

# 공정변수 분석을 통한 ECAP 성형 최적화에 관한 연구

김경태\* · 김창규\* · 김태원†

A study on the optimization of ECAP by processing parameter analysis

Kyoung-Tae Kim, Chang-Kyu Kim and Tae-Won Kim

**Key Words :** ECAP(등통로각압축성형), Plastic deformation(소성변형), FEA(유한요소해석), Optimization(최적화), Processing variables(공정변수)

## Abstract

Parameter analysis has been performed for an equal channel angular process. The processing variables such as channel configuration, friction coefficient, and ram speed were investigated by means of the magnitudes and distributions of effective plastic strain analysis through the deformation. The materials considered were pure aluminum and titanium. Here firstly, a finite element implementation by using the commercial ABAQUS software was carried out for both the aluminum and titanium materials based on the L-channel configuration. The experimental investigation then has been conducted using the obtained data. Finally, the ability of robust metals which can be produced by the optimized ECAP has been discussed by the appropriate parameter analysis.

## 1. 서 론

결정립(grain) 크기는 금속재료의 본성과 관련한 주요 인자로서 특히 초미세 결정립 구조는 높은 강도와 인성과 함께 낮은 온도 및 빠른 가공속도에서도 초소성 특성이 나타나는 등 매우 우수한 기계적 특성을 얻을 수 있다.<sup>(1,2)</sup> 등통로각압축성형(equal channel angular process, ECAP)은 교차각과 만곡각으로 구성된 동일한 크기의 채널 다이 내부로 재료를 통과시킴으로써, 거대 전단변형을 유도함에 반해 압출되는 소재의 단면적 감소가 없음에 따라 대형의 미세립 재료(bulk ultrafine grain)의 제조가 가능한 특징을 갖고 있다.<sup>(1)</sup> Kim 등<sup>(3)</sup>은 ECAP 공정과 관련하여 다이 형상과 마찰을 고려한 수치해석을 수행하였으며 또한 Kim 등<sup>(4)</sup>은 ECAP 공정시 재료의 유동특성 및 다이 형상에 대한 유한요소해석을 통하여 ECAP 다이의 만곡각이

교차각보다 공정 효율에 더 큰 영향을 미침을 고찰하였다. Yang 등<sup>(5)</sup>은 교차각과 마찰을 동시에 고려한 연구를 수행하였으며 이를 통해 소재와 다이의 마찰은 재료의 변형률 분포에 큰 영향을 미치지 않으며 공정에 필요한 압력 또한 마찰에 특별히 기인하지 않음을 확인하였다. Dumoulin 등<sup>(6)</sup>은 변형률 경화율(strain hardening rate)과 마찰이 재료 내부 변형률의 균질성(strain homogeneity)에 매우 중요한 변수임을 확인하였다. 한편, Tóth 등<sup>(7)</sup>은 실험용 ECAP 장치를 설계하여 500°C까지의 공정온도로써 구리, 알루미늄, 티타늄 등의 재료를 대상으로 실험, 분석하였다.

본 연구에서는 우선 이와 같은 ECAP 공정을 최적화하기 위한 방법으로 다이 형상, 마찰계수, 압출속도, 온도 등이 재료의 변형거동에 미치는 영향을 등가변형률의 크기, 분포와 함께 압력 변화를 통해 해석적으로 분석하였다. 또한 최적화된 공정변수를 이용하여 알루미늄과 티타늄 재료의 ECAP 성형 시험을 수행 하였으며 성형 완료된 시료와 해석결과의 비교, 분석을 통해 공정에 필요한 제반 변수의 특성을 고찰할 수 있었다.

† 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : twkim@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2220-0421 FAX : (02)2292-0401

\* 한양대학교 대학원 자동차공학과

## 2. ECAP 성형 공정변수 분석

Segal 등<sup>(8)</sup>에 의해 제안된 ECAP 공정은 Fig 1 과 같이 임의의 각을 이루며 연결된 두 채널 내부로 재료를 통과시킴으로써 가혹한 전단변형을 유도하고 이를 통해 결정립을 미세화 시킴으로써 강건 소재를 개발하는 방법이다.

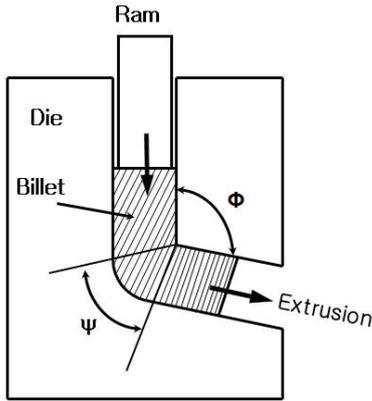


Fig 1. Schematic diagram showing ECAP process.

채널 내부로 유입된 빌렛(billet)은 램(ram)의 이송을 통해 반대쪽 채널 출구로 압출하게 되며 채널의 변곡부분을 지나면서 큰 전단변형을 일으키게 된다. 여기서  $\phi$  는 교차각,  $\psi$  는 만곡각을 나타낸다. 교차각은 단면적이 같은 두 채널의 교차지점에서의 각을 의미하며 만곡각은 채널 외부 교차점에서 곡률의 호로써 정의할 수 있다. Iwahashi 와 Langdon 등<sup>(9)</sup>은 재료의 형상을 고려하여 다음 식 (1)과 같이 전단변형률을 계산하였다.

$$\gamma_{shear}^{ECAP} = 2\cot\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2}\right) + \psi \operatorname{cosec}\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2}\right) \quad (1)$$

ECAP 은 공정조건에 따라 재료의 기계-재료적 특성이 다르게 나타날 수 있으며 이에 따라 최적의 공정변수를 선정하는 것은 매우 중요하다.<sup>(10)</sup> 공정변수 분석을 위해 본 연구에서는 상용 해석프로그램인 ABAQUS 를 사용하였으며 Fig 2 와 같이 해석모델을 구성하였다.

해석모델에서, 다이와 램은 모두 강체로 구성하였으며 빌렛은 탄-소성 변형체로 고려하였다. 빌렛의 메쉬(mesh) 크기는  $0.5 \times 0.5$  mm 이고 2,541 개의 절점수(nodal point)와 2,400 개의 CPE4R 요소(element)로 구성하였다. 다이는  $u_1=u_2=u_3=0$  의 구속조건으로 고정되어 있고 램이 지정한 속도로 이송하며 빌렛에 변형을 가하게 된다.

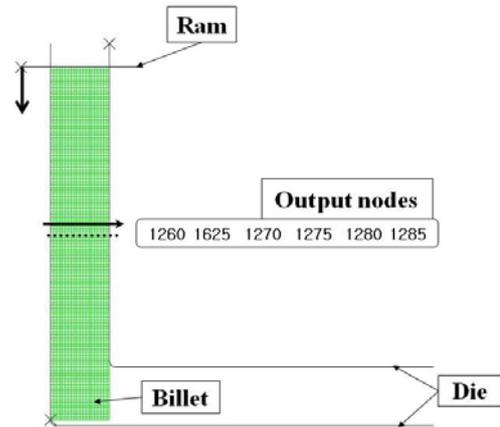


Fig 2. Finite element model for ECAP process.

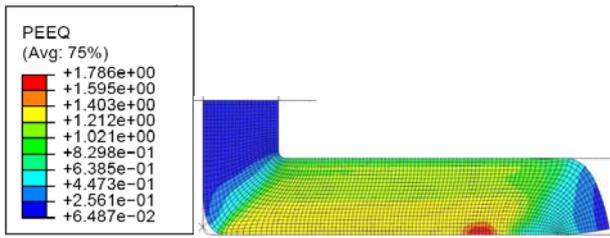
본 연구에서 고려한 ECAP 공정변수는 Table 1 과 같이 총 5 가지로서 교차각, 만곡각, 다이마찰, 램속도 및 공정온도를 들 수 있다. 교차각, 만곡각 및 마찰에 관한 분석은 티타늄 및 알루미늄 소재를 이용하였고, 나머지 램속도, 온도에 관한 해석은 티타늄 만을 대상으로 하였다. 아울러 다이 형상(교차각, 만곡각)을 제외한 공정변수는 모두 최적화된 형상을 바탕으로 해석을 수행하였다.

### 2.1 교차각, 만곡각

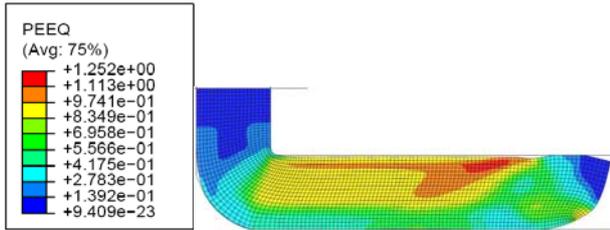
ECAP 공정에 있어 다이의 형상 즉, 교차각과 만곡각은 재료의 균질한 변형에 매우 중요하다.<sup>(5)</sup> 본 연구에서는 교차각, 만곡각에 대한 변수를 각각 2 수준, 총 4 가지로 선정하였으며 이는 Table 1 의 case 1-4 와 같다. Fig 3(a)-(d)는 이와 같은 다이 형상에 따라 해석한 티타늄 재료의 소성변형률 분포를 나타내고 있다. 또한 Fig 4(a)-(d)는 알루미늄 소재의 ECAP 형상에 따른 변형률 분포를 나타내며 Fig 3, 4 의 결과를 통해 교차각  $90^\circ$  와 만곡각  $0^\circ$  일 때의 변형률 크기가 가장 크고 그 분포 또한 상대적으로 균일한 것으로 알 수 있다.

Table 1 Processing variables for ECAP Analysis

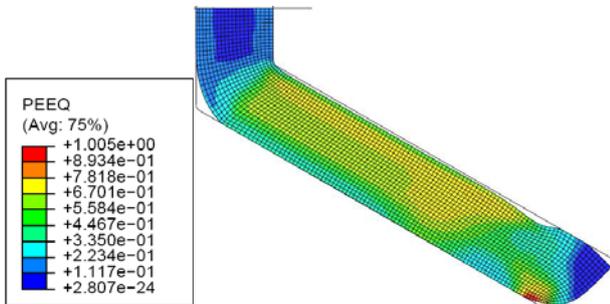
var. / Case	$\Phi$ (°)	$\Psi$ (°)	$\mu$	$V_{ram}$ (mm/s)	$T$ (°C)
1	90	0	0.0015	5	450
2	90	60	0.0015	5	450
3	120	0	0.0015	5	450
4	120	60	0.0015	5	450
5	90	0	0.1	5	450
6	90	0	0.15	5	450
7	90	0	0.0015	2	450
8	90	0	0.0015	0.2	450
9	90	0	0.0015	5	300
10	90	0	0.0015	5	20



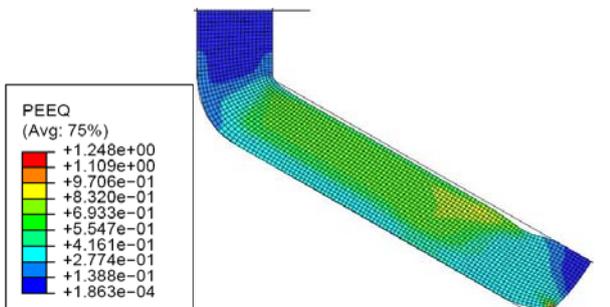
(a)



(b)



(c)

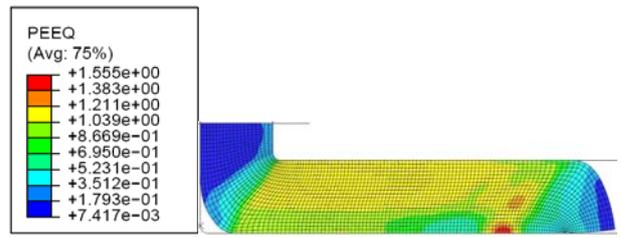


(d)

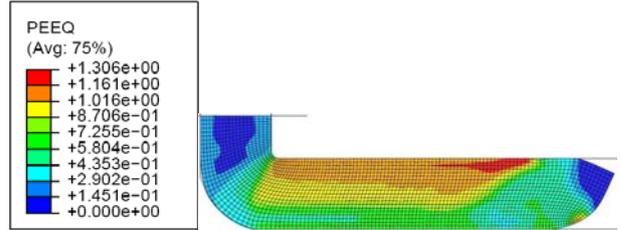
**Fig 3.** Predicted equivalent plastic strains of titanium with various die angles; (a)  $\Phi=90^\circ$ ,  $\Psi=0^\circ$  (b)  $\Phi=90^\circ$ ,  $\Psi=60^\circ$ , (c)  $\Phi=120^\circ$ ,  $\Psi=0^\circ$  and (d)  $\Phi=120^\circ$ ,  $\Psi=60^\circ$ .

## 2.2 다이 마찰

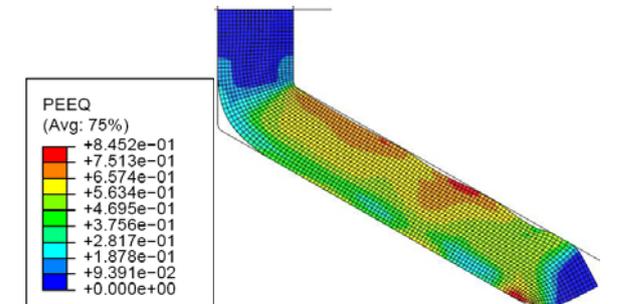
ECAP 다이와 빌렛간의 마찰은 성형 완료된 소재의 성능에 영향을 미치는 또 다른 인자 중 하나이다. 마찰성능은 사용 소재의 종류, 주변환경 및 이송속도에 따라 다르게 나타날 수 있으며 이를 정확히 측정하기란 매우 어렵다. 본 연구에서는 이와 같은 마찰계수를 효과적으로 선정하기 위해 반복해석을 수행하였으며 실험결과와 가장 유사한 해석결과로부터 타당한 마찰계수를 선정할 수 있



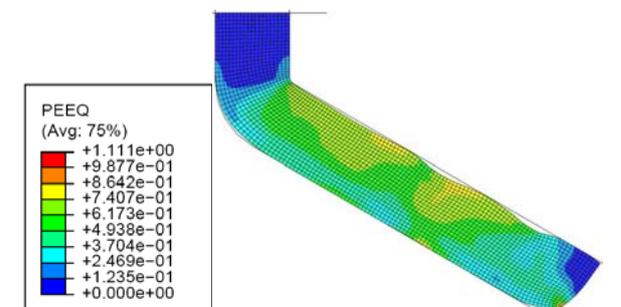
(a)



(b)



(c)

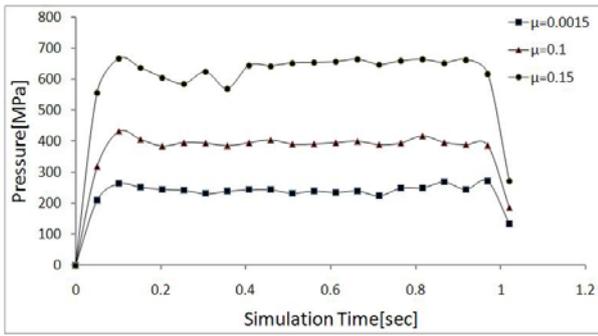


(d)

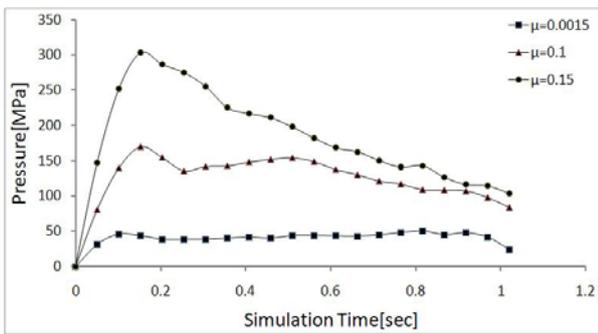
**Fig 4.** Predicted equivalent plastic strains of aluminum with various die angles; (a)  $\Phi=90^\circ$ ,  $\Psi=0^\circ$ , (b)  $\Phi=90^\circ$ ,  $\Psi=60^\circ$ , (c)  $\Phi=120^\circ$ ,  $\Psi=0^\circ$  and (d)  $\Phi=120^\circ$ ,  $\Psi=60^\circ$ .

었다. 아울러 이를 바탕으로 마찰계수에 따른 압력의 변화 또한 고찰할 수 있었다.

해석은 Table 1 의 Case 1, 5, 6 에서와 같이  $\mu=0.0015$ , 0.1 및 0.15 세 가지 조건으로 나누어 수행하였다. 마찰계수에 따른 압력의 변화는 Fig 5, 6 과 같으며 결과에서 알 수 있듯이 마찰계수가 클수록 ECAP 성형 시 발생하는 압력의 크기 또한 커짐을 알 수 있다. 한편 Fig. 7, 8 은 각각 티타늄과 알루미늄의 성형 해석된 빌렛 형상을 나타내고



**Fig 5.** Pressure changes against simulation time of titanium with various friction coefficients.



**Fig 6.** Pressure changes against simulation time of aluminum with various friction coefficients.

있다. 결과에서 알 수 있듯이 마찰계수에 따라 ECAP 성형된 빌렛의 형태가 차이가 남을 확인할 수 있으며 이를 바탕으로 채널 다이와 소재간의 마찰성능을 분석 하였다.

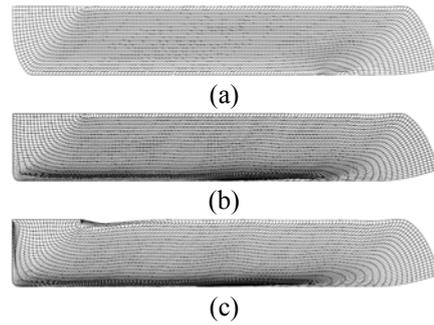
### 2.3 램속도

ECAP 공정에 있어 램속도의 영향은 Table 1 의 case 1, 7 and 8 을 통해 비교, 분석하였다. Fig 9(a)에서 보듯이 램속도는 변형률분포에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보인다. 그러나 Fig 9(b)에서 보듯이 램속도에 따라 압력은 차이가 남을 알 수 있다.

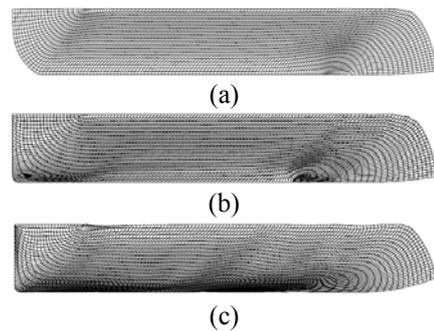
### 2.4 성형온도

티타늄 소재의 실제 ECAP 공정온도는 약 450℃ 가 일반적이다. 이는 티타늄 소재의 경우 상온 변형이 매우 힘들며 성형성 또한 우수하지 못하기 때문이다. 따라서 소재를 반 용융상태로 가열하여 적절한 성형성을 갖도록 해 주는 것이 중요하다. 기존의 연구<sup>(7)</sup>에서 350℃ 및 450℃로 ECAP 공정을 시행한 것처럼 Table 1 의 Case 1, 9, 10 을 통해 압력과 변형률 크기 및 분포 등을 비교하였다.

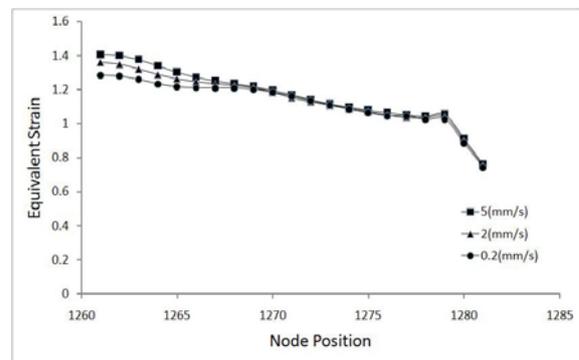
Fig 10(a)과 같이 상온에서 티타늄재료의 ECAP 공정을 시행할 경우 변형률이 매우 불균일해짐을 알 수 있다. 또한 Fig 10(b)에서 보듯이 공정 초기에 수반되는 압력이 300℃ 및 450℃일 때 보다



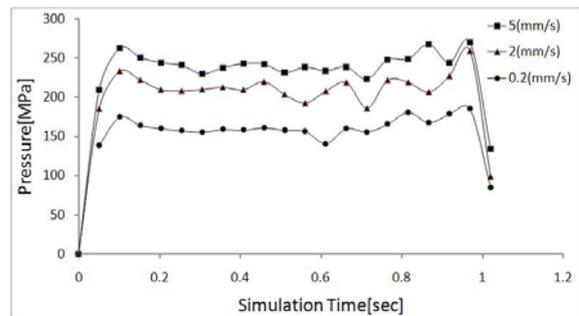
**Fig 7.** Predicted billet configurations of titanium with various friction coefficients; (a)  $\mu=0.0015$ , (b)  $\mu=0.1$  and (c)  $\mu=0.15$ .



**Fig 8.** Predicted billet configurations of aluminum with various friction coefficients; (a)  $\mu=0.0015$ , (b)  $\mu=0.1$  and (c)  $\mu=0.15$ .

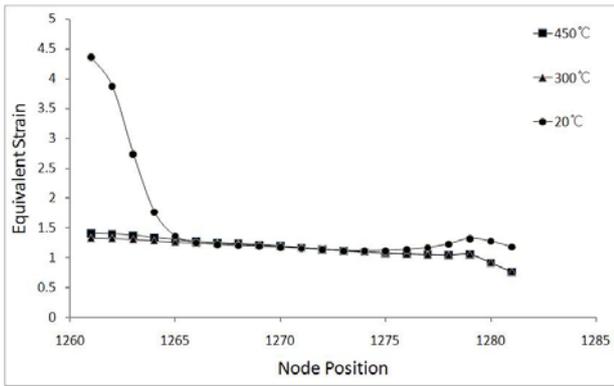


(a)

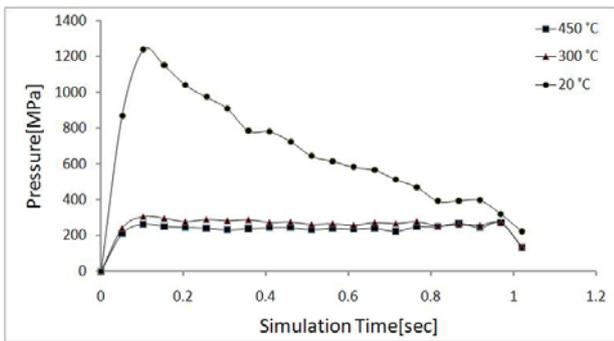


(b)

**Fig 9.** Predicted (a) equivalent plastic strains against node position and (b) pressures against simulation time of titanium billet under various ram speeds.

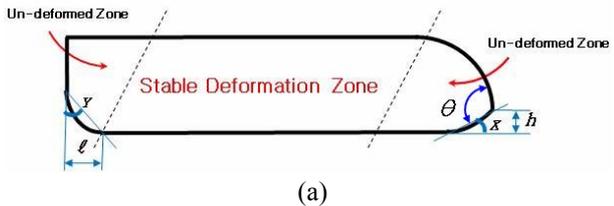


(a)



(b)

**Fig 10.** Predicted (a) equivalent plastic strains against node position and (b) pressures against simulation time of titanium billet under various temperatures.



(a)



(b)



(c)

**Fig 11.** Configurations of the billet; (a) definition of geometric factors, (b) titanium and (c) aluminum samples.

상온일 경우 6 배 정도 높음을 알 수 있으며 이것은 매우 높은 재료강도 기인된 것으로 생각된다.

**Table 2** Chemical composition of titanium (wt. %)

Ti	C	Fe	H	N	O
99.2	Max.0.1	Max.0.3	Max.0.015	Max.0.03	Max.0.25

**Table 3** Chemical composition of aluminum (wt. %)

Al	Si	Fe	Ti	V	Cu	Mn	Others
99.56	0.07	0.34	0.001	0.008	0.001	0.004	0.002

**Table 4** Conditions of experiments for ECAP process

Variable	$\Phi$ (°)	$\Psi$ (°)	$V_{ram}$ (mm/s)	$T$ (°C)
Titanium	90	0	2	450
Aluminum	90	0	5	400

**Table 5** Geometrical evaluation of deformed shapes (units in mm)

$\mu$	Material	Titanium			Aluminum		
		$\theta$	$h$	$l$	$\theta$	$h$	$l$
Predicted	0.0015	82°	0.9	2.7	80°	0.7	4.3
	0.1	84°	1.6	0	84°	0.9	0
	0.15	89°	1.7	0	88°	2.0	0
Experimental	lubricant	90°	1.4	0	79°	2.0	0

### 3. ECAP 성형 실험

본 연구에 사용된 소재는 티타늄과 알루미늄이며 각각의 화학적 조성은 Table 2 와 3 에 나타내었다. 선행 해석을 통해 선정된 다이형상( $\Phi=90^\circ$ ,  $\Psi=0^\circ$ ) 및 램속도, 공정온도에 따라 티타늄 및 알루미늄에 대한 ECAP 성형을 실시하였으며 각각의 공정조건은 Table 4 와 같이 요약하였다. 다이와 빌렛 사이의 윤활제는  $\text{MoS}_2$  기반의 MT-LM (Rocol社, 영국)를 사용하였으며 성형 완료된 빌렛의 기하학적 형태를 각 마찰계수의 해석결과와 비교함으로써 가장 유사한 조건을 선정할 수 있었다. Fig. 11 은 이를 위해 정의된 기하학적 특징(a)과 함께 ECAP 성형 실험을 통해 얻은 티타늄(b) 및 알루미늄(c) 시료를 각각 나타내고 있다.

Table 5 는 Fig. 11(a)에서 정의한 기하학적 특징을 바탕으로 각 조건에서의 해석결과와 실험결과를 비교한 것이며, 해석결과의 경우 Fig. 7, 8 로 부터  $\theta$ ,  $h$ ,  $l$  값을 측정된 결과 마찰계수를 크게 선정할수록  $\theta$ ,  $h$  는 커지고  $l$  은 작아지는 경향을 찾을 수 있었다. 따라서 이러한 경향을 바탕으로 실험결과와 가장 유사 경향을 나타내는 마찰계수를 선정할 수 있었으며 티타늄의 경우  $\theta$  는  $\mu=0.15$  조건에 해당하였고  $h$  는  $\mu=0.1$  이하의 값에 해당하였다.  $l$  의 경우에는  $\mu=0.1$ ,  $0.15$  조건에 모두 해당하였으므로 티타늄과 다이 사이의 마찰계수는 0.1

에서 0.15 사이의 값으로 추정되었다. 또한 알루미늄의 경우  $\theta$  는  $\mu=0.0015$ ,  $h$  는  $\mu=0.15$  에 해당하였으며  $l$  은  $\mu=0.1$  과 0.15 모두에 해당함에 따라 마찰계수를 0.15 로 선정할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구는 ECAP 성형 최적화와 관련하여, 우선 유한요소해석을 바탕으로 공정변수 분석을 수행하였으며 이를 통해 공정에 필요한 다이 형상을 최적화 하였다. 이어 램속도, 온도 및 마찰계수에 따른 영향을 고찰하였으며 다음과 같은 결론을 구할 수 있었다.

(1) ECAP 공정 시, 소재의 소성변형률 양을 극대화하고, 그 분포를 가장 균일하게 할 수 있는 다이 형상으로써 교차각  $90^\circ$ , 만곡각  $0^\circ$ 를 선정하였다.

(2) ECAP 공정에 수반되는 마찰계수는 반복적인 해석을 통해 선정하고자 하였으며 이를 위해 성형 후 빌렛의 형상으로부터 기하학적 특징( $\theta$ ,  $h$ ,  $l$ )을 정의하였다. 정의된 기하학적 특성을 바탕으로 실험결과와 해석결과의 상사성을 비교함으로써 가장 타당한 마찰계수를 추정할 수 있었으며 목적 온도에서 티타늄의 경우 0.1-0.15, 알루미늄은 0.15 로 선정되었다.

(3) ECAP 공정 시, 램속도, 온도에 따른 소성변형률의 차이와 함께 압력의 변화를 분석, 고찰함으로써 공정절계 시 이와 같은 방법들이 실질적으로 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단한다.

#### 참고문헌

(1) H.S. Ko, J.Y. Chang, S.G. Choi and I.G. Moon, 1999, "Characteristics of Shear Deformation in the Equal Channel Angular Pressing(ECAP)", *Journal of Korean Institute of Metals & Materials*, Vol. 37, No. 4, pp. 441-447.

(2) S.C. Yoon, M.H. Seo and H. S. Kim, 2006, "Finite Element Analysis of Continuous Rotary-Die Equal Channel Angular Pressing", *Transactions of Materials Processing*, Vol. 15, No. 7, pp. 524-528.

(3) M.H. Seo and H.S. Kim, 2000, "A numerical investigation of the Effect of Die Friction in ECAP(Equal Channel Angular Pressing)", *Transactions of Materials Processing*, Vol. 9, No. 3, pp. 219-225.

(4) H.S. Kim, M.H. Seo and S. I. Hong, 2002, "Finite element analysis of strain conditions after equal channel angular extrusion", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 130-131, pp. 497-503.

(5) Y.-L. Yang and S. Lee, 2003, "Finite element analysis of strain conditions after equal channel angular extrusion", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 140, pp. 583-587.

(6) S. Dumoulin, H.J. Roven, J.C. Werenskiold and H.S. Valberg, 2005, "Finite element modeling of equal channel angular processing : Effect of material properties, friction and Die geometry", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 410-411, pp. 248-251.

(7) J.-P. Mathieu, S. Suwas, A. Eberhardt, L.S. TÓth and P. Moll, 2006, "A new design for equal channel angular extrusion", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 173, pp. 29-33.

(8) V.M. Segal, 1995, "Materials Processing by simple shear", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 197, pp. 157-164.

(9) Y. Iwahashi, J. Wang, Z. Horita, M. Nemoto and T.G. Langdon, 1996, "Principal of equal-channel angular pressing for the processing of ultra-fine grained materials", *Scripta Materialia*, Vol. 35, No. 2, pp. 143-146.

(10) Z.J. Zhang, I.H. Son, Y.T. Im and J.K. Park, 2007, "Finite element analysis of plastic deformation of CP-Ti by multi-pass equal channel angular extrusion at medium hot-working temperature", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 447, pp. 134-141.