

# EGL 공정용 컨덕터 롤 폴리셔 수명 예측에 관한 연구

## A Study on Wear-Life Prediction of Conductor Roll Polisher in EGL Polishing Process

구자경<sup>1</sup>, 고종민<sup>2</sup>, 구태완<sup>3</sup>, 강범수<sup>1,✉</sup>  
Ja-Kyung Ku<sup>1</sup>, Jong-Min Ko<sup>2</sup>, Tae-Wan Ku<sup>3</sup> and Beom-Soo Kang<sup>1,✉</sup>

1 부산대학교 항공우주공학과 (Department of Aerospace Engineering, Pusan National Univ.)

2 (주)디자인플랜트 기술연구소 (R&D Center, Design Plant Co. Ltd.)

3 부산대학교 부품소재산업협력연구소 (Industrial Liaison Innovation Center, Pusan National Univ.)

✉ Corresponding author: bskang@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-2310

Manuscript received: 2011.2.28 / Revised: 2011.5.10 / Accepted: 2011.6.15

*In electro-galvanizing line to manufacture the electro-galvanized steel sheet, polishing system is required to maintain clean surface of conductor roll and to secure the quality of the steel sheet. At the same time, prediction and decision of the replacement cycle for felt material and its brush installed in the polishing system is also important because the brush is directly contacted on the conductor roll surface. In this study, the polishing system has been designed which the brush is repetitive translating according to the longitudinal direction of the conductor roll. Furthermore, the prediction on the wear-life of the felt material used for the brush is performed using the contact pressure extracted by finite element analysis. And to verify the predicted wear-life of the felt material, the experimental study is also carried out. From the comparison result between the predicted and the measured wear-life of the felt material, it is presented that the wear-life and the replacement cycle of the felt material are well predicted by considering a wear compensation factor, and the wear compensation factor is useful and reasonable.*

Key Words: Electro-Galvanizing (전기아연도금), Conductor Roll (컨덕터 롤), Polishing System (폴리싱 시스템), Wear (마모), Felt (펠트), Hyperfoam (하이퍼폼), Wear Compensation Factor (마모 보정 계수)

### 1. 서론

전세계적으로 가전기와 가구류, 자동차, 건축 용재에 이르기까지 지속적으로 증가하고 있는 전기도금아연강판(Electro-Galvanized Steel Sheet)의 수요에 맞추어 대다수의 철강생산업체에서는 다양한 관련 기술개발이 활발히 진행되고 있다. 특히, 국내 자동차 및 가전기기 등의 산업 분야에서의 생산량 증대와 더불어 깨끗한 외관 및 광택 구현이 가능한 소재의 사용량이 급격하게 증가하고 있으며, 해외에서는 자동차 외관의 방청규제가 강화되어 고내식성 소재의 적용 필요성이 커짐에 따라

자동차용 내외 판재로서 아연도금강판의 적용이 증가하고 있는 추세이다.<sup>1,2</sup> 전기아연도금강판은 전해법에 의해 냉연 또는 열연 강판 표면에 순수 아연이나 아연합금을 부착시켜 내식성을 높인 판재로서 가공성, 도장성, 용접성 등이 우수한 특징이 있다.

전기아연도금강판의 제조 공정은 크게 전처리, 전기도금, 후처리 등으로 분류할 수 있으며,<sup>3</sup> 그 중 도금부(plating section)는 스트립(strip)에 아연을 도금하기 위한 설비로 구성되어 있다. 전기아연도금 공정을 간략하게 요약하면, 양극(anode)으로부터 전류가 공급되어 음(cathode)의 극성을 갖는 스

트립의 표면에서 전해용액 중의 아연금속이온이 환원됨에 따라 도금이 이루어지게 된다. 그리고 도금조(plating cell)의 컨덕터 롤(conductor roll)은 전류가 흐르고 있는 상태에서 도금조로 이송된 스트립이 상부 컨덕터 롤과 하부 컨덕터 롤 사이에 밀착되기 때문에 스트립 표면에 아크현상(arcng) 발생과 이물질 등의 부착으로 인한 도금 강판 표면의 품질 불량 발생할 수 있다. 이러한 전기아연 도금강판의 품질을 안정화 시키기 위해서는 컨덕터 롤의 표면에 이물질 등이 부착되지 않게 하기 위한 폴리싱(polishing) 공정이 필요하다.

기존의 폴리싱 공정은 폴리셔 장비를 사용하지 않고 컨덕터 롤 전체를 교체하거나, 단순한 메커니즘을 사용하여 폴리싱을 수행하는 것이 일반적이다. 후자의 경우는 Fig. 1 에 도시된 기존의 폴리싱 장치가 대표적인 예이며, 일체형 구조는 인장 스프링에 의해서 롤 표면에 밀착되어 폴리싱 공정이 이루어지게 되고, 작업 현장의 조건에 따라 스프링의 인장력 편차 발생에 의해 폴리싱용 브러쉬(brush) 소재로 사용되는 펠트(felt)의 편마모가 발생하게 된다. 그러므로 전기아연도금강판의 생산 원가를 줄임과 동시에 고품질 확보를 위해서는 앞서 언급한 펠트 소재의 편마모 개선 및 컨덕터 롤 표면의 효과적인 폴리싱을 위한 새로운 컨덕터 롤 폴리싱 시스템에 대한 연구가 요구되고 있다.

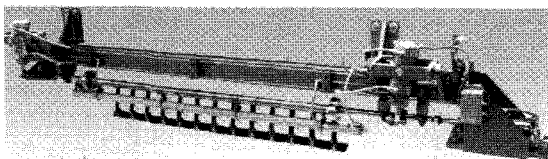


Fig. 1 Typical tower roll polisher of roll polishing system of HyComp LLC

지금까지의 마모(wear)에 관련된 연구로는 Archard 가 제안한 금속 소재에 대한 마모량 예측 방법을 이용한 다양한 연구가 수행된 바 있다.<sup>4-10</sup> 또한, 이미지 처리와 광학적 방법을 이용한 마모량 정의,<sup>11</sup> 딥드로잉에서 수직압력과 상대속도로 나타낸 반실험적 마모 모델 연구,<sup>12</sup> 절삭력과 절삭력 신호(force signal)를 이용한 측면 마모(flank wear) 예측<sup>13,14</sup> 등의 연구가 진행된바 있다. Archard 가 제안한 마모량 예측 방법을 바탕으로한 앞서의 다양한 연구들은 그 대상이 공구나 금속 소재 등에 국한되어 있으며, 펠트와 같은 초탄성

체에 대한 마모 연구는 거의 전무한 실정이다.

본 연구에서는 전기도금아연강판 생산 공정에 있어서, 컨덕터 롤을 폴리싱하기 위한 브러쉬 소재로써 초탄성체인 펠트 소재에 대한 마모 특성을 예측하고자 하였다. 이를 위해 해당 펠트 소재에 대한 단순압축시험과 마모시험을 각각 수행하였다. 또한, 펠트 소재가 컨덕터 롤에 접촉할 경우의 접촉 압력을 산출하기 위해 상용 유한요소 해석 소프트웨어인 ABAQUS 를 이용하였으며, 하이퍼폼(Hyperform) 모델을 유한요소 해석에 적용하였다. 해석적 접근을 통해 도출한 펠트의 접촉 압력과 Archard 의 마모 모델을 이용하여 펠트의 마모 깊이를 예측하였으며, 마모 실험을 통한 마모 계수를 도출하였다. 이들로부터 펠트 소재에 대한 마모 특성을 수치적으로 평가하였다. 또한, 컨덕터 롤 폴리싱 공정에 있어서의 브러쉬용 펠트 소재의 실험적 마모 수명을 산출하기 위해 실제 폴리싱 시스템을 자체 제작하여 실험에 사용하였다. 본 연구 결과로부터, 금속 소재에 대한 기존 마모 모델의 초탄성체인 펠트 소재로의 적용을 위해서는 마모보정계수(wear compensation factor)의 도입이 필요함을 알 수 있었으며, 이러한 마모보정계수적용을 통해 컨덕터 롤 폴리셔 시스템의 브러쉬용 펠트 소재에 대한 마모 수명을 예측할 수 있었다.

## 2. 마모 모델

펠트의 마모 예측에는 미끄럼 마모량을 예측하는데 널리 사용되고 있는 Archard 의 마모식을 사용하였다. Archard 의 마모식은 일반적으로 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{V}{S} = K \frac{P}{H} \tag{1}$$

여기서,  $K$  는 무차원 마모상수이며,  $H$  는 시편의 경도,  $V$  는 총 마모량,  $P$  는 작용 하중(applied normal force), 그리고  $S$  는 접촉 이동 거리(total accumulate displacement)이다.

컨덕터 롤 폴리셔 시스템에 있어서, 펠트 소재가 컨덕터 롤에 접촉할 수 있도록 하는 브러쉬 구조(brush arm)는 Fig. 2 와 같으며, 식 (1)에서의 마모량 또는 마모 깊이는 본 연구에서 펠트 소재의 교체 주기와 같다. 이는 펠트의 어느 한 부분이라도 마모가 일정수준(32mm)으로 발생하였을 경우라고

정의할 수 있고, 그 수준은 다른 조건이 동일할 때 접촉 압력이 가장 큰 부분이라고 예상할 수 있다. 따라서, 앞서 제시된 식 (1)을 접촉면적당 마모 깊이( $h$ )에 대한 식으로 나타내면 다음의 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$h = k \times p(x) \times 2s \times N \quad (2)$$

여기서,  $k$  는  $K/H$  이며,  $p(x)$ 는  $x$  에서의 접촉 압력, 그리고 접촉 이동거리  $S$ 를 사이클( $N$ , cycle)과 스트로크( $s$ , stroke)의 곱으로 나타내었다.

스트로크( $s$ )는 컨덕터 롤 폴리싱 시스템 특성상 롤의 길이 및 회전속도 등에 의해 결정되게 된다. 따라서 접촉 압력과 마모 계수가 주어지면 일정한 마모 깊이(즉, 마모 수준에 따른 교체주기)를 계산할 수 있게 된다.

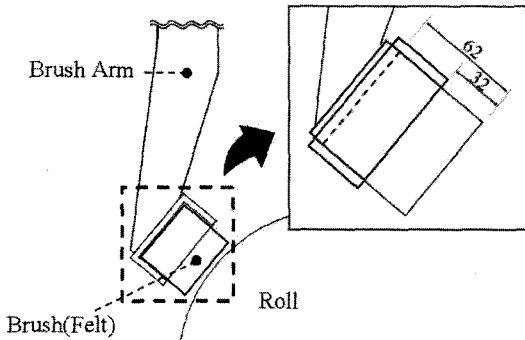


Fig. 2 Schematic view and dimension of brush arm

Table 1 Composition of felt material

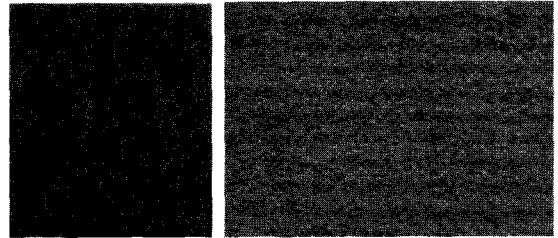
Polyamide staple fibers (PA66 Staple Fiber 17D)	36.1%
Artificial corundum	39.3%
Resin	20.58%
Solvent dyes : synthetic organic dyestuffs	0.57%
Other substances	3.45%

### 3. 유한요소해석을 통한 접촉압력 예측

#### 3.1 변형률 에너지 함수

전기도금아연강판 생산 공정에 있어서 컨덕터를 폴리셔용 브러쉬 펠트 소재는 산화알루미늄이 첨가된 폴리 아미드 계열의 합성섬유로서 Fig. 3(a)

와 같으며, Fig. 3(b)에서 제시된 바와 같이 여러 장을 적층시킨 형태이다. 그리고 해당 펠트 소재의 구성성분은 Table 1 과 같다.



(a) Upper view (b) Side view

Fig. 3 Configuration of felt material used for brush of conductor roll

Fig. 3 과 같은 펠트 재료는 탄성 다공성 폼 (elastomeric cellular foam) 중의 하나이며, Ogden 은 펠트와 같은 초탄성(hyperelastic) 재료에 대한 수학적 모델링을 위하여 변형률 에너지 함수를 기반으로 한 비선형 대변형 모델을 제시하였다.<sup>15</sup> 그리고 본 연구에서 사용한 유한요소 해석 소프트웨어인 ABAQUS 에서는 Ogden 의 변형률 에너지 함수를 다음과 같이 표현하고 있다.

$$U = \sum_{i=1}^{N_{mc}} \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} \left[ \hat{\lambda}_1^{\alpha_i} + \hat{\lambda}_2^{\alpha_i} + \hat{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3 + \frac{1}{\beta_i} ((J^{\alpha_i})^{-\alpha_i\beta_i} - 1) \right] \quad (3)$$

여기서,  $N_{mc}$  은 재료 상수,  $\lambda_i$  는 주연신율이다.  $J$  는 탄성 부피비(elastic volume ratio)이며, 그 정의는 다음과 같다.

$$J = \hat{\lambda}_1 \hat{\lambda}_2 \hat{\lambda}_3 \quad (4)$$

여기서,  $\mu_i$  는 전단계수(shear modulus)로서 초기전단계수(initial shear modulus)  $\mu_0$  와 다음과 같은 관계가 있다. 그리고  $\beta_i$  는 푸아송의 비  $\nu_i$  와 다음과 같은 관계가 있다.

$$\mu_0 = \sum_{i=1}^{N_{mc}} \mu_i \quad (5)$$

$$\beta_i = \frac{\nu_i}{1-2\nu_i} \quad (6)$$

식 (3)~ 식 (6)과 같은 수학적 표현은 단순전단 변형(simple shear)과 같은 압축에서의 거동에 대해 나타내고 있기 때문에 재료 상수  $N_{mc}$  이 주어질 경우, 그 거동을 예측할 수 있다. 그리고 실험에 의한 응력-변형률 데이터로  $N_{mc}$  을 결정할 수 있다.

### 3.2 단축 압축 실험

변형률 에너지 함수에 필요한 공칭응력-공칭변형률 데이터를 얻기 위해서는 단축(uniaxial), 이축(biaxial), 단순 전단(simple shear), 평면(planar), 체적(volumetric) 시험 등 5 가지의 실험적 방법이 있다. 또한, ABAQUS 에서는 실험 데이터로부터 최고 6 개 항( $N_{mc}=6$ )까지의 하이퍼폼 모델에 대해  $\alpha_i, \beta_i$ , 그리고  $\mu_i$  를 계산할 수 있으며, 공칭응력의 상대오차가 최소가 되도록 최소자승법을 이용하게 된다.

본 연구에서는 Fig. 2 의 브러쉬 구조에 대한 개념 설계에서 보듯이 매커니즘 특성상 펠트의 일축 압축 변형이 지배적인 것을 감안하여 단축 압축 실험을 ASTM D 1056 규격을 바탕으로 수행하였으며(Fig. 4), Fig. 5 에 그 결과를 나타내었다. 또한, 이로부터 구해진 실험 결과를 이용하여, 변형률 에너지 함수( $U$ )의 차수를 결정하였다.

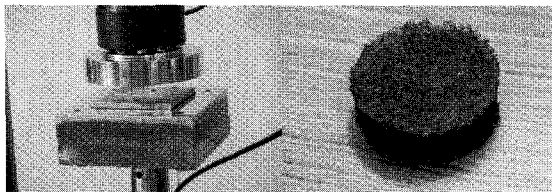


Fig. 4 Uniaxial compression test of felt and specimen

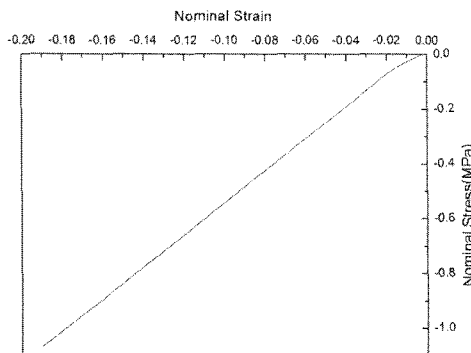


Fig. 5 Result of uniaxial compression test

### 3.3 유한요소 해석

마모 계산을 위해 필요한 접촉압력은 유한요소

해석을 통해 도출하였다. 펠트와 같은 압축성 초탄성체의 구성방정식은 Coleman-Noll 법으로부터 유도된다.<sup>16</sup>

유한요소해석 프로그램은 ABAQUS 를 이용하였으며, 해석 모델은 Fig. 6 에 도시하였다. 본 연구에서의 컨덕터 롤 폴리싱 시스템용 브러쉬 펠트 소재는 높이 62mm, 폭 70mm 및 너비 310mm 의 3 차원 변형체(deformable body)로 모델링 하였고, 컨덕터 롤은 반경 175mm 의 3 차원 폭면(three-dimensional rigid shell)으로 모델링 하였다. 펠트의 밀도는  $1.82 \times 10^{-10} \text{ ton/mm}^3$  를 사용하였다.

또한, 실제 폴리싱 과정에서는 펠트 소재가 장착된 브러쉬 암의 반복적 이송과 컨덕터 롤의 회전이 동시에 일어나지만, 본 연구에서는 접촉면에 수직인 접촉 압력을 산출하기 위해 롤의 회전과 펠트의 이송운동은 고려하지 않았으며, 단지 정적(static) 해석을 수행하였다. 펠트 소재는 브러쉬 암에 작용하는 스프링 하중에 의해 롤에 압착되며, 스프링하중은 모두 브러쉬 윗면에 균일하게 작용한다고 가정하였다. 해당 스프링 상수는 2.06kgf/mm 이고, 스프링이 가할 수 있는 최대 하중은 20.6kgf 이었다. 이 때, 펠트 소재가 컨덕터 롤 표면과 접촉하는 면의 반대방향에서 브러쉬 암의 스프링 반발력에 의해 펠트 소재로 작용하는 압력  $3.85 \times 10^{-3} \text{ MPa}$  의 경계조건을 부여하였으며, 브러쉬 암과 동일한 구속조건으로 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소 이산화에는 8 개의 노드를 가지는 3 차원 육면체 요소를 사용하였으며, 49749 개의 요소로 해석 모델을 구성하였다.

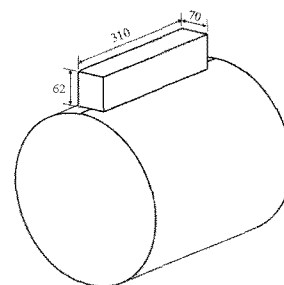


Fig. 6 Schematic view of FE analysis model with polishing felt and conductor roll

펠트 소재가 컨덕터 롤 표면에 접촉할 때의 접촉 압력 예측을 위한 유한요소 해석 결과를 Fig. 7 에 나타내었다. Fig. 7 에 제시된 바와 같이, 최대

$2.30 \times 10^{-2} \text{MPa}$ 의 접촉 압력이 펠트 소재의 중앙부에서 나타남을 알 수 있었으며, 중심으로부터 약 14mm의 폭 영역에서 발생함을 알 수 있었다.

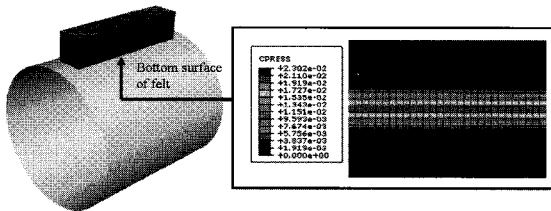


Fig. 7 Contact pressure distribution of bottom surface

#### 4. 브러시 펠트 소재 마모 실험

##### 4.1 펠트 마모 실험

펠트 소재에 대한 마모량을 산출하기 위한 추가 요소인 마모 계수는 마모 실험과 Archard의 마모 모델을 이용하였다. 식 (1)과 식 (2)를  $k$ 에 대해 정리하면 다음의 식 (7)과 같이 정리할 수 있으며, 마모량( $V$ )은 시편의 밀도와 실험 전·후의 질량 차이를 이용하여 구할 수 있다. 실험 장비는 Fig. 8에서와 같이 PLINT TE-92 마찰마모윤활시험기를 사용하였으며, 실험 방법은 ASTM G99를 참조하여 일반적인 마모 실험 방식인 핀 온 디스크(Pin-on-Disc) 방식으로 수행되었다. 컨덕터 롤의 소재인 STS304를 디스크로, 펠트 소재를 핀으로 제작하여 실험을 진행하였으며(Fig. 9), Table 2에 실험 조건을 나타내었다.

$$k = \frac{V}{PS} = \frac{\Delta m}{\rho PS} \quad (7)$$

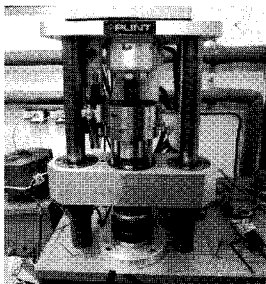


Fig. 8 Rotary tribometer (PLINT TE-92) and schematic view of Pin-on-Disc wear test

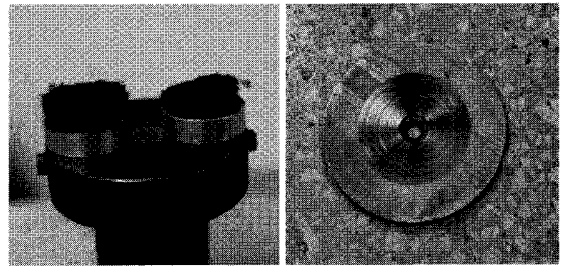


Fig. 9 Pin and disc specimen after wear test

Table 2 Test Condition

Load	0.2 kN
Speed	500rpm
Temp.	R. T.
Test time	47min
Rotation radius	17mm
Total Rev.	23,000

##### 4.2 결과

마모 계수를 구하기 위한 마모 실험 결과를 Table 3에 정리하였다. Table 3에 요약된 실험 결과로부터 펠트 시편의 질량 차이는 0.0135g이었으며, 이 값을 펠트의 밀도 등과 함께 식 (7)에 대입하여 마모계수( $k$ )의 값으로 약  $2.96 \times 10^{-7} \text{MPa}^{-1}$ 의 결과를 얻었다.

Fig. 2에 나타나 있는 설계 상의 펠트의 높이 62mm 중 브러시 암 홀더(bush arm holder)에 의해 고정되는 30mm를 제외한 32mm가 마모되었을 경우 펠트를 교체한다고 가정하면, 마모 깊이( $h$ )는 32mm가 된다. 스트로크( $s$ )는 펠트가 롤을 한번 왕복하는 시간과, 롤과 접촉하여 미끄러지는 속도의 곱으로 정의할 수 있으며, 그 속도는 펠트의 이송 속도와 롤러의 회전 선속도의 벡터합이다. 펠트 이송속도의 설계 사양은 133~150mm/s(8~9m/min)이므로 142mm/s로 가정하고, 175mm의 반경, 30rpm의 회전속도를 가진 롤 표면에서의 선속도는 550mm/s이므로 벡터합은 568mm/s이다. 펠트가 한번 이송운동을 하는데 걸리는 시간은 32.5초이므로 1 사이클 동안 롤 위에서 펠트의 총 미끄럼 이동거리는 18,500mm, 그리고 스트로크( $s$ )는 9,250mm이다. 마모 깊이( $h$ ), 스트로크( $s$ ), 그리고 접촉 압력과 마모 계수를 Table 4에 정리하여 나타내었으며, 이 값들을 식(2)에 대입하여 펠트의 교체주기를 계산하면, 약 260,000 사이클의 펠트 교체 주기를 구할 수 있었다.

Table 3 Mass Difference of specimen as a result of wear test

Specimen	Mass Difference		Avg. Difference
	Before	After	
1	9.161g	9.138g	0.0135g
2	9.432g	9.401g	

Table 4 Parameters which is required for wear equation

h(mm)	32
k(MPa <sup>-1</sup> )	2.96E-7
p <sub>max</sub> (MPa)	0.0230
s(mm)	9250
N(cycle)	260,000

### 4.3 교체 주기 시험 및 비교

4.2 절에서 도출한 이론적 교체 주기(약 260,000 사이클)를 실제 교체주기와 비교하기 위해 Fig. 10 과 같이 제작한 장비에 해당 펠트소재를 적용하여 비교 실험을 수행하였다. 비교 실험은 하루 평균 9 시간씩 컨덕터 롤 폴리싱 장치를 실제 가동하여, 펠트 마모량을 측정함에 의해 교체 주기를 도출하였다. 이때, 교체 주기를 결정하는 펠트 소재의 마모량은 제 2 장에서 언급한 바와 같이 32mm 를 기준으로 하였다. 이러한 펠트 소재의 교환을 위한 마모량 기준을 바탕으로 총 5 회(동일 규격의 컨덕터 롤 폴리셔 장비 5 대 이용)의 가동 시험을 수행하였으며, 그 결과를 Table 5 에 정리하였다. Table 5 에 제시된 바와 같이, 컨덕터 롤 폴리싱 장치에 펠트 소재를 적용시 평균적으로 약 86,400 사이클의 교체 주기를 가지는 것으로 나타났다.

이는 앞서의 시간당 113 회 왕복 이송조건을 기준으로 볼 때, 약 765 시간(약 85 일)의 실제 교체 주기를 의미한다. 이러한 실험적 결과는 앞서의 이론적 교체 주기인 260,000 사이클과는 큰 차이를 보임을 알 수 있다. 이러한 펠트 소재의 교체 주기에 대한 이론적 예측 및 실험적 측정 결과의 차이가 발생하는 원인을 분석해보면 다음과 같이 요약할 수 있다. 앞서 제 2 장에서 제시된 마모 수명 예측 모델은 금속 소재에 대한 모델로 제시된 것이며, 본 연구에서 고려한 펠트 소재는 불균일한 미세조직적 특성을 가지기 때문인 것으로 파악되었다. 따라서 본 연구에서는 Archrd 의 마모 수명 예측 모델을 바탕으로 한 펠트와 같은 다공성 폼 재질의 마모 수명을 예측하기 위한 마모 보

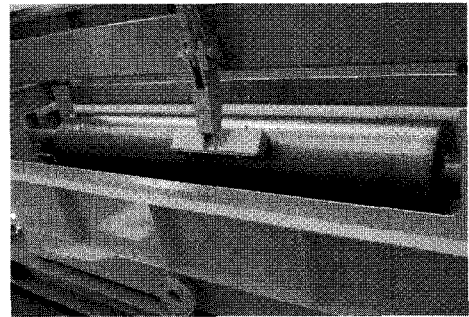


Fig. 10 Conductor roll polishing system for polisher wear test

정 계수( $k_f$ )를 도입하였다. 즉, 앞서의 마찰보정계수를 이용하여 식 (2)를 교체 주기(N)에 대해 다시 쓰면 다음의 식 (8)과 같다. 본 연구에서는 식 (8)에 마모 보정 계수( $k_f$ )를 고려한 식 (9)와 같이 금속 소재가 아닌 불균일 미세조직을 갖는 펠트와 같은 소재에 대한 교체 주기 예측 모델을 도입하였으며, 해당 마모 보정 계수는 적용 소재의 고유 특성으로 고려될 수 있다고 판단하였다.

$$N = \frac{h}{k \times p(x) \times 2s} \tag{8}$$

$$N_f = \frac{h}{k_f \times k \times p(x) \times 2s} \tag{9}$$

Table 5 Experimental results for replacement time of felt

No.	Operation time	Cycle
1	735	83,100
2	770	87,000
3	769	86,900
4	754	85,200
5	795	89,800
Avg.	765	86,400

본 연구에서 도입한 식 (9)의 교체 주기 예측 모델을 이용하여, 이론적으로 도출된 펠트 소재의 교체 주기 약 260,000 사이클과 실험적 연구로부터 얻은 교체 주기 약 86,400 사이클을 비교해 볼 때, 식 (9)에서의 마모 보정 계수( $k_f$ )는 정수인 상수 계수로써 3 의 값을 갖는 것으로 판단되었다. 즉, 일반적으로 적용되던 금속 소재에 대한 Archard 의

마모 예측 모델과 달리 펠트 등의 복합재료 (composite material)와 같은 불균일 미세 조직을 가지는 경우에 있어서는 개선된 마모 수명 예측 모델으로써 기존 모델에 정수배 상수계수를 적용하는 것이 타당함을 본 연구를 통해 얻을 수 있었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 전기도금아연 강판 생산 공정에 있어서의 컨덕터 롤을 폴리싱 하는 소재로 사용되는 펠트의 마모 및 교체 주기를 예측하기 위해서 개선된 마모 수명 예측 모델을 도출하였으며, 마모 수명(즉, 교체 주기)의 결정에 필요한 마모 계수 및 접촉 압력을 구하기 위해 마모 실험과 단축 압축실험, 변형률 에너지 함수를 이용한 유한요소 해석을 본 연구에서 수행하였다.

해석적 접근을 위해 필요한 펠트 소재의 물성치를 얻기 위해 펠트 소재에 대한 단축 압축 실험을 수행하였으며, 해당 소재의 변형 거동을 예측하기 위한 변형률 에너지 함수의 차수를 결정하였다. 유한요소해석 결과로서 약  $2.30 \times 10^{-2} \text{MPa}$ 의 접촉 압력이 롤과 접촉하고 있는 펠트 하단 면에서 나타남을 알 수 있었으며, 핀 온 디스크 방식의 마모 실험을 통해 롤에 대한 펠트의 마모 계수는 약  $2.96 \times 10^{-7} \text{MPa}^{-1}$ 의 값을 얻었다. 이 결과를 토대로 컨덕터 롤 폴리싱 시스템에서 일정한 마모량에 대응하는 교체 주기를 계산하였다. 또한, 본 연구를 통해 개발된 전기도금아연강판 생산 공정용 컨덕터 롤 폴리싱 장치를 펠트 소재의 실제 교체 주기를 결정하기 위한 실험에 적용하였다. 이론적 교체 주기와 실제 펠트 소재의 교체 주기의 차이를 보정하기 위한 마모 보정 계수를 도입한 결과, 마모되는 소재의 미세조직적 특성 및 재료의 기계적 특성에 따라 마모 보정 계수가 달리 결정될 수 있음을 파악하였다.

본 연구 결과는 향후 다양한 비균질 혹은 불균일 소재에 대한 마모 특성 연구에 도움이 될 것으로 판단된다.

## 후 기

본 논문은 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 결과입니다(No. 20104010100540). 또한, 2008년도 과학기술부의 재원으로 한국과학재단의

지원을 받아 수행된 연구 결과(No. R0A-2008-000-20017-0)이며, 이에 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

## 참고문헌

1. Hayashi, H. and Nakagawa, T., "Recent trends in sheet metals and their formability in manufacturing automotive panels," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 46, No. 3-4, pp. 455-487, 1994.
2. Jiang, H., M., Chen, X., P., Wu, H. and Li, C., H., "Forming characteristics and mechanical parameter sensitivity study on pre-phosphated electro-galvanized sheet steel," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 151, No. 1-3, pp. 248-254, 2004.
3. Tang, L., Yang, Y. and Liu, J., "An efficient optimal solution to the coil sequencing problem in electro-galvanizing line," *Computers and Operations Research*, Vol. 37, No. 10, pp. 1780-1796, 2010.
4. Archard, J. F., "Contact and Rubbing of Flat Surfaces," *Journal of Applied Physics*, Vol. 24, No. 8, pp. 981-988, 1953.
5. Hambli, R., "Blanking tool wear modeling using the finite element method", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 41, No. 12, pp. 1815-1829, 2001.
6. Lee, G. A. and Im, Y. T., "Finite-element investigation of the wear and elastic deformation of dies in metal forming," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 89-90, No. 19, pp. 123-127, 1999.
7. Behrens, B.-A. and Schaefer, F., "Prediction of wear in hot forging tools by means of finite-element-analysis," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 167, No. 2-3, pp. 309-315, 2005.
8. McColl, I. R., Ding, J. and Leen, S. B., "Finite element simulation and experimental validation of fretting wear," *Wear*, Vol. 256, No. 11-12, pp. 1114-1127, 2004.
9. Johansson, L., "Numerical Simulation of Contact Pressure Evolution in Fretting," *Journal of Tribology*, Vol. 116, No. 2, pp. 247-254, 1994.
10. Öqvist, M., "Numerical simulations of mild wear using updated geometry with different step size approaches," *Wear*, Vol. 249, No. 1-2, pp. 6-11, 2001.

11. Kwon, Y. and Fischer, G. W., "A novel approach to quantifying tool wear and tool life measurements for optimal tool management," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, No. 4, pp. 359-368, 2003.
12. Jensen, M. R., Damborg, F. F., Nielsen, K. B. and Danckert, J., "Applying the finite-element method for determination of tool wear in conventional deep-drawing," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 83, No. 1-3, pp. 98-105, 1998.
13. Lee, J. H. and Lee, S. J., "One-step-ahead prediction of flank wear using cutting force," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 39, No. 11, pp. 1747-1760, 1999.
14. Choudhury, S. K. and Kishore, K. K., "Tool wear measurement in turning using force ratio," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 40, No. 6, pp. 899-909, 2000.
15. Ogden, R. W., "Large deformation isotropic elasticity: on the correlation of theory and experiment for compressible rubberlike solids," *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol. 328, No. 1575, pp. 567-583, 1972.
16. Holzapfel, G. A., "Nonlinear Solid Mechanics," Willy, pp. 228-230, 2000.