스케일방지용 초음파발신기기술 연구

허필우*, 이양래, 임의수
한국기계연구원

The Research of Ultrasonic Transmitter Technique for Preventing the Scales in Boiler

Pil Woo Heo*, Yang Lae Lee, Eui Su Lim
Korea Institute of Machinery & Materials

Abstract

보일러등의 관벽에 부착되는 스케일 방지용으로 설계된 초음파 발신기는 전기적 신호를 기계적신호로 변환시켜주는 진동자와 발생된 초음파를 부하매질에 전달하는 도파봉으로 구성된다.

본 논문에서는 진동자로 사용되는 자왜소자의 형상설계와 진동자에서 발생된 초음파를 증폭시켜 부하매질로 전달되기위한 몇가지 형태의 도파봉에 대해 이론해석 및 FEM 해석을 수행하였다. 또한 제작된 초음파 발신기의 성능을 음압측정을 통해 확인하였다.

Ⅰ. 서론

보일러와 같은 열교환기를 장시간 가동하는 경우에 용수가 지나가는 관벽에 스케일이 생성되고 그 결과 열유동 통로에 열저항이 증가되어 열전달률이 감소된다. 한해 평균 2㎜정도의 스케일이 형성되면서 약 4%정도의 열효율이 떨어진다.

보일러의 스케일방지에 관한 연구는 19세기초 감자전분이 스케일의 침전속도를 감소시킨다는 것이 알려지면서 시작되었으며 그 후 여러가지 물리, 화학적인 방법들이 제안되어 왔으나 현재는 강산(acid)에 의한 화학세관법이 널리 사용되고 있다. 그러나 이 방법은 고비용과 처리동안의 조업중단 그리고 처리후의 폐산처리가 문제시되고 있다. 최근에는 초음파를 이용하여 스케일을 방지하는 기술이 개발되어 보급되고 있다. 이 방법은 화학세관법의 단점을 보완하고 있으며 사용자로부터 그 효과가 입증되고 있다.

스케일 방지의 원리는 수중에서 초음파에 의한 cavitation과 acoustic streaming 발생에 기인한다. 따라서 초음파 강도가 셀수록 cavitation과 acoustic streaming이 증가되며 스케일 방지효과도 자연히 증가된다.

본 논문에서는 이와같은 cavitation 발생이 용이한 20kHz 주파수에서 초음파를 발생하기 위한 초음파발신기의 진동자와 도파봉에 대해 이론적으로 해석하고 제작한 후 성능을 확인하였다.

Ⅱ. 본론

1) 자왜소자

자왜소자의 형상설계를 위해 그림 1에서 $\alpha\frac{\lambda}{4} = 1.5cm$, $\beta\frac{\lambda}{4} = 4.0cm$로 두고, 자왜소자 공진주파수에서 창파 두께에 관한 방정식 $\tan\alpha\frac{\pi}{2}\ \tan\beta\frac{\pi}{2} = k$ 와 이 식을 이용한 그림 2로부터 k값을 구한 후 가로의 폭 ks를 계

산한다. 여기에 동작시의 음향출력의 여유분을 고려하여 실제 ks를 구한다.

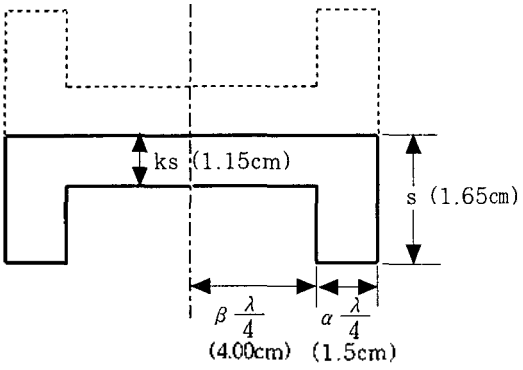


그림 1. 자왜소자형상

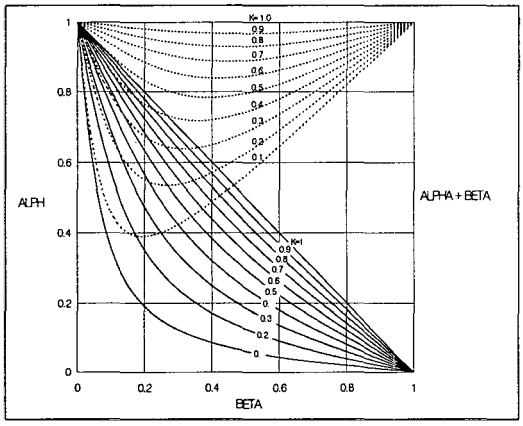


그림 2. 공진조건에서의 자왜진동자 형상표

2) 도파봉

1. 이론적 해석

파동방정식으로부터

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}+\frac{1}{s}\frac{\partial s}{\partial x}\frac{\partial V}{\partial x}+\frac{\omega^2}{C^2}V=0$$

이다. 여기서 s는 도파봉의 형태에 따라 다르며, conical과 exponential 그리고 catenoidal에 대해 해석을 수행하였다. 즉 양단면의 직경비와 공진주파수가 정해지면 길이가 다음의 해석을 통해 구해진다.

① conical type

그림 3에서 D_1과 D_2는 직경을 나타내고 S_1, S_2는 단면적을 나타낸다. 임의의 x점에서 직경은

$$D=D_1\frac{l_1-x}{l_1}+D_2\left(1-\frac{l_1-x}{l_1}\right)$$

이고, 각 구간에서 단면적은

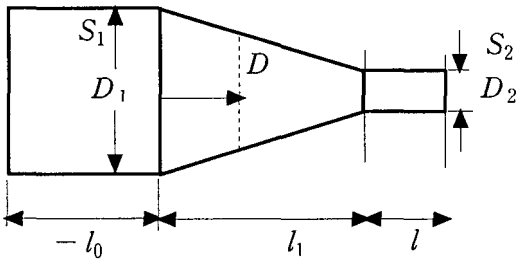


그림 3. Conical type 도파봉

$$0\le x\le l_1, s=\frac{\pi}{4}D^2$$

$$l_1\le l_1+l_2, s=\frac{\pi}{4}D_2{}^2$$

이다. 그러므로 각 구간에 요구되는 파동 방정식은

ⓐ $-l_0\le x\le 0$

$$\ddot{V}_1(-x)+0.0715573\,V_1(-x)=0$$

ⓑ $0\le x\le l_1$

$$\ddot{V}_2(x)+\frac{5.657x-29.4}{0.105757x^2-2.6x+16}\dot{V}_2(x)+0.0715573\,V_2(x)=0$$

ⓒ $l_1\le x\le l_1+\alpha$

$$V_3''(x-l_1)+0.0715573\,V_3(x-l_1)=0$$

이다. 이 방정식과 관련된 경계조건은 아래와 같다.

$V_1(-l_0) = V_0$

$v_1'(-l_0) = 0$

$V_1(0) = V_2 = 0$

$V_1'(0) = V_2'(0)$

$V_2(l_1) = V_3(l_1)$

$V_2'(l_1) = V_3'(l_1)$

$V_3(l_1 + \alpha) = 0$

② exponential type

$0 \le x \le l_1$ 구간만 exponential type을 고려한 후 앞에서와 같은 방법으로 파동방정식을 전개하면 아래와 같다.

ⓐ $-l_0 \le x \le 0$

$V_1'' + 0.0715573\, V_1(x) = 0$

ⓑ $0 \le x \le l_1$

$V_2''(l_1) + 0.23104906\, V_2'(x) + 0.0715573\, V_2(x) = 0$

ⓒ $l_1 \le x \le l_1 + \alpha$

$V_3''(x - l_1) + 0.0715573\, V_3(x - l_1) = 0$

여기서 요구되는 경계조건은 conical과 동일하다.

③ catenoidal type

$0 \le x \le l_1$ 구간에서 catenoidal 형상을 고려하여 전개하면 아래와 같다.

ⓐ $-l_0 \le x \le 0$

$V_1''(x) + 0.0715573\, V_1(x) = 0$

ⓑ $0 \le x \le l_1$

$V_2''(x) + 0.4629026 * \tanh 0.2314513(l_1 - x)\, V_2'(x) + 0.0715573\, V_2(x) = 0$

ⓒ $l_1 \le x \le l_1 + \alpha$

$V_3''(x - l_1) + 0.0715573\, V_3(x - l_1) = 0$

경계조건은 앞에서와 같다.

이상의 3가지 type에 대해 경계조건을 만족하는 파동방정식의 해 α를 구하면 도파봉의 전체 길이를 알 수 있다. 수치해석으로 구한 α 값은 표 1과 같다.

표 1. type별 α 길이

Type	α (mm)
Conical	24. 346518
Exponetial	18.61139
Catenoidal	18.04773

2. FEM 해석

이론적 해석 결과의 보완을 위해 가공이 용이하고 특성이 양호한 conical type에 대해 FEM 해석을 수행하였다. 도파봉은 그림 4와 같은 구조이다.

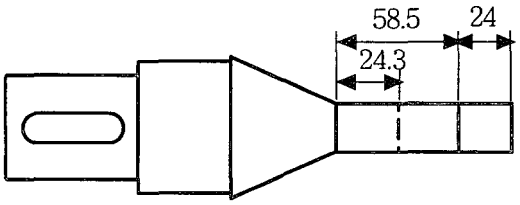


그림 4. FEM해석위한 conical type 도파봉 구조

Case Ⅰ : conical 끝단 + 24.3 ㎜

(공진 주파수 20kHz인 경우의 이론치)

Case Ⅱ : conical 끝단 + 58.5 ㎜

(상용제품과 동일한 길이)

Case III : conical 끝단 + 82.5 ㎜

(Case II + 24 ㎜)

도파봉의 운동방정식은 $m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f$ 로 표현될 수 있다. 이때 도파봉에 가해지는 힘이 주기함수인 경우, 다음과 같이 복소수 형태로 식을 쓸 수 있다.

$$f = f_0 e^{i\omega t}$$

이때 steady state에서의 도파봉의 운동 역시 힘의 주기와 같이 운동하게 된다.

$$x = x_0 e^{i(\omega t + \phi)}$$

따라서 위의 식은,

$(-\omega^2 m + i\omega c + k) x_0 e^{i\phi} = f_0$ 과 같이 되고,

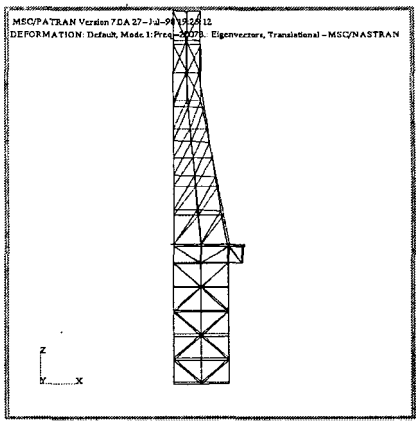
$\frac{x_0 e^{i\phi}}{f_0} = \frac{1.}{-\omega^2 m + i\omega c + k}$, (여기서, x_0, f_0 는 실수)

힘에 대한 응답의 비를 주파수응답함수라고 부르며, 위 식과 같이 복소수형태를 가지게 된다. 따라서, 주파수응답함수의 크기 및 위상각은 다음과 같다.

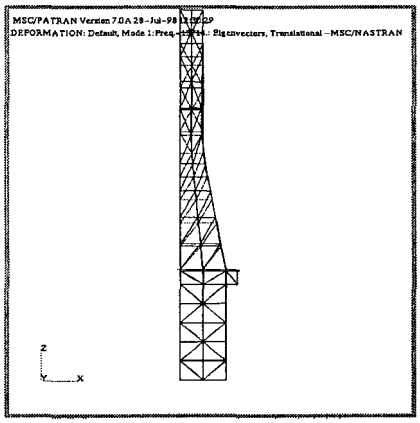
$$x_0/f_0 = \| 1/-\omega^2 m + i\omega c + k \|$$

$$\phi = \angle(1/-\omega^2 m + i\omega c + k)$$

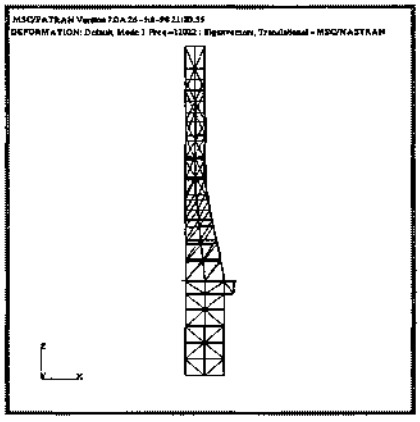
이상에 대해 FEM 해석 결과는 그림 5, 그림 6과 같다. 각 경우에 대한 해석 결과는 첫 번째 모드가 20,073 Hz, 13,714 Hz 그리고 11,022 Hz로서 길이가 길어짐에 따라 예상대로 공진주파수가 낮아졌으며, Case I은 공진주파수가 약 20 kHz로서 이론적 해석 결과와 일치함을 알 수 있었다. 한편, 초음파 발신기를 보일러에 부착할 경우 부하 임피던스 변화에 의해 공진주파수가 달라지므로 이에 대한 고려가 필요하다.



(a) Case I

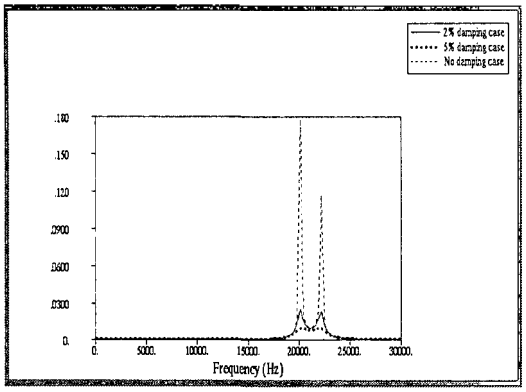


(b) Case II

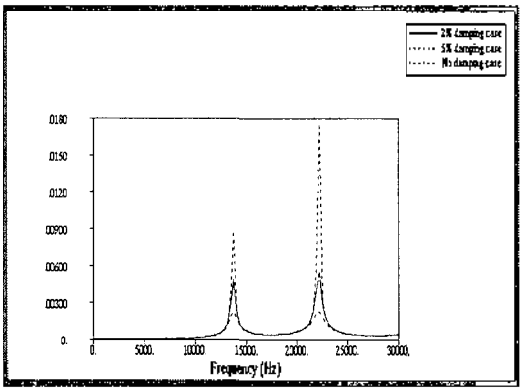


(c) Case III

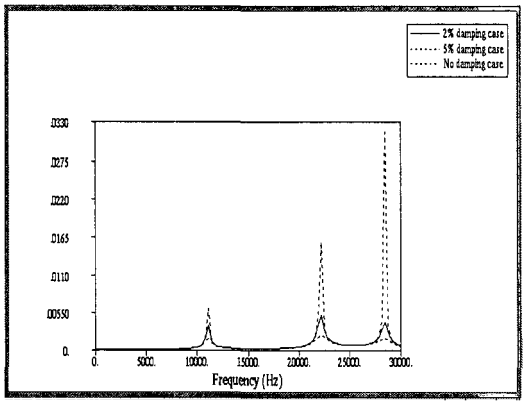
그림 5. 첫 번째 모드 형상



(a) Case Ⅰ



(b) Case Ⅱ



(c) Case Ⅲ

그림 6. 주파수 응답

3) 음압측정

그림 7은 초음파의 수중음압을 측정하기 위한 장치이다. 이 장치는 가로 120cm, 세로 100cm, 높이 100cm의 수조로서 그림과 같이 수조에 물을 수조 하단에서 87cm까지 채운다음 본 연구의 시제품인 초음파발신기를 한쪽 면에 단단히 부착하고, 전자구동부를 동작시킨 다음 발신기로부터 110cm떨어진 거리에 수중음압 측정 센서(hydrophone)를 설치하여 초음파에 의한 수중음압을 측정하였다.

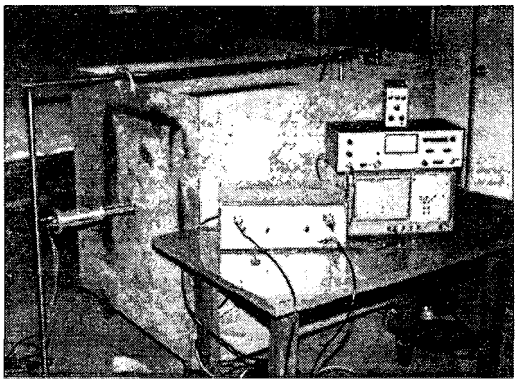


그림 7. 수중음압 측정실험장치

초음파발신기 개발시 가장 중요한 값은 실제로 제작된 초음파발신기에 의해 발생된 수중음압이다. 그래서 Case Ⅰ, Case Ⅱ, Case Ⅲ에 대해 수중음압값을 비교하면 Case Ⅰ이 Case Ⅱ와 Case Ⅲ에비해 상대적으로 낮은 음압값을 나타냈다. 따라서 실험적인 최대음압을 구하기 위해 Case Ⅱ 길이를 기준으로 도파봉 끝단을 10㎜씩 증가시키면서 수조에서 발생되는 상대적인 음압을 측정하였으며 그 결과는 표 2와 같다.

표 2 conical 도파봉 측정음압

expansion (㎜)	수중출력 (pa)
0	3,570
10	3,500
20	3,450
30	3,000

표 2로부터 Case Ⅱ 길이에서 가장 큰 음압이 발생되는 것을 알 수 있다. 따라서 conical 형태의 도파봉은 Case Ⅱ로 결정하였다.

Ⅲ. 결론

본 연구의 주요연구결과는 다음과 같다.

- 보일러의 관벽에 생성되는 스케일 방지용 초음파 발신기를 해석하고 제작하였다.
- 직경비가 주어질 때 20kHz 공진주파수에서 동작하는 conical, exponential, catenoidal 형태의 도파봉을 설계하였다.
- FEM 해석을 통해 길이변화에 따른 공진주파수 특성을 파악하였다.
- hydrophone을 사용하여 conical 형태의 도파봉에 대해 길이변화에 따른 상대적인 음압측정을 통해 그 성능을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. Peter D. Edmonds, Methods of Experimental Physics-Ultrasonics. Academic Press, INC, 1981
2. L. D. Rozenberg, Physical Principles of Ultrasonic Technology, Plenum Press, New York-London, 1973
3. A.P. Cracknell, 'Ultrasonics', 1980
4. A.D. Pandey, K.K. Mallick, P.C. Pandey, S. Varma, 'Prevention of Scale Preposition on Heat Exchanger Surfaces by Use of High Intensity Ultrasonic Waves during Concentration of Wet Process Phosphoric Acid', Fert. News, v.28, n.6, pp. 45-48, 1983
5. A.G. Duncan, C.D. West, 'Prevention of Incrustation on Crystallizer Heat Exchangers by Ultrasonic Vibration', Trans. Instn Chen. Engrs, v.50, pp. 109-114, 1972
6. H. Hatano, 'High-Frequency Ultrasonic Cleaning Tank Utilizing Oblique Incidence', IEEE Transaction on Ultrasonis., v.43, n.2, pp. 531-535, July 1996
7. Dale Ensmings, 'Ultrasonics : The Low- and High- Intensity Applications', 1973
8. J.R. Frederick, 'Ultrasonic Engineering', 1965