

〈논 문〉 SAE NO. 953732

강소성 외연적 유한요소법을 이용한 자동차 박판제품의 성형공정에 대한 단면해석

Sectional Forming Analysis of Automobile Sheet Metal Parts by using Rigid-Plastic Explicit Finite Element Method

안 동 규*, 정 동 원**, 양 동 열**, 이 장 희***
D. G. Ahn, D. W. Jung, D. Y. Yang, J. H. Lee

ABSTRACT

The explicit scheme for finite element analysis of sheet metal forming problems has been widely used for providing practical solutions since it improves the convergency problem, memory size and computational time especially for the case of complicated geometry and large element number. The explicit schemes in general use are based on the elastic-plastic modelling of material requiring large computation time.

In the present work, rigid-plastic explicit finite element method is introduced for analysis of sheet metal forming processes in which plane strain normal anisotropy condition can be assumed by dividing the whole piece into sections.

The explicit scheme is in good agreement with the implicit scheme for numerical analysis and experimental results of auto-body panels. The proposed rigid-plastic explicit finite element method can be used as robust and efficient computational method for prediction of defects and forming severity.

주요기술용어 : Two-Dimensional Rigid-Plastic Explicit Finite Element Method(이차원 외연적 강소성 유한요소법), Normal Anisotropy(수직이방성재료), Plane Strain(평면변형), Industrial Sheet Forming Process(산업용 박판성형 공정)

기 호 설 명

$\bar{\sigma}$: 유효응력(Effective stress)

$\bar{\epsilon}, \Delta\bar{\epsilon}$: 유효변형율(Effective strain) 및 유효변형율증분(Effective Strain Increment)

t^0 : 초기박판두께

f^B, f^S : 체적력(Body Force) 및 표면력(Surface Force)

A^0 : 초기박판의 두께방향에 수직한 면의 면적

* 대우중공업(주) 우주항공연구소

** 정회원, 한국 과학 기술원 정밀공학과

*** 현대자동차(주) 금형부

S : 표면력 작용면
 S^r : Traction Force 작용면
 ρ : 밀도(Density)
 \dot{u}, \ddot{u} : 속도(Velocity) 및 가속도(Acceleration)
 k : 감쇠 파라미터(Damping Parameter)
 $[K], [M]$: 강성행렬 및 질량행렬
 (Mass Matrix)
 $[C]$: 감쇠행렬(Damping Matrix)
 $[F^{int}], [F^{ext}]$: 내력벡터 및 외력벡터
 $\Delta t, \Delta t^{(i)}, dt$: 시간간격, (i)스텝의 시간간격 및 단위시간
 $\Delta t^{(i)}$: (i) 스텝의 시간간격
 δ : 박판침투량
 $u^{pred}, v^{pred}, a^{pred}$: 가상변위, 가상속도, 가상가속도
 $v^{(i+1)}, a^{(i+1)}$: (i+1)스텝의 속도와 가속도
 a^{corl}, a^{corf} : 박판침투량 및 마찰력에 대한 가속도 보정량
 T : 접선방향벡터
 v_{rel} : 박판과 금형사이의 상대속도
 C_n : 박판의 가상속도
 $v_{(o_o)_1}^{p_r e d}$: 금형의 가상속도
 F_{rel} : 상대속도에 대한 마찰력
 μ : 마찰계수
 F_{norm} : 박판침투량에 대한 수직저항력
 F_{frict} : 마찰력
 w : 고유진동수(Natural Frequency)
 β : 질량비례 감쇠비(Mass Proportional Damping Ratio)
 ζ : 임계 감쇠비(Critical Damping Ratio)
 W_{max} : 최대고유진동수
 C : 소재내 응력전파속도(Stress Wave Propagation Speed)
 L_e : 유효요소크기
 E : 종탄성계수
 C_n : 쿨런트 수(Courant Number)
 n : 가공경화지수

상 첩 자

T : 행렬의 transpose 표기
 ST : 표면력 작용력에 관련된 물리량들의 trans-

pose 행렬의 표기

S : 표면력 작용면에 관련된 물리량들의 표기
 τ : Traction Force 작용면에 관련된 물리량들의 표기

1. 서 론

박판 성형공정을 정량적으로 해석하기 위한 방법으로는 상계해석, 슬립라인, 비선형 유한요소법(Nolinear Finite Element Method)등이 있다. 특히, 비선형 유한요소법은 비교적 정확한 해석결과를 얻을 수 있다.

비선형 유한요소해석법에는 큰 시간간격을 가지며 각 단계마다 힘 평형을 맞추며 여러번 촉차하여 수렴해나가는 내연적 유한요소해석법(implicit Finite Element Method)과 반면에 작은 시간 간격을 가지며 각 단계에서 동적 평형방정식을 만족시키는 해를 구하며 촉차하지 않는 외연적 유한요소해석법(Explicit Finite Element Method)등이 있다.

내연적 유한요소해석법은 기하학적 형상이 매우 복잡하거나 대용량의 문제에 대해서는 수렴성이 문제가 되어 정량적 해를 얻을 수 없다. 그러나, 외연적 유한요소해석법은 수렴성이 문제가 되지 않아 복잡한 형상이나 대용량의 문제에도 적용하여 정량적인 해를 얻을 수 있다.

외연적 유한요소해석의 연구사례를 보면 1986년 Honecker와 Mattiason[1]에 의해서 ABAQUS/Explicit과 LS-DYNA3D를 박판 스템핑 공정에 적용 외연적 유한 요소해석법의 효율성을 보였다. 또한, Nagtegal과 Taylor[2]에 의해 사각형 컵 드로우잉과 반구형 펀치 스트레칭 공정에 적용되었다. 또한, Nakamachi등 [3]은 이방성 재료(Anisotropic Material)에 대한 탄소성 외연적 유한 요소법을 이용하여 사각형 컵 드로우잉에 적용하였다. 그러나, 위 연구사례들은 탄소성 모델을 사용하였다. 본 연구에서는 평면변형을 가정한 강소성 외연적 유한 요소법(Rigid-Plastic Explicit Finite Element Method)을 사용하여 실제 차체성형공정인 트렁크리드(Trunk-Lid)와 센터플로어(Center Floor)의 단면을 해

석하였다.

2. 이론해석

2.1. 기본 수식화

본 연구에서는 Hill의 신이방성 이론을 따르는 재료에 대한 평면변형을 가정한 강소성 외연적 유한요소법(Rigid-Plastic Explicit Finite Element Method)을 사용하였다. 기본 수식화 과정을 살펴보면 다음과 같다.

Δt 에서 $\Delta t + \tau$ 까지 변형할 때 가상일의 원리는 아래와 같다.

$$\int_{A^0} \bar{\sigma}(\delta \Delta \bar{\epsilon}) t^0 dA^0 = \int_{A^0} \delta \bar{u}^T f^B t^0 dA^0 + \int_S \delta \bar{u}^S T f^S dS \quad (1)$$

여기서 $\bar{\sigma}$ 는 유효응력이고 $\Delta \bar{\epsilon}$ 는 유효변형증분이며 A^0 및 S 는 각각 박판의 두께방향에 수직인 면의 면적과 표면력 작용면이다.

또한, d'Alembert's 법칙에 따라 동적거동에 대한 관성효과를 고려하고, 에너지 발산효과를 고려하여 조합시키면

$$\int_{A^0} \delta \bar{u}^T f^B t^0 dA^0 = \int_{A^0} \delta \bar{u}^T (f^{BD} - \rho \ddot{u} - k \dot{u}) t^0 dA^0 \quad (2)$$

와 같이 전체 체적력을 고려한 가상일항은 표현되어질 수 있다.

여기서, f^B 는 총체적력을 의미하고 f^{BD} 는 관성력과 점성력을 제외한 체적력을 나타낸다.

그러므로, 동적거동을 고려한 가상일의 원리는,

$$\int_{A^0} \rho \delta \bar{u} \ddot{u} t^0 dA^0 + \int_{A^0} k \delta \bar{u} \dot{u} t^0 dA^0 = \int_S \tau t \delta \bar{u} dS - \int_{A^0} \bar{\sigma}(\delta \Delta \bar{\epsilon}) t^0 dA^0 \quad (3)$$

이 된다.

그러므로, 지배방정식은

$$[M]\ddot{U} + [C]\dot{U} = [F^{ext}] - [F^{int}] \quad (4)$$

이 된다.

여기서, $[M]$ 과 $[C]$ 는 각각 질량행렬(Mass Matrix)과 감쇄행렬(Damping Matrix)이다.

위의 식으로부터 동적평형을 만족하는 가속도를 구한다.

그후, 중앙차분법(Central Difference Method)에 의해 속도(Velocity)와 변위(displacement)를

$$\dot{u}_{(i)} = \dot{u}_{(i-1)} + \Delta t \cdot (\ddot{u}_{(i)})$$

$$u_{(i)} = u_{(i-1)} + \Delta t \cdot (\dot{u}_{(i)}) \quad (5)$$

로 계산한다.

2.2 접촉처리(Contact Treatment)

외연적 유한 요소 해석에서의 접촉처리(Contact Treatment)

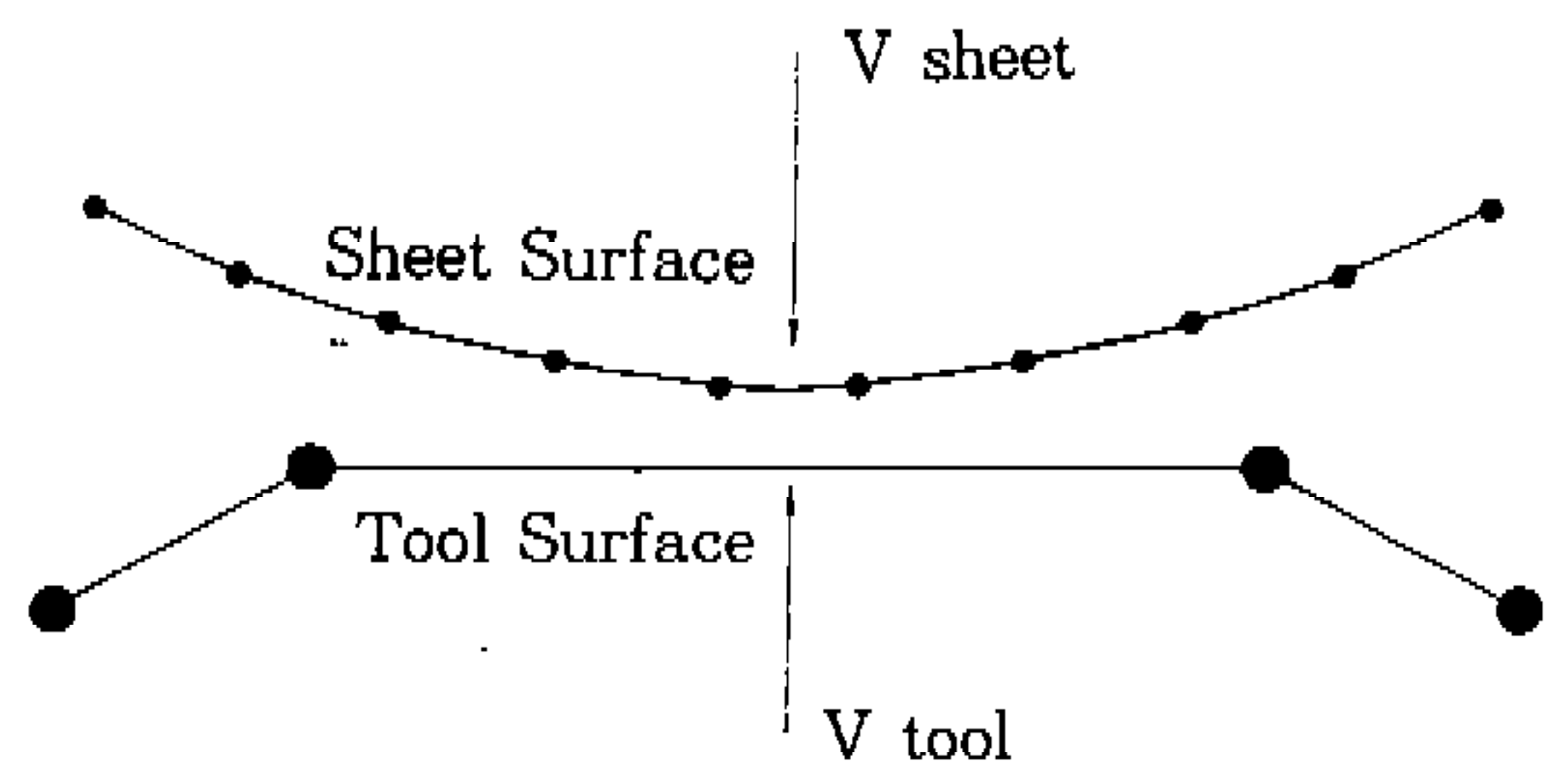


Fig. 1 Impending Contact of Two Surface.

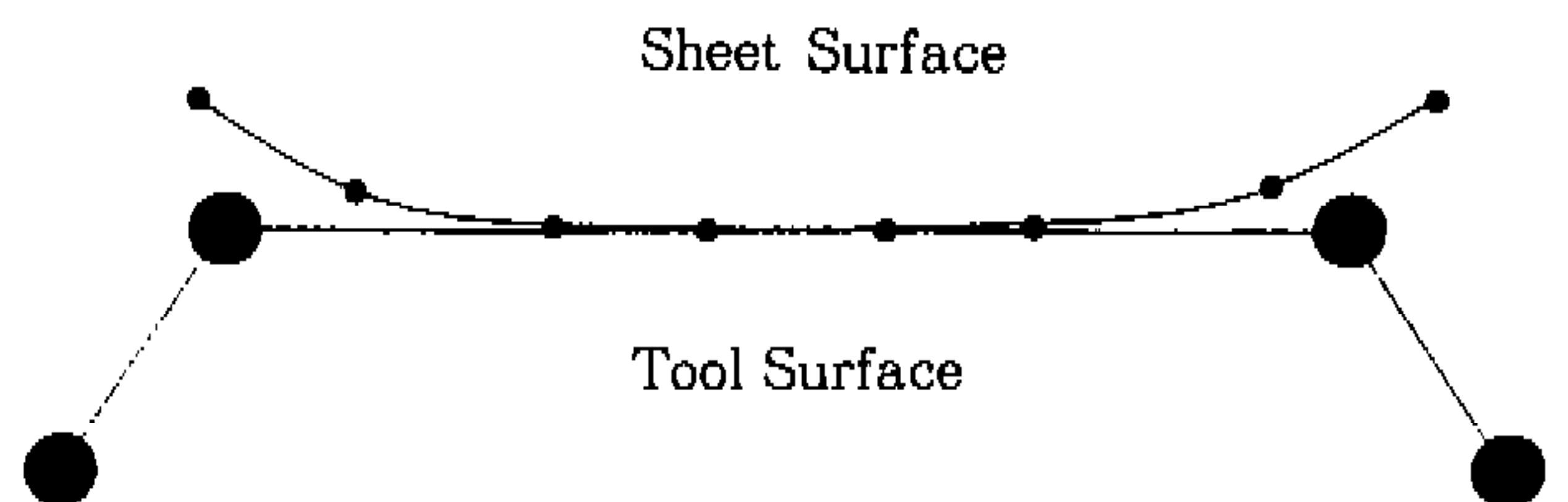


Fig. 2 Kinematically Compliant Surface.

tact Treatment)는 직접적 시행착오법(Direct Trial and Error Method)[4]을 사용하였다. 직접적 시행착오법의 절차는 다음과 같다.

첫단계로서는, Fig.1의 박판과 금형이 서로 접촉하게되면 각 절점(Node)의 가속도, 속도, 변위는 각각 아래와 같이 구한다.

$$\begin{aligned}
 a^{pred} &= (F_{ext}^{(i-1)} - F_{in}^{(i-1)})/M \\
 v^{pred} &= v^{(i)} + \frac{t^{(i-1)} + t^{(i)}}{2} \cdot a^{pred} \\
 u^{pred} &= u^{(i)} + \frac{t^{(i-1)} + t^{(i)}}{2} \cdot v^{pred}
 \end{aligned} \tag{6}$$

다음 단계에서는 각 절점이 금형을 침입하지 못하도록 각 절점의 저항력을 계산하여 가속도, 속도, 변위를 보정하면 Fig.3과 같은 상태가 된다.

$$a^{cor} = \frac{\delta}{\Delta t^2} \tag{7}$$

여기서, δ 는 박판의 금형 침투량(Penetration)이며 보정된다.

가속도, 속도 및 변위는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}
 a^{(i-1)} &= a^{pred} + a^{cor} \\
 v^{(i-1)} &= v^{pred} + \frac{\Delta t^{(i-1)} + \Delta t^{(i)}}{2} \cdot a^{(i-1)}
 \end{aligned}$$

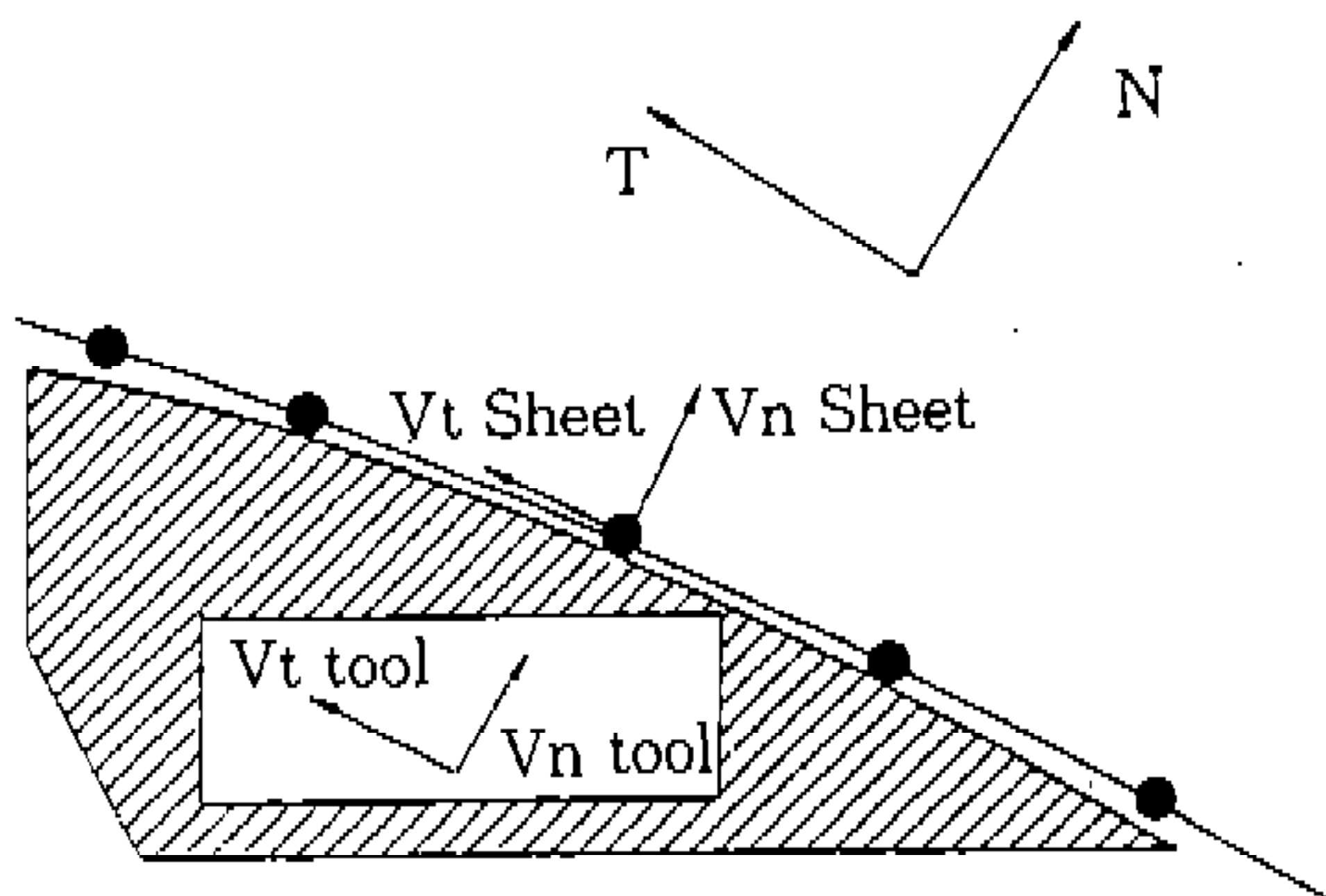


Fig. 3 Relative Velocity Configuration.

$$u^{(i-1)} = u^{pred} + \frac{\Delta t^{(i+1)} + \Delta t^{(i)}}{2} \cdot v^{(i-1)} \tag{8}$$

2.3 미끄러짐(Slip) 및 접촉(Stick) 체크

미끄러짐(Slip)과 접촉(Stick)을 판단하는 방법도 상대속도에 의해 결정된다. 미끄러짐과 접촉을 판단하는 절차는 다음과 같다.

i) 접촉 상태에서 계산된 가속도, 속도, 변위를 가상적 가속도, 속도, 변위로 생각한다.

$$\begin{aligned}
 a^{pred} &= a^{(i+1)} \\
 v^{pred} &= v^{(i+1)} \\
 u^{pred} &= u^{(i+1)}
 \end{aligned} \tag{9}$$

ii) Fig.3에서 보인바와 같이 다음식에 의해서 금형과 박판의 상대 속도를 계산한다.

$$v_{rel} = T \cdot (v_{sheet}^{pred} - v_{tool}^{pred}) \tag{10}$$

iii) 상대속도에 의한 마찰력(Friction Force)을 계산한다.

$$F_{rel} = \frac{M v_{rel}}{\Delta t^{(i)}} \tag{11}$$

한편, 각 절점의 마찰력은 쿨롱(Coulomb) 마찰력 이상이 될 수 없다.

iv) 미끄러짐과 접촉을 판단한다.

$$F_{frict} = \frac{F_{rel}}{|F_{rel}|} \min(\mu F_{norm}, |F_{rel}|) \tag{12}$$

여기서, $F_{norm} = m\delta/\Delta t^2$ 이다.

v) 식(12)에서 계산된 마찰력에 의해 가속도, 속도, 변위를 다시 보정한다.

$$a^{cor} = \frac{F_{frict}}{M}$$

$$a^{(i+1)} = a^{pred} + a^{cor},$$

$$v^{(i+1)} = v^{pred} + \frac{\Delta t^{(i+1)} + \Delta t^{(i)}}{2} \cdot a^{(i+1)}$$

$$u^{(i+1)} = u^{pred} + \frac{\Delta t^{(i+1)} + \Delta t^{(i)}}{2} \cdot v^{(i+1)} \quad (13)$$

3. 외연적 유한요소해석의 매개변수에 대한 연구

3.1 질량(Mass)행렬 구성

외연적 유한요소해석에서는 질량 행렬(Mass Matrix)의 구성방법이 해의정확도에 영향을 준다. 또한 질량(Mass)을 변화시킴으로써 계산시간을 조절할 수 있다.

본 연구에서는 전체질량이 보존되고 영질량(Zero Mass)과 음의 질량(Negative Mass)가 발생하지 않으며, 저차(Low Order)의 요소를 사용할 경우 해의 정확도가 높은 HRZ 집중용량법[5,6,7]을 사용하였다.

$$[M^e] = \alpha d_{ij} \int_e \rho [N]^T [N] dV^e$$

$$\alpha = \frac{\int_{V^e} \rho dV^e}{\sum_{a=1}^{n_{em}} \int_{V^e} \rho N^2 dV}$$

그리고, 질량 스케일링(Mass Scaling)을 통해서 계산시간을 감소시킬 수 있다.

$$[M_e] = C_m [M_e] \quad (15)$$

여기서, C_m 은 질량 스케일링 계수(Mass Scaling Coefficient)이다. 본 연구에서는 1-16 정도의 질량 스케일링 계수를 사용하였다.

3.2 감쇄비(damping ratio)

박판 성형 공정해석에서의 감쇄의 영향은 펀치의 속도 및 시간간격이 증가됨으로서 발생하는

관성 효과, 즉, 과도한 운동에너지의 평가를 보정해 줄 수 있다. 따라서 박판성형공정에서는 고유진동수값이 작기 때문에 질량비례감쇄(Mass Proportional Damping)[8, 9]를 사용한다.

$$\zeta = \frac{1}{2} \frac{\beta}{w} \quad (16)$$

$$\beta = 2w\zeta = \frac{[C]}{[M]} \quad (17)$$

본 연구에서는 $\beta = 1.0e-6/dt$ 를 사용 하였다.

3.3 시간 간격(Time interval)

외연적 유한요소해석에서 해의 정확도(Accuracy)와 안정도(Stability)에 가장 크게 영향을 미치는 것이 시간 간격 Δt 이다.

시간간격에 대한 표현식은 다음과 같다.

$$\Delta t \leq \frac{2}{W_{max}} \quad (18)$$

여기서, W_{max} 는 최대 고유진동수이다.

W_{max} 는 실제로 계산하기가 어려우므로 쿠런트(Courant)등 [10, 11]이 제안한

$$W_{max} = \frac{1}{2} \frac{C}{L_e} \quad (19)$$

를 사용한다.

한편, 해의 안정성과 해의 정확도를 보정하기 위해 C_n (Courant Number)를 도입한다.

$$C_n = \frac{\Delta t_{actual}}{\Delta t_{stable}} \quad (20)$$

한편, 강소성 외연적 유한 요소 해석에서는 $C_n = 10\%$ 이하를 사용하였다.

3.4 펀치 속도(Punch Velocity)

실제 공정에서 펀치 속도는 1m/sec 정도이다. 그러나, 외연적 유한요소해석에서는 해에 영향을 미치지 않고 해석시간을 감소시키기 위해서

일반적으로 5~30m/sec 정도의 펀치 속도를 사용한다.[2]

한편, 강소성 외연적 유한요소해석에서 펀치 속도의 범위는 5~20m/sec 정도로 선택하였다.

4. 결과 및 고찰

실제 자체 제품 성형공정인 트렁크리드와 센터 플로어 대칭단면을 외연적 강소성 유한요소해석한 결과와 내연적 강소성 유한요소해석 및 실험 결과와 비교하였다.

4.1 트렁크리드(Trunk-Lid) 단면 해석결과

강소성 외연적 유한요소해석을 임의의 형상에 적용시키기 위해 트렁크리드(Trunk Lid) 대칭 단면을 해석하였다. 트렁크리드 단면해석은 펀치 행정 110mm까지 성형해석 하였으며, 성형조건은 아래와 같다.

응력-변형도 곡선 : $\bar{\sigma} = 51.915(\bar{\epsilon})^{0.247} \text{kgf/mm}^2$

수직이방성계수 : $R = 1.6$

재료두께 : $t = 0.6 \text{mm}$

Coulomb 마찰 계수 : $\mu = 0.2$

구속력 (Binchig Force) : 15kgf/mm(왼쪽),
15kgf/mm(오른쪽)

트렁크리드 단면은 110개의 굽힘에너지가 보강된 박막요소(Bending Energy Augmented Membrane Element)를 사용하여 균일하게 분할하였으며, 바인더랩 형상은 Fig.4와 같다.

본 예제는 양쪽에서 드로우잉(Drawing)이 일

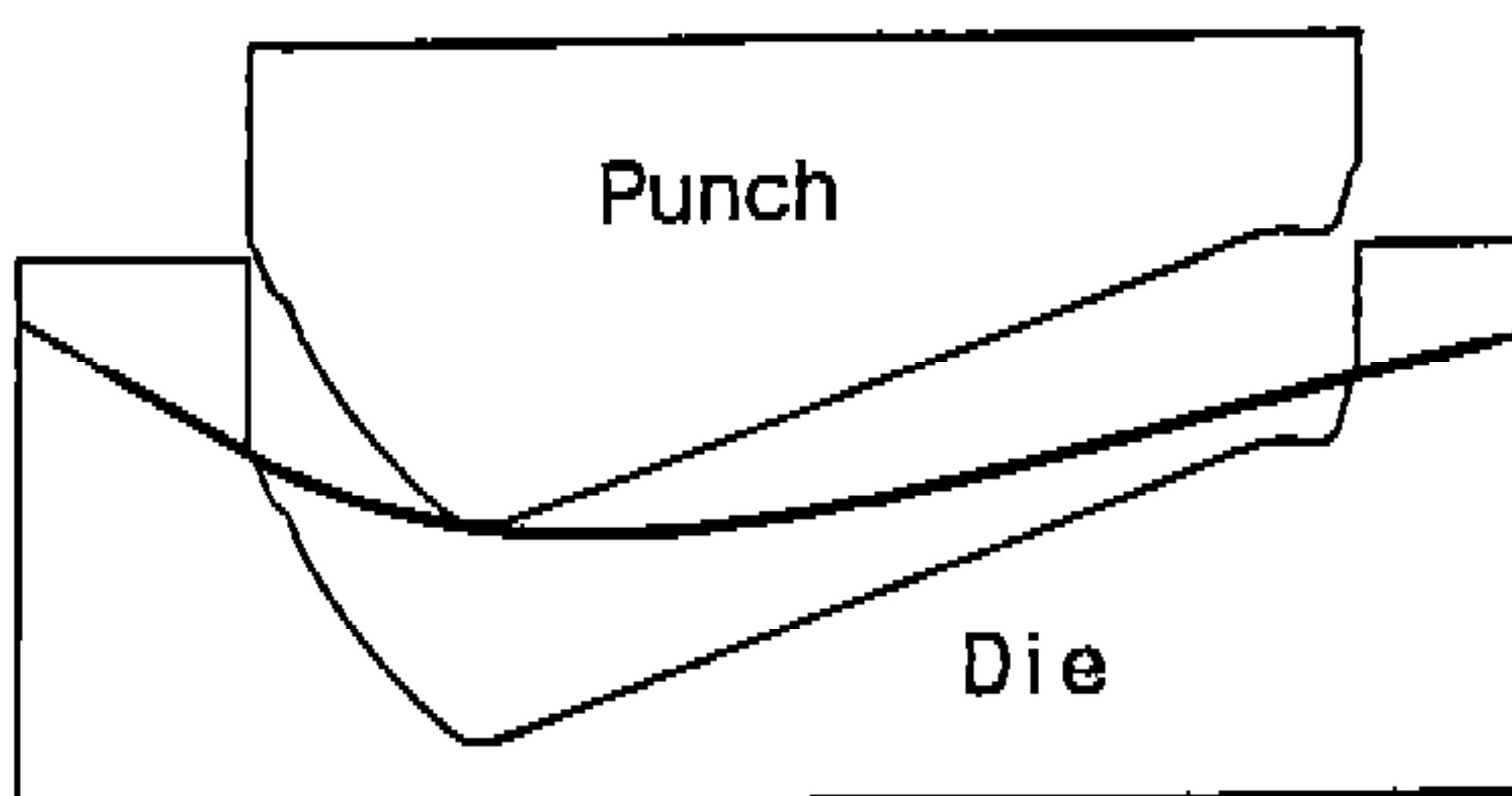
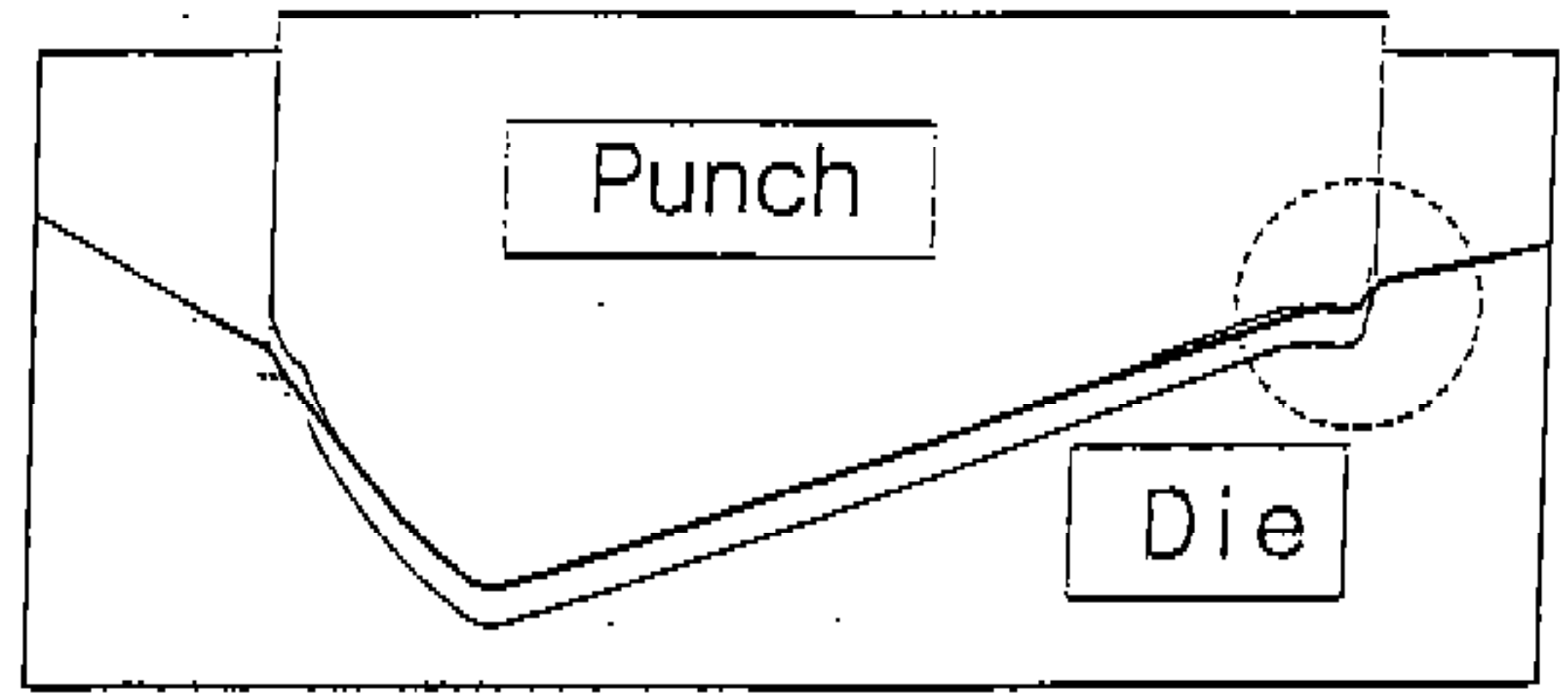
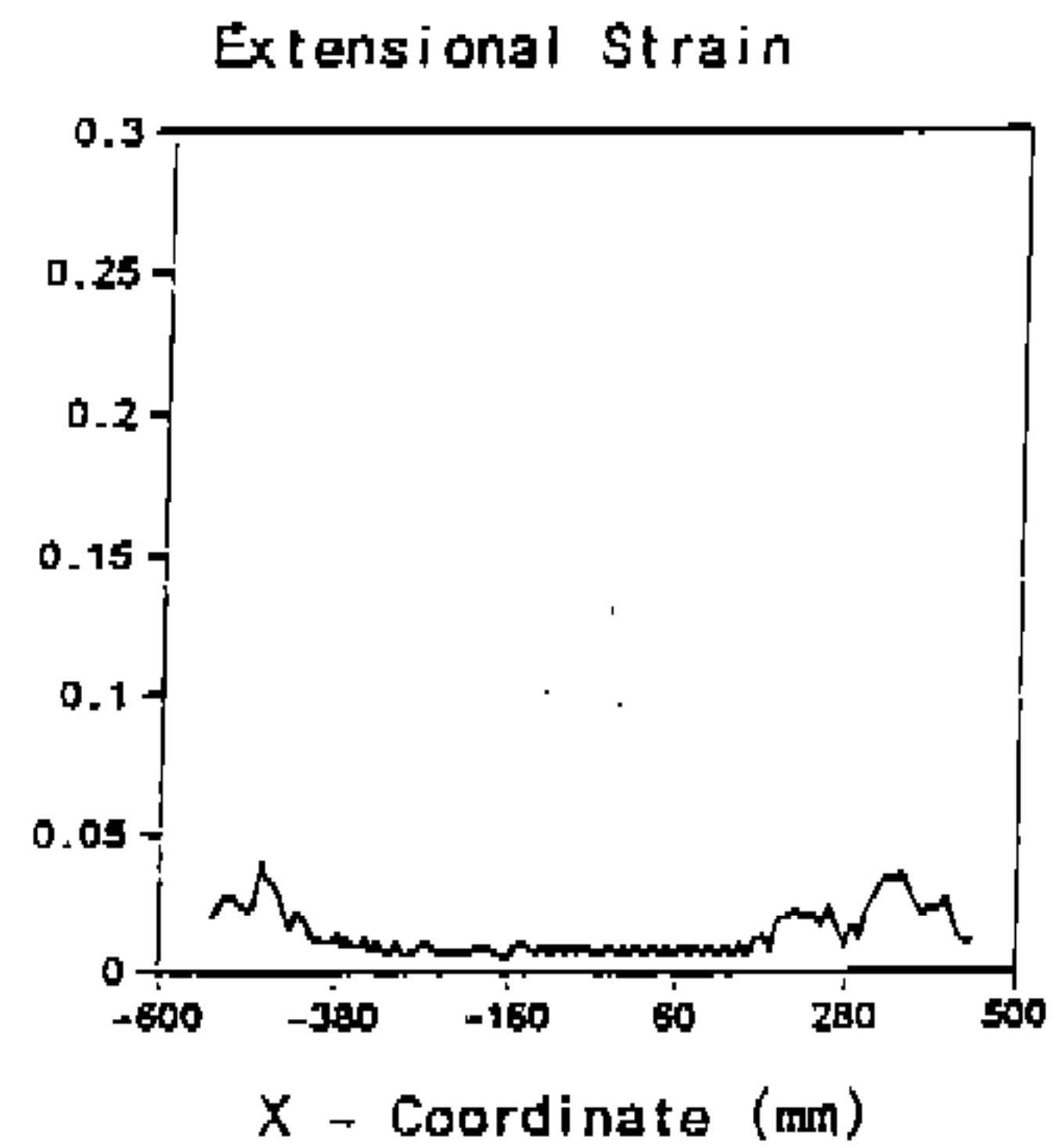


Fig. 4 Binder Wrap State of Trunk-Lid



(a) Deformed Shape



(b) Extensional Strain Distribution

Fig. 5 Using of Large Time Interval and High Punch Speed

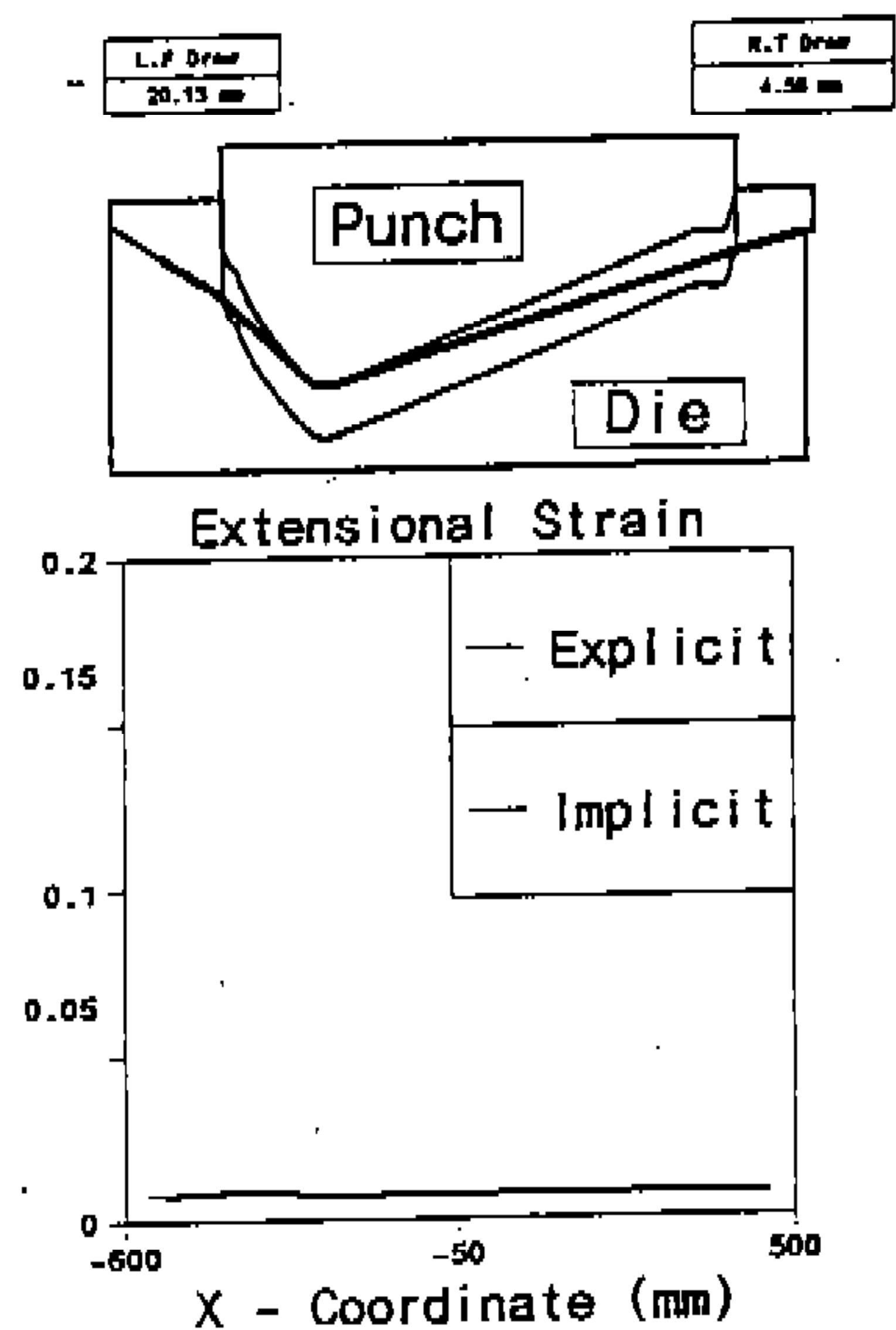


Fig. 6 Deformed Shape and Extensional Strain Distribution of Trunk-Lid (Stroke=40mm)

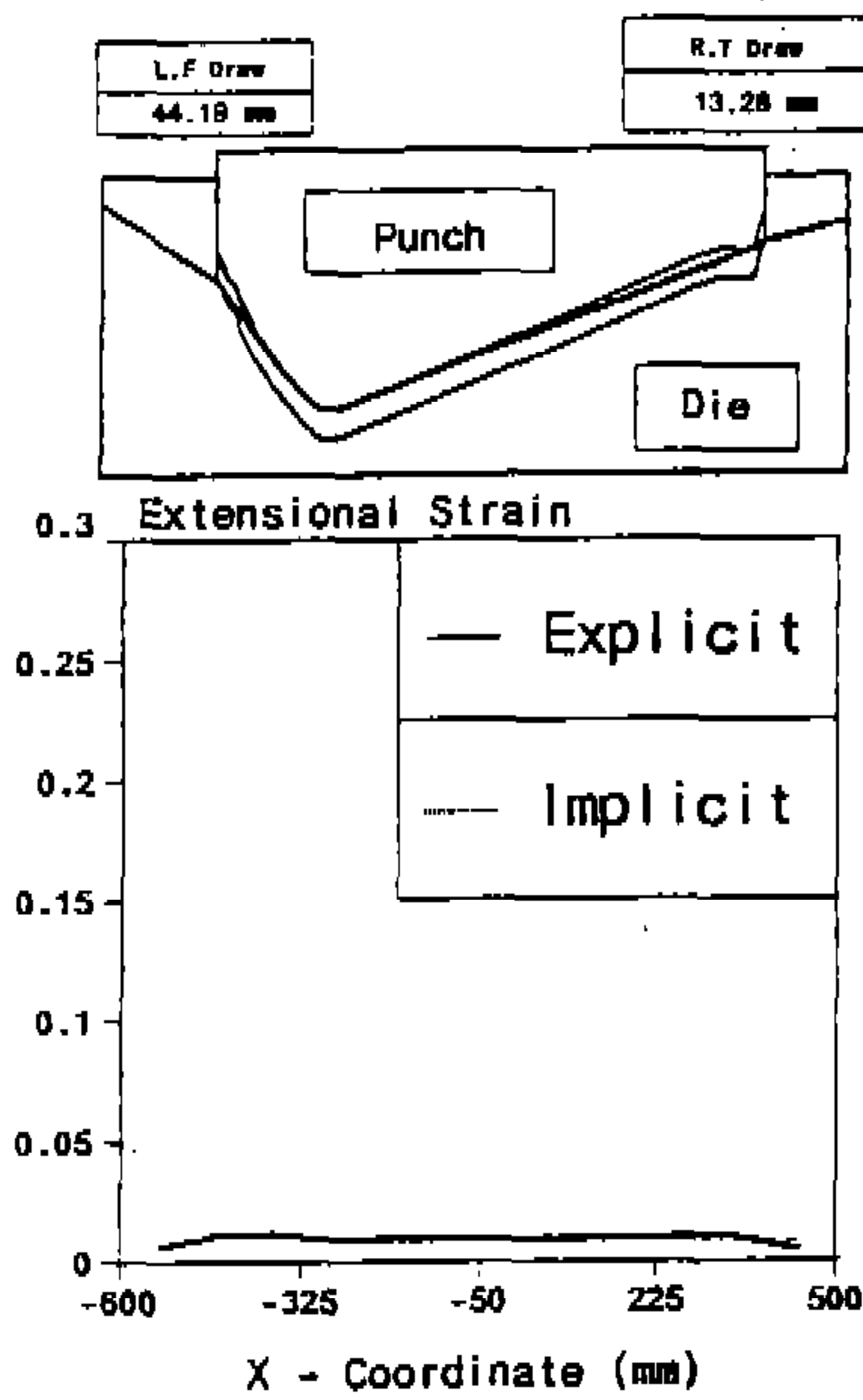


Fig. 7 Deformed Shape and Extensional Strain Distribution of Trunk-Lid (Stroke=75mm)

어나서 변형률분포가 전체적으로 적으며, 펀치의 오른쪽 모서리 부위에서 급격한 곡률변화로 인해 수렴이 잘 되지 않는 문제이다. 특히, 펀치의 오른쪽 끝부분에서 카운터 펀칭(Counter Punching)이 시작되는 펀치행정 73mm에서는 내연적 강소성 유한요소해석에서 수렴성이 문제되었다. 외연적 강소성 유한요소해석의 경우 펀치속도를 15mm/sec, 쿨런트 수는 0.1로 적용하였다.

이 경우 펀치행정 73mm부터 박판이 금형면에 붙기시작하여 펀치 행정 83mm에서는 Fig.5과 같이 박판이 휘어지는 현상, 즉, 강소성 유한요소 해석의 가정인 최소에너지 경로를 따른다는 것에 위배되는 현상이 나타났다. 이것은 단위 스텝당 펀치 진행에 의해 발생하는 관성력을 박판이 이겨낼만한 강성이 생기지 못했다는 것과 제한력에 의한 응력파동의 전파(Stress Wave Propagation)가 일어났기 때문으로 짐작된다. 그러므로, 펀치속도를 10mm/sec, 쿨런트 수를 0.005로 낮추었다. 그결과는 펀치행정 40mm, 75mm, 100mm, 110mm일때 변형형상과 변형률 분포로서 각각 Fig.6, Fig.7, Fig.8, Fig.9에 나타내었다.

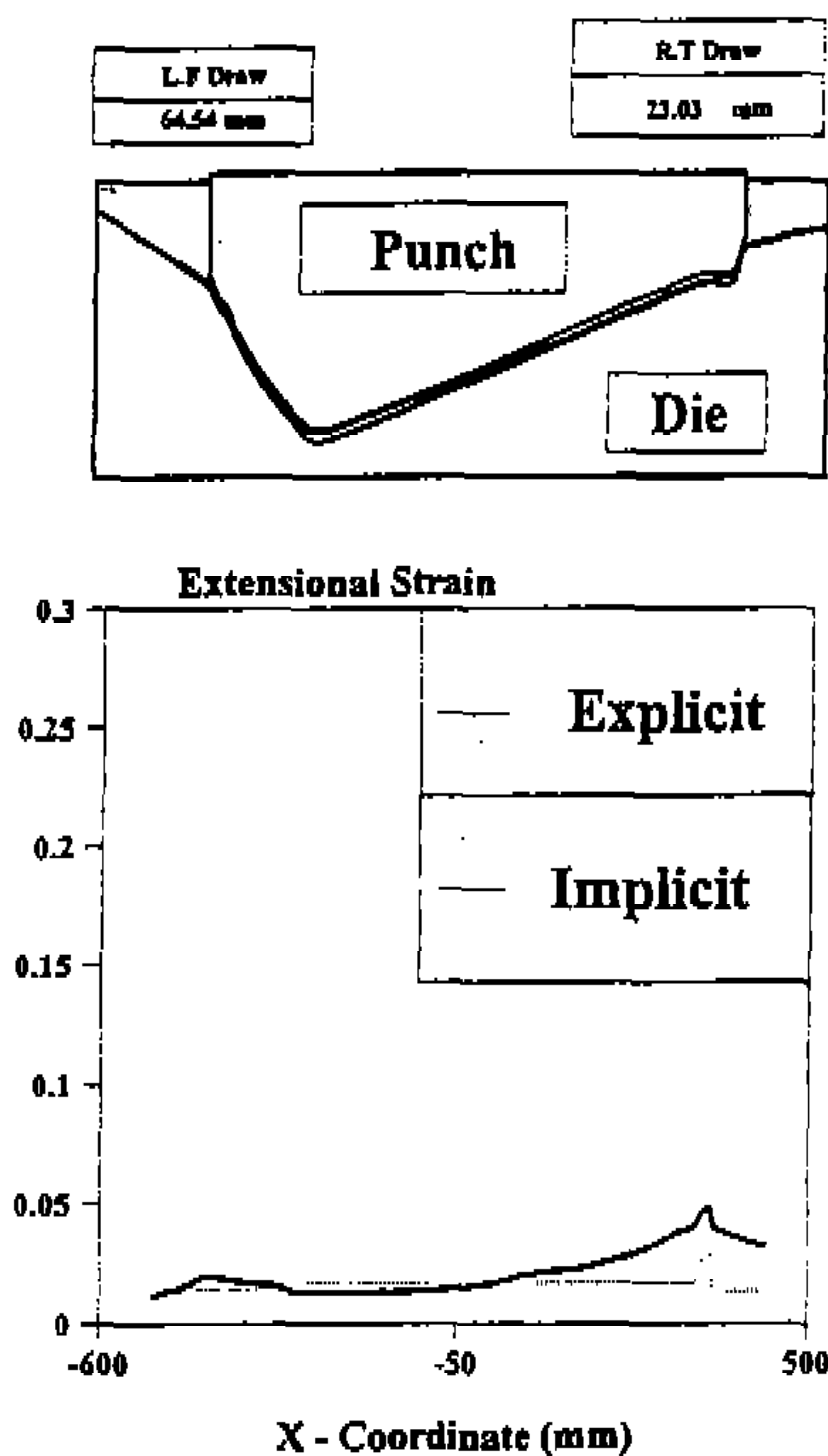


Fig. 8 Deformed Shape and Extensional Strain Distribution of Trunk-Lid (Stroke=100mm)

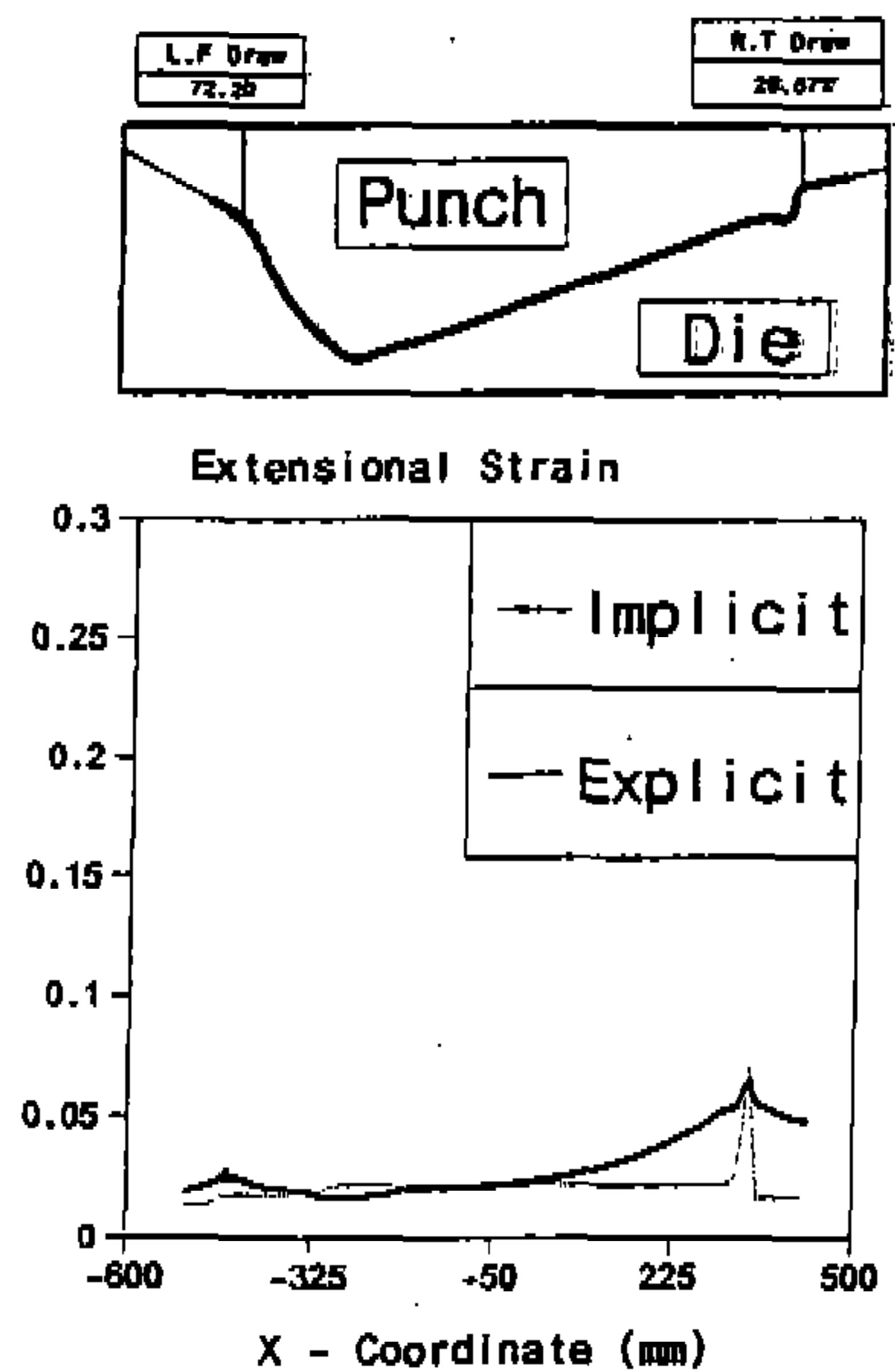


Fig. 9 Deformed Shape and Extensional Strain Distribution of Trunk-Lid (Stroke=110mm)

그리고, Fig.10에는 각 펀치행정에 대한 드로우잉량을 비교하였다.

모든 행정에서 변형을 분포 및 변형 형상이 내연적 유한 요소 해석과 거의 일치하였다. 그러나, 접촉부위가 증가 될수록 접촉부위의 마찰계수를 동마찰계수 대신 정마찰계수를 사용함으로써 전체적으로 변형율분포가 약간 높게 평가된 것으로 생각되며, 제한력을 박판의 끝 절점에 가함으로서 Fig.8, Fig.9과 같이 응력파동의 전파에 의해 최대변형율(Maximum Stain) 부위에서 변형율분포가 조금씩 퍼지는 현상이 나타난 것으로 짐작된다. 한편, 드로우잉량을 비교하면 강소성 외연적 유한 요소 해석의 변형율 분포가 내연적 유한 요소 해석보다 높게 평가되므로 Fig.10 강소성 외연적 유한 요소법이 작게 평가되었다.

본 해석에서 전체적인 변형율분포가 7%이하로 평가되므로 파단의 위험은 없을 것으로 보인다.

4.2 센터플로어(Center-Floor) 단면 해석결과

강소성 외연적 유한요소법의 또다른 적용예로서 센터플로어 대칭단면을 해석하였다. 센터플로어 단면은 펀치행정 86.5mm까지 성형해석 하였으며, 성형조건은 아래와 같다.

- 응력-변형도 곡선 : $\bar{\sigma} = 51.915(\bar{\epsilon})^{0.247} \text{kgf/mm}^2$
- 수직이방성계수 : $R = 1.6$
- 재료두께 : $t = 0.6 \text{mm}$
- Coulomb 마찰 계수 : $\mu = 0.2$
- 구속력(Binchig Force) : 고정 (왼쪽), 15kgf/mm(오른쪽)

센터플로어 단면은 80개의 굽힘에너지가 보강된 박막요소(Bending Energy Augmented Membrane Element)를 사용하여 균일하게 분할하였으며, 바인더랩 형상은 Fig.11와 같다.

본 예제는 박판의 왼쪽 끝부분은 스트레칭을 위해 고정(Stick)되어 있고, 오른쪽 끝부분은 드로우잉 시키기위해 제한력을 가하도록 되어있어 박판이 왼쪽에서 빨려들어 오도록 설계된 공정이

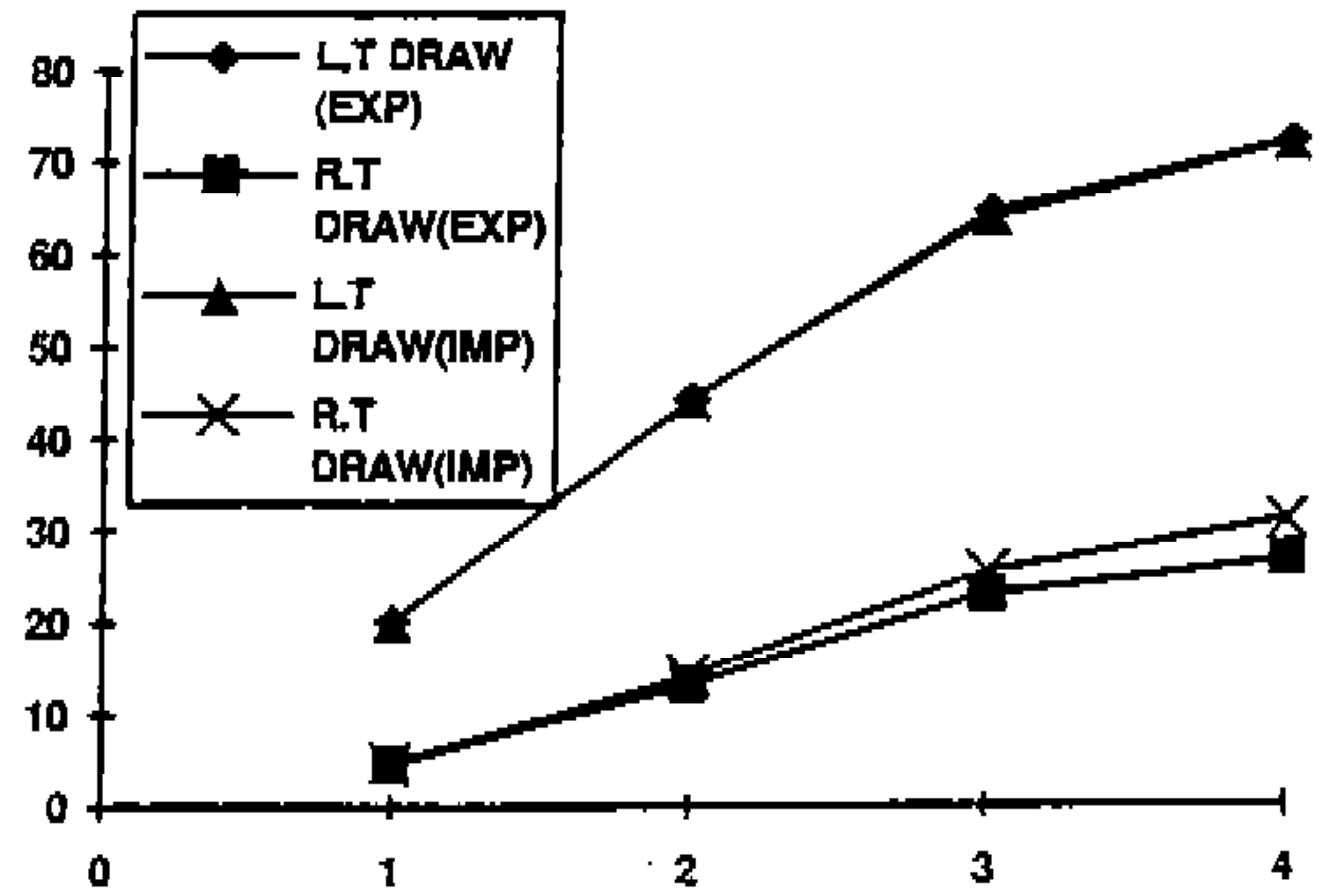


Fig. 10 Comparison of Drawing Value between Explicit and Implicit

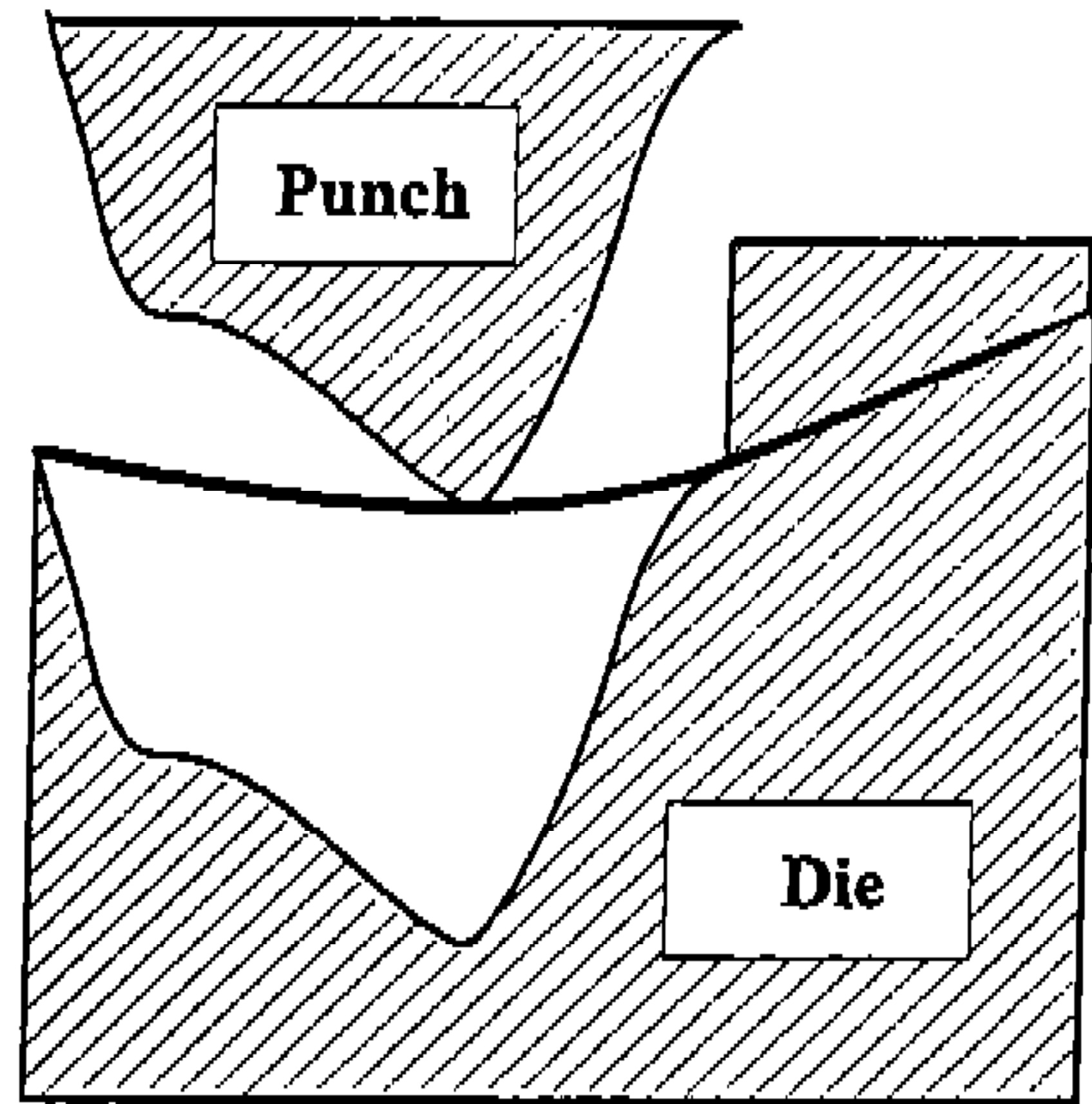


Fig. 11 Binder Wrap State of Center-Floor

다.

해석에 사용된 매개변수들은 펀치속도가 15m/sec, 큐런트 수가 0.1, 감쇄비가 e-7/단위시간, 질량스케일링량이 16이었다. 본 예제는 트렁크리드와 같이 전체적인 변형율분포가 적지않아 단위 펀치진행거리당 충분한 량의 강성(Stiffness)가 평가됨으로 펀치에 박판의 절점들이 붙는 현상은 나타나지 않았다. 그결과는 펀치행정 63.5mm, 87.5mm에 대해 각각 Fig.12 Fig.13에 나타내었다. 전체적인 변형형상 및 변형율분포, 드로우잉량은 내연적 강소성 유한요소해석 및 실험결과와 잘 일치하고 있는 것으로 나타났다.

한편, Fig.12에 보이는 것과 같이 트렁크리드

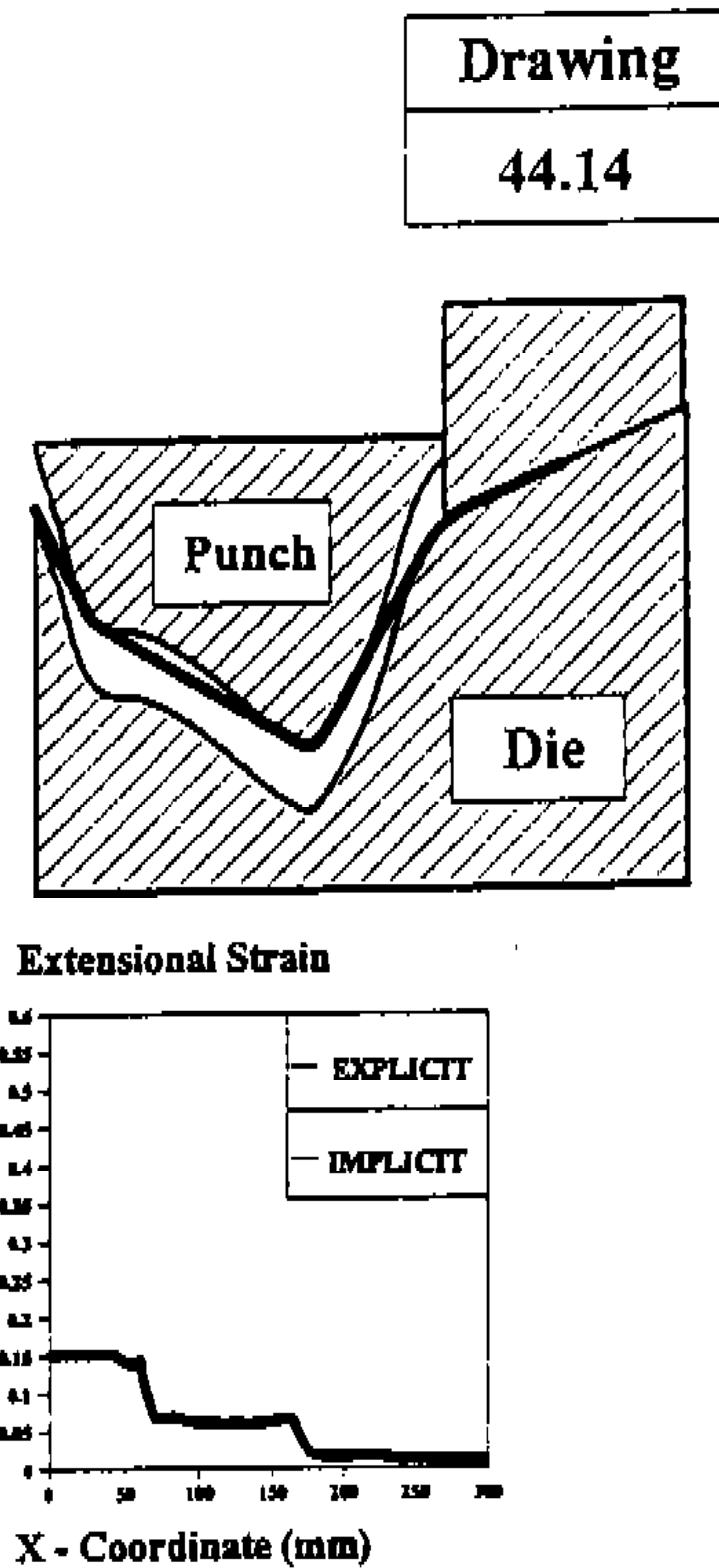


Fig. 12 Deformed Shape, Extensional Strain Distribution, and Drawing Value of Trunk-Lid (Stroke=63.5mm)

와 달리 한쪽방향에서만 드로우잉이 일어남으로 용력파동전파에 의한 영향이 적게 나타나고 있다. 그러나, 동마찰 계수 대신 정마찰 계수를 사용함으로써 전체적인 변형을 분포는 조금씩 높게 나타나는 것 같다. 그리고 Fig.13에 나타난 것처럼 곡률이 급격히 변하는 두곳의 펀치 침단부위에서 변형을 분포가 조금 다른것은 내연적 강소성 유한요소해석의 경우 펀치 침단부위에서 요소를 아주작게 나누고, 접촉이 적은 부위에서는 요소를 크게 나누었다. 그러나, 외연적 강소성 유한요소해석에서는 요소의 크기를 다르게하면 한 질점의 질량이 옆 질점들의 질량크기와 달라져서 질량 불균형에 의한 관성효과 및 수치적 오차가 커진다. 그래서, 전체 요소를 균일하게 나누었다. 그러므로, 펀치의 침단부위에서 변형율이 조금높게 나타난 것으로 짐작된다. 또한, 변형율이

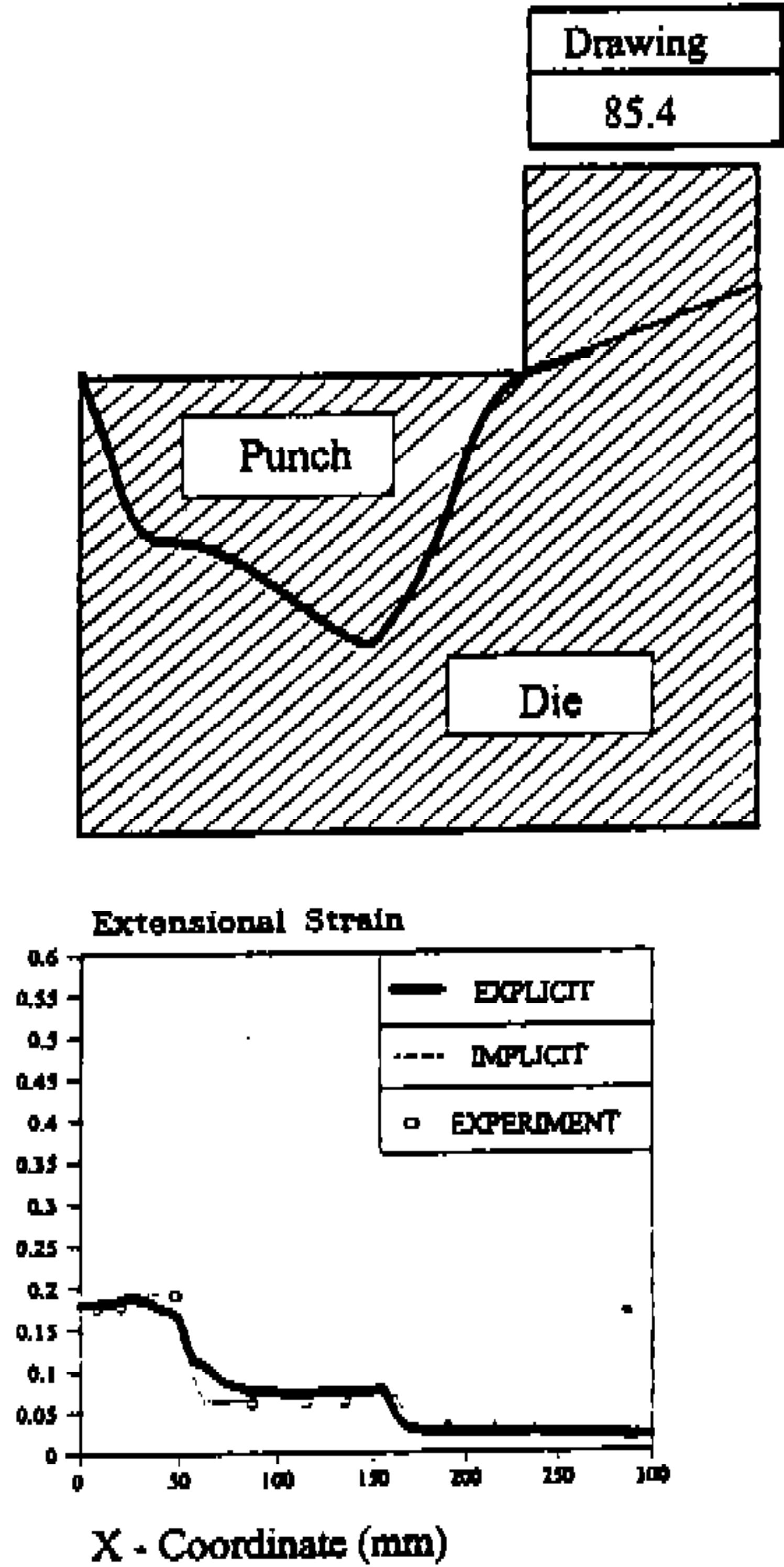


Fig. 13 Deformed Shape, Extensional Strain Distribution, and Drawing Value of Trunk-Lid (Stroke=87.5mm)

조금 높게 평가되어 드로우잉량도 내연적 강소성 유한요소법이 87mm인데 비해, 85.4mm로 조금 낮게 나타났다.

본 해석에서 전체적인 변형률분포가 20% 이하로 나타남으로 파단위험은 없을 것으로 보인다.

5. 결 론

본 연구에서는 평면변형을 가정한 외연적 강소성 유한요소법을 실제박판성형공정인 트렁크리드와 센터플로어 대칭단면의 성형공정 해석에 적용하였다. 그 결과 기존의 내연적 유한요소해석 결과 및 실험결과와 잘 일치하였다. 또한, 기존의 내연적 유한요소해석에서 나타났던 수렴성 문제를 극복할 수 있었으며, 저장용량도 감소시킬 수 있었다. 그리고, 강소성 외연적 유한요소해석

시 요소의 크기를 균일하게 나누어 질량편심에 의한 관성효과를 제어해야함을 알았다.

기존의 외연적 유한요소해석의 경우 탄소성 모델에 대한 적용만 이루어졌다. 그러나, 본 연구를 통해 강소성 모델에도 외연적 유한 요소해석이 적용될 수 있으며, 강소성의 장점인 빠른 시간내에 성형해석이 가능함과 외연적 유한요소해석의 장점인 수렴성문제의 극복 및 저장용량의 감소를 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

1. A. Honecker, K. Mattiasoon "Finite Element Procedures for 3-D Sheet Forming Problems" NUMIFORM 86
2. J.C. Nagtegaal, L. M. Taylor "Comparision of Implicit and Explicit Finite Element Method for Analysis of Sheet Forming Problems" VDM 1991
3. E. Nakamachi "Anisotropic Elastic-Plastic Finite Element Simulation of 3-D Sheet Forming Process" NUMIFORM 92
4. K.Schweizerhof, J. O. Hallquist & B. Wainscott "Improvement in Contact Algorithms for The Simulation of Thin Sheet Metal Forming with Explit Finte Element Programs" NUMIFORM 92
5. I. Fried and D. S. Malkus, "Finite Element Mass Matrix Lumping by Numexical Integration with No Convergence Rate Loss", Int. J. Solids Structure, Vol. 11, pp. 461-466, 1975
6. E. Hinton, T. Rock and O. C. Zienkiwicz, "A Note on Mass Lumping and Related Processes in the Finite Element Method", Earthquake Engng. and structural Dynamics, Vol. 4, pp. 245-249, 1976
7. P. Hall, Hughes, "The Finite Element Method", 1987
8. M. E. Plesha, "Mixed Time Integration for the Transient Analysis of Jointed Media", I. J. Num. & Analytical Method in Geometry, Vol. 10. 91-110, 1980
9. R. D. Cook, D. S. Malkus, e. Plesha, "Concepts and Applications of Finite Element Analysis", Wiley, 1989