◎ 논 문
◎ Original Paper

DOI: http://dx.doi.org/10.5293/kfma.2015.18.2.048
ISSN (Print): 2287-9706

쿠션 형상 변화에 따른 유압 액추에이터 작동 특성 연구

김진형* · 강현수* · 한수민** · 김윤제***†

Motion Characteristics of Hydraulic Actuator with Various Cushion Shapes

Jin-Hyoung Kim*, Hyun-Su Kang*, Su-Min Han**, Youn-Jea Kim***†

Key Words : Hydraulic actuator(유압 액추에이터), Cushion(쿠션), Motion characteristics(작동 특성), CFD(전산유체역학)

ABSTRACT

Hydraulic actuator is a primary component of the hydraulic valve systems. This paper describes a motion characteristic of hydraulic actuator with various configurations of cushion. It plays an important role in protecting the actuator from the shock when the piston reaches the end position. Numerical analyses were conducted by using commercial code, ANSYS with k-ε turbulent model. The results for pressure and velocity distributions in the hydraulic actuator with different cushion shapes were graphically depicted.

1. 서 론

유압 액추에이터는 여러 가지 동력을 이용하여 밸브를 제어하는 장치이다. 최근 대형 건설기계 및 산업기계용 유압기기의 고압화, 고속화가 요구되고 있다. 고압·고속으로 실린더가 선형 왕복 운동시 관성력에 의해 운동에너지가 과대하게 발생하게 되고 이것이 행정끝단에 기계적으로 충돌하면 충격이 발생하여 유압 액추에이터 수명에 큰 영향을 미친다. 이러한 행정 끝단에서 피스톤과 피스톤 로드를 포함한 운동체의 관성력을 흡수하여 가속도를 완화할 목적으로 유압 액추에이터 내부에 댐핑(damping) 효과를 주는 쿠션장치(cushion device)를 내장시킴으로써 외부하중, 공급압력, 고속구동에 의한 충격력 및 진동을 감소시켜 시스템의 신뢰성 및 제어성 향상을 도모할 수 있다. 쿠션장치의 원리는 유압 액추에이터 운동체가 양 끝단에 도달하기 전 유로를 축소하여 순간적으로 높은 압력을 유발시켜 운동체의 운동에너지를 유체에너지로 변화함으로써 가속도를 감소시켜 충격을 완화시키는 것이다. Kim 등[1]은 쿠션슬리브의 오리피스 유무에 따른 작동 특성 비교와 동일한 오리피스 단면적을 가진 4 종류의 쿠션 슬리브를 제작하여 특성을 고찰하였다. 그 결과 오리피스 유무에 대한 비교 연구에서 오리피스가 없는 쿠션슬리브보다 오리피스가 있는 쿠션슬리브 효과가 우수하다는 결과를 도출하였다. Lee 등[2]은 유압서보액추에이터 후단부에 쿠션 기능을 추가하고 쿠션설계 조건에 따른 동특성을 해석할 수 있는 모델링 및 SimulationX을 이용한 시뮬레이션을 수행하였다. Lee 등[3]은 굴삭기에 사용되는 유압실린더 쿠션 장치의 성능을 실험적으로 고찰하였으며, 쿠션 링과 씰 방식을 변형한 3 종의 유압실린더에 외부 하중을 가한 상태에서 속도 및 압력을 변화시켜 쿠션 시간과 쿠션 압력의 변화를 분석하여 최적의 쿠션 특성을 고찰하였다. Choi 등[4]은 굴삭기 승차감과 실린더 수명에 중요한 영향을 미치는 쿠션 특성을 미리 예측하고, 개발시간 및 비용을 단축시키기 위하여 실제 차량의 실험 데이터와 상용 S/W인 AMESim을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 비교 분석하였다. Lee 등[5]은

* 성균관대학교 대학원 기계공학과(Graduate School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University)
** (주)에치케이씨(HKC Co., Ltd.)
*** 성균관대학교 기계공학부(School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University)
† 교신저자, E-mail : yjkim@skku.edu

2014 한국유체기계학회 학술대회 발표 논문, 2014년 11월 26-28일, 부산
The KSFM Journal of Fluid Machinery: Vol. 18, No. 2, April, 2015, pp.48~53(Received 24 Oct. 2014; accepted for publication 2 Feb. 2015)

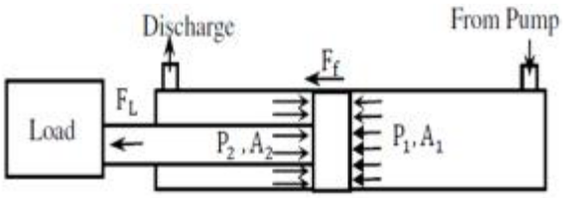


Fig. 1 Forces acting on hydraulic actuator

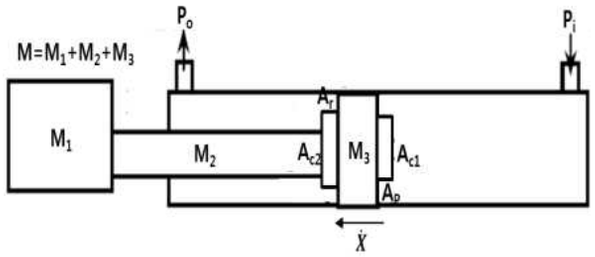


Fig. 2 Schematic of hydraulic cushioning actuator

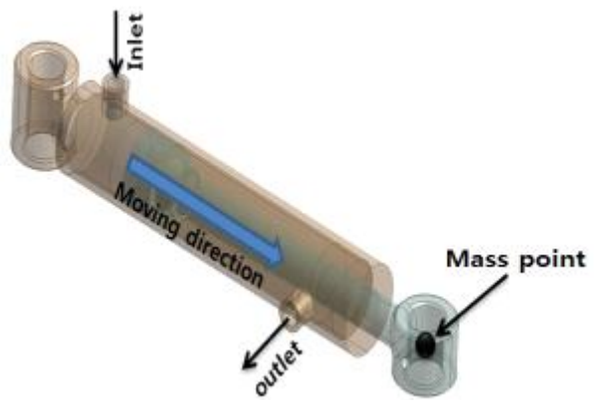


Fig. 3 3-D modeled hydraulic actuator

건설 중장비에 사용되는 유압실린더의 테이퍼형 쿠션장치의 성능에 대하여 실험적으로 고찰하였으며, 쿠션 성능에 영향을 미치는 인자를 검토하기 위하여 외부하중, 공급유량 및 공급압력을 변화시키면서 쿠션특성에 관하여 고찰하였다. 그 결과 쿠션 최대압력과 쿠션행정시간의 함수는 공급유량, 외부하중 및 쿠션 슬리브 길이이며, 공급압력과는 무관하다는 결과를 도출하였다. Jambhrunkar 등[6]은 부시(bush)와 실린더 내부 채널(channel) 사이 간극 변화에 대한 쿠션성능을 고찰하였으며, CFD를 이용한 수치해석 결과와 실험 데이터를 비교 분석하였다. Abodalla 등[7]은 유압 실린더의 동작속도를 개선시키기 위해서 기존 유압 실린더에 추가적으로 2개의 포트(port)를 더 장착하였고, 수치해석 결과 기존 2-포트 유압 실린더보다 4-포트 유압 실린더의 성능이 뛰어나다는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 유압 밸브 시스템에 사용되는 유압 액추에이터 쿠션 장치의 성능을 수치해석적으로 고찰하였으며, 쿠션 형상을 변형한 3 종의 유압액추에이터에 외부 하중을 가한 상태에서 쿠션 시간과 쿠션 압력의 변화를 분석함으로써 최적의 쿠션 설계인자를 연구하였다.

2. 이론적 배경

2.1 유압 액추에이터 평형 방정식

Figure 1은 유압 액추에이터에 작용하는 내력과 외력을 나타낸다. 유압 시스템의 해석을 위하여 다음과 같은 조건을 가정하였다.

(1) 유압펌프의 공급압력은 P1으로 일정하다.
(2) 액추에이터 각 실내(chamber)의 압력분포는 균일하다.
(3) 공동현상(cavitation)은 발생하지 않는다.

공급 압력(P1)에 따라 피스톤에 힘(FL)이 작용할 때, 식 (1)을 통해 P2를 구할 수 있다.

$$P_2 = (P_1 A_1 - F_f - F_L)/A_2 \quad (1)$$

마찰력은 가압력에 비해 작기 때문에 무시할 수 있다는 가정하에, P1과 FL로부터 P2를 결정할 수 있다. 이를 통하여 액추에이터 행정을 3가지 경우로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} &Case\,1 \;:\; P_2 < P_1 \text{ if } F_L > P_1(A_1 - A_2), \\ &Case\,2 \;:\; P_2 = P_1 \text{ if } F_L = P_1(A_1 - A_2), \\ &Case\,3 \;:\; P_2 > P_1 \text{ if } F_L < P_1(A_1 - A_2). \end{aligned} \quad (2)$$

2.2 쿠션 방정식

쿠션행정 중에 관성을 갖는 운동체를 정지시키는데 필요한 힘(Fs)은 질량에 감가속도를 곱한 것으로 식 (3)으로 표현할 수 있다. Y는 쿠션 행정 거리를 나타낸다.

$$F_s = M\ddot{X} = \frac{M\dot{X}^2}{2Y} \quad (3)$$

압력(Pi)이 공급되고 피스톤에 힘(Fa)이 작용할 때(Fig. 2 참조), 식 (4)로 힘의 평형관계식을 나타낼 수 있다. 따라서 피스톤에 작용하는 힘(Fa)에 의해 마찰력($f = \mu Mg$)이 발생하며 쿠션 작용을 위해 피스톤에 가해지는 쿠션력(Fc)은 식 (5)와 같다.

$$F_a = P_s(A_p + A_{c1}) \quad (4)$$

Table 1. Boundary conditions applied in this study

Inlet [kPa]	6894.757
Outlet [kPa]	6860.283
Mass point [N]	980

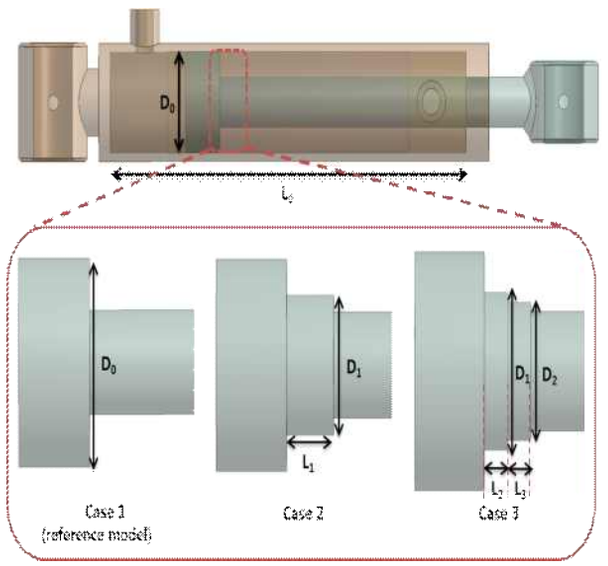


Fig. 4 Configurations of the modeled cushion shapes

$$F_c = F_s - f + F_a \tag{5}$$

3. 수치해석

3.1 해석모델 및 경계조건

유압 액추에이터 3차원 모델링 형상은 Fig. 3에 도시하였고, Table 1에 경계조건을 기술하였다. Figure 4은 본 연구에 사용된 쿠션 형상을 나타내었다. 상세한 치수는 Table 2에 명시하였다. 작동유체의 유동방정식과 구조물의 운동방정식을 결합(coupling)한 유체-구조물 연성해석(fluid-structure interaction)을 수행하였다.

3.2 지배 방정식

유압 액추에이터 쿠션 형상 변화에 따른 작동 특성을 고찰하기 위하여 지배방정식으로 연속 방정식과 운동량 방정식을 사용하였다.

- 연속 방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \tag{6}$$

Table 2. Geometric details of the modeled hydraulic actuator.

Diameter [mm]	D_0	60
	D_1	40
	D_2	35
Length [mm]	L_0	310
	L_1	20
	L_2	10
	L_3	10
Stroke length [mm]	210	

- 운동량 방정식

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + u_j \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \overline{\rho u_i u_j}\right] \tag{7}$$

난류모델은 압축성, 부력, 연소 해석에 사용되는 k-ε 표준모델을 사용하였다.

- 난류에너지 및 소산율 난류모델

$$\overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij}, \tag{8}$$

$$\mu_t = \frac{C_u \rho k^2}{\varepsilon}$$

- k-ε 모델의 수송방정식

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i k)}{\partial x_i} = \rho P - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right],$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = C_{\varepsilon_1}\frac{\rho P_\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon_2}\frac{\rho \varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right],$$

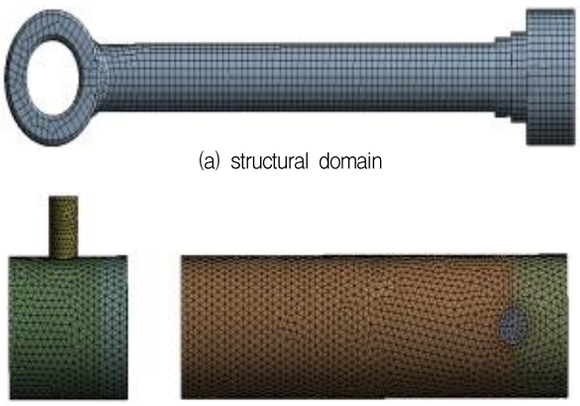
$$P = \frac{\mu_t}{\rho}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\frac{\partial u_m}{\partial x_m}\delta_{ij}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3}k\frac{\partial u_m}{\partial x_m} \tag{9}$$

- k-ε 방정식의 경계조건

$$k = 1.5(I \times U)^2, \varepsilon = \frac{C_\mu^{0.75} k^{1.5}}{L} \tag{10}$$

$$I = 2\%, L = 0.027m, C_\mu = 0.09, C_{\varepsilon_1} = 1.44$$
$$C_{\varepsilon_2} = 1.92, \sigma_k = 1, \sigma_e = 1.3$$

쿠션 형상 변화에 따른 작동 특성을 해석하기 위하여 유동영역은 Fluent에서 제공하는 동적 격자(dynamic mesh) 기능을 사용하였고, 유동영역을 remeshing 기법이 가능한



(a) structural domain

(b) fluid domain

Fig. 5 Grid systems of the modeled hydraulic actuator

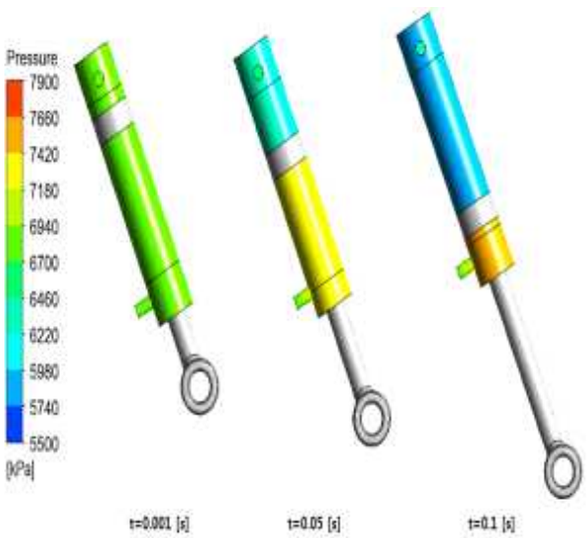


Fig. 6 Pressure distributions for different time steps at t=0.001 [s], t=0.05 [s] and t=0.1 [s]

tetrahedron 형태의 격자로 구성하였다. Remeshing 기법은 경계 변위에 따른 격자 변형에 대하여 격자의 비틀림 정도(skewness)가 증가하여 격자의 질이 저하될 때 부분적으로 격자를 재생성하는 기법이다. 구조영역은 quadrilateral 및 hexahedron 형태의 격자로 구성하였다. Figure 5에 생성된 격자를 도시하였는데, 구조물 영역은 약 60000개의 노드와 약 17000개의 요소로 구성하였고, 유동영역은 19600개의 노드와 97000개의 요소로 구성하였다. 수치해석은 상용 코드인 ANSYS CFX-Ver. 14.5를 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 압력 분포

동일 압력조건 및 외부하중을 980 N로 설정하여 수치해석

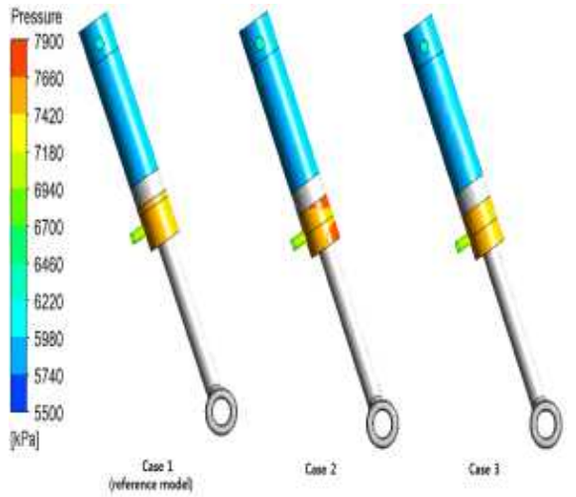


Fig. 7 Pressure distributions for different cushion shapes at t=0.1 [s]

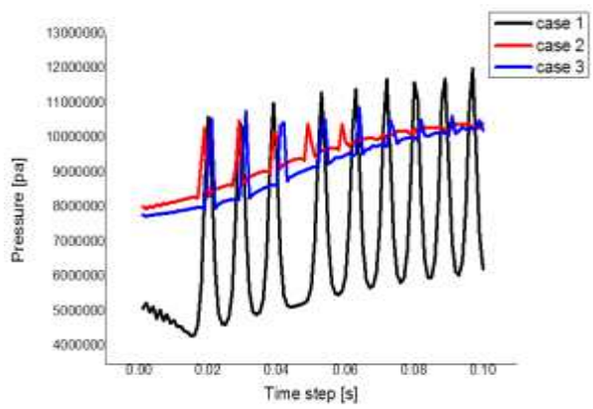


Fig. 8 Maximum Pressure distribution of hydraulic actuator cushions

을 수행하였다. Figure 6은 기준 모델을 사용하여 시간 변화에 따른 유압 액추에이터 내부 압력 분포를 나타내었다. 피스톤 행정거리가 증가함에 따라 끝단 쪽 챔버 압력이 상승하는 경향을 보였으며, Fig. 7은 t=0.1 s일 때 쿠션 형상에 따른 압력 분포를 나타내었다. Figure 8은 쿠션 및 피스톤 헤드에 작용하는 최고(peak) 압력을 도시하였으며, 기준 모델보다 쿠션 장치를 장착한 case 2, case 3의 압력 변동이 확연하게 줄어든 것을 확인할 수 있다. 이는 쿠션 장치를 장착함으로써 유압 액추에이터 구동 시 발생하는 압력 변동을 감쇠시켜 이로 인한 충격을 줄일 수 있다는 것을 검증한다.

4.2 응력 분포

Figure 9는 동일 압력 조건에서 t=0.1s 일 때 피스톤 헤드부에 걸리는 Von Mises 응력을 나타내었다. 기준 모델보다 쿠션 형상을 가진 유압 액추에이터 피스톤 헤드부에 응력이 높게 계산되었는데, 이는 행정이 완료하는 끝단에 도달하기 전 쿠션 장치가 유로를 축소하여 액추에이터 끝단 챔버 내

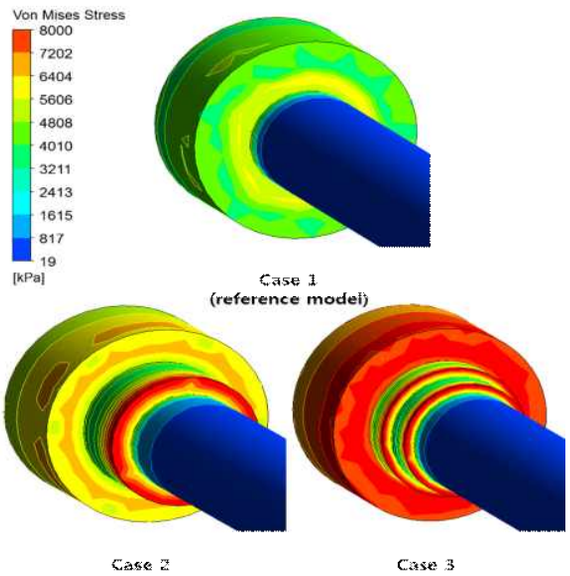


Fig. 9 Von Mises stress distribution of hydraulic actuator pistons at t=0.1s.

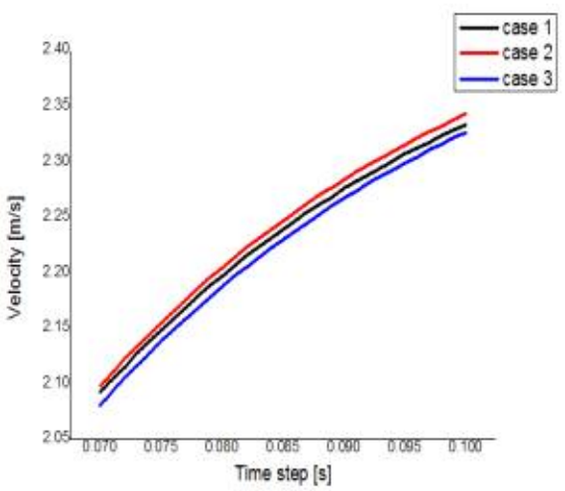


Fig. 10 Average velocity distribution of hydraulic actuator pistons.

유압을 순간적으로 높였기 때문으로 판단된다.

4.3 속도 분포

Figure 10은 동일 압력 조건에서의 피스톤이 갖는 평균 속도를 도시하였고, 기준 모델보다 쿠션 장치를 장착한 유압 액추에이터의 피스톤 속도가 작은 것을 확인할 수 있다. 이는 쿠션 장치가 없는 기준 모델보다 쿠션 장치가 있는 case 2, case 3의 피스톤 운동에너지가 더 작음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 쿠션 형상 변화가 유압 액추에이터 작동 특성에 미치는 영향을 수치적으로 고찰하기 위해 동일 압력 및 외부하중 조건을 고려하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 쿠션 장치는 유압 액추에이터 구동 시 발생되는 압력 변동을 감쇠시키고 압력을 완만하게 상승시켜 충격력을 감소시킬 수 있다.

(2) 쿠션 장치는 행정 끝단 챔버 내 높은 압력을 유발하여 피스톤 속도를 감소시켰고 쿠션 형상이 1단인 case 2와 쿠션 형상이 2단인 case 3을 비교해 보았을 때 case 3의 경우가 쿠션 성능이 뛰어난 것을 확인하였다.

(3) 쿠션 장치로 인한 행정 끝단 챔버 내 압력 상승은 액추에이터에 충격력으로 전달되어 액추에이터의 진동 및 파손의 원인이 될 수 있다. 향후 이러한 연구결과를 검증하기 위하여 실험적인 연구가 수반되기를 기대한다.

후 기

본 연구는 한국산업기술진흥원 국제공동기술개발사업의 일환으로 수행하였음. [N0000902, 해양 플랜트 제어용 Combination Explosion-proof Electro-Hydraulic Control Actuator System 국산화 기술개발]

References

(1) Kim, D. S., Park, J. B. and Lee, W. H., 2002, “The Characteristic Analysis of Cushioning Pneumatic Cylinder”, KSME., Spring Annual Conference, pp. 1950~1956 (in Korean).

(2) Lee, Y. B. and Yoon, Y. H., 2013, “Modeling & Simulation of a Hydraulic Servo Actuator Cushion for Power Plants”, Journal of the KSTLE, Vol. 29, No. 1, pp. 7~12 (in Korean).

(3) Lee, Y. B., Ko, J. M. and Park, J. H., 2008, “Study of the Cushion Characteristics in Accordance with Shapes Cushion Ring of Hydraulic Cylinder”, KSFC., Vol. 5, No. 2, pp. 14~19 (in Korean).

(4) Choi, J. S., Kim, J. H. and Ju, B. H., 2010, “Study of the Cushion Characteristics in Accordance with Hydraulic Excavator's Behavior”, KFPS., Spring Annual Conference, pp. 44~47 (in Korean).

(5) Lee, S. K., Kim, D. S. and Kim, H. U., 1999, “An Experimental Study on the Cushion Characteristics of Hydraulic Cylinder”, KIMS., Vol. 11, No. 2, pp. 53~61 (in Korean).

(6) Jambhrunkar, G. D., Gulhane, N. P. and Biradar M. G., 2012, “CFD Analysis of Hydraulic Cylinder to Evaluate Performance of Cushioning in Cylinder”, IJMPE., Vol. 1, No. 1, pp. 93~98.

(7) Abdalla, M. O., Nagarajan, T. and Hashim, F. M., 2012,

"Improvement of Actuation Speed of Hydraulic Cylinders : Using Novel Flow Control Valve System, ", IRAM., CCIS. 300, pp. 331 ~ 339.

(8) 최봉수, 2009, "FLUENT Dynamic Mesh Method를 이용한 유압식 쇼크 업소버(shock absorber) 해석" , Journal of the Fluid Machinery, Vol. 12, No. 3, pp. 75 ~ 78 (in Korean).

(9) ANSYS FLUENT Theory Guide, ANSYS Inc., 2011.