

논문 16-11-7

Hydroxy Silicone Oil이 실리콘 고무의 절연특성에 미치는 영향(1)

Effects of Hydroxy Silicone Oil on Insulation Properties of Silicone Rubber(1)

강동필*, 박효열*, 안명삼*, 이용재**, 이후범***, 오세호***

(Dong-Pil Kang*, Hoy-Yul Park*, Myeong-Sang Ahn*, Woong-Jae Lee**, Hoo-Bum Lee***, and Se-Ho Oh***)

Abstract

The silicone fluids have been generally used as processing agent in silicone rubber(SIR) compounding. The addition of hydroxy silicone (HS) fluids to SIR for insulator housing material is required to meet the good electrical performance and the good processability. In this study, SIR with HS fluids was evaluated to investigate how the kinds of them affect insulation properties. The contact angle of the virgin sample of 40-HS SIR was low and its recovery rate was also slow. The recovery rate of 50-HS SIR was the highest being decreased with the viscosity increase of HS fluids. The tracking resistances and the corona aging resistance of 70-HS SIR and 1.040-HS SIR were excellent. Tracking resistance depended largely on heat resistance of silicone fluids. But arc resistance didn't depend merely on the kind of silicone fluids.

Key Words : Hydroxy silicone oil, Silicone rubber, Hydrophobicity, Contact angle, Corona treatment

1. 서론

최근 housing용 소재로 고무를 사용한 폴리머 애자의 보급이 확대되고 있지만 고무소재 종류 및 처방에 따라 현장에서의 성능이 크게 다르게 나타나고 있어 제품의 장기신뢰성에 대한 불안감은 아직도 상존하고 있다. 폴리머 housing 소재들이 자기재 소재에 비하여 내열성과 내후성이 부족한 것은 사실이지만 절연물이 오염과 습윤된 환경 하에서 폴리머 애자의 표면절연성능은 훨씬 우수한 것으로 밝혀지고 있다[1,2]. 폴리머 애자에 있어서 문제는 장기간동안 전기방전과 옥외환경에의 노출로 인한 절연성능저하가 소재의 종류 및 소재의 처방

에 따라 상당히 다르게 나타나고 있다는 점이다 [3-7].

옥외절연물 표면이 오염되고 물에 젖으면 누설 전류 상승, 국부적 건조대 형성, 전기방전의 발생 등의 과정을 거쳐 housing 재료의 열화가 진행된다[8-11]. 사용환경에 따라 정도 차이는 있지만 옥외절연물의 오염과 습윤의 불가피성을 고려해 볼 때 housing 재료의 발수성과 전기방전에 의한 열화내성은 대단히 중요하다.

실리콘 고무는 주사슬이 무기결합적 특성을 가지고 있어 폴리머 재료 중에서는 내열성과 내후성이 매우 우수한 편이다. 실록산 폴리머의 낮은 표면에너지로 인하여 발수성과 발수성 회복특성이 우수할 뿐만 아니라 방전으로 발수성을 잃거나 친수성의 물질로 표면이 오손되어 발수성이 저하되었을 경우에도 1-2시간의 단기간에 거의 초기 발수성까지 회복하는 특유의 동적 특성[12-14]을 보이고 있다. 따라서 실리콘 고무는 옥외절연물에서 요구되는 표면발수성과 열화내성이 적절히 조화를 이루고 있어 우수한 housing 소재로 인식되어 가

* : 한국전기연구원 신소재응용연구그룹
(경남 창원시 성주동 28-1,
Fax: 055-280-1590
Corresponding Author : dpkang@keri.re.kr
** : 동아타이어공업(주)
*** : 동양실리콘(주)
2003년 2월 11일 접수, 2003년 4월 4일 1차 심사완료,
2003년 6월 9일 최종 심사완료

고 있다.

오염흡습으로 인한 표면방전 시 고무소재의 열화를 막기 위하여 다량의 ATH가 첨가되고 있는데 ATH의 첨가량, 표면처리상태, 입도 등에 의해 실리콘 고무의 발수성과 회복특성은 다르게 나타날 수가 있다. 그런가 하면 무기보강재의 첨가량이 많아 성형작업성 만족을 위해서 process oil의 사용이 불가피한데 사용하는 오일의 종류와 양에 따라 표면 발수성이나 방전열화내성은 크게 다르게 나타난다.

오염된 표면에서도 실리콘 고무의 발수성이 장기간 유지되는 것은 저분자성 실리콘 오일이 친수성 표면의 오염물질도 효과적으로 encapsulation하기 때문일 것으로 보인다[15]. 실리콘고무의 원료인 gum 상태인 폴리머는 분자량 분포가 매우 크며 오일에 가까운 저분자들도 상당히 포함되어 있기도 하지만 혼련성, 성형성, 전기물성을 만족시키기 위해서 대부분 저분자량의 process oil을 첨가하고 있다. 실리콘 고무의 배합조성에서 저분자성 실리콘 오일의 처방은 발수성 회복특성, 가공성, 폴리머와 무기물 보강재의 계면특성 향상 등의 측면에서 검토되어야 하는데 특히 고무내부로부터 표면으로의 확산성과 오염물질 표면의 wetting에 의한 소수성으로의 개질능력 외에 오일자신의 방전환경에서의 열화내성을 고려하여야 한다. 특히 반응성 오일은 표면방전 시 첨가된 무기물 표면이 친수성 상태로 변하는 것을 저지하는 효과가 기대되므로 고무의 처방 시 저분자오일의 처방에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 무기물 표면의 개질성이 기대되고 저분자량을 가져 process oil로서의 효과가 크면서 휘발성이 낮아 장기간에 걸쳐 표면특성변화가 적을 것으로 기대되는 터미널에 하이드록시기를 가진 HS 오일을 컴파운드에 첨가하여 실리콘 고무로서의 일반적 물성 외에 초고압 옥외절연물의 housing 재료로서 장기성능에 영향을 주는 방전열화내성과 표면 발수성의 회복특성에 대해서 연구하였다.

2. 실험

2.1 ATH의 입도 및 형상분석

Anti-tracking agent로 사용한 ATH의 입도분포를 측정할 장비는 Seishin Enterprise사의 Micron Photo Sizer SKC-2000 이었고 입자의 형상을 조사하기 위하여 IPA에 분산시킨 슬러리 액체를

mount 위에 적가하여 건조시킨 뒤 SEM으로 조사하였다.

2.2 실리콘 고무 컴파운드의 제작

일본 도시바 실리콘의 base gum과 Huber사 ATH를 사용하였다. 고무처방에 사용된 오일의 종류와 시편명은 표 1에 정리하였다. 처방된 구성성분들을 계량하고 kneader를 사용하여 혼합하였으며, 평가용 실험시편은 프레스를 사용하여 175℃에서 15분간 경화시켜 제작하였다.

표 1. 실리콘 고무 컴파운드의 구성성분.

Table 1. Components of silicone rubber compounds.

Ingredients(phr)\Name	SC 1	SC 2	SC 3	SC 4	SC 5
Base Gum	100	100	100	100	100
ATH Content	140	140	140	140	140
PDMS(50 cPs)	1	1	1	1	1
OH-t-PDMS(40 cPs)	6				
OH-t-PDMS(50 cPs)		6			
OH-t-PDMS(70 cPs)			6		
OH-t-PDMS(80 cPs)				6	
OH-t-PDMS(1040 cPs)					6
OH-t-cyclosiloxane(70 cPs)	1	1	1	1	1

2.3 실리콘 고무 컴파운드의 일반물성 평가

고무의 사출성형성과 기계적 특성을 조사하기 위하여 가소도, 경도, 인장강도, 인열강도, 신율, 선수축율 등을 평가하였다. 가소도는 William Plasticity Test Machine (Ueshima-Japan, No. 891517), 경도는 shore A 경도계 (GS-710 JIS 정압 하중기), 그리고 인열강도, 인장강도, 신율은 Shimadzu AG-1 Test Machine으로 측정하였다.

2.4 코로나 방전에 의한 실리콘고무 표면열화

코로나방전 처리장치(Tantec GmbH, Denmark)는 10 cm의 진폭을 가지고 초당 1회식 scan(왕복운동)을 하도록 제작되어 있으며(그림 1), 상압에서 균일한 코로나 방전을 발생시키기 위하여 25 kHz, 10 kV의 전원을 사용하였다. 세라믹 물 전극과 시편 표면과의 거리는 2 mm로서 모든 시편에 동일하게 적용하였다. 실험에 사용한 판상시편의 크기는 100×100×2 mm³이었으며 각 시편별로 100, 200, 1,000 회로 나누어 코로나 방전열화실험을 하였다 [14, 16]. 방전열화된 시편으로 SEM을 사용하여 표면열화정도를 비교하였으며 발수성 회복특성을 평가하였다.

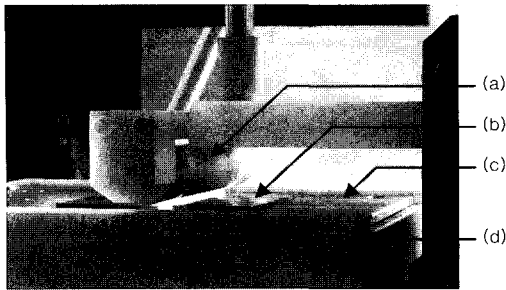


그림 1. 코로나를 이용한 표면처리.

(a) 세라믹 롤 전극(코로나 전극), (b) 시편
(c) 하부전극, (d) PTFE 절연체.

Fig. 1. Corona treatment of silicone rubber.

(a) ceramic roll electrode(corona electrode)
(b) specimen, (c) bottom electrode, (d)
PTFE insulator.

2.5 발수성 측정

코로나 방전 처리된 실리콘 고무표면의 열화에 따른 발수성 감소와 경과시간에 따른 발수성 회복 특성을 조사하기 위하여 Surface and Electro-Optics사의 Dynamic Contact Angle Meter를 사용하여 접촉각을 측정하였다. 적가한 물의 양은 10 μ l이었으며 적가 10초 후에 값을 측정하였다. 코로나 처리 직후는 친수성 표면특성을 보여 접촉각 측정이 불가능하였다.

2.6 SEM 측정

ATH 무기물의 입자형상과 실리콘 고무의 표면을 코로나로 방전처리 후 표면의 열화상태를 Hitachi사의 전자현미경(S-2700)을 사용하여 관찰하였다. 100회와 1,000회 코로나 처리된 고무표면을 2,000배의 배율로 측정하였다.

2.7 내아크성 측정

ASTM D495의 규정에 의하여 시편의 내아크성을 측정하였다. 아크로 인하여 재료에 도전도가 형성되면 아크가 소멸되므로 그 때까지의 시간으로 내아크성을 정의한다. 따라서 시간이 길수록 내아크성이 우수한 것으로 판정한다. 그러나 실리콘 고무는 아크에 의해 탄화 잔존물이 생기지 않으므로 본 연구에서는 시편에 420초의 아크를 발생시킨 후 그 때까지의 무게손실을 측정하여 열화정도의 기준으로 삼았다. 지름 2.4 mm의 텅스텐 재질로

된 1쌍의 전극을 서로 6.35 mm의 간격으로 시편의 면상에 배치하고 전극 간 전압은 12,500 V로 설정하여 측정하였다. CEAST사의 Arc vis를 사용하여 측정하였다.

2.8 내트래킹성 측정

IEC 60587의 규정에 따라 내트래킹성을 측정하였으며 AC 4.5 kV 전압을 인가하였다. 비이온성 wetting agent가 첨가된 0.2g/l의 암모늄 크로라이드 수용액을 전해액으로 사용하였으며 전도도는 2,400 μ S이었고 전해액의 유입속도는 0.6 ml/min이었다. 그러나 규정에 의한 트래킹 파괴는 실리콘 고무에서 거의 발생되지 않으므로 본 연구에서는 4.5 kV의 전압을 6시간 동안 인가 후 발생한 무게손실을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

ATH의 입도분포는 그림 2에 나타내었고, SEM으로 측정된 입자형상사진은 그림 3에 나타내었다. 초고압 고무절연재로서의 적절한 입도분포(0.1-10 μ m)와 적합한 표면적과 표면형상을 갖고 있다. 나노입자의 미세한 분말들은 파쇄, 표면처리, 건조 등의 과정에서 입자간 붕침이 발생할 가능성이 높는데 그런 현상은 전혀 나타나지 않았다. 그러나 입자형상은 고무보강재로서 유리하게 표면요철이 잘 발달되어 있음을 알 수 있다.

고무원료 속에 포함된 오일은 고무로 가교되는 동안 표면으로 나와 이형제 역할도 하고 고무내부에 잘 분산되어 있다가 표면의 오일농도가 낮아지면 공기하고 접하고 있어 표면에너지가 낮은 표면 쪽으로 스며 나와 발수성에 영향을 주므로 표면의 절연능력이 중요한 예자에 있어서 상당한 의미를 갖는다. 그런가 하면 전기방전에 의한 고무재료의 열화내성을 향상시키기 위하여 다량의 ATH가 첨가되면서 생길 수 있는 성형상의 어려움을 해소시켜 주는 역할을 담당한다. 더욱이 고무분자에 비해 훨씬 저분자성 유체이기 때문에 표면에너지가 18-21 dyne/cm 정도로 매우 낮아 활동도가 크며 표면에 오염된 물질도 쉽게 적시는 특징도 가지고 있다. 또한 오염된 물질이 실리콘 오일에 의해 encapsulation되면 오염물의 표면에너지가 매우 낮게 유지되어 그 위에 누적되는 오염물질은 쉽게 바람에 날아가거나 세척이 되는 특성을 보여 오염을 방지하는 효과도 있다[15].

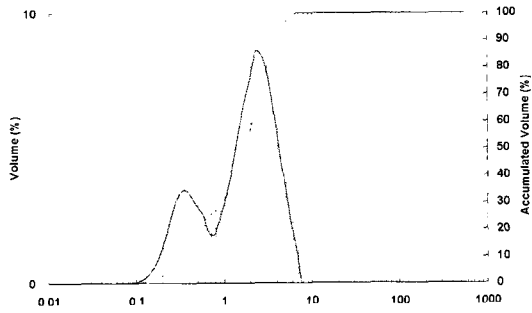


그림 2. ATH 입자의 입도분포.

Fig. 2. Particle size distribution of ATH.

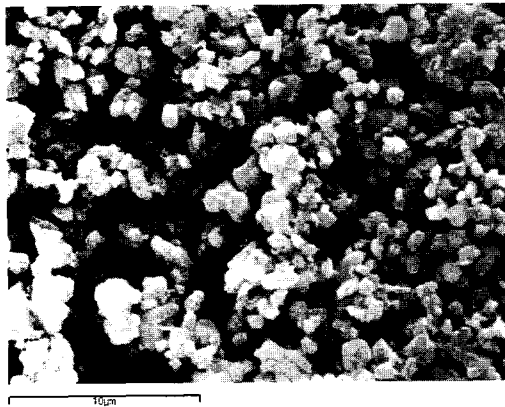


그림 3. ATH 입자의 SEM 관찰 사진.

Fig. 3. SEM micrograph of ATH particles.

고무표면은 오염물질에 의해 표면 porosity가 증가하게 되는데 요철에 의한 표면적 증가는 접촉각을 높이는 원인이 된다. 실리콘 고무 컴파운드 시 process oil로 사용할 수 있는 fluid로는 비반응성인 PDMS와 터미널에 반응성기를 가진 다양한 점도의 오일들이 있다. OH-t-PDMS 오일들은 분자 크기에 비해 점도가 높고 보강재 무기물 표면과의 효과적인 반응성이 기대될 뿐만 아니라 표면으로 migration 속도가 느리고 오염물질의 종류에 따른 wetting성이 우수한 것으로 예상되며 점도에 따라서 이들 거동과 밀접한 관련성이 있을 것으로 예상되어 첨가오일들의 점도별 표면의 절연특성 차이를 비교분석하는 것은 중요한 의미를 가지고 있다.

실리콘 고무의 제반물성들이 표 2에 정리되었는데 고무원료를 이용하여 폴리머 애자로 사출성형하기 위해서는 적절한 유연학적 특성이 요구되고 있으며 가소도가 대체로 230-300 범위에 있는 것이 사출작업성이 적절한데 SC4를 제외하고는 다소 벗어나 있음을 알 수 있다. 가소도나 경도는 첨가 오일의 점도증가와 더불어 증가하고 있으며, 고무 성형 시 금형으로부터 탈형이 용이하기 위해서는 인열강도가 중요한데 거의 비슷한 값을 보이고 있다. 경도와 인장강도는 오일의 점도가 증가할수록 증가하고 하고 있음을 알 수 있다.

표 2. 실리콘 고무 컴파운드의 일반물성.

Table 2. Physical properties of silicone rubber compounds.

Properties \ Name	SC 1	SC 2	SC 3	SC 4	SC 5
가소도	196	202	216	253	303
경도	64	64	65	66	72
인장강도	53	53	55	57	52
인열강도	12	11	11	12	12
신율	259	253	250	242	202

시편 SC1, SC2, SC3, SC4 및 SC5에 대하여 코로나를 100회 처리한 후 발수성의 회복특성을 측정 한 결과를 그림 4에 나타내었다. 코로나 처리한 시편은 표면열화가 어느 정도 진행되었고 방전처리 동안 상당히 가열되는 상태이며 표면이 전기적으로 charge되어 있을 가능성도 있으며 실리콘 분자 사슬들이 유연하고 자유공간이 커 메칠기들이 코로나 방전처리하는 동안 내부로 향하도록 재배열 되었을 가능성 등이 예상되는데 코로나 처리 후 측시는 물이 완전히 퍼져 접촉각의 측정이 불가능 하였다.

경과시간이 0으로 표기된 것은 코로나 처리한 후 바로 접촉각을 측정한 것이고 3,000 분이 경과한 시편의 접촉각은 모든 시편에서 코로나 처리하기 전의 접촉각과 거의 유사한 값을 보였으며 이것은 2일 정도이면 원래 상태로 발수성이 회복되고 있음을 의미한다. 40 cPs인 HS 오일은 초기 접촉각이 낮았는데 이것은 분자량이 작은 실록산 분자 양단에 hydroxy기가 붙어 있어 친수성이 높은 것에 기인한 것으로 보이며 코로나 처리직후 발수

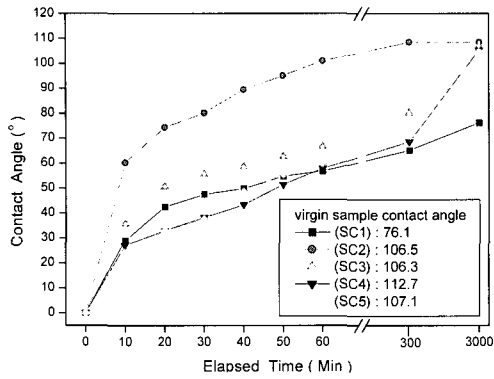


그림 4. 코로나 처리 후 경과시간에 따른 실리콘 고무표면의 접촉각 회복특성.

Fig. 4. Contact angle recovery properties of silicone rubber after corona treatment.

성 회복도는 빠르지만 더 이상 접촉각이 증가하지는 않는 것으로 보인다. 여기에 비해 50 cPs인 HS 오일은 발수성 회복속도가 매우 빠름을 알 수 있다. 그러나 점도가 높아지면 발수성 회복속도가 느려져 1,040 cPs인 HS 오일의 경우는 회복속도가 아주 느림을 알 수 있다. HS 오일의 점도에 따라 발수성 회복속도는 크게 영향을 받으며 분자가 클수록 mobile한 동적 거동이 느려지는 것으로 보인다.

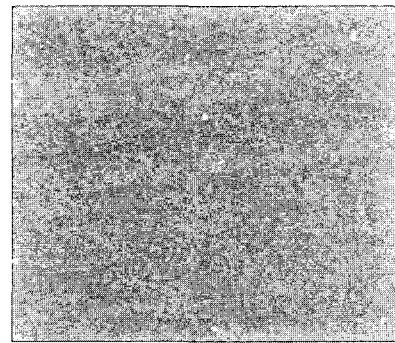
시편 SC4에 대하여 코로나 처리를 하지 않은 건전시편과 코로나를 각각 200회 및 1,000회 처리한 시편을 SEM으로 관찰한 결과를 그림 5에 나타내었다. SEM 관찰결과 코로나 처리 횟수가 증가할수록 재료열화에 의한 표면 거칠기는 증가하는 것으로 관찰되었다. 그러나 1,000회를 처리한 고무표면도 약간의 광택변화가 관측될 뿐 겉보기로는 큰 재료적 변화가 일어난 것으로 보이지는 않았다.

시편 SC1, SC2, SC3, SC4 및 SC5에 대하여 아크를 420초 동안 가한 후 나타난 무게손실을 측정 한 결과를 그림 6에 나타내었다.

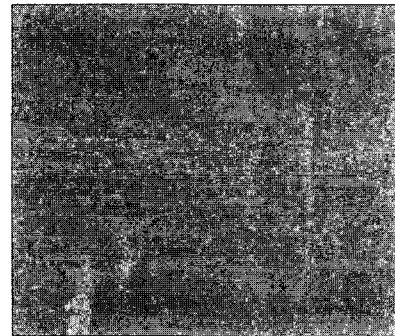
점도가 높고 페닐기를 가진 HS 오일을 첨가한 고무가 아크에 대한 무게손실의 변화는 저점도 오일보다 다소 높지만 값의 재현성은 우수한 것으로 나타났다. 이것은 고점도 오일이 내열성은 우수하지만 같은 량의 오일이라도 분자수가 적고 소수성이 강하여 무기물 표면을 효과적으로 wetting하지 못 하는데 기인하는 것으로 보인다. 오일 종류에 따른 내아크성의 차이는 거의 없는 것으로 나타나고 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 5. 시편 SC4의 SEM 사진.

(a) 건전시편, (b) 코로나를 200회 처리한 시편, (c) 코로나를 1,000회 처리한 시편.

Fig. 5. SEM micrographs of SC4.

(a) sound specimen, (b) corona aged for 200 scans, (c) corona aged for 1,000 scans.

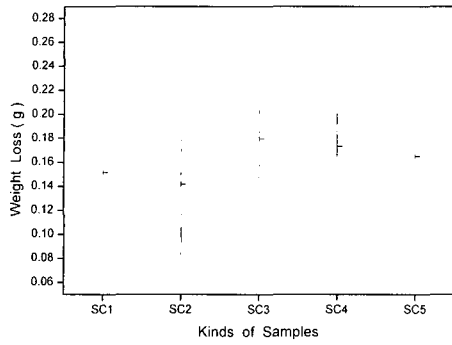


그림 6. 시편의 종류에 따른 내아크성.

Fig. 6. Arc resistance of specimens.

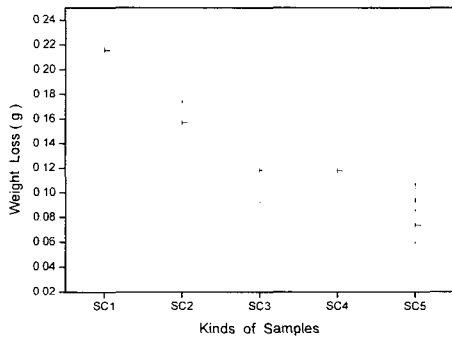


그림 7. 시편의 종류에 따른 내트래킹성.

Fig. 7. Tracking resistance of specimens.

시편 SC1, SC2, SC3, SC4 및 SC5에 대하여 4.5 kV의 전압을 인가하여 6시간 동안 트래킹방전을 시킨 후 발생한 무게손실을 측정된 결과를 그림 7에 나타내었다.

HS 오일은 점도가 낮을수록 터미널의 OH기의 영향이 크게 나타날 것으로 예상되는데 트래킹 방전 시 표면에 물이 존재하고 전기방전에 의한 열과 광이 발생하는 환경이라고 본다면 오일분자가 적어 열화속도가 빠를 수도 있지만 방전열이 발생하여 고온이 되면 터미널에 두개의 OH기를 가진 오일의 물에 대한 용해도가 커서 쉽게 용해되어 없어질 수도 있다. 첨가한 오일의 점도가 높아질수록 트래킹에 의한 무게손실은 감소함을 보이고 있지만 점도가 높아질수록 무게감소의 오차 폭이 점점 커짐을 알 수 있다. 이것은 첨가된 오일의 분자량이 큰 경우 무기물의 모든 표면에 효과적으로 작용하지 못하고 있는데 기인한 것으로 보인다.

4. 결 론

옥외용 송배전용의 폴리머 애자에 사용할 실리콘고무의 장기절연성능에 HS 오일들의 종류가 어떻게 영향을 주는지를 평가하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 첨가한 HS 오일의 점도에 따라 컴파운드 가소도와 고무의 경도 변화가 상당히 크며 점도증가와 더불어 증가하는 값을 보였다.
2. 40 cPs HS 오일이 첨가된 고무는 초기 접촉각이 낮았으며 전체적으로 발수성 회복속도도 느렸다. 50 cPs HS 오일 첨가 고무는 초기 접촉각도 우수하고 접촉각 회복특성도 양호하였다. 그러나 60 cPs 이상인 HS 오일의 경우는 점도증가와 더불어 접촉각 회복속도가 느려지는 것을 알 수 있다.
3. SEM으로 관찰한 코로나 처리후의 표면열화 상태는 코로나 처리회수와 더불어 표면오염이 증가하였으며 점도가 높을수록 열화내성이 우수하였다.
4. 내아크성은 오일 종류에 의존성이 거의 없었다.
5. 트래킹 방전에 의한 무게 감소는 오일 점도가 높을수록 작아지는 결과를 보였다.

애자의 장기성능과 관련성이 큰 표면 발수성 및 발수성 회복특성, 방전열화내성(내트래킹성, 내코로나성, 내아크성)을 평가한 결과 첨가한 오일에 대한 의존성이 상당히 컸으며, 성형작업성과 관련이 큰 가소도도 오일의 점도에 따라 상당한 차이를 보이고 있어 초고압 애자용 실리콘 고무의 컴파운드 개발시 실리콘 오일의 선택과 양의 최적화가 중요할 것으로 보인다.

참고 문헌

- [1] N. Dhahbi-Megrache and A. Beroual, "Flashover dynamic model of polluted insulators under ac voltage", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, No. 2, p. 283, 2000.
- [2] 박영국, 이운석, 정수현, 장동욱, 임기조, "옥외 애자용 재료의 표면 전기전도 특성", 전기전자재료학회논문지, 11권, 10호, p. 758, 1998.
- [3] S. Kumagai and N. Yoshomura, "Tracking and erosion of HTV silicone rubber and

- suppression mechanism of ATH”, *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 8, No. 2, p. 203, 2001.
- [4] D. H. Han, H. Y. Park, D. P. Kang, and H. G. Cho, “Effects of added silicone oils on the surface characteristics of SIR”, *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 9, No. 2, p. 323, 2002.
- [5] 한동희, 조한구, 강동필, 민경은, “코로나 방전에 따른 실리콘 고무의 표면특성”, *전기전자재료학회논문지*, 15권, 2호, p. 133, 2002.
- [6] Y. Hirano, T. Inohara, M. Toyoda, H. Murase, and M. Kosakada, “Accelerated weatherability of shed materials for composite insulators”, *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 8, No. 1, p. 97, 2001.
- [7] D. H. Han, H. Y. Park, D. P. Kang, and K. E. Min, “Tracking and erosion resistance and hydrophobicity of HTV silicone rubber for outdoor insulators”, *Proceedings of 6th ICPADM*, p. 354, 2000.
- [8] H. Deng and R. Hackam, “Low molecular weight silicone fluid in RTV silicone rubber coatings”, *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 5, No. 1, p. 84, 1998.
- [9] J. W. Chang and R. S. Gorur, “Surface recovery of silicone rubber used for HV outdoor insulation”, *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 1, No. 6, p. 1039, 1994.
- [10] X. Wang and N. Yoshimura, “Fractal phenomena dependence of hydrophobicity on surface appearance and structural features of SIR insulators”, *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 6, No. 6, p. 781, 1999.
- [11] 허창수, 연복희, 조한구, “HTV 실리콘 고무에서 열화인자에 따른 저분자량 성분과 표면 발수성의 변화”, *전기전자재료학회논문지*, 12권, 1호, p. 1, 1999.
- [12] H. Homma, T. Kuroyagi, and K. Izumi, “Diffusion of low molecular weight siloxane from bulk to surface”, *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 6, No. 3, p. 370, 1999.
- [13] R. S. Gorur, J. W. Chang, and O. G. Amburgey, “Surface hydrophobicity of polymer used for outdoor insulation”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 5, No. 4, p. 1923, 1990.
- [14] H. Hillborg and U. W. Gedde, “Hydrophobicity recovery of polydimethylsiloxane after exposure to corona discharges”, *Polymer*, Vol. 39, No. 10, p. 1991, 1998.
- [15] A de la O, R. S. Gorur, and J. T. Bumhum, “Electrical performance of non-ceramic insulators in artificial contamination tests - role of resting time”, *IEEE Trans. DEI*, Vol. 3, p. 827, 1996.
- [16] P. J. Smith, M. J. Owen, P. H. Holm, and G. A. Toskey, “Silicone studies of corona treated silicone rubber HV insulation”, 1992 *IEEE Conf. on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Victoria, Canada, p. 829, 1992.