

# 차량용 열차단판의 면품질 개선을 위한 성형해석 기반 금형면 설계

김기풍<sup>#</sup> · 김세호<sup>2</sup> · 이동길<sup>1</sup> · 장경천<sup>1</sup>

## Analysis-based Die Face Design for the Improvement of Surface Quality for a Heat Protect Panel of an Automobile

K. P. Kim, S. H. Kim, D. G. Lee, K. C. Jang

(Received April 4, 2008)

### Abstract

This paper concerns the die face design for a heat protect panel aided by the finite element forming analysis in order to eliminate the surface defect and to improve the surface quality. The CAE procedure of the stamping process is introduced in order to reveal the reason of surface inferiorities and to improve surface quality. Complicated shape of the product induces the surface inferiorities such as wrinkling due to the insufficient restraining force of the forming blank and the non-uniform contact of the blank with the tools. This paper proposes a new guideline for the die design which includes the modification of tool shapes and addition of the draw-beads on the tool surface for ensuring the increased the restraining force with the uniform contact condition. The effectiveness of the proposed design is verified by the forming analysis and is confirmed by the tryout operation in the press shop. The analysis and test results show that the modified process parameters such as tool shapes and draw-beads can reduce the tendency of wrinkling and improve surface quality.

**Key Words** : Die Face Design, Forming Analysis, Surface Quality, Wrinkle, Draw-bead

### 1. 서론

자동차의 차체 부재는 주로 박판을 이용하여 스탬핑 성형 공정에 의하여 생산되며, 자동차의 개발 기간의 단축을 위하여 부품 설계 데이터에서부터 금형 설계, 제작 및 양산까지의 신속한 진행이 요구되고 있다. 소비자들의 수준 향상으로 자동차의 기능 향상뿐만 아니라 외관이 매우 미려하고 우수한 제품을 요구되고 있어, 완성차 업체 및 양산 업체들에서 외관상의 품질 기준을 강화하고 있다.

성형 가공된 박판 부재는 외관적으로 주름, 면

굴곡 등의 불량 발생 수 있으므로 부재의 형상 설계 단계에서 외관 품질 예측하여 설계에 반영해야 한다. 스탬핑 성형 공정에서 발생할 수 있는 주름 및 면굴곡 등의 예측에 가장 많이 사용되는 방법은 CAE 기법 중 하나인 박판 성형 공정 해석이다. 해석을 통하여 실제 공정에서 일어날 수 있는 불량을 미리 파악하면 부품 설계 및 금형 설계 단계에서 형상 변경을 수행할 수 있으므로 현장의 트라이아웃 회수나 금형 제작 비용을 최소화하는 효과를 얻게 된다[1~3].

본 논문에서는 자동차 박판 성형 부재의 성형 과정 중에 발생한 주름 등의 면 품질을 개선하기

1. 한국생산기술연구원 동력부품지원센터  
2. 대구대학교 자동차·산업·기계공학부  
# 교신저자: 한국생산기술연구원,  
E-mail: keepkim@kitech.re.kr

위하여 박판 성형해석을 수행하고 금형면 설계를 수행하였다. 초기 설계된 부재의 형상을 이용한 박판 성형 공정 해석을 수행하여 주름의 발생 원인을 분석하였고, 분석된 결과를 바탕으로 면불량을 제거하기 위한 금형 설계 변경 방안을 제시하였다. 제시된 면 불량 제거를 위한 금형 설계 방안은 다시 박판 성형해석을 수행하여 검증하였다. 성형해석을 통해 검증된 금형면 설계 방안을 이용하여 자동차 박판 부재용 성형 프레스 금형을 수정 제작하고 시제품을 가공하여 면 품질이 개선됨을 확인하였다.

## 2. 유한요소 성형해석

### 2.1 해석 모델

본 논문에서 고려하는 모델은 열을 차단하기 위한 용도로 사용되는 SUV 차량의 열차단판(heat protector panel)으로서 그 형상은 Fig. 1 과 같다. 열차단판의 성형은 3 단계의 프레스 공정으로 이루어지나, 면 품질의 평가에는 처음 단계인 드로잉 공정만을 고려하였다. 드로잉 공정에 관한 금형면의 형상은 Fig. 2 와 같이 도출하였고, 이를 이용하여 성형 해석을 수행하였다.

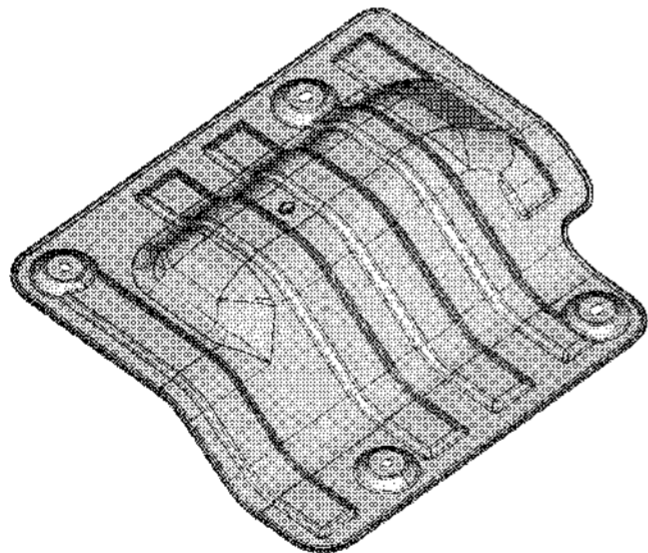


Fig. 1 Shape of a heat protector panel

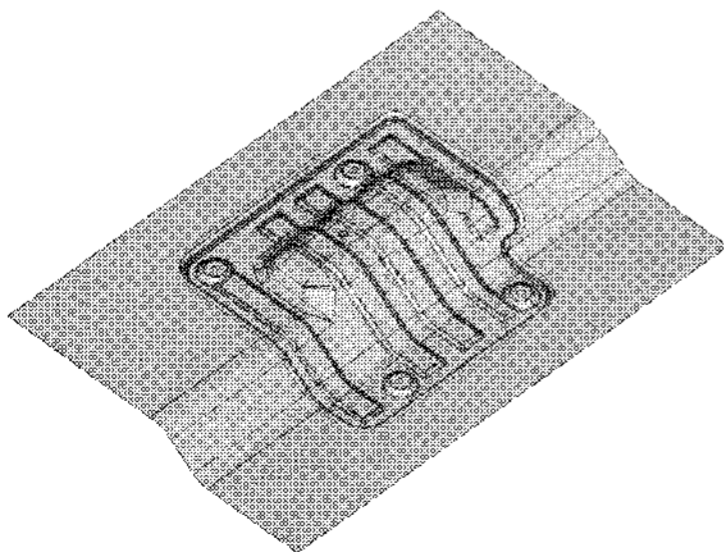


Fig. 2 Die surface for the stamping process of the heat protector panel

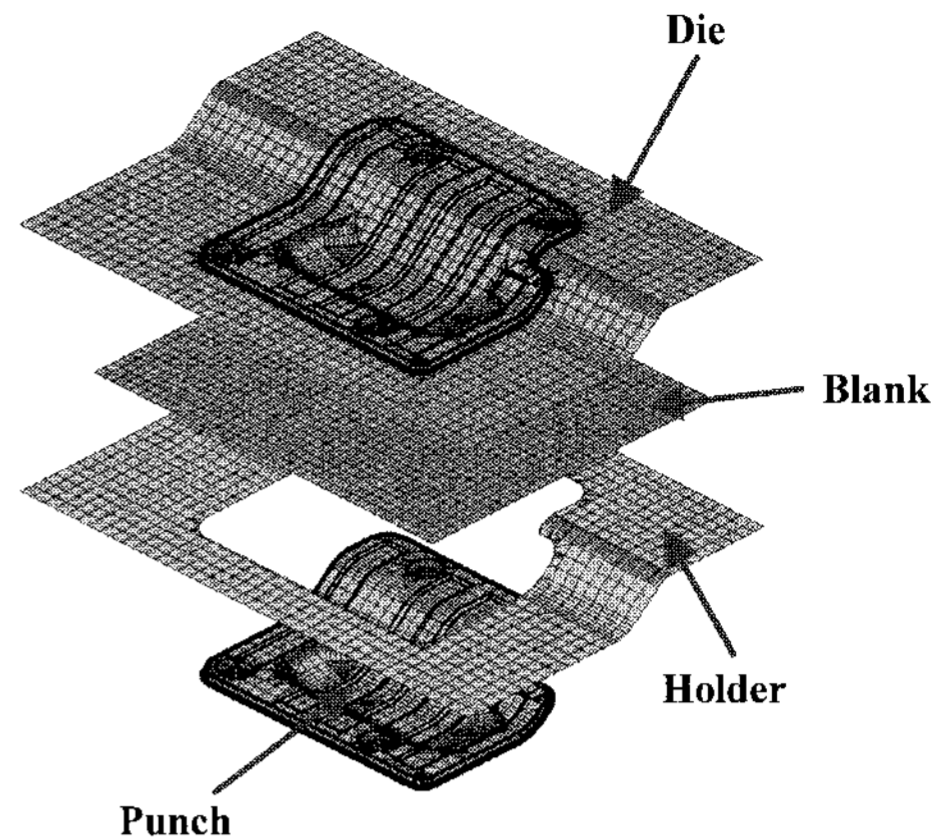


Fig. 3 Initial setting of tools and the blank for the stamping analysis of the heat protector panel

### 2.2 해석 조건

설계된 금형면의 형상을 기반으로 다이(die), 펀치(punch), 홀더(holder) 및 블랭크(blank)의 형상을 도출하였고 이를 이용하여 성형해석을 수행하기 위한 유한요소 모델을 구성하였다. 다이와 펀치 및 홀더의 곡률 형상을 정확하게 표현하기 위하여 곡률부에는 최소 12개의 요소로 나타내었다. 유한요소 모델은 Fig. 3에 도시하였고, 58,672개의 절점과 62,688개의 요소로 구성되어 있다. 블랭크는 SACD강판으로 두께는 0.4mm 이고, 초기 크기는 600mm×400mm이다. 강판의 유동 응력 곡선은  $\sigma = 558.9(0.00891 + \epsilon)^{0.265}$  MPa이고, 평면이방성으로 고려하여 소성이방성계수를  $r_0=1.83$ ,  $r_{45}=1.69$ ,  $r_{90}=2.35$ 로 적용하였다. 해석에 사용한 블랭크 홀딩력은 147kN(15ton)이고 금형과 블랭크 사이의 쿨롱 마찰 계수는 0.12이다. 해석은 상용프로그램인 PAM-STAMP 2G V2005[4]를 이용하였고, 적응적 요소 세분화 기법을 사용하여 접촉 부위의 요소가 형상을 잘 표현하도록 세분화 되도록 하였다. 성형해석은 프레스의 구동방식을 고려하여 단동식(single action)으로 수행하였으며, 중력해석, 바인더랩(binder-wrap) 해석 및 최종 드로잉 해석의 3 단계로 나누어 진행하였다. 바인더랩 해석에서는 다이의 하강속도를 2m/s로 부과하였고, 드로잉 해석에서는 다이의 하강속도를 5m/s로 부과하여 성형해석을 수행하였다. 해석결과 운동에너지가 전체에너지의 0.6% 이하 수준으로 준정적 상태의 성형 해석이 수행되었음을 확인하였다.

### 2.3 성형 해석 결과

앞에서 언급한 해석 조건을 기반으로 3 단계의 성형 해석을 수행하였다. 중력해석과 바인더랩 해석의 최종 결과는 Fig. 4 에 나타내었다. 중력해석에서는 블랭크가 홀더 위에 기울어져 놓이는 것을 확인하였고 바인더랩 해석에서는 블랭크의 외곽 영역이 홀더면과 완전히 접촉함을 확인하였다. 드로잉 공정 해석으로부터 얻어진 최종 변형 형상은 Fig. 5 에 나타내었다. 최종 변형 형상에서는 유한요소 해석의 특성 때문에 실제 제품에서 나타나는 주름 등의 면 품질 불량을 정확하게 예측할 수 없었다. 본 논문에서는 성형완료 1.2mm 전의 형상과 실제의 최종 제품을 비교하여 주름을 예측의 정도를 평가하였고 Fig. 6 에 주름 발생 위치를 비교하여 나타내었다. 비교 결과 Fig. 6 에 표시한 위치에서 거의 동일하게 주름이 발생하는 것을 볼 수 있다. Fig. 7 은 Fig. 5 에서 나타낸 단면 A-A'에서의 두께 분포를 해석결과와 시험결과를 비교하여 나타낸 것이다. 두께 분포에서도 비교 결과가 거의 유사하게 나타나 본 논문에서 적용한 블랭크 홀딩력, 마찰계수 등의 공정변수가 유효함을 확인하였다.

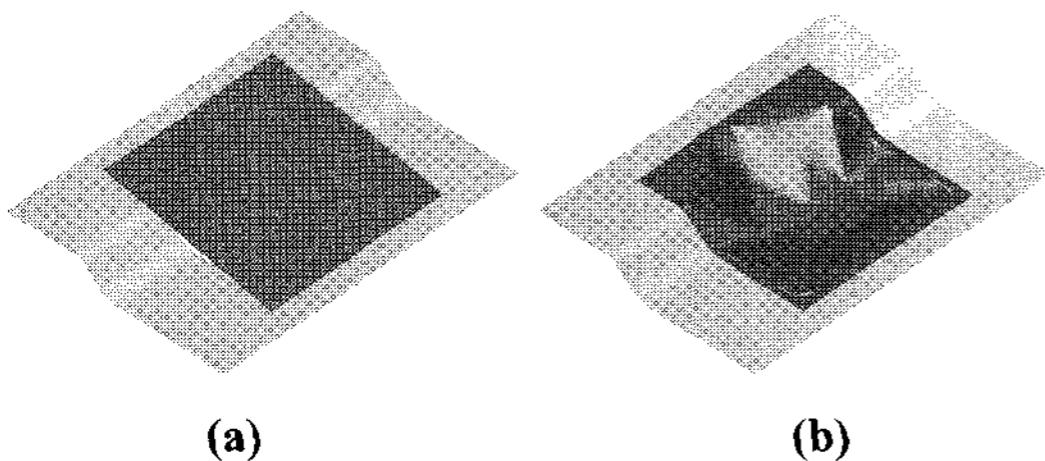


Fig. 4 Formed shape of the blank in the stamping process of the heat protector panel: (a) gravity analysis; (b) binder-wrap analysis

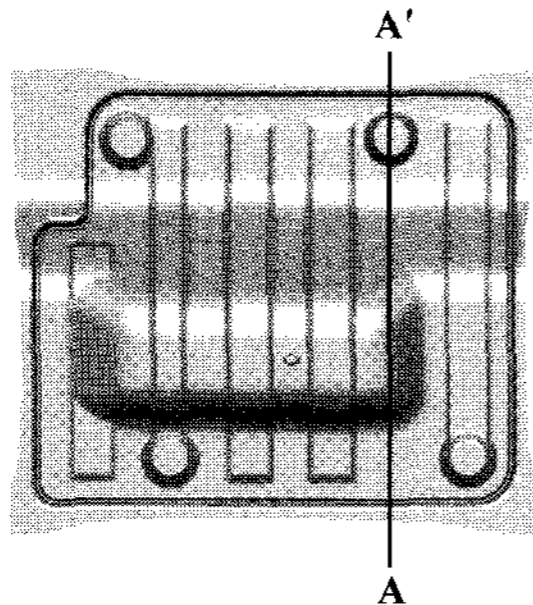


Fig. 5 Final formed shape in the drawing process of the original heat protector panel

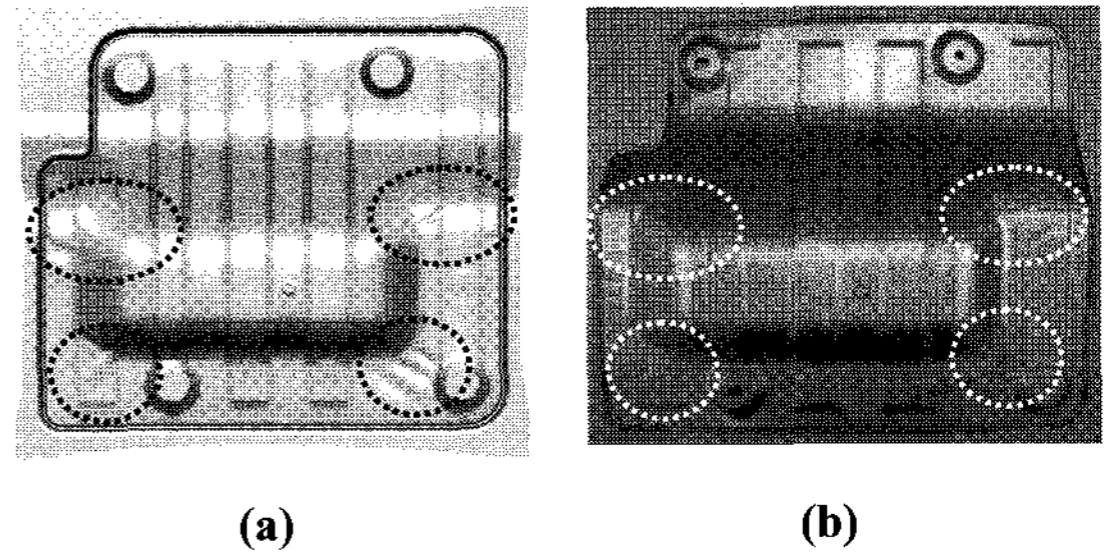


Fig. 6 Comparison of surface defect in the product with the original tool design: (a) analysis; (b) experiment

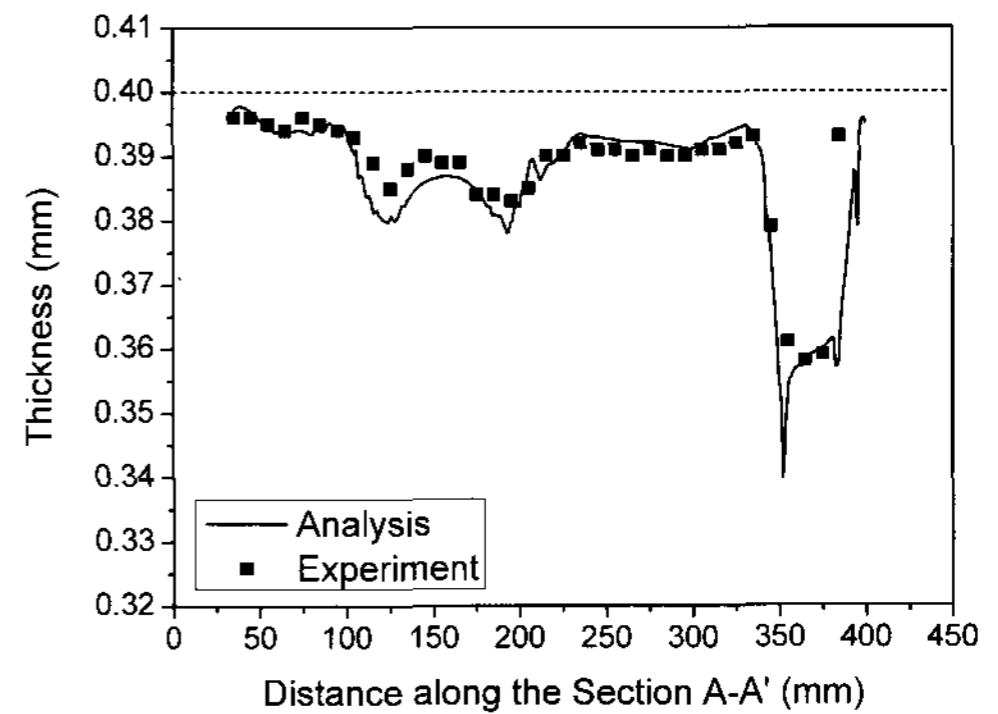


Fig. 7 Comparison of thickness distribution along the section A-A' between the analysis and the experiment of the original panel

### 2.4 면불량의 원인 분석

주름의 발생 원인이 일반적인 딥드로잉 공정의 플랜지 영역에서 나타나는 압축력에 의한 좌굴현상에 의한 것이 아니기 때문에, 성형 완료 직전의 형상뿐만 아니라 성형 중간 단계에서의 블랭크 변형 형상을 이용하여 면불량의 원인을 분석하였다. Fig. 8 에는 성형완료 15.2mm, 10.2mm, 5.2mm 전의 블랭크의 형상을 나타내었다. 점선으로 표시한 영역 등에서 성형 초기부터 다이 및 펀치에 접촉하지 않고 여육(excess metal)이 발생하였다. 성형이 진행되면 펀치 형상의 모서리 부분에 여육이 몰리면서 주름이 발생하였다. Fig 9 에는 Fig. 5 의 단면 A-A'에서 블랭크와 금형의 접촉 상태를 성형완료 15.2mm, 10.2mm, 5.2mm 전으로 구분하여 도시하였다. 전체형상에서와 마찬가지로 그림에서 점선으로 나타낸 영역인 형상의 모서리 부위에서 블랭크가 펀치나 다이면



에 균일하게 접촉하지 못하였다. 균일한 접촉이 발생하지 않는 부분은 단면의 기울기와 깊이가 방향별로 변하는 부분으로 드로잉 비가 방향별로 다르므로 여유가 발생하게 된다. 발생한 여유는 성형이 진행되면서 충분한 인장력을 받지 못하여 주름으로 남게 된다.

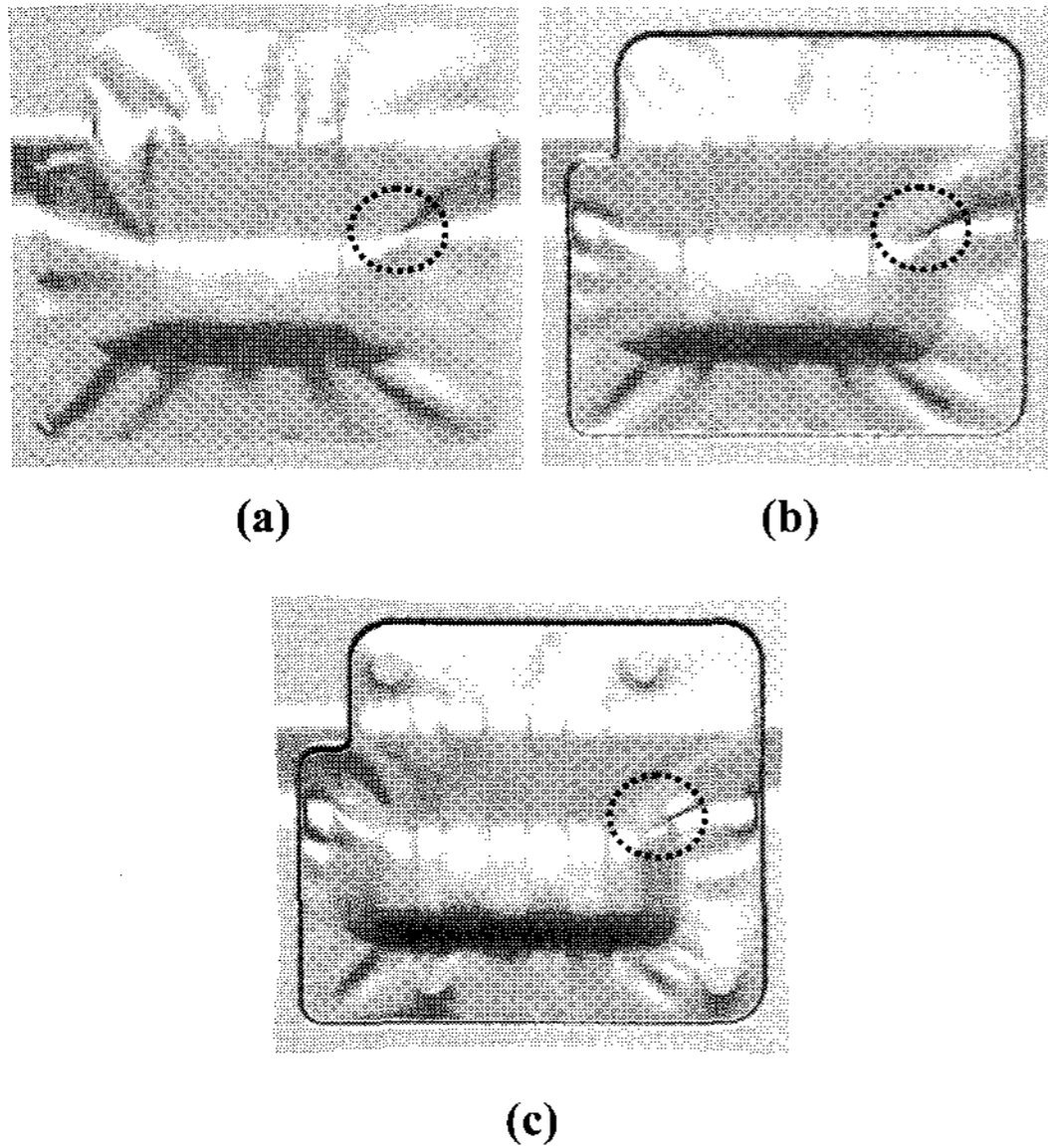


Fig. 8 Formed shape of the blank before forming completion by (a) 15.2mm; (b) 10.2mm; (c) 5.2mm

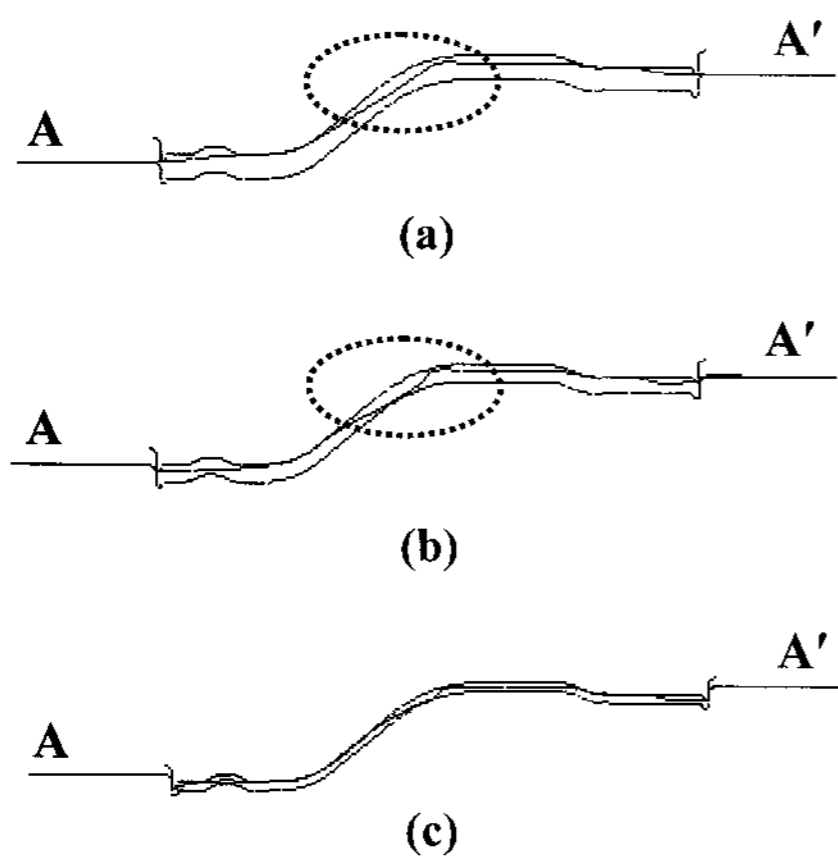


Fig. 9 Cross section shape of the blank and the tools along the section A-A' before forming completion by (a) 15.2mm; (b) 10.2mm; (c) 5.2mm

### 3. 금형면 설계 및 성형 해석

위에서 언급한 바와 같이 면 불량 발생의 원인은 제품의 형상에 의하여 방향에 따른 불균일한 드로잉 비와 부족한 인장력 때문이다. 본 논문에서는 여유에 의하여 발생하는 주름을 제거하기 위하여 형상 변경의 금형면 설계 및 드로우비드의 설치를 제안하였다. 금형 설계 변경의 효과를 검증하기 위하여 성형해석을 수행하였고, 수정 제작된 금형을 이용하여 실제품을 성형 가공하면 품질 개선 효과를 확인하였다.

#### 3.1 제품면 설계 변경

드로잉 공정 중에 발생하는 면 불량을 해결하는 가장 쉬운 방법은 제품면의 형상을 수정하는 것이지만 부재의 구조, 내구 특성 등이나 생산 공정의 제한으로 설계가 완료된 이후에는 성형성이 우수한 형상으로의 변경이 어려운 경우가 많다. 본 논문에서 고려한 열차단판 성형해석의 경우 제품 설계 및 시제품 제작과 동시에 성형성을 평가하였기 때문에 제품면의 형상 변경을 통한 주름 제거가 가능하였다.

제품면의 형상 변경은 금형면의 3 차원 형상 CAD 데이터를 이용하여 수행하였으며 변경 전과 후의 형상은 Fig. 10 과 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 단면의 높이가 변화하는 위치를 제품면 내부에서 바깥쪽으로 이동시키고 기울기도 더욱 완만하게

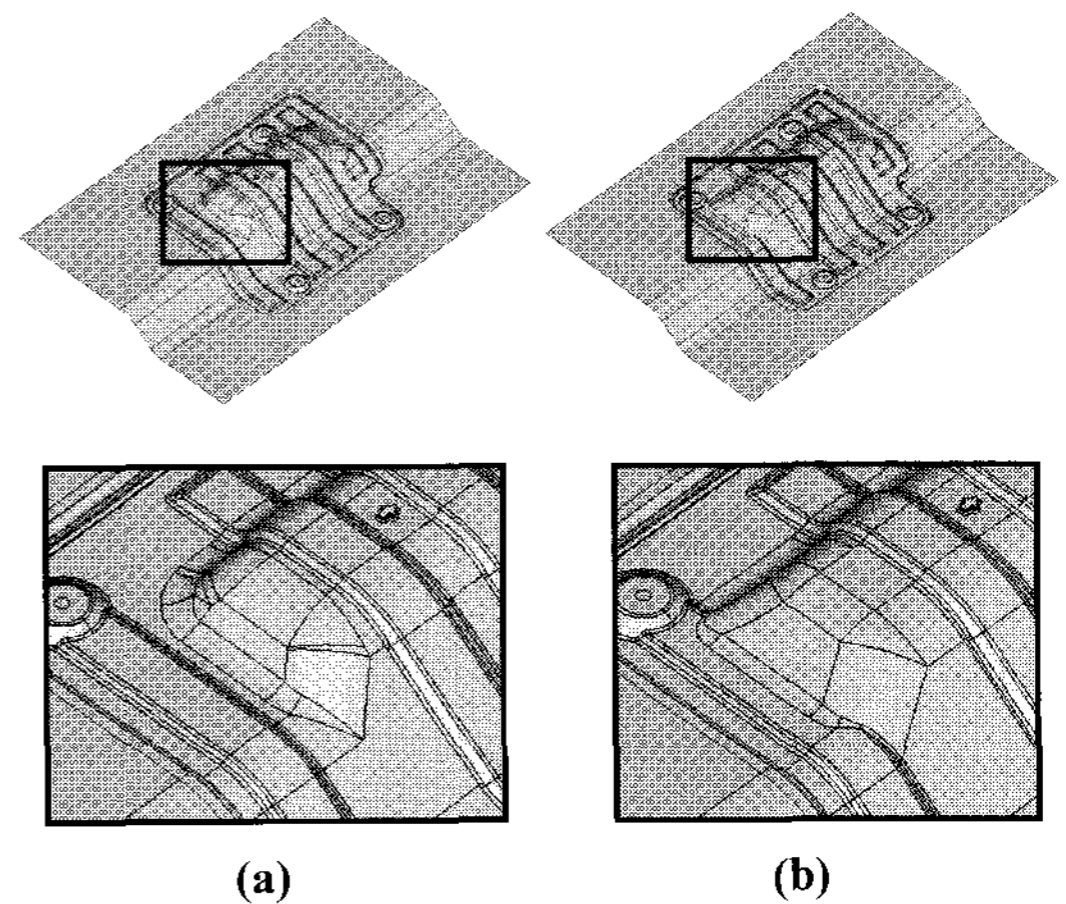


Fig.10 Modification of surface shape of the heat protector panel in order to improve surface quality: (a) original shape; (b) modified shape

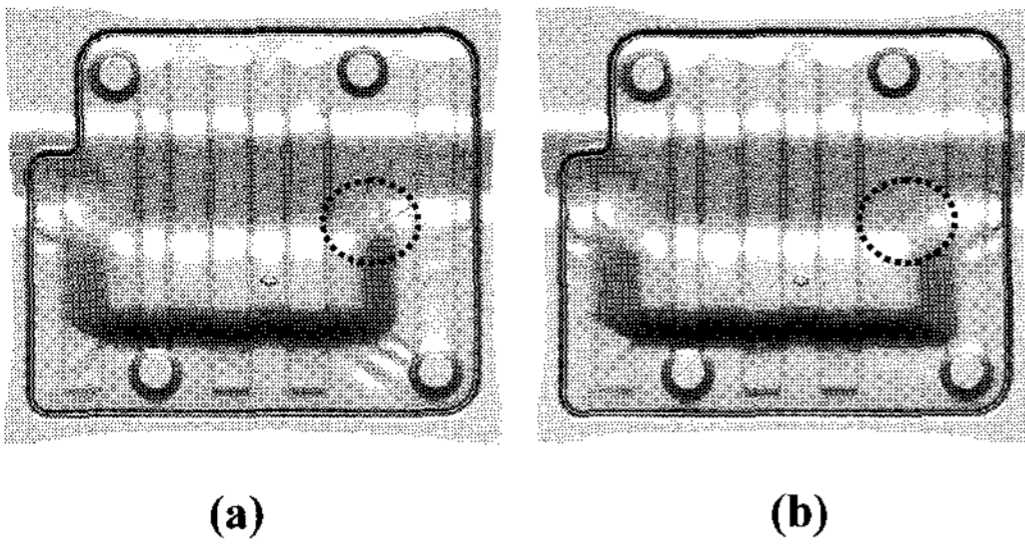


Fig.11 Comparison of formed shape with respect to the surface shape of the heat protector panel: (a) original shape; (b) modified shape

금형면의 형상을 수정하였다. 수정된 금형면을 이용하여 2.1 절에서 언급한 내용과 같은 방법으로 유한요소 모델링을 수행하고, 해석 조건을 부여하여 성형해석을 수행하였다.

형상 변경 전과 후의 면 품질은 성형 완료 직전의 변형 형상으로 비교하였으며 그 결과는 Fig. 11 에 도시하였다. 그림에 표시한 것과 같이 형상이 변경된 위치에서는 주름이 상당히 제거되었으며, 여육의 발생이 감소하여 주름이 줄어든 것을 볼 수 있다. 그러나 제품 형상의 바깥 위치에서는 아직 주름이 잔존하였고, 바깥부분의 주름은 드로우비드를 삽입하여 인장력을 부가하면 제거가 가능한 것으로 분석되었다.

### 3.2 드로우비드의 삽입

제품면의 형상 변화에도 남아 있는 주름을 제거하기 위하여 드로우비드를 삽입하였다. 드로우비드를 적용하여 성형 과정 중에 블랭크에 인장력이 추가로 부가되게 하였다. 드로우비드의 삽입 위치와 형상은 Fig. 12 에 도시하였고, 해석의 효율성을 위하여 드로우비드의 중심선 형상을 이용하는 등가 드로우비드로 적용하였다[5-6]. 등가 드로우비드의 구속력은 2 차원 해석을 통하여 계산하였고, 드로잉에 대한 구속력은 19.6N/mm, 블랭크 홀더에 작용하는 반력은 14.4N/mm 로 부과하였다. 등가 드로우비드를 적용하여 성형 해석을 수행한 결과 충분한 인장력이 부과되어 외곽 영역까지 주름이 제거되었고, 이 때의 변형형상은 Fig. 13 에 도시하였다. 결국 내부에서 발생하는 주름은 금형면 형상을 변경하여 제거하였고, 외곽의 주름은 드로우비드에 의한 인장력 부과로 제거하였다. 그러나 과도한 깊이를 갖는 드로우비드의 삽입은

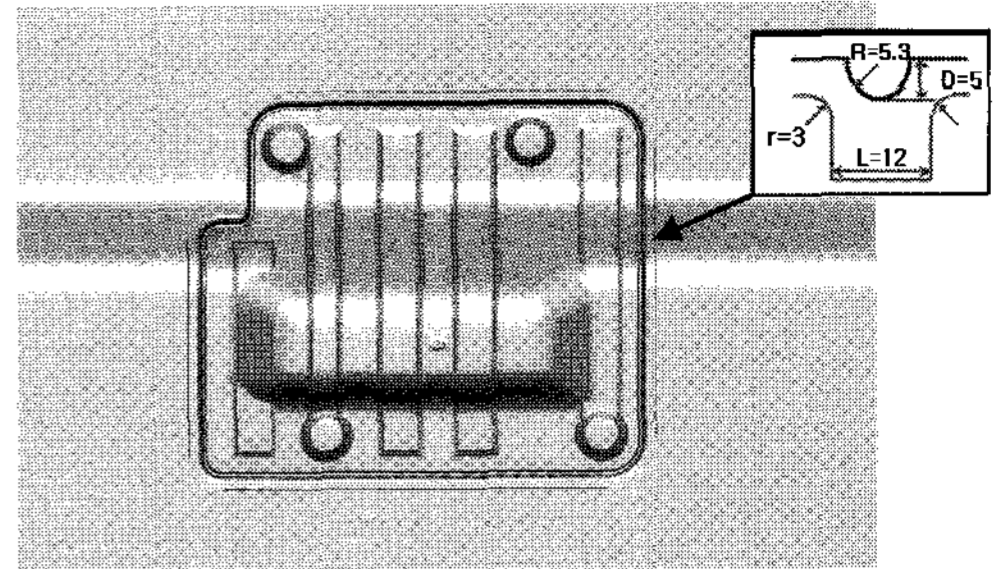


Fig.12 Draw-beads on the die surface of the heat protector panel with modified surface shape

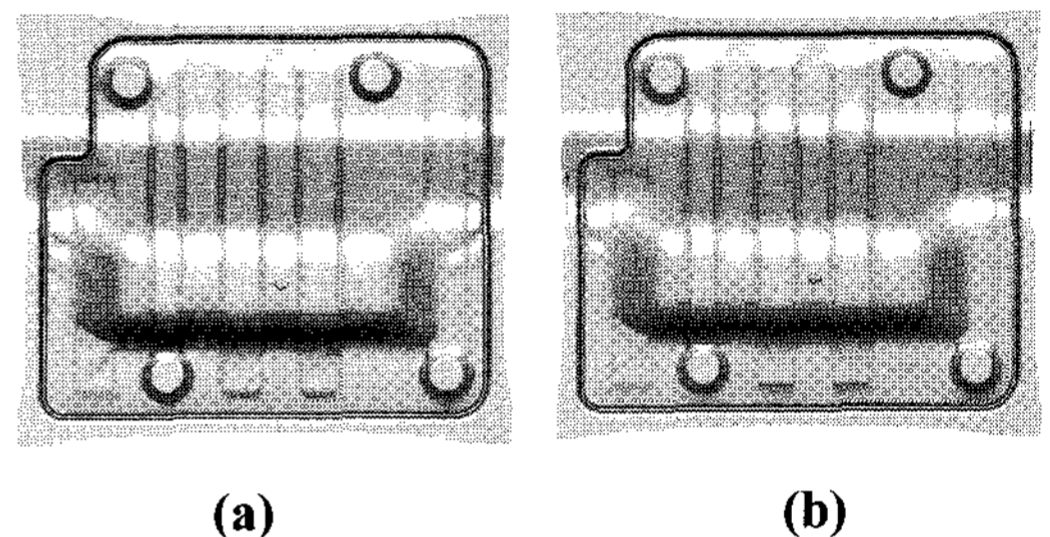


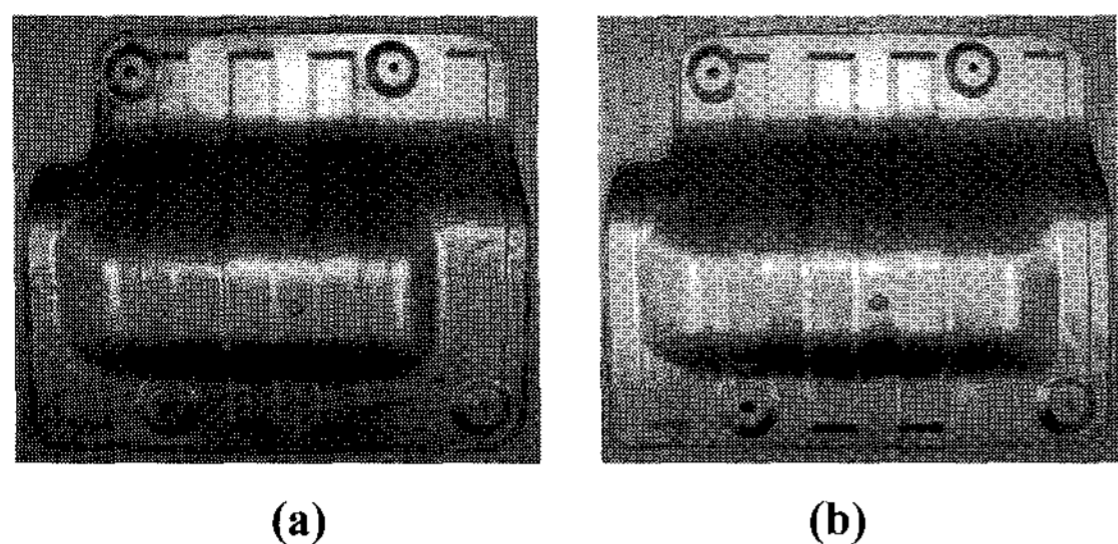
Fig.13 Comparison of formed shape of the heat protector panel: (a) without draw-beads; (b) with draw-beads

성형 과정에서 파단에 의한 불량률의 유발하므로 금형 제작 및 시제품 성형의 단계에서는 드로우비드의 높이를 적절히 조절하였다.

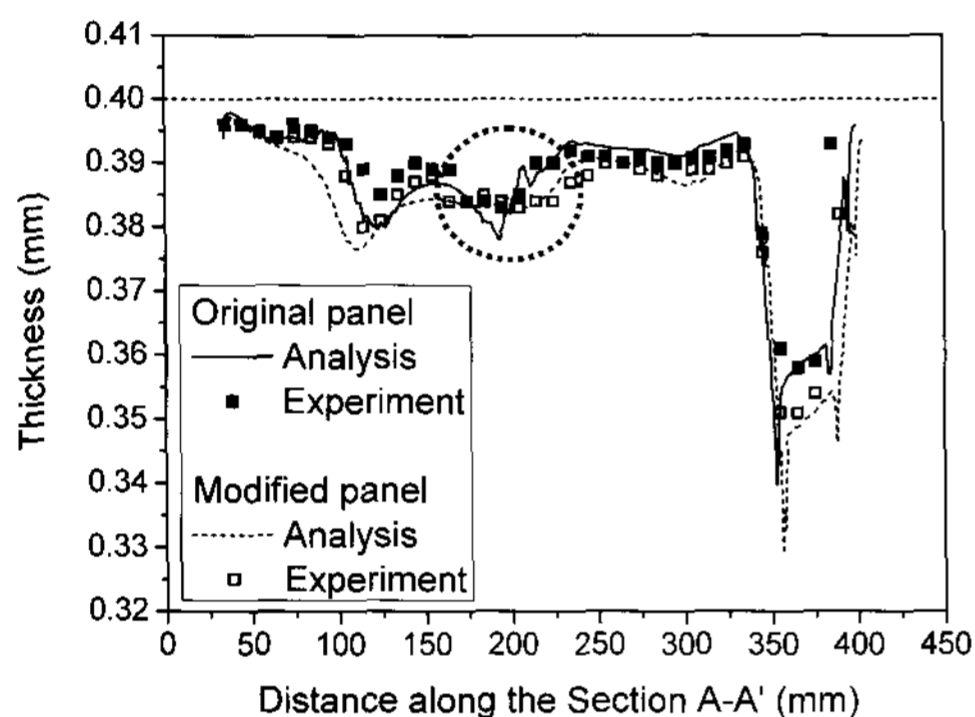
### 3.3 프레스 성형 제품 형상 비교

위의 결과로부터 Fig. 12 의 형상과 드로우비드를 최종 금형 설계안으로 결정하였고, 이를 적용한 열차단판 성형용 프레스 금형을 수정 제작하였다. 제작된 금형을 이용하여 열차단판의 시제품을 프레스 가공하였다. 이 과정에서 드로우비드에 의한 성형품의 파단이 발생하지 않도록 드로우비드의 깊이를 위치별로 적절히 조절하여 금형을 수정하였다.

Fig. 14 에는 설계 변경이 적용된 금형을 이용하여 제작된 열차단판의 최종 제품의 형상을 금형 설계 변경 전의 금형을 이용하여 가공된 열차단판의 최종제품과 비교하여 도시하였다. 성형 해석에서 검증한 바와 같이 제안된 금형면 형상 변경안과 드로우비드를 적용하면 제품면 내부 및 외곽의 주름이 모두 제거되어 면품질이 개선되는



**Fig.14 Comparison of final shape of the heat protector panel stamped in the press machine: (a) original design; (b) modified design**



**Fig.15 Comparison of thickness distribution along the section A-A' between the original panel and the modified panel**

것을 확인할 수 있었다. 주름이 제거되는 면품질의 개선효과는 두께 분포를 통해서도 확인할 수 있다. Fig. 15 는 수정된 제품의 두께분포와 수정 전 모델의 두께분포를 성형해석 및 시험결과에 관하여 비교하여 도시한 것이다. 그림에서 표시한 부분은 Fig. 8 의 수정 전 모델의 주름이 발생한 부분의 두께 분포를 수정된 모델과 비교한 것이다. 주름 발생 원인이 금형면과의 불균일한 접촉이기 때문에 수정 전과 비교하면 수정된 모델에서 두께 분포가 고르게 나타나는 것을 볼 수 있었다. 즉, A-A' 방향으로 작용된 인장력에 의하여 변형이 분산되면서 주름이 개선된 것이다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 제품면에 단차 형상이 있는 열차단판의 프레스 가공 시의 면 품질을 평가하고, 주름 등의 면 품질을 개선하기 위한 금형면 설계 방안을 도출한 후 성형해석과 시제품 가공을 통하여 설계 개선안을 검증하였다.

(1) 열차단판의 성형해석을 수행하여 면품질 불량 위치를 실제 제품과 비교, 검증하였으며, 주름 발생의 원인은 금형면과의 불균일한 접촉과 방향에 따른 드로잉비의 차이가 원인임을 밝혀내었다.

(2) 제품의 면품질 불량을 개선시키는 방안으로 금형면 형상 변화와 드로우비드를 설치하는 것으로 금형 설계 방안을 제시하였으며, 성형 해석 및 실제 금형을 이용한 프레스 가공 결과를 비교하여 주름이 제거되는 것을 확인하여 개선된 금형 설계안을 검증하였다.

#### 참고 문헌

- [1] D. F. Eary, E. A. Reed, 1974, Techniques of Pressworking Sheet Metal - An Approach to Die Design, Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
- [2] J. M. Lee, Y. T. Keum, 1999, Design analysis and field try-out of automotive panel dies, Transactions of Materials Processing, Vol. 8, No. 2, pp. 127~134.
- [3] S. H. Kim, 2007, Improvement of the surface quality of an automotive member by a modification of the stamping tool, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 187-188, pp. 387~391.
- [4] PAM-STAMP 2G 2005 User's Guide, ESI Group.
- [5] J. S. Park, S. H. Kim, H. Huh, 2002, Elasto-plastic finite element analysis of drawbead forming for evaluation of equivalent boundary conditions in sheet metal forming - part II : application to the front door panel forming process, Transactions of Materials Processing, Vol. 11, No. 6, pp. 513~518.
- [6] H. Huh, K. P. Kim, S. H. Kim, J. H. Song, H. S. Kim, S. K. Hong, 2003, Crashworthiness assessment of front side members in an auto-body considering the fabrication histories, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 45, No. 1, pp. 1645~1660.