

외장형 초음파 유속 센서에서 탄성파의 3차원 굴절

Three-dimensional refraction of Elastic Waves at Clamp-on Ultrasonic Flowmetric Sensors

김태언* · 김진오† · 박준관**

Tae Eon Kim, Jin Oh Kim, Joonkwan Park

1. 서 론

유체의 유속 또는 유량 측정 방법에는 벤츨리관, 오리피스, 차압, 초음파 방법 등이 있다. 초음파 센서 기술은 유체의 여러 가지 물리량을 측정하는 데에 활용되고 있는데, (1) 초음파 유속 측정 방법은 원리에 따라 도플러 방법과 전달 시간차 방법으로 구분되며, 설치 방식에 따라 침습형(wetted)과 외장형(clamp-on)으로 구분된다. (2) 또한 초음파 전파경로 수에 따라 단선(single path)과 다회선(multiple path)이 있는데, 일반적으로 외장형은 단선 방식, 침습형은 다회선 방식으로 사용된다.

외장형 다회선 방식은 Fig. 1과 같이 관의 중심을 지나가는 중앙센서(M)와 관의 중심에서 벗어난 측면센서(T/B)를 사용하여 유량을 측정하게 된다. 이때 탄성파가 단면 중앙을 통과하는 중앙센서 경로에서는 Fig. 2(a)에서와 같이 2차원으로 해석이 가능하다. (3) 하지만 측면센서 경로에서는 Fig. 2 (a), (b)에서와 같이 굴절이 입체적으로 이루어진다. 본 논문은 측면센서에 의한 탄성파의 3차원 굴절을 다룬다.

2. 굴절각 해석

외장형 초음파 유속 센서가 파이프의 중앙에서 벗어난 위치에 배치된 측면센서의 경우, 탄성파의 3차원 굴절을 축방향 단면에서의 굴절과 반경방향 단면에서의 굴절로 분리하여 해석할 수 있다. 축방향 단면에서 탄성파의 굴절은 Fig. 2(a)와 같다. 이 때 굴절각은 다음과 같이 Snell의 법칙에 따른다.

$$\frac{\sin \theta_w}{c_w} = \frac{\sin \theta_p}{c_p} = \frac{\sin \theta_l}{c_l} \quad (1)$$

여기서 c 는 전파속도이고 θ 는 입사각 또는 굴절각이다.

파이프의 반경방향 단면에서 탄성파의 굴절은 Fig. 2(b)와 같다. 웨지로부터 관 외벽으로 입사각 θ_{ws} 로 입사한 중

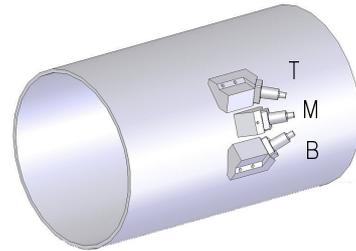
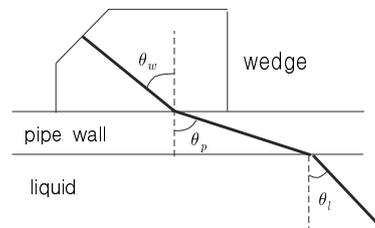
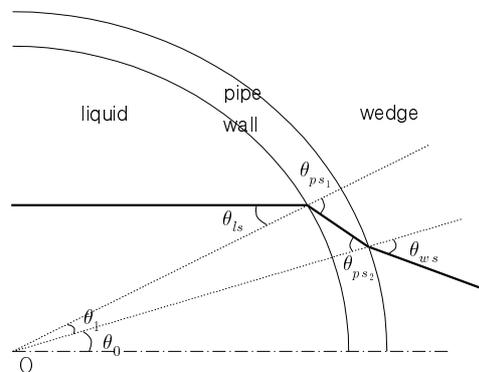


Fig. 1 Clamp-on multi-path ultrasonic flowmetric sensors

파는 관 외벽에서 굴절각 θ_{ps_2} 로 투과되어 전파하다가, 관 내벽에 입사각 θ_{ps_1} 로 입사하여 굴절각 θ_{ls} 로 유체로 투과한다. 파이프 중앙선에 평행하게 전파되는 파동의 전파 위치를 각도 $\theta_2 (= \theta_0 + \theta_1)$ 로 설정하고, 그 크기에 따라 관 벽에서의 입사각 θ_{ps_1} 과 θ_{ws} 를 다음과 같이 결정한다.



(a) axial plane



(b) radial plane

Fig. 2 Cross-sectional view of the wave propagation path.

† 숭실대학교 공과대학 기계공학과
E-mail : jokim@ssu.ac.kr
Tel : (02) 820-0662, Fax : (02) 820-0668

* 숭실대학교 대학원 기계공학과

** (주) 파나메츠

관 내벽 입사각 θ_{ps_1} 은 Snell의 법칙에 따라 유체 쪽 굴절각 θ_{ls} 로부터 다음과 같이 구한다.

$$\frac{\sin \theta_{ls}}{c_l} = \frac{\sin \theta_{ps_1}}{c_p} \quad (2)$$

$$\theta_{ps_1} = \sin^{-1} \left(\frac{c_p}{c_l} \sin \theta_{ls} \right) \quad (3)$$

식 (3)에서 얻어진 관 내벽 입사각 θ_{ps_1} 로부터 관 외벽 굴절각 θ_{ps_2} 를 다음과 같이 기하학적으로 구한다.

$$\frac{\sin(180^\circ - \theta_{ps_1})}{d/2} = \frac{\sin \theta_{ps_2}}{d/2 - t} \quad (4)$$

$$\theta_{ps_2} = \sin^{-1} \left(\frac{d/2 - t}{d/2} \sin(180^\circ - \theta_{ps_1}) \right) \quad (5)$$

여기서 d 는 관의 바깥지름, t 는 관의 두께이다.

웨이 입사각 θ_{ws} 는 다시 Snell의 법칙에 따라 관 외벽 굴절각 θ_{ps_2} 로부터 다음과 같이 구한다.

$$\frac{\sin \theta_{ps_2}}{c_p} = \frac{\sin \theta_{ws}}{c_w} \quad (6)$$

$$\theta_{ws} = \sin^{-1} \left(\frac{c_w}{c_p} \sin \theta_{ps_2} \right) \quad (7)$$

3. 굴절각 계산

측면에 위치한 외장형 초음파 유속센서의 굴절각을 계산하였다. 계산에 사용된 물성치를 Table 1에 나타내었다.

파이프 중심축 방향으로의 파이프 내 굴절각 θ_p 를 식 (3)에 의해 계산하여 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 웨지에서의 입사각이 0~26°에서 파이프로의 투과파는 종파와 횡파이다. 입사각이 26~52°에서는 종파 굴절각이 90°가 되어 관 벽으로의 투과파에는 횡파만 존재하는 모드전환 현상이 나타난다.⁽³⁾

초음파 유속 센서가 중앙에서 벗어난 위치에 배치된 경우, 유체 내 종파가 중앙에 평행하게 전파될 수 있는 θ_{ls} 의 범위와 입사각 θ_{ws} 의 범위를 Fig. 4에 나타내었다. θ_{ls} 는 0~27.3°이며, θ_{ws} 는 0~49.5°이다. θ_{ls} 가 27.3°보다 커지면, 관 내벽 입사각 θ_{ps_1} 이 90°가 되어 표면파로 전파하며 관 벽으로 투과되지 않는다.

4. 결 론

외장형 다회선 초음파 유속 센서에서 웨지와 관 벽, 유체로의 입체적 굴절을 해석하여, 굴절각을 구하였다. 계산 결과로 파이프의 중심축 방향과 원주방향에서 유체 내로 입사하는 특정 영역의 입사각 범위를 확인 하였다. 그 결과를 측면에 위치하는 외장형 초음파 유속 센서의 설계에 활용할 수 있다.

후 기

본 논문은 (주)파나메츠가 주관한 「대전테크노파크 전통 산업육성을 위한 첨단화 지원사업」을 수행하여 얻은 연구 결과임.

Table 1 Properties of materials

	materials	ρ (kg/m ³)	c_t (m/s)	c_l (m/s)
wedge	PEEK-1000	1320	1070	2612
wall	STS 304	7800	3281	5936
liquid	water	1000	-	1500

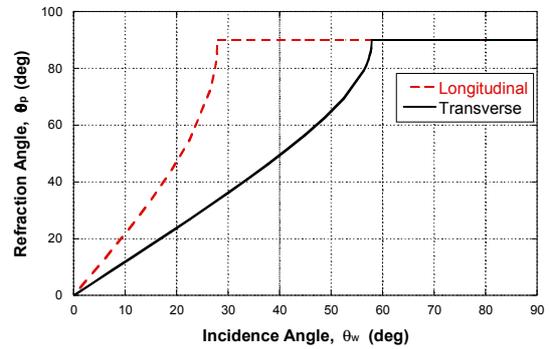


Fig. 3 Refraction angle of the wave transmitted from the wedge to the pipe wall in the axial plane.

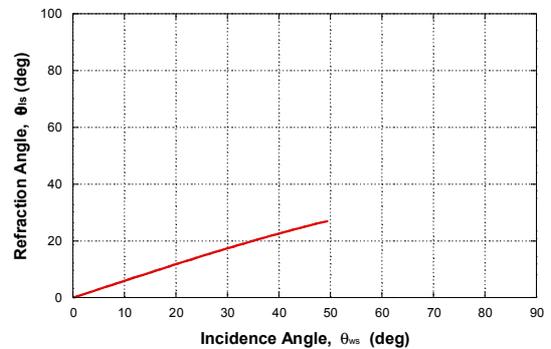


Fig. 4 Refraction angle of the wave transmitted from the wedge to the liquid in the radial plane.

참고문헌

- (1) 김진오, 2000, "초음파 센서 액추에이터", 한국소음진동공학회지, 제10권, 제5호, pp. 723-728.
- (2) Lynnworth, L. C., 1989, Ultrasonic Measurements for Process Control, Academic Press, New York, Chapter 2.
- (3) 김태연, 이정구, 김진오, 2009, "초음파 유속 센서에서 탄성파 모드 전환," 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 466-467.