

논문 2003-12-2-06

보일러내 열 전달 효율 개선을 위한 초음파발신기 개발

허필우*, 이양래*, 임의수*, 고광식**

The development of ultrasonic transmitter to enhance the efficiency of heat transfer rate in boiler

Pil-Woo Heo*, Yang-Lae Lee*, Eui-Su Lim*, Kwang-Sik Koh**

요 약

보일러나 열교환기의 관 벽에 부착되는 스케일 방지용으로 설계된 초음파 발신기는 전기적 에너지를 초음파로 변환시켜주는 자왜소자와 발생된 초음파를 부하매질에 전달하는 도파봉으로 구성된다.

본 논문에서는 진동자로 사용되는 자왜소자의 형상설계와 진동자에서 발생된 초음파를 증폭시켜 부하매질로 전달하기 위한 몇 가지 형태의 도파봉에 대해 이론해석을 수행하여 필요한 사양을 도출하였다. 최종적인 도파봉의 길이는 음압 측정을 통해 선정하였다. 마지막으로 제작된 초음파발신기를 사용하여 보일러와 유사한 조건에서 스케일 방지효과를 확인하였다.

Abstract

Ultrasonic transmitter used for scale prevention in boiler or heat exchanger is composed of the magnetostrictive material which transforms electric energy into ultrasonic wave and the horn which amplifies generated ultrasonic wave and transfers it into medium loaded.

In this paper, we have performed the shape design for magnetostrictive material and analyzed a few type of horns which amplify generated ultrasonic wave and found each solution theoretically. Final length of the horn has been determined by measuring the sound pressure in medium between theoretical value and experience data. At last we have given the results of our study for the effects of ultrasonic wave irradiated by manufactured ultrasonic transmitter on preventing scale deposition on test pipe under the similar condition to boiler.

Key Words : boiler, heat transfer, ultrasonic, cavitation

1. 서 론

보일러와 같은 열교환기를 장시간 가동하는 경우에 용수가 지나가는 관 벽에 스케일이 생성되고 그 결과 열 유동 통로에 열 저항이 증가되어 열 전달률이 감소된다. 한해 평균 2 mm 정도의 스케일이 형성되면서 약 4 % 정도의 열 효율이

떨어진다.

이러한 열 전달 효율의 개선을 위해 스케일의 생성을 방지하거나 생성된 스케일의 제거가 요구된다. 이를 위해 여러 가지 물리, 화학적인 방법들이 제안되어 왔으나 현재는 강산(acid)에 의한 화학세관법이 널리 사용되고 있다. 그러나 이 방법은 고비용과 처리동안의 조업중단 그리고 처리후의 폐산처리가 여러 가지 환경오염 등의 문제를 야기한다. 최근에는 초음파를 이용하여 스케일을 방지하는 기술이 개발되어 보급되고 있다^{1,2)}. 이 방법은 화학세관법의 단점을 보완하고 있으며 사용자로부터 그 효과가 입증되고 있다.

스케일 방지와 제거³⁾의 원리는 수중에서 초음파에 의한 캐비테이션(cavitation)과 음향 스

* 한국기계연구원 (Korea Research of Machinery and Materials)

** 경북대학교 전자전기공학부 (School of Electronic Eng., Kyungpook National Univ.)
<접수일자 : 2003년 1월 28일>

트리밍(streaming) 발생에 기인한다. 따라서 초음파 강도가 셀수록 캐비테이션과 음향 스트리밍이 증가되며 스케일 방지효과도 자연스럽게 증가된다. 이러한 강력 초음파의 응용사례는 세척⁽⁴⁾, 건조, 유화 그리고 화학반응 촉진 등의 많은 분야에서 쉽게 찾을 수 있으며, 초음파가 조사되는 반응조의 형태와 특징 그리고 반응조 내의 음압 분포에 대해서도 보고 되고 있다^(5,6).

초음파발신기는 전기에너지를 공급받아 초음파를 발생시키는 진동자와 발생된 초음파에너지를 증폭시키는 도파봉으로 구성된다. 진동자는 압전소자와 자왜소자가 있으며, 응용분야에 따라 재질 선택이 달라진다. 사용 주파수는 캐비테이션을 발생시키는 문턱값과의 의존성을 고려하였다. 즉 초음파범위에서 고주파수일수록 캐비테이션 문턱값이 높으므로 주파수가 낮을수록 캐비테이션을 일으키기가 유리하다.

따라서 본 논문에서는 고온특성이 우수한 자왜소자를 진동자로 사용하였으며, 도파봉은 3가지 형태에 대해 이론적 해석을 수행하여 필요한 사양을 제시하였다. 이 중에서 도파봉은 제작이 용이한 conical type으로 선정하였으며, 동작주파수는 캐비테이션 발생에 유리한 20 kHz를 사용하였다. 초음파발신기의 성능은 수조내의 음압 측정을 통해 보다 정확하게 알 수 있으므로, 최종적인 도파봉의 길이는 이론적으로 도출된 길이와 경험적인 값을 기준으로 조금씩 값을 변화시키면서 도출하였다. 마지막으로 제작된 초음파발신기를 사용하여 보일러와 유사한 실험실 조건에서 스케일 방지효과를 확인하였다.

II. 본 론

그림 1은 전열면에서 증기로부터 가열(또는 냉각)되어지는 용수로의 열 전달 과정을 보여 주는 것이다. 열역학의 제 2법칙에 따르면 열 전달을 일으키기 위해서는 가열원의 온도는 증발되어지는 용수의 온도보다 높아야 한다.

이때, 가열원의 온도와 용수의 온도차를 $\Delta\theta$ 라 하면 전열면적 A를 가진 열교환기에서의 열 유속 Q는

$$Q = U A \Delta\theta \text{ (kJ/s 또는 kW)}$$

이다. 여기에서 $U(\text{kJ s}^{-1} \text{m}^{-2} \text{C}^{-1})$ 는 열교환기에서의 총괄 열 전달계수이며 다음과 같이 정의된

다.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + R_{i1} + \frac{\Delta x}{k} + R_{o1} + \frac{1}{h_o} \text{ (1)}$$

여기에서, $\frac{1}{U}$ 는 열 전달에 있어서의 총 열 저항, h_i, h_o 는 관 내, 외측 열 전달 계수, R_{i1}, R_{o1} 는 관 내, 외측 오염에 의한 저항, $\frac{\Delta x}{k}$ 는 열 전달면 벽면 두께에 의한 열 저항이다.

식(1)로부터 알 수 있듯이 총괄 열 전달계수 U 값이 크면 클수록 좋다. 따라서 U 값을 크게 하기 위해서는 열 전달 면의 저항(R_{i1}, R_{o1})과 관의 두께에 의한 열저항을 나타내는 $\Delta x/k$ 는 작을수록 유리하며, 액체와 벽 사이에 강한 열 전달을 위해 h_i, h_o 는 클수록 유리하다. 스케일이 열 전달 벽면에 생성되면 전술한 총괄 열 전달계수 U가 감소하므로 이를 개선하기 위해 본 논문에서는 초음파를 이용하여 스케일을 방지하는 연구를 수행하였다.

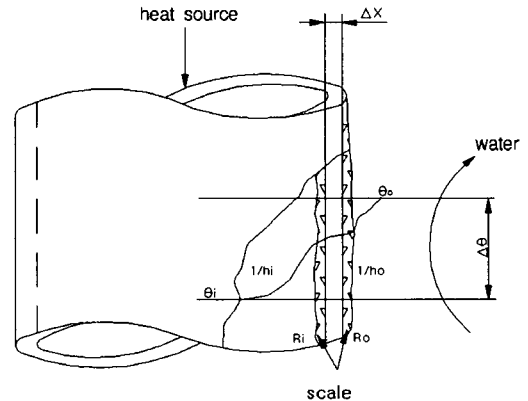


그림 1. 전열면에서의 열 전달.

Fig. 1. Heat transfer on the heat transfer surface.

1) 자왜소자

자왜소자의 형상설계를 위해 그림 2에서 $\alpha \frac{\lambda}{4} = 1.5 \text{ cm}$, $\beta \frac{\lambda}{4} = 4.0 \text{ cm}$ 로 두고, 자왜소자 공진주파수에서 창과 두께에 관한 방정식 $\tan \alpha \frac{\pi}{2} \tan \beta \frac{\pi}{2} = k$ 와 이 식을 이용한 그림 3으로부터 k값을 구한 후 가로와 폭 ks를 계산한다. 여기에 동작시의 음향출력의 여유분을 고려하여 실제 ks를 구한다. 이와 같이 설계·제작된 자왜소자를 초음파발신기의 진동자로 사용하였다.

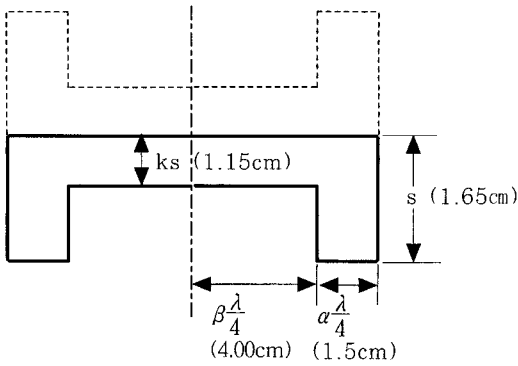


그림 2. 자왜소자형상설계.
Fig. 2. The shape design for magnetostrictive material.

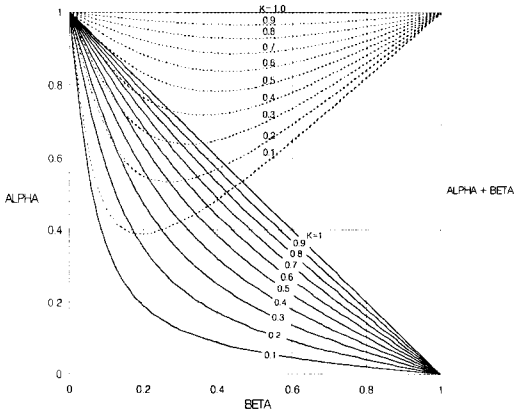


그림 3. 공진조건에서의 자왜진동자 형상표.
Fig. 3. Shape plot for the magnetostrictive vibrator in the resonance condition.

2) 도파봉

1. 이론적 해석

파동방정식^[7]으로부터

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{1}{s} \frac{\partial s}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\omega^2}{c^2} v = 0 \quad (2)$$

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 4에서 D_1 과 D_2 는 직경을 나타내고

S_1 , S_2 는 단면적을 나타낸다. 임의의 x점에서 직경은

$$D = D_1 \frac{l_1 - x}{l_1} + D_2 \left(1 - \frac{l_1 - x}{l_1}\right) \quad (3)$$

이고, 각 구간에서 단면적은

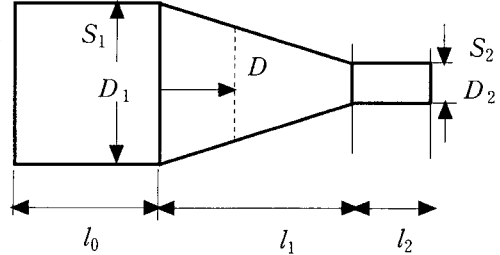


그림 4. Conical type 도파봉.
Fig. 4. Conical type horn.

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

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

이다. 그러므로 각 구간에 요구되는 파동 방정식은

① $-l_0 \leq x \leq 0$

$$v_1''(-x) + 0.0715573 v_1(-x) = 0 \quad (4)$$

② $0 \leq x \leq l_1$

$$v_2''(x) + \frac{5.657x - 29.4}{0.105757x^2 - 2.6x + 16} v_2'(x) + 0.0715573 v_2(x) = 0 \quad (5)$$

③ $l_1 \leq x \leq l_1 + a$

$$v_3''(x - l_1) + 0.0715573 v_3(x - l_1) = 0 \quad (6)$$

이다. 이 방정식과 관련된 경계조건은 아래와 같다.

$$v_1(-l_0) = v_0$$

$$v_1'(-l_0) = 0$$

$$v_1(0) = v_2(0) = 0$$

$$v_1'(0) = v_2'(0)$$

$$v_2(l_1) = v_3(l_1)$$

$$v_2'(l_1) = v_3'(l_1)$$

$$v_3(l_1 + a) = 0$$

② Exponential type

$0 \leq x \leq l_1$ 구간만 exponential type을 고려한 후

앞에서와 같은 방법으로 파동방정식을 전개하면 아래와 같다.

Ⓐ $-l_0 \leq x \leq 0$
 $v_1'' + 0.0715573v_1(x) = 0$ ----- (7)

Ⓑ $0 \leq x \leq l_1$
 $v_2''(l_1) + 0.23104906v_2'(x) + 0.0715573v_2(x) = 0$
 ----- (8)

Ⓒ $l_1 \leq x \leq l_1 + \alpha$
 $v_3''(x - l_1) + 0.0715573v_3(x - l_1) = 0$ ----- (9)

여기서 요구되는 경계조건은 conical과 동일하다.

③ Catenoidal type

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

Ⓐ $-l_0 \leq x \leq 0$
 $v_1''(x) + 0.0715573v_1(x) = 0$ ----- (10)

Ⓑ $0 \leq x \leq l_1$
 $v_2''(x) + 0.4629026 * \tanh 0.2314513(l_1 - x)v_2'(x) + 0.0715573v_2(x) = 0$
 ----- (11)

Ⓒ $l_1 \leq x \leq l_1 + \alpha$
 $v_3''(x - l_1) + 0.0715573v_3(x - l_1) = 0$ ----- (12)

경계조건은 앞에서와 같다.

이상의 3가지 type에 대해 경계조건을 만족하는 파동방정식의 해 α 를 구하면 도파봉의 전체길이를 알 수 있다. Runge-Kutta 방법으로 구한 α 값은 표 1과 같다.

표 1. 도파봉 type별 α 길이.

Table 1. α length for each horn type.

Type	α (mm)
Conical	24.346518
Exponential	18.61139
Catenoidal	18.04773

3) 음압측정

이론적 해석 결과의 보완을 위해 가공이 용이하고 특성이 양호한 conical type 도파봉을 제작하여 다음의 각 경우에 대해 수중 음압을 측정하였다.

Case I : conical 끝단 + 24.3 mm
 (공진주파수 20 kHz인 경우의 이론적인 값)

Case II : conical 끝단 + 58.5 mm
 (경험적인 값)

Case III : conical 끝단 + 82.5 mm
 (Case II + 24 mm)

그림 5는 초음파의 수중 음압을 측정하기 위한 장치이다. 이 장치는 가로 120 cm, 세로 100 cm, 높이 100 cm의 수조로서 그림과 같이 수조에 물을 수조 하단에서 87 cm까지 채운 다음 본 연구의 시제품인 초음파발신기를 한쪽 면에 단단히 부착하고, 전자구동부를 동작시킨 다음 발신기로부터 110 cm떨어진 거리에 수중 음압 측정 센서(hydrophone)를 설치하여 초음파에 의한 수중 음압을 측정하였다.

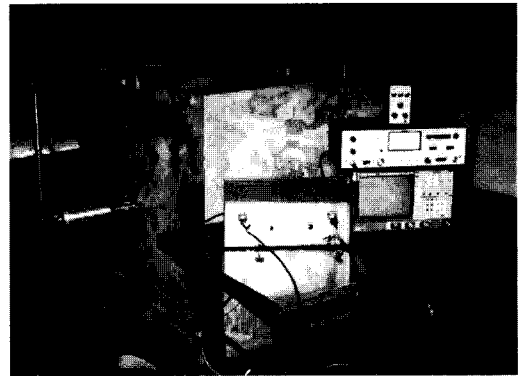


그림 5. 수중 음압 측정실험장치.

Fig. 5. Experimental device for measuring the underwater sound pressure.

표 2. Conical 도파봉 측정음압.

Table 2. Pressure measured for the conical type horn.

Expansion (mm)	Underwater pressure (pa)
0	3,570
10	3,500
20	3,450
30	3,000

초음파발신기 개발시 가장 중요한 값은 실제로 제작된 초음파발신기에 의해 발생된 수중 음압이다. 그래서 Case I, Case II, Case III에 대해 수중 음압값을 비교하면 Case I이 Case II와 Case III에 비해 상대적으로 낮은 음압값을 나타냈다. 따라서 실험적인 최대음압을 구하기 위해 Case II 길이를 기준으로 도파봉 끝단을 10 mm씩 증가시키면서 수조에서 발생되는 상대

적인 음압을 측정하였으며 그 결과는 표 2와 같다.

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

4) 스케일 방지실험

초음파 스케일방지효과를 실험실 조건에서 확인하기 위해 그림 6과 같은 장치를 이용하였으며, 시료로는 스케일이 부착되지 않은 PVC관을 이용하여 스케일 방지실험을 수행하였다.

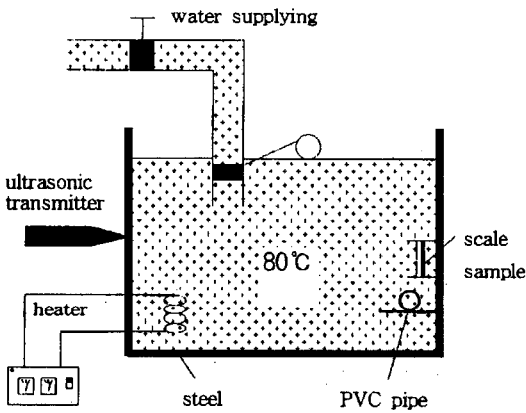


그림 6. 스케일방지 실험장치 구성.
Fig. 6. The drawing of experimental device for scale prevention.

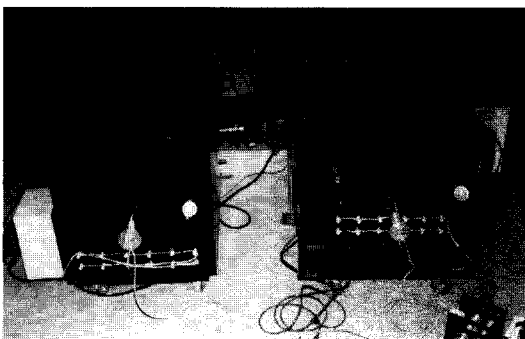


그림 7. 스케일방지 실험장치.
Fig. 7. Experimental device for scale prevention.

초음파 장치는 전술한 바와 같은 개발품을 이용하였고 초음파발진기는 그림 7에서 보듯이 시편의 반대편에 설치하였으며, 이때 초음파에 의한 시편부근의 음압은 약 3,000 pa(1기압=10⁵ pa)의 값을 보였다. 용수는 일반 수도수로 하고

온도는 약 80 °C로 유지하여 30일 동안 실험을 진행하였으며, 건조시킨 시편의 무게를 실험전 후에 각각 측정하여 스케일생성량을 정량화 하였다.

가. 방지효과

그림 8은 스케일 방지실험 후 초음파를 조사 안한 경우와 조사한 경우(20 kHz)의 시편사진을 나타낸다.

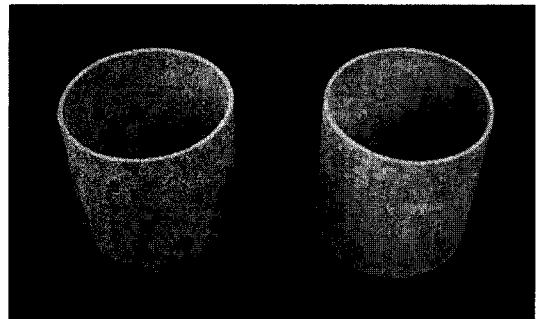


그림 8. 스케일 방지효과.
(좌)초음파 조사를 안한 경우 (우)초음파 조사를 한 경우
Fig. 8. The tested pipe after laboratory experiment. (left) unexposed pipe (right) exposed pipe

그림에서 보는 바와 같이 초음파를 조사안한 경우는 스케일이 많이 생성된 반면, 초음파를 조사해준 경우는 스케일이 거의 생성되지 않은 점으로 보아 초음파에 의한 스케일 방지효과를 확인할 수 있었다. 이와 같은 방지실험 결과를 표 3에 나타내었다.

표 3. 스케일 방지실험 결과.
Table 3. The result for laboratory experiment.

Generated material	Unexposed	Exposed (20 kHz)	Exposed (40 kHz)
Scale	1.84 g	0.2~0.3g	0.95 g

*시편:스케일 부착용 PVC관(직경 약 8 cm, 길이 약 10 cm)

주파수변화에 의한 효과를 살펴보면 40 kHz 보다는 20 kHz가 훨씬 더 방지효과가 좋은 것으로 나타나고 있으며, 이것은 초음파에 의한 수중 입자의 진동폭이 20 kHz가 40 kHz보다 2

배정도 큰 것에 기인하는 것으로 분석된다. 즉 시편표면 부근의 초음파의 미세유동을 고려해 볼 때 부유하고 있는 스케일 입자들의 운동폭이 클수록 침전하는 확률은 적어지는 것으로 볼 수 있기 때문이다. 또한 저주파수가 고주파수에 비해 캐비테이션을 일으키기가 쉬운 점이 이러한 결과에 영향을 미치는 것으로 분석된다.

III. 결 론

본 연구에서는 보일러내 관 벽에 생성되는 스케일을 방지함으로써 열 전달 효율을 개선하기 위해 초음파발신기를 개발하였으며, 이의 성능은 수조내의 음압측정실험과 보일러와 유사한 조건에서의 스케일 방지 실험을 통해 확인하였다.

먼저 스케일 방지용 초음파 발신기를 구성하는 자왜소자형 진동자를 설계하고 제작하였다. 다음으로 초음파출력을 증가시키기 위해 입력단과 출력단의 직경비가 주어질 때 공진주파수가 20 kHz인 conical, exponential, catenoidal 3가지 형태의 도파봉을 설계하였다. 이 중에서 제작이 용이한 conical 형태의 도파봉에 대해 hydrophone를 이용하여 길이변화에 따른 상대적인 음압을 측정하였으며, 이로부터 최종적인 도파봉의 길이를 결정하였다.

마지막으로 개발된 초음파발신기를 사용하여 보일러와 유사한 실험조건 하에서 초음파에 의한 스케일 방지 효과를 확인하였다. 또한 주파수 측면에서 20 kHz가 40 kHz보다 스케일 방지에 유리함을 확인하였다.

감사의 글

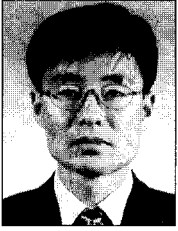
이 연구는 산업자원부의 연구비지원에 의하여 수행되었음

참 고 문 헌

- [1] A. G. Duncan, C. D. West, "Prevention of incrustation on crystallizer heat exchangers by ultrasonic vibration", *Trans. Instn. Chem. Engrs*, vol. 50, pp. 109-114, 1972
- [2] 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", *Fertil. News*, vol. 28, no. 6, pp. 45-48, 1983
- [3] Q. Qi, G. J. Brereton, "Mechanism of removal of micron-sized particles by high-frequency ultrasonic waves", *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, vol. 42, no. 4, pp. 619-629, July 1995
- [4] H. Hatano, "High-frequency ultrasonic cleaning tank utilizing oblique incidence", *IEEE Trans. Ultrason.*, vol. 43, no. 2, pp. 531-535, July 1996
- [5] J. Berlan, T. J. Mason, "Sonochemistry: from research laboratories to industrial plants", *Ultrason.*, vol. 30, No. 4, pp. 203-212, 1992
- [6] S. Dahnke, K. M. Swamy, F. J. Keil, "Modeling of three-dimensional pressure fields in sonochemical reactors with an inhomogeneous density distribution of cavitation bubbles. Comparison of theoretical and experimental results", *Ultrason. Sonochem.* 6, pp. 31-41, 1999
- [7] D. Ensminger, *Ultrasonics: the low-and high-intensity applications*, Marcel Dekker, Inc., New York, 1973

[1] A. G. Duncan, C. D. West, "Pre-

著 者 紹 介



허 필 우 (許弼宇)
 1966년 9월 3일생.
 1989년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사).
 1991년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학석사).
 1998년~현재 경북대학교 박사과정.

1991년~현재 한국기계연구원 선임연구원.
 주관심 분야 : 초음파트랜스듀서 개발, 초음파 응용, Sonochemistry, Bio-MEMS



임 의 수 (林義洙)
 1965년 5월 27일생.
 1992년 대전산업대 전산학(이학사).
 1987년~현재 한국기계연구원 선임기술지원.
 주관심 분야 : 초음파트랜스듀서 개발, 강력초음파 응용

1988 - 경북대학교 전자공학과 조교수
 1993 - 경북대학교 전자공학과 부교수
 현재 경북대학교 전자전기공학부 교수
 주관심 분야 : 디지털시스템 설계, Statistical signal processing, Vision system, 병렬 처리 컴퓨터



이 양 래 (李陽來)
 1958년 5월 18일생.
 1980년 전남대학교 물리학과 졸업(이학사).
 1982년 전남대학교 물리학과 졸업(이학석사).
 1995년 전남대학교 물리학과 졸업(이학박사). 1982년~현재 한국기계연구원 책임연구원.

1982년~현재 한국기계연구원 책임연구원.
 주관심 분야 : 초음파트랜스듀서 개발, 초음파 응용, Megasonic을 이용한 nano-scale 세정



고 광 식
 1980 - 경북대학교 (공학사 - 전자공학)
 1983 - 한국과학기술원 (공학석사 - 전자공학)
 1985 - 경북대학교 전자공학과 전임강사

1988 - 경북대학교 전자공학과 조교수
 1993 - 경북대학교 전자공학과 부교수
 현재 경북대학교 전자전기공학부 교수
 주관심 분야 : 디지털시스템 설계, Statistical signal processing, Vision system, 병렬 처리 컴퓨터