

무전해 도금법에 의한 전자파 차단 의류소재의 제조

김수미 · 송화순

숙명여자대학교 의류학과

Preparation of Electromagnetic Wave Shielding Fabrics by Electroless Plating

Su Mi Kim · Wha Soon Song

Dept. of Clothing & Textiles Sookmyung women's Univ.

(2004. 5. 27. 접수)

Abstract

The purpose of this study was to produce the high quality of electromagnetic wave shielding fabrics. In this study, we have produced polyester fabrics by electroless Ag plating. The untreated polyester was etched with 4% NaOH solution added accelerant(Benzyl Dimethyl Dodecyl Ammonium Chloride) then it was catalyzed by SnCl₂ solution and activated by PdCl₂ solution. Electroless Ag plating was carried out by changing conditions such as temperature, time, weight loss rate of polyester and kind of reducing agents. The electromagnetic wave shielding effectiveness of polyester fabric by electroless Ag plating was measured by RF Impedance Analyzer and element of electromagnetic wave shielding substance was measured using Electron probe micro analyzer.

The results were as follows;

The plating bath using potassium sodium tartrate by reducing agent was excellent electromagnetic wave shielding effectiveness. Element of electromagnetic wave shielding substance was silver. Electromagnetic wave shielding effectiveness was shown over 64dB at the temperature of 40°C, treating time 30min., weight loss rate 20%.

Key words: Electromagnetic wave, Electroless plating, Electromagnetic wave shielding effectiveness; 전자파, 무전해 도금, 전자파 차폐효율

I. 서 론

전자기술이 빠른 속도로 발전하면서 사무실의 전산화는 물론 가정에까지 각종 편리한 기능의 전자기가 대량으로 공급되어 우리 주변의 많은 공간을 차지하고 있다. 이들 전자기기에 사용되는 전자부품에서 고주파의 전자파가 발생하는데, 이는 주변기기의 오작동과 인체의 면역기능 및 생식기능을 파괴하고, 기형과 암 등의 질환을 유발하는 것으로 알려져 있다

(Polk and Postow, 1987; 김기채, 1993). 따라서 전자파에 대한 관심이 높아짐에 따라 이에 대처하기 위하여 전자파 차폐에 관한 연구가 진행되고 있다.

전자파 차폐란 전도체 혹은 자성체를 이용하여 잡음원을 완전히 둘러싸거나 새로운 회로를 형성, 보호할 대상의 주변에 존재하는 유해파의 세기를 감소시키는 것을 말하며, 전자파 차폐 섬유소재를 제조하는 방법은 다양하다. 그 중 섬유표면에 금속피막을 형성시켜 전자파 차폐성능을 부여하는 방법이 전자파 차폐효과가 우수하고 대량 가공이 가능하므로 많이 사용되고 있다. 금속피막 형성법은 금속진공 증착법과 무전해 도금법이 일반적이다. 금속진공 증착법은 섬

본 연구는 숙명여자대학교 2003년도 교내 연구비의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

유 표면의 요철과 일정 두께 이상으로는 가공하기 어려운 점 때문에 전자파 차폐성을 부여하기 어려운 것으로 알려져 있어 주로, 필름과 같은 평면에 많이 적용되고 있다. 반면, 무전해 도금법은 금속 이온의 화학적 에너지 차로 인해 촉매와 반응하여 섬유상에 부착되는 도금방법으로써 처리조건에 따라 도금 층의 두께를 늘릴 수 있으며, 섬유상에 균일한 금속피막을 형성시켜 우수한 전자파 차폐성을 부여할 수 있다.

전자파 차폐제로는 은, 구리, 니켈, 기타 금속 등의 전도성 소실제와 유전손실 전파흡수제 및 스테인레스 강 섬유와 같은 자성손실 전파흡수제가 있다.

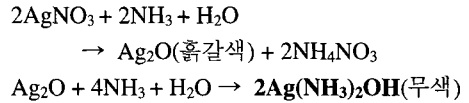
전자파 차폐소재에 대한 선행연구로 금속을 이용한 연구로는 폴리에스터 섬유에 플라즈마 처리로 에칭구조를 만든 후, 전자파 차폐 금속인 니켈을 이용하여 무전해 도금한 결과, 금속과 섬유간의 계면 밀착성이 향상되어 전자파 차폐능이 증가한다고 보고(천태일, 1998)하였으며, 전자파 차폐 의류 소재 제조시 전도성 코팅법과 무전해 도금법을 비교한 연구(한은경 외, 1998)에서는 무전해 도금법에 의해 제조된 의류소재가 전도성 코팅법으로 제조된 소재보다 전자파 차단 효과가 우수하다고 보고하였다. 또한 구리를 이용하여 폴리에스터 직물에 무전해 도금처리시 구리가 산화되어 도금직물이 변색되는 것을 방지하기 위해 산화 방지 코팅을 실시하였으며, 코팅제로는 실리코코팅제가 가장 우수하다고 보고하였다(오경화, 2001).

전도성 고분자를 이용한 연구로는 폴리피롤(장순호 외, 2001; 김미선 외, 2001), 폴리아닐린(하남규 외, 2001) 등을 섬유에 흡착시켜 섬유의 전도성이 향상되었다고 보고하였다.

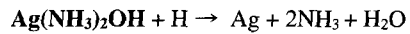
금속을 이용한 전자파 차폐소재는 대부분이 저단가의 구리 또는 니켈을 차폐제로 사용하고 있으며, 이러한 전자파 차폐소재를 의복으로 제작시 부식이나 변색이 발생할 수 있기 때문에 의류의 걸감보다는 안감류로 많이 사용되고 있으므로 이러한 문제점을 개선한 섬유소재의 개발이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 전자파 차폐를 위한 새로운 고부가가치 소재 개발을 위해 폴리에스터 직물에 알칼리 처리 및 촉매화 처리를 하여, 내산화성이 우수

하고 표준전극 준위가 높아 환원석출하기 쉬운 은을 차폐제로 사용하였다. 무전해 은도금의 경우, 도금액 중의 환원제의 산화반응으로 생성된 수소에 의해 은 이온을 환원시킴으로써 섬유 표면에 은 피막을 형성시킨다. 이 때 형성된 흑갈색의 산화은은 암모니아수를 추가하면 은의 암모니아 착체를 형성하여 침전은 사라지고 다시 맑은 액으로 변한다. 이를 화학식으로 나타내면 다음과 같다.



형성된 은 암모니아 착체는 다음 식과 같이 환원제와 반응하여 은을 석출시켜 도금 처리를 할 수 있다.



이에 본 연구에서는 무전해 도금 가공시, 최적의 가공조건에 대한 기초 자료를 제시하고자 한다.

II. 실험

1. 시료 및 시약

시료는 염색견뢰도용 폴리에스터 첨부백포(KS K 0905)를 사용하고, 시료의 특성은 <Table 1>에 나타내었다.

시약으로는 Sodium Hydroxide, Benzyl Dimethyl Dodecyl Ammonium Chloride(이하 BDMDAC), Acetic Acid, Tin(II) Chloride Dihydrate, Palladium Chloride, Hydrochloric Acid, Silver Nitrate, Potassium Sodium Tartrate, Dextrose Anhydrous, Formaldehyde Solution, Methyl Alcohol, Tartaric Acid, Ammonium Hydroxide 등 모두 1급 이상을 사용하였다.

2. 실험방법

- 1) 수산화나트륨 수용액을 이용한 폴리에스터의 알칼리 처리

Table 1. Characteristics of fabric

Fabric	Weave	Yarn number		Fabric counts (thread/5cm)		Thickness (mm)
		Warp	Weft	Warp	Weft	
polyester 100%	Plain	75D	75D	210	191	0.19

폴리에스터 직물에 대한 도금피막의 밀착성을 높이기 위하여 수산화나트륨 수용액을 이용하여 알칼리 처리를 하였다.

알칼리 처리는 4% 수산화나트륨 수용액에 BDMDAC를 첨가하여 액비 1:50으로 90°C에서 10분간 처리한 후, 아세트산으로 중화하였다. 중화가 끝난 시료는 미반응 알칼리를 제거하기 위하여 80°C에서 10분간 소핑하였다.

2) 촉매화 처리

알칼리 처리된 폴리에스터 표면에 금속과의 화학반응을 개시하기 위하여 염화주석(II) 용액으로 감수화 처리 후, 염화팔라듐 용액으로 폴리에스터 표면을 활성화시키는 2단계의 촉매화 처리를 하였으며, 이때 액비는 1:50으로 30°C에서 30분간 처리하였다.

3) 무전해 은도금

전처리 공정을 마친 시료는 차폐제로 질산은을 사용하여 전자파 차폐특성을 비교하기 위하여, 환원액으로 환원제의 종류를 달리하였다. 사용된 환원제는 김남일, 장시성(1996)이 제시한 것으로, 롯데염(이하 도금욕 A), 포도당(이하 도금욕 B), 포름알데히드(이하 도금욕 C)를 사용하였다.

무전해 도금처리는 도금욕 A, B, C 모두 은액과 환원액을 1:1로 혼합하여 shaking incubator(Jeotech SI-600R, Korea)를 이용하여 처리하였다. 이 때 각 도금욕의 조성은 다음과 같다.

도금욕 A의 조성시 은액은 액비 1:50(o.w.f.)으로 질산은(20g/l)을 용해한 후, 소량의 암모니아수를 첨가하여 제조하였고, 환원액은 액비 1:50(o.w.f.)으로 롯데염(143g/l)을 용해하여 사용하였다.

도금욕 B의 조성시 은액은 액비 1:25(o.w.f.)로 질산은(58g/l)을 용해한 후, 소량의 암모니아수를 첨가하여 만든 액에, 액비 1:25(o.w.f.)로 수산화나트륨(42g/l)을 용해시킨 액을 혼합하여 제조하였다. 환원액은 액비 1:50(o.w.f.)으로 포도당(45g/l), 주석산(4g/l)을 순차적으로 용해시켜 10분간 끓인 후, 상온으로 식혀 알코올(100ml/l)을 첨가하여 제조하였다.

도금욕 C의 조성시 은액은 액비 1:30으로 질산은(58g/l)을 용해한 후, 소량의 암모니아수를 첨가하고, 그 후 종류수를 재첨가하여 전량을 액비 1:50으로 만들어 제조하였고, 환원액은 액비를 1:50(o.w.f.)으로 하여 포름알데히드, 알코올, 종류수를 1.1:95:3.9의

비율로 혼합하여 제조하였다.

무전해 도금이 끝난 시료는 초음파 세척기(Ultrasonic, Josun Science Machine Co.)를 사용하여 40°C에서 60분간 수세 후, 자연 건조하였다.

4) 차폐제 성분 분석

무전해 도금에 의해 부착된 물질의 성분은 Electron probe micro analyzer(EPMA, JEOL JXA-8900R, Japan)로 분석하였다.

5) 주사전자현미경에 의한 표면형태관찰

폴리에스터 시료의 알칼리 처리, 촉매화 처리 및 처리조건에 따른 무전해 도금시 표면변화 및 은의 부착상태 등을 관찰하기 위하여 주사전자현미경(SEM, Jeol JSM-5410, Jeol. Co. Japan)으로 표면형태를 비교, 관찰하였다.

6) 전자파 차폐율 측정

처리조건을 변화시켜 무전해 은도금된 폴리에스터의 전자파 차폐효과를 측정하기 위해 ASTM D4935-89법에 따라 RF Impedance analyzer HP4291A(Hewlett Packard Co., Ltd. U.S.A.)를 이용하여 각 주파수 대역(5MHz~1.5GHz)에서 15mm의 원형시료의 임피던스값을 측정하여 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 무전해 은도금에 의한 전자파 차폐 의류소재 제조 최적 조건

1) 무전해 은도금시 환원제의 종류에 따른 표면 형태 및 전자파 차폐효과

<Fig. 1>은 무전해 도금시 도금욕의 종류에 따른 표면형태 변화를 SEM으로 비교, 관찰한 결과로 (a)는 도금욕 A, (b)는 도금욕 B, (c)는 도금욕 C이다.

<Fig. 1>에 나타난 바와 같이 도금욕 A는 섬유표면 전체에 두껍고 균일하게 도금 피막이 형성되어 있는 것을 알 수 있으며, 섬유표면 전체적으로 작은 입자들이 부착되어 있음을 확인할 수 있었다. 이 작은 입자들은 도금처리에 의해 은입자가 환원되면서 섬유표면에 막을 형성할 때, 석출된 은 입자들이 섬유와 결합되기 전에 서로 뭉쳐져 섬유표면에 막을 형성하지 못하고 이미 형성된 막에 부착되었기 때문으로 생

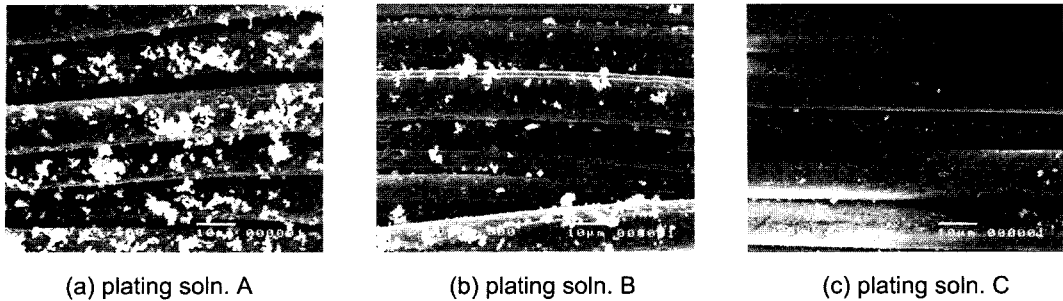


Fig. 1. SEM photographs of electroless Ag plated on polyester fabrics treated with various kind of reducing agents (treating temp. & time 40°C, 30min., weight loss rate 20%)

각된다. 또, 포도당을 환원제로 사용한 도금액 B는 조제로 첨가된 주석산에 의한 것으로 도금액에 주석산이 첨가되면 도금반응속도가 빨라져 섬유와 결합되기 전에 은 입자들끼리 서로 뭉쳐져, 도금피막을 형성시키지 못하기 때문으로 생각된다.

그러나 도금액 C는 그림에 나타난 바와 같이 섬유 표면에 거의 피막을 형성하고 있지 않았다. 환원제로 사용된 포름알데히드가 루셀염 또는 포도당보다 은을 환원시키는 속도가 매우 빠르며 석출된 은 입자의 크기가 크기 때문에 피도금물인 섬유와의 밀착성이 떨어지기 때문이라 생각된다. 이는 김남일, 장시성(1996)의 보고와 같은 결과이다. 또한 포름알데히드는 피부에 자극을 주는 물질로 최근에는 거의 사용하지 않으므로 섬유에 무전해 도금시 환원제로서 바람직하지 않을 것으로 생각된다.

<Fig. 2>는 도금액의 종류에 따른 전자파 차폐효과를 알아보기 위하여 각 주파수 대역(5MHz~1.5GHz)에서 임피던스값을 측정하여 나타낸 것이다.

일반적으로 생활 주변의 전자기기들이 내는 전자파의 주파수는 30MHz에서 1000MHz사이의 범위에 속해 있으며 차폐효과의 수준은 10~30dB은 최소한의 차폐효과가 있으며, 30~60dB은 차폐효과가 어느 정도 있는 것이며, 60~90dB은 차폐효과가 크고, 90dB이상은 최고수준의 차폐효과가 있다고 알려져 있다(안태환, 1999).

<Fig. 2>에 나타난 바와 같이 도금액 A가 60dB 이상의 전자파 차폐율을 나타내었고 도금액 B는 50dB, 도금액 C는 전자파 차폐율이 거의 나타나지 않았다. 이는 <Fig. 1>에 나타난 섬유표면의 은도금피막의 부착상태와 일치하는 결과이다.

따라서 도금액 A인 루셀염을 환원제로 사용한 경

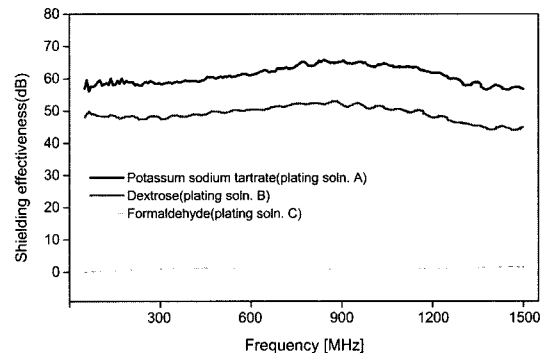


Fig. 2. Effect of reducing agents on the electromagnetic wave shielding effectiveness

우, 가장 우수한 전자파 차폐소재를 얻을 수 있었다.

이에 본 연구에서 이하의 실험 진행은 환원제로 루셀염을 사용하여 무전해 도금 처리하였다.

2) 무전해 은도금시 처리온도에 따른 표면 형태 및 전자파 차폐효과

<Fig. 3>은 무전해 은도금시 처리온도에 따른 표면 형태를 나타낸 것으로 (a)는 미처리, (b)는 처리온도 20°C이며, (c)는 처리온도 30°C, (d)는 처리온도 40°C, (e)는 처리온도 50°C이다.

<Fig. 3>에 나타난 바와 같이 처리온도가 증가할수록 섬유 표면에 금속피막의 형성이 고르고 두껍게 형성됨을 확인할 수 있었고, 처리온도 40°C에서 가장 고르고 두껍게 금속피막이 형성되는 것으로 나타났다. 한편, 처리온도가 50°C인 경우는 온도가 높아짐에 따라 도금속도가 증가하여 석출되는 은의 양이 상대적으로 많아져, 섬유 표면에 금속피막을 형성시키지 못하고, 석출된 은 입자가 서로 응집되기 때문에

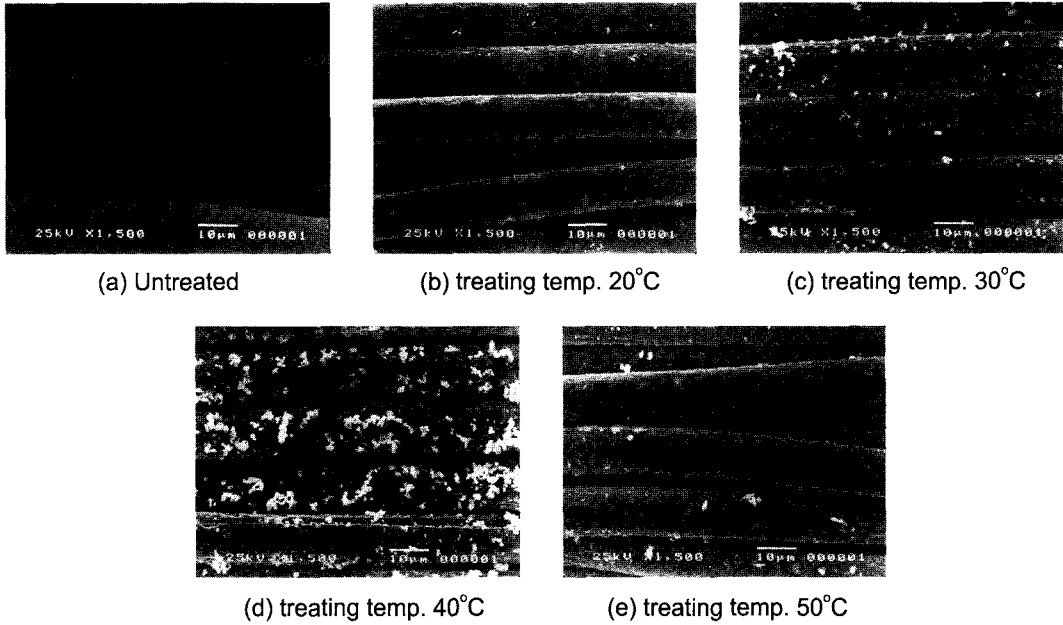


Fig. 3. SEM photographs of electroless Ag plated on polyester fabrics treated at various temperatures(using potassium sodium tartrate as a reducing agent, treating time 30min.)

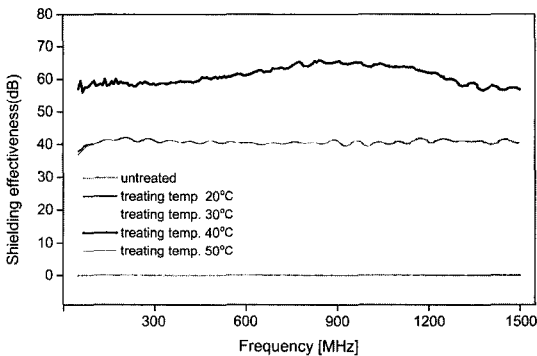


Fig. 4. Effect of treating temperature on the electromagnetic wave shielding effectiveness (using potassium sodium tartrate as a reducing agent, treating time 30min.)

40°C에서 처리한 경우보다 균일한 금속피막층을 얻지 못하는 것으로 생각된다. 또, 처리온도가 30°C 이하일 때는 은의 석출속도가 처리온도 40°C 이상일 때보다 상대적으로 느려, 은 입자가 섬유에 부착되는 시간이 길게 소요되기 때문에 같은 처리 시간으로는 전자파를 차폐하기에 충분한 금속피막을 형성시키지 못하기 때문이라 생각된다.

<Fig. 4>는 처리온도에 따른 전자파 차폐효과를 나

타낸 것으로 처리온도가 20°C와 50°C인 경우는 약 40dB로 비슷한 차폐효과를 나타내었고, 처리온도가 30°C인 경우에는 약 50dB를 나타내었다.

처리온도가 40°C인 경우는 60dB 이상으로 가장 우수한 전자파 차폐효과를 나타내었다. 이는 <Fig. 3>의 SEM을 관찰한 결과와 같은 경향이다.

3) 무전해 은도금시 처리시간에 따른 표면형태 및 전자파 차폐효과

<Fig. 5, 6>은 무전해 은도금시 처리시간에 따른 표면형태 및 전자파 차폐효과를 나타낸 것이다.

<Fig. 5>에 나타난 바와 같이 처리시간이 증가할수록 도금피막은 섬유 표면에 고르고 두껍게 형성되어 30분 처리시 가장 부착이 잘 된 것을 확인할 수 있었다. 그러나 처리시간이 40분인 경우는 섬유 표면에 형성된 도금 피막이 불균일하게 나타났다. 이는 전자파 차폐효과를 나타낸 <Fig. 6>과 같은 경향으로, 처리시간 30분까지는 처리시간이 증가할수록 전자파 차폐효과는 증가하나, 처리시간 40분인 경우는 10분 처리시보다 전자파 차폐효과가 낮게 나타났으며, 처리시간 30분에서 64dB 이상으로 가장 우수한 전자파 차폐효과를 나타내었다.

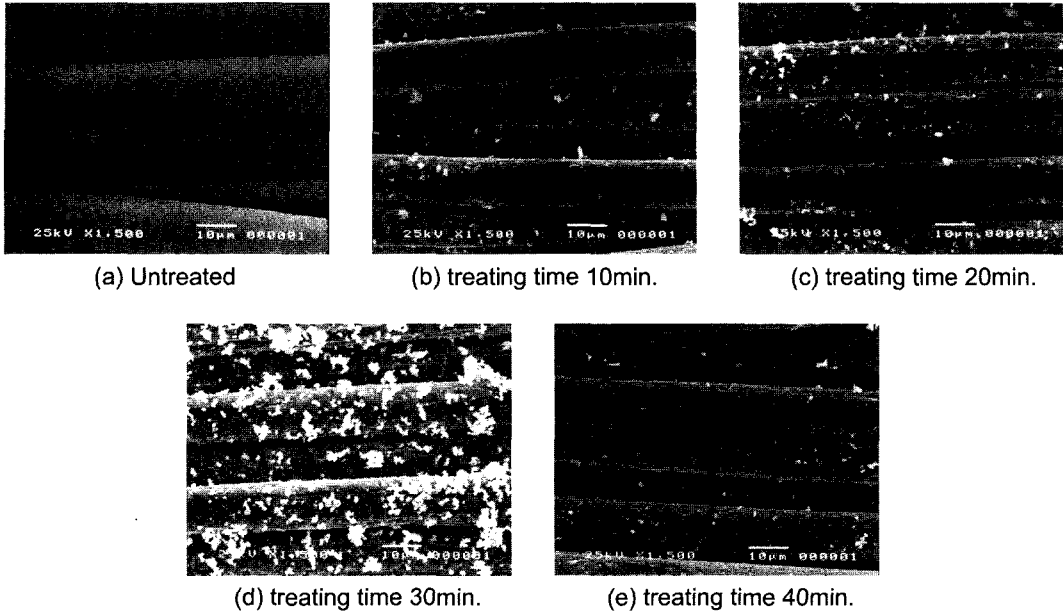


Fig. 5. SEM photographs of electroless Ag plated on polyester fabrics treated at various time(using potassium sodium tartrate as a reducing agent, treating temp. 40°C)

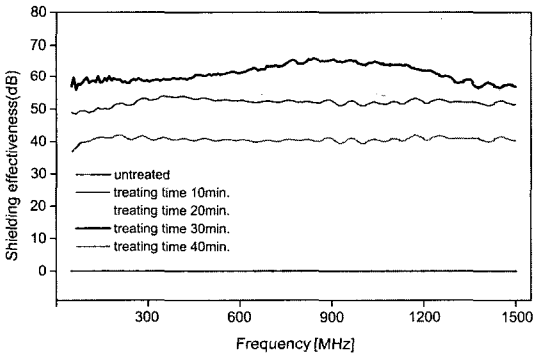


Fig. 6. Effect of treating time on the electromagnetic wave shielding effectiveness(using potassium sodium tartrate as a reducing agent, treating temp. 40°C)

4) 알칼리 처리시 감량률에 따른 표면형태 및 전자파 차폐효과

폴리에스터 섬유의 표면은 매끄러워 금속반응의 촉매를 사용하여도 섬유표면이 대부분 활성화가 되지 않아 도금피막을 형성시키기 어렵다. 따라서 도금 피막과 섬유의 밀착성을 향상시키기 위하여 폴리에스터의 알칼리 처리에 의해 감량률을 0~40%로 변화시켜 이를 촉매화처리 후, 무전해 은도금 처리하였다.

<Fig. 7>은 무전해 은도금시 감량률에 따른 표면형

태를 나타낸 것으로 (a)는 미처리, (b)는 감량률 0% (c) 감량률 10%, (d)는 감량률 20%, (e)는 감량률 30%, (f)는 감량률 40%로 그림(b)-(f)는 모두 촉매화 처리 후, 무전해 은도금 처리한 것이다.

<Fig. 7>의 (b)는 폴리에스터를 촉매화처리만 한 후, 도금처리한 것으로 실과 실사이의 공극에만 도금피막이 부착되었으며, 섬유 표면에는 도금피막이 형성되지 않는 것으로 나타났다. 이는 폴리에스터 섬유표면에 미세한 요철이 없으므로 은 입자가 섬유에 부착할 수 없기 때문이다. (d)는 감량률 20%의 경우로 금속피막이 균일하게 섬유표면에 형성된 것을 확인할 수 있었으며, (c)와 (e), (f)에서 볼 수 있듯이 감량률 10%와 30% 이상에서는 감량률 20%보다 부분적으로 피막의 형성이 매끄럽지 못한 것을 확인할 수 있었다. 이는 금속과의 반응을 개시하기 위해 전처리로 실시한 촉매입자가 섬유표면에 형성된 크레이터에 결합되어 은 입자가 석출되면서 섬유와 결합되는데, 감량률 10%인 경우는 섬유표면에 생성된 크레이터의 크기가 작으며, 감량률 30% 이상인 경우에는 크레이터의 크기가 너무 커서 도금불균일성 및 도금피막의 밀착성에 악영향을 주었기 때문으로 생각된다.

따라서 무전해 도금시 금속과 섬유의 계면밀착성을 높이기 위해서는 섬유표면의 요철 형성이 전자파 차폐

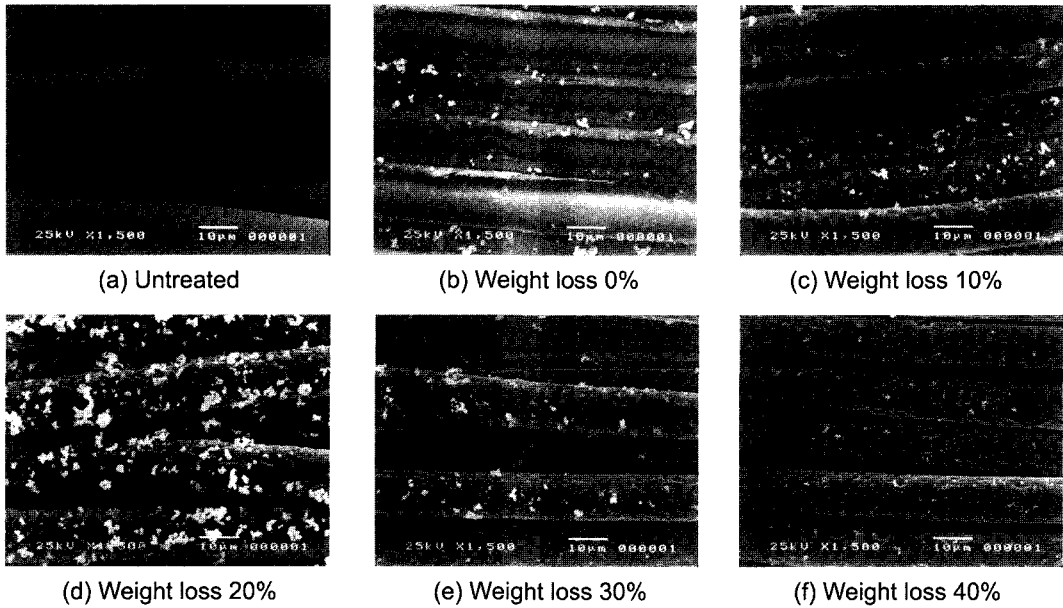


Fig. 7. SEM photographs of electroless Ag plated on polyester fabrics of various weight loss rate(using potassium sodium tartrate as a reducing agent, treating temp. & time 40°C, 30 min.)

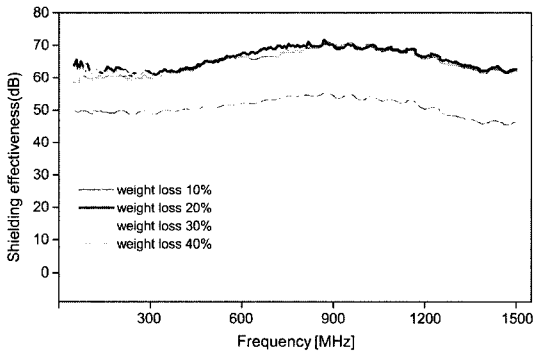


Fig. 8. Effect of polyester fabrics of various weight loss rate on the electromagnetic wave shielding effectiveness(using potassium sodium tartrate as a reducing agent, treating temp. & time 40°C, 30min.)

성능을 부여하는데 중요한 요인임을 확인할 수 있었다. <Fig. 8>은 무전해 은도금시 감량률에 따른 전자파 차폐효과를 측정된 결과로 감량률 20%인 경우, 전자파 차폐효과가 가장 우수한 것으로 나타났다. 이는 <Fig. 7>의 SEM의 결과와 같은 경향이며, 감량률 40%의 경우는 전자파 차폐효과가 저하되는 것으로 나타났는데, 이는 섬유 표면의 지나친 에칭형성으로 무전해 도금시 섬유 표면의 도금피막과의 밀착성이 떨어져 도금피막 형성이 적게 되었기 때문이다.

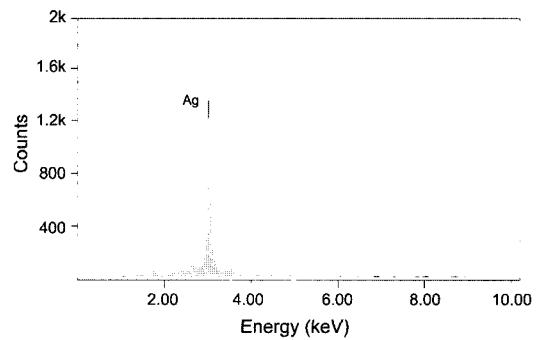


Fig. 9. Detached elements on EPMA graph.

이상의 결과를 토대로 폴리에스터 직물의 무전해 은도금시 적정 조건은 환원제로는 릫셀염을 사용하는 것이 효과가 크며, 처리온도는 40°C, 처리시간은 30분이 바람직하다. 또한 전처리로 알칼리 처리포의 감량률은 20%가 최적이다.

2. 차폐제의 성분

<Fig. 9>는 적정조건으로 제시된 전처리로 감량률 20%인 폴리에스터 직물에 릫셀염을 환원제로 사용하고 40°C에서 30분 동안 처리한 무전해 도금포의 표면에 부착된 물질의 성분을 알아보기 위하여 EPMA로

도금피막을 분석한 결과이다.

<Fig. 9>에 나타난 바와 같이 직물 표면에 은 피막이 형성되어 있음을 확인하였다.

IV. 결 론

전자파 차폐 의류소재 제조를 위하여 폴리에스터 직물에 내산화성이 우수하고 표준전극 준위가 구리, 니켈 등의 금속보다 높아 환원석출하기 쉬운 은을 사용하여 무전해 도금처리를 실시한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

무전해 은도금시 환원제는 루셀염을 사용한 경우, 전자파 차폐성능이 가장 우수하였다.

폴리에스터 직물 표면에 부착된 성분을 EPMA로 분석한 결과, 은으로 나타났다.

무전해 은도금시 처리온도, 처리시간 및 감량률에 따른 전자파 차폐효과는 처리온도 40°C, 처리시간 30분, 감량률 20%에서 전자파 차폐성능이 64dB 이상으로 가장 우수하였다.

참고문헌

- 김기채. (1993). 전자파에 의한 산업기기의 오작동과 인체장애. *대한전기학회지*, 42(2), 5-11.
- 김남일, 장시성. (1996). *무전해도금*. 서울: 도서출판 동화기술.
- 김미선 외. (2001). 전자파 차폐 PET직물/폴리피롤 복합체의 안정성. *한국섬유공학회 추계학술발표회 논문집*, 34(1), 209-212.
- 오경화. (2001). 무전해 동도금 직물의 산화방지코팅에 관한 연구. *한국섬유공학회지*, 38(6), 309-317.
- 장순호 외. (2002). Polypyrrole-Nylon 6 복합 직물의 제조 및 전자파 차폐 특성. *한국섬유공학회지*, 39(2), 217-223.
- 천태일. (1998). 저온 플라즈마 처리에 의한 전자파 차폐성 금속화 합성섬유의 계면 밀착성 개선. *한국염색가공학회지*, 10(2), 8-17.
- 하남규 외. (2001). 전도성 고분자를 이용한 전자파 차폐효과 연구. *전기전자재료학회 논문지*, 14(3), 207-214.
- 한은경, 김은애, 오경화. (1998). 전자파 차단 의류소재 및 방호복 개발(I). *한국섬유공학회지*, 35(8), 515-524.
- Polk, C. & Postow, E. (1987). *Handbook of biological effect of electromagnetic field*. CRC Press.