

핫스탬핑 공정에서 Tailor Rolled Blank 의 성형 특성을 고려한 성형한계 예측

김재홍¹ · 고대훈¹ · 서판기² · 김병민[#]

Limits Considering the Deformation Characteristics of Tailor Rolled Blank during Hot Stamping

J. H. Kim, D. H. Ko, P. G. Seo, B. M. Kim

(Received July 10, 2014 / Revised August 12, 2014 / Accepted September 2, 2014)

Abstract

The current study aims to predict the forming limits considering the deformation characteristics of tailor rolled blank(TRB) during hot stamping. The formability of TRB is affected by the TRB line orientation because elongations change due to the intrinsic geometry within the sheet. To evaluate the forming limits, Nakazima tests were conducted at elevated temperatures with different TRB line orientations. Forming limit diagrams(FLD) of TRB can be predicted by an interpolating equation based on the Nakazima test. Predicted FLDs were used in FE-simulations of a rectangular drawing. The predicted limit drawing height was compared with experimental results. The simulation results show good agreement with the experimental ones with an error range of 3%.

Key Words : Tailor Rolled Blank, Hot Stamping, Forming Limit Diagram, Formability, TRB Line Orientation

1. 서론

최근, 자동차 경량화와 함께 부재의 충돌 성능을 극대화할 목적으로 차체 부품에 있어 이종 물성(Tailored property)을 구현하기 위한 제조 공정이 개발되고 있다. 특히, 이종 물성을 구현하는 공법 중 Tailor rolled blank(TRB)는 소재를 압연하는 과정에서 롤 갭을 제어하여 두께가 상이한 소재를 제작하는 공법이다[1]. 이러한 TRB 소재를 핫스탬핑 공정에 적용할 경우, 두께 차이로 인한 이종 물성을 가짐과 동시에 1.5GPa 이상의 초고강도 부품을 제작할 수 있기 때문에 필라류 및 멤버류 등의 고강도 특성이 요구되는 차체 부품에 적용되고 있다[2].

관재 성형 공정에서 제품의 성형성을 예측하는

보편적인 방법은 실험적으로 구한 성형한계도를 이용하여 성형해석을 통해 소재의 성형성을 예측하는 것이다. 특히, TWB(Tailor welded blank) 및 TRB 등의 이종 물성의 구현을 위한 공법의 경우 동일 제품 내에서도 재질 및 두께차이로 인해 다양한 성형특성을 가지기 때문에 각각의 특성을 고려한 성형성을 예측하는 것이 요구된다.

이에 따라 최근에는 이종 물성 구현을 위한 공법의 성형성 예측에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. Mayer[3] 등은 냉간 드로잉(Drawing) 공정에서 TRB 소재의 각 두께별 성형한계도를 도출하여 성형성을 예측하였다. 그리고 Davies[4] 등은 TWB의 성형성을 예측하기 위하여 Marciniak-Kuczynski 모델[5]을 각 요소에 적용하여 예측 정밀도를 향상시켰다. 또한,

1. 부산대학교 정밀가공시스템 전공

2. ㈜ 신영

Corresponding Author : School of Mechanical Engineering, Pusan National University, E-mail:bmkim@pusan.ac.kr

Cheng[6] 등은 TWB의 두께비 및 용접선 방향에 따른 성형성을 평가하여 성형한계도를 도출하였다.

하지만 현재까지 TRB의 핫스탬핑 공정에 대해 성형성을 예측한 사례가 없으며, 특히 초기에 배치된 TRB 라인은 성형되는 과정 동안 계속 변하기 때문에 이를 고려하여 정밀하게 성형성을 예측할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 TRB 핫스탬핑 공정에서 소재의 불균일한 두께 및 기하학적 특성이 고려된 성형한계도를 적용하여 정밀하게 성형성을 예측하고자 한다. 먼저, TRB의 실험적인 성형한계도를 확보하기 위해 한계 돔 높이(Limit Dome Height) 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 시험편은 두께비가 1.43(1.5mm/1.05mm)인 Nakazima 시험편으로, 이는 0°, 45°, 90°의 TRB 라인 방향을 고려하였다. 실험방법은 핫스탬핑 공정의 절차를 고려하여 TRB 소재를 900°C에서 5분간 유지한 후 급형으로 이송하여 약 750°C에서 성형하였다. 실험적 성형한계도를 기반으로 다양한 TRB 라인 방향에 대한 성형한계도 보간식을 도출하였다. 그리고 보간식은 성형해석과 연계하여 TRB 핫스탬핑 사각 드로잉 공정에 적용하였고, 한계 드로잉 높이를 예측하였다. 마지막으로 예측된 한계 드로잉 높이를 실험 결과와 비교하여 본 연구에서 제시한 TRB 성형성 예측 방법의 타당성을 검증하였다.

2. TRB의 성형성 예측

2.1 TRB 성형성 예측 절차

Fig. 1에 TRB의 성형성을 예측하기 위한 절차를 나타내었다. 본 연구에서는 실험적인 성형한계도를 기반으로 한 TRB 라인 방향에 따른 성형한계도 보간식을 작성하였고, 이를 성형해석과 연계하여 TRB의 성형성을 예측하였다. 본 연구에서 TRB 라인 방향은 압연 방향과 주변형 방향의 각도로 정의하였으며, 이는 성형이 진행되는 동안 계속 변하기 때문에 각 단계별로 계산하여 보간식에 적용하였다. 성형해석 결과에서 TRB 라인을 계산하기 위해 먼저 주변형 방향을 Mohr원을 이용하여 아래와 같이 계산하였다.

$$\varepsilon'_{xy} = 0 = -\frac{1}{2}(\varepsilon_x - \varepsilon_y) \sin 2\theta_{Major\ strain} + \varepsilon_{xy} \cos 2\theta_{Major\ strain} \quad (1)$$

$$\theta_{Major\ strain} = \frac{1}{2} \operatorname{atan}\left(\frac{\varepsilon_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y}\right) \quad (2)$$

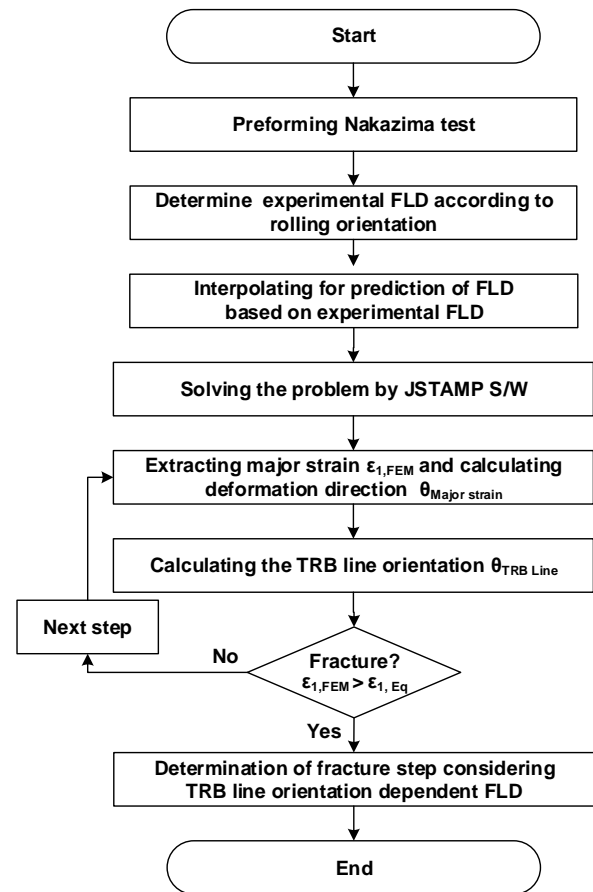


Fig. 1 Procedure for prediction of formability of TRB considering TRB Line

여기서 ε_x 는 x방향의 변형률, ε_y 는 y방향의 변형률, ε_{xy} 는 xy방향의 전단 변형률, $\theta_{Major\ strain}$ 은 주변형 방향이다. TRB 라인 방향은 주변형 방향의 방향벡터 및 TRB 라인의 방향벡터로 계산된다.

$$V_{TRB\ line} \cdot V_{Major\ strain} = |V_{TRB\ line}| \times |V_{Major\ strain}| \cos \theta_{TRB\ Line} \quad (3)$$

$$\theta_{TRB\ line} = A \cos \frac{|V_{TRB\ line}| \times |V_{Major\ strain}|}{V_{TRB\ line} \cdot V_{Major\ strain}} \quad (4)$$

여기서 $V_{TRB\ Line}$ 은 TRB 라인의 방향벡터, $V_{Major\ stain}$ 은 주변형 방향의 방향벡터, $\theta_{TRB\ Line}$ 은 TRB 라인의 방향을 나타낸다.

식(1) ~ (4)를 통해 계산된 TRB 라인 방향과 주변형률을 성형한계도 보간식에 대입하여 계산된 주변형률과 성형해석의 주변형률을 비교하여 판단을 예

측하였다. 또한, TRB 라인 방향은 제품 내에서도 위치마다 다르기 때문에 각각의 요소에 대해 위와 같은 절차를 적용하였다.

2.2 한계 돔 높이 실험

TRB 라인 방향에 따른 성형한계도 보간식을 도출하기 위해 한계 돔 높이 실험을 수행하였으며 Fig. 2와 3에 실험 장치와 시험편의 형상을 나타내었다. 실험 장치는 펀치, 홀더, 다이로 구성되어 있으며 카트리지 히터로 금형을 가열하여 성형 시, 시험편의 온도 저하를 방지하였다. 또한 시험편이 다이의 중앙에 위치할 수 있도록 가이드를 설치하였다. 본 연구에서 사용된 TRB 시험편은 핫스탬핑 공정에 널리 사용되고 있는 Al-Si 코팅된 보론 강판(22MnB5)을 두께비 1.43(1.5mm/1.05mm)으로 압연하였으며, 그 단면 형상을 Fig. 4에 나타내었다. 압연된 시험편을 0°, 45°, 90° 방향으로 와이어 커팅하여 Nakazima 시험편 형상으로 제작하였다. 그리고 시험편 표면에 직경이 1mm인 원형을 그리드 마킹(Grid marking)하여 성형이 완료된 후에 변형률을 측정하였다.

본 실험은 핫스탬핑 공정의 절차에 따라 시험편을 전기가열로를 이용하여 900°C에서 5분간 가열한 후, 금형으로 이송하여 네킹(Necking)이 발생하는 시점까지 성형하였다[2]. 실험은 펀치 속도를 20mm/s, 홀딩력은 20ton으로 설정하여 수행되었으며 성형 시작 시, 시험편의 온도는 약 740 ~ 760°C로 측정되었다. 성형이 완료된 시험편 즉, 네킹이 발생한 시험편을 금형에서 취출하여 광학 변형률 측정 장치(Argus)를 이용하여 변형률을 측정하였다. 성형한계도는 TRB 라인 방향에 따라 ISO-12004 규격에 의거하여 도출하였다[7].

2.3 성형한계도 보간식 작성

한계 돔 높이 실험을 수행하여 도출된 성형한계도를 이용하여 TRB 라인 방향을 고려한 성형한계도 보간식을 작성하였다. 실험 결과 TRB 라인 방향 90°에서 가장 높은 성형성을 가졌으며, 45°에서 가장 낮은 성형성을 나타내었다. 이는 TRB 라인 방향에 따라 소재의 변형 집중이 달라지기 때문이다[6].

한계 돔 높이 실험으로 확보된 성형한계도를 적용하여 TRB 라인에 따라 성형한계도 보간식을 도출하였다. 또한 본 연구에서는 보간식의 정밀도 향상을 위해 식(5) ~ (8)과 같이 부변형률이 “-”인 성형모

드에서는 선형적으로, 부변형률이 “+”인 모드에서는 자연로그 함수로 고려하였다.

$$\epsilon_1 = \left(-0.68 + \frac{0.23 \cdot \theta}{45} \right) \cdot \epsilon_2 + \left(39.62 - \frac{1.66 \cdot \theta}{45} \right) \quad (5)$$

$$\epsilon_1 = \left(0.028 - \frac{0.478 \cdot \theta}{45} \right) \cdot \epsilon_2 + \left(34.39 + \frac{3.57 \cdot \theta}{45} \right) \quad (6)$$

$$\epsilon_1 = \left(1.461 + \frac{0.432 \cdot \theta}{45} \right) \cdot \ln(\epsilon_2) + \left(39.2 - \frac{\theta}{45} \right) \quad (7)$$

$$\epsilon_1 = \left(3.082 - \frac{1.189 \cdot \theta}{45} \right) \cdot \ln(\epsilon_2) + \left(35.82 + \frac{2.38 \cdot \theta}{45} \right) \quad (8)$$

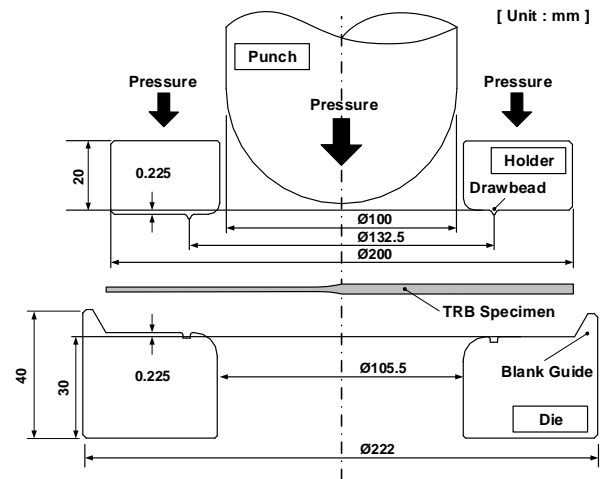


Fig. 2 Experimental set-up for limit dome height test

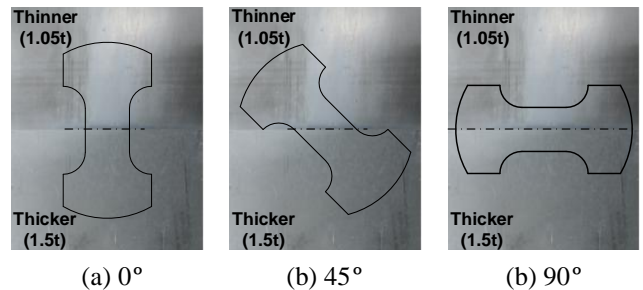


Fig. 3 Shape of Nakazima specimen with width 50mm considering TRB Line orientation



Fig. 4 Cross section of TRB with thickness ratio 1.43(1.5mm/1.05mm)

여기서 ϵ_1 는 주변형률, ϵ_2 는 부변형률, θ 는 TRB 라인의 방향을 나타낸다. 그리고 식(5)와 (6)은 부변형률이 “-”인 성형모드, 식(7)과 (8)은 부변형률이 “+”인 성형모드의 성형한계도를 나타낸다. 그리고, 식(5)와 (7)은 TRB 라인 0°~45° 방향, 식(6)과 (8)은 45°~90° 방향의 성형한계도를 나타낸다.

Fig. 5에 실험적 성형한계도와 보간식을 이용하여 작성된 성형한계도를 비교하여 나타내었다. 보간식은 TRB 라인 방향 및 변형 모드에 따라 최대 오차가 7.2%로 정밀하게 성형한계도를 모사하였다.

3. TRB 성형성 예측의 검증

3.1 사각 드로잉 한계 드로잉 높이 예측

TRB의 성형한계도 보간식을 핫스탬핑 사각 드로잉 공정에 적용하여 성형해석을 통해 한계 드로잉 높이를 예측하였다. 성형해석은 상용 프로그램인 JSTAMP/NV 2.5.5를 사용하였고 해석조건은 Table 1에, 해석 모델은 Fig. 6에 나타내었다. 초기 소재의 사이즈는 길이 120mm, 폭 40mm의 셸 요소로 모델링하였다. TRB 라인은 편치의 중앙에 위치하도록 하였으며 TRB의 단면 형상을 고려하기 위해 천이(Transition) 구간을 8.3mm로 설정하였고 두께비는 1.43(1.5mm/1.05mm)으로 앞서 수행된 한계 돔 높이 실험과 동일하게 설정하였다.

일반적인 TRB의 성형성 예측 방법인 두께에 따라 각각의 성형한계도를 적용한 경우[3], 한계 드로잉 높이는 15.1mm로 예측된 반면에 TRB 라인 방향을 고려한 성형한계도를 적용한 경우에는 14.3mm로 예측되었다.

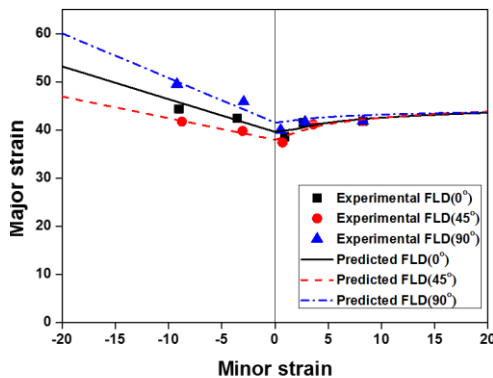


Fig. 5 Comparison of experimental FLD and interpolated FLD at thickness ratio 1.43(1.5mm/1.05mm)

Table 1 The Conditions of FE-Simulation

Conditions	Values
Young's modulus (GPa)	100
Poisson ratio	0.3
Thermal conductivity (W/m·K)	32
Friction coefficient (μ)	0.4 [8]
Material model	Cowper-Symond's [8]
Convective heat transfer coefficient (W/m ² ·K)	20
Convective heat transfer coefficient (W/m ² ·K)	As fuction of pressure [9]
Forming speed (mm/s)	20
Blank thickness ratio	1.43(1.5mm/1.05mm)
Balnk heating temp. (°C)	900
Transfer time (sec)	7
Holding time (sec)	3

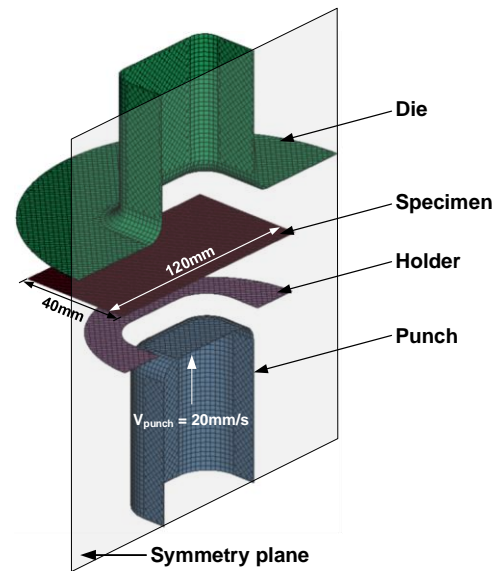


Fig. 6 FE-model of TRB hot stamping rectangular drawing

3.2 핫스탬핑 사각 드로잉 실험

본 연구에서 제시한 TRB의 성형성 예측 방법을 검증하기 위하여, 핫스탬핑 사각 드로잉 실험을 수행하여 성형해석을 통해 예측된 결과와 비교하였다.

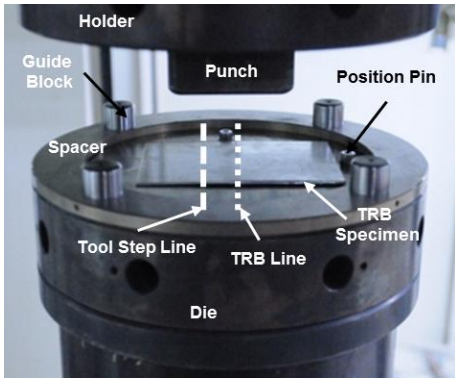


Fig. 7 Experimental set-up for rectangular drawing

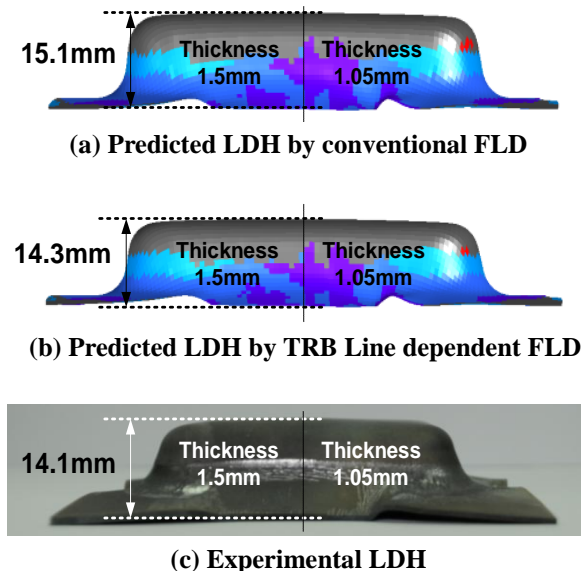


Fig. 8 Comparison of rectangular drawing part between predicted and measured LDH

Fig. 7에 다이, 홀더, 펀치로 구성된 열간 사각 드로잉 실험 장치를 나타내었다. 펀치 사이즈는 길이가 72mm, 폭이 48mm의 직사각형으로 제작하였고 홀더와 다이는 TRB의 두께 편차를 고려하여 균일한 홀딩력을 부가되도록 각각 0.225mm의 단차를 부여하였다. 단차는 TRB 라인이 위치하는 중심으로부터 10mm 떨어진 위치에 배치하여 성형 시, 주름이나 파단을 방지하였다. 그리고 소재의 정확한 안착을 위해 가이드 핀을 설치하고, 금형과 소재간에 발생하는 높은 마찰의 영향을 최소화하기 위하여 높이 7.6mm의 스페이서(Spacer)를 설치하였다. 스페이서는 다이와 홀더간의 간격을 3.5mm로 유지하도록 제작하였고 홀딩 시, 홀더와 다이가 드로잉 방향으로 정확히 정렬하도록 가이드 블록을 설치하였다.

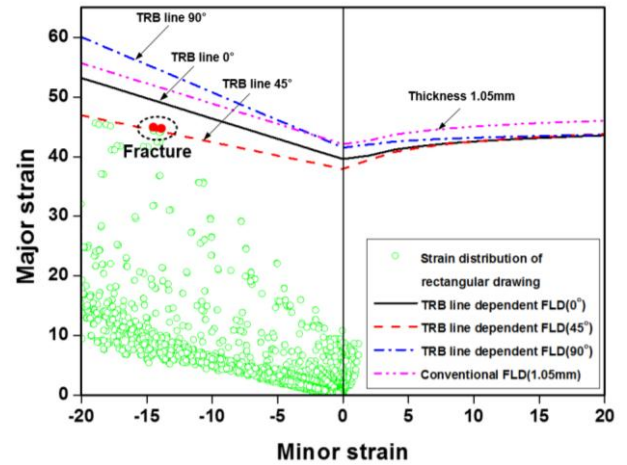


Fig. 9 Strain distribution of rectangular drawing at drawing height 14.3mm

사각 드로잉 실험은 핫스탬핑 공정의 절차에 따라 시험편을 전기가열로를 이용하여 900℃에서 5분간 가열한 후, 금형으로 이송하여 네킹이 발생할 때까지 성형하였다. 본 연구에서는 펀치의 스트로크(Stroke)에 따른 성형하중을 측정하여 하중이 감소하는 시점에 해당하는 스트로크를 한계 드로잉 높이(Limit dome height; LDH)로 정의하였다[10]. 그리고 실험은 펀치 속도가 20mm/s, 홀딩력은 20ton으로 설정하여 수행되었으며 성형 시작 시, 시험편의 온도는 약 740~760℃로 측정되었다.

3.3 한계 드로잉 높이(LDH) 비교

Fig. 8에 예측된 한계 드로잉 높이와 실험을 통해 측정된 한계 드로잉 높이를 비교하여 나타내었다. 그리고 Fig. 9에는 14.3mm의 동일한 드로잉 높이에서 시험편의 변형률 분포와 TRB 라인 방향 고려 여부에 따른 성형한계도를 비교하여 나타내었다. TRB 라인 방향을 고려하여 성형한계도를 적용한 경우, 파단이 발생하는 반면에 일반적인 성형성 예측 방법에 따라 두께 1.05mm 소재의 성형한계도를 적용한 경우에는 파단이 발생하지 않았다. TRB 사각 드로잉 시험편은 두께가 얇은 코너부 모서리에서 네킹이 발생하였으며 이는 TRB의 성형 시 두께가 얇은 부분에서 두꺼운 부분보다 변형이 상대적으로 집중되기 때문이다. 또한 모서리 부분에서의 TRB 라인 방향은 성형성이 가장 낮은 45° 방향이기 때문이다. 그리고 일반적으로 판재 성형에서 두께가 증가할수록 성형성이 증가하는데[11], 이와 같은 경향은 TRB

열간 성형에서도 동일하게 나타났다.

TRB 핫스탬핑 실험 결과에서 측정된 핫스탬핑 사각 드로잉 제품의 한계 드로잉 높이는 14.1mm로 나타났다. 소재 두께에 따라 각각의 성형한계도를 적용한 경우는 한계 드로잉 높이가 실험 결과와 7.1%의 오차가 발생한 반면에 TRB 라인 방향을 고려한 성형한계도를 적용한 경우에는 오차가 1.4%로 정밀한 판단 예측이 가능하였다. 따라서 본 연구에서 제시한 TRB 핫스탬핑 공정에 있어서 성형성 예측 방법의 타당성을 확보하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 TRB 핫스탬핑 공정에서 TRB 라인 방향에 따른 성형 특성을 고려한 성형한계도를 작성하고 핫스탬핑 사각 드로잉 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) TRB 성형 특성을 고려하는 성형한계도 보간식을 작성하기 위해 TRB 라인 방향에 따라 한계 돛 높이를 실험을 수행하여 0°, 45°, 90° TRB 라인 방향의 성형한계도를 작성하였다. 실험 결과, TRB 라인 방향 90°에서 가장 우수한 성형성을 가지는 것으로 나타났다.

(2) 한계 돛 높이를 실험 결과를 기반으로 하여 TRB 라인 방향별 성형한계도 보간식을 작성하였고, 작성된 성형한계도는 실험 결과와 최대 7.2%의 오차를 가졌다.

(3) TRB 라인 방향에 따른 성형성 예측 방법을 검증하기 위해 핫스탬핑 사각 드로잉 공정에 적용하여 비교한 결과, 예측된 한계드로잉 높이는 14.3mm로, 실험 결과에서는 14.1mm로 나타남에 따라 매우 우수한 예측 정밀도를 보였다.

(4) 본 연구에서 제시한 TRB 라인 방향이 고려된 성형한계 예측 방법의 타당성이 확보됨에 따라 향후 TRB 핫스탬핑 공정에 대해 정밀한 판단 예측이 가능할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012R1A5A1048294).

REFERENCES

- [1] S. J. Jeon, M. Y. Lee, B. M. Kim, 2011, Development of Automotive Door Inner Panel using AA5J32 Tailor Rolled Blank, *Trans. Mater. Process*, Vol. 20, No. 7 pp. 512~517.
- [2] H. Karbasian, A. E. Tekkaty, 2010, A Review on Hot Stamping, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 210, No. 15, pp. 2103~2118.
- [3] M. Meyer, B. Wietbrock, G. Hirt, 2008, Increasing of the Drawing Depth using Tailor Rolled Blanks-Numerical and Experimental Analysis. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* Vol. 48, No. 5, pp. 522~531.
- [4] R. Davies, G. Grant, M. Simith, 2002, Describing the Formability of Tailor Welded Blanks. *SAE Tech. pap. Ser. No. 2002-01-2085*.
- [5] Z. Marciniak, K. Kuczynski, 1967. Limit Strains in the Process of Stretch-forming Sheet Metal, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 8, No. 9, pp. 701~709.
- [6] C. H. Cheng, L. C. Chan, C. L. Chow, 2007, Weldment Properties Evaluation and Formability Study of Tailor-welded Blanks of Different Thickness Combinations and Welding Orientations, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 42, No. 15, pp. 5982~5990.
- [7] ISO/DIS - 12004 : Metallic materials - Sheet and Strip - Determination of Forming Limit Curves - Part 2: Determination of Forming Limit Curves in Laboratory.
- [8] A. B. Shapiro, 2009, Using LS-Dyna for Hot Stamping, 7th Eur. LS-Dyna Conf., Dynamore GmbH.
- [9] M. Merklein, J. Lechler, T. Stoehr, 2008, Proc. 7th Int. Conf. THE Coat. Manuf. Eng.(eds. K. D. Bouzakis, F. W. Bach, B. Denkena, M. Geiger), EEDM & Frounhofer PCCM, Aristoteles Univ., Thessaloniki, Greece, pp. 219~218.
- [10] J. Li, S. S. Nayak, E. Biro, S. K. Panda, F. Goodwin, Y. Zhou, 2013, Effect of Weld Line Position and Geometry on the Formability of Laser Welded High Strength Low Alloy and Dual-Phase Steel Blanks, *Mater. Des.*, Vol. 52, pp. 757~766.
- [11] Z. Marciniak, J. L. Duncan, S. J. Hu, 2005 *Mechanics of Sheet Metal Forming*, Butterworth-Heinemann, pp. 61~81.