

무용제 도료용 무화 분사시스템 개발(II) - 유압 액츄에이터의 구조해석 -

김동건*, 김봉환#, 신선빈**

Development of Atomization Spraying System for Solvent-free Paints(II) - Structural Analysis of Hydraulic Actuator -

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

(Received 3 February 2011; received in revised form 30 March 2011; accepted 11 April 2011)

ABSTRACT

Solvent-free paint is sprayed from higher-pressure conditions, because the viscosity is large. The hydraulic actuator which can be operated under higher-pressure condition is required to spray solvent-free paints in painting process for the environmental protection. The purpose of this paper is to develop the hydraulic actuator under higher-pressure conditions for solvent-free paint spraying system. The hydraulic actuator consists of inner spool, outer spool and ball. The analysis of a structural stability was conducted by using ANSYS V11 under the design condition of upward and downward movement of spool. As a result, the maximum von-Mises stress applied on spool under 4mm displacement showed a value of 106MPa which was greater than the allowable stress of the spool with a value of 250MPa and a value of safety factor 3. This result suggested that the spool system be unstable under the design condition so that it was necessary for the spool system to be reinforced to secure the structural stability.

Key Words : Atomization Spray System(무화분사시스템), Solvent-free Paint (무용제 도료), Structural Analysis(구조해석), Equivalent Stress(등가응력), Total Deformation(변형)

1. 서 론

현재 자동차, 조선 및 기타 해양 철구조물 산업

에 있어서 도장 생산라인의 페인트 작업장에서는 압축공기 방식으로 도장 펌프 및 주변 시스템을 이용하여 도장작업을 하고 있다. 하지만 세계 환경 유해물질 다자간 협약으로 휘발성유기화합물질(volatile organic compounds : VOC) 배출 규제가 2008년도부터 우리나라를 포함하여 선진 각국에서 강제적으로 시행됨과 아울러 자동차 및 각 조선소의 도장공장을 보유한 업체들은 환경부의 대기환

* 부산대학교 기계기술연구원

교신저자 : 경남과학기술대학교 자동차공학과

E-mail : bhwkim@gntech.ac.kr

** (주)프로다이나믹스산업

경보전법에 의거 VOC 배출을 낮추어 나가야 하는 상황에 처해 있다.^[1-5] 따라서 이에 부합되는 설비 및 스프레이 시스템을 개발하여 유기용제(신나, 톨루엔 성분)의 사용을 극소화 할 수 있도록 새로운 무화 분사시스템의 개발이 시급하다.

도장산업에서 VOC 배출을 저감할 수 있는 최적의 방법은 근본적으로 VOC 배출이 적은 저용제형, 분체 및 수용성 도료 등을 도료 생산업체에서 개발하여 현장에 사용토록 해야 하나, 신 물질 개발에 한계가 있고 비용이 많이 들어서 이에 대한 대체 방법으로 VOC 배출을 최소화 할 수 있는 장비 및 설비 시스템을 별도로 설치할 것을 요구하고 있다. 따라서 당면한 문제점을 해결하기 위해서는 용제의 사용을 최대한 억제하여 도료를 그대로 분사시킬 수 있는 시스템을 개발해야 한다. 그러기 위해서는 고압조건(500bar)에서 작동할 수 있는 장치 중 유압 액추에이터(hydraulic actuator)설계가 선행되어야 한다. 유압 액추에이터의 부품 중 내부 스푼(spool)은 좌우에 쌍으로 존재하는 볼에 의해 외력이 작용하고, 내부 스푼의 상하 운동에 의해 발생하는 마찰열과 내부의 유압에 의해 발생하는 고압조건에 대해 열응력 해석이 필요하다.

그러므로 본 연구에서는 유압 펌프의 열전달 해석과 변형해석을 통해 내부 스푼의 구조적 안정성을 검토하여 내부 스푼을 설계하고자 한다. 이에 구조해석을 위해서 유한 해석 프로그램인 ANSYS WORKBENCH 11^[6]을 사용하였고, 해석대상에 대한 모델링 툴은 CATIA V5를 이용하였다.

2. 유압 액추에이터의 구조

왕복운동장치의 상단부에 설치되는 액추에이터(actuator)는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 스푼 셋트(spool set), 실린더(cylinder), 밸브 로드(valve load), 피스톤(piston), 피스톤 로드(piston rod), 스프링(spring) 등으로 구성되어 있다. 유압 액추에이터의 작동원리는 스푼 셋트 상부에 압력이 걸리면 밸브 로드와 피스톤은 아래방향으로 움직이게 되고, 하부에 있는 스프링에 닿으면 스프링의 반력에 의해 다시 밸브 로드와 피스톤이 상방향으로 움직이는

과정을 반복적으로 수행한다.

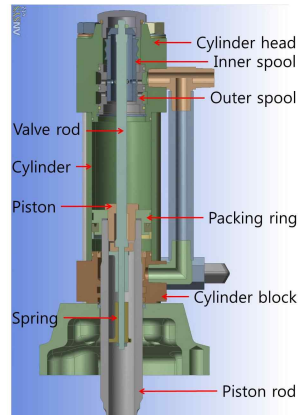


Fig. 1 Structure of hydraulic actuator

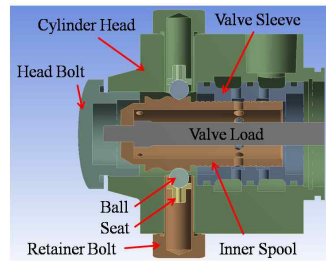


Fig. 2 Schematic diagram of hydraulic upper actuator

유압 상부 액추에이터는 헤드 볼트(head bolt), 실린더 헤드(cylinder head), 밸브 슬리브(valve sleeve), 내부 스푼(inner spool), 밸브 로드(valve load), 볼(ball), 리테이너 볼트(retainer bolt), 시트(seat) 등으로 구성되어 있다. 실린더 헤드에는 고압의 유압오일이 투입되는 오일 입출구부분이 있고, 실린더 헤드의 내부에는 상하 왕복 운동을 수행하는 내부 스푼과 밸브 슬리브의 외측과 실린더 헤드의 내측에 고정된 상태로 설치된다.

내부 스푼은 파이프 상태의 원통형 형상을 하고 있으며, 전체 외주면에 대하여 일정한 높이로 성형된 복수 개의 홀이 있다. 그리고 내부 스푼의 상단부 외주면에는 일정한 홈 형상으로 성형된 상부홈과 하부홈이 일정한 높이차를 가지고 있다. 그리고 밸브 슬리브는 원통 형상으로 성형되며 중간 하부에는 일정한 간격을 가지는 상부 홀과 하부 홀을 갖고 있고 이 홀을 통해 공급된 오일이 출입한다.

내부 스펀은 밸브 슬리브의 내부에서 상·하 일정 간격 유동할 수 있도록 구성되는 것으로 상·하 이동에 의해 내부 스펀의 구멍이 밸브 슬리브의 상부 홀 또는 하부 홀의 어느 하나와 일치하게 되면 그 홀을 통하여 공급되는 오일이 내부 스펀 및 밸브 슬리브의 내, 외부를 관통할 수 있는 상태로 된다. 따라서 밸브 슬리브의 상부 홀을 통하여 오일이 공급되고 있는 상태에서 내부 스펀의 홀이 일치하는 상태로 되면 오일 탱크에서 공급되는 오일은 내부스펀의 내측 부분으로 들어오게 되며, 내부 스펀의 홀이 밸브 슬리브의 하부 홀과 일치하게 되면, 오일 출구 부분을 통하여 실린더 내부에 높은 압력으로 충전된 오일이 외부로 배출되며 이러한 작동 조건을 반복적으로 수행하게 된다.

실린더 헤드에는 그 내부에 일정 간격 상·하 이동하는 내부 스펀을 정해진 위치에서 유지하기 위한 한 쌍의 볼이 스프링에 의하여 내측으로 탄성을 가지도록 설계하였다. 스프링은 실린더 헤드에 리테이너 볼트 결합으로 체결되는 볼트와 시트사이에 설치되어 있기 때문에 실질적으로 스프링의 탄성력이 볼에 전달된다. 스프링에 의해 내측으로 탄성력을 받는 볼은 내부 스펀의 상부 홀 또는 하부 홀에 일정하게 삽입되어 위치 결정되는 것에 의해 내부 스펀의 위치를 유지할 수 있다.

밸브 로드는 상단부에 내부 스펀의 내부를 관통한 상태에서 내부 스펀의 상단부에 연결되어 있고, 그 하단부에는 스프링이 설치되어 있다. 이를 통해 내부 스펀이 상방향으로 작동하게 되고, 실린더 헤드에 충전된 높은 오일 압력에 의해 내부 스펀이 하방향으로 작동한다.

3. 유압 액추에이터의 구조해석

3.1 유한요소모델

유압 액추에이터의 모델링은 CATIA V5를 이용하였고, 구조해석에 영향을 주지 않는 나사산 부분에 대해서는 단순화하였다. 유한 요소 해석을 위한 요소는 3D 솔리드 사면체를 사용하였으며, Fig. 2에 유압 액추에이터 구조해석을 하기 위한 유한 요소 모델을 나타내었다. 유한 요소 모델의 격자는

크기를 1mm로 하여 노드 수가 906,000이다.

3.2 접촉조건 및 경계조건

유압 액추에이터는 내부 스펀이 밸브 슬리브 내부에서 상·하 운동을 하게 되고, 내부 스펀과 밸브 슬리브 사이의 간극으로 오일이 새는 것을 최소화하기 위하여 내부 스펀의 외경과 밸브 슬리브의 내경에 대해 정밀하게 가공되었기 때문에 내부 스펀과 밸브 슬리브가 서로 마찰하게 되어 열이 발생하게 된다. 이 마찰열을 해석에 고려하기 위해 유압 액추에이터의 내부로 출입하는 유압유의 온도를 환산하여 마찰열을 80℃로 설정하여 열전달을 수행하였다. 실질적으로 마찰을 일으키는 내부 스펀, 밸브 슬리브, 볼에 대해서는 내부 온도를 80℃로 설정하였고, 실린더 헤드에서 대기와 접촉하는 바깥쪽은 상온 온도 조건이 22℃를 사용하였으며, 대류 열전달 계수는 대기와 접하는 부품의 외부에 일반적으로 사용되는 값인 $0.00001(W/mm^2\text{C})$ 을 적용하였다. 밸브의 열전달 해석을 위해서는 열전도도, 열전달계수와 같은 물성치가 필요하다. 이러한 물성치가 온도 조건에 따라 변하지만, 본

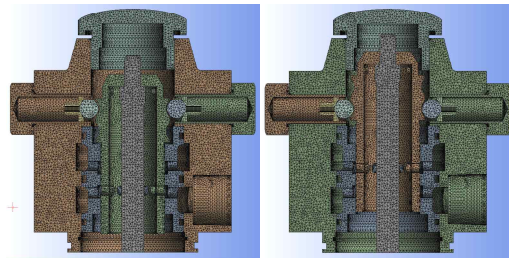


Fig. 3 Finite elements model

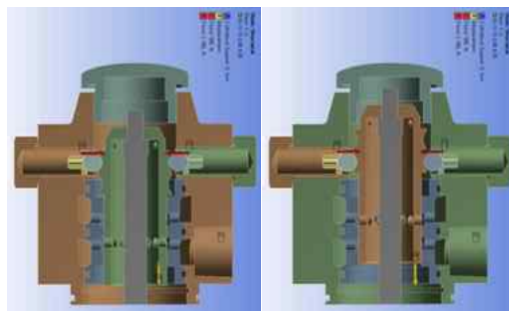


Fig. 4 Boundary condition

연구에서는 전체 온도차가 작기 때문에 80℃의 조건을 사용하여 해석을 수행하였다.

내부 스펴에 작용하는 외력은 시트에 연결된 스프링에 의해 작용된다. 좌우에 쌍으로 존재하는 볼이 내부 스펴에 외력이 작용된다. 외력의 크기는 스프링 상수와 변위를 통해 계산된 500N의 조건을 적용하였다.

본 해석 모델은 총 8개의 부품으로 이루어져 있기 때문에 작동 시 각각의 부품에서 접촉조건을 설정하는 것이 중요하다. 나사로 체결되어 있는 부분은 모두 bonded 조건을 설정하였고, 시트와 볼, 볼과 내부 스펴에 대한 접촉 조건은 Frictionless 조건을 설정하였다. 또한 내부 스펴과 밸브 슬리브에 대해서는 Frictional 조건을 설정하였고, 강 의 경우 압력조건에 따라 마찰계수가 0.18~0.4를 가지기 때문에 본 연구에는 마찰 계수를 0.2로 설정하였다.

또한 비선형 해석에서 해를 수렴시키기 위해 Newton-Raphson법을 이용한 반복해석을 수행하는데 각 구간마다 수렴이 되면 자동으로 다음구간으로 넘어가는 특징을 가지고 있다. 본 해석에서도 수렴성을 좋게 하기 위하여 substep으로 수행하였고, 최대 substep을 1000으로 설정하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 5는 내부 스펴이 상하부로 운동 시 발생하는 마찰열에 대해 묘사한 것으로, 내부 스펴과 밸브 슬리브, 또는 내부 스펴과 볼 부분에서 마찰에 의해 높은 열이 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 마찰열 80℃에 의해 최대 58℃까지 올라간다. 또한 마찰열에 의해 야기될 수 있는 열응력을 조사하기 위해 이 해석의 결과를 응력 해석에 적용하였다.

Fig. 6과 Fig. 7은 내부 스펴이 하부로 운동 시 발생하는 등가응력(equivalent stress)과 전체변형(total deformation) 분포를 나타낸 것이다. 내부 스펴의 하부 끝을 지탱하고 있는 볼이 내부 스펴이 움직임에 따라 내부 스펴에 하중을 미치고, 이 하중에 대해 스펴의 구조적 안정성을 검토하였다. 이때 스펴의 이동은 볼이 내부 스펴의 끝에서 마루 부분으로 움직일 때의 거리인 1~4mm에 대하여 해

석을 수행하였다. 내부 스펴의 변위에 따른 등가응력의 분포를 살펴보면, 내부 스펴이 하향하면서 볼과 내부 스펴의 끝이 맞닿는 부분에서 큰 응력이 걸리는 것을 확인할 수 있다. 또한 볼을 지탱하고 있는 시트 부분에서도 응력이 걸리는 것을 볼 수 있다. Fig. 7의 변형 분포를 보면, 내부 스펴이 이동함에 따라 볼에 대한 변형이 일어나는 것을 볼 수 있다. 볼의 변형이 3mm를 넘지 않는 것으로 보아 볼이 액츄에이터에서 이탈하지 않을 것으로 예측된다.

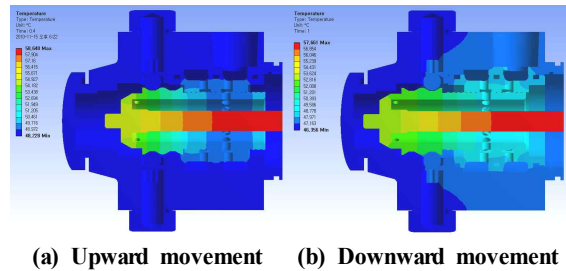


Fig. 5 Distributions of spool temperature with moving spool

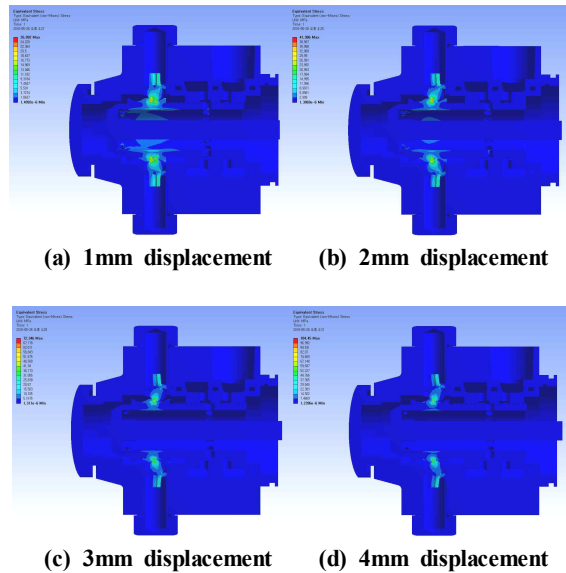
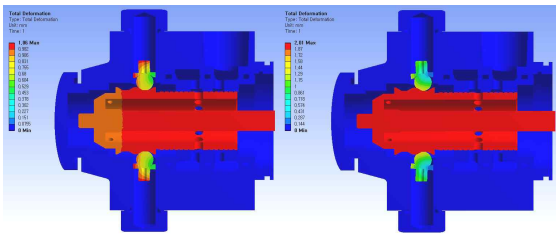
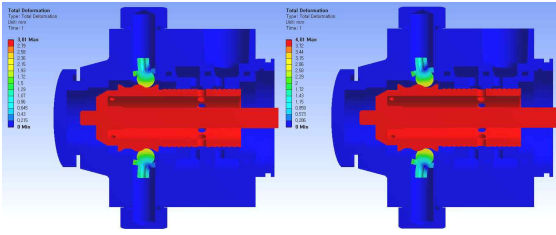


Fig. 6 Distributions of equivalent stress with downward movement of the inner spool

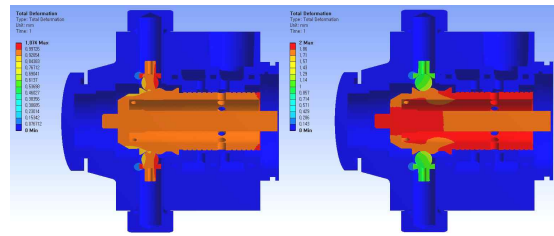


(a) 1mm displacement (b) 2mm displacement

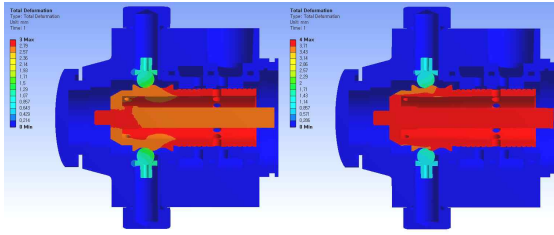


(c) 3mm displacement (d) 4mm displacement

Fig. 7 Distributions of total deformation with downward movement of the inner spool

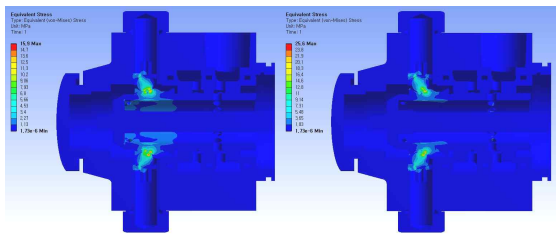


(a) 1mm displacement (b) 2mm displacement

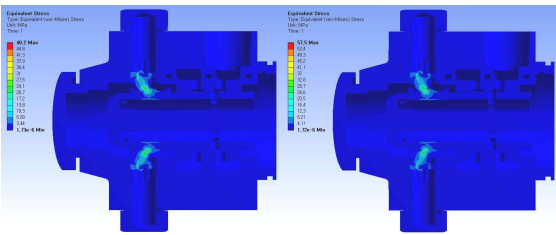


(c) 3mm displacement (d) 4mm displacement

Fig. 9 Distributions of equivalent stress with upward movement of the inner spool



(a) 1mm displacement (b) 2mm displacement



(c) 3mm displacement (d) 4mm displacement

Fig. 8 Distributions of equivalent stress with upward movement of the inner spool

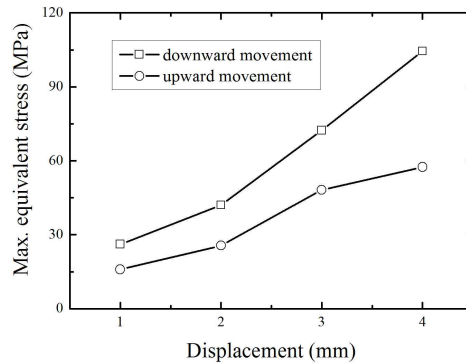


Fig. 10 Results of maximum equivalent stress with range of displacement from 1 to 4mm

Fig. 8와 Fig. 9는 내부 스펴이 상부로 운동 시 발생하는 등가응력(equivalent stress)과 전체변형(total deformation) 분포를 나타낸 것이다. 앞선 결과와 유사한 형태를 보이고 있으나, 최대 응력값은 하부로 운동할 경우와 비교하여 작게 나타났다.

Fig. 10은 내부 스펴의 변위에 따른 최대 등가 응력을 나타낸 것으로, 스펴의 변위는 최대 4mm이다. 변위

증가에 따른 최대 등가 응력은 선형적으로 변화였고, 최대 등가응력 값은 4mm변위에서 104.45MPa이 나타나는 것을 확인하였다. 즉, 스펀과 볼에서 최대 응력이 나타났으므로 이 부분에 대해서는 항복응력이 높은 재질을 선정해야 할 것이다. 그래서 본 연구에서는 볼이 내부 스펀 표면을 따라 반복적으로 움직이는 것을 감안하여 최대응력에 대해 안전율을 3으로 설정하였을 때 SUS 계열의 강보다는 좀 더 내마모성이 좋은 공구강 계열인 SKH1 또는 SKH5의 재질을 선정하여 스펀의 구조적 안정성을 확보하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서 무용제 도료를 사용하기 위한 무화 분사 시스템 중 도료 분사 시 고압조건을 만들어 주는 역할을 하는 유압 액츄에이터의 설계를 위해 ANSYS를 이용하여 구조해석을 수행하였고, 구조적 안정성을 검토하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 최대 발생 응력 위치는 볼과 내부 스펀의 면에서 나타났고, 4mm 변위 시 최대 등가응력은 104.45MPa이다.
2. 볼이 내부 스펀의 표면을 따라 반복적으로 작동하기 때문에 안전율을 3을 설정하면 허용응력은 320MPa가 된다. 이를 토대로 기존의 SUS 계열 보다는 좀 더 내마모성이 좋은 공구강 계열인 SKH51 또는 SKH55 재질을 선정하는 것이 좋을 것으로 판단된다.
3. 실제 유압 액츄에이터의 부품이 내부 스펀과 외부 스펀을 SKH 51로 제작하여 유압 액츄에이터를 작동한 결과 구조적인 결함은 전혀 발생하지 않았다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 원천산업기술개발사업의 연구비 지원에 의해 연구된 것입니다.

참고문헌

1. Jo-Chun Kim, "Trend and Control Technologies of Volatile Organic Compound," Korea Society for

- Atmospheric Environment, J. KOSAE, Vol. 22, No. 6, pp. 743-757, 2006.
2. Ji-Hyeon Song, "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. Mee-Seon Yu, Soo-Il Hwang, Sung-Bong Yang, "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. Jo-Jeong Nam, In-Su Ryou, Sang-phi Yu, Kwang-Sup Song, "Development of a Enamel Coating Machine Typed VOC Incineration and Flue Gas Recirculation," Proc. of the Korea Society for Energy Engineering, pp. 579-588, 2003.
5. Chan Lee, Sang-Won Cha, Tae-Kyu Lee, Kwan-Yun Kim, "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.
6. "ANSYS USER'S MANUAL", ANSYS Inc., 1992.