

인공 강우 시뮬레이터의 강우 특성 분석을 통한 최적 운영방법 제안*

김진관** · 강재원*** · 정관수**** · 최훈***** · 김민석*****

Suggestion for the Optimum Operating Methods of Rainfall Simulator through the Analysis of Raindrop's Characteristics

Jin Kwan Kim** · Jae Won Kang*** · Gwan Soo Jeong**** · Hoon Choi***** · Min Seok Kim*****

요약 : 산사태, 토사유출 실험을 위한 인공강우기의 특성과 이의 운영은 매우 중요하다. 본 고에서는 새로 고안된 인공강우기의 강우에너지 특성분석을 통해 인공강우기의 최적 운영 방법에 대해 연구하였다. 이를 위하여 세 개의 사례(Case)로 구분하여 사례별 강우강도와 강우입자의 에너지 분포를 측정하였다. Case 1은 각각의 노즐 조합별로 입력유량 차이에 따른 강우강도 분포를 측정하였으며, Case 2는 동일조건에서 노즐조합 차이에 따른 강우강도 분포를 측정하였고, 마지막 Case 3은 노즐직경 차이에 따른 강우강도 분포를 측정하였다. 강우강도의 공간적 분포를 고려하여 2가지 최적 강우운영조건, 즉 Condition 1과 Condition 2를 각각 제시하였다. 본 연구에서의 인공강우 시뮬레이터는 자연강우에 비하여 직경이 큰 강우입자의 부재로 인하여 자연상태의 강우에 비하여 강우에너지가 크게 적은 것으로 나타났다. 하지만, 기존의 연구에서 사용된 중소 규모의 여러 인공강우 시뮬레이터의 특성과 비교한 결과 큰 차이가 없는 것으로 밝혀졌다. 앞으로 보다 더 정확한 실험을 위해서는 자연강우특성에 가까운 인공강우기 제작이 요구된다.

주요어 : 인공강우 시뮬레이터, 강우입자특성, 강우강도분포, 강우에너지, 최적운영방법

Abstract : The characteristics of rainfall simulator are so important for the laboratory experiment of landslide and sediment runoff. To analyze the characteristics of the newly designed rainfall simulator and decide its optimum operating methods, we measured the rainfall intensity and the kinetic energy of raindrops with three cases; Case I: different nozzle combinations and different input currents, Case II: only different nozzle combinations, and Case III: only different nozzle sizes. On the base of the measuring results, we suggested two optimum conditions (condition 1 and 2) for the artificial rain simulation. Although there was large difference between the characteristics of natural rainfall and those of simulated rainfall, the kinetic energy distribution of newly designed rainfall simulator was similar to those of many previous studies. However, the new design of rainfall simulator having the characteristics of natural rainfall will be needed for further detailed laboratory study reflecting the natural conditions.

Key Words : Rainfall simulator, Raindrop characteristics, Spatial distribution of rainfall intensity, Kinetic energy of raindrops, Optimum operating method

*이 논문은 2015년도 전남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

**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, zipthin@hanmail.net)

****충남대학교 토목공학과 교수(Professor, Department of Civil Engineering, Chungnam National University, ksjung@cnu.ac.kr)

*****전남대학교 지리교육과 석사과정(Master student, Department of Geography Education, Chonnam National University, genius_hun@naver.com)

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

I. 서론

최근 기상이변으로 인한 강우특성의 변화로 홍수와 산사태의 빈도 및 규모도 이에 따라 변화함에 따라 많은 연구자들의 관심이 모아지고 있다. 특히 강우특성에 따른 지표변화 연구, 즉 산사태 및 토양침식과 같은 연구에서 데이터를 구하기 위해서는 현장에서 여러 요소에 대해 직접 모니터링을 수행하거나, 실내에서 사면모형을 구축하여 실험을 수행하기도 한다. 현장에서 직접 모니터링하는 경우에는 현재의 실제 데이터를 얻을 수 있다는 가장 큰 장점이 있는 반면, 비교적 긴 시간 및 인력이 동원되고, 또한 강우사상 및 발생 정도 등에 대한 한계가 존재한다. 그리하여, 이러한 한계점을 극복하고자 많은 연구자들이 실내 모형실험을 수행하였다.

산사태 및 토양침식에 대한 실내 모형실험을 수행하기 위해서는 기본적으로 요구되는 중요 설비는 인공강우장치와 사면모형(토조모형)이라고 할 수 있다. 이들 인공강우장치 및 사면모형은 연구자들의 연구목적에 따라 가변적으로 사용하여왔다. 인공강우장치는 일반적으로 크게 단일방울강우기(single drop rainulator)와 복합방울강우기(multi-drop rainulator)로 구분되며, 복합방울강우기는 다시 단일방울크기 강우기와 복합방울크기 강우기로 구분된다(김진관 등, 2007). 사면침식 및 토석류와 같은 연구를 수행하는데 있어 많은 연구들에서 복합방울강우기를 사용하여왔다. 그런데, 대형화된 인공강우실험장을 제외하고는 실내 또는 야외에서 사용되는 비교적 중소규모의 인공강우기가 사용된다. 대형화된 인공강우실험장에서는 각각의 실행조건에 따른 강우특성이 정립되어있는 상황이며, 기존의 연구에 사용된 인공강우기는 강우강도의 분포 및 강우에너지에 대한 특성이 밝혀져 있는 인공강우기들이 상당수 있다. 그러나 국내에서 연구자에 의해 새로 만들어진 인공강우기는 주로 강우강도 값의 범위 및 공간적인 분포에만 초점이 맞추어져 있으며, 인공강우기에서 살포되는 강우입자의 특성, 즉 강우에너지에 대한 평가는 대부분 무시되어 왔다.

사면침식과 관련된 연구에서는 사면침식, 즉 린류간 침식에 대한 가식력에 대한 중요 요인을 최근에는 주로 강우에너지로 파악하고 있다. 물론, 강우강도는 일차적으로 주요한 요인이며, 강우에너지와 상관관계를 가지고 있으나, 린류간 침식에서는 강우에너지가 보다 더 직접적이고 더 높은 상관관계를 갖는 것으로 알려져 왔다

(예: Morgan, 2009; Van Dijk *et al.*, 2002; Lal and Water Conservation Society, 1994; Kinnell, 1980). 강우에너지의 중요성은 동일 강우강도일지라도 강우입자의 특성, 즉 강우입자크기분포와 그에 따른 속도분포의 특성에 따라 강우에너지는 크게 차이가 날 수 있기 때문이다(임영신 등, 2012; Lim *et al.*, 2015).

인공강우 시뮬레이터의 강우강도 및 강우에너지에 대한 특성을 파악하는 것은 매우 중요하다. 강우 시뮬레이터를 이용하여 추진될 실험들의 결과를 해석하는 데 있어 강우입자 특성들과 이들 특성들의 공간적 분포에 대한 일차적인 정보를 제공하고, 또한 강우 시뮬레이터를 이용한 토양침식과 붕괴들의 수리적 프로세스들을 다룬 이전의 연구들의 결과를 비교할 때 객관적인 기준으로 활용할 수 있다. 그리하여 본 연구에서는 충남대 국제수자원연구소에 제작된 소규모의 실내 인공강우 시뮬레이터에 대하여 강우강도의 공간적 분포에 따른 최적의 강우조건 추출하고자 하였다. 그리고 최적 강우 조건에서의 인공 강우입자의 물리적 특성을 분석함으로써 강우강도에 따른 강우에너지의 관계를 정립하였다. 이와 같은 연구 결과는 강우가 사면의 물질이동에 미치는 영향을 조사하기 위해 필요한 실험실 규모의 기기의 특성에 관한 기초 연구결과로, 적합한 기기 개발은 향후 광역지역의 사면 물질 이동을 정량화 하는데 큰 도움이 될 것으로 예상된다.

II. 연구방법

제작된 인공 강우 시뮬레이터(충남대 국제수자원연구소)는 일렬로 10개의 노즐로 구성되어 있다. 노즐은 풀콘(full cone) 타입으로 PT 1/4"(인치)에 직경 1.2mm와 1.5mm인 두 가지 노즐을 실험에 따라 교체하며 사용하였다. 강우 시뮬레이터 아래에 직경이 12cm인 원통형 비이커를 30개를 일정 간격으로 설치하여 각각의 강우 시험이 끝난 후에 담겨진 물의 양을 측정하여 강우강도를 산정하였다(그림 1). 노즐 No.10은 사면 하단부 연결을 위해 설치한 것이며, 이 노즐은 본 연구에서는 사용되지 않았다.

제작된 인공 강우 시뮬레이터의 공간적인 강우강도 분포를 고려하여 최적의 강우 조건을 추출해내기 위하여 세 개의 사례(case)로 구분하여 case별 강우강도 분포를 측정하였다. Case 1은 각각의 노즐 조합별로 입력유

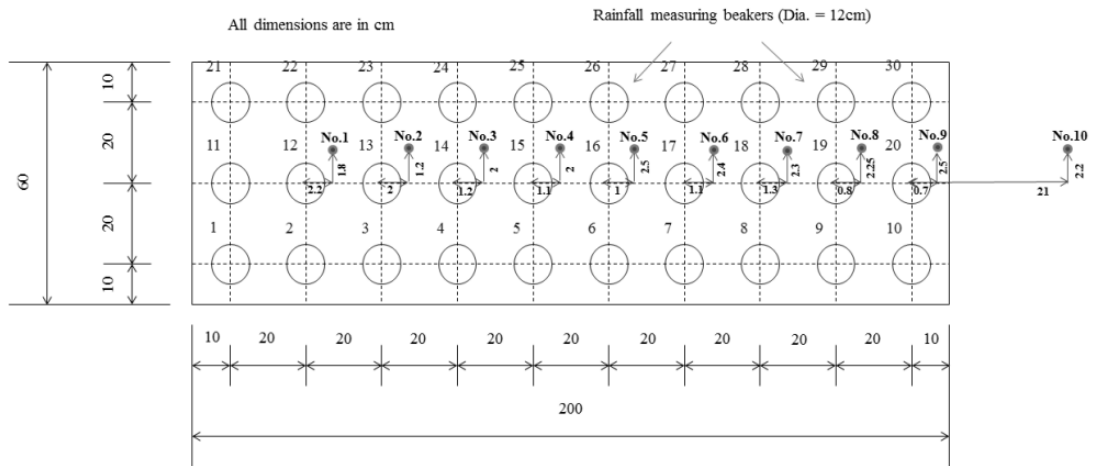


그림 1. 강우시뮬레이터의 노즐위치와 하부 측정 비이커의 위치

량 차이에 따른 강우강도 분포를 측정하였으며, Case 2는 동일조건에서 노즐조합 차이에 따른 강우강도 분포를 측정하였으며, 마지막 Case 3은 노즐직경 차이에 따른 강우강도 분포를 측정하였다.

실제 측정된 강우강도 값을 60cm*200cm(세로*가로)의 10cm 간격의 격자공간(nodes: 147개)에 입력하여 point Kriging 방법을 이용하여 공간 보간을 하였으며, 이때 사용된 Semi-variogram model은 slope=1을 갖는 Linear type이었다. 공간 보간 후의 nodes값은 원 데이터의 속성과 거의 일치하고 있음을 확인하였다. 그리고 강우강도 값의 공간적인 분포를 고려하기 위하여 평균(mean), 표준편차(Std.), 변동계수(Coeff. of Variation), 왜도계수(Coeff. of Skewness), Christiansen's Coefficient of Uniformity (CU) 값을 각각 산출하였다. CU 값은 스프링클러나 노즐을 이용한 강우의 공간적 분포의 균질성을 평가하는데 보편적으로 이용하여 온 값으로, 이 CU 값이 클수록 값의 공간적인 분포가 균질하다는 것을 의미한다.

강우입자의 크기분포와 속도분포는 레이저-옵티컬 디스트로미터(Parsivel, OTT Messtechnik GmbH & Co. KG, Germany)를 비이커 위치 12, 14, 16, 18, 20에서 측정하였으며, 이 디스트로미터를 ASDO 소프트웨어(Parsivel application software, OTT Messtechnik GmbH & Co. KG, Germany)가 설치된 휴대용 컴퓨터와 연결하여 30초 간격의 자료를 획득하였다. 이 디스트로미터에 의한 측정면적은 5400mm²(180×30mm)이며, 강우입자의 크기는 0.062-21.5mm, 속도는 0.05-20.8m/s의 범위 내에서 측정

이 가능하다.

III. 연구결과

1. Case1: 입력 유량에 따른 강우강도 분포 비교

Case 1의 노즐조합(1-3-5-7-9)에서 입력 유량(Q)을 3.5~4.8L/min까지 조절하면서 측정한 강우강도의 분포를 그림 2에 도시하였으며, 각각의 유량 조건에 따른 강우강도의 통계값들은 표 1에 나타내었다. 입력유량이 3.5L/min 일 때, CU값이 73.4%로 가장 높은 것으로 나타났으며, 표준편차, 변동계수, 왜도계수 또한 다른 입력유량에 비해 대체적으로 작은 값을 나타내었다.

Case 1의 노즐조합(2-5-8)에서 입력유량(Q)을 2.0~3.5 L/min까지 조절하면서 측정한 강우강도의 분포를 그림 3에 도시하였으며, 각각의 유량조건에 따른 강우강도의 통계값들은 표 2에 나타내었다. 입력유량이 3.0L/min일 때, CU값이 79.6%로 가장 높은 것으로 나타났으며, 표준편차, 변동계수, 왜도계수 또한 다른 입력유량에 비해 대체적으로 작은 값을 나타내었다.

2. Case2: 노즐 조합에 따른 강우강도 분포 비교

Case 2의 입력유량(Q)이 3.5L/min 일 때, 노즐 1-3-5-7-9 조합과 노즐 2-5-8 조합에서 측정된 강우강도의 분포를

Case 1: 입력유량차이

- Nozzle: 1, 3, 5, 7, 9
- Nozzle diameter: 1.5 mm

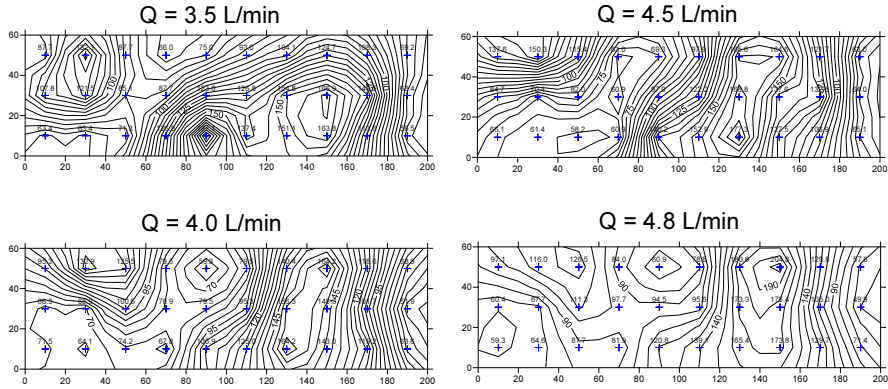


그림 2. 입력 유량(Q)에 따른 강우강도 (mm/h) 분포

* 노즐 1-3-5-7-9, 십자가와 숫자: 실제 측정된 강우강도, 축 단위는 cm임.

표 1. 입력유량 (Q)에 따른 강우강도 (mm/h)의 통계값 (노즐 1-3-5-7-9)

	Q=3.5	Q=4.0	Q=4.5	Q=4.8
Mean	105.55	99.19	105.08	106.48
StD.	33.2	30.68	35.83	38.8
Coef. of Variation	0.31	0.31	0.34	0.36
Coef. of Skewness	0.39	0.46	0.22	0.59
CU (%)	73.4	73.2	69.6	69.9

Case 1: 입력유량차이

- Nozzle: 2, 5, 8
- Nozzle diameter: 1.5 mm

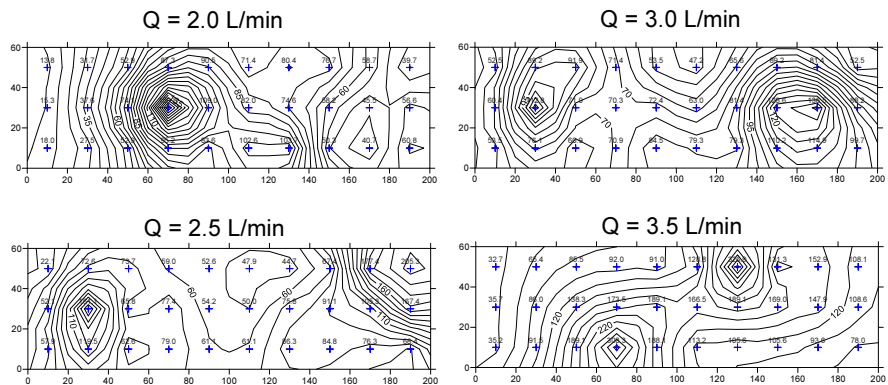
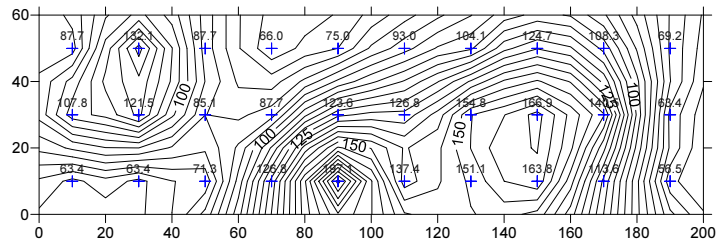
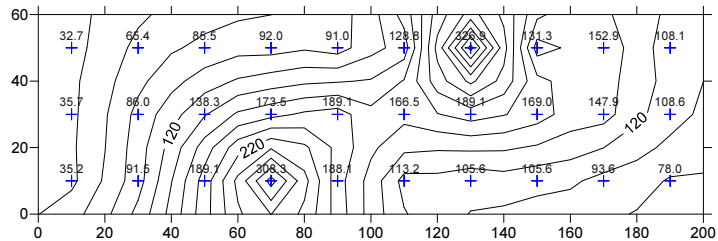


그림 3. 입력 유량(Q)에 따른 강우강도 (mm/h) 분포

* 노즐 2-5-8, 십자가와 숫자: 실제 측정된 강우강도, 축 단위는 cm임.

표 2. 입력유량 (Q)에 따른 강우강도 (mm/h)의 통계값 (노즐 2-5-8)

	Q=2.0	Q=2.5	Q=3.0	Q=3.5
Mean	62.5	82.08	78.12	125.75
StD.	28.91	39.59	20.11	60.73
Coef. of Variation	0.46	0.48	0.26	0.48
Coef. of Skewness	0.23	1.48	0.67	0.62
CU (%)	62.1	65.3	79.6	61.6

Case 2: 노즐조합차이**- Nozzle diameter: 1.5 mm****- Input Q= 3.5 L/min****Nozzle: 1, 3, 5, 7, 9****Nozzle: 2, 5, 8****그림 4. 노즐 조합에 따른 강우강도 (mm/h) 분포**

* 십자가와 숫자: 실제 측정된 강우강도, 축 단위는 cm임.

표 3. 노즐 조합에 따른 강우강도 (mm/h)의 통계값

	Nozzle: 1,3,5,7,9	Nozzle: 2,5,8
Mean	105.55	125.75
StD.	33.2	60.73
Coef. of Variation	0.31	0.48
Coef. of Skewness	0.39	0.62
CU (%)	73.4	61.6

그림 4에 도시하였으며, 각각의 노즐조합 조건에 따른 강우강도의 통계값들은 표 3에 나타내었다. 노즐조합이 1-3-5-7-9 일 때, CU 값이 73.4%로 노즐 2-5-8 조합에 비

해 높은 것으로 나타났다. 표준편차, 변동계수, 왜도계수 또한 노즐 2-5-8 조합에 비해 상대적으로 작은 값을 나타내었다.

Case 3: 노즐직경차이

- Nozzle: 1, 4, 7, 10
- Input Q= 3.0 L/min

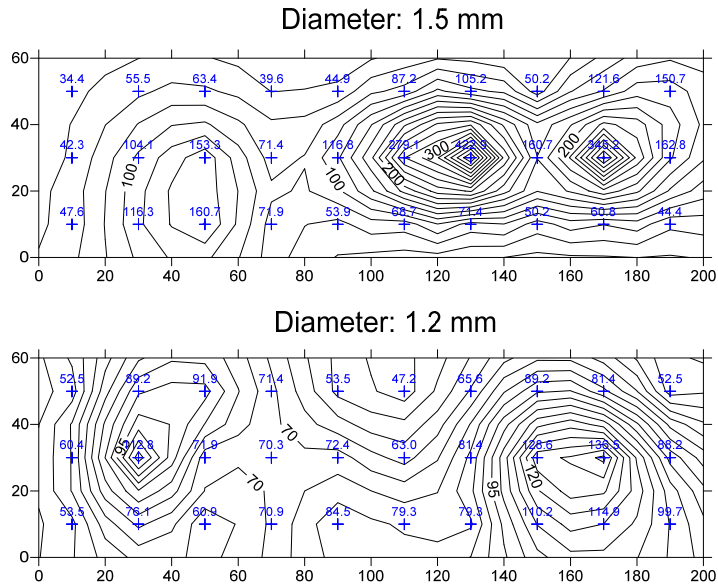


그림 5. 노즐 직경에 따른 강우강도 (mm/h) 분포

* 십자가와 숫자: 실제 측정된 강우강도, 축 단위는 cm임.

표 4. 노즐 직경에 따른 강우강도 (mm/h)의 통계값

	Diameter: 1,2	Diameter: 1,5
Mean	99,61	78,12
StD.	71,55	20,11
Coef. of Variation	0,72	0,26
Coef. of Skewness	1,51	0,67
CU (%)	44,9	79,6

3. Case3: 노즐 직경에 따른 강우강도분포 비교

Case 3의 노즐조합은 1-4-7-10에, 입력유량(Q)이 3.0L/min, 노즐직경이 1.2mm와 1.5mm를 각각 사용하였을 때 측정된 강우강도의 분포를 그림 5에 도시하였으며, 각각의 노즐직경크기 조건에 따른 강우강도의 통계값들은 표 4에 나타내었다. 노즐직경이 1.5mm일 때, CU 값이 79.6%로 노즐직경이 1.2mm일 때에 비해 높은 것으로 나타났다. 표준편차, 변동계수 그리고 왜도계수 또한 노즐직경이 1.2mm일 때에 비해 상대적으로 작은 값을 나타내었다.

IV. 토의

최적의 강우조건을 찾기 위하여 Case에 따른 강우강도의 공간적 분포를 분석하였다. 입력유량의 증가에 따라 평균 강우강도 또한 증가하는 것이 일반적이다. 하지만, 본 실험의 Case 1의 노즐 1-3-5-7-9 조합에서는 평균 강우강도는 감소하거나 비슷한 값을 보이지만 분포가 고르지 못한 점이 나타났다. 본 실험에서는 하나의 파이프를 통해 입력된 유량이 여러 개의 노즐을 통해 유량이 분산되는 형식으로, 입력된 유량의 측정은 각각의 노즐

표 5. 강우강도의 공간적 분포에 따른 최적 강우조건

조건	Condition 1	Condition 2
평균 강우강도	약 78 mm/h	약 106 mm/h
노즐조합	2-5-8	1-3-5-7-9
입력유량	3.0 L/min	3.5 L/min
노즐직경	1.5 mm	1.5 mm

에서 측정된 것이 아닌 분기되기 전에 측정된 것이다. 그리하여 실제로 각 노즐에 걸리는 유량은 위치에 따라 조금의 차이가 발생할 수 있다. 그리고 폴콘 타입의 노즐은 입력유량에 따라 강우가 조사되는 범위 및 강우입자 특성이 달라지며, 겹쳐지게 된 조사 범위 내에서는 강우의 입자의 충돌과 병합이 불규칙하게 발생할 수 있다. 강우의 조사범위의 확장은 측정 공간 바깥, 즉 외부로의 강우를 의미하므로 평균 강우강도의 저하를 발생시킬 수 있다. 또한 분포가 고르지 못함은 각각의 노즐에 걸리는 압력 차와 이로 인한 조사 범위와 강우입자 특성의 변화, 마지막으로 각각의 노즐에서 분사된 강우입자들로 인한 충돌에 의해 나타난 복합적인 현상으로 보여진다.

강우강도의 공간적 분포결과로 보았을 때, 낮은 강우강도(Condition1)와 높은 강우강도(Condition2)에 대해 위의 표 5와 같이 각각 최적의 강우조건을 추정할 수 있다. 위의 표 5와 같은 조건에서의 인공강우의 강우강도는

공간적인 불균질성이 가장 낮은 것으로 나타났다.

Kinnell(1980)에 의하면 강우의 운동에너지는 강우강도와 관계되어 두 가지 형태로 나타내어진다. 하나는 $KEr(J/m^2/h)$ 로 표현되는 운동에너지의 소비율이고, 다른 하나는 $KE(J/m^2/mm)$ 로 표현되는 운동에너지 함유량이다(김진관 등, 2010; 임영신 등, 2012). 본 연구에서는 앞에서 도출된 각각의 최적 강우조건 아래의 5지점에서 레이저디스트로미터를 이용하여 측정된 강우입자의 크기분포와 속도분포를 바탕으로 KEr 과 KE 를 각각 산출하여 이를 그림 6, 그림 7에 도시하였다.

그림 6과 7에서 표시된 점선은 대전지역에서 측정된 실제 강우강도와 강우에너지와의 관계를 나타낸 것이며(임영신 등, 2012), 십자가 표시는 Iserloh *et al.*(2013)에서 소개된 10개의 다른 중소 규모형 인공강우기의 강우강도와 강우에너지와의 관계, 그리고 본 연구에서 구하여진 관계를 각각 도시하였다. 10개의 다른 중소 규모형 인공강우기는 실내 및 현장에서 사면 물질 이동연구에

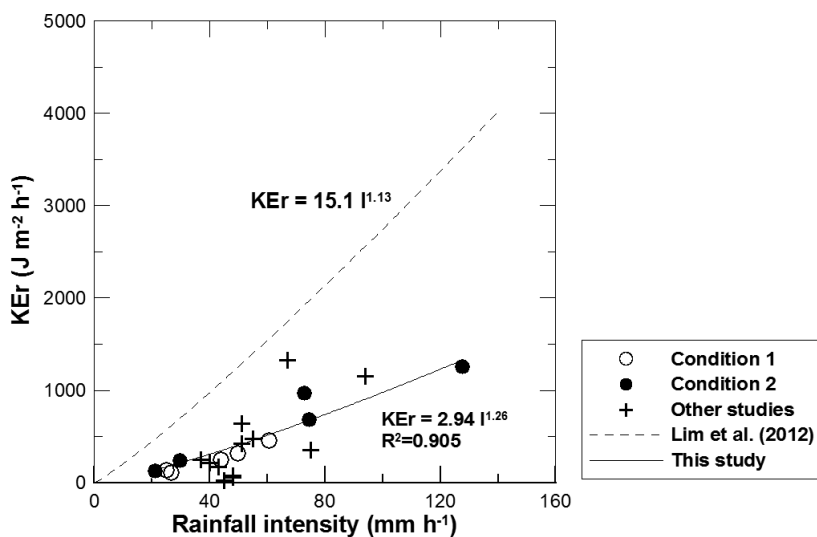


그림 6. 강우강도와 강우에너지 소비율(KEr)과의 관계

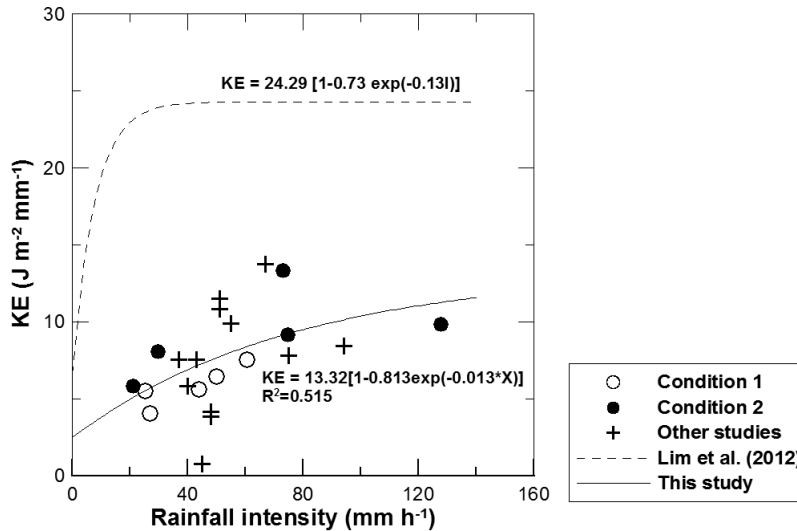


그림 7. 강우강도와 강우에너지 함유량(KE)과의 관계

활용되어 보고된 기기들이다. 그림 6에서는 강우강도와 강우에너지 소비율(KEr)과의 관계를 도시하였으며, 이들의 관계는 매우 높은 상관관계를 나타내고 있다($r^2=0.905$). 그리고 다른 이전 연구들에서 사용된 중소규모의 인공 강우기의 관계와 크게 차이가 나지 않고 있다. 하지만, 임영신 등(2012)의 연구에서의 대전 지역에서 측정된 실제 강우와의 관계와 비교하였을 때, 동일 강우강도에서 강우에너지는 상대적으로 작게 나타나고 있다.

그림 7에서는 강우강도와 강우에너지 함유량(KE)과의 관계가 도시되었다. 일반적으로 강우강도와 KE와의 관계는 Kinnell(1980)이 제안한 지수모형을 사용하였으며, 이는 50mm/h 이상의 높은 강우강도 데이터에 특히 적합한 것으로 알려져 있다. 본 실험에서의 강우강도와 KE와의 관계는 비교적 준수한 편이며($r^2=0.515$), 다른 연구에서의 인공강우기의 특성과 비교해 보았을 때, 그 차이는 크게 나타나지 않았다. 하지만, 대전 지역에서 측정된 실제 강우에서의 관계(임영신 등, 2012)에 비하여 현저히 낮은 것으로 나타났다.

그림 6, 7에서와 같이 본 연구에서의 인공 강우 시뮬레이터와 이전 연구들에서의 인공 강우 시뮬레이터들에서 살포된 강우입자는 실제 강우에 비하여 강우에너지가 전반적으로 낮게 산출되고 있음이 나타났다. 본 연구에서의 강우 시뮬레이터에서 인공적으로 살포된 강우입자들의 강우에너지가 실제 강우에 비해 낮게 나타나는 원인은 직경이 큰 강우입자의 부재 때문인 것으로 보여진

다(그림 8). 그림 8은 본 연구에서 사용된 인공강우기에서 측정된 강우입자의 크기분포와 속도분포에 각각의 강우입자의 수가 명암으로 도시된 그림이다. 중간직의 실선의 곡선은 Günn-Kinzer 곡선으로 표준상태에서의 강우입자크기에 따른 강우입자의 종말속도를 나타낸 곡선이다(Günn and Kinzer, 1949). 실제 강우에서 같은 강우강도 상황을 고려하였을 때, 본 인공강우기가 갖는 가장 큰 문제점은 대부분의 측정 구간에서 1.5mm 이상의 직경을 갖는 강우입자의 출현이 거의 전무하다는 것이다. 즉, 큰 직경을 갖는 강우입자는 큰 강우에너지를 가지므로, 큰 강우입자의 부재는 같은 강우강도의 강우사상이라 할지라도 훨씬 더 적은 강우에너지를 가지고 있음을 의미한다. 자연강우와 같은 실제 실험을 위해서는 큰 강우입자의 형성과 이의 속도문제를 해결하지 않고서는 그 차이를 줄일 수 없을 것으로 판단된다.

그림 9는 강우강도와 KEr과의 관계를 이용하여 condition 1과 2에서 측정된 강우강도를 이용하여 KE 값을 산출한 그림이다. Condition 1에서는 (160, 30)의 위치에서 단위 강우심도에 대해 가장 높은 강우에너지를 갖는 것으로 나타났으며, 전체 실험면적으로는 평균적으로 단위 강우심도 당 $9.13\text{J/m}^2/\text{mm}$ 의 강우에너지를 함유하는 것으로 나타났다. Condition 2에서는 (90, 10)의 위치에서 가장 높은 강우에너지 함유량이 나타났으며, 전체 실험면적에서는 평균적으로 $9.84\text{J/m}^2/\text{mm}$ 로 condition 1에 비하여 조금 높게 나타나는 것으로 나타났다.

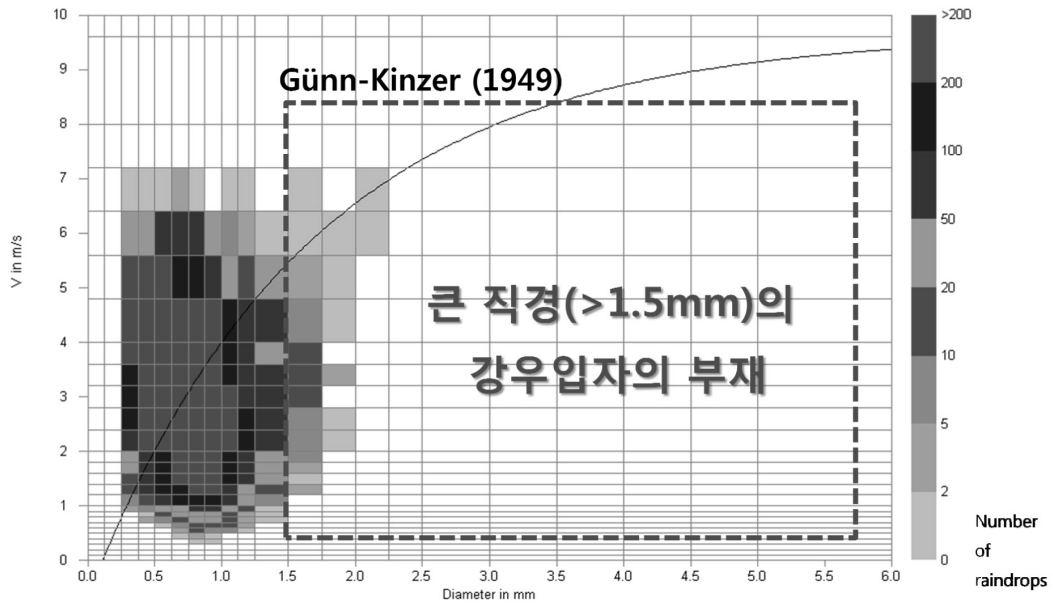


그림 8. 강우입자크기 분포와 강우입자 속도와의 스펙트럼 분석도

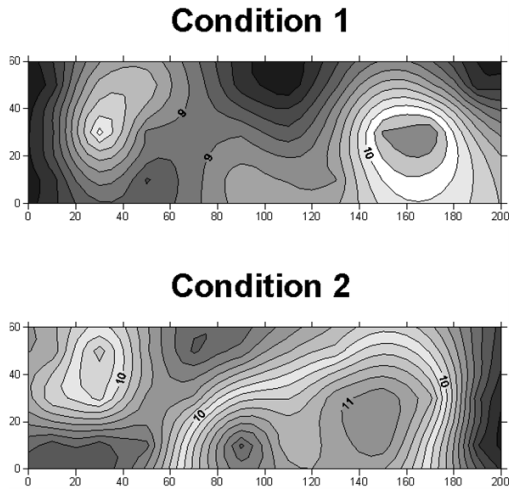


그림 9. Condition 1과 2에서의 강우에너지 함유량(KE)의 공간적 분포

강우시뮬레이터의 강우강도의 분포를 고려하여 2가지 최적 강우조건, 즉 Condition 1과 Condition 2를 각각 제시하였다. 그리고, Condition 1과 Condition 2에서 강우강도-KE, 강우강도-KEr 과의 관계를 각각 도출하여 제시하였다. 본 연구에서의 인공 강우 시뮬레이터는 자연강우에 비하여 직경이 큰 강우입자의 부재로 인하여 자연상태의 강우에 비하여 강우에너지가 크게 적은 것으로 나타났다. 하지만, 기존의 연구에서 사용된 중소규모의 여러 인공 강우 시뮬레이터의 특성과 비교한 결과 큰 차이가 없는 것으로 밝혀졌다. 본 연구결과는 강우가 사면의 물질이동에 미치는 영향을 조사하기 위해 필요한 실험실 규모의 기기의 특성에 관한 기초 연구결과로, 앞으로 보다 더 정확한 실험을 위해서는 자연 강우 특성에 가까운 인공강우기 제작이 요구되며, 이는 향후 광역지역의 사면 물질 이동을 정량화 하는데 큰 도움이 될 것으로 예상된다.

V. 결론

인공강우 시뮬레이터의 강우강도 및 강우에너지에 대한 특성을 파악하는 것은 사면 침식 및 붕괴 실험에서 이들의 프로세스를 이해하고 이전 실험 연구 결과들과의 비교를 위해서 매우 중요하다. 본 연구에서는 인공

참고문헌

김진관·김민석·백봉현·양동운, 2007, “점토함량, 경사, 그리고 토양수분변화가 우곡간 침식에 미치는 영향: 단일크기복합인공강우기를 이용하여,” 한국지형학

- 회지, 14(3), 115-121.
- 김진관·양동윤·김민석, 2010, “강우입자의 물리적 특성평가: 경기도 안성시 지역을 사례로,” *한국지형학회지*, 18(1), 49-57.
- 임영산·김종욱·김진관·박병익, 2012, “레이저-옵티컬 디스트로미터를 활용한 대전지역의 강우에너지 특성 평가,” *한국지형학회지*, 19(2), 133-143.
- Gunn, 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.
- Kinnell, P.I.A., 1980, Rainfall intensity-kinetic energy relationships for soil loss prediction, *Soil Science Society of America Proceedings*, 45, 153-155.
- Lal, R. and Soil and Water Conservation Society (U.S.), 1994, *Soil Erosion: Research Methods*, 2nd ed., Delray Beach, FL: St. Lucie Press.
- 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.
- Morgan, R.P.C., 2009, *Soil Erosion and Conservation*, New York: Wiley-Blackwell.
- Van Dijk, A., Bruijnzeel, L., and Rosewell, C., 2002, Rainfall intensity-kinetic energy relationships: A critical literature appraisal, *Journal of Hydrology*, 261, 1-23.
- 교신 : 김민석, 34134, 대전광역시 유성구 대학로 99 충남대학교 국제수자원연구소 (이메일: varcgisv@gmail.com)
- Correspondence: Min Seok Kim, 34134, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, International Water Resources Research Institute, Chungnam National University (Email: varcgisv@gmail.com)
- 투 고 일: 2016년 3월 27일
심사완료일: 2016년 4월 8일
투고확정일: 2016년 4월 9일