

결정립 제어 기술을 이용한 클락스프링 케이블용 고내구 동박 소재 개발

채을용* · 이호승**

A Development of High-Durability Copper Foil Materials for Clock Spring Cable Using Grain Size Control Techniques

Eul Yong Chae*, Ho Seung Lee**

Key Words: *Steering Roll Connector(클락스프링), Flexible Flat Cable(플렉서블 케이블), Copper Foil(동박), Grain Size(결정립 크기), Durability(내구)*

ABSTRACT

Flexural resistance evaluation of FFC (Flexible Flat Cable) was performed according to the grain size of rolled copper foil by adding 0.1wt% silver (Ag) and electrodeposited copper foil by slitting method after heat-treatment. These methods are aimed at enhancing the flexural durability of the FFC by growing the grain size of copper foil. By increasing the grain size of the copper foil and minimizing the miss-orientation at grain boundaries, the residual stress at the grain boundaries of the copper foil is reduced and the durability of the FFC is improved. Maximizing an average grain size of copper foil can be got a good solution in order to enhance the durability of the FFC or FPCB (Flexible Printed Circuit Board).

1. 서론

최근 자동차의 안전성과 편의성 요구가 커짐에 따라 전장 부품의 수가 증가하고 있고, 이에 따라 부품의 경량화 차원에서의 소형화와 원가경쟁력 확보 요구가 어느 때보다 높아지고 있다. 이러한 경향은 이전에 전선을 사용하던 방식에서 플렉서블 특성이 있는 박막 동선이 라미네이트된 FFC(Flexible Flat Cable)와 연성 인쇄회로기판인 FPCB(Flexible Printed Circuit Board)가 많이 사용되는 방향으로 변화되고 있다.

Fig. 1 및 Fig. 2는 클락스프링 장착위치와 FFC의 구조를 보여주고 있다. 자동차 스티어링 휠 중앙에 장착되는 부품인 스티어링 롤 커넥터(SRC, Steering Roll Connector)

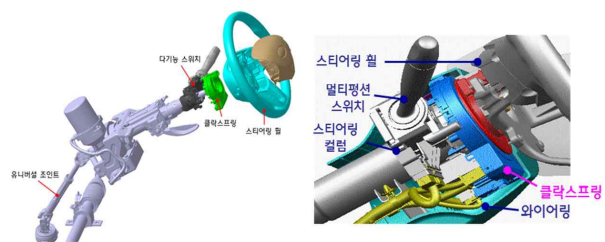


Fig. 1 Mounting Position of Clock Spring

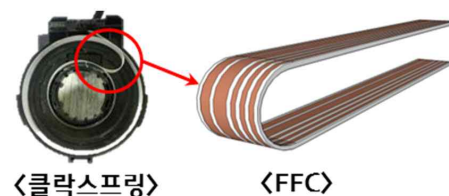


Fig. 2 Structure of Steering Roll Connector (SRC) and Flexible Flat Cable (FFC)

* 현대자동차, 연구원

** 현대자동차, 책임연구원

E-mail: eychae@hyundai.com

는 클락스프링(Clock Spring)이라고도 불리며, 스티어링 휠에 있는 스위치 신호와 에어백의 점화 장치에 전력을 공급해주는 기능을 한다. 이런 신호와 전력의 전달에 FFC가 사용되고 있다. 운전자가 스티어링 휠을 회전시키게 되면 클락스프링 내에 감겨있는 FFC가 굴곡된 상태로 풀렸다가 다시 말리는 작동이 반복적으로 일어나게 되고, 이를 통해 전력을 지속적으로 공급해준다. 지금까지 FFC는 전자 산업에서 폴더폰이나 벽걸이형 TV에 소형화 및 원가절감을 위해 사용된 관계로 가전용 전자제품 기준의 내구 조건으로 개발되어 왔다.⁽¹⁾ 그러나 자동차용 부품인 스티어링 휠에 사용되는 FFC의 경우에는 높은 온도와 습도라는 가혹한 환경에 노출되어 있고, 차량 주행시 응력이 지속적으로 걸리기 때문에 기존 가전 산업에서 사용되는 FFC와는 비교할 수 없을 정도의 높은 내구 특성이 요구된다.

클락스프링 부품은 품질문제 발생시에 승객의 안전과 직결되기 때문에 예방품질 확보 차원의 많은 연구가 이루어지고 있다. 스티어링 휠이 반복적으로 회전하게 되면 FFC 내부의 동박에 반복적인 굴곡 응력이 가해지고 그로 인한 기계적 피로 축적에 의해서 FFC의 도체인 동박에 크랙이 발생하거나 단선이 되기도 한다. 즉, 스티어링 휠의 회전에 따라 FFC 내부 동박은 가혹한 환경 조건에서 계속적으로 작은 굴곡 반경에서 말리고 풀림과 같은 슬라이딩이 일어나게 되고, 굴곡이 많이 발생하는 국부적인 영역에서 지속적인 응력이 가해져 동박에 피로가 누적된다. 과거에는 동박의 두께를 줄였을 때 나타나는 내구 특성에 대한 연구가 많았지만 일정량 이상의 전력을 공급해야 하기 때문에 두께를 줄이는 데에는 한계가 있었다. 본 연구에서는 동박 자체의 특성을 높이기 위해 미량 원소를 첨가하여 합금화를 시키거나 내구성을 높이기 위해 동박의 제조방법을 변경시키는 방법을 채택하였다.

일반적으로 자동차 단품 내구 평가 기준에 따라 FFC 내구 시험을 진행하였을 때, 10만회(동박 두께 35 μ m 기준) 내구 사이클 이상의 내구 수명을 가지기 어렵다. 이런 문제를 해결하고자, FFC 내부 동박의 내구 수명을 증가시키기 위한 방법으로 재료적 내구성에 대한 설계 요구가 증가되었고, 이에 따라 동박 소재의 수명을 증가시킬 수 있는 재료적 연구를 진행하게 되었다.

2. 시험방법

2.1. 동박 및 FFC 제조방법

동박의 종류에 따른 FFC의 굴곡 내구 특성을 확인하

기 위해 압연동박과 전해동박으로 굴곡 내구 시험을 진행하였다.

일반적으로 압연동박은 신선재를 냉간 압연하고 어닐링(Annealing)시켜 원하는 두께와 폭으로 제조한다. 본 연구에서는 결정립 크기를 키우기 위해 타프피치동(TPC, Tough Pitch Copper)에 0.1wt%의 Ag가 첨가된 신선재를 이용하여 신선재를 만들고 압연과 열처리 공정을 각 2회씩 진행하여 동박을 제조하였다. 그 후, Fig. 3과 같이 절연필름과 도체 사이에 접착제를 두고 가압 및 가열 상태에서 라미네이팅 공정을 통해 FFC를 제조하였다.

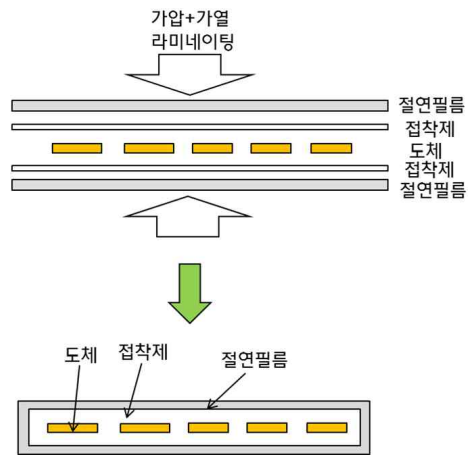


Fig. 3 FFC Lamination Process

전해동박 제조시에는 열처리 온도 및 시간 그리고 표면 조도를 제어하여 각 조건별 동박을 제조하였다. 그 후 동박에 걸리는 응력집중현상을 저감시키기 위해서 슬리팅 공법을 사용하였고 요구되는 폭으로 동박을 슬리팅 절단하여 FFC를 제조하였다. 전해동박 도체 두께는 일반적으로 사용되는 1oz(35 μ m)를 사용하였다.

Fig. 4는 공정 종류에 따른 FFC 절단면을 비교한 그림이다. 선재 압연 공정을 통해 제작된 FFC 내부 도체는 끝단부가 약간 둥그런 형태이며, 슬리팅 공정을 통해 제작

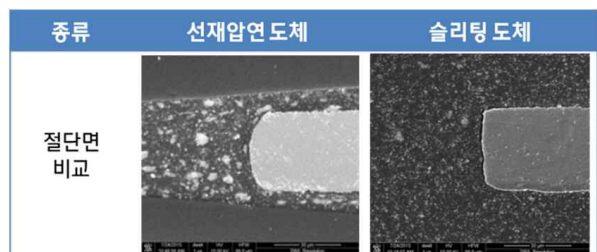


Fig. 4 Comparison of Cross-sectional Image in FFC

된 FFC 내부 도체는 끝단부가 사각형 형태로 절단된 모양을 가진다. 두 공정을 비교하였을 때 도체 옆면에 굴곡부가 있는 선재압연 공정을 통해 제작된 FFC 보다 도체 옆면이 깔끔하게 절단되어 있는 슬리팅 공정을 통해 제작된 FFC가 도체 끝단부에 걸리는 응력 집중 현상이 적다.

2.2. 동박의 결정립 크기 분석

동박의 결정립 크기 분석은 FIB(Focused Ion Beam, FEI V400ACE) 장비를 이용하여 진행하였으며, Fig. 5와 같이 분석 시편에서 폭과 두께 방향의 가운데(35x25 μ m) 부위를 분석하였다.

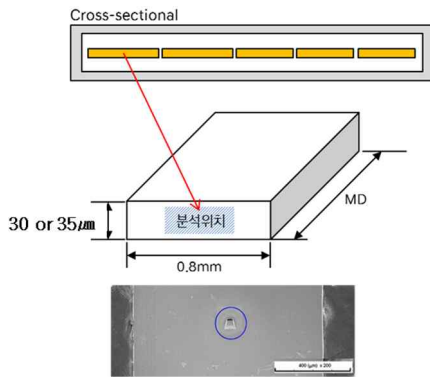


Fig. 5 Analysis Method of Grain Size

2.3. 굴곡 내구 시험 (유연성 시험)

내구 시험은 Fig. 6과 같이 FFC 유연성 시험을 실시하였다. 유연성 시험은 R = 5mm로 굴곡을 시킨 다음에 100mm의 스트로크를 주어 반복적으로 굴곡이 되도록 하였다. 이 때의 환경조건은 85°C, 95%RH이며, 시험 속도는 100회/min로 실시하였다.⁽²⁾

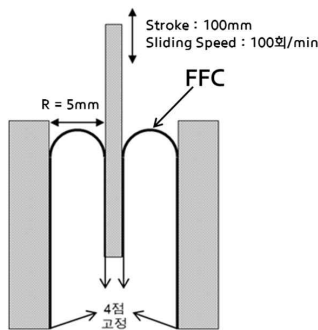


Fig. 6 Test Method of FFC Flexural Endurance Test

3. 결과 및 고찰

FFC는 도체 및 접착제의 다양한 변수에 의해서 내구 수명이 결정되는데, 그중 동박 자체의 내구 특성이 FFC의 내구 수명에 가장 큰 영향을 준다. 고내구 특성을 가지는 FFC를 제조하기 위해서는 FFC 내부 동박 소재에 대한 기계적 특성의 강건화가 필요하다고 판단하였다. 내구성 강건화의 일환으로 구리 판재에 슬리팅(Slitting) 공법을 적용하여 만든 동박으로 FFC를 제조하여 내구 수명을 평가한 결과, 기존 대비 약 200% 이상, 내구 수명을 획기적으로 증가시켰다. 하지만, 슬리팅 공법은 과도한 공정비 상승을 유발시키기 때문에 기존 양산품 대비 원가가 동등 수준이거나 원가를 줄이면서 동박의 내구 수명을 증가시킬 수 있는 방법을 모색하게 되었다.

기존 TAKAAKI⁽³⁾의 연구에 의하면 동박의 결정립이 클수록 FFC 유연성 피로 시험에 더 유리하다는 연구 결과가 있었다. 유연성 피로 시험중 크랙은 주로 결정립계(Grain boundary)에서 많이 발생하게 되므로 결정립(Grain) 크기가 작은 경우에는 크랙의 전파가 용이해지므로 피로 한도가 낮게 나타나고 결정립이 큰 경우에는 결정입내에서 크랙이 발생하므로 내구 수명이 길어질 수 있다는 결과이다. Fig. 7은 결정립의 크기에 따른 FFC 동박의 크랙 형상의 모습이다. 일반적으로 크랙은 결정립계를 따라서 성장하므로, 결정립이 큰 경우보다 작은 경우 결정립계가 차지하는 영역이 많아지게 되고 크랙이 발생할 수 있는 확률이 증가하여 굴곡 내구 특성에 불리하다. 동박의 결정립 크기를 성장시키면 결정립계(Grain boundary)를 따라서 존재하는 잔류응력(Residual stress)을 감소시킬 수 있게 되고, 이에 따라 결정립계에서 발생하는 Miss-orientation을 최소화 시킬 수 있어 동박의 내구 수명을 증가시킬 수 있다.

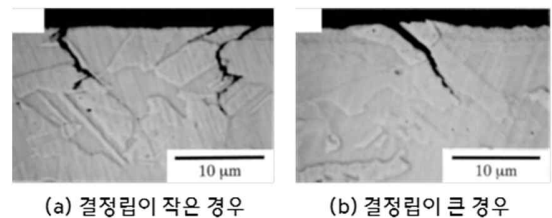


Fig. 7 Cross-sectional Image of Copper Cracks in FFC

본 연구에서는 FFC 내부 동박의 결정립 크기를 제어하는 기술을 접목시킨 아래 두 가지 방법으로 동박 및 FFC를 제조하여 원가를 동등 수준으로 유지 또는 절감시

키면서도 내구 특성을 획기적으로 향상시켰다.

- (1) 구리 선재에 은(Ag)을 약 0.1wt% 첨가한 후 압연하여 동박 및 FFC를 제조
- (2) 증착 방식으로 만들어진 저가의 전해동박을 슬리팅 공법과 접목하여 동박 및 FFC를 제조

3.1. Ag 첨가 압연동박 FFC

첨가물로 Ag를 선정한 배경은 Fig. 8(a)에서 보는 것처럼 Cu 모재에 Ag, Cd, Zn 등의 원소를 최대 1.0wt% 까지 첨가해도 중요한 전기전도도가 90%IACS 이상 수준으로 유지되기 때문이다. Fig. 8(b)에서는 Pure Cu 모재에 Sn, Ag, Cr 등을 미량 첨가하게 되면 기존에 재결정 온도(Recrystallization temperature)가 140°C 수준이던 Pure Cu와 비교하여 합금화된 소재는 재결정 온도가 300°C 이상까지 올라가게 되어 고온에서 기계적 물성이 안정된다. Cu 모재에 0.05~0.1wt% 미량 원소를 넣었을 때 전기 전도도 감소를 최소화 시키면서 재결정 온도를 300°C 이상 향상시킬 수 있는 원소는 Ag이다.⁽⁴⁾

Cu에 Ag가 첨가되면 서로 고용체(Solid solution)를 이루게 되고 원자의 이동도(Atomic mobility)가 떨어지면서 내열성 및 재결정 온도가 향상되어 모재의 어닐링에 대한 저항성을 향상시켜준다. 재결정 온도는 은의 함량이 0.1wt% 부근에서 포화되고 은이 많이 첨가될수록 전기 전도도는 저하되지만 다른 원소에 비해서 은의 함량이 0.1wt% 일 때 전기전도도의 저하는 거의 없다.

이러한 특성을 이용하여 동박 제조시 Cu-Ag 합금 소재의 압하율을 최대화시키고 상온에서 재결정이 일어나지 않게 하고 동박이 내부에너지를 가지고 있다가 고온에서 재결정이 일어나게 함으로써 결정립 조대 성장을 유도시킬 수 있다. 또한, Cu에 Ag를 첨가하면 고온에서 강도 저하 현상이 줄어들어 고온 내구 신뢰성도 확보할 수 있었다.

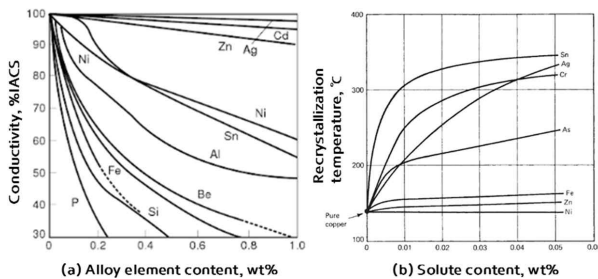


Fig. 8 Variation of (a) Electrical Conductivity (b) Recrystallization Temperature With Ag addition in Cu Materials⁽⁴⁾

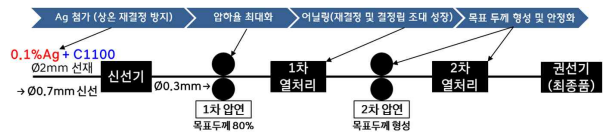


Fig. 9 Rolling process for manufacturing of Ag-added Cu Foil

Fig. 9는 Ag가 첨가된 압연동박 FFC를 제조하는 공정이다. Ag가 첨가된 2mm 선재를 신선기에 통과시키고 1차 압연 공정에서 압하율을 최대한 높여 결정립의 내부에너지를 높여주었다. 그 후, 결정립이 가지고 있던 내부에너지에 더하여 1차 열처리를 통해 고온에서 재결정이 일어나게 하여 기존 2.7 μ m 수준인 결정립을 3.6 μ m 까지 성장시켰다. 이 때, Ag를 0.1wt% 정도 미량 첨가시켰기 때문에 상온에서 쉽게 재결정이 일어나지 않게 되고, 고온에서 재결정이 일어나게 만들었다. 그 후, 2차 압연 및 열처리 공정에서 목표 두께를 형성하고 안정화 처리를 진행하였다.

Fig. 10과 Fig. 11은 열처리 조건에 따른 동박의 신율과 결정립 크기의 관계를 보여주고 있다. 동박 압연시 1

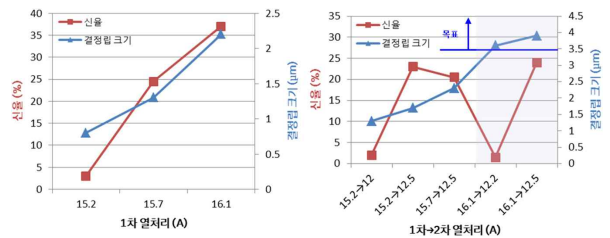


Fig. 10 The Relation between Elongation and Grain Size of Copper Foil according to the Annealing Condition

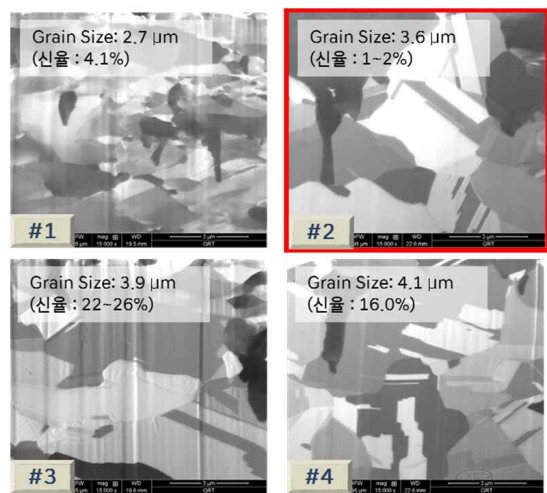


Fig. 11 Grain Size of Copper Foil by Manufacturing Condition

차 열처리 전류 값이 증가할수록 압연된 도체의 결정립 크기와 신율이 증가하는 경향을 보인다. 전류값 16.1A에서 결정립 크기는 약 2 μm 수준으로 수렴한다. 또한, 2차 열처리는 1차 열처리 조건으로부터 영향을 받는다. 1차 열처리 전류값 16.1A 이상에서 2차 열처리시 결정립 크기는 3.5~4.0 μm 범위로 수렴한다. 따라서 결정립 크기를 성장시키려면 1차 열처리 공정에서 임계 전류 이상을 공급해 줄 필요가 있다.

Table 1 Result of Durability Test according to type of copper foil and annealing condition

종류	소재	열처리(A) (1→2차)	항복강도 (MPa)	결정립 크기(μm)	내구 (만회)
#1	C1100	현양산조건	210~270	2.7	20
#2	0.1%Ag +C1100	16.1→12.2	250~320	3.6	57
#3	0.1%Ag +C1100	16.1→12.5	130~160	3.9	26
#4	C1100	17.0→12.0	210~270	4.1	21

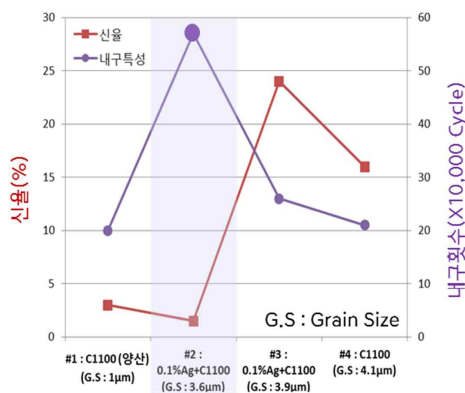


Fig. 12 Characteristics of Elongation and Flexural Durability by Copper Manufacturing Conditions

Table 1과 Fig. 12는 동박 소재 종류 및 열처리 조건에 따른 굴곡 내구 시험 결과를 나타내고 있으며, 2번 샘플인 0.1wt%+C1100 소재를 1차 열처리 16.1A, 2차 열처리 12.2A 일 때 굴곡 내구 특성은 57만회로 가장 좋은 내구 특성을 보이고 있다. 3번 샘플도 Ag가 첨가된 Cu 소재에 결정립 크기도 3.6 μm 수준으로 크지만, 굴곡 내구 특성이 26만회로 기존 양산품 대비 크게 증가하지 않은 이유는 FFC 굴곡 내구 시험은 탄성 영역에서 평가되는데, 낮은 항복강도로 인하여 국부적 영역에서 탄성구간이 2번 샘플 대비 감소하였기 때문이다. 2번 샘플을 보면 항복강도가 300MPa 수준으로 높기 때문에 탄성구간이 길어

서 고주기 피로에서 유연성 내구 측면에서 유리하다. 결론적으로 동박 결정립 제어 기술을 활용해 동등 수준의 원가를 유지하면서 FFC 내구 특성을 약 290% 향상시킬 수 있었다.

3.2. 슬리팅 공법 적용 전해동박 FFC

두 번째로, 저가 전해동박 소재에 열처리 조건을 최적화하여 결정립 크기를 제어하였고, 이 도체를 슬리팅 공법으로 절단하여 FFC를 제조하였다. 이로써 응력 집중현상을 저감시킬 수 있었고 동박의 재료 균질성을 확보할 수 있었다. 또한 전해동박의 표면 조도에 따라서도 내구성에 영향이 있기 때문에 이를 최적화하여 내구성을 증가시켰다.

Table 2 Mechanical Properties of Electrolytic Copper Foil by Annealing Conditions

종류	열처리	인장강도 (MPa)	신율 (%)	결정립 크기(μm)
REF#1	(편각도체)	435.9	1.82	2.8
REF#2	(슬리팅)	417.6	0.97	3.2
ECF#1	—	431.2	6.6	0.7
ECF#2	170 $^{\circ}\text{C}$ /5s	324.8	15.4	3.0
ECF#3	170 $^{\circ}\text{C}$ /10s	254.4	22.1	4.5
ECF#4	170 $^{\circ}\text{C}$ /15s	208.6	25.2	4.7

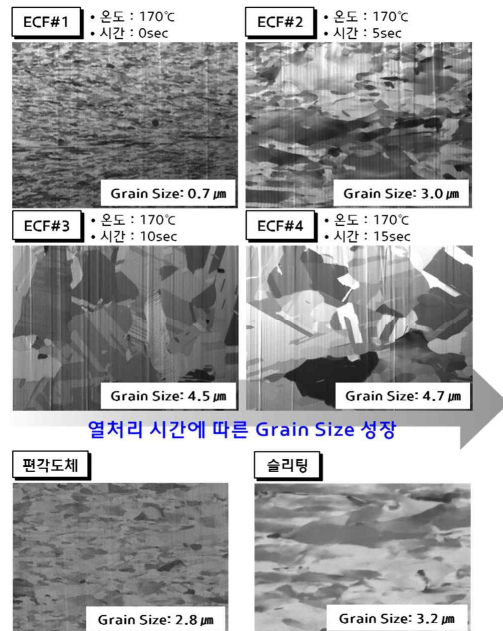


Fig. 13 Grain Size by Annealing Condition of Electrolytic Copper Foil

Table 2 및 Fig. 13은 전해동박의 열처리 조건에 따른 기계적 특성과 결정립 크기 영향성에 대한 결과이다. 170°C에서 열처리 시간이 증가함에 따라 결정립 크기도 같이 성장하는 것을 경향성을 보였으며, 170°C에서 10 초 이상 열처리 하였을 때, 결정립 크기를 4 μm 이상으로 만들 수 있었다.

Fig. 14와 Table 3은 전해동박의 표면조도에 따른 굴곡 내구 특성을 보여주고 있다. 전해동박을 170°C에서 열처리 시간을 증가시키면 도체의 표면 조도는 감소하는 경향을 보인다. 전해동박은 드림과 접촉하는 쪽은 Shiny 면, 증착되는 쪽은 Matt면이라고 한다. 일반적으로 Matt 면이 표면조도가 더 높다. 아래 결과를 보면, 전해동박의 굴곡되는 면이 Shiny면일때보다 Matt 면일때 굴곡 내구 특성이 좋고, 표면조도가 감소할수록 굴곡 내구 특성도 좋아진다. 이는 전해동박이 제품상태가 되면 Shiny 면에 인장응력이 가해지게 되고 Matt 면에 압축응력이 가해지게 된다. 굴곡면이 Matt 면이 되어야 제품 상태의 응력을 상쇄시켜 줄 수 있기 때문에 내구 성능에 유리하다.

Fig. 15에서 ECF#3 샘플의 굴곡면이 Matt면일 경우, 굴곡 내구 특성이 16.5만회로 기존 양산품 대비 170%를 향상된 것을 알 수 있다.

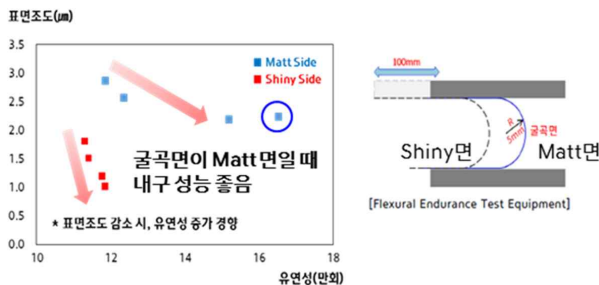


Fig. 14 Characteristic of Flexural Durability by Roughness of Electrolytic Copper Foil

Table 3 Flexural Durability Test by Roughness of Electrolytic Copper Foil

종류	표면조도(μm)		유연성(x10,000)	
	Matt	Shiny	Matt	Shiny
REF#1	0.53		9.8	
REF#2	1.02		29.5	
ECF#1	2.86	1.81	11.9	11.3
ECF#2	2.57	1.51	12.4	11.4
ECF#3	2.23	1.20	16.5	11.8
ECF#4	1.19	1.02	15.2	11.9

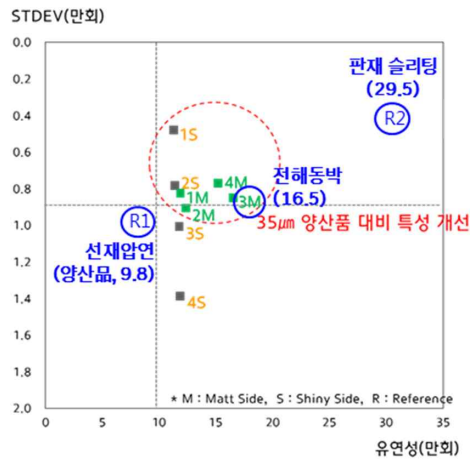


Fig. 15 Characteristic of Flexural Durability of Electrolytic Copper Foil

4. 결론

본 연구에서 두 가지 방법으로 동박의 결정립 제어를 통해 고내구 특성을 가지는 클라스프링용 FFC 제조가 가능함을 확인하였다. 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 동박 소재의 결정립이 커질수록 FFC의 내구 수명이 향상되는 것을 확인하였다.
- 2) Cu에 0.1wt% Ag를 첨가한 동박으로 FFC를제조한 경우 결정립 크기를 3.6 μm 까지 성장시켰으며, 기존 양산품 대비 약 290% 굴곡 내구 성능을 향상시켰다.
- 3) 슬러팅 공법을 적용한 전해동박 FFC의 경우 열처리 조건을 조절하여 결정립을 약 4.7 μm 까지 성장시켰으며, 표면조도 제어를 통해 기존 양산품 대비 굴곡 내구 성능을 약 170% 향상시켰다.

참고문헌

- (1) H.D. Merchant, M.G. Minor, S.J. Clouser, 1998, 18 μm electrodeposited copper foil for flex fatigue applications, Circuit World 25, 28.
- (2) IPC Standard, 1996, The institute for Interconnection and Packaging Electronics Circuit (IPC) Standard, TM-650.
- (3) T. Hatano, Y. Kurosawa, J. Miyake, 2000, Effect of Material Processing on Fatigue of FPC Rolled Copper Foil, Journal of Electronic Materials, 29-5.
- (4) Joseph R. Davis, 2001, Copper and Copper Alloys, 4, 36.