

육면체 요소 재구성을 통한 개방형 사다리꼴이 성형된 판재의 탄성 거동 균질화에 대한 연구

이창환¹ · 양동열[#] · 박종승² · 강동우²

Analysis of the Homogenization of the Elastic Behavior for a Sheet with Sheared Protrusions using Hexahedral Mesh Coarsening

C. W. Lee, D. Y. Yang, J. S. Park, D. W. Kang

(Received January 27, 2014 / Revised February 24, 2014 / Accepted March 11, 2014)

Abstract

The current collector for the molten carbonate fuel cell (MCFC) which has sheared protrusions is manufactured by the three-stage forming process that integrates slitting, preforming and final forming. Due to the repetition of sheared protrusions, an effective simulation method is required to predict the mechanical behavior. In the current study, a sheet with sheared protrusions was assumed to be an orthotropic plate, which has the same length, width and height. FEM simulations were conducted to evaluate the homogenized properties of the current collector, which has 4 (longitudinal direction) x 4 (transverse direction) sheared protrusions. The simulation model was constructed using hexahedral mesh coarsening. From the verification examples, it was found that the proposed simulation method was efficient within reasonable accuracy. The calculated homogenized properties can be applied to the design of a stack for molten carbonate fuel cells and the prediction of mechanical behavior for other applications.

Key Words: Hexahedral Mesh Coarsening, Homogenization, Current Collector, Molten Carbonate Fuel Cell

1. 서 론

최근 반복 구조를 내부 구조로 사용하는 금속 샌드위치 판재 등 관련 제품의 수요가 증가하고 있다. 특히 금속 반복 구조의 성형 및 거동 분석에 대해 많은 연구가 진행 되고 있다[1]. 다양한 금속 반복 구조 중, 개방형 사다리꼴이 성형된 판재는 샌드위치 판재의 내부 구조로 사용될 수 있다. 또한 연료전지 중 하나인 용융탄산염 연료전지(Molten carbonate fuel cell)의 금속 분리판 중 하나인 집전판(current collector)으로 사용 가능하다[2].

개방형 사다리꼴이 성형된 판재는 집전판으로 사

용함에 있어, 작동 중 변형 형상에 대한 예측, 고강성 설계 등이 필요하다. 그러나 패턴의 반복 구조로 인하여 전체 형상에 대한 유한요소 해석의 적용이 어렵다. Eshelby[3], Guedes, Kikuchi[4] 는 균질화를 기반으로 하여 반복 구조의 효율적 해석을 위한 해석 기법을 제안하였다. Desphande, Fleck[5] Desphande[6], Xue, Hutchinson[7]은 금속 샌드위치 판재의 내부 구조 해석에, 반복구조가 균질화된 특성을 갖는 구성 방정식을 사용한 효율적 해석 기법을 적용하였다. 다양한 해석 기법을 사용하여 반복 구조의 효율적 해석 및 분석이 가능하다.

개방형 사다리꼴이 성형된 판재의 경우, 정확한

1. 한국과학기술원 기계공학과

2. 두산중공업 연료전지 개발팀

Corresponding Author : School of Mechanical Engineering & Aerospace System, KAIST, dyyang@kaist.ac.kr

해석을 위해 3 단 성형 공정에서 발생한 소성 변형 (변형 형상, 유효 소성 변형을 분포, 응력 분포)을 고려해야 한다[8, 9]. 또한 단위 형상을 사용한 해석 모델[10]은 형상의 배치를 고려할 수 없기 때문에 개방형 사다리꼴 형상이 성형된 판재의 거동을 정확히 모사할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 유한요소 해석을 통한 균질화에 개방형 사다리꼴 형상이 가로 세로 각각 4 개씩 배치된 단위 영역을 적용하였다. 균질화 해석 모델 구성에 있어서, Lee and Yang[11]에 의해 제안된 요소 재구성 방법을 수정하여 육면체 요소 재구성(Hexahedral mesh coarsening)을 통해 낮은 요소 밀도를 갖는 해석 모델을 구성하였다. 균질화 해석을 통해, 직교 이방성 조건에서 개방형 사다리꼴이 성형된 판재의 탄성 거동에 대한 등가 물성을 계산하였다.

그리고 개방형 사다리꼴이 성형된 판재의 회전각도 별 인장실험을 진행하였다. 균질화 해석을 통해 얻은 소재의 탄성 거동과 실험 결과를 비교하여, 요소 재구성을 통한 균질화 해석 결과의 유효성을 검증하였다.

2. 해석 모델 및 육면체 요소 재구성

2.1 개방형 사다리꼴이 성형된 판재

용융탄산염 연료전지의 금속 분리판은 Fig. 1 에서와 같이 양극과 음극을 구분하는 분리판(Center plate)와 양극(Anode)과 음극(Cathode)에서 발생한 전기를 전달하고, 각 극의 가스가 반응할 수 있는 공간을 확보해 주는 집전판(Current collector)로 구성된다. 특히 집전판의 경우, 집전판 사이 공간으로 양극과 음극의 반응 가스가 흐를 수 있고, 전체 연료전지 스택의 구조를 지지할 수 있도록 Fig. 1 에서와 같이 개방형 사다리꼴 구조로 구성된다. 연료전지의 효율을 향상시키기 위해서는 고 중형비의 개방형 사다리꼴이 성형된 판재를 집전판으로 사용해야 한다.

고 중형비를 갖는 개방형 사다리꼴 형상은 슬리팅 공정, 프리폼 성형 공정, 최종 형상 성형 공정의 3 단 공정에 의해 성형된다[12]. 개방형 사다리꼴의 실험 결과 및 성형 해석 결과는 Fig. 2 와 같다. 개방형 사다리꼴 형상의 성형 후, 사다리꼴 형상 전체에서 소성 변형 및 두께 변화가 발생한다. 따라서 개방형 사다리꼴의 정확한 거동 해석 및 균질화 해석에 있어서, 이와 같은 변형 형상과 소성 변형을 분

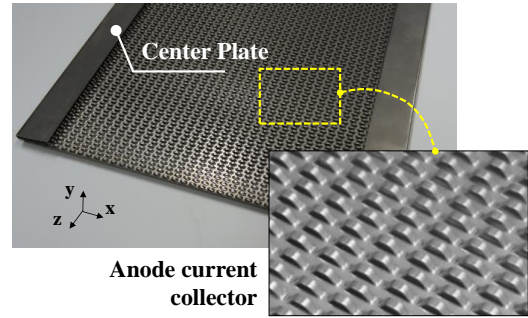


Fig. 1 Metallic bipolar plate of the MCFC and the anode current collector

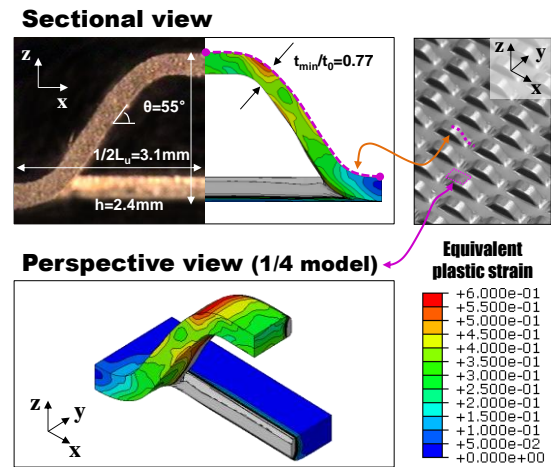


Fig. 2 Experimental results and simulation results of the three-stage forming process for the sheared protrusion[12]

포에 대한 고려가 필수적이다[11].

2.2 육면체 요소 재구성

본 연구에서의 해석 모델은 소재의 배치에 의한 효과를 고려하기 위해 개방형 사다리꼴이 가로, 세로 방향으로 각각 4 개의 단위 형상이 배치된 단위 영역을 해석 모델로 선정하였다. 단위 형상의 성형 해석에는 Fig. 2 와 같이 19,876 개의 8 절점 육면체 요소로 구성된 1/4 모델을 사용하였다. 해석 모델의 경계 영역에는 대칭 경계조건을 사용하였다. 대면적 집전판의 유한요소 해석에 단위 형상의 성형 해석 결과를 직접 적용하기에는, 해석 모델의 크기가 너무 커져 해석이 어려워진다. 또한 단위 형상의 경우 사다리꼴 배치에 의한 효과를 고려할 수 없다. 따라서 개방형 사다리꼴 형상이 가로, 세로 4 개씩 배치되어 있는 단위 영역에 대해 균질화 해석을 진행하였다. 그리고

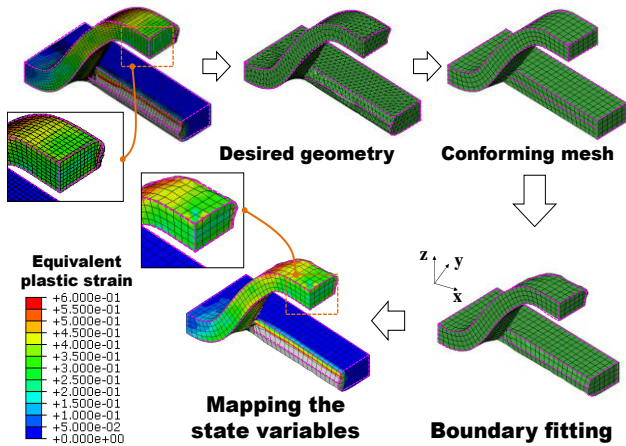


Fig. 3 Hexahedral mesh coarsening of the sheared protrusion

변형 형상, 응력 분포, 소성 변형을 분포와 같은 성형 해석 결과를 효과적으로 고려할 수 있도록, 육면체 요소 재구성을 통해 해석 모델을 구성하였다.

육면체 요소 재구성을 통한 단위 영역의 해석 모델 구성 방법은 다음과 같이 진행된다. 먼저, 성형 해석 결과의 목적 형상을 추출한다. 그리고 목적 형상과 유사하며, 원하는 요소 개수를 포함하는 적응형 요소(Conforming mesh)를 만들어 준다. 다음으로, 적응형 요소의 외곽 형상을 목적형상과 동일하도록 수정하고, 내부의 요소를 재배치(Boundary fitting) 한다. 육면체 요소 재구성을 통해 구성된 1/4 해석 모델은 1,398개의 8절점 육면체 요소로 구성되어, 성형 공정 해석 모델(Fig. 2)에 비해 요소 개수가 7%로 감소되어 효율적 유한요소 해석이 가능하다.

그리고 성형 해석 결과에서 재구성된 단위 형상 요소로 응력 분포, 소성 변형을 분포를 매핑하였다. 마지막으로, 대면적 해석 모델은 Fig. 3에서의 단위 영역 해석 결과를 x축과 y축으로 대칭과 이동을 반복함으로써 구성 가능하다. 이에 따른 전체 해석 모델은 Fig. 4와 같다. 단위 영역의 해석 모델의 크기는 길이(L)는 25.8mm, 폭(w)은 12mm로, 총 94,144개의 요소로 구성된다.

단위 형상의 성형 해석 결과를 사용하여 대면적 해석 모델을 그대로 만드는 경우, 총 120만개 이상의 요소가 필요하며, 이는 일반 상용 컴퓨터에서는 해석이 어렵다. 따라서 육면체 요소 재구성을 통해 구성된 해석 모델을 사용함으로써 효율적인 균질화 해석이 가능하다.

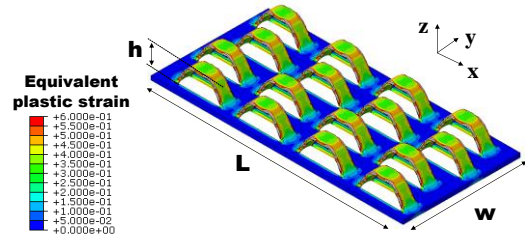


Fig. 4 Simulation model of the sheet with sheared protrusion using hexahedral mesh coarsening

3. 균질화 해석 결과

3.1 균질화 해석

개방형 사다리꼴 형상이 성형된 판재와 같이 복잡한 구조를 갖는 소재의 경우, 이론식에 의한 균질화 기법[5, 6]은 소재의 거동을 정확히 예측하기 어렵고, 다른 단순한 형상에 비해 어려운 문제이다. 따라서 유한요소 해석을 통한 가상 실험[1]을 통해 탄성 영역의 등가물성을 계산하였다. 원 소재는 AISI310S 이며, 소재의 특성은 성형 해석에서와 마찬가지로, 탄성계수는 132GPa, 항복응력(σ_0)은 230MPa를 사용하였다. 또한 유동응력은 식 (1)과 같다.

$$\bar{\sigma}(MPa) = 1192.57(0.0314 + \bar{\epsilon})^{0.455} \quad (1)$$

개방형 사다리꼴이 성형된 판재는 직교 이방성을 갖는 판재로 가정하였다[13]. 탄성 영역에서 직교 이방성(Orthotropic elasticity)을 보이는 소재는 식 (2)와 같이 변형률과 응력의 관계가 표현된다.

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_{xx} & -\nu_{yx}/E_{yy} & -\nu_{zx}/E_{zz} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{xy}/E_{xx} & 1/E_{yy} & -\nu_{zy}/E_{zz} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{xz}/E_{xx} & -\nu_{yz}/E_{yy} & 1/E_{zz} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{yz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{zx} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

직교 이방성을 갖는 소재는 소재의 등가 물성이 $E_{xx}, E_{yy}, E_{zz}, G_{xy}, G_{yz}, G_{zx}, \nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{zx}, \nu_{yx}, \nu_{zy}, \nu_{xz}$ 로 총 12 개로 표현된다. 여기서, $\nu_{yx}, \nu_{zy}, \nu_{xz}$ 는 $E_{ii}\nu_{ji} = E_{jj}\nu_{ij}$ 의 관계로부터 구할 수 있다. 각각의 등가 물성은 Table 1 과 같이 경계 영역에 경계 조건(boundary condition)을 부여함으로써 구할 수 있었다[14]. 유한요소 해석을 사용한 균질화 해석에는 총 6 개의 해

Table 1 Boundary conditions for determining the homogenized properties for the orthotropic plates

	x=0	x=L	y=0	y=w	z=0	z=h
E_{xx}	$u_x=0$	$u_x=\Delta u$	*	*	*	*
E_{yy}	*	*	$u_y=0$	$u_y=\Delta v$	*	*
E_{zz}	*	*	*	*	$u_z=0$	$u_z=\Delta w$
G_{xy}	fixed	$u_y=\Delta\delta$	free	free	*	*
G_{yz}	*	*	fixed	$u_z=\Delta\delta$	free	free
G_{zx}	free	free	*	*	fixed	$u_x=\Delta\delta$

* Normal displacement of this plane is constrained

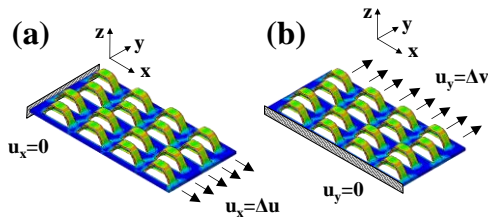


Fig. 5 Deformed shape (a) Tension in x-dir. (b) Tension in y-dir

석 조건이 사용되었다. 유한요소 해석은 Fig. 4의 해석 모델을 사용하여 ABAQUS /Standard v6.10을 통해 진행하였다.

3.2 균질화 해석 결과

Table 1의 경계 조건 해석을 통해 각 해석 상황에 대해 각각의 경계 조건에 대응하는 반력(reaction force)를 구할 수 있다. Fig. 5는 x 방향 탄성계수(E_{xx})와 y 방향 탄성계수 (E_{yy})를 구하는 해석 모델의 유한요소 해석 결과이다. x 방향 응력(σ_{xx})은 $F_x/w \cdot h$ 이 되고, 변형율(ϵ_{xx})은 $\Delta u/L$ 이다. Fig. 6은 x 방향 인장, y 방향 인장, xy 방향 전단에 대한 응력-변형율 그래프이다. 여기서 σ_0 , τ_0 는 소재의 초기 항복응력(230MPa), 전단 항복응력(132MPa)이다. 응력-변형율 선도에서 초기 직선부의 기울기가 탄성계수가 된다 ($E_{xx}=\sigma_{xx}/\epsilon_{xx}$). 나머지 경우에 대해서도 모두 같은 방법으로 변형율 및 하중을 구할 수 있다. 그리고 푸아송 비(Poisson ratio)와 탄성계수의 관계에서 각 방향에 대한 푸아송 비 (ν_{yx} , ν_{zy} , ν_{xz} , ν_{xy} , ν_{yz} , ν_{zx})를 구할 수 있다[14].

이를 통해 구한 소재의 등가 물성은 Table 2에 정리하였다. 탄성 계수의 경우, 소재 길이 방향 탄성계수 (E_{xx})가 소재 수직 방향(E_{yy})에 비해 2.89 배 높

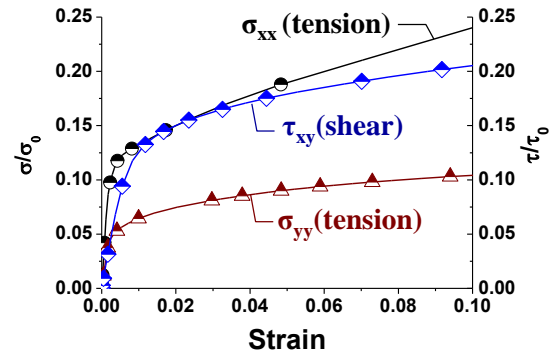


Fig. 6 Stress-strain relationship of the sheet with sheared protrusion in the in-plane deformation

Table 2 Homogenized properties of the sheet with sheared protrusions (Unit: GPa)

E_{xx} (GPa)	E_{yy} (GPa)	E_{zz} (GPa)	G_{xy} (GPa)	G_{yz} (GPa)	G_{zx} (GPa)
13.21	5.83	0.41	2.58	0.45	1.29
ν_{xy}	0.22	ν_{yz}	0.16	ν_{zx}	0.97
ν_{yx}	0.09	ν_{zy}	0.01	ν_{zx}	0.03

다. 그리고 높이 방향 탄성 계수(E_{zz})는 0.41GPa로 사다리꼴 형상이 그대로 변형하기 때문에 다른 방향의 탄성 계수에 비해 낮은 값을 보인다.

4. 균질화 해석 결과 검증

4.1 소재의 각도별 인장 실험

직교 이방성 소재의 배치 각도에 따른 탄성계수 예측 결과와 실험 결과의 비교를 통해 제안된 해석 기법을 사용해 계산된 등가 물성의 유효성을 검증하였다.

소재의 방향에 따른 탄성계수의 비교를 위해 인장 실험을 진행하였다. 인장 실험은 Fig. 7(a)와 같이 각 방향 시편을 위치시키고 중심부에 신장계(Extensometer)를 연결하여 변형율을 측정하였다.

소재의 원 좌표 (Material coordinate - x, y, z)를 중심으로 회전된 좌표 (Rotated coordinate - x', y', z')는 z-축에 대해 θ 만큼 회전되어 있다. Fig. 7(b)는 소재의 회전 각도(θ)에 따른 시편을 나타낸 사진이다. 회전 각도(θ)는 0°, 30°, 45°, 60° 90°의 5가지를 사용하였다. θ 가 0°인 경우는 같이 개방형 사다리꼴이 성형된 방향(longitudinal direction)과, θ 가 90°인 경우는 소재 수

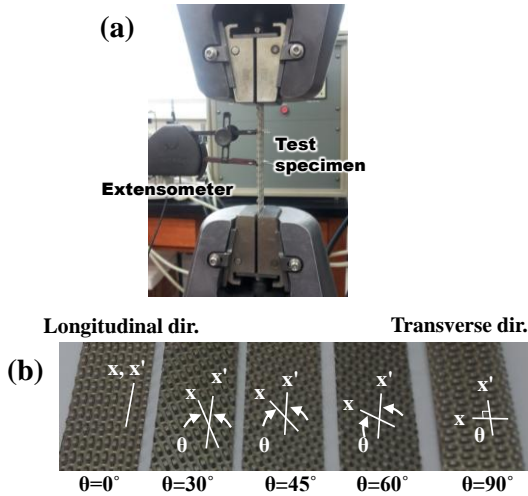


Fig. 7 Tensile test of the sheet with sheared protrusion
(a) Experimental set-up (b) Tensile test specimens with respect to the aligned angle (θ)

직 방향(transverse direction)과 같다. 소재의 크기는 세로 200mm, 가로 30mm 로 절단하여 인장실험을 하였다.

회전 각도 θ 에 따른 탄성 계수 E_{xx}' , E_{yy}' 는 식 (3), (4)와 같이 계산할 수 있다[15]. 여기서 $m=\cos\theta$, $n=\sin\theta$ 이다.

$$E_{xx}' = \frac{E_{xx}}{[m^4 + m^2 n^2 (-2\nu_{xy} + \frac{E_{xx}}{G_{xy}}) + n^4 \frac{E_{xx}}{E_{yy}}]} \quad (3)$$

$$E_{yy}' = \frac{E_{yy}}{[n^4 + m^2 n^2 (-2\nu_{xy} + \frac{E_{xx}}{G_{xy}}) + m^4 \frac{E_{xx}}{E_{yy}}]}$$

4.2 실험 결과

Fig. 8 은 소재의 회전 각도(θ)가 0° (longitudinal direction), 90° (transverse direction)인 경우의 응력-변형률 선도이다. 또한 실험 결과는 기호(symbol)로, 해석 결과는 선(line)으로 표현하였다. $\theta=0^\circ$ 와 $\theta=90^\circ$ 의 해석 결과 모두 유사한 소성 거동을 보인다. 여기서 변형율이 낮은 초기 탄성 구간(응력-변형률 비례 구간)의 비례 상수가 탄성계수이다.

회전 각도(θ)가 0° (Longitudinal direction)의 경우, 탄성계수(E_{xx})는 실험 결과 13.67GPa, 유한요소 해석 결과 13.21GPa 로 3.4%의 차를 보인다. 회전 각도(θ)가 90° (transverse direction)의 경우, 탄성 계수(E_{yy})는

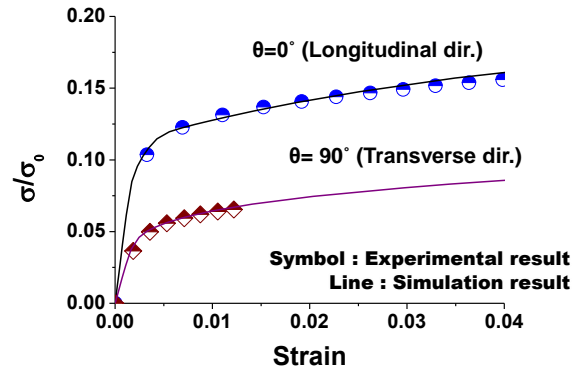


Fig. 8 Stress-strain relation of the sheet in the longitudinal direction and the transverse direction

실험 결과 5.69GPa, 유한요소 해석 결과 5.83GPa 로 2.5%의 차이를 보이며, 요소 재구성과 유한요소 해석을 통해 소재의 거동을 예측할 수 있음을 확인하였다.

변형이 적은 경우, 일반 판재 형상의 시편을 사용하여도 정확한 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 변형량이 커지는 경우, 부착한 신장계에서 얻은 데이터의 오차가 커지고, 개방형 사다리꼴 형상의 파단면으로 변형이 집중되어 정확한 해석 결과를 얻을 수 없었다.

x 방향에 대한 소재의 회전 각도(θ)에 따른 인장 실험 결과 탄성 계수 (E_{xx}')을 Table 3에 정리하였다. 그리고 식 (3)과 (4)의 결과와 실험 결과를 Fig. 9과 같이 하나의 그래프로 표현하였다. Fig 9에서 도형(symbol)은 실험 결과, 그리고 선(line)은 해석 결과로부터 계산한 결과이다. $\theta=30^\circ$ 의 경우, 실험 결과와 계산 결과에서 11.5%의 오차를 보이는데, 이는 모서리 부분에서 연결되지 않은 단위 형상의 영향으로 실험에서 낮게 측정된 것으로 예측된다.

그러나 Fig. 9에서 확인할 수 있듯이 각도에 따른 변화 경향이 동일한 경향을 보인다. 이를 통해, 개방형 사다리꼴이 성형된 판재는 탄성 영역에서 직교 이방성을 만족하는 것을 알 수 있다.

4.3 고찰

요소 재구성을 통해 만들어진 해석 모델을 사용하여 균질화 물성을 계산한 결과, 평면 변형에 대해서는 Table 3과 같이 소재의 탄성 변형을 모사할 수 있음을 확인하였다. 그러나 굽힘 거동의 경우, 균질화 해석 모델의 적용이 어렵다. 개방형 사다리꼴은

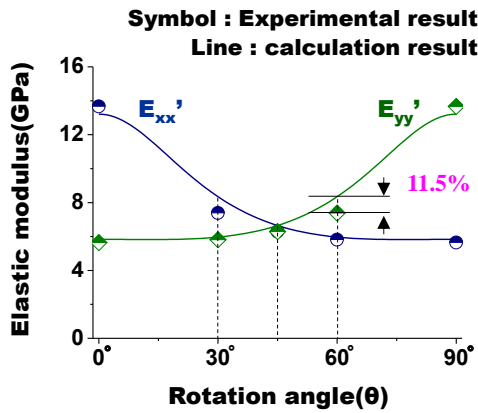


Fig. 9 Elastic modulus with respect to the aligned angle of the sheet with sheared protrusion

Table 3 Experimental results and calculation results of E_{xx}' with respect to the aligned angle (θ)

(GPa)	θ=0°	θ=30°	θ=45°	θ=60°	θ=90°
Experimental results	13.67	7.39	6.29	5.81	5.69
Calculation results	13.21	8.35	6.65	5.97	5.83

굽힘 변형이 개방형 사다리꼴이 성형되지 않은 부분에서 발생하지만[10], 균질화 해석에서는 중심부를 축으로 인장과 압축이 발생하기 때문에, 굽힘 강성이 실제 거동에 비해 높게 예측된다. 따라서 굽힘을 정확히 모사할 수 있는 새로운 해석 모델이 필요하다.

또한 본 연구에서는 소재의 거동을 탄성 영역으로 제한하였다. 그러나 금속 샌드위치 판재의 내부 구조로 적용에 있어서, 소재의 소성 변형에 대한 분석 역시 중요하다. 각 방향 별 인장의 경우, Fig. 8에서와 같이 단순 경화 곡선을 보인다. 이로부터, 항복 곡면(Yield surface)를 그릴 수 있고, 각 변형을 또는 변형 에너지에 따른 항복 곡면의 변화를 모사할 수 있는 경화식을 통해 소재의 소성 거동을 모사할 수 있을 것이다[1, 16].

5. 결론

본 연구에서는 개방형 사다리꼴이 성형된 판재의 등가 물성을 계산하고, 유효성을 검증하였다. 등가 물성 해석은 요소 재구성을 통해 만들어진 해석 모

델을 사용하였다. 그리고 소재의 배치 각도에 따른 인장 실험을 통해 계산된 등가 물성의 유효성을 검증하였다.

본 연구에서 적용한 육면체 요소 재구성을 통한 균질화 특성 분석 방법은 연구에 적용된 개방형 사다리꼴뿐 만 아니라 복잡한 형상으로 되어 있는 다른 반복 구조 특성 분석 및 균질화에도 적용이 가능하다. 또한 연료전지 집전판을 적층하는 과정 및 작동 과정에서 발생할 수 있는 변형 상태, 응력 분포 해석에 적용할 수 있다. 그리고 금속 샌드위치 판재의 내부 구조로 적용하기 위한 기본 연구로 사용될 수 있다.

(1) 육면체 요소 재구성(Hexahedral mesh coarsening)을 통해 가로, 세로 각각 4 개의 개방형 사다리꼴 형상이 성형된 판재의 성형 이력을 고려한 해석 모델(요소 수 94,144 개)을 구성할 수 있었다.

(2) 개방형 사다리꼴이 성형된 방향 (Longitudinal direction)의 탄성 계수(E_{xx})와 패턴의 수직 방향 (Transverse direction) 탄성 계수(E_{yy})의 실험 결과 대비 오차는 각각 3.4%, 2.5%로 제안된 해석 모델을 사용한 균질화 해석이 정확하고 효율적으로 소재의 특성을 예측할 수 있음을 확인하였다.

(3) 개방형 사다리꼴이 성형된 판재의 각도에 따른 인장 실험(θ=0°, 30°, 45°, 60° 90°)에서, 실험 결과와 균질화 물성을 통해 계산한 결과의 차가 30°에서 최대 11.5%로 큰 차이를 보이지 않고, 전체 경향을 예측할 수 있음을 확인하였다. 따라서 등가 물성을 통한 해석 모델이 유효함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2008 년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(2008-N-FC12-J-04-2100).

REFERENCES

[1] C. C. Besse, D. Mohr, 2012, Plasticity of Formable All-metal Sandwich Sheets: Virtual Experiments and Constitutive Modeling, Int. J. Solids Struct., Vol. 49, No. 19-20, pp. 2863~2880.
 [2] C. Yuh, J. Colpetzer, K. Dickson, M. Farooque, G. Xu, 2006, Carbonate Fuel Cell Materials, J. Mater. Eng.

- Perform., Vol. 15, No. 4, pp. 457~462.
- [3] J. D. Eshelby, 1957, The Determination of the Elastic Field of An Ellipsoidal Inclusion and Related Problems, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 241, No. 1226, pp. 376~396.
- [4] J. Guedes, N. Kikuchi, 1990, Preprocessing and Postprocessing for Materials Based on the Homogenization Method with Adaptive Finite Element Methods, Comput. Meth. Appl. Mech. Eng., Vol. 83, No. 2, pp. 143~198.
- [5] V. S. Deshpande, N. A. Fleck, 2000, Isotropic Constitutive Models for Metallic Foams, J. Mech. Phys. Solids, Vol. 48, No. 6, pp. 1253~1283.
- [6] V. S. Deshpande, N. A. Fleck, M. F. Ashby, 2001, Effective Properties of the Octet-truss Lattice Material, J. Mech. Phys. Solids, Vol. 49, No. 8, pp. 1747~1769.
- [7] Z. Xue, J.W. Hutchinson, 2004, Constitutive Model for Quasi-static Deformation of Metallic Sandwich Cores, Int. J. Numer. Methods Eng., Vol. 61, No. 13, pp. 2205~2238.
- [8] T. Dutton, S. Iregbu, R. Sturt, A. Kellicut, B. Cowell, K. K., 1999, The Effect of Forming on the Crashworthiness of Vehicles with Hydroformed Frame Siderails, SAE Technical Paper 1999-01-3208
- [9] H. Huh, K. P. Kim, S. H. Kim, J. H. Song, H. S. Kim, S. K. Hong, 2003, Crashworthiness Assessment of Front Side Members in an Auto-body Considering the Fabrication Histories, Int. J. Mech. Sci., Vol. 45, No. 10, pp. 1645~1660.
- [10] C. W. Lee, D. Y. Yang, D. W. Kang, I. G. Chang, T. W. Lee, 2012, Compressive and Bending Behaviors of the Shielded Slot Plate Considering Forming Effect for Fuel Cell Application, Trans. Mater. Process., Vol. 21, No. 6, pp. 341~347.
- [11] Y. K. Lee, D. Y. Yang, 1999, Development of a Grid-Based Mesh Generation Technique and its Application to Remeshing During the Finite Element Simulation of a Metal Forming Process, Eng. Comput., Vol. 16, No. 3, pp. 316~339.
- [12] D. Y. Yang, C. W. Lee, D. W. Kang, I. G. Chang, T. W. Lee, 2013, Proc. 11th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes, AIP Publishing LLC., Shenyang, China, pp. 446~451.
- [13] C. W. Lee, D. Y. Yang, D. W. Kang, I. G. Chang, T. W. Lee, 2011, Anisotropic Behavior and Homogenization of the Shielded Slot Plate for the Molten Carbonate Fuel Cell, Steel Research International, Special edition, pp. 1102~1107.
- [14] Q. Liu, Y. Lin, Z. Zong, G. Sun, Q. Li, 2013, Lightweight Design of Carbon Twill Weave Fabric Composite Body Structure for Electric Vehicle, Compos. Struct., Vol. 97, pp. 231~238.
- [15] D. G. Lee, N. P. Suh, 2006, Axiomatic Design and Fabrication of Composite Structures, Oxford University Press, New York, pp. 64~109.
- [16] Z. Xue, A. Vaziri, J. W. Hutchinson, 2005, Non-uniform Hardening Constitutive Model for Compressible Orthotropic Materials with Application to Sandwich Plate Cores, Comput. Modeling in Eng. & Sci., Vol. 10, No. 1, pp. 79~96.