

급수용 감압밸브의 비다이어프램 스템에서 압축스프링에 따른 유량 및 토출압력 효과

변재욱^{*,**}, 김치호^{*}, 박성환^{**}, 이명원^{**}, 강명창^{**,#}

^{*}(주)태광후지킨, ^{**}부산대학교 융합학부

Effects of Flow Rate and Discharge Pressure with Compressing Spring in Non-diaphragm Type Stem of Water Pressure Reducing Valve

Jae-Uk Byeon^{*,**}, Chi-Ho Kim^{*}, Seong-Hwan Park^{**}, Myung-Won Lee^{**}, Myungchang Kang^{**,#}

^{*}TK-Fujikin Co., Ltd.

^{**}The Graduate school of Convergence Science, Pusan National University

(Received 16 April 2019; received in revised form 21 April 2019; accepted 29 April 2019)

ABSTRACT

The pressure reducing valve for water is controlled by the load of the compression spring and the force of the fluid acting on the diaphragm of the stem. Repeated upward and downward reciprocation of the pressure-reducing valve stem damages the diaphragm, resulting in leakage. In this study, we designed a stem without a diaphragm and adjusted the stiffness of the compressing spring. In order to select the spring stiffness, springs offering a stiffness of -20%, -10%, 0%, and 10% with respect to the stiffness of the compression spring attached to the existing pressure reducing valve stiffness. A prototype for the pressure reducing valve was fabricated and the pressure change was evaluated for the target static pressure (6 bar) by testing the pressure characteristics after mounting the modified stem and each compression spring. Evaluation of the pressure characteristics was carried out using ASSE 1003 and KS B 6153. In addition, the flow rates were compared by internal flow analysis of the conventional pressure reducing valve and the pressure reducing valve using the modified stems, and the flow analysis was performed using Solidworks flow simulation 2018. The spring stiffness was constantly discharged at the target static pressure of 3.793 kgf/mm, and the flow rate was increased by about 15% compared with the conventional pressure reducing valve.

Key Words : Pressure Reducing Valve(감압밸브), Compressing Spring(압축 스프링), Spring Stiffness(스프링 강성), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학)

1. 서 론

최근 산업용 밸브는 다양한 분야에서 광범위하게 활용되고 수요량이 증가됨에 따라 성능 및 가격경

쟁이 갈수록 요구되고 있다^[1]. 가성비 높은 제품을 개발하기 위하여 여러 해석툴을 연구하고, 설계변경, 제작 공정 변경 등 품질 향상에 많은 노력이 이루어지고 있다^[2-5]. 밸브는 유체에 대한 물리적, 화학적 성질에 따라 다양하게 사용이 되는데, 고압인 물의 압력을 낮추거나 정압력으로 유지하는 장치를 급수용 감압밸브(Pressure reducing valves,

Corresponding Author : kangmc@pusan.ac.kr

Tel: +82-51-510-2361, Fax: +82-51-510-7396

PRV)라 한다^[6].

감압밸브의 시장규모는 매우 다양한 범위에서 나타난다. 시장내에서 밸브를 생산하는 전문업체 뿐 아니라 소규모 제조업체에서도 감압밸브의 제품을 출시하고 있다. 하지만 사용 목적에 맞는 제품의 선정, 정확한 사이징(Sizing)에 대한 결과가 설계 의도에 따라 검증하지 못한 상태에서 제품을 설치하는 경우가 많아 발생하는 문제들이 나타나고 있다^[7]. 그리고 스템의 반복된 상하운동으로 인하여 밸브의 부품이 찢어짐이나 파손이 발생하여 누수에 원인이 된다.

감압밸브의 대표적인 연구로 Hös^[8]는 직접 스프링 작동식 감압밸브 내부 유동해석에 대하여 연구, 유량평가 하였고, Janus^[9]는 감압밸브 제어기 설계에 따른 교란배제와 안정성향상에 대한 연구를 하였다. Park^[7]은 구조-유체연성해석을 통해 감압밸브 유체유발진동에 관한 연구를 하였고, 최근에는 자동차용 현가장치에 적용하는 것에 대한 연구가 이루어지고 있다^[10-12]. 그렇지만, 급수용 감압밸브에 관하여 주로 다루어지지 않고 있다.

따라서, 본 연구에서는 감압밸브 품질향상을 위해 다이어프램이 제외된 스템을 설계 및 제작하고, 작동에 영향을 미치는 압축스프링의 강성선정을 통해 시제품 압력특성평가를 실시하였다. 또한, 감압밸브의 내부 유동해석(CFD, Computational fluid dynamics)을 수행하여 기존의 감압밸브 유량 및 토출압력을 비교하고자 한다.

2. 스템 설계 변경과 압축스프링 강성선정

2.1 감압밸브 스템 설계 변경

Fig. 1은 감압밸브의 내부 단면도를 나타낸 것이다. 좌측에 입구와 우측에 출구를 가지며 내부에 메인유로를 가지는 몸체Body와 상부에 결합된 본넷Bonnet, 감압밸브의 작동에 영향을 미치는 압축스프링Compressing spring, 스템Stem, 다이어프램Diaphragm을 가진 구조로 되어있다.

작동원리는 입구측에서 흐르는 물이 감압밸브 내부 유로를 흐를 때 출구측 압력(6 bar)을 설정해 놓

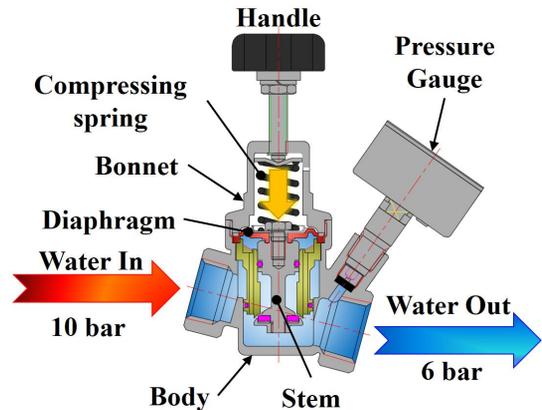


Fig. 1 Front cross-sectional and operating principle of a pressure reducing valve

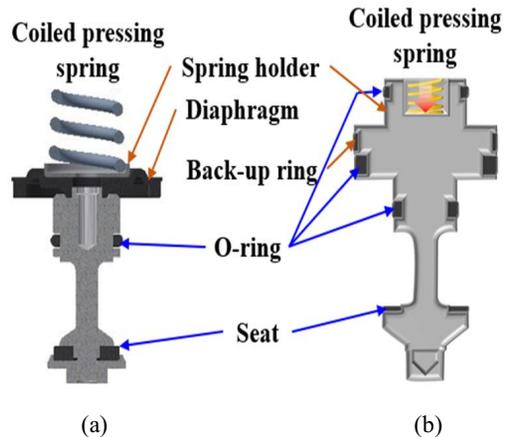


Fig. 2 (a) Original pressure reducing valve of stem front cross-sectional and (b) Design modified non-diaphragm type stem front cross-sectional

으면 압축스프링의 누르는 힘과 출구측 목표정압이 영향을 미치는 다이어프램 하부 압력과 균형이 이루어져 밸브는 닫힌 상태를 유지한다. 이때 물이 사용되면 출구측 압력은 낮아지게 되고, 다이어프램 하부에 작용하는 물의 압력이 감소하게 된다. 그러면 스프링의 하중에 의해 밸브의 스템이 아래로 내려가며 밸브 시트는 열리게 된다. 물이 사용하는 동안에 다이어프램에 미치는 압력과 스프링의 하중이 균형을 이루어 출구측 압력이 일정하게 유지된다^[7].

Table 1 Detailed dimension values of 4 type springs

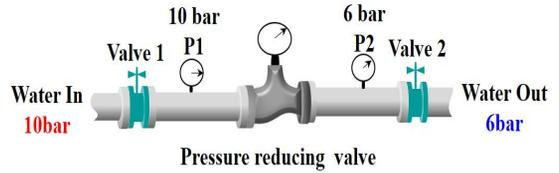
Separation (Spring stiffness %)	Type 1 (-20)	Type 2 (-10)	Type 3 (0)	Type 4 (+10)
Spring stiffness (kg/mm)	3.793	4.280	4.760	5.236
Spring load (kg _r)	48.344	36.380	49.390	43.721
Number of active coils	4.850	6.000	5.250	5.750
Solid height(mm)	15.760	20.000	18.130	20.150
Wire diameter(mm)	2.300	2.500	2.500	2.600
Length(mm)	28.500			
Center diameter(mm)	11.000			

Fig. 2는 본 연구에서 제안한 설계 변경된 스템 구조를 나타낸 것이다. Fig. 2(a)는 기존 감압밸브 스템의 단면도를 나타내었으며, Fig. 2(b)는 다이어프램이 없는 스템의 단면도를 나타내었다. 변경된 구조는 기존의 스템과 달리 스템과 스프링 홀더를 일체형으로 변경하고, 다이어프램 대신 2개의 오링을 추가하여 씰(Seal)역할을 하였으며, 백업링(Back-up ring)을 보강하여 스템의 상하 왕복시 오링의 이탈을 방지하였다.

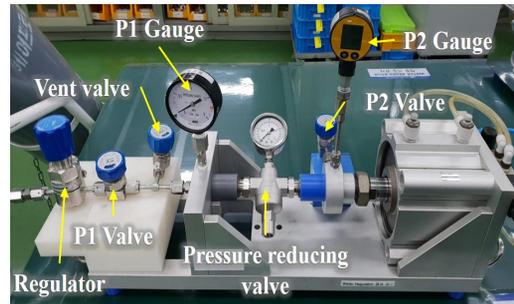
2.2 압축스프링 강성선정

동유체력(Hydrodynamic force)은 유체에 의해 스템에 작용하는 힘으로 시간에 따라 변동한다. 동유체력이 스템에 압력을 가하면 균형을 유지하고 있던 스프링 하중은 반대방향으로 작용을 하게 된다. 동유체력에 비례하여 스프링은 압축을 하고 유체의 유입과 유출이 나타난다³⁾.

Table 1은 스프링강성을 고려하여 4가지 타입으로 제작된 압축스프링 데이터를 나타내었다. 압축스프링 제작을 위해 모든 스프링이 동일하게 적용된 변수는 스프링이 장착되는 홀더 크기에 맞도록 스프링의 전체 자유높이 H=28.5 mm, 중심경 D=11 mm로 동일하게 설계되었다.



(a) Device conceptual diagram for pressure characteristic test



(b) Pressure characteristic test device for pressure reducing valve

Fig. 3 Pressure characteristic evaluation schematics product test device

스프링 강성(K, Spring stiffness)은 기존 감압밸브의 스프링 강성을 기준으로 하여 -20, -10, 0, 10%까지의 4단계의 스프링 강성을 설정 하였다. 기존의 스프링을 사용하였기 때문에 스프링 치수 조건만을 이용하여 설계단계에서 바로 적용을 하였다. 스프링 강성은 다음 식 (1)로 정의할 수 있다.

$$K = \frac{Gd^4}{8NaD^3} \quad (1)$$

여기서 스프링 횡탄성계수 G= 75 GPa로 동일하며, 유효권수 Na와 와이어 선경 d는 스프링에 따라 달라진다. 스프링 하중 P는 식 (2)를 통해 계산되어지며, 이때 변위량 δ는 감압밸브가 닫혀 있을 때의 스프링 자유높이에서 감압밸브를 열었을 때 최대 압축이 되는 스프링 밀착높이를 뺀 값이다.

$$P = K \times \delta \quad (2)$$

3. 실험 장치 및 방법

3.1 압축스프링에 따른 압력특성 평가

4종류의 압축스프링을 제작하여 감압밸브에 조립한 후 압력특성평가를 실시하였다. 압력특성평가는 ASSE 1003^[13], KS B 6153의 시험 방법에 따라 진행되었으며, 합격 기준은 1분간 압력 유지 후 15초 동안 P2의 압력이 변동 없는지 확인한다.

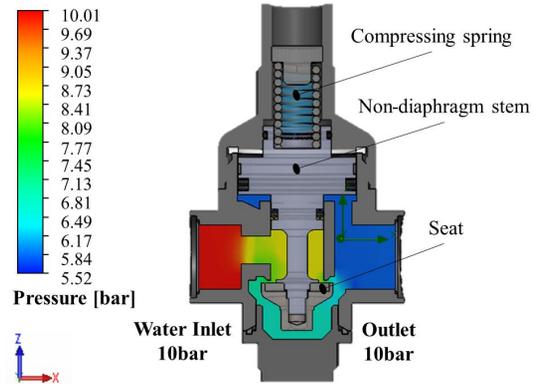
Fig. 3(a)는 압력특성평가 장치 개념도를 나타낸다. Fig. 3(b)는 개념도를 바탕으로 시제품 시험을 위한 장치를 구성해 놓은 것이다. 감압밸브 토출구측 밸브(P2 Valve)를 막고 레귤레이터로 입구측 압력(P1 Gauge)을 10 bar로 설정한 후 출구측 압력(P2 Gauge)을 6 bar로 설정한다. 이때 사용된 유체는 질소(N₂)가스를 사용하였는데, 가스분자가 물분자보다 크기가 작아 누설이 발생할 확률이 더 높다. 감압밸브의 누설시험과 압력특성평가를 동시에 진행할 수 있는 장점이 있다. 질소가스가 감압밸브를 걸쳐 토출되는 압력 값을 확인하여 스프링을 선택한다.

3.2 감압밸브 내부 유동해석

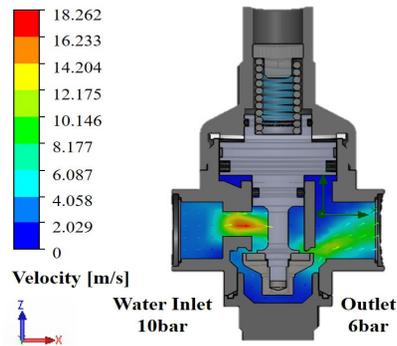
감압밸브 내부 유동해석을 하기 위한 모델링은 3D CAD S/W(Autodesk Inventor Pro 2017)를 사용하였으며, Solidworks Flow Simulation 2018^[14,15]을 사용하여 유동 해석을 진행하였다. 최종 선정된 스프링의 모델링과 설계 변경된 스템이 적용된 감압밸브 내부 유동장에서 압력과 유속, 유량을 해석하여 기존의 감압밸브와 비교하기 위해 유동해석을 수행하였다.

입구측과 출구측의 경계조건은 감압밸브가 실제 사용되는 조건과 동일하게 적용하였으며, 유체의 종류는 물로 지정하였으며, 모든 벽면에는 점착조건(No-slip)과 단열조건을 적용하였고, 유동해석 형상 중심면을 기준으로 유동혼합이 없는 대칭조건(Symmetry)을 주었다. 유체의 유동이 발생하기 위해서 감압밸브의 열림상태에서 유동해석을 수행하였다.

Fig. 4은 설계 변경된 스템과 선정된 압축스프링이 적용된 감압밸브 내의 압력과 속도 분포에 대한



(a) Pressure change of pressure reducing valve



(b) Velocity change of pressure reducing valve

Fig. 4 Computational fluid dynamics results of pressure reducing valve

대표적인 CFD 결과를 나타낸 것이다. Fig. 4(a)는 압력의 변화를 나타낸 것이고, Fig. 4(b)는 속도분포를 나타낸 것이다. 입구측에서 물이 지나면서 감압이 될 때 토출압력과 유속에 대한 변화를 알 수 있다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 외부누설과 토출압력 평가

시제품의 입구측으로 압력을 가했을 때 가스 누설이 예상되는 본넷과 바디 결합부와 핸들이 장착되는 부분에 누설액을 뿌려 가스누설을 육안으로

Table 2 Result of pressure characteristic test according to each spring stiffness

Separation (Spring stiffness %)	Type 1 (-20)	Type 2 (-10)	Type 3 (0)	Type 4 (+10)
Spring stiffness (kg/mm)	3.793	4.280	4.760	5.236
ΔP	0	0.5	1	1.3

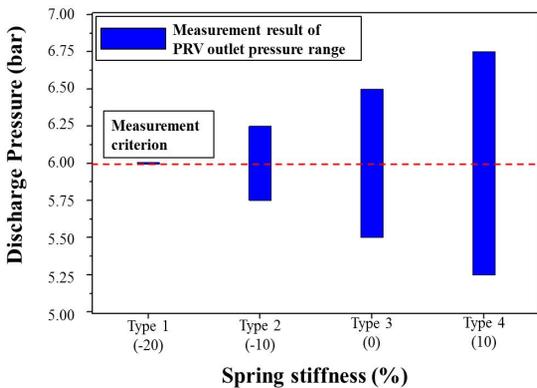


Fig. 5 Graph showing pressure variation per spring stiffness

확인하였다. 1분간 누설액 변화를 관찰하였으며, 외부로의 질소가스 누출은 나타나지 않았다. 내부 구조 변경에 따른 감압밸브 기밀성능은 이상없는 것을 확인하였다.

Table 2는 스프링별 P2로 토출되는 질소가스의 압력변화량을 나타낸 것이다. 출구측의 압력이 6 bar로 설정이 되어있는 상태에서 유체가 흐르게 되면 스프링의 하중과 압력의 균형이 이루어져 밸브가 닫힌 상태에서 감압이 이루어 져야한다. 이때, Type 1의 스프링을 적용한 감압밸브는 스프링의 하중과 감압밸브 내부 유체의 압력이 균형을 이루어 목표한 정압으로의 압력을 방출하였다.

Fig. 5는 각 스프링별 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 스프링 강성 스프링을 적용한 감압밸브는 동일한 조건에서 압력이 일정하게 토출되는 것이 아니라 일정구간의 범위내에서 늘었다 줄었다를 반복하였다. 스프링 강성이 커질수록 토출되는 압력의 변화량도 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

Table 3 Flow analysis result of existing pressure reducing valve(PRV) and design modified pressure reducing valve

	Conventional PRV	Design modified PRV
Mass flow rate (kg/h)	2005.15	2302.18
Max velocity (m/s)	23.32	18.26

스프링 강성이 적다는 것은 제어압력 변화로 인해 밸브 개도가 보다 클 수 있다는 것으로서 직접적으로 민감도를 증가시킨다.

예를 들어 스프링 강성이 반으로 줄어든다면 동일한 제어 압력 감소에 대하여 2배의 밸브 이동 거리가 발생하게 된다. 밸브 이동거리가 크면 압력 저감량을 보충할 수 있는 유량이 즉시 공급되어 압력오차가 저감되게 된다. 제어 범위가 넓은 감압밸브와 좁은 제어 범위의 감압밸브를 비교하면, 압력제어 범위가 넓은 경우 부하 스프링 강성이 커지게 되므로 제어범위가 좁은 것이 유리하다 [16].

따라서 설계 변경된 감압밸브는 제어압력의 범위가 4 bar로 좁은 범위에 속하게 된다. 압축 스프링 강성이 적을수록 나타나는 압력의 변화량이 적게 나타나므로 -20% 스프링을 선정하였다.

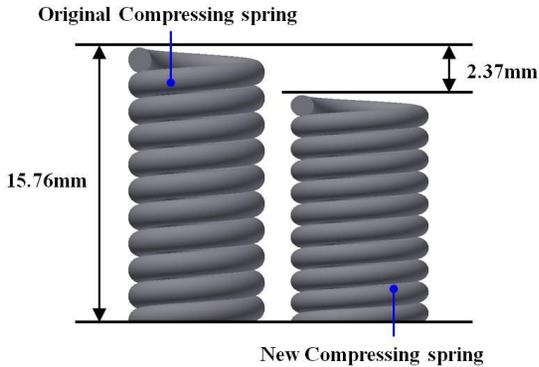
4.2 비다이어프램식 스템의 감압밸브 유량 평가

Table 3은 동일한 해석조건을 이용하여 기존의 감압밸브와 설계 변경된 감압밸브의 내부 유동해석을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 기존의 감압밸브의 질량유량 값은 2005.15kg/h로 나왔으며, 설계 변경된 감압밸브의 질량유량 값은 2302.18kg/h로 나타났다.

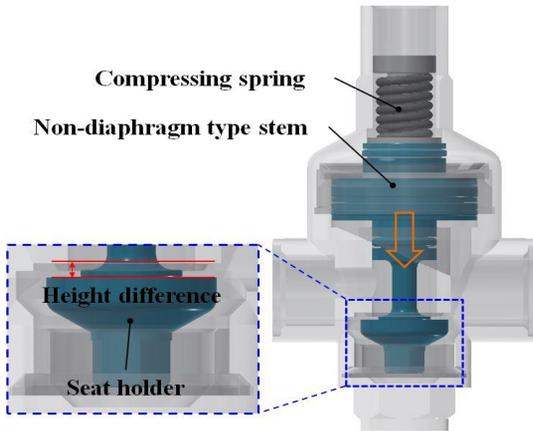
일반적으로 유량 Q는 식 (3)에서 구할 수 있다^[18].

$$Q = Av \quad (3)$$

여기서, A는 단면적, v는 유속으로 계산이 된다.



(a) Original and new compressing spring solid height



(b) Area of the seat through which the fluid flows

Fig. 6 Variation of fluid flow area due to height difference of compressing spring

감압밸브를 최대로 열었을 때의 스프링 밀착높이가 유체가 흘러 나가는 면적에 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. Fig. 6(a)는 기존 압축스프링과 새로 선정된 압축스프링의 밀착높이 차이를 보여준 것이다. 기존 감압밸브의 최대 밀착높이는 18.13 mm이고, 설계 변경된 감압밸브에 적용된 압축스프링의 밀착높이 15.76 mm보다 2.37 mm가 높다. Fig. 6(b)는 스프링의 높이차이로 인한 유체가 흐르는 면적의 변화를 나타낸 것이다. 기존의 감압밸브는 스템이 최대로 열릴 수 있는 거리가 줄어들어 유체가 흘러가는 시트부분의 면적이 더 넓어지지 못하였다. 그리고 기존 감압밸브 유속이 설계 변경된 제품보다 빠르지만, 유량

은 더 작게 토출이 된다는 것을 알 수 있다.

비다이어프램형 스템의 설계와 압축스프링 강성 선정으로 인하여 기존의 감압밸브보다 유량이 더 많이 토출되는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 기존 감압밸브 스템에서 야기되는 다이어프램이 손상되는 문제점들을 개선하기 위하여 다이어프램이 없는 스템으로 설계 변경 및 제작하고, 압축스프링을 선정하여 성능평가 및 기존의 감압밸브와의 유량을 비교 평가함으로써 다음의 결론을 도출하였다.

1. 감압밸브의 스템을 다이어프램이 없는 구조로 설계 변경하여 다이어프램의 역할을 오링과 백업링 보강으로 대체하였으며, 시제품을 제작, 가압하였을 때 외부로의 누설이 없고 유사한 성능을 보였다.
2. 감압밸브에 장착이 되는 압축스프링의 자유높이와, 중심직경이 동일하고, 스프링 강성과 유효권수,와이어 선경이 다른 4개의 스프링에 따라 스프링 강성이 클수록 토출압력의 변화량이 크게 나타났는데, 압력이 변동되는 범위내에서 최소 범위가 나타나는 스프링 강성을 선택해야 하는 것을 확인할 수 있었다.
3. 다이어프램이 적용된 감압밸브에 비하여, 비다이어프램식 스템 설계 변경된 감압밸브의 시트부 유로 면적이 넓어지면서 유속은 감소하였으나, 토출압력은 목표정압에 일정하게 토출되었으며, 유량은 15%가 증가되는 효과를 얻었다.

REFERENCES

1. Allison, T., and Brun, K., "Testing and Modeling of an Acoustic Instability in Pilot Operated Pressure Relief Valves," J. Gas Turbines Power Eng., Vol 138, No. 5, 2015.
2. Kang, C. W., Yi, C. S., Jang, S. M., and Lee, C. W., "A Study of the Measurement of the

- Flow Coefficient Cv of a Ball Valve for Instrumentation,” J. Korean Soc. of Manuf. Process Eng., Vol. 18, No. 3, pp. 103-108. 2019.
3. Park, J. Y., Baek, S. H., and Kang, J. H., “Design Criteria of Spring Stiffness for Pan Check Valve Using CFD Analysis,” J. Korean Soc. of Manuf. Process Eng., Vol. 13, No. 3, pp. 49-55. 2014.
 4. Lee, J. H., Kang, G. A., and Kwak, J. S., “Valve Seat Design for Full Contact Effect Using Grey Relational Analysis,” J. Korean Soc. of Manuf. Process Eng., Vol. 17, No. 4, pp. 17-22. 2018.
 5. Bae, J. K., Ahn, D. H., Kwon, B. C., and Ko, S. L., “Development of Efficient Brush Deburring Process for Valve Body of Auto Transmission,” J. Korean Soc. of Manuf. Process Eng., Vol. 17, No. 1, pp. 144-152. 2018.
 6. Lee, J. S., “Design and Computational Fluid Dynamics of Pressure Reducing Valve,” J. Korea Soc. Academia-Industrial Cooperation, Vol. 13, No. 7, pp. 2853-2857. 2012.
 7. Park, W. C., Lee, J. K., Kim, I. G., and Park, Y. S., “Study on Vibration Induced by Fluid at a Water Pressure Reducing Valve through Structure-Fluid Coupled Analysis,” J. Korea Soc. Academia-Industrial Cooperation, Vol. 13, No. 10, pp. 4371-4377, 2012.
 8. Hös, C. J., Champneys. A. R., Paul, K., and McNeely. M., “Dynamic Behaviour of Direct Spring Loaded Pressure Relief Valves Connected to Inlet Piping,” J. Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 48, pp. 270-288, 2017.
 9. Janus, T., Ulanicki, B. “Hydraulic Modeling for Pressure Reducing Valve Controller Design Addressing Disturbance Rejection and Stability Properties,” J. Procedia Engineering, Vol. 186, pp. 635-642, 2017.
 10. Yang, K. U., and Lee, I. Y., “A modeling of Proportional Control Valve and its Control,” J. Korea Soc. for Power System Eng., Vol. 6, No. 3, pp. 71-77, 2002.
 11. Yun, S. N., Ham, Y. B., and Jo, J. D., “Pressure Control Characteristics of Proportional Pressure Reducing Valve,” J. Korea Soc. for Power System Eng., Vol. 7, No. 1, pp. 68-73. 2003.
 12. Hong, Y. S., Ryu, S. B., and Kim, Y. S. “Development of a Direct-Operated Proportional Pressure Reducing Valve for Low-Band Type Active Suspension Control,” J. Korea Soc. Automotive Technology, Vol. 2, No. 3, pp. 75-84, 1994.
 13. ASSE 1003, “Performance Requirements for Water Pressure Reducing Valves for Domestic Water Distribution Systems,” American Soc. Sanitary Eng., 2009.
 14. Park, M. H., Lee, Y. W., Lee, Y. M., Park, J. H., and Kang, M. C., “Structural Optimization of Industrial Safety Helmet According to Frame Shape Using Engineering Plastic,” J. Korean Soc. of Manuf. Process Eng., Vol 18, No. 3, pp. 41-48, 2019.
 15. Jung, I. D., Lee, Y. M., Oh, M. O., Kim, S. C. Lee, T. G., and Kang, M. C., “Development of Skin Type Airbag Helmet Through Consumer Oriented Concept Design and the Cushion Part’s Impact Analysis,” J. Korean Soc. of Manuf. Process Eng., Vol. 15, No. 6, pp. 101-108, 2016.
 16. Samar, G. V. “Solidworks Flow Simulation 2018 Black Book,” CadCamCae Works, 2018.
 17. Jury, F. D., “Fundamentals of Gas Pressure Regulation,” Technical monography 27, Fisher Control, 1972.
 18. Yi, H. W., Lee, Y. M., Shin, B. S., Lee, T. G. and Kang, M. C., “Prototype Manufacturing Using 3D Printing and Characteristics of Flow Rate and Dynamics for High Temperature Solenoid Valve,” J. Korean Soc. of Precis Eng., Vol. 33, No. 5, pp. 341-348, 2016.