

## Preparation of conductive EPDM rubber sheets by electroless Ni-plating for electromagnetic interference shielding applications

Byeong Woo Lee<sup>†</sup>, Soo Jin Cho and Jun Seok Yang

*Department of Marine Equipments Engineering, Korea Maritime University, Busan 49112, Korea*

(Received September 4, 2015)

(Revised September 18, 2015)

(Accepted September 25, 2015)

**Abstract** In the study, electroless Ni-plating on flexible ethylene-propylene-diene-monomer (EPDM) rubber sheets for the application of an insert block for shielding electromagnetic interference of multi cable transit (MCT) systems was investigated. Ni crystallinity and adhesion have been found to vary with processing parameters such as pH and temperature of the plating bath. It was shown that Ni-films having the high crystallinity and optimum electric conductivity were obtained on EPDM rubber sheets under pH 7 and 8 at 60~70°C. The conductive Ni-plated EPDM rubber prepared at pH 7 at 70°C showed the enhanced adhesion and electric conductivity, and the high electromagnetic interference shielding effect in the 400 MHz~1 GHz range.

**Key words** Electroless plating, Ni plating, EPDM rubber, MCT, EMI shielding

## 무전해 Ni 도금법을 이용한 전자파 차폐용 도전성 EPDM 고무의 제조

이병우<sup>†</sup>, 조수진, 양준석

한국해양대학교 조선기자재공학과, 부산, 49112

(2015년 9월 4일 접수)

(2015년 9월 18일 심사완료)

(2015년 9월 25일 게재확정)

**요약** 본 연구에서는 전자파 차폐용 MCT(multi cable transit)의 인서트블록에 사용되는 유연성 EPDM(ethylene propylene diene monomer)고무 상에 무전해 도금을 이용하여 니켈도금을 실시하였다. 도금욕의 공정변수 조절 즉 pH 및 온도에 따라 Ni 도금층의 결정성 및 부착력이 결정되었다. pH와 온도를 달리하여 합성한 결과 pH 7 및 8, 60~70°C에서 얻은 도금막들에서 잘 발달된 결정상과 높은 전기 전도도를 가짐을 알 수 있었다. pH 7, 70°C에서 도금 시 가장 높은 부착력 및 전기전도도를 얻을 수 있었으며, 또한 400 MHz~1 GHz 범위에서 우수한 전자파 차단능을 얻을 수 있었다.

### 1. 서론

최근 인체부착형(wearable) 전자정보기기 등 도전성이 부여된 유연성(flexible) 소재를 응용하려는 연구개발이 활발히 진행되고 있다[1]. 이러한 소재들은 반복되는 움직임에 신축성과 유연성을 갖추어야 하며 다양한 형태의 변형에 견딜 수 있는 부착성 등 내구성이 필요하다. 고무 등 플라스틱 소재들은 유연성 및 신축성은 높으나 대부분이 부도체로 그 자체로는 전기전도성을 갖기 힘들어,

주로 유연성 플라스틱 기지 내에 카본나노튜브, 금속(나노)분말 등 전기전도성 분말을 첨가하여 사용된다[2-4]. 그러나 분말들 사이의 높은 접촉저항으로 인해 전기전도도가 현저히 낮아 70 vol% 이상의 도전성 분말을 첨가하여야 충분한 전기전도성을 얻을 수 있어 비용이 많이 드는 단점이 있다.

도전성이 부여된 유연성 소재의 또 다른 중요한 응용 분야로는 전자기와 차폐용 소재로의 응용이다. 특히 최근 전선투과 격벽-시스템(MCT)의 인서트 블록(insert block)용 전자파 차폐체로의 응용이 시도되고 있다[5]. 각종 플랜트에서 사용되는 MCT는 벽과 벽 사이에 설치되어 각종 전선케이블을 고정시키기 위한 장치로 유연성 고무소재로 구성되어 있다. 원자력 발전소와 같이 안전

<sup>†</sup>Corresponding author

Tel: +82-51-410-4356

Fax: +82-51-404-4350

E-mail: bwlee@kmou.ac.kr

성을 최우선으로 하는 플랜트구조물에서는 기본적인 방수, 난연, 방폭 성능 및 전자파 차단능을 갖춘 MCT의 사용이 필수적이다. 특히 전자파 간섭에 의하여 발생하는 원전설비 오작동은 막대한 물적, 인적 피해를 유발하므로 전선격벽장치에 전자파 적합성(electromagnetic compatibility, EMC)을 유지하기 위한 차폐기능이 필수적으로 요구되고 있다.

전기전도성 분말첨가 외에 고무소재의 유연성을 유지하면서 전도성을 동시에 부여할 수 있는 손쉬운 방법이 표면처리에 의한 전도성부여 방식이다. 이러한 표면처리 방법에는 Au, Ag, Pt, Pd 등과 같은 금속을 물리적 박막성장법(physical vapor deposition, PVD)으로 증착시키는 방법이 있다[6-10]. 하지만 PVD법은 증착속도가 느리며, 대형의 진공장비가 필요하고, 대량생산이 어려워 제조비용이 높은 단점이 있다. 또한 이렇게 제작된 전극들은 인장변형 하에서는 금속 층이 유연기질에서 쉽게 박리되어 전기 전도성이 감소되는 문제점이 있다[10]. 이를 개선하기 위해 용액에서 손쉽게 박막 형성이 가능한 무전해 도금법(electroless plating)이 개발되어 널리 사용되고 있다[11-14]. 무전해 도금은 전기를 사용하지 않아 부도체인 플라스틱이나 고무 등에 유용하게 사용될 수 있으며, 박막형성 방법 중 기판의 크기나 모양에 구애 받지 않고, 전자파 차폐 효과가 높은 양면동시도금이 단일공정에서 이루어지며, 경제성이 뛰어나다는 등의 장점이 있다. Cu, Ag, Ni 등의 무전해 도금소재 중 Ni이 비용적인 측면에서 유리하고, 표면 산화가 적기 때문에 코팅용 재료로 널리 사용되고 있다.

따라서 본 연구에서는 내열성 및 화학적 안정성이 좋아 MCT의 인서트 블록에 사용되는 유연성 EPDM(Ethylene propylene diene monomer-terpolymer)고무의 표면에 무전해 도금법을 통해 전도성을 부여하여 실용화 가능한 전자파 차폐용 소재를 제조하는 것을 목표로 하였다. 연질 고무소재들은 외력에 의한 변형이 커 도금층이 쉽게 박리되는 단점을 가지고 있다. 이러한 연질고무에 다양한 무전해 도금 조건을 적용하여 부착력 및 도전성이 우수한 Ni 도금층을 얻고, 이렇게 제조된 전도성 부여된 EPDM고무의 물리적 및 전기적 물성에 대해 연구하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 무전해 Ni 도금

본 연구에 사용한 유연성 고무는 내화성을 부여하기 위해 Al(OH)<sub>3</sub> 및 Mg(OH)<sub>2</sub> 등 세라믹 분말이 첨가된 MCT용 EPDM((주)극동일렉콤)이었고, 가로, 세로 및 두께 100 × 100 × 1 mm인 시트를 사용하였다. 무전해 Ni

도금은 고무표면의 Sn/Pd 활성화 처리와 금속도금 두 과정으로 나누어 처리하였다. 먼저 EPDM 고무의 표면 활성화(sensitizing/activation) 처리를 위해, NaOH 용액(16 g/L)에 70°C, 4시간 동안 담가 세정하였다. 그 후 다시 증류수로 세척을 한 뒤, SnCl<sub>2</sub>(8 g/L)/10 % HCl 수용액에 30분간 담근 후 증류수로 세척 하였다. 이후 PdCl<sub>2</sub>(0.4 g/L)/10 % HCl 수용액에 30분간 담근 후 증류수로 세척하여 활성화 처리를 완료하였다.

다음으로 무전해 도금을 위해, 일반적인 Ni(P)-욕(bath)을 제조하여 사용하였다. Ni 공급원으로 염화니켈(nickel chloride 6-hydrate, NiCl<sub>2</sub> · 6H<sub>2</sub>O) 21 g/L과 환원제로 차아인산나트륨(sodium hypophosphite monohydrate, NaH<sub>2</sub>PO<sub>2</sub> · H<sub>2</sub>O) 25 g/L을 사용하였으며, 착화제(complexing agent)로는 글리신(glycine, H<sub>2</sub>NCH<sub>2</sub>COOH) 7 g/L과 완충제(buffer)로는 염화암모늄(ammonium chloride, NH<sub>4</sub>Cl) 30 g/L을 사용하였다. 여기에 pH 조절제로 0.8 M NaOH를 첨가하여 pH를 5, 6, 7, 8, 9 및 10으로 조절하였으며 반응 중 pH의 추가조절은 수행하지 않았다. 이때 도금욕의 온도를 50°C에서부터 90°C까지 10°C 간격으로 조절하였으며 도금 시간은 10분으로 고정하였다.

### 2.2. 물성분석

도금 조건에 따른 합성 도금막의 결정상은 X-선회절분석기(x-ray diffractometer, XRD, Cu-K $\alpha$ )를 통해 분석하였으며, 도금막의 미세구조는 광학현미경(optical microscope) 및 주사전자현미경(field-emission scanning electron microscope, FE-SEM)을 이용하여 분석하였다. Ni 도금막과 고무표면간의 접착력 측정을 위해 스카치테이프(scotch-tape, 3M-610) peel-off test(ESQ-517-16)를 수행하였다. 테이프를 부착 한 후 체중을 가해 고르게 누른 후 제거 하여 벗겨져 나온 형태를 관찰하였다. 무전해 Ni 도금 조건에 따른 도전성 부여된 유연성 EPDM 고무의 전기적 특성을 알아보기 위해 도금된 시편표면에 4-단자 면저항 측정기(4-point-probe)를 사용하여 면(시트)저항을 측정하였다. 전자파 차폐 특성은 RS103 시스템에서 IEEE 299 규정[15]에 맞추어 500~1000 MHz의 주파수 영역에서 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. pH 및 도금 온도가 Ni 도금에 미치는 영향

무전해 도금시 공정조건 특히 pH 및 온도가 도금 속도, 표면구조 및 부착력 등 도금층의 물리적 특성과 전기전도도 등 전기적 물성에도 큰 영향을 미치게 된다.

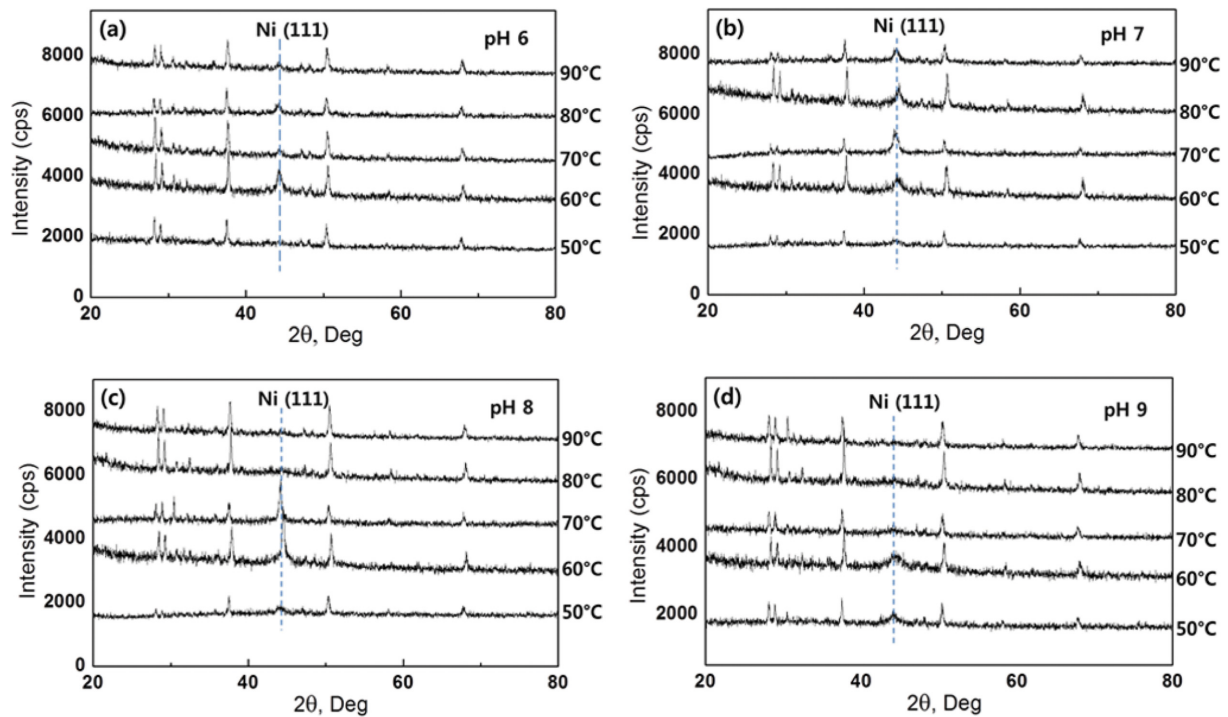


Fig. 1. XRD patterns of Ni-plated EPDM rubbers obtained under various processing pH conditions at temperatures ranging from 50 to 90°C: (a) pH 5, (b) pH 6, (c) pH 7, and (d) pH 8.

Ni 무전해 도금액(bath)의 조성은 비교적 잘 알려져 있으나 도금되는 물질의 종류 및 전처리 조건의 영향을 받아 도금층이 전혀 생기지 않거나 부착력이 낮은 도금층이 형성되기 쉽다. 따라서 적절한 전처리와 도금 공정 조절이 필요하다.

Sn 및 Pd로 표면 활성화 처리된 EPDM고무 표면에 도금조건을 달리하여 Ni 코팅층을 형성시켰으며, Fig. 1에 도금조건 즉 pH 및 온도에 따른 XRD 상합성 결과를 나타내었다.  $2\theta$  43° 부근에서 보이는 Ni(111) peak의 강도로 Ni 결정상의 합성 정도를 비교하였다. Ni(111) 외에 다른 Ni peak들은 관찰되지 않았으며, XRD 결과에서 보이는 다른 peak들은 모두 내화성을 증진시키기 위해 EPDM고무에 첨가된 세라믹 분말들의 peak들이었다. pH가 낮거나 높은 6 및 9에선 60°C를 제외하면 전 온도 영역에서 전반적으로 결정성이 좋지 못했으며(Fig. 1(a) 및 1(d)), pH 7에선 60~90°C에 걸친 도금온도에서 비교적 잘 발달된 Ni의 결정상이 합성되었다(Fig. 1(b)). pH 8에선 60 및 70°C의 좁은 범위를 제외한 온도에선 결정성 높은 도금층을 얻기 힘들었다(Fig. 1(c)). 또한 도금온도가 70°C로 동일할 경우엔 pH 7과 8에서 도금을 수행할 경우 가장 결정성이 우수한 Ni 막이 합성되었다(Fig. 2).

Ni 무전해 도금의 경우 90°C 이상에서는 도금액의 불안정성이 높아지며, 60°C 이하에서는 전체 고무면에 균일한 도금층 형성이 이루어지지 않았다. XRD 분석을

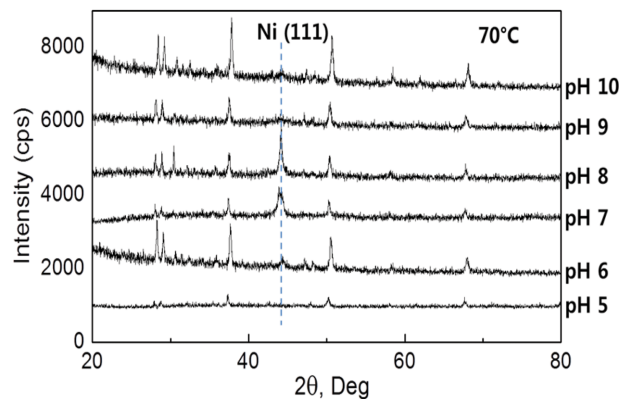


Fig. 2. XRD patterns of Ni-plated EPDM rubbers prepared under different pH conditions at 70°C.

통한 도전성 금속의 결정성(crystallinity) 관점에서 볼 경우 pH 7에서는 60~80°C, pH 8에선 60~70°C 사이가 가장 우수한 도금층을 얻을 수 있는 합성조건으로 여겨진다.

Fig. 3에 각각 pH 7, 여러 도금온도(60, 70, 80, 90°C) 조건 하에서 얻은 도금 층의 표면을 광학현미경으로 관찰한 표면구조를 나타내었다. 유연성 기관 위에 성막되었지만 균열(crack)들이 보이지 않고 박리의 흔적도 없이 비교적 도금막을 잘 유지하고 있었다. 70°C에서 얻은 박막의 경우에 비해 60, 80, 90°C에서 얻은 도금의 경우 pits/pinholes들이 더 많이 보이고 있다. 이러한 박막들에

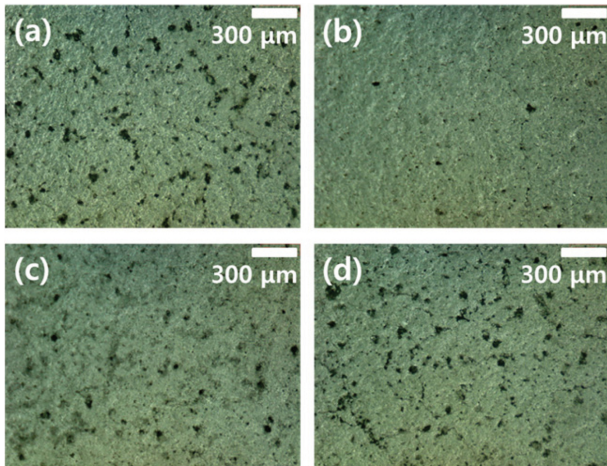


Fig. 3. Optical microscope surface morphologies of Ni-plated EPDM rubbers prepared at different processing temperatures under pH 7: (a) 60°C, (b) 70°C, (c) 80°C, and (d) 90°C.

대해 보다 고 배율에서 관찰한 SEM 표면구조를 Fig. 4에 나타내었다. 중간 온도인 70 및 80°C 합성 조건에서는 핵생성 및 성장의 균형이 맞아 비교적 균질한 미세구조를 보이고 있으나(Fig. 4(b) 및 4(c)) 온도가 낮거나 높은 60 및 90°C 조건에서 얻은 도금층에서는 저온에서의 높은 핵생성 속도, 고온에서의 높은 결정성장 속도 같은 상대적인 핵형성 및 성장의 균형이 맞지 않아 불균일한 미세구조(Fig. 4(a) 및 4(d))를 보이는 것으로 여겨진다.

도금층에 대한 부착력 측정은 indentation, scratch, peel-off, pull-off 등 여러 가지 방법들이 제안되고 있으나 유연성이 높은 고무에는 모두 적용하기 어려웠다. 따라서 가장 손쉽게 측정할 수 있는 스카치테이프(scotch-tape) peel-off test(ESQ-517-16)를 수행하였다. Fig. 5는 스카치테이프 사용한 부착력 테스트 결과를 보여주고 있

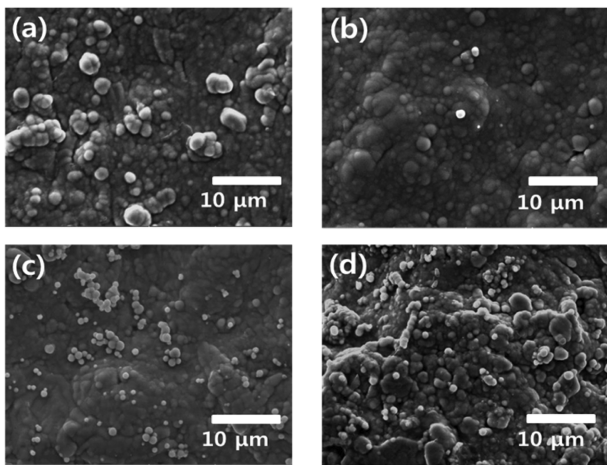


Fig. 4. SEM surface morphologies of Ni-plated EPDM rubbers prepared at different processing temperatures under pH 7: (a) 60°C, (b) 70°C, (c) 80°C, and (d) 90°C.

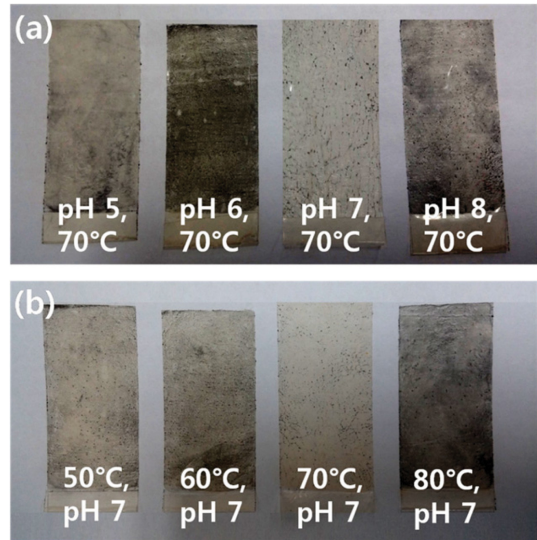


Fig. 5. Scotch-tape peeling test results from Ni plated EPDM rubbers prepared at different preparation conditions: (a) different pH values at same reaction temperature of 70°C and (b) different temperatures under same pH of 7.

다. 온도가 70°C로 동일할 경우엔 pH 5, 6 및 8의 경우보다 pH 7에서 도금을 수행할 경우 가장 우수한 접착력을 가짐을 알 수 있었으며(Fig. 5(a)), pH가 7로 동일할 경우엔 70°C에서 가장 우수한 접착력을 보임을 알 수 있었다(Fig. 5(b)).

3.2. 전기전도도 및 전자과 차폐율

EPDM 고무 표면에 형성된 무전해 Ni 도금층의 전기 전도도를 알아보기 위해 4-point-probe 측정기를 사용하여 면(sheet)저항( $\Omega/\text{sq}$ )을 측정하였으며, 그 결과를 Table 1에 나타내었다. pH 5의 낮은 pH에서 얻은 도금막의 경우 저항이 너무 높아 측정이 불가능 하였으며 pH가 비교적 높거나 낮은 pH 10 및 6에서 얻은 도금막들도 비교적 높은 면저항 값을 보여 전기전도도가 좋지 않았다. 반면에 pH 7, 8, 9에서 얻은 박막들의 경우 넓은 온

Table 1 Sheet resistance values of Ni-plated EPDM rubbers prepared at various processing temperatures under different pH conditions

pH	Sheet resistance, $\Omega/\text{sq}$				
	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
5	×	×	×	×	×
6	250.3	263	210.3	<b>25.6</b>	85.5
7	9.1	5.1	<b>1.3</b>	3.5	45
8	15.1	2.8	<b>2.3</b>	21.1	70.4
9	5.9	5.4	<b>3.1</b>	16.4	52
10	×	102	<b>9</b>	180	×

**Bold numbers:** The lowest resistance values of the selected pH.

도범위에 걸쳐 낮은 저항 값들을 보였으며, 70°C에서 얻은 박막들이 가장 낮은 저항 값을 나타내고 있다. 전자현미경으로 확인한 pH 7, 8, 9에서 얻은 박막들의 두께가 대부분 1.5  $\mu\text{m}$  정도였고 따라서 체적저항으로 환산할 경우  $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$  대의 낮은 저항 값 즉 높은 전기전도도를 가짐을 확인할 수 있었다. pH 7, 70°C에서 가장 낮은 면저항 즉 가장 높은 전기전도도를 얻을 수 있었으며, 이는 이 조건에서 얻은 Ni 도금막의 균질한 미세구조, 우수한 결정성 및 부착력의 영향으로 보인다.

전자파 차폐는 외부의 전자기파를 살내나 시스템내로 투과되지 않도록 차폐 재료에 의해 그 파를 흡수 혹은 반사시키는 것을 말하는데 물체에 입사된 전자기파를 얼마나 많이 감소시키는 것인가로 정의된다. 차폐면에 수직으로 입사하는 입사전압  $E_1$ 에 대하여 재료를 통과해 수신되는 전압을  $E_2$ 라 하면 dB로 측정되는 재료의 shielding effectiveness(SE)는 다음 식(1)과 같다.

$$SE_{\text{dB}} = 20\log(E_1/E_2) \quad (1)$$

금속 등 도전성 소재는 전자파를 흡수, 반사시키는 반면, 플라스틱 등 부도체들은 전자파를 통과시킨다. 금속 부품의 경우 틈새나 구멍이 없으면 100 dB에 가까운 완벽한 차폐 효과를 얻을 수 있다. 부도체 고무소재의 경우 전자파 차폐능이 전혀 없기 때문에 도전성을 부여하여 전자파를 차단시켜야 한다. Ni-도금된 도전성 고무를 사용하여 전자파 차폐용 MCT에 적용하는 단면모식도를 Fig. 6에 나타내었다. MCT의 인서트블록 중심에 수직으로 도전성 고무가 위치하고 케이블의 도전성 shield를 노출시켜 이 부분에 면 접촉시켜 완전히 감싸 사용하게

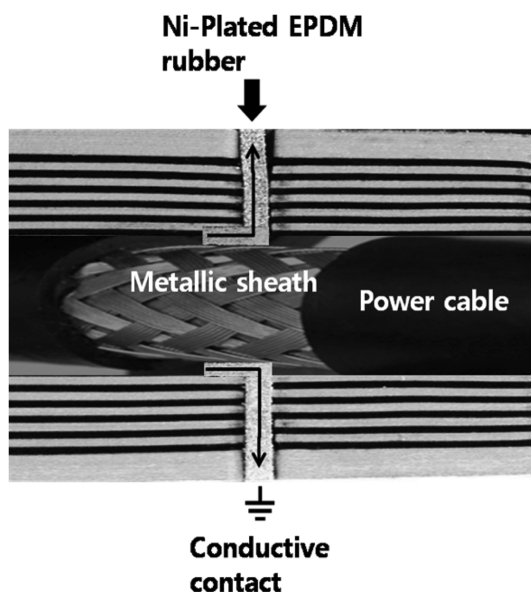


Fig. 6. A cross-sectional view of the insert block of a MCT system showing the conductive contact.

Table 2

The comparison of electromagnetic interference shield effectiveness (dB) values between two different MCT systems adopting the Ni-plated EPDM rubber sheet prepared at 70°C under pH 7 and a commercial conductive rubber sheet

Test samples	Frequency (MHz)	S.E. (Shield Effectiveness, dB)	
		Vertical	Horizontal
Commercial (metal powder filled) sheet (Ag/Cu powders -70 vol%)	400	82.26	75.27
	600	82.34	65.78
	800	52.48	48.22
	1000	58.43	56.06
Ni-plated EPDM sheet (prepared at pH 7, 70°C)	400	88.12	76.43
	600	81.58	66.65
	800	59.48	46.01
	1000	65.30	66.58

된다. 이러한 도전성 고무를 사용함으로써 MCT의 방수, 방화, 방폭 성능에 영향을 주지 않고 케이블을 단단히 고정시킬 수 있게 된다. 최종적으로 인서트블록 내·외부를 얇은 Al 금속막으로 연결하여 접지시킴으로써 MCT 블록 전체에 전자파 차폐성을 부여하게 된다.

본 연구를 통해 가장 우수한 부착력과 전기전도성을 가지는 pH 7, 70°C에서 얻은 Ni-도금된 도전성 EPDM고무를 MCT에 적용하여 400, 600, 800 MHz 및 1000 MHz (1 GHz)에서 측정된 전자파 차폐능을 Table 2에 나타내었다. 이때 기존 상용 Cu 분말에 Ag가 입혀진, Ag/Cu 분말첨가-복합 도전성 시트를 사용한 경우와 전자파 차폐물성을 비교하였다. 기존 상용 도전성 금속 분말을 이용한 시트와 비교할 때 경제성이 우수한 무전해 도금 도전성 고무를 사용한 경우, 대부분의 주파수에서 대등하거나 우수한 전자파 차단능을 얻을 수 있었다. 두 경우 모두에서 주파수 증가에 따라 전반적으로 차단능이 감소하는 일반적인 경향을 보이나 1 GHz보다 800 MHz에서 가장 낮은 값을 보인다. 이는 물성을 측정된 MCT tray 내부 구조에 따른 특성으로 여겨진다. 이때 가장 낮은 차폐율을 가지는 800 MHz에서도 Ni-도금된 도전성 EPDM 고무에서 59.48 dB(vertical), 46.01 dB(horizontal)에 이르는 높은 차폐율을 기록하였다. 따라서 무전해 도금된 고무의 경우 도전성 금속 분말 첨가된 시트를 대신하여 전자파차폐용 MCT의 인서트블록에 상용화 적용도 가능하다고 여겨진다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 부도체 EPDM 고무 표면에 Ni 무전해 도금을 실시하였고, 유연성 및 도전성을 갖춘 시편을 제작 할 수 있었다. 고무소재는 유연성이 높아 부착력이

우수한 도금층을 얻기 힘들으나 본 연구에서 사용된 도금 조건 하에서 EPDM 고무에 비교적 우수한 부착력을 가지는 도금층을 얻을 수 있었다. 도금 전 고무 표면에 Sn/Pd 전처리를 수행하였고 Ni 도금액의 pH 및 온도를 변수로 하여 무전해 도금을 수행하였다. pH와 온도를 달리하여 합성 한 결과 pH 7 및 8, 60~70°C에서 얻은 도금막들에서 비교적 잘 발달된 결정상과 높은 고무소지와 결합력 및 높은 전기 전도도를 가짐을 알 수 있었다. 가장 높은 전기전도도 및 부착력을 보인 무전해 도금조건(pH 7, 70°C)에서 도전성이 부여된 EPDM 고무를 MCT 시스템에 적용하여 전자파 차폐능을 측정 한 결과 기존 상용 도전성 금속 분말을 이용한 전자파 차폐체와 비교할 때 대부분의 주파수에서 대등하거나 우수한 전자파 차폐능을 얻을 수 있었다.

## References

- [ 1 ] M. Stoppa and A. Chiolerio, "Wearable electronics and smart textiles: a critical review", *Sensors* 14 (2014) 11957.
- [ 2 ] N.C. Das, D. Khastgir, T.K. Chaki and A. Chakraborty, "Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon black and carbon fibre filled EVA and NR based composites", *Composites* 31A (2000) 1069.
- [ 3 ] K. Sasikumar, G. Suresh, K.A. Thomas, R. John, V. Natarajan, T. Mukundav and R.M.R. Vishnubhatla, "Magnetoactive elastomeric composites: cure, tensile, electrical and magnetic properties", *Bull. Mater. Sci.* 29 (2006) 637.
- [ 4 ] S.J Lee, D.Y. Lee, M.H. Lee and B.Y. Kim, "Tailored biomimetic actuators made with multiwalled carbon nanotube loaded ionomeric nanocomposites", *J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol.* 15 (2005) 108.
- [ 5 ] Technical report, Roxtec multi-cable transit devices: applications and design practices, Roxtec, Sweden (2014).
- [ 6 ] D.Y.W. Yu and F. Spaepen, "The yield strength of thin copper films on Kapton", *J. Appl. Phys.* 95 (2004) 2991.
- [ 7 ] S. Rosset, M. Niklaus, P. Dubois and H.R. Shea, "Metal ion implantation for the fabrication of stretchable electrodes on elastomers", *Adv. Funct. Mater.* 19 (2009) 470.
- [ 8 ] S. Griehl, T. Muller and R. Winkler, "Thick metallization-layers on polymers through vacuum-technology", *J. Surf. Coat. Technol.* 169 (2003) 24.
- [ 9 ] K. De Bruyn, M. van Stappen, H. De Deurwaerder, L. Rouxhet and J.P. Celis, "Study of pretreatment methods for vacuum metallization of plastics", *Surf. Coat. Technol.* 163 (2003) 710.
- [ 10 ] S.P. Lacour, J. Jones, S. Wagner T. Li and Z. Suo, "Stretchable interconnects for elastic electronic surfaces", *Proc. IEEE* 93 (2005) 1459.
- [ 11 ] M.C. Zhang, E.T. Kang, K.G. Neoh and K.L. Tan, "Electroless plating of copper and nickel on surface modified poly (tetrafluoroethylene) films", *J. Electrochem. Soc.* 148 (2001) 71.
- [ 12 ] D. Li, K. Goodwin and C.L. Yang, "Electroless copper deposition on aluminum-seeded ABS plastics", *J. Mater. Sci.* 43 (2008) 7121.
- [ 13 ] P. Dechaisit and W. Trakarnpruk, "Ni electroless plating of ABS polymer by palladium and tin-free process", *J. Met. Mater. Miner.* 21 (2011) 19.
- [ 14 ] B.W. Lee and J.H. Lee, "Preparation of conductive silicone rubber sheets by electroless nickel plating", *J. Kor. Inst. Surf. Eng.* 47 (2014) 269.
- [ 15 ] IEEE Std. 299, IEEE standard method for measuring the effectiveness of electromagnetic shielding enclosure (1997).