

최근 프레스 성형 기술과 연구동향



양균의
전북대 교수
(자동차 부품 · 금형 TIC 소장)



장동규
전북대 대학원
(기계공학과)



이희관
전북대
(자동차 부품 · 금형 TIC 전임 연구원)

1. 서론

현대의 생산 시스템은 다품종 소량 생산시스템으로 변모하면서 저가격화, 고품질화와 더불어 제작기간의 단축에 대응하여 왔다. 현재, 산업기계의 주요한 많은 부품들의 가공방법이 절삭가공에서 탈피하여 소성가공으로 이행되는 추세이며, 소성가공에 주로 사용되는 금형은 제품의 형상이 바뀌면 금형을 새로 제작하여야 하는 일품일형의 다품종 소량 생산품목으로 그 제작의 다양성이 날로 증가하고 있다. 또한, 최근 공업 제품에 대한 고도화, 다양화, 제품의 life cycle의 단축화로 인하여 소성가공에 의해 생산되는 제품에 대한 요구도 더욱 엄격해지고 있으며 이러한 요구와 생산성을 향상시키기 위하여 프레스의 고속화와 자동화가 추진되고 있으며, 공정 및 금형설계의 표준화 또한 절실히 요구되고 있다.

본 고에서는 소성가공의 대표적인 프레스 가공의 특징과 프레스 가공 및 금형에 대한 국내외 발전동향을 살펴보고자 한다.

2. 프레스 가공

2.1 프레스 가공의 특징

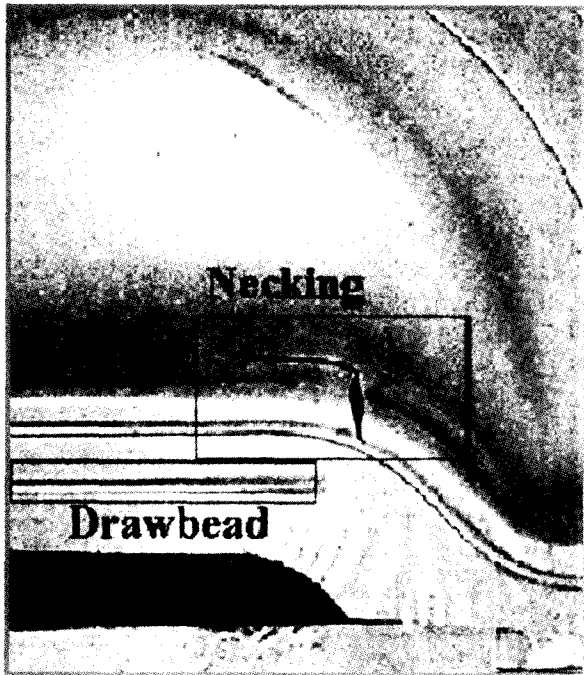
프레스 가공이란 프레스 기계를 사용하여 판류를 여러 가지로 변형 가공하는 작업을 말하며 대체로 냉간 가공을 주로 하는 소성가공을 말하며 이러한 프레스 가공을 특징을 살펴보면 다음과 같다.

(1) 제품의 강도가 높고 경량이다.

프레스 가공에 사용되는 소재는 압연된 것이며 성형 압축함으로써 재료가 섬유상 조직이 되므로 강도가 높아 제품의 중량을 경감시킬 수 있다.

(2) 재료 이용률이 좋다.

절삭가공과 같이 소재의 50~70%를 칩(chip)으로 버리지 않으며, 주물과 같이 탕도, 덧씻물, 주조, 펀딩의 플래시(flash)가 불필요하다. 또한, 프레스가공의 스크랩(scrap)은 다시 다른 소형 제품에도 이용할 수 있으므로 재료 이용률을 60~98%로 높일 수 있다. 프레스 가공품의 원가 중 재료비가 차지하는 비중이 60~96%로 매우 크기 때문에



(a) Necking



(b) Wrinkling

Fig.1 Necking and Wrinkling defects in forming process

이용률을 높이면 제품의 원가를 낮출 수 있다.

(3) 가공속도가 빠르고 능률이 좋다

램이 큰 부품이라도 1분간에 수회 또는 수십회, 작은 것 이면 수백회를 상하 왕복운동을 하여 반제품 또는 완제품 을 짧은 시간에 완성하므로 가공속도가 빠르고 작업자는 작은 노력으로도 능률을 극대화할 수 있다.

(4) 제품의 정도가 높고 품질이 균일하다

금형의 제작 정도가 높아지면 금형에서 가공한 제품의 정도도 높아져 절삭가공과 비슷하거나 우수한 정도가 되고 같은 금형에서 가공한 제품의 정도가 균일하므로 가공해야 할 수량이 많으면 타가공에 의한 제품보다 우수하다.

위와 같은 장점과 달리 프레스 가공은 제품의 형상이 재 료의 이용률을 좋게 하는 독특한 형상을 가져야 하고 아주 가늘고 긴 형상을 피해야 하며 구멍 등을 최하로 round(R) 를 붙인 형상 및 언더컷이 없는 형상이 되어야 한다는 것과 드로잉 금형의 수명, 강도등이 불가결한 조건이 된다. 또, 프레스 가공은 강력한 가압력을 요구하므로 금형 및 프레스 기계의 탄성변형과 제품 자체의 변형에 의하여 높은 정

밀도와 균일성의 문제들은 앞으로 많이 개선해야 할 부분 이다.

프레스 가공에서 금형 또는 공정조건등이 적절히 설계되 어 있지 않으면 최종 부품 또는 중간단계에서 Fig. 1와 같 은 파단, 주름, 치수 불량등의 결함이 발생하게 된다.

시행착오법에 기본을 두고 있는 기존의 전통적인 금형 및 공정조건 설계 작업은 많은 비용부담과 소요시간이 과 다한 단점을 가지고 있다. 이러한 이유로 유한요소법에 바 탕을 둔 성형공정의 시뮬레이션 기법이 비용 및 시간의 최 소화를 위하여 점차 널리 보급되고 있는 실정이다.

유한요소법에서 사용되는 시간적분법은 크게 두가지로 구분된다. 하나는 implicit법이며 다른 하나는 explicit법 이다. Implicit법은 explicit법에 비하여 좀 더 정확한 해를 제공할 수 있으며 접촉 정식화가 상대적으로 간단하고, 계 산 소요시간이 많이 소요되지 않는 이차원 준정적 문제에 대하여 효율적인 것으로 알려져 있다. 반면에 삼차원 판재 성형 시뮬레이션의 경우에는 단순한 접촉 정식, 상대적으 로 적절한 수준의 계산 시간으로 인하여, explicit법이 더

많이 적용되고 있다.

2.2 프레스 가공의 종류

프레스 가공의 종류는 전단가공, 굽힘가공, 드로잉 가공, 압축 가공, 기타 가공으로 나뉘게 되며 이러한 프레스 가공을 위한 금형의 종류는 전단금형(shear die), 굽힘금형(bending die), 드로잉금형(drawing die), 압축금형(forming by compression die), 순차이송금형(progressive die) 등으로 나뉘게 된다. 이 장에서는 주로 프레스 가공중에서 많이 사용되는 딥드로잉 가공과 순차이송가공에 대하여 살펴보기로 한다.

프레스 가공중의 하나인 딥드로잉 성형은 자동차, 전기·전자, 항공산업에서의 매우 중요한 제조산업 공정에 속한다. 그리고 부품의 경량화와 더불어 공정이 단순하고 대량생산이 가능하기 때문에 광범위하게 사용되고 있다. 딥드로잉 공정은 굽힘, 인장, 전단, 재료의 특성, 다이의 형상, 다이와 펀치 사이의 틈새등 많은 인자들에 영향을 받는 성형공정이다. 딥드로잉 공정에 있어서 중요한 역할을 하는 것들 중 하나가 블랭크 형상이다. 드로잉 공정에서 초기 블랭크의 형상에 따라 펀치력과 블랭크의 변형률이 크게 영향을 받는다. 그리고 재료 손실에 있어서 또한 큰 변수를 가져 올 수 있는 것이 블랭크의 형상이다. 딥드로잉 공정에서 드로잉 공정 후에 주름이 형성되는 부분을 트리밍하게 되는데 이때 재료의 손실이 발생하게 된다. 현재 블랭크 가공에서 재료의 이용률은 75%정도이다.

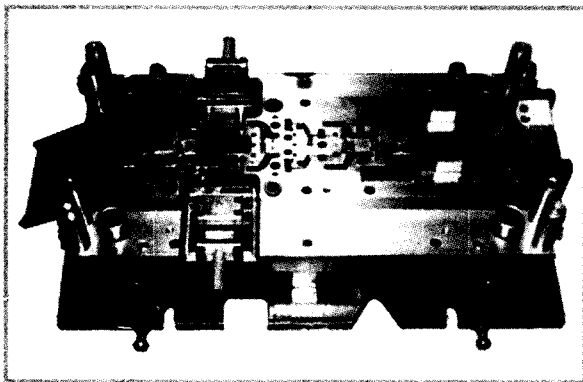


Fig. 2 Example of progressive die

프레스 가공에서 많이 사용되고 있는 가공방법중 하나가 순차이송 가공이다. 순차이송 가공은 프레스에서 가공할 소재를 연속적으로 이송시키면서 여러 공정을 거쳐 하나의 제품으로 가공하는 것을 말하며 단일 프레스 금형과 달리 여러 가지 고도의 기술과 기능 및 높은 생산비가 소요되지만 대량생산 또는 지속적인 양산제품에 적용하면 이익이 큰 가공이다.

순차이송 금형은 처음에 재료에 피어싱 가공과 노칭가공을 하여 재료를 한번 더 이송시켜 다음 공정에서 절단가공 또는 블랭킹가공으로 제품을 완성시키는 2공정 금형(two step dies) 또는 탠덤 금형(tandem dies)이라고 불리는 간단한 것부터 20공정 이상의 복잡한 금형이 있다. 순차이송 금형에서 각 공정에 필요한 요소의 다이 및 펀치를 스테이지(stage) 단계라 하며 2공정에 제품으로 완성하는 금형을 2스테이지 금형이라고 한다.

Fig. 2는 순차이송금형의 예를 보여주고 있으며 Fig. 3은 순차이송가공으로 생산된 제품의 예이다.

2.3 금형 제작 공정

전통적으로 금형 제작 과정은 제품 설계로부터 제품을 만들기 위해 전체 공정 및 성형 부위를 설계하는 공법설계, 주물에 의해 구조부를 만들기 위한 구조설계, 성형부를 기계 가공하기 위한 NC데이터 작성, 그리고 기계가공에 의한 금형 부품 제작으로 구성된다. 이어서, 가공된 금형 부품들의 조립 및 사상 그리고 실제로 트라이얼 프레스에 금형을 설치한 후 패널을 시험 성형하는 트라이아웃(tryout) 단계를 거쳐 최종적으로 금형이 완성된다. Fig. 4는 트라이얼 프레스를 이용한 트라이아웃을 보여주고 있다.

트라이아웃은 금형이 원하는 치수의 제품을 생산하지 못하거나 표면 불량인 패널을 생산할 경우, 이미 완성된 금형을 수작업으로 수정하는 길고 지루한 반복 과정이다. 이 과정은 품질, 비용, 생산성의 측면에서 심각한 손실이며 특히 CAD에 의한 3차원 모델링, CAM에 의한 정밀 가공, 그리고 초고속 기계가공이 가능해진 오늘날 금형 개발과정에서 새로운 걸림돌로 대두되었다.

이는 프레스 금형 개발과정이 설계자의 경험과 직관에

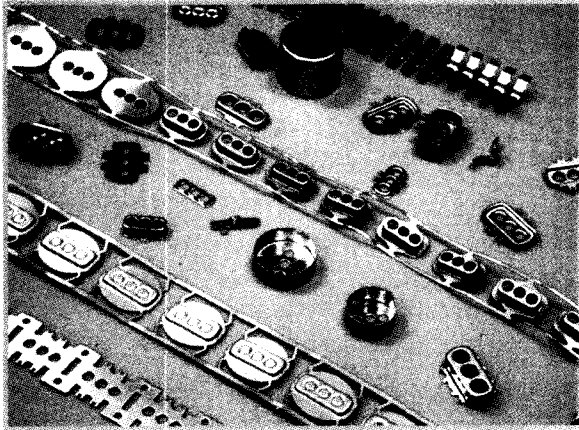
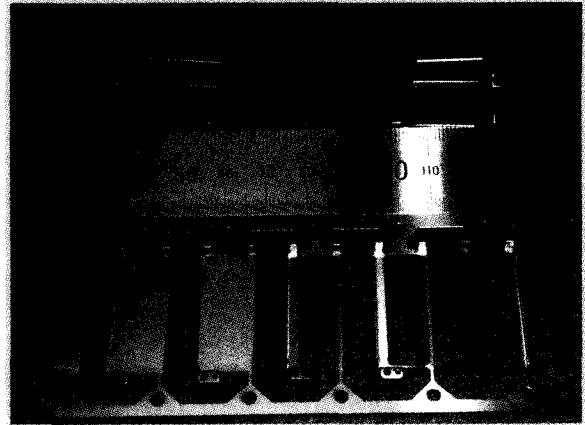


Fig. 3 progressive product



의존하는 경향이 큰 탓으로 스탬핑 공정 및 금형 설계를 최적화 및 자동화 할 수 있는 과학적 방법이 필요하며 이에 관한 연구들이 진행되어 오고 있다.

또한, 최근 CAE를 이용하여 패널의 성형 불량으로 인한 불필요한 금형 수정의 횟수를 줄여 트라이아웃 기간 단축을 도모하는 '가상 트라이아웃'이 시도되고 있다. 성형 해석 공정의 순서는 블랭크의 자체 무게로 인한 자중 처짐, 블랭크홀더의 바인더랩에 의한 예비성형, 블랭크와 다이, 펀치의 접촉에 의한 성형, 마지막으로 성형 과정 중 발생한 재료 내부의 응력이 재료가 금형에서 축출되는 순간 새로운 정적 평형 상태를 만족시키기 위해 변형되는 스프링백의 해석 순으로 진행된다. 이렇게 하여 블랭크의 성형 과정

및 성형 후 형상, 두께 분포, 응력 및 변형률분포, FLD (Forming Limit Diagram) 등의 결과를 통해 파단, 주름, 스프링백등의 불량을 예측할 수 있다.

3. 프레스 가공에 대한 연구

프레스 가공에 대한 연구는 크게 분류해 보면 다음과 같이 분류할 수 있다. 그 분류는 가공 시뮬레이션을 통해 트라이아웃을 줄이는 연구와 공정 해석을 컴퓨터로 설계하는 CAPP(Computer Aided Process Planning)기법, 프레스 성형 특성에 대한 연구, 성형 공정의 설정에 대한 연구와 기타 연구들로 나눌 수 있다.

3.1 트라이아웃을 줄이기 위한 방법 (가공 시뮬레이션)

가공시뮬레이션을 하여 트라이아웃을 줄이는 연구로는 판재 성형에서 블랭크 설계에 대하여 재료의 특성과 여러 가지 공업적인 여건을 고려하여 one-stop시뮬레이션 적용에 대한 연구¹⁾가 있었으며 성형 작업의 최적화를 위하여 기존의 시행착오법을 개선하기 위하여 이상적인 성형 이론인 직접설계법을 이용하여 VCR deck의 샤시를 위한 초기 형상설계에 적용한 연구²⁾가 있었다. 또한, 파단이나 주름 같은 스프링백 후에 블랭크의 각변화, 벽면 감김과 블랭크

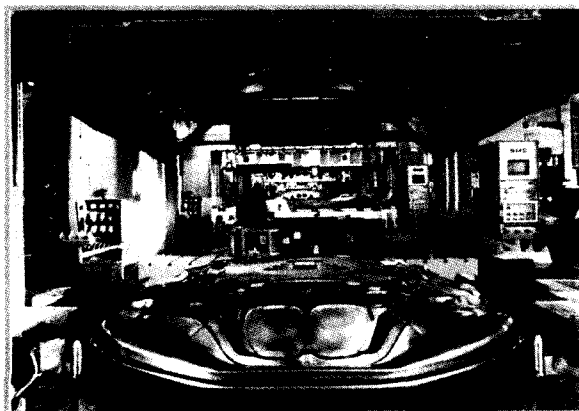


Fig. 4 Die maker during die tryout on the hydraulic high-speed press

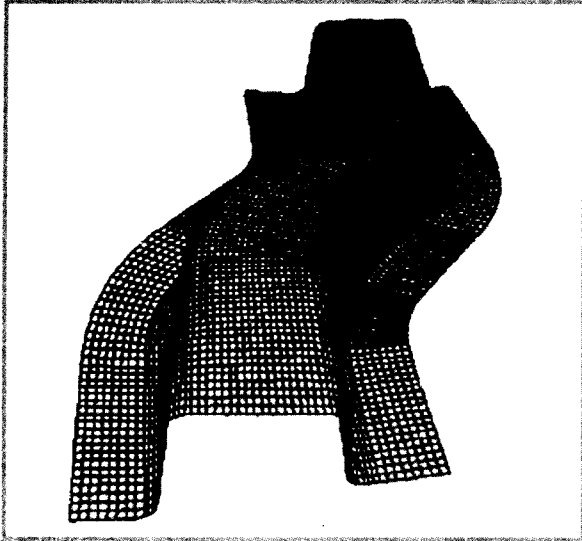


Fig. 5 Deformed shape of s-rail after springback

의 꼬임등으로 가장 어려운 스탬핑 부품중의 하나인 수직 벽을 가진 자동차 몸체 부품에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 스프링백 후 각변화, 벽면 감김과 블랭크의 꼬임의 성형 해석을 수행한 연구⁽⁶⁾가 수행되었다. Fig. 6은 스프링백 후의 S자 레일의 변형을 보여주고 있다.

그리고, VPCM(Viscoplastic Pressure -carrying Medium)을 사용하여 유연 다이 성형(FDF : Flexible-Die Forming)형태인 판재금속성형에 대한 새로운 디프드로잉 기법을 연구하고 성형 절차 변수들과 생산성을 검증한 연구⁽⁴⁾가 수행되었으며 다점성형(MPF : Multi-Point Forming)작업들의 제어에 관련하여 기하학적 형상과 판재 블랭크의 예측하고 재료의 변형을 함수적으로 계산하는 판재변형 접근법이 있었다⁽⁶⁾. Fig. 6은 가공 시뮬레이션을 위한 해석 모델의 예를 보여주고 있다.

3.2 CAPP관련 연구

CAPP에 관련된 연구를 살펴보면 프레스 작업에서 열단 조나 블랭킹 제품에 대한 자동화된 CAPP에 대하여 연구하였으며 개인용 컴퓨터에서는 AutoLISP로 워크스테이션에서는 I-DEAS Drafting language로 구현하여 블랭크 형상의 복잡성, 펀치와 다이의 프로파일, 프레스 장치의 능력

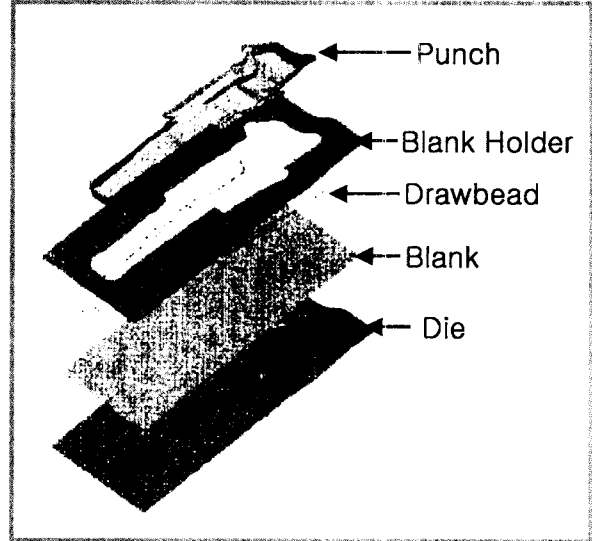


Fig. 6 Analysis models for slide frame simulation

과 표준 부품들의 정보를 고려하여 디자인하여 블랭킹 다이의 설계에 효과성을 입증하였다.⁽⁶⁾

타원형 디프드로잉 작업에서 작업 절차 설계를 이용한 전문가 시스템을 개발하여 lead time을 줄이는 시스템을 개발하였고⁽⁷⁾ 관재 또는 용접된 블랭크에 대하여 동적 explicit 유한 요소 프로그램을 이용하여 굽힘, 스프링백과 성형해석 수행하는 방법으로 hydroforming 공정에 대해서 해석하고 자동차 엔진 마운트 블라켓에 대한 공정의 성형도를 비교한 연구⁽⁸⁾가 수행되었다. 또한, 휴대폰의 알루미늄 합금 건전지 케이스를 제작하는데 가장 중요한 작업인 디프드로잉과 아이언 아크 작업에서 다단계 디프드로잉, 아이언 작업과 재드로잉 공정의 실제적인 비에 대한 추가적인 정보를 제공할 수 있는 공정 해석을 수행한 연구⁽⁹⁾가 있었다.

그리고, 판재 성형에서 중요한 결함중의 하나인 주름짐에 대하여 도어의 스탬핑 공정에서 주름의 해석을 위하여 전체-국부 해석기법을 제안하여 생산의 효율을 높이는 연구⁽¹⁰⁾가 수행되었고 2D와 3D의 설계 공정의 해석을 위하여 implicit와 explicit방법을 개발하여 평면 변형 드로우굽힘과 TWB(Tailor welded blank)의 정방 컵드로잉등의 다양한 공정에 적용되었다.⁽¹¹⁾

3.3 성형 특성 파악

디프드로잉 공정에서 타원형 디프드로잉을 위한 판재강 (SECD)의 편치하중과 두께변형에 대하여 다양한 조건에서 실험한 연구⁽⁴²⁾와 두께 0.2mm미만의 매우 얇은 판재강의 미소 디프드로잉 특성들에 대하여 상대적 편치 직경(D_p/t ; D_p :편치 직경, t :판재 두께)를 가지고 실험하여 박막 성형의 특성을 파악하고⁽⁴³⁾ 접착된 판재의 V-굽힘에 대하여 특성을 파악하여 V-굽힘의 최종단계에서만 큰 전단변형이 급격히 진행됨을 발견한 연구⁽⁴⁴⁾도 있었다.

판재 성형 구성품에 대한 증분 성형 기술의 특성을 찾기 위해 자유롭게 회전하는 볼을 가진 성형 공구를 가지고 Al 1050판재의 성형 과정에서 발생하는 변형 특성들을 찾고, Explicit 기법과 층으로 구성된 셀을 이용하여 클래드 강판의 디프드로잉에 대한 탄성 유한 요소 해석을 통하여 성형 특성과 유한 요소 해석의 수정을 통한 연구⁽⁴⁵⁾가 수행되었다.

3.4 성형 조건에 관한 연구

성형 설정 조건은 프레스 가공을 위한 홀더 힘과 구속력, 다이와 편치의 반경등에 대한 연구가 주로 다루어졌다.

Gunnarsson과 Schedin⁽⁴⁷⁾은 판재 성형 과정에서 가변 블랭크 홀더 힘(Blank Holder Force)을 이용하는 방법을 사용하여 편치 행정 끝단에서 힘을 줄이고 초기 블랭크 홀더력을 강하게 함으로써 이중-곡선화 패널의 스프링백을 감소시키는 연구를 하였으며 역접근(Inverse Approach)를 사용한 드로우비드 구속력을 최적화하여 판재의 성형성을 향상시키는 연구를 수행하였다⁽⁴⁸⁾. 디프드로잉 작업에서 최적의 제품을 생산하기 위한 타원체의 디프드로잉 테스트를 수행하여 기존의 형상 반경을 가진 기술자의 경험과 시행 오차법을 통해 비교되고 FEM기법으로 시뮬레이션을 수행하여 근사적인 편치와 다이의 형상 반경들을 제안하였고⁽⁴⁹⁾ 폭방향으로 평면 변형을 가지는 판재를 설계된 형상으로 변형시키기 위한 인장력, 전단력과 굽힘모멘트를 정의하기 위하여 FEM을 이용하여 수행하였으며 변형된 형상의 기하학적 정보와 표면에 따라 적용된 힘과 모멘트 그리고

stress-strain 본포를 구한 연구를 Samuel⁽²⁰⁾이 수행하였다.

3.5 기타 연구

이외의 연구로는 유압프레스 기계 구조에 대한 연구와 해석을 위한 모델링 기법등이나 형상 설계 연구들이 있다.

디프드로잉에서 블랭크 홀딩력을 적용하기 위하여 유압 프레스 기계에 쿠션 압력제어시스템을 설계하여 드로잉력을 향상시켰으며⁽²¹⁾ 스텝핑 프레스 금형에서 다이페이스의 초기 판재 형상의 예측을 위한 중요한 요소인 binder-wrap, 편치 접촉 상태, 단면 길이 변화율, 주름형상과 같은 디자인 정보를 제공하는 CAD/CAM system인 CATIA 나 일반적인 해석프로그램들의 데이터 형식을 연계할 수 있는 다이페이스 설계 해석 시스템을 개발하여 다이페이스의 설계를 평가하였다⁽²²⁾. 그물망 형태의 판재 성형에서 가장 중요한 부분인 블랭크 설계에 대하여 강체-탄성 유한요소법의 후방향 추적계획, 최종적으로 설계된 설정에서 중간이나 초기 블랭크로 후방향으로 탐색하는 후방향 추적계획을 사용하여 블랭크 설계의 초기 설계를 쉽게 할 수 있도록 하는 연구⁽²³⁾가 수행되었으며 판재 성형의 유한 요소 해석에 사용되는 drawbead의 인발특성을 계산하기 위하여 차수와 공정이 다양한 원형, 단계형과 사각형 drawbead같은 기본형을 여러 법칙으로 먼저 유도한 후 실험과 기본형의 조합을 통한 전문가 drawbead모형을 개발한 연구가 Keum⁽²⁴⁾등에 의해 수행되었다. Fig. 8은 후방탐색 계획에 의해 블랭크 초기 설계를 하는 모습이다.

4 프레스 가공의 추세

프레스 가공의 미비점을 보완하고 좋은 금형을 개발하기 위해 다음과 같은 추세로 발전하고 있다.

(1) 주물품의 프레스화

종래의 주물 프레임을 강판 또는 강봉으로 프레임을 제작하여 중량의 감소와 제작 단가의 절감 효과를 얻을 수 있다.

(2) 절삭 부품의 프레스화

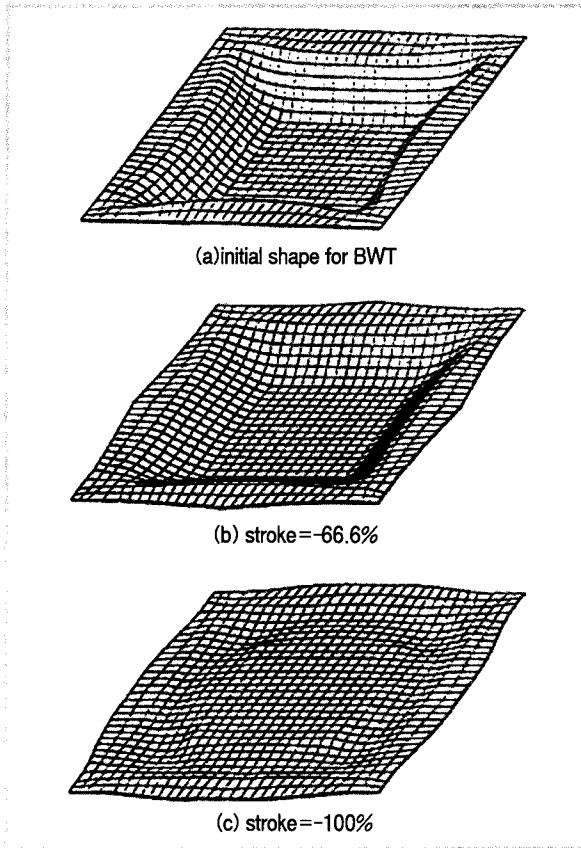


Fig. 7 Backward tracing(BWT) scheme to get the initial blank shape

카메라 부품의 얇은 플랜지 달린 링, 컴프레서의 피스톤 플랜지, 자전거, 자동차용 부품등을 기계 가공에서 프레스 가공으로 하고 있다.

(3) 진동 가공

단조, 블랭킹, 셰이빙 등은 가압중에 진동을 줌으로써 가압력을 저하시킬 수 있고 또 취약한 재료 등의 블랭킹 면을 곱게 다듬질할 수 있다.

(4) 고 에너지 가공

최근에 개발된 가스의 폭발적 에너지에 의하여 고속으로 가압하는 다이내믹 프레스 기계에 의하여, 가열 정밀 단조가 사용되고 있다.

(5) 정밀 블랭킹 가공

절단면을 광택있는 다듬면으로 하는 피니시블랭킹, 정밀 블랭킹 및 상하 블랭킹가공 등이 개발되고 있다.

(6) 프레스 가공의 자동화

대량 생산이 될수록 가공비의 경감이 중요하다. 그 때문에 판재에 블랭킹, 벤딩, 성형등 제품 완성까지를 행하는 순차이송금형을 자동 이송 장치에서 연속 운전함으로써 최고의 효과를 얻을 수 있다. 또, 다공정 가공을 차례로 물건을 이동시키면서 가공을 완성시키는 트랜스퍼 프레스나, 각 공정의 프레스를 연결하여 트랜스퍼 이송에 의하여 가공하는 트랜스퍼 라인, 그리고 소재나 제품을 장입, 꺼내기를 자동화하여 인력을 줄이는 등 최대의 효과를 얻는 자동화도 많이 이용되고 있다.

(7) 수치제어 터릿 펀치 프레스

패널의 다종 다양한 창구멍 뚫기, 구멍 뚫기를 수치제어에 의해 위치 구멍의 크기를 자동 선정하고 가공하는 터릿 펀치 프레스도 양이 많아지며 채산적으로 효과가 있는 동시에 숙련도를 요하지 않고 작업자의 오류를 최소화한다.

(8) 퀵 다이 체인지 시스템(Quick die change)

다이가 커지거나, 소량 생산인 경우에 금형을 프레스에서 분리 설치하는 시간을 절약하는 것은 중요하다. 그 때문에 미리 준비한 다음 공정 다이를 무빙 볼스터로 미끄러뜨려서 분해 조립하는 것과 그 제품의 전가공 공정용 다이를 옆에 준비해 두고서 불과 15~20초에 다이 장치를 바꾸고 소량의 부품을 최저의 가공 시간 내에 가공하는 것도 프레스 가공의 나아갈 방향이다.

참고 문헌

- (1) "Research on applying one-step simulation to blank design in sheet metal forming", Wang, Y., Shen, Q., Wang, Y., Zhang, Y., Journal of materials processing technology, v.120 no.1/3, 2002, pp.111-114
- (2) "직접설계법에 의한 박판부품의 초기형상설계", 김상국, 윤정환, 정관수, 연의정, 소성·가공, Vol.9 No.6, 2000, pp.598-603
- (3) "수직벽을 가진 자동차 부품 성형공정의 스프링백 유한요소 해석", 윤치상, 신철수, 조원석, 이두환, 구분영, 금영

- 탁, 소성·가공, Vol.9, No.6, 2000, pp.574-581
- (4) "Process parameters and products quality analysis of flexible-die deep-drawing using a viscoplastic pressure-carrying medium", Fu, M.W., Huang, M.H., Journal of materials processing technology, v.115, no.3, 2001, pp.384-390
- (5) "Multi-point forming of three-dimensional sheet metal and the control of the forming process", Cai, Z.-Y., Li, M.-Z., The International journal of pressure vessels and piping, v.79, no.4, 2002, pp.289-296
- (6) "Development of an integrated computer-aided process planning system for press working products", Kim, C., Kim, B.M., Choi, J.C., Journal of materials processing technology, v.111 no.1/3, 2001, pp.188-192
- (7) "타원형 디프 드로잉 트랜스퍼 금형의 공정설계 전문가 시스템(Ⅱ)", 박동환, 배원락, 박상봉, 강성수, 한국 CAD/CAM학회논문집, Vol.7, No.1, 2002, pp.9-17
- (8) "자동차 엔진마운트 브래킷의 관재 및 용접판재 유압성형에 대한 성형 해석", 김현영, 신용승, 오수익, 홍춘기, 전병희, 소성·가공, Vol.10, No.1, 2001, pp.3-14
- (9) "세장비가 큰 다단계 사각형 디프드로잉 성형공정해석 및 금형설계", 김홍주, 구태완, 강범수, 소성·가공, Vol.10, No.6, 2001, pp.456-464
- (10) "전체해석과 국부해석을 통한 Door Inner 스탬핑 공정에서 발생하는 주름의 효과적인 해석", 김태정, 김종봉, 양동열, 유동진, 소성·가공, Vol.9, No.6, 2000, pp.653-662
- (11) "판재성형의 유한요소해석", 오수익, 정영철, 강정진, 박종진, 한국정밀공학회지, Vol.17, No.4, 2000, pp.38-47
- (12) "자동차 YOKE 제품의 타원용기 성형에 관한 연구", 박동환, 배원락, 박상봉, 강성수, 한국정밀공학회지, Vol.18, No.8, 2001, pp.182-192
- (13) "Microdeep drawability of very thin sheet steels", Saotome, Y., Yasuda, K., Kaga, H., Journal of materials processing technology, v.113, no.1/3, 2001, pp.641-647
- (14) "Plastic bending of adhesive-bonded sheet metals", Takiguchi, M., Yoshida, F., Journal of materials processing technology, v.113, no.1/3, 2001, pp.743-748
- (15) "소형 구를 이용한 박판 성형에서의 변형특성", 심명섭, 박종진, 소성·가공, Vol.10, No.1, 2001, pp.59-66
- (16) "클래드 강판재에 의한 축대칭 디프드로잉의 탄소성 유한요소해석", 류호연, 김영은, 정완진, 김종호, 소성·가공, Vol.10, No.5, 2001, pp.411-417
- (17) "Improving the properties of exterior body panels in automobiles using variable blank holder force", Gunnarsson, L., Schedin, E., Journal of materials processing technology, v.114, no.2, 2001, pp.168-173
- (18) "Optimization of drawbead restraining forces and drawbead design in sheet metal forming process", Naceur, H., Guo, Y.Q., Batoz, J.L., Knopf-Lenoir, C., International journal of mechanical sciences, v.43, no.10, 2001,
- (19) "비축대칭 디프 드로잉 제품의 박판 성형 해석", 배원락, 박동환, 강성수, 소성·가공, Vol.10, No.3, 2001, pp.185-192
- (20) "Influence of drawbead geometry on sheet metal forming", Samuel, M., Journal of materials processing technology, v.122, no.1, 2002, pp.94-103
- (21) "박판의 딥 드로잉 성형을 위한 수치제어 쿠션 시스템의 개발", 이정우, 최치수, 소성·가공, Vol.10, No.2, 2001, pp.115-122
- (22) "스탬핑 프레스 금형 다이페이스 설계 해석 시스템", 김영탁, 정승훈, 박성일, 이완우, 소성·가공, Vol.9, No.6, 2000, pp.567-573
- (23) "Implementation of backward tracing scheme of the FEM to blank design in sheet metal forming", Ku, T.W., Lim, H.J., Choi, H.H., Hwang, S.M., Kang, B.S., Journal of materials processing technology, v.111, no.1/3, 2001, pp.90-97
- (24) "Expert drawbead models for finite element analysis of sheet metal forming processes", Keum, Y.T., Kim, J.H., Ghoo, B.Y., International journal of solids and structures, v.38, no.30/31, 2001, pp.5335-5353