

열 차단용 초음파 도파관의 전파성능 향상 연구

Improving Wave Propagation Performance of an Ultrasonic Waveguide for Heat Isolation

최 인 석*, 전 한 용*, 김 진 오**, 김 인 수***
(In-Suk Choi*, Han-Yong Chun*, Jin-Oh Kim**, In-Soo Kim***)

* 숭실대학교 대학원 기계공학과, ** 숭실대학교 공과대학 기계공학과, *** 아이에스텍(주) 연구소
(접수일자: 2003년 6월 13일; 수정일자: 2003년 9월 15일; 채택일자: 2003년 9월 25일)

압전 변환기를 사용하는 초음파 유량계에서 고온의 유체로부터 압전 변환기를 보호하기 위하여 도파관을 사용하면서 종진동 초음파 전파성능을 향상시키기 위한 연구를 하였다. 도파관을 따라 전달되는 열을 효율적으로 차단하는 도파관 재질을 선정하였고, 압전 변환기를 보호할 수 있는 도파관의 최소 길이를 파악하였다. 균일한 원형 봉의 종진동 가진 응답을 구하여 진폭을 최대로 하는 도파관 길이를 선정하였다. 원추형 테이퍼 봉의 가진 응답을 구하여 도파관의 단면 크기가 길이방향으로 작은 쪽에서 파동이 증폭됨을 확인하였다. 균일한 도파관에서 단면 반지름이 작을수록 펄스 파 분산이 줄어들음을 파악하고, 단일 봉 도파관을 사용한 실험으로 이를 입증하였다. 실용적 도파관으로서 철심 조합형 도파관을 제시하고 제작과 평가를 통하여 파동 전파의 우수성을 확인하였다.

핵심용어: 탄성파, 도파관, 전파속도, 파동 진폭, 분산

투고분야: 초음파 및 탄성파 분야 (4.2)

This paper is concerned with protecting piezoelectric transducers used in an ultrasonic flowmeter from the high temperature of hot fluid in a pipe by using a waveguide and with improving the propagation of ultrasonic longitudinal vibration in the waveguide. Waveguide material has been chosen for efficient insulation of heat transferred in the waveguide, and the minimum length of the waveguide for protecting piezoelectric transducer has been estimated. Forced response of the longitudinal vibration in a uniform circular rod has been obtained and the length of the waveguide has been selected for maximum amplitude. Longitudinal vibration response of a conically-tapered rod excited at a natural frequency has been obtained to confirm that wave motion is amplified as the cross-sectional size of the waveguide decreases along the axial direction. The fact that dispersion of a pulse wave in a waveguide is reduced as the cross-sectional radius is decreased has been examined theoretically and confirmed experimentally by using a single-rod waveguide. A bundle-type waveguide has proven to be a practical one through the evaluation of the wave propagation performance.

Keywords: Elastic wave, Waveguide, Propagation speed, Wave amplitude, Dispersion

ASK subject classification: Ultrasonic and elastic waves (4.2)

I. 서론

초음파 센서 및 액추에이터 기술이 응용되고 있는 여러 분야 중 하나인 초음파 유량계는 다른 방식의 유량계에 비해서 여러 가지 장점이 있다. 그림 1(a)에 보인 바와같이 초음파 유량계는 유체 흐름을 방해하지 않으므로

정확한 측정이 가능하고, 흐르는 유체에 직접 닿지 않아 마모가 없으므로 내구성이 좋으며, 유체가 흐르는 관의 외부에 설치하므로 유지 보수가 쉽다[1,2]. 이러한 유량계에서 초음파를 발생시키거나 감지하는 데에는 주로 압전 변환기가 사용된다.

압전 (piezoelectric) 현상[3]은 Curie 온도 이상의 고온에서는 발생하지 않으므로 압전 변환기는 고온에서 작동되지 않는다. 따라서 고온 유체의 유량을 측정하고자 하는 경우에는 고온의 관으로부터 열을 차단하면서 초음파

책임저자: 김진오 (jokim@ssu.ac.kr)
156-743 서울시 동작구 상도5동 1-1
숭실대학교 공과대학 기계공학과
(전화: 02-820-0662; 팩스: 02-820-0668)

를 전달할 필요가 있다. 이를 위하여 그림 1(b)에 제시한 바와 같이 도파관 (waveguide)을 사용해서 압전 변환기를 분리하는 방안을 강구할 수 있다. 그런데 도파관에서는 파동의 분산 (dispersion) 현상[4,5]으로 인하여 펄스 파가 변형되므로 측정에 지장을 준다. 따라서 본 논문은 초음파 종진동이 전파하는 도파관을 적절히 설계하는 방안을 제시하여 열 차단과 파동 전파 성능을 향상시키고자 한다.

도파관은 대개 원형 단면이며 단위 길이당 표면적을 증가시키기 위하여 울퉁불퉁하게 하는 경우[6]도 있지만 대부분의 경우 균일한데 진폭을 증대시키기 위하여 단면 크기가 길이 방향으로 감소하는 경우[7,8,9]도 있으므로, 연구대상을 균일한 원형 봉과 원추형 테이퍼 봉으로 한다. 이와 같이 선정된 원형 봉 도파관의 열차단 성능을 확인하고 파동 진폭을 증대시키며 파동 분산을 저감하는 방안을 강구한다. 도파관의 열 차단을 위하여 열전달 이론[10]을 적용하여 재질을 선정하고 압전 변환기를 보호할 수 있는 적절한 길이를 이론과 실험을 통해서 결정한다.

파동 진폭을 증대시키기 위해서 우선 도파관의 길이에 따른 성능을 파악한다. 이를 위해 균일한 봉에서의 종진동의 운동방정식으로 부터 한쪽 끝에서 가진하고 다른 쪽 끝은 자유로운 경우의 정상파 (standing wave), 즉 진동 응답을 구한다. 가진 응답의 진폭을 도파관 길이가 작으

하므로 응답이 최대가 되는 길이를 선정한다.

파동 진폭을 증대시키기 위한 또 하나의 방안으로 길이 방향의 단면 크기 변화를 고려한다. 이를 위해 원추형 테이퍼 봉에서 파동 증폭 성능을 파악한다. 가진되는 원추형 테이퍼 봉에 대하여 종진동 응답을 엄밀해법[11]을 적용하여 구한다. 면내 진동 측정기[12]를 사용하여 원추형 테이퍼 봉의 진동 응답을 측정하여 해석 결과를 검증한다.

분산 저감 설계를 위하여 우선 종진동 변환기에 의해 원형 봉 도파관에 전달된 파동의 전파 특성을 기존 이론 [4]을 활용하여 해석한다. 일정한 주파수 즉 일정한 파장의 파동에 대하여 원형 봉의 단면크기에 따른 전파속도를 계산하여 분산현상을 규명한다. 단면지름에 따른 전파속도를 나타내는 분산곡선 그래프에서 전파속도가 일정하게 유지되는 단면크기 범위를 찾아 도파관에서 펄스 파의 분산을 줄이는데에 활용한다. 실제 도파관에서 전파속도와 파형을 측정하는 실험을 통해서 해석 결과를 검증한다. 단일 봉으로 도파관 단면을 작게 하는데는 한계가 있으므로 가는 봉들을 조합한 도파관을 제작하여 파동 전파 성능을 확인한다.

II. 열 차단 성능

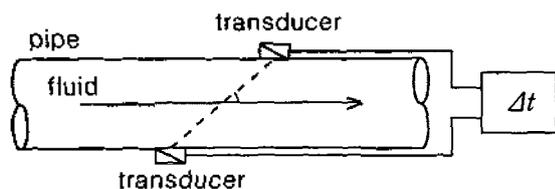
도파관을 사용하는 이유는 고온 유체용 초음파 유량계에서 압전 변환기로 전달되는 열을 차단하려는 것이다. 반면에 도파관 사용으로 인하여 펄스 파가 분산되는 부작용이 있으므로 이를 최소화하여야 한다. 따라서 열 차단 성능이 좋은 재질을 선정하고 열 차단이 충분히 이루어지는 최소 길이를 파악한다.

단면이 일정한 핀 (fin)에 대한 열 전달 이론에 있어서 길이방향 (x)의 온도 분포 $T(x)$ 를 구하는 식은 다음과 같으므로[10], 이를 원형 봉 도파관에서의 열전달 계산에 사용한다.

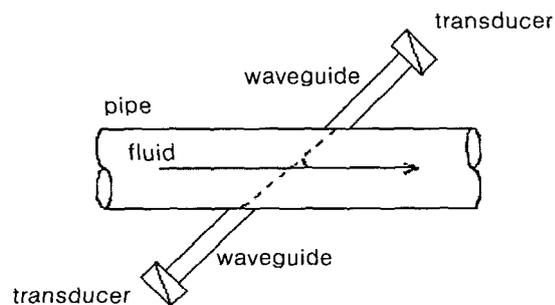
$$T(x) = T_{\infty} + (T_b - T_{\infty}) e^{-mx} \quad (1)$$

여기서 T_b 는 봉의 한쪽 끝 열원에서 온도이고, T_{∞} 는 주위 공기의 온도이다. 또한 m 은 무차원 변수로서 재질의 열전도 계수 β 및 대류 열전달 계수 h 와 매체의 단면적 A_c 및 단위길이당 표면적 P 에 의존된다. 단면 지름이 D 인 원형 봉의 경우에 m 은 다음과 같다[10].

$$m = \sqrt{\frac{hP}{BA_c}} = \sqrt{\frac{4h}{BD}} \quad (2)$$



(a) 기존의 방식
(a) A conventional type



(b) 도파관을 사용하는 방식
(b) A waveguide-type

그림 1. 초음파 유량계의 개략도
Fig. 1. Schematic diagram of ultrasonic flowmeters.

스텐레스 강 (STS-302)과 알루미늄을 대상으로 열 차단 성능을 비교하기 위하여 단면 지름 D 가 25 mm인 원형 봉에 대해서 표 1에 기재된 열 물성치[10]를 식 (1)에 대입하여 길이방향 온도 분포를 계산하였다. 열원의 온도가 450℃일 때 열원으로부터 300 mm 떨어진 지점까지 계산된 온도 분포를 그림 2에 선으로 나타내었다. 두 재질에 대해 계산된 결과를 비교하여 보면, 열전도 계수가 낮은 스텐레스 강이 알루미늄보다 열 차단 성능이 좋은 것을 알 수 있다. 따라서 도파관 재질로는 스텐레스 강을 선정하였다.

식 (1)은 단순화된 이론 식으로서 이상적인 경우에는 타당하지만, 실제 상황에서 어느 정도 정확한지 확인하고자 실험을 병행하였다. 실험 대상은 단면 지름이 25 mm이고 길이가 230 mm인 스텐레스 강 재질의 원형 봉이다. 실험 장치로는 가변저항체로서 전압 조절에 의해 열원의 온도를 조절하는 슬라이더(slidacs)와 코일 저항을 통해서 발열하는 알루미늄 발열판을 사용하였다. T형 또는 K형 열전대 (thermocouple)를 측정위치에 고정하고 온도 지시계 (thermometer) (Fluke 50S 및 TES-1320)를 사용하여 온도를 표시하였다.

열원 온도가 450±2℃인 경우에 대하여 도파관의 길이 방향 온도 분포를 측정된 결과를 그림 2에 원으로 나타내었다. 열원에서 멀어질수록 온도가 낮아지는 경향을 측정결과와 계산결과가 일관되게 보여준다. 열원의 온도가

450℃일 때, 다른 쪽에서 150℃ 이하의 온도가 되려면 도파관 길이가 0.13 m 이상이어야 한다고 판단된다.

III. 파동 진폭 증대

도파관에서의 파동 진폭을 증대시키기 위하여 도파관의 길이에 따른 진폭을 살펴보고 진폭을 증대시키는 적절한 길이를 선정한다. 또한 단면 크기 변화에 따른 진폭을 살펴보고 파동 진폭을 증대시키는 방안을 모색한다.

3.1. 길이에 따른 진폭

열 차단에 필요한 길이 범위 중에서 파동 진폭을 크게 하는 최적 길이를 선정한다. 유한한 길이의 도파관에서의 파동은 정상파, 즉 진동 모드를 형성하므로 다음과 같이 길이방향 진동, 즉 종진동에 대한 해석을 행한다.

그림 3과 같은 원형 봉의 종진동은 길이 방향 변위 $u(x, t)$ 로써 다음과 같은 파동방정식[4]으로 표현된다.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \tag{3}$$

여기서 $c_0 (= \sqrt{E/\rho})$ 은 종파 전파속도이고, E 는 영률이며 ρ 는 밀도이다. 식 (3)을 변수 분리하기 위해서 $u(x, t) = U(x) e^{i\omega t}$ 라 두고 정리하여 변위 진폭 $U(x)$

표 1. 스텐레스강 STS-320과 알루미늄의 열전달 상수
Table 1. Heat transfer constants of stainless steel STS-320 and aluminum.

Material	Thermal conductivity, β (W/mK)	Convection heat transfer coefficient, h (W/m ² K) (gas, free convection)
Aluminum	180	10 or 5
Stainless steel 302	16	

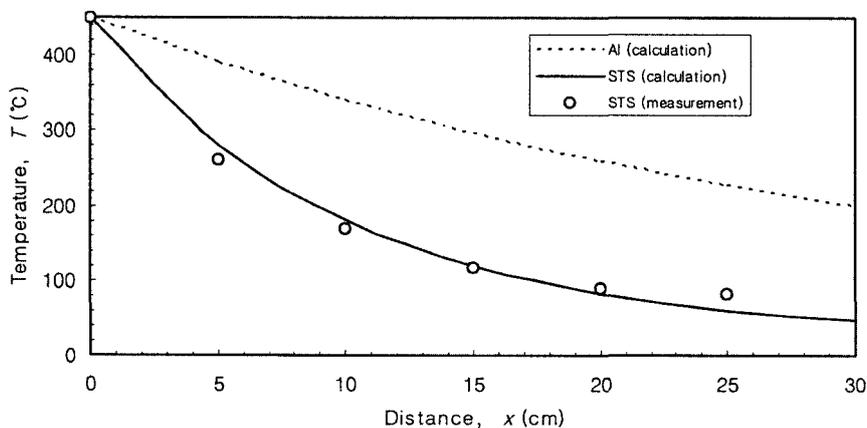


그림 2. 끝 면 온도가 450℃인 도파관에서의 온도 분포
Fig. 2. Temperature distribution in a waveguide with the end temperature 450℃.

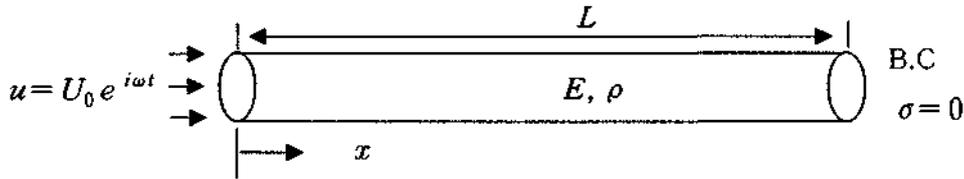


그림 3. 한쪽 끝에서 변환기에 의해 가진되는 균일 봉의 개략도
Fig. 3. Schematic diagram of a uniform rod excited by transducer at one end.

에 관한 다음 식을 얻는다.

$$\frac{d^2U}{dx^2} + k^2U = 0 \tag{4}$$

여기서 $k(= \omega/c_0)$ 는 파수 (wavenumber)이다. 그림 3과 같이 봉의 한쪽 끝 ($x=0$)이 변위 진폭 U_0 인 가진을 받고, 다른 쪽 끝 ($x=L$)은 자유로운 경우, 경계조건은 다음과 같이 표현된다.

$$U(0) = U_0 \tag{5a}$$

$$E \frac{dU}{dx} \Big|_{x=L} = 0 \tag{5b}$$

식 (4)와 경계조건 (5)를 만족하는 해는 다음과 같다.

$$U(x) = U_0 \frac{\cos k(L-x)}{\cos kL} \tag{6}$$

식 (6)에서 $\cos kL \approx 0$ 이면 진폭이 무한히 커지므로 최대 변위 진폭을 갖게 하는 길이 L 들을 다음과 같이 구한다.

$$L = \frac{(2n-1)\pi}{2k} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \tag{7}$$

재질이 스테레스 강 (STS-302)이고 단면 직경이 25 mm인 원형 봉에서 한쪽 끝이 진동수 100 kHz로 가진될 경우, 스테레스 강의 물성치[10]와 이로부터 환산된 파동 특성을 표 2에 기재하였다. 이 경우에 진동 응답이 최대 진폭을 가지는 도파관의 길이를 식 (7)로부터 계산하였다. 그 결과 저차 모드부터 12, 37, 61, 86, 110, 135, 160, ... mm를 얻었다. 1차, 2차, 7차 모드에 해당하는 진동 응답을 그림 4에 나타내었다. 열 차단을 위해서 최소 130 mm의 길이를 가져야 한다고 판단하였으므로 7차 모드인 160 mm를 도파관의 길이로 선정하였다.

3.2. 단면 크기 변화에 따른 진폭

단면 크기가 길이방향으로 변화하는 봉에서의 진동은 단면이 작은 쪽으로 갈수록 진폭이 커진다[7-10]. 이러한

표 2. 스테레스강 STS-320의 탄성 및 음향 성질
Table 2. Elastic and acoustic properties of stainless steel STS-302.

Properties		Values
Elastic property	Mass density, ρ	7920 kg/m ³
	Young's modulus, E	190 GPa
	Shear modulus, G	75 GPa
	Possion's ratio, ν	0.30
Wave speed	Transverse wave, c_T	3060 m/s
	Longitudinal wave in a thin bar, c_b	4910 m/s
	Longitudinal wave, c_L	5720 m/s

성질을 송신용 도파관에 적용해서 진동을 증폭시키는 방안을 검토한다. 불균일 봉의 고유진동수를 구하여 가진 주파수로 선정하고, 도파관 한쪽 끝에서의 가진에 따른 진동응답을 구하여 증폭 성능을 확인한다.

봉의 단면적 변화에 따른 종진동 $u(x, t)$ 의 운동방정식은 다음과 같다[14].

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1}{A} \frac{dA}{dx} \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \tag{8}$$

그림 5(a)에 보인 원추형 테이퍼 봉의 x 방향의 변화를 나타내는 단면적 함수 $A(x)$ 는 다음과 같이 표현된다.

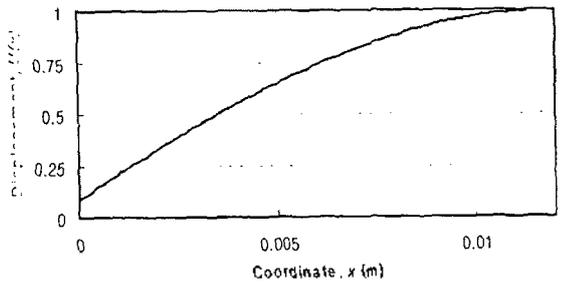
$$A(x) = A_0 \left(1 - \frac{x}{2L}\right)^2 \tag{9}$$

여기서 A_0 는 짧은 쪽 끝 ($x=0$)의 단면적이다.

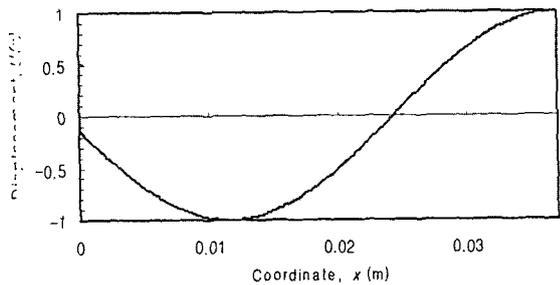
한쪽 끝 ($x=0$)에 $U_0 e^{i\omega t}$ 의 변위 진동을 가하는 경우에 대하여, $u(x, t) = U(x) e^{i\omega t}$ 로 변수 분리하고 식 (9)를 식 (8)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 방정식이 얻어진다.

$$\frac{d^2U}{d\xi^2} + \frac{2}{\xi} \frac{dU}{d\xi} + \lambda^2 U = 0 \tag{10}$$

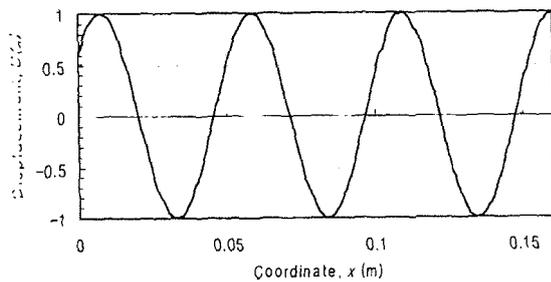
여기서 $\xi = (1 - x/2L)$ 이며, $\lambda = 2kL$ 이고 $k = \omega/c_0$



(a) 1차 모드
(a) 1st mode



(b) 2차 모드
(b) 2nd mode



(c) 7차 모드
(c) 7th mode

그림 4. 각 모드에서 봉의 길이 선정에 의해 최대화된 진동 범위
Fig. 4. Vibration displacement maximized by selecting the rod length at each mode.

이다.

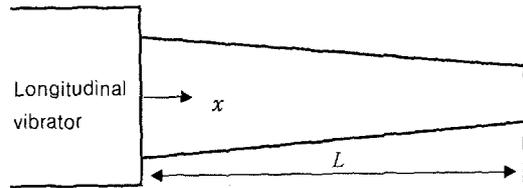
식 (10)의 일반해는 다음과 같이 베셀함수를 포함하여 표현된다[11].

$$U(x) = \xi^{-1/2} [C_1 J_{1/2}(\lambda \xi) + C_2 J_{-1/2}(\lambda \xi)] \quad (11)$$

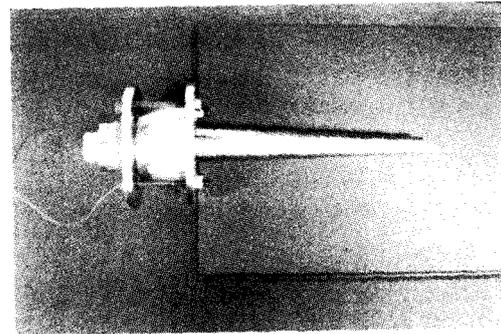
이거서 C_1 과 C_2 는 경계조건에 의해서 결정되는 상수이다. 그림 5(a)와 같이 원추형 테이퍼 봉의 한쪽 끝 ($x=0$) 이서 가진되고 다른 쪽 끝 ($x=L$)이 자유로운 경우, 양 단에서의 경계조건은 다음과 같다.

$$U(0) = U_0 \quad (12a)$$

$$iEA_0 \frac{dU}{dx} \Big|_{x=L} = 0 \quad (12b)$$



(a) 개략도
(a) Schematic diagram



(b) 사진
(b) Photograph

그림 5. 한쪽 끝에서 변환기에 의해 가진되는 원추형 테이퍼 봉
Fig. 5. Conically-tapered circular rod excited by a transducer at one end.

경계조건 (12)를 적용하여 C_1 과 C_2 를 구하여 완성한 해는 다음과 같다.

$$U(x) = U_0 \xi^{-1/2} \frac{J_{-3/2}(\frac{\lambda}{2})J_{1/2}(\lambda \xi) - J_{3/2}(\frac{\lambda}{2})J_{-1/2}(\lambda \xi)}{J_{-3/2}(\frac{\lambda}{2})J_{1/2}(\lambda) + J_{3/2}(\frac{\lambda}{2})J_{-1/2}(\lambda)} \quad (13)$$

원추형 테이퍼 봉의 치수는 길이 $L = 0.165$ m, 왼쪽 끝 단면의 지름 25 mm, 오른쪽 끝 단면의 지름 12.5 mm 이고, 가진주파수는 30 kHz이다. 이러한 치수들과 표 2에 기재된 스테레스 강의 물성치를 식 (13)에 대입하여 원추형 테이퍼 봉의 가진 응답을 구하였다. 이와 같이 계산된 가진 응답을 그림 6에 선으로 나타내었다.

해석 결과와 비교하기 위하여 실험을 행하였다. 레이저 간섭 방식의 면내 진동 측정기 (Polytec OFV-3320)를 사용하여 비틀림 진동을 측정할 바가 있는데[12], 같은 원리로 종진동을 측정한다. 측정 원리는 차분 레이저 도플러 방법[15]이다. 레이저 다이오드로부터 발생되어 두 부분으로 분리된 빔이 움직이는 물체에 입사하는 경우 Δs 간격의 간섭무늬와 함께 주파수 변이 f_b 가 발생하고, 이를 통해서 물체의 면내 진동속도 v_p 를 다음 관계로 측정하는 것이다.

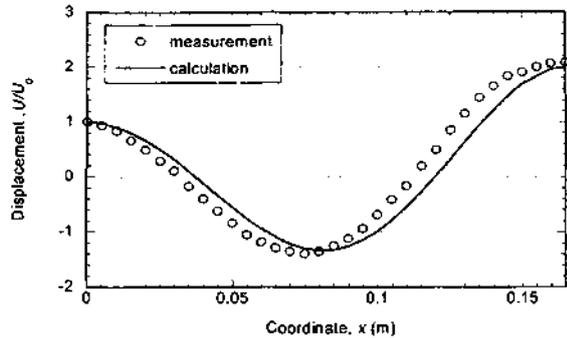


그림 6. 한쪽 끝 ($x=0$)에서 가진되고 다른 쪽 끝 ($x=L$)이 자유로운 원추형 테이퍼 봉의 응답
 Fig. 6. Response of the conically-tapered rod excited at one end ($x=0$) and free at the other end ($x=L$).

$$v_p = f_D \cdot \Delta s \quad (14)$$

측정 대상인 원추형 테이퍼 봉을 그림 5(b)에 사진으로 보였다. 측정된 결과를 그림 6에 원으로 나타내었다. 실험결과와 해석결과가 비교적 잘 일치한다.

그림 6에서 원추형 테이퍼 봉의 진동 응답을 살펴보면 단면 크기가 작은 쪽으로 갈수록 진폭이 커지는 것을 알 수 있다. 따라서 송신용 도파관을 이와 같은 형상으로 만들면 파동을 증폭시킬 수 있으리라 판단된다.

IV. 분산 저감

펄스 파의 분산을 최소화시킨 도파관을 제작하기 위하여 원형 봉의 단면 크기에 따른 전파속도를 계산하여 분산 곡선을 나타내고, 이로부터 적정 단면크기 범위를 찾아 도파관의 단면 치수를 선정한다. 단일 봉의 도파관에서 실험을 통해 해석 결과를 검증하고, 현실적으로 사용 가능한 가는 봉들의 조합형 도파관을 제작하여 파동 전파 성능을 확인한다.

4.1. 단일 봉에서의 분산

단면 반지름이 a 인 원형 봉에서 전파하는 종파의 운동은 다음의 특성방정식을 만족시킨다[3].

$$\frac{2b}{a} (q^2 + k^2) J_1(pa) J_1(qa) - (q^2 - k^2) J_0(pa) J_1(qa) - 4k^2 pq J_1(pa) J_0(qa) = 0 \quad (15)$$

여기서 p 와 q 는 다음과 같이 주파수 ω , 무한공간에서의 종파 속도 c_L 또는 횡파 속도 c_T , 그리고 파동수 k 로 표현된다.

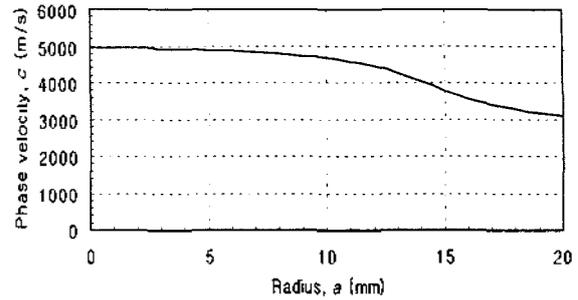


그림 7. 스테인레스 강 도파관에서 주파수 100 kHz인 파동에 대하여 반지름의 함수로 도시한 기본 모드의 위상속도
 Fig. 7. Phase velocity of the fundamental mode displayed as a function of the radius for the wave of frequency 100 kHz in a stainless steel waveguide.

$$p^2 = \frac{\omega^2}{c_L^2} - k^2, \quad q^2 = \frac{\omega^2}{c_T^2} - k^2 \quad (16a,b)$$

식 (15)는 파동수 k 와 주파수 ω 의 관계를 나타내며 $\omega = kc$ 의 관계가 있으므로 결국 파동수 k 와 파동 전파 위상속도 (phase velocity) c 의 관계식이다.

재질이 스테인레스 강 (STS-302)인 원형 봉을 대상으로 하고, 표 2에 기재된 탄성 물성치들을 계산에 사용하였다. 식 (15)에서 k 의 값을 일정하게 유지하고 단면 반지름 a 의 크기를 변화시켜 가며 수치해석 프로그램 Mathematica[16]의 FindRoot 기능을 이용하여 위상속도 c 의 값을 계산하였다. 파동 주파수가 100 kHz인 경우, 분산곡선의 1차 모드를 계산하여 그림 7에 그래프로 나타내었다.

단면 크기가 일정할 때 파동수 (또는 파동수가 일정할 때 단면 크기)에 무관하게 위상속도 c 가 일정한 값을 갖는다면 펄스 파는 분산없이 전파한다. 그러나 그림 7에서 보듯이 도파관에서 전파하는 탄성파는 위상속도 c 가 단면 반지름 a 에 따라 다르므로 분산현상이 발생한다. 분산현상은 펄스 파가 전파하는 과정에서 파형을 퍼지게 하므로 계측 신호를 사용하기 어렵게 한다. 실제 파동에 주로 기여하는 1차 모드의 그래프에서 수평을 유지하는 영역이 있으므로, 펄스 파의 중심 주파수에 해당하는 단면 반지름이 이런 영역에 있도록 도파관을 설계하면 분산 현상을 최소화할 수 있다.

해석 결과를 검증하기 위해서 그림 8과 같이 실험 장치를 구성하였고, 도파관에서의 탄성파 전파 실험을 행하여 전파속도를 측정하고 파형을 관찰하였다. 압전 변환기를 사용하여 종진동 탄성파를 발생시키고, 도파관을 따라 전파한 탄성파를 감지하였다. 사용된 압전 변환기는 아이에스텍(주)제품으로서 중심 주파수가 100 kHz이며 도파관에 결합되어 파동을 송신 및 수신한다.

신호 발생기 (Agilent 33120A)에서 생성된 펄스형 전기 신호가 파워 증폭기 (Eliezer HA400)을 거쳐서 송신 변환기에 인가된다. 펄스 신호를 받은 변환기는 종방향 진동을 도파관에 전달한다. 도파관에서 전파한 파동은 맞닿은 도파관을 거쳐 수신 변환기에서 전기 신호로 변환된다. 수신 신호는 오실로스코프 (Tektronix TDS3032)로 보내어지는데 신호 크기가 너무 작을 때에는 RTX회로를 사용하여 증폭한 후 오실로스코프로 보내어진다.

신호 발생기에서 생성된 펄스 신호는 중심 주파수 100 kHz이고 10 V 크기이며 전압 증폭기를 거쳐 변환기에 인가된 신호 파형이 그림 9(a)에 보여진다. 단면 지름이 5 mm인 도파관과 25 mm인 도파관에서 전파한 후 수신된 파형이 각각 그림 9의 (b)와 (c)에 보여져 있다. 그림 9(b)의 파형은 수신된 신호를 증폭하지 않고 관찰한 것임에 비해, 그림 9(c)의 파형은 굵은 도파관에서 심한 분산 때문에 진폭이 작으므로 20배 증폭한 후에 관찰한 것이다.

전파속도 c 는 전파시간 Δt 와 각 도파관의 길이 L 로부터 $c = 2L/\Delta t$ 로 구해진다. 측정된 전파속도와 해석을 통해 계산된 전파속도의 값을 표 3에 나타내어 비교하였다. 계산값과 측정값이 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 단면 지름이 커질수록 전파속도가 느려지는 현상이 해석과 실험에서 일관되게 관찰되었다.

4.2. 철심 조합형 도파관에서의 분산

단일 봉에서의 분산 현상을 앞 절에서 살펴본 바에 따르면, 일정한 주파수일 때 봉의 단면이 작을수록 펄스 파의 분산이 저감된다. 그런데 봉의 단면이 너무 작으면 봉

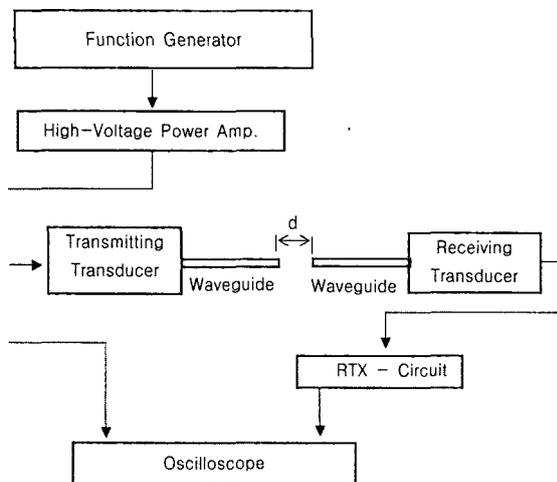
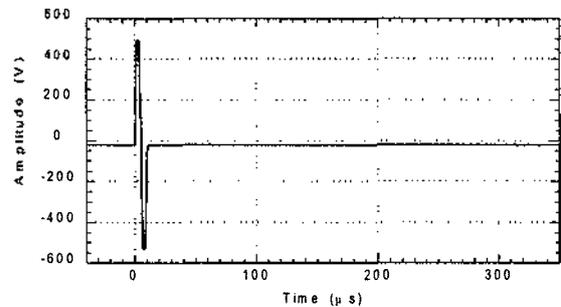


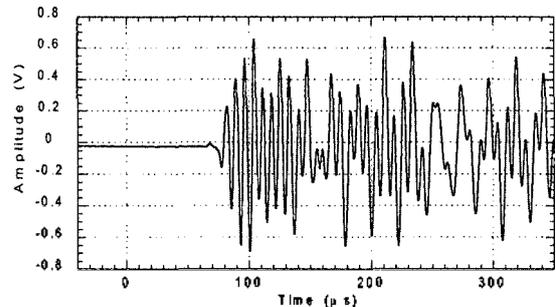
그림 8. 파형 측정용 실험장치 구성도
Fig. 8. Schematic diagram of the waveform measurement system.

이 휘어지기 쉽고 파동 에너지가 적게 전달되는 단점이 있다. 이런 단점을 극복할 방안을 시도하여 보았다. 가는 봉들을 다발로 묶은 도파관[17]을 사용하면 각각의 봉들의 단면은 작으면서 잘 휘어지지 않고 파동 에너지를 충분히 전달할 수 있다. 따라서 그림 10에 사진으로 보인 바와 같이 가는 봉들, 즉 철심들을 조합한 도파관을 제작하여 파동 전파 성능을 관찰하였다.

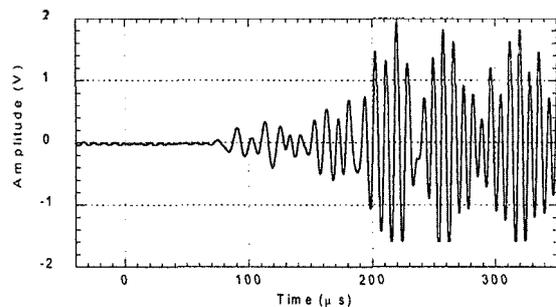
4.1절에서 설명된 실험 방법에 따라 그림 9(a)와 같은 신호를 송신 변환기에 인가하여 도파관을 따라 전파한 파동을 수신 변환기에서 감지하였다. 관찰된 파형을 그림 11에 나타내었다. 그림 11에서 (a)는 두 도파관이 맞닿은 경우에 수신된 파형이고, (b)는 두 도파관 끝이 50 mm



(a) 입력 신호
(a) Input signal



(b) 지름 5 mm인 도파관에서의 출력 신호
(b) Output signal at 5 mm-diameter waveguide



(c) 지름 25 mm인 도파관에서의 출력 신호
(c) Output signal at 25 mm-diameter waveguide

그림 9. 도파관에서의 파형
Fig. 9. Waveforms in the waveguide.

표 3. 측정된 전파속도와 계산된 전파속도의 비교
Table 3. Comparison of the measured and calculated wave speeds.

Diameter, 2a (mm)	Measurement			Calculated wave speed c (m/s)	Difference (%)
	Distance, 2L (mm)	Time, Δt (μ s)	wave speed, c (m/s)		
5.0	320	68.8	4920	4651	5.43
25	320	74.4	4305	4301	0.1

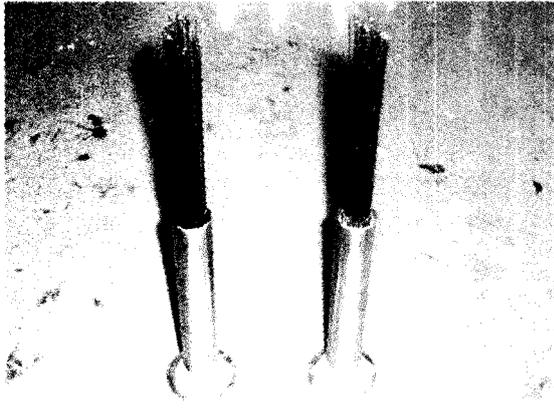
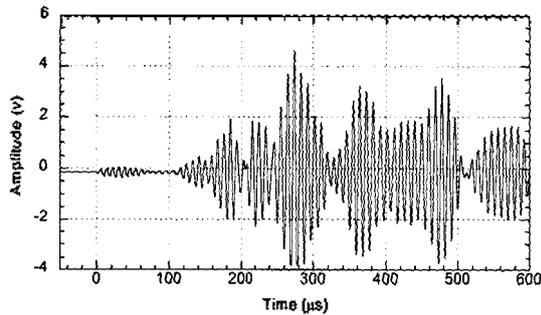
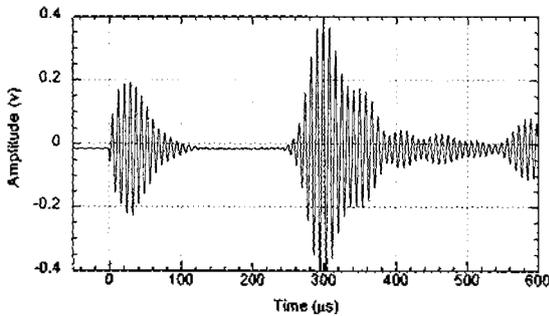


그림 10. 철심 조합형 도파관 사진
Fig. 10. Photograph of a bundle-type waveguide.



(a) 거리 $d = 0$
(a) Distance $d = 0$



(b) 거리 $d = 50$ mm
(b) Distance $d = 50$ mm

그림 11. 철심조합형 도파관에서의 출력 파형
Fig. 11. Output waveforms in a bundle-type waveguide.

간격을 두고 있는 경우에 수신된 파형이다. 계측용 신호로 사용하기에 충분한 파형을 유지하고 있다. 특히 (b)의 결과는 그림 1(b)에 제시된 바와 같이 도파관 두 개가 일정 거리 떨어져 있는 상태에서 파이프 내의 유속을 측정하는 데 가능함을 보여준다.

V. 결론

고온 유체용 초음파 유량계에서 압전 변환기를 보호하기 위한 도파관의 열 차단 성능과 종진동 초음파 전파 성능을 향상시키는 연구 결과를 제시하였다. 도파관을 따라 전달되는 열을 효율적으로 차단하는 도파관 재질로 스테인레스 강을 선정하였고, 450°C 열원으로부터 압전 변환기를 보호할 수 있는 도파관의 최소 길이가 130 mm임을 파악하였다. 균일한 원형 봉의 종진동 가진 응답을 구하여 진폭을 최대화 하는 도파관 길이를 계산할 수 있도록 이론적 해석을 하였다. 중심 주파수 100 kHz인 파동이 스테인레스 강 도파관에서 전파하는 경우 7차 모드에 해당하는 160 mm를 최적 길이로 선정하였다.

진폭을 증대시키는 방안으로 원추형 테이퍼 봉 형태의 도파관을 고려하였다. 종진동 가진 응답을 이론적 해석과 실험을 통해 구하여 도파관의 단면 크기가 길이방향으로 작은 쪽에서 파동이 증폭됨을 확인하였다. 균일한 도파관에서 단면 반지름이 작을수록 펄스 파 분산이 줄어듦을 파악하였다. 단일 봉 도파관을 사용한 실험에서 파형을 관찰하여 이를 확인하였고 전파속도를 측정하여 이론적 해석 결과를 검증하였다. 실용적 방안으로서 철심 조합형 도파관을 제작하고 평가하여 그러한 도파관의 우수한 전파 성능을 확인하였다.

후기

본 논문은 아이에스텍(주)에서 주관한 산업자원부 부품

소재공동기술개발사업의 위탁기술개발 과제를 수행하여 얻은 연구결과임.

systems," United States Patent 5,962,790, 1999.

참고 문헌

1. L. C. Lynnworth, *Ultrasonic Measurements for Process Control*, Academic Press, Boston, Chap. 4, 1989.
2. 노용래, "초음파의 산업 응용," *한국음향학회지*, 12 (4), 72-77, 1993.
3. T. Ikeda, *Fundamentals of Piezoelectricity*, Oxford University Press, Oxford, 1996.
4. J. D. Achenbach, *Wave Propagation in Elastic Solids*, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Chap. 6, 1975.
5. J. L. Rose, *Ultrasonic Waves in Solid Media*, Cambridge University Press, Cambridge, Chap. 11, 1999.
6. 김진오, "주기적으로 불균일한 원형 막대에서 전파하는 비틀림 성파," *한국음향학회지*, 17 (5), 79-84, 1998.
7. E. Eisner, "Design of sonic amplitude transformers for high magnification," *The Journal of the Acoustical Society of America*, 35 (9), 1367-1377, 1963.
8. 이건복, 김희수, "초음파 트랜스듀서의 종진동을 이용한 알루미늄 와이어 용접," *한국정밀공학학회지*, 13 (11), 38-45, 1996.
9. 강종표, "초음파 진동 절삭공구 혼의 설계에 관한 연구," *한국정밀공학학회지*, 8 (3), 55-63, 1991.
10. P. I. Frank and P. D. David, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 4th ed., John Wiley & Sons, New York, 114-120, 1996.
11. Q. S. Li, "Exact solutions for longitudinal vibration of multi-step bars with varying cross-section," *ASME Journal of Vibration and Acoustics*, 122 (2), 183-187, 2000.
12. 정형곤, "불균일 원형 봉의 비틀림 진동 특성," *숭실대학교 석사학위논문*, 2001.
13. F. P. Beer and E. R. Johnston, Jr., *Mechanics of Materials*, McGraw-Hill, New York, Appendix B, 1992.
14. K. F. Graff, *Wave Motion in Elastic Solids*, Dover, New York, Chap. 3, 1991.
15. L. E. Drain, *The Laser Doppler Technique*, John Wiley & Sons, Chichester, Chap. 5 & 7, 1980.
16. S. Wolfram, *The Mathematica Book*, 4th ed., Wolfram Media, Cambridge University Press, 1999.
17. L. C. Lynnworth and Y. Liu, "Ultrasonic path bundle and

저자 약력

• 최 인 석 (In-Suk Choi)



2001년 2월: 숭실대학교 기계공학과 (공학사)
 2003년 8월: 숭실대학교 기계공학과 (공학석사)
 2003년 6월~현재: ㈜강택 연구개발팀 근무
 ※ 주관심 분야: 역학적 진동, Solenoid를 이용한 유량제어

• 전 한 용 (Han-Yong Chun)



1999년 2월: 숭실대학교 기계공학과 (공학사)
 2001년 2월: 숭실대학교 기계공학과 (공학석사)
 2002년 3월~2002년 11월: 숭실대학교 기계공학과 (박사과정 휴학)
 2003년 4월~현재: ㈜아모텍 모터연구소 (연구원)
 ※ 주관심 분야: 역학적 진동 해석, 초음파 센서/액추에이터, BLDC 모터

• 김 진 오 (Jin-Oh Kim)



1981년 2월: 서울대학교 기계설계학과 (공학사)
 1983년 2월: 서울대학교 기계설계학과 (공학석사)
 1983년 5월~1985년 6월: 한국표준과학연구원 음향진동연구실 (연구원)
 1989년 12월: 미국 University of Pennsylvania, 기계공학과 (Ph. D.)
 1989년 11월~1994년 1월: 미국 Northwestern University (연구조교수)
 1994년 3월~1997년 8월: 삼성중합기술원 그룹기술지원센터 (수석연구원)
 1997년 9월~현재: 숭실대학교 기계공학과 (조교수, 부교수)
 ※ 주관심 분야: 역학적 진동을 이용한 초음파 센서 및 액추에이터 연구/개발

• 김 인 수 (In-Soo Kim)



1988년 2월: 한양대학교 기계공학과 (공학사)
 1990년 2월: 한양대학교 정밀기계공학과 (공학석사)
 1990년 3월~1996년 3월: 진해 국방과학연구소 (연구원)
 1996년 3월~1997년 6월: 한국산업인력공단 수원지 도원 검사부 (대리)
 1997년 6월~현재: 아이에스텍주 연구소 (부장)
 ※ 주관심 분야: 초음파 센서 & 시스템설계/소음진동 측정/초음파 유량계측