

# 판재 성형용 프레스 금형 설계를 위한 유한요소법의 응용

김 권 희  
한국기계연수소 가공기술실



● 1956년생  
● 구성식등 소성역학 분  
야의 기초적인 문제들  
과, 전산기를 이용한 금  
형설계에 관심이 있다.

## 1. 머리말

대개 열간, 또는 냉간압연에 의하여 생산되는 공업용 금속판재는 자동차, 항공기, 가전제품 및 일반 산업기기등 거의 모든 공업제품의 생산에 사용된다. 금속판재에서 원하는 최종제품을 얻기 위한 판재 성형방식은 판재에 가해지는 변형양식에 따라서 다음의 몇가지로 분류된다.

스피닝을 제외한 대부분의 판재가공은 상온에서 금형과 프레스를 통하여 이루어지며 후가공이 없는 경우가 많아 성형 결과는 제품의 최종 형상을 좌우하게 된다. 금형의 형상, 성형중 판재의 구속방법, 소재의 기계적 변형 특성 등 여러 인자들의 복잡한 상호작용에 의하여 판재성형의 결과가 결정된다. 이러한 인자들의 적절한 조화가 이루어 지지 않는 경우에는 네킹(necking), 주름발생(wrinkling), 탄성복원(spring back)에 의한 치수정도 불량등 다양한 가공결함이 발생하게 된다. 대부분의 가공결함들은 금형과 펀치(die and punch), 비이드(draw bead), 블랭크홀더 가압력(blank holder pressure)등의 적절한 설계에 의하여 방지되나, 이러한 방법에 의하여 가공결함이 시정되지 않을 때는 제품 형상 자체를 변경하여야 하는 경우도 있다. 이러한 일련의 노력은

숙련된 기능공들에 의하여 이루어지며, 만족할 만한 결과를 얻기까지 이미 만들어 놓은 금형을 여러차례 수정하여야 하는 것이 보통이다. 이러한 시행착오(try out)에 의한 금형의 수정작업은 많은 시간과 비용을 소요하게 되고 따라서 제품의 개발기간 및 원가에 직접적으로 반영된다. 제품의 라이프 사이클이 점차로 짧아지는 추세에 있는 자동차, 가전기기등의 경우 신속한 신제품 개발 능력이 매우 중요하다. 이러한 업종에서는 신제품 생산을 위한 금형의 수정작업에 들어가는 시간을 최소화 하여야 하며 금형의 설계단계에서 최종 성형결과를 예측할 수 있는 능력이 필요하다. 제품 형상 자체를 변경해야 할 필요가 있는 경우, 이를 금형 설계 단계에서 미리 예측하지 못하여 신제품 개발의 일정에 차질을 초래할 수도 있다. 금형

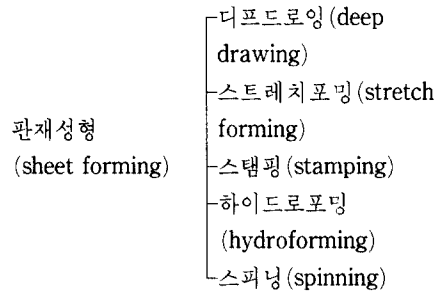


그림 1 소재에 가해지는 변형양식에 의한 판재 성형의 분류

개발에 따르는 이러한 문제점들을 개선하기 위한 노력의 일환으로써 최근 컴퓨터를 이용한 체계적 금형설계 방법이 개발, 응용되고 있다.

## 2. 컴퓨터를 이용한 체계적 금형설계

판재성형용 금형의 컴퓨터를 이용한 체계적 설계 방법은 그 산업적 중요성 때문에 국제적으로 활발한 연구와 개발의 대상이 되고 있는데 기술적 접근방식에 따라서 크게 두가지로 대별할 수 있다.

### 2.1 체계화된 경험적 데이터 베이스에 의한 방법

판재성형의 결과를 좌우하는 금형의 구조 및 형상, 가압력 및 판재의 구속방법, 금형-판재 간의 마찰조건, 판재의 기계적 변형특성 등 제반 인자들의 적절한 선택에 대한 과거의 경험치를 체계적으로 정리하여 새로운 제품의 금형설계에 활용하는 방법이다. 부분적으로 형상변경이 된 동종 제품의 경우 이러한 방법을 통하여 비교적 신속하고 신뢰도 높은 금형설계를 수행할 수 있다. 이를 위하여는 판재성형의 결과를 좌우하는 중요한 인자들을 파악하고 과거의 금형개발 경험을 각 인자별로 분석하여 데이터 베이스화 하는 작업이 필요하다. 일단 데이터 베이스가 마련되어 있으면 자료검색 및 도면의 출력등 비교적 단순기능을 갖춘 개인용 컴퓨터(PC)와 출력장치를 활용하여 중소기업에서도 실행할 수 있는 경제적 방법이다. 그러나 금형설계 및 생산의 실무에서 습득된 경험법칙이 체계적으로 문서화되어 관리되고 양적으로 많이 축적되어 있지 않은 경우에는 활용하기 어려운 방법이다. 이 방법은 도요다, 마즈다, نيسان등 일본 자동차 업계에서 효율적으로 활용하고 있다<sup>(1,2,3)</sup>.

### 2.2 컴퓨터 모의실험(computer simulation)에 의한 방법

체계화된 경험적 데이터 베이스에 의한 방법

은 이미 만들어 본 제품, 또는 이와 유사한 종류의 제품의 금형설계에 적용할 수 있으나 그 적용대상이 과거의 실무경험 범위에 한정되어 있다는 한계가 있다. 따라서 완전히 새로운 형상의 제품이나 새로운 소재를 사용한 제품의 금형 설계에서는 적용할 수 없게 된다. 이러한 경험적, 현상학적인 방법의 한계를 극복하고 기능공의 경험적 요소에 대한 의존도를 탈피하기 위한 방법으로서 해석적 방법을 들 수 있다. 해석적 방법은 컴퓨터의 급속한 발전과 더불어 비교적 최근에 개발되기 시작한 방법이고 현재 국내외에서 활발히 연구, 개발되고 있다.

해석적 방법은 판재성형의 결과를 결정하는 제반 인자들의 상호 작용을 과학적으로 체계화, 정량화하여 금형의 설계단계에서 판재성형 공정을 컴퓨터로 모의실험(simulation)하는 것을 기본적 수단으로 삼고 있다. 유한요소법의 발전에 힘입어 금형구조 및 형상, 판재의 구속조건등 제반 성형조건들을 변화시켜가며 다양한 가공결함의 발생 여부를 모의실험에 의하여 예측하는 것이 가능해지고 있다. 가공 결함을 방지하기 위한 최적 성형조건을 금형 설계 단계에서 예측하거나 제품형상의 성형가능성을 판별하는 것이 해석적 방법의 목표라고 할 수 있다. 이 방법은 미래 지향적인 금형의 설계수단으로서 인식되고 있고 최근에 들어서는 부분적으로 실용화되기 시작하고 있다. 이 방법을 도입하기 위하여는 비교적 고가의 공학용 컴퓨터(워크스테이션급 이상) 및 출력기기, 판재성형의 모의실험을 위한 소프트웨어, 그리고 이를 전달하기 위한 훈련된 인력을 필요로 한다.

## 3. 유한요소법을 이용한 판재성형의 모의실험

컴퓨터 모의실험을 통한 체계적 금형설계 방법의 성패는 유한요소 모의실험(finite element simulation)의 경제성과 신뢰성에 달려있다. 유한요소해석에 소요되는 비용은 이 방법의 경제성을 좌우하게 되는데 종래에는 비교적 간단한 문제의 해결에도 고가의 장비와 많은 비용

이 소요되어 이 방법의 실용화가 부진하였다. 그러나 공학용 컴퓨터의 급속한 발전에 따라 컴퓨터 가격 대비 연산속도와 기억용량이 획기적으로 증가됨에 따라서 본 방법의 경제성과 실용화 가능성이 높아지고 있다. 모의실험 결과의 신뢰성을 증가시키기 위하여 유한요소 해석법 자체도 꾸준히 향상되고 있으며 ABAQUS, NIKE, DYNA 등 유한요소해석용 소프트웨어가 미국을 중심으로 이미 개발되어 국내외에서 활용되고 있다.

컴퓨터 모의실험은 전처리(pre-processing) 시스템을 통한 입력자료의 준비단계, 판재성형의 유한요소해석(finite element analysis)단계, 그리고 후처리(post-processing) 시스템을 통한 해석결과의 분석단계등 3단계로 분류된다. 각 단계별 활용가능한 상업용, 또는 일반에게 공개된 소프트웨어들은 다음과 같다.

비 상업용인 MAZE, INGRID, NIKE, DYNA, ORION, TAURUS 등의 소프트웨어는 미국의 국립연구소인 Lawrence Livermore National Laboratory 에서 개발한 것으로 Argonne National Laboratory 를 통해서 국내외의 일반 사용자들에게 보급되고 있다. 상업용인 PATRAN, SUPERTAB, ABAQUS, MARC 등은 미국에서 개발된 것이 대부분으로 국내에서도 보급과 활용이 점차 확대되고 있다. 이외에도 강소성(rigid-plastic)유한요소 프로그램으로서 Battelle 연구소에서 개발한 DEFORM과 미국의 GM사에서 개발한 막요소

(membrane element)를 이용한 프로그램<sup>(4,5)</sup> 등이 있으며 국내에서도 이들과 유사한 기능을 갖춘 프로그램들이 개발되고 있다<sup>(6,7)</sup>.

### 3.1 컴퓨터 모의실험의 실례

표 1에 수록된 현재 활용가능한 소프트웨어들을 적절히 이용하면 상당히 넓은 범위의 판재가공 문제의 해결에 도움을 받을 수 있으리라고 생각된다. 하나의 실례로서 필자가 최근에 국내 자동차용 금형제작업체의 요청으로 수행하고 있는 국산 승용차 문짝 내판(inner door panel)의 프레스 성형 모의실험의 중간결과 일부를 그림 2에 나타내 보았다. 이 모의실험은 프레스가공중 발생하는 소재의 넥킹 및 찢어짐을 금형의 설계단계에서 예측하기 위하여 수행되고 있다. 금형설계시 판재의 파단 가능성이 우려되는 부분의 성형조건 즉, 금형, 펀치, 비이드 등의 단면 형상과 블랭크홀더 가압력, 금형-판재간의 마찰조건, 금속판재의 기계적 물성등이 정해지면 MAZE로 유한요소 해석을 위한 입력자료를 만들어 NIKE2D로 판재가공의 해석을 수행한다. 해석결과는 ORION을 통하여 판독되며 그림에서 보는 바와 같이 요소망의 찌그러짐을 통하여 넥킹의 발생여부를 확인할 수 있다. 넥킹이 예측되면 성형조건을 변경시켜가며 모의실험을 반복함으로써 넥킹을 방지할 수 있는 성형조건을 결정할 수 있다. 그림 2는 이러한 여러 차례의 반복 모의실험 중의 하나를 보여주고 있다.

표 1 판재성형의 컴퓨터 모의실험에 활용가능한 소프트웨어

작업단계	소프트웨어	비 고
전 처리 단계	PATRAN, SUPERTAB MAZE, INGRID	상업용 비상업용
유한요소 해석단계	ABAQUS, MARC NIKE, DYNA	상업용 비상업용
후 처리 단계	PATRAN, SUPERTAB ORION, TAURUS	상업용 비상업용

### 3.2 유한요소법의 기술적 제문제

위의 예제에서 볼 수 있듯이 이미 개발된 소프트웨어들을 적절히 사용함으로써 판재성형용 금형설계에 유용한 모의실험을 수행할 수 있다. 그러나 이를 위한 전처리 소프트웨어, 유한요소법등은 아직도 개선될 점들이 많아 국내외에서 지속적인 연구와 개선의 대상이 되고 있다. 개선이 요구되는 구체적인 기술적 과제들은 다음과 같다.

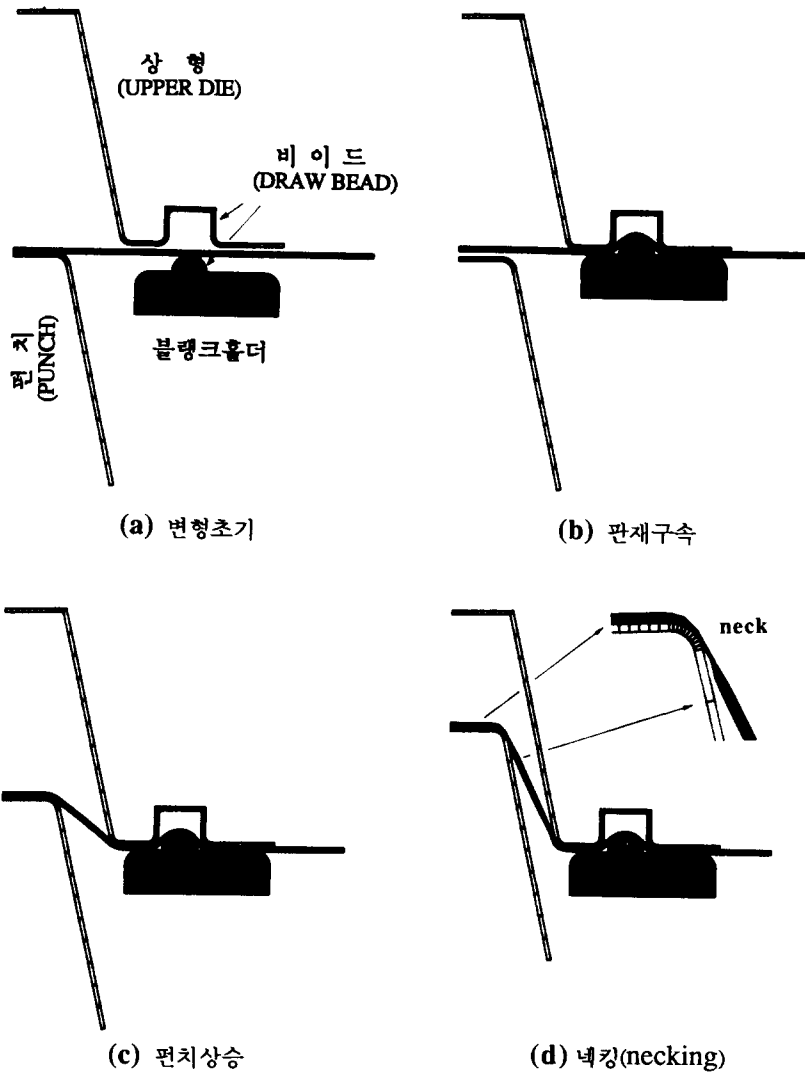


그림 2 승용차 문짝 내판(inner door panel)의 프레스 성형 모의실험의 일례 소재강판 : EZFCEN 30/30 1.2th (MS 121-14) (제조원 : 포항제철) 모의실험(simulation) 장비 : Apollo DN4500, 소요시간 : 10시간 사용소프트웨어 : MAZE(전처리)-NIKE2D(변형해석)-ORION(후처리) 599개의 4절점(4 node quad.) 연속체 요소 사용, 마찰계수=0.1

(1) 3차원 자유곡면의 효율적 처리

금형의 구조와 형상은 제품의 형상에 따라서 좌우되며 일반적으로 복잡한 자유곡면을 포함하고 있는 경우가 많다. 이런 경우 현재의 전처리 방식에 의하면 유한요소망을 구성하기 위하여 자유표면위의 절점 좌표들을 일일이 확인

하여 입력해야 하는데 이는 많은 시간을 필요로 하는 작업이다. 금형, 펀치, 비이드 등의 형상을 자주 수정해가며 3차원 모의실험(3-D simulation)을 반복해야 하는 경우 전처리과정에 엄청난 시간과 노력이 소요되는 경우가 많으며 이는 모의실험의 효율성을 감소시키는 중

요한 원인이 되고 있다. 따라서 최소한의 노력으로 3차원 자유곡면의 형상을 입력하기 위한 방안이 강구되어야 한다. 또한 금형자체에 가해지는 변형이나 응력상태를 알고 싶은 경우에는 자유곡면을 포함하는 물체 내부 혹은 표면에서의 유한요소망을 자동적으로 구성할 수 있는 알고리즘의 개발이 필요하게 된다. 이를 위하여 3차원 물체에서의 자동 요소망 구성에 관한 연구가 국내외에서 활발히 추진되고 있으며<sup>(8)</sup> 이러한 연구의 결과는 가까운 시일에 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

### (2) 금형-판재간 마찰특성의 실험적 측정 및 해석에의 활용

프레스 성형시 금형과 판재간의 마찰조건에 따라 비이드를 통하여 판재에 가해지는 구속조건이 결정되며 따라서 성형결과가 좌우된다. 일정한 쿨롱 마찰계수나 판재의 전단항복응력의 일정비율로 마찰저항을 가정하여 판재성형의 유한요소해석을 실시하는 것이 보편적이거나 이러한 가정들은 유한요소해석 결과의 신뢰도 향상을 위하여 실험적으로 검증된 마찰조건으로 대체되어야 한다. 마찰계수  $\mu$ 를 압력  $p$ 와 상대 미끄러짐속도  $v$ 의 일반적 함수로 보면 접촉점에서의 접선방향 전단응력  $s$ 는  $s = \mu(p, v)p$  로 표시할 수 있고  $\mu = \mu(p, v)$ 의 실험적 함수관계가 측정되면 penalty method 등 유한요소의 접촉 해석과정에서 이를 활용하기 위한 알고리즘이 마련되어야 한다.

### (3) 유한요소의 찌그러짐을 보상하기 위한 요소망 재구성법 개발

판재성형의 유한요소 해석에 있어서 변형이 국부적으로 진행됨에 따라 유한요소망을 구성하는 각 요소들이 찌그러지게 되어 모의실험의 결과가 부정확하게 되거나, 경우에 따라서는 모의실험을 불가능하게 한다. 따라서 대변형에 따른 요소망 재구성은 모의실험 결과의 신뢰도를 높인다는 목적 이외에도 모의실험 자체를 계속적으로 진행하기 위해서 필요하게 된다.

최근에 화상처리 기능이 탁월한 공학용 전산기 EWS(engineering work station)가 보편화 되면서 탄성변형등 선형 문제에 대하여 적응적 요소망 재구성법이 활용되고 있다. 그러나 소성변형등 비선형 문제의 경우에는 해석자가 적절한 해석 단계에서 해석의 중간결과를 판독하여 요소망 재구성의 필요성 여부를 결정하고 필요한 경우에는 요소망을 대화식(interactive)으로 재구성하는 것 이외에는 다른 방법이 없는 것이 현실이다. 이같은 작업은 해석대상이 되는 문제의 특성을 잘 파악하고 있어야 가능하며, 유한요소 해석의 경험이 풍부하지 않는 초보자의 경우에는 매우 어려운 작업이다. 유한요소 해석을 보편적으로 활용하기 위해서는 개인적인 경험이나 숙련도에 의존하지 않고 문제에 따라 적응적으로 구성할 수 있는 요소망 재구성법이 개발되어야 한다.

(4) 계산속도 향상 및 모의실험 비용의 절감  
앞에서 예제로서 언급한 승용차 문짝내판 모의실험의 경우 전후처리 시간을 제외하고 유한해석에 Apollo DN4500 컴퓨터로 약 10시간이 소요되었다. 곡면판요소(shell element)나 막요소(membrane element)를 사용하면 문제의 자유도를 크게 줄여 모의실험을 매우 빠르게 수행할 수 있지만<sup>(4,5,6)</sup> 그림 2에 보인 것과 같은 국부적 넥킹이나 비이드(draw bead)부분에서는 판재의 거동등은 예측하기 어렵게 되어 연속체 요소를 사용하는 경우보다 모의실험 결과의 신뢰도가 저하된다. 실제의 금형 개발을 위하여는 제품에 따라 다르지만 대개 5~10개의 각 단면에 대하여 그림 2와 같은 모의실험을 여러번 반복 수행하여야 하므로 하나의 단면형상에 대한 모의실험을 5~10분 이내에 수행할 수 있어야 한다. 이를 위하여는 유한요소 해석용 알고리즘의 효율적 구성도 필요하지만 근본적으로 컴퓨터의 연산속도, 주기억용량 그리고 이러한 제반 성능에 비한 컴퓨터의 가격등이 현실적으로 문제가 된다. 최근 대단히 빠른 컴퓨터의 발전속도로 보아 이러한 문제들이

조만간 해결될 것으로 생각된다.

#### 4. 맺음말

컴퓨터의 대단히 빠른 발전속도에 힘입어 공업용 관재의 프레스 성형을 위한 금형의 설계에 유한요소법을 응용하는 것이 현실적으로 가능해지고 있다. 유한요소 해석 결과의 신뢰도와 수행속도의 향상을 위하여 위에서 언급한 기술적 문제들에 대한 연구와 개발이 해외에서는 물론, 국내에서도 활발히 진행되고 있다. 비교적 가까운 시일내에 관재성형용 금형설계에 유한요소법이 본격적으로 활용될 수 있으리라고 생각된다. 끝으로 본 글의 (1)절 (3차원 자유곡면의 효율적 처리)과 (3)절 (유한요소의 짜그리짐을 보상하기 위한 요소망 재구성법의 개발)의 작성에 필자와의 유익한 토론을 통하여 협조해 주신 한국기계연구소의 고병천 박사, 채수원 박사께 감사드린다.

#### 참 고 문 헌

- (1) 戸田宗敬, 1982, “프레스 成形的 CAE” 塑性과 加工, 일본소성가공학회지, 제 30권, 제 337호, pp. 212~219.
- (2) 福原新一郎, 田村邦典, 1982, “自動車用 프레스 部品加工에 있어서 CAE의 展開”, 塑性과 加工, 일본소성가공학회지, 제 30권,

- 제 337호, pp. 200~205.
- (3) 坂本達治, 氏原新, 古林忠, 1982, “自動車用 프레스의 成形性豫測과 드로비이드의 役割”, 塑性과 加工, 일본소성가공학회지, 제 30권, 제 337호, pp. 206~211.
- (4) Arlinghaus, F.J., Frey, W.H. and Stoughton, T.B., 1985, “Finite element modeling of a stretch-formed part”, Computer Modeling of Sheet Metal Forming Process: Theory, Verification and Application, Proceedings of a Symposium Held at the 12th Automotive Materials Symposium, Ann Arbor, Michigan, USA, April 29~30, pp. 51~64.
- (5) Frey, W. and Wenner, M., 1987, “Development and applications of a one-dimensional finite element code for sheet metal forming analysis”, Interdisciplinary Issues in Materials Boston, Massachusetts, USA, December 13~18, pp. 307~319.
- (6) 심현보, 양동열, 정완진, 1989, “원형컵 딥드로잉의 탄소성 유한요소 해석” 대한기계학회 추계학술대회 초록집, pp. 279~282.
- (7) 유동진, 이정우, 전기찬, 1989, “차체판넬 프레스성형 공정의 평면해석” 대한기계학회 추계학술대회 초록집, pp. 275~278.
- (8) 채수원, 1989, “유한요소해석과 CAD/CAM” 대한기계학회지, 제29권, 제3호, pp. 279~293.

