강우에 비해 상당히 낮게 산출되었으며, 입력 유량에 따른 변화양상도 유사하게 나타났다. Case 1(1.7kgf/cm²)이 자연강우의 모멘텀 추세선과 가장 가까웠으며 입력 유량이 높아질수록 멀어지는 경향을 보였다.

IV. 토의

KICT-ERS의 공간적 균질성과 물리적 특성을 알아보기 위하여 실험 조건 별로 강우의 공간적 분포와 강우 입자의 크기분포와 속도분포를 분석하였다. 이찬주 등(2015)의 KICT-ERS 연구에서는 공간적 균질성에 대한 검증에 집중했으며, 물리적 특성에 대한 검증은 강우강도를 이

용하여 진행하였다. 해당 연구에서도 입력 유량에 따른 강우강도의 상승에 따라 공간적 균질성이 상승한다고 밝히고 있으며, 이는 본 연구에서도 동일하게 나타났다. 공간적 분포의 균질성은 Case 4(2.6kgf/cm²)와 Case 5(2.9kgf/cm²)이 각각 CU값이 82.29, 81.11%로 산출되어 입력 유량이 높아질수록 단위 면적에 동일한 강우를 분사한다는 결과가 산출되었다.

인공강우기가 분사하는 강우의 크기들은 강우강도가 상승할수록 작아지는 경향을 보였다. 입력 유량을 높일수록 강우강도가 상승하며, 강우강도의 상승에 따라 강우 입자의 크기가 감소하였다. Case 1이 다섯 Case 중에서 강우 입자 직경의 중간값이 큰 것으로 산출되었다. 강우강도에 따른 강우 입자 크기의 변화는 인공강우기가 분사하는 강우의 운동에너지와 모멘텀에 영향을 미친다고 볼 수 있다. Lim *et al.*(2015)이 연구한 대전 지역 자연강우의 강우강도-운동에너지, 강우강도-모멘텀 관계와 비교했을 때, KICT-ERS가 분사하는 강우의 운동에너지와 모멘텀은 큰 차이로 낮게 산출되었다. 운동에너지 함유량(KE)는 강우강도 상승에 따라 오히려 감소하는 경향도 보였다. 본 인공강우기에서는 강우강도 증가에 따른 강우 입자 크기의 감소는 결국 강우의 운동에너지와 모멘텀의 감소로 나타났다.

본 연구에서의 인공강우기의 운동에너지 함유량, 운동에너지 소비율 및 모멘텀을 자연강우와 비교해보면 전반적으로 낮게 산출되었다. 본 연구에서 사용된 인공강우기가 분사하는 강우의 침식 에너지들이 자연 강우

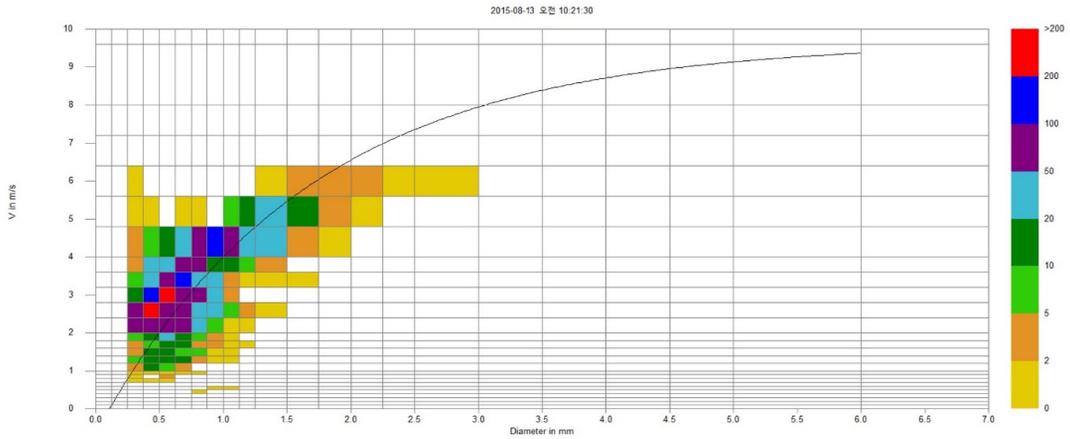


그림 9. 강우 입자의 크기분포 및 속도분포의 스펙트럼 분석도

에 비해 낮게 산출되는 원인은 직경이 큰 강우 입자의 부재로 인한 것으로 보여진다. 그림 9는 본 연구에서 사용된 인공강우기가 분사한 강우 입자의 크기분포와 속도분포가 명암으로 표현된 그래프이다. 종간의 실선은 Gunn-Kinzer 곡선으로 표준 상태에서의 강우 입자 크기에 따른 강우 입자의 종말속도를 나타낸 곡선이다(Gunn-Kinzer, 1949). 동일한 강우강도 상황을 고려했을 때, 자연강우와 비교하여 인공강우기가 가지는 문제점은 1.5mm 이상의 강우의 비율이 상당히 낮다는 것이다. 직경이 큰 강우 입자가 큰 운동에너지를 가지므로, 강우강도가 높을지라도 직경이 큰 강우 입자의 부재는 실질적인 침식력의 감소로 이어진다. 자연강우와 같은 강우를 재현하기 위해서는 직경이 큰 강우 입자의 형성과 이의 속도 문제를 해결하지 않는다면 그 격차를 줄일 수 없을 것이다.

그림 10은 1987년부터 2016년까지 30년간 대전지역에서 관측된 강우사상들의 1일 기준 최대 강우강도의 분포를 보여주는 그래프이다(기상청 홈페이지). 대전지역에서 관측된 강우사상들은 주로 9.00mm/h 이하의 강우가 약 60%를 차지한 반면, 30.00mm/h 이상의 강우는 약 6%에 그쳤다. 30년 간 대전지역에서 관측된 강우 사상들의 강우강도의 평균은 11.42mm/h인 반면, 본 연구에서 사용된 인공강우기가 분사하는 강우강도는 30~40mm/h 범위를 갖는다는 점을 감안하면 자연강우에 비해 비교적 강한 강우를 분사한다고 볼 수 있다. Lim *et al.*(2015)의 대전지역에서의 강우에너지 및 모멘텀의 연구와 함께 고려하였을 때, 본 연구에서 사용된 인공강우기를 이용한 실험은 30.00mm/h 이상의 강우강도를 갖는 강우

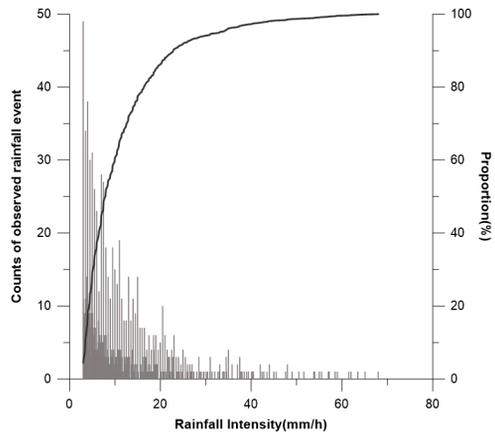


그림 10. 전지역의 강우강도별 강우사상 분포 출처 : 기상청 홈페이지.

사상에서의 사면침식이나 사면붕괴 실험을 모의함이 적합하다고 보인다.

본 연구에서 수행한 실험 조건들을 바탕으로 구분하면, 공간적 균질성이 준수한 조건(Condition 1)과 자연강우와 비교하여 강우에너지와 강우의 물리적 특성이 비교적 유사한 조건(Condition2)으로 구분할 수 있다. Condition 1은 다섯 Case들 중에서 CU값이 준수하게 산출된 Case 4(2,6kgf/cm²)와 Case 5(2,9kgf/cm²)이다. 산사태의 발생 요인을 평가할 때 공간적 변수로 토심(soil depth), 토양과 식생뿌리의 점성, 수리전도도(hydraulic conductivity), 지하수위, 내부마찰각(angle of internal friction)을 이용한다(Kim *et al.*, 2015). 인공강우를 이용

한 산사태 붕괴실험에서 강우의 공간적 균질성은 사면 전체에 균일한 토양 점성과 고른 지하수 분포를 조성하고 실험의 정확성을 위한 중요한 요인이라고 볼 수 있다. 그리하여 강우의 공간적 균질성이 우수한 Case 4와 Case 5는 사면 붕괴 실험에 적합할 것이라 생각된다.

Condition 2는 자연강우와 비교하여 강우의 물리적 특성이 유사하고, 강우에너지 측면에서도 준수했던 Case 1(1.7kgf/cm²)이다. 최근 연구에서 사면침식을 유발하는 주요 요인들을 강우의 운동에너지와 모멘텀으로 평가하고 있다. 특히 킬류간 침식을 유발하는 주요 기저는 강우강도보다는 강우에너지가 직접적인 상관관계를 갖는다고 알려져 왔다(Kinnell, 1980; Lal and Water Conservation Society, 1994; Van Dijk *et al.*, 2002; Morgan, 2009; 김진관 등, 2016). 직경이 큰 강우 입자가 큰 강우에너지를 갖는데, Case 1은 다른 Case들에 비해 강우 입자 크기의 중간값이 크게 측정되었다. 또한, 실질적인 침식력을 평가하는 요인인 운동에너지와 모멘텀이 다른 Case들에 비해 Case 1은 자연강우와 유사하기 때문에 유사하기에 Case 1은 사면 침식 실험에 적합할 것이라 생각된다.

본 연구에서는 KICT-ERS 60개의 노즐 중에서 한 개의 노즐을 이용하여 실험을 진행하였다. KICT-ERS가 이용되는 실험들은 주로 규모가 큰 실험들이기 때문에 노즐 전체를 가동하고 이에 대한 검증도 필요하다. 이찬주 등(2015)의 연구에서도 노즐 전체를 가동한 실험결과와 단일 노즐에 대한 실험결과와의 강우강도값은 2.3배 정도 차이가 존재했으며, 이 강우강도값의 차이는 노즐이 분사하는 범위가 서로 중첩되면서 부족한 강우 강도를 상호 보완하는 것으로 측정된다. 하지만 강우 강도에 대한 분석과 더불어 최근 연구들에서도 강우의 침식력을 강우의 운동에너지나 모멘텀을 통해 평가하는 만큼, 노즐 전체를 가동한 상황의 강우의 운동에너지와 모멘텀에 대한 분석이 필요하다. 즉, 인공강우기에서 분사되는 강우 입자의 특성과 에너지에 대한 분석은 인공강우를 이용한 침식 실험을 진행하기 전에 반드시 선행되어야 하는 절차가 되어야 할 것이다.

V. 결론

본 연구에서는 한국건설기술연구원에 설치된 KICT-ERS를 이용하여 입력 유량 별 강우의 공간적 분포와 강우에

너지에 대하여 분석하고, 실험 결과를 바탕으로 적합한 실험을 제안하였다. 공간적 균질성은 측정된 강우량으로 강우강도를 산정하고, 이를 공간보간하여 CU값을 계산해 평가하였다. 인공강우기가 분사하는 강우 입자의 크기분포와 속도분포를 측정하고자 Laser-optical Discrometer를 이용하였다. 이를 통해 측정된 데이터를 이용해 강우 에너지를 산정하였다.

공간적 균질성은 입력 유량이 증가할수록 증가하였다. 강우의 운동에너지나 모멘텀의 경우 직경이 큰 강우 입자의 부재로 인해 자연강우에 비해 전반적으로 낮게 산출되었다. 입력 유량이 낮을수록 강우강도는 낮아졌으나, 직경이 큰 강우 입자의 비율이 커지면서 강우에너지는 높게 산출되었다. 입력 유량이 높을수록 강우강도는 강해지지만, 직경이 큰 강우 입자가 줄어들면서 강우에너지는 낮게 산출되었다. 강우 입자의 운동에너지 함량(KE)은 강우강도의 상승에 따라 오히려 감소하는 경향을 보였다. 실험 조건 별 강우의 특성을 고려하여 공간적 균질성이 우수한 Condition 1(Case 4와 Case 5)과 강우에너지 측면에서 우수한 Condition 2(Case 1)를 제안하였다.

인공강우기의 강우강도와 강우에너지 특성을 파악하는 것은 실험결과에 대한 정확한 해석과 인공강우기를 이용한 이전의 연구와 비교에 객관적인 지표로 사용될 수 있기 때문에 매우 중요하다. 본 연구에서는 KICT-ERS의 단일 노즐을 대상으로 공간적 균질성 및 강우에너지를 분석하였기에 추후 연구에서는 전체 노즐을 가동한 상황에 대해 분석할 필요가 있다. 하지만 본 연구는 실험 조건 별 강우 입자의 특성과 강우에너지에 대한 분석을 통해 KICT-ERS의 단일 노즐 침식력을 파악하였다는 점에서 의의가 있다. 본 연구는 KICT-ERS를 이용한 강우 특성 별 침식 모의 실험 및 연구에 활용될 것으로 기대된다.

註

- 1) 강우 운동 에너지(rainfall kinetic energy: KE): 강우가 낙하할 때 지니는 에너지를 의미함.

$$KE = \frac{1}{2}mv^2 (kg \cdot (m/s)^2)$$

- 2) 모멘텀(momentum: M): 물리학 용어로 운동량을 의미하며, 본 논문에서는 강우 입자가 토양 표면에

가하는 충격의 정도를 의미함. $M = mv(\text{kg} \cdot \text{m/s})$

- 3) 강우강도(rainfall intensity: RI): 단위시간당 강우량. 보통 1분, 10분, 30분, 1시간 단위로 측정하며 본 논문에서는 1시간 단위의 강우강도(mm/h)를 의미함.

참고문헌

- 김진관·강재원·정관수·최훈·김민석, 2016, “인공 강우 시 물레이터의 강우 특성 분석을 통한 최적 운영방법 제안,” 한국지리학회지, 5(1), 51-60.
- 김진관·김민석·백봉현·양동윤, 2007, “점토함량, 경사, 그리고 토양수분변화가 우곡간 침식에 미치는 영향: 단일크기복합인공강우기를 이용하여,” 한국지형학회지, 14(3), 115-121.
- 김진관·김민석·한민·양동윤, 2016, “Veejet 노즐을 이용한 진동 강우 시물레이터: 토양 침식 및 붕괴 연구를 위한 이의 구성과 특성 측정,” 한국지리학회지, 5(2), 133-142.
- 김성수·김태한·이상민·박동식·Yong-Zhe, Z.·허장현, 2005, “실내 인공강우를 이용한 강원도 고랭지 토양의 토성 및 경사도별 농약 이동특성,” 농약과학회지, 9(4), 316-329.
- 신민환·최용훈·서지연·이재운·최중대, 2009, “실내인공 강우기를 이용한 경사지 밭의 토양유실량과 오염부하 모의,” 한국수자원학회 2009년도 학술발표회 초록집, 986-990.
- 이찬주·김종필·이진원·김원, 2015, “고정식 노즐 배치를 가진 대형 강우모사장치의 강우 분포 특성 분석,” 한국산학기술학회논문지, 16(12), 8116-8127.
- 최광용·이승욱, 2013, “남한의 연중 극한강수현상의 시·공간적 발생 패턴,” 한국지리학회지, 2(2), 137-145.
- Agassi, M. and Bradford, J.M., 1999, Methodologies for interrill soil erosion studies, *Soil and Tillage Research*, 49(4), 277-287.
- Christiansen, J.E., 1942, *Irrigation by Sprinkling*, University of California Berkeley.
- Fornis, R.L., Vermeulen, H.R., and Nieuwenhuis, J.D., 2005, Kinetic energy-rainfall intensity relationship for Central Cebu, Philippines for soil erosion studies, *Journal of Hydrology*, 300(1), 20-32.
- Guhathakurta, P., Sreejith, O.P., and Menon, P.A., 2011, Impact of climate change on extreme rainfall events and flood risk in India, *Journal of Earth System Science*, 120(3), 359-373.
- Günn, R. and Kinzer, G.D., 1949, The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air, *Journal of Meteorology*, 6(4), 243-248.
- Iserloh, T., Fister, W., Seeger, M., Willger, H., and Ries, J.B., 2012, A small portable rainfall simulator for reproducible experiments on soil erosion, *Soil and Tillage Research*, 124, 131-137.
- Jakob, M. and Lambert, S., 2009, Climate change effects on landslides along the southwest coast of British Columbia, *Geomorphology*, 107(3), 275-284.
- Kim, J.K., Yang, D.Y., and Kim, M.S., 2010, Evaluating physical characteristics of raindrop in Anseong Gyeonggi province, *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 17(1), 49-57 (in Korean with English abstract).
- 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.
- Kim, M.S., Onda, Y., Uchida, T., Kim, J.K., and Song, Y.S., 2018, Effect of seepage on shallow landslides in consideration of changes in topography: Case study including and experimental sandy slope with artificial rainfall, *Catena*, 161, 50-62.
- Kinnell, P.I.A., 1981, Rainfall intensity-kinetic energy relationships for soil loss prediction, *Soil Science Society of America Journal*, 45(1), 153-155.
- Laws, J.O., 1940, Recent studies in raindrops and erosion, *Agricultural Engineering*, 21, 431-433.
- Lal, R. and Soil and Water Conservation Society(U.S.), 1994, *Soil Erosion: Research Methods*, CRC Press.
- Lascelles, B., Favis-Mortlock, D.T., Parsons, A.J., and Guerra, A.J., 2000, Spatial and temporal variation in two rainfall simulators: Implications for spatially explicit rainfall simulation experiments, *Earth Surface Processes and Landforms*, 25(7), 709-721.

- 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.
- Marshall, J.S., Langille, R.C., and Palmer, W.M.K., 1947, Measurement of rainfall by radar, *Journal of Meteorology*, 4(6), 186-192.
- Morgan, R.P.C., 2009, *Soil Erosion and Conservation*, John Wiley & Sons.
- Rose, C.W., 1960, Soil detachment caused by rainfall, *Soil Science*, 89(1), 28-35.
- Salles, C. and Poesen, J., 2000, Rain properties controlling soil splash detachment, *Hydrological Processes*, 14(2), 271-282.
- Salles, C., Poesen, J., and Sempere-Torres, D., 2002, Kinetic energy of rain and its functional relationship with intensity, *Journal of Hydrology*, 257(1), 256-270.
- Sanchez-Moreno, J.F., Mannaerts, C.M., Jetten, V., and Löffler-Mang, M., 2012, Rainfall kinetic energy-intensity and rainfall momentum-intensity relationships for Cape Verde, *Journal of Hydrology*, 454, 131-140.
- Van Dijk, A.I.J.M., Bruijnzeel, L.A., and Rosewell, C.J., 2002, Rainfall intensity-kinetic energy relationships: A critical literature appraisal, *Journal of Hydrology*, 261(1), 1-23.
- 기상청 홈페이지, “국내기후자료(과거자료: 1987-2016년)” (http://www.weather.go.kr/weather/climate/past_cal.jsp)
- 교신 : 김진관, 61186, 광주광역시 북구 용봉로 77, 전남대학교 사범대학 지리교육과 (이메일: jinkwankim77@gmail.com)
- Correspondence : Jin Kwan Kim, 61186, 77 Yongbong-ro, Buk-gu, Gwangju, Korea, Department of Geography Education, College of Education, Chonnam National University (Email: jinkwankim77@gmail.com)
- 투 고 일: 2017년 10월 24일
심사완료일: 2017년 11월 19일
투고확정일: 2017년 12월 4일

