

반구형 딥-드로잉 공정에서 동적 외연적 해석방법에 관한 연구

정 동 원* · 황 재 신**

A Study of Dynamic-explicit analysis method in Semisphere Deep-drawing Process

Dong-Won Jung* · Jae-Sin Hwang**

ABSTRACT

In the present work a finite element formulation using dynamic explicit time integration scheme is used for numerical analysis of auto-body panel stamping processes. Analyzed auto-panel stamping process correction of forming using common use software called Dynaform using dynamic extensive method. The developed algorithm is also capable of calculating the diagram black shapes as the initial state of binder wrap condition for large scale parts such as a fender or a rear quarter part. Further, the simulated results for the total auto-body panel stamping processes are shown and discussed. Its application is being increased especially in the automotive industrial area for the cost reduction, weight saving, and improvement of strength.

Key Words : Dynamic explicit time integration scheme, auto-body panel stamping, Binder Wrap

1. 서 론

박판 성형이 산업부문에서 차지하는 비중은 매우 크며 또한 많은 영향을 미치고 있다. 박판성형공정은 가공 중에 소재의 손실이 적고 가공시간이 짧아 낮은

가격으로 대량생산이 가능하며 무게에 비해 강도가 높고 표면특성이 우수한 장점이 있으므로 자동차산업, 항공산업, 전자부품산업과 주방용품산업 등에서 중요한 제조공정중의 하나이기 때문이다. 박판성형은 드로잉, 스트레칭, 굽힘, 아이어닝 및 이들의 조합으로 구성된 복잡한 변형모드를 포함하고 있을 뿐만 아니라, 재료 자체의 성형성, 이방성 등의 기계적 성질이나, 두께의 불균일, 공구(편치, 다이 및 블랭크 홀더 등의 집합체) 각부의 조합, 표면 및 윤활상태, 성형속도 등이 변형에 영향을 미치기 때문에 그 물리적 현상을 정량적으로 파악하기는 매우 어렵다. 복잡한

* 제주대학교 기계·에너지·생산공학부, 첨단기술연구소
Faculty of Mechanical, Energy and Production Eng., Cheju Nat'l Univ., Res. Inst. of Adv. Tech.
** 제주대학교 대학원
Graduate School, Cheju National Univ.

박판부품들이 공정과 금형의 설계와 제작에서 수많은 시행착오를 피하여 공정과정을 적절히 설계하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션 해석이 시도되고 있다. 다양한 접촉과 마찰조건들뿐만 아니라 기하학적 비선형과 재료학적 비선형을 포함하는 어려운 문제들을 해결하기 위하여 신뢰할 만한 시뮬레이션 방법이 요구되어진다. 이러한 방법들 중 가장 널리 쓰이는 것이 유한요소 해석법인데 박판성형공정의 2차원 해석이 시작되면서 크게 외연적 방법과 내연적 방법으로 나누어졌다. [1-6]

오늘날에는 단순한 접촉면의 미소 변화가 있는 박판 성형 공정을 수치적으로 정확하게 사전 예측하는 것이 가능해지면서 복잡하고 불규칙적인 곡선형상들과 박판과 다이 사이의 비교적 큰 상대적인 변위를 실질적인 산업현장 문제들을 해석하기 위하여 보다 신뢰성 있고 경제적인 해석방법이 요구되고 이런 효율적인 알고리즘을 개발하기 위해선 아직도 많은 노력이 필요하다. 일반적인 박판 금속성형 과정은 고차원의 비선형 문제로 규정지을 수 있는데, 이것은 대상물의 기하학적 형상과 재질이 비선형일 뿐만 아니라 접촉 현상이 비선형이기 때문이다. 게다가 주름의 형성과 네킹 등이 전형적인 딥-드로잉(Deep-drawing) 과정 중에 나타나 비선형 효과를 더하기도 한다. 이러한 강한 비선형 효과들로 인해서 내연적 방법은 때론 수렴하지 못하는 경우가 일어나지만 외연적 적분 방법은 항상 해를 이끌어 낼 수 있다.

박판 금속성형과정을 해석함에 있어 외연적 동적 알고리즘은 내연적 정적 알고리즘에 비해서 몇 가지 중요한 이점들을 갖고 있다. 첫째, 뉴우튼-랩슨법과 같은 비선형 해석법이 필요 없다. 둘째, 대변형, 미끄러짐, 3차원 접촉 구속들은 외연적 방법에서 처리하는 것이 상대적으로 쉽다. 하지만 이러한 장점도 있는 반면에 정적문제에 동적 방법을 적용함에 따른 해의 정적 불안정을 일으킬 수 있다는 외연적 동적 방법의 가장 큰 단점도 있다. 동적해석에서는 보다 경제적인 해석을 위하여 해의 정확도에 큰 영향을 미치지 않는 범위 내에서 실제보다 훨씬 빠른 편치속도와 Mass Scaling 방법을 사용하고 있으며, 차체판넬을 성형하는 과정에서 박판을 블랭크홀더로 고정시키게 되면, 바인더-랩(Binder-Wrap)이 형성된다. 바인

더-랩이 형성되면서 갖게 되는 이러한 변형은 차체판넬을 성형하기 위한 박판의 초기상태에 영향을 미치게 되므로 올바른 차체판넬 성형 공정 설계를 위해서는 바인더-랩의 해석이 선행되어야만 한다.

본 연구는 동적 외연적 방법을 이용하여 바인더-랩이 형성되면서 갖게 되는 변형을 시뮬레이션 하였다.

II. 본 론

2.1. 외연적 유한요소 수식화

비선형 유한요소 운동 방정식은 평형방정식의 약형으로 표현되는 가상일의 원리로부터 얻어진다. 성형 가공중에 발생하는 내부응력, 접촉력, 관성력, 감쇄력, 외부힘과 경계조건을 모두 포함하는 평형방정식의 약형은 다음과 같이 표현된다.

$$\int_{V_c} S \delta E dV + \int_{V_0} \rho_0 \ddot{u} \delta u dV - \int_{V_c} \rho_0 b \delta u dV - \int_S F_0 \delta u ds + \sum_{i=1}^n \int_S (P_i^t \delta g_n^i + \tau_i^t \delta g_r^i) ds \quad (1)$$

위 식 좌변은 순서에 따라 내부일, 관성력에 의한 일, 중력에 의한 일, 응력 경계조건 및 접촉과 마찰에 의한 일을 나타낸다. 위식을 유한요소화 할 경우 내부일 항에 요소의 종류에 따른 재료 거동 모델과 운동학적 모델이 포함된다. 박막모델, 재료거동 모델, 유한요소 형상함수와 강체요소의 동역학을 가상일의 원리에 도입하면 비선형유한요소 운동방정식을 얻을 수 있다. 비선형 유한요소방정식은 시간 n단계에서 다음과 같은 행렬식으로 쓸 수 있다.

$$[M]\{\ddot{u}_n\} + [C]\{\dot{u}_n\} + \{P_n\} - \{F_n\} + \{R_m\} = 0 \quad (2)$$

위 식으로부터 시간증분 n+1에서의 해를 얻기 위해 다음과 같은 중간차분법을 사용한다.

$$\ddot{u}_n = \frac{\dot{u}_{n+1/2} - \dot{u}_{n-1/2}}{\Delta t} = \frac{u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}}{2\Delta t^2} \quad (3)$$

$$\dot{u}_{n+1/2} = \frac{u_{n+1} - u_n}{\Delta t} \quad \text{또는} \quad \dot{u}_n = \frac{u_{n+1} - u_{n-1}}{2\Delta t}$$

위 식을 (2)식에 대입하고 정리하면 간단한 계산에 의해 계속적인 해를 얻을 수 있는 형태가 된다.

$$\left(\frac{M}{\Delta t^2} + \frac{C}{2\Delta t}\right) u_{n+1} = F_n - P_n - R_{cn} + \frac{M}{\Delta t^2} u_n - \left(\frac{M}{\Delta t^2} - \frac{C}{2\Delta t}\right) u_{n-1} \quad (4)$$

중간차분법은 Δt 의 크기에 따라 선택적인 수렴성을 가지며, 정확성과 수렴성은 Δt 의 세곱에 비례한다.[7] 식(4)에 의해 시간 증분 $n+1$ 에서의 절점 변위가 구해지면 변형영역을 수정(update)하고 그에 따라 수렴성이 보장되는 새로운 시간 증분의 크기를 결정해야 한다. 전체적인 시간증분의 크기는 모든 요소들에 대해 각각의 시간증분의 크기를 계산한 후 다음과 같은 식에 의해 결정한다.

$$\Delta t_{n+1} = \alpha \min \{ \Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_N \} \quad (5)$$

위 식에서 N 은 총 요소수이며 Δt_i 는 i 요소에 대한 시간증분의 크기를 나타낸다. α 는 안정성을 위한 상수로 통상 0.9이하의 값을 선택한다. 시간 증분 크기는 다음과 같은 식으로 결정한다.[8]

$$\Delta t_c = L_s / C \quad (6)$$

위 식에서 L_s 는 요소의 면적을 최대변의 길이로 나눈 특성 길이이며 C 는 소재 내에서의 음속으로 아래와 같다.

$$C = \sqrt{\frac{E_t}{\rho}} \quad (7)$$

여기서, E_t 은 절선계수이고 ρ 은 재료의 밀도이다. 재료의 음속은 재료밀도의 평방근에 반비례하여 밀도를 100배 높이면 Δt_c 가 10배 증가되어 전체

해석시간이 10배 줄어든다. 동적외연적 해석은 원래 빠른 속도의 충돌문제를 해석하기 위하여 개발되었으나 접촉알고리즘이 안정되고 아주 큰 문제도 해석 가능하므로 스탬핑 공정에도 적용하고 있다. 실제 스탬핑 공정의 편치속도는 1m/sec정도인데 재료의 음속에 비하여 훨씬 느리다. 강의 음속은 대략 5000m/sec 정도이므로 관성효과가 해에 영향을 크게 주지 않는 범위 내에서 실제보다 편치속도를 높여 해석하는데 경제적 해석을 위하여 해의 정확도에 큰 영향이 없는 가능한 최대 편치속도로 해석한다.

2.2. 집중 질량 행렬

축차가 없는 외연적 시간 적분을 위해 M 행렬을 대각선 행렬(diagonal matrix)로 만드는 것이 필수적이다. 이를 위해 다음과 같은 집중 질량 M 행렬을 정의한다.

$$M = \sum_c m_c = \begin{cases} \frac{1}{n} \int_{V_c} \rho dV^c & : \text{대각 요소} \\ 0 & : \text{비대각 요소} \end{cases} \quad (8)$$

여기서 n 은 한 요소의 절점수이다.

2.3. 외연적 시간적분법

계산의 편리를 위해 (2)식에서 점성 행렬 C 를 무시한다. 그러면 외연적 시간 적분 절차는 절점에서와 요소에서의 계산을 번갈아 수행하는 형태가 된다. 이를 요약하여 Fig. 1에 나타내었다.[9] 먼저 각 절점에서 구해진 외력과 내력의 차이와 그 질량으로 가속도를 구한 후 이를 중간 차분법을 이용해 속도 및 변위를 구한다. 구해진 변위로부터 해당 요소의 변형률을 구할 수 있다. 이를 지배방정식에 대입하면 그 요소에서의 응력과 그와 관련한 상태 변수들을 구할 수 있다. 이로부터 다시 내력을 구할 수 있다. 외력은 이미 주어져 있으므로 다음 계산 스텝에 이를 반영하여 계속 반복 계산하게 된다. 이는 응력파(stress wave)의 전달 과정과 동일한데 이를 Fig. 2처럼 도식적으로 나타낼 수 있다.[10] 즉, 모든 계산은 변형률로부터 출발하여 응력을 계산해 나가는 방식이다.

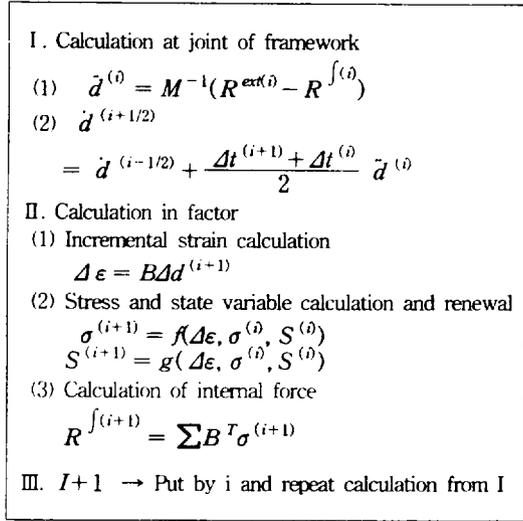


Fig. 1. Algorithm of explicit time integration method

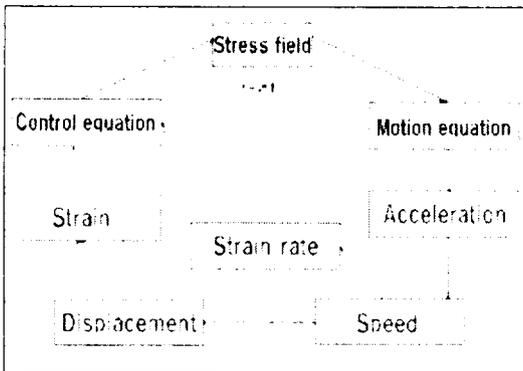


Fig. 2. Transmission process of stress wave in material

2.4. 접촉 처리

외연적 시간 적분법의 장점을 살리기 위해 벌칙 함수법(penalty method)를 사용한다. 절점이 급형을 ρ 만큼 과고들면 접촉력 f_s 를 절점에 가해준다.[11]

$$f_s = -h k n \quad (9)$$

여기서 h 는 침투량, n 은 수직 벡터(normal vector), k 는 강성 인수(stiffness factor)로서 다음과 같이 정의된다.

$$k = \alpha K A^2 / V$$

여기서

α : 척도 계수(scale factor)

K : 체적 탄성 계수

A : 요소 면적

V : 요소 부피

이다.

이의 모식도를 Fig. 3 에 나타내었다. Fig. 3에서 (a) 는 두개의 표면이 접촉하기 직전의 모습을 나타내고 있고, (b)는 두개의 표면이 계산상으로 먼저 침투를 허용하는 모습을 나타내고 있다.

이는 벌칙 함수법의 특성이다. 침투를 허용한 후 그 침투량 h 에 해당하는 f_s 를 식(7)과 같이 구하여 이를 양쪽 표면에 대칭적으로 가해주면 (c)와 같이 기하학적으로 맞는 접촉 상태를 가지게 된다.[12]

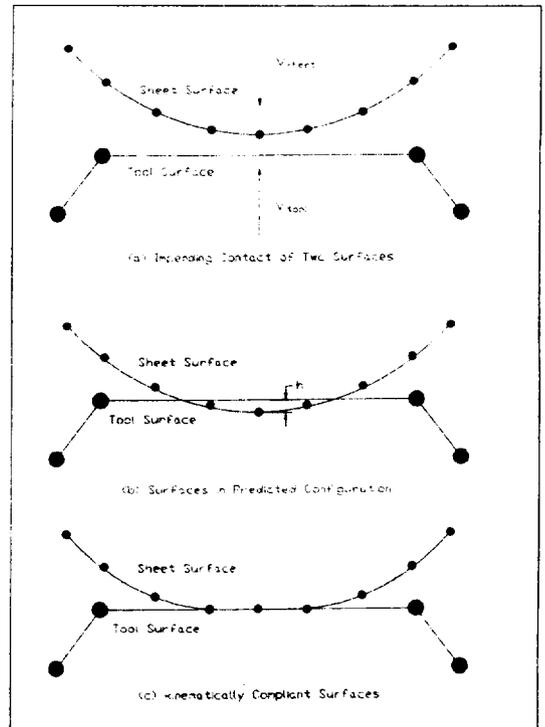


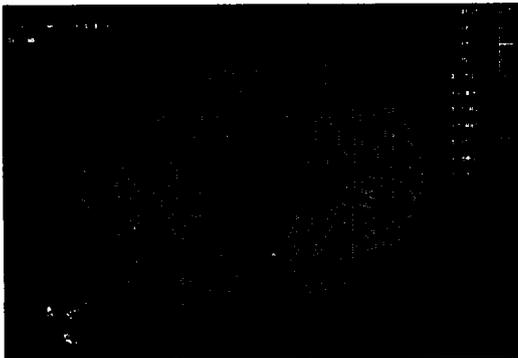
Fig. 3 Schematic diagram about contact technique

III. 성형해석 결과

수식화 된 결과에 따라 유한요소해석 프로그램을 작성하여 성형품의 각 단면들을 성형단계에 따라 두께감소율, 성형한계곡선(주름경향), 잔류응력분포도, 이 3가지를 3차원으로 나타내 보았다. 결과들은 다음과 같다.



(a) Thickness distribution chart in first step



(b) Thickness distribution chart in step 3



(c) Thickness distribution chart in step 5



(d) Thickness distribution chart in step 6

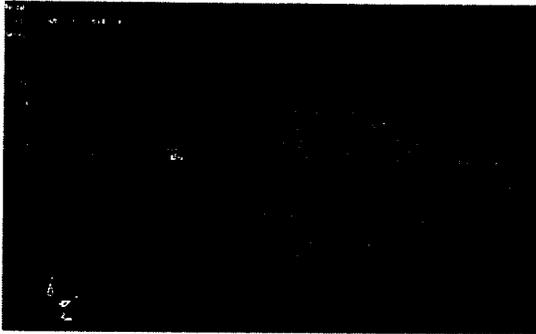


(e) Thickness distribution chart in step 8

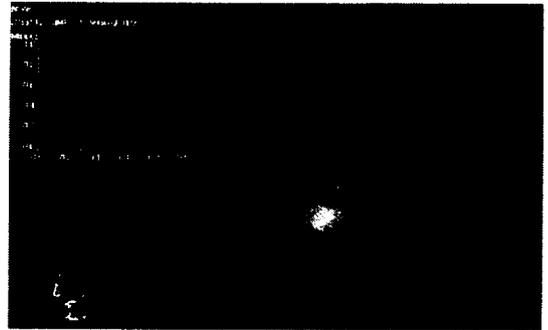


(f) Thickness distribution chart in finally step

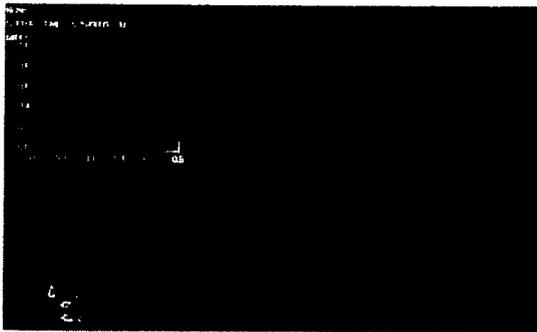
Fig. 4. Thickness distribution chart by punch stroke



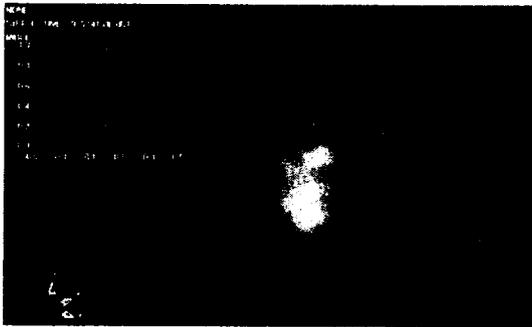
(a) Forming limit diagram distribution chart in step 2



(d) Forming limit diagram distribution chart in finally step

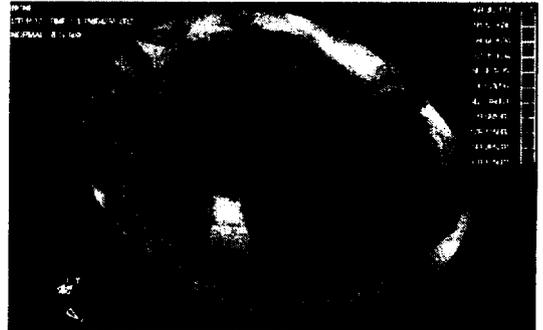


(b) Forming limit diagram distribution chart in step 6

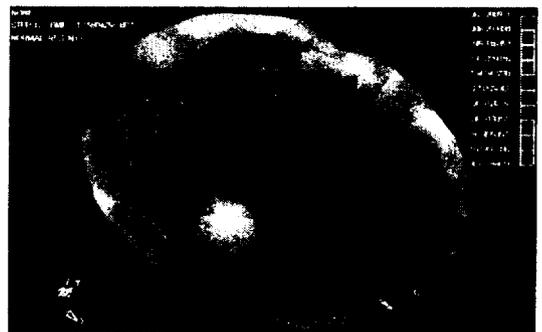


(c) Forming limit diagram distribution chart in step 9

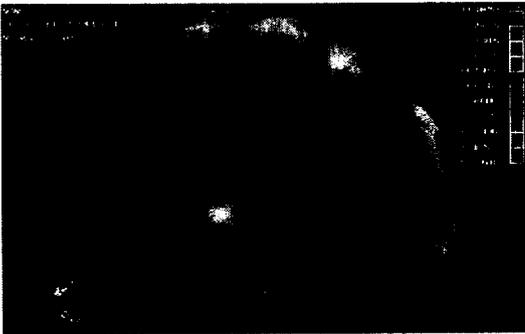
Fig. 5. Forming limit diagram distribution chart by punch stroke



(a) x-x coordinate residual stress distribution chart in finally shape



(b) y-y coordinate residual stress distribution chart in finally shape



(c) x-y coordinate residual stress distribution in finally shape

Fig. 6. Esidual stress distribution chart by punch stroke

IV. 결론 및 고찰

본 연구는 동적 외연적 방법을 이용하여 반구형 딥드로잉공정을 Dynaform 상용소프트웨어를 사용하여 성형해석해 보았다. 많은 수의 격자를 가진 복잡한 형상의 해석에는 외연적 방법이 내연적 방법보다 효과적이다. 성형해석결과 잔류응력분포도와 성형한계곡선(FLD), 그리고 두께감소율의 시뮬레이션 해 본 결과를 볼 때 성형완료 후 변형과 주름경향 그리고 터짐(crack) 발생의 예측을 할 수 있었으며 동적 외연적 해석에서는 해석시간을 줄이기 위한 펀치속도를 실제 속도보다 훨씬 증가시키는데 이에 반해 해의 신뢰도는 떨어지기 쉽다는 것을 알 수 있었다. 따라서 해의 신뢰도에 영향을 크게 주지 않는 범위 내에서 적절히 밀도를 증가시켜 해의 신뢰도와 경제성을 동시에 만족시켜야하며 적절한 펀치 속도로 해석시간과 신뢰도에 있어서 타협하여야 하며 동적 해석에서 관성효과를 적절히 제어할 수 있어야 할 것이다.

이런 점들을 볼 때 제품 생산에 앞서 시뮬레이션을 통해 여러 가지 문제점을 파악하고 개선시킬 수 있을 것이며 금형개발비로 소요되는 비용 및 트라이아웃(try-out)의 횟수를 줄임으로 개발기간을 단축시킬 수도 있을 것이며 개발투자비까지도 절감할 수 있을 것으로 보여진다. 앞으로 나아가야 할 부분은 국내 산업체에 도움을 줄 수 있도록 가격이 저렴하고 효율적

인 전용 해석소프트웨어를 개발하는데 노력해야 할 것이다.

후 기

이 논문은 2003년도 제주대학교발전기금 청봉학술연구기금의 지원에 의해서 연구되었음.

참고문헌

1. Jung, D. W., Yoo, D. J. and Yang, D. Y., 1995 "A dynamic explicit/rigid-plastic finite element formulation and its application to sheet metal forming processes", *Engineering Computations*, vol.12, pp.707-722.
2. Yang, D. Y., Jung, D. W., Song, I. S., Yoo, D. J. and Lee, J. H., 1995 Comparative investigation into implicit, explicit and iterative implicit/explicit schemes for the simulation of sheet-metal forming processes, *J. Materials Processing Technology*, vol .50, pp.39-53.
3. Jung, D. W., Song, I. S. and Yang, D. Y., 1995 An improved method for application of blank holding force considering sheet thickness in deep drawing simulation of planar anisotropy sheet, *J. Materials Processing Technology*, vol. 52, pp.472-488.
4. Jung, D. W., Yoo, D. J. and Yang, D. Y., 1995 A dynamic explicit/rigid-plastic finite element formulation and its application to sheet metal forming processes, *Engineering Computations*, vol.12, pp.707-722.
5. Lee, H. S., Jung, D. W., Jung, J. H. and Im, S. Y., 1994, Finite element analysis of lateral buckling for beam structures, *Computers & Structures*, vol.53, pp.1357-1371.
6. 정동원, 김귀식, 양동열, 1998 "대형 차체관널 스텝핑공정에서의 동적 외연적 탄소성 유한요소해석",

- 한국해양공학회 12권 1호, 통권 제27호, pp.10-22.
7. 정동원, 양동열, 1996 “차체 스텝핑공정을 위한 스텝형식의 내연적/외연적 결합 유한요소해석”, 한국정밀공학회 제13권 제12호, pp.86-98.
 8. 정동원, 양동열, 안동규, 1993 “박판성형공정의 시뮬레이션을 위한 내연적, 외연적 및 내외연적 유한요소해석법의 비교 연구”, 대한기계학회 추계 학술대회 논문집, pp.552-576.
 9. “An Introduction to ABAQUS/Explicit”, 1991, Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc.
 10. Moss, W.C., 1984, “On the Computational Significance of the Strain Space Formulation of Plasticity Theory”. Int. J.Num.Met.Engr.,vol.20, pp.1703-1709.
 11. Hallquist, J.O., 1983, “Theoretical Manual for DYNA3D”, Lawrence Livermore Laboratory.
 12. Meyers, M.A., Ravichandran, G., 1997 “Lectures on Dynamic Behavior of Materials”, University of California, San Diego. No.1, pp.3~10.