

정밀전단금형에서 판누름압력과 삼각돌기가 전단특성에 미치는 영향

이종구*, 오환섭**

Effects of Blankholding force and Vee-ring on the Blanking characteristics in Fine-Blanking Die

Jong-Ku Lee*, Hwan-Sup Oh**

Abstract

This study was performed the blankholding force and Vee-ring effects on blanking characteristics, such as maximum blanking force, burnish, dish-shape, hardness, etc. in fine-blanking die by the experimental method. Two types of aluminum (Al.1050-O, Al. 5052-H) Such as annealed and unannealed materials were used for the experiment. In order to get a hydrostatic pressure effect, the clearance was set to 0.5% of the thickness of strip, and the counter punch and stripper plate with Vee-ring was set-up. While this experiment was carrying out, the average blanking velocity was constant (37.5mm/sec). As a result of this study, we got a good surface roughness and a glassy shear plane(burnish) of the sheet over 90% thickness, and such as the excellent accuracy of dimensions, the good squareness and the reduction of dish-shape could be obtained, and also the additional results obtained were such that the hardness of shear plane was increased and the maximum blanking force was reduced in the condition of Vee-ring height of 1.0~1.5mm, and blankholding force of 1200kg.

1. 서 론

정밀전단가공 기술은 정수압원리를 이용하여 가소성재를 한 공정으로 재료 두께 100%에 전단면(burnish)을 얻고 또한 counter-sinking, coining, semi-piercing

등의 가공을 동시에 할 수 있는 것으로 일반 전단 가공법으로 불가능한 가공을 연구 보완한 정밀 전단금형 가공기술이다.¹⁾²⁾³⁾

기초 이론은 Lange⁴⁾⁵⁾ 등이 연구하였고, 실용 면은 Haac¹⁾ 등이 연구하여, 초기에는 소형의 사무용 부품 산업에 주를 이루었으나 최근 computer의 부품에서 자동차, 항공 산업의 발전으로 대형화,후판화 되어 가고

* 한영공업전문대학
** 경희대학교

있는 추세로서, 두께 15mm 정도까지 가공이 가능하나, 우리나라에서는 아직도 금형가공기술의 부족과 고가의 장비비 부담 때문에 자체 기술개발에 어려움을 겪고 있다. 일반적으로 깨끗한 전단면을 얻으려면, 일반전단가공 후 shaving, Finish-blanking, 또는 기계가공등의 후가공이 필요하다. 정밀전단가공에 필요한 조건을 만족시킨다면 고가의 설비비를 부담하지 않아도 가공가능하다. 따라서 본 연구에서는 프레스의 가공영역을 확대시키기위해 고가의 정밀전단전용 프레스기계(Triple action hydraulic press)를 사용하지 않고⁽⁶⁾⁽⁷⁾, 광범위하게 사용되는 범용 기계식 프레스(Crank power press)를 이용, 1회의 가공공정으로 고정밀도의 제품을 경제적으로 생산할수 있는 최적의 가공 조건을 유추하여 금형설계제작시 활용할 수 있도록 하였다.

따라서 실험용 금형을 제작하여 정밀전단시에 판누름압력과 삼각돌기가 제품의 전단 특성에 미치는 영향, 즉 최대 전단 하중, 전단면의 형상 및 표면거칠기, 전단면의경도, 만곡(dish-shpe)등의 내용을 중심으로 실험고찰하여, 판두께와 원주전체 면적에 걸쳐 경면의 전단면을 얻을수 있는 적정가공조건을 유추하는데 가능성을 제시하였다.

2. 전단이론

2.1 전단현상

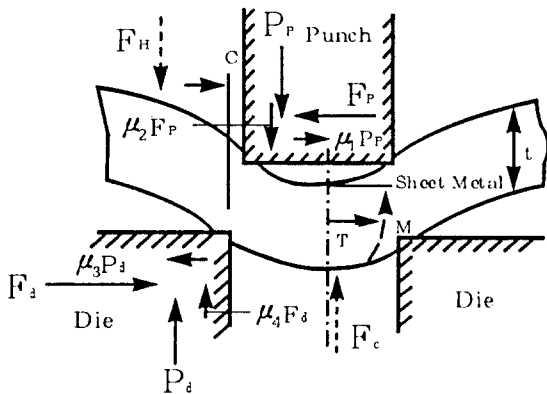


Fig. 1 External force acting on work material

Fig. 1 에서

- Pp μ_1 Pp : 펀치면에 작용하는 힘
- Pd μ_3 Pd : 다이면에 작용하는 힘
- Fp μ_2 Fp : 펀치측면에 작용하는 힘
- Fd μ_4 Fd : 다이 측면에 작용하는 힘

여기서, $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ 는 μ_1 Pp(수평분력)과 Pp에 의한 마찰력을 포함한 마찰계수 이다. 상기 4개의 힘을 1개의 집중력으로 치환하면

$$P = Pp + \mu_2 Fp = Pd + \mu_4 Fd \dots\dots\dots (1)$$

Pp + μ_2 Fp, Pd + μ_4 Fd-Blankholding force, P (편측)

만약, 재료의 튀어오름과 굽힘을 방지하기위해, 판누름압력과 역판누름압력을 이용할경우

식(1)에 Blankholding force 와 Counter punch force F_H, F_c 를 대입하면 다음식을 얻을수있다

$$P = Pp + \mu_2 Fp = (Pd + F_H) + \mu_4 Fd + (F_c - F_H) \\ = Pd + \mu_4 F_H + F_c \dots\dots\dots (2)$$

가공의 진행과 동시에 틈새(C)부 및 틈새 근접부에는 전단변형을 일으킨다. 따라서 하중P를 증가시키면 $(Pp + \mu_2 Fp)$ $(Pd + \mu_4 Fd)$ 및 $(Fp - \mu_1 Pp)$, $(Fd - \mu_3 Pd)$ 는 각기 모우멘트를 형성하고, 이모멘트에 의해 재료는 틈새부에서 굽힘 하려고 할것이다. 이 굽힘에 의해 측방력 F_p, F_d 가 발생하고 $(Pp - F_p)$ 및 $(Pd - F_d)$ 의 힘의 조합이 일종의 썩기작용을 한다. punch의 침입량이 어느정도 초과하면 재료의 날끝 부분에서의 소성변형은 없어지고, 크랙이 생성, 성장하여 전단이 완료된다. 재료는 펀치와 다이의 표면에 수평방향으로 인장응력이 작용하고, 수직방향으로 압축응력이 작용하며, 45° 방향으로는 전단응력이 작용한다.측면의 인장응력 σ_{t1} 은 평면의 인장응력 σ_{t2} 보다 크다. 압축응력쪽은 반대로 $\sigma_{c1} < \sigma_{c2}$ 이다. 또, 전단응력은 펀치, 다이 표면과 재료사이의 마찰에 기인한다고 하면, 다음식을 얻을수 있다.

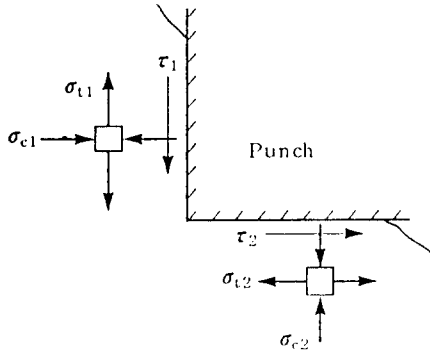
$$|\tau_1| = \mu \sigma_{c1} \quad |\tau_2| = \mu \sigma_{c2} \dots\dots\dots (3)$$

따라서, 펀치, 다이측면과 평면과의 주응력을 구하면,

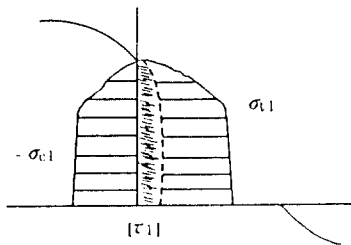
직선전단의 경우는 식 (4),(5)와 같다.

$$\text{측면: } \sigma_1 = \frac{1}{2}(\sigma_n - \sigma_{c1}) + \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_n + \sigma_{c1})^2 + 4\mu^2\sigma_{c1}^2} \quad (4)$$

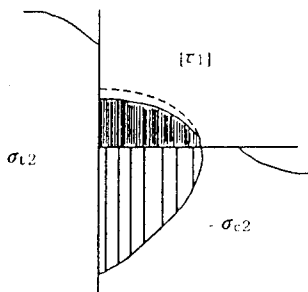
$$\text{평면: } \sigma_2 = \frac{1}{2}(\sigma_e - \sigma_{c2}) + \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_e + \sigma_{c2})^2 + 4\mu^2\sigma_{c2}^2} \quad (5)$$



(a) Direction of stress distribution in punching area



(b) Stress distribution in lateral plane



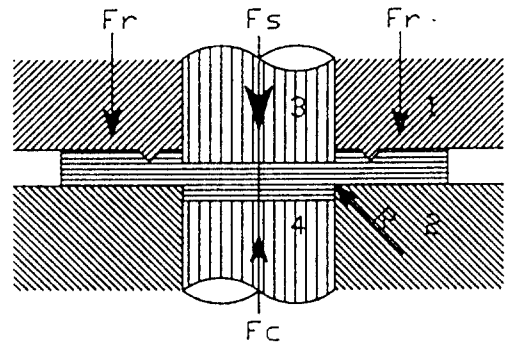
(c) Stress distribution of material plane

Fig.2 Stress distribution of the area contacting with punch die

일반적으로 $\mu = 0.2$ 정도에서, 다른 응력관계가 Fig.2 (b)(c)에 있어서 일반적으로 $\sigma_1 > \sigma_2$ 이다 따라서, 재료의 파단 기준에 대해서는 항복기준과 같이 명확한 법칙은 없지만, 여기에서 논하는 전단과정에 있어서는 충분한 소성변형에 의해서 가공경화되어 전단한 상태에서는 최대수직인장응력이 파단(Fracture)의 유력한 기준이 된다고 보기 때문에, σ_1 이 작용하는 측면쪽이 σ_2 가 작용하는 평면보다 크다고 볼 수 있다.²⁾

2.2 정밀전단가공법 원리

Fig.3은 정밀전단가공법의 기본원리를 나타낸 것으로 펀치주위에 있는 스트리퍼판으로



- | | |
|--|-----------------------------------|
| F_s = Blanking force | 1. Stripper plate(indenter plate) |
| F_r = Ring indenter force | 2. Blanking die |
| F_c = Counter force | 3. Blanking punch |
| R = Small cutting edge radius of die | 4. Counter punch |
| | 5. Material |

FIG.3 Principle of fine-blanking

다이 위에 놓여있는 피가공재(strip)를 고정하여 전단가공시 펀치침입에 의한 굽힘을 방지할수 있도록 하였다. 또한, 펀치 반대편에 있는 카운터 펀치(counter punch)로 피가공재를 반대로 가압함으로써 전단변형을 일으키는 틈새부의 재료에 압축력을 증가시킴으로서, 펀치, 다이날끝에서 시작되는 균열에 의한 파단을 발생시키지 않고 1펀칭으로 경면의 전단면을 얻을수 있는 가

공법이다. 따라서 압축력을 효과적으로 높이기 위해 스트립과 판과 다이면의 한쪽, 또는 양쪽면에 전단윤곽에 따르는 삼각형의 돌기(Vee-ring)를 붙여 피가공재내에 파고 들어가도록 하고 있다.

펀치와 다이의 틈새를 극히 작게(피가공재의 두께의 1%이하)하고, 압출효과를 얻기 위해 다이의 날 끝에 작은 반경(R)을 주었다. 이상과 같이 정밀전단가공법은 정수압 상태를 유지할수 있는 조건을 충족시킴과 동시에, 피가공재의 연성이 증가되는 재료의 물성을 이용하는 방법으로서, 현재 사용되고 있는 전단가공법 중에서 가장 정밀도가 높은 가공법이다.

3. 실험장치 및 조건

3.1 정밀전단금형의 제작

Fig.4과 같이 정밀도를 고려하여 Ball guide 형식의 Steel die set와 sub-guide를 부착하여, 실험용 정밀전단금형을 Euler의 좌굴식과 Strasser의 경험식 $H=k\sqrt[3]{P}$ 를 이용하여 전단펀치, die 그리고 blankholder 를 설계하였다. 전단가공 조건중 전단면에 가장 큰 영향을 미치는 펀치와 다이의 틈새는 피가공재 두께 3.0mm 의 0.5%로 지그그라인딩후 래핑가공하였다.

판누름압력(blankholding force)을 변화시키면서 실험할수 있도록 금형용 극중하중(extra heavy load) 사각 스프링을 4개,6개,8개를 설치하였다. 또한, 전단시

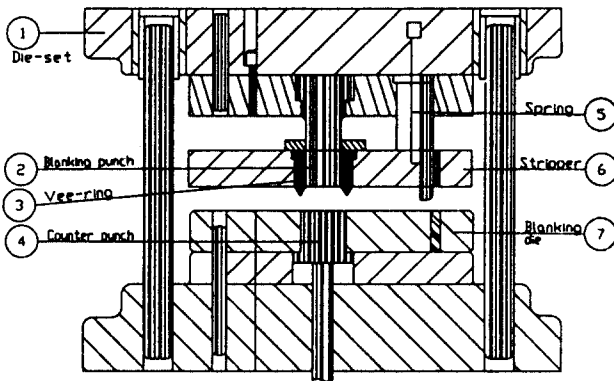


Fig. 4 Fine-blanking die set-up

굽힘에 의한 압축력 손실과 만곡(dish-shpe)방지 및 제품의 취출을 할수 있도록 counter punch 를 설치하여 유압식 다이쿠션으로 작동되게 하였다.

범용 크랭크 파워 프레스의 Ram과 Bolster의 평행도, 직각도를 고려하여 램에 shank를 장착하지 않고 하중만을 가할수 있도록 하였다.

판누름압력을 효과적으로 하기 위하여 Blank holder 밑면에 전단윤곽에 따른 삼각형의 돌기를 설치하여, 변화시키면서 실험할 수 있도록 하였다.

3.2 실험용피가공재

본 실험에서 사용한 피가공재는 비교적 전단가공이 용이함과 금형의 강성 및 프레스의 용량을 고려하여 두께 3.0mm, 4.0mm, 5.0mm 의 상용 순수 알루미늄판, 연질재(Al.1050-O)와 경질재(Al.5052-H)를 사용하였다. Table.1 및 .2에 화학성분 및 기계적 성질을 나타내었다.

또한, 연성의 효과를 고찰하기 위해 재료를 340° C 에서 30분동안 연한풀림(soft annealing)을 하여 사용하였다.

Table.1 Chemical compositions

Material	Chemical composition(%)							
	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
Al.1050-O	99.50	0.25	0.40	0.05	0.05	0.05	0.05	0.03
Al.1050-H	99.00	0.25	0.40	0.10	0.10	2.2		

Table.2 Mechanical properties of material

Material	Tensile Strength (kg/mm)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
Al.1050-O	9.5	6.0	40.0
Al.1050-H	18	18	69.0

3.3 실험조건

프레스에 금형을 장착하여 Table.3 에서와 같이, 펀치와 다이의 틈새는 피가공재 두께 3.0mm의 0.5%인 편측 0.015mm와 전단속도 37.5mm/sec, 카운터하중은 전단하중의 20%인 400kg 으로 일정하게 하였

으나, 판누름압력은 전단하중의 30%,40%,50% 에 삼각돌기의 높이 $h=0.0\text{mm}$, 0.5mm , 1.0mm , 1.5mm 의 조건으로 12회의 변화를 주면서 실험하였다.

Table.3 Experimental condition

Blankholding force, F_R (Kg)	Couter force, F_C (Kg)	Height of vee-ring, h (mm)	Clearance (%)	Blacking velocity (mm/sec)
725 966 1200	400	0.0, 0.5 1.0, 1.5	0.5	37.5

3.4 최대전단하중의 측정장치

본 실험에서 전단시 펀치에 가해지는 최대 전단하중을 측정하기 위해 2축 90° 형의 로우젯(two gage rosette)를 FIG.5 와 같이 펀치가 직접적인 수감체가 되도록 펀치의 원주부에 180° 방향으로 2개를 부착하여, Full-bridge를 형성하였고, Dynamic strain meter 와 Multi-pen Recorder 를 설치하여 측정기록할수 있도록 하였다.⁸⁾⁹⁾ 실험전 전단펀치에 부착한 Rosettes의 정확성을 보정하기 위해 만능 재료시험기 (Instron: YAMATU)에서 전단하중 계산식으로 구한 하중보다 높은 4000kg 까지, 하중을 가압 및 감압하는 것을 Recorder 에 기록하여 실험시에 최대 전단하중의 측정자료로 이용하였다. 실험에 사용한 기계는 50ton 크랭크 프레스에 5ton의 Die cushion을 장착하여 사용하였다.

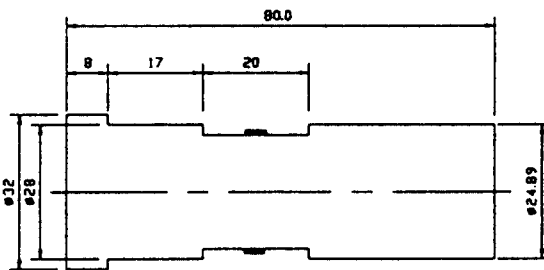


Fig.5 Blanking punch

4. 실험결과 및 고찰

4.1 최대 전단력의 변화

Fig.6은 전단시 판누름압력과 돌기의 높이 변화에 따라 펀치에 가해지는 최대 전단하중의 변화를 나타낸 것으로, 하중선도는 각 조건별 5회 반복측정하여 평균값으로 나타내었다. 판누름압력과 카운터압력이 0인 조건에서는 전단하중 계산식에 의한 하중의 값을 나타내었고 판누름압력과 돌기높이가 증가함에 따라 최대 전단하중은 감소하는 현상을 고찰하였다. 이와같은 현상은 Nakagawa¹⁰⁾의 실험결과를 인용하면 전단변형부의 재료에 압축력을 증가시키면 피가공재는 연성이 증가하는 재료의 물성을 이용한 것으로, 압축력의 극대화에 의한 연성의 증가로 피가공재는 보다 쉽게 소성항복 할수 있기 때문이라고 할 수 있다.

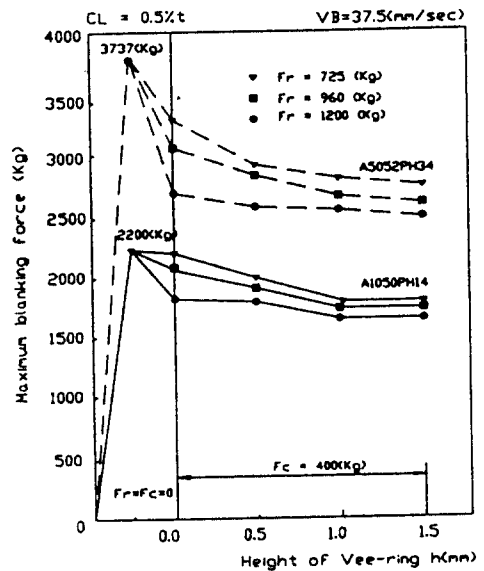


Fig.6 Influence of maximum blanking force according to the various Vee-ring heights.

4.2 전단면의 영향

정밀전단법의 주목적은 파단면이 없이 판두께 전체에 경면의 전단면을 형성하는 것으로서, 이 전단면의 크기가 정밀전단의 성공여부를 결정하는 가장 큰 기준이 된다.

Fig.7 및 Photo. 1은 돌기의 높이 및 피가공재료 두께 변화에 따른 전단면과 파단면의 분포를 비교한 것이다.

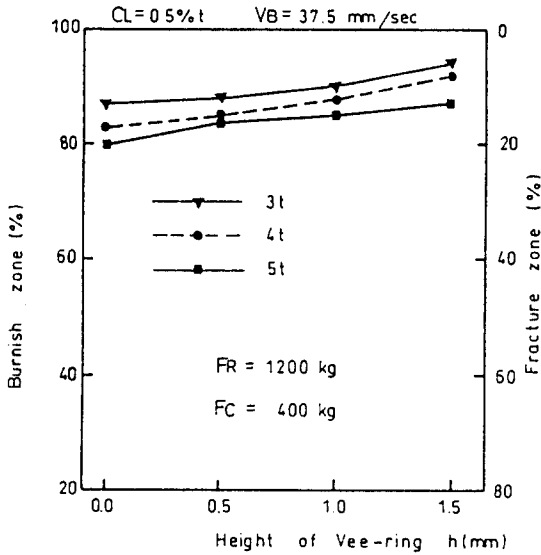


Fig.7 Influence of burnish zone according to the various Vee-ring heights.

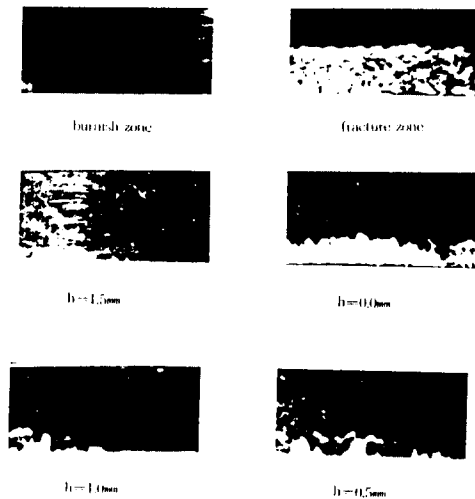


Photo.1 Macrophotographs of burnish zone

편치와 다이의 틈새는 피가공재 두께의 0.5%로 하였고, 전단속도는 37.5 mm/sec 로 일정하게 하였다. 또한 카운터하중(F_c)은 전단하중의 20%로 하였고, 판누름압력(F_R)은 전단하중의 50%인 약1200kg 으로 하였다. 사용 피가공재는 두께 3.0mm, 4.0mm, 5.0mm의 순수 Al 판을 사용하였다. 실험결과 삼각돌기의 높이가 커짐에 따라 파단면(Fracture zone)은 감소하고, 전단면(burnish zone)은 증가하여 삼각돌기가 1.5mm 피가공재 두께 3.0mm 에서 판두께와 원주전체면적 94%의 경면의 전단면을 얻을 수 있었다.

4.3 치수정밀도

Fig .8 은 돌기높이 변화에 따른 제품외경의 치수정밀도를 나타낸 것으로 피가공재 두께 2mm~4mm와

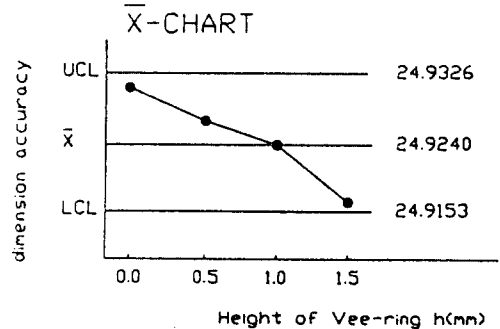
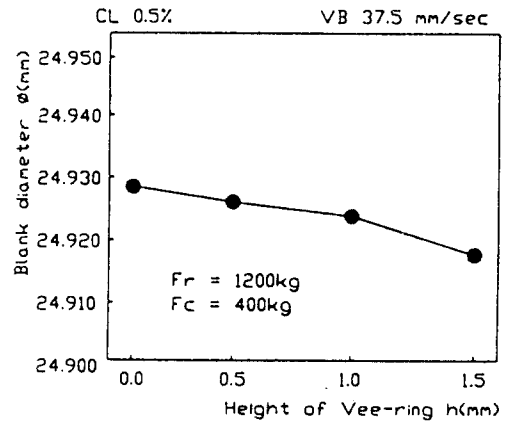


Fig.8 Influence of dimensional accuracy according to the various Vee-ring heights.

외경 $\phi 10\text{mm}$ 이상 ~ $\phi 50\text{mm}$ 이하의 조건에서 일반전단법과 셰이빙(shaving)법에서의 표준공차와 비교한 결과 일반전단에서는 0.28mm , 셰이빙에서는 0.03mm 의 표준공차보다 더 작은 량 0.017mm 의 우수한 치수정밀도를 나타내었고, 다이직경의 치수와 비교한 결과 다이직경 $\phi 24.9200$, 제품의 직경이 0.0040mm 만큼 큰 것을 알 수 있었다. 이 현상은 피가공재는 굽힘발생없는 상태에서 직선 전단되기 때문에 전단면은 테이퍼가 발생되지 않아 치수정밀도에 있어서도 안정한결과를 얻었다 치수의 측정은 Digimatic mini processor에 $1/1000\text{mm}$, Micrometer를 연결하여 조건별로 5개씩 샘플링하여 평균치로 나타내었다.

4.4 전단면의 경도분포

전단가공은 소성변형을 수반하기 때문에 전단면은 가공경화 되어 경도가 상승된다. 이런 결과를 Fig.9에 나타내었다. 전단면을 접촉면으로 하는 경우 표면경화됨으로서, 내마모성을 향상시키는 차원에서 바람직한 현상이다.

경도측정은 전단면의 처짐부(die-roll), 전단중심부, 거스러미부를 비커스 경도계로 측정하여 평균치로 나타내었고, 모재와 비교한 결과 연결재(Al.1050)에서는 큰

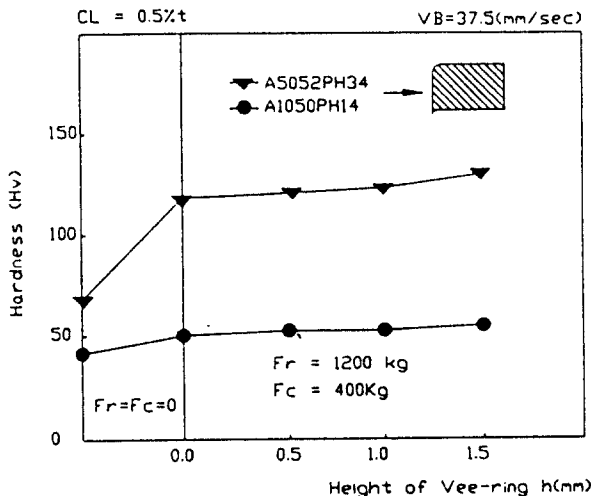


Fig.9 Distribution of micro-hardness in the burnish zone

차이가 없었으나, 경질재(Al.5052)에서는 모재의 약 2배 정도의 경도값을 나타내었다.

4.5 만곡(dish-shape)의 변화

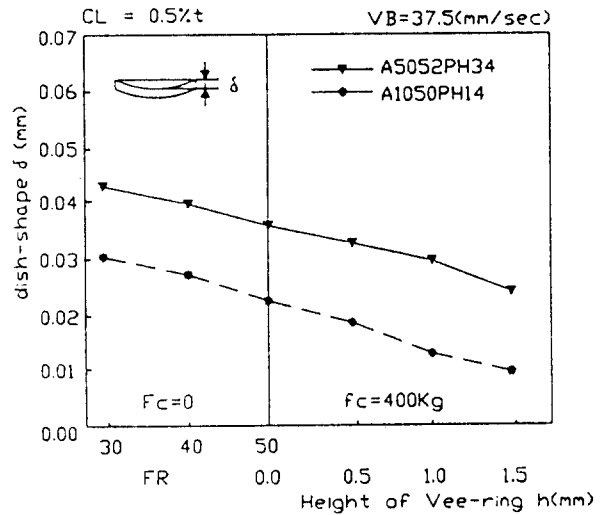


Fig.10 Influence of dish-shape according to the various Vee-ring heights and stripper forces

만곡은 전단편치가 피가공재에 침입할 때 굽힘모멘트가 작용하여 발생하는 현상으로, 제품의 직각도, 평행도와 치수정밀도에 나쁜 영향을 미친다. Fig.10는 카운터압력이 0(zero)인 상태에서 판누름압력만을 증가시켰을 경우와 카운터압력과 판누름압력을 증가시킨 상태에서 돌기높이의 변화에 따른 만곡의 양을 나타낸 것으로서, 판누름압력만의 증가에 의해서는 만곡은 잔류하였고, 돌기의 높이증가에 따라서는 거의 0에 가까운 값과, 직각도, 평행도가 우수한 결과를 얻을 수 있었다.

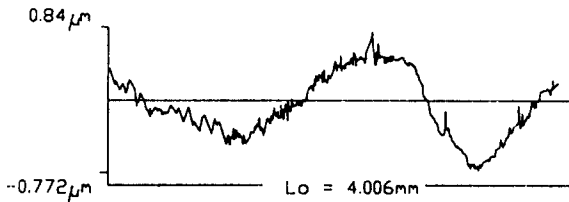
측정은 CNC 3차원 측정기로 측정, 평균치로 나타내었다.

4.6 전단면의표면거칠기

전단면의 표면거칠기(surface roughness)는 전단다이홀(blanking die hole)의 표면거칠기와 같기 때문에

경면의 전단면을 얻게 되었다. Fig.11 은 전단면의 원주방향의 길이 $L_0 = 4.006\text{mm}$ 의 표면거칠기를 측정 한 것으로 최대표면거칠기 $R_{max} = 0.835\mu\text{m}$, 중심선 평균거칠기 $R_a = 0.298\mu\text{m}$, 10점평균거칠기 $R_z = 0.698\mu\text{m}$ 로 양호한 결과를 얻었다. 전단면의 표면거칠기는 판누름압력에 의한 영향은 없는 것으로 나타났으나 순수알루미늄판을 사용했기 때문에 간헐적으로 다이홀면에 용착하거나 이중전단 현상이 생기는 것을 관찰 할수 있었으나, 윤활을 효과적으로 함으로써 방지할 수 있었다.

Mode	Cut OFF	Filiter	Reference	Ignore
ROUGH	0.8mm	ISO	CONCAVE	1%
f-blank				



Peak To Valley = $1.606\mu\text{m}$
 $R_{tm} = 0.835\mu\text{m}$ $R_a = 0.298\mu\text{m}$ $R_{3z} = 0.698\mu\text{m}$

Taylor-Hobson

Fig.11 Roughness of burnish zone.

5 결론

본 연구는 알루미늄(Al.1050-O)판의 정밀전단에서, 판누름압력과 삼각돌기(Vee-ring)가 전단제품의 가공특성에 미치는 영향에 대하여 아래와 같은 실험결과를 얻었다.

- (1) 판누름압력 1200kg, 카운터압력 400kg, 삼각돌기높이 1.5mm인 조건에서 피가공재두께 3.0mm에서 94%, 4.0mm에서 93%, 5.00mm에서 87%의 깨끗한 전단면을 얻었다. 따라서, 재료두께변화에 따라 판누름압력이나 삼각돌기의 크기등 적정조건을 유추할 수 있는 가능성을 제시하였다.
- (2) 치수정밀도에 있어서는 테이퍼가 없는 직각의 전단면과 전단제품의 외경치수가 평균 $\phi 24.9240$ 으로,

표준오차 0.004mm의 우수한 결과를 얻었다.

- (3) 전단면의 경도에 있어서는 전단면을 사용면으로 하는 부품은 표면경화됨으로써 내마모성을 향상시킨다.
- (4) 판누름압력과 카운터압력을 증가시킴으로써 0.01mm의 미소한 값으로 평행도와 직각도가 우수한 결과를 얻었다.
- (5) 100% 전단면을 얻기위해서 펀치와 다이의 틈새를 더욱 작게하고, 틈새에는 치우침이 없어야 하며, 다이홀의 표면을 펀치운동방향으로 매끄럽게 다듬질 해주어야 한다.

참고 문헌

- [1] Haac, J. and Birzer, F. Practical Handbook of Fine-Blanking. Feintool AG, Lyss, Swis. 1984.
- [2] 前田 禎三 論文集. 東京大學工學部 精密機械工學科, pp.168~183. 1981.
- [3] Lang, K. "The Potential of the Fine-Blanking Technique". Fine-Blanking Technical Review, ed. A. no.20, pp 1~6, Feintool AG, Lyss, Swiss, 1978.
- [4] Lange, k. "The Potential of the Fine-Blanking Technique". Fine-Blanking Technical Review, ed. A. No.20, No.25, No.26, Fe-intool AG, Lyss, Swiss, 1989.
- [5] Lange, k., Handbook of Metal Forming, pp.24.3~24.42, McGrawHill book company, 1983.
- [6] 日刊工業新聞社 "プレス技術" Vol.2.No. 2, 1989.
- [7] 日本塑性加工學會編, "プレス加工便覽, 丸善(株), pp.89~170, 1976.
- [8] 한응교 "스트레인게이지 理論과 應用" 普成文化社, 1982.
- [9] Perry, The strain primer McGraw-Hill Book Company, New York, 1995.
- [10] 日刊工業新聞社 "プレス技術" Vol.7.NO.3, 1969.