

배관의 표면진동을 이용한 소음예측기법 연구

A study on the Prediction of the Radiated Noise by Fluid Induced Vibration in the pipe

이종주* · 박경훈* · 정우진* · 서영수†

Jongju Yi, Kyunghyon Pak, Woojin Jung and Youngsoo Seo

Key Words : flow-induced vibration(유체기인 진동), pipe noise(배관 소음), radiation efficiency(방사효율)

ABSTRACT

This study is on the experiment of the pipe noise due to the internal fluid. The straight pipe, the 90° mitred pipe, rounded 90° and 135° pipe were tested and measured the vibration and noise. In the experiment, the vibration and noise level of the straight pipe and rounded pipes show that the vibration and noise level are almost same. The 90° mitred pipe shows the high vibration and noise level. In the prediction of noise due to the internal flow, the use of pipe surface vibration and radiation efficiency shows good agreement with experiment result.

기 호 설 명

- L_p : 배관 소음 dB(Ref : 20uPa)
- L_a : 배관 표면 진동, dB(Ref : $5 \times 10^{-8} \text{m/s}^2$)
- σ : 배관 방사효율
- d : 배관 평균 지름, m
- r : 배관중심에서 소음 계측지점간 거리, m
- f : 주파수, Hz
- ρ_0 : 배관 외부 유체 밀도, kg/m^3
- c_0 : 배관 외부 유체 음속, m/s

1. 서 론

선진 각국에서는 수중 함정의 은밀성 증대와 작전 능력 확대를 위하여 수중 방사소음 감소를 위한 해석 및 실험 연구를 지속적으로 수행함으로써 음향

스텔스 기술을 발전시키고 있다. 함정 수중 방사소음은 추진 및 보조 기계류 진동/소음, 추진기 소음, 유체 동력학적 소음 등에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다. 또한 함정에서는 각종 기계류의 정상 작동을 위하여 윤활유 계측, 냉각수계통 및 유압공급계통 등이 필요하며, 이러한 유류, 냉각수 등의 유체는 배관 시스템을 통하여 필요한 장비까지 공급된다. 특히 배관시스템은 여러 가지 형태 및 크기의 배관으로 이루어진 복합 시스템으로 내부 유체 운동 특성에 따라 다양한 소음이 발생하는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 배관내부 유체의 난류 특성에 의해서 유체소음과 내부유체 운동과 배관의 상호작용에 의하여 배관의 표면이 진동하여 발생하여 공기중으로 방사되는 구조소음이 있다. 본 논문에서는 배관 표면진동에 의해서 발생하는 구조소음에 대해 연구하였다.

배관의 표면진동에 의해 발생하는 구조소음에 관한 연구^{(1), (2)}는 주로 공기, 천연가스와 같은 기체 종류에 의한 실험 및 연구가 주를 이루며 내부유체가 물, 기름과 같은 액체인 경우에 발생하는 소음에 대한 연구는 찾아보기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 내부유체가 물이며 펌프에 의해서 배관 내부에

† 교신저자; 정회원, 국방과학연구소
E-mail : sys@add.re.kr
Tel : 055-540-6419

* 국방과학연구소

물이 순환될 경우 배관에서 발생하는 진동과 소음을 계측하였다. 그리고 계측된 배관의 표면진동과 기존 논문에서 제시한 방사효율을 이용하여 배관의 소음을 예측하고 그 결과를 계측된 값과 비교하였다.

2. 배관 진동소음 실험장치

2.1 실험 대상

배관 시스템은 다양한 형태와 크기의 배관 및 밸브, 펌프류 등 여러 가지의 소음원을 가지고 있다. 본 연구에서는 밸브 및 펌프류를 제외하고 직관, 90도 곡관, 135도 곡관에 대해서 실험을 실시하였다. 직관, 곡관은 내경 54.9mm, 두께 2.8mm인 Seamless pipe(50A SCH10S)로 제작하였다. 곡관의 경우, 곡률반경, 곡관 꺾임 각도를 달리하여 그 영향의 정도를 고찰하고자 하였다. 실험에 사용된 배관의 종류 및 형태는 표 1과 같다.

Table 1 Test specimen

Bending degree	Curvature[m]	Specimen
90	0	
90	3, 5, 7	
135	3, 5, 7	

2.2 실험장치 구성

배관 내부 유체 유동에 의해서 배관에 발생하는 진동 및 소음을 측정하기 위하여 Fig. 1과 같이 실험장치를 제작하였다. 실험장치는 다양한 배관요소에 대한 실험을 하기 위하여 1개 입구, 3개 출구를 가지고 있으며, 실험대상에 따라 출구를 달리 설정할 수 있도록 하였다. 실험장치는 배관 내부 물의 순환을 위한 펌프와 물 탱크 그리고 물의 흐름을 조

절할 수 있는 밸브로 구성되어 있다. 그림에서 보는 바와 같이 물은 펌프를 통해서 배출되어 시험장치 입구로 들어가고 직관 및 곡관등을 거쳐 출구로 나와서 다시 물 탱크로 들어가게 된다. 이때 펌프에 의한 소음을 차단하기 위하여 실험장치 입구와 출구단에 방음챔버를 설치하였다. 따라서 배관 진동소음 실험은 챔버 내부에서 수행되었으며 최대한 외부 잡음을 차단하였다. 챔버의 크기와 벽면재질을 고려할 때, 측정 가능한 하한 주파수는 대략 400Hz로 설계되었다.

내부 유체에 의한 진동 및 소음을 계측하기 위하여 배관요소 표면에 가속도센서 6개를 설치하였다. 내부유체에 의한 소음을 계측하기 위한 마이크로폰은 MIL-STD-740-1/2에 의거하여 배관 중심으로부터 1m 이격된 수직, 수평방향에 각 1개씩 설치하였다. 그 외에 입구와 출구에 B&K사의 8103 하이드론폰을 설치하여 내부유체 소음을 계측하였으며, 압력센서를 이용한 배관 내부 표면 정압도 같이 계측하였다. 그리고 유속 계측을 위한 유속계를 입출구 4개 지점에 설치하여 내부유체 속도를 실시간으로 계측하였다. 내부 유체 유속은 0.5, 2, 4, 6, 10m/s로 설정하였고 배관 직경에 의한 레이놀즈 수는 $4.5 \times 10^3 \sim 4.5 \times 10^5$ 이다.

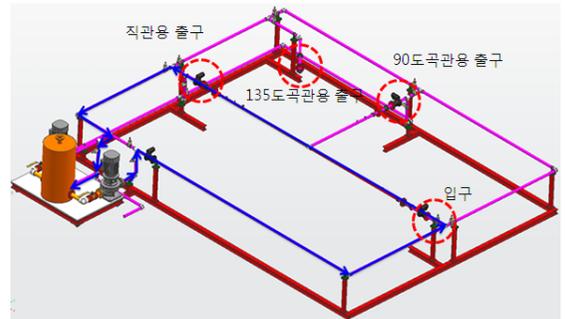


Fig. 1 The scheme of the experiment setup

3. 배관 소음 예측기법

기존 연구를 검토한 결과, 배관에 의해서 발생하는 소음 예측은 크게 배관 표면진동을 이용한 방법, 배관 내부 유체의 섭동압력을 이용한 방법 그리고 통계적 에너지기법(SEA)으로 나눌 수 있었다. 본 연구에서는 배관 표면진동을 이용한 소음 예측기법

을 사용하여 배관 진동소음 실험결과를 통하여 소음을 예측하고, 배관 소음 실험결과와 비교를 하였다. 배관 진동(a)을 이용한 소음 예측기법은 방사효율(σ)을 사용하여 다음과 같은 관계가 있는 것으로 알려져 있다.

$$p^2 = \sigma \rho_0^2 c_0^2 \frac{d}{2r} \frac{a^2}{\omega^2} \quad (1)$$

여기서 ρ_0 , c_0 는 배관 외부 유체의 밀도와 음속, d 는 배관 외부 직경, r 은 배관 표면과 소음 측정점까지의 거리 그리고 ω 는 각주파수이다. 위 식을 dB로 표현하면 다음과 같다.

$$L_p = 10\log\sigma + L_a + 10\log\frac{d}{2r} - 20\log(2\pi f) \quad (2)$$

위 식에서 방사효율은 실험을 통하여 구할 수 있으며 본 논문에서는 Norton과 Pruiti⁽⁷⁾가 제안한 값을 사용하여 소음을 계산하였다.

$$f < f_{10} \quad : \quad 10\log\sigma = 10\log\frac{f}{f_{10}} + 3dB$$

$$f_{10} \leq f \leq f_r \quad : \quad 10\log\sigma = 3dB$$

$$f > f_r \quad : \quad 10\log\sigma = 10\log\frac{f_r}{f} + 3dB \quad (3)$$

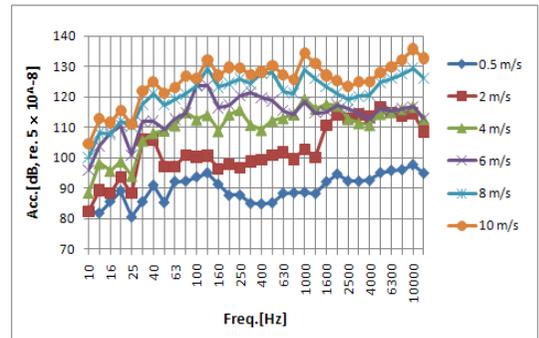
여기서 f_{10} 는 배관의 평면파 한계주파수(Cut-off frequency)이고 f_r 은 링 주파수(Ring frequency)이다. 본 실험장치에 사용된 배관의 한계주파수는 3,626Hz 이고 링 주파수는 29,916Hz이다.

4. 배관 진동소음 실험 결과

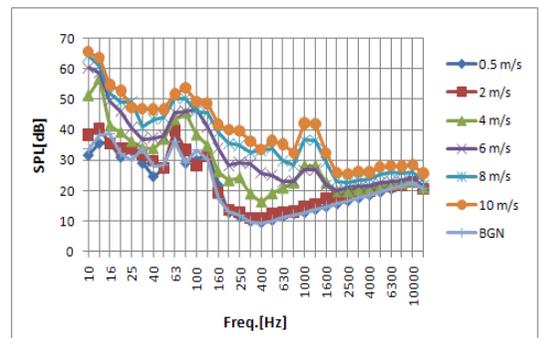
Fig. 2와 3은 배관요소의 진동 및 소음 계측 실험 중 직관과 90도 0D에 대해서 속도별 계측결과를 나

타낸 것이다. 내부 유체 유속이 올라감에 따라 표면 진동 및 공기중 소음 수준이 상승한 것으로 파악되었다. 이는 배관 내부 유속이 증가함에 따라 내부 유체와 배관 내부 벽면간의 전단응력이 상승하였고 이에 따라서 배관 진동수준이 증가하여 공기중 소음이 커진 것으로 판단된다. 그림에서 BGN은 챔버내의 배경소음이다.

내부유체의 유속이 2m/s이하의 구간에서는 공기중 소음과 배경소음이 구분되지 않는다. 그러나 속도가 증가할수록 배경소음과 배관 진동에 의한 소음이 점차 증가하는 것을 확인할 수 있다. 직관과 90도 0D 배관의 소음특성을 비교하면 직관은 주파수가 증가함에 따라 소음이 점차로 감소하나 90도 0D의 배관은 소음이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 90도 0D 배관의 진동특성을 살펴보면 주파수가 증가함에 따라 진동이 커진 것을 확인할 수 있다. 따라서 이러한 특성들이 공기중 소음에 반영되었을 것으로 판단된다.

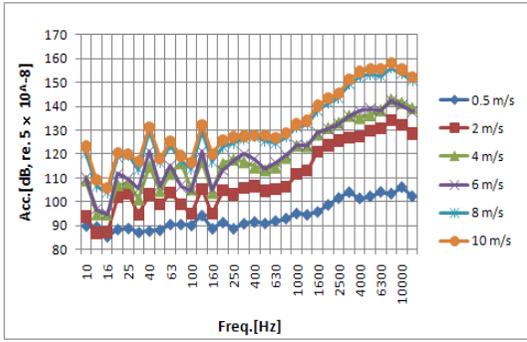


(a) Acceleration level

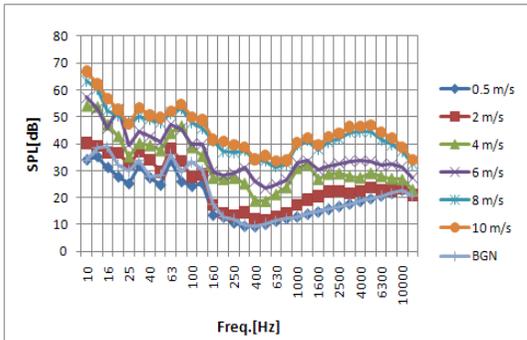


(b) Sound pressure level

Fig. 2 The result of the measurement(straight pipe)



(a) Acceleration level



(b) Sound pressure level

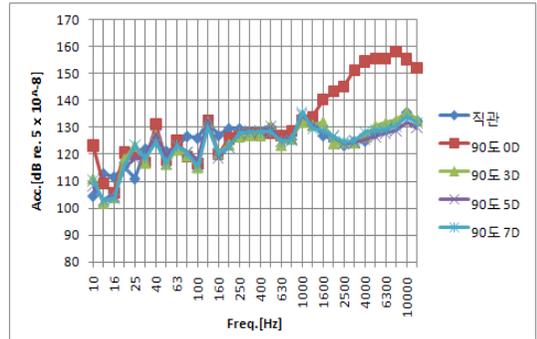
Fig. 3 The result of the measurement(90, 0D)

Fig. 4는 배관요소별 측정 결과 중 10m/s에 해당하는 내용을 정리하였다. 먼저 진동특성을 살펴보면 곡률이 3D에서 7D로 증가하여도 진동크기는 차이가 없었다. 그러나 90도 0D 배관은 1kHz 이상의 주파수에서 큰 차이를 보였다. 이런 경향은 0.5, 2, 4, 6, 8m/s 실험결과에서도 유사하게 나왔다. 이 결과를 보면 90도 0D의 경우 배관 꺾임 부근에서 강한 압력섭동이 발생하였고, 이에 따라 진동의 크기가 크게 증가한 것으로 판단된다. 이러한 진동의 증가는 공기중 소음에 그대로 반영되어 나타났다. 따라서 배관 곡률이 0D가 아닌 3D 이상에서는 직관이나 곡관 등 배관 형상에 따라서 소음 수준이 크게 변동되는 것이 아니며, 직각으로 꺾이는 배관요소 가장 큰 소음원으로 작용할 것으로 판단된다.

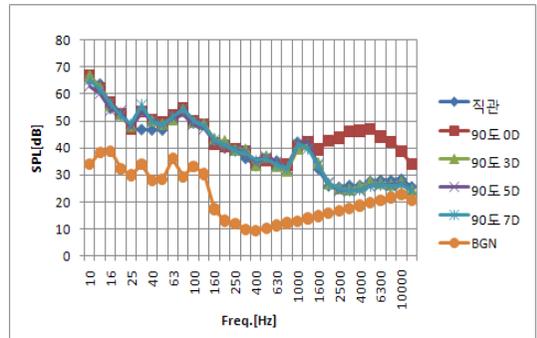
5. 방사효율 고찰

기존 논문에서 제시된 방사효율은 Cut-off frequency와 Ring frequency를 고려하여 실험적으로

제시된 값이다. 본 연구에서 측정된 표면진동과 소음수준을 식(1)을 이용하여 $10\log\sigma$ 를 계산하면 Fig. 5와 같다. 그림에서 방사효율 평균은 유속별, 배관요소별 표면진동과 소음수준을 통하여 구한 방사효율을 파워 평균한 값이며, 검은색 실선은 식(1)으로 계산한 방사효율이다.



(a) Acceleration level



(b) Sound pressure level

Fig. 4 The result of the measurement according to the pipe component(10m/s)

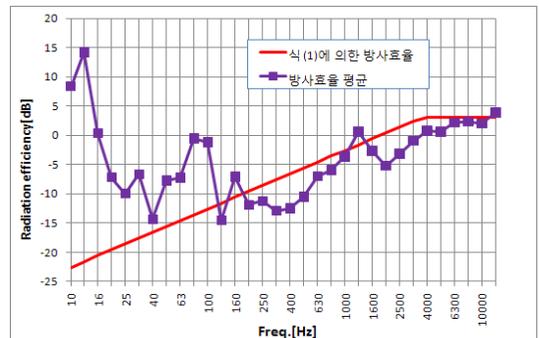


Fig. 5 The radiation efficiency of experiment

기존 연구에서 제시된 방사효율과 본 실험에서 도출한 방사효율은 저주파수 대역(~400Hz)까지는 큰 차이를 보이고 있다. 이는 챔버 방음수준에 의한 것으로 방사효율은 400Hz 이상에서 의미가 있는 것으로 생각된다. 기존 연구에서 제시된 방사효율에 비해 실험을 통하여 도출된 방사효율이 약 2~3dB 높은 것으로 판단되나 본 논문에서는 기존 연구에서 제시된 방사효율 예측 값을 사용하여 배관 표면 진동에 의한 소음을 예측하였다.

6. 배관 소음 예측 결과

배관 진동소음 실험결과중 배관 표면에서 계측한 6개 가속도 계측결과와 파워 평균값과 Fig. 5에 제시된 방사효율을 이용하여 배관 소음수준을 예측한 뒤 배경소음을 고려하여 전체적인 배관소음 예측결과를 Fig 6~8에 제시하였다.

그림 6은 직관이고 내부유속이 10m/s인 경우의 예측값과 계측값이다. 배관 진동에 따른 소음 예측 시 배경소음을 포함하여 계산을 수행하였다. 따라서 배경소음이 큰 저주파수 영역에서는 배경소음의 영향이 지배적으로 나타나고 있으며 160Hz 이상의 영역에서는 예측값과 계측값이 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

그림 7과 8은 90도 0D 배관과 135도 7D 배관에 대해서 내부 유속이 10m/s일때의 예측값과 계측값이다. 이 경우에서 앞서의 경우와 같은 경향을 나타내고 있으며 예측값과 계측값이 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

7. 결론

일반적인 배관 시스템을 구성하는 요소인 직관, 90도 곡관, 135도 곡관에 대한 내부 유체 운동에 의한 배관의 진동 및 소음 계측 실험을 실시하였다. 내부 유체 유속이 0.5, 2, 4, 6, 8, 10 m/s에 대해 실험을 수행하였으며 유속이 0.5, 2m/s인 경우 배관 소음은 배경소음 값과 동일하게 계측되었으며 4, 6, 8, 10 m/s등 빠른 유속에서는 배관 진동에 의한 소음이 배경소음 보다 높게 계측되었다. 내부 유체 유속이 빠를수록 배관에 발생하는 진동 및 소음의 크기가 높아지는 것을 확인하였다.

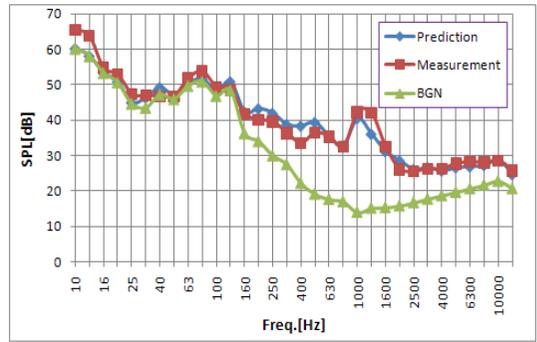


Fig. 6 The comparison result(Straight Pipe)

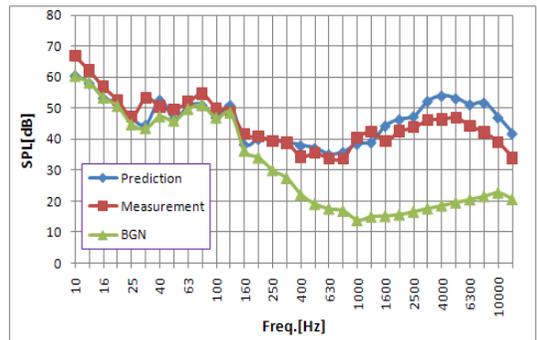


Fig. 7 The comparison result(90도 0D)

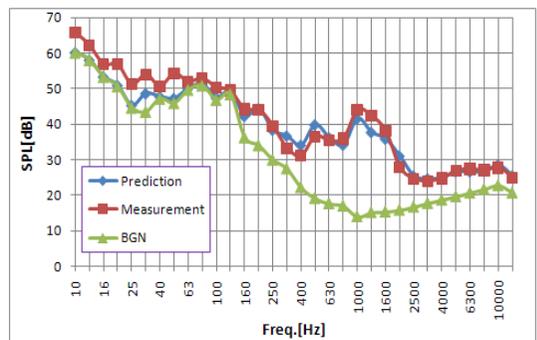


Fig. 8 The comparison result(135도 7D)

이는 내부 유체의 속도가 유속 증가로 인하여 배관 내부 벽면과 유체간의 전달응력이 증가하여 배관 진동이 강하게 나타났고, 이에 따라서 소음 수준이 증가한 것으로 판단된다.

곡관의 곡률반경별 실험결과에서 곡률 반경이 90도 직각으로 꺾이는 0D결과를 제외하고 3D, 5D, 7D의 진동수준 및 소음수준이 직관과 거의 유사한 수준인 것으로 계측되었다. 그러나 90도 0D 배관의

경우 직관 및 곡관에 비해 1kHz 이상의 고주파수 영역에서 상대적으로 큰 진동과 소음이 나타났다.

직관과 곡물이 있는 곡관의 배관 표면진동과 방사효율을 이용하여 배관의 공기중 소음을 예측하였다. 소음 예측시 측정된 배경소음의 영향을 고려하였다. 직관, 곡관 그리고 90도 OD 배관의 내부 유체 유속이 10m/s에 대해서 소음 예측과 계측을 수행한 결과 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 배관 설계 시 배관의 진동을 해석하고 배관의 방사효율을 이용한 소음 예측을 수행하여 배관 소음에 대한 적절한 감소대책 수립에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

(1) M.P. Norton, M.K. Bull, 1984, Mechanisms of the generation of external acoustic radiation from pipes due to internal flow disturbances, *Journal of Sound and Vibration* 94(1), pp105~146

(2) C. Durant and G. Robert, 1997, Experimental study of vibration and acoustic radiation of a pipe induced by fully-developed turbulent air flow, *Flow-induced vibration and noise(1)*, pp397~402

(3) M. K. Bull and Langeheineken, 1981, On the wall pressure field in turbulent pipe flow, *Mitteilungen aus dem Max-Planck-Institute*.

(4) Matthew T. Pittard, Robert P. Evans and R. Daniel Maynes and Jonathan D. Blotter, 2004, Experimental and numerical investigation of turbulent flow induced pipe vibration in fully developed flow, *American Institute of Physics*, V75., pp2393-2401

(5) M. K. Bull and M.P. Norton, 1981, On the hydrodynamic and acoustic wall pressure fluctuations in turbulent pipe flow due to a 90° mitred bend, *Journal of Sound and Vibration*, 76(4), pp561-586

(6) M.P. Norton and A. Pruiti, 1991, Universal prediction schemes for estimating flow-induced industrial pipeline noise and vibration, *Applied*

Acoustic 33, pp313-336

(7) T.R. Lin, P.O'Shea and C.K.Mechefske, 2008, Modal Sound Radiation from Finite Cylindrical Shells, *Proc. Intl. Soc. Mag. Reson. Med.* 16

(8) Fred W. Catron and J. Adin Mann III, 2005 Comparison of models for piping transmission loss measurements, *NOISE-CON*

(9) Jeong, W.B, Seo, Y.S, Jeong S.H, Lee, S.H and Hong, C.S, 2006, Vibration analysis of pipes considering fluid pulsation, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 16, No. 10