

## 유압 베인 펌프의 캠 링 변형에 관한 연구

조명래 · 한동철\* · 양광식\*\* · 박제승\*\* · 최상현

서울대학교, 터보 동력기계 연구소

\*서울대학교 기계설계학과

\*\*서울대학교 대학원

## A Study on the Cam Ring Deformation in a Balanced Type Vane Pump

Myung-Rae Cho, Dong-Chul Han\*, Kwang-Shik Yang\*\*,  
Je-Seung Park\*\* and Sang-Hyun Choi

*Turbo & Power Machinery Research Center, Seoul National University*

*\*Professor, Dep. of Mech. Design & Production Engineering, Seoul National University*

*\*\*Graduate Student, Dep. of Mech. Design & Production Engineering, Seoul National University*

**Abstract**—This paper presents the deformation characteristics of cam ring in a balanced type vane pump. Cam ring is operated in the high-pressure condition. Therefore the local deformation of cam ring affects the characteristics of compression, vane motion and noise and vibration. We analyzed the deformation of cam ring for the three types by using the finite element method. The deformed shape of cam ring and the effects of deformation on the compression are presented. As a result of analysis, we know that the right hole of the cam ring has advantage for reducing the pressure overshoot.

**Key words**—cam ring, deformation, vane pump, finite element method, compression, overshoot.

### 1. 서 론

유압 베인 펌프의 캠 링은 베인의 원활한 작동을 보장할 뿐 아니라 펌프의 압축 성능에 중요한 역할을 담당한다. 따라서 베인 펌프의 캠 링 특성을 향상시키기 위한 많은 연구가 이루어 졌다. 그러나 캠 링 자체가 펌프의 성능을 좌우하는 중요한 역할을 담당하므로 기술 보호의 차원에서, Koji[1], Hattori[2], 그리고 Cho와 Han[3] 등의 연구 논문을 제외하고는 곡선 자체의 특성 등에 대한 연구 논문은 잘 발표되지 않고 있다. 따라서 단지 측정 등에 의해 어떤 종류의 곡선이 사용되었을 것이라는 추정 정도만이 가능한 실정이다.

한편 베인 펌프는 고압에서 작동하고 있으므로 캠 링이 받는 하중은 상당히 가혹하다. 또한 최근 펌프의

개발 추세가 소형 경량화, 고압화 되면서 운전 조건은 더 가혹해지고 있다. 따라서 이러한 운전 조건의 변화에 따라 펌프의 내구성 확보를 위한 많은 연구가 펌프 제작사를 중심으로 이루어지고 있다. 이 중 캠 링의 변형 특성에 대한 연구는 Nagata[4]의 연구 논문을 제외하고는 보고된 바가 없다. Nagata는 캠 링 변형 특성에 대한 파악을 통해 펌프에서의 소음 특성에 대한 연구를 수행하였다. 그러나 캠 링의 변형이 펌프의 압축 특성 등에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 구체적인 결론을 제시하지는 못하였다.

따라서 본 연구에서는 유한 요소법을 이용하여 캠 링의 변형 특성을 해석하여 캠 링의 변형이 펌프의 압축 특성에 어떠한 영향을 미치는지를 파악하고, 그 결과를 캠 링의 설계 단계에 반영할 수 있는 발판을 마련하고자 한다.

## 2. 이론 해석

### 2-1. 펌프실의 변동 압력 해석

Fig. 1에는 본 연구의 해석 대상인 유압 베인 펌프의 개략도를 나타내었다.

Fig. 2에는 캠 링을 펼친 개략도를 나타내었다.

캠 링은 크게 3개의 곡선으로 구성되어 있다. 영역 A는 소원호 부로 일정한 반경을 가지게 되고, 영역 B, D는 연결 곡선으로 고차의 곡선으로 구성되어 있다. 영역 C는 대원호부로 역류의 영향을 줄이고 예압 축을 주기 위해서 일정 비율로 반경이 감소하게 되어 있다.

캠 링 설계의 핵심은 연결 곡선을 어떻게 선정하고 반경 감소율을 어느 정도를 주느냐에 있으나 본 연구의 목적은 캠 링 변형 특성에 있으므로 캠 링의 연결 곡선 및 반경 감소율에 대한 것은 저자들의 기존 연구 논문[3,5]를 참조하기 바란다.

Fig. 3에는 베인실의 변동 압력을 구하기 위한 개략도를 나타내었다. 검사 체적은 2 개의 베인과 로터 그리고 캠 링으로 구성되어 있다. 베인실 내의 압력 변

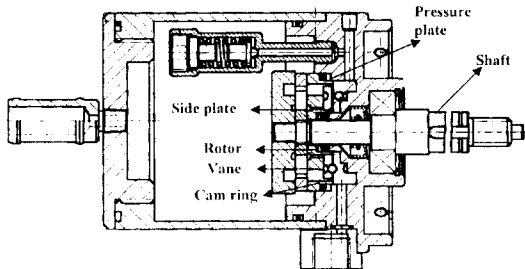


Fig. 1. Schematic diagram of balanced type vane pump.

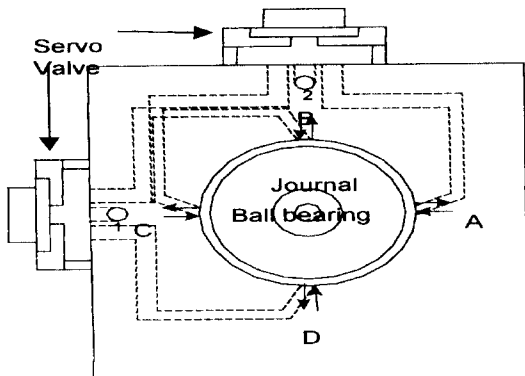


Fig. 2. Schematic diagram of cam ring curve.

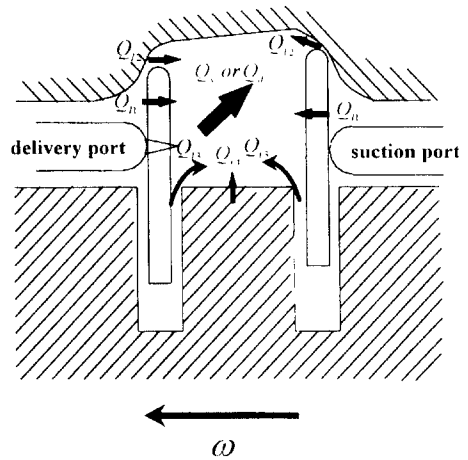


Fig. 3. Schematic diagram of pumping chamber.

동은 다음과 같은 유량 평형식과 V형 그루브에서의 미소 유량 변동 식을 통해 구할 수 있다[3,5].

$$\frac{dP_p}{d\theta} = \frac{B_c}{V} \left( -\omega \frac{dV}{d\theta} + Q_d + Q_s + Q_l \right) \quad (1)$$

$$\dot{Q}_g = \frac{\left( \frac{\Delta P_p}{\rho} - \frac{\dot{Q}_g^2}{2C_g^2 A_f^2} \right)}{\int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{a(x)} dx} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)를 동시에 풀면 로터의 회전에 따른 베인실 내의 압력 변동을 구할 수 있다.

Table 1에는 해석에 사용된 펌프의 주요 치수를 나타내었다. 캠 링에서의 구멍의 위치 및 크기는 기업 기밀인 관계로 밝힐 수 없음을 미리 밝히는 바이다.

Fig. 4에는 회전 속도의 변동에 따른 베인실의 압력 변동 해석 결과를 나타내었다. 그래프에서 가로축의 각도는 2개의 베인 중 뒤쪽 베인을 기준으로 한 것이다. 회전 속도의 증가에 따라 압력 상승이 지연되고, 최대 상승 압력은 다소 증가함을 알 수 있다. 또한 토

Table 1. Specification of test pump

로터 반경	15.6 mm
소원호 반경	18.0 mm
대원호 반경	19.5 mm
베인 폭	5.0 mm
베인 길이	7.0 mm
베인 두께	1.6 mm
캠 링 두께	5.04 mm
베인의 수	10

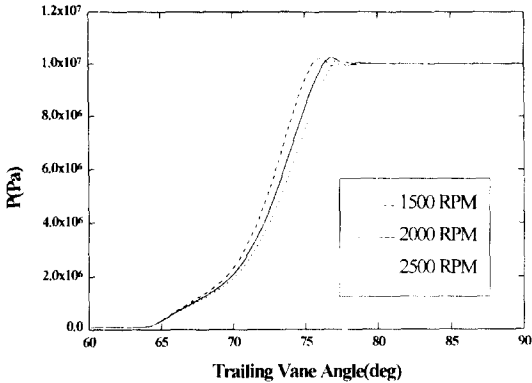


Fig. 4. Example of compression chamber pressure variation ( $P_c=10$  MPa).

출 포트의 노치에 해당하는 부분에서는 유량 변동에 따른 압력 변동이 발생하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4에서 구한 로터 회전 위치에 따른 베인실의 변동 압력은 캠 링의 변형 해석을 위한 경계 조건으로 이용된다.

2-2. 캠 링 변형 해석

Fig. 5에는 본 연구에 사용된 캠 링의 개략도를 나타내었다. 캠 링에는 고정용 핀 구멍 외에 또 다른 한 쌍의 구멍이 가공되어 있다.

본 연구에서는 Fig. 5의 그림에서 소원호 중심에 해당하는 고정용 핀 구멍을 중심으로 구멍(hole)의 위치에 따라 구멍이 없는 경우, 로터 회전 방향에 대해 구멍이 시계 방향 및 반시계 방향으로 대칭으로 있는 세 가지 경우의 캠 링에 대한 변형 해석을 하였다. Fig. 6에는 캠 링의 변형 해석을 위한 3차원 유한 요소 해

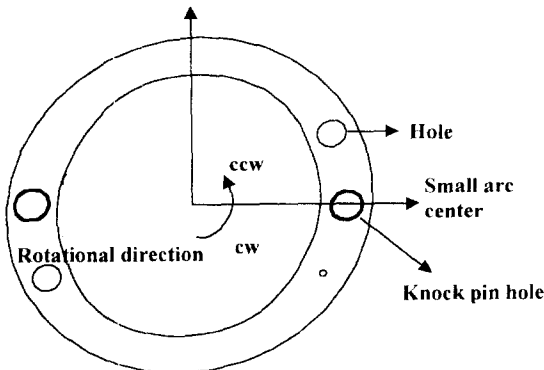
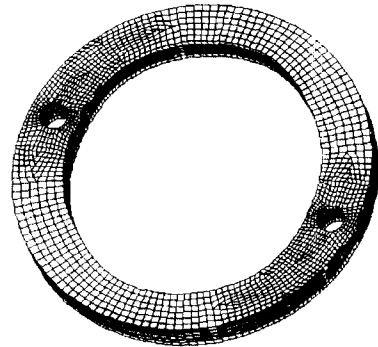
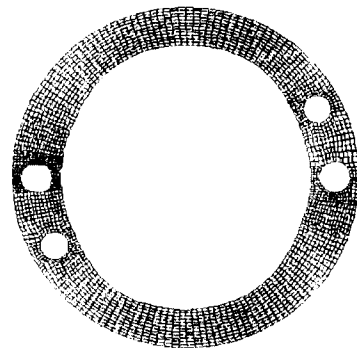


Fig. 5. Schematic diagram of cam ring.



(a) no hole



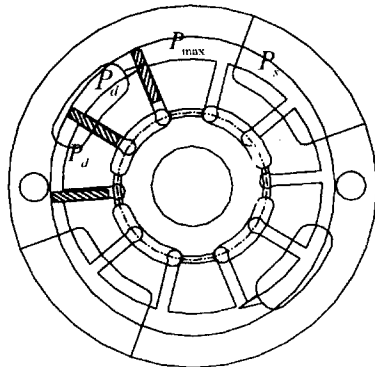
(b) ccw hole

Fig. 6. Finite element model of cam ring.

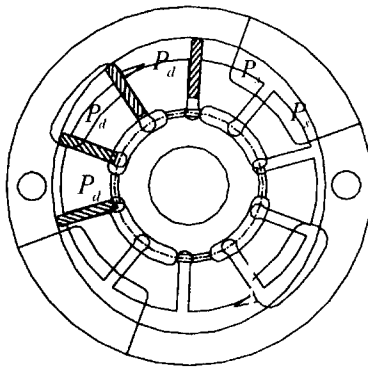
석 모델 중 구멍이 없는 경우와 로터 회전 방향으로 구멍이 존재하는 경우를 나타내었다. 유한요소 모델은 3차원 솔리드 요소로 구성되어 있으며 구멍이 없는 모델의 경우 총 절점(node)수는 9372개이며, 총 요소 수는 6930개이다. 캠 링의 유한 요소 모델링은 상용 유한 요소 모델링 프로그램인 HyperMesh[6]를 이용하였다.

Fig. 7에는 캠 링에 작용하는 압력의 위치를 결정하기 위해 베인과 캠 링의 위치 관계를 나타내었다. 캠 링에서 가장 큰 압력을 받는 부분은 토출 포트 영역으로 로터의 회전 위치에 따라 Fig. 7처럼 토출 포트에 물리는 베인실의 개수는 2개 또는 3개가 된다. 이 중 토출 포트에 베인실이 2개 물리는 경우가 캠 링에 작용하는 압력이 더 크므로 본 연구에서는 Fig. 7의 (a)의 경우에 대해 변형 해석을 수행하였다.

Fig. 8에는 유한 요소 해석을 위한 하중 조건 및 경계 조건을 나타내었다. 고정 핀(knock pin)은 고정된 것으로 경계 조건을 주었다.



(a) case 1



(b) case 2

Fig. 7. Chamber pressure variation with vane rotating position.

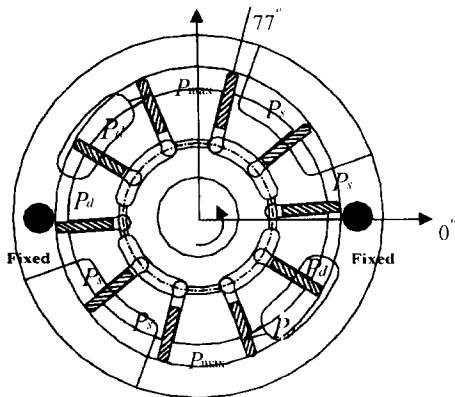


Fig. 8. Boundary condition of cam ring.

유한 요소 해석은 상용 유한 요소 해석 프로그램인 ABAQUS[6]를 이용하여 수행하였다. 해석에 사용된 운전 조건은 최대 토출 압력 10 MPa, 주 사용 회전수

Table 2. Property of pressure plate material

Young's Modulus	120 GPa
Poisson's Ratio	0.25

인 2000 RPM이다. Table 2에는 본 연구에 사용된 캠 링의 재질인 소결재의 주요 물성치를 나타내었다.

### 3. 해석 결과

Fig. 9에는 변형 해석 수행 후의 캠 링의 반경 변화를 원래 캠 링 곡선과 비교하여 나타내었다. 그림에서 실선으로 표현된 부분은 원래 캠 링을 나타내고 점선으로 표시된 부분은 변형 후의 캠 링 반경을 나타낸다. Fig. 9를 보면 구멍의 유무, 그리고 구멍의 위치에 따라 다양한 변형 특성을 보이고 있음을 알 수 있다. 우선 전체적인 변형 특성을 살펴 볼 때, 세 경우 모두 최대 압력이 걸리는 대원호 끝 부분에서 변형이 발생하는 공통점을 가지고 있다. 그러나 구멍이 없는 경우와 구멍이 로터 회전 반대 방향에 있는 경우의 변형 특성은 로터 회전 방향에 있는 경우와는 다른 변형 특성을 보이고 있음을 알 수 있다. 즉 흡입 영역인 소원호 영역에서 구멍이 없는 경우와 로터 회전 방향에 있는 경우의 변형이 큼을 알 수 있고 또한 압축이 시작되는 대원호 시작부의 반경이 구멍이 로터 회전의 반대 방향에 있는 경우에 비해 오히려 줄어들고 있음을 알 수 있다. 대원호 끝 부분에서의 반경이 늘어나는 것은 베인실의 체적 증가를 유발하여 압축되는 유체가 팽창되도록 하는 기능을 수행한다. 이는 과도 압축에 의한 오버슈트(overshot)을 방지하는데 도움이 될 것으로 생각된다. 그러나 대원호 시작부의 반경 감소는 압축 시작부의 체적을 줄여들게 만들어 적절한 예압축을 위해 주는, 대원호부의 반경 감소율의 기능을 저해하는 역할을 수행할 것으로 보인다. 즉 예압축이 불충분하게 일어나게 되므로 토출 포트로부터 유입되는 역류의 영향이 커져서 압력 맥동 등이 심하게 될 것으로 판단된다.

Fig. 10에는 캠 링의 변형이 일어나기 전의 압력 상승 곡선과 각 구멍 위치에 따라 캠 링의 변형이 일어난 후의 압력 상승 곡선을 비교하여 나타내었다. Fig. 10을 보면 앞서 예상했던 바와 같이 구멍이 반시계 방향에 있는 경우 압력 상승이 종료되는 대원호 끝부분의 반경이 늘어남에 따라 변형이 일어나기 전에 비해

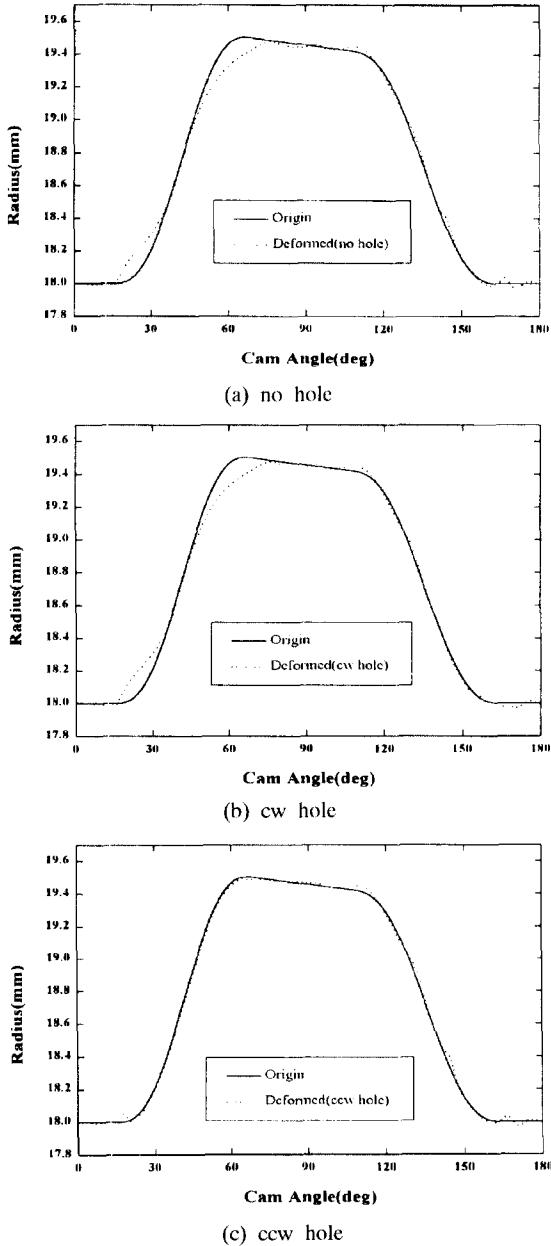


Fig. 9. Comparison between origin and deformed shape of cam ring.

압력의 오버슈트 양이 다소 감소하고 있음을 알 수 있다. 그러나 압력 상승이 개시되는 대원호 시작부의 반경이 변형이 일어나기 전에 비해 다소 감소하므로 예압축 양은 다소 줄어드는 경향을 보이고 있고 압력 상승이 지연되는 현상을 나타내고 있다. 그러나 구멍이

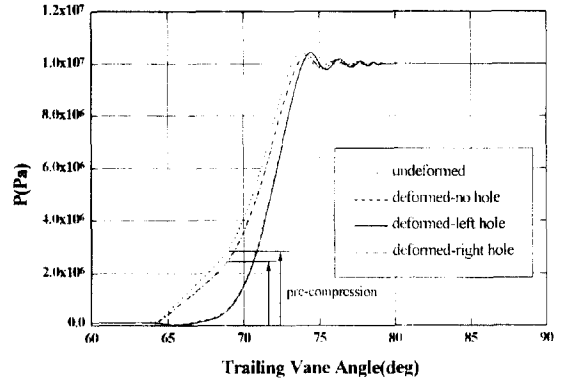


Fig. 10. Chamber pressure variation with and without cam ring deformation for the various hole positions (2000 RPM,  $P_d=10$  MPa).

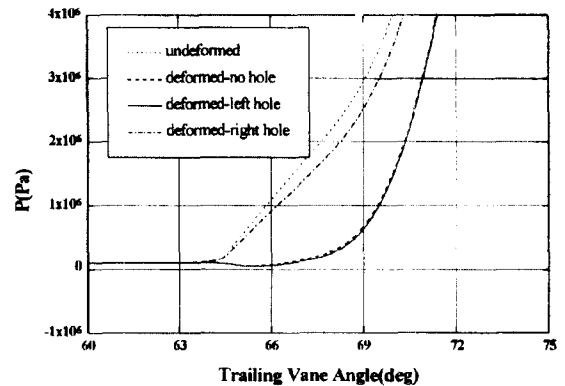


Fig. 11. Chamber pressure variation with and without cam ring deformation in the suction area (2000 RPM,  $P_d=10$  MPa).

없거나 구멍이 시계 방향에 있는 경우, 압축 시작부의 반경 감소에 의해 충분한 예압축이 일어나지 못하므로 V형 그루브를 통한 역류에 의해 압력이 바로 상승하고 있음을 알 수 있고 흡입 영역의 반경 증가에 따른 체적 팽창에 의해 베인실의 압력이 흡입 압력 이하로 떨어지는 현상도 관찰되고 있음을 알 수 있다. 이는 Fig. 11에 나타난 흡입 영역의 압력 변동 선도에 잘 나타나 있다.

또한 압력 상승이 종료되는 부분의 반경이 늘어남에도 불구하고 역류의 영향에 의해 압력의 오버슈트는 줄어들지 않음을 알 수 있다. 따라서 이상의 결과로부터 원하는 예압축을 얻고 역류의 영향에 의한 압력의 오버슈트를 줄이기 위해서는 대원호 시작부 및 대원호 끝부분의 반경이 늘어나는 것이 유리함을 알 수가 있

다. 그리고 이러한 방향으로 캠 링의 변형을 유도하기 위해서는 캠 링의 구멍 위치 및 크기를 적절히 선정해야 할 필요가 있음을 알 수 있다.

## 결 론

이상과 같은 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 캠 링에서 변형이 주로 발생하는 부분은 소원호부와 대원호의 시작 및 끝부분임을 알 수 있었다.
2. 구멍의 유무, 그리고 구멍의 위치에 따라 다양한 변형 특성을 보이고 있음을 알 수 있었고 구멍에 상관없이 최대 압력이 작용하는 대원호 끝부분에서 변형이 관찰되었다.
3. 구멍이 없는 경우와 구멍이 시계 방향에 있는 경우 소원호의 반경이 늘어나는 대신 대원호 시작부의 반경이 크게 줄어들음을 알 수 있었다. 이는 예압축을 저해하여 역류에 의한 맥동을 증가시키는 역할을 할 것으로 생각된다.
4. 구멍이 반시계 방향에 있는 경우가 다른 경우에 비해 캠 링의 압축 성능이 우수할 것으로 생각된다.
5. 이상과 같은 방법을 통해 압축 특성에 유리하게 캠 링이 변형되도록 하는 캠 링 설계가 가능할 것으로 생각된다.

## 후 기

본 연구는 공업 기반 기술 과제인 "유압 베인 펌프 설계 기술 개발"의 연구의 일환으로 만도기계의 지원에 의해 서울대학교 터보동력기계 연구센터에서 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 기호설명

$A_l$  : orifice area at vane position  
 $\alpha(x)$  : groove orifice area at vane position

$B_c$  : bulk modulus of working fluid  
 $C_g$  : orifice flow coefficient  
 $P_d$  : delivery pressure  
 $P_p$  : pumping chamber pressure  
 $P_s$  : suction pressure  
 $Q_d$  : delivery flow  
 $Q_g, \dot{Q}_g$  : flow and flow variation through the groove  
 $Q_l$  : total leakage flow  
 $Q_s$  : inlet flow  
 $V$  : pumping chamber volume  
 $x_1, x_2$  : position of vane and end of the fluid jet  
 $\theta$  : angular position of vane  
 $\omega$  : rotational speed

## 참 고 문 헌

1. Koji, T. and Yoneaki, T., "Effect of the cam profile of a vane pump on the noise level," JHPS, Vol.9, No. 2, pp.46-54, 1978.
2. Hattori, K., Suzuki, H., and Hasegawa, J., "Design Method of Small-Ripple Vane Pump," SAE871681, pp. 83-90, 1987.
3. Cho, M. R., Han, D. C., et al., "A Study on the Pressure Rising Considered Fluid Inertial in the Notch Area of Balanced Type Vane Pump," J. of KSTLE, Vol.13, No.1, pp.14-20, 1997.
4. Nagata, K., "Simulation of Internal Pressure in a Vane Pump with Consideration Given to the Effects of the Cam Ring Deformation," JHPS, Vol.26, No.6, pp811-917, 1995.
5. Kim, K. D., Cho, M. R., Han, D. C., Choi, S. H., and Moon, H. J., "A Study on the Role of Notch and Radius Reduction Ratio in the Balanced Type Vane Pump," J. of KSPE, Vol.15, No.1, pp87-93, 1998.
6. HyperMesh USER'S MANUAL. Ver. 2.0, 1996.
7. ABAQUES USER'S MANUAL, Ver. 5.4, 1994.