

마그네슘을 적용한 자동차 시트 쿠션 패널 비등온 성형해석

서 오 석¹⁾ · 이 충 안²⁾ · 박 창 수³⁾ · 김 화 진³⁾ · 이 경 택^{*3)}

화신 기술연구소¹⁾ · 강원대학교 기계의용공학과²⁾ · 오스템 해석팀³⁾

Non-isothermal Stamping Analysis of Automotive Seat Cushion Panel Using Mg Alloy Sheet

Oh Suk Seo¹⁾ · Chung An Lee²⁾ · Chang Su Park³⁾ · Hwa Jin Kim³⁾ · Kyoung Teak Lee^{*3)}

¹⁾R&D Center, Hwashin Co., Ltd., 14 Eonhagongdan 1-gil, Yeongcheon-si, Gyeongbuk 38828, Korea

²⁾Department of Mechanical and Biomedical Engineering, Kangwon National University, Gangwon 24341, Korea

³⁾CAE Team, Austem Company, 5 Bodojin-ro, 42beon-gil, Seo-gu, Incheon 22847, Korea

(Received 7 June 2016 / Revised 11 July 2016 / Accepted 12 July 2016)

Abstract : Mg alloy sheet exhibits significant differences in tensile and compressive yield stress depending on the temperature, as well as variations in its hardening behavior. Such unusual behavior makes it difficult to simulate the forming process of Mg alloy sheets. Results of analysis tend to deviate significantly from the experimental data because commercial software do not completely implement the unusual hardening behavior, yield asymmetry and temperature dependent changes in the Mg alloy's material properties. In the previous study, an in-plane tension-compression cyclic tester was developed to predict the cyclic behavior of Mg alloy sheets at an elevated temperature of up to 250 °C. A new constitutive equation was suggested to analyze the unusual behavior, and was implemented in the commercial software in the form of user subroutine. In this paper, a stamping process of Mg seat cushion panel for automotive parts was simulated using the experimental data and user subroutine. Based on the analysis, an optimal temperature condition was determined and a stamping die shape at each step was suggested in the non-isothermal stamping of Mg alloy sheets.

Key words : Mg alloy sheet(마그네슘합금판재), Stamping analysis(성형해석), Isothermal(등온), Non-isothermal(비등온)

1. 서론

최근 자동차 산업은 지구 온난화 현상과 에너지 절약 대책에 대한 관심이 높아지면서 에너지 절감 효과를 위해 경량 재료를 적용하고 있다. 경량 재료에는 알루미늄 합금, 마그네슘 합금, 티타늄 합금, 탄소섬유 강화 플라스틱 등이 있다. 특히 유럽, 일본 등 수송기기 산업분야를 선도하는 국가에서는 차체 경량화를 통한 연비 향상을 위해 마그네슘 합금에

대한 연구가 활발히 진행 중이다. 마그네슘 합금은 비중이 1.74 g/cm³로 알루미늄 합금의 2/3, 티타늄 합금의 1/3, 철의 1/5에 해당하는 대표적인 경량재료로써 높은 비강도와 진동 흡수성, 충격 흡수성, 전자파 차폐성 및 방열성이 우수하다.¹⁻⁶⁾ 종래에는 주로 용융된 마그네슘을 주입하여 금형과 똑같은 주물을 얻는 다이캐스팅 공법에 의해서 제품이 생산되었다. 하지만 이러한 제품은 기계적 강도 미흡, 높은 후처리 비용, 박육성형의 어려움 등의 이유로 적용 범위가 제한적이다. 따라서 최근에는 마그네슘 합

*Corresponding author, E-mail: leekt@austem.co.kr

금 판재를 이용한 프레스 가공의 연구가 활발하게 연구되고 있다.^{7,8)} 마그네슘 합금 판재는 기존 금속 판재와는 다른 기계적 특성을 갖는다. 특히 상온에서 인장과 압축 시 상이한 초기 항복 응력과 항복 이후 응력 비대칭 거동을 보이며 이방성이 크고 슬립, 쌍정, 역쌍정과 같은 특이 거동이 나타난다. 그리고 적정 온도 이상에서는 이러한 특이 거동이 사라진다.^{9,11)} 일반적으로 마그네슘 합금 판재는 성형성이 증가되는 200 °C 이상의 온도에서 성형이 진행되며, 펀치와 다이의 온도를 다르게 적용하여 비등온으로 이루어진다. 마그네슘 합금 판재를 이용하여 제품을 생산하기 위해서는 성형성 극대화 기술 확보가 매우 중요하다. 따라서 마그네슘 합금 판재의 재료 데이터를 구축하고 성형해석 기술을 개발하여 공정 중간에 발생하는 결함 및 문제점을 예측해야 한다. 또한 공정 설계 및 스프링 백 감소 방안을 모색하여 공정 최적화를 진행해야 한다. 이전 연구에서는 마그네슘 합금 판재의 기계적 거동 및 특이 거동을 예측하기 위해 시험기를 개발하였다.¹²⁾ 개발한 시험기를 사용해 온도 및 변형률 속도, 이방성을 고려한 단축 인장시험을 진행하고 온도에 따라 탄성계수(E) 및 R-value를 측정하였다. 그리고 재료의 특이 거동을 예측하기 위해 온도를 고려한 반복 하중(인장-압축-인장 T-C-T, 압축-인장-압축 C-T-C) 시험을 진행하였고, 다양한 변형률 조건에서 응력-변형률 거동을 예측하기 위해 예 변형률(pre-strain) 시험을 진행하였다. Table 1에 온도에 따른 탄성계수와 R-value를 나타내었고, Fig. 1에 반복하중 시험 선도를 나타내었다. 그리고 구축된 시험 데이터를 이용해 마그네슘 거동 예측이 가능한 전용 구성식을 개발하고 상용 프로그램에 user subroutine하여 구성식의 신뢰성을 검증하였다.¹³⁾ 따라서 본 연구에서는 이전 연구 결과를 이용하여 자동차 부품 성형해석을 진행하였다. 동일한 마그네슘 합금 재료를 사용하였으며 아이템은 시트 쿠션 패널이다. 성형해석을 진행하면서 공정 중간에 발생하는 결함 및 문제점을 예측하여 새로운 공정 및 최적의 온도 조건을 제시하였다. 그리고 해석 결과를 바탕으로 시제품을 제작하고 해석 결과와 비교하여 해석의 신뢰성을 검증하였다.

Table 1 Variation of Young's modulus and R-value of the AZ31B magnesium alloy from 25 °C ~ 250 °C

	E(GPa)	R0	R45	R90
25 °C	42.4	2.1198	2.6705	3.0235
100 °C	40.5	1.50219	1.9190	2.4203
150 °C	32.5	1.095008	1.2968	1.5418
200 °C	27.4	0.74784	0.933004	1.0401
250 °C	25.8	0.7165	0.8221	0.8942

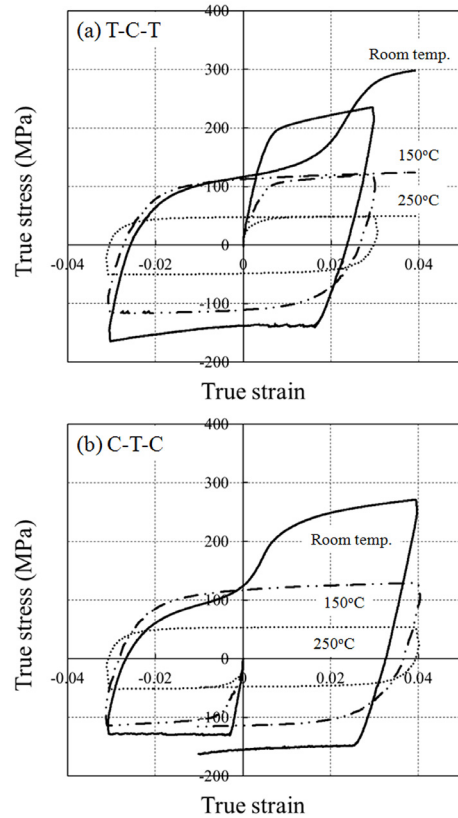


Fig. 1 Results of tension-compression test according to temperature effect (a: T-C-T, b: C-T-C)

2. 공정 및 유한요소 해석 소개

2.1 공정 소개

차량용 시트는 주행 시 전달되는 충격이나 진동을 적절히 흡수하여 승객에게 안락한 승차감을 제공하고, 사고 시 승객을 보호하는 역할을 한다. 시트 구조물은 쿠션 부와 철제 구조물로 이루어지며 철제 구조물은 백 프레임과 쿠션 프레임으로 나누어진다. 쿠션 프레임과 백 프레임은 리클라이너로 연

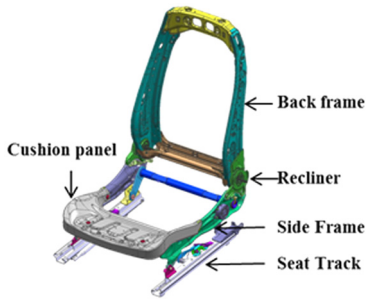


Fig. 2 Shape of seat structure

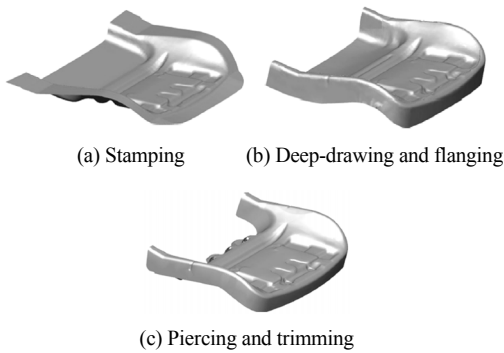


Fig. 3 Stamping process of seat cushion panel

결이 되며 쿠션 프레임은 시트의 앞뒤 길이를 조절할 수 있는 시트 트랙이 연결되어 있다. 시트 쿠션 패널은 상단에 위치하며 운전자의 엉덩이 부분을 지지하는 역할을 한다. Fig. 2에 시트 구조물에 대해 나타내었다.

시트 쿠션 패널은 3단계의 성형공정으로 이루어진다. 초기 형상을 성형하는 스탬핑(stamping) 공정을 시작으로 디프 드로잉(deep drawing)과 플랜징(flanging) 공정 그리고 마지막 후처리 공정인 피어싱(piercing)과 트리밍(trimming) 공정으로 이루어져 있다. Fig. 3에 성형공정 순서를 나타내었다.

2.2 유한요소 해석 소개

공정에 따라 유한요소 해석을 수행하기 위해 블랭크(blank)는 4절점을 갖는 사각형 셸 요소(shell element)를 사용하였고, 시트 패널의 최소 R을 갖는 형상을 고려하여 초기 요소 크기는 2 mm로 균일하다. 따라서 초기 전체 요소의 개수는 50,232개이며 자동적응 메쉬(adaptive mesh)를 적용하여 최소 요소 크기 0.5 mm까지 사용하였다. 다이와 펀치, 홀더

Table 2 Thermal property for the stamping analysis

Heat capacity	1,000 J kg ⁻¹ °C ⁻¹
Thermal conductivity	96 W m ⁻¹ °C ⁻¹
Heat transfer coefficient	4 W m ⁻² °C ⁻¹

는 강체(rigid body)로 구성하였다. 해석 시간을 고려한 해석 속도는 1 m/s이며 velocity scale factor를 0.001로 하여 1 mm/s의 준정적 속도를 유지하도록 하였다. 해석에 사용된 재료는 포스코에서 생산하고 있는 AZ31B-O이며 두께는 1.4 mm이다. 금형과 소재의 열전달을 고려하였고 사용된 열 물성은 Table 2와 같다. 재료 물성은 마그네슘 전용 구성식을 사용하여 재료의 온도와 변형률 속도, 이방성을 고려하였다. 또한 제품의 파단 기준을 정의하고자 성형 한계도를 적용하였으며 데이터는 참고 문헌을 활용하였다.¹³⁾

2.3 블랭크 형상 및 홀딩력 산출

초기 블랭크는 제품 설계 데이터를 이용해 역해석(inverse analysis)을 진행하여 블랭크 형상을 결정하였다. 역해석은 최종 형상인 제품을 바탕으로 곡률 면과 같은 형상을 평면으로 바꿔주는 방법¹⁴⁾으로 열적 영향성과 마찬가지로 틀의 작동 방향, 적용 패드 압력, 그리고 소성·탄성만을 고려하였다. 역해석을 통하여 도출한 블랭크의 초기 외곽선을 Fig. 4에 나타내었고, 하단의 트림부 라인은 마지막 공정에서 트림을 고려하기 위해 살을 채웠다. 따라서 초기 블랭크 형상의 외곽선을 결정하고 외곽선의 크기에 변화를 주어 최종 형상을 결정하였다. 소재의 유입 및 트림의 여유를 고려하여 외곽선의 크기는 10 mm 씩 증가시켜 총 30 mm까지 경향을 살펴보았다. 따라서 최종 블랭크 형상 및 크기는 Fig. 5와 같다.

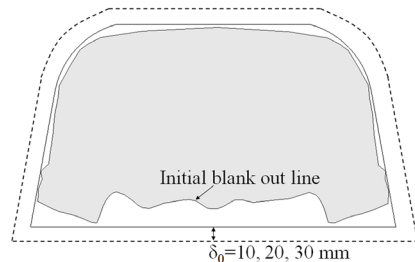


Fig. 4 Designed blank shape from initial blank out line

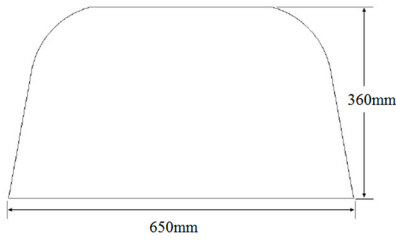


Fig. 5 The blank shape and size for seat cushion panel

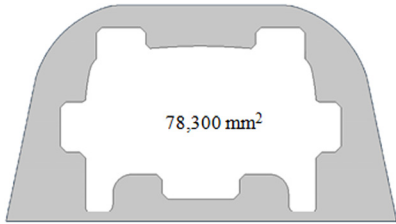


Fig. 6 Contact area of holder for the blank

홀딩력은 블랭크의 성형부를 제외하고 홀더와 접촉되는 블랭크의 면적에 대한 힘을 계산하여 산출하였다. Fig. 6은 홀더가 접촉되는 블랭크의 면적을 나타낸 것이며 이를 이용하여 홀딩력은 다음과 같은 간단한 식으로 산출하였다.

$$H_b = H_s \times S \tag{1}$$

여기서 H_b 는 홀딩력이고 H_s 는 재료의 단위 면적당 작용하는 최소 홀딩력이다. S 는 홀더와 접촉되는 블랭크의 면적이다. 일반적인 재료의 H_s 는 연강이 0.2 ~ 0.3, 알루미늄 0.08 ~ 0.12, 구리 0.1 ~ 0.15이다. 여기서 마그네슘의 H_s 는 알 수 없어 알루미늄의 H_s 를 사용하였고 값을 대입해 보면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$0.08 \text{ kgf/mm}^2 \times 78,300 \text{ mm}^2 = 6,264 \text{ kgf}$$

$$6,264 \text{ kgf} \times 9.81 \text{ m/s}^2 = 61,449.84 \text{ N}$$

$$\text{Blank Holding Force (BHF)} \approx 60 \text{ kN}$$

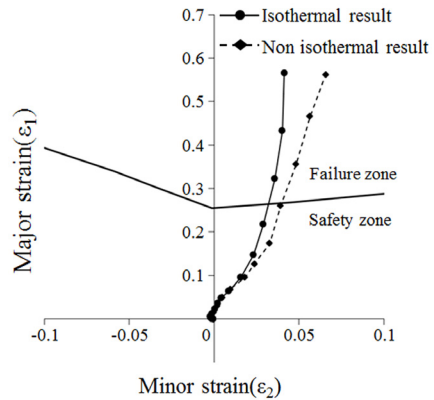
따라서 알루미늄의 BHF 추정 값이 약 60 kN이므로 마그네슘은 50 kN으로 결정하였다.

3. 초기 공정 성형해석

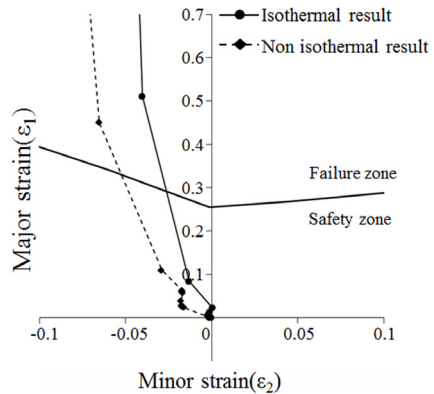
성형해석은 각 단계별 성형 공정의 온도 영향성을 평가하기 위해 등온과 비등온 조건으로 성형해

Table 3 Temperature conditions for non-isothermal

	1 st process	2 nd process
Die	250 °C	200 °C
Punch	100 °C	150 °C
Holder	250 °C	250 °C



(a) Strain path of the R part



(b) Strain path of the wall part

Fig. 7 Strain path for the maximum thinning element

석을 수행하였다. 등온 해석의 온도는 250 °C로 다이, 펀치, 홀더의 온도가 동일하다. 비등온 조건은 공정마다 온도가 다르며 조건을 Table 3에 나타내었다. 해석 결과 두 조건 모두 볼트 체결부의 최소 R부분과 하단 끝단부의 벽 부분에서 과도한 두께 감소율을 보였다. 최대 두께 감소율을 보이는 요소를 선택하여 변형 이력을 확인하였고, R부에서는 이축 변형 모드가, 벽부에서는 단축 변형 모드가 동일하게 나타났다. Fig. 7에 변형 이력을 나타내었고, 변형 이력을 분석한 결과 성형 중간에 소재의 유입이 차단되어 공정 중간에 요소가 급격히 늘어남을 확인

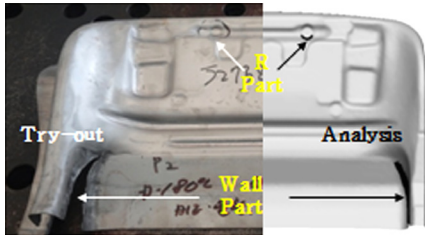


Fig. 8 Comparison of non-isothermal analysis result and try-out for initial process

할 수 있었다. 이는 성형 공정 시 온도가 고려되기 전에 소재의 유입 및 공정 조건 등과 같은 문제가 있음을 알 수 있다.

초기 공정을 적용하여 시제품을 제작하고 해석 결과와 비교하였다. 초기 공정을 적용한 등온 및 비등온 조건 모두 해석 결과와 동일한 위치에서 찢어짐을 확인하였다. Fig. 8에 비등온 조건을 적용한 시제품과 해석 결과를 비교하였다.

4. 공정 변경 및 제안

4.1 초기 성형 공정 분석

시트 쿠션 패널의 성형은 1공정에서 35 mm 성형 후 2공정에서 총 제품의 깊이 65 mm를 성형하게 된다. 따라서 2공정에서 디프 드로잉 공정으로 30 mm를 더 성형하게 되고 동시에 플랜징 공정이 진행되는데, 플랜징 공정 시 소재의 유입을 차단하게 되어 찢어지게 된다. Fig. 9에 각 공정 시 소재 유입 방향을 단면으로 나타내었다.

이러한 문제를 해결하기 위해 금형을 변경하고 공정을 제안하였다. 먼저 소재의 유입이 원활한 1공정에서 최종 깊이의 65 mm를 성형하고자 하였다. 따라서 1공정에서 65 mm 디프 드로잉 공정 완료 후 2공정에서는 플랜징 공정을 수행하도록 성형공정

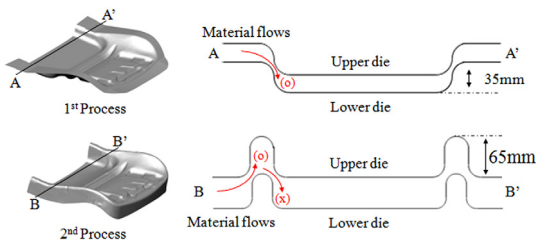


Fig. 9 Section view of material flows for 1st and 2nd process

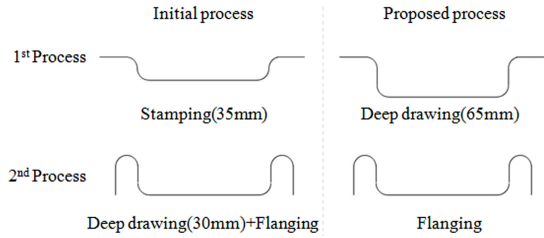


Fig. 10 Comparison of section view for initial process and proposed process

을 제안하였다. Fig. 10에 초기 금형의 단면 형상과 변경된 금형의 단면 형상을 비교하여 나타내었다. 그리고 볼트 체결 최소 R 부분은 2 mm에서 4 mm로 증가시켰다.

4.2 제안 공정 성형해석

변경 및 제안한 공정을 이용해 등온 및 비등온 성형해석을 수행하였다. 온도 조건은 공정 변경 전과 동일하며 1공정에서 65 mm 깊이의 디프 드로잉 후 2공정의 플랜징 공정을 진행하였다. 등온 해석 결과 초기 등온해석 결과와는 다른 양상을 보였으며 이는 소재의 유입을 확보하였으나 온도 조건으로 인하여 마찰이 심한 벽부와 날카로운 모서리부에서 찢어짐을 알 수 있다. Fig. 11에 등온 해석 결과를 나타내었다.

비등온 해석 결과 계속 찢어지던 볼트 체결의 벽부 성형을 완료하였다. Fig. 12의 온도 분포에서 나타나듯이 플랜지 부의 온도를 높게 하여 소재의 유입을 원활히 하고 모서리와 벽부의 온도를 낮게 하여 파단 저항을 높임으로써 성형을 완료시켰다. Fig. 13에 해석 결과를 나타내었다.

시트 쿠션 패널 부품을 성형하고 시트 프레임과 체결을 하기 위해 피어싱 및 트리밍과 같은 후처리

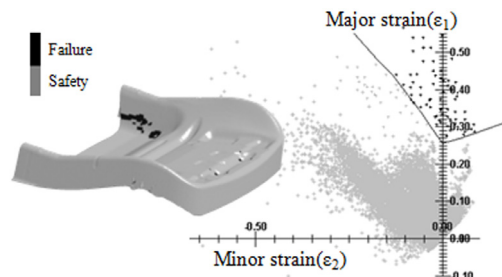


Fig. 11 Analysis result of isothermal by the proposed process

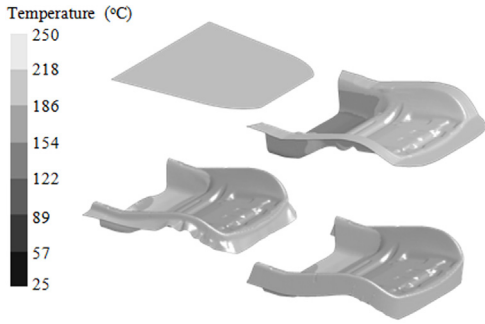


Fig. 12 Deformed shape and temperature distributions of non-isothermal for seat cushion panel

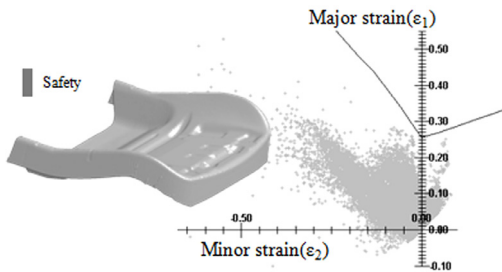


Fig. 13 Analysis result of non-isothermal by the proposed process

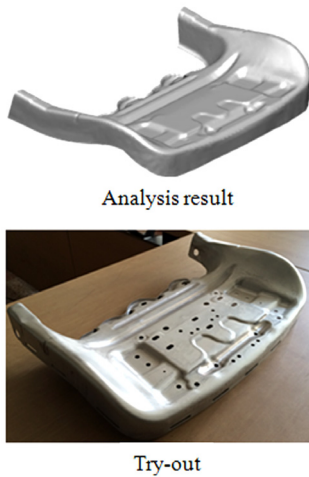


Fig. 14 Comparison of analysis result and try-out using the proposed process

공정이 진행된다. 따라서 트리밍 공정을 수행하기 위해 금형 데이터의 다이에서 트림 라인을 생성하고 시트 쿠션 팬에 적용하여 최종 형상을 만들었다. 따라서 제안한 성형 공정을 적용하여 시제품을 제작하고 해석 결과와 비교하여 Fig. 14에 나타내었다.

4. 결과 분석

해석 결과를 통해 최대 두께 감소가 나타나는 주요 부의 두께를 확인하였다. 그림과 같이 최소 R을 갖는 시트의 상단부와 하단 벽부 모서리에서 전체 9 곳을 측정하였으며, 왼쪽 하단부의 모서리 부분(8번 측정지점)에서 1.099 mm로 최소 두께가 나타났다. 해석결과의 신뢰성을 검증하기 위해 제작한 시제품을 가지고 동일한 측정 점에서 두께를 측정하였다. 제품의 단면 절단은 와이어 커팅을 이용하였고, 두께 측정은 마이크로미터기를 사용하였다. 측정은 3회 이상 측정하여 평균값을 사용하였다. 측정 결과 최소 두께가 나타는 부분이 해석 결과와 동일하였으며 전체적으로 유사한 두께 분포의 경향을 보였다. Fig. 15에 제품의 두께 측정 지점을 표시하였으며 Fig. 16에 해석 결과와 시제품 측정 결과를 비교하여 나타내었다.

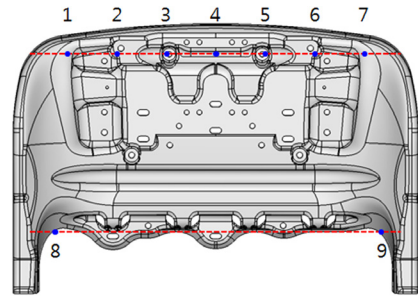


Fig. 15 The thickness measurement points of the product

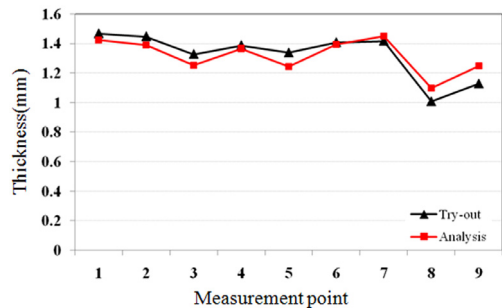


Fig. 16 Comparison of the thickness measurement result for analysis and try-out

5. 결론

마그네슘 합금 판재를 이용한 자동차용 시트 쿠션 패널의 성형해석을 수행하였다. 온도의 영향성

을 분석하고자 다양한 온도 조건에서 성형해석을 수행하였으며, 공정 시 발생하는 문제점을 분석하고 이를 보완하는 새로운 성형 공정을 제안하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 이전 연구에서 진행한 마그네슘 합금 판재의 재료 시험 데이터 및 user subroutine을 이용하여 자동차 시트 쿠션 패널 부품 성형 해석을 수행하였다. 해석 결과를 통해 성형 공정 시 발생할 수 있는 결함 및 오류를 예측하였고, 결과 분석을 토대로 새로운 성형 공정을 제안하였다.
- 2) 제안한 성형 공정을 바탕으로 등온과 비등온 조건으로 해석을 진행하여 비교 검토하였고, 해석 결과 비등온 조건에서 좋은 성형 결과를 보였다.
- 3) 제안한 해석 공정을 반영하여 시제품을 제작하였다. 해석 결과와 동일한 결과를 얻을 수 있었으며 이러한 과정을 통하여 해석 기술의 축적 및 신뢰성을 검증하였다.

References

- 1) J. K. Hwang and D. M. Kang, "FE Analysis on the Press Forging of AZ31 Magnesium Alloy," Transactions of KSAE, Vol.14, No.1, pp.86-91, 2006.
- 2) T. W. Yoon, R. H. Kim, M. Y. Lee and R. H. Kim, "Optimization of Forming Condition and Development of Forming Process with Mg Car Body," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.1689-1693, 2013.
- 3) M. K. Kulekci, "Magnesium and its Alloys Applications in Automotive Industry," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.39, pp.851-865, 2008.
- 4) A. A. Luo, "Magnesium Casting Technology for Structural Applications," Journal of Magnesium and Alloys, Vol.1, Issue 1, pp.2-22, 2013.
- 5) M. Kiani, I. Gandikota, M. R. Rohani and K. Motoyama, "Design of Lightweight Magnesium Car Body Structure under Crash and Vibration Constraint," Journal of Magnesium and Alloys, Vol.2, Issue 2, pp.99-108, 2014.
- 6) D. Biermann and Y. Liu, "Innovative Flow Drilling on Magnesium Wrought Alloy AZ31," Procedia CIRP, Vol.18, pp.209-214, 2014.
- 7) H. Y. Wu, P. H. Sun and F. Z. Lin, "Anisotropic and Tensile Flow Behaviors of Mg Alloy AZ31B Thin Sheet in H24 Condition at Elevated Temperatures," Material Science and Engineering:A, Vol.528, Issue 6, pp.2522-2531, 2011.
- 8) M. G. Lee, S. J. Kim, R. H. Wagoner, K. Chung and H. Y. Kim, "Constitutive Modeling for Anisotropic / Asymmetric Hardening Behavior of Magnesium Alloy Sheets: Application to Sheet Springback," International Journal of Plasticity, Vol.25, Issue 4, pp.70-104, 2009.
- 9) N. T. Nguyen, M. G. Lee, J. H. Kim and H. Y. Kim, "A Practical Constitutive Model for AZ31B Mg Alloy Sheets with Unusual Stress-strain Response," Finite Elements in Analysis and Design, Vol.76, p.3949, 2013.
- 10) N. T. Nguyen, O. S. Seo, C. A. Lee, M. G. Lee, J. H. Kim and H. Y. Kim, "Mechanical Behavior of AZ31B Mg Alloy Sheets under Monotonic and Cyclic Loadings at Room and Moderately Elevated Temperatures," Materials, Vol.7, Issue 2, pp.1271-1295, 2014.
- 11) H. Y. Kim, S. C. Choi and H. J. Kim, "Evaluation and Prediction of the Forming Limit of AZ31B Magnesium Alloy Sheet in a Cross-Shaped Cup Deep Drawing Process," Metals and Materials International, Vol.15, No.4, pp.575-584, 2009.
- 12) M. G. Lee, J. H. Kim, D. Kim, O. S. Seo, N. T. Nguyen and H. Y. Kim, "Anisotropic Hardening of Sheet Metals at Elevated Temperature: Tension-Compressions Test Development and Validation," Experimental Mechanics, Vol.53, Issue 6, pp.1039-1055, 2013.
- 13) C. A. Lee, M. G. Lee, O. S. Seo, N. T. Nguyen, J. H. Kim and H. Y. Kim, "Cyclic Behavior of AZ31B Mg: Experiments and Non-isothermal Forming Simulations," International Journal of Plasticity, Vol.75, pp.39-62, 2015.
- 14) J. T. Kim, B. M. Kim and C. G. Kang, "Blank Shape Design Process for a Hot Stamped Front Pillar and its Experimental Verification," Transactions of Materials Processing, Vol.21, Issue 3, pp.186-194, 2012.