

자동차 부품용 알루미늄 접합 제진 패널의 기계적 특성 및 진동 특성 평가

배성열* · 배기만** · 김윤해***†

Evaluation of Mechanical and Vibration Characteristics of Laminated Damping Aluminum Panel for Automobile Components

Sung-Youl Bae*, Ki-Man Bae**, Yun-Hae Kim***†

ABSTRACT: The objective of this research is to study the mechanical and vibration characteristics of vibration damping aluminum panels for automotive parts. For this purpose, the test and simulation results of aluminum-resin hybrid materials and aluminum sheet materials were compared. Tensile strength and elastic modulus of the hybrid material were approximately 10% lower than aluminum sheet. Also, it was showed that the hybrid material have lower natural frequency than aluminum sheet, and it was confirmed that loss factor increases as the thickness of resin increases. Finally, it is confirmed that the test results and the analysis results are similar with each other and the performance prediction of the materials are possible by FEA.

초 록: 본 연구의 목적은 자동차용 부품에 적용하기 위한 알루미늄 접합 제진 패널에 대한 기계적 특성 및 진동 특성을 도출하기 위한 것이며, 이를 위해서 알루미늄 하이브리드 소재와 알루미늄 원소재의 시험 및 시뮬레이션 결과가 상호 비교되었다. 알루미늄 제진 패널 및 알루미늄 원소재의 인장강도 평가를 통해서 알루미늄 하이브리드 소재의 인장강도 및 인장탄성계수가 알루미늄 원소재 대비 약 10% 내외로 낮음을 확인할 수 있었다. 소재 단위의 해석 및 시험을 통해서 하이브리드 소재가 원소재 대비 낮은 고유진동수를 나타냄을 확인하였고, 하이브리드 소재를 구성하는 수지의 두께가 높아질수록 손실계수가 상승됨을 확인하였다. 또한, 기계적 특성 평가 모사 시뮬레이션을 통해 시험결과와 시뮬레이션 결과가 잘 일치하며, 유한요소해석을 통한 소재의 성능예측이 가능함을 확인할 수 있었다.

Key Words: 알루미늄 제진 패널(Vibration damping aluminum panel), 진동 특성(Vibration characteristics), 유한요소 해석(Finite element analysis), 점탄성고분자(Viscoelastic damping polymer)

1. 서 론

2020년 기준으로 2015년 대비 20% 이상 강화되는 자동차 연비 및 배출가스 규제에 따라 자동차의 중량 저감은 선택이 아닌 필수적인 상황이며, 이를 위해 그 차체와 부품의 경

량화 기술개발이 시급히 요구되고 있다[1-4]. 하지만 자동차 경량화 기술개발 과정에서 차체, 부품, 흡·차음재의 중량 저감에 의한 소음 및 진동 성능 저하에 대한 관련 업계에서의 우려가 있는 상황이다. 자동차 중량 저감과 NVH(Noise, Vibration, Harshness) 성능을 동시에 만족하기

Received 5 March 2019, received in revised form 11 April 2019, accepted 17 April 2019

*Composites Convergence Team, Korea Textile Machinery Convergence Research Institute, Gyeongsan 38542, Korea

**R&D Center, Iljitech, Gyeongsan 38471, Korea

***†Department of Ocean Advanced Materials Convergence Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea,
Corresponding author (E-mail: yunheak@kmou.ac.kr)

위해 고강성의 차체 개발, 사시 부품 차체 결합부의 강성 확보, 경량 흡·차음 재료의 개발 및 배치 최적화에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다[9,10]. 이러한 연구와 더불어 자동차용 경량/저진동 소재 개발도 이루어지고 있으며, 알루미늄 제진 패널은 기존 자동차용 스틸 재질 대비 가볍고 저진동/저소음 특성 때문에 자동차용 소재로 적용을 위해 많은 연구가 이루어지고 있다. 알루미늄 제진 패널은 얇은 두께의 2매의 알루미늄 면재 내부에 약 70~250 μm 의 점탄성 수지가 적용되어, 두 장의 면재가 접착된 형태로 구성된다. 알루미늄-수지 제진 패널이 자동차용 소재로 적용될 경우, 강재 대비 밀도가 30% 수준인 알루미늄 적용에 따른 부품 경량화가 가능하고, 금속 판재 내부의 점탄성 수지가 외력에 의한 진동에너지를 흡수하는 역할을 하게 되어 승차감 개선의 효과도 기대된다. 미국의 MSC, 독일의 티센크루프, 일본의 신일본제철 사 등의 해외 선진 소재기업에서는 제진금속 패널을 기 개발하여, 현재 그 소재를 자동차에 적용하기 위한 기술개발이 일부 진행 중에 있다[5-8]. 또한, 국내에서는 1980년대부터 철강업계를 중심으로 제진강판이 연구되고 있고, 현재는 주로 가전제품, 건축용 외장재, 엘리베이터용 벽체 등의 진동/소음 저감용 소재로 적용되고 있다. 또한, 국내에서 자동차용 소재로 적용하기 위한 기술 개발 사례는 많지 않기 때문에 자동차용 부품 설계를 위한 기초 데이터 확보가 필요하며, 관련 설계/해석/평가 등의 기술개발이 요구된다.

본 연구에서는 알루미늄 접합 제진 패널을 자동차용 부품 소재로 적용하기 위하여 소재 단위의 기계적 특성 및 진동 특성을 밝히고자 하였다. 하이브리드 소재 및 원소재 시트에 대해서 각각 성능시험을 수행하여 결과를 비교하였고, 소재 최적화를 위한 사례 연구도 진행되었다. 또한, 부품 설계 단계에서 설계 및 검증을 위한 소재 단위 시뮬레이션 모델을 개발하였으며, 소재 단위의 시험과 해석 결과 비교를 통해서 최적 시뮬레이션 모델 개발을 완료하였다. 본 연구를 통해 알루미늄-수지 하이브리드 소재의 최적 설계안 및 그 재료 특성을 도출하는 것을 목표로 하였다.

2. 시험 및 시뮬레이션 방법

2.1 알루미늄-수지 하이브리드 소재

본 연구에 적용된 알루미늄 하이브리드 소재에 대해 아



Fig. 1. Schematic of vibration damping aluminum panel applied on this study

래 그림에 나타내었다. 접합패널은 접합수지와 접착력을 향상시키기 위해 Al 5754 면재에 화성처리를 통해 전처리된 소재가 적용되었다. 접합 공정을 통해 아래 그림과 같이 상, 하에 알루미늄 면재로 구성되며, 그 사이에 얇은 두께의 수지가 적용되어 최종적으로 알루미늄 면재 간 접합된 복합소재가 제작되었다.

2.2 소재 인장강도 평가

KS B 0802 규격에 의거하여 알루미늄 접합 패널에 대한 인장시험이 수행되었고, UTM(Universal Testing Machine, 만능재료 시험기) 장비를 사용하여 진행되었다. Fig. 2에 하이브리드 소재의 인장강도 평가 시의 장비 및 시험편이 장착된 모습을 보여주고 있다. 시험편의 변형률 데이터를 확보하기 위하여 시험편에 스트레인게이지를 부착하였고, 데이터 수집장치를 통해 시험편의 변형 데이터를 확보할 수 있었다. 또한, 시험편의 인장 속도는 5 mm/min을 적용하였고, 시험을 통해 인장강도, 연신율, 항복강도, 탄성계수, 프와송비가 도출되었다.

제진 패널의 인장시험편은 KS B 0801 규격의 5호 시험편 제작 방법을 적용하여 제작되었고, 상기 규격대로 가공 후 스트레인게이지가 부착된 시험편을 Fig. 3에 나타내었다. 또한, 인장시험은 두 매의 0.8 mm 알루미늄 면재가 접합된 형태인 하이브리드 패널 및 0.8 mm 알루미늄 단일 시트에 대해 각각 수행되었다.

2.3 소재 진동성능 평가

KS D 0076 규격에 따라서 고유 진동수 및 손실계수 평가가 진행되었다. 진동 감쇠 특성에 대한 시험 방법은 중앙지



Fig. 2. Test set-up for tensile tests of damped aluminum panel



Fig. 3. Manufactured specimens of damped aluminum panel

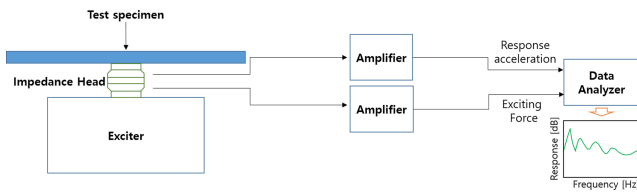


Fig. 4. Test methods for vibration-damping property in laminated damping method

Table 1. Specimen informations of vibration damping tests

	Dimensions	Layer thickness
TYPE A	25×250 mm	Al 0.8 mm + Resin 0.11 mm + Al 0.8 mm
TYPE B	25×250 mm	Al 0.8 mm + Resin 0.13 mm + Al 0.8 mm

지 정상 여진법과 타격 여진법으로 구분될 수 있다. 본 연구에서는 중앙지지 정상 여진 방식을 적용하여 제진 패넌에 대한 소재 단위의 동적 거동에 대한 실험적 평가가 진행되었다. Fig. 4에 금속 적층판의 진동감쇠 시험 방법에 대해 나타내었다.

중앙지지 여진법은 시험편을 전자 여진기에 장착 후 전자 여진기를 이용하여 시험편에 증폭을 가하고, 시험편에 전해지는 진동을 측정하여 소재 단위의 고유 진동수를 및 손실계수를 측정하는 시험방법이다.

손실계수의 산출 방법은 아래에 나타내었다. 손실계수를 산출하기 위해 소재 진동시험을 통해 도출된 진동데이터의 후처리 과정을 거치며, 이를 통해 주파수응답함수(Frequency Response Function, FRF)를 도출한다. 도출된 주파수 별 응답 피크에 대해서 손실계수를 구할 수 있다. 소재단위의 진동감쇠 성능 측정 및 손실계수 계산 방법에 대해 아래에 나타내었다.

- ① 타격 여진법 또는 정상 여진법에 의해 얻은 여진력 F 응답 속도 V , 응답가속도 A 또는 응답 변위 도출
- ② 데이터 후처리를 통해 전달 함수의 주파수-응답 곡선 도출
- ③ 공진 피크에서 i 차 공진 주파수 f_i 와 전달 함수의 절대값이 최대값보다 3dB 낮은 지점에서의 주파수 f_{i1} , f_{i2} 를 구하고, " $f_{i2}-f_{i1}$ "를 도출
- ④ 앞서 도출된 " $f_{i2}-f_{i1}$ "를 f_i 로 나누어서 최종적으로 손실계수 도출

2.4 소재 단위 시뮬레이션

알루미늄 하이브리드 소재의 동적거동을 평가하기 위해서 단일 알루미늄 패넌 및 샌드위치 알루미늄 패넌에 대한 동적거동 평가 및 조화가진 해석이 수행되었다. 알루미늄과 수지로 구성된 하이브리드 소재를 적층 모델링 기법을 적용하여 면재 및 수지층에 대한 쉘 요소를 적용한 유한요소 해석 모델링을 완료하였고[11], 그 과정을 Fig. 5에 나타내었다.

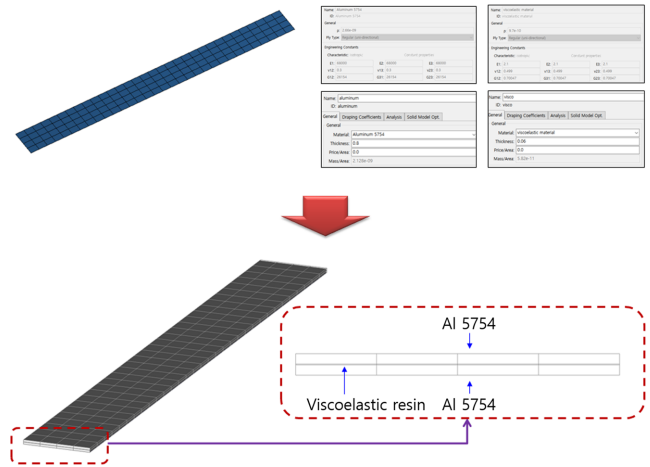


Fig. 5. Finite element modelling procedures of damped aluminum laminate for modal analysis

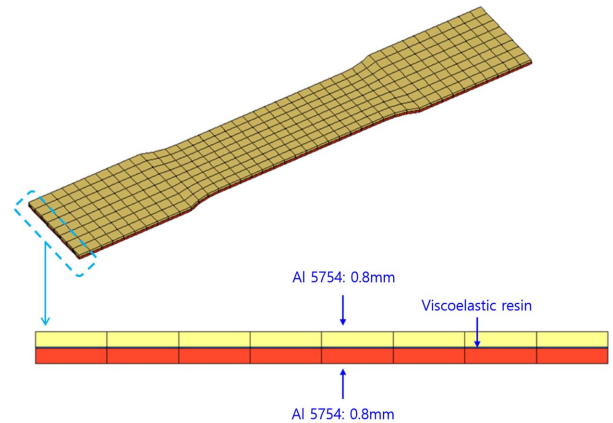


Fig. 6. Analysis model of damped aluminum laminate for tensile test simulation

알루미늄 제진 패넌의 시뮬레이션 모델 및 해석 가정의 타당성을 확인하기 위하여 인장시험 모사 해석을 수행하여 그 결과를 시험결과와 비교하였다. 해석 및 전/후처리에는 Hyperworks 제품군이 적용되었으며, 해석 모델은 3차원 육각형 요소가 적용되어 노드 개수는 1,512개, 요소 개수는 984개로 구성되었으며, 이는 Fig. 6에 제시되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 인장시험 결과

Fig. 7과 Fig. 8에 각각 알루미늄 제진 패넌 및 알루미늄 원소재 시트의 인장시험 결과를 나타내었다. 알루미늄 원소재 시트의 첫 번째 시험편에서 평균치 보다 약 10 MPa 높은 인장강도가 도출되었고, 알루미늄 제진 패넌 및 알루미늄 원소재 시트에서 대체로 거의 유사한 거동을 보임을 확인할 수 있었다. 또한, 인장시험 결과를 바탕으로 인장강도, 인장탄성계수, 프아송비가 도출되었다.

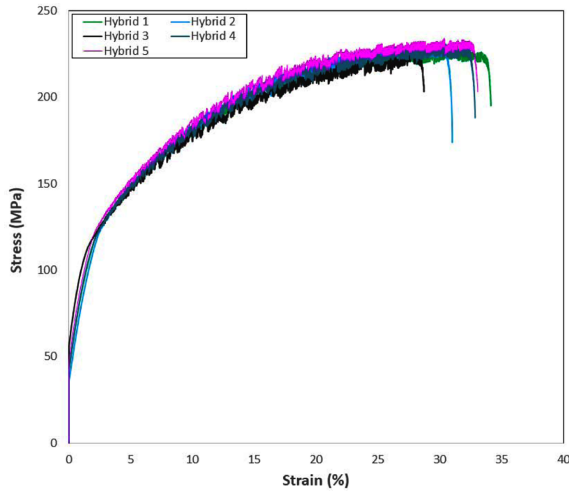


Fig. 7. Stress-strain curve of damped aluminum laminate specimens

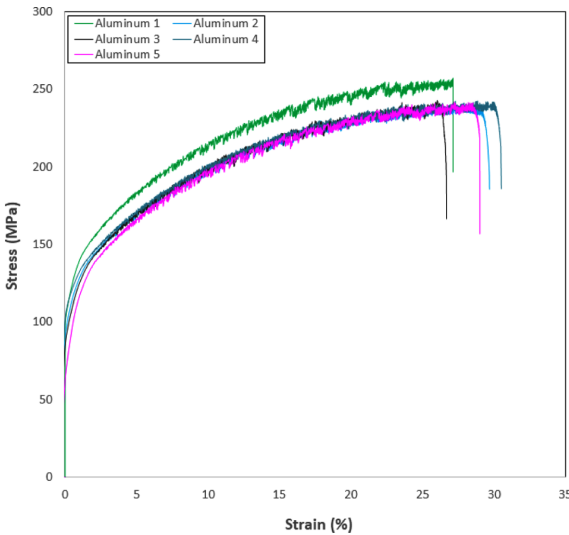


Fig. 8. Stress-strain curve of aluminum panel specimens

알루미늄 제진 패널과 알루미늄 원소재 패널에 대한 인장시험 결과 비교가 수행되었다. 인장강도 측면에서는 알루미늄 원소재 패널이 하이브리드 소재 대비 약 6% 높음을 확인할 수 있었으며, 인장 탄성계수는 알루미늄 원소재 패널이 하이브리드 소재 대비 약 12% 높은 값이 도출되었다. 인장시험을 통해 소재 및 부품단위의 설계/해석에 필요한 물성치가 도출되었으며, 이 물성치를 적용하여 본 연구의 소재 단위의 구조해석이 수행되었다.

3.2 진동시험 결과

하이브리드 제진 패널의 진동시험을 통해 도출한 주파수 응답함수 그래프를 Fig. 9, Fig. 10에 나타내었다. 각 시험편에 대한 손실계수는 2.3절에 제시된 방법을 적용하여 도출하였으며, 최종 분석된 각 시험편의 고유진동수 및 손실

Table 2. Results of damping test for hybrid panels

	Damping ratio of 1 st specimen	Damping ratio of 2 nd specimen	Damping ratio of average
TYPE A	2.42%	2.50%	2.46%
TYPE B	2.70%	2.54%	2.62%

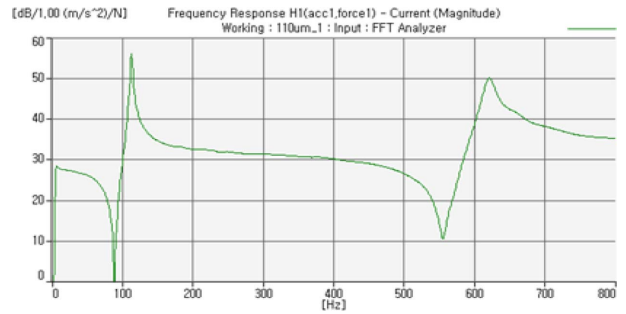


Fig. 9. FRF curve of damping test specimen 1

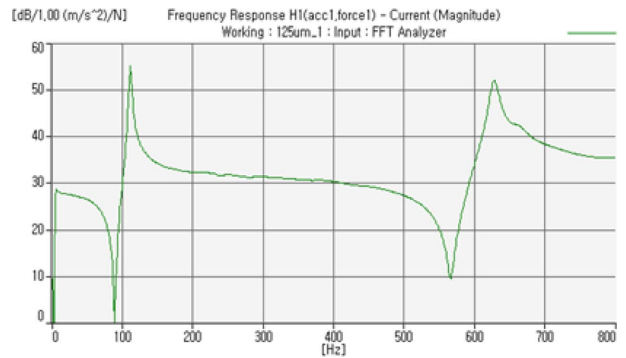


Fig. 10. FRF curve of damping test specimen 2

계수를 Table 2에 나타내었다. 이 결과를 통해서 알루미늄 소재의 접합 두께가 높아짐에 따라 진동 감쇠에 효과적임을 확인할 수 있다.

3.3 동적거동 해석 결과

알루미늄-수지 하이브리드 소재의 동적 거동을 확인하기 위해서 모달해석을 수행하였고, 알루미늄 원소재 및 하이브리드 소재에 대해 각각 모드형상 및 고유진동수를 확

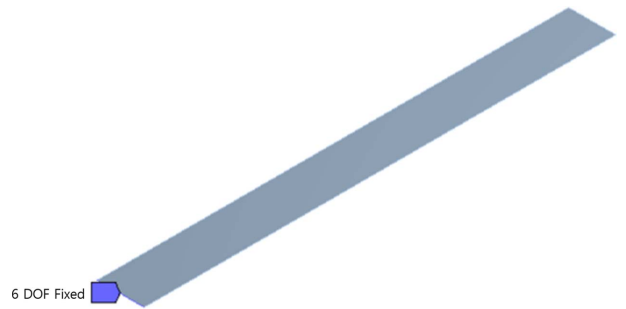


Fig. 11. Constraint conditions of modal analysis

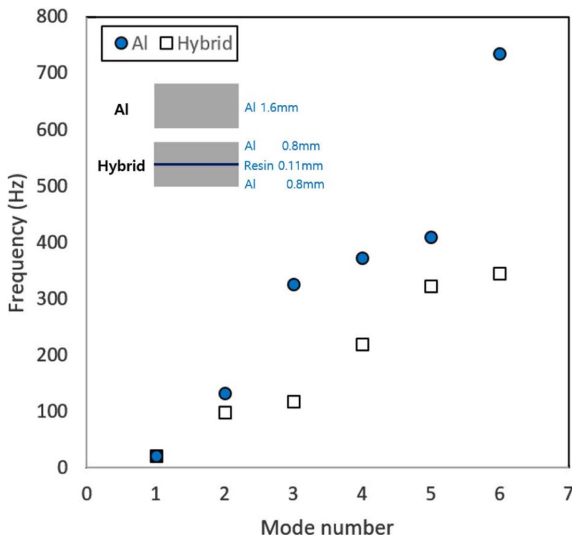


Fig. 12. Frequency comparison between aluminum sheet and hybrid panel

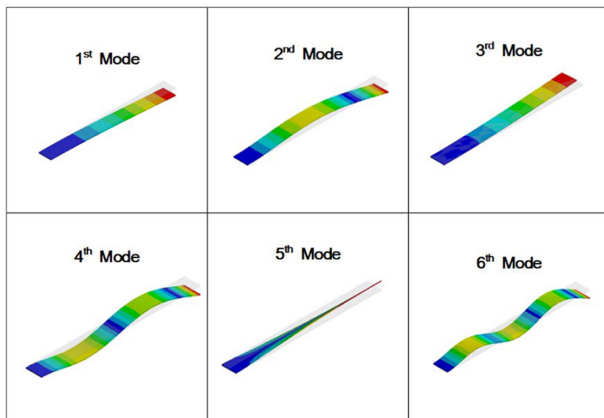


Fig. 13. Mode shape of aluminum sheet

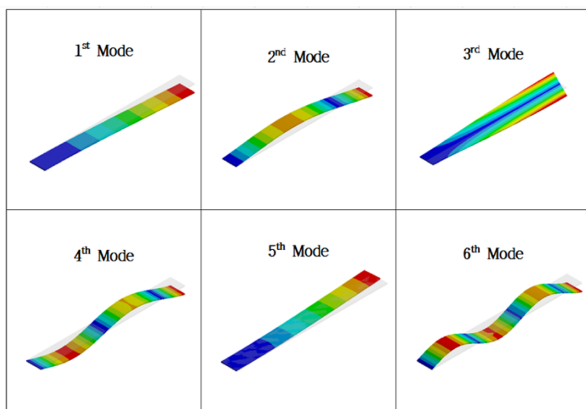


Fig. 14. Mode shape of hybrid panel

인하였다. 모달 해석에 적용된 구속 조건은 Fig. 11과 같이 한쪽 단을 완전 구속한 형태이며, 모달해석 결과를 1~6차까지 도출하여 Fig. 12~Fig. 14에 나타내었다. 결과를 통해

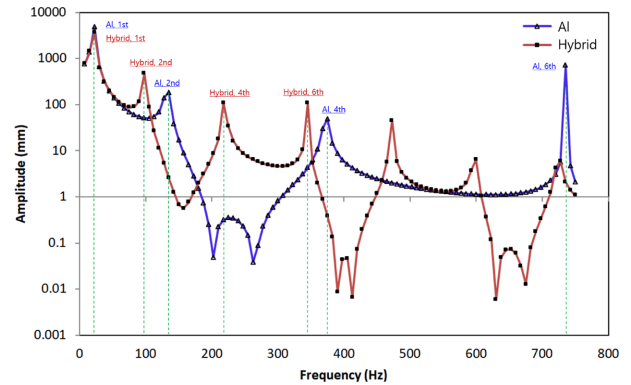


Fig. 15. Results of harmonic excitation analysis

서 점탄성 수지가 적용된 경우에 고유진동수가 알루미늄 원소재에 비해서 낮아짐을 확인할 수 있었으며, 1, 2, 4, 6차 모드에서 소재 두께 방향의 굽힘모드가 관찰되었다.

알루미늄-수지 하이브리드 소재의 주파수별 응답 거동을 확인하기 위해 조화가진 해석을 수행하였고, 알루미늄 원소재 시트 및 하이브리드 소재에 대해 각각 해석을 수행하여 그 결과를 Fig. 15에 나타내었다. 경계조건은 모달해석 경계조건과 동일하게 적용하였고, 구속조건을 부여한 반대편 끝단에 두께 방향으로 단위하중을 부여하였다. 또한, 응답치를 명확히 관찰하기 위해 y축을 로그 스케일로 변환하여, 주파수별 응답 그래프를 도출하였다. 결과 분석을 통해서 모달해석을 통해서 두께방향의 굽힘 모드가 발생하였던 1, 2, 4, 6 차수에 해당하는 주파수에서 높은 응답이 발생됨을 확인하였다. 또한, 하이브리드 소재는 알루미늄 원소재에 비해 낮은 주파수 대역에서 높은 응답을 나타냄을 확인할 수 있었다.

3.4 인장해석 결과

알루미늄-수지 하이브리드 소재의 시뮬레이션 모델 구축을 위하여 3차원 솔리드 요소를 적용하여 시뮬레이션 모

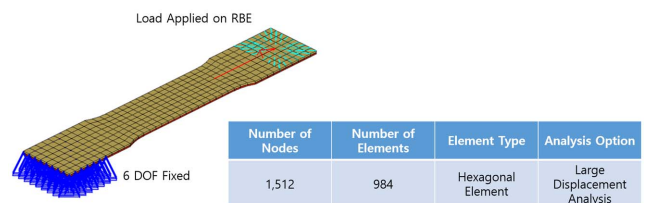


Fig. 16. Analysis condition of tensile test simulation

Table 3. Comparison between test results and simulation results

	Displacement (mm)	Stress (MPa)
Test Results	0.2	117
Simulation Results	0.19	129

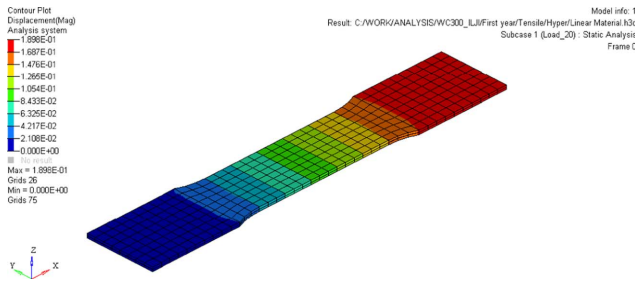


Fig. 17. Displacement result of tensile test simulation

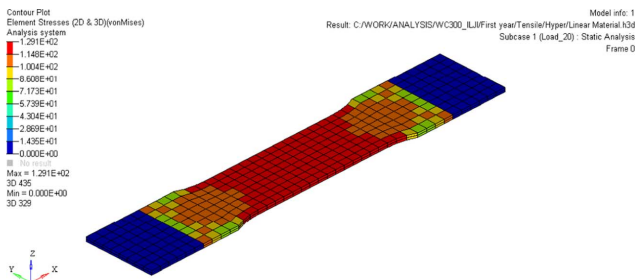


Fig. 18. Equivalent stress result of tensile test simulation

델을 구성하였고, 해석 조건을 Fig. 16에 나타내었다. 인장 시험을 통해 도출한 하중 및 응력 데이터를 이용하여 구조 해석을 통해 도출한 결과와 비교하였다. Table 3에 4,186 N 하중 적용 시점에서의 시험결과와 해석 결과를 비교하였고, 결과는 비교적 잘 일치하며 소재 단위의 시뮬레이션 모델 구축이 적절하게 되었음을 확인할 수 있었다. Fig. 17 및 Fig. 18에 각각 변형량 및 등가 응력 결과를 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 가볍고 진동흡수 성능이 우수하여 자동차용 소재로 개발이 진행 중인 알루미늄 제진 패널에 대한 소재 단위의 성능시험 및 시뮬레이션을 진행하였고, 알루미늄 시트 및 하이브리드 소재의 시험 및 시뮬레이션 결과를 상호 비교하였다. 알루미늄 원소재 시트 및 하이브리드 패널에 대한 인장강도 평가를 각각 수행하였고, 알루미늄 원소재 시트가 접합 패널에 비해 인장강도 및 인장 탄성계수가 약 10% 높음을 확인할 수 있었다. 중앙지지 정상 여진 방식이 적용된 소재 진동성능 평가를 통해서 접착 수지의 두께가 상승할수록 일정 수준의 진동 감쇠 성능의 향상 효과가 있는 것을 확인할 수 있었다. 소재 동적 거동 시뮬레이션을 통해 알루미늄 원소재 및 제진 패널에 대한 고유진동수, 진동 모드, 주파수 응답 거동을 확인하였다. 그 시뮬레이션을 통해서 1, 2, 4, 6 차수에서 소재 두께 방향을 굽힘 모드가 발생하며, 제진 수지가 적용된 하이브리드 소재의 경우 각 차수별 주파수가 감소됨을 확인할 수 있었다. 인장 시험 모사 시뮬레이션을 통해 시험 결과와 해석 결과를 상

호 비교하였으며, 성능 예측 결과가 비교적 시험결과와 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

본 연구를 통해 알루미늄-수지 하이브리드 소재의 특성 평가가 진행되었고, 소재 단위의 최적화가 이루어졌다. 향후 이 데이터를 활용한 자동차용 부품 설계/해석이 진행될 예정이다. 또한, 소재 단위의 굽힘, 접착력, 충격 특성 시험 및 성능예측 시뮬레이션과 온도 등 환경 인자에 의한 소재 특성 변화 등이 추가적으로 연구될 예정이다.

후 기

본 연구는 본 연구는 산업통상자원부 WC300 프로젝트 기술개발지원사업(S2640096)에 의해 수행되었으며, 지원에 대해 감사 드립니다.

REFERENCES

1. Tisza, M., and Czinege, I., "Comparative Study of the Application of Steels and Aluminium in Lightweight Production of Automotive Parts", *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, Vol. 1, No. 4, 2018, pp. 229-238.
2. Fuchs, E.R., Field, F.R., Roth, R., and Kirchain, R.E., "Strategic Materials Selection in the Automobile Body: Economic Opportunities for Polymer Composite Design", *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 9, 2008, pp. 1989-2002.
3. Park, H.S., Dang, X.P., Roderburg, A., and Nau, B., "Development of Plastic Front Side Panels for Green Cars", *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 6, No. 1, 2013, pp. 44-52.
4. Kim, K.J., Lim, J.H., Park, J.H., Choi, B.I., Lee, J.W., and Kim, Y.J., "Light-weight Design of Automotive AA6061 Rear Sub-frame Based on CAE Simulation", *The Korean Society of Automotive Engineers*, 2012, pp. 77-82.
5. Liu, Y., Zogg, M., and Ermanni, P., "An Experimental Comparative Study on Non-conventional Surface and Interface Damping Techniques for Automotive Panel Structures", *Journal of Vibration and Control*, Vol. 18, No. 14, 2011, pp. 2210-2233.
6. Hiroshi, E., Mizuno, E., and Yoshimasa, Z., "The Development of Vibration Damping Steel Sheet for Automotive Use", *Journal of Material and Manufacturing*, Vol. 98, No. 5, 1989, pp. 670-677.
7. Deshmukh, A.B., Chaitanya, S.V., and Wagh, S., "Case Study on Sandwich Steel Application in Automotive BIW for NVH Improvements," *Proceeding of the 2nd National Conference on Recent Developments in Mechanical Engineering*, Pune, India, Apr. 2013, pp. 1-6.
8. Jung, J.H., Min, B.D., and Ha, Y.C., "Evaluation of Mechanical Properties of Vibration Damping Steel Sheets and Their Application to Automobile Engine Oil Pan," *The Korean Society for Technology of Plasticity*, 1994, pp. 99-118.
9. Kim, K.C., Kwon, Y.S., Kim, C.M., and Kim, J.T., "Study on the Design Process to Minimize the Weight of the Damping Material," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration*

- Engineering*, Vol. 22, No. 2, 2012, pp. 99-118.
10. Kim, J.B., Ryu, K.H., Park, S.K., and Lee, S.J., "Application of Strain Energy for Determining the Location of Damping Material," *Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 18, No. 11, 2008, pp. 1199-1205.
 11. Xial, X., Hsiung, C.K., and Zhao, Z., "Analysis and Modeling of Flexural Deformation of Laminated Steel," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 50, 2008, pp. 69-82.