

# IF-Steel의 ECAP 공정 중 채널 상태와 온도에 따른 마찰효과

류원선\*, 서민홍\*, 김형섭\*, 백승철\*\*, Ralph Hellmig\*\*\*, Yuri Estrin\*\*\*

## Effect of friction different channel conditions and temperatures during ECAP

W.S. Ryu, M.H. Seo, H.S. Kim, S.C. Baik, R.J. Hellmig, Y. Estrin

### Abstract

Equal channel angular pressing (ECAP) provides an efficient procedure for introducing an ultrafine grain size into a material. In this study, ECAP were conducted on IF-steel to investigate the effect of friction and processing temperatures on the deformation characteristics of the samples. Due to the blocking effect of the previously pressed samples residing in the exit channel, the shear pattern (especially on the bottom region) changes.

Key Words : ECAP, Effect of friction, Channel conditions

### 1. 서론

Equal channel angular pressing (ECAP)법은 구 소련의 Segal [1,2]에 의해 처음으로 개발되었으며 심한소성변형 (SPD, Severe Plastic Deformation) 공정의 하나로 Top-Down 방식으로 초미세 결정립 재료를 제조할 수 있다. 공정의 특성상 재료의 주된 변형 형태는 단순전단변형이며 가공 전,후의 단면감소 없이 균일한 전단변형을 부여할 수 있어 반복가공도 용이하고 효과적으로 초미세 결정립을 얻을 수 있어, 지난 10여년간 많은 연구가 진행되어 왔다. 초기에는 Ni[2], Cu[3], Al[4,5] 등의 재료에 대한 연구가 주를 이루었으나 최근에는 기능성 및 경량화 특성이 있는 Ti[6], Mg[7,8] 등의 재료에

관한 연구도 이루어지고 있으며, 분말의 벌크화 공정에도 이용되는등 그 응용성이 점차 넓혀지고 있다.

ECAP공정에서 평균 소성변형량은 통로교차각 ( $\phi$ ), 통로모서리각 ( $\psi$ )에 따라 다음과 같이 나타내어진다. [2,9]

$$\epsilon = \frac{2}{\sqrt{3}} \left\{ \cot\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2}\right) + \operatorname{cosec}\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\psi}{2}\right) \right\}$$

ECAP 공정에서 재료의 변형 양상은 채널 (Channel)을 통과하는 시편의 통과 경로에 따라 여러 가지 다른 형태가 나타난다. [4,5] 이러한 공정상의 특징과 공정변수의 영향을 고려할 수 있는 유한요소법 (FEM, Finite Element Method)을 적용하여 재료 물성 [10], 금형 모서

\* Chungnam National University

\*\* 포항제철

\*\*\* TU Clausthal, Germany

리각 [11], 재료의 가공성 [12], 마찰 [13], 후방압력 [14] 등의 효과를 해석한 연구가 많이 시도되어지고 있다. ECAP 공정변수로는 통로교차각 ( $\phi$ ), 통로모서리각 ( $\psi$ ), 마찰 및 변형온도, 변형속도, 재료물성 등을 들 수 있으며, 아직까지는 실험적인 연구결과가 부족한 편이다. 따라서 본 연구에서는 BCC 결정구조인 IF강을 이용해 다양한 온도에서의 재료유통 특성과 ECAP 공정변수의 하나인 마찰의 영향을 변형 하중과 관련하여 고찰하였다.

## 2. 실험 절차 및 방법

실험에 사용된 재료는 IF-steel 으로 포항제철로부터 제공 받았으며 ECAP 가공을 하기 위해 6x6x30 mm<sup>3</sup> 의 사각막대 형태로 준비하였다. ECAP 금형에는 온도 조절을 위해 Heat pipe 를 삽입하였으며 통로교차각 ( $\phi$ ) 은 90°, 통로모서리각 ( $\psi$ ) 은 0°이고 Inner channel과 Outer channel의 길이는 각각 80mm 이다. 시편의 취득이 쉽도록 분리형으로 제작된 금형이나 본 연구에서는 다이 채널상태에 따른 마찰효과를 확인하기 위해 출구쪽 채널에 변형된 시편이 있는 상태에서 연속 가공을 수행하였다. 가공속도는 램의 속도로 0.12 mm/sec로 하였으며, 가공에 이용된 프레스는 50 ton의 2단 프레스이고 로드셀을 이용해 변형 하중을 측정하였다. ECAP 가공을 위해 시편의 표면을 SiC 연마지를 이용해 연마하였고 윤활을 위해 몰리코트 (MoS<sub>2</sub>)를 사용하였다. 변형 온도는 각각 실온 (RT, Room Temperature), 100°C, 200°C 이며 시편을 Channel에 장입한 상태로 승온하였다. 미세조직을 관찰하기 위해 변형온도를 각각 100°C, 200°C로 조절한 후 Route C의 형태로 8 Pass ECAP 된 시편을 가공하였다. 시편을 길이방향으로 절단하여 기계적 연마를 하였고 Nital 부식액 (Nitric acid 10% + ethanol 90%)으로 부식처리한 후 광학현미경으로 관찰하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

그림. 1 에는 각각 (a) RT, (b) 100°C, (c) 200°C 에서 ECAP 가공이 수행되는 동안의 변형 하중을 나타내었다. 1회 ECAP 가공된 시편은 따로 취득하지 않은 상태로 즉, Outer Channel에 유지되는 상태로 새로운 시편을 삽입해 가공을 수행하였다.

Outer channel이 비어있는 상태보다 변형된 시편이 존재하는 상태에서의 변형하중이 보다 높게 나타났다. 이를 통해 변형된 시편과 Outer Channel 벽 사이의 마찰효과를 간접적으로 고찰 할 수 있다. 표 1 에는 Outer channel에 존재하는 변형 된 시편의 수와 온도에 따른 최대 변형 하중을 나타내었다. Outer Channel의 상태에 따라, 즉 먼저 가공된 시편이 Outer Channel에 각각 1개씩, 2개씩 존재함에 따라 하중값은 상온에서는 27.7% 와 67.6% 로 증가하였고 100°C에서는 26.3% 와 43.8% 로 증가되었으며 200°C에서는 22.5% 와 57.6% 로 증가하였다. 상기한 상태에서는 낮은 온도에서보다 오히려 높은 온도에서 마찰의 영향이 상대적으로 낮게 나타났다. 이는 높은 온도에서 변형 하중의 감소로 인해 변형 중에 램 사이로 끼어드는 시편의 버 (Bur) 등이 상대적으로 작게 나타났기 때문으로 생각된다.

그림. 2 에는 각각 100°C, 200°C에서 Route C로 8 Pass ECAP 가공된 시편의 미세조직을 나타내었다. 시편의 높이 방향으로 각각 상, 중, 하 부분의 미세조직이 서로 다른 형태를 보이며 불균질하게 나타나고 있다. 시편의 상부와 하부의 전단 방향이 각각 반대 방향으로 나타난 것은 Route C의 가공 특성상 각 가공 공정마다 시편을 180°씩 회전하여 변형시키기 때문이다. ECAP 가공은 비교적 균일한 전단 변형을 재료에 부여할 수 있는 것으로 알려져 있으나 마찰 등의 영향으로 국부적인 심한 변형영역이 나타날 수 있다. FEM을 이용한 이론적인 해석결과를 따르면 이러한 불균일 영역은 주로 가공경화 특성이 적은 재료에서 통로모서리각 ( $\psi$ )이 0° 인 경우와 역방향 응력 (후방압력)이 존재하며 마찰이 큰 경우에 나타날 수 있다. [14] 본 실험 조건에서보면 IF-Steel이 초기에는 가공 경화특성이 큰 재료물성을 가지고 있었으나 ECAP 가공 회수가 증가되면서 점점 포화되고 가공경화 특성이 낮아지게 되며, 취득되지 않은 시편이 존재하는 Outer Channel 에서의 시편과 금형 간의 마찰이 후방압력[15]으로 작용하여 시편의 바닥면 부근에 심한 변형 영역이 나타나게 된 것으로 여겨진다. 즉, 재료 물성의 변화와 더불어 마찰의 영향으로 불균일한 변형이 나타나게 된 것으로 생각할 수 있다. 이러한 관점에서 본다면 균질한 변형 조직을 가지는 재료를 제조하기 위해서는 적당한 크기의 통로모서리각 ( $\psi$ )을 가지는 금형의 설계 조건과

좋은 윤활을 통한 마찰 효과의 감소가 상당히 중요함을 알 수 있다.

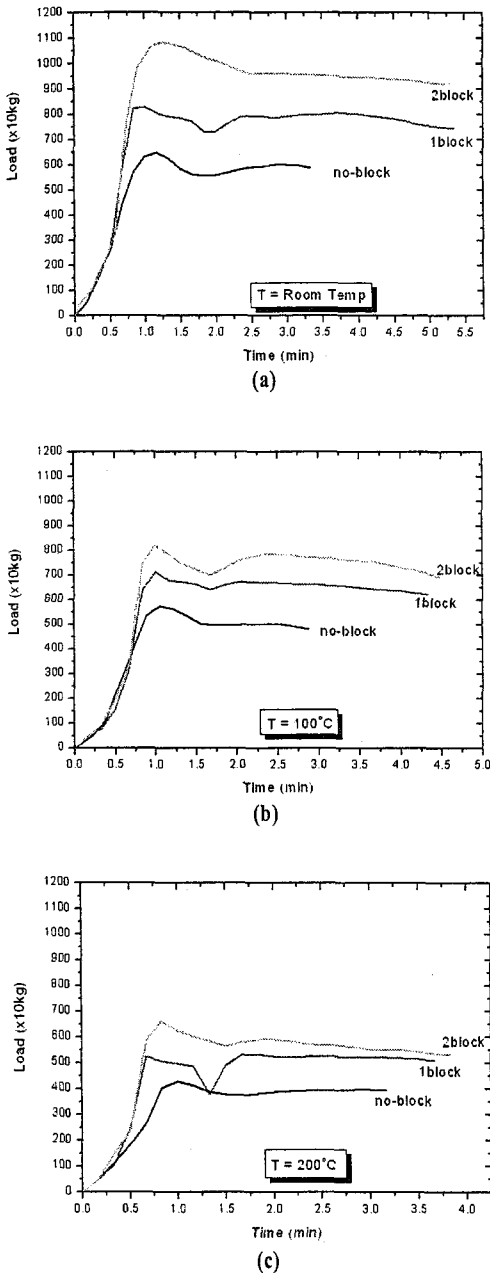


Fig. 1 Plot of Ram displacement time vs Load Room-T(a), 100 °C(b), 200 °C(c), during ECAPressing.

Table. 1 Maximum Load (x10 kg)

	no-block	1block	2block
Room-Temp	648	828	1086
100 °C	577	729	830
200 °C	430	527	678

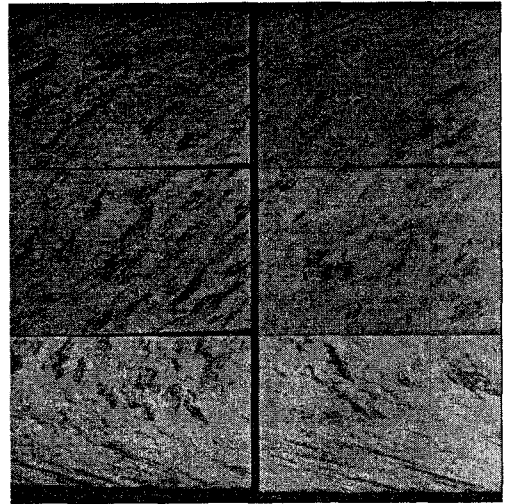


Fig. 2 Optical micrographs of longitudinal direction, after 100 °C(a), 200 °C(b) 8Pass ECAPressing (X50)

#### 4. 결론

본 연구에서는 ECAP 가공에서의 여러 공정변수 중 변형 하중에 영향을 미치는 가공 온도와 마찰의 영향에 대하여 고찰하였다.

(1) 출구쪽 채널에 먼저 가공된 시편이 1개와 2개가 존재할 때 ECAP 가공에서 변형된 시편과 금형 사이의 마찰효과로 인해 변형하중이 평균 25% 와 50% 로 각각 증가하였다.

(2) 마찰에 따른 변형 하중의 증가 현상은 온도의 증가에 따라 감소하였으며 이는 보다 높은 온도에서의 낮은 변형하중으로 인해 시편이 램에 끼는 현상 (Bur)이 상대적으로 작기 때문으로 생각된다.

(3) 각각 100 °C, 200 °C 의 온도조건에서 Route C의 형태로 ECAP 가공한 시편의 경우 마찰의 영향에 의해 불균질한 변형이 나타나게 되었다.

## 참 고 문 헌

- (1)V.M. Segal, V.I. Reznikov, A.E. Drobyshevskiy, V.I. Kopylov, Russ. Metall.1 (1981) 99
- (2)V.M. Segal. Mater.Sci. Eng. A197(1995)157~164
- (3)S.R. Agnew, J.R. Weertman, Materials Science and Engineering A244(1998) 145~153
- (4).Gholinia, P.B Prangnell and M.V. Markushev, Acta. Mater. 48(2000) 1115~1130
- (5)Kiyotaka Naka Shima, Zenji Horita, Minoru Nemoto and Terence G. Langdon Acta. Mater. 46, No.5, P1589~1599, 1998
- (6)Vladimir V. Stolyarov, Y.Theodore Zhu, Igor V. Alexandrov, Terry C. Lowe, Ruslan Z. Valiev. Materials Science and Engineering A343(2003) 4 3~50
- (7)Akihiro Yamashita, Zenji Horita, Terence G. Langdon. Materials Science and Engineering A300(2001) 142~147
- (8)W.J. Kim, S.I. Hong, Y.S. Kim, S.H. Min, H.T. Jeong, J.D. Lee. Acta Materialia 51 (2003) 3293~3307
- (9)Yoshinori Iwahashi, Jingtao Wang, Zenji Horita, Minoru Nemoto and Terence G. Langdon Scripta.Mat. 35, No2. 143~146, 1996
- (10)H.S. Kim, M.H. Seo, S.I. Hong, Mater.Sci. Eng. A291 (2000) 86~96
- (11)H.S. Kim, Mater. Sci. Eng. A315 (2001) 122~128
- (12)S.L Semiatin, D.D Delo Materials and Design 21(2000) 311~322
- (13)P.B Prangnell, C.Harris, and S.M Roberts, Scripta Mater. 37, No7, 983~989, 1997
- (14)S.J. Oh, S.B. Kang, Materials Science and Engineering A00 (2002)1~9
- (15)V.V. Stolyarov, R. Lapovok, I.G. Brodova and P.F. Thomson Materials Science and Engineering A, 357, issues 1-2, 2003, 159~167