Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 20, No. 12 pp. 828-835, 2019

https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.12.828
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

급경사지 붕괴 모의실험을 위한 인공강우장치의 강우분포특성

정향선, 강효섭*, 석재욱, 김호종
국립재난안전연구원 방재연구실

Rainfall Distribution Characteristics of Artificial Rainfall System for Steep-Slope Collapse Model Experiment

Hyang-Seon Jeong, Hyo-Sub Kang*, Jae-Wook Suk, Ho-Jong Kim
Disaster Prevention Research Division, National Disaster Management Research Institute

요 약 인공강우장치는 실내실험 기반의 모형실험 데이터를 생성하는 연구도구로 널리 이용되고 있다. 다양한 연구에 인공강우장치가 이용되고 있음에도 불구하고 대부분의 연구에서 강우분포의 균질성에 대한 논의는 등한시되고 있다. 다양한 강우특성이 반영된 급경사지 붕괴 모의실험을 위해서는 저강도에서 고강도까지 강우를 모사할 수 있는 강우장치가 필수적이며 실험의 신뢰성을 확보하기 위해서라도 강우분포의 균질성은 확보되어야 한다. 본 연구에서는 급경사지 붕괴 모의실험의 주요설비인 인공강우장치의 최대 강우강도 130mm/hr 내에서 10mm/hr 단위 제어를 목표로 하며, 균등계수 80% 이상 확보하고자 하였다. 이를 위해 노즐타입, 크기, 위치 및 펌프압력에 따른 다양한 조건하에서 강우실험을 수행하였다. 실험결과 노즐형태는 원형노즐, 크기는 1.9mm와 1.4mm가 적합한 것으로 분석되었고 적정 펌프압력은 3~6kg/cm^{2}으로 분석되었다. 다양한 강우강도를 재현하기 위해 노즐수는 2, 3, 5개, 펌프압력은 3, 4, 5, 6kg/cm2로 조건을 달리하여 실험을 수행하였다. 펌프압력이 증가함에 따라 강우강도는 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 실험결과를 바탕으로 펌프압력, 노즐형태 및 노즐수를 변수로 하는 강우제어 매뉴얼을 작성하였다. 또한 검증실험을 수행하여 목표 강우강도 대비 오차범위 ±3.1%, 균등계수는 평균 86.8%로 균질한 강우분포를 보였다.

Abstract An artificial rainfall system is used widely as a research tool for generating model experiment data. Artificial rainfall devices have been used in many studies, but studies of the rainfall distribution are not considered as important issues. To simulate various rainfall characteristics, it should be possible to simulate from low to high intensity, and the homogeneity of the rainfall distribution should be ensured. In this study, the maximum rainfall intensity was set to 130mm/hr and controlled by 10mm/hr. In addition, the aim was to secure a uniform coefficient value of 80% or more. To this end, rainfall tests were performed according to the nozzle type, diameter, position, and pump pressure. The rainfall test showed that the circular nozzle was suitable, and the nozzle size was 1.9mm and 1.4mm. The optimal pump pressure was found to be 3~6kg/cm^2. The rainfall intensity tended to increase linearly with increasing pump pressure. Based on the rainfall test results, a rainfall control manual was produced with variables, such as pump pressure, nozzle type, and number of nozzles. As a result of rainfall verification, rainfall intensity showed a 3.1% error with a uniformity coefficient of 86%.

Keywords : Artificial Rainfall, Intensity, Uniformity Coefficient, Nozzle, Steep-Slope Collapse Model Experiment

본 논문은 행정안전부 국립재난안전연구원의 지원("지반재난 관리기준 개선", NDMI-주요-2019-06-02)에 의해 수행되었습니다.
*Corresponding Author : Hyo-Sub Kang(National Disaster Management Research Institute)
email: hskang2233@korea.kr
Received October 2, 2019 Revised December 4, 2019
Accepted December 6, 2019 Published December 31, 2019

1. 서론

재해연보를 분석한 결과 최근 10년간 전체 자연재해 사망자 중 약 45%가 급경사지 재해로 나타났다[1]. 이와 같이 급경사지 재해로 인한 인명 및 재산피해가 지속적으로 발생하고 있으나, 붕괴전조 현상 파악과 이와 관련된 계측기준 설정에 대한 연구는 활발하게 진행되고 있지 못하는 실정이다. 연구를 통해 현업에 적용하기 위해서는 급경사지 붕괴가 예상되는 현장을 대상으로 현장계측 및 조사를 통한 분석이 필요하다[2]. 그러나 현장에서 직접 모니터링 하는 경우 현장의 실제 데이터를 얻을 수 있다는 큰 장점이 있는 반면, 비교적 긴 시간 및 인력이 동원된다[3]. 또한 급경사지 붕괴 시점의 데이터를 확보할 수 있을지 확신할 수 없다. 이러한 한계점을 극복하기 위해 많은 연구자들은 모형실험을 통해 연구를 수행하고 있다[4]. 급경사지 붕괴모의를 위한 중요 설비는 인공강우장치와 모형토조이다. 국내에서 주로 발생하는 강우침투에 의한 얕은 사면 파괴를 모사하기 위해서는 인공강우장치는 중요한 설비이다. 다양한 강우사상을 재현하기 위해서는 인공강우장치의 강우강도 제어가 필요하다.

기존 연구사례를 살펴보면 인공강우장치를 이용하여 실내실험 기반의 모형실험 데이터를 생성하는 연구 도구로 널리 이용되고 있다[5]. 사면의 침투특성, 지중 내 간극수압 변화, 토양침식 특성, 지표유출량 등에 대한 실험을 수행하는 연구에 인공강우장치가 이용되고 있다[6-10]. 다양한 연구에 인공강우장치가 이용되고 있음에도 불구하고 대부분 강우분포의 균질성 등에 대한 논의는 크게 중요시 되지 않고 있다. 인공강우장치는 강우강도, 지속시간 등을 조절할 수 있는 이점이 있지만, 자연강우의 모든 특성을 재현하는 것은 쉬운 일이 아니다. 균질한 강우분포는 강우장치가 충족해야하는 기본 요구사항 중의 하나이다.

국내에서는 장마철 집중강우 및 태풍에 의한 극한강우 등 복잡한 강우특성을 보인다. 이와 같이 복잡한 강우특성을 반영한 급경사지 붕괴 모의실험을 위해서는 저강도에서 고강도까지 강우강도를 모사할 수 있는 강우장치가 필수적이다. 이와 더불어 모형실험의 신뢰성을 확보하기 위해서라도 강우분포의 균질성은 확보되어야 한다. 인공강우장치의 강우분포 및 강도는 노즐 사이의 거리, 작동압력, 노즐 크기 등 다양한 조건에 따라 달라진다[11].

본 연구는 급경사지 붕괴 모의실험을 위한 주요 설비인 인공강우재현 장치의 강우강도 제어와 강우분포의 균질성 확보를 통해 최적의 인공강우재현을 목표로 한다. 이를 통해 강우제어 매뉴얼을 구축하고자 하였다. 본 연구에서는 노즐타입, 크기, 위치 및 펌프압력에 따른 강우검증 실험을 수행하였다.

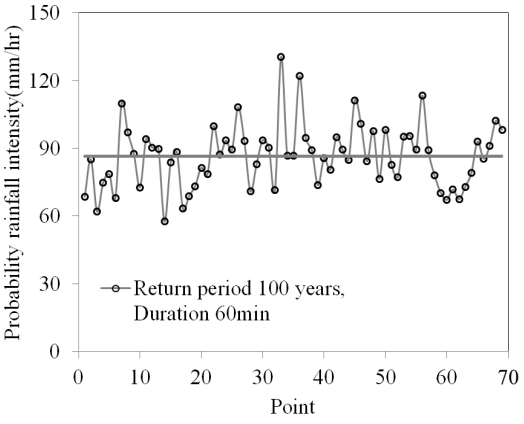


Fig. 1. Probability rainfall intensity of key measurement point(return period 100years, Duration 60 minutes)

모형실험의 인공강우장치 최대강우강도 설정을 위해 전국 주요지점의 확률강우강도를 분석하였다 재현기간 100년 지속시간 60분에 포함할 수 있도록 최대강우강도를 설정하고자 하였다. 확률강우강도는 확률강우량에 시간개념이 고려된 것으로 확률강우량은 과거 관측 강우량을 수집하여 지속시간별 연 최대강우량을 통계적 기법으로 산정된다. 재현기간은 연간 최대 일 강우량이 평균적으로 몇 년에 한번 일어날 것으로 기대되는 확률로 정의된다. Fig. 1은 전국 주요 69개 지점의 지속시간 60분, 재현기간 100년의 확률강우강도를 나타낸다. 확률강우강도의 평균값이 86.4mm/hr이며, 성산이 130.5mm/hr로 나타났으며, 울진이 57.6mm/hr로 최저값을 나타내었다. 본 연구에서는 분석된 자료를 바탕으로 인공강우장치의 최대 강우강도를 130mm/hr까지 구현할 수 있도록 설정하고자 하였다.

강우분포의 균질성을 확보하기 위해 기존 문헌분석을 통해 목표 균등계수 값을 설정하였다. 일반적으로 균등계수의 값이 80% 이상이면 강우분포가 일정하다고 할 수 있다[11,12]. Luk 등에 의하면 대형 강우발생장치에 있어서는 70% 이상만 되어도 강우 분포가 일정한 것으로 간주할 수 있다[13]. 본 연구에서는 선행연구 사례를 바탕으로 강우분포에 대한 균등계수를 80%로 설정하였다.

2. 인공강우장치 구성

2.1 급경사지 붕괴모의 토조

급경사지 붕괴모의 실험장비의 전경을 Fig. 2에 나타내었다. 토조와 인공강우강치로 구성되어 있으며, 토조 상단에 인공강우장치가 설치되어 있다. 토조바닥에서 강우노즐이 설치된 인공강우장치까지의 높이는 3.0m이며, 토조 폭은 0.4m, 길이 2.5m, 높이 0.5m이다. 토조는 3개로 분리되어 각 토조별 각도 조절이 가능한 경사 가변형 구조로 구성되어 있다. 1번 토조는 0~5°, 2번 토조는 0~15°, 3번 토조는 15~40°로 경사조절이 가능하다. 토조에 최대 약 0.5t의 흙을 채워 실험을 수행할 수 있다.

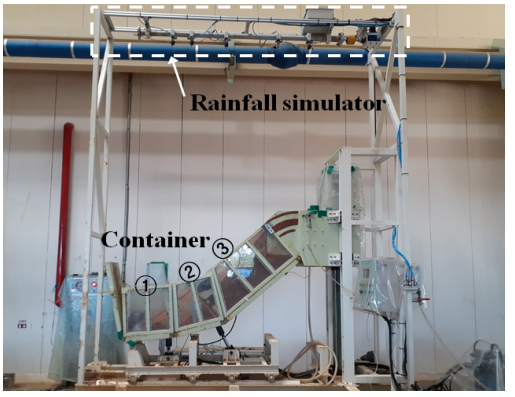


Fig. 2. Model test equipment for steep slope collapse simulation

2.2 인공강우장치 구성

인공강우장치 구성도는 Fig. 3에 나타내었다. 물탱크, 펌프압력 조절부, 강우노즐 제어부, 제어장치부, 강우노즐부로 크게 5단계로 구성되어 있다.

펌프압력 조절부에서는 압력을 0.5kg/cm^{2}에서 9.0kg/cm^{2}까지 0.1kg/cm^{2}단위로 제어가 가능하다. 강우노즐 제어부에서는 각 노즐로 공급되는 물을 수동으로 개폐할 수 있도록 5개의 밸브가 설치되어 있다. 실험 시 필요한 밸브만 열고 실험을 수행할 수 있으며, 펌프압력 조절부에서 설정된 압력이 정상적으로 들어오는지 확인하기 위해 아날로그 압력계가 설치되어 있다. 제어장치부에는 초기 제어신호에 의해 부하를 구동하는 장치인 서보모터가 각각의 노즐에 개별로 설치되어 있다. 이 장치를 통해 동시에 강우를 분사 및 중지할 수 있으며, 강우분사 시작과 중지 순간에 관에 남은 물의 잔량이 노즐을 통해 떨어지는 것을 방지할 수 있다.

3. 실험 및 분석방법

3.1 실험방법

토조에 설치된 간이 강우량계의 현황은 Fig. 4와 같다. 강우가 분사되는 토조의 크기는 너비 0.4m, 길이 2.1m이다. 토조 내에 원형 컵 형태인 간이 강우량계를 3열 8행으로 총 24개를 설치하였다. 간이 강우량계의 입구 크기는 직경 100m이다. 강우분사 시 간이 강우량계에 담긴 물의 양을 측정하여 강우강도를 계산하였다. 강우실험 시 분사지속시간은 10분으로 하였다.

실험에 사용된 강우노즐은 Fig. 5와 같다. 면단위 형태로 분사되는 원형노즐과 사각노즐을 이용하여 강우검증 실험을 수행하였다. Fig. 5에서 보듯이 원형노즐의 강우분포는 원형형태를 나타내며, 사각노즐은 정사각형 형태의 강우분포를 나타낸다. 본 연구에서는 1차적으로 적

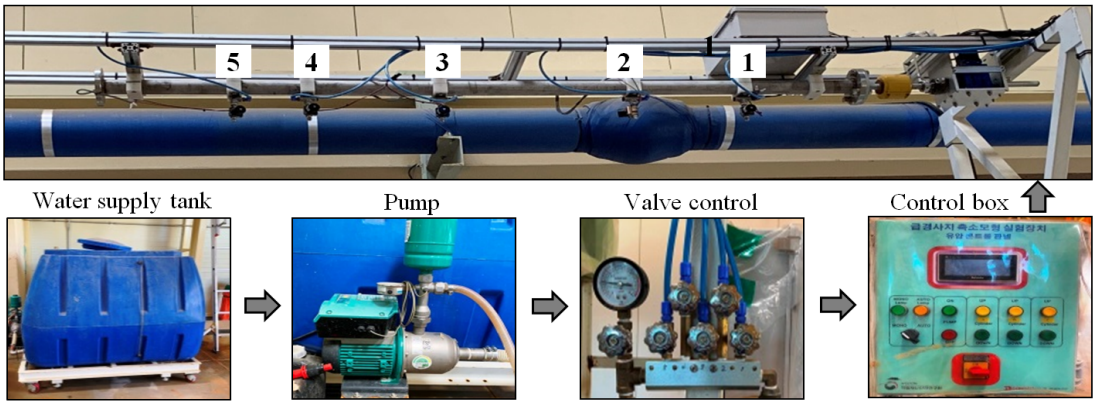


Fig. 3. Diagram of artificial rainfall device

정한 노즐형태와 노즐크기를 선정하기 위해 Table 1과 같이 총 4개 조건에 대해 사전 강우시험을 수행하였다. 강우강도와 균등계수를 기반으로 적정한 노즐을 선정 후 최종적으로 노즐의 개수, 위치, 펌프압력에 따른 강우시험을 수행하여 최대강우강도 130mm/hr 범위 내에서 10mm/hr 단위의 강우강도 재현과 균등계수 80%를 만족하는 강우제어 매뉴얼을 작성하고자 하였다.

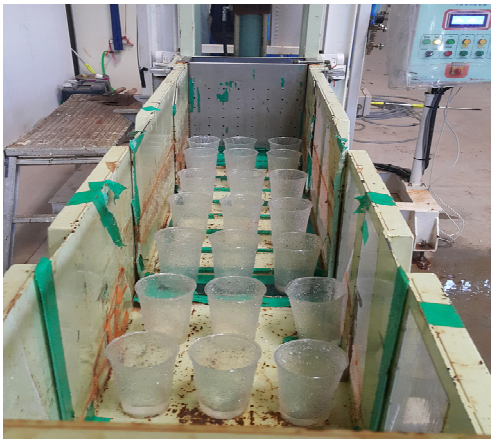
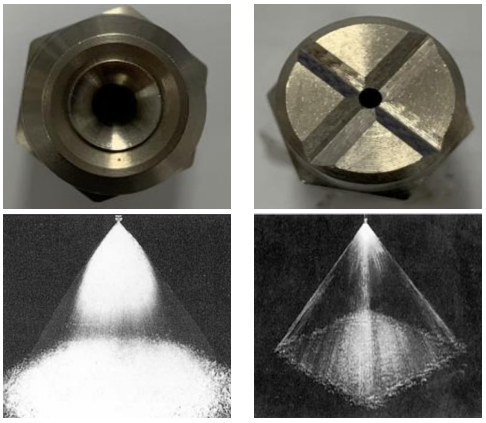


Fig. 4. Measurement of rainfall

Table. 1. Test condition for rainfall nozzle selection

Case	Nozzle type	Nozzle size
case 1	square	1.6
case 2		2.2
case 3	circle	1.4
case 4		1.9



(a) (b)

Fig. 5. Rainfall nozzle
(a) circular nozzle (b) rectangular nozzle

3.2 분석방법

노즐 분사 우량의 공간분포 분석을 위해 식 (1)과 같이 Christiansen 등이 제안한 균등계수(coefficient of uniformity)를 이용하였다[11,14,15].

$$CU = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} \left| X_i - \overline{X} \right|}{n\overline{X}}\right) \quad (1)$$

여기서, $\overline{X}$는 평균강우강도, n은 관측 수, X_i(i=1,2,....., n)은 개별적으로 관측된 강우강도이다. 완전히 균일한 분포에서 균등계수는 1이다.

4. 실험결과

4.1 노즐선정 및 배치

강우시뮬레이터에 사용될 노즐을 선정하기 위해 강우노즐 형태와 크기에 따라 사각노즐 2.2mm와 1.6mm, 원형노즐 1.9mm와 1.4mm에 대해 강우분포실험을 수행하였다. Fig. 6은 총 4개 노즐에 대해 실험을 수행한 결과로 강우강도와 균등계수와의 관계를 나타낸다. 결과에서 보듯이 펌프압력에 따라 경향은 다소 차이나지만 노즐크기가 클수록 강우강도가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 균등계수는 사각노즐 보다 원형노즐을 적용한 결과에서 다소 높게 나타났다. 사각노즐을 적용한 경우 100mm/hr 이상의 고 강우강도를 재현하고 있으나, 대부분의 조건에서 균등계수가 평균 64.9%로 80% 이하를 나타낸다. 원형노즐의 경우 50mm/hr 이하의 다소 낮은 강우강도를 보이나 균등계수는 평균 80.6%로 사각노즐에 비해 높은 값을 나타낸다. 노즐분사 형태와 크기 외에도 노즐위치와 분사압력에 따라 강우강도 및 균등계수는 달라질 수 있다. 그러나 본 연구의 급경사지 붕괴모의 실험장비 제원을 기반으로 130mm/hr 이하의 강우강도 재현과 균등계수 80% 이상을 구현하기 위해 강우노즐 형태는 원형노즐, 노즐크기는 1.9mm와 1.4mm가 적합한 것으로 나타났다.

노즐선정 결과와 다양한 조건의 강우실험을 통해 얻어진 노즐배치도는 Fig. 7과 같이 표현할 수 있다. 총 5개의 노즐로 구성되어 있으며, 모두 원형노즐을 배치하였다. 1번과 4번 노즐의 경우 크기 1.4mm를 배치하였고, 2, 3, 5번은 크기 1.9mm인 노즐을 배치하였다. 노즐 위치는 2, 3, 5번 노즐을 500mm간격을 두고 배치하였고, 반복실험을 통해 목표 강우강도와 균등계수 값이 잘 반

영되는 위치에 1번과 4번 노즐을 배치하였다.

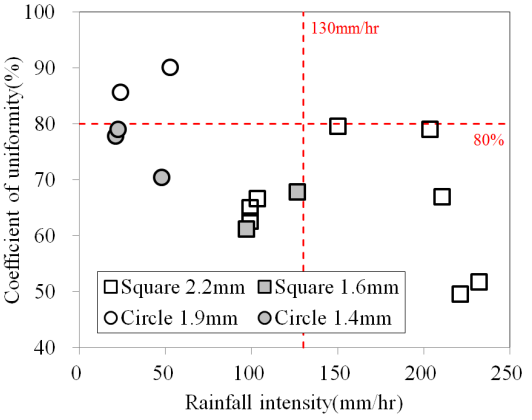


Fig. 6. Relationship between rainfall intensity and coefficient of uniformity

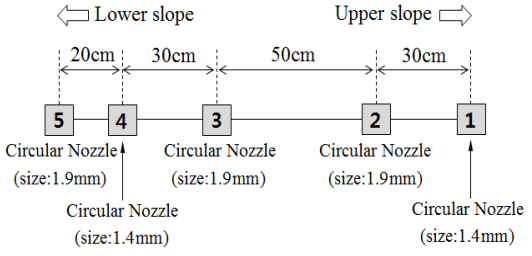


Fig. 7. Nozzle Arrangement of artificial rainfall system

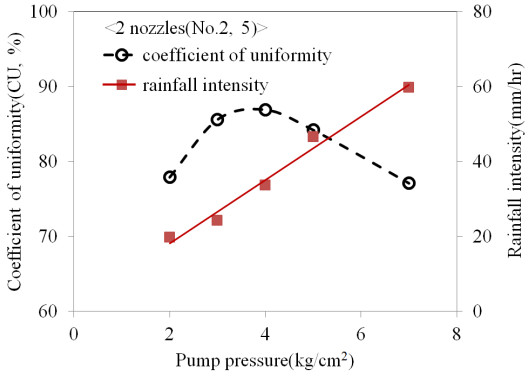


Fig. 8. Change characteristic of rainfall intensity and uniformity coefficient according to pump pressure

4.2 펌프압력과 균등계수 관계

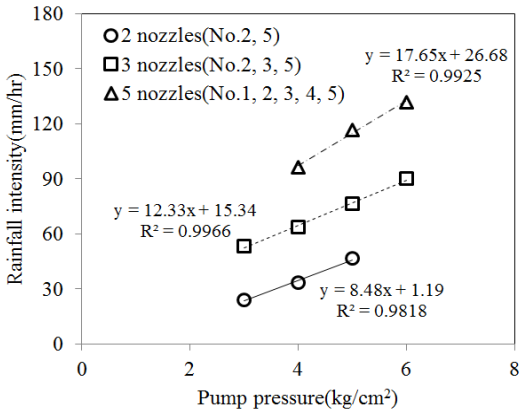
Fig. 8은 노즐 2개를 이용한 조건에서 펌프압력과 균등계수 및 강우강도와의 관계를 나타낸다. 노즐 2개로 강우실험을 수행한 결과 펌프압력이 상대적으로 낮은 2kg/cm^{2}와 높은 7kg/cm^{2}인 조건에서 균등계수는 각각 77.9%와 77.1%로 80% 이하로 나타났다. 이에 반해 펌프압력이 3, 4, 5kg/cm^{2}인 조건에서는 균등계수가 평균 84% 이상으로 나타났다.

펌프압력이 증가할수록 강우강도는 선형적으로 증가하는 경향을 보이는 반면, 균등계수는 적정압력이 존재하고 있음을 알 수 있다. 이러한 특징은 압력에 의한 분사각이 달라지면서 균등계수에 영향을 주기 때문이다. 분사각은 펌프압력 외에도 노즐과 강우분사 표면적간의 거리, 노즐 위치 등의 영향으로 인해 달라질 수 있다. 본 실험 조건에서는 적정 펌프압력은 3~6kg/cm^{2}으로 판단된다.

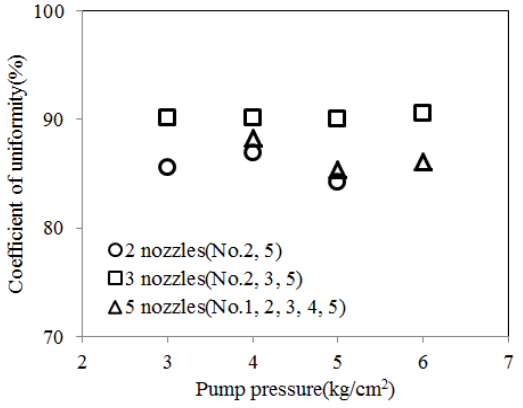
4.3 급경사지 모형실험 강우제어 매뉴얼

본 연구에서는 인공강우장치의 강우강도를 130mm/hr 이하, 10mm/hr 단위 제어를 목표로 하며, 균등계수 80% 이상을 확보하고자 하였다. 이를 위해 사전 강우실험을 통해 도출된 결과를 기반으로 노즐수, 노즐위치, 펌프압력에 따른 강우실험을 수행하였다. 다양한 강우강도를 재현하기 위해 노즐수는 2, 3, 5개로 단계적으로 적용하였고, 펌프압력은 3, 4, 5, 6kg/cm^{2}로 조건을 달리하여 실험을 수행하였다. 펌프압력과 노즐수에 따른 강우강도 분석결과를 Fig. 9에 나타내었다. 펌프압력이 증가할수록 강우강도는 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 선형회귀분석을 적용한 결과 결정계수(R^2)는 0.98~1.0로 높은 상관성을 나타내었다. 또한 노즐수가 늘어남에 따라 강우강도는 증가하는 것으로 나타났다. 노즐수가 2개에서 3개를 적용할 경우 강우강도는 평균 1.9배 증가하였고, 3개에서 5개 적용할 경우 평균 1.5배 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 9(b)는 펌프압력과 노즐수에 따른 균등계수 분석결과를 나타낸다. 실험을 수행한 조건 모두 균등계수 80% 이상으로 균질한 강우분포를 나타내고 있음을 알 수 있다.

Table 2는 강우실험을 통해 얻어진 결과를 바탕으로 작성된 강우제어 매뉴얼을 나타낸다. 강우강도 범위는 20~130mm/hr이며, 10mm/hr 단위로 제어가 가능하다. 펌프압력, 노즐형태 및 노즐수를 변수로 작성되었다.



(a) rainfall intensity



(b) Coefficient of uniformity

Fig. 9. Rainfall test results according to nozzle number and pump pressure

Table. 2. Rainfall control manual

Rainfall intensity (mm/hr)	Control factor		
	Pump pressure (kg/cm²)	Nozzle type	No. of nozzle
20	2.2	② ⑤	2
30	3.4	② ⑤	2
40	4.6	② ⑤	2
50	2.8	② ③ ⑤	3
60	3.6	② ③ ⑤	3
70	4.4	② ③ ⑤	3
80	5.2	② ③ ⑤	3
90	6.1	② ③ ⑤	3
100	4.2	② ③ ⑤	3
110	4.7	① ② ③ ④ ⑤	5
120	5.3	① ② ③ ④ ⑤	5
130	5.9	① ② ③ ④ ⑤	5

강우제어 매뉴얼은 Fig. 9(a)의 노즐수에 따른 강우강도와 펌프압력과의 관계에서 재현하고자하는 강우강도를 대입하여 펌프압력을 도출하고, 도출된 펌프압력으로 조정하여 원하는 강우강도를 구현하는 방식이다. 강우강도 20~40mm/hr는 2번과 5번 노즐 2개 적용한 결과를 기반으로 하고 있다. 강우강도 50~100mm/hr는 2, 3, 5번 노즐 3개를 적용한 결과이며, 강우강도 110~130mm/hr는 노즐 5개 모두 적용한 결과를 기반으로 한다.

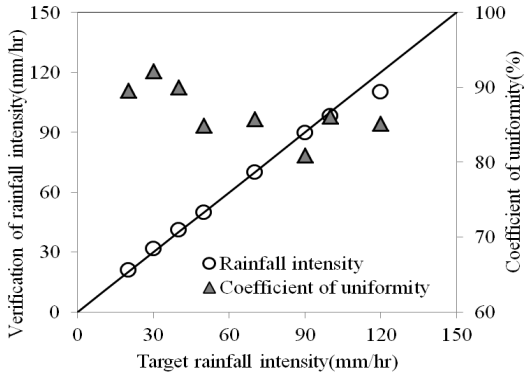


Fig. 10. Verification results for rainfall experiment

4.4 강우강도 검증

4.3절에서 언급된 강우제어 매뉴얼 기반으로 강우강도 검증실험을 수행한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 목표 강우강도와 검증실험을 통해 얻어진 강우강도를 비교함과 동시에 균등계수도 함께 도시화 하였다. 강우검증은 목표 강우강도를 설정하고, 설정된 강우강도에 해당되는 펌프압력을 강우제어 매뉴얼을 통해 도출하여 강우실험이 이루어졌다. 목표 강우강도 20~130mm/hr 범위 내 총 8개 조건에 대한 강우검증실험을 수행하였다. 검증실험을 수행한 결과 목표 강우강도 대비 오차는 ±3.1%로 미소한 차이를 보이는 것으로 분석되었다. 균등계수는 80% 이상으로 나타났으며, 평균 86.8%로 균질한 분포특성을 나타내었다.

5. 결론

급경사지 붕괴 모의실험을 위한 주요설비인 인공강우재현 장치의 강우강도 제어와 강우분포의 균질성 확보를 위해 노즐형태, 크기, 위치 및 펌프압력에 따른 강우실험을 수행하였다. 이를 통해 강우제어 매뉴얼을 구축하고

급경사지 붕괴 모의실험에 활용하고자 하였다.

인공강우장치 최대강우강도는 전국 주요지점의 지속시간 60분, 재현기간 100년의 확률강우강도 분석 자료를 기반으로 최대강우강도 130mm/hr로 설정하였다. 또한 강우분포의 균질성을 확보하기 위해 선행 연구사례 분석을 통해 균등계수 값을 80%로 설정하였다.

강우강도와 강우분포 균질성 확보하기 위한 강우노즐 선정을 위해 노즐형태 및 크기에 따른 실험을 수행하였고 강우강도와 균등계수 분석을 통해 노즐형태는 원형노즐, 크기는 1.9mm와 1.4mm가 적합한 것으로 나타났다.

펌프압력이 증가할수록 강우강도는 증가하는 경향을 보인 반면 균등계수의 경우 최적 압력이 존재하는 것으로 나타났다. 펌프압력이 상대적으로 낮은 2kg/cm^{2}과 높은 7kg/cm^{2}인 조건의 경우 균등계수가 80% 이하로 나타났으나 압력이 3~5kg/cm^{2}인 조건에서는 균등계수가 평균 84% 이상으로 나타났다. 본 실험조건에서는 적정 펌프압력을 3~6kg/cm^{2}으로 설정하였다.

다양한 강우강도를 재현하기 위해 노즐수는 2, 3, 5개, 펌프압력은 3, 4, 5, 6kg/cm^{2}로 조건을 달리하여 실험을 수행하여 강우제어 매뉴얼 작성에 이용하였다. 펌프압력이 증가함에 따라 강우강도는 선형적으로 증가하는 경향을 보였고 균등계수 80% 이상으로 균질한 강우분포를 나타내었다.

펌프압력, 노즐형태 및 노즐수를 변수로 하는 강우제어 매뉴얼을 작성하였다. 강우강도는 20~130mm/hr의 범위로 10mm/hr단위로 설정할 수 있다.

작성된 강우제어 매뉴얼 기반 강우강도 검증실험을 수행한 결과 목표 강우강도 대비 오차는 ±3.1%, 균등계수는 평균 86.8%로 균질한 강우분포를 보였다.

References

[1] Ministry of the Interior and Safety, Statistical Yearbook of Natural Disaster, Korea, 2008-2017.

[2] H. S. Kang, J. W. Suk, H. J. Kim, "Analysis on Characteristics of Volumetric Water Content through Large-scale Slope Failure Experiment", *Proceedings of 2019 Korean Geo-environmental Society Conference*, KGES, Seoul, Korea, pp.31-32, Sep. 2019.

[3] J. K. Kim, J. W. Kang, G. S. Jeong, H. Choi, M. S. Kim, "Suggestion for the Optimum Operating Methods of Rainfall Simulator through the Analysis of Raindrop's Characteristics", *Journal of the Association of Korean Geographers*, Vol.5, No.1, pp.51-60, Apr. 2016.

[4] H. S. Kim, T. J. Ko, H. S. Jeong, S. J. Ye, "The Development of a Methodology for Calibrating a Large-Scale Laboratory Rainfall Simulator", *Atmosphere*, Vol.9, No.11, pp.427-441, Nov. 2018. DOI: https://doi.org/10.3390/atmos9110427

[5] C. J. Lee, J. P. Kim, J. W. Lee, W. Kim, "Analysis on Rainfall Distribution in a Large Experimental Rainfall Simulator with Fixed Nozzle Arrangement", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.16, No.12 pp.8116-8127, Dec. 2015. DOI: http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.12.8116

[6] M. Sagong, J. H. Yoo, S. J. Lee, "Analysis on the Rainfall Triggered Slope Failure with a Variation of Soil Layer Thickness: Flume Tests", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.25, No.4, pp.91-103, Apr. 2009.

[7] B. G. Chae, Y. S. Seo, Y. S. Song, Y. C. Cho, W. Y. Kim, "A Flume Test for Characterization on Landslides Occurrence and Flow Features of Debris by an Artificial Rainfall Simulator", *Proceedings of the KSEG Conference*, The korea society of engineering geology, Daejeon, Korea, pp.69-78, Apr. 2006

[8] H. H. Lee, J. D. Joo, "Characteristics of Soil Erosion on the Forest Fired Site by Using Rainfall Simulator", *Journal of Korean Forest Society*, Vol.95, No.6, pp.649-656, Apr. 2006.

[9] D. Y. Kim, J. P. Seo, C. W. Lee, C. S. Woo, "Analysis on the Behaviors of Soil Water Characteristic Sensors through Rainfall-induced Landslide Flume Experiments", *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.16, No.6, pp.209-218, Dec. 2016. DOI: https://dx.doi.org/10.9798/KOSHAM.2016.16.6.209

[10] B. K. Ahn, H. T. Choi, Q. W. Lee, S. J. Im, "Estimating Rainfall Interception Loss of Decomposed Floor in a Deciduous Forest Using Rainfall Simulation Experiments", *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol.16, No.3, pp.181-187, Sep. 2014. DOI: https://doi.org/10.5532/KJAFM.2014.16.3.181

[11] T. S. Cheong, H. S. Choi, T. J. Ko, "Development and Calibration of a Large-scale Rainfall Simulator for the Urban Flood Experimental Research", *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.17, No.6, pp.433-441, Dec. 2017. DOI: https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2017.17.6.433

[12] H. Moazed, A. Bavi, S. Boroomand-Nasab, A. Naseri, M. Albaji, "Effects of Climatic and Hydraulic Parameters on Water Uniformity Coefficient in Solid Set Systems", *Journal of Applied Sciences*, Vol.10, No.16, pp.1792-1796. DOI: https://doi.org/10.3923/jas.2010.1792.1796

[13] S. H. Luk, A. D. Abrahams, A. J. Parsons, "Sediment Sources and sediment transport by rill flow and interrill flow on a semi-arid piedmont slope, southern Arizona", *Catena*, Vol.20, No.1-2, pp.93-111, Feb-Apr, 1993. DOI: https://doi.org/10.1016/0341-8162(93)90031-J

[14] O. Gabric, D. Prodanovic, J. Plavsic, "Uncertainty Assessment of Rainfall Simulator Uniformity Coefficient",

Journal of Faculty of Civil Engineering International Conference of Contemporary Achievements in Civil Engineering, Vol.25, pp.661-667, 2014.
DOI: https://doi.org/10.14415/konferencijagfs2014.088

[15] J. E. Christiansen, "The uniformity of application of water by sprinkler system". *Agricultural Engineering*, Vol. 22, pp.89-92.

정 향 선(Hyang-Seon Jeong) [정회원]

- 2014년 3월 ~ 2016년 2월 : 부산대학교 사회환경시스템공학부 토목공학과(공학석사)
- 2016년 3월 ~ 현재 : 국립재난안전연구원 선임연구원

〈관심분야〉
지반공학

강 효 섭(Hyo-Sub Kang) [정회원]

- 2010년 2월 : 부경대학교 환경해양대학 해양공학과(공학석사)
- 2010년 1월 ~ 2012년 3월 : 도담이앤씨 지반터널부
- 2016년 2월 : 부경대학교 환경해양대학 해양공학과(공학박사)
- 2018년 1월 ~ 현재 : 국립재난안전연구원 시설연구사

〈관심분야〉
지반공학

석 재 욱(Jae-Wook Suk) [정회원]

- 2008년 2월 : 부경대학교 환경해양대학 탐사공학과 (공학석사)
- 2013년 2월 : 부경대학교 환경해양대학 에너지자원공학과 (공학박사)
- 2013년 4월 ~ 2015년 10월 : 한국시설안전공단 선임연구원
- 2015년 11월 ~ 현재 : 국립재난안전연구원 시설연구사

〈관심분야〉
지반공학, 지질공학

김 호 종(Ho-Jong Kim) [정회원]

- 2009년 2월 : 건국대학교 공과대학 토목공학과(공학석사)
- 2009년 2월 ~ 2014년 8월 : 서영엔지니어링 지반터널팀
- 2018년 8월 : 건국대학교 공과대학 토목공학과(공학박사)
- 2018년 10월 ~ 현재 : 국립재난안전연구원 시설연구사

〈관심분야〉
지반공학, 터널공학