

〈論 文〉

회전마멸현상에서의 마찰과 편심의 영향

Effect of Friction and Eccentricity on Rubbing Phenomenon

최연선* · 김준모* · 정호권**

Y. S. Choi, J. M. Kim and H. K. Chung

(1996년 7월 16일 접수 ; 1996년 8월 5일 심사완료)

Key Words : Rotor Dynamics(회전체역학), Rubbing(회전마멸), Clearance(간극), Forward Whirl(정방향선회), Backward Whirl(역방향선회), Backward Rolling(역방향구름), Backward Slipping(역방향미끄럼), Friction Coefficient(마찰계수), Eccentricity(편심)

ABSTRACT

Nonlinear dynamic characteristics of rubbing phenomenon in rotor dynamics are investigated experimentally and numerically. Rubbing phenomenon occurs when rotor contacts with stator during whirling and causes the large amplitude of vibration, high whirl frequencies, and possibly catastrophic failure. Rubbing has various types of forward whirl, backward rolling, backward slipping, and partial rub depending on the system parameters of rotating machinery and running speed. Experiments are performed for forward whirl and backward whirl. And numerical analysis are conducted to explain the changes between backward rolling and backward slipping. Experimental and numerical results show that the types of whirling motion depends on the friction coefficient between rotor and stator and the eccentricity of rotor.

1. 서 론

모터, 펌프, 압축기와 발전소의 증기터빈, 항공기의 제트엔진 등의 회전기계는 회전자(rotor)와 고정자(stator) 사이의 간극(clearance)이 작을수록 좋은 성능을 얻을 수 있다. 그러나 편심, 축정렬불량(misalignment) 등의 요인에 의하여 회전자가 선회운동(whirling motion)을 하게 되면 회전자는 고정자와 접촉하게 된다. 이와 같이 자체회전(spin)과 세차운동(precession)을 하는 회전자가 고정자와 접촉하는 현상을 회전마멸(rubbing)이라 한다. 회전기계의 운전중 회전마멸의 발생하면 고주파, 대진폭의 진동이 발생하며 심한 경우 회전기계의 파손을 일으

키게 되므로 운전을 중지해야 하는 사태가 발생한다. 특히 제트엔진과 하절기에 전력 수요가 많은 발전소에서 이러한 현상이 발생하면 어려운 상황에 직면하게 된다.

이러한 회전마멸현상은 회전기계의 설계변수와 운전조건에 따라 여러 가지 다른 형태로 나타난다. 회전마멸현상은 크게 완전접촉선회(full annular rub)와 부분접촉선회(partial rub)의 두 가지 형태로 나누어진다. 완전접촉선회는 회전자가 고정자의 내면을 따라서 궤도의 이탈이 없이 회전하는 경우이며 부분접촉선회는 회전자와 고정자의 접촉이 간헐적으로 이루어지는 경우이다. 회전마멸 발생시 회전자의 선회방향이 회전방향과 같은 정방향선회(forward whirl)인 경우와 반대인 역방향선회(backward whirl)인 경우가 존재한다. 정방향선회는 접촉면에서 항상 미끄럼(slipping)을 동반하나 역방향선회의 경우 고정자와의 접촉면에서 회전자가 미끄럼이 없

*정회원, 성균관대학교 공과대학 기계설계학과

**성균관대학교 대학원

이 구름운동을 하는 역방향구름(backward rolling)과 미끄럼이 발생하는 역방향미끄럼(backward slipping)의 경우로 나누어진다.

이와 같이 회전마멸은 복잡한 회전기계의 특이 동적현상의 하나로서 고속, 고성능을 요구하는 회전기계의 설계를 위해서는 회전마멸에 대한 충분한 이해를 수반하여야 한다.

Black⁽¹⁾은 polar receptance를 이용하여 회전자의 회전방향과 선회방향이 같은 정방향선회 회전마멸현상을 설명하였다. Erich⁽²⁾는 회전마멸현상을 편적선형(piecewise-linear)으로 모델링하고 수치적분을 함으로서 회전자와 고정자의 응답을 계산하였다. 최연선⁽³⁾은 간극이 있는 베어링으로 지지된 회전자운동을 편적선형 형태로 모델링하고 FFT 알고리즘을 이용하여 다중(multiple)의 정상해를 구하였다. Crandall⁽⁴⁾은 실험장치를 만들어 회전마멸현상을 실험실에서 재현시키고 안정성 해석을 통하여 역방향선회하는 회전마멸현상에 대한 물리적인 설명을 시도하였다. 최연선⁽⁵⁾은 M.I.T.의 실험장치⁽⁴⁾를 이용하여 회전자의 가속, 감속시 다른 양상의 회전마멸현상을 실험적으로 증명하고 고정자와 회전자의 receptance를 계산하여 미끄럼이 발생하는 운전속도를 예측하고 편심에 의하여 미끄럼이 부분고리형 회전마멸양상을 가짐을 보였으나, 실험결과와 완전히 일치하지는 않았다. Shlomi⁽⁷⁾는 고속 카메라를 사용하여 회전마멸 발생시 회전자의 운동양상을 촬영하였다. Childs⁽⁹⁾는 역방향선회가 발생하기 위해서는 큰 운동에너지가 필요하나 실제 경우에는 그와 같이 큰 운동에너지를 회전기계에 공급할 수가 없으므로 대부분의 회전기계에서는 정방향선회가 발생한다는 사실을 지적하였다.

이상과 같이 회전마멸현상은 실험적으로 확인되었으나 이러한 회전마멸의 발생에 대한 물리적 설명은 아직 미흡한 실정이다. 이에 본 연구에서는 회전마멸현상을 실험적으로 구현하고, 이를 수식으로 표현함과 동시에 수치해석을 통하여 회전마멸현상을 물리적으로 설명하고자 하였다.

2. 이 론

2.1 회전 마찰 모델

Fig. 1은 평면 위를 구르는 원통의 자유물체도를 나타내고 있다. 식 (1)은 자유물체도로부터 구한 운동방정식이다. 원통이 평면 위를 미끄럼이 없이 구르고 있다면 $\dot{x} = ar$ 의 운동학적 관계식이 성립하여야 하며 4개의 미지수 F , N , \dot{x} , α 를 계산할 수

있다. 이 때 마찰계수는 접촉면의 정마찰계수 μ_s 보다 작아야 한다. 접촉면에서의 마찰계수가 정마찰계수보다 크게 계산되는 경우는 물리적으로 있을 수 없으며, 이는 원통이 평면상에서 미끄러지는 경우이다. 이 때 마찰력과 수직항력 N 사이에는 동마찰계수 μ_k 가 작용하게 되어 $F = \mu_k N$ 의 관계식이 성립한다. 이 식을 3개로 구성된 식 (1)에 대입하면 4개의 미지수를 계산할 수 있다. 이와 같이 회전운동하는 물체가 정지한 다른 물체와 접촉하게 되면 접촉면에서 마찰력이 발생하며 마찰력과 수직항력의 비, 즉 마찰계수에 따라 미끄럼이 없는 단순한 구름운동이나 미끄럼 운동이 발생하게 된다.

$$\begin{aligned} P - F &= m\ddot{x} \\ F \cdot r &= I_c \cdot \alpha \\ N &= mg \end{aligned} \quad (1)$$

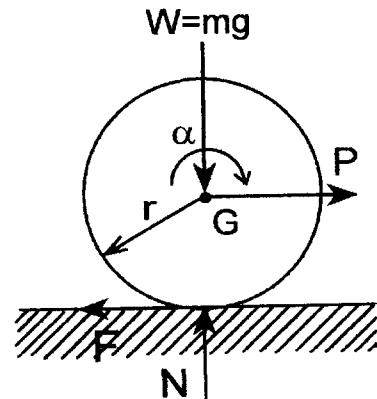


Fig. 1 Friction model of rotating cylinder

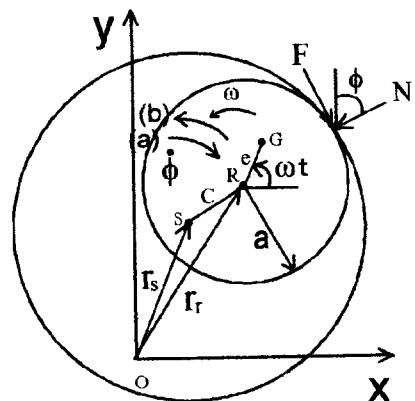


Fig. 2 Models of (a) backward whirl and (b) forward whirl

2.2 선회 모델

Fig. 2는 고정자와 회전자의 간극이 c 인 회전기계에서 반경 a 인 회전자가 고정자와 접촉하며 회전하는 것을 보여주는 그림으로서 회전자의 회전방향과 선회방향이 같은 경우인 정방향선회(a)와 선회방향이 회전방향과 반대인 역방향선회(b)를 보여주고 있다. 정방향선회는 접촉면에서 미끄럼이 있는 경우이고, 역방향선회는 전 절에 기술한 회전마찰모델의 접촉면에서 미끄럼이 없는 역방향구름(backward rolling)과 미끄럼이 있는 역방향미끄럼(backward slipping)의 두가지 형태로 발생할 수 있다. 역방향구름은 접촉점에서 상대속도가 없으므로 회전자의 중심 R 의 고정자의 중심 S 에 대한 선회속도는 식 (2)과 같이 된다. 역방향미끄럼이 되는 경우는 접촉면에서 미끄럼이 있는 경우로서 선회속도는 식 (2) 보다는 작은 값이 될 것이다.

$$\dot{\Phi} = -\frac{a}{c} \omega \quad (2)$$

2.3 운동방정식

Fig. 2의 모델로부터 회전자와 고정자의 운동방정식을 유도하면 식 (3)과 같이 된다. 여기서 x , y 축은 관성축(inertial reference frame)을 의미한다.

$$m_r \ddot{x}_r + c_r \dot{x}_r + k_r x_r + R_x = m_e \omega^2 \sin \omega t \quad (3.a)$$

$$m_r \ddot{y}_r + c_r \dot{y}_r + k_r y_r + R_y = m_e \omega^2 \cos \omega t \quad (3.b)$$

$$m_s \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + k_s x_s - R_x = 0 \quad (3.c)$$

$$m_s \ddot{y}_s + c_s \dot{y}_s + k_s y_s - R_y = 0 \quad (3.d)$$

완전접촉선회(full annular rub)를 가정하면 회전자 변위와 고정자 변위의 기구학적관계(kinematic relation)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_r &= x_s + c \sin \Phi \\ y_r &= y_s + c \cos \Phi \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 m_r , m_s 는 회전자와 고정자의 질량, c_r , c_s 는 감쇠상수, k_r , k_s 는 축과 베어링의 강성값이다. ω 는 회전자의 자체회전속도(spin rate), 즉 운전속도이고 $\dot{\Phi}$ 는 선회속도(whirling speed)를 가리키며 R_x , R_y 는 각각 x 축, y 축 방향의 반력을 나타낸다. 식 (3.a)과 (3.c)을 더하여 R_x 를 소거하고 식 (3.b)와 (3.d)를 더하여 R_y 를 소거한 각각의 식에 식 (4)를 미분하여 얻은 \dot{x}_r , \dot{y}_r , \ddot{x}_r , \ddot{y}_r 을 대입하면 고정자의 x , y 방향에 대한 운동방정식이 아래와 같이 얻어진다. 한편 식 (4)를 미분할 때 선회속도 $\dot{\Phi}$ 를 정상상태에서 상수라고 가정한다.

$$\begin{aligned} (m_r + m_s) \ddot{x}_s - m_r c \dot{\Phi}^2 \sin \Phi + (c_r + c_s) \dot{x}_s + c_r c \dot{\Phi} \cos \Phi + (k_r + k_s) x_s + k_r c \sin \Phi &= m_r e \omega^2 \sin \omega t \\ (m_r + m_s) \ddot{y}_s - m_r c \dot{\Phi}^2 \cos \Phi + (c_r + c_s) \dot{y}_s - c_r c \dot{\Phi} \sin \Phi + (k_r + k_s) y_s + k_r c \cos \Phi &= m_r e \omega^2 \cos \omega t \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에서 역방향구름을 가정하면 식 (2)와 같은 관계가 성립하므로 수치해석이 가능하다. 수치해석으로 계산된 고정자의 x , y 각각의 변위와 속도를 이용하면 반력은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} R_x &= \frac{m_r m_s}{m_r + m_s} \left[c \dot{\Phi}^2 \sin \Phi + \frac{m_e}{m_r} \omega^2 \sin \omega t \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{c_s}{m_s} - \frac{c_r}{m_r} \right) \dot{x}_s - \frac{c_r}{m_r} c \dot{\Phi} \cos \Phi \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{k_s}{m_s} - \frac{k_r}{m_r} \right) x_s - \frac{k_r}{m_r} c \sin \Phi \right] \\ R_y &= \frac{m_r m_s}{m_r + m_s} \left[c \dot{\Phi}^2 \cos \Phi + \frac{m_e}{m_r} \omega^2 \cos \omega t \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{c_s}{m_s} - \frac{c_r}{m_r} \right) \dot{y}_s - \frac{c_r}{m_r} c \dot{\Phi} \sin \Phi \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{k_s}{m_s} - \frac{k_r}{m_r} \right) y_s - \frac{k_r}{m_r} c \cos \Phi \right] \end{aligned} \quad (6)$$

위에서 구한 R_x , R_y 값으로부터 Fig. 2의 수직항력 N 과 마찰력 F 는 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} N &= \left(\frac{R_x}{\cos \Phi} + \frac{R_y}{\sin \Phi} \right) / \left(\tan \Phi + \frac{1}{\tan \Phi} \right) \\ F &= \left(\frac{R_y}{\cos \Phi} - \frac{R_x}{\sin \Phi} \right) / \left(\tan \Phi + \frac{1}{\tan \Phi} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

3. 실험

3.1 실험장치 및 실험방법

본 연구에서는 Fig. 3과 같은 실험장치를 설계, 제

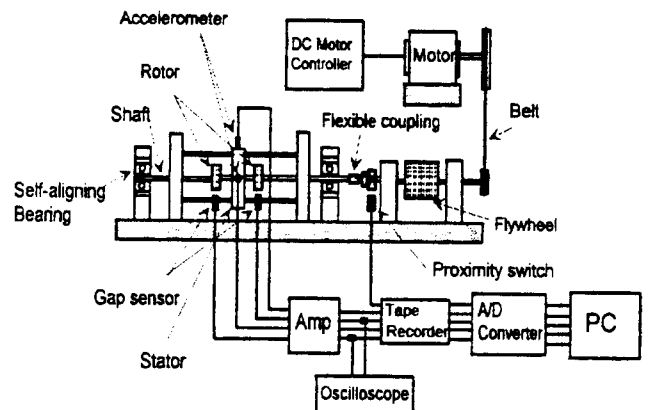


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

작하여 회전마멸현상을 실험적으로 재현하였다. 구동부는 1.5 kW의 DC모터와 모터속도제어기를 사용하여 회전자의 속도를 변화시켰다. 회전속도의 증가를 위해 직경비 3:1의 폴리를 사용하여 벨트로 구동하였으며 저속에서 일정한 속도를 얻기 위하여 부가회전 관성질량을 입력단쪽에 부착하였다. 또한 유연커플링(flexible coupling)과 자동조심형 베어링(self-aligning bearing)을 사용하여 회전축의 굽힘모멘트와 정렬불량의 영향을 최소화시켰다. 고정자는 5 mm 알루미늄 혹은 아크릴 평판 중앙에 회전자 직경보다 약간 큰 구멍을 뚫으므로 회전자와 고정자 사이에 간극을 갖도록 하였다. 또한 고정자의 강성을 변화하면서 실험을 하기 위해 사각평판으로 된 고정자의 네 귀퉁이에 피아노선을 연결하여 양단지지보(simple support beam) 형태로 지지하였다. 회전자의 변위는 x축, y축 각각의 방향에 대하여 2개의 gap sensor를 부착하여 회전자의 선회운동을 측정하였고, 고정자의 x축, y축 방향으로 가속도계(accelerometer)를 부착하여 고정자의 운동을 측정하였다. 회전자의 회전수(spin rate)는 근접스위치를 사용하여 일회전당 하나의 펄스를 발생시켰으며 각각의 신호는 테이프레코더에 저장한 후 A/D변환기를 거쳐 PC에 저장하였다.

Table 1 Parameters of experimental apparatus

Parameters	Case 1	Case 2
Shaft radius(mm)	4.0	4.0
Clearance(mm)	9.45	0.50
Rotor mass(kg)	0.944	0.944
Rotor natural frequency(Hz)	23	23
Rotor loss factor	0.06	0.06
Stator mass(kg)	0.874	0.874
Stator natural frequency(Hz)	76	76
Stator loss factor	0.12	0.12
Eccentricity(kg·m)	0.00613	0.00613

(Case 1: Aluminum stator, Case 2: Acryl stator)

Table 1은 본 실험에서 사용된 실험장치의 실제 제원이다. 마찰계수의 영향을 관찰하기 위하여 알루미늄과 아크릴 재료를 사용한 2종류의 고정자를 제작하여 각각에 대하여 실험하였다. 회전자의 운전속도를 120~1200 rpm 사이의 영역에서 천천히 가속, 감속시키면서 각각의 선회특성을 관찰하였다.

3.2 실험결과

Fig. 4는 알루미늄 고정자를 사용한 실험에서 회전자의 가속 및 감속시 각각의 선회속도를 나타낸 결과이다. 대부분 정방향 선회가 발생하며, 이 경우 회전자의 운전속도와 선회속도는 같은 값을 가짐을 알 수 있다. 역방향 선회는 정렬불량(misalignment)이 없고 회전자와 고정자간의 간극이 균일하며 오랜 시간 동안 예비운전을 시켜 접촉부위에 윤활유가 없는 건마찰조건이 되어야만 발생하였다. 역방향 선회 상태에서 가속실험의 경우 선회속도가 운전속도에 비례하는 역방향 구름은 운전속도 2.6 Hz와 5.5 Hz

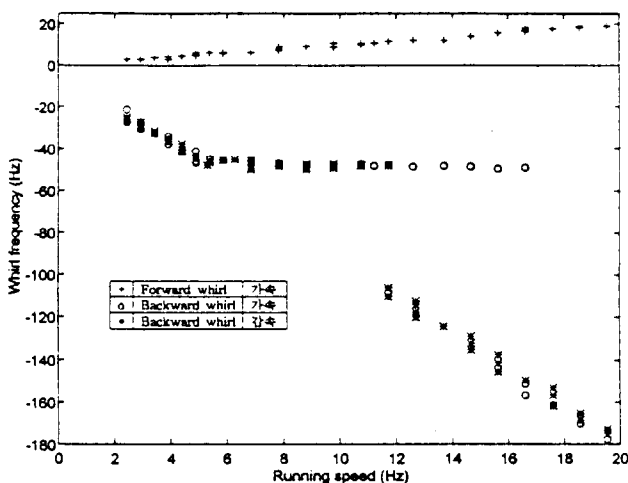


Fig. 4 Whirling frequency v. s. rotor running speed by experiment for aluminum stator

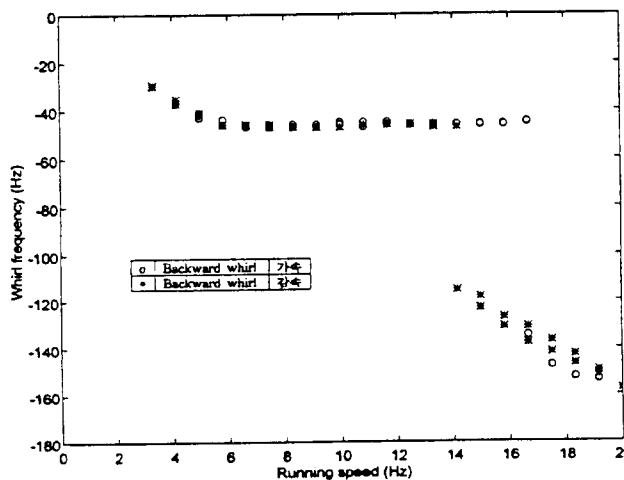


Fig. 5 Whirling frequency v. s. rotor running speed by experiment for acryl stator

사이에서 발생하며 그 이후에는 역방향 미끄럼으로 바뀌고, 계속 운전속도를 증가시키면 운전속도 16.6 Hz부근에서 다시 역방향 구름으로 바뀔 수 있었다. 감속실험에서는 운전속도가 감소함에 따라 역방향구름상태를 유지하다가 운전속도 11.7 Hz부근에서 선회양상이 역방향 미끄럼으로 바뀌어 일정한 선회속도의 역방향 미끄럼이 유지되다가 운전속도 5.5 Hz부근에서 다시 역방향 구름으로 바뀌며, 2.6 Hz부근에서 정방향 선회로 바뀔 수 있었다. 이상의 실험결과로부터 저속운전영역에서 구름과 미끄럼간의 천이점이 5.5 Hz부근임을 볼 수 있다.

Fig. 5는 아크릴 고정자를 사용한 경우의 실험결과이다. 가속시 역방향 구름은 운전속도 3 Hz에서 5.8 Hz사이에서 발생하며 이후에는 역방향미끄럼으로

로 바뀐다. 역방향 미끄럼은 16.7 Hz에서 다시 역방향 구름으로 바뀐다. 감속시에는 14 Hz에서 역방향 미끄럼으로 선회양상이 바뀌며 다시 5.8 Hz에서 역방향 구름이 발생한다.

Fig. 6에서 알루미늄 고정자를 사용한 경우와 가속, 감속실험시 각각 같은 운전속도에서 나타나는 다른 모습의 선회형태를 나타내었다. 가속시 12.7 Hz의 운전속도에서는 역방향 미끄럼(a)이, 감속시 12.7 Hz의 운전속도에서는 역방향 구름(b)이 발생한다. 운전속도 12.7 Hz에서의 정방향 선회의 궤적(c)도 도시하였다. 즉 회전마멸 현상은 동일 운전조건에서 복수개의 응답이 존재하는 비선형 동적 현상임을 알 수 있다. 또한 감속시 운전속도 11.7 Hz에서 역방향 구름으로부터 역방향 미끄럼으로 선회양상이 바뀌는 궤적을 도시하였다.

4. 수치해석

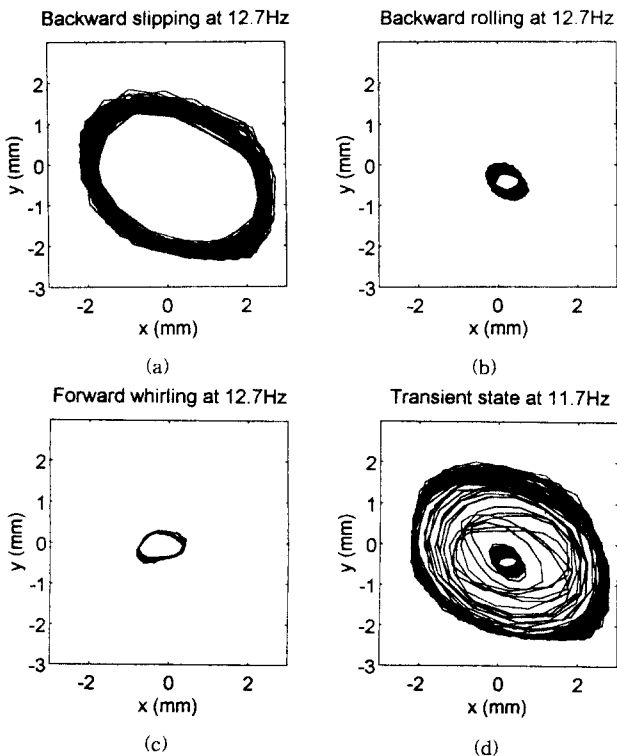
4.1 수치해석 방법

Table 1의 설계변수를 식 (5)에서 구해진 상태방정식에 대입하여 4차 Runge-Kutta법으로 수치해석하였다. 수치해석에서는 회전체의 정방향 선회, 그리고 역방향 선회가 역방향 구름의 형태가 된 경우, 가속 및 감속에 대한 정상 상태 응답을 계산하였다.

역방향 구름이 발생할 때는 회전자와 고정자 사이에 미끄럼이 전혀 없다고 가정하고 회전속도의 변화에 따른 역방향 구름상태 접촉면의 마찰계수를 계산하여, 이 마찰계수가 회전자와 고정자 사이의 정적 마찰계수값보다 커질 경우에는 역방향 미끄럼이 발생하며, 이때의 선회속도는 역방향 구름에서 역방향 미끄럼으로 바뀌는 회전속도에 대한 선회속도로 일정하게 유지된다고 가정하였다. 가속시에 역방향 미끄럼에서 역방향 구름으로 바뀌는 점은 회전자의 편심에 의하여 수직항력(N)이 음의 값으로 변하는 점으로 가정하였다. 이는 편심량에 의한 힘과 접촉력간의 위상차에 의해서 수직항력이 음의 값이 되면 미끄럼의 발생 조건을 잃는다고 보았기 때문이다. 정방향선회의 경우 회전자와 고정자가 접촉하기 전에는 반력 및 고정자에 관련된 물성치는 고려하지 않았고 접촉조건을 만족한 후에는 상태방정식에서 선회속도를 회전속도와 같다고 놓고 수치적분을 수행하였다.

4.2 마찰계수의 영향

회전자의 가속, 감속 운전시 역방향 구름에서 역



- (a) Backward slipping (12.7 Hz)
- (b) Backward rolling (12.7 Hz)
- (c) Forward whirl (12.7 Hz)
- (d) Transient state from backward rolling to backward slipping with decreasing speed (11.7 Hz)

Fig. 6 Comparison of orbits for aluminum stator

방향 미끄럼으로 선회 양상이 달라지는 회전자의 운전속도영역을 알아보기 위하여 역방향 구름으로 가정한 경우의 마찰계수선도를 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. 알루미늄 고정자와 아크릴 고정자에 대한 각각의 실험결과에서는 가속시에는 운전속도 5.5 Hz, 5.8 Hz에서, 감속시에는 11.7 Hz, 14 Hz에서 역방향구름이 역방향 미끄럼으로 바뀐 후, 저속영역에서는 역시 운전속도 5.5 Hz, 5.8 Hz에서 미끄럼으로부터 구름으로 선회양상이 바뀌게 된다. 수치해

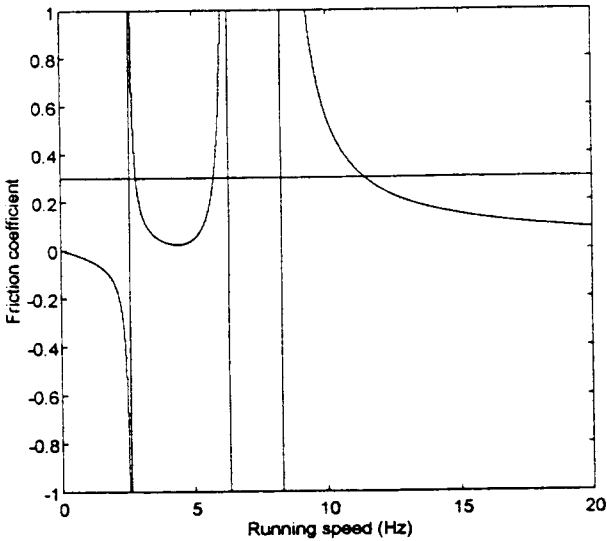


Fig. 7 Friction coefficient v. s. rotor running speed for aluminum stator

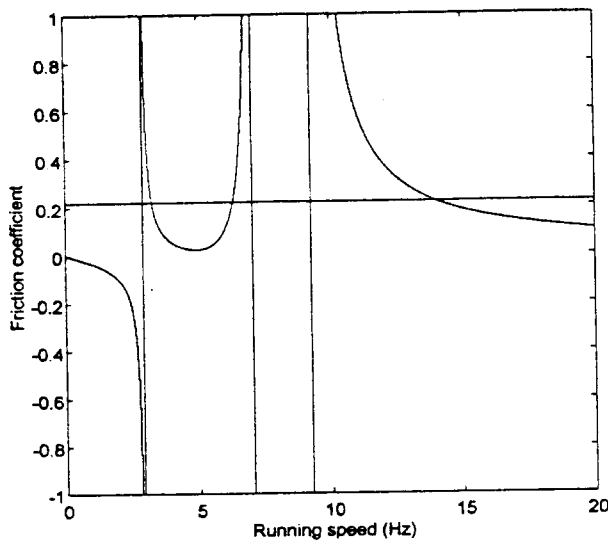


Fig. 8 Friction coefficient v. s. rotor running speed for acryl stator

석에서 계산된 마찰계수선도와 실험결과를 비교해보면 실험에서의 정마찰계수는 0.3, 0.22의 값을 갖는다고 볼 수 있다. 만약 마찰계수가 계산된 정마찰계수값인 0.3, 0.22 이상이 된다면 구름의 조건을 잃고 미끄럼이 발생한다고 볼 수 있다. 그리고 회전자와 고정자의 접촉부에 윤활유를 사용하였을 경우에는 정방향선회만 발생하는데, 이는 접촉면의 마찰계수가 작아져 회전방향으로의 구름조건을 만족할 수 없기 때문이다.

4.3 편심량의 영향

역방향 선회에서 가속운전시 역방향 미끄럼에서 역방향 구름으로의 운동양상의 변화점을 알아보기 위하여, 역방향 미끄럼상태에서 가속운전시 수직항력의 변화선도를 Fig. 7에 나타내었다. 회전속도가 증가함에 따라서 수직항력의 변화폭이 커지다가 회전속도 16.7 Hz 부근에서 음의 값을 가짐을 알 수 있다. 이 지점은 역방향 미끄럼이 부분접촉선회의 형태로 바뀌어 미끄럼을 유지하지 못하고 구름으로 선회 형태가 바뀌게 되는 운전속도임을 알 수 있다.

5. 실험 및 수치해석 결과 고찰

알루미늄 고정자를 사용한 경우 회전속도 120 rpm ~ 1200 rpm의 운전영역에서 가속, 감속시 회전자의 변위에 대한 수치해석결과와 실험결과를 Fig. 8에 도시하였으며 각각의 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 수치해석에서는 최대 정마찰계수를 0.3으로 가정하였다. 정방향 선회의 경우 운전속도 6 Hz 부근에서 접촉이 발생하며 회전자의 변위는 운전속도에 비례한다. 역방향 선회상태에서 가속시에는 회전자의 운전속도 2.6 Hz 부근에서 역방향 구름이 발생하며 5.5 Hz에서 역방향 미끄럼으로 선회양상이 바뀌고 16.7 Hz에서 다시 역방향 구름으로 전환된다. 감속시에는 역방향 구름상태에서 운전속도 11.7 Hz에서 역방향 미끄럼으로 바뀌며 다시 5.5 Hz의 운전속도에서 구름으로 바뀐 후 2.6 Hz의 운전속도에서 정방향 선회로 바뀔 수 있다.

본 연구에 사용한 실험장치의 설계변수에 대하여 Crandall⁽⁴⁾의 해석방법을 적용하면 알루미늄 고정자를 사용하였을 경우, 회전자의 가속시 역방향 구름이 발생하게 되는 운전속도는 2.58 Hz이고 역방향 미끄럼이 발생하는 지점은 6.3 Hz이며, 감속시에는 역방향 구름으로부터 역방향 미끄럼이 발생하는 지점은 10.9 Hz로 예측된다.

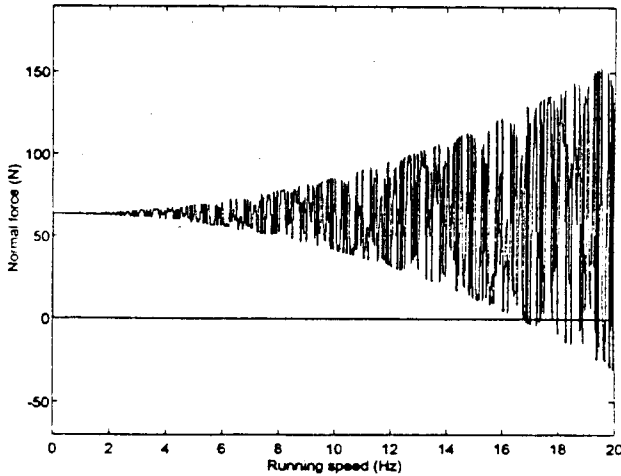


Fig. 9 Variation of normal force due to eccentricity during backward slipping for aluminum stator

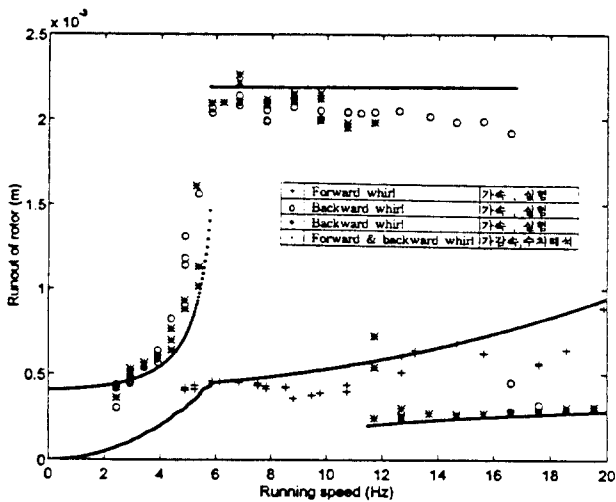


Fig. 10 Comparison of runout of experimental and numerical analysis results for aluminum stator

이는 본 연구의 실험결과와는 다소 차이를 보이고 있다. 오히려 본 연구와 같이 마찰력과 편심을 고려하여야 실험에서 밝혀진 회전마멸현상을 설명할 수 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

회전마멸현상의 물리적 특성을 알아보기 위하여 실험과 수치해석을 수행하였다. 실험결과를 바탕으로 하여 회전체의 회전마멸현상 중 역방향 구름과

역방향 미끄럼의 발생조건을 규명하기 위하여 수치해석을 하였다. 실험결과와 수치해석결과는 비교적 잘 일치하였고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 고정자와 회전자 접촉부의 정마찰계수가 가속시 역방향 구름에서 역방향 미끄럼으로 전환하는 회전속도를 결정하는 인자임을 알았다.

(2) 회전자의 편심량은 가속시 역방향 미끄럼에서 역방향 구름으로 전환하는 회전속도를 결정하는 설계변수임을 알았다.

(3) 실제 실험에서는 역방향 선회의 경우보다 정방향 선회가 자주 발생하며 건마찰 접촉같은 특정한 운전 조건하에서만 역방향 선회가 발생함을 알았다.

참고 문헌

- (1) Black, H. F., 1968, "Interaction of a Whirling Rotor with a Vibrating Stator Across a Clearance Annulus," J. Mech. Engr. Sci, 10, pp. 1~12.
- (2) Erich, F. F. and O'Connor, J. J., 1966, "Stator Whirl with Rotor in Bearing Clearance," ASME Paper 66-WA/MD-8.
- (3) Choi, Y.-S. and Noah, S. T., 1987, "Nonlinear Steady State Response of a Rotor-Support System," Journal of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design, 169(3), pp. 255~261.
- (4) Crandall, S. H., Ligener, A., and Zhang, W., 1990, "Backward Whirl Due to Rotor-Stator Contact," Proceedings of 12th International Conference on Nonlinear Oscillations, Cracow, September 27.
- (5) Choi, Y.-S., 1994, "Dynamics of Rotor Rub in Annular Clearance with Experimental Evaluation," KSME Journal, Vol. 8, No. 4, pp. 404~413.
- (6) Glitzenstein, K. L., 1988, "Investigation of Unstable Reverse Whirl," Bachelor's Thesis, Dept. of Mechanical Eng., MIT.
- (7) Shlomi, R., 1994, "Experimental Investigation of the Dynamic Behavior of a Rotor While in Contact with a Stator," MIT.
- (8) 정호권, 1994, "회전체 역학의 Rubbing현상에 관한 연구," 성균관대학교 석사학위 논문.
- (9) Childs, D., 1993, "Turbomachinery Rotor-dynamics," Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 61~83.