

진동 특성을 이용한 접합된 차량 구조의 BSR(Buzz, Squeak, Rattle) 소음 강건성 관측에 대한 실험연구

Experimental study to investigate the structural integrity of welded vehicle structure for BSR (Buzz, Squeak, Rattle) noise by vibration measurement

곽윤상,¹ 이종호,¹ 박준홍^{1†}

(Yunsang Kwak,¹ Jongho Lee,¹ and Junhong Park^{1†})

¹한양대학교 기계공학과

(Received March 4, 2019; revised April 18, 2019; accepted May 14, 2019)

초 록: 차량 점용접 부위에서 BSR(Buzz, Squeak, Rattle) 소음 발생 가능성을 국부 진동을 사용하여 비파괴적으로 추정하는 진동기반 계측법을 제시한다. 용접부에 부착된 구조물에 의한 점용접 부위의 국부적인 진동을 유발하고 진동전달 특성을 파악한다. 관측된 진동 특성으로부터 국부 구조의 굽힘강성값을 도출하였다. 강성값의 변화로부터 점용접의 상태 강건성을 파악하였다. 제시되는 방법의 검증에 위해 부분적으로 용접품질이 변화된 시편을 제작하였다. 제작된 시편에서 계측된 진동 특성을 분석하였다. 용접 강건성에 의해 변화하는 특정 주파수 대역을 파악하였다. 구조별, 위치별 계측을 통해 제시된 방법으로 분별이 가능한지 검증하였다. 국부 진동 평가방법은 구조물의 용접 강건성을 생산 현장에서 파악하게 하는 평가방법으로써 BSR 발생 가능성을 저감하기 위한 생산 품질 확보에 사용될 수 있다.

핵심용어: BSR (Buzz, Squeak, Rattle) 소음, 스팟용접, 진동전파, 국부진동

ABSTRACT: In this study, the vibration test method to nondestructively evaluate the possibility of vehicle BSR (Buzz, Squeak, Rattle) noise generation in spot-welded structures was proposed. The weld quality was predicted by analyzing the local vibration transmission characteristics for the beam-shaped structure attached to testing spots. The bending stiffness was evaluated from the identified vibration properties. From the change in the stiffness, the weld quality was evaluated. For verification of the proposed method, the welded specimens were fabricated with partial changes in welding parameters. The local vibration transfers were measured. The frequency bands affected by the weld quality was identified. The capability of evaluating the welding parameters including defect position and quality variations was investigated. The proposed method enables fast quality evaluation to minimize the possibility of BSR noise generation in the manufactured vehicle.

Keywords: BSR (Buzz, Squeak, Rattle) noise, Spot welding, Vibration transfer, Local vibration

PACS numbers: 43.40.At, 43.20.Ye

1. 서 론

차량 BSR(Buzz, Squeak, Rattle) 소음은 조립된 부품 사이의 마찰 접촉 또는 충격에 의해 차량 내부 소음을 발생시킨다.^[1,2] BSR 소음은 탑승자의 주요 불만

원인이며, 이에 따라 BSR 소음저감에 대한 중요성은 점점 증가하고 있다.^[1,3] 차량의 품질을 보장하기 위해, BSR 소음발생을 최소화해야 한다. BSR 소음은 사후 파악이 어려울 뿐만 아니라, 소리를 발생시키는 원인을 예측하기 어렵다. 따라서 구조물간 간섭을 일으키는 위치를 식별하는 것이 필요하다.^[4]

†Corresponding author: Junhong Park (parkj@hanyang.ac.kr)
Mechanical Engineering, Hanyang University, 222 Wangsimni-ro,
Seongdong-gu, Seoul 04763, Republic of Korea
(Tel: 82-2-2220-0424)

차량 BSR 소음을 측정하고, 해석적으로 예측하기 위한 다양한 연구가 수행되었다. 접촉면 사이의 물리적인 상호 작용에 의한 소음 발생메커니즘을 분석하였다.^[5] 차량에서 BSR 소음을 감지하고 예측하기 위해, 각 잡음의 메커니즘을 고려하여 진행도를 맵핑하는 분석이 진행되었다.^[6] 차량 계기판에서 발생하는 BSR 소음에 대해 시스템의 모드형상과 음장가시화하는 연구가 수행되었다.^[7] 차량구조 결합에 스팟용접이 가장 많이 사용되고 있다. 국소적인 용접의 누락이나 강건성 저하는 BSR 소음의 발생으로 직결되기 때문에, 용접의 강건성 평가가 필수적이다.^[8]

본 연구에서는 스팟용접에 의한 BSR 소음 발생 관찰을 실험을 통해 확인하고, 부분적인 용접의 강건성을 판별하기 위한 진동계측법을 제시하였다. 국부적인 진동전달 특성을 계측하기 위한 부착구조물 형태의 진동계측을 통해 목표한 구조물의 강건성을 평가하였다. 제시한 계측법은 구조별, 위치별 계측을 통해 검증되었으며, 부분적인 용접 강성에 의한 진동특성을 도출하였다. 도출된 진동특성을 이용하여 목표부위의 굽힘강성을 예측하였으며, 예측된 강성값으로부터 용접의 강건성을 평가하였다. 제시된 진동 평가방법은 국부적인 진동을 계측 및 분석함으로써 임의 구조물의 목표구간에 대한 용접 강건성을 외부 조건이나 상태에 상관없이 평가가 가능하게 한다.

II. Effects of Welding Conditions on BSR noises

2.1 스팟용접 실험시편 구성

BSR 소음은 차량의 구조요소 간의 결합이 강건하지 못할 때 발생한다. 스팟용접은 차량의 요소결합 방법으로 가장 많이 쓰이는 방법이다. 용접 결합력의 저하는 차량 구조의 치명적인 결함을 야기한다. 따라서 본 연구에서는 용접의 강건성에 의한 BSR 소음의 발생 영향을 고찰하기 위한 실험을 진행하였다. 실험에 사용될 용접 시편이 제작되었다. 시편의 조건은 실제 차량의 플렌지부의 구조적 조건과 용접 간격을 고려하여 결정되었다.

용접시편은 철 재질이며, 시편의 폭과 길이는 각

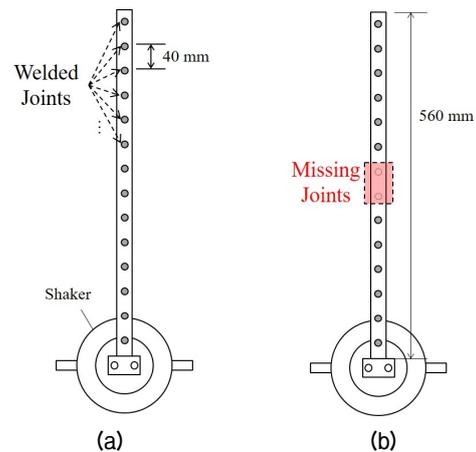


Fig. 1. Experimental setup for measuring vibrations occurred by the generation of BSR noise. Two types of welded specimens were fabricated with different number of missing joints. (a) The specimens without and (b) with missing welded joints.

각 20 mm, 600 mm였다. 스팟용접을 이용하여 결합되었으며, 용접의 간격은 40 mm로 설정되었다. 용접 전류는 7 kA로 모두 동일하게 제어되었다.

용접에 의한 BSR 소음의 영향을 파악하기 위해 용접 상태가 다른 두 시편을 제작하였다. 제작한 두 시편은 Fig. 1에 나타내었다. 40 mm 간격으로 균일하게 14개의 용접이 존재하는 시편과, 중앙부 2개 용접이 누락된 시편이다. 전체 구조물 특성은 소수의 용접 누락으로 크게 변하지 않는다. 그러나 특정 부위의 결합력의 저하는 부분적인 구조물의 동적거동 변위를 증가시킨다. 이러한 동적 거동변위의 증가는 요소간의 충돌이나 마찰을 일으키며 BSR소음 원인이 된다.

2.2 BSR 소음 발생 실험

제작한 용접 시편을 이용하여, 용접 누락에 의한 BSR 소음의 영향을 파악하기 위한 실험을 진행하였다. 시편의 처짐 효과를 방지하기 위해 지면과 수직방향으로 진동셰이커에 고정시켰다. 차량이 굴곡진 면을 주행할 때 BIW(Body In White)의 구조변형에 의해 발생하는 주요 공진주파수에 근접하는 5 Hz의 조화진동으로 시편을 가진 하였다. 가해진 진동에 의해 발생하는 두 시편의 진동 특성을 비교하기 위해 시편의 중앙에 가속도계가 설치되었다. Fig. 1에 나타난 것과 같이 두 시편에 설치된 가속도계의 위치는 동일하다.

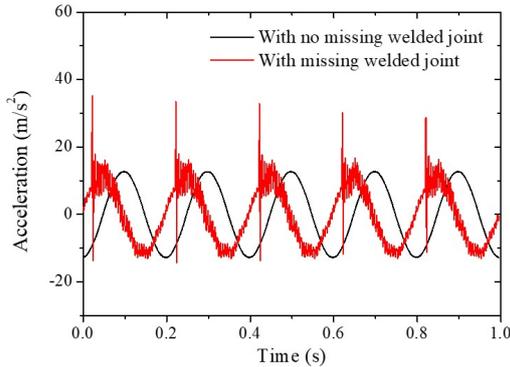


Fig. 2. Measured vibrations of two types of spot-welded specimens when the 5 Hz harmonic vibration was applied on the specimens.

두 시편에 대한 실험을 통해 계측된 가속도 신호를 Fig. 2에 나타내었다. 용접이 균일하게 되어있는 시편에서는 일정한 하모닉 진동이 발생하였다. 그러나 용접이 부분만 제거된 시편에서 일정한 주기로 충격성 신호가 계측되었다. 용접 누락으로 인해 부분적인 구조요소의 진동이 증가하였으며, 이로 인해 구조물의 간섭에 의해 충격성 신호가 발생하였다. 실험을 통해, 용접의 누락위치에서 BSR 소음이 발생하는 것을 확인하였다. 이러한 현상은 실제 차량에서도 용접의 부분적인 누락으로 BSR 소음이 발생할 수 있음을 시사한다. 차량에 존재하는 용접의 강건성을 통해, BSR 소음의 발생위치를 미리 파악할 수 있다.

부분적인 용접 누락은 전체적인 구조의 결합력에 영향을 작지만, 부분적인 요소간의 간섭을 야기할 수 있다. 요소간의 간섭을 줄이기 위해서는 부분적인 결합을 강건하게 유지해야하며, 이러한 차량에서의 구조간 부분적인 결합력은 용접의 강건성에 의해 결정된다. 따라서 용접의 강건성을 구조적 평가로 파악할 수 있는 실험적 방법에 대한 검토가 필요하다.

III. Measurement of Local Vibration Transfer

3.1 실험시편 제작 및 실험세팅

용접의 부분적인 누락을 계측하기 위한 실험법 개발을 위해 실험에 사용할 시편을 제작하였다. 실험 시편은 길이 400 mm, 폭 20 mm 보 형태의 철 시편을

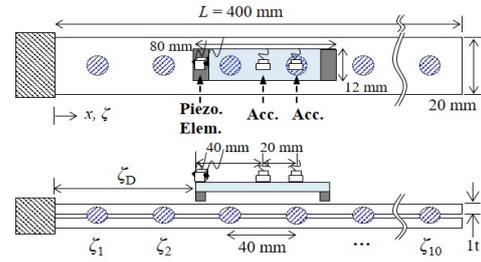


Fig. 3. Parameters and experimental setup for measuring vibrations using the attached structure. The welding currents at ζ_7 were controlled from 0 to 10 kA. All spot welds except for the weld at ζ_7 were performed with a welding current of 7 kA.

이용하여 제작되었다. 스팟용접의 간격은 40 mm 간격으로 유지되었으며, 용접의 위치는 시편의 중앙에 위치시켰다. 실험에 사용된 시편의 길이와 좌표계를 Fig. 3에 나타내었다. 본 논문에서 모든 위치와 길이는 무차원 변수 $\zeta = x/L$ 을 사용하였다.

용접의 결합력을 변화시키기 위하여 용접전류가 제어되었다. ζ_7 에 위치한 용접을 제외한 모든 시편의 용접전류는 7 kA로 제작되었으며, ζ_7 에 위치한 용접의 용접전류는 (0, 4, 6, 7, 8, 10) kA로 변화시켰다. 모든 구간의 용접의 전류를 변화시킨 것이 아니기 때문에, 전체 결합력의 변화는 크지 않다. 그러나 용접의 부분적인 결합력의 저하는 BSR 소음을 일으킬 수 있기 때문에 부분적인 구조물의 결합력도 면밀히 검토되어야 한다.

본 연구에서는 부분적인 구조파의 전달특성을 활용하여 구조물의 원하는 부분의 강건성을 판단하기 위한 계측법을 제시하였다. 부분적인 구조파의 전달특성을 계측하기 위해, 보 형태의 부착 구조물을 이용하였다. Fig. 3에 나타낸 것과 같이, 길이 80 mm, 폭 12 mm의 아크릴 재질로 제작된 부착 구조물은 양단에 위치한 자석을 이용하여 용접시편과 결합되었다. 압전소자(Noliac, NAC2013-A01)를 이용하여 랜덤가진 되었으며, 부착구조물의 상단에 위치한 두 가속도계(Endevco, 2250-A10)를 이용하여 발생하는 진동을 계측하였다.

3.2 부착구조물을 이용한 국부 전달특성 계측결과

부착구조물을 이용하여 국부적인 진동 전달특성

을 계측하기 위해, 전달함수를 이용하였다. 전달함수는 두 위치에서 계측된 진동신호를 통해 계산되었으며, 다음의 식과 같다.

$$\Lambda e^{i\phi} = \hat{w}(x_b) / \hat{w}(x_a), \quad (1)$$

\hat{w} 은 계측된 진동이며, x_a 와 x_b 는 부착구조물의 가진위치로부터 위치를 나타낸다. Λ 와 ϕ 는 주파수 응답의 크기와 위상을 의미한다. 부착구조물을 이용하여 계측된 진동 전달함수를 통해 부착된 위치의 국부적인 특성을 예측할 수 있다. 부착구조물을 이용한 국부진동 계측을 검증하기 위한 실험을 진행하였으며, Fig. 4는 부착된 구조물에 따른 계측 진동을 Eq. (1)에 따라 계산된 결과를 보여준다. 광학테이블(남일광학, TX1218-200)에 부착되어 계측된 결과를 나타내며, 부착 가인에 의한 고정체의 변형은 시험되는 장치의 진동보다 작기 때문에 무시되었다. Fig. 4(b)는 보 형태의 용접시편에 부착되어 측정된 결과

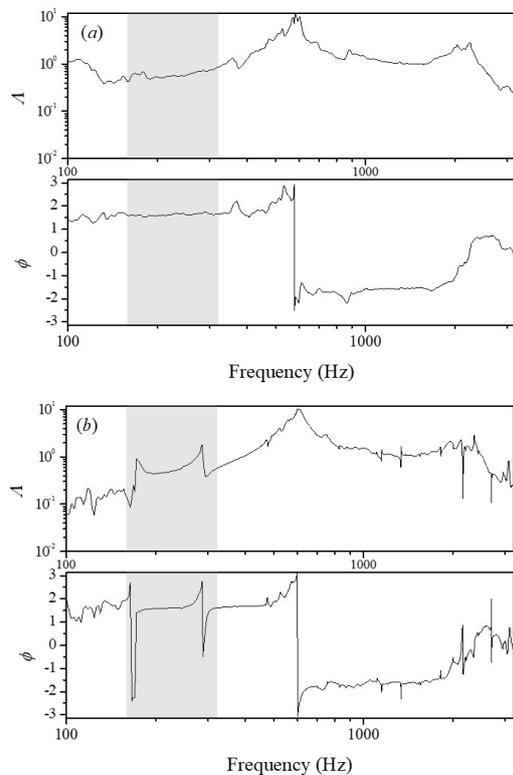


Fig. 4. Measured vibration responses using the attached structure. (a) Attached on a rigid body and (b) attached on the welded structure.

를 나타낸다.

두 측정결과에서 큰 변화가 발생한 주파수 대역을 그래프에 음영처리하여 나타내었다. 보 형태의 구조물에 부착될 경우 명확한 공진 현상이 발생하는 것이 보여진다. 이 결과는 부착구조물을 통해 시험하고있는 위치의 진동전달 특성이 계측된 것을 나타낸다.

또한 국부진동 특성 계측을 검증하기 위해 부착위치별 계측결과를 비교하였다. 모든 용접을 7kA의 용접전류로 제작된 시편과 ζ_7 위치의 용접만 0kA로 시행한 시편의 부착진동 계측결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)는 모두 7kA의 용접전류로 제작된 시편에서의 계측된 결과를 나타내었으며, ζ_D 는 부착구조물의 부착위치를 나타낸다. ζ_D 가 0.2에서 0.6으로 변화함에도 동일한 공진주파수가 발생하였다. 그러나 Fig. 5(b)에 나타낸 것과 같이, $\zeta_7 = 0.65$ 에 위치한 용접전류 변화에 의해 국부적인 강성이 저하된 위치, $\zeta_D = 0.6$ 에서의 계측된 진동특성의 공진주파수가 변

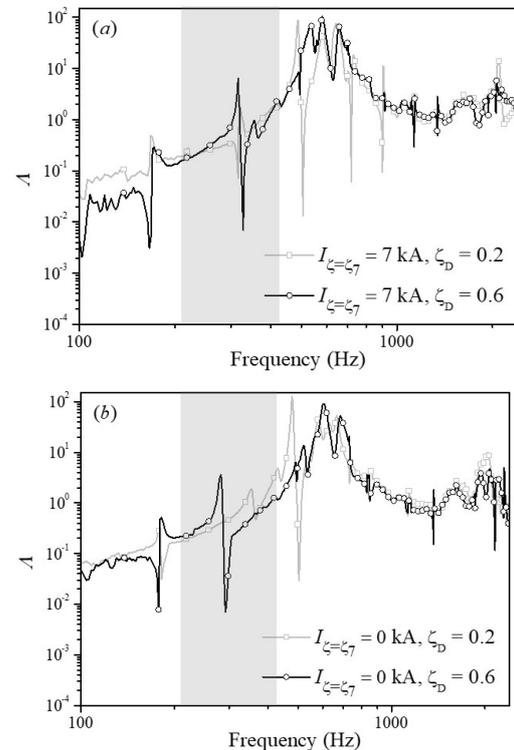


Fig. 5. Measured vibration responses according to attached locations (ζ_D) when the welding current at ζ_7 was (a) 7 kA and (b) 0 kA. The frequency shifting in the specific band occurred only at the vibration response on the defected spot ($\zeta_D = 0.6$).

화하였다. 변화한 공진주파수 대역은 Fig. 5(a)에 나타난 결과에서는 변화하지 않은 대역과 일치하였다. 실험을 통해 국부적인 용접특성의 변화에 의해 영향을 받는 주파수 대역이 존재하며, 이러한 변화는 부차구조물을 통해 계측되는 것을 확인하였다. 부분적인 진동 전달특성을 활용하여 부분의 강성을 예측하는 계측법을 제시하였다.

3.3 국부적인 용접의 강건성 평가결과

부차구조물을 통해 국부적인 진동특성을 계측할 수 있음을 실험적으로 확인하였다. 계측된 진동특성을 이용하여 부분적인 용접의 강건성을 평가할 수 있는 지표를 제시하였다. 용접 강성을 변화시킨 위치 ($\zeta_D = 0.6$)에서의 모든 시편에 대한 진동계측 결과

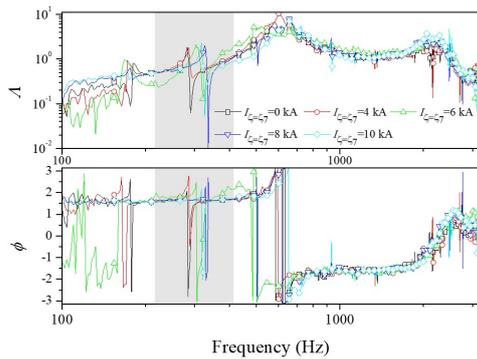


Fig. 6. The measured vibration responses at $\zeta_D = 0.6$ according to welding currents from 0 to 10 kA. Only the frequency band in the shaded section varied with the welding currents.

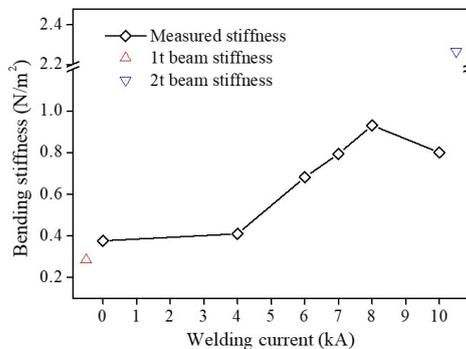


Fig. 7. The measured bending stiffnesses with the welding currents. The estimated bending stiffness of welded joints was closer to that of a 2 mm thickness as the welding current increased.

를 Fig. 6에 나타내었다. 0 kA, 4 kA, 6 kA, 8 kA, 10 kA로 용접된 시편에 대한 계측결과를 비교하였다. 공진주파수 변화가 발생하는 주파수대역을 그래프에 음영처리 하였다. 음영처리가 된 주파수 대역을 제외한 다른 대역에 대한 진동응답은 시편별로 모두 일치하였으며, 음영처리 된 특정주파수 대역의 공진주파수만 명확히 변화하였다.

실험에 사용된 시편은 구조적인 물성치가 일치하고, 하나의 용접에 대한 강성을 변화시켰다. 부차구조물을 이용한 진동계측법을 통해 부분의 용접 강성 변화를 계측하였다. 용접 강성의 변화는 부차구조물을 이용한 계측법을 통해 계측된 특성주파수의 변화로 나타났다. 앞선 검증 실험을 통해 제시한 진동계측법은 목표한 위치에서만 공진주파수 이동현상이 발생하는 것을 확인하였으며, 시편에 따라 목표 위치의 구조강건성에 따른 변화를 계측할 수 있는 것을 확인하였다. 부차구조물을 이용한 진동전달은 목표 구조물과의 연성효과를 발생시키며, 이를 이용하여 부분의 강성을 예측할 수 있다.

부분의 강건성을 공진주파수를 이용하여 정량화하였다. 계측된 진동특성은 부분적인 용접강성에 따라 순차적으로 변화하는 것을 확인하였다. 따라서 계측된 특성 주파수를 이용하여 국부적 굽힘강성을 계산하였다. 본 연구에서는 부차구조물의 진동전달에 의해 목표 구조물의 국부적인 진동을 이용하였다. 따라서 국부 진동에 의한 특성주파수의 파수는 부차구조물의 물리적 길이과 일치한다고 가정하였다. 이를 통해 국부적 굽힘강성은 다음의 식을 통해 계산되었으며, 계산결과는 Fig. 7에 나타내었다.

$$D_{pt} = (4\pi^2 M/k^4) f_{ch}^2, \quad (2)$$

여기서 D_{pt} 는 국부적 굽힘강성, M 은 목표 구조물의 단위길이당 질량, k 는 파수, f_{ch} 는 계측된 특성주파수를 나타낸다. 실험에 사용된 시편은 1 mm 두께의 철 시편 2개를 용접을 이용하여 결합하였다. 동일 재질의 시편의 1 mm, 2 mm 두께에 대한 굽힘강성 값을 Fig. 7에 계산된 강성값과 같이 나타내었다. 부차구조물을 이용하여 계산된 강성값은 결합이 전혀 되지 않은 상태에서는 1 mm 두께의 굽힘강성과 거의 일

치하였다. 용접 강성이 증가함에 따라, 2 mm 두께의 굽힘강성값으로 수렴하였다. 이러한 경향성은 용접에 의한 부분적인 결합력 도출 결과에 대한 타당성을 설명해준다. 결론적으로 부분적인 용접 강성에 의한 차이는 국부적인 구조 강건성에 영향을 주며, 국부적인 진동현상 예측법을 통해 부분의 용접 강건성을 예측할 수 있다. 제안된 예측법은 한정된 주파수 영역안에서의 공진주파수의 변화를 기반으로 하기 때문에, 목표구조물의 상태를 고려한 예측법의 교정 및 실적용이 가능할 것으로 기대된다.

IV. Conclusion

본 연구에서는 BSR 소음을 일으키는 용접된 구조의 강건성을 예측할 수 있는 진동계측법을 개발하였다. 실험을 통해 국소적인 용접누락에 의해 BSR 소음이 발생하는 것을 확인하였다. 국부적인 용접 강건성을 측정하기 위해 부착구조물 형태를 이용한 진동계측법을 제시하였다. 보 형태의 다점 스팟용접 구조물에서 부분적인 결합력의 영향을 보기 위해 용접전류를 변화하면서 제작하였다. 부착위치에 따른 진동응답과 목표구조물의 부분적인 강성변화에 따른 진동응답을 비교하였으며, 제시된 방법을 통해 국부적인 진동특성이 계측됨을 확인하였다. 국부적인 진동특성을 반영하는 특성주파수를 계측하였으며, 특성주파수를 이용하여 점용접 부분의 굽힘강성을 예측하였다. 예측된 구조물 굽힘강성은 용접상태에 따라 순차적으로 변화하는 것을 확인하였다. 제시한 방법은 부분적인 진동특성을 발생시킴으로써 구조물의 환경이나 조건과 상관없이 측정 부위의 강건성을 판별할 수 있다. 이를 통해 차량에 존재하는 임의의 용접구간에 대한 강건성을 판별하여, BSR 소음 발생 가능성을 미리 예측함으로써 차량의 품질을 확보할 수 있다.

References

1. M. Trapp and F. Chen, *Automotive Buzz, Squeak and Rattle: Mechanisms, Analysis, Evaluation and Prevention* (Elsevier, Waltham, 2011), pp. 2-131.
2. R. A. Rorrer and V. Juneja, "Friction-induced vibration and noise generation of instrument panel material

pairs," *Tribol. Int.*, **35**, 523-531 (2002).

3. F. Kavarana and B. Rediers, "Squeak and rattle-state of the art and beyond," *SAE Tech. Paper.*, 1999.
4. U. K. Chandrika and J. H. Kim, "Development of an algorithm for automatic detection and rating of squeak and rattle events," *J. Sound Vib.*, **329**, 4567-4577 (2010).
5. S. Choi, S. Ahn, and K. D. Ih, "Basic principle of BSR (Buzz, Squeak, Rattle) noise according to the generation mechanism" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **37**, 309-316 (2018).
6. S. S. Gosavi, "Automotive buzz, squeak and rattle (BSR) detection and prevention," *SAE Tech. Paper.*, 2005.
7. S. -H. Shin, C. -U. Cheong, D. -W. Kim, and S. -S. Jung, "Evaluation of BSR noise properties of instrument panel in a vehicle" (in Korean), *Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng.* **20**, 644-650 (2010).
8. S. Aslanlar, A. Ogur, U. Ozsarac, E. Ilhan, and Z. Demir, "Effect of welding current on mechanical properties of galvanized chromided steel sheets in electrical resistance spot welding," *Materials & Design*, **28**, 2-7 (2007).

저자 약력

▶ 곽 윤 상 (Yunsang Kwak)



2013년: 한양대학교 기계공학부 학사
2018년: 한양대학교 융합기계공학과 박사
2018년 ~ 현재: 프랑스로립과학연구소 박사후 연구원

▶ 이 종 호 (Jongho Lee)



2004년: 건국대학교 기계공학과 학사
2013년 ~ 현재: 한양대학교 기계공학과 박사과정
2004년: 현대자동차 입사
2012년 ~ 현재: 현대자동차 책임연구원

▶ 박 준 흥 (Junhong Park)



1991년: KAIST 생산공학과 학사
1993년: KAIST 정밀공학과 석사
2002년: Purdue University Mechanical Engineering 박사
2004년 ~ 현재: 한양대학교 기계공학부 교수