

메커니컬 씰에서 발생하는 스틱슬립 현상 연구 A Study of Stick-slip Phenomenon in a Mechanical Seal

김보형* · 정진태†
B Kim and J Chung

1. 서 론

메커니컬 씰은 면 접촉식 밀봉장치로 수직으로 된 두 개의 회전부와 고정부의 섭동면으로 구성되어있으며 회전부가 회전축과 함께 회전하여 유체의 압력이나 스프링의 장력에 의해 밀봉을 지속시키는 장치이다. 메커니컬 씰은 주로 펌프에 사용되는데 펌프가 회전할 시 특정한 조건에서 주기적으로 킁킁거리는 스컬소음이 발생한다. 서로 접촉하여 회전하는 두 섭동면 사이에서 발생하는 마찰력에 의해 회전축에서 자러진동이 발생하게 된다. 이 때 발생한 자러진동으로부터 저속 회전과 열간 조건에서 두 섭동면 사이에 비틀림 거동에 의한 스틱슬립(Stick-slip)현상이 발생하여 스컬소음이 발생하게 된다.

스티크슬립 현상은 마찰력과 속도의 비선형성에 의해 나타나게 된다. 스틱슬립 운동은 마찰이 있는 접촉 면에서 자러진동에 의해 발생하게 되며, 회전체의 상대속도가 증가함에 감소하는 마찰력이 작용할 때 발생한다. 이러한 자러진동이 발생하는 시스템에 대해 실험적으로 그 원인을 규명하는 것은 매우 어려우므로 수학적 모델을 수립하여 스틱슬립 현상을 이해하는 것이 더 효과적이다.

90 년도 이후부터 자러진동에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 자동차용 디스크 브레이크 등에 대해 발생하는 자러진동 및 스컬소음에 대한 연구는 리뷰논문집도 꾸준히 출판되는 등 활발히 이루어지고 있다. 디스크 브레이크에 사용된 연구 내용을 메커니컬 씰에서 발생하는 자러진동과

연관지어 스틱슬립 현상에 대한 이해를 높여 그 메커니즘을 이해할 수 있다.

본 연구에서는 연속체인 샤프트에 부착된 회전부와 고정되어있는 메커니컬 씰의 고정부 사이에서 발생하는 스틱슬립 현상에 대한 분석하기 위하여 Hamilton 원리에 의해 운동방정식을 유도할 것이다. 또한 비선형 방정식에 적합한 시간 적분법을 이용하여 동적 거동을 살펴으로써 스틱슬립 현상을 확인하고 스틱슬립 현상이 발생하지 않는 이상적인 회전속도와 설계변수에 대해 알아볼 것이다.

2. 메커니컬 씰이 존재하는 펌프의 운동방정식

2.1 펌프의 모델수립

메커니컬 씰이 존재하는 펌프는 Fig.1과 같다. 샤프트는 연속체로 모델링 하였으며 양단에 폴리우레탄 임펠러가 존재한다. 회전부인 메이팅 링과 고정부인 씰 링은 서로 접촉하여 마찰하고 있으며 씰 링은 고정되어 움직이지 않는다고 가정하였다. 또한 메이팅 링은 샤프트에 부착되어 있으며 질량은 없다고 가정한다. 메이팅 링과 씰 링 사이에 수직항력 N 이 작용하며 이는 변하지 않는다. 샤프트는 Ω 의 속도로 일정하게 회전하고 있으며 메커니컬 씰은

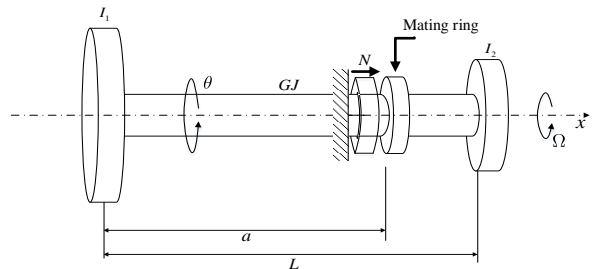


Fig. 1 Simplified model of pump with mechanical seal

† 교신저자: 정진태, 한양대학교 기계공학과
E-mail : jchung@hanyang.ac.kr
Tel : (031)400-5287, Fax : (031)406-6964
* 한양대학교 일반대학원 기계공학과

폴리의 위치로부터 a 만큼 떨어져 있는 것으로 정의하였다.

2.2 운동방정식 유도

양단에 폴리와 임펠러가 존재하고 있으며 a 위치에 마찰면이 존재하는 샤프트에 대한 비틀림 운동 방정식과 경계조건은 Hamilton 원리에 의해 다음과 같이 구해진다.

$$\rho J \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} - GJ \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = f u(x-a) \quad (1)$$

$$GJ \frac{\partial \theta}{\partial x} = I_1 \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad \text{at } x=0 \quad (2)$$

$$GJ \frac{\partial \theta}{\partial x} = -I_2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad \text{at } x=L$$

여기서 I_1 은 폴리의 질량관성모멘트, I_2 는 임펠러의 질량관성모멘트, f 는 마찰력을 나타낸다. 슬립이 일어나는 상태에서의 마찰력 f 와 마찰계수 μ 는 다음과 같다.

$$f = -\text{sgn}(v_r) \mu N r \quad (3)$$

$$\mu = \mu_d + (\mu_s - \mu_d) e^{-\alpha v_r} \quad (4)$$

여기서 μ_d 는 동마찰계수, μ_s 는 정마찰계수, α 는 마찰력의 기울기 조절 계수, N 은 수직항력, r 은 쉘의 직경을 의미한다. 여기서 $v_r = \Omega + \partial \theta / \partial t$ 로 나타낸다.

스틱 상태에서의 마찰력 f_s 는 $|f_s| \leq \mu_s N r$ 을 만족시켜야 하므로 스틱과 슬립 상태의 마찰력은 다음과 같다.

$$f = \begin{cases} \min(|f_s|, \mu_s N r) \cdot \text{sgn}(f_s) & \text{for } v_r = 0 \\ \mu(v_r) N r \cdot \text{sgn}(v_r) & \text{for } v_r \neq 0 \end{cases} \quad (5)$$

유도된 운동방정식을 바탕으로 스틱 상태와 슬립 상태의 방정식을 matrix-vector 방정식으로 다음과

같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{T}} + \mathbf{K}^s \mathbf{T} = \mathbf{0} \quad (6)$$

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{T}} + \mathbf{K}^d \mathbf{T} = \mathbf{F}(\dot{\mathbf{T}}) \quad (7)$$

여기서 식 (6)은 스틱 상태에서의 선형 방정식이고, 식 (7)은 슬립 상태에서의 비선형 방정식이다. Matrix-vector 방정식을 비선형 Newmark 알고리즘을 사용하여 시간적분을 수행하여 응답을 확인함으로써 스틱슬립 현상 발생의 유무를 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 스틱 상태와 슬립 상태에서 다르게 구현되는 마찰력을 적용시킨 방정식을 matrix-vector 방정식으로 표현하고 시간적분을 통해 스틱슬립 현상 발생 유무를 확인하고자 하였다. 차후 영향도 분석을 통해 스틱슬립 현상을 회피할 수 있는 설계에 대한 방안을 논의할 것이다.

참고문헌

- (1) R. I. Leine, D. H. Van Campen and A. De Kraker, 1998, "Stick-Slip Vibrations Induced by Alternate Friction Models", *Nonlinear Dynamics*, Vol. 16, pp. 41-54.
- (2) B Kim, W Jung and J. Chung, 2013, "Parametric Study for the Squeal Noise Reduction of an Automobile Water Pump", *KSNVE*, Vol. 23, pp. 624-630.
- (3) Singiresu S. Rao, 2007 "Vibration of Continuous Systems", John Wiley & Sons, Inc. pp. 271-294.

후 기

본 연구는 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 2011-0017408)