

(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2019-0137337

(43) 공개일자 2019년12월11일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

G01N 3/08 (2006.01) G01N 33/38 (2006.01)

(52) CPC특허분류

G01N 3/08 (2013.01)

G01N 33/38 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2018-0063402

(22) 출원일자 2018년06월01일

심사청구일자 2018년06월01일

(71) 출원인

경희대학교 산학협력단

경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 (서천동, 경희대학교 국제캠퍼스내)

강릉원주대학교산학협력단

강원도 강릉시 죽헌길 7(지변동)

(72) 발명자

이경엽

경기도 성남시 분당구 정자로 56, 110동 902호 (정자동, 상록마을라이프1단지아파트)

김대성

서울특별시 광진구 자양로42길 18, 201호 (구의동, 현진빌라)

신현호

강원도 강릉시 죽헌길 7, 공학2호 209호 (지변동)

(74) 대리인

특허법인 하나

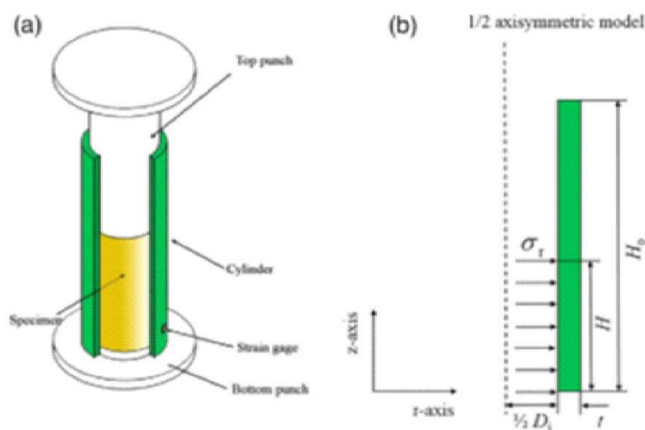
전체 청구항 수 : 총 6 항

(54) 발명의 명칭 압축성 소재의 평균 반경방향 응력 및 압력-체적 관계를 결정하는 방법

(57) 요약

본 발명의 일 측면은, 압축성 소재의 옆면을 둘러싼 실린더 및 상기 실린더의 내부에서 동축으로 상하방향으로 이동하는 로드를 이용하여 압축성 소재의 평균 반경방향 응력을 결정하는 방법에 있어서, 두꺼운 벽 실린더 (thick walled cylinder, TWC) 이론에 따라 변형률 게이지의 위치와 실린더의 규격을 결정하고, 일련의 수치해석을 통해 압축성 소재의 평균 반경방향 응력과 그에 따른 압력-체적 관계를 정확하게 측정, 결정, 규명할 수 있는 방법을 제공한다.

대표도 - 도1



명세서

청구범위

청구항 1

압축성 소재의 옆면을 둘러싼 실린더 및 상기 실린더의 내부에서 동축으로 상하방향으로 이동하는 로드를 이용하여 상기 압축성 소재의 평균 반경방향 응력을 결정하는 방법에 있어서,

- (a) 상기 실린더의 외면에 부착되는 변형률 게이지(strain gauge)의 위치를 결정하는 단계;
- (b) 상기 실린더의 벽 두께 및 내경을 결정하는 단계;
- (c) 하기 식 1을 이용하여 상기 압축성 소재의 반경방향 응력(σ_r^{TWC})을 결정하는 단계;

<식 1>

$$\sigma_r^{TWC} = \frac{b^2 - a^2}{2a^2} E \varepsilon_\theta$$

- (d) 하기 식 2를 이용하여 보정함수($f(\varepsilon_v, \mu)$)를 결정하는 단계; 및

<식 2>

$$F_T - F_B = \mu \sigma_r^{TWC} f(\varepsilon_v, \mu) A_c$$

- (e) 하기 식 3을 이용하여 상기 압축성 소재의 평균 반경방향 응력(σ_r^{ave})을 결정하는 단계;를 포함하는, 방법;

<식 3>

$$\frac{\sigma_r^{ave}}{\sigma_r^{TWC}} = f(\varepsilon_v, \mu)$$

상기 식 1 내지 3에서,

a 및 b는 각각 상기 실린더의 내경 및 외경이고,

E는 상기 실린더의 탄성률(Young's modulus)이고,

ε_θ 는 상기 변형률 게이지에 의해 측정된 원주 변형률(hoop strain)이고,

F_T 및 F_B 는 각각 상기 압축성 소재의 상부 및 하부에서 측정된 하중이고,

μ 는 상기 압축성 소재 및 상기 실린더의 내벽 사이의 마찰계수이고,

ε_v 는 상기 압축성 소재의 체적 변형률이고,

A_c 는 상기 압축성 소재 및 상기 실린더의 내벽 사이의 접촉면적이다.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 (a) 단계에서,

상기 실린더의 높이에 대한 상기 압축성 소재의 높이의 비가 0.75일 때,

상기 변형률 게이지는 상기 실린더의 높이의 65% 이하인 위치에 부착되는, 방법.

청구항 3

제1항에 있어서,
상기 (a) 단계에서,
상기 실린더의 높이에 대한 상기 압축성 소재의 높이의 비가 0.50일 때,
상기 변형률 게이지는 상기 실린더의 높이의 40% 이하인 위치에 부착되는, 방법.

청구항 4

제1항에 있어서,
상기 (a) 단계에서,
상기 실린더의 높이에 대한 상기 압축성 소재의 높이의 비가 0.25일 때,
상기 변형률 게이지는 상기 실린더의 높이의 15% 이하인 위치에 부착되는, 방법.

청구항 5

제1항에 있어서,
상기 보정함수는 하기 식 4로 표시되는 2차 함수인, 방법:

<식 4>

$$f(\varepsilon_v, \mu) = z_0 + z_1 \varepsilon_v + z_2 \mu + z_3 \varepsilon_v^2 + z_4 \mu^2$$

상기 식 4에서,

z_0 내지 z_4 는 각각 미리 정해진 μ 에서 ε_v 대 $\sigma_r^{avg} / \sigma_r^{TWC}$ 의 비선형 곡선 맞춤(non-linear curve fitting)에 의해 얻어진 실수이다.

청구항 6

제1항에 있어서,
상기 압축성 소재는 콘크리트, 암석, 다공성 세라믹, 분말 성형체, 흙, 경질 플라스틱 폼 및 이들 중 2 이상의 조합으로 이루어진 군에서 선택된 하나인, 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 압축성 소재의 평균 반경방향 응력 및 압력-체적 관계를 결정하는 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 소성 변형중 부피 변화를 수반하지 않는 금속 재료와는 달리, 압축성 소재, 특히, 압축성 고체(compressible solids)는 소성 변형 중 부피 변화를 수반한다. 이들 압축성 고체들은 압력 의존성 항복 조건을 가지며, 순수한 정수압의 작용에 의해서도 항복(소성 변형)이 발생한다. 따라서, 압축성 고체의 거동을 기술하는 거의 모든 구성방정식들은 압축성 고체의 압력과 체적의 관계를 포함하여 기술되고 있으며, 이러한 이유로 정확한 압축성 고체의 압력-체적(P-V) 관계를 규명하는 것은 매우 중요하다.

[0003] 재료의 압력-체적 관계를 규명하기 위한 가장 대표적인 방법은 3축 시험(conventional triaxial test, CTX)인데, 이는 전통적으로 대표적인 압축성 고체 중 하나인 흙(soil)의 압력-체적 관계를 규명하는데 많이 이용되어 왔다. 일반적으로 알려진 CTX 시험의 측정가능한 압력의 크기는 1MPa 수준으로 제한적이며, 100MPa 이상의 압력을 측정할 수 있는 3축 시험 장치의 경우 높은 비용 및 접근성의 제한을 받고 있다. 뿐만 아니라 CTX 측정방법은 시편의 barreling을 유발한다는 근본적인 단점을 가지고 있다. CTX 측정방법에서는 시편이 균질한 변형(uniform deformation)을 한다는 가정하에 압력-체적 관계를 산출하기 때문에 barreling이 발생하는 시편으로부터 측정된 결과는 상당한 오차를 수반할 수 밖에 없다.

[0004] 약 100MPa (300MPa 수준도 가능) 압력까지 P-V 관계를 측정할 수 있는 또 다른 장비로는 instrumented die를 들 수 있다. 이 방법에서는 반경방향 응력 측정용 센서가 부착된 die 내부에 실린더 형상의 시편을 넣고 상, 하부 펀치를 이용하여 시편에 체적 변형률을 발생시킨다. Instrumented die를 이용한 압축성 고체의 체적 변형률(volume strain)은 축 하중이 인가되는 펀치의 스트로크(stroke)에 의해 결정된다. Instrumented die는 설계와 제작이 어렵기 때문에 고압(100MPa 수준) CTX 장비처럼 장비 자체가 매우 고가이다. 또한, instrumented die를 이용한 측정결과와 신뢰성은 장비의 calibration이 얼마나 정확하게 이루어졌는지에 따라 민감하게 좌우되는데, 장비의 calibration은 매우 어려운(고가의) 작업이다. Calibration을 위해서는 알려진 압력의 정수압 유체를 instrumented die에 밀어 넣으면서 수행하게 되는데, die의 자유 거동을 제한하지 않으면서 유체를 die 내부로 유입시키는 것은 상당한 노력을 필요로 하기 때문이다.

[0005] 상기와 같은 이유로, 압축성 고체의 P-V 관계를 100MPa 수준까지 측정하는 것은, 그 중요성에도 불구하고, 결코 쉬운 일이 아니다. 따라서, 압축성 고체의 P-V 관계 데이터는, 그 중요성에도 불구하고, 일축시험 데이터 등 다른 여타의 시험 데이터들과 비교하여, 문헌상에서도 매우 드물게 제공되고 있는 실정이다. 만일, 보다 간편하면서도 경제적으로 압축성 고체의 P-V 관계를 측정할 수 있는 방법이 개발된다면, 압축성 고체의 거동을 기술하는 데에 필수적인 P-V 관계는 다양한 압축성 고체에 대해 현재보다 매우 풍성하게 제공될 수 있을 것이다.

[0006] 따라서, 본 발명에서는, 압축성 고체의 P-V 관계를 보다 손쉽게도 경제적으로 측정할 수 있는 대안 방법론을 수립(개발)하고자 하였다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0007] 본 발명은 전술한 종래 기술의 문제점을 해결하기 위한 것으로, 본 발명의 목적은 압축성 소재의 평균 반경방향 응력 및 압력-체적 관계를 보다 쉽고 경제적으로 결정하는 방법을 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0008] 본 발명의 일 측면은, 압축성 소재의 옆면을 둘러싼 실린더 및 상기 실린더의 내부에서 동축으로 상하방향으로 이동하는 로드를 이용하여 상기 압축성 소재의 평균 반경방향 응력을 결정하는 방법에 있어서, (a) 상기 실린더의 외면에 부착되는 변형률 게이지(strain gauge)의 위치를 결정하는 단계; (b) 상기 실린더의 벽 두께 및 내경을 결정하는 단계; (c) 하기 식 1을 이용하여 상기 압축성 소재의 반경방향 응력(σ_r^{TWC})을 결정하는 단계; (d) 하기 식 2를 이용하여 보정함수($f(\varepsilon_v, \mu)$)를 결정하는 단계; 및 (e) 하기 식 3을 이용하여 상기 압축성 소재의 평균 반경방향 응력(σ_r^{avg})을 결정하는 단계;를 포함하는 방법을 제공한다.

[0009] <식 1>

$$\sigma_r^{TWC} = \frac{b^2 - a^2}{2a^2} E \varepsilon_\theta$$

[0010]

[0011] <식 2>

$$F_T - F_B = \mu \sigma_r^{TWC} f(\varepsilon_v, \mu) A_c$$

[0012]

[0013] <식 3>

$$\frac{\sigma_r^{avg}}{\sigma_r^{TWC}} = f(\varepsilon_v, \mu)$$

[0014]

[0015] 상기 식 1 내지 3에서, a 및 b는 각각 상기 실린더의 내경 및 외경이고, E는 상기 실린더의 탄성률(Young's modulus)이고, ε_θ 는 상기 변형률 게이지에 의해 측정된 원주 변형률(hoop strain)이고, F_T 및 F_B 는 각각 상기 압축성 소재의 상부 및 하부에서 측정된 하중이고, μ 는 상기 압축성 소재 및 상기 실린더의 내벽 사이의 마찰 계수이고, ε_v 는 상기 압축성 소재의 체적 변형률이고, A_c 는 상기 압축성 소재 및 상기 실린더의 내벽 사이의 접촉면적이다.

[0016] 일 실시예에 있어서, 상기 (a) 단계에서, 상기 실린더의 높이에 대한 상기 압축성 소재의 높이의 비가 0.75일

때, 상기 변형률 게이지는 상기 실린더의 높이의 65% 이하인 위치에 부착될 수 있다.

[0017] 일 실시예에 있어서, 상기 (a) 단계에서, 상기 실린더의 높이에 대한 상기 압축성 소재의 높이의 비가 0.50일 때, 상기 변형률 게이지는 상기 실린더의 높이의 40% 이하인 위치에 부착될 수 있다.

[0018] 일 실시예에 있어서, 상기 (a) 단계에서, 상기 실린더의 높이에 대한 상기 압축성 소재의 높이의 비가 0.25일 때, 상기 변형률 게이지는 상기 실린더의 높이의 15% 이하인 위치에 부착될 수 있다.

[0019] 일 실시예에 있어서, 상기 보정함수는 하기 식 4로 표시되는 2차 함수일 수 있다.

[0020] <식 4>

$$f(\varepsilon_v, \mu) = z_0 + z_1 \varepsilon_v + z_2 \mu + z_3 \varepsilon_v^2 + z_4 \mu^2$$

[0022] 상기 식 4에서, z_0 내지 z_4 는 각각 미리 정해진 μ 에서 ε_v 대 $\sigma_r^{avg} / \sigma_r^{TWC}$ 의 비선형 곡선 맞춤(non-linear curve fitting)에 의해 얻어진 실수이다.

[0023] 일 실시예에 있어서, 상기 압축성 소재는 콘크리트, 암석, 다공성 세라믹, 분말 성형체, 흙, 경질 플라스틱 폼 및 이들 중 2 이상의 조합으로 이루어진 군에서 선택된 하나일 수 있다.

발명의 효과

[0024] 본 발명의 일 측면에 따르면, 두꺼운 벽 실린더(thick walled cylinder, TWC) 이론에 따라 변형률 게이지의 위치와 실린더의 규격을 결정하고, 일련의 수치해석을 통해 압축성 소재의 평균 반경방향 응력과 그에 따른 압력-체적 관계를 정확하게 측정, 결정, 규명할 수 있다.

[0025] 본 발명의 효과는 상기한 효과로 한정되는 것은 아니며, 본 발명의 상세한 설명 또는 청구범위에 기재된 발명의 구성으로부터 추론 가능한 모든 효과를 포함하는 것으로 이해되어야 한다.

도면의 간단한 설명

[0026] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 TWC를 이용한 압축시험의 개념도와 이의 2차원 회전축대칭 모델이고;

도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 TWC의 2차원 회전축대칭 유한요소 모델이고;

도 3 및 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 TWC의 외벽에서 측정된 원주 변형률이고;

도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 TWC의 내벽에 적용된 반경방향 응력의 함수로서 계산된 등가 응력(equivalent stress)이고;

도 6은 본 발명의 다른 일 실시예에 따른 TWC의 외벽에서 측정된 원주 변형률이고;

도 7은 본 발명의 다른 일 실시예에 따른 TWC의 내벽에 적용된 반경방향 응력의 함수로서 계산된 등가 응력(equivalent stress)이고;

도 8은 본 발명의 일 실시예에 따른 TWC의 설계지침을 종합적으로 나타내고;

도 9는 본 발명의 일 실시예에 따른 TWC의 2차원 회전축대칭 유한요소 모델이고;

도 10은 본 발명의 일 실시예에 따른 폴리우레탄 폼의 P-V 곡선이고;

도 11은 본 발명의 일 실시예에 따른 알루미나 분말의 P-V 곡선이고;

도 12는 본 발명의 일 실시예에 따른 폴리우레탄 폼의 (비율) 대 (체적변형률) 관계를 나타내고;

도 13은 본 발명의 일 실시예에 따른 폴리우레탄 폼의 보정함수 적용에 따른 (비율) 대 (체적변형률) 곡선 피팅 능력을 나타내고;

도 14는 본 발명의 일 실시예에 따른 알루미나 분말의 (비율) 대 (체적변형률) 관계를 나타내고;

도 15는 본 발명의 일 실시예에 따른 알루미나 분말의 보정함수 적용에 따른 (비율) 대 (체적변형률) 곡선 피팅 능력을 나타내고;

- 도 16은 본 발명의 일 실시예에 따른 TWC의 내부에 위치한 시편의 힘 평형 상태를 나타내고;
- 도 17은 본 발명의 일 실시예에 따른 압축성 소재의 평균 반경방향 응력을 측정하는 절차를 도식화한 것이고;
- 도 18은 본 발명의 일 실시예에 따른 폴리우레탄 폼의 전산수치해석 데이터 세트들에 대한 비선형 곡선 맞춤 결과이고;
- 도 19는 본 발명의 일 실시예에 따른 알루미늄 분말의 전산수치해석 데이터 세트들에 대한 비선형 곡선 맞춤 결과이고;
- 도 20은 본 발명의 일 실시예에 따른 폴리우레탄 폼 및 알루미늄 분말의 전산수치해석 결과이고;
- 도 21은 본 발명의 일 실시예에 따른 폴리우레탄 폼 및 알루미늄 분말의 반경방향 응력을 나타내고;
- 도 22는 본 발명의 일 실시예에 따른 폴리우레탄 폼의 SEM 이미지이고;
- 도 23은 본 발명의 일 실시예에 따른 폴리우레탄 폼의 P-V 관계 측정을 위한 실험 장비의 개념도 및 준비상태이고;
- 도 24는 본 발명의 일 실시예에 따른 폴리우레탄 폼에 대한 식 2의 좌변 및 우변의 일치도 평가 결과이고;
- 도 25는 본 발명의 일 실시예에 따른 폴리우레탄 폼의 평균 반경방향 응력-평균 축방향 힘 관계를 나타내고;
- 도 26은 본 발명의 일 실시예에 따른 폴리우레탄 폼의 P-V 관계를 나타내고;
- 도 27은 본 발명의 일 실시예에 따른 폴리우레탄 폼의 ASTM D1621, ISO 3386 표준에 따른 압축 시험 결과이고;
- 도 28은 본 발명의 일 실시예에 따른 초탄성 구성방정식 모델 및 파라미터들이 도 27의 결과를 피팅하는 능력을 나타내고;
- 도 29는 본 발명의 일 실시예에 따른 초탄성 구성방정식 모델 및 파라미터들이 도 26의 결과를 피팅하는 능력을 나타내고;
- 도 30은 본 발명의 일 실시예에 따른 전산수치해석을 수행한 결과 도출된 P-V 곡선 및 전산수치해석을 위한 입력물성 곡선을 나타낸다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0027] 이하에서는 첨부한 도면을 참조하여 본 발명을 설명하기로 한다. 그러나 본 발명은 여러 가지 상이한 형태로 구현될 수 있으며, 따라서 여기에서 설명하는 실시예로 한정되는 것은 아니다. 그리고 도면에서 본 발명을 명확하게 설명하기 위해서 설명과 관계없는 부분은 생략하였으며, 명세서 전체를 통하여 유사한 부분에 대해서는 유사한 도면 부호를 붙였다.
- [0028] 명세서 전체에서, 어떤 부분이 다른 부분과 "연결"되어 있다고 할 때, 이는 "직접적으로 연결"되어 있는 경우뿐 아니라, 그 중간에 다른 부재를 사이에 두고 "간접적으로 연결"되어 있는 경우도 포함한다. 또한 어떤 부분이 어떤 구성요소를 "포함"한다고 할 때, 이는 특별히 반대되는 기재가 없는 한 다른 구성요소를 제외하는 것이 아니라 다른 구성요소를 더 구비할 수 있다는 것을 의미한다.
- [0029] 이하, 첨부된 도면을 참고하여 본 발명의 실시예를 상세히 설명하기로 한다.
- [0030] 본 발명에서는 압축성 소재의 반경방향 응력을 측정하기 위한 수단으로 두꺼운 벽 실린더(thick walled cylinder, TWC) 및 그 이론을 고려하였다. TWC 이론(open end 조건)에 따르면, 실린더의 내부 벽면에 압축성 소재가 가하는 반경방향 응력(radial stress)은 실린더의 외벽에서 측정한 원주 변형률(hoop strain) 값을 이용하여 간단히 결정할 수 있다.
- [0031] TWC 이론은 실린더 내벽의 반경방향 응력(내부 압력)이 실린더 전체 높이에 걸쳐 작용되고, 이로 인해 전체 실린더가 반경방향으로 팽창하는 상황을 가정한 것이다. 그러나, 실제 압축시험에서는, 압축성 소재가 수축하기 때문에 압축성 소재와 접촉하지 않는 실린더 부분, 즉, 압축성 소재로부터 반경방향 응력을 받지 못하는 부분이 발생한다. 압축성 소재와 접촉하지 않는 실린더 부분은 압축성 소재와 접촉하는 실린더 부분의 반경방향 팽창을 제한한다. 이와 같은 이유로, 압축성 소재와 접촉하지 않는 실린더 부분에 대한 고려없이, TWC 이론을 이용하여 압축성 소재의 반경방향 응력을 측정할 경우, 잘못된 반경방향 응력 측정, 즉, 잘못된 소재의 P-V 관계를 결정하게 된다.

[0032] 그러나, 압축성 소재의 높이가 실린더의 높이보다 너무 낮지 않으면, 즉 제한된 펀치 스트로크(punch stroke) 내에서 압축성 소재를 압축하는 경우, TWC 이론을 이용하여 압축성 소재의 반경방향 응력을 측정할 수 있을 가능성이 있다. 본 발명에서는 이러한 가능성 검토에서부터 시작하여, TWC 및 그 이론을 이용하여 실질적으로 압축성 소재의 P-V 관계를 결정할 수 있는 방법론을 수립할 수 있다.

[0033] 본 발명의 일 측면은, 압축성 소재의 옆면을 둘러싼 실린더 및 상기 실린더의 내부에서 동축으로 상하방향으로 이동하는 로드를 이용하여 상기 압축성 소재의 평균 반경방향 응력을 결정하는 방법에 있어서, (a) 상기 실린더의 외면에 부착되는 변형률 게이지(strain gauge)의 위치를 결정하는 단계; (b) 상기 실린더의 벽 두께 및 내경을 결정하는 단계; (c) 하기 식 1을 이용하여 상기 압축성 소재의 반경방향 응력(σ_r^{TWC})을 결정하는 단계; (d) 하기 식 2를 이용하여 보정함수($f(\varepsilon_v, \mu)$)를 결정하는 단계; 및 (e) 하기 식 3을 이용하여 상기 압축성 소재의 평균 반경방향 응력(σ_r^{avg})을 결정하는 단계;를 포함하는 방법을 제공한다.

[0034] <식 1>

$$\sigma_r^{TWC} = \frac{b^2 - a^2}{2a^2} E \varepsilon_\theta$$

[0035]

[0036] <식 2>

$$F_T - F_B = \mu \sigma_r^{TWC} f(\varepsilon_v, \mu) A_c$$

[0037]

[0038] <식 3>

$$\frac{\sigma_r^{avg}}{\sigma_r^{TWC}} = f(\varepsilon_v, \mu)$$

[0039]

[0040] 상기 식 1 내지 3에서, a 및 b는 각각 상기 실린더의 내경 및 외경이고, E는 상기 실린더의 탄성률(Young's modulus)이고, ε_θ 는 상기 변형률 게이지에 의해 측정된 원주 변형률(hoop strain)이고, F_T 및 F_B 는 각각 상기 압축성 소재의 상부 및 하부에서 측정된 하중이고, μ 는 상기 압축성 소재 및 상기 실린더의 내벽 사이의 마찰 계수이고, ε_v 는 상기 압축성 소재의 체적 변형률이고, A_c 는 상기 압축성 소재 및 상기 실린더의 내벽 사이의 접촉면적이다.

[0041] 상기 (a) 단계에서는 TWC 및 그 이론을 이용하여 상기 실린더의 외면에 부착되는 변형률 게이지(strain gauge)의 위치를 결정할 수 있다. TWC 이론은 내벽의 반경방향 응력(내부 압력)이 실린더의 전체 높이에 걸쳐 작용되고, 이로 인해 전체 실린더가 반경방향으로 팽창하는 상황을 가정한 것이다. 그러나, 실제 압축시험에서는, 압축성 소재(시편)가 수축하기 때문에 시편과 접촉하지 않는 실린더 부분 즉, 시편으로부터 반경방향 응력을 받지 못하는 부분이 발생할 수 있다. 시편과 접촉하지 않는 실린더 부분은 시편과 접촉하는 실린더 부분의 반경방향 팽창을 제한할 수 있다. 따라서, 실린더의 외벽에서 측정한 원주 변형률에 TWC 이론(식 1)을 적용하여 반경방향 응력을 측정하는 데에는 한계가 있을 수 있다.

[0042] 그럼에도 불구하고, 시편과 실린더의 높이 편차가 너무 크지 않고(즉, 펀치 스트로크가 작고), 실린더의 외벽에 부착되는 변형률 게이지의 위치가 실린더의 바닥 면에 근접할 경우에는, 실린더의 외벽에서 측정한 원주 변형률에 TWC 이론(식 1)을 적용하여 반경방향 응력을 측정하는 것이 가능할 수 있다. 이러한 가정은 미리 정해진 전산수치해석에 의해 검증될 수 있다. 또한, 얼마나 깊은 스트로크까지(얼마나 큰 시편의 체적 변형률까지) TWC 이론(식 1)을 적용하여 반경방향 응력을 측정하는 것이 가능한지 알아볼 수 있다.

[0043] 전산수치해석에서 고려한 TWC를 이용한 압축시험 개념도와 이의 2차원 회전축 대칭 모델을 도 1에 나타내었다.

[0044] 도 1(b)에 나타난 것과 같이, 실린더 안쪽에 위치한 시편이 시편 높이에 걸쳐서 균일하게 반경방향으로 응력을 인가하는 단순화된 가정에 전산수치해석을 수행하였다. 도 1에서, H는 시편의 현재 높이, H_0 는 실린더의 전체 높이, D_i 는 실린더의 내경, 그리고 t는 실린더의 벽 두께이다. 실제 시편이 압축되었을 때, 높이에 대한 표현을 용이하게 하기 위해, 시편의 현재 높이를 실린더 전체 높이(H_0)에 대해 정규화된 형태, 즉, H/H_0 로 표현하였다. 또한, 실린더의 외벽에 부착되는 변형률 게이지(strain gauge)의 위치를 고려하기 위해 실린더 높이의 방향의 위치(z)를 실린더 전체 높이(H_0)에 대해 정규화하여 z/H_0 로 나타내었다.

- [0045] 실제 시험에서 시편이 압축되면서 시편 높이가 줄어드는 현상을 모사하기 위해, 다양한 H/H_0 를 갖는 유한요소 모델을 생성하였다. 생성된 유한요소 모델의 예를 도 2에 나타내었다. 해석해(analytical solution, 식 1)에 근사하는 수치해석 결과를 얻기 위해 반경방향으로 편향된 요소(biased mesh)를 적용하였다. 실린더의 내경은 10mm, 높이는 1mm를 고려하였으며, 40MPa의 반경방향 응력을 인가하였다. 전산수치해석 solver는 상용 유한요소 패키지(ABAQUS)를 사용하였다.
- [0046] 두꺼운 벽 실린더(TWC)의 재질은 AISI 304L 스테인레스 스틸을 고려하였고, 상기 스테인레스 스틸의 탄성 물성(탄성률 193GPa, Poisson 비 0.3)만을 전산수치해석의 입력물성으로 사용하였다.
- [0047] 실린더의 내벽에 40MPa의 반경방향 응력(내부 압력)을 가한 조건에서, 시편이 다양한 현재 높이(H/H_0)를 가질 때, 실린더 외벽에서는 원주 변형률(hoop strain)이 어떻게 나타나는지 보여주는 프로파일들을 도 3에 나타내었다.
- [0048] 도 3을 참고하면, 먼저, 시편의 현재 높이(H/H_0)가 1일 때는, 외벽에 나타나는 원주 변형률은 실린더 높이 전체에 대해 균일한 값을 나타내며, 그 값은 해석해와 일치한다. 이는 본 발명에서 수행한 전산수치해석의 신뢰성을 입증하는 것이다. 시편의 현재 높이(H/H_0)가 0.75일 때는, 시편과 접촉하지 않은 80 내지 90% z/H_0 구간에서는 원주 변형률이 나타나지 않으나, 약 65% 이하, 바람직하게는, 약 62% 이하의 z/H_0 구간에서 해석해와 일치하는 원주 변형률 값이 나타난다. H/H_0 가 0.50일 때는 약 40% 이하, 바람직하게는, 약 37% 이하의 z/H_0 구간에서 해석해와 일치하는 원주 변형률 값이 나타난다. 또한, H/H_0 가 0.25일 때는 약 15% 이하, 바람직하게는, 약 12% 이하의 z/H_0 구간에서 해석해와 일치하는 원주 변형률 값이 나타난다.
- [0049] 상기 결과로부터, 실린더 외벽에 부착되는 변형률 게이지의 위치(z/H_0)를 실린더 바닥 면에 가깝게 하면 상당히 낮은 시편의 현재 높이 H/H_0 (즉, 상당히 깊은 펀치 스트로크)까지 TWC 이론을 적용하여 실린더 외벽에서 측정된 원주 변형률로부터 시편의 반경방향 응력을 측정할 수 있음을 알 수 있다. 예를 들어, 변형률 게이지의 부착 위치(z/H_0)를 시편 바닥으로부터 시편 높이의 12% ($z/H_0 < 0.12$) 미만으로 할 경우 시편의 현재 높이 25%($H/H_0=0.25$)까지도 TWC 이론을 적용하여 반경방향 응력을 측정할 수 있다.
- [0050] 상기 (b) 단계에서는, 다음과 같은 세 가지 관점에서 상기 실린더의 벽 두께 및 내경을 결정할 수 있다.
- [0051] (i) 최대 측정 가능한 punch stroke (시편의 체적 변형률)의 관점; (ii) 실린더의 항복 없이 최대 측정 가능한 반경방향 응력 관점; 및 (iii) 시편의 압축 초기 단계, 즉 측정 가능한 원주 변형률의 크기가 매우 작은 경우 변형률 측정을 용이하게 하기 위한 관점. 상기 관점에서 TWC 형상(벽 두께 및 내경)을 결정하기 위해 미리 정해진 전산수치해석을 수행하였다.
- [0052] 실제 시험에서 시편이 압축되면서 시편 높이가 줄어드는 현상을 모사하기 위해, 다양한 H/H_0 를 갖는 유한요소 모델을 생성하였다. 생성된 유한요소 모델은 도 2에서 제시한 것과 같다. TWC의 재질은 스테인레스 스틸을 고려하였으며, 탄성 거동 및 항복 여부를 판단하기 위해 Ludwik 경화법칙(Ludwik hardening law)이 고려된 탄성-소성(가공 경화) 모델(elastic-work hardening model)을 사용하였다. 적용된 Ludwik 경화법칙은 하기 식 5와 같다.
- [0053] <식 5>
- [0054]
$$\sigma' = A + B\varepsilon'^n$$
- [0055] 상기 식 5에서 σ' 및 ε' 는 각각 등가 응력(equivalent stress)과 등가 소성 변형률(equivalent plastic strain)이며, A, B, n은 재료 파라미터들(material parameters)로서, 각각 253.32MPa, 685.1MPa, 0.3128이다.
- [0056] TWC의 형상(벽 두께 및 내경)이 기 상기 세 가지 관점에 미치는 영향을 조사하기 위해 본 발명에서 사용한 유한요소 모델들의 제원을 하기 표 1에 나타내었다. 반경방향 응력은 1MPa 또는 40MPa를 실린더의 내벽에 적용하였다.

표 1

D_i (mm)	H/H_0	t (mm)
10, 20	1, 0.75, 0.5, 0.25, 0.2, 0.1	1, 2, 5, 10

[0057]

[0058]

도 4는 다양한 벽 두께를 갖는 실린더에서 시편의 현재 높이(H/H_0)에 따른 원주 변형률(ϵ_θ)의 프로파일들을 나타낸다. 도 4의 결과는 10mm의 내경(D_i)을 갖는 실린더의 내벽에 가해진 압력(반경방향 응력)이 1MPa인 경우에 얻어졌다. 도 4(a)에서($t=1\text{mm}$), 시편의 현재 높이(H/H_0)가 0.20인 경우 측정된 원주 변형률 값은 z/H_0 가 약 8% 미만일 때 TWC 이론을 통해 계산된 값과 일치한다. 다시 말해, 변형률 게이지가 실린더의 바닥으로부터 8% 이내($z/H_0 < 5\%$)에 위치한다면, $D_i=10\text{mm}$, $t=1\text{mm}$ 인 실린더를 이용하여 체적 변형률 약 $1.61(\ln 0.2)$ 까지 TWC 이론을 적용하여 시편의 반경방향 응력을 측정할 수 있다.

[0059]

도 4의 결과에서 실린더 벽의 두께가 증가하면 최대 측정 가능한 체적 변형률($\ln(H/H_0)$)의 크기는 감소한다. 예를 들어, 실린더의 벽 두께가 5mm인 경우(도 4(c)), 시편의 현재 높이(H/H_0)가 0.5일 때, $z/H_0 < 10\%$ 구간에서 TWC 이론을 통해 계산된 값과 일치하는 원주 변형률을 얻을 수 있다. 즉, 변형률 게이지가 실린더의 바닥으로부터 10% 이내($z/H_0 < 10\%$)에 위치할 경우 체적 변형률 약 $0.69(\ln 0.5)$ 까지 TWC 이론을 적용하여 시편의 반경방향 응력을 측정할 수 있다. 따라서, 시편의 최대 측정 가능한 체적 변형률 관점에서 실린더의 벽 두께가 얇을수록 유리하다.

[0060]

실린더의 항복없이 최대 측정 가능한 반경방향 응력에 벽 두께가 미치는 영향을 살펴보기 위해, 다양한 실린더 벽 두께에 대해 내벽에 적용된 반경방향 응력의 함수로서 계산된 등가 응력(equivalent stress)의 변화를 도 5에 나타내었다.

[0061]

도 5는 내경(D_i)이 10mm와 20mm인 실린더 조건에서 고려되었다. 등가 응력(σ'')은 하기 식 6을 통해 계산된다.

[0062]

<식 6>

$$\sigma'' = \sqrt{\sigma_r^2 - \sigma_r \sigma_\theta + \sigma_\theta^2}$$

[0063]

[0064]

상기 식 6에서 원주 응력(hoop stress, σ_θ)은 하기 식 7을 통해 계산된다.

[0065]

<식 7>

$$\sigma_\theta = \frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} \sigma_r$$

[0066]

[0067]

상기 식 7에서, a 및 b는 각각 상기 실린더의 내경 및 외경이다.

[0068]

도 5에서, 수평선(horizontal line)은 304L 스테인레스 스틸의 소성 등가 응력(식 5의 파라미터 A)을 나타낸다. 도 5의 해석해(slanted line)는 실린더의 응력 상태가 탄성 한도 내에 있다는 가정 하에 식 6을 통해 계산된 결과로 항복 강도(yield strength) 이전 구간에서 물리적 의미를 갖는다.

[0069]

도 5에 제시된 것과 같이 실린더가 항복이 일어나지 않는 조건에서, 실린더의 벽 두께가 증가할수록 최대 측정 가능한 반경방향 응력의 값은 증가한다. 따라서, 최대 측정 가능한 반경"월* 응력을 고려할 때 실린더의 벽 두께가 두꺼울수록 유리하다.

[0070]

또한, 시편의 압축 초기 단계와 같이 반경방향 응력이 매우 낮을 때, 예를 들어, 1MPa일 때 얻을 수 있는 원주 변형률 크기에 미치는 실린더 벽 두께의 영향을 조사하였다. 상기 식 1을 이용하여 실린더의 내경(D_i)이 10mm 일 때, 벽 두께(t) 1, 2, 5, 10mm에 대해 실린더 외벽으로부터 얻을 수 있는 원주 변형률 값은 각각 23.6, 10.8, 3.5, 1.3micro-strain으로 계산되었으며, 내경이 20mm인 경우 동일한 벽 두께에 대해 얻을 수 있는 원주 변형률 값은 각각 49.3, 23.6, 8.3, 3.4micro-strain으로 계산되었다. 따라서, 시편이 인가하는 반경방향 응력

이 작을 때, 원주 변형률 측정 관점에서는 실린더의 벽 두께가 얇을수록 유리하다.

[0071] 내경(D_i) 20mm와 벽 두께(t) 1mm를 갖는 실린더 내벽에 40MPa의 반경방향 응력(radial stress)을 가했을 때, 다양한 시편의 현재 높이(H/H_0) 별로 실린더 외벽에 나타나는 ϵ_θ 프로파일을 도 6에 나타내었다.

[0072] 도 6을 도 3($D_i=10\text{mm}$, $t=1\text{mm}$)과 비교하면, 변형률 게이지가 실린더의 바닥으로부터 5% 이내($z/H_0 < 5\%$)에 위치한다면 내경(D_i)이 작은 실린더를 사용할 경우, 더 큰 크기의 체적 변형률($\ln(H/H_0)$)까지 TWC 이론(식 1)을 적용하여 시편의 반경방향 응력을 측정할 수 있다. 예를 들어, 변형률 게이지가 $z/H_0 < 5\%$ 에 위치하는 경우, 내경 10mm의 실린더(도 3)에서 체적 변형률 약 1.61($\ln 0.2$)까지 TWC 이론을 통해 계산된 값과 일치하는 원주 변형률을 얻을 수 있지만, 내경 20mm의 실린더(도 6)에서 TWC 이론을 통해 계산된 값과 일치하는 원주 변형률을 얻을 수 있는 시편의 최대 허용 가능한 체적 변형률은 약 1.39($\ln 0.25$)이다. 따라서, TWC 이론을 통해 계산된 값과 일치하는 원주 변형률을 얻을 수 있는 최대 허용 가능한 시편의 체적 변형률(volume strain) 관점에서 실린더의 내경(D_i)이 작을수록 이점이 있다.

[0073] 실린더의 항복 없이 최대 측정 가능한 반경방향 응력에 내경이 미치는 영향을 살펴보기 위해, 다양한 실린더 내경에 대해 내벽에 적용된 반경방향 응력의 함수로서 계산된 등가 응력(equivalent stress)의 변화를 도 7에 나타내었다. 도 7에서 수평선(horizontal line)은 304L 스테인레스 스틸의 항복점(식 5의 파라미터 A)을 나타낸다. 도 7(a) 및 7(b)의 결과를 비교해보면, 실린더의 항복 없이 최대 측정 가능한 반경방향 응력 값은 실린더의 내경이 증가할수록 감소한다. 따라서, 최대 측정 가능한 반경방향 응력의 관점에서 실린더의 내경은 작을수록 유리하다.

[0074] 마지막으로, 시편의 압축 초기 단계와 같이 반경방향 응력이 매우 낮을 때, 예를 들어, 1MPa일 때 얻을 수 있는 원주 변형률 크기에 미치는 실린더의 내경의 영향을 조사하였다. 상기 식 1을 이용하여 실린더의 벽 두께(t)가 1mm일 때, 내경(D_i) 10, 20, 30, 40mm에 대해 실린더 외벽으로부터 얻을 수 있는 원주 변형률 값은 각각 23.6, 49.3, 75.2, 101.1micro-strain로 계산되며, 벽 두께가 2mm인 경우 동일한 내경에 대해 얻을 수 있는 원주 변형률 값은 각각 10.8, 23.6, 36.4, 49.3micro-strain으로 계산된다. 따라서, 시편이 인가하는 반경방향 응력이 작을 때, 원주 변형률 측정 관점에서는 실린더의 내경이 클수록 유리하다.

[0075] 도 8은 최대 허용 가능한 시편의 체적 변형률(volume strain)의 크기, TWC의 항복 없이 최대 측정 가능한 반경방향 응력, 마지막으로 반경방향 응력(radial stress)이 작은 경우에 측정 가능한 원주 변형률(hoop strain)에 대한 TWC의 설계 변수, 즉, 실린더의 내부 직경과 벽 두께의 영향을 종합적으로 나타낸다.

[0076] 상기 (c) 내지 (e) 단계에서는 상기 식 1 내지 식 3을 이용하여 상기 압축성 소재의 반경방향 응력(σ_r^{TWC}), 보정함수($f(\epsilon_v, \mu)$) 및 상기 압축성 소재의 평균 반경방향 응력(σ_r^{ave})을 순차적으로 결정할 수 있다.

[0077] 마찰이 존재하는 경우 시편은 실린더의 높이 방향으로 불균일한 반경방향 응력을 인가한다. 그러므로 시편의 높이 방향으로 분포된 반경방향 응력은 평균적인 값(σ_r^{ave})만이 물리적 의미를 갖는다.

[0078] 상기와 같이, (1) 시편과 실린더의 높이 편차가 너무 크지 않고(즉, 펀치 스트로크가 작고), (2) 실린더 외벽의 변형률 게이지의 위치가 실린더의 바닥면에 근접할 경우에는, 실린더 외벽에서 측정한 원주 변형률에 TWC 이론(식 1)을 적용하여 반경방향 응력을 측정할 수 있다. 이하에서는, 실제 시편과 실린더 벽 사이에 마찰이 존재하는 경우에도 TWC 및 그 이론을 적용하여 반경방향 응력을 측정할 수 있는지 여부를 살펴본다. 측정이 불가능한 경우, 적절한 보정식(보정함수)을 수립하여 마찰이 있는 경우에도 TWC 및 그 이론을 이용하여 반경방향 응력을 측정할 수 있는 방법론을 수립할 수 있다. 이를 위해 먼저 전산수치해석을 통해, TWC 및 그 이론을 적용하여 구한 반경방향 응력(σ_r^{TWC})과 실제 시편의 평균 반경방향 응력(σ_r^{ave})을 정량화하였으며 이들의 상대적인 비율($\sigma_r^{ave}/\sigma_r^{TWC}$)을 구하였다.

[0079] 상기 (b) 단계에서 수립한 실린더 설계 지침을 근거로, (i) 실린더가 탄성 한도 내에서 거동하고, (ii) 상당한 깊이의 펀치 스트로크까지 TWC 및 그 이론을 적용할 수 있고, (iii) 작은 크기의 ϵ_θ 도 측정 가능한 TWC 형상을 설계하였으며, 그 제원을 하기 표 2에 나타내었다.

표 2

D_i (mm)	H_0 (mm)	t (mm)
10	10	5

도 9는 전산수치해석에 사용한 2차원 축대칭 유한요소 모델(FE model)을 나타낸다. 시편의 상, 하부를 지지하는 펀치(로드)는 강체를 고려하여 단순화된 형태로 모델링하였다. 보다 정확한 수치해석 결과를 도출하기 위해 시편과 실린더의 반경방향 및 시편의 높이방향(실린더 하단에 변형률 게이지 부착)으로 편향된 요소망(mesh)을 적용하였다. 시편과 실린더 벽 사이에는 마찰계수 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5를 적용하였다. 전산수치해석 solver는 상용 유한요소 패키지(ABAQUS)를 사용하였다. 상기 시편은 2종의 폴리우레탄 폼이고, 이들의 P-V(압력-체적) 관계는 도 10과 같다. 이 2종의 폴리우레탄 폼은 서로 다른 P-V 관계를 갖는다. 시편의 물성으로 Ogden model을 적용하였으며, 상기 모델의 파라미터들을 하기 표 3에 나타내었다. α_i 와 μ_i 를 구할 때 incompressibility 가정을 사용하는 한계가 있지만, P-V 관계만을 이용하여 구한 D_i 값을 통해 시편의 부피 압축 거동을 기술한다는 점을 고려하여 사용하였다.

표 3

구분	폴리우레탄 폼 ($\rho=0.09\text{g/cm}^3$)			폴리우레탄 폼 ($\rho=0.32\text{g/cm}^3$)		
i	μ_i	α_i	D_i	μ_i	α_i	D_i
1	-2.752	1.056	0.013	0.412	0.757	0.021
2	3.263	1.377	0.015	17.761	16.167	3.603E-003
3	-0.220	-0.895	5.557E-003	-8.881	-8.083	4.190E-003

또한, 본 발명에서는 2종의 알루미늄 분말을 고려하였다. 이들의 P-V 관계는 도 11과 같다. 이들 또한 서로 다른 P-V 관계를 갖는다. Modified Drucker-Prager cap (MDPC) model을 이용하여 상기 시편들의 거동을 수치적으로 해석하였으며, 상기 모델의 파라미터들을 하기 표 4 및 표 5에 나타내었다.

표 4

Properties in the elastic regime		Parameters of the MDPC model in the plastic regime				
E (GPa)	ν	d (MPa)	β (°)	R	α	경화법칙 (MPa) ($x=\epsilon_v$)
9.03	0.28	5.5	16.5	0.558	0.03	$p=5.466+0.034e^{8.49x}$

표 5

Properties in the elastic regime		Parameters of the MDPC model in the plastic regime				
E (GPa)	ν	d (MPa)	β (°)	R	α	경화법칙 (MPa) ($x=\epsilon_v$)
10	0.26	4	44	0.5	0	$p=3.919+0.482e^{8.818x}$

실린더의 거동을 모사하기 위해 Ludwik 경화법칙(Ludwik hardening law)이 고려된 탄성-소성(가공 경화) 모델(elastic-work hardening model)을 사용하였다. 전산수치해석에 사용된 상기 모델의 파라미터들은 상기 식 5의 파라미터 A, B, n과 같다. σ_r^{TWC} 값은 시편과 실린더 사이에 존재하는 마찰의 영향 및 원주 변형률을 측정하는 변형률 게이지의 위치(z/H_0)에 영향을 받는다. 따라서, 다양한 변형률 게이지의 위치($z/H_0=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$)에서, 각 마찰계수에 대한 정규화된 반경방향 응력($\sigma_r^{avg}/\sigma_r^{TWC}$) 대 체적 변형률의 관계를 검토하였다.

도 12는 $\sigma_r^{avg}/\sigma_r^{TWC}$ 값을 체적 변형률(ϵ_v)의 함수로 나타낸 결과이다. 도 12(a) 내지 12(f)는 변형률 게이지의

부착 위치가 다른 상황을 나타낸다. 마찰계수가 증가함에 따라 $\sigma_r^{avg}/\sigma_r^{TWC}$ 값은 마찰계수가 0일 때의 값으로부터 점점 더 큰 편차를 보인다. 즉, 마찰계수가 증가함에 따라 σ_r^{TWC} 값은 실제 시편의 σ_r^{avg} 값으로부터 더 멀어진다. 도 12에서 주목할 점은 2종 폴리우레탄 폼의 $\sigma_r^{avg}/\sigma_r^{TWC}$ 값은 다양한 마찰계수 값에 걸쳐 매우 근사하다는 점이다. 이는 도 12에서 얻어진 데이터를 ε_v 와 μ 의 함수로 피팅할 수 있는 적절한 보정식(보정함수)을 수립한다면, 실린더 외벽 ε_θ 로부터(TWC 이론을 통해) 구한 σ_r^{TWC} 로부터 σ_r^{avg} 값을 구할 수 있다는 의미이다. 본 발명에서는 상기 식 3과 같은 보정함수를 수립하였다.

[0088] 현상학적 보정함수는 도 12에서 얻어진 데이터를 ε_v 와 μ 의 함수로 잘 피팅할 수 있다면, 어떤 형태라도 무방하다. 예를 들어, 상기 보정함수는 n차의 다항식일 수 있고, 더 바람직하게는, 하기 식 4로 표시되는 2차 함수일 수 있다.

[0089] <식 4>

[0090]
$$f(\varepsilon_v, \mu) = z_0 + z_1 \varepsilon_v + z_2 \mu + z_3 \varepsilon_v^2 + z_4 \mu^2$$

[0091] 상기 식 4에서, z_0 내지 z_4 는 각각 미리 정해진 μ 에서 ε_v 대 $\sigma_r^{avg}/\sigma_r^{TWC}$ 의 비선형 곡선 맞춤(non-linear curve fitting)에 의해 얻어진 실수이다.

[0092] 상기 식 4를 이용하여 도 12의 데이터들에 대해 비선형 곡선 맞춤을 수행한 결과 하기 표 6에 나타낸 것과 같은 피팅 파라미터들을 구하였다. 이 파라미터들이 적용된 식 4의 곡선 피팅 능력을 도 13에 나타내었다.

표 6

[0093]

z/H_0	z_0	z_1	z_2	z_3	z_4	R^2
0	0.9670	-0.3059	-0.8717	1.1908	0.5803	0.9846
0.1	0.9712	-0.2870	-0.8714	1.2058	0.5476	0.9884
0.2	0.9742	-0.2330	-0.8496	1.2882	0.5027	0.9897
0.3	0.9792	-0.1326	-0.8161	1.4607	0.4401	0.9917
0.4	0.9860	-0.0252	-0.7703	1.8016	0.3698	0.9941
0.5	0.9925	-0.2583	-0.7110	2.5101	0.3429	0.9947

[0094] 상기와 같이, P-V 곡선이 서로 다른 2종 폴리우레탄 폼에 대해 실린더 외벽 ε_θ 로부터(TWC 이론을 통해) 구한 σ_r^{TWC} 로부터 보정함수를 통해 σ_r^{avg} 값을 구하는 절차를 수립할 수 있는 이유는 2종 폴리우레탄 폼들의 $\sigma_r^{avg}/\sigma_r^{TWC}$ 값이 다양한 마찰계수 값에 걸쳐서 매우 근사하기 때문이다. 폴리우레탄 폼과는 다른 재질인 알루미늄 분말들도 다양한 마찰계수 값에 걸쳐서 $\sigma_r^{avg}/\sigma_r^{TWC}$ 값이 매우 근사하게 나타나는지 알아보기 위해, 도 14에는 2종 알루미늄 분말들에 대한 $\sigma_r^{avg}/\sigma_r^{TWC}$ 값을 체적 변형률의 함수로 나타내었다. 도 14에서 알 수 있듯이 서로 다른 P-V 관계를 갖는 2종의 알루미늄 분말들 또한 다양한 마찰계수 값에 걸쳐서 $\sigma_r^{avg}/\sigma_r^{TWC}$ 값이 매우 근사하게 나타난다. 따라서, 알루미늄 분말들 또한 폴리우레탄 폼들의 경우와 마찬가지로 적절한 보정식을 수립한다면 실린더 외벽 ε_θ 로부터(TWC 이론을 통해) 구한 σ_r^{TWC} 로부터 σ_r^{avg} 값을 구할 수 있다.

[0095] 본 발명에서는 폴리우레탄 폼들의 경우와 마찬가지로 상기 식 4의 보정함수를 이용하여 도 14에 나타낸 알루미늄 분말 데이터들에 대해 비선형 곡선 맞춤을 수행하였으며, 이를 통해 얻은 피팅 파라미터들을 하기 표 7에 나타내었다. 도 15는 보정함수 및 그 파라미터들이 도 14의 데이터들을 피팅하는 능력을 나타낸다.

표 7

[0096]

z/H_0	z_0	z_1	z_2	z_3	z_4	R^2
0	0.9818	-0.5240	-0.6535	1.6736	0.3348	0.9919
0.1	0.9852	-0.5381	-0.6382	1.6610	0.3155	0.9919

0.2	0.9911	-0.5312	-0.6007	1.8690	0.2722	0.9917
0.3	1.0027	-0.5315	-0.5372	2.2974	0.2048	0.9918
0.4	1.0214	-0.5568	-0.4411	3.0904	0.1176	0.9924
0.5	1.0474	-0.6459	-0.2864	4.5604	0.0131	0.9931

[0097] 동일한 보정함수가 서로 다른 폴리우레탄 폼과 알루미늄 분말의 $\sigma_r^{avg}/\sigma_r^{TWC}$ 데이터들을 성공적으로 기술하는 것으로 볼 때, 상기 식 4와 같은 보정함수는 다양한 압축성 고체들에 대해 적용이 가능할 것으로 판단된다. 물론 동일한 보정함수라도 주어진 소재별로 피팅 파라미터 값들은 달라질 수 있다.상기와 같이, 상기 식 4의 보정함수뿐만 아니라 어떤 형태의 보정함수라도 도 12 및 도 14에 나타난 $\sigma_r^{avg}/\sigma_r^{TWC}$ 데이터들을 ε_v 와 μ 의 함수로 성공적으로 기술할 수 있다면 이 또한 다양한 압축성 고체들에 대해 적용될 수 있다.

[0098] 어떤 폴리우레탄 폼의 P-V 곡선이 도 10에 나타난 두 P-V 곡선 사이 또는 근처에 있다면, 보정함수 및 그 파라미터(표 6)를 이용하여 σ_r^{TWC} 로부터 σ_r^{avg} 를 구할 수 있다. 이 때, 상기 식 4의 보정함수를 적용하기 위해서는 별도의 실험, 예를 들어, instrumented die 이용법을 통해 해당 폴리우레탄 폼과 die 간의 마찰계수를 측정해야 한다. 마찬가지로 어떤 알루미늄 분말의 P-V 곡선이 도 11에 나타난 두 P-V 곡선 사이 혹은 근처에 있다면, 보정함수 및 그 파라미터(표 7)를 이용하여 σ_r^{TWC} 로부터 σ_r^{avg} 를 구할 수 있다. 물론 이 경우에도 상기 식 4의 보정함수를 적용하기 위해서는 별도의 실험, 예를 들어, instrumented die 이용법을 통해 해당 알루미늄 분말과 die 간의 마찰계수를 측정해야 한다.

[0099] 다만, 본 발명에 따르면, 마찰계수를 별도로 측정하지 않고, TWC 실험을 통해 보정함수와 마찰계수를 동시에 결정함으로써 시편의 평균 반경방향 응력(σ_r^{avg})을 구할 수 있다. 이를 위해, 본 발명에서는 도 16에 나타난 것과 같은 실린더 내부에 위치한 시편의 힘 평형 상태를 분석하였으며, 그 결과 하기 식 8의 힘 평형식을 수립할 수 있다.

[0100] <식 8>

[0101]
$$F_T - F_B = \mu \sigma_r^{avg} A_c$$

[0102] 상기 식 8에서, F_T 및 F_B 는 각각 시편의 상부 및 하부에서 측정된 하중이고, μ 는 상기 시편 및 상기 실린더의 내벽 사이의 마찰계수이고, A_c 는 상기 시편 및 상기 실린더의 내벽 사이의 접촉면적이다. 상기 식 8에 상기 식 3을 대입하면 상기 식 2가 도출된다.

[0103] 식 2에서 좌변의 $F_T - F_B$ 항, σ_r^{TWC} , ε_v , A_c 값들은 실제 실험에서 실시간으로 무수히 많은 데이터 값들이 생성된다. μ 와 보정함수 파라미터들은 상수이다.

[0104] 만일 $F_T - F_B$ 값을 종속변수로 두고 다른 변수들인 σ_r^{TWC} , ε_v , A_c 값들을 독립변수로 한 후, 실시간으로 얻어진 수많은 $[F_T - F_B, \sigma_r^{TWC}, \varepsilon_v, A_c]$ 데이터 세트들에 대해 상기 식 2를 이용하여 비선형 곡선 맞춤(non-linear curve fitting)을 실시한다면, 상수인 μ 와 보정함수 파라미터들을 동시에 결정할 수 있다. 즉, μ 와 보정함수 $f(\varepsilon_v, \mu)$ 를 동시에 구할 수 있다. 보정함수 $f(\varepsilon_v, \mu)$ 를 구하고 난 후에는, 이를 이용하여 시편의 평균 반경방향 응력 σ_r^{avg} 를 구할 수 있다. 도 17은 이러한 절차를 정리하여 도식화한 것이다.

[0105] 보정함수 $f(\varepsilon_v, \mu)$ 만 구하면, 도 17의 절차대로, 즉, 상기 식 3을 이용하여 반경방향 응력을 구할 수 있다. 이하에서는 전산수치해석 데이터를 이용하여 이 과정을 설명한다.

[0106] 폴리우레탄 폼에 대해 전산수치해석을 수행하여 $F_T - F_B$, σ_r^{TWC} , ε_v , A_c 값들을 구하였었고, 그 결과를 도 18에 나타내었다. 하기 표 8에는 실시간으로 얻어진 수많은 $[F_T - F_B, \sigma_r^{TWC}, \varepsilon_v, A_c]$ 데이터 세트의 예를 나타내었다. 상기 식 2를 이용하여 도 18 및 표 8에 나타난 데이터들에 대한 비선형 곡선 맞춤을 실시하였고, 그 결과 모든 마찰계수들에 대해 표 6과 동일한 보정함수 계수들을 찾아낼 수 있었다.

표 8

Time (s)	σ_r^{TWC}	ε_v	A_c	$F_T - F_B$
0	0	0	314.159	0
0.01	0.483	0.004	312.903	13.363
0.02	0.971	0.008	311.646	27.313
0.03	1.464	0.012	310.389	41.336
0.04	1.962	0.016	309.133	55.343
0.05	2.466	0.020	307.876	69.328
0.06	2.974	0.024	306.619	83.408

또한, 알루미늄 분말에 대해서도 마찬가지로 방법으로 도 19 및 표 9와 같은 류의 데이터를 얻고 상기 데이터들에 대한 비선형 곡선 맞춤을 실시하였다. 그 결과, 고려한 모든 마찰계수들에 대하여 표 7과 동일한 보정함수 계수들을 찾아낼 수 있었다.

표 9

Time (s)	σ_r^{TWC}	ε_v	A_c	$F_T - F_B$
0	0	0	314.159	0
0.078	1.831	0.048	299.451	35.617
0.228	1.843	0.136	271.123	35.788
0.443	1.886	0.266	230.657	42.424
0.535	2.095	0.321	213.362	45.620
0.794	5.842	0.476	164.528	116.970
0.958	23.382	0.575	133.626	436.990

폴리우레탄 폼에 대한 전산수치해석을 수행한 결과, 구한 $F_T - F_B$ 값을 도 20(a)에 실선으로 나타내었다. 결정된 $f(\varepsilon_v, \mu)$ 를 적용하여 $\mu \sigma_r^{TWC} f(\varepsilon_v, \mu) A_c$ 값을 얻었고, 그 결과를 도 20(a)에 대시선으로 나타내었다. 도 20을 참고하면, 상기 식 2의 좌변과 우변 값들은 매우 근사하다. 따라서, 채택한 보정함수 및 그 파라미터들은 정확한 값이며, 도 17에 나타난 절차를 따라, 즉, 상기 식 3을 통해 구한 평균 반경방향 응력은 정확한 값일 수 밖에 없다. 만일 채택한 보정함수 및 결정된 파라미터들이 부적절하다면 좌변과 우변 값들은 결코 일치할 수 없다. 실제 실험에서도 상기 식 2의 좌변과 우변이 얼마나 잘 일치하는지를 관찰함으로써 채택한 보정함수 및 그 파라미터들이 얼마나 신뢰성이 있는지 판단할 수 있을 것이다.

알루미늄 분말에 대해서도 동일한 절차를 통해 상기 식 2의 좌변과 우변 값을 얻었고, 그 결과를 그림 20(b)에 나타내었다. 알루미늄 분말에 대해서도 좌변 값과 우변 값은 근사하게 일치하고 있다.

폴리우레탄 폼에 대한 전산수치해석을 통해 얻은 $[F_T - F_B, \sigma_r^{TWC}, \varepsilon_v, A_c]$ 데이터 세트를 이용하여 본 발명에서 수립한 방법대로 반경방향 응력을 구하였으며, 그 결과를 도 21(a)에 대시선으로 나타내었다. 또한 전산수치해석을 실시할 때 시편 element들이 경험하는 반경방향 응력 값을 평균 처리한 결과($\sigma_r^{element}$)를 도 21(a)에 실선으로 나타내었다.

도 21(a)에서 대시선은 실제 실험에서 수행하게 되는 절차와 동일한 절차를 수치적으로 모사하여 구한 것이다. 반면, 실선은 실험에서는 불가능하고 전산수치해석에서만 얻을 수 있는 결과이다. 두 곡선의 일치로부터, 본 발명에서 연구에서 수립한 방법은 전산수치해석적으로 검증될 수 있다.

알루미늄 분말에 대한 전산수치해석을 통해 얻은 $[F_T - F_B, \sigma_r^{TWC}, \varepsilon_v, A_c]$ 데이터 세트를 이용하여 위와 동일한 방법으로 구한 곡선들을 도 21(b)에 나타내었다. 두 곡선의 일치로부터 본 발명에서 수립한 방법은 알루미늄 분말에 대해서도 전산수치해석적으로 검증될 수 있다.

상기에서 수립된 방법론을 통해, 이하에서는, 압축성 소재의 일종인 경질 폴리우레탄 폼(foam)의 P-V 관계를 실험을 통해 측정한다. 측정된 물성을 전산수치해석 입력물성으로 사용하여 TWC 측정 과정을 수치적으로 모사하

였을 때, 수치모사를 통해 도출된 P-V 곡선이 실험을 통해 측정된 P-V 곡선(전산수치해석 입력물성)과 일치하는지를 조사함으로써, 측정된 물성의 신뢰성을 검증할 수 있다.

[0116] 사용된 경질 폴리우레탄 폼은 일반적인 발포재료의 특성이 아닌 고무와 같은 기계적 거동을 보이는 소재이기 때문에, 시편이 발포재료인지 여부를 검증하기 위해 SEM을 통한 시편의 미세조직 관찰을 수행하였다.

[0117] 경질 폴리우레탄 발포재료 시편 표면의 기공 손상을 최소화하기 위해 초정밀 밀링을 수행하였다. 관찰 표면을 폴리싱(polishing)한 후, 표면에 전기전도성을 부여하기 위해 이온코터 진공 챔버 내에서 시편 표면에 백금(Pt)코팅 처리를 하였다.

[0118] 주사전자현미경(SEM, scanning electron microscope, Strate 400 STEM)을 이용하여 경질 폴리우레탄 폼의 미세조직을 조사하였다. 아르키메데스 원리를 이용하여 경질 폴리우레탄 폼 시편의 기공률을 측정하였다. 시편의 포수 및 현수 중량 측정을 유체로 0.626 g/ml의 밀도를 갖는 Pentane(Sigma-Aldrich, Korea)을 사용하였다. 관찰된 경질 폴리우레탄 폼의 미세조직을 도 22에 나타내었다. 50배의 배율에서 관찰된 결과로부터, 경질 폴리우레탄 폼의 표면에 평균 50~60 μm 의 기공이 존재하는 것을 확인할 수 있다.

[0119] 하기 표 10은 경질 폴리우레탄 폼의 밀도와 기공률을 나타낸다. 아르키메데스 원리를 이용해 측정된 경질 폴리우레탄 폼 시편의 총 기공률(P)은 약 38%, 개기공률(P_{op})은 약 1.33%, 폐기공률(P_{cp})은 약 37.48%로 측정되었다.

표 10

구분	시편 1	시편 2	시편 3	평균값
m_D (g)	0.7446	0.7140	0.7441	0.7342
m_{SS} (g)	0.1308	0.1027	0.1312	0.1216
$m_D - m_{SS}$ (g)	0.6138	0.6113	0.6129	0.6127
ρ_a (g/ml)	0.7594	0.7312	0.7600	0.7502
ρ_b (g/ml)	0.9446	0.7140	0.7441	0.7342
ρ_t (g/ml)	1.2000	1.2000	1.2000	1.2000
P (%)	37.9508	40.4973	37.9932	38.8138
P_{op} (%)	1.2356	1.4275	1.3293	1.3308
P_{cp} (%)	36.7152	39.0697	36.6639	37.4829

[0121] $-m_D$, m_{SS} 는 각각 건조중량 및 현수중량을 의미함- ρ_a , ρ_b , ρ_t 는 각각 겉보기밀도, 벌크밀도, 참밀도를 의미함 (시편 체적= 1cm^3)

[0122] -순수 폴리우레탄의 참밀도= $1.2\text{g}/\text{cm}^3$

[0123] 상기에서 수립된 방법론을 이용하여 경질 폴리우레탄 폼의 P-V 관계 측정을 위한 실험 장비의 개념도 및 준비상태를 도 23에 나타내었다. 도 23(a)를 참고하면, P-V 관계 측정을 위한 장치는 두꺼운 벽 실린더(TWC), 상부 캡, 하부 지지대, 상부 편치(상부 로드) 및 하부 편치(하부 로드)로 이루어져 있다.

[0124] 100MPa 수준의 압력을 측정하기 위해, 상기 (b) 단계에서 수립한 설계지침을 고려하여 두꺼운 벽 실린더(TWC)를 설계하였다. 설계된 실린더의 제원은 내경(D_i) 10mm, 벽 두께(t) 5mm, 높이(H_o) 11mm이다. 실제 시험에서 시편이 어느 정도 압축되었을 때, 시편이 TWC 내벽에 가하는 압력이 증가함에 따라 시편이 TWC 바깥으로 빠져나오는 현상이 발생하였다. 이러한 현상이 발생할 경우 시편이 TWC 내벽에 가하는 압력이 급격하게 감소함에 따라 부정확한 원주 변형률이 측정된다. 상기 이유로 상부 캡 및 하부 지지대를 이용해 TWC 내부에 시편을 안정적으로 위치시켰다. 또한, 시편과 TWC 내벽 간 마찰의 영향으로 발생하는 하중 편차를 정확하게 측정하기 위해, 순수한 시편의 하중만이 전달될 수 있도록 하부 지지대를 설계하였다.

[0125] TWC와 상부 및 하부 편치 사이의 가공 공차는 일반 공차를 적용하였으며, instrumented die에 사용되는 rigid wall 몰드 급의 정밀 공차는 적용되지 않았다. 또한, 시편과 TWC 내벽 사이의 순수한 마찰 영향을 고려하기 위해 TWC 압축 실험에서 별도의 윤활제는 도포하지 않았다.

[0126] 상기 식 4의 구해진 파라미터 결과를 살펴보았을 때, 보정함수가 $\sigma_r^{ave} / \sigma_t^{TWC}$ 값을 피팅하는 능력을 변형률 계이

지의 위치가 시편의 바닥으로부터 30% 이상($z/H_0 > 0.3$)일 때 우수하였다. 이러한 결과를 근거로 변형률 게이지의 부착 위치는 시편 바닥으로부터 30%($z/H_0=0.3$)로 선정하였다.

[0127] TWC 압축 실험에서 원주 변형률(ϵ_θ) 측정에 사용된 foil strain gauge(N11-FA-5, SHOWA)의 gage factor는 2.12이며, 저항은 350 Ω 이다. 변형률 게이지의 저항값의 변화는 휘트스톤 브리지가 내장된 신호처리 장치(SDL-350R, Radian)를 통해 변형률로 변환되었다. 시편의 상부 및 하부의 하중은 TWC 장치의 상부와 하부에 위치한 로드 셀을 이용하여 측정하였다. 또한, 상부 편치의 스트로크는 상부 platen의 변위를 측정하도록 장착된 신율계(extensometer)를 이용하여 측정하였다.

[0128] TWC 압축 실험에서 실시간으로 측정된 데이터들은 cross-head displacement(이로부터 ϵ_v 와 A_c 계산), F_T , F_B , ϵ_θ 이다. 측정된 원주 변형률 값을 상기 식 1에 적용하여 σ_r^{TWC} 를 구하였다. TWC 압축 실험을 통해 결정된 ϵ_v , σ_r^{TWC} , A_c , $F_T - F_B$ 데이터들에 대해 상기 식 8의 힘 평형식 및 상기 식 2를 적용하여 비선형 곡선 맞춤을 실시함으로써 $f(\epsilon_v, \mu)$ 값을 구하였다. 이 때, $F_T - F_B$ 값을 종속변수로 두고, 실시간으로 측정되는 다른 변수들인 ϵ_v , σ_r^{TWC} , A_c 값들을 독립변수로 설정하였으며, 보정함수 파라미터들과 마찰계수는 상수로 설정하였다. 여기서 사용한 보정함수는 상기 식 4이다. 비선형 곡선 맞춤을 실시함으로써 모든 상수 값들(보정함수 파라미터 및 마찰계수)을 결정하였다. 참고로, 상기 식 2에 적용된 보정함수가 얼마나 신뢰성이 있는지에 대해서는, 비선형 곡선 맞춤이 끝난 후 구해진 계수 값들을 상기 식 2에 적용하였을 때 좌변과 우변이 얼마나 잘 일치하는지를 관찰함으로써 알 수 있다. 상기 비선형 곡선 맞춤으로부터 상기 식 2의 모든 계수 값들을 구한 후(즉, $f(\epsilon_v, \mu)$ 를 구한 후), $f(\epsilon_v, \mu)$ 를 σ_r^{TWC} 에 곱함으로써 σ_r^{ave} 값을 결정하였다.

[0129] 한편, 시편의 평균 축방향 응력 σ_a^{avg} 시편에 작용하는 평균 축방향 힘을 고려하였다. 평균 축방향 힘은 $(F_T+F_B)/2$ 인데, 이 값을 시편의 단면적으로 나눔으로써 시편의 평균 축방향 응력 σ_a^{avg} 을 계산하였다.

[0130] 최종적으로, 시편의 압력은 하기 식 9를 이용하여 구하였다.

[0131] <식 9>

$$P = \frac{\sigma_a^{avg} + 2\sigma_r^{avg}}{3}$$

[0132]

[0133] 상기와 같이 raw data인 cross-head displacement, F_T , F_B , ϵ_θ , ϵ_v 데이터들을 1차로 가공함으로써, ϵ_v , σ_r^{TWC} , A_c , $F_T - F_B$ 를 얻었으며, 상기 가공된 데이터들에 상기 식 2를 적용하여 비선형 곡선 맞춤(non-linear curve fitting)을 실시함으로써, $f(\epsilon_v, \mu)$ 를 결정하였다. 그 결과 얻어진 보정함수(식 4)의 파라미터 및 마찰계수를 하기 표 11에 나타내었다.

표 11

[0134]

μ	z_0	z_1	z_2	z_3	z_4
0.4245	1.6589	-0.3197	-0.7149	3.1183	0.4922

[0135] 만일 상기 식 4가 실제 실험에 사용한 압축성 소재의 $\sigma_r^{ave}/\sigma_r^{TWC}$ 비율을 ϵ_v 와 μ 의 함수로 제대로 기술해내지 못한다면, 상기 식 2의 좌변과 우변은 결코 일치할 수 없다. 본 발명에서 사용한 보정함수인 상기 식 4가 얼마나 신뢰성있게 경질 폴리우레탄 폼의 $\sigma_r^{ave}/\sigma_r^{TWC}$ 비율을 기술하고 있는지를 알아보기 위해, 표 11의 계수값들을 적용한 후 상기 식 2의 좌변과 우변이 얼마나 잘 일치하는지를 조사하였으며, 그 결과를 도 24에 나타내었다. 도 24를 참고하면, 식 2의 좌변과 우변 결과 사이의 피팅 오차는 약 8.476%로 나타났다. 이러한 결과로부터 본 발명에서 사용한 보정함수인 상기 식 4는 상기 식 2의 좌변과 우변이 합리적으로 일치하도록 만들어준다는 것을 확인하였다. 이는 본 발명에서 사용한 보정함수의 신뢰성을 나타낸다. 또한, 이 사실은 본 발명에서 보정함수

를 사용하여 측정된 경질 폴리우레탄 폼의 P-V 곡선의 신뢰성을 나타내는 것이기도 하다.

[0136] 상기 결과를 바탕으로 TWC 압축 실험 결과를 이용하여 σ_r^{avg} 및 σ_a^{avg} 를 구하였고, 이를 도 25에 나타내었다. 여기서 σ_r^{avg} 는 상기 식 3을 통해 구했고, σ_a^{avg} 는 측정된 평균 축방향 힘 $((F_T+F_B)/2)$ 을 시편의 단면적으로 나누어 계산하였다.

[0137] 최종적으로, 시편의 압력은 도 25의 σ_r^{avg} 및 σ_a^{avg} 결과를 상기 식 9에 대입하여 구하였다. 측정된 시편의 P-V 결과를 도 26에 나타내었다.

[0138] 이와 같이, 측정된 경질 폴리우레탄 폼의 P-V 관계의 신뢰성을 확인하기 위해 측정된 물성을 전산수치해석 입력 물성으로 사용하여 TWC 측정과정을 수치적으로 모사하였다. 시편의 변형거동을 기술하기 위해 초탄성 구성방정식을 사용하였다. 이 구성방정식은 $C_{ij}(\alpha_i, \mu_i)$ 파라미터를 구할 때 incompressibility 가정을 사용한다는 한계성이 있지만, P-V 관계만을 이용하여 구한 D_i 값을 통해 시편의 파괴 압축 거동을 기술한다는 점을 고려하여 본 발명에서 사용하였다. 또한, 수치모사를 통해 도출된 P-V 곡선이 실험을 통해 측정된 P-V 곡선(전산수치해석 입력물성)과 얼마나 일치하는지를 조사하여 측정된 물성의 신뢰성을 검증하였다.

[0139] 경질 폴리우레탄 폼의 $C_{ij}(\alpha_i, \mu_i)$ calibration용 데이터를 얻기 위해 ASTM D1621, ISO 3386 표준을 참고하여 압축 시험을 수행하였다. 시편의 변형률 속도는 $0.001s^{-1}$ 이었다. 도 27은 실험결과를 나타낸다.

[0140] ABAQUS CAE 프로그램을 이용하여 도 27의 결과로부터 초탄성 구성방정식 중 Polynomial, Yeoh, Ogden model의 파라미터 calibration을 수행하였으며, 이를 통해 얻은 파라미터들을 각각 하기 표 12 내지 14에 나타내었다. 도 28은 각 초탄성 구성방정식 모델 및 표 12 내지 14의 파라미터들이 도 27의 결과를 피팅하는 능력을 나타낸다.

표 12

C ₁₀ [MPa]	C ₀₁ [MPa]	C ₂₀ [MPa]	C ₁₁ [MPa]	C ₀₂ [MPa]
0.5479	0.0396	-0.3400	0.0787	0.0619

표 13

C ₁₀ [MPa]	C ₂₀ [MPa]	C ₃₀ [MPa]
0.5890	-0.1431	0.0841

표 14

i	μ_i [MPa]	α_i [MPa]
1	6.3123	2.0000
2	-4.2919	4.0000
3	0.8510	6.0000
4	-2.5510	-2.0000
5	0.8943	-4.0000
6	-0.0369	-6.0000

[0144] 도 28을 참고하면, 실제 경질 폴리우레탄 폼의 압축 응력-변형률 결과(도 27)를 실선으로 나타내었으며, 표 12 내지 14의 파라미터 값이 적용된 각 초탄성 구성방정식 모델로 피팅된 압축 응력-변형률 결과는 점선으로 나타내었다. 각 초탄성 구성방정식 모델을 통해 피팅된 결과들(점선들)과 경질 폴리우레탄 폼의 압축 시험 결과(실선)는 거의 일치한다. Polynomial, Yeoh, Ogden model로 피팅된 결과들 간의 오차는 각각 약 0.022%, 약 0.015%, 약 0.014%이다. 결과로부터 각 초탄성 구성방정식 모델들은 경질 폴리우레탄 폼의 압축 시험결과에 대해서는 신뢰 가능한 수준으로 피팅한다.

[0145] 도 26의 P-V 곡선을 사용하여 초탄성 구성방정식(Polynomial, Yeoh, Ogden model)의 volumetric 파라미터

calibration을 수행하였으며, 이를 통해 얻은 파라미터들을 하기 표 15 내지 표 17에 나타내었다. 도 29는 각 초탄성 구성방정식 모델 및 표 15 내지 표 17의 파라미터들이 측정된 도 26의 P-V 곡선 결과를 피팅하는 능력을 나타낸다.

표 15

D ₁ [MPa ⁻¹]	D ₂ [MPa ⁻¹]
-2.1927	0.0119

표 16

D ₁ [MPa ⁻¹]	D ₂ [MPa ⁻¹]	D ₃ [MPa ⁻¹]
0.0893	-0.0059	8.2029E-04

표 17

D ₁ [MPa ⁻¹]	0.1363
D ₂ [MPa ⁻¹]	-7.9976E-03
D ₃ [MPa ⁻¹]	2.9173E-04
D ₄ [MPa ⁻¹]	-2.5696E-05
D ₅ [MPa ⁻¹]	5.3424E-06
D ₆ [MPa ⁻¹]	-4.5160E-06

도 29에서 실선은 실제 경질 폴리우레탄 폼의 P-V 곡선 측정 결과(도 26)이며, 점선은 상기 표 15 내지 표 17의 파라미터 값이 적용된 각 초탄성 구성방정식 모델로 피팅된 P-V 결과이다. 압축 시험 결과를 피팅하는 능력(도 28)은 검토한 모든 모델이 우수하였으나 측정된 P-V 결과(실선)를 피팅하는 능력(도 29)은 Ogden model만이 신뢰할 수 있다. 여기서, 측정된 P-V 곡선과 Polynomial, Yeoh, Ogden model로 피팅된 결과들 사이의 오차는 각각 약 49.79%, 약 25.29%, 약 4.77%로 이다. 도 28 및 도 29의 결과를 종합했을 때, 실제 실험 결과를 피팅하는 능력은 Ogden model이 가장 우수하다. 따라서, Ogden model의 calibration된 파라미터 값들(표 14 및 표 17)을 사용하여 측정된 경질 폴리우레탄 폼의 P-V 곡선을 전산수치해석 입력물성으로 활용하였다.

TWC를 이용한 P-V 측정 실험 과정을 모사하기 위해, 도 9의 2차원 축대칭 유한요소 모델(FE model)을 이용하였다. 상기 모델에서 시편과 TWC 내벽 사이의 마찰계수는 수립된 방법론을 통해 구해진 마찰계수(표 11) 결과를 이용하였으며, 시편의 입력물성은 Ogden model의 calibration된 파라미터 값들(표 14 및 표 17)을 사용하였다. 실린더의 거동을 모사하기 위한 탄성물성은 전술한 AISI 304L 스테인레스 스틸 TWC의 탄성 물성 및 재료 파라미터 값을 참고한다.

도 30에는 전산수치해석을 수행한 결과 도출된 P-V 곡선을 실선으로 나타내었으며, 전산수치해석을 위한 입력물성 곡선(실험을 통해 측정된 P-V 곡선)을 대시선으로 나타내었다. 도 30에서 입력물성으로 사용된 P-V 곡선화 수치모사를 통해 도출된 P-V 곡선은 약 91% 수준의 일치도를 보였다. 이러한 결과는 본 발명에서 수립한 보정 함수인 상기 식 4와 힘 평형식인 상기 식 2가 시편의 P-V 곡선 및 마찰계수를 합리적인 수준에서 구할 수 있게 해준다는 것을 보여준다.

수치모사를 통해 도출된 P-V 곡선(대시선)은 시편과 TWC 내벽 사이에 균일한 마찰계수 조건에서 구해진 결과이다. 그러나 실험을 통해 측정된 P-V 곡선(실선)은 시편과 TWC 내벽 사이 마찰계수가 시편이 압축됨에 따라 변하는 조건에서 측정된 결과이다. 도 30의 두 곡선 간 오차는 마찰계수 조건 외에도, 실제 시험에서 존재할 수 있는 다양한 요인(TWC가 팽창함에 따라 TWC와 편치 사이에 발생할 수 있는 시편의 간섭, 시편 및 TWC 표면의 가공 정밀도 등)에서 기인한 것으로 분석된다.

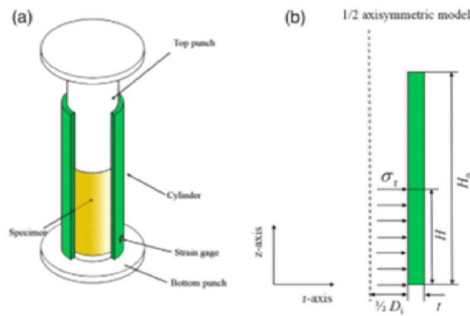
전술한 본 발명의 설명은 예시를 위한 것이며, 본 발명이 속하는 기술분야의 통상의 지식을 가진 자는 본 발명

의 기술적 사상이나 필수적인 특징을 변경하지 않고서 다른 구체적인 형태로 쉽게 변형이 가능하다는 것을 이해할 수 있을 것이다. 그러므로 이상에서 기술한 실시예들은 모든 면에서 예시적인 것이며 한정적이 아닌 것으로 이해해야만 한다. 예를 들어, 단일형으로 설명되어 있는 각 구성 요소는 분산되어 실시될 수도 있으며, 마찬가지로 분산된 것으로 설명되어 있는 구성 요소들도 결합된 형태로 실시될 수 있다.

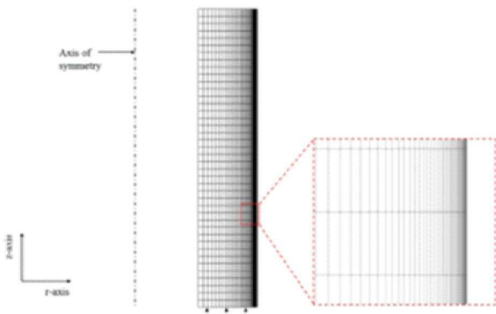
[0154] 본 발명의 범위는 후술하는 청구범위에 의하여 나타내어지며, 청구범위의 의미 및 범위 그리고 그 균등 개념으로부터 도출되는 모든 변경 또는 변형된 형태가 본 발명의 범위에 포함되는 것으로 해석되어야 한다.

도면

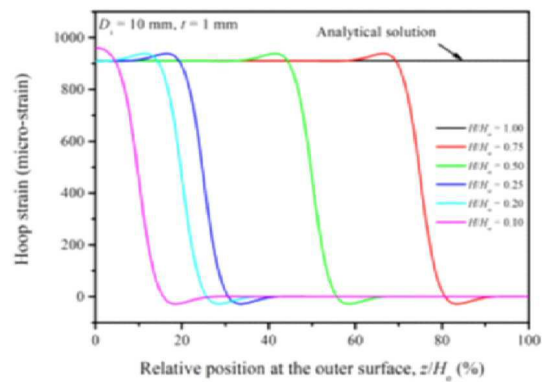
도면1



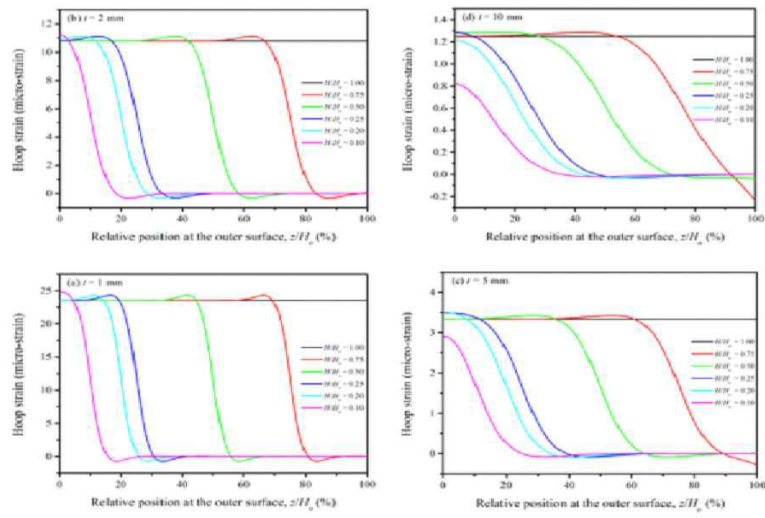
도면2



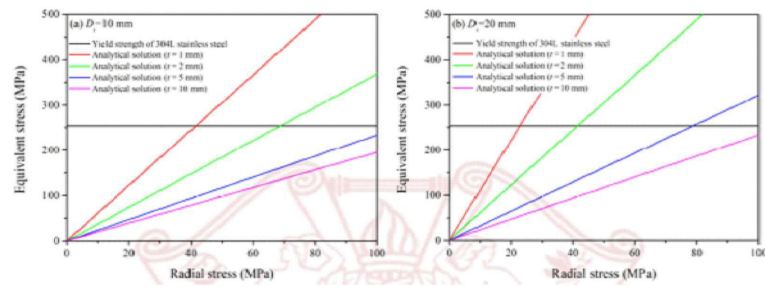
도면3



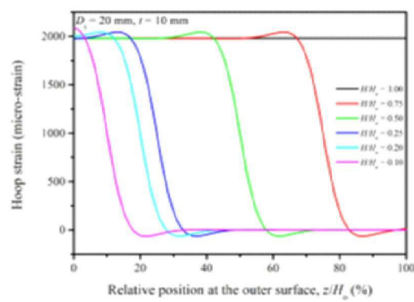
도면4



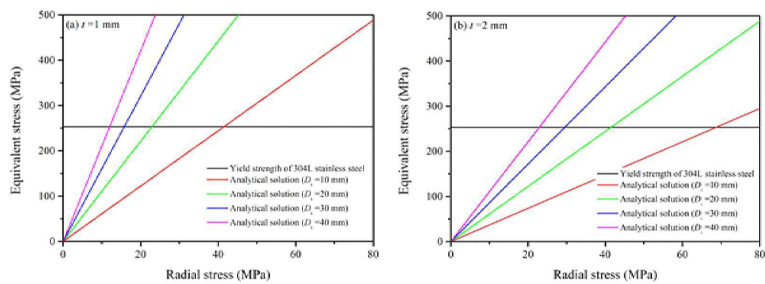
도면5



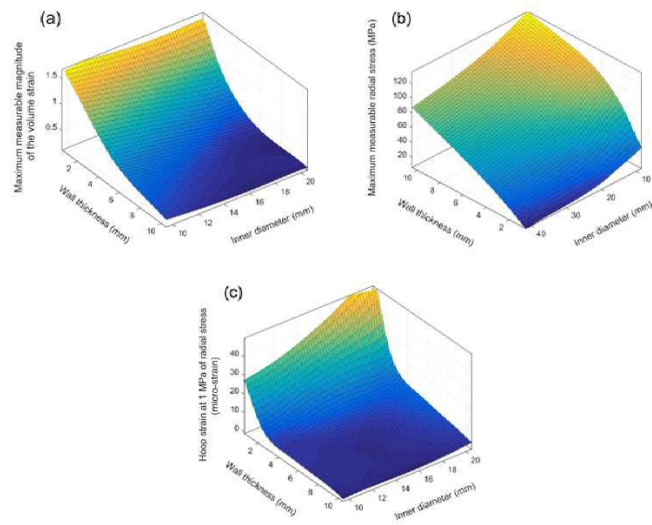
도면6



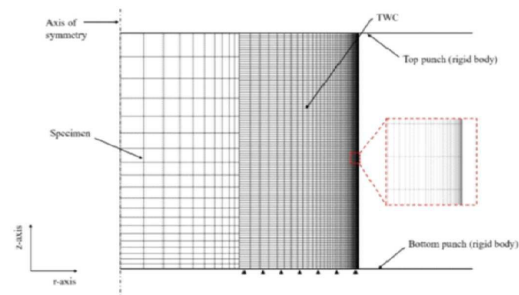
도면7



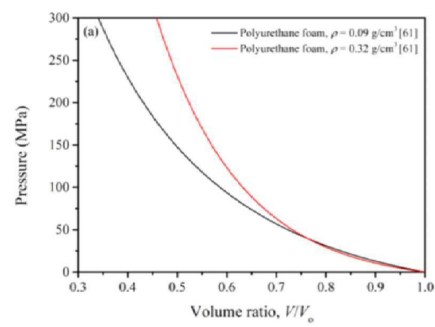
도면8



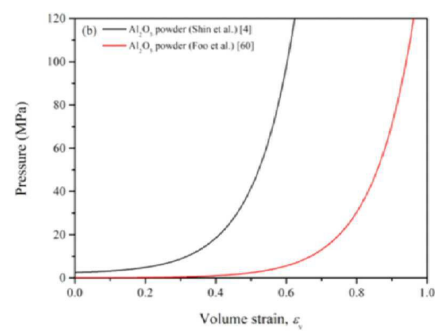
도면9



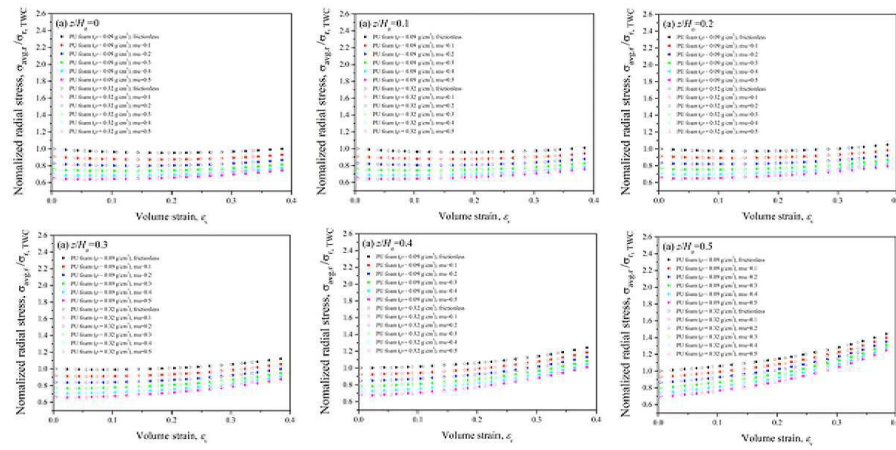
도면10



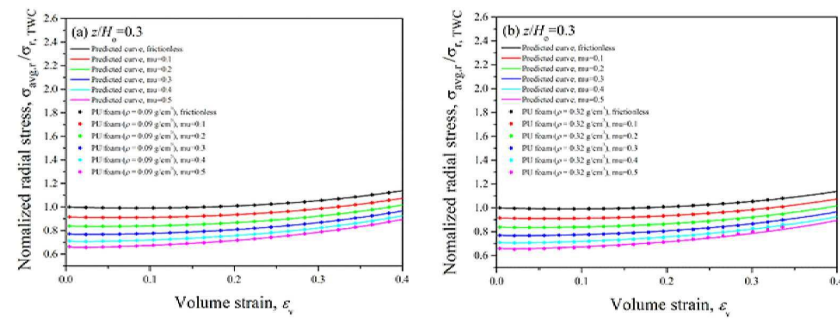
도면11



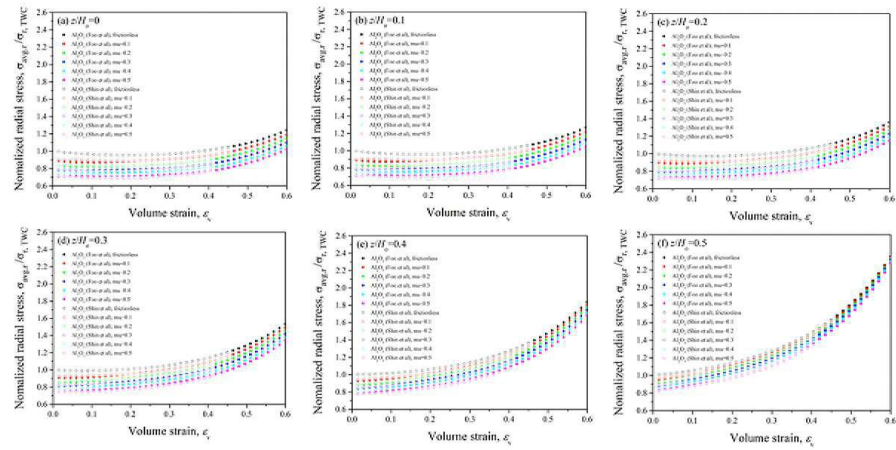
도면12



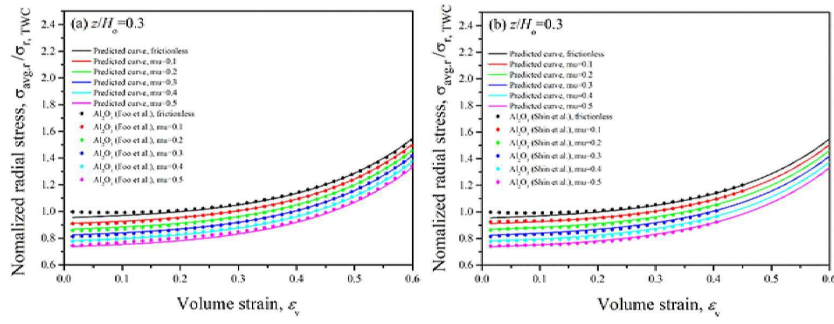
도면13



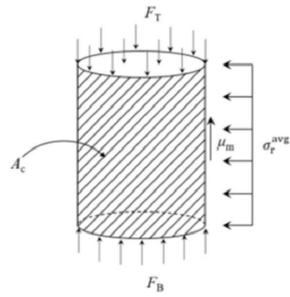
도면14



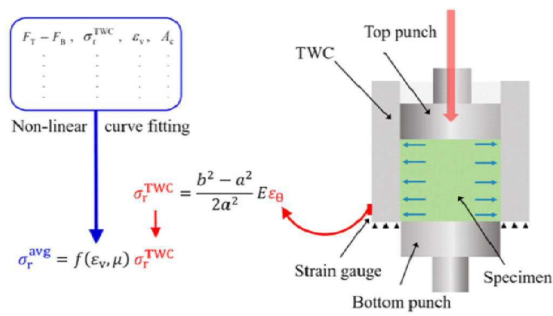
도면15



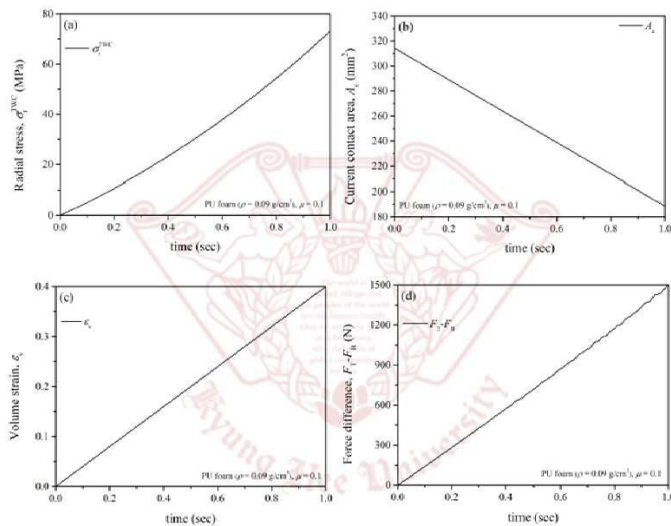
도면16



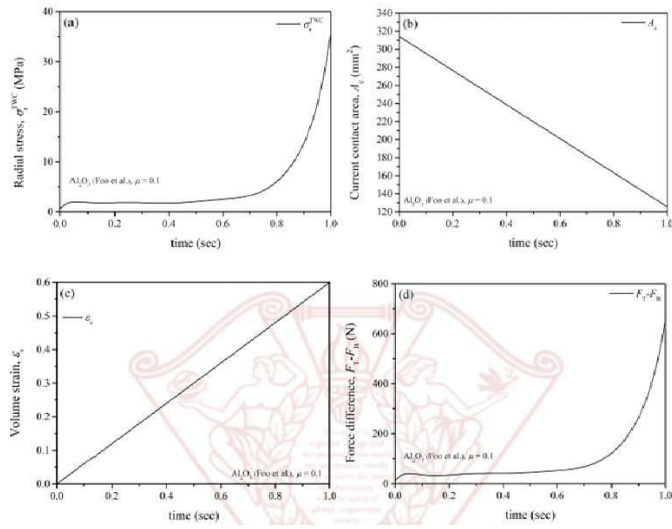
도면17



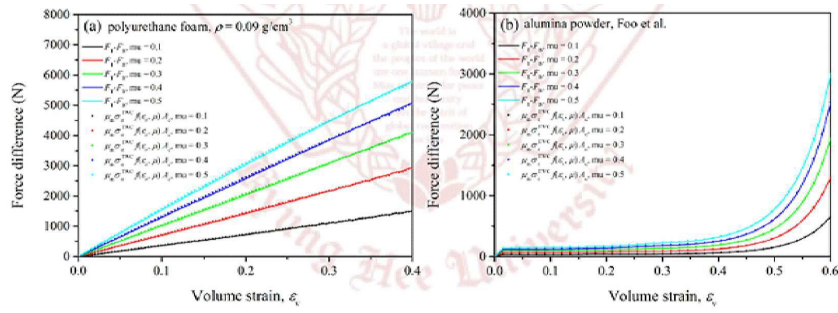
도면18



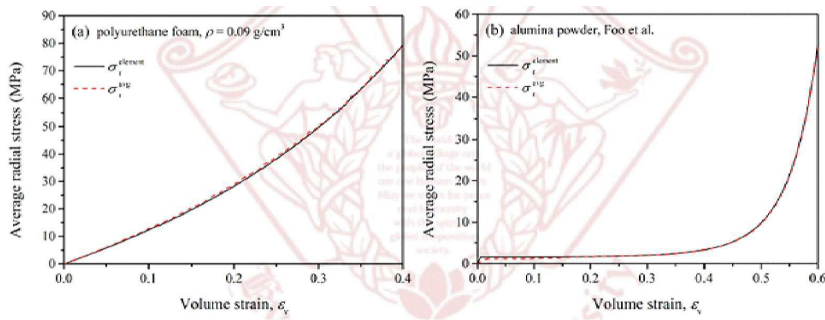
도면19



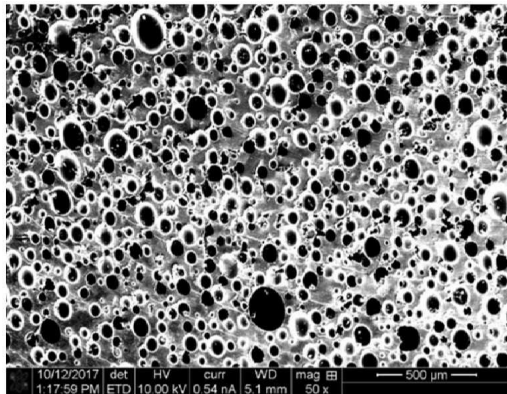
도면20



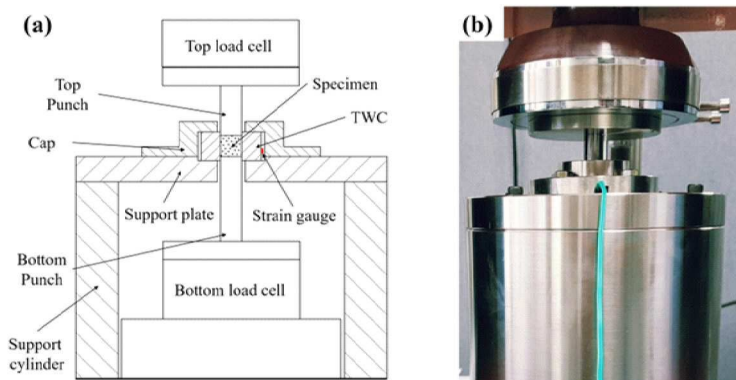
도면21



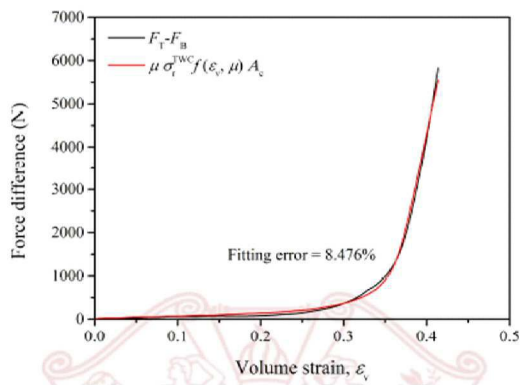
도면22



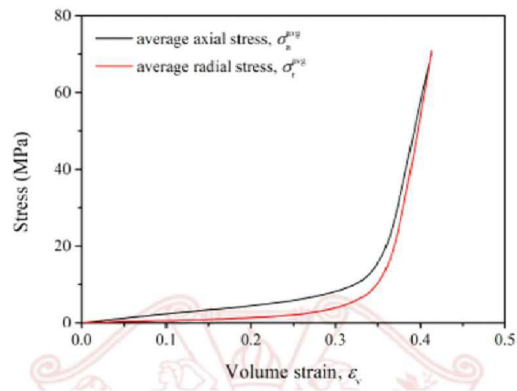
도면23



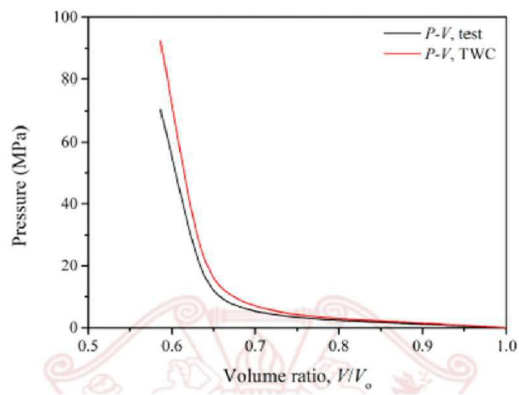
도면24



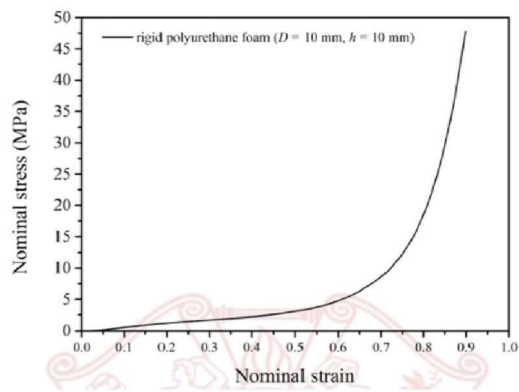
도면25



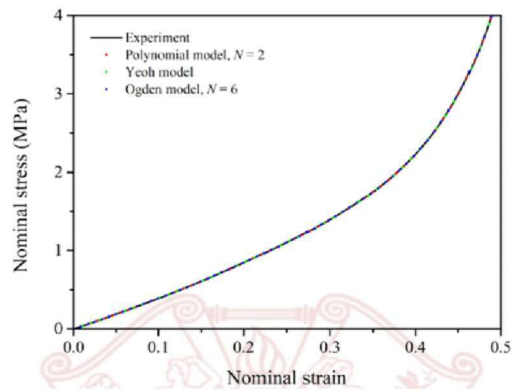
도면26



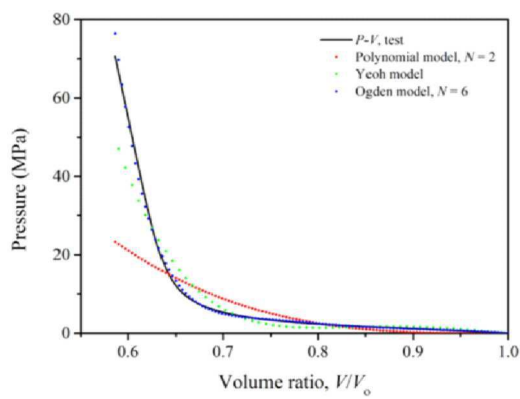
도면27



도면28



도면29



도면30

