

# 고정식 노즐 배치를 가진 대형 강우모사장치에의 강우 분포 특성 분석

이찬주<sup>1\*</sup>, 김종필<sup>1</sup>, 이진원<sup>1</sup>, 김원<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>한국건설기술연구원 수자원하천연구소

## Analysis on Rainfall Distribution in a Large Experimental Rainfall Simulator with Fixed Nozzle Arrangement

Chan-Joo Lee<sup>1\*</sup>, Jong Pil Kim<sup>1</sup>, Jin-Won Lee<sup>1</sup>, Won Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Hydro Science and Engineering Research Institute,  
Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

**요약** 본 논문에서는 고정식 노즐 배치를 가진 대형 강우모사장치(KICT-ERS)와 이를 이용한 강우 분포 실험결과를 분석하였다. 강우 분사에 영향을 미치는 노즐 유량 실험 결과 실내 장치를 이용한 표준오차의 백분율은 0.15~0.38%였으며, KICT-ERS에 장착한 오차는 0.37~0.59%로 나타났다. 노즐의 분사 범위를 검토하기 위한 방사형과 삼각형 실험을 실시하였다. 방사형 실험에서 1개 노즐 분사시 균일계수가 0.348~0.657이었으나 주변 노즐을 포함할 경우 균일계수가 0.854~0.895로 높아져서 노즐 분사의 중첩에 의한 강우강도 증가 및 균일도 제고가 확인되었다. 삼각형 실험 결과의 균일계수는 0.845~0.896으로 나타났다. KICT-ERS 전체 범위에 대한 실험 결과 1.5φ 노즐의 1개 실험 케이스를 제외하면 모든 조건에서 균일계수는 0.7을 넘었으며, 균일계수는 강우강도가 증가함에 따라 높아지는 특성을 보였다. 기존 연구와의 비교 결과 KICT-ERS는 대체로 평균 이상의 균일계수를 제공하는 것으로 나타났다.

**Abstract** This study provides results from the experiment on the rainfall distribution using a large Experimental rainfall simulator with fixed nozzle arrangement. Results from the experiment on the nozzles which are crucial for rainfall simulation show standard errors expressed as percentage are 0.15~0.38% at the indoor flow testing apparatus and 0.37~0.59% at the KICT-ERS. To examine spraying range of the nozzles, radial and triangular rainfall measurement test are done. In the radial test, coefficient of uniformity (CU) lies in 0.348~0.657 in the single nozzle spraying case, while it increases up to 0.854~0.895 in the seven nozzle spraying case. This means increase of both rain rate and uniformity by means of superimposition of spraying. The CU of the triangular test falls to 0.845~0.896. The results from the experiment on the whole-scale of the KICT-ERS show that CU exceeds 0.7 for every case except the one experimental condition where a 1.5φ nozzle is used. The CU tends to increase with increasing rainfall intensity. Comparison with the previous studies shows that KICT-ERS provides rainfall distribution above average CU.

**Keywords** : Experiment, Nozzle, Rainfall simulator, Spatial distribution, Uniformity coefficient

### 1. 서론

강우모사장치(rainfall simulator)는 인공적으로 강우를 발생시키는 장치로서 토양[1][2][3], 농업[4], 지형[5],

지반[6], 재해[7], 물 순환[8], 하천 시설[9] 연구 분야뿐만 아니라 악기상에서의 자동차 광통신[10][11] 분야에도 활용된다. 특히 기후변화로 인해 집중호우가 빈발하고 이로 인해 산사태, 도심 침수 등의 재해가 발생하고

본 연구는 한국건설기술연구원의 연구비 지원(과제명 : (15주요-대3-우량계) 전자파를 이용한 초소형 우량계 개발)에 의해 수행되었습니다.

\*Corresponding Author : Chanjoo Lee(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

Tel: +82-31-910-0657 email: c0gnitum@kict.re.kr

Received November 9, 2015

Revised November 30, 2015

Accepted December 4, 2015

Published December 31, 2015

있어 이에 대한 실증적 연구 차원에서 인공 강우 실험이 많이 수행되고 있다.

이와 관련하여 강우모사장치는 국내에서도 설치, 운영된 사례가 있으나[2][6][8][12][13], 대부분 특정 목적의 실험을 위한 소규모인 장치인 반면, 외국의 강우모사장치는 수 내지 십여 제곱미터 내외에서 단일 목적의 소규모 실험을 수행할 수 있는 간이 시설부터 [3][14][15][16], 수십 내지는 수백 제곱미터 범위의 공간을 가지고 있어 소규모부터 대규모의 다양한 실험을 수행, 지원할 수 있도록 복합적인 배관 시스템을 가진 시설[11][17][18][19]까지 그 규모 역시 다양하다. 특히 대형 강우모사장치의 경우 시설 구축에 많은 비용이 들지만, 산사태, 토양 침투[11], 하계망 발달[18], 강우-유출[19] 등의 실험에 가까운 규모의 각종 실험이 가능하여 실험의 사실성을 높이고 계측이 용이하다는 장점이 있다. 이러한 실험 시설은 보유 기관뿐만 아니라 대학, 연구소, 산업계 등 다양한 수요에 대응할 수 있으므로 활용성이 높으나, 국내에서는 소규모의 강우모사장치만이 제한적으로 구축, 운영되어 범용성이 크지 않았다. 이에 한국건설기술연구원에서는 국내에서 활용 가능한 개방형 기초시설로서 다양한 규모의 실증 실험을 수행할 수 있는 대형 강우모사장치(KICT-ERS, Korea Institute of Civil engineering and building Technology-Experimental Rainfall Simulator)를 설계, 구축하였다. KICT-ERS는 원추 형태로 물을 분사하는 완전원추노즐(full-cone nozzle)을 강우 제공 설비로 갖추고 있으며 노즐은 일정한 간격으로 고정되어 배열되어 있다.

본 연구는 KICT-ERS의 설계 및 구축 과정을 기술한 후, 이를 실제 가동하면서 강우모사장치로서의 기본적인 특성을 분석하는데 그 일차적인 목적이 있다. 특히 실험 장치의 성능을 좌우하는 강우분사의 공간적 분포 특성을 파악함으로써 향후 KICT-ERS의 활용성을 높이고 보다 정확한 실험을 하기 위한 개선 방향을 찾고자 한다.

## 2. 강우 실험시설

### 2.1 실험시설 개요

한국건설기술연구원에서는 전자과 우량 센서의 검보정을 위한 강우-반사도 실험을 위해 KICT-ERS를 설계하고 시험 운영한 바 있다[20]. KICT-ERS는 그 외에도

강우-유출실험, 도시침수 모형실험, 산사태 실험, 토양 실험, 우천시 시인성 실험, 침투 및 차단 실험 등 다양한 목적에 활용할 수 있도록 공동활용의 기반을 제공하고 있다.

이러한 다양한 목적의 실험을 수행하기 위해서는 가능한 넓은 공간이 필요하다. KICT-ERS는 폭 12 m, 길이 18 m, 넓이 216 m<sup>2</sup> 크기의 강우 분사 공간을 가진다. 또한 지상에서의 낙하속도가 자연 강우의 낙하속도를 최대한 재현할 수 있도록 함과 동시에 높은 시설물을 실험할 수 있도록 최대 지상고 11 m, 유효 지상고 10 m를 확보하였다(Table 1).

Table 1. Dimension of the KICT-ERS

Item	Width (m)	Length (m)	Area (m <sup>2</sup> )	Max. Height (m)	Effective Height (m)	Effective volume (m <sup>3</sup> )	Structure
Dimension	12	18	216	11	10	2,160	Steel

KICT-ERS는 고정식 분사 노즐에 기반한 강우모사장치로서 철골구조물과 함께 공급수조, 유량공급펌프, 배관망 및 노즐 등으로 구성되어 있다(Fig. 1). 공급 수조는 최대 1.0 m<sup>3</sup>/sec의 유량을 공급할 수 있는 실험장주 배관에 직결되어 있으며, 펌프에 일정한 수압으로 물을 공급할 수 있도록 수위 조절이 가능하다. 펌프는 12 m 높이에 있는 60개 노즐에 균일한 압력으로 유량을 고르게 분사할 수 있도록 64 m의 양정고를 가진 3.75 kW급 인버터 모터(신한일전기 입형부스터시스템 HIT3-4405-3T) 2대가 병렬로 배치되어 있고 제어장치를 통해 세밀하게 압력 조절이 가능하다. 이렇게 함으로써 다양한 노즐 크기와 강우강도의 실험을 지원할 수 있다.

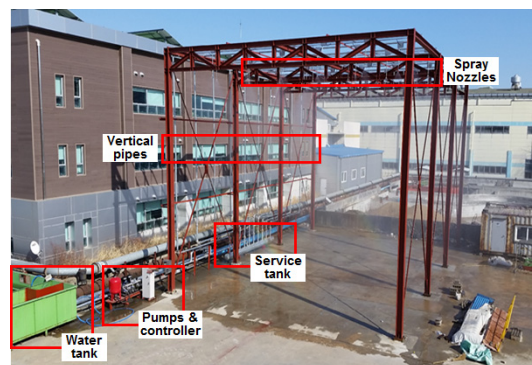


Fig. 1. KICT-ERS

펌프의 유량과 압력을 노즐에 전달하는 배관은 1차적으로 서비스탱크가 설치되어 있어 압력을 고르게 조절하며, 각각 10본의 수직 배관, 상부 배관을 거쳐 60개의 노즐관으로 유량이 공급된다. 노즐관에는 별도로 솔레노이드 밸브(solenoid valve)가 부착되어 있으며 제어반에 연결되어 있어 원격으로 개별 노즐의 개폐를 통제할 수 있다.

### 2.2 노즐관 배열

인공적으로 강우를 모사하기 위한 다양한 방법이 알려져 있으나 대표적으로 활용되는 것 중에 하나는 분사노즐을 이용하는 것이다. 분사 노즐 중에서는 완전원추노즐(full-cone nozzle)이 강우 실험에 많이 사용되는데 [5][8][11][19], 이 노즐은 원형의 분사 영역에 비교적 균일한 강우 분포를 재현할 수 있고 우적의 재현성이 높다는 특징이 있다[19]. KICT-ERS 역시 완전원추노즐을 강우 제공 설비로 갖추고 있다.

노즐관의 위치 배열은 고정되어 있다. 기존의 대형 강우모사장치에서 채택된 고정식 배열은 편의성과 안정성이 있으나 강우 분사의 범위 변동에 대응하여 분사 위치를 조절하기가 매우 어려운 단점이 있다. 이에 따라 강우를 균일하게 분사하기 위한 공간 배열이 중요하다. KICT-ERS는 완전원추노즐의 분사 범위와 각도 및 유효지상고 등을 종합적으로 고려하여 노즐 간의 간격이 2.0m 이면서 최대한 접할 수 있도록 삼각망 형태로 노즐관을 배치하였다(Fig. 2). 이 때 각 상부배관별로 유량과 압력이 고르게 되도록 하기 위해 1개 상부배관당 6개씩 동일한 수의 노즐관을 배치하였다. 그 결과 실험장 내부 외곽의 좌측 일부 영역은 설계 분사 범위에 포함되지 않고, 우측에서는 실험장 바깥으로 분사되는 문제점이 발생하기도 하였다. 하지만, 본 배열은 정사각형의 격자 배열에 비해 설계상 미분사 영역이 더 적고, 배관별 압력 및 유량의 균일성이 더 높으므로 설계안대로 구축하였다. Table 2에는 노즐관 배치와 제원이 나타나 있다.

노즐번호는 기준점(좌표 0,0)부터 행(Y방향)과 열(X방향)으로 1-1번부터 10-6번까지이다.

Table 2. Details of nozzle arrangement

Type of nozzle	No.	Spacing (m)	Arrangement	Nozzle projected area (m <sup>2</sup> )	Total projected area (m <sup>2</sup> )
full-cone	60	2	Triangular network	3.14	172.7

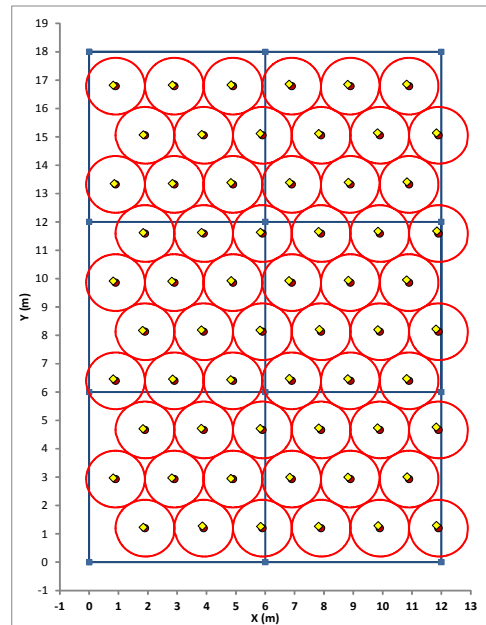


Fig. 2. Nozzle arrangement of KICT-ERS (Red dots represent designed nozzle positions, while yellow dots actual positions)

## 3. 실험 내용 및 방법

본 연구에서는 강우모사장치로서 KICT-ERS의 특성을 파악하기 위해 세 가지 실험을 실시하였다.

### 3.1 노즐 유량 실험

노즐은 강우모사장치의 핵심 부품이고 정밀한 가공 과정을 거쳐서 제작된다. 그에 따라 강우모사장치와 관련된 기존의 연구들에서 노즐 자체에 대한 분석이 시도된 사례가 매우 드물다. 하지만, 본 연구의 예비 단계의 검토 결과 노즐에 따른 유량 차이가 발생하는 경우가 있었기에 본격적인 실험에 앞서 노즐 유량을 검토하였다.

노즐의 유량은 토출구(outlet)에서의 속도( $V$ )와 토출구 면적( $A$ )의 곱이며, 압력( $P$ )의 제곱근에 비례한다.  $c$ 는 상수이다.

$$Q = A \cdot V = A \cdot c \cdot \sqrt{P} \quad (1)$$

실험에서는  $A$ ,  $P$ ,  $Q$ 를 각각 측정하였다. 사용한 노즐은 스테인리스강(stainless steel) 재질의 완전원추노즐이며, 국내의 제일노즐사에서 제작한 것으로 JEIL-1/4FF-SS 계열의 모델이다. 실험에서는 3종류의

토출구 크기[직경-φ 각 1.5 mm(모델 SS3), 2.3 mm(모델 SS6.5), 3.6 mm(모델 SS15)]의 노즐이 사용되었다. 완전원추노즐은 베인(vane)을 통해 소용돌이를 유도함으로써 액체를 균일하게 분사하는 구조이다. Fig. 3에는 완전원추노즐 내외부의 유체역학적 구조, 본 실험에서 사용한 노즐과 실제 장착한 모습을 각각 보여준다.

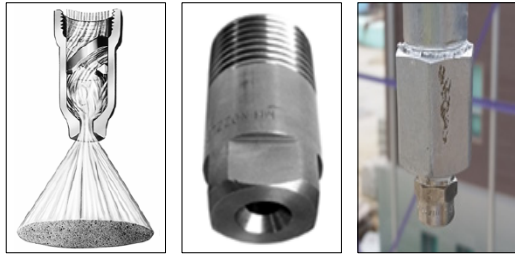


Fig. 3. Full-cone nozzle (left : structure and spray shape[21], Middle : nozzle used for this study, <http://www.jeilnozzle.co.kr/product/a04.html>, right : photo showing a nozzle attached to KICT-ERS)

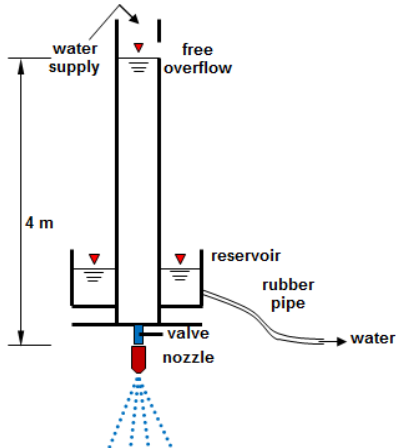


Fig. 4. Indoor nozzle flow testing apparatus

유량 실험은 모든 노즐에서 동일한 압력, 유량 조건을 제공하기 위해 먼저 실내 실험 장치(Fig. 4)에서 실시하였고, 실제 조건에서의 유량을 파악하기 위해 KICT-ERS에 각각 장착하여 실시하였다. 실내 실험장치에서는 압력 0.443 kgf/cm<sup>2</sup> 조건에서만 실시하였고, 각 노즐의 토출구 직경은 버니어캘리퍼스로 측정하였으며, 유량을 측정하였다. KICT-ERS에서는 압력은 펌프제어기에서 측정하였고, 유량을 된 압력으로 실험은 노즐에서 분사되는 유량을 10~20초 동안 직접 받아 메스실린

더로 계량하였다. 사용된 노즐은 1.5φ 69개, 2.3φ 60개, 3.6φ 60개 등 총 189개이다.

### 3.2 노즐 분사 강우의 공간 분포 실험

강우모사장치를 이용한 기존의 연구에서 강우의 공간적 분포를 분석한 사례는 부족하다. Lascelles 등[5]은 실험 과정에서 강우모사장치를 이용하는 주된 목적은 강우량, 강우강도, 시공간 분포를 조절하는데 있다고 하였다. 물론 강우모사장치의 이용 목적에 따라 강우 분포의 중요성이 크지 않을 경우 실험이 불필요할 수도 있지만, 실제 분사된 강우의 공간 분포 특성을 파악하는 것은 강우모사장치의 성능과 활용성에 직결되는 일이기 때문에 본 연구에서는 두 가지 방식으로 공간적 특성을 분석하였다.

첫째는 노즐의 위치를 기준으로 중심과 주변부 관계를 분석하는 것이다. 본 연구에서는 노즐 위치를 중심으로 방사형과 삼각형 형태로 우량계를 배열하고 강우량을 측정함으로써 중심과 주변부 관계를 검토하고자 하였다. 강우모사장치의 강우분포의 균일성과 관련한 기존 연구들은 대체로 격자형으로 우량계를 배열한 상태에서만 실험을 실시해 왔다[8][17][19]. 그러나 노즐의 설계상 혹은 실제 분사 폭이 2 m 내외를 크게 벗어나지 않으므로 격자 규모에서의 실험은 노즐 분사 범위 내부에서의 공간적 변동성을 분석하기에는 충분하지 않다고 볼 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 직경 0.2 m 정도인 우량계를 최대한 근접하여 배치함으로써 분사 범위 내부의 공간적 변동성을 파악할 목적으로 실험을 수행하였다. 방사형 실험은 노즐 직하와 그 주변부 사이의 분포를 파악할 목적으로 수행하였고, 삼각형 실험은 노즐 사이의 공간 및 노즐의 원형 범위 바깥의 구역에서의 강우 특성을 파악하기 위함이다. 방사상 실험은 순수하게 노즐 1개만을 분사하는 조건(1노즐, 5-3번 노즐 분사)과 5-3번 노즐과 주변 6개 노즐을 함께 분사하는 조건(7노즐)으로 실험하였는데, 이를 통해 강우강도의 변화와 인접 노즐 방사의 영향을 비교할 수 있다. 우량계는 노즐 직하와 전후 좌우로는 노즐 중심부터 0.25 m 간격으로 1.5 m 까지, 각 6개씩, 대각선 방향으로로는 노즐 중심에서 0.5 m 거리부터 0.25 m 간격으로 각 5개씩 설치하는 등 총 45개를 설치하였다. 강우강도에 따라 우량계에 부착된 메스실린더 용량을 고려하여 9~30분간 지속하였다(Table 5).

삼각형 실험은 삼각형을 완전히 포함하는 3개 노즐(7-3번, 6-3번, 6-4번)을 분사하는 조건에서 실험하였다.

우량계는 3개 노즐의 중심에 각 1개씩 배치하였고 삼각형 내부에서 우량계간 간격이 0.25 m가 되도록 배치하였으며, 총 우량계 수는 45개이다. 지속 시간은 방사형과 마찬가지로 우량계에 부착된 메스실린더 용량을 고려하여 10~30분간 지속하였다(Table 6).

둘째는 강우모사장치 공간 전체에서 강우의 공간 분포를 파악하기 위해 전체 노즐을 분사하는 조건으로 실험을 실시하였다. 이 실험은 특정 압력 조건에서 강우모사장치가 제공하는 강우강도를 판단하는데 활용하며 시설의 운용에서 가장 중요한 부분이다. 실험은 3가지 노즐에 대해 각각 3가지 압력 조건을 부여하여 총 9가지 조건에 대해 진행하였다. 강우량은 Fig. 2의 좌표를 기준으로 지상에서 가로, 세로 각 2 m 간격, 대각선으로는  $\sqrt{2}$  m 간격으로 총 82개 지점에서 우량계를 설치하여 강우량을 측정하였다.

강우 분포 실험에는 자체적으로 제작한 PVC 우량계를 사용하였다. 우량계의 내경은 202~205 mm로 200 mm인 표준우량계보다 1.0~2.5% 크다. 하지만 수수구의 면적을 고려하여 계산할 경우 기존의 표준 우량계와 비교한 바 3% 이내의 오차를 보였으며, 이는 우량계 검정기준을 만족하는 것이다.

## 4. 실험 결과

### 4.1 노즐 유량

Table 3은 실내 실험장치에서의 결과를 보여준다. 측정된 노즐의 평균 유량은 13.1~61.2 ml/sec이고, 표준오차는 0.02~0.23 ml/sec로 오차율은 0.15~0.38% 정도로 미미한 수준인 것으로 나타났다. 또한, 노즐 유량의 오차는 토출구 크기가 커질수록 증가하였다. 노즐 유량의 오차는 대부분 작았으나 1~2개의 노즐이 큰 오차를 나타내는 경우가 있으므로 실제 사용에 앞서 실험이 필요함을 알 수 있었다.

Table 3. Test results of nozzle flow with the indoor apparatus

Nozzle (φ)	No.	Outlet diameter (mm)	Duration (sec)	Pressure (kgf/cm <sup>2</sup> )	Flow Mean/SD (ml/sec)	Standard error (ml/sec)
1.5	69	1.49	10	0.4	13.1/0.17	0.020
2.3	60	2.34	20	0.4	33.5/0.6	0.077
3.6	60	3.67	10	0.4	61.2/1.78	0.230

Table 4는 KICT-ERS에 장착한 상태에서의 실험 결과인데 2.3φ, 3.6φ 노즐에 대해서만 실험을 실시하였다. 표준오차는 0.596~0.671이고, 오차율은 0.37~0.59%로 다소 증가하였다. 이는 실내 실험 장치에 비해 노즐 배관의 편차까지 반영된 것으로 볼 수 있다. 또한, 일부 노즐에서 오차가 큰 경우가 나타나 본 실험에 앞선 사전 검사의 필요성을 확인시켜 주었으며, 이러한 노즐들은 실험에서 제외하였다.

Table 4. Test results of nozzle flow with the KICT-ERS(Each nozzle flow was measured at a different point)

Nozzle (φ)	No.	Duration (sec)	Pressure (kgf/cm <sup>2</sup> )	Flow Mean/SD (ml/sec)	Standard error (ml/sec)
2.3	60	20	4.6	100.6/4.62	0.596
3.6	60	20	4.3	179.8/5.20	0.671

Fig. 5는 본 연구에서 사용한 1.5φ, 2.3φ, 3.6φ 노즐에 대한 제조사의 압력-유량 곡선과 본 연구의 실측 자료를 비교한 것이다. 압력-유량 곡선은 노즐 유량에 관한 Eq. (1)에서 알 수 있듯이 압력의 약 1/2승에 비례하여 증가하고 있다. 검정색 원, 네모, 세모는 본 실험의 결과를 도시한 것으로 1.5φ, 2.3φ의 경우 제조사의 곡선과 대체로 비슷한 결과를 나타내고 있으나 3.6φ 노즐 유량의 경우 상대적으로 유량이 적게 측정되었다. 앞서 Table 3과 Table 4에서 노즐 유량의 표준오차가 매우 적은 것을 고려하면 3.6φ 노즐의 경우 제조사 사양과 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 이 차이는 다양한 압력 범위에서 검토하지는 못했으나 실내 실험과 KICT-ERS에서의 실험 모두에서 확인된 점을 고려할 때, 향후 실험시 노즐 장착에 앞서 실제 유량을 확인하는 과정이 필요하다는 것을 보여준다.

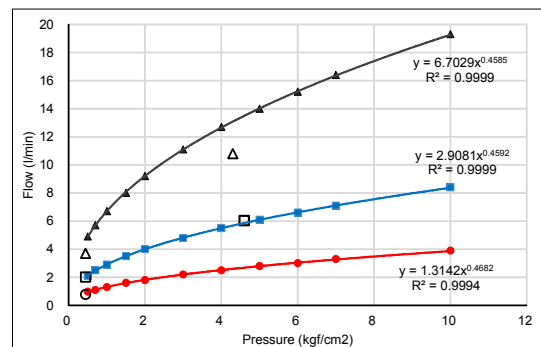


Fig. 5. Comparison of the maker's table with the measured data



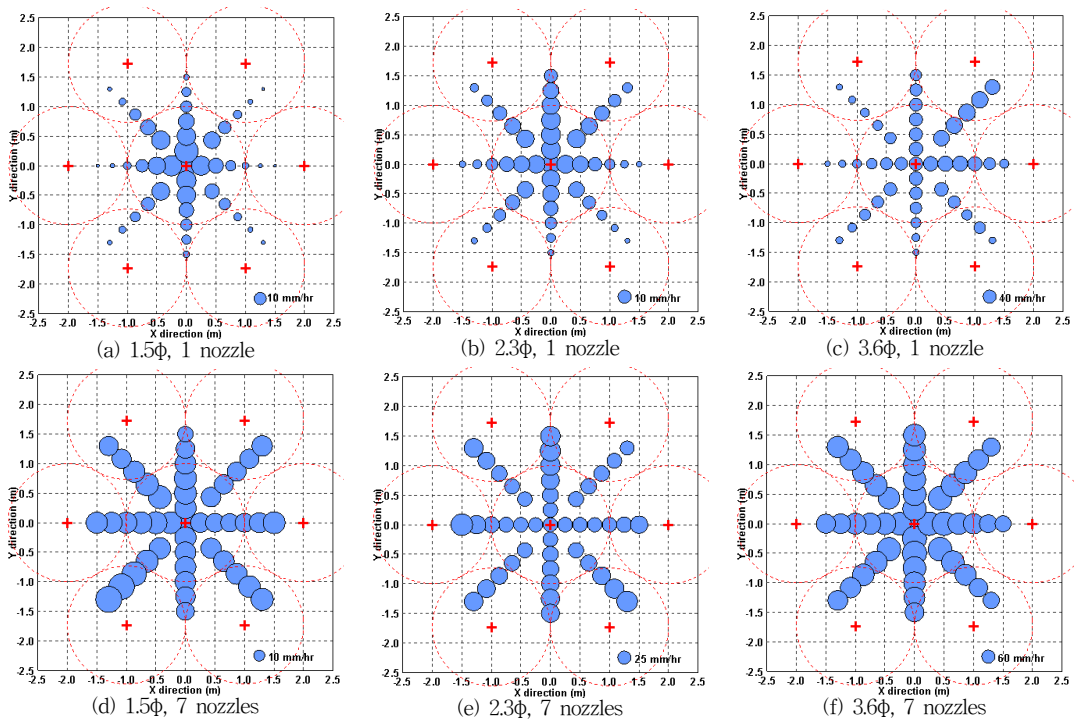


Fig. 6. Radial measurement of rainfall distribution

4.2 분사범위 실험(1)-방사형

Table 5과 Fig. 6는 방사형 분사 실험의 결과를 보여 준다. Fig. 6(a)~(c)는 중앙의 5-3번 노즐(중앙의 적색 십자)에서만 분사된 경우이다. 적색 점선으로 표시된 것은 KICT-ERS의 노즐 배열에 따른 설계 분사범위로서 직경 2 m인 원이며, 적색 십자는 각 원의 중심이다. 각 그래프에서 파란 거품의 크기는 각 측정 위치에서의 강우강도를 의미한다. 방사상 배열에서 우량계는 중심 원과 인접 원에 모두 걸쳐 있다. 대체로 노즐 중심부에서 강우량이 상대적으로 많고 주변부로 갈수록 우량이 적어짐을 알 수 있다. 또한 중앙 원 바깥의 우량이 크게 작음을 알 수 있다. 다만, Fig 6(c)의 경우 우상향 대각선 쪽으로 우량이 치우쳐 있는 특징을 보여준다. 방사상 실험의 결과는 Table 5에 정리되어 있는데, 45개 우량계 전체의 평균 강우강도는 각각 9.1, 10.1, 33.9 mm/hr으로 2.3φ 노즐 분사시 강우량이 노즐 크기에 비해 상대적으로 적은 것으로 나타났다.

Table 5. Test result of radial measurement

Cases	Nozzle (φ)	Duration (min)	Pressure (kgf/cm <sup>2</sup> )	Rainfall intensity Mean/SD (mm/hr)		Coefficient of uniformity
1 nozzle	1.5	30	2.30	All	9.1/5.9	0.348
				center circle	13.5/4.6	0.659
	2.3	30	2.40	All	10.1/4.1	0.597
				center circle	12.8/2.4	0.815
	3.6	15	2.35	All	33.9/11.6	0.657
				center circle	39.1/7.3	0.813
7 nozzle	1.5	30	2.40	All	21.8/2.3	0.895
				center circle	22.0/1.5	0.931
	2.3	30	2.60	All	33.1/4.8	0.854
				center circle	30.3/3.1	0.898
	3.6	9	2.35	All	112.4/11.9	0.894
				center circle	118.3/7.7	0.935

본 연구에서는 노즐 분사 우량의 공간 분포 분석을 위해 Christiansen 등[22]이 제안한 균일계수(coefficient of uniformity, CU, Eq. (2))를 사용하였다.

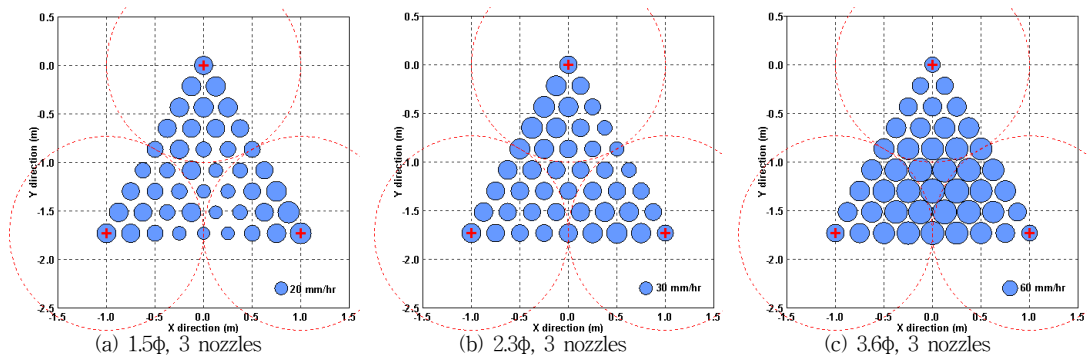


Fig. 8. Triangular measurement of rainfall distribution

$$CU = 1 - \left( \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - \bar{X}|}{\bar{X}} \right) \quad (2)$$

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

5-3번 노즐 1개만을 개방한 조건을 나타내는 Fig. 6(a)~(c)의 균일계수는 각각 0.348, 0.597, 0.657로 나타나 1.5φ에서 균일도가 가장 낮고 노즐이 커질수록 균일도가 증가함을 알 수 있다. 이는 상대적으로 많은 유량이 분사되는 토출구가 큰 노즐이 주변부까지 고르게 분사한다는 것을 의미한다.

한편, 5-3번 노즐의 분사 범위(중앙 원) 내부에서의 강우강도만 볼 경우 13.5, 12.8, 39.1 mm/hr로 전체 측정값에 비해 다소 증가하였다(Table 6). 균일계수의 경우 0.659, 0.815, 0.813으로 크게 증가하였는데, 이를 통해 설계상의 원에 해당되는 노즐의 지배 범위에서는 상대적으로 균일계수가 증가함을 의미한다. 하지만, 1.5φ 노즐의 경우 다른 노즐에 비해 균일도가 현저히 낮아 설계 범위에서도 노즐 1개만으로는 균일한 분포의 구현이 어렵다고 판단된다.

Fig. 6(d)~(f)는 중앙(5-3번) 및 인접한 6개 노즐을 포함하여 7개 노즐을 분사했을 때의 결과이다. 전반적으로 볼 때, 단일 노즐 분사에 비해 강우강도가 전체적으로는 2.4~3.3배, 5-3 노즐의 지배 범위에서는 1.6~3.0배 증가하여 인접 노즐의 분사로 인한 전반적인 강우강도 증가가 나타남을 보여주고 있다. 균일계수의 경우 0.854~0.935로 단일 노즐에 비해 높게 나타났으며, 이 역시 중앙에 있는 5-3 원에서 더 높게 나타났다.

이러한 결과들은 강우 분포의 균일성이 노즐의 밀도와 관련이 있으며, 인접한 노즐이 동시 분사하여 강우가 중첩될 때, 강우강도와 함께 공간 분포의 균일성이 높아짐을 보여준다.

### 4.3 분사범위 실험(2)-삼각형

삼각형 실험의 경우 방사형에 비해 우량계를 조밀하게 배치함으로써 노즐 주변부와 설계상 노즐의 분사 범위(원)이 접하면서 생기는 구역에 대한 강우량을 파악하는 것이 목적이다. 강우량의 배치는 Fig. 7과 같다.



Fig. 7. Triangular experiment

Fig. 8과 Table 6은 삼각형 실험 결과를 보여준다. 삼각형 실험결과는 방사형(1노즐, 7노즐)과 비교할 때, 1노즐 실험에 비해서는 강우강도가 크고, 7노즐 실험과 비교하면 1.5φ, 2.3φ 결과는 강우강도가 크고, 3.6φ 결과는 강우강도가 작게 나타났다. 균일계수는 0.845~0.896으로 세 개의 노즐 실험이 비교적 유사한 결과를 나타내고 있고, 7노즐 분사시의 방사형과 비슷한 결과이다.

삼각형 실험의 결과를 볼 때, 설계상 노즐의 분사 범위 바깥에 있는 원들 사이의 공간에서도 우량 차이가 크지 않다고 볼 수 있다. 1.5φ 실험의 경우 원들 사이 공간

의 강우강도는 24.6 mm/hr로 전체 평균대비 -11.3%이지만, 2.3φ, 3.6φ 실험의 경우 각각 42.3 mm/hr(-4.7%), 103.2 mm/hr (16.3%)로 나타나 큰 차이가 없거나 원 안에 속한 부분보다 높게 나타났다. 이러한 결과는 원의 여러 노즐이 동시에 분사될 경우 설계상 분사 범위 외부에서도 더 큰 노즐일수록 강우강도가 높아질 수 있음을 의미한다.

Table 6. Test result of triangular measurement

cases	Nozzle (φ)	Duration (min)	Pressure (kgf/cm <sup>2</sup> )	Rainfall intensity Mean/SD (mm/hr)	Coefficient of uniformity
3 nozzles	1.5	30	2.40	27.7/4.3	0.845
	2.3	20	1.90	44.4/4.6	0.896
	3.6	10	2.35	88.7/11.3	0.873

4.4 전체 강우분포 실험

KICT-ERS의 전체 범위에 대한 강우 분포 실험을 실시하였다(Fig. 9). 실험 과정에서 7-6번 노즐이 고장난 관계로 59개 노즐을 가동하였다. 1.5φ, 2.3φ, 3.6φ 노즐을 이용하여 각 노즐별로 3개 압력 조건에서 실시한 결과는 Table 7에 요약되어 있다.

KICT-ERS 전체 범위에 대한 실험 결과, 1.5φ 노즐의 경우 13.7~26.4 mm/hr, 2.3φ 노즐의 경우 46.5~68.1 mm/hr, 3.6φ 노즐의 경우 89.6~118.3 mm/hr의 강우강도를 나타냈다. 이 결과를 볼 때, 세 가지 토출구 크기의 노즐만을 이용할 경우에도 비교적 넓은 범위를 포괄하는 강우강도를 얻을 수 있을 것으로 볼 수 있다.



Fig. 9. Whole-scale rainfall test

Table 6에 제시된 비슷한 압력 조건(약 2.3 kgf/cm<sup>2</sup>)의 7방사상 강우량 측정 실험과 비교했을 때, 1.5φ는 -2.7%, 3.6φ는 -8.3% 정도로 대체로 비슷하나 2.3φ의 경우 96.7%로 방사상 실험에 비해 강우량이 매우 크게 나타났다. 이러한 결과가 발생한 원인은 현재로서는 추

분히 판단하기 어려운 점이 있지만, 압력이 약간 낮은 1.9kgf/cm<sup>2</sup> 조건에서의 2.3φ 삼각형 실험시와 비교하면 그 차이는 34.2%로 감소하여, 실험 당시의 바람 영향이 반영된 것으로 보인다.

Table 7. Test result of grid measurement. Values in the parenthesis are those in case of exclusion of marginal measurement data.

Nozzle (φ)	Duration (min)	Pressure (kgf/cm <sup>2</sup> )	Rainfall intensity Mean/SD (mm/hr)	Coefficient of uniformity
1.5	30	1.6	13.7/4.6 (13.9/4.7)	0.666 (0.663)
	30	2.3	21.4/4.9 (21.8/4.8)	0.771 (0.781)
	20	3.05	26.4/5.0 (26.3/4.2)	0.811 (0.839)
2.3	15	1.8	46.5/14.0 (47.7/14.0)	0.700 (0.707)
	10	2.3	59.6/11.8 (60.1/10.5)	0.802 (0.825)
	10	3.0	68.1/10.9 (69.5/10.2)	0.840 (0.853)
3.6	7	1.8	89.6/17.0 (91.1/14.9)	0.810 (0.836)
	7	2.3	108.5/18.5 (109.5/15.8)	0.829 (0.856)
	7	2.7	118.3/20.5 (118.7/19.3)	0.827 (0.837)

전체 범위 실험 결과, 압력이 증가할수록 균일계수가 증가하는 경향이 나타났다. 1.5φ 실험에서는 0.666에서 0.811로, 2.3φ에서는 0.70에서 0.84로 증가하였으며, 3.6φ의 경우 0.810에서 0.829로 증가하였다. 이는 압력의 증가로 분사 범위가 증가하고 우적 크기가 감소하면서 상호 평균화되는 결과로 볼 수 있다. 이와 관련하여 Lascelles 등[5]은 동일한 크기의 완전원추노즐에 대해 강우강도 20~140 mm/hr 범위까지 20 mm/hr 간격으로 실험을 수행한 결과 20 mm/hr에서만 0.4 미만의 낮은 균일계수가 나타났고, 40 mm/hr 이상에서는 0.7~0.9 사이의 값을 나타내어 낮은 강우강도의 문제점을 지적한 바 있다. 하지만, 본 연구에서 전체 범위 실험의 최저 균일계수는 0.666이고 대략 2.0 kgf/cm<sup>2</sup> 이상의 압력에서는 대체로 0.8 내지는 그 이상의 균일계수가 얻어진다. 본 연구에서는 1.6kgf/cm<sup>2</sup> 이하의 낮은 압력에서는 실험을 수행하지 않았는데, 이는 예비 실험시에 지나치게 낮은 압력 조건은 분사 범위가 감소하고 균일성이 떨어진다는 점을 실험 과정 중에 직접 확인하였기 때문이다. 이런 이유로 제조사에 따라 각 노즐 모델별 표준 압력을



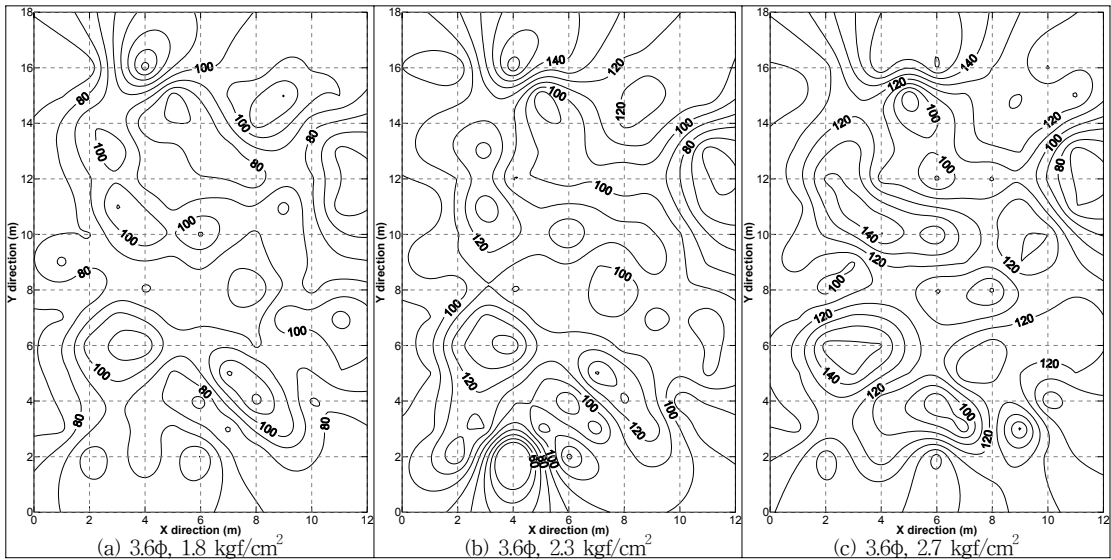


Fig. 10. Whole-scale rainfall distribution for 3.6φ cases

제시하는 경우도 있다. 본 연구의 결과는 노즐의 분사 범위가 현저하게 감소할 수 있는 과도한 저압 조건이나 강우 실험에 맞지 않는 과도한 고압 조건이 아닌 적절한 압력 범위에서 사용할 경우 비교적 고른 강우 분포를 얻을 수 있음을 시사한다. 다만 이러한 압력 조건이 정확하게 어느 정도인지에 대해서는 추가적인 실험을 통해 밝혀야 할 필요가 있다.

일본 교토대학교방재연구소에서 실험한 전체 강우 분포 실험의 경우에도 단일 노즐 사용시 강우강도가 높아질수록 균일성이 증가한다는 점이 확인된 바 있다[19]. 결과적으로 각 노즐이 고른 강우 분포를 제공할 수 있는 압력 조건에서 실험을 수행하는 것이 중요하다고 할 수 있겠다.

Fig. 10은 3.6φ의 실험 결과를 Kriging 기법을 적용하여 도시한 강우의 공간 분포도이다. 이 그림을 볼 때, 강우 분포는 압력과 관계없이 대체로 비슷하며, 특정한 첨두 지점을 중심으로 강약이 분포하는 것으로 보인다. 전체적으로는 좌측으로 높은 강우대역이 치우친 특징이며, 몇몇 첨두부가 곳곳에 나타나 있다. 또한 7-6 노즐(X=12, Y=11.6)의 고장으로 인해 주변의 강우강도 역시 낮게 반영되어 있다. 이러한 분포의 특성은 통계적으로 높은 균일도에도 불구하고 특정 영역에서 강우강도가 과도하게 높거나 낮을 수 있음을 보여준다. 다만 이러한 과도하게 높거나 낮은 값은 실험장치 외곽에서 주로 발생

하는데, 이는 노즐의 배치(Fig. 2 참조) 및 외곽에서의 중첩 효과의 미약 등과 관련이 있어 보인다. Table 7의 괄호 안의 값들은 실험장치 외곽에서 측정된 자료를 제외하고 계산한 값들로 전체 자료를 이용했을 때에 비해 균일도가 높아짐을 알 수 있다. 이는 실험장치 내부에서 수행된 방사형 및 삼각형 실험 결과와도 부합하는 결과이며, 강우 실험시 외곽보다는 내부에서의 실험을 통해 균일도를 높일 수 있음을 의미한다.

#### 4.5 기존 연구와의 비교

균일계수는 강우모사장치의 성능을 모두 설명할 수는 없으나 중요한 성능 중에 하나를 보여주는 지표라고 볼 수 있다. KICT-ERS는 여러 연구자들에게 개방하여 활용할 수 있는 대형 시설이므로 강우 분포의 균일성에 대한 성능이 중요할 것으로 판단되기 때문이다. 기존의 연구에서는 어느 정도의 균일계수가 실험에 적절한지에 대해서는 언급이 별로 없다. 다만, 여러 조건의 실험 중에 높은 균일도를 조건에서 실험을 수행했던 사례가 있으며 [8], 이러한 방식은 반복적으로 같은 결과가 얻어진다면 활용할 수 있는 방법이다. 본 연구에서도 격자형 전체 분포 실험 결과를 볼 때, 강우강도가 낮은 1.5 노즐과 2.3 노즐의 낮은 압력에서는 실험을 수행하지 않는 것이 더 낫다고 판단된다.

국내외의 강우모사장치에 대한 연구 중에서 강우강도

의 평균값과 표준편차가 제시되어 균일계수를 계산할 수 있는 몇몇 연구의 자료를 함께 비교검토함으로써 본 연구의 시설인 KICT-ERS에 대해 간접적으로 평가해 볼 수 있다. Fig. 11을 볼 때, 현저하게 낮은 균일도를 갖는 25 mm/hr 미만의 3개의 자료를 제외한 65개 강우강도-균일도 자료에서 평균값은 선으로 표시된 것과 같이 0.815이며, 본 연구의 경우 1.5 노즐의 2개 케이스와 2.3 노즐의 1개 케이스가 평균 이하에 해당하며, 나머지 6개 케이스는 평균 이상의 균일도를 나타낸다. 평균 이상의 케이스에 소규모 실험도 포함되어 있는 점을 고려하면 대체로 본 연구의 균일계수는 기존 국내외 연구들과 비슷한 수준으로 볼 수 있다.

또한, Fig. 11에 낮은 강우강도에서 더 많은 자료가 포함되어 있기는 하나 낮은 강우강도에서는 균일계수의 편차가 크며, 강우강도 증가할수록 균일계수의 편차가 감소한다. 30~300 mm/hr의 강우강도 범위에 대해 실험을 수행한 Kitagawa 등[19]의 결과도 일치한다. 그러므로 규모가 큰 강우모사장치에서는 낮은 강우강도에서 균일도가 낮아질 수 있다는 점이 실험시에 주요한 한계 조건으로 고려되어야 할 것이다.

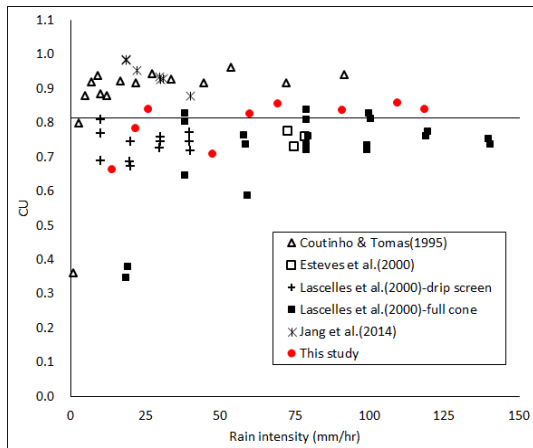


Fig. 11. Relationship of rainfall intensity and CU

### 5. 요약 및 결론

본 연구에서는 한국건설기술연구원에서 설계·구축한 강우모사장치(KICT-ERS)를 간략하게 소개하고, 이를 이용하여 강우의 공간 분포 실험을 수행하여 그 결과를 분석하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 강우 분사에 영향을 미치는 노즐 유량 실험 결과 실내 장치를 이용한 표준오차의 백분율은 0.15~0.38%였으며, 본 실험시설에 장착한 오차는 0.37~0.59%로 역시 1% 미만이므로 비교적 유량이 균일하게 분사되는 것으로 볼 수 있다. 다만, 다양한 압력 조건에서 실험을 통해 압력에 따른 오차 변화를 검토하는 것이 필요하다.
- 2) 노즐의 분사 범위를 검토하기 위해 방사형과 삼각형 실험을 실시하였다. 방사형 실험 결과 1개 노즐 분사시 균일계수가 0.348~0.657이었으나 주변 노즐을 포함하여 7개 노즐 분사시 균일계수가 0.854~0.895로 높아졌다. 삼각형 실험 결과의 균일계수 역시 0.845~0.896으로 비교적 균일한 강우 모사가 가능하다고 볼 수 있다. 이러한 결과는 인접한 노즐의 중첩 효과에 의해 균일도가 높아짐을 의미한다.
- 3) 강우모사장치 전체 범위에 대한 실험 결과 1.5φ 노즐의 1.6 kgf/cm<sup>2</sup> 실험 케이스를 제외하면 모든 조건에서 균일계수는 0.7을 넘었으며, 균일계수는 노즐 토출구가 커지고 강우강도가 증가함에 따라 높아지는 특성을 보였다. 7-6번 노즐의 고장에 의한 영향을 고려하지 않더라도 격자 실험의 경우 노즐 중첩에 의한 균일도 제고 효과가 적은 실험장치가 장자리에서의 우량값을 제외하면 균일계수가 0.781~0.856으로 증가하였다.
- 4) KICT-ERS의 강우 분포 균일도는 기존의 연구와 비교할 때, 대체로 평균 이상의 균일도를 갖는 것으로 나타났으며, 기존 연구를 통해 강우강도가 낮을수록 균일도의 편차가 커지는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 고정식 노즐 기반의 강우모사장치인 KICT-ERS의 노즐 및 강우 분포 특성을 분석한 결과 적정한 압력 조건으로 분사할 경우 비교적 균일한 강우 분포의 구현이 가능할 것으로 기대된다. 하지만, 보다 균일한 강우 분포를 제공함으로써 개방형 연구 시설로서의 성능을 제고하기 위해 노즐 유량의 일정성을 최대한 확보하며, 분사 특성과 중첩 효과를 최적화하기 위한 배관 압력 조건 등에 대한 검토와 연구가 필요하다. 또한 현재 KICT-ERS는 천막의 설치에도 불구하고 바람의 영향이 일부 작용하고 있으므로 향후 바람의 영향을 완벽하게 차단하여 실험할 필요가 있다.

## References

- [1] J. D. Pelletier, "Drainage basin evolution in the Rainfall Erosion Facility: dependence on initial conditions", *Geomorphology*, Vol. 53, pp. 183-196, 2003  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00353-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00353-7)
- [2] M-I. Kim, B-G, Chae, G-C, Jung, "A laboratory test for detecting the infiltrating characteristics of unsaturated soil in soil slide", *The journal of Engineering Geology*, Vol. 15, No. 4, pp. 487-494, 2005
- [3] I. Abudi, G. Carmi, P. Berliner, "Rainfall simulator for field runoff studies", *Journal of Hydrology*, Vol. 454-455, pp. 76-81, 2012  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.056>
- [4] R. Corona, T. Wilson, L. P. D'Adderio, F. Porcù, N. Montaldo, J. Albertson, "On the estimation of surface runoff through a new plot scale rainfall simulator in Sardinia, Italy", *Procedia Environmental Sciences*, Vol. 19, pp. 875-884, 2013  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proenv.2013.06.097>
- [5] B. Lascelles, D. T. Favis-Mortlock, A. J. Parsons, A. J. T. Guerra, "Spatial and temporal variation in two rainfall simulators: implications for spatially explicit rainfall simulation experiments", *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 25, No. 7, pp. 709-721, 2000  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1002/1096-9837\(200007\)25:7%3C709::AID-ESP126%3E3.0.CO;2-K](http://dx.doi.org/10.1002/1096-9837(200007)25:7%3C709::AID-ESP126%3E3.0.CO;2-K)
- [6] S-H. Kim, "Pore water pressure characteristic of unsaturated weathered granite soil slopes through rainfall simulation", *Journal of the Korea Academia-Industrial Co-operation Society*, Vol. 19, No. 11, pp. 3287-3295, 2009  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2009.10.11.3287>
- [7] B-G. Chae, S-H. Lee, Y-S. Song, Y-C, Cho, Y-S. Seo, "Characterization on the relationship among rainfall intensity, slope angle and pore water pressure by a flume test: in case of gneissic weathered soil", *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 17, No. 1, pp. 57-64, 2007
- [8] Y. S. Jang, M. E. Kim, J. S. Baek, H. S. Shin, "The study on development and verification of rainfall-runoff simulator for LID technology verification", *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 6, pp. 513-522, 2014  
DOI: <http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2014.47.6.513>
- [9] S. Takakura, M. Yoshioka, T. Ishizawa, N. Sakai, "Geoelectrical monitoring for observation of changes in water content in the slope of an embankment caused by heavy rain using a large-scale rainfall simulator", *AGU Fall meeting 2014*, abstract #NS33A-3944, 2014
- [10] J. Ryde, N. Hillier, "Performance of laser and radar ranging devices in adverse environmental conditions", *Journal of Field Robotics*, Vol. 26, No. 9, pp. 712-727, 2009  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/rob.20310>
- [11] NIED(National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention), Large-scale rainfall simulator, 2005
- [12] B-G. Chae, Y-S. Song, Y-S. Seo, Y-C. Cho, W-Y. Kim, "A test for characterization on landslides triggering and flow features of debris using a flume test equipment", *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 16, No. 3, pp. 275-282, 2006
- [13] W-S. Ki, S-H. Kim, "Soil water characteristic curve of the weathered granite soil through simulated rainfall system and SWCC cell test", *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 18, No. 4, pp. 523-535, 2008
- [14] J. Morin, S. Goldberg, I. Seginer, "A rainfall simulator with a rotating disc", *Transactions of American Society of Agricultural Engineering*, Vol. 10, pp. 74-79, 1967  
DOI: <http://dx.doi.org/10.13031/2013.39599>
- [15] W. P. Miller, "A solenoid-operated, variable intensity rainfall simulator", *Soil Science of America Journal*, Vol. 51, pp. 832 - 834, 1987  
DOI: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1987.0361599500510030048x>
- [16] C. T. Hignett, S. Gusli, A. Cass, W. Besz, "An automated laboratory rainfall simulation system with controlled rainfall intensity, raindrop energy and soil drainage", *Soil Technology*, Vol. 8, pp. 31-42, 1995  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0933-3630\(95\)00004-2](http://dx.doi.org/10.1016/0933-3630(95)00004-2)
- [17] M. Esteves, O. Planchon, J. M. Lapetite, N. Silvera, P. Cadet, "The 'EMIRE' large rainfall simulator: design and field testing", *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 25, No. 7, pp. 681-690, 2000  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1002/1096-9837\(200007\)25:7%3C681::AID-ESP124%3E3.0.CO;2-8](http://dx.doi.org/10.1002/1096-9837(200007)25:7%3C681::AID-ESP124%3E3.0.CO;2-8)
- [18] S. A. Schumm, "Geomorphic thresholds and complex response of drainage systems", in M. Morisawa (ed.) *Fluvial Geomorphology*, Binghamton, Publication in *Geomorphology* 3, pp. 299-310, 1973
- [19] Y. Kitagawa, G. Fujiwara, Y. Nakamura, "Experimental facility for rainfall and drainage", 1999
- [20] C-J. Lee, W. Kim, G-W. Wee, G-O. Lee, "Design and tentative operation of a rainfall simulator", *Proceedings of fall conference of The Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 2014
- [21] G. Tanner, K. F. Knasiak, "Spray characterization of typical fire suppression nozzles", *Proceedings of the 3rd International Water Mist Conference*, Madrid, Spain, 2003
- [22] J. E. Christiansen, "The uniformity of application of water by sprinkler system". *Agricultural Engineering*, Vol. 22, pp. 89-92

## 이 찬 주(Chan-Joo Lee)

[정회원]



- 1999년 2월 : 서울대학교 대학원 지리교육과 (교육학석사)
- 2007년 2월 : 서울대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2015년 2월 : 서울대학교 대학원 지리교육과 (박사수료)
- 2002년 1월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수자원·하천연구소 수석연구원

<관심분야>

실험, 하천지형학, 하천흐름계측

김 종 필(Jong Pil Kim)

[정회원]



- 2007년 2월 : 경북대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2013년 8월 : 경북대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2011년 7월 ~ 2015년 1월 : APEC기후센터 연구원
- 2015년 2월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수자원·하천연구소 박사후연구원

<관심분야>

수문기상, 레이더강우, 분포형모델링

이 진 원(Jin Won Lee)

[정회원]



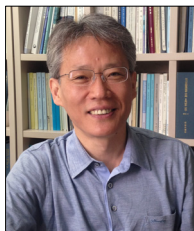
- 1987년 2월 : 인하대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2009년 8월 : 인하대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 1988년 1월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수자원·하천연구소 연구위원

<관심분야>

수리학, 하천생태, 하천복원

김 원(Won Kim)

[정회원]



- 2000년 2월 : 경북대학교 토목공학과(공학박사)
- 1991년 5월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수자원·하천연구소 선임연구위원
- 2014년 9월 ~ 현재 : 과학기술연합대학원대학교(UST) 건설환경공학부 교수

<관심분야>

토목공학, 수리학