

계단형 드로오비드의 인출특성에 관한 유한요소해석 및 실험

박 원배*, 김 창만**, 전 기찬***, 김 낙수****, 서 대교*

* 성균관대 기계설계학과

** 대원전문대 기계설계과

*** 기아 자동차(주)

**** 서강대학교

Finite Element Analysis and Experiment on Drawing Characteristics through Step Drawbead

Won Bae Park*, Chang Man Kim**, Ki Chan Jeon***, Nak Soo Kim****, Dae Gyo Seo*

* Dept. of Mechanical Design, Sung Kyun Kwan University

** Dept. of Mechanical Design, Dae Won Junior College

*** Kia motors

**** So Gang University

Abstract

Theoretical and experimental drawing characteristics for the step drawbead are discussed. The drawbead restraining forces and strains by the various drawing angles are measured experimentally. Also, during the blank holding process, the strain distributions of upper and lower skins of specimens are analysed by the 2-D rigid-plastic F.E.M. And the drawbead restraining forces and strain distributions for the drawn specimens by the drawing length are obtained by experiment.

1. 서 론

박판 금속성형공정은 자동차 및 항공산업등에서 널리 이용되는 공정이다. 특히, 닥드로잉 공정에서의 주된 실패는 국부넉킹이나 주름현상에 의해 일반적으로 발생된다. 먼저 국부넉킹은 다이내부로의 재료의 유동을 제어하는 인출력이 너무 과다할 경우이며, 반면에 주름현상은 이러한 인출력이 과소할때 일어난다. 따라서, 이러한 결함을 제거하여 판재의 성형률을 높이기 위해서는 블랭크홀더 및 바인더의 표면에 적절한 형상의 드로오비드를 설치함으로써 인출력을 조절할 필요가 있다.

한편, 드로오비드에 대한 연구는 1978년 H.D. Nine의 단일원형비드에 대한 연구로써 본격화 되어 그 후, 1986년에는 B. Maker와 Shyam S. K. Samanta등이 드로오비드가 설치되었을 경우의 성형과정을 Binder Lock한 뒤에 펀치가 진행하면서 Sheet Panel이 드로오비드부를 통과할 때의 인출력 및 변위분포 선도등을 탄소성 셸 모델로써 해석한 후 실험을 행하였다. 또한, 1988년 이후에는 S. Ujihara, T. Sakamoto와 T. Frubayashi등이 소재가 드로오비드부를 통과한 뒤의 공구다이 모서리부에서의 거동을 해석한 바 있다.

본 연구에서는 스텝형 드로오비드에 대해 인출각도별 인출실험을 수행함과 동시에 해석으로 2차원 강소성 유한요소법을 이용하여 그 인출특성들을 고찰하고자 한다.

2. 이론 해석

본 연구에서는 이론해석의 방법으로서 그 적용의 일반성과 효율성이 다른 해석방법에 비해 비교적 높아 소성분야에서 널리 적용되는 유한요소법을 이용하였다.

유한요소해석법은 크게 그 재료의 구성방정식에 따라 탄소성 유한요소법과 강소성 유한요소법으로 구별되며, 특히 강소성 유한요소법은 제하시 탄성회복에 의한 잔류응력의 계산이 불가능하나 소성가공과 같은 대변형 문제에서는 탄성에 의한 변형은 미소하기 때문에 보다 효율적인 2차원 강소성 유한요소법을 이용하였다. 한편, 일반적으로 유한요소모델은 박막요소(Membrane element), 셸요소(Shell element), 연속체요소(Solid element)로 대별되며 이 중 박막요소는 계산효율 및 접촉처리가 용이하여 유한요소해석시 주종을 이루고 있으나 굽힘효과를 고려할수 없는 단점이 있어 본 연구에서는 굽힘효과를 고려할수 있는 셸요소와 연속체요소 중 보다 계산이 효율적인 등방성의 4절점 연속체요소를 사용하였다.

한편, 유한요소의 구성방정식은 평형방정식과 가상일률의 원리, 경계조건(비압축성조건)으로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV - \int_{S_f} \bar{t}_i \delta v_i dS + \int_V k \dot{\epsilon}_{kk} \delta \dot{\epsilon}_{kk} dV = 0 \quad (2.1)$$

여기에서, 상당변형률 속도(effective strain rate)는 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} &= \dot{\epsilon}_{11}^2 + \dot{\epsilon}_{22}^2 + \dot{\epsilon}_{33}^2 + 2(\dot{\epsilon}_{12}^2 + \dot{\epsilon}_{23}^2 + \dot{\epsilon}_{31}^2) \\ &= \dot{\epsilon}^T \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^T D \dot{\epsilon} \end{aligned} \quad (2.2)$$

이산화과정후 텐서(tensor)형태의 식을 행렬식으로 바꾸면 다음과 같다.

$$\left\{ \int_V \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\epsilon} \hat{v}^T B^T D B dV + \int_V k \hat{v}^T B^T c c^T B dV - \int_{S_f} t^T N ds \right\} \delta \hat{v} = 0 \quad (2.3)$$

위의 식을 1차 Taylor 전개한 후 선형화하면

$$K \Delta \hat{v} = L \quad (2.4)$$

로 요약되고 직접 반복법과 Newton-Raphson법으로 속도벡터를 구해 낼 수 있다.

3. 실험

본 실험에 사용된 재료는 두께 0.7mm의 자동차 판넬 성형용인 아연도금 유기피막 강판(SPC 3J-3J/3J)으로 그 기계적 성질은 Table 1과 같다.

Table 1 Mechanical properties of drawbead specimen

KS B 0801 제 5호 단축인장시험편 (t=0.7mm)			
Yield stress(Y)	Plastic coefficient(K)	Tensile strength(T.S)	Strain-hardening exponent(n)
16.0 Kgf/mm ²	47.765 Kgf/mm ²	29.0 Kgf/mm ²	0.25

드로오비드 시험편은 길이 600mm, 폭 50mm의 크기로 동력절단기를 이용해 절단한 후 모아레 무늬입힘장치에 의해 시험편의 선단 약 200mm가량을 Photo-Grid법으로 직경이 2.4mm인 원형 격자 무늬를 입힌다. 다음 단계로 제작된 시험편을 비드시험기에 약 160mm정도 삽입한 뒤 유압잭을 이용하여 적절한 가압력을 주어 시험편을 드로오비드 형상으로 성형한 뒤 끝부분을 U.T.M(인장/압축 만능시험기)의 Grip에 물리고 일정한 인출각도(0° ~ 60°)로 Setting하여 시험편을 인출한다. 또한, 이때 인출속도는 분당 50mm로 일정하게 유지한다.

한편, 비드시험기에서 인출된 시험편은 386PC와 연결된 TM-111 type의 공구 현미경에 Digital Gauge를 부착하여 1/1000mm까지 길이방향의 대수변형률을 측정한다.

4. 결과 및 고찰

본 실험에서 사용된 드로오비드 형상 및 공구의 형상은 Fig. 1과 같다. 처음에 시험편의 인출특성에 영향을 미치는 인자들, 즉 드로오비드 반경(R₁, R₂), 공구다이 모서리 반경(R₃), 블랭크가압력 및 인출각도등을 변화하며 인출실험을 수행하여 Table 2와 같은 결과표를 얻었다. 또한 Fig. 2와 Fig. 3에서 보는 바와 같이 2차원 강소성 유한요소법을 이용하여 인출각도 0°와 30°에 대한 해석을 수행하였으며, 초기에 블랭크가압력에 의해 블랭크홀더가 시험편을 가압한 다음 그 다음 단계로 성형된 시험편을 드로오비드부를 통하여 인출시킨다. Fig. 4는 드로오비드 반경 R₁, R₂와 공구다이 모서리 반경 R₃를 각각 바꿔가며 실험하여 얻은 인출각도에 대한 인출력의 선도로써 인출각도가 증가함에 따라 시험편이 공구다이 모서리부에서 굽힘변형 및 인

장변형을 크게 받아 인출력이 비교적 선형으로 증가함을 보여준다. Fig. 5는 블랭크가 압력이 인출력에 미치는 영향을 보여주는 선도로써 블랭크가압력이 커질때 다소 인출력이 증가하고 있음을 보여준다.

한편, Fig. 6에서는 인출각도를 0° 로하여 시험편을 160mm가량 인출하였을때 드로오비드 반경 R_1 , R_2 가 시험편의 전반적인 인출력에 미치는 영향을 보여주며, 여기서 보는 바와 같이 두 선도 모두 초기에 인출력의 큰 증가와 함께 어느 정도 일정한 상태를 유지하다가 인출길이 약 130mm부근에서 인출력이 급격히 감소함을 나타낸다.

Fig. 7과 Fig. 8은 인출각도 0° 에서 시험편이 비드형상으로 완전히 성형되었을때 그 상부 및 하부표면에서의 변형률분포를 보여주는 선도로써 상부표면은 R_1 부근에서 압축변형, R_2 부근에서 인장변형을 받으며 반면에 하부표면은 R_1 부근에서 인장변형, R_2 부근에서 압축변형을 받아 그 형상이 대칭이 됨을 보여준다. 또한, Fig. 9와 Fig. 10은 비드형상으로 완전히 성형된 시험편을 인출길이 160mm로 인출하였을때 상부 및 하부표면이 받는 변형률분포를 나타내는 선도로 실험결과와 비교되고 있다. 이 선도에서 시험편이 비드부를 통과했을때 가장 큰폭으로 변형률이 증가하였으며, 특히 상부표면과 하부표면에서는 같은 크기의 변형률분포를 보여주었다. 또한, 해석과 실험에서 다소 그 값의 차이를 보여주고 있으나 그 경향은 비교적 잘 일치하고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 스텝형 드로오비드를 대상으로 2차원 강소성 유한요소해석과 실험을 행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 드로오비드 인출력은 공구다이 모서리 반경(R_3)에 비해 드로오비드 반경(R_1, R_2)이 예리해질수록 크게 증가하며, 또한 블랭크가압력이 커질수록 그 값이 다소 증가함을 알 수 있었다.
2. 시험편을 적절한 가압력에 의해 드로오비드 형상으로 성형하였을때 상부표면이 압축변형을 받는 곳에서 하부표면은 인장변형을, 또한 상부표면이 인장변형을 받는 곳에서는 하부표면이 압축변형을 받으며 그 값들의 크기가 거의 같음을 알 수 있었다.
3. 시험편을 일정 인출길이이로써 인출실험을 함과 동시에 2차원 강소성 유한요소해석을 하였을때 실험과 해석 모두에서 시험편이 드로오비드부를 통과하였을때 그 변형률이 가장 컸으며, 또한 실험치와 해석치가 다소 차이를 보이나 그 경향은 비교적 잘 일치하고 있다.

* 후기: 본 연구는 한국 과학 재단 (과제번호:93-10-00-04-3)의 지원과 기아 자동차 (주)의 협력에 의하여 수행 중에 있으며 지원에 감사 드립니다.

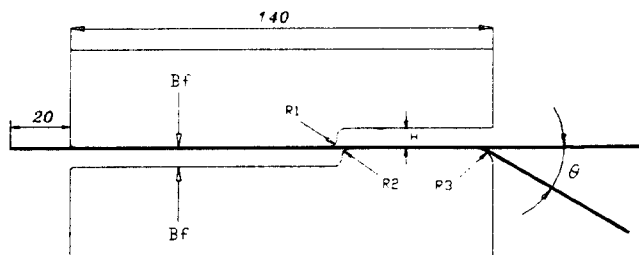
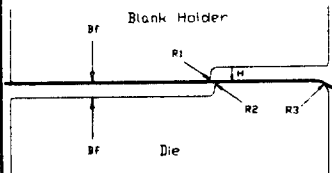
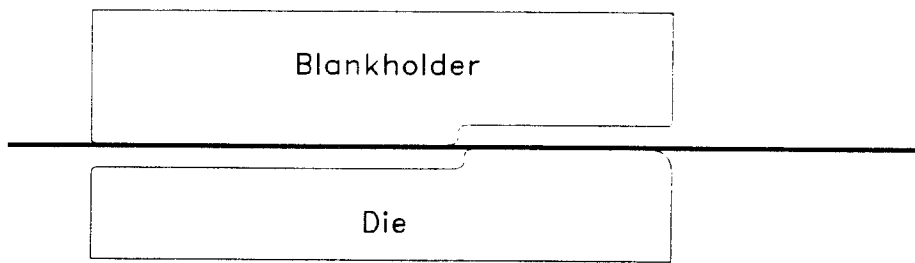


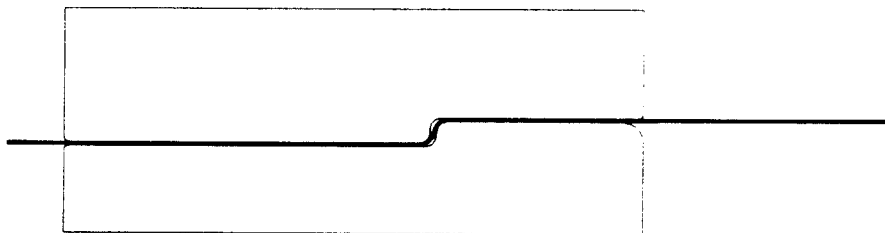
Fig. 1 Step drawbead set and specimen geometry

Table 2 Experimental results for step drawbead

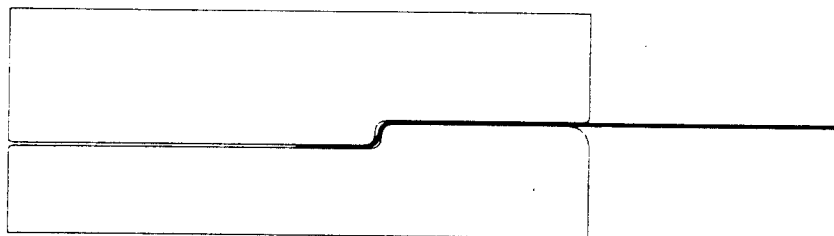
Step Drawbead	Drawing Angle	Drawbead Dim. (mm) *H=6	Holding Force (Kgf)	Restraining Force (Kgf)	Strain (ϵ_{max})
	$\theta = 0^\circ$	R1=R2=2.5, R3=5	666	420.7	0.110
			499.5	390	0.102
		R1=R2=3.5, R3=5	666	345	0.081
	R1=R2=2.5, R3=2.5	666	430	0.124	
	$\theta = 10^\circ$	R1=R2=2.5, R3=5	666	437.5	0.123
			499.5	410	0.111
		R1=R2=3.5, R3=5	666	380	0.087
	R1=R2=2.5, R3=2.5	666	452.5	0.129	
	$\theta = 20^\circ$	R1=R2=2.5, R3=5	666	477.5	0.132
			499.5	432.5	0.116
		R1=R2=3.5, R3=5	666	405	0.094
	R1=R2=2.5, R3=2.5	666	492.5	0.137	
	$\theta = 30^\circ$	R1=R2=2.5, R3=5	666	537.5	0.144
			499.5	482.5	0.124
		R1=R2=3.5, R3=5	666	420	0.102
	R1=R2=2.5, R3=2.5	666	552.5	0.150	
	$\theta = 40^\circ$	R1=R2=2.5, R3=5	666	575	0.156
			499.5	520	0.135
		R1=R2=3.5, R3=5	666	452.5	0.112
	R1=R2=2.5, R3=2.5	666	605	0.162	
	$\theta = 50^\circ$	R1=R2=2.5, R3=5	666	605	0.167
			499.5	550	0.145
		R1=R2=3.5, R3=5	666	475	0.120
	R1=R2=2.5, R3=2.5	666	660	0.182	
$\theta = 60^\circ$	R1=R2=2.5, R3=5	666	650	0.180	
		499.5	585	0.158	
	R1=R2=3.5, R3=5	666	502.5	0.129	
R1=R2=2.5, R3=2.5	666	720	0.219		



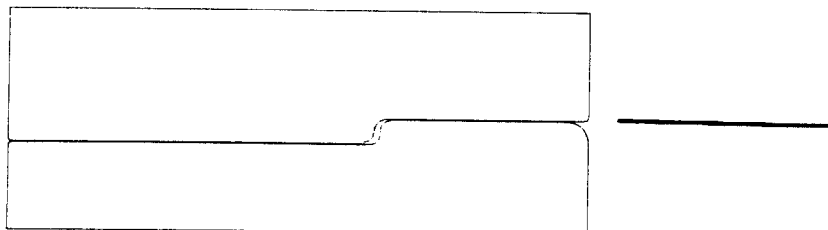
a) specimen initial mesh and position



b) drawing length = 0mm

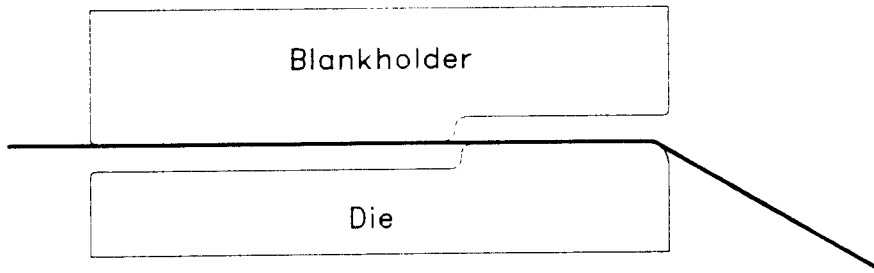


c) drawing length = 90mm

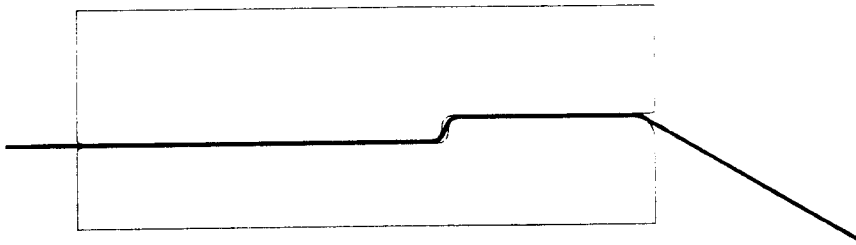


d) drawing length = 160mm

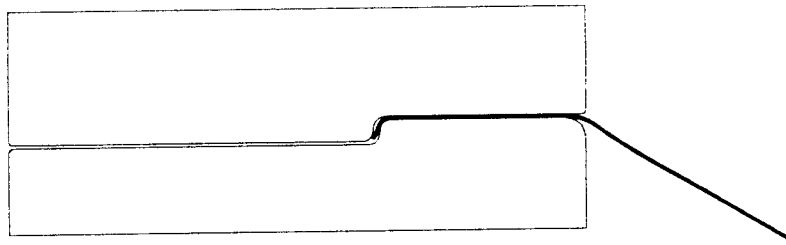
Fig. 2 Drawn phenomena of specimen when drawing angle = 0°



a) specimen initial mesh and position



b) drawing length = 0mm



c) drawing length = 107mm

Fig. 3 Drawn phenomena of specimen when drawing angle = 30°

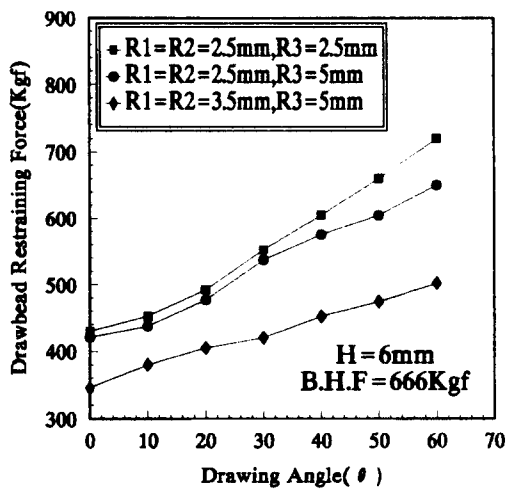


Fig. 4 Drawbead restraining force vs. drawing angle for different R1(R2) and R3

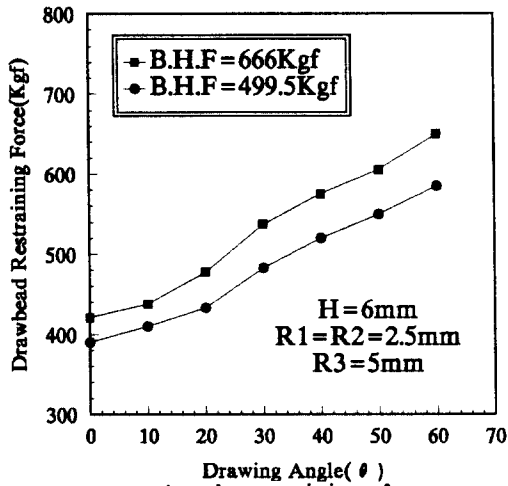


Fig. 5 Drawbead restraining force vs. drawing angle for different B.H.F

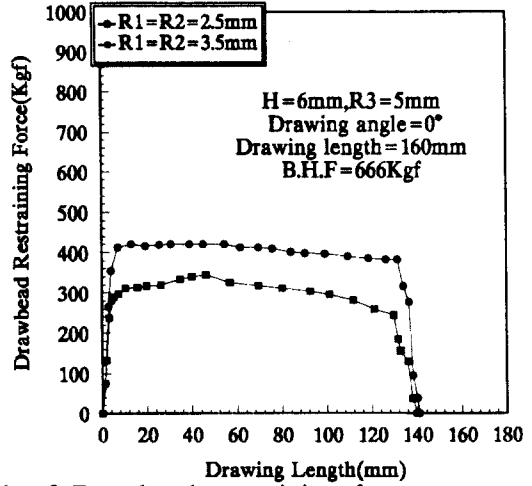


Fig. 6 Drawbead restraining force vs. drawing length for different R1(R2)

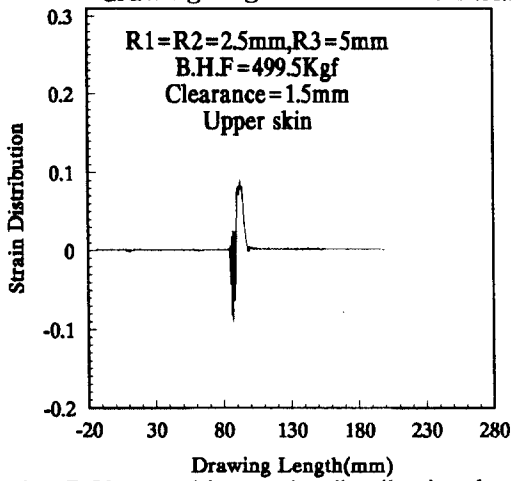


Fig. 7 Upper skin strain distribution by F.E.M. when drawing length=0mm

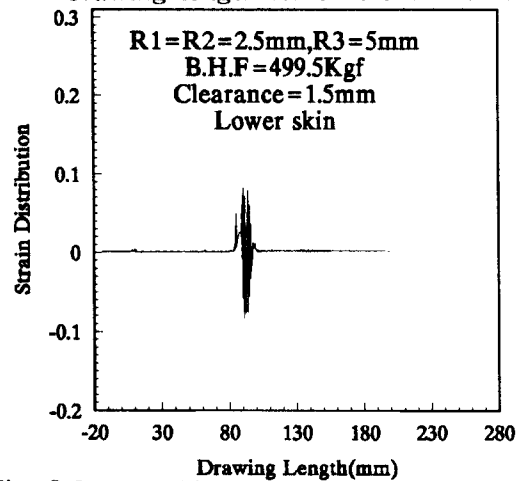


Fig. 8 Lower skin strain distribution by F.E.M. when drawing length=0mm

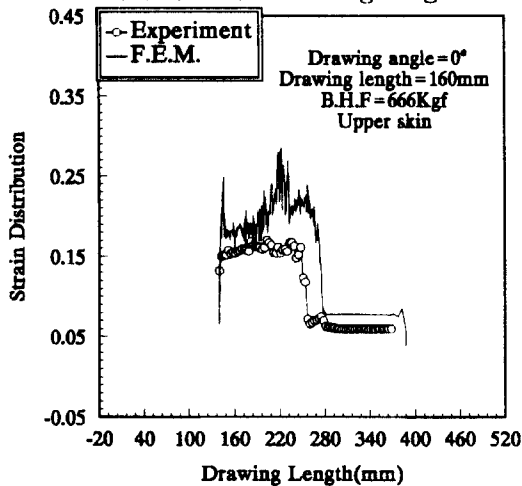


Fig. 9 Upper skin strain distribution by Experiment and F.E.M.

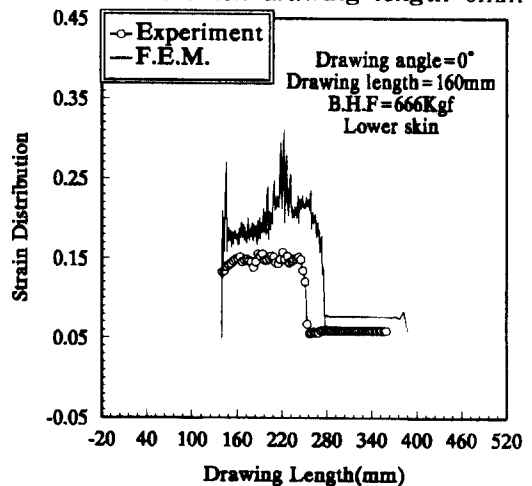


Fig. 10 Lower skin strain distribution by Experiment and F.E.M.