

## 수송기기용 난연 실리콘 폼의 기계적 신뢰성 분석

홍민지 · 채수광 · 강민구 · 최동국 · 장홍래\*<sup>†</sup> · 최경후<sup>‡</sup>

한국항공대학교, \*창원대학교

(2022년 10월 1일 접수, 2022년 11월 12일 수정, 2022년 12월 1일 채택)

### Mechanical Reliability Analysis of Flame Retardant Silicone Foam for Mass Transportation

Minji Hong, Sugwang Chae, Min Gu Kang, Dongkuk Choi, Hong-Lae Jang\*<sup>†</sup>, and Kyungwho Choi<sup>‡</sup>

Korea Aerospace University, 76, Hanggongdaehak-ro, Deogyang-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10540, Korea

\*Changwon National University, 20, Changwondaehak-ro, Uichang-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do 51140, Korea

(Received October 1, 2022; Revised November 12, 2022; Accepted December 1, 2022)

**초록:** 대형 수송기기에서의 화재 안정성에 대한 관심은 나날이 높아지고 있다. 화재에 취약한 내장재 중에서도 특히 고분자 기반의 발포체로 이루어진 방석재는 유독 가스 발생 및 화염의 2차 전파 등의 이유 때문에 높은 난연성이 요구된다. 하지만 난연 필러가 함침된 실리콘 폼은 기계적 성질이 변하므로 이에 대한 기계적 신뢰성 분석을 실시하였다. 이를 위해 초탄성 물질의 기계적 거동을 예측할 수 있는 Ogden 모델을 활용하여 유한요소해석을 수행하였다. 또한 시편의 점탄성 특성을 고려하여 최적화 과정을 통해 파라미터를 얻고, 전달률 실험을 통해 외부 진동 주파수에 따른 전달률 특징을 분석하였다. 그 결과, 외부 진동 주파수가 5-15 Hz 사이에서 1 이상의 높은 전달률을 가지는 반면 5 Hz 이하, 20 Hz 이상의 주파수에서 1 이하의 전달률을 나타내는 것을 관찰할 수 있었다.

**Abstract:** The importance of fire safety in public transportation has been increased. Among interior materials vulnerable to fire, cushion materials made of polymer-based foam require high flame retardancy due to toxic gas generation and secondary propagation of flames. Since the silicone foam impregnated with the flame-retardant filler changes its mechanical properties, a mechanical reliability analysis was performed on it. In order to predict the mechanical behavior of hyper-foam, finite element analysis was performed using the Ogden model. In addition, parameters were obtained through an optimization process in consideration of the viscoelastic properties of the specimen, and the transmissibility according to the external vibration frequency were analyzed. As a result, it was observed that the external vibration frequency had a high transmittance of 1 or more between 5 and 15 Hz, while exhibiting a transmittance of 1 or less at frequencies of 5 Hz or less and 20 Hz or more.

**Keywords:** hyper-foam, flame retardant, silicone foam, Ogden model, transfer.

## 서 론

실리콘 폼은 저 흡수성 표면 스킨을 갖는 주로 폐쇄된 셀 구조를 갖는 합성 폼 고무이다. 이는 친환경 대표 소재로, 화재 안정성이 우수할 뿐만 아니라 균일한 압력분산, 반복하중에 대한 우수한 복원특성, 경량화 및 내구성 향상으로 인한 사용수명 증가를 충족할 수 있는 장점이 있다. 기존의 유기 발포폼은 할로겐계 난연 필러를 첨가하여 유해성 논란이 있

다.<sup>1</sup> 인체와 밀접하게 접촉을 하는 내장재나 방석으로 기존의 유기 발포폼을 사용한다면 시간이 지남에 따라 제품이 훼손되어 유해성 물질이 호흡기를 통해 인체 내부로 들어올 수 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 친환경에 대한 관심이 높아지는 추세이다. 또한 각국의 안전기준의 강화로 난연재 산업은 높은 성장가치를 가진 산업 분야이다. 유기 발포폼의 경우, 통기성이 좋아 공기가 잘 통하기 때문에 화재의 위험이 매우 높다. 또한 화재가 발생했을 때, 연기의 독성이 심해 사람이 연기에 노출될 경우 정신을 잃을 수 있다. 현재 많이 사용되고 있는 우레탄폼은 난연성이 매우 떨어진다. 따라서, 본 연구에서는 우레탄 폼에 비해 높은 난연성을 가지는 실리콘 폼을 주재료로 선정하였다. 또한 인체에 유해한 할로겐계 물질을 포함하지 않는 친환경적인 난연 필러를 실

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
kwchoi@kau.ac.kr, ORCID<sup>®</sup> 0000-0002-4011-0402  
hjang@changwon.ac.kr, ORCID<sup>®</sup> 0000-0003-0803-8583  
©2023 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

리콘 폼에 첨가하여 실리콘 폼의 난연성을 높이고, 유해성에 대한 문제를 해결하였다.

본 연구에서 사용된 시편은 연소시 유독 가스를 발생시키지 않는 무기계 난연제와 특정 온도 이상에서 물을 생성하고 팽창되어 열과 산소를 차단하는 팽창 난연제를 난연성 필러로 선정하였다.<sup>2,3</sup> 해당 난연성 필러를 첨가한 실리콘 폼은 화재 안정성이 우수하여 높은 수준의 화재 안전 규격을 만족시킬 것으로 예상된다. 특히, 방석재의 기준을 충족시키는 소재로 선박, 항공기, 자동차, 철도, 건축용 자재 등 다양한 분야에 사용될 것이다. 실리콘 폼에 난연성 필러를 첨가하게 되면 난연성과 내열성이 높아지지만 압축강도(compressive strength)가 증가하게 되어 안정성과 편의성이 떨어질 수 있다. 이는 난연성 필러의 추가로 인해 본연의 실리콘 폼의 기계적 특성이 달라지기 때문이다. 따라서 난연 실리콘 폼의 안락감과 관련된 기계적 물성치를 다시 분석해야 한다. 하지만 실리콘 폼은 금속과 같은 선형재료에서 나타나는 Hooke's Law를 따르지 않고, 변형률에 따른 응력의 변화가 비선형으로 나타나는 초탄성 재료이기 때문에 해석이 까다롭다. 초탄성 재료는 외부의 하중에 의해 물체의 변형이 500% 이상 발생되더라도, 하중을 제거했을 때, 초기의 형태로 되돌아가는 재료를 말하며, 기하학적 비선형성과 재료학적 비선형성이 공존한다.

기존의 연구논문에서 초탄성 재료의 정적 특성을 분석하기 위해 압축 및 전단실험결과를 이용한 유한요소해석을 진행하였다. 이때 사용되는 해석 모델은 Neo-Hooke model, Mooney-Rivlin model, Arruda-Boyce model, Ogden model 등이 있다. Briody 등은 연질 폴리우레탄폼에 대해서 단축압축시험과 단순전단시험을 통해서 초탄성 재료 해석을 진행했다. 해석 모델은 Ogden 2<sup>nd</sup> model을 이용했고, 시험데이터와 매우 일치하는 것을 확인했다.<sup>4</sup> Petre 등은 폴리우레탄 폼에 대해서 단축 압축 및 단순 전단, 체적 압축 시험을 수행한 뒤 Ogden model의 차수를 정할 때 효율적인 방안을 제시했다. 차수가 높아질수록 예측 결과에 대한 정확도가 좋지만, 해석하는 시간이 길어진다고 보고했다.<sup>5</sup> Jang 등은 폴리우레탄 폼에 대해 도출한 Ogden 2차 모델을 이용하여 단축 압축 및 단순전단 시험 데이터를 통해서 재료 모델링을 수행했고, 단축 압축시험과 단순전단시험 데이터를 모두 활용하는 것이 실험데이터와 비교했을 때 더 뛰어난 일치치를 보여줬다고 결론지었다.<sup>6</sup>

시트의 동특성을 이용해 동적 안락감을 측정하는 기존의 연구논문에서 Kim 등은 폴리우레탄 폼을 전달함수를 사용하여 측정하는 방식을 선택했다. 실험장치는 외팔보의 한 쪽은 고정하고, 다른 한 쪽에 조화가진을 주는 방식으로 구성하였다.<sup>7</sup> 또 다른 연구논문에서 Kang 등은 폴리우레탄 폼의 비선형성과 점탄성 특성을 나타내는 수학적 모델을 사용했다. 이 모델은 준-정역학적 시험을 통해 비선형 강성항과 convolution 적분항으로 모델링되었다. 수학적 모델과 인체진동모델을 이용하여 폴리우레탄 폼에 입력된 진동가속도에 대한 진동 전

달을 수치적으로 분석하였다.<sup>8</sup>

본 연구에서 난연성을 부여한 실리콘 폼을 철도차량 시트의 방석재로 활용하기 위해 압축 및 전단실험을 진행하였다. 정적 특성 분석을 위해 실험 결과를 바탕으로 Ansys 프로그램을 사용한 유한요소해석을 진행하였으며, 초탄성 물질의 해석 모델은 2차 Ogden model을 사용하였다. 동적 특성 분석을 위해 origin fitting 프로그램을 사용하여 점탄성 모델링식의 최적 파라미터 값을 도출했다. 실리콘 폼의 고유진동수와 최대 전달률을 알아내기 위해 전달률 실험을 진행하였다. 실리콘 폼의 정적, 동적 특성 분석을 통해 본 연구에서 사용된 난연 실리콘 폼의 기계적 물성치를 얻고, 난연 실리콘 폼이 사용될 수 있는 application에 대해 제시하고자 한다.

## 실 험

본 연구에서 분석한 난연 실리콘 폼은 서로 다른 난연 특성을 가진 다음의 두가지 시편으로 제작하여 비교하였다. 시편 A는 무기 난연제가 함유된 실리콘폼, 시편 B는 무기 난연제와 팽창 난연제를 첨가한 실리콘 폼이며 제작 과정은 다음과 같다. 2액형 부가형 실리콘 고무 컴파운드는 경화 시 수분이 필요 없고, 온도를 올릴수록 경화 시간이 촉진되는 특징을 가지고 있다. 따라서 백금 촉매의 종류와 양을 변화시키거나 경화 지연제(inhibitor)를 사용해서 경화시간을 조절한다. 발포체의 제작과정은 컴파운드를 A, B 파트로 나눈다. A 파트에는 액상실리콘 고무와 양 말단에 실라놀기(OH-polymer)를 갖는 실록산 오일과 백금계 촉매를 투입 제조하였다. B파트에는 난연제인 무기계 난연제(aluminium hydroxide, ATH)와 팽창난연제(팽창 흑연)를 첨가하고 오가노하이드로젠폴리실록산(H-polymer) 및 경화 지연제를 혼합하여 제조하였다. 따라서 A, B파트를 1:1 중량비로 백금계 촉매가 Si-H기의 반응을 유발시켜 발포를 진행하였다. 이 때 두 시편 배합비는 Table 1과 같고, 각각의 시편에 대한 겉보기 형상은 Figure 1과 같다.

**Table 1. Specimen Production Mixing Ratio** (unit: wt%)

	Foam A	Foam B
Liquid silicone rubber	32-35	27-30
Inorganic flame retardant(ATH)	6-8	5-6
Intumescent flame retardant (Expandable graphite)	-	15-18
OH-Polymer	19-22	17-20
H-Polymer	25-28	20-23
Vinyl-Polymer	17-20	12-15
Inhibitor	0.05-0.06	0.05-0.06
Platinum catalyst	0.5-0.6	0.5-0.6

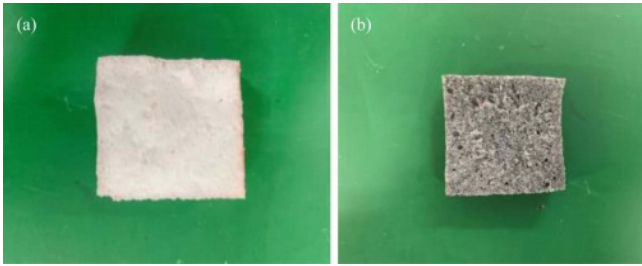


Figure 1. Schematics of (a) foam A; (b) foam B.

**정적 특성. 압축 및 전단 시험:** 단축압축시험은 KS M ISO 3386-2 : 2013 “연질 발포 고분자 재료 압축 응력-변형 특성 측정방법”에 따라 만능시험기(MTS 810, USA)를 사용하여 진행하였다. 시편 크기는 50×50×12.5(mm)이고, 시험 속도는 5 mm/min으로 측정하였다. 고분자 재료에서 나타나는 특이인 Mullins effect(멀린스 효과)를 제거하기 위해서 동일한 속도로 시편 두께의 75%까지 3회 압축 후 하중 제거를 반복하여 4회째 데이터를 이용하였다.

단순전단시험은 KS M ISO 1827 : 2014 “가황 또는 열가소성 고무 - 단단한 판에 대한 접착 또는 전단 모듈러스 측정”에 따라서 진행하였다(MTS 810). 시편의 크기는 30×25×5 (mm)이고 시험 속도는 4 mm/min으로 측정하였다. 100% 전단변형률까지 측정하였고, 시험 도중 접착이 떨어지는 시편은 즉시 파기하고 재시험을 진행하였다.<sup>6</sup> Figure 2는 단축압축시험과 단순전단시험을 진행하는 사진이다.

**동적 특성. 점탄성 특성 분석:** 본 연구에서 사용된 시트 폼은 실리콘 재질의 시트 폼에 난연성 물질을 추가하여 제작하였다. 따라서 본 연구에서 사용된 시트 폼은 점탄성 특성을 가지고 있다. 시트 폼의 모델링을 위해 다음과 같이 선행된 연구에 사용된 점탄성 모델링 식을 사용하였다.<sup>8,9</sup>

$$F = \sum_{i=1}^N \int_0^t a_i y(\tau) e^{-\alpha_i(t-\tau)} d\tau + \sum_{j=1}^M k_j y^j \quad (1)$$

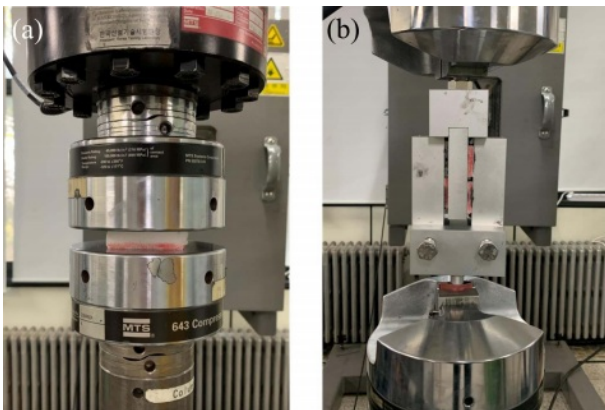


Figure 2. Schematics of (a) uniaxial compression test; (b) simple shear test.

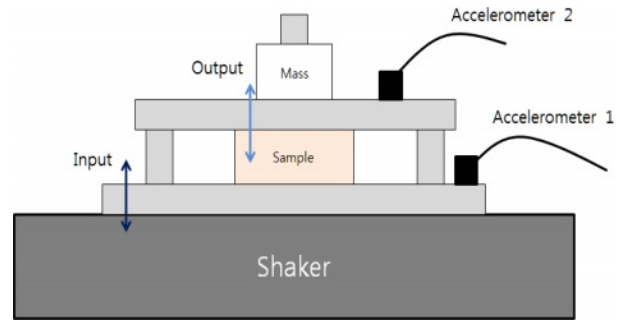


Figure 3. The schematic diagram of the transmissibility test.

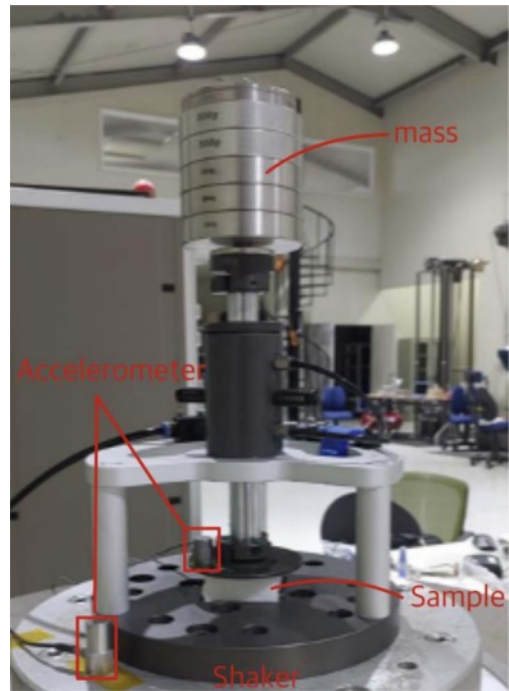


Figure 4. Transmissibility test.

$k_j$ 는 점탄성에서 비선형적 특성을 반영하는 항의 파라미터이고,  $a_i$ 와  $\alpha_i$ 는 점성의 시간 지연 특성을 반영하는 항의 시간 지연 계수이다. 본 연구에서  $M=7$ ,  $N=2$ 로 가정하여 총 11개의 최적 파라미터 값을 Origin으로 구하였다.

**전달률 시험:** Figure 3은 전달률 시험을 위한 실험 장치의 모식도를 나타낸 것으로, 가진기(Shaker, G25-210N, ShinKen, Japan)로부터 발생한 진동(input)이 시편(sample)을 지나 전달된 응답(output)을 가속도계로 측정하여 시편의 진동 전달률을 계산하는 방법을 사용하였다. 철도 차량의 주파수를 고려하기 위해 1-25 Hz의 범위에서 sine sweep 방식으로 0.05 g의 가진력을 주어 가진하였으며, 이때 sweep rate는 2 octave/min으로, 무게 추(mass)는 3.2 kg으로 설정하였다. 사용된 시트 폼의 크기는 400×400×100 mm이다. Figure 3의 모식도를

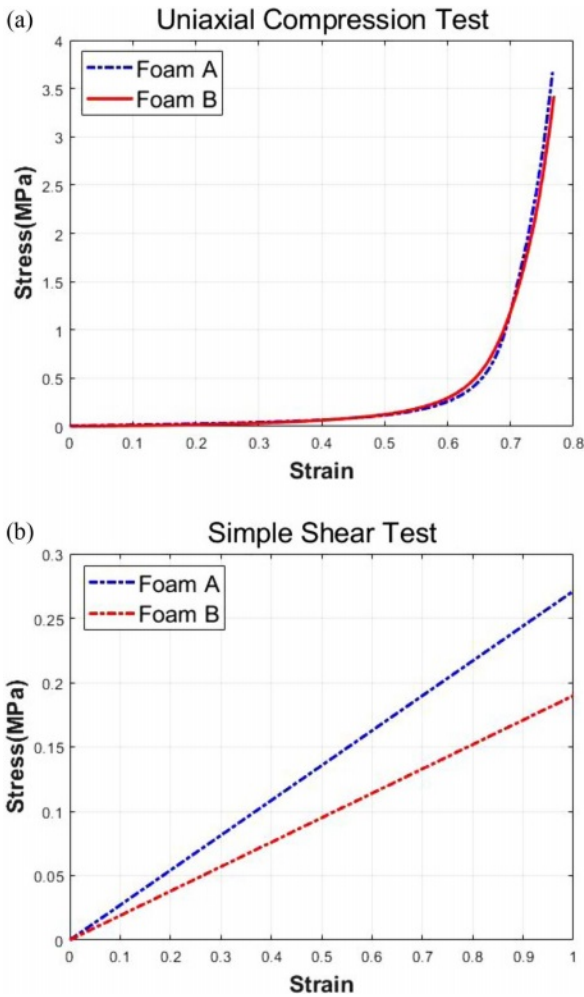


Figure 5. (a) Data of uniaxial compression test; (b) data of simple shear test.

바탕으로 실험을 진행하였으며, Figure 4는 실험에 사용된 실험 장치이다.

### 결과 및 토론

**정적 특성. 압축 및 전단 시험 결과:** 시편 A와 B의 단축 압축시험과 단순전단시험 데이터의 결과를 비교하면 Figure 5와 같다.

단축압축시험의 결과는 두 시편 모두 비슷한 것을 볼 수 있다. 하지만 단순전단시험의 경우 시편 A가 시편 B에 비해 변형률에 따른 응력이 더 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 시편 B에 첨가된 팽창 난연제의 팽창 후연 입자 크기가 무기계 난연 필러와 비교했을 때 매우 크고, 실리콘 고무와 상호작용하는 작용기가 없어 기계적 전단 강도가 소폭 하락한 것으로 보인다.<sup>10</sup>

**Ansys 프로그램 해석:** 유한요소해석에 사용된 초탄성 재

Table 2. Ingredient Constant

Material constant	Expression ( $E$ : Shear strength, $\nu$ : Poisson's ratio)
$\alpha_i$	Constant
$\mu_i$	$\frac{E}{2(1+\nu)}$
$\beta$	$\frac{\nu}{1-2\nu}$

질 해석 모델은 Ogden model을 사용했다. 순수 탄성을 가지고 완전 복원되는 에너지 보존이 된다고 가정하기 때문에 변형률 에너지 밀도 함수로 식 (2)와 같이 표현되고, 기존의 연구에 사용된 모델링 식을 이용했다.<sup>7,11,12</sup>

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i} [\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3 + f(J)] \quad (2)$$

식 (1)에서  $f(J)$ 는 체적과 관련된 항으로 식 (3)과 같이 표현된다.

$$f(J) = \frac{1}{\beta_k} ((J^{el})^{-\alpha_k \beta_k} - 1) \quad (3)$$

식 (2)에서  $\alpha_i$ 는 재료의 거동을 표현하는 상수로서 음의 값이면 압축 거동을 표현하고, 양의 값이면 인장 거동을 나타낸다. 본 연구에서는 압축에 대한 변형률과 응력값을 절댓값을 취해서 양의 값으로 해석을 진행하였다. 따라서 재료 상수  $\alpha_i$  값이 양의 값으로 나타난다.  $\mu_i$ 는 전단탄성계수를 나타내는 상수이다.  $\beta$ 는 압축성을 나타내는 상수이고 포이송의 비로 표현된다.

식 (3)에서  $J^{el}$  값은 탄성 체적과 관련된 항으로 다음과 같이 표현된다. 전체 체적 변형은 열적 체적 변형과 탄성 체적 변형의 비로 식 (4)와 같이 표현된다.

$$J_{total} = \frac{J^{el}}{J_{th}} \quad (4)$$

압축실험과 전단실험을 진행할 때 실험실의 온도는 거의 일정하였기 때문에 열적 체적 변형은 고려하지 않았다. 따라서 탄성 체적 변형을 식으로 나타내면 식 (5)와 같다.

$$J^{el} = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = \frac{l_1 l_2 l_3}{l_0 l_0 l_0} = \frac{V}{V_0} \quad (5)$$

순수 탄성을 가지고 완전 복원되는 초탄성 재료의 특성에 따라  $J=1$ 로 가정하였다. 결론적으로  $f(J)$ 로 표현되는 체적항은 고려하지 않고 유한요소해석을 진행하였다. 변형률 에너지 밀도 함수를 신장률로 미분하면 압축응력을 얻을 수 있고, 단축방향으로의 응력은  $\lambda_2 = \lambda_3 = 0$ 을 함수에 대입해서 식 (6)와 같이 계산된다.



**Table 3. Ingredient Constant of Foam A and B**

Material name	Density (kg/m <sup>3</sup> )	i	$\mu_i$	$\alpha_i$
Foam A	363	1	0.041	3.444
		2	$6.789 \times 10^{-10}$	40.449
Foam B	332	1	0.021	4.345
		2	$5.321 \times 10^{-9}$	36.560

$$\sigma_1 = \frac{\partial W}{\partial \lambda_1} = \frac{2}{\lambda_1} \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} [\lambda_1^{\alpha_i} - ((J^e)^{-\alpha_i \beta_i})] \quad (6)$$

단순전단응력은 변형률 에너지 밀도 함수를 전단변형률( $\gamma$ )로 미분하여 식 (7)과 같이 계산된다.

$$\tau_s = \frac{\partial W}{\partial \gamma} = \sum_{j=1}^2 \left[ \frac{2\gamma}{2(\lambda_1^2 - 1) - \gamma^2} \sum_{k=1}^N \frac{\mu_k}{\alpha_k} (\lambda_j^{\alpha_k} - 1) \right] \quad (7)$$

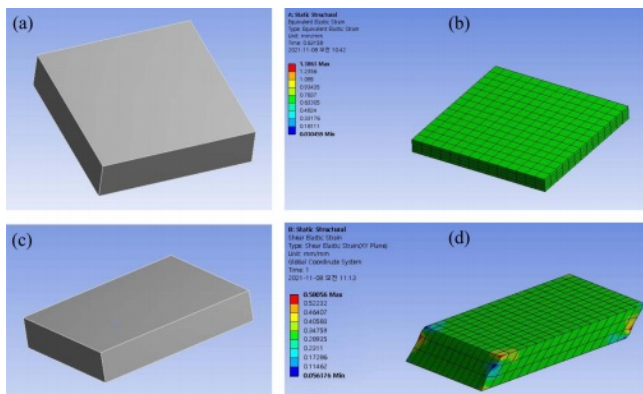
식 (7)에서 주 신장률  $\lambda_1, \lambda_2$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda_{1,2} = \sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{2} \pm \gamma \sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{4}}} \quad (8)$$

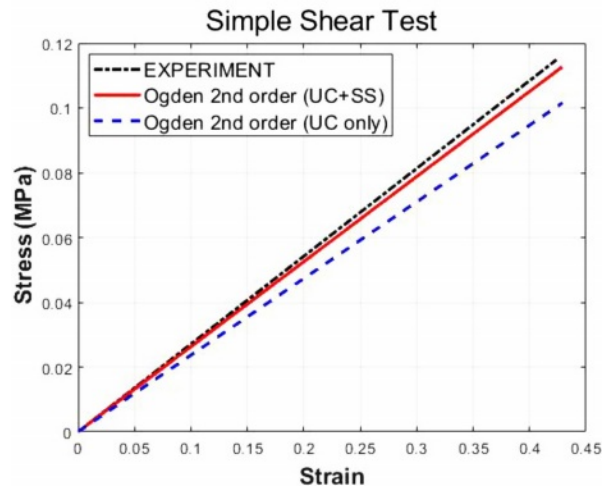
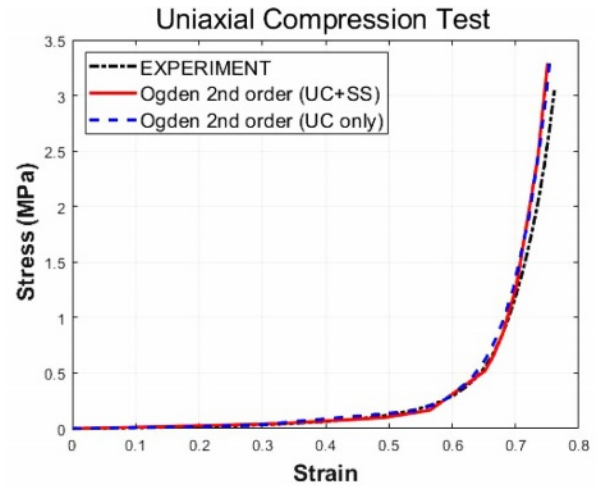
본 연구에서는 단축압축과 단순전단 데이터를 이용하여 Table 3과 같이 재료상수를 구하였다. 유한요소해석은 ANSYS 프로그램을 이용하였고, 시험과 동일한 크기의 시편을 모델링하여 75% 압축과 40% 전단 변위 하중을 적용해서 해석하였다.

Ogden model에서 1차 항은 소변형 구간, 2차 항은 대변형 구간을 나타낸다. 따라서 변형률이 증가하면서 급격하게 응력이 커지는 구간에 의해  $\alpha_1 \ll \alpha_2$ 를 확인할 수 있다. 또한 압축응력과 전단응력 모두 재료 상수가 제공 되어 있지 않기 때문에  $\mu$ 와  $\alpha$ 의 부호가 같도록 설정하는 것이 안정하다.<sup>13,14</sup>

Figure 6은 두 가지 난연 필러를 첨가한 시편 B에 대해서



**Figure 6.** Finite element analysis of uniaxial compression test (a) and (b); simple shear test (c) and (d) for Foam B.



**Figure 7.** Results of the Experimental Data and Finite Element Analysis in Foam B.

유한요소해석을 진행한 결과이다. 75% 압축과 40% 전단에서 난연 실리콘 발포 폼의 거동이 비교적 안정적인 것을 확인할 수 있다. 실험데이터와 해석결과를 그래프로 나타내면 Figure 7과 같다.

두 그래프 모두 검정색 실점과 점으로 표시된 선은 실제 시험 데이터이고, 파란 점선은 단축압축시험 데이터만 이용한 해석 결과이고, 빨간 실선은 단축압축시험과 단순전단시험 데이터를 모두 고려한 결과이다. 압축거동에서는 두 결과 모두 시험데이터와 비슷한 것을 볼 수 있다. 하지만 전단시험의 경우 단축압축데이터와 단순전단데이터를 모두 고려한 결과가 실제 실험데이터와 더 유사한 것을 확인할 수 있다. 따라서 Ogden model 2차 해석은 단축압축데이터와 단순전단데이터를 동시에 고려하여 해석하는 것이 정확도가 높은 것을 확인할 수 있다.

또한 두 그래프에서 압축변형률 70%, 전단변형률 15% 보다 큰 변형률 영역부터 실험치와 유한요소해석 결과치의 차

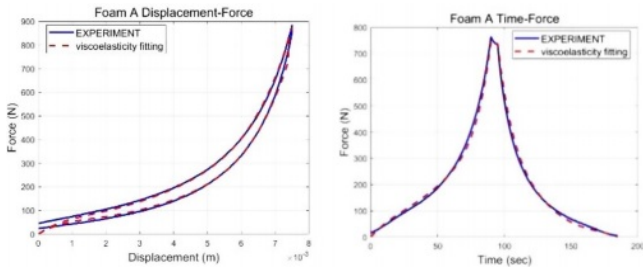


Figure 8. Origin Fitting Results of Foam A.

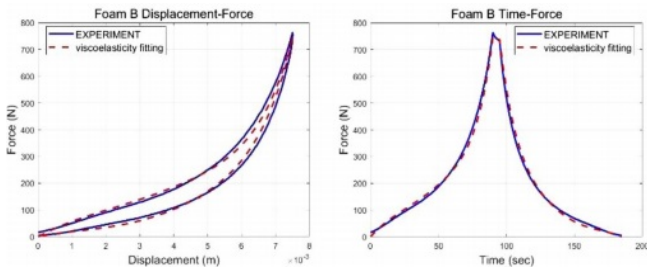


Figure 9. Origin Fitting Results of Foam B.

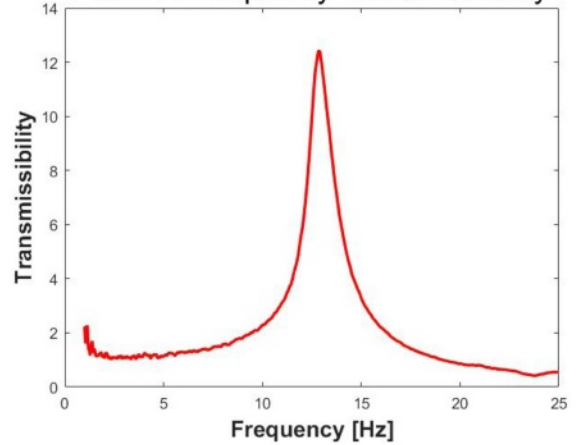
이가 나기 시작하지만, 의자 방석재 등 수송기기 내장재 적용 시 예상되는 거동의 변형을 고려함과 동시에 계산비용의 효율성을 제고하기 위하여 2차 Ogden model의 차수가 충분하다고 판단하였다.

**동적 특성. 점탄성 특성:** Figure 8과 Figure 9는 동적특성 분석을 위해 시행한 시편 A와 B의 단축압축시험 데이터에 대하여 점탄성 모델링 식으로 근사한 결과이다. 동적특성 시험에 사용된 시편 A, B의 크기는 50×50×25 mm이다. 두 시편에 대해서 모두 변형률 30%에 해당하는 7.5 mm까지 압축하였고, 시험 시간은 184.75초 동안 수행하였다. 각각의 좌측 그래프는 시간과 축력에 대해서, 우측 그래프는 압축 변위와 압축력에 대한 것이다. 근사 정확도를 확인하기 위해 구한 시

Table 4. Optimal Parameter Value of Foam A and B

	Foam A	Foam B
$k_1$	$9.16 \times 10^4$	$6.88 \times 10^4$
$k_2$	$-5.70 \times 10^7$	$-1.17 \times 10^7$
$k_3$	$2.06 \times 10^{10}$	$2.22 \times 10^{17}$
$k_4$	$-3.25 \times 10^{12}$	$1.90 \times 10^{11}$
$k_5$	$1.64 \times 10^{14}$	$-4.51 \times 10^{13}$
$k_6$	$1.19 \times 10^{16}$	$-4.70 \times 10^{15}$
$k_7$	$-8.42 \times 10^{17}$	$1.06 \times 10^{18}$
$\alpha_1$	$1.14 \times 10^6 + 0.01i$	$-1.17 \times 10^2 + 0.01i$
$\alpha_2$	$1.14 \times 10^6 - 0.01i$	$-1.17 \times 10^2 - 0.01i$
$\alpha_1$	$1.91 \times 10^2 - 0.007i$	$-4.58 \times 10^{-6} - 0.007i$
$\alpha_2$	$1.91 \times 10^2 + 0.007i$	$-4.58 \times 10^{-6} + 0.007i$

(a) Foam A Frequency-Transmissibility



(b) Foam A Frequency-Acceleration

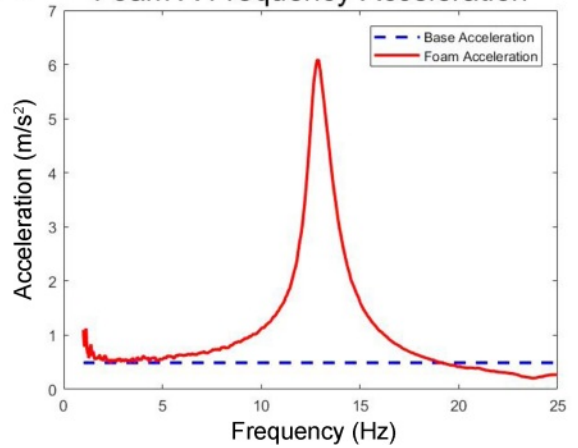


Figure 10. (a) Transmissibility according to the frequency of foam A; (b) base acceleration and foam acceleration according to the frequency of foam A.

편 A의 결정 계수(R-square) 값은 0.9979, 시편 B는 0.9948로 근사 결과가 정확함을 나타낸다. Table 4은 Origin으로 구한 최적 파라미터 값을 나타낸 표이다.

**전달률 시험:** Figure 10(a)는 시편 A의 frequency에 따른 전달률을 나타낸 그래프이다. 시편 A의 경우, 12.9 Hz에서 최대 전달률 12.4를 가지는 것을 확인할 수 있다. 또한 2-5 Hz, 19 Hz 이상의 frequency에서 전달률이 1 또는 1이하의 값을 가지는 것을 확인할 수 있다.

Figure 10(b)는 시편 A의 frequency에 따른 바닥가속도와 시편가속도를 나타낸 그래프이다. 점선은 바닥가속도를, 실선은 시편가속도를 나타낸다. 전달률과 마찬가지로 시편 가속도의 경우에도 2-5 Hz 사이에서는 바닥 가속도와 유사한 값을 가지고, 19 Hz 이상의 frequency에서는 바닥 가속도보다 작은 값을 가지는 것을 확인할 수 있다.

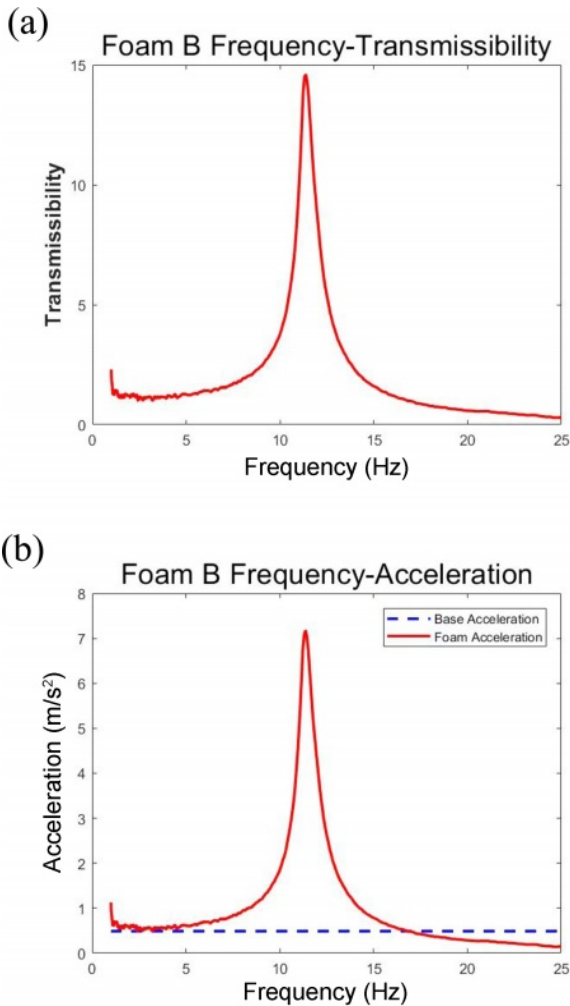


Figure 11. (a) Transmissibility according to the frequency of foam B; (b) base acceleration and foam acceleration according to the frequency of foam B.

Figure 11(a)는 시편 B의 frequency에 따른 전달률을 나타낸 그래프이다. 시편 B의 경우 11.4 Hz에서 최대 전달률 14.6을 가진다. 또한 1.5-5, 16 Hz 이상의 frequency에서 전달률이 1 또는 1 이하의 값을 가진다. Figure 11(b)는 시편 B의 frequency에 따른 바닥가속도와 시편가속도를 나타낸 그래프이다. 점선은 바닥가속도를, 실선은 시편가속도를 나타낸다. 전달률과 마찬가지로 시편 가속도의 경우에도 1.5-5 Hz 사이에서는 바닥 가속도와 유사한 값을 가지고, 16 Hz 이상의 frequency에서는 바닥 가속도보다 작은 값을 가진다.

Figure 12는 시편 A와 시편 B의 frequency에 따른 전달률을 나타낸 그래프이다. 실선은 시편 A를, 점선은 시편 B를 나타낸다. Table 5는 시편 A와 시편 B의 고유진동수와 최대 전달률을 각각 나타낸 표이다. 시편 A의 최대 전달률이 시편 B의 최대 전달률보다 작은 것을 확인할 수 있고 두 시편의 최대 전달률은 10-15 Hz 사이에서 발생한다는 것을 확인할

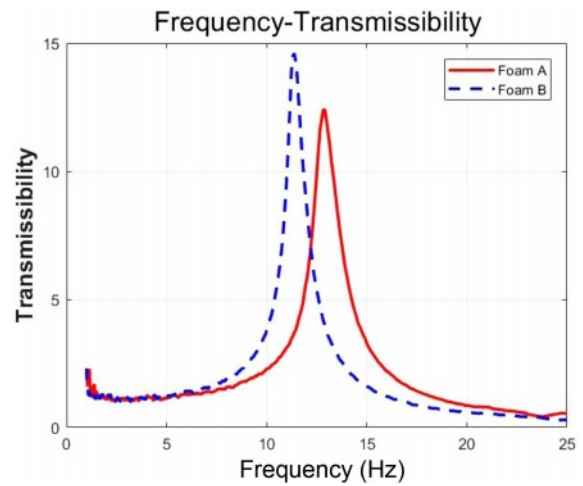


Figure 12. Comparison of transmissibility according to the frequency of foam A and B.

Table 5. Unique Frequency and Maximum Transmissibility of Foam A and B

	Foam A	Foam B
Natural frequency (Hz)	12.9	11.4
Maximum transmissibility	12.4	14.6

수 있다. 시편 A와 B의 첨가 난연제의 차이에서 기인하는 입자 크기와 작용기 유무로 인해 Figure 3과 같이 전단강성의 차이가 뚜렷하였다. 시편 A와 B의 압축강성의 차이가 미미하기에 고유진동수의 차이가 전단강성 차이의 제공근에 근사하여 비례하는 경향을 확인할 수 있었다.

## 결론

단축압축시험과 단순전단시험 데이터를 이용해서 간단한 유한요소해석을 진행한 결과 Ogden 2차 model이 실험데이터와 해석결과가 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 차량 시트와 같은 복잡한 형상을 모델링해서 실제 실험을 진행함에 앞서 데이터 결과를 예측해볼 수 있을 것이다.

동적 특성 실험 결과 두 시편 모두 5-15 Hz 사이의 frequency에 1 이상의 높은 전달률을 가지는 반면 5 Hz 이하, 20 Hz 이상의 frequency에서는 1 또는 1보다 작은 전달률을 가진다. 따라서, 5-15 Hz 사이의 성분은 전달이 크지만, 5 Hz 이하, 20 Hz 이상에서의 전달은 줄어드는 특징을 보인다. 따라서 본 연구에서 분석한 시트 폼은 5 Hz 이하, 20 Hz 이상의 frequency이외의 frequency에서 고유진동수를 갖는 수송기기에 적합하다.

철도 차량은 운행 중 궤도의 회전 불균형으로 인해 특정 주파수 범위의 진동이 발생하는데, 다양한 철도 차량에서 차

체로 전달되는 주요 진동 주파수는 다음과 같다. 통상적인 지하철은 운행 중 주로 3.5, 5 Hz의 저주파 주기진동이 차체에 전달되고,<sup>15</sup> 고속철도(KTX)의 경우 200-350 km/h의 주행시험 결과 4.5, 20-22, 25-28 Hz와 같은 주파수가 주로 전달됨을 알 수 있다. 인체에 악영향을 주는 진동수 범위는 1-90 Hz로 알려져 있기 때문에 철도 운행 중 발생하는 진동을 승객이 앉는 시트 폼에서 억제하는 것이 중요하다. 본 연구의 시편들은 5 Hz 이하, 20 Hz 이상의 주파수에서 전달률이 1보다 작은 값을 가짐으로 지하철과 KTX의 시트에 적용 가능할 것으로 보인다.

본 연구에서는 난연성 필러를 추가한 실리콘 폼을 유한요소해석을 통해 모델링하여 분석하였다. 또한 시편의 점탄성 특성을 고려하여 최적화 과정을 통해 파라미터를 얻고, 전달률 실험을 통해 시편의 frequency에 따른 전달률 특징을 분석하였다. 본 연구에서 사용한 난연성 필러를 추가한 실리콘 폼은 철도 차량뿐만 아니라 난연 특성과 진동 감소가 요구되는 시트를 필요로 하는 의자, 완충재 등에도 활용 가능할 것으로 기대된다.

**감사의 글:** 이 논문은 2020년도 산업통상자원부 및 산업기술평가원(KEIT) 연구비 지원(20010265)과 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(과제번호: 2022R1A6A1A03056784).

**이해상충:** 저자(들)는 이해상충이 없음을 선언합니다.

## 참 고 문 헌

- Shin, J. H. Componential Analysis of Textiles Treated by Halogen Type Flame Retardants. *Korean J. Community Living Sci.* **2013**, 460.
- Ryu, H. J.; Cho, S. T.; Kim, Y.; Baeck, S. H.; Jin, S. H.; Shim, S. E. Thermal and Physical Properties of Silicone Rubber Composites Filled with Inorganic Fire-proof Fillers. *Polym. Korea* **2017**, 41, 425-432.
- Lee, P. C.; Jeoung, S. K.; Ha, J. U.; Kim, B. R.; Han, J. K. Flame Retardancy and Sound Absorption Properties of Polyurethane/Expandable Graphite Foams. *Trans. Korean Soc. Automot. Eng.* **2019**, 27, 441-445.
- Briody, C.; Duignan, B.; Jerrams, S.; Tieman, J. The Implementation of a Visco-hyperelastic Numerical Material Model for Simulating the Behaviour of Polymer Foam Materials. *Comput. Mater. Sci.* **2012**, 64, 47-51.
- Petre, M. T.; Erdemir, A.; Cavanagh, P. R. Determination of Elastomeric Foam Parameters for Simulations of Complex Loading. *Comput. Methods Biomech. Biomed. Eng.* **2006**, 9, 231-242.
- Jang, H. L.; Kwon, T. S.; Park, W. H.; Lee, D.; Kim, S. R.; Bae, Y. H. A Study on Strength Properties of Sandwich Panels Including Flame Resisting Polyurethane Foam Cores for Application to Rolling Stocks. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.* **2017**, 17, 227-234.
- Kim, D. M.; Min, K. W.; Park, H. K.; Park, J. H. Evaluation of Vibration Comfort Using Dynamic Properties of Vehicle Seats. *Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng.* **2015**, 883-884.
- Kang, J. S. Human Body Vibration Analysis under Consideration of Seat Dynamic. *J. Korea Academia-Industrial Cooperation Soc.* **2012**, 13, 5689-5695.
- Kang, J. S. Ride Quality Analysis Using Seated Human Vibration Modeling. *J. Korean Soc. Railw.* **2015**, 18, 194-202.
- Hwang, S. S.; Ryu, H.; Kim, Y. S.; So, J.; Jin, S.; Baeck, S.; Shim, S. E. Thermal Stability and Mechanical Properties of Silicone Rubber Composites Filled with Inorganic Fire-proof Fillers and Expendable Materials. *Polym. Korea* **2018**, 42, 354-363.
- Ogden, R. W. Large Deformation Isotropic Elasticity – On the Correlation of Theory and Experiment for Incompressible Rubberlike Solids. *Rubber Chem. Tech.* **1973**, 46.
- Ogden, R. W. Recent Advances in the Phenomenological Theory of Rubber Elasticity. *Rubber Chem. Tech.* **1986**, 59.
- Ogden, R. W.; Saccomandi, G.; Sgura, I. Fitting hyperelastic models to experimental data. *Comput.* **2004**, 34, 484-502.
- Park, M. S.; Song, S. Comparative Study of Bifurcation Behavior of Rubber in Accordance with the Constitutive Equations. *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A* **2010**, 34, 731-742.
- Hong, D.-K.; Jeong, J.-B.; Jung, S.-W.; Kim, G.-B.; Ahn, C.-W. Investigating Natural Frequency Analysis and Measurement of Railway Vehicle to Avoid Resonance. *Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng.* **2012**, 22, 713-719.

**출판자 공지사항:** 한국고분자화학회는 게재된 논문 및 기관 소속의 관할권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.