

One-Step Forming을 이용한 박판성형 해석에 관한 연구

정동원* · 이상제** · 김광희***
(98년 7월 22일 접수)

Numerical Study on Sheet Metal Forming Analysis Using the One-Step Forming

D. W. Jung* · S. J. Lee** · K. H. Kim***

Key Words : One-Step Forming(단단계 성형), FEM(유한요소법), Trouble-Shooting Process
(문제조정 과정), Deformation Theory(변형이론), Upper Bound Theorem(상부 경
계 이론)

Abstract

The objective of this paper is to introduce very fast but still stable solution using finite element procedures, and it has been used in an iterative mode for product design applications. A lot of numerical techniques have been developed to deal with the material, geometric and boundary condition non-linearities occurred in the stamping process. One of them, the One-Step FEM is very efficient and useful tool for a design and trouble-shooting in various stamping processes. In this method, the material is assumed to deform directly from the initial flat blank to the final configuration without any intermediate steps. The formulation is based on the deformation theory of plasticity and the upper bound theorem. As a result of the calculations, the initial blank shape is obtained, together with the material flow, strains and thickness distribution in the part.

1. 서 론

컴퓨터를 이용한 해석 프로그램들이 실제 산업에 이용되기 시작한 때는 그리 오래되지 않았다. 1970년대 이후로, 컴퓨터의 성능과 수치해석적인 기법들이 빠르게 발전되기 시작하면서 컴퓨터를

이용한 많은 해석 프로그램들이 개발되었고, 직접적으로 산업에 이용되기 시작하였다. 이러한 응용 프로그램들은 제품의 질 향상과 원가절감 그리고 새로운 제품의 빠른 도입을 가능케 하였다.

하지만 기존의 유한요소해석 방법의 한계성 때문에 공정을 완전히 예측하기에는 무리가 있었다.

* 정희원, 제주대학교 기계공학과

** 제주대학교 대학원

*** 정희원, 부경대학교 기계·자동차공학부

전통적인 증분 유한요소해석(Incremental FEA)이 잠재적인 성형문제들을 확인하는데 도움이 되긴 했지만, 이것 역시 계산시간이 오래 걸린다는 단점 때문에 짧은 lead time을 갖는 설계공정에 적용하기에는 적합하지 못했다.^{1),2)} 다시 말하자면, 유한요소 해석에 있어서 성형가능 해석은 제품과 공정설계(product and process design) 동안에 반복적이고 상호작용적으로 수행되어지는데, 전통적인 증분 해석은 그 사용의 어려움과 계산시간의 과다로 인해서 생산단계(production stage)에서 문제조정 과정(trouble shooting process)에 그리 만족할 만한 성과를 가져다 주지 못했다.

이와같은 문제점을 개선하고자 개발되기 시작한 것이 소성(plasticity) 변형이론을 사용한 One-Step FEM이다. 간단히 말해서 One-Step FEM이란, 초기 평판 블랭크에서 최종 형상까지 어떠한 중간 과정을 고려하지 않고 직접 변형된다고 가정하여 처리한 것이다. 중간 과정을 무시했기 때문에 정확한 예측을 한다는 점에서는 다소 어려운 점이 있다. 따라서 일반적으로 사용되고 있는 증분형 FEM 프로그램과는 달리, One-Step FEM은 제품 설계단계에서 필요로 하는 정보를 얻기 위해 사용되고 있다. 초기에는 E. Chu³⁾, S. A. Majlessi⁴⁾ 등이 형상 사상기술(geometric mapping techniques)을 이용하여 선대칭 딥드로잉 과정을 해석하기 위한 One-Step FEM을 개발하였다. 그리고 최근에는 J. L. Batoz⁵⁾, S. D. Liu^{6),7)}, K. Chung⁸⁾ 등에 의해서 여러 가지 성형조건을 고려할 수 있고, 비선형 변형에너지 즉 bending-unbending과 드로우비드를 반영할 수 있는 좀더 일반적인 One-Step 접근이 제시되었다. 이들의 연구결과들은 현재 산업 현장에서 조금씩 응용되어 지고 있으며, FAST_3D⁶⁾ 와 같은 One-Step FEM을 이용한 상업용 프로그램도 이미 나와 있다.

다음절에서 One-Step FEM에 대한 기본 원리와 수행 과정에 대해서 설명하고, 상용패키지인 FAST_3D를 이용하여 몇가지 응용예들을 적용해 보고자 한다. 따라서, 이 방법을 사용하여 얻을 수 있는 장점은 무엇인지, 또한 실제 산업현장에 유용한 방법인지를 검증하여 One-Step FEM을 보다 널리 소개하고자 한다. 그리고 더 나아가서는 보

다 실제적이고, 정확한 FEM code를 개발하려는 기초 준비가 되고자 한다.

2. 블랭크 형상에 관한 초기추정

One-Step FEM을 이용해서 초기 블랭크의 형상을 계산하기 위해서는 먼저, 블랭크 형상에 관한 초기 추정값이 필요하다. 그것은 초기 블랭크의 형상이 최종 형상과 큰 차이를 가지고 있고 역해석이 비선형 해석이기 때문이다.

초기 추정값을 계산하기 위해서 선형 역사상의 방법을 도입하였다. 이 방법은 최종 형상을 평면에 탄성적으로 펼치는 것으로 형상에 구애받지 않고, 신속하게 계산할 수 있는 장점이 있다. 또한, 선형 역사상으로 계산한 형상은 역해석으로 계산한 블랭크 형상과 매우 유사하기 때문에 초기 형상을 쉽게 찾아갈 수 있다. 초기 추정값을 계산하기 위한 첫 번째 단계로, 두가지 변환을 수행하게 되는데, 하나는 최종 상태의 형상을 XY평면으로 회전시키는 변환과 - 여기서서는 각 요소의 변형은 동반하지 않는다 - XY평면으로 z축 사상을 하는 변환을 수행한다. 이 두가지 형태의 변환을 수행한 후에, Fig. 1과 같이 변형이 없는 첫 번째 변환에서 변형이 있는 두 번째 변환으로 유한요소가 변형하였다고 가정하고 이때의 초기 변형률 ϵ_0 를 각 요소마다 계산해 준다.

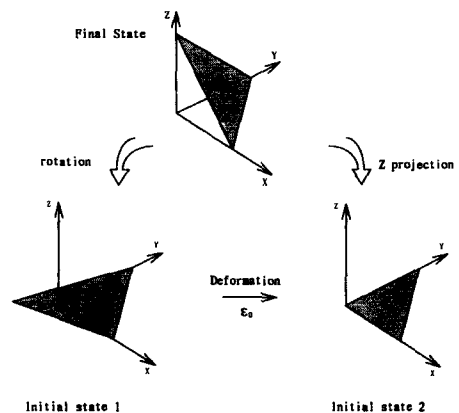


Fig. 1 Transformation of elements from the final state to the initial state

다음 단계에서는, 초기 변형률 ϵ_0 에 의한 내부 응력이 두 번째 변환으로 놓인 유한요소들에 작용한다고 가정하고, 내부 응력에 의한 탄성 회복을 아래와 같은 탄성 유한요소 해석으로 계산한다.

$$\sum_{i=1}^E \int_{V_i} [B]^T [D] [B] dV(U) = \sum_{i=1}^E \int_{V_i} [B]^T [D] [\epsilon_0] dV \quad (2.1)$$

여기서 [B]는 형상함수를 미분한 행렬이고, [D]는 응력-변형도의 관계를 나타내는 행렬이다.

식 (2.1)을 이용하여 변위를 계산하고, 두 번째 변환으로 놓인 절점들의 좌표를 갱신한다. 다시, 첫 번째 변환의 유한요소에서 좌표가 갱신된 유한요소로 변형하였다고 가정하고 초기 변형률 ϵ_0 를 각 유한요소 마다 계산한다. 다시 (2.1)식을 이용해서 변위를 계산하고 절점의 좌표를 갱신해 준다. 이렇게 반복수행을 하다가 식의 우변으로 계산되는 잔류력에 대한 허용한계가 한계치 이하로 될 때까지 수행하면, 초기 블랭크의 형상을 추정할 수가 있게 된다.

3. 역해석의 이론적 수식화

블랭크에 대한 초기 추정이 이뤄진 후에는 초기 블랭크 형상을 찾아가기 위해서 유한요소 역해석 방법을 사용하게 된다. 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 표현된다. 여기서 첨자 2, 3은 삼각형 요소의 변을 의미하며 첨자 i는 좌표계의 성분을 나타낸다. 두 쌍의 벡터 ($G_{2i}, G_{3i}, g_{2i}, g_{3i}$)를 이용하여 변형구배 F를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = g_i \cdot G_i^{-1} \quad (3.1)$$

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

Cauchy-Green 텐서 C를 변형구배 F에 의해서 식 (3.2)와 같이 표현한다. 이로부터 주신장량 λ_1, λ_2 와 (식 3.3) 대수변형률 ϵ_i 를 유도한다(식 3.4)

$$[C] = [F]^T \cdot [F] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{(C_1+C_2)}{2} + \left[\left(\frac{C_1-C_2}{2} \right)^2 + C_3^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \\ \sqrt{\frac{(C_1+C_2)}{2} - \left[\left(\frac{C_1-C_2}{2} \right)^2 + C_3^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \\ \tan^{-1} \left(\frac{\lambda_1 - C_1}{C_3} \right) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$[\epsilon_i(x \text{ or } X)] = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ln \lambda_1 \cos^2 \theta + \ln \lambda_2 \sin^2 \theta \\ \ln \lambda_1 \sin^2 \theta + \ln \lambda_2 \cos^2 \theta \\ \ln \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) \sin \theta \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

여기서, Hill의 신헌복 이론을 나타내면, 식 (3.5)와 같다.

$$\bar{\epsilon} = D_1 [|\dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2|]^{\frac{M}{M-1}} + D_2 [|\dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_2|]^{\frac{M}{M-1}}]^{\frac{M-1}{M}} \quad (3.5)$$

$$D_1 = \frac{1}{2} [2(1+r)]^{\frac{1}{2}}, \quad D_2 = (1+2r)^{-\frac{1}{M-1}} \text{ 이며,}$$

M은 Hill의 신헌복이론식에서 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 (3.5)식은 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$\bar{\epsilon} = D_1 [|\ln(\dot{\lambda}_1 \cdot \dot{\lambda}_2)|]^{\frac{M}{M-1}} + D_2 [|\ln(\frac{\dot{\lambda}_1}{\dot{\lambda}_2})|]^{\frac{M}{M-1}}]^{\frac{M-1}{M}} \quad (3.6)$$

이때, Chung⁹⁾이 제안한 최소일의 경로를 이용하여 역 유효 변형률을 구하고, (3.5)식을 대입하면,

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon} &= \int_0^{t_1} \dot{\varepsilon} dt \\ &= D_1 [|\ln(\lambda_1 \cdot \lambda_2)|^{\frac{M}{M-1}} + D_2 |\ln(\frac{\lambda_1}{\lambda_2})|^{\frac{M}{M-1}}]^{\frac{M-1}{M}} \end{aligned} \quad (3.7)$$

과 같다. 여기서 얻은 유효 변형률을 이용하여 유효응력을 정의한다.

$$\bar{\sigma} = K(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon})^n \quad (3.8)$$

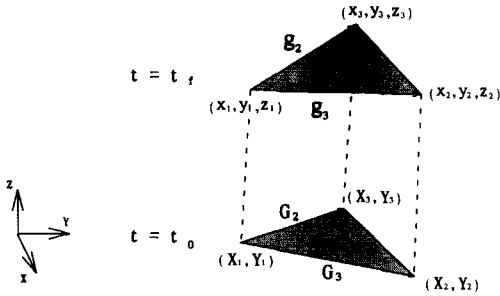


Fig. 2 Kinematics of triangular membrane elements between the initial state and the final state

이상과 같이 정의된 유효 변형률과 유효 응력을 이용하여 변형된 내부 소성변형일을 계산할 수 있다. 마지막으로, 구한 소성일의 극값을 취하여 식 (3.10)과 같이 초기 블랭크의 형상을 찾는다.

$$W = \int_{V_0} \bar{\sigma} \cdot \bar{\varepsilon} dV_0 \quad (3.9)$$

$$\frac{dW}{dX_i} = 0 \quad \text{for } i=1,2 \quad (3.10)$$

이제까지 살펴본 One-Step FEM을 이용한 초기 블랭크 형상의 예측과정을 정리해 보면 Fig. 3과 같다.¹⁰⁾

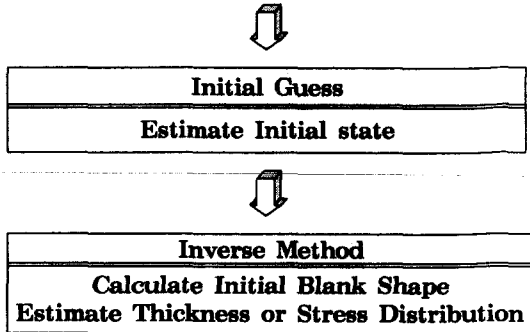
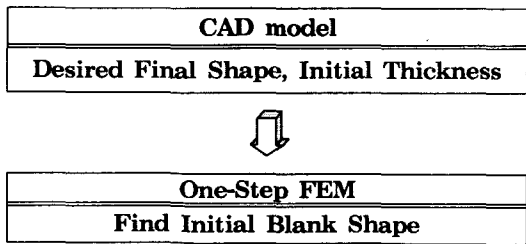


Fig. 3 One-Step forming process with the inverse method

4. One-Step FEM의 장 · 단점

4.1 장점

- 1) One-Step FEM을 사용하게 되면, 우선 계산시간을 매우 단축시킬 수 있다. 다음에 보이는 세가지 요인들이 One Step FEM의 빠른 계산속도에 기여하게 된다. 첫째는 2차원으로 차원을 줄인다는 것과 둘째로, 중간 과정이 없다는 점 그리고 셋째로, 비선형 방정식들을 푸는데 있어 반복 계산의 감소 등을 들 수 있다.
- 2) 초기 블랭크의 형상을 예측함으로써, 후가공(trimming)으로 드는 비용과 시간을 절약할 수 있다.
- 3) 수식이 제품형상을 근거로 하기 때문에 제품과 공정설계(product and process design) 이전에 제조가능성과 재료비용을 평가할 수 있다.
- 4) 반복적이고 상호 작용적인 설계 과정들에 적합하며, CAD 시스템에서 처리하기가 쉽다.

4.2 단점

- 1) 초기형상과 최종형상만을 다루기 때문에 높은 비선형 변형경로가 존재할 때는 정확성이 많이 감소된다.
- 2) 성형과정 중에 일어나는 주름의 발생과 소멸 같은 중간 과정들이 무시된다.

5. 해석결과 및 토의

5.1 트렁크 플로어(trunk floor)에의 응용

본 연구에서는 One-Step FEM을 이용한 상용 패키지의 일종인 FAST_3D를 이용하여 성형해석 과정을 고찰하였다. Fig. 4은 자동차의 예비 타이어(spare tire)가 들어가는 트렁크 플로어 형상이다.

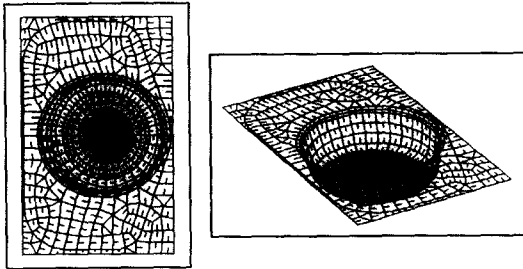


Fig. 4 Trunk floor model

FAST_3D 프로그램을 이용해서 다음과 같은 사항을 검토해 보고자 한다.

- 1) 초기 블랭크 형상의 예측
- 2) 성형난이와 파단되기 쉬운 영역들의 예측
- 3) 최종 형상에서 두께분포의 예측

FEM 격자는 제품형상을 따라 생성되었고, 해석을 위해서 재료물성치들과 경계조건, 제품의 형상이 입력조건으로 주어졌다. 해석에 사용된 재료변수는 아래 Table 1과 같다.

Table 1 Material property

Initial material thickness	K-value	n-value	r-value	number of nodes	number of element
0.71mm	551.6 Mpa	0.185	1.45	3,813	632

계산시간은 PC-Pentium/200MHz에서 약 2분이 소요되었다. 해석된 결과는 Fig. 5와 같으며, 성형되기 전의 초기 블랭크 형상을 보여주고 있다. 그림에서 직사각 블랭크의 크기는 1208.90×1922.07 (mm)이다.

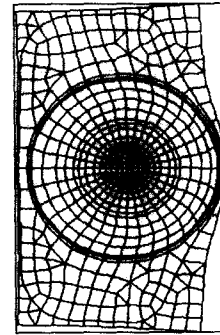
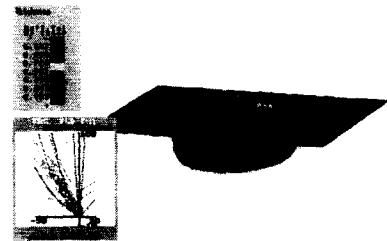
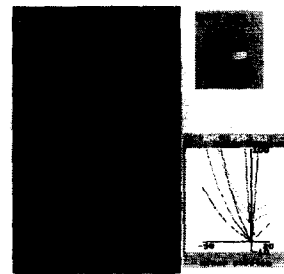


Fig. 5 Calculated blank geometry

Fig. 6(a)는 FLD상에서 전체 제품 형상의 두께 분포를 나타낸다. 마우스를 원하는 격자에 가져가면 그 부분의 정보(두께, 응력, 변형률 등)들이 수치적인 값으로 표시된다. 또한, 3차원 입체 칼라로 표시되기 때문에 전체적인 제품의 두께 분포를 쉽게 파악할 수 있다. 그림에서 두께가 얇은 영역은 벽면 주위(빨간색)이고, 노란색에서 녹색으로 갈수록 재료가 두꺼우며, 제품형상의 바깥쪽 주변에 위치해 있음을 알 수 있다.



(a) Predicted thickness distributions



(b) Predicted safety zones

Fig. 6 Analysis Results

Fig. 6(b)는 제품형상에 분포하는 안전지역 (safety zones)을 나타내는데, 가장자리에 한계 주름(marginal wrinkle)과 주름(wrinkle)이 발생하는 것이 보여진다. 그러나 그외 지역에서는 모두 안전(safe)하다고 예측된다.

5.2 오일팬(oilpan)에의 응용

여기서는 산업용 오일팬(oilpan) 성형에서의 초기 블랭크 크기를 예측하고, 최종 제품의 두께와 응력분포를 살펴 보고자 한다. 해석에 사용된 재료 변수는 Table 2와 같다.

Table 2 Material property

Thickness	Yield strength	Strain hardening	Strain rate sensitivity	Number of elements	Number of degrees of freedom
1.2mm	452 Mpa	0.306	1.7	24,174	4,085

계산시간은 PC-Pentium/200MHz에서 약 40분이 소요되었다.

최종 오일팬 형상은 Fig. 7과 같고, 해석된 제품의 초기 블랭크 형상은 Fig. 8과 같이 가로×세로 = 468.92×329.11인 크기로 나타났다.

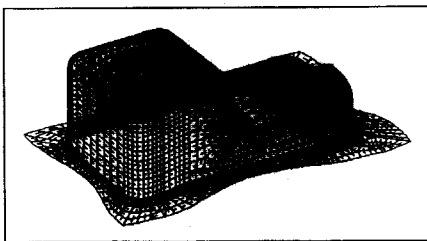
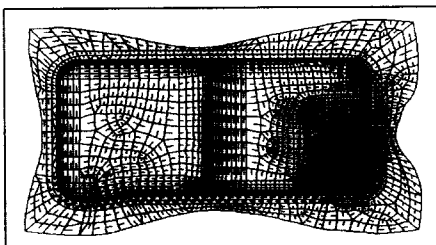


Fig. 7 Oilpan model

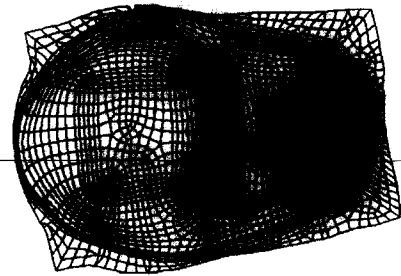
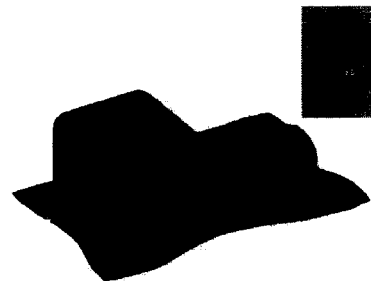


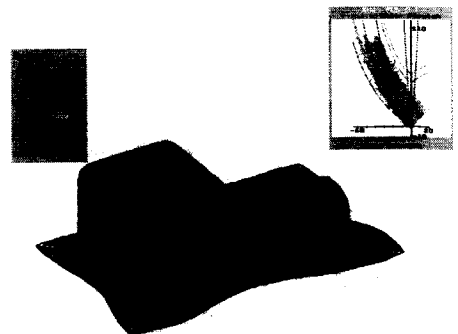
Fig. 8 Calculated blank geometry

FLD상에서 전체 제품에 대한 두께 분포는 Fig. 9(a)에 보여지는 바와 같이 편치가 맞닿는 윗쪽부분이 얇아짐을 알 수 있다.

그리고 Fig. 9(b)를 보면 제품형상 전체의 응력 분포(stress distribution)들을 한 눈에 살펴볼 수 있다.



(a) Predicted thickness distributions



(b) Predicted stress distributions

Fig. 9 Analysis Results

6. 결 론

지금까지 재료와 형상, 성형조건에서 비선형성을 다루기 위해 많은 기술들이 개발되어 왔고, 아직도 연구가 진행 중에 있다. 그 중에서 One-Step FEM은 제품, 공정, 금형 설계와 생산 공정 중에 발생하는 문제조정을 위한 방법으로 널리 이용되고 있으며, 본 논문에서는 그에 대한 제반적 사항 및 효율성에 관해서 몇가지 예를 들어 설명하였다. 이로부터 다음과 같은 결과들을 확인할 수 있었다.

- 1) One-Step FEM을 사용하여 몇가지 예제들을 해석해 본 결과, 성형 후의 제품에 대한 제반적인 사항 - 두께라든지 응력, 변형률분포 등을 가시적으로 쉽게 파악할 수 있었다.
- 2) One-Step 접근에 의한 빠른 계산시간은 trial and error를 많이 거치는 제품설계 과정에서 매우 유용하게 적용되어질 수 있을 것이다.
- 3) 초기 블랭크 형상을 예측함으로써 후가공에 의한 재료손실과 작업 시간을 절약할 수 있리라 본다.
- 4) One-Step FEM은 중간과정을 무시한 방법이다. 따라서 그만큼 정확성이 떨어질 우려가 있기 때문에 앞으로 정확도와 성형 가능성, 그리고 프로그램의 계산시간을 좀더 단축시키는 연구가 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

- 1) Kawka, M. and A. Makinoouchi, "Shell Element Formulation in the Static Explicit FEM Code for Simulation of Sheet Stamping", Proc. NUMISHEET'93. pp.97-107, 1993

- 2) Duncan, J. L., R. Sowerby & E. Chu, "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, 1985
- 3) Chu, E., "New Horizons in CAD of Sheet Metal Stampings", Ph. D. Thesis, McMaster University, 1983
- 4) Majlessi, S.A. & D. Lee, "Further Development of Sheet Metal Forming Analysis Method", ASME J. Eng. Ind. 109: pp.330-337, 1987
- 5) Guo, Y. Q., J. L. Batoz, J. M. Detraux and P. Duroux, "Finite Element Procedures for Strain Estimations of Sheet Metal Forming Parts", Intl. J. Numer. Meth. Eng., Vol.30, pp.1385-1401, 1990
- 6) Liu, S. D. and A. Assempoor, "Development of Fast 3D-A Design-Oriented One Step FEM in Sheet Metal Forming", Proc. Complas' IV, pp.1515-1526, 1995
- 7) Liu, S. D. & M. Karima, "A One Step Finite Element Approach for Product Design of Sheet Metal Stampings", Proc. NUMIFORM'92. pp.497-502, 1992
- 8) Chung, K. & O. Richmond, "Sheet Forming Process Design Based on Ideal Forming Theory", Proc. NUMIFORM'92, pp.455-460, 1992
- 9) Chung, K. and O. Richmond, "A Deformation Theory of Plasticity Based on Minimum Work Paths", Int. J. Plasticity, Vol.9, pp.907-920, 1993
- 10) 이충호, 허 훈, "박판금속 성형공정에서의 블랭크 설계 및 변형을 예측", 대한기계학회 춘계 학술대회 논문집(I), pp.451-456, 1995