

무용제 도료용 무화 분사시스템 개발(I)

- 유압 액츄에이터의 유동해석 -

김동건*, 김봉환#, 신선빈**

Development of Atomization Spraying System for Solvent-free Paint(I)

- Flow Analysis of Hydraulic Actuator -

Dong-Keon Kim*, Bong-Hwan Kim#, Sun-Bin Shin**

(Received 03 February 2011; received in revised form 16 April 2011; accepted 18 April 2011)

ABSTRACT

The purpose of this paper is to design a hydraulic actuator to operate under high pressure conditions. The flow characteristics under design conditions of hydraulic actuator were numerically conducted by commercial fluid dynamic code(ANSYS CFX V11). The numerical analysis was performed by transient technique according to the variation of stroke times, which was changed from 0 to 1 second by interval of 0.01. Turbulence model, k- ω SST was selected to secure more accurate prediction of hydraulic oil flow. The ICEM-CFD 11 and CFXMesher, reliable grid generation software was also adapted to secure high quality grid necessary for the reliable analysis. According to the simulation results, the flow rate which was supplied to the hydraulic actuator was 30.4 l/min. These results are in good agreement with design results within 3.5% error.

Key Words : Atomization Spray System(무화 분사시스템), Solvent-free Paint(무용제 도료), Flow Analysis(유동해석), Transient Analysis(과도해석), Flow Rate(유량)

1. 서 론

도장라인에서 점성이 큰 도료를 사용하기 위해서는 도료에 용제를 섞어서 압축공기 방식으로 도장작업을 하고 있다. 이때 도료와 함께 사용되는

용제는 대부분 휘발성유기화합물질(volatile organic compounds : VOC)로서, 이 물질은 세계 환경 유해 물질 다자간 협약으로 배출 규제가 우리나라를 포함하여 선진 각국에서 강제적으로 시행되고 있다. 그래서 도장공장을 보유한 자동차 및 조선업체들은 환경부의 대기환경보전법에 의거 VOC 배출을 낮추는 방법을 모색하고 있다.^[1-4] 이에 VOC 배출을 낮추는 방법에 부합되는 설비 및 도료 분사 시스템을 개발하여 유기용제의 사용을 극소화 할 수 있는 무화 분사시스템의 개발이 시급한 실정인데,

* 부산대학교 기계기술연구원

교신저자 : 경남과학기술대학교 자동차공학과

E-mail : bhwkim@gntech.ac.kr

** (주)프로다이나믹산업

기존의 도료 분사 시스템으로는 도료에 용제를 섞지 않고 사용하는 것은 도료의 큰 점성 때문에 무화상태가 고르지 않아 도장작업이 매우 힘들다. 따라서 도료만을 분사할 수 있는 유압 액추에이터의 개발이 절실히 필요하다.

그래서 본 연구에서는 기존보다 더 큰 압력조건을 얻을 수 있는 유압 액추에이터를 이론적 해석을 통하여 설계하고, 고압조건에서 유압 액추에이터의 작동성에 대해 CFX 11를 통한 유동해석으로 검토하여, 그 결과를 제품 설계에 반영하고자 한다.^[5]

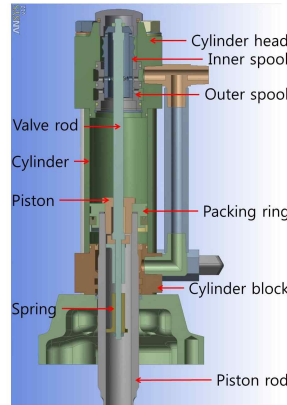


Fig. 1 Structure of hydraulic actuator

2. 유압 액추에이터의 설계

2.1 유압 액추에이터의 구조

Fig. 1은 유압 액추에이터의 구조를 나타낸 것으로, 밸브 로드의 상단부는 내부 스푼의 내부를 관통한 상태에서 볼트로 연결되어 있고, 밸브 로드의 하단부는 피스톤 너트의 중심을 관통한 상태에서 스프링이 설치되어 있다. 스프링은 소정의 탄성계수를 가질 수 있도록 상단부에는 와셔 부재에 의해 그리고 하단부에는 와셔 부재에 의해 그 사이에서 지지되어 있다. 상부의 와셔 부재의 상단부는 상기 걸림턱에 걸려 있어서 하방향으로 이동하여 스프링을 압축시킬 수 있기 때문에 상방향으로 이동하는 것은 방지하도록 하였다. 그리고 피스톤 너트와 피스톤 로드가 서로 결합하는 나사 결합부의 상부에는 피스톤의 내측 플랜지부가 삽입되어 있어서 실질적으로 피스톤 너트, 피스톤, 그리고 피스톤로드는 같이 상·하 이동 가능하도록 하였다. 실린더 블럭의 일측에는 일정한 압력을 가지는 오일 공급공이 형성되어 있다. 유압오일 공급공은 상기 실린더 헤드의 유압오일 공급공으로 공급되는 것과 동일한 압력의 유압오일이 동시에 공급되는 부분이다.

2.2 유압 액추에이터의 설계 이론

피스톤이 하방향으로 이동할 때의 시간은 연속 방정식, 질량보존법칙을 적용하면 식 (1)~(6)에 의해 구해진다.

$$Q_3 = Q_1 + Q_2 \quad (1)$$

$$\frac{d(A_1 y)}{dt} = Q_3, \quad \frac{d(A_2(1-y))}{dt} = -Q_2 \quad (2)$$

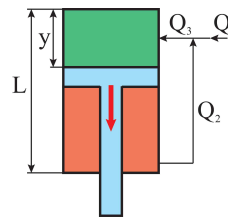
$$\frac{dy}{dt} = \frac{Q_3}{A_1}, \quad \frac{dy}{dt} = \frac{Q_2}{A_2} \quad (3)$$

$$Q_2 = \frac{A_2}{A_1} Q_3 \quad (4)$$

$$Q_3 = \frac{A_1}{A_1 - A_2} Q_1 \quad (5)$$

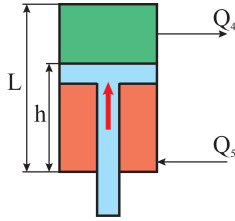
$$L = \frac{Q_3}{A_1} t_{down} = \frac{Q_1}{A_1 - A_2} t_{down} \quad (6)$$

$$t_{down} = \frac{A_1}{Q_3} L = \frac{A_1 - A_2}{Q_1} L$$



Q₁: 유압 펌프에서 공급되는 유량
 Q₂: 실린더 하부에서 상부로 공급되는 유량
 Q₃: 유압 액추에이터에 공급되는 유량 t: 피스톤 이동시간
 A₁, A₂: 피스톤 상, 하부 면적 L: 실린더 길이 y: 피스톤 이동거리

Fig. 2 Schematic diagram of downward movement of piston



Q₁, Q₂ : 유압액츄에이터의 공급 및 토출 유량

Fig. 3 Schematic diagram of upward movement of piston

또한 피스톤이 상방향으로 이동할 때의 시간도 마찬가지로 연속방정식, 질량보존법칙을 적용하면 식 (7)~(10)에 의해 구해진다.

$$\frac{d(A_2h)}{dt} = Q_1, \frac{d(A_1(1-h))}{dt} = -Q_2 \quad (7)$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q_1}{A_2}, \frac{dh}{dt} = \frac{Q_2}{A_1} \quad (8)$$

$$Q_2 = \frac{A_1}{A_2} Q_1 \quad (9)$$

$$L = \frac{Q_1}{A_2} t_{up}, t_{up} = \frac{A_2}{Q_1} L \quad (10)$$

유압 액츄에이터가 한 사이클 동안 작동하는데 걸리는 시간 t_{total} 과 분당 사이클 수는 식 (11)과 식 (12)에 의해 계산된다.

$$t_{total} = t_{down} + t_{up} \quad (11)$$

$$N_{cycle} = \frac{60}{t_{total}} \quad [cycle/min] \quad (12)$$

유압 액츄에이터에 작용하는 동력 P_{power} 는 식 (13)에 의해 산출할 수 있다.

$$P_{power, down} = \frac{P \times Q_3}{4.5} \quad [PS] \quad (13)$$

$$P_{power, up} = \frac{P \times Q_1}{4.5} \quad [PS]$$

여기서, $P[kg_f/cm^2]$ 는 유압펌프에서 공급되어지는 압력이고 $Q_1, Q_3[l/min]$ 는 상승행정과 하강행정일 때에 유압 액츄에이터에 공급되는 유량이다.

3. 유압 액츄에이터의 유동해석

3.1 지배 방정식

유압 액츄에이터 내부의 유압오일의 거동을 수치해석하기 위해 열유체 유동해석 상용 CFD 코드인 ANSYS CFX V11을 사용하였으며, 질량, 운동량 방정식은 식 (14)와 식 (15)이다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{U}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \times \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + S_M \quad (15)$$

본 해석에 사용된 난류 모델은 $k-\omega$ SST(shear stress transport) 모델로 난류전단응력의 수송을 계산하기 때문에 역 압력구배에 의해 발생하는 유동 박리 크기와 발생시점을 정확히 예측할 수 있다. 열유체 유동해석을 수행할 때 가장 큰 에러의 원인 중의 하나는 난류모델의 부적절한 적용이라 할 수 있으며, 특히 벽면 근처의 격자생성에 있어 모든 영역에 $y+$ 를 일정한 수준으로 유지한다는 것은 3차원 유동장의 경우 상당히 어려운 문제이다. $k-\omega$ SST 모델은 벽면 근처에서는 $k-\omega$ 모델을 사용하고 바깥쪽은 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.^[5]

3.2 격자 생성 및 경계조건

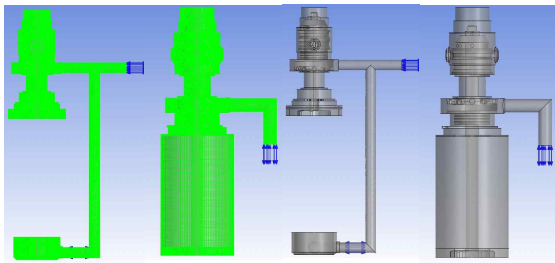
격자는 실제 유압 액츄에이터의 내부유동과 피스톤의 상하 운동을 묘사하기 위하여 액츄에이터 내부 유동과 피스톤유동으로 구분하여 생성하였다. 유압 액츄에이터의 내부유동은 비정렬격자(tetra)를 사용하였고, 피스톤유동은 정렬격자(hexa)를 이용하여 생성하였다. 이 때 격자에 대한 정보는 Table 1에 나타내었으며 Fig. 4는 격자생성 결과를 나타낸 것이다.

본 연구의 해석 방법은 피스톤의 왕복시간에 대해 과도해석(transient analysis)으로 수행하였고, 유압 액츄에이터의 피스톤이 1회 왕복하는 데 걸리는 시간은 2초이고, 이를 상방향 운동과 하방향 운동으로 각각 나누어 1초로 하였고, 1초 사이의 구간은 100등분하여 해석을 수행하였다. 또한 피스톤의 속도는 피스톤의 행정 거리를 시간으로 나누어 계산하였다.

해석에 사용된 작동유체는 ISO VG46으로, 비중은 0.874이고, 점성계수는 0.040204kg/m · s이다. 유압펌프에서 공급되는 압력은 240bar로 설정하였고, 유동의 출입이 자유로운 opening 조건으로 설정하였다. 또한 피스톤의 상하 운동은 이동격자(moving grid)를 사용하여 묘사하였고, 유압 액츄에이터 내부 유동과 인터페이스(interface) 시켰다. Fig. 5는 해석을 위한 경계조건을 나타낸다.

Table 1 Mesh statistics

Items	Downward	Upward
Node number	1,217,228	1,354,522
Elements number	3,217,539	3,160,879
-Tetrahedra	1,956,089	1,508,375
-Wedges	12,597	15,298
-Hexahedra	888,853	1,277,206
-Pyramids	360,000	360,000



(a) Downward (b) Upward (a) Downward (b) Upward
Fig. 4 Grid generation Fig. 5 Boundary condition

4. 결과 및 고찰

Fig. 6~8은 유압 액츄에이터의 피스톤이 하방향 운동을 할 때 유압 액츄에이터의 내부에 발생하는 유속, 압력, 유량분포를 행정시간에 대해 나타낸 것이다. Fig. 6은 유속분포를 나타낸 것으로, 유압 액츄에이터의 중앙 단면을 잘라서 표현하였다. 유압 액츄에이터의 피스톤이 하방향 운동을 함에 따라 내부 유압유가 들어오는 것을 볼 수 있다. 들어오는 입구에 비해 유압 액츄에이터의 실린더 내부가 넓기 때문에 외류의 형태로 쉬여서 들어오는 것을 관찰할 수 있다. 유압유의 유입은 유압펌프에

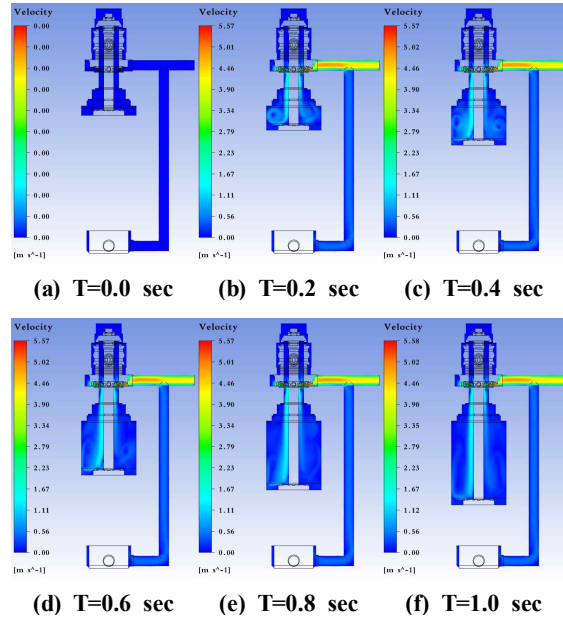


Fig. 6 Distributions of velocity with variation of stroke time at downward movement of piston

서 공급된 유량이 주로 공급되고 있으며 부분적으로 유압 액츄에이터의 하단부에서도 공급되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 6의 결과를 토대로 시간에 따른 유입되는 유량의 분포를 나타낸 것이다. 유압펌프의 설계사양을 보면 1회전당 18cc가 공급되고, 정격회전수가 1,750rpm일 때 유압 액츄에이터로 공급되는 유량은 31.5l/min이다.

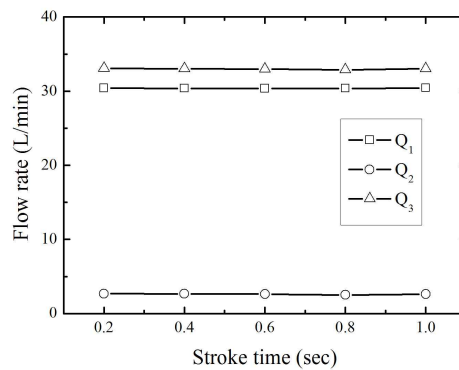
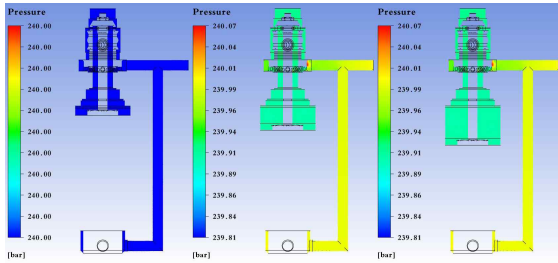
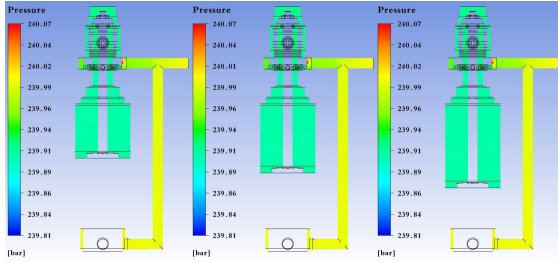


Fig. 7 Distributions of flow rate with variation of stroke time at downward movement of piston

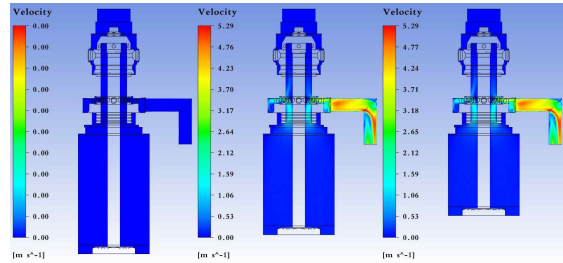


(a) T=0.0 sec (b) T=0.2 sec (c) T=0.4 sec

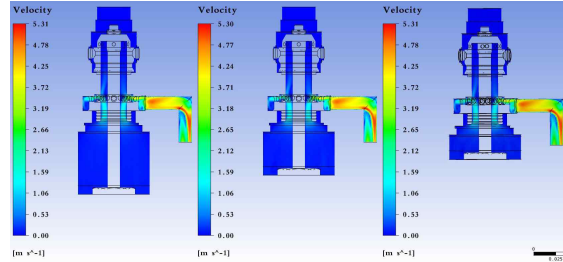


(d) T=0.6 sec (e) T=0.8 sec (f) T=1.0 sec

Fig. 8 Distributions of pressure with variation of stroke time at downward movement of piston



(a) T=0.0 sec (b) T=0.2 sec (c) T=0.4 sec



(d) T=0.6 sec (e) T=0.8 sec (f) T=1.0 sec

Fig. 9 Distributions of velocity with variation of stroke time at upward movement of piston

해석을 통해 유압 액츄에이터로 공급되는 총 유량은 33l/min인데 이 중 유압펌프로 공급되는 유량은 30.4l/min이고, 나머지 2.6l/min은 유압 액츄에이터의 하부에서 다시 공급된다. 시간에 따른 유량의 변화는 거의 없었고, 실제 유압펌프에서 의해 공급되는 유량과 해석을 통해 얻어진 유량과 비교해 볼 때 3.6% 오차 내에 비교적 잘 맞는 것으로 판단되기 때문에 유압 액츄에이터의 기본설계가 잘 이루어졌음을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 압력분포로, 피스톤의 하방향 운동 시 압력강하가 발생하는 지를 검토하기 위하여 나타내었다. 유압 펌프에서 공급된 240bar의 압력이 압력 손실이 거의 없이 유압 액츄에이터로 공급이 원활하게 이루어지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9~11은 유압 액츄에이터의 피스톤이 상방향 운동을 할 때 유압 액츄에이터의 내부에 발생하는 유속, 압력, 유량 분포를 행정시간에 대해 나타낸 것이다. Fig. 9는 유압 액츄에이터의 중앙 단면에서 유속분포를 나타낸 것으로, 피스톤의 상방향 운동으로 인해 유압 액츄에이터의 토출부로 나가서 유압탱크로 토출되는 것을 볼 수 있다.

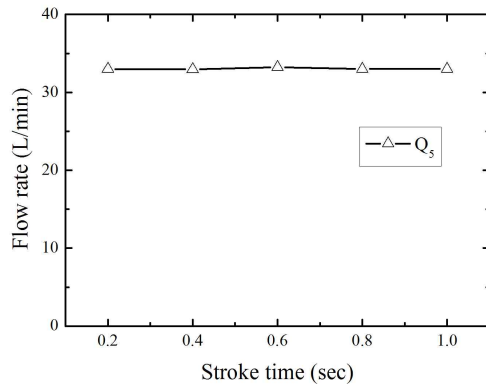


Fig. 10 Distributions of flow rate with variation of stroke time at downward movement of piston

이 때 토출부의 평균 속도는 3.16 m/s 이다.

Fig. 10은 Fig. 9의 결과를 토대로 토출부의 유량을 시간에 따라 나타낸 것이다. 공급유량인 Q_4 와 토출유량인 Q_5 는 질량보존법칙에 의해 동일 값을 가져야 하며, 해석결과에서 동일한 결과가 나왔음을 확인하였다.

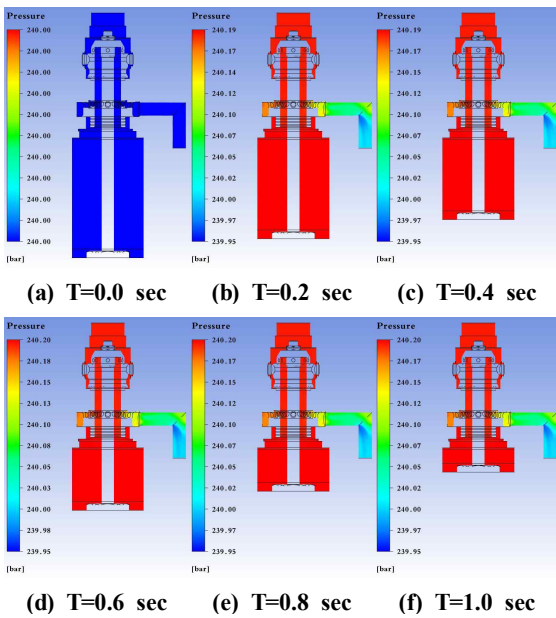


Fig. 11 Distributions of pressure with variation of stroke time at upward movement of piston

이 경우의 토출유량은 33l/min로 피스톤의 하방향 운동 시 공급되는 유량과 일치하는 것을 확인하였다. Fig. 11은 압력분포를 나타낸 것으로, 압력손실 없이 원활한 유동이 이루어지는 것을 확인할 수 있었다. 이상의 결과를 토대로 판단해 볼 때 유압 액추에이터는 유압펌프의 공급사양에 맞게 잘 설계되었을 유동해석을 통해 검증하였다.

5. 결론

본 연구에서는 도장 작업 중 발생하는 VOC를 줄일 수 있는 새로운 고압 도료 분사 시스템의 핵심요소부품인 고압용 유압 액추에이터를 설계하기 위하여 내부 유동해석을 수행하였으며, 해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 유압펌프의 사양이 1회전당 18cc이고, 유압 펌프의 정격 회전수를 1,750rpm이라고 할 때 유압펌프로부터 공급되는 유량은 31.5l/min이다. 유압 액추에이터의 내부 유동해석을 통해 얻은 결과에서는 30.4l/min으로, 실제 유압펌프에서 공급되는 유량과 비교하였

을 때 3.6% 오차를 가지고 있고, 비교적 잘 일치한다고 판단된다.

2. 유압 액추에이터로 공급되는 유량과 토출되는 유량이 동일한 값인 33l/min으로 질량 보존법칙을 잘 만족한다.
3. 이상의 결과를 종합해 보면 점도가 매우 높은 무용제 도료의 분사를 가능케 하는 유압 액추에이터의 기본 성능을 만족하는 것으로 보아 설계가 잘 되었음을 알 수 있으며, 향후 성능실험을 통하여 검증할 것이다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 원천산업기술개발사업의 연구비 지원에 의해 연구된 것입니다.

참고문헌

1. Kim, J. C., "Trend and Control Technologies of Volatile Organic Compound," Korea Society for Atmospheric Environment, J. KOSAE, Vol. 22, No. 6, pp. 743-757, 2006.
2. Song, J. H., "Effects of Moisture Contents on Removal Efficiencies of Biofiltration Processes Treating VOCs Found in Paint Spray Booth Emissions," Proc. of the Korean Society of Civil Engineers, pp. 3333-3336, 2002.
3. Yu, M. S., Hwang, S. I. and Yang, S. B., "Analysis of VOC and Oder Abatement Effect by Application of Microbes to Painting Process in Automotive Industry," Korean Journal of Oder Research and Engineering, Vol. 7, No. 2, pp. 105-113, 2008.
4. Lee, C., Cha, S. W., Lee, T. K. and Kim, K. Y., "Treatment of the VOC in the Exhaust Gas from Painting Process by Using Activated Carbon and Photocatalytic Hybrid System," Proc. of the Korea Society for Energy Engineering, pp. 3-9, 2004.
5. ANSYS Inc., "ANSYS CFX USER Manual," Version 11, 2007.