선박 도장용 50MPa급 고압 펌프 개발

김순경* · 김동건**

*동의과학대학교 자동차과

**부산대학교 바이오산업기계공학과

Development of High Pressure Pump of 50MPa class for Ship Painting

Soon-Kyung Kim* and Dong-Keon Kim**

*Department of Automotive Dong-eui Institute of Technology, Busan, Korea

**Department of Bio-Industrial Machinery Engineering Department Pusan National University, Milyang, Korea

KEY WORDS: Ship painting 선박도장, High pressure pump 고압펌프, Computation fluid dynamics 전산유체역학 Freezing phenomenon 냉결 현상, Pressure fluctuation 압력 맥동

ABSTRACT: In this study, numerical simulations and performance evaluation has been carried out to investigate performance characteristics of air-type high pressure piston pump. ANSYS and CFX were applied for analyzing the structure and flow behavior of air-type high pressure piston pump, respectively. The performance evaluation of high pressure piston pump was performed experimentally, the results were compared with simulation. It was found that the freezing phenomenon was improved by 20% and the pressure fluctuation decreased by 50%, compared with the previous pump.

1. 서 론

중방식 도장(Heavy duty coating)은 교량, 해상구조물, 각종 플랜트의 대형구조물, 선박, 컨테이너 또는 심한 부식 환경에 놓여 있는 기타 철 구조물을 부식으로부터 보호하기 위한 도료 및 그 도장 방법으로, 장기간에 걸쳐서 심한 부식 환경에 견딜 수 있는 방식 도장시스템의 총칭을 말한다.

현재 선박도장에서 사용되는 도료는 큰 점성을 가지고 있기 때문에 도료만을 통해 도장 공정을 수행하는 데 있어 어려움이 많다. 이러한 고점성의 단점을 해결하기 위해서 도료에 용제를 섞어서 사용하게 되는데, 사용하는 용제는 대부분 휘발성 유기 화합 물질(Volatile organic compounds, VOC)이기 때문에 작업 환경을 열악하게 만들고, 유해물질 배출규제가 적용되는 실정이다(Song, 2002; Lee et al., 2004; Kim, 2006; Yu et al., 2008). 이러한 문제를 해결하기 위해서는 기존의 분사방식인 에어 스프레이 방식이 에어리스 방식으로 대체되고 있으나, 고점성 도료에 대한 문제를 해결하기 위해서는 고압으로 분사할 수 있는 분사펌프의 개발이 필요하다(Kim et al., 2011a; Kim et al., 2011b).

현재의 선박도장용 공압 펌프는 복동식 왕복형으로, 실린더,

피스톤 및 하부 프레임으로 구성되어 있으며, 흡입 밸브는 실린더 상부에 위치하여 상부와 하부의 흡입 공급관로가 차이가 발생한다. 이로 인해 구조적으로 압축과

팽창이 교차할 시점에 압력강하로 인해 맥동현상이 나타나고, 또한 급속 배출로 인해 펌프 내부의 온도가 급격히 떨어지면서 액화현상으로 인해 펌프 내부에 결빙(Freezing)현상이 발생하고, 이로 인해 관로가 폐쇄되는 문제점을 가지고 있다. Fig. 1은 펌프 작동시 급속 배출로 인해 펌프의 실린더 표면에 결빙이 나타나는 그림이다.

실제 도장 작업시 펌프 내부에 결빙현상이 일어나면 흡입 및 배출 관로가 폐쇄되어 결빙이 제거되지 않는 한 작업을 할 수 없기 때문에 작업시간의 연장을 초래하여 비용적인 측면에서도 손실이 발생한다. 더구나 가연성 도료를 사용함으로 인해 별도의 전열기구의 설치가 불가능하기 때문에 결빙이 제거될 때까지 기다릴 수밖에 없다. 또한 펌프 작동시 발생하는 맥동현상은 도장 작업시 불균일한 도막두께가 유발하여 도막상태를 불량으로 만들기 쉽기 때문에 보다 효율적으로 압력을 제어할 필요가 있다.

이상에서 기존 공압식 펌프의 문제점을 개선하기 위해 본 연구에서는 펌프 내부의 냉결시간을 2배 이상 연장하고, 맥동효과

Received 22 October 2013, revised 3 December 2013, accepted 20 December 2013

Corresponding author Soon-Kyung Kim: +82-51-860-3264, kskim@dit.ac.kr

© 2013, The Korean Society of Ocean Engineers

Fig. 1 Freezing phenomenon of pump

Fig. 2 Schematic diagram of air type high pressure pump

를 20%이상 감소하는 선박도장용 50MPa급 고압 펌프를 개발하고자 한다.

2. 펌프의 설계 및 해석

2.1 공압식 펌프의 설계

Fig. 2는 본 연구에서 개발된 공압식 도장 펌프로, 크게 상부 하우징(Upper housing), 하부 하우징(Lower housing), 피스톤(Piston), 방향전환밸브(Directional control valve) 등으로 구성되어 있다. 토출압력을 50MPa급을 내기 위하여 압축비를 72:1로 설계하였고, 고압을 발생하기 위해서 왕복동 피스톤 타입의 고압펌프 시스템을 적용하였다. 맥동현상을 최소화하는 방법으로는 기존의 고압펌프의 경우, 밸브 전환 하우징이 상부에 위치하여 흡입과 배출의 관로 길이가 다르게 제작되어 맥동효과가 강하게 나타나지만, 본 연구에서는 밸브 전환 하우징을 측면부에 부착하여 흡입과 배출 관로의 길이를 동일하게 해줌으로써 규칙적인 맥동사이클을 형성하도록 설계하였다. 또한 구동방식을 개선함으로 맥동압력과 맥동폭을 감소토록 하였다.

냉결시간을 지연시키기 위한 방법은 실린더 내의 흡입 및 배출 관로 주변에 자연 통풍구의 면적을 최대한 확대해줌으로써 자연대류에 의한 열전달 효과를 줘서 내부의 저온을 배출할 수

있도록 설계하였다.

2.2 공압 펌프의 구조해석

공압 펌프는 사용 압력과 결빙으로 인한 온도 변화에 대해 구조적 안정성을 검토하기 위하여 열응력 해석을 수행하였다. 고압 펌프의 모델링은 CATIA V5를 이용하였고, 구조해석에 영향을 주지 않는 미세한 부품에 대해서는 단순화하였다. 구조해석을 위한 유한 요소 모델은 Ansys workbench 14.0에서 제공되는 3D 솔리드 사면체를 사용하였으며, 유한 요소 모델의 격자는 요소 수는 506,687이고, 노드 수는 904,714이다. Fig. 3은 해석에 사용된 유한 요소 모델이다. 고압 펌프의 재질은 알루미늄 합금(Aluminum alloy)이며, 물성치는 Table 1에 나타내었다. 경계조건은 압축공기의 사용압력은 0.6MPa이고, 내부 온도의 설정은 너무 낮은 온도가 되면 결빙현상으로 펌프의 작동이 불가능하기 때문에 -5°C 로 하였다. 또한 외기 조건은 온도를 35°C 로 설정하였고, 자유 대류를 고려한 대류열전달 계수 $5\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ 를 적용하였다.

2.3 공압식 펌프의 유동해석

본 연구에서는 $k-\omega$ SST(Shear stress transport)의 난류모델을 사용하여 공압식 도장 펌프의 내부 유동해석을 수행하였고, 상용해석 프로그램인 CFX 14.0을 사용하였다. CFX는 Navier-Stokes 방정식을 Reynolds 평균함으로써 얻어지는 URANS(Unsteady reynolds averaged Navier-Stokes)방정식에 대한 해를 구한다. 연속방정식, 운동량방정식, 에너지 방정식은 다음과 같다.

Fig. 3 Structure of air-type pump

Table 1 Material properties

Aluminum alloy	
Density	2.7[g/cc]
Modulus of elasticity	70 [GPa]
Poisson ratio	0.33
Tensile yield strength	280 [MPa]
Tensile ultimate strength	310 [MPa]

연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

운동량방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U) + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (2)$$

여기서 응력텐서 τ 는 변형률에 연관된다.

$$\tau = \mu \left[\nabla U + (\nabla U)^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot U \right] \quad (3)$$

에너지방정식

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \nabla \cdot (U \cdot \tau) + U \cdot S_M + S_E \quad (4)$$

여기서 ρ 는 유체의 밀도, U 는 속도, p 는 압력, H 는 전엔탈피 ($H = h + 1/2 U^2$), h 는 정적엔탈피, T 는 온도, τ 는 응력텐서이다. 여기서 $\nabla \cdot (U \cdot \tau)$ 는 점성응력에 의한 일을 나타낸다. 그리고 $U \cdot S_M$ 은 외부 모멘텀에 의한 일을 나타낸다.

Fig. 4는 해석 모델을 격자 생성한 것으로, 노드 수는 1,5530,760이고, 요소 수는 5,055,910이다. Fig. 5는 해석의 경계 조건을 나타낸 것으로, 고압펌프의 내부 유동은 피스톤의 상하 방향에 따라 구분되지만, 흡입 및 배출유동이 동일하기 때문에 피스톤의 상 행정만을 해석하였다. 피스톤이 위로 움직이는 경우, 상부 공간은 압축되는 반면에 하부 공간은 팽창을 한다. 이러한 현상을 구현하기 위해 이동격자를 이용한 과도해석을 수행하였다. 고압 펌프의 행정길이는 125mm이고, 행정 시간은 1초이다. 즉, 한 번 왕복 운동하는 경우 행정길이는 250mm에 2초가 걸린다. 해석의 총 시간은 1초이고, 시간 간격은 0.001로 하여 해석을 수행하였다. 입, 출구 조건은 압축기에서 공급되는 압축공기의 압력이 0.6MPa이기 때문에 입구 조건은 0.6MPa로 설정하였고, 대기압 상태로 유동이 분사되기 때문에 출구 조건은 대기압 조건을 주어 해석하였다.

Fig. 4 Mesh generation

Fig. 5 Boundary condition

3. 결과 및 고찰

3.1 구조해석 결과

(a) Temperature

(b) Equivalent stress

(c) Total deformation

Fig. 6 Results of structural analysis

Fig. 6은 고압펌프 작동시 사용되는 압력과 온도조건을 적용하여 열응력해석을 한 결과이다. Fig. 6(a)는 주어진 온도조건을 통해 온도 해석을 한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 6(b), Fig. 6(c)는 고압펌프의 등가응력(Equivalent stress)과 전체 변형(Total deformation) 결과를 나타낸 것으로, 최대응력이 49.292MPa로 실린더 상단부에 나타나는 것으로 예측되었다. 이는 재료의 항

복응력이 280MPa에 비해 작은 값으로 열응력에 대한 구조적 안정성을 확보하는 것으로 사료된다. 이 때 안전율은 5.6이고, 최대 변형은 0.050036mm이다.

2.2 유동해석 결과

Fig. 7과 Fig. 8은 공압펌프에서 피스톤이 상부로 움직이는

Fig. 7 Distributions of velocity with variation of stroke in high pressure pump

Fig. 8 Distributions of temperature with variation of stroke in high pressure pump

과정을 이동격자를 이용하여 묘사한 것으로, Fig. 7은 내부의 속도 분포를 나타낸 것이고, Fig. 8은 온도 분포를 나타낸 것이다. 속도 분포를 살펴보면, 피스톤이 상부로 움직임에 따라 피스톤 하부에서는 팽창행정으로 인해 유동이 펌프내로 공급되는 것을 볼 수 있고, 피스톤의 상부는 압축행정에 의해 펌프 내부에서 외부로 토출되는 현상이 나타난다. 이 때 최대 속도는 밸브 전환 하우징근처에서 나타나며 이 때의 속도는 304m/s로 예측된다.

Fig. 8의 온도분포를 보면, 피스톤이 움직이기 시작하면서 토출부에서 급속배출로 인해 온도가 급격히 떨어지는 것을 볼 수 있고, 이 때 온도 강하는 -100°C 이하로 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 온도 강하는 행정시간이 지남에 따라 펌프 내부로 확산되어 진다.

이동격자를 이용하여 실제 고압펌프의 내부 유동해석을 분석해 본 결과 고압펌프 내부의 온도가 공기의 임계온도까지 내려가는 것을 확인하였고, 이 결과는 고압 펌프 내부에서 공기의 상변화가 일어나서 물이 생기는 것을 의미한다. 즉, 고압펌프 내부에 결빙현상이 일어나 배출구에서 관로가 폐쇄되면 펌프의 작동이 멈추는 문제점을 야기시키는 것으로 파악할 수 있다.

2.3 성능 평가

해석 결과를 통해 나타난 설계의 문제점을 보완하여 실제 고압펌프를 제작하여 펌프 사용에 따른 맥동압력과 냉결 시간을 평가하였다. 맥동압력의 평가는 맥동압력차를 1cycle에 대해 최대압력과 최소압력의 차로 정의하였고, 이를 5회 반복하여 평균치를 산정하였다.

Fig. 7은 5cycle에 대한 토출압력의 분포를 나타낸 것이다. 최대 토출압력이 24.2MPa이고, 최소 토출압력은 20MPa이기 때문에 맥동압력차는 4.2MPa이다. 이는 기존의 공압펌프 맥동압력차가 8.0MPa임을 감안하면 50%정도 개선된 것을 알 수 있다. Table 2는 5cycle에 대한 맥동압력차를 나타낸 것이다. 맥동압력차가 5cycle에 대해 일정한 값을 가지며, 5회에 대한 평균치는 4.2MPa이다.

Fig. 9 Distribution of discharge pressure of high pressure pump

Table 2 Distributions of pressure pulsation of 5 cycles

Cycle	Max. pressure	Min. pressure	pressure pulsation
1	24.4 MPa	20.0 MPa	4.4 MPa
2	24.2 MPa	20.0 MPa	4.2 MPa
3	24.1 MPa	20.0 MPa	4.1 MPa
4	24.1 MPa	20.2 MPa	3.9 MPa
5	24.0 MPa	19.6 MPa	4.4 MPa

Fig. 10 Freezing test of pump

Table 3 Results of freezing test

	Development	Previous	H. co.	G. co.
Freezing time	140 min	72 min	75 min	126 min

Fig. 10은 펌프의 작동시간에 따른 펌프의 냉결상태를 상온 상태에서 5시간동안 시험한 것으로, 펌프가 작동하면서 배출구에서 결빙현상이 나타나기 시작하지만, 결빙으로 인한 관로 폐쇄 현상은 나타나지 않아 펌프는 지속적으로 작동되었으며, 오작동도 발생하지 않았다. Table 3은 상온에서 냉결 시험을 통해 개발제품과 타사 제품의 냉결 시간을 서로 비교하여 나타낸 것이다. 타사 제품에 비해 냉결시간이 개선되는 것을 확인하였습니다.

5. 결론

본 연구는 선박용 도장시스템인 공압펌프에서 나타나는 맥동압력과 냉결시간의 문제점을 개선하기 위하여 구조 및 유동해석을 수행하여 원인을 파악하여, 설계 제작하여 성능평가를 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 고압 펌프 작동시 온도 및 압력 조건에 대해 열응력 해석을 수행한 결과 최대 등가응력이 49.292MPa이며 이를 재료의 항복응력과 비교하면 안전율이 8이다.
- (2) 이동격자를 이용하여 펌프 내부의 유동해석을 수행한 결과 토출부분에서 급속배출로 인해 급격히 온도강하가 일어나며, 이로 인해 배출구에서부터 결빙현상이 일어나는 것을 확인하였다.

- (3) 공압펌프의 흡, 배기 밸브전환하우징을 측면에 설치하여 흡기관과 배기관의 길이를 동일하게 해줌으로써 기존 펌프가 가지고 있는 맥동압력차가 8.0MPa를 50% 개선하여 평균 맥동압력차를 4.2MPa가 되었다.
- (4) 펌프 작동시 급속 배출로 인해 발생하는 냉결기간을 지연시키기 위하여 자연 통풍면적을 극대화하고, 초저온의 배출가스를 최대한 빨리 배출시키기 위해 4-way 밸브 타입의 파일럿 밸브보다는 3-way 밸브 타입의 파일럿 밸브가 사용하는 것이 밸브전환이 용이하다.

References

- Song, J.H., 2002. Effects of Moisture Contents on Removal Efficiencies of Biofiltration Processes Treating VOCs Found in Paint Spray Booth Emissions. Proceedings of the Korean Society of Civil Engineers, 3333-3336.
- Lee, C., Cha, S.W., Lee, T.K., Kim, K.Y., 2004. Treatment of the VOC in the Exhaust Gas from Painting Process by Using Activated Carbon and Photocatalytic Hybrid System. Proceedings of the Korea Society for Energy Engineering, 3-9.
- Kim, J.C., 2006. Trend and Control Technologies of Volatile Organic Compound. Korea Society for Atmospheric Environment, Journal of KOSAE, 22(6), 743-757.
- Yu, M.S., Hwang, S.I., Yang, S.B., 2008. Analysis of VOC and Oder Abatement Effect by Application of Microbes to Painting Process in Automotive Industry. Korean Journal of Oder Research and Engineering, 7(2), 105-113.
- Kim, D.K., Kim, B.W., Shin, S.B., 2011a. Development of Atomization Spraying System for Solvent-free Paint(I) - Flow Analysis of Hydraulic Actuator. Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 10(2), 61-66.
- Kim, D.K., Kim, B.W., Shin, S.B., 2011b. Development of Atomization Spraying System for Solvent-free Paint(II) - Structure Analysis of Hydraulic Actuator. Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 10(2), 67-72.