ECAP 공정시 강화상이 첨가된 금속기지 거동에 대한 유한요소해석

이성철† · 하상렬* · 김기태** · 정형식***

Finite Element Analysis for Behavior of Aluminum Alloy Embedding a Particle under Equal Channel Angular Pressing

S. C. Lee, S. R. Ha, K. T. Kim, H. S. Chung

Key Words : Composites(복합재료), Equal Channel Angular Pressing(구속전단가공), Finite Element Analysis(유한요소해석), Porous Materials(다공성물질), Weibull Fracture Probability(웨이블 파단 확률)

Abstract

Behavior of aluminum alloy embedding a particle was investigated at room temperature under ECAP. Finite element analysis by using ABAQUS shows that ECAP is a useful tool for eliminating residual porosity in the specimen, and much more effective under friction condition. The simulation, however, shows considerably low density distributions for matrix near a particle at which rich 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. 서 론

강소성가공(severe plastic deformation) 중의 하나인 ECAP(Equal Channel Angular Pressing)공정은 미세한 결정립의 조직을 지닌 재료를 제조하는 새로운 방법으로 대두되고 있다. ECAP 은 반복공정으로 인한 생산성 저하, 높은 하중 용량의 프레스, 초소성 변형에 따른 소재의 크랙 발생 등의 단점에도 불구하고, 단면적 변화 없는 고변형 재료 성형, 미세한 결정립 조직 제어, 잔류기공의 제거 등의 장점을 지니고 있다.

최근에는 기존의 단일재료뿐만 아니라 복합재료에 대해 재가공 공정으로 ECAP 을 가하여 복합재료의 물성치를 향상시키는 연구가 진행되어 왔다. Li 와 Langdon[11]과 Valiev 등[12]은 주조로 제조된 알루미늄과 실리콘카바이드의 복합재료에 ECAP 공정을 가하여 재료의 초소성변형 거동과 강도 증가 및 결정립 미세화를 확인하였다.

주조공정에 비하여 분말야금으로 복합재료를 제조할 경우 첨가상 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 더욱 유용할 수 있다. Chang 등[13]은 가압소결 후 알루미늄 합금분말에

† 정회원, 포항공과대학교 대학원
E-mail: yanus@postech.ac.kr
Tel: (054) 279-2838 FAX: (054) 279-2871
* 포항공과대학교 대학원
** 정회원, 포항공과대학교 기계공학과
*** 정회원, 아주대학교 재료공학과

대한 ECAP 의 영향을 연구하였다. 또한 Chang 등[14]은 알루미늄합금 분말에 실리콘 카바이드 휘스커를 첨가한 혼합분말을 가압 소결 한 후, ECAP 공정을 가하여 비교적 저온에서 균일한 미세조직과 고른 강화상의 분포를 얻을 수 있음을 보였다. 최근에는 강화상과 모재의 접착력을 향상시키기 위하여 강화상을 구리로 코팅한후 분말야금공정과 ECAP 공정을 가하는 연구도 진행되고 있다.

그러나 지금까지 ECAP 공정시 재료내부의 잔류기공 소멸에 대한 수치적 연구는 미미했다. 또한 ECAP 공정에서 강화상 첨가시 금속기지의 변형거동과 변형이력에 대해서는 아직 수치해석적 접근이 이루어지지 않았다. 특히 강소성공정시 복합재료 내부는 강화상 파단, 강화상과 기지상의 계면분리 등의 재료 결손(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 단일재료과 강화상이 첨가된 기지의 치밀화 거동을 해석하였다. 또한 상온에서 ECAP 공정시 원형 강화상이 첨가된 금속기지의 변형거동과 응력상태를 유한요소를 통해 분석하였다. 마지막으로 웨이블 파단 확률(Weibull fracture probability) 을 이용하여 강화상의 크기과 코팅에 따른 강화상과 코팅층의 파단 확률을 예측해보고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 Gurson 모델

본 연구에서는 ECAP 공정시 성형체의 치밀화거동과 잔류기공의 소멸현상을 유한요소해석하기 위하여 Gurson 모델[15]을 도입하였다.

Gurson 은 중공구형 모델의 해석을 통하여 상대밀도 0.9 이상인 분말 성형체의 소성 항복조건식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\Phi(\sigma,\bar{\varepsilon}_m^p,D)=(\frac{q}{\sigma_m})^2+2q_1(1-D)\cosh(-\frac{3q_2p}{2\sigma_m}) \quad (1)$$
$$-1-\{q_1(1-D)\}^2=0$$

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 소성항복거동을 적절히 예측할 수 있도록 도입한 상수이며, q_1과 q_2의 값이 1 인 경우 Gurson 에 의하여 제안된 원래의 식이다.

3. 해석 결과 및 토의

3.1 해석 모델링

상용 프로그램인 ABAQUS[17]를 이용하여 상온에서 ECAP 공정을 해석하였다. 시편이 최대 유효변형량을 얻을 수 있도록 교차각(Φ) 90°, 외부만곡각(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 평면변형(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 경우에 대해서도 해석을 수행하여 ECAP 공정시 강화상의 크기와 코팅에 의한 영향을 비교, 분석하였다.

본 논문에서는 모재 Al6061 에 실리콘 카바이드 강화상을 첨가한 경우에 대해 해석을 수행하였으며, 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.

$$\text{Al6061}: \quad \sigma_m=80+172.64(\bar{\varepsilon}_m^p)^{0.3103} \quad (2)$$

$$\text{copper}: \quad \sigma_m=149+479.97(\bar{\varepsilon}_m^p)^{0.2433} \quad (3)$$

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

3.2 해석 결과

3.2.1 재료의 치밀화와 유효변형률의 변화

Fig. 2 는 ECAP 공정중 다양한 초기 상대밀도를 지닌 Al6061 시편에서 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 단순전단응력에 의한 강소성 변형이 시편내부의 잔류기공을 제거에 영향을 주지만, 잔류기공을 완전히 제거하기 위해서는 마찰력의 영향이 더 큼을 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 존재시 D 구간에서 완전치밀화에 도달하게 된다. Fig. 3 은 램 65mm 이동후 초기밀도에 따른 시편내부의 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 초기상대밀도 0.97 과 0.99 경우 ECAP 공정후 비슷한 시편내부의 상대밀도 분포를 보였다. 특히 정상상태에 있는 시편의 중간부분이후부터 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 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, 강소성 변형시 계면 분리 등의 재료 결손(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 유효변형율의 변화를 나타낸다. Iwahashi 등[6]은 교차각과 외부만곡각을 고려하여 재료의 유효변형률을 다음과 같이 계산하였다.

$$\varepsilon = \left[\frac{2\cot(\frac{\Phi}{2}+\frac{\Psi}{2}) + \Psi \cos ec(\frac{\Phi}{2}+\frac{\Psi}{2})}{\sqrt{3}} \right] \qquad (4)$$

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 변

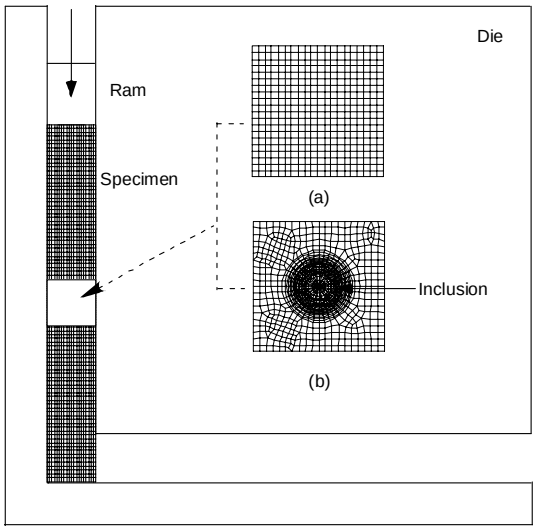

Fig. 1 A schematic drawing and finite element meshes for ECAP.

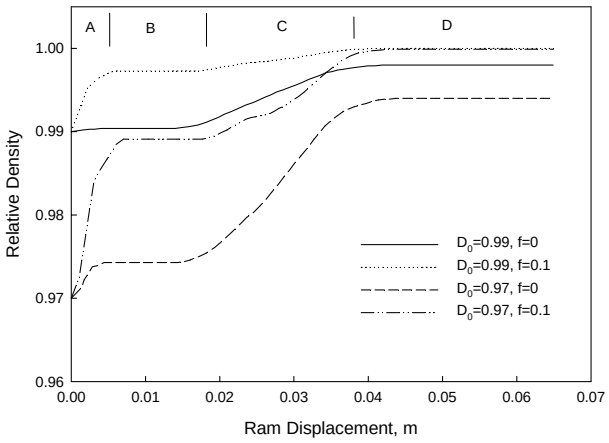

Fig. 2 Variation of relative density of specimen with ram displacement under ECAP.

형률이 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. 7 에 나타내었다. 점선으로 표시된 평형사변형의 이론각도는 26.5°이었지만 해석치는 모두 26.5°보다 다소 큰 값을 보였다. ECAP 공정중 금형모서리와 시편과의 모서리 틈(corner gap)이 형성되어 시편 너비 바깥부분으로 갈수록 유효변형률이 감소했기 때문으로 판단된다. 마찰이 작용할 경우, 평행사변형 하부에서 전단변형이 증가했으며 증가된 변형에 의해 Fig. 6 에서 유효변형률이 이론값보다 높은 값을 보였다. Fig. 7(b) 에서 첨가물의 크기가 증가할수록 첨가물 주변의 심한 전단변형으로 평행사변형 상부과 하부 모서리 끝단부근의 변형이 증가되었다. 이는 Fig. 6 에서 10 vol% 강화상의 경우 5 vol%보다 유효변형률이 증가한 사실에서 확인할 수 있다.

Fig. 8 은 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 첨가물주변에서 유효변형률이 보다 많이 증가하였다.

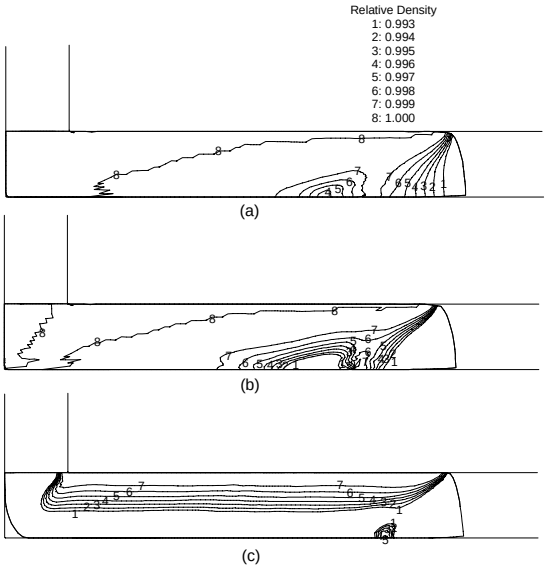

Fig. 3 Finite element calculations for distribution of relative density in the cases of (a) D_0=0.99, f=0.1, (b) D_0=0.97, f=0.1 and (c) D_0=0.99, f=0 under ECAP.

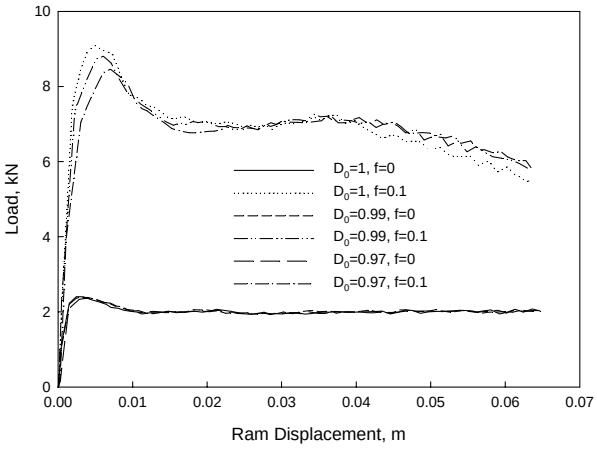

Fig. 4 Variation of pressing load with ram displacement for various initial densities and friction conditions.

3.2.2 웨이블 파단 확률

ECAP 공정으로 복합재료 제조시, 심한 전단응력으로 인한 강화상의 파괴와 강화상과 기지와의 계면 분리는 재료의 결손(defect)을 야기시킬 수 있다. 이러한 단점을 극복하고자 알루미늄에 대해 고용도가 높은 구리를 실리콘 카바이드 강화상에 코팅하여 계면밀착성을 향상시키고자 하는 연구들이 진행되었다. 특히 Al-Cu 이원계 합금에서 공정온도이상에서 가압소결시 구리 코팅층에

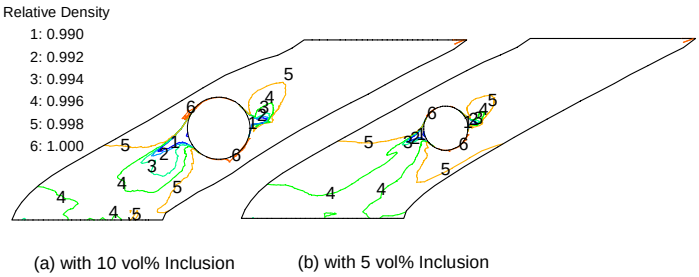

Fig. 5 Relative density contour plots of Al alloy with a SiC particle after ECAP.

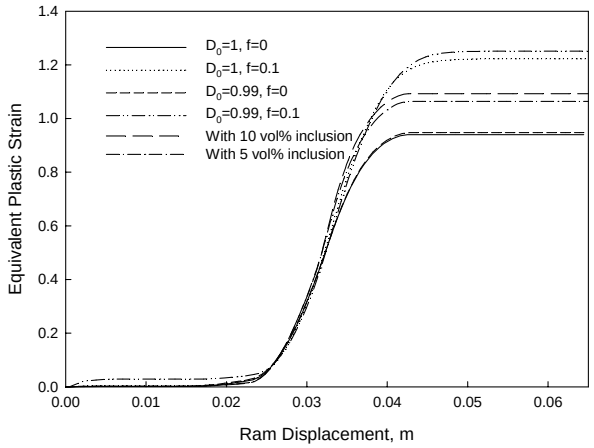

Fig. 6 Variation of effective plastic strain with ram displacement for unreinforced and a SiC particle-embedding Al alloy.

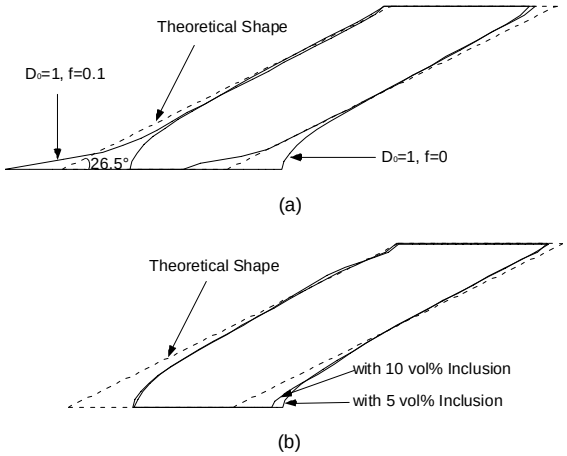

Fig. 7 Comparisons of final deformed shapes betweeı finite element results and theoretical calculatioıı for (a) unreinforced and (b) a SiC particle-embedding Al alloy.

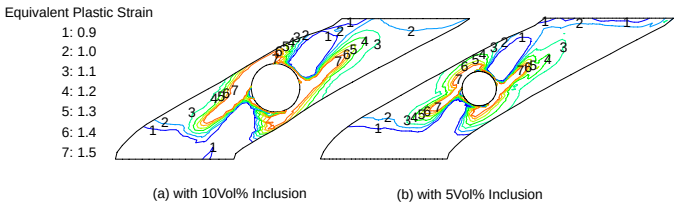

Fig. 8 Finite element calculations for distribution of effective plastic strain for Al alloy with a SiC particle after ECAP.

$CuAl_2$ 의 액상이 생성되며 액상은 젖음성을 향상시켜 계면밀착성을 더욱 향상시킬 수 있다. 그러나 가압소결후 상온에서 ECAP 공정시 취성이 강한 $CuAl_2$ 에서 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 웨이블 파단 확률(Weibull fracture probability)을 이용하여 강화상 파단 확률을 살펴보았다. 임의의 부피 V 를 지닌 실리콘 카바이드 내부에 최대 주 인장응력(maximum principal tensile stress)이 가해질 때 웨이블 파단 확률[23]은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_f = 1 - \exp\left[-\frac{1}{V_0(\sigma_0)^m}\int_{V:\sigma_1(r)>0}(\sigma_1(r))^m dV\right] \quad (5)$$

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 카바이

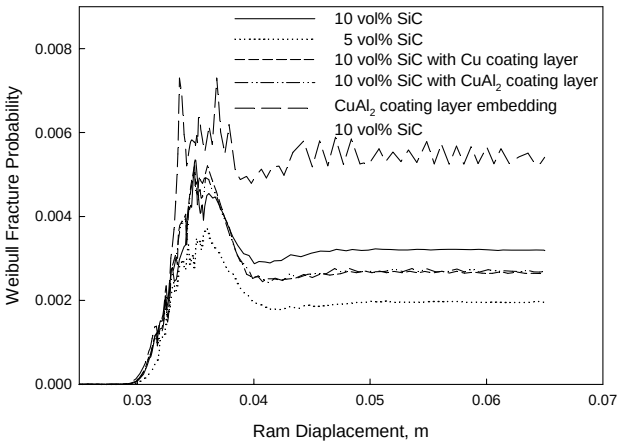

Fig. 9 Variation of Weibull fracture probability with ram displacement under ECAP.

드의 특성강도로 일반적으로 1.2–1.8GPa 를 지니며 웨이블 계수 m 은 비교적 낮은 3 에서 6 사이의 값을 지닌다.[24]

ECAP 공정중 최대 주응력이 강화상에 분포할 때 강화상의 크기, 코팅층의 물성치와 유무에 따른 웨이블 파단 확률을 Fig. 9 에 나타내었다. 유한요소해석 후 σ_0 는 1.2GPa, m 은 3 일 경우에 대해 웨이블 파단확률을 계산하였다. 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. 코팅층이 소성변형하는 구리와 취성의 $CuAl_2$ 경우 강화상의 파단확률은 비슷하였고 $CuAl_2$ 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 결손(defect)을 생성하기 쉬움을 확인할 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 웨이블 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. 강화

상 첨가시 강화상 주변에서는 상대적으로 낮은 밀도분포를 보이며, 이는 계면의 결손을 발생시킬 수 있다.

ECAP 공정후 무마찰인 경우 유효변형량은 이론값보다 적었으나, 마찰을 고려한 경우 시편너비외부의 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 웨이블 파단 확률은 코팅하지 않은 강화상보다 전반적으로 높은 값을 보였다. 따라서 웨이블 파단 확률을 통해 상온 ECAP 공정시 $CuAl_2$ 코팅층 파괴에 의한 계면에서의 결손 현상을 설명할 수 있었다.

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) Seimiatin, 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 Roung 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.