

박판금속 성형공정 해석시스템 개발

정완진* · 조진우**

(1998년 7월 1일 접수)

Development of Analysis System for Sheet Metal Forming

Wan Jin Chung and Jin Woo Cho

Abstract

An analysis system for sheet metal forming(SAIT_STAMP) has been developed to improve the design and tryout process by predicting the deformation behavior more precisely. This analysis system consists of forming analysis, springback analysis and post processor modules. The more accurate prediction of stress history can be achieved due to the improved contact algorithm. Continuous simulation of sequential processes can be carried out conveniently without interruption by the improved data management of the developed system. The error of data transfer between forming analysis and springback analysis is minimized using the proper shell element. Several benchmark test results and practical results are presented to show the effectiveness and reliability of this program.

Key Words : Sheet Metal Forming, Finite Element Method, Springback, Stress Relaxation

1. 서 론

최근에 3차원 박판금속의 성형해석시스템이 실현가능케 된 것은 무엇보다도 박판금속 성형공정 해석을 효과적으로 수행할 수 있는 유한요소법의 개발에 따른 것이다. 동적외연적 유한요소법(dynamic explicit FEM)은 수렴성의 문제 없이 해를 얻을 수 있고 요소수가 증가해도 계산시간이나 기억장치 사용량이 급속히 증가하지 않아서 복잡한 형상을 가진 공정해석도 수행가능하다. 그러나 박판금속성형공정은 준정적 과정으로서 외연적 유한요소법은 동적문제를 중앙차분법으로 풀기 때문에 야기되는 여러 가지 문제점들이 있다. 응력완화현상⁽¹⁾은 동적에너지와 내부에너지의 교환에서 발생되며 이는 탄성복원해석에서 많은 오차를 일으킨다. 또한 성형후의 탄성복원 해석을

위해서는 정적내연적 유한요소법(static implicit FEM)이 가장 적절한 것으로 판명되었다.

현재의 성형해석프로그램의 해석수준은 성형시의 전체적인 변형분포 및 파단등은 어느 정도 효과적으로 예측할 수 있으나 성형후의 형상정밀도에 영향을 미치는 응력분포의 예측 정확성은 미흡하여 좌굴변형과 후변형해석은 정확도가 문제가 되고 있어 이를 개선하기 위한 연구가 요구되고 있다. 기존의 프로그램은 거친 접촉처리방법으로 인해 인위적인 마찰력 및 상당한 양의 응력완화현상을 발생시킨다. 응력완화는 완전히 회피하기는 불가능하지만 CAD 패치를 이용한 부드러운 접촉처리방법을 사용하면 크게 감소시킬 수 있다.⁽²⁾ 그러나 CAD 패치를 이용한 방법은 복잡한 형상의 금형인 경우 수렴성이 보장되지 않고 계산시간이 크게 증가하는 단점이 있다. 따라서 유한요소

* 서울산업대 금형설계학과

** 삼성중합기술원

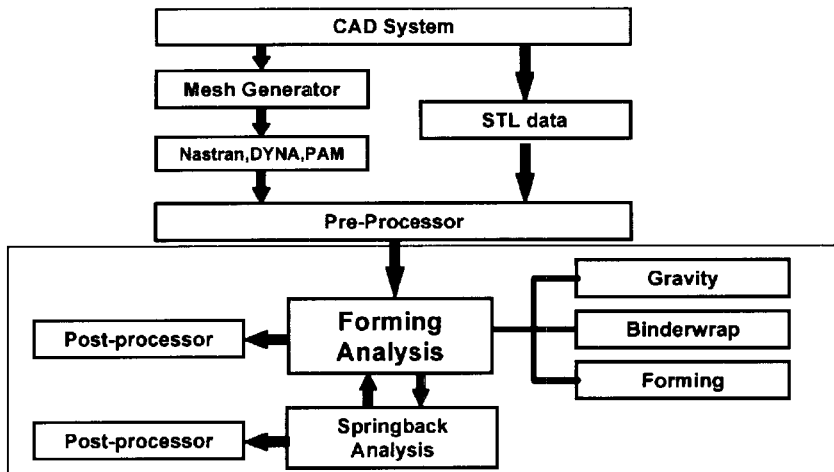


Fig. 1 Schematic diagram of SAIT_STAMP

로 금형을 나타내면서 보다 부드러운 접촉처리를 하는 방법의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 개선하여 보다 정확한 해석을 수행할 수 있는 박판금속 성형공정 해석시스템(SAIT_STAMP)을 개발하였다.(Fig.1) SAIT_STAMP는 성형해석, 성형후 해석 프로그램 및 전, 후처리로 구성되어 있다. 성형해석 프로그램은 동적외연적 유한요소법을 사용하며 성형후해석 프로그램⁹⁾은 정적내연적 유한요소법을 사용한다. 성형해석에서는 박판금속 성형공정의 특성을 고려한 금형과 소재의 접촉처리를 개발하여 응력 및 변형도에측의 정확도를 향상시켰다. 또한 박판재료의 특성을 고려하여 이방성을 가진 탄소소재로 특성을 표현할 수 있도록 하였다. 성형후해석에서는 성형해석에서 사용한 shell 요소와 호환성 있고 정확도 높은 shell 요소를 채용하였고 기하학적 비선형 및 co-rotational 기법을 채용하여 해의 수렴성을 크게 향상시켰다. 성형후해석은 성형해석의 결과를 이용한 연계해석이 가능하도록 하였다. 전처리기는 NASTRAN, PAM/STAMP, LS-DYNA같은 상용S/W에서 사용되는 격자를 SAIT_STAMP가 사용가능하게 함으로써 사용자의 편의성을 증대시켰으며 CATIA 같은 CAD 모델러에서 생성된 STL 형식의 금형면을 해석에 사용할 수 있도록 한다. 또한 금형의 초기위치 설정할 수 있는 tool positioning 기능을 가지고 있으며 모든 해석 명령의 무순서 입력과 해석인자의 free format 입력을 가능케 하고 사용자가 입력한 해석인자들을 검토하여 올바른 해석이 될 수 있도록 체크하는 기능을

가진다.

본 논문에서는 SAIT_STAMP의 신뢰성을 검증하기 위하여 공개된 benchmark test를 실시하고 타 S/W와 비교검토하였으며 실제 현장에서 발생하는 문제의 수행을 통하여 기능을 평가하였다.

2. 성형해석S/W

2.1 프로그램 설계

유한요소 및 강체(rigid body)의 운동을 외연적 시간적 분법에 의하여 나타내었다.

$$M\mathbf{a} = \mathbf{F}_{ext} - \mathbf{F}_{int}$$

여기서 M은 질량행렬(mass matrix), a는 가속도 벡터(acceleration vector), F는 힘 벡터(force vector)를 나타내며 아래첨자 ext는 외력, int는 내력을 나타낸다.

SAIT_STAMP은 주로 C로 작성되었으며 몇 개의 말단 함수는 Fortran77 로 작성되었다. C로 작성하였으므로 프로그램의 유지보수가 기존의 외연적 유한요소 프로그램 보다 매우 쉬우며 최근의 CPU특성을 이용한 최적화를 수행하여 해석속도를 향상시켰다.

기존의 상용S/W는 박판금속과 금형 데이터를 절점 및 요소로 나타내고 재료의 종류로써 구분하였는 데 본 프로그램에서는 독립된 객체(object)로 취급하여 구별이 용이하게 하였다.

따라서 SAIT_STAMP은 다단계 성형해석을 자연스럽게

게 하나의 입력데이터에서 표현할 수 있으며 전체 공정 중 하나의 공정에서 사용하는 금형에 해당하는 기억용량만을 할당하여 사용하므로 작은 기억용량으로도 다단계성형을 재수행(restart)없이 해석할 수 있다. 금형에 존재하는 드로우 비드는 그에 상당(equivalent)한 힘을 소재와 금형에 가할 수 있는 비드모델로써 고려할 수 있게 하였으며 다단계 성형시 재료의 제거도 고려할 수 있다. 또한 성형 해석후 탄성복원해석 프로그램으로 연계하여 탄성복원해석을 수행할 수도 있다. 성형해석후 트리밍(trimming)을 수행하고 탄성복원해석을 수행하는 것도 가능하다. 또한 적응요소세분화기법(adaptive refinement scheme)을 활용하여 계산의 효율성을 기할 수도 있다.

2.2 Shell 요소

박판금속성형해석시 박판금속은 shell요소로 근사된다. 따라서 적합한 shell요소가 필요한데 본 프로그램에서는 1984년에 Belytschko 와 Tsay⁽⁴⁾가 개발한 1점적분을 사용하는 4-node BT shell요소를 채용하였다. 외연적유한요소법에서는 요소의 내력계산시간이 전체계산시간의 대부분을 차지하므로 계산속도가 빠른 이 요소가 자동차 충돌해석이나 박판성형해석에 현재 가장 널리 사용되고 있다. 본 프로그램에서 사용한 shell요소는 변형률이 co-rotational좌표계에서 정의되므로 한 시간증분(time step)에서 변형이 과도하게 크지 않는 한 대회전에 의한 기하학적 비선형은 자연적으로 고려된다. 또한 응력적분시 co-rotational좌표계에서는 응력변형률이 objective하므로 응력적분시 용이하게 objectivity를 유지할 수 있다.

2.3 탄소성 재료 모델링

박판금속은 압연공정에 의해 제작되기 때문에 이방성을 가지게 되므로 이방성을 고려한 항복조건식을 사용하여야 한다. 따라서 이방성 탄소성재료를 묘사하는 항복조건에 따라 주어진 변형에 따른 응력을 계산하는 응력적분법이 필요하다. SAIT_STAMP는 이방성 탄성재료에 대하여 평면응력조건을 적용하여 가공경화를 고려하면서 응력을 계산할 수 있다. 응력적분법으로는 계산방법이 간단하고 오차가 적은 것으로 알려진 radial return법에 평면응력조건을 적용한 Simo⁽⁵⁾이 제안한 closest point projection return mapping법을 사용하였다. 기존의 외연적 유한요소법은 반복법에 의하여 근사적으로 평면응력을 만족하므로 해석결과가 부정확해지는 단점이 있었다.

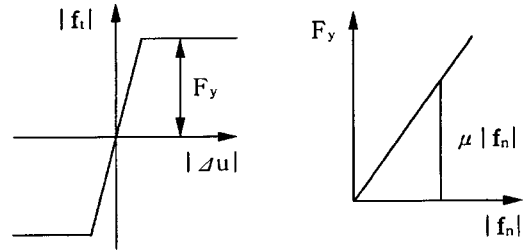


Fig. 2 non-classical Coulomb's Law

2.4 접촉처리 모델

박판금속성형해석시 금형은 박판금속에 비해 변형이 매우 작으므로 강체로 나타내어 박판금속의 접촉처리를 수행하는 것이 편리하다. 따라서 접촉처리방법은 강체-변형체 접촉처리가 된다. 접촉처리 시간을 최소화하고 3차원적인 형상을 잘 묘사하기 위하여 삼각형patch를 사용하여 금형형상을 표현하도록 하였다.

접촉탐색시간을 줄이기 위하여 HITA접촉탐색방법을 활용하여 자세한 접촉탐색 이전에 요소를 포함하는 근사적인 접촉탐색영역을 사용하여 검색대상을 줄여 주었다. 자세한 접촉탐색시는 독자적인 알고리즘을 채용하여 정확성을 개선하여 성형해석시 응력계산의 정확도를 크게 개선하였다. 접촉처리시 계속해서 변화하는 재료의 윗면과 아랫면의 금형과의 접촉을 고려함으로써 성형중의 두께변화를 고려하였다.

접촉력 계산 및 부여는 보편적으로 널리 쓰이는 penalty법을 채택하였다.⁽⁶⁾ 수직접촉력의 계산은 아래 식을 이용하여 수행되는데 박판금속의 금형면에 대한 침투깊이(e)에 벌칙상수(k)를 곱하여 계산한다. 절점이 접촉후에 안정화되도록 사용하는 critical damping(C_{cr})의 계산은 1자유도계 spring-mass system에서 유도된다. 위 사항을 고려한 수직접촉력(F_n)은 다음과 같이 계산된다.

$$F_n = (ke - C_{cr}\dot{e})n$$

SAIT_STAMP에서 구현된 friction model은 stick-slip현상을 고려한 non-classical Coulomb friction Law로써 return mapping 알고리즘을 써서 구현하였다.⁽⁶⁾

2.5 드로우 비드 모델

재료의 흐름을 제어하기 위해 사용되는 드로우 비드는 변형에 큰 영향을 미친다. SAIT_STAMP은 Fig.3과 같

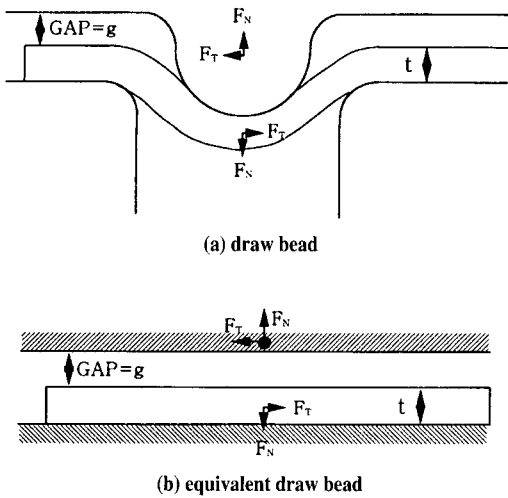


Fig. 3 Draw bead model

이 드로우비드의 특성을 단함량 g 에 따른 힘의 변화로 나타내는 상당힘을 소재와 금형에 부여한다. 드로우 비드에 의한 수직력(F_N) 및 수평력(F_T)의 변화가 함께 고려된다. 드로우 비드의 형상은 2차원 평면상에서 선형요소로 근사하여 입력하게끔 되어 있고 해석에서는 비드 모델을 3차원 금형면에 투영(projection)시켜 사용한다.⁽⁷⁾

2.6 적응요소 세분화

성형공정에서 국소적으로 작은 금형형상에 의하여 소재가 변형하는 것을 나타내기 위하여 그 부분에서 작은 요소를 사용해야 한다. 그러나 소재의 어느 부분이 접촉하게

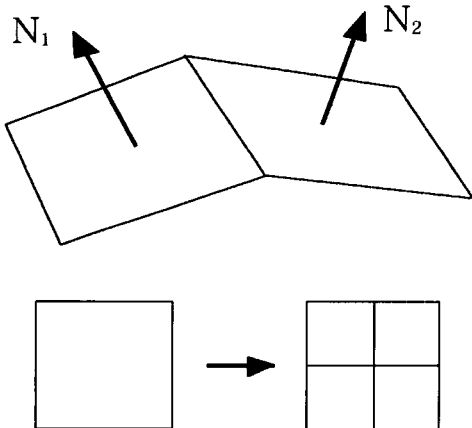


Fig. 4 Adaptive refinement scheme

되는 지 사용자가 사전에 판단하기는 어렵다. 또한 자중치 짐해석이나 binder wrap해석의 경우 큰 요소를 사용하고 성형해석에서 작은 요소를 사용하는 것이 해석시간상 매우 유리하다. 이러한 경우에 적응요소세분화기법을 사용하면 매우 편리하고 경제적이다. 다만 해석결과는 처음부터 충분히 작은 요소를 사용한 경우에 비해 오차가 발생할 가능성이 있으므로 주의해서 판별해야 한다. 현재 SAIT_STAMP에서는 다단계 적응요소세분화가 가능하며 Fig.4와 같이 두 요소가 이루는 각도가 일정한 값 이상이 되면 각 요소를 4개의 부요소로 분할하는 방법을 사용하고 있다.⁽⁸⁾

3. 후처리기(post-processor)

SAIT_STAMP를 이용한 성형 및 성형후 해석결과를 시각적으로 확인할 수 있도록 후처리기를 개발하였다. 개발된 후처리기는 window 95/NT 환경의 PC에서 수행되며 프로그램의 시각적 바탕이 되는 window의 기본 골격은 MicroSoft의 Visual C++로 작성하였고 3차원 형상 구현을 위한 graphic 개발환경으로서 Open Inventor를 사용하였다. Fig.5는 개발된 후처리기가 오일팬 성형해석의 결과를 보여주는 그림이다.

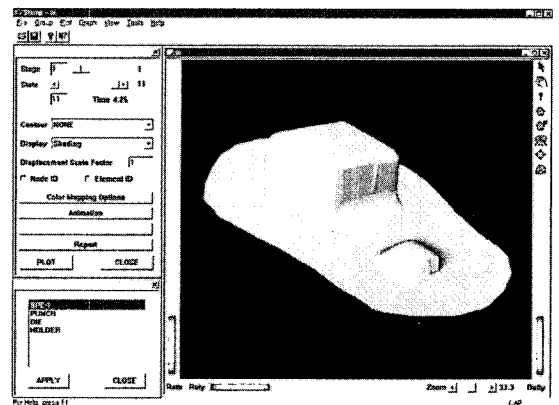


Fig. 5 Post-processor

4. Benchmark test에 의한 검증

Benchmark test의 해석은 실제 결과가 잘 검증되어 있으므로 프로그램의 정확성을 검증하는 데 적합하다. 다음 세 가지 benchmark 문제는 널리 공인된 예제들로

S/W간의 정확성 비교에 매우 적합하다.

4.1 NUMISHEET'93 2D draw bending

개발된 프로그램을 이용한 해석결과와 정확성을 검증하고 성형해석과 성형후해석의 연계해석 기능을 확인하기 위해 NUMISHEET'93⁽⁹⁾의 benchmark인 U형 draw bending 문제를 해석하였다. Fig.6은 draw bending 문제의 기하학적 형상을 보여준다.

본 해석에서는 고강력강(high tensile strength steel)을 19.6KN의 홀딩력으로 성형하는 경우의 해석을 수행하였다. 자세한 재료 물성치는 mattiasson⁽¹⁰⁾의 논문에서 기술되어 있다. 본 문제는 형상이 간단하여 성형도중 발생하는 응력을 계산과정없이 예측할 수 있고 큰 탄성복원량을 유발하기 때문에 성형해석과 성형후해석의 정확성을 검증하기 적합하다.

탄성복원해석은 성형해석의 결과로 얻어지는 소재내의 응력에 기초하여 수행되기 때문에 정확한 탄성복원량을 해석하기 위해서는 성형해석시에 정확한 응력을 얻어내야

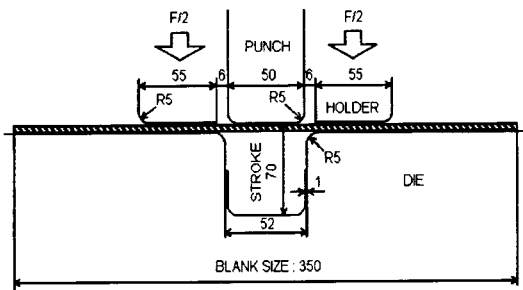


Fig. 6 NUMISHEET'93 draw bending benchmark problem

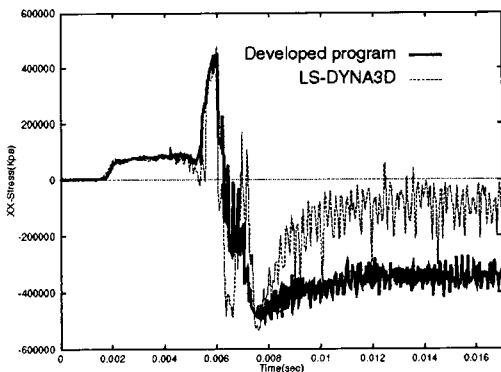


Fig. 7 Stress histories in a point of the sheet strip

한다. 실제로 NUMISHEET'93에 제출된 본 문제의 탄성복원해석결과들은 실험에 의한 것보다 변형량이 적은 것으로 나타났는데, 그 이유는 응력완화(stress relaxation)라고 하는 현상에 기인한 것이며 접촉처리와 깊은 관련이 있다고 Mattiasson⁽¹⁰⁾이 기술한 바 있다. 그러므로 본 검증에서는 예상되는 응력과 해석을 통하여 계산된 응력을 비교하여 정확성을 평가하고자 한다.

Fig.7 에는 상용 S/W의 하나로 정확성을 인정받고 있는 LS-DYNA3D⁽¹¹⁾, 그리고 개발된 SAIT_STAMP에 의한 응력결과가 비교되어 있다. 이 응력들은 성형전 중심에서 40 mm 떨어진 요소의 두께방향으로의 5개 적분점중 홀더에 가장 가까운 적분점에서 관찰된 응력이며 동일한 유한요소 모델과 해석인자를 사용하였을 때의 결과를 비교하였다.

성형도중 관찰점에 발생할 응력을 결과에 큰 영향을 미치지 않는 가정하에서 이론적으로 추론해 볼 수 있는데⁽¹²⁾, 펀치가 진행함에 따라 관찰점은 다이의 수평부분을 따라 움직이면서 금형과의 마찰에 의해 약간의 인장상태가 되며 펀치가 더 진행하면 다이의 곡선부분을 따라 재료가 벤딩되면서 인장소성을 겪게 되고 수직벽부분으로 빠져나오면서 압축응력을 받으면서 다시 소성상태로 들어가게 된다. 그 후 수직벽부분을 따라 움직이는 동안에는 더 이상의 응력변화를 보이지 않고 관찰점의 응력은 발생된 크기의 압축응력을 그대로 유지해야 한다. 그러나 LS-DYNA3D의 경우 압축응력은 응력완화현상이 발생하여 다시 커지면서 부정확한 결과를 초래하게 되는데 반하여 본 프로그램의 결과는 다소 응력완화가 발생하지만 그 양이 훨씬 적은 것을 볼 수 있다.

위의 두가지 응력결과를 이용하여 LS-NIKE3D와 개발된 성형후 해석프로그램으로 탄성복원해석을 실시한 결과 Fig.8의 결과를 얻었다. LS-DYNA3D의 응력결과는 실제보다 낮은 모멘트를 유발시키기 때문에 탄성복원량이

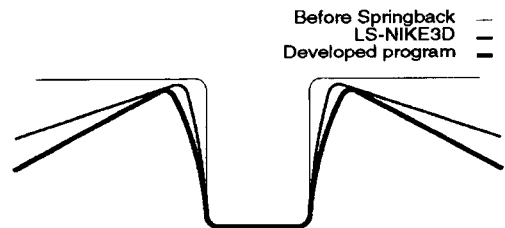


Fig. 8 Deformed shapes from springback analysis of u-bending

과소평가됨을 볼 수 있으며 상대적으로 본 프로그램이 더 정확한 응력결과를 예측함으로써 탄성복원해석결과가 정확해진 것을 알 수 있다.

4.2 NUMISHEET'96 S-Rail 문제

대용량의 문제를 테스트해보기 위해 '96NUMISHEET⁽¹²⁾에 벤치마킹 문제로 출제되어 시험되었던 S-rail 문제를 선정하였다(Fig.9). 사용된 요소의 크기는 약 2.7 mm이며 6000개의 요소가 사용되었다. 탄성복원 형상결과는 LS-Nike3D와 비교하여 비슷하였다. Fig.10는 S-rail상의 한 단면에서의 탄성복원 공정 전·후의 결과를 실험데이터와 비교하여 보여주고 있다. 굵은 선이 탄성복원해석 결과인데 실험데이터와 비교적 잘 일치하는 것을 보여준다.

4.3 해석시간 비교

앞의 두가지 benchmark 문제에 대하여 모든 해석조건을 동일하게 하여 LS-DYNA와 해석시간을 비교하였다.

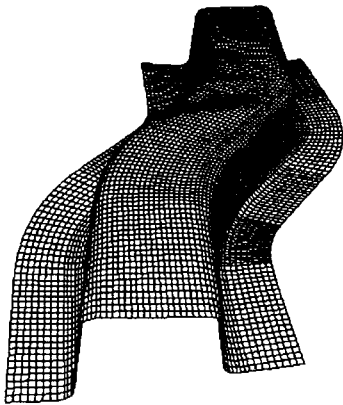


Fig. 9 Deformed shape of s-rail after springback

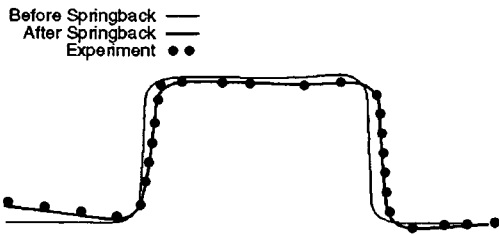


Fig. 10 Deformed profile of a section after springback

Table 1 Comparison of CPU time between SAIT_STAMP and LS-DYNA(unit:sec)

	LS-DYNA	SAIT_STAMP
2D Draw Bending	458	172
S-rail	12462	4265

두 프로그램 모두 HP-exemplar s-class 상에서 수행되었다. 해석모델은 동일하며 접촉처리 방법으로는 SAIT_STAMP, LS_DYNA 모두 node-to-surface 접촉처리방법을 사용하였다. 두 가지 문제에서 모두 BT shell을 사용하였고 요소의 두께 방향에 따른 적분점은 5개이며 평면방향으로는 1개의 적분점을 사용하였다. Table 1에 나타난 바와 같이 SAIT_STAMP의 CPU time이 두 가지 문제 모두 LS-DYNA가 사용한 CPU time의 40% 이하로서 상대적으로 빠른 계산속도를 보이고 있다.

이와 같이 SAIT_STAMP가 빠른 계산속도를 보이는 이유는 앞서 기술한 바와 같이 박판성형 전용 접촉탐색법을 사용하여 접촉처리 시간을 줄였으며 빠른 응력적분법과 최적화된 내력계산 알고리즘을 사용하기 때문이다.

5. 실제 문제적용에 의한 검증

실제 문제풀이는 정확한 비교 데이터를 구하기가 쉽지 않아 정확성에 대한 검토에는 적합하지 않으나 Benchmark Test에 의한 검증에서 파악할 수 없었던 기능에 대하여 검증하고 사용자의 요구를 파악하기 위해서 실시하였다.

5.1 Motor Yoke의 다단계 성형해석

자동차 와이퍼 구동용 motor case인 yoke는 대표적인 다단계 드로잉 공정을 거치는 부품으로서 본 프로그램의 다단계공정 해석기능을 확인하기 좋은 예제이다. Yoke는 축대칭이므로 전체의 1/4 모델을 사용하였으며 초기 블랭크 두께 2 mm에서 3단계의 드로잉 공정을 거친 뒤 머리부의 성형을 하는 총 4단계 공정에 대한 해석이 실시되었다. Fig.11은 yoke의 각 공정별 성형해석결과를 그린 것이다. 연속적으로 성형되는 모습을 보여 주며 원활하게 해석이 수행되는 것을 알 수 있다. 이 경우에 4번째 드로잉 공정에서 적응요소세분법을 적용하여 작은 형상을 잘 묘사할 수 있었다.

개발된 성형해석 프로그램은 각 공정별 해석 초기단계

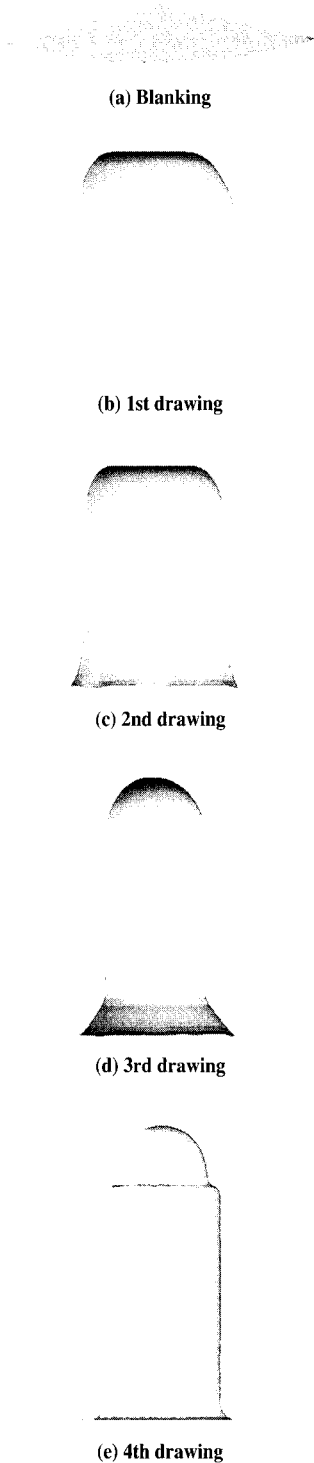


Fig. 11 Deformed shapes from multi-stage forming analysis of yoke

에서 금형에 대한 정보만 따로 읽어들이면서 연속해석이 가능하기 때문에 각 공정마다 restart를 해야하는 기존의 상용 프로그램의 번거로움을 피할 수 있다. 또한 해당공정의 금형 위치를 사용자가 원하는 대로 움직일 수 있게 하는 offset 기능을 부여하여 pre-processor를 따로 거치지 않고도 모델의 위치 수정이 가능하게 하였다.

5.2 Front door outer panel의 성형해석

Front door outer panel 성형공정을 해석하였다. 해석에 사용된 모델은 블랭크의 4절점 요소가 24,733개이고 금형의 삼각형 patch수가 50,184개이어서 상당히 큰 모델이다. 이 문제는 개발된 프로그램이 대형모델을 문제없이 해석할 수 있는가를 판별하기 위해서 좋은 예제이다. Binder Wrap해석후 성형해석을 연속해서 수행하였다.

Fig.12는 비드가 사용되지 않은 경우 성형해석이 끝난 형상을 Shading처리한 것이며 Fig.13은 두께분포를 나타낸 것이다. 두께분포를 살펴보면 국부적으로 두께가 심

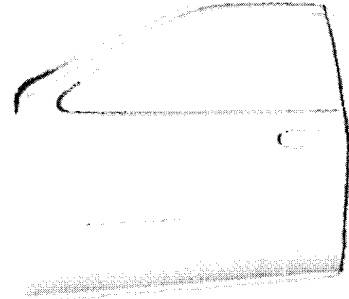


Fig. 12 Deformed shape of front door outer panel (without bead)

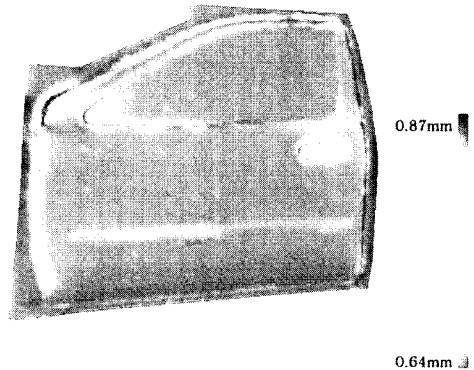


Fig. 13 Thickness distribution of Front door outer panel after forming

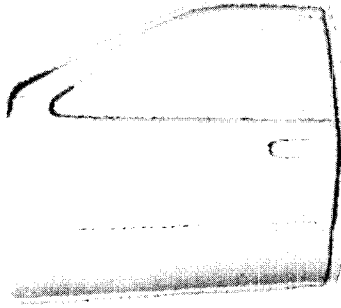


Fig. 14 Deformed shape of front door outer panel(with bead)

하게 변하는 곳이 없이 접촉처리가 잘 이루어졌음을 확인할 수 있었다.

Fig.14은 Fig.12에서 비드를 사용하지 않아서 재료의 유입이 크고 도어에 변형률이 균등하지 않고 높고 낮은 부분이 발생하여 형상오차가 커지는 것을 개선하기 위하여 비드를 사용하여 해석한 변형결과이다. Fig.12에서 비드를 사용하지 않았을 때에 비해서 Fig.14에서 비드를 사용한 경우가 비드의 구속력으로 인해 재료의 유입이 적은 것을 플랜지 하단부의 변형으로 알 수 있다. 변형률도 내부에서 충분히 커지면서 균등해져서 성형후 스프링백이 감소하는 것을 예측할 수 있다.

이 결과로부터 개발된 드로우 비드 모델이 잘 구현되었음을 확인할 수 있었다.

5.3 Fender의 trimming test

Trimming 기능을 확인하기 위해 NUMISHEET'93 benchmark 문제인 fender 성형해석 후 trimming을 실시하였다. Fig. 15는 성형이 끝난 후의 변형형상이며 Fig. 16은 trimming 후의 형상이다. SAIT_STAMP는 2차원 평면상에 폐곡선으로 이루어진 trim line을 정의하고 trim 방향을 정의하면 폐곡선의 내부 또는 외부를 trimming할 수 있다. 따라서 trimming 공정뿐만 아니라 piercing 공정까지 해석할 수 있다.

6. 결론

성형 및 성형후 해석 프로그램 및 전,후처리 시스템으로 구성된 박판금속 성형해석시스템(SAIT_STAMP)을 개발하였다.

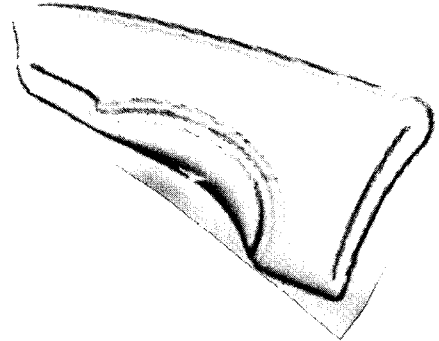


Fig. 15 Deformed shape of fender after forming

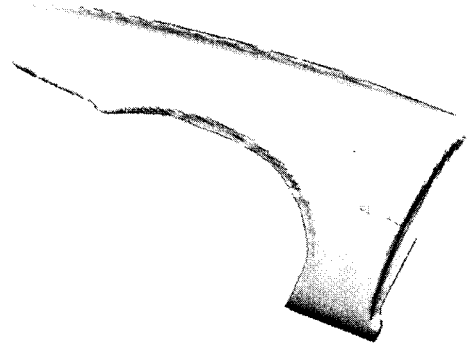


Fig. 16 Shape of fender after trimming

성형해석 프로그램은 이방성을 지닌 탄소성박판금속재료에 대해 금형과 재료의 접촉 및 마찰을 고려한 새로운 접촉처리방법을 개발하여 기존의 해석S/W에 비하여 해석속도 개선 및 해석정확도 향상이 이루어졌다. 성형후 해석 프로그램은 기하학적 비선형을 고려한 수렴성 높은 프로그램으로서 성형해석후 계속하여 탄성복원해석을 수행할 수 있다. 개발된 프로그램은 드로우 비드등의 다양한 경계조건을 모사할 수 있으며 입력데이터에서 해석과정을 실제공정과 매우 유사하게 기술할 수 있어 사용이 편리하다. 특히 연속성형공정을 쉽게 해석할 수 있다. 여러 가지 잘 알려진 Benchmark test를 수행하여 개발된 프로그램의 우수성을 보였다. 또한 실제 검증 예제를 수행하여 개발된 프로그램의 신뢰성을 보였다.

앞으로 개발된 SAIT_STAMP에 의한 가상성형을 활용하여 금형제작후 시험작업에서 실패 가능성을 크게 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- (1) W.J. Chung et al, 1998, "On the Dynamic Effect of Dynamic Explicit FEM in Sheet Metal Forming Analysis", Eng. Computations, Vol. 15, No. 6, pp.750~776.
- (2) Z. M. Zhong, 1993, "Finite Element Procedures for Contact-Impact Problems", Oxford Science Publications.
- (3) 김충식, 정완진, 1998, "박판성형을 위한 탄성복원 해석의 수치적 묘사", 제 2회 박판성형 심포지움 논문, 한국소성가공학회.
- (4) Belytschko and Tsay, 1983, Int. J. Numer. Methods Eng, vol.19, pp.405~419.
- (5) J.C.Simo and R.L.Taylor, 1983, "Consistent tangent operators for rate-independent elastoplasticity", Int. J. Numer. Methods Eng, Vol.19, pp.405~419.
- (6) K.Schweizerhof and J.O. Hallquist, 1991, "Improving standard shell elements, friction models and contact algorithms for the efficient solution of sheet metal forming problems with LS-DYNA3D", FE simulations of 3D sheet metal forming processes in automotive industry, pp.405~439.
- (7) Caller B.D., P.T. Vreede, M.F.M. Louwes, J. Huetink, 1994, "Modelling Drawbeads with Finite Elements and Verification", J. Mat. Proc. Tech., Vol 45, pp.63~68.
- (8) F. Aberlenc et al., 1995, "OPTRIS: The complete simulation of the sheet metal forming", Proceedings of NUMIFORM'95, pp.651~656.
- (9) proceedings of NUMISHEET'93, 1993, pp.398~405.
- (10) K.Mattiasson, A.Strange, P.Thilderkvist and A.Samuelsson, 1995, "Simulation of Springback in Sheet Metal Forming", NUMIFORM'95, pp.115~124.
- (11) LS-Dyna3D User's Guide, 1995., LSTC.
- (12) proceedings of NUMISHEET'96, 1996, pp.444~464.