

<논 문> SAE NO. 943742

# Explicit code를 이용한 Lower control arm의 스탬핑 해석

Analysis of stamping for the Lower control arm using Explicit code

하 원 필,\* 임 세 영\*  
W. P. Ha, S. Y. Im

## ABSTRACT

To examine the residual stress field resulting from stamping process for the lower control arm of a car, the explicit finite element analysis is performed for the stamping process by way of the ABAQUS Explicit. The residual stress is obtained in terms of the Von Mises stress and other parameters such as equivalent plastic strain, the change of blank thickness, the final configuration of the blank and the spring back effect are also considered. Moreover, discussed is the convergence of the explicit FEM versus the punch speed and the element discretization

주요기술용어 : Stamping(스탬핑), Lower Control Arm(로컨트롤 아암), Explicit(외현적), Blank(블랭크), Von-Mises Stress(폰-미세스응력), Equivalent Plastic Strain(동가소성변형률), Spring Back (탄성복원)

### 1. 서 론

로 컨트롤 아암(lower control arm)은 차의 바퀴축과 크로스멤버(cross member)를 연결하며 그 사이의 충격소마(shock absorber)와 함께 자동차 현가장치를 구성하는 한 구조요소이다. 이 로 컨트롤 아암은 주행시 일정하지 않은 도로조건과 외적요인으로 인한 랜덤하중과 구조적 요인인 다축하중 그리고 이로인한 피로현상으로 국부적인 파괴가 일어난다. 이와같은 피로파괴 현상은 응력이력(stress history)에 크게 좌우되며 응력이력은 하중은 물론 잔류응력에 따라서 크게

달라질수 있다. 즉 잔류응력은 결과적으로 피로 파괴에 큰 영향을 미칠수 있으며 정확한 잔류응력의 평가는 피로파괴 설계를 위해서 아주 중요하다. 실제 차체 구조요소들은 각종 열처리, 용접, 프레스가공, 솟피닝(shot peening)공정 등의 여러 과정을 거치게 되므로 이때 발생하는 잔류응력은 피로수명과 밀접한 관계를 가지고 있으며 설계 시에 중요한 인자가 된다.

본 연구에서는 로 컨트롤아암 제작 공정 중 첫번째 단계인 블랭크(blank)의 스탬핑(stamping) 해석에서 나타나는 잔류응력을 ABAQUS Explicit code<sup>(1, 2)</sup>를 이용하여 계산해보고 해석과

\* 한국과학기술원 기계공학과

관련된 여러 변수들이 성형해석에 미치는 효과를 고찰해 보고자 한다.

## 2. Explicit 유한요소법에 의한 성형공정해석

유한요소법을 이용한 박판성형공정의 해석은 Implicit 준정적 과정과 Explicit 동적과정을 동시에 적용하여 2차원 문제, 축대칭 문제를 해결하는 것으로 시작하였고<sup>(3,4)</sup> 점차 실제 해석에 가까운 큰 규모의 형상이 복잡한 문제로 관심이 옮겨졌다. 형상이 간단할 경우, 안정된 해를 위해 아주 작은 시간증분을 사용해야하는 Explicit 해석이 많은 계산시간을 필요로 하므로, 축차에 따른 시간증분이 가변적인 Implicit 해석이 보다 더 효율적이고, 접촉처리에 따른 문제도 크지 않아 그 결과도 더 신뢰할 수 있으나 자동차에 사용되는 각종 구조요소나 차체 판넬과 같이 복잡한 3차원형상의 경우 수렴성을 보장하기 어렵고 접촉처리에 따른 계산시간의 증가로 비효율적이다. Honecker<sup>(5)</sup>는 3차원 형상의 자동차 부품의 성형에 Implicit/Explicit 해석을 통하여 이의 효율성을 확인하였고 Nagtegaal,<sup>(6)</sup> Rebelo,<sup>(7)</sup> Taylor<sup>(8)</sup>은 기하학적 형상이 복잡한 3차원 박판성형의 경우 Explicit 해석이 더 효과적임을 보였다. 최근에 자동차의 프런트 펜더(front fender)와 휠(wheel) 스텝핑 해석은 Explicit code를 적용하여 그 성형성을 평가한 연구가 있었다.<sup>(8, 9, 10)</sup>

### 2.1 Explicit scheme

Explicit scheme은 시간  $i$ 에서의 값을 이용하여  $i+1$ 의 변위, 속도, 가속도등을 결정한다. 중앙차분법을 이용하여 변위, 속도식과 운동방정식을 쓰면 다음과 같다.<sup>(6, 11)</sup>

$$u^{(i+1)} = u^{(i)} + \Delta t^{(i+1)} \dot{u}^{(i+1/2)}$$

$$\dot{u}^{(i+1/2)} = \dot{u}^{(i-1/2)} + \frac{\Delta t^{(i+1)} + \Delta t^{(i)}}{2} \ddot{u}^{(i)}$$

$$\ddot{u}^{(i)} = M^{-1}(F^{(i)} - I^{(i)})$$

여기서  $u$ ,  $\dot{u}$ ,  $\ddot{u}$ 는 각각 변위, 속도, 가속도를 나타내며  $\Delta t$ 는 시간증분, 상첨자는 시간간격(time step)을 나타낸다. Explicit 과정에서는 절선강성행렬과 축차과정이 없는 것이 특징이며 직접적분과 중앙차분법을 이용해서 속도와 변위를 차례로 구한다. 직접적분이 쉬운것은 대각질량(diagonal or lumped mass)행렬을 이용하기 때문이다. 적분하는 시간증분은 ABAQUS내에서 자동적으로 계산되며 안정(stable)된 해를 위한 시간증분 한계는 감쇠(damping)가 있는 경우 다음과 같다.

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{max}} (\sqrt{1+\xi^2} - \xi)$$

여기서  $\omega_{max}$ 는 시스템의 가장 큰 고유치(highest eigenvalue in the system),  $\xi$ 는 가장 높은 모드에서 임계감쇠비(fraction of critical damping in the highest mode)다. 근사적인 시간증분은

$$\Delta t \cong \frac{L}{C_d}$$

로 나타낼 수 있다. 여기서  $L$ 은 요소의 대표적인(characteristic length)이고  $C_d$ 는 팽창전파 속도(dilatational wave speed)로서 요구되는 시간증분이 응력파가 한 요소를 통과하는 시간정도의 수준이어야 함을 알 수 있다. 팽창전파 속도  $C_d$ 는 아래와 같은 관계가 있다.

$$C_d = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$$

이때  $\rho$ 는 재료의 밀도이고  $\lambda$ ,  $\mu$ 는 Lamé의 상수이다. 즉 시간증분이 요소의 크기와 재료 강성의 함수이고 재료내의 팽창전파속도가 실제 공정에서 사용되는 펀치속도보다 훨씬 빠르므로 높은 속도의 해석이 가능하다. 그러나 과도하게 크면 관성(inertia)효과도 크게 나타나고 실제 성형공정과 거리가 있게된다. 이를 위해서는 관성효과를 적절히 제어해야 한다고 알려져 있다.<sup>(1)</sup>

b) Nagtegaal<sup>(6)</sup>은 펀치속도에 따른 Explicit해를 구하고 준정적(quasi static)해와 비교를 통해 어느 정도의 펀치속도에서는 Explicit해라 할지라도 아주 좋은 결과를 보여주었다. 로 컨트롤아암의 해석에서는 위의 과정을 이용하여 여러 속도에 따른 해석을 수행한 후, 속도에 따른 수렴성으로 이를 확인하는 과정을 거쳤다.

## 2.2 로 컨트롤 아암 해석과정

실제 로 컨트롤 아암 제작공정은 블랭킹(blanking), 스탬핑(stamping), 노칭(notching), 피어싱(piercing)의 여러 단계로 진행된다. ABAQUS Explicit code를 이용해서 Fig.1.1과 Fig.1.2의 블랭크에 펀치로 드로잉 했을 때 발생하는 응력, 변형률, 최종형상변화, 블랭크의 두께변화와 탄성복원을 구하고자 한다.

### 2.2.1 기하학적 형상

블랭크의 유한요소 모델을 Fig.1.1과 Fig.1.2에 나타내었다. 대칭성을 고려해서 오른쪽 반만을 모델로 설정하였다. 블랭크의 중앙선을 따라서 x 방향의 변위를 구속하였고, 나머지 자유도는 성형에 따라 움직일 수 있도록 하였다.

셸 요소인 S4RF를 블랭크의 요소로 사용하였고 사용한 두개의 mesh인 mesh 1과 mesh 2에 대한 요소수와 결점수를 Table 1에 나타내었다. 두가지 경우의 블랭크 유한요소모델에 대해 해석했으나 그 변형된 모습의 결과는 두번째 모델(mesh2)의 경우만을 나타내었다. 첫번째 모델(mesh 1)은 요소수가 1048개이고, 두번째 모델(mesh 2)은 요소수가 1676개이다. Fig.1.1과 Fig.1.2에서 검은 부위는  $x=0.2$ 부터  $x=0.28$ 사이를 첫번째 모델(mesh 1)에서는 14개로 나누고 두번째 모델(mesh 2)에서는 16개로 나눈 것으로, 이 부위의 응력, 변형률, 두께변화, 스프링 백등의 수치결과는 Fig.8.1부터 Fig.16까지의 그림에서 보여주었다. Fig.1.3에 그 위치를 상세히 나타내보였다. S4RF요소는 4결점, reduced 적분, 유한 변형 수식화(finite strain formulation)을 사용하여 대변형을 잘 표현할 수 있도록 되어 있다. Explicit에서는 다이, 펀치, 블랭크홀더 등의 금형은 삼각형패치를 구성하고, 3결점 강제요소를 이용하여 연결하였다. Fig.2,

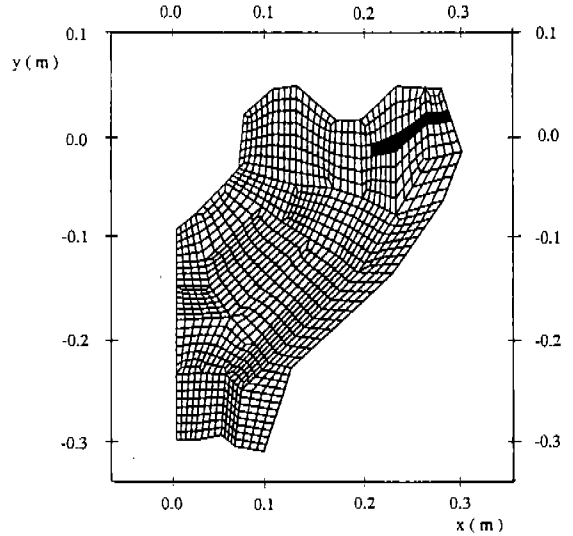


Fig.1.1 Finite Element Mesh(mesh1).

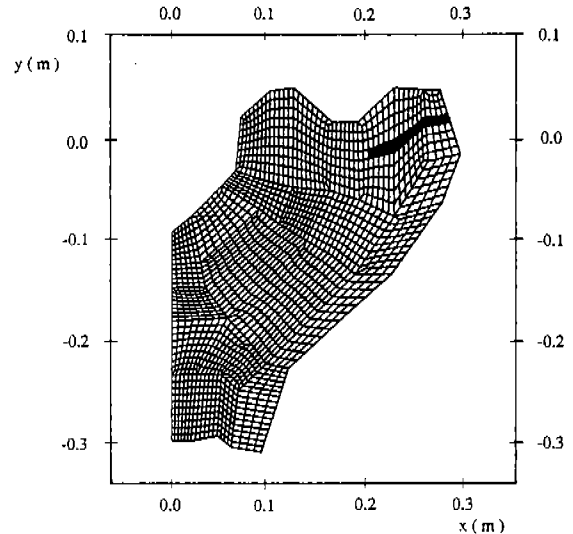


Fig.1.2 Finite Element Mesh(mesh2).

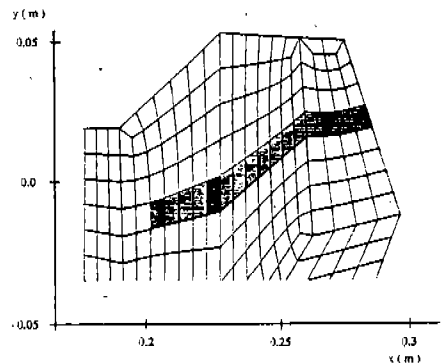


Fig.1.3 Location of the selected elements

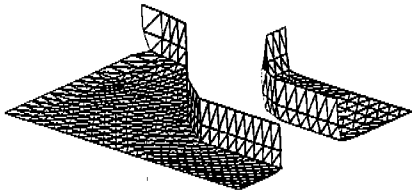


Fig.2 Configuration of the Die.

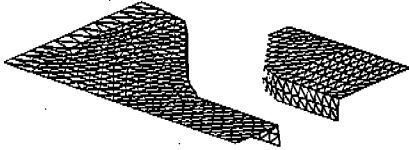


Fig.3 Configuration of the Blankholder.

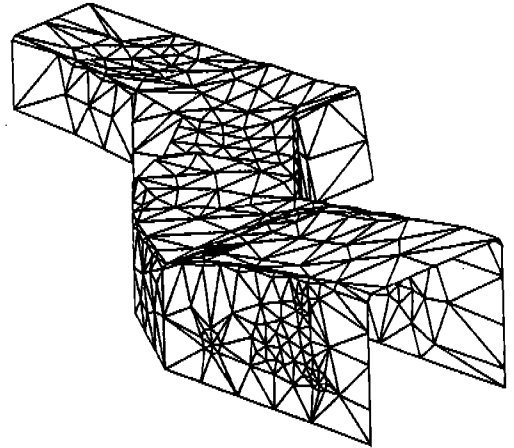


Fig.4 Configuration of the Punch.

Table 1 Number of the elements and nodes

	die	holder	punch	blank	
				mesh 1	mesh 2
No. of elements	867	774	690	1048	1676
No. of nodes	492	443	434	1116	1765
element type	Rigid 3			S4RF	

Fig.3, Fig.4에 이들의 형상이 나타나 있다. 금형면을 나타냄에 있어서 C<sup>0</sup>연속성만 만족해도 표면을 구현할 수 있으므로 표면의 매끄러움(smoothness)에 지나치게 신경쓰지 않아도 되어 금형 모델의 구현이 쉬우나 그에 반한 약점으로 정확한 해석에는 한계를 지니게 된다.

2.2.2 재 료

로 컨트롤 아암에 사용되는 재료의 물성치는 AK 강(Alluminum Killed steel)의 자료를 사용하였다. 재료는 탄성계수 E=211GPa와 포와송비(poisson ratio)는 0.3, 그리고 초기항복응력은 91.3 MPa이고 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\epsilon = (\sigma/K)^{\frac{1}{n}}$$

기준 응력값 K는 513MPa, 가공경화 지수 n은 0.223으로 두었고 Fig.5와 같은 응력·변형을 곡선이 입력으로 주어졌다. 재료는 Von Mises 항복조건을 만족하고 등방성(isotropic)이며 변화율(rate)에 무관하다고 가정하였다. 금형면 들과

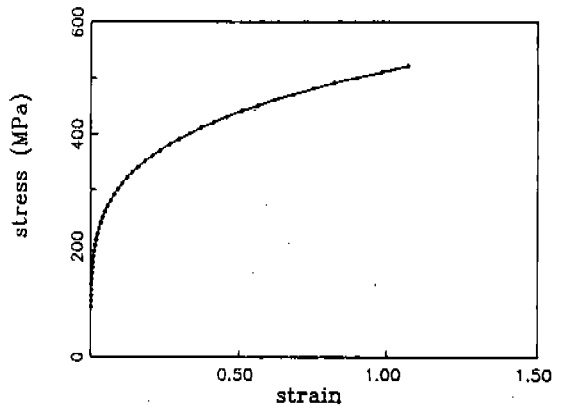


Fig.5 Stress vs Strain curve of the material

블랭크사이의 마찰계수는 펀치와 블랭크 사이의 0.2, 다이, 블랭크홀더와 블랭크 사이는 0.25로 두었다. 일반적으로 마찰계수가 크면 드로잉되는 깊이가 깊어지고 따라서 마찰계수는 최종형상에 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 정확한 마찰계수를 입력하는 것이 중요하지만 정확한 값을 알기가 어렵기 때문에 위의 값을 사용하였으며 이때 최종형상도 큰 무리가 없음을 확인하였다. 이

값은 마찰계수의 변화에 따른 최종형상이 어느 정도 적절하다고 생각했을때의 값이다. 재료의 초기 두께는 3.2mm로 두었다.

2.2.3 하 중

편치를 제외한 금형들을 고정시켜 놓고 편치를 밀어 올리면서 드로잉한 후 다이 블랭크홀더와 편치를 블랭크로부터 제거하였다. 이때 편치의 속도가 중요한 해석 공정변수가 되는데, 관성(inertia)의 영향 즉 파동영향(wave effect)이 해에 크게 영향을 주지 않는 한 준정적 해를 얻는데는 별 어려움이 없다.<sup>(6,7)</sup> 따라서 해석에 이용되는 편치속도는 관성의 영향이 크게 나타나지 않는 한도 내에서 가능한 한 실행공정에서의 속도보다 크게잡아서 해석에 소요되는 computer CPU 시간을 줄이도록 해야한다. 하지만 이것은 문제에 따라서 다를 수 있으며 해석결과가 해석에 사용된 편치속도에 따른 수렴성을 확인하는 것이 바람직하다. 예제 Nagtegaal등<sup>(6)</sup>은 해석 공정속도를 실제 공정속도의 10배 정도로 잡았을 때에 이미 해가 준정적 해에 수렴하는 것을 보였다. 본 논

문에서 다루는 blank의 stamping 공정에서 실제 편치속도는 5~10m/s인데, 본 해석에서는 100m/s, 70m/s, 35m/s, 17.5m/s, 10m/s의 경우에 대해 각각 해석하여 보았고 편치의 후퇴시 속도는 모두 70 m/s로 하여 해석하였다. 그림에서 보인 결과는 변형형상이 타당한 35m/s, 17.5m/s, 10m/s의 속도 변화에 따른 블랭크의 최종형상, Von-Mises응력, 동가소성 변형률, 블랭크의 두께변화에 대한 수렴경향이고, 금형면과 블랭크의 초기간격(gap), 블랭크 홀딩력(blank holding force : BHF)에 따른 영향도 함께 살펴보았다. 또한 블랭크의 요소수를 더 늘려서 메쉬에 따른 수렴성도 고찰하였다.

또한 금형의 제하중으로 인한 블랭크의 천이파 효과(transient wave effect)를 제거해 주기 위해 블랭크의 표면에 점성압(viscous pressure)을 가하였다. 이는 제하중 시간동안 빨리 준정적 평형에 도달하도록 하며 그값은  $0.35E^*Kg/(m^2sec)$ 으로 두었고 이는 대략  $\rho C_d$  보다 조금 작은 값이다. 여기서  $\rho$ 는 재료의 밀도,  $C_d$ 는 팽창전파속도(dilatational wave speed)이다.

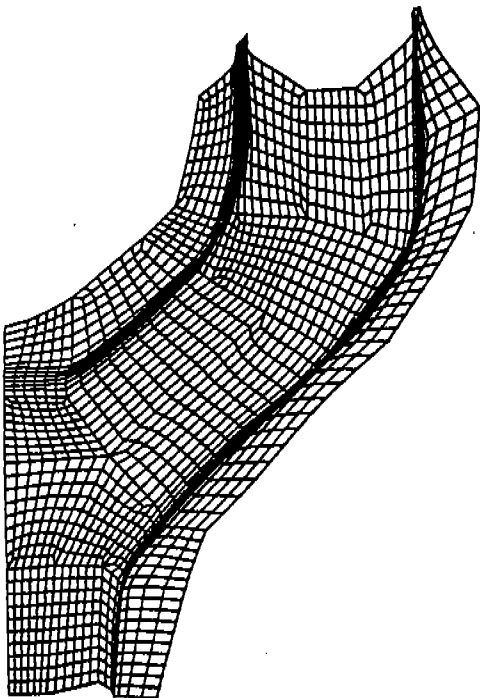


Fig.6 Deformed shape of the Blank(Top View)

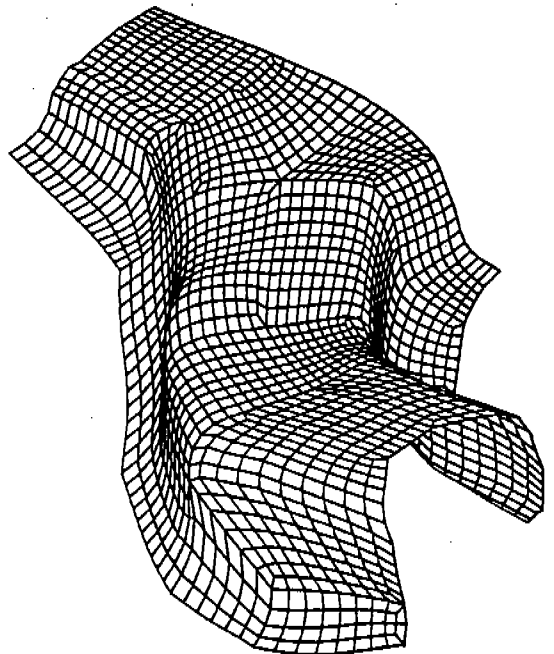


Fig.7 Deformed shape of the Blank(Inclined View)

### 3. 해석결과 및 토의

#### 3.1 변형형상

Fig.6과 Fig.7은 미세한 메쉬(mesh2)에 대한 최종형상변화를 보인 것이다. 요소크기가 작을때 변형된 모양이 좀더 매끄러웠고 크기가 커질수록 굽어지는 부분의 최종형상은 펀치의 급격한 형상변화를 따라가지 못해서 심하게 뒤틀리는 모습을 보였다. 세가지 경우의 펀치속도(10m/s, 17.5 m/s, 35m/s)에 대한 최종형상은 큰 차이를 보이지 않았고, 속도를 70~80m/s 이상으로 했을때 변형이 심한 부위가 비대칭적으로 나타났는데 이는 펀치의 모델이 정확히 대칭이 되지않아서 한쪽 모서리 부분이 먼저 접촉함으로 인한 것이라 생각된다.

#### 3.2 최종잔류응력

Fig.13에서 선택한 부위에 대한 최종단계의 Von-Mises 응력분포를 Fig.8.1과 Fig.8.2에서 속도와 x좌표에 따라 그래프로 나타내 보였다. 그림에서 볼수 있듯이 응력은 블랭크 모델에 따른 수렴경향은 볼수 있었으나 펀치속도에 따른 수렴경향은 명확하지 않았다. Fig.9는 블랭크홀더와 블랭크사이의 초기간격에 따른 잔류응력의 그림을 보인것이고 Fig.10은 초기간격이 없을때 블랭크홀딩력(BHF)에 따른 잔류응력의 그림을 보인 것이다. 블랭크홀딩력이 존재할때 블랭크에 더 많은 구속이 가해지므로 그 응력또한 상대적으로 높게 남게됨을 볼 수 있었다.

Fig.13에 선택된 부위중 진하게 표시된 2개의 요소(x=0.204, x=0.225)에 대한 드로잉 과정중의 응력이력(stress history)분포를 Fig.11에 보였다. 요소의 회전이 심할수록 응력의 변동이 심하게 나타남을 볼수 있었다. 최종단계의 잔류응력은 펀치속도에 따라 변화는 있지만 변형이 많은 부분(드로잉되는 부위)에서 대부분 초기 항복응력의 90%~100% 정도의 응력을 보였고 몇 요소에서는 초기 항복응력의 3~4배를 보이기도 했다. 가공경화(work hardening)에 따른 응력변형을 선도를 따라 최종단계의 각 요소의 소성변형 양에 해당하는 항복응력으로 비교하였을때는 대부분

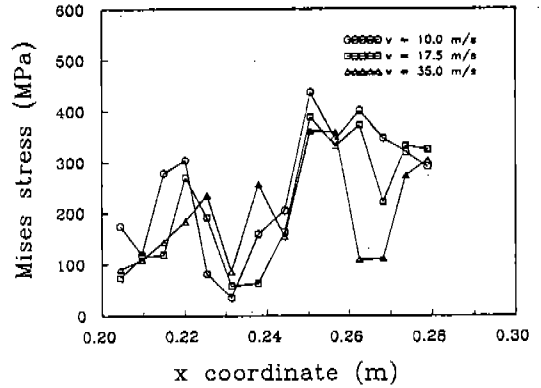


Fig.8.1 Von-Mises Stress(mesh1).

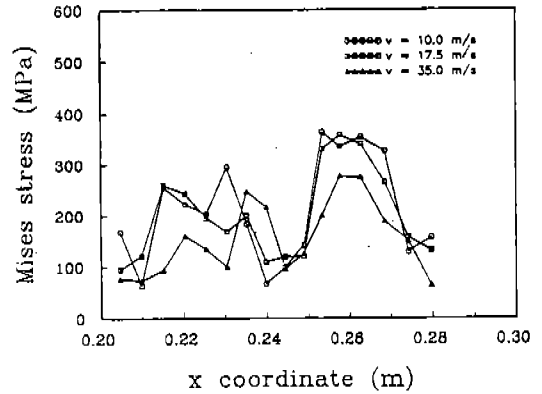


Fig.8.2 Von-Mises Stress(mesh2).

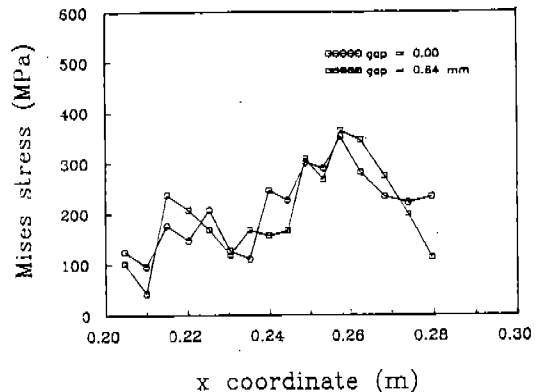


Fig.9 Von-Mises Stress w.r.t. initial gap.

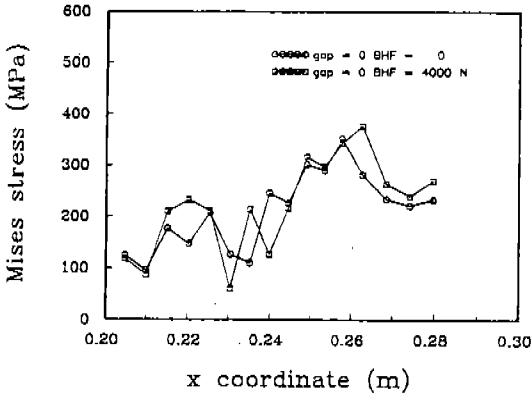


Fig.10 Von-Mises Stress w.r.t. Blankholding Force

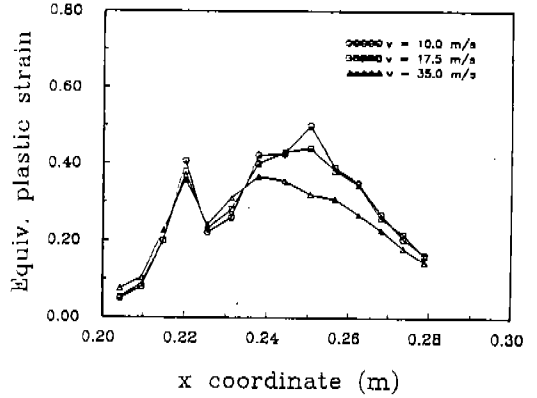


Fig.12.1 Equivalent Plastic Strain(mesh1).

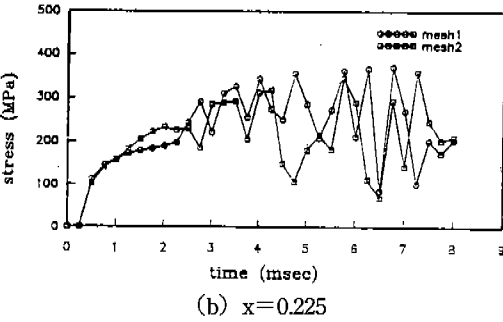
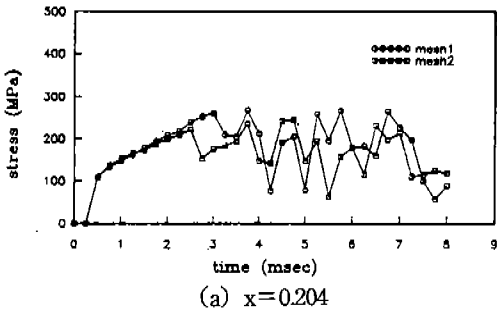


Fig.11 Time history of the Stress in critical elements.

60%~90% 범위의 잔류응력을 보였다. 최종의 잔류응력은 드로잉과정 중의 최대 응력의 50%~60% 정도의 응력을 보였다. 인장응력이 지배적인 가운데 부분(편치와 접촉부분)에서는 이 경향이 잘 나타났으나 압축응력이 지배적인 모서리 주위(다이와 접촉부분)의 요소는 최대응력의 값과 거의 비슷하였다.

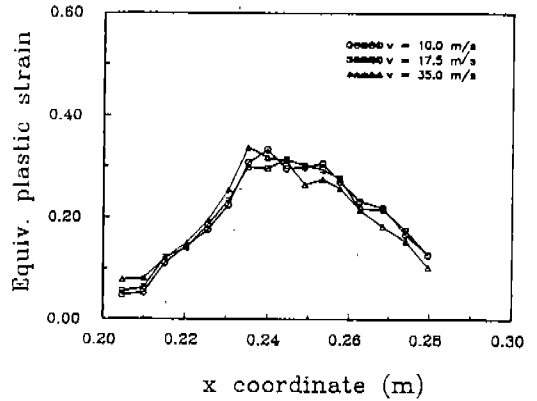


Fig.12.2 Equivalent Plastic Strain(mesh2).

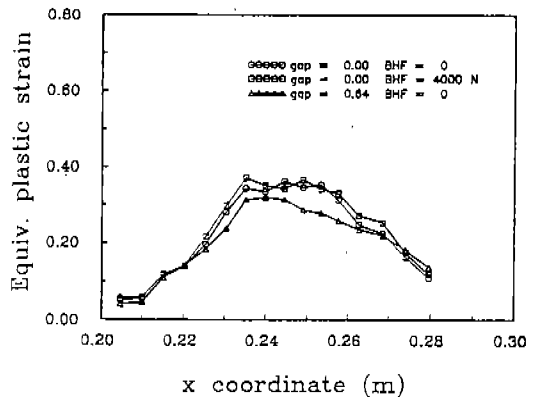


Fig.13 Equivalent Plastic Strain w.r.t. gap and Blankholding Force.

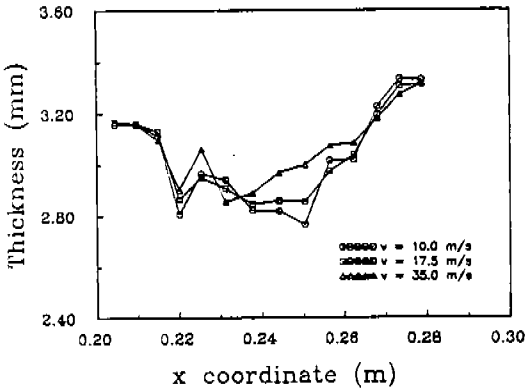


Fig.14.1 Thickness change of the Blank(mesh 1).

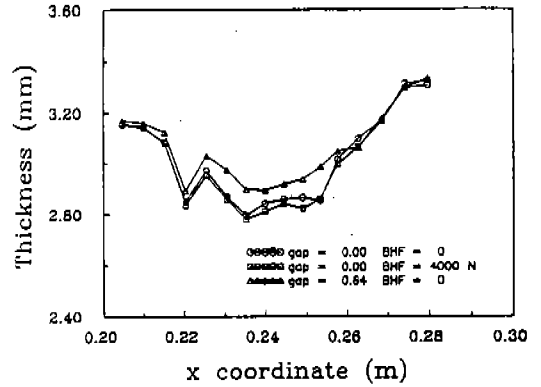


Fig.15 Thickness w.r.t. gap and Blankholding Force.

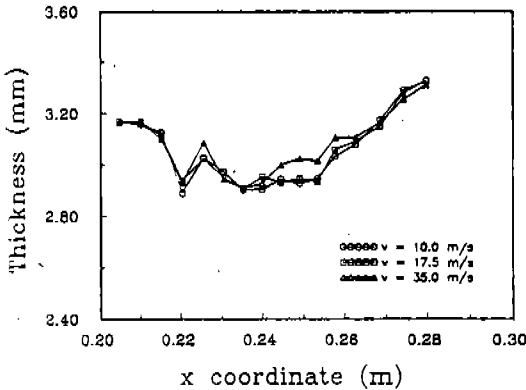


Fig.14.2 Thickness change of the Blank(mesh 2).

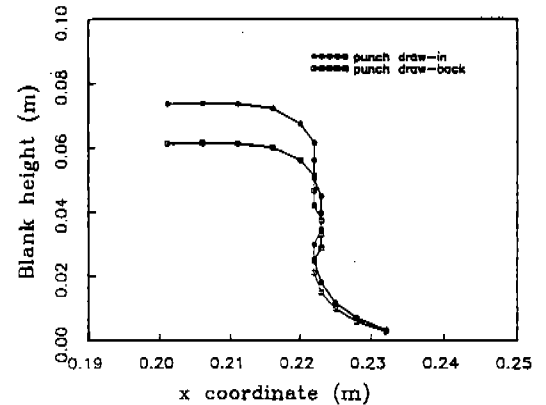


Fig.16 Spring Back of the selected elements (180times).

### 3.3 등가소성변형률 및 블랭크두께 변화

Fig.12.1과 Fig.12.2는 각각 블랭크 모델에 따른 등가 소성변형률 분포를 속도와 x좌표에 따라 나타내 보였다. 펀치행정거리(punch stroke)를 일정하게 했기 때문에 등가소성변형률의 모델에 따른 그 절대값은 약간의 차이가 있다. Fig.14.1과 Fig.14.2는 초기 3.2mm 블랭크의 두께변화의 결과로 과도한 압축응력으로 인한 플랜지 부근의 두께 증가를 볼 수 있었고 Fig.13과 Fig.15에서 초기 간격과 블랭크 홀딩력에 따라 작은 양의 변화를 확인하였다.

스탬핑공정의 성형성 해석에는 응력을 통한 비교보다는 변형후 형상, 소성변형률, 폭이나 두

께변화를 그 변수로 많이 사용하는데 이는 실험과의 비교를 통한 검증이 쉽고, 수치해석과의 비교도 좋은 결과를 보이기 때문이다. 여기서 해석에서도 변형과 관련된 양은 비교적 좋은 결과를 보였으나 응력은 그 결과에 대해 좀더 명확한 검증을 필요로 한다.

### 3.4 스프링백(spring back)

일반적으로 펀치가 하중(load)과 제하중(unloading)을 함에 따라 재료의 탄소성거동으로 인하여 블랭크에 탄성복원현상(spring back)이 나타난다. 이에 따른 완성품의 치수불량을 예방하기 위해 금형설계시 이를 고려해야하며 일반적으로 탄성계수가 낮을수록, 항복응력이 높은



재질일수록 크게 나타난다고 알려져있다. 여기에서 해석한 결과로는 0.6-1mm안팎의 작은 양이 줄어들음을 볼 수 있었고 Fig.16은 이 양을 180배 확대한 것이다.

#### 4. 결론 및 향후과제

스탬핑시에 펀치속도, 해석시간은 최종 변형형상, 응력분포, 변형률 분포에 큰 영향이 있음을 알았다. 실제가공으로 얻어진 최종형상과의 차이를 줄이기 위해서는 금형모델의 세밀한 수평과 펀치속도, 요소크기를 조정하여 해석해야 하며 많은 시행이 요구된다.

Explicit code를 이용한 해석에서 응력을 바탕으로 한 비교는 현재로서는 많은 한계를 가지고 있으며 좀더 많은 해석경험을 필요로 한다.

소성변형률 분포는 블랭크에서 대변형이 일어나는 부위의 변형경향과 일치하는 결과를 보여 주었고 펀치의 속도가 줄어들수록, 요소수가 증가할수록 수렴경향을 볼수있었고, 두께변화의 분포도 실제공정의 결과와 비슷한 결과를 보인다.

여러가지 변수의 적절한 선택을 통하여 Explicit해와 실험치 사이의 비교를 통한 상관관계를 구하는 것도 설계에 도움이 될 것이다. 또한 미세한 요소 사용이 가져오는 득실을 감안하여 최적의 요소생성을 구현해 줄 수 있는 전처리기(preprocessor)의 개발도 의미있는 일이 될것이다.

#### 참 고 문 헌

1. ABAQUS EXPLICIT User's Manual, Version 5.2, Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc, 1992.
2. ABAQUS EXPLICIT Example Manual, Version 5.2, Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc, 1992.
3. N.M. Wang and B.Budiansky, "Analysis of sheet metal stamping by a Finite Element Method", J.of Applied Mechanics, Vol.45, 1978, pp. 73-82.
4. S.W. Key, R.D. Krieg, and K.J. Bathe, "On the Application of the Finite Element Method to Metal Forming Processes", Com. Meth. in Appl. Mech. and Eng., Vol.17/18, 1979, pp.597-608.
5. A. Honecker and K. Mattiason, "Finite element procedures for 3D sheet forming simulation", Numiform 89, 1989.
6. Nagtegaal, J.C., and Taylor, L.M., "Comparison of implicit and explicit finite element methods for analysis of sheet forming problems", VDI Berichte NR 894, 1991.
7. Rebelo, N., Nagtegaal, J.C., Taylor, L.M., and Passmann, R., Industrial application of implicit and explicit finite element methods to forming processes", CED-Vol.5/AMD Vol.156, Numerical Methods for simulation of Industrial Metal forming processes, 1992.
8. L. Taylor, J.Cao, A.P. Karafillis, and M.C.Boyce, "Numerical Simulation of Sheet Metal Forming", NUMISHEET'93 Porceedings of the 2nd Int. Conf., 1993, pp.161-171.
9. 김현영, 김중재, "Explicit Code를 이용한 차체 stamping공정해석", 한국자동차공학회 춘계 학술대회 논문 4-6, 1993.
10. 김주성, 민홍기, "자동차용 휠 디스크 스템핑 해석", 자동차공학회지, Vol.14, No.3, 1992.
11. Schweizerhof, K. and Hallquist, J.O., "Explicit integration scheme and contact formulations for thin sheet metal forming", VDI Berichte NR 894, 1991.