Composites Research

Vol. 37, No. 5, 427-433 (2024)
DOI: http://dx.doi.org/10.7234/composres.2024.37.5.427
ISSN 2288-2103(Print), ISSN 2288-2111(Online)

Paper

고하중 저속 조건에서의 자동차 AVN 소재의 스퀵 소음에 관한 연구

박태호* · 김혜영* · 장진우** · 서종환*,**†

Study on Squeak Noises in Car AVN Materials under High Load and Low Speed Conditions

Tae Ho Park*, HuiYing Jin*, Jin Woo Jang**, Jonghwan Suhr*,**†

ABSTRACT: As the automotive industry transitions from internal combustion engine vehicles (ICEV) to battery electric vehicles (BEVs), customers are becoming increasingly aware of and demanding solutions to squeak noises, especially from audio, video, and navigation (AVN) components. These noises occur under relatively high load and low speed conditions and cannot be reproduced on commercial friction test equipment. Therefore, a new friction testing machine was developed and evaluated in this study. This machine is a pin-on-disk type tribometer that can set up the squeak noises test conditions for AVN component materials and quantitatively measure acceleration, sound pressure, and displacement due to friction. The developed equipment was evaluated through two types of tests: the noise evaluation of well-known contact pairs, and the comparison test of the friction coefficient repeatability. The test results confirm that the developed test machine can be utilized for the evaluation of the squeak noise. In addition, it was also found that the characteristics of squeak noise in high load and low speed conditions can be defined as groan noise. Moreover, displacement, friction force, acceleration was found to have a relationship with sound amplitude with relation of more than R^2 = 0.75. Acceleration can be a key parameter to predict squeak noise, since it has a strong correlation (R^2 = 0.94) in high load low speed conditions.

초 록: 자동차 산업이 내연기관(ICE)에서 배터리 전기 자동차(BEV)로 전환함에 따라 고객들은 특히 오디오, 비디오, 내비게이션(AVN) 부품에서 발생하는 스퀵 소음에 대한 인식과 해결책에 대한 요구가 점점 더 커지고 있다. 이러한 소음은 상대적으로 높은 하중과 저속 조건에서 발생하며, 과거 문제가 되었던 스퀵 소음과는 다른 발현 조건을 가지고 있어 상용 마찰시험장비에서는 재현할 수 없다는 한계가 존재했다. 따라서 이 연구에서는 현재 문제가 되고 있는 이음 현상을 관측할 수 있는 새로운 마찰시험기를 개발하여 평가하였다. 이 마찰시험기는 Pin-on-Disk 형태의 마찰시험기로 AVN 부품 소재의 스퀵 이음 시험 조건을 설정할 수 있고, 마찰에 의한 가속도, 음압 및 변위 등을 정량적으로 계측할 수 있다. 개발된 장비는 잘 알려진 접촉 쌍의 소음 평가 및 반복성 비교시험 두 가지 유형의 시험으로 평가하였다. 시험 결과, 개발된 시험기가 스퀵 소음 평가에 활용될 수 있음을 확인하였다. 본 시험에서는 고하중 저속 조건에서의 이음의 특성을 파악하고 마찰과 이음과의 관계를 확인하였으며, 고하중 저속 조건의 이음이 여러 스퀵 이음 현상 중 Groan noise에 해당되는 것을 확인하였다. 더불어, 변위, 마찰력 및 가속도가 음압과 R^2 = 0.75 이상의 상관관계를 확인하였으며, 특히 가속도는 음압과 R^2 = 0.94 이상의 상관관계를 보여 이음을 예측할 수 있는 주요 파라미터로 확인되었다.

Key Words: BSR, 스퀵 이음(Squeak), 스틱-슬립(Stick-slip), 응착일(Work of Adhesion)

Received 19 July 2024, received in revised form 23 September 2024, accepted 12 October 2024

*School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea
**Department of Polymer Science and Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea
†Corresponding author (E-mail: suhr@skku.edu)

1. 서 론

현재 차량은 기존 내연기관 차량에서 전기차로 바뀌는 전환점을 맞고 있으며, 이에 따라 엔진과 파워트레인과 같이 주 소음으로 인지되었던 큰 소음들이 획기적으로 줄어들게 되었다. 때문에 상대적으로 인지되지 않던 소음인 Buzz, squeak, rattle (BSR)이라는 새로운 소음이 사용자들에게 인식되기 시작하면서 문제가 되고 있으며, 이들 소음이 자동차의 품질을 결정하는 주요한 요소로 부각되었다[1,2].

Buzz의 경우에는 접촉된 두 소재의 공유 진동주파수가 외부 가진력에 의한 가진주파수와 일치될 때 발생하는 것으로 알려져 있다. Squeak의 경우 접합된 소재의 상대변위가 발생할 때 마찰 운동인 Stick-Slip으로 발생한다고 알려져 있다. Rattle의 경우 두 소재가 충돌하면서 발생하는 소음으로 알려져 있다[3].

이 중 스퀵 소음(Squeak)이 현재 자동차 AVN 장치에서 서로 다른 두 소재가 접합하고 있는 상황에서 발생하고 있는 것으로 나타났다. 이는 차량의 여름철 차량이 높은 온도에 노출됨에 따라 차량 내부의 온도가 급격히 상승한 상태(약 70°C)에서 에어컨 사용으로 급격하게 냉각되면서 접촉된 다른 소재 간의 상대변위에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다[4]. 위 이음현상은 비교적 고하중, 저속 조건에서 발현되며 상대적으로 큰 소음이 발생한다.

다양한 부품에서 발생하는 스퀵 소음을 감소시키기 위해 다양한 연구가 진행되었으며 이에 따른 다양한 장비도 만들어졌다. Don Conglin 등[5]은 Pin-on-Disk 상용 마찰 장비를 이용하여 세라믹과 메탈 소재의 접촉 간 속도와 수직응력 변화에 따른 이음 현상을 분석하였다. Cho 등[6] 및 Yoon 등[7]은 친환경 소재를 이용하여 합성한 고무에 대한 마찰거동을 선형 마찰 장비를 이용하여 측정하였으며, 고무의 점탄성 특성과 마찰과의 분석을 진행하였다. Nam 등[8]은 Pin-on-Disk를 직접 제작하여 마찰과 소음진동에 대한 상관관계를 연구하였다. 또한 Giannini 등[9]은 브레이크 패드에 발생하는 스퀵 이음을 분석하기 위해 자체 장비를 제작하여 이음에 대한 특성을 연구하였다. 최근에는 Zins-Ziegler SSP-04 라는 장비를 이용한 시험법(VDA 230-204)이 개발되어, 접촉된 두 시편의 이음의 발생 정도를 (1-10)까지 RPN으로 도출하여 데이터 베이스를 구축하고 있다[10]. 하지만 지금까지 보고된 연구에서 고하중 및 저속 조건에서의 이음 분석을 진행한 사례와 AVN 부품에서 발생하고 있는 이음 현상에 대한 사례가 제한적으로 나타났다. 때문에 자동차 내부 AVN 부품에서 발생하고 있는 고하중 저속 조건에서의 스퀵 이음 현상에 대한 연구가 필요하며, 이를 진행하기 위한 장비를 개발할 필요가 있었다.

본 연구에서는 고하중 저속 조건의 이음을 관찰하기 위한 장비를 개발하여 실제 이용되고 있는 접합쌍을 이용하여 평가하였다. 신뢰성 있는 스퀵 소음의 데이터베이스 구축을 위하여 Sprag-Slip mechanism을 이용하여 스퀵 이음이 발생하기 쉬운 환경을 구축하였다. 현 장비의 신뢰성 파악을 위하여 실제 자동차 AVN 소재에서 문제가 되고 있는 접합쌍(Contact pair)을 이용한 시험을 진행하여 경향성을 확인해 보았다. 또한 재현성 파악을 위하여 유사 논문의 비슷한 장비와 정마찰계수의 편차를 비교하였다. 마지막으로 구축된 장비로 시험을 진행하였을 때 발생하는 이음의 특성을 파악해보았으며, 고하중 저속 조건 내 시험 조건 변화에 따른 이음 발생 경향을 확인해 보았다.

2. 이 론

2.1 Sprag-Slip Mechanism

다양한 소재 조합의 우수한 스퀵 소음 발현에 대한 데이터베이스를 구축하기 위해 Sprag-Slip mechanism을 이용하여 장비를 구축하였다. Spurr[11]와 Papinniemi[12]가 처음 정의한 Sprag-Slip mechanism이란 두 접합쌍에서 마찰이 가장 크게 작용할 수 있는 환경을 구조적으로 조성하는 방법이다. Fig. 1은 Sprag-Slip이 발현되는 구조에 대해 단순화 표현한 것이다. Fig. 1은 힌지에 연결된 길이의 강체 막대가 강체 평면과 각이 진 상태에서 접촉되어 있을 때 마찰 거동은 식 (1)과 (2)와 같이 표현할 수 있으며, 이때 μ는 마찰계수이고 L은 힘이다[13].

$$F_f = \frac{\mu L}{1-\mu\tan\theta} \tag{1}$$

$$F_n = \frac{L}{1-\mu\tan\theta} \tag{2}$$

식 (1)은 마찰력(F_f)이 두 선이 만나는 각도(θ)에 따른 마찰계수(μ)의 관계를 나타내고 있으며 식 (2)는 마찰력에 따른 수직항력(F_n)관계를 나타낸다. 위 식에서 마찰계수가 μ = cot(θ)인 경우 마찰력은 무한대가 되는데 이 경우를 스프래깅(Spragging)이라고 한다[13]. 스프래깅 조건이 만족되면 막대 끝이 움직이는 판의 반대방향으로 튀어 나가면

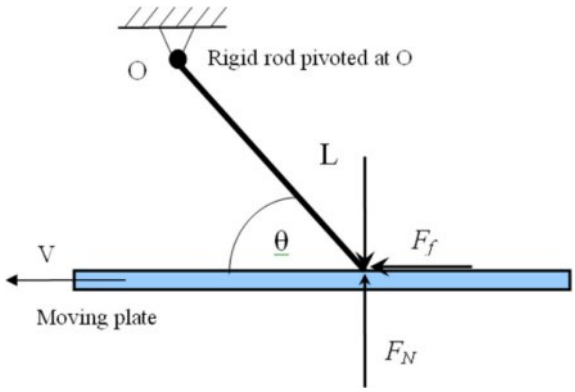


Fig. 1. Schematic diagram of Sprag-Slip mechanism

서 판과 막대 사이의 상대적인 운동이 무한히 지속된다.

이러한 원리를 이용하여 장비를 개발할 경우 구조적으로 스퀵 소음이 일어났을 때 가장 크고 잘 발생하게 되는 환경을 조성해 준 상태의 이음 현상을 관찰할 수 있다. 또한 이 장비를 이용한다면 다양한 AVN 소재 접합쌍의 스퀵 소음에 대한 특성을 파악할 수 있어 제품 생산 단계 전 소재 선정간 도움을 줄 수 있을 것이라 판단된다.

3. 시험 장비와 방법

3.1 소음 시험 장비

Fig. 2는 장비의 시험 부에 대한 설계 디자인과 실제 모습이다. 두 시편은 각각 디스크 윗부분과 L자형 지그(Jig) 아랫부분에 위치에 접하게 되며 디스크가 회전하면서 시험이 진행되는 Pin-on-Disk 방식 장비를 개발하였다. 이 장비를 사용하게 된다면 디스크가 회전하며 지그와 마찰되므로 선형 장비와 비교하여 시험시간 및 시험거리의 제한이 없다. 해당 장비의 시험 조건은 Table 1과 같다. Table 1에 따르면 시편이 특정 사이즈일 때에 고하중에서의 시험이 가능하며, 속도 조건 또한 웜 기어를 통하여 디스크 중심으로부터 거리를 자유롭게 조절할 수 있어 시험 속도를 저속 조건으로 광범위하게 조절하여 시험을 진행할 수 있다.

Fig. 3은 장비에 부착된 센서의 종류 및 위치를 나타내고 있다. 로드셀, 토크센서, 근접 프로브, 가속도계 그리고 마이크까지 5개의 센서가 부착되었다. 위 센서들은 접촉된 두 소재가 마찰 운동을 진행함에 따라 각 물리량(토크, 가속도, 변위, 음압 등)을 실시간으로 측정하여 데이터를 저장하였다.

구축된 장비를 이용한 시험 방법은 다음과 같다. 시편을 준비하여 큰 시편은 아랫부분 디스크에 고정시키고 나머지 작은 시편은 L자형 지그 밑부분에 부착시킨다. 두 소재가 접촉 및 하중조건이 만족될 때까지 장비 상단부를 하강시킨다. 하중조건이 조정된 후 센서들의 영점을 지정해 주고 속도 조건에 알맞게 디스크를 회전시키며 시험을 진행한다.

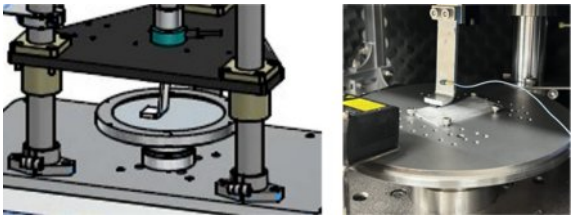


Fig. 2. Pin-on-Disk test section

Table 1. Operational range of testing machine

Parameter	Specifications
Load Cell	5 N - 280 N
Stress* Condition	0.08 MPa - 4 MPa
Disc Rotational Speed	0.00005 deg/s - 0.2 deg/s
Speed* Condition	0.001 mm/min - 4 mm/min

* Area: 64 mm^2 , ** Disc Radius: 20 mm

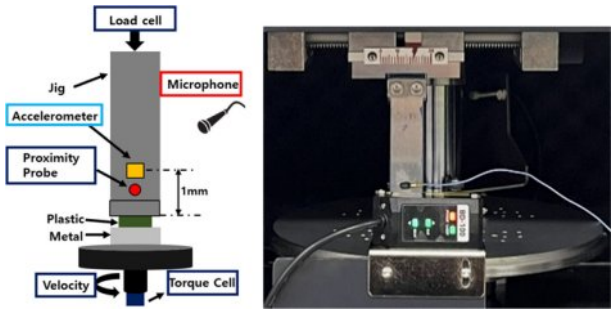


Fig. 3. Sensors and test parts of friction testing machine

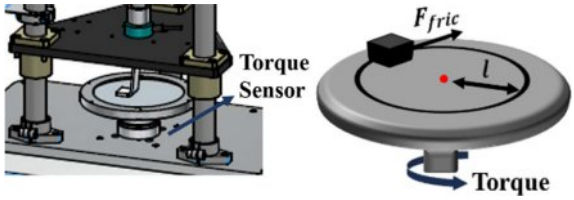


Fig. 4. Force diagram of friction in test equipment

Fig. 4는 토크센서의 위치와 토크센서로부터 측정된 값으로 마찰력을 계산하는 방법에 대해 도식적으로 표현한 것이다. 토크센서는 디스크의 하단부에 위치하며 식 (3)을 이용하여 계산하였다. 이때 l은 웜기어를 이용하여 거리를 조절할 수 있는데 위 연구에서는 l = 20 mm로 시험을 진행하였다.

$$F_{fric}(N) = Torque\,(N \times m) / \; l\;(m) \tag{3}$$

시험을 진행하게 되면 Fig. 5와 같은 stick-slip 현상이 관측되는 것을 알 수 있었다. 이러한 경향은 시험을 진행하였을 때 여러 센서에서 측정된 가속도, 마찰력, 변위, 수직하중 등 마찰 관련 물리량 전체에서 동일한 경향을 확인할 수

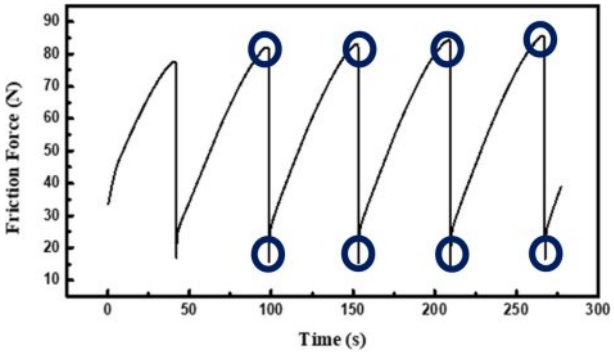


Fig. 5. Example of friction force graph

있었다. 이음과 마찰 간의 상관관계를 분석하는데 있어 마찰 관련 물리량의 경우, 이음이 발생한 이벤트의 국부적인 최댓값과 최솟값의 차를 도출하여 분석하였다. 이러한 분석법을 사용한 이유는, 스퀵 소음의 크기는 마찰 운동간 측정되는 마찰력의 최대값에 따라 변화하기보다는 정지상태에서 응축된 에너지가 움직이기 시작할 때 방출되는 운동에너지에 따라 이음의 크기가 결정된다고 알려져 있기 때문이다[14]. 이 때 방출되는 에너지는 Stick-slip 현상에서 정지상태에서의 최대 마찰력에서 slip 시 떨어지는 마찰력의 차로 나타낼 수 있으며, 위 값이 커질수록 방출되는 에너지가 증가하여 빛, 열 그리고 소리로 소비되는 에너지의 양 또한 증가하는 것을 나타낸다고 알려져 있다[15,16].

마이크로폰의 경우에는 장비가 비치된 장소에 기본적으로 배경 소음이 약 45-50 dB(A) 정도 존재하여 50 dB(A) 미만의 값은 제외하고 분석을 진행하였다. 또한 스퀵 소음 발생간 소음의 주파수의 영향도를 동일하게 측정하기 위해 150 mm 떨어진 곳에 위치하여 측정을 진행하였다. 분석을 진행함에 있어 가속도와는 다르게 음압의 최댓값만을 이용하여 분석을 진행하였다.

3.2 장비 검증

본 연구에서는 개발한 장비를 검증하기 위해 소재조합 사례 시험 및 반복성 비교시험 2가지 종류의 시험을 수행하였다. 첫번째 소재조합 사례시험은 실제로 잘 알려진 접촉쌍을 이용하여 실제로 이음이 크게 나는 소재조합과 작게 나는 소재조합이 구축된 장비에서도 동일한 결과가 나오는 지 확인해보았다. Table 2는 해당 시험을 진행하기 위해 사용한 접합쌍의 시편 정보 및 실제 이음의 크기에 대한 정보가 나타나 있다.

Table 2에 나온 접합쌍은 서로 다른 소재로 이루어져 있으며 Pair #1 부터 Pair #3로 갈수록 이음이 점차 감소하는 경향을 보임을 알 수 있다.

3개의 접합쌍이 0.8 MPa 부터 4 MPa까지 3가지 응력 조건으로 변화하였을 때 이음 발생의 변화에 대한 결과가 Fig. 6에 나와 있다. Pair #1 부터 Pair #3까지 모든 시험 조건에서 일정한 경향성을 가지고 있는 것을 확인하였다. 또한 실제 차량에서 발생하고 있는 이음 현상이 구축된 장비에서도 유사한 결과가 나오는 것을 확인하였다.

두번째 반복성 비교시험은 비슷한 Pin-on-Disk의 재현성에 대한 연구를 진행한 논문을 참고하여 진행하였다[17]. 이 논문[17]에서 상용장비의 재현성을 정마찰계수의 편차를 이용하여 분석하였다.

Table 2. Contact pairs for compatibility check

Pair	Material Pairs	Loudness
Pair #1	PC/ABS, SECC	Loud
Pair #2	PC, Aluminum (Glossy)	Noisy
Pair #3	PC/ABS Aluminum	Quiet

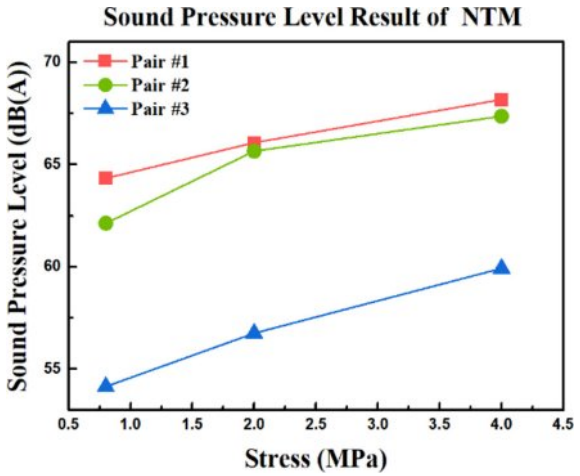


Fig. 6. Results of compatibility test

Table 3. Results of repeatability on commercial equipment

Test Condition	Results	Relative Standard Deviation (RSD)
Condition #1	μ = 0.087 ± 0.015	17%
Condition #2	μ = 0.091 ± 0.016	17%
Condition #3	μ = 0.073 ± 0.015	20%
Condition #4	μ = 0.078 ± 0.019	24%

Table 4. Results of repeatability on developed equipment

Test Condition	Results	Relative Standard Deviation (RSD)
Condition 1, pair 1	μ = 0.33 ± 0.017	5.32%
Condition 2, pair 1	μ = 0.28 ± 0.033	11%
Condition 1, pair 2	μ = 0.4 ± 0.02	6%
Condition 2, pair 2	μ = 0.3 ± 0.011	2.84%

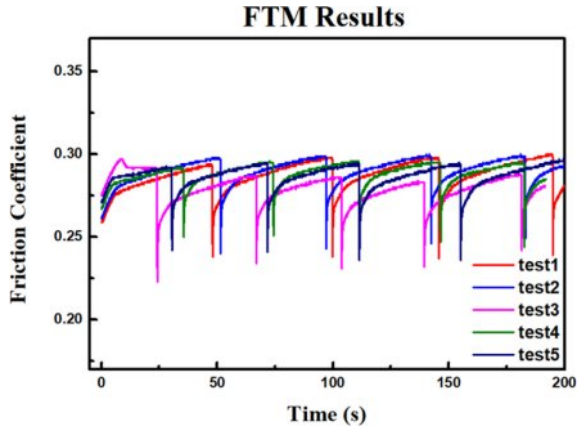


Fig. 7. Repeatability tests of developed equipment

Table 5. Test conditions

Parameter	Test Range
Stress	0.8/ 2/ 4 MPa
Speed	0.5 mm/min

Table 3에 따르면, 상용 Pin-on-Disk에 대한 재현성에 대하여 4가지 서로 다른 조건으로 시험을 진행하였을 때, 상대 표준편차는 17~24% 정도가 형성된 것을 확인하였다. 위와 동일한 분석법을 적용하여 유사한 시험조건으로 구축된 장비에서 시험을 진행하였을 때 Table 4와 같은 결과가 도출되었다.

개발된 장비의 경우 상대 표준편차가 2%~11% 정도로 형성되어 재현성이 상대적으로 나은 장비임을 확인하였다.

동일 시험을 연속으로 진행하였을 때의 마찰계수의 변화가 Fig. 7과 같이 나타났다. 정마찰계수는 0.30에서 0.27로 10% 이내에서 형성되는 것을 알 수 있으며, 로컬 최댓값과 최솟값의 진폭의 재현성은 20%로 나타났다.

이는 상용화 된 Pin-on-Disk 형식의 장비보다 구축된 장비의 재현성이 더 좋음을 알 수 있으며, 위 연구로 시험을 진행하더라도 일반적인 상용장비의 오차범위 내 시험 결과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

3.3 재료 및 시험 방법

접합쌍의 경우 기존 Table 2에서 사용했던 3개의 접합쌍 중 가장 큰 소음을 유발했던 첫번째 조합을 선정하여 시험을 진행하였다.

시험 조건은 기존 사례 시험에서 이용했던 Table 5의 3가지 응력조건에 대하여 이용하여 진행했으며, 속도는 스퀵 소음이 잘 발생하는 0.5 mm/min로 고정하였다[18].

시험 분석은 총 2가지로 진행되었다. 첫번째로 이음의 특성을 파악하기 위한 시험으로 마이크로부터 입력되는 이음의 특성을 옥타브 밴드로 분석을 진행하였다. 이음 발생에 따른 옥타브 밴드 분석간 소음의 종류를 주파수 대로 나눈 기준을 적용하여 분석을 진행하였다[19]. 두번째는 이음을 대표할 수 있는 마찰 물리량을 알아보고자 각 마찰 물리량과 이음 간의 상관관계를 분석해보았다. 마찰 이벤트에서 다양한 센서에서 측정된 데이터를 바탕으로 이음과 센서 신호가 어떠한 상관관계가 있는지 분석을 진행하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 고하중 저속 조건에서의 이음 특성 분석

선정한 접합쌍을 이용하여 고하중 조건에서의 소음 분석을 진행하였다. 발생한 10번의 소음에 대한 평균 주파수 밴드 값은 Fig. 8과 같이 분석되었다.

Fig. 8에 따르면 125-500 Hz 구간대의 소음이 가장 많이 분포되어 있는 것으로 조사되었다. 이는 스퀵 소음이 저주파수 위주로 발생이 되어 Groan Noise로 분류됨을 확인할 수 있다[20]. Groan noise는 다른 스퀵 소음보다 발생 빈도가 낮지만 한번 발생하면 큰 소음이 유발된다고 알려져 있다.

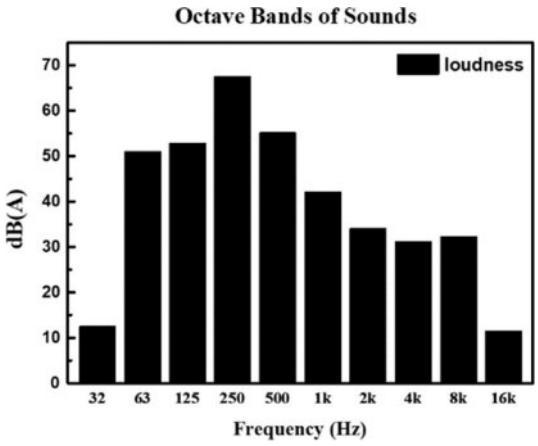


Fig. 8. Octave band results of squeak noise

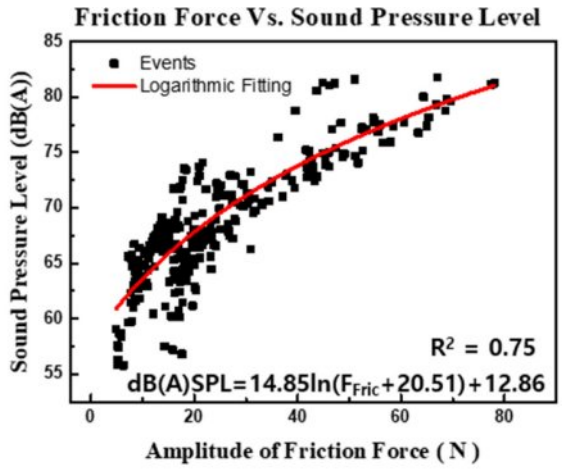
Table 6. Test conditions

Frequency (Hz)	Sound Pressure Level (dB(A))	Sound Pressure (Pa)
32	12.7	15
63	51.1	128
125	53	196,000
250	67.6	5,736,000
500	55.2	330,000
1,000	42.2	16,400
2,000	34.2	2,600
4,000	31.3	1,300
8,000	32.4	1.700
16,000	11.5	14

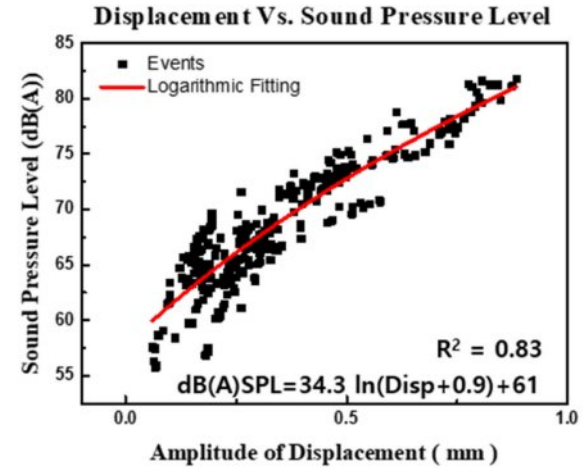
구성 주파수의 양을 Pa로 나타내면 Table 7과 같이 나타난다. Table 7에 따르면 대부분의 음압이 250 Hz에 모여 있는 것을 알 수 있다. 이는 모든 시험 조건에서 동일한 경향을 보인다.

4.2 고하중 저속 조건에서의 이음 특성 분석

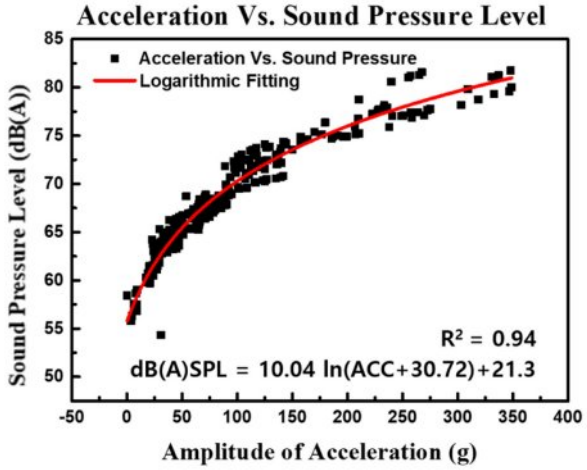
Fig. 9에 마찰 물리 량과 이음의 크기와의 상관관계를 나타내었다. 각 물리 량은 음압과 최소 R^2 = 0.75 이상의 로그 관계를 가지고 있는 것이 확인되었으며, 이중 가속도와 이음이 R^2 = 0.94로 높은 연관성을 보였다. 이는 마이크가 주변 소음으로 인해 측정이 잘 되지 않더라도 마찰 이벤트의 가속도 값을 안다면 어느 크기의 이음이 발생하는지 예측할 수 있어 가속도계를 이용한 이음예측이 가능함을 확인하였다.



(a) Relationship between friction force and sound pressure level



(b) Relationship between displacement and sound pressure level



(c) Relationship between acceleration and sound pressure level

Fig. 9. Relationship between friction properties and sound pressure level

5. 결 론

본 연구에서는 자동차 내부 AVN 장치에서 상이한 소재가 접촉된 상태에서 발생하는 고하중 저속 조건의 이음 현상을 시험하고 분석하였다. 위 연구를 진행하기 위해 새로운 장비를 개발하였으며 두가지 시험을 통해 위 개발장비의 적합성을 확인하였다. 또한, 개발 장비를 이용하여 AVN 접합쌍의 고하중 저속 조건에서 이음 특성과 마찰과 이음과의 정량적 관계를 알아보았다.

위 연구의 결론은 다음과 같다.

1. 각 시험 조건에서 발생한 이음 현상에 대해 옥타브 밴드로 분석을 진행한 결과 90%에 해당하는 주파수가 Groan Noise인 저주파수(50-500 Hz) 영역의 소음이 발생하였다.
2. 마찰 관련 물리량인 변위, 마찰, 가속도와 이음의 크기와 상관관계 분석간 R^2 = 0.75 이상의 로그관계를 확인하였다.
3. 가속도의 경우 음압과의 관계가 R^2 = 0.95 이상으로 도출되어 이음을 예측할 수 있는 가장 신뢰성 있는 물리량임을 확인하였다.

본 연구의 개발 장비를 이용한다면 고하중 저속 조건에서의 이음 현상을 실험실 규모에서 모사할 수 있으며, 다양한 AVN 소재조합에 대한 시험을 통하여 자동차 이음 저감 연구를 진행할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

This work was supported by the Technology Innovation Program (20013794, Center for Composite Materials and Concurrent Design), funded by LGE VS company (C2023006222).

REFERENCES

1. Shin, S.H., and Cheong, C., "Experimetal Characterization of Instrument Panel Buzz, Squeak, and Rattle (BSR) in a Vehicle," *Applied Acoustics*, Vol. 71, No. 12, 2010, pp. 1162-1168.
2. El-Essawi, M., Lin, J., and Sobek, G., "Analytical Predictions and Correlation with Physical Tests for Potential Buzz, Squeak, and Rattle Regions in a Cockpit Assembly", 2004-01-0393, SAE, Warrendale, PA, 2004.
3. Kim, S., Ko, D., Lee, H., Nam, J., and Lee, J., "A Study on Design Method for BSR Noise Reduction Based on Simulation of Vehicle Seat," *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 31, No. 3, 2023, pp. 199-208.
4. Yeo, S., Jeong, Y., Choi, S., Kim, H., Park, G., and Shon, M., "Study on the Reduction of Stick-slip Noise in Acrylonitrile Butadiene Styrene-based Plastics Using Non-polar Additives to Reduce Friction," *The Journal of the Acoustical Society of Korea*, 2024, Vol. 43, No. 1, pp. 49-59.
5. Dong, C., Mo, J., Yuan, C., Bai, X., and Tian, Y., "Vibration and Noise Behaviors during Stick–slip Friction," *Tribology Letters/Tribology Letter*, Vol. 67, No. 4, Sep. 2019.
6. Cho, S.H., Yoon, B., Lee, S.H., Hong, K.M., and Suhr, J., "Inves-

tigation of Viscoelastic Properties of EPDM/PP Thermoplastic Vulcanizates for Reducing Innerbelt Weatherstrip Squeak Noise of Electric Vehicles", *Composites Research*, Vol. 34, No. 3, 2021, pp. 192-198.
7. Yoon, B., Kim, S., Lang, A., Egelkamp, C., Meier, J., Giese, U., Kim, B., Kim, J.H., Bae, J.W., Um, G.Y., Kim, S.H., Kim, D.I., Kim, S.J., and Suhr, J., "Friction Behaviors of Rice Husk Silica-reinforced Elastomer Composites in Contact with Rough Self-affine Surfaces," *Polymer Testing*, Vol. 116, 2022, 107764.
8. Nam, J.H., and Kang, J.Y., "A Basic Experimental Study on the Squeak Noise Using the Pin-on-disk," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 22, No. 8, 2012, pp. 736-741.
9. Giannini, O., Akay, A., and Massi, F., "Experimental Analysis of Brake Squeal Noise on a Laboratory Brake Setup," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 292, No. 1-2, 2006, pp. 1-20.
10. Choi, S.U., Ahn, S., and Ih, K.D., "Basic Principle of BSR (Buzz, Squeak, Rattle) Noise according to the Generation Mechanism," *The Journal of the Acoustical Society of Korea*, Vol. 37, No. 5, 2018, pp. 309-316.
11. Spurr, R.T., "A Theory of Brake Squeal, Proceedings of the Automobile Division", *Institution Mechanical Engineers*, Vol. 15, No. 1, 1961, pp. 33-52.
12. Papinniemi, A., Lai, J.C.S., Zhao, J., and Loader, L., "Brake Squeal: A Literature Review," *Applied Acoustics*, Vol. 63, No. 4, 2002, pp. 391-400.
13. Ghazaly, N.M., El-Sharkawy, M., and Ahmed, I., "A Review of Automotive Brake Squeal Mechanisms," *Journal of Mechanical Design and Vibration*, Vol. 1, No. 1, 2014, pp. 5-9.
14. Park, J.H., and Lee, Y.Z., "The Evaluation of Noise Based on the Frictional Phenomena Using Automotive Interior Materials," *Tribology Transactions*, Vol. 64, No. 5, 2021, pp. 777-783.
15. Jacko, M., Tsang, P., and Rhee, S., "Automotive Friction Materials Evolution during the Past Decade," *Wear*, Vol. 100, 1984, pp. 503-515.
16. Brach, R., "Friction, Restitution, and Energy Loss in Planar Collisions," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 51, No. 1, 1984, pp. 164-170.
17. Novak, R., and Polcar, T., "Tribological Analysis of Thin Films by Pin-on-disc: Evaluation of Friction and Wear Measurement Uncertainty," *Tribology International*, Vol. 74, 2014, pp. 154-163.
18. Lee, D.G., Park, H.J., and Park, S.H., "Experimental Study on Friction Characteristics between Sliding Polymer Plates for Reduction of Stick-and-Slip Abnormal Noise," *Polymer (Korea)*, Vol. 37, No. 5, 2013, pp. 642-648.
19. Hegde, S., and Suresh, B.S., "Study of Friction Induced Stick-Slip Phenomenon in a Minimal Disc Brake Model," *Journal of Mechanical Engineering and Automation*, Vol. 5, No. 8, 2015, pp. 100-106.
20. Stojanovic, N., Glisovic, J., Grujic, I., N., Narayan, S., Vasiljević, S., and Bošković, B., "Experimental and Numerical Modal Analysis of Brake Squeal Noise," *Mobility & Vehicle Mechanics*, Vol. 44, No. 4, 2018, pp.73-85.