

# 항공기용 유압 펌프 부품의 동적특성 및 유한 요소 분석 FEM Analysis and Dynamic Characteristics of Hydraulic Pump Assembly Components for Aircraft

김형의 · 한성건  
H.E. Kim and S. G. Han

(접수일 : 2011년 02월 17일, 수정일 : 2011년 08월 26일, 채택확정 : 2011년 10월 06일)

**Key Words** : Piston(피스톤), Block(블록), Slipper(슬리퍼), Gap(틈새), Yoke(요크)

**Abstract** : In this paper, the numerical analysis is introduced to predict the dynamic characteristics of piston pump assembly components in hydraulic piston pump for aircraft. Rotating cylinder block and reciprocating pistons are modelled kinematically. Furthermore, leakage flow and torque losses between the boundary surfaces of components are analyzed. This analysis has been carried out through the commercial CASPAR program. The simulations for stress on pump assembly components using the dynamic analysis model are performed using the ANSYS 11 program. Such dynamic characteristics and stress simulation procedures will be carried out repeatedly for the optimized design.

## 1. 서 론

사판식 액셀 피스톤(piston) 펌프는 상대윤활부분에 정압베어링을 사용하기 때문에 고출력 밀도화가 가능하며, 소형, 경량화에 유리하여 여러 분야에서 사용되어져 오고 있다. 이에 따라 액셀 피스톤(piston) 펌프 연구가 광범위하게 연구되어져 오고 있으며<sup>1-4)</sup>, 대표적으로 활발하게 이루어지는 곳이 항공분야이다. 항공용 펌프를 경량화하기 위해서는 작동압력을 증가시키거나 기계부품의 질량을 줄여야 한다. 질량을 줄이기 위해서는 기계부품의 정적 및 동적 응력을 고려하여, 기계 결합구조의 최적 설계에 따라 행해져야 한다. 또한 고압화에 맞추어, 우선 피스톤 펌프의 최적 설계를 얻도록 동적 거동해석과 설계가 반복적으로 이루어져야 한다.

따라서 본 연구에서는 피스톤 펌프에 대한 회전부의 부품에 대한 동적거동 특성을 위해 CASPAR 프로그램과 밸브판 및 실린더 형상에 적용하여 C-프로그램을 작성하여 시뮬레이션 하였다. 이외에 최대 주축 응력계산을 위해 ANSYS 11 프로그램을 사용하였다.

## 2. 구성 어셈블리의 기본좌표와 유한요소 모델

### 2.1 구성 어셈블리의 기본좌표

Fig. 1은 피스톤 축 좌표 ( $x_A, y_B, y_A, y_B$ )로 표현되는 틸팅된(tilted) 피스톤 위치를 나타낸다.

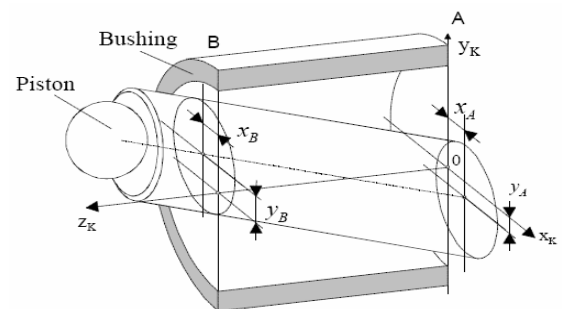


Fig. 1 Position of the piston

Fig. 2는 아래의 틈새(gap) 높이가 120° 거리에 있는 세 점의 높이( $h_{G1}, h_{G2}, h_{G3}$ )로 표현되는 슬리퍼(slipper) 위치를 나타내며, Fig.3은 실린더 블록(block)의 내경에 120° 간격으로 위치한 세 점 높이( $h_{b1}, h_{b2}, h_{b3}$ )로 기술되는 실린더 블록 위치를 나타낸다. 각각의 초기 틈새 높이 초기 값(1e-06m, 1e-06m, 1e-06m)로 설정하였다.

한성건(교신저자) : 한국기계연구원  
E-mail : kks9912@paran.com, Tel : 042-864-7306  
김형의 : 한국기계연구원, 신뢰성 센터

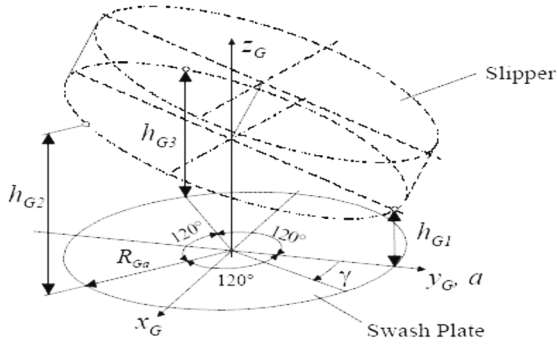


Fig. 2 Position of the slipper

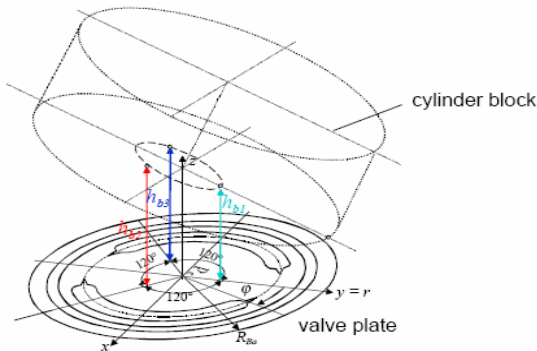


Fig. 3 Position of the cylinder block

## 2.2 유한요소 모델

Fig. 4에서 보는 것처럼, 유압 펌프의 주요 구성품인 실린더 블록, 요크(yoke), 피스톤 조립체의 거동을 시뮬레이션하기 위해 유한 요소법을 사용한다. 이 모델은 ANSYS 11 프로그램으로 들여와 결합 구조의 최종배열이 만들어진다.

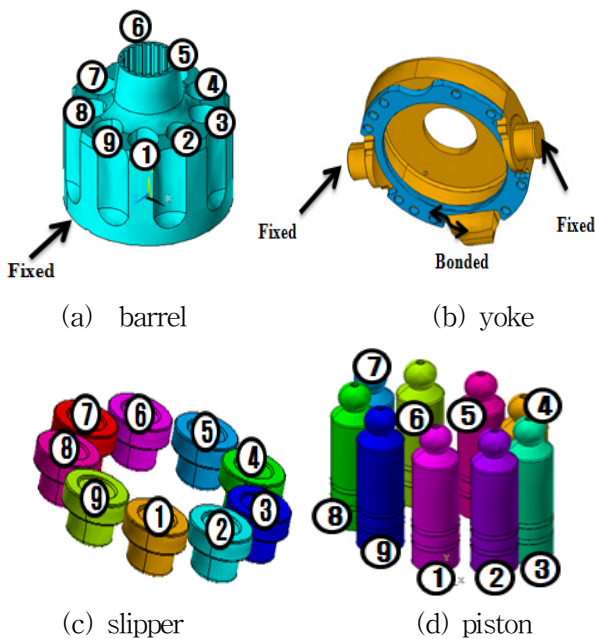


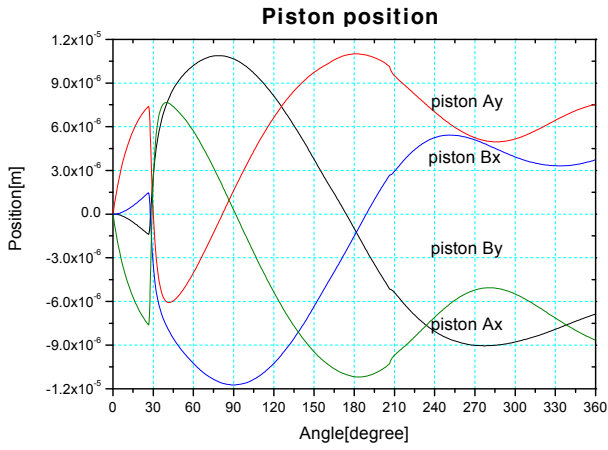
Fig. 4 Boundary conditions of pump assembly

숫자 1~4는 토출부(207bar), 5~9는 흡입부(2bar) 임을 의미한다.

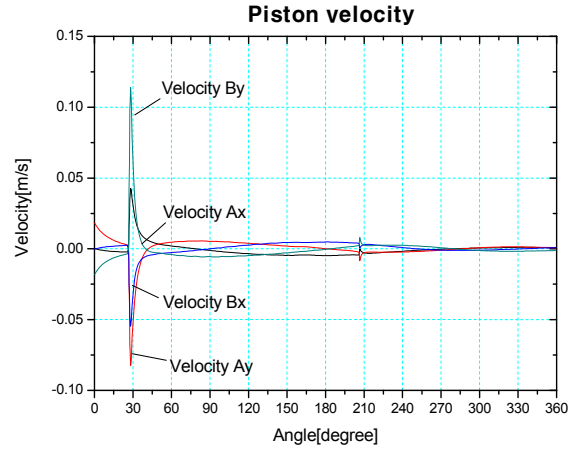
## 3. 결과 및 고찰

펌프의 핵심부품을 구성하는 피스톤, 슬리퍼 및 실린더 블록의 동적 특성을 알아보기 위해 상용 프로그램인 CASPAR을 사용하여 기본사양에 따라 시뮬레이션 하였다. 또한 실린더 블록 및 밸브 플레이트의 흡입 포트와 토출포트 형상에 맞춰 C-프로그램을 작성하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 시간과 관련된 Grid 수는 피스톤과 슬리퍼에 대해 축방향에 20, 지름방향에 8로 설정하였다. 실린더 블록에 대해서는 15, 8로 설정하였으며, 안정된 그래프를 얻기 위해 시뮬레이션 횟수를 7회로 설정하였다. Mesh는 더 작게 나뉘야 하지만, 현재 컴퓨터의 CPU 제한에 의한 시간이 너무 드는 문제가 있었다.

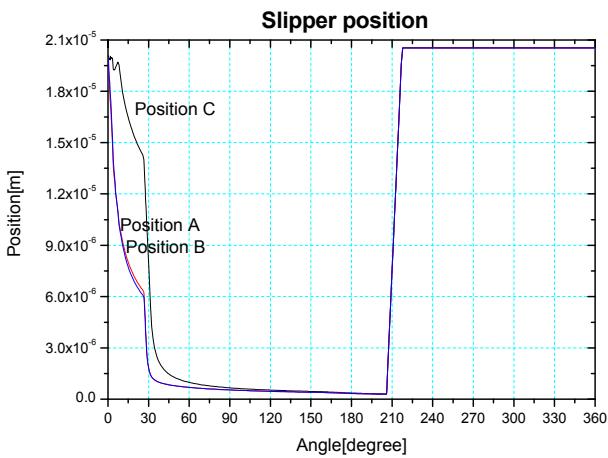
Fig. 5(a)는 Fig. 1의 위치 A와 위치 B에 대해 1회 전동간의 틸팅하는 피스톤 1개에 대한 틈새의 변화 곡선을 나타낸다. 피스톤의 A점과 B점에서의 성분 x와 y는 서로 대칭하여 틈새가 변화하는 것을 알 수 있다. Fig. 5(b)로부터, 실린더내의 압력이 상사점을 지날 때 저압이기 때문에 슬리퍼와 경사판의 틈새가 가공오차로 가질 수 있는 최대값을 가지다가 실린더 압력이 상승하면서 피스톤을 경사판이 미는 힘이 커지면서 틈새가 점점 줄어드는 것을 알 수 있다. 또한 실린더가 저압측 포트와 연결되면서 압력이 작아져 다시 최대값을 가진다. 이 해석 결과를 통해 슬리퍼와 경사판의 틈새가 고압인 경우 1 $\mu$ m보다 작은 값을 가짐을 알 수 있다. 슬리퍼와 경사판 사이의 마찰을 증가시킬 뿐만 아니라 슬리퍼의 마모를 가속화시킬 수 있다. 이와 같은 문제가 실험에서도 발생한다면 현재 설계된 슬리퍼의 압력이 형성되는 면적을 키움으로서 해결될 수 있다. 실린더 블록과 밸브 판사이의 틈새 해석 결과인 Fig. 5(c)처럼 실린더 블록이 틸팅됨을 알 수 있으며, 밸브 플레이트에 형성되는 압력분포 때문에 실린더 블록을 띄우려는 힘이 실린더 블록을 누르려는 힘보다 크기 때문에 고압측의 틈새가 저압측의 틈새보다 크다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6은 1회전동안의 피스톤, 슬리퍼 및 실린더 블록의 속도를 나타낸다. 피스톤은 실린더 보어를 중심으로 왕복운동을 하고 실린더 블록의 중심축을 기준으로 회전한다. 왕복운동은 z방향으로 표시되며 자전과 공전운동은 x, y 방향의 합이다. 피스톤은 상



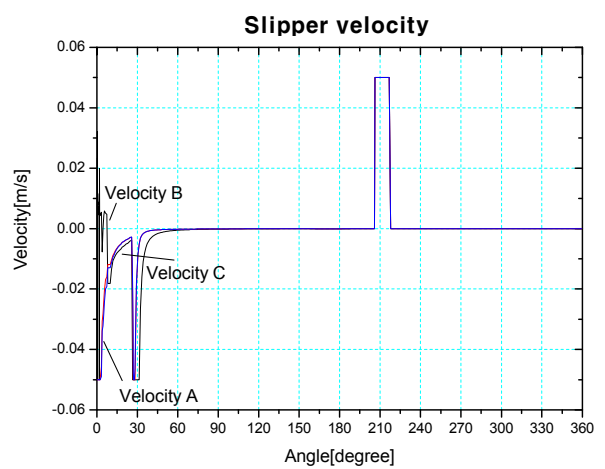
(a) piston



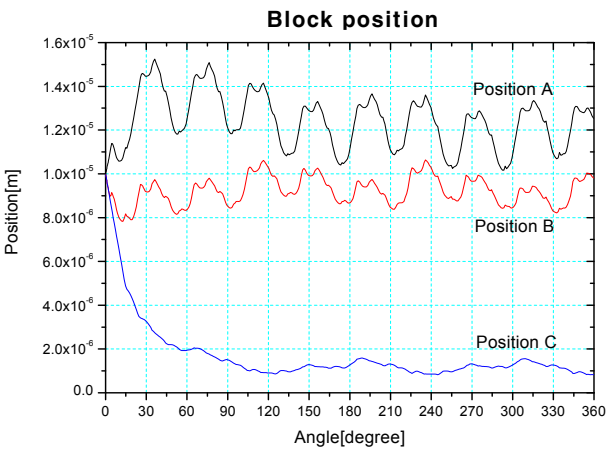
(a) piston



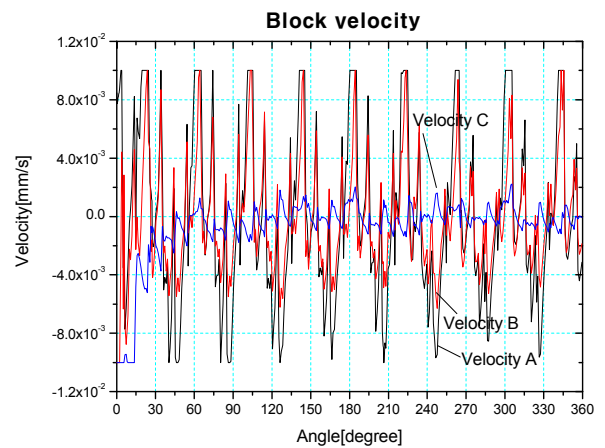
(b) slipper



(b) slipper



(c) cylinder block



(c) cylinder block

Fig. 5 Position of piston, slipper and cylinder block

Fig. 6 Velocity of piston, slipper and cylinder block

사점을 지나는 영역에서 저압이므로 속도가 점차로 감소하며, 고압 영역인 하사점을 통과하면서 피스톤 속도가 일정해 짐을 알 수 있다. 그리고 슬리퍼 속도는  $180^\circ$  부근에서 저압부에서 고압부를 통과할 때 유량이 순간적으로 역 유입되어 속도가 크게 증가함을

알 수 있다. 즉 맥동현상이 발생한다는 것을 알 수 있다. 또한 실린더가 저압 측 포트와 연결되면서 압력이 작아져 다시 최대값을 가진다. 실린더 블록의 z 방향은 스프링력과 공급압력에 의해 압착되기 때문에 변위가 발생하지 않는다. 이때 스프링 힘은 대략

1950N이다. 현재 펌프의 실린더 블록의 속도는 최대 0.25mm/sec내외의 범위에서 작동됨을 알 수 있다.

Fig. 7에서 보듯이, 슬리퍼와 경사판사이의 틈새가 아주 작기 때문에 이 부분에서 발생하는 마찰 손실이 가장 크다는 것을 토크 손실해석으로부터 알 수 있다. 반면에, 실린더 블록과 밸브 플레이트사이의 틈새가 커 Fig. 8에서처럼 실린더 블록에서 누설이 가장 큼을 알 수 있다.

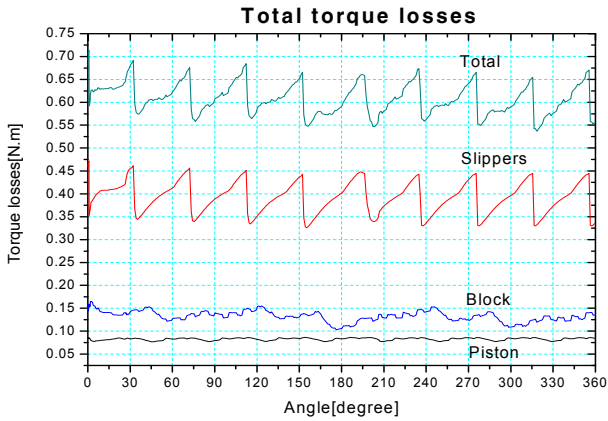


Fig. 7 Total torque losses

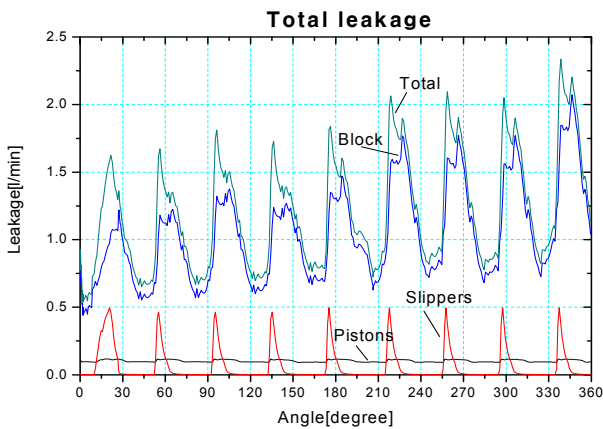


Fig. 8 Total leakage

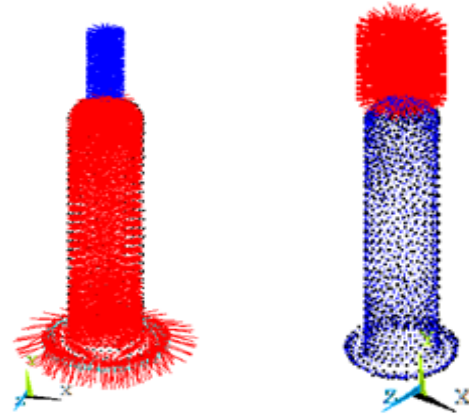
시뮬레이션에 사용된 각 부품명 및 요소 수가 Table 1에 주어진다. Fig. 9는 210 bar의 고압(토출부)과 2bar의 저압(흡입부)에서 피스톤 해석 조건으로 피스톤내부에 각각 근사적으로 147bar, 44bar의 압력을 걸어준 경계조건을 나타내는 그림이다.

사용된 피스톤의 재질은 SNCM220, Young률은 205GPa, Poisson 비율은 0.3이다.

다음의 Fig. 10은 Fig. 9의 피스톤 경계조건을 사용하여 ANSYS 11 프로그램으로부터 얻어진 피스톤의 정적 비선형 분석 결과를 보여준다. 고압부에서

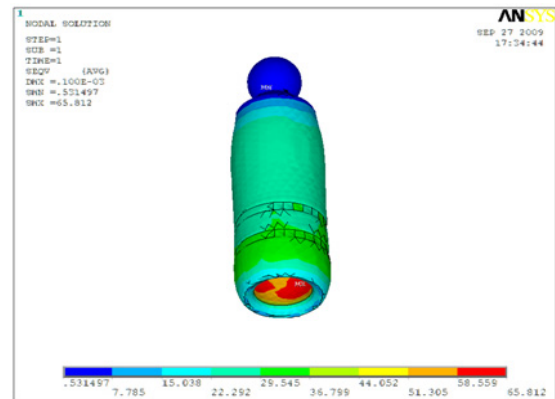
Table 1 Element number used in assembly parts

Name	Number of elements
Cylinder Barrel	260396
Piston	48452
Piston Slipper	28275
Yoke	929480

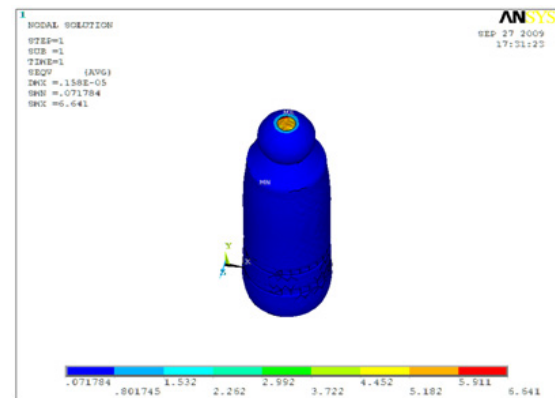


(a) high pressure (b) low pressure

Fig. 9 Analysis condition of a piston



(a) high pressure

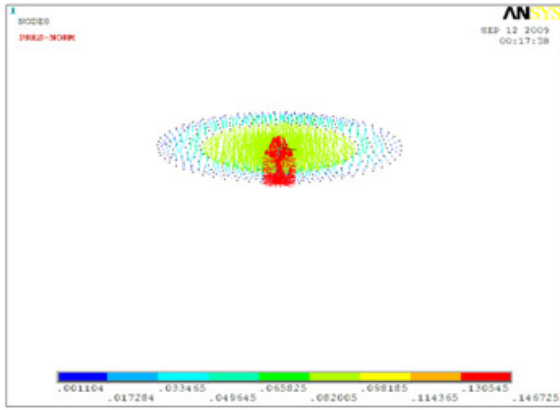


(b) low pressure

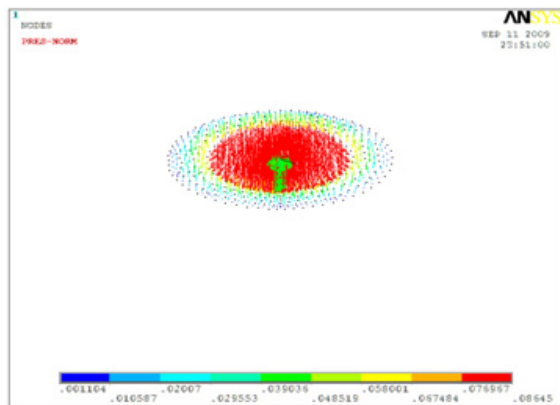
Fig. 10 Numerical results of a piston

65.8MPa와 저압부에서 6.6MPa 주축 최대응력을 얻었다. 이것은 항복응력이 1375MPa와 비교하면 매우 작으므로 구조적으로 안정적이라고 판단된다.

Fig. 11은 고압부와 저압부 슬리퍼에 대한 분석조건이다. 사용된 슬리퍼의 재질은 SCM440, Young률은 122GPa, Poisson 비율은 0.38이다.



(a) high pressure

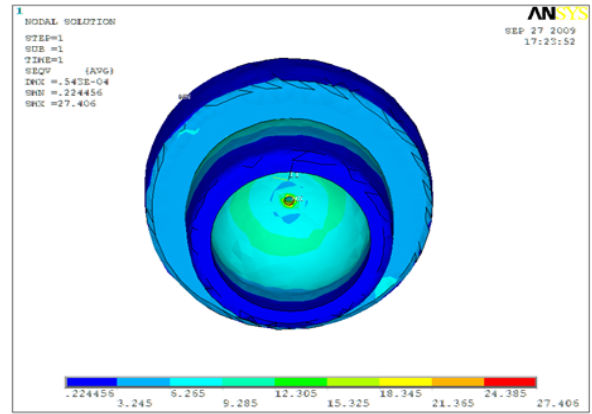


(b) low pressure

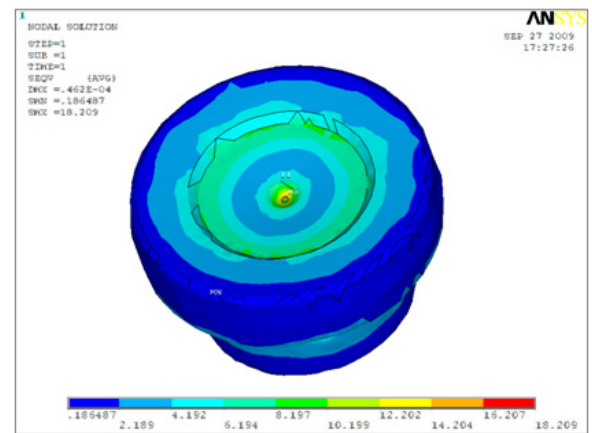
Fig. 11 Analysis condition of a slipper

Fig. 12는 Fig. 11의 슬리퍼 경계조건을 사용하여 고압부의 슬리퍼에서 27.4MPa와 저압부의 슬리퍼에서 18.2MPa의 최대 주축 응력을 얻었다. 슬리퍼의 항복응력 670MPa와 비교하면 구조적으로 안정하다고 판단 할 수 있다.

Fig. 13은 실린더 블록에 대한 해석조건이다. 사용된 블록의 재질은 CAC203이며, Young률은 122GPa, Poisson 비율은 0.38이다. Fig. 14는 Fig. 13의 블록의 경계조건을 사용하여 얻어진 최대 주축 응력 76.6MPa를 얻었다. 이것은 블록의 항복응력 670MPa와 비교하면 아주 작으므로 구조적으로 안정하다고 사료된다.



(a) high pressure



(b) low pressure

Fig. 12 Numerical results of the slipper

Fig. 15는 요크의 해석조건이다. 사용된 요크 재질은 SNCM220이며, Young률은 205GPa, Poisson 비율은 0.38이다. 이 해석조건을 사용하여 얻어진 요크의 주축 최대 응력은 208.7MPa를 얻었으며, 요크의 항복응력 1375MPa 값과 비교하면 작으므로 안정하다고 판단된다.

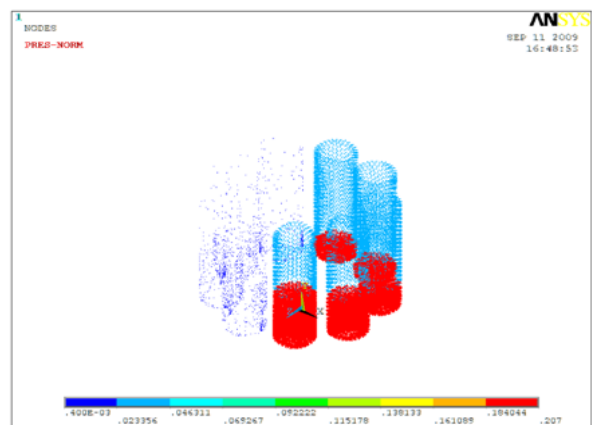


Fig. 13 Analysis condition of the barrel

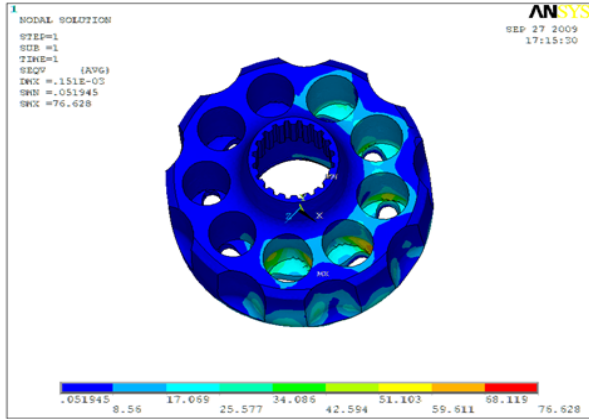


Fig. 14 Numerical results of the barrel

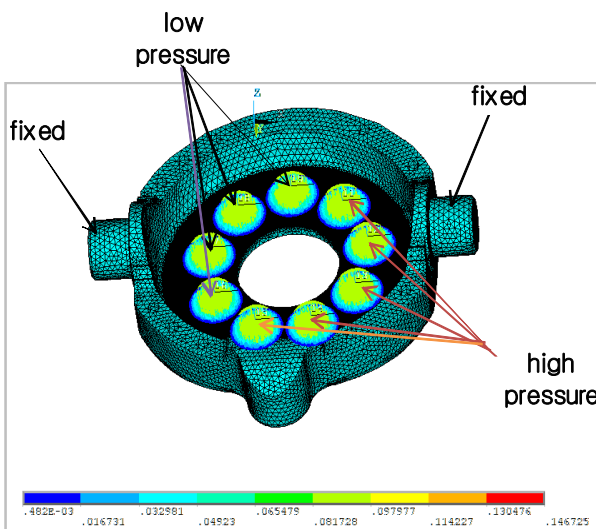


Fig. 15 Analysis condition of the yoke

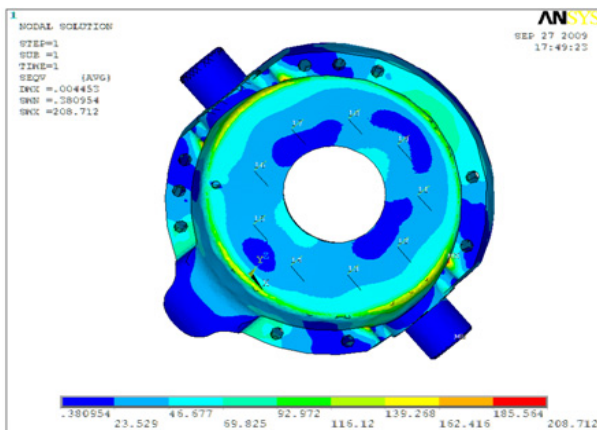


Fig. 16 Numerical results of the Yoke

최대응력은 실린더 블록과 피스톤 사이에 가해지는 토출압력과 스플라인으로 연결되는 샤프트, 왕복하는 피스톤, 회전 운동하는 밸브 플레이트 등의 조인트와 정지한 상태에서 발생하는 접촉 및 변형력에 의해

최대 응력 값이 발생한다. 지금까지 펌프 구성품에 대해 얻어진 주축 최대 응력 값과 항복응력 값을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Results of Maximum 1<sup>st</sup> principal stress on each component

Name	Max. 1st principal stress(Mpa)	Yield force(Mpa)
Cylinder Barrel	76.6	670
Piston (high pressure)	65.8	1375
Piston (low pressure)	6.6	1375
Slipper (high pressure)	27.4	670
Slipper (low pressure)	18.2	670
Yoke	208.7	1375

#### 4. 결론

항공용 유압 피스톤 펌프의 피스톤, 슬리퍼 및 실린더 블록에 대한 동적거동 분석 및 응력 분석에 대해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) CASPAR 프로그램을 이용하여 유압 피스톤 펌프의 동적거동 모델을 구현하고 피스톤, 슬리퍼, 실린더 블록 위치 및 속도를 검토하였다.
- (2) 동적거동상태에서 발생하는 압력과 속도를 이용하여 분석대상인 피스톤, 슬리퍼, 실린더 블록에 대한 응력을 분석하였다.
- (3) 슬리퍼와 경사판사이에서 발생하는 마찰 손실이 가장 컸다.
- (4) 실린더 블록과 밸브 플레이트사이에서 누설이 가장 큼을 알 수 있었다.
- (5) 각 구성품의 주축 최대 응력은 항복응력 보다 훨씬 작기 때문에 아주 만족한다는 것을 알 수 있다.

본 연구는 피스톤에서 발생된 압력이 가정을 통해 간략화된 분석임으로 실제조건과 결과 값이 다를 수 있다. 그럼으로, 차후에 경계조건에 적용한 값과 실험값과의 비교분석을 통해 보다 명확한 결과를 도출할 필요성이 있다.

#### 참고 문헌

1. S.Kumar, J.M.Bergada, and J.Watton, 2009,

- “Axial piston pump grooved slipper analysis by CFD simulation of three-dimensional NVS equation in cylindrical coordinates”, *Computers & Fluids* 38, pp. 648-663.
2. Tae-Jo Park and Jae-Chan Yoo, 2008, “Flow analysis in a slipper bearing for swash plate type axial piston pump”, *Journal of the KSTLE*, Vol. 24, No. 6, pp. 343-348.
  3. Dong-Sik Park, 2006, “Analysis and improvement of high pressure piston pump”, *Journal of KOSME*, pp. 151-153.
  4. J.H.Cho, S.M.Kim, J.H.Park, K.B.Kim and M.K.Park, 2008, “The study of characteristic of variable displacement axial piston pump”, *한국정밀공학회, 추계학술 논문집*, pp. 387-388.