

차체 판넬 스템핑 공정에서 동적-외연적 유한요소법을 이용한 성형해석에 관한 연구

정동원[#] · 황재신^{*}

A Study of Forming Analysis by using Dynamic-Explicit Finite Element Method in Auto-Body Stamping

Dong-Won Jung[#], Jae-Sin Hwang^{*}

ABSTRACT

In this paper, a finite element formulation using dynamic-explicit time integration scheme is used for numerical analysis of auto-body panel stamping processes. The lumping scheme is employed for the diagonal mass matrix and dynamic explicit formulation. Auto-body panel forming is analyzed by using dynamic-explicit finite element method. Further, the simulated results of the auto-body panel stamping processes are shown and discussed. Its application is being increased especially in the stamping industrial area for the cost reduction, weight saving, and improvement of strength.

Key Words : Dynamic-explicit Time Integration Scheme(동적-외연적 시간 적분법), Forming Analysis(성형해석), Auto-body Panel Stamping Forming(차체 판넬 스템핑 공정), Lumping Scheme(집중법)

1. 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 적용되어지고 있는 분야이다. 하지만 대부분의 박판 성형물은 제조 공정 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^[1]. Fig. 1에 나타낸 것과 같이 차체 판넬의 설계 제작 과정을 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 신속하게 이루어져야만 한다^[2].

본 연구에서는 동적-외연적 방법을 이용하여 개발되어진 DynaForm을 사용하여 차체 판넬 성형 시 받

교신저자 : 제주대학교 기계공학과
E-mail : jdwcjeju@cheju.ac.kr
* 제주대학교 대학원 기계공학과

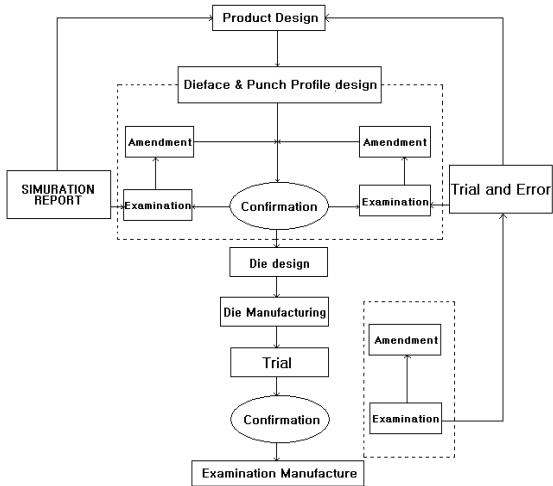


Fig. 1 Flow chart for die manufacturing

생하는 바인더-랩에 대한 해석과 차체 판넬의 대표적인 박판 부품 중에서 S-rail과 반구형 덩-드로잉을 실제와 동일한 3차원 차체판넬 스탬핑 공정으로 해석하여 실제 산업현장에서의 적용가능성과 타당성을 검토하고자 한다.

2. 본 론

2.1 운동 방정식 수식화

외력에 의해 행해진 일(W^{ext})과 내력, 관성력 및 점성력에 의한 일(W^{int})은 같아야 한다는 일평형 (work balance)을^[3] (1)식으로 나타낼 수 있다.

$$\int_{V^0} \delta U^{T\psi} dV + \int_{S^0} \delta U^{T\phi} dS + \sum_{i=1}^n \delta U_i^T F_i = \int_{V^0} (\delta \varepsilon^{T\sigma} + \delta u^{T\rho} \ddot{u} + \delta u^{Tk} \dot{u}) dV \quad (1)$$

형상 함수(shape function) N 을 도입하면

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

(2)식처럼 되고 이를 (1)식에 대입하고 정리하면 다음과 같이 동적 힘 평형식을 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,

$$M = \int_{V^0} \rho N^T N dV$$

$$C = \int_{V^0} k_d N^T N dV \quad (4)$$

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

$$R^{int} = \int_{V^0} B^T \sigma dV$$

$$R^{ext} = \int_{V^0} N^T \psi dV + \int_{S^0} N^T \phi dS + \sum_{i=1}^n F_i \quad (5)$$

2.2 집중 질량법

외연적 시간적분법에서 요소 질량행렬을 집중시켜 사용하면 해의 정확도가 증가하고 해석시간을 줄일 수 있다^[4-6].

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

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 질량법보다 해의 정확도가 우수하다. 실제 해석에서는 Mass scaling방법도 많이 쓰이고 있는데 동적 외연적방법에서 경제적인 해석을 위하여 인위적으로 질량비중을 높여서 해석하는 방법으로 해의 정확도에 큰영향이 없는 한도 내에서 질량비중을 높여서 해석을 수행하고 있다.

2.3 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. 2에 나타내었다^[7].

먼저 각 절점에서 구해진 외력과 내력의 차이와 그 질량으로 가속도를 구한 후 이를 중간 차분법을

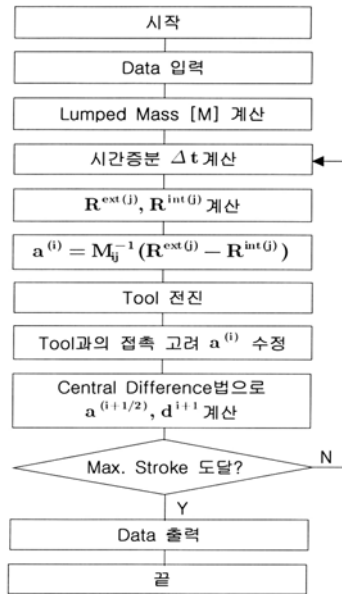


Fig. 2 Flow chart

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 주어졌으므로 다음 계산 스텝에 이를 반영하여 계속 반복 계산하게 된다. 이는 응력과(stress wave)의 전달 과정과 동일한데 이를 Fig. 3처럼 도식적으로 나타낼 수 있다¹⁸⁾.

즉, 모든 계산은 변형률로부터 출발하여 응력을 계산해 나가는 방식이다.

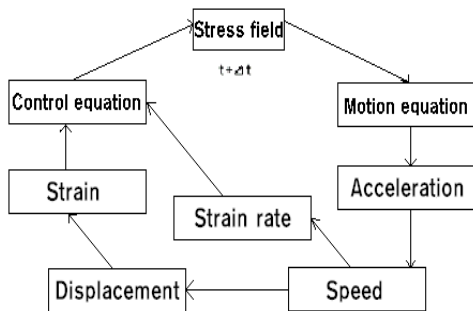


Fig. 3 Transmission process of stress

2.4 접촉 처리

외연적 시간 적분법의 장점을 살리기 위해 벌칙 함수법(penalty method)을 사용한다. 절점이 금형을 ρ 만큼 파고들면 접촉력 f_s 를 절점에 가해준다.

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

여기서 h 는 침투량, n 은 수직벡터, k 는 강성인수로써 다음과 같이 정의된다⁹⁾.

$$k = aKA^2 / V$$

이의 모식도를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 (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 을 식(7)과 같이 구하여 이를 양쪽 표면에 대칭적으로 가해주면 (c)와 같이 기하학적으로 맞는 접촉 상태를 가지게 된다.

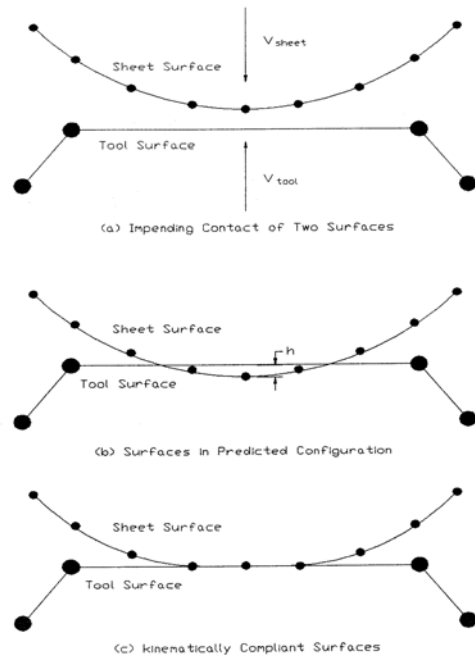


Fig. 4 Schematic about contact technique

2.5 시간 증분의 안정 한계

외연적 시간 적분법에서는 축차가 없는 대신 해의 안정성을 보장하기 위한 임계 시간 증분이 존재하여 시간 증분이 이 값 이하일 것을 요구하고 있다.

점성이 없을 경우 임계 시간 증분은,

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

가 된다^[10]. 여기서 C 는 재료내의 탄성과 속도이다.

3. 성형해석결과

본 논문에서 제시된 방법을 이용하여 차체 판넬 성형 시 발생하는 바인더-랩과 산업현장에서 적용되는 자동차 부품인 S-rail과 반구형 담-드로잉을 실제 공정과 동일하게 3차원 차체판넬 스탬핑 공정으로 해석하여 보았다.

3.1 바인더-랩(Binder-Wrap) 해석

차체 판넬을 성형하는 과정에서 박판을 블랭크 호울더로 고정시키게 되면, 바인더-랩이 형성된다. 바인더-랩이 형성되면서 갖게 되는 이러한 변형은 판넬을 성형하기 위한 박판의 초기상태에 영향을 미치게 되므로 올바른 판넬 성형 공정 설계를 위해서는 바인더-랩 해석이 선행되어야만 한다. 다음은 차체 판넬 성형 시 펀치스트로크에 따른 금형형상과 각 단계 별로 두께분포도, 성형한계곡선과 잔류응력분포를 3차원으로 나타내 보았으며, 해석결과는 다음과 같다.

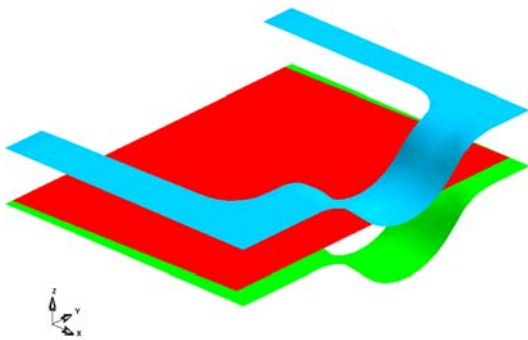
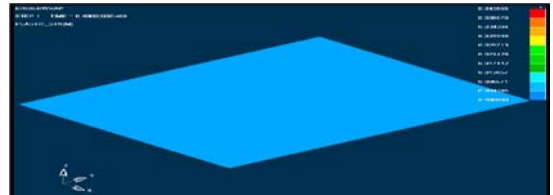
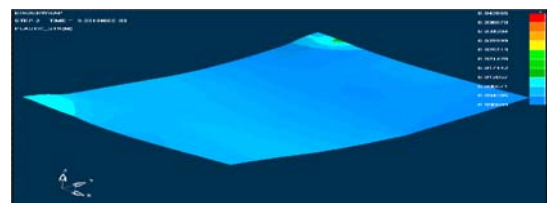


Fig. 5 Metallic pattern shape at Binder-Wrap analysis

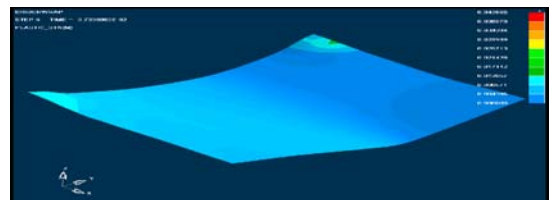
Fig. 5에서의 금형형상은 윗부분과 아랫부분이 블랭크홀더와 다이이며 다이 위에 올려진 중간부분에 판재를 보여준다.



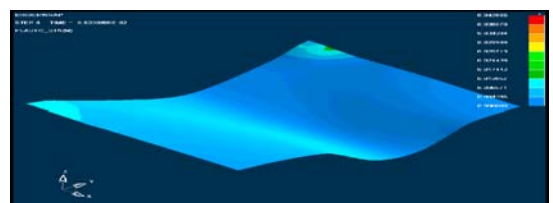
(a) Thickness distribution chart in first step



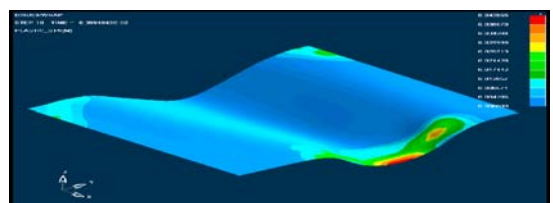
(b) Thickness distribution chart in step 2



(c) Thickness distribution chart in step 5



(d) Thickness distribution chart in step 8

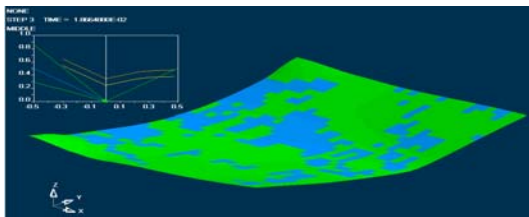


(e) Thickness distribution chart in finally step

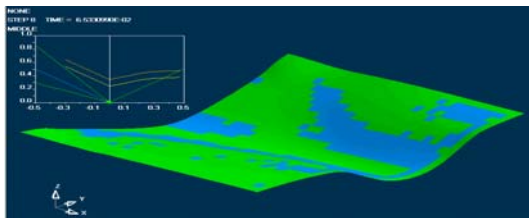
Fig. 6 Thickness distribution chart by punch stroke

Fig. 6은 펀치 행정에 따라 스태별로 판넬두께의 변형분포를 볼 수 있다. 스태2에서부터 판재의 모서리 부분에서 주름이 형성되고 있는 것을 알 수 있으며 스태가 진행될수록 모서리에서부터 점점 주름의 변형 크기가 증가하고 있다는 것을 알 수 있다. 최종 단계에서의 두께 분포도에서는 국부적인 두께의 주름이 발생하고 있다는 것을 알 수 있다. 국부적인 두께의 주름을 해결하기 위해 추가적인 비드 성형이 필요하다는 것을 예측할 수 있었다.

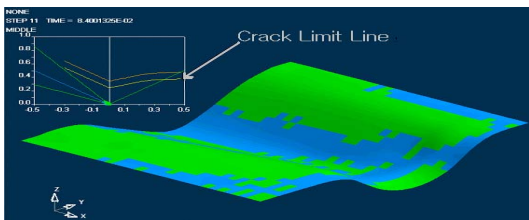
성형한계곡선은 판재의 스트레칭 실험을 실시하고 이 결과로부터 파단 된 영역과 그렇지 않은 안전영역을 경계 짓는다. 곡선은 성형해석결과를 이 곡선에 대입하여 성형가능 여부를 판별한다. Fig. 7에서 성형한계곡선을 보면 점들이 파단한계선 밑에 있으므로 성형 시 파단이 일어나지 않는다. 이것으로 바인더랩의 해석에서 성형의 가능여부를 판별하는 것이다.



(a) Forming limit diagram distribution chart in step 3

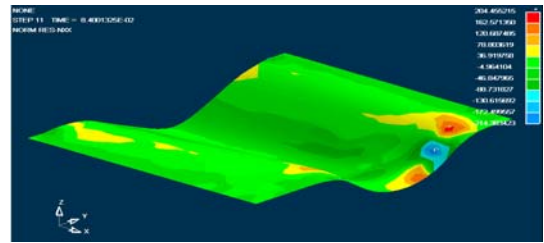


(b) Forming limit diagram distribution chart in step 8

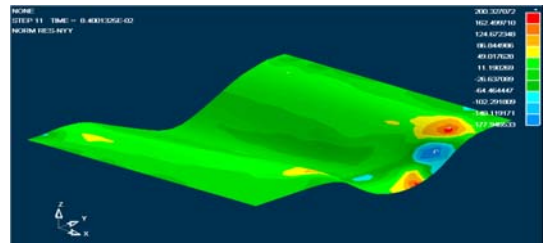


(c) Forming limit diagram distribution chart in finally step

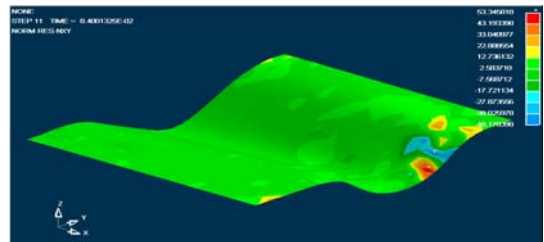
Fig. 7 Forming limit diagram distribution chart by punch stroke



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



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



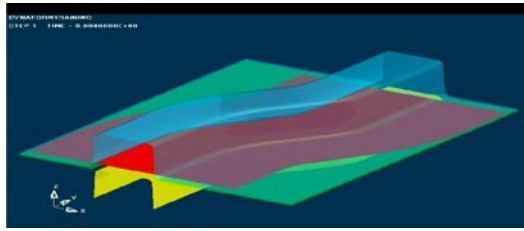
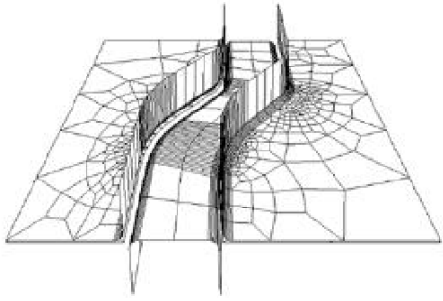
(c) x-y coordinate residual stress distribution chart in finally shape

Fig. 8 Residual stress distribution chart by punch stroke

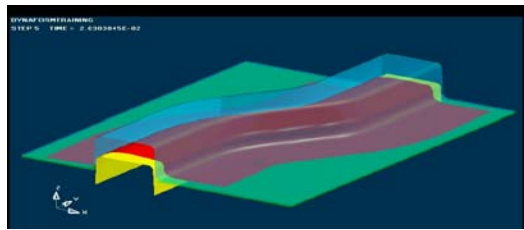
Fig. 8에서는 최종형상에서 각각의 측면에서의 잔류응력의 분포를 보여주고 있다. x-y방향에서의 잔류응력분포가 각각의 같은 방향에서의 잔류응력분포보다 적게 나타나는 것을 볼 수 있다. 대체적으로 잔류응력의 분포가 없는 것으로 보인다.

3.2 S-rail 해석

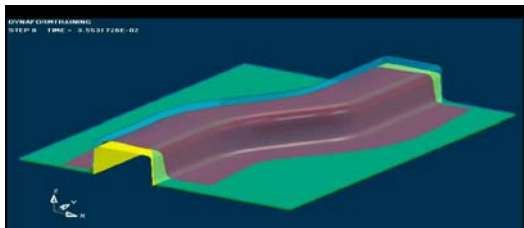
자동차 구조부재의 경우 충돌 사고 시 인명의 보호를 위하여 차체의 변형에 의한 충돌에너지의 적절한 흡수를 유도하도록 설계함으로써 충돌안전성을 확보하려는 노력이 요구된다. 일반적으로 자동차 프레임은 축 또는 현가장치 등과와 간섭을 피하기 위하여 굴곡을 가지게 되는 등 여러 가지 기하학적 형상을 갖게 된다. 사이드레일(side rail)은 자동차 충돌 시 에너지흡수에 중요한 역할을 하는 프론트 사이드 멤버



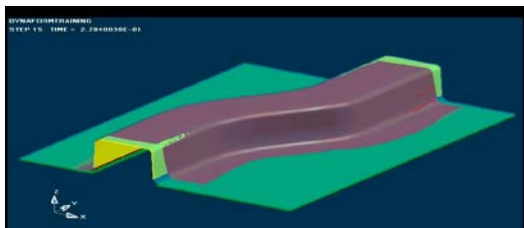
(a) Metallic pattern shape in first step



(b) Metallic pattern shape in step 5



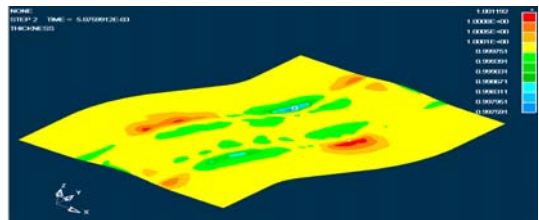
(c) Metallic pattern shape in step 8



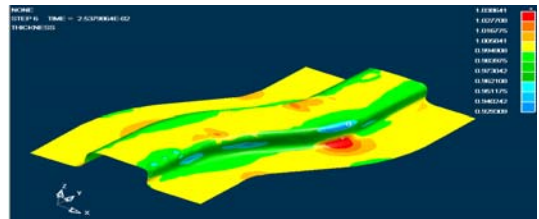
(d) Metallic pattern shape in finally step

Fig. 9 Metallic pattern shape by punch stroke

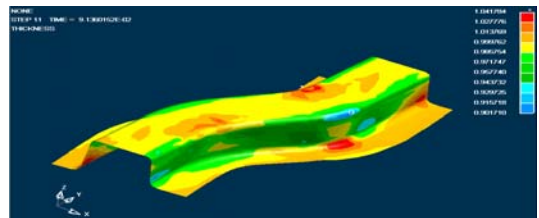
(front side member)를 단순화한 형태로 볼 수 있으며, 초기 형상이 곡률을 가지고 있다. 프론트 사이드 멤버와 같은 박판부재의 에너지 흡수 특성은 단면형상 및 두께 등의 기하학적 형상이나 재료의 항복응력에 영향을, 이런 인자들이 미치는 영향을 평가 할 필요가 있다. 다음은 S-rail의 성형 시 펀치스트로크에 따른 각 스텝별로 금형형상, 두께분포도, 성형한계곡선과 잔류응력분포를 실제 공정과 동일하게 3차원으로 시뮬레이션 하였으며, 해석결과는 다음과 같다.



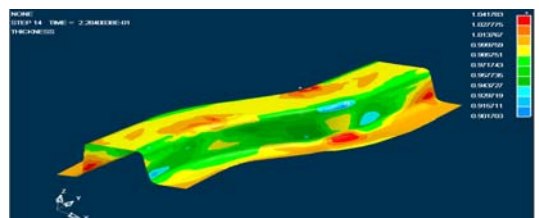
(a) Thickness distribution chart in step 2



(b) Thickness distribution chart in step 6



(c) Thickness distribution chart in step 11

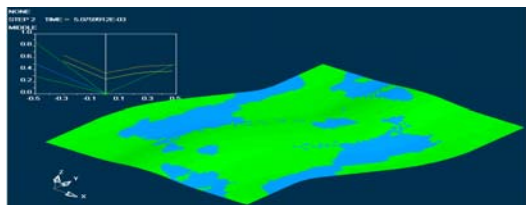


(d) Thickness distribution chart in finally step

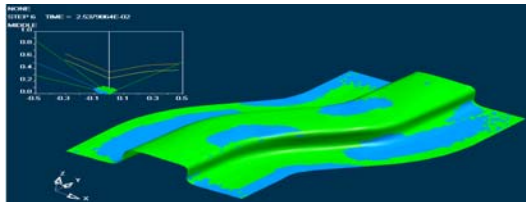
Fig. 10 Thickness distribution chart by punch stroke

Fig. 9는 S-rail을 펀치 스트로크 따라 스텝별로 금형형상을 보여주고 있으며 펀치가 올라가면서 최종 단계에서는 판재의 모서리 부분에서의 파단이 생긴 것을 볼 수 있다.

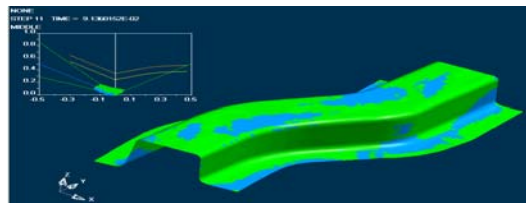
초기변형상태에서부터 두께의 변화가 일어나는 것을 볼 수 있다. 성형이 진행 될수록 초기상태에서의 두께의 분포에서보다 두께 분포변화의 정도가 증가하고 있다. 최종현상단계에서 보는 두께 분포도에서 보는 것과 같이 심한 주름부분과 파단발생의 가능성이 있다. 국부적인 두께의 주름과 파단을 해결하기 위해 추가적인 공정설계 변경이 필요할 것으로 보인다.



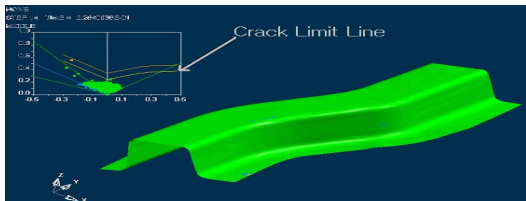
(a) Forming limit diagram distribution chart in step 2



(b) Forming limit diagram distribution chart in step 6

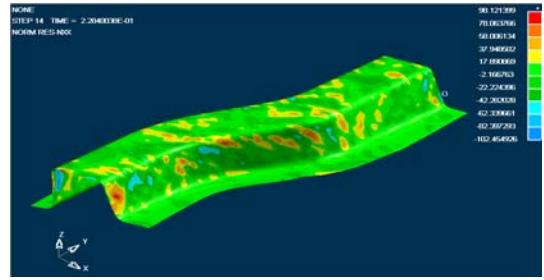


(c) Forming limit diagram distribution chart in step 11

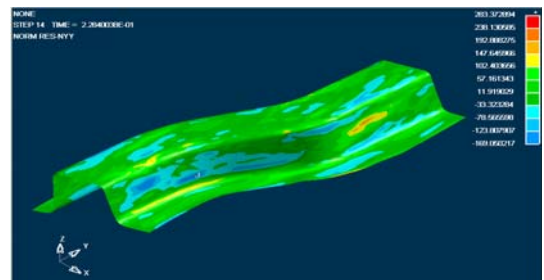


(d) Forming limit diagram distribution chart in finally step

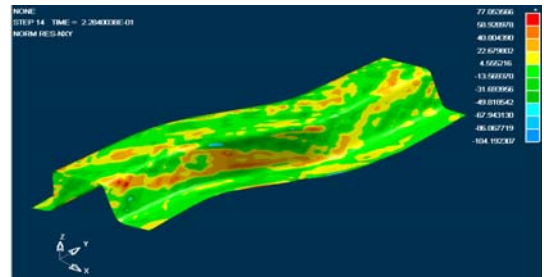
Fig. 11 Forming limit diagram distribution chart by punch stroke



(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 chart in finally shape

Fig. 12 Residual stress distribution chart by punch stroke

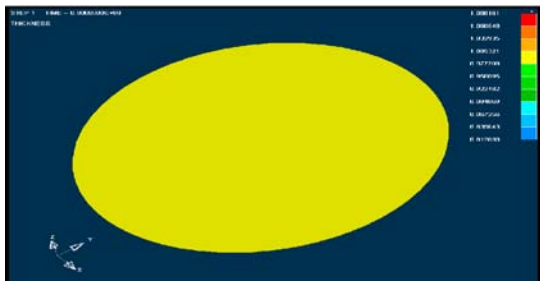
펀치행정진행에 따른 S-rail의 성형한계곡선으로 성형이 진행될수록 판넬의 몇 군데에서 파단이 일어날 가능성을 보여주고 있다. 파단 한계선인 부분 위에 하나의 점은 파단의 가능성이 높아지고 있는 부분이다.

최종형상에서의 잔류응력분포도를 보면 x-x방향의 잔류응력의 분포는 높게 나오고 있는 반면에 y-y방향은 낮게 나타나고 있다. 일반적으로 잔류응력이 존재하는 것은 비틀림과 스프링-백 등의 탄성복원현상으로 치수정밀도를 낮추고 제품의 탄성한계를 낮추며

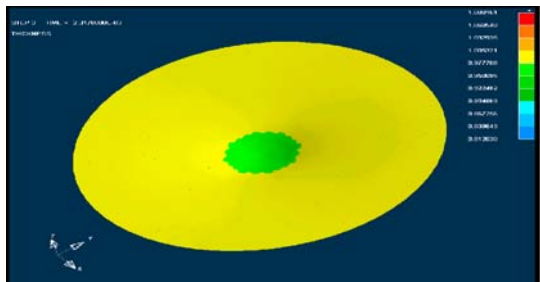
차후의 기계가공에 문제점을 일으키는데, 이런 점들은 바람직하지 못하므로 잔류응력의 예측은 제품설계과정에서 필요하다.

3.3 반구형 딥-드로잉

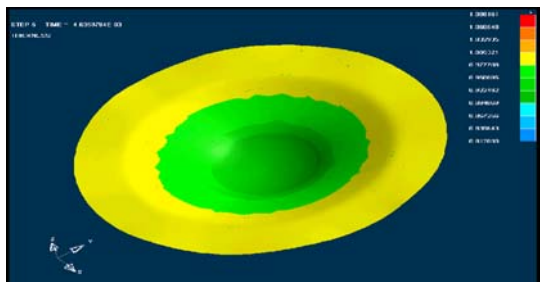
반구형 딥-드로잉은 산업현장의 어디에서나 응용이 가능하며 아주 유용한 부분이므로 성형해석이 필요하다. 다음은 반구형 딥-드로잉 공정 시 펀치스트로크에 따른 각 스텝별로 두께분포도, 성형한계곡선과 잔류응력분포를 시뮬레이션 하였다. 해석결과는 다음과 같다.



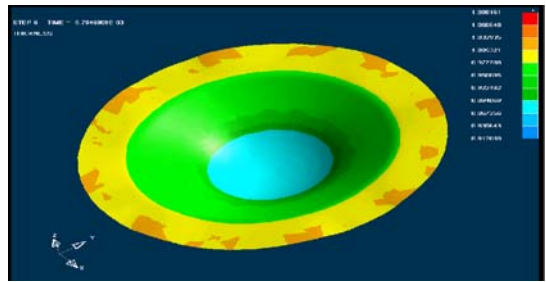
(a) Thickness distribution chart in first step



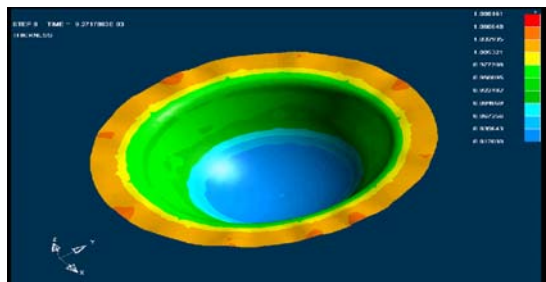
(b) Thickness distribution chart in step 3



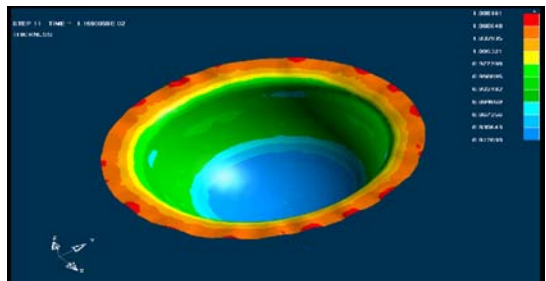
(c) Thickness distribution chart in step 5



(d) Thickness distribution chart in step 6



(e) Thickness distribution chart in step 8

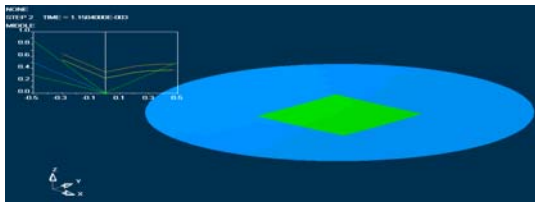


(f) Thickness distribution chart in finally step

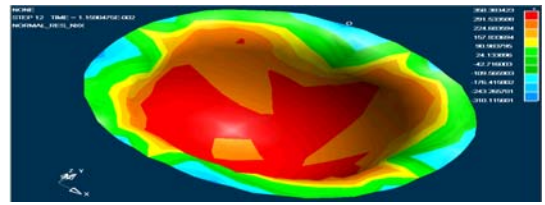
Fig. 13 Thickness distribution chart by punch stroke

Fig. 13은 반구형의 성형의 시작에서 종료 시까지 두께 분포도를 표현하고 있다. 위의 그림을 보면 가운데에서 두께의 변화가 일어나면서 스텝이 진행될수록 점점 두께가 가운데를 중심으로 점점 퍼지면서 커지고 있는 것을 알 수 있었다.

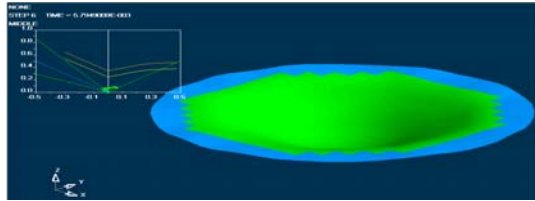
반구형의 성형한계곡선을 보면 가운데부분에서부터 점점 이상적으로 퍼지는 형상의 응력형태를 보이는 것으로 국부적인 파단이나 주름은 없을 것으로 사료된다.



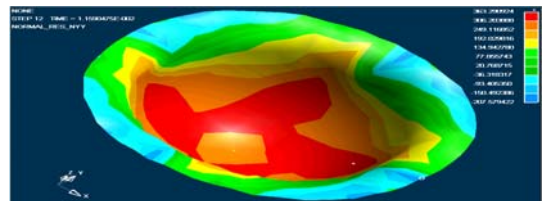
(a) Forming limit diagram distribution chart in step 2



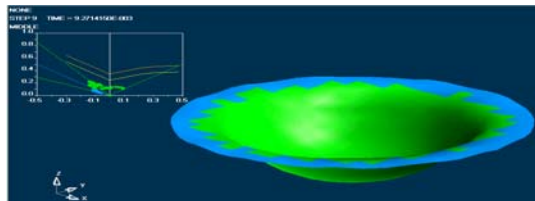
(a) x-x coordinate residual stress distribution chart in finally shape



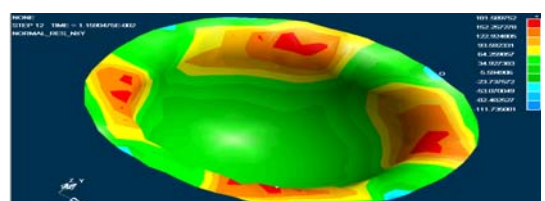
(b) Forming limit diagram distribution chart in step 6



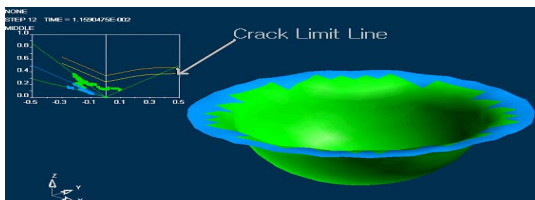
(b) y-y coordinate residual stress distribution chart in finally shape



(c) Forming limit diagram distribution chart in step 9



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



(d) Forming limit diagram distribution chart in finally step

Fig. 15 Residual stress distribution chart by punch stroke

Fig. 14 Forming limit diagram distribution chart by punch stroke

각각의 최종형상에서 보는 축의 잔류응력분포도를 보면 표면에는 잔류인장이 중심부에는 잔류압축이 남아 있는 것을 알 수 있으며 내부와 외부표면이 같은 수축을 해야 하기 때문에 표면에는 잔류인장이 남아 있는 것을 알 수 있었다. 이러한 점을 볼 때 잔류응력의 예측으로 인해 제품의 탄성한계를 낮추고 차후의 기계가공에 문제점을 일으키는 문제점들을 예측할 수 있으며 더불어 이상적인 공정을 위한 대안을 마련할 수 있을 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 산업현장에서 사용되어지는 대표적인 차체 판넬의 단면형상과 두께 등의 기하학적 형상 및 재료의 항복응력에 대한 영향을 평가 해 보았다. 이에 사용된 방법은 동적-외연적 방법을 이용하였으며, 바인더-랩, S-rail과 반구형 덩-드로잉 예제에 대해 적용해 봄으로써 차체 판넬 성형 시 발생하는 공정변수들을 예측할 수 있다는 가능성을 제시하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 동적-외연적 유한요소법을 이용하여 바인더-랩, S-rail과 반구형 덩-드로잉을 해석하여 사전에 문제점들을 파악하고 대안을 제시해 봄으로써 이러한 해석방법이 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. 성형해석을 통하여 주름, 파단, 비틀림, 스프링-백 등을 미리 예측하여 공정단축과 경량화, 품질향상, 개발기간 및 생산에 소요되는 기간의 단축 등의 최적설계를 수행할 수 있는 가능성을 보여주고 있다.
4. 실제 공정에서의 결함의 사전예측은 금형개발비의 감소와 정확하고 빠른 Try-out을 위하여 절실히 필요한 실정이다. 이러한 차체 판넬 성형해석은 앞으로 더욱더 선행되어야 할 것이다.
9. Hallquist, J. O., "Theoretical Manual for DYNA3 D," Lawrence Livermore Laboratory, 1983.
10. Meyers, M. A., Ravichandran, G., "Lectures on Dynamic Behavior of Materials," University of California, San Diego, 1989.

참고문헌

1. 정효상, 이성수, "자동차 프레스 금형 자동 설계지원시스템," 한국정밀공학회지, Vol. 19, No. 8, pp. 194-202, 2002.
2. 정동원, 안동규, 양동열, 이장희, "강소성 외연적 유한요소법을 이용한 자동차 박판제품의 성형공정에 대한 단면해석," 자동차공학회지, 제3권 제3호, pp. 19-28, 1995.
3. Hibbit, "An Introduction to ABAQUS/ Explicit," Karlsson & Sorensen Inc, 1991.
4. Nagtegaal, J. C. and Taylor, L. M., "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. Reissner et al, VDI Verlag, Dusseldorf, 1991.
5. Hinton, E., Rock, T. and Zienkiewicz, O. C., "A Note on Mass Lumping and Related Processes in the Finite Element Method," Earthquake Engng. Struct. Dynamics, Vol. 4, No. 3, pp. 145-149, 1976.
6. Surana, K. S., "Lumped Mass Matrices with Non-Zero Inertia for General Shell and Axisymmetric Shell Elements," Int. J. Num. Meth. Engng., Vol. 12, No.11, pp. 1635-1650, 1978.
7. Moss, W. C., "On the Computational Significance the Strain Space Formulation of Plasticity Theory," Int. J.Num.Met.Engr., Vol. 20, pp. 1703-1709, 1984.
8. Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E.,