

# 튜브 형상에 따른 진동 특성의 안전성 연구

신 귀 수

전북대학교 기계공학부

(2000. 4. 6. 접수 / 2000. 9. 21. 채택)

## A Study on the Safety of Vibration Characteristics on the Various Configuration of Tube

Gwi-su Shin

Faculty of Mechanical Engineering, Chonbuk University

(Received April 6, 2000 / Accepted September 21, 2000)

**Abstract :** This paper studies the effect of vibrational characteristics of the various tubes analyzed through experiment. By an experiment analysis we found out that the factor of system vibration is fluid-structure interaction of tube line. In fluid-filled tube system we study on the influence that the natural frequency of system and the frequency of wave motion produce upon through three experiments. Three experiments are modal test on each tube, FRF in continuous system, and vibrating tests when the system is driving on. From the results of the experimental studies, we obtained that the natural frequencies of system are very important than wave induced vibrations. and according to the variation of configuration, the frequencies are different each other. And we found that though fluid passed away through the tube, the tendency of system vibration level was similar with the mode shape at the simple system

**Key Words :** power steering tube, fluid-structure interaction, frequency response function, tube system

### 1. 서 론

일반적으로 파이프는 유체를 수송하기 위해 사용되는 요소로 중화학공장이나 발전설비의 많은 부분과 산업현장, 산업기계 또는 자동차 등에 광범위하게 사용되고 있다. 파이프에 발생하는 진동은 펌프에서 발생하는 기계적인 힘이나 배관의 형상변화 또는 압력변화에 의해 발생하며, 여러 요인들에 의해 발생하는 진동은 시스템을 통해 비교적 쉽게 전달되고 이로 인해 소음이 발생하거나 심한 경우에는 피로 파괴되기도 한다. 또한 많은 유압기계 및 자동차의 파워 스티어링 시스템과 같은 관로속을 유체가 일정 속도로 흐를 때 상당한 진동이 발생하고 이로 인한 소음이 발생한다. 어떤 유체가 일정한 길이를 일정한 속도로 관로를 진행할 때 발생하는 소음의

고유 진동수가 관로를 따라 발생하는 진동 주파수와 일치하면 상당한 소음이 발생한다. 따라서 관로를 따라 흐르는 진동에 관한 연구가 소음의 저감에 선행하여 연구되어야 한다. 파이프 계에서 유체 유동에 의한 구조물의 진동을 정확하게 해석하기 위해서는 유체-파이프간의 상호작용에 대한 연계메커니즘이 엄밀하게 모델링되어야 한다<sup>1,2)</sup>. Williams<sup>3)</sup>, Walker와 Phillips<sup>4)</sup>, 그리고 Wiggert<sup>5,6)</sup> 등은 유체와 파이프 벽사이의 Poission Coupling을 고려하였다. Lee<sup>7)</sup> 등은 파이프를 빔으로 모델링하여 유체-파이프간의 상호작용 메커니즘을 포함한 완전히 연계된 운동방정식을 유도하였다.

배관자체의 진동이나 내부 유체의 맥동문제를 설계단계에서 파악하기 위하여서는 배관계의 동특성을 관과 유체의 연성을 고려한 계산을 Urata, Y.와 Sano<sup>8)</sup> 등이 연구하였다. 베인 펌프에 의해 맥동된 오일의 파동에 관한 연구는 유체가

채워진 파이프 시스템 형상에 따라서 진동과 파동 전파를 유한요소해석적으로 수행한 연구가 보고되었다<sup>9,10</sup>. 그러나 실제산업체에서 사용하는 파이프나 튜브는 구조물의 형상 및 상태에 따라서 형상의 변화가 불가피한 경우가 많고 이러한 형상의 변화에 따른 유체의 운동에 의해 나타나는 진동특성에 대한 예측은 아직까지도 미흡한 실정이다. 더욱이 지금까지는 길이에 대해 지름이 큰 파이프에 대한 연구가 활발히 이루어졌으나 지름이 작은 튜브에 대한 진동특성에 대한 연구는 그다지 많이 수행되지는 않았다. 그리고 기존의 연구에서는 맥동에 기인한 주파수 성분을 주된 관심 영역으로 다루었으나 유체가 관로속을 빠른 속도로 진행할 때 유체에 의해서 관로계 자체의 진동특성 또한 분명 중요한 과제가 되고 있다.

따라서 본 논문에서는 서로 다른 형상으로 제작된 튜브에 따른 유체와 튜브간의 상호작용에 의해서 발생하는 진동특성에 관하여 연구를 하기 위하여 길이가 동일한 튜브를 임의로 형상을 변화하여 그에 따른 진동특성의 변이를 연구하고 맥동에 의한 주파수대역이 튜브 자체에서 어떠한 반응을 일으키고 유체가 관로를 진행할 때 튜브 자체의 진동특성의 변화에 대해 연구하고자 한다.

## 2. 실험 장치 및 방법

본 실험은 서로 다른 형상을 갖는 튜브 3가지에 대해서 세 가지 실험을 수행하기 위한 실험 장치를 구성하였다. 실험에 사용된 튜브는 직관(straight tube), ㄱ관(single curved tube), ㄷ관(double curved tube)에 대하여 실험하였으며, Table 1과 2는 튜브의 재질과 형상을 나타내고 있다.

Fig. 1의 실험 장치는 각각의 단일 튜브에 대하여 모달테스트를 하기 위한 장치로 I-DEAS TDAS(Test Data Analysis Software)가 내장된 워크스테이션과 데이터처리장치, 오실로스코프, 그

Table 1. Material properties of tube

Material	Young's modulus	Poisson's ratio	Density	Shear modulus
steel	$2.068 \times 10^5$ (N/mm <sup>2</sup> )	0.29	$7.82 \times 10^{-6}$ (Kg/mm <sup>3</sup> )	$8.016 \times 10^4$ (N/mm <sup>2</sup> )

Table 2. Tube size for boundary conditions

Boundary conditions	Size( $\phi \times l$ ) (mm)
Tube(이하 직관)	12 × 2300
Tube(이하 ㄱ관)	12 × 2300
Tube(이하 ㄷ관)	12 × 2300

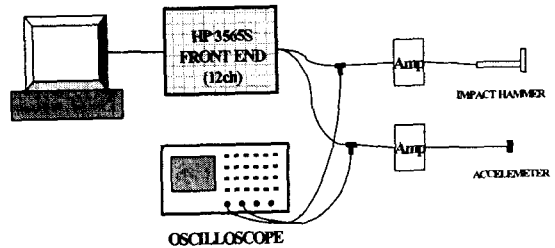


Fig. 1. Modal test setting

리고 임팩트 해머와 가속도계로 구성되어 있다. 모든 튜브에는 내부에 오일을 채워 고무마개로 막았다. 또한, 실제 연속적으로 튜브가 연결되어 있을 때 위와 같은 길이와 클램프 조건에서 나타나는 공진 주파수와 베인펌프의 압력 맥동에 기인한 관로내 맥동전파와 진동을 측정하기 위해 Fig. 2에서 개략적으로 보여주는 것처럼 현대 자동차(차종 : LS Aero City BUS)의 파워 스티어링 시스템에 사용되는 베인펌프, 기어박스과 튜브를 실험실에 설치하였다. 이 실험을 통해서 연속계에서의 정지 시에 나타나는 공진 점을 조사하고 펌프를 구동하여 나타나는 진동수를 조사하여 위의 단일계에서의 모달 테스트와 비교하기 위해서 위의 실험과 동일하게 튜브의 고정에 쓰이는 클램프만으로 체결하여 실험하였고, 또한 각각의 튜브가 단일계에 근접하도록 각각 튜브의 양 끝단에 완전 고정에 근접하는 클램프로 고정하였다.

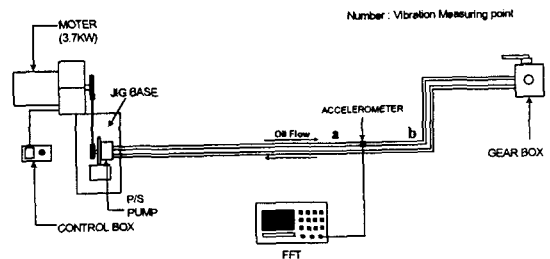


Fig. 2. Schematic of measuring systems

첫 번째 실험은 가속도계 7개를 동시에 부착하고 임팩트 해머로 일정부분은 5회 가격하여 얻은 신호를 데이터처리장치인 hp FRONT END로 저장하고, 획득된 신호는 I-DEAS TEST 모듈로 저장되고 I-DEAS TDAS를 이용하여 모달 파라메타를 구하였다.

두 번째 실험은 3가지 튜브를 동일한 위치에 연결하여 연속계에서 공진점을 구하는 실험을 행하였으며, 세 번째 실험은 실제 구동시에 나타나는 주파수 성분을 찾기 위해서 펌프로 구동하여 각각의 구간에서 가속도계로 측정하였다. 이때 연속계에서 나타나는 공진 주파수를 구하기 위하여 위 그림의 a~b 구간의 14개 측정 점에서 세 튜브를 교대로 연결하고 첫 번째 실험과 동일한 위치에 클램프로 고정하고, 가속도계와 해머를 F. F. T(Fast Fourier Transform, Di 2200)에 연결하여 일정부분을 5회 가격하여 공진 주파수를 측정하였다.

또한 구동시 나타나는 베인펌프의 압력 맥동에 기인한 관로내 맥동전파와 진동을 측정하기 위한 시스템 관로내 진동 측정은 가속도계를 이용하여 F. F. T(AD3524)로 측정하였다. 위 두 번째 실험을 완전고정용 클램프로 튜브의 양 끝단을 고정한 후에 반복하였다.

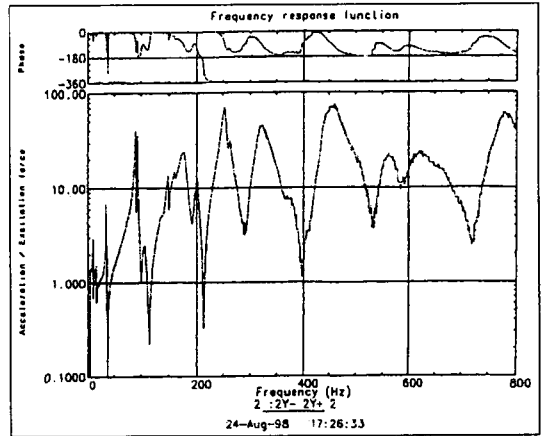
### 3. 결과 및 고찰

유체를 포함한 튜브의 형상 변화에 따라서 주파수와 모우드형의 변화를 알아보기 위해서 우선 위에서 열거한 튜브를 단일체로 간주하고 모달시험을 행하였다. 이때 관찰된 고유 진동수는 Table 3과 같다.

Fig. 3부터 5는 각 실험 튜브에 대한 모우드 형상을 나타내고 있는데 직관과는 달리 구부러진 튜브에서는 굴곡 부에서 에너지가 소산되어 충분한 에너지가 전달되지 않는 현상이 일어나

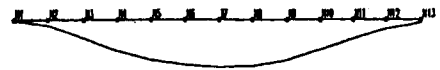
Table 3. Natural frequencies in various tube

Tube	1st(Hz)	2nd(Hz)	3rd(Hz)
straight	34.79	89.4	149.3
single curve	10.71	33.64	124.6
double curve	4.75	44.19	52.31

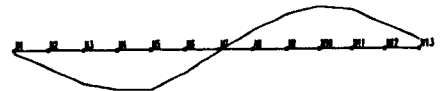


(a) Frequency response function

DEFORMATION: 171-3-PIPE-I-0-535-IN/34.78928  
 DISPLACEMENT (mm) MIN: 4.97E-01 MAX: 2.79E+01  
 MODE OF REF: PART



(b) 1st order



(c) 2nd order



(d) 3rd order

Fig. 3. FRF and mode shapes on straight tube

고 있음을 알 수 있다. 두 번째 실험에서 위에서 열거한 튜브를 일정구간에 연결하여 연속계에서 이러한 튜브가 어떠한 반응을 하는지를 알아보기 위하여 주파수응답함수(Frequency Response Function, FRF)실험을 행하였다. 이때 단일 튜브의 실험은 상용 소프트웨어를 사용하여 행하였으나, 전체 시스템은 10m에 이르는 튜브라인이 설치되어있는 실험실구조의 위치에 따라 임팩트 해머와 가속도계를 F. F. T에 연결하여 고유진동수를 찾았다. 이때 불연속점을 포함한 튜브의 형상에 대해서는 y방향과 z방향 각각에 대하여 FRF실험을 행하였다. 이때 관찰된 고유진동수는 다음 Table 4와 같다.

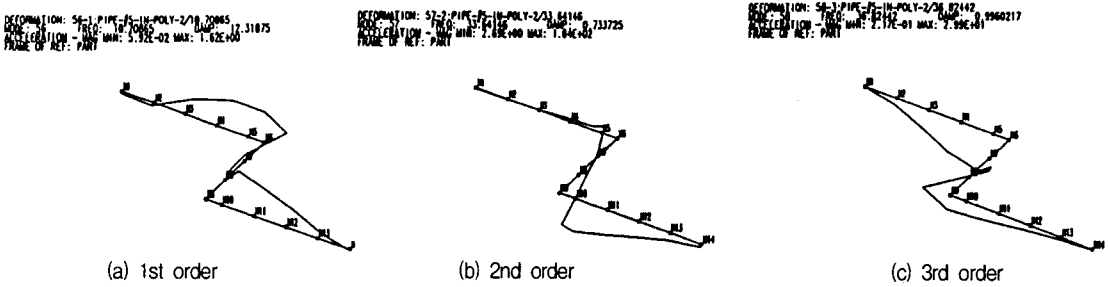


Fig. 4. Mode shapes on single curved tube

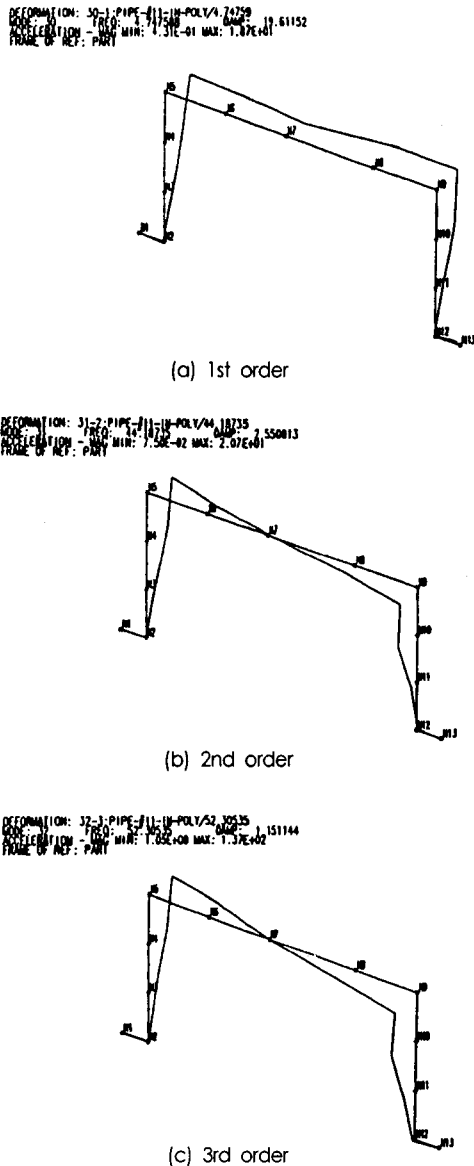


Fig. 5. Mode shapes on double curved tube

Table 4 Natural frequency in continuous system

Without absolute clamp		1s(Hz)t	2nd(Hz)	3rd(Hz)
Straight		26.875	36.25	48.125
single curve	y-dir	30	38.125	80.625
	z-dir	31.875	38.75	80
double curve	y-dir	55	59.375	140
	z-dir	10	53.125	87.5
With absolute clamp		1st(Hz)	2nd(Hz)	3rd(Hz)
Straight		31.875	88.125	110.625
single curve	y-dir	31.875	49.375	110.625
	z-dir	33.125	48.75	116.25
double curve	y-dir	47.5	57.5	145
	z-dir	16.25	47.5	57.5

첫 번째 실험과 두 번째 실험에서 동일한 길이에 대한 실험을 행함에도 불구하고 주파수의 각각의 주파수가 상이한 것을 볼 수 있다. 이는 튜브의 기하학적 형상에 따라 고유 진동수의 변화가 있음을 알 수 있다. 이것은 직관과 비교해서 굴곡부가 존재하는 ㄷ관과 ㄱ관에서 관찰할 수 있으며 이는 굴곡 부에 따른 탄성계수 K의 영향이라 할 수 있다. 또한 유체의 전파의 가짐에 따른 튜브의 형상에 따라 변화하고 있음을 알 수 있다. 특히 굴곡점이 두 개인 ㄷ관에 비해 4개인 ㄱ관에서 심한 변화가 있음을 알 수 있다. 완전 고정용 클램프를 체결한 것과 체결하지 않은 것에는 주파수의 차이가 있음을 볼 수 있다. 튜브 연결용 나사 끝단에 완전 고정용 클램프로 체결했을 경우 일반적으로 탄성 K가 커지므로 주파수의 증가가 있음을 볼 수 있다. 다만 ㄷ관

에서는 굴곡부가 많아서 y방향의 1차 주파수 성분과 z방향의 2차 주파수 성분에서는 오히려 낮아지는데, 이것은 r관에 굴곡부가 많아서 나타나는 특성으로 사료된다. 위의 단일계에서의 모달 테스트와 연속계에서의 주파수 응답 함수의 고유진동수의 차이가 동일한 튜브의 동일 구간에 대한 실험에도 불구하고 이처럼 큰 이유는 연속계에서 행해 졌다는 이유도 있지만 튜브 체결용 클램프라는 구속조건이 완전 클램프가 아니라 단순 지지의 역할만 할 수 있으므로 강성의 영향이 각 튜브의 형상에 대하여 차이를 나타냄에 기인한다고 볼 수 있다.

세 번째 실험에서는 베인펌프의 압력 맥동에 의한 맥동장이 관로속에서 맥동 흐름으로 연장되는 것을 확인하고 위에서 행한 공진 주파수가 구동시에 어떠한 변화가 있는지를 알아보기 위해 F. F. T로 진동 측정하였다. 우선 1000rpm, 1500rpm, 1800rpm 으로 속도를 변화하여 측정하였다. 이때 사용된 베인펌프는 베인이 10개이므로 각각의 펌프 속도에 따라서 166.7Hz, 250Hz, 300Hz의 주파수가 관찰되고 사인 커브를 이루고 있으므로 조화함수임을 확인하였다.

Fig. 6과 같이 실제 각각의 형상에 따라서 펌프를 위에서 열거한 회전수별로 가동하면 시스템의 고유 주파수 성분과 맥동에 의한 주파수 성분을 관찰할 수 있다. 이때 위의 두 번째 실험과 비교하면 튜브 형상에 따라 1차 또는 2차 주파수 대역에서만 관찰할 수 있었다. 이때 시스템의 주파수는 펌프의 회전수에 따라서 약간의 오차는 있으나 평균값으로 열거하였으며, 정지 시에 관찰된 고유진동수보다는 작음을 알 수 있다.

이는 파이프 계에서와 마찬가지로 유속과 압력이 증가하면 고유진동수가 감소함을 튜브 계

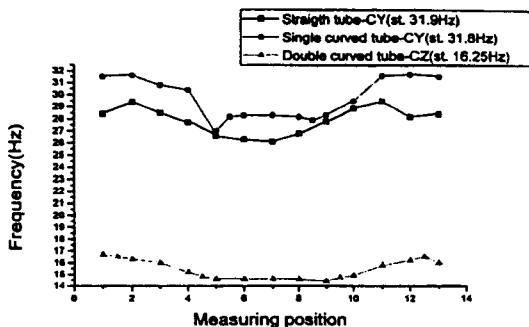


Fig. 6. Variation of frequencies with measuring position

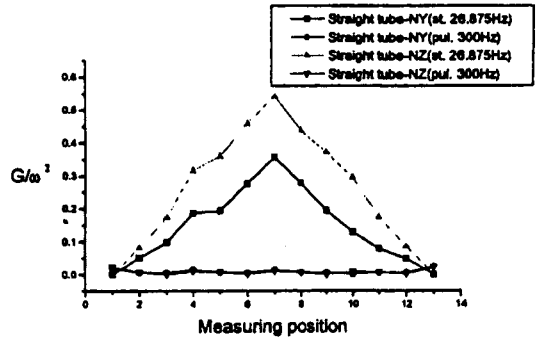
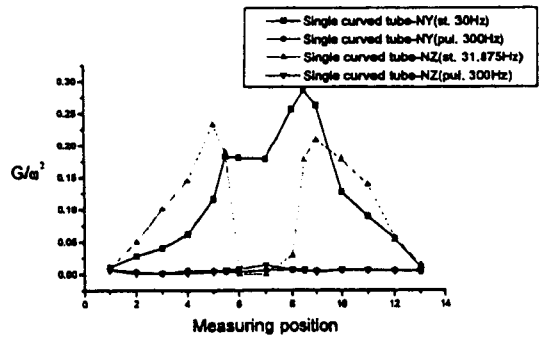


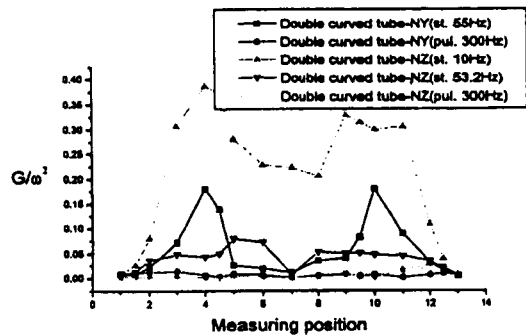
Fig. 7. Relative displacement on straight tube(1800rpm)

에 대해서도 일치함을 알 수 있다.

Fig. 7에서 알 수 있듯이 진동레벨은 맥동에 의한 진동보다는 시스템자체의 진동이 훨씬 큰 영향을 튜브계에 미침을 알 수 있다. 또한 직관에 대한 변위의 위치에서의 변화는 첫 번째 실험에서 구한 1차 모우드형과 일치함을 알 수 있다. Fig. 8에서는 다른 튜브의 형상에 대해서도 위상을 고려한다면 단일계 자체에서의 모우드형



(a) single curved tube

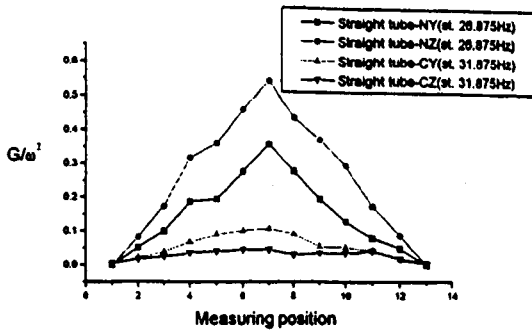


(b) double curved tube

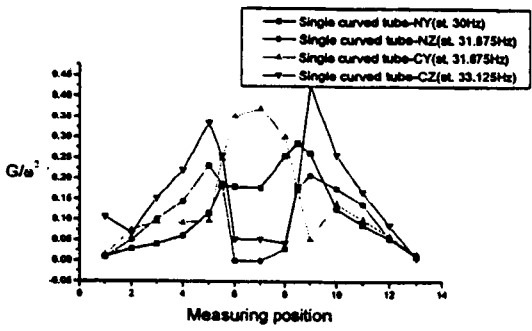
Fig. 8. Relative displacements on single curved tube and double curved tube

에 일치함을 알 수 있었다. 또한 완전 고정용 클램프에 대해서도 동일한 결과를 얻었다.

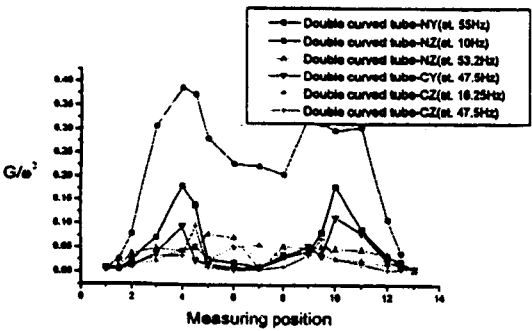
Fig. 9는 어떠한 튜브의 형상에 대해서도 펌프의 회전수에 관계없이 튜브 시스템 자체의 고유진동수의 진동레벨은 거의 동일함을 알 수 있다. 또한 완전체결용 클램프로 튜브의 연결 나사 끝단에 연결시에 진동 레벨이 일반적으로 낮아짐을 알 수 있다.



(a) straight tube



(b) single curved tube



(c) double curved tube

Fig. 9. Vibration level of system according to being clamp for absolute fix - straight tube, single curved tube and double curved tube

#### 4. 결론

본 연구에서는 튜브의 기하학적 형상과 배인 펌프의 맥동 전파에 의해 야기된 유체-구조 상호작용에 의한 진동이 튜브 관로를 따라 전파되는 특성을 실험적으로 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 시스템의 진동에 의한 변위가 맥동에 의한 진동의 변위보다 훨씬 크다. 따라서 시스템 진동의 영향이 증대함을 알 수 있다.

(2) 액체의 유속이 증가하고 유량이 증가함에 따라서 시스템의 고유진동수가 감소하는 경향을 직경이 큰 튜브뿐만 아니라 직경이 좁은 튜브에서도 관찰할 수 있었다.

(3) 동일한 경계조건에서 단일 계에서 나타나는 진동모우드형이 실제 펌프의 구동시에 유사한 경향을 보인다. 따라서 튜브의 단일 계에서 모달 테스트를 시행함으로써 연속계에서 일어날 수 있는 고유진동수의 모우드형을 예상할 수 있으며 이를 토대로 진동을 저감시키는데 활용할 수 있다.

#### 참고문헌

- 1) G. C. Everstine, "Finite Element Formulation of Structural Acoustics Problems", Computers and Structures, Vol. 65, No. 3, pp. 307~321, 1997.
- 2) L. G. Olson. and D. Jamison, "Application of a General Purpose Finite Element Method to Elastic Pipes Conveying Fluid", Journal of Fluids and Structures, No. 11, pp. 207~222, 1997.
- 3) D. J. Williams, "Water-hammer in Non-Rigid Pipes : Precursor Waves and Mechanical Damping", ASME Journal of Mechanical Eng. Sci. Vol. 19, No. 6, pp. 237~242, 1977.
- 4) J. S. Walker and J. W. Phillips, "Pulse Propagation in Fluid Tubes" ASME Journal of Applied Mechanics, pp. 31~35, 1977.
- 5) D. C. Wiggert, R. S. Otwell and F. J. Hatfield, "The Effect of Elbow Restraint on Pressure Transients", ASME Journal of Fluids Engineering, 107(3), pp. 402~406, 1985.
- 6) D. C. Wiggert, F. J. Hatfield and S. Stuckenbruck, "Analysis of Liquid and Structural Transients in Piping by the method of Characteristics", ASME Journal of Fluids Engineering. 109(2),

- pp. 161~165, 1987.
- 7) Lee, U., Park, C. H. and Hong, S. C., "The Dynamics of Piping System with Internal Unsteady Flow" *Journal of Sound of Vibration*, 180(2), pp. 297~321. 1995.
  - 8) Y, Urata. and T. Sano, "Vibration Analysis of Three-Dimensional Piping Systems Containing Fluids", *日本機械學會論文集(C編)*, 59卷, 568号, pp. 46~53, 1993.
  - 9) Leo L, Beranek. "Noise and Vibration Control", 1988.
  - 10) G. S. Shin, "An experimental study on the vibration and noise characteristics in power Steering Tube Line System of Vehicle", Ph. D Thesis, Chonbuk National Univ. 1999.
  - 11) R. J. Allemang and D. L. Brown, "A Review of Modal Parameter Estimation Concepts".