

# 베인 펌프에서 노치와 반경 감소비의 역할에 관한 연구

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

김기동(서울대 대학원), 조명래(서울대 대학원), 한동철(서울대), 문호지(만도기계), 배홍용(만도기계)  
K.D. Kim(Graduate School, Seoul National Univ.), M. R. Cho(Graduate School, Seoul National Univ.),  
D. C. Han(Seoul National Univ.), H. J. Moon(Mando R&D Center), H. Y. Bhae(Mando R&D Center)

### Abstract

Pressure ripple of hydraulic vane pump results from flow ripple 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 ripple. 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 ripple(압력 맥동), flow ripple(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 진동 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 접속기기의 진동, 소음의 원인이 된다.<sup>(1)</sup>

압력 평형형 베인 펌프에 있어서는 캠링 곡선의 기하학적인 형상에 의해 이론 토출 유량의 맥동이 발생하게 되고,<sup>(2)</sup> 또, 흡입에서 토출로 전환되는 단계에서 흡입쪽 오일이 불완전한 예압축 상태로 토출구에 소통하게 될 때, 토출구로부터의 급격한 역류가 발생하여 유량 맥동의 원인이 된다.<sup>(3)</sup> 이때 압력 상승 구배가 크게 되어 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 충동을 피하고 있다. 그리고, 측판에 노치를 설치하여, 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.<sup>(4,5)</sup> 한편, 국내에서는 조<sup>(3,6)</sup>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.

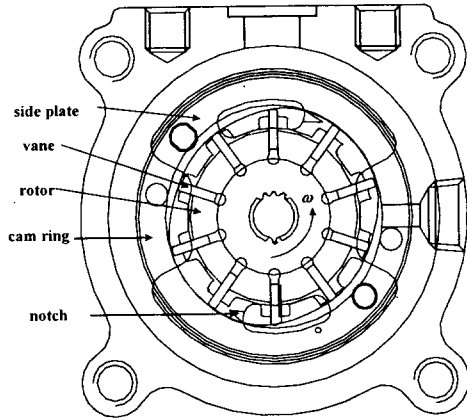


Fig.1 Schematic diagram of balanced type vane pump.

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.

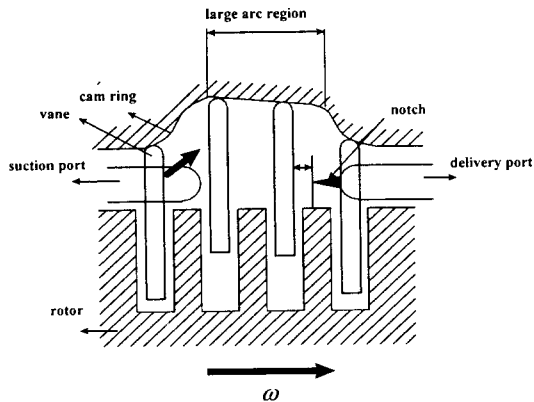


Fig.2 Developed view of balanced type vane pump

$Q_s, Q_d$ 는 토출 포트와 흡입 포트를 가변 오리피스 로 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 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<sup>(1,3)</sup>

한편, 베인실에 노치가 개구되는 경우에는 노치에서 유체 관성 효과를 고려하여야 하며, 이것은 식(6)에 의해 표현되어질 수 있다<sup>(1,3,4)</sup>.

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

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

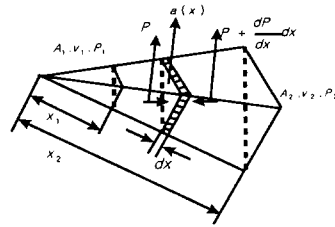
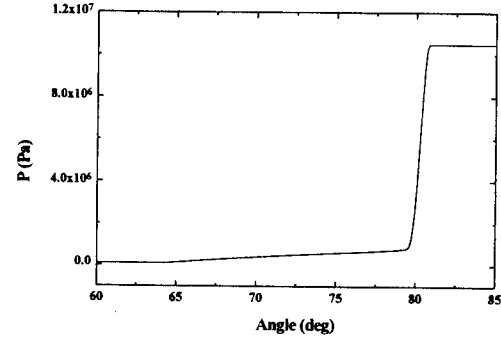


Fig.3 Detail of notch area

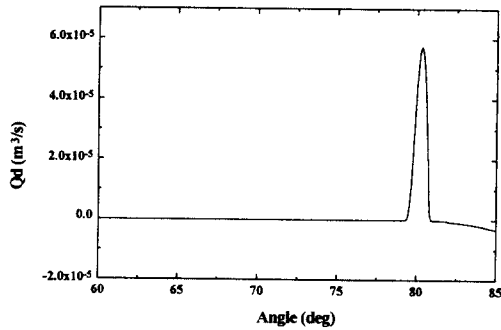
베인실의 압력 계산은 흡입압과 토출압이 일정하다는 가정 하에서 베인실을 구성하는 2개의 베인 중 회전 방향에서 볼 때, 뒤쪽에 있는 베인이 소원호 중심에 위치할 때를 0°로 하여 베인실이 흡입 포트에 충분히 열려 있는 55°의 위치로부터 시작하였으며, 베인실이 노치와 만나지 않는 경우에는 식(1)을 4차의 Runge-Kutta 방법을 사용하여 적분하였고, 베인실이 노치와 만나게 될 때에는, 식(1)과 식(3)을 함께 4차의 Runge-Kutta 방법을 사용하여 적분하였다.

### 3. 해석 결과

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



(a) Chamber pressure



(b) Flow through notch and delivery port

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

노치와 대원호에 반경 감소비를 주지 않은 경우 토출 포트가 열리는 순간에 급격한 압력 상승이 있음을 볼 수 있다. 이것은 예압축(precompression)이 불충분하여 토출압보다 훨씬 낮은 압력에서 베인실이 토출 포트와 만나게 되면서 생기는 토출측으로부터 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.

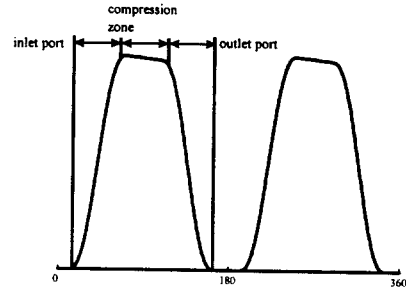
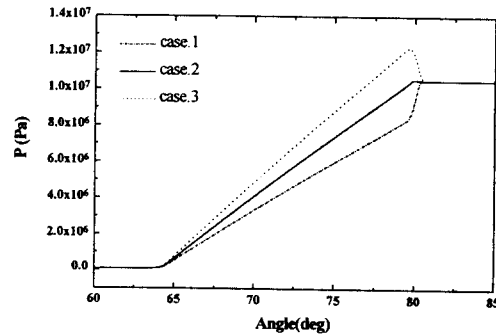
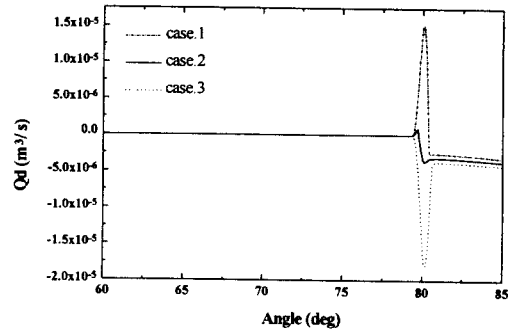


Fig.5 Configuration of cam ring curve



(a) Chamber pressure



(b) Flow through notch and delivery port

Fig.6 Simulated results according to Radius Reduction Ratio (1500rpm,  $P_d=10.5\text{MPa}$ , R.R.R.[case.1 :1%, case.2 :1.25%, case.3 :1.5%])

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 노치 및 토출 포트를 통한 유량에 대한 해석

결과이다.

Fig.6의 case.1은 반경 감소비가 작은 경우로 예압축이 불충분하여 앞선 Fig.4와 유사한 결과를 볼 수 있다. case.2는 반경 감소비가 적절한 경우로 완만한 압력 상승 결과를 볼 수 있다. 이것은 적절한 예압축을 통해 토출압에 근접한 상태에서 베인실이 토출 포트와 만나게 함으로써 토출측에서의 역류가 거의 없게 한 것이다. case.3은 반경 감소비가 큰 경우로 예압축이 과도하여 베인실이 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.

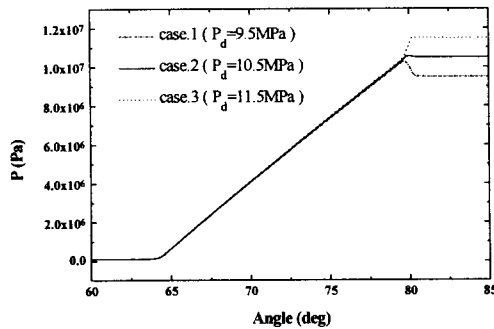


Fig.7 Simulated results of chamber pressure according to delivery pressure (1500rpm, R.R.R : 1.25%)

### 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

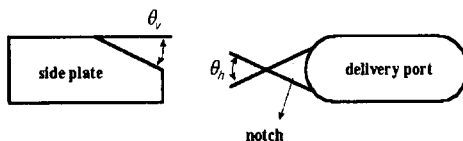
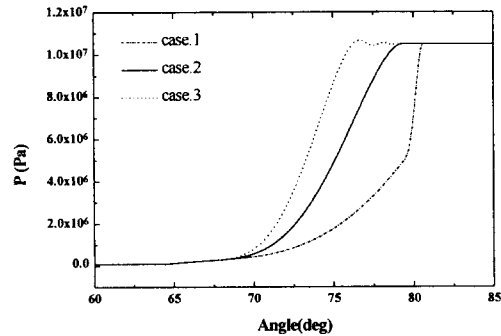
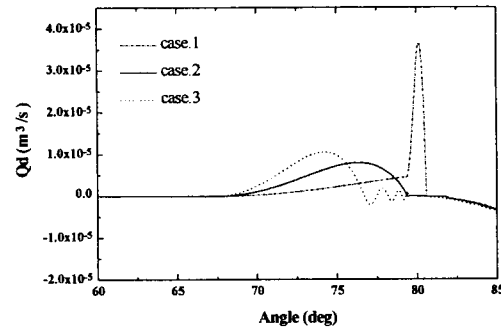


Fig.8 Schematic diagram of notch

노치의 크기는 폭 방향의 각도  $\theta_h$ 와 깊이 방향의 각도  $\theta_v$ 로 나타내어진다.



(a) Chamber pressure



(b) Flow through notch and delivery port

Fig.9 Simulated results according to notch size(1500rpm,  $P_d=10.5\text{MPa}$ ,  $\theta_h, \theta_v$ [case.1 :  $5^\circ$  case.2 :  $10^\circ$  case.3:  $15^\circ$ ])

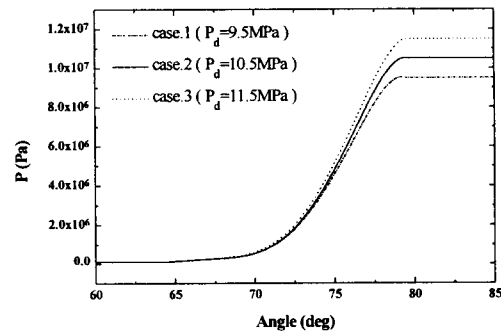


Fig.10 Simulated results of chamber pressure according to delivery pressure variation (1500rpm,  $\theta_h, \theta_v : 10^\circ, 10^\circ$ )

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

Fig.9의 case.1은 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. case.2는 노치의 크기가 적절한 경우로서 완만한 압력 상승을 볼 수 있는데, 이것은 노치 구간에서 적절한 역류가 베인실로 유도되어진 경우이다.

case.3은 노치의 크기가 큰 경우로서 토출 포트 이전에서 베인실의 압력이 토출압 이상으로 올라가는 오버슈트 현상을 관찰할 수 있으며, 이후에 토출 포트를 만나기 전까지 압력이 진동함을 볼 수 있다. 이것은 노치가 커져 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.

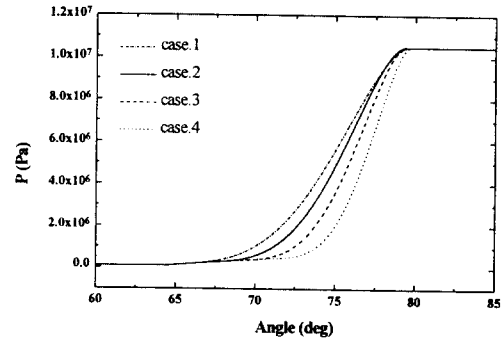
Fig.10는 Fig.9의 case.2의 노치 크기에 대하여 토출압이 변동하는 경우에 대한 해석 결과를 나타내는 것인데, 이로부터 토출압의 변동이 압력 상승에는 별로 영향을 주지 않음을 알 수 있다

### 3.2.2 노치 길이의 영향

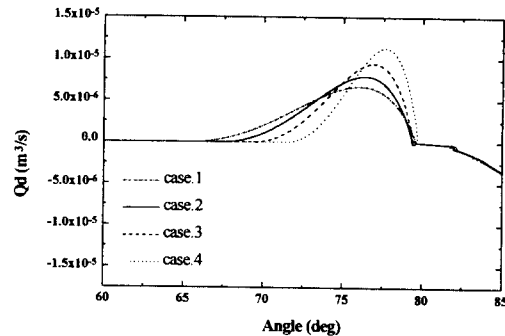
Fig.11의 (a), (b)는 각각 노치의 길이를 변화시켰을 때의 베인실의 내부압과 노치 및 토출 포트를 통한 유량에 대한 해석 결과이다. 여기서는 노치 길이 각 경우에 대해서 완만한 압력 상승이 이루어지도록 노치의 크기를 조정하였다.

case.1의 경우는 베인실이 흡입 포트를 지나자마자 노치와 만나게 되는, 노치의 길이가 긴 경우이며, case.1에서 case.4로 갈수록 노치가 짧아지는 경우이다. 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 압

축의 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.



(a) Chamber pressure



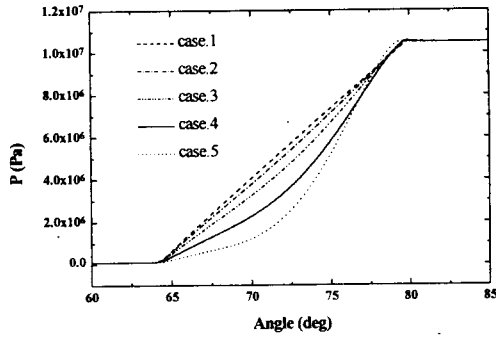
(b) Flow through notch and delivery port

Fig.11 Simulated results according to notch length (1500rpm,  $P_d=10.5\text{MPa}$ , notch length [case.1 :  $14^\circ$ , case.2 :  $12^\circ$ , case.3 :  $10^\circ$ , case.4 :  $8^\circ$ ],  $\theta_h, \theta_v$  [ case.1 :  $7.75^\circ$  case.2 :  $10^\circ$  case.3 :  $13^\circ$  case.4 :  $17^\circ$  ] ).

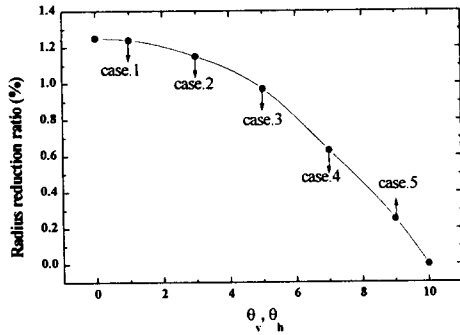
### 3.3 노치와 대원호 반경 감소비의 조합

Fig.12은 노치의 크기를 변화시킬 때, 각 노치 크기에 대하여 완만한 압력 상승을 유도하기 위해 필요한 대원호의 반경 감소비에 대한 해석 결과를 나타내었다. case.1에서 case.6으로 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.



(a) Chamber pressure



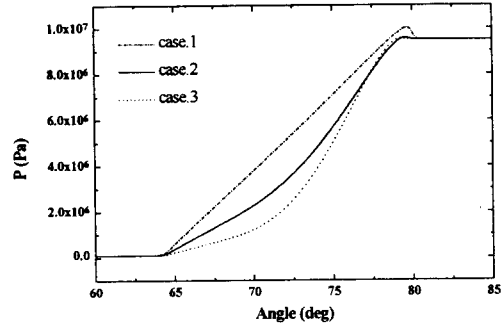
(b) variation of R.R.R according to notch size

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

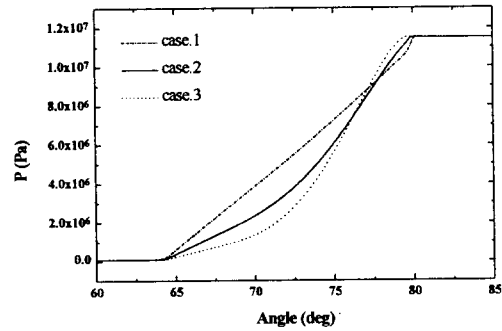
이는 노치의 크기가 작은 경우 요구 되어지는 대원호의 반경 감소비가 커지게 되어, 압력 상승에 있어 반경 감소비의 영향을 많이 받게 되고, 반대로 노치의 크기가 큰 경우 요구되어지는 반경 감소비가 작아짐에 따라 노치의 영향을 많이 받기 때문이다.

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.13로부터 알 수 있다.

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



(a)  $P_d=9.5MPa$



(b)  $P_d=11.5MPa$

Fig.13 Simulated results of chamber pressure according to delivery pressure(1500rpm, R.R.R.[ case.1 : 1.15% case.2 : 0.63% case.3 : 0.25% ],  $\theta_h, \theta_v$  [ case.1 : 3° case.2 : 7° case.3 : 9° ] )

#### 4. 결론

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 적어 압축 끝부분에서 압력 상승 구배

가 크게 되었다. 그러나, 토출압이 변동하여도 그다지 큰 영향을 받지 않음을 볼 수 있었다.

- 3) 노치와 대원호의 반경 감소비의 크기를 적절히 조절한 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. 조명래, 한동철 외 3인, "노치영역에서 유체 관성을 고려한 압력평형형 베인 펌프의 압력 상승에 관한 연구", 한국 윤활학회 24회 학술대회 논문집, pp.168~175, 1996.
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. 조명래, 한동철 외 3인, "EHPS용 압력 평형형 베인 펌프의 압축 과정에 대한 연구", 한국자동차 공학회 논문집, Vol.4 , No.5 , pp215~222 ,1996.