한국농림기상학회지, 제6권 제4호(2004)
Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 6, No. 4, (2004), pp. 211~217

중량식 전도형 우량계를 이용한 강우강도 측정

김현철 · 이부용
대구가톨릭대학교 환경과학과
(2004년 10월 14일 접수; 2004년 11월 5일 수락)

Measurement of Rainfall Intensity Using a Weighting Tipping Bucket Raingauge

Hyun-Chul Kim and Bu-Yong Lee
Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu, Daegu, Korea
(Received October 14, 2004; accepted November 5, 2004)

ABSTRACT

The instrument used in this study consists of a 1kg capacity loadcell and a 1mm tipping bucket rain gauge. There are two signals : one is the weight of the water in the tipping bucket and the other is the pulse from the reversing mechanism of the tipping bucket. The loadcell measures the weight of water with a 0.01mm resolution up to 1mm rainfall and the bucket reverses beyond 1mm. From this point, a pulse signal generates and the loadcell starts measuring the weight again. A field test was carried out with the range of rainfall intensity from 42mm/h to 250mm/h. The result shows an error range from -2.2% to + 2.6% in 12 measurement cases with a rainfall of 100mm or more. This result satisfies the WMO recommendation for rainfall intensity instrumentation which allows a 5% range. In a field experiment during 17 to 19 August, 2004, more than 100mm/h rainfall intensity was observed by this instrument, confirming that our instrument has a sufficient capacity of rainfall intensity measurement under extreme conditions like Jangma (Bai-u season). Compared with existing commercial models which employ a water drop measurement method, our method can give a practical solution for diagnostic check of remote rain gauges using two independent signals.

***Key words* : Instrument, Rainfall, Rain gauge, Tipping bucket, Loadcell**

I. 서 언

인간 활동에 필요한 수자원 공급은 강우 및 강수현상에 의해서 이루어지고 있으며, 세종 23년 (1441년) 측우기의 개발이 세계 최초의 객관적인 우량관측이다. 이때 제작된 우량계는 지금의 우량계와 비교해서 크기와 높이에 차이는 있으나, 객관적으로 우량을 관측한 방법에는 지금의 것과 차이가 없어 큰 의의를 가진다.

수자원을 파악하는데 가장 기본적인 강우관측에 대해서는 세계기상기구 WMO에 의해 규정되고 있는데, WMO(1996)는 우량관측의 최소 단위로 0.2mm를 규정하고 있으며, 0.1mm를 권장하고 있다.

우리나라와 같이 계절별 강우량의 편차가 심하고, 수자원이 세계 평균에 비해 부족한 나라에서는 수자원의 관리 및 연구를 위해 강우의 정확하고 세밀한 관측이 요구되어진다. 한국 기상청에서는 2002년 1월 23일자로 누적 강우 0.5mm 미만은 0.1mm의 우량계로 관측을 하고, 그 이상은 0.5mm 우량계로 관측하게 되어 있어, WMO의 권고 사항을 만족시키지 못하고 있다. 미세 강우와 강우 강도 측정을 위한 강우강도계의 측정 한계는 시간당 100mm로 그 이상의 강우가 내릴 경우도 강우 강도 기록계에는 100mm/h로

Corresponding Author : Bu-Yong Lee (bylee@cu.ac.kr)

만 기록되는 문제점을 가지고 있다. 최근 이상기상 현상으로 시간 당 100mm를 초과하는 강우 현상이 빈번히 발생하고 있어, 정확한 관측에 문제점으로 인식되어 강우 강도에 따른 오차에 대한 연구가 있었다(Woo, 2002; Michel, 2000).

이러한 문제점을 해결하기 위해서 부력을 이용한 강우 관측의 원리를 적용하여 정밀하고 정확하게 200mm 까지의 강우를 관측할 수 있는 우량계가 개발되었다(Lee, 1999). 그리고 측정 강우량의 범위를 1200mm까지 확대한 부력식 우량계가 새롭게 개발되었다(Kim and Lee, 2002). 부력식으로 개발된 우량계의 단점으로는 중량식 우량계와 마찬가지로 그 측정용량이 되었을 때 배수를 해야하는 문제점을 가지고 있어, 현업에 적용하지 못하고 있는 상태이다. Lee(2004)는 이러한 문제점들을 해결한 중량식 전도형 우량계를 개발하여 일본 쯔쿠바에서 시험관측을 하였다. 이 연구에서는 시간당 강우 강도가 100mm를 초과하지 않는 범위에서 실내 검정을 하였으며, 야외관측에서는 이 범위를 초과하지 않았다.

본 연구는 Lee(2004)에 의해 개발된 중량식 전도형 우량계를 이용하여 시간당 100mm 이상의 강우에 대해서 검정을 실시하고, 야외에서도 시간당 100mm가 넘는 강우를 측정하여 현업 적용과 정밀 강우 관측에 대한 가능성을 연구하는 것과 독자적인 우량계 기술을 확보하는 기초 자료를 제공하는 것이 목적이다.

II. 측정 원리와 검정 결과

2.1. 강우와 물리량

우량계는 원통형으로 내부 직경은 0.2m로 되어 있다. 가장자리 부분은 날카로운 edge형으로 정확한 단면적을 계산할 수 있게 제작되어 있다. Table 1은 직경 0.2m의 표준형 우량계의 강우량에 대한 물의 부피와 무게로, 강우 밀도는 1g/cm^{3}로 계산한다. 우량계 직경 0.2m이고, 단면적이 314.16cm^{2}인 우량계에서 100mm 강우량은 무게로 3141.6g, 부피로는 3141.6m*l*가 된다. 따라서 0.01mm의 강우량은 무게로 0.31416g, 부피로는 0.31416m*l*가 된다. 유효자리를 소수 3자리로 할 경우 0.314g 또는 0.314m*l*이 된다.

2.2. 기존 측정원리

강우량을 측정하는 방법에 따라 우량계를 분류해 보면 부피 측정, 무게 측정, 수압 측정, 광선을 이용한 물방울 갯수의 관측, 부력을 측정하는 방법 등이 있다.

Table 1. Weight and volume of water according to rainfall amount.

Rainfall(mm)	Weight(g)	Volume(m*l*)
100	3140	3140
10	314	314
1	31.4	31.4
0.1	3.14	3.14
0.01	0.31	0.314

부피를 측정하는 우량계에는 사이펀형 우량계와 표준형 우량계가 있고, 로드셀을 이용한 무게 측정 방식에는 중량식 우량계와 수정우설량계가 있다. 수압을 이용하는 압력식 우량계, 광선을 이용하는 광학식 우량계가 있으며, 부력을 이용한 부력식 우량계가 있다.

가장 많이 사용하고 있는 전도형 우량계의 경우 강우의 무게에 의한 tipping bucket의 좌·우 전도 운동으로 내부에 설치된 마그네틱 스위치의 전도 횟수로 강우량을 측정하고 있다. 이 측정원리는 안정적으로 강우를 측정할 수 있는 구조이나, 사용되는 우량계의 tipping bucket는 bucket의 용량보다 부족한 강우를 측정하지 못하는 단점을 가지고 있다. 그리고 강우 강도가 계속 증가할 경우 우량계 관측 값에 대한 정확도는 낮아지는 것으로 밝혀졌다(Woo, 2002; Michel, 2000).

일본에서 개발된 수정우설량계의 경우 중량센서에 의해 강우를 측정하고 20mm 강우마다 우량계 내부 수차를 90°씩 강제 회전시켜 배수하는 구조를 가지고 있으며, 로드셀을 이용한 200mm급 중량식 우량계의 경우 200mm가 되면 강제 배수시켜야 하는 문제점이 있다. 또한 바람이 강할 경우 풍압에 의해 하중이 로드셀에 가해지는 구조로 오차가 발생할 수 있다.

Lee type 부력식 우량계의 경우 로드셀을 이용한 중량식 우량계와 마찬가지로 강우를 강제로 배수시켜야 하는 문제점과 항시 일정량의 물이 우량계 내부에 있어야 하는 단점을 가지고 있다(Lee, 1999).

2.3. 중량식 전도형 우량계의 구조

Fig. 1은 중량식 전도형 우량계 구조를 나타내었다. 현재 가장 널리 쓰이고 있는 전도형 우량계와 무게를 측정하는데 사용하는 로드셀을 결합하여 제작하였다. 우량계의 재질은 stainless steel이며, 수수구의 직경은 0.2m, bucket의 용량은 1mm이다(한국 웨덴사 제품).

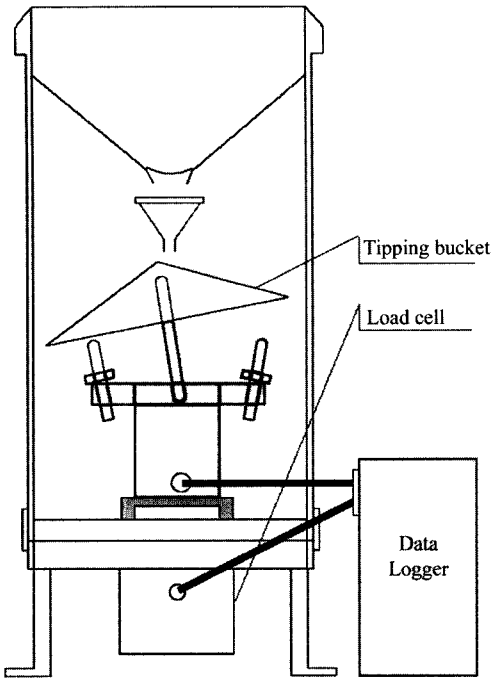

Fig. 1. Schematic diagram of the weighting tipping bucket raingauge.

이 우량계에는 1kg급 로드셀을 적용하여 0.1g까지 측정이 가능하다. 이를 강우량으로 환산할 경우 약 0.003mm에 해당하는 강우량이다.

비가 오는 경우 강우는 수수구에 모여서 tipping bucket으로 떨어진다. 이때 전도형 우량계의 경우 bucket의 용량만큼 강우가 되었을 때 bucket이 전도하면서 마그네틱 스위치를 작동시켜 전접 신호가 발생하여 강우를 측정하는 구조이다. 그러나 중량식 전도형 우량계는 bucket에 강우가 떨어지면 Fig. 1의 하부에 위치한 로드셀이 tipping bucket 전체와 강우 무게를 측정하여, 전도하기 전에도 내부에 모여진 강우량 측정이 가능하다. 또한 1mm급의 대용량 tipping bucket을 사용하여 100mm/h 이상의 강우에도 충분히 측정이 가능한 구조이다.

Fig. 1에서 2개선의 선이 Data Logger에 연결되어 있다. 일반적으로 우량계는 전접 신호 1개 선만 있으나, 중량식 전도형 우량계의 경우엔 로드셀을 이용한 중량측정 신호선이 별도로 있어 2개의 신호선이 사용되며, 이 두 신호선의 신호를 이용하여 강우량을 측정할 수 있게 만든 구조이다.

2.4. 우량계의 실내검정

우량계의 야외 사용에 앞서 충분한 실내 검정을 필요로 한다. 검정에 필요한 강우량은 100mm로 무게로는 3141.5g에 해당한다. 1mm급 전도형 우량계는 100회의 전도를 필요로 한다.

실내 검증의 방법은 100회 전도되었을 때, 우량계로부터 흘러나온 강우의 양을 측정하고, 이렇게 측정된 무게를 다시 강우의 단위인 mm로 환산하였다. 그 환산된 양과 전도된 횟수를 비교하여 그 측정 오차를 산출하였다. 물의 배출량을 조절하여 최저 42.6mm/h에서 최대 250mm/h의 강우 강도에 대해서 검증을 실시하였으며, 총 12회의 작업에서 오차 범위는 ± 2.6% 보다 적게 나왔다.

Table 2는 12회의 결과를 나타낸 표이다. 오차는 강우량 100mm에 대한 오차이다. Table 2의 결과에서 강우 강도가 증가할수록 강우량을 적게 관측하는 음의 방향으로 오차가 점차 증가한다는 것을 알 수 있다. 이 현상은 전도되(tipping bucket)가 전도하는 도중에 강우가 흘러내려 강우가 실제 관측에 사용되지 않은 결과로 나타난다. 이러한 현상은 0.2mm급 전도형 우량계를 사용하여 강우 강도별로 우량계를 검정한 프랑스 기상청의 Michel(2000)의 강우 강도가 증가할수록 음의 방향으로 오차가 증가한다는 연구 결과와 일치하는 것이다.

III. 야외 관측

야외 관측은 경북 경산시 하양읍 금락리에 위치한

Table 2. Test data of raingauge.

No	Rainfall Intensity (mm/h)	Error (mm)	Rate of error(%)
1	250.0	-2.55	2.6
2	206.9	-0.64	0.6
3	187.5	-0.96	1.0
4	181.8	-0.64	0.6
5	92.3	1.59	1.6
6	88.2	0.64	0.6
7	87.0	1.27	1.3
8	84.5	0.96	1.0
9	66.7	1.59	1.6
10	56.6	0.64	0.6
11	48.0	1.91	1.9
12	42.6	2.23	2.2

대구가톨릭대학교 자연관 4층 건물의 옥상에서 관측하였다(Fig. 2 and 3). 관측은 2004년 7월 10일부터 시작하였다. 자료의 기록에는 CR10X datalogger (Campbell Scientific Inc., USA)를 사용하였다. 관측은 매 1초 마다 이루어졌으며, 매 1분 간격으로 로드셀로부터 나오는 중량 신호와 bucket으로부터 나오는 전접 신호를 datalogger에 기록하였다.

관측 기간 중 제 15호 태풍 메기의 영향으로 많은 강우가 집중하여 내렸던 8월 18일과 19일 양일간의 데이터를 분석 자료로 활용하였다. Fig. 4는 8월 17일 24시에서 8월 19일 24시까지로 강우의 누적량을 알아보기 위해 누적 강우량 그래프로 나타내었다. 이 틀간의 총 강우량은 160mm를 기록하였다.

Fig. 5는 같은 기간에 관측된 강우를 세밀하게 그 변화의 패턴을 보고자 1분 단위로 관측된 강우량을 나타내었다.

18일 23시 부근에서 분당 강우량이 2.0mm를 넘었고, 1.0mm가 넘는 시간대도 4번이 관측되었다. 분당 2.0mm의 강우는 강우 강도로 120mm/h이고, 분당 강우량 1.0mm는 60mm/h의 강도이다. 분당 강우량이 1.67mm 이상이면 강우 강도가 100mm/h 이상으로 계산이 된다.

IV. 결과 및 고찰

4.1. 실내 검증 결과

Fig. 2. The weighting tipping bucket raingauge.

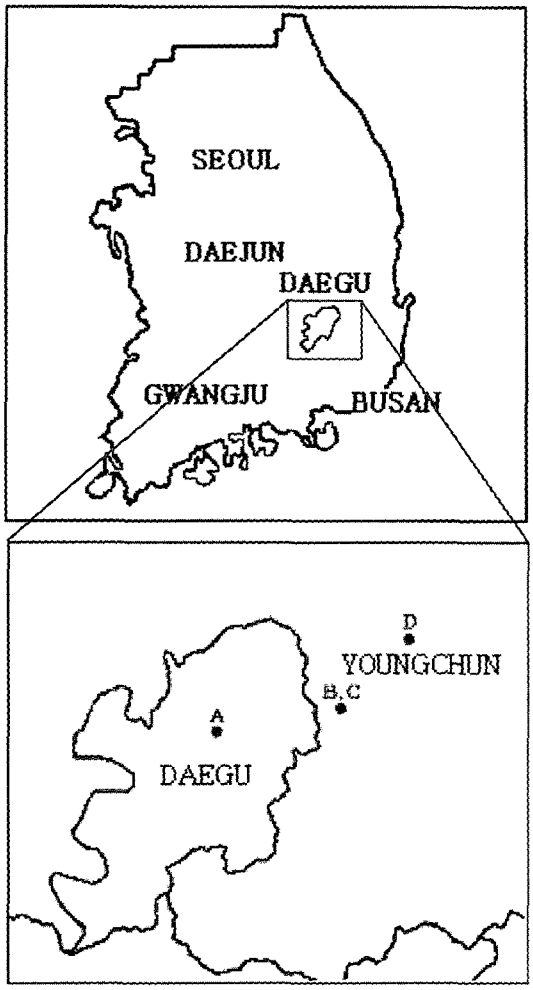

Fig. 3. Rainfall observation stations of this study.
A : DaeGu Weather Station
B : Catholic University of Daegu
C : HaYang AWS
D : YoungChun Observatory

Table. 2는 총 12회의 실내 검증 자료이다. 강우량은 검증 기준량인 100mm를 사용하였다. 12회에 걸친 실내 검증에서 강우 강도는 42.6mm/h에서 250mm/h까지이다. 오차율은 2.6% 이하로 관측되었다. 2.6%의 오차는 현재 기상청에서 요구하는 검정 기준 ±5%보다 적어 현업에 적합한 우량계로 판명되었다.

관측일은 2004년 8월 17일 24시에서 2004년 8월 19일 24시까지로 Fig. 6은 Fig. 5에 나타낸 1분 단위의 데이터에 60을 곱하여 분당 강우 강도(mm/h)로 환산한 그래프이다. 8월 18일 23시 부근에서 1분 단

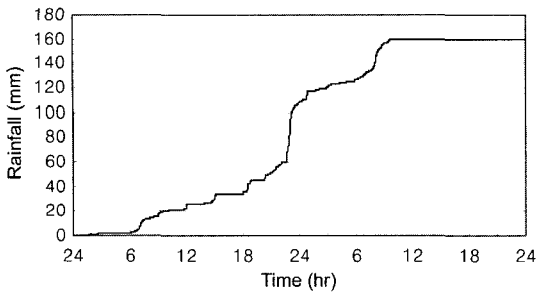

Fig. 4. Accumulated rainfall.

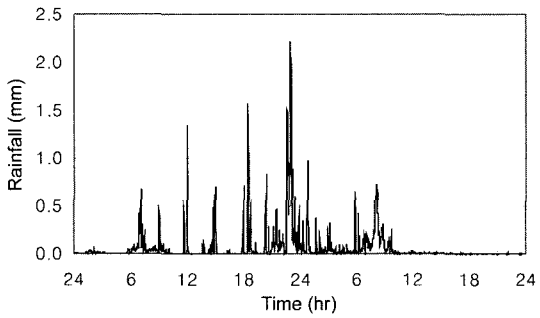

Fig. 5. Distribution of the one minute rainfall amount.

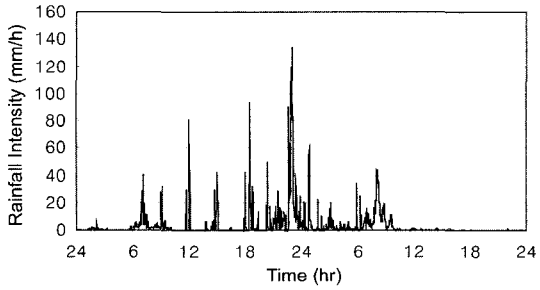

Fig. 6. Distribution of the rainfall intensity calculated from 1 minute rainfall amount.

위의 강우 강도가 130mm/h를 넘는 강우가 연속 관측되어 1분 강우 강도를 관측하고 있는 기상청의 물방울 계수형 강우강도계로는 관측할 수 없는 100mm/h 이상도 관측할 수 있었다.

종합적으로 중량식 전도형 우량계는 WMO의 권고 기준인 0.2mm의 측정도 만족하는 결과를 보여주었고, 전도형 우량계가 가지는 단점 또한 보완한 측기로 강우 관측기로서의 사용에 문제가 없음을 알 수 있다. 또한 짧은 시간의 강우강도를 관측하는 측기로 사용 가능하다는 것을 알 수 있다.

4.2. 1시간 강우 자료의 비교 관측

Fig. 3은 대구기상대(대구광역시 동구 신암1동 716-1)와 영천관측소(영천시 망정동 216-2) 그리고 대구가톨릭대학교(경북 경산시 하양읍 금락리 330번지) 자연관 옥상을 점으로 나타낸 것이다. Fig. 3의 오른쪽의 (A) 지점은 대구기상대이고 지도의 중앙 부분의 (B) 지점은 대구가톨릭대학교, (C) 지점은 하양AWS, 제일 왼쪽 (D) 지점은 영천관측소이다.

대구기상대와 대구가톨릭대학교 간의 직선거리는 약 18km이고 대학교와 영천관측소와의 직선거리는 약 16km가 된다. 하양AWS는 하양읍 사무소의 옥상에 설치되어 있으며 대학교와 직선거리는 약 1km에 위치하고 있다. 하양AWS의 관리는 대구기상대에서 하고 있다.

기상청에서는 1시간 간격으로 강우 자료를 제공하고 있다. 따라서 상세한 강우 패턴은 비교할 수가 없어 중량식 전도형 우량계에서 나온 자료를 1시간 간격으로 바꾸어 비교하여 보았다.

대구기상대는 0.1mm급의 전도형 우량계와 0.5mm급의 전도형 우량계를 같이 사용하고 영천관측소와 하양AWS에서는 0.5mm급의 전도형 우량계만 사용하고 있다.

Fig. 7은 자연관에서 관측된 data에 절편을 0으로 하고 하양AWS에서 관측된 data는 10으로 하고, 영천관측소에서 관측된 data는 20으로 하고, 대구기상대에서 관측된 자료는 30으로 하여 하나의 그래프에 모두 표시하였다.

Fig. 7에서 대구가톨릭대학교는 가장 인접한 곳에 위치한 하양AWS의 그래프와 거의 일치한다. 그러나 동편에 위치한 영천관측소의 경우 그 패턴의 일치도가 하양AWS 보다는 다소 떨어진다. 그러나 서편에 위치한 대구기상대의 경우에는 그 패턴에 많은 차이가 있다. 대구가톨릭대학교, 하양AWS와 영천관측소 데이터에서는 18일 23시 부근에서 강우량의 피크가 관측되었으나, 대구기상대의 데이터에서는 22시와 24시 두 번에 걸쳐서 피크가 관측되었다. 19일 9시 부근에서도 대구가톨릭대학교, 하양AWS, 영천관측소의 데이터는 다시 한번 피크 강우량이 관측되었으나, 대구기상대에서는 피크 강우량이 관측되지 않았다. 이것은 지역에 따라서 강우의 패턴이 달리 나타날 수 있다는 것을 보여 주는 결과이다.

Fig. 8은 8월 18일 23시 정각의 기상청 합성 레이

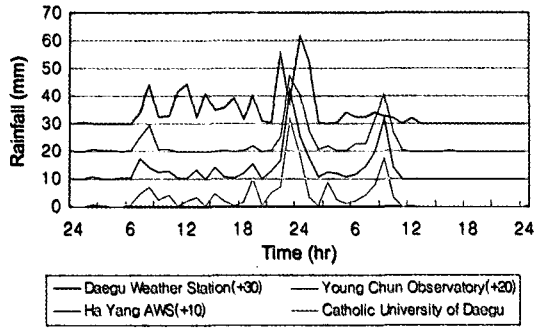

Fig. 7. Time series of hourly rainfall amount.

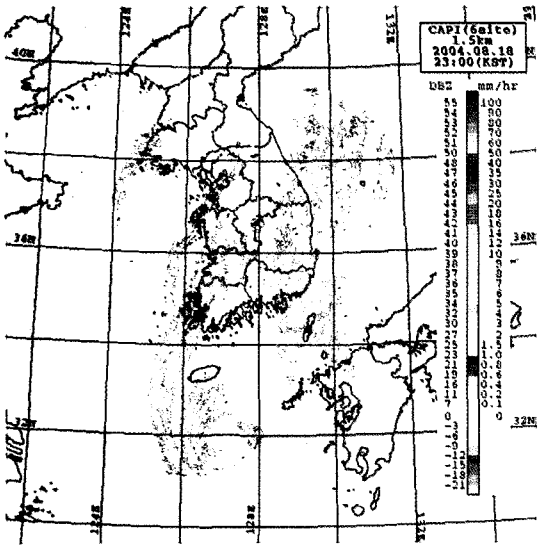

Fig. 8. Radar image of the KMA.

다 영상이다. 레이다의 영상 자료상에서는 하양 지역의 강우 강도가 약 30mm/h 정도만 관측이 되었다. 대구가톨릭대학교 옥상에서 관측된 강우 강도 자료를 보면 이때 130mm/h 이상의 강우 강도가 약 6분간 지속되었다. 따라서 100mm/h 이상 강우 강도관측의 필요성이 요구되고 있다.

Fig. 9는 관측자료 중 22시 30분에서 23시 15분 사이에 강우량을 표시한 것으로 1시간 강우에서 볼 수 없는 세밀한 강우를 분석하기 위해서 1분 단위관측 자료로부터 시간당 강우 강도를 나타낸 자료이다. 이 자료에서 보면 앞의 Fig. 7에서 보았을 때 하나의 피크로 나타난 것이 세밀하게 분석해보면 2개의 피크가 있음을 알 수가 있다. 이러한 결과는 세밀한 강우 관측의 필요성을 나타내는 것이다. 이러한 세밀한 강우의 관측과 분석은 강우 시스템의 이동, 발달과 수문

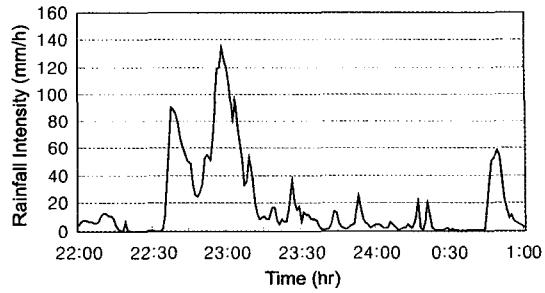

Fig. 9. Distribution of the one minute rainfall intensity.

학에 관련한 많은 연구에 도움을 줄 수 있을 것으로 생각하며, 추후 연구를 통해 강우 시스템의 이동속도 및 변화의 과정을 이해할 수 있게 여러 곳에서 동시 관측을 수행하고자 한다.

4.3. 원격 관리

원격지에 설치된 우량계에 대해서 고장 유무를 판단하는 것은 무척 어려운 것으로 이에 대한 연구가 최근 진행되었다(Upton and Rahimi, 2003). 이 연구는 전도형 우량계에 대한 연구로 주변의 우량계가 없는 경우에는 적용할 수 없는 문제점을 가지고 있다. 우량계 고장 유무 판단을 주변에 설치된 우량계 자료와 비교해야하고, 주변 우량계가 정확하다는 가정이 필요하다. 이러한 방법은 좁은 지역에 많은 강우량을 기록하는 최근의 강우 패턴에는 적용하기 어려운 면이 있다.

본 연구에서는 로드셀의 중량 신호와 bucket의 전도에 의한 전접 신호를 사용하고 있다. 이 두 신호는 각각 독립된 신호로 각 신호의 고장 유무를 판정할 수 있다. 예를 들어 중량 신호는 변화하는데, 전접 신호가 없는 경우 또는 전접 신호는 있는데 중량 신호가 없는 경우이다. 이러한 경우에는 원격지에서 수집된 두 신호에 대한 자료를 분석함으로서 우량계의 고장 유무를 판단할 수 있어 효과적으로 우량계를 관리할 수 있으며, 나아가 강우량 관측 자료의 질적인 향상에 도움을 줄 수가 있다.

V. 적 요

본 연구는 12회에 걸친 실내 검정과 태풍의 영향권에 들었을 당시 강우량의 정확한 관측을 통해서 중량식 전도형 우량계에 대해서 다음과 같은 결과를 도출

할 수 있었다. 중량식 전도형 우량계는 0.1mm 이하의 분해능으로 연속적인 강우의 측정이 가능하며, WMO의 권고 기준인 0.2mm 관측을 충분히 만족시켜 강우 계측기로써 사용하는데 문제가 없었다. 1mm 전도형 bucket으로 매 1분마다 100mm/h 이상의 강우 강도를 관측할 수 있어 수자원 관리와 이용 분야 연구에 많은 도움을 줄 수 있다. 정밀하고 세밀한 강우 관측으로 레이다나 위성을 이용한 강우의 원격 탐사에 관련한 연구에 필요로 하는 지상 정보를 제공할 수 있어, 수문과 관련한 연구 분야의 발달과 연구 영역의 확장을 도모할 수 있다. 두 개의 신호선을 이용하여 우량을 관측하는 중량식 전도형 우량계는 원격지에서 우량계의 고장 유무를 알 수 있어 자동 관측 장비 관리의 애로 사항을 해결할 수 있고, 결측과 오차를 줄여 고품질의 관측 자료 생산이 가능하게 된다. 우량 관측 장비의 국산화 개발과 테스트를 할 수 있는 독자적인 기술을 확보하였으며, 나아가 새로운 장비를 개발할 수 있는 기초를 마련하였다.

인용문헌

WMO 1996: *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation* WMO-No. 8.

Woo, D. M., 2002: The characteristics of the rainfall intensity by the tipping-bucket rain gauge. *Journal of Korean Meteorological Society* **38**, 479-491.

Michel, L., 2000: *Calibration and Control Methods for Tipping-Bucket raingauges*, WMO Instrument and Observing Method Report. 74, 94-95.

Lee, B. Y., 1999: A Study on the development of raingaguage with a resolution of 0.1mm, *Journal of Environmental Sciences* **8**, 419-422.

Kim, D. W., and B. Y. Lee, 2002: Development of raingauge and observation error. *Journal of Environmental Sciences* **11**, 1055-1060.

Lee, B. Y., 2004: A Study on the development of raingauge with 0.01mm resolution. *Journal of Environmental Sciences* **13**, 637-643.

Upton G. J. G., and A. R. Rahimi, 2003: On-line detection of errors in tipping-bucket raingauges. *Journal of Hydrology* **283**, 197-212.