

강화상과 기공이 포함된 금속기지 복합재 모델의 ECAP 거동에 대한 유한요소해석

이성철* · 하상렬* · 김기태† · 황상무** · 허륜민*** · 정형식****

(2003년 9월 17일 접수, 2004년 4월 20일 심사완료)

Finite Element Analysis of Deformation Behavior During ECAP for an Aluminum Alloy Composite Model containing a SiC Particle and Porosities

SungChul Lee, SangYul Ha, KiTae Kim, SangMoo Hwang, LyunMin Huh and HyungSik Chung

Key Words : Composites(복합재료), Equal Channel Angular Pressing(ECAP, 등통로각압축), Finite Element Analysis(유한요소해석), Porous Materials(다공성재료), Weibull Fracture Probability(와이블 파단 확률)

Abstract

The plastic deformation behavior of an aluminum alloy containing a particle and porosities was investigated at room temperature during equal channel angular pressing (ECAP). Finite element analysis by using ABAQUS shows that ECAP is a useful tool for eliminating residual porosity in the specimen, and more effective under friction condition. The simulation, however, shows considerably low density distributions for matrix near a particle at which many defects may occur during severe deformation. Finite element results of effective strains and deformed shapes for matrix with a particle were compared with theoretical calculations under simple shear stress. Also, based on the distribution of the maximum principal stress in the specimen, Weibull fracture probability was obtained for particle sizes and particle-coating layer materials. The probability was useful to predict the trend of more susceptible failure of a brittle coating layer than a particle without an interphase in metal matrix composites.

1. 서론

분말야금공정은 타공정에 비해 결정립의 조대화 및 제품의 후가공을 최소화하여 재료의 조성 및 조직을 용이하게 조절할 수 있어 다양한 물성치를 지닌 제품을 정형가공(Near shape forming) 할 수 있는 장점을 지니고 있다. 특히 나노 분말을 이용한 성형은 결정립을 나노 사이즈까지 제어할 수 있어 기존의 금속과 세라믹에 비해 강도, 경도, 확

산, 연성과 인성 등을 더욱 증가시킬 수 있다. 그러나 나노 분말의 상온 압축 성형시 분말간 큰 마찰력과 분말의 조대한 응집체(Aggregate)는 성형체의 불균일한 밀도구배를 유발시킬 수 있고, 상압 소결 등의 고온성형시 나노 금속 분말 표면의 산화와 결정립의 조대화가 발생하기 쉽다.

기존의 분말야금공정과 다른 심한 소성변형(Severe plastic deformation)공정 중의 하나인 ECAP(Equal Channel Angular Pressing)공정은 미세한 결정립의 조직을 지닌 재료를 제조하는 새로운 방법으로 대두되고 있다. ECAP은 여러 공정 변수들의 제어가 용이하여 미세한 결정립 조직 제어, 잔류기공의 제거등의 장점을 지니고 있다.

ECAP 공정후 금속 소재의 미세조직과 기계적 특성에 대한 많은 실험적 연구⁽¹⁻⁴⁾가 수행되어 왔으며 Segal⁽⁵⁾과 Iwahashi 등⁽⁶⁾은 ECAP 공정후 금형 형상에 따른 재료의 유효변형률의 값을 이론적으

* 포항공과대학교 대학원
** 회원, 포항공과대학교 기계공학과
*** 아주대학교 대학원 분자과학기술학과
**** 아주대학교 분자과학기술학과
† 회원, 포항공과대학교 기계공학과
E-mail: korean@postech.ac.kr
TEL: (054) 279-2164 FAX: (054) 279-5569

로 계산하였다.

그러나 Iwahashi 등의 이론값은 균일한 시편의 변형거동을 가정한 한계를 지니므로 실제 시편의 불균일한 거동에 따른 재료의 미세조직과 변형 및 응력의 적절한 예측을 위해 수치모사가 요구된다. 현재까지 많은 연구자들은 ECAP 공정시 재료의 불균일한 변형거동과 변형이력에 대한 금형형상,⁽⁷⁾ 금형과 재료의 마찰력,⁽⁸⁾ 재료의 가공경화^(9,10)의 영향을 유한요소해석을 통해 예측해왔다.

최근에는 기존의 단일재료뿐만 아니라 복합재료에 대해 재가공 공정으로 ECAP 을 이용하여 복합재료의 물성치를 향상시키는 연구가 진행되어 왔다. Li 와 Langdon⁽¹¹⁾과 Valiev 등⁽¹²⁾은 주조로 제조된 알루미늄과 실리콘카바이드의 복합재료에 ECAP 공정을 가하여 재료의 결정립 미세화와 이에 따른 강도증가 혹은 초소성 변형 거동을 확인하였다.

주조공정에 비하여 분말야금으로 복합재료를 제조할 경우 첨가상의 부피 분율조절이 용이하고 첨가상 배열이 균일하며 강화상과 모재의 접착력을 증가시킬 수 있다. 따라서 단일재료나 복합재료에 대해 분말야금 공정(가압소결 및 상압소결) 후 ECAP 으로 재가공시 조직 미세화와 특성향상에 더욱 유용할 수 있다. Chang 등⁽¹³⁾은 가압소결 후 알루미늄 합금분말에 대한 ECAP 의 영향을 연구하였으며 또한 알루미늄합금 분말에 실리콘 카바이드 휘스커를 첨가한 혼합분말을 가압 소결 한 후, ECAP 공정을 이용하여 비교적 저온에서 균일한 미세조직과 고른 강화상의 분포를 얻을 수 있음을 보였다.⁽¹⁴⁾ 최근에는 강화상과 모재의 접착력을 향상시키기 위하여 강화상을 구리로 코팅한 후 분말야금공정과 ECAP 공정을 이용하는 연구도 진행되고 있다. ECAP 은 재료를 주로 전단 변형하는 공정이나 분말합금 혹은 복합재료 소결체를 ECAP 한 경우 상당 양의 치밀화가 수반됨이 실험적으로 관찰되었다.

그러나 지금까지 ECAP 공정에 따른 소결체 내부의 잔류기공 소멸이나 강화상 첨가시 금속기지의 변형거동과 변형이력에 대해서는 아직 수치해석적 접근이 이루어지지 않았다. 특히 강소성공정시 복합재료 내부는 강화상 파단, 강화상과 기지상의 계면분리 등의 재료 결함(Defect)이 발생하기 쉬우므로, 고물성치를 지닌 복합재료를 얻기 위해 적절한 수치 해석은 필수적이다.

따라서 본 논문에서는 상대밀도 0.9 이상의 고밀도범위에서 사용이 적합한 Gurson 모델⁽¹⁵⁾을 적용하여 상온에서 ECAP 공정시 단일재료와 강화상이 첨가된 기지의 치밀화 거동을 해석하였다. 또한

상온에서 ECAP 공정시 원형 강화상이 첨가된 금속기지의 변형거동과 응력상태를 유한요소를 통해 분석하였다. 마지막으로 와이불 파단 확률(Weibull fracture probability) 을 이용하여 강화상의 크기와 코팅에 따른 강화상과 코팅층의 파단 확률을 예측해보고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 구성방정식

전체 변형을 속도성분 $\dot{\epsilon}_{ij}$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^{(el)} + \dot{\epsilon}_{ij}^{(m)} \quad (1)$$

여기서, $\dot{\epsilon}_{ij}^{(el)}$ 와 $\dot{\epsilon}_{ij}^{(m)}$ 는 각각 탄성변형을 속도성분과 비탄성변형을 속도성분을 나타낸다. 탄성변형에 대해서 후크의 법칙을 적용하면 응력 성분 σ_{ij} 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}^{(el)} \epsilon_{kl}^{(el)} \quad (2)$$

여기서, $C_{ijkl}^{(el)}$ 는 4 차 탄성계수이다.

비탄성 거동은 항복함수에 조함유동법칙(Associated flow rule)을 적용하여 해석하였다. 따라서, 비탄성 변형을 속도 성분 $\dot{\epsilon}_{ij}^{(m)}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{(m)} = \dot{\lambda} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (3)$$

여기서 f 는 항복함수이며, $\dot{\lambda}$ 는 양의 스칼라양이다.

질량 불변의 관계로부터 상대밀도의 변화율 \dot{D} 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{D} = -D \dot{\epsilon}_{kk}^{(m)} \quad (4)$$

또한, 전체 분말 성형체의 변형에너지가 모재의 변형에너지와 같다고 하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$D \sigma_m \dot{\epsilon}_m^p = \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^p \quad (5)$$

여기서, σ_m 은 모재의 유동응력, $\dot{\epsilon}_m^p$ 은 모재의 등가 소성변형률 속도를 나타낸다

2.2 Gurson 모델

본 연구에서는 ECAP 공정시 성형체의 치밀화 거동과 잔류기공의 소멸현상을 유한요소해석하기 위하여 Gurson 모델⁽¹⁵⁾을 도입하였다.

Gurson 은 중공구형 모델의 해석을 통하여 상대 밀도 0.9 이상인 분말 성형체의 소성 항복조건식을

다음과 같이 제안하였다.

$$F(\sigma, \bar{\epsilon}_m^p, D) = \left(\frac{q}{\sigma_m}\right)^2 + 2q_1(1-D)\cosh\left(-\frac{3q_2 p}{2\sigma_m}\right) - 1 - \{q_1(1-D)\}^2 = 0 \quad (6)$$

여기서 p 와 q 는 각각 정수응력($=\sigma_{kk}/3$)와 유효응력($=\sqrt{3\sigma'_{ij}\sigma'_{ij}/2}$)를 나타낸다. $q_1=1.25$ 와 $q_2=1$ 은 Tvergaard⁽¹⁶⁾가 수치해석을 통해 소성항복 거동을 적절히 예측할 수 있도록 도입한 상수이며, q_1 과 q_2 의 값이 1인 경우 Gurson 에 의하여 제안된 원래의 식이다.

3. 해석 결과 및 토의

3.1 해석 모델링

Table 1 Material properties of various materials⁽¹⁹⁻²²⁾

Materials	Elastic Modulus(GPa)	Poisson's Ratio
Al6061	69.7	0.33
Copper	110.3	0.3
CuAl2	138	0.3
SiC	414	0.17

상용 프로그램인 ABAQUS⁽¹⁷⁾를 이용하여 상온에서 ECAP 공정을 해석하였다. 시편이 최대 유효변형량을 얻을 수 있도록 교차각(Φ) 90°, 외부 만곡각(Ψ) 0° 인 금형에 대해 해석을 수행하였다.

Fig. 1 은 ECAP 공정 유한요소해석을 위한 개략도와 요소격자를 나타낸다. 단일재료와 강화상이 첨가된 알루미늄 합금의 변형거동 해석시 10mm×10mm×75mm 의 시편에 대해 각각 2720 개와 4211 개의 4 절점 평면변형 연계저감 적분요소 (Plane strain reduced integration element, CPE4R)를 사용하였다. ECAP 공정시 불균일한 변형거동을 보이는 시편의 도입부와 말단부와는 달리 중간부분은 비교적 균일한 거동을 보인다.⁽¹⁸⁾ 또한 본 연구에서는 마찰력과 강화상들의 상호작용이 존재하지 않을 때, 단순전단응력하에서 단일 강화상에 작용하는 응력과 그 주변 기지의 변형거동을 평면 변형(Plane strain)조건에서 예측하고자 하였다. 따라서 강화상이 첨가된 재료의 해석시 비교적 균일한 변형거동을 보이는 시편 중간위치에서 10mm×10mm 의 격자에 대해 10 vol%를 차지하는 직경 3.56mm 의 원형 강화상을 첨가하였으며 Fig. 1(b)에 나타내었다. 5 vol%를 차지하는 직경 2.52mm 원형 강화상과 두께 0.15mm 의 코팅된 강화상의 경우에도 해석을 수행하여 ECAP 공정시 강화상의 크기와 코팅에 의한 영향을 비교, 분석하였다.

본 논문에서는 모재 Al6061 에 실리콘 카바이드 강화상을 첨가한 경우에 대해 해석을 수행하였으

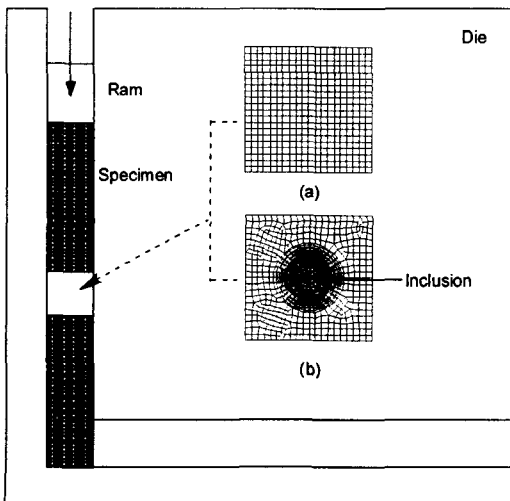


Fig. 1 A schematic drawing and finite element meshes for ECAP

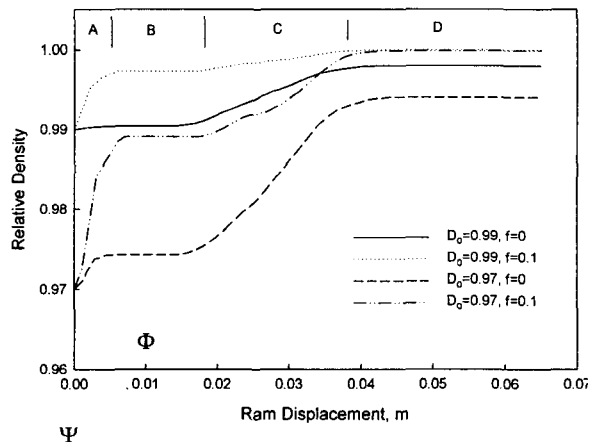


Fig. 2 Variation of relative density of specimen with ram displacement under ECAP

며, 코팅 재료는 구리와 $CuAl_2$ 를 이용하였다. 각 재료들의 물성치는 Table 1 에 나타내었다. 또한 Al6061 과 구리의 유동응력^(19,20)과 소성변형률의 관계는 각각 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$Al6061 : \sigma_m = 80 + 172.64(\bar{\epsilon}_m^p)^{0.3103} \quad (7)$$

$$copper : \sigma_m = 149 + 479.97(\bar{\epsilon}_m^p)^{0.2433} \quad (8)$$

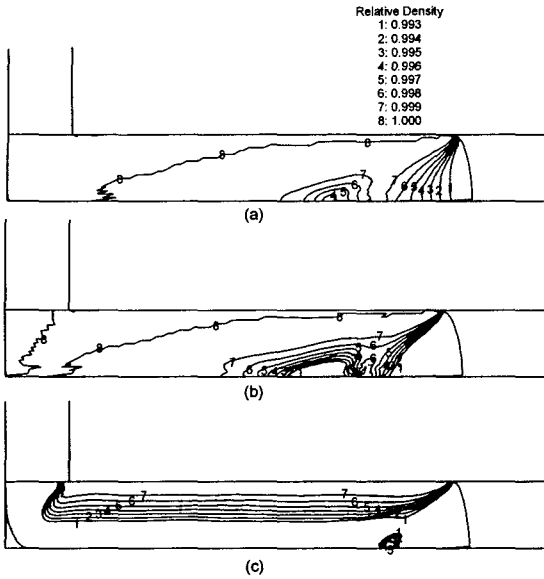


Fig. 3 Finite element calculations for distribution of relative density in the cases of (a) $D_0=0.99$, $f=0.1$, (b) $D_0=0.97$, $f=0.1$ and (c) $D_0=0.99$, $f=0$ under ECAP

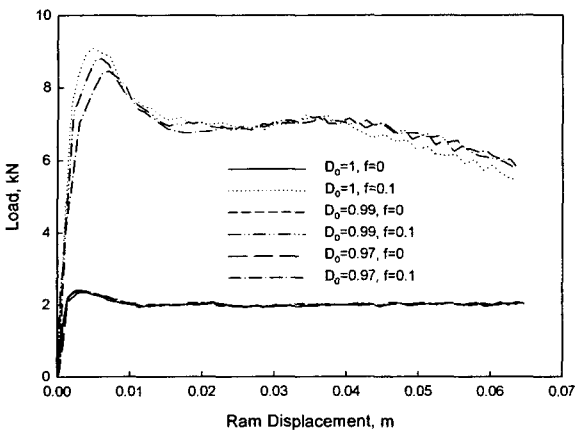


Fig. 4 Variation of pressing load with ram displacement for various initial densities and friction conditions

3.2 해석 결과

3.2.1 재료의 치밀화와 유효변형률의 변화

Fig. 2 는 ECAP 공정중 다양한 초기 상대밀도 (D_0)를 지닌 Al6061 시편에서 마찰계수(f)에 따른 Fig. 1(a) 격자 부분의 상대밀도 변화를 나타낸다. ECAP 공정을 통해 잔류기공이 상당히 제거되는 현상을 관찰할 수 있다. 또한 $D_0=0.99$, $f=0.1$ 과 $D_0=0.97$, $f=0.1$ 경우의 해석결과를 통해 단순전단 응력에 의한 강소성 변형이 시편내부의 잔류기공을 제거에 영향을 주지만, 잔류기공을 완전히 제거하기 위해서는 마찰력의 영향이 더 크음을 알 수 있다. Fig. 2 에서 보듯 상대밀도 변화는 마찰 존재시 4 단계로 나누어 질 수 있다. A 구간에서 시편도입부가 외부 금형부분에서 받는 하중과 마찰에 의해서 상대밀도는 급격히 증가한다. C 구간에서는 전단응력과 마찰에 의해 상대밀도는 다시 증가하며 금형 모서리부분을 빠져나오면서 마찰

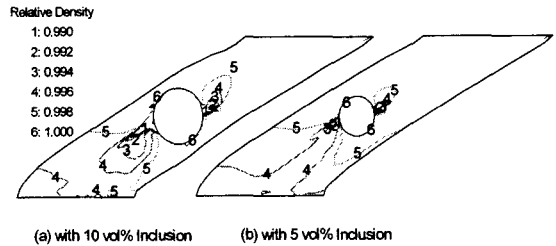


Fig. 5 Relative density contour plots of Al alloy with a SiC particle after ECAP

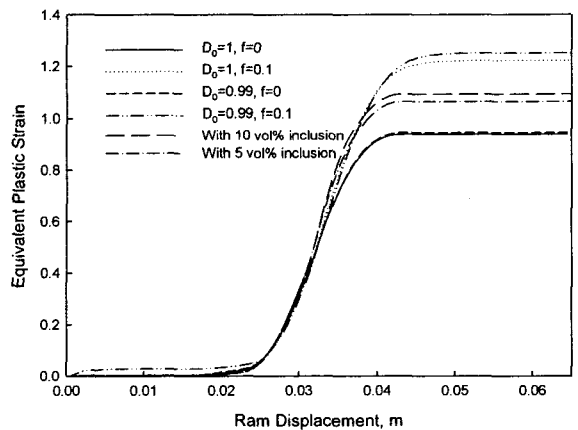


Fig. 6 Variation of effective plastic strain with ram displacement for unreinforced and a SiC particle-embedding Al alloy

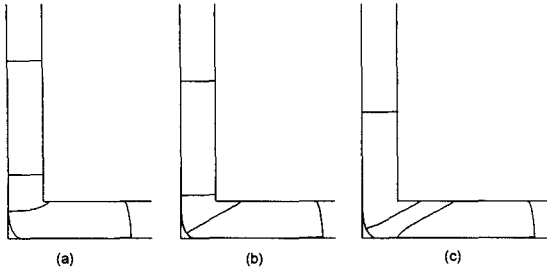


Fig. 7 Variation of deformed shapes with ram displacement (a) 25 mm, (b) 30 mm, and (c) 40 mm under ECAP

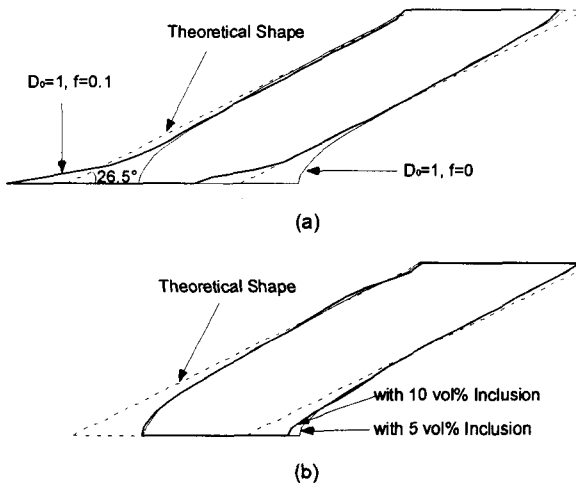


Fig. 8 Comparisons of final deformed shapes between finite element results and theoretical calculation for (a) unreinforced and (b) a SiC particle-embedding Al alloy

존재시 D 구간에서 완전치밀화에 도달하게 된다. Fig. 3 은 램이 65mm 이동후 초기밀도에 따른 시편 내부의 상대밀도 분포를 나타낸다. 무마찰인 경우 교차각부분의 금형에서 작용하는 압축응력에 의해 시편 상부의 밀도가 높은 반면(Fig. 3(c)), 마찰력이 존재할 경우 시편 하부도 밀도가 증가하면서 시편 중간부에서는 잔류기공이 상당히 제거됨을 알 수 있다(Fig. 3(a,b)). 마찰 존재시 초기상대 밀도 0.97 과 0.99 경우 ECAP 공정후 비슷한 시편 내부의 상대밀도 분포를 보였다. 특히 정상상태에 있는 시편의 중간부에서 이후부터 시편말단부근까지는 상대밀도 1 을 보이므로, 시편의 잔류기공이 소량 존재할 때 ECAP 공정후 재료의 중간부근에서 말단부근은 잔류기공이 완전히 소멸됨을 확인할 수 있다. Fig. 4 는 ECAP 공정시 마찰력에 따른 램에 부과된 하중값을 나타낸다. 마찰계수 0.1

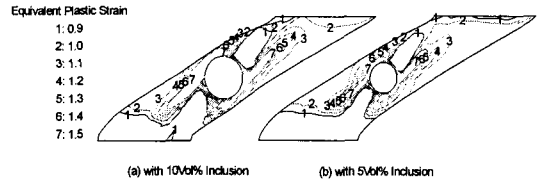


Fig. 9 Finite element calculations for distribution of effective plastic strain for Al alloy with a SiC particle after ECAP

일 때 무마찰 경우보다 하중값이 약 3.5 배 높은 값을 보였다. 또한 마찰을 고려한 경우 기공이 적은 시편일수록 초기 하중값이 높았으나 공정말기에는 하중값이 상대적으로 낮아지는 경향을 보였다.

Fig. 5 는 금속기지의 초기상대밀도가 0.99 일 때 강화상이 첨가된 경우 ECAP 공정후 무마찰 조건에서 Fig. 1(b) 격자의 상대밀도 분포를 나타낸다. 10 vol% 강화상의 경우, 첨가물의 양쪽 끝단 주변에 낮은 상대밀도가 더 넓게 분포하나 첨가물에서 상당히 떨어진 지점에서 상대밀도는 보다 높은 값을 보임을 알 수 있다. 또한 강화상 주변의 상대적으로 낮은 밀도 분포로 인하여, 감소성 변형시 계면 분리 등의 재료 결함(Defect)이 발생할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 6 은 ECAP 공정시 단일재료와 실리콘 카바이드를 첨가한 재료의 경우 Fig. 1 (a,b) 격자내부의 알루미늄합금기지의 유효변형률의 변화를 나타낸다. 이때 램변위에 따른 Fig. 1(a) 격자 모양변화는 Fig. 7 에 나타내었다. Iwahashi 등⁽⁶⁾은 교차각과 외부만곡각을 고려하여 재료의 유효변형률을 다음과 같이 계산하였다.

$$\epsilon = \left[\frac{2 \cot\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) + \Psi \operatorname{cosec}\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right)}{\sqrt{3}} \right] \quad (9)$$

교차각(Φ) 90° , 만곡각(Ψ) 0° 일때 이론값은 1.155 인 반면, 무마찰인 경우 모재의 유효변형률 해석치는 0.9399, $f=0.1$ 을 고려하면 1.223 의 값을 지닌다. $D_0=0.99$ 일 경우 시편의 치밀화에 의해 $D_0=1$ 보다 높은 변형률을 보이며 $D_0=0.99, f=0.1$ 인 경우 마찰에 의한 치밀화에 의해 초기단계부터 변형률이 증가하였다. 또한 강화상이 첨가된 경우 강화상 주변에서 기지의 심한 변형으로 인하여 변형률이 단일재료에 비해 증가하였다.

램 변위가 65mm 이동한 후 Fig. 1(a,b) 정사각형 격자의 변형을 Fig. 8 에 나타내었다. 점선으로 표시된 평행사변형의 이론각도는 26.5° 이었지만 해석치는 모두 26.5° 보다 다소 큰 값을 보였다. ECAP 공정중 금형모서리와 시편과의 모서리 특

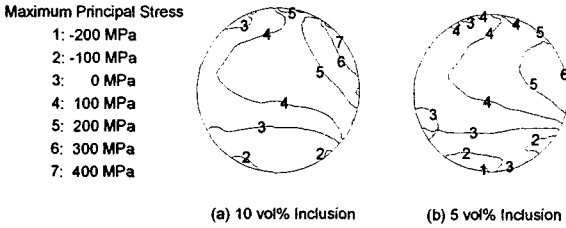


Fig. 10 Distribution of the maximum principal stress for 5 and 10 vol% inclusions after ECAP.

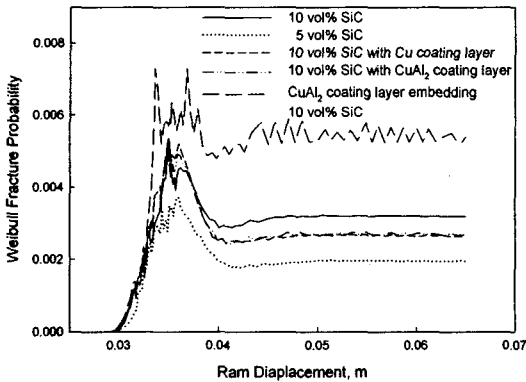


Fig. 11 Variation of Weibull fracture probability with ram displacement under ECAP.

(Corner gap)이 형성되어 시편 너비 바깥부분으로 갈수록 유효변형률이 감소했기 때문에 판단된다. 마찰이 작용할 경우, 평행사변형 하부에서 전단변형이 증가했으며 증가된 변형에 의해 Fig. 6에서 유효변형률이 이온값보다 높은 값을 보였다. Fig. 8(b)에서 첨가물의 크기가 증가할수록 첨가물 주변의 심한 전단변형으로 평행사변형 상부와 하부 모서리 끝단부근의 변형이 증가되었다. 이는 Fig. 6에서 10 vol% 강화상의 경우 5 vol%보다 유효변형률이 증가한 사실에서 확인할 수 있다.

Fig. 9는 모재의 상대밀도가 1 일때 ECAP 공정 후 격자 내부의 유효변형률 분포를 나타낸다. 비교적 높은 유효변형률은 첨가물 양쪽 끝점에서 약 45°방향으로 늘어서 분포한다. 또한 높은 vol%의 첨가물의 경우 첨가물 주변에서 유효변형률이 보다 많이 증가하였다.

3.2.2 와이불 파단 확률

ECAP 공정으로 복합재료 제조시, 심한 전단응력으로 인한 강화상의 파괴와 강화상과 기지와의 계면 분리는 재료의 결함(Defect)을 야기시킬 수 있다. 이러한 단점을 극복하고자 알루미늄에 대

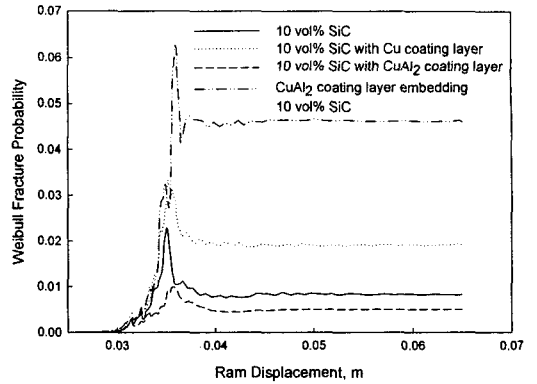


Fig. 12 Variation of Weibull fracture probability with ram displacement for Al alloy with higher flow stress under ECAP

해 고용도가 높은 구리를 실리콘 카바이드 강화상에 코팅하여 알루미늄 기지상과의 계면밀착성을 향상시키고자 하는 연구들이 진행되었다. 특히 Al 분말과 Cu 코팅된 SiC 입자의 혼합분말을 공정 온도이상에서 가압소결하면 구리 코팅층에서 Al과의 합금화에 의해 Al-Cu 액상이 생성되어 Al 기지상과 SiC 입자간의 결합력을 증진시킨다. 그러나 이 액상은 가압 소결 후 냉각시 취성이 큰 CuAl₂ 상을 계면에 석출하게 됨으로 가압 소결후 상온에서 ECAP 공정시 CuAl₂가 많은 계면에서 파괴가 발생하여 계면분리나 강화상 파단의 원인을 제공하기도 한다. 따라서 효과적인 ECAP 공정을 위하여 강화상의 파단발생의 기준(Criteria)을 결정하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 금속기지 복합재료에서 입자의 취성파괴에 대한 모델로 많이 적용되는 와이불 파단 확률(Weibull fracture probability)을 이용하여 강화상 파단 확률을 살펴 보았다. 임의의 부피 V를 지닌 실리콘 카바이드 내부에 최대 주 인장응력(Maximum principal tensile stress)이 가해질 때 와이불 파단 확률⁽²³⁾은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_f = 1 - \exp \left[- \frac{1}{V_0(\sigma_0)^m} \int_{\sigma_1(r) > 0} (\sigma_1(r))^m dV \right] \quad (10)$$

여기서 $\sigma_1(r)$ 은 최대 주응력의 분포를 나타내며, 기준 부피(Reference volume) V_0 는 강화상 입자의 부피, $V: \sigma_1(r) > 0$ 은 최대 주응력이 인장응력일 때 부피를 각각 나타낸다. σ_0 은 실리콘 카바이드의 특성강도로 일반적으로 1.2-1.8GPa를 지니며

와이블 계수 m 은 비교적 낮은 3에서 6 사이의 값을 지닌다.⁽²⁴⁾

Fig. 10은 65mm 램이동후 5 vol%와 10 vol% 강화상 내부의 최대 주응력의 분포를 나타낸다. 각각 강화상 우상부근에서 최대 인장값, 하부 근처에서 최대 압축값을 보인다. 또한 강화상 크기가 클수록 최대 주인장응력크기가 증가함을 알 수 있다.

ECAP 공정중 최대 주응력이 강화상에 분포할 때 강화상의 크기, 코팅층의 물성치와 유무에 따른 와이블 파단 확률을 Fig. 11에 나타내었다. 유한요소해석 후 최대 와이블 파단확률을 얻도록 σ_0 는 1.2GPa, m 은 3을 적용하였다. 강화상의 파단 확률은 전반적으로 낮은 값을 보였으며, 강화상의 크기가 작아질수록 파단확률이 작아짐을 확인할 수 있다. 각각의 파단확률은 심한 전단응력 발생시 (램변위: 0.030~0.037m) 최대값을 나타내었다. CuAl_2 의 파단확률은 코팅하지 않은 강화상보다 상대적으로 높은 값을 보였다. 따라서 상온에서 ECAP 공정시 취성의 CuAl_2 코팅층은 파단되기 쉬우며 이는 강화상의 파단과 계면사이의 잔류기공을 발생하여 재료의 결함(Defect)을 생성하기 쉬움을 확인할 수 있다. Fig. 12는 열처리에 의해 약 1.6 배정도 증가한 Al6061 기지의 유동응력, $\sigma_m = 413.68(\bar{\epsilon}_m^p)^{0.05}$ ⁽⁹⁾을 적용했을 때 ECAP 공정중 파단확률을 나타낸다. 구리코팅시 강화상 파단확률이 증가한 반면, CuAl_2 코팅시 강화상의 파단확률은 감소하였다. 또한 유동응력이 증가함에 따라 코팅하지 않은 강화상에 비해 CuAl_2 코팅층 파단확률이 더욱 큰 증가폭을 보임을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 Gurson 모델을 적용하여 ECAP 공정시 단일재료와 강화상 첨가시 금속기지에 대해 치밀화 거동을 해석하였다. 또한 원형의 강화상이 첨가된 금속기지의 변형거동과 응력상태를 해석하고 와이블 파단 확률을 이용하여 강화상의 크기, 코팅의 유무, 코팅의 물성치에 따른 강화상과 코팅층의 파단확률을 살펴보았다.

해석을 통해 ECAP 공정은 재료의 잔류기공제거에 효과적이고, 완전치밀화를 얻기 위해서 마찰력의 영향은 상당히 큼을 확인할 수 있었다. 강화상 첨가시 강화상 주변에서는 상대적으로 낮은 밀도분포를 보이며, 이는 계면의 결함을 발생시킬 수 있다.

ECAP 공정후 무마찰인 경우 유효변형량은 이론

값보다 적었으나, 마찰을 고려한 경우 시편너비의 부의 변형으로 인하여 이론값보다 높은 값을 얻었다. 또한 강화상 첨가시 강화상 주변에 높은 유효변형량이 분포하며 강화상이 클수록 변형량이 증가함을 확인할 수 있었다.

상온에서 ECAP 공정시 강화상이 클수록 파단확률이 증가함을 확인할 수 있었다. 취성의 계면물질 CuAl_2 의 와이블 파단 확률은 코팅하지 않은 강화상보다 전반적으로 높은 값을 보였다. 따라서 와이블 파단 확률을 통해 상온 ECAP 공정시 CuAl_2 코팅층 파괴에 의한 계면에서의 결함 발생 현상을 설명할 수 있었다.

후 기

본 연구는 과학재단 목적기초연구(R01-2000-000-00230-0)지원으로 수행되었습.

참고문헌

- (1) Shan, A., Moon, I. G., Ko, H. S. and Park, J. W., 1999, "Direct Observation of Shear Deformation During Equal Channel Angular Pressing of Pure Aluminum," *Scripta Mater.*, Vol. 41, No. 4, pp. 353~357.
- (2) Saito, Y., Utsunomiya, H., Suzuki, H. and Sakai, T., 2000, "Improvement in the γ -value of Aluminum Strip by a Continuous Shear Deformation Process," *Scripta Mater.*, Vol. 42, pp. 1139~1144.
- (3) Horita, Z., Fujinami, T. and Langdon, T. G., 2001, "The Potential for Scaling ECAP: Effect of Sample Size on Grain Refinement and Mechanical Properties," *Mater. Sci. Eng.*, Vol. A318, pp. 34~41.
- (4) Furukawa, W., Horita, Z., Nemoto, M., Valiev, R. Z. and Langdon, T. G., 1996, "Microhardness Measurements and the Hall-Petch Relationship in an Al-Mg Alloy with Submicrometer Grain Size," *Acta Mater.*, Vol. 44, No. 11, pp. 4619~4629.
- (5) Segal, V. M., 1995, "Materials Processing by Simple Shear," *Mater. Sci. Eng.*, Vol. A197, pp. 157~164.
- (6) Iwahashi, Y., Wang, J., Horita, Z., Nemoto, M. and Langdon, T. G., 1996, "Principle of Equal-Channel Angular Pressing for the Processing of Ultra-fine Grained Materials," *Scripta Metall.*, Vol. 35, No. 2, pp. 143~146.
- (7) Srinivasan, R., 2001, "Computer Simulation of the Equichannel Angular Extrusion (ECAE) Process," *Scripta Mater.*, Vol. 44, pp. 91~96.
- (8) Prangnell, P. B., Harris, C. and Roberts, S. M., 1997, "Finite Element Modelling of Equal Channel Angular Extrusion," *Scripta Mater.*, Vol. 37, No. 7, pp. 983~989.
- (9) Kim, H. S., Seo, M. H. and Hong, S. I., 2000, "On the Die Corner Gap Formation in Equal Channel Angular Pressing," *Mater. Sci. Eng.*, Vol. A291, pp.

- 86~90.
- (10) Seimiati, S. L., Delo, D. P. and Shell, E. B., 2000, "The Effect of Material Properties and Tooling Design on Deformation and Fracture during Equal Channel Angular Extrusion," *Acta Mater.*, Vol. 48, pp. 1841~1851.
- (11) Li, Y. and Langdon, T. G., 2000, "Equal-channel Angular Pressing of an Al-6061 Metal Matrix Composite," *J. Mater. Sci.*, Vol. 35, pp. 1201~1204.
- (12) Valiev, R. Z., Islamgaliev, R. K. and Kuzmina, N. F., Li, Y. and Langdon, T. G., 1999, "Strengthening and Grain Refinement in an Al-6061 Metal Matrix Composite through Intense Plastic Straining," *Scripta Mater.*, Vol. 40, No. 1, pp. 117~122.
- (13) Chang, S. Y., Lee, K. S., Choi, S. H. and Shin, D. H., 2003, "Effect of ECAP on Microstructure and Mechanical Properties of a Commercial 6061 Al Alloy Produced by Powder Metallurgy," *J. Alloys Compd.*, Vol. 354, pp. 216~220.
- (14) Chang, S. Y., Lee, K. S., Ryu, S. K., Park, K. T. and Shin, D. H., 2002, "Effect of Equal Channel Angular Pressing on the Distribution of Reinforcements in the Discontinuous Metal Matrix Composites," *Mater. Trans.*, Vol. 43, No. 4, pp. 757~761.
- (15) Gurson, A. L., 1977, "Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth-Part 1. Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media," *J. Eng. Mat. Tech.*, Vol. 99, pp. 2~15.
- (16) Tvergaard, V., 1982, "On Localization in Ductile Materials Containing Spherical Voids," *Int. J. Fracture*, Vol. 18, pp. 237~252.
- (17) *ABAQUS User's I and II Manual*, Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, 1998.
- (18) Kim, H. S., 2001, "Finite Element Analysis of Equal Channel Angular Pressing Using a Round Corner Die," *Mater. Sci. Eng.*, Vol. A315, pp. 122~128.
- (19) Lee, S. C. and Kim, K. T., 2002, "Densification Behavior of Aluminum Alloy Powder under Cold Compaction," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 44, pp. 1295~1308.
- (20) Kim, K. T. and Cho, J. H., 2001, "A Densification Model for Mixed Metal Powder under Cold Compaction," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 43, pp. 2929~2946.
- (21) Rice, R. W., 1990, "Toughening in Ceramic Particulate and Whisker Composite," *Ceram. Eng. Sci. Proc.* Vol. 2, No. 7~8, pp. 667~694.
- (22) Heoowege, K. H. and Madelung, O., 1984, *Landolt-Bornstein*, Springer-Verlag Berlin.
- (23) Lauke, B. Schüller, T. and Beckert, W., 2000, "Calculation of Adhesion Strength at the Interface of a Coated Particle Embedded within Matrix under Multiaxial Load," *Comput. Mater. Sci.*, Vol. 18, pp. 362~380.
- (24) Clyne, T. W., 2000, "Comprehensive Composite Materials," *Elsevier Press*, Vol. 3, pp. 95~96.