Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 20, No. 12 pp. 125-130, 2019

https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.12.125
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

가스스프링 실린더내의 오리피스 홀을 갖는 피스톤 거동에 관한 연구

정남균
인하공업전문대학 기계과

A study on the behavior of the piston with orifice hole in the cylinder of a gas spring

Nam-Gyun Jeong
Division of Mechanical Engineering, Inha Technical College

요 약 가스스프링은 그 사용 목적에 따라 다양한 설계가 가능하여 많은 분야에서 사용되고 있고 그 사용량도 계속하여 증가하고 있다. 본 연구에서는 가스스프링을 압축할 경우 반발력을 감소시키고 피스톤이 복귀할 때 저속으로 복귀할 수 있도록 설계된, 오리피스 홀을 갖는 피스톤의 가스스프링 실린더 내부에서의 거동을 전산유체해석을 이용하여 예측해 보았다. 해석결과 가스스프링 내의 초기 가스압을 일정 수준 이상으로 증가시키면 피스톤의 복귀속도가 시간에 따라 감소하지 않고 일정하게 유지됨을 알 수 있었다. 오리피스 홀 사이즈가 피스톤 복귀속도에 미치는 영향을 해석을 통해 알아보았다. 오리피스 홀 사이즈를 줄이게 되면 피스톤 양단의 압력 차가 증가하여 피스톤 전진속도가 감소하게 되고 보다 등속으로 운동하게 됨을 알 수 있었다. 마지막으로 피스톤의 속도가 일정하다는 가정에서 초기 가스압에 따른 피스톤의 복귀속도를 이론적인 방법으로 도출하였고, 여러 초기 가스압에 대한 해석 결과와 비교하였다. 비교결과 이론적으로 도출한 해와 해석결과로부터 얻어진 결과 값이 거의 일치함을 알 수 있었다.

Abstract A gas-spring has been used in many areas and its use is increasing because it can be designed for a range of purposes. In this study, the behavior of a piston with an orifice hole inside the gas-spring cylinder was predicted using computational fluid dynamics (CFD). The piston was designed to reduce the reaction force if the gas-spring is compressed and to move at a low speed when it is returned. The analysis showed that if the initial gas pressure in the gas-spring is increased to a certain level, the speed of the piston would not decrease with time but will remain constant. The effects of orifice hall size on the piston return speed were investigated. Reducing the size of the orifice hole will increase the pressure difference on both sides of the piston, reduce the piston speed, and make it more constant. On the assumption of a constant speed of the piston, a theoretical solution to the return speed of the piston was derived according to the initial gas pressure, and the results for several initial gas pressures were compared with those of CFD. Comparison studies showed similar results for both methods.

Keywords : Gas-spring, Piston, Return Speed, Orifice Hole, Computational Fluid Dynamics

1. 서론

다양한 산업분야에서 널리 사용되고 있는 가스스프링은 밀폐된 실린더에 고압으로 주입된 가스의 압력으로부터 반발력을 얻어 사용되는 스프링의 한 형태로, 실린더 내부에 주입되는 가스의 압력에 따라 소형의 사이즈로도 큰 반발력을 얻을 수 있고, 그 사용 목적에 따라 다양한 설계가 가능하여 효용성이 높아 사용량이 지속적으로 증

*Corresponding Author : Nam-Gyun Jeong(Inha Technical College)
email: nkjung@inhatc.ac.kr
Received August 8, 2019 Revised October 22, 2019
Accepted December 6, 2019 Published December 31, 2019

가하고 있다[1-3].

가스스프링은 압축되었다가 압축된 가스의 반발력으로 복귀가 되는 압축가스스프링과 인장된 상태의 피스톤이 원상태로 복귀하게 되는 인장가스스프링으로 나뉘게 되는데, 안전문제 및 목적에 맞는 이용을 위하여 속도 제어 구현에 대한 연구 및 노력이 지속적으로 이루어지고 있다[4-6]. 예를 들어, 일반적인 압축가스스프링의 경우 스프링을 압축하면 피스톤 전단에 충진 되어 있는 가스가 압축되어 고압의 영역을 형성하고, 피스톤로드 쪽은 팽창된 진공영역으로 인해 저압의 영역이 형성되어 스프링이 압축될수록 반발력이 크게 증가하게 된다. 또한, 스프링에 작용하는 외력이 제거될 경우 가스스프링이 빠른 속도로 복귀하게 되므로 이러한 반발력 증가 문제와 빠른 복귀속도 문제를 해결하기 위해 피스톤 내부에 사이즈가 다른 오리피스 홀을 가공하여 피스톤의 운동 방향에 따라 가스가 다른 사이즈의 홀을 통과하도록 설계하는 방안이 제시되었는데, 가스스프링이 압축될 때는 가스가 피스톤에 가공된 대직경의 오리피스 홀을 통과하도록 하여 피스톤 전, 후단에서의 압력차를 줄여 반발력을 감소시키고, 피스톤이 복귀할 때는 가스가 피스톤의 소직경 오리피스를 통과하도록 하여 저속으로 복귀할 수 있도록 하였다[5].

본 연구에서는 오리피스 홀이 있는 피스톤이 복귀할 때 스프링 내부 가스압이 피스톤 거동에 어떤 영향을 미치는지 전산해석을 통하여 알아보았다.

2. 본론

2.1 형상 및 격자계

가스스프링의 기본구조는 개략적으로 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있으나, 스프링 내부의 유동해석에서는 가스씰, 피스톤 오링 등 실제 가스스프링을 설계하기 위한 모든 부품의 3차원 모델링 데이터가 불필요하므로, 이러한 부품들을 제외한 실린더와 피스톤 부분만 고려하였고, 고체에 해당되는 부분을 제외하여 Fig. 2와 같이 해석에 사용할 유동영역을 추출하였다. 따라서 Fig. 2에서는 피스톤의 형상은 나타나지 않고 피스톤 내부에 존재하는 소직경의 오리피스 홀만 나타나 있다. 실린더의 내부 직경과 길이는 각각 2 cm와 15 cm로 하였고, 피스톤 오리피스는 2 mm 직경에 1 cm 길이의 유로를 갖는다고 가정하였다.

가스스프링의 피스톤거동을 모사하기 위해서는 피스톤의 움직임에 따라 오리피스 홀을 포함한 피스톤의 경계면이 이동해야 되고, 경계면 이동과 더불어 내부 공간의 변형이 수반되어야 하는데 이러한 공간 변형에 따른 격자의 재생성이 유리하도록 오리피스 홀 앞, 뒤의 실린더 내부 영역을 따로 분할하였다.

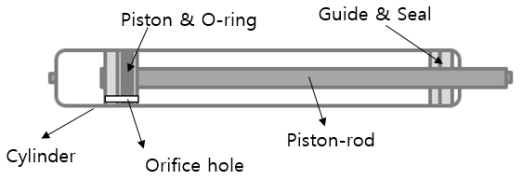

Fig. 1. Schematic diagram of the gas-spring.

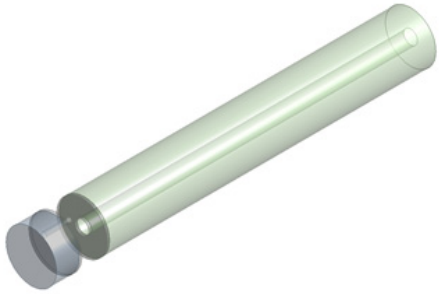

Fig. 2. Fluid domain for the calculation

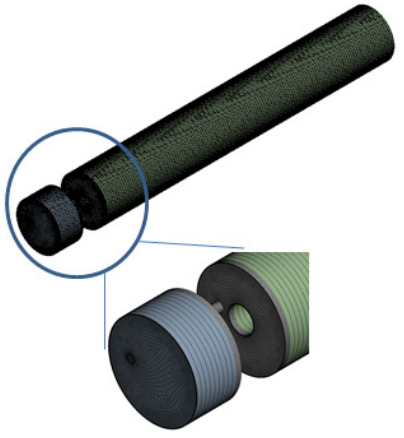

Fig. 3. Grid system

유동해석은 해석을 위한 격자를 어떻게 구성하느냐에 따라서 해석에 필요한 격자 수, 그에 따른 해석 시간, 해석이 진행되는 과정에서 해의 수렴성, 해석 결과의 정확도 등이 크게 좌우하게 된다. 따라서 본 연구에서는 격자의 품질을 좋게 하고 격자의 재생성이 유리하도록 Fig. 3

과 같이 해석 전체 영역에서 Hexahedral 격자를 사용하였고, 벽면 근처에서의 유동을 잘 모사하기 위하여 실린더와 오리피스 홀의 벽 근체에 경계층 격자를 조밀하게 구성하였다.

2.2 해석 조건 및 방법

가스스프링이 압축이 되면 피스톤이 실린더 안쪽으로 진입하게 되면서 피스톤과 실린더 사이에 충진된 질소가스가 압축되어 실린더 내부의 압력이 증가하게 된다[7]. 피스톤에 오리피스 홀이 존재하게 되면, 일정 시간이 지난 후 피스톤 전면과 로드면에서의 압력은 동일하게 되는데, 피스톤 로드면의 면적이 피스톤 전면의 면적보다 작기 때문에 피스톤 양단에 힘의 차이가 발생하여 피스톤이 복귀하기 시작한다. 본 연구는 이렇게 실린더 내부의 압력이 증가된 상태에서 피스톤이 복귀하는 운동을 모사하였는데, 계산에서 피스톤의 초기 위치를 실린더 내벽에서 1 cm 떨어진 위치로 가정하였다. 경계조건은 가스가 실린더 외부로 유출되지 않으므로 전 경계영역에 벽조건을 사용하였다.

가스스프링에 대한 시뮬레이션에서 피스톤의 운동을 실제와 같이 모사하기 위해서는 Eq. (1)과 같이 피스톤에 작용하는 외력 및 마찰력에 의해 피스톤의 운동이 결정되게 해야 한다[8].

$$V^n = V^{n-1} + (F_E^n + F_S^n)\frac{dt}{m} \qquad (1)$$

여기서 V^n, F_E^n, F_S^n, 은 n번째 time step에서의 피스톤 속도, 피스톤에 가해지는 외력 및 마찰력이고, m과 dt는 피스톤과 피스톤 로드의 총 질량 및 time step이다. 본 연구에서 피스톤에 가해지는 마찰력과 피스톤 및 피스톤로드의 총 질량을 각각 10 N, 0.046 kg이라고 가정하였다.

전산해석을 위해 사용한 ANSYS-FLUENT[8]는 피스톤의 거동 모사와 같이 경계 변위 모델링이 필요한 해석에 대하여 시간의 변화에 따른 경계면의 변화를 모델링하는 다양한 Dynamic Mesh Model을 제공하고 있는데, 피스톤의 변위가 피스톤에 가해지는 외력 및 내부 유체가 피스톤에 작용하는 힘의 관계에 따라 결정되므로 본 연구에서는 6-DOF 모델과 더불어 User Defined Function 모델을 같이 사용하였다. 또한, 피스톤의 움직임에 따른 해석 격자의 재생성은 Layering 기법을 이용하여 구현하였다.

2.3 해석 결과

피스톤 복귀운동이 시작되면 피스톤로드 쪽에서 가스가 압축되면서 압력이 증가하게 되고, 피스톤 양단간에 압력 차가 발생하여 로드면의 가스가 상대적으로 압력이 작은 피스톤 전면 쪽으로 이동하게 된다. Fig. 4에 가스스프링 내 초기 가스압이 5 bar인 경우, 피스톤이 복귀하기 시작하는 초기 단계에서의 가스스프링 내부 압력과 유동을 나타내었는데, 피스톤 복귀운동 시에 발생하는 이러한 유동 특성을 해석 결과에서도 파악해 볼 수 있다.

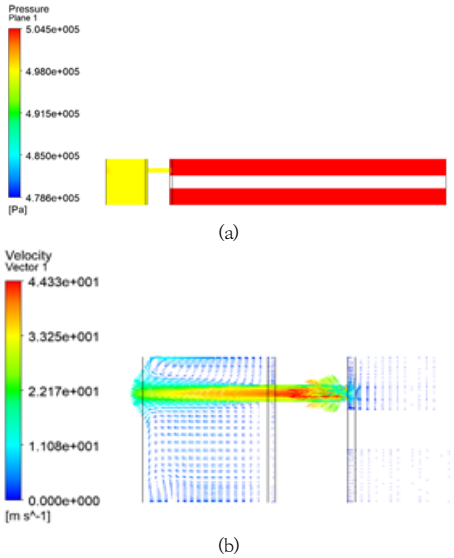

Fig. 4. Pressure and velocity distribution in the gas-spring (a) Pressure distribution (b) Flow distribution

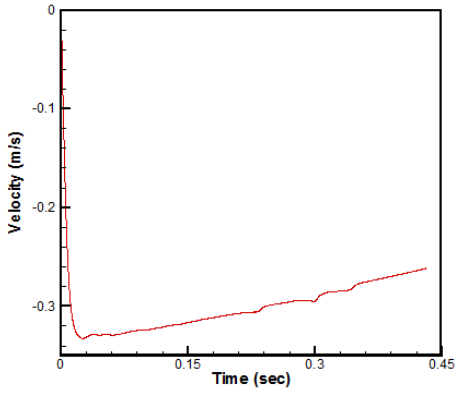

Fig. 5. Return speed of the piston along the time

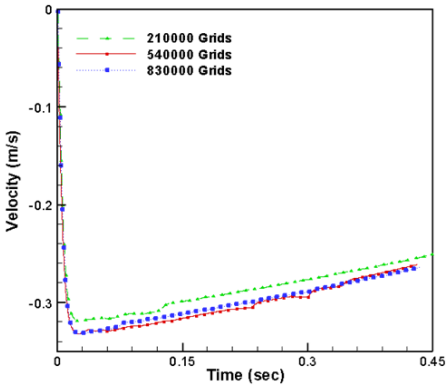

Fig. 6. Results of grid sensitive test

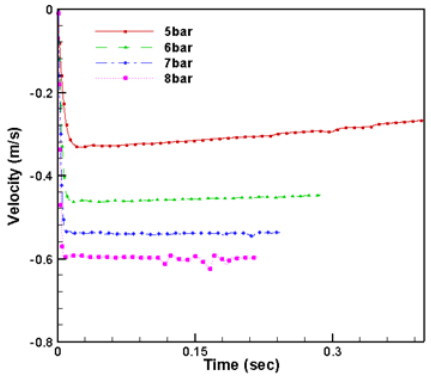

Fig. 7. Comparison of piston return speed for several initial gas pressures

Fig. 5는 시간에 따른 피스톤 복귀속도를 나타냈다. 초반에 피스톤 전, 후면에서 발생하는 힘의 차이로 인해 피스톤 복귀속도가 순간적으로 0.33 m/s까지 증가하다 이후로는 마찰력과 피스톤 로드면에서 발생하는 고압으로 인해 피스톤 복귀속도가 점진적으로 감소하고 있음을 알 수 있다. 계산의 신뢰성을 확보하기 위하여 동일한 계산 조건에서 격자 민감도테스트를 수행하였다. 테스트에 사용된 격자는 210000, 540000, 830000개이고, 비교결과는 Fig. 6에 나타내었다. 540000개와 830000개의 격자를 사용했을 경우는 순간 증가하는 피스톤 복귀속도의 크기와 시간에 따라 감소하는 경향이 두 격자에 대하여 거의 일치하나, 210000개의 격자를 사용했을 경우는 피스톤 복귀속도의 최대 크기가 다른 두 경우와 약 3.3 % 의 차이를 보인다. 따라서 계산의 효율성을 고려하여 이후의 계산에서는 540000개의 격자를 사용하였다.

가스스프링 내부의 초기 압력이 피스톤 거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 가스스프링 내부의 초기 가스압을 점차로 증가 시켰을 경우에 대한 피스톤 복귀속도를 계산하였고, Fig. 7에결과를 나타내었다. 초기 가스 압력을 6 bar, 7 bar, 8 bar로 변경하여 해석을 수행하였는데, 각 경우에 대하여 피스톤 초기 이동 속도의 크기만 0.46 m/s, 0.54 m/s, 0.60 m/s로 증가하고 시간에 따라서 감소하는 모습 없이 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있다. 초기 가스 압이 커지면 피스톤을 복귀시키는 힘이 증가하므로, 동일한 마찰력이 작용하는 경우 피스톤의 가속도 또한 증가하게 되어 초기 피스톤의 이동속도는 초기 가스 압력에 따라 증가하게 된다. 초기 가스 압력이 일정 수준보다 크면 피스톤을 복귀시키는 힘이 마찰력보다 더 커져서 복귀속도가 시간에 따라 점차로 증가해야 하나, 피스톤이 복귀운동을 하게 되면 Fig. 1에서 보인 것과 같이 피스톤 로드면에서 압축되는 가스의 압력이 피스톤 전면에서의 압력보다 더 커지게 되어 피스톤을 감속시키게 된다. 그런데, 초기 가스 압력이 일정 수준 이상이 되면 피스톤을 복귀시키려는 힘이 피스톤에 작용하는 마찰력 및 피스톤 전, 후면의 압력차에 의한 힘과 평형을 이루게 되어 피스톤이 등속운동을 하게 되는 것으로 판단된다.

마지막으로 오리피스 홀 사이즈가 변경되었을 때 피스톤 복귀속도에 어떻게 영향을 미치는 지 알아보기 위하여, 초기 가스스프링 내부의 가스압을 5 bar로 유지한 상태에서 오리피스 홀 사이즈만 2 mm 직경에서 1.5 mm와 1.0 mm로 줄여 해석을 수행하였다. Fig. 8에서 보이는 것처럼 동일한 조건에서 오리피스 홀 사이즈를 줄였을 때, 피스톤 초기 이동 속도의 크기가 0.33 m/s, 0.17 m/s, 0.079 m/s로 감소함을 알 수 있다. 또한 홀 사이즈가 2 mm일 때보다 1.5 mm인 경우가 시간에 따른 속도 감소가 훨씬 작고, 홀 사이즈를 1.0 mm로 줄인 경우는 시간에 따라서 감소하는 모습 없이 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다. 이것은 홀 사이즈가 감소하게 되면 유체가 홀을 통과하여 흐르기 어려워지고, 이에 따라 피스톤 복귀 시 피스톤 로드면에서의 압력 증가가 더 커지기 때문이라고 판단된다.

2.4 이론 해 도출

앞선 해석결과에서 가스스프링 내부의 초기 가스압을 증가시키거나, 피스톤의 오리피스 홀 사이즈를 줄이면, 피스톤이 등속운동에 가까워짐을 알 수 있었다. 피스톤이 등속운동을 한다는 것은 피스톤 주변에서 피스톤에 가해지는 힘이 평형을 이루고 있다는 것이므로, 이를 이용하여 피스톤 복귀속도에 대한 이론적인 해를 도출할 수 있

다. 피스톤 주변에 작용하는 힘을 개략적으로 나타내면 Fig. 9과 같다.

피스톤 전면에 작용하는 압력을 P라고 하고, 피스톤 복귀운동으로 인하여 증가된 압력을 $P+\triangle P$라고 하면 힘 평형방정식으로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\triangle P = \frac{P(A_1 - A_2) - F}{A_2} \tag{2}$$

여기서, F는 피스톤에 작용하는 마찰력이고, A_1과 A_2는 각각 피스톤 전면과 로드면에서 가스가 접하는 면적이다.

피스톤 양단에 압력차 $\triangle P$가 발생하면, 피스톤 로드면의 가스가 V_g의 속도로 직경이 D인 오리피스 홀을 통과하게 되고, 피스톤 전면부로 이동한 가스는 V_P로 움직이는 피스톤의 전면부의 공간을 채우면서 압력을 회복시키게 되는데, $\triangle P$, V_P, 그리고 V_g의 관계는 아래와 같다.

$$\triangle P = \left(f\frac{L}{D} + K_1 + K_2\right)\frac{1}{2}\rho V_g \tag{3}$$

$$V_P = \frac{A_{hole}}{A_1} V_g = \frac{(\pi D^2)/4}{A_1} V_g \tag{4}$$

$$\therefore \quad V_P = \frac{\pi D^2\{P(A_1 - A_2) - F\}}{2A_1A_2\rho(fL/D + K_1 + K_2)} \tag{5}$$

여기서, f는 마찰계수로서 $Re \le 10^5$인 범위에서 $f = 0.3164/Re^{1/4}$으로 나타낼 수 있다[9]. L은 오리피스 홀의 길이이며, K_1과 K_2는 가스가 오리피스 홀로 유입되거나 빠져나가면서 발생하는 손실계수로 $K_1 = 0.5$, $K_2 = 1.0$이 사용되었다[10].

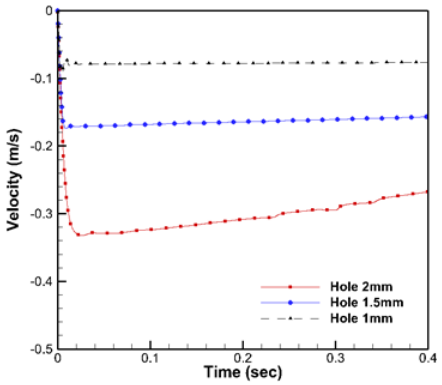

Fig. 8. Results of hole size effect on the piston return speed

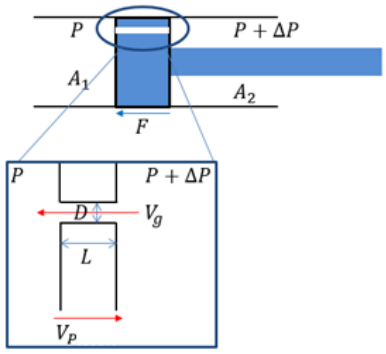

Fig. 9. Schematic diagram of acting force on the piston

본 연구에서 가스스프링에 채워진 질소가스는 계산에 가스의 압축성이 반영되어야 하고, 계산조건이 질소가스의 critical point에서 상당히 멀리 떨어져있어 이상기체로 가정하여 해석을 수행하였다. 따라서 질소의 밀도는 $\rho = (P + P_{atm})/RT$ 로 나타낼 수 있고, 가정된 온도조건 $T = 300K$ 과 질소의 기체상수인 $R = 0.2968kJ/kg \cdot K$을 사용하여 주어진 압력조건에 따라 값을 예측할 수가 있다. Eq. (5)에서 f는 Re 수에 대한 함수 값이고 Re 수는 V_g에 따라 변하기 때문에, 피스톤의 복귀 속도인 V_P를 구하기 위해서는 Implicit 방법을 이용해야 된다. Table 1에 등속으로 운동하는 피스톤의 복귀속도에 대한 이론 해를 전산해석으로 구한 값과 비교해보았다. 이론적으로 구한 값과 전산해석을 통하여 계산된 값이 약 5 % 내의 차이를 보이며 일치하는 것을 알 수 있다.

Table 1. Comparison of piston velocity

Initial gas pressure	Piston velocity		
	CFD result	Theoretical solution	Error
5 bar (D=1mm)	0.079 m/s	0.083 m/s	5.1 %
6 bar (D=2mm)	0.46 m/s	0.48 m/s	4.3 %
7 bar (D=2mm)	0.54 m/s	0.56 m/s	3.7 %
8 bar (D=2mm)	0.60 m/s	0.61 m/s	2.2 %

3. 결론

본 연구에서는 가스스프링 내에서 오리피스 피스톤의 거동을 전산유체해석을 통해 모사해 보았다. 계산에서 고

려한 가스스프링 실린더의 내경과 길이는 2 cm x 15 cm이고, 길이가 1 cm인 피스톤에는 직경 2 mm의 오리피스 홀이 가공되어있다고 가정하였다. 로드를 포함한 총 질량이 0.046 kg인 피스톤에 10 N의 마찰력이 작용한다고 가정하여 계산을 수행한 결과 아래와 같은 결론을 얻게 되었다.

1. 초기 가스압이 5 bar인 경우는 시간에 따라 피스톤 복귀 속도가 점차로 작아졌으나, 초기 가스압을 특정 압력 이상으로 증가시키면 피스톤 복귀속도는 압력에 따라 초기 속도의 크기만 달라지고 시간에 따른 변화는 없는 것으로 예측되었다.
2. 초기 가스압을 5 bar로 유지하는 대신 홀 사이즈를 1.5 mm와 1.0 mm로 줄여 피스톤 양단간의 압력차를 증가시키게 되면, 피스톤 복귀속도의 크기는 줄어드나 시간에 따른 속도의 변화가 없이 등속운동에 가까워짐을 알 수 있었다.
3. 피스톤 복귀운동을 등속운동으로 가정하여 이론 해를 도출하고 해석결과와 비교해본 결과, 이론적으로 도출된 해와 전산해석을 통해 얻어진 해가 거의 일치함을 알 수 있었다.

References

[1] I. S. Han, K. J. Choi, J. Y. Kim, Y. B. Lee, "The numerical analysis and experimental verification of the heat transfer effect on the highly pressured gas spring", *Trans. KSAE.*, Vol.21, No.2, pp.87-97, 2013. DOI: http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.11.7745

[2] S. K. Lim, C. H. Lee, I. Hwang, H. W. Kang, S. J. Park, "Design of high frequency casting machine for dental", *Proceedings of KSMTE Spring Meeting*, pp.264-265, 2011.

[3] C. W. Park, H. Y. Kim, "A study on the auto-mobile gas spring structural analysis using of bimetal", *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, Vol.22, No.1, pp.131-137, 2013. DOI: http://dx.doi.org/10.7735/ksmte.2013.22.1.131

[4] J. I. Lee, "A study on the cross section in pipe type orifice of suitable piston rod moving in gas spring elevation working", *J. Korea Acad. Industr. Coop. Soc.* Vol.16, No.11, pp.7745-7753, 2015. DOI: http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.11.7745

[5] J. I. Lee, "A optimized structural design of piston on moving in gas spring elevation working", *J. Korea Acad. Industr. Coop. Soc.* Vol.16, No.12, pp.8274-8283, 2015. DOI: http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.12.8274

[6] N. G. Jeong, "A study on the behavior of the piston with varying friction force in the double cylinder-typed extension gas spring", *J. Korea Acad. Industr. Coop. Soc.* Vol.19, No.2, pp.9-14, 2018. DOI: https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.2.9

[7] Camloc motion control Inc., "Understanding The Basics: Guide to Gas Spring Application"

[8] ANSYS Inc., "ANSYS FLUENT User's Guide"

[9] R. W. Fox, A. T. McDonald, *Introduction to Fluid Mechanics, Fourth Edition,* John Wiley & Sons, p.335, 1994.

[10] CRANE Corporation, *Flow of fluids through valves, fittings and pipe,* CRANE, p. A-29, 1988.

정 남 균(Nam-Gyun Jeong) [정회원]

- 2001년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)
- 2007년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
- 2007년 3월 ~ 2010년 10월 : 삼성전자 책임연구원
- 2010년 11월 ~ 2015년 2월 : 한국원자력연구원 선임연구원
- 2015년 3월 ~ 현재 : 인하공업전문대학 기계과교수

〈관심분야〉
전산유체역학, 다상유동