

## 전기 절연용 EPDM Compounds

김진국<sup>†</sup> · 김인환 · 황성혁  
경상대학교 고분자공학과, 항공기부품 기술연구소  
(1999년 10월 29일 접수)

## EPDM Compounds for Electric Insulator

Jin K. Kim, In H. Kim, S. H. Hwang

Dept. of Polymer Sci. & Eng., Gyeongsang National University,

Research Center for Aircraft Parts Technology, Chinju, Gyeongnam 660-701, Korea

(Received October 29, 1999)

요약: 비세라믹 복합절연소재는 기계적 물성, 환경문제, 대량생산과 용이한 설계등의 우수한 특성으로 인해 전력산업분야에서 관심의 대상이 되어왔다. 또한 세라믹 절연체에 비하여 가볍고, 더욱 강인한 물성을 가진다는 장점이 있다. 본 연구에서는 뛰어난 전기 절연 특성과 우수한 내열, 내산화, 내오존성과 내후성을 가진 ethylene propylene diene monomer(EPDM)를 절연소재로 사용하였다. 특히, EPDM은 다른 고무 복합체에 비해 우수한 소수성을 가지기 때문에 장기간 사용이 가능하다는 점에서 본 연구에서는 EPDM 복합체의 유변학적 물성, 전기적물성, 그리고 접촉각의 측정을 통한 소수성 및 회복력에 관한 연구를 하였다. 또한 SEM을 사용하여 표면 형태학적 연구를 수행하였다.

**ABSTRACT** : Non-ceramic composite insulator has been interested in the power industry because of its good characteristics in mechanical properties, mass product and design availability. Also it is lighter, and less unexplosive, compared to a ceramic insulator. Especially, EPDM rubber composite insulator can be used for long-term in contaminated environments because of its hydrophobicity. This paper showed the rheological properties, the electrical properties, and contact angles to check the hydrophobicity and the recoverability of the EPDM compounds. Also, we investigated surface morphology of the compound by SEM.

*Keywords* : non-ceramic composite insulator, hydrophobicity, contact angle, surface morphology.

### I. 서 론

발전소에서 생산된 전력을 수송하기 위해서는 철탑이나 장주를 이용한 가공선로를 통하게 된다. 현재 국내에서는 송전급 전압으로 154,

345, 765 kV를 공급하고 있으며 배전급 전압으로는 22.9 kV를 표준으로 사용하고 있다. 가공선로를 통하여 전력 수송을 하는 경우 전선과 지지물 사이의 절연이 필수적이며 이때 사용하는 기자재를 애자라 한다.

이와 같은 송, 배전급의 애자재료로는 전통

<sup>†</sup>대표저자(e-mail : rubber@nongae.gsnu.ac.kr)

적으로 내후성, 내열성 등의 특성이 우수한 세라믹 재료를 사용해 왔다. 그러나 세라믹 애자의 경우 밀도가 높기 때문에 중량이 높아 취급이나 설치의 어려움이 생기며 운반 경비가 많이 들어가게 된다. 또한 옥외용 절연 재료의 경우 충격에 의한 작은 흠집이나 scratch가 내부 섬광을 일으키게 하는 insulator내의 구멍을 유발시키게 되어 절연 재료로서의 성질을 저하시키게 되며 세라믹 재료의 물리적 특성으로 취성이 있어 충격강도가 낮다. 그리고 제조 공정에서 품질제어가 쉽지 않아 다양한 형상의 제조가 어려운 단점이 있다.

이에 반해 고분자재료의 경우 밀도가 낮아 제품의 중량을 감소시킬 수 있어서 취급이나 설치가 용이하고 운반경비도 적게 든다. 또한 고분자재료의 충격강도가 세라믹재료에 비해 강하며 낮은 표면에너지의 특성으로 젖음(wetting)에 대하여 저항성을 가지고 있으며 발수성이 있다. 발수성을 가지는 물질의 표면에서 물은 방울을 형성하므로 물방울 내의 전도성 오염물은 불연속적이 된다. 이러한 조건은 낮은 누설 전류의 흐름과 건조대(dry band)형성을 유도하게 된다. 고분자재료의 소수성으로 인하여 물은 표면을 따라 수막을 형성하기보다는 방울을 형성하며 세라믹과 비교하여 일부 고분자 재료는 열화된 상태에서도 훨씬 우수한 섬락 저항성을 보인다.<sup>1</sup>

또한 고분자 재료는 비교적 공정들이 간단하기 때문에 품질제어가 매우 쉽다. 이러한 이유로 최근 고분자 물질들은 비세라믹 전기애자에서 매력적인 재료로 관심을 받아왔다. 그러나 고분자 재료는 세라믹재료보다 쉽게 열화될 수 있으며 사용중의 복합적인 스트레스(stress)에 의해 변형이 나타나게 된다. 그러므로 본 실험의 중요한 목표는 각종 첨가제나 조성의 적절한 배합으로 복합적 응력이나 열악한 환경에서 전기적 성질이 우수한 고기능성 고분자 절연체를 연구 개발하는 데에 있다.<sup>2-3</sup>

우수한 전기적 성질과 넓은 온도 범위에서의 유연성, 수분 및 기후에 대한 높은 저항성 때문에 전기 절연 분야에서 다양하게 사용되고 있는 에틸렌-프로필렌 디엔 모노머(EPDM)<sup>4</sup>를 주원료로 본 실험에서 사용하였다. 그리고 각종 첨가제 사용과 조성을 다양하게 함으로써 고전압의 전선에서 발생할 수 있는 열에서의 환경에서도 우수한 기계적 성질을 가지게 하였으며 실리콘 오일의 첨가로 절연체가 작은 표면에너지를 가지게 하여 전기 절연 능력을 향상시켰다.

## II. 실험

### 2.1 실험재료

실험재료는 EPDM이며 조제로서 파라핀 오일과 실리콘 오일을 비교 실험하였다. 실리콘 오일은 EPDM과는 용해도 계수의 차이가 많이 나서 상용성이 파라핀 오일에 비해 많이 떨어지기는 하지만 요구되는 물성, 즉 전기절연성과 발수성이 우수하기 때문에 실리콘 오일을 선택하였는데 이는 실리콘 고무에 비해 분자량이 적어 EPDM 내부에 침투가 용이하기 때문이다. Table 1에 EPDM과 실리콘 오일, 파라핀 오일의 용해도 인자를 나타내었다.

두 가지 종류(파라핀 오일, 실리콘 오일)의 오일을 사용하여 시편 3종을 제조하였으며 Table 2에 배합 조성표를 나타내었다. 본 실험에서는 2종류의 실리콘 오일(다우코닝(社)의 LI grade, 동양실리콘(주)의 DI grade)을 사용하였다.

Table 1. Solubility Parameters of Materials

종 류	EPDM	Paraffin oil	Silicone oil
Solubility parameter ( $\delta$ , (cal · cm <sup>-3</sup> ) <sup>1/2</sup> )	7.9	7.5	5.4

Table 2. Formulation (phr)

	Sample A	Sample B	Sample C
EPDM(ENB type)	100	100	100
Additives	6	6	6
Peroxide	4	4	4
Filler	10	10	10
Flame retardant	90	90	90
Plasticizer	3	3	3
Paraffin oil	7	-	-
Silicone oil	LI	7	-
	DI	-	7
Total	220	220	220

## 2.2 시편제조

절연물질은 불순물의 영향을 많이 받기 때문에 배합공정에 주의를 기울여야 한다. 배합은 4" open roll에서 이루어졌는데 온도는 60℃로 초기에 주어졌고 roll speed는 56 rpm으로 맞추어 작업을 진행하였다. 배합순서는 EPDM을 먼저 투입하여 약 5분간 소련과정을 거친 다음 충전제와 오일을 투입하였다. 배합시의 roll 온도는 약 80℃ 이었다. 시편제조는 100 ton 프레스(press)에서 135 kgf/cm<sup>2</sup>의 clamping force로 약 9분동안 가류하였다.

## 2.3 시험방법

기본적인 물성의 측정에는 만능 인장 시험기(Instron, Series IX Automated Materials Testing System)를 사용하여 네 번의 시험을 하여 평균값을 내었다. 그리고 경화특성의 측정에는 고무레오메타 Rheometer(명지산업, R-100)를 사용하였고, 절연저항을은 Hewlett Packard(4339A) 기기를 사용하여 측정하였다.

물을 이용한 접촉각은 접촉각 측정기(Matec사)를 이용하였으며, 코로나 방전의 영향을 보기 위하여 코로나 방전으로 시편의 표면을 노화시킨 다음 표면의 접촉각을 시간에 따라 24시간 동안 측정하였다. 주사전자현미경(JEOL사)을 이용하여 10일 단위로 120일 동안 각 시편의 사진을 찍어 migration 상태를 측정하였다.

## III. 결과 및 고찰

먼저 가류속도를 알아보기 위해 고무 레오메타를 이용하여 170℃에서 10분간 측정한 결과를 Fig. 1에 나타내었다.

Fig. 1에서 나타난바와 같이  $t_{55}$ 까지는 3개 sample이 같은 속도로 유변학적 거동을 하지만 이후에서는 차이가 나타나기 시작한다. 같은 시간을 놓고 비교해보면 파라핀 오일을 첨가한 컴파운드(sample A)의 torque가 많이 걸리는 것으로 보아 sample A의 가류정도가 높으나  $t_{50}$ 과  $t_{90}$ 을 보면 시간이 실리콘 오일을 첨가한 컴파운드(sample B, C)가 거의 같은 값을 가지고 sample A보다 긴것을 알 수 있었다. 이는 파라핀 오일을 첨가한 컴파운드보다 실리콘 오일을 첨가한 컴파운드가 가류속도가 빠르다는 것을 나타낸다.

Fig. 2에서는 각 sample에 대한 노화전 물성과 70℃에서 70hrs동안 노화시킨 후 물성을 나타내었다. 파라핀 오일을 첨가한 컴파운드(sample A)가 실리콘 오일을 첨가한 컴파운드(sample B, C)보다 높은 파단신율과 인장강도를 나타내었다. 이것은 시편 내부에서의 상용성에 따른 것으로 파라핀 오일이 실리콘 오일보다 가소제 역할을 충실히 해서 분자의 사슬 자체를 유연하게 만드는 결과로서 나타나는 거동으로 설명된다. 이 사실을 뒷받침하는 것이

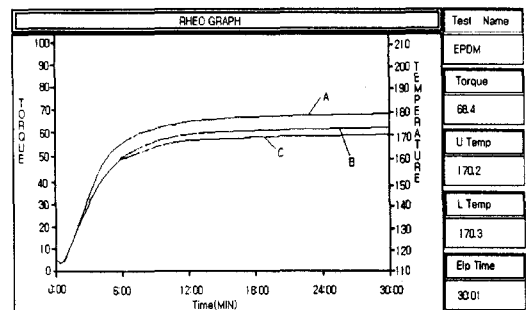


Fig. 1. Cure rheographs of samples.

(A) : Sample A, (B) : Sample B, (C) : Sample C

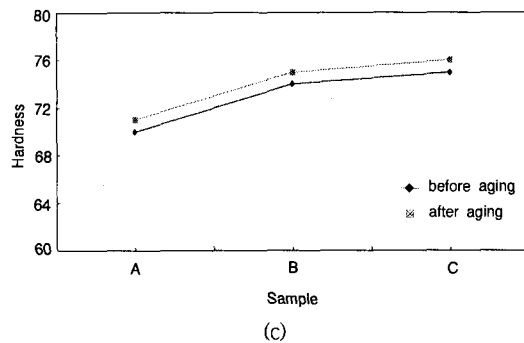
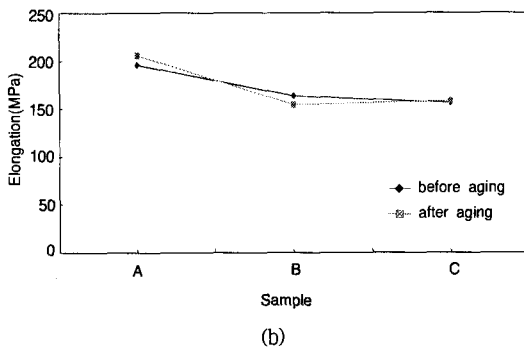
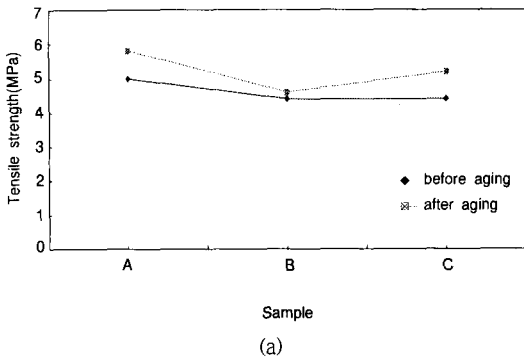


Fig. 2. Mechanical properties of samples before and after aging.

Table 1의 용해도 계수 값이 EPDM과 파라핀 오일이 유사하게 나타난 것이다. 노화 후와 노화전의 물성값을 비교했을 때 노화 후의 물성이 노화에 의하여 영향을 많이 받지 않았는데, 이것은 퍼옥사이드 가교의 영향으로써 내열노화성이 우수해졌기 때문이라고 할 수 있다.

Table 3에는 저항기기를 이용하여 절연 저항

율을 측정된 값을 정리하였다. 도체일 경우에는 절연 저항율의 값이 10보다 작은값을 나타내고, 반도체일 경우는  $10^3 \sim 10^5$  정도의 값을 나타낸다. 절연물로서 우수한 성능을 나타내려면  $10^{12}$  이상의 값을 나타내어야 하는데 Table 3에 나타난 체적저항과 표면저항의 값이 시편 A, B, C 모두에서  $10^{12}$  이상의 값을 가지므로 우수한 절연재료라고 할 수 있다.

Table 4에는 표면을 코로나 방전을 시키기 이전의 시편에 대한 접촉각을 측정된 결과를 나타내었다.

코로나 방전후 각 시편의 시간에 따른 대한 접촉각을 측정된 결과는 Fig. 3에 나타내었다.

접촉각측정으로 발수성 회복 특성을 분석할 수 있는데 본 연구에 사용된 EPDM 컴파운드는 발수성 회복 특성이 뛰어난을 알 수 있었고,

Table 3. Insulation Resistivity of Samples

	체적 저항율	표면 저항율
Sample A	7.67E13	6.66E12
Sample B	7.20E13	1.30E13
Sample C	7.76E13	3.48E12

Table 4. Contact Angle of Samples

	Sample A	Sample B	Sample C
건전시편	109.2	108.2	109.2

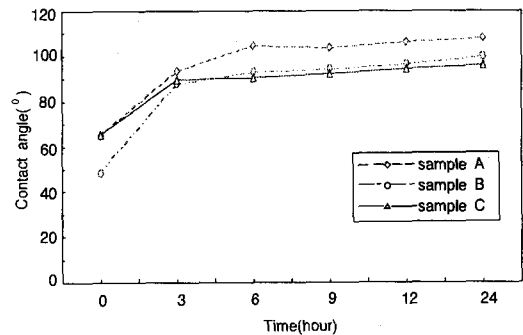


Fig. 3. Change in contact angles with time.

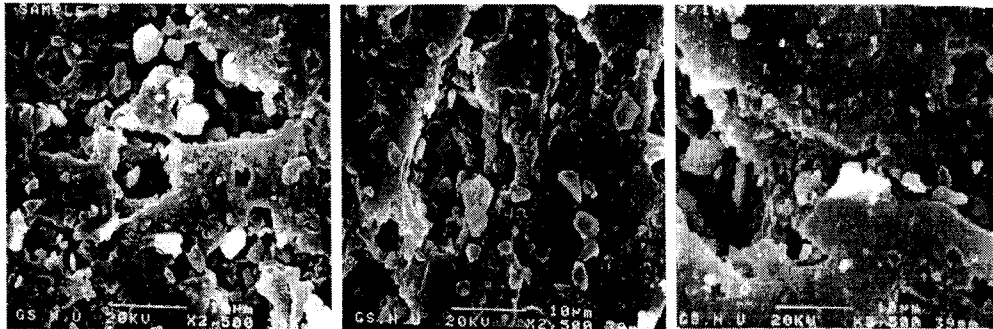
파라핀 오일을 첨가한 컴파운드가 실리콘 오일을 첨가한 컴파운드 보다 더욱 좋은 발수성 회복 특성을 지니고 있었다. 이는 파라핀 오일과 EPDM과의 상용성이 좋아 migration이 용이함에 기인한 것으로 판단된다.

접촉각의 시간에 따른 변화는 첨가된 오일이

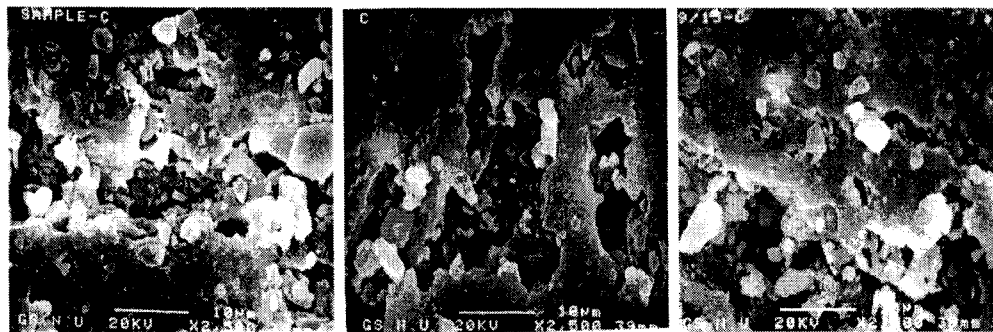
표면으로 migration되어 발수성이 회복된다고 할 수 있다. 초기 값이 낮은 것은 표면이 노화된 후 오일이 migration되지 않은 상태이기 때문이고, 시간이 지남에 따라 값이 커지는 것은 migration이 진행되고 있음을 의미하는 것이고 24시간이 지난 후에는 코로나 처리 이전 (건전



(Sample A)



(Sample B)



(a)

(b)

(c)

(Sample C)

Fig. 4. SEM micrographs of EPDM compounds:(a) 1 day later, (b) 10 days later, (c) 120 days later.

시편)의 값과 거의 유사한 값을 가질 정도로 오일이 표면으로 migration 되었음을 의미한다. 옥외용으로서의 응용에는 오랫동안 사용할 수 있어야 하기 때문에 발수성 회복시간 이외의 시간의 지속성도 굉장히 중요한 요소이다. 그렇기 때문에 빠른 접촉각의 회복이 꼭 좋다고는 할 수 없다.

Fig. 4는 각 sample에 대한 SEM 사진을 나타내었다. 무기 충전제들의 컴파운드속에서의 상태를 보기 위함인데 컴파운드 속의 flame retardant와 충전제인 실리카의 상태가 하루 경과 시에는 뚜렷하게 나타났으나 120일 경과 후는 충전제들의 모습이 희미하게 분산되어 있는 모습을 보다 시간이 지남에 따라 오일이 표면으로 migration 되었기 때문이라 사료된다. 특히 파라핀 오일을 첨가한 컴파운드의 migration 상태가 가장 심하여 접촉각 회복시간이 빠른 것으로 Fig. 3의 결과와 일치함을 나타내었다.

#### IV. 결 론

절연물로서의 응용여부는 재료 자체의 절연성과 표면의 수분에 대한 발수성이 가장 중요하다. EPDM과의 상용성이 없음에도 불구하고 실리콘 오일을 사용하여 실험해본 결과 가교속도가 빠르고 물리적 성질도 우수함을 알 수 있었다.

파라핀 오일을 첨가한 EPDM 컴파운드의 접촉각 회복이 실리콘 오일을 첨가한 컴파운드보다 빠르게 일어남을 볼 수 있었는데 이는 파라핀 오일의 EPDM 분자내에서 사슬 이동성이 크고, 용해도 계수가 유사함으로 인해 이동이 용이하기 때문이다.

옥외절연물로서 EPDM의 응용은 기존의 세라믹 및 가격이 비싼 실리콘 고무의 대체용으로 적용시키기 위함이다. 저분자의 실리콘 오일을 EPDM과 섞어서 과산화물 가교를 하여 여러 가지 실험을 해본 결과 첫째, 내열노화성이 우수

함을 볼 수 있는데 이는 고압의 전류가 흐르는 곳이나 열이 발생될 수 있는 곳에서 사용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 둘째, 표면저항과 체적저항이 모두 우수하게 나타났는데 이는 고압의 전류가 흐르는 곳에 사용 가능한 재료라고 판단되었다. 마지막으로 시간경과에 따라 접촉각이 회복되었는데 이는 발수성을 높여 절연물 표면에서 유체에 의해 생길 수 있는 전력누수 현상을 방지할 수 있다는 장점이 있다.

절연체의 기본 물성인 비중, 경도와 인장강도 등을 측정비교 하였으며 절연체 표면의 접촉각을 측정하여 전기 절연성, 절연체 표면의 코로나 방전에 의한 표면 노화 후 실리콘 오일의 migration의 속도를 측정하여 절연체로서의 지속성을 시험하였다.

시험결과 노화전이나 노화후의 기계적 특성인 비중, 경도, 인장강도, 파단신율의 수치 변화는 거의 없었으며 절연체의 표면저항이나 체적저항은 고압전선의 전기애자로 사용해도 될 정도로 우수한 전기 절연성을 나타내었고 migration의 속도는 지속적으로 나타났다. 이런 결과로부터 EPDM을 주원료로 하여 실리콘 오일과 각종 첨가제를 함유한 고분자 전기 절연체는 세라믹 전기 절연체를 대체하여 고기능 전기 절연체로 사용할 수 있다는 결론을 얻었으며 고전압을 이용하는 기계나 시설, 건물이나 높은 전기 절연성을 요구하는 시설물에서의 응용을 기대할 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국고무학회의 지원과 항공기 부품 기술연구센터에 의해 연구되었으며 이에 감사드립니다. 또한 이 논문 작성에 필요한 실험 및 측정에 많은 협조를 주신 경상대학교 고무공학 연구실의 박병규, 조수환, 이성효께 깊은 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. I. H. Kim & J. K. Kim, "Polymer Insulator", International Rubber Conference '99 Seoul, 1999.
2. J. A. Brydson, "Rubbery Materials and Their Compounds", Ch. 8. Elsevier Applied Science, London and New York, 1988.
3. 한재홍, 조성수, *Polym. Sci. & Technol.*, **9(5)**, 411, 1998.
4. KumHo Poly Chem. Co. Ltd., "EPM/EPDM Technical Information", 1997.