자동배수형 무게식 강수량계 개발 및 강우량 측정 성능검사

김상조* · 손 탑

웰비안시스템(주)

(접수: 2011년 12월 19일, 수정: 2012년 1월 17일, 게재확정일: 2012년 2월 29일)

Development of Auto-Emptying Type Weighing Precipitation Gauge and Performance Test on Rainfall Measurement

Sang-Jo Kim* and Top Son

Wellbian System Co., Ltd.

(Received: 19 December 2011, Revised: 17 January 2012, Accepted: 29 February 2012)

Abstract The weighing precipitation gauge with auto-emptying capability was developed in the R&D project organized by the Research Agency for Climate Science (RACS) and supported by the Korea Meteorological Administration (KMA). This project was initiated in line with the KMA's plan executed since 2010 to introduce the weighing precipitation gauges partly into of their Automatic Weather Station (AWS) network in order to upgrade the quality of precipitation data. The innovative feature of this research is that the auto-emptying in weighing precipitation gauge is realized by abrupt rotation of receiving container. The prototype was tested in compliance with the relevant standards of KMA. The results of performance test on rainfall measurement in laboratory verified that the accuracies for 20 mm and 100 mm reference rainfall amount were 0.1 mm and 0.4 mm, respectively in both conditions of auto-emptying and non-emptying. During the rotation of container for auto-emptying, the data was extrapolated smoothly by applying the same precipitation intensity of the previous 10 sec. Consequently, it was found that the auto-emptying precipitation gauge developed in this research is quite enough to be used for the operational purpose of accurate measurement with 0.1 mm resolution, regardless of the precipitation intensity.

Keywords: weighing precipitation gauge, auto-emptying, rotating container, instrument development, RACS R&D

1. 서 론

우리나라에서 지상기상관측의 자동화는 1988~1992년 기상청의 장비현대화 계획에 의해 국내에서 개발된 자동기상관측장비 (AWS: Automatic Weather Station) 가 설치되어 전국적인 실시간 기상감시에 활용되면서 본격적으로 시작되었다. 지난 20여 년간 꾸준히 기상

관측망이 확충되어 2010년 말 현재 종관자동기상관측 장비 (ASOS) 80대를 포함하여 총 547대의 국산 자동 기상관측장비가 기상청에 의하여 구축·운영되는 상황으로 발전되어 왔다 (기상청, 2011).

기본적인 AWS는 기온, 습도, 풍향, 풍속, 강수량, 강수감지 센서와 자료처리장치인 데이터로거로 구성되어 있으며 이들은 모두 국산화가 이루어진 상태이다. 그러나 그 성능 면에서는 세계적인 수준으로 발전시켜야 할 여지가 아직 남아있다 (김성균, 2011).

특히 강수량 센서로 사용하여 온 전도형 (tipping bucket type) 우량계는 일반적으로 측정 분해능이 0.5 mm이며 설혹 수수구를 크게 하여 0.1 mm 분해능

*Corresponding Author: Sang-Jo Kim, Wellbian System Co., Ltd., ACE High-End Tower 1310, Guro3-dong, Guro-gu, Seoul 152-740, Korea.

Phone : +82-2-6220-3773, Fax : +82-2-6220-3774

E-mail : kimsj@wellbisys.co.kr

을 구현하기도 하나 집중호우와 같이 강수강도가 매우 강한 경우 오차가 크다는 근본적인 단점이 있어 세계기상기구 (WMO)가 정하는 측기성능 요건 (reported resolution: 0.1 mm / measurement uncertainty: 0.1 mm for ≤ 5 mm, 2% for > 5 mm)을 충족할 수 없다 (WMO, 2008). 또한 눈과 같은 고체 강수 측정을 위해 전도형 우량계에 히터를 적용하기는 하나 이 또한 용해 시간에 따른 지연관측과 충분한 온도유지에 따르는 과열로 인한 무시할 수 없는 증발 등과 같은 문제점으로 여전히 현업에서 만족스런 평가를 얻지 못해 왔다. 이러한 전도형 우량계의 단점은 본 연구개발 관련 사업 과제 제안요구서(RFP)의 연구 필요성에도 지적되어 있다 (기후과학연구관리단, 2011).

구체적인 사례로 강설관측에 있어 전도형 우량계는 눈을 녹이기 위한 가열에 의한 손실로 23% 정도 강수량을 적게 측정하고 강설 시작시각에서 약 30분 지연현상을 보인다는 비교결과가 있다 (Savina M. *et al.*, 2012). 또한 강수강도에 대한 야외 비교관측을 통하여 대부분의 전도형 우량계가 강한 강수강도에서 적게 측정하는 반면 무게식 강수량계는 만족스런 결과를 보였다 (Vuerich E. *et al.*, 2009).

한편 기상청은 2010년 3월 ‘자동기상관측장비 첨단화 기본계획’을 수립하여 AWS의 성능 고급화를 추진하면서 위에 언급한 전도형 우량계의 문제점을 고려하여 ASOS 및 동네예보용 AWS에 외국산 무게식 강수량계 총 8대를 도입, 적용한 바 있다 (기상청, 2011).

이러한 배경에서 본 연구개발 과제의 연구내용 및 범위는 자동배수가 가능하고 가열 시에도 증발을 최소화 할 수 있고 여름철 액체형 강수 및 겨울철 고체형 강수를 강도에 무관하게 정확도가 높은 관측을 실시할 수 있는 전천후 강수량계와 효율적인 바람막이의 개발을 목표로 하고 있다.

이 과제를 통하여 개발되는 장비는, 그 특징적 명칭을 ‘저수통 회전 자동배수형 무게식 강수량계’로 정하고 그간 AWS 및 ASOS에서 사용되어온 전도형 우량계의 성능한계를 극복하고 일반적으로 수동적 배수 및 부동액 충전을 필요로 하는 외국산 무게식 강수량계의 단점을 보완한 창의적인 제품을 완성하는 데 연구개발의 중점을 두고 있으며, 목표성능 수준은 WMO가 정하는 측기 성능요건을 고려하여 아래와 같이 설정하고 있다.

- 측정범위: 무제한(자동배수, 연속관측)
- 분해능: 0.1 mm 이하
- 정확도: 0.1 mm (강수량 ≤ 5 mm에서), 2%이하 (강수량 > 5 mm에서)
- 가열성능: 수수기 표면 및 내부온도 0°C이상 유지
- 운용온도 조건: -40~+60°C

2. 기존 기술과 개발품의 설계 개념 비교

무게식 강수량계는 저수통에 담기는 빗물 또는 눈 등의 모든 강수의 무게를 로드 셀과 같은 스트레인 게이지 (strain gauge)로 측정하는 기술을 적용하고 있어 전도형 우량계와 달리 분해능에 제한을 받지 않는다. 또한 수수기 (collector)는 끝이 좁은 깔때기 형이 아닌 파이프 형으로 되어 있어 눈이나 우박이 곧바로 저수통에 들어가 반응의 지연현상이 거의 없으며 전도 되와 같은 중간 장치가 없어 강수강도에 무관하게 정확한 강수량 측정이 가능한 구조로 되어 있다. 현재 전 세계적으로 판매되고 있는 대부분의 무게식 강수량계도 위와 같은 장점을 포함하여 Table 1과 같은 특성을 가지고 있다.

반면에 기존의 무게식 강수량계는 대부분 강수량 600~1,500 mm에 해당하는 대형 저수통에 비교적 장기간 물이 저장된 상태를 유지하고 연 중 1~3회 수작업으로 저수통의 물을 비우는 방법을 채택하고 있다. 또한 겨울철의 결빙을 방지하기 위해 수수기에 부분적인 가열장치를 붙이는 것 이외에 저수통에 부동액을 채우고 여름철 장기간 저장에 따른 증발을 억제하기 위해 기름을 넣어야 하는 번거로움을 피할 수 없다.

한편, 모든 강수량계에 공통적으로 적용되는 문제이지만, 특히 고체강수 측정에 장점을 가지고 있는 무게식 강수량계에서는 수수기 상부 기류변화에 의한 영향 즉, 눈의 날림으로 인한 측정량 감소 현상을 최소화하기 위한 바람막이 (wind shield)가 필수적이다 (ASOS PI Program NWS, 2007). 또한 무게식 강수량계에서는 강풍 시 풍압 진동이 로드 셀 등의 계근장치에 영향을 주는 노이즈 문제도 고려되어야 한다.

무게식 강수량계에서의 자동배수에 관한 기존의 기술은 위 Table 1에 나타나 있듯이 슬로바키아의 MPS 사 제품의 선택사양으로 알려져 있으나 실체적 자료는 공개되어 있지 않아 논의할 상황이 아니며, 그 밖에 국내 발명자에 의해 국내, 국제 특허를 취득한 ‘무게 및 배수 교차식 강수량계’가 있으나 아직 상용화되지 못한 상황이다 (정기덕 등, 2008).

위에서 검토한 기존의 무게식 강수량계가 가지는 단점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 로드 셀을 이용한 무게측정방식을 채택하되 자동배수 기능을 구현하고 수수기의 구조 개선 및 가열 및 보온 성능을 효율화에 중점을 두었다. 또한 위 특허의 제품 구조가 전도형 우량계와 유사한 형태를 가지고 있으며 배수 구조에 밸브를 사용한 점에서 예상되는 문제점이 있다. 따라서 기존 기술의 문제점을 극복하고 제품의 차별화를 위하여 밑면 구멍이 큰 반 깔때기 형 수수기의 구조와 저수통 급속 회전에 의한 자동배수라는 독창성을 부여하였다 (Fig. 1 참조)

Table 1. Characteristic Features of Weighing Precipitation Gauge in the Market.

Manufacturer	OTT (Germany)	Geonor (Norway)	Vaisala (Finland)	Belfort (USA)	MPS (Slovakia)	MeteoServis (Czech)
Shape
Seonsor Type	Load Cell	Vibrating Wire	Load Cell	Load Transducer	Strain Gauge	Strain Gauge
Orifice Area (cm ²)	200/400	200	400	200	200/500	500
Container (mm)	1500/750	600/1500	650	609/1016	750/240	1000
Resolution (mm)	0.1/0.01	0.05/0.1	0.1	0.25	0.001	0.1(0.002)
Accuracy	0.1 mm/1%	0.1% FS	0.2 mm	0.25 mm/0.1%	0.1%	0.1 mm
Output Data	Amount/ Intensity	Amount	Amount/ Intensity	Amount	Amount/ Intensity	Amount
Prevention	Antifreeze	Antifreeze/oil	Antifreeze	Antifreeze	-	Antifreeze/oil
Emptying Method	Manual	Manual	Manual	Manual	Manual (Auto Optional)	Manual

Fig. 1. Design concept of the conventional (upper left), the Jung et al.'s patent registered (upper right) and this R&D prototype (lower) weighing precipitation gauge.

3. 연구 방법과 성과 내용

3.1. 로드 셀의 선정 및 계근장치 제작 · 실험

하중 측정용 로드 셀 (load cell)에는 여러 가지 형태가 있으나 강수량계에 적합한 형태는 휘는 막대형 (bending beam type)인 것으로 분석되었다. 이는 측정하고자 하는 무게가 강수량 100 mm (수수구 직경 200 mm에서)를 포함하여 7~8 kg 정도인 점을 고려할 때 고유진동이 최소화되고 감도, 안정성 및 선형성 측면에서 우수한 것으로 알려져 있기 때문이다 (민남기, 2007).

상용화되어 확보가 용이한 로드 셀로서 CAS (국산), AND (일본산) 및 HBM (독일산)이 검토되었으나 이들의 성능규격은 거의 동일하여 순수 국산이며 세계적인 인지도를 확보한 CAS 제품을 사용하기로 하였다. 시제품 제작에 사용하기 위해 선정된 로드 셀은 Fig. 2의 형태를 가진 CAS사 모델 HBS-10L로서 최대하중 10 kg, 출력감도 2.0 ± 0.005 mV/V, 종합오차 0.030% 이내, 온도보상 기능 그리고 스테인리스 주름관 보호장치 등의 성능규격을 가지고 있다.

선정된 로드 셀의 실제적인 성능확인 및 자료처리 알고리즘 기본설계를 위하여 실험용 계근장치 (베이스, 고정장치, 신호 증폭기, 자료수집기 등)를 구성하여 선

Fig. 2. Selected load cell HBS-10L of CAS.

Fig. 3. Linearity of load cell outputs of HBS-10L vs. standard weights.

형성, 안정성, 반응성 및 온도영향에 관한 실험을 수행하여 그 적합성을 검증하였다.

선형성 검증 : 1~5000 g의 표준분동으로 하중을 가하면서 로드 셀의 출력 (gain 1,000 적용)을 획득하여 Fig. 3과 같은 관계식을 얻었다. 하중과 출력 추세선에서 약간의 off-set은 보이나 $R^2=1$ 인 매우 확실한 선형성이 확인되었다.

안정성 검증 : 로드 셀의 출력은 원천적으로 미세한 진동을 보이므로 그 변화의 정도를 파악하기 위해 여러 개의 표준분동에 대한 각각의 2분간 1초 간격 출력을 구해 분석하였다. 그 결과 출력의 표준편차(σ)는 평균적으로 0.4506 mV로서 2σ 이상인 1 mV의 변화가 있더라도 무게 0.7 g 즉, 강수량 0.03 mm 이하에 불과하여 목표성능 달성에 문제가 되지 않는 것으로 확인되었다.

반응성 검증 : 본 연구의 핵심인 저수통 회전에 의한 자동배수에서 배수 후 로드 셀의 정상상태 복귀시간이 신호처리 알고리즘에 영향을 주므로 그 정도를 파악하기 위하여 하중 부가/제거 시 안정화 소요시간을 검증하였다. 그 결과 하중 10 g, 100 g, 1000 g, 2000 g, 5000 g에서 모두 1.1 초 이내에 정상출력 상태로 복귀하는 것으로 확인되었다.

온도영향 검증: 로드 셀에 표준분동 5 kg의 하중을 가한 상태에서 검정 챔버 내의 온도를 +50~30°C 사이 10°C 간격으로 변화 시키면서 출력의 변화를 측

정하였다. 그 결과 평균 9.2 mV의 극차를 보여 강수량으로서는 0.22 mm (± 20.11 mm)의 변화로 나타나는 것으로 확인되었다. 이는 비록 로드 셀 자체에 온도 보상 기능이 있다 하나 무시할 수준은 아니므로 동절기 강설관측을 위해 하우스 내 온도를 0°C 이상으로 유지하고 필요 시 온도 보정식을 적용하는 것으로 검토 되었다.

3.2. 회전식 저수통 구조 및 구동장치 제작·실험

저수통은 자동배수의 빈도를 줄이되 구동장치 및 물받이 통 등의 전체적 구조와 크기의 적정화를 고려하고 우리나라의 우량계 수수기 태두리 표준규격이 직경 200 mm (면적 314 cm²)인 점을 반영하여 그 규격을 강수량 약 115 mm에 해당하는 내경 176 mm, 높이 154 mm인 원통형 용기로 정하였다. 저수통의 재질은 스테인리스 강판을 사용하고 배수 후 남아 있는 물의 량을 최소화하기 위하여 비 점착성 테프론 (FEP) 코팅으로 표면 처리하였다.

구동장치는 회전 저수통을 L 형태의 지지대에 장착하고 그 옆면에 약 4초에 1회전하는 소형 감속 기어 모터를 달았으며 반대편에는 1회전 후 정 위치에서 정지하도록 광전소자 감지장치를 붙였다. 또한 무게 측정에 영향을 주지 않으면서 배수 물받이 역할을 하는 배수통을 장착하여 Fig. 4와 같은 기본적인 측정/배수/측정 기능을 갖춘 시제품을 제작하여 실험을 수행하였다.

실험결과를 Fig. 5를 통하여 알 수 있듯이, 본 연구에서 개발된 시제품이 배수과정 전 후에 걸쳐 적정하게 무게를 측정하는 것을 보였다. 또한 배수 후 다시 측정을 시작하는 시점까지 배수과정에서의 자료 손실을 보상하기 위하여 본 실험에서는 배수 후 10초 동안의 자료는 전 10초 동안의 강수량도가 유지되는 것을 전제로 강수량을 추산하여 원시자료를 대체하고 그 후에는 새로운 초기 값을 설정하여 실 측정값을

Fig. 4. Test of the container's rotation for auto-emptying.

Fig. 5. The raw data of measured precipitation including the auto-emptying process (upper) and the result of 10 s extrapolation with the same intensity of previous 10 s (lower).

Fig. 6. The housing cover of precipitation gauge and the heaters on surface of collector and discharging box.

사용함으로써 자료의 연결성이 확보되는 것을 확인하였다.

3.3. 수수기/하우징 (가열·보온장치 포함) 제작·실험

위 회전 저수통 및 계근장치와 물받이 통 등의 기본 기능 장치를 보호하는 외형을 이루고 상부에 수수기를 포함하는 수수기/하우징 구조물은, 상부의 내경 200 mm 및 외경 224 mm이고 하부의 직경 140 mm 그리고 높이 160 mm인 수수기와 밑면 외경 396 mm 총 높이 530 mm인 외통으로 설계·제작되었다 (Fig. 6).

수수기 상부의 테두리는 알루미늄 판재를 정교하게 가공하여 내경 200 mm를 정확히 맞추고 수수기 전체

Fig. 7. Flow of the measurement procedure and data processing.

에 비 점착성 테프론 코팅을 하여 물이 묻는 양을 최소화 시켰다. 외통은 1.5 mm 두께의 스테인리스 강판을 metal spinning (시보리 금형 기법)방법으로 가공하여 이음새가 없도록 제작하였다. 이 외통의 크기는 보온을 위하여 내부 면에 약 6 mm의 절연 시트가 부착되도록 여유 공간을 고려하여 정해 진 것이다.

가열장치로는 수수기와 물받이 통 밑면에 용량 220VAC/350W인 필름형 히터를 부착하도록 하였으며 각 히터에는 5°C 에서 동작 하고 과열 방지를 위해 히터 표면 온도가 80°C 이상이 되었을 때 전원을 차단하는 열 감응 스위치를 적용하였다.

3.4. 자료처리 및 시스템제어용 컨트롤 모듈 제작·실험

컨트롤 모듈은 로드 셀에 DC전압을 인가하고 그 값과 로드 셀의 출력 값을 증폭한 후 1차 noise 제거를 위한 low-pass filter (10 Hz)를 거쳐 고속 24bit AD

Table 2. Performance test results on precipitation measurement.

Reference Total Amount		20 mm		100 mm	
Auto-empting Setting Value		10 mm	No Emptying	80 mm	No emptying
Measured Amount	Intensity 37 mm/h	19.9	19.9	-	-
(mm)	Intensity 93 mm/h	19.9	-	99.6	99.6

converter를 이용하여 디지털 값으로 측정한다. 그 다음 단계로 마이크로 컨트롤러 (MCU)에 의한 이상 극한 값 제거 및 평균화 과정을 거친 후 측정된 무게를 강수량으로 변환할 뿐만 아니라 설정된 강수량에서의 자동 배수를 위한 저수통 회전 모터 제어와 온도 측정 및 히터 제어 기능을 갖추도록 설계되었다. 또한 측정 처리된 자료를 가공·저장하고 수요자가 필요로 하는 형태로 자료를 출력·전송하는 기능을 갖는다.

컨트롤 모듈은 강수량계 내부 공간의 여건 상 자료 처리 및 시스템 제어용 모듈 이외에 별도의 전원공급 모듈로 구성되어 계근장치 양쪽에 분리 장착하였다.

로드 셀에 의한 무게 측정 출력은 1초 간격으로 10회 수집되고 처리 후 최종적으로 1초 자료 (기본 자료)로 생산된다. 자동 배수 시점의 강수량 임계 값은 임의로 설정될 수 있으나 기본적으로 100 mm로 정하였다. 또한 전원 인가 후 최초 가동 시, 강수량 임계 값 도달 시 그리고 일계 24시에는 자동적으로 저수통을 회전시키고 로드 셀 출력의 영점을 재 설정하는 과정을 수행하도록 프로그램 되어 있다.

이 강수량계의 컨트롤 모듈에 내장된 소프트웨어가 수행하는 측정을 위한 장치의 구동 및 자료처리 과정은 Fig. 7의 flow chart에 나타나 있다.

4. 시스템 교정 및 성능검사

무게식 강수량계는 로드 셀에 가해진 하중과 그에 비례하여 검출되는 전압과의 관계식을 이용하여 강수량을 측정하는 것이므로 로드 셀의 반응 특성이 거의 유사하더라도 각 장비 마다 교정 (calibration)을 필요로 한다. 검정 대상 시제품의 교정은 표준 분동으로 여러 개의 정밀한 하중 (500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500 g)을 가하고 로드 셀의 입출력 비를 측정하여 구한 아래의 관계식 (회귀직선 함수)를 적용하여 이루어 졌다.

$$Y = 23,660.63506 X - 3,011.76492$$

여기서 Y는 하중 (g)이며 X는 출력/입력 전압 비이다.

본 과제를 통하여 개발된 자동배수형 무게식 강수량계 시제품의 측정 성능을 공식적으로 확인하기 위하여 기상청의 측기검정 대행기관인 한국기상산업진흥원 (KMIPA)의 검정을 받았다 (Fig. 8).

검정은 기존의 전도형 및 일반 원통형 강수량계 검

Fig. 8. Picture showing the laboratory test at KMIPA.

정방법을 따르되 자동배수 성능까지 확인하기 위하여 기준 강수량 이내에 자동배수가 행해진 경우와 배수가 없는 (무 배수) 경우 그리고 강수강도가 다른 상황 모두를 시험하였다. 강수량 측정에 대한 성능검사 결과는 아래 Table 2에서 알 수 있듯이 기준 강수량 20 mm에서 기차 0.1 mm, 100 mm에서 기차 0.4 mm로 측정되어 매우 정확한 것으로 밝혀 졌다. 또한 그 기차는 자동배수를 행하거나 아니하거나 동일하게 나타나, 자동배수 과정 동안 과거 10초 간의 강수강도가 유지되는 것을 전제로 그 과정의 자료손실을 일정시간 (약 10~15초) 보상한 방법에 전혀 문제가 없음이 확인되었다.

5. 결과 종합 및 토의

본 연구개발 사업 제1차년도 성과로 제작된 자동배수형 무게식 강수량계 시제품은 KMIPA의 검정에

의한 성능검사 결과에서 알 수 있듯이, 기상청 검정 기준인 기차 $\pm 5\%$ (기계식 $\pm 3\%$)는 물론 WMO의 성능요건인 정확도 0.1 mm (강수량 ≤ 5 mm에서) 및 2% 이하 (강수량 > 5 mm에서)에 비해 월등한 정확성을 보였다 (기상청, 2009).

특히 무게식 강수량계에서 저수통을 회전 시켜 자동배수를 구현한 방법과 배수과정에 대한 자료보상으로 강수량 측정의 연결성과 정확성이 확보됨이 입증되었다. 현재 이 방법을 적용한 무게식 강수량계는 ‘저수통 회전 자동배수형 무게측정식 강수량계’라는 명칭으로 국내 특허를 출원 (번호10-2011-0097504)한 상태이다.

그러나 겨울철 강설 시 눈을 적절히 녹이는 가열·보온 성능에 대한 시험과 바람 영향에 대한 분석 및 처리방안의 구현, 실제 야외 환경에서의 비교관측 등 제2차년도 사업에서 지속적으로 수행하여야 하는 과제가 남아 있다. 또한 전세계 수요자 모두를 만족시킬 수 있는 자료 출력형식의 결정, 상품성 제고를 위한 생산기법의 개선 등 추가적인 연구개발을 필요로 한다.

결과적으로 이번에 개발된 시제품은, 후속 연구개발을 거쳐서 완전 상용화되는 과정은 남아 있으나, 현 상태에서도 강우강도에 무관하게 0.1 mm 분해능을 가지고 매우 정확한 강수량을 측정하는 데에 실제 적용될 수 있는 자동배수형 무게식 강수량계의 실체를 구현한 것이다.

감사의 글

본 연구는 기후과학연구관리단 (RACS)의 2011년도 “기상산업 지원 및 활용기술 개발사업”의 하나로 추진 되었음을 밝히며, 연구비의 지원 및 사업관리를 감

당하신 기상청 및 RASC 사무국 그리고 개발된 장비의 강수량 검정에 협조해 주신 한국기상산업진흥원에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- 기상청, 2011: 2010 기상연감, **31**, 98-104.
- , 2009: 기상측기의 검정기준에 대한 검사방법 및 공차, *기상청 고시 제2009-1호*.
- 김성균, 2011: 기상장비산업 육성 정책 및 지원방안, *기상장비 기술동향 워크숍*, 5-15.
- 기후과학연구관리단, 2011: *기상산업 지원 및 활용기술 개발사업 2011년도 사업안내서*, 24.
- 민남기, 2007: *센서전자공학*, 225-254.
- 정기덕, 남경엽, 장기호, 오성남, 정효상, 최병철, 2008: 무게 및 배수 교차식 강수량계, *대한민국특허청 등록특허공보*.
- ASOS PI Program NWS, 2007: *Final Report for Winter Test of Production All-Weather Precipitation Accumulation Gauge (AWPAG) November 2006-April 2007*.
- OTT, 2011: *Operating instructions Precipitation Gauge OTT Pluvio²*, 4-49.
- Savina M., B. Schättli, P. Molnar, P. Burlando, and B. Sevruc, 2012: Comparison of a tipping-bucket and electronic weighing precipitation gauge for snowfall, *Atmos. Res.*, **103**, 45-51.
- Vuerich E., C. Monesi, L. G. Lanza, L. Stagi, and E. Lanzinger, 2009: WMO Field Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges, *WMO/TD-No.1504*.
- WMO, 2008: *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (WMO-No.8)*, I.1-21, I.6-1-I6-11.