

스탬핑공정에서 OneStep 유한요소법에 관한 연구

정 동 원* · 황 재 신**

A Study of OneStep Finite element method in Stamping Processes

Dong-Won Jung* · Jae-Sin Hwang**

ABSTRACT

Thin plate correction of forming process that it is nowadays smile change of simple contact surface as it becomes possible that forecast dictionary numerically exactly to analyze comparative big comp displacement real industry spot problems between complicated and abnormal curved line shapes and thin plate and die more reliable and need many efforts yet economical analysis method is required and develops this efficient algorithm. This research analyzes correction of forming and examined possibility and validity of spot application using OneStep Finite Element Method. Its application is being increased especially in the automotive industrial area for the cost reduction, weight saving, and improvement of strength.

Key Words : Auto-body panel stamping, OneStep Finite Element Method

1. 서 론

오늘날 박판 성형 공정해석에 컴퓨터를 이용한 해석 프로그램을 사용하는 것은 그리 낯선 일은 아니다. 1970년대 이후로, 컴퓨터의 성능과 수치해석적인 기법들이 빠르게 발전되기 시작하면서 컴퓨터를 이용한 많은 해석 프로그램들이 개발되었고, 직접적으로 산업에 이용되기 시작하였다. 이러한 응용 프로그램

들은 제품의 질 향상과 원가절감 그리고 새로운 제품의 빠른 도입을 가능케 하였다. 하지만 아무리 성형 공정을 예측한다 하지만, 박판 공정은 복잡한 비선형 문제이기 때문에, 공정을 완전히 예측하기에는 무리가 있었다. 전통적인 층분 유한요소해석(Incremental FEA)이 잠재적인 성형문제들을 확인하는데 도움이 되긴 했지만, 이것 역시 계산시간이 오래 걸린다는 단점 때문에 짧은 lead을 갖는 설계공정에 적용하기에는 적합하지 못했다.[1-5]

이와 같은 문제점을 개선하고자 개발되기 시작한 것이 소성(Plasticity) 변형이론을 사용한 One-step 유한요소해석(One-step FEA)이다.

One-step 유한요소해석이란, 초기 평판 블랭크에서 최종 형상까지 어떠한 중간 과정을 고려하지 않고 직접 변형된다고 가정하여 처리한 것이다. 즉, 중간 과

* 제주대학교 기계·에너지·생산공학부

Faculty of Mechanical, Energy and Production Eng., Cheju Nat'l Univ., Res. Inst. of Adv. Tech.

** 제주대학교 대학원

Graduate School, Cheju Nat'l Univ.

정을 무시했기 때문에 정확한 예측을 한다는 점에서는 다소 어려운 점이 있지만 일반적으로 사용되고 있는 중분형 유한요소 프로그램과는 달리, One-step 유한요소법은 제품 설계단계에서 필요로 하는 정보를 얻기 위해 사용되고 있다. One-step 유한요소법에 대한 연구로는 초기에 E. Chul[6], S. A. Majlessi[7] 등이 형상 사상 기술을 이용하여 선대칭 덩드로잉 과정을 해석하기 위해 이 방법을 이용하였다. 그리고 최근에는 J. L. Batoz[8], S. D. Liu[9-10], K. Chung [11]등에 의해서 여러 가지 성형조건을 고려할 수 있고, 비선형 변형에너지, 즉 bending - unbending과 드로우비드를 반영할 수 있는 좀 더 일반적인 One-step 접근이 제시되었으면, 이들의 연구결과들은 현재 산업 현장에서 조금씩 응용되어 지고 있다.

본 연구에서는 One-step 유한요소법에 대한 기본 원리와 수행과정에 대해서 설명하고 상용 프로그램인 Autoform을 사용하여 차체판넬을 해석해 봄으로써 실제 현장에서의 실용성과 가능성을 알아보고자 한다.

II. 본 론

2.1. 블랭크 선정을 위한 초기 추측방법

One-step 유한요소방법을 이용해서 초기 블랭크의 형상을 계산하기 위해서는 먼저, 블랭크의 형상에 관한 초기 추정값이 필요하다. 그것은 초기 블랭크의 형상이 최종형상과 큰 차이를 가지고 있고 역해석이 비선형 해석이기 때문이다. 초기 추정값을 구하는 방법은 다양한 방법이 가능하며 주어진 문제의 형태에 따라 적절한 방법을 선택하여 구하면 된다. 또한, 주어진 형상에 따라 여러 가지 경우를 조합하여 추정값을 구할 수도 있다.

먼저, 가장 쉽게 구할 수 있는 연직투사법(z-projection)을 이용할 수 있다. 이 방법은 벽면이 거의 수직인 경우는 형상 위에 있는 절점들이 겹치게 되므로 전체적인 요소의 크기와 형태가 차이가 많이 생기게 된다. 따라서 Fig. 1과 같이 벽면이 수직하지 않고 경사가 완만하며, 곡면이 많은 경우에 주로 이용된다.

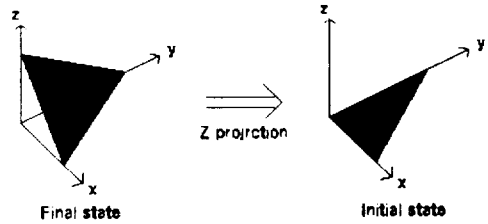


Fig. 1. Transformation of element from the final state to the initial state

다른 방법으로는 각 절점을 그대로 평면으로 펼쳐서 초기 추측값을 구하는 기하학적 사상법이 있다. 이 방법은 최종 형상의 면적을 동일하게 평면으로 펼치는 것으로 벽면이 수직이든 아니든 상관이 없다.

2.2. 유한요소 역해석 수식화

역해석은 초기 형상에서 최종 형상으로 소성변형이 이루어지는 상태에 대한 해석으로, 최종 형상이 되기 위한 초기 형상을 계산한다. 먼저, 수식화에는 변형률식을 단지 좌표의 함수로 쉽게 표현할 수 있는 삼각형 박막 요소를 택한다. Fig. 2에서 초기상태의 삼각형 요소는 G_{2i}, G_{3i} 의 벡터로 표현되며 최종상태의 삼각형 요소는 g_{2i}, g_{3i} 의 벡터로 표현 할 수 있다. 여기서 첨자 2, 3은 삼각형 요소의 변을 의미하며, 첨자 i 는 좌표계의 성분을 나타낸다. 두 쌍의 벡터 ($G_{2i}, G_{3i}, g_{2i}, g_{3i}$)를 이용하여 변형구배 F 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

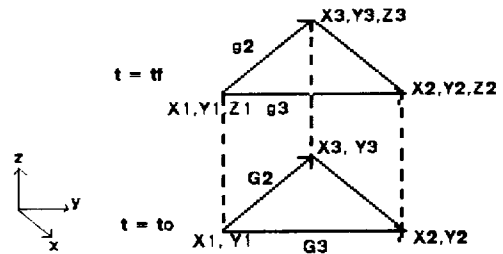


Fig. 2. Kinematics of triangular membrane element between the initial state and final state

$$F = g_i \cdot G_i^{-1}$$

$$= \frac{1}{\det} \begin{bmatrix} g_{21} & g_{31} \\ g_{22} & g_{32} \\ g_{23} & g_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} G_{32} & -G_{31} \\ -G_{22} & G_{21} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Cauchy-Green 텐서 C 를 변형구배 F 에 의해서 식 (2)와 같이 표현한다. 이로부터 주신장량 λ_1, λ_2 와 대수변형률 ϵ_i 를 유도한다.

$$[C] = [F]^T \cdot [F] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{(C_1 + C_2)}{2} + \left[\left(\frac{C_1 - C_2}{2} \right)^2 + C_3^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \\ \sqrt{\frac{(C_1 + C_2)}{2} - \left[\left(\frac{C_1 - C_2}{2} \right)^2 + C_3^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \\ \tan^{-1} \left(\frac{\lambda_1 - C_1}{C_3} \right) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[\epsilon_i, (\vec{x} \text{ or } X)] = \begin{bmatrix} \epsilon_{XX} \\ \epsilon_{XY} \\ \epsilon_{YY} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \ln \lambda_1 \cos^2 \theta + \ln \lambda_2 \sin^2 \theta \\ \ln \lambda_1 \sin^2 \theta + \ln \lambda_2 \cos^2 \theta \\ \ln \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) \sin \theta \cos \theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서, Hill의 신허복 이론을 나타내면, 식 (5)와 같다.

$$\bar{\epsilon} = D_1 [|\dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2|^{\frac{M}{M-1}} + D_2 [|\dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_2|^{\frac{M}{M-1}}]^{\frac{M-1}{M}} \quad (5)$$

$D_1 = (1+2r)^{\frac{1}{M}}$, $D_2 = (1+2r)^{-\frac{1}{M-1}}$ 이며, M 은 Hill의 신허복 이론식에서 항복면을 묘사하는 지수이다. Cauchy-Green 텐서의 주 값은 주 변형률의 양으로 나타낼 수 있기 때문에 $\dot{\epsilon}_1 = \ln \dot{\lambda}_1$, $\dot{\epsilon}_2 = \ln \dot{\lambda}_2$ 로 표현이 가능하다. 따라서 식(5)은 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$\bar{\epsilon} = D_1 [|\dot{\lambda}_1 + \dot{\lambda}_2|^{\frac{M}{M-1}} + D_2 \left| \ln \left(\frac{\dot{\lambda}_1}{\dot{\lambda}_2} \right) \right|^{\frac{M}{M-1}}]^{\frac{M-1}{M}} \quad (6)$$

이때, Chung[12]이 제안한 최소일의 경로를 이용하여 유효 변형률을 구하고, 식(5)를 대입하면,

$$\bar{\epsilon} = \int_0^{t'} \bar{\epsilon} dt$$

$$= D_1 [|\dot{\lambda}_1 + \dot{\lambda}_2|^{\frac{M}{M-1}} + D_2 \left| \ln \left(\frac{\dot{\lambda}_1}{\dot{\lambda}_2} \right) \right|^{\frac{M}{M-1}}]^{\frac{M-1}{M}} \quad (7)$$

과 같다. 여기서 얻은 유효 변형률을 이용하여 유효 응력을 정의한다.

$$\bar{\sigma} = K(\epsilon_0 + \bar{\epsilon})^n \quad (8)$$

위의 식들과 같이 정의된 유효변형률과 유효응력을 이용하여 변형된 내부 소성변형일을 계산 할 수 있다. 마지막으로, 구한 소성일의 극값을 취하여 식 (10)와 같이 초기 블랭크의 형상을 찾는다.[13]

$$W = \int_{V_0} \bar{\sigma} \cdot \bar{\epsilon} dV_0 \quad (9)$$

$$\frac{dW}{dX_i} = 0 \quad \text{for } i = 1, 2 \quad (10)$$

III. 성형해석 예

수식화 된 결과에 따라 상용프로그램인 Autoform을 사용하여 성형품의 최종형상과 주름경향을 3차원으로 나타내어 보았다. 결과들은 다음과 같다.

감소된다는 점, 그리고 성형과정 중에 일어나는 주름의 발생과 소멸 같은 중간 과정들이 무시된다는 문제점을 발견 할 수 있었다.

IV. 결론 및 토론

지금까지 재료와 형상, 성형조건에서 비선형성을 다루기 위해 많은 기술들이 개발되어 왔고, 아직도 연구가 진행 중에 있다. 그 중에서 One-step 유한요소법은 제품, 공정, 금형 설계와 생산 공정 중에 발생하는 문제조정을 위한 방법으로 널리 이용되고 있으며, 본 논문에서는 그에 대한 실제 현장에서의 실용성과 가능성에 관해서 예를 들어 설명하였다. 이로부터 다음과 같은 결과들을 확인 할 수 있었다.

1. 성형 후의 제품에 대한 제반적인 사항으로 두께와 응력, 변형률 분포 등을 가시적으로 쉽게 파악 할 수 있었다.
2. 기존의 방법들에 대비해서 최소 10배 이상의 빠른 계산속도와 정확한 해석결과를 얻을 수 있었다.
3. One-step 접근에 의한 빠른 계산시간은 trial and error를 많이 거치는 제품 설계 과정에서 매우 유용하게 적용되어질 수 있을 것이다.
4. 100% 완벽한 Auto Meshing 기능은 15분 이내에 어떠한 제품형상 이라도 완벽하게 구현함으로써 사용자는 Meshing 작업에 따른 문제점에 고려할 필요가 없으며 완벽한 CAD형상의 Mesh 변환은 더욱 더 정확한 해석결과를 제공할 수 있으며 계속해서 짧아지는 금형개발기간의 문제에서도 One-Step 유한요소법을 이용하면 문제를 해결 할 수 있을 것으로 보여진다.

후 기

이 논문은 2003년도 제주대학교발전기금 청봉학술연구기금의 지원에 의해서 연구되었음.

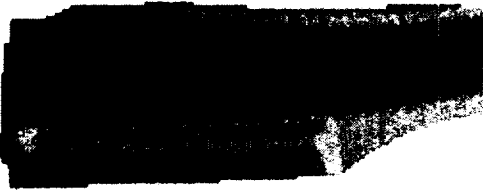


Fig. 3 Deformed shape

Fig. 3과 같이 차원을 2차원 평면으로 줄여서, 한 단계만으로 해석을 하기 때문에 중간 과정이 들어가지 않으므로 그만큼 시간을 줄 일 수 있다. 또, 비선형 방정식들을 푸는데 있어 반복 계산이 감소되기 때문에 해석시간을 매우 단축시킬 수 있다. 그리고 One-step 유한요소법은 초기 블랭크의 형상을 예측하기 때문에 펀치 성형공정 후, 가해지는 후가공(trimming)이 수월해지며, 그에 들어가는 비용과 시간을 절약할 수 있다. 또한 수식이 제품형상을 근거로 하기 때문에 제품과 공정설계 이전에 제조가능성과 재료비용을 평가해 볼 수 있다.



Fig. 4 Formability

반면에 초기형상과 최종형상만을 다루기 때문에 높은 비선형 변형경로가 존재 할 때는 정확성이 많이

참고문헌

1. M. Kawka and A. Makinoouchi, 1993 "Shell element formulation of sheet stamping", Proc. NUMISHEET'93, pp.91 -107.
2. J. L. Duncan, R. Sowerby & E. Chu, 1985 "The development of sheet metal modelling", in "Computer Modelling of Sheet Metal Forming Process", edited by N. M. Wang & S. c. Tang, pp.1-11.
3. 정동원, 양동열, 1996 "차체 스탬핑공정을 위한 스탬핑형식의 내연적/외연적 결합 유한요소해석", 한국정밀공학회 제13권 제12호, pp.86-98.
4. 정동원, 이상재 1999 "기하학적 방법을 이용한 초기 박판형상 추정", 한국해양공학, 제13권제3(1)호, pp.12-20.
5. 정동원, 이상재 1999 "One-Step FEM을 이용한 초기 블랭크 형상 결정에 관한 연구", 한국해양공학회, 제13권 제3(1)호, pp.21-28.
6. E. Chu, 1983 "New horizons in CAD of Sheet metal stampings", Ph. D. thesis, McMaster University, .
7. S. A. Majlessi & D, Lee, 1987 "Further development of sheet metal forming analysis method", ASME J. Eng. Ind. 09 : pp330-337.
8. Y. Q. Guo, J. L. Batoz, J. M. Detraux and P. Duroux, 1990 "Finite element procedures for strain estimations of sheet metal forming parts", Intl. j. Numer. Meth. Eng., Vol. 30, pp.1385-1401.
9. S. D. Liu and A Assempoor, 1995 "Development of Fast_3D-A design-oriented one step FEM in sheet metal forming", Proc. Complas'IV, pp.1515 -1526.
10. S. D. Liu & M. Karima, 1992 "A one step finite element approach for product design of sheet metal stampings" Proc. NUMIFORM'92, pp.497-502.
11. K. Chung & O. Richmond, 1992 "Sheet forming process design based on ideal forming theory", Proc. NUMIFORM'92, pp.455-460.
12. K. Chung and O. Richmond, 1993 "A deformation theory of plasticity based on minimum work paths", Int. J. Plasticity, Vol. 9, pp.907 -920.
13. 이충호, 허훈, 1995 "박판금속 성형공정에서의 블랭크 설계 및 변형률 예측", 대한기계학회 춘계 학술 대회 논문집(I), pp.451 - 456.