

# 유한요소해석에 의한 슬리팅가공에 관한 연구 A Study on the Slitting Working by Finite Element Analysis

한규택 · 서종근

K. T. Han and J. K. Seo

**Key Words** : Slitting(슬리팅), Clearance(틈새), S.K.B.(Shrinkage Band)

**Abstract** : A slitter is a sort of machinery to cut sheet materials in rolls continuously in the longitudinal direction. Recently slitter line users have requiring higher quality and precision in products in addition to high productivity. A finite element analysis has been performed to investigate the effect of processing factors on shear planes in the slitting of Shrinkage Band(S.K.B.). For the analysis, Hot-dip 55% aluminum-zinc alloy-coated steel sheets and coils(SAZCC) is selected as a material. The results obtained are that deformation was concentrated along the very narrow zone and the maximum slitting load decreases by increasing the knife clearance. Also effective strain decreases according to the clearance increases.

## 1. 서 론

최근 자동차 및 반도체 산업이 발전함에 따라 소재의 성형성이 더욱 중요하게 부각되고 있으며 특히 슬리팅(slitting) 및 프레스(press)와 같이 대량생산 공정에 있어서 발생하는 각종 불량은 생산성에 막대한 손실을 가져온다.

슬리팅은 압연되어진 판재를 원형나이프(knife)를 이용하여 소성변형을 유발시켜 원하는 치수의 폭으로 전단하는 공정, 또는 긴 스트립을 가진 판재를 전단함으로서 원하는 형상으로 만드는 가공방법이다.

현재, 정밀프레스 기술은 공구제작기술의 진보로 인해 고도로 발달되고 있으나, 정밀슬리팅에 대해서는 그 성장도가 매우 낮은 것이 사실이다.

현재, 슬리팅기술은 숙련자의 경험 및 직관에 의해 좌우되고 있으므로 컴퓨터 시뮬레이션 등의 사용에 의한 좀더 체계적이고 정량적인 분석이 필요하다. 슬리팅공정시 발생하는 캠버, 버, 커얼링 등의 방지를 위해서는 컴퓨터시뮬레이션을 통한 이론적 해석이 선행되어야 한다.

슬리팅에 의한 제품은 정밀 프레스가공에 의한 제품과 유사한 현상을 나타내고 있다는 데에 유의

해야 한다. 특히 극박판 슬리팅은 파인블랭킹<sup>1,2)</sup>에서의 가공 방법을 적용시킬 수 있다. 그러나 슬리팅은 스트립이 롤링, 스트레칭, 전단 등의 작업을 거치기 때문에 슬리팅은 일반 프레스가공 보다 더 난해한 기술임을 간과해서는 안 된다.

시뮬레이션을 통한 전단해석에 있어서는 오수익<sup>3)</sup> 등이 유한요소해석코드인 DEFORM을 이용하여 전단해석을 한 바 있으며, T. Altan<sup>4)</sup> 등은 파단과 버 형상에 대하여 중점적으로 연구하였다. 또한 전단면 형상에 영향을 미치는 다이틈새에 대해서는 F. Faura<sup>5)</sup> 등이 유한요소법에 의한 최적 틈새예측에 대해서 연구한 바 있다.

한편, 슬리팅가공에 대해서는 J. W.Rogers<sup>6)</sup> 등이 1973년에 이미 코일 슬리팅(coil slitting)에 대해서 서술한 바 있다. 최근은 한<sup>7,8,9)</sup> 등이 슬리팅공정에 대한 연구, 특히 나이프틈새가 슬리팅가공의 전단면에 미치는 영향에 대해서 연구 한 바 있다. 본 논문의 목적은 S.K.B.용 박판의 슬리팅가공을 위한 정밀 전단기구에 대하여 연구하는데 있다. 특히, 슬리팅가공에서 틈새(clearance)가 제품의 전단면에 미치는 영향, 나이프 코너 반경이 슬리팅제품의 전단면 형상에 미치는 영향에 대해서 연구하며 실험에 의한 전단면 형상과의 비교를 통해 유한요소법이 슬리팅공정의 해석에 타당한 방법임을 보였다.

접수일 : 2001년 1월 29일  
한규택 : 부경대학교 기계공학부  
서종근 : 부경대학교 대학원

## 2. 슬리팅공정의 구성

슬리팅가공은 압연공정에 의해서 박판 혹은 후판의 소재를 코일카(coilcar)에 의해 운반되어 언코일러(uncoiler)에 장착시켜 모터에 의해 구동되는 라인을 따라 슬리터를 통과함에 의해 슬리팅 되며 리코일러(recoiler)에 의해 되감겨 작업이 종료된다.

Fig. 1은 슬리팅라인을 나타낸다.

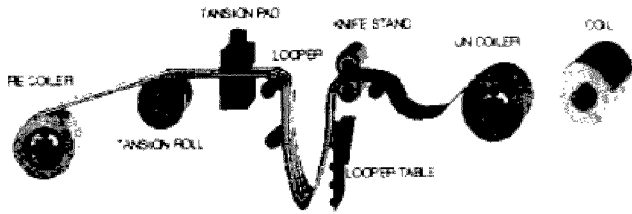


Fig. 1 Slitting process

## 3. 유한요소해석

### 3.1 모델형상

슬리팅 작업은 일종의 전단작업이라 할 수 있다. 전단가공에서는 소재가 매우 높은 변형률을 가진다.

슬리팅가공은 Fig. 2와 같이 두 개의 아아버(arbor)에 의해 지지된 다수의 나이프 사이를 소재가 통과하여 전단된다. 전단가공에서와 마찬가지로 슬리팅에서도 상하 나이프간의 틈새는 가공제품의 전단면(sheared surface)과 파단면(fractured surface) 및 버(burr) 그리고 롤오버(rollover)의 형성에 많은 영향을 미친다. Fig. 2는 해석에 사용될 모델 형상을 나타내고 있는데 상하 나이프는 강체(rigid)로 가정하였으며, 소재는 강소성(rigid-plastic) 재료로 가정하였다. 또한 소재의 압연방향에 따른 이방성은 고려하지 않고 등방성재료로 가정하였으며 해석대상이 되는 소재의 재질은 SAZCC이다.

Fig. 3은 모델치수를 나타낸다. 나이프의 폭(A)은 5mm, 펀치측 나이프의 간격(B)은 12mm이며 D는

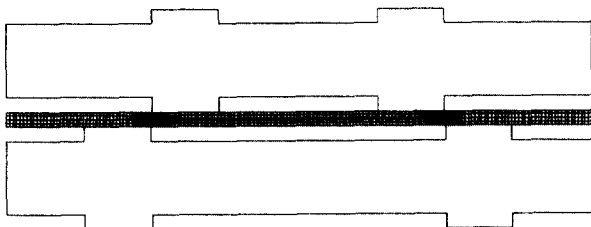


Fig. 2 Simulation model

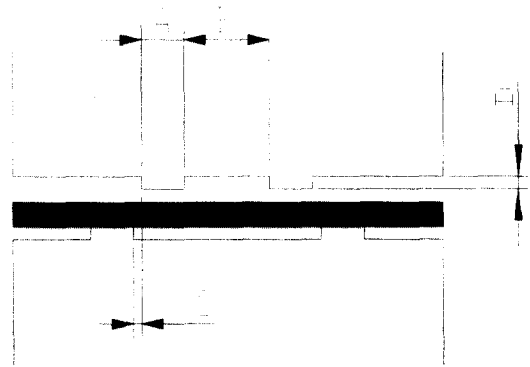


Fig. 3 Model dimension

1mm이다.

한편 펀치측 나이프와 다이측 나이프의 간격(C)을 틈새라 정의한다.

### 3.2 공정매개변수

해석 도구로는 유한요소법 상용 소프트웨어인 DEFORM2를 사용하였고 틈새를 1%, 5%, 10%, 20%로 하여 해석하였으며, 나이프 코너반경을 0.05mm, 0.1mm로 정한다. Table 1은 공정매개변수를 나타낸다.

Table 1 Parameter settings

Parameter	Value	Dim.
workpiece	SAZCC	
clearance	1, 5, 10, 20	%
knife diameter	100, 150, 200 250, 300	mm
knife corner radius	0.05, 0.1	mm
element Num.	3024	EA
step Num.	100	
stroke per step	0.01	mm
friction coefficient	$\mu = 0.1$	

### 3.3 시뮬레이션에 적용된 조건식

해석을 위하여 소재와 나이프와의 접촉 마찰조건은 식(1)과 같이 쿨롱(Coulomb)의 법칙에 따른다고 가정한다.

$$\tau_f = \mu \sigma_n \quad (1)$$

단,  $\tau_f$ 는 마찰전단응력이고,  $\sigma_n$ 는 접촉면에서의 법선응력을 나타내고  $\mu$ 는 마찰계수를 나타낸다.

또한 해석에 사용된 재료는 강소성 재료이면서 동시에 가공경화성재료이기도 하므로 구성방정식은 식 (2)와 같다.

$$\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n \quad (2)$$

$\bar{\sigma}$ 는 유효응력, K는 재료상수,  $\bar{\epsilon}$ 는 유효변형률을 나타내고 n은 변형경화지수를 나타낸다.

한편 변형해석으로서 뉴턴-랩슨법(Newton-Raphson method)을 사용하였으며, 슬리팅공정동안에 발생 되는 파괴와 균열의 진전을 고려해 주기 위해 연성 파괴조건으로서 본 논문에서는 Cockcroft와 Latham의 연성파괴기준<sup>10)</sup>(ductile fracture criterion)식을 적용하였는데, 그 모델식은 식 (3)과 같다.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \sigma^* d\bar{\epsilon} = C_0 \quad (3)$$

여기서  $\sigma^*$ 는 최대 인장주응력,  $\bar{\epsilon}$ 은 유효변형률, 그리고  $C_0$ 는 재료상수이다. 이 조건은 파괴가 변형과 인장응력에 의존함을 의미하고 있다.

그리고 재료상수는 실험에 의해서 구해질 수 있는 값이나, 본 연구에서 반복적인 시뮬레이션을 통해서 구해본 결과 유효 변형률값이 2.0일때 실제제품과 가장 근사함을 얻을 수 있었다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 틈새에 의한 영향

##### 4.1.1 틈새에 따른 하중과 스트로크

Fig. 4는 각각 틈새가 1%, 5%, 10%, 20%일 때의 하중과 스트로크의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 나이프간의 틈새가 커질수록 초기 소성변형에 요구되는 하중은 낮으며 최종파단점까지의 스트로크가 증가함을 알 수 있으며 스트로크의 증가는 슬리터 라인 속도의 선정과 밀접한 연관이 있다. 즉 파단완료가 늦어지면 슬리팅속도를 늦춰야 한다.

##### 4.1.2 틈새에 따른 전단면의 형상

Fig. 5는 전단면 및 파단면, 롤오버, 버의 형상을 나타낸 것이다.

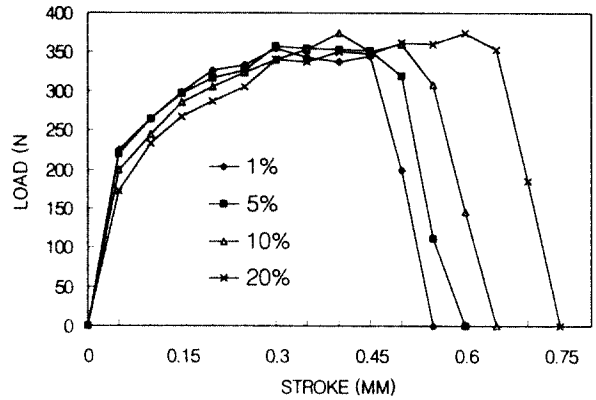
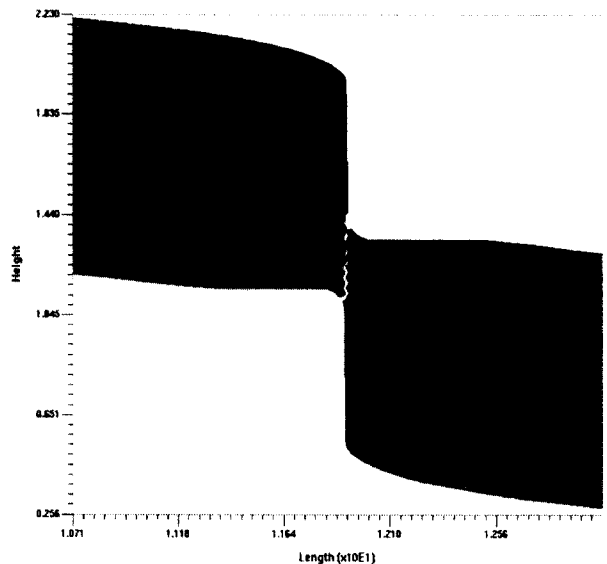
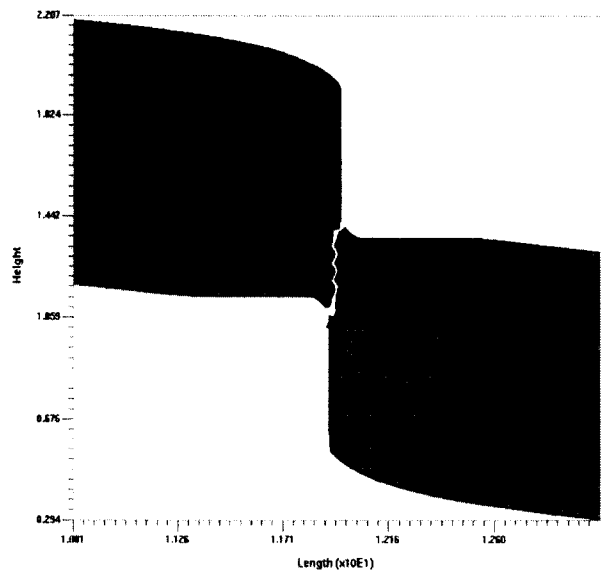


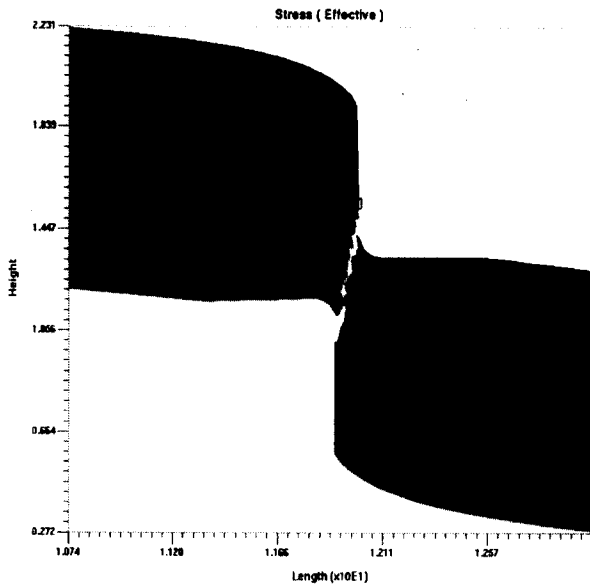
Fig. 4 Load-stroke curve by clearance



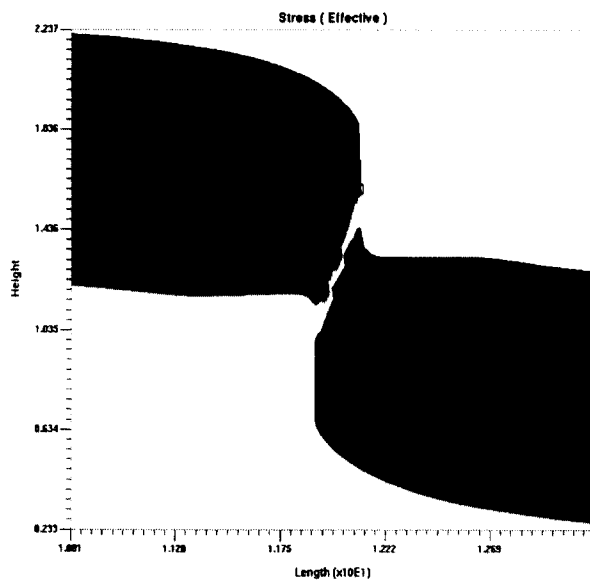
(a) Clearance 1%



(b) Clearance 5%



(c) Clearance 10%



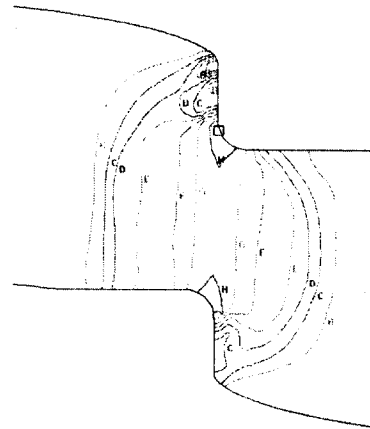
(d) Clearance 20%

Fig. 5 Simulated part edge

그림에서 틈새가 커질수록 롤오버(rollover)량이 커짐을 알 수 있으며, 버 형상을 보면 나이프간의 틈새가 작을수록 가늘고 길다란 모양을 나타내는 것을 볼 수 있으며 틈새가 커질수록 굵고 짧은 버가 생성됨을 볼 수 있다. 또한 틈새가 작을수록 전단면 영역은 커지며 파단면과 롤오버 및 버 영역은 작아짐을 알 수 있다.

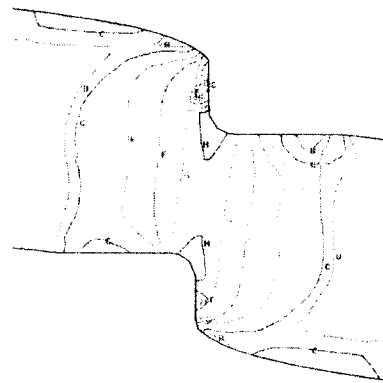
#### 4.1.3 틈새에 따른 응력분포

응력은 소재의 휨이나 뒤틀림 등에 영향을 준다. Fig. 6을 보면, 편치측 나이프와 다이측나이프간의 틈새가 커질수록 응력이 미치는 영역이 넓은 범위에 걸쳐 분포됨을 알 수 있다.



A	= 0.0
B	= 0.0610
C	= 0.1219
D	= 0.1829
E	= 0.2438
F	= 0.3048
G	= 0.3657
H	= 0.4267
I	= 0.4877
J	= 0.5486

(a) Clearance 5%



A	= 0.0
B	= 0.0581
C	= 0.1162
D	= 0.1744
E	= 0.2325
F	= 0.2906
G	= 0.3487
H	= 0.4069
I	= 0.4650
J	= 0.5231

(b) Clearance 10%

Fig. 6 Effective stress distribution by clearance

#### 4.2 나이프코너반경에 의한 영향

##### 4.2.1 나이프코너반경에 따른 하중과 스트로크

Fig. 7은 나이프의 반경의 변경에 따른 하중과 스트로크곡선이다. 나이프의 코너 반경이 클수록 초기 소성변형시 최대 하중은 낮은 반면, 완전 분리되는 데까지의 거리는 길어졌다.

##### 4.2.2 나이프코너반경에 따른 전단면의 형상

Fig. 8은 파단 진행에 따른 응력 집중을 나타낸다. 코너반경이 클수록 최대 하중은 낮아지나 응력이 광범위하게 분포되어 진다. 그러나 전단면이 상대적으로 작아짐에 따라 버, 처짐 및 파단면이 증가하였다.

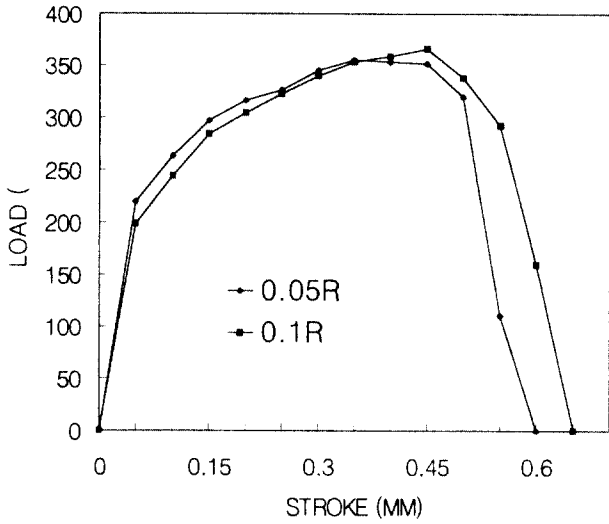
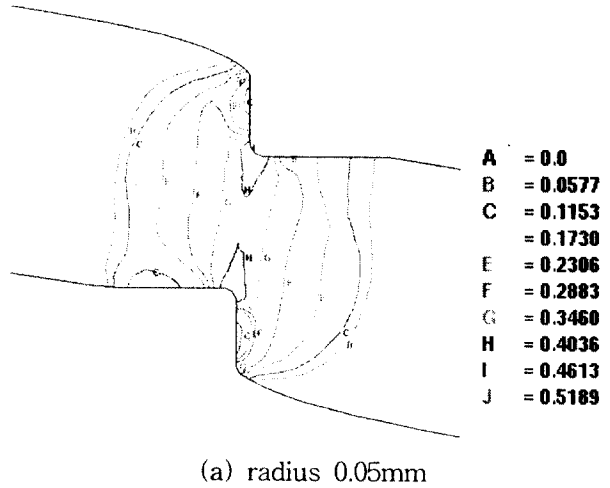
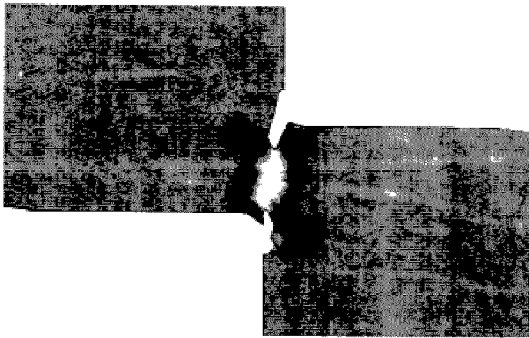


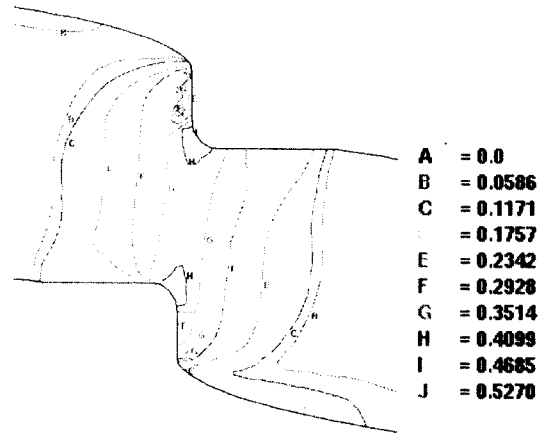
Fig. 7 Load-stroke curve by coner radii.



(a) radius 0.05mm



(a) Radius 0.05mm



(b) radius 0.1mm

Fig. 9 Effective stress distribution by radius



(b) Radius 0.1mm

Fig. 8 Effective stress distribution

#### 4.2.3 나이프의 코너반경에 의한 응력분포

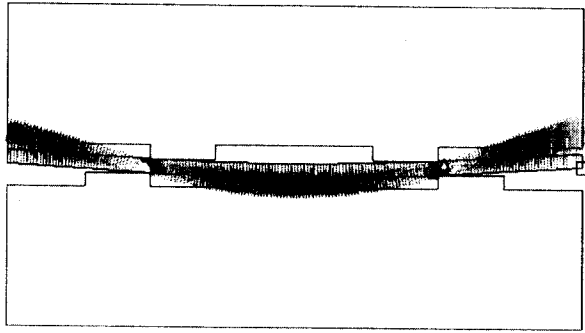
Fig. 9는 나이프 코너반경을 0.05mm, 0.1mm로 했을 때의 유효응력을 나타낸다.

코너반경이 클수록 최대 하중이 커지고 응력이 광범위하게 분포되어 진다. 그러나 전단면이 상대적으로 작아짐에 따라 버, 처짐 및 파단면이 증가하였다.

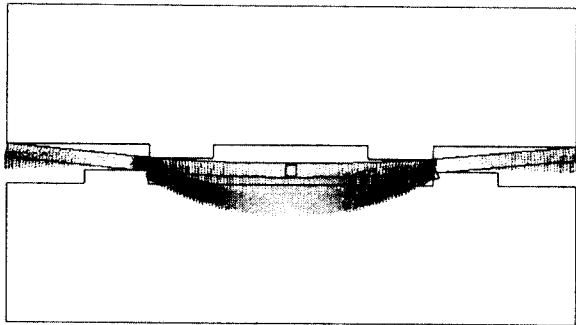
#### 4.3 나이프진입에 따른 후프의 변형

Fig. 10은 후프의 거동을 나타내고 있다. 나이프의 틈새 1%, 총 진행거리 1mm로 하였을 때의 각 단계에서의 재료거동을 나타내고 있다. (a)와 같이 초기단계에서의 후프는 나이프간의 접촉점을 중심으로 굽힘모멘트가 작용하고 있으며 상측나이프의 하강으로 인해 (b)에서는 상측나이프의 양 끝점에 후프가 접촉되어 그 점을 중심으로 역방향으로의 굽힘모멘트가 작용하고 있다. 따라서 후프는 역으로 굽혀지게 된다. 이렇게 생성된 후프는 (d)와 같이 파형을 띄게 되며 따라서 이것이 비틀림이나 뒤틀림 발생 등의 원인이 된다.

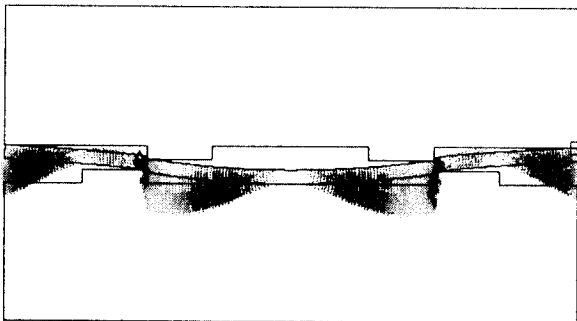
각 틈새에서의 파단 완료 직전의 후프의 최대 굽힘모멘트는 틈새가 클수록 커지는 결과를 얻었으나, 그 차이는 아주 근소한 것으로 나타났다.



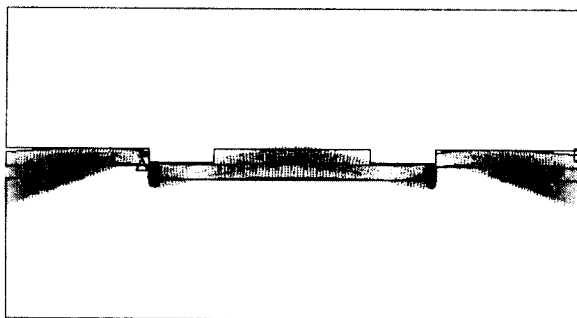
(a) Stroke 0.05mm



(b) Stroke 0.1mm



(c) Stroke 0.35mm

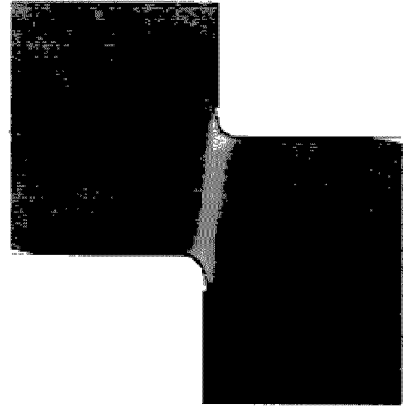


(d) Stroke 0.45mm

Fig. 10 Deformation of hoop

#### 4.4 나이프의 진입에 따른 균열 전파과정

Fig. 11은 나이프 진입에 의해 발생하는 후프의



(a) Stroke 0.63mm



(b) Stroke 0.65mm



(c) Stroke 0.67mm



(d) Stroke 0.70mm

Fig. 11 Deformation of slit hoop

전단면 및 파단면 형성과정을 나타내고 있다. 나이프 코너반경을 0.05로 했을 때를 나타내는 것으로서 나이프가 소재두께의 약 50%정도가 되면 파단이 시작되는 것을 볼 수 있다.

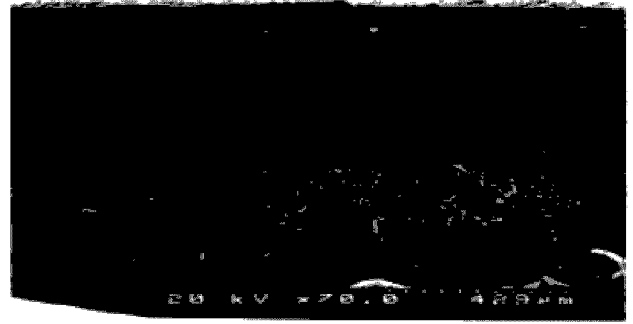
4.5 오버랩과 전단각의 관계

Fig. 12는 나이프직경을 달리했을 때의 전단각을 나타내고 있으며 슬리터 후프의 두께가 얇을수록 또한 나이프 직경이 작을수록 전단각은 작아짐을 알 수 있다. 전단각이 작을수록 나이프와 소재에 미치는 응력이 낮으므로 양호한 전단면이 얻어진다. 또한 버부분에 응력집중이 작아진다.

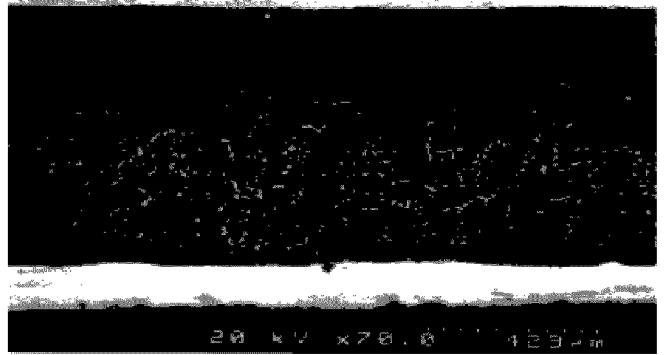
4.6 소재 및 틈새와 전단면과의 관계

Fig. 13은 슬리팅후의 전단면 형상을 주사식전자현미경(SEM:Scanning Electron Microscope)으로 촬영한 것이다.

그림에서 볼 수 있듯이 틈새를 5%로 하였을때는 전단면영역이 전체의 약 55%를 차지하는 반면 틈새를 10%로 했을때는 전체의 약 45%를 차지하는 것을 알 수 있다. 이로서 본 논문에서 시뮬레이션에 의해서 예측된 값 54.8%, 42.5%와 근사함을 알 수 있다. 약간의 오차값은 나이프의 코너반경, 즉 나이프의 마모에 의한 것이라 생각된다.

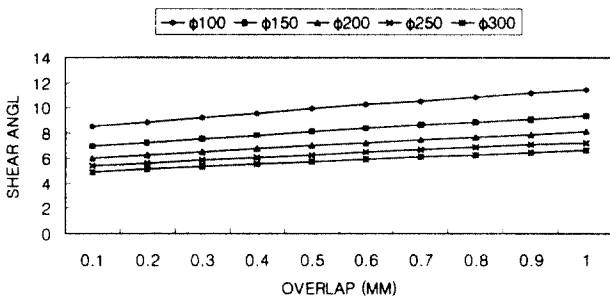


(a) Clearance 5%

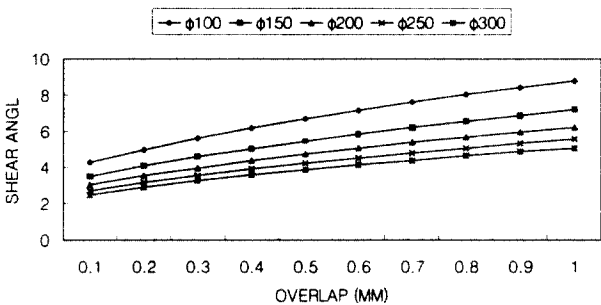


(b) Clearance 10%

Fig. 13 Comparison of sheared surface



(a) Material thickness 0.18mm



(b) Material thickness 1mm

Fig. 12 Relations of shear angle and overlap

5. 결 론

본 논문에서는 유한요소해석을 이용하여 슬리팅 가공에 관하여 연구하였다. 특히 나이프간의 틈새와 나이프 코너반경에 의한 전단면, 후프의 거동을 규명하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 슬리팅을 전단가공의 일종으로 인식하여 유한요소해석을 한 결과 슬리팅실험에 의한 결과와 양호한 일치를 보였으며 슬리팅공정 전반에 관한 체계를 확립할 수 있었다.

1. 틈새가 커질수록 파단이 완료되는 지점이 늦으며, 롤오버와 버가 커지고 응력이 광범위하게 분포한다.
2. 나이프 코너의 반경이 커질수록 소성변형시 최대 하중은 낮은 반면, 완전 분리되는데까지의 거리는 길어진다.
3. 코너 반경이 커질수록 버가 크게 발생하였으며 이것은 나이프간의 틈새 증가와 같은 결과를 나타낸다.
4. 전단각은 나이프의 외경이 작을수록, 오버랩이

클수록 커지는 경향이 있다.

### 참고문헌

1. T. C. Lee, L. C. Chan and P. F. Zheng  
"Application of the Finite-Element Deformation Method in the Fine Blanking Process" Journal of Materials Processing Technology 63, pp. 744~749, 1997
2. Z. H. Chen, C. Y. Tang, T. C. Lee, Lee, L. C. Chan, "A study of strain localization in the fine-blanking process using the large deformation finite element method", Journal of Materials Processing Technology 86, pp. 163~167, 1999
3. S. H. Jeong, J. J. Kang & S. I. Oh. "A Study on Shearing Mechanism by FEM Simulation". Seoul National University, Seoul, Korea, 1995
4. E. Taupin, J. Breitling, W.-T. Wu, T. Altan. "Material fracture and burr formation in blanking results of FEM simulations and comparison with experiments". Journal of Materials Processing Technology. Vol. 59, pp. 68~78, 1996
5. F. Faura, A. Garcia, M. Estrems, "Finite element analysis of optimum clearance in the blanking process", Journal of Materials Processing Technology 80-81, pp. 121~125, 1998
6. J. W. Rogers, W. H. Millan, "Coil Slitting", The Corinthian Press, 1973
7. 한규택, 서종근, 조영석, "슬리팅가공에서 전단면에 미치는 나이프 틈새의 영향에 관한 유한요소해석" 한국공작기계학회, 2000춘계 학술대회 논문집, pp. 607~612, 2000
8. 한규택, 서종근, 조영석, "박판의 슬리팅가공에서 전단면에 미치는 가공인자에 관한 연구" 한국정밀공학회, 2000 춘계학술대회논문집, pp. 144~147, 2000
9. 한규택, 서종근, 조영석, "버 없는 슬리팅공정 개발을 위한 전단변형해석" 대한기계학회부산지부학회, 2000 춘계학술대회논문집, pp. 93~98, 2000
10. M. G. Cockroft & D. J. Latham "Ductility and workability of metals". J. Inst. Metals, Vol. 96, pp. 33~39, 1968