

압력센서 스너버의 형상 설계와 압력강하에 대한 수치적 연구

김종현¹, 이준성^{2*}

¹경기대학교 대학원 기계공학과, ²경기대학교 기계시스템공학과

Numerical Study on Shape Design and Pressure Drop of Pressure Sensor Snubber

Jong-Hyun Kim¹, Joon-Seong Lee^{2*}

¹Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Kyonggi Univ.

²Dept. of Mechanical System Engineering, Kyonggi Univ.

요약 압력센서는 고압으로부터 다이어프램을 보호하기 위해 내부에 스너버가 장착된다. 본 연구에서는 스너버의 형상을 설계하고, 전산유체해석을 통해 스너버 내부 급격 축소관의 지름에 따라 압력강하 기준을 충족시키는지 확인하고자 하였다. 또한 수치해석의 검증에 위해 해석 값을 이론 값, 실험 값과 비교하여 타당성을 입증하였다. 급격 축소관의 지름을 0.1 mm~0.6 mm까지 설정하여 해석을 수행하였으며, 스너버가 없는 모델인 기본 모델과 압력강하를 비교하였다. 해석 결과 급격 축소관의 지름이 작아질수록 압력강하가 크게 일어나는 결과가 나왔다. 그러나 0.6 mm 스너버는 기본 모델과 비교하여 압력의 감쇠 효과는 있었으나, 기본 모델보다 압력이 2.79% 더 크게 나오는 결과가 나와 압력 강하 효과가 없는 것으로 나타났다. 또한 지름이 작아질수록 압력의 감쇠가 커져 압력 측정에 오차를 발생시킬 수 있으므로, 압력센서 설계 시 주의가 요구된다.

Abstract To protect the diaphragms of pressure sensors from high pressure, the sensors are equipped with snubbers. In this study, a snubber shape was designed, and computational fluid dynamics analysis was conducted to verify whether the pressure drop criteria are met based on the diameter of sudden contraction of the snubber's internal pipe. For validation of the numerical analysis, the computed values were compared to theoretical and experimental values. The diameters of the sudden contraction in the pipe were varied from 0.1 mm to 0.6 mm for analysis, and a comparison was made between the standard shape without a snubber and configurations with pressure drop effects. The analysis results showed that as the diameter of the sudden contraction pipe decreases, there is a significant increase in pressure drop. However, the 0.6-mm snubber exhibited a damping effect compared to the base model. Nonetheless, the results indicated that the pressure was 2.79% higher than that of the base model, implying the absence of a pressure reduction effect. Additionally, as the diameter decreased, pressure attenuation became more pronounced, potentially introducing errors in pressure measurement. Therefore, careful attention is required during the design of pressure sensors.

Keywords : Orifice, Pressure Sensor, Pressure Spikes, Pulse Snubber, Water hammer

이 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임. (No. 20016075)

본 연구는 2023년 경기대학교 대학원 연구원장학생 장학금 지원에 의하여 수행되었음.

*Corresponding Author : Joon-Seong Lee(Kyonggi Univ.)

email: jslee1@kgu.ac.kr

Received August 1, 2023

Revised August 30, 2023

Accepted October 6, 2023

Published October 31, 2023

1. 서론

최근 스마트 팩토리와 같은 공장의 시스템 선진화에 따라 센서의 중요성이 주목받고 있다. 센서는 데이터의 모니터링을 통해 고장 예측, 수명 진단 등 다양한 분야에 활용할 수 있다[1]. 다양한 센서 중 압전 저항 방식을 사용한 압력센서는 스트레인 게이지가 부착된 다이어프램을 포함하는 구조로 되어 있으며 유체 등에 의해 발생한 다이어프램의 변형이 스트레인 게이지의 저항 변화를 일으키고 전기적 신호로 변환하여 압력을 측정하는 방식이다[2]. 특히 압력센서가 장착되는 증장비 중 유압 브레이크는 장비의 작동에 따라 출구의 개방과 폐쇄가 반복되는 시스템을 가진다[3]. 이러한 출구의 급격한 폐쇄는 유체의 운동에너지가 압력에너지로 변환되면서 고압을 발생시키는 수격현상을 발생시키게 된다[4]. 수격현상에 의해 발생하는 압력 스파이크는 압력이 센서의 측정 범위에 있는 경우에도 센서를 손상시킬 수 있다. 이러한 손상은 잘못된 압력을 표시하거나 느린 응답을 유발할 수 있고, 연결부의 영구적인 변형, 내부 유체의 유출 등을 일으키며, 다이어프램이 파괴될 수 있다[5]. 따라서 압력센서는 압력 스파이크의 역제를 위해 내부에 스너버를 장착하여 고압으로부터 다이어프램을 보호한다[6]. 그러나 스너버를 장착 할 경우 압력 신호가 감쇠되고, 고주파 변동에 대한 정보가 손실될 수 있기에 주의해야 한다[7]. 스너버에는 다공성 필터, 피스톤, 오리피스 관, 밸브 등이 적용된 제품들이 있다[8]. 그 중 오리피스 형태의 스너버는 압력을 제어하거나 충격 흡수 등을 위해 여러 배관시스템에서 사용되고 있다[9]. Howell 등은 스너버가 캐비테이션을 방지하는 원리를 수학적으로 접근하고자 하였으며, 전산유체해석(CFD)을 통해 보다 정확한 예측을 할 수 있을 것이라 평가하였다[10]. Hyundai Kefico는 유체에 의한 지속적인 물리적인 과압인 맥동 현상으로부터 압력센서를 보호하고 측정 신뢰도를 보장할 수 있는 장치에 대해 특허를 출원하였다[11]. Gao 등은 2단 오리피스 구조의 압력강하에 대해 연구하여 2단 구조 중 지름이 큰 단계에서는 유동장의 변화 추세를 늦추고, 지름이 작은 단계에서는 주로 압력 손실에 대해 영향을 끼친다는 것을 실험과 해석을 통해 조사하였다[12]. 수격현상의 전산유체해석에 대한 연구로 Saemi 등은 레이놀즈수와 난류모델에 따라 전산유체해석을 수행하였고, 실험결과와 비교했을 때 $k-\omega$ SST 난류모델이 실험결과와 가장 잘 일치하는 것을 보였다[13]. 수격현상의 수치 해석은 특성 곡선법(Method of Characteristics)을 이

용한 1차원 해석이 주류지만, 유체의 거동과 유체 고체 연성해석 등 정확한 해석을 위해 3차원 수격현상 해석 모델에 대한 연구가 진행되고 있다[14]. Shin 등은 수격현상으로 인한 원자력 배관의 파손 및 고장 분석을 위해 1차원과 3차원 수격현상 해석을 비교하였다. 두 조건 모두 실험 결과와 잘 일치하는 경향을 보였으나, 형상과 구성요소에 따라 압력 파동이 달라 질 수 있음을 연구하였다[15]. 그러나 압력센서에 장착되는 스너버의 형상에 대해 정량적으로 연구한 자료는 찾기 어렵고 관련 연구도 미비한 실정이다. 본 논문에서는 압력센서의 스너버를 장착과 제작 용이성에 따라 설계 하였으며, 수격현상의 이론해로 계산한 값과 선행연구의 실험 값을 전산유체해석 코드인 ANSYS Fluent 2021 R2[16,17]를 사용하여 계산한 해석 값과 비교하여 검증하고, 수격현상을 모사하여 스너버의 급격 축소관 지름에 따른 최대 압력을 계산하였다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식

수치해석의 지배방정식은 압축성 유동에 대한 Navier-Stokes 방정식, 연속방정식을 적용하였고, 식을 적용하였고, 식 (1)과 식 (2)에 나타내었다. τ 는 전단응력 항으로 식 (3)과 같다. 유동을 압축성 등온 유체라고 가정하면 유체의 밀도를 식 (4)로 정의할 수 있으며, 사용자 정의 함수 기능인 UDFs를 사용하여 유체의 밀도를 적용하였다. 이외의 물성치에 대해서는 Table 1에 나타내었고, 배관의 재질과 팽창에 대해서는 고려하지 않았다. 난류모델은 이전 연구[16]에 따라 $k-\omega$ SST 모델을 사용하였으며, 연속방정식과 운동량 방정식을 결합하여 계산하는 Coupled method를 사용하였다. 압력항은 PRESTO!, 밀도와 모멘텀은 Second Order, 나머지 항목에 대해서는 First Order를 적용하였다.

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \tau + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = 0 \quad (2)$$

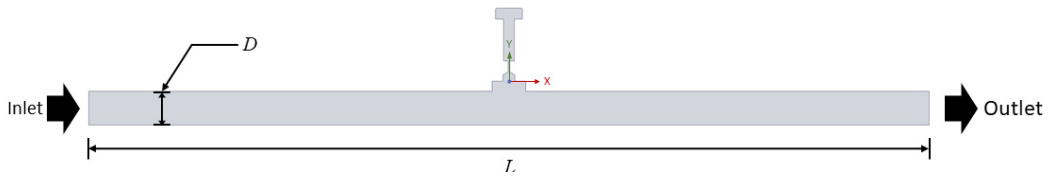


Fig. 1. Schematic diagram about pressure sensor and pipe

$$\tau = \mu(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \quad (3)$$

$$\rho = \frac{\rho_{ref}}{1 - \frac{p - p_{op}}{K}} \quad (4)$$

Where, ρ denotes density, v denotes velocity, t denotes time, p denotes pressure, g denotes gravitational acceleration, \vec{F} denotes external force, τ denotes shear stress, μ denotes viscosity, I denotes unit matrix, ρ_{ref} denotes reference density, p_{op} denotes operation pressure, K denotes bulk modulus of water-liquid

Table 1. Material properties of water-liquid

Properties	Values
ρ_{ref}	998.2 kg/m ³
Viscosity	0.001003 kg/m·s
Bulk Modulus, K	2.2 GPa

2.2 스너버 형상 설계

본 연구에서는 2단 오리피스 형상을 가진 스너버를 설계하였다. 2단 오리피스 형상은 출구의 유동을 안정시켜 단일 오리피스 형상보다 압력강하가 적지만, 스너버의 장착과 압력센서의 제작 용이성을 고려하여 육각 홀 d_1 을 1단 급격 축소관 d_2 를 2단으로 하는 2단 오리피스 형상의 스너버를 설계하였다. 또한 스너버의 유무를 비교하기 위해 스너버와 스너버 장착부가 없는 기본 모델을 설계하였다. 배관과 센서에 대한 전체 유동장은 Fig. 1과 같으며, 설계한 스너버와 기본 모델의 세부 명칭을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2의 Measuring point는 압력센서의 다이어그램이 위치한 곳으로 수치해석을 통해 압력을 측정하는 위치이자, 스너버로 압력을 완화해야 하는 부분이다. 스너버의 급격 축소관 지름 d_2 에 따라 6개의

형상을 설계하였으며, 압력센서의 세부 수치는 Table 2에 나타냈다.

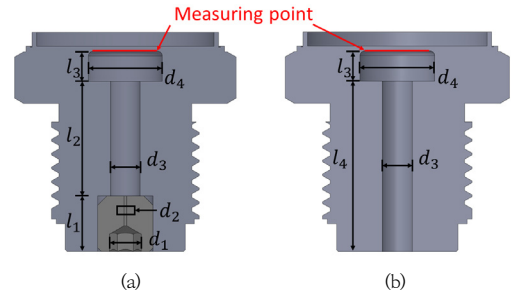


Fig. 2. Schematic diagram about pressure sensor
(a) Pressure sensor with snubber (b) Pressure sensor without snubber and snubber mount, Base model

Table 2. Parameters of pressure sensor with snubber

Symbol	Values
L	250 mm
D	10 mm
d_1	M3
d_2	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 mm
d_3	3.2 mm
d_4	8 mm
l_1	6 mm
l_2	12.4 mm
l_3	3.25 mm
l_4	18.4 mm

2.3 수치해석 검증

2.3.1 수격현상 이론식

일반적으로 수격현상의 수치해석에는 유체의 거동보다는 배관의 시스템 해석을 위한 용도로 1차원 해석이 주류를 이루고 있다. 그러나 스너버의 형상에 따른 유체의 거동을 파악하기 위해서는 3차원 유동해석이 요구된다. 본 논문에서는 ANSYS Fluent를 사용하고자 하였고, 3차원 해석의 검증을 위해 수격현상의 이론해로 알려진 Joukowsky equation (5) ~ (8)을 사용하여 구한 이론값과 비교하고자 하였다. 밸브의 폐쇄시간 $t=0$ 에 폐쇄

지점에서 발생한 압축파가 입구를 향해 간다고 하면, $t=t$, $t=t+\Delta t$ 에서 각각 위치 s , $s=s+\Delta s$ 에 도달한다고 했을 때 체적 $A\Delta s$ 의 유체는 $t=t$ 에서 유속이 $-u_0$, $t=t+\Delta t$ 에서는 유속이 0이 되므로 운동량 법칙에 의해 식 (5)는 식 (6)이 됨을 알 수 있다. 식 (6)에서 $\Delta p=p_{\max}-p_0$ 이고, $\Delta s/\Delta t$ 는 음속 a 에 대한 식 (7)과 같으므로, 식 (8)이 되어 배관 내의 최대상승압력 p_{\max} 를 구할 수 있다.

$$A\Delta p = \frac{\rho A \Delta s \{v(t+\Delta t) - v(t)\}}{\Delta t} \tag{5}$$

$$= \frac{\rho A \Delta s \{0 - (-v_0)\}}{\Delta t}$$

$$\Delta p = \frac{\rho \Delta s v_0}{\Delta t} \tag{6}$$

$$a = \frac{\Delta s}{\Delta t} \tag{7}$$

$$p_{\max} - p_0 = \rho a v_0 \tag{8}$$

Where, A denotes cross section area, p denotes pressure, p_0 denotes initial pressure, p_{\max} denotes max pressure, Δp denotes pressure fluctuation, ρ denotes density, v denotes velocity, v_0 denotes initial velocity, t denotes time, s denotes position, a denotes speed of sound

2.3.2 검증 모델 수치해석

검증에 사용된 모델은 지름 10 mm, 길이 1,000 mm의 단일 배관 형상을 검증 모델로 생성하였다. 검증 모델은 240만 개의 Hexahedral 격자로 구성하였으며, 생성한 격자를 Fig. 3에 나타내었다. 먼저 정상상태 해석의 경계조건으로 입구에 대기압, 출구에 0.1 kg/s ~ 0.5 kg/s의 질량유량을 적용하여 배관에 유체가 흐르는 조건을 해석하였다. 정상상태 해석 수렴 후 과도해석으로 변경하였다. 과도해석에서는 출구의 질량유량 조건을 벽으로 변경하여 수격현상을 유도하는 급격 폐쇄를 모사하였다. 시간 간격은 1e-5초로 하였으며, 해석 시간 동안 출구에서의 최대 압력을 계산하였다.

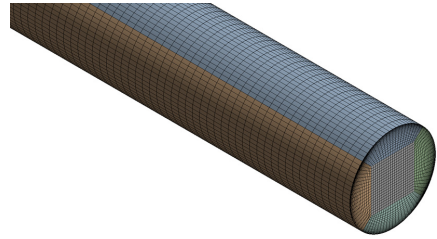


Fig. 3. Single pipe grid model for analysis validation

이론값과의 검증 외에도 선행 연구[18]의 실험과 비교하여 검증을 수행했다. 선행 연구는 길이 15.22 m, 지름 0.02 m의 단일배관의 급격 폐쇄에 따른 수격현상을 실험하였으며, 입구는 44.66 m의 압력수두, 출구에는 0.1206 l/s의 유량인 조건이다. 본 검증에서는 실험 조건과 동일한 경계조건과 모델을 구성하였다. 정상상태 수렴 후 과도해석으로 변경하여 출구의 급격 폐쇄를 모사하였으며, 시간간격을 1e-5초로 하여 배관 중간부의 압력 수두를 계산하였다.

Table 3. Comparison of theoretical and numerical values according to flow rate

Mass flow rate (kg/s)	Max pressure (Pa)		Diff. (%)
	Theory	CFD	
0.1	1,890,221	1,901,154	0.578
0.2	3,780,442	3,798,034	0.465
0.3	5,670,663	5,691,302	0.364
0.4	7,560,883	7,581,440	0.272
0.5	9,451,104	9,468,727	0.186

Table 4. Comparison of experimental and numerical values

Initial condition		Max head (m)		Diff. (%)
Inlet (m)	Outlet (l/s)	Exp.	CFD	
44.66	0.1206	93.71	94.39	0.726

Joukowsky equation으로 구한 최대 압력과 검증 모델의 최대 압력을 비교하여 Table 3에 나타내었다. 유량이 작을수록 오차가 커졌지만, 최대 0.578%의 무시할 수 있다고 판단되는 오차가 발생하였다. 또한 선행 연구의 실험과 비교한 Table 4에서는 최대 0.726%의 오차가 발생하였으며, 실험과 일치하는 결과를 보였다. 따라서 수격현상 해석에 대해 3차원 전산유체해석의 타당성이

있다고 판단하였다.

2.4 격자 생성 및 격자의존성테스트

스너버의 유동해석을 위해 격자를 생성하였다. 격자 생성에는 사면체 요소를 사용하였으며, 스너버의 노즐부와 압력센서의 유동장에는 더 조밀한 격자를 생성하였고, 벽면에는 유동의 정확도를 위해 20개의 Prism 격자를 추가하였다. 격자 의존성 검증을 위해 가장 조밀한 격자를 요구하는 $d_2 = 0.1\text{mm}$ 기준으로 격자의 크기에 따른 Measuring point의 최대 압력 값을 계산하여 Fig. 4에 나타내었다. Case 4부터 최대 압력이 수렴됨을 확인하였고 해당 격자 크기를 사용하여 해석을 진행하였다. 이후 0.2 mm ~ 0.6 mm 스너버의 격자에도 해당 격자 크기를 적용하여 계산을 수행하였다.

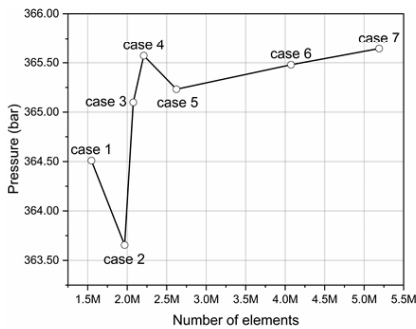


Fig. 4. Grid dependency test

2.5 수치해석 경계조건

압력 배관에서의 수격현상 모사를 위해 먼저 입구에 350 bar의 압력을, 출구에는 1 kg/s의 질량유량을 적용하여 정상상태 해석을 수행하였다. 정상상태 해석 수렴 후 과도해석으로 변경하였다. 과도해석에서는 출구의 질량유량 조건을 벽으로 변경하여 수격현상을 유도하는 급격 폐쇄를 모사하였다. 시간 간격을 $1e-5$ 초로 하여, Fig. 2에 표시한 Measuring point의 압력을 시간에 따라 계산하였다.

3. 해석 결과

Fig. 5는 각 형상에 대해 출구 폐쇄 시간부터 0.0005초까지의 압력 변화를 나타낸 그래프이다. 기본 모델이 최단 시간에 최대 압력이 발생했고, 지름이 작아질수록

최대 압력 발생 시간이 지연됐다. 또한 지름이 작을수록 최대압력이 낮아지는 경향을 보였다. 그러나 0.6 mm 형상의 경우 기본 모델과 비교하여 압력 발생을 지연시키는 효과는 있었으나, 최대 압력이 더 크게 발생하였다. 최대 압력과 최대 압력 발생 시간을 나타낸 표인 Table 5에 따르면 기본 모델의 경우 0.00015초에 최대압력이 발생하였고, 0.6 mm는 0.00022초, 0.1 mm는 0.00037초에 최대압력이 발생하였다. 이 결과는 스너버가 센서로 들어가는 유량을 감소시켜 압력파가 다이어프램에도달하는 시간을 지연시키는 현상으로 판단된다. Fig. 6은 기본 모델의 최대 압력 발생 시간인 0.00015초를 수격으로 발생한 압축파가 배관 중심부에 도달했을 때의 시간으로 판단하여 배관 단면의 중심부터 다이어프램까지 압력을 선형화하여 나타낸 그래프이다. 기본 모델은 스너버의 부재로 인해 압력을 직접적으로 받아 가장 높은 압력을 보였고, 스너버의 지름 순서대로 압력을 지연시키는 결과를 보였다.

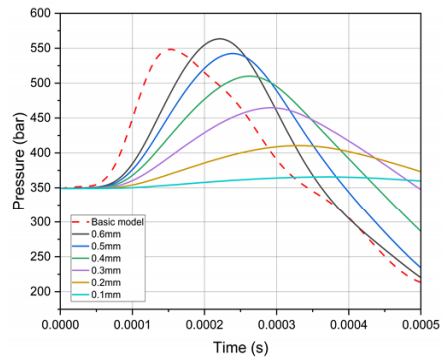


Fig. 5. Pressure graph up to 0.001 seconds according to nozzle diameter

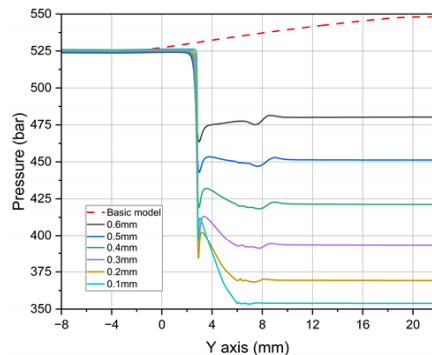


Fig. 6. Pressure drop according to nozzle diameter at 0.00015 seconds

Table 5. Maximum pressure and maximum pressure occurrence time according to nozzle diameter

Nozzle diameter, d_2 (mm)	Max pressure (bar)	Occurrence time (s)
0.6	563.40	0.00022
0.5	542.34	0.00024
0.4	509.87	0.00026
0.3	464.66	0.00029
0.2	410.49	0.00033
0.1	365.57	0.00037
Basic model	548.13	0.00015

4. 결론

본 연구에서는 수격현상에 의해 발생하는 고압으로부터 압력센서의 다이어프램을 보호하는 장치인 스너버의 형상을 설계하였다. 설계한 스너버에 대하여 수격현상을 모사하는 해석을 수행하였고 스너버 급격 축소관의 지름에 따른 압력강하를 계산하였다.

- (1) 스너버의 장착과 제작의 용이성을 고려하여 육각 홀과 급격 축소관으로 구성된 2단 오리피스 형태의 스너버를 설계하였다.
- (2) 수격현상 해석의 검증을 위해 이론값과 실험 값을 수치해석을 통해 계산한 값과 비교하였다. 이론해인 Joukowsky equation로 계산한 값과 수치해석 값을 비교했을 때 최대 0.578%의 차이가 발생하였고, 실험 값과 수치해석 값을 비교했을 때는 0.726%의 차이가 발생하였다. 결과적으로 무시할 수 있는 작은 오차가 발생하였으며, 3차원 전산유체해석의 수격현상 해석에 대해 타당성이 있다고 판단하였다.
- (3) 설계한 스너버에 대해 전산유체해석을 수행하였다. 수치해석 결과 급격 축소관의 지름이 작을수록 압력강하가 크게 발생하여 스너버의 압력 강하 효과가 크게 나타나는 결과를 얻었다. 그러나 기본 모델과 비교하여 0.5 mm이하의 스너버는 1.05%부터 33.31%의 압력 강하를 보였으나, 0.6 mm 스너버는 기본 모델보다 압력이 2.79% 더 크게 발생하여 압력 강하의 효과가 없는 것으로 나타났다.
- (4) 지름이 작아질수록 압력의 감쇠가 커져, 압력의 발생이 지연되는 결과가 도출됐다. 압력의 감쇠는 측

정에 오차를 발생시킬 수 있기에, 압력센서의 측정 범위에 따라 적절한 지름의 스너버를 선택하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

References

- [1] Agrawal, K. K., Pandey, G. N., & Chandrasekaran, K., "Analysis of the condition based monitoring system for heavy industrial machineries", *2013 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research*, pp. 1~4, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCCIC.2013.6724183>
- [2] Fiorillo, A. S., Critello, C. D., & Pullano, S. A., "Theory, technology and applications of piezoresistive", *sensors: A review. Sensors and Actuators, A: Physical*, 281, pp. 156-175, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.07.006>
- [3] Giuffrida, A., and Laforgia, D., "Modelling and simulation of a hydraulic breaker", *International journal of fluid power*, Vol. 6, Issue 2, pp. 47~56, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1080/14399776.2005.10781219>
- [4] Chaudhry, M. Hanif, *Applied Hydraulic Transients*, p.583, Springer, 2014, pp. 3~15. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8538-4>
- [5] Hashemian, H. M., Petersen, K. M., Fain, R. E., & Gingrich, J. J., "Effect of aging on response time of nuclear plant pressure sensors", No. NUREG/CR-5383, *Nuclear Regulatory Commission*, Washington, DC (USA). Div. of Engineering; Analysis and Measurement Services Corp., Knoxville, TN (USA), 1989. DOI: <https://doi.org/10.2172/5941890>
- [6] Parr, A., *Hydraulics and pneumatics: a technician's and engineer's guide*, p.248, Elsevier, 2011, p.19. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2009-0-64113-1>
- [7] Wu, K., Galli, F., de Tommaso, J., Patience, G. S., & van Ommen, J. R., "Experimental methods in chemical engineering: Pressure", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 101(1), pp. 41-58, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/cjce.24533>
- [8] Lipták, B. G., Ed., *Instrument Engineers' Handbook, Volume One: Process Measurement and Analysis (Vol. 1)*, p. 1920, CRC press, 2003, pp.718-725 DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420064025>
- [9] Onesto, A. T., Larson, D. A., "Snubber qualification and test requirements," United States, 1983. DOI: <https://doi.org/10.2172/5732697>
- [10] Howel, P. D., Lacey, A. A., Vogler, J., and Vonsild, A., "Mathematical analysis of the dynamic flow characteristic in a damping nozzle for a pressure transmitter," *In Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 52, No. 1, p. 008, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/52/1/008>

- [11] Hyundai Kefico, "Semi-conductor pressure sensor module with preventing structure for physical shock of continuous over-pressure of fluid flow", *Korean Intellectual Property Office*, 10-2011-0101393, Seoul, 2013.
- [12] Gao, J., & Wu, F., "Investigation of flow through the two-stage orifice", *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 13(1), pp. 117-127, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1080/19942060.2018.1561517>
- [13] Saemi, S., Raisee, M., Cervantes, M., Nourbakhsh, A., "Computation of laminar and turbulent water hammer flows", In *WCCM-ECCM-ECFD 2014 Congress: 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI) 5th European Conference on Computational Mechanics (ECCM V) 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI), Spain*, 20/07/2014-25/07/2014.
- [14] Martin, N. M. C., and Wahba, E. M., "On the Hierarchy of Models for Pipe Transients: From Quasi-Two-Dimensional Water Hammer Models to Full Three-Dimensional Computational Fluid Dynamics Models", *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 144, Issue 2, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4051930>
- [15] Shin, B. S., Lee, G. H. "Comparison of 1D and 3D Water Hammer Analysis for Fast Transients in Nuclear Power Plant", *28th International Conference Nuclear Energy for New Europe*, 2019.
- [16] Ansys, Ansys Fluent Theory Guide 2021 r2, ANSYS Inc, 2021.
- [17] Ansys, Ansys Fluent User's Guide 2021 r2, ANSYS Inc, 2021.
- [18] Martins, N. M., Soares, A. K., Ramos, H. M., & Covas, D. I. (2016). CFD modeling of transient flow in pressurized pipes. *Computers & Fluids*, 126, 129-140.
DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4051930>

이 준 성(Joon-Seong Lee)

[중신회원]



- 1988년 2월 : 성균관대학교 기계공학과 (공학석사)
- 1995년 9월 : 동경대학교 시스템공학과 (공학박사)
- 1988년 7월 ~ 1991년 7월 : 육군사관학교 교수부 기계공학과 교수
- 1996년 3월 ~ 현재 : 경기대학교 기계시스템공학과 교수

<관심분야>

피로/파괴, Neural Network, 최적설계

김 종 현(Jong-Hyun Kim)

[준회원]



- 2022년 2월 : 경기대학교 기계시스템공학과 (기계공학 학사)
- 2022년 3월 ~ 현재 : 경기대학교 일반대학원 기계공학과 (석사 과정)

<관심분야>

센서의 시뮬레이션, 수격현상, 파괴역학