Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 17, No. 11, p. 1205, November 2004.

논 문 17-10-10

클로로프렌 고무의 난연성 및 내방사선 특성 향상

The Improvements for Fire Retardancy and Radiation Resistance of Chloroprene Rubber

김기엽[1], 이 청[1,a], 류부형[2]
(Ki-Yup Kim[1], Chung Lee[1,a], and Boo-Hyung Ryu[2])

Abstract

This study has investigated radiation degradation of chloroprene rubber in the presence of some fire retardant. Ammonium polyphosphate, aluminium trihydroxide, magnesium hydroxide, calcium carbonate and antimony trioxide were selected as flame retardant. Samples were irradiated using a Co^{60} γ-ray and ray up to 2000 kGy at a dose rate of 5 kGy/hr in the presence of air atmosphere at room temperature. After irradiation, samples were assessed fire retardancy with electrical properties and mechanical properties. Some considerations concerning the effects of the fire retardants added to chloroprene rubber on the radiation and thermal stability of chloroprene rubber are presented. From fire retardancy with electrical and mechanical property measurements, it was found that addition of magnesium hydroxide resulted in maximum fire retardant effect.

Key Words : Chloroprene rubber, Radiation degradation, Fire retardancy, LOI

1. 서 론

원전 시설에는 일반 산업시설과 마찬가지로 많은 부분에 유기 고분자 재료가 사용되고 있다. 핵반응 시설의 실링재와 전력 케이블의 절연체 및 피복재용으로 유기고분자 재료가 중요하게 사용되고 있다[1,2]. 하지만 원전에서 사용되는 고분자 재료들은 저선량의 방사선에 오랜 시간에 걸쳐 노출되거나 불의의 화재사고에 노출되는 경우가 발생할 수 있으므로 난연성과 함께 방사선에 대한 안정성을 우선적으로 파악해야 한다. 현재 많이 쓰이고 있는 난연성 고분자 절연재료로는 Hypalon, Neoprene 및 Teflon 계열의 불소수지 등이 있다. Neoprene은 클로로프렌 고무(chloroprene rubber, 이하 CR)로 난연특성, 저온특성 및 자외선에 대한 저항성이 우수하여 난연특성이 요구되는 장소에서 전기절연용 재료로 사용되며 특히, 원전 시설과 같은 방사선 환경 하에서의 전력 케이블 절연재와 피복재로 많이 사용되고 있다. 그러나, CR의 최고 사용온도가 약 116 ℃ 정도이고 체적저항율이 10^{11} Ωcm 정도로 낮아 자체만으로는 원전 시설에서 방출되는 방사선과 열을 견디기 어려우므로 원전 시설에 적합한 물성이 발현되도록 개선해야 할 것이다[3,4]. 고분자 물질의 난연성을 개선하는 방법으로는 분자구조설계를 통해 열적으로 안정한 수지의 합성, 기존 고분자의 화학적 개량, 난연제의 블렌딩이나 컴파운딩을 통한 물리적 첨가, 난연제 코팅, 페인팅 방법 등이 있다. 하지만 분자구조설계를 통한 수지의 합성은 고내열성으로 인해 가공이 어려우며 고가로 인해 경제성이 없어 특수 분야에만 적용이 되고, 기존 고분자의 화학적 개량은 열경화성 수지와 섬유용 고분에 주로 사용된다. 따라서, 난연제의 물리적 첨가에 의한 방법이 열가소성

1. 한국원자력연구소 방사선이용연구부
(대전시 유성구 덕진동 150)
2. 동국대학교 안전공학과
a. Corresponding Author : ex-clee@kaeri.re.kr
접수일자 : 2004. 7. 2
1차 심사 : 2004. 10. 13
심사완료 : 2004. 10. 15

고분자 난연성 개선에 가장 많이 사용된다. 난연성의 개선을 위해 첨가되는 난연제는 연소하기 쉬운 성질을 가진 고분자 재료의 발화를 늦춰 주고 연소의 확대를 막아주는 첨가제이지만 단순히 난연 효과만을 발휘해서는 실제 제품으로서의 사용이 어렵고 또한 연소시 연기 및 독성가스를 적게 발생하고, 이와 혼합되는 고분자와의 상용성과 혼합성도 좋아야 하며, 제품의 기계적 물성을 저하시키지 않아야 하는 등의 여러 가지 요구 조건을 만족시켜야 한다.

현재 많이 사용되는 난연제는 크게 인계, 할로겐계, 무기 수화물계, 안티몬계 등으로 구분할 수 있다. 인계 난연제는 분해 및 연소반응으로 탄소가 표면층(char)을 형성하여 물리적으로 재료와 산소를 차단하고[5,6], 할로겐계 난연제는 분해과정에서 불연기체 또는 무거운 기체를 생성시켜 재료가 분해하면서 발생하는 가연기체를 열과 산소로부터 차단하며, 무기 수화물계 난연제는 연소반응에서 탈수가 일어나고 이때 생성된 물의 증발 잠열로 인해 열을 흡수하고 열전도율을 올려 열을 분산시킨다. 안티몬계 난연제는 연소 초기에 안티몬이 용융되면서 재료의 표면에 피막을 형성하여 산소를 차단하고 내부 흡열반응에 의해 착화온도를 증가시켜서 자기소화성을 발휘한다. 또한 산화안티몬 난연제는 할로겐계 난연제와 함께 사용할 경우 공동상승 효과를 나타내게 된다.

우수한 절연체와 피복 재료인 CR의 열적 열화에 따른 산화 특성에 관한 보고는 비교적 활발히 이루어졌으나[7-11], 방사선 열화에 따른 특성의 연구는 많지 않은 실정이다. 또한, 난연제가 첨가된 CR이 방사선 열화에 어떠한 거동을 하는지에 관한 연구도 많지 않다. 따라서, 본 연구에서는 첨가형 난연제인 암모늄 폴리포스페이트, 수산화마그네슘[$Mg(OH)_2$], 탄산칼슘[$CaCO_3$], 수산화알루미늄[$Al(OH)_3$], 삼산화안티몬[Sb_2O_3] 등을 첨가한 CR의 방사선 열화에 따른 난연 특성을 연구하였다. CR의 방사선 열화에 따른 난연특성 평가를 위해 산소지수법과 시차주사열량 분석을 이용한 분해개시 온도의 변화를 확인하였으며, 전기적 특성을 확인하기 위해 체적 저항율과 표면 저항율을 측정하였다. 그리고 인장강도 및 파단시 연신율과 같은 기계적 특성도 측정하였다.

2. 실 험

2.1 원재료

CR의 원재료는 Dupont사의 Neoprene W를 사용하였으며, 난연특성을 향상시키기 위한 첨가제로 암모늄 폴리포스페이트, 수산화마그네슘[$Mg(OH)_2$], 탄산칼슘[$CaCO_3$], 수산화알루미늄[$Al(OH)_3$], 삼산화안티몬[Sb_2O_3]을 각 30 phr 씩 첨가하여 80 ℃에서 Bunbury mixer로 20분간 혼합한 후, MgO와 ZnO를 경화제로 하여 170 ℃에서 약 20분간 경화시켜 시료를 제작하였다. 클로로프렌 고무는 네 가지 종류의 구조 이성체를 가지고 있으며 각각의 이성체 단위들을 그림 1에 나타내었다[12]. CR의 경화제 혼합비와 첨가형 난연제의 첨가비는 표 1과 같다. 시편의 가공은 170 ℃에서 20분간 hot press를 이용하여 0.3 mm 두께로 가공하였다. 케이블 재료의 내방사선성을 시험하기 위하여 한국원자력연구소 방사선 조사시설의 Co^{60} γ-ray 선원을 사용하여 실온, 대기 중에서 5 kGy/hr의 선량율로 각각 100, 250, 500, 1000, 1500, 2000 kGy까지 조사하였다.

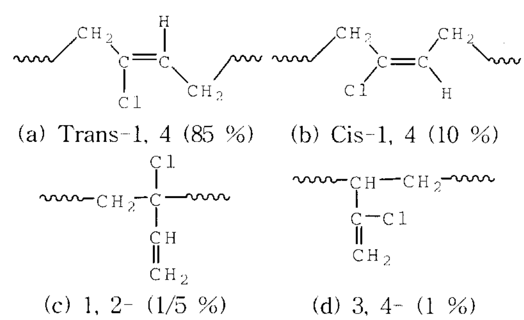

그림 1. 클로로프렌 고무의 구조.
Fig. 1. Main structural units of CR.

표 1. 폴리클로로프렌의 조성.
Table 1. Mixing content of polychloroprene.

Composition \ Sample	Contents (phr)					
	CR-1	CR-2	CR-3	CR-4	CR-5	CR-6
Base polymer (Neoprene W)	100					
MgO	4					
ZnO	5					
Process oil	10					
Ammonium polyphosphate*	-	30	-	-	-	-
Magnesium hydroxide	-	-	30	-	-	-
Calcium carbonate	-	-	-	30	-	-
Aluminum trihydroxide	-	-	-	-	30	-
Antimony trioxide	-	-	-	-	-	30

* $(NH_4)_n$-$2P_nO_{3n+1}$ (n=1000~3000)

2.2 난연특성 시험

2.2.1 산소지수 측정

방사선을 조사한 CR의 산소지수(limited oxygen index, LOI)에 의한 난연성 평가는 JIS D1201 규정에 따라 평가하였다. 시편은 각각 120×60 mm의 크기로 재단한 후 투명한 통 안에 산소의 농도를 설정하여 산소와 질소의 혼합가스를 일정하게 유지한 다음 수직으로 시험편을 장착하여 위쪽을 점화시켜 불이 타들어 갈 때의 산소 농도를 측정하였고 아래의 관계식을 이용하여 산소지수를 구하였다[13].

$$\text{산소지수}(LOI)\% = \frac{[O_2]}{[O_2]+[N_2]} \times 100$$

$[O_2]$: 산소유량(ℓ/min)

$[N_2]$: 질소유량(ℓ/min)

2.2.2 분해개시온도 측정

방사선 열화에 따른 CR의 분해개시온도(decomposition onset temperature, DOT)를 differential scanning calorimeter(DSC, TA Inst. Co., Model Q1000)을 사용하여 측정하였다. 각각의 방사선 조사 시료를 산화되기 쉬운 가혹한 조건하에 두고 산화가 유발되기까지의 온도를 측정하여 시료가 지닌 내산화성 정도를 상대적으로 평가하였다. 시료물질을 oxidized copper pan에 넣고 산소 분위기에서 10 ℃/min으로 50~300 ℃까지 온도를 상승시켜 산소에 의한 분해가 시작되는 온도를 측정하였다[14].

2.3 전기적 특성 및 기계적 특성 시험

2.3.1 체적 저항율 및 표면 저항율

난연제 첨가에 따른 클로로프렌 고무의 전기절연 특성을 평가하기 위하여 시편의 체적저항율과 표면저항율을 실온에서 electrometer & high resistance meter(Keithley, 6517 A)와 test fixture (Keithley, 8009)를 사용하여 1 kV의 전압을 인가하면서 측정하였다.

2.3.2 인장강도 및 파단시 연신율

난연제를 첨가한 클로로프렌 고무의 방사선 열화에 따른 인장강도 및 파단시 연신율의 측정은 인장시험기(Zwick, Model. Z010)를 사용하여 실온에서 측정하였다. ASTM D638 규정에 의거하여 dumbbell 형태의 시편 양끝을 지그에 3×10^5 MPa의 압력으로 고정시킨 후 재료에 따른 load cell, crosshead speed를 ASTM 규정에 따라 적용하여 시편이 파단될 때까지 인장시켜서 시편의 초기길이와 파단시 시편의 길이를 비교하여 파단시 연신율을 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 난연특성

그림 2는 난연제를 첨가한 클로로프렌 고무의 방사선 조사선량에 따른 한계산소지수를 측정한 결과이다. 난연제를 첨가하지 않은 시편인 CR-1은 미조사 상태에서 약 31 %의 한계산소지수를 나타내고 있는데 이것은 염소를 함유하고 있는 클로로프렌 고무에서 연소시 염소성분의 무거운 기체를 발생시켜 산소의 접근과 열전달을 억제하기 때문에 클로로프렌 고무 자체로서도 어느 정도 난연특성을 나타내는 것으로 볼 수 있다. 반면 난연제를 첨가한 경우 CR-6를 제외한 모든 경우 CR-1보다 더욱 우수한 난연특성을 보이고 있으며 이것은 금속수화물이 흡열, 분해반응을 하여 연소를 지연시키고 수분의 방출을 동반하여 기상에서 가연성 기체를 희석시키기 때문인 것으로 사료된다[15]. 또 방사선 조사선량의 증가에 대해 한계산소지수는 저선량 영역에서 일부 감소하는 경우를 나타내었으나 전반적으로 선량증가와 함께 한계산소지수 값의 증가를 나타내며, 약 1000 kGy의 고선량 영

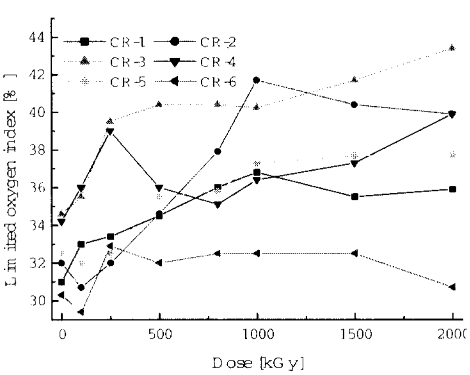

그림 2. 방사선 조사에 따른 CR의 한계산소지수.

Fig. 2. Limited oxygen index of CR containing fire retardants as a function of the radiation dose.

역에서는 포화하는 경향을 나타내고 있다. 삼산화안티몬[Sb_2O_3]을 첨가한 CR-6은 미첨가 CR에 비해 낮은 LOI 값을 나타내어 클로로프렌 고무자체의 난연특성을 저하시키고 있으며, 방사선 조사 후에도 조사선량에 상관없이 가장 나쁜 특성을 나타내었다. 한계산소지수 측정결과에서 가장 우수한 특성을 나타낸 시편은 수산화마그네슘[$Mg(OH)_2$]을 첨가한 CR-3로 나타났으며, 암모늄 폴리 포스페이트와 탄산칼슘[$CaCO_3$]을 첨가한 CR-2와 CR-4 역시 우수한 난연특성을 나타내었다.

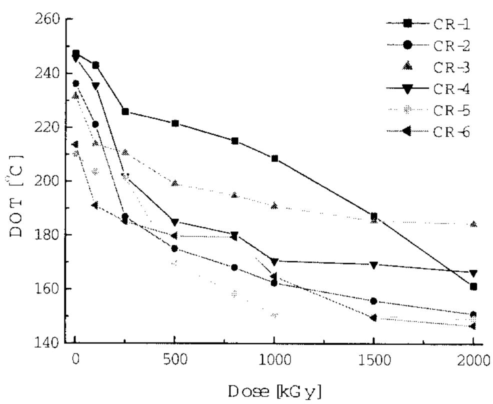

그림 3. 방사선 조사에 따른 CR의 분해개시온도.

Fig. 3. Decomposition onset temperature of CR containing fire retardants as a function of the radiation dose.

난연제를 첨가한 클로로프렌 고무의 방사선 조사에 따른 분해개시온도 측정결과를 그림 3에 나타내었다. 난연제를 첨가한 시편의 분해개시온도는 모두 난연제를 첨가하지 않은 CR-1에 비해 낮은 수치를 보였다. 방사선 미조사시 난연제 첨가시편이 CR-1에 비해 더 낮은 분해개시온도를 나타낸 것은 시편 배합과정의 난연제 첨가과정에서 클로로프렌 고무의 열화가 진행되어 산화가 일부 발생하였기 때문인 것으로 사료된다. 방사선 조사에 따른 분해개시온도의 변화는 모든 시편에서 전반적으로 조사선량의 증가에 대해 저선량 영역에서는 급격한 감소를 보이다가 고선량 영역에서는 DOT의 감소가 둔하거나 포화하는 경향을 나타내었다. 이러한 현상은 방사선 조사선량이 증가하면서 클로로프렌 고무 측쇄의 절단으로 인해 대부분의 유기성분이 이미 주쇄에서 떨어져 있어 분해가 쉽게 발생되기 때문인 것으로 사료된다. 난연제를 첨가하지 않은 CR-1의 경우 방사선 조사영향에 대해 가장 우수한 특성을 나타내었으며, 난연제를 첨가한 시편 중에서는 수산화마그네슘과 탄산칼슘을 첨가한 CR-3과 CR-4이 상대적으로 우수한 내방사선 특성을 나타내었다. CR-4는 저선량 영역의 방사선 조사에 대해 우수한 특성을 나타내었으나 500 kGy 이상의 영역에서는 급격한 감소 후 낮은 분해개시온도를 유지하였으며, CR-3는 선량의 증가에 따라 분해개시온도가 크게 감소하지 않으면서 일정한 수치를 유지하여 가장 우수한 내방사선 특성을 나타내고 있다.

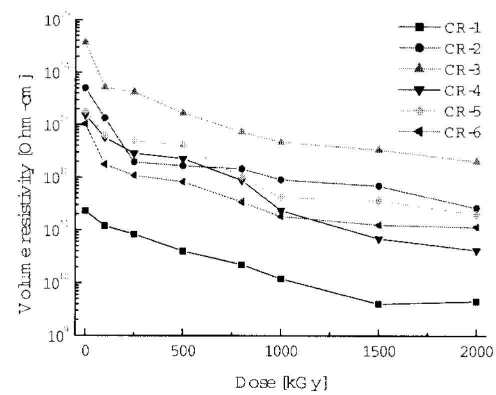

그림 4. 방사선 조사에 따른 CR의 체적저항율.

Fig. 4. Volume resistivity of CR containing fire retardants as a function of the radiation dose.

3.2 전기적 특성 및 기계적 특성

그림 4는 난연제를 첨가한 클로로프렌 고무의 방사선 조사에 따른 체적저항율의 변화를 나타낸 것이다. 난연제를 첨가한 시편의 체적저항율은 전반적으로 미첨가 시편에 비해 높은 값을 나타내고 있으며, 초기 100 kGy와 250 kGy의 저선량 영역에서 미조사 시편에 비해 급격한 감소를 보이지만 그 후 서서히 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이것은 저선량 영역에서 방사선 조사에 의한 측쇄나 주쇄의 붕괴, 절단 작용과 함께 생성된 기포, 불순물, 도전성 이온 등의 급격한 증가로 체적 저항율이 급격히 감소하는 것으로 보이며, 이후 지속적으로 서서히 감소하는 경향이 나타나는 것은 방사선 조사에 의해 생성된 도전성을 지니는 이온들의 재

결합으로 인하여 생성 케리어의 수가 감소하기 때문인 것[16]으로 사료된다. 난연제를 첨가한 클로로프렌 고무의 경우, CR-1에 비해 높은 체적 저항율을 나타내고 있으며 수산화마그네슘을 첨가한 CR-3이 가장 우수한 체적 저항율을 보이며, 방사선 조사에 따른 특성의 변화도 가장 우수한 것으로 나타났다. CR-3를 제외한 다른 종류의 난연제를 첨가한 경우는 모두 유사한 수치를 보였으며, 방사선 열화에 따른 체적저항율의 변화도 유사하게 나타났다. 기존의 연구에서 고분자 재료에 금속수화물을 첨가하여 열화시킨 경우 고분자 재료에서 측쇄의 절단과 도전성 이온이 증가하기 때문에 미첨가 시편에 비해 낮은 체적 저항율을 보였지만, 본 연구에서는 반대의 경향을 보이고 있어 향후 추가적인 실험이 필요한 것으로 생각된다.

난연제 첨가 클로로프렌 고무의 표면특성 평가를 위해 표면 저항율을 측정한 결과를 그림 5에 나타내었다. 표면저항율의 크기도 체적저항율의 경우와 유사하게 순수 클로로프렌 고무가 가장 낮은 수치를 나타내었으며, 수산화마그네슘과 암모늄 폴리포스페이트를 첨가한 CR-3와 CR-2는 높은 값을 보였다. 그러나 CR-2는 방사선 조사에 대해 급격한 표면저항율의 감소를 보이고 있으며, CR-3도 체적저항율 결과와는 달리 1000 kGy 이후 급격한 감소를 나타내고 있다. 이것은 방사선 조사 후 시편의 상온보관으로 인하여 시편의 표면에서 공기중 산소와 반응하여 급격한 산화반응이 발생하기 때문인 것으로 생각된다.

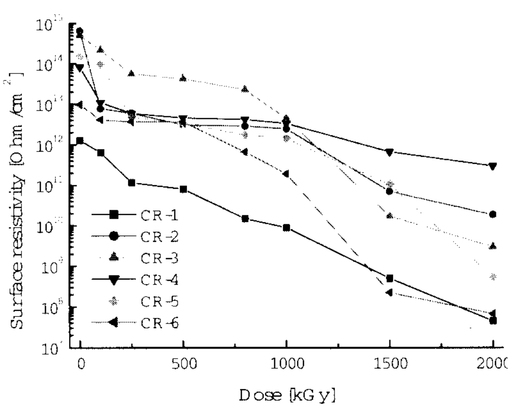

그림 5. 방사선 조사에 따른 CR의 표면저항율.
Fig. 5. Surface resistivity of CR containing fire retardants as a function of the radiation dose.

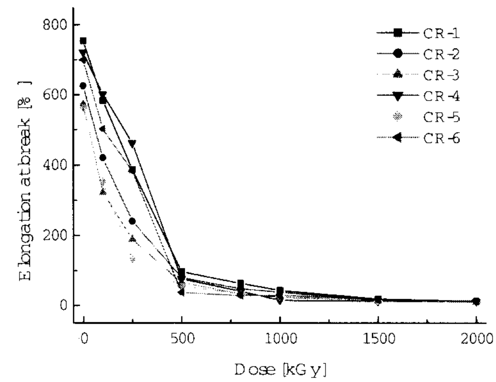

그림 6. 방사선 조사에 따른 CR의 파단시 연신율.
Fig. 6. Elongation at break of CR containing fire retardants as a function of the radiation dose.

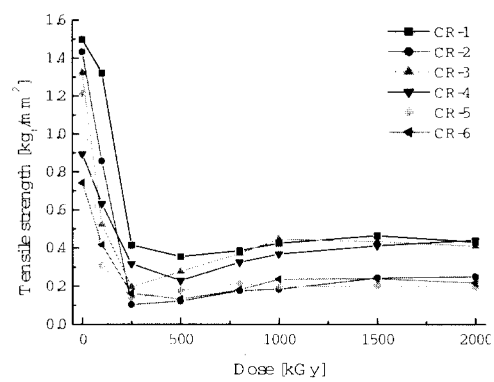

그림 7. 방사선 조사에 따른 CR의 인장강도.
Fig. 7. Tensile strength of CR containing fire retardants as a function of the radiation dose.

그림 6과 7은 난연제를 첨가한 클로로프렌 고무의 방사선 조사에 따른 기계적 특성 변화로 파단시 연신율과 인장강도를 측정한 결과이다. 케이블 절연재료로 파단시 연신율과 인장강도는 초기치의 50 % 감소치를 열화에 대한 수명의 한계로 규정하고 있으며, 케이블 절연재료로 적합한 파단시 연신율의 초기치는 대략 500 % 이상의 것을 사용하고 있는 실정이다[17]. 본 연구에서 사용한 클로로프렌 시료의 연신율은 그림 6에서 보는 바와 같이 전부 건전상태에서 550 % 이상의 파단시 연신율

을 나타내고 있으며, 난연제를 첨가하지 않은 경우 약 750 %로 우수한 유연성을 가지는 것으로 나타났다. 난연제를 첨가한 시편의 파단시 연신율은 CR-1의 경우보다 모두 감소하는 것으로 나타났으며, 이것은 무기질 충진제 역할을 하는 난연제의 첨가로 시편 내부에서 형성되는 유기질의 상대적 감소에 기인하는 것으로 해석된다. 방사선 조사에 따른 변화는 500 kGy까지 급격하게 감소하다가 그 이상의 선량에서는 포화하는 경향을 나타내었다. 이러한 연신율의 저하는 방사선 조사로 인해 시편이 취성으로 변하면서 탄성을 잃게 되고, 500 kGy 이후의 선량에서는 시편의 주쇄 절단으로 인하여 더 이상의 감소가 나타나지 않은 것으로 보인다. 250 kGy에서의 연신율 측정결과를 비교해보면 CR-1, CR-4, CR-6이 다른 시편에 비해 연신율의 감소 정도가 적게 나타나 우수한 내방사선 특성을 나타낸 것으로 볼 수 있다. 인장강도의 경우도 그림 7에 나타낸 바와 같이 초기치에 대해 250 kGy의 방사선 조사선량에서 급격한 감소를 보이다 다시 약간의 증가와 함께 포화하는 경향을 나타내고 있다. 본 연구결과에서 파단시 연신율과 인장강도의 방사선에 대한 경향은 유사하게 나타나고 있으나, 방사선 미조사시 인장강도와 초기 100 kGy에서는 연신율 측정결과에서 보여주는 바와 같이 파단시 급격히 시편이 늘어난 상태이므로 파단되는 부분의 단면적이 초기 단면적에 비해 현저히 감소하여 단면적에 대한 힘으로 나타나는 인장강도의 수치가 급격히 증가한 것으로 보인 것으로, 실제 인장강도는 그림 7에 나타낸 것보다 적을 것으로 사료된다.

기계적 특성 측정결과에서 가장 우수한 내방사선성을 가지는 난연제는 탄산칼슘과 삼산화안티몬을 첨가한 CR-4, CR-6으로 나타났으며, 이것은 난연제를 첨가하지 않은 순수한 클로로프렌 고무와 유사한 정도의 유연성을 보였다.

4. 결 론

방사선 환경에서 사용되는 케이블 절연재의 난연성 향상을 위해 클로로프렌 고무에 난연첨가제로 암모늄 폴리포스페이트, 수산화마그네슘, 탄산칼슘, 수산화알루미늄, 삼산화안티몬을 각각 30 phr 씩 첨가한 시편의 연소시험, 전기적 특성, 기계적 특성을 방사선 조사 전후에 대하여 검토하였다.

1) 클로로프렌 고무의 난연제 첨가에 따른 한계산소지수와 분해개시온도 측정 결과, 가장 우수한 특성을 나타내는 난연제는 수산화마그네슘과 탄산칼슘으로 나타났으며, 방사선 조사에 따르는 난연 특성의 저하가 작게 나타나는 시편은 난연제를 첨가하지 않은 클로로프렌 고무와 수산화마그네슘을 첨가한 경우인 것으로 나타났다.
2) 클로로프렌 고무에 첨가한 난연제 중 가장 우수한 전기절연 특성을 보인 난연제는 수산화마그네슘과 암모늄 폴리포스페이트로 나타났으며, 두 경우 모두 방사선 조사에 따른 성능의 저하는 유사하게 나타났다.
3) 기계적 특성 변화에 대한 첨가제의 효과는 미소한 차이를 나타내었으나, 순수한 클로로프렌 고무와 암모늄 폴리포스페이트, 수산화마그네슘, 삼산화안티몬을 첨가한 순서로 열화에 대한 연신율의 저하가 적게 나타났다.

방사선 열화에 따르는 난연특성, 전기적, 기계적 특성변화를 관측하여 클로로프렌 고무의 난연제 첨가효과를 검토한 결과, 수산화마그네슘이 가장 우수한 결과를 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업 지원을 받았기에 감사드립니다.

참고 문헌

[1] F. Bouquet and J. Winslow, "Radiation Data for Design and Qualification of Nuclear Plant Equipment", EPRI Report, NP-4172SP, 1985.

[2] D. W. Clegg and A. A. Collyer, "Irradiation Effects on Polymers", ISBN 1-85166-563-3, pp. 360-370, Elsevier Science Publishers, 1991.

[3] Maurice Morton, "Rubber Technology", p. 339, and p. 360, 1987.

[4] W. Tillar Shugg, "Handbook of Electrical and Electronic Insulating Materials", p. 26, and p. 121, 1986.

[5] W. C. Kuryl and A. J. Papa, "Flame

retardancy of polymeric materials", Marcel Dekker, New York, Vol. 3, p. 29, 1980.

[6] H. K. Kim, J. H. Keun, H. S. Hahm, M. S. Pyoun, and H. S. Park, "Preparation of Phosphate Type Softening Flame Retardant for Synthetic Fibers and Its Characterization", J. Kor. Fiber Soc. 30, p. 752, 1993.

[7] C. M. Dick, J. J. Liggat, and C. E. Snape, "Solid state 13C NMR study of the char forming processes in polychloroprene", Polymer Degradation and Stability, Vol. 74, p. 397, 2001.

[8] B. Ivan, J. P. Kennedy, S. S. Plamthottam, T. Kelen, and F. Tudos, "Characterization of polychloroprenes and cationically modified polychloroprenes by thermal dehydrochlorination", J. Polym. Sci.: Polym. Chem. Ed., Vol. 18, p. 1685, 1980.

[9] Y. Miyata and M. Atsumi, "Spectroscopic studies on the initial stages of thermal degradation of polychloroprene", J. Polym. Sci.: Part A : Polym. Chem., Vol. 26, p. 2561, 1988.

[10] D. D. Jiang, "Thermal degradation of cross-linked polyisoprene and polychloroprene", Polymer Degradation and Stability, Vol. 68, p. 75, 2000.

[11] P. Budrugeac and E. Segal, "Thermal degradation of polychloroprene rubber under isothermal and non-isothermal conditions", Journal of Thermal Analysis, Vol. 53, p. 441, 1998.

[12] P. E. Mallon, W. J. McGill, and D. P. Shillington, "A DSC study of the cross-linking of polychloroprene with ZnO and MgO", J. Appl. Polym. Sci., Vol. 55, p. 705, 1995.

[13] Young-Il Mok, "A Review of the Flame Retardation of Flamable Polymer", Chemical Engineering, Vol. 15, No. 4, 1977.

[14] 배현제, "電氣 電線 絶緣材料", LG전선연구소, p. 138, 1987.

[15] Z. Wang, G. Wu, Y. Hu, and Y. Ding, "Thermal degradaion of magnesium hydroxide and red phosphorus flame retarded polyethylene composites", Polymer Degradation and Stability, Vol. 77, p. 427, 2002.

[16] 김기엽, 이 청, 김규백, 류부형, "난연제가 첨가된 Chlorosulfonated Polyethylene의 방사선 열화에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 12권, 10호, p. 854, 1999.

[17] 김기엽, 이 청, 김재희, "NSSS 기기 건전성 검사·진단 기술 개발 기술보고서", 한국원자력연구소, 2004.