

알루미늄 판재 구속전단가공에서 형성되는 불균일 변형의 유한요소해석

최호준* · 이강노** · 황병복*** · 허무영****

(2002년 11월 1일 접수)

FEM Analysis on Deformation Inhomogeneities Developed in Aluminum Sheets During Continuous Confined Strip Shearing

H. J. Choi, K. R. Lee, B. B. Hwang and M. Y. Huh

Abstract

The strain state during the continuous confined strip shearing (CCSS) based on ECAP was tackled by means of a two-dimensional FEM analysis. The deformation of AA 1100 sheet in the CCSS apparatus was composed of three distinct processes of rolling, bending and shearing. The pronounced difference in the friction conditions on the upper and lower roll surfaces led to the different variation of the strain component ϵ_{13} throughout the thickness of the aluminum sheet. Strain accompanying bending was negligible because of a large radius of curvature. The shear deformation was concentrated at the corner of the CCSS channel where the abrupt change in the direction of material flow occurred. The process variables involving the CCSS-die design and frictions between tools and strip influenced the evolution of shear strains during CCSS.

Key Words : Continuous Confined Strip Shearing (CCSS), Equal Channel Angular Pressing (DCAP), FEM Shear Deformation

1. 서론

최근에 결정립미세화에 의한 벌크금속의 강도향상⁽¹⁻³⁾과 초소성 향상⁽⁴⁾을 위한 방법으로써 ECAP (Equal Channel Angular Pressing, 구속전단가공) 공정에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 구 소련의 Segal⁽⁵⁾에 의해 개발된 ECAP 법은 다결정의 일반

금속재료에 유효변형률 1 이상의 심한 전단변형을 가하여 초미세결정립(ultrafine-grain, UFG) 미세조직의 재료를 만드는 성형가공이다. Wu 등⁽⁶⁻⁷⁾은 플라스티신을 이용하여 금형 형상에 따른 재료의 변형 거동을 관찰하였고 Delo 등⁽⁸⁻⁹⁾은 유한요소법을 적용하여 ECAP 공정의 해석을 수행하였다. ECAP 공정은 주로 원형 또는 사각형 형상을 갖는 벌크

* 인하대학교 자동차공학과 박사과정

** 고려대학교 신소재공학과 석사과정

*** 인하대학교 기계공학과

**** 고려대학교 재료공학부

금속재료를 ECAP 금형 내에서 전단변형을 가하여 결정립 미세화를 얻는데 사용되고 있다. 그러나 ECAP 공정은 그 공정의 특성상 연속적 공정이 어렵기 때문에 공업적으로 적용성에는 많은 문제점을 갖고 있다.

최근 기존의 단속 ECAP 가공법이 가진 장점을 가지며 동시에 그 단점을 극복할 수 있는 연속/고속의 판재의 전단가공법이 Chung 등⁽¹⁰⁻¹¹⁾에 의하여 제안되었다. 이러한 연속 ECAP 가공법을 기존의 단속적인 방법과 구분하기 위하여 DCAP (Dissimilar Channel Angular Pressing) 또는 CCSS (Continuous Confined Strip Shearing, 판재 연속구속 전단법)이라 명명⁽¹²⁾하였다. CCSS 공정은 단속 ECAP 공정에 비하여 100-500 배 이상의 빠른 속도로 금속판재를 연속적으로 가공할 수 있다. 뿐만 아니라, 가공 금형의 투입구와 출구의 두께를 다르게 하여 판재 금속의 두께를 일정하게 유지하면서 반복가공이 가능하다.

Chung 등⁽¹⁰⁻¹¹⁾은 유한요소해석을 통하여 CCSS 공정시 전단변형에 따라 금형 내에서 얻어지는 전단변형률 상태와 전단변형률을 얻었고, 이를 이용하여 전단변형 집합조직을 해석하였다. 그러나 아직까지 CCSS 공정 시 각 CCSS 장치의 각 부분에서 변형상태를 연구한 결과와 CCSS 금형의 형태 변화가 변형되는 판재의 변형상태에 어떠한 영향을 주는지에 대한 연구는 보고된 것이 없다.

본 논문에서는 CCSS 공정을 상용 프로그램인 DEFORMTM-2D⁽¹³⁾을 이용한 유한요소해석을 통하여 CCSS 공정 전반에 걸친 변형상태의 변화를 추적하였고 또한 CCSS 금형의 형태변화 등의 공정변수 변화가 알루미늄 판재의 변형모드에 어떠한 영향을 줄 수 있는지 고찰 하였다.

2. 실험방법

본 연구에서 사용한 CCSS 판재구속전단가공 장치가 Fig. 1 에서 보여진다. CCSS 판재구속전단가공 장치는 판재를 금형 안으로 밀어내는 상부 롤과 하부 롤로 구성되는 압연장치와 판재에 전단변형을 가할 수 있는 CCSS 금형으로 구성된다. 본 연구에서는 재결정 소둔된 1.0mm 두께의 알루미늄 AA 1100 판재를 사용하였다. 1.0mm 두께의 알루미늄 판재는 먼저 압연장치로 들어가 냉간압연 변형에 의하여 두께변형률 15%로 변형되어 0.85mm의 두께가 된다. 압연기의 롤 사이를 통과한 직후 판재는 CCSS 금형의 상부 금형과 하부 롤의 사이를

진행하며, 판재가 CCSS 금형의 하부 금형에 접촉하며 급격한 진행방향 및 속도 변화를 거친다. 이때 전단변형과 함께 판재 두께의 변화가 일어나, 판재 두께가 원래의 두께인 1.0mm 로 두꺼워진다. 이와 같이 CCSS 금형에서 두께의 변화가 일어나므로 CCSS 공정을 DCAP (Dissimilar Channel Angular Pressing) 공정으로 기술하기도 한다. 그런데, 압연 변형 및 전단변형이 조합된 CCSS 공정에서는 한번의 공정 후에 원래의 두께가 회복되기 때문에

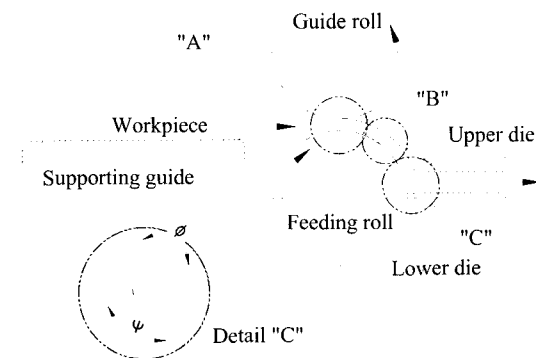


Fig. 1 Schematic diagram of the CCSS process

두께의 감소 없이 즉, 시료의 초기형태를 유지하면서 판재금속에 반복적인 전단변형을 가할 수 있는 것이다.

CCSS 금형에서 전단변형이 일어나는 곳의 위쪽 금형의 모서리각(Φ , oblique angle)은 120° 로 또한 아래쪽 금형의 만곡각(Ψ , curvature angle)은 0° 로 하였다. 이 모서리각(Φ)과 만곡각(Ψ)은 CCSS 금형에서 일어나는 전단변형의 크기와 분포에 매우 큰 영향을 준다. 압연롤 표면의 선속도는 약 10mm/s, 압연롤의 직경은 100mm 이다. 판재의 두께가 1.0mm 이하이므로 Fig. 1 에서는 본 공정을 알아보기 쉽게 하기 위하여 판재의 두께를 크게 과장하여 표현하였다.

Fig. 1 과 같이 CCSS 공정에서 시료인 알루미늄 판재는 CCSS 장치를 진행하면서 연속적인 변형을 받는다. 이때 일어나는 변형을 재료의 진행방향에 A, B, C 구역으로 구분하여 생각할 수 있다. 구역 A 는 압연변형이 일어나는 부분, 구역 B 는 소재가 금형의 원호부분을 이동함에 따라 굽힘변형이 일어나는 부분, 구역 C 는 실제로 판재에서 전단변형이 일어나는 부분이다. 이 구역 C 에서의 변형이 CCSS 공정에서 가장 중요하다.

3. 유한요소해석과 공정조건

3.1 압연부 및 굽힘부 유한요소 해석

CCSS 장치에는 알루미늄 판재를 CCSS 급형내로 공급하는 압연장치가 설치되어 있다. 이 압연장치는 같은 직경 100mm 의 크기를 갖는 안내롤(guide rolling)과 이송롤(feeding roll)로 구성된다. 이송롤은 미끄럼이 일어나지 않고 판재를 밀어낼 수 있도록 매우 거칠은 표면을 갖고 있으며, 안내롤은 일반적인 냉간 압연롤과 같이 매끄러운 표면을 갖고 있었다. 유한요소해석 시 재료간의 마찰의 정도는 마찰인자(friction parameter)인 m 으로 표현될 수 있는데, m 은 마찰응력/임계전단응력의 비로 정의된다. 본 연구에서는 압연유를 사용하지 않았고, 동시에 알루미늄 판재와 이송롤 계면에는 매우 큰 마찰이 작용하므로, 유한요소해석 시 이 계면에 고착마찰(sticking friction) $m=1.0$ 의 마찰인자가 작용하는 것으로 가정하였다. 또한 안내롤은 이송롤에 비하여 표면이 매우 매끄럽기 때문에 알루미늄 판재와 안내롤의 계면의 마찰인자는 $m=0.1$ 을 가정하여 유한요소해석을 수행하였다.

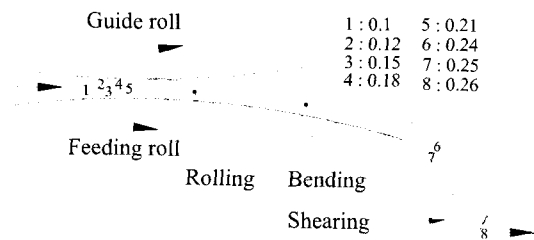


Fig. 2 Deformation route during CCSS

CCSS 장치에서 다양한 형태의 소성변형이 일어난다고 있음을 Fig. 2 는 보여준다. 알루미늄 판재는 안내롤과 이송롤로 구성되는 압연장치에 의하여 먼저 압연변형이 일어난다. 일반적으로 압연변형은 압연 전과 후의 판재의 형태변화 만을 가정하면 평면변형으로 가정될 수 있다. 압연롤 사이에서 연속적으로 평면변형상태가 작용한다면 $\epsilon_{11} = -\epsilon_{33}$ 이며 다른 변위요소 ϵ_{22} , ϵ_{12} , ϵ_{13} , ϵ_{23} 들은 0 이다. 그러나 이 가정은 압연되는 판재의 중앙 층이 아닌 다른 두께 층에서 일어나는 전단변위를 무시한 것이다. 압연변형 시에는 롤의 기하학적인 형상 변화에 의하여 e_{31} 값이 0 이 아니며, 이 e_{31} 은 압연롤 사이에서 계속적으로 변한다. 또 하나의 전단요소인 e_{13} 은 마찰언덕(friction hill)이라 불리는

롤의 표면과 압연재의 표면에서 작용하는 마찰에 의하여 얻어진다.⁽¹⁴⁾ 마찰언덕의 변화에 의하여 얻어지는 전단요소 e_{13} 는 롤의 입구쪽에서는 양의 값을 갖으며, 중립점에서는 0 이며, 롤의 출구쪽에서는 음의 값을 갖는다. 그런데 e_{13} 의 변화는 롤과 압연재와의 마찰에 크게 의존하며 이에 따라 변위요소 ϵ_{13} 의 변화가 얻어진다.

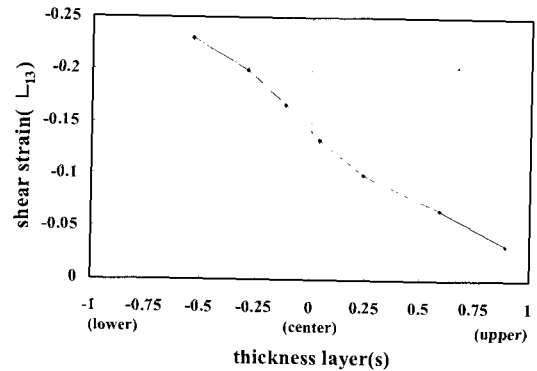


Fig. 3 Variation of ϵ_{13} in the roll gap (the parameters $s=+1.0, 0.0$ and -1.0 denote the upper surface, center and lower layers, respectively)

압연변형 시 판재의 두께 층에 따른 변위요소 ϵ_{13} 의 변화를 Fig. 3 은 보여준다. 본 연구에서 안내롤에는 $m=0.1$, 이송롤에는 $m=1.0$ 의 마찰인자가 작용하였다고 가정하였기 때문에 안내롤과 접하는 판재의 윗면(upper surface)에 비하여 이송롤에 접하는 판재의 아래쪽 면(lower surface)에는 훨씬 큰 마찰이 얻어지고 그 결과 변위요소 ϵ_{13} 의 변화가 크게 얻어졌다. Fig. 2 에서 판재 아랫면 쪽에 높은 유효변형률이 얻어진 것도 이를 입증하고 있다.

Fig. 2 에서 압연을 받은 재료는 CCSS 급형에서 전단변형을 받기 전에 급형의 원호부분을 이동하면서 압연롤의 곡률반경 만큼 굽힘(bending) 변형을 받는다. 압연변형 후에 알루미늄 판재의 두께가 0.85mm 이며, 압연롤의 직경이 100mm 임을 감안하면, 굽힘에 의한 소성변형은 무시할 정도로 매우 작음을 알 수 있다. 이것은 Fig. 2 의 굽힘부에서의 유효변형률의 변화가 거의 없는 것으로도 확인할 수 있다.

3.2 전단변형부의 변형상태

CCSS 공정에서 가장 중요한 변형은 CCSS 급형의 모서리에서 일어나는 전단변형이다. Fig. 4 는 정

상상태(steady-state)에서의 전단변형 특성을 알아보기 위해 격자 왜곡(grid distortion), 변형률, 변형률 속도를 분석한 것이다. 교차각(Φ)은 120° 이고 만곡각(Ψ)은 0° 이며, 교차각을 이루는 부분에는 실제로 금형의 제작상 필요로 되어지는 라운딩처리를 하였으며, 만곡각 부분에는 일반모페기가 되어져 있

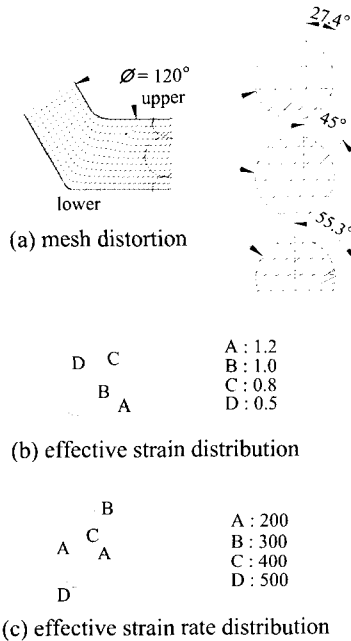


Fig. 4 Shearing deformation part ($\Psi=0^\circ$)

는 것으로 간주하여 유한요소해석을 수행하였다. 아래 금형(lower die)의 마찰인자(m)는 0.8로 하였으며 윗금형(upper die)은 마찰이 없는 것으로 가정하였다. 알루미늄 관재가 CCSS 금형의 모서리를 통과할 때 일어나는 전단변형은 금형의 교차각과 만곡각을 연결하는 직선부위에서 일어난다. 즉 재료의 진행방향이 변하는 곳에서 전단면(shear plane)이 형성되며, 이곳에서 전단변형이 집중적으로 일어남을 알 수 있다. 여기서 주목할 것은 전단변형이 끝난 후에는 추가적인 변형이 거의 없다는 점이다. 관재 두께 층에 따라 나누어 격자왜곡상태를 전단각도로 살펴보면 Fig. 4(a)의 그림과 같다. 관재의 위쪽 표면에서는 얻어진 전단변위는 약 27.4° 로 매우 낮으며, 또한 관재의 아래 쪽의 표면에는 약 55.3° 로 전단변위가 높게 일어났다. 그러나 대부분의 중앙 층에서는 약 45° 의 전단변위가 일어났다.

Fig. 4의 (b), (c)는 CCSS 시 유효변형률과 유효변형률 속도 분포를 보여주는데, 위쪽과 아래쪽의 표면층에서 중앙 층과는 다른 불균일 변형이 일어남을 보여주고 있다.

CCSS 시 불균일 변형의 주요 원인은 CCSS 금형의 모서리에서 일어나는 전단변형 ϵ_{13} 이 관재

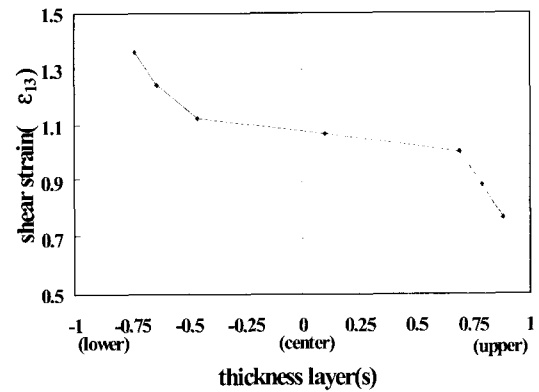


Fig. 5 Variation of the shear strain in the thickness layers (the parameters $s=+1.0, 0.0$ and -1.0 denote the upper surface, center and lower layers, respectively)

의 중앙에서 일어나는 전단변형 ϵ_{13} 과 다르게 얻어지기 때문이다. 관재 위쪽의 표면층($S=+1.0$)과 아래쪽의 표면층($S=-1.0$) 그리고 중앙층($S=0.0$)사이의 두께 층들에서 얻어지는 전단변형 ϵ_{13} 의 변화를 Fig. 5는 보여준다. 전단변형의 최대 및 최소 값의 차이를 최대 전단변형 값으로 나누면 약 0.4 정도의 불균일성이 얻어짐을 알 수 있다. 여기서 주목할 것은 $\dot{\epsilon}_{13}$ 의 변화곡선을 시간에 따라 적분하면 Fig. 4(a)에서 구한 전단각에 해당하는 즉 Fig. 5에서의 ϵ_{13} 전단변위가 얻어진다.

3.3 만곡각이 형성되는 전단변형부의 변형 상태

Fig. 6은 Fig. 4와 같이 교차각(Φ)은 120° 로 동일하지만 아래금형 표면에 작용하는 마찰을 $m=0.6$ 으로 하여 유한요소해석한 결과로, 금형의 원호부분과 소재의 출구가 만나는 만곡각(Ψ)이 형성됨을 보여주고 있다. 이러한 만곡각이 형성되는 가장 큰 이유는 아래금형(lower die)의 마찰이 작아져서 역방향 압력(back pressure)의 작용이 미비할 때 발생한다.⁽¹⁵⁾ 또한 여러 가지 유한요소해석을 시도한

바에 의하면 비정상 상태(non-steady state)에서 소재의 선단 모양에 따라 많은 영향을 받음을 알 수 있었다. 앞으로 이 부분에 대한 보다 많은 연구가 필요하다. (a)는 격자의 왜곡(grid distortion)을 보여주는데 판재에는 두께 층에 따라 심한 불균일 전단변형이 일어났음을 알 수 있다. 이와 같은 불균일 전단변형이 일어나는 이유는 두께 층에 따라 재료가 전단변형구역을 지나가는 거리가 다르기 때문이다.⁽¹⁶⁾

Fig. 6(a)의 판재의 위쪽 표면에서 얻어진 전단변위는 약 25.9°, 또한 판재의 아래 쪽의 표면에는 약 10.7°, 중앙 층에서는 약 38.7°의 전단변위가 얻어졌다. 이와 같이 만곡각(Ψ)이 존재하면 두께 층에 따른 불균일 전단변형이 증가함과 동시에 전체적인 전단변형의 양도 감소함을 확인할 수 있었다.

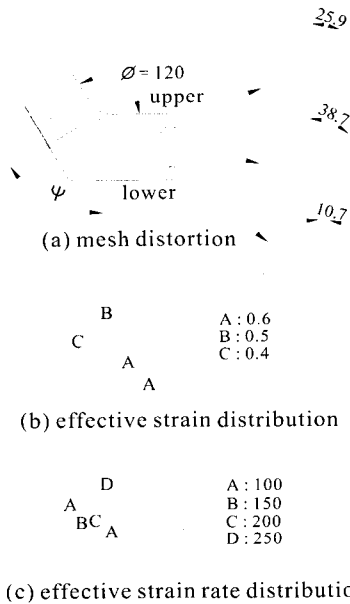


Fig. 6 Shearing deformation part ($\Psi=61^\circ$)

Fig. 6(b), (c)는 유효변형률분포와 변형률속도를 나타낸 것이다. (b)의 유효변형률은 Fig. 4(b)와 유사한 형태를 갖지만 최대 유효변형률 값이 더 작아졌다. (c)의 유효변형률 속도분포는 전단변형구역이 매우 불균일함을 보여준다.

Fig. 6의 CCSS를 행할 때 일어나는 전단변형 ϵ_{13} 의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 5에 비하여 두께 층에 따라 매우 심한 불균일한 전단변형이 일어났음을 확인할 수 있다. 즉, 전단변형의 최

대 및 최소 값의 차이를 최대 전단변형 값으로 나누면 약 0.6 정도의 불균일성이 얻어지는데, 이것은 Fig. 5의 0.4보다 큰 값임을 알 수 있다. 이것은

만곡각(Ψ)이 존재하면 만곡각이 존재하는 부위를 지나가는 재료에서 전단변형이 거의 일어나지 않기 때문이다. 따라서 판재의 모든 두께 층에 보다 균일한 전단변형을 가하기 위해서는 만곡각의 형성이 최소가 되는 조건에서 CCSS공정이 수행되어야 한다.

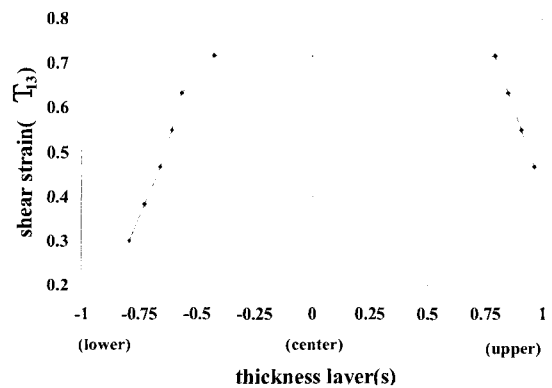


Fig. 7 Variation of the shear strain in the thickness layers (the parameters $s=+1.0, 0.0$ and -1.0 denote the upper surface, center and lower layers, respectively)

4. 결론

본 연구에서는 유한요소해석을 통하여 CCSS공정 전반에 걸친 변형상태의 변화를 추적하였고 또한 CCSS금형의 형태변화 등의 공정변수 변화가 알루미늄 판재의 변형상태에 어떠한 영향을 주는지 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 안내롤에 비하여 이송롤에 높은 마찰 인자가 작용하여 판재의 윗면에 비하여 판재의 아래쪽 면에서 ϵ_{13} 의 변화가 크게 일어났다.
- (2) CCSS공정시 굽힘변형은 매우 적어 굽힘부에서의 유효변형률의 변화가 거의 없었다.
- (3) 알루미늄 판재가 CCSS금형의 모서리를 통과할 때 일어나는 전단변형은 금형의 교차각과 만곡각을 연결하는 직선부위에서 일어나며, 만곡각이 클수록 변형되는 판재에서 두께 층에 따른 불균일 변형이 증가하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 지원(No. R01-2001-00261-0)을 받았습니다.

참 고 문 헌

- (1) Y. Iwahashi, Z. Horita, M. Nemoto and T. G. Langdon, 1997, "An investigation of microstructural evolution during equal Channel angular pressing", *Acta Materialia*, Vol. 45, pp. 4733~4741.
- (2) K. Nakashima, Z. Horita, M. Nemoto and T. G. Langdon, 1998, "Influence of channel angle on the development of ultrafine grains in equal-channel angular pressing", *Acta Materialia*, Vol. 46, pp. 1589~1599.
- (3) Y. Iwahashi, Z. Horita, M. Nemoto and T. G. Langdon, 1998, "The process of grain refinement in equal-channel angular pressing", *Acta Materialia*, Vol. 46, pp. 3317~3331.
- (4) M. Furukawa, Y. Ma, Z. Horita, M. Nemoto, R. Valiev and T. G. Langdon, 1998, "Microstructural characteristics and superplastic ductility in a Zn-22% Al alloy with submicrometer grain size", *Material Science Engineering A*, Vol. 241, pp. 122~128.
- (5) V. M. Segal, V. I. Reznikov, A. E. Drobyshvskiy and V. I. Kopylov, 1981, "Plastic working of metals by simple shear", *Metally (Eng. Trans. : Russian Metallurgy)*, Vol. 1, pp. 99~105.
- (6) Y. Wu and I. Baker, 1997, "An experimental study of equal channel angular extrusion", *Scripta Materialia*, Vol. 37, pp. 437~442.
- (7) A. Shan, I. G. Moon, H. S. Ko and J. W. Park, 1999, "Direct observation of shear deformation during equal channel angular pressing of pure aluminum", *Scripta Materialia*, Vol. 41, No. 4, pp. 353~357.
- (8) S. D. P. DeLo and L. Semiatin, 1999, "Finite Element Modeling of Nonisothermal Equal-Channel Angular Extrusion", *Met. Mater. Trans.*, Vol. 30A, pp. 1181~1402.
- (9) G. H. Bae, G. H. Kwon, S. W. Chae, S. I. Kwun, M. H. Kim and S. K. Hwang, 2002, "Finite element analysis of deformation behavior due to material properties during equal channel angular pressing", *J. KSPE*, Vol. 19, No. 8, pp. 187~193.
- (10) Y. H. Chung, D. H. Kim, H. T. Jeong, O. Engler and M. Y. Huh, 2002, "Evolution of texture and microstructure in AA 3004 sheets during continuous confined strip shearing deformation and subsequent annealing", *Mater. Sci. Forum*, Vols. 396-480, pp. 475~480.
- (11) Y. H. Chung, J. P. Ahn, H. D. Kim, B. B. Hwang, O. Engler and M. Y. Huh, 2002, "Effect of strain paths on the evolution of texture and work hardening in AA 5052 sheets during continuous confined strip shearing deformation", *Mater. Sci. Forum*, Vols. 408-412, pp. 1495~1500.
- (12) J. C. Lee, H. K. Seok, J. H. Han and Y. H. Chung, 2001, "Controlling the textures of the metal strips via the continuous confined strip shearing(C2S2) process", *Materials Research Bulletin*, Vol. 36, pp. 997~1004.
- (13) SFTC, 2000, Version 7.0 Users Manual, 5038 Reed Road Columbus, Ohio 43220.
- (14) E. Siebel, 1930, "Resistance and deformation and the flow material during rolling", *Stahl und Eisen*, Vol. 50, p. 1769.
- (15) B. S. Moon, H. S. Kim and S. I. Hong, 2002, "Plastic flow and deformation homogeneity of 6061 Al during equal channel angular pressing", *Scripta Materialia*, Vol. 46, pp. 131~136.
- (16) J. R. Bowen, A. Gholinia, S. M. Rogerts and P. B. Prangnell, 2000, "Analysis of the billet deformation behaviour in equal channel angular extrusion", *Material Science Engineering A*, Vol. 287, p. 87.