

동적-외연적 유한요소법을 이용한 도어 판넬 성형해석에 관한 연구

정 동 원 · 황 재 신*

제주대학교 기계에너지생산공학부, 제주대학교 대학원*

A Study of forming analysis of door panel by using dynamic-explicit finite element method

Dong-Won Jung and Jae-Sin Hwang*

Faculty of Mechanical, Energy and Production Engineering, Cheju National University,
Jeju-Do 690-756, Korea

*Graduate School, Cheju National University, Jeju-Do 690-756, Korea

Finite element method is a very effective method to simulate the forming processes with good prediction of the deformation behaviour. For the finite element modeling of sheet metal forming, the accurate tool model is required. Due to the geometrical complexity of real-size part stamping tools, it is hard to make a finite element model for real-size auto-body stamping parts. This paper, it was focussed on the drawability factors on auto-body panel stamping by Dynaform with using tool planing alloy to reduce raw price as well as high precision from design optimization of the die. According to this study, the results of simulation will give engineers good information to access the design optimization of the die.

Key words : dynamic-explicit time integration scheme, auto-body panel stamping processes, lumping scheme, dynaform

서 론

박판 금속성형은 금속 판재를 이용하여 다양하고, 비교적 복잡한 형상의 제품을 만드는 것으로서 저렴한 소재, 제품의 높은 비강도, 대량 생산성 등의 큰 장점으로 인해서 현대 산업에 폭 넓게 적용되어 지고 있는 분야이다. 하지만 대부분의 박판 성형물은 제조과정 중에 커다란 소성변형을 수반하게 되어 판재의 파단, 형상불량 등의 가공 결함이 발생하게 된다. 따라서 우수한 박판 성형물을 얻기 위해서는 합리적인 가공공정의 설계가 필수적이라 할 수 있다(정 등, 2002).

Fig. 1과 같이 금형제작 과정은 차체부품의 최적설계를 위한 제품 솔루션을 한 후 현재제품상태에서 전개할 수 있는 최적의 공정계획, 제품물, 생산라인 로드'지(LOAD'G)조건, 성형성확보 방안 등을 제안한 다음 성형해석을 위한 제품 필렛팅, 다이모델링을 3차원으로 모델링한다. 다음으로 해석시스템을 직접 수행함으로써 실제 트라이아웃 상황에서 발생하는 모든 변수들을 데이터 입력 시 고려하여 실제상황에 최대한 근접한 실제 트라이아웃을 구현할 수 있게 한 다음 초기공법계획에 성형해석시스템의 해석결과에 대한 기술적 대응방안을 사전에 반영함으로써 최적 다이레이아웃을 완성한다.

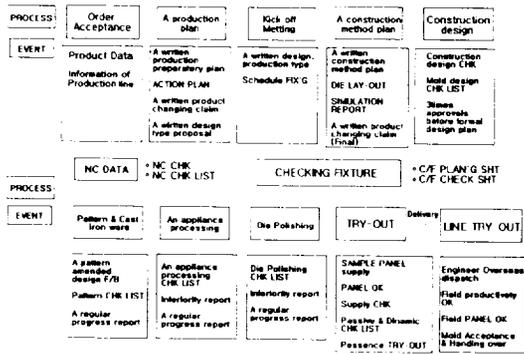


Fig. 1. Metallic mould manufacture process.

금형제작 과정과 마찬가지로 차체 판넬의 설계 제작 과정을 Fig. 2에서 살펴보면, 제품도가 완성된 후에 펀치 프로파일과 다이 페이스를 얻기 위해서는 경험에 의한 데이터베이스를 이용하는 방법과 성형 시뮬레이션을 이용하는 두 가지 방법이 있다. 그러나 현재로서는 경험에 의한 설계가 지배적이며, 향후에는 성형 시뮬레이션으로 점차 변경 될 것으로 예상된다. 이러한 두 방법은 모두 수정과 검토 반복 작업이 이루어진다. 따라서 레이아웃의 변경에 따라, 금형 설계의 변경이 신속히 이루어져야한다(정 등, 1995).

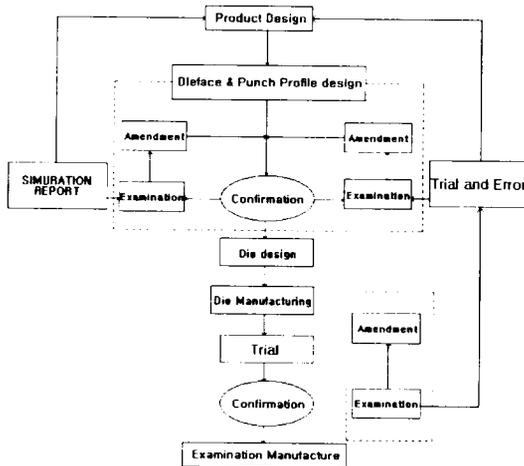


Fig. 2. Flow chart for die manufacturing.

본 연구에서는 동적-외연적 방법을 이용하여 차체 판넬 성형 시 발생하는 바인더-랩에 대한 해석과 차체 판넬의 대표적인 박판 부품 중에서 자동차 도어를 3차원으로 해석하여 실제 산업현장에서의 적용가능성

과 타당성을 검토하고자 한다.

이론적 배경

운동 방정식 수식화

외력에 의해 행해진 일(Wext)과 내력, 관성력 및 점성력에 의한 일(Wint)은 같아야 한다는 일평형(work balance)으로부터 (1)식으로 나타낼 수 있다.

$$\int_{V''} \delta U^T \phi dV + \int_{S''} \delta U^T \phi dS + \sum_{i=1}^n \delta U_i^T F_i = \int_{V''} (\delta \epsilon^T \sigma + \delta u^T \rho \ddot{u} + \delta u^T k_d \dot{u}) dV \quad (1)$$

여기서

- $\delta u, \delta \epsilon$: 임의의 변위 및 변형률
- ϕ : 체적력 (Body force)
- ϕ : 표면력 (Surface traction)
- F_i : 집중 하중
- ρ : 밀도
- k_d : 점성 계수
- u, \dot{u}, \ddot{u} : 변위, 속도, 가속도

이다.

형상 함수(shape function) N을 도입하면

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

(2)식처럼 되고 이를 (1)식에 대입하고 정리하면 다음과 같이 동적 힘 평형식(dynamic force balance equation)을 구할 수 있다.

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

여기서 M 과 C는 각각 질량과 점성 행렬을 나타내며,

$$M = \int_{V''} \rho N^T N dV$$

$$C = \int_{V''} k_d N^T N dV \quad (4)$$

R_{int} 와 R_{ext} 는 각각 내력과 외력을 나타내는 벡터이다.

$$R^i = \int_V B^T \sigma dV$$

$$R^{ext} = \int_V N^T \phi dV + \int_S N^T \phi dS + \sum_{i=1}^n F_i \quad (5)$$

집중 질량법

외연적 시간적분법에서 요소 질량행렬을 집중시켜 사용하면 해의 정확도가 증가하고 해석시간을 줄일 수 있다.(Nagtegaal, 1991 ; Hinton, 1976 ; Surana, 1978)

$$[M][a] = [F].$$

$$[a] = [M]^{-1}[F] \quad (6)$$

만일, 행렬 $[M]$ 을 집중시켜 대각선 행렬로 만들면, 역행렬 $[M]^{-1}$ 을 구할 필요 없이 바로 선형식 $a_i = m_i^{-1} f_i$ 을 풀어 해를 직접 구할 수 있다. 따라서 집중 설계는 행렬을 구하는데 많은 시간이 소요되지 않으므로 경제적인 해석을 수행할 수 있다. 또 동적 해석에서는 집중 질량법이 연속 질량법(Consistent mass scheme)보다 해의 정확도가 우수하다.

외연적 시간적분법

계산의 편리를 위해 (3)식에서 점성 행렬 C 를 무시한다. 그러면 외연적 시간 적분 절차는 절점에서와 요소에서의 계산을 번갈아 수행하는 형태가 된다. 이를 요약하여 Fig. 3에 나타내었다(Moss, 1984).

먼저 각 절점에서 구해진 외력과 내력의 차이와 그 질량으로 가속도를 구한 후 이를 중간 차분법(central difference method)을 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. 4처럼 도식적으로 나타낼 수

있다(Cook, 1989).

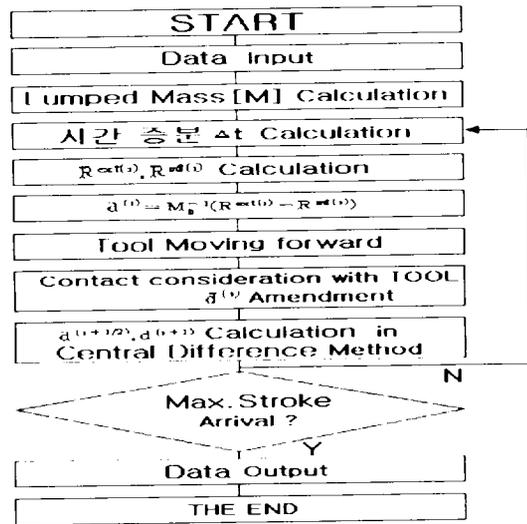


Fig. 3. Algorithm of extensive time integration.

즉, 모든 계산은 변형률로부터 출발하여 응력을 계산해 나가는 방식이다.

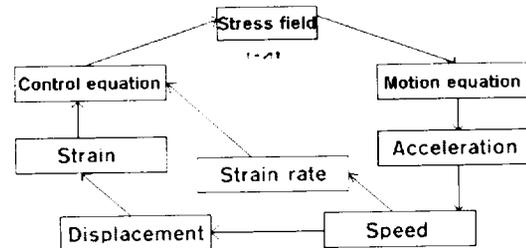


Fig. 4. Transmission process of stress.

접촉 처리

외연적 시간 적분법의 장점을 살리기 위해 벌칙 함수법(penalty method)을 사용한다. 절점이 금형을 Fig. 3(b)에서의 h 만큼 파고들면 접촉력 f_c 를 절점에 가해준다.

$$f_c = -hkn \quad (7)$$

여기서 h 는 침투량, n 은 수직 벡터(normal vector), k 는 강성 인수(stiffness factor)로서 다음과 같이 정의된다(Hallquist, 1983).

$$k = aKA^2 / V \quad (8)$$

- a : 척도 계수(scale factor)
- K : 체적 탄성 계수
- A : 요소 면적
- V : 요소 부피

이의 모식도를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 (a)는 두개의 표면이 접촉하기 직전의 모습을 나타내고 있고, (b)는 두개의 표면이 제산상으로 먼저 침투를 허용하는 모습을 나타내고 있다.

이는 벌칙 함수법의 특성이다. 침투를 허용한 후 그 침투량 k 에 해당하는 f 을 식(7)과 같이 구하여 이를 양쪽 표면에 대칭적으로 가해주면 (c)와 같이 기하학적으로 맞는 접촉 상태를 가지게 된다.

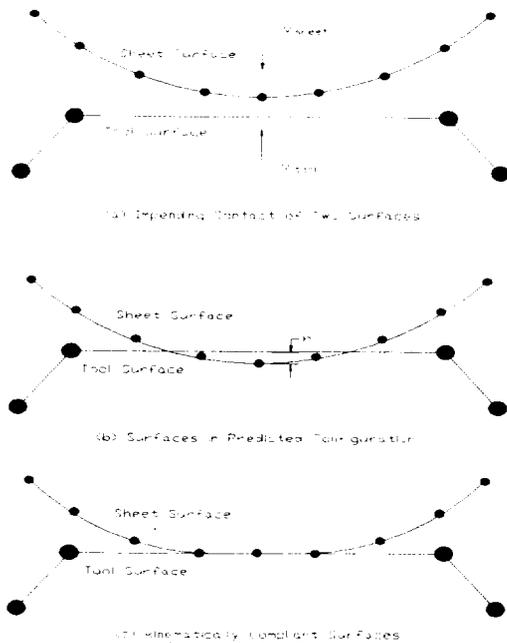


Fig. 5. Schematic about contact technique.

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,

$$\Delta t_c = L_s / C \quad (9)$$

L_s : 요소의 특성 길이
(characteristic length)

$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$: 응력 전파 속도

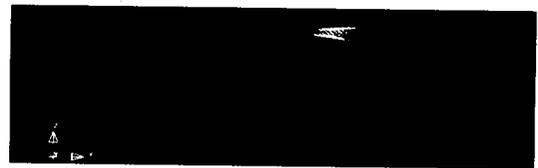
E : 영계수 (Young's modulus)

ρ : 밀도

가 된다(Meyers, M. A., 1989).

1 도어 판넬의 해석

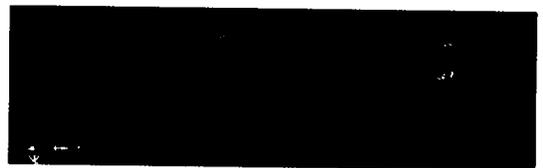
다음은 도어 판넬의 성형 공정 시 보이는 각도에 따른 금형형상과 펀치스트로크에 따른 각 스텝별로 두께분포도, 성형한계곡선과 잔류응력분포를 시물레이션 하였다. 결과는 다음과 같다.



(a) Metallic pattern shape seeing in side



(b) Obliquely seeing metallic pattern shape



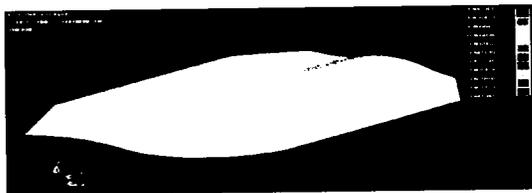
(c) Over seeing metallic pattern shape

Fig. 6. Metallic pattern shape by punch stroke.

Fig. 6에서는 도어 판넬의 여러 측면에서 본 금형 형상을 보여주고 있다.

Table 1. Thickness data

Color	Thickness
	0.860161
	0.851269
	0.842376
	0.833404
	0.824502
	0.815700
	0.806808
	0.797916
	0.780132
	0.771240



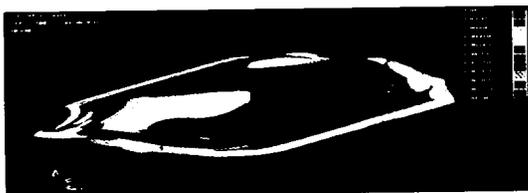
(a) Thickness distribution chart in first step



(b) Thickness distribution chart in step 7



(c) Thickness distribution chart in step 7



(d) Thickness distribution chart in step 9



(e) Thickness distribution chart in finally step

Fig. 7. Thickness distribution chart by punch stroke.

Fig. 7에서는 펀치 스트로크에 따라 step별로 두께가 이상적으로 성형되어지고 있으며 step9부터 제품에 몇 군데에서 주름과 파단이 발생하고 있다.



(a) Forming limit diagram distribution chart in first step (Middle thickness layer)



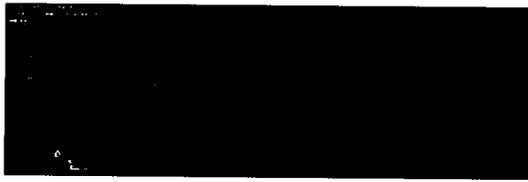
(b) Forming limit diagram distribution chart in step 5 (Middle thickness layer)



(c) Forming limit diagram distribution chart in step 7 (Middle thickness layer)



(d) Forming limit diagram distribution chart in step 9 (Middle thickness layer)



(e) Forming limit diagram distribution chart in finally step (Middle thickness layer)



(f) Forming limit diagram distribution chart in step 5 (Bottom thickness layer)



(g) Forming limit diagram distribution chart in step 8 (Bottom thickness layer)

Fig. 8. Forming limit diagram(FLD) distribution chart by punch stroke.

Fig. 8에서는 중간과 맨아래 두께층을 펀치스트로크에 따라 성형한계곡선을 시뮬레이션 해 보았다. 노란색 곡선아래와 가까운, 파단이 일어 날 가능성이 있는 한 부분만을 제외하고는 대체적으로 이상적인 성형이 이루어지고 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 9에서는 최종형상에서의 잔류응력분포도를 보면 표면에는 잔류인장이 중심부에는 잔류압축이 남아 있는 것을 알 수 있다. 내부와 외부표면이 같은 수축을



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



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



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



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



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



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

Fig. 9. Residual stress distribution chart by punch stroke.

해야 하기 때문에 표면에는 잔류인장이 남게 된다.

결론 및 고찰

본 연구에서는 산업현장에서 사용되어지는 대표적 인 차체 판넬의 단면형상과 두께 등의 기하학적 형상 및 재료의 항복응력에 대한 영향을 평가 해 보았다. 이에 사용된 방법은 동적-외연적 방법을 이용하였으며 도어 판넬에 대해 적용해 봄으로써 차체 판넬 성형 시 발생하는 공정변수들을 예측할 수 있다는 가능성을 제시하였고 다음과 같은 결론과 고찰을 얻었다.

1. 동적-외연적 유한요소법을 이용하여 도어를 해석하여 사전에 문제점들을 파악하고 대안을 제시해 봄으로써 이러한 해석 방법이 최적의 금형 설계조건과 공정변수를 예측하는데 유용하다는 것을 알 수 있다.
2. 수렴성에 대한 문제없이 원활하게 성형 공정을 해석 할 수 있다는 실용적인 장점을 알 수 있다.
3. 이런 해석을 바탕으로 실제 실험과 비교, 검토하여 신뢰성 있는 해석 프로그램을 확립한다.
4. 실제 공정에서 20개의 스텝핑 제품 중 1개의 결함만 발생하여도 매우 심각한 문제가 되므로 이러한 차체 판넬 성형해석은 앞으로도 더욱더 선행되어야 할 것이다.

참고 문헌

정효상 · 이성수, 2002. "자동차 프레스 금형 자동 설계

- 지원 시스템". 한국정밀공학회, 19(8): 194-20.
- 정동원 · 안동규 · 양동열 · 이장희, 1995. "강소성 외연적 유한요소법을 이용한 자동차 박판제품의 성형공정에 대한 단면해석". 자동차공학회, 3(3): 19-28.
- Nagtegaal J. C., Taylor L. M. 1991. "Comparison of Implicit and Explicit Finite Element Methods for Analysis of the FE-Sim. of 3-D Sheet Metal Forming Processes". in Automotive Ind. Conf., J. Reissneretal. VDI Verlag, Dusseldorf.
- Hinton. E., Rock. T., and O. C. Zienkiewicz. 1976. "A Note on Mass Lumping and Related Processes in the Finite Element Method". Earthquake Engng. Struct. Dynamics, 4(3): 145-149.
- Surana. K. S. 1978. "Lumped Mass Matrices with Non-Zero Inertia for General Shell and Axisymmetric Shell Elements". Int. J. Num. Meth. Engng., 12(11): 1635-1650.
- Moss, W. C. 1984. "On the Computational Significance the Strain Space Formulation of Plasticity Theory". Int. J. Num. Met. Engr., 20: 1703-1709.
- Cook, R. D., Malkus, D.S., Plesha, M.E. 1989. "Concepts and Applications of Finite Element Analysis", 3rd ed., Wiley, pp. 367-381.
- Hallquist, J. O. 1983. "Theoretical Manual for DYNA3D". Lawrence Livermore Laboratory.
- Meyers, M. A., Ravichandran, G. 1989. "Lectures on Dynamic Behavior of Materials". University of California, San Diego.