

공압베인모터 설계 및 성능특성에 관한 실험적 고찰

김동수(한국기계연구원 산업기술연구부), 김유일(한국기계연구원 신교통기술연구부),
김미성(에너지관리공단 기술개발본부)

An Experimental Study on the Design and Performance Characteristics of Vane type Pneumatic Motors

D. S. Kim(KIMM), Y. I. Kim(KIMM), M. S. KIM(KEMCO)

ABSTRACT

It is well known that pneumatic motors convert fluid power into mechanical power with a low efficiency. The Value of the efficiency depends on several factors, of which the most important are ; type of motor, speed, supply pressure, size and geometry of the motor. This paper presents an analytical and experimental study of the performance of the vane type pneumatic motors. This investigation deals with all the pneumatic motors. This investigation deals with all the major aspects of the air flow through a vane type pneumatic motor and points out which are the main causes of the low efficiency of the motor, and therefore indicates which changes in a motor design can lead to optimum performance.

Key Words : Vane type Pneumatic Motor(베인형 공압모터), Efficiency(효율), Fluid Power(유체동력), Mechanical Power(기계동력)

1. 서론

공압모터는 공기압축기로 압축된 공기를 작동유체로 하여 연속 회전운동으로 변화시켜주는 액추에이터로, 광산, 화학공장, 선박등 폭발성가스가 존재하는 장소에서 전동기 대신에 사용되어 왔으며, 최근에는 공구류, 컨베이어, 호이스트, 교반기 및 일반 산업기계 등 그 수요가 증가 추세에 있다.

연구대상인 베인형 공압모터는 케이싱에 닿아 있는 베인을 로터에 내장하여 베인사이에 유입된 압축공기에 의해 회전하는 것을 말하며, 출력 7.5KW이내, 회전수 15,000rpm이내 소, 중용량으로 회전수 500rpm 이하에서는 감속기를 부착하여 고토오크와 저속 영역의 안정성을 도모하고 있다.

베인형 공압모터는 비팽창형과 불완전팽창형으로 구분 되며, 불완전팽창형은 베인 중간에 1차배기포트를 형성하여 압축공기의 팽창에너지를 이용하므로 효율은 비교적 좋은 반면에, 비팽창형은 공기소비량이 많고 효율은 낮지만 용적당 출력이 크기 때문에 소형화 할 수 있다는 장점이 있다.

지금까지의 연구배경을 살펴보면, G. Jacazio(1) 등이 베인모터의 성능 최적화 연구를 J.PU(2) 등이 공압모터를 이용한 서보제어기술 연구를 Arie Perry(3)가 비팽창형 베인펌프 설계에 새로운 개념을 적용한 연구결과가 제시된적이 있다.

본 연구에서는 4HP, 2500rpm, 7.5Nm, 8개 베인으로 구성된 비팽창형 공압베인모터의 성능특성인 출력, 토오크, 유량변화를 회전수별로 측정하여 규명하였으며 20:1의 감속비를 가진 워엄형 감속기를 부착한 후 특성을 전자동으로 구성된 시험기를 이용하여 측정하였다. 공급압력과 유량의 정확한 제어를 위하여 서보밸브를 사용하였으며 부하부는 에어 다이내모메타를 채택하였고, 1채널당 데이터 획득수는 초당 2,300개로 하여 데이터의 정확성을 도모하였다.

2. 이론적 배경

Fig.1은 시험대상 베인모터의 구조를 개략적으로 도시한 것으로 다음과 같은 이론적 특성을 가지고 있다.

즉, Q지점에서 베인은 완전히 로터 내부로 흡수

되고 Z지점에서 베인이 100% 확장되며, 로터의 최대 직경은 모터직경의 2/3보다는 크다

$$r > \frac{2}{3} B \dots \dots \dots (1)$$

또한 베인모터의 최대작동면적은 다음식과 같다.

$$S = L(x-1) \dots \dots \dots (2)$$

여기서, L은 축방향의 베인의 확장길이

r은 로터의 직경이고

x는 기하학적인 물성치로써

$$x = (B^2 - e^2 \sin^2 \psi)^{\frac{1}{2}} + e \cos \psi \dots \dots \dots (3)$$

식(3)에서 x의 최대값은 B+e일 때이며, $\psi=0$ 일 때 베인은 Q-Z 선상에 위치함을 알수가 있다.

Fig1과 2에서 구동부와 배기부 챔버의 검사체적은

$$V_a = V_0 + \int_0^\psi \frac{L}{2x^2} B d\psi$$

$$V_b = V_0 - \int_0^\psi \frac{L}{2x^2} B d\psi \dots \dots \dots (4)$$

여기서, $V_0 = \frac{\pi}{2} L(B^2 - r^2)$ 이다.

비활동면적 최소화는

$$-\frac{\phi m}{2} < \phi < +\frac{\phi m}{2} \dots \dots \dots (5)$$

$$\text{여기서, } \phi m = \frac{2\pi}{n} \dots \dots \dots (6)$$

식(3)에서 ϕm 또는 ϕ 를 0(zero)로 간주하면, 즉 베인모터의 수가 최대일 때,

$$x = B + e \dots \dots \dots (7)$$

따라서 베인모터의 입,출구 검사체적은

$$V_a = V_0 + 2eBL\phi i \dots \dots \dots (8)$$

$$V_b = V_0 + 2eBL\phi i \dots \dots \dots (9)$$

사실상, $V_a = V_b = V_0 \dots \dots \dots (10)$

공압모터시스템의 동적 거동해석을 위해서는 밸브, 모터, 부하 등 3가지 부품에 대한 수학적 모델이 필요하다.

먼저 밸브의 유량특성은

$$W_a = q_a(x, p_a) \dots \dots \dots (11)$$

$$W_b = q_b(-x, p_b) \dots \dots \dots (12)$$

밸브오리피스를 통과하는 질량 유량은

$$W = C_d C_o A_o X P_u / Tu^{\frac{1}{2}} f(P_r) \dots \dots \dots (13)$$

모터 챔버내의 동특성은 단열과정으로 가정하면

$$W_a = (P_{ai} V_a + \frac{V_0}{KP_a}) / (RT_s) \dots \dots \dots (14)$$

$$W_b = (P_{bi} V_b + \frac{V_0}{KP_b}) / (RT_s) \dots \dots \dots (15)$$

여기서, 검사체적의 순간 변화율은 식 (8), (9)로

부터

$$V_a = 2eBL\phi \dots \dots \dots (16)$$

$$V_b = 2eBL\phi \dots \dots \dots (17)$$

식 (14), (15)는 두 개의 챔버사이에서 내부 누설이 없다고 가정했을 때 성립된다.

마지막으로 베인모터의 부하특성에 관한 것으로 뉴턴의 제 2법칙으로부터 마찰토크는

$$M - M_c \sin(\phi) = J\phi \dots \dots \dots (18)$$

여기서, 구동토크는 아래 식과 같다

$$M = [(P_a - P_b)eL]B \dots \dots \dots (19)$$

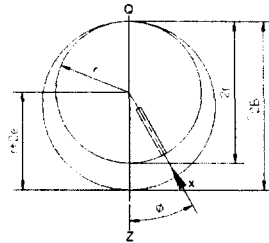


Fig.1 Simplified Vane Motor Structure

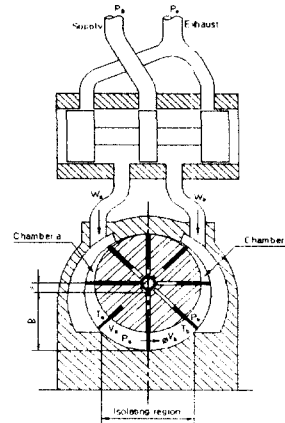


Fig.2 Vane Motor Controlled by a Servo Valve

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

Fig.3, 4에서 나타낸바와 같이 시험대상 베인모터 앞부분에는 보조탱크, FRL Unit, 서보밸브와 압력 및 유량센서를 뒷부분에는 에어 다이내모 메타와 비례밸브, 토오크와 속도측정센서를 부착하고 이들을 전자적으로 제어하고, 계측하기 위한 A/D, D/A변환기와 컴퓨터로 구성되어 있다.

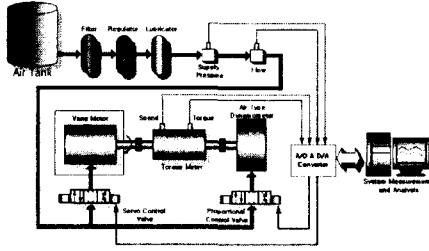


Fig.3 Schematic of Experimental Apparatus

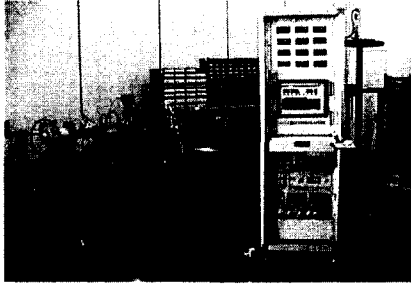


Fig.4 Photo of Experimental Apparatus

3.2 실험방법

앞에서 언급한 Fig.3, 4의 실험장치에서 베인모터의 압력특성, 유량특성, 부하특성 등을 파악하기 위하여 다음과 같은 실험방법으로 데이터를 획득하였다.

- (1) 공급유량 밸브인 서보밸브를 작동시킨다.
- (2) 레귤레이터를 이용하여 압력을 2~6bar까지 1bar씩 증가해가면서 공급압력을 조절한다.
- (3) 컴퓨터의 D/A변환기를 이용하여 서보밸브와 비례밸브를 초기화시킨다.
- (4) 에어 다이내모메타를 이용하여 부하량을 설정한다.
- (5) 컴퓨터의 D/A변환기를 이용하여 공급유량을 서서히 증가시켜 회전수를 조절한다.
- (6) 회전수는 Point-to-Point 방식으로 목적하는 회전수를 설정하며, PID 제어 알고리즘을 사용한다. 이때 허용오차는 $\pm 2\text{rpm}$ 이다.
- (7) 회전수가 목표값에 도달했을 때, 공급압력, 유량, 회전수, 토크 등의 데이터를 A/D변환기를 통하여 획득하여 저장 및 표시한다.
- (8) 최대회전수에 도달했을 때 서보밸브 및 비례밸브를 중지시킨다.
- (9) 모니터상의 실험결과 그래프를 클릭하면 회전수별 각종 센서를 통하여 획득한 데이터를 디지털 값으로 확인이 가능하다.

4. 실험결과 고찰

지금까지 베인모터의 이론특성 및 실험장치, 방법에 대해 살펴보았으며 본 장에서는 실험결과에 대한 베인모터의 특성인 토오크와 회전수, 출력과 회전수 그리고 유량과 회전수에 대해 설명하기로 한다.

Fig.5는 토크와 회전수에 대한 실험결과로서, 토오크와 회전수는 반비례 관계임을 알 수 있다.

회전수 0(zero)에서 각각의 공급압력 2, 3, 4, 5, 6bar에 대한 토오크값 0.5, 0.75, 0.9, 1.2, 1.5Kgf.m를 나타내다가 회전수가 450rpm 일 때 시동 토오크값이 최대가 되고 그 이후부터 회전수가 2,400rpm이 될 때까지 회전수와 토오크는 반비례관계로 회전수가 증가하면서 토오크값이 감소하는 경향을 나타냈다. 공급압력이 클수록 상대 토오크값도 큼을 알 수가 있었다.

Fig.6은 출력과 회전수에 대한 실험결과로서, 회전수가 증가함에 따라 출력값도 증가하며 회전수 2,400rpm, 공급압력 6bar에서 3.5Kw의 출력을 나타낼 수 있었으며, 회전수 300rpm 이하에서는 출력값이 불안정함을 알 수 있었다.

Fig.7은 유량과 회전수의 관계 그래프이며 유량은 회전수에 비례하여 증가함을 알 수가 있으며, 회전수 2,400rpm에서 공급압력 6bar일 경우 유량은 약 4,000 ℓ /min가 됨을 알 수 있다.

그리고 Fig.8, 9, 10은 감속비 20:1인 워엄기어 감속기를 부착하여 시험한 결과로서 Fig.5, 6, 7과 유사한 특성을 가졌으며 베인모터의 특성인 회전수에 의한 출력, 토오크값도 감속비 20:1에 상응한 값으로 나타났다.

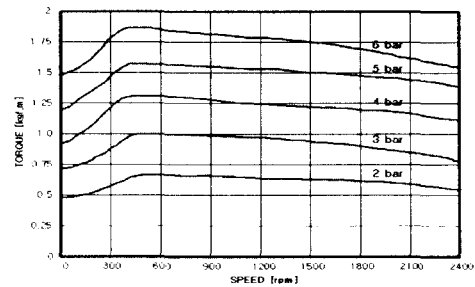


Fig.5 Torque Test Results of Vane Motors

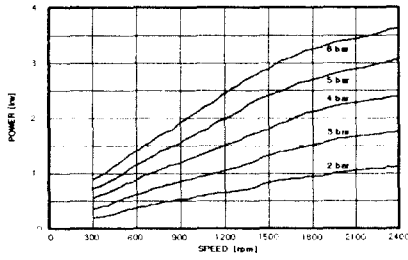


Fig.6 Power Test Results of Vane Motors

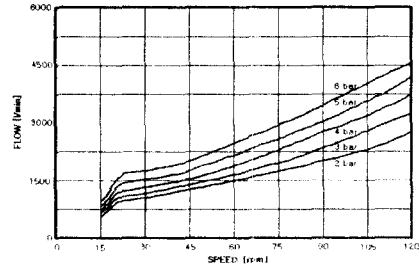


Fig.10 Flowrate Test Results of Vane Motor with Worm Gear Reducer

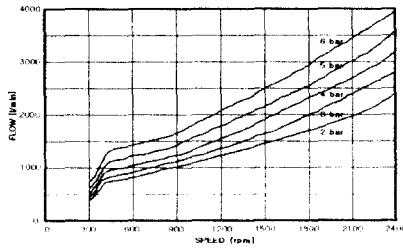


Fig.7 Flowrate Test Results of Vane Motor

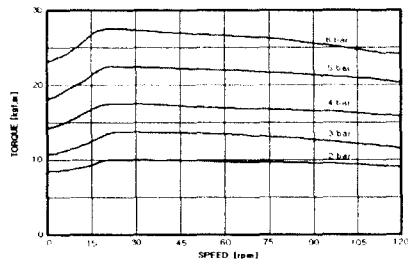


Fig.8 Torque Test Results of Vane Motor with Worm Gear Reducer

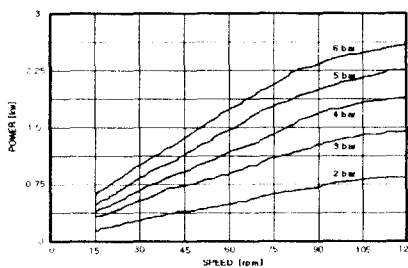


Fig.9 Power Test Results of Vane Motor with Worm Gear Reducer

5. 결론

지금까지 베인모터의 특성에 관한 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 4HP급, 2,500rpm, 7.5Nm 베인형 공압모터를 설계 제작하여 실험한 결과, 토크와 회전수는 반비례하였으며 회전수 450rpm에서 토크 최대값인 시동 토크가 발생함을 알 수 있었다.

(2) 베인형 공압모터의 특성인 출력과 회전수는 회전수 증가에 따라 출력값이 포물선형으로 증가하였으며, 최대공급압력, 최대회전수에서 최대출력 값이 나타났으며 회전수 300rpm 이하에서 불안정한 출력 값으로 스틱슬립현상이 나타났다.

(3) 베인형 공압모터의 특성인 유량과 회전수의 관계는 비례관계로 최대공급압력, 최대회전수에서 최대 유량값이 나타났다.

(4) 4HP급 베인모터에 20:1의 감속 비를 가진 워엄형 감속기를 부착한 후 실험결과는 회전수대 토크, 출력, 유량값이 감속기를 부착하지 않은 경우와 유사한 경향을 나타내며, 감속 비만큼의 상응한 값으로 나타났다.

후기

본 연구는 산업자원부의 에너지 자원 개발과제인 (다목적 천공장비용) 공압회전작동기 국산화 개발과제 일부를 밝혀 드립니다.

참고문헌

1. G. Jacazio, B. Piombo and A. Romiti, "The Optimization of the performance of Vane type air motors", Proc. of the W.C.T.M.M., pp. 607-610, 1979.
2. J. PU, P.R. Moore and R.H. Weston, "Digital servo motion control of air motors", Int. J. Proc. RES., Vol. 2p, No.3, pp. 599-618, 1991.
3. A. Perry, "New Concept of a pressure balanced variable displacement vane pump", Fluid Power JHPS Int. Sym. pp. 69-72, 1999.