

〈논 문〉 SAE NO. 96370039

저밀도 폴리우레탄 폼재료의 유한요소 모델링

Finite Element Modeling of Low Density Polyurethane Foam Material

김 원 택,* 최 형 언**
W. T. Kim, H. Y. Choi

ABSTRACT

The compressive stress-strain response of Low Density Polyurethane foam material is modeled using the finite element method. A constitutive equation which include experimental constants based on quasi-static and dynamic uniaxial compression test is proposed. Impact test with different impactor masses and velocities are performed to verify the proposed model. The comparison between impact test and finite element analysis shows good agreements.

주요기술용어 : Foam material(폼재료), Finite element method(유한요소법), Constitutive equation(구성방정식), quasi-static and dynamic uniaxial compression test(준정적 및 동적 단축 압축 시험), Impact test(충격시험), Elongation(연신률)

1. 서 론

폼재료는 압축변형시 많은 에너지를 흡수하며 또한 경량화에도 매우 효과적이어서 범퍼, 도어 등의 차체에 충돌에너지 흡수용으로 활용되고 있다. 일례로서 김진 등¹⁾은 최근 전기자동차용으로 설계, 제작중인 복합재료 차체 중의 일부분인 도어를 다각도 경편재료와 폴리우레탄 폼코어를 사용하여 샌드위치 구조로 제작하였으며, 이는 기존의 철재 도어와 비교하여 35% 정도의

경량화를 이룸과 동시에 측면 충돌저항성도 매우 높아졌다고 발표하였다. 또한 최근들어 강조되고 있는 측면충돌시험에서도 폼재료가 사용되고 있다. 미국 연방법규의 측면충돌관련규제(FMVSS 214)는 1973년 이래 시행되고 있는 정적 도어 강도 기준(static side door strength requirement)과 1996년 6월 이후 모든 승용차에 적용될 동적인 측면 충돌시험으로 이루어져 있다. 이러한 동적인 측면 충돌시험에서는 충돌하는 차체의 평균적인 변형특성을 갖도록 제작되는 이동충돌벽(moving deformable barrier)이 사용되며, 충돌벽의 전면은 알루미늄 허니콤(미국)이나 폼재료(유럽)로 만들어진다. 이렇듯 쓰임이 많

* 홍익대학교 대학원
** 정희원, 홍익대학교 기계공학과

아짐에 따라 포옴재료의 변형거동 모델링은 차체의 설계 및 해석에 있어 필수적인 유한요소해석에 매우 중요하게 부각되고 있다. 따라서 충돌해석 전용프로그램인 LS-DYNA²⁾, PAM-CRASH³⁾ 등에는 이러한 포옴재료를 모델링하는 모듈이 지속적으로 개량, 개발되고 있다. 이런 이유로 본 연구에서는 G7 차세대 자동차 안전도 공통기반 기술 부문중 자동차 충돌해석용 프로그램개발^{4),5)}의 일부분으로서 포옴재료의 변형거동을 해석하는 모듈을 개발하였다.

포옴재료의 기계적인 특성은 주로 압축하중하에서의 강성, 강도 등으로 표현되며, 이는 포옴의 재질과 밀도에 따라 변한다⁶⁾. 본 연구에서는 밀도가 0.09g/cm³인 폴리우레탄 포옴에 대한 충격시험과 준정적 압축시험을 수행하여 그 결과를 변형률속도의 영향이 고려된 유한요소프로그램의 해석결과와 비교하였다. 일반 금속재료에 비해서 상대적으로 저밀도($\rho=0.09\text{g/cm}^3$)의 포옴은 초기의 5%정도 변형률까지는 선형탄성변형을 하며 항복 후 약 50%의 변형률까지 일정한 하중하에서 압축된다. 50%이후의 변형률부터는 저항용력의 크기가 급격히 증가하며, 70~80% 정도의 변형률에 이르러서는 더 이상 압축하기 힘들게 된다. 이 저밀도 포옴재료는 압축과 수직 방향으로는 변형이 매우 작으며($\nu=0.01\sim 0.07$), 하중을 제거한 후에는 압축비에 따라 40% 정도까지의 영구 변형률을 갖는다. 또한 압축에 따른 하중-변위곡선은 하중의 속도, 즉 변형률속도에 영향을 받으나 어느 정도 이상의 변형률속도에서는 그 영향이 감소함을 알 수 있었다.

2. 유한요소의 정식화

본 논문에서는 전절에서 언급된 포옴재료의 거동을 다음과 같이 응력과 변형률의 관계식으로 제안한다.

$$\bar{\sigma}_i = \tilde{\sigma}_i M(\dot{\epsilon}_i) \quad (i=1,2,3) \quad (1)$$

$$\tilde{\sigma}_i = f(\epsilon_i) \quad (2)$$

$$M(\dot{\epsilon}_i) = 1 + a \cdot \tan^{-1}(\log(\dot{\epsilon}_i/\dot{\epsilon}_0)/b) \quad (3)$$

수식(2)의 함수 f 는 준정적 단축 압축실험으로부터 구한 응력과 변형률의 Tabulated Data 관계식을 의미하며, 수식(3)에서 제안된 함수 M 은 변형률속도, $\dot{\epsilon}$ 의 영향을 고려한 영향계수이다. 수식(3)에 포함된 a 와 b 는 실험상수이며, 이들은 준정적 및 변형률속도를 달리한 동적 압축 시험으로부터 측정된 응력-변형률곡선으로 구한다. 또한 수식(3)의 $\dot{\epsilon}_0$ 는 실험상수, a , b 를 구하는데 있어 기준이 되는 변형률 속도를 의미한다. 수식(2)의 연신률(Elongation), ϵ ,는 주신장률(Principal stretch)인 λ_i 로부터 다음과 같이 구한다.

$$\epsilon_i = \lambda_i - 1 \quad (4)$$

이때 λ_i 는 Left stretch tensor인 V_{ij} 의 Eigenvalue로부터 구할 수가 있고, 또한 V_{ij} 는 변형 구배 행렬식(Deformation gradient matrix)인 F_{ij} 를 polar decomposition함으로써 찾을 수 있다. 변형 구배 행렬식, F_{ij} 는 다음의 수식(5)와 같으며

$$F_{ij} = \frac{\partial x_i}{\partial X_j} = V_{ik} R_{kj} \quad (5)$$

이때 x_i 는 재료의 현재, 즉 변형된 후의 좌표이고 X_j 는 초기, 즉 변형하기 전의 좌표이다. 또한 R_{kj} 는 직교(회전)행렬식(Orthogonal(rotation) matrix)이며 수식(5)의 분해에는 일반적인 polar decomposition방법⁸⁾이 사용되었다. 수식(6)과 같이 주신장률, λ_i 는 Stretch tensor, V_{ij} 의 Eigenvalue가 된다.

$$\det(V_{ij} - \lambda_i \delta_{ij}) = 0 \quad (6)$$

Elongation, ϵ_i 가 인장값(>0)을 가지게 되면, 공칭응력-변형률식은

$$\bar{\sigma}_i \cong E \epsilon_i \quad (7)$$

이 된다. 여기서 E 는 인장탄성계수이며 압축곡선의 초기 기울기로부터 구한다. 실험으로부터

구한 응력성분이 공칭 응력(Engineering stress)인 경우, 수식(8)에 따라 Cauchy 응력을 구하고 다시 절점력을 구하기 위해 global 좌표로 변환시키게 된다.

$$\sigma_i = \frac{\bar{\sigma}_i}{\lambda_j \lambda_k} \quad (8)$$

3. 압축 및 충격실험

밀도가 0.09g/cm³인 45×45×30mm 크기의 직육면체 폼에 대한 정적 및 동적압축시험이 Instron을 사용하여 수행되었으며, 그 결과로부터 다음과 같은 변형특성을 구하였다.

1) 변형률속도의 영향

3.5, 200, 2000, 20000mm/min의 네가지 하중속도에 따른 응력-변형률곡선을 측정하고, 그 결과로부터 전절의 식(3)에서 제안된 실험상수 a , b 를 구하였다. 이때의 상수값 a , b 는 수치해석적 방법을 사용하여 구하였는데 실험치와 근사한 거동을 찾기 위해 시행착오법을 이용하였다. Fig.1은 수식(1)~(3)에서 제안된 구성방정식으로부터의 계산결과를 실험결과와 함께 보여주고 있다. 제안된 수식이 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

2) 포아송비

Fig.2에서 보듯이 압축비에 따른 평면내 변형률을 측정하여 응력 및 변형률의 직교성분간의 연계(coupling)정도를 구하였다. 압축비가 커짐에 따라 평면내 변형률은 증가하는 양상을 보이나, 포아송비는 0.01~0.07정도로 작음을 알 수 있다. 따라서 i 성분의 응력과 j ($\neq i$)성분의 변형률이 서로 연계되지 않도록 모델링된 전절의 수식(1), (2), (7)이 적절함을 실험적으로 알 수 있다.

3) 영구변형률

하중을 제거한 후 폼소재는 변형률의 크기에 따라 회복하는 정도의 차이가 있다. 비교적 짧은 시간이라는 하나 하중제거 직후와 일정기간이 지난 후의 회복량에 차이가 있음을 Fig.3에서와 같이 실험적으로 확인하였다. 이러한 제하중시의

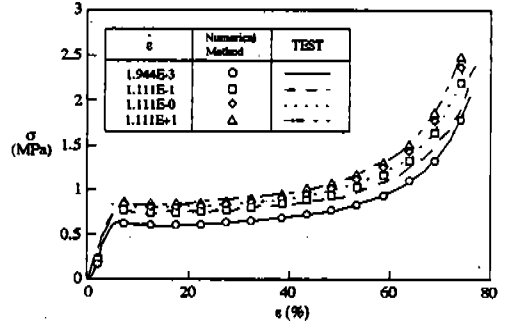


Fig.1 Stress-strain response of foam at four strain rates

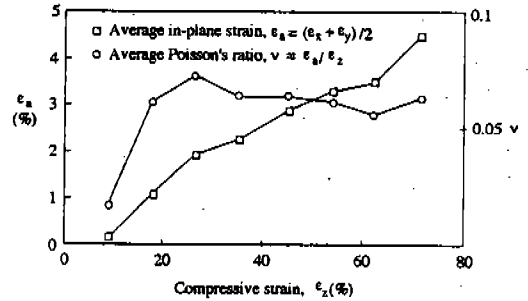


Fig.2 In-plane strain and Poisson's ratio as a function of compressive strain of foam

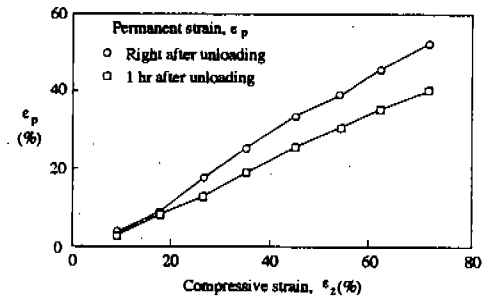


Fig.3 Permanent strain vs. compressive strain of foam

변형거동은 아직 프로그램에 포함되어 있지 않다.

충격실험은 General Research사의 Dynatup 8250을 사용하였으며, Impactor의 무게와 속도를 달리하여 폼의 압축응력-변형률곡선과 Impactor의 속도변화를 측정하였다.

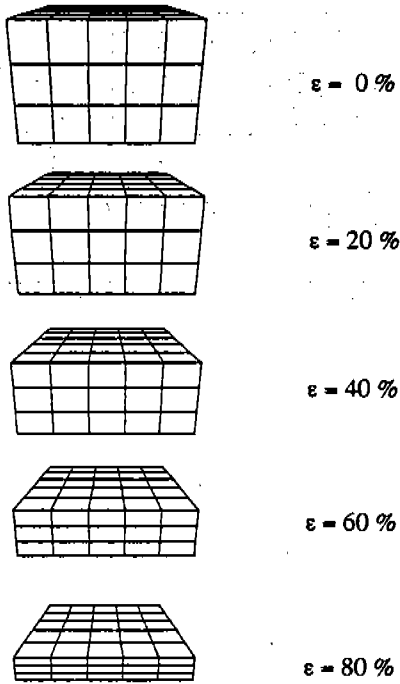


Fig.4 Calculated deformed shapes of PU foam at the various strains

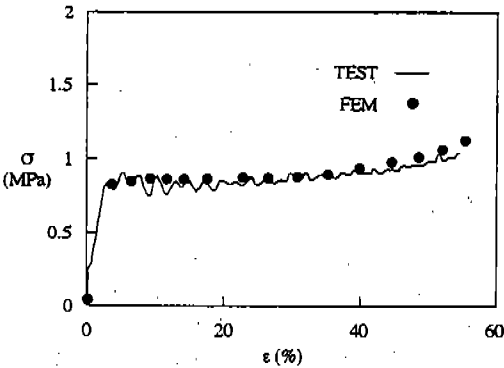


Fig.5 Stress-strain response of foam from impact loading(Impactor mass : 13.157 kg, Impact Velocity : 2.20m/sec)

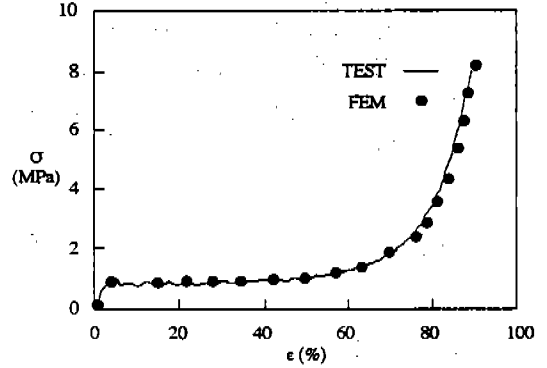


Fig.6 Stress-strain response of foam from impact loading(Impactor mass : 13.157 kg, Impact Velocity : 3.90m/sec)

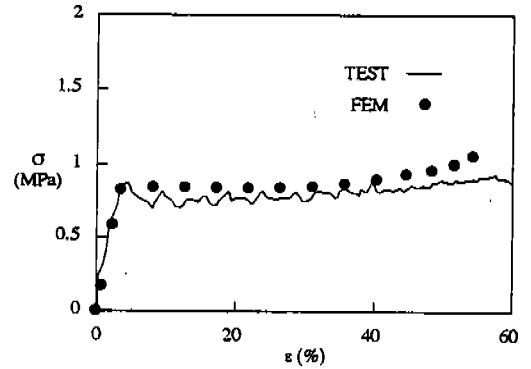


Fig.7 Stress-strain response of foam from impact loading(Impactor mass : 6.507 kg, Impact Velocity : 3.04m/sec)

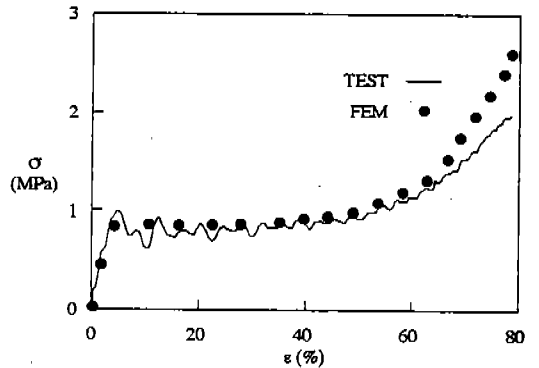


Fig.8 Stress-strain response of foam from impact loading(Impactor mass : 6.507 kg, Impact Velocity : 4.03m/sec)

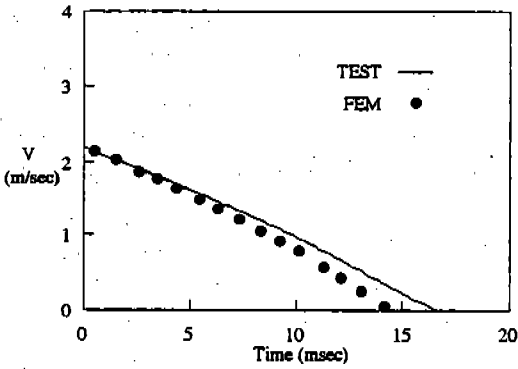


Fig.9 Velocity-Time response of foam from impact loading(Impactor mass : 13.157 kg, Impact Velocity : 2.20m/sec)

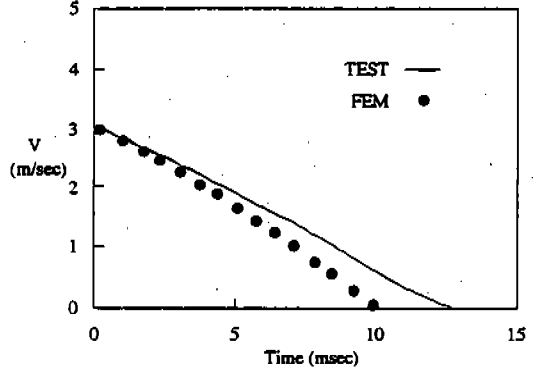


Fig.11 Velocity-Time response of foam from impact loading(Impactor mass : 6.507 kg, Impact Velocity : 3.04m/sec)

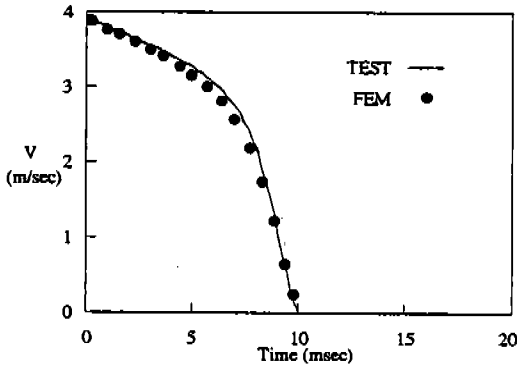


Fig.10 Velocity-Time response of foam from impact loading(Impactor mass : 13.157kg, Impact Velocity : 3.90m/sec)

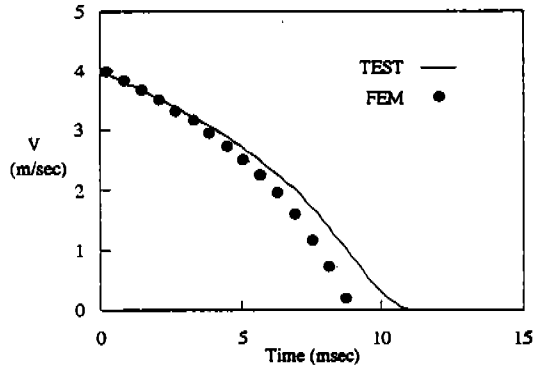


Fig.12 Velocity-Time response of foam from impact loading(Impactor mass : 6.507 kg, Impact Velocity : 4.03m/sec)

이때 Impactor의 무게는 6.507kg과 13.157kg을 사용하였고 속도는 2.20~4.03m/sec로써 변화를 주었다. 실험결과는 다음 절에서 수치해석 결과와 함께 보여진다.

4. 수치해석 및 결과

충격하중을 받는 폼소재의 유한요소 해석을 위하여 자동차 충돌해석 전용프로그램으로 개발 중인 Auto CRASH^(4,5)가 이용되었다. 여기서 144개의 node를 가진 75개의 8 node brick element와, 속도와 무게를 갖는 Rigid wall이 각각 폼소재와 Impactor를 모델링하기 위하여 사용

되었다. Fig.4는 충돌하중을 받는 폼소재의 여러 변형률에서의 계산된 변형모습을 보여주고 있다.

Fig.5와 6은 13.157kg인 Impactor의 두가지 다른 충격속도에 따른 폼소재의 응력-변형률 곡선을 보여주고 있다. 충격속도가 빠른 경우에 최대변형률이 커지나 두 경우 모두에서 같은 응력-변형률 경로를 지남을 알 수 있다. Fig.7과 8에서는 Impactor의 무게를 6.507kg으로 줄여 사용함에 따라 최대변형률도 Fig.5와 6에서 보다 작음을 알 수 있다. 또한 충격 초기의 동적인 진동현상이 가벼운 Impactor에서 더욱 심하게 나타남을 보이고 있다. Fig.5~8에서 보듯이 충

격하증을 받는 폼재료의 응력-변형률관계에 대한 유한요소해석 결과를 실험으로부터 측정된 것과 비교하여 매우 유사함을 알 수 있다.

충돌과정중 Impactor의 속도변화는 Fig.9~12에서 보여주고 있으며, 유한요소해석결과와 실험결과가 매우 유사함을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 충격에너지 흡수에 효과적인 폼재료의 압축변형특성을 유한요소 모델링하였다. 준정적 압축실험과 변형률속도를 달리한 동적 압축실험을 통하여 폼재료의 응력-변형률 관계를 구하였으며, 이로부터 변형률속도의 영향이 고려된 구성방정식을 제안하였다. Impactor의 무게 및 속도를 변화시켜 수행한 충격실험 결과와 유한요소해석 결과를 비교하여 제안된 구성방정식이 폼재료의 변형거동을 예측하는 데 사용될 수 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구를 수행하는데 있어 압축 및 충격실험에 도움을 준 삼성중공업 중앙연구소 이재원 박사를 비롯하여 이윤목, 유요한 연구원에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. J. Kim, J. W. Lee, H. Y. Choi, "A Study on

the Structural Design and Fabrication of Composite Vehicle Door", ICCM10, summit-ed, Canada, Vancouver, 1995.

2. LS-DYNA3D Theoretical Manual, Livermore Software Technology Corporation, 15~53, 1991.
3. PAM-CRASH™ Theory Manual, released: June 1990, ESI/PSI
4. 채수원, 최형연, 박상준, 김원택, "자동차 충돌해석용 프로그램 개발-유한요소모델링 및 재료의 변형특성 연구", 제2회 G7 차세대 자동차 기술 Workshop, 479~482, 1994.
5. 강신유, 민동균, 김현영, "자동차 충돌해석용 프로그램 개발-셀요소 및 접촉 알고리즘 개발", 제2회 G7 차세대 자동차 기술 Workshop, 483~486, 1994.
6. Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics, Designation: D 1621-73(Reapproved 1979), Annual book of ASTM standard, Vol. 08.01.
7. F. Chang, J. Hallquist. et al., "Finite Element Analysis of Low-Density High-Hysteresis Foam Materials and the Application in the Automotive Industry", SAE 1994, Feb. 28-March 3, 1994, Detroit, MI. Paper No. 940908.
8. K. J. Bathe, Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall, 318~331, 1982.