

인자 분석을 통한 전기차 열교환기 분리판용 고강도 알루미늄 판재 성형 연구

정선호^{1,5} · 양종훈¹ · 김용배^{2,5} · 이광진³ · 김봉환⁴ · 이종섭⁴ · 배기현^{4,#}

A Study on the Forming Process of High-strength Aluminum Sheet for Electric Vehicle Heat Exchanger Separator Through Parametric Analysis

S. H. Jung, J. H. Yang, Y. B. Kim, K. J. Lee, B. H. Kim, J. S. Lee, G. H. Bae
(Received November 16, 2021 / Revised January 27, 2022 / Accepted February 7, 2022)

Abstract

The current study performed formability analysis of a heat exchanger separator for an electric vehicle to apply a high-strength aluminum sheet based on parametric analysis. Mechanical properties for sheet metal forming simulation were evaluated by tensile test, bulge test, and Nakajima test. Two-stage crash forming was established by considering the mass production process using conventional low-strength aluminum sheets. In this study, FEM for the two-stage forming process was conducted to optimize the corner radius and height for improving the formability. In addition, the possibility of a one-stage forming process application was confirmed through FEM. The prototype of the sample was manufactured as FEM results to validate the parametric analysis. Finally, this result can provide a one-stage forming process design method using the high-strength aluminum sheet for weight reduction of a heat exchanger separator for an electric vehicle.

Keywords : Heat exchanger separator, Sheet metal forming, Crash forming, High-strength aluminum sheet, Formability

1. 서론

자동차 산업에서는 배기가스 규제에 효과적으로 대응하기 위한 대안으로 친환경적인 전기자동차 수요가 급증하고 있다.[1~3] 이와 동시에 전기자동차 주행거리 증가를 위한 배터리의 성능 및 효율 향상이 요구되고 있다. 전기자동차 배터리는 운전 중 충전과 방전을 반복하며 발열 및 냉각하게 되는데, 배터리의 적정 온도를 초과하게 되면 효율 및 성능이 저하되게 된다. 최적 배터리 성능 구현을 위하여 최근 수가열 방식의 열교환기 모듈 열관리 시스템이 적용되고 있으나, 이로 인한 자동차 중량 증가는 주행거리 감소로 이어지게 되므로 경량화를 위한 연

구가 필수적으로 병행되어야 한다.[4~6]

열교환기 분리판은 유로 형상으로 인해 작은 체적에 비해 넓은 열전달 면적을 제공한다. 이때 열교환기 분리판의 열전달 면적을 극대화하고 제품의 강도와 강성을 높이기 위해서 다양한 굴곡 및 패턴을 부여하게 된다. 이와 동시에 열교환기 분리판의 경량화를 위하여 최근 고강도 알루미늄 판재를 이용한 부품 개발 요구가 확대되고 있다. 따라서 고강도 알루미늄 판재를 이용한 난성형성 굴곡 및 패턴 형상 제품을 생산하기 위해서는 소재 특성을 고려한 최적 프레스 성형공정 개발이 필요하다.[7]

본 논문에서는 고강도 알루미늄인 AlMg6-H18 판재를 이용하여 열교환기 분리판의 성형성 확보를 위한 설계 인자 및 공정 관련 연구를 진행하였다. 해석 정밀도 향상을 위해 소재의 이방성 및 성형한

1. 한국생산기술연구원 뿌리기술연구소, 학생연구원
2. 한국생산기술연구원 뿌리기술연구소, 연구원
3. 한국생산기술연구원 전남본부, 수석연구원
4. 한국생산기술연구원 뿌리기술연구소, 수석연구원
5. 인하대학교 기계공학과, 박사과정

Corresponding Author: Korea Institute of Industrial Technology, Incheon Regional Division, E-mail: baegh@kitech.re.kr.
ORCID : 0000-0002-0015-4742

계를 고려한 물성 모델을 구축하였다. 해석을 판재 두께, 비드 높이, 코너 반경 및 공정수에 따른 영향을 확인하였으며, 최종 금형 형상을 도출하여 시제품 제작을 통하여 제안한 설계 기법의 유효성을 검증하여 경량화 가능성을 확인하였다.

2. 열교환기 분리판

본 논문의 대상 제품인 HEX 모듈은 경량화를 목적으로 Fig. 1과 같이 기존에 전기자동차 배터리 가열용 히터 및 cabin room 가열용 PTC 히터를 열교환기 분리판 모듈을 사용하여 일체화하는 방식으로 구조가 변경된 것이다. HEX모듈은 Fig. 2과 같이 순서대로 적층 배열된 판 사이에 유로가 형성되고 유로를 통해 배터리의 냉각수가 흐르게 된다. 또한 가열된 냉각수로 인한 폐열을 cabin room에 사용한다. 열교환기 분리판은 많이 적층할수록 효율이 증가하지만 추가적인 중량 증가로 인해 기존에 적용되는 저장도 판재를 고강도화할 경우 추가적인 경량화가 가능하다. 고강도 소재 적용 시 돌출부 및 유로와 같은 복잡한 형상을 성형하기 위한 공정 및 성형기술 연구가 필요한 상황이다.

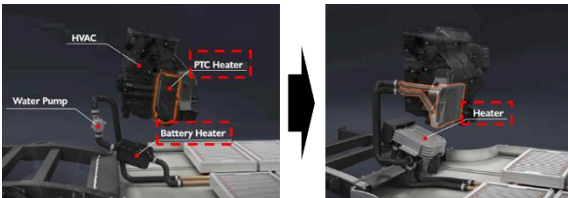


Fig. 1 Example of application of heat exchanger module to the electric vehicle

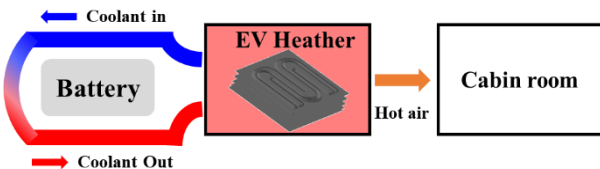


Fig. 2 Schematic diagram of the heat exchanging process for the battery performance in an electric vehicle

3. 성형해석용 모델 물성 평가

AlMg6-H18 0.5t소재를 적용한 열교환기 분리판의 성형성 평가 및 최적 성형 조건 도출을 위하여 수

치해석 기법을 도입한다. 수치해석 기법의 신뢰성 확보를 위하여 방향별 인장 시험 및 유압식 벌지 시험으로 Yield 2000-2d모델을 구축하였으며, 성형성을 평가를 통해 성형한계도를 도출하여 판재 성형시 파단이 예상되는 영역을 파악하고 설계에 적용하였다.

3.1 인장 시험

경화 선도 측정 및 이방성 평가를 위하여 판재 압연 방향으로부터 45도 간격으로 인장 시험을 수행하였다. 인장 시험은 Fig. 3과 같이 MTS 810 만능시험기를 사용하여 0.025 mm/s의 준정적 속도로 물성평가를 진행하였다. 인장 시험용 시편은 ASTM E8M Subsize 규격으로 가공하였다. 시편의 변형률 측정을 위하여 영상분석기법(Digital Image Correlation, DIC)을 도입하였다.

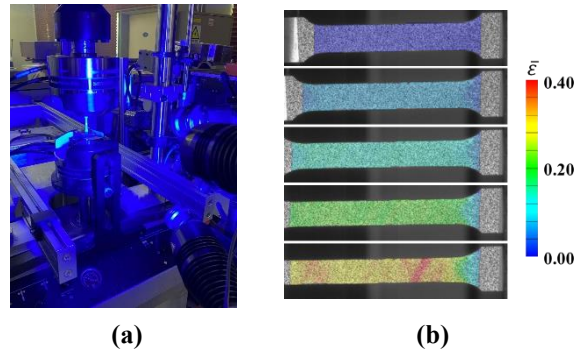


Fig. 3 Tensile test of AlMg6-H18 0.5t with DIC system: (a) MTS810 with DIC system; and (b) DIC analysis result

인장 시험을 통하여 측정된 방향별 공칭 응력-공칭 변형률 선도를 Fig. 4(a)에 제시하였다. 인장 시험 결과, 경화 거동의 이방성은 거의 없는 것으로 확인되었다. 소성비압축성 가정하에 r-value는 식 (1) 및 Fig. 4(b)와 같이 축 및 폭 방향의 변형률로 정의될 수 있다. 인장 시험을 통하여 측정된 기계적 물성을 Table 1에 제시하였다.

$$r\text{-value} = \frac{d\epsilon_w}{d\epsilon_t} = -\frac{d\epsilon_w}{d\epsilon_w + d\epsilon_t} \quad (1)$$

유동 응력 선도는 Al 합금의 경화 거동 표현에 적합한 식(2)의 Voce 경화식을 이용하여 근사하였다.

$$\sigma_{Voce} = A - Be^{-C\epsilon^p} \quad (2)$$

Fig. 4(c)를 통하여 Voce 경화식의 유동 응력 선도 근사 성능이 우수함을 확인할 수 있으며, Table 2 에 Voce 경화식의 계수 값을 제시하였다

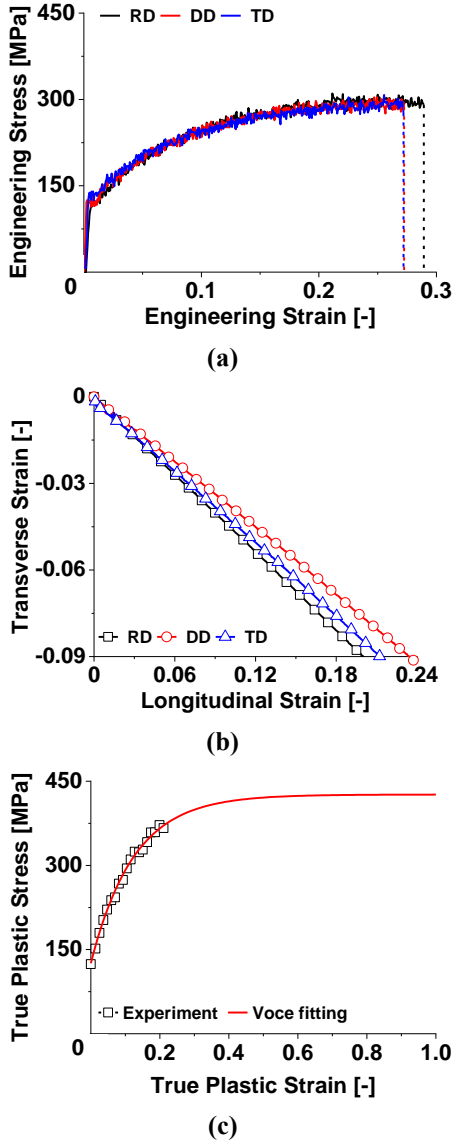


Fig. 4 Tensile test results of AlMg6-H18 0.5t: (a) Eng. stress–Eng. strain curves; (b) Transverse strain–longitudinal strain; (c) Fitted flow stress curve

3.2 액압 벌지 시험

알루미늄 판재의 성형해석 정확도를 향상하기 위하여 이축 인장 모드에서의 항복 응력 및 r -value 측정하고 Yld2000-2d 항복 함수를 적용하였다. Fig. 5(a)와 같이 판재 만능 성형기를 이용하여 액압 벌지 시험을 진행하였으며, DIC system 을 이용하여 변

Table 1 Mechanical properties according to the loading angle from the rolling direction.

Direction	Fracture elongation [-]	Yield stress [MPa]	Tensile stress [MPa]	r-value [-]
RD (0°)	0.281	124.977	309.128	0.829
DD (45°)	0.276	124.650	302.942	0.613
TD (90°)	0.272	132.960	306.821	0.709

Table 2 Coefficients of the Voce and bulge test.

Voce Parameter			Bulge test	
A [MPa]	B [MPa]	C [-]	YS [MPa]	r_b [-]
421.603	295.196	8.132	132.02	1.01

형률 분포를 확인 분석하였다. 액압 벌지 시험은 200 x 200mm 의 정사각형으로 가공이 된 시편을 금형 위에 올려놓고 약 40 ton 의 힘으로 시편을 고정하였다. 펀치를 0.1 mm/s 속도로 유체를 유압을 이용하여 평판 형상의 시편을 돔 형태로 변형함으로써 시편에 균일한 압력으로 팽창하여 대변형의 유동 특성을 획득하였으며, 시험 개략도를 Fig. 5(b)에 나타내었다. Fig. 6(a)와 같이 이축 인장 상태에서의 항복강도를 획득하였다. 또한 Fig. 6(b)과 같이 파단 지점의 축 및 폭 방향의 변형률을 측정하여 r -value 를 확보하였으며, Table 2 에 결과를 나타내었다.

3.3 성형한계도 시험

수치해석에서 성형한계 평가를 위해 Nakajima 실험을 ISO 12004 에 따라 수행하여 성형 한계선 (Forming Limit Curve, FLC)을 확보하였다. 성형한계도 실험은 판재 만능 성형시험기(Fig. 5(a))로 수행하였으며, 영상분석기법을 이용하여 변형률 분포를 분석하였다. 다양한 변형 모드에 따른 성형한계 측정을 위하여 25mm 에서 200mm 사이의 시편 폭을 갖는 Nakajima 시편을 사용하였다. Fig. 5(c)와 같이 시편을 금형 위에 올려놓고 소재 유입 방지를 위하여 40 ton 의 가압력을 적용하였다. 반구형의 펀치를 이용하여 0.1 mm/s 속도로 판재를 성형하였다. 영상분석기법을 통하여 파단 시점에서의 주변형과 부분형률을 측정 한 후 Fig. 7 과 같이 네킹, 안전 구간 사이 영역에서 성형 한계선을 도출하였다.

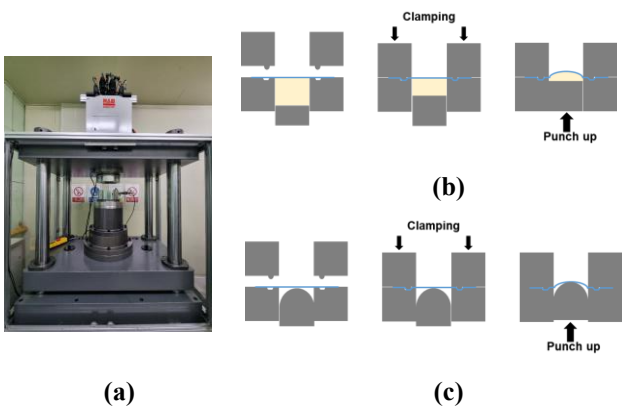


Fig. 5 (a) Sheet metal plate forming tester; (b) Process of hydraulic bulge test; (c) Process of Fracture limit curve test.

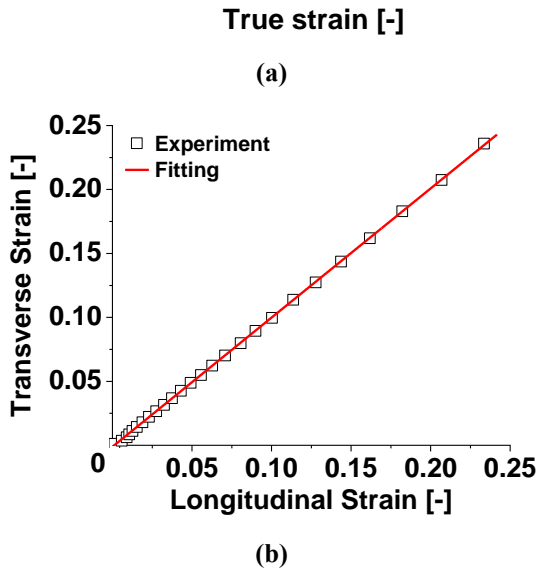


Fig. 6 Result of bulge test: (a) True Stress-Strain curve; (b) Transverse Strain-Longitudinal Strain

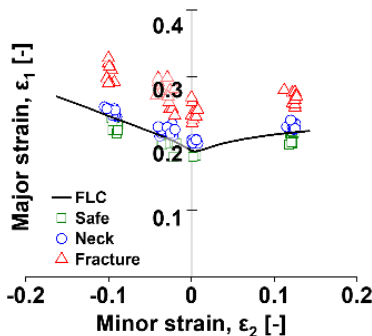


Fig. 7 Forming limit diagram of AlMg6-H18 0.5t

4. 열교환기 분리판 성형 해석

열교환기 분리판 성형공정의 해석을 위하여 모델링을 수행하였다. 성형 해석은 2절의 물성 평가를 통해 도출한 물성을 Autoform R8을 이용하여 실제 크래쉬 포밍 공정으로 설정하였으며, 해석 조건은 Table 3에 나타내었다. 알루미늄 판재는 일반적으로 압력, 속도 등에 따라 마찰조건이 변화하게 되며, 본 연구에서는 0.15를 대표값으로 선정하였다.[8] 또한 Autoform 기능 중 Keeler와 Brazier에 의해서 제안된 식으로부터 경험적으로 확정된 FLD_0 을 사용하여 두께 변화에 따른 성형한계도를 정의하였다.

Table 3 FE-simulation conditions of crash forming.

	Material	AlMg6-H18
Blank	Thickness [mm]	0.5, 1.0, 1.5
	Blank size [mm]	200 × 200
	Refinement level	6
Modeling	Initial mesh size [mm]	20
	Min. mesh size [mm]	0.31
	Press stroke [mm]	700
Process Condition	Stamping velocity [mm/s]	233.33
	Friction coefficient	0.15

4.1 모델링 및 초기 성형 해석

열교환기 분리판 성형에 사용되는 공정은 크래쉬 포밍으로 블랭크 홀더 없이 다이와 펀치로만 제품을 성형하게 되어 제품 성형 중 소재의 유입을 제어하지 못하여 파단이 유발된다. 성형공정은 열선이 성형되는 1공정(Fig. 8(a))과 유로 현상이 성형되는 2공정(Fig. 8(b))으로 구성되어있다. 열교환기 분리판의 설계 제한 조건은 Fig. 8의 판재 단면과 같이 유로간의 간격으로 인해 R(코너부 반경)은 3~4R의 설계 제한 조건이 있다. 또한 직경 8mm의 열선 장착으로 인해 H(비드 높이)는 4.05~5mm로 설계되어야 한다. R 및 H가 성형성에 민감하게 영향을 줄 것으로 판단하였으며, 상세 치수는 도면에 도시하였다.

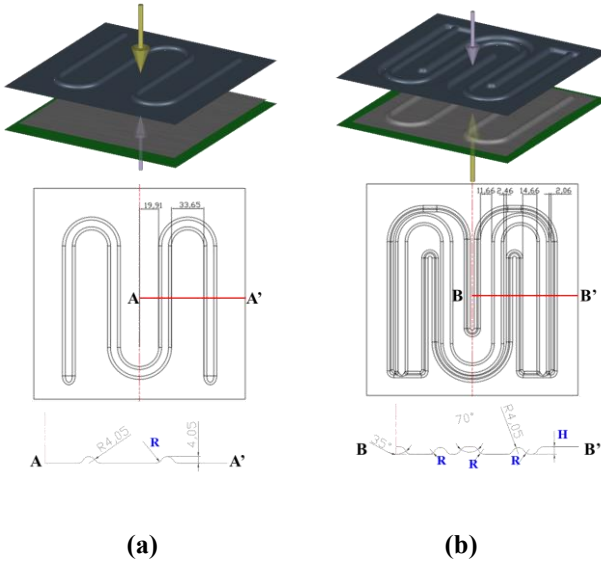


Fig. 8 Modeling of heat exchanger separator for crash forming process: (a) 1st stage; (b) 2nd stage

위의 해석 조건과 모델링을 사용한 초기 성형 해석 결과를 Fig. 9(a)에 나타내었다. 최대 두께 감소 영역은 구속된 돌출부로 확인되었으며, 성형성 확보에 문제가 없음을 확인하였다. 또한 성형 마진이 확보되므로 공정 설계 인자 분석을 통한 성형 공정 분석을 통해 경량화 및 공정 수 감소 가능성을 검토하였다.

4.2 부품 및 공정인자 분석

4.2.1 소재 두께

경량화를 위해 기존 1.5t의 소재를 1.0t 및 0.5t로 수정하여 성형 해석을 하였으며, 설계 조건은 R 3.0, H 5.0 일 때 해석 결과를 Fig. 9(b), (c)에 나타내었다. 판재 두께가 감소할수록 두께 감소율이 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 최대 감소 영역은 구속된 돌출부로 확인되었다. 또한 판재 두께가 0.5t일 때 1단에서 성형된 평탄부가 두꺼워지면서 돌출부 벽부에 과도한 두께 감소에 따른 파단이 예측되었다. Fig. 10은 소재 두께에 따른 두께 감소에 취약한 요소의 변형률 경로를 성형한계도에 나타내었다. 소재 두께가 감소할수록 변형률 경로는 이축 변형 모드에서 평면 변형 모드로 변화는 것을 확인할 수 있다. 이는 소재가 얇을수록 벽부에 변형이 집중되며, 금형 설계 변수를 변경하면 성형이 가능할 것으로 판단된다. 해석 결과를 통하여 0.5t 소재 적용 시 유로 형상 수정을 통한 성형성 확보가 가능할 것으로 판단되어, 형상 설계 변수에 따른 성형성 검토를 수행하였다.

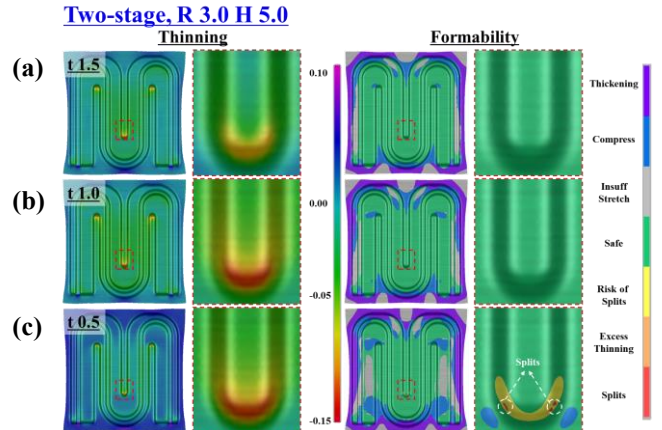


Fig. 9 Thinning and formability distribution according to sheet thickness: (a) t1.5; (b) t1.0; (c) t0.5

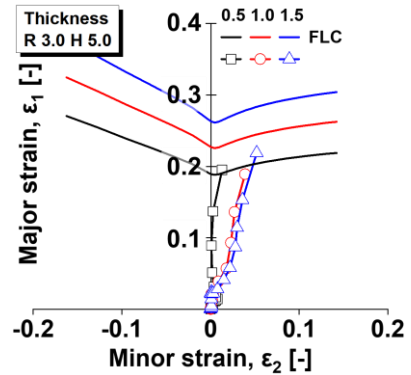


Fig. 10 Strain path for the maximum thinning element according to sheet thickness

4.2.2 유로현상

금형 설계 변수에 따른 성형 해석을 위해 0.5t 소재를 사용하였다. Fig. 11(a)에 설계 조건 R3.5, H 5.0 일 때 해석 결과를 나타내었다. 최대 두께 감소 영역은 구속된 돌출부로 확인되었으나 이전 결과와 비교하여 R 증가로 인해 소재의 유입이 원활하였으며, 크랙이 발생한 돌출부 벽부에 성형성이 개선되었음을 확인하였다. 그러나 Fig. 12(a)와 같이 곡률반경 변화에 의해 성형 한계를 초과하지 않았으나, 파단 위험 지역이므로 추가 성형성 개선을 위해 비드 높이 변경이 필요할 것으로 판단된다. Fig. 11(b)은 설계 조건 R 3.5, H 4.5 일 때 해석 결과를 나타내었다. 이때 Fig. 12(a)에 비해 안정 영역이 증가하였으며, Fig. 12(b)와 같이 변형률 경로는 거의 동일하나 최대 주변형률이 감소하여 성형성 확보가 가능할 것으로 판단된다.

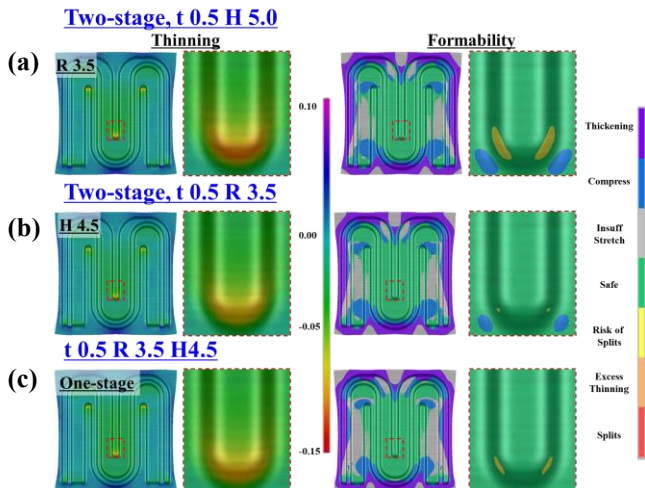


Fig. 11 Thinning and formability distribution according to design factors: (a) Corner R; (b) Height; (c) Number of stages

4.2.3 공정수

추가로 프레스 성형공정의 생산 비용 절감을 위하여 2단 공정의 1단 공정 대체 가능성을 확인하였다. 앞 절에서 결정된 최종 설계안(t 0.5, R3.5, H4.5)을 대상으로 성형해석을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 11(c)에 제시하였다. 이때 최대 두께 감소 영역은 이전 해석과 마찬가지로 구속된 돌출부로 확인되었으며, 성형해석 결과 파단 위험은 확인되었으나 Fig. 11(b)과 비교하여 단공정에 의해 평탄부의 소재 두께가 일정하여 주름 발생 가능성은 감소할 것으로 판단된다. 또한 Fig. 12(c)와 같이 주변형률은 다소 증가하나 성형성 확보에는 문제가 없는 것으로 확인되었다. 따라서 1단 공정을 통하여 열교환기 분리판 성형이 가능한 것으로 판단하여, 이를 이용하여 열교환기 분리판 시제품 제작 및 성형성 검증을 수행하였다.

5. 시제품 제작

성형해석을 통하여 확보한 단공정 금형 설계안을 검증하기 위하여 시제품 T/O 수행하였다. Fig. 13은 제작된 금형이며, 코너 반경 R3.5, 비드 높이 H 4.5로 제작하였다. 제작된 금형을 이용하여 시제품 제작한 결과, Fig. 14와 같이 제품면 전체에서 파단이 관찰되지 않았다. 이를 통하여 제안한 금형면 설계에서 AlMg6-H18 0.5t 소재를 이용한 열교환기 분리판의 성형에 문제가 없음을 검증하였다. 이와 같이

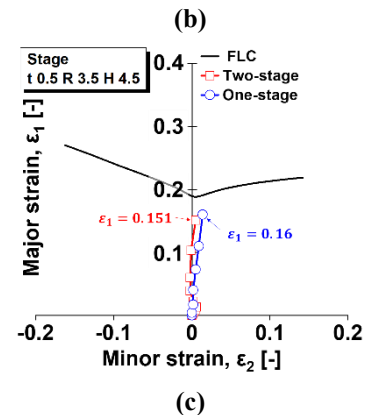
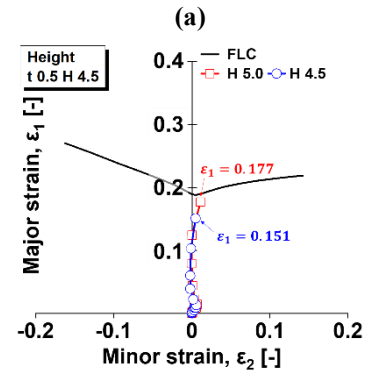
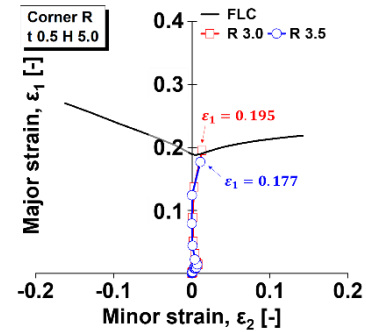


Fig. 12 Strain path for the maximum thinning element according to: (a) Corner R; (b) Height; (c) Number of stages

유로 형상 설계 최적화에 따른 열교환기 분리판 박판화 및 경량화가 가능하였다. 또한 기존 공정에 비해 공정수가 감소하여 양산 시 원가 절감과 생산성 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

6. 결론

본 논문에서는 전기차 열교환기 분리판의 경량화를 위하여 고강도 알루미늄 소재 적용 시 두께, 유로 형상, 공정수에 따른 성형성 분석을 수행하고 최

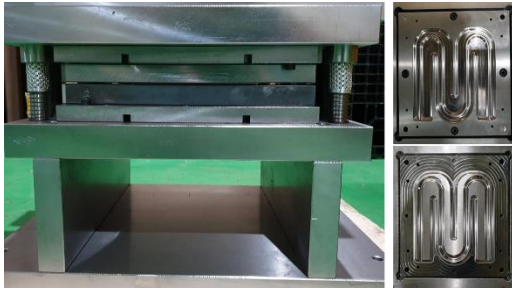


Fig. 13 Prototype die of heat exchanger separator



Fig. 14 Tryout result of heat exchanger separator using the crash forming

적 성형 조건을 도출하였으며, 시제품 성형을 통하여 성형공정 설계 유효성을 검증하였다. 주요 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) AlMg6-H18 0.5t 소재의 인장시험 및 벌지시험을 통해 이방성 및 대변형의 항복강도 및 r -vaule 확보하였다. 또한 성형성 시험을 통해 네킹, 안전구간 사이 영역에서 성형 한계선을 도출하였다.

(2) 성형해석을 통해 예측함으로 기존 1.5t 판재 및 2단 공정에서 0.5t 판재 및 1단 공정 적용 가능성을 확인하였다.

(3) 시제품 성형을 통하여 해석 결과를 검증하였으며, 이를 통해 복잡한 형상의 열교환기 분리판 설계에 시간 및 비용 절감 효과를 가져올 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 한국생산기술연구원 기관주요사업 “Add-on 모듈 탑재를 통한 지능형 뿌리공정 기술개발 (KITECH EO-21-0009)”의 지원으로 수행한 연구입니다.

REFERENCES

- [1] A. Foley, B. Tyther, P. Calnan, B. Ó. Gallachóir, 2013, Impacts of electric vehicle charging under electricity market operations, *Appl. Energy*, Vol. 101, pp. 93-102. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.052>
- [2] T. Zhang, C. Gao, Q. Gao, G. Wang, M. Liu, Y. Guo, C. Xiao, Y. Y. Yan, 2015, Status and development of electric vehicle integrated thermal management from BTM to HVAC, *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 88, pp. 398-409. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.02.001>
- [3] S. Yang, C. Ling, Y. Fan, Y. Yang, X. Tan, H. Dong, 2019, A review of lithium-ion battery thermal management system strategies and the evaluate criteria, *Int. J. Electrochem. Sci.*, Vol. 14, pp. 6077-6107. <https://doi.org/10.20964/2019.07.06>
- [4] D. W. Kim, M. Y. Lee, 2014, Theoretical approach on the heating and cooling system design for an effective operation of Li-ion batteries for electric vehicles, *J. Korea Acad. Industr. Coop. Soc.*, Vol. 15, pp. 2545-2552. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.5.2545>
- [5] S. H. Jeong, H. K. Suh, 2016, Predictions of the Cooling Performance on an Air-Cooled EV Battery System According to the Air Flow Passage Shape. *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 40, pp. 801-807. <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2016.40.12.801>
- [6] Y. Xing, W. He, M. Pecht, K. L. Tsui, 2014, State of charge estimation of lithium-ion batteries using the open-circuit voltage at various ambient temperatures. , *Appl. Energy*, Vol. 113, pp. 106-115. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.008>
- [7] J. H. Park, 2009, Characteristics and applications of plate type heat exchanger, *J. Ocean Eng. Technol.*, Vol. 33, pp. 801-811. <https://doi.org/10.5916/jkosme.2009.33.6.801>
- [8] J. Domitner, Z. Silvayeh, A. Shafiee Sabet, K. I. Oksüz, L. Pelcastre, J. Hardell, 2021, Characterization of wear and friction between tool steel and aluminum alloys in sheet forming at room temperature, *J. Manuf. Process.*, Vol. 64, pp. 774-784. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.02.007>