

# 파인 블랭킹에서 전단면에 미치는 다이 틈새의 영향에 관한 유한 요소 해석

김운주\* · 곽태수\* · 배원병\*\*

(1999년 10월 1일 접수)

## Finite Element Analysis on Effect of Die Clearance on Shear Planes in Fine Blanking

Y.J. Kim, T.S. Kwak and W.B. Bae

### Abstract

A finite element analysis has been performed to investigate the effect of die clearance on shear planes in the fine blanking of a part of automobile safety belt. For the analysis, S45C is selected as an material, which is used in manufacturing the part of automobile safety belt, and Cockcroft-Latham fracture criterion is applied. Effect of die clearance on die-roll width, die-roll depth, burnish zone, and fracture zone has been investigated in the finite element analysis by a rigid-plastic FEM code, DEFORM-2D.

From the analysis, it has been found that die-roll width and depth of the shear plane increase with increasing die clearance. And the burnish zone decreases with increasing die clearance, but the variation of fracture zone is opposite to that of burnish zone because the increase in die clearance requires less fracture energy. Theoretical predictions are compared with experimental results. There is a good agreement between theory and experiment.

**Key Words** : Fine Blanking, Clearance, Die-roll, Burnish zone, Fracture zone

### 기 호 설 명

$\sigma^*$  : the maximum tensile stress attained in  
the specimen under axial loading

$\bar{\epsilon}^f$  : fracture strain

C : material constant

$\bar{\sigma}$  : effective stress

$\bar{\epsilon}$  : effective strain

\* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

\*\* 부산대학교 기계공학부/기계기술 연구소

Table 1 Mechanical properties of S45C(Cold rolled, annealed)  $\bar{\sigma} = K(\bar{\epsilon})^n$

Steel	Composition(%)						Tensile strength		Yield strength		Elongation %	Hardness HB	K		n
	C	Mn	P	S	Si	Steel	MPa	ksi	MPa	ksi			MPa	ksi	
S45C	0.45	0.65	0.045	0.045	0.25	Rem.	585	85	505	73	12	170	1019.7	147.9	0.11

$\frac{\sigma^*}{\sigma}$  : non-dimensional stress-concentration factor representing the highest tensile stress  $\sigma^*$

### 1. 서론

파인 블랭킹은 판재성형에서 소재를 준비하는 가공방법 중의 하나로 제품의 정밀도와 신뢰성이 매우 높으므로 정밀기계, 항공기, 자동차 부품 등의 제조에 주로 적용되고 있다.

파인 블랭킹에 관한 연구를 살펴보면, Schiss<sup>(1)</sup>는 피가공재를 V형의 돌기로 고정하는 장치를 이용하여 판두께 전체를 평활하게 하는 전단하는 공법을 고안하였고 Lange<sup>(2)</sup>와 Maeda<sup>(3)</sup>는 V형의 돌기에 의해 발생하는 정수압 응력이 파단을 억제하는 효과에 대해 연구하였다. Rotter<sup>(4)</sup>는 유한 요소법을 이용하여 블랭크 두께의 1/30까지 해석하여 응력 분포 곡선을 가시화 하였다. Guanggi 등<sup>(5)</sup>은 범용 프레스에서 파인 블랭킹 가공을 실현시키기 위해서 V-돌기력과 카운터 펀치력을 임의로 장착하여 약 25%의 대체효과를 거두었다. Lazarev, Kocov<sup>(6)</sup>는 FEA Lusac s/w를 이용하여 탄소성 모델로 응력-변형률 조건 해석을 시도하였으며, 최적 V형 돌기의 위치를 제안하였다. 국내에서는 김종호<sup>(7)</sup>등이 간이 파인 블랭킹 금형을 제작하여 실험을 통한 V형 돌기의 위치와 챔버량의 관계를 보였다. 또한, T.C. Lee, L.C. Chan, P.F. Zheng<sup>(8)</sup>은 강소성 유한 요소법 코드를 개발하여 0.18t까지 해석을 수행함으로써 강소성 유한 요소법의 적용 가능성을 확인하였다.

그러나, 지금까지 연구가 대부분 실험적인 방법에 많이 의존했기에 강소성 유한 요소법에 의한 파인 블랭킹 해석

기법 도입을 위한 타당성을 검증하기에는 부족하였다. 또한, 현재 국내의 파인 블랭킹 금형 제작을 위한 기초 데이터가 매우 부족한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 강소성 유한요소 해석을 통해 파인 블랭킹 다이의 틈새가 제품 전단면에 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

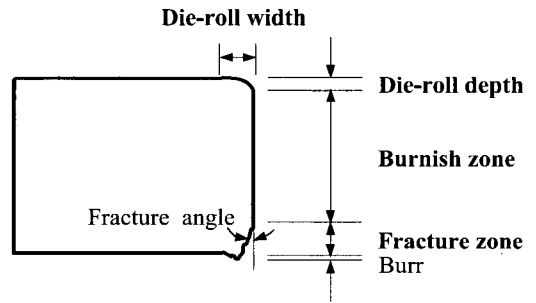


Fig. 1 Shear plane in fine blanking

즉, Fig. 1에서 보듯이 제품의 전단면을 형성하고 있는 다이롤(die-roll)의 폭과 깊이, 유효 전단면(burnish zone)과 파단면(fracture zone)등의 변화를 유한 요소법으로 해석하고 실험결과와 비교 검토함으로써 유한 요소 해석의 타당성을 검증 하고자 한다.

### 2. 유한 요소 해석

#### 2.1 해석 대상

해석 대상으로 하는 제품은 Fig. 2와 같다. 본 제품은 자동차 안전벨트를 구성하고 있는 부품으로 벨트를 풀어 주고 죄어주는 역할을 한다.

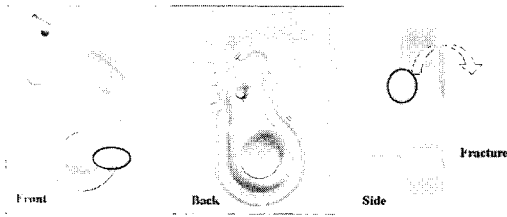


Fig. 2 Configuration of the final product

2.2 유한 요소 모델링

이상의 제품을 가지고 원형 블랭킹과 피어싱으로 이루어진 제품의 우측면(Fig. 2의 front view에서 타원부분)을 2차원 축대칭 형상의 문제로 가정하여 유한 요소법 상용 코드인 DEFORM으로 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션에 사용된 공정매개변수는 Table 2에서 제시하였고, 해석에서 소재를 강소성 재료로 모델링하여 소재의 압연 방향에 따른 이방성은 고려하지 않고 등방성으로 간주하였다. 그리고, 전단 가공 공정에서는 펀치와 다이 사이의 국부적인 영역에 큰 변형이 집중되는 국소화 현상으로 전단 밴드가 형성되므로 이 부분의 집중적인 관찰이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 전단 밴드의 형성이 예상되는 부분에 매우 작은 크기의 격자를 집중적으로 구성[요소의 밀도 : 전단밴드부분(50), 가운데(10), 자유단(5)]하였다.

Table 2 Parameters used in FE analysis

Parameter	Value	Unit
Punch speed(V)	1	mm/s
Friction factor(m)	0.1	
Punch corner radius( R <sub>p</sub> )	0.01	mm
No. of Elements	5000	EA
Die corner radius( R <sub>d</sub> )	0.4	mm
No. of Steps	200	
Stroke per step	0.025	mm

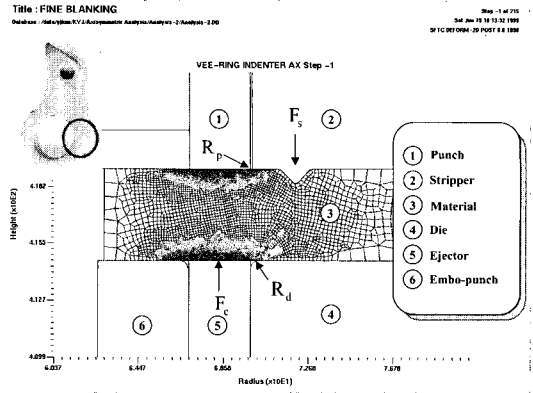


Fig. 3 Initial meshes for FE analysis

2.3 연성 파괴 조건(ductile fracture criterion)

지금까지 많은 실험적인 연구는 각기 다른 재료의 성형 한계를 계산하기 위해 연성 파괴 조건을 사용했다. 본 연구에서는 다양한 하중조건에 적용될 수 있고 실험적 접근 및 수치적 계산이 용이한 Cockcroft와 Latham의 연성파괴 기준을<sup>(9)</sup> 적용하였는데, 그 모델 식은 다음과 같다.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}^f} \bar{\sigma} \left( \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} \right) d\bar{\epsilon} = C \tag{1}$$

여기서,  $\bar{\epsilon}^f$ 는 파괴 유효 변형률,  $\sigma^*$ 는 주인장 응력의 최대치,  $\bar{\sigma}$ 는 유효 응력,  $\bar{\epsilon}$ 는 유효 변형률, C는 재료 상수이다. 위 식은 전단 공정에서 인장 변형률 에너지가 임계값에 도달 후 파괴가 발생함을 뜻한다. 또한, 응력 집중상수  $(\sigma^* / \bar{\sigma})$ 는 전단폭을 따라서 변화되지 않는 값이다. 여기서 전단가공 공정동안 주인장 응력의 최대치가 일정하게 유지된다고 가정하면<sup>(10)</sup> 식(1)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}^f} \bar{\sigma} d\bar{\epsilon} \approx C_1 \tag{2}$$

그리고, 유한요소 해석에서 위 식(2)은 증분 개념으로 다음과 같이 근사화 할 수 있다.<sup>(11)</sup>

$$\sum_{i=1}^n (\Delta \bar{\epsilon}_e)_i = C_1' \quad (3)$$

여기서,  $n$ 은 스텝 수,  $\Delta \bar{\epsilon}_e$ 는 요소의 유효 변형률 증분이다. 따라서, Cockcroft와 Latham의 경계는 파괴 변형률  $\bar{\epsilon}^f = C_1'$ 에 의해서 근사화된다. 이것은 파괴 변형률에 다르면 균열이 발생하고 다시 균열이 성장하여 파괴에 이른다. 또한  $C_1'$ 의 값은 실험적으로 측정할 수 있는 재료의 상수이지만, 본 연구에서는 이전에 연구결과<sup>(10,11)</sup>에서 제시하였듯이 반복적인 시뮬레이션을 통해서 본 결과 유효 변형률 값( $C_1'$ )이 3.2에서 가장 실제 제품과 근사함을 얻을 수 있었다.

특히, 유효 변형률의 값이 3.2보다 작을 경우 요소가 좀더 빨리 임계값에 도달하므로 실제 실험에서 얻은 결과보다 파단 영역을 증가시켰으며, 유효 변형률의 값이 3.2보다 클 경우에는 유한요소 해석에서 얻은 결과 값은 실제 실험에서 얻은 결과 보다 더욱 넓은 유효 전단면을 가지는 결과를 가져왔다.

### 2.4 요소 제거법(element kill method)

유한 요소법을 이용한 전단 공정동안 전단 밴드의 형성에 따라 파괴의 유형을 관찰할 수 있었다.

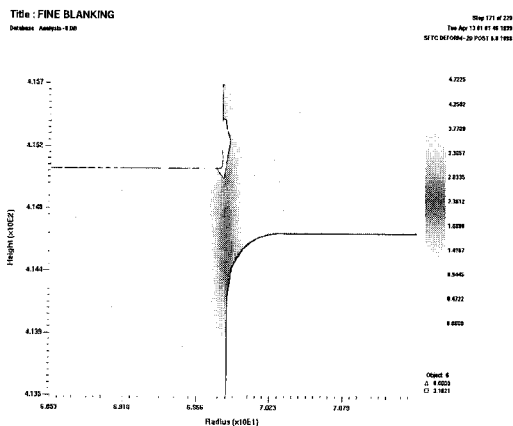


Fig. 4 Fracture initiation by element kill method

Fig. 4에서 보듯이 요소의 유효 변형률이 3.2에 도달하면 이 요소에 대하여 요소 제거법을 적용하여 파괴가 일어남을 보여주고 있다. Fig. 5는 요소 제거법에 의한 요소들이

파괴가 진행하고 있음을 보여주고 있다.

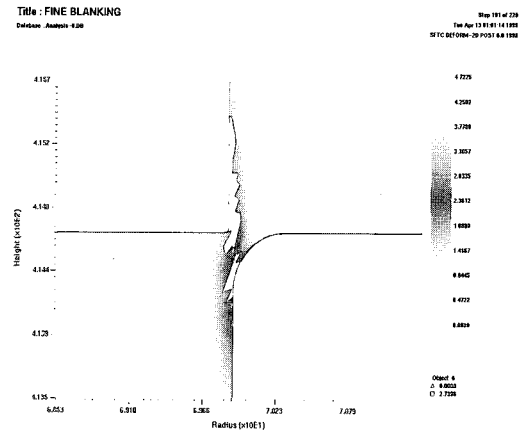


Fig. 5 Fracture progress by element kill method

그 요소들의 파괴 진행을 살펴보면 펀치의 코너부에서 가장먼저 임계 유효 변형률에 도달하여 요소가 제거되었다. 다음으로 다이 코너에서 유효 변형률이 임계값에 도달하여 요소가 제거되어 결국 파단이 일어났다.

## 3. 실험

### 3.1 실험 소재

실험에 사용된 소재는 S45C이고 두께 4.5mm의 냉간 압연 구상화 풀림 처리된 재료이다.

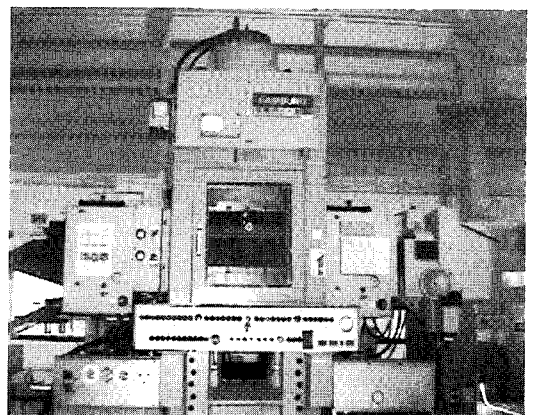


Fig. 6 Fine Blanking machine

### 3.2 실험 방법

편치와 다이 틈새(clearance)를 각각 0.02mm (소재두께의 0.44%), 0.04mm(소재두께의 0.9%), 0.09mm(소재두께의 2.0%)로 하여 Fig. 6에서 보듯이 250톤 파인 블랭킹 전용 프레스에서 실험하였고, 제품의 다이롤 폭과 깊이, 유효 전단면, 파단면 길이 등을 프로젝터를 이용하여 측정하였다.

### 4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 편치와 다이 사이의 틈새를 주 공정변수로 선정하여 이들이 제품의 전단면에 미치는 영향을 실험과 유한요소 해석을 통해 비교 검토하였다.

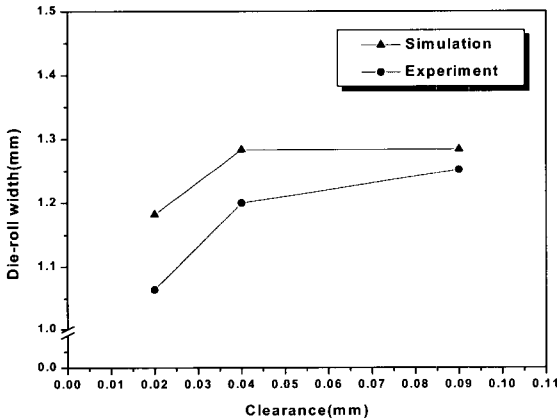


Fig. 7 Variation of die-roll width according to die clearance.

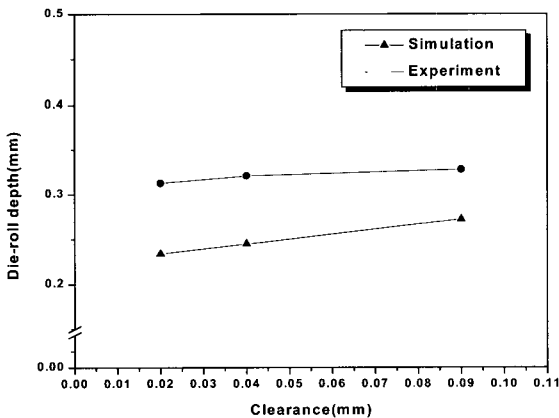


Fig. 8 Variation of die-roll depth according to die clearance

특히, Fig. 1에서 보듯이 다이롤의 폭과 깊이 유효 전단면, 파단면의 영향을 비교하였다.

Fig. 7과 Fig. 8은 편치와 다이의 틈새가 증가하면 제품 결합중의 하나인 다이롤의 폭과 깊이가 증가함을 알 수 있었고, 해석한 결과와 실험 값이 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 다이롤의 폭과 깊이를 감소시킴으로써 제품에서는 좀더 치수 정밀도와 신뢰도를 높일 수 있다.

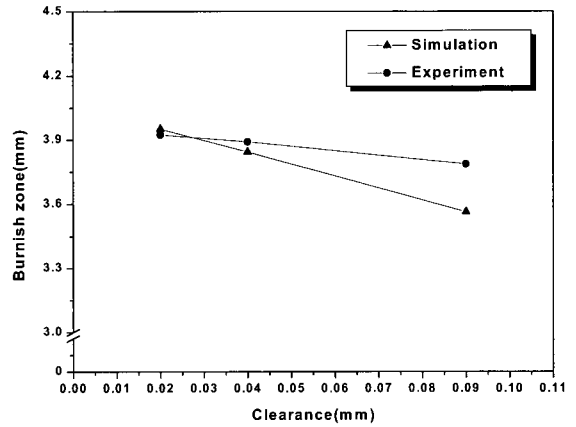


Fig. 9 Variation of burnish zone according to die clearance

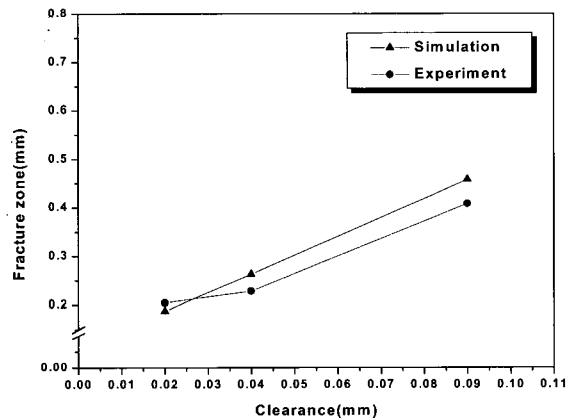


Fig. 10 Variation of fracture zone according to die clearance

Fig. 9와 Fig. 10도 해석 결과와 실험치가 잘 일치하며 편치와 다이의 틈새가 증가함에 따라 유효 전단면이 감소하고 파단면의 영역이 증가함을 볼 수 있다. 또한, 파인 블랭킹 금형의 틈새가 클 때가 틈새가 작을 때 보다 전단 밴드 영역이 더욱 넓게 분포되었다. 즉, Fig. 11~Fig. 13에서 보듯이 편치인선부 부근에서 유효 변형률의 값이 다이

틈새가 2.0%의 소재 두께에서 가장 큼을 볼 수 있다.

따라서, 파단이 2.0% 틈새에서 가장 먼저 발생하였고, 파단 영역이 틈새가 증가할수록 더욱 증가하였으며 유효 전단면이 감소함을 알 수 있었다.

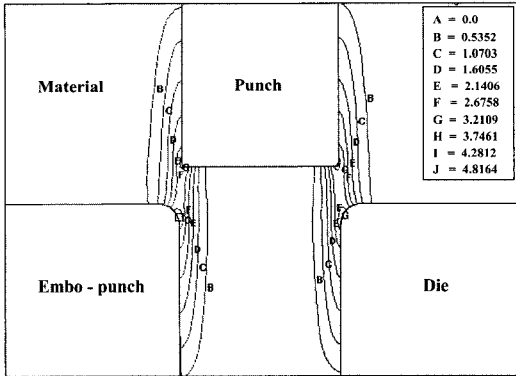


Fig. 11 Effective strain distribution for C=0.44% (0.02mm)

Fig. 11 ~ Fig. 13은 파인 블랭킹 금형 틈새가 각각 0.02mm(소재두께 0.44%), 0.04mm(소재 두께 0.9%), 0.09mm(소재두께 2%)에 대한 유효 변형률의 분포를 동일한 펀치 스트로크(86%)에 대해서 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 파인 블랭킹 금형의 틈새가 클 때가 작을 때보다 펀치인선부 부근의 변형률 값이 파과 변형률 임계 값에 일찍 도달함을 볼 수 있다.

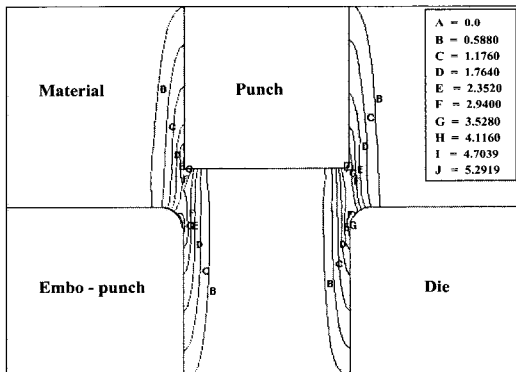


Fig. 12 Effective strain distribution for C=0.9% (0.04mm)

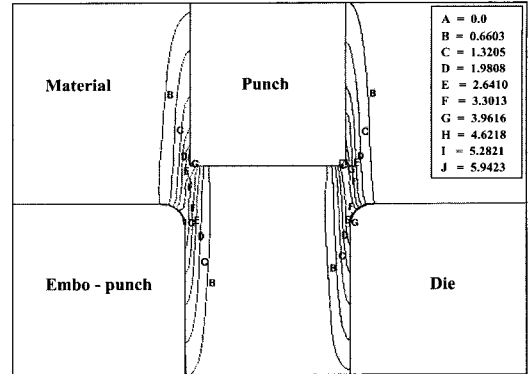


Fig. 13 Effective strain distribution for C=2.0% (0.09mm)

따라서, 해석결과에 따르면 펀치와 다이의 틈새가 감소함에 따라 유효 전단면이 향상되고, 다이롤의 폭과 깊이가 줄어들므로써 제품의 기능면에 해당하는 전체 전단면이 커지는 양호한 제품을 얻을 수 있으며 제품의 신뢰도와 치수정밀도를 높일 수 있다.

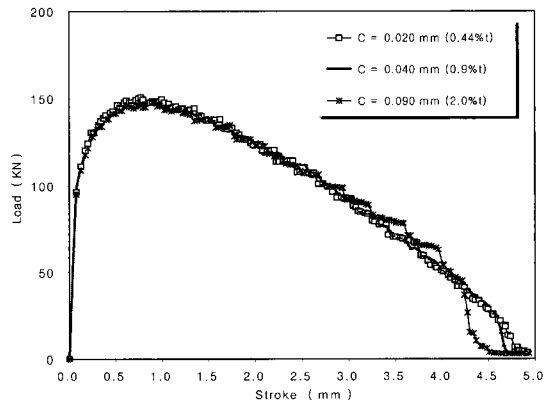


Fig. 14 The simulation result of load-stroke curve

Fig. 14는 전단공정 해석의 펀치 스트로크에 따른 전단하중의 변화를 보여주고 있다. Fig. 14에서 틈새의 변화에 따라 최대 전단하중은 큰 차이는 없지만(틈새가 0.02mm=150.87kN, 0.04mm=149.69kN, 0.09mm=146.56kN) 틈새가 작을수록 전단하중도 증가하였으며, 소재의 파단도 늦게 일어나는 것을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 자동차 안전벨트에 사용하는 파인 블랭킹 제품의 전단 공정을 유한 요소법으로 해석하고, 실험과 비교 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 틱새가 증가함에 따라 소재에 대한 다이틀의 폭과 깊이는 증가함을 알 수 있었다. 따라서, 제품에 있어서 더욱 정확한 치수 정밀도를 얻기 위해서는 틱새를 작게 하면 다이틀의 폭과 깊이도 줄어드는 것을 알 수 있었다.

(2) 유효 전단면이 양호한 제품을 얻기 위해서는 틱새가 작을수록 유리함을 알 수 있었다.

(3) 틱새가 증가할수록 파단 영역이 점차적으로 증가함을 알 수 있었다.

(4) 틱새가 증가함에 따라 소재의 전단 밴드 영역이 넓게 분포됨을 알 수 있었고, 파단이 조기에 일어나므로 유효 전단면이 상대적으로 작아짐을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- (1) 日本塑性加工學會編, 昭和50, プレス加工便覽, 丸善株式會社, pp.156 ~ 162.
- (2) K. Lange, 1978, "The potential of the fine blanking technique", Feintool AG, Lyss, Swiss, pp.1 ~ 6.
- (3) 前田禎三 論文集, 1981, 東京大學工學部 精密機械工學科, pp.168 ~ 183.
- (4) W. König, F. Rotter and A. Krapoth, 1984, "Feinschneiden dicker Bleche-Experiment und Theorie", Industrie-Anzeiger, 106(14)24 ~ 28.
- (5) T. Guanggi., Z. Pengfei. and L. Ronghong., N. Jinwang. and Z. Xiaoguang., 1993, "Recent development of fine blanking technology in china", Proceed. 4th Int. Con. on Tech. of Plasticity, Beijing, China, pp.246 ~ 250.
- (6) Jovan Lazarev, Atanas Kocov, 1996, "Finite Element Analysis of the Stress-Strain Condition in the Process of Fine Blanking", Proceeding of International Manufacturing Engineering Con.,

Freund Publishing Com19960807 United Kingdom, pp.272 ~ 274.

- (7) 김종호, 류제구, 최지수, 정완진, 1996, "간이 파인 블랭킹 금형의 개발을 통한 범용 유압 프레스에서의 원형 정밀전단 가공성 연구", 한국정밀공학회지 제13권 제5호, pp. 157 ~ 163.
- (8) T.C. Lee, L.C. Chan and P.F. Zheng, 1997, "Application of the Finite-Element Deformation Method in the Fine Blanking Process", J. of Mater. Process. Tech., Vol. 63, pp.744 ~ 749.
- (9) Edward M., Mielnik, 1991, "Metal Working Science and Engineering", McGraw-Hill, Inc.
- (10) S.H. Jeong, J.J. Kang and S.I. Oh, 1996, "A Study on Shearing Mechanism by FEM Simulation", Proceed. 5th Int. Con. on Tech. of Plasticity, Vol. 2 pp.631 ~ 634.
- (11) 고대철, 김철, 김병민, 최재찬, 1996, "요소제거법에 의한 판재 전단가공의 유한요소 시뮬레이션", 한국정밀공학회지 제13권 11호, pp.114 ~ 123.
- (12) K. Lange, 1985, Handbook of Metal Forming, McGraw-Hill.
- (13) T.C. Lee, L.C. Chan and B.J. Wu, 1997, "Further investigation of the fine blanking process employing large deformation theory", J. of Mater. Process. Tech., Vol. 66, pp.258 ~ 263.
- (14) T.C. Lee, L.C. Chan and B. J. Wu, 1995, "Straining Behaviour in Blanking Process-Fine Blanking Vs Conventional Blanking", J. of Mater. Process. Tech., Vol. 48, pp. 105 ~ 111.
- (15) DEFORM-2D Ver. 6.0 Users Manual, 1998, D-EFORM<sup>TM</sup>, Scientific Forming Tech. Co..
- (16) 柳炳烈編著, 1997, 파인블랭킹금형, 성안당.
- (17) Z. Marciniak, J.L. Duncan, 1992, The Mechanics of Sheet Metal Forming, Edward Arnold.
- (18) T. Altan, S.I. Oh and H. L. Gegel, 1983, Metal Forming, American Society For Metals.