

외부 가진을 받는 관로계에서 볼트 결합부의 동특성

Dynamic Characteristics of Bolted Joint in Tube Line by External Vibration

박태원 · 김영권 · 신귀수

T. W. Park, Y. K. Kim and G. S. Shin

Key Words : Tube Line(관로계), Structural Coupling(구조적 연성) Fluid-Structure Interaction(유체-구조 상호작용), Vibration Analysis(진동해석)

Abstract : This paper describes the effect of dynamic characteristics in tube line by external vibration conveying fluid with the power steering system. By the experimental analysis we found out that the factor of system vibration is the 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 experiment. Experiments are modal test, frequency response function in continuous system, and vibrating tests when the system is driving with bolted clamping joint condition. From the results of the experimental studies, we obtained that the natural frequencies of system are very important than the wave induced vibrations. And we found that the tendency of system vibration level was decreased by bolting force, bolting condition and clamping distance.

1. 서 론

최근 기계 구조물 각 부재의 진동 특성을 알고 있어도 구조물 전체의 진동 특성을 도출할 수 없는 어려움이 있으며, 문제의 해석을 위한 많은 방법들이 논의되고 있고 그 중 유한요소법을 적용할 때의 애로와 해결할 수 있는 방법에 대해서도 연구되고 있다. 그러나 많은 연구들에 있어서는 구조물을 구성하는 각 부재를 연결하기 위해서 가장 많이 사용되는 볼트 결합부의 특성에 관하여는 자세히 언급되어있지 않다. 자동차 차체를 포함한 대부분의 기계 구조물들은 적어도 한 개 이상의 볼트 결합부를 가지고 있는 복합 구조물이라고 할 수 있으며, 이 결합부는 진동, 충격 또는 열적 주기를 포함하는 동적 환경에 자주 영향을 받는다^{1,2)}.

유압기계 및 자동차의 파워 스티어링 시스템과 같은 관로속을 유체가 일정 속도로 흐를 때 상당한 진동이 발생하고 이로 인한 소음이 발생한다.

배관 계에서 유체 유동에 의한 구조물의 진동을 정확하게 해석하기 위해서는 유체-관 사이의 상호작용에 대한 연계메커니즘이 엄밀하게 모델링되어야 한다^{3,4)}. Wiggert^{5,6)} 등은 유체와 관 벽사이의 Poission Coupling을 고려하였다. Lee⁷⁾ 등은 관을 보로 모델링하여 유체-배관 사이의 상호작용 메커니즘을 포함한 완전히 연계된 운동방정식을 유도하였다.

베인 펌프에 의해 맥동된 오일의 파동에 관한 연구는 유체가 채워진 배관 형상에 따라서 진동과 파동 전파를 유한요소해석적으로 수행한 연구가 보고되었다⁸⁾. 그러나 실제산업체에서 사용하는 파이프나 튜브는 구조물의 형상 및 상태에 따라서 형상의 변화가 불가피한 경우가 많고, 대부분이 볼트 지지 결합부를 갖고 있으므로 사용기간이 지남에 따라 진동에 의한 이완현상이 일어난다⁹⁾. 이러한 볼트지지 결합부 이완에 따른 유체의 운동에 의해 나타나는 진동특성에 대한 예측은 아직까지도 미흡한 실정이다. 그리고 기존의 연구에서는 맥동에 기인한 주파수 성분을 주된 관심 영역으로 다루었으나 유체가 관로속을 빠른 속도로 진행할 때 유체에 의해서 관로계 자체의 진동특성 또한

접수일 : 2001년 8월 16일
박태원 : 전주공업대학 정밀기계과
김영권 : 전북대학교 대학원
신귀수 : 벽성대학 자동차과

분명 중요한 과제가 되고 있다.

따라서 본 논문에서는 관로에서 발생하는 진동 특성에 관하여 연구를 하기 위하여 직경이 동일한 관로에 진동특성의 변이를 연구하고, 진동이 관로를 진행할 때 구조물의 진동에 어떤 영향을 일으키는가를 확인하기 위하여 배관 연결부 전후에 볼트 체결을 하였다. 또한 외부 가진을 가함으로서 관 자체에서 어떠한 반응을 일으키는가에 대한 관로계의 진동특성 변화에 대해 연구하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

배인 펌프 구동에 의한 유압 맥동이 전파되는 관로계의 볼트지지 결합부의 동특성을 측정하기 위한 실험장치 시스템은 배인펌프 고정 지그 정반, 펌프 구동 모터, 공회전 조절 장치, 관로 고정용 베이스와 진동을 측정하는 FFT(Fast Fourier Transform, A&D 3524)로 구성되었다. 기존 실험의 서로 다른 형상을 갖는 관로 중 일차 굴곡이진 관로에 대해서 실험을 수행하기 위한 실험 장치를 구성하였다. Table 1은 실험에 사용된 관로의 재질을 나타내고 있다. 관로 직경은 12 mm이다.

Table 1 Material properties of tube

Material	Young's modulus	Possion's ratio	Density	Shear modulus
steel	2.068×10^5 (N/mm ²)	0.29	7.82×10^{-6} (kg/mm ³)	8.016×10^4 (N/mm ²)

실제 연속적으로 관로가 연결되어 있을 때 클램프 조건에서 나타나는 공진 주파수와 배인펌프의 압력 맥동에 기인한 관로내 맥동전파와 진동을 측정하기 위해 Fig. 1에서 개략적으로 보여주는 것처럼 파워 스티어링 시스템에 사용되는 배인펌프, 기어박스과 관로를 실험실에 설치하였다. 이 실험을 통해서 연속계에서의 유체 흐름이 정지 시에 나타나는 공진 점을 조사하고, 펌프 구동에 의하여 나타나는 진동수를 조사하여 위의 단일계에서의 관로의 고정에 쓰이는 클램프를 이용 일정한 위치에 토크렌치를 이용하여 볼트 체결하였다. 또한 관로가 단일계에 근접하도록 각각 관로의 양 끝단에 완전 고정에 근접하는 클램프로 고정하였다.

실험은 실제 배인펌프 구동시에 나타나는 주파수 성분을 찾기 위해서 펌프로 구동하여 각각의 구간에서 가속도계(DIL AC-4 9.91mV/G)로 측정하였다.

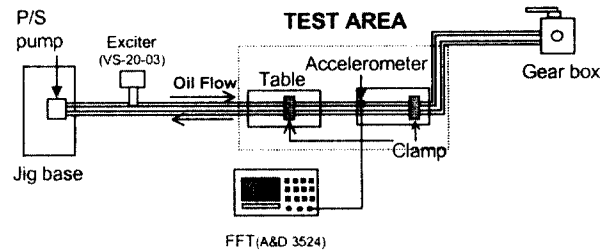


Fig. 1 Schematic of measuring systems

이때 연속계에서 나타나는 공진 주파수를 구하기 위하여 시험 장치중 단일 관로 측정을 위해 시편의 연결부 전후에 클램프로 고정하고, 가속도계와 임펄스해머를 FFT(Fast Fourier Transform, Di 2200)에 연결하여 일정부분을 5회 가격하여 공진 주파수를 측정하였다.

또한 구동시 나타나는 배인펌프의 압력 맥동에 기인한 관로내 맥동전파와 진동을 측정하기 위한 관로계 진동 측정은 가속도계를 이용하여 FFT(A&D3524)로 측정하였다. 이 실험은 완전고정용 클램프로 관로의 양 끝단을 고정한 후에 반복 수행하였다.

이상은 관로계의 맥동에 관한 실험을 수행한 것이고 관로계가 외부 가진에 의해 발생하는 진동 특성을 해석하기 위해서 관로의 일정 위치에 진동 시험시스템(MODEL : VS-20-03, IMV Co.)을 설치하고, 외력을 일으키는 가진기를 이용하여 일정 주파수로 가진을 발생하여 동특성을 측정하였다. 가진기와 관로의 연결은 알루미늄 블록을 이용하여 클램프를 볼트 체결하였다. 측정점 위치는 직선부와 굴곡 부에 대하여 실시하였고, 또한 볼트지지 체결부의 특성을 파악하기 위해 관로계의 반력을 가했을 때 체결력의 변화(900, 1000, 1100 N·m)에 대한 실험과 고무를 삽입한 경우와 제거한 상태에서 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

유체를 포함한 관로 연결부의 볼트지지 결합부의 동특성을 알아보기 위해서 우선 실험 장치에서 관로의 단일체 모드시험을 행하였다. 이때 관찰된 고유 진동수는 Table 2와 같다.

Table 2 Natural frequency of tube

Specimen	1st(Hz)	2nd(Hz)	3rd(Hz)
single curve	10.71	33.64	124.6

DEFORMATION: 56-1-PIPE-F3-IN-POLY-2/10_20865
 MODEL: 56-1-PIPE-F3-IN-POLY-2/10_20865
 ACCELERATION - DISC MIN: 3.52E-02 MAX: 1.52E+00
 FRAME OF REF: PART

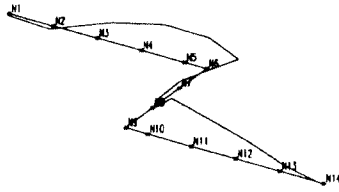


Fig. 2 First mode shape on specimen

Fig. 2는 실험 관로에 대한 일차 모드 형상을 나타내고 있는데 완전한 일차 모드형이 나타나지 않고 전체적으로 에너지가 소산되어 굴곡 부에서 충분한 에너지가 전달되지 않는 현상이 일어나고 있음을 알 수 있다.

관로를 일정구간에 연결하여 연속계에서 각각의 관로가 어떠한 반응을 하는지를 알아보기 위하여 주파수응답함수(Frequency Response Function, FRF)실험을 행하였다. 이때 불연속점을 포함한 관로의 형상에 대해서는 y방향과 z방향 각각에 대하여 FRF실험을 행하였다. 이때 관찰된 고유진동수는 다음 Table 3과 같다.

Table 3 Natural frequency of tube with clamp condition

single curve		1st(Hz)	2nd(Hz)	3rd(Hz)
Without clamp	y-dir	30	38.125	80.625
	z-dir	31.875	38.75	80
With clamp	y-dir	31.875	49.375	110.625
	z-dir	33.125	48.75	116.25

관로계에 연결하지 않은 관로 실험과 연결한 실험에서 동일한 길이에 대한 실험을 행함에도 불구하고 각각의 주파수가 상이한 것을 볼 수 있다. 이는 관로의 기하학적 형상에 따라 고유 진동수의 변화가 있음을 알 수 있다. 이것은 직관과 비교해서 굴곡부에서 관찰할 수 있으며 이는 굴곡 부에 따른 탄성계수 K 의 영향이라 할 수 있다. 또한 유체 전파의 가진에 따른 관로의 형상에 따라 변화하고 있음을 알 수 있다. 완전 고정용 클램프를 체결한 것과 체결하지 않은 것에는 주파수의 차이가 있음을 볼 수 있다. 관로 연결용 나사 끝단에 완전 고정용 클램프로 체결했을 경우, 일반적으로 탄성계수 K 가 커지므로 주파수의 증가가 있음을 볼 수 있다. 위의 단일계에서의 모드 시험과 연속

계에서의 주파수 응답 함수의 고유진동수 차이가 동일한 관로의 동일 구간에 대한 실험에도 불구하고 이처럼 큰 이유는 연속계에서 행해 졌다는 이유도 있지만 관로 체결용 클램프라는 구속조건이 완전 클램프가 아니라 단순 지지의 역할만 할 수 있으므로 강성의 영향이 각 관로의 형상에 대하여 차이를 나타냄에 기인한다고 볼 수 있다.

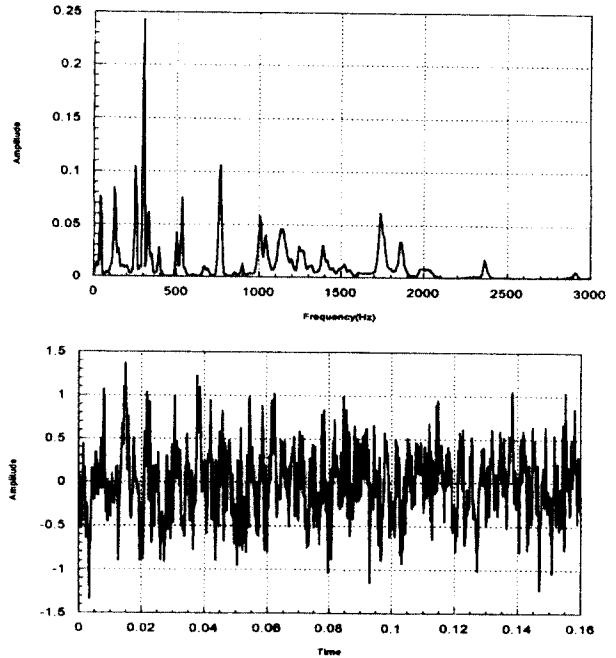


Fig. 3 Output signal of exciting condition without clamp

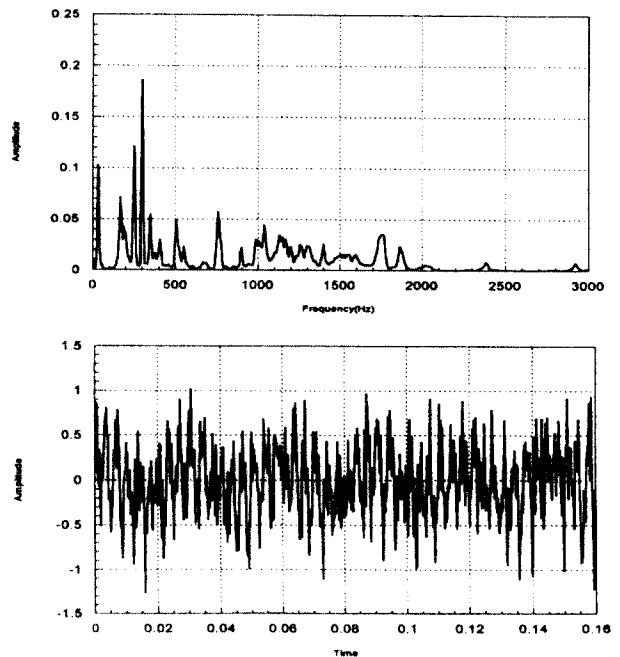
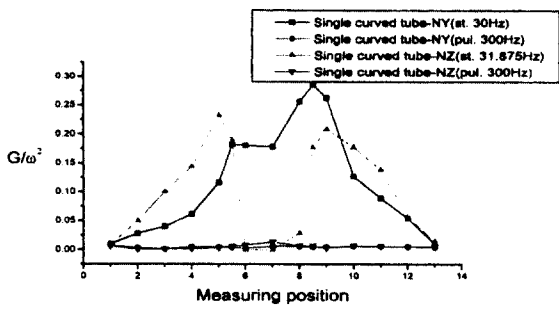


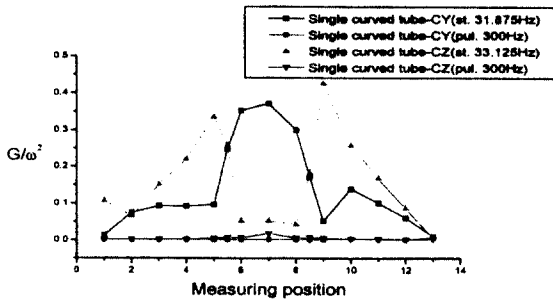
Fig. 4 Output signal of exciting condition with clamp

Fig. 3과 4는 베인펌프의 압력 맥동에 의한 맥동장이 관로속에서 맥동 흐름으로 연장되는 것을 확인하고 위에서 행한 공진 주파수가 구동시에 어떠한 변화가 있는지를 알아보기 위해 회전 속도 1800rpm에서 FFT로 진동 측정된 결과이다. 이때 사용된 베인펌프는 베인이 10개이므로, 각각의 펌프 속도에 따라서 300Hz의 맥동이 전파되는 진폭과 과형을 보여주고 있다. 진동 시험장치 가진에 의한 300 Hz 피크 값이 클램프 볼트지지 체결에 의해 진폭 값이 감소하나 가진과 공진에 의한 오일 맥동의 변동이 심하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

따라서, 기다란 관로계의 영향으로 오일 맥동이 관로의 연결에 따른 영향을 고려하는 볼트 지지 조건이나 체결 위치 등을 고려하면 진동 레벨을 저감할 수 있고, 이에 따라서 새로운 설계도 할 수 있다.



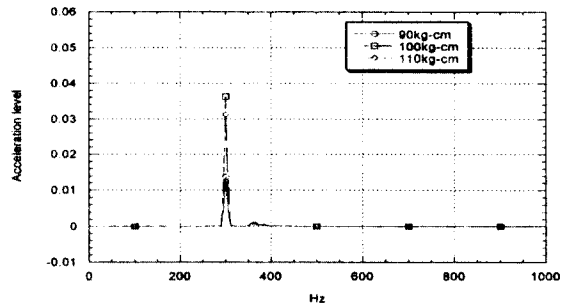
(a) without clamp



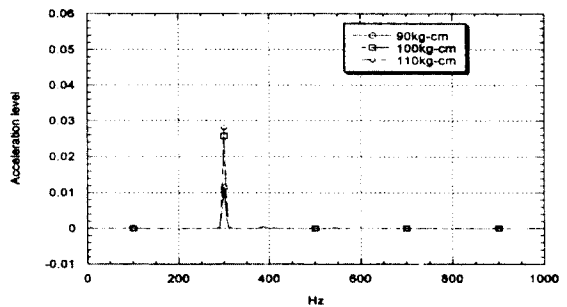
(a) with clamp

Fig. 5 Comparison with vibration level by clamp condition

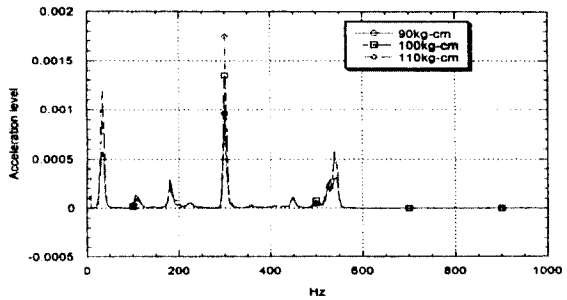
Fig. 5는 관로와 구조적 연성 관계를 측정할 실험으로서 클램프 체결 전후의 진동레벨을 보여주고 있다. 클램프 유무에 상관없이 베인 펌프의 맥동에 의한 진동보다는 관로계 자체의 고유 진동에 의한 영향이 훨씬 증대함을 알 수 있다. 그러나 관로 자체의 고유 진동수는 저주파 성분이며 유체를 수송할 수 있는 펌프의 최적 회전 속도에 의한 주파수 대역보다는 작으므로 베인 펌프 맥동에 의한 공진은 일어나지 않는다. 따라서 관로의 단일계에서 모드 시험을 실행함으로써 연속계에서 일어날 수 있는 고유 진동수의 모드 형을 예상할 수 있다.



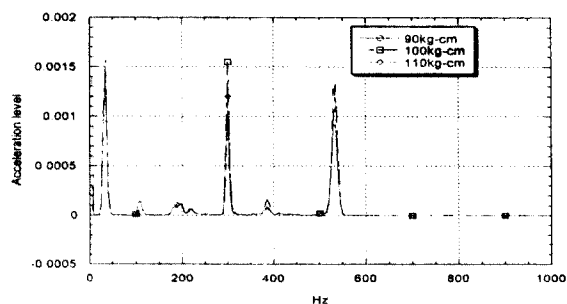
(a)



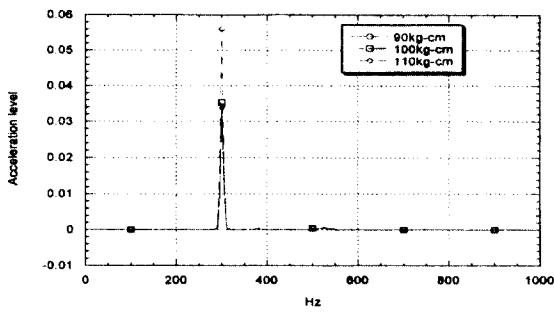
(b)



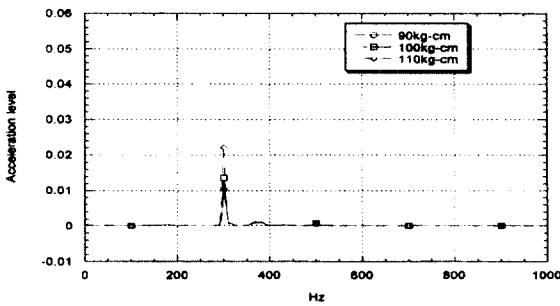
(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 6 Comparison of clamp support condition

Fig. 6은 시험장치에서 시험 영역의 전후 체결부 체결력을 각각 900, 1000, 1100 N·m로 가함으로 발생한 변화에 대한 결과로서, (a)는 관로 사이의 클램프연결부 앞쪽 위치에서 측정하였고, (b)는 연결부 뒤쪽 (c)와 (d)는 연결부 중간 점 위치로 클램프가 체결되지 않았다. (e)는 뒤쪽 연결부 앞쪽에 클램프를 (f)는 뒤쪽에 클램프를 체결한 경우의 경과 그래프이다. 그림에서 연결부 전후의 가속도 레벨의 감소를 확인할 수 있으며 또한 관로 직경이 작기 때문에 체결 상태에 따른 강성의 변화로 작은 힘의 체결 상태에서 레벨이 낮아지는 것을 볼 수 있다. 따라서 직경이 작은 관로의 진동 저감을 위해서는 일정한 체결력으로 체결해야 한다.

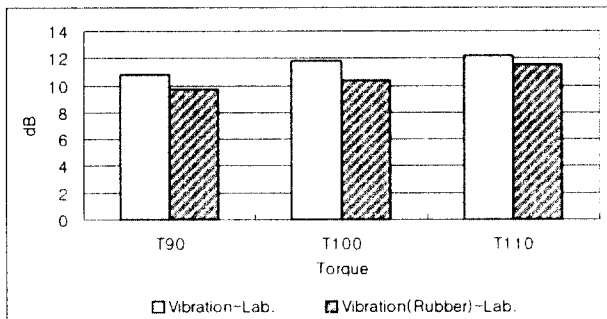


Fig. 7 Overall vibration level

Fig. 7은 체결력의 변화와 클램프와 시편 사이에 고무를 삽입한 경우의 실험을 행한 결과로 각 체결력에서의 진동 레벨 총합을 보여 주고 있다. 실험결과 클램프에서 직접 받는 진동을 억제하기 위해 고무를 삽입한 경우가 레벨의 현저한 저감이 일어나고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

직경이 작은 관로에 있어서 배인펌프의 맥동 전파에 의해 야기된 유체-구조 상호작용에 의한 진동이 관로 연결 볼트지지 체결부의 동특성을 실험적으로 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 구조물 연결부 진동에 의한 변위가 맥동에 의한 진동의 변위보다 훨씬 크다. 따라서 시스템 진동의 영향이 중대함을 알 수 있다.
- (2) 관로를 지나는 맥동의 영향에 의해 관로 전체 측정값들이 액체의 유속이 증가하고 유량이 증가함에 따라서 불규칙적으로 얻어지고 있음을 알 수 있었다.
- (3) 작은 체결력의 변화에 의한 레벨 감소가 일어나고 있음을 알 수 있듯이 관로 연결에 따른 영향을 고려하여 체결력, 지지조건 그리고 체결위치 등을 고려하여 진동을 저감할 수 있다.

후 기

이 논문은 전주공업대학 산업기술연구소의 연구비 지원으로 연구되었음.

참고문헌

1. K. Wyckaert, G. McAvoy and P. Sas, "Flexible Substructuring Coupling Based on Mixed Finite Element and Experimental Models : A Step Ahead of Transfer Path Analysis," 14th IMAC, pp. 633~640, 1996
2. R. H. Lyon, "Statistical Energy Analysis of Dynamical System Theory and Application.", MIT Press. pp.373, 1975
3. G. C. Everstine, "Finite Element Formulation of Structural Acoustics Problems", Computers and Structures, Vol. 65, No. 3, pp. 307~321, 1997
4. 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
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. U. S. Lee, C. H. Park and S. C. Hong, "The Dynamics of Piping System with Internal Unsteady Flow" Journal of Sound and Vibration, 180(2), pp. 297~321. 1995
 8. 정인성, 정재연, 김동우, "Bus용 Power Steering 계에 있어서 소음 발생 원인 규명 및 특성 해석에 관한 연구," 현대자동차연구보고서, 1998
 9. 신 귀수 "자동차용 파워 스티어링 관로계의 진동 및 소음 특성에 관한 실험적 연구," 전북대학교박사학위논문, 1999