

베인 이간 현상에 관한 연구

Detachment of Vane Tip in a Positive Displacement Vane Pump

문 호 지, 조 명 래*, 한 동 철**

만도 기계 중앙 연구소

*서울대학교 대학원

**서울대학교 기계설계학과

Abstract—This paper reports on the theoretical study of the vane motions in a positive displacement vane pump. Vane detachment cause the pressure fluctuation, noise, wear in cam ring, and decrease the volumetric efficiency. Dynamic equation of vane motion and flow continuity equation have been modeled and solved simultaneously using 4th order Runge-Kutta method. As results of analysis, vane detachment occurs due to pressure overshoot by excess compression in the pumping chamber. Amount of vane detachment has been reduced by decreasing the pressure overshoot.

Key Words : vane pump, detachment, pressure fluctuation, overshoot

1. 서 론

차량용 조향 장치의 동력원으로 널리 이용되고 있는 유압 베인 펌프는 많은 운동부분을 가지고 있으며 이들의 원활한 작동을 위해서는 적절한 틈새를 유지하여야 한다. 그러나 이러한 틈새는 누설 유량의 통로가 되고 누설 유량의 맥동에 의한 압력 맥동 및 소음이 발생 할 수 있다.[1]

일반적으로 베인은 캠 링에 대해 적절한 유막을 유지하며 운동하여야하나 압축실내의 압력이 과도 상승하는 등, 베인에 작용하는 힘의 평형 상태가 깨어질 때 베인이 캠 링에서 이탈하는 이간 현상이 발생하게 된다. 베인이 캠 링에서 이간되는 현상이 발생할 경우 베인과 캠 링을 통한

누설이 증대하여 체적 효율을 저하시키게 되고, 유량 맥동 및 베인의 이간과 재부착에 따른 소음 및 캠 링의 마모 현상이 발생하게 된다.[2]

압력 평형형 베인 펌프에서 이간 현상의 원인이 되는 과도 압력 상승 등에 대해서 조[3]와 Watton[4]등이 연구한 바 있으나 베인의 운동과 관련된 연구는 이루어지지 않았다. Dickinson과 Edge[5]는 베인의 운동에 관한 해석 모델을 제시한 바 있으나 그 직접적인 해석 결과를 밝히지는 않았고, Ueno[6]는 가변 용량형 베인 펌프의 이간 현상에 대해 실험적 연구를 수행한 바 있고, Nishiumi[2]는 가변 용량형 베인 펌프에서의 이간 현상에 대해 해석하고 실험을 통해 이간량을 측정한 바 있으며,

Karmel[7,8]은 가변 용량형 베인 펌프의 내부 작동 하중에 대해 규명한 바 있으나 압력 평형형 베인 펌프에 대한 연구는 전무하다.

따라서 본 논문에서는 압력 평형형 베인 펌프에 대해 압축 과정 및 베인의 운동에 대한 해석을 통해 압축실내의 압력 변동과 베인의 운동사이의 관계를 고찰한다.

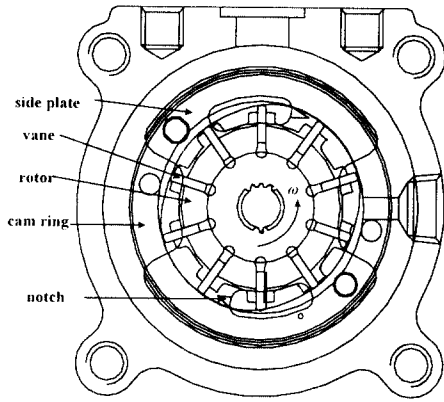


Fig.1 Configuration of positive displacement vane pump.

2. 이론 해석

압력 평형형 베인 펌프는 흡입 및 토출구가 각각 2곳씩 존재하고 흡입부를 통해 유입된 작동유는 압축 구간을 지나면서 압축되어 토출부를 통해 압축된 작동유를 방출한다. 흡입에서 토출로 전환되는 단계에서 흡입쪽 작동유가 불완전한 예압축 상태로 토출부와 소통하게 되면 토출부로부터 고압의 작동유가 역류하여 압축실내의 압력이 토출 압력 이상으로 상승하는 오버슈트(overshoot)현상이 발생하게 되고, 또는 예압축량이 과도하여 오버슈트 현상이 발생하기도 한다. 이러한 과도한 압력 상승으로 인해 압축실의 압력이 베인 배압구의 압력보다 과도하게 커지면 베인

이 캠 링으로부터 이탈하는 이간 현상이 발생하게 된다. Fig.1에는 압력 평형형 베인 펌프의 개략도를 나타내었다.

압축실 내의 압력은 다음과 같은 연속 방정식으로 나타내어진다.

$$\frac{dP}{dt} = \frac{B_e}{V} \left(-\frac{dV}{dt} + Q_a + Q_s + Q_l \right) \quad (1)$$

Q_s , Q_a 는 흡입, 토출부를 통해 유입, 유출되는 유량으로서, 다음과 같이 정의된다.

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

한편 Q_l 은 베인 펌프의 각 틈새를 통한 누설 유량으로서 베인 배압구에서 로터를 통해 압축실로의 누설, 베인 측면에서의 누설, 로터 슬릿에서의 누설 및 베인 선단에서의 누설을 포함한다.[5]

한편 베인이 토출부의 노치 영역을 지날 때 유체의 가속에 의한 미소 유량의 변동은 다음과 같은 식으로 나타내어진다.[3,5]

$$\frac{dQ}{dt} = \left(\frac{P - P_d}{\rho} - \frac{Q^2}{2C^2 A^2} \right) / \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{a(x)} dx \quad (3)$$

흡입 영역으로부터 베인이 측판의 노치부 전까지 회전 시에는 식(1)을, 노치부를 지날 때는 식(1)과 (2)를 동시에 해석함으로써 베인의 회전 위치에 따른 압축실내의 압력 및 압력의 변동을 계산할 수 있다.

베인의 운동 해석시 해석상의 편의를 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

- 로터의 회전 속도는 일정하다.
- 베인에 대한 캠 링의 상대적인 기울기는 무시한다.
- 베인 배압구의 압력은 토출압으로 일정

하다.

- 각 운동 부재의 상대적인 틈새는 항상 일정하다.

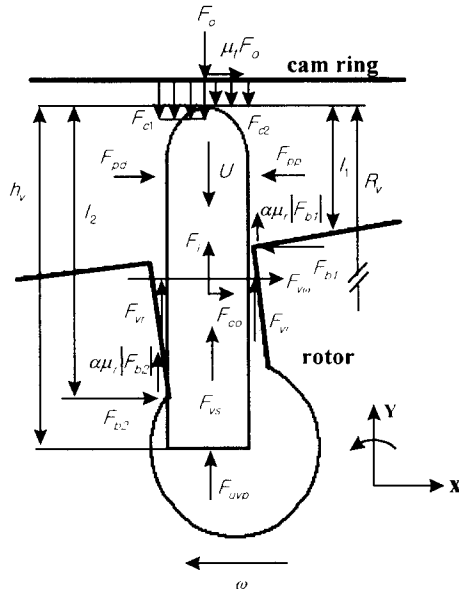


Fig.2 Schematic diagram of vane force

Fig.2에는 베인에 작용하는 하중을 도시하였다. 베인의 반경 방향, 원주 방향 하중 평형 및 베인 중심에 대한 모멘트 평형식을 세우면 다음과 같다.

- X방향 평형

$$F_{pd} - F_{pp} + F_{b2} - F_{b1} + \mu_r F_o + 2F_{vr} + F_{co} = 0 \quad (4)$$

- 베인 선단에 대한 모멘트

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} h_v F_{co} + \frac{1}{2} l_1 (F_{pd} - F_{pp}) + 2(R_v - r_{vu}) F_{vr} \\ & + l_2 F_{vr} - l_1 F_{b1} + \frac{1}{2} \alpha \mu_r t_v (F_{b1} - F_{b2}) \\ & + \frac{1}{4} t_r (F_{c1} - F_{c2}) = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$(l_1 = R_v - r_{rotor}, \alpha = \frac{U}{|U|}, l_2 = R_v - r_{wv})$$

- Y방향 평형

$$\begin{aligned} & F_i + 2(F_{vr} + F_{vs}) + (F_{wv} - F_{c1} - F_{c2}) \\ & + \alpha \beta \mu_r (F_{b1} + F_{b2}) - F_o = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\left(\beta = \frac{F_{pd} - F_{pp}}{|F_{pd} - F_{pp}|} \right)$$

식(6)에서 F_o 배인 선단과 캠 링 사이의 반역으로써 다음과 같이 정의된다.

$$F_o = 0 \quad (R_v < r_c) \quad (7)$$

$$F_o = k(R_v - r_c) + c\dot{R}_v \quad (R_v \geq r_c)$$

k 는 캠 링의 강성을 c 는 댐핑 계수를 나타낸다. 식(4)~(6)을 정리하고 미소항을 소거하면 다음과 같은 베인의 운동 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d^2 R_v}{dt^2} = R_v - \frac{h_v}{2} + \frac{F_{y1} + F_{y2} + F_{y3}}{m_r \omega} \quad (8)$$

$$F_{y1} = F_{wv} - F_{c1} - F_{c2} - F_o$$

$$F_{y2} = 2(F_{vr} + F_{vs}) \quad (9)$$

$$F_{y3} = \alpha \beta \mu_r (F_{b1} + F_{b2})$$

식(1)과 (3) 그리고 식(8)을 연립하여 해석함으로써 압축실내의 압력과 베인 선단의 운동 궤적을 구할 수 있다.

3. 해석 결과

Fig.3에는 압축실의 압력 변동에 따른 베인 선단의 운동 궤적을 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯 압축실내의 압력이 토출 압력 이상으로 과도 상승하는 구간에서

베인이 캠 링으로부터 이탈하는 이간 현상이 발생함을 알 수 있다. 따라서 이러한 압축실 내의 과도 압력 상승이 베인의 이간에 중요한 역할을 함을 알 수 있다.

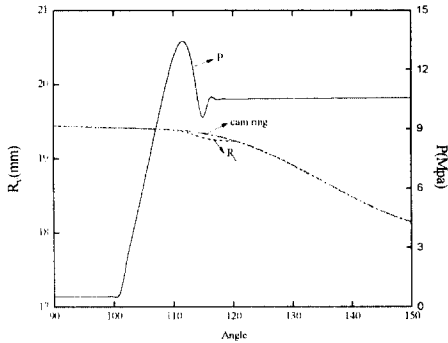


Fig.3 Calculated results of chamber pressure and vane tip locus(2000 rpm, $P_d=10.5\text{MPa}$)

Fig.4에는 로터의 회전 속도에 따른 해석 결과를 나타내었다. 회전 속도 외의 작동 조건 및 펌프의 기하학적 형상은 동일하다.

회전 속도의 증가에 따라 베인의 이간량 및 재부착 위치가 줄어들음을 알 수 있는데 이는 회전 속도의 증가에 따른 베인의 관성력의 증가 때문인 것으로 생각된다. 특히 2500rpm에서는 베인의 이간이 발생하지 않음을 확인할 수 있다.

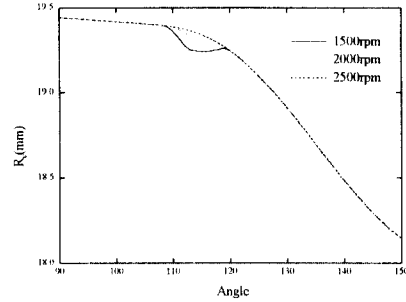
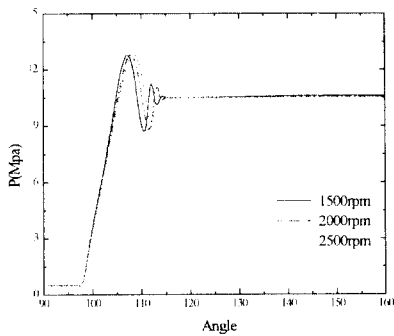


Fig.4 Chamber pressure and locus of vane tip for rotational speed($P_d=10.5\text{MPa}$)

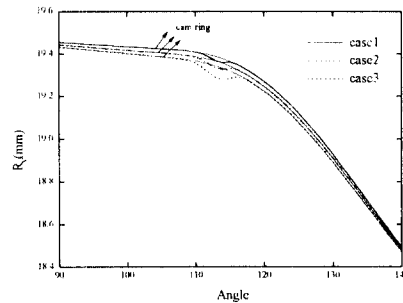
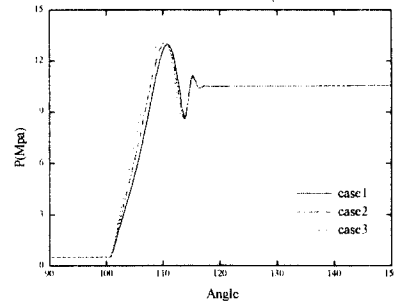


Fig.5 Compression ratio of chamber volume effect on chamber pressure and vane locus($\omega=209.4\text{rad/s}$, $P_d=10.5\text{MPa}$)

Fig.5에는 예압축을 위한 캠 링의 대원호부의 반경 감소율에 따른 해석 결과를 나

타내었다. 반경 감소율을 제외한 조건은 동일하다. case.1에서 case.3으로 갈수록 반경 감소율이 큰 경우이다.

반경 감소율이 클수록 상대적인 베인실의 체적 감소율이 크고 빨라지므로 압력 상승의 종료점이 앞으로 당겨지고 있으며 최대 압력 역시 증가한다. 따라서 베인의 이간량 역시 증가하는 경향을 나타내고 있다.

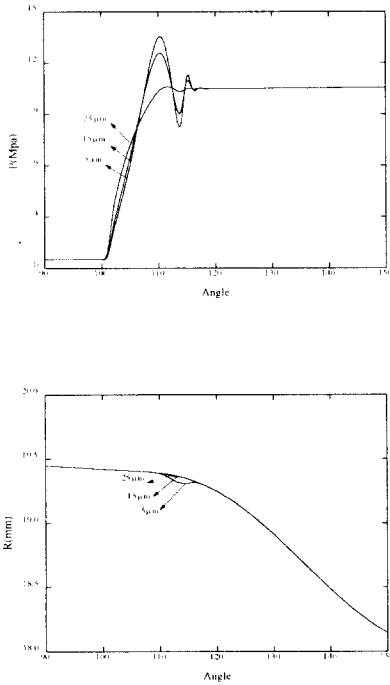


Fig.6 Chamber pressure and locus of vane for vane side clearance($\omega = 209.4 \text{ rad/s}$, $P_d = 10.5 \text{ MPa}$)

Fig.6에는 베인 측면 틈새의 크기에 따른 해석 결과를 나타내었다. 틈새를 통한 누설은 베인실의 압축 효율을 저하시킨다. 베인 측면 틈새가 커질수록 압축실의 최대 압력이 감소하는 경향을 나타내며 베인의 이간량 역시 감소한다.

Fig.7에는 로터의 베인 슬릿 틈새의 크기에 따른 해석 결과를 나타내었고, Fig.8에는 로터의 측면 틈새의 크기에 따른 해석 결과를 나타내었다. 베인 측면 틈새에 대한 해석 결과와 유사한 경향을 나타내고 있다.

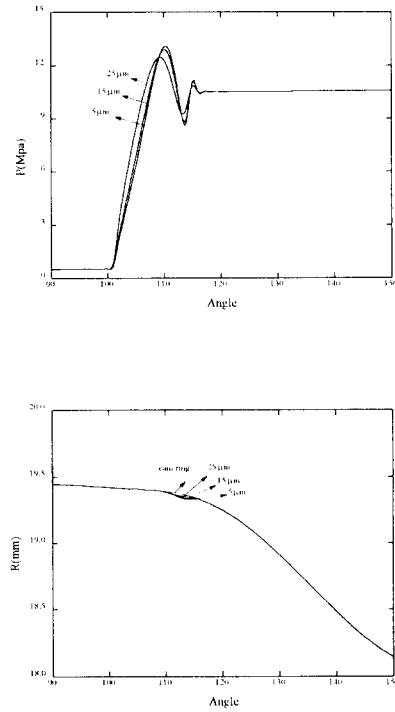
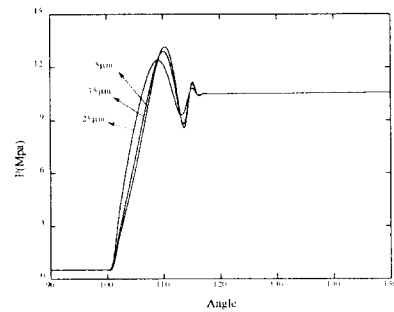


Fig.7 Chamber pressure and locus of vane for rotor slit clearance($\omega = 209.4 \text{ rad/s}$, $P_d = 10.5 \text{ MPa}$)



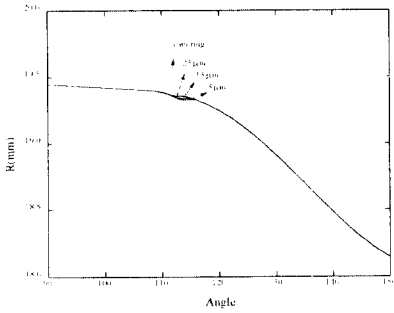


Fig.8 Chamber pressure and locus of vane for rotor side clearance ($\omega = 209.4 \text{ rad/s}$, $P_d = 10.5 \text{ MPa}$)

4. 결론

베인 펌프에서의 압축 과정 및 베인의 운동에 대한 해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 베인이 캠 링으로부터 이탈되는 이간 현상은 압축실 압력의 과도 상승에 따른 것임을 확인할 수 있었다.
2. 회전 속도가 증가할수록 관성력의 증가에 따라 베인의 이간량이 줄어들음을 알 수 있었다.
3. 예압축을 위한 캠 링의 반경 감소율이 증가할수록 베인의 이간량이 증가함을 알 수 있었다.
4. 각 운동 부재사이의 틈새가 커질수록 베인의 이간량이 감소함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

(1) G.G.L. Seet, J.E.T.P. Penny, and K. Foster, "Applications of a computer model in the design and development of a quiet vane pump", Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol.199,

No. B4, pp.247-253, 1990.

- (2) T. Nishiumi, and T. Maeda, "The relationship between vane motion and chamber pressure in a vane pump", Fluid Power, pp.209-214, 1993.
- (3) 조명래, 한동철 외 3인, "노치영역에서 유체 관성을 고려한 압력 평형형 베인 펌프의 압력 상승에 관한 연구", 한국윤활학회 24회 학술대회 논문집, pp.168-175, 1996.
- (4) J. Watton, and K. Watkins, "the transient pressure characteristic of a positive displacement vane pump", Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol.204, pp.269-275, 1990.
- (5) A. L. Dickinson, K. A. Edge, N. Johnson, "Measurement and Prediction of Power Steering Vane Pump Fluidborne Noise", SAE931294, pp.267-275, 1993.
- (6) H. Ueno, and A. Okajima, "Detachment of Vanes from a Cam Ring in a Vane Pump", JSME., Vol.52, No.477, pp.2152-2157, 1992.
- (7) A. M. Karmel, "A Study of the Internal Forces in a Variable Displacement Vane Pump Part I: A Theoretical Analysis", ASME J. of Fluids Eng., Vol.108, pp.227-232, 1986.
- (8) A. M. Karmel, "A Study of the Internal Forces in a Variable Displacement Vane-Pump-Part II: A Parametric Study", ASME J. of Fluids Eng., Vol.108, pp.233-237, 1986.