

< 논문 >

폴리머 배터리 전극제조용 압연 고온롤 표면의 형상 및 유한요소 열변형 해석

김 철* · 장동수* · 유선준**

(2007년 1월 24일 접수, 2007년 7월 18일 심사완료)

Shapes and Thermomechanical Analyses of a Hot Roll for Manufacturing Electrodes of Polymer Batteries

Cheol Kim, Dong-Sue Jang and Seon-Jun Yu

Key Words: Thermal Deformation(열변형), Polymer Battery(고분자 배터리), Hot Rolling(열간압연), Crown Roll(왕관 롤), Heat Transfer(열전달)

Abstract

The battery electrode of a mobile phone is made of layered polymer coated on aluminum foils and the hot rolling process is applied to increase the density per volume of an electrode for a high capacity battery. The flatness of batteries surfaces should be less than 2 μm . To satisfy the required flatness, the deformation of roll surface due to bending and heating of the roll should be minimized. Complicated hot oil paths of 100 $^{\circ}\text{C}$ inside the roll are required for heating the polymer layers. FEA was used to calculate thermal deformations and temperatures distributions of the roller. Based on FEA, a modified surface curvature called a crown roll was suggested and this gave the area of 30% improved flatness compared with a flat roll. The flat roll satisfied the flatness of 2 μm in the length of 340 mm and the crown roll resulted in the longer length of 460 mm. Experiments to measure the temperature distribution and thermal strain were performed and compared with FEA. There were only 6% difference between two results.

1. 서 론

휴대용 전화 및 PDA, 기타 소형전자기기의 수요증가에 따라 2차 전지(rechargeable battery)가 21세기 핵심 산업으로 주목받고 있다. 그러나 선행된 2차전지의 연구는 전지의 재료특성, 전지 제조기술개발에 국한되어왔다. 매년 증가하는 전지의 수요량을 충족시키기 위해서는 그에 따른 고

가의 제조 설비를 해외에서 수입하지 않을 수 없었는데 이에 전지 생산량 증가에 따른 설비의 수요증가에 대처하고, 2차 전지의 생산단가 절감을 위해서 제조설비의 국산화가 시급한 실정이다.

일반 강 제조용 롤러와 달리 2차 전지의 주재료인 전극 압연용 롤러는 압연공정 시, 열간 압연을 위한 가열공정에 의해 표면에 열 변형이 발생하고 이로 인해서 압연되는 전극의 품질에 큰 영향을 끼친다. 기존의 강 제조용 롤러의 형상에 관한 연구는 활발히 진행되었으나, 폴리머를 압연하는 롤러에 대한 연구는 미비한 수준이다.^(1~4) 기존의 전극 압연용 롤러는 롤러 표면 형상이 직선 형태를 띠고 있어, 압연공정 중 열 변형과 압

† 책임저자, 경북대학교 기계공학부 교수

E-mail : kimchul@knu.ac.kr

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

* 경북대학교 대학원 기계공학과

** (주) CIS

연하중에 의한 기계적인 변형을 거쳐 균일하지 못한 표면 편차를 가져 전극 압연에 낮은 생산율을 보여 왔다. 이에 압연되는 전극의 표면이 고른 편차를 가지도록 열 변형과 기계적인 변형을 고려한 표면 형상을 가진 롤러의 개발이 필요하게 되었다.

전극(electrode)은 알루미늄 호일(Al foil)에 양극(anode) 혹은 음극(cathode)의 성질을 가지는 폴리머 재료(LiCoO₂, LiNiO₂)가 도포된 형태로 이루어져있으며, 이 폴리머 재료들은 상온에서 압연하면 쉽게 파손되어 전극으로 그 기능을 할 수 없다. 이와 함께 전지의 용량을 결정하는 전극의 단위체적당 밀도(g/cm³)를 높이기 위해 열간압연(hot rolling)이 이용된다. 전지 셀(cell)의 용량 증가를 위해 셀 내부에 적층되는 전극 표면의 편평도(flatness)가 2 μ m 이하여야 한다. 이러한 이유로 전극을 압연하는 롤러는 열간압연 공정에 의한 열 변형과 압연 하중에 의한 기계적인 변형을 고려하여 압연되는 전극의 표면 편차가 2 μ m 이내의 값을 가지도록 해야 한다. 본 논문에서는 유한요소해석을 통해 기존의 평롤(flat roll)의 열적 특성을 조사하였고, 그 결과를 바탕으로 압연공정 시 압연되는 전극의 표면 편차를 2 μ m 이하로 가지는 구간을 극대화하는 롤 표면 형상을 제안하였다. 그리고 유한요소해석을 통하여 평롤과 제안된 롤 표면 형상을 가지는 왕관 롤(crown roll)의 압연공정 시 2 μ m이하의 표면 편차를 가지는 구간의 길이를 비교하였다. 마지막으로 압연 공정 중의 롤러 표면의 온도측정과 압연된 전극의 두께를 측정하여 유한요소해석결과와 비교하였고, 유한요소해석의 신뢰성을 검토하였다.

2. 열전달 및 열변형 해석

2.1 롤러의 열적 특성

기존 전극 제조용 롤러는 지름과 길이가 각각 500mm인 원통형 구조이며, 그 내부에 롤러 표면 가열을 위한 유로(oil path)가 롤러 중앙에서 표면으로 산개된 구조를 가지고 있다(Figs. 1-2). 이 유로를 통하여 고온의 유체(SERIOLA KL1120)가 롤러의 중앙에서 표면으로 이동하고 다시 중앙으로 방출된다(Fig. 3). 이때 유체의 온도는 100 $^{\circ}$ C로 유체의 기화온도는 390 $^{\circ}$ C이므로 액상 형태로 유로를 이동하게 된다. 롤러는 SUJ2라는 고탄소

롬특수강으로 제작되었으며 이는 내마모성 및 내충격성이 큰 강으로 볼 베어링이나 롤러 베어링 및 압연 롤러의 재료로 각광받고 있다. Table 1에 SUJ2의 재료 특성을 나타내었다.

Table 1 Material properties of SUJ2

Density	7.81g/mm ³
Modulus of Elasticity	210GPa
Poisson's ratio	0.3
Thermal expansion coefficient	11.9 $\times 10^{-6}$ / $^{\circ}$ C
Heat conductivity	46.6W/m \cdot K
Heat capacity	0.475J/g \cdot $^{\circ}$ C

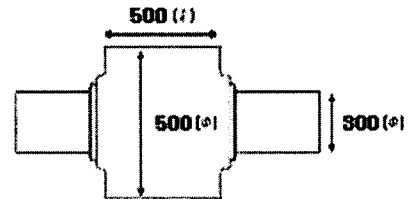


Fig. 1 A flat roll

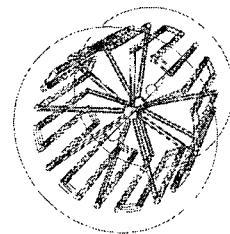


Fig. 2 Hot oil paths in the roll

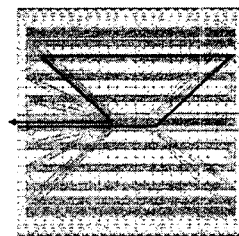


Fig. 3 Flow direction of a hot oil

2.2 열전달 해석

평롤의 열 변형을 알아보기 위해서 평롤의 온도분포해석을 수행하였다. 온도분포해석을 위해 롤러의 초기 온도와 주변온도는 25℃로 가정하였다. 또한 롤러를 가열하기 위한 열 유체의 온도를 표현하기 위해 유로의 표면을 나타내는 절점에 100℃의 온도를 부여하였다. 롤러 내부의 열 전달은 전도(conduction)에 의한 온도 확산으로 설정하였으며, 롤러의 표면의 냉각은 자유대류조건에 의한 냉각으로 설정하였다. 이는 압연 롤러가 약 6rpm의 회전속도를 가짐으로써 롤러 표면에 약 160mm/s의 속력을 가지는 대기에 의한 냉각이 진행되며, 이것은 거의 자유대류에 의한 냉각으로 가정할 수 있기 때문이다. 대류계수에 의한 영향을 알아보기 위해 자연대류계수 범위 내에서 15, 20, 25W/m²K의 값을 사용하였다.⁽⁵⁾

롤러 측면부에는 지름 300mm의 축이 장착되어 있어 이 부분에는 열전도에 의해서 냉각이 이루어진다(Fig. 4). 그러나 본 논문에서는 축 장착지역을 전도에 의한 냉각 대신 대류에 의한 냉각으로 가정하여 해석하였다. 축이 장착되는 지역의 대류계수를 결정하기 위해서 이 부분에 단일조건과 롤 표면에 부여된 대류계수의 50, 80, 90%의 값을 가지는 대류계수를 적용하여 열전달 해석 후 측면부에 분포된 표면 온도를 비교하였다. Fig. 5에 단일조건과 롤 표면에 적용된 대류계수의 50, 80, 90%의 값을 적용한 롤 측면의 온도를 나타내었다. 그 결과 단일조건과 롤 표면의 대류계수의 90%를 적용한 냉각조건과의 온도 차이는 2℃를 넘지 않았다. 이는 곧 열전도에 의한 냉각에서도 이 범위를 넘어서는 냉각은 이루어지지 않음을 의미한다. 이에 따라 온도해석에서 축 장착지점은 롤 표면에 사용된 대류계수의 80%에 해당하는 값을 넣어 해석을 수행하였다.

본 해석에 사용된 요소는 4절점 4면체요소(C3D4)이며, 이 요소는 3차원 응력해석용 요소지만 온도분포 및 열 변형 계산에도 사용된다.⁽⁶⁾ 롤러를 이루는 유한 요소는 44,856개이며 ABAQUS를 이용하여 계산되었다. 유한요소해석을 통해 얻어진 롤러 내부의 온도분포를 Fig. 6에 나타내었다. 온도분포를 보면 유로로 감싸여진 롤 내부는 열 방출이 거의 없어 열 유체와 비슷한 온도분포를 나타내고 있고 표면으로 갈수록 대류 냉각에 의해 온도가 약간 낮아짐을 알 수 있다.

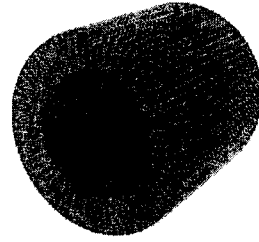


Fig. 4 A shaded lateral region where shafts are attached

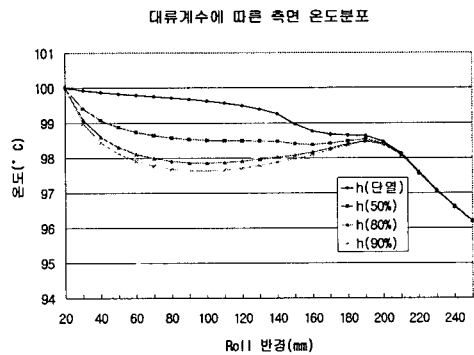


Fig. 5 The temperature distribution at a lateral region with varying convection coefficients

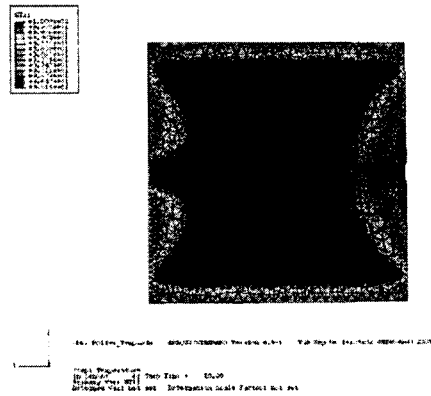


Fig. 6 Temperature distribution in the roller body

표면의 온도 분포를 보면 롤러 중앙에서는 온도가 상대적으로 높은 것에 비해 롤 끝단부에서는 온도가 상대적으로 낮음을 알 수 있다. 이는 롤러의 압연 면과 측면에서 동시에 냉각이 이루어지기 때문에 롤 표면 중앙부분에서 측면으로 갈수록 냉각이 활발하게 이루어지기 때문이다.

2.3 대류계수의 영향

대류계수의 변화에 의한 물리 표면 온도와 유로 바로 위의 표면과 유로-유로 사이의 표면과의 온도를 비교하였다. 자유대류 조건하에서 비교할 대류계수는 앞서 언급하였듯이 15, 20, 25W/m²K이며, 이 대류계수들을 적용한 온도해석 결과 나타난 물리 표면의 온도를 비교하였다. 그리고 유로가 설치된 지점의 물리 표면과 유로와 유로 사이 지점의 물리 표면을 Fig. 7에 나타내었다. 여기서 실선은 유로가 설치된 지점의 표면을 나타내며 점선은 유로와 유로가 설치된 지점의 중간부분의 표면을 나타낸다. 이때, 주변온도는 25℃로 가정하였고 물리 초기 온도 역시 25℃로 가정하였다. 열 유체의 온도는 100℃로 유로를 나타내는 절점에 부여하였다. 유한요소해석을 통해 얻어진 물리 표면의 온도를 Figs. 8~9에 나타내었다. 이 결과에서 대류계수 값이 낮아질수록 표면 온도가 높아지는 경향을 나타내며 그 차이는 최대 1.4℃ 정도로 그다지 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 즉, 대류계수가 물리 전체의 온도변화에 큰 영향력이 없음을 나타낸다. 그리고 실선과 점선으로 표시된 표면의 온도차이 역시 동일한 조건하에서 0.5℃ 미만의 차이를 보여 물리의 표면이 전체적으로 고르게 가열되었음을 알 수 있었다. 물리의 측면 온도분포는 Figs. 10~11에 나타내었다. 물리의 측면 역시 열 유체가 유입되는 중간부분에서 최대 온도를 나타내고 반경 방향으로 나갈수록 온도가 낮아졌다. 물리의 가열을 위한 유로가 설치된 지점에 가까울수록 온도가 소폭 상승하였으나 그 차이는 1℃미만으로 나타났다.

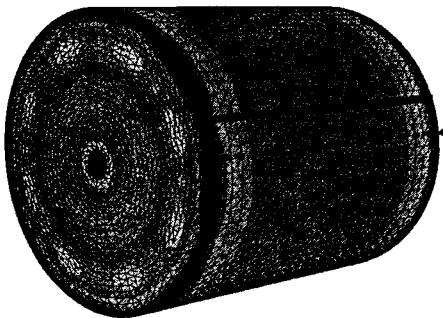


Fig. 7 FE meshes and temperature paths

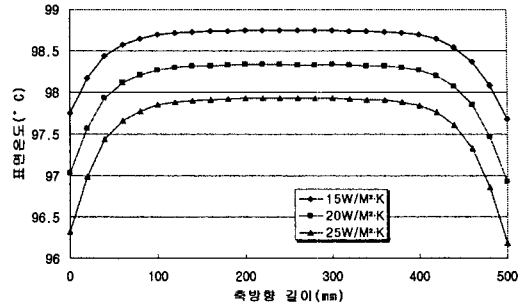


Fig. 8 Surface temperatures on a solid line

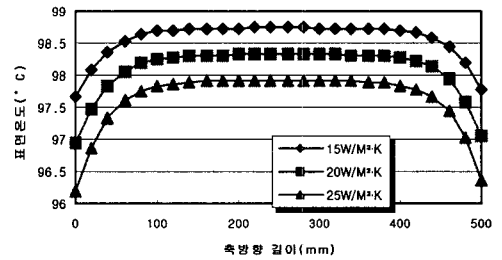


Fig. 9 Surface temperatures on a dotted line

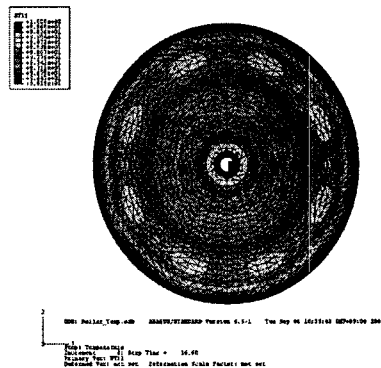


Fig. 10 Temperature distribution on a lateral surface

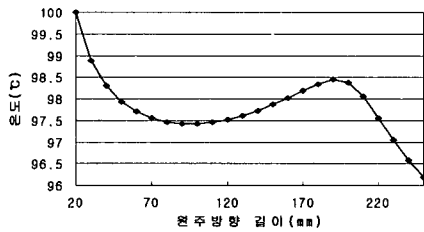


Fig. 11 Temperature distribution on a lateral surface

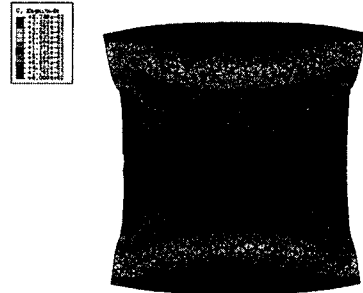


Fig. 12 Surface swell of a roll

2.4 열 변형 해석

롤러의 초기 온도와 열전달 해석을 통해 얻은 롤러의 최종 온도와 차이를 이용하여 롤러 표면의 열 변형 값을 계산하였다.⁽⁷⁾ 롤러의 양 측면에 축이 체결되는 지름 300mm의 원형지점에 변위구속을 하였고, 전체 절점의 온도를 초기 25℃에서 온도분포해석을 통해 얻은 최종 온도로 변화시켜 열 변형을 계산하였다. 온도분포해석과 마찬가지로 각 대류계수별 열 변형 해석을 수행하였고 롤의 축 방향 단면에서 원의 반경방향으로의 변위를 얻었다. Fig. 12에 열 변형후의 롤러 단면을 나타내었다. 롤러의 표면지점을 보면 중앙부에서는 가장 높은 열 변형률을 나타냈고, 측면으로 갈수록 낮은 열 변형률을 나타내었다. 이는 롤러 표면의 냉각이 측면으로 갈수록 롤러 측면 부분의 냉각의 영향으로 원활해져 온도의 차이가 중앙의 표면보다 측면에 가까운 지점으로 갈수록 낮아지기 때문이다.

열 변형 해석결과, 기존 평롤의 경우에는 롤러 중앙지점에서 단면의 반경방향 열 변위 값은 약 65 μ m로 나타났고 측면 끝 지점에서는 약 35 μ m로 나타났다. 온도분포해석에서 사용된 대류계수별 반경 방향의 열 변위 결과와 유로가 있는 지점과 유로 사이 지점의 반경방향 열 변위를 Figs. 13~14에 나타내었다. 유한요소해석결과 대류계수별 반경 방향 열 변위 차이는 1 μ m를 넘지 않았다. 그리고 유로가 있는 지점과 유로 사이 지점의 반경 방향 열 변위 역시 1 μ m 이내의 차이를 가졌다. 온도분포해석과 마찬가지로 자유대류 하에서는 대류계수의 차이가 열 변위에 큰 영향력이 없음을 알 수 있었다.

실선지역의 열변형

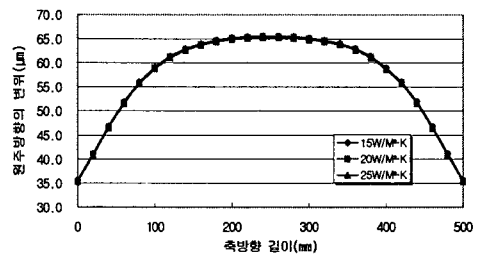


Fig. 13 Thermal expansion on a solid line

점선지역의 열변형

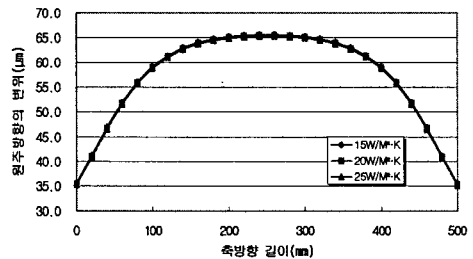


Fig. 14 Thermal expansion on a dotted line

2.5 형상곡선

앞에서 평롤의 열전달 해석, 열변형 해석을 통하여 롤러의 열적 특성을 알아보았다. 롤러가 압연공정에서 생산되는 전극의 목표 편평도를 만족하는 구간을 증가시키기 위해서는 롤러의 가열시, 표면의 열 변형을 고려하여 표면 편차를 최소화하는 형상곡선이 필요하다. 시행 착오법을 통하여 여러 가지 롤러의 형상곡선 중, 다음과

같은 형상곡선을 제안하였고(Fig. 15) 이러한 형상곡선을 적용한 롤은 왕관 롤(crown roll)이라고 불린다. 왕관 롤의 열적 특성을 알아보기 위해 평롤에서 수행한 온도분포해석과 열 변형 해석을 동일하게 수행하였다. 평롤과 새로이 제안된 왕관 롤의 온도분포는 거의 동일하게 나왔으나 단면의 반경방향으로의 열변위에서 차이가 났다. Fig. 16에 왕관 롤의 대류계수별 단면의 반경방향으로의 열 변위를 나타내었다. 결과를 보면 롤러의 중앙부는 변위가 약 27 μm 이고, 측면의 끝부분은 약 14 μm 의 값을 가진다. 기존 평롤의 경우 반경 방향의 열 변위 최대 값과 최소 값의 차이가 약 30 μm 이었지만, 새로이 제안된 왕관 롤의 경우에는 그 차이가 약 13 μm 를 보여 열 변형 후에 왕관 롤이 기존 평롤에 비해 더 평편한 표면을 가지는 것을 알 수 있었다. 왕관 롤의 열 변형 해석에서도 대류계수에 의한 열 변위 차이는 1 μm 이하로 나타나 역시 큰 영향력이 없음을 알 수 있었다.

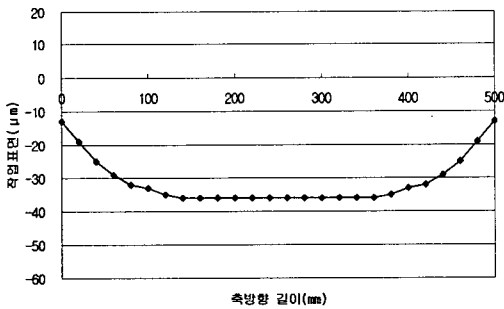


Fig. 15 Crowned surface of a roll

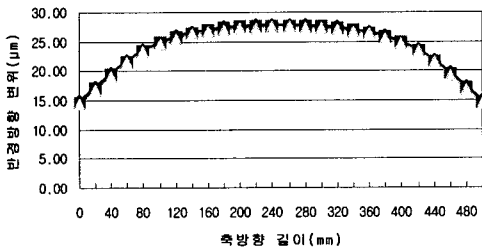


Fig. 16 Thermal expansion of a crown roll surface

2.6 압연하중에 의한 영향

압연 롤러는 압연 공정 시, 열 변형 후 양측에 약 63톤의 압연하중을 받게 된다(Fig. 17). 이 하중은 온도변화에 의한 열 변위 차이로 변화된 압연 롤러의 표면에 기계적인 변형을 일으킨다. 하중에 의한 기계적인 변형을 알아보기 위해 유한요소해석을 이용하여 평롤의 열 변형된 형상과 새로이 제안된 왕관 롤의 열 변형된 형상의 유한요소해석모델 양 측면에 축을 표현하는 강제 보요소(rigid bar element)를 부착하고 실제 하중이 가해지는 지점에 하중을 적용하였다(Fig. 18). 그리고 롤러의 중앙 지점에 압연공정 시 최초로 접촉하는 부분의 절점을 변위 구속하였다. Table 2에 평롤과 새로이 제안된 왕관 롤의 반경 방향의 변위차이가 2 μm 이하인 구간의 길이를 열 변형만 적용한 경우와 열 변형과 기계적인 변형이 동시에 적용된 경우에 대해 각각 비교하였다.

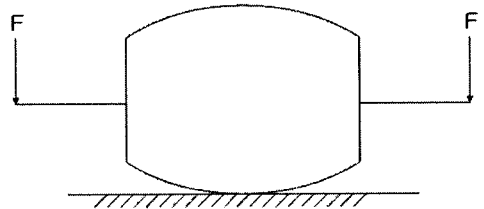


Fig. 17 Pressing force on a roll

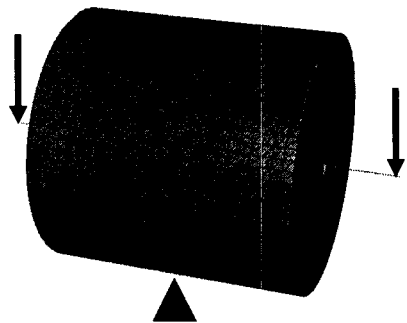


Fig. 18 FE model of a roll with a shaft force

Table 2 Flat Length satisfied on the roll surface

Type	Under thermal load	Under thermal & mechanical loads
Flat roll	220mm	340mm
Crown roll	300mm	460mm

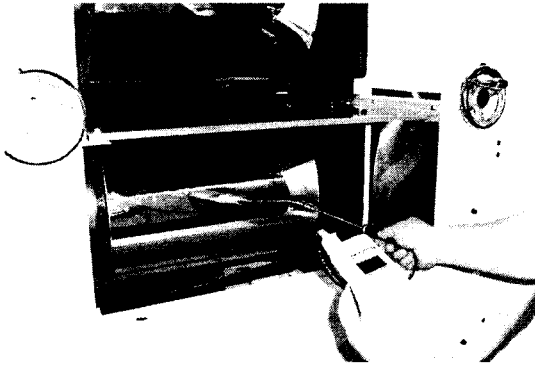


Fig. 19 Temperature measurement

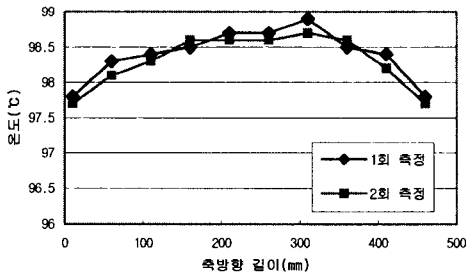


Fig. 20 Measured temperatures on a roll surface

3. 실험

3.1 온도측정

유한요소해석으로 롤러 표면의 온도 분포를 파악한 결과, 균일한 가열에 의해 전 구간 온도가 비슷한 것으로 나타났다. 이에 실제 압연공정 중인 롤러의 표면 온도측정을 통해 유한요소해석 결과와 비교해 보았다. 온도측정은 기존 평롤의 표면 50mm 구간별로 디지털 온도계(TM20, Yokogawa)를 이용하여 측정하였다(Fig. 19).

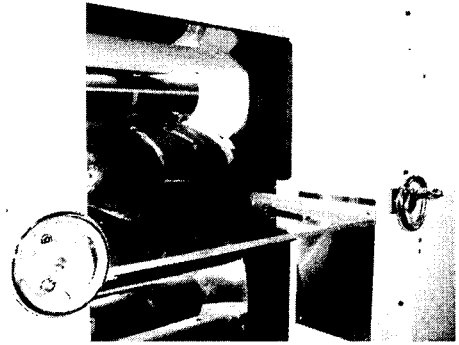


Fig. 21 Rolling process of electrodes



Fig. 22 Measurement of electrode thicknesses

Fig. 20에 실제 측정된 롤러 표면의 온도분포를 나타내었다. 유한요소해석 결과와 비슷하게 전 표면의 온도는 2℃미만의 고른 분포를 보였고 각 지점의 온도도 유한요소해석 결과와 1℃미만의 차이를 보였다.

3.2 전극 두께 측정

실제 압연공정 중인 롤러의 원통도를 직접 측정하여 원하는 롤러의 표면이 구현되었는지 확인하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 압연 공정 중인 롤러의 원통도 측정을 대신하여 압연되는 전극의 표면을 측정하고 두께 편차가 2 μ m 이하인 지점의 길이를 측정하여 유한요소해석의 결과를 검증하였다(Figs. 21~22). 압연 롤 사이에 너비 500mm인 전극을 넣고 압연 후 그 두께를 측정하였다. Table 3에 정리한 결과를 보면, 평롤을 통과한 전극의 경우 300~320mm의 구간이 두께 편차 2 μ m 이하의 값을 가졌고, 새로 제안된 왕관 롤

Table 3 Comparison between FEA and Experiments

Roll type	FEA	Experiment
Flat roll	340mm	300~320mm
Crown roll	460mm	440~450mm

의 경우에는 약 450mm의 구간이 두께 편차 $2\mu\text{m}$ 이하의 값을 가지는 것으로 나타났다. 이는 평롤을 사용할 때보다 왕관 롤을 사용할 경우 약 130~150mm의 길이만큼 기존에 사용하지 못했던 전극을 더 사용할 수 있다는 의미이다. 이는 약 30% 이상의 전극 생산성 향상과 직결된다.

4. 결 론

(1) 유한요소해석을 통하여 2차 전지 전극제조용 롤러의 열적 특성을 분석하였고, 기존 평롤에 비해 압연된 전극의 표면 편차가 목표한 $2\mu\text{m}$ 이하가 되는 구간이 증가되는 롤러의 표면형상곡선을 제안하였다.

(2) 온도분포해석 결과, 롤러 내부에 설치된 유로에 의해 표면은 1.5°C 미만의 온도 차이의 균일한 온도분포를 가졌으며, 자유대류 조건하에서 대류계수에 의한 온도 차이는 2°C 미만으로 나타나 롤러의 온도에 대한 대류계수의 영향력은 미미한 것으로 나타났다.

(3) 왕관롤에 열 변형과 기계적 변형이 나타나도록 유한요소해석을 실시한 결과 기존의 평롤보다 압연된 전극이 목표 편차를 가지는 구간이 340mm에서 460mm로 120mm 가량 증가하였다.

(4) 롤러표면의 온도를 측정된 결과, 유한요소해석 값과 측정된 값이 약 1°C 이하의 차이를 보였다. 또한, 압연된 전극의 두께 측정을 통해 기존의 평롤의 경우에 목표한 두께편차를 가지는 전극의 폭이 300~320mm, 왕관 롤의 경우에는 약 450mm인 것으로 나타나 전극의 사용가능한 구간

이 약 30%정도 증가함을 알 수 있어 왕관 롤이 전극의 생산성 향상에 기여함을 확인하였다.

(5) 실제 생산된 전극의 두께 측정으로 계산된 전극의 사용가능한 구간 길이와 유한요소해석에 의한 결과의 차이가 약 6%미만의 오차를 나타냄으로서, 유한요소해석의 신뢰성도 확보하였다고 말할 수 있다.

참고문헌

- (1) 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.
- (2) Park, J. J. and Oh, S. I., 1990, "Application of Three Dimensional Finite Element Analysis to Shape Rolling Processes," *Trans. ASME (A)*, Vol. 112, pp. 36~46.
- (3) Park, C., Kim, W. and Park, G., 2002, "Analysis of Thermal Stress and Deformation of Casting Roll in Twin Roll Strip Casting process," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 26, No. 9, pp. 1943~1951.
- (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) Incropera, F. P. and Dewitt, D. P., 2003, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Willey & Sons, 5th Ed., pp. 6~10.
- (6) ABAQUS Inc., 2004, *ABAQUS Analysis User's Manual Version 6.5*, Vol. 4, pp. 14.1.4-1~14.1.4-3
- (7) Gere, J. M. and Timoshenko, S. P., 1995, *Mechanics of Materials*, International Thomson Publishing, 3rd ed., Korean version, pp. 73~76.