

# 유한요소법을 이용한 정밀전단 변형부의 응력해석

이종구\*, 오환섭\*\*

## The stress Analysis in the Fine-blanking deformation zone by the application of the FEM

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

### Abstract

The goal of this study is to analyse the stress and the strain occurring within the work piece at the fine-blanking process and hence to assume the size, direction and a distribution chart of the shearing stress as the penetration of the punch is being increased through the application of the FEM. For this analysis we introduced the piece-wise linear method in the non linear structural analysis program for large deformation sheet metal forming and we defined it as the problem of the non linear contact. Therefore, we modeled the above problems as quadratic-nodded axi-symmetrical elements for the characteristics of the work piece. From the result of this analysis, it was found that the shearing stress is a great deal occurred on the surface of the work piece during the beginning process of the punch penetration and its effect is expected to influence importantly for the formation of burnish because the deeper is the penetration of the punch in the narrow clearance zone, the greater is the degree of the strain stress.

**Key Words :** Punch penetration(펀치 침입), Burnish(깨끗한 전단면), Clearance zone(틈새 영역), Quadratic-nodded(4절점)

### 1. 서론

정밀 전단가공은 기계, 자동차, 전기전자, 우주항공산업 을 비롯한 기타산업의 기반기술로서 대량생산을 할 수 있는 매우 중요한 방법이다. 갈수록 공업제품들을 고정밀도 화, 고품질화가 크게 요구되는 반면 형상의 복잡화 등 엄

격해진 요구조건 그리고, 다품종 소량생산과 신소재에 대한 대응 및 기계적 특성 등이 중요하게 요구 되어지고 있다. 이와 같은 요구를 받아 들여야 하는 제품중에서 소재로 쓰이는 금속판재는 전단과정이 일반 가공공정으로 분류되고 있으나, 최근 유한변형의 확립에 의해 여러종류의 소성가공법에 적용되고 있다. 그러나, 정밀전단법에 있어

\* 조선대학교 기계공학부  
\*\* 조선대학교 대학원 기계공학과

서 이론해석은 많지 않다. 그 이유로는 전단과정에서의 피가공재는 펀치와 다이의 틈새(clearance)에서의 변형, 즉 전단변형부(shear zone)의 극히 좁은 영역에서 가공초기에 펀치침입에 의해 소성변형, 전단, 균열의 발생 성장과 가공후기에 파단을 동반하는 복잡한 변형을 하기 때문이다. 또 다른 이유로서는 이와 같은 복잡한 변형에 최적의 가공조건을 적용하기가 용이하지 못하기 때문이다. 특히 파단에 관한 해석은 아직 미미한 상태로서 대부분 전단공정에 관한 해석은 균열발생전의 해석에 국한되어 있고, 또한 대변형, 응력구배하에 있어서 균열의 발생조건과 회복조건, 균열의 거동을 수치화하기 위한 이론이 충분히 확립되어 있지 못했기 때문이라 생각된다.

Takaishi<sup>(1)</sup>는 전단가공에 유한요소법을 이용하여 펀치하중 등을 유추하였으나, 펀치침입이 2.3 $\mu$ m으로 한정된 해석에 그쳤고, Koga<sup>(2)</sup>는 점소성(visioplasticity)에 의한 전단가공현상을 해석한 결과 균열발생 주변의 정수압 성분이 작고, 인장응력성분 증가에 의해 균열이 발생하는 것을 추측하였다.

Takemasu<sup>(3)</sup>는 유한요소법을 기본으로 하는 입자유동모델을 이용한 해석을 통하여 재료의 변형거동과 가공하중과의 관계가 실험결과와 일치한다고 하였으나, 펀치침입량이 0.75mm에 한정된 일반전단 해석으로서 정밀전단(fine blanking) 특성의 정확한 해를 구하지는 못하였다.

본 연구에서는 최근 십수년간 발표된 일반전단 및 정밀전단 가공특성에 관한 해석조건 등을 검토하였고, 유한요소법에 의한 모델링으로 최근 대변형 금속성형의 상용비선형 구조해석 프로그램인 ABAQUS/Standard(Version 5.7)<sup>(4)</sup>을 이용하여 정밀전단(fine-blanking) 과정에서 일어나는 응력과 변형의 크기, 방향 및 그 분포도를 해석하였다.

## 2. 정밀전단이론

금속판재의 일반적인 가공방식은 Fig. 1에서와 같이 평행한 2단에 의한 전단가공(Blanking)으로 축대칭 및 평면 변형을 문제로서, Punch, Die, Blank-holder 등으로 구성되고 Blank-holder의 사용여부에 따라서, Fig. 2에서와 같이 6종류의 피가공판재의 구속방법이 있다.<sup>(5)</sup>

일반적으로 전단과정은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 (A) Punch, Die가 피가공판재에 접촉하고, 피가공재로부터 저항을 받으며, 압력을 가하면, 판재는 굽힘과 표면의 미소요철을 동반한다. (B) Punch, Die 날끝부의 피가공재의 항복

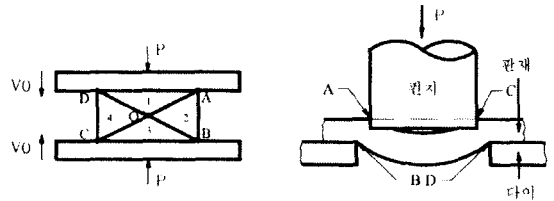


Fig.1 Shearing mechanism

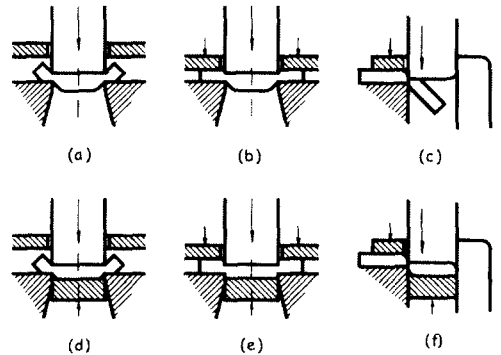


Fig.2 Constrained condition of work piece

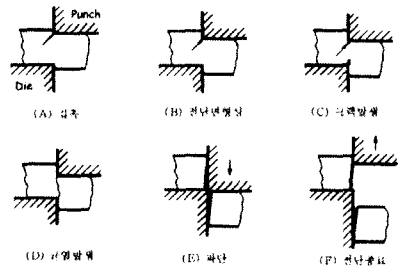


Fig. 3 Shearing force diagram and sheet metal deformation stage

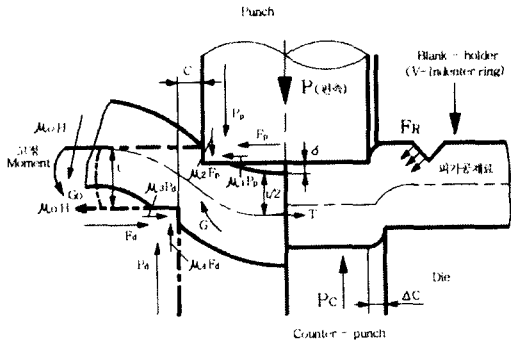


Fig. 4 External force acting on work-piece

에 따라 소성변형하며, 급속히 재료내부에 침입, 전단변형이 증대되어 전단면이 형성되고, (C) Punch, Die 날끝 측면부에 접촉하는 곳은 인장변형하고, 작은 균열이 발생한다. (D) Punch의 진행과 함께, 틈새(Clearance)부의 상, 하 균열이 성장하고, (E) 이에 따라 응력은 급격히 감소되어, Punch 밑의 피가공재는 파단집중의 최대가 됨에 따라, (F) 소재(Strip)로부터 전단완료된다. 이에 따른 전단하중 선도를 변형단계별로 나타내었고, 균열이 발생하면, 전단하중은 급격히 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 결과적으로 전단에서 큰 복잡한 변형을 하는 부분은 틈새부와 그 근접미소부에 집중되고 피가공판재가 받은 외력은 Punch, Die의 날끝부에 집중되지만, 작용력을 나타내면 Fig. 4와 같다.<sup>(6)</sup>

여기서, Punch면에는  $P_p$ ,  $\mu_1 P_p$ , Die면에는  $P_d$ ,  $\mu_3 P_d$ , Punch측면에는  $F_p$ ,  $\mu_2 F_p$ , Die측면에는  $F_d$ ,  $\mu_4 F_d$ ,의 분력이 작용한다.

또한, Blank-holder력이 작용할때의 힘  $\mu_0 H$ 와 Moment  $G_0$ 가 작용하고, Punch밑의 피가공판재의 중앙 종단면에는 인장력 T와 굽힘 모멘트 G가 작용한다.

문제를 간단히 하기 위해, Punch, Die는 평행직선날로 하고, 피가공판재는 단위폭으로 하여, 중앙종단면 좌측의 피가공판재에 작용력을 평행식으로 나타내면, 전단력 P는

$$P = P_p + \mu_2 F_p = P_d - \mu_4 F_d \quad (1)$$

$$T = 2\mu_0 H = (F_p - \mu_1 P_p) - (F_d - \mu_3 P_d) \quad (2)$$

또한, Die에 작용하는 측방력을 F로 하면

$$F = (F_d - \mu_3 P_d) - 2\mu_0 H = (F_p - \mu_1 P_d) - T \quad (3)$$

(1)식에 의해  $P_p = P - \mu_2 F_p$ ,  $P_d = P - \mu_4 F_d$  이것을

(3)식에 대입해서  $F_p$ ,  $F_d$ 를 구하면

$$F_p = \frac{\mu_1 P + F + T}{1 + \mu_1 \mu_2} \quad (4)$$

$$F_d = \frac{\mu_3 P + F + 2\mu_0 H}{1 + \mu_3 \mu_4}$$

따라서,

$$P_p = \frac{P - \mu_2 F - \mu_2 T}{1 + \mu_1 \mu_2} \quad (5)$$

$$P_d = \frac{P - \mu_4 F - \mu_4 \cdot 2\mu_0 H}{1 + \mu_3 \mu_4}$$

가 된다.

이와같이 전단가공은 진행과 동시에 복잡한 변형을 하며, 급속재료는 대부분 냉간가공으로서, 가공경화현상을 수반하기 때문에, 하중을 증가 시키지 않으면 안되며, 이때,  $(P_p + \mu_2 F_p)$ ,  $(P_d + \mu_4 F_d)$ ,  $(F_p - \mu_1 P_p)$ ,  $(F_d - \mu_3 P_d)$ 는 각각, 모멘트를 형성하고, 이 모멘트에 의해 피가공판재의 틈새부는 굽힘을 받고, 이로 인하여 Punch, Die 측면에서의 힘  $F_p$ ,  $F_d$ 가 발생한다. 즉,  $(P_p, F_p)$ ,  $(P_d, F_d)$  2힘의 조합이 일종의 썩기 작용을 하고, Punch의 침입량이 어느정도 초과하면, 날끝부 피가공판재는 변형능이 감소되고, 균열이 발생, 성장하여 전단이 종료된다.

Fine-Blanking은 전단변형부에 압축력을 증가시켜 인장응력 성분을 감소시키고, 냉간소성변형능을 증가시켜, 균열 발생 및 파단을 억제하는 정밀 소성가공 기술로서<sup>(7)</sup> Fig. 4의 우측과 같이 Counter-Punch력 ( $P_c$ )을 작용시켜 굽힘모멘트(G)를 제거하고, V-Indenter Ring력( $F_R$ )을 작용시켜, 굽힘에 의한 인장응력성분을 감소시키고, 완전한 재료구속을 할 수 있다. 따라서, (1)식에  $P_c$ ,  $F_R$ 을 대입하면,

$$\begin{aligned} P &= P_p + \mu_2 F_p \\ &= (P_d + F_R) + \mu_4 F_d + (P_c - F_R) \\ &= P_d + \mu_4 F_R + P_c \end{aligned} \quad (6)$$

과 같다.

전단변형부에 압축력을 증가시키고, 정수압을 유지할수 있도록 Punch와 Die사이의 틈새는 피가공판두께의 1%이하로 매우 작게 한다. 또한, Die의 날끝부에서 발생하는 초기균열을 방지하고, 압축효과를 얻기 위해 작은 반경(R)을 붙이는 것도 정밀전단법의 특징이다.

### 3. 유한요소해석

#### 3.1 유한요소모델의 구성

본 해석의 기본적인 정의는 비선형 접촉문제로서 모델은 Fig. 5와 같다. 모델은 크게, punch, counter punch, V-holder, V-Indenter Ring 피가공물로 구분되어지고, 가공물의 특성상 축대칭 문제로 모델링하였다. V-holder와 die는 그림에서 보는바와 같이 single point constraint를 이용하여 구속하는 방법으로 모델링되었고, punch와 counter punch는 그 경계면을 강제표면(Rigid Surface)으로 표현하여 해석하였다. 다음으로 피가공물의 표면을 위면은 punch와 아랫면은 counter punch와 접촉면(contact surface)으로 정의하였으며, 전단 변형부를 보다 세밀하게 모델링하였다. 이 때 피가공물의 진응력-진변형률 선도를 Data값으로 입력하는 방법으로, piece-wise linear 기법<sup>18)</sup>을 도입하여 구간 구간의 탄성계수를 외삽하는 방법으로, 비선형 접촉문제를 정의하였다.

피가공재는 상용순수 알루미늄 3.0mm로써 두께방향(y축)이 깊다고 가정하여, 평면변형을 문제로서, 4절점, 축대칭(Axisymmetric) 요소로서 총 1027개의 요소수와 1120개의 절점으로 구성하였다. 정밀전단가공 조건중에서 가장 중요한 Blanking-punch와 Die의 틈새(Clearance)는 Slave두께의 1%로 제한하고, 다이날끝의 모서리 반경(Die corner radius)은 0.2mm로 하여 초기 균열(Crack)이 발생되지 않도록 하였다.

punch와 counter punch는 Fine blanking의 특성상 동시에 작동하여야 하므로, 임의의 한점을 주고 이 절점(reference node)의 변위와 punch, counter punch의 변위가 동일하다고 가정하여 절점에 강제 변위를 주는 방법으로 하

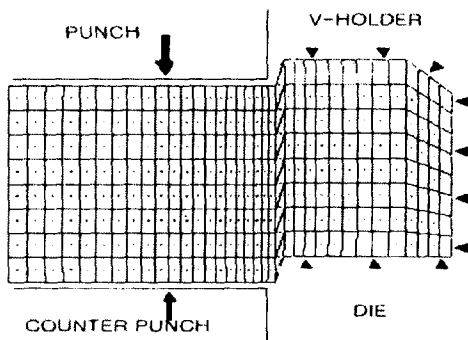


Fig. 5 Illustration of finite element modeling

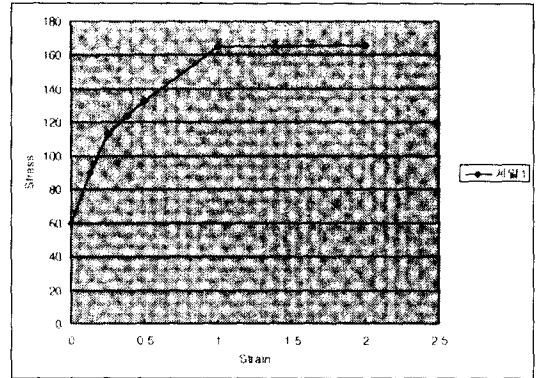


Fig. 6 S-S Curve

중을 가하였다. 이 때 초기 조건은 당연히 피가공재의 표면에 punch와 counter punch가 접촉되어 있는 상태로 출발한다. 그리고 피가공재의 물성치인 탄성계수= $6.9 \times 10^4$ , 포아송의비=0.33과 비선형부의 진응력-진변형률 선도를 Fig. 6과 같다.

#### 3.2 Implicit Calculation

지금부터 관련된 해석 과정을 고려해 보자. 그리고 중요하다고 생각되는 마찰력의 계산을 다시 한다.

Penalty method와 Lagrange multiplier method 모두 접촉 노드의  $f'_1$  와  $f'_j$ , ( $j=1,2,3$ )을 계산하는데 사용할 수 있으며, zero-penetration condition과 접촉 조건을 부가하기 위해 Lagrange multiplier method만을 선택한다.<sup>19)</sup>

접촉 접촉노드에 대해서는 다음 식을 얻을 수 있다.

$${}^t r_c = Q_c^{T'} \bar{N}_1 f_i$$

$$= \left[ Q_c^{T'} \bar{N}_1 \quad Q_c^{T'} \bar{N}_2 \quad Q_c^{T'} \bar{N}_3 \right] \begin{Bmatrix} f'_1 \\ f'_2 \\ f'_3 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

zero-penetration condition은

$${}^t \bar{N}_1^T Q_c u_c + {}^t p = 0 \quad (8)$$

접촉 조건은

$${}^t \bar{N}_1^T Q_c u_c + {}^t p_j = 0 \quad J = 2, 3 \quad (9)$$

식(6)을 식(8)에 대입하면

$$\begin{bmatrix} 0 & Q_c^{T'} \bar{N}_1 & Q_c^{T'} \bar{N}_2 & Q_c^{T'} \bar{N}_3 \\ -{}^i \bar{N}_1^T Q_c & & & \\ -{}^i \bar{N}_2^T Q_c & & 0 & \\ -{}^i \bar{N}_3^T Q_c & & & \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{Bmatrix} u_c \\ f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} r_c \\ p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{Bmatrix}$$

미끄럼 노드에 대하여,

$$\begin{aligned} {}^i r_c &= Q_c^{T'} \bar{N}_1^i f_1 + Q_c^{T'} \bar{N}_2^i \mu_s f_1^i v_{i2} / |{}^i V_i| \\ &+ Q_c^{T'} \bar{N}_3^i \mu_s f_1^i v_{i3} / |{}^i V_i| \\ &= Q_c^{T'} [{}^i \bar{N}_1 + {}^i C_2 \mu_s {}^i \bar{N}_2 + {}^i C_3 \mu_s {}^i \bar{N}_3] f_1 \end{aligned} \quad (11)$$

여기서,

$${}^i C_2 = {}^i v_{i2} / |{}^i V_i| = \cos \theta \quad (12a)$$

$${}^i C_3 = {}^i v_{i3} / |{}^i V_i| = \sin \theta \quad (12b)$$

식(12)에서,  $\theta$  는 미끄럼 방향과 단위 벡터  ${}^i N_2$ , 사이의 각을 의미한다. 식(8)과 식(11)을 조합하면,

$$\begin{bmatrix} 0 & Q_c^{T'} \bar{N}_1 + Q_c^{T'} ({}^i C_2 \mu_s {}^i \bar{N}_2 + {}^i C_3 \mu_s {}^i \bar{N}_3) \\ -{}^i \bar{N}_1^T Q_c & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_c \\ f_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} r_c \\ p \end{Bmatrix} \quad (13)$$

마찰 효과를 가지고, 함축적 과정에서 방정식을 풀기 위해 일반적인 형태로 쓸 수 있는데,

$$\bar{K} \bar{U} = \bar{R} \quad (14)$$

여기서,

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} {}^* K & -Q_c^T \\ -Q_c & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\bar{U} = \begin{Bmatrix} U \\ F \end{Bmatrix} \quad (16)$$

$$\bar{R} = \begin{Bmatrix} R \\ P \end{Bmatrix} \quad (17)$$

위에서  $Q_1$  과  $Q_2$  는 수직과 접선의 마찰효과에 기인한 것이다. 만약 접촉노드에 미끄럼이 없다면,  $Q_1 = Q_2$  이므로 행렬 계수  $\bar{K}$  는 대칭이다. 반면  $Q_1 \neq Q_2$  이면  $\bar{K}$  는 마찰 접촉 문제로 잘 알려진 비대칭이다. 식(4), (6) (17)에서 벡터  ${}^i F$  는 접촉노드에 관련한 미지 마찰력뿐만 아니라 미지 수직 접촉력을 포함하고 있다.

위의 기술에 기초하여 마찰 접촉 문제에 대한 함축적 해결과정은 일반적으로 다음과 같다.

1.  $t=0$  을 설정하고,  $\Delta t, \beta,$  와  $\gamma$  를 결정.
2. M과에서  ${}^o K$  와  ${}^o \sigma,$   ${}^o F,$   ${}^* K$  를 계산.
3.  ${}^o A = M^{-1} ({}^o R - {}^o F)$  을 계산.
4.  $\tau = t, t = t + \Delta t, i=0$  을 설정.
5.  ${}^o R$  과  ${}^i F$  을 계산.
6.  $i=i+1$  로 설정.
7.  ${}^i \sigma^{(i-1)}, {}^i F^{(i-1)},$  및  ${}^* R^{(i)}$  을 계산.
8. 접촉점  ${}^i L^{(i)}$  을 찾는다.
9. 접촉 상태나 미끄럼 상태에서 접촉 노드를 결정.
10.  $Q_1^{(i)}$  과  $Q_2^{(i)}$  으로부터  ${}^i p^{(i)}$  을 계산.
11.  $\bar{K}^{(i)}$  과  $\bar{R}^{(i)}$  의 형태.
12.  $\bar{U}^{(i)}$  즉  $\bar{U}^{(i)} = (\bar{K}^{(i)})^{-1} \bar{R}^{(i)}$  에 대하여 푼다.
13. 변위 즉,  ${}^i \bar{U}^{(i)} = {}^i \bar{U}^{(i-1)} + \bar{U}^{(i)}$  을 새롭게 한다.
14. 오류 확인. 만약 오류를 찾으면 (6)으로 가고, 아니면 (15)로 가라.

15. 만약 미끄럼 노드가 접촉노드이거나 결함이 있으면 (6)으로 가고, 아니면 (16)으로 가라.
16.  ${}^i V$  와 가속도  ${}^i A$  을 각각 계산.
17. 만약  $k < T$  이면 (4)으로 가고, 아니면 종료하라.

비교전적인 마찰 법칙의 수행은 특히, 탄젠트 상수 연산자가 마찰 요소관계와 관련하여 사용 될 때 더욱 더 복잡하게 된다. 미세한 미끄럼 없이  ${}^i r_{cf}$  를 먼저 평가해 보자. 증가량 분석에 대해 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta f_i = e_f \Delta u_i \quad (18)$$

더 나아가서, 다음의 관계를 만들 수 있다.

$${}^i f_j = {}^i f_j + \Delta f_j \quad (19)$$

$$\Delta u_{i,j} = {}^i \bar{N}_j^T Q_c u_c \quad (20)$$

$${}^i r_{cf} = {}^i r_{cf} - E_f \left[ Q_1^{T'} \bar{N}_2 \quad Q_2^{T'} \bar{N}_3 \right] \begin{bmatrix} \bar{N}_2^T Q_c \\ \bar{N}_3^T Q_c \end{bmatrix} u_c \quad (21)$$

여기서,

$$r_{cf} = \begin{bmatrix} Q_c^{T'} \overline{N}_2 & Q_c^{T'} \overline{N}_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_2 \\ f_3 \end{Bmatrix} \quad (22)$$

수직 접촉 계산을 수행하면, 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} K_f & Q_c^{T'} \overline{N}_1 \\ {}^t \overline{N}_1^T Q_c & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_c \\ f_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} {}^t r_c - {}^t r_c \\ {}^t r_c \end{Bmatrix} \quad (23)$$

여기서,

$$K_f = -E_f \begin{bmatrix} Q_c^{T'} \overline{N}_2 & Q_c^{T'} \overline{N}_3 \\ {}^t \overline{N}_2^T Q_c & {}^t \overline{N}_3^T Q_c \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$Q_c = \begin{bmatrix} Q_c^{T'} \overline{N}_2 & Q_c^{T'} \overline{N}_3 \end{bmatrix} C_2 \quad (25)$$

식(23)으로부터 수직접촉에 대한 반력과 강성행렬을 얻을 수 있게 되므로, 미세 미끄럼이 발생할 때 행렬계수가 결정된다. 이것은 3장에서 초기에 Punch와 Counter punch가 피가공물에 하중을 가하게 될 때, 수직접촉에 대한 정보를 얻을 수 있음을 의미하고, 초기에 작은 시간 단계를 가정하여 아래와 같이 각각의 증분에 대한 접촉문제를 해결할 수 있게 된다.

식(24)에서  $K_f$ 가 대칭행렬이기 때문에 식(23)에서 행렬 계수는 대칭행렬임이 분명하다.

미세 미끄럼이 발생할 때, 연속체 마찰 요소 관계를 사용할 수 있다. 작은 시간 단계를 가정 할 때 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta f_i = C_1 \Delta u_i + C_2 f_i \quad (26)$$

여기서,

$$C_1 = -E_f(1 - n \otimes n) \quad C_2 = -\mu n \quad (27)$$

이 때, 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} {}^t r_{cf} = & {}^t r_{cf} + \begin{bmatrix} Q_c^{T'} \overline{N}_2 & Q_c^{T'} \overline{N}_3 \end{bmatrix} C_1 \begin{bmatrix} {}^t \overline{N}_2^T Q_c \\ {}^t \overline{N}_3^T Q_c \end{bmatrix} u_c \\ & + \begin{bmatrix} Q_c^{T'} \overline{N}_2 & Q_c^{T'} \overline{N}_3 \end{bmatrix} C_2 f_1 \end{aligned} \quad (28)$$

식(8)과 식(27)을 조합하고, 수직 접촉을 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} K_f & Q_c^{T'} \overline{N}_1 \\ {}^t \overline{N}_1^T Q_c & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_c \\ f_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} {}^t r_c - {}^t r_c \\ {}^t r_c \end{Bmatrix} \quad (29)$$

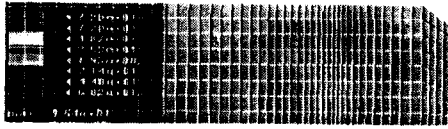
여기서,

$$K_f = \begin{bmatrix} Q_c^{T'} \overline{N}_2 & Q_c^{T'} \overline{N}_3 \end{bmatrix} C_1 \begin{bmatrix} {}^t \overline{N}_2^T Q_c \\ {}^t \overline{N}_3^T Q_c \end{bmatrix} \quad (30)$$

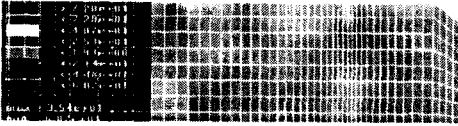
$$Q_c = \begin{bmatrix} Q_c^{T'} \overline{N}_2 & Q_c^{T'} \overline{N}_3 \end{bmatrix} C_2 \quad (31)$$

### 3.3 해석결과

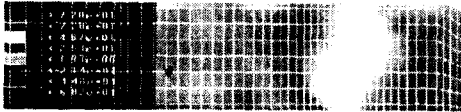
Fig. 7은 각 하중의 증분에 따른 전단 응력분포를 나타낸 그림이다. 해석 초기 상태는 punch, counter punch가 피가공물과 접촉면이 접촉되어있지 않다. 따라서 해석 단계는 크게 두 단계로 나누어지는데, 첫 번째 단계는 단순히 punch와 counter punch를 피가공물의 표면에 위치시키는 것이고 두 번째 단계는 punch와 counter punch가 동시에 같은 간격 즉 피가공재의 두께인 3mm를 유지하면서 하중을 가하는 것이다. Fig. 7에서 나타난  $t=1.0, 1.19, 1.73$  등이 의미하는 것은  $t=0.00 \sim 1.00$ 은 첫 번째 단계를 의미하는 것이고  $t=1.00 \sim 2.0$ 까지는 두 번째 단계를 의미한다. 두 번째 단계에서 punch의 강제 변위를 가공방향으로 2mm로 하였으므로  $t=1.5$ 는 2mm x 0.5인 1mm가 가공방향으로 punch와 counter punch가 강제 변형되었을 때의 응력 분포를 의미하는 것이다. 그림에서 보여지듯이  $\text{Inc}=80(t=1.73)$ 의 상태에서는 punch의 우측면과 피가공물과의 침투(penetration)가 발생하므로 더 이상의 계산 결과는 의미가 없다고 고려되어 생략하였다. Fig. 7에서 초기의 전단 변형부는 크게 두 부분으로 나누어지다가 중반 이후는 그 범위가 넓게 발생함을 알 수 있다. 이를 표로 표현한 것이 Fig. 8, (a), (b), (c)로서, node number 490부터 498 즉, 전단 변형부의 경계면에 위치한 각 절점에서 전단응력의 평균값을 나타낸 그림이다. 여기서 절점 490은 피가공재 전단면의 가장 아래쪽에 위치한 절점이고, 절점 498은 가장 위쪽에 위치하고 있어 절점 490에서 498까지 절점수가 증가하면 그 만큼 피가공재의 아랫면에서 윗면으로 위치가 이동한 것이다. Fig. 8, (a), (b), (c)는 y축은 전단응력 값을 나타낸 것이고 x축은 변위의 증분으로 표현되었는데, 당연히 punch의 변위가 증가함에 따라 전반적인 전단 응력값은 높게 나타난다. 그러나 여기서 눈여겨 보아야 할 것은 초기 (a)에는 피가공재의 표면에서 전



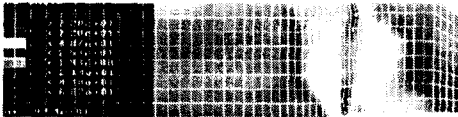
(a) Inc=20 t=1.00



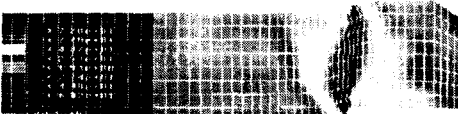
(b) Inc=30 t=1.00



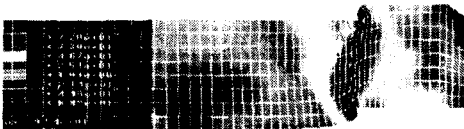
(c) Inc=45 t=1.00



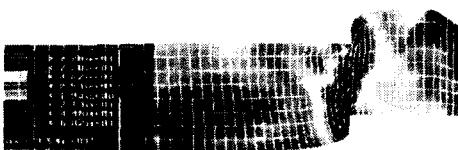
(d) Inc=50 t=1.00



(e) Inc=55 t=1.19



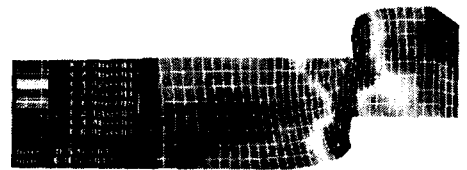
(f) Inc=60 t=1.31



(g) Inc=70 t=1.51

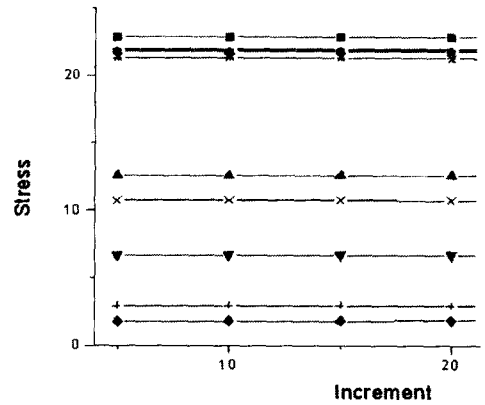


(h) Inc=75 t=1.64

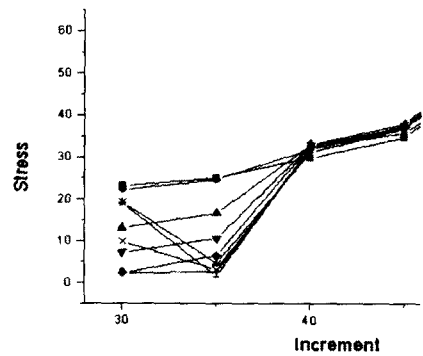


(i) Inc=80 t=1.73

Fig. 7 Equivalent shearing stress contour



(a)



(b)

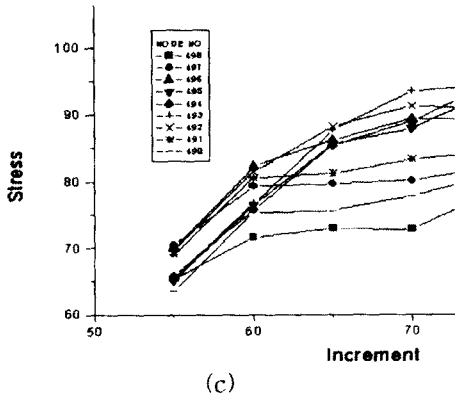


Fig. 8 Effective shearing stress Distribution punch penetration to about (a)10% ~ 30%, (b) 30 ~ 50%, (c) 50 ~ 80% of sheet material Thickness.

단응력의 값이 높게 나타나고 있으나, 중반부(b)에 이르러서는 복잡한 거동을 보이다가 변형의 후반부(c)에 이르러서는 피가공재의 중앙부에서 더 높은 응력의 분포를 보인다는 것이다. Fig. 8(b)의 inc=30에서 45로 변형되는 순간 피가공재의 상부는 계속 높은 응력의 수준을 보이지만, 하부에서는 순간적으로 응력값이 낮은 값을 보이다가 다시 회복하는 것을 볼 수 있다. 이를 종합해보면 변형의 초기에는 피가공재의 상,하부의 표면에서 높은 전단 응력을 보이지만 이후 변형이 진전함에 따라 상부, 중앙부로 높은 응력의 전이가 발생함을 알 수 있다. 그러나 Fig. 7에서 보여 지듯이 전단 변형부의 중앙부에 높은 전단력의 분포가 넓게 퍼져있다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문은 FEM을 이용하여 정밀전단과정에서 전단 변형부의 응력분포 상태를 해석한 것으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 펀치 침입 초기의 응력값은 피가공판재의 표면에 높게 분포하였다.
- (2) 펀치침입의 증가(변형의 증가)와 함께 전단 변형부를 중심으로 좌우측 및 피가공판 두께의 중앙에 높은 응력이 분포함을 알 수 있었다.
- (3) 펀치침입 중반이후의 높은 응력하에서 전단선은 펀치 진행방향으로만 변형하고 있음을 고찰할 수 있었다.

이와 같은 현상은 일반전단과정에서 나타나는 굽힘에 의한 측방력 발생은 작은 것으로 추측된다. 즉, 높은 정수 응력하에서 피가공재의 전단변형부는 연성이 증가되어, 편치진행방향으로 보다 쉽게 소성유동하고 있음을 의미하고, 이 소성유동은 균열을 발생시키지 않고, 다이홀면을 압출되듯이 슬라이딩 되면서 깨끗한 전단면(Burnish)을 형성할것으로 판단되며, 이와같은 결론을 규명하기위해 실험적인 연구가 필요하다고 생각된다.

#### 참고 문헌

- (1) 前田 禎三 論文集, 東京大學 工學部 精 機械 工學科., pp. 151~158, 1981.
- (2) N, Koga. "An Application of Visioplasticity to the Analysis of shearing phenomenon" Journal of the JSTP, Vol. 33. No. 383. 1992.
- (3) T.Takemasu. "Numerical Analysis of shearing of sheet Metal by Particle Flow Model" JSTP Vol. 36 No. 418, 1995.
- (4) ABAQUS/Theory Manual Ver 5.5.
- (5) 日本塑性加工學會誌. Vol. 35 No. 396. pp. 10~16. 1994.
- (6) 加 健三, 金屬加工學, 丸善(株). pp. 268~269, 1971.
- (7) K. Lange. "The Potential of the Fine-Blanking Technique" Feintoo AG, Lyss, SWiss, 1989.
- (8) D. Lloyd Smith, Mathematical programming Methods in Structural Plasticity. Springer-Verlag Wten-NewYork. No,299 pp. 83~111. 1990.
- (9) Z.H. Zhong. "Finite Element Procedures for contact-impact problems." Oxford university press. 1993.