폴리우레탄 폼 비선형 압축 거동 해석용 온도 의존 손상 점소성 구성방정식

이 정 호¹ · 김 슬 기¹ · 이 제 명^{1*}

¹부산대학교 조선해양공학과

Temperature-Dependent Viscoplastic-Damage Constitutive Model for Nonlinear Compressive Behavior of Polyurethane Foam

Jeong-Ho Lee¹, Seul-Kee Kim¹ and Jae-Myung Lee^{1*}

¹Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Pusan, 46241, Korea

Abstract

Recently, polyurethane foam has been used in various industry fields to preserve temperature environment of structures, and a wide range of loads from the static to the dynamic are imposed on the material during a life period. The biggest characteristic of polyurethane foam is porosity as being polymeric material, and it is generally known that insulation performance of the material strongly depends on internal void size. In addition, polyurethane foam's mechanical behavior has high dependence on strain rate and temperature as well as being highly non-linear ductile for compression. In the non-linear compressive behavior, volume fraction of voids and elastic modulus decrease as strain increases. Therefore, in this study, temperature-dependent viscoplastic-damage constitutive model was developed to describe the non-linear compressive behavior with the aforementioned features of polyurethane foam.

Keywords : polyurethane foam, compressive behavior dependent on strain rate and temperature, constitutive model, ABAQUS user-defined material subroutine

1. 서 론

현재 LNG 선박의 탱크를 포함한 여러 산업현장에서는 구조물의 온도환경 유지를 위한 단열성능이 필수적이며, 이를 위해 단열재를 사용하는 방법이 주로 채택되어 단열성능이 만족되고 있다(Demharter, 1998). 이러한 단열재는 구조물의 사용수명 동안에 다양한 하중을 견뎌야 하며, 하중이 부과되는 동안에도 단열성능이 유지되어야 한다.

폴리우레탄 폼은 훌륭한 단열성능 뿐만 아니라 높은 강도-무게 비, 낮은 제작비용 등의 이유로 구조물의 단열재로 사용되는 대표적인 재료이며 타 단열재에 비하여 상당히 좋은 기계적 특성을 가지고 있다. 또한, 폴리우레탄 폼은 고분자 복합재료로써 다공성을 가장 큰 특징으로 가지고 있으며, 이의 단열성능은

내부기공의 크기 및 형태에 크게 의존한다(Modesti *et al.*, 2007).

폴리우레탄 폼의 기계적 거동은 변형률 속도 및 온도에 높은 의존성(Luo *et al.*, 2010)을 가지며, 압축에서 큰 비선형 연성 거동을 보이기 때문에 압축하중에 대하여 폴리우레탄 폼의 거동을 정확히 예측하여 모사하는 것이 중요한 과제이다. 또한, 이러한 비선형 연성 압축거동에서 폴리우레탄 폼의 기공율과 탄성계수는 변형률의 증가에 따라 감소하는 특성을 가진다.

폴리우레탄 폼은 사용수명 동안에 정적하중에서부터 반복적인 동적하중까지의 하중에 노출되며 상기 서술한대로 다공성재료로써 단열성능이 내부기공에 크게 의존하기 때문에 폴리우레탄 폼으로 구성된 구조물의 구조안전성 해석과 성능평가에 상기 서술된 폴리우레탄 폼의 기계적 거동특성들은 반드시 고려

* Corresponding author:

Tel: +82-51-510-2342; E-mail: jaemlee@pusan.ac.kr
Received August 1 2016; Revised September 26 2016;
Accepted September 27 2016

©2016 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 압축하중에 의한 기공율과 탄성계수의 감소를 포함한 폴리우레탄 폼의 변형률 속도 및 온도 의존 비선형 압축거동을 모사하기 위하여 온도 의존 손상 점소성 구성방정식(temperature-dependent viscoplastic-damage constitutive model)이 개발되었다.

2. 폴리우레탄 폼 압축거동

이 장에서는 폴리우레탄 폼의 개요를 서술한 후 변형률 속도 및 온도 의존 압축거동과 압축에 의한 탄성계수의 감소에 대하여 자세히 소개하고자 한다.

2.1 경질 폴리우레탄 폼

폴리우레탄 폼은 다양한 산업에서 적용되고 있는 다용도의 열경화성 및 다공성 복합 고분자 재료이며, 이 중에 낮은 열전도도를 가지는 적절한 발포제가 사용된 closed-cell 경질 폴리우레탄 폼은 매우 훌륭한 단열성능을 가지기 때문에 구조물의 단열재로 주로 사용되고 있다. 이러한 경질 폴리우레탄 폼의 단열성능은 발포제의 특성, 내부기공의 크기 및 형태에 의해 결정된다. 또한, 폴리우레탄 폼은 뛰어난 단열성능 뿐만 아니라 높은 기계적 강도, 강한 부착성, 낮은 제작 비용, 제작 용이성 등의 장점을 가진다.

폴리우레탄 폼의 제작은 polyol과 isocyanate의 혼합으로 시작되며 이 때 기포가 발생하고, 그 후 발포가 일어난다. 대표적인 polyol과 isocyanate의 반응 화학식은 Fig. 1과

Fig. 1 Chemical reaction formulae for polyurethane (Lee *et al.*, 2016)

Fig. 2 Internal void of polyurethane foam: (a) initial shape and (b) shape after compressive loading (Lee *et al.*, 2014)

Fig. 3 Schematic compressive behavior of polyurethane foam

같으며(Lee *et al.*, 2016), 생성되는 내부기공의 형태는 Fig. 2(a)와 같다(Lee *et al.*, 2014).

폴리우레탄 폼을 포함한 고분자 폼 재료는 압축하중에 대하여 큰 비선형성을 가지는 연성거동을 보이며, Fig. 3은 I) 선형 탄성 구간, II) 응력 평형부 구간, III) 고밀도화로 인한 응력 급상승 구간을 포함한 폼 재료의 비선형 압축거동을 도식적으로 나타내고 있다.

폼 재료의 비선형 압축거동에 있어서 또 하나의 특징은 압축하중에 대한 항복 후 일정 구간에서 응력의 감소(stress-drop)가 있다는 점이며, 폼 밀도가 높을수록 응력의 감소가 커지는 경향을 보인다. 이는 높은 밀도의 폼 재료가 가지는 큰 항복응력에 있어서 cell buckling이 cellular network 전역에서 일어나며 이로 인해 폼 재료가 버틸 수 있는 하중의 용량이 크게 작아지기 때문이다(Lim *et al.*, 2009).

또한, Fig. 2(b)와 같이 폼 재료 내부의 기공은 압축거동에 대하여 점점 작아지기 시작하며 일정 수준까지 기공의 크기가 작아진 후 재료가 고밀도화되어 응력이 급상승하게 된다. 이에 대하여 Di Prima 등(2007)은 epoxy shape memory polymer foam에 micro-CT scanning 수행하여 압축 변형률의 증가에 따른 cell size의 변화를 측정하였다. Fig. 4는 변형률 간격 0.1에 대한 cell size와 각각의 변형률에 있어서의 cell snapshot을 나타낸다.

Fig. 4 Micro-structural cell response to compressive behavior of the foam material(Di Prima *et al.*, 2007)

2.2 변형률 속도 및 온도 의존 압축거동

폴리우레탄 폼의 기계적 거동은 cell wall의 두께, 분포, 형태 등의 재료 내부 구조에 기인하며, 이러한 재료 내부 구조는 변형률 속도 및 온도에 대한 민감성이 크기 때문에 결과적으로 폴리우레탄 폼의 기계적 거동에 대한 변형률 속도 및 온도의 영향은 매우 크다. 폴리우레탄 폼은 단열성능, 에너지 흡수, 감쇠거동, 흡음성능 등에 대한 장점으로 인해 광범위한 구조물에 적용되며, 이로 인해 사용수명 동안 다양한 온도 및 하중속도에 노출되기 때문에 이러한 변형률 속도 및 온도 의존 거동은 반드시 고려되어야 한다.

Altenbach 등(2014)이 편집한 책에 수록된 Marsavina 등의 연구는 폴리우레탄 폼의 변형률 속도 및 온도 의존 거동에 대하여 실험하였으며, 밀도 200kg/m^3 의 폴리우레탄 폼에 대한 대표적인 압축하중 실험결과는 Fig. 5와 같다. 본 연구에서는 실제 구조물에 적용된 폴리우레탄 폼이 하중을 받게 되는 방향인 발포방향만을 고려하였다. 실험에 사용된 시편의 형상은 $12 \times 12 \times 11.9\text{mm}$ (폭×길이×높이)의 직육면체 형상이며, -60 , 23 , 80°C 의 세 가지 온도와 $2 \sim 360000\text{mm/min}$ 의 실험속도의 실험조건 하에 hydraulic MTS testing machine을 이용하여 압축실험이 수행되었다. 각각의 실험 시나리오에 대하여 5개의 시편이 실험되어 이들의 평균이 결과로 사용되었고 경향을 아주 벗어나는 실험결과는 무시되었다. 실험결과로써 탄성계수, 항복응력, stress-drop이 변형률 속도의 증가와 온도의 감소에 의존하여 증가함을 알 수 있다. 또한, stress-drop에 대하여 응력감소가 진행되는 구간이 변형률 속도 및 온도에 의존하여 길어지는 현상을 확인할 수 있다.

Fig. 5 Strain rate- and temperature-dependent compressive behavior of polyurethane foam on rise-direction(Altenbach *et al.*, 2014)

2.3 압축에 의한 탄성계수 감소

압축하중에 대한 폴리우레탄 폼의 기계적 거동은 상기 서술한 대로 재료 내부 구조에 기인하며, 항복강도 이상의 하중이 부과되면 좌굴, 소성변형, cell wall 및 edge의 파열로 인해 cell의 붕괴가 시작된다. 이러한 cell의 붕괴는 하중이 제거된 후에도 회복되지 않기 때문에 다시 하중이 부과되었을 때 폴리우레탄 폼의 탄성계수는 감소하게 되며, 이는 재료의 손상(damage)으로 고려될 수 있다.

이에 대하여 Hou 등(2014)은 I) 비 강화 폴리우레탄 폼과 II) 강화 폴리우레탄 폼에 대하여 준정적 반복압축실험을 수행하였다. 실험의 결과는 Fig. 6과 같으며, 본 연구에서는 반복하중실험의 결과 중에 첫 번째(load)와 두 번째(reloading)의 결과만을 사용하여 탄성계수의 감소를 고려하였다. 실험에 사용된 폴리우레탄 폼의 밀도는 I)과 II)에 대하여 각각 73kg/m^3 과 87kg/m^3 이며, 압축실험 시편의 크기는 높이 $27 \sim 46\text{mm}$ 이고 폭과 깊이는 $50 \sim 80\text{mm}$ 로 제작되었다. 여기서 높이방향은 하중방향과 평행한 방향으로 설정되었다.

Fig. 6 Degradation of elastic modulus: (a) neat- and (b) reinforced-polyurethane foam(Hou *et al.*, 2014)

실험 시나리오는 3개의 초기변형률 0.15, 0.50, 0.80로 설정되었고, ASTM D 3574-08에 의거하여 Instron 8562 testing machine를 사용해 하중속도 5mm/min로 수행되었다. 실험의 결과로써 각각의 초기변형률 0.15, 0.50, 0.80에 대하여 첫 번째(loading)와 두 번째(reloading) 반복하중 간의 탄성계수 감소율은 0.521, 0.242, 0.139으로 계산되었다. 탄성계수 감소율의 계산은 I)과 II)의 평균값이 사용되었으며, 초기변형률 0.80에 대하여 두 번째 반복하중(reloading)에서 선형탄성구간의 종료지점은 변형률 0.60으로 설정되어 계산되었다.

3. 온도 의존 손상 점소성 구성방정식

본 연구에서는 앞 장에서 서술된 폴리우레탄 폼의 압축거동 특성을 모사하기 위하여 온도 의존 손상 점소성 구성방정식이 개발되어 제안되었으며, 이 장에서는 압축에 의한 기공율과 탄성계수의 감소를 모사하기 위해 수정된 GTN 모델과 변형률 속도 및 온도 의존 압축거동을 모사하기 위해 수정된 KHL 모델에 대하여 서술하겠다.

3.1 수정된 GTN model

Gurson(1977)은 다공성재료에 포함된 기공의 성장, 생성, 합체를 내부손상의 매커니즘으로 모사하는 구성방정식을 제안하였다. Gurson 모델은 강-소성 von-Mises 구성방정식에 기반을 두어 거동하는 모재에 내부기공의 총합이 간단한 형태로 포함되어 있도록 이상화하여 기공율 f 를 통해 재료 거동을 모사한다. 하지만 이에 대하여 Tvergaard 등(1984)은 Gurson 모델을 통해 모사된 재료의 파단이 실제 수행된 실험의 결과에 비하여 과소평가되어 있다고 판단하고 재료모델상수 q_1 , q_2 , q_3 와 유효기공율 f^* 를 포함한 수정된 Gurson 모델인 GTN 모델을 식 (1)과 같이 제안하였다.

$$\Phi = J_2(s) - \frac{\sigma_y^2}{3} \left\{ 1 + q_3 f^{*2} - 2q_1 f^* \cosh \left[\frac{3q_2 \sigma_h}{2\sigma_y} \right] \right\} \quad (1)$$

여기서, Φ 는 항복함수를 의미하고, s 는 편차응력이며 $J_2(s)$ 는 편차응력의 2차 불변량을 의미한다. 또한, σ_y 와 σ_h 는 각각 항복응력과 정수압응력을 의미한다. GTN 모델에서 사용되는 유효기공율은 $\bar{f}_F = (q_1 + \sqrt{q_1^2 - q_3}) \div q_3$ 를 이용하여 식 (2)와 같이 계산된다.

$$f^* = \begin{cases} f & \cdots f \leq f_c \\ f_c + \frac{\bar{f}_F - f_c}{\bar{f}_F - f_c} (f - f_c) & \cdots f_c < f < \bar{f}_F \\ \bar{f}_F & \cdots \bar{f}_F \leq f \end{cases} \quad (2)$$

여기서, f_c , $\bar{f}_F$, $\bar{f}_F$ 는 각각 임계기공율, 파단기공율, 최종기공율을 의미한다.

재료의 거동에 따른 기공율의 성장 및 생성에 대한 증분은 식 (3)~(5)를 통해 계산된다.

$$\dot{f} = \dot{f}_{growth} + \dot{f}_{nucleation} \quad (3)$$

$$\dot{f}_{growth} = (1-f)\dot{\epsilon}^p : I \quad (4)$$

$$\dot{f}_{nucleation} = A \dot{p} \quad (5)$$

여기서, $\dot{\epsilon}^p$, $\dot{p}$, I 는 각각 소성변형률 증분, 등가소성변형률 증분, 2차 단위텐서를 의미하며, A 는 기공을 생성하는 변형률의 확률적 분포로써 표준정규분포의 형태로 계산된다.

Lemaitre(1985)는 변형률 증가의 가설과 유효응력의 개념을 이용하여 연성재료의 탄-소성 거동을 손상과 함께 모사하는 구성방정식을 제안하였다. Lemaitre 모델은 손상 D 의 증분을 Y (damage energy release rate)를 통하여 식 (6)~(7)과 같이 계산한다.

$$\dot{D} = \left(\frac{\dot{\gamma}}{1-D} \right) \left(-\frac{Y}{r} \right)^l \quad (6)$$

$$Y = - \left(\frac{J_2(s)}{2G(1-D)^2} + \frac{\sigma_h^2}{2K(1-D)^2} \right) \quad (7)$$

여기서, r 과 l 은 재료모델상수이며 $\dot{\gamma}$ 은 소성증수이고, G 와 K 는 각각 전단계수와 체적계수이다.

Lemaitre 모델은 $\sigma = (1-D)D^e : \epsilon^e$ 의 stress-strain rule을 통하여 재료의 거동을 모사하기 때문에 위의 식들을 이용하여 계산된 손상은 탄성법칙과 결합되어 변형률 증가의 가설을 통해 식 (8)과 같은 유효탄성계수 D_{eff} 을 도출한다.

$$D_{eff} = (1-D)D^e \quad \text{at elastic region} \quad (8)$$

여기서, σ 와 ϵ^e 는 각각 응력과 탄성변형률을 의미하며, D^e 는 손상되지 않은 상태의 기준탄성계수를 의미한다.

본 연구에서는 폴리우레탄 폼의 압축거동 특성 중 압축에

의한 기공율과 탄성계수의 감소를 모사하기 위해 GTN 모델을 기초로 Lemaitre 모델을 결합한 수정된 GTN 모델을 식 (9)와 같이 제안하였다.

$$\Phi = \frac{J_2(s)}{(1-D)^{Q_2}} - \frac{\sigma_y^2}{3} \left\{ 1 + q_3 f^{*2} - 2q_1 f^* \cosh \left[\frac{3q_2 \sigma_h}{2\sigma_y} \right] \right\} \\ \dots D_{eff} = (1-D)^{Q_2} D^e \quad \text{at elastic region} \quad (9)$$

여기서, Q_2 는 재료모델상수이며, 수정된 GTN 모델을 이용하여 기존 GTN모델의 기공율 감소에 대한 모사뿐만 아니라 $J_2(s)/(1-D)^{Q_2}$ 를 통해 손상으로 인한 응력과 탄성계수의 감소를 모사할 수 있다.

본 모델에서의 손상의 증분은 Lemaitre 모델의 증분 식 (6)을 통하여 계산되며, 기공율의 성장 증분은 GTN 모델의 증분 식에 가속도상수 Q 를 적용하여 식 (10)과 같이 계산된다.

$$\dot{f}_{growth} = Q(1-f)\dot{\epsilon}^p : I \quad (10)$$

폴리우레탄 폼은 Fig. 2(b)에서 볼 수 있듯이 압축하중에 대하여 기공은 감소하는 성장을 보이며 생성은 없기 때문에 유효기공율의 효용성은 없으므로 $f^* = f$ 로 사용할 수 있다.

3.2 수정된 KHL 모델

Khan 등(1999)은 재료의 변형률 속도 및 온도 의존거동을 모사하기 위하여 식 (11)과 같은 구성방정식을 제안하였다.

$$J_2(s) = f_1(\epsilon_{eq}, D_2^p) f_2(T) \quad (11a)$$

$$\sigma = \left[c_1 + c_2 \left(1 - \frac{\ln \dot{\epsilon}}{\ln D_0^p} \right)^{c_3} \right] \dot{\epsilon}^{c_4} (1 - T'^{c_5}) \\ \dots T' = (T - T_r) / (T_{melting} - T_r) \quad (11b)$$

여기서, ϵ_{eq} , D_2^p , T 는 각각 등가변형률, 소성변형률속도의 2차 불변량, 절대온도를 의미한다. 또한, c_1 , c_2 , c_3 , c_4 , c_5 , c_6 은 재료모델상수이며 D_0^p 는 최대 변형률 속도이고, T_r 과 $T_{melting}$ 은 각각 기준온도와 용융온도를 의미한다.

$f_1(\epsilon_{eq}, D_2^p)$ 는 기준변형률 속도에서의 응력-변형률 관계와 변형률 속도 의존 거동을 정의하며 $f_2(T)$ 는 온도 의존 거동을 정의하는 역할을 가진다.

기존의 KHL 모델은 재료의 변형률을 탄성부분과 탄성부분으로 나누어 고려하지 않기 때문에 폴리우레탄 폼과 같이

상당한 변형 후 소성구간으로 진입하는 재료에는 부적합하다. 또한, 기존의 재료모델상수만으로 폴리우레탄 폼의 변형률 및 온도에 따른 항복응력의 변화와 기계적 거동을 모사하기에 무리가 있기 때문에 본 연구에서는 폴리우레탄 폼의 변형률 속도 및 온도 의존 압축거동을 모사하기 위해 $X = \ln \dot{\epsilon}$ 와 등가 소성변형률 p 를 이용하여 식 (12)와 같은 수정된 KHL 모델을 제안하였다.

$$\sigma = \left\{ \left[A_1 + B \left(1 - \frac{\ln \dot{\epsilon}}{\ln D_0^p} \right)^{n_1} p^{n_0} \right] \exp(A_2 X) + A_3 \exp(A_4 X) \right\} \\ \times (1 - m_2 T^*)^{m_1} \div R_{dense} \\ \dots T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r) \quad (12)$$

여기서, A_1 , A_2 , A_3 , A_4 , B , n_0 , n_1 , m_1 , m_2 는 재료모델 상수이며, T_m 은 재료가 사용될 수 있는 최대온도로 설정되었다. D_0^p 는 본 연구에서는 $10^6/s$ 가 사용되었다. 또한, 3.1의 서술되었던 수정된 GTN 모델은 수치적 구현에서 기공율이 0인 상태의 재료(dense material)를 기준으로 기공율에 따라 재료가 버틸 수 있는 응력을 결정하기 때문에 온도 의존 손상 점소성 구성방정식의 수치적 구현을 위하여 수정된 KHL 모델에 기공율에 따른 응력변화를 R_{dense} 가 적용되었다. 즉, R_{dense} 는 일정 초기기공율을 포함하는 porous material과 그 재료의 dense material 상태의 응력 비를 의미한다. 1축 압축하중에서는 축응력 σ_{axial} , 등가응력 q , 3배의 정수압응력 $3\sigma_h$ 가 동일하기 때문에 식 (13)과 같은 방정식의 해를 통해 R_{dense} 를 얻을 수 있다. 여기서, f_0 는 재료의 초기기공율이다.

$$(R_{dense})^2 + 2q_1 f_0 \cosh \left(\frac{R_{dense} q_2}{2} \right) - 1 - q_3 f_0^2 = 0 \quad (13)$$

수정된 KHL 모델은 재료거동모사에서 재료의 변형률 속도 및 온도 의존 재료경화 및 변형경화를 모사하기 위해 구성 방정식의 수치적 구현에서 3.1의 수정된 GTN 모델의 σ_y 에 대입되어 사용된다.

3.3 재료모델상수 결정

3.3.1 수정된 KHL 모델의 재료모델상수

초기 재료모델상수 집단을 도출하기 위해 변형률 속도 및 온도 의존 1축 실험결과가 사용되며 그 과정은 다음과 같다.

1) A_1 , A_2 , A_3 , A_4

항복지점에서의 등가소성변형률은 비교적 매우 작기 때문에

상온에서 식 (12)는 식 (14)와 같이 표현되며, 이를 통해 A_1 , A_2 , A_3 , A_4 를 결정할 수 있다.

$$\sigma_y = A_1 \exp(A_2 X) + A_3 \exp(A_4 X) \quad (14)$$

2) B , n_0

변형률 속도가 $1/s$ 이며 상온의 경우 식 (12)는 식 (15)와 같이 표현되며, B 와 n_0 를 결정할 수 있다. 본 연구에서 참고한 폴리우레탄 폼의 압축실험결과의 경우 변형률 속도 $1/s$ 의 실험결과가 없기 때문에 보간법이 사용되었다.

$$\sigma - A_1 - A_3 = B p^{n_0} \quad (15)$$

3) n_1

상온에서 식 (12)는 n_1 에 대하여 식 (16)과 같이 표현될 수 있으며, 상온에서의 n_1 은 변형률 속도 $1/s$ 를 제외한 변형률 속도에 대하여 평균값으로 계산된 n_1 값들의 범위 안에서 결정되었다.

$$n_1 = \ln \left(\frac{\frac{\sigma - A_3 \exp(A_4 X)}{\exp(A_2 X)} - A_1}{B p^{n_0}} \right) \div \ln \left(1 - \frac{\ln \dot{\epsilon}}{\ln D_0^p} \right) \quad (16)$$

4) m_1 , m_2

m_1 과 m_2 는 상온을 제외한 온도의 재료 항복강도 실험 결과를 식 (17)을 통해 dense material로 환산한 값과 식 (14)에 온도 의존 항을 추가한 식 (18)을 이용하여 최소자승법으로 결정되었다.

$$\sigma_{y,dense} = \sigma_{y,experience} \div R_{dense} \quad (17)$$

$$\sigma_{y,T} = \{A_1 \exp(A_2 X) + A_3 \exp(A_4 X)\} \times (1 - m_2 T^*)^{m_1} \div R_{dense} \quad (18)$$

먼저, m_2 를 $[0,1]$ 의 범위로 설정한 후 양의 정수 m_1 중 오차 제곱의 합이 0.5 이하가 되는 최솟값이 m_1 값으로 결정되었다. 그 후, 결정된 m_1 을 이용하여 각각의 변형률 속도 대하여 $[0,1]$ 의 범위 중 가장 작은 오차 제곱의 합을 가지는 m_2 값이 사용되었다. 즉, 본 연구에서 m_2 는 변형률 속도를 의미하는 X 의 함수로 표현되었다.

5) 본 연구에서 n_1 은 최종적으로 $T^{**} = T/T_r$ 을 이용하여 T^{**} 의 함수로 표현되었으며, 상온을 제외한 온도범위에서의 n_1 을 실험 중 가장 높은 변형률 속도의 실험결과를 통해 얻은

Table 1 Material parameters of the modified KHL model

A_1	6.316	B	1.844E+4
A_2	0.032	n_0	7.563
A_3	0.012	m_1	25
A_4	0.978	D_0^p	1000000
T_r	296.150K	T_m	473.150K
$R_{dense} = 0.296$			
$n_1 = 1.654 T^{*-2.039} - 1.755$			
$m_2 = 0.049 \exp(-0.033 X) + 0.001 \exp(0.103 X)$			

후 모든 n_1 값이 T^{**} 에 대하여 표현되었다.

상기 과정을 통해 얻어진 초기 재료모델상수 집합을 이용한 폴리우레탄 폼의 압축거동 모사결과와 압축실험결과를 비교하여 수정된 KHL 모델의 재료모델상수가 Table 1과 같이 최종 결정되었다. 또한, 폴리우레탄 폼에 대한 T_m 은 이 재료가 산업현장에서 단열재로 사용되는 온도범위 중 최고온도인 200℃로 결정되었다.

3.3.2 수정된 GTN 모델의 재료모델상수

본 연구에서 제안된 GTN 모델은 재료의 변형에 따른 기공율의 변화와 탄성계수의 변화를 모사하는 의미를 가지기 때문에 Fig. 4의 기공율 변화 곡선과 Fig. 6에서 계산된 변형률에 따른 탄성계수 감소율을 이용하여 재료모델상수가 결정되었으며 그 과정은 다음과 같다.

1) f_0 , q_1 , q_2 , q_3

본 연구에서 압축거동 모사가 수행된 폴리우레탄 폼은 밀도 200kg/m³이기 때문에 초기기공율 f_0 는 Table 2를 이용하여 보간법을 통해 결정되었다(Linul *et al.*, 2013).

Table 2 Initial void fraction of polyurethane foam

Density(kg/m ³)	100	160	300
Porosity	0.910	0.860	0.740

GTN 모델에서 q_1 과 q_3 는 기공율 영향의 정도를 의미하며, q_2 는 정수압응력 영향의 정도를 의미한다. 현재까지 수행되어온 많은 연구에서 $q_1 = 1.5$, $q_2 = 1.0$, $q_3 = q_1^2$ 이 금속재료에 대하여 제안되었으나 폴리우레탄 폼은 금속재료에 비하여 초기기공율이 매우 크기 때문에 본 연구에서는 $q_1 < 1.5$ 의 범위에서 결정되었다.

2) Q_2 , l

재료모델상수 Q_2 는 손상에 의해 탄성계수와 응력이 얼마나 감소되는지를 결정하는 의미를 가지며 Q_2 가 클수록 작은 손상의 증분에서도 탄성계수 감소의 폭이 크다. 본 연구에서는

반복비교를 통해 양의 정수 중에 Q_2 가 결정되었다. 여기서, 반복비교 시 Fig. 6에서 계산된 변형률에 따른 탄성계수 감소율과 비교되는 제안된 GTN 모델에서 계산되는 탄성계수 감소율은 $(1-D)^{Q_2}$ 이다.

재료모델상수 l 은 변형에 의한 손상 곡선의 형태를 결정하며, 이 손상 곡선의 형태는 변형에 따른 탄성계수의 감소 곡선의 형태를 결정한다. 따라서 본 연구에서는 $l < 1.0$ 의 범위에서 결정되었다.

3) r , Q

재료모델상수 r 과 Q 는 각각 식 (6)의 손상 증분과 식 (10)의 기공을 증분에서 증분의 크기를 결정하는 상수이며 본 연구에서는 식 (19)와 같이 변형률 속도와 온도의 함수로 표현되었다. 여기서, 변형률 속도 및 온도 영향에 대한 표현의 일관성을 유지하기 위해 식 (14)의 변형률 속도 의존부가 정규화되어 사용되었으며 수정된 KHL 모델의 온도 의존부가 사용되었다.

$$r, Q = c_1 \left[\{A_1 \exp(A_2 X) + A_3 \exp(A_4 X)\} / 5.221 \right]^{c_2} \times (1 - T^*)^{c_3} \quad (19)$$

먼저, 변형률 속도가 가장 낮을 때 정규화된 변형률 속도의 의존부의 값이 1이 되고 상온에서 온도 의존부의 값이 1이 되기 때문에 이때의 실험결과를 기준으로 c_1 이 결정되었으며, 결정된 c_1 과 상온에서 가장 높은 변형률 속도에서의 실험결과를 이용하여 c_2 가 결정되었다. 그 후 마지막으로 상온 외의 온도에서 가장 낮은 변형률 속도의 실험결과를 이용하여 c_3 가 결정되었다.

Fig. 4의 기공을 변화 곡선과 Fig. 6에서 계산된 압축 변형률에 따른 탄성계수 감소율을 이용하여 상기 과정으로 결정된 수정된 GTN 모델의 재료모델상수는 Table 3과 같다.

Table 3 Material parameters of the modified GTN model

f_0	0.829	q_1	0.820
Q_2	9	q_2	1
l	0.600	q_3	$= q_1^2$
$r = 0.020 \{A_1 \exp(A_2 X) + A_3 \exp(A_4 X) / 5.221\}^{-1.900} (1 - T^*)^{-1.300}$			
$Q = 39 \{A_1 \exp(A_2 X) + A_3 \exp(A_4 X) / 5.221\} (1 - T^*)^{0.600}$			

4. 유한요소해석 적용 폴리우레탄 폼 압축거동모사

본 연구에서 제안된 온도 의존 손상 점소성 구성방정식은 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS/Standard의 사용자 정의

Fig. 7 Finite element modeling of polyurethane foam

서브루틴(UMAT, User-defined material)에 탑재되어 폴리우레탄 폼의 비선형 압축거동이 모사되었으며, UMAT은 요소의 모든 iteration 과정에서 재료의 거동을 정의하는 의미를 가진다.

유한요소모델링은 Fig. 7과 같이 125개의 저감적분 입방 요소 C3D8R을 이용하여 수행되었으며, 2면에 z 방향 병진 구속, 3면의 맞은편 면에 y 방향 병진구속, 1면의 맞은편 면에 x 방향 병진구속이 경계조건으로 주어졌다. 또한, 하중은 1면에 고루 분포되어 부과된다는 가정 하에 1면 x 축 변위제어를 통해 압축되었으며, 각각의 실험속도와 동일한 변위제어속도를 적용함으로써 변형률속도가 구현되었다.

또한, 수행된 유한요소해석은 3차원 결과(tensor)인데 반해 거동모사의 비교검증을 위한 실험은 1차원 결과(scalar)이기 때문에 유한요소해석의 결과와 실험결과에서의 변형률 및 변형률 속도는 모두 von-Mises 등가 변형률($\epsilon_{eq}, \dot{\epsilon}_{eq}$)으로 변환되어 비교되었다.

Table 4 Coefficients of E and ϵ_{drop}

	E	ϵ_{drop}
a	$-0.050 T + 20.010$	$(4.958 E-5) T - 0.004$
b	0.444	$(3.551 E-17) T^{5.870} + 0.215$
c	$(9.001 E+9) T^{-3.454} + 62.600$	$(-1.504 E-12) T^{4.093} + 0.096$

본 연구에서 재료모델상수를 제외하고 유한요소해석에 사용된 재료상수는 탄성계수 E , 포아송 비 ν , stress-drop 변형률 ϵ_{drop} 이며, 여기서 ϵ_{drop} 은 재료가 항복한 후 이 변형률까지 기공율의 변화없이 cell의 붕괴로 인한 stress-drop만 진행 된다는 의미를 가진다. 여기서, 포아송 비는 0.3이 사용되었으며, E 와 ϵ_{drop} 은 Fig. 5에서 알 수 있듯이 변형률 속도와 온도에 의존하기 때문에 $E, \epsilon_{drop} = f_3(\dot{\epsilon}_{eq}, T)$ 로 Table 4의 계수를 가지는 식 (20)과 같이 표현되었다.

$$E, \epsilon_{drop} = a (\dot{\epsilon}_{eq})^b + c \quad (20)$$

Fig. 8은 폴리우레탄 폼의 비선형 압축거동을 모사하기 위해 본 연구에서 제안된 온도 의존 손상 점소성 구성방정식을

Fig. 8 Results of FEA using the proposed temperature-dependent viscoplastic-damage constitutive model, compared with the experimental results

이용한 유한요소해석 결과이며, 모사된 응력-변형률 곡선이 실제 실험결과를 성공적으로 모사하고 있음을 알 수 있고 압축에 의한 기공율과 탄성계수의 감소율 또한 제안된 구성방정식으로 계산될 수 있음이 확인되었다.

본 연구에서 제안된 구성방정식에서 기공율의 변화는 소성 변형률에 기인하므로 응력 급상승 구간에서는 변형률 증분이 급격히 작아지기 때문에 기공율의 감소가 작아짐에 따라 기공율 변화의 모사에서 오차가 다소 발생하였으나 기공율 감소의 경향을 성공적으로 모사함을 알 수 있다.

모사결과에서 변형률 속도가 높아지고 온도가 낮아짐에 따라 압축에 의한 기공율 감소와 탄성계수 감소율이 크게 나타나는 경향으로 모사되었으며, 이에 따라 모사결과와 실험결과 비교에서 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 하지만 이는 변형률 속도가 높아지고 온도가 낮아짐에 따라 재료가 취성화 및 경화되기 때문에 압축에 따른 cell의 붕괴가 더욱 심해진다는 관점 하에 타당하다고 고려된다.

5. 결 론

본 연구에서는 변형률 속도 및 온도 의존 경향을 보이는 폴리우레탄 폼의 비선형 압축거동의 모사를 위해 온도 의존 손상 점소성 구성방정식이 제안되었으며 Fortran 언어로 작성되어 ABAQUS 사용자 정의 서브루틴 UMAT을 통하여 상용 유한요소해석 프로그램에 재료카드로 탑재되었다. 모사된 폴리우레탄 폼의 비선형 압축거동은 검증을 위하여 실험 결과와 비교되었으며, 수행된 본 연구의 결과는 다음과 같다.

- (1) 제안된 온도 의존 손상 점소성 구성방정식은 기공율의 변화를 모사할 수 있는 GTN 모델을 기반으로 Lemaitre 손상 모델이 탑재된 항복함수에 재료의 변형률 속도 및 온도 의존성을 표현할 수 있는 KHL 모델이 폴리우레탄 폼에 대해 수정되어 사용되었다. 제안된 구성방정식과 유한요소해석을 이용하여 수행된 거동모사는 폴리우레탄 폼의 비선형 응력-변형률 곡선과 압축 변형에 따른 기공율과 탄성계수의 감소를 변형률 속도 및 온도가 재료에 미치는 영향을 타당하게 고려하며 성공적으로 모사할 수 있음을 보였다.
- (2) 많은 산업현장에서 단열재로 사용되고 있는 폴리우레탄 폼의 단열성능은 재료 내부기공의 크기 및 형태에 크게 의존하기 때문에 압축변형에 의해 감소한 기공율이 단열성능에 미치는 영향을 정량적으로 측정할 수 있다면 본 연구에서 모사된 기공율의 변화가 더욱 의미를 가질 수 있을 것이라 예상된다.
- (3) 현재 다양한 이유로 복합재가 구조물에 적용되는 경우가 많아지고 있으며, 이에 따라 복합재의 거동을 구성방정식을 이용하여 모사하기 위한 연구가 여러 분야에서 활발히 진행되고 있다. 산업에서 사용되는 대표적인 복합재료 중 하나인 폴리우레탄 폼은 구조물의 온도환경 유지를 위하여 단열재로 사용되는 동안 다양한 정적 및 동적 하중에 노출되며 주된 하중은 압축방향이기 때문에 본 연구에서 제안된 온도 의존 손상 점소성 구성방정식과 같은 복합재의 재료특성을 고려한 구성방정식을 통한 재료거동모사는 구조물의 구조해석분야에서 효과적으로 유용하게 적용될 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2015R1A2A1A150526 88). 이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0030013).

References

- Altenbach, H., Sadowski, T. (2014) *Failure and Damage Analysis of Advanced Materials*, Springer Vienna, p.278.
- Demharther, A. (1998) Polyurethane Rigid Foam, A Proven Thermal Insulating Material for Applications between +130°C and -196°C, *Cryogenics*, 38(1), pp.113~117.
- Di Prima, M.A., Lesniewski, M., Gall, K., McDowell, D.L., Sanderson, T., Campbell, D. (2007) Thermo-Mechanical behavior of Epoxy Shape Memory Polymer Foams, *Smart Mater. & Struct.*, 16(6), pp.2330~2340.
- Gurson, A.L. (1977) Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part I—Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media, *J. Eng. Mater. & Tech.*, 99(1), pp.2~15.
- Hou, C., Czubernat, K., Jin, S.Y., Altenhof, W., Maeva, E., Seviaryna, I., Bandyopadhyay-Ghosh, S., Sain, M., Gu, R. (2014) Mechanical Response of Hard Bio-based PU Foams under Cyclic Quasi-static Compressive Loading Conditions, *Int. J. Fatigue*, 59, pp.76~89.
- Khan, A.S., Liang, R. (1999) Behaviors of Three BCC Metal over a Wide Range of Strain Rates and Temperatures: Experiments and Modeling, *Int. J. Plast.*, 15(10), pp.1089~1109.
- Lee, C.S., Lee, J.M. (2014) Anisotropic Elasto-viscoplastic Damage Model for Glass-fiber Reinforced Polyurethane Foam, *J. Compos. Mater.*, 48(27), pp.3367~3380.
- Lee, J.H., Kim, S.K., Park, S.B., Bang, C.S., Lee, J.M. (2016) Application of Gurson Model for Evaluation of Density Dependent Mechanical Behavior of Polyurethane Foam: Comparative Study on Explicit and Implicit Method, *Macromol. Mater. & Eng.*, 301(6), pp.694~706.
- Lemaitre, J. (1985) A Continuous Damage Mechanics Model for Ductile Fracture, *J. Eng. Mater. & Tech.*, 107(1), pp.83~89.
- Lim, G.T., Altstädt, V., Ramsteiner, F. (2009) Understanding the Compressive behavior of Linear and Cross-linked Poly(vinyl chloride) Foams, *J. Cell. Plast.*, 45, pp.419~439.
- Linul, E., Marsavina, L., Voiconi, T., Sadowski, T. (2013) Study of Factors Influencing the Mechanical Properties of Polyurethane Foams under Dynamic Compression, *Int. J. Phys.: Conf. Ser.*, 451(1), p. 012002. IOP Publishing.
- Luo, H., Zhang, Y., Wang, B., Lu, H. (2010) Characterization of the Compressive behavior of Glass Fiber Reinforced Polyurethane Foam at Different Strain Rates, *J. Offshore Mech. & Arctic Eng.*, 132(2), 021301.
- Modesti, M., Lorenzetti, A., Besco, S. (2007) Influence of Nanofillers on Thermal Insulating Properties of Polyurethane Nanocomposites Foams, *Polym. Eng. & Sci.*, 47(9), pp.1351~1358.
- Tvergaard, V., Needleman, A. (1984) Analysis of the Cup-cone Fracture in a Round Tensile Bar, *Acta Metall.*, 32(1), pp.157~169.

요 지

현재 많은 산업에서 구조물의 온도환경 유지를 위한 단열재로 폴리우레탄 폼이 사용되며, 수명 동안 정적 및 동적의 다양한 하중이 이에 부과된다. 폴리우레탄 폼은 고분자재료로써 다공성이며, 단열성능은 내부기공의 크기에 크게 의존한다. 또한, 폴리우레탄 폼의 기계적 거동은 변형률 속도 및 온도에 대한 의존성이 큰 동시에 압축에 대하여 큰 비선형 연성거동을 보인다. 이러한 비선형 연성 압축거동 중에 폴리우레탄 폼은 변형률의 증가에 따라 기공율과 탄성계수의 감소를 보인다. 따라서 본 연구에서는 상기 특성들을 포함한 폴리우레탄 폼의 변형률 속도 및 온도 의존 비선형 압축거동을 모사하기 위하여 온도 의존 손상 점소성 구성방정식이 개발되었다.

핵심용어 : 폴리우레탄 폼, 변형률 속도 및 온도 의존 압축거동, 구성방정식, 아바쿠스 사용자 정의 서브루틴