

본 연구는 서울대학교 정밀기계설계 공동연구소와 만도기계(주)의 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

베인 펌프에서 노치와 반경 감소비의 역할에 관한 연구

김기동*, 조명래*, 한동철**, 최상현***, 문호지****

A Study on the Role of Notch and Radius Reduction Ratio in the Balanced Type Vane Pump

K.D. Kim*, M.R. Cho*, D.C. Han**, S.H. Choi***, H.J. Moon****

ABSTRACT

Pressure ripples of hydraulic vane pump results from flow ripples due to pump geometry and reverse flow through the discharge port due to compressibility of fluid and result in vibration and noise of connected hydraulic elements. In a balanced type vane pump, cam ring curve is important factor to influence the flow ripples. Therefore, to reduce the flow ripple, it has been required that optimal selection of seal region by proper design of cam ring and each port position, and notches for preventing the excessive reverse flow. This paper has been performed analytical study of compression characteristics with major design parameter in: side plate and cam ring, and examined into the role of notch and radius reduction ratio.

Key Words : balanced type vane pump(압력 평형형 베인 펌프), pressure ripples(압력 맥동), flow ripples(유량 맥동), reverse flow(역류), notch(노치), radius reduction ratio(반경 감소비)

1. 서론

유압 펌프처럼 유한개의 고체벽 이동으로 펌프 작용을 하는 용적 기기에서는 기구에 의한 유량 변동 및 이행점에서의 간헐적인 비정상 누출에 기인하는 유량 맥동이 발생하기 때문에 토출 압력도 진동한다. 이 압력 맥동은 유체 전파 소음 또는 유체 전파 진동으로도 불리며 구조 전파 소음과 함께 집속기기의 진동, 소음의 원인이 된다.⁽¹⁾

압력 평형형 베인 펌프에 있어서는 캠링 곡선의 기하학적 형상에 의해 이론 토출 유량의 맥동이 발생하게 되

고,⁽²⁾ 또, 흡입에서 토출로 전환되는 단계에서 흡입쪽 오일이 불완전한 예압축 상태로 토출구에 소통하게 될 때, 토출구로부터의 급격한 역류가 발생하여 압력 맥동의 원인이 된다.⁽³⁾ 이때 압력 상승 구배가 크게 되면 펌프 소음의 원인이 되므로, 급격한 역류를 줄이고 완만한 압력 상승을 유도하도록 하여야 한다.

유압 베인 펌프에서는 이를 위해 흡입과 토출 포트 사이에 적당한 폐입 구간을 두고 대원호 반경을 서서히 줄여서 작동유를 압축시킴으로써 흡입 오일과 토출 오일의 급격한 충돌을 피하고 있다. 그리고, 측면에 노치를 설치

* 서울대학교 기계설계학과 대학원
** 서울대학교 기계설계학과
*** 서울대학교 터보 동력기계연구센터
**** 만도기계 중앙연구소

하여, 그 단면적, 길이 등을 적당한 크기로 하여 토출 포트로부터 베인실로의 유입량을 조절하도록 하고 있다. 그러나, 이런 설계 변수들의 영향에 대한 연구는 기업 기밀 보호의 차원에서 그 결과가 잘 공개되지 않고 있는 실정이며, 피스톤 펌프에 대해서는 상대적으로 많은 연구 결과가 나와 있다.^(4,5) 한편, 국내에서는 조^(3,6)가 베인 펌프의 설계 변수들에 따른 내부 압력 상승 특성 및 맥동 현상에 대해 해석을 수행한 바 있으나, 압력의 과도 상승량(overshoot)이 과대 평가된 것으로 생각되며, 베인 펌프의 설계에 직접 이용하기에는 미흡한 점이 많다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 노치 및 대원호 반경 감소비 등의 인자들이 베인실의 내부 압력 상승 과정에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하여 펌프 설계에 이용하고자 한다.

2. 이론 해석

Fig.1은 압력 평형형 베인 펌프의 개략도를 나타낸 것이며, 그림에서 볼 수 있듯이 베인, 로터, 캠링, 측판 및 케이싱으로 구성되어 있다.

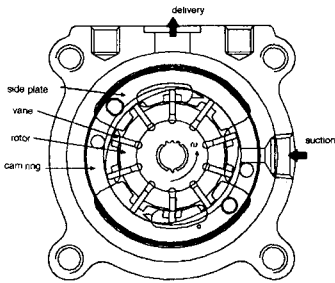


Fig. 1 Schematic diagram of balanced type vane pump

Table.1은 해석 대상이 되는 베인 펌프의 주요한 제원을 나타내었다.

Table 1 베인 펌프 주요 제원

radius of rotor	15.6 mm
small arc radius	18.0 mm
large arc radius	19.5 mm
width of vanes	5.0 mm
length of vanes	7.0 mm
thickness of vanes	1.6 mm
number of vanes	10

한편, 로터의 회전에 따라 2개의 베인과 로터, 캠링, 측판에 의해 형성되는 베인실의 압력을 구하기 위해서는 Fig.2와 같이 베인실을 검사 체적으로 하여 유량 평형식이 세워져야 하며, 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{dP}{d\theta} = \frac{B}{V\omega} (-\omega \frac{dV}{d\theta} + Q_d + Q_s + Q_l) \quad (1)$$

여기서, B는 체적 탄성계수를 나타내고, Q_s , Q_d 는 흡입 포트와 토출 포트를 통한 유량을, Q_l 은 누설 유량을 나타낸다.

Q_s , Q_d 는 흡입 포트와 토출 포트를 가변 오리피스로 모델링하여 식(2)에 의해 표현되어질 수 있다.

$$Q_{d,s} = CA_{d,s} \sqrt{\frac{2}{\rho} |P_{d,s} - P| \operatorname{sgn}(P_{d,s} - P)} \quad (2)$$

여기서, A_s , A_d 는 각각 흡입, 토출 포트의 개구 면적, C는 오리피스의 유량 계수, P는 검사 체적 내의 압력을 나타내고 P_s , P_d 는 각각 흡입, 토출 압력을 나타낸다.

누설 유량 Q_l 은 로터와 측판 사이의 누설, 측판과 베인 측면 사이의 누설 및 로터 슬릿과 베인 사이의 누설의 총합이다.^(1,3)

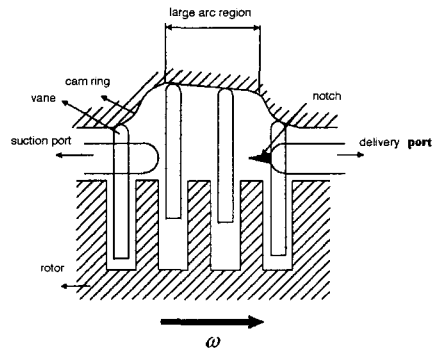


Fig 2 Developed view of balanced type vane pump

한편, 베인실에 노치가 개구되는 경우에는 노치에서 유체 관성 효과를 고려하여야 하며, 이것은 식(3)에 의해 표현되어질 수 있다.^(1,3,4)

$$\Delta P = \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q}{CA_1}\right)^2 \operatorname{sgn}(Q) + \rho\omega \frac{dQ}{d\theta} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{a(x)} \quad (3)$$

식(3)에서, x_1 는 베인의 위치를, x_2 는 제트 유동이 끝나는 지점을 나타내고, A_1 은 베인이 노치부의 x_1 지점에 있을 때 노치부의 수직 단면적을, $a(x)$ 는 x_1 과 x_2 사이의 노치부의 수직 단면적을 나타낸다.

베인실의 압력 계산은 흡입압과 토출압이 일정하다는 가정 하에서 베인실을 구성하는 2개의 베인 중 회전 방향에서 볼 때, 뒤쪽에 있는 베인이 소원호 중심에 위치할 때를 0° 로 하여 베인실이 흡입 포트에 충분히 열려 있는 55° 의 위치로부터 시작하였으며, 베인실이 노치와 만나지 않는 경우에는 식(1)을 4차의 Runge-Kutta 방법을 사용하여 적분하였고, 베인실이 노치와 만나게 될 때에는, 식(1)과 식(3)을 함께 4차의 Runge-Kutta 방법을 사용하여 적분하였다.

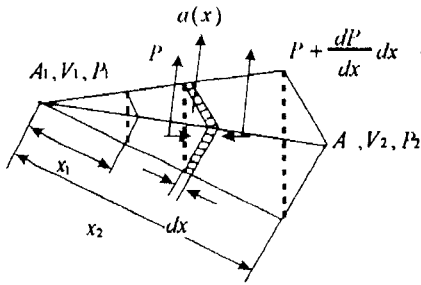


Fig. 3 Detail of notch area

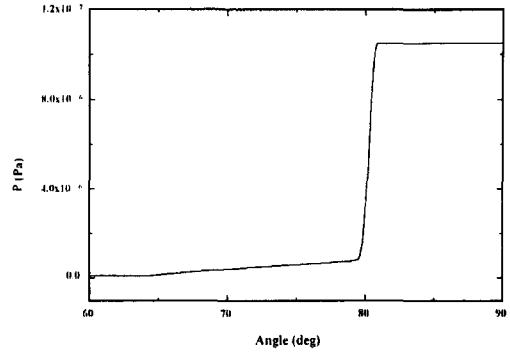
3. 해석 결과

Fig.4의 (a), (b)는 각각 대원호 반경 감소비와 노치가 없는 경우에 대한 베인실의 압력 상승과 토출 포트를 통한 유량에 대한 해석 결과이다.

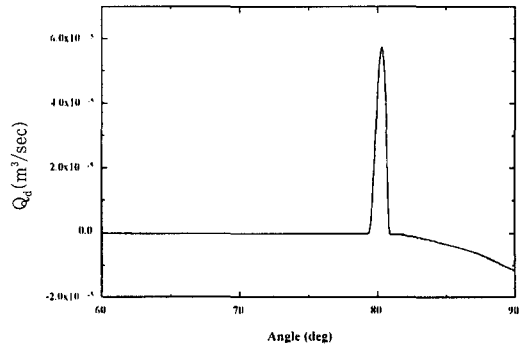
노치 및 대원호 반경 감소비를 주지 않은 경우 토출 포트가 열리는 순간에 급격한 압력 상승이 있음을 볼 수 있다. 이것은 예압축(precompression)이 불충분하여 토출 압보다 훨씬 낮은 압력에서 베인실이 토출 포트와 만나게 되면서 생기는 토출측으로부터의 고압의 역류에 의한 것이다.

3.1 대원호 반경 감소비의 영향

Fig.5에는 해석에 사용된 캠 링 곡선의 개략도를 나타내었다. 캠 링은 각각 소원호, 대원호와 이를 연결하는 연결 곡선으로 구성되어 있으며, 그림에서 압축 구간이 대원호부에 해당한다.



(a) Chamber pressure



(b) Flow through delivery port

Fig. 4 Simulated result for no notch and radius reduction ratio(1500rpm, $P_d = 10.5\text{MPa}$)

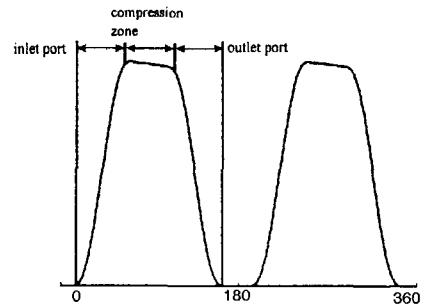


Fig. 5 Configuration of cam ring curve

Fig.6의 (a), (b)는 각각 노치 없이 적절한 폐입 구간을 두고 대원호의 반경을 감소시켜 베인실의 부피 감소를 통해 예압축을 주어 흡입과 토출 사이에서 압력 상승을 유도하는 경우에 대한 베인실의 내부 압력과 토출 포트를 통한 유량에 대한 해석 결과이다.

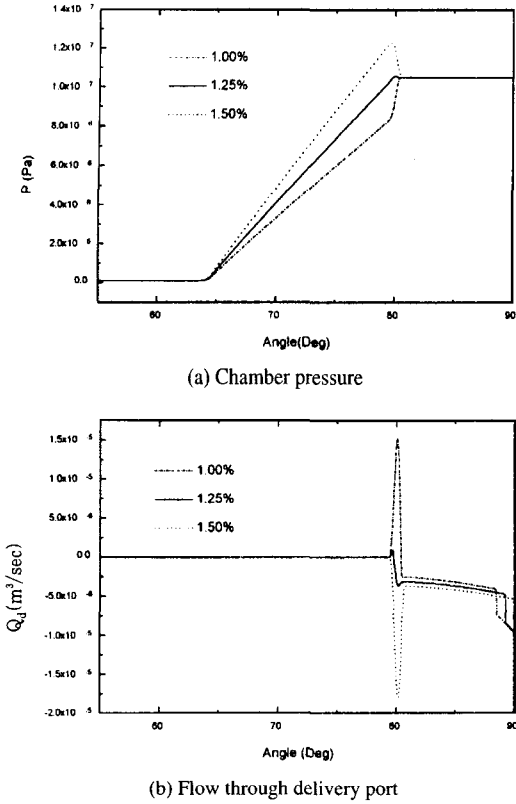


Fig. 6 Simulated results according to Radius Reduction Ratio (1500rpm, $P_d=10.5\text{MPa}$)

Fig.6의 반경 감소비 1%를 준 경우는 반경 감소비가 작은 경우로 예압축이 불충분하여 앞선 Fig.4와 유사한 결과를 볼 수 있다. 반경 감소비 1.25%를 준 경우는 반경 감소비가 적절한 경우로 완만한 압력 상승 결과를 볼 수 있다. 이것은 적절한 예압축을 통해 토출압에 근접한 상태에서 베인실이 토출 포트와 만나게 됨으로써 토출측에서의 역류를 거의 없게 한 것이다. 반경 감소비 1.5%를 준 경우는 반경 감소비가 큰 경우로 예압축이 과도하여 베인실의 압력이 토출 포트 이전에서 토출압 이상으로 상승하는 오버슈트 현상이 발생하며, 이때, 베인실이 토출 포트와 만나게 되면 베인실로부터 토출측으로 유출이 생기게 된다. 이상의 결과로부터 적절한 폐입 구간과 대원호 반경 감소비를 이용하여 완만한 압력 상승을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

그러나, 토출압이 변하는 작동 조건에 있어서는 반경 감소비만으로는 적절하게 대응할 수 없음을 Fig.7을 통해 알 수 있다.

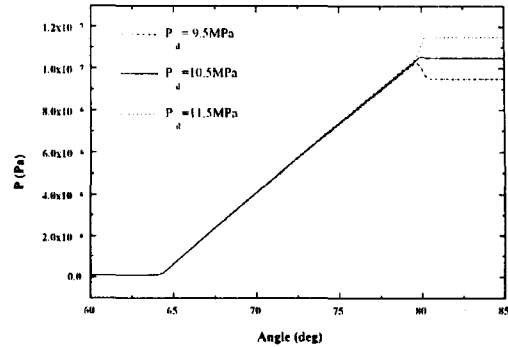


Fig. 7 Simulated results of chamber pressure according to delivery pressure (1500rpm, R.R.R : 1.25%)

3.2 노치의 영향

다음은 대원호에 반경 감소비를 주지 않은 상태에서 토출 포트로부터 노치를 통해 적절한 역류를 유도함으로써 압력 상승을 유도한 경우의 해석 결과이다.

3.2.1 노치 크기의 영향

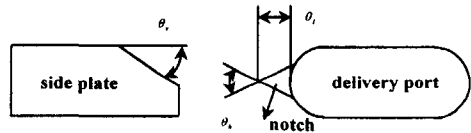


Fig. 8 Schematic diagram of notch

노치는 폭 방향의 각도 θ_h 와 깊이 방향의 각도 θ_v 및 노치의 길이 θ_l 로 나타내어진다.

Fig.9의 (a), (b)는 각각 노치의 θ_h, θ_v 를 변화시킬 때의 베인실의 내부압과 노치 및 토출 포트를 통한 유량에 대한 해석 결과이다.

Fig.9의 노치 크기 5°의 경우는 노치가 작은 경우로서 베인실이 토출 포트와 만나게 될 때, 급격한 압력 상승이 있음을 볼 수 있는데, 이것은 노치 구간에서의 역류가 충분하지 않아 베인실의 압력이 토출압까지 상승하지 못한 상태에서 토출 포트와 만나게 됨으로써 이 순간에 토출 포트를 통한 급격한 역류에 의한 것이다. 노치 크기 10°의 경우는 노치의 크기가 적절한 경우로서 완만한 압력 상승을 볼 수 있는데, 이것은 노치 구간에서 적절한 역류가 베인실로 유도되어진 경우이다.

노치 크기 15°의 경우는 노치의 크기가 큰 경우로서 토출 포트 이전에서 베인실의 압력이 토출압 이상으로 올라

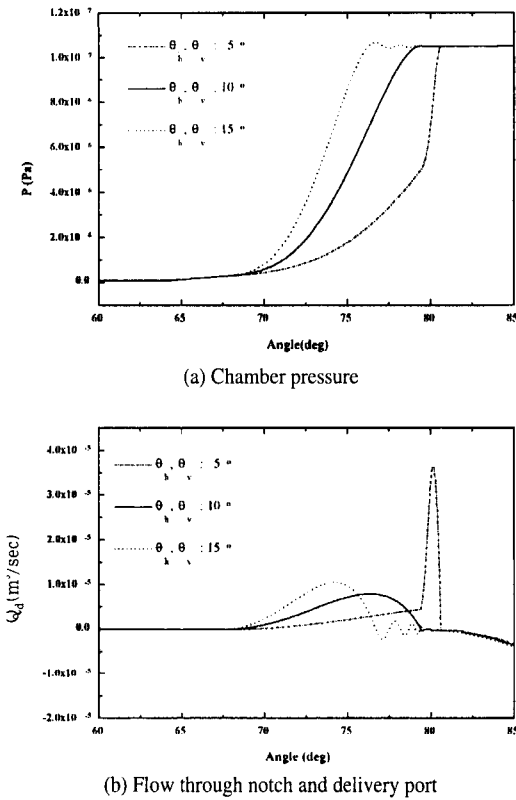


Fig.9 Simulated results according to notch size(1500rpm, $P_d=10.5MPa$)

가는 오버슈트 현상을 관찰할 수 있으며, 이후에 토출 포트를 만나기 전까지 압력이 진동함을 볼 수 있다. 이것은 노치가 커서 노치 구간 초기에 많은 역류가 생기고, 노치 영역에서의 유체 관성 고려시 대상이 되는 유체 질량이 노치 뒷부분에서 커짐에 따라 유체 관성의 효과가 커지기 때문인 것으로 생각된다.

Fig.10은 Fig.9의 노치 크기 10° 에 대하여 토출압이 변동하는 경우에 대한 해석 결과를 나타내는 것인데, 이로부터 토출압의 변동이 압력 상승에는 별로 영향을 주지 않음을 알 수 있다

3.2.2 노치 길이의 영향

Fig.11의 (a), (b)는 각각 노치의 길이를 변화시켰을 때의 베인실의 내부압과 노치 및 토출 포트를 통한 유량에 대한 해석 결과이다. 여기서는 노치 길이 각 경우에 대해서 완전한 압력 상승이 이루어지도록 노치의 크기를 조정하였다. 여기서, 노치 길이 14° 경우는 베인실이 흡입

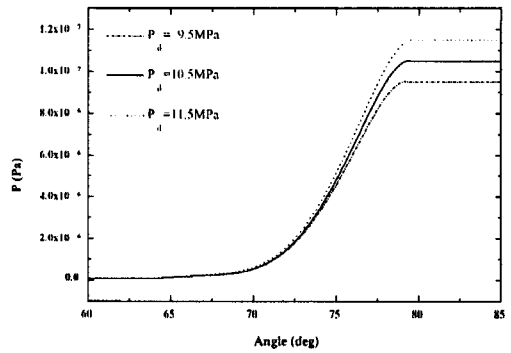


Fig. 10 Simulated results of chamber pressure according to delivery pressure variation (1500rpm, $\theta_h, \theta_v : 10^\circ, 10^\circ$)

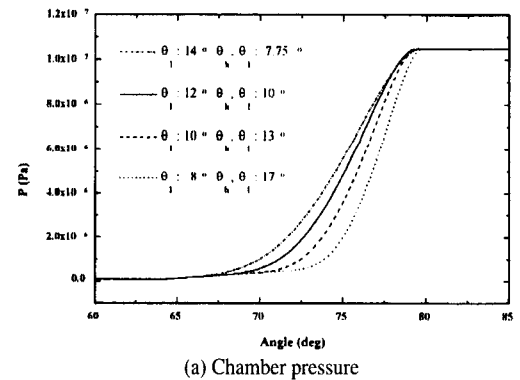


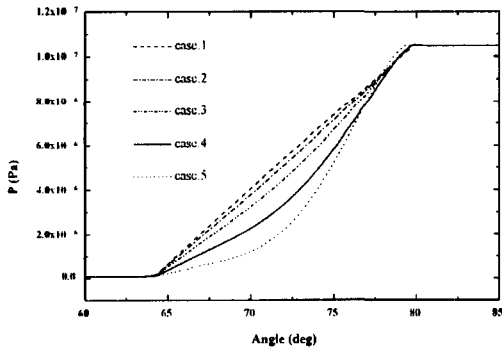
Fig. 11 Simulated results according to notch length (1500rpm, $P_d=10.5MPa$)

포트를 지나자마자 노치와 만나게 되는, 노치의 길이가 긴 경우이며, 이로부터 노치의 길이를 조금씩 줄여가면서 해석을 수행하였다.

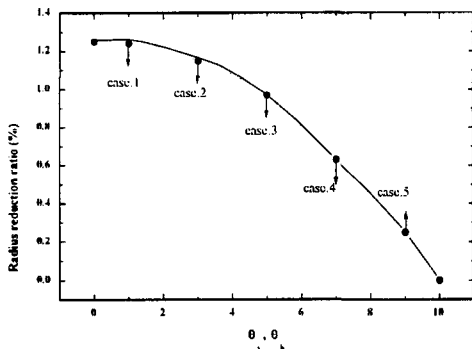
결과에서 볼 수 있듯이 노치의 길이가 길어질수록 압력 상승 구간의 길이는 길어지게 되고, 완만한 압력 상승을 유도하기 위해 필요한 노치의 크기가 더 작아지게 되어 압축 뒷부분에서 압력 상승이 더 완만해짐을 볼 수 있다. 따라서, 반경 감소비를 주지 않고 노치만으로 압력 상승을 유도하는 경우 노치의 길이가 길수록 더 완만한 압력 상승 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그러나, 전체적인 해석 결과를 비교해 볼 때, 대원호에 반경 감소비를 주지 않고 노치만으로 압력 상승을 유도한 경우가 노치 없이 반경 감소비만으로 압력 상승을 유도한 경우에 비해 압축 초기의 압력 상승 구배가 너무 낮기 때문에 압축의 끝부분에서 압력 상승 구배가 커지는 경향을 보이는데, 이를 해결하기 위해 압축 초기의 압력 상승 구배를 높이는 방안을 생각하여야 한다. 이것은 노치와 대원호의 반경 감소비의 조합으로 이루어질 수 있다.

3.3 노치와 대원호 반경 감소비의 조합

Fig.12는 노치의 크기를 변화시킬 때, 각 노치 크기에



(a) Chamber pressure



(b) variation of R.R.R according to notch size

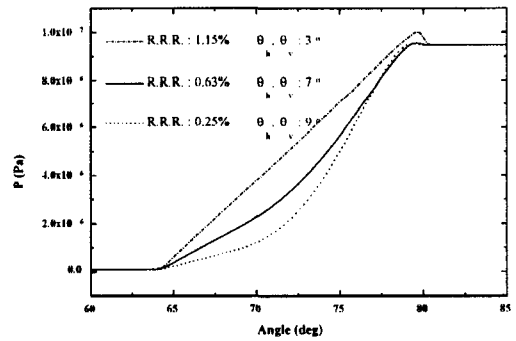
Fig. 12 Simulated results according to notch size variation(1500rpm, $P_d=10.5\text{MPa}$)

대하여 완만한 압력 상승을 유도하기 위해 필요한 대원호의 반경 감소비에 대한 해석 결과를 나타내었다.

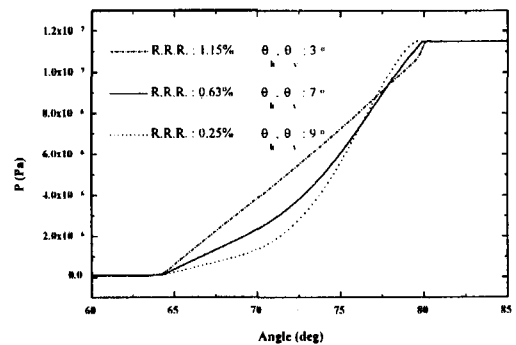
case.1에서 case.5으로 갈수록 노치의 크기가 커지는 경우로서, 노치의 크기가 작아질수록 결과는 반경 감소비만으로 압력 상승을 유도하는 경우와 유사하며, 노치의 크기가 커질수록 노치만으로 압력 상승을 유도한 경우와 유사함을 알 수 있다.

이는 노치의 크기가 작은 경우 요구되어지는 대원호의 반경 감소비가 커지게 되어, 압력 상승에 있어 반경 감소비의 영향을 많이 받게 되고, 반대로 노치의 크기가 큰 경우 요구되어지는 반경 감소비가 작아짐에 따라 노치의 영향을 많이 받기 때문이다.

그리고, 토출압이 변동하는 작동 조건에서의 압력 상승의 결과를 보면, 노치의 크기가 작아질수록, 결과는 반경 감소비만으로 압력 상승을 유도하는 경우와 유사하며, 노치의 크기가 커질수록 노치만으로 압력 상승을 유도한 경우와 유사한 경향을 나타냄을 Fig.13으로부터 알 수 있다.



(a) $P_d=9.5\text{MPa}$



(b) $P_d=11.5\text{MPa}$

Fig. 13 Simulated results of chamber pressure according to delivery pressure (1500rpm)

한편, 노치의 크기와 대원호의 반경 감소비가 적절하게 조절된 경우 압축 초기에 반경 감소비에 의해 어느 정도 더압축됨으로 인해 비교적 완만한 압력 상승을 얻을 수 있으며, 토출압이 변동하는 경우에도 노치가 적절하게 대응하여 별로 영향을 받지 않음을 볼 수 있다.

4. 결 론

이상의 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 노치 없이 대원호의 반경 감소비만으로 압력 상승을 유도하는 경우, 가장 이상적인 압력 상승 곡선을 얻을 수 있었다. 그러나, 토출압이 변동하는 작동 조건에서는 적절하게 대응하지 못하므로, 토출압이 크게 변동하지 않는 경우에 적합함을 알 수 있었다.

2) 대원호에 반경 감소비를 주지 않고 노치만으로 압력 상승을 유도하는 경우 압축 초기의 압력 상승 구배가 적 이 압축 끝부분에서 압력 상승 구배가 크게 되었다. 그러나, 토출압이 변동하여도 그다지 큰 영향을 받지 않음을 볼 수 있었다.

3) 노치와 대원호의 반경 감소비의 크기를 적절히 조절 한 경우 노치와 반경 감소비 각각의 장점을 취하도록 할 수 있었다. 따라서, 토출압이 변동하는 경우에 가장 적합한 경우임을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. A. L. Dickinson, K. A. Edge, N. Johnson, "Measurement and Prediction of Power Steering Vane Pump Fluidborne Noise," SAE931294, pp.267~275, 1993.
2. Koji Takahashi, Yoneaki Takahashi, "Effect of the cam profile of a vane pump on the noise level," JHPS, Vol.9, No.2, pp46~54, 1978.
3. M.R. Cho, D.C. Han, "A Study on the Pressure Rising Considered Fluid Inertia in the Notch Area of Balanced Type Vane Pump," J. of the KSTLE, Vol. 13, No. 1, pp.14~20, 1997.
4. R. M. Harris, K.A. Edge, D. G. Tilley, "The Suction Dynamics of Positive Displacement Axial Piston Pumps," J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 116, pp.281~287, 1994.
5. B. O. Helgestad, K. Foster, "PRESSURE TRANSIENTS IN AN AXIAL PISTON HYDRAULIC PUMP," Proc. Instn. Mech. Engrs. pp.189~199, 1974.
6. M.R. Cho, D.C. Han, "A Study on the Compression Process of Balanced Type Vane Pump for Electro-Hydraulic Power Steering," KSAE 96370112, pp. 215~222, 1996.