

폴의 파인 블랭킹 공정에서 전단면에 미치는 V형 돌기의 영향에 관한 연구

김윤주*, 곽태수*, 배원병**

Effect of V-Ring Indenter on the Sheared Surface in the Fine Blanking Process of a Pawl

Yun Joo Kim*, Tae Soo Kwak* and Won Byong Bae**

ABSTRACT

A finite element analysis has been performed to investigate the effect of v-ring indenter on the sheared surface in the fine blanking of a pawl, which is a part of the automotive safety belt and is made of S45C sheet. In the present analysis, the Cockcroft and Latham fracture criterion and the element kill method are used in order to simulate the blanking operation successfully. The simulation results are obtained for various positions and heights of the v-ring indenter. And the theoretical results are compared with available experimental results. It is shown that this FEM simulation result can be useful for predicting the optimal fine blanking condition of real products.

Key Words : Fine Blanking (파인 블랭킹), Pawl(폴), V-ring indenter(V형 돌기), Sheared surface(전단면)

1. 서론

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

파인 블랭킹 제품의 전단면은 치수정밀도 및 기능적인 측면에서 중요한 역할을 하고 있으며, 파인 블랭킹 급형에서 V형 돌기는 전단가공시 정수압 응력을 발생시켜 가공소재의 연성을 높여줌으로써 파단을 억제하는 역할을 한다. 파인 블랭킹에 관한 연구를 살펴보면, Schiss^[1]는 피가공재를 V형의 돌기로 고정하는 장치를 이용하여 판두께 전체를 평

활하게 전단하는 공법을 고안하였고 Lange^[2]와 Maeda^[3]는 V형의 돌기에 의해 발생하는 정수압 응력이 파단을 억제하는 효과에 대해 연구하였다. Rotter^[4]는 유한요소법을 이용하여 블랭크 두께의 1/30까지 해석하여 응력 분포 곡선을 가시화하였다. Guanggi 등^[5]은 범용 프레스에서 파인 블랭킹 가공을 실현시키기 위해서 V형 돌기의 돌기력과 카운터 펀치력을 따로 설치된 장치로 공급함으로써 약 25%의 제품 대체 효과를 거두었다. Lazarev, Kocov^[6]는 FEA Lusas s/w를 이용하여 탄소성 해석을 수행하여 최적 V-ring 위치를 제안하였다.

* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

** 부산대학교 기계공학부/기계기술 연구소

Table 1 Mechanical Properties of S45C(Cold rolled, annealed) $\bar{\sigma} = K(\bar{\epsilon})^n$ [10,11]

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

국내에서는 김종호 등^[7]이 간이 파인 블랭킹 급형을 제작하여 실험을 통한 V형 돌기의 위치와 캠버량의 관계를 보였다. 또한, T.C. Lee 등^[8]은 강소성 유한요소법 코드를 개발하여 0.18mm급박판의 파인 블랭킹 해석을 수행함으로써 강소성 유한요소법의 적용 가능성을 확인하였다. 또한 Jeong 등^[9]은 상용 유한요소 코드인 DEFORM을 이용하여 AISI 4340소재의 진단가공에서 형성되는 진단면을 이론적으로 예측하고, 기존 실험연구결과와 비교하였다. 그런데 소재의 두께에 대한 펀치 틈새비 10% 이상에서는 이론치와 실험치가 잘 일치하지만, 2%에서는 경향이 서로 반대이다. 따라서 실제 현장에서 파인 블랭킹으로 제품을 제작하는 펀치 틈새비인 2%이하에 대한 이론적인 연구가 더 필요하다.

본 연구에서는 기존연구들을 바탕으로 자동차 안전벨트를 제어하는 부품인 폴(pawl)을 제조하는 파인 블랭킹 공정에서 유한요소 해석에 의하여 최적공정을 찾기 위한 연구의 일부분으로 V형 돌기가 제품의 진단면에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 즉, V형 돌기의 높이와 위치에 따른 진단면을 형성하고 있는 다이롤(die-roll)의 폭과 깊이, 유효 진단면(burnish zone), 파단면(fracture zone) 등의 변화를 예측하고 현장의 실험결과와 비교·검토하고자 한다.

2. 유한요소 해석

2.1 해석 대상

해석대상인 폴의 실제형상은 Fig. 1과 같다. 본 제품은 자동차 안전벨트를 구성하고 있는 부품으로 벨트를 풀어주고 죄어주는 역할을 하며 S45C 소재로 만들어졌다. Table 1은 S45C의 물성치를 나타낸

다.



Fig. 1 Configuration of the final product

2.2 유한 요소 모델링

위의 형상은 비축대칭이어서 해석에 어려움이 있으므로 원형 블랭킹과 피어싱으로 만들어진 제품의 우측편(Fig. 1 front view에서 타원부분)을 두께 4.5mm의 등은 2차원 축대칭 형상의 문제로 가정하였다. 또한 파인 블랭킹에서는 펀치의 틈새가 매우 좁으므로 소재의 탄성변형이 무시할 만큼 작다고 생각하여 강소성 재료로 가정하였으며, 압연에 따른 이방성은 고려하지 않고 등방성으로 간주하였다. 또한, 시뮬레이션에 사용된 입력값은 Table 2와 같고, 공정 변수는 Table 3에 제시되었다.

Fig. 2는 선택한 공정 변수들인 V형 돌기의 위치(p)와 높이(h)를 나타내고 있다.

2.3 연성 파괴 조건(ductile fracture criterion)

지금까지 많은 실험적인 연구는 서로 다른 재료의 성형한계를 계산하기 위해 연성 파괴 조건을 사용했다. 본 연구에서는 다양한 하중조건에 적용될 수 있고 실험적 접근 및 수치적 계산이 용이한 Cockcroft와 Latham의 연성파괴 기준을 적용했는데, 그 모델 식^[12]은 다음과 같다.

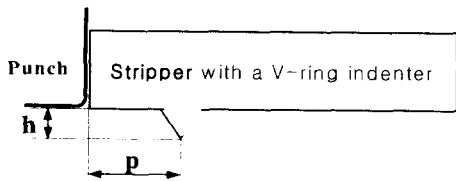


Fig. 2 Formation of the V-ring indenter

Table 2 Input values used in FE analysis

Parameter	Value	Unit
Friction factor(m)	0.1	
Punch corner radius(R_p)	0.01	mm
No. of Elements	5000	EA
Die corner radius(R_d)	0.4	mm
No. of Steps	200	
Stroke per step	0.025	mm
Stripper force(F_s)	110	kN
Counter force(F_c)	2	kN

Table 3 Design parameters used in FE analysis

Design parameter	Value	Unit
Punch clearance	0.4	%t
V-ring indenter		
Height of the v-ring indenter(h)	0.5, 0.8, 1.0	mm
Position of the v-ring indenter(p)	0.8, 1.0, 1.27	mm

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

여기서, σ^* 는 최대 인장응력, $\bar{\epsilon}^f$ 은 연성과괴 즉 전단이 일어나기 시작하는 한계변형률, C는 재료의 상수, $\bar{\sigma}$ 는 유효응력, $\bar{\epsilon}$ 는 유효변형률, σ^*/σ 는 응력 집중 상수 값이다.

(1)식은 전단가공에서 인장 변형률 에너지가 한 계값에 도달한 후, 전단이 일어나기 시작한다고 가정한 것이다. 여기서 전단가공을 하는 동안 주 인장응력(principal tensile stress)의 최대치가 일정하게 유지된다고 가정하면¹⁰⁾, 식(1)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}^f} d\bar{\epsilon} \approx C_1 \quad (2)$$

그리고, 유한요소 해석에서 (2)식은 충분 개념으로 다음과 같이 근사화할 수 있다.¹¹⁾

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

여기서, n은 스텝 수, $\Delta \bar{\epsilon}_e$ 는 요소의 유효 변형률 충분이다. 그러므로, Cockcroft와 Latham의 경계는 한계 변형률 $\bar{\epsilon}^f = C_1'$ 로 근사화될 수 있고, 이것은 한계 변형률에 도달하면 전단이 시작된다는 의미이다. 그런데, C_1' 값은 실험을 하여 측정해야 하는 재료상수이지만, 본 연구에서는 이전의 연구결과들^{13),14)}에서 하였듯이 시뮬레이션을 통해 현장에서 실험결과[편치률새=0.4%t, V형 돌기의 h=0.8mm, p=1.27mm인 경우]와 가장 근사한 유효 변형률 값인 3.2를 사용하여 본 해석을 수행하였다.¹⁴⁾

유한요소 해석에서 전단가공을 하는 동안 전단 영역의 형성과정을 수치적으로 접근하기 위하여 어떤 특정 요소의 유효변형률의 값이 한계변형률에 도달하면 이 요소를 제거하는 기법^{9),13)}을 적용하였다

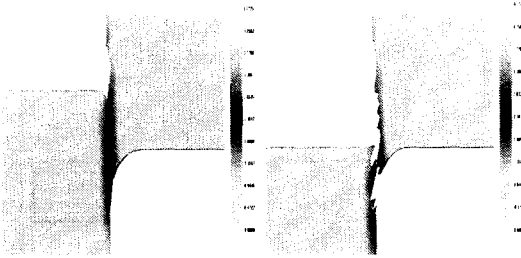


Fig. 3 Predicted sheared edges by element kill method

요소제거법을 적용하여 전단이 일어나는 과정을 Fig. 3에서 볼 수 있다. 왼쪽은 소재의 일부 요소가 한계 변형률 3.2에 도달하여 일부가 제거된 경우이고, 오른쪽은 대부분의 요소가 전단을 일으킨 경우를 나타낸다. 요소들의 전단이 진행되는 과정을 보면 펀치의 코너부에서 가장 먼저 한계 유효 변형률 값에 도달하여 요소가 제거되었고, 그 다음 급형 코너에서 유효 변형률이 한계값에 도달하여 요소가 제거되어 결국 파단이 일어나는 것을 볼 수 있다.

Fig. 4는 파인 블랭킹된 제품의 전단면을 나타내고 있는데, 실험[펀치틈새=0.4%, V형 돌기의 h=0.8mm, p=1.27mm인 경우]에서는 제품의 전단면을 배율 100배의 형상투영기(profile projector)에 비춰서 다이롤의 폭과 깊이, 유효 전단면, 파단면 등의 세 영역을 구분하고 3회 이상 측정하여 그 평균값을 구하였다.^[14]

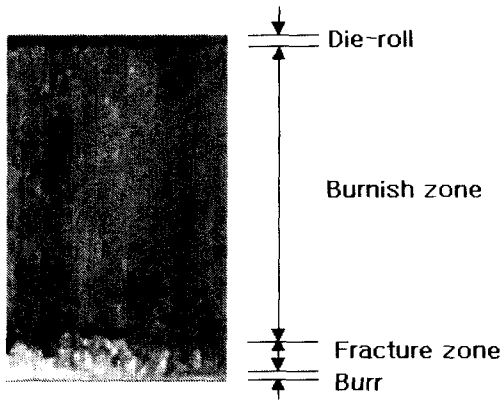


Fig. 4 Sheared surface after fine blanking

3. 결과 및 고찰

3.1 V형 돌기 높이의 영향

Fig. 5는 다이롤 폭과 V형 돌기의 높이 관계를 보여주고 있으며, Fig. 6은 다이롤 깊이와 V형 돌기의 높이와의 관계를 나타내고 있다. Fig. 5와 Fig. 6에서 V형 돌기의 높이가 높을수록 다이롤 폭과 깊이가 줄어드는 것을 볼 수 있는데, 이것은 V형 돌기에 의해 밀려난 재료가 전단밴드 주위에 발생하는 소재의 강제 회전을 억제하기 때문이다.^[15]

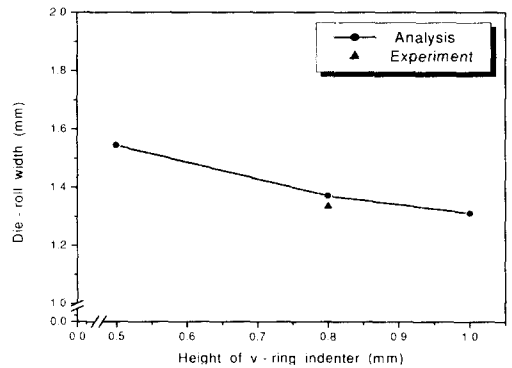


Fig. 5 Variation of die-roll width according to height of v-ring indenter

Fig. 5에서는 V형 돌기의 높이에 따라서 최고 15%의 다이롤 폭의 차이를 보이고 있으며 Fig. 6에서는 최고 22.8%의 다이롤 깊이의 차이를 보이고 있다.

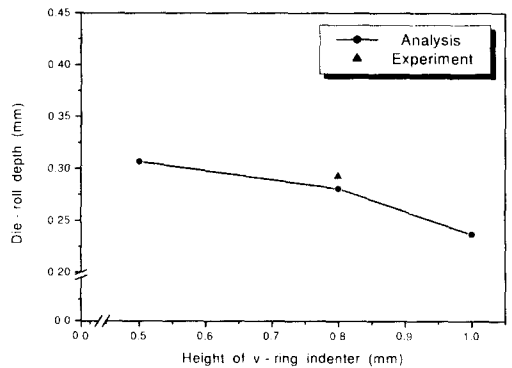


Fig. 6 Variation of die-roll depth according to height of v-ring indenter

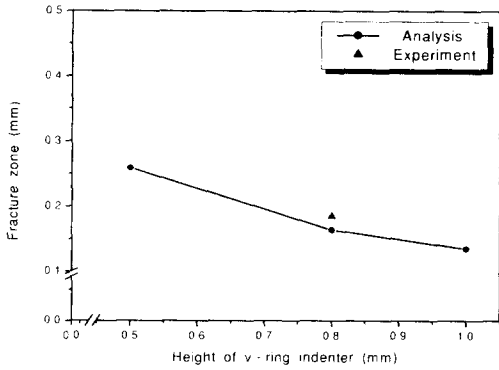


Fig. 7 Variation of fracture zone according to height of v-ring indenter

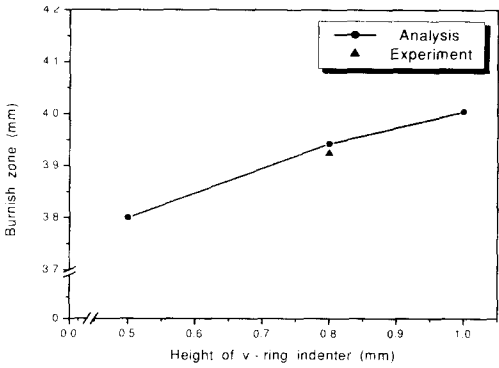


Fig. 8 Variation of burnish zone according to height of v-ring indenter

Fig. 7과 Fig. 8은 V형 돌기의 높이가 파단면과 유효전단면에 미치는 영향을 보여주고 있다.

V형 돌기의 높이가 높아짐에 따라 유효 전단면이 향상되는 것을 볼 수 있는데, 이는 V형 돌기가 높을수록 전단면 주위에 정수압이 증가하므로 피가공체는 연성이 증가하게 되어 파단이 늦게 일어남을 알 수 있다.^[15] Fig. 7에서는 V형 돌기의 높이에 따라서 최고 47.9%의 파단면의 차이를 보여주고 있고, Fig. 8에서도 최고 5.1%의 유효 전단면의 차이를 보여주고 있다.

3.2 V형 돌기의 위치에 관한 영향

Fig. 9에서 살펴보면 V형 돌기의 위치에 따라 다이 롤 폭의 변화는 미미하게 나타나는데 비하여 다이 롤 깊이에는 상당히 크게 변화하는 것을 Fig. 10

에서 볼 수 있다.

이는 V형의 돌기가 편치인선부에 가까울수록 전단밴드로 유입되는 소재의 양이 적어지기 때문이다.

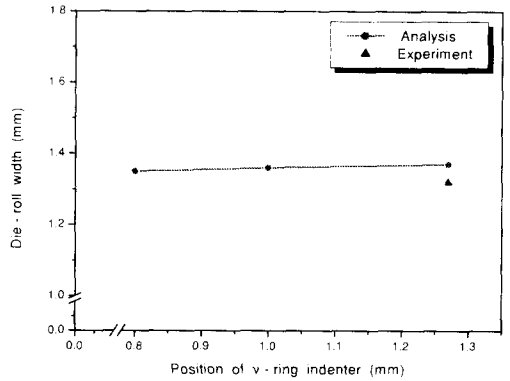


Fig. 9 Variation of die-roll width according to position of v-ring indenter

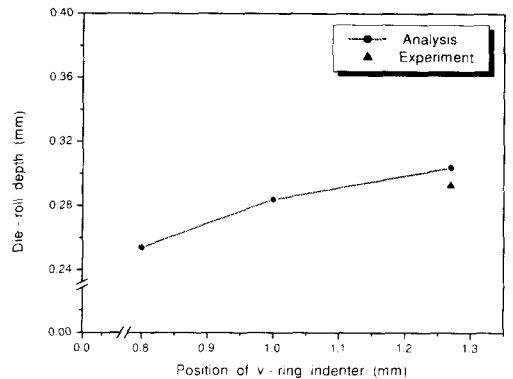


Fig. 10 Variation of die-roll depth according to position of v-ring indenter

Fig. 11과 Fig. 12는 V형의 돌기가 편치면에 가까울수록 파단면이 감소하고 유효 전단면이 증가하는 결과를 볼 수 있다. Fig. 11에서 V형 돌기의 위치에 따라 최고 52.4%의 파단면 차이를 보이며 Fig. 12에서는 최고 3.4%의 유효 전단면 차이를 보이고 있다. 이것은 V형의 돌기가 편치인선부에 가까울수록 전단밴드 주위에 발생하는 정수압 응력이 커지기 때문이다.^[15] 따라서, V형의 돌기의 높이가 높을수록, V형의 돌기가 편치인선부에 가까울수록 전단면

이 향상됨을 알 수 있다.

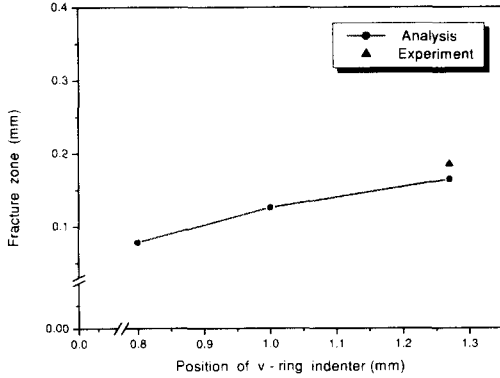


Fig. 11 Variation of fracture zone according to position of v-ring indenter

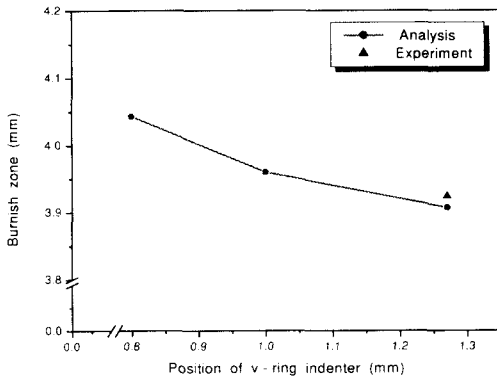


Fig. 12 Variation of burnish zone according to position of v-ring indenter

4. 결론

본 논문에서는 자동차 안전벨트의 부품인 폴의 파인 블랭킹 공정에서 V형 돌기의 높이와 위치가 제품의 전단면에 미치는 영향에 대하여 강소성 유한 요소해석을 한 결과, 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) V형 돌기가 높을수록 소재가 받는 정수압 응력은 증가하며 피가공재는 연성이 증가되어 파단이 늦어지고 유효 전단면이 커진다.
- 2) V형 돌기가 높아지면 다이롤의 폭과 깊이는

작아지고 전단면은 양호한 제품을 얻을 수 있다.

- 3) V형 돌기의 위치가 편치인선부에 가까울수록 다이롤의 폭과 깊이는 감소하고, 유효 전단면이 향상된다.
- 4) 위의 이론해석 결과들은 특정한 조건에서 일부 실험한 결과와 서로 잘 일치하였다.

참고문헌

1. 日本塑性加工學會編, 프레스 가공편람, 丸善株式會社, pp. 156-162, 1975.
2. K. Lange., "The potential of the fine blanking technique," Feintool AG, Lyss, Swiss, pp. 1-6, 1978.
3. 前田禎三, 東京大學工學部 精密機械工學科論文 集, pp. 168-183, 1981.
4. W. König, F. Rotter and A. Krapoth, "Feinschneiden dicker Bleche - Experiment und Theorie," Industrie-Anzeiger, Vol. 106 No. 14, pp. 24- 28, 1981.
5. T. Guanggi., Z. Pengfei., L. Ronghong., Jinwang. and Z. Xiaoguang., "Recent development of fine blanking technology in china," Proceed. 4th Int. Con. on Technology of Plasticity, Beijing, China, pp. 246-250, 1993.
6. Jovan Lazarev, Atanas Kocov, "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, 1996.
7. 김종호, 류제구, 최지수, 정완진, "간이 파인 블랭킹 금형의 개발을 통한 범용 유압 프레스에서의 원형 정밀전단 가공성 연구," 한국정밀공학회지 제13권 제5호, pp. 157-163, 1996.
8. T. C. Lee, L. C. Chan and P. F. Zheng, "Application of the Finite-Element Deformation Method in the Fine Blanking Process," J. of Mater. Process. Technol., Vol. 63, pp. 744-749, 1997.

9. S. H. Jeong, J. J. Kang and S. I. Oh, "A Study Shearing Mechanism by FEM Simulation," Proceed. 5th Int. Con. on Technology of Plasticity, Vol. 2, pp. 631-634, 1996.
10. T. Altan, S. I. Oh and H. L. Gegel, Metal Forming, American Society for Metals, 1983.
11. P. D. Harvey, Engineering Properties of Steel, American Society for Metals, 1985.
12. Edward M. Mielnik, Metal Working Science and Engineering, McGraw-Hill, Inc, 1991.
13. 고대철, 김철, 김병민, 최재찬, "요소제거법에 의한 판재 전단가공의 유한요소 시뮬레이션," 한국정밀공학회지 제13권 11호, pp. 114-123, 1996.
14. 김윤주, 곽태수, 배원병, "과인 블랭킹에서 전단면에 미치는 다이 틈새의 영향에 관한 유한요소 해석," '99년 한국소성가공학회 추계 학술대회 논문집, pp. 40-44, 1999.
15. 이종구, Fine Blanking 급형에서 삼각돌기가 제품의 가공특성에 미치는 영향, 석사논문, 단국대학교 대학원, 1990.