

삼각주형 와 발생체의 스트로우할 수의 예측

Prediction of Strouhal Number of the Triangular Cylinder Bluff Bodies

김 창 호*
(Chang Ho Kim*)

요 약

와(vortex) 박리는 고형물체가 유동내에서 유체의 흐름을 방해할때 발생하는 전형적인 주기적 진동 현상이다. 본 연구에서는 삼각주형 실린더가 유동내에서 유발하는 와 박리 특성을 가시화 기법, 와에 의해 변조된 초음파의 파워 스펙트럼 및 유동관에서의 진동측정 등을 통해 연구하였다. 가시화 관찰과 유동측정 실험 결과, 발생 와는 발생체 전면으로부터 3d 와 5d 사이에서 가장 안정성이 유지됨을 발견하였다. 넓은 레이놀즈 수 ($10^4 \leq Re \leq 10^6$)의 유동영역에서 액체와 기체 원형유동의 측정 실험결과로부터 스트로우할(Strouhal) 수가 와발생체 폭(d)과 형상비(d/D)의 증가함수이며, 삼각주 단면의 높이에 반비례함을 알 수 있었다. 또한 실험 결과로부터 실린더의 기하학적 치수로 삼각주형 실린더의 스트로우할 수를 예측할 수 있는 경험식을 제시하였다.

ABSTRACT

The vortex shedding is the typical flow induced and periodic vibrating phenomenon when a bluff body obstructs the flow. The vortex shedding characteristics near the triangular section cylinders have been studied by flow visualization, the power spectrum analysis of the modulated ultrasound and the vibration frequency measurements in process pipes. From the visual analysis and the flow measurement, it was found that the vortices are most stable in the region between 3d and 5d behind the bluff face. Gas and liquid flow experiments over a wide range of Reynolds number ($10^4 \leq Re \leq 10^6$) in the circular pipes revealed that Strouhal number is the increasing function of d and d/D ratio and is inversely proportional to the apex length of the triangular section. An empirical equation for the prediction of Strouhal number of the triangular section cylinder is correlated based on the experimental results.

1. 서 론

단방향으로 흐르는 유동장 내에 2차원 고형물체가 정지해 있을 때 또는 정지유체내에 이러한 고형물체가 이동할 때에 그 고형물체 후방에는 양 방향의 대칭적이고 주기적인 와(vortex)가 발생한다. 이와 열(vortex street)의 발생현상은 Strouhal⁽¹⁾에 의해 처음으로 실험적 해석이 시도되었으며, von Karman⁽²⁾의 와 발생의 안정조건에 제시, Roshko⁽³⁾ 등의 연구를 통해 일정한 레이놀즈 수 범위 내에서 와 발생 주파수(f)와 유속(U)과의 사이의 다음과 같은 비례관계가 이루어짐이 알려져있다.

$$f = St \cdot \frac{U}{d} \quad (1)$$

여기에서, St는 무차원 수인 스트로우할 수(Strouhal number)

이며 와 발생체의 형상에 따라 각기 다른 고유 값을 가진다. 특히 원형 폐쇄관 유동과 같이 닫혀진 유동계의 경우에는 관 내부에 설치되는 와 발생체(bluff body)의 형상비(d/D)에 크게 의존한다.

진동 주파수와 평균 유속과의 선형관계를 나타내는 이러한 와 발생의 고유현상은 유체의 유속 또는 유량측정으로의 응용 면에서 매우 흥미로운 것이다. 1960년대 초에 Shiba⁽⁴⁾는 이 원리를 이용하여 선박용 유속계로의 응용을 시도하였다. 공정용 유량계로서의 실용화 연구는 Tsuchiya등⁽⁵⁾, Cousin등⁽⁶⁾, Bearman과 Trueman⁽⁶⁾ 등이 각 주형 와 발생체의 박리 외주파수와 유체의 유동속도와의 선형성, 일정 유속에서의 재현성과 유량측정 정확도에 관하여 연구하였다. 삼각주형 발생체의 연구는 Ogawa와 Matsubara⁽¹¹⁾가 형상비(d/D) 0.3 부근의 와 발생체를 이상적 모델로 제시하였으며 이 때 St수는 0.16의 값을 가지며 $10^4 \leq Re \leq 10^6$ 범위에서 원형관 유동측정에 적용할 때 $\pm 1\%$ 이내의 정확도로 유체유량 측정이 가능하다고 하였다. Calvert⁽⁷⁾은 구에 대하여, Takamoto⁽¹²⁾는 얇은 환

*한국표준과학연구원 유체유동그룹

접수일자: 1998년 1월 19일

형 량 구조물에서 발생하는 와 박리현상을 유량측정에 응용하는 기초연구를 수행하였다.

최근에 들어 이러한 연구결과들은 공정용 와 유량계의 형태로 개발 응용되고 있는데, 주로 와 발생체를 원형관 내에 막대형태의 와 발생체를 삽입하는 형식의 실용적 유량측정 기법으로 천연가스, 공정 유틸리티 및 용수 측정 등의 양측정(quantity measurement)은 물론 실험실의 유량측정법으로 응용되고 있다. 그러나 정확한 와 유량계의 설계를 위해서는 아직도 해결해야 할 문제점들이 많은데, 예를 들면 와 발생체 후방의 어느 지점에서 가장 균일하고 안정된 와 열이 존재하는 가에 대한 연구, 즉 최적의 측정 지점에 대한 연구와 더불어 특히 발생체의 일정 기계적 형상비(d/D)에 대응하는 스트로우할 수의 크기나 예측치에 대한 연구 등에 관한 실험 연구는 거의 보고가 되지 않고 있다.

본 연구에서는 삼각주 형 와 발생체의 유량측정 목적으로의 최적 설계를 위한 응용의 일환으로 공기유동에서 발생하는 후방 와열을 초음파 변조신호를 이용하여 측정하는 기법의 실용성을 검토하였다. 또한 이와 동시에 서로 다른 물성을 가지는 유체인 물과 공기에 대해 넓은 범위의 유속영역에서 삼각주형 와 발생체가 주는 와 박리 특성을 실험적으로 관찰하였다. 일련의 실험결과로부터 와 발생체의 기계적 가공수치만으로 고유 스트로우할 수 및 유량계 미터인자를 예측할 수 있는 경험식을 제시하였다.

II. 스트로우할 수와 형상비

Strouhal⁽¹⁾과 von Karman⁽²⁾에 의하면 자유 유동장에서 2차원 구조물 후방의 발생 와 열(vortex street)은

$$\cosh \frac{\pi h}{a} = \sqrt{2} \tag{2}$$

의 관계에서 가장 안전성을 유지한다고 하였다. 이러한 기준으로 볼 때 유동장내 발생체의 후방에 형성되는 와 열(vortex street)의 기하학적 구도는 그림 1과 같이 발생체 폭의 약 3 배 정도의 길이로 진행한다. 그러나 자유유동장이 아닌, 원형관과 같이 닫힌 관을 통해 유체가 수송될 경우, 와 발생체와 유동관 내벽 사이에 복잡한 상호작용이 발생하게 되며 균일한 와 박리가 어렵게 될 뿐 아니라 삼차원적 구조를 띌 수가 있다. 이 경우 와 발생체의 설계치수에 따라 박리되는 와의 측정학적 안정성과 발생 형태가 크게 좌우된다. 이러한 관점에서 삼각주형 와 발생체가 원형관내에 위치할 경우, 설계의 주요변수는 와 발생체의 폭(d)과 와 발생체의 길이로 대표되는 원형관의 내경(D)이다.

식 (1)의 관계를 원형관 내에 밀폐된 와 발생체에 적용할 경우 다음이 성립된다.

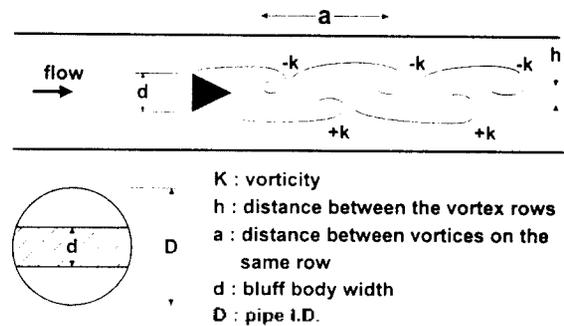


그림 1. 원형관 유동에서 삼각주 후방의 와 발생의 개략도

$$St' = f \cdot \frac{d}{\bar{V}'} = f \cdot \frac{d}{\bar{V}_o} \cdot \left(\frac{A'}{A_o} \right) \tag{3}$$

여기서 \bar{V}' 는 원형관 단면을 흐르는 평균 유속, A' 는 와 발생체의 단면을 제외한 유동단면, A_o 는 원형관의 단면이다. V' 는 따라서 와 발생체 근방의 평균 유속으로 전방을 흐르는 평균 유속에 비해 높은 값을 가진다.

관 내부를 흐르는 유체의 부피유량이 Q 이면, 연속의 정리에 의해, 평균유속(\bar{V})과 와 발생체 부근의 평균유속(\bar{V}')의 관계는,

$$Q = \bar{V} \cdot A_o = \bar{V}' \cdot A' \tag{4}$$

로 나타난다.

따라서 식(3)을 측정하려는 부피유량(Q)의 함수로 표현하면

$$\begin{aligned} Q &= \bar{V}_o \cdot A_o = f \cdot \left(\frac{d}{St'} \right) \left(\frac{A'}{A_o} \right) \cdot \pi R_o^2 \\ &= \left(\frac{\pi}{4} \right) \cdot \left(\frac{f}{St'} \right) \cdot D^3 \cdot \left(\frac{d}{D} \right) \cdot \left(\frac{A'}{A_o} \right) \end{aligned} \tag{5}$$

가 된다. 식 (5)에서 A'/A_o , 즉 와 발생체로 인해 유로가 좁아지는 영역의 유동 단면적, A' 와 유동배관의 내부 단면적, A_o 의 면적비는,

$$\frac{A'}{A_o} = 1 - \frac{2}{\pi} \left[\sin^{-1} \left(\frac{d}{D} \right) + \left(\frac{d}{D} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2} \right] \tag{6}$$

이다.

식(5)에서 St' 수, 즉 와 발생체 부근의 빠른 유속에 기준한 스트로우할 수는 와 발생체의 형상비(d/D)의 함수임을 알 수 있으며, 형상비가 일정할 경우 유동관의 크기와 관계없이 유동에 대응하는 와 주파수(f)의 측정은 원형관내 이송유체의 부피유량을 결정할 수 있음을 알 수 있다.

이 식은 원형관 내에 위치하는 어떠한 형태의 실린더에도 적용이 가능하다. Tsuchiya 등⁽³⁾은 식(5)에 적용하기 위한 원형 실린더의 스트로우할 수를 실험을 통해 결정

하였는데 d/D 비가 0.3 이하일 경우 St' 가 0.184에서 $\pm 2\%$ 이내로 일치함을 보였다. 반면에 본 연구에서 목표로 하고 있는 삼각주의 경우는 원형 실린더의 단순구조에 비해 조금 더 복잡한 구조이며 삼각주 단면의 높이라던지 전면 양 날개의 부분의 처리등 몇 가지 문제를 가지고 있다. 따라서 이러한 변수를 포함한 일반적 예측이 필요한 상황이나 Kim과 Song⁽¹⁹⁾의 보고를 제외하고는 아직까지 만족할 만한 경험식이 제시되지 않고 있다.

본 연구에서는 기하학적 구조상 비교적 와 박리가 용이하고 원형관 차압손실을 줄일 수 있는 형태인 삼각주형 와 발생체를 대상으로 실험적 방법을 통해 스트로우할 수를 결정하였고, 이를 종합하여 삼각주를 채용한 원형관 유동에서의 스트로우할 수의 예측 경험식을 제시하였다.

III. 실험장치

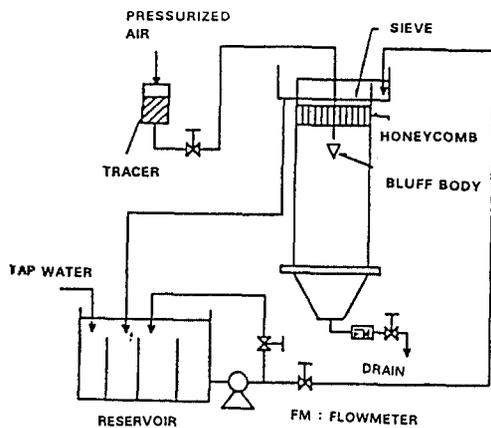
3.1 가시화 장치

높은 유속에서의 와 박리의 가시화 측정의 어려움으로 인해, 본 연구에서는 낮은 유속의 실험범위($Re \leq 500$)에

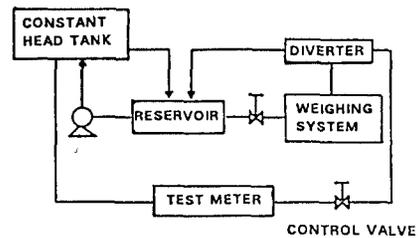
서 삼각주 후방 와열의 형성을 관측하였다. 가시화 장치는 그림 3에서 볼 수 있듯이 넓이 0.40 m X 폭 0.15 m X 높이 0.85m의 아크릴 투명창 구조로 제작하였다. 사용 유체는 물(tap water)이며 펌프로 이송되는 물은 위에서 아래로 흐르게 하였고 3mm 유리구슬의 충전층과 5mm 구멍의 스테인레스 허니콤(honey comb)을 지나 시험부를 지나게 되어있다. 이 장치의 사전 실험결과 유동분포는 매우 잘 유지됨을 확인하였다. 유량은 하부에 배수되는 위치에 볼밸브로 조절하였고, 유량측정은 교정된 디지털 터빈미터를 사용하였다(그림 2(가) 참조).

크리스탈 바이올렛 용액을 가시화 추적자(tracer)로 사용하였으며 니들밸브와 연결된 가압용기로 부터 1mm 구경의 스테인레스 관을 통해 와 발생체 전면에 차압영향이 없도록 주의하여 주입하였다. 일정한 유량조절 후 추적자 주입을 개시한 뒤 수십초 후에 120 mm 카메라(Pentax 67형)로 사진을 연속 촬영하였다. 배경조명은 2kW의 할로겐 램프를 반투명 차광막을 이용하여 광도를 조절하였다.

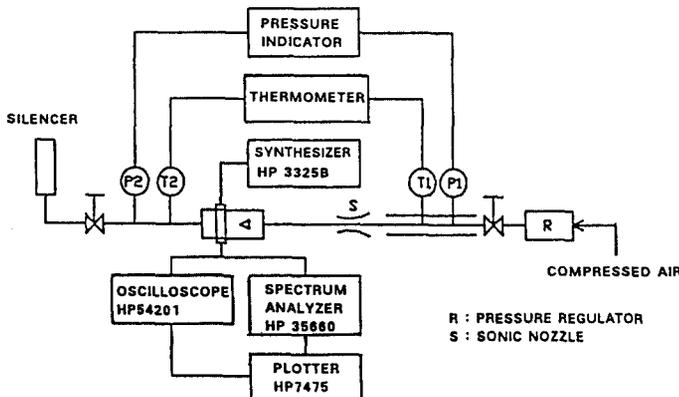
와 주파수는 와 발생체 전면의 5d 이후에 도달하는 와를 초시계를 이용하여 목측으로 계수하여 측정하였으며,



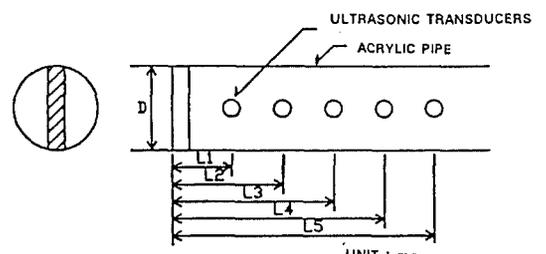
가) 가시화 실험장치



나) 액체 유량표준 시스템의 개략도



다) 기체유동 실험의 개략도



	L1	L2	L3	L4	L5	D
A	23	49	74	94	-	71.5
B	44	64	89	109	-	71.5
C	40.5	70	100	130	190	71.7

라) 와 감지용 초음파변환기 배열(공기유동 실험)

그림 2 실험장치들의 개략도

표 1. 실험에 사용한 삼각주형 와 발생체의 종류

experimental	shape	d (m)	d/D (-)	d/l (-)	legend
visualization		0.030	rectangular duct 0.15 x 0.40 m	1.155	A
		0.050		1.155	B
		0.030		0.750	C
		0.050		0.750	D
air flow measurement		0.0149	0.208	1.129	E
		0.0150	0.210	0.503	F
		0.0300	0.418	1.145	G
		0.0219	0.271	0.811	H
water flow measurement		0.0128	0.311	0.719	I
		0.0219	0.280	0.755	J
		0.0286	0.280	0.747	K

d : bluff body width
l : apex length of the triangular cylinder section
l' : right angle cut length

모두 8개를 평균하였다. 와 박리주기는 이를 4로 나누어 계산하였다. 가시화 실험에 사용한 삼각주형 와 발생체는 모두 4 종류의 각기 다른 치수를 가진다($0.15 \leq d/D \leq 0.33$, $0.50 \leq d/l \leq 1.15$). (표 1).

3.2 유량측정 실험장치

액체유동 실험의 경우는 물을 유체로 하는 액체유량 표준장치를 이용하였다(그림 2(나)). 이 경우는 압전형 센서를(김창호등⁽¹³⁾ 참조) 와 발생체 내부에 삽입하여 검출되는 와 진동주파수를 주파수 카운터로 10분간 평균하여 측정하였으며 사용한 와 발생체는 모두 세 종류이다($0.0412m \leq D \leq 0.102m$, $0.28 \leq d/D \leq 0.31$, $0.72 \leq d/l \leq 0.76$). 액체 유속의 변화는 0.5 m/s에서 8.3 m/s ($1.9 \times 10^4 \leq Re \leq 8.5 \times 10^5$)이다.

공기유량 측정실험은 한국표준과학연구원이 보유한 공기유량 표준 유동장치를 이용하였다(그림 2(다) 참조). 이 장치는 목직경 0.006456m 및 0.015878m인 소닉노즐을 기준 유량계로 이용하여 표준유량에 대한 와 주파수 측정을 하였으며, 교정된 압력계와 백금저항온도계로 측정 한 온도와 압력을 보정하여 표준유량으로 환산하였다. 공기유동 실험에 사용한 삼각주형 와 발생체는 4종류의 서로 다른 치수로 구성되며 표 1과 같다($0.21 \leq d/D \leq 0.42$, $0.50 \leq d/l \leq 1.15$).

공기유동에서 와 주파수를 감지하는 방법은 초음파 변환기를 이용한 주파수 변조방식을 채택하였으며, 그림 2-(라)에서 볼 수 있듯이 와 발생체 전면에서 0.32-2.65D 내에 위치한 5개의 마주보는 초음파 변환기 쌍을 통해 40 kHz의 구동 정현파를 방사하여 주파수가 변조되어 도달 하는 상대측 신호를 스펙트럼 분석기와 디지털 오실로스코프로 파형을 분석하여 와에 의해 변조되는 주파수를 측정하였다. 이러한 거리별 측정위치 변화의 목적은 와 발생체 후방의 거리별로 최적 신호 감지 위치를 찾기 위

한 것이다. 공기실험에서의 원형관 평균유속 범위는 1.7m/s에서 18.4m/s 사이이며, 이에 해당하는 레이놀즈 수 범위는 $9 \times 10^3 \leq Re \leq 9.8 \times 10^4$ 이다.

IV. 결과와 논의

4.1 가시화

형상비가 각기 다른 삼각주 A, B, C와 D를 낮은 레이놀즈 수 영역에서 실험한 결과 양단의 박리점을 강조하기 위해 직각으로 절단한 형태(right angle cut)와 이등변 삼각형 형태로 그대로 둔 형태 모두 최초의 와 중심(vortex core)의 형성은 와 발생체 전면에서 2d에서 3d 이내에서 형성되었다. 직각절단 형의 의미는 실제 공정상에서 먼저 보래 등의 이물질이 단면 양날을 장기적으로 마모시켜 단면 폭의 변형이 일어날 수 있으므로 이를 보다 더 안전한 와 발생체 폭(d)를 유지할 수 있도록 개선하기 위한 모델이다. 실험 조건하에서 일단 형성된 와는 6d 거리까지 안정성을 유지하였으나 이 이상의 후방에서는 가시적인 형태가 분산되어 형태가 유지되지 않았다.

유동 속도가 증가함에 따라 와 주파수가 증가하는 식 (1)의 선형 관계를 가시화 실험을 통해 확인할 수 있었다(그림 3). 또한 삼각주 단면 높이(l, apex length)의 증가는 와 박리 주파수를 감소시키는 경향이 관찰되었다. 그림 3에서 볼 수 있듯 단면 높이가 큰 직각절단 형의 와 주파수는 같은 폭의 이등변 삼각형 형태에 비해 작은 와 주파수를 나타내었다. 따라서 미소하나마 작은 스트로우할 수를 나타내게 된다. 직각 절단형의 경우 이등변삼각형 보다 삼각주 단면높이가 커서 와가 박리되어 자유롭게 이동할 영역을 공간적으로 더 차지하게 되어 와도(vorticity)의 감소를 유발하는 것으로 보인다. 또한 공기 유량측정의 경우에도 같은 폭의 동일한 이등변 삼각주들 간에도 단순한 l의 증가에 따른 스트로우할 수의 감소가 나타남이 확인되어 이러한 가설이 입증된다.

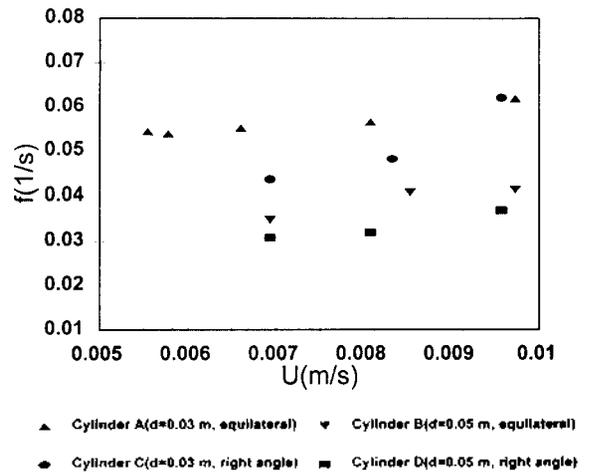
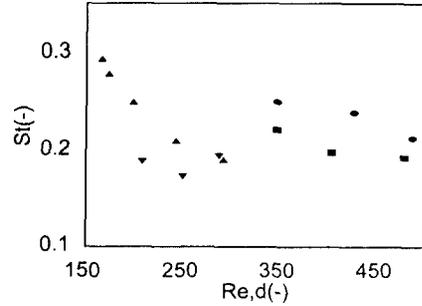


그림 3. 와 주파수와 유동속도의 관계(가시화 실험)

발생 와열의 안정성은, 비록 제한된 유속범위($0.005 \leq U \leq 0.010$ m/s)에서의 정성적 결과이지만, 가시적으로 유속이 증가함에 따라 안정되었다. 그런데 유속이 0.07cm/s 이하로 매우 낮아지게 되면, 폭 0.030m의 이동면 삼각주를 제외하고는 가시적으로 와가 관찰되지 않았다. 이는 이동면 삼각주가 와 박리지점에서의 와 이동의 공간상 여유가 있다는 점 그리고 유속이 낮을 경우 와 발생의 이상적 2차원 구조로 부터 벽면효과와 벽면용력(wall shear)로부터의 영향이 상대적으로 커져 삼차원적 유동구조로 전이되면서 와도의 감소로 나타내기 때문으로 보인다. 이러한 이유로 박리 주파수가 발생체 폭(d)이 커짐에 따라 감소되는 경향이 설명된다.

그림 4에 레이놀즈 수($Re_d = U \cdot \rho \cdot d / \mu$)에 대한 스트로우할 수의 변화를 제시하였다. 레이놀즈 수 250까지는 St의 감소가 그 이상의 범위에서는 2.3 정도의 일정한 값을 보였다. 이 경우 가시화 유동단면 ($W=0.15m$)에 대한 와 발생체 폭의 비율, 즉 W/d 비율이 3-5 정도로 자유유동장 실험으로는 작은 비율이기 때문에 발생체 폭의 증가에 대한 영향이 크게 보이지는 않으나, $Re > 250$ 의 경우 발생체 폭의 증가가 스트로우할 수의 증가를 나타내었다. 낮은 유속의 경우 ($Re < 250$), 유동 모멘텀에 비해 상대적으로 큰 벽면효과(wall effect)가 지배적이 되어 스트로우할 수의 감소현상이 나타나는 것으로 보인다. 결론적으로 충분한 유동 모멘텀이 존재할 경우 d의 증가가 스트로우할 수를 증가시키는 것으로 보여진다.

가시화 실험은 실제 응용을 위한 난류 영역의 구체적 정량화는 될 수 없으나 와의 박리점과 안정한 위치에 대한 실험적 일부 결과는 측정센서, 특히 초음파 변환기의



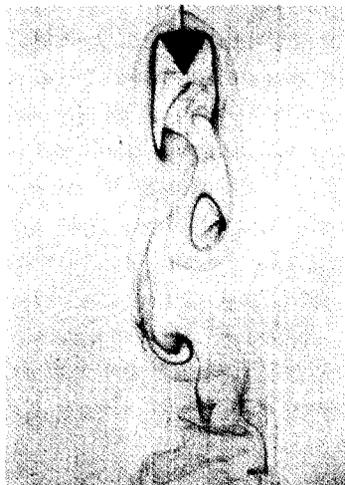
● Cylinder A (d=0.03 m, equilateral) ● Cylinder B (d=0.05 m, equilateral)
 ▼ Cylinder C (d=0.03 m, right angle) ■ Cylinder D (d=0.05 m, right angle)

그림 4. 스트로우할 수(St)와 레이놀즈 수의 관계(가시화 실험)

설치 위치 등에 대한 기초 자료로 활용 가능하다. 사진 1은 가시화 실험 사진들의 일부 예이다.

4.2 유동실험

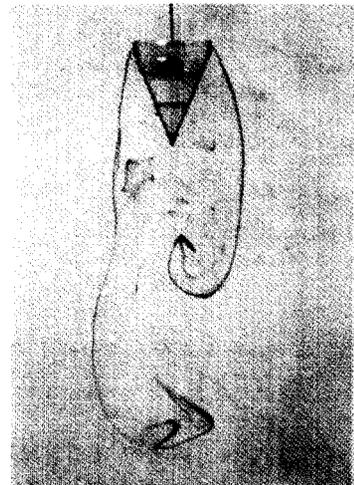
그림 5는 기체 유량측정 실험에서 초음파 변환기 수신 부속 신호의 한 예이다(삼각주 E, 측정위치 전면부에서 4.9d 후방). 중앙의 피이크는 초음파 발전기로부터 전달되는 구동 주파수($f = 40$ kHz)를 나타낸다. 그리고 중첩되어 일정 폭을 가지며 나타나는 기타 피이크들은 발생 와에 의해 변조된 수신신호를 나타낸다. 공기유량이 증가함에 따라 중심 피이크에 대칭인 와 변조 주파수가 1에서 5로 가면서 점차 넓어짐을 알 수 있다(각기 $f = 49, 98, 156, 204$ 및 256 Hz에 해당). 중앙의 구동 주파수와 이를 중심으로 양쪽에 대칭으로 보이는 피이크간의 차이가 와 주파수를 나타낸다.



(a) Equilateral
 $d = 0.030m$
 $\ell = 0.026m$
 $Re, d = 290$



(b) Right angle cut
 $d = 0.030m$
 $\ell = 0.040m$
 $\ell' = 0.0045m$
 $Re, d = 290$



(c) Right angle cut
 $d = 0.050m$
 $\ell = 0.067m$
 $\ell' = 0.0073m$
 $Re, d = 480$

사진 1. 와 발생체 후방의 와열 구조의 사진 예

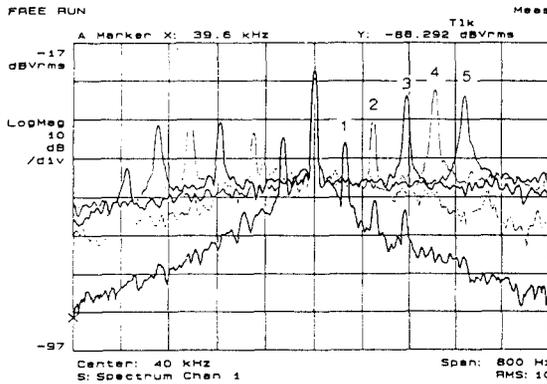


그림 5. 와에 의해 변조된 초음파 신호의 파워스펙트럼의 한 예 (실린더 E, L/d=0.49)

1: 49 Hz 2: 98 Hz 3: 156 Hz 4: 204 Hz 5: 256 Hz

와 발생의 세기는 파워 스펙트럼을 통한 와 변조피크의 크기로 부터 알 수 있다. 또한 피크의 날카로움 (sharpness)는 발생 와열의 정밀도를 나타낸다. 이러한 방식으로 그림 2(라)에 성한 모든 실험 지점에서 와 주파수를 측정하였다. 높은 유속방향으로는 유동실험이 가능한 최대 300 Hz 까지 측정의 결과가 만족스러웠으며, 낮은 유량 쪽으로는 약 50 Hz 까지의 주파수 측정이 가능하였다(그림 6). 폐쇄 원형관내 평균 유속과 와 주파수간의 선형성은 1% 이내로 아주 우수하였다(---선 참조). 낮은 유속에서는 정량적인 값정이 어려웠는데 이는 기체의 모넨팅 저하로 인한 변조신호 약화에 기인하는 것으로 보인다.

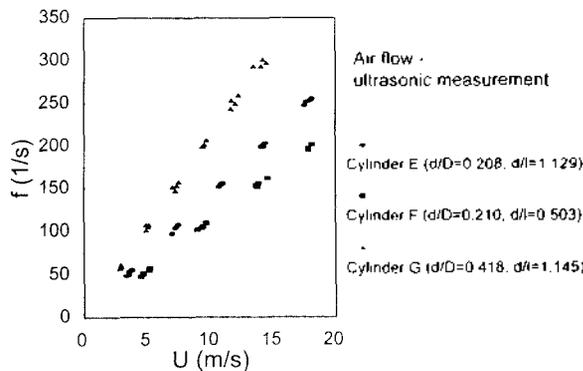


그림 6. 와 주파수와 원형관 평균유동 속도와의 관계(초음파 기법, 공기유동 실험)

그림 2(라)에 제시한 모든 측정위치가 만족스러운 측정 결과를 보이고 있으나 폭이 가장 넓은 G 실린더 (d/D=0.418)의 경우 발생체 전면으로 부터 0.19m (L/d=2.66) 떨어진 지점에서는 다른 실린더와는 달리 측정이 어려웠다. 이 현상은 유체를 발생체가 막는 부분이 40% 이상 (d/D=0.418) 되는 상태에서는 와 발생이 2차원적인 구조를 이상적으로 가지지 못하고 얇고 3차원 구조의 복잡

한 양상으로 전개되기 때문인 것으로 보여진다. 또한 측정거리가 절대적 길이로 볼 때 너무 멀어 많은 와 열이 분산 소멸되어 감지가 어려운 것으로 볼 수 있다. 따라서 초음파를 이용한 와 주파수 감지의 경우 와 발생체 전면에서 0.2m 이하의 위치를 지키는 것이 중요하다고 보여진다.

변조된 피크의 최대세기 및 측정 평균치에서 최소편차를 보이는 지점은 실린더 E의 경우 L/d=4.9 (L=0.73m)인 지점이었으며, 같은 발생체 폭을 가지는 F 실린더의 경우 L/d가 3.3과 4.3인 지점에서 가장 큰 출력을 얻을 수 있었다. 즉, 가시적 관찰을 통해 얻은 결과와 마찬가지로 L/d 비율이 3에서 5의 사이에서 가장 불확도가 적은 안정된 측정이 가능한 것으로 판단된다.

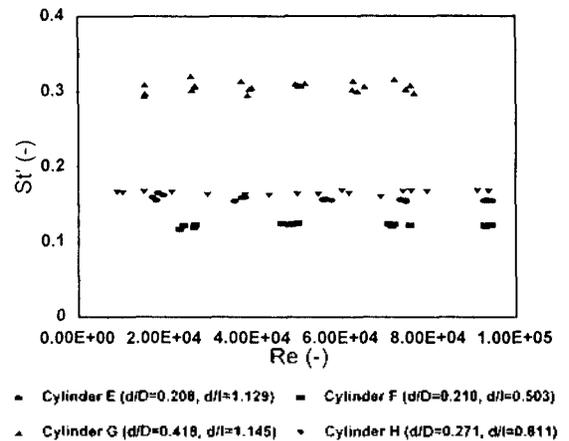


그림 7. 보정 스트로우할 수(St)와 레이놀즈 수의 관계(초음파 기법, 공기유동 실험)

삼각단면의 높이, l와 와 박리 주파수에 미치는 영향은 같은 폭을 가지는 E와 F 실린더를 비교하면 알 수 있다. 삼각주 높이의 두 배 증가는 약 40%의 주파수 감소를 보여준다. d/D 비율의 증가는 같은 원형관 구경(D)을 유지하는 E (d/D=0.208) 실린더와 G (d/D=0.418)를 서로 비교해 볼 때 와 주파수를 증가시켜 결과적으로 스트로우할 수의 증가를 보여준다(그림 7). 이러한 d/D와 D/l의 증가가 박리되는 와 주파수와 비례하는 현상은 가시화 실험에서의 결과와 일치한다. 또한 Kim 과 Song⁽¹⁵⁾의 삼각주에 대한 결과 및 Kalkhof⁽¹⁶⁾ 그리고 Takamoto와 Terao⁽¹⁶⁾의 T-형 와 발생체에 대한 보고에서 단면높이 l의 길이 증가가 스트로우할 수의 감소를 가져오는 결과와 일치한다.

기체유동의 와 주파수를 초음파로 측정하는 연구는 본 연구실에서 지속적으로 연구하고 있다. 기체의 경우는 40 kHz, 액체유동의 경우는 1 Mhz의 초음파 변환기를 사용하며 주파수 복조기를 통한 와 주파수 검출 방식의 초음파형 와 유량계의 실용화가 연구의 목적이다⁽¹⁴⁾.

물을 매체로한 액체유량 측정의 결과에서도 공기유동

실험과 동일한 현상을 볼 수 있었다. 그림 8에서 알 수 있듯이 실린더 d/D 비가 각기 0.28 과 0.31인 두 경우를 비교해 보면 d/D 비의 증가에 따른 스트로우할 수의 증가, 즉 와 주파수의 증가를 보여주었다. 또한 서로 같은 형상비를 가지는 J와 K실린더의 경우 스트로우할 수의 크기가 0.5% 이내로 거의 동일한 값을 보여 형상비가 와 박리 주파수의 대표적 지배 변수임이 확인된다.

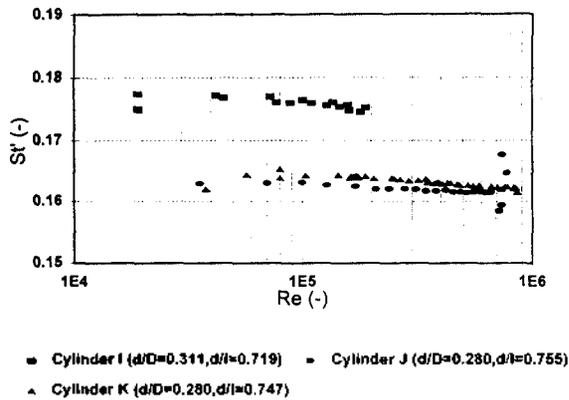


그림 8. 보정 스트로우할 수(St')와 레이놀즈 수의 관계(압전식 진동감지법, 물 유동실험)

4.3 스트로우할 수의 예측

차원해석을 통해 원형관 내부에 설치된 삼각주의 와 박리에 연관되는 모든 변수를 정리해 보면 다음의 네 종류의 무차원 군으로 표현할 수 있다.

$$St' \propto \left(\frac{U\rho D}{\mu}\right) \left(\frac{d}{D}\right) \left(\frac{d}{l}\right) \quad (7)$$

스트로우할 수(St')는 정해진 레이놀즈 수의 범위에서 독립적이다. 따라서 레이놀즈 수를 무시하면,

$$St' \propto a \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^b \left(\frac{d}{l}\right)^c \quad (8)$$

본 연구에서 결정된 삼각주의 스트로우할 수와 해당하는 기계적 가공수치들로부터의 다중 회귀 분석을 통해 다음의 식이 얻어진다.

$$St' = 0.570 \left(\frac{d}{D}\right)^{0.857} \left(\frac{d}{l}\right)^{0.405} \quad (9)$$

상관계수(correlation coefficient) = 0.986

실험에서 결정된 스트로우할 수(St')와 식(9)로 예측되는 값과의 표준편차는 $\pm 5.1\%$ 이다. 이 식은 $0.21 \leq d/D \leq 0.42$ 와 $0.50 \leq d/l \leq 1.15$ 이고, 원형관 구경(D) 이 0.040m에서 0.102m의 범위에서 적용 가능하다. 따라서 식(9)와 앞서 언급한 식(5)를 이용하면 주어진 범위에서의 삼각주형 유량측정 기구를 이용하여 공기 및 물 유량을 불확도

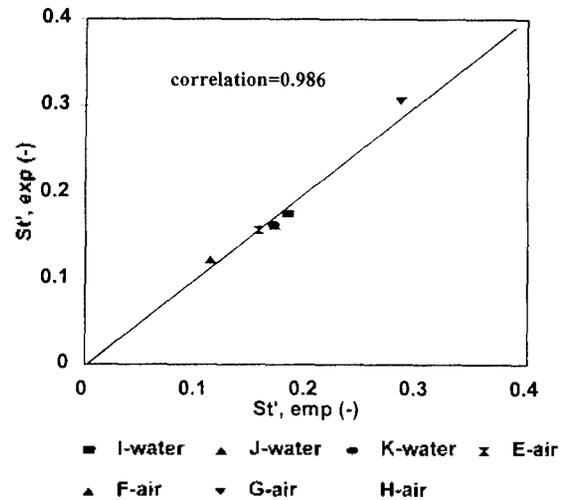


그림 9. 실험으로 결정된 스트로우할 수와 경험식의 예측값의 비교(공기 및 물 유동측정)

5% 수준 이내로 측정가능하며, 삼각주형 패쇄 원형관 와 유량계의 기초 설계자료로 활용할 수 있다.

이러한 개념의 와 유량계 설계적 적용은 올리피스 유량계를 기계적 치수별로 설계가공하여 별도의 실 유체를 통한 교정과정없이 사용하는 방식과 유사하다.

V. 결 론

가시화 기법과 공기와 물을 유동매체로한 원형관 내 삼각주의 와 박리 주파수의 특성을 연구한 결과 다음의 결론을 얻었다.

삼각주 후방에 박리되는 와열(vortex street)은 발생체 전면부에서 3-5 d의 거리에서 가장 안정된 상태를 유지한다. 또한 와 주파수는 유동장의 막힘정도(bluffness)를 나타내는 형상비 d/D 비에 증가한다. 또한 와 주파수는 삼각주 단면의 높이, l 에 반비례하였다.

초음파 주파수 변조방식의 와 주파수 측정을 이용한 유량 측정기구의 설계와 실용적 타당성을 확인하였다. 초음파를 이용한 와 주파수 측정의 응용은 최적 측정위치(3-5d)에서 가체 또는 액체용 초음파 변환기를 각기 사용하는 방식이 제안된다.

실험 결과를 토대로 기계적 가공수치만으로 와 주파수 또는 스트로우할 수를 예측하기 위한 경험식을 제시하였다. 이 경험식은 삼각주형 실린더를 이용한 원형관 유량 측정 기법에 별도의 교정없이 적용할 수 있으며 주어진 적용범위 ($9 \times 10^3 \leq Re \leq 8.5 \times 10^5$, $0.0412m \leq D \leq 0.102m$) 내에서 $\pm 5\%$ 이내의 불확도로 유량측정 목적의 삼각주 설계에 활용 가능하다.

아울러 기체와 액체유량 측정의 실험 결과 스트로우할 수가 한정된 레이놀즈 수 영역에서 일정값을 가짐을 확인하였다. 이 때 이 평균 스트로우할 수에 대한 개별 측정

치의 편차는 $\pm 1\%$ 이내이다. 즉 정해진 삼각주에 대해 해당 유체별 유동측정에 본 기법이 사용될 경우 정밀한 유량측정이 가능하다. 이에 따라 일정 기계적 치수로 정해진 스트로우할 수를 가지는 와 발생체 또는 폐쇄관 와 유량계를 설계제작한 뒤 실험을 통해 교정하여 사용할 경우에는 그 선형성이 오리피스와 같은 수준으로 보장된다.

▲김 창 호(Chang Ho Kim)
한국음향학회지 제14권 1호 참조

참 고 문 헌

1. V. Strouhal, "Über eine besondere Art der Tonerregung", Ann. der Phys. und Chemie, Vol.5, pp.216-251, 1878.
2. T. Von Karman and Rubach, H., "Über den Mechanismus des Flüssigkeits und Luftwiderstandes", Phy. Zeitschrift, 13-2, pp.49-59, 1912.
3. A. Roshko, "On the Development of Turbulent Wakes from Vortex Streets", NACA Technical Note, 1119, 1954.
4. H.Shiba, "新型流量計", Japan Soc. Shipbuild, 97, pp. 127-134, 1960.
5. K. Tsuchiya et al, "Karman vortex flowmeter", Bull. of the JSME, Vol.13, No.58, pp.573-582, 1970.
6. P. W. Bearman and A.J. Trueman, "An Investigation of the Flow around Rectangular Cylinders", The Aero. Quart. 23, pp.229-237, 1972.
9. T. Flora and T.K.Matsuura, "Vortex Flow Metering", J. A, Vol.24, No.3, pp.573, 1983.
8. T.Cousin, S.A. Foster, P.A. Johnson, "A Linear and Accurate Flowmeter using Vortex Shedding", Proc., Symp., Power Process Control, pp.45-56, 1973.
9. T.Flora, T.K.Matsuura, "Vortex Flow Metering", J. A, Vol.24, No.3, pp.573, 1983.
10. H.G.Kalkhof, "Influence of The Bluff Body Shape on The Measurement Characteristics of Vortex Flowmeters", Proc. of the Int. Conf. on the Metering of Petroleum and its Products, London, 1985.
11. Y. Ogawa and N. Matsubara, "Piezoelectric Vortex Flowmeter", Proc. 2nd Flow Meas. Sympo. pp.13-16, Tokyo, 1985.
12. M.Takamoto, "A Study of the Wake Structure behind Bluff Ring", Bulletin of NRLM, Vol.36, No.139, 1987.
13. 김창호 등, "압전형 불텍스 센서를 이용한 유량측정", 에너지 R&D, 12권, 1호, pp.181-192, 1990.
14. 최해만 등, "초음파를 이용한 와주파수 측정", 한국기계학회 학술대회 논문집, III, pp.11-14, 1990.
15. C. H. Kim and K.W. Song "Vortex Shedding from Triangular Section Cylinders", paper presented on 2nd Inter. Symp. on Flow Measurement, Calgary, Canada, 1990.
16. M.Takamoto and Y.Terao, "Development of a Standard Vortex Shedding Flowmeter", Proc. Conf. Flow Meas. in the mid-90s(FLOMEKO '94), Eastkilbride, Scotland, 1994.