

자동차용 부재 금형설계의 공정변수 결정을 위한 CAE 프로세스 적용

김 세 호^{*1)} · 허 훈²⁾ · 송 정 한²⁾

대구대학교 자동차 · 산업 · 기계공학부¹⁾ · 한국과학기술원 기계공학과²⁾

Application of the CAE Process to the Parameter Determination for the Tool Design of an Auto-body Member

Seho Kim^{*1)} · Hoon Huh²⁾ · Junghan Song²⁾

¹⁾School of Automotive, Industrial and Mechanical Engineering, Daegu University, Gyeongbook 712-714, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, KAIST, Science Town, Daejeon 305-701, Korea

(Received 18 September 2004 / Accepted 7 March 2005)

Abstract : This paper is concerned with the simulation-based parameter determination for the tool design in the stamping process of the complicated auto-body member. The CAE procedure of the stamping process is proposed so that troubles such as wrinkle, springback and excess metal be eliminated with changing parameters such as the blank size, the restraining force of the draw-bead and the embossing shape in the die face. The selected indicators of failure during forming are wrinkling, the amount of spring after unloading of the tool, the amount of excess metal developed. The proposed analysis scheme is applied to the tool and process parameter design for the front side member of a RV car. The simulation results show that the scheme can produce sound product from the viewpoint of thickness distribution, the contact condition between tools and the blank, the shape accuracy and so on.

Key words : Auto-body member(자동차용 부재), Tool design(금형설계), CAE(전산원용공학), Stamping process (스탬핑 공정)

1. 서론

자동차의 구조부재는 주로 박판을 이용한 스탬핑 공정에 의하여 생산되고 있으며, 설계 데이터로부터 신속한 금형 설계 및 성형성 평가 등이 요구되고 있다. 최근 들어 연비향상 등의 목적에 따른 차량 경량화 및 충돌 법규와 상품성의 강화로 인한 안전성 향상 등의 요구되고 있으며, 구조용 부재의 형상이 복잡해지는 추세이다. 이에 따라 30 kg급 이상의 고장력 강판의 사용이 점차 확대되고 있다.¹⁾ 기존의 일반 강판에 비하여 고장력 강판은 성형 자체가 어

렵고, 스프링 백 현상이 심하여 공정설계가 매우 까다롭다.²⁾ 또한, 완성차 업체의 차량품질 향상에 따라 업체 자체의 품질기준 강화를 목적으로 외관상으로 드러나는 부위의 면품질, 주름, 크랙 발생 등의 항목이 불량을 좌우하는 대상으로 선택되고 있다. 고장력 강판의 사용 및 품질기준 강화에 따라 성형의 난이도는 계속 증가하고 있는 반면 금형의 개발 기간은 점점 단축되고 있어 기존 엔지니어의 경험만으로는 다양한 형태의 제품을 설계하고 개발하는 것은 어려워지고 있다.

최근 들어 유한요소해석의 발전으로 성형공정의 해석을 이용한 설계 개선안 도출 등이 현업에서 적용되고 있으나, 차량 부재의 대부분을 생산하고 있

*To whom correspondence should be addressed.
mvksh@daegu.ac.kr

는 1-2차 부품업체들은 해석의 활용도가 낮아 해석의 주요 공정변수들이 성형성에 미치는 영향의 파악 및 성형 메커니즘의 연구에 의 적용은 어려운 편이다.

본 논문에서는 차량용 부재의 금형 설계 시 해석을 활용하여 짧은 시간에 성형공정의 기본적 문제점을 파악하고 개선안을 제시할 수 있는 해석 프로세스를 개발하고, 유사한 형태의 제품의 금형 설계 시 개발 일정을 단축할 수 있는 방안을 제시하고자 한다. 이를 위하여 제품의 설계 데이터로부터 주름 및 면불량을 개선할 수 있는 금형면 설계, 블랭크 크기 결정, 드로우 비드력 설계 등을 CAE를 이용하여 수행할 수 있는 단계별 프로세스를 제안하여 적용하였다. 이를 이용하여 프런트 사이드 멤버(front side member)의 제품 데이터로부터의 금형설계 과정에 적용하고, 제품의 불량을 최소화할 수 있는 공정변수를 구하였다.

2. 금형설계의 조건

2.1 금형설계 개요

자동차 부품의 금형설계 시 제품형상 데이터를 차체구조 D/B로부터 받아 제품형상을 파악하는 기초작업과 프레스 방향 결정, 바인더 면의 형성, 프로파일 라인의 결정, 여육 형성 등에 CAD 프로그램이 활용되고 있다. 추후 구성된 다이면 정보로부터 해석을 실시하여 성형 난이성을 평가하고, 다이면 형상 및 블랭크 형상을 설계한다. 일반적으로 금형설계가 완료된 후에 문제점을 수정하기 위한 목적으로 해석이 활용되고 있으므로, 전체적인 재료의 유동 및 주요 불량을 발생시키는 인자들에 대한 이해가 부족한 실정이다. 본 논문에서는 금형설계 과정에서 주요 공정변수들이 재료의 유동 및 불량에 미치는 영향을 파악하여 금형형상을 쉽게 수정할 수 있게 하도록 설계과정에서 CAE를 도입하고 시간과 비용을 줄일 수 있도록 하였다.

본 논문에서 해석의 대상은 RV 차량의 프런트 사이드 이너 멤버(front side member inner)이다. 프런트 사이드 멤버는 엔진룸에서 가장 중요한 구조용 부재로 충돌사고 시 적절한 변형에 의하여 충격을 감소시키고 엔진룸 부품의 승객실 침입을 방지하는

역할을 한다. 프런트 사이드 멤버는 직선형으로 설계하는 것이 바람직하나 엔진, 변속기, 타이어 궤적 등의 간섭 회피 및 타 부재와의 연결을 위하여 복잡한 형상으로 설계된다.

2.2 금형 설계를 위한 해석 조건

프런트 사이드 멤버의 성형 공정은 다단계 공정이나, 본 논문에서는 제품의 불량이 주로 발생하는 1단계 드로우 공정의 금형설계를 대상으로 하였다. 타 공정들은 주로 타발 공정 및 재드로잉 공정으로 이루어지므로 고려의 대상에서 제외하였다. Fig. 1에 도시한 바와 같이 제품설계 단계에서 초기 제품형상 선 데이터로부터 면 데이터를 형성하여 제품 데이터를 만들게 되며, 이 데이터를 기본으로 바인더 면을 설계하게 된다. Fig. 2에 드로우 성형용 금형의 초기 설계 형상을 도시하였다.

바인더 면은 각 단면의 정점에 대하여 최대한 같은 길이로 하고, 형상이 급변하는 모양을 피하도록 평면에 가깝게 설계되며, 단면선장의 균일화를 위하여 재료 흐름이 균일하도록 설계된다. 제품면 하단부가 높은 부위에 단 비드를 부과시켜, 성형 후 낮은 변형률에 의한 스프링백 현상 등을 방지하였다.

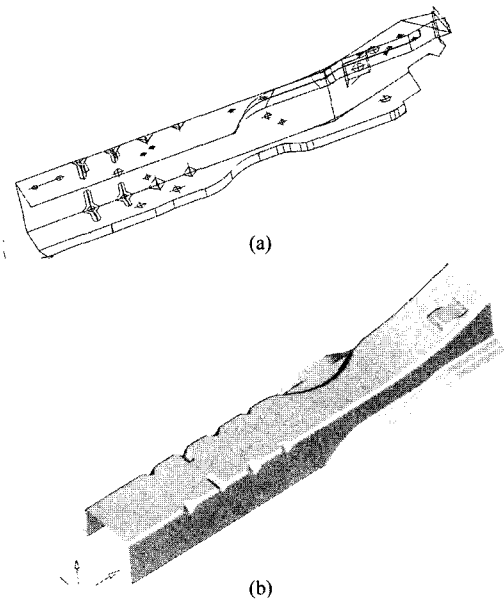


Fig. 1 CAD model of the front side member inner: (a) wireframe data; (b) surface data

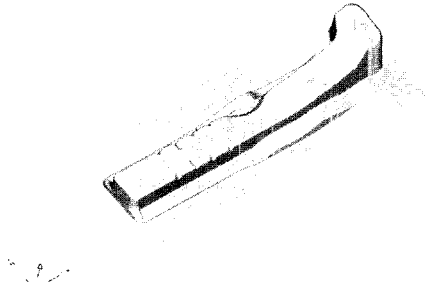


Fig. 2 CAD model of the tool for the stamping of the front side member inner with the initial binder design

금형설계를 위한 성형공정의 유한요소해석은 상용 유한요소 프로그램인 LS-DYNA3D³⁾를 이용하여 수행하였다. Fig. 3에는 금형 및 블랭크의 유한요소 모델을 도시하였다. 블랭크는 40 kgf 급의 강판인 SPRC40으로 $\bar{\sigma} = 734.7(0.01 + \bar{\epsilon})^{0.245}$ MPa으로 표현되는 유동응력 곡선을 가지며, 두께는 1.6 mm이다. 박판재료는 수직 이방성을 가진다고 가정하였으며, 수직 이방성 계수는 1.78이었다. 블랭크와 금형의 마찰계수는 0.15로 근사하여 해석을 수행하였다. 해석은 블랭크 홀더를 다이면으로 내려 블랭크를 고정시키는 바인더랩 해석과 펀치성형 공정의 해석으로 나누어 2단계로 실시하였다.

이상의 초기 금형 데이터와 해석조건을 이용하여 최종 성형품의 파단, 주름, 스프링 백 및 국부적인 재료유입 과다의 가능성이 낮은 최적의 금형 및 공정변수를 최적화하고자 하였다. 이를 위하여 블랭크 형상을 결정하고, 드로오 비드력, 제품 내부의 포밍형상을 추가하여 그 영향을 파악하는 해석을 수행하여 현장의 트라이 아웃을 최소화하고 빠른 시간 내에 최적의 제품을 생산할 수 있는 금형 형상 및 공정변수를 구하였다.

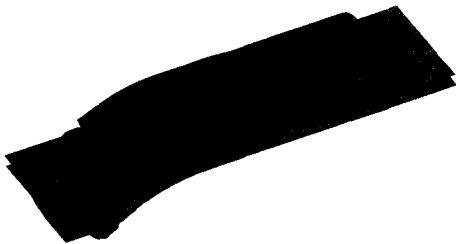


Fig. 3 finite element model of tools and the blank for the numerical analysis of the front side member inner

3. 해석을 통한 설계인자 결정

3.1 설계 인자 개요

본 절에서는 성형 중 파단, 주름, 국부 재료 유입, 스프링 백 등의 불량이 일어나지 않도록 하는 형상 변수 및 비형상 변수를 결정하기 위하여 유한요소 해석을 수행하였다. 결정하고자 하는 주요변수로 블랭크 길이, 드로오 비드, 국부 주름을 제어하는 포밍형상의 배치를 선택하였다. 성형중에 발생하는 주름 및 국부 재료유입 과다 여부를 판정하기 위하여 변형형상 및 블랭크와 금형의 접촉조건을 활용하였다. 과도한 스프링백 여부를 판정하기 위하여 내연적 유한요소법을 이용한 스프링백 해석을 수행하여 금형 제거 전후의 플랜지 부 형상이 변화된 각도를 비교하였다.

3.2 초기 블랭크 크기의 설계

블랭크 형상은 일반적으로 제품의 표면적을 고려하고, 절단에 필요한 여유를 주어서 결정하게 된다. 절단 여유분 결정 시에 윤활, 불균일한 블랭크 홀딩력 분포, 블랭크 편심, 이방성에 의한 귀발생 등을 고려하게 되는데, 시험을 통한 결정은 매우 어려우며 시행오차를 거치게 된다. 본 논문의 대상인 프린트 사이드 이너 멤버는 단면이 모자형 채널의 형태로 되어 있으므로, 폭 방향의 블랭크 크기가 성형성에 큰 영향을 미치지 않는다. 그러나, 길이 방향의 블랭크 길이에 따라 재료의 유동이 민감하게 변화할 가능성이 있으므로 블랭크 크기의 설계가 매우 중요하다. 블랭크 길이가 과도하게 길어 제품 모서리의 금형 어깨부에서 재료의 유동이 증첩될 경우 측면에서 주름이 발생할 가능성이 높고, 파단의 가능성도 높아진다. 반대로 블랭크 길이가 짧은 경우는 블랭크 길이 및 폭 방향으로 인장력이 부족하여 성형 후 과도한 스프링 백에 의한 형상 동결성(shape fixability)이 저하될 가능성도 크다.

본 해석에서는 초기 블랭크의 형상을 변화시키면서 스프링백 및 주름의 발생 가능성 여부를 고찰하여 최적의 블랭크 크기를 구하였다. 해석에 사용된 블랭크 홀딩력은 100 kN 이었다. 해석은 Fig. 4에 도시한 바와 같이 블랭크 길이가 1260 mm(CASE1), 1140 mm(CASE2), 945 mm(CASE3)의 3가지 경우로

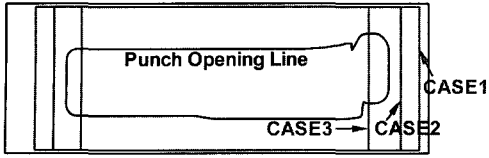


Fig. 4 Initial blank types with the punch opening line after the binder-wrap analysis

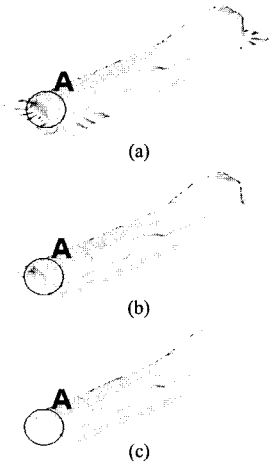


Fig. 5 Comparison of deformed shapes with respect to the initial blank types with the initial tool design

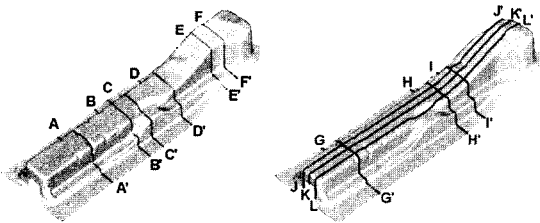


Fig. 6 Locations of the cross sections for the comparison of thickness, springback shape and the contact condition

수행하였으며, 각 경우 변형 형상은 Fig. 5에 도시하였다. CASE 1은 직사각컵 형상과 유사한 닫힌 블랭크(closed blank)가 형성되었으며, 길이방향 끝부분의 폭 벽면부위인 A부위에 재료의 유동이 중첩되면서 발생하는 재료유입 과다 및 주름이 발생하였다. 또한, 국부적인 재료유입 과다에 의한 블랭크 홀딩력의 국부 집중으로 인하여 플랜지부에 큰 주름이 발생하여 불량으로 판정되었다. CASE 2는 A부위의 벽면에 재료가 유입되면서 완전성형 후 일부분만 남아있도록 반열림(semi-open) 형태의 블랭크가 형성되었다. CASE3는 열린 채널(open channel)형태의

블랭크 설계로서 주름이나 파단의 문제점 없이 성형이 완료되었다.

CASE2와 CASE3의 변형양상을 비교하기 위하여 Fig. 6에 도시된 단면에서의 두께분포를 Fig. 7에 도시하였다. 두께는 거의 유사한 분포를 보이고 있으며, 드로잉 비가 크고 단면형상의 변화가 심한 단면 C-C'와 D-D'에서 일부분의 두께가 심하게 두꺼워지고 있음을 알 수 있다. 두께 증가의 원인을 살펴보기 위하여 성형중의 단면 C-C'와 K-K'에서의 변형형상을 Fig. 8에 도시하였다. 단면부위의 블랭크가 펀치에 접촉하지 못하는 부위가 발생되며, 이러한 현상으로부터 접촉되지 못한 블랭크는 성형중 인장력을 받지 못하게 되고 여육(excess metal)으로 남게 된다. 이러한 여육은 성형 후 두께의 증가 원인이 되고, 주름이 발생할 가능성이 높아지게 된다. 또한, 충분한 인장력을 받지 못하였기 때문에 가공경화가 되지 않아 강도가 약한 부분으로 남게 된다. Fig. 9에 CASE2와 CASE3의 변형형상을 도시하였으며, 단면 C-C'과 D-D' 부근의 블랭크가 많이 찌그러지면서 성형 후에도 주름이 발생함을 확인할 수 있다.

성형 후 형상동결성을 비교하기 위하여 스프링백 해석을 수행하고, 탄성복원 후 단면 B-B', C-C', D-D'의 플랜지부 형상 변화를 CASE2와 CASE3에 대하여 비교하였다. Fig. 10에 정의된 플랜지 각도 변화를 Fig. 11에 도표로 도시하였다. CASE2의 경우가 CASE3의 경우보다 스프링백의 양이 작은 것을 알 수 있으며, CASE3의 블랭크 형상으로 블랭크 홀딩력을 200 kN 초과한 경우에도 스프링백이 약간 감소하는 경향을 보이나 완전히 제거하지는 못하였다.

본 절에서는 블랭크 크기를 결정하기 위한 해석을 수행하였으며, 완전 단합형의 블랭크를 사용할 경우 제품의 불량률이 발생함을 알 수 있었다. CASE2와 CASE3는 과도한 스프링백 현상 및 펀치 평면부의 여육 발생 등의 문제를 보였으며, 이는 드로오 비드 설치 및 여육 흡수를 위한 포밍 형상 설치 등의 공정변수 고려가 필요하다고 판단되었다.

3.3 드로오 비드의 설계

3.2절의 해석결과 CASE3의 블랭크는 과도한 스프링백 현상 및 펀치 평면부의 여육 발생 등의 문제를 보이며, CASE2의 경우도 과도한 여육발생 문제

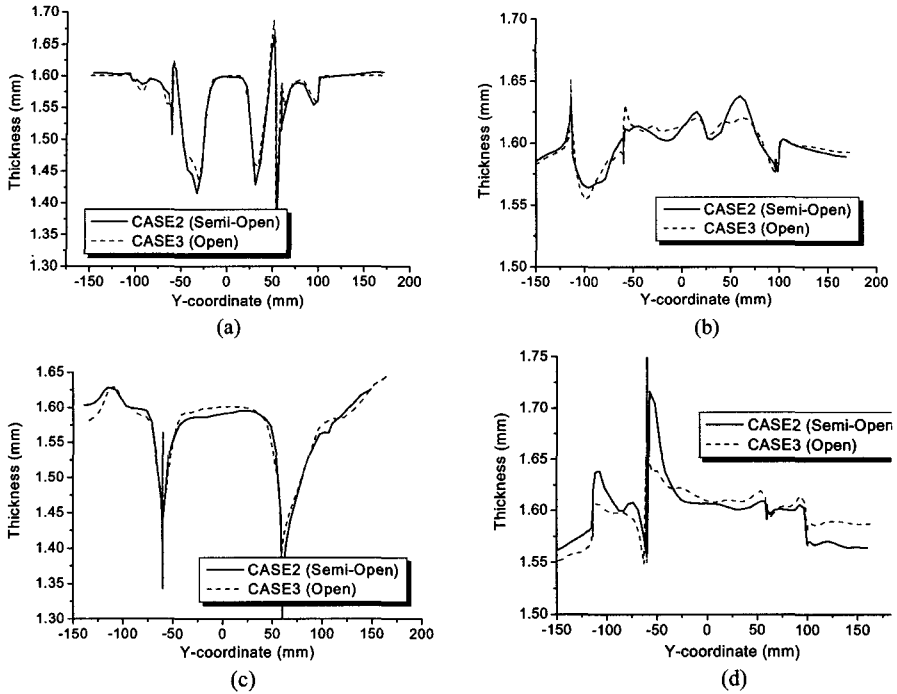


Fig. 7 Comparison of the thickness distribution with respect to the blank size with the initial tool design: (a) section A-A'; (b) C-C'; (c) D-D'; (d) E-E'

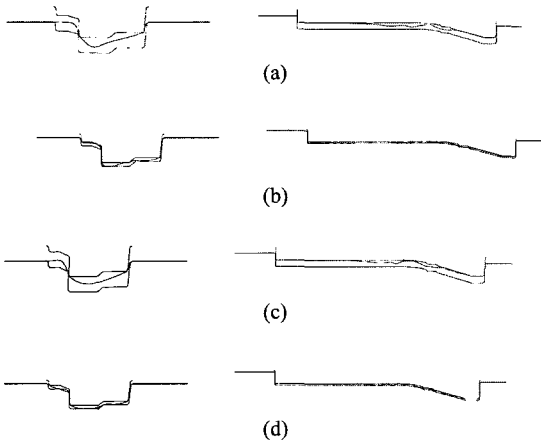


Fig. 8 Comparison of the contact condition between tools and the blank along the section C-C' and K-K' with the initial tool design: (a) CASE2, stroke=118mm; (b) CASE2, stroke=150mm; (c) CASE3, stroke=118mm; (d) CASE3, stroke=150mm

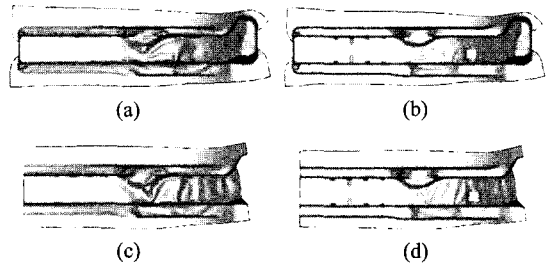


Fig. 9 Deformed shapes of the blank with the initial tool design: (a) CASE2, stroke=118mm; (b) CASE2, stroke=150mm; (c) CASE3, stroke=118mm; (d) CASE3, stroke=150mm



Fig. 10 Definition of the flange shape change after the springback

에 의한 주름발생 현상을 보였다. 해결책으로 바인더 면에 드로오 비드를 설치하여 해석을 수행하였다. 일반적으로 바인더 면에 위치하고 있는 드로오

비드는 형상은 상대적으로 굵형의 다른 부분들에 비해 그 크기가 매우 작으므로 실제 유한 요소 모델

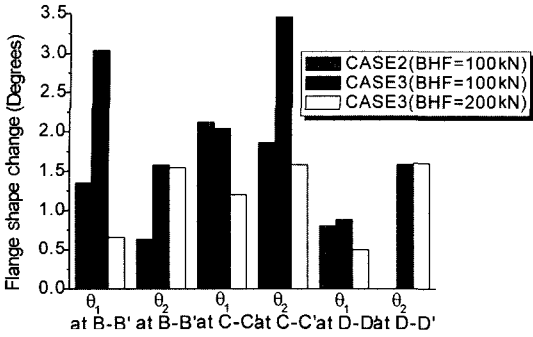


Fig. 11 Comparison of the amount of springback after the forming process with respect to the blank shape

링을 하기가 어렵고 해석시간이 매우 길어지는 문제점이 발생하게 된다. 이에 대한 대안으로 박판 성형공정해석 시에 드로오비드의 영향을 고려하기 위하여 등가의 경계조건으로 구속력을 부가하는 방법⁴⁾이 사용되며 본 논문에서도 구속력을 등가의 경계조건으로 부가하여 해석을 수행하였다. 본 논문에서는 드로오 비드를 원형으로 설계하였으며, 상당 구속력을 0.226 N/mm로 설정하여 해석을 수행하고,

CASE2와 CASE3 두 경우에 대하여 성형품의 두께 분포, 여육 발생, 스프링백 등을 비교하였다.

Fig. 12에 CASE2와 CASE3의 두께를 비교하였다. 비드를 적용한 결과 여육 발생으로 두께가 두꺼워지던 경향을 보이는 단면 C-C' 부근의 두께가 감소한 것을 알 수 있으며, 이는 CASE2의 경우가 더 향상된 결과를 보여주고 있다. Fig. 13에 도시된 바와 같이 비드를 적용하지 않은 경우보다 변형률이 크게 발생하며, 20% 이상의 감소가 벽면에서 발생하였다. 또한 단면 C-C' 부근의 두께증가가 완화되는 좋은 결과를 보여주고 있다.

여육 발생 문제점의 확인을 위하여 Fig. 14에 단면 C-C'과 K-K'에서의 블랭크와 금형의 접촉상태를 도시하였다. 드로오 비드를 부과한 결과 폭방향의 인장력이 증가하여 전반적으로 여육 발생이 감소하고 있음을 알 수 있으나 Fig. 15에서 알 수 있듯이 여전히 여육과 주름이 발생함을 알 수 있다. 스프링백 해석 후 단면 B-B', C-C', D-D'에서의 플랜지의 변형 각도를 Fig. 16에 도시하였다. 드로오 비드가 설치되

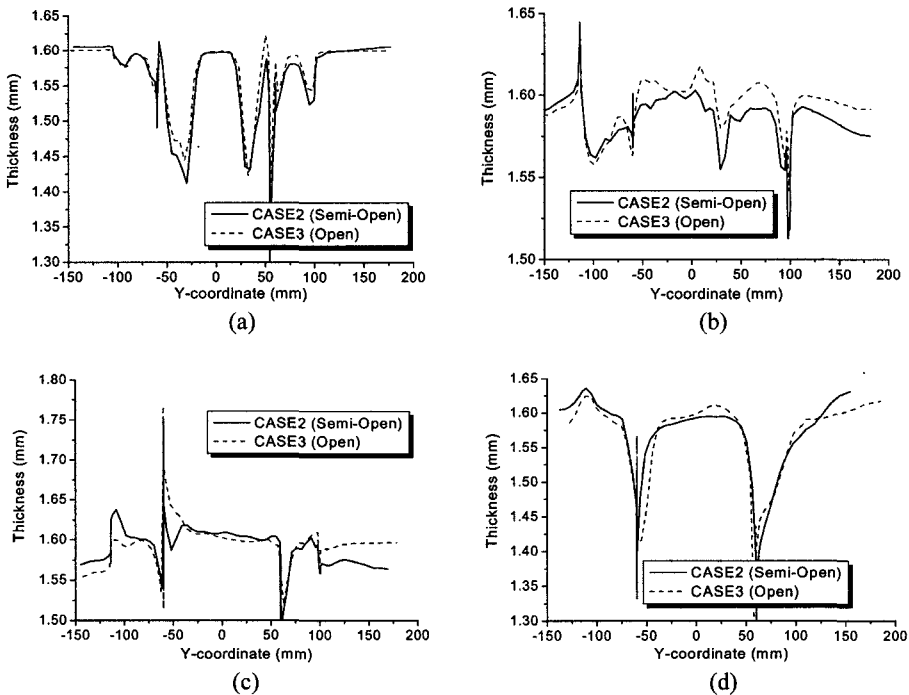


Fig. 12 Comparison of the thickness distribution with respect to the blank size with the draw-bead: (a) section A-A'; (b) C-C'; (c) D-D'; (d) E-E'

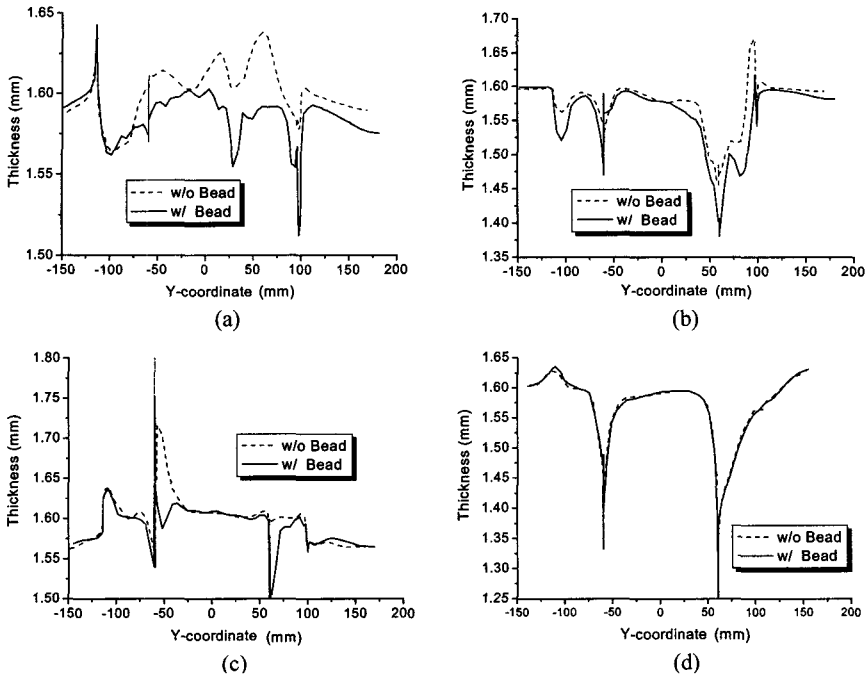


Fig. 13 Comparison of the thickness distribution with respect to the presence of the draw-bead (CASE2): (a) section A-A'; (b) C-C'; (c) D-D'; (d) E-E'

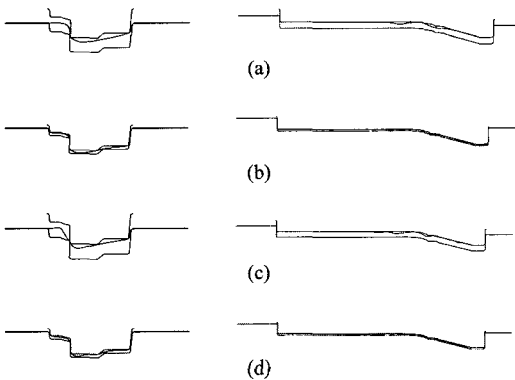


Fig. 14 Comparison of the contact condition between tools and the blank along the section C-C' and K-K' with the draw-bead: (a) CASE2, stroke=118mm; (b) CASE2, stroke=150mm; (c) CASE3, stroke=118mm; (d) CASE3, stroke=150mm

지 않은 경우보다 형상동결성이 향상되었으며, CASE2의 경우에는 스프링백 후 플랜지 각도 변화가 1.5° 미만이었다. CASE 3의 경우에는 스프링백 문제를 어느 정도 해결하였으나, 여전히 CASE2 대비 형상동결성이 좋지 않은 결과를 보이고 있으며, 이 현상은 CASE2의 경우가 더 심하다.

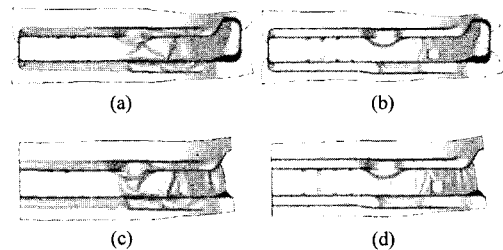


Fig. 15 Deformed shapes of the blank with the draw-bead: (a) CASE2, stroke=118mm; (b) CASE2, stroke=150mm; (c) CASE3, stroke=118mm; (d) CASE3, stroke=150mm

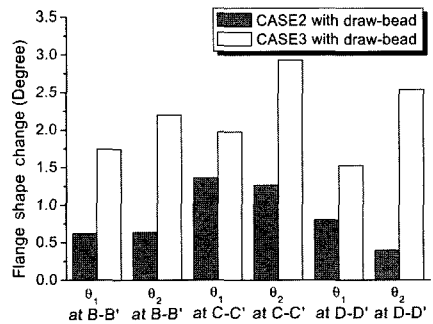


Fig. 16 Comparison of the amount of springback after the forming process with draw-bead

본 질의 해석결과 드로오 비드를 설계하여 스프링백 문제를 해결하였다. 형상 동결성 및 안정적인 접촉 조건의 확보를 위해서는 CASE3의 열린 채널 형태의 블랭크 형상보다는 CASE2와 같은 반열린 형상의 블랭크가 성형조건에서 더 유리함을 알 수 있었다. 그러나, 여육 발생에 의한 펀치 평면부 주름의 억제를 위해서는 금형형상의 수정이 필요하다고 판단되었다.

3.4 금형 내부 포밍 형상 설계

블랭크 형상을 CASE2와 같은 semi-open 블랭크의 형태로 하고, 드로오 비드를 부과한 결과 성형성이 향상된 제품을 얻을 수 있으나, 여육의 발생을 제거할 수 없었다. 이에 대한 대책으로 본 논문에서는 금형면에 포밍(forming)형상을 추가하여 여육 발생 문제를 해결하고자 하였다. 프론트 사이드 멤버는 외관상으로 드러나는 부품이 아니므로 제품의 체결에 영향이 없는 위치에 형상 설계변경을 한다면 큰 문제가 없을 것으로 판단되었다. 포밍은 주로 두께

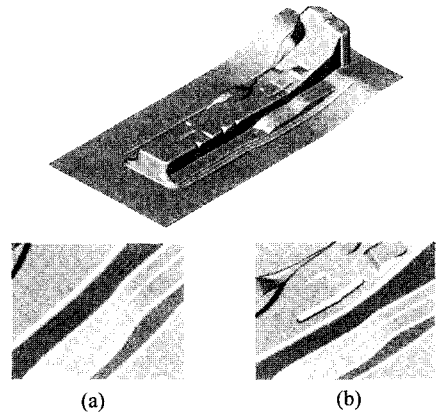


Fig. 17 CAD model of the modified tool surface for the stamping of the front side member inner: (a) initial design; (b) with forming shape

가 크게 증가하고 있는 중심부에 부과하였다. 포밍과 비드가 반영된 금형의 형상은 Fig. 17에 도시하였다. 설계 변경된 금형 형상을 이용하여 기존과 동일 조건으로 해석을 수행하였다.

Fig. 18에 두께분포를 최종실험 결과와 함께 도시

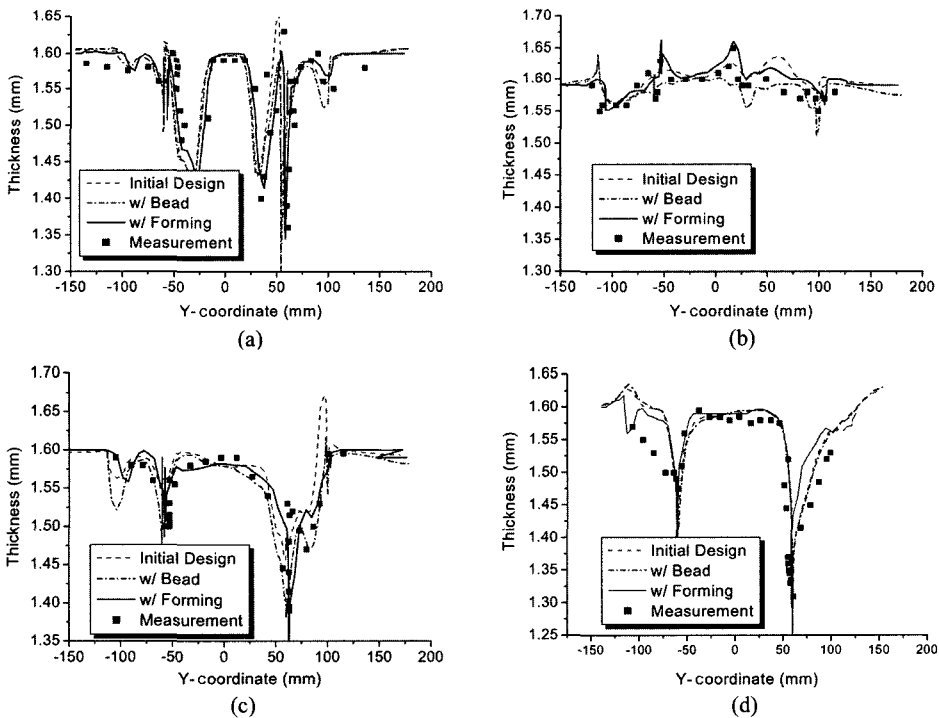


Fig. 18 Comparison of the thickness distribution with respect to the presence of the draw-bead and the forming shape (CASE2): (a) section A-A'; (b) B-B'; (c) C-C'; (d) E-E'

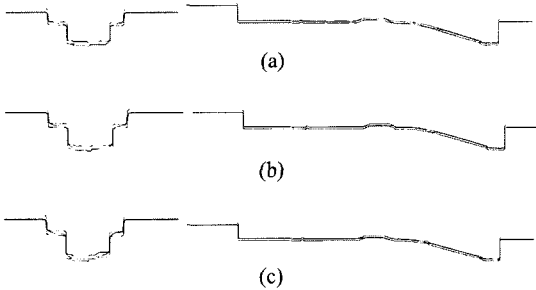


Fig. 19 Comparison of the contact condition between tools and the blank along the section H-H' and J-J': (a) initial design; (b) with draw-bead; (c) with forming shape

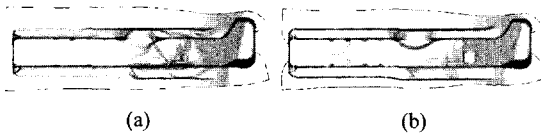


Fig. 20 Deformed shapes of the blank with the draw-bead: (a) stroke=118mm; (b) stroke=150mm

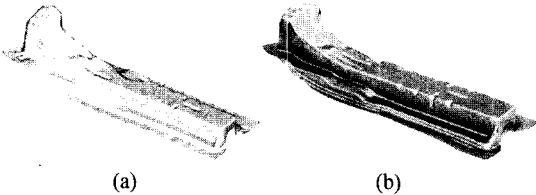


Fig. 21 Comparison of the deformed shape for the experimental verification: (a) analysis results; (b) product

하였다. 실험결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있으며, 본 해석이 타당성을 가진다는 것을 의미한다. 단면 B-B' 부위의 일부분의 두께가 증가하는 경향을 보이고 있으나, 타 부위는 두께 증가 경향이 완화되었다. Fig. 19에서는 단면 H-H'과 J-J'의 접촉상태를 비교하였다. 비드를 부과하였을 때 여유가 감소하고, 포밍 형상을 추가하면 성형의 최종단계에서 여유가 흡수되는 것을 알 수 있다. Fig. 20에 도시한 바와 같이 여유를 포밍부에서 흡수하며, 인장력을 부과하여 주름발생이 없는 향상된 결과를 얻을 수 있었다.

이상의 해석에서 얻어진 공정변수 및 수정된 금형형상을 바탕으로 시제품을 생산한 결과 Fig. 18의 두께분포와 Fig. 21에 도시한 변형형상에서 해석과 비교적 잘 일치하는 결과를 보였다.

4. 결론

본 논문에서는 복잡한 형상의 자동차 부재용 금형설계에 있어 주요 공정변수를 결정하는데 소요되는 시간과 비용을 단축하기 위한 CAE 프로세스 개발에 관련된 연구를 수행하였다. 주요불량 원인인 파단, 주름, 여유 발생, 스프링백의 개선을 위한 공정변수인 블랭크 크기를 변화시키고 드로오 비드, 포밍 형상을 추가하여 초기설계의 문제점을 해결하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 스프링 백 감소 및 접촉형상 개선을 위하여 semi-open 형태의 초기 블랭크를 사용하는 것이 가장 좋은 성형성을 얻었다.
- 2) 드로오 비드를 부과한 결과 스프링 백의 감소 및 접촉상태를 향상시킬 수 있었으나, 여유 발생을 제거하지는 못하였다.
- 3) 금형면에 포밍 형상을 추가한 결과 접촉조건을 향상시켜 여유가 감소하였으며, 향상된 품질의 제품을 얻을 수 있었다.
- 4) 추후 유사한 형상을 가진 자동차 부품의 금형개발 단계에서 접촉, 스프링백 개선을 위한 단계별 CAE의 적용이 이루어진다면 빠른 시간 안에 금형의 설계변경이 가능할 것으로 판단된다.

References

- 1) S. J. Kim and K. K. Jin, "Development of Automotive Cold-rolled High Strength Steel Sheets," Proc. KSTP Spring Conference, pp. 349-364, 2004.
- 2) Y. H. Kim, T. W. Kim, Y. S. Lee and J. H. Lee, "A Study on the Springback of High-strength TRIP Steel," Trans. Materials Processing, Vol.13, No.5, pp.409-414, 2004.
- 3) J. Hallquist, "LS-DYNA Keyword User's Manual - Version 960," Livermore Software Technology Corporation, 2001.
- 4) J. S. Park, S. H. Kim and H. Huh, "Elasto-plastic Finite Element Analysis of Drawbead Forming for Evaluation of Equivalent Boundary Conditions in Sheet Metal Forming," Trans. Materials Processing, Vol.11, No.6, pp.503-518, 2002.

- 5) Y. T. Keum and J. H. Kim, "Application of Drawbead Expert Model to Finite Element Analysis of Forming Process for Auto-body Panel," Transactions of KSAE, Vol.8, No.3, pp.119-129, 2000.
- 6) D. F. Eary and E. A. Reed, Techniques of Pressworking Sheet Metal - An Engineering Approach to Die Design, Prentice Hall, New Jersey, 1974.