

원전 저압케이블 열화도 평가를 위한 초음파 음속측정에 관한 연구

A Study on the Measurement of Ultrasound Velocity to Evaluate Degradation of Low Voltage Cables for Nuclear Power Plants

김경조*[†], 강석철*, 구철수*, 김진호**, 박재석**, 주금중**, 박치승**

Kyung-Cho Kim*[†], Suk-Chull Kang*, Charles Goo*, Jin-Ho Kim**, Jae-Seok Park**,
 Geum-Jong Joo** and Chi-Seung Park**

초 록 원자력발전소에는 여러 종류의 케이블이 전력공급, 감시 및 제어신호의 전달을 위해 열악한 환경하에서 이용되고 있다. 발전소의 안전한 운영을 위해서 이 케이블이 어느 정도 열화 되었는지 확인할 필요가 있다. 특히, 원자력발전소의 수명 연장과 더불어 저압 케이블을 장기간 사용함에 따라서 저압케이블의 열화를 평가하기 위한 방법이 필요하게 되었다. 저압케이블의 열화를 측정하는 파라미터로는 주변 온도, 절연재질의 경도, 파단시 연신률(EAB, Elongation At Breaking Point) 등이 있다. 그러나, 온도나 경도를 측정하는 검사는 정량적인 판단기준의 설정이 곤란하고 진단의 정밀도가 낮으며, 부분적으로 샘플링하는 방법은 샘플링되는 케이블에 연결된 부하를 정전시켜야 하고 장소와 시간적인 제약이 있으며, 전기적 측정법은 노화 초기부터 중기까지의 열화정도를 확인하기 어렵다. 본 연구에서는 재료의 열화에 따라서 초음파의 음속이 변화한다는 이론적인 배경[1,2]을 바탕으로 저압 케이블 재료의 열화에 따른 초음파의 음속을 측정하였다. 이를 위해, 원자력발전소에서 사용되는 저압케이블을 가속 열화시켰으며, 저압케이블의 피복재에서 초음파의 음속을 측정할 수 있는 장비를 개발하여, 초음파의 음속측정 후 인장시험을 통해 파단시 연신률을 측정하였다. 파단시 연신률이 증가함에 따라서 음속이 선형적으로 감소 하였으며, 초음파의 음속은 열화의 정량적 평가 파라미터로서의 사용 가능성을 확인할 수 있었다.

주요용어: 저압 케이블, 열화도, 음속 변화, 원자력 발전소

Abstract Several kinds of low voltage cables have been used in nuclear power plants for the supply of electric power, supervision, and the propagation of control signals. These low voltage cables must be inspected for safe and stable operation of nuclear power plants. In particular, the degradation diagnosis to estimate the integrity of low voltage cables has recently been emphasized according to the long use of nuclear power plants. In order to evaluate their degradation, the surrounding temperature, hardness of insulation material, elongation at breaking point (EAB), etc. have been used. However, the measurement of temperature or hardness is not useful because of the absence of quantitative criteria; the inspection of a sample requires turning off of the power plant power; and, the electrical inspection method is not sufficiently sensitive from the initial through the middle stage of degradation. In this research, based on the theory that the ultrasonic velocity changes with relation to the degradation of the material, we measured the ultrasonic velocity as low voltage cables were degraded. To this end, an ultrasonic degradation diagnosis device was developed and used to measure the ultrasonic velocity with the clothing on the cable, and it was confirmed that the ultrasonic velocity changes according to the degradation of low voltage cables. The low voltage cables used in nuclear power plants were

degraded at an accelerated rate, and EAB was measured in a tensile test conducted after the measurement of ultrasonic velocity. With the increasing degradation degree, the ultrasonic velocity decreased, whose potential as a useful parameter for the quantitative degradation evaluation was thus confirmed.

Keywords: low voltage cables, ultrasonic wave, degradation diagnosis, nuclear power plant

1. 서 론

현재, 한국에서는 18기의 원자력발전소가 가동되고 있고 총 2,700만kW의 전력을 생산하고 있으며 국내 총 전력량의 40%를 차지하고 있다. 이 중 일부 발전소는 20년 이상 가동되었으며 각종 기기에 대한 안전성 평가 등이 필요하며, 경년열화 등이 중요한 문제로 되고 있다[1-4]. 원자력발전소에서는 여러 가지 케이블이 전력 공급, 기기의 감시, 제어신호의 전달을 위해서 이용되고 있다. 케이블이 기능을 상실하게 되면 원자력발전소의 안정된 운전이 어렵게 되므로 원자력발전소에서 사용되고 있는 안전용 케이블에는 통상 운전시뿐만 아니라 유사 시에도 필요한 기기에 전력을 공급할 수 있고 기기의 감시, 제어신호를 전달할 수 있는 기능이 요구되고 있다.

원자력발전소에서 사용되고 있는 케이블 절연체에는 폴리에틸렌, 폴리염화비닐, 각종 고무 등이 이용되고 있으나 이 재료들은 열, 방사선, 자외선 등의 환경에 의해 조금씩 변화하고 그 기계적 특성이나 전기적 특성이 서서히 저하된다. 이 때문에 원자력발전소의 안전한 운영을 위해서는 케이블의 경년열화 정도를 상시 모니터링해서 잔여수명을 추정하고 보수관리하여야 한다.

원자력발전소에서 사용하고 있는 케이블 중에 대부분을 차지하는 저압 케이블은 지금까지 정기보수 시에 행해지는 선간의 절연저항 측정 등에 의한 전기적 진단이 행해져 왔다. 절연저항의 측정만으로는 케이블의 열화정도를 확인하기 어렵고, 경년열화의 말기 즉 절연저항이 낮아진 후가 되지 않으면 변화를 감지할 수 없다. 이 때문에 경년열화의 초기나 중기에서의 연속적인 변화의 감시는 곤란하고 잔여수명의 추정은 불가능했다.

한편 케이블에서는 전기적 특성 저하에 앞서 절연체나 외피의 신장 등 물리적 특성의 완만한 저하가 초기부터 나타난다. 이러한 물성변화를 비파괴적으로 계측할 수 있다면 저압 케이블의 연속적인 경년열화의 감시 또는 잔여수명의 추정을 위해서

유용하리라 생각되며 현재 이러한 기술의 개발이 필요한 실정이다[4,5]. 본 연구의 목적은 고분자재료를 통과한 초음파 음속과 파단시 연신률과의 상관관계를 구하여 초음파의 음속으로 열화의 정도를 예측하는 것이며 이를 위하여 다음과 같은 연구를 수행하였다. 원자력 발전소에 사용되는 케이블을 단계별로 가속 열화 시킨 후, 파단시 연신률을 각각 측정하였고, 고분자 재료의 케이블 피복재에 초음파를 투과시키기 위하여 크리핑파를 이용하였으며, 케이블 피복재의 길이에 영향을 받지 않고 크리핑파를 송 수신하기 위한 열화진단 장치를 개발하였다. 실험으로부터 열화된 재료의 음속을 측정하였고, 파단시 연신률과 음속과의 상관관계를 얻었으며 그 결과가 고찰되었다.

2. 초음파 열화진단의 원리

케이블의 절연체나 외피 등에 사용되고 있는 고분자재료는 열, 방사선이나 자외선 등의 외적인 환경에 의해서 영향을 받는다. 또한, 재료 자체의 여러 가지 메커니즘에 의해서 화학적 경년열화가 생기고, 서서히 기계적 특성이나 전기적 특성이 저하된다. 이 특성저하를 통틀어 일반적으로 열화라고 총칭한다. 저압케이블 열화의 일반적인 지표로서, 외피나 절연체의 인장 강도, 파단시 연신률, 절연저항, 교류 파괴전압 등이 이용되고 있으나, 절연저항과 같은 전기적 특성은 열화가 상당히 진행한 후에나 감지할 수 있는 변화가 나타나는 반면 파단시 연신률은 열화의 초기부터 검출 가능한 변화가 나타나므로 케이블의 열화진단에 적용할 수 있으며, 케이블의 열화 초기 단계부터 모니터링할 수 있다. 그러나, 파단시 연신률을 직접 측정하기 위해서는 파괴시험으로 인장시험이 필요하므로 파단시 연신률을 비파괴적으로 구하기 위해서는 비파괴적으로 측정가능한 다른 물성치로부터 파단시 연신률을 간접적으로 환산 추정할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 재질을 통과하는 초음파의 종파속도 V_u

가 물리적 특성의 변화를 예민하게 검출할 수 있다는 것과 재료에서 초음파의 전파속도와 연신률이 명확한 상관관계가 있다는 사실에 주목해서 초음파에 의한 케이블 절연체나 외피의 열화진단법을 개발했다.

$$V_u = [(E/\rho) \times (1-\nu)/(1+\nu)(1-2\nu)]^{1/2} \quad (1)$$

여기서, E는 탄성계수, ρ 는 밀도, ν 는 포와송 비이다. 케이블의 절연체나 외피의 고분자 재료는 열이나 방사선 등에 의해 열화되면 탄성계수나 밀도가 변화해서 식 (1)에서 알 수 있는 것처럼 탄성계수나 밀도의 변화에 대응해서 재료중의 초음파 전파속도 V_u 가 변화한다. 이 성질을 이용해서 재료를 통과하는 초음파의 속도를 측정하는 것에 의해 그 재료의 열화진단을 할 수 있다.

3. 초음파속도의 측정방법

3.1. 펄스 반사법에 의한 음속의 측정

초음파의 진행속도를 측정하기 위하여 Fig. 1에 표시한 것처럼 펄스-에코법이 사용되었다. 이것은 시험대상의 표면에 수직방향으로 초음파를 입사해서 경계면에서 반사시켜 초음파를 검출하는 방법이고 여기서 얻어진 시간과 재료의 두께로부터 초음파의 속도를 구하는 방법이다.

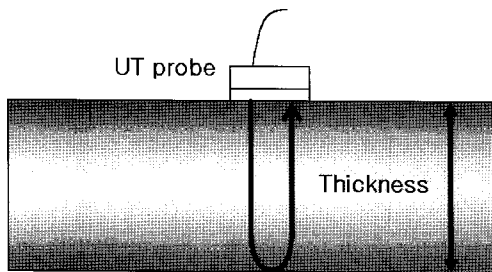


Fig. 1 Schematic diagram of pulse-echo method

피검체 두께의 정확한 측정이 가능하다면 펄스-에코법은 상당히 효과적인 초음파 속도 측정법이다. 그렇지만 케이블 절연체나 외피의 두께는 반드시 균일하지 않기 때문에 이 두께를 비파괴적으로 정확히 측정하기는 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해서 사각초음파를 이용하여 케이블 피복재의 표면을 진행하는 초음파 속

도를 정확히 측정하는 방법을 개발했다. 이 방법은 Fig. 2에 나타난 것처럼 웨지(Wedge)를 이용해서 초음파를 케이블 피복재에 경사되게 전파시켰다. 한편, 굴절된 초음파는 식 (2)에 표시된 것처럼 스넬의 법칙을 따른다.

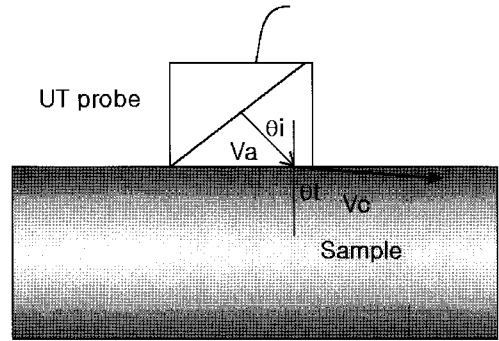


Fig. 2 Relation between incidence and refraction of ultrasonic waves

$$\sin \theta_i / \sin \theta_t = V_a / V_c \quad (2)$$

여기서 θ_i 는 입사각, θ_t 는 굴절각, V_a 는 송·수신 탐촉자의 웨지 내에서의 초음파 속도, V_c 는 피복재 중의 초음파 속도이다. Fig. 2와 식 (2)로부터 초음파를 케이블 피복재의 표면에 전파시키기 위해서는 $V_a < V_c$ 의 조건을 만족해야 하고, 가능한 한 웨지 내에서 초음파의 손실을 저감하기 위하여 감쇠량이 적은 웨지의 재질을 선택해서, $\theta_t = 90^\circ$ 로 될 수 있도록 θ_i 를 설정했다.

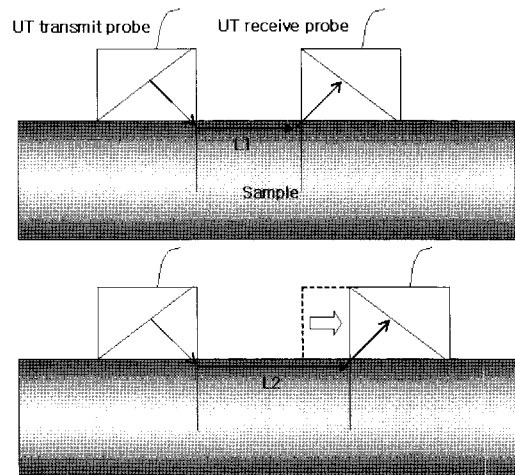


Fig. 3 Measurement principle of the ultrasonic velocity

초음파 속도의 측정은 Fig. 3에 표시한 것처럼 송신 및 수신 초음파 탐촉자 각각의 거리를 L1으로 하고 송신 탐촉자에서 수신 탐촉자까지 초음파가 전파한 시간 T1을 측정한다. 다음에 송신 수신 프로브간의 거리를 L2로 두고 전파시간 T2를 측정한다. 이 때의 프로브간 거리의 차와 전파시간의 차에서 식 (3)에 의해 케이블 피복재중에서의 초음파 속도를 구하는 것이 가능하다.

$$V_u = (L2 - L1)/(T2 - T1) \quad (3)$$

이 방법에서는 케이블의 피복재의 두께에 관계없이 초음파의 속도가 측정가능하기 때문에 여러 가지 종류 및 크기의 케이블에 행해지는 열화진단에 적당하고 케이블의 경도측정과 같은 방법처럼 구조나 피복재의 두께에 영향을 받지 않는다.

3.2. 크리핑파(Creeping Wave)

크리핑파는 고체의 표면 직하를 따라 전달하는 파로 표면파와 같이 시험체 표면의 상태에 영향을 받지 않고 표면 결함 및 표면 직하의 결함 검출에 사용된다. 따라서, 굴곡된 표면을 따라 전파되는 것이 가능하며 전파속도는 종파의 속도와 거의 같고 전파방향의 길이를 따라 지수함수적으로 그 진폭이 감쇠하는 특징을 갖고 있다. 본 연구에서는 횡파에 의한 표면파를 발생시킬 수 없었으므로, 종파에 의해 발생시킬 수 있는 크리핑파를 이용하였다.

4. 열화진단장치의 구성 및 시편

4.1. 열화진단장치의 개요

본 연구에서는 앞 장에서 설명한 초음파법에 의한 진단기술을 기초로 원자력 발전소용 저압케이블 열화 진단 시스템을 Fig. 4와 같이 개발했다.

이 시스템은 디지털 오실로스코프 (Tektronix-TDS3032B), 펄스리시버 (Panamatics-5073PR), 1.5 MHz 초음파탐촉자(1/2"×2ea), 지그(jig) 등으로 구성되었다. 이 시스템에서 사용된 지그는 케이블과 평행한 방향으로 크리핑 웨이브를 발생시키기 위하여 특별히 제작되었다. 케이블 표피 재료의 음속이 2000m/s정도 이므로, 웨지 재료는 테프론(Teflon)을 사용하였으며, 1차 임계각은 54.6° 였다.

발생된 파가 표면파인지를 댐핑으로 확인하였으나 크게 감쇠되지 않으므로, 표면파가 아니라 크리핑 웨이브임을 확인할 수 있었다.

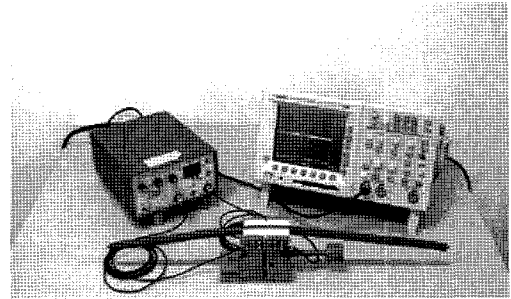


Fig. 4 The equipment for measuring the degradation of the cable

4.2. 파단시 연신률의 측을 위한 시편

열화된 재료의 음속변화와 파단시 연신률과의 상관관계를 구하기 위해서, 열화되지 않은 케이블과 열화된 케이블을 얻기 위해 섭씨 130° 에서 가속열화를 통해 10년 단위로 하여 40년까지 단계적으로 열화를 하였다. 가속열화 시간은 울진 5, 6호기 안전관련 케이블의 환경검증 시험보고서에서 사용한 활성화에너지(Activation Energy)를 참조하였고 가속열화 시간을 결정하는데 가장 일반적으로 사용하는 아르헨니우스 방정식을 근거로 하여 계산하였다 [6]. 가속 열화시킨 케이블을 음속을 측정 후 외피만을 Fig. 5처럼 잘라내어 파단시 연신률을 인장시험으로 구하였다. Fig. 5는 인장시험을 위해서 사용된 인장시험용 시편의 형상을 나타내며 ASTM D412규격에 따라 만들었다.

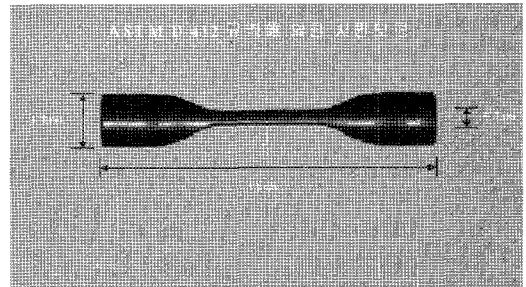


Fig. 5 The shape of specimen by ASTM D412

인장시험을 통하여 구한 파단시 늘어난 길이와 열화도와의 관계를 Table 1에 나타내었다. 인장시험은 한번의 열화 조건당 5회 실시하였고 그 중간치 3회의 값을 채택하였고, 이 3개의 값으로부터 커브 피팅하여 열화도와 파단시 연신률과의 상관관계를 구하여 Fig. 6에 표시하였다. 이 커브 피팅된 직선으로부터 열화도에 따른 파단시 연신률을 계산하였다.

Table 1 Relation between the elongated length at breaking point and the degree of degradation

Elongated length / Degree of degradation	1st	2nd	3rd
0 years	137.16	138.01	135.81
10 years	114.91	115.83	121.29
20 years	84.01	84.91	81.51
30 years	80.25	80.25	81.97
40 years	58.55	67.66	62.07

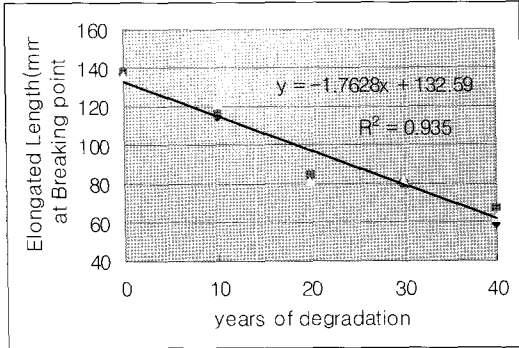


Fig. 6 Relation between the elongated length at breaking point and the degree of degradation

5. 실험결과 및 고찰

케이블이 원통형이므로 반경 방향으로 0°, 90°, 180°, 270° 의 간격으로 같은 위치에서 10회 음속을 측정하였고, 길이방향으로 2.5 cm 간격으로 14군데의 위치에서 측정을 수행하여 그 평균값을 구하였다. 이 결과로부터 음속과 파단시 연신률과의 상관관계를 Fig. 7에 나타내었다. 열화의 경향을 파악하기 위해서 최소자승법을 이용하여 피팅한 직선을 삽입하였으며, 이 직선으로부터 파단시 인장과 음

속과의 관계는 선형관계이며 반비례하는 것을 알 수 있다. 따라서, 열화가 증가함에 따라서 음속이 증가한다는 것은 확인할 수 있었고, 이는 열화의 증가에 따라 재료가 단단해 지기 때문인 것으로 사료된다. 이 결과는 일본에서 발표된 결과와 같은 경향이므로 본 연구가 적절히 수행되었음을 확인할 수 있다[4].

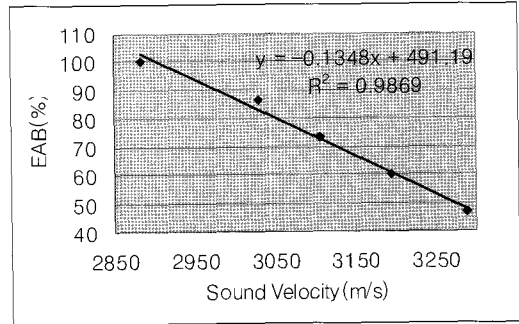


Fig. 7 Relationship between sound velocity and degraded years

6. 결론

원자력발전소 저압케이블 피복재의 음속을 계속할 수 있는 열화진단시스템을 개발하였다.

초음파 음속과 파단시 연신률은 선형적으로 반비례하였으며, 이 관계로부터 초음파 음속을 계속하면 파단시 연신률과 열화의 정도를 예측할 수 있게 되었다.

열화지표로서 채용한 음속은 열화의 초기부터 열화의 변화추정이 가능하기 때문에 열화의 초기 단계부터 열화의 연속적인 경향을 예측하는 것이 가능하게 되었다.

본 장치에 의해 평가한 음속과 파단시 연신률과의 상관관계를 추적 해석하면 원자력 발전소에서 케이블의 잔여수명을 측정하는 것이 가능하게 되리라 사료된다.

참고문헌

[1] J. Ikehara, et al., "Degradation diagnosis of polymeric materials by ultrasonic," Abstracts of IEEE International Ultrasonic Symposium, pp. 42-51, (1998)

- [2] 박은수, 박익근, 김덕희, 안형근, "초음파 특성을 이용한 경년열화 평가", 비파괴검사학회지, Vol. 22, No. 2, pp. 149-154, (2002)
- [3] Y. Nishida, et al., "Non-destructive diagnosis technique for aging of cable used at nuclear power plant," 7th International Conference on Nuclear Engineering, pp. 42-47, (1999)
- [4] 池田毅 외, 超音波에 의한 高分子材料의 劣化診斷(1) (超音波 による高分子材料の 劣化診斷(1)), 三菱電線工業時報(94), pp. 43-47, (1998)
- [5] 池田毅 외, 超音波에 의한 高分子材料의 劣化診斷(2)(超音波 による高分子材料の 劣化診斷(2)), 三菱電線工業時報(95), pp. 27-32, (1999)
- [6] 울진 5, 6호기 안전관련 케이블의 환경검증 시험보고서(Doc No. TEC-uc56-E241-20), 한국수력원자력
- [7] 吉川育太郎, 超音波探傷法, 東京, 日刊工業新聞社, pp. 2-30, (1974)
- [8] 栗林照幸 외, 絶縁材料의 劣化診斷方法의 檢討, 平成 5년 전기학회 전력 에너지분야 대회, pp. 745-746, (1993)
- [9] 超音波便覽編集委員会編, 超音波便覽, 東京, 丸善, pp. 25-62, (1999)