

유한요소해석을 이용한 차체시작부품 프레스성형 공정 개선

Improvement of the Stamping Process for Sheet Metal Prototypes of an Auto-body with Finite Element Analysis

김세호^{1,✉}
Se-Ho Kim^{1,✉}

1 대구대학교 기계·자동차공학부 (School of Mechanical and Automotive Engineering, Daegu University)

✉ Corresponding author: mvksh@daegu.ac.kr, Tel: 053-850-6685

Manuscript received: 2010.12.15 / Accepted: 2011.2.18

This paper introduces a CAE-based design procedure in the press forming process for the fabrication of sheet metal parts used in proto-cars. The finite element analysis reveals formability problems during the forming process of a floor member and a front cross member that constitute a rear floor assembly. The study proposes the modification of the initial blank shape or intermediate trimming of the product to prevent failure during forming. It is confirmed by the try-out process as well as the finite element analysis that sound prototype can be obtained with the modified design. The finite element analysis result also provides fairly good prediction of springback amounts used for the post-compensation of the product.

Key Words: Sheet Metal Prototype (프레스 시작부품), Finite Element Analysis (유한요소해석)

1. 서론

현재 차량 제작단계에서 양산을 위한 개발과정은 18~24 개월 정도 소요되며, 개발기간 동안 약 3~4 회의 중간 설계단계에서 시작차를 제작하여 시작차가 요구되는 설계 성능을 만족하는가에 대한 시험 및 분석이 이루어지게 된다. 최근 신차 출시 기간의 획기적 단축 요구로 인하여 모델고정 전후의 기간이 크게 줄어들고 있으며, 이에 상응하도록 시작차용 부품의 단납기화가 급속도로 요구되고 있는 실정이다.¹

일반적으로 양산차에 사용되는 양산 프레스 가공 판재 부품은 블랭킹, 드로우 성형, 트리밍/피어싱, 리스트라이킹, 플랜징 등의 4~5 단계 공정을 거치도록 금형 및 공정을 설계하여 가공하고 있다. 이 경우 별도의 수작업 없는 파단, 주름 등의 성형불량 제거와 형상정밀도 확보를 위하여 금형면

보정, 비드 등의 바인더면의 부대장치, 캠 등의 측면가공 설비를 사용하고 있다. 특히, 양산차에의 적용을 위하여 불가피하게 필요한 부분은 공정설계중에 제품형상 설계데이터 수정도 실시하여 제품 생산을 수행하고 있다.

반면에 시작차에 사용되는 시작 프레스 부품의 경우 단납기에 의한 소량 생산을 하게 되므로 다단계 성형공정을 고려하지 않고 드로우 성형 후 트리밍을 하는 단순한 공정설계를 하는 경우가 대부분이다. 또한 금형수정이 엄격히 제한되어 있어 보통 스프링백 등에 대한 금형형상의 보정 없이 제품형상 그대로 사용하고 있으며, 파단 등의 성형성 문제 발생 시에는 공정중에 중간성형 블랭크를 일부 트리밍하여 사용하고 있다. 주름이나 스프링백 발생의 경우 후가공 시 추가적인 수작업을 통하여 문제를 해결하고 있는 실정이다. 소량 생산인 관계로 수작업에 의한 시작품 제작은 불가피

하나 성형공정의 합리화 및 공수 단축을 위해서는 보다 효율적인 성형공정 설계가 요구된다.

본 논문에서는 소형 SUV 의 대형부품인 리어 플로어 시작부품 중 2 종의 주요부품 제작을 위한 성형공정 전 유한요소해석을 수행하고 성형 시에 발생하는 파단 등의 성형성 불량량의 문제점을 고찰하였다. 파단억제를 위하여 블랭크 중간 트리밍 등의 수정안을 제시하였다. 제시된 수정안을 바탕으로 시작품 성형을 실시하였으며, 불량이 없는 시작품을 얻을 수 있었다. 또한, 스프링백 현상의 해석을 통한 후공정 작업정도를 예측하여 시작품 제작에 반영할 수 있도록 하였다.

2. 리어 플로어 시작품의 초기 성형성 분석

2.1 대상을 형상 및 성형 조건

대상 제품은 소형 SUV 의 리어 플로어 시작품을 구성하는 리어 플로어 판넬(rear floor panel)과 프런트 크로스 멤버(front cross member)로 Fig. 1 에 제품의 CAD 데이터를 도시하였다. 시작품 제작을 위하여 제품면과 동일한 형상을 가지는 금형면에 경험설계에 의한 바인더면 추가를 통하여 금형설계가 수행되었다. 성형에 사용된 금형의 형상은 Fig. 2 에 도시하였으며, 금형은 양산금형과 동일한 재질인 FC300 으로 제작된다. Fig. 3 에 금형 모델링에 사용된 비드의 형상을 도시하였으며, Table 1 에 각 비드 단면 치수를 비교하였다. 성형에 사용된 강판은 리어 플로어 판넬과 프런트 크로스 멤버의 경우 각각 SGACEN 과 SGARC340 이다. 각 판재의 기계적 물성치는 Table 2 에 도시하였다. 초기 블랭크의 형상은 Fig. 4 에 도시한 바와 같이 직사각형 및 모뎀기한 직사각형 블랭크를 사용하였다. 성형은

유압식 단동형 프레스를 사용하여 수행되며, 편치 성형공정(OP10)과 트리밍(OP20) 및 수작업에 의한 형상정밀도 맞춤작업(OP30)으로 이루어진다.

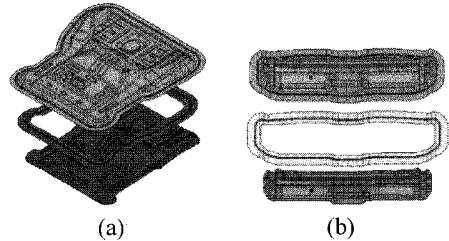


Fig. 2 Shape of the tools for the fabrication of rear floor parts: (a) rear floor panel; (b) front cross member

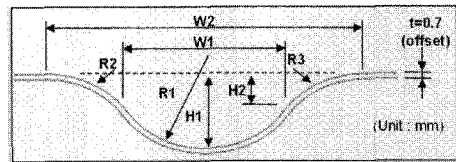


Fig. 3 Geometric parameters of draw-beads used in the tool surface

Table 1 Section shape dimensions of draw-beads

	Rear Floor Panel	Cross Member
R1 (mm)	9.35	8
R2 (mm)	10	8
R3 (mm)	10	8
H1 (mm)	25	3
H2 (mm)	2.5	1.5
W1 (mm)	12.5	9.33
W2 (mm)	26	18.6

Table 2 Mechanical properties of SGACEN and SGARC340 obtained from tensile tests

Properties	SGACEN	SGARC340
Thickness	0.75 mm	0.7 mm
Yield Strength	119 MPa	226 MPa
Tensile	402 MPa	452 MPa
Elongation	36 %	31 %
FLD0	0.38	0.22
K*	563 MPa	602 MPa
n*	0.269	0.222
ϵ_{0}^*	0.003108	0.01211
R0/R45/R90	1.66 / 1.52 /	1.62 / 1.56 /

* $\bar{\sigma} = K(\epsilon_0 + \bar{\epsilon}^n)^m$

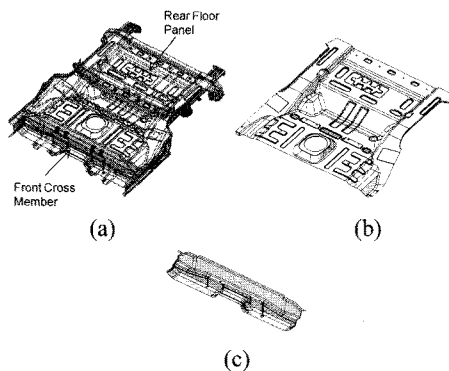


Fig. 1 Shape of the rear floor assembly: (a) assembly; (b) rear floor panel; (c) front cross member

2.2 성형해석 조건

초기 공정변수를 바탕으로 하여 성형성을 파악하기 위한 유한요소해석을 수행하였다. 재료는 평면 이방성을 고려한 Hill's 1948 항복식²을 사용하였다. 성형 및 스프링백 과정의 정확한 모사를 위하여 금형면의 라운드부를 7.5° 간격으로 요소분할하였다. 블랭크의 요소는 초기 크기 10 mm 를 사용하였으며, 해석중 적응형 격자분할을 최대 4 회 까지 수행하였다. 해석은 외연적 상용유한요소 프로그램인 PAM-STAMP 2G V2008³을 사용하였다. 보다 정확한 해석을 위하여 비드의 형상을 금형에 직접 고려하였다. Fig. 5 와 같이 OP10 성형공정의 해석은 바인더랩 해석, 펀치성형 해석으로 세분하여 실시하였다. 추후 파단 및 주름이 제거된 수정 설계안의 해석 시에는 펀치성형 공정이 완료된 후 트리밍 공정 및 스프링백 해석을 추가적으로 실시하여 형상정밀도를 분석하였다. 각 부품의 성형해석을 위하여 부과된 공정 및 수치변수는 Table 3 에 도시하였다.

Table 3 Process parameters used in the stamping simulation

Parameters	Rear Floor Panel	Cross Member
BHF	650 kN	400 kN
Friction Coefficient	0.15	0.10
Punch speed	2 m/s	2 m/s
Total punch stroke	178 mm	168 mm

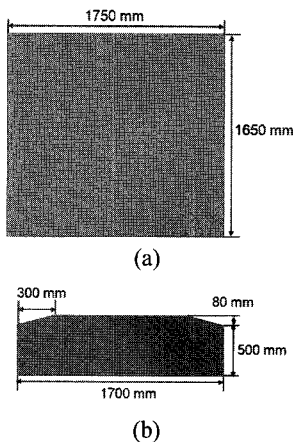


Fig. 4 Shape of the initial blank with the initial process design: (a) rear floor member; (b) front cross member

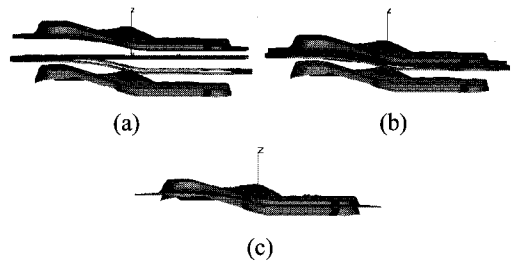


Fig. 5 Shape of the tools and the blank during the stamping analysis of the rear floor panel: (a) initial setting; (b) binderwrap; (c) punch forming

2.3 초기 공정설계안의 성형해석 결과

2.3.1 리어 플로어 패널

초기 공정설계안의 문제점을 파악하기 위하여 변형형상과 함께 두께 변형률 분포를 Fig. 6 에 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 직벽부에서 심한 변형이 발생하고 있으며, 최대 두께변형률은 0.34 였다. 이 현상은 파단부위의 펀치 라운드 반경이 3 mm 로 매우 작으며 직벽부의 각도가 수직에 가까워 국부변형이 발생한 것으로 판단된다. 파단여부를 확인하기 위하여 성형한계도 상의 주 변형률 분포를 도시하였으며 Fig. 7 에서 확인된 바와 같이 펀치행정 167 mm 에서 파단이 최초로 예측되며, Fig. 8 에 도시한 바와 같이 최종 성형후에는 3 개 부위에서 파단이 예측되었다. 시험에서 얻은 성형품 역시 유사부위에서 파단이 발생된 것을 확인할 수 있었다.

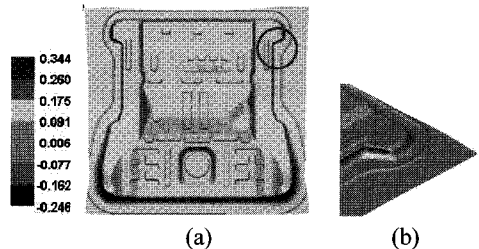


Fig. 6 Thickness strain distribution of the rear floor panel with the initial process design: (a) thickness strain distribution; (b) a weak region

2.3.2 프론트 크로스 멤버

프론트 크로스 멤버는 리어 플로어 멤버보다는 크기가 작지만 국부적인 변형을 많이 수반하는 부품으로 주로 국부 파단 및 과도한 스프링백 등의 문제가 발생할 가능성이 있다. 시작품의 특성상

제품형상과 동일한 금형형상을 사용하는 관계로 국부파단의 가능성은 높으나 금형면을 수정하는데 제약에 따르므로 다른 공정안 수정 방법을 찾아야 하는 애로점이 있다.

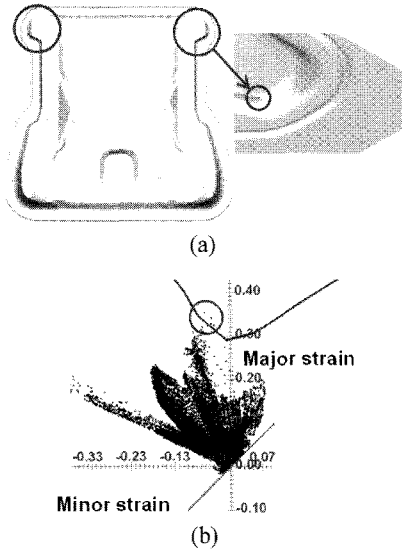


Fig. 7 Initiation of the failure on the blank in the analysis of the rear floor panel: (a) fracture region; (b) principal strain distribution on FLD

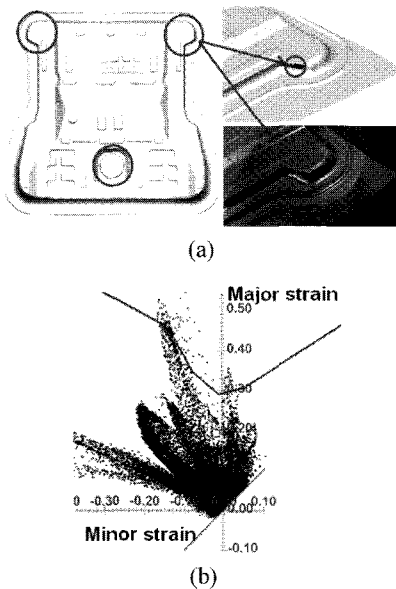


Fig. 8 Comparison of the fracture region in the analysis of the rear floor panel: (a) fracture region; (b) principal strain distribution on FLD

Fig. 9 에 해석에서 얻어진 두께변형률 분포를 도시하였다. 길이방향 라운드부 끝쪽에서 주로 국부 변형 집중이 발생하고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 10 에 도시한 바와 같이 최종행정에서는 6 개 부위에서 파단이 예측되었다. 그림에서 검게 표시된 부위가 파단이 예측된 부위이다. 펀치행정 151 mm 에서 다이측 라운드부에서 최초의 파단발생이 예측되었다. 시험에서 얻은 성형품에서도 유사한 파단현상을 보였으며, 이는 파단 예측이 어느 정도 신뢰성을 가진다는 것을 의미한다.

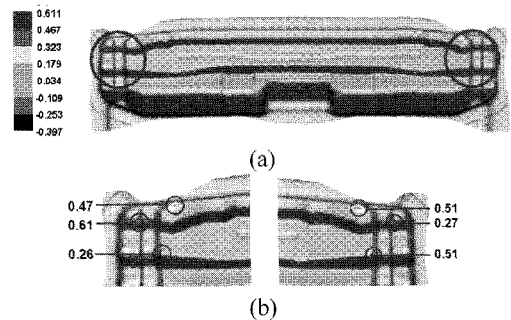


Fig. 9 Thickness strain distribution of the front cross member with the initial process design: (a) thickness strain distribution; (b) weak regions

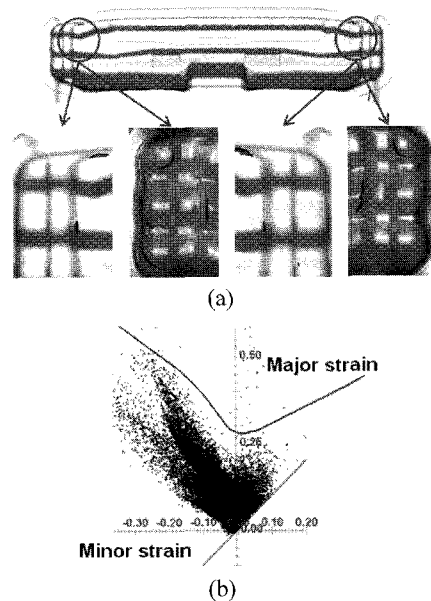


Fig. 10 Comparison of the fracture region in the analysis of the front cross member: (a) fracture region; (b) principal strain distribution on FLD

3. 시작품 제작을 위한 공정설계 변경

제 2 장에서 발생한 리어 플로어 시작부품의 성형공정 상의 문제는 주로 제품면 상의 과도하게 작게 설계된 라운드 부의 영향으로 벽면부에서 파단이 발생한 경우로 분석되었다. 양산부품의 성형공정 설계에서는 제품면의 수정 및 금형수정, 리스트라이킹 공정의 추가 등을 통하여 문제를 해결할 수 있으나, 시작품의 경우 제품면 수정이나 금형의 수정은 엄격하게 제한되어 있어 주로 초기 블랭크의 수정설계나 성형 중간단계에서 파단부 주위를 트리밍하여 국부 변형집중을 방지하는 방법을 사용한다. 본 논문에서는 유사한 방법을 사용하되 현장 작업자의 경험에 의존하지 않고 해석적으로 블랭크 형상 또는 중간형상의 트리밍 방법을 결정하도록 하였다. 변경된 공정설계안의 타당성을 검증하기 위하여 해석시간이 많이 소요되는 직접해석 대신 역해석을 사용하여 블랭크 설계에 대한 영향을 성형성 관점에서 신속하게 파악하였다. 역해석은 상용 프로그램인 HyperForm⁴의 1-step 해석기능을 사용하여 제품의 파단여부를 판정하였다.

3.1 리어 플로어 판넬의 공정설계 수정

리어 플로어 판넬의 경우 주로 변형이 심한 라운드 부근의 직벽면에서 파단이 발생하므로 해당 부위의 초기 블랭크의 일부분을 제거하는 방향으로 수정설계를 진행하였다. Fig. 11 에 초기설계에서의 블랭크 형상과 수정설계에서 변경된 블랭크 형상을 비교하였다. 수정된 블랭크를 사용하여 유한요소 역해석을 수행한 결과중 성형한계도상의 주변형을 분포를 Fig. 12 에 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 파단이 발생하지 않는 제품을 얻을 수 있음을 확인하였다.

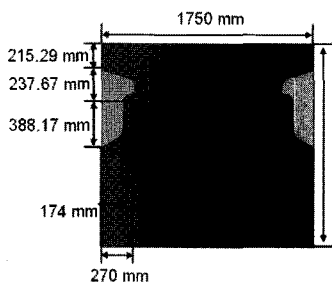


Fig. 11 Shape of the modified blank for the process improvement of the rear floor panel

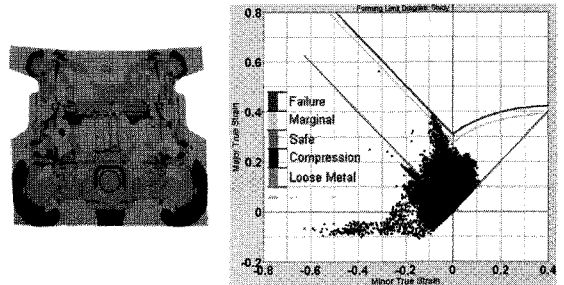


Fig. 12 Principal strain distribution on the FLD from the analysis result of the rear floor panel

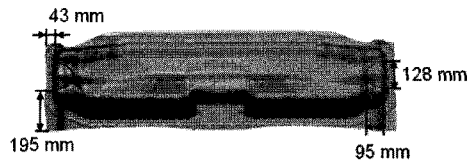


Fig. 13 Shape of the trimmed shape for the front cross member at the punch stroke of 145 mm

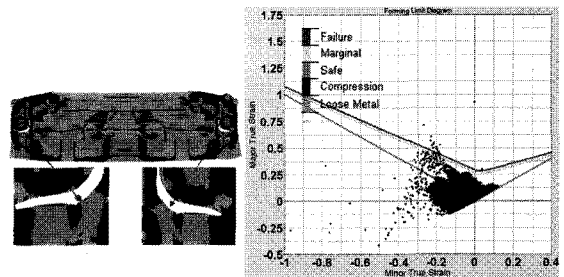


Fig. 14 Principal strain distribution on the FLD from the analysis result of the front cross member

3.2 프론트 크로스 멤버의 공정설계 수정

리어 플로어 판넬의 경우 좌우측 끝단부의 종횡방향 라운드부가 만나는 부분에서 파단이 발생하나 라운드의 크기가 매우 작으므로, 초기 블랭크 형상을 수정하여서는 성형성의 개선을 기대하기 어려운 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 중간성형 단계에서 블랭크를 추출하여 변형이 집중되는 부위를 트리밍하고 계속 성형하는 방식을 택하였다. 파단이 발생하기 전인 펀치행정 145 mm에서 Fig. 13 과 같이 중간제품의 길이방향 끝쪽을 초승달 모양으로 트리밍하였다. Fig. 14 에는 유한요소 역해석을 이용하여 성형성을 파악한 결과를 성형한계곡선과 함께 나타내었다. 블랭크 트리밍부 주변에서만 국부 파단이 일어나고 있음을 예측하고 있으며, 실제 소요제품의 바깥쪽의 파단이므로 제품

성형에는 영향을 주지 않을 것이라고 판단되었다.

4. 시제품 제작 및 검증

제 3 장에서 제안한 수정설계안을 이용하여 직접 유한요소해석을 수행하고 설계안을 검증하였으며, 스프링백에 의한 형상오차의 정도를 예측하여 추후 수작업 공정에 쉽게 반영할 수 있는 데이터를 제공하였다. 이와 같은 과정을 거쳐 실제 시제품 성형을 실시하였다. 시제품 성형에서 얻어진 제품의 불량 존재 여부를 파악하였으며, 유한요소해석과의 비교를 통하여 사용된 해석방법의 타당성도 검증하였다.

4.1 리어 플로어 판넬의 검증

리어 플로어 판넬의 수정설계된 블랭크를 적용하여 유한요소해석을 실시하였다. 성형해석 조건은 블랭크 형상을 제외하고는 초기설계안과 동일하며, 펀치성형 후 트리밍 및 스프링백 해석까지 수행하여 제품 제작 후 후처리 공정에서 고려해야 할 형상 정밀도에 관한 정량평가를 실시하였다. 해석결과를 확인하고 문제가 없는 제품을 성형할 수 있는지의 여부를 최종확인하기 위하여 해석에서 사용된 금형형상과 공정변수를 활용하여 Fig. 15 와 같은 시험성형 공정을 수행하고 Fig. 16 에 도시한 시제품을 제작하였다. 시제품의 변형양상을 검증하기 위하여 초음파 두께측정기를 이용하여 단면에서의 두께를 측정하였으며, 광학식 3 차원 측정기를 이용하여 형상을 측정하였다.

변형형상 비교를 위하여 Fig. 17(a)의 측정점에서 펀치성형 직후 판넬 외곽선의 유입량을 Fig. 18 에 도시하였으며, 최종제품에서의 스프링백의 절대값을 Fig. 19 에 비교하였다. 외곽선 유입량은 비슷한 경향을 보이고 있으나 일부에서 10 mm 정도의 오차를 보이고 있다. 성형시험 시 가이드를 설치하지 않고 블랭크를 하형에 공급한 결과 블랭크가 성형중 약간 움직인 것이 오차의 원인으로 분석되었다. 스프링백양도 시험과 해석에서 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 시험결과의 측정을 위하여 일반적으로 측정구(C/F)를 사용하나 본 논문에서는 측정구를 활용하지 않아 자중처짐 등의 오차가 발생한 것으로 판단된다. 최대 스프링백양은 국부에 7 mm 로 나타나 트리밍 이후 약간의 보정을 거치면 시제품으로 사용하는데 문제가 없을 것임을 확인하였다. 변형기구를 검증하기 위하여 Fig. 17(b)에 도시한 단면 중 4 개 단면

에서 두께 변형 률 분포를 Fig. 20 에 비교했으며, 시험과 해석결과가 잘 일치하는 것으로 나타났다.



Fig. 15 Try-out process for the rear floor panel

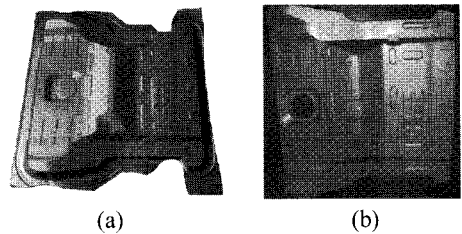


Fig. 16 Fabricated prototypes of the rear floor panel: (a) draw-panel; (b) final product

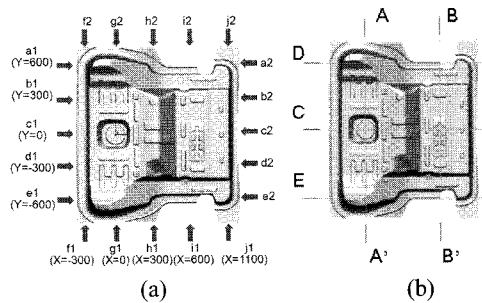


Fig. 17 Schematic shape of measuring locations for the comparison of results: (a) points for edge draw-in; (b) sections for thickness distribution

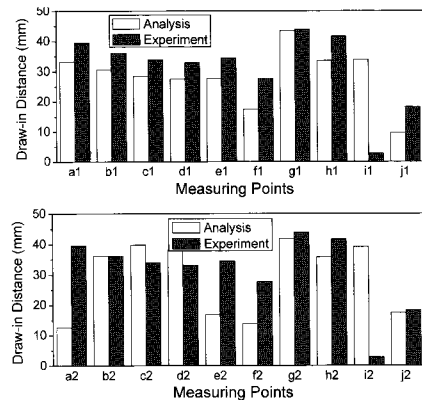


Fig. 18 Comparison of edge draw-in amounts in the press forming of the rear floor panel

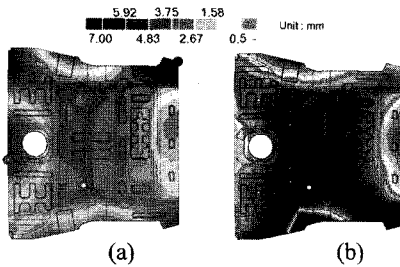


Fig. 19 Comparison of the springback amount in the rear floor panel: (a) analysis; (b) experiment

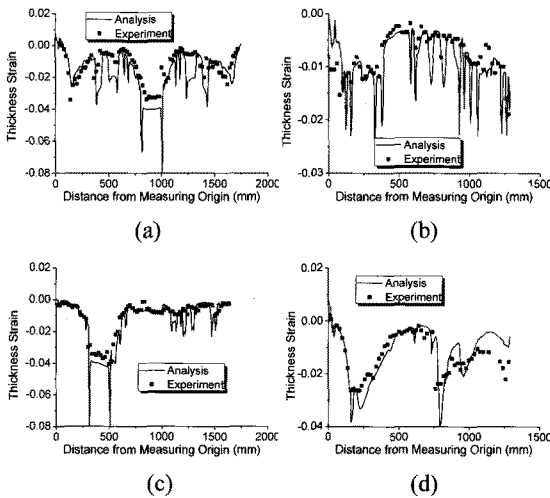


Fig. 20 Comparison of the thickness distribution in the rear floor panel at cross sections: (a) A-A'; (b) B-B'; (c) C-C'; (d) D-D'

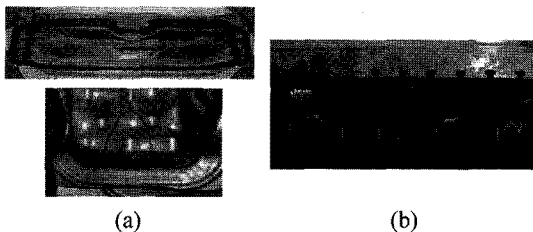


Fig. 21 Try-out process for the front cross member: (a) intermediate trimming; (b) stamping

4.2 프론트 크로스 멤버의 검증

프론트 크로스 멤버의 설계안 검증을 위한 해석 및 시험은 리어 플로어 판넬과 동일한 방법으로 실시하였다. 시험 및 해석 시에 펀치행정 145 mm 에서 중간단계 블랭크를 추출하고 플라즈마 커팅기를 이용하여 초승달 모양의 형상을 트리밍

후 재성형하는 방법을 사용하였다. Fig. 21 과 같이 시험성형 공정을 거쳐 Fig. 22 에 도시한 시제품을 제작하였다.

변형형상 비교를 위하여 Fig. 23(a)에 도시한 측정점에서 펀치성형 후 판넬 외곽선의 유입량을 Fig. 24 에 도시하였으며, 최종제품에서의 스프링백 양의 절대값을 Fig. 25 에 비교하였다. 외곽선 유입량은 블랭크가 정확한 위치에 공급되지 못하여 발생한 문제로 인하여 3~4 개 측정점에서는 오차가 발생하고 있으나 대부분 오차범위 10 mm 이내로 잘 일치함을 알 수 있었으며, 스프링백 경향도 일치하였다. 스프링백량은 최대 4 mm 의 값이 국부적으로 나타나 약간의 보정 또는 용접 시의 가압 과정을 거치면 시작품으로 사용하는데 문제가 없을 것임을 확인하였다. 변형기구를 검증하기 위하여 Fig. 23(b)에 도시한 단면중 4 개 단면에서의 두께변형을 분포를 Fig. 26 에 비교하였다. 시험과 해석결과가 잘 일치하는 것을 확인하였다.

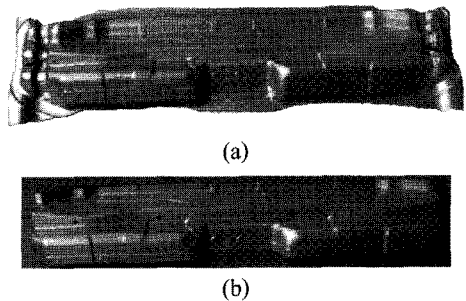


Fig. 22 Fabricated prototypes of the front cross member: (a) drawn product; (b) final product

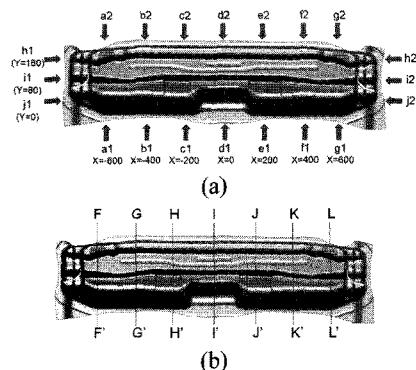


Fig. 23 Schematic shape of measuring locations for the comparison of results: (a) points for edge draw-in; (b) sections for thickness distribution

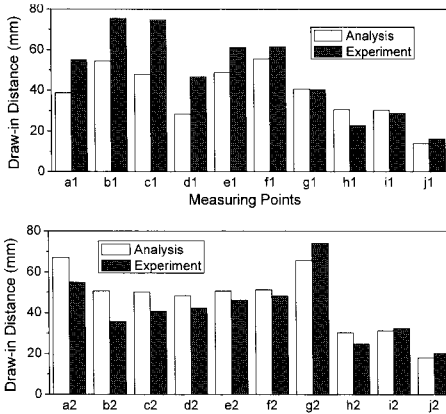


Fig. 24 Comparison of edge draw-in amounts in the press forming of the front cross member

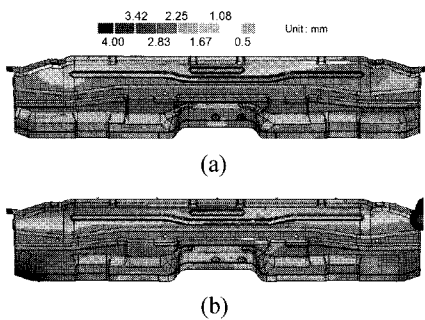


Fig. 25 Comparison of the springback amount in the press forming of the front cross member: (a) analysis; (b) experiment

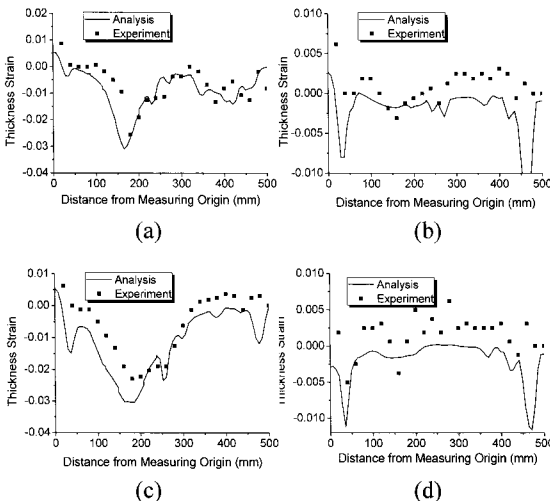


Fig. 26 Comparison of the thickness distribution in the front cross member at cross-sections: (a) F-F; (b) G-G'; (c) H-H'; (d) I-I'

5. 결론

본 논문에서는 시작차용 프레스 부품 생산 현장의 경험에 의하여 설계 및 제작되는 과정을 사전에 유한요소해석을 통하여 개선하였다. 리어 플로어 부품의 주요 시작품인 리어 플로어 판넬과 프론트 크로스멤버를 대상으로 선정하고 초기 금형형상 및 공정변수를 이용하여 유한요소해석을 수행하고 설계안의 문제점을 사전 파악하였다. 공정중 발생한 파단 등 불량률의 원인은 제품면을 그대로 사용한 금형면 부위의 매우 작은 라운드 부 때문으로 파악되었다. 파단 등의 문제점이 없는 시작부품을 제작하기 위하여 초기 블랭크 형상 및 성형중 블랭크의 트리밍 방법을 제안하고 이를 역 해석을 통하여 검증하였다.

제안된 수정설계안을 이용하여 직접 유한요소 해석 및 시험성형을 실시하였고, 수정된 설계안이 성형성을 개선하여 파단이 없는 제품을 얻을 수 있었고, 리어 플로어와 프론트 크로스 멤버의 경우 형상정밀도는 각각 7 mm와 4 mm로 완제품 성형 후 약간의 보정작업을 거친다면 시작부품으로의 활용에 큰 문제가 없을 것을 확인하였다. 본 논문에서의 활용된 시작품 성형공정 유한요소해석이 형상이 복잡하고 대형 제품인 경우에도 문제없이 활용 가능함을 입증하였으며, 추후 다양한 부품에 표준을 적용하게 되면 개발 기간 단축 및 비용절감에 상당부분의 역할을 하리라 기대된다.

후 기

이 논문은 2007 학년도 대구대학교 학술연구비 지원에 의한 논문임.

참고문헌

1. Kim, T. Y., "Analysis of success factor to reduce the new car developing period by automobile industry," M.B.A. Dissertation, Dept. of Business Administration, Kyungpook National University, 2010.
2. Hill, R., "A Theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals," Proc. The Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 193, pp. 281-297, 1948.
3. ESI, "PAM-STAMP 2G User's Guide," 2009.
4. Altair Engineering, "Hyperform User's Manual

- Version 9,” 2008.
5. Kim, S. H., Jung, D. G. and Choi, H. J., “Standard construction of CAE and evaluation processes for stamping of rear floor panel,” Proc. KSPE Spring Conference, pp. 1307-1308, 2010.
 6. Jung, D. W., Ko, H. H., Lee, C. H. and You, H. Y., “Finite element analysis of sheet metal forming process using shell element,” J. Korean Society for Precision Engineering, Vol. 23, No. 1, pp. 152-158, 2006.