

[blog.naver.com](https://blog.naver.com)

# 차압식 유량계

센서로세계로미래로 2019. 8. 21. 18:01

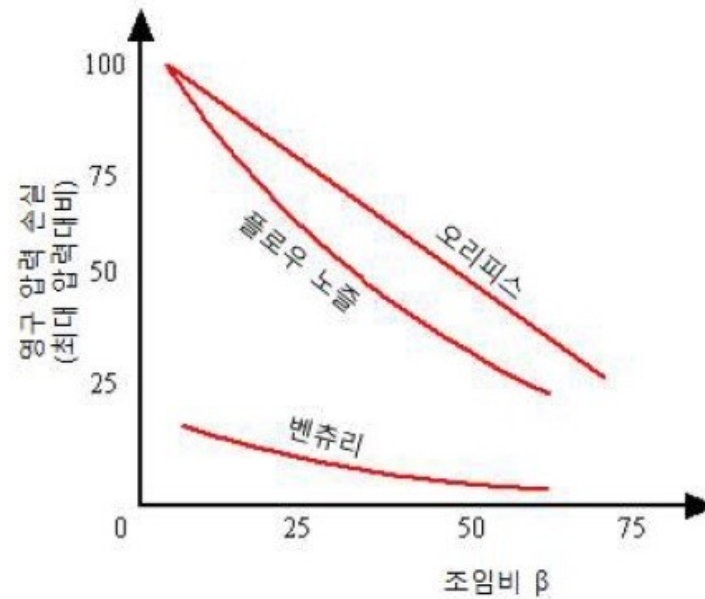
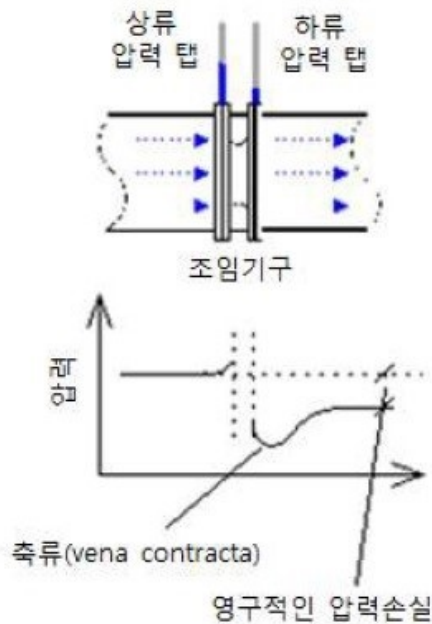
22~28분

---

## 1. 개요

액체 및 기체 등의 유체 유량을 측정하는 경우 유체가 흐르고 있는 관로 중에 조임기구(restriction element)인 오리피스(orifice), 벤츨리관(venturi tube), 플로우 노즐(flow nozzle) 등을 설치하여 전후 발생하는 압력의 차로부터 유량을 검출하는 방식이다. 이러한 조임기구는 관로의 중간에 설치하여 관로의 단면적을 축소하게 하는 역할을 한다. 조임비( $\beta$ )는 조임기구의 구멍 직경  $d$ 와 조임기구 이전 관로의 내경  $D$ 와의 비로써  $\beta=d/D$ 이다. 차압은 조임기구의 상류측 압력 출구와 하류측 출구에서의 압력의 차이이다. 아래 그림과 같이 상류에서 하류로 조임기구를 통과하는 지점에서 압력이 급격하게 떨어지는데,

이와 같은 차압 발생기구에 의해 축소된 단면적은 유체의 관성 때문에 실제의 기구 구경보다 조금 하류 쪽에서 최소로 되어 기구의 개구 단면보다 적게 되는데, 이것을 축류(vena contracta)라고 한다. 축류의 단면적을 작은 구멍의 단면적으로 나눈 값을 축류계수라고 하며, 오리피스 계산식에서 유량계수에 관계되는 보정 계수이다. 그리고 조임기구를 통과하게 되면 초기에 압력이 떨어졌다가 다시 원래의 압력으로 서서히 회복을 하기 시작하는데, 조임기구에 따라 영원히 원래의 압력으로 회복하지 못하는 현상이 있는데 이것을 압력손실이라고 한다. 이러한 압력 손실은 오리피스에서 가장 크고, 벤츄리관에서의 압력손실이 가장 적다.



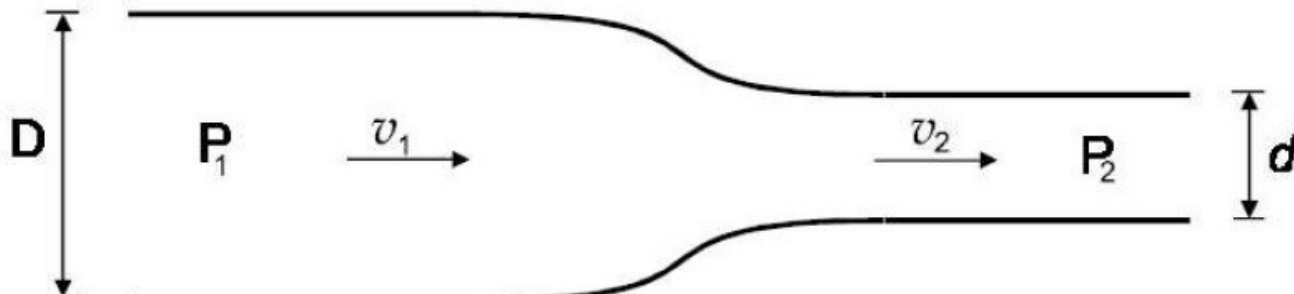
(a) 조임기구에 의한 위치별 압력 변화

(b) 조임기구별 조임비에 따른 압력손실

## 조임기구에 의한 조임비에 따른 압력손실 변화

베르누이(Bernoulli) 법칙에 의하면 유체가 흐르고 있는 관로상 일부를 축소시키면 유체가 그 부분을 통과할 때 속도는 증가하고 압력이 감소함으로써 조임기구 전후 압력차와 유량과의 사이에는 일정한 관계가 있어 차압으로부터 유량을 측정할 수 있다. 아래 그림과 같이 단면이 원형인 수평 파이프의 중심에 동심원의 구멍이 있는 평판 형태의 조임기구를 흐름에 직각으로 설치하고, 유체는 비압축성으로 점도의 영향이 없는 유체이며, 조임기구 전후의 밀도가 동일하고, 흐름은 정상적인 흐름으로 관로 내를 가득차서 흐르고 있다고 가정하면, 조임기구 상류 단면도 a와 하류의 흐름이 좁혀진 단면 b와의 사이에는 다음과 같은 베르누이 방정식과 연속방정식이 성립한다.

$$Const = \rho \cdot g \cdot h + \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 + P$$



## 차압유량계의 유량 계산 모델

위의 식에서  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $v$ 는 유체의 선형 속도,  $P$ 는 압력이다. 위 식의 첫 번째 항인  $\rho gh$ 는 중력장 하에서의 위치 에너지이다. 만약 유체가 동일한 위치에 있다고 하면 첫 번째 항은 무시가 가능하여 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$Const = \frac{1}{2}\rho \cdot v^2 + P$$

여기서 첫 번째 항은 운동에너지에 해당하고, 밀도는 질량과 동일한 개념이 된다. 그리고 두 번째 항인 압력  $P$ 는 위치 에너지에 해당한다. 즉 에너지 보존법칙을 의미하며, 조임기구 전후단을 통과하는 유체의 에너지는 보존되므로 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{2}\rho_1 \cdot v_1^2 + P_1 = \frac{1}{2}\rho_2 \cdot v_2^2 + P_2$$

여기서  $\rho_1, v_1, P_1$ 은 상류측(upstream) 밀도, 속도, 압력이며,  $\rho_2, v_2, P_2$ 는 하류측(downstream) 밀도, 속도, 압력이다. 따라서 파이프 상류측의 단면적을  $A_1$ , 하류측 단면적을  $A_2$ , 조임기구를 통과하는 질

량유량  $Q_M$  [kg/s]은 다음과 같다.

$$Q_M = \rho_1 \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot v_2 \cdot A_2$$

위 식의 양변을 제곱하여 하류측 속도항인  $v_2$ 의 제곱항으로 풀면 다음과 같다.

$$v_2^2 = v_1^2 \left( \frac{\rho_1 \cdot A_1}{\rho_2 \cdot A_2} \right)^2$$

위의 식을 이용하여  $v_1$ 에 대해 풀어쓰면 다음과 같다.

$$v_1 = \sqrt{2 \cdot (P_1 - P_2)} \cdot \sqrt{\frac{(\rho_2 \cdot A_2)^2}{[\rho_2^2 \cdot (\rho_1 \cdot A_1)^2 - \rho_1^2 \cdot (\rho_2 \cdot A_2)^2]}}$$

이 식을 이용하여 질량유량을 계산하면 다음과 같다.

$$Q_M = \rho_1 \cdot v_1 \cdot A_1 = \sqrt{2 \cdot (P_1 - P_2)} \cdot \sqrt{\frac{(\rho_1 \cdot A_1)^2 \cdot (\rho_2 \cdot A_2)^2}{[\rho_2^2 \cdot (\rho_1 \cdot A_1)^2 - \rho_1^2 \cdot (\rho_2 \cdot A_2)^2]}}$$

상류측 파이프의 직경이  $D$ 이고 하류측 파이프의 직경이  $d$ 이므로 단면적은 각각  $A_1 = \pi(D/2)^2$ ,  $A_2 = \pi(d/2)^2$ 가 된다. 그리고 면적을 파이

프의 직경으로 바꾸고 조임비  $\beta=(d/D)$ 를 대입하면 위의 식은 다음과 같다.

$$Q_M = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\rho_1}{\rho_2} - \beta^4\right)}} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \sqrt{2 \cdot (P_1 - P_2) \cdot \rho_1}$$

이 식은 베르누이 방정식과 질량보존의 법칙만으로 유도한 식이다. 그러나 실제 유량은 유체의 마찰, 수축부의 불일치 등 이상적인 가정 조건들과 차이가 있으며, 비압축성 유체(특히 액체)인 경우,  $\rho = \rho_1 = \rho_2$  이므로 위의 식 대신에 ISO-5167에서 질량유량에 대해 다음과 같은 실험식을 제안하고 있다.

$$Q_M = \frac{C}{\sqrt{(1-\beta)^4}} \cdot \varepsilon_1 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho_1}$$

여기서 C 는 유출계수(discharge coefficient)로 실제 유량과 이론 유량의 비를 나타내며, 조임기구를 설치한 관로에 비압축성 유체를 흘려 실험을 통해 구하는 값이다. 오리피스인 경우, ISO5167-1:1991의 8.3.2.1에 다음과 같은 실험식을 제시하고 있다.

$$C = 0.5959 + 0.0312 \cdot \beta^{2.1} - 0.184 \cdot \beta^8 + 0.0029 \cdot \beta^{2.5} \cdot \left( \frac{10^6}{Re_D} \right)^{0.13} \\ + 0.09 L_1 \cdot \beta^4 \cdot (1 - \beta^4)^{-1} - 0.0337 L_2 \cdot \beta^3$$

여기서  $L_1$ ,  $L_2$ 는 ISO 규격에서 정의한 오리피스 기하학적인 변수이며,  $Re_D$ 는 상류측의 레이놀드 수이다. 질량유량 식에 있는  $\varepsilon_1$ 은 팽창계수(expansion factor)인데 이 값은 실험적으로 결정되는 값이다. 보통 물의 경우 이 값은

1이다. 그러나 압축성 유체인 증기나 가스인 경우 이 값은 1보다 작다. 오리피스인 경우, ISO 5167-1:1991(E)의 8.3.2.2에 의하면 다음과 같다.

$$\varepsilon_1 = 1 - (0.41 + 0.35 \cdot \beta^4) \cdot \frac{\Delta p}{k \cdot P_1}$$

여기서  $k$ 는 등엔트로피 지수(isoentropic exponent)이며, 유체의 압력과 온도에 의해 결정되는 유체특성이다.

차압유량계를 설치하고 차압계와 차압 측정관(도압배관)을 설치할 때는 유체의 종류에 따라 상당한 주의를 기울여야 한다. 차압유량계



설치 지점의 공간 확보 문제, 유체의 종류에 따른 문제 때문에 부득이 한 경우도 있으나, 반드시 이 두 가지 중요한 사항을 고려하고 설치를 해야 한다. 대표적인 오리피스, 플로우 노즐, 벤츄리관의 장단점 비교는 아래 표와 같다.

종류	장점	단점
오리피스	<ul style="list-style-type: none"> <li>① 구조가 간단하고 저가격</li> <li>② 사용구조에 따라 다르나, 거의 반영구적</li> <li>③ 측정유량 범위 변경시 플레이트 변경만으로 가능</li> <li>④ 점도는 일반적으로 1~2%</li> <li>⑤ 액체, 가스, 증기의 유량측정이 가능하고, 광범위한 온도, 압력에서의 유량측정이 가능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>① 충분한 정도를 보증하기 위해 필요한 직관부가 필요</li> <li>② 벤츄리관에 비해 압력손실이 큼</li> <li>③ 낮은 측정가능범위(rangeability)이며, 통상 4:1 정도</li> <li>④ 엣지의 마모가 곧 정도에 영향을 미치므로 유체 중에 고형물 함유를 피해야 함</li> </ul>
플로우 노즐	<ul style="list-style-type: none"> <li>① 오리피스에 비해 소량 고형물이 포함된 유량측정이 가능</li> <li>② 오리피스에 비해 차압손실이 작으나 벤츄리관보다는 큼</li> <li>③ 오리피스 보다 마모가 정도에 미치는 영향이 작음</li> <li>④ 고온, 고압, 빠른 유속 유체에도 측정이 적당</li> <li>⑤ 같은 사양의 오리피스에 비해 유량계수가 60% 이상 많음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>① 오리피스와 같은 구경일 경우, 측정가능범위가 작음</li> <li>② 유량 측정 범위 변경시 교환이 오리피스에 비하여 어려움</li> <li>③ 오리피스에 비해 고가임</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>① 고형물을 함유한 유체에 적합. 단, 차압취출구의 막힘이 발생</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>① 가격이 노즐이나 오리피스에 비해 고가임</li> </ul>



벤츄리관	<p>하므로 퍼지 등 대책이 필요</p> <p>② 오리피스 및 노즐에 비해 압력손실이 적음</p> <p>③ 유체 체류부가 없으므로 마모에 의한 내구성이 우수</p> <p>④ 대유량 측정이 가능</p>	<p>② 낮은 측정가능범위를 가짐</p> <p>③ 유량의 측정범위 변경시 교환이 어려움</p> <p>④ 설치 범위가 큼</p> <p>⑤ 동일 사이즈의 오리피스에 비하여 발생차압이 작음</p>
------	---	--

## 2. 직관부 규격

다른 유량계도 마찬가지로 특이 차압유량계는 유량계 설치 지점의 상하류측에는 각종 규격에서 요구하는 길이만큼의 직관부를 설치하여야 한다. 요구하는 길이만큼의 직관부를 설치하지 않으면 기대하는 만큼의 유량 측정 정확도를 얻을 수 없다. 차압유량계에서 요구하는 상하류측의 직관부 길이는 다른 유량계에 비하여 상대적으로 길다. 특히 설치한 유량계가 고가의 유체, 에너지 유체 등의 상거래에 직접적으로 관련된 것인 경우에는 반드시 이 기준을 준수해야 한다. 보통의 경우 유량계를 공급하는 유량계 제조업체는 유량계를 공급할 때 요구되는 직관부의 길이를 명시하고 제공하게끔 되어 있으나, 제공하지 않는 제조업체도 있으므로 유량계를 공급받을 때 이에 대한 자료여부를 확인해야 한다.

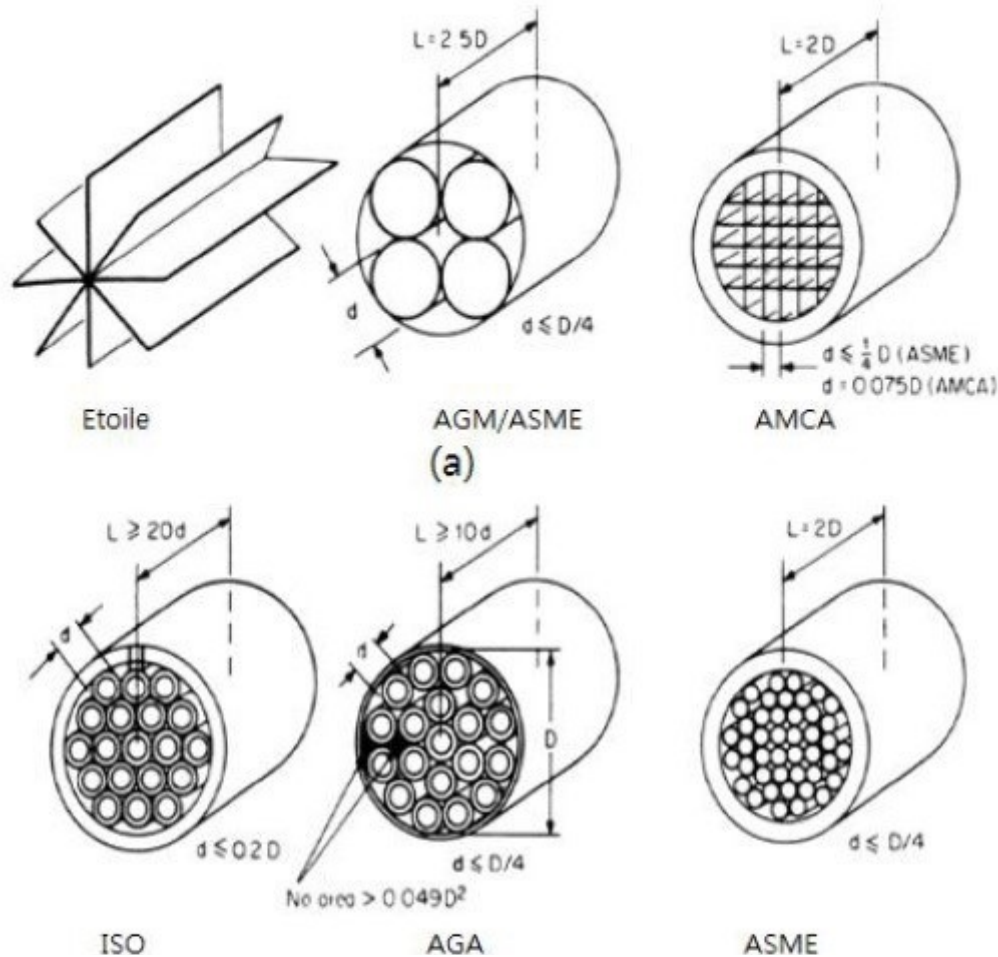
같은 차압유량계라도 차압유량계의 종류에 따라 직관부의 길이는 다르며, 또한 유량계를 설치하는 부근의 파이프 형상에 따라 요구되는 직관부의 길이는 달라진다. 따라서 직관부에 대한 지식을 잘 습득하여 실패하는 일이 없도록 해야 한다. 미국, 유럽 등에서 오리피스, 노즐, 벤츄리의 상하류에서 유동에 교란을 발생시키는 엘보우, 밸브 등이 있는 경우에 대하여 직관부의 길이를 변화시키면서 교란의 영향을 실험하였으며, 그 결과를 기준으로 교란의 영향을 피하는데 필요한 최소한의 직관부 길이를 결정하였다. 미국의 실험결과를 기준으로 하여 만들어진 ANSI 2503과 ASME Fluid Meters는 ISO 5167 규격과 다르며, ISO 규격이 더 보수적으로 되어 있다.

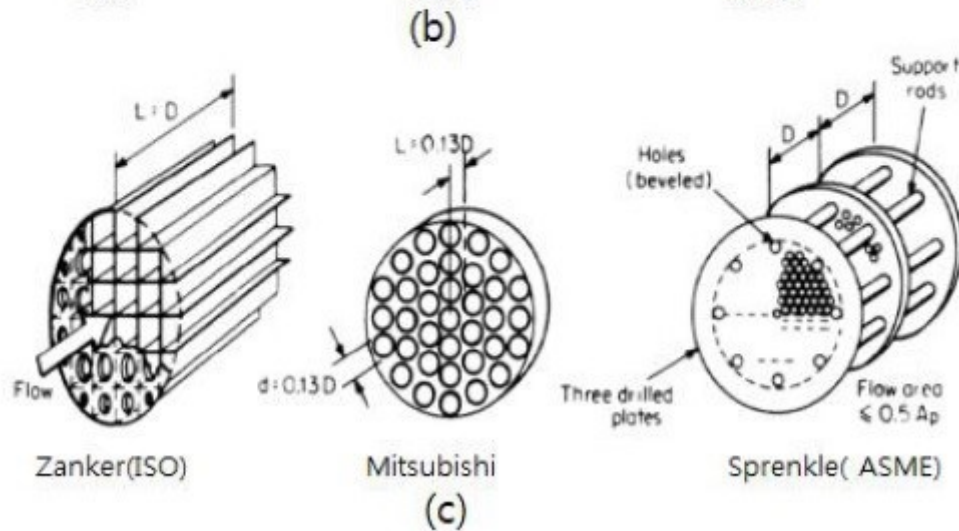
- ANSI : American National Standards Institute(미국규격협회)
- ASME : American Society of Mechanical Engineer(미국기계학회)
- ISO : International Organization for Standard(국제표준화기구)

### 3. 정류기 및 도압배관

유량계를 설치할 때 소용돌이(swirl)를 제거하거나, 완전히 발달된 이

상적인 유속분포를 발생시킬 수 있는 충분한 길이의 직관부를 확보 하기가 곤란할 경우에는 아래 그림과 같은 정류기를 사용하게 된다. 4개의 작은 관으로 구성된 그림의 (a)와 같은 정류기를 사용하면 소 용돌이는 효과적으로 제거되나, 속도분포는 대칭이 되지 않는다. (c) 와 같은 정류기를 사용하게 되면 소용돌이의 제거도 잘 되고, 속도분 포도 거의 대칭으로 된다.

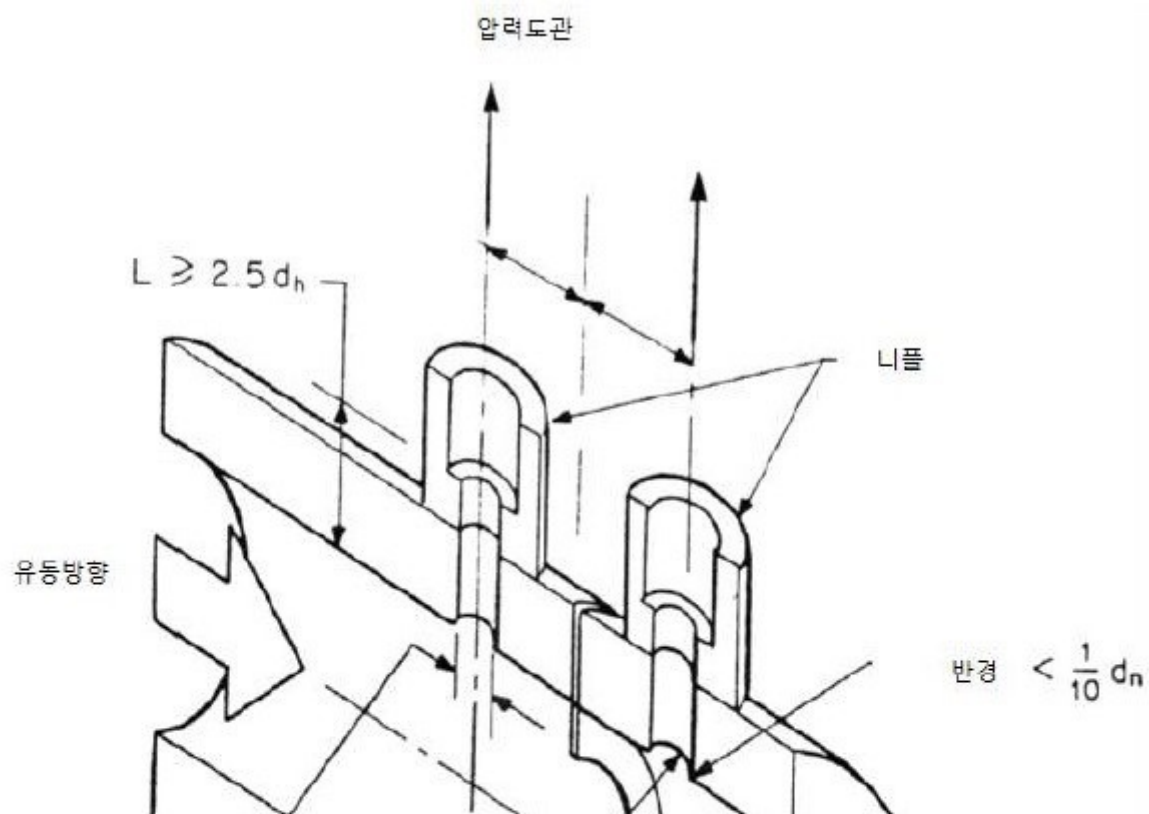


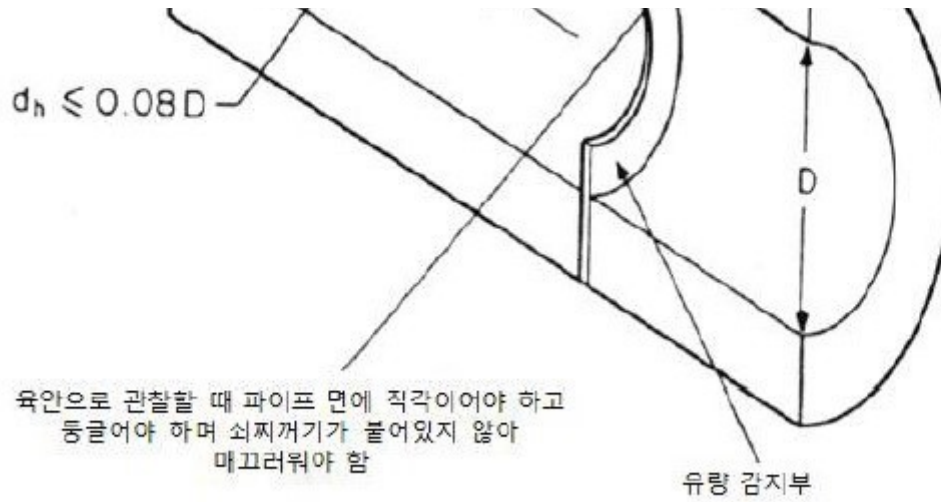


실제 현장에서는 값이 저렴하고 제작하기 용이하며 유지보수가 간단한 AGA 및 ASME형의 관다발 정류기가 많이 사용된다. 설치할 작은 관의 수는 규정되어 있지 않지만, 일반적으로 4개의 관으로는 소용돌이와 2차 유동을 효과적으로 제한시킬 수 있지만, 속도분포의 변형까지 교정하고자 하는 경우에는 19개 이상의 작은 관으로 제작된 정류기를 사용하여야 한다. 소용돌이 제거용 정류기인 그림(a)는 압력 손실은 작지만, (c)와 같은 압력 손실이 큰 정류기에 비하여 더 긴 직관부가 필요하다.

차압을 측정하여 유량을 측정하기 위해서는 차압을 측정하는 도압배

관 및 차압계를 반드시 설치해야 한다. 이 경우에 도입배관의 크기는 파이프 내경에 따라 달라지며 또한 설치하는 도입배관 및 차압계의 위치 및 파이프 방법은 어떠한 유체의 유량을 측정하느냐에 따라 매우 다양하다. 이 경우에 대해 ISO에서는 매우 자세하게 규정하고 있다. 특히 설치하는 도입배관 및 차압계의 위치 및 파이프 형상은 유량 측정의 정확도에 결정적인 영향을 미치기 때문에 유의하여 설치하여야 한다. 차압을 측정하기 위한 구멍의 위치와 크기에 대한 ISO 규격은 아래 그림과 같다.





두 개의 차압 측정 구멍의 크기는 동일하여야 하며 구멍 끝의 표면은 매끄럽게 처리되어야 한다. 그리고 도압배관의 구멍 크기에 대한 AGA(American Gas Association, 미국가스협회) 규격은 아래 표와 같다.

파이프 내경	권고 구멍 직경	최대 구멍 직경	최소 구멍 직경
2 이하	1/4	1/4	1/4
2 ~ 3	3/8	3/8	1/4
4 이상	1/2	1/2	1/4

그리고 차압식 유량계의 파이프 구경에 따른 적정 사용량은 아래 표와 같다.



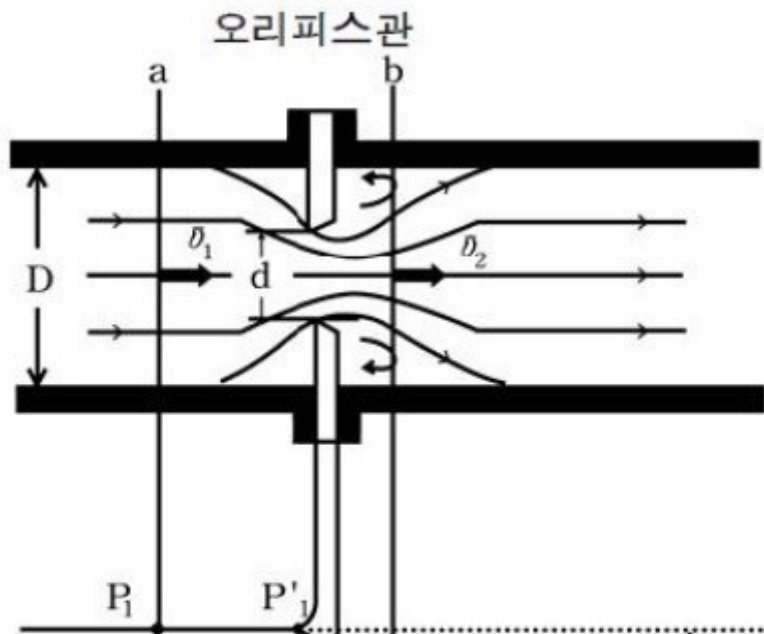
구경 (mm)	벤츄리, 노즐 유량계		오리피스 유량계	
	유량(m <sup>3</sup> /h)	유량(m <sup>3</sup> /일)	유량(m <sup>3</sup> /h)	유량(m <sup>3</sup> /일)
75	5-50	120-1,200	2.5-30	60-720
100	7-65	168-1,560	5.0-50	120-1,200
125	12-100	288-2,400	7.5-85	180-2,040
150	20-150	480-3,600	10-120	240-2,880
200	30-270	720-6,480	17.5-210	420-5,040
250	45-425	1,080-10,200	25-325	600-7,800
300	60-600	1,440-14,400	37.5-500	900-12,000
350	85-850	2,040-20,400	50-650	1,200-15,600
400	100-1,000	2,400-24,000	65-850	1,560-20,400
450	140-1,400	3,360-33,600	85-1,100	2,040-26,400
500	180-1,800	4,320-43,200	100-1,350	2,400-32,400
600	250-2,500	6,000-60,000	150-2,000	3,600-48,000
700	350-3,500	8,400-84,000	200-2,600	4,800-62,400
800	450-4,500	10,800-108,000	250-3,500	6,000-84,000
900	550-5,500	13,200-132,000	350-4,500	8,400-108,000
1,000	700-7,000	16,800-168,000	450-5,500	10,800-132,000
1,100	850-8,500	20,400-204,000	550-6,700	13,200-160,800
1,200	1,000-10,000	24,000-240,000	700-8,000	16,800-192,000
1,350	1,250-12,500	30,000-300,000		
1,500	1,500-15,000	36,000-360,000		
1,650	1,850-18,500	44,400-444,000		

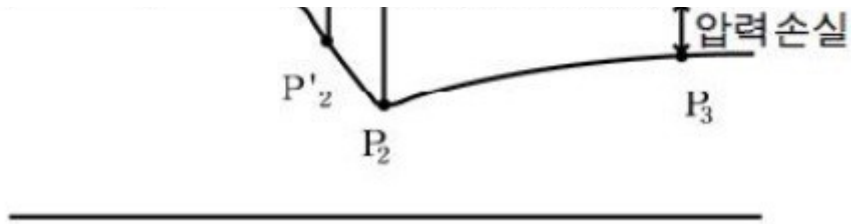


1,800	2,250-22,500	54,000-540,000		
2,000	2,750-27,500	66,000-660,000		

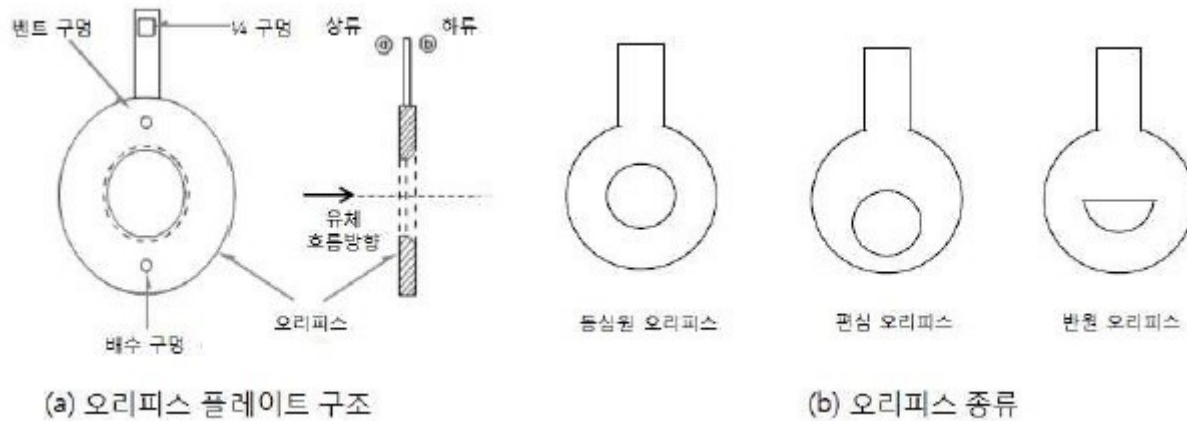
#### 4. 오리피스 유량계

오리피스 방식의 측정원리는 아래 그림과 같다. 파이프 내에 유체가 흐르면 파이프벽, 밸브 또는 오리피스에 의해 에너지가 손실되며, 이에 따라 하류측의 압력은 낮아지게 된다. 오리피스의 경우에는 그림과 같이 한번 낮아진 압력 중 일부분은 다시 회복되지만, 여전히 회복되지 않는 손실을 오리피스의 압력손실이라 한다. 일반적으로 압력손실은 대략  $\pm(1-\beta)$ 로 주어지며, 오리피스가 다른 조임기구에 비해 압력손실이 제일 큰 편이다.





차압식에 사용되는 핵심부품인 조임기구용으로 가장 많이 사용하는 것이 오리피스이다. 오리피스는 노즐이나 벤츄리관에 비해 압력손실이 크고 다른 조임기구에 비해 유량계수가 작은 결점이 있다. 그러나 형상이 간단하고 제작이 용이하고 고정밀 가공이 가능하며, 가격이 저렴하기 때문에 가장 많이 사용되고 있다. 오리피스 플레이트의 구조는 아래 그림에서 보듯이 상류측과 하류측을 구분해야 한다.



하류쪽에 그림과 같이 경사지게 되어 있는데, 보통 30~45°각도로 제작한다. 오리피스 플레이트 가운데 부분, 즉 유

체가 통과하는 부분의 형태는 동심원, 편심, 반원형 등이 있으며, 가장 많이 사용되는 모양은 동심원 오리피스 플레이트이다. 편심과 반원형 오리피스는 상류쪽에 고체 또는 입자들의 퇴적 우려가 있는 입자를 포함한 유체 측정에 적합하다. 대부분의 응용에서 액체의 경우 조임비는 0.15 ~ 0.75, 가스나 증기의 경우 조임비는 0.2 ~ 0.7이지만, 0.4 ~ 0.6 인 경우가 가장 좋은 결과가 나온다. 오리피스를 이용한 자세한 사용 방법은 국제규격 ISO 5167에서 다루고 있으며, 한국공업규격 KSA 0612에서 규정하고 있다. 오리피스 판의 두께는 파이프 내경을 D라 하면 보통 0.005D ~ 0.02D 사이의 값을 이용하고, 같은 유체에서도 고온용의 경우에는 팽창에 의한 변형을 막기 위해 최소 두께가 아래 표와 같이 약간 두껍게 하여 사용한다.

파이프 직경(mm)	유체온도 (320℃ 이하)	유체온도 (320℃ 이상)
100 이하	1.5 ~ 3.0	6.0
100 ~ 180	3.0 ~ 5.0	10
180 ~ 250	3.0 ~ 8.0	13
250 이상	8.0 ~ 13.0	13 ~ 20

오리피스의 전, 후단에 압력을 측정하는 위치를 탭(tap)이라고 하며, 탭의 위치에 따라 오차가 발생할 수 있다. 오리피스를 지난 후부터 급격히 압력이 낮아지다가 어느 지점 이후부터 다시 압력이 증가하기

시작한다. 따라서 오리피스를 이용한 압력차는 탭의 위치에 따라 달라질 수 있다. 따라서 오리피스를 이용한 압력차는 탭의 위치에 따라 달라질 수 있다. 탭의 위치 선정은 다음과 같은 5가지 방법이 있다.

- ① 플랜지탭(flange taps) : 이것은 파이프 직경이 50 mm 이상이고 파이프 직경이 35 mm 보다 작은 경우에는 사용하지 않는다.
- ② 축류탭(venacontracta taps) : 오리피스에서 상류측은 파이프 직경만큼 떨어진 위치 그리고 하류측은 압력이 최소가 되는 위치에 탭을 설치한다. 이러한 축류탭은 파이프 직경이 150 mm까지는 적용이 가능하다.
- ③ 반경탭(radius taps) : 오리피스에서 상류측은 배관직경(D), 하류측은 배관직경의  $D/2$  인 위치에 탭을 설치한다. 이것은 축류탭과 거의 유사하지만, 오리피스의 조임비에 관계없이 항상 탭의 위치를 선정할 수 있으므로 보다 간단하게 설치할 수 있다.
- ④ 파이프 탭(pipe taps) : 오리피스에서 상류측은  $2.5D$ , 하류측은  $8D$  의 위치에 탭을 설치한다. 오리피스에서 멀리 떨어진 위치이므로 정확한 위치는 별로 중요하지 않다. 그러나 파이프의 거칠기, 파이프의 정밀도 등에 영향을 많이 받는다.
- ⑤ 코너탭(coner taps) : 이것은 플랜지탭과 거의 유사하지만, 오리피

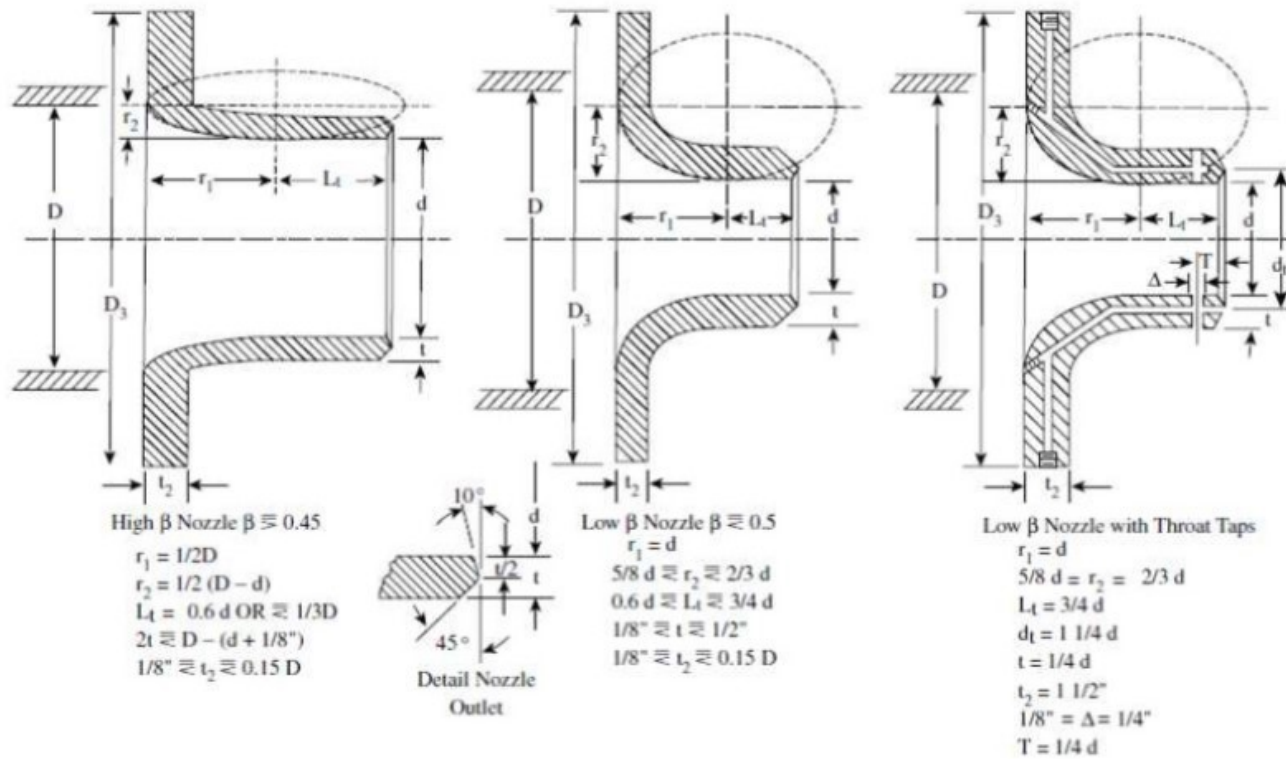
스판과 파이프벽 사이 코너에 탭을 설치하는 점이 약간 다르다. 이것은 보통 파이프 직경이 50 mm 이하인 경우에 주로 사용한다.

## 5. 플로우 노즐 유량계

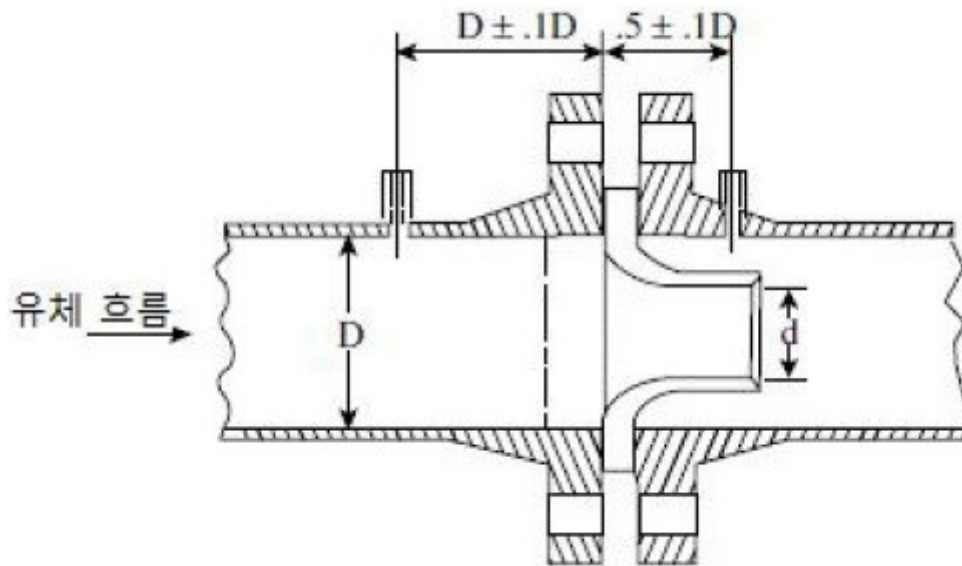
또 다른 조임기구로 플로우 노즐(flow nozzle)이 있다. 노즐형상은 유체흐름에 의한 유선형로를 많이 따르고 있기 때문에 유체 중에 이물질에 의한 마모 등의 영향은 직각날 오리피스에 비해 매우 작은 편이며, 유출계수는 전 측정범위에서 0.9 ~ 0.99 범위로 동일한 직경, 동일 차압을 발생시키는 오리피스에 비하여 약 65% 정도 많은 유체를 흘릴 수 있다. 일반적으로 노즐은 수직관로상에서 유입부가 위쪽으로 설치하는 것이 바람직하며, 액체보다는 기체 유량측정에 더 적합하다고 볼 수 있다. 노즐의 크기는 1/8"~ 60"까지 다양하게 있으며, 스테인리스강, 탄소강, 동, 유리섬유, 알루미늄, PVC, monel, hastalloy 등 다양한 재료로 만들 수 있다. 이에 제작 규격은 ASME MFC-3M, BS-1042, ISO-5167 표준에 자세히 기술되어 있다.

1932 ISA 노즐은 미국에서는 볼 수 없는 유럽형이며, 일명 벤츄리 노

즐이라고 알려진 변형은 1932 ISA 노즐의 입구 부분에 벤츄리관의 확산콘을 결합한 형상이다. ASME 플로우 노즐은 미국에서 사용하는 노즐 표준이다. 이 노즐은 아래 그림과 같이 2종류로 구분할 수 있는데, 높은  $\beta$  값을 가지는 것과 낮은  $\beta$  값을 가지는 것이다. 높은  $\beta$  노즐은 0.45~0.8 사이의 값, 낮은  $\beta$ 는 0.2~0.5 사이의 값을 가진다. 두 노즐의 차이점은 낮은  $\beta$  노즐은 입구부분의 곡면이 부드러운 원형을 보인 반면, 높은  $\beta$  노즐은 입구구분의 곡면이 타원형을 보인다.



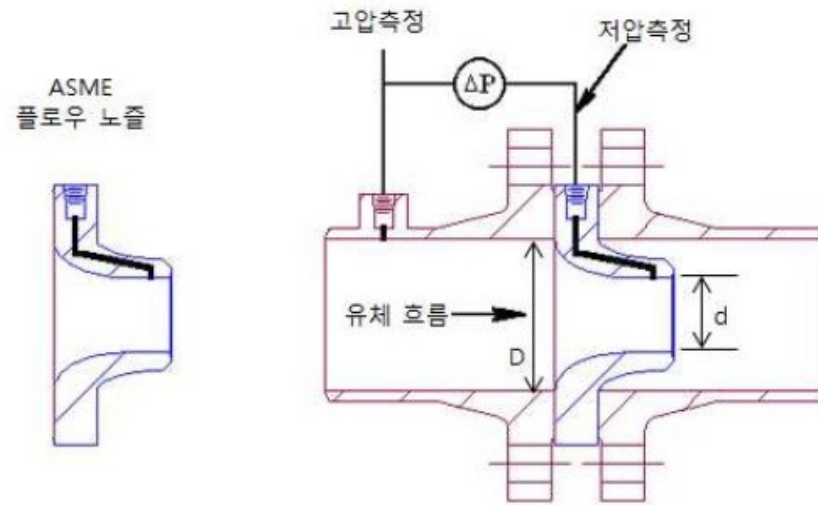
노즐의 파이프 내 설치방법에는 플렌지로 고정하는 방법, 링으로 고정하는 방법, 용접으로 고정하는 방법이 있다. 아래 그림과 같은 표준 플렌지형(flanged type)이 가장 많이 사용하는 노즐 설치방법이며, 파이프 플렌지 사이에 삽입하여 설치하는 형태이다. 링 고정 방법은 플렌지가 없는 파이프에 설치하는 방법이며, 동일재료로 만든 링과 핀을 이용해서 설치한다. 링을 이용해서 노즐을 고정시키는 방식이므로 4인치 이하의 크기는 사용하지 않는 것이 좋다. 용접방법은 파이프 내에 용접을 통해 장시간 설치하여 운영하는 용도로 사용되며, 고온 고압의 유체에 대해 주로 사용한다.



노즐의 파이프 내 설치규격은 ASME PTC-6에 자세히 나와 있다. 이

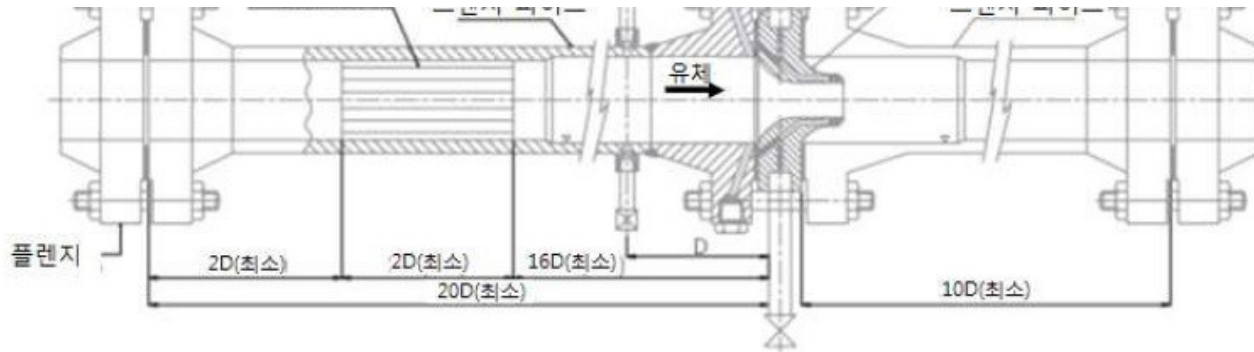


중에서 표준 플렌지형의 경우는 아래 그림과 같다. 노즐은 유체의 손실을 막기 위해 가스켓을 사용하여 단단히 고정시킨다. 압력 측정용 전단부 탭의 위치는 파이프의 직경인  $D$ 의 위치에 탭을 내어 설치를 하고, 노즐 전단부에 설치되는 직관부의 길이는 최소  $20D$  이어야 하고, 유체의 흐름을 평탄하게 해 주는 정류기의 길이도 최소  $2D$  이상, 그리고 정류기 끝부분부터 노즐까지 최소  $16D$ 의 길이가 확보되어야 한다. 그리고 노즐을 지난 후의 파이프도 최소  $10D$ 의 길이는 확보를 해야 한다.



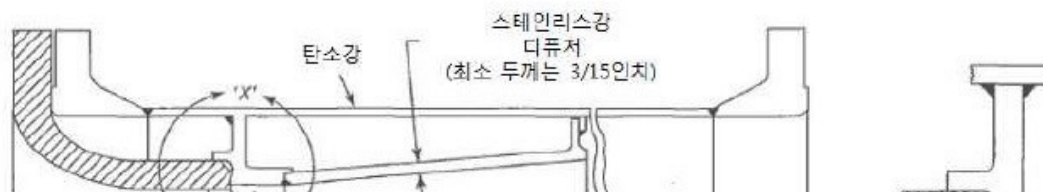
(a) ASME 플로우 노즐 구조

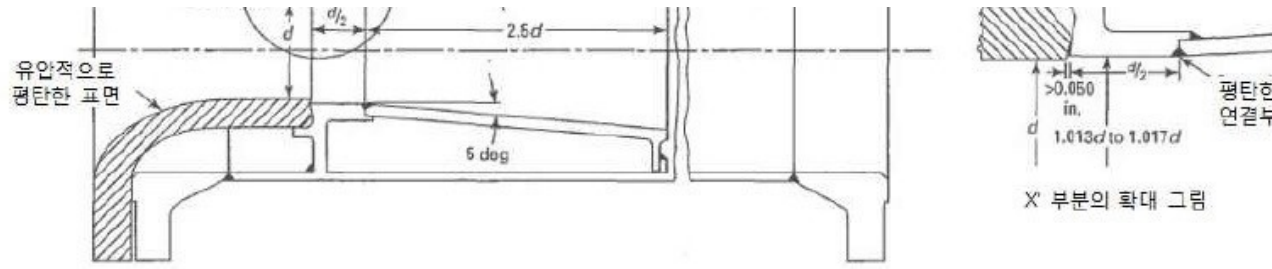




(b) ASME PTC-6에 규정된 노즐 조립 규격

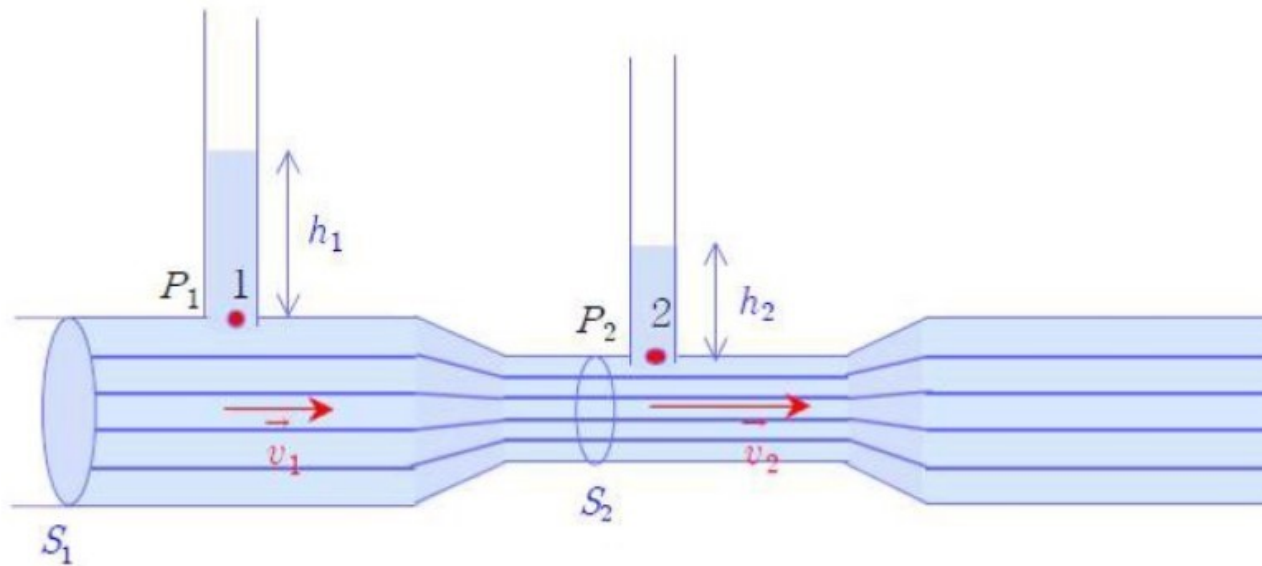
노즐을 이용하여 대용량의 유량을 측정할 때, 노즐에 의해 상대적으로 매우 큰 압력손실이 발생한다. 이러한 압력손실에 의해 제어공정에 정상적인 흐름을 방해할 수도 있다. 짧은 시간에 사용하는 것은 문제가 없지만, 장시간 사용하게 되면 이러한 압력손실은 정상적인 공정에 큰 방해가 될 수 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 노즐 후 단부에 설치하는 것이 디퓨저(diffuser)이며, 디퓨저를 사용하게 되면 압력손실의 약 70%를 줄일 수 있다. 디퓨저의 대표적인 설치 규격은 아래 그림과 같다. 노즐과 디퓨저 사이에 유체 계수에 영향을 주지 않도록 하기 위해  $d/2$  만큼의 유체거리 확보가 중요하다.(그림에서 X' 부분)





## 6. 벤츄리관 유량계

1791년 이탈리아 물리학자인 지오반니 벤츄리(Giovanni Venturi)가 벤츄리 효과라는 것을 처음으로 제안하였는데, 아래 그림과 같이 넓은 파이프에서 좁은 파이프으로 유체가 흐르게 되면 압력은 낮아지고 유속은 빨라진다는 효과이다. 이것은 추후 베르누이에 의해 수식적으로 증명이 되었다.



벤츄리관의 유량측정과 관련된 실험식은 베르누이 방정식과 파스칼의 법칙을 이용해서 계산할 수 있다. 위의 그림에서 보는 것처럼 관을 통과하는 중에 단면적이 각각  $S_1$ 과  $S_2$ 로 다른 두 부분에 수직관 1과 2를 세워 놓는다. 유체의 흐름은 단면의 넓이가 넓은  $S_1$ 인 곳을 흐르는 유체의 속도  $v_1$ 은 좁은 단면적  $S_2$ 인 곳을 흐르는 유체의 속도  $v_2$ 보다 더 느리게 흐른다. 유체의 속력이 빠르면 베르누이 방정식에 의해 속력이 더 느린 곳의 유체에서보다 압력이 더 작게 된다. 따라서 그림처럼 액주의 높이가 1의 위치보다 2의 위치에서 액주 높이가 더 낮아지게 된다. 1의 위치에서 압력  $P_1 = \rho gh_1$ 이 되고, 2의 위치에서의 압력은  $P_2 = \rho gh_2$ 가 된다. 따라서 유체의 높이  $h_1$ 과  $h_2$ , 유체의 속도  $v_1$  과  $v_2$  사이에는 다음과 같은 식이 성립한다.

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

여기서 다시 연속방정식을 도입하여 부피유량을 계산하면 다음과 같다.

$$Q_v = S_2 v_2 = \sqrt{2} S_2 \frac{1}{\sqrt{(S_1)^2}} \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{\rho}}$$

$$\sqrt{1 - \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2}$$

이 식은 비압축성이고 큰 레이놀드 수를 가지는 이상적인 유체에 대해 적용이 가능한 이론적인 식이다. 만약 작은 레이놀드 수인 경우는 이상적인 경우와 차이가 나기 때문에, 이상적인 유량과 실제유량의 비인 속도계수를 도입하고 파스칼의 법칙에 의한 압력  $P = \rho gh$ 를 도입하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Q = CQ_{ideal} = \frac{CS_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2}} \sqrt{2g(h_1 - h_2)}$$

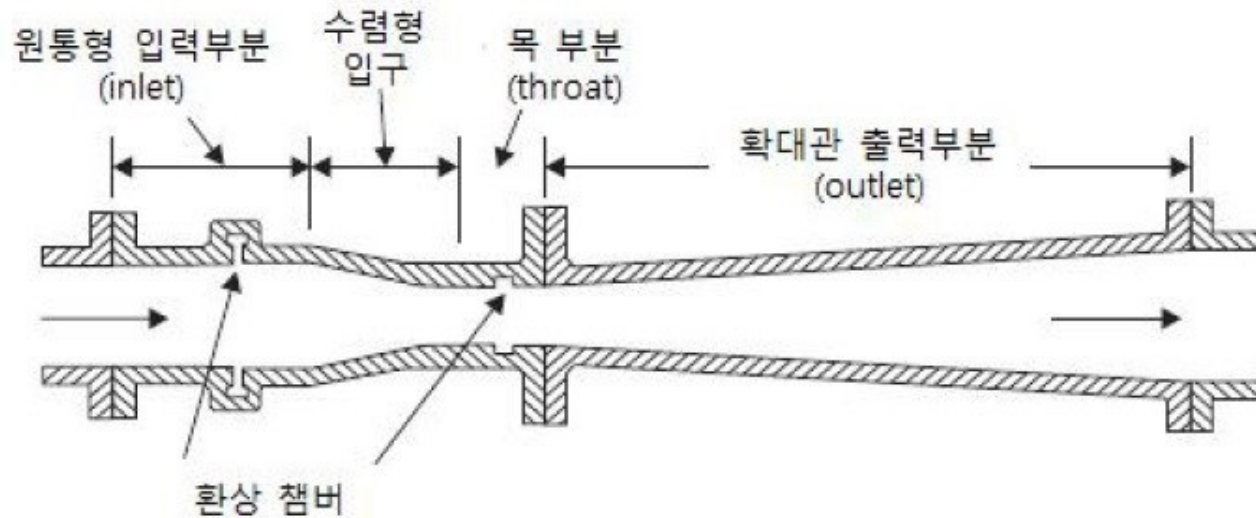
$$K = \frac{C}{\sqrt{1 - \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2}}$$

따라서 1과 2 지점에서의 압력차를 측정하면 관 속에 흐르는 실제 부피유량을 다음과 같은 간단한 식으로부터 계산할 수 있다.

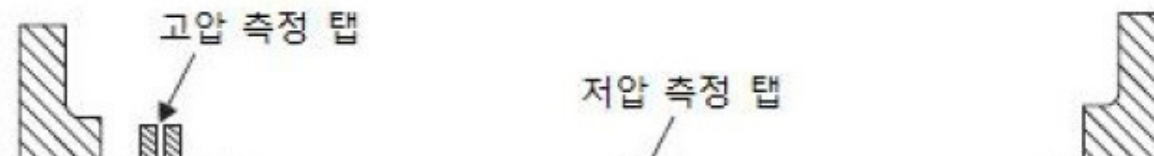
$$Q = KS_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)}$$

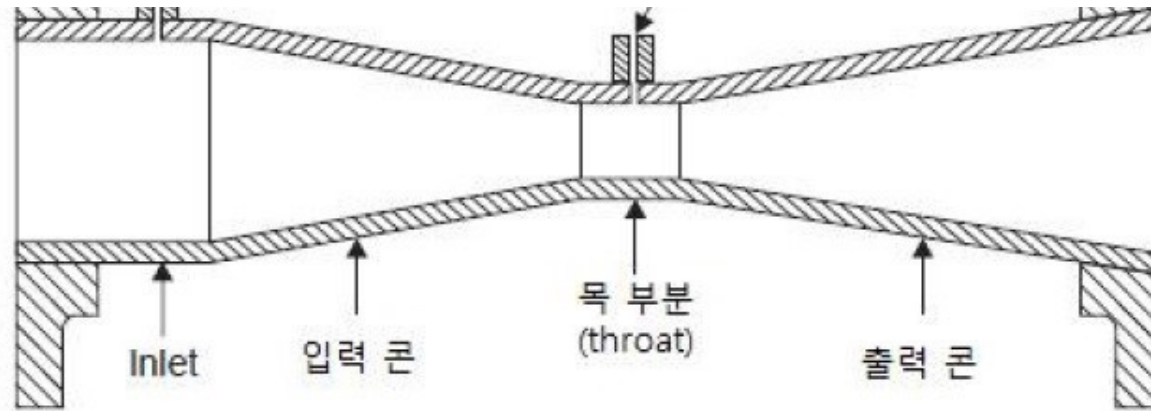
벤츄리관은 아래 그림과 같이 크게 클레멘스 허셀(Clemens Herschel)이 1887년에 제안한 고전형(긴 벤츄리관, long form venturi tube)과 1950년대에 제안된 짧은 벤츄리관(short form venturi tube)으로 나눌 수 있다. 벤

츄리관은 유체의 유입 및 유출부분이 모두 유선형으로 되어 있어서 유량 측정시 압력손실이 적으며, 실제적인 유체 유동과 벤츄리의 유선형도가 잘 일치하기 때문에 유출계수는 거의 1에 가깝다.



(a) 고전적인 장형 벤츄리 관





(b) 단형 벤츄리 관

허셀이 제안한 고전적인 장형 벤츄리관은 다음과 같이 구성되어 있다.

- ① 원통형 입력부분은 파이프의 직경과 동일하다.
- ② 수렴하는 원뿔형 입구 부분은 단면적이 감소하도록 설계되어 있다. 이것은 이 부분을 지나는 유속이 점점 더 빨라지도록 하고, 동시에 압력은 감소하도록 한다.
- ③ 원통형 목 부분에서 속도는 일정하며, 여기서 감소된 압력을 측정한다. 목 부분의 중간 위치에 환상형으로 압력 탭을 가공하여 6~8군데에서 압력을 측정하고 평균하여 저압을 측정한다. 일반적으로 4개 정도의 탭을 가장 많이 사용한다.
- ④ 방사형 출력부분에서 속도는 다시 감소하고 압력손실은 여기서



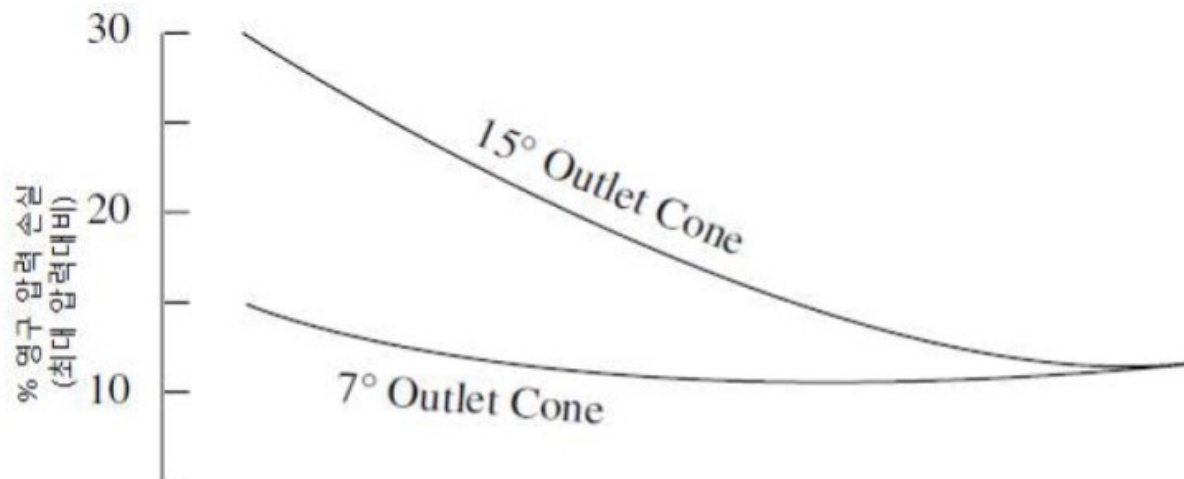
대부분 처음 입력부분의 압력과 동일하게 회복된다.

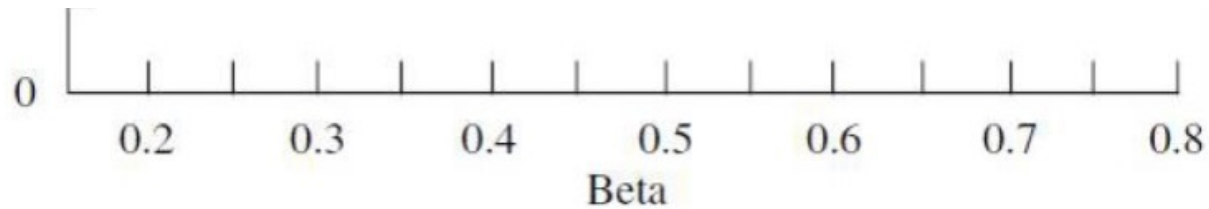
전형적인 벤츄리관 유출부분의 발산각도는 규격서에 7~15°로 되어 있지만 실제적으로는 7~8°로 하는 것이 많이 사용되고 있으며, 축류가 없으므로 유출계수는 0.98~1.0 정도이다. 장형 벤츄리관 제작은 기계 가공법, 주철을 이용한 방법, 그리고 판금을 이용한 방법이 있는데 각각의 방법에 따라 유출계수와 오차는 아래 표와 같이 차이가 난다. 유출계수는 실제값과 측정값의 비율을 의미한다. 이러한 장형 벤츄리관은 깨끗하고 부식성이 없는 액체와 기체 등에만 사용이 가능하다. 왜냐하면 압력 탭 부분이 먼지 또는 쓰레기에 의해 막히면 압력 탭 부분을 깨끗이 청소할 수 없는 구조로 되어 있기 때문이다.

방법	레이놀즈 수( $\times 10^4$ )	유출계수 C	예상오차(%)
주철관	4	0.957	2.5
	6	0.966	2.0
	10	0.976	1.5
	15	0.982	1.0
	20	불변	불변
판금관	4	0.96	3.0
	6	0.97	2.5
	10	0.98	2.5
	20 이상	불변	1.0

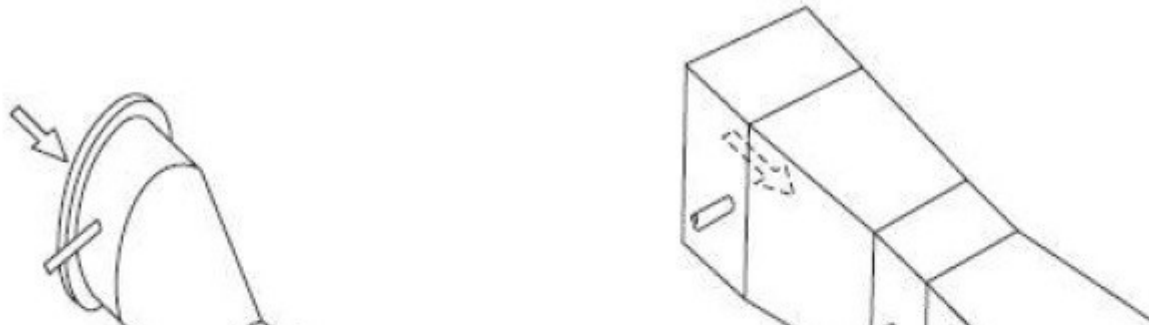
기계 가공판	5	0.970	3.0
	10	0.977	2.5
	20	0.992	2.5
	30	0.998	1.5
	50	0.995	1.0

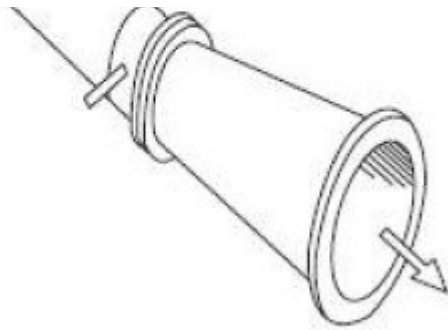
장형 벤츄리관이 가지고 있는 단점을 보완하고 가격도 낮추고 파이프 길이도 짧게 만들기 위해 개발된 것이 단형 벤츄리관이다. 이것은 이전의 장형과 비교해서 두 가지 점에서 큰 차이점이 있는데, 압력을 측정하기 위한 목 부분의 환상형 압력탭 대신에 하나의 외부 압력탭을 만든 것과 출력부분의 콘의 각도를 7도에서 21도로 바꾼 것이다. 각도가 커지게 되면 길이는 더 짧게 줄일 수 있지만 이로 인한 압력 손실은 점점 더 커진다. 조임비에 따른 7도와 15도에 대한 압력손실은 아래 그림과 같다.



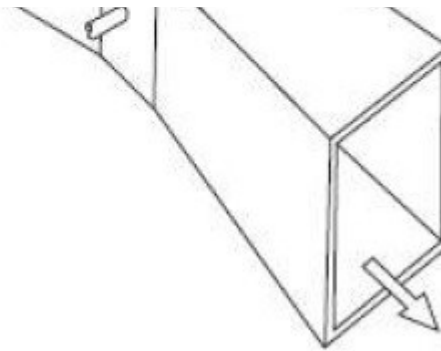


고압 측정용 압력탭은 입력콘 직경의  $1/4 \sim 1/2$  사이 위치에 설치하고, 저압 측정용 압력탭은 목 부분의 중앙에 설치한다. 이들의 제작사양 및 설치조건 등에 관해서는 ISO 5167에 자세히 나와 있다. 벤츄리관의 압력손실은 다른 유량계에 비하여 적기 때문에, 정기적이고 계속적인 대용량 유체 공급 관로에 설치하는 것이 최초의 설치비용을 감안하더라도 오리피스 등과 같이 압력손실이 큰 유량계에 비하여 훨씬 경제적이다. 따라서 벤츄리관은 고속 대용량의 측정이나 압력손실에 주의해야 하는 경우에 주로 사용되며, 고체가 측정 유체 중에 포함되어 있는 탁한 액체에도 사용이 가능한 장점이 있다. 벤츄리관은 위의 그림 형태 이외에도 아래 그림과 같이 타원형과 직육면체형 벤츄리관 등 다양한 형태로 제조하여 사용을 하고 있다.





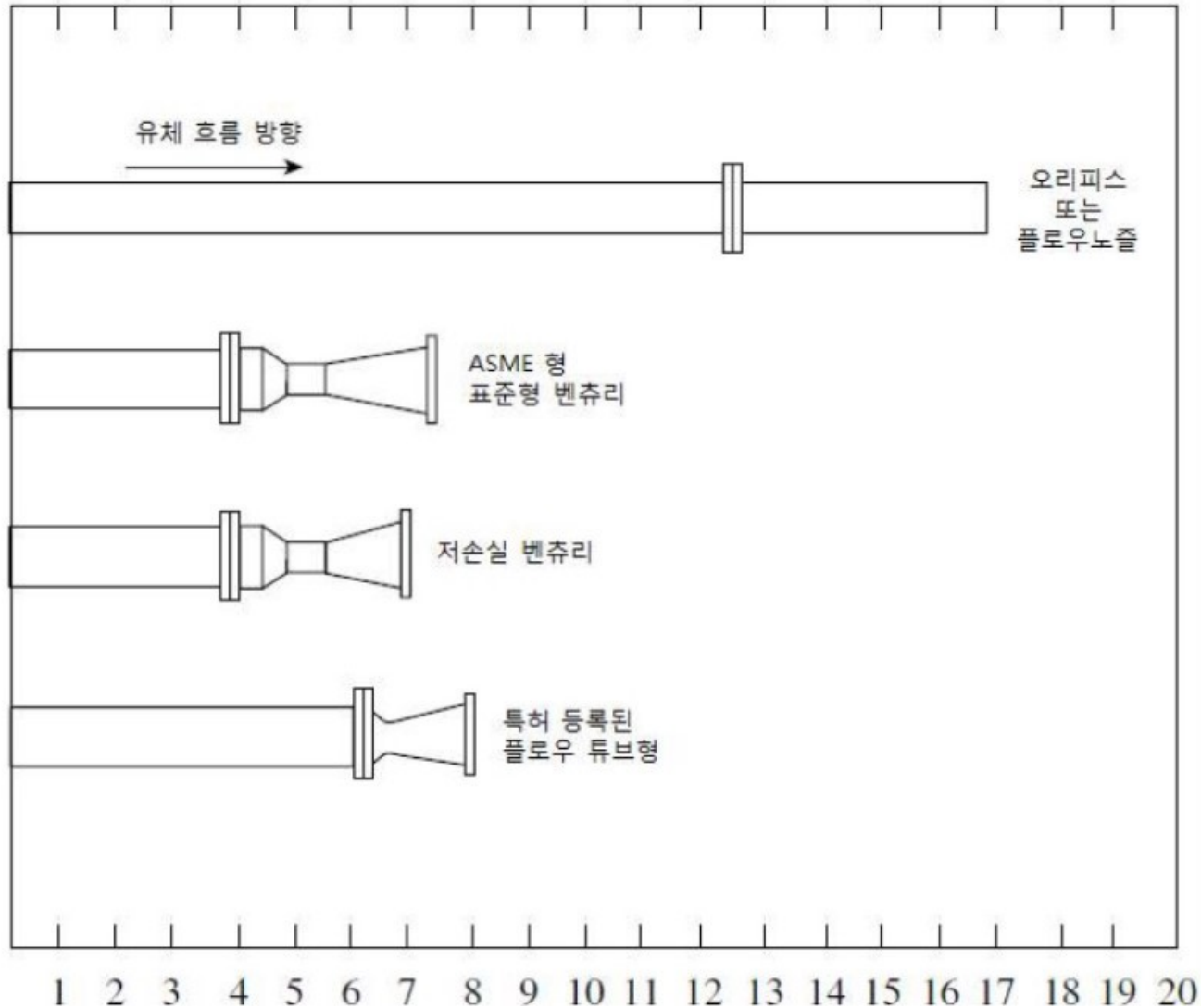
(a) 타원형 벤츄리 관



(b) 직육면체형 벤츄리관

벤츄리관은 응용과 파이프의 요구 조건에 따라 어떤 위치에도 설치가 가능하다. 그러나 설치할 때 유일한 제약 사항은 액체인 유체를 다룰 때, 벤츄리관 내부에 유체로 항상 가득 차 있어야 한다는 것이다. 이를 위해 대부분의 경우, 오리피스와 마찬가지로 밸브로 된 압력탭 설치를 권장하고 있다. 상류측에서 적절한 유속을 얻기 위해서는 가능한 파이프의 길이가 긴 것이 좋다. 그러나 실제 설치 상황에서는 오리피스 보다는 더 짧은 파이프를 사용해도 된다. 왜냐하면 벤츄리관의 디자인 모양이 유체 흐름과 유사한 형상을 제공하기 때문이다. 그리고 오리피스나 노즐 보다는 벤츄리관의 상류측 파이프 길이가 일반적으로 더 짧으며, 상류측 파이프와 벤츄리관을 합친 전체 파이프 길이는 오리피스 또는 노즐의 파이프 길이보다 훨씬 짧다.

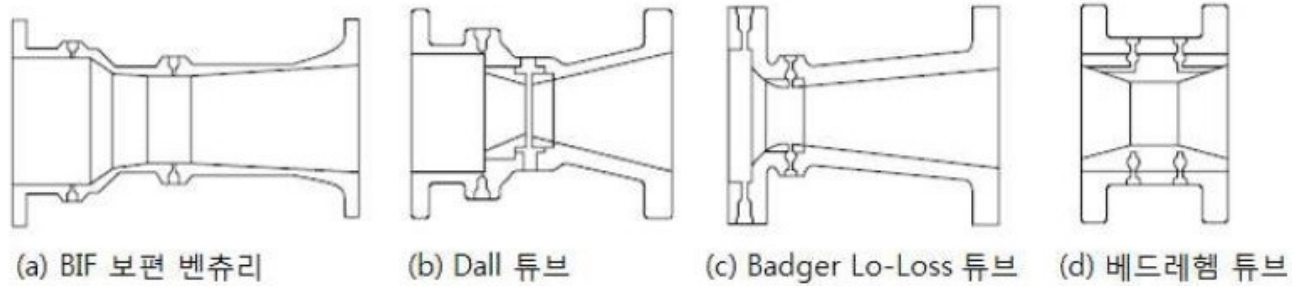
아래 그림은 0.7β와 하나의 관이름이 있는 경우, 조임기구별로 요구되는 상류측 파이프 직경을 나타낸다. 정류기를 사용하면 입력부 파이프 길이를 그림보다 더 줄일 수는 있다. 밸브를 2D 보다 가까이 두지 않는다면 벤추리의 하류측 파이프에 대한 제약은 없다.



### 배관 직경 배수

## 하나의 관이음과 $0.7\beta$ 에서의 상류측 파이프 직경의 비교

고전적인 벤츄리관에 비해 출력부 길이를 줄인 아래 그림과 같은 소형화된 다양한 유체튜브(flow tube)들이 특허로 등록되었다. 이 중에서 Dall 튜브는 영국에서 특허를 받은 것이고, 나머지 3개는 미국에서 특허를 받은 것이다. 이들 모두는 파이프 길이가 모두  $4D$  이하이며, 가장 짧은 것은  $2\sim 2.5D$  인 것도 있다. 유체튜브는 압력탭의 수압 위치에 따라 크게 3가지 형태로 구분이 된다. 타입 1은 입력부(inlet)와 출력부(outlet) 양쪽에 고정된 압력탭이 있는 것이고, 타입 2는 입력부에 코너탭, 목부분에 고정탭이 있는 것이고, 타입 3은 입력부와 출력부 모두 코너탭으로 구성된 것이다. 고전적인 벤츄리관은 속도가 방향을 바꾸지 않고 파이프벽과 평행한 부분에 고정 압력탭이 설치되어 있는 반면, 코너탭은 속도가 방향을 바꾸고 파이프 벽과 평행하지 않는 곳에서 압력을 측정한다. 타입 3 유체튜브는 전체 길이가 짧기 때문에 보다 큰 크기로 사용이 가능하지만, 적절한 성능을 위해서는 상류측의 적절한 파이프 길이가 필요하다. 일반적으로 유체튜브는 4 인치부터 48 인치 크기까지 가능하며, 적은 유량과 작은 파이프에는 적합하지 않다. 대신 큰 시스템에서는 벤츄리 보다는 비용이 덜 소요되는 장점이 있다.

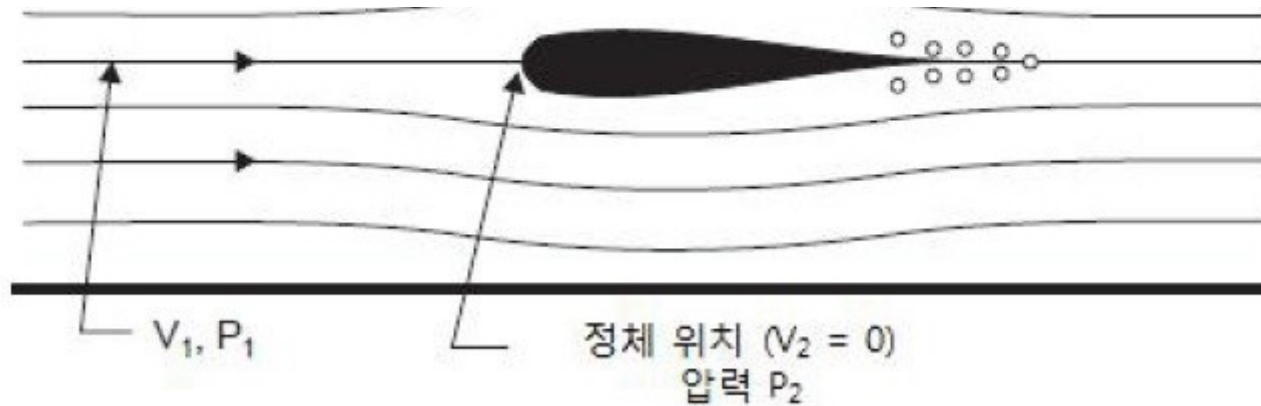


## 7. 피토투드

피토투드는 프랑스의 공학도인 헨리 피토(Henri Pitot)가 1730년경에 최초로 개발되었으며, 이후 1800년대에 프랑스의 과학자 다시(Henry Darcy)가 현대적인 형태로 개량하였다. 현재 항공기의 비행 속도 측정용으로 가장 널리 사용되고 있으며, 산업 현장에서 유체의 속도 측정에도 사용되고 있으며, 개발자의 이름을 따서 피토투브(Pitot tube)라고 한다. 피토투브의 원리는 다음과 같다. 아래 그림과 같이 어떤 고체가 파이프의 중심에 정지해 있고 고체 주위로 유체가 흐르는 상황을 고려해 보면, 고체가 있는 위치로 접근하는 유체는 속도를 잃게 되어 고체의 앞 중앙 위치에서는 속도가 0이 된다.





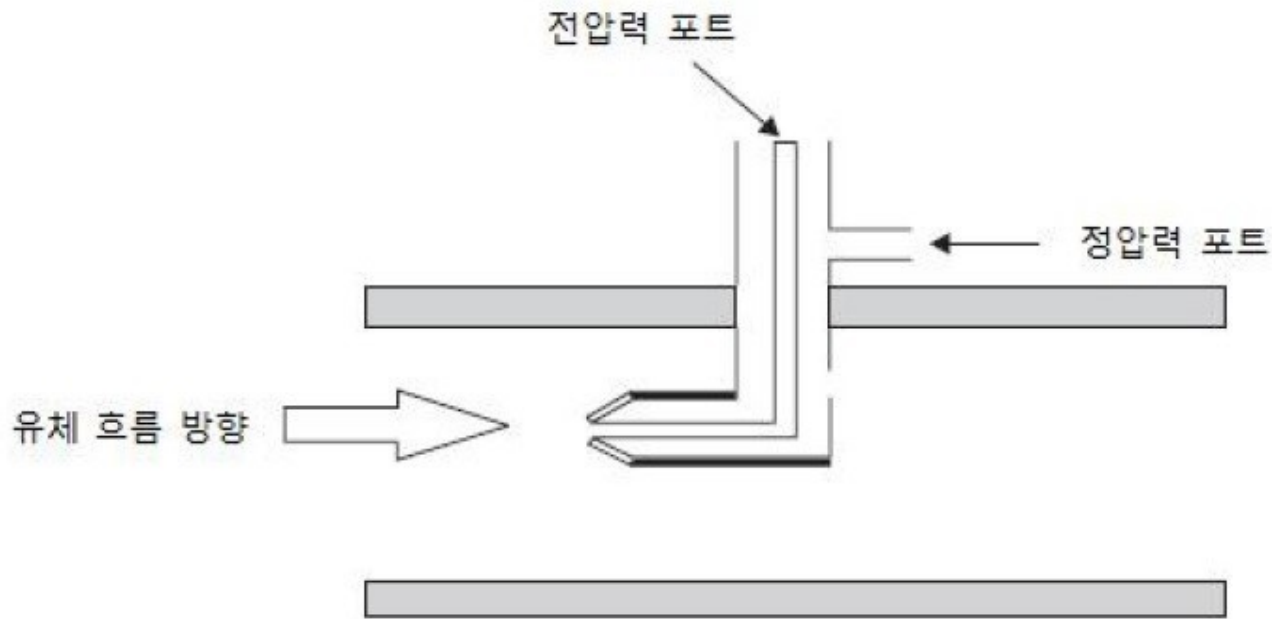


속도가 0이 되는 위치를 정체위치(stagnation point)라고 하며, 이 지점에서 유속수두(kinetic head)는 유체에 의해 손실되고, 정수두(static head)는 늘어나게 된다. 즉, 정체위치에서의 압력은 유체의 정압력(static pressure)에 유체의 운동에 의한 동압력(dynamic pressure)의 합과 같다. 따라서 일반 유체의 위치와 정체위치 사이의 압력차를 측정하게 되면 속도를 계산할 수 있는데, 이것이 피토의 원리이다. 이것을 수학적으로 표현하면 다음과 같다.

$$P_2 = P_1 + \left( \frac{\rho V_1^2}{2} \right)$$

$$V_1 = \sqrt{\frac{2(P_2 - P_1)}{\rho}}$$

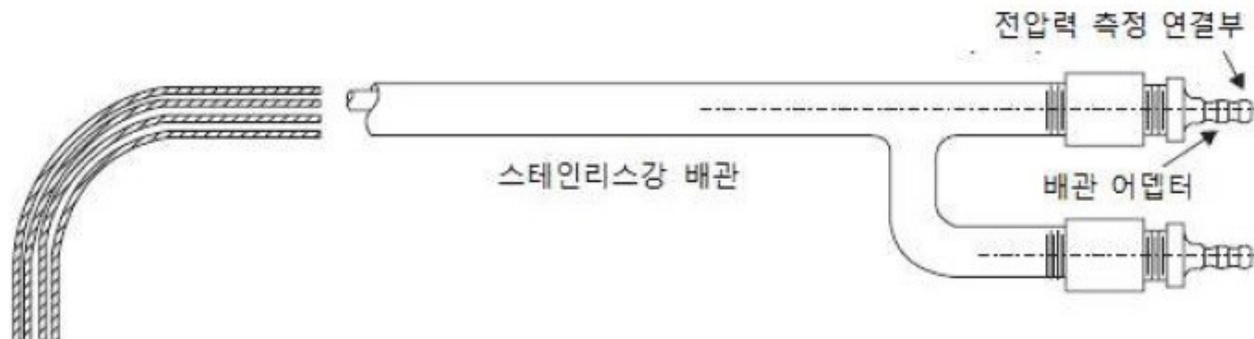
이러한 원리를 이용해서 유체의 속도를 측정하는 개념적인 형태는 아래 그림과 같다. 피토튜브의 기본형태는 정체위치에서의 압력을 측정하기 위해 유체의 흐름이 이어져 들어올 수 있도록 측정구멍이 필요하며, 여기서 측정된 압력을 유체의 정체압력(stagnation pressure)이라 하는데, 항공공학에서는 전압력(total pressure) 또는 피토압력이라고 한다. 전압력을 측정하는 구멍의 직경은 일반적으로 3.125 mm ~ 6.35 mm 이며, 이것은 흐르는 유체와 마주보게 열려있으며, 이곳에서 전압력을 측정하여 속도를 계산할 수 있다.

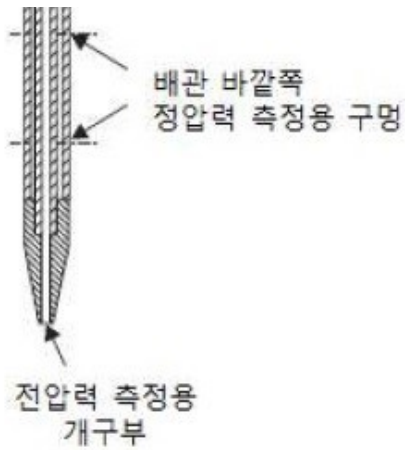


피토튜브에서 측정된 전압력은 정압력과 동압력의 합과 같은데, 정

압력은 일반적으로 파이프 옆면에 있는 정지포트(static port)를 통해 측정이 되며, 정지포트 대신에 프랜들 튜브(Prandtl tube)라고 불리는 피토-정지튜브를 사용하기도 한다. 이것은 기존의 피토튜브 내부에 또 하나의 튜브를 만들어 피토튜브 외부의 홀(hole)과 연결하여 공기의 흐름방향에서의 정압력을 측정할 수 있다.

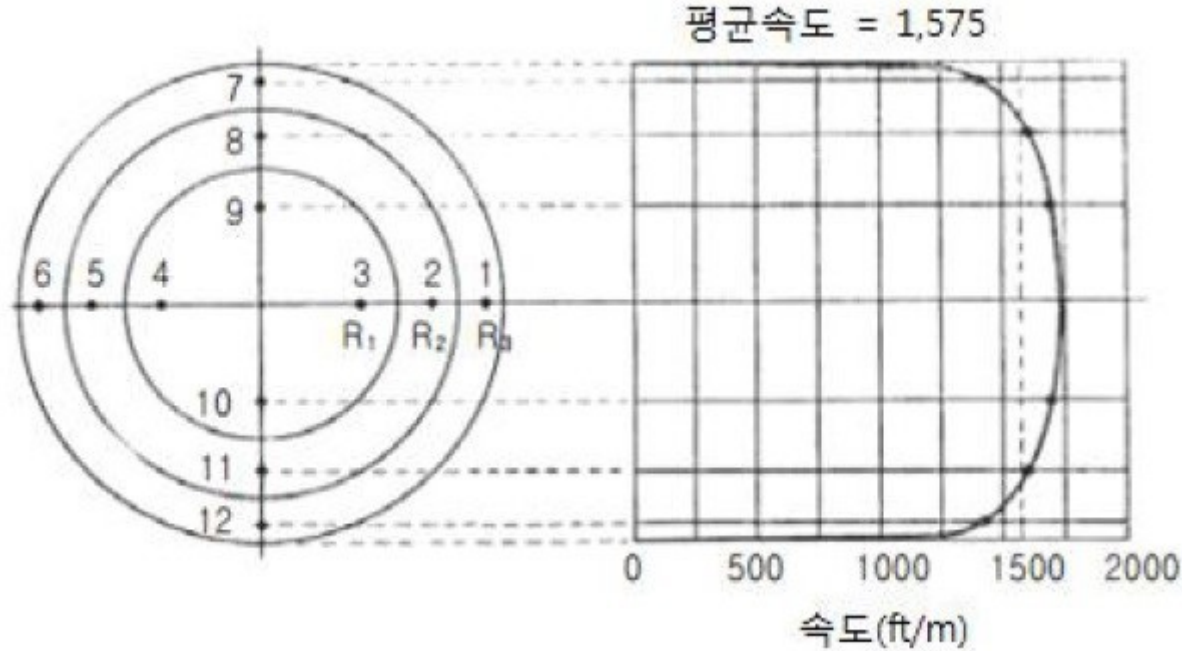
일반적인 산업용 피토튜브는 아래 그림과 같이 유체 흐름 속에 집어 넣을 수 있는 원통형 프로브(probe)로 구성되어 있다. 프로브의 전면부는 유체가 흐르는 방향과 정면으로 마주보고 있으며, 유체의 속도는 전압력 개구부에서 0으로 줄어들게 된다. 이러한 속도감소는 압력으로 변환이 되고, 내부의 조그만 관을 통해 외부에서 압력을 측정할 수 있다. 그리고 프로브의 측면에 있는 조그만 구멍은 정압력을 측정하는 데 사용된다. 외부의 압력 측정장치는 두 곳의 압력차를 측정하도록 되어 있다.



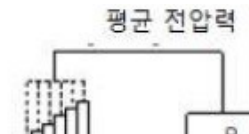


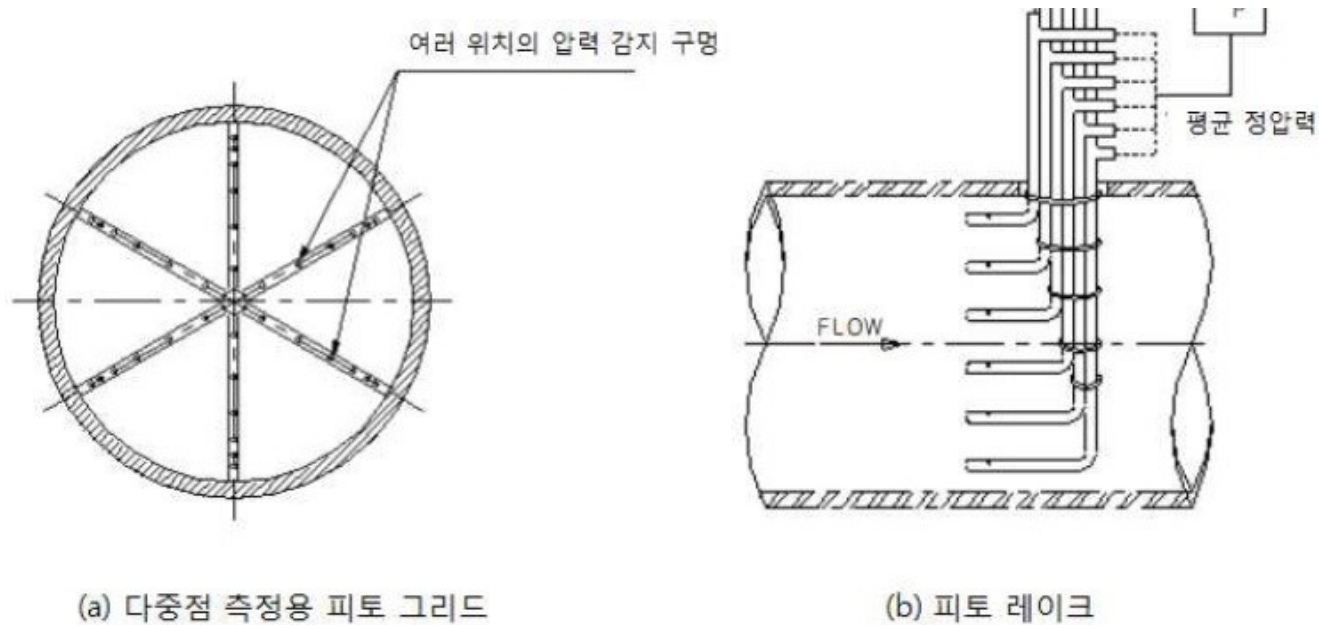
파이프 내의 유체 속도를 피토투브로 측정한 속도는 파이프 전체를 흐르는 유체의 평균속도가 아니고 한 지점의 국지속도이다. 만약 흐르는 강물의 속도를 측정하기 위해 피토투브로 측정되는 속도는 그 한 지점에서의 속도이다. 따라서 이런 이유로 피토투브를 국지적 측정기(local probe)라고 한다. 만약 파이프 내에서의 평균속도를 얻고자 하면, 피토투브의 삽입심도와 방향을 변경하면서 단면적의 여러 곳에서 속도를 여러 번 측정하여 그것을 평균하여야 한다. 예를 들면 아래 그림과 같이 파이프의 단면적으로 3개의 동심원과 x, y 좌표와 만나는 12개의 지점에서 속도를 측정하여 평균치를 산출할 수 있다. 파이프 내의 유속분포는 불규칙적이며 유량에 따라 다소 변화하고 축 방향으로 대칭형도 아니기 때문에 일반적으로 파이프 내의 어느 한 지점에서 측정된 속도로 평균속도를 산출할 수는 없다. 그렇기 때

문에 구경이 200이나 300 mm 되는 공조 덕트와 같은 경우에는 피토 튜브의 측정지점을 20개나 그 이상으로 정하여 덕트 내의 여러 곳에서 측정을 시행하여 평균속도의 정확도를 확보한다.



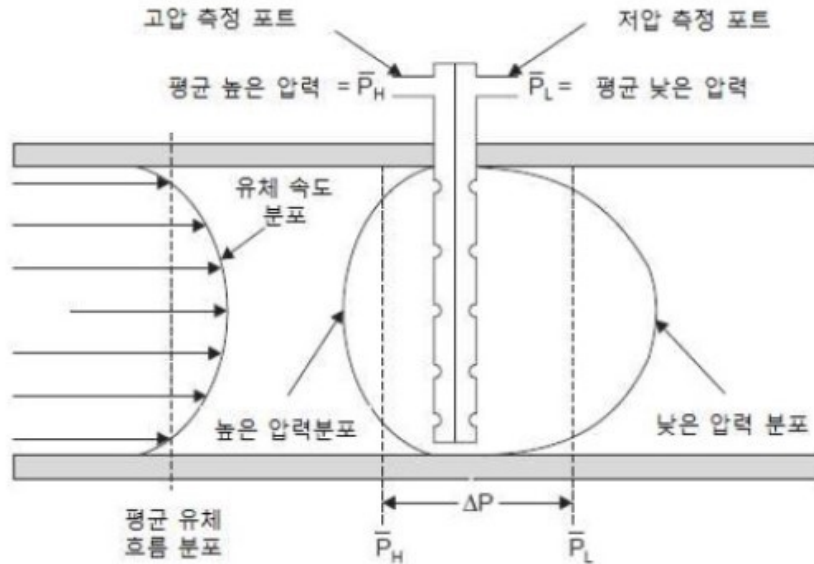
여러 지점을 옮겨 가면서 측정하는 작업은 매우 절차가 까다롭고 많은 시간이 소요된다. 그래서 작업을 간소화하기 위하여 아래 그림과 같은 다중점 피토 그리드(multi-point Pitot grid)를 사용하거나 여러 개의 피토튜브를 묶은 피토 레이크(Pitot rake)가 제안되었다.





앞에서 설명한 방법들은 실험실에서 사용하기에는 편리할 수 있으나 설치와 조작절차가 복잡하여 유체를 취급하는 공장이나 발전소 등의 상설 유량계로 사용하기에는 적합하지 않다. 그래서 산업용으로 개발된 것이 아래 그림과 같은 평균피토튜브(averaging Pitot tube, APT) 유량계이다. 이것은 피토 레이크를 한 단계 발전시켜 설치작업을 간소화 한 것이다. 즉, 제조업자가 공장에서 미리 APT를 제작해서 설치현장으로 보내면 거기서는 파이프에 구멍을 뚫어 APT를 파이프에 용접하고 신호전송기(transmitter)에 연결하면 작업이 끝나도록 고안된 것이다. 미국의 Dieterich Standard사가 1970년대에 처음으로 Annubar라는 상표명으로 사업화하여 오늘날까지 사용되고 있

다. APT를 사용하여 불규칙한 유속분포를 평균하는 방법은 파이프의 단면적을 하나의 동심원과 2, 3, 또는 4개의 동면적의 동심환으로 분할하여, 동심환 하나 마다 정체압력 감지공과 정압력 감지공 각각 두 개씩을 피토투브에 가공하여 유체의 평균속도를 측정하는 원리이다. 이렇게 얻은 전체 단면적을 대표하는 평균유속( $V$ )을 단면적( $A$ )과 곱해서 유량( $Q$ )을 산출하는 장치가 APT 유량계이다.



(a) APT의 배관내 유체 특성



(b) APT 형상

그러나 이런 방법은 불규칙적이며 유량의 증감에 따라 변형하는 유속분포를 항상 잘 반영하기에는 만족스럽지 못한 부분이 있다. 보다 정확한 유속 평균을 통한 측정의 정확도를 향상시키기 위해서는 이



와 같은 피토티브를 60도나 90도 간격으로 한두 개 더 설치할 수도 있으나, 추가비용과 설치의 복잡성 때문에 현실성이 희박하여 산업 현장에서는 아직도 70년대의 기본기술을 그대로 사용하고 있다. 그러나 그 동안 여러 가지 방법이 연구된 결과, 피토티브의 단면적 모양이 다이아몬드 뿐만 아니라 총알 모양, 원형 등 다양해졌지만, 그 어느 것이나 좀 더 합리적이며 정확한 평균속도를 측정하는데 별로 도움이 되지 못하고 있다.