

프런트 도어의 드로잉 공정해석과 프레스 금형 제작 공정에 관한 연구

박용국*

(1998년 7월 1일 접수)

Study on Drawing Analysis of an Automotive Front Door and Stamping Die Manufacturing Process

Yong Kuk Park

Abstract

In recent automotive industries, there has been significant increase in applications of computer simulation to the manufacturing of stamping dies for inner and outer body panels which greatly affect durability and aesthetic quality of automobiles. Enhancement of die quality, and reduction of total die manufacturing time and consequently manufacturing cost are the visible outcome. However, to successfully apply the result of simulation by a commercial package to the die manufacturing, development of an optimal die manufacturing process is required upon the completion of analysis of forte and shortcoming of available sheet metal forming softwares. Based on the results of numerical analysis of front door outer panel forming, this paper evaluates the applicability of simulation results to the real die manufacturing for automotive body panels. Also, it attempts to select an optimal die manufacturing process including design, machining and tryout. Lastly, it discusses the expected effects by adopting the selected process in a real stamping die manufacturing facility.

Key Words : BIW, Stamping, Die Layout, Dynamic Explicit Method, Forming Limit Diagram

1. 서론

최근 세계 자동차 회사들의 자동차 개발기간은 종래 4년 이상 소요되던 것에 비하여 급격히 단축되고 있다. 이는 자동차 개발에 필요한 제품 설계 단계와 생산 준비 단계에서 CAD, CAM 그리고 CAE를 적극 활용함으로써 가능하게 되었다. 1993년 크라이슬러(Chrysler) 자동차사는 BIW(body-in-white)의 개발에 이 기법을 적용,

'Plymouth Neon'의 개발기간을 종래 60개월에서 31개월로 단축시켰다.⁽¹⁾ 또한 자동차 경량화를 위해 TWB(Tailor Welded Blank)의 적용 등 차체(automotive body) 중량을 감소하는 추세에 있다.⁽²⁾ BIW 또는 차체는 400개 이상의 성형된 패널들의 용접, 헤밍 및 볼트 체결 등으로 이루어지는데, 이 패널들은 프레스에 장착된 스탬핑 금형에 의해 생산된다. 스탬핑 공정은 일반적으로 하나의 패널을 생산하기 위해 블랭킹공정으로부터 성형이

* 대구효성카톨릭대학교, 자동차공학부

이루어지는 드로잉공정, 트리밍, 피어싱 그리고 플랜징 및 캠공정들을 거치는 다단계공정이며 각 공정은 각각의 고유한 금형을 필요로 한다. 이중 드로잉공정은 성형 후 부정확한 치수의 제품 및 많은 불량이나 나타나는 가장 어려운 공정으로서 외판의 경우 3차원 자유 곡면의 성형면을 가지는 정밀한 금형이 요구된다. 전통적으로 금형 제작 과정은 제품 데이터로부터 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 패넌을 시험 성형하는 트리아아웃 단계를 거쳐 최종적으로 금형이 완성된다.

일반적으로 새로운 차종을 위한 금형의 개발에는 12개월에서 18개월 이상의 긴 시간이 소요된다. 이중 트리아아웃은, 금형이 원하는 치수의 제품을 생산하지 못하거나 표면 불량의 패넌을 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 개발 과정이 설계자의 경험과 직관에 의존하는 경향이 큰 탓으로 스탬핑 공정 및 금형 설계를 최적화 및 자동화 할 수 있는 과학적 방법이 필요하며 이에 관한 연구들이 진행되어 오고있다.^(3, 4)

최근 자동차 산업에서는 CAE를 이용, 패넌의 성형 불량으로 인한 불필요한 금형 수정의 횟수를 줄여 트리아아웃기간 단축을 도모하는 '가상 트리아아웃'이 시도되고 있다.^(5, 6) 성형 해석 공정의 순서는 블랭크의 자체 무게로 인한 자중 처짐, 브랭크홀더의 바인더랩에 의한 예비성형, 블랭크와 다이, 펀치의 접촉에 의한 성형, 마지막으로 성형 과정 중 발생한 재료 내부의 응력이 재료가 금형에서 추출되는 순간 새로운 정적 평형 상태를 만족시키기 위해 변형되는 스프링백의 해석 순으로 진행된다. 이렇게 하여 블랭크의 성형 과정 중 및 성형 후 형상, 두께 분포, 응력 및 변형률분포, FLD (forming limit diagram) 등의 결과를 통해 파단, 주름, 스프링백등의 불량을 예측할 수 있다.^(7, 8) 즉 박판성형 CAE는 성형 과정을 가시화함으로써 성형 메커니즘을 이해할 수 있게 하고 패넌의 불량 발생 여부 및 위치, 발생 요인 등을 미리 예측 가능하게 한다.

따라서 불량으로 인한 금형 수정의 소지를 금형의 초기 설계단계에서 미연에 방지할 수 있다.

실제 자동차 산업에서 CAE의 효과적 활용을 위해서는 전통적 프레스 금형 개발 과정에 CAE를 도입하여 고품질의 금형을 신속하게 만들 수 있도록 금형 제작 공정을 개선하여야 한다. 예를 들어 설계자의 경험과 직관에 전적으로 의존하는 공법설계단계에서 2차원 CAE를 이용 시간으로 여유, 바인더랩, 비드 설계 및 다이페이스 전개 등 불량 패넌을 막는 예비 작업을 실행할 수 있다. 이를 토대로 한 3차원 다이페이스 모델링 완료 후, 생성된 금형 모델을 이용한 증분해석 (incremental analysis)을 시행하면 보다 정확한 성형 메커니즘 및 불량의 예측이 가능하다. 또 전통적 금형 개발의 마지막 단계, 즉 트리아아웃이 끝난 후 비로소 설계가 가능한 블랭크다이를 최적의 성형 상태에서 역 추적한 블랭크의 형상을 이용하여 미리 설계할 수 있다.⁽⁹⁾ 실제 프레스 금형 개발 과정에 CAE를 이러한 방법으로 접목시킴으로써 고품질의 금형을 적은 비용으로 보다 빨리 패넌 양산공정에 투입할 수 있게 되어 궁극적으로 자동차 산업의 경쟁력 확보에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 자동차 외판 가운데 프린트 도어의 드로잉 공정을 해석하였으며, 가상 트리아아웃 결과의 실제 자동차 박판 성형에의 적용가능성을 검토하였다. 또한, 성형 해석을 이용하여 현재 자동차 패넌 생산용 프레스 금형 제작공정을 개선함으로써 기대되는 효과를 논의하였다.

2. 재료시험 및 해석수행 과정

2. 1 재료시험⁽¹⁰⁾

해석의 정확성을 위하여 프린트 도어 외판용 강판의 기초 물성시험을 다음과 같이 행하였다.

시험재료: 자동차용 일반냉연강,

두께: 0.85 mm

인장시험장비: INSTRONG 4485

인장시험조건:

-크로스 헤드 속도: 10 mm/min

-시편: JIS 5호 (Gauge Length 50 mm, Width 25 mm)

Table 1 및 Fig. 1은 물성 시험 결과이다.

2. 2 해석수행 과정

CATIA에서 모델링한 블랭크와 금형형상

(Fig. 2)을 IGES (Initial Graphics

Table 1 Material properties of cold rolled steel for automotive panels

Properties	Value
Yield stress	17.58 kgf/mm ²
Tensile stress	31.69 kgf/mm ²
Elongation	48.18%
Strain hardening exponent (n)	0.225
Lankford value (r)	1.799
Young's modulus (E)	210 GPa
Poisson's ratio (ν)	0.25
Density (ρ)	7.83 × 10 ⁻⁶ kg/mm ³

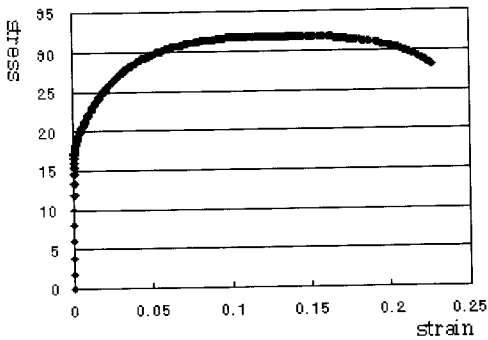


Fig. 1 Stress-strain curve

Exchange Specification) 파일로 변환하여 유한요소 모델러인 I-DEAS에서 메쉬작업을 하였다. I-DEAS에서 생성된 유한요소 모델을 기초로 다이, 플로팅다이, 블랭크홀더, 펀치 등의 모델을 작성 (Fig. 3)하였고, 이 모델을 Pam-Stamp 전 처리기에서 경계조건 및 공정변수, 재료물성치 등을 입력하고 바인더랩 해석을 한 후 동적외연법을 이용 성형해석을 하였다. 금형(다이, 플로팅다이, 블랭크홀더, 펀치)은 강체로 가정하였으며, 블랭크는 쉘요소를 사용하였다. Table 2는 유한요소 모델의 크기이다. 드로비드 형상은 해석모델에는 포함시키지 않고 캘리브레이션하여 사용하였으며, 바인더랩 하중은 최대 150톤이다. Table 3은 비드를 캘리브레이션한 값이다.⁽¹¹⁾

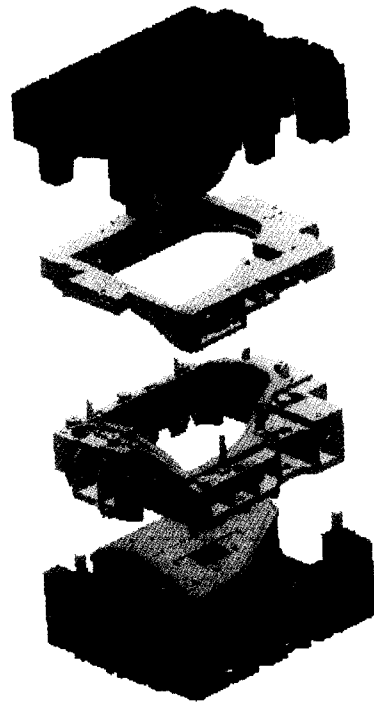


Fig. 2 3D modeling of stamping dies

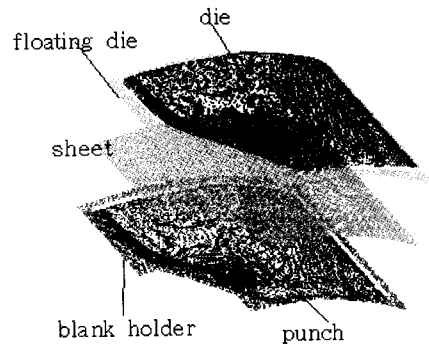


Fig. 3 Finite element model

Fig. 4는 실제 공정에서의 금형배치도를 보여준다. 본 스탬핑공정에서 사용되는 금형은 제품수율의 증가 및 초기 변형률을 부여하기 위해 플로팅다이를 사용한 것이 특징이다. 성형공정은 슬라이드가 하강하면서 바인더랩 (플로팅다이와 블랭크홀더의 접촉)이 이루어진 후 다이와 블랭크의 접촉 그리고 다이/블랭크/펀치의 접촉과 동시에 성형이 순차적으로 이루어진다.

Table 2 Finite element of blank and dies

	Number of elements	Element shape
Punch	22191	triangle
Die	22191	triangle
Blank holder	4897	triangle
Floating die	4897	triangle
Blank	25047	quadrilateral

Table 3 Bead Calibration

distance	tangential force(N)	normal force(N)
0.85128	160	250
2.85036	85	130
4.85024	32	70
6.84975	20	35
8.84989	6	16
10.0000	0	0
20.0000	0	0

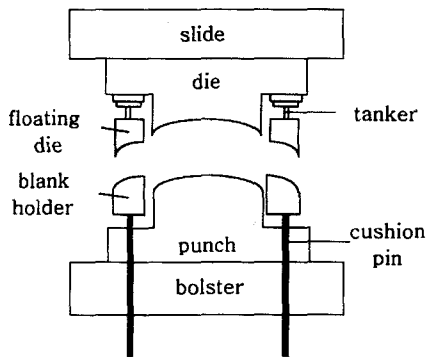
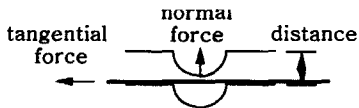


Fig. 4 Die layout

3. 해석결과 검토 및 고찰

Fig. 5는 성형 시뮬레이션중 각 단계에서의 성형과정과 두께분포를 나타낸 것이다. (a)는 초기 블랭크의 형상이며 (b)는 바인더랩이 완료되었을 때의 형상, (c)는 다이가 움직이기 시작한 시점이므로 블랭크의 성형시작 형상을 볼 수가 있다. 이 제품은 실제 현장의 프레스 성형조건에 의해 다이가 먼저 블랭크와 접촉하게 되는데, 이 그림에서 다이가 블랭크와 접촉될 때의 형상변화를 관찰할 수 있다. (d)는 성형이 상당히 진행되었음을 보여주며, (e)는 성형이 완료되었을 때의 형상이다.

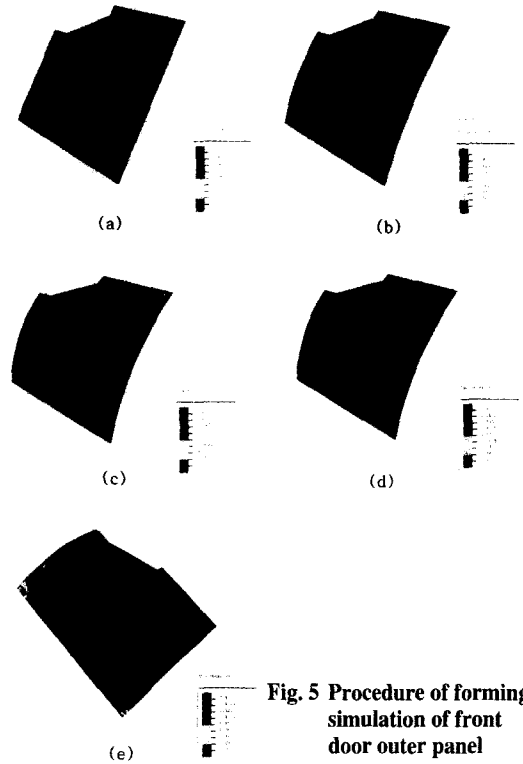


Fig. 5 Procedure of forming simulation of front door outer panel

Fig. 6, Fig. 7은 실제 성형된 프런트도어 외판의 형상과 성형 해석 결과를 비교한 것이다. 성형 해석결과의 정확도가 자동차 바디 패널의 금형 제작을 위한 기초자료로써 충분히 활용가능함을 보여준다.

Fig. 8, Fig. 9는 성형 해석 완료 후의 변형률분포를 나타낸다. 자동차용 대형 외판의 경우는 변형률분포의 불균일에 의해 굴곡(highs and lows), 오일 캐닝(oil can-

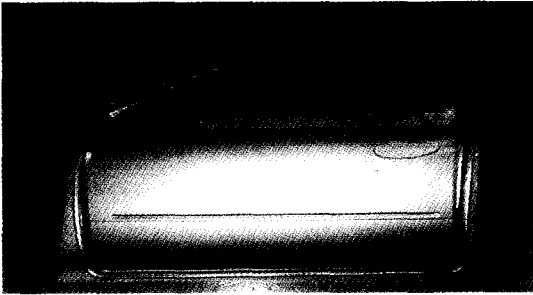


Fig. 6 Photograph of front door outer panel

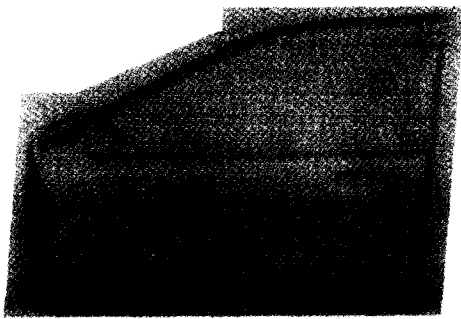


Fig. 7 Simulation result

ning)등의 불량이가 발생하는 경우가 많다. 물론, 성형력을 제하(除荷)한 후에는 스프링백에 의해 도어 손잡이 부근에서의 베어 이어(bear ear)현상 등의 발생 가능성도 고려해야 한다. 이런 현상들의 해결을 위해 다이페이스의 여유형상을 변경하여 변형률분포의 조정을 해야 한다. Fig. 8은 드로비드의 형상을 조절하기 전 변형률분포이며 Fig. 9는 8에 비해 훨씬 개선된 변형률분포를 가지고 있음을 알 수 있는데 드로비드의 형상의 조정에 의해 변형률분포를 개선한 경우이다. Fig. 8과 9에서의 예와 같이 성형해석결과를 프레스 금형설계에 적용, 즉 성형해석 과정을 통해 산출된 최적의 드로비드, 여유 등의 형상 그리고 공정 조건등에 대한 해석결과를 미리 금형설계에 반영함으로써 트라이아웃 시간을 줄일 수 있다.

Fig. 10은 FLD(성형한계도)위에 변형률분포를 표시한 것이다. Fig. 10의 변형률분포를 보면 평면변형률축 근처에 변형률 값들이 분포되어 있음을 알 수 있는데 이는 금형 설계단계에서의 2D해석 활용 가능성을 보여준다.^(12, 13)

Fig. 11은 현재 실제 스텝핑 공정에서 성형되는 프론트 도어 성형과정중의 블랭크형상을 보여준다. 이 프론트 도어 외판의 성형은 플로팅다이를 이용한 4개로 구성된 금

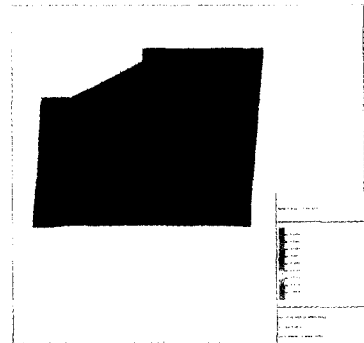


Fig. 8 Strain distribution before drawbead improvement

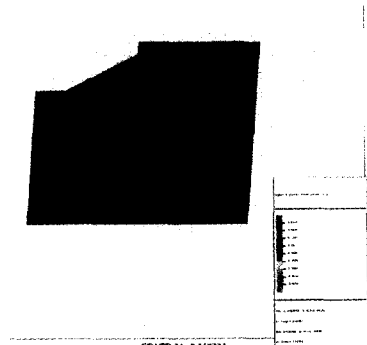


Fig. 9 Strain distribution after drawbead improvement

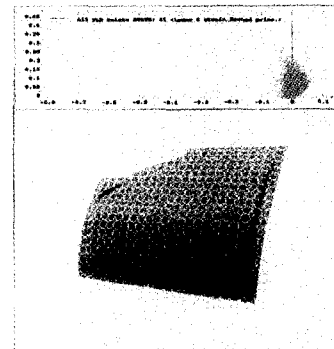


Fig. 10 Forming Limit Diagram

형에 의해 이루어진다. 플로팅다이는 특별히 초기 변형률 부여를 위해 설계하였으나 실제로는 Fig. 11에서와 같이 성형중 주름의 발생가능성이 있음을 보여준다. 이 현상은 상형다리와 플로팅다이 사이의 탱커(tanker)압력이 블랭크홀더를 지탱하는 쿠션핀(cushion pin)압력보다 작아 상형다리가 펀치보다 먼저 블랭크와 닿아 주름이 생기기



Fig. 11 Wrinkling before blank holding force adjustment



Fig. 12 No wrinkling after blank holding force adjustment

때문이다. 이 성형품의 경우 탱커가 건디는 최대의 힘은 93톤이나 쿠션핀은 150 톤이다. 만약 프레스의 탱커압력보다 쿠션핀의 압력을 작게 조절한다면 바인더랩된 후 펀치가 블랭크와 먼저 접촉할 것이라고 사료된다. 따라서 성형시 플로팅다이가 블랭크를 충분히 인장하여 주름발생을 억제할 수 있을 것으로 예측할 수 있다. Fig. 12는 실제로 탱커압력을 증가시켜 쿠션핀압력보다 크게 한 후 성형결과를 보여준다. 예측한 데로 주름이 발생하지 않아 불량요인을 실제 성형 이전에 방지할 수 있음을 알 수 있다.

위와같은 해석 특히 자동차용 대형 패널의 성형해석을 위해서는 모델준비과정, 즉 CATIA등의 CAD를 이용 모델링하는 과정과 그 결과 데이터를 메쉬생성기로 옮겨 유한요소를 생성하는 과정이 필요하다. 그런데 이 모델 준비과정에서의 소요 시간이 전체 해석 시간 중 상당 부분을 차지함을 경험적으로 알 수 있다. 그리고, 이와같은 해석 과정을 통해 얻은 데이터는 충분한 활용가치가 있으나 아직 형상, 파단부위, 주름발생 등을 예측하는 정도이며 스프링백, 표면의 흠 등을 정량적으로 정확히 예측하는 데는 부족함이 있었다. 따라서, 각 성형 제품마다의 접근방법, 중점 해석사항 등의 데이터베이스구축이 중요하며, 또 실

제 현업에서의 활용을 위해서는 성형해석뿐만 아니라 모델준비과정에 대한 연구, 성형해석 결과를 프레스금형 제작 공정에 적용하는 방법에 관한 연구도 중요하리라 생각된다.⁽¹⁴⁾

4. 성형해석을 응용한 프레스 금형 제작 공정의 개선

Fig. 13은 기존의 프레스 금형 제작 공정이며, Fig. 14는 CAE의 적용에 의한 금형 제작 공정 개선 흐름도이다. 기존의 프레스 금형 제작 공정은 금형공법설계가 2차원 도면으로 작성, 출도되며 CAM 데이터 생성을 위해 이 도면을 받아 NC데이터 작성을 위해 다시 3차원 모델링을 하게 된다. 따라서, 2D 도면작성 및 3D 모델링의 이중 작업이 이루어지게 되며 또한, 다이 페이스 전개가 설계자의 경험에 의해 이루어지기 때문에 트라이아웃 공정에서 제품의 불구함으로 인해 많은 시간을 들여 다이 페이스를 다듬는 작업을 하게 된다.

Fig. 14는 이에 대한 개선안으로, 금형 공법설계 단계에서부터 3차원 모델링을 하게 된다. 또한 기존의 경험에 의한 다이페이스 전개가 '가상 트라이아웃 단계'를 거쳐 그 결과가 설계에 반영되기 때문에 트라이아웃 단계에서 공수를 최소화 할 수 있다.

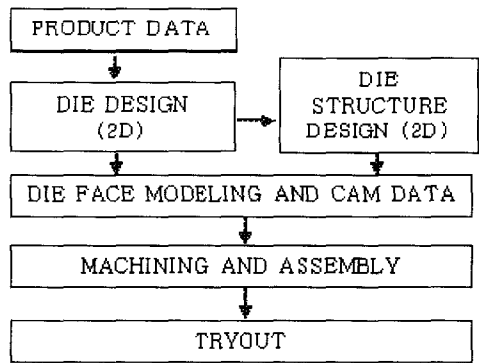


Fig. 13 Processes of die manufacturing (Conventional)

Fig. 14의 프레스 금형제작 공정에서 모든 데이터의 흐름은 디지털이며, 데이터의 전송은 도면없이 네트워크에 의해 이루어진다. 프레스 금형 제작 공정 개선 흐름도에서의 각 항목별 내용은 다음과 같다.

- ① 2D 해석단계는 공법설계지원(드로다이의 다이페이

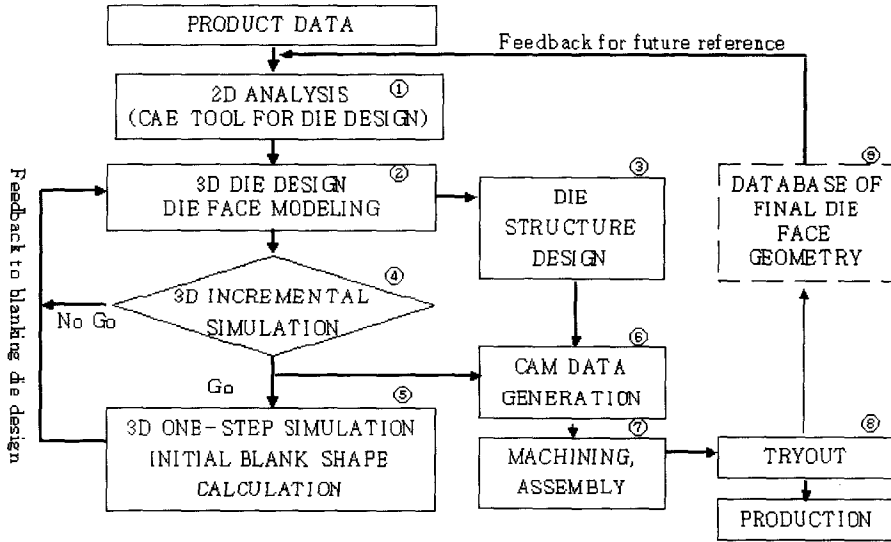


Fig. 14 Processes of die manufacturing (Proposed)

스 전개등)을 위한 도구로 설계자의 관심 부위 단면을 2차원으로 해석하여 그 결과(응력, 변형률, 양 끝단의 유입량 등)를 분석, 여유, 드로비드를 포함한 다이페이스 설계(3차원 모델링)에 적용할 수 있다. 이 단계에서의 해석은 실시간으로 이루어지므로 금형 설계자가 기존의 CAD 도구와 병행하여 신속히 이용할 수 있다.⁽¹⁵⁾

② 금형공법설계에서는 의 결과를 이용해 드로다이 3차원 모델링을 하며 드로공정 이외의 공정설계도 하게 된다.

③ 금형구조설계 단계는 의 CAE해석단계와 동시병행적으로 작업이 가능하다.

④ CAE해석은 의 다이페이스 3D 모델을이용 3D CAE 상세해석(Incremental

analysis)을 하며 성형중의 불량률 예측한다. 해석결과 Go이면 이 모델은 CAM데이터생성 및 CAE One-step해석을 하게 되며, No Go이면 공법설계단계에서 모델을 재조정한다.

⑤ CAE One-step 해석단계에서는 완성된 패널 모델을 이용해 역으로 계산해 초기 블랭크 형상을 구할 수 있다. 해석결과는 블랭킹 금형설계를 위해 다시 공법설계자에게 제공된다.⁽¹⁶⁾

⑥ CAM 데이터생성은 금형공법설계 단계에서의 3D 모델을 사용하기 때문에 기존의 2차원도면을 보고 3차원 모델링을 할 때 보다 작업시간 및 노력을 상당히 줄일 수 있다.

⑦ 기계 가공 및 금형의 조립

⑧ tryout 단계에서는 불량 발생부위를 예측하여 금형 설계시 이미 반영된 상태이므로 기존의 공정에 비해 짧은 기간으로 가능하다.

⑨ 차기차종 개발시 공법설계 참고 데이터로서 활용하기 위해 트라이아웃 공정에서 수정된 다이페이스의 형상을 데이터베이스로 저장한다.

위와 같은 금형제작 공정을 활용하면 CAE에 의해 결함 발생 부위를 예측하여 금형 설계 단계에서 이를 반영할 수 있다. 이로 인해 트라이아웃 공장에서 금형의 수정 횟수를 줄이게 되므로 금형 품질의 확보와 트라이아웃 기간의 단축도 가능하게 된다.

5. 결 론

현재 실제 시판되고 있는 자동차의 프론트 도어 외판을 동적 외연적 성형해석 프로그램을 사용하여 3차원 해석을 수행하였고 또한 컴퓨터 시뮬레이션을 현행 금형제작 공정에 응용하는 방안을 제시하였다. 성형해석과 프레스 제작 공정 개선방안을 모색하면서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 3차원 성형해석 결과는 블랭크 형상에 있어서 실 제품과 매우 유사하게 나타났다.

(2) 성형 공정변수들(드로비드, 블랭크 홀딩력 등)을 변화시켜 관찰한 결과 변형률, 두께, 응력 분포, 주름형성

등이 개선되어 불량률의 원인과 발생 부위를 사전에 예측할 수 있었다.

(3) 3차원 성형해석을 검토한 결과 평면변형으로 가정할 수 있는 부분은 실시간으로 2차원 해석하여 설계에 적용할 수 있다.

(4) 성형해석 결과를 이용하여 금형제작 공정을 개선함으로써 금형의 품질, 납기단축 및 비용절감의 효과를 기대할 수 있다.

참고문헌

- (1) Bruce Haase, 1994, "The Neon - a shining example of design efficiency", Computer Graphics World, pp. 41~44.
- (2) 김현영 외, 1998, "레이저 용접 차체의 성형해석과 금형설계", 한국소성가공학회지, 제7권, 제4호, pp. 382~392.
- (3) 최재찬, 김철, 1998, "박판제품의 블랭킹 및 피어싱과 굽힘 가공을 위한 순차이송용 공정 및 금형 설계와 가공자동화 시스템", 한국소성가공학회지, 제7권, 제3호, pp. 246~259.
- (4) 김재훈 외, 1998, "박판제품의 블랭킹 및 굽힘 가공을 위한 통합적 공정 및 금형설계와 가공시스템", 한국소성가공학회 '98 춘계 학술대회 논문집, pp. 155~159.
- (5) Tooru Kato and Shin Ikura, 1997, "프레스성형 시뮬레이션 실용화의 발자취", 형기술, vol.12, no.6
- (6) M. Diller et al., 1997, "Applications of Computer Simulation for Part and Process Design for Automotive Stampings", Sheet Metal Stamping: Development Applications, Paper No. 970985, Society of Automotive Engineers, pp. 223~231.
- (7) 김종봉 외, 1998, "분기좌굴이론을 이용한 박판성형 공정에서의 주름발생해석", 한국소성가공학회 '98 춘계 학술대회 논문집, pp. 28~31.
- (8) Li Zhang, et al., 1995, "Springback Compensation in Die Surface Geometry Using Simulation Methodology", Body Assembly and Manufacturing, IBEC '95, pp. 98~103.
- (9) H. Gloeckl and K. Lange, 1983, "Computer Aided Designing of Blanks for Deep Drawn Irregular Shaped Components", Proceedings of 11th NAMRC, pp. 243~252.
- (10) E. Marciniak and J.L.Duncan, 1992, The Mechanics of Sheet Metal Forming, Edward Arnold, London, pp. 19~27.
- (11) B. Carleer, T.Menders, and H. Huetink, 1996, "EQUIVALENT DRAWBEAD MODEL IN FINITE ELEMENT SIMULATIONS," NUMISHEET'96, Part 1-Papers, pp. 25~31.
- (12) 전기찬, 1993, 박판금속의 성형, 반도출판사, pp. 228~240.
- (13) 전기찬, 이항우, 이정우, 김충환, 1992, "차체판넬 프레스 성형공정의 평면 변형 해석," 대한기계학회 논문집, 제16권, 제10호, pp. 1853~1860.
- (14) 오세욱 외, 1998, "자동차 차체 판넬에 대한 성형해석과 현장적용", 한국소성가공학회 제2회 박판성형 심포지엄 논문집, pp. 41~46.
- (15) T. Huo and S. Liu, 1996, "A FAST 2D Forming Analysis Program for Automotive Stamping Designs," Body Assembly & Manufacturing, IBEC '96, pp. 23~26.
- (16) S.D. Liu, 1995, "Application of One-Step FEM in Multi-stage Stamping Processes Designs", Advanced Technologies and Processes, IBEC '95, pp. 40~46.