[논문] 한국소성가공학회지, 제 20 권 제 7 호, 2011
Transactions of Materials Processing, Vol.20, No.7, 2011
http://dx.doi.org /10.5228/KSTP.2011.20.7.512

AA 5J32 Tailor Rolled Blank를 이용한 차량용 Door Inner Panel 개발

전성진[1] · 이문용[2] · 김병민[#]

Development of Automotive Door Inner Panel using AA 5J32 Tailor Rolled Blank

S. J. Jeon, M. Y. Lee, B. M. Kim

(Received September 8, 2011 / Revised September 21, 2011/ Accepted September 28, 2011)

Abstract

TRB(Tailor Rolled Blank) is an emerging manufacturing technology by which engineers are able to change blank thickness continuously within a sheet metal. TRB door inner panels with required larger thicknesses can be used to support localized high loads. In this study, the aluminum alloy 5J32 TRB sheet is used for a door inner panel application. The TRB material properties were varied by using three heat treatment conditions. In order to predict the failure of the aluminum TRB during simulation, the forming limit diagram, which is used in sheet metal forming analysis to determine the criterion for failure, was investigated. Full-field photogrammetric measurement of the TRB deformation was performed with an ARAMIS 3D system. A FE model of the door inner panel was created using Autoform software. The material properties obtained from the tensile tests were used in the numerical model to simulate the door inner of AA 5J32 for each heat treatment condition. After finite element analysis for the evaluation of formability, a prototype front door panel was manufactured using a hydraulic press.

Key Words : Tailor Rolled Blank, Door Inner Panel, Sheet Metal Forming, Light-weight, Limit Dome Height, Finite Element Analysis

1. 서 론

자동차 연비개선 정책의 일환으로 제정된 자동차 기업 평균연비 규제(Cooperate Average Fuel Economy)와 같은 국제 룰을 만족하기 위해 자동차 완성업체에서는 차량의 효율적 연비개선에 대한 신기술 개발 요구가 증대하고 있으며, 이를 위한 대책으로 경량 부품 개발에 대한 많은 연구가 진행 중이다. 차체 경량화를 위해 적용되고 있는 이종두께판재(TWB; Tailor Welded Blank)은 두께가 서로 다른 판재에 레이저 용접기술이 적용된 이종두께 합체 박판 판재로서 도어 인너 패널(Door Inner Panel), 센터 필라(Center Pillar), 사이드 멤버(Side Member) 등 국부적으로 강성을 요구하는 차체 부품에 많이 적용되고 있다. TWB는 차체 설계자들이 원하는 부위에 서로 다른 두께 및 강성을 가진 소재의 조합이 가능하다[1, 2].

그러나 용융용접이 어려운 알루미늄과 같은 비철금속은 TWB 제작이 어렵기 때문에 판재의 압연공정에서 길이방향 스트립(Strip)에 압하력의 조절에 따른 워크롤 갭(Work Roll Gap)의 차이를 이용한 이종두께판재(TRB; Tailor Rolled Blank) 기술이 적용된

1. 부산대학교 정밀기계공학과
2. ㈜성우하이텍 기술연구소
교신저자: 부산대학교 정밀기계공학과, bmkim@pusan.ac.kr

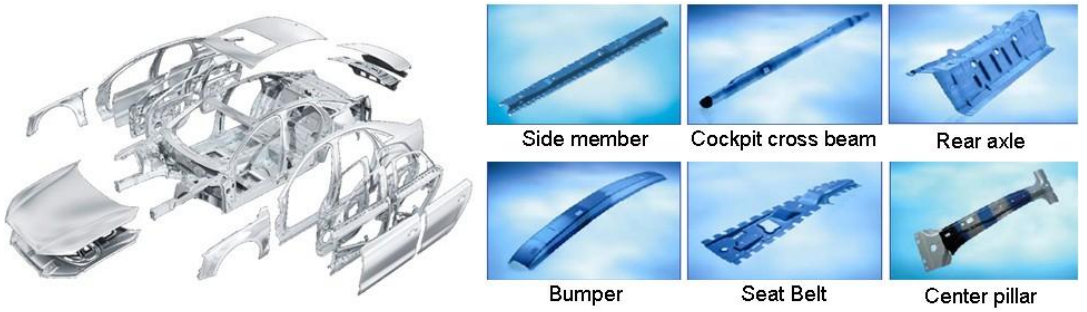


Fig. 1 Range of automotive body parts made of Tailor Rolled Blank (Source: Mubea)

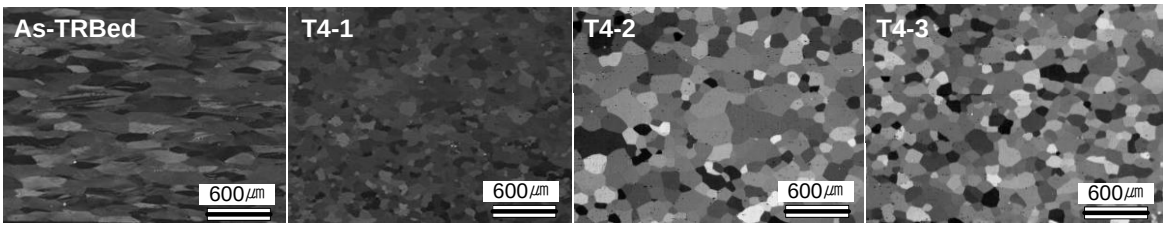


Fig. 2 Micrograph on the surface of TRB for the other conditions

다. TRB는 고강성이 요구되는 경량 차체 부품을 제작하기 위한 획기적인 반제품 제조 기술로서 차체의 경량화뿐만 아니라 TWB의 용접공정의 삭제를 통해 부품의 원가절감에 크게 기여할 수 있다.

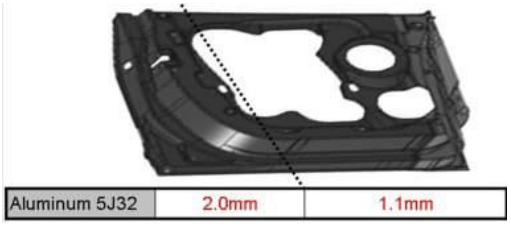
TRB는 Fig. 1과 같이 Steel 소재의 많은 양산용 차체부품에 적용되고 있으며 Steel 강판의 TRB는 현재까지 연구된 바가 있으나[5], 알루미늄(Aluminum) 합금으로 제조된 차체용 TRB에 대한 연구는 전무하다.

고강도 경량 알루미늄 합금 소재는 차체의 경량화를 위해 유럽 자동차 메이커를 중심으로 많은 개발이 진행되어 왔으며, 국내에서도 자동차 부품사를 중심으로 온실가스 절감, 연비향상을 위해 많은 경량 소재 가공 기술이 연구되고 있다.

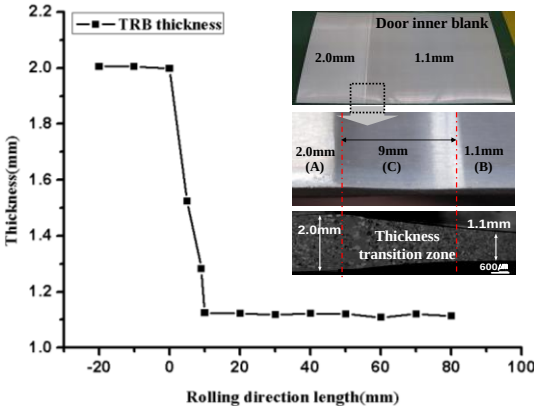
본 논문에서는 고경도 경량 알루미늄 TRB 판재를 사용하여 자동차용 프런트 도어 인너(Front Door Inner)를 개발하기 위해 알루미늄 TRB(Kobe Steel, AA 5J32) 판재의 기계적 특성과 프레스 성형성을 분석하고자 하였다. 특히 TRB의 두께 변화 구간에 대한 프레스의 복합적인 성형성을 검토하기 위해 LDH(Limit Dome Height) 시험을 수행하였다. LDH 시험은 판재의 복합 성형모드에 대한 장출특성 평가를 위해 많이 사용되었다.[3,4] LDH 시험은 금형과 소재간 접촉정도 및 각각의 표면특성에 의해 결정되고 표면의 부변형률의 크기에 의해 표시된다. 도어 인너 모델에 대한 CAE 성형해석을 통해 TRB 판재의 프레스 성형성을 예측하였고 시작용(Prototype) 금형을 제작하여 TRB 판재의 가공성을 성형해석 결과와 비교 분석하였다. 이에 CAE를 통해 예측된 성형결함 결과를 바탕으로 시작용 펀치(Punch), 다이(Die)를 수정 하였으며, 금형 최적화를 통해 TRB 판재가 적용된 고강도 경량 도어 인너 시제품을 제작하였다.

2. 알루미늄 합금 5J32 TRB 제작

TRB 기술은 압연 롤 갭 조정에 의해 이종 두께의 강판 제조 및 이를 성형하는 기술로서 기존 TWB 의 레이저 용접 공정 삭제가 가능하다. 이러한 제조공정 축소는 생산시간(Cycle Time) 절감, 차체 부품 중량 및 부품수 감소를 통해 원가절감이 가능한 획기적인 반제품 제조 기술이다. TRB는 기존 TWB 기술이 적용된 Fig. 1 과 같은 차체 부품에 대해 최대 50%까지 두께 변동 제어가 가능하다. TRB 의 장점으로는 롤 갭에 의한 두께 변경 부위의 노치(Notch)에 의한 용접부 응력집중 영향이 없고, 용접결함에 의한 피해가 없으며, 보강재 삭제를 통한 중량감소, 충돌 안정성 및 비용절감 효과를 들 수 있다. 그러나 압연 롤에 의한 짧은 두께 변화구간의 롤 마크는 프레스 성형 시 응력집중에 의한 넥킹(Necking) 현상이 발생하기 쉬운 단점이 있다.



(a) TRB Condition of Door inner panel



(b) Thickness transition of door inner TRB

Fig. 3 Process of AA 5J32 TRB door inner panel

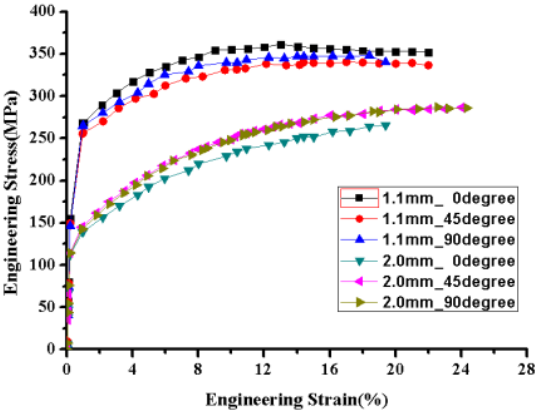


Fig. 4 Result of tensile test for AA 5J32 TRB

Table 1 Heat treatment conditions for AA 5J32 TRB

Conditions	Heat Treatment		
	T4-1	T4-2	T4-3
Solutionizing Temperature	400℃	450℃	500℃
Solutionizing Time	120sec		
Cooling Condition	Water Quenching		

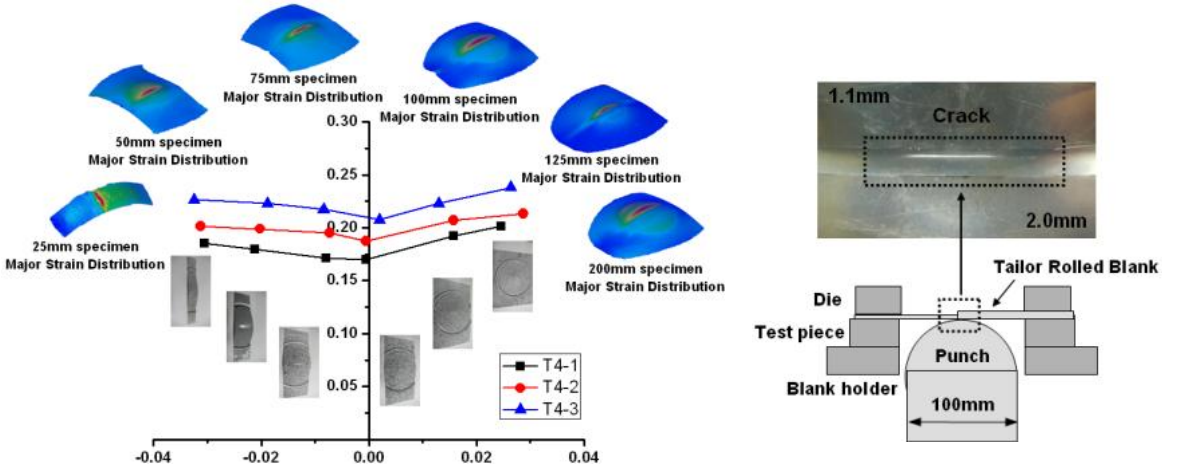
알루미늄 판재는 가볍고 내식성이 뛰어난 소재이지만, steel 대비 낮은 연신율로 인해 프레스공정에서 주름, 국부 파단과 같은 성형결함이 발생할 수 있다. 알루미늄 합금 특성, 두께, 열처리와 같은 제조공정이 가공성에 많은 영향을 미치므로 이를 향상시키기 위해서는 재료의 합금성분을 조절하거나, 압연 및 열처리를 통해 합금의 미세조직을 제어하여 프레스 성형에 유리하게 하는 작업이 필요하다. 본 논문에서 사용된 알루미늄 합금 5J32 는 Table 1 과 같은 배치 타입(Batch Type) 열처리 방법으로 시험용 시편을 제작하였으며 Fig. 2 와 같이 열처리 조건별 금속조직을 보였다.

냉간압연 후 기계적 물성 회복을 위한 열처리는 용체화 온도에 따라 세가지 조건으로 설정하였으며, 열처리 온도증가에 따라 압연조직 재결정 후 결정립이 성장하였고 특히 압연가공량이 50%인 두께 T4-3 조건의 경우 온도증가에 따라 결정립 조대화율이 증가하였다. 자동차용 도어 인너의 경량화를 위한 최적의 두께 프로파일(Profile)를 선정했으며, Fig. 3(a)와 같이 냉간압연에 의한 TRB 두께변화율은 45%로 결정하였다. 도어 인너 패널의 두꺼운 부분이 힌지(Hinge)부이고, 얇은 부분이 랫치(Latch)부로서 Fig. 3(b)와 같이 45% 두께 변화율을 갖는 알루미늄 TRB 판재를 제작하였다.

3. 기계적 특성 평가

금속재료는 가공시 열처리 이력과 기계적 변형에 의한 결정학적 구조의 변화 등에 따라 기계적 성질이 변한다. 특히 압연에 의해 제조된 알루미늄 합금 판재는 소성변형시 압연방향에 따라 서로 다른 기계적 성질을 나타내는데 이를 소성이방성이라 한다.

알루미늄 합금 5J32 TRB 판재의 기계적 특성을 평가하기 위해 ASTM E8 규격시편을 사용하여 단축인장시험을 수행하였다. 본 시험에서는 Zwick 만능시험기를 활용하여 시험을 수행하였으며, Fig. 4와 같이 알루미늄 합금 5J32 판재의 두께 별 공칭응력-공칭변형률 곡선을 나타내었다. 시료의 이방성을 고려하기 위해 2.0mm의 소재 원판과 두께 변화 45%로 압연된 1.1mm의 시료로 구분하여 각각 시료별 압연방향 0°, 45°, 90°에 대해 기계적 물성을 평가하였다. 1.1mm 시편의 경우 TRB 압연에 의한 가공경화로 인해 알루미늄 원판에 비해 높은 응력특성을 보였다.



(a) Forming limit diagram detail for heat treatment conditions **(b) Fracture location of TRB**

Fig. 5 Results of limiting dome height test and ARAMIS-analysis for AA 5J32 TRB

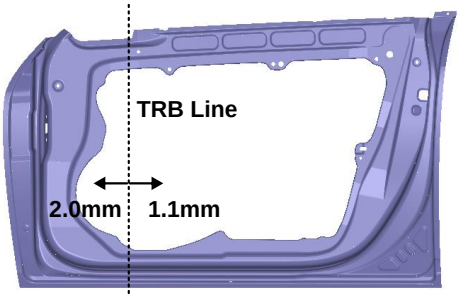


Fig. 6 Model of TRB door inner panel

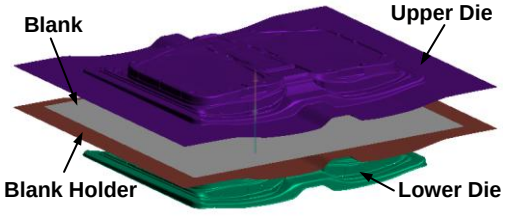
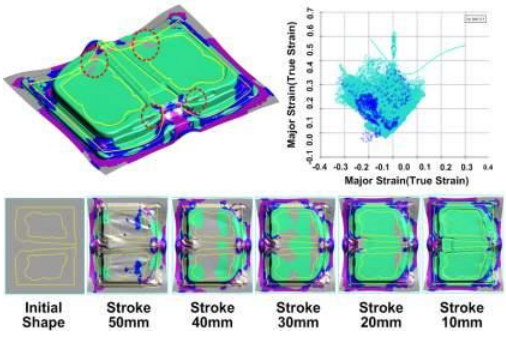


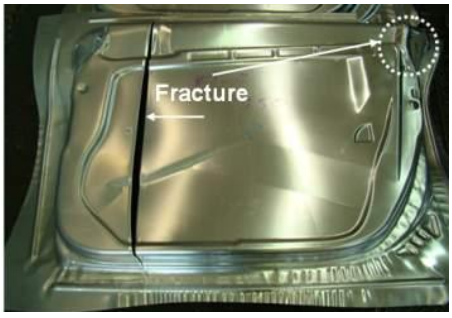
Fig. 7 Explosion view of door inner panel stamping

4. 성형성 평가

금속판재의 성형성 평가를 위한 시험으로 널리 사용되고 있는 LDH 시험을 통해 AA 5J32 TRB 판재를 Table 1과 같은 열처리조건으로 성형성 평가를 수행하였다.[6] 시험을 통해 TRB 판재 열처리 시 용체화 온도가 성형성에 미치는 영향을 분석하기 위해 열처리 조건별 장출특성을 분석하였으며, 성형한계곡선(FLD; Forming Limited Diagram)을 도출하였다. 시험에는 USTM(Universal Sheet Metal Forming Test Machine)을 사용하였다. 설비의 최대 하중 능력은 50톤이며 100mm 직경의 펀치를 사용하였다. 시편은 TRB 라인 기준 압연방향으로 각 변형모드별 6종류를 제작하여 시험을 수행하였다. 한계돔높이시험은 먼저 가공 완료된 시편을 시험용 금형인 다이 표면 위에 올려놓고 블랭크 홀더(Blank Holder)를 이용하여 시편을 고정시킨다. 시편을 고정한 후 펀치를 유압장치를 이용하여 상부로 밀어 올린다. 펀치의 스트로크(Stroke)는 시편에 넥킹(Necking) 또는 크랙(Crack)이 발생되면 하중을 제거하고 시험을 중단하였다. 시험을 수행하기 전 모든 시편들의 표면에는 변형과정 동안의 변형률 상태를 실시간으로 측정하기 위하여 US-ST(White-Color)를 베이스로 스프레이 프린트하고 변형률 측정을 위해 검정(Black-Color) 스프레이를 불규칙적으로 프린트 하였다. 시편에 프린트된 불규칙 점은 TRB 판재의 변형에 의하여 사각형 형상으로 변형된다. 시험을 완료한 후 각각의 시편에 대하여 파단이 발생한 영역과 그 주변에 있는 변화된 프린트 형상에서 주 변형률과(Major Strain) 부 변형률(Minor Strain)을 측정하였다. 본 연구에서는 ARAMIS 자동 변형률 측정장치의 디지털 CCD 카메라를 통해 프린트의 형상 변형을 측정하였다. ARAMIS 변형률 측정장치는 시험중 시료 표면의 변형을 3차원으로 분석하는

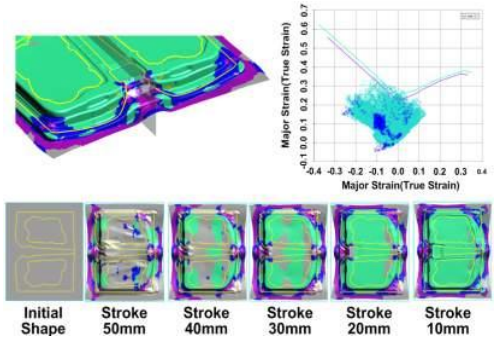


(a) Results of numerical analysis for initial model



(b) Sample of the preform panel for 1st tryout

Fig. 8 Formability analysis of initial model



(a) Results of numerical analysis for modified model

(b) Sample of the preform panel for 2nd tryout

Fig. 9 Formability analysis of modified model

측정기기로서 변형과정을 실시간으로 측정 가능하다. 시험에 사용된 시편은 TRB 압연라인을 중심으로 LDH 시험용 시편을 제작하여 각 변형모드를 구현하였다.

한계돔높이시험을 통해 Fig. 5(a)와 같이 열처리 조건별 알루미늄 TRB 판재의 성형한계선도를 도출하였으며, T4-3 조건에서 가장 성형성이 양호하였다. Fig. 5(b)는 TRB 라인에서 발생된 전형적인 크랙의 형상을 나타내었다. 대부분의 일반적인 판재는 펀치의 코너부에서 최초 크랙이 발생되지만, TRB 판재는 압연두께가 얇은 센터부에서 응력집중이 일어나며 크랙이 발생함을 알 수 있었다.

5. 유한요소해석 및 Tryout

유한요소해석을 통해 알루미늄 TRB 판재에 대한 가상의 프레스 성형을 수행하여 성형한계 예측 및 제품의 성형성을 사전검토하고, 금형제작시 발생할 수 있는 문제점을 파악하였다.

TRB 도어 인너에 대한 성형성 예측을 위해 Fig. 6과 같이 CATIA 모델 파일을 제작하였다. 도어 인너의 구조강성이 요구되는 힌지부분은 2.0mm, 도어 랫치부는 1.1mm로 구성되어 있다. 유한요소해석은 외연적 유한요소해석 프로그램 Autoform V4.2 Explicit 를 사용하였으며, 3차원 비선형해석을 수행하였다. 판재성형용 다이는 Fig. 7과 같이 더블다이(Double Die) 형태로 모델링되었으며, 블랭크(Blank), 어퍼다이(Upper Die), 로어다이(Lower Die), 블랭크홀더(Blank Holder)로 구성되어 있다. 블랭크는 쉘요소(Shell Element)로 제작하였으며, Al 5J32 T4-3 열처리 조건의 물성을 입력하였다.

Fig. 8은 도어 인너 모델에 대한 1차 성형해석 및 시제품 테스트 결과이다. 해석결과 Fig. 8(a)와 같이 압연으로 인해 두께가 얇아지는 TRB 라인 및 제품 코너부에서 국부파단이 발생하였다. 실제 시작금형 제작을 통한 테스트 결과에서도 Fig. 8(b)와 같이 TRB 라인 및 제품 코너부에서 국부파단이 발생하였다. 1차 성형해석 및 시제품 테스트 결과를 토대로 성형결함 발생 원인 분석 후 로어다이 코너부 곡률 및 성형조건을 수정하여 2차 해석을 수행하였다. 성형해석 결과 Fig. 9(a)와 같이 제품 코너부 및 TRB 라인에서 파단이 발생하지 않았으며, 1차와 동일하게 800톤 유압프레스를 사용하여 Fig. 9(b)과 같이 프레스 성형에서도 이러한 파단은 발생하지 않았다.

Fig.10 Example of final formed part

프레스 성형 후 알루미늄 도어 인너의 최종 플랜지(Flange) 트리밍(Trimming) 공정을 거쳐 Fig. 10과 같이 양품의 알루미늄 TRB 도어 인너를 제작할 수 있었다.

6. 결 론

본 연구에서는 AA 5J32 TRB 판재를 적용하여 3,000cc급 승용 자동차 프런트 도어 인너를 제작하고자 하였다. 이를 위해 성형한계돔높이(LDH) 시험을 통해 알루미늄 TRB의 성형성을 평가하였다. 이때 알루미늄 판재의 용체화온도 변화에 따른 최적의 열처리조건을 비교 분석하였다. 또한 단축인장 시험으로 압연방향별 알루미늄 판재의 기계적특성을 평가하고 유한요소해석을 통해 도어 인너의 프레스 성형결함을 예측하고자 하였다. 도어 인너에 대한 성형결함 예측 후 시작금형을 제작하여 실제 프레스 성형으로 시제품을 제작하였으며 이 연구로부터 얻은 결론은 아래와 같다.

(1) 자동차용 프런트 도어 인너의 두께변화율 45% 이상의 1-piece 알루미늄 TRB 판재를 제작하였다.

(2) 성형한계돔높이 시험 결과 AA 5J32 TRB 판재의 열처리 온도는 T4-3 조건에서 가장 성형성이 양호하였다.

(3) 기존 스틸재 도어 인너와 동일한 모델에서 AA 5J32의 기계적 물성 적용 후 성형해석 결과 제품 코너부 및 TRB 라인에서 파단이 발생하였다.

(4) CAE 성형해석을 통한 성형결함 예측으로 파단부 로어다이 및 공정조건 수정 후 재해석 결과 국부파단 없이 양호한 해석결과를 보였다.

(5) 알루미늄 TRB 판재의 두께 변화부 형상이 고려된 시작금형을 제작하여 800톤 유압프레스 장치를 통해 양품의 알루미늄 TRB 도어 인너 시제품을 제작할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] B. Kinsey, V. Viswanathan, J. Cao, 2001, Forming of Aluminum Tailor Welded Blanks, Journal of Materials & Manufacturing, SAE 01M-38, Vol. 110, Section 5, pp. 673~679.

[2] R. Davies, G. Grant, M. Smith, S. McCleary, 2002, Describing the Formability of Tailor Welded Blanks, SAE, 2002-01-2085.

[3] F. I. Saunder, R. H. Wagoner, 1996, Forming of Tailor Welded Blanks, Metall. Mater. Trans. A, Vol. 27, No. 9, pp. 2605~2616.

[4] M. F. Shi, K. M. Pickett, K. K. Bhatt, 1993, Formability Issues in the Application of Tailor Welded Blank Sheet, SAE, Technical Paper Series, and SAE Paper No.930278.

[5] A. 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. 552~531.

[6] I. K. Kwak, Y. S. Shin. H. J. Kim, H. Y. Kim, 2000, Some Remarks on the Experiment and Finite Element Analysis to Evaluate to Forming Limit of Sheet Metals, Trans. Mater. Process., Vol. 9, No. 4, pp. 379~388.