

# 캐비테이션 발생 저감을 위한 상수도용 반사판 초음파 유량계의 내부유동 특성 연구

김성하<sup>1</sup>, 김찬후<sup>1</sup>, 박성영<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>국립공주대학교 일반대학원 기계공학과, <sup>2</sup>국립공주대학교 미래자동차공학과

## Study on the Internal-Flow Characteristics of the Water Ultrasonic Flow-Meter with Reflect-Plate to Reduce Cavitation Generation

Seong Ha Kim<sup>1</sup>, Chan Hoo Kim<sup>1</sup>, Sung-Young Park<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Dept, Kongju National University

<sup>2</sup>Future Automotive Engineering Dept, Kongju National University

**요약** 초음파 유량계는 구동부가 없다는 장점으로 산업 현장에 적용되기 시작하였다. 최근 다양한 규모와 다양한 유체에 적용이 가능하다는 장점 덕분에 폭넓게 사용되고 있다. 초음파 유량계는 초음파가 진행함과 동시에, 전달하는 매질이 이동하면 초음파의 속도에 매질인 유체가 이동하는 속도가 합해진 속도로 이동하게 된다. 이로 인하여 송수신된 신호는 시간차가 발생하고, 이 시간차를 이용하여 유체의 속도 및 유량을 계산한다. 이러한 초음파 유량계의 특성상 측정 중에 유동이 한쪽으로 치우치거나 캐비테이션이 발생하게 될 경우, 측정 오차의 원인이 된다. 본 연구에서는 반사판 초음파 유량계의 측정 정도 향상을 위하여 전산유체역학(CFD : Computational Fluid Dynamics, 이하 CFD) 해석을 수행하고, 그 결과를 분석하였다. 본 연구의 대상은 상수도용 반사판 초음파 유량계이다. 기존 반사판을 장착한 초음파 유량계는 반사판 및관이 좁아지는 Neck부분의 형상으로 인하여 큰 압력강하량이 발생하였으며, 캐비테이션의 발생과 유량이 편중되는 것을 확인하였다. 유동이 가장 개선된 모델에서는 기존 모델 대비 압력강하량이 51.2 % 감소하고, 캐비테이션의 발생 체적은 76.8 % 감소하는 것을 확인하였다.

**Abstract** Ultrasonic flow meters began to be applied to industrial sites with the advantage of not having a driving unit. Recently, they have been used widely because they can be applied to various sizes and various fluids. A difference in the transmission and reception time of ultrasonic waves occurs according to the fluid speed, and the speed and mass flow rate are calculated using this time difference. The measurement method of the ultrasonic flow meter is greatly affected by the flow. Flow bias and cavitation cause significant errors in the flow meter measurements. In this study, CFD analysis was performed to improve the measurement error of the ultrasonic flow meter, and the results were analyzed. The subject of this study was an ultrasonic flow meter equipped with a reflect plate. The ultrasonic flow meter equipped with a reflect plate caused a significant pressure drop due to the shape of the reflect plate and the neck part where the pipe narrows. In addition, cavitation and flow rate bias occurred. In the model with the most improved flow, the pressure drop was decreased by 51.2 %, and the cavitation volume decreased by 76.8 % compared to the original model.

**Keywords** : Ultrasonic, Flow-Meters, Reflect-Plate, CFD, Error, Flow, Cavitation

본 연구는 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다. (2021RIS-004)

\*Corresponding Author : Sung-Young Park(Kongju National Univ.)

email: sungyoung@kongju.ac.kr

Received November 21, 2023

Revised December 18, 2023

Accepted February 6, 2024

Published February 29, 2024

## 1. 서론

초음파 유량계는 구동부가 따로 없다는 장점으로 인하여 산업현장에 적용되기 시작하였다[1,2]. Fig. 1은 다양한 초음파 유량계 중 반사판을 내장한 초음파 유량계의 측정 방식을 나타낸 것이다. 초음파 유량계의 통신은 Fig. 1 (a)와 같이 입구측 초음파 센서에서 송신된 신호가 45° 기울어져 설치된 두 개의 반사판을 거쳐 출구측 초음파 센서에서 수신된다. 반대로, 출구측 초음파 센서에서 송신한 신호도 동일한 경로를 이동하여 입구측 초음파 센서에서 수신된다. 센서간 통신에 사용되는 초음파의 속도는 매질에 따라 속도가 달라진다. 초음파의 속도  $C$ 는 매질의 경도  $B$ 에 비례한 영향을 받고, 매질의 밀도  $\rho$ 에 반비례한 영향을 받는다. 매질에서 초음파의 속도  $C$ 는 Eq. (1)을 이용하여 계산할 수 있다[3,4].

$$C = \sqrt{B/\rho} \quad (1)$$

where,  $C$  is velocity of ultrasonic waves in a medium,  $B$  is hardness of a medium,  $\rho$  is density of a medium

초음파 센서간 통신에서 수신되는 신호는 Fig. 1 (b)와 같이 수집된다. 수집된 신호 중, 입구측 초음파 센서에서 송신하여 출구측 초음파 센서에 수신된 신호는  $t_1$ 의 시간이 소요된다. 반대 방향으로 송수신된 신호는  $t_1$ 보다 긴  $t_2$ 의 시간이 걸리게 된다. 이는 유체의 이동 방향과 초음파의 진행방향이 평행할 때에, 전달 속도에 영향을 미치기 때문이다. 초음파의 이동 경로와 유체의 진행 방향이 평행한 거리를  $L$ , 유체의 이동 속도를  $V$ 라고 하였을 때,  $t_1$ 과  $t_2$ 는 각각 Eq. (2)와 Eq. (3)로 표현될 수 있다. 측정된 시간  $t_1$ 과  $t_2$ 의 시간차이를 이용하여 유체의 속도  $V$ 를 산출할 수 있다. 유량  $Q$ 는 산출된 유체의 속도  $V$ 에 단면적  $A$ 를 곱한  $Q = VA$ 로 계산된다[5-7].

$$t_1 = L/(C + V) \quad (2)$$

$$t_2 = L/(C - V) \quad (3)$$

where,  $t_1$  is time of transmission as same direction with a medium,  $t_2$  is time of transmission as reverse direction with a medium,

$L$  is distance between the direction of ultrasonic travel and the direction of fluid travel in parallel,  $V$  is velocity of movement of the medium

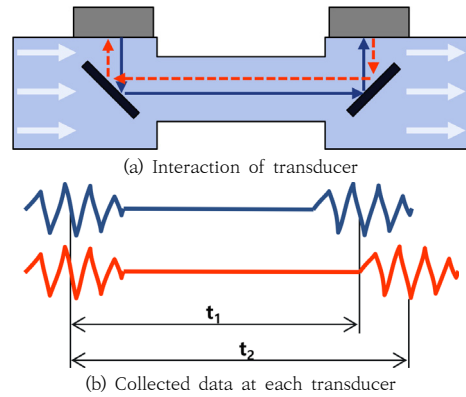


Fig. 1. Ultrasonic flow-meter measurement method

초음파 유량계의 측정 방식은 다양한 규모의 유량 측정에 사용가능하다. 또한 측정 가능 대상도 액체에서 기체로 확장되었다. 측정 규모와 측정 대상의 확장은 초음파 유량계의 보급을 가속화 시켰다[8-11]. 초음파 유량계가 널리 활용되면서 초음파 유량계에 대한 다양한 연구들이 진행되고 있다.

초음파 유량계에 대한 선행연구로 김영준은 버터플라이 밸브가 설치된 위치와 개폐정도에 따른 유량별 오차 특성을 CFD 해석을 통해 분석하여 개폐정도에 따라 오차가 크게 발생하는 위치가 다른 것으로 나타남을 확인하였다[12]. Hongliang Zhou는 다선 회로 초음파 유량계의 정밀도를 향상시키기 위한 연구를 실험으로 진행하여 여러 개의 경로에 대한 측정값을 평균하여 기준파를 얻는 방법이 정밀도 향상에 도움이 될 수 있음을 확인하였다[13]. Zhaoli Yan는 초음파 신호의 위상 복조를 이용하여 유체의 캐비테이션을 검출 하는 방법에 대해 실험적 연구를 진행하여 캐비테이션의 인식률이 98 %로 우수한 결과를 나타냈으며 파이프라인에서 층류와 난류를 구별 가능한 것으로 나타났다[14]. Jan G. Drenthen는 초음파 유량계를 최적화 하는 환경과 실제 환경에 적용되었을 때의 오차를 보기 위한 연구를 진행하여 계측기의 최적화를 진행한 환경이 실제 환경에서보다 열악하기에 실제 환경에서도 사용가능한 오차값을 보였다[15]. Weiguo Zhao는 반사판 내장형 초음파 유량계의 전력 사용량을 줄이는 연구를 진행하여 0.21 mW의 전력 소모량으로 오차율이 1 % 이내로 나타났다[16].

초음파 유량계에 대한 다양한 선행연구들이 진행되었고, 초음파 센서의 배치와 회신 수, 설치 환경에 따른 측정 정밀도에 대한 연구들이 주를 이루었다. 하지만 측정 거리가 충분하여 반사판을 이용하지 않는 초음파 유량계에 대한 연구들이 대부분이다. 관의 직경이 작은 경우는 측정 거리가 짧아져 측정의 정밀도와 안정성이 저해되는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 반사판을 이용하여 측정 거리를 연장하는 방식으로 측정 정밀도와 안정성을 확보하고자 하는 제품들이 개발되고 있다. 하지만, 측정 거리를 늘리기 위해 장착한 반사판으로 인하여 발생하는 유동 특성 및 현상으로 측정 오차를 유발할 수 있을 것으로 예상된다. 유량의 치우침과 같은 유동 특성이 예상되고, 유량이 증가하게 되면 캐비테이션의 발생도 우려된다. 캐비테이션은 급격한 유동 단면적의 변화로 인하여 유속이 증가함에 따라 유체의 압력이 감소하게 되면서 임계 압력 이하로 감소하게 되면 발생하게 된다[17]. 캐비테이션이 발생하게 되면 초음파를 이용하여 측정하는 유량계에서는 다양한 오차의 원인으로 작용하게 된다. Fig. 2는 초음파 유량계에서 캐비테이션이 발생하게 될 경우, 오차를 일으키는 이유를 나타낸 것이다. Fig. 2 (a)는 초음파가 매질 사이의 경계층에서 나타내는 현상을 나타낸 것이다. 경계층에는 반사(reflection)와 굴절(refraction)같은 다양한 현상이 발생한다. 반사는 매질 사이의 경계층에서 원래의 진행방향과 달리 일부가 본래의 매질로 진행방향을 바꾸는 현상이다. 반사되는 크기는 두 매질의 음파 저항의 차이에 비례하다. 음파 저항  $Z$ 는 밀도  $\rho$ 와 매질에서의 초음파 속도  $C$ 와 비례하여  $Z = \rho \times C$ 로 계산된다. 굴절은 초음파가 매질의 경계면에 비스듬히 입사할 때, 진행 방향이 바뀌는 현상이다. 굴절의 정도는 두 매질의 밀도 차에 영향을 받는다. Fig. 2 (b)는 캐비테이션으로 생긴 기포 방울이 소멸하면서 발생하는 충격파를 나타낸 것으로, 초음파 신호를 송수신하는 센서에 충격파로 인한 신호가 수신되면서 측정 오차를 일으키는 원인으로 작용되기도 한다. 또한 캐비테이션으로 인해 생기는 영역도 측정 오차의 원인이 된다. 그 이유는 초음파의 속도가 물과 공기에서 다르기 때문이다. 앞서 나온 Eq. (1)을 이용하면 물에서 초음파 속도는  $1,540 \text{ m/s}$ 이고, 공기에서 초음파의 속도는  $331 \text{ m/s}$ 이다. 이러한 속도차이로 캐비테이션이 발생한 영역을 지나는 신호는 본래의 송수신 시간보다 지연되어 도달하며 오차를 야기한다[18,19].

본 연구에서는 관의 직경이 작은 경우, 반사판으로 측

정 거리를 연장하여 측정 안전성과 정밀도 향상을 하고자 하는 반사판 장착형 초음파 유량계를 대상으로 하였다. 연구는 반사판에 의해 발생하는 유동특성 및 현상으로 인하여 측정에 저해되는 유동을 개선하고자 CFD 해석을 진행하였다.

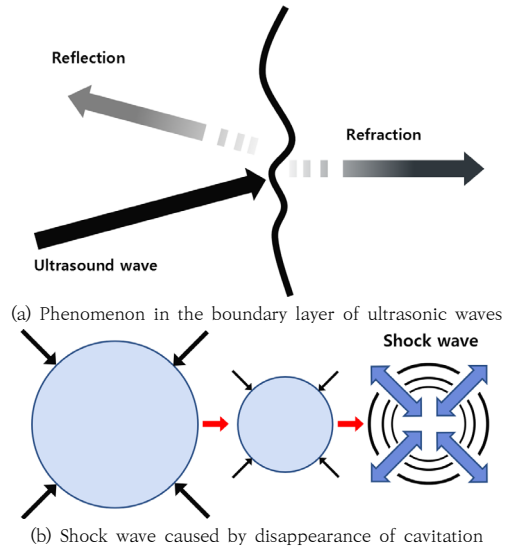


Fig. 2. Factors that caused the error of ultrasonic flow meters

## 2. 초음파 유량계 해석

### 2.1 초음파 유량계 구조 및 유동 영역

Fig. 3은 반사판을 장착한 초음파 유량계의 구조 및 해석을 진행할 4종의 유동영역을 나타내고 있다. 해석을 통해 개선하고자 하는 초음파 유량계는 Fig. 3 (a)와 같이 초음파 센서 2개와 반사판 2개가 설치되어 유량을 측정하는 모델이다. 초음파 센서는 각각 입·출구 상부에 설치되어 있으며, 초음파센서 사이의 통신을 위해 설치된 반사판은 각각  $45^\circ$  기울어져 마주보고 있다. 또한 초음파 유량계는 가운데를 중심으로 출입구가 대칭을 이루고 있다. Fig. 3 (b)는 초음파 유량계의 내부 유동 영역이다. 내부 유동 영역은 대칭이므로 입구측의 형상만을 나타냈다. 초음파 유량계의 출입구 직경은  $17.7 \text{ mm}$ 이며, 반사판은  $13 \times 9.5 \text{ mm}^2$ 의 단면적으로 두께는  $1.5 \text{ mm}$ 이다. 기존 초음파 유량계의 유동영역인 BASE모델의 경우, 반사판의 모서리에 Fillet이 적용되어 있지 않고 얇은 판으로 이어주는 Neck 부분에는  $1.4 \text{ mm}$ 의 작은

Fillet이 적용되어 있다. 특히 상부에는 초음파 센서의 매립으로 인해 각진 모서리를 가진 형상이다. M모델은 BASE모델의 Neck 부분에 적용되어 있는 1.4 mm의 Fillet이 12.5 mm로 변경된 모델이다. P모델은 BASE모델의 반사판 모서리에 1.25 mm의 Fillet을 적용한 모델이다. MP모델은 BASE모델의 반사판에 1.25 mm의 Fillet이 적용되고, Neck 부분에 12.5 mm의 Fillet이 적용된 모델이다.

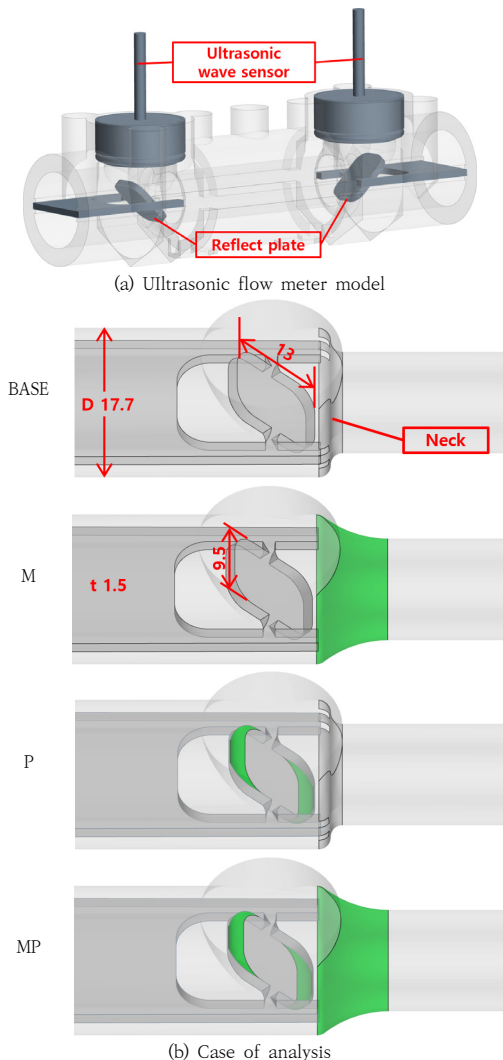


Fig. 3. Ultrasonic flow meter model and analysis case

## 2.2 해석 모델 격자 및 해석 조건

Fig. 4는 해석용 모델 및 격자를 나타낸 것이다. 해석용 모델의 입·출구 직경은 17.7 mm이다. 해석의 유동

안정화를 위해 Fig. 4 (a)와 같이 관 직경의 10배인 177 mm 씩 입·출구를 연장하였다. 해석을 위한 격자는 Polyhydral mesh type을 적용하였으며, Base size는 1 mm로 설정하였다. 벽에서 발생하는 저항을 고려하기 위해 Prism layer는 5개를 적용하였다. 반사판 주변에는 유동 흐름이 불안정 할 것으로 예상된다. 유동 흐름이 불안정할 것으로 예상되는 반사판 주변은 Volume metric mesh 기능을 적용하여 더 조밀한 격자를 생성하도록 하였다. 적용된 설정에 따라 약 187 만 개의 Cell로 구성된 격자가 생성되었으며, 관의 길이 방향으로 자른 단면은 Fig. 4 (b)와 같은 격자 구조로 형성되었다.

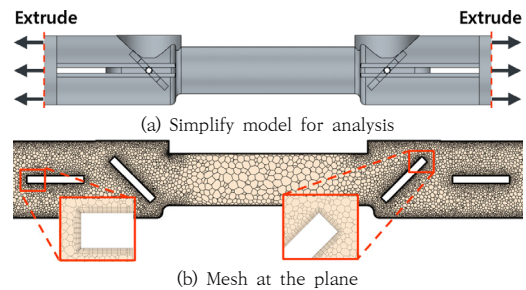


Fig. 4. Model and mesh for analysis

해석을 위해 상용 소프트웨어인 Star CCM+를 사용하였다. 해석은 시간에 따른 캐비테이션의 발생 및 소멸을 확인하고자 Unsteady로 가정하였다. 계산 모델은 K-epsilon turbulence 모델을 적용하였으며, 액체와 기체 사이에서 발생하는 상호작용에 대한 해석을 위한 Multi-phase 계산 모델로 Schnerr-Sauer를 적용하였다. 해석 조건은 177 mm 연장된 입구에서 H<sub>2</sub>O가 100 LPM의 체적 유량 속도로 통과하는 것으로 설정하였다. 해석 시간은 10<sup>-4</sup> s의 시간간격으로 0.1 s까지의 해석을 진행하였다.

## 3. 해석 결과

### 3.1 모델별 유량계 내부 유동 특성

Fig. 5는 모델별 단면에서의 유동 방향과 속도를 나타낸 것이다. 기존 초음파 유량계인 BASE모델은 입구측 반사판 모서리에서 박리현상이 발생하여 재순환 영역이 형성되었다. 이 영역으로 인하여 반사판 상부를 통과하는 유체는 실제 모델의 유동 영역보다 좁은 단면적에 유량이 편중되어 통과하는 것으로 나타났다. 또한 급격히

좁아지는 Neck부분으로 인해 앞쪽에 정체구간이 형성되어, 유동은 급격한 방향전환을 하며 하부쪽으로 진행방향이 바뀌었다. 편중되어 빨라진 속도로 하부쪽을 향하는 유동은 Neck부분에서 박리현상이 발생하며 재순환 영역이 형성되었다. 형성된 재순환 영역 및 정체구간으로 인하여 편중된 유체는 좁은 관로 내에서의 평균 유체 속도인  $15.1\text{ m/s}$ 에 비해서 약 55 % 높은  $23.4\text{ m/s}$ 로 높은 최대 속도 값으로, 불균일한 속도분포를 보였다. Neck 부분의 Fillet 값을 크게 수정한 M모델과 MP모델은 Neck부분 앞쪽에 형성되던 정체 구간이 완화되었으며, 박리현상으로 형성되었던 재순환 영역이 해소되었다. P모델과 MP모델은 Fillet이 적용되지 않은 모델에 비해 입·출구의 반사판 상하부를 지나는 유동 영역이 더 넓게 형성되는 것으로 나타났다. 형상에 따른 유동의 변화로 인해 M모델, P모델, MP모델은 BASE 모델 대비 각각 최대 속도값이 20.5 %, 7.2 %, 26.1 % 개선되어  $18.6\text{ m/s}$ ,  $21.7\text{ m/s}$ ,  $17.3\text{ m/s}$ 로 나타났다. 특히 MP 모델은 평균 속도 대비 14.6 % 높은 최대 속도 값으로, 55 % 높은 BASE 모델에 비해 상당히 균일한 속도 분포를 나타냈다.

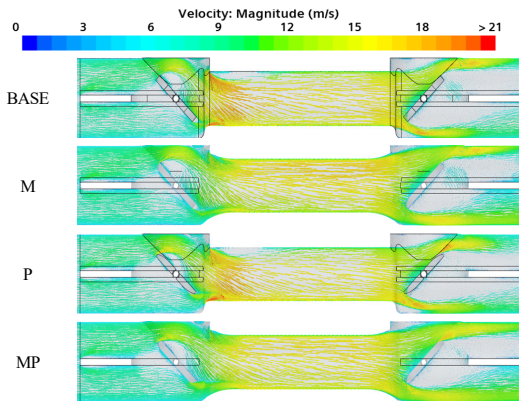


Fig. 5. Vector scene at the plane section(velocity)

Fig. 6은 모델별 단면에서의 압력 분포를 나타낸 것이다. 기존 초음파 유량계인 BASE모델은 입·출구에서 압력 차이가 가장 크게 나타났으며, P모델, M모델, MP모델 순서로 크게 나타났다. 모델별 경향은 BASE 모델과 P모델이 대체로 비슷한 경향이 나타났고, 관 하부쪽에 유량이 집중되면서 빨라진 속도에 의해 저압의 영역이 형성되었다. P모델과 MP모델은 BASE모델, M모델 대비 입구측 반사판 직후에 재순환 영역으로 인해 형성되는 저압 영역이 더 아래쪽에 형성되는 것으로 나타났다.

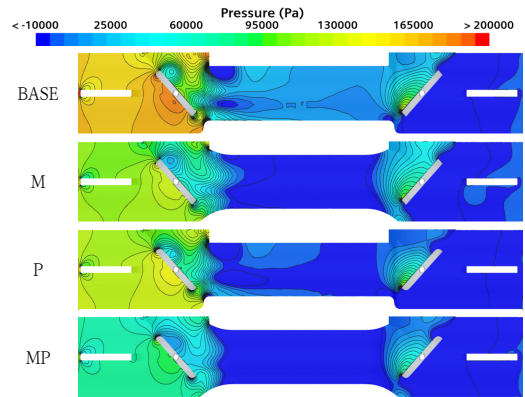


Fig. 6. Scalar scene at the plane section(pressure)

Fig. 7은 모델별 단면에서의 전압분포를 나타낸 것이다. BASE모델과 P모델은 반사판 직후와 Neck부분에서 생긴 재순환 영역의 영향을 받아 실제 모델의 단면적 보다 훨씬 좁은 면적에 유동이 집중되어 통과한다. P모델은 BASE모델 대비 반사판 직후에 생기는 재순환 영역이 작게 형성되었다. 이로 인해 BASE모델 대비 유동이 아래쪽으로 확장된 단면적을 통과할 수 있게 되었지만 하부로 편중되는 현상이 나타났다. M모델과 MP모델은 Neck부분에서 발생하던 정체구간과 재순환 영역이 개선되었다. 이로 인해 BASE모델과 P모델 대비 넓은 면적에 걸쳐 원활한 유동을 보였다. M모델의 경우, 반사판 직후의 재순환 영역과 Neck부분의 흐름 개선으로 유량이 상부쪽에 편중되는 현상이 나타났다. MP모델은 M모델 대비 반사판 직후에 형성되는 재순환 영역이 아래쪽으로 이동하게 되어 유량의 편중이 완화되었다.

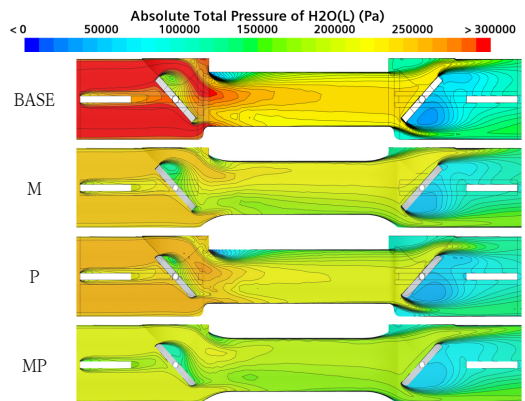


Fig. 7. Scalar scene at the plane section (total pressure)

Fig. 8은 모델별 캐비테이션 발생 영역을 나타낸 것이다. 캐비테이션 영역으로 표시된 부분은 공기의 체적 비율이 5% 이상인 셀들에 대해서 표시한 것이다. BASE모델은 Neck부분과 출구부 반사판 및 초음파 센서 부근에서 캐비테이션 발생 영역이 분포되었다. M모델은 Neck부분에서 발생하는 캐비테이션 발생 영역이 해소되었으며, 출구부 반사판 부근의 캐비테이션 발생 영역은 일부 축소 되었지만 초음파 센서 부근에는 캐비테이션 발생 영역이 일부 확장하였다. P모델은 Neck부분과 출구부 반사판 부근의 캐비테이션 발생 영역이 일부 확장 하였지만, 출구부 초음파 센서 부근의 캐비테이션 발생 영역이 축소하였다. MP모델은 Neck부분과 초음파 센서 부근의 캐비테이션 발생 영역이 대부분 해소되었으며, 출구부 반사판 부근의 캐비테이션 발생 영역도 축소하였다. 네 개의 모델 중 BASE모델에서 캐비테이션 발생 영역이  $14.3 \text{ mm}^3$ 로 가장 크게 나타났으며, M모델은 63.5 % 감소한  $5.2 \text{ mm}^3$ 의 영역을 차지하였다. P모델은 30.3 % 감소한  $10 \text{ mm}^3$ 의 영역에 발생하였으며, MP모델은 76.8 % 감소한  $3.3 \text{ mm}^3$ 의 영역에 발생하였다.

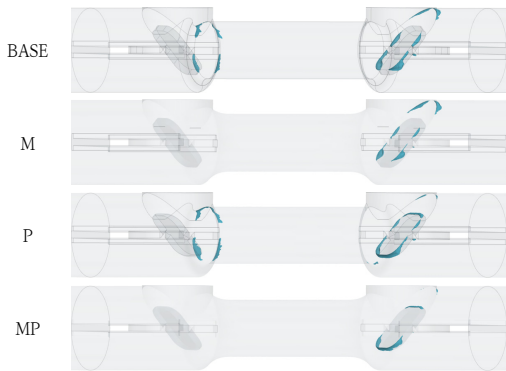


Fig. 8. Cavitation generation region of each model

### 3.2 시간에 따른 압력 변화 및 압력 강하

Fig. 9는 해석이 안정화된 0.04~0.1 s 사이의 시간에 따른 압력강하량을 나타낸 그래프이다. 기존 BASE 모델의 압력 강하량이 가장 크게 나타나며, P모델, M모델, MP모델 순서대로 크게 나타났다. P모델의 경우, 압력강하량이 시간에 따라 일정한 주기로 변동하였다. 이는 시간에 따라 캐비테이션의 영역이 확장 및 축소를 반복하는 주기와 동일한 것으로 확인되었다.

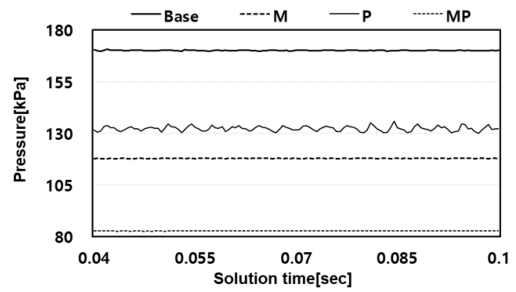


Fig. 9. Pressure drop graph for each model over time

Fig. 10은 모델별 입-출구에서의 압력 강하량을 나타낸 그래프이다. BASE모델은 170 kPa의 압력 강하가 측정되었다. 다른 모델들에서는 BASE모델 대비 더 낮은 압력 강하량이 측정되어 관 내부에서 발생하는 유동이 개선된 것으로 나타났다. Neck 부분의 Fillet을 수정한 M모델은 118 kPa로 약 30.6 % 감소된 것으로 나타났으며, 반사판에 Fillet을 적용한 P모델은 132 kPa로 약 22.4 % 감소한 것으로 나타났다. 두 가지 모두 적용된 MP 모델에서는 83 kPa로 약 51.2 % 감소한 것으로 나타났다.

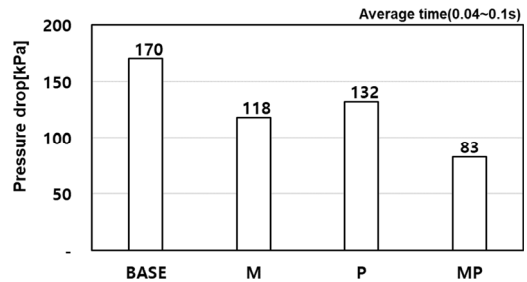


Fig. 10. Pressure drop for each model

## 4. 결론

본 연구에서는 초음파 유량계의 측정 정도 향상을 위하여 CFD 해석을 수행하고, 그 결과를 분석하였다. 본 연구의 대상은 반사판을 장착한 초음파 유량계이다. 유량계의 측정 정밀도와 매우 밀접한 관계가 있는 초음파 반사판 주위의 유동특성과 현상을 분석하고, 유동 개선을 통한 측정 정밀도를 향상시키고자 하였다. 해석결과를 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 기존 초음파 유량계에서 100 LPM까지 유량이 증가하게 되면, 170 kPa의 큰 압력강하량과  $14.3$

mm<sup>3</sup> 정도의 캐비테이션 발생 체적이 확인되었다. 이러한 캐비테이션의 발생은 측정 오차의 증가와 직접적으로 연계된다.

2. Neck부분 Fillet의 곡률을 증가하는 것은 기존 초음파 유량계 대비, 압력 강하량이 30.6 % 감소하고, 캐비테이션의 발생 체적은 63.5 % 감소하였다. Neck부분 Fillet의 곡률 증가는, Neck부분에서 발생하던 정체구간 및 재순환 영역의 개선에 도움이 된다.
3. 반사판에 Fillet을 적용하는 것은 기존 초음파 유량계 대비, 압력 강하량이 22.4 % 감소하고, 캐비테이션의 발생 체적은 30.3 % 감소하였다. 반사판에 적용된 Fillet은 반사판 직후에 형성되던 재순환 영역을 아래쪽으로 이동시키며, 그 크기 또한 축소시켜 유동 흐름 개선에 도움이 된다.
4. 반사판에 Fillet이 적용되고, Neck부분에 Fillet을 변경한 MP모델에서는 가장 원활한 유동 특성을 보이고 있다. 기존 초음파 유량계 대비, 압력강하량이 51.2 % 감소하고, 캐비테이션의 발생체적은 76.8 % 감소하였다. 속도구배의 급격한 부분을 해소하여 측정 정밀도 향상에 일조할 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구에서는 상수도용 반사판 초음파 유량계의 내부 형상을 일부 수정하여 유동 특성이 개선됨을 확인하였다. 반사판을 내장한 초음파 유량계의 정밀한 측정이 가능한 초음파 유량계의 내부 형상 설계 및 개발의 기초자료 활용 가능할 것으로 사료된다.

## References

- [1] D. W. Park, G. S. Kim, "A Study on the Square-pipe Ultrasonic Wave Flow Meter", Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers, Vol.55, No.2, pp.223-228, Feb. 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.5573/ieie.2018.55.2.91>
- [2] E. Mandard, D. Kouamé, R. Battault, J. P. Remenieras, F. Patat, "Methodology for developing a high-precision ultrasound flow meter and fluid velocity profile reconstruction", IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, Vol.55, No.1, pp.161-72, Jan. 2008.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2008.625>
- [3] J. Y. Kim, K. J. Ahn, "Basic Physics and Artifact of Ultrasound", Journal of Clinical Otolaryngology Head and Neck Surgery, Vol.18, No.2, pp.135-143, 2007.  
DOI: <https://doi.org/10.35420/jcohn.2007.18.2.135>
- [4] H. M. Song, "Ultrasonic Imaging Technology for Nondestructive Condition Assessment of Concrete Structures", Magazine of the Korea Concrete Institute, Vol.35, No.5, pp.68-72, 2023.
- [5] S. F. Mousavi, S. H. Hashemabadi, J. Jamali, "Calculation of geometric flow profile correction factor for ultrasonic flow", Ultrasonics, Vol.106, Aug. 2020.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2020.106165>
- [6] J. G. Park, H. Y. Jeon, "Ultrasonic Flow Measurement Technology", Journal of KSNVE, Vol.19, No.5, pp.25-29, Oct. 2009.
- [7] E. S. Lee, O. H. Kwon, M. H. Rho, H. S. Lee, "A Study on the Wet Type Ultrasonic Flow - meter System Development", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A, Vol.29, No.12, pp.1638-1644, 2005.
- [8] C. W. Kim, M. H. Lee, S. H. Cheong, I. H. Min, "Real-time Stream Measurement with Ultrasonic Current Meter", Journal of Korea Water Resources Association, pp.220-224, May. 2004, Available From: <https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchArticle.do?cn=NPAP08153187>
- [9] S. Y. Hwang, "Development Trends of Ultrasonic Flowmeter Technology", The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol.9, No.3, pp.51-57, 2006.
- [10] J. H. Kim, H. D. Kim, H. J. Lee, S. Y. Hwang, "A CFD Analysis of Gas Flow through an Ultrasonic Meter", KSME Autumn Conference, Korean Society of Mechanical Engineers, pp.998-1003, 2003.
- [11] D. W. Choi, "Ultrasonic Transducer and Flow Measurement Technology", Journal of KSNVE, Vol.19, No.5, pp.19-24, Oct. 2009.
- [12] Y. J. Kim, S. G. Kim, D. K. Lee, J. Y. Park, J. M. Ko, "Numerical estimation of a single path ultrasonic flowmeter performance in the pipeflows with butterfly valve flows", Proceedings of the KFMA Annual Meeting, Korean Society for Fluid Machinery, Jeju, Korea, pp.378-379, 2009.
- [13] H. Zhou, T. Ji, R. Wang, X. Ge, X. Tang, S. Tang, "Multipath ultrasonic gas flow-meter based on multiple reference waves", Ultrasonics, Vol.82, pp.145-152, 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2017.07.010>
- [14] Z. Yan, J. Liu, B. Chen, X. Cheng, J. Yang, "Fluid cavitation detection method with phase demodulation of ultrasonic signal", Applied Acoustics, Vol.87, pp.198-204, 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.07.007>
- [15] J. G. Drenthen, M. Kurth, J. V. Klooster, M. Vermeulen, "Reducing installation effects on ultrasonic flow meters", 27th North Sea Flow Measurement Conference, Tonsberg, pp.1-18, 2009, [cited 2023 Nov. 07], Available From: <https://nfgm.no/wp-content/uploads/2019/02/2009-10-Reducing-installation-effects-on-ultrasonic-flow-meters-Drenthen-Krohne-CT-Products.pdf>

- [16] W. Zhao, Y. Jiang and C. Huang, "A new ultrasonic flowmeter with low power consumption for small pipeline applications," 2016 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, Taipei, Taiwan, pp. 1-6, 2016.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/I2MTC.2016.7520522>
- [17] J. Y. Yoon, "A Study on the Disinfection Method Using Hydrodynamic Cavitation Reactor", Proceedings of the KSME Fluid Engineering Division 2021 Spring Conference, pp.324-325, 2021, Available From: [www.dbpia.co.kr/pdf/pdfView.do?nodeId=NODE10607589&googleIPSandBox=false&mark=0&ipRange=false&b2cLoginYN=false&isPDFSizeAllowed=true&accessgl=Y&language=ko\\_KR&hasTopBanner=true](http://www.dbpia.co.kr/pdf/pdfView.do?nodeId=NODE10607589&googleIPSandBox=false&mark=0&ipRange=false&b2cLoginYN=false&isPDFSizeAllowed=true&accessgl=Y&language=ko_KR&hasTopBanner=true)
- [18] I. J. Bae, E. S. Lee, "Improvement of Measuring Stability of Amplitude Attenuation by the Bubble in Ultrasonic Flow-Meter for Semiconductor Process", Journal of the Korean Society for Precision, Vol.36, No.9, pp.843-849, 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.7736/KSPE.2019.36.9.843>
- [19] S. J. Shin, B. J. Jeong, "Principle and Comprehension of Ultrasound Imaging", Journal of The Korean Orthopaedic Association, Vol.48, No.5, pp.325-333, Oct. 2013.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.4055/jkoa.2013.48.5.325>

김 성 하(Seong Ha Kim)

[준회원]



- 2023년 2월 : 공주대학교 기계자동차공학부 (공학사)
- 2023년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 일반대학원 기계공학과 석사과정

<관심분야>

모빌리티 유동해석, 기계공학

김 찬 후(Chan Hoo Kim)

[준회원]



- 2021년 2월 : 공주대학교 기계자동차공학부 (공학사)
- 2021년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 일반대학원 기계공학과 석·박 통합과정

<관심분야>

열유체 해석, 내연기관 성능개발

박 성 영(Sung-Young Park)

[종신회원]



- 1993년 2월 : 충남대학교 기계공학과 (공학사)
- 1995년 2월 : 충남대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2002년 5월 : Texas A&M Univ. 기계공학과 (공학박사)
- 2006년 4월 ~ 현재 : 공주대학교 미래자동차공학과, 정교수

<관심분야>

열유체 해석, 내연기관 성능개발