

크립 그론 소음 특성에 대한 실험적 연구[§]

강경민* · 전현철* · 강연준*[†] · 조민형**

* 서울대학교 기계항공공학부, ** 현대 모비스 연구개발팀

Experimental Investigation of Creep Groan Noise

Kyung Min Kang^{*}, Hyun Cheol Jeon^{*}, Yeon June Kang^{*†} and Min Hyung Cho^{**}

^{*} School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul Nat'l Univ.,

^{**} Research Engineer Team, Hyundai Mobis

(Received May 2, 2012 ; Revised July 4, 2012 ; Accepted January 28, 2013)

Key Words: Creep Groan(크립 그론), Brake Noise(브레이크 소음), Structural-Borne Noise(구조기인소음)

초록: 크립 그론 소음은 자동차 브레이크에서 제동압 제거 초기나 제동 말기에 발생하는 저주파 소음 현상이다. 이러한 현상은 브레이크 시스템에 국한되는 문제가 아니라 샤시의 진동특성에도 영향을 받는 것으로 예측되고 있기 때문에 그 특성 파악이 어려운 것으로 알려져 있다. 때문에 현재까지의 연구는 마찰재를 통한 개선이 대부분이었다. 그래서 실차를 이용한 실험은 여전히 어려운 과제로 남겨져 있다. 이번 연구는 환경에 민감한 크립 그론 소음의 특성과 샤시 진동특성의 영향을 실차와 NVH 전용 샤시 다이내모를 이용한 여러 가지 실험을 통해 알아 보았다. 이를 통해 실차에서의 새로운 크립 그론 소음 평가시 중요한 통제변수를 제시하고 차량 시스템 측면에서 소음 저감 대책 연구에 대한 가능성을 확인할 수 있었다.

Abstract: Creep groan noise occurs at low frequencies immediately after releasing brake pressure or when a car stops. This noise can be used to predict problems in not only the brake system but also the vehicle system. Because of its complexity, it is difficult to determine its characteristics. Therefore, most improvements are conducted by changing the brake pad, and it still remains difficult to conduct a test using a vehicle. In this study, the characteristics of creep groan noise and the effects from a vehicle system are investigated by using vehicles and an NVH chassis-dynamometer through various tests. A new evaluation method for creep groan noise by using a vehicle is proposed, and the possibility of reduction schemes from the viewpoint of the vehicle system is confirmed from the results mentioned above.

1. 서 론

1.1 논문의 각 절 제목

크립 그론 소음은 자동차 브레이크에서 제동압 제거 초기나 제동 말기에 발생하는 저주파 소음 현상이다. 이러한 현상은 브레이크 시스템에 국한되는 문제가 아니라 샤시의 진동특성에도 영향을 받는 것으로 예측되고 있기 때문에^(1,2) 그 특성 파악이 어려운 것으로 알려져 있다. 때문에 지금까지는 브레이크 시스템 자체에서의 연구나 마찰재를 통한 개선⁽³⁾이 대부분이었고 현재는 전달경로

의 관점에서 샤시 시스템의 기여 인자를 연구하는 경향이⁽⁴⁾ 증가하는 추세이다. 또한 최근에는 크립 그론이 발생하는 원리를 수학적인 방법을 통해 모델링 하는 연구^(5,6)가 이루어지고 있지만 아직 뚜렷한 해결책을 내놓지 못하고 있다.

따라서 지속적인 연구를 위해 실차 환경에서의 크립 그론 소음 평가시 중요한 통제변수를 제시하고 샤시 시스템의 영향이 어느 정도인지 알아야 할 필요가 있다.

1.2 연구개요

이번 연구에서는 크립 그론 소음의 특징을 실차와 NVH(Noise, Vibration and Harshness) 전용 샤시 동력계를 이용하여 알아보았다.

크립 그론 소음에 영향을 미치는 인자는 매우

[§]이 논문은 2012년도 대한기계학회 동역학 및 제어부분 춘계학술대회(2012. 4. 11.-13., 제주 KAL 호텔) 발표논문임.

[†] Corresponding Author, yeonjune@snu.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

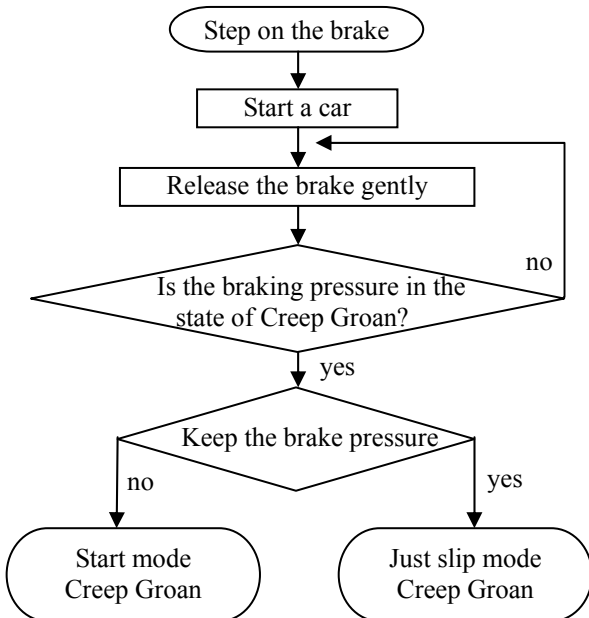
다양하다. 그 중에서 차량이 위치한 도로의 경사도나 절대습도에 따른 영향은 익히 알려진 바다. 이번 연구에서는 그 외에 어떤 변수가 크립 그론 소음에 영향을 미치는지에 초점을 두고 소음 평가 시 중요한 통제변수를 제시했다.

또한 마찰재와 차량 변화에 따른 소음 변화의 측정으로 차량 시스템이 크립 그론 소음에 미치는 영향을 비교하였다.

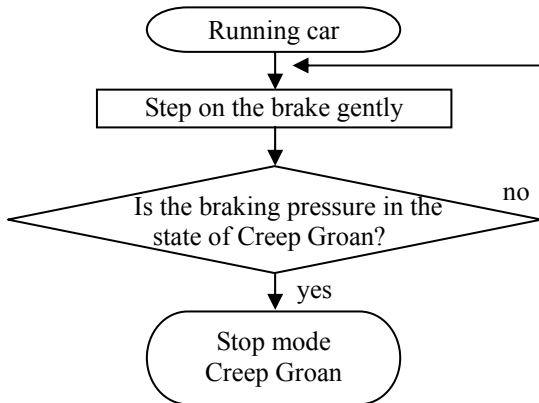
2. 크립 그론 소음의 현상 분석

2.1 소음 재현 환경

크립 그론 재현은 차량이 출발하는 순간 발생하는 출발 모드, 차량이 정지하는 순간 발생하는 정



(a)



(b)

Fig. 1 Mechanism of (a) start, just slip and (b) stop mode of Creep Groan

지 모드 그리고 차량이 거의 움직이지 않는 상태를 유지하며 발생하는 저스트 슬립 모드의 세가지 실험 모드로 나눌 수 있다. Fig. 1은 각 모드의 발생 메커니즘에 대한 순서도이다. 본 연구에서는 실험의 재현성을 높이고 분석을 용이하게 하기 위해 저스트 슬립 모드를 택하였다. 샤시 동력계에서 저스트 슬립 모드의 크립 그론 재현 방법은 Fig. 2와 같다. 실험 차량의 소음 측정 위치는 운전자의 오른쪽 귀 위치로 하였다.

실험 차량의 크립 그론 소음의 피크 주파수는 Table 1과 같이 180 ~ 200 Hz에서 랜덤하게 발생하였기 때문에 분석시 20회 반복 측정된 값의 평균을 취하였다. 또한 위 주파수 영역에서 아이들 엔진 소음보다 20 dBA 이상 높았기 때문에 엔진을 가동한 상태에서 실험이 이루어졌다. 그리고 차량을 정상상태로 만들기 위해 10분간 워업시간을 가졌다.

2.2 브레이크 작동 압력에 따른 소음 변화

경사도나 절대습도에 따른 영향은 익히 알려진 바이다. 이러한 현상은 결국 브레이크 작동 압력에 따라 크게 좌우됨을 알 수 있었다. Fig. 3과 같이 어떤 일정한 환경에서 크립 그론 소음을 발생시키는 브레이크 작동 압력은 범위를 갖는다. 또한 다른 환경에서는 브레이크 작동 압력은 기존의 환경에 비해 높거나 낮은 압력에서 범위를 갖는다.



(a) Vehicle stop



(b) Full brake with drive mode



(c) Partially release the brake

Fig. 2 Reproduce process of just slip creep groan noise (a), (b), (c)

Table 1 Peak frequency of creep groan noise

Set1	Set2	Set3	Set4	Set5
183 Hz 184 Hz 186 Hz 187 Hz 197 Hz	184 Hz 187 Hz 199 Hz	184 Hz	185 Hz 186 Hz 197 Hz	187 Hz
Set6	Set7	Set8	Set9	Set10
186 Hz 187 Hz	186 Hz 187 Hz	194 Hz 195 Hz	189 Hz 190 Hz 192 Hz 193 Hz	193 Hz 194 Hz 195 Hz
Set11	Set12	Set13	Set14	Set15
186 Hz 187 Hz 188 Hz 197 Hz	191 Hz 194 Hz 195 Hz 196 Hz 197 H	191 Hz 192 Hz 193 Hz	189 Hz 190 Hz 194 Hz	193 Hz 194 Hz 195 Hz
Set16	Set17	Set18	Set19	Set20
186 Hz 187 Hz 190 Hz	187 Hz 190 Hz 191 Hz	192 Hz 193 Hz 194 Hz 200 Hz	192 Hz 193 Hz	194 Hz 195 Hz

Table 2 Creep groan noise by braking pressure

Braking Pressure	Principal Peak[Hz]	Peak Frequency SPL [dBA]	Overall SPL [dBA]
8.4 bar	180-200	67.11	73.89
6.1 bar	96, 193	69.30	73.47

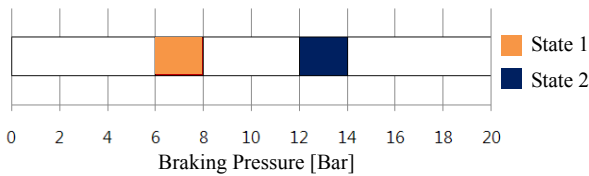


Fig. 3 Creep groan noise occurred braking pressure by state

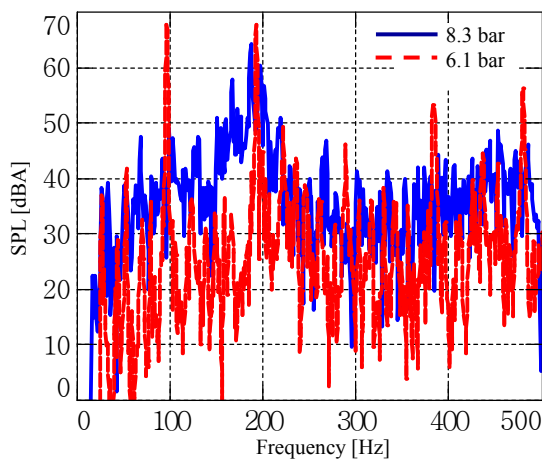


Fig. 4 Creep groan noise by braking pressure

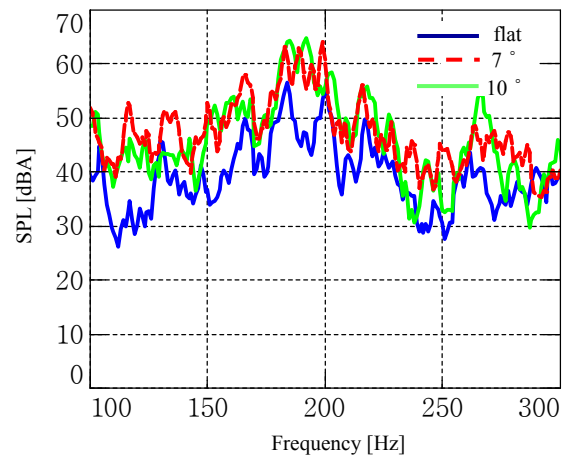


Fig. 5 Creep groan noise by decline angle

동일한 환경에서는 브레이크 작동 압력이 변함에 따라 크립 그론 소음의 주파수 특성이 변하고 다른 환경에서는 소음의 크기가 달라지는 경향이 있다. 여기서 말하는 다른 환경이란 차가 위치한 길의 경사도나 날씨와 같은 외부 환경과 마찰재의 종류나 온도, 차체와 같은 차량 환경 모두를 의미한다.

또한 반복되는 실험을 통해 마찰재의 온도가 브레이크 작동 압력에 큰 영향을 미치는 것으로 판단되었다. 이는 마찰재의 열 팽창 때문에 크립 그론 소음이 발생하는 브레이크 작동 압력이 변한 것으로 생각된다. 엔진의 열기에 의해 마찰재가 가열되기도 하고 브레이크를 작동하면 마찰열에 의해 가열되기도 했다. 때문에 이번 실험에서는 마찰재의 온도를 모니터링 하며 크립 그론을 재현할 때 온도가 유지되는 온도를 찾았다.

2.3 동일한 환경에서 브레이크 작동 압력에 따른 소음 변화

Fig. 4 에서는 동일한 환경에서 브레이크 작동 압력이 다른 경우에 대해 소음 특성이 달라짐을 보여준다. 동일한 환경이라고 함은 차량이 방치된 절대습도가 같고 마찰재의 온도도 같은 상태를 의미한다. 귀로 들었을 경우 높은 압력에서는 ‘구구

Table 3 Creep groan noise by decline angle

Decline Angle	Braking Pressure	Peak Frequency SPL [dBA]	Overall SPL [dBA]
0 °	5.3 bar	56.62	66.98
7 °	14.2 bar	66.00	75.61
10 °	17.5 bar	65.27	75.17

Table 4 Creep groan noise by absolute humidity

Absolute Humidity	Braking Pressure	Peak Frequency SPL [dBA]	Overall SPL [dBA]
3.4 g/m ³	4.8 bar	45.95	57.84
8.5 g/m ³	5.3 bar	51.23	60.96
10.1 g/m ³	5.5 bar	54.24	63.26
14.9 g/m ³	6.8 bar	58.70	68.47

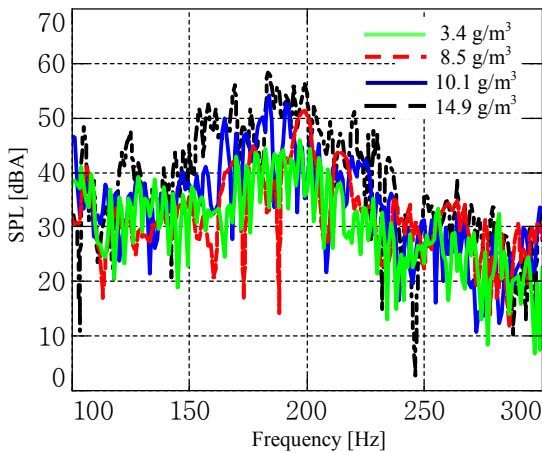


Fig. 6 Creep groan noise by absolute humidity

국'하는 소리가 나며 낮은 압력에서는 '끼이익'하는 소리가 나는 것으로 느낄 수 있다. 또한 낮은 압력에서는 90 Hz 주변에서 기본 주파수를 갖고 고조파 형태로 180~200 Hz 사이에 피크가 발생하는 것을 알 수 있다. Table 2 은 20 회 측정된 크립 그론 소음의 주요 피크 주파수와 실내 음압 레벨이다. 이번 실험을 통해 브레이크 작동 압력을 동일한 조건에 두는 것이 가장 중요하다는 것을 알게 되었다. 아래의 두 가지 실험은 브레이크 작동 압력 범위에서 높은 압력에 해당되는 조건으로 이루어졌다.

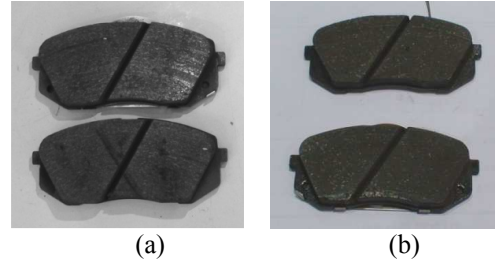


Fig. 7 (a) Brake pad 1 and (b) Brake pad 2

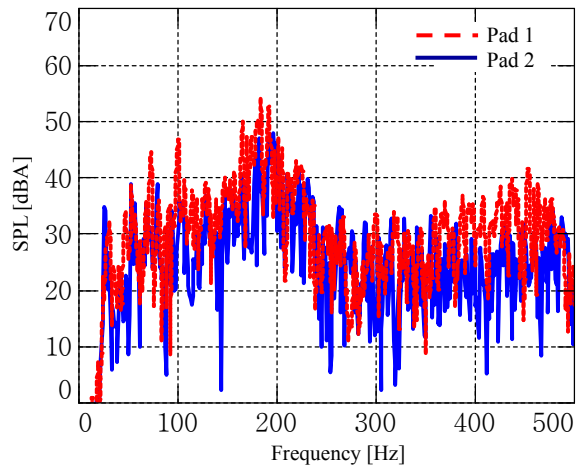


Fig. 8 Creep groan noise by brake pad

2.4 다른 환경에서 브레이크 작동 압력에 따른 소음 변화

Fig. 5 는 경사도에 따른 크립 그론 소음의 변화이다. 환경이 변하면서 브레이크 작동 압력이 달라진 것을 볼 수 있는데 경사도가 증가하면서 크립 그론 소음을 발생시키는 브레이크 작동 압력도 증가했다. 작동 압력이 증가한 만큼 디스크와 마찰재에 가해지는 힘이 커서 소음도 커지는 것으로 생각된다. Table 3 은 20 회씩 측정된 크립 그론 소음의 실내 음압 레벨의 평균이다. 이 때 차량은 같은 절대습도에 방치 되었고 마찰재의 온도도 같은 조건이었다.

Fig. 6 은 각 습도에 10 시간 방치된 후에 크립 그론 소음을 측정된 결과이다. Table 4 는 크립 그론 소음의 실내 음압 레벨이다. 방치 후 첫 번째로 발생하는 소음을 측정했기 때문에 다른 실험과 같이 20 회 반복 실험은 하지 않았다. 예상대로 절대 습도에 따라 소음이 커지는 것을 알 수 있었고 브레이크 작동 압력 또한 증가하였다.

2.5 마찰재와 차량 변화에 따른 소음 변화

앞선 실험을 통해 통제변수를 정하였고 두 가지

마찰재와 두가지 차량을 실험하였다.

마찰재는 형상에 따라서도 성능에 차이가 있고 크립 그론 소음에 영향을 미치므로 재질만 다른 두 개의 마찰재를 이용하였다. Fig. 7은 이용한 마찰재 1과 마찰재 2의 사진이다. Fig. 8은 각 마찰재를 차량에 장착 하였을 때 실험 결과이며 Table 5은 20회 반복 측정된 크립 그론 소음의 피크 주파수와 실내 음압 레벨의 평균 값이다. 이번 실험을 통해 마찰재의 재질을 바꿈으로써 5 dB 가량 소음을 저감시킬 수 있다는 것을 확인하였다. 물론 이 실험에 적용한 마찰재의 성능이 가장 뛰어나다고 할 수는 없다. 하지만 마찰재에 따른 소음 저감의 정도와 차량에 따른 소음 저감 정도를 비교하면 마찰재의 소음 저감 효과 비중을 어렵잡아 볼 수 있을 것이다.

Fig. 9는 차량을 바꾸었을 때 소음 측정 결과이다. Table 6은 각 차량에서 20회 측정된 크립 그론 소음의 피크 주파수와 실내 음압 레벨의 평균이다. 결과와 같이 차량 2에서 7 dB 가량 소음이 저감되었다. 이는 앞에서 살펴본 마찰재 재질 변경을 통해 얻은 소음 저감 효과보다 큰 값이다.

또한 Fig. 10은 구조기인 전달경로 해석의 결과 그래프인데, 피크 주파수에서의 실내 소음 레벨 예측값이 63.2 dBA로 실측값인 64.5 dBA와 유사하다. 전달경로 해석의 기본식은 다음과 같다.⁽⁷⁾

$$p = \sum_{i=1}^{paths} f_i^{oper} \cdot \frac{p_i}{f_i} + \sum_{i=1}^{paths} q_i^{oper} \cdot \frac{p_i}{q_i} \quad (1)$$

여기서 p 는 음압 f 는 힘, q 는 음원의 세기이다. 식 (1)에서 q 항을 버린 식이 구조기인 전달경로 해석의 식이다. 구조기인 전달경로 해석을 통해 예측한 값이 실측값과 유사 할 경우는 q 항을 무시 할 수 있는 경우로 소리가 공기를 통해 전달되는 정도가 미약하고 대부분 차량 시스템을 통해 전달되는 구조기인 소음이라고 판단 할 수 있다.

전달경로 해석은 주행시 전달되는 힘 f_i^{oper} 을 구하는 방법에 따라 종류가 다양한데 이번 연구에서는 Full Matrix Inversion Method (MIM)을 이용하였다. MIM은 가속도를 측정하는 각 지점의 응답함수를 측정하고 역수를 취하여 실제 작동 할 때의 지점의 가속도를 곱하여 전달되는 힘을 구하는 방법이다. 이를 식으로 나타내면

$$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1^{oper} \\ \ddot{x}_2^{oper} \\ \ddot{x}_3^{oper} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1^{oper} \\ f_2^{oper} \\ f_3^{oper} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Table 5 Creep groan noise by brake pad

Brake Pad	Peak Frequency	Peak Frequency SPL [dBA]	Overall SPL [dBA]
Pad 1	184 Hz	54.24	63.26
Pad 2	190 Hz	43.90	58.10

Table 6 Creep groan noise by vehicle system

Vehicle System	Peak Frequency	Peak Frequency SPL [dBA]	Overall SPL [dBA]
Car 1	184 Hz	54.24	63.26
Car 2	182 Hz	48.68	55.83

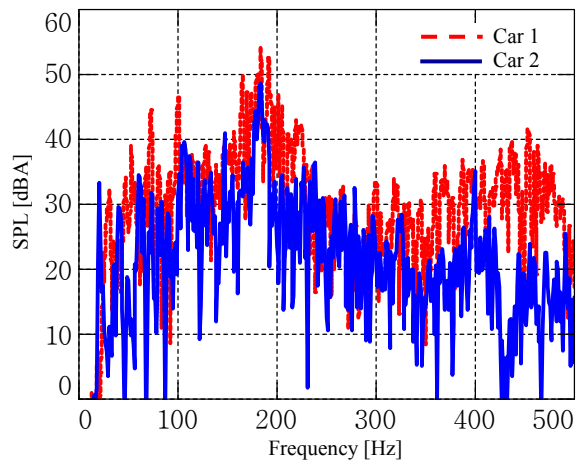


Fig. 9 Creep groan noise by vehicle system

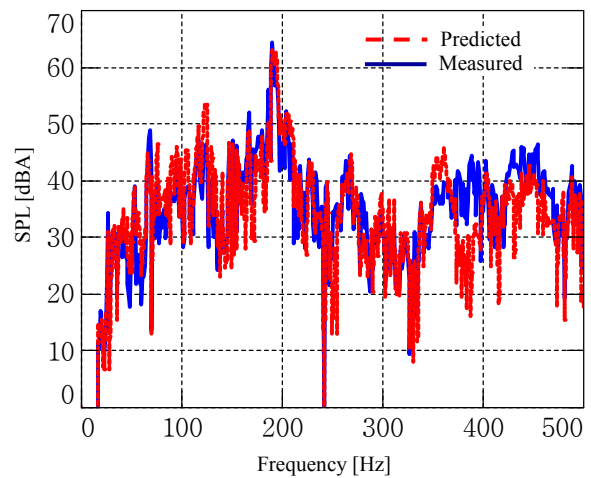


Fig. 10 Transfer path analysis

과 같다. 이때 H_{ij} 는 j 지점을 가졌을 때 i 지점의 가속도 응답함수이며 \ddot{x}_i^{oper} 는 크립 그론 재현시

각 지점에서의 가속도, f_i^{oper} 는 i 번째 경로로 전달되는 힘이다. 본 연구에서는 크립 그론 소음이 발생하는 브레이크 켈리퍼에서 연결된 허브너클과 허브너클과 연결된 타이로드, 로워암, 스트럿에서 가속도를 측정하였다.

두가지 실험을 통해 앞으로 차량 시스템의 개선에 따라 크립 그론 소음을 저감 할 수 있는 가능성을 확인 할 수 있었다. 마찰재의 경우 여러 종류의 마찰재를 실험을 통해 비교해 보는 방법 밖에 없기 때문에 뚜렷한 대책을 세울 수 없는 것이 단점인 반면 차량 시스템의 변화에 의해 소음을 저감 시킬 수 있는 방법을 정립할 경우 설계 단계부터 대책을 마련 할 수 있는 장점이 있다.

마찰재나 차량 변화에 따라서 크립 그론 소음의 크기는 변하였지만 특징은 크게 변하지 않았다. 이를 볼 때 크립 그론 소음의 특징이 차량 시스템의 변화 보다는 디스크나 마찰재 형상의 영향이 큰 것 같다.

3. 결 론

다양한 인자에 민감한 크립 그론 소음의 재현성을 높이기 위해서는 통제변수를 결정하는 것이 매우 중요하다. 이번 연구를 통해 크립 그론 소음에 대한 실차 실험에서는 차량 내/외부의 환경과 브레이크 작동 압력을 고려해야 함을 알 수 있었다.

또한 마찰재와 차량 변화에 따른 소음 변화의 측정으로 차량 시스템의 개선에 따라 크립 그론 소음을 저감할 수 있는 가능성을 확인 할 수 있었다.

후 기

본 연구는 현대 모비스와 한국연구재단(BK21 사업), 서울대학교 정밀기계설계공동연구소의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

- (1) Bettella, M., Harrison, M. F. and Sharp, R. S., 2002, "Investigation of Automotive Creep Groan Noise with a Distributed Source Excitation Technique," *Journal of Sound and Vibration*, Vol.255, No. 3, pp.531~547.
- (2) Donley, M. and Riesland, D., 2003, "Brake Groan Simulation for a McPherson Strut Type Suspension," *SAE Technical Paper Series*, NO.2003-01-1627.
- (3) Dunlap, K. B., Riehle, M. A. and Longhouse, R. E., 1999, "An Investigate Overview of Automotive Disc Brake Noise," *SAE Technical Paper Series*, No.1999-01-0142.
- (4) Vadari, V. and Jackson, M., 1999, "An Experimental Investigation of Disk Brake Creep-Groan in Vehicles and Brake Dynamometer Correlation," *SAE Technical Paper Series*, NO.1999-01-3408.
- (5) Crowther, A. R., Yoon, J. and Singh, R., 2007, "An Explanation for Brake Groan Based on Coupled Brake-Driveline System Analysis," *SAE Technical Paper Series*, No.2007-01-2260.
- (6) Crowther, A. R. and Singh, R., 2007, "Analytical Investigation of Stick-Slip Motions in Coupled Brake-Driveline Systems," *Nonlinear Dynamics*, Vol.50, No. 3, pp.463~481.
- (7) "Transfer Path Analysis : The Qualification and Quantification of Vibro-Acoustic Transfer Paths," LMS International Application Note.