

## 마이크로 R2R 성형에서 주름의 발생 예측과 개선

민병욱<sup>1</sup>·서원상<sup>1</sup>·김종봉<sup>#</sup>·이혜진<sup>2</sup>·이상훈<sup>3</sup>·김종호<sup>4</sup>

### Prediction of Wrinkling in Micro R2R Forming and Its Improvement

B. W. Min, W. S. Seo, J. B. Kim, H. J. Lee, S. H. Lee, J. H. Kim

(Received December 27, 2010 / Revised January 20, 2011 / Accepted January 24, 2011)

#### Abstract

Recently, with the merits of simplicity, ease of mass production and cost effectiveness, a roll-to-roll (R2R) forming process is tried to be employed in the manufacturing of the circuit board, barrier ribs and other electronic device. In this study, the roll-to-roll process for the forming of micro-pattern in electronic device panel is designed and analyzed. In the preliminary experiments, two major defects, i.e., crack near the dimple wall and wrinkling on outside region of dimple, are found. The study on the crack prevention is carried out in previous works by authors. In this study, the cause of wrinkling and modification of tooling to prevent the wrinkling is studied. The main cause of wrinkling is considered to be the uneven material flow along the rolling direction. To reduce or to retard the wrinkling initiation, a dummy shape on outside the pattern is introduced. From the finite element analysis results, it is shown that the dummy shape can reduce the uneven material flow significantly. Finally the effect of dimensions of the dummy shape on material flow is investigated and the optimum dimensions are found.

**Key Words** : Roll-to-roll Forming, Wrinkling, Crack

#### 1. 서 론

산업 수준이 고도화 되고 소비자의 요구가 증대됨에 따라 반도체, 의료, 정보 통신 등의 분야에서 고기능화 및 경박단소 제품의 수요가 증가하고 있다. 이와 같은 요구에 맞게 최근 IT 기술이 급속하게 발전하고 있다. 이런 IT 기술의 발전에 비해 제품을 생산하는 생산기술의 발전은 매우 느린 실정이다. 그래서 대부분의 IT 핵심 부품은 선진국에서 수입하고 있다. 본 연구는 IT 부품에 핵심으로 이용이 될 마이크로 부품의 생산에

관한 것이다.

소성 가공을 이용한 마이크로 크기의 부품 생산을 위해서 마이크로 압출[1], 마이크로 엠보싱[2], 마이크로 펀칭[3] 등의 공정에 관한 연구가 수행되고 있다. 마이크로 크기의 부품은 아니지만, 매크로 크기의 부품에 마이크로 크기의 형상 성형에 대한 연구도 최근 수행이 시도되고 있다. 연료전지 분리판의 마이크로 채널 성형[4], PDP의 벽면 리브[5], 그리고 플렉서블 디스플레이 패널의 패턴[6]이 그 예제들이다. 최근에 플라스틱의 재질 특성의 한계로 인해 금속 미세 박판의

1 서울과학기술대학교 NID 융합대학원  
2 한국생산기술연구원 융합생산기술연구부  
3 서울과학기술대학교 자동차공학과  
4 서울과학기술대학교 제품설계금형공학과  
# 교신저자 : 서울과학기술대학교 자동차공학과,  
E-mail : jbkim@snut.ac.kr

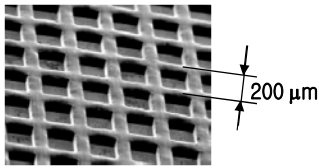


Fig. 1 An example shape of flexible display panel

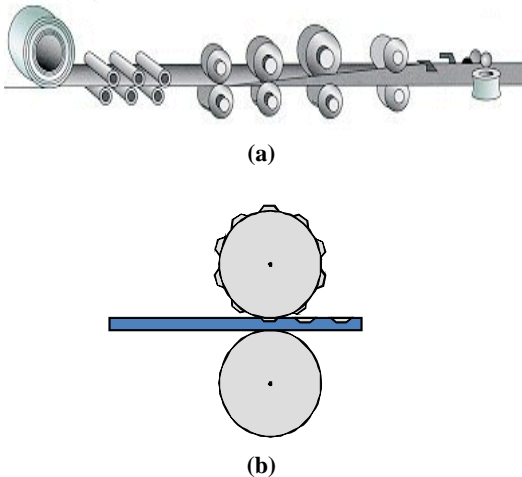


Fig. 2 Schematic illustration of (a) the conventional roll forming process and (b) the R2R forming process

플렉서블 디스플레이 패널에의 주로 사용이 검토되고 있다. 이러한 플렉서블 디스플레이 패널 내에는 Fig. 1에 보이는 것과 같이 격벽 구조를 갖춘 일정한 간격의 패턴이 연속적으로 성형되어 있다. 따라서 이번 연구에서는 롤-롤 성형 공정을 통해서 이러한 미세박판에 연속적인 패턴을 성형하는 공정에 관한 연구를 진행하였다. 제시하는 롤-롤 성형 공정은 Fig. 2(a)에서 보이는 롤 포밍 공정과 유사하다. 롤 포밍 공정은 동시에 돌아가는 여러 개의 롤 사이에 미세박판이 통과되어 패턴을 성형하는 방법으로써 롤-롤 성형 공정과는 다르게 성형 제품이 일정한 단면을 갖고 있고, 주요 성형 메커니즘이 굽힘이라는 특징이 있다. 롤 포밍 공정은 단순하고 높은 생산성을 갖추고 있어 대량 생산에 효율적으로 사용되고 있다.

하지만 본 연구에서 제안하는 롤-롤 성형은 이러한 롤 포밍 공정과는 약간의 차이가 있다. 상하부 롤의 회전을 통해 연속적인 배열의 홈이나 패

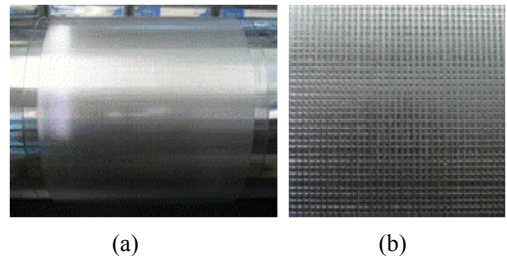


Fig. 3 (a) The upper roll and (b) the detailed view of protrusion patterns on the upper roll used in the experiments

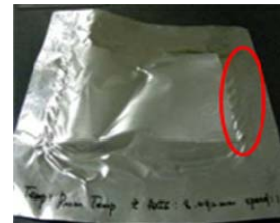


Fig. 4 Formed sheet by the R2R forming process

턴 등을 성형하는 점은 같다. 하지만 상부 롤에만 돌기가 있어 성형 후 미세박판에는 한쪽 면만 패턴이 성형되는 특징을 가지고 있다. 이러한 이유로 인해 롤-롤 성형 공정은 롤 포밍 공정과는 다르게 성형 후 제품의 단면이 일정하지 않고 메커니즘 또한 단순 압축 공정과 유사하다.

공정 중 발생 할 수 있는 결함을 예측하고 공정 후 성형 분석을 위해 사전 실험을 수행하였다. Fig. 3은 실험에 사용 되는 상부롤과 상부롤 표면 위에 형성된 미세 돌기를 보여 준다. Fig. 4는 실험 후 결과로서 패턴내의 성형은 이루어 졌지만 타 원으로 표시된 부분을 보면 패턴의 가장자리 끝에서 주름이 발생함을 확인 하였다. 이러한 결함은 추후 조립 공정과 전체적인 재료의 성형에 영향을 줄 것으로 판단된다. 따라서 이러한 결함을 해결 해야만 성공적인 롤-롤 성형 공정이 이루어진다.

따라서 본 연구에서는 미세패턴의 롤-롤 성형 공정 중 발생하는 결함 중 하나인 주름을 해석을 통해 예측하였고, 주름 발생을 없애기 위해 추가적인 가이드의 도입을 제안하였으며 가이드의 거리와 가이드의 폭 그리고 소재의 폭 방향 길이에 따라서 주름의 발생을 재료의 흐름 관점에서 비교 분석하였다.

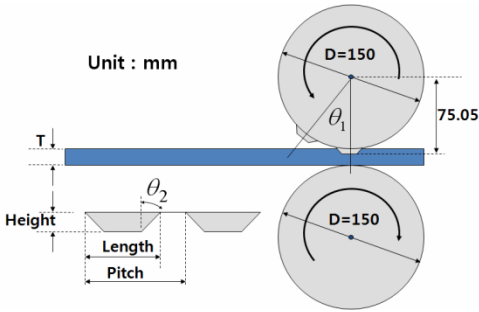


Fig. 5 Configuration of the analysis model

## 2. 해석모델링

### 2.1 형상 모델링

해석은 소성가공 공정해석에 많이 이용되는 범용 프로그램 Deform-3D를 이용하였다. Fig. 5는 해석을 위한 개략적인 형상을 보여 준다. 소재의 두께(T)는 0.2mm, 상부와 하부 롤러의 직경(D)은 150mm, 돌기의 높이(Height)는 0.05mm, 돌기내의 경사각( $\theta_2$ )은 20°, 그리고 돌기의 피치(Pitch)는 0.2mm이다.

딥 드로잉이나 스탬핑 공정에서 발생하는 주름은 대부분 압축응력에 의해서 발생된다. 하지만 롤-롤 성형 공정 중 발생하는 주름(Fig. 4)은 불규칙한 재료의 흐름 때문인 것으로 사료된다. 이는 Fig. 6을 통해서 확인 가능하다. Fig. 6은 롤-롤 공정에 의해 변형된 재료의 예를 보여 준다. 롤러의 진행방향은 오른쪽이며 재료의 오른쪽 끝부분이 수직이 아닌 커브를 그리는 점을 보면 롤-롤 성형 공정 중에 발생하는 재료의 흐름이 불규칙함을 알 수 있다. 해석에 제시된 모델은 전체 모델이 아닌 부분모델을 택하였기 때문에 전체 모델일 경우 이러한 불규칙한 재료의 흐름은 Fig. 4에서 보여지듯이 연속적으로 축적되어 최종적으로 주름을 일으킨 것으로 판단된다.

### 2.2 유한요소 격자 및 경계 조건

범용 3D CAD 프로그램 Pro-Engineer 을 이용하여 소재와 금형에 대한 모델링을 수행하였다. 이를 통해 얻은 모델을 STL 파일로 변환하여 해석 프로그램인 Deform-3D 에서 읽어 들여 해석에 적합한 요소로 분할하였다. 변형이 이루어지는 박판소재는 30만개의 요소로 분할하였다. 성형 시에 발생하는 주름은 국부적인 현상이 아니기 때문에 가능한 한 많은 돌기(6×12)에 대해 해석을 수행하



Fig. 6 Deformed shape at intermediate stage of the R2R forming

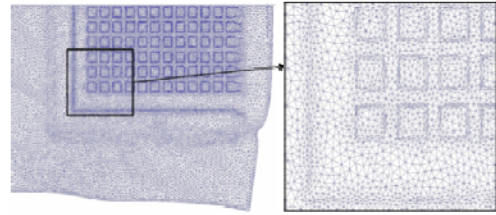


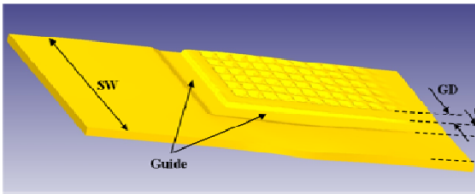
Fig. 7 Mesh structure during the R2R forming analysis

였다. 실제 금형에는 수백 만개의 돌기가 있지만, 해석 시간과 컴퓨터 메모리 제한으로 인해 부분 모델에 대해 해석하였다. 연속되는 부분은 대칭조건을 부여하였다. 비록 많은 요소수로 소재를 나누었으나 Fig. 7에서 보듯이 응력과 변형을 등의 값을 정확하게 예측하기에 패턴내의 격자가 여전히 크를 확인 할 수 있다. 따라서 분석을 오직 소재의 유동 측면에서 하였다. 요소의 종류는 격자 재생성이 용이한 사면체 요소를 이용 하였으며 상하부 롤러는 강체로 설정하였다. 롤러(Roller)의 회전속도는 상·하부 롤러 모두 0.035rad/s를 적용하였다. 상·하부 롤러와 소재와의 마찰조건은 냉간가공에서 일반적으로 적용이 되는 전단마찰  $m=0.12$ 로 설정하였다.

### 2.3 연구 방향

롤-롤 성형 공정에 있어서 불규칙한 재료의 흐름을 파악하기 위해 추가적인 가이드 형상을 도입하였다(Fig. 8). 그리고, 다음과 같이 세가지 설계 인자에 따른 재료의 거동을 관찰하였다.

- (1) 가이드 거리(GD)에 따른 영향 : 가이드는 폭 방향으로 흐르는 재료의 흐름을 롤러의 진행 방향으로 향하도록 하는 방벽 역할을 할 것으로 판단된다. 그래서 재료의 흐름을 보다 균일하게 할 것으로 보이며, GD에 따른 영향을 관찰 하였다.
- (2) 가이드 폭(GW)에 따른 영향 : 롤-롤 성형 공정 동안 가이드 아래의 소재부피는 패턴의 안쪽과 가이드의 외부 플랜지 부분으로 흐를 것이



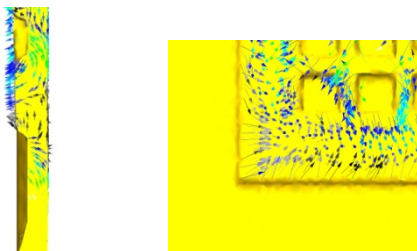
**Fig. 8 Schematic illustration of a guide shape and design parameters**

다. 이는 패턴이 성형되면서 롤러의 진행 방향으로 발생하는 소재의 불규칙한 흐름을 상세 시켜 줄 것이라 판단된다.

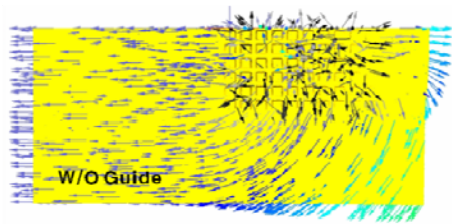
(3) 플랜지 길이(FL)에 따른 효과 : 불규칙한 소재의 유동은 패턴이 성형 되지 않는 플랜지 부분의 영향을 받을 것으로 생각된다. 그래서 플랜지 부분의 크기에 따른 영향을 파악하였다.

### 3. 결과 및 논의

Fig. 9는 가이드가 재료 흐름의 특성에 미치는 영향을 보여 준다. Fig. 9 (a)와 (b)는 각각 패턴과 가이드 사이의 재료 흐름을 패턴의 단면과 소재의 위에서 본 결과를 보여준다. 가이드에 의해 밀려난 체적이 패턴에 의해 밀려난 체적과 서로 상쇄됨을 확인 할 수 있다. Fig. 10은 가이드 형상이 없는 경우와 가이드 형상이 있는 경우에 대해 롤-롤 성형 공정 중 흐름(Fig. 10(a)와 Fig. 10(c))과 성형 이 끝난 시점의 소재형상(Fig. 10(b)와 Fig. 10(d))를 보여준다. 여전히 소재의 오른쪽 가장자리가 두 경우 모두 일직선을 이루지 않음을 확인 하였다. 하지만 앞서 제시한 가이드의 효과는 전체적인 소재의 흐름과 성형에 긍정적인 영향을 보임을 알 수 있다. 이는 가이드가 롤-롤 성형 시 소재의 유동 흐름이 일정한 방향을 이루게 도움을 주는 것으로 판단 할 수 있다.



**(a) pattern section view (b) Top view**  
**Fig. 9 Effect of guide on material flow**



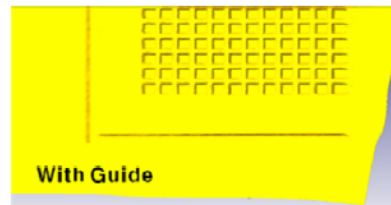
**(a) Material flow(w/o guide, after indentation)**



**(b) Deformed shape(w/o guide, after 0.8° rotation of rolls)**



**(c) Material flow(with guide, after indentation)**



**(d) Deformed shape(with guide, after 0.8° rotation of rolls)**

**Fig.10 Comparison of Material flow and deformed shapes**

Fig. 8 에서 보인 세가지 설계 인자 GD, GW, 그리고 FL의 영향을 상세히 분석 하기 위해 Fig. 6 에 타원으로 표시한 오른쪽 끝 소재의 형상과 오른쪽 끝 부분의 X 방향 속도를 Fig. 11과 Fig. 12에 각각 표시 하였다. Fig. 11(a)와 Fig. 12(a)는 가이드 거리(GD)에 따른 결과를 보여준다. GW는 0.2mm 이고 소재의 폭(SW)은 2.5mm로 고정되어 있다. 이는 GD가 증가 함으로써 FL값이 감소함을 의미

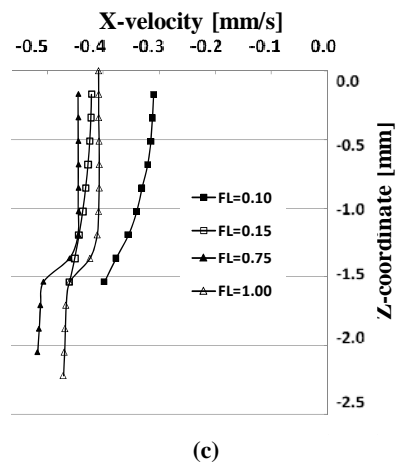
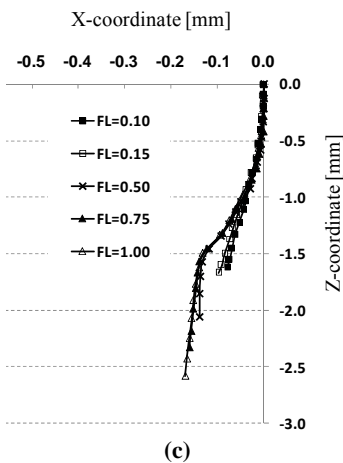
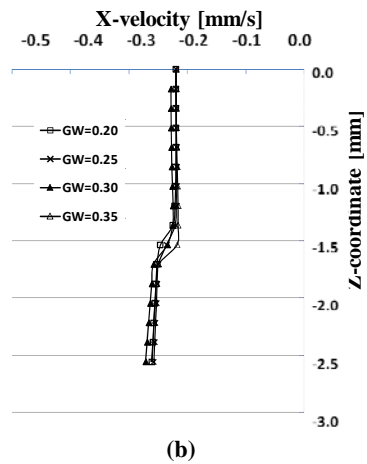
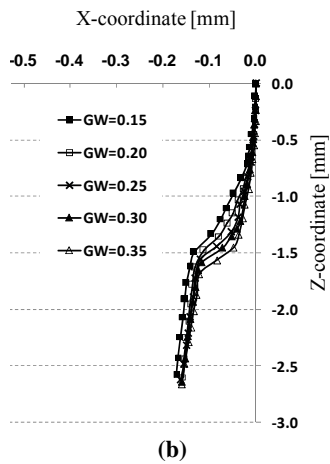
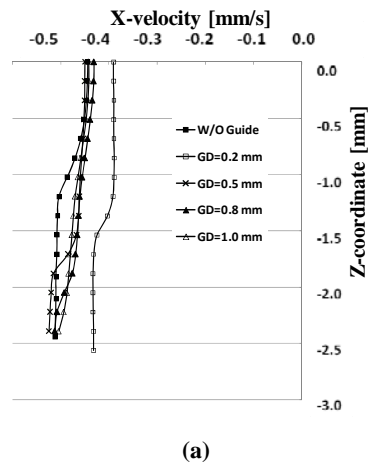
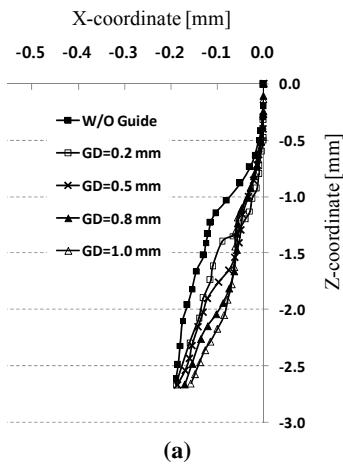


Fig.11 Comparison of deformed shapes of right edge for various values of (a) GD, (b) GW and (c) FL after  $0.8^\circ$  rotation of rolls

Fig.12 Comparison of x-velocity of right edge for various values of (a) GD, (b) GW and (c) FL after  $0.8^\circ$  rotation of rolls

한다. 결국 Fig. 11(a) 소재의 오른쪽 끝 부분의 변형된 형상은 가이드의 위치에 따라 영향이 크다고 판단 할 수 있으며 가이드가 패턴과 가까운 경우 Z방향으로의 패턴 열이 끝나는 지점( $Z > -1.2$ )까지의 재료흐름이 일정하다. 이는 X방향 속도 분포 Fig. 12(a)에서도 확인된다. Fig. 11(b)와 Fig. 12(b)는 가이드 폭에 따른 결과를 보여준다. GD는 0.2mm이고 소재의 폭SW는 2.5mm이다. 이는 GW의 값이 증가 할수록 FL의 값이 감소함을 의미한다. 가이드 폭이 증가할수록 재료의 유동이 균일해짐을 알 수 있다. 이는 Fig. 12(b)에 보인 속도 분포에서도 알 수 있다. Fig. 11(c)와 Fig. 12(c)는 플랜지 길이에 따른 효과를 보여준다. GD와 GW는 모두 0.2mm이다. FL이 감소할수록 오른쪽 변의 형상이 일정해 짐을 알 수 있다. 하지만 X방향 속도는 형상에서의 특징과 반대의 경향을 나타낸다. 원인은 추후 분석이 필요하다.

본 연구에서는 GD, GW, FL의 값이 주름의 발생에 미치는 영향을 분석하였고, 주름의 발생을 지연시키는 방법에 대해 해석을 통해 분석하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 박판 소재에 수십~수백 마이크로 크기의 패턴을 롤-롤 공정을 이용하여 성형하는 공정에 대해 연구하였다. 공정에서 발생할 수 있는 주름을 줄이기 위하여 추가적인 가이드 형상을 제안 하였고 유한요소 해석으로 검증하였다. 가이드의 유무와 가이드 형상의 위치, 가이드의 폭 방향 길이와 후 가공 측면에서 가이드의 바깥쪽과 성형되는 소재의 끝부분의 길이에 따른 소재의 유동을 비교 분석하였다. 결과로, 재료흐름 측면에서 가이드 형상을 둔 경우, 패턴과 가이드 사이의 거리(GD)가 작을수록, 가이드의 폭(GW)이 클수록, 그리고 외부 플랜지 길이(FL)이 작을수록 소재의 흐름이 일정함을 확인 하였다.

결과적으로, 본 연구에서 도입한 가이드 형상을 롤-롤 공정에서 재료의 불 균일한 흐름에 의해서

발생하는 주름을 완전 제거하기는 힘들지만 주름의 발생시점을 늦출 수 있음을 알 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 지식경제부가 지원한 전략 기술 개발 사업과, 지식경제부와 한국산업기술재단의 전략 기술 인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

#### 참 고 문 헌

- [1] J. Y. Kim, S. M. Joo, H. K. Kim, 2008, Super plastic Micro-extrusion for Micro-gears, Trans. of Kor. Soc. Machine Tool Eng., Vol. 17, No. 4, pp. 1~7.
- [2] M. Geiger, M. Kleiner, R. Eckstein, N. Tiesler, U. Engel, 2001, Micro forming, Annals of the CIRP, Vol. 50, No. 2, pp. 445~459.
- [3] B. Y. Joo, S. I. Oh, 2001, Development of Micro Punching System, Annals of the CIRP, Vol. 50, No. 1, pp. 191~194.
- [4] L. Peng, X. Lai, D. Liu, P. Hu, J. Ni, 2008, Flow channel shape optimum design for hydro formed metal bipolar plate in PEM fuel cell, J. Power Sources, Vol. 178, No. 1, pp. 223~230.
- [5] J. J. Park, H. S. Hwang, Y.S. Kim, H. C. Jeon, 2002, Design of groove and preform for roll forming of PDP barrier ribs, Trans. of Kor. Soc. Mech. Eng., Vol. 26, No. 10, pp. 2082~2088.
- [6] S. H. Cha, M. S. Shin, H. J. Lee, J. B. Kim, 2010, Design of roll-to-roll forming process of micro pattern on the thin sheet metal by finite element analysis, Trans. Mater. Process., Vol. 19, No. 3, pp. 167~172.
- [7] D. Li, A. Ghosh, 2003, Tensile deformation behavior of aluminum alloys at warm forming temperatures, Mater. Sci. Eng. Vol. A352, pp. 279~289.
- [8] H. Lke, M. Plancak, 1998, Coining Process as a Means of Controlling Surface Micro geometry, J. Mater. Process. Technol., Vol. 80~81, pp. 101~107.