韓國精密工學會 '96年度 春季學術大會論文集 pp.191~195

요소제거기법에 의한 판재 전단가공의 수치해석
(Numerical Analysis of Sheet Metal Shearing by the Element Kill Method)

고 대 철*, 김 병 민**, 최 재 찬**
* 부산대학교 대학원 기계설계공학과
** 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터

Abstract

Conventional single-side straight cutting of sheet metal is analyzed by the rigid-thermoviscoplastic finite element method. The FE-simulation is performed from initial stage to final stage of shearing process. The ductile fracture criterion and element kill method are used in the present work to estimate if and where a fracture occurs and to investigate the features of sheared surface in shearing process. The FE-simulation results are obtained for different clearances and these are compared with published experimental results. It is found that the results of the present work are in close agreement with published experimental results.

Key words : Shearing Process(전단가공 공정), FE-Simulation(유한 요소 시뮬레이션), Ductile Fracture Criterion(연성파괴기준), Element Kill Method(요소제거기법)

1 서 론

블랭킹(blanking), 피어싱(piercing), 트리밍(trimming) 등과 같은 전단가공 공정은 펀치와 다이를 이용하여 판재로부터 원하는 형상을 절단하는 가공방법이다. 전단가공은 경량의 제품 및 치수 정밀도가 우수한 형상의 제품을 얻을 수 있으며, 제품의 호환성이 높으므로 대량생산에 적합하다. 또한 가공의 자동화를 이루기 쉽고 작업시 고도의 숙련을 요하지 않으며 가공시간 및 노동력이 적게 드는 장점이 있다. 따라서 최근 산업계의 경량화, 소형화 및 고속화의 추세와 더불어 전단가공이 생산분야에서 차지하는 역할과 그 이용범위는 비약적으로 증가하고 있다.

전단가공에서는 펀치와 다이사이의 국부적인 영역에서 비탄성 대변형(large inelastic deformation)이 일어나므로 큰 변형이 집중되는 국소화 현상(localization)으로 인해 전단밴드가 형성된다. 이러한 전단밴드 내의 국소화 현상은 급속한 기공의 성장(void growth)과 합체(coalescence)를 야기하므로 최종적으로 변형소재는 전단파괴(shear fracture)를 일으키게 된다.

전단가공에서 소재의 변형 메카니즘에 관한 연구 내용은 크게 실험적 연구와 해석적 연구로 나뉘어지며 현재까지 많은 실험적 연구[1-7]가 수행되어 왔다. 실험에 의한 연구는 많은 시간과 비용을 초래하며, 이와 같은 실험적 연구를 통하여 재료 내부의 응력 분포, 변형률 분포, 재료 특성의 영향과 전단가공의 변형 메카니즘 등을 정확히 파악하는 것은 상당히 어렵다. 이러한 이유에서 전단가공 공정에 대한 해석적 또는 수치적 연구[8-12]의 필요성이 증대되었다. 그러나 최근에 발표된 일부 논문[13,14]을 제외하면 대부분의 수치해석적인 연구들은 전단가공 공정의 초기 단계인 파괴 시작 시점까지의 해석결과만을 제시하고 있으므로 파괴 시작 이후에 진행된 변형에 대해 그 결과를 적용하기에는 다소의 무리가 있다고 생각된다.

따라서 본 연구에서는 앞서 발표한 연구결과[14]를 적용하여 전단가공의 초기 단계에서 최종 단계까지 펀치 스트로크에 대한 재료의 변형거동을 수치해석하였다. 소성가공 문제의 수치해석에 널리 적용되고 있는 유한 요소법을 이용하였으며, 변형소재의 파괴를 예측하고 전단면의 형성과정을 관찰하기 위하여 연성파괴기준과 요소제거기법(element kill method)[15]을 도입하였다. 전단가공에 있어서 중요한 공정변수 중의 하나인 펀치와 다이사이의 클리어런스(clearance)를 달리하여 이에 따른 전단면의 형성과정을 관찰하였으며, 이러한 수치해석의 결과는 문헌상[16]에 제시된 결과와 비교된다.

2 이 론

본 연구에서는 전단가공 공정을 보다 실제에 적합하게 해석하기 위해서 강-열점소성 유한 요소법을 근거로 수치해석하였다[14].

2.1 변형해석을 위한 유한 요소 정식화

변형해석을 위하여 강-점소성 유한 요소법을 이용하였다. 이의 수식화 과정은 이미 많은 문헌[17,18]에 잘 알려져 있으므로 여기서는 간략하게 언급한다.

강-점소성 재료에 대한 범함수(functional), Π는 다음과 같다.

$$\Pi = \int_V E(\dot{\varepsilon}_{ij})\,dV - \int_{S_F} \bar{t}_i\, v_i\, dS \qquad (1)$$

여기서, E는 점소성 포텐셜, $\dot{\varepsilon}_{ij}$는 변형률속도, $\bar{t}_i$는 표면력, v_i는 절점속도를 나타낸다.

비압축성 조건을 고려하기 위하여 벌칙함수(penalty function), K를 도입하면, 위의 식(1)에 대한 일차 변분 범함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta\Pi = \int_V \bar{\sigma}\,\delta\bar{\dot{\varepsilon}}\,dV + K\int_V \dot{\varepsilon}_v\,\delta\dot{\varepsilon}_v\,dV - \int_{S_F} \bar{t}_i\,\delta v_i\,dS = 0 \qquad (2)$$

여기서, $\bar{\sigma}$는 유효응력, $\bar{\dot{\varepsilon}}$는 유효 변형률속도, $\dot{\varepsilon}_v$는 체적 변형률속도를 나타낸다.

위의 식(2)는 유한 요소 분할화과정을 거치면 절점속도가 미지수인 비선형 방정식이 되므로 뉴우톤-랩슨법(Newton-Raphson method)을 이용하여 해를 구하며, 초기 속도장은 직접 반복법(direct iteration method)을 이용하여 구한다.

2.2 온도해석 방법

온도해석의 지배방정식은 다음과 같이 표현되는 에너지 방정식이다.

$$k_1 T_{,ii} + \dot{r} - \rho c \dot{T} = 0 \qquad (3)$$

여기서 $k_1 T_{,ii}$는 열전달율, k_1은 열전도계수, $\dot{r}$는 열발생율, $\rho c \dot{T}$는 내부에너지율이다.

위의 식(3)을 변분 원리에 의해 정리하면 다음과 같다.

$$\int_v k_1 T_{,i}\delta T_{,i}\,dV + \int_v \rho c \dot{T}\delta T dV - \int_v k\sigma_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij}\delta T\,dV - \int_{S_q} q_n \delta T\,dS = 0 \qquad (4)$$

여기서, T는 온도, $\dot{T}$는 온도변화율, ρ는 밀도, c는 비열, k는 총에너지가 열로 바뀌는 비율을 나타내는 상수, q_n은 경계면, S_q을 가로지르는 열유동을 나타낸다.

위의 식(4)를 유한 요소 분할화한 뒤 유한차분 근사에 의해 선형화하여 온도장을 구한다. 또한 본 연구에서의 온도장은 변형해석의 결과와 연계(couple)되어 계산된다.

2.3 연성파괴기준과 요소제거기법

유한 요소법을 이용하여 전단가공 공정동안 나타나는 전단밴드의 형성에 의한 파괴의 기본적 유형과 전단면의 형성과정을 조사하기 위해서는 파괴의 예측과 파괴의 전파를 효과적으로 고려해야 한다. 이를 위해서 본 연구에서는 연성파괴기준과 요소제거기법을 도입하였다.

전단가공 공정동안 일어나는 파괴를 예측하기 위하여 다양한 하중조건에 적용될 수 있고 실험적 접근 및 수치적 계산이 용이한 Cockcroft-Latham[19]의 연성파괴기준을 이용하였다. 즉,

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \sigma^*\,d\bar{\varepsilon} = C \qquad (5)$$

여기서, $\bar{\varepsilon}_f$는 파괴시 유효 변형률, $\bar{\varepsilon}$는 유효 변형률, σ^*는 주인장응력의 최대치이며, C는 Cockcroft-Latham 상수이다.

여기서 전단가공 공정동안 주인장응력의 최대치가 일정하게 유지된다고 가정하면, 위 식(5)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} d\bar{\varepsilon} \approx C_1 \qquad (6)$$

유한 요소 해석에서 위 식(6)은 증분 개념으로 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$\sum_{i=1}^{n} (\Delta\bar{\varepsilon}_e)_i = C_1 \qquad (7)$$

여기서, n는 스텝 수, $\Delta\bar{\varepsilon}_e$는 요소의 유효 변형률 증분이다.

위에서 언급한 재료상수 값은 실험적으로 결정되어야 하지만, 본 연구의 시뮬레이션에서는 기존의 연구결과[13]에서 제시하였듯이 식(6)의 C_1의 값 즉, 유효 변형률이 2.0에 도달하면 파괴가 일어난다고 가정하였다.

전단가공 공정에서 전단면의 형성과정을 수치적으로 접근하기 위하여 어떤 특정 요소의 유효 변형률의 값이 파괴기준에 도달하면 이 요소에 대하여 요소제거기법을 적용하였다. 즉, 제거되는 요소의 강성 값에 reduction factor를 곱하여 강성 값을 매우 작게 만들어 다른 요소에 거의 영향을 미치지 못하도록 하였다. 이러한 해석기법은 파괴가 일어나는 변형의 각 단계에서 변형소재의 영역을 다시 정의할 필요가 없기 때문에 정성훈 등[13]이 제시한 방법보다는 격자 재구성 회수가 대단히 감소하므로 해석에 소요되는 시간도 줄어든다.

이상에서 언급한 연성파괴기준과 요소제거기법을 이용하여 전단가공 공정을 시뮬레이션하기 위한 유한 요소 해석의 흐름도는 Fig. 1와 같다. 변형경로의 각 스텝에서 계산된 절점속도와 시간증분으로 절점좌표가 변화

되고, 유효 변형률은 변형경로를 따라 적분된다. 변형경로의 각 스텝에서 변형률장은 연성파괴의 발생여부를 판단하기 위해 식(7)의 연성파괴기준식을 계산하는데 이용된다. 만약 파괴기준을 초과하는 요소가 나타나면, 그 요소에서 파괴가 일어난 것으로 간주하고 앞서 제시한 요소제거기법을 이용하여 계속적인 시뮬레이션을 수행하게 된다. 또한 온도의 영향을 고려하기 위하여 변형해석의 결과는 온도장의 해석을 위해 연계된다.

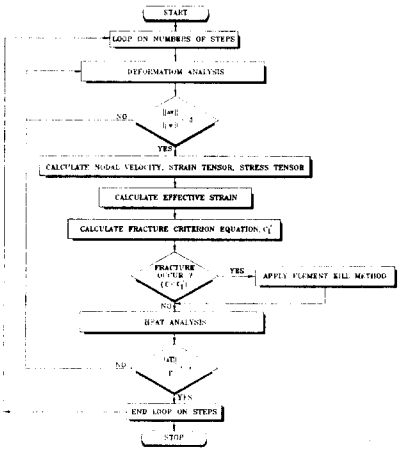

Fig. 1 Analysis procedure of shearing process

3 유한 요소 모델링

전단가공 공정에서는 펀치와 다이사이의 국부적인 영역에 큰 변형이 집중되는 국소화 현상으로 전단밴드가 형성되므로 이 부위의 집중적인 관찰이 요구된다. 따라서 본 논문에서는 Fig. 2과 같이 전단밴드의 형성이 예상되는 부위에 매우 작은 크기의 격자(수십 마이크로미터 정도)를 집중적으로 구성하였다. 시뮬레이션에 사용된 판재의 재료는 AISI 4340[20]이며, 전단공정동안에 일어나는 변형은 재료 폭 방향으로의 변형을 무시하여 평면변형률 문제로 가정하였다. 본 연구의 시뮬레이션에서 판재의 두께는 2mm이고 펀치로 전단되는 부분과 다이에 의해 지지되는 부분의 판재 길이는 4mm이다. 또한 판재의 양쪽 끝단은 자유표면으로 가정하였으며, 펀치와 다이는 각각 강체로 고려하였다. 실제 전단가공 공정과 유사하게 모델링하기 위하여 재료 오른쪽 아래에 펀치와 동일한 속도로 움직이는 가상의 다이를 고려하여 시뮬레이션하였다[13]. 소재와 공구 접촉면에서의 마찰은 쿠울롬마찰로 가정하고 마찰계수는 0.1로 두었다. 클리어런스의 변화에 따른 전단가공의 특성을 관찰하기 위하여 펀치와 다이사이의 클리어런스를 판재 두께의 10%와 20% 즉, 10%t와 20%t인 경우에 대하여 시뮬레이션하였다. 유한 요소 시뮬레이션을 위한 전단가공의 공정조건은 Table 1과 같다.

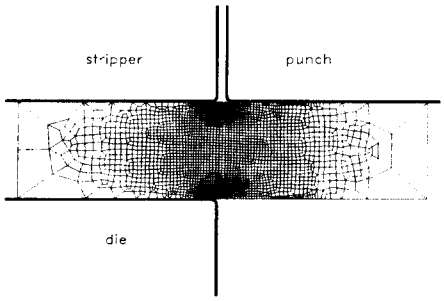

Fig. 2 Initial mesh system

Table 1 Process condition for FE-simulation of shearing process

material	AISI 4340
flow stress	$\bar{\sigma}=\sigma_0(1+\bar{\epsilon}/0.001)^{0.1}\ \dot{\bar{\epsilon}}^{0.008}e^{(-0.003(T-T_r))}$
friction coefficient	0.1
clearance	10%t, 20%t
punch speed	100mm/s
thermal conductivity	33.49N/mm/°C
heat capacity	3.94N/mm/°C
heat transfer coefficient	0.0

4 해석 결과 및 고찰

4.1 전단 메카니즘

일반적인 전단가공 공정에서 전단면의 형상은 Fig. 3과 같다. 펀치가 하강함에 따라 재료의 표면층과 펀치는 접촉하게 되고 이 때 재료는 굽힘작용을 받아서 변형하게 되므로 굽힘에 의해 자유표면에 롤오버(rollover)가 나타난다. 펀치가 계속적으로 하강함에 따라 펀치 및 다이의 측면에 의해 가공되어 광택이 있고 매끈한 부분인 버니쉬(burnish)가 생기게 되며, 펀치 가장자리부에서 발생한 균열에 의해 표면이 거친 파단면(fracture)이 나타난다. 이러한 현상은 다이부에서도 비슷하게 일어나며, 최종적으로 공정이 완료되면 제품의 전단면에는 공구 끝의 형상 또는 연성재료의 특성으로 예리한 돌출부인 버(burr)가 생기게 된다.

4.2 수치해석 결과

펀치와 다이사이의 클리어런스가 10%t, 20%t인 전단가공 공정에 대하여 수치해석을 수행하였다. 각각의 클

리어런스에 대하여 펀치 스트로크의 진행에 따른 재료의 변형상태와 내부유동은 Fig. 4, 5와 같다. 전단밴드의 형성이 예상되는 부위 즉, 클리어런스 내의 재료는 심한 전단 변형을 받지만, 그외 부분에서 재료의 변형은 거의 없다. 전단측의 재료는 회전하면서 아랫방향으로 유동함을 볼 수 있으며, 클리어런스가 증가하면 롤오버가 더욱 크게 나타난다. 또한 펀치와 다이의 측면에서 파괴가 발생한 후 점차 내부쪽으로 성장하여 각각의 클리어런스에 대해 펀치 스트로크 46.18%, 62.61%에서 완전히 파단된다.

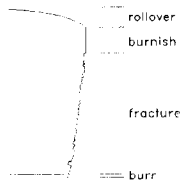

Fig. 3 Feature of sheared surface

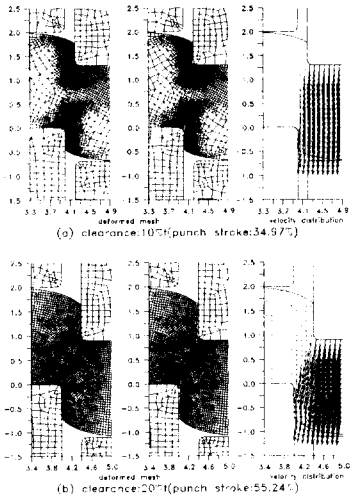

Fig. 4 Deformed mesh and velocity distribution in intermediate stage
(Hatched elements refer killed element)

각각의 클리어런스에 대하여 Fig. 4, 5에 나타낸 변형상태에서 유효 변형률 및 온도 분포를 Fig. 6, 7에 나타내었다. 파단이 진행되는 부위를 따라 변형이 집중되고 있음을 알 수 있으며, 변형이 집중되는 영역에서 온도의 상승을 관찰할 수 있다. 또한 클리어런스가 작을수록 유효 변형률과 온도는 더욱 세밀하게 분포한다. 이러한 결과로부터 클리어런스가 작을수록 발달되는 전단밴드의 폭이 좁고 전단밴드 내의 온도상승이 더욱 크다는 것을 알 수 있다.

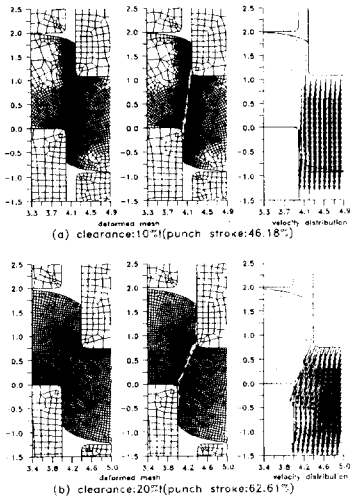

Fig. 5 Deformed mesh and velocity distribution in final stage
(Hatched elements refer killed element)

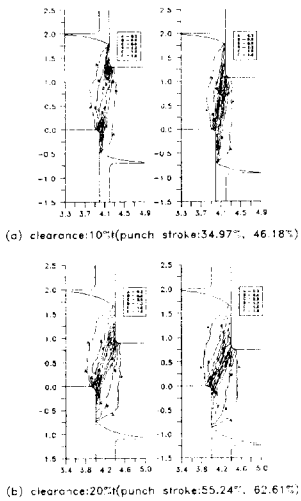

Fig. 6 Effective strain distribution for punch stroke

각각의 클리어런스에 대해 본 연구의 시뮬레이션에서 얻은 전단면의 최종 형상비 구분을 Table 2에 문헌상의 결과와 비교해 보았다. 버니쉬와 파단면의 구분비에 약간의 차이가 있으나 대체적으로 문헌상의 결과와 비슷함을 볼 수 있다.

또한 각각의 클리어런스에 대한 하중-스트로크 선도를 Fig. 8에 나타내었다. 클리어런스가 작을수록 최대 전단력은 더욱 크게 나타나며, 두 경우 모두 파단이 진행됨에 따라 하중이 감소함을 볼 수 있다. 이는 파단의 진행에 따른 변형영역의 감소와 전단밴드 내의 온도상승으로 인한 일

직인화현상 때문이라 생각된다.

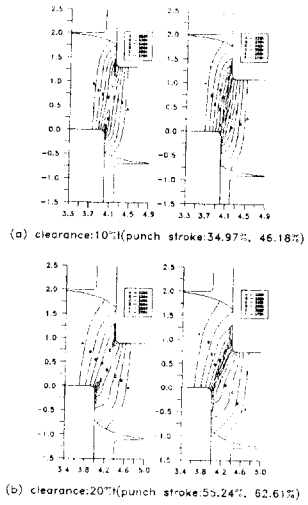

Fig. 7 Temperature distribution for punch stroke

Table 2 Features of the sheared surface obtained from rigid-plastic FE-simulation

	ref.[15]	this study	ref.[15]	this study
clearance	8-10%t	10%t	17-21%	20%t
fracture angle	7-11°	8.4°	14-16°	16.9°
rollover	6-8%t	11.9%t	10-20%t	18.1%
burnish	25-40%t	15.5%t	10-20%t	17.4%
fracture	50-60%t	72.6%t	70-80%t	64.5%

5 결 론

(1) 관재 전단가공의 수치해석을 위해 연성파괴기준과 요소제거기법을 도입하여 가공 초기 단계에서 최종 단계까지 유한 요소 시뮬레이션을 수행할 수 있었다.

(2) 클리어런스 내의 재료는 심한 전단변형을 받으며, 클리어런스가 증가하면 롤오버가 크게 나타났다.

(3) 파단이 진행되는 부위를 따라 변형이 집중되며, 변형이 집중되는 영역에서 온도상승을 관찰할 수 있었다. 또한 클리어런스가 작을수록 발달되는 전단밴드의 폭이 좁고 전단밴드 내의 온도 상승이 더욱 크다는 것을 알 수 있었다.

(4) 클리어런스가 작을수록 최대 전단력은 더욱 크게 나타났다.

(5) 유한 요소 시뮬레이션으로 얻은 전단면의 최종 형상비 구분은 문헌상에 제시된 실험결과와 유사하였다.

(6) 파괴기준 유효 변형률 값이 실험적으로 결정된다면 보다 정확한 해석결과를 얻을 수 있을 것이다.

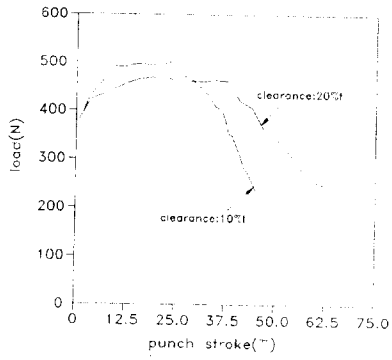

Fig. 8 Variation of the load for punch stroke

참 고 문 헌

[1] J.E.Biegel, Tool Mfg. Engr., 48, 5, p.97, 1962

[2] H.H.Hugo, Tron Age, 203, 21, p.72, 1969

[3] N.H.Cook et al., Tool Mfg. Engr., 48, 5, p.97, 1962

[4] K.Lange et al., Annals CIRP, 27 , 1, p.177, 1978

[5] D.F.Eary, Tool Mfg. Engr., 49 , 6, p.109, 1962

[6] S.Jana et al., J. mat. proc. tech., 19, pp.55-72, 1989

[7] Y.Lu et al., 塑性と加工, 제31권, 제356호, pp.1142-1147, 1990

[8] A.Ghosh et al., J. mat. proc. tech., pp.215-228, 1985

[9] P.B.Popat et al., J. mat. proc. tech. 18 , pp.269-282, 1989

[10] P.B.Popat et al., J. mat. proc. tech. 19 , pp.251-259, 1989

[11] T.Takemasu et al., 塑性加工春秋講演會, pp. 21-24, 1992

[12] C.M.Choy et al., Proceedings of the 9th international cold forging congress, Solihull, UK, pp.217-222, 1995

[13] 정성훈 등, 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 211-223, 1995

[14] 고대철 등, 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp.225-234, 1995

[15] ANSYS user's guide, Revision 5.0 tutorials Volume III, Swanson analysis system, Inc., 1994

[16] 손양언 등, "금형설계", 성안당, 1990

[17] O.C.Zienkiexicz, "The finite element method", 1977

[18] S.Kobayashi et al., "Metal forming and finite element method", 1989

[19] M.G.Cockcroft et al., J. Inst. Metals., Vol. 96, pp. 33-39, 1968

[20] 유요한 등, 대한기계학회 논문집, 제16권, 제8호, pp.1519-1529, 1992