

## 가속열화 된 CSPE 상태감시법의 유효성 연구

신용덕\*, 구철수\*\*, 김인용\*\*, 이정훈\*  
원광대학교\*, 한국원자력안전기술원

### A Study on Validation of Condition Monitoring Method of Accelerated Thermal Aging CSPE

Yong-Deok Shin\*, Cheol-Soo Goo\*\*, In-Yong Kim\*\*, Jung-hoon Lee\*\*  
Wonkwang University\*, Korea Institute of Nuclear Safety\*\*

**Abstract** – The CSPE cables are used for three years in nuclear power plant. The accelerated thermal aging of chloro sulfonate polyethylene(CSPE) jacket of test cables were carried out for the period equal to 10, 20 and 30 years in air at 90 and 100°C, respectively. The electrical volume resistivity, density, XPS, FE-SEM, EDS and XRF of the accelerated thermal aging of CSPE were measured. The validation of condition monitoring method of accelerated thermal aging CSPE was estimated by them.

The best validation of condition monitoring method of accelerated aging CSPE is electrical volume resistivity because change thermal of the specimen showed distinction.

#### 1. 서 론

미국, 일본, 프랑스 등 원자력 선진국들은 원전 케이블에 대한 수명 예측 및 열화평가를 위한 상태감시 방법들이 꾸준히 연구되고 있다. 국내에서도 신규원전의 수명이 40~60년으로 길어지고, 최초 30년 설계수명을 가진 원전이 연장을 추진하고 있다. 추후에도 계속해서 수명 연장이 예상되며, 40년 설계수명을 갖는 발전소들도 수명연장을 준비함에 따라 케이블의 상태감시방법 및 수명평가방법에 대해 필요성이 증가하고 있다.

국제원자력기구(IAEA)에서 제시한 이상적인 케이블 상태감시 방법인 상태감시법에 유용성 조건[1-2]으로 비 과거적, 비 침투적인 방법이여야 하고, 특성의 변화추정이 가능하고 정상운전 중 성능과 관련 있으며, 추이분석이 가능한 방법으로 원자력 발전소에서 많이 사용하는 케이블 종류와 재질에 적용 가능한 방법이여야 한다.

본 연구에서는 원전 케이블의 전력선으로 상용하고 있는 가속 열화 정도를 달리한 CSPE를 이용하여 상태감시법의 유효성을 연구하고자 한다. 상태감시로는 전기저항률, 상대밀도, FE-SEM, XPS, EDS, XRF를 측정하여 측정결과에 따른 상태감시의 유효성을 확인해 보고자 한다.

이러한 원전 케이블 상태감시와 관련한 다양한 방법들에 대한 연구는 향후 원전 cable의 상태감시 및 열화평가를 통한 수명예측에 대한 신뢰성과 효율성이 높아질 것이다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 시편제작

실험에 사용되는 CSPE는 1995년에 대한전선에서 제작하여 원자력 발전소에 3년동안 설치되었다. CSPE의 가속열화는 공기 중에서 다단형 전기 가열로에 넣고, 발전소 운전온도 50°C에서 30년 동안 자연열화 과정이 모의될 수 있도록 시험시편을 제작하였다. 이를 위해 총 14개 시편 중 상은에 보관한 시편 2개를 제외한 12개 시편을 가지고 온도 90, 100°C로 설정한 후 각 온도군 별로 10, 20, 30년의 열화과정을 모의할 수 있도록 각각의 시편들을 해당되는 시간동안 가속열화 하였으며, 각 케이블 시편은 ‘열화온도-자연열화시간’의 형식으로 명명하였다. 케이블 상태감시가 용이하도록 각 시편에 sand paper를 이용하여 평탄화 시켰다. 가속열화 된 CSPE의 표면의 이물질을 제거하기 위해 초음파 세척기를 이용하여 증류수로 세척 후 30°C에서 1시간 동안 건조시켰다.

##### 2.2 상태감시로 사용한 측정법

상태감시로는 체적전기저항률, 밀도, EDS, XRF, XPS, FE-SEM을 이용하였다. 체적전기저항률은 3단자를로 측정하였고, 측정 장비는 Mitsubishi 사에서 제작한 MCP-HP450을 이용하였다. 밀도는 증류수를 이용하여 Archimedes법으로 각 시편당 5회 이상 측정하였고, 동시에 FE-SEM을 통해 열화정도에 따른 치밀화 정도를 확인하였다. 열화에 따른 화학적 변화를 확인하기 위해서 EDS(S-4800, horiba, Japan), XRF(S4 PIONEER, BRUKER, Germany), XPS(X'Pert PRO MRD, PANalytical B.V., Nederland)을 측정하였다. 이때 체적전기저항률과 밀도를 제외하고, 모두 CSPE 케이블 시편의 안과 밖을 구분하여 각각 측

정하였다.

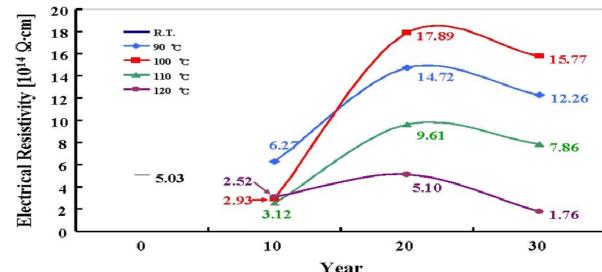
#### 3. 결과 및 고찰

##### 3.1 전기적 상태감시 방법

각각의 온도군에서 각 시간대별로 비슷한 열화추이를 보이고 있다. 10~20년 까지 절연 특성이 향상 되고 있으며 20년 이후부터 절연 특성이 떨어지고 있다. 이는 케이블 제작과정 중 절연공정에서 필연적으로 발생하는 부산물(가스 및 액상으로 존재)들이 절연체 내에 잔류하고 있다가 일정 사용기간 동안 열에 의해 서서히 방출되어 절연재료 분자구조가 안정화 되면서 절연성능이 향상되는 것에 기인한다고 판단된다.

절연공정에서의 주요 부산물의 종류로는 Acetophenon(액상), Cumyl-alcohol(액상), Methane(기체)가 발생되는 것으로 보고되고 있으며, 실제로 이러한 부산물들로 인해 설치초기에 다양한 가스발생으로 케이블 단말 접속제 등을 부풀게 하여 케이블 고장의 원인이 되고 있다. 하지만 가스발생에 대한 제거 문제에 대한 완벽한 해결책은 없는 상황이다[3].

이와 같이 케이블 절연재료의 체적전기저항률 측정결과 값이 cable 절연재료의 열화진행 과정을 뚜렷이 보여주고 있음을 확인하였다.

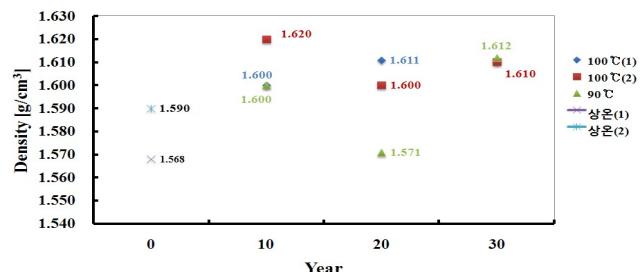


〈그림 1〉 체적전기저항률 온도군/시간대별 그래프

따라서 체적전기저항률을 이용하여 케이블 상태를 파악할 수 있으며, 20년 이후 실험을 통해 절연특성이 떨어지는 기울기를 구한다면 케이블의 잔여 수명예측도 가능할 것으로 판단한다.

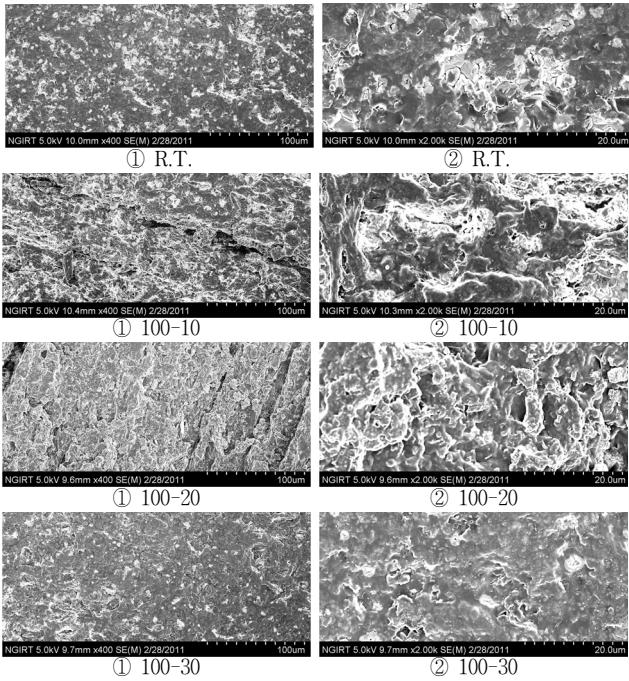
##### 2.1 물성적 상태감시 방법

밀도는 90°C에서의 경향은 체적전기저항률의 준성을 나타나고 있다. 그림 2에서 10년 가속열화 된 CSPE 시편이 가속열화 시키지 않는 시편보다 더 높은 밀도를 가지고 있고, 20년 가속열화 시켰을 시에는 오히려 밀도가 상대적으로 낮아졌다.



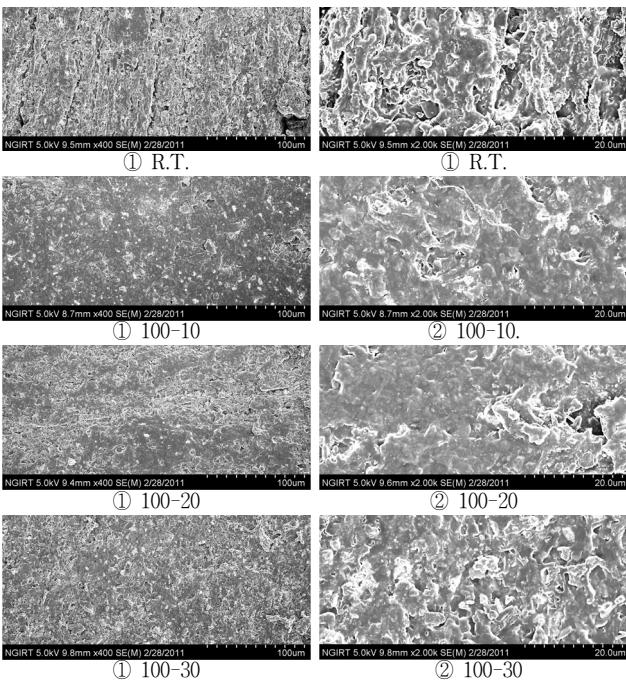
〈그림 2〉 밀도에 대한 온도군/시간대별 그래프

하지만 100°C에서도 열화시간에 따른 밀도는 시간별로 상대적 차이가 커서 체적전기저항률의 경향성과 같지만 뚜렷하게 나타나지 않았고, 가속열화 시간대별 밀도의 변화가 약 0.1 g/cm³이하에서 차이가 나타나기 때문에 매우 정밀하게 측정이 요구 된다.



〈그림 3〉 케이블 안쪽 FE-SEM측정

그림 3와 그림 4는 FE-SEM을 찍은 사진으로 ①은 400배 ②은 2000배 확대하여 찍은 사진이며 각각 케이블 안쪽과 바깥쪽을 나타내고 있다. 그림 3에서 100-20은 거칠기가 높아지고 기공도 많아진 반면 100-30에서는 R.T.과 거의 흡사한 형태를 나타냈다.



〈그림 4〉 케이블 바깥쪽 FE-SEM측정

그림 4에서 R.T.에서 거칠기가 높고, 기공도 많으며 100-10에서는 오히려 기공이 적어지고, 100-20부터 100-30까지는 기공이 점점 증가하였다. 이것은 실제 사용한 CSPE 케이블은 상온에서 3년간 보관하였다. 즉, 안쪽보다는 바깥쪽에 열화가 더 빨리 이루어진 것으로 보이고, 가속 열화 시에도 열을 직접적으로 받는 부분이 바깥쪽이기 때문에 안쪽보다 더 빠른 열화가 진행된 것으로 보인다.

그림 3의 안쪽 보다는 그림 4의 바깥쪽에 열화진행이 빠른 것으로 보이며, 케이블이 안쪽보다 바깥쪽에 안정화 되는 시점이 더욱 빨라 열화과정 동안 기공률이 낮아지면서 경화되는 것으로 보인다.

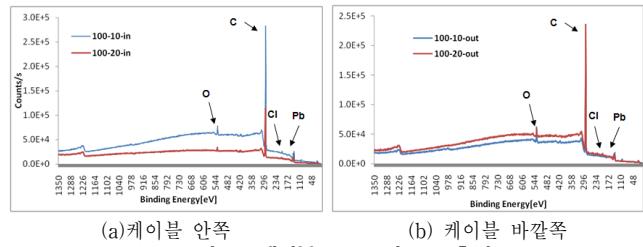
체적전기저항률은 안쪽과 바깥쪽을 통과한 체적전기저항률을 측정하는 것이기 때문에 샘플의 측정범위가 SEM 보다는 체적전기저항률이

더욱 넓고 평균적인 면이 강하다는 것을 보여준다. 또한 밀도 측정 역시 케이블의 안쪽과 바깥쪽을 구분하지 않고, 포괄해서 측정하기 때문에 체적전기저항률의 결과와 경향성이 비슷하게 나온 것으로 보인다.

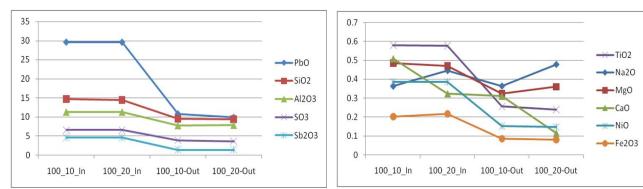
하지만 FE-SEM도 일정 부분은 케이블의 특성을 해석을 하는데 참고할 수 있으나 아직은 SEM으로 자체 상태감사는 쉽지 않을 것으로 판단된다.

### 3.3 화학적 상태감시 방법

EDS 분석에서 검출된 원소는 케이블의 안쪽과 바깥쪽 모두 Cl, C, O, Al, Pb, S, Au, Mg, Ca이 검출 되었지만, 정량적인 분석은 쉽지 않다. XPS는 EDS, XRD에서 공통적으로 나타나는 원소는 Cl, Pb, C이다.



〈그림 5〉 케이블 CSPE의 XPS측정



〈그림 6〉 CSPE 케이블의 XRF

XRF측정 시 샘플의 측정 범위가 깊은 만큼 정량분석에 강한 장비이다. EDS에서 검출되지 않는 원소들이 검출되었고, 초기 물성 및 재료성분, 첨가제 등을 알지 못한 상태이기 때문에 XRF에 검출된 분자들이 100% 맞다고 할 수는 없는 상황이다. 하지만 XRF를 보는 바와 같이 케이블의 시간별 가속열화보다 상대적으로 안쪽과 바깥쪽에 정량분석 시 변화가 더욱 크다는 것을 볼 수 있다. 이것은 안쪽과 바깥쪽의 열화 정도가 달라짐을 재확인 가능하다.

## 4. 결 론

원자력 발전소에서 3년동안 설치된 CSPE 케이블을 각각 90°C, 100°C의 온도분위기에서 10, 20, 30년으로 가속열화 시켰고, 케이블을 이용하여 체적전기저항률, 밀도, XPS, FE-SEM, EDS, XRF를 측정/특성분석을 하였고, 측정 결과에 따른 유효성 평가를 하였다.

- (1) 체적전기저항률은 온도 군으로 비교 시 뚜렷한 경향성을 보이고 있다.
- (2) 밀도는 체적전기저항률의 경향성은 90°C에서 일치하며 100°C에서는 평균치는 경향성이 같으나 뚜렷하게 나타나지는 않는다.
- (3) XRF, FE-SEM 결과 케이블 바깥쪽이 안쪽보다 열화 진행이 빠른 것으로 나타났으며, FE-SEM의 경우 시편의 열화정도의 특정부분을 확인 시 적절할 것으로 보인다.
- (4) 상태감시법의 유효성이 높은 측정법은 체적전기저항률, 상대밀도, XRF가 가장 적절할 것으로 보이고, XPS, EDS 보다는 정량분석이 강한 XRF가 상태감시에 적절하다.

케이블 상태감시로 적절한 방법은 체적전기저항률, 밀도, XRF, FE-SEM로 판단되며, 열화변화가 가장 뚜렷하게 나온 체적전기저항률이 상당히 유효한 방법으로 판단된다. 또한 XPS와 EDS는 자체 상태감시는 하기 어렵지만 XRF의 결과와 접목하여 사용한다면 신뢰성 있는 상태감시 평가를 할 수 있을 것으로 사료된다.

### 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부 원자력기술개발사업(연구기관 과리번호 : 20110018856)의 지원으로 수행된 연구임.

### 참 고 문 헌

- [3] Draft Regulatory Guide DG-1240, "Condition monitoring program for electric cables used in nuclear power plants", Division 1, June, 2010.
- [4] NUREG/CR-7000, "Essential Elements of an electric Cable Condition Monitoring Program", Brookhaven National Laboratory Upton, NY, January, 2010.
- [5] T. Andrews, R.N. Hampton, A. Smedberg and D. Wald, "The Role of Degassing in XLPE power cable manufacture", IEEE Electrical Insulation, Vol. 22, No. 6, 2006.