

# 슬리팅가공에서 전단면에 미치는 나이프 틈새의 영향에 관한 유한요소해석 Finite Element Analysis on Effect of Knifes Clearance on Shear Planes in Slitting

한규택(부경대 기계공학부), 서종근\*, 조영석(부경대 대학원)

K.T. Han(Pukyong National Univ.), J.K. Seo\*, Y.S. Cho(Graduate School, Pukyong Univ.)

## ABSTRACT

A slitter, also called a roll slitter or rewinding machine, 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.

In this paper, on effect of clearance on shear planes in slitting of S.K.B(Shrinkage Band) is performed by using finite element method.

The results obtained are as follows:

- (1) Load stroke curves show decreasing maximum force when increasing the clearance.
- (2) Effective strain decreases when the clearance increases.
- (3) Deformation is concentrated along the very narrow shear band.

Key Words: Slitting(슬리팅), Clearance(틈새), Knife(나이프), Camber(휨)

## 1. 서론

슬리팅은 긴 스트립을 가진 판재를 전단함으로써 원하는 형상으로 만드는 가공방법이며 여기에 사용되는 것이 슬리터이다. 따라서 슬리터는 제조업체로부터 수요자에게 이르는 과정에서 수요자가 요구하는 규격으로 절단 가공하여 공급하는 역할을 하는 기계라고 정의 할 수 있다.

슬리터에 의한 제작은 저렴한 가공비, 양호한

절단면 및 대량 생산성 등의 장점을 가지고 있어 현대 사회에 광범위하게 사용되고 있다. 이와 같이 슬리터에 의한 가공은 많은 장점을 가지고 있으나 제품의 질은 슬리터라인 전체에 걸리는 공정 변수에 크게 좌우되므로 최적의 공정 변수를 결정하는 것은 매우 어렵다.

또한 슬리팅라인 전체에 대해서는 롤링, 굽힘 및 전단이 발생하기 때문에 다른 가공법과 달리 복합적인 연구가 이루어져야 한다. 그러나 현재, 슬리팅에 관한 연구는 초기상태에 머무르고 있으며 숙련자에 의한 시행착오법에 크게 의존하고 있는 실정이다.

슬리팅에서 제품의 형상이 주어지는 경우에는 이에 적합한 슬리팅라인의 구성이 필요하며, 컴퓨터 시뮬레이션 방법에 의해 경제적 손실과 시간의 낭비를 줄일 수 있다.

슬리팅에 의한 제품은 정밀 프레스가공에 의한 제품과 유사한 현상을 나타내고 있으며, 특히 극박판 슬리팅은 파인블랭킹에서의 가공 방법을 적용시킬 수 있으나 이것은 압연된 스트립이 롤링, 스트레칭, 전단 등의 작업을 거치기 때문에 다른 가공방법보다 더 복잡하고 난해하다고 할 수 있다.

슬리팅에 의해 생산된 제품의 품질에 있어서 악영향을 미치는 버(burr), 휨(camber), 뒤틀림(twisting) 등과 가공 후의 잔류응력 등의 영향을 유한요소법에 의하여 해석하고 예측하면 시행착오법에 의한 시간의 낭비를 줄일 수 있다.

이에 관한 연구로 오수익<sup>1)</sup>등이 유한요소해석코드인 DEFORM을 이용하여 전단해석을 하였고, Taylan Altan<sup>2)</sup>등은 유한요소프로그램을 이용해서 파단과 버 형상에 대해서 실험치와 비교한 바 있으며, 배원병<sup>3)</sup>등은 다이틈새가 파인블랭킹의

전단면에 미치는 영향에 대해서 연구하였다.

한편, 슬리팅가공에의 적용은 村川正夫<sup>4)</sup>등이 슬리팅가공을 전단가공으로 인식하여 연구를 하였으며, 또한 前田禎三<sup>5)</sup>등은 슬리팅나이프의 응력 해석을 원주좌표계를 이용하여 연구한 바 있다. 그러나, 지금까지의 연구가 대부분 전단가공, 특히 파인블랭킹에 국한되어있기 때문에 슬리팅에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 유한요소해석을 이용하여 슬리팅가공에서 나이프간의 틈새가 제품의 전단면에 미치는 영향을 규명하기 위하여 펀치측 나이프와 다이측 나이프의 틈새에 따른 전단면의 버의 형성과 응력분포 및 소재의 휨 등에 관하여 연구하였다.

## 2. 슬리팅에서의 유한요소해석 적용

### 2.1 모델형상

슬리팅 작업은 일종의 전단작업이라 할 수 있다. 전단가공에서는 소재가 매우 높은 변형률을 가지며 전단면 형상은 나이프의 틈새에 의해 많은 형상변화가 일어난다.

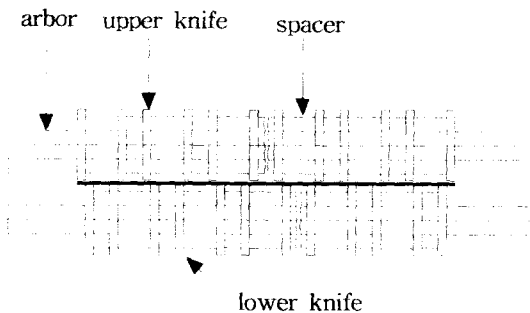


Fig. 1 Arrangement of the slitting knives

슬리팅가공은 Fig.1에 보이는 것과 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 SCPI로 하였다.

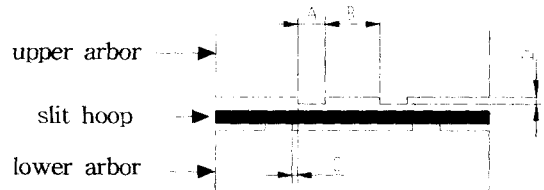


Fig. 2 Model geometry

윗 그림에서 나이프의 폭(A)은 5mm, 펀치측 나이프의 간격(B)은 12mm이며 D는 1mm이다.

한편 펀치측 나이프와 다이측 나이프의 간격(C)을 틈새라 정의한다.

### 2.2 틈새의 계산

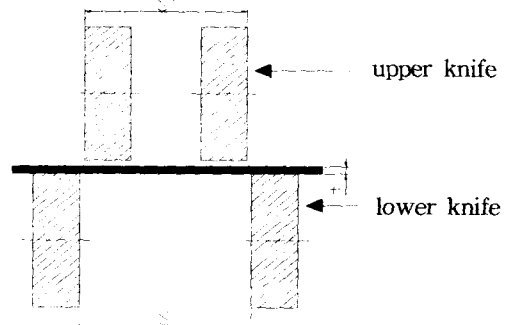


Fig. 3 Upper knife and Lower knife

Fig.3은 나이프의 조합을 나타낸다. 그림에서 틈새를 구하는 식은 (1)과 같다.

$$\text{틈새}(C) = \frac{s-s'}{2t} \times 100 (\%) \quad (1)$$

본 연구에서는 Fig.2의 A, B, D의 값을 일정하게 두고 C값, 즉 틈새의 조절만을 행한다. 틈새는 소재두께에 대한 1%, 5%, 10%, 20%로 한다.

### 2.3 유한요소 해석

해석 도구로는 유한요소법 상용 소프트웨어인 DEFORM을 사용하였다.

시뮬레이션에서 공정매개변수는 Table 1에 나타낸바와 같으며, 시뮬레이션에서의 형상은 Fig.4와 같다. 한편 Fig.5와 같이 매쉬 생성시 응력의 집중이 예상되는 나이프의 에지부에서는 매쉬수를 늘렸다.

매쉬수의 증가는 계산시간이 많이 소요된다는 단점이 있는 반면 보다 정확한 결과를 얻을 수 있다.

Table 1 Geometric and kinematic parameter settings.

Parameter	Value	Dim.
workpiece	SCP1	
clearance	1	%
	5	
	10	
	20	
upper knife speed	V=1	mm/sec
upper knife corner radius	0.05	mm
lower knife corner radius	0.05	mm
friction coefficient	$\mu=0.1$	
element No.	3000	EA
step No.	100	
stroke per step	0.01	mm

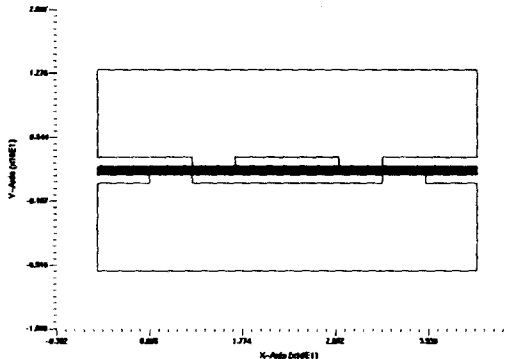


Fig. 4 Simulation model

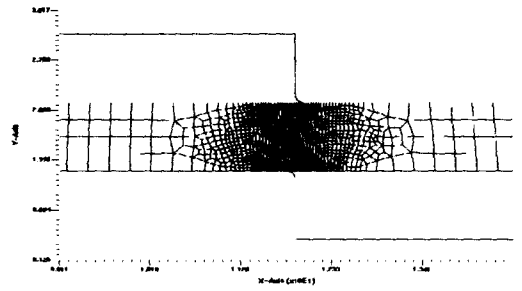


Fig. 5 Mesh concentration in the shearing zone

### 3. 시뮬레이션에 적용된 조건식

#### 3.1 마찰조건식

소재와 나이프와의 접촉 마찰조건은 식 (2)와 같이 쿨롱(Coulomb)의 법칙에 따른다고 가정한다.

$$\tau_t = \mu \sigma_n \quad (2)$$

여기서,

$\tau_t$ : 마찰 전단응력

$\sigma_n$ : 접촉면에서의 법선(normal)응력

$\mu$ : 마찰계수

#### 3.2 구성방정식(Constitutive Equation)

재료의 구성방정식은 식 (3)과 같다.

$$\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n \quad (3)$$

여기서,

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

$\bar{\epsilon}$ : 유효변형률(effective strain)

K: 재료상수(material constant)

n: 변형경화지수(strain hardening coefficient)

#### 3.3 변형해석과 연성파괴조건식의 적용

변형해석으로서 뉴우턴-랩슨법(Newton-Raphson method)을 사용하였으며, 슬리팅공정동안에 발생되는 파괴와 균열의 진전을 고려해 주기 위해 연성 파괴조건으로서 본 논문에서는 Cockcroft와 Latham의 연성파괴기준<sup>(6)</sup>(ductile fracture criterion)식을 적용하였는데, 그 모델식은 식(4)와 같다.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}^f} \frac{\sigma}{\bar{\sigma}} \left( \frac{\bar{\sigma}^*}{\bar{\sigma}} \right) d \bar{\epsilon} = C \quad (4)$$

여기서,  $\sigma^*$ 는 최대인장응력,  $\bar{\sigma}$ 는 유효응력,  $\bar{\epsilon}^f$ 는 파괴 변형률,  $\bar{\epsilon}$ 는 유효 변형률, C는 재료상수이다. 그리고 재료상수 C는 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 전단면 형상의 예측

편치축 나이프와 다이축 나이프간의 틈새에 의해 전단된 제품의 형상변화를 예측하기 위해서 유한요소 해석을 행하였으며, 전단된 후의 형상은 Fig.6과 같다.

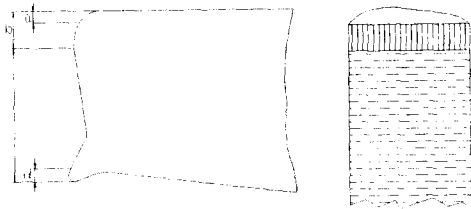


Fig. 6 Theoretical part edge after slitting

전단면은 그림의 a-d로 형성된다.

a = 나이프가 직접 닿는부분(rollover)

b = 나이프가 하강시 마찰로 광택이 발생하는 부분(sheared surface)

c = 크랙으로 파단면이 발생된 부분으로 결정립면과 미세한 요철부분(fractured surface)

d = 버부분(burr)

##### 4.2 나이프 틈새와 하중 및 스트로크와의 관계

Fig.7은 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 스트로크는 증가하였다.

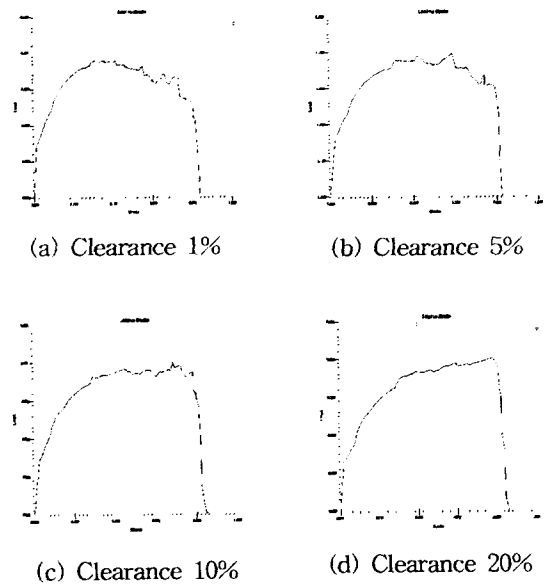


Fig. 7 Simulated load-stroke curve

##### 4.3 틈새에 따른 전단면의 형상

Fig.8은 전단면 및 파단면, 롤오버, 버의 형상을 나타낸 것이다.

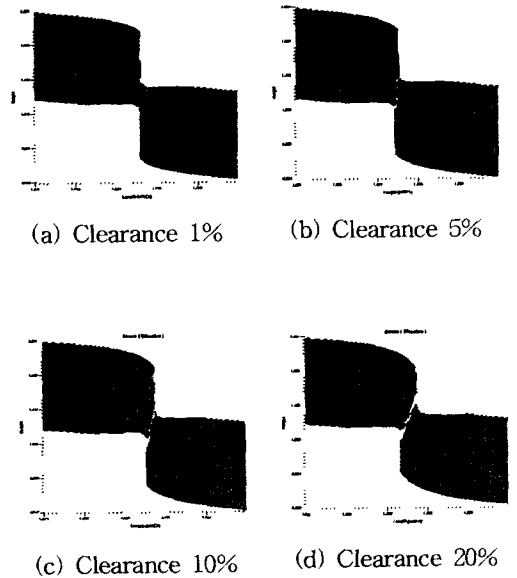


Fig. 8 Simulated part edge

그림에서 틈새가 커질수록 롤오버(rollover)량이

커짐을 알 수 있으며, 베틀 형상을 보면 나이프간의 틈새가 작을수록 가늘고 길다란 모양을 나타내는 것을 볼 수 있으며 틈새가 커질수록 굵고 짧은 베틀이 생성됨을 볼 수 있다.

다음으로 전단면의 형상을 보면, 틈새가 작아질수록 수직에 가까워졌으며 전단 영역은 틈새 값이 0.01일 때, 54.8%, 0.05에서 50%, 0.1에서 42.5%, 0.2에서는 36.7%로 나타났다. 따라서 틈새가 작을수록 전단면 영역은 커지며 파단면과 롤오버 및 베틀 영역은 작아짐을 알 수 있다.

#### 4.4 틈새에 따른 응력분포

응력은 소재의 휨이나 뒤틀림 등에 영향을 준다.

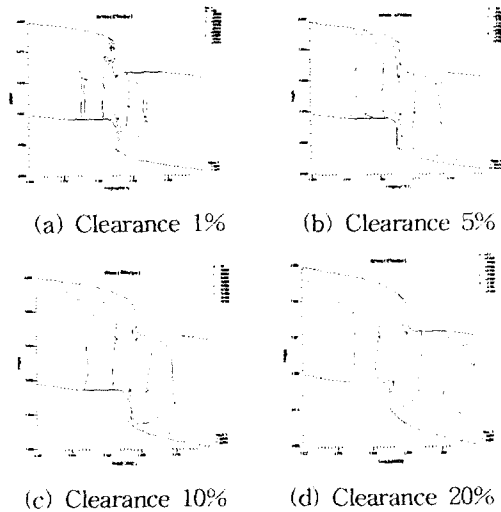


Fig. 9 Effective stress distribution

Fig.9를 보면, 펀치측 나이프와 다이측 나이프 간의 틈새가 커질수록 응력이 미치는 영역이 넓은 범위에 걸쳐 분포됨을 알 수 있다.

Fig.10은 최종 파단 직전의 소재에 잔류하는 응력을 나타내고 있다.

그림에서 볼 수 있듯이 파단이 종료되는 부분과 베틀영역에서 응력집중이 발생하였다. 이것은 가공경화되어서 타 제품에 손상을 주는 원인이 된다.

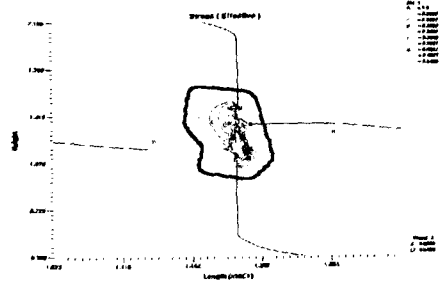


Fig. 10 Concentration of stress

#### 4.5 슬리핑과정중의 소재의 거동

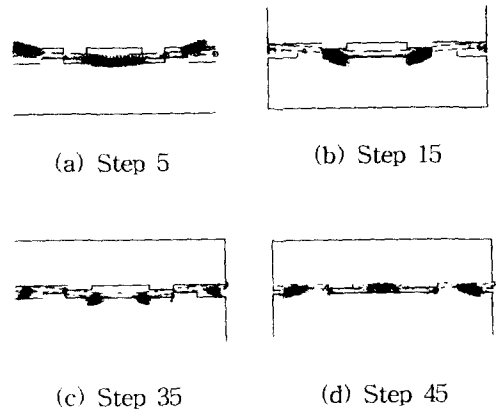


Fig. 11 Velocity Distribution

Fig.11은 나이프의 틈새를 일정(간극: 1%)하게 하였을 때 각 단계에서의 재료거동을 나타내고 있다. (a)와 같이 초기단계에서의 소재는 나이프간의 접촉점을 중심으로 굽힘모멘트가 작용하고 있으며 펀치측 나이프의 하강으로 인해 (b)에서는 펀치측 나이프의 양 끝점에 소재가 접촉되어 그 점을 중심으로 역방향으로의 굽힘모멘트가 작용하고 있다. 그리하여 소재는 역으로 굽혀지게 된다. 이렇게 생성된 소재는 (d)와 같이 파형을 띄게되며 따라서 이것이 비틀림이나 뒤틀림 발생 등의 원인이 된다.

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

## 5. 결 론

본 논문에서는 슬리팅공정에서 펀치측 나이프와 다이측 나이프의 틈새가 제품의 전단면에 미치는 영향을 규명하기 위하여 유한요소 해석을 하였으며, 그 결과를 분석 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 틈새가 커질수록 소성 변형에 요구되는 하중은 낮으며 최종 파단점까지의 스트로크는 증가한다.
2. 틈새가 커질수록 응력은 광범위하게 분포된다.
3. 틈새가 작을수록 전단면 영역은 커지며 파단면과 물오버 및 버 영역은 작아짐을 알 수 있다.
4. 파단이 종료되는 부분과 버영역에서 응력집중이 발생한다.
5. 펀치측 나이프와 다이측 나이프가 접촉되는 부분에서 집중응력이 발생하며, 이 불균일한 응력으로 인해 소재는 힘을 받게되고 이것은 비틀림의 원인이 된다.

## 참 고 문 헌

1. S.H. Jeong, J.J. Kang & S.I. Oh. "A Study on Shearing Mechanism by FEM Simulation". Seoul National University, Seoul, Korea, 1995.
2. Etienne Taupin, Jochen Breitling, Wei-Tsu Wu, Taylan Altan. "Material fracture and burr formation in blanking results of FEM simulations and comparison with experiments". Journal of Materials Processing Technology. Vol.59, 68-78, 1996.
3. 김윤주, 곽태수, 배원병, "과인블랭킹에서 전단면에 미치는 다이 틈새의 영향에 관한 유한요소 해석", 한국소성가공학회지 '99추계학술대회논문집, pp.40-44, 1999.
4. 村川正夫, 前田禎三, "せん剪斷 加工としてのスリッティング 加工". 塑性と加工, Vol.19, No.208, pp.343, 1978.
5. 高石和年, 高橋善生, 前田禎三, "スリッティングカッタの應力解析". 塑性と加工, Vol.22, No.240, pp.80, 1981.

6. Cockroft, M.G. & Latham, D.J. "Ductility and workability of metals". J.Inst. Metals, Vol.96, pp.33-39, 1968.