

# LZ-F/L차체판넬 스템핑공정 해석에 관한 연구

정 동 원 \* · 황 재 신 \*\*

## 1. 서 론

박판성형 공정은 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 제조공정 중의 하나이다.

박판성형은 드로잉, 스트레칭, 굽힘, 아이어닝 및 이들의 조합으로 구성된 복잡한 변형모드를 포함하고 있을 뿐만 아니라, 재료 자체의 성형성(formability), 이방성(anisotropy) 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 어려우므로 복잡하고 불규칙적인 곡선형상들과 박판과 다이 사이의 비교적 큰 상대적인 변위 등의 실질적인 산업현장 문제들을 해석하기 위하여 보다 신뢰성 있고 경제적인 해석방법이 요구되고 이런 효율적인 알고리즘을 개발하기 위해선 아직도 많은 노력이 필요하다. 해의 효율성과 강건성(efficiency and robustness)은 매우 중요한 요인이다.<sup>1,2</sup>

최근에 수치적 방법으로서 유한 요소법(FEM)이 사용되어지면서 많은 관심을 갖게 되었다. 이런 이유는 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 덤드로잉 과정 중에 나타나 비선형 효과를 더하기도 한다. 이러한 강한 비선형 효과들로 인해서 내연적 방법은 때론 수렴하지 못하는 경우가

\* 제주대학교 기계·에너지·생산 공학부

\*\* 제주대학교 기계공학과 대학원

일어나지만 반면에 외연적 적분방법을 사용하면 이러한 문제들을 해결 할 수 있게 되었다. 다시 말해서 외연적 적분방법으로는 항상 해를 이끌어 낼 수 있다는 것이다.

내연적 시간 적분법은 축차(iteration)을 통하여  $(n+1)$ 번째 상태에서의 내력(internal force)과 외력(external)간의 힘평형(force balance)

e)을 맞추는 방법이고, 외연적 시간 적분법은 축차가 전혀 필요 없으며 대신 내력과 외력간의 불균형(force unbalance)에 의해 유발되는  $(n)$ 번째 상태에서 추진력(driving force)에 의해  $(n+1)$ 번째 상태를 구하는 방법이다.

내연적 시간 적분법은 해(solution)의 정밀도(accuracy)가 우수하나, 축차에 소요되는 계산시간(computing time)이 크고 강성 행렬(stiffness matrix)을 꾸며야 하기 때문에 메모리 용량이 커야 하며, 무엇보다 접촉 조건(contact condition)이 매우 복잡한 3차원 문제에 있어서는 수렴(convergency)에 실패하는 경우가 많아 해 자체를 얻을 수 없는 때가 있다.

이에 비해 외연적 시간 적분법은 시간 증분(time increment)을 안정 한계(stability limit)이하로 유지하면 축차에 의한 수렴 없이 항상 해를 구할 수 있고, 강성행렬이 필요 없어져 메모리 관리가 좋아질 뿐 아니라 여유분의 메모리를 활용하여 유한 요소수를 크게 늘려 잡을 수 있으며, 복잡한 형태의 접촉이 계제된 문제도 쉽게 해결된다. 또한 외연적 시간 적분법에서는 해의 안정성(stability)을 위해 시간 증분을 안정 한계(내연적 시간 적분법의  $1/100 \sim 1/1000$  정도)내로 유지해야 하기 때문에 전체 계산 스텝수는 매우 크게 되지만 계산소요시간에 있어서는 복잡한 3차원 형상 및 접촉의 경우 내연적 시간 적분법에 비해 오히려 작게 된다.

스프링백 현상이, 박판이 성형된 후 박판 내부의 응력이 탄성적으로 재편(redistribution)되면서 생겨나는 현상인 만큼 탄성 변형율을 고려하는 탄소성 유한 요소법의 채택이 필수적이다. 또한 유한 요소 형태는 박판의 특징을 잘 반영할 수 있는 셸(shell) 요소가 적당하다. 시간 적분법으로는 성형공정 해석에는 외연적(explicit) 방법을, 스프링백 해석에는 내연적(implicit)방법을 채택하는 데, 이렇게 함으로써 계산 효율을 극대화시킬 수 있기 때문이다.<sup>3</sup>

본 논문에서는, 트리밍과 스프링백을 포함하는 전체 스텝핑공정을 복잡하고 어려운 대형차체판넬과 접합판재에 적용하여 유한요소해석 하였으며 현장적용의 가능성과 타당성을 검토하여 보았다.

## 2. 본 론

### 2. 1 외연적 시간 적분법의 운동 방정식 수식화

외력에 의해 행해진 일( $W^{ext}$ )과 내력, 관성력 및 점성력에 의한 일( $W^{int}$ )은 같아야 한다는 일평형(work balance)으로부터<sup>4</sup>

$$\begin{aligned} & \int_V \delta U^T \psi dV + \int_S \delta U^T \phi dS + \sum_{i=1}^n \delta U_i^T F_i \\ & = \int_V (\delta \epsilon^T \sigma + \delta u^T \rho \ddot{u} + \delta u^T k_d \dot{u}) dV \end{aligned} \quad (1)$$

이 성립된다.

여기서

$\delta u, \delta \epsilon$  : 임의의 변위 및 변형률

$\psi$  : 체적력 (Body force)

$\phi$  : 표면력 (Surface traction)

$F_i$  : 집중 하중

$\rho$  : 밀도

$k_d$  : 점성 계수

$u, \dot{u}, \ddot{u}$  : 변위, 속도, 가속도이다.

형상 함수(shape function)  $N$ 을 도입하면

$$u = Nd, \quad \dot{u} = N\dot{d}, \quad \ddot{u} = N\ddot{d} \quad (2)$$

이 되고 이를 (1)식에 대입하고 정리하면 다음과 같이 동적힘 평형식(dynamic force balance equation)을 구할 수 있다.

$$M\ddot{d} + C\dot{d} + R^{int} = R^{ext} \quad (3)$$

여기서  $M$  과  $C$ 는 각각 질량과 점성 행렬을 나타내며,

$$\begin{aligned}
 M &= \int_V \rho N^T N dV \\
 C &= \int_V k_d N^T N dV
 \end{aligned} \tag{4}$$

$R^{\text{int}}$ 와  $R^{\text{ext}}$ 는 각각 내력과 외력을 나타내는 벡터이다.

$$\begin{aligned}
 R^{\text{int}} &= \int_V B^T \alpha dV \\
 R^{\text{ext}} &= \int_V N^T \psi dV + \int_S N^T \phi dS + \sum_{i=1}^n F_i
 \end{aligned} \tag{5}$$

## 2. 2 집중 질량 행렬(lumped mass matrix)

축차가 없는 외연적 시간 적분을 위해 M 행렬을 대각선 행렬 (diagonal matrix)로 만드는 것이 필수적이다. 이를 위해 (4) 식 대신 다음과 같은 집중 질량 M 행렬을 정의한다.

$$M = \sum_e m_e = \begin{cases} \frac{1}{n} \int_{V^e} \rho dV^e & : \text{대각 요소} \\ 0 & : \text{비대각 요소} \end{cases} \tag{6}$$

여기서 n은 한 요소의 절점수이다.

## 2. 3 외연적 시간적분법(explicit time integration method)

계산의 편리를 위해 (3)식에서 점성 행렬 C를 무시한다. 그러면 외연적 시간 적분 절차는 절점에서와 요소에서의 계산을 번갈아 수행하는 형태가 된다. 이를 요약하여 Fig. 1에 나타내었다.<sup>5</sup>

먼저 각 절점에서 구해진 외력과 내력의 차이와 그 질량으로 가속도를 구한 후 이를 중간 차분법 (central difference method)를 이용해 속도 및 변위를 구한다. 구해진 변위로부터 해당 요소의 변형률을 구할 수 있다.

이를 지배방정식에 대입하면 그 요소에서의 응력과 그와 관련한 상태 변수

들을 구할 수 있다. 이로부터 다시 내력을 구할 수 있다. 외력은 이미 주어졌으므로 다음 계산 스텝에 이를 반영하여 계속 반복 계산하게 된다. 이는 응력파(stress wave)의 전달 과정과 동일한데 이를 Fig. 2처럼 도식적으로 나타낼 수 있다.<sup>6</sup>

즉, 모든 계산은 변형률로부터 출발하여 응력을 계산해 나가는 방식이다.

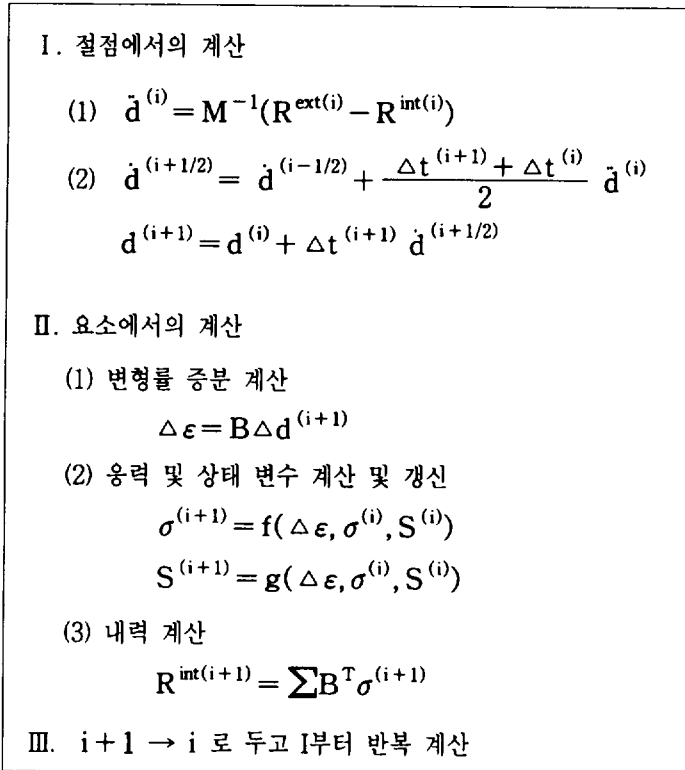


Fig. 1 외연적 시간 적분법의 계산 절차

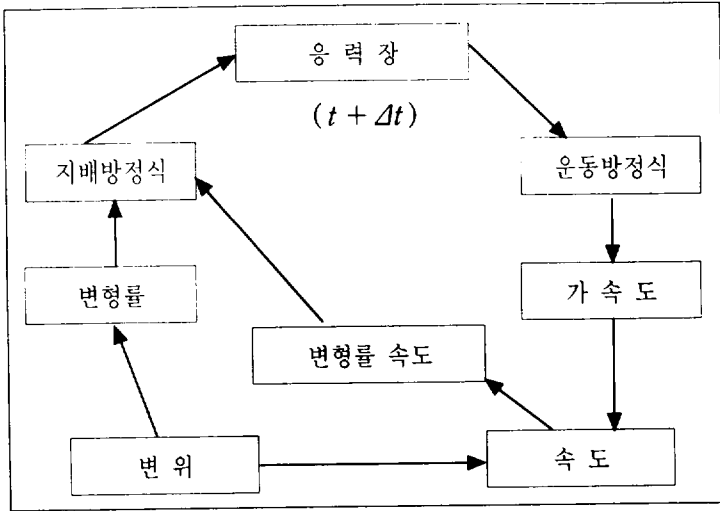


Fig. 2 재료 내 응력파의 전달 과정

## 2. 4 접촉 처리

외연적 시간 적분법의 장점을 살리기 위해 벌칙 함수법(penalty method)를 사용한다. 절점이 금형을  $\rho$ 만큼 파고들면 접촉력  $f_s$ 를 절점에 가해준다.<sup>7</sup>

$$f_s = -h k n \quad (7)$$

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

$$k = a K A^2 / V$$

여기서

- $a$  : 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 침

투를 허용하는 모습을 나타내고 있다.

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

## 2.5 시간 증분의 안정 한계

외연적 시간 적분법에서는 축차가 없는 대신 해의 안정성을 보장하기 위한 임계 시간 증분(critical time increment)이 존재하여 시간 증분이 이 값 이하일 것을 요구하고 있다. 점성이 없을 경우 임계 시간 증분은,

$$\Delta t_c = L_s / C \quad (8)$$

$L_s$  : 요소의 특성 길이(characteristic length)

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} : \text{응력 전파 속도}$$

$E$  : 영계수(Young's modulus)

$\rho$  : 밀도

가 된다.<sup>8</sup>



Fig. 3 접촉기법에 대한 개략도

### 3. 결과 및 결론

#### 3. 1 성형해석 결과

수식화 된 결과에 따라 평면 변형 유한요소 해석 프로그램을 작성하여 성형품의 각 단면들을 성형단계에 따라 3차원 해석하였다. 해석에 사용된 재료는 다음과 같다.

해석 MODEL : LZ-F/L PART  
해석 P/NAME : PNL BACK  
성형방법 : SINGLE ACTION PRESS  
BLANK 재질 : SGARC35 0.75T  
BLANK SIZE : 1730×575  
BLANK 홀딩력 : 70 TON  
해석범위 : OP10 DRAW공정 해석

OP10 DRAW공정 해석범위에서 초기 BINDING, 하사점 20mm전, 하사점 10mm전, 하사점 0mm STROKE별로 단계적으로 성형하였다.

그리고 최종성형 결과를 통해 두께축소율(THINNING)과 주름분포도(WRINKLE), 마지막으로 초기BLANK에서 최종BLANK까지의 거리(유입량)를 알 수 있었다.



초기 BINDING



하사점 20mm



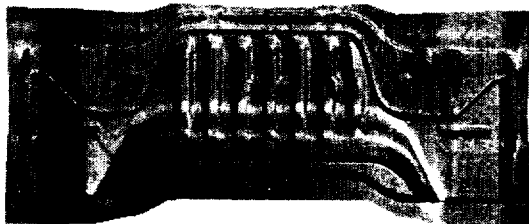
하사점 10mm



하사점 0mm

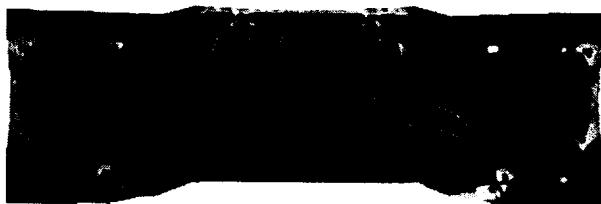


Fig. 4 Stroke별 성형과정



하사점 0mm(최대축소량)

Fig. 5 두께축소율(THINNING) 분포



부분적 주름발생 : 가형상 추가

최종성형결과: 붉은색과 연두색으로 표기된 부분이 주름발생 가능성이 큰 부분으로 해석 됨

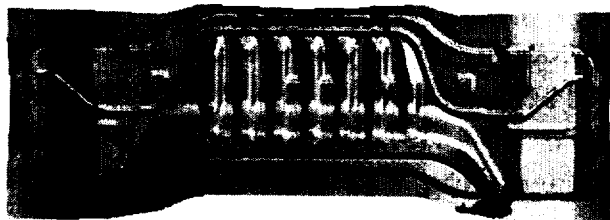


Fig. 6 주름(WRINKLE) 분포도

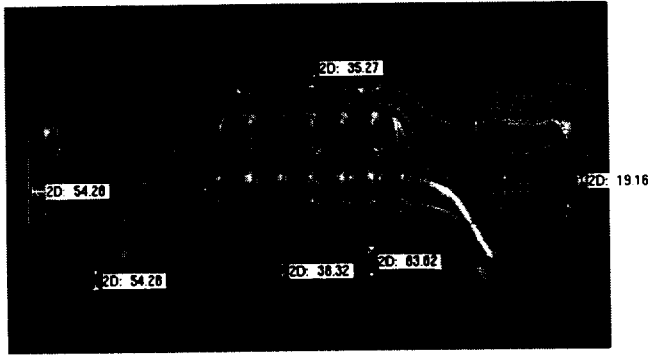


Fig. 7 초기BLANK에서 최종BLANK까지의 거리(유입량)

### 3. 2 결 론

1. 상용소프트웨어인 PAM-STAMP와 LS-DYNA3D를 사용하여 차체판넬의 3차원 스텝핑공정해석을 하였으며, 성형공정과 아울러 트리밍공정과 스프링백 해석을 동시에 병행하여 현업의 전체 공정에 도움이 되는 해석을 수행하였다.
2. 어렵고 복잡한 비선형성이 아주 높은 대형차체판넬을 해석하여 현업적용 가능성을 타진하여 보았으며 성형공정해석은 외연적 해석방법으로 하였고 스프링백 해석은 내연적 해석방법으로 수행하여 효율성과 정확도를 높였다.
3. 접합판재 개발에 성형해석기법을 도입하여 그 효용성을 타진하여 보았다. LS-DYNA3D를 사용하여 접합판재의 전체 스텝핑공정을 해석하여 성형 후 성형성평가, 변형형상 및 용접선의 변화 등을 살펴보았다.
4. 경제적인 해석과 보다 정밀한 성형해석을 동시에 만족시키기 위한 Adaptive-remeshing 방법을 적용하여 가능성과 타당성을 검증하여 보았다.

## 참 고 문 헌

1. Yang, D. Y., Jung, D. W., Song, I. S., Yoo, D. J. and Lee, J. H., 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, 1995.
2. Jung, D. W., Yoo, D. J. and Yang, D. Y., A dynamic explicit/rigid-plastic finite element formulation and its application to sheet metal forming processes, *Engineering Computations*, vol.12, pp.707-722, 1995.
3. 이상욱, 윤정환, 양동열, 1996. "외연적 시간 적분법을 이용한 박판 성형 및 내연적 스프링백 해석", 대한 기계학회 춘계 학술대회 논문집, pp.647-652.
4. Wang, N.M. and Budiansky, B., "Analysis of Sheet Metal Stamping by a Finite Element Method", *Journal of Applied Mechanics*, vol. 45, pp.73-82, March 1978.
5. "An Introduction to ABAQUS/Explicit", 1991, Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc.
6. 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.
7. Hallquist, J.O., 1983, "Theoretical Manual for DYNA3D", Lawrence Livermore Laboratory.
8. Meyers, M.A., Ravichandran, G., 1989, "Lectures on Dynamic Behavior of Materials", University of California, San Diego. No.1, pp.3~10, 1997.