

## 자기유변탄성체를 이용한 스켈 소음 저감 타당성 연구

송혁근<sup>1</sup> · 이철희<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>인하대학교 대학원 건설기계공학과 석사과정생

<sup>2</sup>인하대학교 기계공학과 교수

### Feasibility Study of Squeal Noise Reduction using Magneto-rheological Elastomer

HyukGeun Song<sup>1</sup> and Chul-Hee Lee<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Master's Student, Graduate School, Dept. of Construction machinery Engineering, Inha University

<sup>2</sup>Professor, Dept. of Mechanical Engineering, Inha University

(Received September 8, 2020; Revised October 21, 2020; Accepted October 26, 2020)

**Abstract** – This study investigates the possibility of reducing squeal noise generated at the contact point between an elastomer and glass by using the properties of a magneto-rheological elastomer (MRE) whose stiffness changes with the application of a magnetic field. Previously, squeal noise was mainly observed in the unstable section caused by the weakening of friction due to velocity. Previous studies have shown that squeal noise decreases as the stiffness increases. Accordingly, this study is conducted to control the unstable area of the friction curve and to reduce the noise by inducing the stiffness change of the MRE by applying a magnetic field. The friction, vibration, and noise characteristics are measured using a reciprocating friction tester. The frequency ranges of vibration and noise measured with the accelerometer and sound sensor show similar results. When a magnetic field is applied to the MRE, there is significantly lower noise compared with the case without the application of the magnetic field. The average coefficient of friction decreases with the application of the magnetic field. The maximum coefficient of friction increases rapidly at the turning point and decreases when the magnetic field is applied. This shows that the mechanical properties of the MRE change due to the magnetic field, and the noise and friction coefficient also decrease.



© Korean Tribology Society 2020. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License(CC BY, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction of the work in any medium, provided the original authors and source are properly cited.

**Keywords** – friction(마찰), magnetic field(자기장), magneto-rheological elastomer(자기유변탄성체), squeal noise(스켈 소음), vibration(진동)

## 1. 서 론

고무와 유리 사이에서 발생하는 스켈(Squeal) 소음은 스틱-슬립(Stick-slip) 또는 시스템 불안정성에 의해 발생한다. 이러한 현상으로 인한 소음은 기계 시스템에서[1] 큰 문제이며 특히 와이퍼 블레이드 시스템에서 발생하는 스켈 소음은 운전 간에 운전자의 만족감을 낮추는 원인이 된다.

\*Corresponding author: Chul-Hee Lee

Tel: +82-32-860-7311, Fax: +82-70-8249-7312

E-mail: [chulhee@inha.ac.kr](mailto:chulhee@inha.ac.kr)

<https://orcid.org/0000-0003-1095-3713>

<https://orcid.org/0000-0003-1650-6260> (HyukGeun Song)

따라서 와이퍼 시스템과 같이 고무와 유리가 접촉할 때 발생하는 스켈소음에 대한 많은 연구가 진행 중이다 [2-4]. Dongki Min 등은 유리의 곡률 및 단차로 인해 와이퍼 블레이드와 접촉할 때 발생하는 소음에 대해 연구하였으며 접촉점이 충분히 윤활이 되지 않는 조건에서 물보다 워셔액을 사용하였을 때 발생하는 소음이 커지는 것을 확인하였다 [5]. F. Dalzin 등은 현미경을 이용하여 접촉 면적을 속도에 따라 비교하였으며 접촉 면적이 작을수록 마찰계수가 낮아짐을 확인 하였다 [6]. Tom Reddyhoff 등은 방출되는 소음은 질량의 함수이며 물의 표면에너지에 따라 소음이 방출되는 구간이 다름을 확인하였다 [7].

와이퍼 블레이드 시스템은 스프링-댐퍼 모델이며 스프링상수(강성)에 따라 진동특성이 다르게 나타난다. 기존 연구에 따르면 스켈소음은 강성과 관련이 있으며 강성이 높아질수록 스켈소음이 감소한다는 연구결과가 있다 [8]. 이에 따라 자기장의 세기에 따라 강성, 경도, 마찰계수 등의 기계적 물성치가 변화하는 자기유변탄성체 (Magnetorheological Elastomer, MRE)를 와이퍼 블레이드 시스템에 적용하면 진동 및 소음제어가 가능할 것으로 예상된다 [9-11]. 따라서 본 연구에서는 자기유변탄성체를 실제 와이퍼 시스템에 적용하기 전에 간단한 실험 모델을 설계하여 스켈노이즈 제어가 가능한지 타당성 연구를 수행하였다.

## 2. 연구방법 및 내용

Fig. 1은 스켈소음 및 진동 성분을 측정하기 위한 실험 장치를 나타낸다. 시편에 상대재를 좌우 가진 운동 (Oscillating motion)을 시켜 마찰력을 측정하는 장치인 왕복동시험기(RB 108-RF, R&B)를 이용하여 마찰계수를 측정한다. 소음은 사운드센서(Type2236, B&K)를 통해 측정되어 지며 샘플과 유리판 사이에서 발생하는 소음을

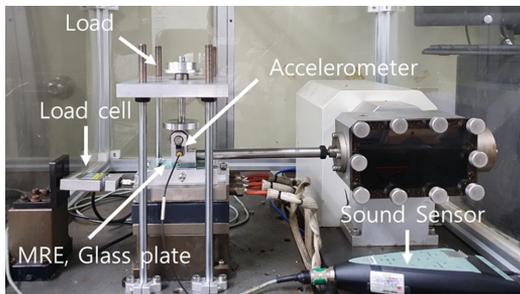


Fig. 1. Experimental setup for measuring the squeal noise.

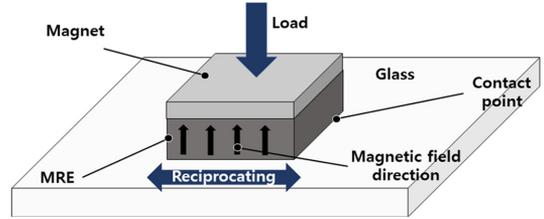


Fig. 2. Principle of Experiment.

Table 1. Experimental Conditions

Parameters	Values
Sliding distance(mm)	10
Dimension of MRE - width × depth × height(mm)	5 × 5 × 3
Dimension of Glass - width × depth × height(mm)	70 × 50 × 10
Magnetic field(mT)	120
Load(N)	1.5
Velocity(mm/s)	40
Temperature(°C)	24

측정할 수 있도록 충분히 가까이 위치시켰다. 자기유변탄성체의 진동을 측정하기 위해 가속도 센서(Type4501, B&K)를 사용하였으며 NI와 랩뷰(Labview) 연동을 통해 데이터를 실시간으로 획득하였다.

자기유변탄성체의 주성분은 실리콘으로 이루어져 있으며 내부에 자성입자(CI particle)가 포함 되어있다. 자성입자의 자기장 방향으로 정렬되어 지는 특성 때문에 자기유변탄성체는 자기장의 세기에 따라 강성이 변화하게 된다. 영구자석은 Fig. 2와 같이 자기유변탄성체에 자기력을 인가 하기 위해 수직으로 위치시켰다. 또한 실험이 자기장의 영향으로부터 받는 영향을 최소화하기 위해 샘플 홀더를 알루미늄으로 제작하였다. 자기유변탄성체 샘플은 무게 추에 의해 하중을 받게 된다. 유리판 시편의 크기는 50 mm × 70 mm이며 유리판과 접해지는 자기유변탄성체 샘플의 크기는 5 mm × 5 mm이고 두께는 3 mm이다. 실제 작동 조건을 모사하기 위해 물이 충분하지 않은 상태(tacky)에서 윤활 조건을 고려하였다.

실험 전에 유리판은 이소프로판올(isopropanol)로 채워져 있는 초음파 세척기에 20분간 세척 하였다. 온도에 의한 실험 오차를 줄이기 위해 공조기를 통해 24°C로 유지한 상태에서 시험을 진행하였다. 왕복동시험기의 행정 거리는 Fig. 3처럼 10 mm이며 2 Hz로 구동되어 평균 속도는 40 mm/s이다.

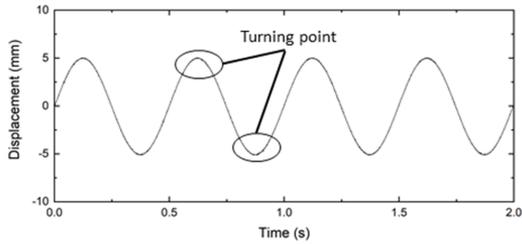


Fig. 3. Reciprocation tester stroke displacement.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 가속도센서로 진동 성분을 측정된 결과로 자기유변탄성체에 영구자석을 적용하지 않았을 때 4500 Hz ~6000 Hz의 구간에서 진동 성분이 높게 나타나는 것을 확인하였다. Fig. 5는 사운드센서를 통해 얻어진 소음 데이터이며 Fig. 4와 마찬가지로 동일한 구간에서 소음 성

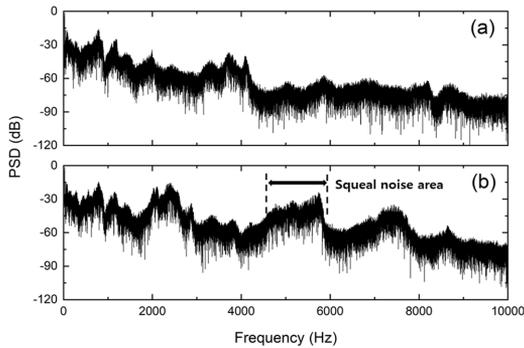


Fig. 4. Vibration frequency analysis results with (a) without magnetic field (b).

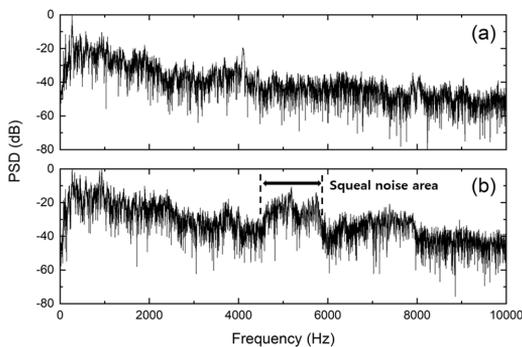


Fig. 5. Sound frequency analysis results with (a) with out magnetic field (b).

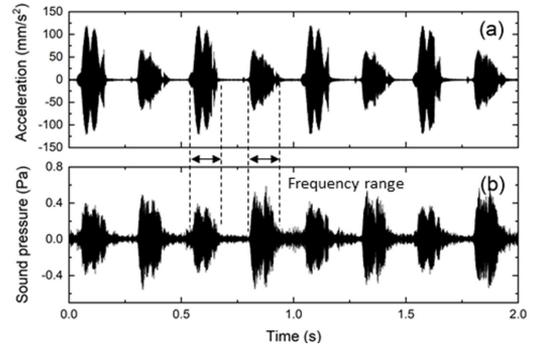


Fig. 6. Filtered vibration and noise result (4500-6000Hz Band Pass filter) (a) Acceleration of vibration (b) Squeal noise sound pressure(Pa).

분이 크게 나타나는 것을 확인하였다. 실험 결과에 영향을 미치는 왕복동시험기로부터 발생하는 노이즈 해결 및 4500 Hz~6000 Hz 주파수 구간에 소음 성분이 스킨소음이 맞는지 확인하기 위해 밴드패스필터(Band pass filter) 처리 하였다. 그 후 데이터를 매트랩(MATLAB)을 통해 오디오(audio) 파일로 변환 후 확인한 결과 선명한 스킨소음을 들을 수 있었다.

Fig. 6은 밴드패스필터 처리 후 얻어진 소리 및 진동 성분을 나타낸다. 진동과 소음의 세기는 동일한 시간대에서 크게 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 또한 Fig. 4 및 Fig. 5에서 확인 하였듯이 스킨소음은 동일 주파수(Frequency) 구간에서 발생하였으며 이는 자기유변탄성체의 진동에 의해 스킨소음이 발생함을 보여준다. 스킨소음은 왕복동시험기 구동 방향과 측정된 소음, 진동 성분의 비교를 통해 속도가 높은 구간보다 정전과 역전(Turning point)구간에서 크게 발생하는 것을 확인 하였다.

Fig. 7(a)와 (b)는 자기장 조건에 따라 얻어진 마찰계수를 보여준다. 초기조건에서 마찰계수는 자기장이 인가되었을 때 더 높이 나타났고 평균 마찰 계수는 0.336인 것을 확인하였다. 자기유변 탄성체에 자기장이 적용됨에 따라 마찰계수는 낮아지는 경향성을 보였고 얻어진 평균 마찰 계수는 0.329이다. 평균 마찰계수는 2초 동안 측정된 데이터를 평균한 결과이다.

Fig. 7(c)는 왕복동시험기를 통해 측정된 데이터의 자세한 확인을 위해 마찰계수가 높게 나타나는 구간을 비교한 것이며 자기장을 인가하지 않았을 때 최대 마찰계수가 높게 나타나는 것을 확인하였다. 또한 정전 및 역전 구간에서 마찰계수가 급격하게 증가하였다. 자기장을 인가하였을 때 마찰계수의 상승폭은 기존보다 완만하게 나타났다. 이는 이전 연구의 결과처럼 자기장 유무에 따

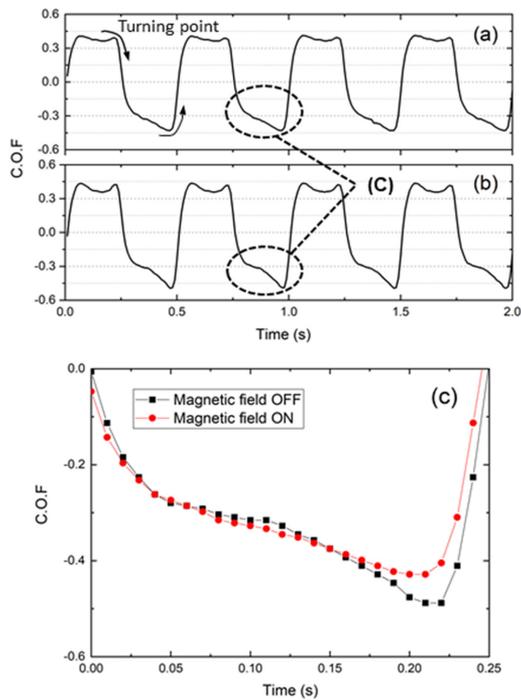


Fig. 7. Coefficient of Friction result (a) Magnetic field ON (b) Magnetic field OFF (c) Peak comparison.

라 강성이 변하고 마찰계수가 제어될 수 있음을 나타낸다[12].

#### 4. 결 론

본 논문에서는 왕복동시험기를 이용하여 물로 윤활된 자기유변탄성체가 유리판과 접촉할 때 발생하는 소음에 대해 연구하였다. 자기장의 유무에 따라 기계적 특성이 변하는 자기유변탄성체의 성질을 이용하여 스틱-슬립 및 시스템 불안정성으로 인한 소음 및 마찰계수를 자기장의 유무를 조건으로 하여 측정하였다.

자기장을 인가하지 않았을 때 주로 스켈소음이 발생하였으며 정전과 역전 구간에서 크게 나타났다. 마찰계수는 슬라이딩 속도가 증가 할수록 감소하였으며 정전 및 역전 구간에 가까울수록 높아지는 것을 확인하였다. 또한 자기유변탄성체에 자기장이 가해졌을 때 마찰계수가 감소하는 것을 확인하였다. 이는 자기장에 의해 자기유변탄성체의 강성이 변할 때 마찰계수의 감소뿐만 아니라 스켈소음의 발생이 억제될 수 있다는 것을 나타낸다.

추후 연구는 스틱-슬립 및 시스템의 불안정성 등 여러 외부 환경에 의해 발생하는 스켈소음을 제어하기 위

해 가변적으로 자기장의 세기를 제어 할 수 있는 전자석을 부착하여 테스트를 진행할 예정이며 자기장 조건에 따른 마찰계수 변화와 소음 감소의 연관성에 관하여 연구할 예정이다.

#### Acknowledgements

본 연구는 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 연구과제입니다. (NRF-2018R1D1A1A09084239).

#### References

- [1] Giannini, O., A. Akay, Massi, F., "Experimental analysis of brake squeal noise on a laboratory brake setup", *J. Sound Vib.*, 2006, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.05.032>
- [2] Hong, J. G., Won, H. I., Kim, H. R., Yoon, M. J. and Chung, J. T., "Squeal noise reduction of an automobile wiper blade", *KSNVE*, 2014, <https://doi.org/10.5050/KSNVE.2014.24.5.374>
- [3] Goto, S., Takahashi, H., Oya, T., "Clarification of the mechanism of wiper blade rubber squeal noise generation" *JSAE Rev.*, 2001, [https://doi.org/10.1016/S0389-4304\(00\)00095-3](https://doi.org/10.1016/S0389-4304(00)00095-3).
- [4] Le Rouzic, J., Le Bot, A., Perret-Liaudet, J., Guibert, M., Rusanov, A., Douminge, L., Bretagnol, F. and Mazuyer, D., "Friction-induced Vibration by Stribeck's Law: Application to Wiper Blade Squeal Noise", *Tribol Lett.*, 2013, <https://doi.org/10.1007/s11249-012-0100-z>.
- [5] Min, D., Jeong, S., Yoo, H., Kang, H., Park, J., "Experimental investigation of vehicle wiper blade's squeal noise generation due to windscreen waviness", *Tribol. Int.*, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.06.024>
- [6] Dalzin, F., Bot, A., Le, Perret-Liaudet, J., Mazuyer, D., "Tribological origin of squeal noise in lubricated elastomer-glass contact", *J. Sound Vib.*, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.01.019>
- [7] Reddyhoff, T., Dober, O., Rouzic, J.L., Gotzen, N.A., Parton, H., Dini, D., "Friction induced vibration in windscreen wiper contacts", *J Vib Acoust*, 2015, <https://doi.org/10.1115/1.4029987>
- [8] Liu, P., Zheng, H., Cai, C., Wang, Y.Y., Ang, K.H., Liu, G.R., "Analysis of disc brake squeal using the complex eigenvalue method" *Appl Acoust*, 2007, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2006.03.012>
- [9] Lian, C.L., Lee, K.H., and Lee, C.H., "Friction and Wear Characteristics of Magneto-Rheological Elastomers Based on Silicone/Polyurethane Hybrid", *J*

- Tribol*, 2015, <https://doi.org/10.1115/1.4029942>
- [10] Lim, J., Lee, K. -H., Lee, C. -H., “Frictional Hysteresis Model for Stick-Slip Behavior of Magnetorheological Elastomer under Various Magnetic Field Strengths”, *J Tribol*, 2018, <https://doi.org/10.1115/1.4038352>
- [11] Lee, D. W., Lee, C. H., Kim, C. H., Cho, W.O., “A Study of Friction Characteristics in Magneto-Rheological Elastomer”, *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, 2011, <https://doi.org/10.9725/kstle.2011.27.4.21>
- [12] Lina, C. G., Lee, D. W., Lee, K. H., Lee, C. H., Kim, C. H., Cho, W.O., “Application Study of Magneto-Rheological Elastomer to Friction Control”, *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol.28, No.3, pp.107-111, 2012, <https://doi.org/10.9725/kstle.2012.28.3.107>