

원전 케이블의 열적 열화 평가

Evaluation on Thermal Ageing of Cable in Nuclear Power Plant

김기엽*, 이청*, 김평중*, 김진아*, 류부형**

* 한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150

** 동국대학교, 경북 경주시 석장동 707

요약

원전 케이블의 절연재료와 피복재료로 사용되는 Ethylene propylene rubber (EPR), Chloroprene rubber (CR)의 열적 열화에 대한 평가를 수행하였다. 열적 열화는 열중량 분석을 통하여 구한 CR의 활성화에너지를 이용하여 Arrhenius 외삽법에 의해 120°C에서 가속 열화시켰으며, 열화에 따른 난연특성, 중량감소온도의 변화를 확인하였으며, 파단시 연신율 및 교류절연과괴강도의 관계를 검토하였다. 파단시 연신율의 변화에 따른 열가속 열화 EPR의 임계치는 70년으로 나타났다.

Abstract

Thermal degradation of Ethylene propylene rubber (EPR) and Chloroprene rubber (CR), which is used for cable material insulator and sheath materials in the nuclear power plants, is examined. The thermal degradation is accelerated at 120°C by Arrhenius exploit method using the activation energy calculated by thermogravimetric analysis. The decomposition temperature and flame retardant characteristic are verified for thermally aged CR. The relationship between elongation at break and AC breakdown strength are also investigated. The threshold value of thermally aged EPR is 70 year in the change of elongation at break.

1. 서론

전력계통 및 전력기기의 대용량화에 따라 전력케이블과 기기의 절연재료로 유기고분자 소재가 주로 사용되는 추세이나, 유기고분자 소재는 열 및 방사선에 대해 취약한 단점을 가져 이로 인한 각종 기기의 오동작이나 절연성능의 저하는 실로 심각한 문제라고 할 수 있다. 특히, 방사선 장내에서 사용되어지는 소재들은 내열성 및 내방사선 특성을 필수적으로 가져야 하나, 아직 절연재의 열적 열화와 방사선 열화에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 또한 전력케이블에 있어, 케이블 절연과피의 주된 요인이 되는 경년열화에 관한 방사선의 영향은 방사선 장내의 피폭 뿐만 아니라 고압 또는 특고압 송배전 계통에서는 근접한 케이블 사이에서도 전자선 및 방사선의 집적에 의해 절연성능이 저하할 가능성이 높기 때문에 열화평가에 중요한 요인이라 할 수 있다[1]. 원자력발전소와 같은 방사선 장내에서 사용하는 케이블은 크게 전력, 제어, 계측 케이블의 세 종류로 구분되어지며, 일반 케이블의 사양에 비해 까다로우며, 안전성이 높은 Class 1E 등급의 조건을 만족시켜야 한다[2]. 원자력발전소의 경우는 사람의 진입이 어려운 원전 리액터 내부에서 사고가 발생하더라도 제어, 계측 케이블은 어느 정도 정상적인 작동이 이루어져야 하며, 이러한 사고에 대비하여 케이블의 제조 후 냉각재 상실 사고(Loss of coolant accident: LOCA)의 경우를 모의한 실험을 거쳐야 한다. LOCA 시험에서는 케이블의 가혹조건으로 고온, 방사선, 고압의 증기, 화학적 분무 등을 들고 있으며, 이러한 열화요인들 중 고온(열)과 방사선은 가장 일반적으로 잘 알려진 열화요인이다. 또 실제 케이블 LOCA 시험의 요소로 고온의 조건에서 수 시간 노출시킨 후, 고온과 선량율의 변화에 따른 방사선 조사를 함께 수행한 후 케이블 재료의 물성을 측정하여 수명을 예측하기도 한다[3,4].

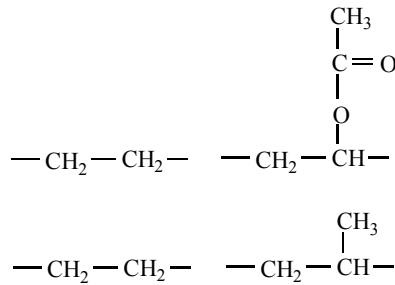
케이블 재료의 절연재 및 피복재로는 가교폴리에틸렌, 에틸렌-프로필렌 고무, 클로로프렌 고무, 클로로술포네이티드 폴리에틸렌(Chlorosulfonated polyethylene) 등이 사용되고 있으며, 원전 계열에서 사용하는 케이블은 그 용도에 따라 적절한 재료로 가공한 케이블을 사용한다. 또 원전 케이블은 고온, 고압 뿐만 아니라 방사선 등의 특수한 환경에서도 특성을 유지해야 하기 때문에, 첨가제의 종류가 다양하여 제조 케이블의 다양한 열화시험을 통하여 열화 및 수명을 예측하게 되며, 내열성 및 내방사선에 관한 여러 실험들이 외삽법을 이용한 가속열화 시험으로 수행되고 있다[3].

원전 케이블 재료의 수명한계를 결정짓는 임계특성으로는 인장시험(ISO/R 527), 충격시험(ISO 179), 체적저항율 및 표면저항율(IEC 93), 내전압시험(IEC 243) 경도시험(ISO 48, ISO 868) 등으로 측정하여 초기치의 50%, 10% 감소시점을 기준으로 하고 있다[5]. 본 연구에서는 Arrhenius 반응속도식에 따라 열 가속열화시킨 고리 3, 4호기에 설치된 케이블 재료의 물리적 성질과 열분석을 통하여 열적 열화의 정도와 수명을 예측하였다.

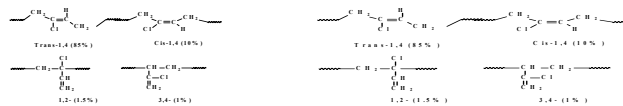
2. 실험

2.1. 원재료

실험에 사용한 케이블은 1985년 고리 3, 4호기의 600V급 계측케이블과 제어케이블을 대상으로 하였으며, 절연재와 피복재의 주요 재질은 Ethylene propylene rubber (EPR)과 Chloroprene rubber (CR)로 구성되어 있다. EPR은 우수한 내방사선 특성을 지녀 가스냉각 방식의 AGR(Advanced gas cooled reactor) 원전 계통에서 Acrylonitrile butadiene rubber (NBR)과 함께 O-ring과 같은 봉인재료에도 주로 사용되고 있는 실정이다. CR은 염화 비닐수지(PVC)와 같이 주쇄에 염소를 함유하고 있는 고분자 재료로 난연성과 내유성이 우수한 고분자 재료이다. 클로로프렌 고무는 주 반복 구조인 trans-1,4 외에 cis-1,4, 1,2 그리고 3,4의 네 가지 반복 구조를 가지고 있으며, 이 반복 구조들의 특성과 농도가 CR의 열 안정성과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다[6]. 본 연구에서 사용한 EPR과 CR의 화학적 구조를 그림 1에 나타내었다.



(a) Poly(ethylene-propylene) copolymers



Ⓐ Trans-1, 4

Ⓑ Cis-1, 4



Ⓒ 1, 2-

Ⓓ 3, 4-

(b) Chloroprene rubber

Figure 1. Main structure units of EPR and CR

2.2. 열열화

2.2.1. 활성화에너지의 측정

TGA 측정으로 Flynn-Wall-Ozawa 방정식을 이용한 열분해 반응의 활성화 에너지는 다음에 나타낸 식(1)을 통하여 구할 수 있다. 이는 여러 승온속도에서의 중량감소와 온도에 대해 직접적으로 반응차수에 관계없이 적분법으로 활성화에너지를 구하는 것이다[7].

$$\log F(\alpha) = \log \frac{AE_a}{R} - \log \beta - 2.315 - 0.4567 \frac{E_a}{RT} \quad (1)$$

A : 지수변환인자, β : 승온속도 [K/min]
 R : 이상기체상수 (=8.314 J · mol⁻¹K⁻¹)
 E_a : 열분해 활성화에너지 [kJ/mol]

식(1)을 이용하여 활성화에너지를 구하기 위하여 본 연구에서는 conversion level을 5.0%로 설정하여 1, 2, 5, 10°C/min의 승온속도로 측정한 열중량 감소곡선을 이용하였다.

2.2.2. 활성화에너지에 의한 케이블 재료의 등가수명예측

아레니우스 식은 사용온도에 따른 반응속도에 관련한 식으로 이에 의해 화학적 반응의 속도 예측에 사용되며, 활성화에너지의 측정, 사용온도와 기간에 따른 등가수명을 예측하는데 일반적으로 사용된다. 아레니우스 식은 식(2)와 같이 비율상수 (reaction rate) k 와 온도 T 의 관계로 표현되어지며, 식(2)의 양변에 로그를 취해 식(3)과 같이 전개할 수 있다.

$$k = A e^{-E_a/RT} \quad (2)$$

$$\ln\left(\frac{k_2}{k_1}\right) = \left(\frac{E_a}{R}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right) \quad (3)$$

k_1 : 가속열화시간 [hour], k_2 : 등가수명 [hour]
 T_1 : 가속열화온도 [K], T_2 : 사용온도 [K]

TGA 측정으로부터 구한 계측, 제어케이블 피복재료의 활성화에너지 126.112, 136.216 [kJ/mol]를 이용하여, 연속허용온도 60°C를 기준으로 가속열화온도 120°C에서 각각 10년에서 50년까지의 가속열화 등가수명을 계산하면 표 1과 같다. 표 1에서 계측케이블을 CAB1, 제어케이블을 CAB2로 표시하였으며, 열적 열화에 대한 등가수명에 해당하는 열화 기간(year)을 아래첨자로 표기하였다.

Table 1. Equivalent lifetime of class 1E cable materials at $T_1 : 120^\circ\text{C}$, $T_2 : 60^\circ\text{C}$

등가수명	초기	10년	20년	30년	40년	50년
Sample No.	CAB1 ₀	CAB1 ₁₀	CAB1 ₂₀	CAB1 ₃₀	CAB1 ₄₀	CAB1 ₅₀
가속열화시간 (시간)	0	84.1	168.3	252.4	336.5	420.6
Sample No.	CAB2 ₀	CAB2 ₁₀	CAB2 ₂₀	CAB2 ₃₀	CAB2 ₄₀	CAB2 ₅₀
가속열화시간 (시간)	0	48.2	96.4	144.6	192.9	241

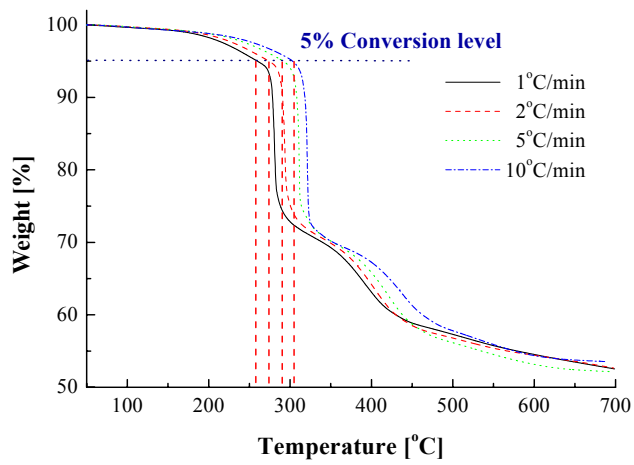


Figure 2. TG thermograms of Cable sheath material (CR) at various heating rates

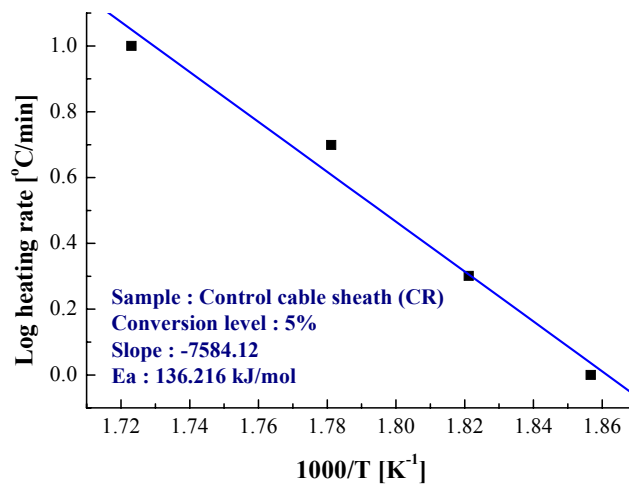


Figure 3. Arrhenius plot of heating rate, temperature of 5% conversion data

2.3. 측정

원전 케이블 피복재료의 활성화에너지를 이용하여 최대사용온도를 60℃로 모의한 후, 120℃의 oven에서 수명에 해당하는 시간만큼 가속열화시켜, 케이블 절연재료는 절연성능의 평가로 교류절연파괴강도와 기계적 특성으로 파단시 연신율을 측정하였으며, 피복재료는 난연특성으로 한계산소지수, 열중량 분석을 측정하였다.

2.3.1. 파단시 연신율

열적 열화에 따른 케이블 절연재료(EPR)의 파단시 연신율의 측정은 인장시험기(Instron, Model 1130)를 사용하여 실온에서 측정하였다. ASTM D 638 규정에 의거하여 [8] dumb-bell 형태의 시편 양끝을 지그에 3×10^5 MPa의 압력으로 고정시킨 후 시편이 파단할 때까지 인장시켜 식 (4)와 같이 시편의 초기길기와 파단 후 시편의 길이를 비교하여 파단시 연신율을 구하였다. EPR의 인장실험시 Load cell은 500 kg으로 하였으며, Crosshead speed는 50 mm/min으로 하여 시료의 파단시까지 인장시켰다.

$$\epsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100 \quad (4)$$

ϵ : 파단시 연신율 (%)

L : 파단 후의 길이, L_0 : 초기 길이

2.3.2. 교류절연파괴강도 측정

교류절연파괴강도는 1차전압 100V, 2차전압 0~50kV, 60Hz 정격의 교류내압시험장치를 사용하여 평등전계를 구성하는 구대 구 전극사이에 시편을 장착하여 인가 교류전압을 3kV/sec의 속도로 상승시키면서 측정하였다. 파괴전압의 세기는 각 시편의 두께와 절연파괴시의 전압을 10회씩 측정하여 그 평균값으로 하였으며, 시편의 연면방전을 피하기 위해 시편을 실리콘유에 함침하여 측정하였고 절연파괴전압과 두께를 구한 후 $V = E \cdot d$ 의 관계를 이용하여 전계의 세기를 구하였다. (V : 절연파괴전압 [kV], E : 절연파괴강도 [kV/cm], d : 시편의 두께 [cm])

2.3.3. 한계산소지수 측정

열적 열화에 따른 케이블 피복재료의 난연성능 변화는 한계산소지수법을 이용하여 평가하였으며, 한계산소지수의 측정은 JIS D1201 규정에 의거하여 측정하였다. 먼저 시료를 공기 중에서 연소시키면서 연소속도를 파악하여 대략의 산소농도를 추정하며 본 실험의 경우 산소농도 추정치 27%에서 시작하였다. 시편은 각각 120 × 60 mm의 크기로 재단한 후 연소 원통 내의 총 유량을 11.4 ℓ/min으로 하고 농도에 대응하는 산소 및 질소의 유량을 유량계를 보면서 밸브로 조절한 후 시편을 받침대 사이에 끼우고, 연소 원통 내에

똑바로 세운다. 점화기에 착화하여 불꽃의 길이를 6~25 mm로 조절하여 시편의 상단을 착화하고 충분히 착화되었는 지를 육안으로 확인한 후에 점화원을 제거하였다. 그리고 즉시 연소시간과 연소된 길이의 측정을 시작하였다. 한계산소농도는 시편의 연소시간이 5 cm를 넘는 경우에 있어서는 점차적으로 산소농도를 내리고 반면 시료에 점화한 화염이 5 cm 이내에 꺼지는 경우에는 산소농도를 높이면서 한계산소농도를 구하였다. 3회의 측정치를 평균하여 그 시편의 한계산소지수로 하였다.

2.3.4. 열중량 분석

케이블 피복재료(CR)의 열적 열화에 대한 화학적 변화를 분석하기 위하여 열중량 분석을 TA Instrument사의 Thermogravimetric Analyzer (Model. TGA 2950)를 사용하여 수행하였으며, 질소 분위기에서 50℃로 평형을 유지한 후, 10℃/min의 승온속도로 시료의 중량변화를 측정하였다. 열적 열화에 따른 케이블 재료의 분해 정도를 열화에 따라 비교, 분석하기 위하여, 시료 중량의 10%, 15%, 20% 감소시점에서의 온도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 파단시 연신율

그림 4는 열가속 열화에 따른 원전 케이블 절연재료 EPR의 파단시 연신율의 변화를 나타낸 것이다. 본 연구에서 사용한 고리 3, 4호기에 사용되는 600V급 제어케이블과 계측케이블의 절연재료로 사용된 EPR의 조성은 동일하며, 열 가속열화의 진행에 따라 파단시 연신율은 감소하는 경향을 나타내었다. 본 열열화에 의한 연신율 측정시험에서는 원전 수명주기인 40년에도 연신율의 감소는 임계치인 건전상태의 50% 이상을 나타내고 있었으며 40년 이상에 상당하는 열 가속열화 시편에서는 급격한 감소를 나타내었다. 또 ISO 37에서 규정하고 있는 원전 케이블의 파단시 연신율의 수명임계치인 건전상태의 50% 시점은 약 70년에 해당하는 것으로 나타났다. 또 이러한 연신율의 감소는 열적 열화에 따라 발생한 축쇄의 절단으로 인해 가교반응이 작용하여 망상구조를 형성하였으며, 이로 인해 탄성을 잃었기 때문인 것으로 사료된다. 일정 기간 이상의 열화 영역에서는 가교반응과 산화반응이 경쟁적으로 발생하기 때문에[9], 열적 열화의 정도가 증가하더라도 케이블 절연재료의 화학적 구조적인 변화는 현저하게 발생하지 않아 파단시 연신율은 포화하는 경향을 나타낼 것으로 보인다.. 그러나 실제 현장의 경우는 열적 열화 뿐만 아니라 방사선에 의한 열화 및 전계, 기계적 stress 등의 복합적인 열화가 발생하므로 본 열 가속열화 실험에서 나타난 파단시 연신율을 이용한 임계치 70년과는 상당한 차이가 있을 것으로 사료된다. 기존의 연구[5]에서 원전 케이블 절연재료 EPR의 방사선 열화를 이용한 연신율의 평가에서는 저선량의 방사선 열화에서 급격한 감소를 나타낸 반면, 열 가속열화를

독립적으로 수행한 본 연구에서는 상당한 열화가 진행된 후에 임계치를 나타내었다. 이것은 케이블 재료의 가속열화 과정에서 ^{60}Co γ -선의 우수한 투과성으로 기인하는 것으로 방사선 열화의 경우는 피복재의 유무에 상관없이 열화원(^{60}Co γ -선)이 절연재에 영향을 주었으며, 열 가속열화의 경우는 피복재로 인해 절연재에 영향을 미치지 못한 것으로 보인다. 열화의 진행이 복합적이란 측면을 고려하여 독립적인 열화에 있어서는 열화평가에 대해 충분한 고려가 있어야 할 것으로 사료된다.

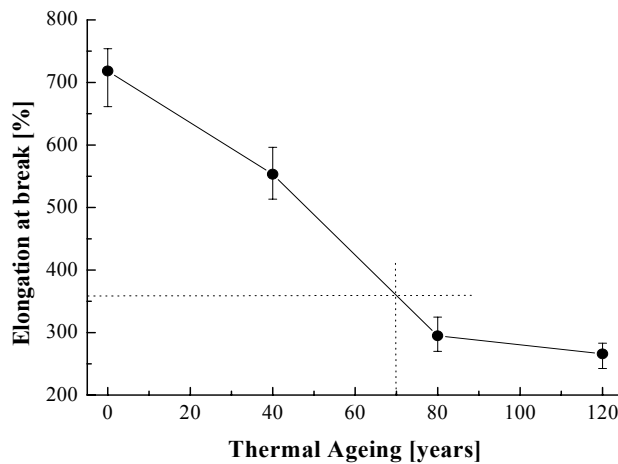


Figure 4. Elongation at break of thermally aged cable insulator material (EPR)

3.2. 교류절연파괴강도

그림 5는 열적 열화에 따른 원전 케이블 절연재료의 교류절연파괴강도를 나타낸 것이다. 열 가속열화에 따른 EPR의 교류절연파괴강도는 20년 상당의 열화까지는 변화의 폭이 적다가 20~40년 사이에서 큰 저하현상을 나타내었고 40년 이후에서는 포화하는 경향을 나타내었다. 이러한 현상으로 미루어 볼 때 0~20년 상당의 열화 사이에서는 열적 열화에 의한 축쇄나 주쇄의 붕괴, 절단 작용이 두드러지지 않아 교류절연파괴강도에 큰 변화를 보이지 않다가 20년 상당의 열화 이후 축쇄와 주쇄의 절단과 붕괴에 의해 생성된 케리어, 가스기포, 불순물, 도전성 이온의 급격한 증가로 교류절연파괴강도가 급격하게 떨어진 후 40년 상당의 열화 이후 더 이상의 절단과 붕괴현상이 나타나지 않아 포화하는 경향을 나타낼 수 있다[10].

EPR의 열 가속열화에 따른 교류절연파괴강도는 열화가 진행됨에 따라 그 수치가 감소하는 경향을 나타내어 원전 케이블의 열화에 대한 평가지침으로 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

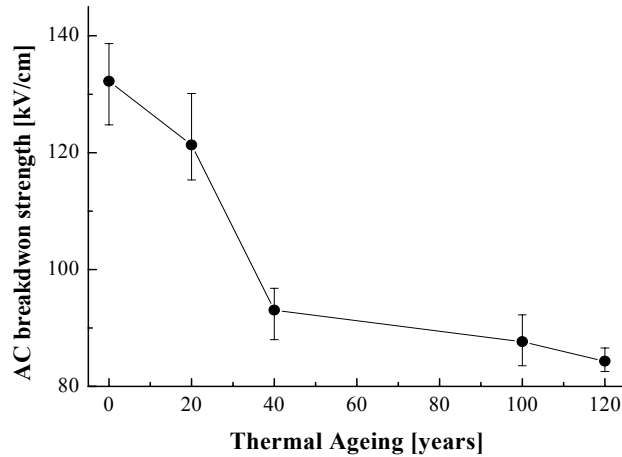


Figure 5. AC breakdown strength of thermally aged cable insulator material (EPR)

3.3. 한계산소지수

그림 6은 열 가속열화에 따른 케이블 피복재료(CR)의 한계산소지수와 완전연소에 이르는 시간을 나타낸 것이다. 건전상태의 케이블 피복재료는 한계산소지수 34 정도의 수치를 나타내었으면, 완전연소에 소요되는 시간은 140초로 나타났다. JIS D1201 규정에서는 한계산소지수 30% 이상을 난연 1등급으로 규정하고 있으며, 건전상태 CR의 한계산소지수 34는 염소를 함유하고 있는 CR에서 연소시 발생하는 화학반응이 역행 또는 완료되고 염소를 함유하는 무거운 기체를 발생시켜 산소의 접근과 열전달을 억제하기 때문에 우수한 난연특성을 나타내고 있다. 열 가속열화에 대한 한계산소지수는 전반적으로 열화에 대해 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 20년 상당의 열화 이후 포화하는 경향을 나타내었다. 이러한 현상은 열 가속열화에 의한 CR 측쇄의 절단현상과 염소를 제외한 다른 유기성분의 휘발량이 증가하여 상대적으로 염소성분의 양이 증가하기 때문에 나타나는 현상이며, 난연특성은 가속열화시간의 증가로 인해 향상된 것처럼 보인다. 반면 열화 시편의 완전연소에 소요되는 시간은 열화에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 이것은 한계산소지수의 증가와 같이 열화에 따른 유기성분의 휘발에 기인한 것으로 생각된다.

기존의 연구[11]에서 클로로프로렌 고무의 방사선 열화에 따른 한계산소지수 및 완전연소에 이르는 시간도 본 연구에서 수행한 열 열화에 따른 한계산소지수의 변화와 유사한 결과를 나타내었으며, 클로로프로렌 고무의 방사선 열화에 대해서는 약 100 kGy의 선량에서 한계산소지수의 급격한 증가를 보였으며 그 이후 포화하는 경향을 나타내었다. 기존 연구 결과와 비교하여보면, CR의 난연특성 변화에서는 열적 열화 10년 상당과 방사선 열화

100 kGy에서 유사한 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

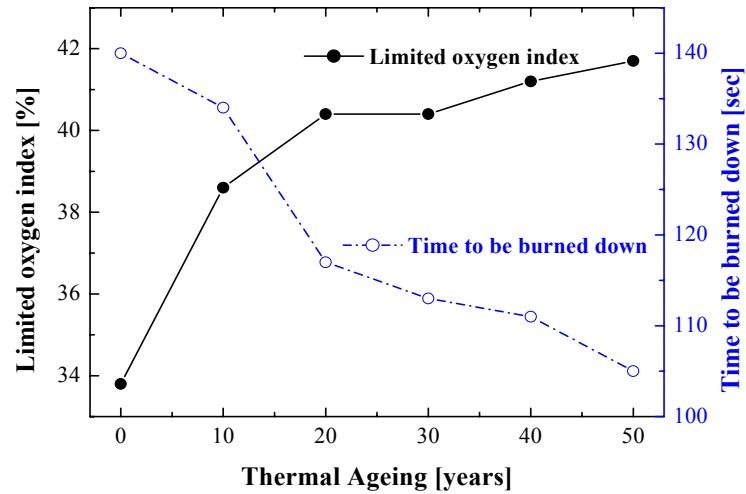
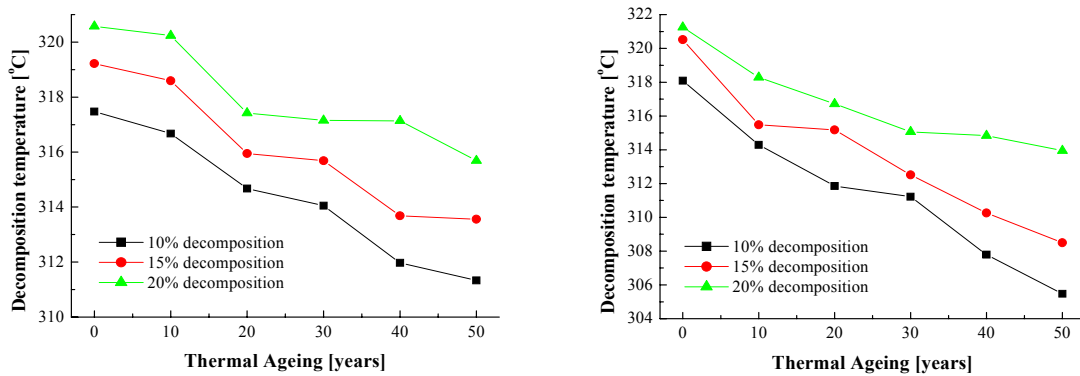


Figure 6. Limited oxygen index and time to be burned down of cable sheath material (CR) as a function of thermal ageing

3.4. 열중량 분석

열중량 분석을 통한 고분자 재료의 열화평가는 일정 함량의 분해 정도에 따른 5%, 10%, 20% 중량감소온도 등으로 평가되며, 이것은 열화에 대한 파단시 연신율과 잘 대응됨이 기존의 연구에서 밝혀졌다[12,13]. 원전 제어 및 계측케이블의 피복재료인 CR의 열가속열화에 따른 열분해 특성으로 질소 중 10°C/min의 속도로 승온시킨 열중량 분석 곡선의 10, 15, 20% 분해시점에서의 온도를 그림 7에 나타내었다. 피복재료의 열중량 분해 곡선은 그림 2에 나타낸 것과 같이 두 단계의 분해 반응을 보이고 있으며, 첫 번째 단계는 270°C 이상에서 빠르게 발생하는 탈염화수소 반응이며, 두 번째 단계는 350°C 부근에서 시작되는 반응으로 클로로프렌 고무가 열분해되어 탄화수소를 생성하는 반응이다[14]. 첫 번째 단계의 주 반응인 탈 염화수소 반응은 반응을 통해 쉽게 이중결합을 형성할 수 있는 염화 비닐수지의 경우와 달리 주성분을 이루는 trans-1,4(그림 1)처럼 이중결합에 염소가 결합된 형태에서는 발생하기 어렵고, 1,2-와 같은 다른 구조의 반복단위에서 발생하게 된다[14]. 첫 번째 단계의 탈 염화수소 반응에 의해 분해가 가능한 염소의 약 90% 정도가 분해된다. 방사선을 조사하지 않은 클로로프렌 고무의 열분해 곡선을 보면 100°C 전후에서 서서히 중량이 감소되기 시작하여, 260°C에서 빠르게 진행되었다. 첫 번째 열분해 반응에 의한 분해 속도는 320°C에서 감소하였으며, 전체 클로로프렌 고무 중량의 약

30%가 감소하였다. 그림 7에 나타난 10%, 15%, 20% 분해온도의 경향은 계측 및 제어케이블 모두에서 열 열화의 정도에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있다. 열 가속열화 시간이 증가할수록 CR의 첫 번째 열분해 온도는 낮아졌으며, 열분해에 따른 중량감소량도 작아졌다. 또 열화시킨 CR의 열분해 곡선에서 두 번째 단계의 경우는 열화시간에 따라 차이가 매우 작게 나타났다. 이것은 열적 열화가 CR에 포함되어 있는 염소의 제거 반응에 더 큰 영향을 미치기 때문인 것으로 보이며, 분해되어 탄화수소를 형성하는 두 번째 단계에는 거의 영향을 미치지 않기 때문으로 보인다.



(a) Control cable sheath

(b) Instrumental cable sheath

Figure 7. Decomposition temperature of thermally aged instrumental and control cable sheath material (CR)

4. 결론

원전 케이블 재료의 열분해 활성화에너지를 이용, 열 가속열화하여 절연재료인 EPR과 피복재료인 클로로프로렌 고무에 대하여 파단시 연신율, 교류절연파괴강도, 한계산소지수, 열중량 분석 등의 측정을 하였으며, 열적 열화와의 관계를 검토한 결과 다음과 같았다.

- 열 가속열화에 따른 케이블 절연재료의 연신율의 변화는 70년 상당의 열화된 경우 초기치의 50% 값을 나타내어 수명임계치는 70년인 것으로 나타났다.
- 열 가속열화에 따른 케이블 피복재료의 난연특성은 열화의 진행에 따라 높은 한계산소지수 값을 나타내었으나 연소에 소요되는 시간은 감소하여 난연성능의 저하를 보였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업지원을 받았기에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] Rex W. Could *et al*, "Practical Aspects of Polymer Stabilisation", British Polymer Journal, Vol.16, 1984
- [2] "IEEE Standard Criteria for Class 1E Power Systems for Nuclear Power Generating Stations", ANSI/IEEE Std. 308-1980, 1980
- [3] D. W. Clegg and A. A. Collyer, "Irradiation Effects on Polymers", ISBN 1-85166-563-3, pp.360-380, Elsevier Science Publishers, 1991
- [4] M. J. Jacobus, "Aging, Condition Monitoring, and Loss-of-Coolant Accident Test of Class 1E Electrical Cables-Crosslinked Polyolefin Cables", NUREG/CR-5772, SAND91-1766/1, Vol.1, 1992
- [5] K. Y. Kim *et al*, "Accelerated Ageing Test of Cable Materials used in Nuclear Power Plants for the Evaluation of Lifetime", KAERI/TR-2424, 2003
- [6] P. E. Mallon, W. J. McGill, and D. P. Shillington, "A DSC study of the crosslinking of polychloroprene with ZnO and MgO", J. Appl. Polym. Sci., Vol. 55, p. 705, 1995
- [7] Annual book of ASTM standards, E1641, "Standard Test Method for Decomposition Kinetics by Thermogravimetry", pp.1041-1045, 1994
- [8] Annual book of ASTM standards, D 638, "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics", Vol.8.02, pp. 52-64, 1998
- [9] K. Y. Kim *et al*, "Dielectric Properties on Gamma Ray Irradiated Low Density Polyethylene", *J. of Korean Insti. of Electric. and Electron. Mater. Engg.*, Vol. 13, No. 11, pp. 938-942, 2000
- [10] J. R. Laghari, "A Brief Survey of Radiation Effects on Polymer Dielectrics", IEEE Trans. on Nuclear Science, Vol.37, No.2, 1990
- [11] K. Y. Kim *et al*, "The Improvement for Fire Retardant and Radiation Resistance Characteristics of Chloroprene Rubber", KAEIR/TR-2743, 2004
- [12] S. Ray *et al*, "Characterization of electron-beam-modified surface coated clay fillers and their influence on physical properties of rubbers", *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 65, pp. 627-640, 2002
- [13] Y. S. Cho *et al*, "Thermal Degradation Kinetics of PE by the Kissinger Equation", *Material Chemistry and Physics*, Vol. 52, pp. 94-97, 1998
- [14] M. Celina *et al*, "Correlation of Chemical and Mechanical Property Changes during oxidative Degradation of Neoprene", *Polymer Degradation and Stability*, Vol.68, pp.171-184, 2000