

# 압력 평형형 소형 베인펌프에서의 베인 이간 현상 측정

## The Measurement of Detachment of Vane Tip in a Positive Displacement Small Vane Pump

안 형 준\*, 양 광 식\*, 한 동 철\*\*, 박 민 호\*\*\*

\*서울대학교 대학원 \*\*서울대학교 기계설계학과

\*\*\*만도기계 중앙연구소

H. J. Ahn\*, K. S. Yang\*, D. C. Han\*\* M. H. Park\*\*\*

\*Graduate school, Seoul National Univ.

\*\*Mechanical Design & Production Engineering, Seoul National Univ.

\*\*\*Mando Machinery Corp, Research & Development Center

**Abstract**-This paper reports on the measurement of the vane motion in a positive displacement small vane pump. The capacitive method using ceramic vane is proposed to measure the vane motion. This method enables us to measure only radial motion of the vane regardless of the motions of other directions. With simple experiments and solutions of simultaneous equations, the indirect compensation of measured signal was performed.

**Key words** - vane pump, detachment, capacitive method

### 1. 서 론

차량용 조향 장치의 동력원으로 널리 이용되고 있는 유압 베인 펌프는 많은 운동 부분을 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 발생할 수 있다.[1]

일반적으로 베인은 캠 링에 대해 적절한 유막을 유지하며 운동하여야 하나 압축실 내의 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] 따라서 베인의 이간현상을 발생시키는 원인을 규명하기 위하여 베인의 운동을 정확히 측정하는 것이 필요하다.

Ueno[3]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[4,5]은 가변 용량형 베인 펌프의 내부 작동 하중에 대해 규명한 바 있다. 그러나 대부분 대형 가변 용량형 베인 펌프에 대한 것이고 정확한 보정도 이루어지지 않았다. 또한 압축과정에서 베인의 운

동은 반경방향 운동뿐 아니라 압축실의 압력으로 인한 기울어짐도 발생하는데 기존의 방법들은 이 기울어짐으로 인한 운동의 영향을 측정시 완전히 배제할 수가 없다.

따라서 본 논문에서는 센서의 장착이 어려운 압력 평형형 소형 베인 펌프에서의 베인의 운동을 측정하기 위하여 세라믹 베인을 이용한 정전용량법을 제안한다. 이 방법은 베인의 다른 방향 운동은 배제하고 오직 반경 방향 운동만 측정하며 베인 펌프의 크기에 관계없이 측정이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 또한 간단한 실험과 연립방정식을 풀면 간접적인 보정이 가능하다. 이러한 장점을 가진 정전용량법을 이용하여 압력평형형 소형 베인 펌프의 베인 운동을 훌륭하게 측정하여 이 방법의 우수성을 입증하였다.

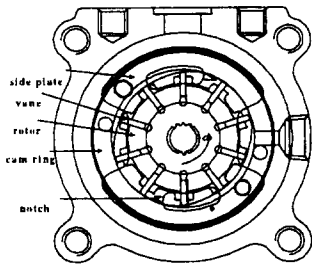


Fig. 1 Configuration of positive displacement vane pump.

## 2. 정전용량방법

Fig. 1은 본 연구의 대상인 압력평형형 소형 베인 펌프를 나타내고 있다. 이 베인 펌프는 로터의 직경이 35.2mm정도이고 폭이 5mm정도로 매우 작아 이간현상 측정의 일반적인 방법인 상용센서를 장착할 수가 없다.

### 2.1 정전용량방법의 이론

두 평행한 도체판 사이의 정전용량은 다음식 (1)과 같이 주어진다.

$$C = \epsilon_0 \frac{S}{d} \quad (1)$$

여기서  $C$ 는 정전용량,  $\epsilon_0$ 은 공기의 유전률 (permittivity),  $S$ 는 두판의 면적,  $d$ 는 두 도체판 사이의 거리이다.

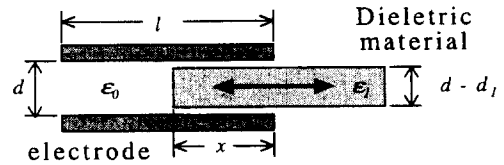


Fig. 2 Principle of capacitive method

이 때, 두 도체판 사이에 Fig. 2와 같이 두께가  $d-d_1$ 이고, 유전률이  $\epsilon_1$ 인 물체가 있어 길이 방향으로 움직인다면 두 도체판 사이의 정전용량은 다음식 (2)와 같이 표현된다.

$$C = \frac{(l-x)}{l} \epsilon_0 \frac{S}{d} + \frac{x}{l} \frac{S}{\frac{d_1}{\epsilon_0} + \frac{d-d_1}{\epsilon_1}} \quad (2)$$

베인 펌프의 경우, 유전율의 비보다  $d_1$ 과  $d$ 의 비가 매우 크고  $d_1$ 이  $d$ 보다 매우 작으므로 위의 식은 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$C = \frac{(l-x)}{l} \epsilon_0 \frac{S}{d} + \frac{x}{l} \epsilon_1 \frac{S}{d} \quad (3)$$

식 (3)에서와 같이 베인의 변위에 비례하는 정전용량을 얻을 수 있다.

두 도체판 사이의 유전체가 어떠한 자세를 취하여도 틈새  $d_1$ 의 값은 변하지 않기 때문에 정전용량은 오직 유전체의 길이 방향 운동에만 관계된다.

### 2.2 정전용량 검출회로 [6]

두 도체판 사이의 정전용량을 기생정전용량 ( $C_s$ ,  $C_p$ )의 영향없이 측정할 수 있는 전하전달

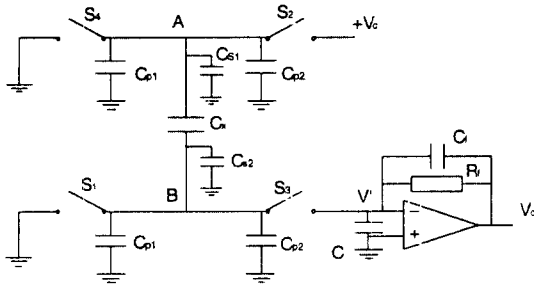


Fig. 3 The charge transfer principle

법을 이용하여 정전용량 검출 회로를 제작하였다. 전하전달법은 Fig. 3과 같이 CMOS 스위치 ( $S_1, S_2, S_3, S_4$ )를 이용하여 미지의 정전용량을 일정한 전압  $V_c$ 로 충전시킨 후 이를 방전시키며 충전되어 있던 전하가 순간 전류로 흐르게 되고 이 전류를 OP Amp로 적분하여 정전용량에 비례하는 직류전압을 얻는 방법이다. 이 방법은 회로의 특성상 아주 넓은 주파수 대역을 가지며, 전류를 적분하여 출력을 얻기 때문에 잡음의 영향이 적고, 따로 정전용량에 비례하는 출력을 얻기 위한 부대 장치-예를 들어 최고치 검출장치, 위상 검출 장치 등-가 필요하지 않아 회로가 간단해진다. 또한, 특별한 스위칭 방법을 통하여 기생정전용량을 배제할 수 있으며 기본 전압 변동량도 줄일 수 있다.

위의 회로를 해석하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$V_o = -C_x V_c f R_f \quad (4)$$

측정회로의 출력  $V_o$ 가 케환저항  $R_f$ 와 충전전압  $V_c$  그리고 스위칭 주파수  $f$ 에 비례함을 알 수 있다.

### 3. 베인의 운동 측정

#### 3.1 실험장치

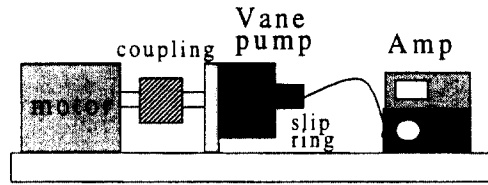


Fig. 5 Experimental set-up

실험장치는 Fig. 5와 같이 모터 부분, 세라믹 베인과 도체판이 장착된 로터, 슬립링, 그리고 정전용량 검출 회로로 구성된다.

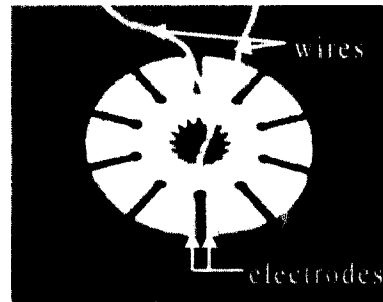


Fig. 4 Rotor with electrodes for measurement

로터의 한 부분을 가공하여 선을 연결한 황동 조각을 금속접착제를 이용하여 절연시켜 붙인 다음 후가공하여 Fig. 4와 같은 실험용 로터를 제작한다. 측정을 위하여 특별히 세라믹 베인을 제작하여 측정 부분에만 사용한다.

#### 3.2 정전용량법의 보정

공기의 유전율은 알고 있으므로 작동유와 세라믹의 유전율을 알아내야 한다. 그리고 정전용량 검출 회로에서 발생할 수 있는 바이어스 그리고 모델의 간략화로 인한 이득의 변화를 추정하는 것도 중요하다.

우선 실험용 로터와 세라믹 그리고 작동유를 이용하여 아래와 같은 네 가지 실험을 수행한다.

1. 공기 중에서 두 도체의 정전용량 검출
2. 공기 중에서 세라믹 베인을 삽입한 후 두 도체사이의 정전용량 검출
3. 작동유 안에서 두 도체의 정전용량 검출
4. 작동유 안에서 세라믹 베인을 삽입한 후 두 도체사이의 정전용량 검출

이 네가지 실험을 식(2)를 이용하여 아래 식 (5), (6), (7), (8)로 나타낼 수 있다.

(이득:  $A$ , 바이어스:  $B$ , 작동유의 유전율:  $\epsilon_{oil}$ , 세라믹의 유전율:  $\epsilon_{cera}$  )

$$V_1 = A \cdot \epsilon_0 \frac{S}{d} + B \quad (5)$$

$$V_2 = A \cdot \frac{S}{\frac{d_1}{\epsilon_0} + \frac{d-d_1}{\epsilon_{cera}}} + B \quad (6)$$

$$V_3 = A \cdot \epsilon_{oil} \frac{S}{d} + B \quad (7)$$

$$V_4 = A \cdot \frac{S}{\frac{d_1}{\epsilon_{oil}} + \frac{d-d_1}{\epsilon_{cera}}} + B \quad (8)$$

위의 네 식을 풀면 원하는 미지수 네 개를 구할 수 있다.

여기서 얻은 미지수로 베인의 변위에 대한 전압이득의 관계식을 구하면 다음식 (9)와 같다.

$$V_o = A \cdot \left[ \frac{S}{\epsilon_{oil} d} + \frac{x}{l} \left( \frac{S}{\epsilon_{oil} d_1 + \epsilon_{cera} (d-d_1)} - \frac{S}{\epsilon_{oil} d} \right) \right] + B \quad (9)$$

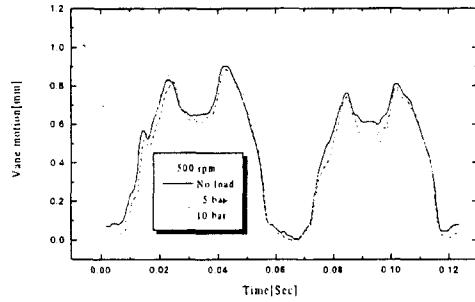
각각의 실험데이터를 정리한 것을 **Table. 1**에 나타내었고 이 것으로 추정된 이득의 값의 오차는 베인의 공차범위(6-20  $\mu m$ )에서 최대 8.5 % 이다.

**Table. 1** Experimental data for compensation

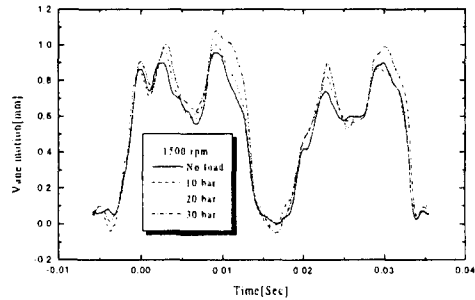
$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$
-10.68	-1.528	-9.696	-0.432
$\sigma=0.194$	$\sigma=0.307$	$\sigma=0.124$	$\sigma=0.083$

### 3.2 실험 결과

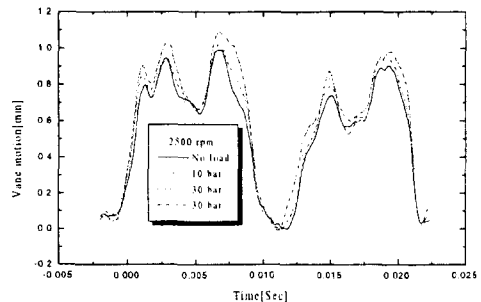
로터의 회전수와 토출압력을 변화시키면서 베인의 운동을 측정된 것을 **Fig. 6**부터 **Fig. 10**까지 보였다. 회전수는 500rpm에서 2500rpm까지, 압력은 30bar까지 측정하였다.



**Fig. 6** Vane motions with various delivery pressures in 500rpm



**Fig. 7** Vane motions with various delivery pressures in 1500rpm



**Fig. 8** Vane motions with various delivery pressures in 2500rpm

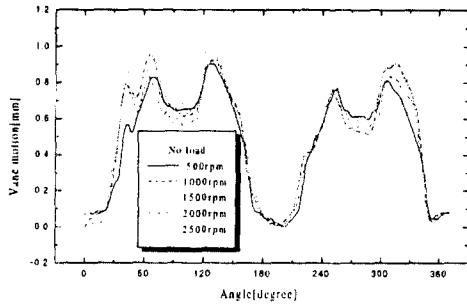


Fig. 9 Vane motions with various speed at no load

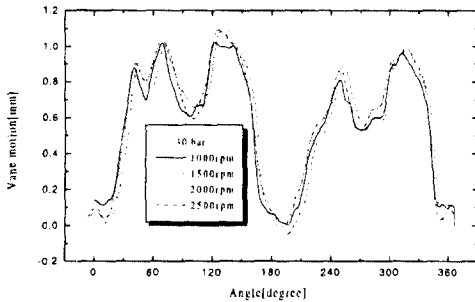


Fig. 10 Vane motions with various speed at 30 bar delivery pressure

Fig. 11은 축진동을 고려하지 않은 경우와 1주기와 2주기를 갖는 축진동을 고려한 경우의 이론적인 베인의 운동을 보인 것이다.

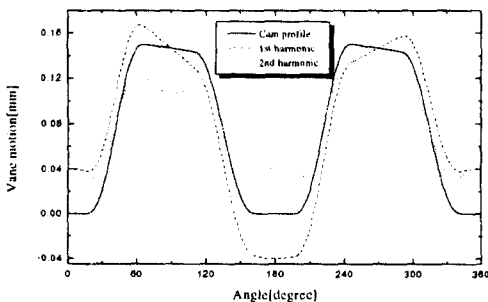


Fig. 11 Calculated vane motion considering rotor vibration

위의 실험의 결과에서 보면 베인의 운동이 초

기에 설계된 캠링의 형상과는 상당한 차이를 보였다. 이것은 베인의 운동에 축진동이 추가되어 왜곡된 형상을 보이는 것으로, Fig. 11에 축진동을 고려한 이론적인 베인의 운동을 보였다. 여기서 보듯이 축진동을 고려함으로써 베인의 운동이 원래의 캠형상을 따르지 못하고 왜곡된 형상을 갖음을 알 수 있다.

실험시, 슬립링이 장착되는 부분이 잘 지지되지 않았고, 조립 시에 축의 어긋남으로 인한 축진동으로 베인의 운동이 왜곡된 것으로 추정된다.

Fig. 8과 Fig. 9에서 나타나듯이 로터의 속도가 증가할수록 베인의 운동이 심하게 왜곡되는 것을 알 수 있다. 이것은 로터의 속도가 증가함에 따라 축진동의 영향이 매우 큼을 나타낸다.

#### 4. 결 론

소형 압력 평형형 베인 펌프에서 베인의 운동 측정에 대한 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 새로이 제안한 정전용량법으로 베인의 운동을 측정하였고 이를 간단한 방법으로 보정하였다.
2. 정전용량법은 베인의 자세와 상관없이 베인의 운동을 측정할 수 있다.
3. 축의 진동이 베인의 운동과 결합되어 측정의 오차가 발생되었다. 따라서 정확히 베인의 운동만을 측정하기 위해서는 축의 회전을 동시에 측정하여 보상하거나 지지부를 변형하여 축 진동의 크기를 줄이는 것이 필요하다. 또한 베인의 운동과 압력과의 상관관계를 알아보기 위하여 압력센서를 동시에 측정하는 것이 필요하다.

#### 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 quite 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. 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.
4. 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.
5. 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.
6. S. M. Huang, R. G. Green, A. Plaskowski, M. S. Beck, "A High Frequency Stray-immune capacitance transducer based on the charge transfer principle", IEEE Trans. Instru. Meas., Vol. 37, No. 3, 1988, pp 368-373.