

# 유량측정을 위한 초음파 전파경로 비교

## Comparison of Ultrasonic Paths for Flow Rate Measurement

김 주 완\* · 박 춘 광\* · 김 진 오† · 박 두 식\*\*  
Ju Wan Kim, Chunguang Piao, Jin Oh Kim and Doo-Sik Park

(Received January 27, 2015 ; Revised June 9, 2015 ; Accepted June 9, 2015)

**Key Words** : Ultrasound(초음파), Path(경로), Flow Rate(유량), Transducer(변환기), Transit Time(전파시간)

### ABSTRACT

The paper deals with the accuracy comparison between two kinds of ultrasonic paths for flow rate measurement. In the Z-path, two transducers are installed on the opposite sides of each other on a pipe, and the ultrasonic waves generated at one transducer propagate to arrive at the other one only by refraction. In the V-path, two transducers are installed on one side of a pipe, and the ultrasonic waves reflected at the inner wall of the pipe are received. Transit times were confirmed to identify the propagation paths by comparing the theoretically calculated results and measured ones. The flow rate measurements with two kinds of ultrasonic paths appeared very similar. It would be possible to select either of the paths by considering the advantages and disadvantages.

## 1. 서 론

센서 또는 액추에이터에 다양하게 활용되는 초음파 기술 중에 유량 측정 기술이 있다<sup>(1)</sup>. 초음파 유량계는 유속 센서 설치 방식에 따라 침습형과 외장형으로 분류된다<sup>(2)</sup>. 파이프 외벽에 센서를 부착하는 외장형 초음파 유량계는 현장 설치가 편리한 장점이 있다<sup>(2,3)</sup>. 파이프 외벽에 센서 배치에 따른 전파경로 유형에는 Fig. 1에 보인 Z-path와 V-path가 있고, 그 외에 W-path 등도 있다<sup>(4,5)</sup>. 각 유형에 각각 장단점이 있으므로, 용도에 맞게 선택되기 위해서는 우선 계측 정확도가 확인되어야 한다.

초음파 유량계용 트랜스듀서는 주로 압전소자를 기본으로 하고 썸(wedge) 형태의 입사각 조절 매질로 구성된다. 이러한 매질에서 초음파의 전파와

파이프 경계면에서의 굴절 등이 연구된 바 있다<sup>(6)</sup>. 또한 유속 측정용 초음파 트랜스듀서에서 파동 에너지 투과율이 최대인 입사 각도를 찾는 과정이 연구된 바 있다<sup>(7)</sup>.

이 논문은 유량측정을 위한 초음파 전파경로 유형 중 Z-path 방식과 V-path 방식의 정확도를 비교하고자 한다. 이를 위해 우선 초음파 전파경로에 따른 파동의 전파시간을 이론적 계산과 측정으로 확인한다. 파이프에 유동이 있는 상태에서 여러 유속의 유량 측정을 하여 기준값과 비교하고 정확도를 파악한다.

## 2. 초음파 경로 및 전파시간

### 2.1 전파경로

Z-path는 Fig. 1(a)에 보인 경로로서, 두 트랜스듀서가 서로 파이프의 반대편에 설치되어, 송신된

† Corresponding Author ; Member, Soongsil University  
E-mail : jokim@ssu.ac.kr  
\* Member, Soongsil University  
\*\* Pana Korea Co., Ltd.

‡ Recommended by Editor Heung Soo Kim  
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

초음파가 굴절 투과만을 거쳐 수신된다. V-path는 Fig. 1(b)에 보인 경로로서, 두 트랜스듀서가 같은 편에 설치되어, 유체를 지난 초음파가 배관 내벽에서 반사된 후 수신된다. 두 가지 전파경로에 대해서 트랜스듀서가 설치된 실제 사례가 Fig. 2에 사진으로 보여 있다.

전파경로를 선택할 때에는 배관 내벽의 손상도, 설치가능 공간 및 배관으로의 접근성 등을 고려해야 한다. V-path 방식은 유체에서의 초음파 전파경로가 Z-path보다 길어 전파시간차를 확보하기에 용이하기 때문에 배관 내부의 부식이 우려되지 않는 경우 일반적으로 활용할 수 있다. 또한 두 트랜스듀서를 함께 고정시키는 지그(zig)를 사용할 수 있어서 설치가 쉽고, 현장 여건상 사용자가 해당 배관의 반대편으로 접근하기 어려운 경우에 특히 유용하다. Z-path 방식은 전체 전파거리가 짧으며, 거치는 경계면의 수가 최소한으로 구성된 경로이므로 탄성파 에너지 전달률이 가장 높다. 따라서 신호에 노이즈가 크거나, 배관 내벽의 상태가 좋지 않은 경우에 사용할 수 있다. 다만 두 트랜스듀서가 서로 반대편에

설치되므로 사용자는 정확하게 초음파 전파경로에 해당하는 위치에 설치가 가능하도록 주의해야 한다. 또한 유체에서의 초음파 전파거리가 짧아 유량 측정 정확도가 V-path에 비해 좋지 않을 수 있으므로 특별하게 V-path로 설치할 수 없는 경우에 사용한다.

유량을 측정하기에 앞서, 수신된 파동 신호가 예상경로로 전파된 것인지 확인한다. 초음파 송신과 수신에 사용되는 트랜스듀서는 Fig. 3(a)에 보인 것처럼 자체 제작한 것이다. 이 트랜스듀서의 설계는 앞서 보고된 과정을 따랐다<sup>(6)</sup>. 초음파 전파경로의 일부가 Fig. 3(b)에 도시되어 있다. 전파 중 초음파가 통과하는 매질들에서의 전파속도<sup>(6)</sup>를 Table 1에 기재하였다.

초음파는 웨지에서 종파로 진행하고, 파이프에서 횡파로, 유체에서는 다시 종파로 진행한다<sup>(6)</sup>. 이 때의 입사각과 굴절각의 관계는 Snell의 법칙으로 설명된다<sup>(8,9)</sup>. 입사각<sup>(7)</sup>과 굴절각으로부터 각 재질에서의 전파거리를 구한다. 사용된 파이프의 안쪽 지름은 108.4 mm이고 두께는 3 mm이다. Fig. 3(b)에

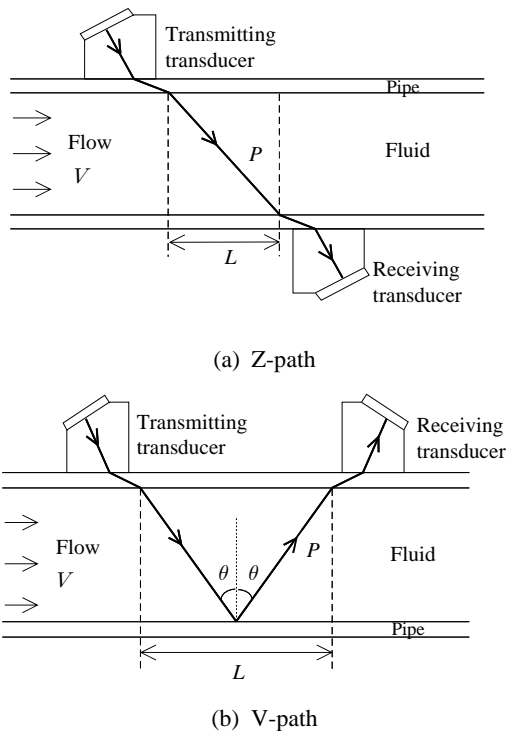
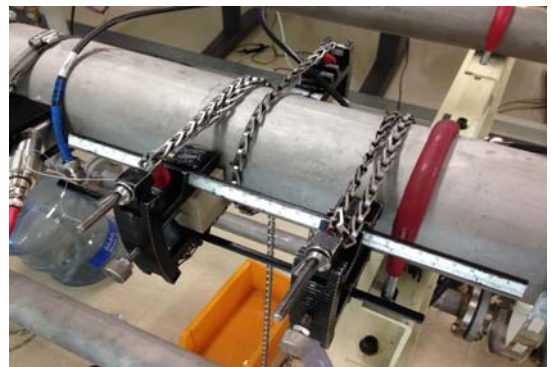


Fig. 1 Schematic diagrams of ultrasonic paths



(a) Z-path



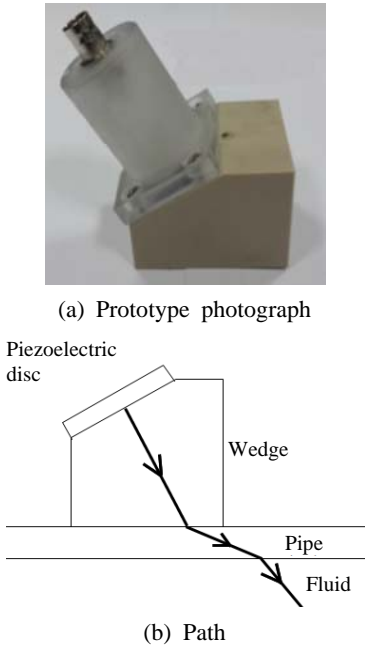
(b) V-path

Fig. 2 Photograph of experiment

도시된 경로의 거리는 웨지, 파이프, 유체에서 각각 34, 4, 113 mm이다.

**2.2 전파시간**

매질 별 전파속도를 적용하여 Fig. 1의 (a)와 (b)의 경로에 대한 초음파 전파시간을 계산한다. 이처럼 계산된 전파시간을 Table 2에 기재하였다. 파동



**Fig. 3** Transducer

**Table 1** Wave speed at the materials

Material	Wave speed(m/s)	
	$C_L$	$C_T$
Wedge(plastic)	2612	1070
Pipe(STS 304)	5936	3281
Fluid(water)	1500	-

**Table 2** Comparison of transit times

Path	Transit time( $\mu$ s)	
	Calculated	Measured
Wedge	13.02	-
Pipe	1.19	-
Fluid	77.40	-
Z-path	105.82	108 $\pm$ 2
V-path	183.22	184 $\pm$ 1

전파시간 계산에 사용된 전파거리를 이용하여 각 경로에 따른 설치거리를 계산 후 트랜스듀서를 설치하였다. Z-path에서 설치거리는 웨지, 파이프, 유체에서 각 전파경로에 매질에서 입사각을 고려하여 구한다. 이 때의 설치거리는  $L = \sum P_i \sin\theta_i$ 이다. 여기서  $P_i$ 는 매질별 전파경로이고,  $\theta_i$ 는 해당 매질에서의 입사각이다. V-path의 경우 Z-path의 설치거리에 유체에서의 초음파 전파 수평거리만 2배가 되며 이와 같이 계산된 설치거리  $L$ 은 Z-path에서 38.2 mm이고 V-path에서 71.4 mm이다.

실험을 통해 파동 전파시간을 측정한다. 실험에 사용된 계측기는 펄스 송수신기(GE Panametrics 5072PR)와 오실로스코프(Tektronix TDS3032)이고, 이들은 Fig. 4에 보인 바와 같다. 펄스 신호를 0  $\mu$ s에 송신하여 Z-path와 V-path를 통해 수신한 파형을 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5(a)는 Z-path를 통해 수신된 파형이다. 펄스 전파시간은 108  $\mu$ s로 측정되었다. 측정된 전파시간을 Table 2에 기재하였고 계산결과와 비교하여 서로 유사함을 확인하였다.

Fig. 5(b)는 V-path를 통해 수신된 파형이다. 50  $\mu$ s와 184  $\mu$ s일 때 펄스 수신파가 나타났다. V-path에서는 트랜스듀서가 같은 편에 설치되기 때문에 50  $\mu$ s에서 수신된 펄스는 V-path를 따라 전파한 파동이 아니라 파이프 표면을 따라 전파된 표면파이다. 표면파의 전파속도는 횡파 속도의 약 0.9배<sup>(8)</sup>인 2950 m/s 정도이므로, 두 트랜스듀서 설치거리 70 mm에서 전파시간이 24  $\mu$ s이다. 여기에 두 웨지에서의 전파시간의 합인 26  $\mu$ s를 더하면 50  $\mu$ s가 된다. 측정된 V-path 전파시간 184  $\mu$ s를 Table 2에 기재하였다. 측정된 전파시간이 계산결과와 유사하다. 두 트랜스듀서가 경로에 따라 유량 측정에 적합하게 설치되었음이 확인되었다.



**Fig. 4** Pulser/receiver & oscilloscope

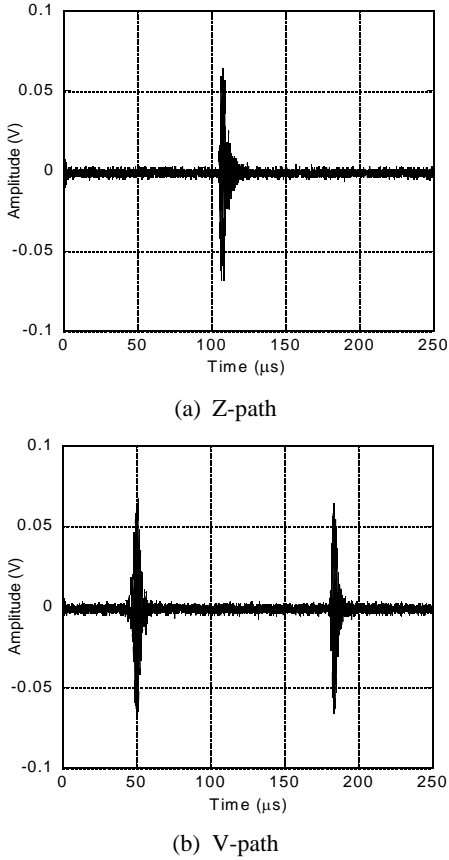


Fig. 5 Received signals of Z-path and V-path

### 3. 유량 측정

#### 3.1 초음파 유속 측정 원리

Fig. 1에서 전파 경로에 표시된 화살표는 유동의 순방향, 즉 하류방향으로 전파하는 경우를 나타낸다. 이 때 전파속도는  $u_d = u_0 + V \sin \theta$ 이다. 여기서  $u_0$ 는 정지 유체에서 초음파 전파속도이고,  $V$ 는 유속이며, 이들의 관계를 Fig. 6에 도시하였다. 유동의 역방향, 즉 상류방향으로 전파하는 경우에는 전파속도가  $u_u = u_0 - V \sin \theta$ 이다. 두 전파속도의 차이로부터 다음 관계식이 나온다.

$$V = \frac{u_d - u_u}{2 \sin \theta} \quad (1)$$

Fig. 1에 표현된 유체에서 초음파 전파거리를  $P$ , 그에 해당하는 유체 이동거리를  $L$ 이라 하면,  $u_d = P/t_d$ ,

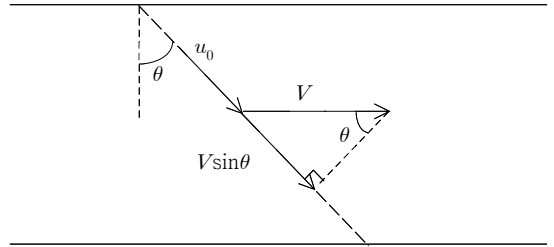


Fig. 6 Velocity components of flow and ultrasound

$u_u = P/t_u$ ,  $\sin \theta = L/P$ 이다. 여기서  $t_d$ 와  $t_u$ 는 각각 초음파 전파시간이다. 따라서 식 (1)은 다음과 같이 표현된다.

$$V = \frac{P^2}{2L} \left( \frac{1}{t_d} - \frac{1}{t_u} \right) \quad (2)$$

거리 정보와 시간 측정 결과로부터 유속  $V$ 를 알 수 있다.

#### 3.2 유량 측정 결과

수신파에서 파동 전파시간을 측정하고 식 (2)에 의해 유속을 구한 후 파이프 단면적을 곱하여 유량으로 환산한다. 파동 전파시간  $t_u$ 와  $t_d$ 를 측정할 때, 압전원판이 파동의 송수신이 가능하므로 송수신의 연결을 바꾸거나 컨트롤러를 사용하면 트랜스듀서를 바꿔 설치할 필요가 없다. 전파시간차를 구할 때 실험에 사용된 파이프의 안쪽 지름은 108.3 mm로서, 단면적은 9212 mm<sup>2</sup>이다. 이와 같이 측정된 유량을 전자유량계의 수치와 비교하였다. 측정 유량 범위는 189~1729 L/min이며, 실험에 사용된 펌프의 용량제한으로 인해 밸브를 조정해야하는 200~500 L/min의 유량 구간은 실험에서 제외하였다. 유량이 안정된 후 매 초마다 측정되는 유량을 30초 동안 확인하여 평균값을 취하였다. 계측기로는 Fig. 7에 보인 컨트롤러(GE Panametrics AT868)를 사용하였고, 기준기로는 교정된 전자유량계(ABB FEP311)를 사용하였다.

Table 3과 Table 4는 각각 Z-path와 V-path에서 AT868을 통해 측정된 유량을 기준기인 전자유량계와 비교한 결과를 보여준다. 측정된 유량은 각 유량마다 30회 측정된 평균값과 표준편차를 나타낸다. Table 3의 Z-path에서는 180 L/min 영역의 유량을 제외한 전 구간에서 평균 8.2±0.91% 균일한 오차율이

**Table 3** Comparison of flow rates measured at Z-path

Flow rate(L/min)		Difference (%)
Reference	Measured	
189±0.4	185±0.7	2.1
561±0.7	511±2.0	9.0
755±1.0	686±2.4	9.2
1005±1.1	939±1.8	6.6
1242±1.0	1150±3.3	7.4
1503±2.0	1376±3.6	8.4
1729±2.2	1584±5.1	8.4

**Table 4** Comparison of flow rates measured at V-path

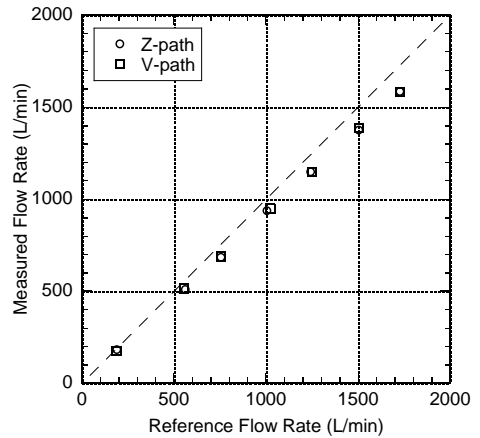
Flow rate(L/min)		Difference (%)
Reference	Measured	
189±0.4	175±0.7	7.4
553±0.6	515±0.9	6.9
754±0.9	689±1.5	8.6
1024±1.2	950±0.8	7.3
1252±2.7	1146±1.9	8.5
1504±1.7	1388±3.3	7.7
1727±1.9	1586±3.1	8.2



**Fig. 7** GE AT868 controller

발생함을 확인할 수 있다. 또한 Table 4의 V-path에서는 전 구간에서 평균 7.8±0.62 %의 균일한 오차율이 발생하였다.

Table 3과 Table 4의 데이터를 Fig. 8에 그래프로 나타내었다. Z-path 방식과 V-path 방식의 유량 측정 결과가 매우 유사하게 나왔다. 전자 유량계로 측정한



**Fig. 8** Comparison between the measured flow rates of Z-path and V-path

기준 값과 비교할 때, 유량 측정 결과는 경로 방식에 무관하게 8 % 내외의 오차율을 갖는 유량 범위가 있다. 이러한 오차의 원인은 1회선 초음파 유량계가 유동상태에 민감하고, 트랜스듀서 설치위치의 파이프 직관부 거리에 따라 영향 받을 수 있기 때문으로 추정된다. 일반적으로 초음파 유량계에서 1회선보다 다회선인 경우 유동 영향에 둔감하여 측정 불확도가 낮아진다<sup>(10)</sup>. 트랜스듀서의 설치위치는 환경부지침인 상류 10D 이상, 하류 5D 이상의 직관부를 확보하였으나, 이러한 경우에도 오차가 발생할 수 있다. 따라서 상류의 직관부를 40D 이상 충분히 확보한다면 오차를 줄일 수 있을 것으로 예상된다. 또한 유속에 따라 저속구간은 오차가 크게 나타날 수 있다<sup>(11)</sup>. 이렇게 균일한 비율로 발생된 오차는 보정계수  $k$ 를 적용하여  $V' = kV$ 로 보정하면 정확도를 높일 수 있다. 앞서 측정된 유량 중 500~1700 L/min의 구간에 대하여 보정계수를  $k = 1.08$ 로 적용하면 오차율을 2 % 이하로 낮출 수 있다.

**4. 결 론**

초음파 유량측정에 사용되는 두 가지 초음파 전파 경로를 비교하였다. 유량 측정에 앞서 먼저 두 경로에서 초음파가 이론적인 전파경로에 따라 수신되었는지 확인하기 위해 수신된 신호의 파형을 획득하고 전파시간을 확인하였다. Z-path에서는 계산 결과와 유사한 시간에서 하나의 신호가 수신되었고, V-path

에서는 계산 결과와 유사한 신호와 그보다 앞서 발견된 표면파가 존재했다. 송수신을 위한 두 트랜스듀서가 같은 편에 설치되는 V-path의 특성상 표면파가 수신되었으나, 두 경로 모두 이론과 유사한 수신시간을 갖는 신호가 확인되어 유량 측정을 위한 초음파 전파경로에 맞게 트랜스듀서가 설치되었음을 확인하였다.

유량 측정 결과는 기준 값과 비교할 때 Z-path와 V-path에서 모두 약 8%의 오차율을 갖는 유량 범위가 있음을 보여준다. 이는 경로방식과 무관한 정확도를 가짐을 나타내며, 발생한 오차율은 보정을 통해 정확도를 확보할 수 있다는 것을 나타낸다. Z-path 방식과 V-path 방식 간에는 유량 측정 결과가 매우 유사하게 나타났다.

해당 초음파 유량계의 설치를 각 경로 방식의 장단점을 고려하여 용도에 맞게 선택하여 사용할 수 있다.

## 후 기

이 연구는 한국파나메트릭스(주)의 산학연구과제 지원으로 수행되었음.

## References

(1) Kim, J. O., 2000, Ultrasonic Sensors and Actuators, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 10, No. 5, pp. 723~728.

(2) Lynnworth, L. C., 1989, Ultrasonic Measurements for Process Control, Academic Press, New York, Ch. 4.

(3) Lee, E. S., Kwon, O. H. and Rho, M. H., 2003, A Study on the Ultrasonic Flow-meter System Development, Journal of Industrial Science and Technology Institute, Vol. 17, No. 1, pp. 55~62.

(4) Funck, B. and Mitzkus, A., 1996, Acoustic Transfer Function of the Clamp-on Flowmeter, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 43, No. 4, pp. 569~575.

(5) Lee, Y. J. and Im, J. I., 2006, Development and Evaluation of the Piezoelectric Transducer for the Transit-time Ultrasonic Flowmeters, Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea, Vol. 43, No. 4, pp. 30~34.

(6) Kim, T. E., Chun, H. Y., Kim, J. O. and Park, J., 2010, Mode Conversion and Energy Transmission Ratio of Elastic Waves, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 3, pp. 296~307.

(7) Piao, C., Kim, D. J. and Kim, J. O., 2015, Energy Transmission of Elastic Waves in Ultrasonic Transducers, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 25, No. 2, pp. 124~132.

(8) Achenbach, J. D., 1975, Wave Propagation in Elastic Solids, North-Holland, Amsterdam, Chapter 5.

(9) Rose, J. L., 1999, Ultrasonic Waves in Solid Media, Cambridge University Press, Cambridge, Chapter 5.

(10) Moore, P. I., Brown, G. J. and Stimpson, B. P., 2000, Ultrasonic Transit-time Flowmeters Modelled with Theoretical Velocity Profiles: Methodology, Measurement Science and Technology, Vol. 11, No. 12, pp. 1802~1811.

(11) Lee, D. K. and Cho, Y., 2011, Error Characteristics of Clamp-on Ultrasonic Flowmeters Depending on Location of Sensors and Downstream Straight Run of Bent Pipe, Transactions of the KSME (B), Vol. 35, No. 8, pp. 861~868.



**Ju Wan Kim** received the B.S. degree in mechanical engineering from Soongsil University in 2012. He worked as an engineer at Hanwha Engineering & Construction Corp. for two years. Since 2014 as a graduate student at Soongsil, he has been working on ultrasonic wave propagation.



**Chunguang Piao** received the M.S. degree in mechanical engineering from Soongsil University in 2013. He is now a Ph.D. candidate. During his stay at Soongsil as a graduate student, he has been working on ultrasonic wave propagation and vibration characteristics of piezoelectric transducers.



**Jin Oh Kim** received the B.S. and M.S. degrees in mechanical engineering from Seoul National University in 1981 and 1983, respectively, and the Ph.D. degree from University of Pennsylvania in 1989. Since 1997, he has been

with the Faculty of Soongsil University, where he is currently a Professor of mechanical engineering. His research interests are in the areas of ultrasonic sensors and actuators using mechanical vibrations and human-body dynamics for rehabilitation robots.



**Doo-Sik Park** received the B.S. degree in electronics engineering from Soongsil University in 1996. He started working on ultrasonic flow meters when he joined Panametrics Korea in 1996. From 2002 to 2008 he worked as a

technology business executive at PanaEng, which was the base of the present company. In 2008 he founded Pana Korea Co., Ltd. and he has been working as a chief executive officer since then.