Transactions of the KSNVE, 23(12) : 1090~1095, 2013
http://dx.doi.org/10.5050/KSNVE.2013.23.12.1090

한국소음진동공학회논문집 제23권 제12호, pp. 1090~1095, 2013
ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

FEM을 이용한 세라믹-세라믹 고관절 마찰소음의 불안정성 해석에 관한 연구

Squeak Noise of Ceramic-on-ceramic Hip Joint using FEM

남 재 현*·강 재 영†
Jaehyun Nam and Jaeyoung Kang

(Received October 22, 2013 ; Revised November 28, 2013 ; Accepted December 2, 2013)

Key Words : Friction Noise(마찰 소음), Hip Joint(고관절), Hip Squeak(고관절 소음)

ABSTRACT

This paper describes the FEM analysis for squeak problem of the ceramic-on-ceramic hip joint system. The onset of hip squeak is estimated by the positive real parts of the eigenvalues in the hip joint system. From the complex eigenvalue analysis, the unstable frequencies and the corresponding mode shapes are determined at the certain severe friction coefficients. It is found that some bending and torsion modes of the femoral stem can be unstable due to the mode-coupling mechanism. It also shows that the magnitude of the friction coefficient plays a key role on the occurrence of hip squeak.

1. 서 론

인공고관절 전치환술은 1960년대 초부터 지속적으로 쓰이는 치료방법이며, 고관절 질환에 대해 매우 일반적이고 가장 효과적인 방법으로 알려져 있다. 인공고관절에 사용되는 재료는 금속성 생체재료와 비금속성 생체 재료로 나뉘며 현재까지 지속적인 발전을 거듭하고 있다. 최근 사용되는 세라믹-세라믹 관절 구조에서 재질의 향상에도 불구하고 많은 문제점이 발생하고 있다. 이중 관절면의 파괴 및 관절 내 스퀵 소음이 주요한 문제점으로 부각되고 있다. 기계의 신뢰성을 결정짓는 주요한 두 요소 중 관절면 파손에 대한 연구는 ISO 7206-10과 같이 시험에 대한 과정이 표준화 되어 있다. 또한 Higuchi 등(1)은 세라믹의 높은 강도와 매우 작은 연성으로 인한 무균성 해리 등에 대한 문제와 세라믹 헤드의 균열 및 파손에 대해 기술하였으며, Han 외(2)는 3차원 유한요소 해석을 통해 세라믹 헤드의 안정성 평가 및 응력 분포에 대해 해석적인 연구를 진행 하였으며, ISO 시험법을 통해 고관절용 인공관절에 대한 시스템 안정성 평가를 진행하였다.

그러나 인공관절 내 발생하는 소음에 관한 연구는 상대적으로 다소 미흡한 편이다. Kim 외(3)는 그의 연구에서 임상 시험의 결과와 참고문헌에서 관절 내 마찰 소음에 대한 전반적인 결과를 제시하였으며, 환자들의 스트레스에 매우 민감한 요소로 판단하였다. 그러나 임상시험을 통한 시험 결과를 제시하기 위해서는 매우 오랜 시간과 비용적 측면에서 효율성이 상대적으로 매우 낮다.

† Corresponding Author ; Member, Division of Automotive & Mechanical Engineering, Kongju National University
E-mail : jkang@kongju.ac.kr
Tel : +82-41-521-9263
* Division of Automotive & Mechanical Engineering, Kongju National University

‡ Recommended by Editor SungSoo Na

따라서 Fan 등[4]과 Weiss 외[5]는 ABAQUS를 통한 복소수 고유치 해석을 수행하여 모드 연성에 의한 불안정 주파수를 확인 하였으며, 다양한 설계 변수를 고려하여 해석 결과를 제시하였다. 또한 수치 해석적인 접근 방법으로 인공고관절의 불안정 모드를 예측할 수 있음을 보여주었다.

Sariali 외[6]는 시험 장치를 통하여 간이 인공관절 시스템을 구축하고 불안정 주파수를 예측하였으며 Currier 등[7]은 또한 세라믹-세라믹 관절 모델을 이용해 수학적인 연산과 시험을 통해 인공관절소음 메커니즘에 대해 분석하였다.

마찰 소음 메커니즘의 경우 매우 비선형적인 특징을 갖기 때문에 시험 결과와 FEM 결과가 항상 일치 하지는 않는다. 그러나 대표적인 모드연성 메커니즘의 경우 상대적으로 상관관계 규명이 다소 잘 나타나는 것으로 알려져 있다. Meziane 외[8]는 빔-빔 모델에 대한 수치해석적 방법과 시험 방법과의 상호 관계를 규명하여 모드연성에 의한 불안정 모드에 대해 연구하였으며, Ghazaly 외[9]는 브레이크 스퀼 해석에서 FEM 해석과 모달 테스트를 통하여 모드연성에 의한 불안정 주파수 대역의 상호관계를 규명하였다.

따라서 이 논문은 마찰 소음의 대표적인 메커니즘인 모드 연성에 의한 불안정 모드를 FEM 해석을 통해 이 시스템에서 확인 하고자 하였다. 기존의 FEM 해석의 경우 실제 인공고관절이 작동하는 시스템과는 조금 상이한 조건으로 접근하였으나 구속조건을 수정하여 실제 작용하는 시스템의 상태를 고려하여 해석을 수행하였다.

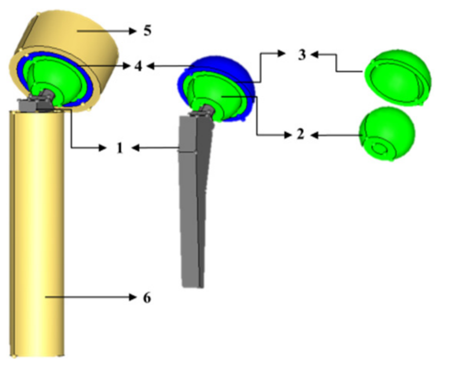
2. 본 론

2.1 유한요소 해석 모델

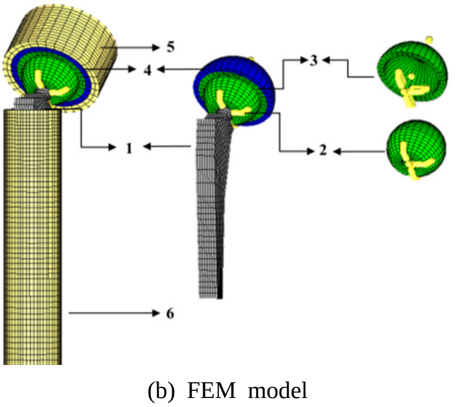
Fig. 1(a)와 같이 ISO 7206-1 및 참고문헌[10]에 따라 인공고관절 모델을 구현하였다. Fig. 1에서의 인공고관절 모델은 다리 뼈에 삽입되는 stem ‘1’과 상대운동의 결과 마찰을 일으키는 head ‘2’와 liner ‘3’ 및 대퇴부 뼈에 삽입되는 금속 shell ‘4’로 이루어져 있다. 그 외 part ‘5’와 ‘6’은 인체의 뼈를 모사화 한 것이다. 위와 같이 모델링 된 인공고관절 시스템을 상용 유한요소 프로그램을 Fig. 1(b)와 같이 2920개의 Linear wedge요소, 36636개의 Linear hexahedron과 44621개의 절점으로 유한요소 모델로 정의 하였다.

금속 shell ‘4’과 stem ‘1’은 티타늄 합금인 Ti6A14V로 이루어져 있다. 마찰이 발생하는 head ‘2’와 liner ‘3’은 최근 들어 많이 사용되고 있는 ceramics로 가정 하였으며, 인체의 뼈 ‘5’와 ‘6’ 및 각 부품의 물성치[4]는 Table 1과 같다.

구속조건은 Fig. 2와 같이 대퇴부의 뼈 ‘5’는 각 축 방향으로 모두 변위 및 회전이 ‘0’이며, 금속 shell ‘4’는 대퇴부 뼈 ‘5’에 붙어 있는 것으로 가정 하였다. 다리 뼈 ‘6’과 스템 ‘1’ 역시 붙어 있다고 가정 하였으며, 1500 N의 하중이 가해지고 있다. 대퇴부 뼈 ‘5’와 Shell ‘4’, liner ‘3’은 인체의 다리가 움직이는 방향인 글로벌 좌표계의 Y방향으로 저속(1rad/s)으로 pseudo rotation[11]하고 있음을 정의하였다. Stem ‘1’과 세라믹 head ‘2’ 가 결합 되어 있으므로 head ‘2’와 liner ‘3’의 마찰 유도가 가능하다. 이때, 세라믹-세라믹의 마찰계수는 환경 및 시험



(a) 3D model



(b) FEM model

Fig. 1 Ceramic on ceramic hip joint

조건에 따라 매우 다양하다[4]. 따라서 이 논문에서는 마찰계수를 임의의 상수인 0.3과 0.4로 정의하여 해석을 수행하였다.

마찰접촉을 하고 있는 시스템에 대해서 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있고, 다음과 같이 마찰력에 대한 표현이 가능하다.

$$f = \mu N \qquad (1)$$

Table 1 Material properties

Materials	Density[kg/m^3]	Young's modulus[GPa]	Poisson ratio
Ti6Al4V	4500	1024	0.3
Ceramic	4370	3584	0.23
Bone	1932	4736	0.3

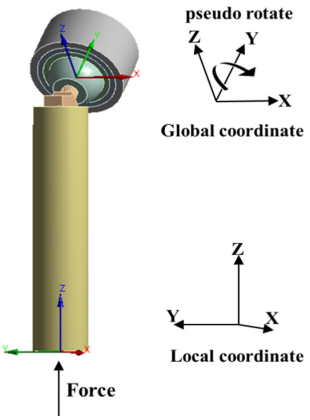


Fig. 2 Coordinate systems in hip joint model

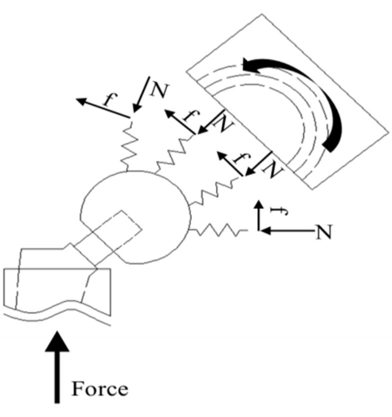


Fig. 3 Contact model

여기서 f는 마찰력, μ는 마찰계수이고, N은 수직항력으로 다음으로부터 계산된다.

$$N = k_c u_n + p_o \qquad (2)$$

이때, k_c는 접촉강성, u_n은 수직방향의 변위, p_o는 축력에 따른 초기 압력이다. 이에 대한 마찰 진동에 대한 방정식은 다음과 같이 표현 된다.

$$[M]\ddot{\mathbf{x}} + [K]\mathbf{x} = 0 \qquad (3)$$

여기서 $[M]$은 질량 행렬이고, $[K]$는 시스템 구조강성, 접촉강성 및 마찰강성으로 이루어진 비대칭 강성행렬이다. 이때 모달 좌표계를 이용한 좌표변환은 다음과 같다.

$$\mathbf{x} = [\phi]\mathbf{q} \qquad (4)$$

$[\phi]$는 정규화된 고유치 벡터이며, $\mathbf{q}$는 모달 좌표 벡터이다. 따라서 마찰 접촉을 하고 있는 모델에 대해 다음과 모달 좌표계 방정식으로 표현 가능하다.

$$\ddot{\mathbf{q}} + \left(\left[\omega^2\right] + \left[K_{asym}\right]\right)\mathbf{q} = \mathbf{0} \qquad (5)$$

여기서 $[\omega^2]$는 단품 고유주파수 행렬, $[K_{asym}]$는 접촉에 의한 비대칭 강성행렬이다. 상기 운동방정식에 대한 고유치 해석을 수행하면 마찰에 대한 불안정성을 해석할 수 있다. 즉, 실수부(real part)가 양수인 불안정 모드를 확인하여 불안정 모드형상을 유추하고자 한다. 따라서, 해석 절차를 요약하면 다음과 같다.

(1) 비선형 구조 해석을 통하여 인공고관절 시스템에 하중을 부과 하였다.

(2) Stem과 다리 뼈에 pseudo-rotation을 정의하여 세라믹 헤드와 세라믹 볼의 마찰을 유도하였다.

(3) 모달해석 후 QR Damped solver이용하여 복소수 고유치 해석을 수행하였다.

위의 해석 절차를 통하여 마찰계수가 상수일 경우 발생하는 모드연성에 의한 불안정 모드를 확인하였다.

2.2 해석결과

마찰계수가 0.3일 경우, 상기 모델의 복소수 고유

치 해석의 결과는 Fig. 4와 같다. 16 kHz까지의 복소수 해석의 결과 실수부는 ‘A’, ‘B’, ‘C’의 주파수 대역에서 불안정 모드가 발생하고 이 모드들에 의해 마찰 소음이 발생할 수 있음을 확인할 수 있다.

‘A’ 모드의 경우 마찰 소음에 기인할 수 있는 모드이긴 하지만 다른 모드들에 실수부가 매우 작아 그 영향도가 상대적으로 매우 낮음을 확인할 수 있다. ‘B’ 모드는 실수부가 매우 크게 나타나는 주요한 모드이며, 6242 Hz에서 모드 연성이 일어남을 확인하였다. 모드형상은 Fig. 5(a)와 같이 토션 모드가 지배적인 모드임을 확인하였다. ‘C’ 모드는 14, 15번째 모드이며, 7306 Hz에서 모드 연성이 발생하는 것을 확인하였다. 평형상태의 모드형상은 Fig. 5(b)와 같으며, 인공고관절 시스템의 굽힘 모드임을 확인하였다.

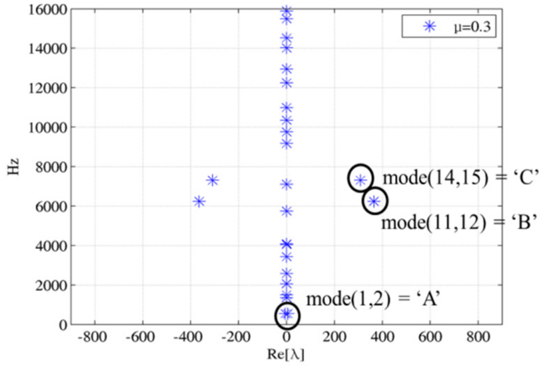
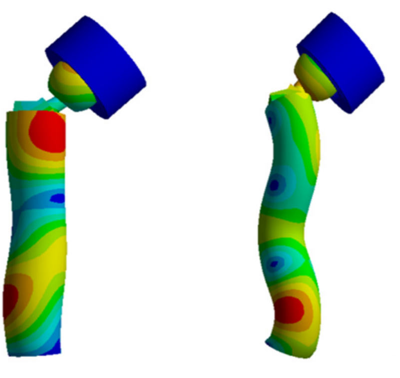


Fig. 4 Complex eigenvalue analysis of friction co-efficient 0.3



(a) ‘B’ mode (b) ‘C’ mode

Fig. 5 Unstable mode shape of Fig. 4. (a) 11,12 mode, (b) 14,15 mode

마찰계수가 0.4로 위와 동일한 조건으로 해석한 결과 Fig. 6과 같다. ‘B’ 모드의 경우 마찰계수가 0.4로 증가하면서 실수부가 사라진 것을 확인할 수 있으며, ‘D’, ‘E’, ‘F’, ‘G’와 같이 새로운 불안정 모드가 발생하였다. ‘C’ 모드의 경우 마찰계수가 0.3

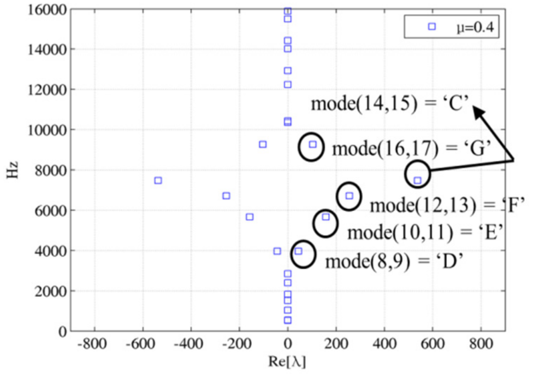
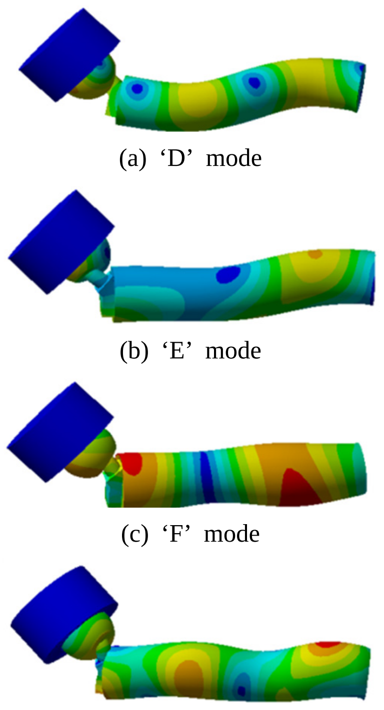


Fig. 6 Complex eigenvalue analysis of friction co-efficient 0.4



(a) ‘D’ mode

(b) ‘E’ mode

(c) ‘F’ mode

(d) ‘G’ mode

Fig. 7 Unstable mode shape of Fig. 6. (a) 8,9 mode, (b) 10,11 mode, (c) 12,13 mode, (d) 16,17 mode

일 때 보다 상대적으로 높은 주파수인 7477 Hz에서 모드연성이 발생하였으며, 실수부의 크기는 상대적으로 증가 하지만 모드 형상은 유사하였다.

'D' 모드의 경우 상대적으로 실수부의 크기가 작은 모드이며 3968 Hz에서 모드연성이 발생함을 확인 할 수 있다. 평형상태의 모드 형상을 확인 해 본 결과 Fig. 7(a)와 같이 2차 굽힘 모드임을 확인 하였다. 'E' 모드는 5673 Hz에서 모드 연성이 발생하며, Fig.7 (b)와 같이 토션 모드와 굽힘 모드가 함께 일어나는 모드임을 확인할 수 있었다. 'F' 모드는 6720 Hz에서 모드 연성이 발생하며 Fig. 7(c)와 같이 토션 모드가 지배적인 모드임을 확인 할 수 있었다. 'G' 모드의 경우 9267 Hz에서 모드연성이 발생하며, 토션 모드와 굽힘 모드가 함께 발생하는 모드임을 확인 하였다(Fig. 7(d)).

3. 결 론

이 논문은 인공고관절 세라믹-세라믹 접촉 모델을 참고문헌 및 표준규격을 참조하여 간이 시스템을 모델링 하였다. 실제 모델의 운동 방향과 유사한 조건으로 상용 소프트웨어를 이용하여 복소수 고유치 해석을 수행하였으며, FEM 모델을 이용해 인공 고관절 시스템의 불안정 주파수 대역 및 모드를 유추 할 수 있음을 확인하였다. 결론은 다음과 같다.

(1) 상기 모델의 경우 마찰계수가 0.3일 때, 7306 Hz 및 6242 Hz에서 모드 연성이 발생함을 확인 할 수 있었다.

(2) 마찰계수가 0.4일 때, 'C' 모드(7477 Hz)와 3968 Hz, 5673 Hz, 6720 Hz, 9267 Hz에서 모드 연성이 발생함을 확인 할 수 있었다.

(3) 시스템의 불안정 모드형상은 스템과 다리 뼈의 굽힘 모드와 토션 모드에 의해 발생함을 확인 하였다.

(4) 인공고관절 FEM 해석은 마찰계수에 매우 민감하며, 브레이크 스퀄 해석[3]과는 다르게 마찰계수의 증가와 실수부의 증가가 선형적이지 않음을 확인하였다.

(5) 인공고관절 FEM 해석의 결과 모델의 정확성 및 주요인자를 유사하게 모델링 한다면 인공관절 소음주파수 대역 및 모드를 유사하게 예측 할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 설계 변수 해석 및 다양한 인자들은 고려하여 인공관절 소음의 복합적인 메커니즘에 대해 체계적인 접근이 가능하다.

References

(1) Higuchi, F., Shiba, N., Inoue, A. and Wakebe, I., 1995, Fracture of an Alumina Ceramic Head in Total Hip Arthroplasty, Journal of Arthoplasty, Vol. 10, No. 6, pp. 854~854.

(2) Han, S., Chu, J., Song, K., Park, S., Choi, J., Kim, J., Suh, J., Choi, K. and Youn, I., 2012, Prediction of Stress Distribution in the Ceramic Femoral Head After Total Hip Replacement, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 29, No. 29, pp. 680~685.

(3) Kim, D., Ki, S., Park, K., Kim, Y. and Chung, Y., 2008, Total Hip Arthroplasty Using a Ceramic on Ceramic Bearing Surfaces, Journal of Korean Orthopaedic Association, Vol. 43, No. 4, pp. 495~500.

(4) Fan, N. and Chen, G., 2012, Numerical Study of Squeaking Suppresses for Ceramic-on-ceramic Hip Endoprosthesis, Tribology International, Vol. 48, pp. 172~181.

(5) Weiss, C., Gdaniec, P., Hoffman, N., Hothan, A., Huber, G. and Morlock, M., 2010, Squeak in Hip Endoprosthesis Systems: An Experimentalstudy and a Numerical Technique to Analyze Design Variants, Medical Engineering & Physics, Vol. 32, No. 6, pp. 604~609.

(6) Sariali, E., Stewart, T., Jin, Z. and Fisher, J., 2009, In vitro Investigation of Friction under Edge Loading Conditions for Ceramic-on-ceramic total Hip Prosthesis, Journal of Orthopaedic Research, Vol. 28, No. 8, pp. 979~985.

(7) Currier, J., Anderson, D. and Van Citters, D., 2010, A Proposed Mechanism for Squeaking of Ceramic-on-ceramic Hips, Wear, Vol. 28, No. 8, pp. 979~ 985.

(8) Meziane, A., Baillet, L. and Laulagnet, B., 2010, Experimental and Numerical Investigation of Friction-induced Vibration of a Beam-on-beam in Contact with Friction, Applied Acoustics, Vol. 71, No. 9, pp. 843~853.

(9) Ghazaly, N., Mohammed, S. and Abd-El-Tawwab, A., 2012, Understanding Mode-coupling Mechanism of Brake Squeal Using Finite Element Analysis, International Journal of Engineering Research and Application, Vol. 2, No. 1, pp. 241~250.

(10) Pyburn, E. and Goswami, T., 2003, Finite Element Analysis of Femoral Components Paper III Hip Joints, Materials & Design, Vol. 25, No. 8, pp. 705~713.

(11) Kang, J., 2012, Finite Element Modeling for the Investigation of In-plane Modes and Damping Shims in Disc Squeal, Journal of Sound and Vibration, Vol. 331, No. 9, pp. 2190~2202.

(12) Kang, J., 2009, Squeal Analysis of Gyroscopic Disc Brake System based on Finite Element Method, International Journal of Mechanical Science, Vol. 51, No. 4, pp. 284~294.

(13) Nam, J. and Kang, J., 2012, Unstable Brake Pad Mode due to Friction-velocity Slope, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 22, No. 12, pp. 1206~1212.

Jaehyun Nam received the B.S. degree in the Department of Mecha- nical and Automotive Engineering, Kongju National University in 2012. He is currently a graduate student of Kongju National Uni- versity and one of the members in Dynamic Stability Lab. His research interest is the simulation and experiment of disc brake squeal.

Jaeyoung Kang is an Associate Professor in the Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University. He received his Ph.D. degree in Mechanical Engineering from Purdue University in 2008. His research interests include friction noise, structural vibration and nonlinear dynamics.