



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

PEM 연료전지용 금속 분리판의 다단 성형 공정 설계

**Design of multi-stage forming process of metal bipolar
plate for PEM fuel cell**

울산대학교 일반대학원

기계공학과 기계자동차공학전공

이 대 호

PEM 연료전지용 금속 분리판의 다단 성형 공정 설계

지도교수 김 동 규

이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함

2022 년 2 월

울산대학교 일반대학원
기계공학과 기계자동차공학전공
이 대 호

이 대 호의 공학석사학위 논문을 인준함

심사위원장

홍성태

(인) 

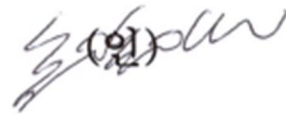
심사위원

김동규

(인) 

심사위원

장경식

(인) 

울산대학교 일반대학원

2022 년 2 월

국 문 요 약

PEM 연료전지용 금속 분리판의 다단 성형 공정 설계

Design of multi-stage forming process of metal bipolar plate for PEM fuel cell

울산대학교 대학원

기계자동차공학과

이대호

분리판은 연료전지의 메인 부품 중 하나이다. U 자 모양의 유로 채널을 가지고 있으며 이 채널을 통해서 수소와 산소를 공급한다. 최근에는 재료로 금속판이 사용되고 있으며 경량화 등의 이유로 두께가 매우 얇은 극박판으로 제작되고 있다. 이 때문에 유로 채널 성형과정에서 국부적인 두께 감육에 의한 파단이나 스프링 백 등 많은 문제가 발생하고 있다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 새로운 분리판 다단성형공정을 제안하고자 한다. 다단성형공정은 총 2 단계의 스탬핑 공정으로 구성되며 첫 번째 성형 단계에 새로운 형상의 다이 및 펀치를 적용하였다. 제안된 공정의 효과는 분리판 단면에 대해 2D 유한요소해석을 실시해 검증하였다. 새로운 금형의 형상 및 펀치 변위 값에 대한 최적화를 위해 인공 신경망(Artificial Neural Network)과 유전 알고리즘(Genetic Algorithm)을 사용하였다. 목적함수로는 두께 최솟값 및 두께 편차가 설정되었다. 최적화 결과 기존 공정 대비 유효 변형률과 유효 응력은 각각 약 8%, 13% 감소하였고 두께 최솟값 및 두께에 대한 표준편차는 각각 약 4.4%, 57.4%

감소하였다. 거시적인 규모의 스프링 백으로 인한 판재의 비틀림 및 유로 채널 끝 단 부분의 두께 분포 표준편차 등은 3 차원 유한요소해석을 통해 분석되었다. 판재의 비틀림은 2.16° 에서 1.77° 로 18%가량 감소하였고 채널 코너 부위에서의 두께 분포 표준편차는 5%가량 감소하였다. 각 해석 결과를 바탕으로 제안된 연료전지 분리판의 다단 성형 공정이 국부적 두께 감육으로 인한 판재의 파단을 방지하고 비틀림 문제를 저감시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

Contents

국 문 요 약.....	i
Contents	iii
List of Figure.....	iv
List of Table.....	vi
제 1 장 서론.....	1
1.1 연구 배경.....	1
1.2 문헌 조사.....	5
1.3 연구 목적.....	6
2. 소재의 기계적 물성 평가.....	6
2.1 소재 특징.....	6
2.2 소재 미세구조 분석 결과.....	7
2.3 소재 인장시험	9
3. 유한요소해석모델	12
3.1 유한요소해석조건	12
3.2 예비 성형 공정안 제시.....	14
3.3 ANN 과 GA 를 이용한 금형의 형상 최적화.....	16
4. 마이크로채널(2D) 유한요소해석 결과	21
5. 매크로스케일(3D) 유한요소해석 조건 및 결과.....	24
6. 결론	27
7. 향후 과제.....	27
8. 참고문헌	28

List of Figure

Figure 1. Fuel cell market size, by application (2018-2023)	2
Figure 2. Structure and principle of hydrogen fuel cell	3
Figure 3. Global market share by fuel cell type (2019)	4
Figure 4. (a) ND IPF map and (b) grain size distribution of the material.....	7
Figure 5. Orientation distribution function (ODF) for the material.....	8
Figure 6. Stress-strain curve	9
Figure 7. (a)Shape and (b)direction of specimen	10
Figure 8. Tensile test result (a) r-value-true strain curves, (b) true stress-true strain curves for three directions, (c) true stress-true strain curves for rolling direction	11
Figure 9. (a) Micro channel and (b) forming process modeling for 2D finite element analysis	13
Figure 10. Schematic of the bipolar plates (a) before and (b) after forming.....	14
Figure 11. Setting parameters of conventional preform dies and punches	14
Figure 12. Schematic of the microchannel deformation aspect of the (a) conventional method and the (b) proposed method	15
Figure 13. Schematic of the proposed designs of pre-forming process	15
Figure 14. Schematic of artificial neural network	16
Figure 15. Genetic algorithm	17
Figure 16. Flow chart of ANN-GA.....	18
Figure 17. ANN model prediction with coefficient of determinations for (a) training, (b) validation, (c) all, and (d) predicted error of minimum thickness	19
Figure 18. ANN model prediction with coefficient of determinations for (a) training, (b) validation, (c) all, and (d) predicted error of thickness deviation.....	20

Figure 19. (a) von Mises stress and (b) effective plastic strain distributions, and (c) histogram compared between conventional and proposed design by FEA without clamping	21
Figure 20. FEA condition of the BPP channel with clamping	21
Figure 21. (a) von Mises stress and (b) effective plastic strain distributions, and (c) histogram compared between conventional and proposed design by FEA with clamping.....	22
Figure 22. Thickness distributions of the BBP channel compared between conventional and proposed design by FEA (a) without and (b) with clamping	23
Figure 23. Histogram of minimum thickness and standard deviation of thickness of the BBP channel compared between conventional and proposed design by FEA (a) without and (b) with clamping	23
Figure 24. Three-dimensional FEA condition of multi-stage forming process of the BPP	24
Figure 25. FE mesh of punch, die and blank used in the multi-stage forming process of the BPP.....	25
Figure 26. Three-dimensional FEA results of (a) thickness distribution along TD, (b) local thinning at each channel and (c) histogram of minimum thickness and standard deviation compared between conventional and proposed design.....	25
Figure 27. Three-dimensional FEA results of (a) thickness distribution of full channel BPP, and (b) histogram of minimum thickness and (c) standard deviation at 12 corners of full channel BPP compared between conventional and proposed design.....	26
Figure 28. The twist angle and curvature obtained along (a) line 1 and line 2 compared between (a) conventional and (b) proposed design and (d-e) their histogram, respectively	27

List of Table

Table 1. Chemical composition ratio of material.....	6
Table 2. Parameter and level settings.....	15
Table 3. Optimization result value for process parameter.....	20

제 1 장 서론

1.1 연구 배경

2018 년 10 월 인천에서 개최된 기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC) 총회에서 특별 보고서인 ‘Global Warming of 1.5 ’ 이 최종 승인되었다. 이 보고서는 2015 년 파리 협정에서 유엔기후변화협약(UNFCCC)이 요청한 것으로 온실가스 배출로 인한 지구의 평균 온도 상승 폭을 산업혁명 이전 대비 1.5 이하로 제한하기 위한 내용이 담겨있다. [1] 이 때문에 세계 각국에선 화석연료를 대체하기 위한 에너지 기술 개발에 혈안이 되어있다.

그 중 수소 연료전지 기술은 최근 급부상하고 있는 대표적인 대체 에너지 기술 중 하나이다. 미국 에너지부(DOE)에서는 수소연료전지 및 터빈을 포함한 수소 생산 기술을 연구개발 및 검증하기 위해 2020년 11월 수소 프로그램 계획을 발표했다. 본 프로그램을 통해 미국은 각 기관 및 시장의 장벽을 해결함으로써 여러 응용 분야에 수소 에너지가 적용될 수 있도록 할 계획이다. 유럽에서도 최근 기가 와트 규모의 투자 계획이 계속해서 발표되면서 수소에너지의 중요성을 실감해 2020년 7월 유럽의 기후 중립을 위한 수소 전략을 발표했다. 유럽은 수소에너지가 2050년 유럽의 에너지믹스 중 13~14%의 비율을 차지할 것으로 바라보고 있다. [2]

연료전지는 형태에 따라 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 수송형(Transport) 연료전지는 주로 차량에 적용되는 연료전지를 의미하며 Figure 1 과 같이 연료전지 시장에서 가장 큰 비율을 차지하고 있다. 고정형(Stationary) 연료전지는 발전용으로 사용되는 연료전지를 의미한다. 가정용 및 건물용 발전기로 국내의 대표적인 제조사는 듀산퓨얼셀이 있다. 고정형 연료전지로는 주로 SOFC 가 사용되고 있다. 휴대형(Portable) 연료전지는 반도체나 소형 배터리와 같이 60V 미만의 출력을 가진 연료전지이다. 메탄올이 연료로 공급하는 DMFC 가 주로 사용된다.

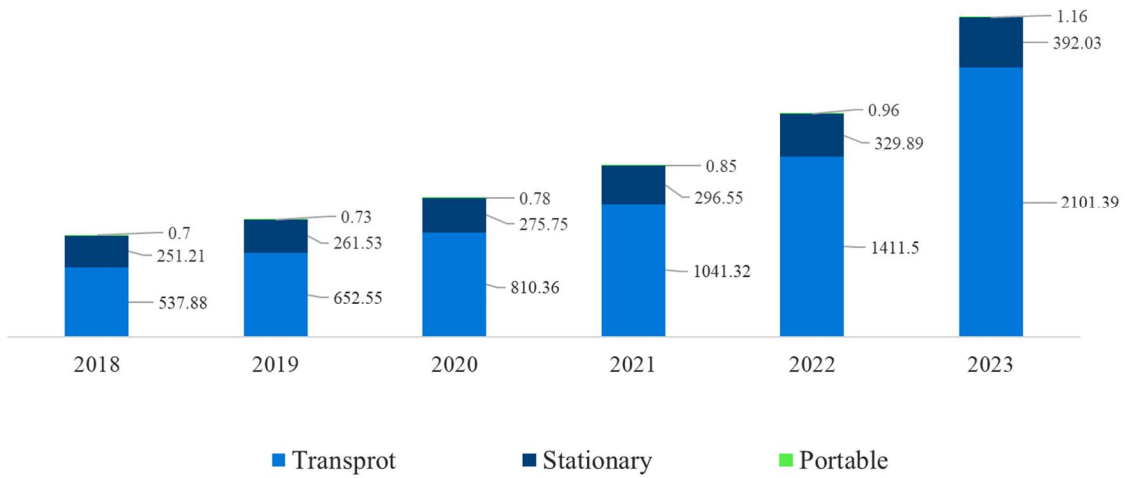


Figure 1. Fuel cell market size, by application (2018-2023)

수소연료전지는 수소와 산소가 만나 물이 되는 일련의 화학 반응을 통해서 전자를 발생시키고 이 전자를 이용해 외부에 일을 해주는 장치이다. 주요 부품 스택으로 스택은 Figure 1 과 같이 분리판, 가스확산층(GDL), 촉매층(CL), 전해질막으로 이루어져 있다. 해당 부품들이 반복해서 계속 쌓이면 스택이 되는 것이다. 전기가 생산되는 원리에 대해서 간단하게 설명하자면 분리판을 따라 산화 전극(anode)에 보급된 수소가 GDL 을 통해 촉매층으로 이동한 뒤 이온화하면서 전자와 수소이온(양성자)로 나뉘게 된다. 이 때 전자는 GDL 과 분리판을 따라 외부 도선으로 이동해 외부에서 전기적인 일을 하게 된다. 수소이온은 촉매층에서 전해질막을 통과해 반대편 촉매층으로 이동하게 되고 여기서 환원 전극(cathode)을 통해 공급된 산소와 외부에서 일을 하고 온 전자를 만나 물이 되는 것이다. 발생한 물은 GDL 및 분리판을 통해 배출된다. 이처럼 수소 연료전지는 전기에너지를 생산하는 과정에서 온실가스를 발생시키지 않고 화력 및 태양광 발전보다 에너지 효율이 높기 때문에 차세대 에너지원으로써 각광을 받고 있다.

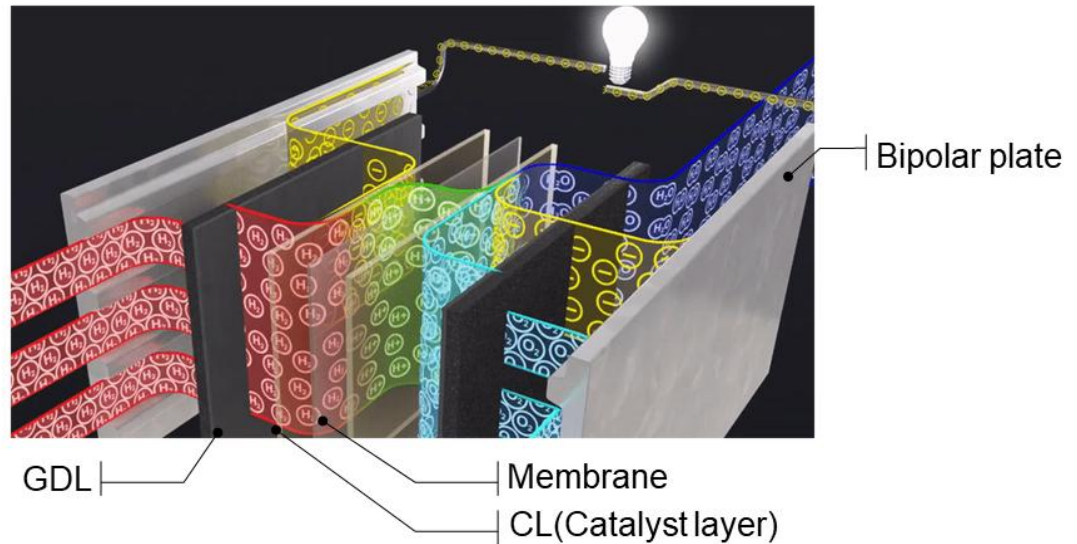


Figure 2. Structure and principle of hydrogen fuel cell

(Refer: <https://www.youtube.com/watch?v=K593QzqJUQk>)

연료전지는 전해질의 종류 또는 공급 연료에 따라서도 그 종류를 나눌 수 있다. SOFC 는 세라믹을 전해질 막으로 사용하며 환원전극에서 발생한 산소 이온이 전해질을 통과해 산화전극으로 이동함으로써 연료로 공급된 수소와 반응해 물과 전기를 생산한다. 연료전지 중에서 에너지 효율이 85%로 가장 높지만 작동 온도가 700~1000 로 매우 높다는 단점이 있다. 주로 가정 및 대형발전소의 발전용으로 쓰인다. PAFC 는 인산(H_3PO_4)을 전해질로 사용하며 촉매로 백금을 이용하며 작동 온도는 약 200 이다. 작동 온도가 물의 끓는 점보다 높기 때문에 생성되는 물을 증기로 바꾸는 등 반응열을 이용하면 효율을 더욱 높일 수 있다는 장점이 있으나 백금을 촉매로 사용하기 때문에 제작 단가가 비싸다는 단점이 있다. PEMFC 는 고분자 막을 전해질로 사용한 것으로 작동 온도는 60~80 이다. 저온 작동성이 우수하고 구조가 간단하며 안전성이 높다는 장점이 있어 Figure2 와 같이 가장 널리 사용되고 있다. 주로 차량용 및 건물 발전용으로 쓰인다. DMFC 는 PEMFC 와 마찬가지로 고분자막을 전해질로 사용하지만 수소를 연료로 공급하는 것이 아닌 산화 전극에 메탄올을 공급함으로써 물과의 반응을 통해 수소이온

및 전기를 생성한다는 특징을 가지고 있다. 효율은 약 40%로 타 연료전지에 비해 비교적 낮은 편이지만 메탄올을 연료로 사용하기 때문에 소형화가 가능하다는 장점이 있다. 주로 소형 휴대용 전원용으로 사용된다. [3-4]

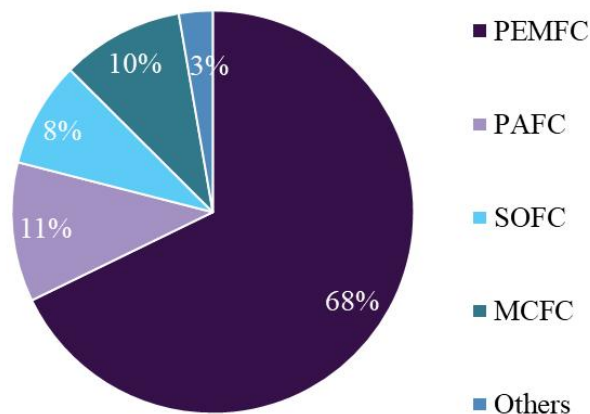


Figure 3. Global market share by fuel cell type (2019)

연료전지의 메인 부품 중 하나인 분리판(bipolar plate)은 최근 금속 재료가 사용되면서 연료전지 무게의 60~80%를 차지하고 있다. [5] 이는 PEMFC 와 같이 차량용으로 연료전지로 쓰이는 경우 연비 손실 문제로 직결된다. 이 때문에 경량화를 위해서 0.2 mm 이하의 극박판이 분리판으로 사용되고 있다. 하지만 이렇게 판재가 지나치게 얇은 경우 분리판의 유로 채널 성형 공정에서 주름과 국부적인 두께 감육에 의한 파단, 스프링 백, 비틀림 등이 발생한다. 국부적인 두께 감육에 의한 파단은 물 또는 수소, 산소 누출의 직접적인 원인이 되어 연료전지의 효율을 감소시키고 고장의 원인이 된다. 그 밖의 주름과 스프링 백, 과도한 비틀림은 기밀 유지를 위한 가스켓 체결과 각 부품 조인팅 시 불량률을 증가시키며 스택을 체결함에 있어서 큰 어려움을 겪게 한다.

1.2 문헌 조사

분리판의 성형공정에는 대표적으로 형상 압연, 하이드로포밍, 고무패드성형, 스탬핑 등이 있다. 여기서 형상 압연의 경우 생산속도는 빠르지만 스프링 백이 과도하게 일어난다는 단점이 있다. 하이드로포밍과 고무패드성형의 경우 표면 상태가 우수하다는 장점이 있으나 분리판 채널의 필렛부에서 정확도가 뒤떨어진다는 단점이 있다. 이러한 결과를 토대로 본 연구에서는 스탬핑 공정이 비교적 생산 비용이 저렴하고 생산 속도와 치수 정밀도 측면에서 대량생산에 가장 적합하다고 판단했다. 그러나 분리판의 지나치게 얇은 두께로 인해 스탬핑 공정에서도 주름과 국부적인 두께 감육, 스프링 백, 비틀림 등 여전히 수많은 고질적인 문제가 발생하고 있다. [6]

위와 같은 문제를 해결하기 위해 Qinghui Hu 등의 저자는 스탬핑 공정에서 금형의 형상, 공정 조건 등에 따른 분리판의 성형성 변화에 대한 연구를 진행하였다. 유한요소해석 결과 주름과 두께 감육 등을 바탕으로 성형성을 판단하고 실험값과 비교함으로써 유한요소해석 결과의 유효성을 입증하였다. [7]

Diogo M. Neto, Shugen Xu 등의 저자는 유한요소해석을 통해 다이 및 펀치의 형상에 따른 채널의 두께 감육 분포에 대한 연구를 진행했다. [8-9] 그리고 최근에는 H. J. Bong, Z. Xu 등의 저자는 다단성형기술을 적용한 스탬핑 공정을 연구하였다. 그들은 예비 성형 단계를 도입함으로써 스탬핑 공정을 여러 단계로 나누었고 이를 통해 채널에서 발생하는 과도한 두께 감육을 저감시키고자 하였다. [10-11] H. J. Bong 은 최적의 공정 조건을 찾기 위해 예비 성형 단계의 다이와 펀치의 형상 및 공정 조건 등을 변수로 설정한 뒤 유한요소법을 이용한 최적화를 진행하였다. [10]

위와 같이 분리판의 성형성 향상을 위한 여러 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 다이 및 펀치의 형상에서 고려해야할 변수가 많아질수록 두께 감육 및 두께 분포와의 명확한 상관관계를 설명하는 것은 여전히 매우 어렵기 때문에 최적화된 공정조건을 찾는 것은 매우 어려운 실정이다.

머신 러닝 기법 중 하나인 인공 신경망(Artificial neural networks, ANN)과 GA(Genetic algorithm)은 이러한 비선형적이고 다변수인 문제를 예측하기 위한 새로운 해결책으로 떠오르고 있다. Fei Yin 는 유한요소 해석을 통해 다중목적 및 비선형 문제인 플라스틱

사출 모델 최적화에 대한 연구를 진행했다. 최적화를 위해 Back Propagation(BP) neural network 와 GA 를 이용하였으며 변수로는 금형 온도, 용융 온도, 보압력, 보압 시간, 냉각 시간을 설정한 뒤 다목적 함수인 warpage 와 clamp force 를 토대로 최적화된 공정을 찾고자 하였다. [12]

1.3 연구 목적

본 연구에서는 2 단계의 다단 스탬핑 성형 공정을 이용해 연료전지 분리판을 성형하고자 하였으며 예비 성형 단계에 새로운 형상의 다이 및 펀치를 적용함으로써 분리판의 성형성을 향상시키고자 하였다. 또한 금형 및 공정 조건의 최적화를 위해 총 7 가지의 변수를 설정하였으며 ANN 및 GA 를 이용해 두께 감육 및 두께 편차를 토대로 최적화를 진행하였다. ANN 을 학습시키는 데엔 마이크로 채널에 대한 2D 유한요소 성형해석결과를 사용하였으며 데이터는 총 2187 개를 제공하였다. 또한 최적화된 결과를 바탕으로 매크로 규모의 3D 유한요소해석을 추가적으로 진행함으로써 채널의 코너 부위 두께 감육과 거시적인 규모의 스프링 백에 의한 비틀림 등을 평가하고자 하였다.

2. 소재의 기계적 물성 평가

2.1 소재 특징

분리판의 재료는 POSCO 에서 개발한 0.08 mm 두께의 페라이트 스테인리스 스틸이 사용되었다. Table. 1 과 같이 분리판은 연료전지 내부에서 해당 재료는 25-30%의 Cr 을 포함하고 있어 코팅 없이도 우수한 내식성과 계면 접촉 저항을 가지고 있다. [13]

Table 1. Chemical composition ratio of material

										Unit: wt %
C	Si	Mn	P	Cr	S	Ni	Mo	N	Cu	Other elements
0.02	0.40	0.20	0.04	25.0-32.0	0.03	0.5	-	0.02	2.0	Nb/Ti

2.2 소재 미세구조 분석 결과

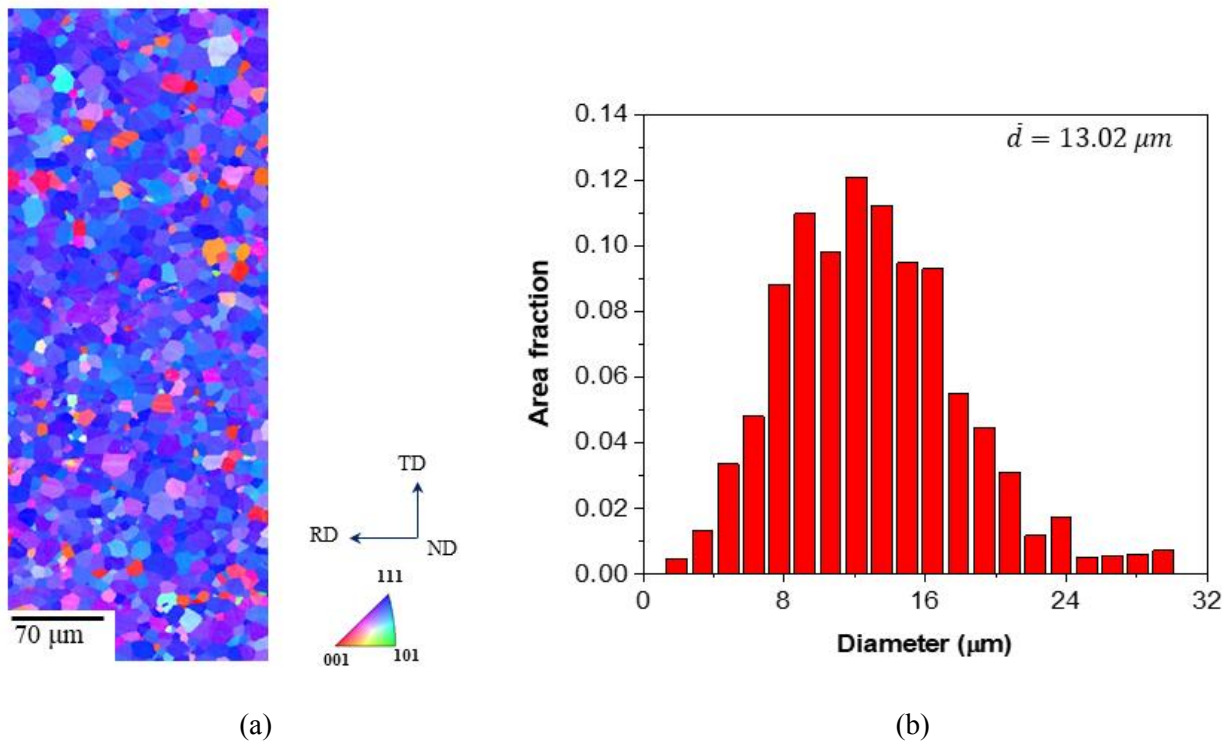


Figure 4. (a) ND IPF map and (b) grain size distribution of the material

본 재료에 대한 압연은 상온에서 냉간 압연으로 진행하기 때문에 전위 밀도가 증가함에 따라 내부 응력 및 강도가 증가하고 연성이 감소하는 가공경화현상이 발생하게 된다. 따라서 성형성을 확보하기 위해선 풀림 처리를 해주어야 한다. Figure 4(a)의 EBSD (Electron BackScatter Diffraction) 분석 결과를 보게 되면 압연 공정으로 인해 결정면이 ND 방향과 평행한 방향으로 {111} 방위를 띄고 있으며 재결정이 일어나는 온도까지 풀림 처리를 함으로써 등방향 결정립이 형성되었음을 알 수 있다. 또한 이 과정에서 결정립 미세화 효과가 발생해 결정립의 평균 크기가 Figure 4(b) 와 같이 13.02 μm 로 매우 작아진 것을 확인할 수 있다.

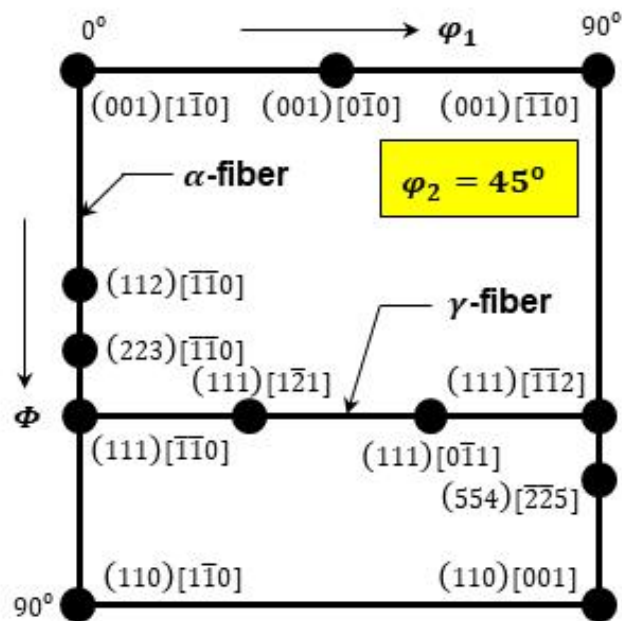
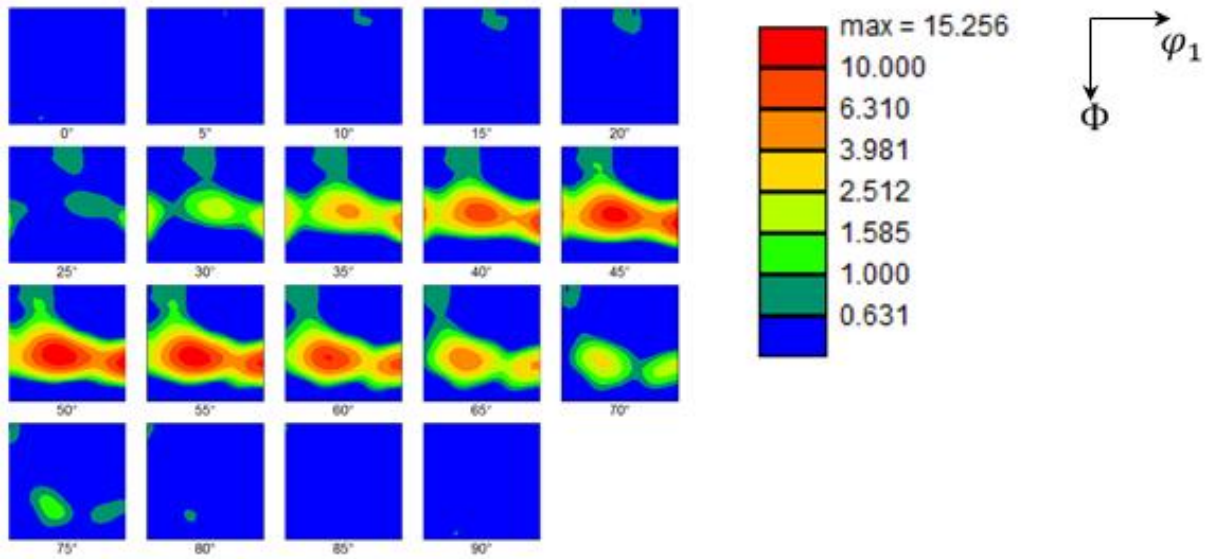


Figure 5. Orientation distribution function (ODF) for the material

Figure 5 와 같이 EBSD 분석 결과로부터 집합조직의 발달 정도를 정량적으로 평가하기 위해 방위 분포 함수인 ODF (Orientation Distribution Function)를 계산하였다. 오일러 각 중에서 대부분의 주요 방위가 파악 가능한 $\varphi_2 = 45^\circ$ 일 때 해당 단면에서 압연공정으로 인해 감마섬유조직이 잘 발달해 있음을 확인할 수 있다.

2.3 소재 인장시험

인장시험은 가장 기초적인 성형성 시험 중 하나로 항복강도, 인장강도, 탄성계수 등 재료에 대해 다양한 기본적인 물성 데이터를 제공한다. 시험은 지그로 시편을 고정한 뒤 시험 목적에 따라 일반적으로 하중, 변형률 속도, 시험 속도 중 한 가지 값을 조정함으로써 시편에 인장력을 가하고 로드셀 및 신율계를 통해 시편에 가해지는 응력과 변형률을 측정한다. 시편의 형상은 환봉이나 평판 형태로 나뉘며 주로 가운데가 얇은 Dumbbell 형상을 하고 있는데 시험 중 대부분의 변형이 발생하는 이 얇은 부분은 게이지부라고 한다. 그 외에 지그를 이용해 시편을 고정하는 부분은 그립부라고 칭한다.

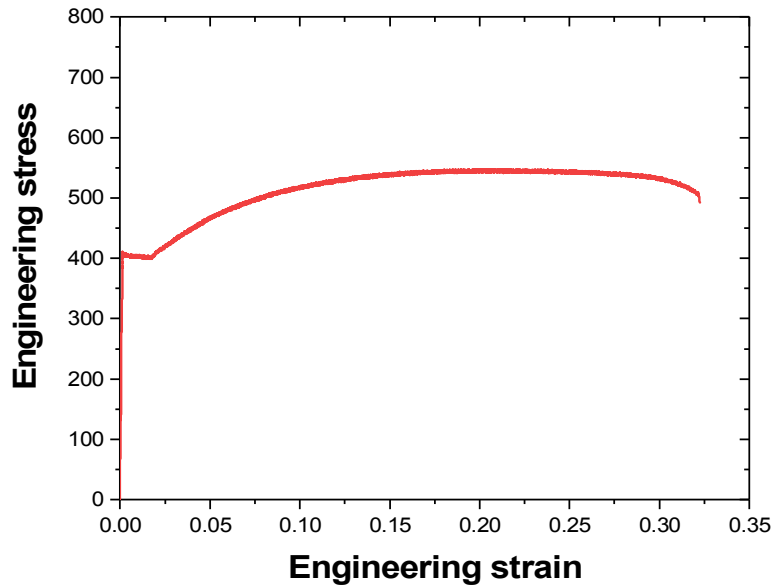


Figure 6. Stress-strain curve

재료의 기본적인 물성 및 변형 양상은 Figure 6와 같이 응력-변형률 선도를 통해 확인할 수 있다. 인장시험 초기 가파른 직선 경사 구간은 탄성 변형을 하며 직선의 기울기 값을 통해 탄성 계수를 계산할 수 있다. 이 직선 구간을 0.2% 오프셋 시켜 그래프와 만나는 점을 통해 항복응력 값을 알 수 있고 항복점을 지나면 일정한 응력 하에 45도 각도로 소성변형이 발생하는 뒤틀림의 띠가 형성되기 시작한다. 소성변형량이 일정량에 도달한 후엔 가공 경화에 의해 응력이 점차 상승하게 된다. 응력이 최고점에 도달 시 이 값을 인장강도라고 하며 이후엔 변형이 국소부위에 집중적으로 발생하면서 단면적이 급격히 감소하는 네킹 현상이 나타나게 된다. 단면적의 감소로 인해 응력 값은 점차 감소하며 종국엔 파단에 이르게 된다.

압연 등의 공정으로 인해 재료의 결정이 방향성을 갖는 경우 압연 방향(Rolling direction, RD)을 기준으로 각 방향에 따라 물성 값이 다르게 나타나는데 이를 이방성이라고 한다. 소재의 이방성은 인장시험을 여러 방향으로 수행해 소성변형률비(r-value)를 측정함으로써 그 크기를 정량적으로 파악할 수 있으며 소성변형률비는 아래의 Equation. (1) 과 같다.

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\varepsilon_w}{-(\varepsilon_l + \varepsilon_w)} \quad (1)$$

R 은 소성변형률 비, ε_w 는 시편의 폭 방향(Transverse direction, TD) 변형률, ε_t 는 시편의 두께 방향(Normal direction, ND) 변형률을 의미하며 소성 변형이 발생하여도 부피는 일정하므로 $\varepsilon_t = -(\varepsilon_l + \varepsilon_w)$ 로 나타낼 수 있다.

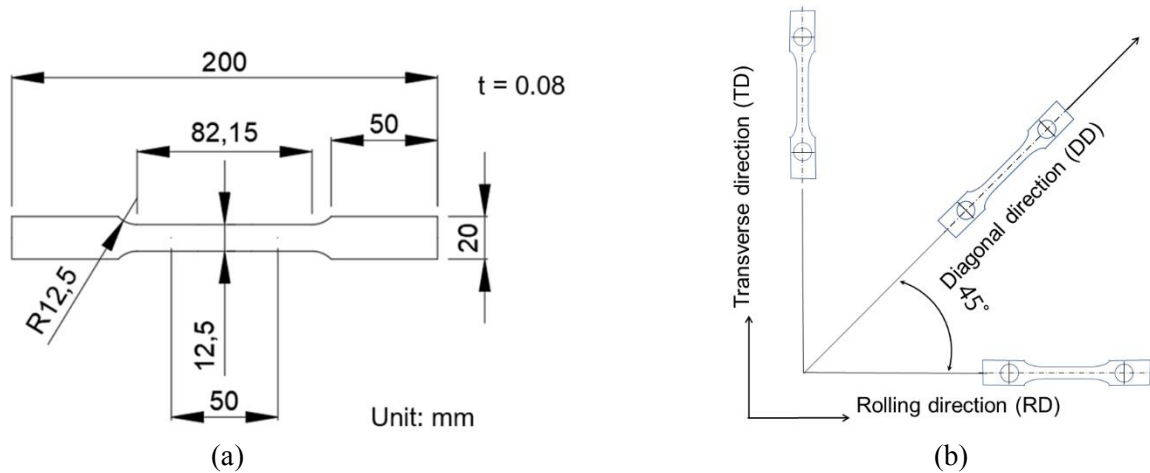


Figure 7. (a)Shape and (b)direction of specimen

본 논문의 인장시험에서는 Figure 7(a)와 같이 ASTM E8 규격의 시편을 사용하였으며 재료가 압연 공정을 통해 제작된 매우 얇은 판재이기 때문에 소재의 이방성을 파악하고자 Figure 7(b)와 같이 세 방향으로 인장시험을 수행하였다. 시험에서 변형속도는 0.001 s^{-1} 로 상온에서 진행되었으며 변형률은 DIC(Digital Image Correlation) 장비인 ARAMIS v6.3.1 을 사용해 측정하였다.

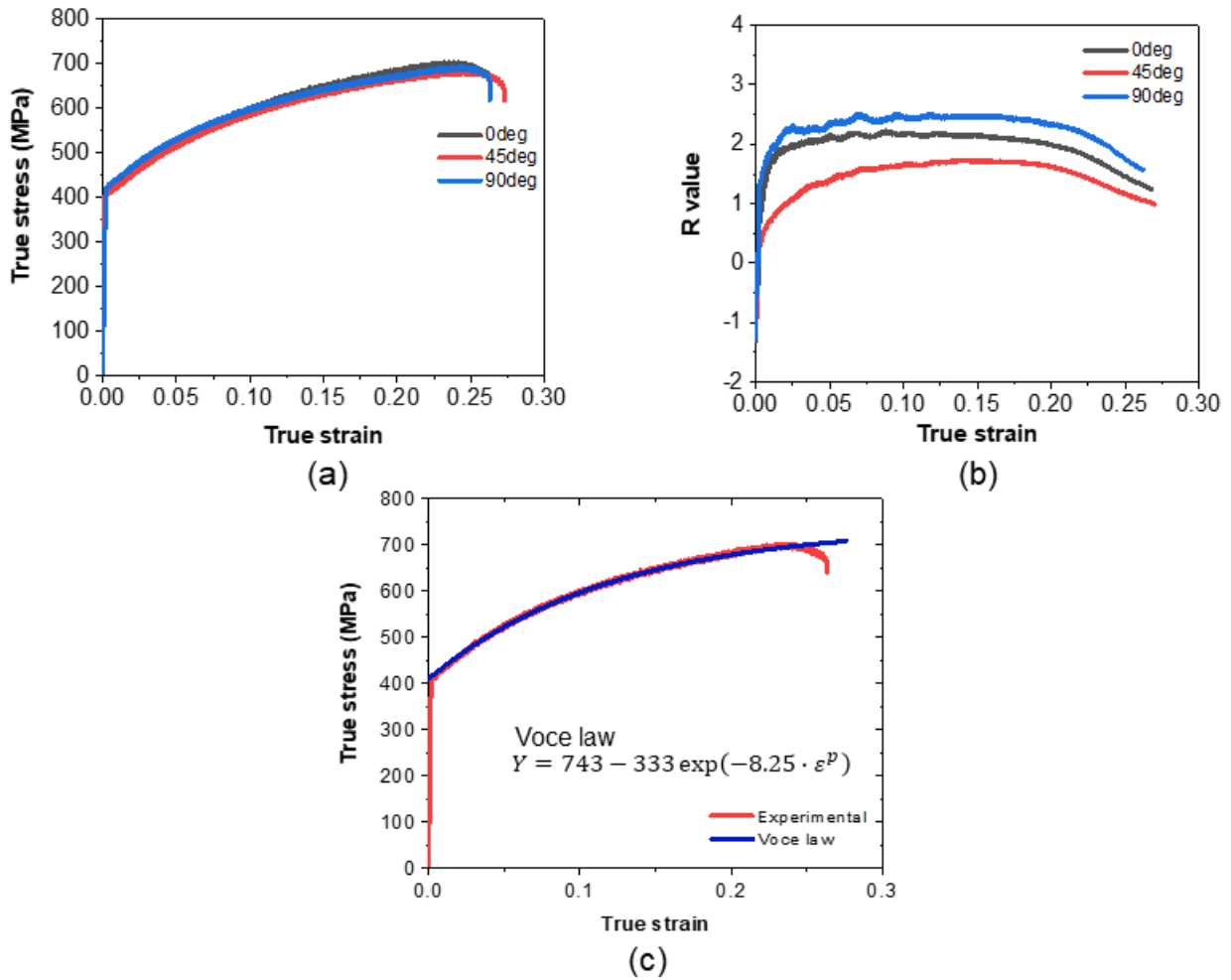


Figure 8. Tensile test result (a) r-value-true strain curves, (b) true stress-true strain curves for three directions, (c) true stress-true strain curves for rolling direction

인장시험은 압연 방향 기준 0° 와 45°, 90° 방향으로 진행하였다. 시험결과 Figure 8(b)의 소성변형률비(r-value)-진변형률 곡선을 보게 되면 방향에 따라 소성변형률비 값이 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있으며 이를 통해 해당 소재의 이방성이 크다는 것을 알 수 있다. 하지만 Figure 8(a)의 진응력-진변형률 곡선에서는 방향별로 연신율 및 인장강도, 항복강도 측면에서 그 값들이 크게 다르게 나타나지 않았다. 하여 Figure 8(c)와 같이 압연 방향의 물성만을 Voce 가공 경화방정식으로 curve fitting 하여 유한요소해석에 사용하였다.

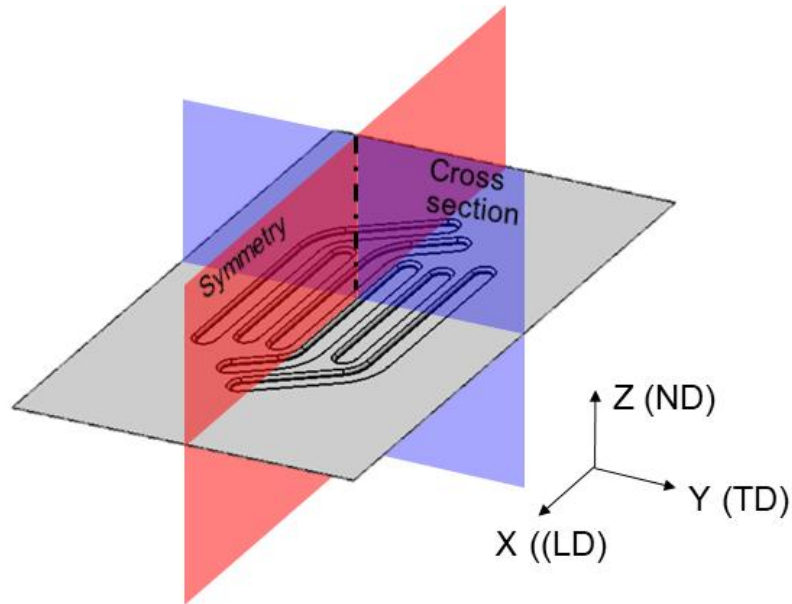
3. 유한요소해석모델

3.1 유한요소해석조건

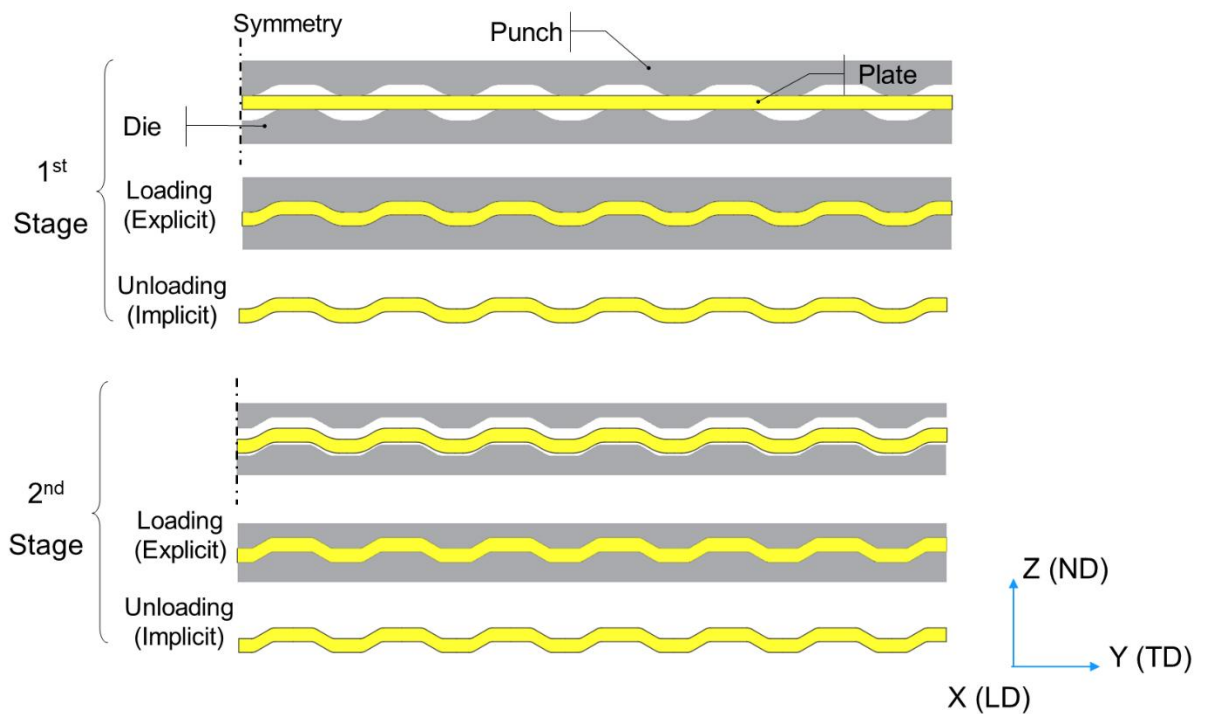
본 연구에서는 새롭게 제안한 연료전지 분리판 성형 공정의 효과를 유한요소해석을 통해 검증하고자 하였다. 해석프로그램은 ABAQUS 가 사용되었다. Figure 9(b)와 같이 2 단 다단 성형 공정이므로 성형해석을 1st Stage 와 2nd Stage 로 나누었고 각 Stage 는 또다시 Loading 과정과 Unloading 과정으로 나누었다. Loading 과정은 다이와 펀치, 분리판으로 구성하였으며 다이와 펀치는 강체로 가정하였다. 분리판의 마이크로 채널 성형 시 채널의 길이 방향(LD)으로는 변형이 거의 발생하지 않기 때문에 평면 변형 조건을 적용하는 것이 가능하다. 따라서 효율적인 해석을 위해 Figure 9(a)와 같이 분리판을 채널 길이 방향에 대해 수직한 파란색 단면으로 잘라 해당 단면에 대해 2 차원 성형해석을 수행하였다. 또한 해당 단면의 형상이 분리판 중심을 기준으로 대칭 형상이기 때문에 절반을 잘라 대칭 조건을 부여하였다. 분리판은 Figure 9(b)와 같이 6.5 개의 채널로 구성하였으며 Loading 과정의 성형해석은 Explicit 으로 진행하였다. 그리고 성형해석 결과는 ABAQUS 의 Predefined-field 기능을 통해 Unloading 과정에서 판재의 초기 상태로 설정되었다. Unloading 과정에서는 다이와 펀치를 모두 제거하고 Implicit 으로 분리판의 스프링 백 해석을 실시하였다. Unloading 과정에서 Loading 과정의 Explicit 과 다른 방식을 사용해 해석한 이유는 Explicit 으로도 스프링 백 해석이 가능하지만 동적인 영향으로 인해 해석에 약 40 분의 시간이 소요되었고 반면 Implicit 은 수초 내에 해석이 완료되었으며 일반적으로 Implicit 해석이 보다 높은 정확도를 보여주기 때문에 해석 시간을 절감하고 해석 결과의 정확도를 보장하기 위해 Implicit 해석을 사용하였다.

분리판의 요소는 4 개의 절점으로 이루어진 평면 변형률 요소에 계산 시간을 단축하기 위해 Reduced-integration 기능이 적용되는 CPE4R 을 사용하였다. 그리고 Reduced-integration 으로 인해 Hourglass 현상이 발생할 수 있기 때문에 이를 방지하기 위해 Hourglass stiffness 를 300 으로 설정하였다. 요소의 크기는 $0.01 \times 0.01143(TD \times ND)$ mm²으로 판재의 두께 방향으로 요소 수를 7 개로 설정해 총 11242 개의 요소를 생성하였다. 각 Stage 에서 Die 와 Plate, Punch 와 Plate 간의 접촉조건은 Surface to Surface 로 마찰 계수는 참조된 논문[8-9]을 바탕으로 0.1 로 설정하였다. 탄성계수는 200 GPa, 푸아송 비는 0.3 으로 설정되었다. 이방성을 고려하지 않았기 때문에 항복식은 등방 항복

함수인 von-Mises 식을 사용하였으며 스프링 백은 등방 경화모델 (Isotropic hardening model)을 사용해 해석하였다.



(a)



(b)

Figure 9. (a) Micro channel and (b) forming process modeling for 2D finite element analysis

3.2 예비 성형 공정안 제시

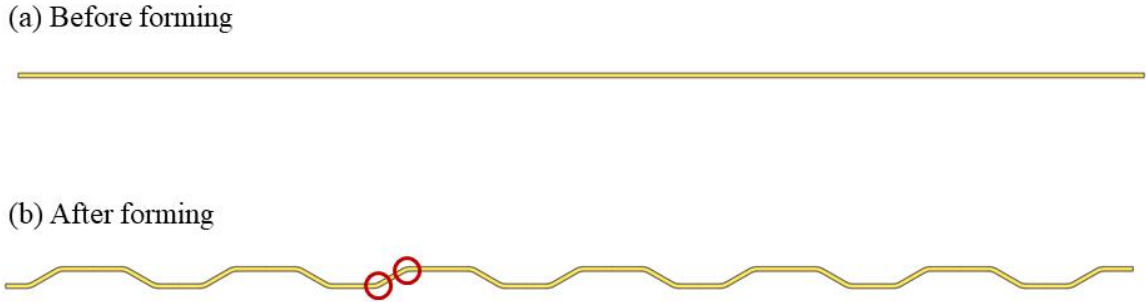


Figure 10. Schematic of the bipolar plates (a) before and (b) after forming

스탬핑 등의 공정을 통해 판재의 유로 채널 성형 시 결과적으로 판재는 Figure 10 와 같이 길이가 신장하게 된다. 그리고 이러한 판재의 신장은 Figure 10(b)의 채널 코너 부위와 같이 변형이 많이 발생하는 지점에서 집중적으로 일어난다. 기존의 연료전지분리판 다단성형공정 연구는 아래와 같은 형태의 금형을 사용해 변형이 과도하게 일어나는 채널의 코너 및 주변부에 선제적으로 변형을 가함으로써 해당 부위의 두께 감육 등을 저감시키고자 하였다. 그리고 최적의 금형 형상을 찾기 위해 Figure 11 와 같이 일반적으로 다이 및 펀치의 너비(w), 필렛부 반경(r), 채널의 높이(h), 다이와 펀치 사이의 간격(c)등의 변수를 설정한 뒤 최적화를 진행하였다.

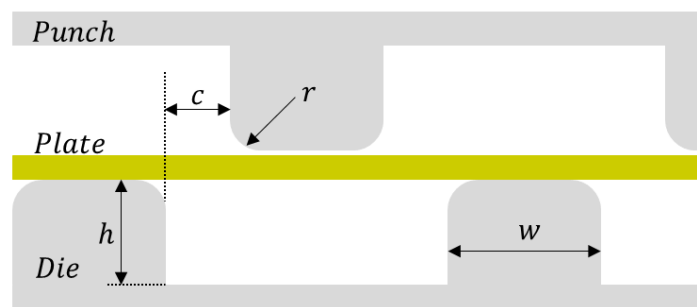


Figure 11. Setting parameters of conventional preform dies and punches

하지만 이러한 방법은 Figure 12(a)와 같이 채널의 평탄한 부위에서 변형이 거의 일어나지 않는다. 즉, 해당 부위에서 신장이 거의 일어나지 않고 있기 때문에 채널의 코너 부위에서 여전히 과도한 신장이 발생하고 있고 이에 따른 두께 감육이 집중되고 있다.

하여 본 연구에서는 Figure 12(b)와 같이 채널의 평탄한 부위에 선제적으로 변형을 가함으로써 해당 부위를 신장시키고 최종 성형단계에서 해당 부위를 복원함과 동시에 코너 부위를 최종적으로 성형하고자 하였다. 결과적으로 변형이 채널 전체에 걸쳐 일어남으로써 관재 전체에 균일한 두께 감육을 유도하고자 하였다.

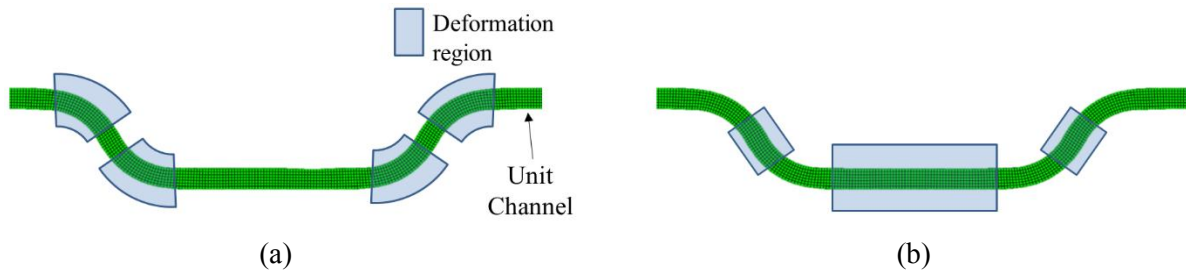


Figure 12. Schematic of the microchannel deformation aspect of the (a) conventional method and the (b) proposed method

이러한 관재의 변형 양상을 이끌어내기 위해 새로운 형상의 예비 성형 다이 및 펀치를 고안했으며 그 형상은 Figure 13 와 같다. 유한요소법 및 ANN-GA 를 이용해 금형의 형상을 최적화 하고자 하였으며 Figure 13 및 Table. 2 와 같이 7 가지의 변수를 지정하였다. 각 변수의 Level 은 3 으로 설정되었으며 실험계획법은 Full facotrial 로 총 2187 개의 경우에 대해서 유한요소해석을 진행하였다.

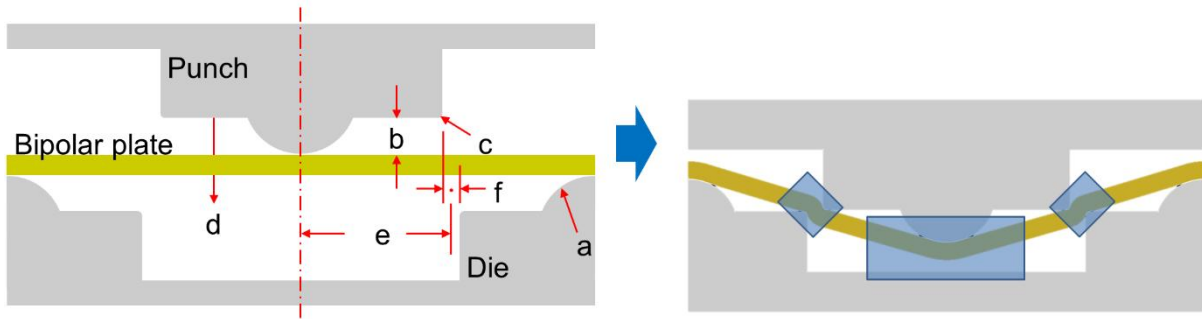


Figure 13. Schematic of the proposed designs of pre-forming process

Table 2. Parameter and level settings

Unit: mm

a	Projection radius	0.5 ± 0.1	d	Punch displacement	0.375 ± 0.025
b	Projection Height	0.11 ± 0.025	e	Gap Center position	0.6 ± 0.025
c	Fillet radius (Die & Punch)	0.11 ± 0.025	f	Gap	0.08 ± 0.01

3.3 ANN 과 GA 를 이용한 금형의 형상 최적화

예비 성형단계에서 금형의 형상과 펀치의 이동 거리는 MATLAB 을 이용해 모델링 된 ANN-GA 를 통해 최적화하였다. ANN 은 인간의 뇌 구조를 이루는 기본적인 단위인 뉴런이 신호를 전달하는 방식에서 착안한 학습 알고리즘이다. Figure 14 은 ANN 의 구조를 설명하기 위한 그림으로 ANN 은 그림과 같이 크게 세 개의 Layer 로 나뉜다. 왼쪽부터 차례대로 변수 값을 받아들이는 층인 입력층(Input layer)과 학습을 통해 입력과 출력 사이 메커니즘을 나타내는 은닉층(Hidden layer), 결과 값을 도출하는 출력층(Output layer)이다. 각 layer 의 모든 원들은 노드라고 불리며 은닉층과 출력층의 노드들은 활성화 함수 f^s 를 가지고 있어 뉴런과 같이 출력 신호를 생성하는 역할을 한다. 노드를 잇는 선들은 시냅스 역할을 해 노드로부터 출력 신호를 받아들이고 해당 값에 가중치 w_i 를 곱함으로써 각 노드 간의 연결 강도를 설정한다. ANN 은 제공되는 입력 데이터 x_i 와 출력 데이터인 목적함수값 obj_i 를 바탕으로 특정 문제에 대한 기계적인 학습을 수행한다. ANN 은 먼저 제공받은 입력값 x_i 를 정규화한 후 각 값에 가중치를 곱하여 은닉층의 각 노드로 해당 값을 전달한다. 은닉층의 각 노드에서는 전달받은 모든 입력값에 시그마를 취해 net_i 를 계산한 뒤 해당 값을 활성화 함수 f^s 에 넣어 출력 신호 out_i 를 생성한다. 각각의 노드에서 나온 out_i 는 출력층에 도달해 obj_i 를 만들 때까지 이러한 일련의 과정을 계속해서 반복한다. 마지막 단계에서는 계산된 obj_i 를 재정규화하고 모델 성능 평가지표인 MSE 와 결정계수 R^2 등을 통해 기존에 제공받은 출력 데이터와의 적합도를 판단한다. 만약 모델이 주어진 정확도 값을 만족하지 못한다면 해당 값을 충족할 때까지 경사 하강법을 통해 가중치와 은닉층의 노드 개수 등을 조절하면서 학습을 계속한다.

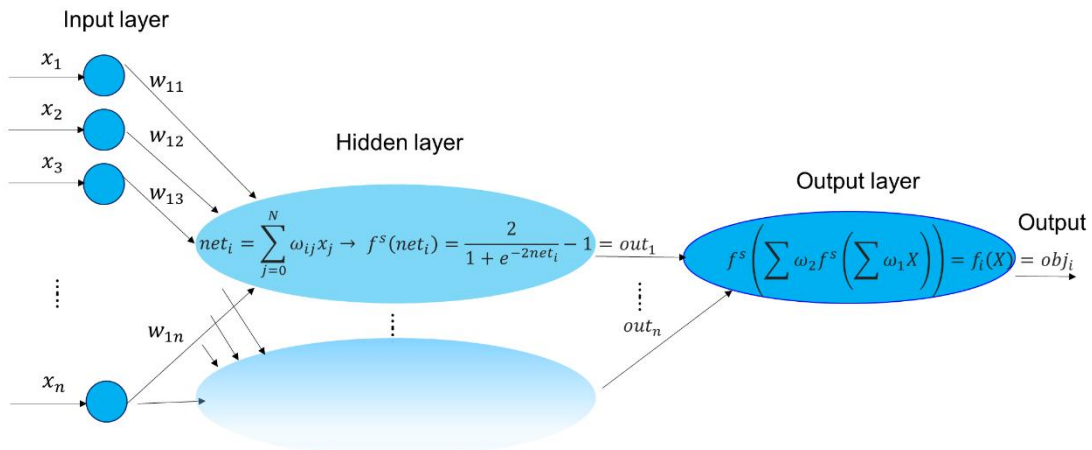


Figure 14. Schematic of artificial neural network

GA 는 다윈의 적자생존에서 영감을 얻은 계산 모델로써 환경에 적응하기 쉬운 우수한 염색체를 가진 개체만이 살아남거나 다소 뒤쳐지는 개체도 교배와 돌연변이의 발생을 통해 진화함으로써 환경에 적응하는 원리를 바탕으로 한 최적화 방법이다. 최적화가 진행되는 과정은 다음과 같다. 먼저, 초기 입력값을 주어진 데이터(변수값)을 바탕으로 랜덤하게 구성해 여러 경우의 수를 만든 뒤 ANN 등을 통해 해당 입력값에 의한 결과를 도출한다. 각 결과 값이 특정 조건을 만족하지 못할 경우 선택(Selection) 또는 Figure 15 와 같이 교배(Crossover), 돌연변이(Mutation)의 방법을 이용해 최적화 조건을 만족할 때까지 새로운 염색체를 가진 세대를 만듦으로써 입력값을 재구성한다. ‘선택’은 기존의 세대에서 최선의 결과값을 만들어내는 우수한 염색체 집단을 새로운 세대의 일부로 선택하는 방법이다. 이 방법은 추후 교배를 통해 보다 나은 개체를 생성해낼 수 있는 가능성을 마련해준다. 교배는 룰렛 휠 선택(Roulette wheel selection)방법을 이용해 경우의 수를 랜덤하게 선택한 뒤 각 염색체의 입력값(유전자)을 랜덤하게 섞거나 각 값의 사이값을 새로운 입력값으로 설정해 다음 세대를 만드는 방법이다. 돌연변이는 아주 적은 확률로 입력값을 강제로 바꾸어 새로운 유전자와 염색체를 만드는 방법으로 새로운 세대의 다양성을 추구하기 위해 사용된다.

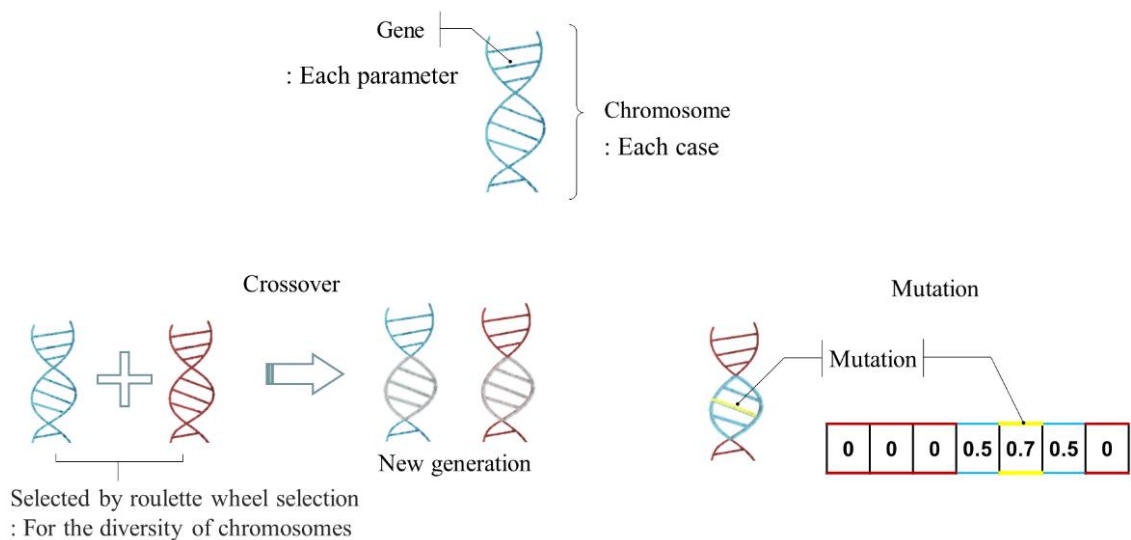


Figure 15. Genetic algorithm

ANN의 입력값으로는 금형의 형상 및 편치의 이동 거리 등 7개의 변수가 설정되었으며 출력값인 목적함수는 판재의 두께 최솟값 및 두께 편차 값으로 설정되었다. ANN을 학습하는 데에는 2,187개의 유한요소해석 데이터 중 약 70%인 1,531개의 데이터를 사용하였으며 나머지 30%인 655개의 데이터는 학습된 ANN 모델의 정확도를 검증하기 위해 사용되었다. ANN에 적용된 활성화 함수는 Tansig 함수로 아래의 Equation. (2)와 같고 ANN-GA 모델의 순서도는 Figure 16과 같다.

$$f^s(x) = \frac{2}{1+e^{-2net_i}} - 1 \quad (2)$$

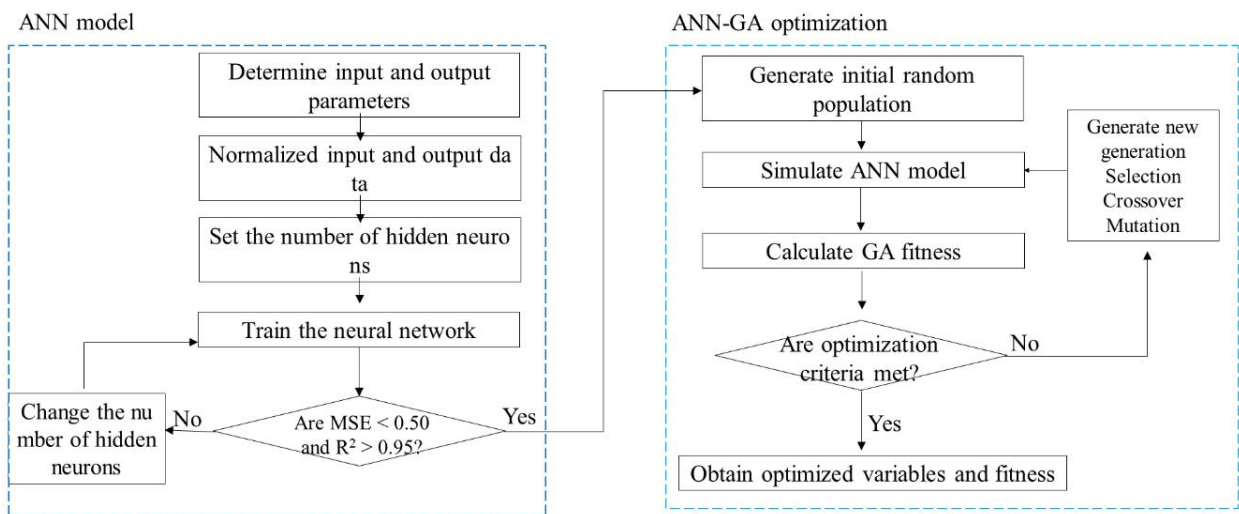


Figure 16. Flow chart of ANN-GA

학습된 ANN 모델은 아래의 Equation. (3)와 같이 결정 계수 값을 통해 평가되었다.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

위 식에서 R^2 은 결정 계수를 의미하며 y_i 는 제공된 데이터값, 즉 유한요소해석 결과값을 말하고, \bar{y} 는 평균값, \hat{y}_i 는 ANN을 통해 예측된 결과값이다. 결정 계수는 그 값이 1에 가까울수록 학습된 모델의 정확도가 높음을 의미한다.

Figure 17 과 Figure 18 은 학습된 ANN 의 각각의 목적 함수에 대한 정확도를 나타낸다.

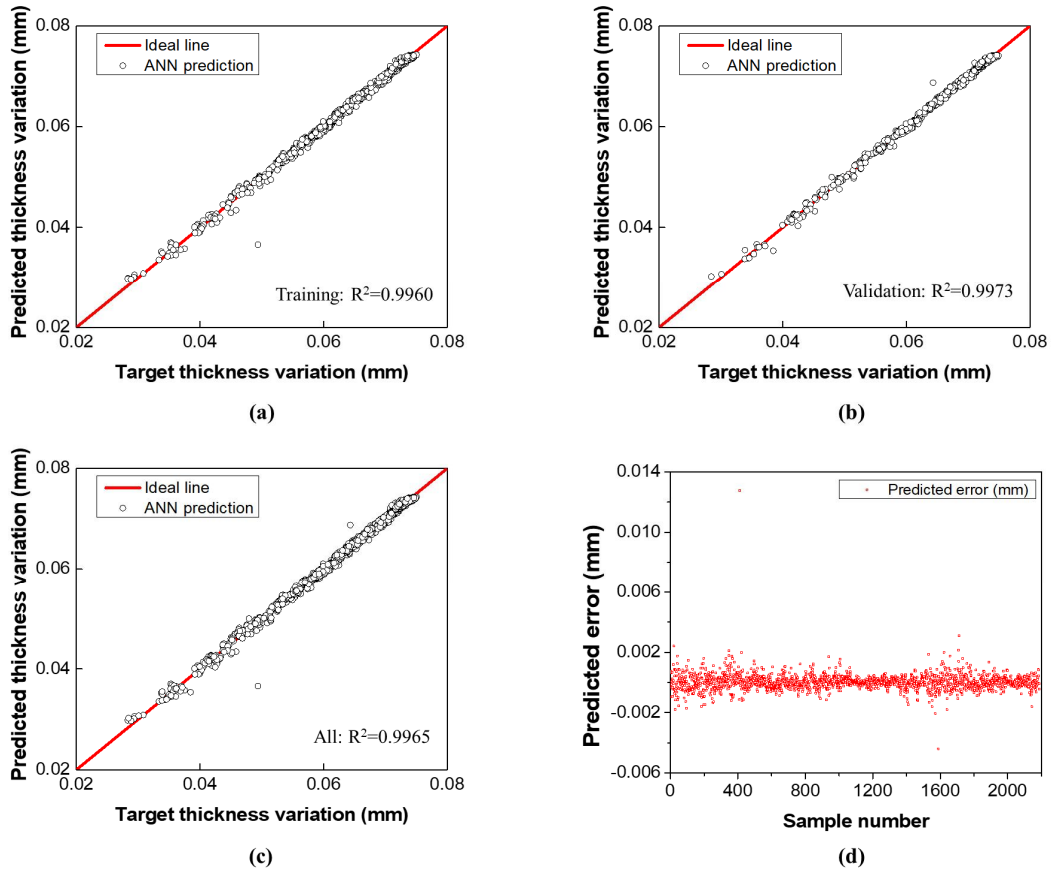


Figure 17. ANN model prediction with coefficient of determinations for (a) training, (b) validation, (c) all, and (d) predicted error of minimum thickness

Figure 17(c)와 Figure 18(c)에서 알 수 있듯이 두께 최솟값과 두께 편차에 대한 ANN 의 예측값이 실제 유한요소해석 결과값과 거의 일치해 데이터가 대부분 $y = x$ 선 상에 있음을 알 수 있다. 결정 계수 또한 각각 0.9965 와 0.9969 로 매우 높은 값을 나타내고 있다. Figure 17(d)와 Figure 18(d)에서도 예측값과 실제값 사이에 오차가 거의 존재하지 않아 오차값이 0 에 수렴하고 있음을 확인할 수 있다.

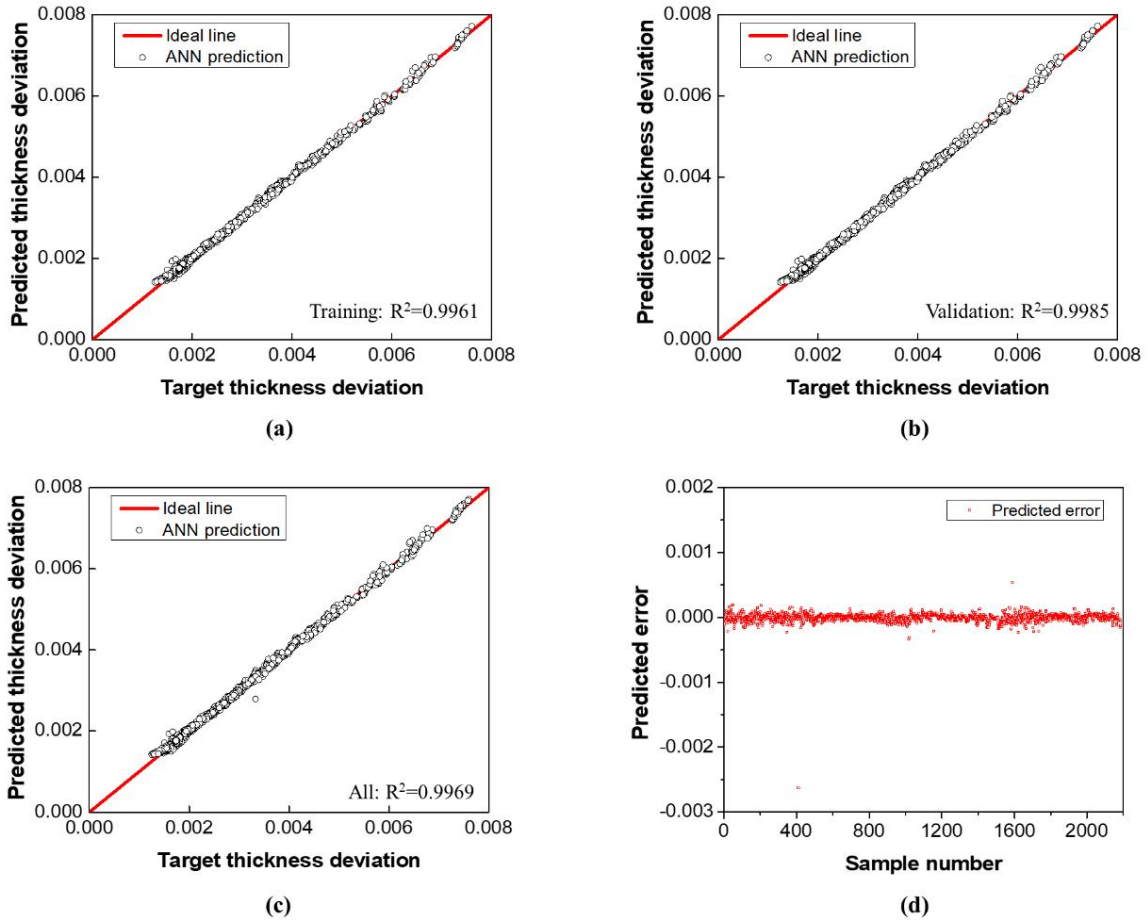


Figure 18. ANN model prediction with coefficient of determinations for (a) training, (b) validation, (c) all, and (d) predicted error of thickness deviation

이렇게 학습된 ANN 모델과 GA 를 이용해 최적의 공정 조건을 도출하였으며 그 값은 Table 3 과 같다.

Table 3. Optimization result value for process parameter

Unit: mm

Projection height	Projection radius	Fillet radius		Punch Displacement	Gap center Position	Gap
		Die	Punch			
0.1338	0.593	0.1228	0.1308	0.3982	0.621493	0.0887

4. 마이크로채널(2D) 유한요소해석 결과

최적화된 공정 조건의 효과를 검증하기 위해 해당 값을 토대로 2D 유한요소해석을 진행하였다. Figure 19 는 대칭축 부근에 있는 채널을 일부만 따온 것으로 기존 공정과 제안된 공정에 대한 유한요소해석 결과 유효 응력 및 유효 변형률 분포도를 보여준다. 유효 응력 및 유효 변형률은 분포 양상과 최대값의 크기에 있어서 큰 차이를 보이지

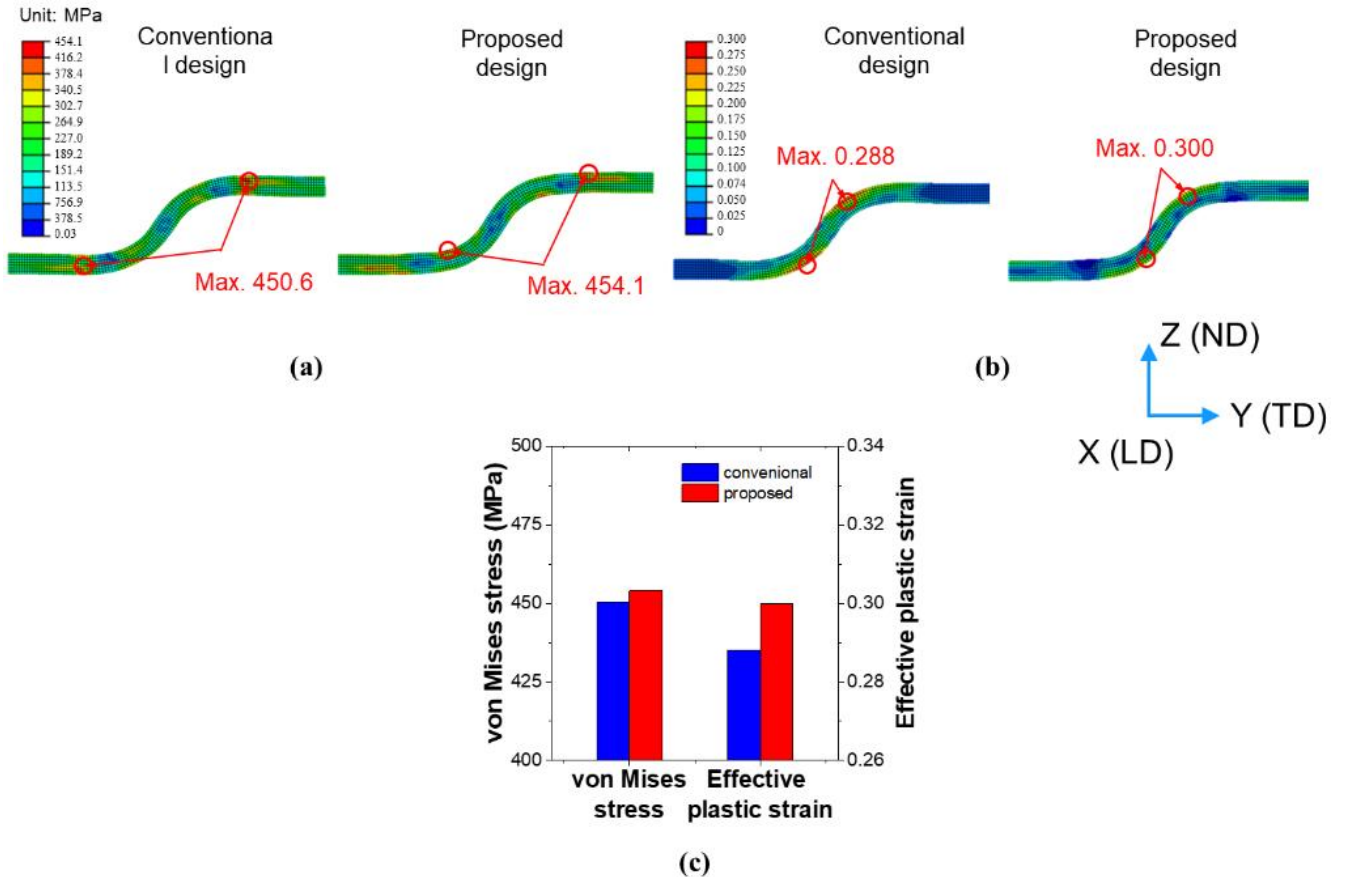


Figure 19. (a) von Mises stress and (b) effective plastic strain distributions, and (c) histogram compared between conventional and proposed design by FEA without clamping

않았다. 오히려 제안된 공정에서의 최대값이 미소하지만 크게 나타나기도 하였다. 하지만 Figure 20 과 같이 채널의 끝단을 y 축 방향에 대해 고정함으로써 클램핑 조건을 부여한



Figure 20. FEA condition of the BPP channel with clamping

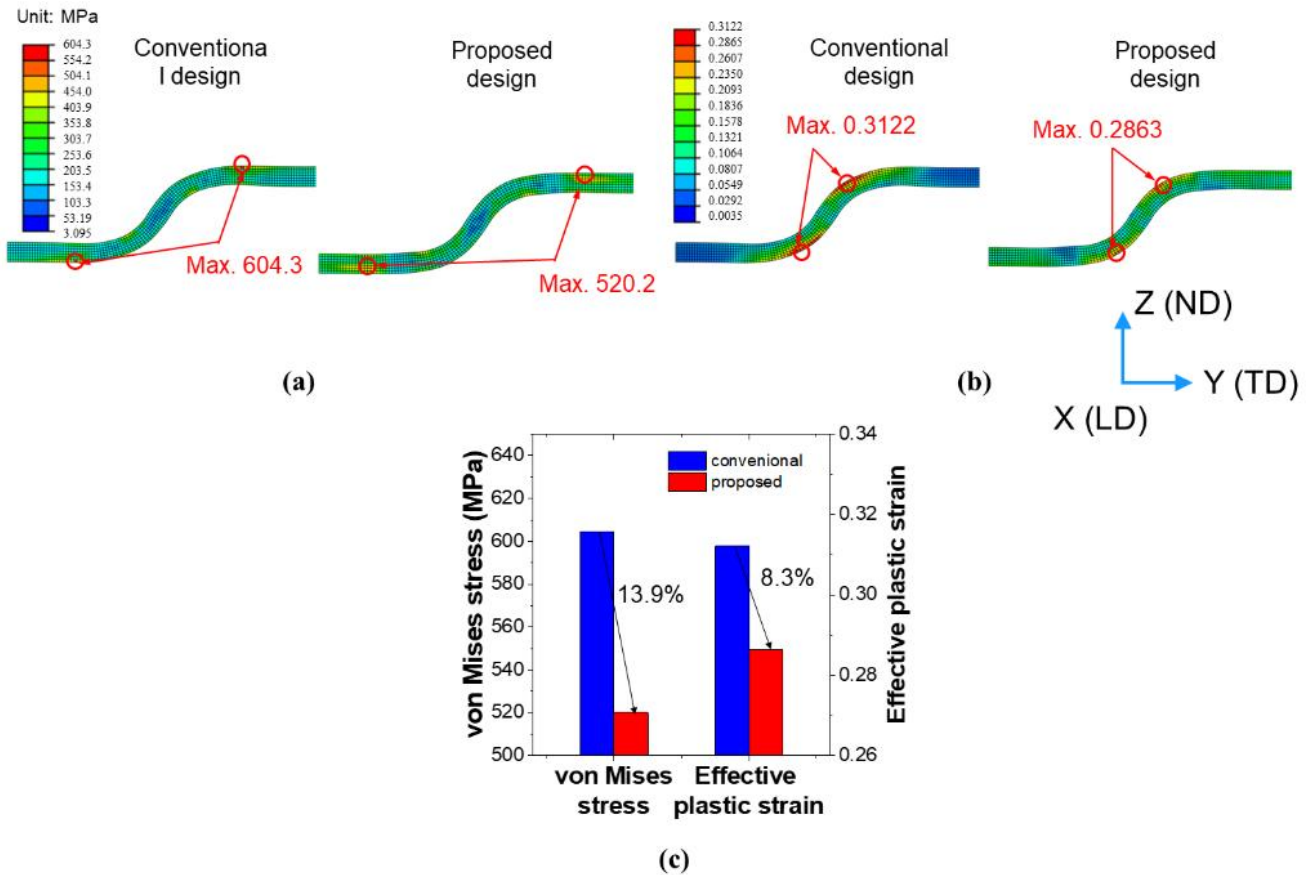


Figure 21. (a) von Mises stress and (b) effective plastic strain distributions, and (c) histogram compared between conventional and proposed design by FEA with clamping

경우에는 Figure 21 과 같이 유효 응력과 유효 변형률이 각각 13.9%, 8.3%만큼 크게 감소한 것을 확인할 수 있다.

Figure 22 는 기존 공정과 제안된 공정에 대한 유한요소해석을 진행한 후 TD 방향을 따라 분리판의 두께 분포를 나타낸 것이다. 클램핑이 적용되지 않은 Figure 22(a)의 경우 판재 외각에서 분리판의 두께 감육은 기존 및 제안된 공정이 크게 다르지 않지만 판재의 중심부로 갈수록 기존 공정의 경우 두께 감육이 크게 증가하고 있다. 반면 제안된 공정의 경우 두께 감육이 전체적으로 균일한 것을 확인할 수 있다. Figure 22(b)와 같이 클램핑 조건이 적용된 경우에는 판재 전체에 걸쳐서 제안된 공정이 기존 공정보다 두께 감육이 적으며 두께 편차 또한 크게 감소한 것을 확인할 수 있다. 이처럼 클램핑의 유무와 관계없이 제안된 공정은 분리판의 국부적인 두께 감육 및 두께 편차를 크게 감소시킨 것을 알 수 있다. Figure 23 은 이 결과값을 히스토그램으로 나타낸 것으로 클램핑이 없는 경우 판재의 두께 감육이 약 6.1% 감소하였으며 두께 편차의 경우 55%

감소한 것을 알 수 있다. 클램핑 된 경우도 마찬가지로 두께 감육은 약 4.4%, 두께 편차는 약 57.4% 감소한 것을 확인할 수 있다.

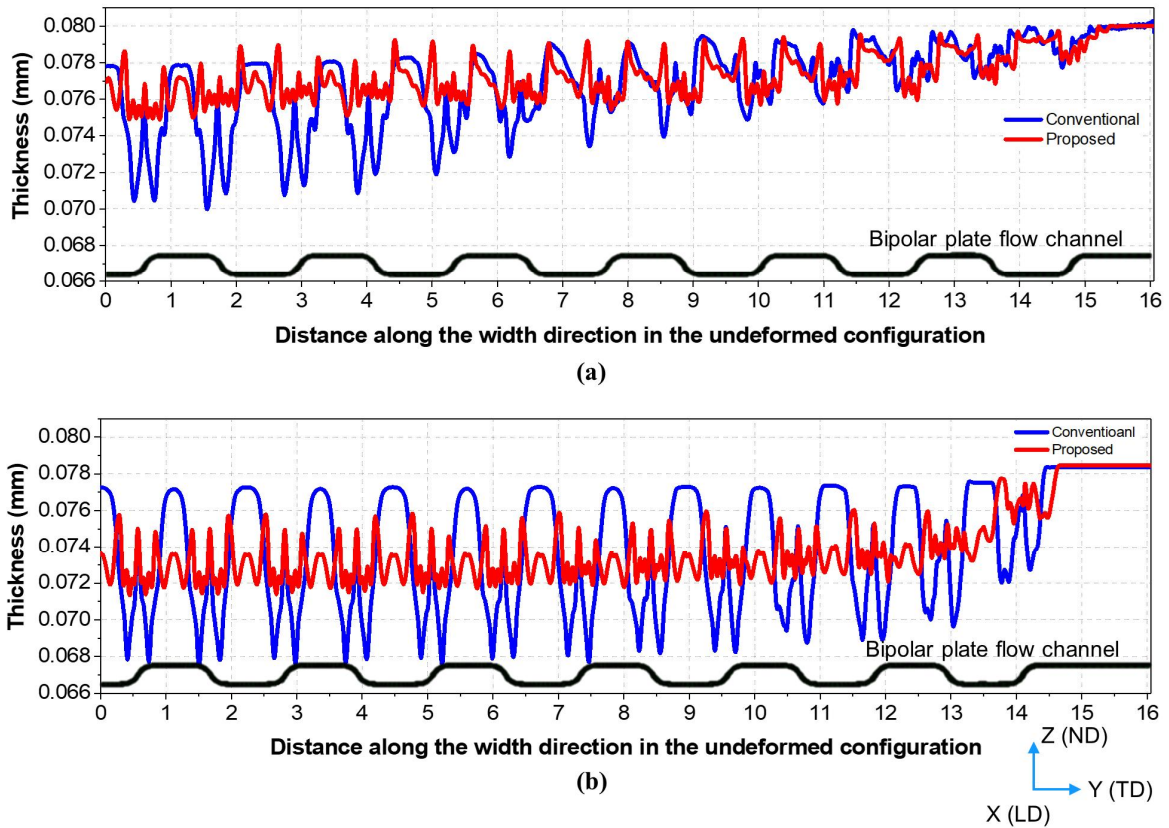


Figure 22. Thickness distributions of the BBP channel compared between conventional and proposed design by FEA (a) without and (b) with clamping

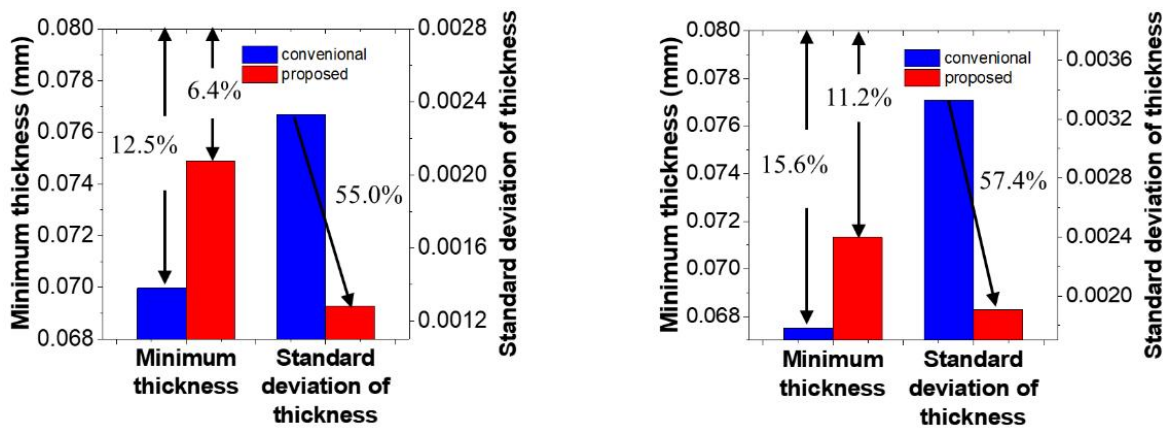


Figure 23. Histogram of minimum thickness and standard deviation of thickness of the BBP channel compared between conventional and proposed design by FEA (a) without and (b) with clamping

5. 매크로스케일(3D) 유한요소해석 조건 및 결과

분리판의 2D 유한요소해석은 채널이 일직선인 구간에 대해서만 해석이 이루어지기 때문에 채널의 끝단부 변형 양상 및 거시적인 규모에서의 스프링 백에 의한 비틀림 등은 알 수가 없다. 본 연구에서는 이를 파악하기 위해 3D 유한요소해석을 추가로 진행하였다.

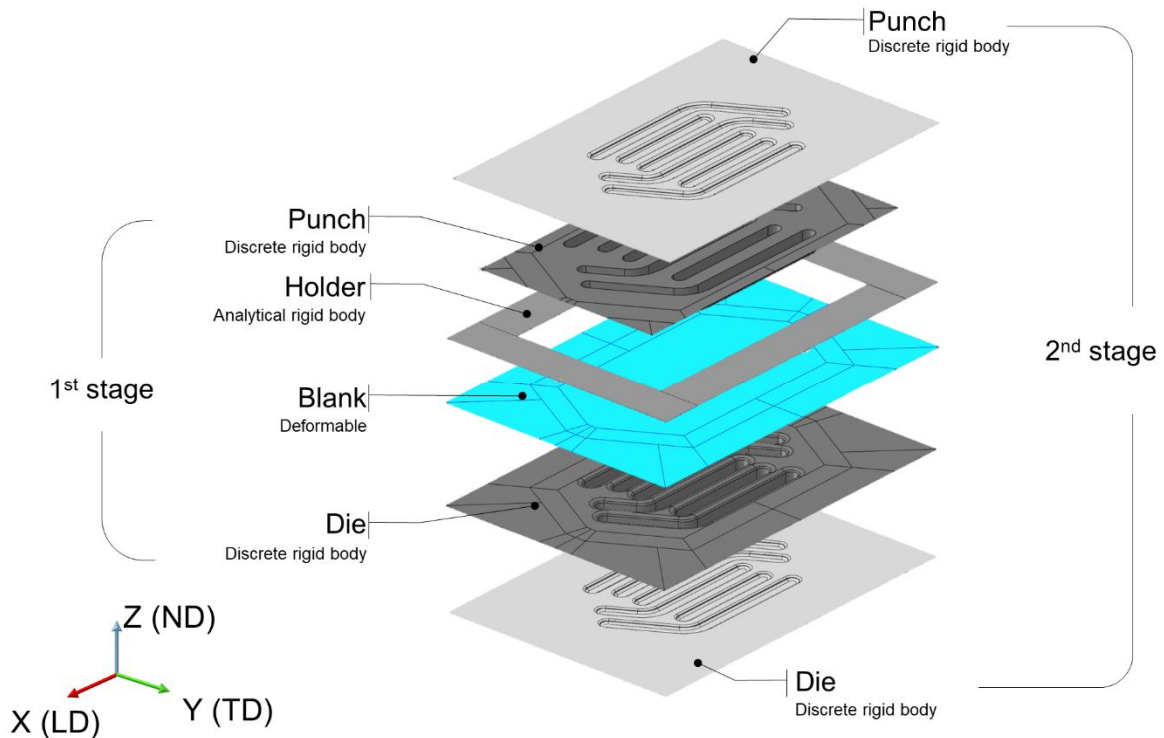


Figure 24. Three-dimensional FEA condition of multi-stage forming process of the BPP

Figure 24 는 각 파트의 형상 및 파트가 쓰이는 공정 단계, 강체 조건 등을 나타내고 있다. 2D 해석과 마찬가지로 3D 에서도 von-Mises 항복 함수와 등방 경화 모델을 고려해 해석을 진행하였다. 이 외에 마찰 계수와 접촉조건 또한 0.1 과 surface to surface 조건을 사용하였다. 각 객체의 요소는 Figure 25 와 같은 형태로 생성하였으며 Blank 의 경우에는 전체 요소 수가 95,244 개로 대부분 S4R 를 사용했지만 S3 요소도 일부 사용해 격자를 생성하였다.

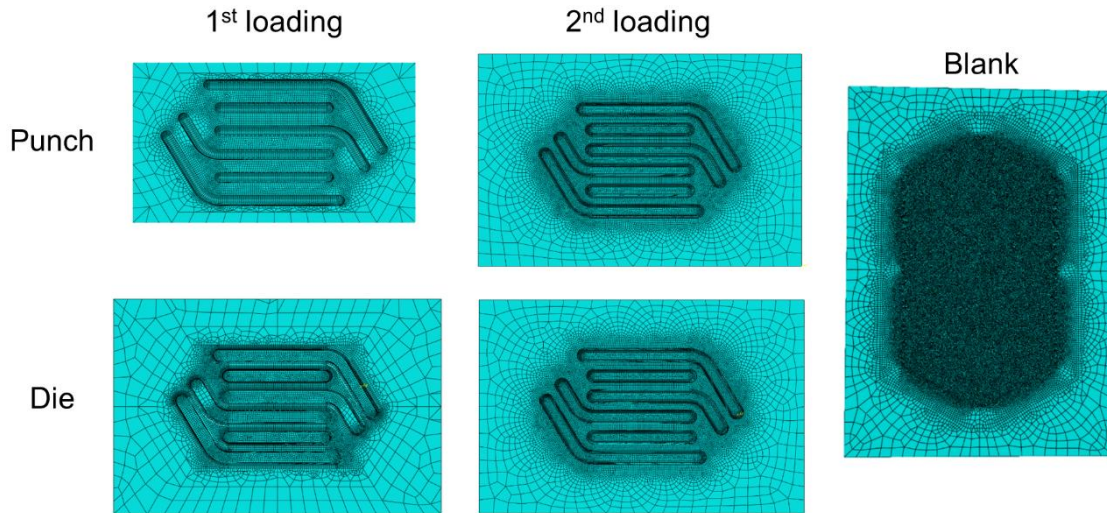


Figure 25. FE mesh of punch, die and blank used in the multi-stage forming process of the BPP

Figure 26은 3D 유한요소해석 후 분리판 중앙에서 TD 방향을 따라 두께 분포를 나타낸 것이다. Figure 26(c)를 통해 알 수 있듯이 2D 유한요소해석 결과와 마찬가지로 3D 해석에서도 두께 감육과 두께 편차가 감소하였음을 확인할 수 있다.

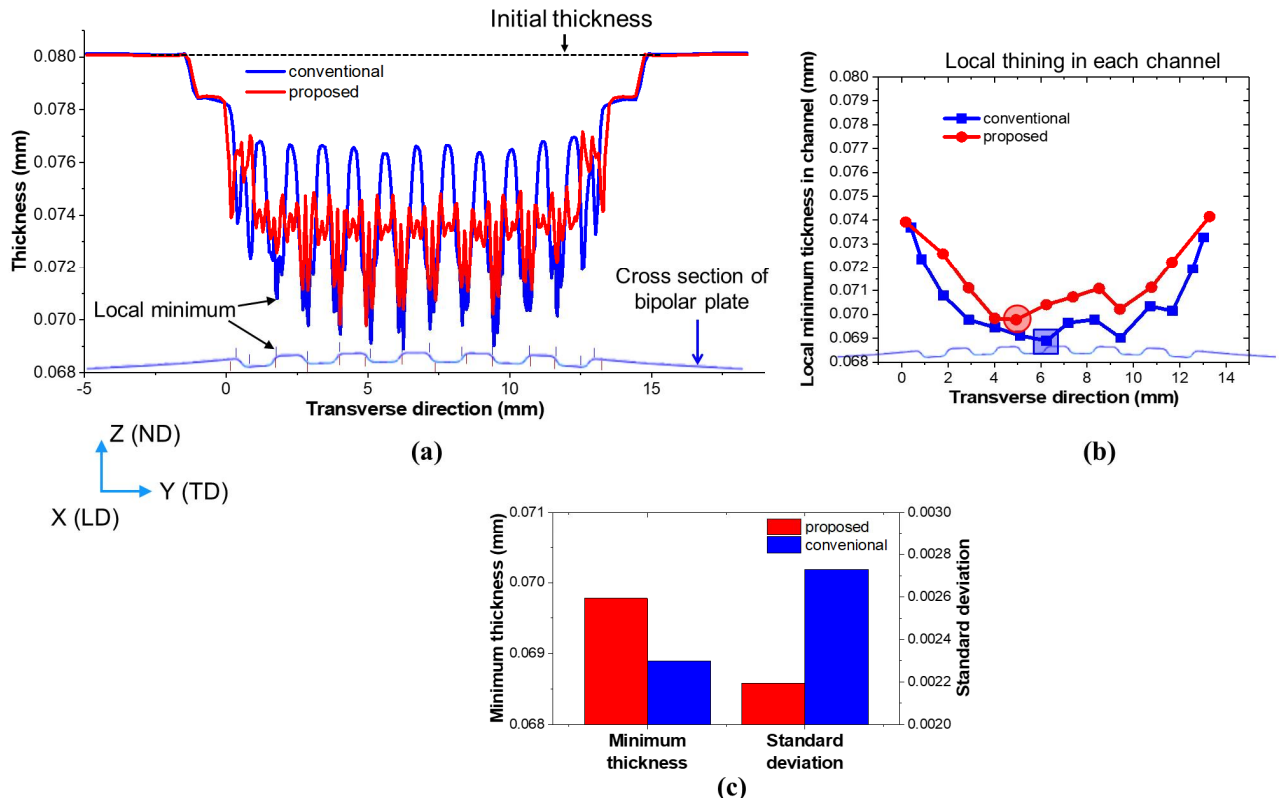


Figure 26. Three-dimensional FEA results of (a) thickness distribution along TD, (b) local thinning at each channel and (c) histogram of minimum thickness and standard deviation compared between conventional and proposed design

Figure 27 는 각 채널의 끝단 부에서 두께 감육과 두께 편차를 나타낸 것이다. Figure 27(b)를 통해 대부분의 영역에서 두께 감육의 크기가 감소함을 확인할 수 있고 두께 편차의 경우 Figure 27(c)를 통해 모든 영역에서 개선된 수치를 보임을 확인할 수 있었다.

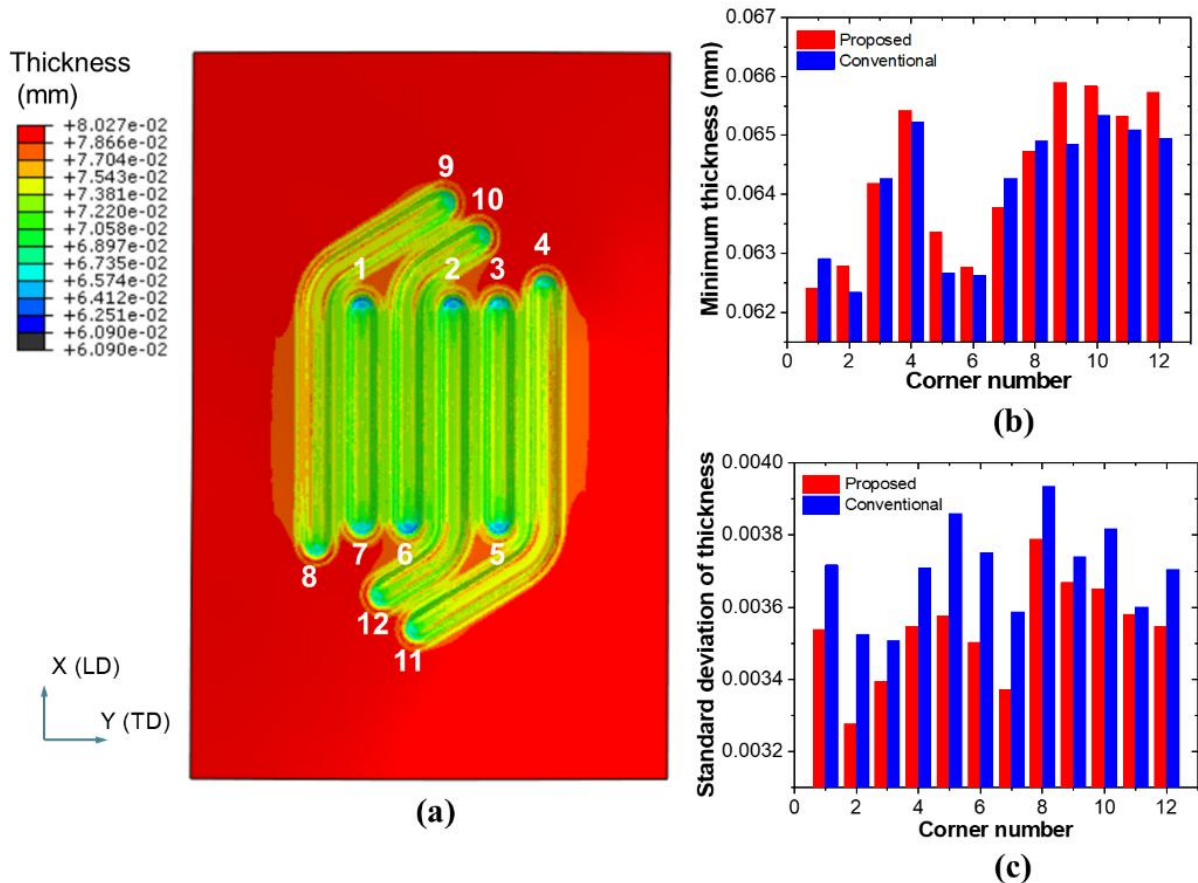


Figure 27. Three-dimensional FEA results of (a) thickness distribution of full channel BPP, and (b) histogram of minimum thickness and (c) standard deviation at 12 corners of full channel BPP compared between conventional and proposed design

Figure 28 은 거시적인 규모에서 스프링 백 양상을 파악해 판재의 비틀림을 곡률 및 각도로 나타낸 결과이다. Figure 28(a)와 같이 Line 1 과 line 2 를 따라 분포해 있는 노드의 좌표를 통해 곡률 및 비틀림 각도를 측정하였다. 측정 결과 Figure 28(d-e)에서 볼 수 있듯이 비틀림 각도가 기존공정에서 2.16 도, 제안된 공정에서 1.77 도로 약 18% 감소하였고 곡률 또한 line 1 과 line 2 에서 모두 전체적으로 감소한 것을 확인할 수 있었습니다.

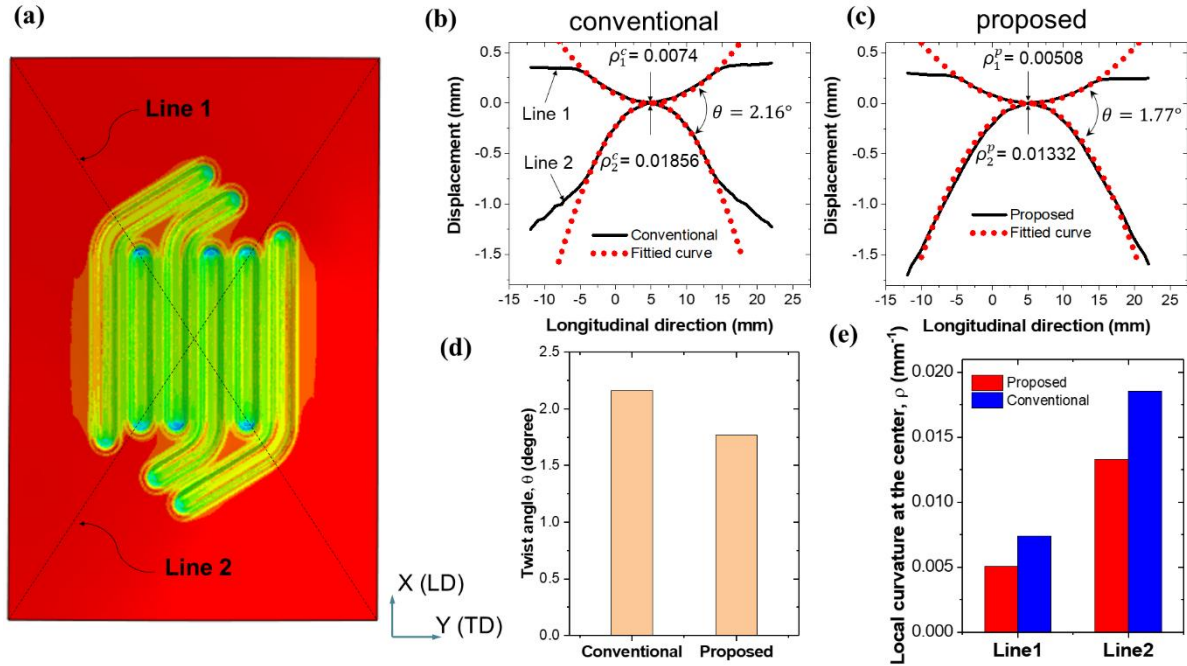


Figure 28. The twist angle and curvature obtained along (a) line 1 and line 2 compared between (a) conventional and (b) proposed design and (d-e) their histogram, respectively

6. 결론

본 연구에서는 PEM 연료전지용 분리판 다단 성형 시 국부적 두께 감육과 두께 편차를 감소시키기 위해 새로운 형상의 예비 성형 다이 및 펀치를 디자인하였다. ANN-GA 를 이용해 금형에 대한 형상 최적화를 진행하였으며 금형의 효과를 검증하기 위해 2D 유한요소해석을 실시한 결과 Clamping 조건에서의 두께 감육은 약 4%, 두께 편차는 57.4% 감소하였고 유효 응력은 13.9%, 유효 변형률은 8.3% 감소함을 확인하였다. 그리고 거시적인 규모의 스프링 백에 의한 판재의 비틀림 양상을 파악하기 위해 3D 유한요소해석을 진행한 결과 대각 방향 판재의 곡률은 각각 31.3%, 28.2% 감소하였으며 각 대각선 간의 비틀림 각도는 18.1% 감소하였음을 확인할 수 있었다.

7. 향후 과제

추후에 Projection radius 변수를 다이와 펀치별로 구분하고 level 범위를 확장해 최적화를 진행한다면 판재 성형성을 보다 향상시킬 수 있는 금형 형상을 찾을 수 있을 것이라고 기대된다. 또한 판재의 이방성을 고려하여 Yld2000 과 같은 새로운 항복 함수를 적용하거나 스프링 백 예측 모델로 Combined hardening model 을 적용하는 등 유한요소해석의 정확도를 높이기 위한 연구가 추가로 진행될 수 있다.

8. 참고문헌

- [1] Global Warming of 1.5 : Summary for Policymakers, Technical Summary and Frequently Asked Questions, IPCC, 2019
- [2] Commission to the European parliament The councilm The European economic and social committee and the committee of the regions: A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe, European commission, Brussels, 2020
- [3] 신재생에너지소개[한국에너지공단],
URL: https://www.knrec.or.kr/m/energy/fuelcell_summary.aspx, 2021.11
- [4] Ryuji Kikuchi, 고체산화물 연료전지의 최근 연구개발 동향, 日本エネルギー學會誌, 2012, 91(9), 880~885p
- [5] A. Hermann, T. Chaudhuri, P. Spagnol, 2005, Bipolar Plates for PEM Fuel Cells: A Review, Int. J. Hydrogen Energy., Vol. 30 pp. 1297~1302.
- [6] Y. Leng, P. Ming, D. Yang, C. Zhang, 2020, Stainless steel bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells: Materials, flow channel design and forming processes, J. Power Sourece., Vol. 451,1
- [7] Q. Hu, D. Zhang, G. Fu, K. Huang, 2014, Investigation of stamping process of metallic bipolar plates in PEM fuel cell - Numerical simulation and experiments, J. Hydrogen Energy., Vol 39 pp. 13770-13776
- [8] Diogo M. Meto, Marta C. Oliveira, Jose L. Alves, Luis F. Menezes, 2019, Numerical Study on the Formability of Metallic Bipolar Plates for Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells, J. metals, Vol 9
- [9] S. Xu, K. Li, Y. Wei, W. Jiang, Numerical investigation of formed residual stresses and the thickness of stainless steel bipolar plate in PEMFC, J. Hydrogen Energy, Vol. 41 pp. 6855-6863
- [10] H. J. Bong, J. Lee, J. H. Kim, F. Barlat, M. G. Lee, Two-stage forming approach for manufacturing ferritic stainless steel bipolar plates in PEM fuel cell: Experiments and numerical simulations, J. Hydrogen Energy, Vol. 42 pp. 6965-6977
- [11] Z. Xu, Z. Li, R. Zhang, T. Jiang, L. Peng, Fabrication of micro channels for titanium PEMFC bipolar plates by multistage forming process, J. Hydrogen Energy, Vol. 46 pp. 11092-11103

- [12] F. Yin, H. Mao, L. Hua, A hybrid of back propagation neural network and genetic algorithm for optimization of injection molding process parameters, *J. Materials & Design*, Vol 32 pp. 3457-3464
- [13] J. Kim, K. Jo, Y. Kim, J. Lee, Y. Lee, J. Kim, J. Seok, (2016) U.S. Patent No. 9,290,845 B2, STAINLESS STEEL FOR POLYMER FUEL CELL SEPARATOR AND METHOD FOR PREPARING SAME, US9