

바람에 의한 우량자료의 변동성 연구

A Study on the Underestimation of the Rainfall Data due to Wind

박 무 종* / 김 응 석** / 김 중 훈***

Park, Moo Jong / Kim, Eung Seok / Kim, Joong Hoon

Abstract

Wind effects on a rain gauge can cause a significant underestimation of rainfall depths and contribute to the inconsistency in rainfall data. To revise the rainfall data requires the study about calculation of deficiency percentages of rain catch. There are few studies which reflect the variation of wind speed. In this study, the raindrop terminal velocity is quantified according to the particle size of rainfall. The model for calculating deficiency percentages of rain catch according to the particle size of rainfall is examined by experimentation. Experimentation shows that deficiency percentages of rain catch have no relationship with rainfall intensity and affected by raindrop diameter. In conclusion, the estimated deficiency percentages of rain catch coincided with the experimental results and can be used as recommended adjustment factors.

Keywords : wind speed, rainfall, rainfall gauge, deficiency percentages

요 지

우량계에 대한 바람의 영향은 우량의 감소와 강우자료의 일관성에 영향을 미치게 된다. 이러한 강우량을 보정하기 위해서는 강우의 감소율을 산정 할 수 있는 연구가 필요하다. 이러한, 강우의 감소에 대한 연구는 거의 수행되지 않았으며, 적절한 보정기법에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 강우의 입자 크기에 따른 낙하속도를 산정하였다. 이를 이용하여 강우의 입자크기에 따라 강우의 감소율을 보정할 수 있는 모형을 실험을 통하여 검토하였다. 실험결과 강우의 감소율은 강우의 강도와는 상관없고 강우의 입자크기에 따라 영향을 받는 것으로 나타났다. 본 연구에서 산정된 강우감소율은 실험결과와 잘 일치하고 있으며, 보정계수로 사용가능 한 것으로 판단된다.

핵심용어 : 풍속, 강우량, 우량계, 감소율

* 한서대학교 토목공학과 조교수

Assistant Professor., Department of Civil Engineering., Hanseo University., Choongnam, 356-820, Korea
(E-mail : mjpark@hanseo.ac.kr)

** 고려대학교 부설 방재과학기술연구센터 선임연구원

Senior Researcher, Research Center for Disaster Prevention Science and Technology, Korea University, Seoul 136-701

(E-mail : hydrokes@empal.com)

*** 고려대학교 토목환경공학과 교수

Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Korea University, Seoul 136-701
(E-mail : jaykim@korea.ac.kr)

1. 서 론

우리나라는 조선시대 세종대왕 때부터 측우기를 이용하여 각 지방의 강우량을 측정하였다. 그러나 근대적 강우량 관측의 개념은 일제시대 조선총독부 내무국이 한강, 대동강, 낙동강 유역조사를 위해 설치한 15개 자기우량계의 설치가 세계기상기구 기준의 규정에 의해 조사한 시초가 된다. 1986년에는 전국의 강우량관측소의 개수가 254개로 증가되었으며, 1990년대에는 컴퓨터 기술 및 관측장비의 발전으로 다양한 기관에서 우량계를 설치 및 운영하고 있다. 국내의 강우량관측은 건설교통부, 기상청, 한국수자원공사, 농업기반공사 등에서 체계적으로 관측하고 있다. 또한, 강우량관측소의 밀도를 살펴보면 전국에 분포된 우량계의 관측밀도는 $39\text{km}^2/1$ 개로 국제기상기구(World Meteorological Organization, WMO)에서 권장하는 최소 관측밀도 기준($100\sim 250\text{km}^2$ 당 1개 관측소)을 상회하여 관측소를 설치 운영하고 있다.

강우량의 관측은 이·치수의 계획 및 관리를 위해 필요한 가장 기본적인 자료이다. 즉, 수문해석을 위한 수문시스템은 강우를 입력자료로 이용하여 홍수 및 가뭄 등의 수문해석을 정량적으로 산정하는 일련의 과정을 의미한다. 강우량은 최초의 입력자료로서 그 영향이 수리·수문 시설 규모에 직접적으로 영향을 미치게 된다. 그러나 우량계를 이용한 관측에 있어 실제 강우량과 우량계에 측정되는 관측강우량의 차이는 우량계 개구부의 크기, 방향, 돌출정도, 바람(풍속)효과, 주변시설물과의 이격거리, 증발 등의 다양한 인자에 의해 영향을 받는다(Dingman, 1994). 우리나라의 경우 특히 하절기인 6~8월에 발생하는 열대성저기압 혹은 태풍 등에 의한 강수는 강한 바람을 동반하게 되는 경우가 대부분이다. 또한, 자동우량경보시설과 같이 강우의 규모만을 이용하여 경보를 발령하는 경우, 대부분의 우량계 설치 위치가 산악으로 이는 평탄한 지역과는 다른 환경조건에 직면하게 된다. 즉, 바람의 규모에 따라 측정된 강우량과 실제 발생된 강우량의 규모는 상이할 것이다. 그럼에도 불구하고 바람의 속도, 즉 풍속에 따른 감소효과에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

기존의 강우량 측정에 관한 연구내용은 다음과 같다. Huff(1955)는 우량계 개구부의 직경이 약 30mm (면적인 경우 700mm^2)이상이어야 한다고 주장했다. 그러나, Brakensiek 등(1979)은 이보다 큰 경우에는 대부분의 경우 개구부의 직경은 강우량의 관측결과에 영향을 미

치지 않으나, 작은 직경을 갖는 우량계를 이용하는 경우에는 제작시 작은 오차에도 큰 영향을 미치므로 제작시 체적 혹은 무게를 이용하여 검증되어야 하며, 증발의 영향을 감소시키기 위해서는 자주 관측되어야 한다고 하였다. 또한 바람과 식생피복이 강우측정시 일관성에 영향을 미치는 인자라고 주장하였다.

Larson과 Peck(1974)은 많은 문헌을 조사하고 바람에 대한 강우 감소율 관계를 그래프로 제안하였다. 이 연구에서 방풍장치는 눈에 대해서는 효과적이나 비에 대해서는 효과가 거의 없음이 밝혀졌다. 이 결과는 지면에 돌출된 우량계의 경우 강수는 10%, 강설은 30%의 감소율을 보이는 것으로 제안되었다. Neff(1977)는 대기중에 노출된 표준형이 매립형과 비교하여 5~15%정도 감소하는 것을 발견하였으나 바람과 감소율과의 관계를 수립할 수 있는 일관성은 없는 것으로 나타났다.

Helvey와 Patric(1983)은 풍속이 Neff(1977)의 실험보다 작은 것으로 예상되는 숲에 위치한 표준형 우량계에서 2.3~3.4%의 감소가 있음을 보고하였다. Brakensiek 등(1979)은 우량계 설치에 적절한 곳은 근처에 비교적 균일한 나무, 잡목, 담 혹은 바람의 효과를 감소시킬 수 있는 트인 공간이어야 하며 지면을 기준으로 45° 의 공간에는 장애물이 없어야 한다고 보고하였다. 즉, 독립적으로 위치한 나무, 건물, 담 혹은 와류를 발생시킬 수 있는 구조물은 관측값을 감소시킬 수 있다고 보고하였다. Guo 등(2001)은 기존의 연구결과를 이론식을 이용하여 바람의 영향을 수학적으로 증명하였다.

본 연구에서는 바람에 의한 우량계 관측자료의 변동성을 분석하고자 한다. 따라서, 우량관측시 영향을 미치는 바람에 의한 우량 감소효과를 실험을 통하여 산정하였다. 그러나, 강우나 바람은 자연적 현상으로 실험에 필요한 결과를 얻기 위해서 실내 실험을 통하여 그 효과를 추정하였다. 또한 바람에 의한 강우감소율을 기존의 실험 및 문헌 등을 바탕으로 정리하여 이론식에 의한 감소율을 산정하여 그 결과를 실험에 의한 실측값과 비교하여 실험의 타당성을 검증하였다. 실험실내에서 자연현상을 그대로 재현해 내는 것은 물리적으로 불가능하나 가장 유사한 조건이 되도록 실험을 수행하였으며 그 결과를 이론식과 비교하여 실험의 적정성을 확인할 수 있었다. 또한 연구결과는 강우량 자료의 일관성을 유지할 수 있는 체계적인 방법으로 사용 가능할 수 있다고 판단된다.

2. 이론식에 의한 풍속에 따른 강우감소율 산정

2.1 강우의 낙하속도

낙하하는 강우입자에는 3개의 힘이 작용한다. 자중에 의해 발생하는 중력방향의 힘 F_g , 강우입자 배제하는 공기에 의한 부양력 F_b , 강우와 공기사이에 발생하는 항력 F_d 이다. 만약에 강우가 직경이 D 인 구형이라면, 체적은 $(\pi/6)D^3$ 이며 작용하는 중력의 크기는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다(Chow 등, 1988).

$$F_g = \rho_w g \left(\frac{\pi}{6}\right) D^3 \quad (1)$$

여기서 ρ_w 는 물의 밀도이다. 또한 부양력은 식(2)와 같다.

$$F_b = \rho_a g \left(\frac{\pi}{6}\right) D^3 \quad (2)$$

여기서 ρ_a 는 공기의 밀도이다. 또한 항력은 다음 식(3)과 같다.

$$F_d = C_d \rho_a A \frac{V^2}{2} \quad (3)$$

여기서 C_d 는 무차원항력계수이고, A 는 강우입자의 투영면적이며, v 는 낙하속도이다. 강우가 응집하여 입자의 형태로 낙하를 시작하면 강우입자는 종말속도(terminal velocity) V_t 에 도달할 때까지 가속하게 된다. 이때는 3개의 힘이 균형을 이루게 되며, 이는 다음 식(4)와 같이 표현된다.

$$F_d = F_g - F_b \quad (4)$$

따라서, $v = V_t$ 로 가정하면 항력은 다시 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_d = C_d \rho_a A \frac{V_t^2}{2} = \rho_w g \left(\frac{\pi}{6}\right) D^3 - \rho_a g \left(\frac{\pi}{6}\right) D^3 \quad (5)$$

따라서, 이를 종말속도로 정리하면 식(6)과 같다.

$$v = \left[\frac{4gd}{3C_d} \left(\frac{\rho_w}{\rho_a} - 1 \right) \right]^{1/2} \quad (6)$$

식(6)은 강우의 입자가 1mm 이하의 구형인 경우에

적절하다. 이 크기 이상에서는 강우입자의 바닥이 평평해져 투영면적이 넓어진다. 따라서, 이는 실제 강우의 직경과 같은 체적을 차지하는 강우의 체적에 대한 상당 직경으로 변환되어야 한다(Pruppacher와 Klet, 1978). 강우입자는 6mm까지 존재가능하나, 강우강도가 작은 경우에는 3mm이상은 거의 발생하지 않는다(Chow 등, 1988). 직경 0.1mm 이하의 작은 강우입자의 경우에는 항력은 Stokes의 법칙에 따르게 되며 이때 항력계수 $C_d = 24/Re$ 이다. Re 는 Reynolds 수로 $\rho_a v D / \mu_a$ 이며, μ_a 는 공기의 점성계수이다. Stokes의 법칙에 적용되지 않는 범위에서의 항력계수 및 종말속도는 다음 표 1 및 그림 1과 같다. 일반적으로 강우의 종말속도는 입자크기가 5mm에 이르면 9.07m/s에 수렴하게 된다(Chow 등, 1988).

2.2 바람에 의한 강우감소 효과 산정 기법

우량계에 대한 바람의 영향은 강우입자의 종말속도가 45° 방향으로 유입하는 것으로 종종 가정된다. 실제적으로 그림 2와 같이 강우입자의 낙하방향은 강우 벡터에 영향을 미치는 속도성분에 따라 결정된다(Guo 등, 2001).

그림 2에서의 강우입자의 낙하시의 속도 벡터와 각도를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\vec{V} = u\mathbf{i} + v\mathbf{j} \quad (7)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{v}{u} \right)$$

여기서 \vec{V} 는 강우입자의 속도이며 u 는 속도의 수평방향성분, v 는 속도의 연직방향성분, 그리고 θ 는 입사각이다. 또한 강우 입자의 낙하시의 상대운동 속도를 그림으로 나타내면 그림 2와 같다. 강우입자의 연직방향 종말속도(terminal velocity) v 는 식(6)에서 유도되었다.

강우입자의 종말속도는 강우입자의 직경이 증가함에 따라 증가하나 강우입자의 직경이 5mm이면 9.07m/s로 일정해진다. 강우의 평균직경은 약 2mm이며 이때의 낙하속도는 약 6.48m/s이다.

강우입자의 궤적은 또한 바람에 의해 영향을 받는다. 난류경계면에 위치한 지배적인 바람의 방향은 지면과 평행하며 연직방향 속도분포는 식(8)과 같다

$$U = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{Y}{Y_0} \right) \quad (8)$$

표 1. 강우입자 직경에 따른 항력계수 및 종말속도 (압력 1013Pa, 온도 20 °C)

입자직경 D(mm)	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
항력계수 C_d	4.2	1.66	1.07	0.82	0.67	0.52	0.50	0.56	0.66
종말속도(m/sec)	0.72	1.62	2.47	3.27	4.02	6.48	8.05	8.81	9.07

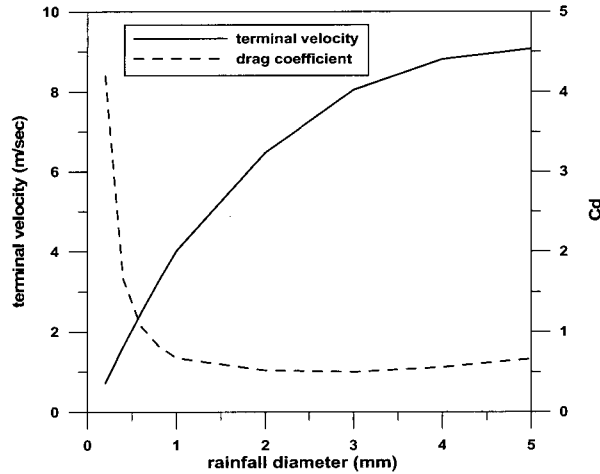


그림 1. 강우입자 직경에 따른 항력계수 및 종말속도

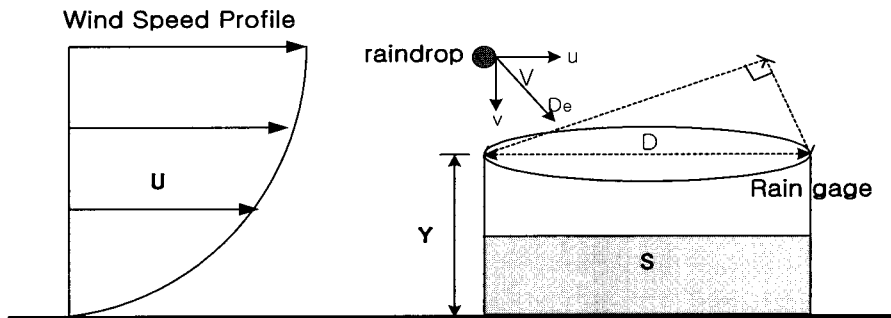


그림 2. 풍속의 영향에 따른 우량계 주변의 강우

여기서 U 는 지면으로부터 Y 위치에서의 속도이며 u_x 는 전단속도, x 는 von Karman의 우주상수, 그리고 Y_0 는 지면에서의 조도이다. 위 식(8)을 자연대수에서 상용대수로 변환하여 정리하면 식(9)로 나타낼 수 있다.

$$U = m \log Y + n \quad (9)$$

여기서 n 과 m 은 연직방향의 난류에 따른 경험상수이다. 단순화된 식의 장점은 n 과 m 을 산정하기 위해

연직방향으로 2개 지점의 풍속만 측정하면 된다. 예를 들어 n 의 값은 수치적으로 지면 1ft에서의 풍속이라면 n 과 m 의 합은 지면 10ft에서의 풍속과 동일하다. 동일하게 지면으로부터 1m와 10m에서의 풍속은 metric 시스템에서 적용될 수 있다.

난류혼합과정에서 강우의 횡방향 거동은 공기의 속도에 의해 결정된다. 공기의 흐름과 강우입자간의 모멘텀 변화는 매우 복잡하다. 그림 3에서 보는 바와 같이

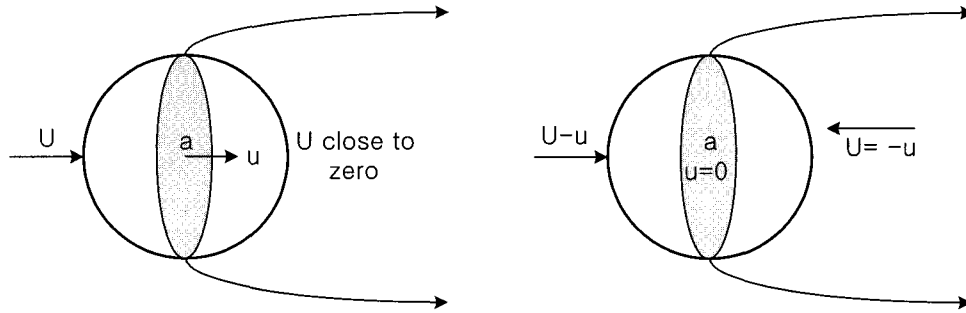


그림 3. 강우입자의 상태운동 속도

강우에 대한 공기흐름의 상대적 거동은 흐름영역에 대한 강우입자의 (-) 방향 수평방향 속도 성분을 더함으로써 얻어질 수 있다.

강우입자에 대한 공기흐름의 모멘트가 수평방향 항력과 같다는 가정(Liggett, 1994) 아래 수평방향에 대한 강우입자의 평형조건은 다음과 같다.

$$\rho_a a (U-u)^2 = C_d \frac{\rho_a u^2}{2} a \quad (10)$$

여기서 a 는 강우의 투영면적이다.

위 식(10)을 다시 정리하여 나타내면 식(11)과 같다.

$$u = \frac{1}{(\sqrt{0.5C_d} + 1)} U = KU \quad (11)$$

여기서 K 는 수평방향 속도비이다.

예를 들어 $C_d = 0.67$ 이면 K 는 0.63 이다. 따라서 우량계로 유입하는 강우입자의 낙하속도는 다음 식(12)와 같다.

$$\vec{V} = ui + vj = KUi + vj \quad (12)$$

따라서, 낙하속도 V 는 식(13)과 같다.

$$V = [\vec{V}] = \sqrt{K^2 U^2 + v^2} \quad (13)$$

강우의 우량계 유입비율은 강우입자의 입사각과 우량계 상단에 위치한 식생 등의 장애물에 의하여 영향을 받게 되나, 우량계 상단의 장애물을 제거한다면 실제적으로 가장 큰 영향을 미치는 인자는 강우입자가 입사하는 유효직경 D_e 이다.

$$D_e = (1-k)D \sin \theta \quad (14)$$

여기서 k 는 우량계의 유효단면을 감소시키는 식생유효계수이며, D 는 우량계의 직경이다. 식생유효계수는 아무런 영향이 없는 경우는 0이며 완전히 덮여있는 경우에는 1이다.

결과적으로 강우입자가 우량계로 떨어질 때의 우량계 유효면적 A_e 는 다음 식(15)와 같다.

$$A_e = \frac{\pi [(1-k)D \sin \theta]^2}{4} = A [(1-k) \sin \theta]^2 \quad (15)$$

여기서 A 는 우량계의 개구면적이다.

강우지속시간동안 포집되는 강우의 체적 S 는 다음 식(16)과 같다.

$$S = CVA_e T_d \quad (16)$$

여기서 C 는 강우입자의 공간적 밀도이며 T_d 는 강우의 지속시간이다. 강우는 연속적으로 우량계로 유입하지 않으므로 C 값은 강우의 강도를 의미한다.

강우지속시간 T_d 동안의 평균강우강도 I 는 식(17)과 같이 표시된다.

$$I = \frac{S}{AT_d} = CV \frac{A_e}{A} = CV \left(\frac{D_e}{D} \right)^2 = CV [(1-k) \sin \theta]^2 \quad (17)$$

C 값은 강우강도와 강우입자의 낙하속도가 측정되었을 때 식(17)을 이용하여 산정이 가능하다.

우량계의 감소비율은 우량계에 바람이 불지 않고 식생의 영향도 없다면 $u=0$, $k=0$, 그리고 $\theta=90^\circ$ 가 되면 식(18)~(19)이 성립된다.

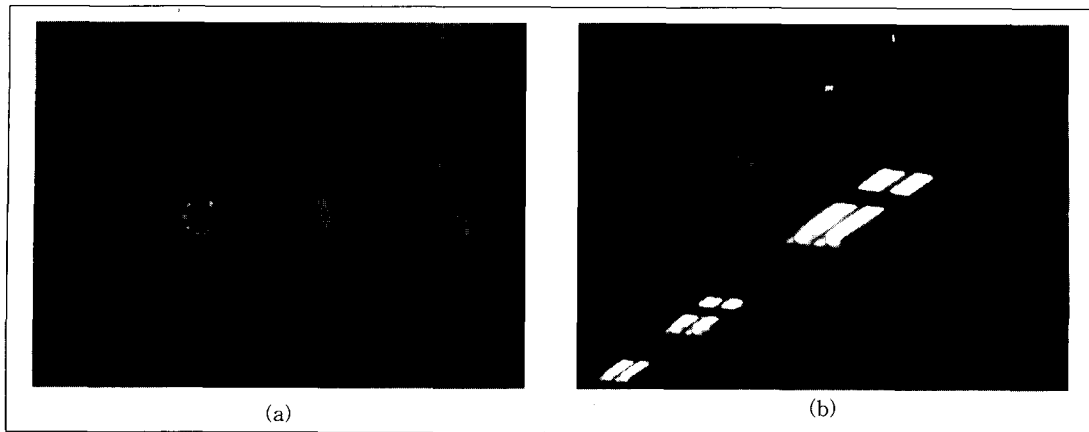


그림 4. 노즐을 이용한 강우발생 장치

$$V_0 = v \quad (18)$$

$$I_0 = CV \quad (19)$$

이때 V_0 와 I_0 가 참값이라고 가정하면 강우포착율 R 은 다음 식(20)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{I}{I_0} = \frac{V}{v} [(1-k) \sin \theta]^2 \quad (20)$$

즉, 따라서 강우감소율은 $r = 1 - R$ 로 나타낼 수 있다.

3. 실험에 의한 풍속에 따른 강우감소율 산정

3.1 실험실 구성

실험실은 크게 강우발생장치(rainfall generator)와 바람발생장치(wind blower) 2개의 부분으로 구성되어 있다. 그러나, 자연현상인 강우와 바람은 실제 대 규모로 발생하므로 실험실에서 재현하는 경우에는 규모의 감소로 인한 영향(scale effect)이 최소화 되도록 실험실을 구성하였다.

3.2 강우 및 바람 발생장치

강우라 함은 구름이 응결핵을 만나 지상으로 떨어지는 물덩어리를 의미한다. 또한, 우량계로 포착되는 강우는 횡방향(lateral direction) 풍속과 강우의 종말속도(terminal velocity)의 벡터합과 입사각의 합으로 결정되므로 강우의 입자크기는 중요한 인자이다. 일반적으로 강우의 입자크기는 0.2mm~5mm에서 발생하는

것으로 조사되었다.

강우의 직경은 실제 우량계를 이용한 강우 측정시 바람과 함께 중요한 영향인자이다. 실험실에서 강우를 발생하기 위해서는 분사 노즐(nozzle)을 사용하는 것이 가장 효율적이며 노즐에 의한 강우발생은 노즐을 통과한 물입자의 운동에너지에 의한 모멘텀이 발생이 최소화 되도록 구성되어야 한다. 실험에 사용된 콘형 노즐에 의한 강우의 직경은 0.5mm 이다.

실험은 바람에 의해 발생하는 우량계의 포착율 감소를 측정하는 것이며 강우의 발생은 매우 중요한 인자이다. 바람이 발생하는 경우 풍속이 커짐에 따라 강우 입자는 풍속방향으로 밀려나게 되며 공간적으로 밀려나가는 거리보다 먼 거리까지 강우가 발생되도록 노즐을 설치하였으며 또한 강우의 강도는 실험실내에서는 공히 동일하도록 하였다. 강우의 강도는 1시간당 최소 84mm~최대 228mm 까지 발생가능 하였다. 그림 4는 실험에 사용한 노즐 및 강우발생 장치를 나타내었다.

바람은 기압의 차이로 인해 발생하는 공기의 흐름이다. 실제 강우시에는 바람의 방향 즉, 풍향과 풍속이 연속적으로 변화하게 된다. 그러나, 본 연구에서는 바람의 규모에 의한 강우의 관측값의 변동성을 연구하는 것이므로 일정한 강우강도가 계속되고 이때, 바람의 풍속도 일정하게 유지하여 풍속에 의한 포착율을 측정하였다. 바람을 이용한 실험을 위해서는 풍동(wind tunnel)을 사용하는 것이 일반적이다. 이는 바람의 꼬임(swirl), 종방향과 횡방향의 변동성을 최소화하기 위해서이다. 그러나, 강우발생장치를 풍동의 시험대(test section)에 삽입할 수 있을 정도의 풍동을 구하는 것은 국내 실험에서는 불가능하다. 따라서, 본 연구에서는 회전형 프로

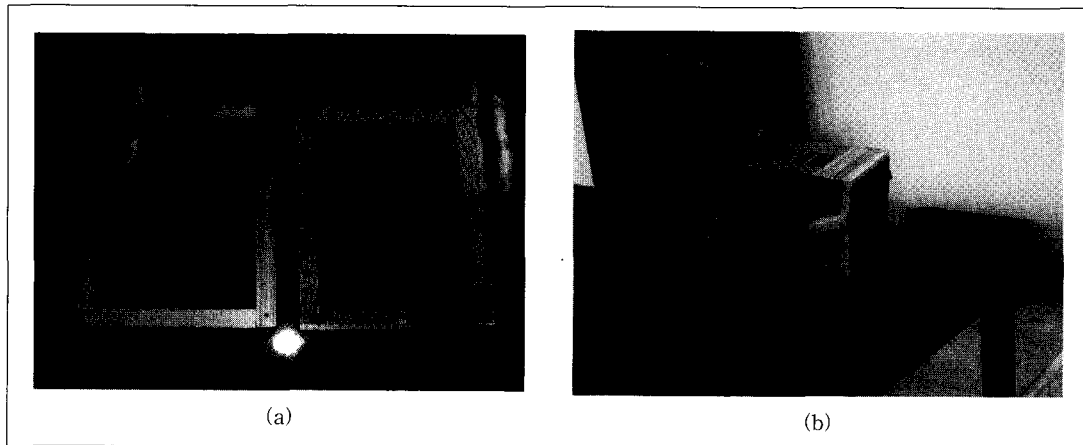


그림 5. 바람발생 장치

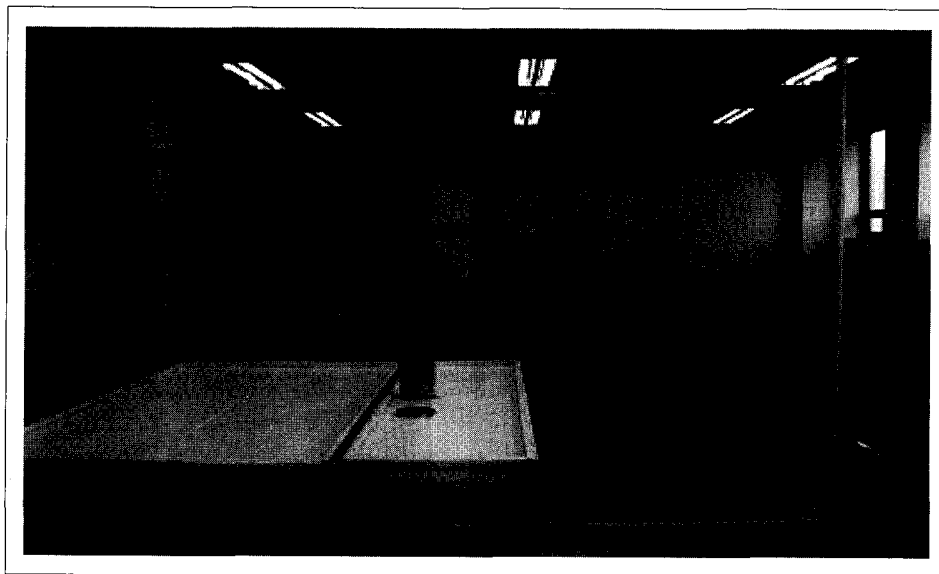


그림 6. 전체 실험장치 구조

펠러가 아닌 원통형 임펠러를 가진 시로코 블로워어를 사용하고 팬 앞에 덕트(duct)와 정류판을 4열로 설치하여 자연적인 바람과 유사한 조건이 되도록 하였다.

그림 5-a는 일정한 바람을 위해 덕트(duct)를 만들기 위한 철사로 구성된 망을 만들기 위한 준비과정이며, 그림 5-b는 바람발생을 위한 블로워어이다. 본 실험에서 사용된 바람발생장치는 전압을 일정하게 유지할 수 있도록 전압유지장치를 연결하였으며, 실험 전후에 무강우 조건에서 풍속을 측정하였다. 풍속은 최소 0m/sec ~ 10m/sec까지 발생가능 하였으며, air pitot

tube를 이용하여 측정하였다.

3.3 실험방법 및 내용

3.2절에서 설명한 바람발생장치 및 강우발생장치를 이용한 전체 실험은 시간에 의한 영향을 최소화하기 위해 강우강도 및 풍속별로 1시간을 기준으로 수행하였으며, 실험실의 전체 구조는 그림 6에 나타내었다.

실험 방법 및 내용은 다음과 같은 순서로 수행하였다.

- (1) 우량계를 강우발생장치부터 2.5m 아래에 설치한다.

이때 주위 할 점은 노즐에 의한 인공강우는 압력에 의한 속도를 가지고 있으므로 자연강우와 동일하게 중력에 의한 낙하를 만들기 위해서는 바로 아래가 아닌 노즐의 위치를 45°로 분사 할 수 있게 고정하였다.

(2) 강우발생장치를 이용한 인공강우를 발생시킨다.

강우 발생량은 노즐과 밸브를 이용하여 바람의 영향이 없는 조건에서 5가지 강우강도 조건으로 만든다. 즉, 함몰식과 돌출식의 2가지 우량계를 이용하여 노즐에 의해 발생하는 인공강우에 의해 228mm/hr, 186mm/hr, 150mm/hr, 120mm/hr, 84mm/hr의 각각의 5가지 인공강우를 설정하였다. 먼저 바람을 발생시키지 않고, 강우를 발생시켜 1시간동안 우량계를 이용하여 1분단위의 강우량값을 측정하였다. 또한, 우량계의 위치를 변화시켜 5회 반복하여 총 10개의 강우량값이 동일하도록 노즐을 수정하였다.

(3) 바람발생장치를 이용하여 5개 조건에 의해 바람을 발생시킨다.

그림 5에서처럼 바람발생장치를 이용하여 우량계의 유입부의 풍속을 기준으로 바람을 5개 조건으로 수행하였다.

(4) 바람의 영향에 의한 강우감소율을 측정한다.

바람발생장치에 의해 조정된 바람을 고정하고, 5가지 강우강도별 강우의 감소율을 측정하였다. 이때 각각의 실험은 시간에 따른 영향을 배제할 수 있도록 1시간 단위로 수행하였다. 따라서 실험은 강우강도 5가지 조건과 풍속 6가지 조건을 조합하여 총 30개에 대해 수행하였다.

4. 적용 및 결과

4.1 이론식의 적용 및 결과

이론식을 바탕으로 강우의 직경 및 풍속에 따른 강우낙하속도, 강우의 입사각을 고려한 낙하속도, 입사각, 유효직경, 포착율, 감소율을 대표적인 강우의 직경인 2mm에 대해 산정하여 다음 표 2에 나타내었다. 또한 표 2의 계산식을 이용하여 강우입자 직경 0.2~3.0mm 까지 다양한 직경에 대해 풍속에 따른 감소율을 표 3 및 그림 7에 나타내었다. 직경 5mm 규모의 강우가 발생하는 경우에는 바람에 의한 영향은 직경 0.2mm 규모의 강우가 발생하는 경우에 비하여 강우감소율은 5배 정도 차이가 발생한다.

4.2 실험결과

바람의 영향에 의한 강우량의 감소율을 5가지 강우강도에 대하여 실험하였다. 강우강도의 조건별 강우량 감소율은 다음 표 4에 나타내었다.

실험결과에서 강우강도와 관계없이 대부분 비슷한 감소율을 나타내었다. 이는 강우의 감소율은 풍속의 영향이 중요하며, 강우강도되는 거의 연관성이 없음을 알 수 있었다.

그림 8-(a)는 표 4의 강우강도 조건 5가지에 대한 각각의 감소율을 보여주고 있다. 또한 그림 8-(b)는 전체 5가지 실험으로 회귀분석을 유추한 것으로 다차항식을 선정하였다. 이때 2차 함수를 적용한 감소율 곡선은 상관계수 $R=0.97$ 로 그림 8-(b)의 실선으로 나타내었으며 이론식 계산에 의한 점선의 감소율 곡선과도 매우 유사하게 나타나고 있다.

4.3 이론식 및 실험 결과 비교

실험실에서 실제 자연현상을 재현하는 것은 불가능하나 시간적, 공간적 제한을 실험의 목적에 따라 제한하여 의도하는 결과를 확인할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 풍속에 의한 강우량의 감소율을 검토하였다. 즉, 수평방향의 풍속에 따른 감소율을 이론식 및 실험결과와 비교하였다.

실험 조건에서 분사 노즐에 의한 인공강우의 직경은 0.5mm이다. 또한, 온도가 20°C, 기압이 1013pa일 때 물의 밀도는 $\rho_w = 998\text{kg/m}^3$, 공기의 밀도는 $\rho_a = 1.2\text{kg/m}^3$ 이다. 이 조건에서 강우의 항력계수는 $C_d = 1.365$, 강우의 입자직경이 0.5mm일 때 강우낙하 속도는 식 (6)에 의해 1.99m/sec이다. 이를 이론식에 강우강도별 풍속별 강우감소율을 산정하여 실험에서 구한 강우감소율과 비교하여 표 5에 나타내었다. 이론식과 실험결과에 따른 강우감소율의 오차 범위는 0.3~18.4%를 나타내고 있다.

본 연구에서 실시한 실험 결과인 그림 8-(b)와 이론식을 바탕으로 강우의 직경에 따른 감소율을 나타낸 그림 7의 직경 0.5mm 인 경우의 결과가 거의 유사하게 나타났다. 실험결과 그림 8-(a)에서는 다양한 강우강도별 강우의 풍속에 따른 감소율의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

따라서 풍속에 의한 강우의 감소율은 강우강도보다는 강우의 직경에 의해 산정 될 수 있을 것으로 판단된다. 따라서, 일반적으로 발생하는 강우의 직경이 2mm

표 2. 강우의 직경 2mm에 대한 풍속에 따른 감소율

풍속 (m/sec)	강우의 낙하속도 (m/sec)	강우의 입사각을 고려한 낙하속도 (m/sec)	입사각 (°)	우량계 직경 (m)	유효직경 (m)	포착율 (%)	감소율 (%)
0.25	6.48	6.49	87.79	0.20	0.200	99.93	0.07
0.50	6.48	6.50	85.59	0.20	0.199	99.70	0.30
0.75	6.48	6.53	83.40	0.20	0.199	99.34	0.66
1.00	6.48	6.56	81.23	0.20	0.198	98.83	1.17
1.25	6.48	6.60	79.09	0.20	0.196	98.19	1.81
1.50	6.48	6.65	76.97	0.20	0.195	97.43	2.57
1.75	6.48	6.72	74.89	0.20	0.193	96.54	3.46
2.00	6.48	6.78	72.86	0.20	0.191	95.56	4.44
2.25	6.48	6.86	70.86	0.20	0.189	94.47	5.53
2.50	6.48	6.95	68.91	0.20	0.187	93.30	6.70
2.75	6.48	7.04	67.01	0.20	0.184	92.06	7.94
3.00	6.48	7.14	65.17	0.20	0.182	90.75	9.25
3.25	6.48	7.25	63.38	0.20	0.179	89.40	10.60
3.50	6.48	7.37	61.64	0.20	0.176	88.00	12.00
3.75	6.48	7.49	59.95	0.20	0.173	86.56	13.44
4.00	6.48	7.62	58.33	0.20	0.170	85.11	14.89
4.25	6.48	7.75	56.75	0.20	0.167	83.63	16.37
4.50	6.48	7.89	55.24	0.20	0.164	82.15	17.85
4.75	6.48	8.04	53.77	0.20	0.161	80.67	19.33
5.00	6.48	8.19	52.36	0.20	0.158	79.19	20.81
5.25	6.48	8.34	51.00	0.20	0.155	77.71	22.29
5.50	6.48	8.50	49.69	0.20	0.153	76.26	23.74
5.75	6.48	8.67	48.43	0.20	0.150	74.81	25.19
6.00	6.48	8.83	47.22	0.20	0.147	73.39	26.61

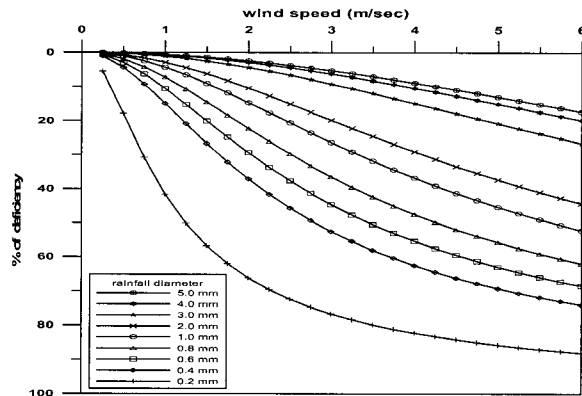


그림 7. 강우 직경별 풍속에 따른 감소율

표 3. 강우 직경별 풍속에 따른 감소율 (%)

직경 (mm) \n 풍속 (m/sec)	0.20	0.40	0.5	0.6	0.8	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
0.25	5.54	1.17	0.78	0.51	0.29	0.19	0.07	0.05	0.04	0.04
0.50	17.89	4.46	3.00	1.99	1.15	0.76	0.30	0.19	0.16	0.15
0.75	30.78	9.27	6.40	4.32	2.54	1.69	0.66	0.43	0.36	0.34
1.00	41.61	14.93	10.60	7.32	4.38	2.95	1.17	0.76	0.64	0.60
1.25	50.12	20.86	15.26	10.79	6.61	4.50	1.81	1.18	0.99	0.94
1.50	56.76	26.66	20.07	14.54	9.13	6.30	2.57	1.69	1.42	1.34
1.75	61.98	32.11	24.82	18.42	11.86	8.30	3.46	2.28	1.91	1.81
2.00	66.16	37.10	29.38	22.30	14.72	10.45	4.44	2.95	2.48	2.34
2.25	69.55	41.62	33.66	26.10	17.65	12.72	5.53	3.69	3.10	2.94
2.50	72.35	45.67	37.63	29.74	20.60	15.06	6.70	4.50	3.79	3.59
2.75	74.70	49.29	41.28	33.20	23.51	17.44	7.94	5.37	4.54	4.30
3.00	76.68	52.53	44.63	36.46	26.36	19.83	9.25	6.30	5.33	5.06
3.25	78.39	55.43	47.69	39.52	29.12	22.20	10.60	7.27	6.17	5.86
3.50	79.87	58.04	50.48	42.37	31.78	24.55	12.00	8.29	7.05	6.70
3.75	81.16	60.38	53.03	45.02	34.33	26.84	13.44	9.35	7.98	7.58
4.00	82.30	62.50	55.37	47.49	36.76	29.08	14.89	10.45	8.93	8.50
4.25	83.31	64.42	57.51	49.78	39.07	31.25	16.37	11.57	9.92	9.44
4.50	84.22	66.16	59.47	51.91	41.26	33.34	17.85	12.71	10.93	10.41
4.75	85.03	67.76	61.28	53.89	43.35	35.36	19.33	13.88	11.96	11.41
5.00	85.76	69.21	62.94	55.73	45.32	37.30	20.81	15.05	13.01	12.42
5.25	86.43	70.55	64.48	57.45	47.18	39.17	22.29	16.24	14.08	13.45
5.50	87.03	71.78	65.90	59.06	48.94	40.95	23.74	17.43	15.15	14.49
5.75	87.59	72.91	67.22	60.55	50.61	42.66	25.19	18.63	16.24	15.54
6.00	88.10	73.96	68.45	61.95	52.19	44.30	26.61	19.82	17.33	16.59

표 4. 강우강도별 바람에 의한 강수량 감소율

강우강도 84(mm/hr)	풍속(m/sec)	0.0	1.5	2.3	3.4	4.2	5.3
	강수량(mm)	84	78	60	42	36	30
	포착율(%)	100	93	71	50	43	36
	감소율(%)	0	7	29	50	57	64
강우강도 120(mm/hr)	풍속(m/sec)	0.0	1.4	2.3	3.5	4.3	5.5
	강수량(mm)	120	102	84	60	54	42
	포착율(%)	100	85	70	50	45	35
	감소율(%)	0	15	30	50	55	65
강우강도 150(mm/hr)	풍속(m/sec)	0.0	1.5	2.2	3.0	4.0	5.0
	강수량(mm)	150	126	108	96	72	60
	포착율(%)	100	84	72	64	48	40
	감소율(%)	0	16	28	36	52	60
강우강도 186(mm/hr)	풍속(m/sec)	0.0	1.3	2.8	3.5	4.8	5.5
	강수량(mm)	186	156	114	90	78	72
	포착율(%)	100	84	61	48	42	39
	감소율(%)	0	16	39	52	58	61
강우강도 228(mm/hr)	풍속(m/sec)	0.0	1.5	2.5	3.6	4.5	5.3
	강수량(mm)	228	180	148	102	96	96
	포착율(%)	100	79	63	45	42	42
	감소율(%)	0	21	37	55	58	58

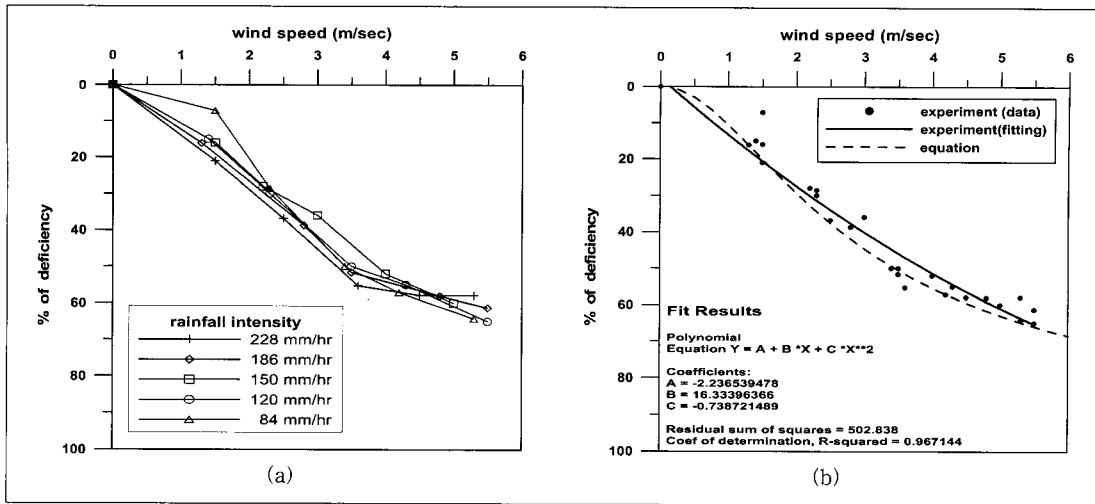


그림 8. 강우강도별 풍속에 의한 강수량 감소율 (강우직경 0.5mm)

표 5. 이론식과 실험값에 의한 강수량의 감소율 비교

구 분		이론식에 의한 결과					실험에 의한 결과				감소율 오차* (%)
강수량 (mm/hr)	풍속 (m/sec)	강우의 입사각을 고려한 낙하속도 (m/sec)	입사각 (°)	유효 직경 (m)	감소율 (%)	측정량 (mm)	추정량 (mm)	포착율 (%)	감소율 (%)		
84	0.0	2.36	90.00	0.20	0	84	84	100	0	0.0	
	1.5	2.80	57.56	0.17	16	71	78	93	7	10.0	
	2.3	3.30	45.74	0.14	28	60	60	71	29	0.3	
	3.4	4.14	34.77	0.11	43	48	42	50	50	12.3	
	4.2	4.82	29.33	0.10	51	41	36	43	57	12.5	
5.3	5.80	24.00	0.08	59	34	30	36	64	12.2		
120	0.0	2.36	90.00	0.20	0	120	120	100	0	0.0	
	1.4	2.74	59.32	0.17	14	103	102	85	15	1.2	
	2.3	3.30	45.74	0.14	28	86	84	70	30	2.3	
	3.5	4.22	33.99	0.11	44	67	60	50	50	10.6	
	4.3	4.91	28.76	0.10	52	58	54	45	55	6.5	
5.5	5.98	23.22	0.08	61	47	42	35	65	11.2		
150	0.0	2.36	90.00	0.20	0	150	150	100	0	0.0	
	1.5	2.80	57.56	0.17	16	103	126	84	16	0.5	
	2.2	3.23	47.01	0.15	27	86	108	72	28	1.6	
	3.0	3.82	38.19	0.12	38	67	96	64	36	3.5	
	4.0	4.64	30.54	0.10	49	58	72	48	52	5.5	
5.0	5.53	25.27	0.09	57	47	60	40	60	6.3		
186	0.0	2.36	90.00	0.20	0	186	186	100	0	0.0	
	1.3	2.69	61.15	0.18	12	163	156	84	16	4.2	
	2.8	3.66	40.13	0.13	36	120	114	61	39	4.9	
	3.5	4.22	33.99	0.11	44	104	90	48	52	13.5	
	4.8	5.35	26.18	0.09	56	82	78	42	58	5.0	
5.5	5.98	23.22	0.08	61	73	72	39	61	1.8		

구 분		이론식에 의한 결과					실험에 의한 결과			감소율 오차* (%)
강수량 (mm/hr)	풍속 (m/sec)	강우의 입사각을 고려한 낙하속도 (m/sec)	입사각 (°)	유효 직경 (m)	감소율 (%)	측정량 (mm)	추정량 (mm)	포착율 (%)	감소율 (%)	
228	0.0	2.36	90.00	0.20	0	228	228	100	0	0.0
	1.5	2.80	57.56	0.17	16	192	180	79	21	6.5
	2.5	3.44	43.35	0.14	31	157	148	63	37	8.0
	3.6	4.30	33.25	0.11	45	125	102	45	55	18.4
	4.5	5.08	27.67	0.09	54	106	96	42	58	9.3
	5.3	5.80	24.00	0.08	59	93	96	42	58	3.5

주) $\frac{\text{이론식측정량} - \text{실험측정량}}{\text{이론식측정량}} \times 100$

표 5. 이론식과 실험값에 의한 강우량의 감소율 비교(계속)

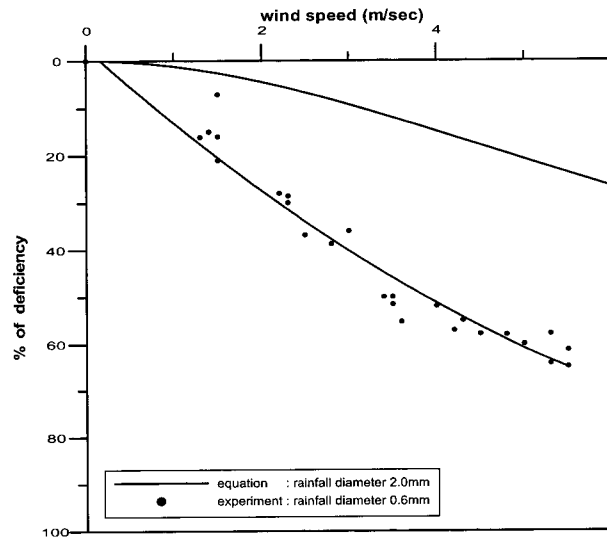


그림 9. 풍속에 따른 강우량 감소율

로 가정한다면 강우의 감소율을 풍속에 의해서만 결정될 수 있다. 강우직경이 2mm 일 때의 강우의 낙하속도는 6.48m/sec 이며 이때의 감소율을 이론식을 이용하여 정리하면 다음 식(21)와 같다. 또한, 그림 9는 강우직경 2mm 일 때의 이론적 감소율과 실제 실험에서 도출된 결과를 나타내었다.

$$\text{강우감소율}(\%) = \left[1 - \frac{v'_t}{v_t} \times \sin^2 \left(\tan^{-1} \left(\frac{v_t}{v_{\text{wind}}} \right) \right) \right] \times 100 \quad (21)$$

여기서, v_t 는 강우 직경에 따른 낙하속도, v_{wind} 는

풍속, $v'_t = \sqrt{v_{\text{wind}}^2 + v_t^2}$ 이다.

5. 결 론

본 연구에서는 풍속에 의해 우량계에 측정되는 강우의 감소율을 모형실험을 통하여 산정하고 이를 이론식에 의한 결과와 비교하였다. 모형실험에 의한 강우의 감소율은 이론식에 의한 결과와 매우 유사한 결과가 도출되었다. 본 연구를 통하여 도출된 결과는 다음과 같다.

- 1) 강우의 감소율은 풍속의 규모가 증가할수록 증가하는 추세를 보이며, 가장 큰 영향인자는 강우의 낙하속도와 풍속의 규모이다.

- 2) 강우의 감소율은 강우강도와는 거의 상관이 없다. 따라서, 단위시간당 발생하는 강우총량보다는 강우의 입자에 의한 영향이 가장 크다.
- 3) 강우발생시 강우의 직경은 0.2~5.0mm 내에서 존재하며 강우의 낙하속도는 최대 9m/sec를 초과하지 않는 것으로 조사되었다. 실제 대부분의 강우발생시 입자의 크기는 약 2mm 내외이며 이때의 강우의 낙하속도는 약 6.48mm 정도인 것으로 산정되었다. 따라서, 가장 일반적으로 발생하는 강우입자 2mm에 대한 감소율은 제안한 식 (21)을 이용하여 산정 할 수 있다.
- 4) 강우의 감소율은 강우의 직경이 2mm인 경우 바람의 규모에 따라 20% 이내로 발생함을 파악 할 수 있었다.
- 5) 실험에 의한 강우감소율은 이론식에 의한 강우감소율과 거의 유사하게 나타나고 있다. 따라서 강우감소율은 강우의 입사각 변화에 따른 유효면적의 감소에 의해 주로 발생함을 알 수 있었다.
- 6) 본 실험에 의한 결과를 이용하여 실제 발생하는 강우자료를 산정할 수 있으며 이를 통한 일관성 있는 강우자료의 축적이 가능하다.

감사의 글

본 연구는 (주)한성전자산업개발에서 지원한 연구과제의 일부로 수행되었다. 본 연구를 진행하는데 도움을 준 최광남 사장, 최영렬 전무께 감사의 뜻을 전한다

참 고 문 헌

- Brakensiek, D. L., Osborn, H. B. and Rawels, W. J. eds. (1979). "Field Manual for Research in Agricultural Hydrology", *Washington DC: Science and Education Administration, U.S. Department of Agriculture.*
- Chow, V. T., Maidment, D. R. and Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*, McGraw-Hill Book Company, pp.64~71.
- Dingman, S. L. (1994). *Physical Hydrology*, Macmillan College Publishing Company, pp. 97~107.
- Guo, J. C. Y., Urbonas, B. and Stewart, K. (2001). "Rain Catch Under Wind and Vegetal Cover Effects", *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 6, No. 1, pp. 29~33.
- Helvey, J. D., and Patric, J. H. (1983). "Sampling accuracy of pit vs. standard rain gage on the Fernow Experiment Forest", *Water Resources Bulletin*, Vol. 19, pp.87~89.
- Huff, F. A (1955). "Comparison between standard and small orifice rain gage", *American Geophysical Union Transactions*, Vol. 36, pp.689~649.
- Larson, L. L., and Peck, E. L. (1974). "Accuracy of precipitation measurements for hydrologic modeling", *Journal of Water Resources Research*, Vol.10, pp.857~863.
- Liggett, J. A., (1994). *Fluid mechanics*, McGraw-Hill, New York.
- Neff, E. L. (1977). "How much rain does a rain gage?", *Journal of Hydrology*, Vol.35. pp. 213-220.
- Pruppacher, H. R., and Klett, J. D. (1978). *Microphysics of Clouds and Precipitation*, D. Reidel, Dordrecht, Holland.

(논문번호:03-08/접수:2003.02.03/심사완료:2003.03.11)