

## Fine-Blanking시 전단 단계별 변형 거동에 관한 연구

이종구\*, 박원규†

(논문접수일 2001. 8. 28, 심사완료일 2002. 5. 31)

### A Study on the Steps of Shear Deformations Behavior of Fine-Blanking Process

Jong-Ku Lee\*, Won-Kyou Park†

#### Abstract

One characteristic of Fine-Blanking is that the size and the direction of stress and strain are very complex in the plastic flow according to the condition of blanking. Especially, they are affected by the clearance of punch and die, by the force of blanking holder and by the force of counter punch. The purpose of this research is to know the deformation behavior in shear zone more clearly, based on Green & Cauch's large deformation theory. The deformation behavior and cracks were investigated in each step of shear, according to punch penetration increase, the use of V-indenter ring and the hardness of materials. This research found that the transforming behavior was the same as pure dislocation, and the cracks could be prevented when hardness is low.

### 1. 서론

1923년경 스위스에서 화인블랭킹법이 최초로 개발된 이후, 이 가공법에 필요한 소성가공이론과 금형, 피가공재, 사용할 프레스기계 등 가공조건에 대한 연구가 급속히 진전 확대 되었다. 최근에는 자동차, 항공산업의 발전으로 대형화, 후판화 뿐만 아니라 컴퓨터 산업의 발전으로 소형화, 초정밀화가 이루어지고 있고, 가공공정에 있어서도 콤팩트(compact)에서 프로그래시브로 전개되는 가운데 입체형상

화가 이루어지고 있으며,<sup>(1)</sup> 또한, 다품종 소량생산화에 의해 금형을 교환할 때 마다 가장 적절한 가공조건을 재현하기 위해서는 금형별로 가공데이터를 컴퓨터에 기억시키는 화인블랭킹 제어의 CNC화가 이루어지고 있다<sup>(2)</sup>. 이와 같이 전단가공은 프레스를 이용하여 한쌍의 공구에 압축력을 가하여 금속판재에 전단변형을 일으켜 파괴분리 시키는 방법으로 단순한 것 같지만, 본질적으로는 전단가공조건에 영향을 의한 복잡한 파괴 현상으로서, 간단히 설명할 수 없는 복잡한 현상을 수반한다. 특히, 화인블랭킹법은 일반 전

\* 주저자, 경기공업대학 금형설계과 (ljk003@kinst.ac.kr)  
주소: 429-792 경기도 시흥시 정왕동 3가 102, Tel: 031-496-4714  
† 경기공업대학

단 과정에서보다 가공 인자들이 많고 극히 좁은 전단영역에서 복잡한 변형을 하기 때문에 이론적으로 정확한 해를 구하는 것은 매우 어렵다<sup>(3)</sup>. 최근에 Faura<sup>(4)</sup>, Brokken,<sup>(5)</sup>은 전단 과정에서 최적 틈새에 관하여 유한요소법을 이용 해석하여 재료두께에 대한 틈새를 예측하였으나 실험적 고찰이 없었고, Takemasu, Ozaki,<sup>(6)</sup>등은 입자유동 모델에 의한 전단가공의 수치해석을 하였으나 실험적 뒷받침이 없었다. 이와 같이 최근에 전단기구의 해석방법으로 유한요소법이 이용되고 있으나, 전단가공 기구에서 균열의 발생, 성장 및 파단면의 생성 등 전단부의 변형거동을 명확하게 해석한 것은 아직도 미흡한 상태이다.

따라서, 화인블랭킹의 메카니즘을 이해하고, 실제적인 문제점을 해결하기 위해서는 적극적인 연구가 필요하다. 대부분의 소재는 최종 제품형상으로 마무리 될 때까지 1회 이상의 가공 공정이 필요하다. 가공방법으로는 절단, 연삭, 용단, 전단 등을 들 수 있으나, 프레스와 금형에 의한 전단가공은 가공속도 뿐만 아니라 복잡한 이형윤곽 판재를 1회의 전단공정으로 정밀하게 가공하는 것은 다른 방법으로 대체할 수 없을 정도로 중요하다.

본 연구에서는 화인블랭킹 과정에서의 복잡한 변형을 해석하고자 대변형(large deformation) 이론의 고찰과 편치 침입량 및 V형 압입량의 사용유무, 피가공판재의 경도값의 대소 및 피가공재에 함유되어 있는 개재물에 따른 전단부의 변형 거동, 그리고 균열발생 여부를 전단 단계별 실험을 통하여 연구하였다.

## 2. 정밀전단의 대변형이론

Green과 Cauchy의 변형률 텐서에서의 대변형(large deformation)은 보통 2차의 변위구배를 포함하고 있는 해석에 사용되는 것으로, 수학적 복잡함을 피하기 위하여 Hsu가 균질(homogeneous) 변형이라고 가정한 이론<sup>(7)</sup>을 적용하였다. 이것은 변형율의 상태가 수직 변형율과 전단 변형율 성분에 의한 것 뿐만 아니라, 강제회전과 주변형률 축의 방향과 주변형률에 의한 것이라는 것을 설명하고 있다. 최근 이와 같은 이론적 접근은 금속판재(sheet metal) 가공과정에 적용되고 있다<sup>(8)</sup>.

Fig. 1에 나타낸 xy좌표면상, 균질의 대변형(large homogeneous deformation)에서 실선으로 된 사각형 부분은 초기 가공전의 상태이고, 점선의 평행사변형 부분은 가공후의 상태이다. 좌표축은 공간상에 고정 되어있고, 실선과 점선

으로 된 그리드 사이의 변형은 밀접한 행렬형태의 변환으로 표현되는 것으로 이해된다. 따라서, 변형이 균질이라면, 다음과 같이 변환된다.

$$\begin{cases} P_1' = a_{xx} P_1 + a_{xy} P_2 \\ P_2' = a_{yx} P_1 + a_{yy} P_2 \end{cases} \quad (1)$$

여기서  $P_1$ 과  $P_2$ 는 변형되지 않은 절점의 좌표이고,  $P_1'$ 와  $P_2'$ 는 같은 좌표축에 대한 변형후 같은 절점에 관한 값이고,  $a_{xx}, a_{xy}, a_{yx}, a_{yy}$ 는 상수이다. 더욱 간단하게 식 (1)에서 변환은 다음과 같은 행렬형으로 표현될 수 있다.

$$[P'] = [A][P] \quad (2)$$

만약 두 개의 연속적인 변형이 발생한다면, 변환은 식 (1)에 의해 표현되고, 다음과 같은 변환이 뒤따른다.

$$\begin{cases} P_1'' = b_{xx} P_1' + b_{xy} P_2' \\ P_2'' = b_{yx} P_1' + b_{yy} P_2' \end{cases} \quad (3)$$

이것은 전 행렬형의 변환과 등가이므로 다음과 같이 된다.

$$\begin{cases} P_1'' = c_{xx} P_1 + c_{xy} P_2 \\ P_2'' = c_{yx} P_1 + c_{yy} P_2 \end{cases} \quad (4)$$

행렬 표시법으로 식 (1)과 (3), 그리고 (4)는 식 (5)와 같이 된다.

$$\begin{Bmatrix} c_{xx} & c_{xy} \\ c_{yx} & c_{yy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} b_{xx} & b_{xy} \\ b_{yx} & b_{yy} \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} a_{xx} & a_{xy} \\ a_{yx} & a_{yy} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

c와 a와 b 값의 관계는 행렬 곱셈법칙에 의해 결정된다. 행렬 (2)는 초기 구성을 변화시키는 일반적인 선형 변환을 나타낸다.

재료의 비압축성으로 변하지 않고 남아있는 물체의 면적(혹은 체적)의 상태와 관련된 행렬을 구속해야만 한다. 즉,

$$|A| = 1 \quad (6)$$

그래서 행렬식 (2)에서 4개의 성분은 단지 3개만이 독립적이다.

모든 2D 변형의 경우에 순수전단을 가시화하는 것이 가장 쉽다. 명백하게 이 변형에 대한 행렬은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} e^\epsilon & 0 \\ 0 & e^{-\epsilon} \end{pmatrix} \quad (7)$$

여기서,  $\epsilon$ 와  $-\epsilon$ 은 각각 가장 많이 인장되고, 가장 많이 압축된 섬유조직에서의 변형률이다. 일반적인 조건에서 변형에 대한 행렬은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^\epsilon & 0 \\ 0 & e^{-\epsilon} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \quad (8)$$

구속이 있는 특별한 경우 식 (8)은 다음과 같이 된다.

$$\begin{pmatrix} a_{xx} & a_{xy} \\ a_{yx} & (a_{xy}a_{yx} + 1)/a_{xx} \end{pmatrix} \quad (9)$$

식 (9)는 3개의 독립변수를 가지고 있다. 단지 2D 변형에서 발생하는 변화만을 나타내는 행렬식 (8)과 가장 일반적인 변형을 나타내는 행렬식 (9) 사이의 링크를 찾기 위하여 행렬식 (8)에 회전을 더해 줄 수 있다. 그러면,

$$\begin{pmatrix} a_{xx} & a_{xy} \\ a_{yx} & (a_{xy}a_{yx} + 1)/a_{xx} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \omega & -\sin \omega \\ \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cosh \epsilon + \sinh \epsilon \cdot \cos 2\phi & \sinh \epsilon \cdot \sin 2\phi \\ \sinh \epsilon \cdot \sin 2\phi & \cosh \epsilon - \sinh \epsilon \cdot \cos 2\phi \end{pmatrix} \quad (10)$$

식 (10)을 풀면, 다음을 얻는다.

$$\begin{aligned} \tan \omega &= (a_{yx} - a_{xy}) / (a_{xx}^2 + a_{xy}a_{yx} + 1) \\ \cosh \epsilon &= \sqrt{\{(a_{xx}^2 + a_{xy}a_{yx} + 1)^2 + (a_{yx} - a_{xy})^2 a_{xx}^2\} / 2a_{xx}} \\ \sin 2\phi &= \frac{2a_{xx}[a_{yx}(a_{xx}^2 + a_{xy}^2) + a_{xy}]}{\sqrt{\{(a_{xx}^2 + a_{xy}a_{yx} + 1)^2 + (a_{yx} - a_{xy})^2 a_{xx}^2\}}} \\ &= \frac{2a_{xx}[a_{yx}(a_{xx}^2 + a_{xy}^2) + a_{xy}]}{\sqrt{\{(a_{xx}^2 + a_{xy}a_{yx} + 1)^2 + (a_{yx} - a_{xy})^2 a_{xx}^2 - 4a_{xx}^2\}}} \quad (11) \end{aligned}$$

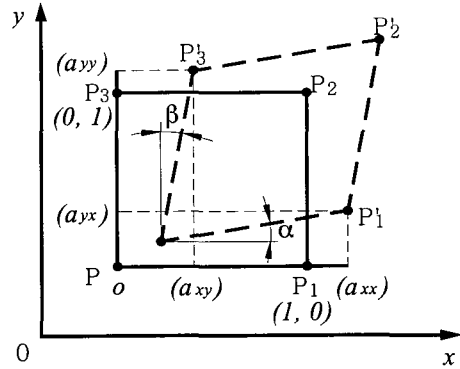


Fig. 1 Two - dimensional finite deformation

임의의 2D 변형은 순수전단과 회전으로 나뉘어질 수도 있고, 또는 단순전단에 회전을 더한 것이나, 또는 다른 방식이 있을 수 있고, 각기 모든 방식들은 동등하게 유효하다. 그러나, 실제 측정을 단순화하기 위하여 위 식들의 직접적인 적용은 가장 적합한 선택이다. 평면변형률에 대하여 두께방향의 변형을 무시하고 있는 2D 변형의 위 식들을 바로 사용할 수 있다. 축대칭 변형에 대해서는 일반적으로 편치의 직경비가 블랭크의 두께에 비하여 큰 상태하에서의 실제적인 사용시 원주방향의 변형률을 무시하는 것이 허용된다. 그러므로, 위 식은 또한 직접 적용할 수 있다. 등가 변형률은 다음과 같다.

$$\bar{\epsilon} = \sqrt{(2 \times (\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_3^2)) / 3} \quad (12)$$

원주방향의 변형률을 무시할 때, 등가 변형률은 주변형률에 비례한다.

### 3. 전단 단계별 실험

#### 3.1 실험재료

본 실험에 사용한 피가공재는, Table 1과 2와 같고 사용할 프레스의 용량 및 V형 압입링(V-Indenter ring)의 작용 압력을 고려하여, 두께 3.0mm의 냉간압연된 상용 순수 알루미늄 판재(Al 1050-0재, Al 5052-H재)를 선정하여 Fig. 2와 같이 70mm×40mm의 직사각형 단면을 2개의 대칭부분으로 나누어, 각 시험편의 단면부는 깨끗하게 다듬질된 상태에서 정밀전단 실험을 함으로써, 피가공판재의 전단변형부의 소성유동을 관찰할 수 있도록 하였다.



Fig. 2 The experimental sequence

Table 1. Chemical composition of materials

Chemical Element	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
Materials								
Al1050-O	99.50	0.25	0.40	0.05	0.05	0.05	0.05	0.03
Al5052-H	99.00	0.25	0.40	0.10	0.10	2.2-2.8	0	0

Table 2. Mechanical properties of materials

Mechanical properties	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Micro Vickers Hardness (Hv)
Materials			
Al1050-O	93.1	6.0	52.4
Al5052-H	176.4	18	107.2

### 3.2 실험장치 및 조건

본 실험에 사용한 실험장치는 Fig. 3과 같은 금형을 Fig. 4에서와 같이 범용 크랭크 프레스에 회전수(rpm)조절용 모터를 장착하여 전단속도를 조절할 수 있도록 하였고, 프레스에 Fine-Blanking금형을 장착하여 프레스의 램을 조절하여 펀치의 침입량을 변화시킬 수 있도록 하였다.

정밀전단에 있어서 여러 가공조건이 있으나, 가장 큰 영향을 미치는 인자는 펀치와 다이 사이의 틈새(clearance)로써, 피가공판 두께의 0.5%로 하였고, 블랭크홀터력은 전단하중의 40%를 적용하여, V형 압입링(V-Indenter ring)이 피가공판재의 전단변형부(transformed zone) 주위에 완전히 침입하여 피가공판재를 고정할 수 있도록 하였다. 또한, 카운터펀치력은 전단하중의 20%를 적용하여, 펀치 침입시 급힘방지 및 제품(blank)을 취출(ejecting)할 수 있도록 하였다. 여기서, 피가공판재의 두께방향의 변형은 없고, 카운터펀치는 블랭킹펀치 보다 작은 힘으로 펀치 진행방향으로 동시에 같은 속도로 작동된다. 전단속도는 일반전단가공에

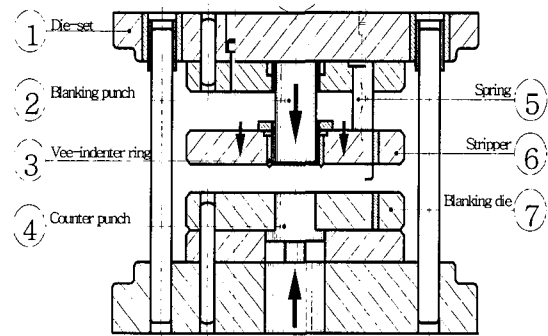


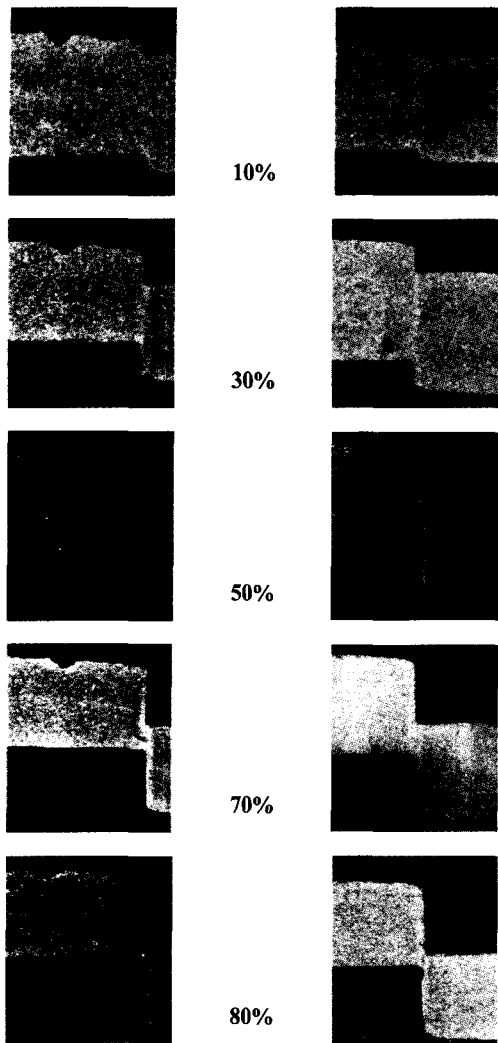
Fig. 3 Fine-Blanking die

비하여 아주 느린 37.5mm/sec로 일정하게 하였다.

또한, 블랭킹펀치 침입량에 따른 전단변형부의 소성유동 및 균열(crack) 발생여부를 관찰하기 위해, Fig. 5에서와 같이 피가공판 두께의 10%, 30%, 50%, 70%, 80%이상 단계별로, 블랭킹펀치 침입을 증가시켜 전단실험을 하였다. 또한 V형 압입링의 사용유무에 따른 영향을 관찰하였다.



Fig. 4 Experimental of Fine-Blanking die set up



(a) with V-Indenter ring (b) without V-Indenter ring

Fig. 5 Steps of the experimental procedures (AL 1050-0)

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 전단부 변형거동

정밀전단에서 전단변형부의 전형적인 응력상태는 Fig. 6 과 같고, 피가공재료는 대부분 전단응력에 영향을 받는다. SEM을 이용하여 피가공판재의 전단변형부 및 V형 압입링 부의 재료변형거동을 검정한 결과를 Fig. 6의 소성영역(plastic zone)으로 표시하여 나타내었다. Fig. 6의 소성영역에서 전

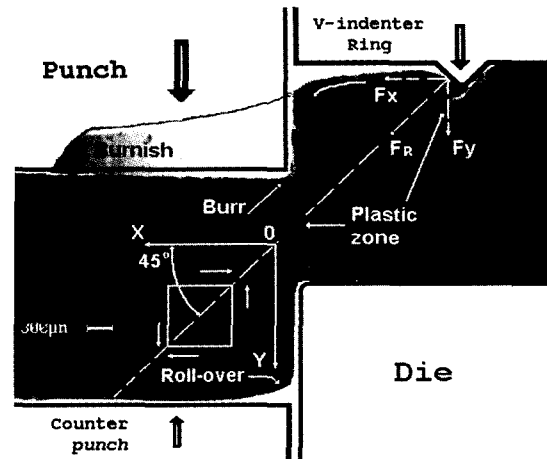


Fig. 6 Micrograph showing metal plastic Flow (Al 1050-O) (Penetration depth of punch: 50% clearance : 0.5% of t)

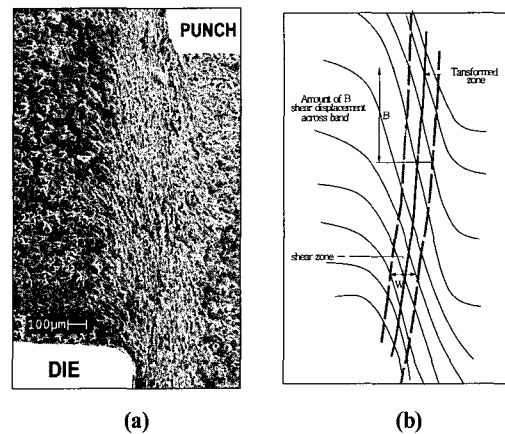


Fig. 7 Micrograph (a) and schematic (b) of a shear band in a plate of blanked medium Al 1050-O produced by find-blanking showing the transformed zone and the zone of strain localization

단면을 중심으로 좌우측에서 주미소인장변형을 방향( $\psi + \omega$ )은 약  $45^\circ$  방향으로서, 정성적으로 순수전단 경향과 일치하고 있음을 알 수 있었다. Fig. 7에 마이크로그래프(a)와 도식적인 방법(b)으로, 변형영역의 분포를 나타내었다. 결과적으로 정밀전단과정에서의 변형은 순수전단변형의 일종이라는 것을 명확히 할 수 있었고, 이 결과는 FEM에 의한 해석결과와 잘 일치하고 있다.

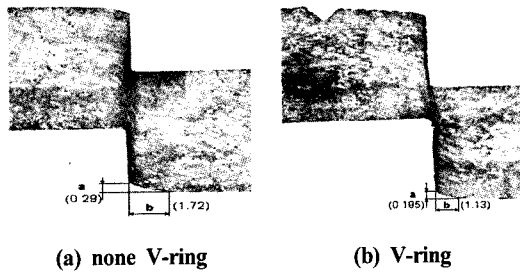


Fig. 8 Roll-over observation

### 4.2 V형 압입링에 의한 영향

V형 압입링의 사용유무에 따른 재료의 변형거동을 고찰한 결과, 동일한 변형형태를 나타내었고, 균열(crack) 발생 여부를 관찰한 결과 V형 압입링을 사용했을 경우에는, 피가공재두께의 80%이상에서도 균열발생이 없었으나, V형 압입링을 사용하지 않았을 경우에는 피가공재두께의 75%에서 균열이 발생함을 알 수 있었다(Fig. 5). 따라서, V형 압입링은 균열발생을 감소시켜 파단을 방지하므로, 깨끗한 전단면(burnish)을 형성하는데 큰 영향을 미치고 있는 것으로 해석된다. 이와 같은 결론은, V형 압입링의 사용목적은 전단변형부의 압력을 극대화시켜, 피가공재의 연성이 증가한 상태에서 전단함으로써, 전단면이 증대되는 것이 결론의 의미를 뒷받침한다. 또한, 제품(blank)의 모서리처짐(roll-over)을 측정할 결과, V형 압입링을 사용하였을 때, 작게 나타나는 좋은 결과를 얻었다.

이 처짐현상은, 제품의 사용면의 두께와 직각 정밀도에 영향을 미치기 때문에 작은 값을 갖는 것이 좋은 결과이다. Fig. 8에 나타내었고, SEM으로 측정하였다.

### 4.3 피가공재의 경도값에 의한 영향

Al 5052 경질재를, V-형 압입링을 사용하지 않은 조건으로 전단하여, Al 1050 연질재와의 소성유동상태를 비교한 결과, 경질재에서의 소성유동은 매우 작게 나타났고, V-형 압입링을 사용한 조건에서도 큰 변화는 없었다. 이와 같은 현상은 여러 가지 영향이 있겠지만, V-형 압입링의 균일한 압력부족으로, 전단변형부에 압력을 극대화시키지 못하여, 피가공재의 연성을 증가시키지 못했기 때문이라 고찰되지만, 재료자체의 연성이 부족한 것이 주원인이라 생각된다.

이와 같은 결과는 동일가공조건에서 실험한 후, 전단변형부 및 그 근접부의 경도값을 측정할 결과, 경도값이 큰 쪽에서만 균열이 발생하고 있는 것이 그 의미를 확실하게 한다.

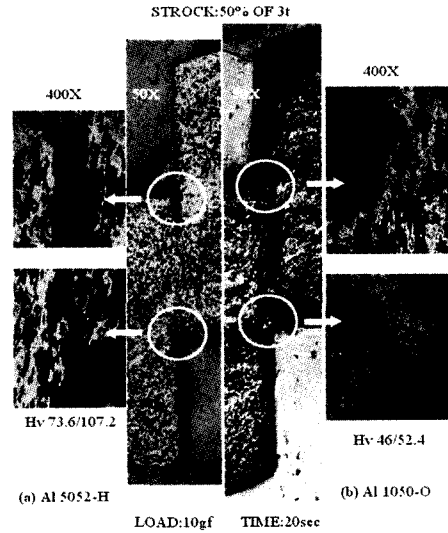


Fig. 9 Distribution of micro-hardness in the plastic zone

그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9는 피가공판재두께의 50%를 전단한 후에, 하중: 0.098 N, 시간: 20sec로 경도를 측정할 것으로 (a)는 Al 5052-H재의 평균값으로 Hv107.2는 base부, Hv73.6은 전단변형부의 경도값이다. (b)는 Al 1050-0재의 평균값으로, Hv52.4는 base부, Hv46은 전단변형부의 경도값으로, 비교하여 나타내었다.

균열발생의 원인을 좀더 명확하게 하기 위해, SEM촬영을 하여 재료 입자의 크기를 비교한 결과, Al 5052-H재에서는 미소 유동이 있는 상태에서 균열이 발생하였으나, Al 1050-0재에서는 전단선의 45° 방향으로 크게 유동하고 있음을 고찰할 수 있었고, 균열이 발생하지 않았다(Fig. 9). 결과적으로 정밀전단과정에서 균열 발생 방지는, 최소한 전단변형부의 경도값을 낮게하여, 재료의 유효 소성변형능을 증가시켜 주어야 한다고 생각되며, 그 방법으로는, 연한 풀림(soft annealing)처리 방법이 가능하다고 고찰된다. 또한, 균열의 크기는, 펀치 날끝부 보다, 다이 날끝부가 크게 나타난 것으로 보아, 초기균열은 다이 날끝부의 측면으로부터 발생되는 것을 고찰할 수 있었다. 이와 같은 현상은 일반적으로 전단과정에서 펀치 날끝부의 피가공재에는 압축력이, 다이 날끝부의 피가공재는 인장력이 작용하는 것으로 고찰된다. 이 결과는 제품(blank) 모서리의 처짐(roll-over)은 다이쪽에서, 거스러미(burr)는 펀치쪽에서 형성되는 것이 그 결과를 더욱 확실하게 한다. 결과적으로 펀치쪽의 압축응력

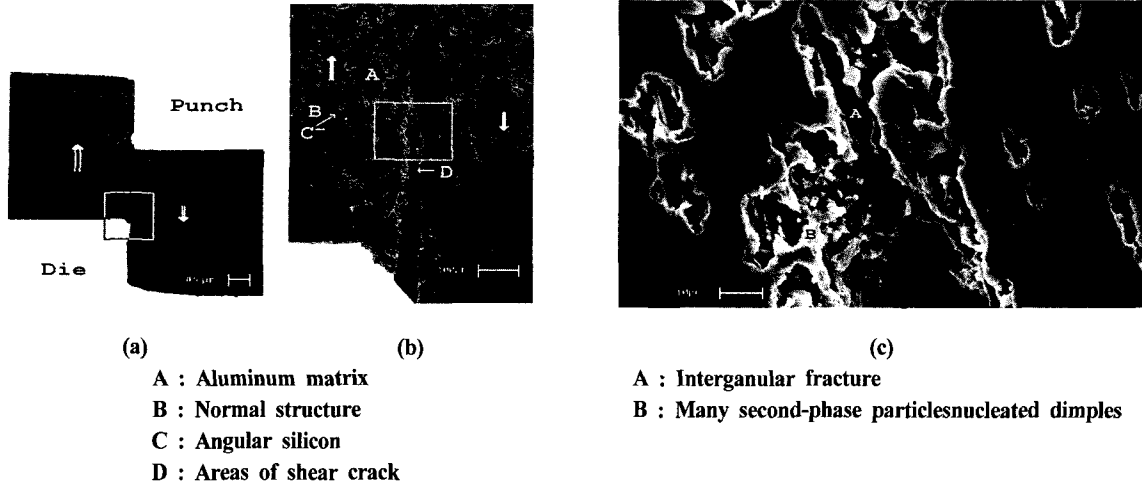


Fig. 10. An SEM view of the surface of the blanking-test crack in Al5052-H. Alloy SEM (Gold shadowed)  
 (a)42×(b)280×(c)2850×

이 다이쪽의 인장응력보다 작기 때문에 균열이 발생하는 것으로 고찰된다.

#### 4.4 개재물(inclusion)에 의한 영향

연성재료에서 균열의 발생 원인을 좀더 명확하게 고찰하기 위해 개재물(inclusion)에 대하여 고찰한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 이 개재물들은 공동(void)이 생성되는 곳으로 연성파괴와 나아가서는 재료의 성형성에도 중대한 영향을 미친다. 이 개재물들은 다양한 형태의 불순물(impurity)들과 산화물, 탄화물 및 황화물과 같은 제2상입자(second-phase-particle)들로 되어있고, 이러한 개재물의 영향은 이들의 형상, 경도분포 및 체적비와 같은 인자들에 따라 다르다. 따라서 이 개재물들의 체적비가 클수록 재료의 연성을 저하시키고, 공동(void)을 유발시키며, 개재물과 모재의 경계면에서 결합강도를 약화시키는 영향을 미치고 소성변형 중에는 공동을 형성하고 취성 때문에 잘게 부서지기도 한다. 결과적으로 화인블랭킹시 연성재료에서의 균열 발생 원인은 피가공 재료에 함유되어 있는 개재물과 제2상 입자에 의한 공동현상에 의한 영향이 크다고 고찰된다.

### 5. 결론

본 연구는 화인블랭킹시 전단 단계별 변형거동에 관한 연구로서, 전단시 재료변형거동의 경향과 균열발생에 영향을 미치는 인자에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 화인블랭킹에서 전단부의 재료 변형 거동은 정성적으로 순수전단 경향 과 일치하고 있음을 알았다.
- (2) V-Indenter ring의 사용유무에 따른 재료 변형형태는 순수전단 경향과 같았으나 균열발생을 감소시키는 영향을 미치고 있음을 알았고, 또한, 제품의 모서리 처짐(roll-over)을 작게 하는 좋은 결과를 얻었다. 이 처짐 현상은 제품의 사용면의 두께와 직각 정밀도에 영향을 미치기 때문에 작은값을 갖는 것이 좋은 결과이다.
- (3) 피가공재의 경도값에 의한 영향을 살펴보면 경도값이 큰쪽이 균열발생을 쉽게 유도함을 알았다. 따라서, 화인블랭킹 과정에서 균열발생 방지는 전단부의 경도값을 낮게하여 재료의 유효 소성변형능을 증가시켜 주어야 한다고 고찰되며, 연한 풀림(solt annealing) 처리 방법이 필요하다.
- (4) 전단변형부에서 균열의 크기는 펀치 인선부 보다 다이 인선부에서 크게 나타난 것으로 보아 초기균열은 다이 인 선부의 측면으로부터 발생되는 것을 고찰할 수 있었다. 이와 같은 현상은 펀치 인선부는 피가공재에 압축력이 작용하나, 다이 인선부의 측면에는 인장력이 작용하여 압축력보다 인장력이 크기 때문에 균열이 발생하는 것으로 판단된다.
- (5) 연성재료의 화인블랭킹 시 균열발생 원인은 피가공재료에 함유되어 있는 개재물에 의한 영향으로 알루미늄의 경우 탄화물에 의해 공동현상이 발생되며 이 공동(void)에 의해서 균열이 발생원인임을 알았다.

### 참고 문헌

- (1) F. Bösch. "FeinTooling Information." Vol. 30. Feintool AG Lyss. 1999.
- (2) F. Bösch. "FeinTooling Information." Vol. 32. Feintool AG Lyss. 1999.
- (3) 이종구, 오환섭, "유한요소법을 이용한 정밀전단 변형부의 응력해석" 한국공작기계학회지, 제8권, 제6호, pp. 84~85, 1999.
- (4) Faura F., Garcia A., Estrems M., Finite Element Analysis of Optimum Clearance in the Blanking Process, JMPT, pp. 121~125. 1998.
- (5) Brokken D., Brekelmans W. A. M., Baaijens F. P. T., Numerical analysis of the metal blanking process, Eindhoven University of Technology, The Netherlands, pp. 665~668. 1996.
- (6) Takenasu T., Ozaki T., Yamasaki S., Numerical Analysis of Shearing of Sheet Metal by Particle Flow Medel, JSTP, Vol. 36, No. 418, pp. 1318~1323. 1995.
- (7) T.C. Hsu, A Study of Large Deformation by Matrix Algebra, J. Strain Anal., pp. 313~320, 1966.
- (8) Journal of Materials Precessing Technology Vol. 66, pp. 258~263. 1997.