

# 이차전지 전극제조용 열간압연롤러와 전극재료의 열 변형 및 스프링백 해석

김경식\* · 김철†

## Analysis of a Hot Rolling Roller and Spring-back of Electrode Materials for Secondary Batteries

Kyung-Sik Kim, Cheol Kim

**Key Words:** Hot rolling(열간압연), Spring-back(스프링백), Electrode material(전극재료), Thermal deformation(열 변형), Contact analysis(접촉 해석)

### Abstract

A roller with a shaft and hot oil paths for pressing electrodes of polymer batteries were modeled and analyzed by FEM. There are many hot oil tubes in the roller and shaft, through which 72°C hot oil flows for heating the surface of a roller and shaft. Thermal deformations and temperatures distributions of the roller and shaft were calculated and a convection boundary condition on surfaces was used. The influence of existence of a groove in the shaft on the flatness of a roller surface caused by thermal deformation was investigated. In addition, the amount of spring-back of electrodes under vacuum pressure and heating was calculated after the hot rolling process. It was shown from this study that the groove in one shaft had a favorable effect on the surface flatness.

### 1. 서 론

2차 전지(rechargeable battery)의 수요증가로 인해 재료특성, 전지 제조기술개발의 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 고온에서는 전지 케이스 파손과 부풀음(swelling) 현상으로 안전성의 문제가 발생하여 전극재료에 대한 제조공정 특성연구의 필요성이 대두되었다. 또한, 매년 증가하는 전지 수요량을 충족시키기 위해서는 제조설비의 국산화가 시급한 실정이다.<sup>(1)</sup>

전지 셀(cell)의 용량 증가를 위해 셀 내부에 적층되는 전극 표면의 편평도가 2 $\mu$ m여야 한다. 그러나 전극재료는 압연공정(pressing process)과 진공건조공정(vacuum drying process)을 거치면서 스프링백(spring-back)이 일어나 전극 표면의 편평도가 나빠지며 제조공정에 어려움이 생긴다. 또한 전극 압연용 롤러는 열 변형으로 인한 표면의 미세한 형상변형이 전극의 품질에 큰 영향을 끼친다. 기존의 강 제조 롤러의 형상에 관한 연구는 활발히 진행되었으나 폴리머를 압연하는 롤러의 개발은 미비한 수준이다.<sup>(2,3,4)</sup>

본 연구에서는 탄소성 해석(elastic-plastic analysis)과 접촉해석(contact analysis)을 수행하여 압연공정과 진공건조공정을 거치면서 생긴 전극 재료의 스프링백을 계산하였다. 또한, 전극 압연

---

† 정회원, 교수, 경북대학교 기계공학부

E-mail : kimchul@knu.ac.kr

TEL : (053)950-6586 FAX : (053)950-6550

\* 경북대학교 대학원 기계공학과

용 롤러의 열간압연 시, 실제 전극의 압연온도와 표면 편차를 측정하기 위해 열전달 및 열 변형 해석을 수행하였다. 마지막으로 전극 압연용 롤러의 열 변형으로 인해 나빠진 표면의 편평도를 높이기 위해 압연하중과 반대방향으로 하중을 작용하여 요철의 유·무에 따른 변위를 비교하였다.

## 2. 전극재료의 스프링백 해석

### 2.1 유한요소수식화

대변형(large deformation)의 비선형문제에는 변형 속도에 따라 시간 적분법으로 계산하는 내연적(implicit)방법과 외연적(explicit)방법이 있다. 그 중 내연적 유한요소해석법(implicit finite element method)은 큰 시간간격을 가지며 각 단계마다 힘의 평형을 맞추어 여러 번 촉차하여 수렴해나가는 방식이며 생산기술 분야에서 소성, 늘어짐(creep), 일방접촉(unilateral contact), 마찰 접촉(contact friction) 등 복잡한 현상을 해석하는데 쓰이고 있다.

탄소성 재료에 대한 개정된 라그랑지언 방정식(updated Lagrangian equation)(1)은 가상일의 원리로부터 도출하였다.<sup>(5)</sup>

$$\int_{V_0} L^{\alpha\beta\gamma\rho} e^{\alpha\beta} \delta e^{\gamma\rho} dV + \int_{V_0} \tau^{\alpha\beta} \frac{\partial u_i}{\partial \theta^\alpha} \frac{\partial u_i}{\partial \theta^\beta} dV = \int_{S_0^i} t_0^{(t_i + \Delta t)} \delta u_i dS - \int_{V_0} \tau^{\alpha\beta} \delta e^{\alpha\beta} dV \quad (1)$$

위의 식을 뉴턴-랩슨법(Newton-Raphson algorithm)을 적용하여 유한요소수식화(FEM formulation)하면 다음과 같이 표현된다.

$$K(u) \cdot \delta u = F - R(u) \quad (2)$$

여기서  $K$ 는 강성행렬,  $u$ 는 변위벡터,  $F$ 는 외력벡터, 그리고  $R$ 은 내부응력벡터에서 얻은 내력벡터이며,  $K$ ,  $R$ , 그리고  $F$ 는  $u$ 의 함수이다. 위의 (2)식에 완전 뉴턴-랩슨법(full Newton-Raphson algorithm)을 적용하면 다음과 같이 표현된다.

$$K(u_{n+1}^{i-1}) \cdot \delta u^i = F - R(u_{n+1}^{i-1}) \quad (3)$$

여기서 마지막의 근사 해를 얻기 위해  $\delta u^i$ 항을

가정하였으며  $i$ 는 반복횟수이다.

$$\Delta u^i = \Delta u^{i-1} + \delta u^i, u_{n+1}^i = u_{n+1}^{i-1} + \delta u^i \quad (4)$$

위의 수식의 해는 일정한도까지 수렴할 때까지 반복되며  $n$ 은 최종 횟수이다.

본 연구에서는 완전 뉴턴-랩슨법을 적용한 MD Nastran SOL600을 사용하였으며 부피가 크고 3차원 문제를 해결하기에는 어렵지만, 접촉문제에서는 가장 좋은 방법으로 알려져 있다.<sup>(6)</sup>

### 2.2 스프링백 해석

전극(electrode)은 정극(cathode)과 부극(anode)으로 나뉠 수 있다. 정극재료는 알루미늄 호일(Al foil)에 폴리머 재료(LiCoO<sub>2</sub>, LiNiO<sub>2</sub>)가 도포된 형태로 이루어져있으며 부극재료는 구리 호일(Cu foil)에 탄소 재료(Carbon)가 도포된 형태로 이루어져 있다. 폴리머 재료들은 상온에서 쉽게 압연되지 않는다. 또한, 고용량의 전지를 좌우하는 전극의 단위체적당 밀도(g/cm<sup>3</sup>)를 높이기 위해서는 열간압연(hot rolling)이 이용된다. 특히 부극재료에 도포되는 탄소재료는 섬유(fiber)를 띄고 있어 정극재료와 같이 약 30%의 높은 압연율로 작업을 하였을 경우에는 그 구조가 파괴되어 전지의 용량 및 수명 저하 등의 문제가 유발될 수 있다. 따라서 부극재료는 약 15% 전후의 압연율로 작업을 실시할 수 있다(Fig. 1).

스프링백은 전극재료가 열간 압연 롤러에 의하여 강제변형이 일어난 후 열간 압연 롤러에서 빠져 나오면서 구속이 사라지게 되어 새로운 정적 평형 상태를 만족하기 위하여 일부 탄성변형이 복원되어 일어나는 현상이다. Table 1에 전극재료의 실제 스프링백 두께를 나타내었으며 본 연구에서는 Table 2, Fig. 2에 나타난 전극재료의 물성값을 사용하였다. 압연 롤러는 하중을 받는 전극 재료보다 매우 강성이 크기 때문에 변형이 발생하지 않는다고 가정을 하여 강체(rigid body)요소로 모델을 정의하였다. 그리고 전극 재료는 비선형해석이 가능한 shell요소로 모델링하였다. 압연 롤러와 전극 재료사이에는 접촉조건을 주어 기계적인 거동이 이루어지도록 하였으며 전극 재료에 비해 상대적으로 강성이 높은 압연 롤러를 전극 재료의 30% 두께로 강제 이동하여 전극 재료의 스프링백이 일어날 수 있도록 하였다. 전극 재료

는 양쪽 끝부분의 절점(node)에 변위를 고정하였다(Fig. 3).<sup>(7)</sup> Fig. 4는 전극재료의 스프링백을 나타내었으며 시간에 따라 전극 재료의 두께변화를 볼 때 1 초까지 45 $\mu\text{m}$ 까지 압연되면서 이후로는 9 $\mu\text{m}$ 로 스프링백이 일어나면서 수렴하였다.

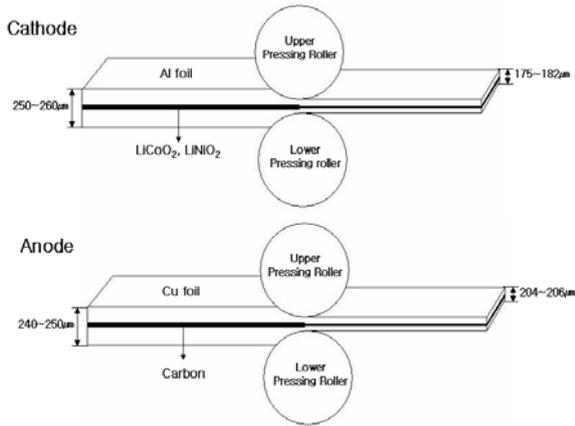


Fig. 1 Pressing process of the electrode

Table 1 Thickness of the electrode

	Cathode	Anode
Before	250~260 $\mu\text{m}$	240~250 $\mu\text{m}$
After	175~182 $\mu\text{m}$	204~206 $\mu\text{m}$
Spring-back	1~2 $\mu\text{m}$	7~10 $\mu\text{m}$

Table 2 Material properties of the electrode

Modulus of elasticity	300 GPa
Poisson's ratio	0.3

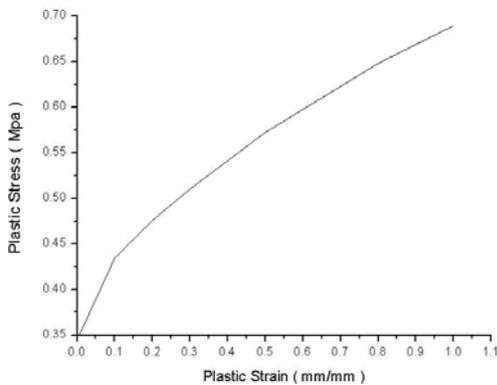


Fig. 2 Plastic stress-strain curve of electrode

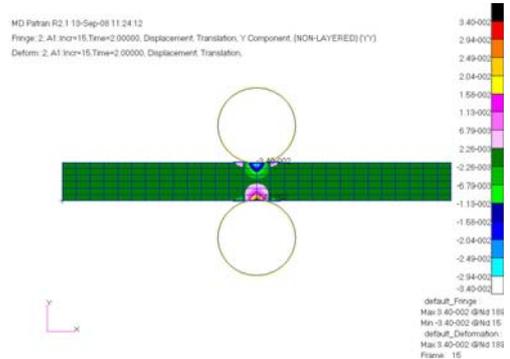


Fig. 3 Contact analysis of the electrode

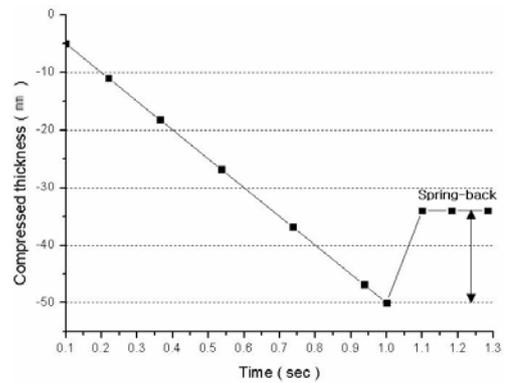


Fig. 4 Spring-back of the electrode

### 3. 축에 대한 요철부의 영향

#### 3.1 롤러의 재료 특성 및 구조

전극 압연 롤러는 지름이 650mm이고 길이가 800mm인 원통형구조에 내부에 롤러의 가열을 위한 유로가 중앙에서 표면으로 산개된 구조를 가지고 있다(Fig. 5~6). 이 유로를 통하여 고온의 유체(oil)가 중앙에서 표면으로 이동하고 다시 중앙으로 방출됨으로써, 롤러 전체를 가열하게 된다. 롤러는 SUJ2라는 고탄소크롬특수강으로 제작되었으며 SUJ2의 재료특성은 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Material properties of SUJ2

Density	7.81 $\text{g/cm}^3$
Modulus of elasticity	210 GPa
Poisson's ratio	0.3
Thermal expansion coefficient	$11.9 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
Thermal conductivity	46.6 $\text{W/m} \cdot \text{K}$

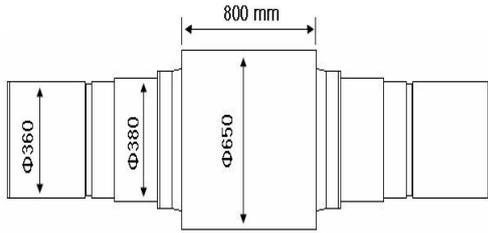


Fig. 5 Hot rolling roller

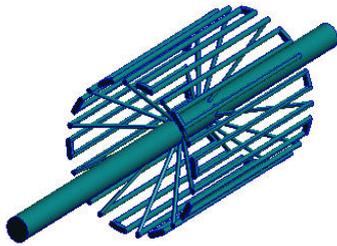


Fig. 6 Hot oil paths in the roller

### 3.2 열전달 해석

롤러의 열전달 해석을 위하여 롤러의 초기온도와 주변온도는 20℃로 가정하였다. 또한, 롤러를 가열하기 위한 열 유체의 온도는 롤러 내부 유로를 지나는 절점에 실제 열 유체의 온도인 72℃로 설정하였다. 롤러와 축의 내부는 열전도에 의한 온도확산을 구현하였으며, 롤러와 축의 표면은 대류조건을 주어 냉각시켰다. 롤러는 압연공정시, 19.5rpm의 회전속도를 가지는데 이는 거의 자연대류로 간주할 수 있어 대류계수는  $25W/m^2 \cdot K$ 의 값을 사용하였다. 본 해석은 Nastran SOL 153을 사용하여 요소의 수는 58,501개이며 요소는 8절점 6면체요소(Hex 8)를 사용하였고, 이 요소는 3차원 열전달 및 열 변형 계산에 정확한 값을 가진다.<sup>(8)</sup> 해석을 통해 얻어진 롤러와 축 내부의 온도분포를 Fig. 7에 나타내었다. 온도분포의 결과를 보면 유로 안쪽의 부분은 열 방출이 거의 없어 가장 큰 온도를 나타내고 있고 표면 쪽으로 갈수록 대류에 의해 온도가 낮아짐을 알 수 있다. 표면의 온도분포도 롤러의 중앙은 높은 반면에 축 방향으로 멀어질수록 온도가 낮아진다. 이는 롤러의 끝단 부분은 롤러의 작업표면과 측면에서의 대류에 의한 냉각이 활발하기 때문이다. Fig. 8은 롤러의 작업표면 위치별 온도분포를 나타내었으며 전극을 압연하는 작업표면은 70℃로 일정하게 유지됨을 알 수 있다.

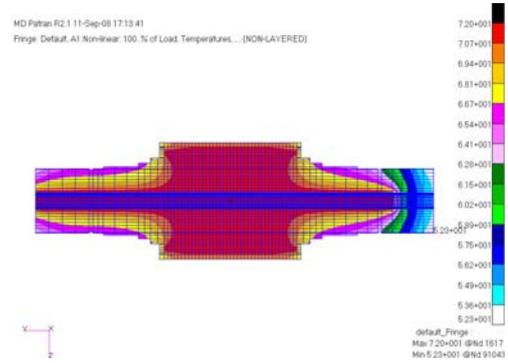


Fig. 7 Temperature distribution in a roller and shaft

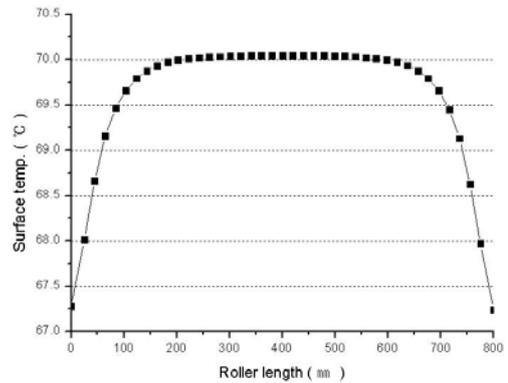


Fig. 8 Temperatures on a roller

### 3.3 열 변형 해석

롤러의 초기온도와 열전달해석을 통해 얻은 최종 온도와의 차이를 이용하여 롤러와 축의 열 변형을 계산하였다. 롤러의 열 유체가 들어가지 않는 오른쪽 측면에 변위를 구속을 하였고, 전체 절점의 온도를 초기온도 20℃에서 72℃로 변화시켜 변위를 계산하였다. Fig. 9에 열 변형후의 롤러와 축의 단면을 나타냈으며, Fig. 10은 롤러 작업표면의 열 변형 값을 나타내었다. 롤러의 표면 지점을 보면 중앙부에서는 가장 높은 변형률을 나타냈고, 측면으로 갈수록 낮은 변형률을 나타내었다. 이는 롤러 표면의 냉각이 측면으로 갈수록 측면 부분 냉각의 영향으로 원활해져 온도의 차이가 중앙지점의 표면보다 측면지점의 표면에서 낮기 때문이다. 해석결과, 롤러 작업표면의 중앙지점의 반경방향 열 변위 값은 약  $199\mu m$ 로 나타났고, 끝단의 반경방향 열 변위 값은 약  $194\mu m$ 로 나타났다. 롤러의 중앙지점과 끝단의 열 변위 값의 차이는  $3\mu m$ 로 나타났고 전극을 압연하는 작업표면인 650mm구간의 열 변위 값의 차이는  $2\mu m$ 이다.

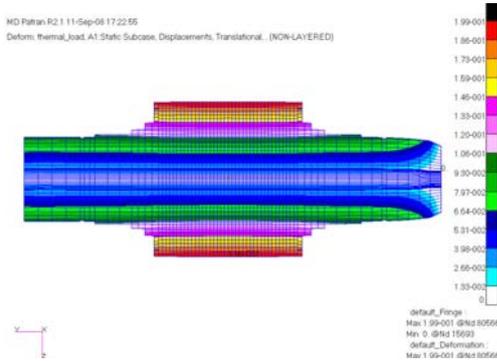


Fig. 9 Surface swell of a roller

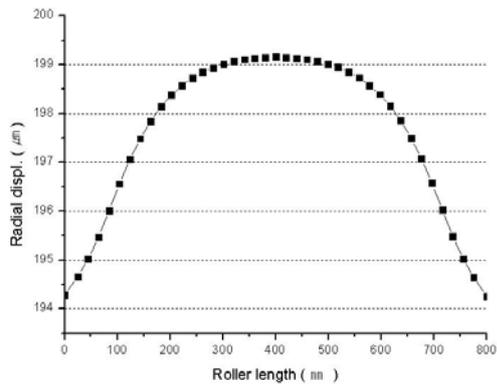


Fig. 10 Thermal expansion of surface

### 3.4 굽힘력에 의한 영향

롤러는 압연 공정 시, 열 변형 후 양측에 96 ton의 압연하중을 받게 된다. 이 하중은 온도변화에 의한 열 변위 차이로 변화된 롤러의 표면에 기계적인 변형을 일으킨다. 하지만 압연하중에 의한 굽힘 변형(bending deformation)은 압연 롤러 표면의 편평도를 떨어뜨리는 작용을 한다. 압연 공정 시, 롤러의 직경에 비해 축의 길이가 길기 때문에 롤러의 중심부에 대해 대칭으로 양쪽의 축이 처지는 탄성변형이 발생하게 된다. 이때, 롤러의 탄성변형에 의해 발생된 롤러의 중심부와 축의 변형차가 전극재료에 전사되어 전극 중심부의 두께가 전극 끝단보다 커지는 현상이 발생하게 된다. Fig 11은 굽힘력(bender force) 제어를 통해 롤러의 형상을 제어할 수 있으며, 동시에 하중변동에 의한 형상의 영향을 억제하는 것이 가능하다는 것을 보여주고 있다.

굽힘력에 의한 굽힘 변형을 알아보기 위해 실제 하중이 가해지는 지점에 굽힘력을 작용시켰으며 변위는 압연하중이 가해지는 베어링 부분의 절점에 구속시켰다(Fig 12). 그리고 Fig 13은 36

ton의 굽힘력을 작용하였을 때, 압연 롤러 작업표면의 축의 요철 유·무에 따른 변위차이를 비교하였다. 요철이 있는 경우의 최대변위와 최소변위의 차이는 3.242 $\mu$ m로 나타났고, 요철이 없는 경우의 최대변위와 최소변위의 차이는 0.236 $\mu$ m로 나타났다. 이는 요철이 존재할 경우 압연하중과 반대방향으로 작용하는 굽힘 변형이 더 커져 롤러의 편평도를 높이는 작용을 한다.

Fig 14는 요철이 존재할 때의 세 종류의 굽힘력의 굽힘 변형을 비교하였다. 36ton일 때 3.242 $\mu$ m, 80ton일 때 5.812 $\mu$ m, 그리고 160ton일 때 12.348 $\mu$ m로 나타났다.

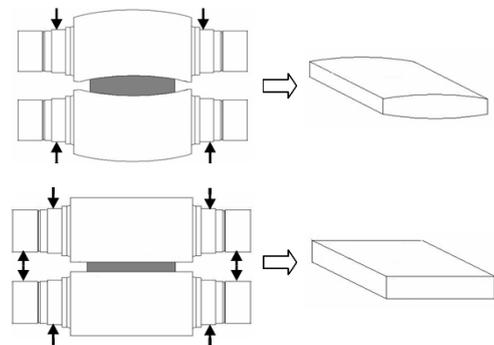


Fig. 11 control of a bender force

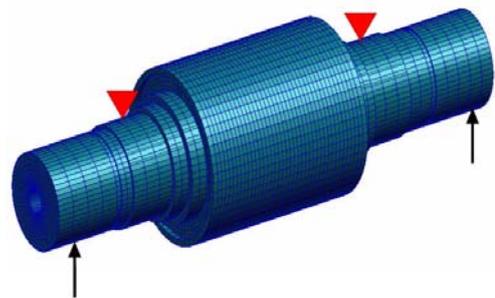


Fig. 12 FE model of a roller with a bender force

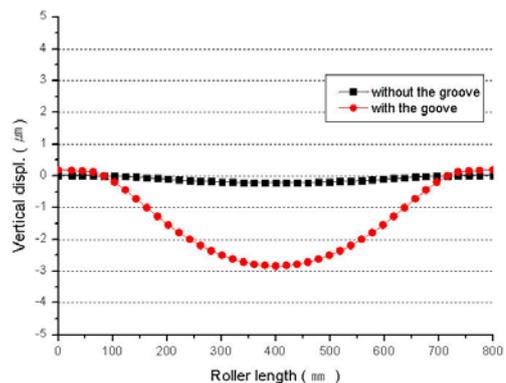


Fig. 13 Influence of existence of a groove

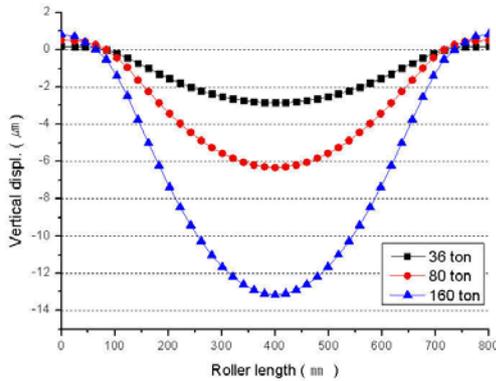


Fig. 14 Comparison of varied bender forces

#### 4. 결론

유한요소해석을 이용하여 압연공정과 진공건조 공정을 거치면서 생긴 전극재료의 스프링백을 계산하였고 배터리 전극 제조용 롤러의 열적특성을 분석하였다. 그리고 롤러의 열 변형과 압연하중으로 나빠진 편평도를 높이기 위해 굽힘력을 작용하여 롤러의 표면편차를 제어하였다. 해석을 통해 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) 실제 전극재료의 스프링백과 비교하여 해석 결과의 타당성을 검증하였다.
- (2) 열전달 해석결과, 전극재료의 실제 작업표면 온도인 70℃로 유지하기 위해 열 유체온도를 72℃로 사용해야 된다는 것을 보여주었다.
- (3) 열 변형 해석결과, 2μm의 롤러의 표면 편차를 보여주었으며 이는 실제 전극재료 작업표면의 편평도가 2μm와 같은 결과이다. 이 결과는 기계적인 하중을 제외시킨 경우로 가정하였다.
- (4) 압연하중에 의한 굽힘 변형을 보완하기 위해서 굽힘력을 작용시켰으며 요철이 없는 경우보다 요철이 있는 경우 굽힘 변형은 조금 더 크지만, 압연하중에 의한 변형의 상쇄효과는 더 커서 압연하중과 굽힘력을 동시에 작용할 경우 롤러의 작업표면은 편차는 더 줄어들 수 있다. 즉, 압연하중에 의한 변형은 요철이 있는 경우의 굽힘력으로 더 효과적으로 제어할 수 있다고 판단된다.

#### 참고문헌

- (1) Kim, C., Jang, D. S. and Yu, S. J., 2007, "Shape and Thermomechanical Analyses of a Hot Roll for Manufacturing Electrodes of Polymer

Batteries," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 31, No. 8, pp. 847~854

- (2) Yanagimoto, J. and Kiuchi, M., 1990, "Advanced Computer Aided Simulation Technique for Three-Dimensional Rolling Processes," *Adv. Tech. of Plasticity*, Vol. 2, pp. 637~644.

- (3) Park, J. J. and Oh, S. I., 1990, "Application of Three Dimensional Finite Element Analysis to Shape Rolling Processes," *Trans. ASME*, Vol. 112, pp. 36~46.

- (4) Mori, K. and Osakada, K., 1989, "Finite Element Simulation of the Three-Dimensional Deformation in Shape Rolling," *Numiform 89, Balkhema Press, Rotterdam*, pp. 337~342.

- (5) Hibbit, H. D., Marcal, P. V. and Rice, J. R., 1970, "Finite element formulation for problem of large strain and large displacements," *Int. J. Soilds Struct.*, Vol. 6, pp. 1069~1089

- (6) MSC. Software Co., 2006, MD Nastran Implicit Nonlinear(SOL 600), pp. 66~68

- (7) Kim, H. J., Lim, S. H., Lee, C. M., 2005, "A study on the process for precision forming by 3-dimension bending machine," *KSPE*, Vol. 30, pp. 1897~1900

- (8) MSC. Software Co., 2002, Nastran Thermal Analysis User's Guide, pp. 7~9