

배관 표면진동과 방사효율을 이용한 배관 소음예측기법 연구

A Study on the Radiated Noise the Prediction in the Pipe by Fluid Induced Vibration using the Radiation Efficiency and Pipe Surface Vibration

이 종 주* · 박 경 훈* · 정 우 진* · 서 영 수†

Jongju Yi, Kyunghoon Park, Woojin Jung and Youngsoo Seo

(Received August 4, 2014 ; Revised October 10, 2014 ; Accepted October 10, 2014)

Key Words : Flow-induced Vibration(유체기인 진동), Pipe Noise(배관 소음), Radiation Efficiency(방사효율)

ABSTRACT

This study is on the experiment and prediction of the pipe noise due to the internal fluid. The vibration of pipe external surface and noise in air were measured according to the internal fluid velocity and pipe type. 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 900 mitred pipe shows the high vibration and noise level. In the prediction of noise due to the internal flow, the method using the pipe surface vibration and radiation efficiency shows good agreement with experimental result.

기 호 설 명

- L_p : 배관 소음 dB(Ref : 20 uPa)
- L_a : 배관 표면 진동, dB(Ref : $5 \times 10^{-8} \text{m/s}^2$)
- σ : 배관 방사효율
- d : 배관 평균 외경, 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 계통, 냉각수계통 및 유압공급 계통 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. 이 논문에서는 배관 표면진동에 의해서 발생하는 구조소음에 대해 연구하였다.

배관의 표면진동에 의해 발생하는 구조소음에 관

† Corresponding Author ; Member, Agency for Defense Development
E-mail : sys@add.re.kr
Tel : +82-55-540-6419

** Member, Agency for Defense Development

‡ Recommended by Editor Don Chool Lee

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

한 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 이 논문에서는 내부유체가 물이며 펌프에 의해서 배관 내부에 물이 순환될 경우 배관에서 발생하는 진동과 소음을 계측하였다. 그리고 계측된 배관의 표면진동 및 방사소음을 이용하여 방사효율을 도출하였고 이를 이용한 방사소음 예측 및 기존논문에서 제시한 방사효율을 이용한 배관소음 예측결과와 비교분석하였다.

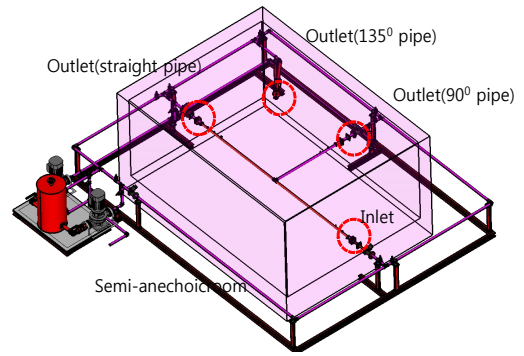


Fig. 1 The scheme of the experiment setup

2. 배관 진동소음 실험

2.1 실험 대상

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

2.2 실험장치 구성

이 실험을 수행하기 위하여 배관소음/진동 실험장치 및 방음챔버를 제작하였다. 방음챔버와 실험장치는 Fig. 1과 같이 설치되어 있다.

실험장치는 다양한 배관요소에 대한 실험을 하기 위하여 1개 입구, 3개 출구를 가지고 있으며, 실험 대상에 따라 출구를 달리 설정할 수 있도록 하였다. 실험장치는 배관 내부 물의 순환을 위한 펌프와 물탱크 그리고 유량을 조절할 수 있는 밸브로 구성되어 있다. Fig. 1과 같이 물은 펌프를 통해서 시험장치 입구로 들어가고 직관 및 곡관등을 거쳐 출구로 나와서 다시 물탱크로 들어가게 된다. 실험용 펌프 및 주변소음을 최대한 차단하기 위하여 방음챔버 내부에서 실험이 진행되었다. 방음챔버 내부에는 배관 실험 계측용 센서 및 실험대상이 설치되어 있으며, 방음챔버 외부에 별도 챔버를 설치하고 그 안에 펌프를 설치하였다. 방음챔버의 크기는 5.9×3.0×2.5 m이며, 방음챔버 벽체 구성 및 방음챔버 성능곡선은

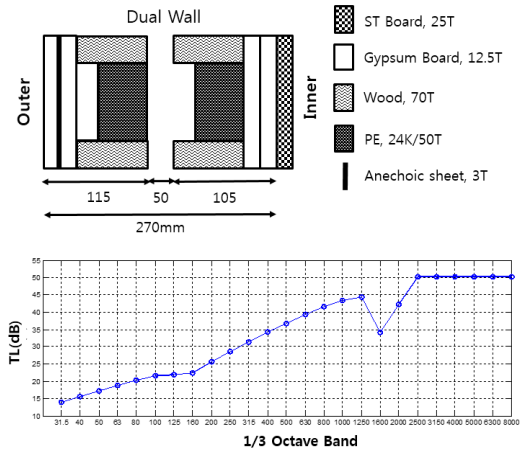


Fig. 2 The performance of the semi anechoic room

Fig. 2와 같다. 방음챔버의 크기로 모드 밀도를 산출한 결과는 Fig. 3에 나타냈다. 실험중 외부 소음을 차단하기 위하여 방음챔버는 최소 모드 밀도를 1 Hz당 1 이상이 되어야하며, 1 Hz당 3개 이상 되어야 실험시 외부소음에 의한 데이터 오염을 최소화할 수 있다. Fig. 3에서 400 Hz부터 모드밀도가 3 이상되는 것으로 판단하였고 400 Hz 이상 주파수 영역에서 신뢰성이 있는 실험이 진행 될 것으로 판단하였다. 또한 실험시 펌프가 작동되고 방음챔버 외부로 유체가 순환할 때, 암소음은 50 dB 이하 인 것으로 계측되었다.

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 1 m 이격된 수직, 수평방향에 각 1개씩 설치하였

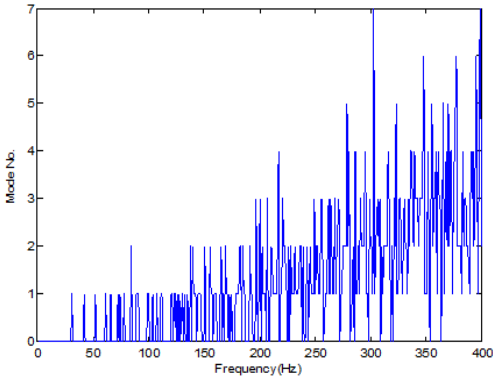


Fig. 3 The calculation of the mode density

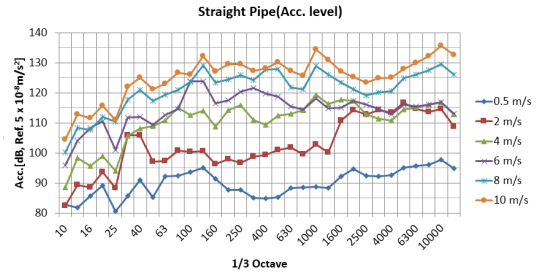
Table 1 Test specimen

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

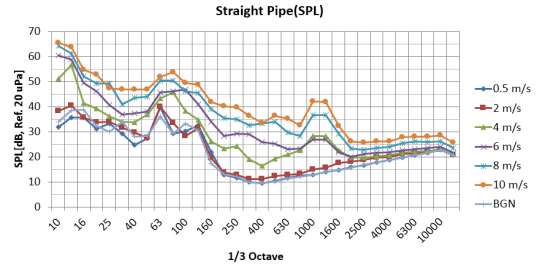
다. 그리고 유속 계측을 위한 유속계를 입출구 4개 지점에 설치하여 내부유체 속도를 실시간으로 계측하였다. 내부 유체 유속은 0.5, 2, 4, 6, 10 m/s로 설정하였고 배관 직경에 의한 레이놀즈수는 $4.5 \times 10^3 \sim 4.5 \times 10^5$ 이다.

2.3 실험결과

Fig. 4와 5는 배관요소의 진동 및 소음 계측 실험 중 직관과 90° 0D에 대해서 속도별 계측결과를 나타낸 것이다. 내부 유체 유속이 올라감에 따라 배관 표면 진동 및 공기중 소음 수준이 상승한 것으로 파악되었다. 이는 배관 내부 유속이 증가함에 따라 내부 유체와 배관 내부 벽면간의 전단응력이 증가하였고 이에 따라서 배관 진동수준이 증가하여 공기중 소음이 커진 것으로 판단된다. Fig. 4, Fig. 5(b)에서

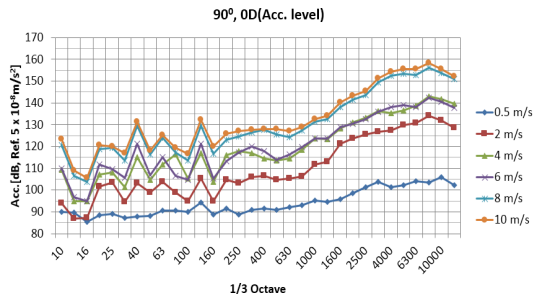


(a) Acceleration level

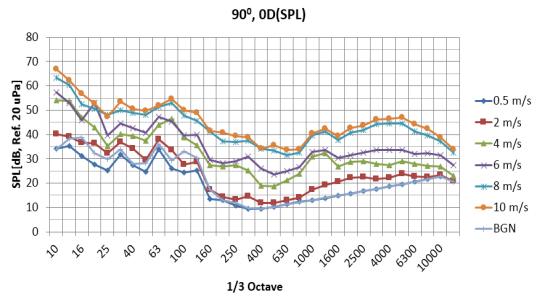


(b) SPL

Fig. 4 The result of the measurement(straight pipe)



(a) Acceleration level



(b) SPL

Fig. 5 The result of the measurement(90, 0D)

BGN은 챔버내의 배경소음이다.

내부유체의 유속이 2 m/s이하의 구간에서는 공기 중 소음과 배경소음이 구분되지 않는다. 그러나 속도가

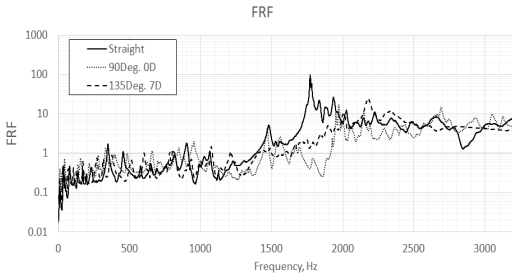
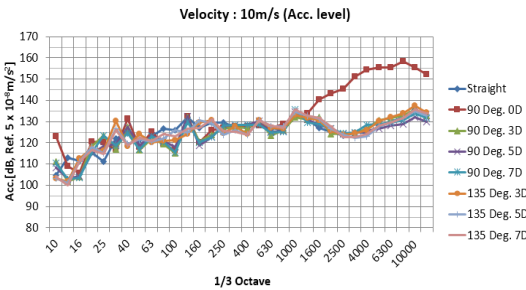
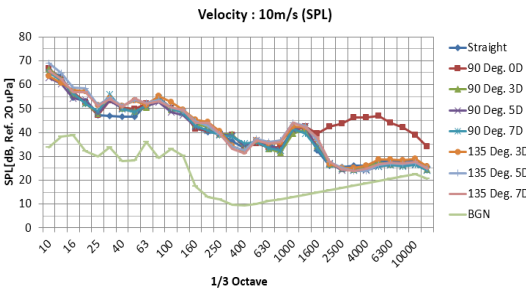


Fig. 6 The FRF test result



(a) Acceleration



(b) SPL

Fig. 7 The result of the measurement according to the pipe component(10 m/s)

증가할수록 배경소음과 배관 진동에 의한 소음이 점차 증가하는 것을 확인할 수 있다. 직관과 90° 0D 배관의 소음특성을 비교하면 직관은 주파수가 증가함에 따라 소음이 점차로 감소하나 90° 0D의 배관은 소음이 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 6의 배관별 FRF결과를 보면, 90° 0D는 주파수 증가에 따른 FRF 증가경향이 보이나, 직관은 1.8 kHz까지는 증가하나 그 이후에는 감소하는 경향을 보이고 있다. 따라서 이러한 특성들이 공기중 소음에 반영되었을 것으로 판단된다.

Fig. 7은 배관요소별 측정 결과 중 10 m/s에 해당한 내용을 정리하였다. 먼저 진동특성을 살펴보면

곡률이 3D에서 7D로 증가하여도 진동크기는 차이가 없었다. 그러나 90° 0D 배관은 1 kHz 이상의 주파수에서 큰 차이를 보였다. 이런 경향은 0.5, 2, 4, 6, 8 m/s 실험결과에서도 유사하게 나왔다. 이 결과를 보면 90° 0D의 경우 배관 꺾임 부근에서 강한 압력섭동이 발생하였고, 이에 따라 진동의 크기가 크게 증가한 것으로 판단된다. 이러한 진동 수준 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.

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. 이 연구에서는 배관 표면진동을 이용한 소음 예측기법을 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.

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

위 식을 dB로 표현하면 다음과 같다.

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

위 식에서 방사효율은 실험을 통하여 구할 수 있다. 또한 방사소음 예측결과비교를 위해 Norton과 Pruiti⁽⁶⁾가 제안한 값을 사용하여 방사소음을 계산하였다.

$$\begin{aligned} f < f_{10} & : 10 \log \sigma = 10 \log \frac{f}{f_{10}} + 3dB \\ f_{10} \leq f \leq f_r & : 10 \log \sigma = 3dB \\ f > f_r & : 10 \log \sigma = 10 \log \frac{f_r}{f} + 3dB \end{aligned} \tag{3}$$

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

4. 결과 및 고찰

참고논문⁽⁶⁾에서 제시된 방사효율은 내부 유체가 공기인 상태에서 cut-off frequency와 ring frequency를 고려하여 실험적으로 제시된 값이다. 이 연구에서 계측된 표면진동과 소음수준을 식 (1)을 이용하여 $10\log\sigma$ 를 계산하면 Fig. 8과 같다. Fig. 8에서 평균 방사효율은 유속별, 배관요소별 표면진동과 소음수준을 통하여 구한 방사효율을 파워 평균한 값이며, 다른 하나는 식 (1)을 이용하여 계산한 방사효율이다. 참고논문⁽⁶⁾에서 제시된 방사효율과 이 실험에서 도출한 방사효율은 저주파수 대역(~400 Hz)까지는 큰 차이를 보이고 있다. 이는 방음챔버의 방음수준에 의한 것으로 방사효율은 400 Hz 이상에서의 의미가 있는 것으로 생각된다. 기존 연구에서 제시된 방사효율에 비해 실험을 통하여 도출된 방사효율이 약 5 dB 낮은 것으로 도출되었다. 이는 참고문헌⁽⁶⁾에서 배관 내부 유체를 기체(공기)이며, 이 논문에서는 작동유체를 액체(물)로 했기 때문에 물과 공기의 fluid loading 영향의 크기가 다르기 때문인 것으로 판단된다.

배관 진동소음 실험결과중 내부유속이 10 m/s일 때, Fig. 8에 제시된 식 (1)을 이용한 방사효율 및 이 연구에서 도출한 평균 방사효율을 이용하여 배관 소음수준을 각기 예측한 뒤 배경소음을 고려하여 전체적인 배관소음 예측결과를 Fig. 9에 제시하였다.

Fig. 9(a)는 직관, (b)는 90° OD, (c)는 135° 7D의 방사소음 예측결과 및 비교이다. 배관 진동에 따른 소음 예측시 배경소음을 포함하여 계산을 수행하였다. 따라서 방음챔버 성능을 고려하면 400 Hz 이하 주파수에서 배경소음이 소음 계측에 큰 영향을 주는 것으로 판단된다. 따라서 400 Hz 이상 주파수에서 예측값과 계측값을 비교하는 것이 의미가 있을 것으로 판단된다. 전체적으로 두 가지 방사효율을 이용한 배관 방사소음 예측결과는 계측결과와 잘 일치하는 것으로 판단된다.

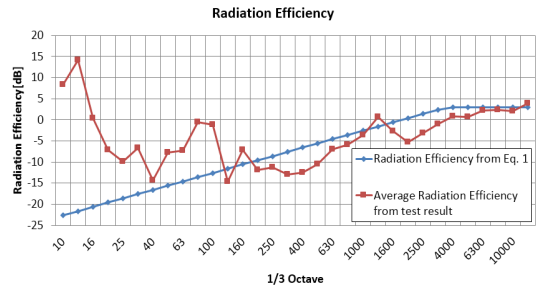
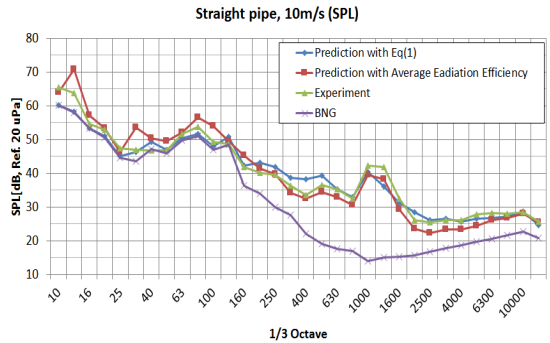
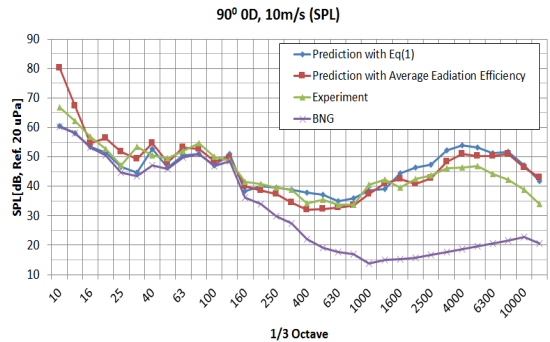


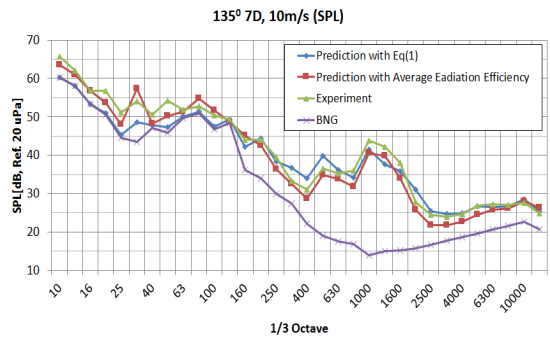
Fig. 8 The radiation efficiency of experiment



(a) Straight pipe



(b) 90° OD pipe



(c) 135° 7D pipe

Fig. 9 The comparison between the measurement and prediction result

Table 2 The average difference between the prediction result of each result and measurement

Type	Average difference, dB	
	With Eq. (1)	With average R.E.
Straight	1.906	2.427
90° 0D	3.88	3.515
135° 7D	2.456	2.022

두 개 방사효율방법에 의한 예측결과 비교를 해 보면 식(1)에 의한 방사효율을 이용한 방사소음 예측 결과가 평균 방사효율로 해석한 결과보다 다소 높은 방사소음 수준을 예측하고 있다. 이는 식(1)로 계산한 방사효율이 평균 방사효율보다 약 5 dB 정도 높기 때문인 것으로 판단된다. 실험시 계측된 소음수준과 두 방사효율 도출방식으로 예측한 소음의 dB 차이에 대한 평균 dB를 Table 2에 제시하였다. 내부 유체가 기체일 때 도출된 식(1)보다는 내부 유체가 액체일 때 실험으로 도출한 평균 방사효율을 사용하는 것이 이 실험에서 배관소음 예측을 보다 정확히 할 수 있다고 판단된다.

5. 결 론

일반적인 배관 시스템을 구성하는 요소인 직관, 90° 곡관, 135° 곡관에 대한 내부 유체 운동에 의한 배관의 진동 및 소음 계측 실험을 실시하고 배관표면진동 계측결과를 이용하여 공기중 배관소음 수준을 예측하였다.

내부 유체 유속이 빠를수록 배관에 발생하는 진동 및 소음의 크기가 높아지는 것을 확인하였고, 이는 내부 유체의 속도가 유속 증가로 인하여 배관 내부 벽면과 유체간의 전단응력이 증가하여 배관진동이 강하게 나타났으며, 이에 따라서 소음 수준이 증가한 것으로 판단된다.

곡관의 배관 표면진동, 방사효율 및 배경소음을 고려한 배관의 공기중 소음을 예측결과에서 평균 방사효율을 이용한 소음 예측결과가 식(1)을 이용하여 도출된 방사효율을 사용한 예측결과보다 계측결과에

유사한 결과를 얻을 수 있었다.

따라서 배관 설계 시 배관 내부 유체가 액체인 경우, 배관의 진동을 해석하고 이 연구에서 도출된 평균 방사효율을 사용한 소음 예측을 수행하면 배관 소음에 대한 적절한 감소대책 수립에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- (1) Norton, M. P. and Bull, M. K., 1984, Mechanisms of the Generation of External Acoustic Radiation from Pipes due to Internal Flow Disturbances, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 94, No. 1, pp. 105~146.
- (2) Durant, C. and Robert, G., 1997, Experimental Study of Vibration and Acoustic Radiation of a Pipe Induced by Fully-developed Turbulent Air Flow, *Flow-induced Vibration and Noise(1)*, pp. 397~402.
- (3) Bull, M. K. and Langeheineken, 1981, On the Wall Pressure Field in Turbulent Pipe Flow, *Mitteilungen aus dem Max-Planck-Institute*.
- (4) Pittard, M. T., Evans, R. P., Maynes, R. D. and Blotter, J. D., 2004, Eperimental and Numerical Investigation of Turbulent Flow Induced Pipe Vibration in Fully Developed Flow, *American Institute of Physics*, Vol. 75, pp. 2393~2401.
- (5) Bull, M. K. and Norton, M. P., 1981, On the Hydrodynamic and Acoustic Wall Pressure Fluctuations in Turbulent Pipe Flow due to a 900 Mitred Bend, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 76, No. 4, pp. 561~586.
- (6) Norton, M. P. and Pruiti, A., 1991, Universal Prediction Schemes for Estimating Flow-induced Industrial Pipeline Noise and Vibration, *Applied Acoustic*, Vol. 33, pp. 313~336.
- (7) Lin, T. R., O'Shea, P. and Mechefske, C. K., 2008, Modal Sound Radiation from Finite Cylindrical Shells, *Proc. Intl. Soc. Mag. Reson. Med.* 16.
- (8) Catron, F. W. and Mann III, J. A., 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, pp. 1050~1056.



Jong-Ju Lee is received his B.S. and M.S. degrees from Yonsei University in 2006 and 2008 respectively. He is currently a senior researcher at the Agency for Defense Development, Korea. His research interests are underwater

acoustic stealth technologies.



Woo-Jin Jung is received his B.S. and M.S. degrees from Korea Aerospace University in 1985 and 1987 respectively, a Ph.D. degree from Pusan National University. He is currently a principal researcher at the Agency for Defense

Development, Korea. His research interests are underwater acoustic stealth technologies.



Youngsoo Seo is currently a senior researcher at Agency for Defense Development(ADD). He received the B.S degree, M.S. degree and the Ph.D. degree in Mechanical Engineering from Busan National University, Korea in 1999, 2001 and 2005, respectively. His research interests are in the reduction of noise in the ship.