한국소성가공학회 '99춘계학술대회 논문집 pp.233~236

이종재료의 압축에 의한 경계면의 성장거동에 관한 수치해석

정태훈*, 後藤學**

Numerical Analysis for Growth Behavior of Sawtoothed Interface by the compression of Dissimilar Blocks Twinned

Tae-Hoon Chung*, Manabu Gotoh**

ABSTRACT

In this paper, Compression in the case where dissimilar blocks are twinned variously are carried out in the condition of lubricated interface. The degree of growth is experimentally investigated. Moreover, numerical simulations are carried out by the elastic-plastic FEM for the case of the dissimilar blocks with the initial sawtooth angle of 60° . The dissimilar blocks are twinned, larger difference between material properties leads smaller growth, and the degreased interface leads smaller growth than that in the lubricated one. Furthermore, by the simulation of compression where dissimilar blocks are twinned, it is confirmed that the tendency of the general deformation pattern is very similar to the experiment.

Key Words : Elastic-plastic FEM(탄소성유한요소법), Dissimilar blocks(이종재 블록), Degree of growth(성장도)

1.서 론

컴퓨터 및 해석 소프트웨어의 급속한 발전으로 소성변형의 수치 시뮬레이션이 매우 친근하게 되어 여러 가지 제안되고 있는 구성관계식도 계산결과와 현장에서 관찰되는 현상과의 비교에 의해 그 상용성을 평가함이 가능해 졌다. 소성가공의 기본은 전영역에서의 소성변형을 가능한한 균질화 하는 것이다. 금형설계와 공정설계에서는 이 기본을 실현하는 것이 요구된다. 그러나 현실적으로 최선의 설계가 이루어지는 것은 거의 없고 제품형상과 피가공재의 재질에 의해서 어떤 고안을 하더라도 국소적스트레인 집중을 피할수 없는 경우도 많이 있다. 따라서 국소적 스트레인 집중현상은 소성가공의 현장에서 매우 빈번히 보여지는 것이다. 이러한 현상은 피가공재의 '파단'내지 '파괴'등 치명적인 불량현상으로 되어 가공을 불가능하게 한다. 이러한 현상은 판재, 벌크재의 어떤것에 있어서도 볼수있다. 벌크재 경우의 국소적 스트레인집중현상은 어떤 평면에서 생기는 좁은 폭의 내부에서 나타나는 전단변형의 '전단띠' 형성으로 볼수있다. 이 전단띠의 형성은 반드시 재료를 파괴에 이르게 한다고는 말할수 없지만, 파괴의 예방과 변형의 안정화를 위해 해결해야만 하는 현상이다. 수치적으로는 '국소적 분기현상 ' 내지 '전단띠타입의 분기현상'으로서 연구되 왔다. 분기조건에 의한 경우는, 파괴발생을 관찰하면서 파괴양식도 예측하는 점으로 종래의 형식론을 초월한다. 그러나, 전단띠분기이론의 현실적 현상에의 적용성에 관한 검사는 역시 불충분하다.

* 중부대학교 기술공학부
** 岐阜大學 工學部

예를들어, 직방체블럭을 겹쳐 평면스트레인압축을 할 경우, 그 경계면을 톱니상으로 해두면 경계면의 톱니에 특이한 변형거동이 발생했다[1]. 이 특이한 거동은, 블럭의 압축과 함께 톱니는 부서지는 것이 아니라 의외로 높이 방향으로 크게되고 톱니의 선단에서 전단띠를 발생하면서 원래의 형과 거의 상이한 채로 형전체로서 성장하는 것이다. 이 현상에서 전단띠형성이 관여하고 있는 것은 시편의 관찰로부터 확인했다. 두 개의 블록을 그 경계면을 톱니상으로 해서 평면스트레인압축할 때, 톱니가 성장하는 변형거동은 톱니의 선단에서 전단띠를 형성하면서 톱니의 산이 골에로 빠져들어가고, 신생면을 발생해서 성장하며 압축률이 크게 됨에 따라 톱니의 성장이 급격히 되는 경향을 이용하여 동종 또는 이종재료끼리의 접합법에 응용되어 최근 많이 사용되고 있는 접합재를 제조하는 적층압축접합법에 적용을 검토하고 있다. 따라서 본 연구에서는 탄소성유한요소법을 이용하여 상기의 현상을 재현하는 것을 주된 목적으로 각종의 계산을 행하였다.

2. 해 석 방 법

FEM해석에서는, 대변형용의 탄소성유한요소법 코드 GOLDA을 이용했다. 여기에 페날티법에 의한 경계면의 처리 및 형상의 기하학적대칭성에 관한 처리와 이종재료를 취급할수 있도록 프로그램을 부가했다.

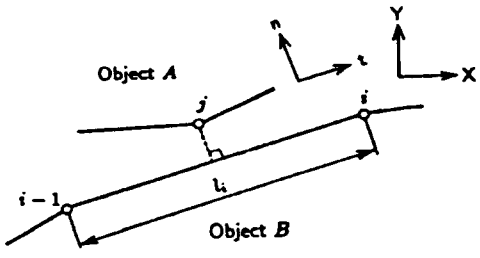

Fig.1 Geometrical relationship between point j on surface of object A and points i and $i-1$ on surface of object B.

Fig.1에서 물체 A점 j가 물체 B의 선분(i-1, i)간에 접촉하는 것이 기하학적관계로 부터 예상될 때, 점j에서 이 선분까지의 거리 $\triangle U_n$ 의 상대적 시간변화율 $\triangle \dot{U}_n$ 은 다음의 식으로 주어진다.

$$\triangle \dot{U}_n=[(Y_i-Y_{i-1})\dot{X}_j+(-X_i+X_{i-1})\dot{Y}_j+(Y_j-Y_i)\dot{X}_{i-1}+(-X_j+X_i)\dot{Y}_{i-1}+(-Y_j+Y_{i-1})\dot{X}_i+(X_j-X_{i-1})\dot{Y}_i]/l_i \quad (1)$$

또 물체 B의 접선방향에 따른 점 j의 상대적시간변화율 $\triangle \dot{U}_t$ 는 다음의 식으로 주어진다.

$$\triangle \dot{U}_t=[(X_i-X_{i-1})\dot{X}_j+(Y_i-Y_{i-1})\dot{Y}_j+(X_j-X_i)\dot{X}_{i-1}+(Y_j-Y_i)\dot{Y}_{i-1}-(X_j-X_{i-1})\dot{X}_i-(Y_j-Y_{i-1})\dot{Y}_i]/l_i \quad (2)$$

물체 A가 물체 B로 빠져들어 감을 막기 위해서 다음 식의 E_n 을 에너지범함수 Φ에 더한다.

$$E_n=(1/2)K(\triangle \dot{U}_n)^2 \quad (3)$$

여기서, K는 페날티정수로서 Young율값이 주어진다. 또, 점 j가 물체B에 고착한다면, 또 한번 Φ에 다음의 E_t 를 더한다.

$$E_t=(1/2)K(\triangle \dot{U}_t)^2 \quad (4)$$

따라서, 선분(i-1, i)상의 점 j에 있어서, 수직방향 및 접선방향의 절점력속도 $\dot{F}_n, \dot{F}_t$를 다음과 같이 얻는다.

$$\dot{F}_n=-\partial E_n/\partial \dot{n} \quad (5)$$

$$\dot{F}_t=-\partial E_t/\partial \dot{t} \quad (6)$$

식(5), (6)과 식(1), (2)로 부터 부가절점력속도를 계산할 수 있고, 전체좌표계성분으로 변환한 후 강성행렬로 도입하여 경계면에 관한 수정을 행한다. 또, 고착상태에서 슬라이딩이 개시하는 조건은 마찰계수를 μ라 하면

$$\mu|F_n+\gamma\dot{F}_n|=|F_t+\gamma\dot{F}_t| \quad (7)$$

로 주어진다. 조정인자γ는 r-min법의 인자의 하나가 된다. 윗식의 절점력 F_n, F_t 는 다음과 같다.

$$F_n=\Sigma \dot{F}_n\triangle t \quad (8)$$

$$F_t=\Sigma \dot{F}_t\triangle t \quad (9)$$

여기서 $\triangle t$는 시간증분이다. 점 j가 선분(i-1, i)에서 떨어져 있을 때 $E_n=E_t=0$이다. 기하학적관계에서 점 j의 위치는 알 수 있다. 그 때, 점 j가 정확히 이 선분의 위에 오도록 r-min인자를 설정할 수 있다. 접촉했다면 우선 고착으로서 취급하고, 식(7)에서 슬라이딩 개시조건을 체크한다.

슬라이딩 개시가 판정되었다면 E_t에 의한 고착조건을 제외한다. F_n 이 음수이면 점 i는 접촉상태이고, 양수라면 떨어져 있고, E_n = 0 이다. 무마찰을 가정할 때 언제나 E_t = 0 이고 취급은 간략화된다.

3. 계 산 조 건

소성구성식으로는 다음의 J2G를 이용했다. 먼저 J2G구성식을 기술하면, 단 상세는 문헌을 참조한다[2),3)]. 굵은 문자는 2계 텐서를 나타내고, t_r은 trace의 기호이며 표시는 증분형식이다.

$$d\boldsymbol{e} = d\boldsymbol{e}^e + d\boldsymbol{e}^p$$

$$= (1/2G^*)\,\dot{d}\boldsymbol{T} + (\langle P(\Theta)\rangle b/2\bar{\sigma}h_0)\,\boldsymbol{T}\overline{d\sigma} \quad (10)$$

$$t_r d\varepsilon = (1/3K)t_r d\sigma \quad (11)$$

여기서, $d\boldsymbol{e}$는 변형률증분 $d\varepsilon$의 편차, 첨자 e, p로서 탄성, 소성을 나타낸다. $\boldsymbol{T}$는 Cauchy응력 σ의 편차, $\dot{d}\boldsymbol{T} = d\boldsymbol{T} - d\omega\boldsymbol{T} + \boldsymbol{T}d\omega$, $d\omega$는 강체회전증분이다. K는 체적탄성계수이며 식(10)은 후속부하면에서의 부하점으로서 꼭지점(첨점)의 형성을 하고 있으며, Θ_0는 이 반정각을 나타낸다. 여기서,

$$\Theta_0 = (\pi/2) - \rho\,\bar{\varepsilon}^{p2};\ \bar{\varepsilon}^p = \int d\bar{\varepsilon}^p \quad (12)$$

가 되며, 일반적으로 $0 \le \rho < 1$ 이다. $\rho \equiv 0, \Theta_0 \equiv \pi/2$에서는 꼭지점은 없고, 식(10)은 종래의 J2F(J_2 Flow theory)로 된다. 또한 소성성형에서는 $70^\circ < \Theta_0 < 90^\circ$에서 꼭지점의 진전은 없지만, 이 작은 꼭지점형성이 국부넥킹 등 스트레인집중현상에 크게 기여한다. ρ는 꼭지점 진전에 관한 재료정수(본 계산에서는 ρ=0.8)이고, $\bar{\varepsilon}^p$는 스트레인 경로의 전장의 소성성분이다. 계산에서는 평면스트레인 및 무마찰을 가정했다. 계산시간 등의 사정상 해석에서는 실험과 비교해서 형상을 단순화하였고, 압축률 30%까지 계산했다. Fig.2와 같이 초기톱니각도는 60° 및 90°, [톱니의 높이]:[단일체의 높이]=1:5 로 설정했다.

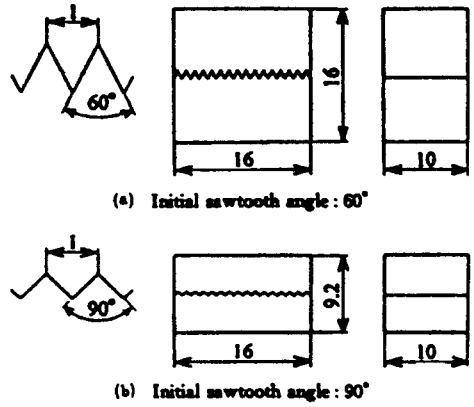

Fig.2 Geometry of tested blocks(mm)

즉, 스텝(step)에서의 최대상당소성스트레인증분의 규제는 0.01로 했다. 가공경화특성을 $\sigma = K\varepsilon^n$으로 표시하고, 이종재료의 적층압축 해석에서는 소성정수 K를 일정으로 하고 가공경화지수 n을 바꾼 경우(CASE1)와 가공경화지수 n을 일정으로 하고 소성정수 K를 바꾼 경우(CASE2)에 관해서 해석했다. 어느 쪽의 경우도 Young율 E = 122.6GPa, 프와송비=0.34 이다. 이용된 계산조건을 Table 1에 나타낸다. 또, 그 때의 가공경화곡선을 Fig.3에 나타낸다.

Table 1. K and n values

	CASE1	CASE2
Upper material	K=656.0MPa n=0.15	K=656.0MPa n=0.15
Lower material	K=656.0MPa n=0.01	K=787.2MPa n=0.15

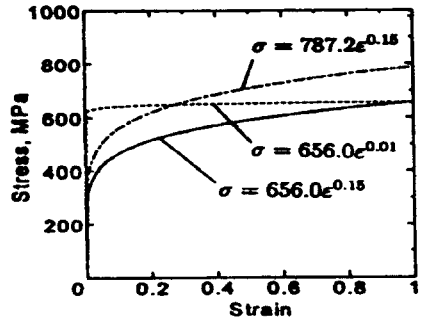

Fig.3 Material properties used in numerical simulation.

4. 계산결과 및 고찰

재료의 기계적성질이 다른 이종재료를 평면스트레인 적층압축한 초기톱니각도 60° 인 경우의 결과를 Fig.4에 나타낸다. 실험에 있어서 A1050-O를 조합해서 압축한 경우 처럼 변형저항이 작은 재료(상측)가 좌우로 튀어나오는 변형양식이 나타났다. 또 좌우양단부의 톱니가 크게 치우쳤다. 스트레인이 그렇게 크지 않은 경우인 CASE1의 쪽이 CASE2에 비교해서 변형저항의 차이가 크게 설정이 되어 있다. 같은 그림에 있어서 CASE1의 쪽이 굴곡의 정도는 크고 실험과 같은 경향을 나타냈다. 중앙의 톱니에 주목하면 CASE1에서는 톱니는 거의 변형하고 있지 않다. 한편, CASE2에서는 톱니내부로 향한 재료의 흐름을 약간 볼 수 있고, 톱니 단면적이 크게 되는 모양을 관찰할 수 있다.

5. 결 론

두 개의 직방체블록을 적층평면스트레인압축하여 접합할 경우 그 경계면을 톱니상으로 해 두고, 톱니가 성장하는 현상에 있어서 이종재료를 적층압축하는 경우에 관해서 실험과 비교하여 재질과 시험편의 초기형상이 성장거동에 미치는 영향에 대해서 검토했다. 더욱이 이 변형거동을 탄소성유한요소법에 의해서 수치해석적으로 시뮬레이션하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 톱니상 경계면의 적층블록의 평면스트레인압축실험에서 보여진 톱니의 성장을 계산에서도 정성적으로 재현할 수 있었다.

2) 재료의 변형저항의 차가 클 경우는 경계면의 굴곡이 발생하기 쉽고 성장정도는 작은 경향이 있는 것을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1) 後藤學, 山下實, 鄭泰勳, 松野, "平面ひずみ壓縮を受ける齒狀積層界面の成長擧動", 日本塑性加工春季講演會, (1994), 655.

2) 後藤學, "彈塑性構成の一形式(第2報, 一次形式の檢討)", 日本機械學會論文誌, A編, 48-428(1982), 493.

3) 後藤學, "彈塑性構成の一形式(第4報, 金屬薄板のFLDの計算への適用)", 日本機械學會論文誌, A編, 49-437(1983), 92.

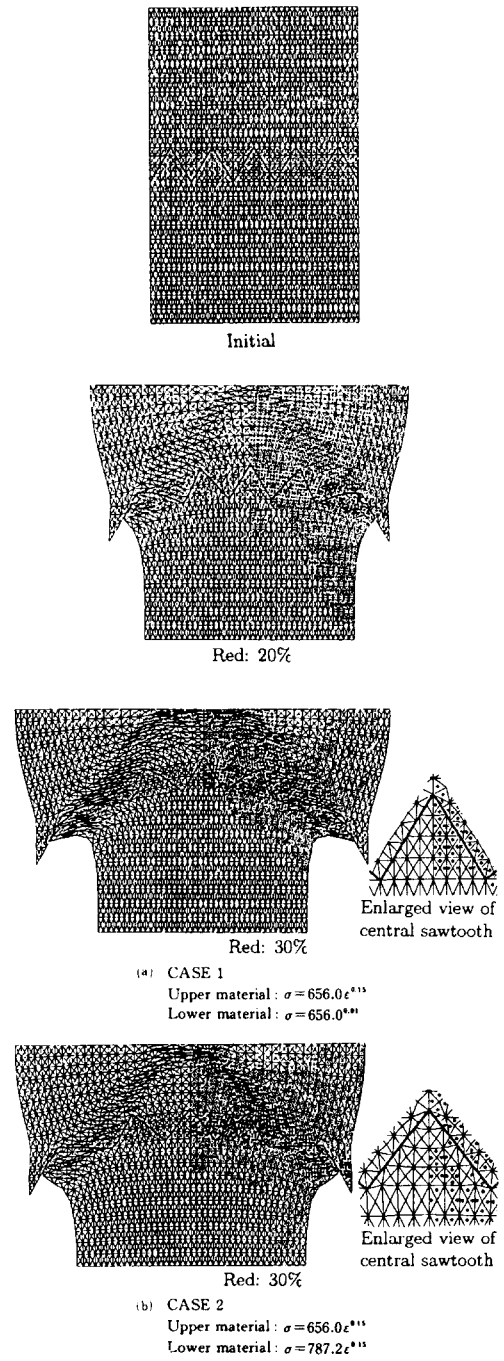

Fig.4 Deformed shapes of compression of sawtoothed blocks where dissimilar materials are twinned.
(Red:Reduction in height.)