

자동차용 와이퍼 블레이드의 스켈소음 저감

Squeal Noise Reduction of an Automobile Wiper Blade

홍준기*·원홍인*·김형래*·윤민재**·정진태†
Jun-Gi Hong, Hong-In Won, Hyoung-Rae Kim, Min-Jae Yoon and Jintai Chung

(Received December 27, 2013 ; Revised April 15, 2014 ; Accepted April 23, 2014)

Key Words : Wiper Blade(와이퍼 블레이드), Squeal Noise(스켈소음), Stick-slip Vibration(스틱-슬립 진동)

ABSTRACT

This article proposes a design guideline to reduce squeal noise generated by an automobile wiper blade. In order to explain the squeal noise phenomenon, a source of squeal noise is experimentally investigated using a rotating disk equipment, and then a single-degree-of-freedom stick-slip vibration model is established for a blade tip. Based on analytical results, we discuss a tendency of the squeal noise for various physical parameters.

기 호 설 명

- m : 물체의 질량
- c : 감쇠계수
- k : 스프링 상수
- x : 물체의 변위
- v_d : 마찰면의 속도
- v_r : 물체와 마찰면의 상대속도
- P : 수직하중
- f : 마찰력
- α : 마찰계수 수렴률
- μ_s : 정지 마찰계수
- μ_k : 운동 마찰계수
- μ_d : 동적 마찰계수
- g : 중력가속도
- N : 수직하중

1. 서 론

와이퍼는 차량에 장착되어 우천 시에 운전자의 시야를 확보해 주는 안전관련 장치이다. 와이퍼의 작동환경은 운전자의 시야에 항상 노출되어 있어 와이퍼에서 발생하는 떨림이나 소음현상은 운전자가 매우 민감히 느끼게 된다. 특히 1000 Hz 이상의 고주파 소음인 스켈소음은 운전자의 귀를 자극하고 불쾌하게 하여 운전환경의 질을 저하시키는 요소가 되고 있다.

와이퍼의 스켈소음에 대한 연구는 와이퍼 블레이드와 유리면 사이의 마찰에 대한 연구와 함께 많이 진행되어 왔다. Le Rouzic 등⁽¹⁾은 와이퍼와 유리면 사이의 마찰에 의한 와이퍼 블레이드의 자력진동이 스켈소음을 유발한다고 주장하였고, 이 때 마찰선도의 음의 기울기에 따라 와이퍼의 특정 구동속도 구간에서 스켈소음이 발생할 수 있음을 보였다. Bóдай 외⁽²⁾는 와이퍼와 유리면 사이에 작용하는 마찰력 측

† Corresponding Author ; Member, Hanyang University
E-mail : jchung@hanyang.ac.kr
Tel : +82-31-400-5287, Fax : +82-31-406-6964
* Hanyang University
** Hyundai Motor Company

‡ Recommended by Editor Don Chool Lee
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

정 장치를 고안하여 와이퍼에 블레이드의 구동속도, 누름 압력에 따른 마찰선도를 측정하였다. 여기서 측정된 마찰선도는 와이퍼 블레이드와 유리면의 상대속도에 따라 점감하는 양상을 보였으며 누름 압력에 비례하여 그 크기가 변화하였다. 그 외에도 Goto 등³⁾은 유한요소 해석을 통해 스킵소음이 발생할 때 와이퍼의 단면에 대하여 모드형상과 응력분포를 분석하였다.

와이퍼에 대한 연구 이외에도 마찰소음에 대한 연구가 진행되었는데 Nam 외⁴⁾는 pin-on-disk 실험 장치를 통해 미끄럼 속도의 변화에 따른 마찰계수의 변화를 계측하여 소음진동 특성을 분석하였다.

하지만 선행 연구들은 와이퍼에서 발생하는 스킵소음과 스틱-슬립 현상을 유기적으로 설명하지 못하였고 연구 결과를 실제로 와이퍼 설계에 적용하기에는 어려움이 있었다. 이에 이 연구에서는 와이퍼 블레이드의 스킵소음에 대해 회전원판 실험과 1자유도 스틱-슬립 모델을 이용하여 설명하고, 설명된 내용을 토대로 주요 인자들에 대한 스틱-슬립 운동의 주파수 특성을 분석하여 스킵소음 저감을 위한 스틱-슬립 운동의 변화를 관찰하였다.

2. 소음/진동 신호 분석

스킵소음 발생시 나타나는 소음신호와 블레이드의 진동신호를 확인하기 위하여 회전원판을 이용한 실험장치를 구성하였다. 실제 차량에서 와이퍼의 고무 블레이드가 윈드글래스 위를 움직이는 것과는 반대로 고무 블레이드가 고정되고 원판유리가 회전하는 것이 특징이다. 실험장치는 크게 회전원판 고정부와 블레이드 고정부로 나뉜다. 회전원판 고정부는 3상 유도모터와 모터를 고정하는 선반, 모터 축에 장착되는 회전원판 및 유리원판으로 구성된다. 회전원판은 8 mm 두께의 직경 40 cm 유리원판을 고정하는 역할로서 돌기부로 유리를 1차적으로 고정하고 주변을 실리콘으로 고정시켜 원판 회전이 유리가 분리되지 않도록 한다. 하중센서는 홀더와 고정대 사이에 장착되어 홀더에 고정된 블레이드가 유리원판에 눌러질 때 나타나는 하중을 측정하게 되고, 높낮이 조절나사를 통해 유리원판에 가해지는 하중을 조절하게 된다. 고무 블레이드는 시중에서 사용하는 제품을 원판 크기에 맞게 잘라 사용하였다.

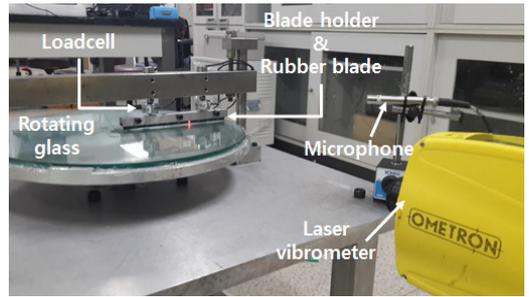


Fig. 1 Experimental setup for measuring the squeal noise of a wiper blade

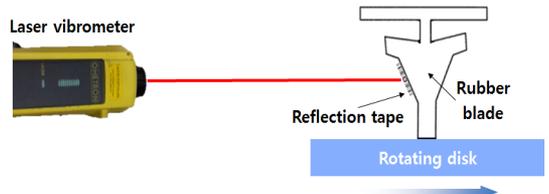


Fig. 2 Measuring point on a rubber blade

진동신호와 소음신호의 동시 측정을 위하여 Fig. 1과 같이 실험장치를 배치하였다. 소음측정에는 PCB사의 microphone 모델 378B02를 사용하였고, 고무 블레이드 진동측정은 OMETRON사의 laser vibrometer 모델 VQ-500-D를 이용하였다. 또한 반사테이프를 Fig. 2와 같이 고무 블레이드의 움직임에 방해가 되지 않도록 작은 크기로 잘라서 부착하여 레이저가 반사될 수 있도록 하였다.

실험장치에서 발생하는 스킵소음과 실제차량에서 발생하는 스킵소음의 유사성을 확인하기 위해 소음을 측정하였다. Fig. 3(a)는 회전원판 실험장치에 소음 측정결과로서 1배수 성분인 3000 Hz부터 2배수, 3배수 성분이 나타난다. 실제차량의 소음 측정결과인 Fig. 3(b)에서는 1배수성분인 1350 Hz부터 2배수, 3배수 성분이 나타난다. (a), (b)를 비교하여 보면 1배수 성분의 주파수 위치는 다르지만 모두 1000 Hz 이상에서 발생하며, 배수성분을 갖는 특성 또한 동일하게 나타난다. 이를 통하여 실제차량에서의 스킵소음과 회전원판에서 스킵소음이 유사함을 확인하였다.

회전원판 실험장치에서 스킵소음이 발생할 때 나타나는 소음신호와 고무 블레이드 진동신호의 연관성을 확인하기 위해 신호를 측정하였다. Fig. 4에 나

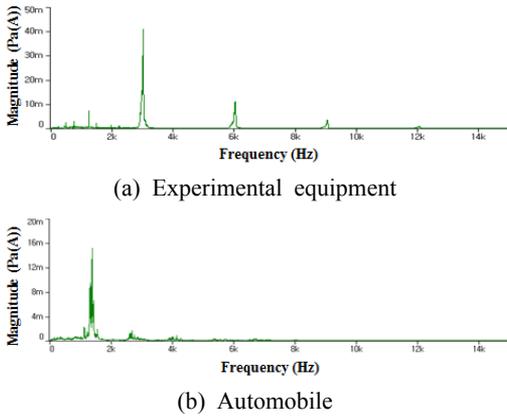


Fig. 3 Frequency spectra of the squeal noise generated from a wiper blade

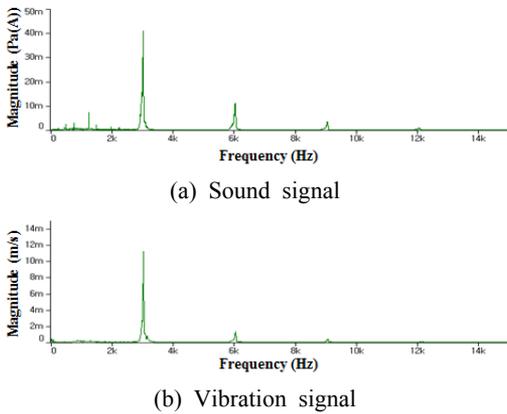


Fig. 4 Comparison of the frequency spectra between sound and vibration signals on the experimental equipment

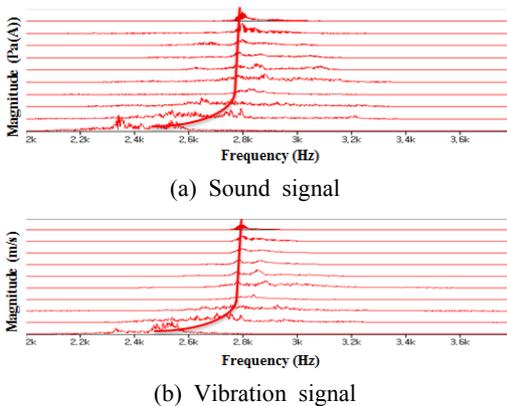


Fig. 5 Waterfall plots for the fundamental frequency as the rotating speed increases

타낸 측정 결과를 살펴보면 소음주파수와 진동주파수 모두 동일하게 1배수 성분이 3000 Hz를 가지며 2배, 3배의 배수성분을 가졌다. Fig. 5에 나타난 원판 회전속도를 상승시켜가며 관찰한 1배수 성분의 소음주파수와 진동주파수는 동일하게 특정 위치의 주파수로 수렴해 가는 현상을 보여준다. 이를 통해 스킵소음의 특성이 고무 블레이드의 진동에 의해 영향을 받는다는 것을 확인하였다.

3. 해석모델 수립

앞선 실험결과를 통해 확인한 스킵소음에 따른 진동특성을 표현하기 위하여 물체와 스프링, 댐퍼를 이용하여 고무 블레이드의 진동을 나타낼 수 있는 1자유도 스틱-슬립 모델을 Fig. 6과 같이 수립하였다⁽⁶⁻¹⁰⁾. 여기서 질량 m 은 고무 블레이드의 무게, 감쇠계수 c 는 고무 블레이드의 감쇠계수, 스프링 상수 k 는 와이퍼 팁의 미소변위 x 에 대한 블레이드의 복원력에 대응될 수 있다. 마찰면의 속도 v_d 는 와이퍼의 회전속도와 대응되며, 앞선 회전원판 실험장치의 원판유리의 회전속도와도 대응한다. 앞서 설명한 시스템 요소 중에서 고무 블레이드의 감쇠계수 c 와 마찰면 속도 v_d 는 진동특성 분석을 위한 시스템의 주요인자이다. 이와 같은 1자유도 스틱-슬립 모델에 대한 시스템의 운동방정식은 식 (1)과 같다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(x, \dot{x}, v_r) \tag{1}$$

운동방정식 (1)에서 f 는 물체에 작용하는 마찰력으로서 운동 상태에 따라 그 식이 식 (2)와 같이 두 가지로 나뉜다.

$$f(x, \dot{x}, v_r) = \begin{cases} f(x, \dot{x}) = \min(|kx + c\dot{x}|, \mu_s N) \text{sgn}(kx + c\dot{x}) \\ f(v_r) = \mu_d N \end{cases} \tag{2}$$

식 (2)에서 수직하중 N 은 $mg + P$ 와 같으며, 두 식으로 표현한 마찰력은 상대속도가 ‘0’일 때는 ‘스틱구간’이며 변위 x 와 물체의 속도 \dot{x} 에 따라 마찰력이 변하고, 상대속도가 ‘0’이 아닐 때는 ‘슬립구간’으로서 상대속도 v_r 에 따라서 마찰력이 결정된다.

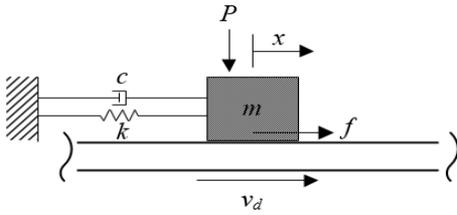


Fig. 6 Single-degree-of-freedom oscillator for stick-slip vibration analysis

상대속도 v_r 는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$v_r = \dot{x} - v_d \tag{3}$$

식 (2)의 μ_d 는 상대속도에 따라 달라지는 동적 마찰계수로서 식 (4)와 같이 표현되며⁽⁶⁾, 이에 대한 그래프는 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7과 같은 형태의 마찰계수 선도는 와이퍼를 이용한 마찰계수 측정실험 결과와 유사한 형태로서⁽²⁾ 와이퍼와 유리면 사이의 마찰을 표현하기 위해 모델에 사용하였다.

$$\mu_d = \mu_k + (\mu_s - \mu_k)e^{-\alpha(v_d - \dot{x})} \tag{4}$$

정지 마찰계수 μ_s 와 운동 마찰계수 μ_k 의 편차는 음의 기울기를 결정하는 요소로서 마찰편차가 커질수록 음의 기울기는 증가하게 되어 스틱-슬립 운동에 영향을 끼치게 된다.

구축한 1차 스틱-슬립 모델을 이용하여 물체의 움직임을 해석하였다. 해석에 사용된 각 요소별 값은 Table 1에 나타내었고, 해석결과는 Fig. 8부터 Fig. 10까지 총 3종류로 나타내었다. Fig. 8은 물체의 시간에 대한 속도 응답을 나타낸 것으로 전체적인 움직임이 사인과 곡선과 비슷하다.

하지만 속도가 일정하게 유지되는 구간이 반복적으로 나타나는데, 이를 ‘스틱구간’이라하며 스킨소음 획득 시 주파수가 배수성분을 갖도록 한다. Fig. 9는 Fig. 8의 시간에 대한 속도응답 결과를 주파수 분석하여 나타낸 주파수 그래프로써 1배수 성분인 1.54 Hz부터 2배수, 3배수 성분이 관찰된다. 이는 Fig. 3, Fig. 4와 같이 스킨소음 주파수응답에서 배수 성분이 나오는 현상과 동일하다. 또한 Fig. 10은 마찰면의 속도를 상승시켜가며 속도응답에 대한 1차 주파수성분만 나타난 그래프로써 속도가 상승할수록 주파수가 시스템의 고유진동수인 1.59 Hz로 수렴하는

Table 1 Nominal values of system parameter

Symbol	Value	Unit
m	1	kg
c	1	N·s/m
k	100	N/m
v_d	0.5	m/s
P	0	N
α	3	-
μ_s	0.5	-
μ_k	0.2	-
g	9.81	m/s ²

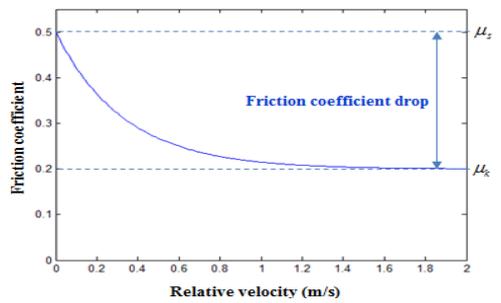


Fig. 7 Friction coefficient curve

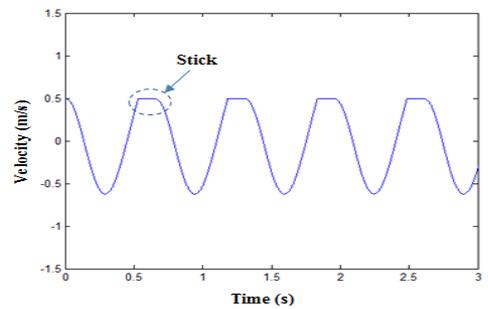


Fig. 8 Time response for stick-slip vibration

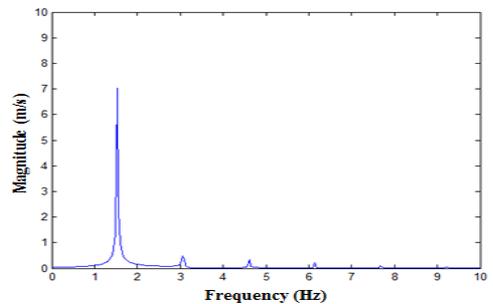


Fig. 9 Frequency analysis for stick-slip vibration

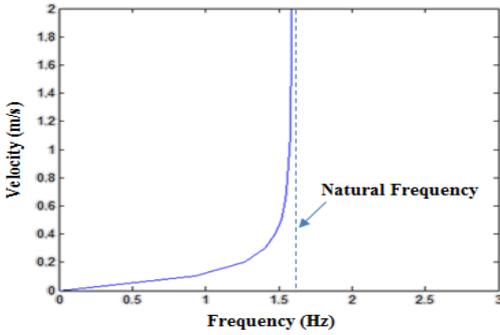


Fig. 10 Change of the fundamental frequency as the driving speed increases

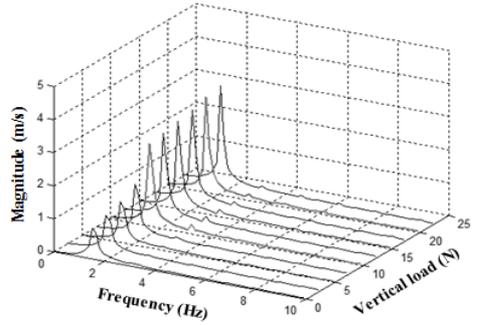


Fig. 11 Waterfall plot for the vertical load

현상이 나오는데, 이는 속도가 상승할 시 ‘스틱구간’이 점차 사라지면서 속도응답에 대한 주기가 점차 짧아져 주파수가 상승하게 되어 나타나는 것이다. 이러한 현상은 Fig. 5의 회전원판 속도 상승에 따른 주파수 수렴현상과 유사하다. 해석모델의 결과를 통해 실험에서의 주파수 수렴위치는 실험장치의 고유진동수로 예상할 수 있다. 이와 같은 해석결과들을 종합하여 살펴보면 스킵소음은 블레이드와 마찰면 사이에서 발생하는 스틱-슬립 운동에 의해 발생하는 것임을 알 수 있다.

4. 주요인자별 해석

모델의 해석을 기반으로 하여 스틱-슬립 운동에 변화를 주도록 하는 주요인자들을 선정하고, 인자별로 값을 변화시켜가며 스틱-슬립 운동에 어떠한 영향을 끼치는지에 대해 해석을 수행하였다. 주요 인자는 수직하중, 마찰면속도, 감쇠계수, 마찰계수 등의 기율기로 총 4종류로 나누었다.

해석에 사용한 시스템의 값들은 Table 1과 같으며, 각 인자별 해석 시 해당하는 인자들을 변화시키며 해석을 수행하였다.

먼저 수직하중에 대한 영향분석을 수행하였다. 수직하중은 실제 와이퍼 시스템에서 누름압에 대응되는 것으로서 와이퍼 뒤틀임성능에 영향을 주는 인자이다. 해석결과를 나타낸 Fig. 11은 수직하중을 0N부터 20N까지 상승시켜가며 획득한 주파수응답을 표현한 것으로서 수직하중이 증가할수록 점차 진폭의 크기가 증가하며 주파수의 배수성분이 뚜렷하게 나타난다. 특히 5N에서 10N으로 상승할 때 그 변화가

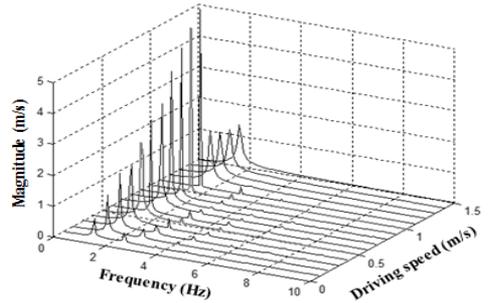


Fig. 12 Waterfall plot for the driving speed

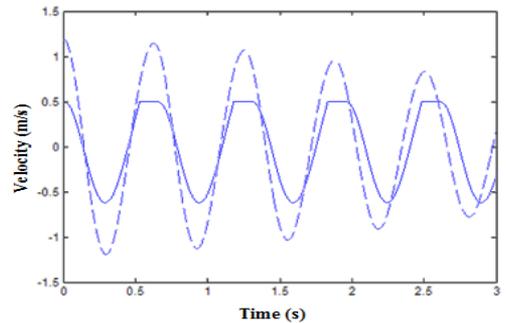


Fig. 13 Time response for two driving speeds(solid line : $v_d=0.5$, dashed line : $v_d=1.2$)

급격히 나타난다.

다음은 마찰면 속도에 대해 영향분석이다. 마찰면 속도는 실제 와이퍼 시스템에서 와이퍼의 운행속도에 대응한다. 해석결과를 나타낸 Fig. 12는 마찰면 속도를 0 m/s부터 1.5 m/s까지 상승시켜가며 획득한 주파수 응답을 표현한 것으로서 속도가 상승할수록 점점 1배수 성분에 해당하는 주파수의 크기가 증가하고, 1.1 m/s 이후부터 급격히 감소하며 배수성분

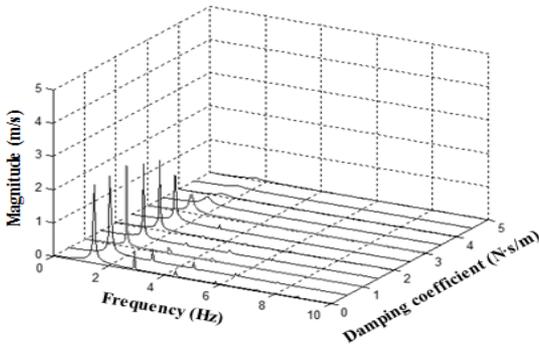


Fig. 14 Waterfall plot for the damping coefficient

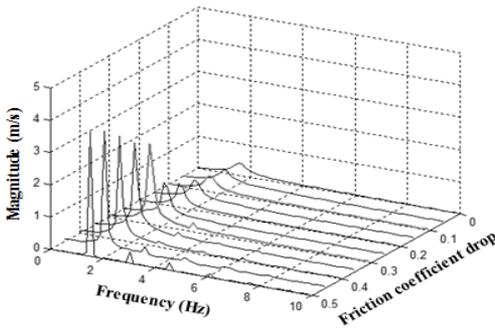


Fig. 15 Waterfall plot for the negative gradient coefficient

또한 나타나지 않는다.

이러한 현상은 물체의 운동이 스틱-슬립운동에서 스틱구간이 사라진 슬립운동을 하게 되어 나타나는 것이며, 물체의 진동이 감쇠진동으로 바뀌어 움직임이 점차 사라지기 때문에 1배수 성분의 주파수 크기가 급격히 감소하게 되는 것으로서, Fig. 12와 Fig. 13의 비교를 통해 알 수 있다. Fig. 13의 실선은 0.5 m/s에서의 스틱-슬립 운동을 나타낸 것이고, 점선은 1.2 m/s에서의 감쇠진동을 나타낸 것이다.

다음은 감쇠계수에 대한 영향분석이다. 감쇠계수는 고무 블레이드의 물성치에 대응하는 것으로서, 고무의 특성을 결정한다. 해석결과를 나타낸 Fig. 14는 감쇠계수를 0 N·s/m에서부터 5 N·s/m 상승시켰을 때 획득한 주파수응답을 표현한 것으로서 앞선 수직하중에 따른 영향분석 결과와 경향이 매우 유사하다. 1배수 성분에 해당하는 주파수크기의 변화는 거의 없지만, 감쇠계수 3 N·s/m부터 그 크기가 급격히 감소하고 배수성분 또한 사라진다.

이 역시 물체가 스틱구간이 없는 감쇠진동을 하여 나타나는 현상이다.

마지막으로 마찰계수의 음의 기울기를 통한 영향 분석을 수행하였다. 마찰계수는 와이퍼의 닦임 성능을 결정하는 중요한 요소 중 하나로서 속도에 따라 점차 감소되어지는 특성이 있다. Fig. 15는 해석결과를 나타낸 것으로서, 마찰계수 편차를 0.5에서 부터 0까지 감소시켜가며 획득한 결과이다. 마찰계수 편차가 감소할수록, 즉 음의 기울기가 감소할수록 주파수 크기가 감소되며, 배수성분 또한 점차 사라지는 경향을 보인다.

5. 결 론

이 연구에서는 스켈소음 저감을 위한 설계 가이드를 제시하기 위하여 회전원판 실험과 1자유도 스틱-슬립 모델을 이용하여 와이퍼 블레이드 스켈소음이 고무 블레이드에서 발생하는 스틱-슬립형태의 진동에 의해 발생하는 것임을 확인하였고, 주요 인자들에 대한 스틱-슬립 운동 영향분석을 수행하여 수직하중이 감소할수록, 마찰면속도가 증가할수록, 감쇠계수가 증가할수록, 마찰계수의 음의 기울기가 감소할수록 스켈소음에 해당하는 주파수의 진폭이 감소하며 배수성분 또한 사라져 스틱-슬립에서 감쇠진동으로 바뀌는 모습을 확인하였다.

연구결과를 토대로하여 차량의 와이퍼 작동 시 고무 블레이드가 스틱-슬립 운동이 아닌 감쇠진동 형태의 운동을 할 수 있도록 설계인자를 조정한다면 스켈소음을 저감시킬 수 있을 것이다.

References

- (1) Le Rouzic, J., Le Bot, A., Perret-Liaudet, J., Guibert, M., Rusanov, A., Douminge, L., Bretagnol, F. and Mazuyer, D., 2013, Friction-induced Vibration by Stribeck's Law: Application to Wiper Blade Squeal Noise, Tribology Letter, Vol. 49, No. 3, pp. 563~572.
- (2) Bodai, G. and Goda, T. J., 2012, Friction Force Measurement at Windscreen Wiper/Glass Contact, Tribology Letter, Vol. 45, No. 3, pp. 515~523
- (3) Goto, S., Takahashi, H. and Oya, T., 2001, Clarification of the Mechanism of Wiper Blade Rubber

Squeal Noise Generation, *JSAE Review*, Vol. 22, No. 1, pp. 57~42.

(4) Nam, J. H. and Kang, J. Y., 2013, Characteristics of Friction Noise with Respect to Friction Curve, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 23, No. 5, pp. 420~430.

(5) Kang, J. Y., 2008, Parametric Study in Friction-induced Coupled Oscillator, *Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 222, No. 8, pp. 1381~1387.

(6) Galvanetto, U. and Bishop, S. R., 1999, Dynamics of a Simple Damped Oscillator Undergoing Stick-slip Vibrations, *Meccanica*, Vol. 34, No. 5, pp. 337~347.

(7) Ding, W. J., Fan, S. C. and Li, M. W., 2000, A New Criterion for Occurrence of Stick-slip Motion in Drive Mechanism, *Acta Mechanica Sinica*, Vol. 16, No. 3, pp. 273~281.

(8) Thomsen, J. J. and Fidlin, A., 2003, Analytical Approximations for Stick-slip Vibration Amplitudes, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol. 38, No. 3, pp. 389~403.

(9) Stark, R. W., Schitter, G. and Stemmer, A., 2004, Velocity Dependent Friction Laws in Contact Mode Atomic Force Microscopy, *Ultramicroscopy*, Vol. 100, No. 3-4, pp. 309~317.

(10) Li, Q. H., Chen, Y. M. and Qin, Z. Y., 2011,

Existence of Stick-slip Periodic Solutions in a Dry Friction Oscillator, *Chinese Physics Letters*, Vol. 28, No. 3, 030502.



JunGi Hong received his B.S. degree in mechanical engineering from Hanyang University, Korea in 2012. Currently he is a Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Korea. His research

interests are structural dynamics and squeal noise in the disc brake.



Jintai Chung received his B.S. and M.S. degrees in mechanical engineering from Seoul National University, Seoul, Korea in 1984 and 1986, respectively, and a Ph.D. degree in mechanical engineering from the University of

Michigan, Ann Arbor, USA in 1992. He is now a professor in the Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Korea. His research fields are structural dynamics, vibration and noise.