

# 하수관거용 비만관 유량계 (Flowmeters for Partly Filled Pipes) 분야 연구 동향

유 성 호\* · 이 민 수\*

## 1. 서 언

환경부는 체계적으로 4대강 유역의 하수를 관리 모니터링하기 위한 하수관거 정비사업에 많은 예산을 투자하여, 선진화된 하수관거정비 모델을 개발하고, 하수처리시설의 운영효율 개선 및 정부 예산 투자의 효율성을 증대하려고 노력하고 있다. 이 사업을 효율적이고 원활한 운영을 위하여 비만관 유량계를 설치하여 운영하여야 한다. 본 논문에서는 비만관 유량계의 종류 및 특성과 유량 교정 시스템을 소개하고자 한다.

## 2. 국내외 교정 기관 현황

만관유량계의 경우 국내의 액체유량 분야의 국내 KOLAS 인정 국가교정기관은 12개 기관이 인정받았다. 그러나 비만관 유량계의 경우 교정기관은 국내는 없으며 국제적으로는 호주에 있는 Manly hydraulics Laboratory만 교정기관으로 인정받고 있다.

## 3. 측정 유체 유동성에 따른 유량계 종류

### 3.1 만관 유량계

배관에 흐르는 유체의 운동 에너지는 펌프 또는 낙차에 의해서 발생하며, 이 에너지에 의해서 만관이 되고, 배관의 유체가 흐르게 된다. 펌프에 의해서 공급되지 않는 유량계는 만관이 아닌 경우가 대부분이다. 모든 유량계 중에서 개수로 유량계와 비만관 유량계를 제외하고, 나머지 모든 유량계가 여기에 해당된다.

### 3.2 비만관 유량계

관로에 흐르는 유체의 운동 에너지는 상류와 하류의 위치 에너지 차에 의해서 발생한다. 따라서 만관이 안 되는 경우가 많으며, 만관이 되더라도 유속에는 베르누이 법칙에 의해서 한계(일반적으로 저속)가 있다. 비만관 부분이 대기 중의 노출 여부에 따라 압력이 있는 경우도 있으나, 일반적으로는 압력은 무시할 만하다.

초음파식 측정 방식의 경우, 유체부분의 유속 측정과 압력계 또는 수위계에 의해서 수위가 측정되며, 연산기에서 수위에 따른 유속단면의 단면적을 계산하고, 이 단면적과 평균유속을 연속적으로 곱하여 유량을 계산한다.

압력이 가해지지 않으므로 내압은 고려하지 않아도 되며, 측정 대상유체의 화학적 특성에 의한 부식성만 고려하면 된다.

### 3.3 개수로 유량계

비만관 유량계와 같이 관로에 흐르는 유체의 운동 에너지는 상류와 하류의 위치 에너지 차에 의해서 발생한다. 또한 액체가 대기에 노출되어 흐르므로 유속이 베르누이 법칙에 의해서 저속으로 흐른다. 측정 방식은 비만관 유량계와 동일하다.

단면적은 원형, 사각형, 사다리꼴 등 여러 가지 모양이 있으며, 이러한 모양에 단면적 계산 공식이 연산기에 기억되어 있어, 개수로의 모양만 선택하면, 수위에 따른 유속 단면적을 연산기가 자동으로 계산한다.

## 4. 비만관 유량계의 종류 및 특성

### 4.1 초음파식 비만관 유량계

초음파 센서의 설치를 기준으로 유체가 흐르는 배

\* 산업기술시험원  
E-mail : shyoo@ktl.re.kr

관 표면에 설치하는 클램프 온(clamp on)형과 배관 속의 유체에 닿게 직접 설치하는 삽입(wet type)형이 있다. 위와 같은 구분으로 분류할 때 하수관거용 초음파 유량계는 도플러 방식의 삽입형이라 할 수 있다.

하수관거용 초음파 유량계의 측정원리인 도플러법은 도플러 효과를 이용하여 유체 중 부유입자의 이동 속도에 비례한 편이 주파수  $f_d$ (도플러 주파수라 부른다)를 측정하여 유체의 유속, 유량을 연산하는 원리이다. 유량은 다음 (1)식과 같이 유량보정계수, 도플러 주파수, 단면적에 비례한다.

$$Q \propto K \cdot f_d \cdot A \quad (1)$$

여기서,  $K$  : 유량 보정 계수

$f_d$  : 도플러 주파수

$$f_d = \frac{2 V \cos \theta}{C} f_t$$

$f_t$  : 발신 주파수

$C$  : 유체 내에서의 음속

$A$  : 단면적

도플러 방식은 정해진 주파수, 정해진 각도로 유체에 대해 초음파 빔을 전송한다. 일부 초음파는 유체의 입자들이나 가스 거품 등에 의해 반사되어진다. 이때 입자들은 움직이기 때문에 주파수의 변이가 발생하고 이 주파수의 변이는 입자의 속도와 비례관계가 있다. 유속분포가 다르고 또한 많은 반사 입장에 의해 다양한 주파수의 연속체를 얻어서 이로부터 평균유속을 산출해 낸다. 또한 수위는 보통 압력식이나 초음파 방식을 사용하는데 일반적으로 초음파 방식이 좀 더 정확하고 유지 보수 등이 편리하다.

유체 내 부유입자에 의하여 반사되어 오는 초음파를 검출하는 원리이기 때문에 부유 입자나 미소한 기포를 포함하고 있는 유체의 측정에 적합하다. 따라서 주로 하수나 우수 등 슬러리 액의 측정에 사용되고 있다. 또한 수로에 수두차를 발생시키지 않으며 설치가 용이하다. 반면 정확한 유량측정을 위하여 유량계의 설치 지점을 주의해서 선택해야 하며 아주 깨끗한 유체에서는 사용이 불가능하며 주기적인 점검을 하여 센서부분의 이물질 등을 제거하여 주어야 한다.

#### 4.2 PB(Palmer Bowlus) 플룸식 비만관 유량계

원리는 개수로 유량계 웨어식과 유사하다. 웨어가 물

의 흐름 중간에 직각인 벽을 설치하여 흐름을 막으면 흐름은 웨어판을 넘쳐 흐르고, 웨어판을 넘쳐흐르는(초과류) 유량은 웨어판의 상류측 수위와 일정한 관계가 성립하므로 웨어판을 넘는 수위를 검출하여 유량을 연산하는 데 반해 PB 플룸식 비만관 유량계의 경우는 수로의 중간을 조여 유량을 측정한다. 좁혀진 수로에서 유속은 빨라지면서 플룸의 바로 앞에서는 흐르는 유체가 독처럼 상승하고, 이 상승한 수위를 측정하면 이것은 유량값과의 비례관계를 나타내게 된다. 즉, 구조물에 의해 상승한 수위측정을 통하여 유량값을 유추해내는 것이다.

구조물에 의해 상승한 수위측정을 통하여 유량값을 유추해내는 것이다. 유량은 다음 (2)식과 같이 수위(h)의 함수이다.

$$Q = f(h) \quad (2)$$

유량측정에 관해 각종 규격이 잘 정비되어 있고, 일정한 유체의 흐름의 조건에서는 정확한 유량을 산출할 수 있다.

관수로의 벤츄리식 유량계를 개수로에 응용한 것으로, 주로 처리시설의 유입관거에 이용되는 파살플룸과 하수맨홀에서 관거 유량을 계속하기 위해 개발된 PB 플룸이 있다.

#### 4.3 벤츄리 플룸식 비만관 유량계

개수로 유량 측정 조건에서는 벤츄리 플룸식 유량계는 교정된 플룸(flume)방식으로 작동된다. 플룸에서 유량  $Q$ 는 유량 튜브 유입부의 유체 정역학 높이  $h$ 의 함수이다.

$$Q = f(h) \quad (3)$$

벤츄리 플룸식 유량계는 유입부의  $h$ 를 측정하기 위하여 압력 변환기를 사용하고 유량  $Q$ 를 계산한다. 또한 개수로의 관 끝부분의 하류에 역 경사나 장애물이 있을 경우, 역류가 유량튜브의 하류 끝부분에 발생하게 되어 이상홍수(surcharged)가 되는데 이러한 경우에는 벤츄리 플룸식 유량계는 자체 알고리즘에 의하여 정상적으로 유량을 계산할 수 있다.

만관 유량 측정 시 벤츄리플룸식 유량계는 벤츄리 튜브(venturi tube)방식으로 작동한다. 그러므로 유량

$Q$ 는 유입부의 압력  $p_1$ 와 목부의 압력  $p_2$ 의 압력 차에 의해서만 구할 수 있다. 만관시 유량  $Q = f(p_1 - p_2)$ 이며 벤츨리 플롭식 유량계는 압력  $p_1$ 과  $p_2$ 를 각각 측정하여 사전에 교정된 유량튜브에서의 유량  $Q$ 를 계산한다. 또한 맨홀에 유체가 유입 또는 침투가 발생하면 맨홀은 범람하고 이상홍수(surcharged)조건이 발생하게 된다. 이러한 조건에서 압력  $p_1$ 과  $p_2$ 의 차를 사용하여 정상적으로 유량 측정이 가능하다.

벤츨리 플롭식 유량계는 위와 같이 개수로에서는 플롭방식으로 작동하고 만관에서는 벤츨리 튜브 방식으로 작동되어 모든 하수관거 조건, 유체의 여러 흐름 조건에서도 유량 측정이 가능하다. 반면에 적용하려는 배관 사이즈에 각각 일치하는 flow tube를 제작하여야 한다. flow tube의 크기가 타 유량계에 비해 크므로 설치 이전 등이 불편하다. 또한 압력센서의 주기적인 교정 작업이 필요하다.

#### 4.4 레이더식 비만관 유량계

레이더식 유량계는 개방식 수로의 유체 흐름을 보다 진보된 레이더 속도 감지 기술을 이용하여 초음파 주파수 진동 상태에서 개방식 수로의 흐름을 측정할 수 있다. 흐름 속 액체와 반응하여 처음 발산한 것과는 다른 주파수로 반사 신호를 보내는 빛을 발산한다. 이렇게 반사된 신호를 처음 발산한 주파수와 비교해보면 정확히 흐름의 속도와 방향을 계산해 낼 수 있게 된다. 이때 초음파 진동 반사파로 흐름의 높이가 측정된다. 이때 흐름을 계산해내는 식은 다음과 같은 연속식으로 정리될 수 있다.

$$Q = \bar{v} \cdot A \quad (4)$$

여기서,  $Q$  : 유량  
 $\bar{v}$  : 평균 속도  
 $A$  : 단면적

액체의 수면 위에서 속도를 측정함으로써, 센서를 액체 내부에 담겨서 측정할 때와 달리 센서의 교란, 고밀도 물질이 센서에 끼는 문제 또는 반사파의 방해 효과 등 정확도에 영향을 미칠 수 있는 많은 문제를 해결할 수 있다. 또한 센서를 배관에 직접 설치하는 것이 아니므로 profile 작업이 필요 없다.

거대수로 등에는 적합하지만 이상홍수(surcharge)가 자주 일어나고, 만관의 형태로 흐름이 가능한 일반적인 크기의 수로에 적용하기에 문제가 있다. 또한 수면의 유속측정으로 전체 평균 유속을 가정하므로 정확도에 한계가 있으며, 타 유량계에 비하여 고가이다.

#### 4.5 전자식 비만관 유량계

전자식 비만관 유량계는 전자유량계의 원리를 그대로 이용하여, 비만관의평균 유속을 측정하는 유량계로 Delta형 전자유량계와, 비만관의 수위를 측정하는 수위계와, 수위에서 유속 단면을, 평균유속과 유속단면에서 유량을 계산하는 연산기로 구성되어 있다. Single 센서 전자 유량계의 구조에서 전자식 비만관 유량계는 유속단면을 계산하기 위하여, 수위계를 설치하였으며, 상부에는 내부의 보수유지가 가능하도록 보수유지 flange가 설치되어 있다. 수위 센서는 청결 유체의 경우에는 하부에 압력 전송기를, 배관에 압력이 있는 경우에는 수위와 관내와의 차압 전송기를, 침전물 등 고형물질이 포함된 유체의 경우에는 보수구에 초음파 수위계를 설치한다. 초음파 수위계의 경우에는 불감대가 있으므로 선택 수위계에 따라 약간 높이가 커진다.

#### 5. 비만관 유량계 선정 시 고려사항

비만관 유량계에서는 모든 물성에 대해서 특별한 고려가 필요치 않으며 상온에서 물에서의 내식성만 고려하는 것이 일반적이다. 그러나, 유량계 몸체로서는 주철제, 강제, 플라스틱 등 모든 재질이 사용될 수는 있으나, 요즘은 수질의 유지 수준에서 에나멜 코팅의 재질이라든지 고급의 배관재질을 요구하므로 유량계 몸체의 재질도 이를 따라야 할 것이다. 구동부, 배어링, 전극 등의 재질은 스테인레스 강 이상의 재질이 요구된다.

물의 물성은 핸드북 등에 잘 나타나 있으므로 상온에서는 제작업체의 추천에 따르면 충분하고, 온도변화에 대한 밀도변화도 부피 팽창율이 0.02%/℃이므로 고려치 않아도 되지만 측정 정도가 0.2% 이상이고, 온도가 80℃ 이상이면, 밀도 보상, 패킹 재질, O링 재질이 별도로 고려되어야 한다. 따라서 상수용 비만관 유량계로는 전자유량계, 초음파 유량계 등 모든 유량계가 사용될 수가 있으며, 다만 유량계 종류에 따른 정도, 가격, 보수유지비를 포함한 일반적인 경제적 가

치만 고려되면 된다.

## 6. 교정시스템의 종류 및 원리

### 6.1 중량 측정 방법(gravimetric method)

비만관 유량계를 통과한 유체를 수집하여 중량을 측정하여 비만관 유량계의 지시값과 비교하는 방법으로 부피 유량을 측정하려면 밀도를 별도로 측정하여 환산하여야 하고 중량 측정 장치는 로드셀이나 저울을 사용한다.

### 6.2 부피 측정 방법(volumetric method)

비만관 유량계를 통과한 유체를 수집하여 비만관 유량계의 지시값과 수집한 유체의 부피를 비교하는 방법이다. 부피 측정 장치는 기준탱크(standard volume tank)를 사용하고 기준탱크는 소정의 규격에 의해 제작되며 충분한 분해능을 가져야 한다. 수집한 유체와 기준탱크 재질의 변화를 각각 보정해야 한다.

### 6.3 기준유량계 방법(master meter method)

비만관 유량계보다 정확도가 높은 만관 유량계로 비교 교정하는 방법으로 이때 기준유량계는 측정하는 동안 정상적인 동작임을 확인할 수 있도록 2개 이상을 직렬로 연결하여 사용한다. 그 중 1개를 기준기로 사용하고, 나머지는 확인용으로 사용한다.

## 7. 비만관 유량계 교정 시스템

### 7.1 비만관 유량계 소급성 체계

소급성이란 모든 불확도가 명확히 기술되고 끊어지지 않는 비교의 연결고리를 통하여, 명확한 기준(국가 또는 국제기준)에 연관시킬 수 있는 표준 값이나 측정결과와 특성을 말한다. 이와 같이 끊어지지 않는 연결고리에 의한 표준과의 비교는 교정기관이 고객에게 제공하는 불확도 수준을 국가표준으로 이끌어지도록 설정하는 것을 의미한다. 비만관 유량계에서 소급성 체계는 한국표준과학연구원의 중량식 물 유량 표준 시스템에서 소급된 만관 전자기 유량계에 의해 유지되고 있다.

### 7.2 유량계 교정 시스템 구성도

비만관 유량계 교정 시스템에 대한 구성도는 Fig. 1과 같다. 펌프로 저수조의 물을 퍼올려서 밸런스 탱크에 물을 채운다. 이후에 기준 유량계에 흘려서 정확한 유량을 측정된 후에 스트레이너를 지나 비만관 유량계의 지시값을 읽어 들인다. 이를 통해서 기준유량계와 비만관 유량계의 오차를 계산한다.

### 7.3 교정 시스템의 특징

소하 배수펌프장 하수 및 우수를 이용하여 실제 유량계를 설치하는 유사한 조건으로 교정을 실시하고,

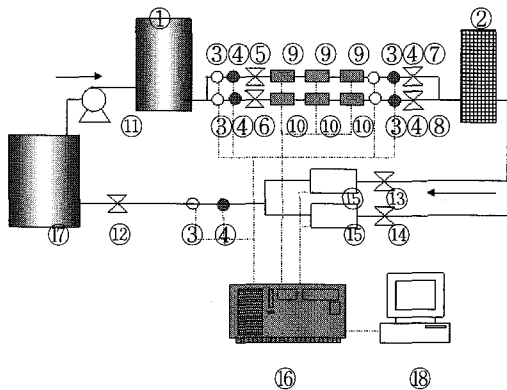


Fig. 1 Systematic diagram

Table 1 Design specification of calibration system

번호	품명	번호	품명
①	밸런스탱크(1000 L)	⑩	기준유량계(E+H, 65 A)
②	스트레이너	⑪	수중펌프(200 m <sup>3</sup> /h)
③	온도계(0~100) °C	⑫	유량조절밸브(200 A)
④	압력계(0~1 000) kPa	⑬	유량조절밸브(300 A)
⑤	On-off valve(100 A)	⑭	유량조절밸브(600 A)
⑥	On-off valve(65 A)	⑮	비만관 유량계
⑦	볼밸브(100 A)	⑯	저수조
⑧	볼밸브(65 A)	⑰	DAQ
⑨	기준유량계(E+H, 100 A)	⑱	컴퓨터

기준유량계를 직렬로 3대를 설치하여 1대를 기준기로 2대를 확인용으로 사용하여 데이터의 신뢰도를 증대시켰다. 기준 유량계의 측정 데이터는 자동 데이터 획득 프로그램으로 실시간으로 컴퓨터에 입력 저장시킨다.

## 8. 결 언

비만관 유량계 교정시스템을 상대확장불확도 1.7%로 구성하였으며, 비만관유량계 교정 기준을 제정하였다. 본 교정 시스템으로 4대강 유역에 사용되는 하수관거에 사용되는 비만관 유량계를 교정 가능하게 되었다.

## 참고문헌

- (1) 유성호, 이동락, 이민수, 백흥균, 2004, “환경계측 및 법정단속용 계측기기 교정시스템 및 교정기준 개발 연구”, 기술표준원, pp. 14~44
- (2) 일본계량기기공업연합회, 1997, “유량계측 AtoZ”, 테크하우스, pp. 194~196
- (3) KS B ISO/TS 15769 : 2004, 수리량 측정 - 개수로와 만관이 아닌 관로에서의 유체흐름 - 도플러식 흐름 측정의 적용, pp. 2~10
- (4) KS B ISO/TR 5168 : 2004, 유량측정-불확도 평가, pp. 1~23