

해석적인 방법을 이용한 복잡한 형상의 자동차 부재 스탬핑 공정에서의 주요 설계인자 연구

송정환¹ · 허 훈[#] · 김세호² · 김승호³

Study on Design Parameters in a Stamping Process of an Automotive Member with the Simulation-based Approach

J. H. Song, H. Huh, S. H. Kim, S. H. Kim

(Received July 27, 2004)

Abstract

This paper is concerned with the quantitative effect of design parameters on a stamped part of the auto-body. The considered parameters in this paper are the blank holding force, the draw-bead force, the blank size which greatly affect the metal flow during stamping. The indicators of formability selected in this paper are failures such as tearing, wrinkling and the amount of springback. The stamping process of the front side inner member is simulated using the finite element analysis changing the design parameters. The numerical results demonstrate that the blank holding force cannot control the local metal flow during forming although it controls the overall metal flow. The modification of the initial blank size considering the punch opening line ensures the local wrinkling and reduces the amount of springback after forming. The restraining force of draw-bead controls the metal flow in the local area and reduces the amount of excess metal. It is noted that the parametric study of design parameters such as blank holding force, the blank size and the draw-bead are very important in the process design of the complicated member.

Key Words : Stamping Process, Blank Holding Force, Draw-bead, Blank Size, Formability

1. 서 론

박판 스탬핑 공정은 자동차 외관 및 구조용 부재를 생산하는데 많이 사용되고 있다. 최근 들어 차량의 경량화 및 충돌 안전성 향상 등의 추세에 따라 차체용 부재의 경우 고강도 강판의 사용이 높아지고 형상이 복잡해지는 추세이며, 이에 따라 성형공정의 난이도는 계속 높아지고 있다. 따라서, 부재의 성형성을 높이기 위하여 여러 가지 성형 방법에 대한 연구가 진행되고 있다. 스탬핑 공

은 Fig. 1과 같이 박판의 소재 물성, 금형 형상, 마찰 특성 및 경계조건 등 여러 가지 공정 변수들에 의해서 제품의 품질이 크게 좌우된다. 주로 금형 및 공정의 설계과정 이후에 금형의 시험 작업과 수정 단계에서 면변형, 주름, 파단 등의 문제를 해결하는데 많은 노력과 시간이 소요되어 왔다. 현재까지도 현장작업의 상당부분에서 공정 변수가 성형에 미치는 영향을 정량적으로 파악하지 못하고 숙련된 기능공과 엔지니어의 경험, 시행착오 및 직관 등에 의존해서 결정되고 있다. 특히

1. 한국과학기술원 기계공학과
2. 대구대학교 자동차·산업기계공학과
3. 삼성코닝 정밀유리팀
교신저자 : 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : hhuh@kaist.ac.kr

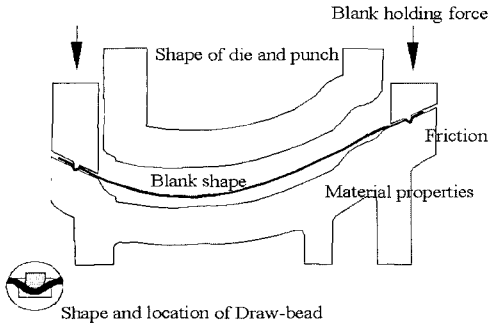


Fig. 1 Shape of the inner panel in front side member

성형공정 자체는 CAE 를 이용하여 공정 자체의 분석이나 파단 및 주름 등을 예측하고 있으나, 각 공정변수가 성형에 미치는 영향을 파악하는데는 미흡한 실정이다[1].

복잡한 형상을 가지는 자동차 구조용 부재의 경우 성형성을 높이기 위해서는 성형 과정에서 판재의 유입량 조절이 중요하게 된다. 일반적으로 판재의 유입량은 제품의 형상을 고려하여 살물림 및 파단이 발생하지 않도록 초기 블랭크의 형상, 블랭크 홀딩력, 드로오 비드의 구속력 등에 의하여 조절되기 때문에 블랭크 홀딩력 및 드로오 비드의 구속력에 의한 재료의 유입량 조절에 관한 연구가 많이 진행되어 왔다.

Triantafyllidis[2] 등은 드로오 비드의 효과를 수치 해석을 통하여 조사하고 이를 실험과 비교하였으며, Wang 과 Shah[3] 는 성형 과정에서의 구속력에 대한 수학적 모델링을 제안하였다. 비드의 구속력에 관련하여 Cao[4] 등은 비드의 깊이에 따른 구속력을, Choi[5] 등은 판재의 길이에 따른 영향을 조사하였다. 유한요소 성형해석에서 비드의 효과를 고려하기 위하여 Heutink[6] 등과 Huh[7] 등은 구속력을 등가의 경계조건으로 적용하기 위한 연구를 수행하였다. 그리고 최근에는 성형 과정에서 각 영향 인자의 최적화에 대한 연구가 진행되었다. Kim[8] 등은 직접 적분법을 이용한 민감도 기법을 적용하여 주름 및 파단을 방지하며 스프링백을 감소시켜 형상 동결성을 높이는 최적의 블랭크 홀딩력 결정에 관한 연구를 수행하였다.

본 논문에서는 SUV 차량의 주요 구조 부재인 프론트 사이드 이너 멤버 (front side inner member) 의 스탬핑 공정에서 판재의 유입량이 성형성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 주요 성형인자인

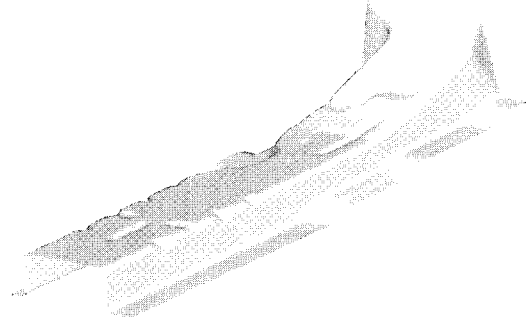


Fig. 2 Shape of the inner panel in front side member

블랭크 홀딩력, 드로오 비드 구속력, 초기 블랭크 크기를 변화시켜 유한요소해석을 수행하였다. 성형성을 정량적으로 평가하기 위하여 주름 및 파단 발생, 국부적인 살물림, 스프링백 정도를 지표로 하였다. 먼저 다양한 블랭크 홀딩력을 부가하여 초기 블랭크를 닫힌형 형태로 유한요소 해석을 수행하여 파단 및 주름여부를 판단하였다. 초기 블랭크의 크기를 변화시켜가며 제품 전면에 플랜지가 생기게 하는 닫힌 블랭크 형태(closed blank type), 장축부위를 짧게 하여 플랜지 대신 벽면에 재료가 남게 하는 반열린 블랭크 형태(semi-open blank type), 장축부위에 플랜지 및 벽면 재료가 남지 않게 하는 열린 블랭크 형태(open blank type)로 해석을 수행하여 성형성을 평가하였다. 이중 가장 우수한 반열린 블랭크 형태에 대하여 드로오 비드의 구속력을 적용하여 변형에 미치는 영향을 조사하였으며, 실패품과의 형상 및 두께 비교를 통하여 해석의 타당성을 검증하였다.

2. 유한요소 스탬핑 해석

프론트 사이드 멤버는 엔진룸에서 가장 중요한 구조용 부재로서 충돌사고 시 적절한 변형에 의하여 충격을 줄여주고 엔진의 승객실 침입을 방지하는데 가장 큰 역할을 한다. 프론트 사이드 멤버는 직선형으로 설계되어야 하나 엔진, 변속기, 타이어 케직 등의 간섭 회피 및 타 부재와의 연결을 위하여 복잡한 형상으로 설계된다. Fig. 2에 본 논문에서 해석의 인자연구의 대상인 프론트 사이드 이너 멤버의 형상을 도시하였다. 본 논문에서는 부재의 성형에서 주요 설계인자가 성형성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 블랭크 홀딩력, 초기 블랭크의 크기, 드로오 비드의 구속력을

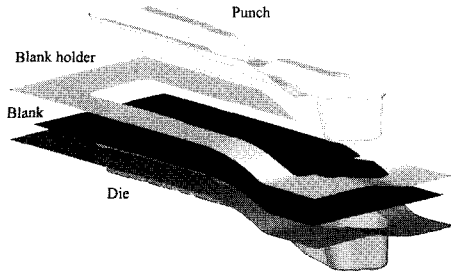


Fig. 3 Initial setting of tools and the blank for analysis

변화시켜가며 해석을 수행하였으며 파단, 주름발생, 스프링백 크기 등으로 성형성을 판단하였다.

유한요소해석은 외연적 상용 프로그램인 LS-DYNA 3D[9]를 이용하였다. 성형 해석에 사용한 판재는 40kgf급의 고장력 강판인SPRC40으로 유동응력 곡선은 $\sigma = 734.7(0.01 + \epsilon)^{0.245}$ MPa과 같다. 초기 판재의 두께는 1.6mm, 금형과 판재 사이의 굴뚝 마찰계수는 0.15로 가정하였다. 성형 해석 과정에서 박판의 형상을 정밀하게 모사하기 위하여 적응형 요소 세분화 기법을 사용하였고, 쉘요소의 두께 방향 적분은 스프링백 해석을 고려하여 5점 적분을 수행하였다. 그리고 해석시간을 단축시키기 위하여 재료의 밀도를 10배 증가시켜 시간 증분의 크기를 증가시켰다. 밀도 증가에 따른 성형 해석 과정에서의 운동에너지와 내부 변형 에너지를 조사함으로써 정적 해석조건을 만족하는지를 판별하였다. 판재의 유한요소 해석을 위한 금형 시스템은 Fig. 3과 같으며, 펀치 행정속도는 2.0m/s로 고정하였다. 해석은 드로우 공정(OP10 공정)에 대하여 수행되었으며, 블랭크 홀더를 다이면으로 내려 블랭크를 고정시키는 바인더랩 해석과 펀치성형 공정의 해석으로 나누어 2단계로 실시하였다.

2.1 블랭크 홀딩력의 영향 고찰

블랭크 홀딩력의 변화에 따른 효과를 살펴보기 위하여 홀딩력의 크기를 100 kN, 200 kN, 300 kN 으로 변화시키며 해석을 수행하였다. 블랭크 홀딩력 변화에 따른 두께 변형률 분포를 Fig. 4에 도시하였다. 블랭크 홀딩력이 100 kN 이 부가된 경우 플랜지 부분에서 주름이 심하게 발생하고 있음을 살펴 볼 수 있다. 블랭크 홀딩력의 크기를 증가시킨 경우, 주름의 크기는 감소하고 있으나 멤버의 측벽부에서 과도한 인장력에 의한 찢어짐이 발생하고 있음을 알 수 있다. 블랭크 홀딩력을 성형성을 향상시키기 위한 변수로 사용할 경우 판재의 전반적인 유동량을 조절할 수 있으나 형상이 길이방향으로 길고 전체적으로 직사각형 형상의 모서리를 가지는 제품에서는 블랭크 홀딩력이 장축 부위에만 집중되어 벽면의 파단 가능성이 높아지는 문제점이 발생하였다. 또한, 장축 모서리부에 유입될 수 있는 블랭크의 양이 제한됨에 반하여 블랭크의 크기가 너무 커서 여유에 의한 플랜지 주름도 동시에 발생하게 된다.

본 절의 해석결과는 블랭크 홀딩력만으로는 재료의 유입 및 유동을 적절히 제어할 수 없음을 보이고 있다.

2.2 초기 블랭크 크기의 영향 고찰

2.1절의 결과에서 블랭크 홀딩력의 변화만을 통해서는 적절한 재료의 유동이 이루어지지 않아 주름이 심하게 발생함을 확인하였다. 본 절에서는 초기 블랭크의 크기를 변화시키며 주름 및 스프링백 발생에 대한 영향을 고찰하였다. 해석은 블랭크의 장축방향 길이를 각각 1250mm, 1060mm, 1120mm 로 하였다. 블랭크 길이가 1250mm 인 경우(CASE 1: closed blank type)에는 장축 방향으로 성형 후 사각갑 모양의 플랜지가 남게 된다. 블랭

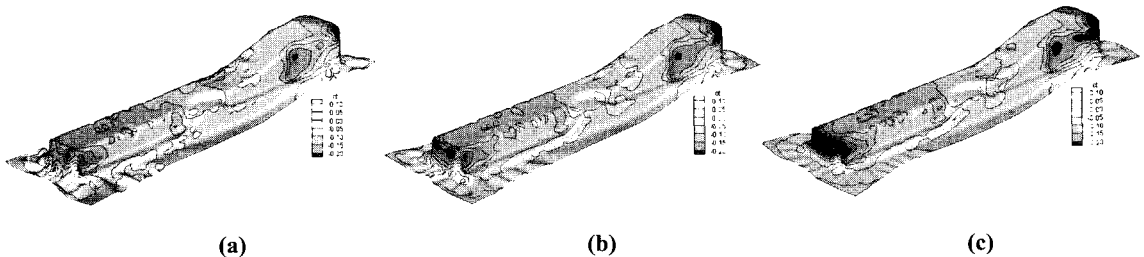


Fig. 4 Distribution of the thickness strain on the inner panel with the variation of the blank holding force: (a) BHF = 100 kN; (b) BHF = 200 kN; (c) BHF = 300kN

크 길이가 1060mm 인 경우 (CASE 2: open blank type)는 성형 후에 제품의 형상이 열린 채널 형태를 가지며, 블랭크 길이가 1120mm 인 경우(CASE 3: semi-open blank type)는 장축 방향으로 플랜지가 남지 않게 되고, 벽면에 재료가 일부분 남게 된다. 각각 초기 블랭크의 크기를 금형의 형상과 함께 Fig. 5에 도시하였다.

기타 해석 조건은 2.1절과 동일하며, 블랭크 홀딩력은 100 kN으로 동일하게 부가하였다. 초기 블랭크의 크기에 따른 변형 형상 및 두께 변형률의 분포는 Fig. 6과 같다. CASE1에서는 장축 벽면 및 모서리 부분에 재료의 유동이 중첩되어 살물림이 발생하고 플랜지 부분에서 주름이 생기나, 초기 블랭크 크기를 변화시킨 CASE2나 CASE3의 경우에는 주름이 발생하지 않음을 알 수 있다. 이는 초기 블랭크의 크기가 감소함으로써 성형 과정에서 장축 방향으로 재료의 과도한 유입이 조절되기 때문이다.

CASE2와 CASE3에 대한 성형성의 정량적 평가를 위하여 국부적 두께 증가로 인한 주름발생 가능성을 비교하였다. 성형 후 변형 형상의 비교는 측벽부의 형상 변화가 크게 발생하는 부분으로

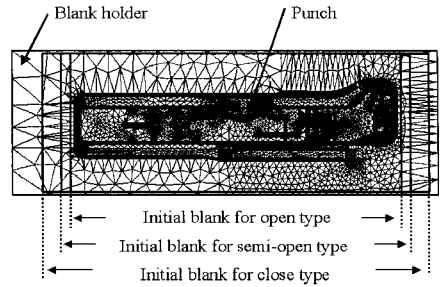


Fig. 5 Initial blank for the forming analysis of an inner panel with different formed type

선정하였으며, Fig. 7에 변형 형상 및 두께 분포를 도시하였다. CASE2인 경우 두께 방향의 구속력 부족으로 인하여 펀치 윗부분에 살물림이 발생하여 초기 두께 1.6mm와 비교하여 약 2.6mm까지 증가하여 나타나며, CASE3에서는 CASE2보다는 적지만 약 1.9mm까지 증가하는 양상을 보인다.

성형 공정 후의 스프링백에 의한 형상 동결성 저하 정도를 비교하기 위하여 Fig. 8에 도시된 단면에서의 스프링백 후의 변형 형상을 비교하였다.

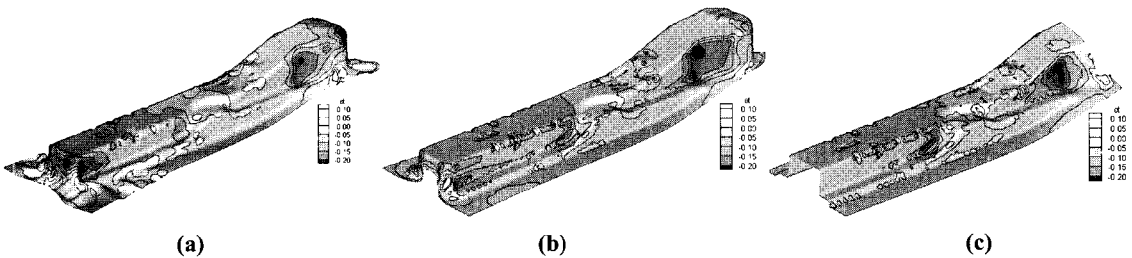


Fig. 6 Distribution of the thickness strain on the inner panel at BHF = 100 kN with the variation of the initial blank size: (a) closed blank type; (b) semi-open blank type; (c) open blank type

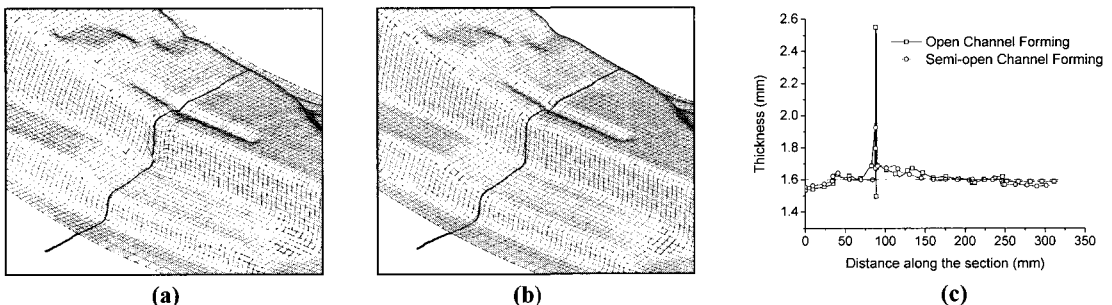


Fig. 7 Comparison of the deformed shape and thickness distribution with respect to the initial blank: (a) open blank type; (b) semi-open blank type; (c) comparison of the thickness distribution

도시한 세 영역은 양 끝 경계와 중앙 부분이다. 스프링백 해석은 LS-DYNA 3D를 사용하였으며, 정밀도를 높이기 위하여 내연적 비선형 해석(implicit nonlinear analysis)을 수행하였다. 초기 블랭크 크기에 따라 CASE2과 CASE3로 성형된 두 경우에 대하여 Fig. 8에 도시된 단면에서의 탄성 복원 후 변형 형상을 Fig. 9에 도시하였다. CASE2의 경우 성형 후 탄성 복원에 의하여 플랜지 부분에서 스프링백 현상이 심하게 발생함을 살펴 볼 수 있다. 이와 비교하여 CASE3는 초기 성형 완료 후의 형상과 비교하여 탄성 복원이 거의 발생하지 않는다. 성형형상 대비 스프링백 후 플랜지의 각도 변화는 CASE2가 8.4° 였으며, CASE3는 0.7° 였다. CASE2의 경우에는 U 드로우 벤딩 공정과 유사한 변형기구를 가지며, 길이 방향의 재료가 없으므로 구속력 부족에 의하여 형상 변화가 큰 부분에서 살물림 현상이 발생하고 플랜지 부분에서 탄성복원에 의한 스프링백이 커진다. CASE1과 같이 플랜지가 큰 직사각형 형태인 경우 장축부 벽면 및 모서리 부분에 살물림으로 인한 주름 현상이 심하게 발생한다. CASE3와 같이 장축방향 블랭크의 크기를 적절히 조절해 주면 장축부에서의 살물림

및 스프링백 현상을 방지할 수 있다. 그러나, 드로잉 비 및 부재의 형상이 급격하게 변화하는 중앙부의 경우는 살물림에 의한 주름의 발생 가능성이 높으므로 추가적인 구속력의 부가가 요구된다.

2.3 드로오 비드의 영향 고찰

2.2절에서의 최종적인 문제점은 단면 및 드로잉 비의 급격한 변화에 의한 편치 윗부분의 국부적 두꺼워짐과 주름발생 가능성이다. 본 절에서는 블랭크 홀더면에 드로오 비드를 추가하여 영향을 고찰하였다.

블랭크 홀더에 위치하고 있는 드로오 비드는 형상은 상대적으로 급형의 다른 부분들에 비해 그 크기가 매우 작으므로 유한 요소 모델링을 하기가 어렵고 해석시간이 매우 길어지는 문제점이 발생하게 된다. 박판 성형 공정 해석 시에 드로오 비드의 영향을 고려하기 위하여 등가의 경계조건으로 구속력을 추가하는 방법이 사용되며 본 논문에서도 구속력을 등가의 경계조건으로 추가하여 해석을 수행하였다. 등가 경계조건을 구하기 위해서는 우선적으로 드로오 비드의 구속력을 계산하여야 한다. 본 논문에서는 Fig.10의 (a)에 도시된 원형 드로오 비드에 관하여 ABAQUS/Standard[10]를 이용하여 비드 성형 공정 및 인발 공정에 관한 해석을 수행하고 등가의 구속력을 계산하였다. 해석에 사용된 요소는 2차원 평면 변형률 요소였으며, 비드 성형 과정에서의 굽힘 효과를 모사하기 위하여 두께 방향으로 4층으로 요소를 나누어 해석을 수행하였다. Fig.10의 (b)에 인발 과정에서 인발량에 따른 구속력의 변화를 도시하였다. 인발 과정에서 판재의 변위 경계조건에 따라 길이 방향으로 인장을 받기 때문에 구속력

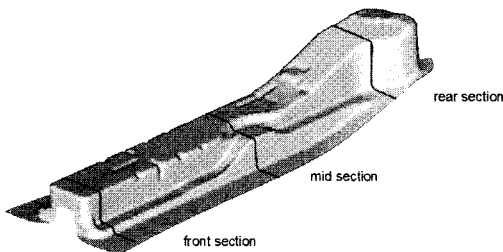


Fig. 8 Measurement section for the comparison of the amount of springback

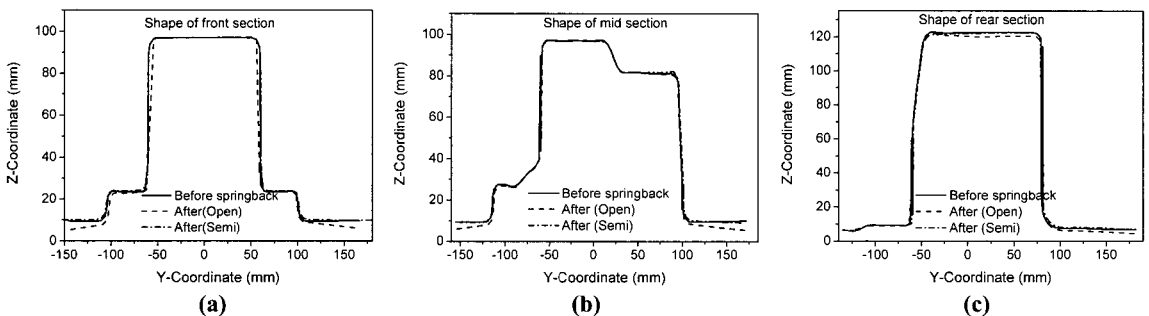


Fig. 9 Comparison of the deformed shape after springback with respect to the formed type: (a) front section; (b) mid section; (c) rear section

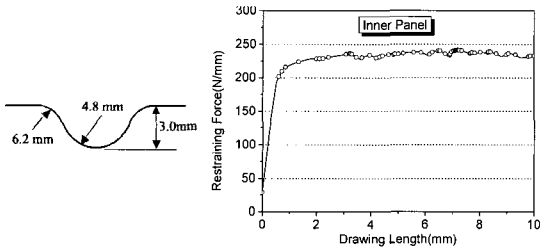


Fig.10 The restraining force of the draw-bead in the inner panel

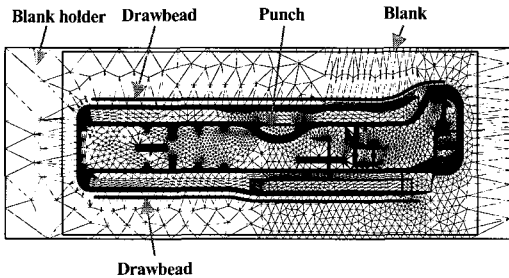
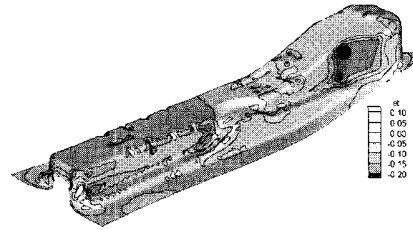


Fig.11 Locations of draw-bead in the sheet metal forming die for an inner panel

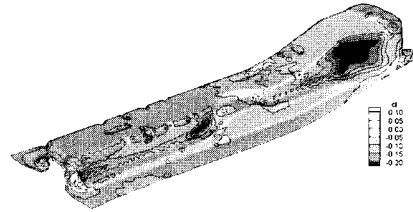
이 급격히 증가하다가 판재가 일정량의 변형에 도달하여 굽힘 변형과 마찰에 의한 힘과 당기는 힘이 평형을 이루면서 정상 상태에 도달하는 경향을 보인다. 등가 경계조건은 드로오 비드 인발 과정의 정상 상태에서의 구속력으로부터 구하였다.

판재 단축 방향으로 구속력을 부가하기 위하여 드로오 비드를 Fig.11에 도시된 부분에 설치하였다. 블랭크 홀딩력은 100kN, 쿨롱 마찰 계수는 0.15를 부가하였고, 초기 블랭크의 크기는 2.2절의 CASE2의 경우를 사용하였다. 드로오 비드 유무에 따른 두께 변형률의 분포는 Fig.12에 도시하였다. 드로오 비드 구속력의 부가로 성형 과정에서 재료의 유동이 제한되어 장축의 벽면부에서 두께가 얇아지는 경향을 보이고 있다. 2.2절의 해석에서 단면 형상의 굴곡이 심하여 살물림이 나타났던 중앙부도 드로오 비드를 부가한 경우에는 살물림이 감소하는 경향을 보이고 있다.

드로오 비드 구속력의 부가에 따른 효과를 정량적으로 살펴보기 위하여 Fig.13에 도시된 세 가지 절단면에 대하여 부재의 두께 변화를 비교하였다. 절단면의 선정은 내부 포밍 형상이 있는 section 1과 단면의 형상 및 드로잉 비의 변화가 심한 section 2 및 section 3으로 결정하였다. 각



(a)



(b)

Fig.12 Comparison of the thickness strain distribution: (a) only BHF; (b) BHF and draw-bead

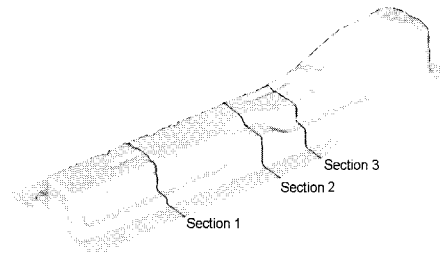


Fig.13 Measurement section for the evaluation of the restraining effects of draw-bead

단면에서 드로오 비드 유무에 따른 두께의 분포를 Fig.14에 도시하였다. 내부에 포밍 형상이 있는 section 1은 전체적으로 블랭크 홀딩력만 부가된 경우와 유사한 분포를 보이고 있다. 그러나 단면의 형상변화가 심한 section 2와 section 3는 드로오 비드 구속력을 추가로 부가한 경우와 블랭크 홀딩력만 부가한 경우가 큰 차이를 보이고 있다. 드로오 비드의 구속력으로 인하여 펀치 평면부의 살물림이 상대적으로 감소하고 있으며 단면에서의 두께 분포의 편차가 적게 나타나고 있다. Fig. 14에 도시된 두께 분포를 통하여 드로오 비드의 구속력 부가는 성형 과정에서 판재의 유동이 적절하게 조절되어 성형성이 높아진다는 사실을 확인할 수 있었다.

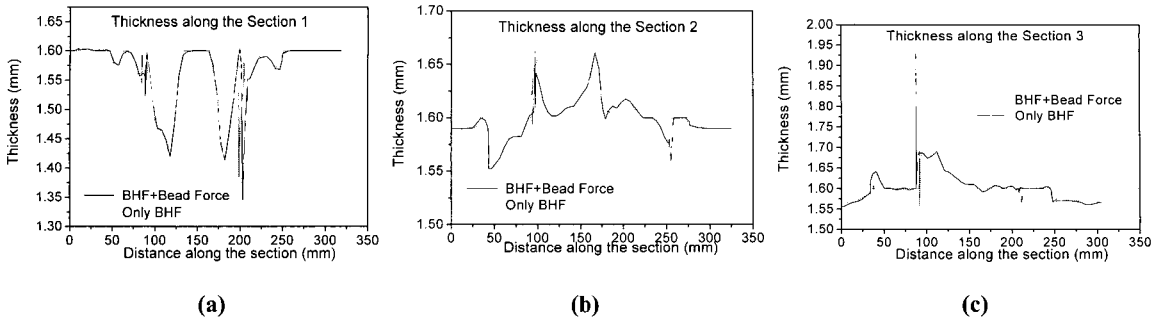


Fig.14 Comparison of the thickness distribution with respect to the presence of draw-bead: (a) thickness along the section 1; (b) thickness along the section 2; (c) thickness along the section 3

3. 성형 해석의 검증

본 논문에서는 프런트 사이드 이너 멤버 스탬핑 공정에서 주요 공정변수의 영향이 성형성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 블랭크 홀딩력, 초기 블랭크의 형상과 드로오비드의 구속력을 변화시켜 성형해석을 수행하였다. 성형 인자연구의 결과로 재료의 유동을 적절하게 조절하기 위하여 초기 블랭크의 형상을 최종형상을 고려하여 수정하고 드로오 비드의 구속력을 부가한 경우가 가장 성형성이 좋게 평가되었다. 이와 같은 공정변수를 부가한 성형 해석 결과를 검증하기 위하여 동일한 조건을 부가하여 성형을 수행한 실제 제품과 변형 형상 및 두께를 비교하였다.

Fig.15에 성형해석의 변형 형상을 실품과 비교하여 도시하였다. 변형 형상 및 주름의 위치 등이 매우 유사한 분포를 보이고 있다. 보다 정량적인 비교를 위하여 Fig.16과 같이 총 5개의 단면에서 실품의 두께를 측정하여 유한요소 해석 결과와 비교하였다. 그 결과 성형 해석 결과와 측정결과가 거의 일치한 분포를 보이고 있다. 특히 드로오비드가 없을 경우 펀치 평면부에서 살물림이 발생하였던 section C-C'의 경우에 드로오 비드를 부가한 해석 결과가 살물림 없이 실품의 두께와 매우 유사한 분포를 갖는다.

4. 결론

본 논문에서는 복잡한 형상의 자동차 구조용 부재인 프런트 사이드 이너 멤버의 성형 해석에 있어서 재료의 유입량 변화가 성형성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 블랭크 홀딩력, 초기 블

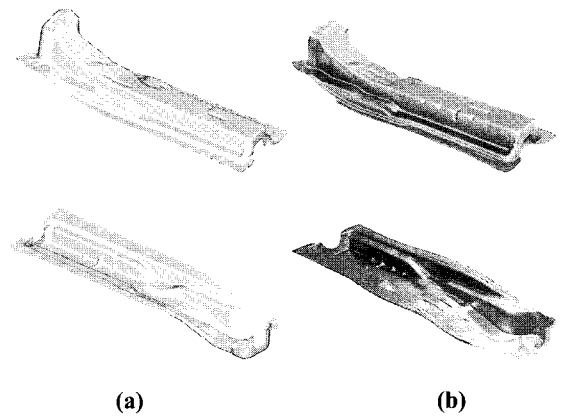


Fig.15 Comparison of the deformed shape for the experimental verification: (a) analysis result; (b) real product

랭크의 크기, 드로오 비드의 구속력을 변화시켜 해석을 수행하고, 파단, 주름발생, 스프링백 등의 변화를 고찰하였다. 블랭크 홀딩력을 변화시켜 전면에 플랜지가 생기는 초기 블랭크 형상으로 해석을 수행한 경우, 국부적인 블랭크 홀딩력 집중과 장축 벽면부의 여유발생에 의한 주름 및 파단 현상이 발생하였다. 초기 블랭크의 크기를 변화시켜 주름 및 파단 현상을 제어할 수 있었으나 플랜지 부분에서 재료 유동의 구속력이 부족하여 펀치 윗부분의 살물림 현상이 발생하였다. 드로오 비드를 블랭크 홀더에 설치하고 그 영향을 해석에 반영한 결과 재료의 유동이 적절하게 조절되어 펀치 윗부분의 살물림을 제거할 수 있었다. 복잡한 형상의 구조용 부재 성형을 위한 공정변수 설계를 위해서는 기본적으로 주름 및 파단, 스프링백을 감소시킬 수 있는 블랭크 형상, 블랭크 홀딩력, 드로오 비드의 조절이 필요함을 확인하였다.

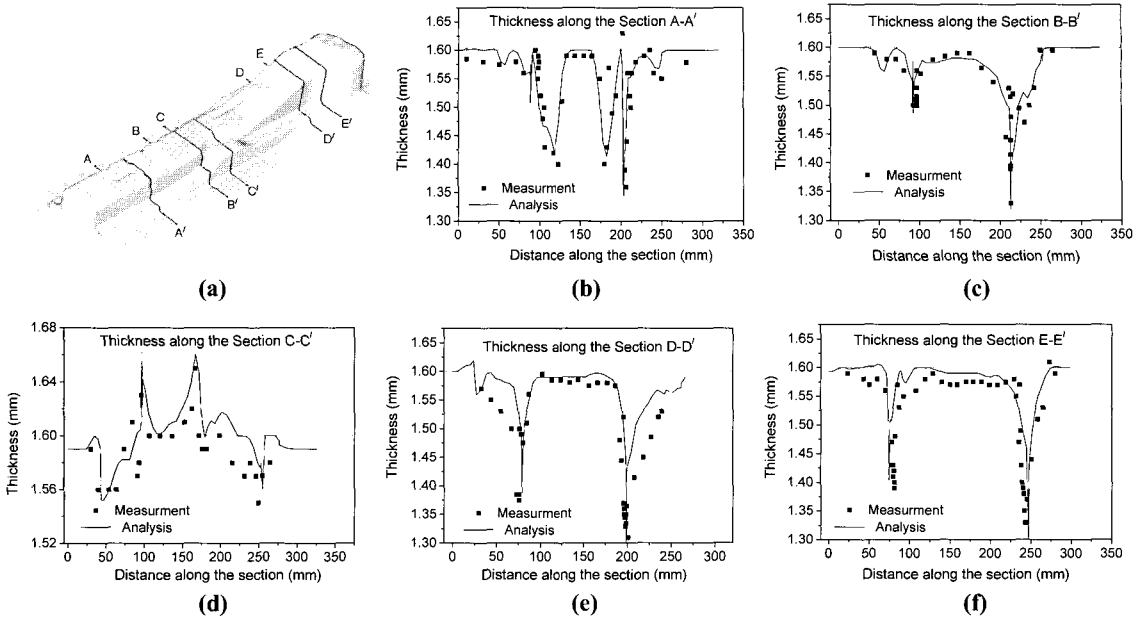


Fig.16 Comparison of the thickness distribution along the designated section for the experimental verification. (a) thickness along the section 1; (b) thickness along the section 2; (c) thickness along the section 3; (d) thickness along the section 4; (e) thickness along the section 5; (f) thickness along the section 6

참 고 문 헌

- [1] 전기찬, 1993, 박판금속의 성형-이론과 실제, 반도출판사.
- [2] N. Triantafyllidis, B. Maker, S. K. Samanta, 1986, An Analysis of Drawbeads in Sheet Metal Forming: Part I - Problem Formulation, J. Engr. Mater. Technol., Vol. 108, pp. 321~327.
- [3] M. N. Wang, V. C. Shah, 1991, Drawbead Design and Performance, J. Mater. Shaping Technol., Vol. 9, pp.21~26.
- [4] J. Cao, M. C. Boyce, 1993, Drawbead Penetration as a Control Element of Material Flow, SAE 930517, Sheet-Metal and Stamping Symposium, Detroit.
- [5] T. H. Choi, H. Huh, B. K. Chun, J. H. Lee, 1997, Draw-bead Simulation by an Elasto-Plastic Finite Element Method with Directional Reduced Integration, J. Mater. Process. Technol., Vol. 63, pp. 666~671.
- [6] T. Meinders, H. J. M., Geijselasers, J. Huetink, 1999, Equivalent Drawbead Performance in Deep Drawing Simulations, Proc. NUMISHEET '99, pp. 243~248.
- [7] 박종세, 김승호, 허 훈, 2002, 박판 성형공정에서의 등가 경계조건 계산을 위한 드로우비드 성형의 탄소성 유한요소 해석, 한국소성가공학회지, 제 11 권, 제 6 호, pp. 503~512.
- [8] S. H. Kim, H. Huh, 2002, Design Sensitivity Analysis of Sheet Metal Forming Processes with a Direct Differentiation Method, J. Mater. Process. Technol., Vol. 130, pp. 504~510.
- [9] J. Hallquist, 2001, LS-DYNA Keyword User's Manual - Version 960, Livermore Software Technology Corporation.
- [10] Hibbit, Karlsson, Sorensen Inc., 2003, User's Manual - Version 6.4-1.
- [11] H. Huh, J. H. Song, S. H. Kim, S. H. Kim, 2004, Effect of Draw-bead and Blank Holding Force on Sheet Metal Forming Process, Proc. NUMIFORM 2004, N07.