

[논문] - 비파괴검사학회지
*Journal of the Korean Society
 for Nondestructive Testing*
 Vol. 28, No. 2 (2008. 4)

등전위 교번식 직류전위차법의 신호 정밀도 검증을 통한 배관 감육 진단 기술에의 적용성 검증

Verification of the Viability of Equipotential Switching Direct Current Potential Drop Method for Piping Wall Loss Monitoring with Signal Sensitivity Analysis

류경하*, 황일순*, 김지현**†

Kyung Ha Ryu*, Il Soon Hwang* and Ji Hyun Kim**†

초 록 유체가속부식에 의한 탄소강 배관의 감육은 원자력 발전소 저탄소강 배관의 주요 경년열화 현상으로, 예상치 못한 배관의 파단을 야기해 발전소의 성능 및 안전을 저해할 수 있다. 최근, 등전위 교번식 직류전위차법(ES-DCPD, equipotential switching direct current potential drop)을 이용한 배관 감육의 정밀 감시 기법이 본 연구자들에 의하여 개발되었다. ES-DCPD 방법은 넓은 배관 영역을 빠르게 검사할 수 있는 방법으로, 넓은 영역의 직관부 감육을 빠르게 검사하는 광역감시법(WiRM, wide range monitoring)과 엘보우 등 곡관부의 감육이 활발한 컴포넌트의 국부적 감육을 비교적 넓은 범위에서 빠르게 스캔하는 협역감시법(NaRM, narrow range monitoring)으로 사용이 가능하다. 광역감시와 협역감시 기법은 초음파검사의 위치 선정과 초음파검사의 검사 누락부에 대한 신뢰성을 개선할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 ES-DCPD를 바탕으로 한 새로운 감육 진단 기술을 실험실 환경에서 장기 검증 시험을 수행하여 신호 정밀도를 분석하였고, 결과의 현장 적용성을 논의하였다.

주요용어: 유체가속부식, 감육 감시, 직류전위차법, 광역감시, 협역감시, 신호 정밀도

Abstract Flow accelerated corrosion (FAC) phenomenon of low alloy carbon steels in nuclear power plant has been known as one of major degradation mechanisms. It has a potential to cause nuclear pipe rupture accident which may directly impact on the plant reliability and safety. Recently, the equipotential switching direct current potential drop (ES-DCPD) method has been developed, by the present authors, as a method to monitor wall loss in a piping. This method can rapidly monitor the thinning of piping, utilizing either the wide range monitoring (WiRM) or the narrow range monitoring (NaRM) technique. WiRM is a method to monitor wide range of straight piping, whereas NaRM focuses significantly on a narrow range such as an elbow. WiRM and NaRM can improve the reliability of the current FAC screening method that is based on computer modeling on fluid flow conditions. In this paper, the measurements by ES-DCPD are performed with signal sensitivity analyses in the laboratory environment for extended period and showed the viability of ES-DCPD for real plant applications.

Keywords: Flow Accelerated Corrosion, Wall Loss Monitoring, Direct Current Potential Drop, Wide Range Monitoring, Narrow Range Monitoring, Signal Sensitivity

1. 서론

유체 가속 부식(FAC, flow accelerated corrosion) 현상은 유체와 금속간의 상대 운동으로 금속 이온의 확산 기율이 증가하여 정상상태 유체에서의 부식에 비해 부식의 속도가 가속화 되는 현상이다. 0.1% 이상의 크롬 함량만으로도 FAC를 충분히 줄일 수 있다고 보고되고 있지만 발전소 배관의 대부분에서 사용되고 있는 배관은 저합금 탄소강으로써 대부분의 영역에서 FAC 발생의 잠재적인 위험성을 가지고 있다[1].

현재 발전소 배관 두께 검사에 이용되고 있는 초음파검사(UT, ultrasonic technique) 방법은 full grid 방식을 통해 대상 컴포넌트 전체의 감육 정도와 형상을 비교적 정확히 구할 수 있는 장점이 있다. 그러나 발전소의 방대한 탄소강 배관을 이러한 방법으로 모두 검사하는 일은 사실상 불가능하다. 따라서 상용화된 감육예측 프로그램을 사용하여 감육이 활발할 것으로 예측되는 영역을 선별하여 발전소 정비 기간에 이들 컴포넌트에 대한 UT 두께 검사를 개별적으로 수행하고 있다[2]. 그러나 가속화되는 감육을 정확히 예측하는 일은 쉽지 않을 뿐 아니라 발전소가 노후화됨에 따라 FAC 관리 대상 컴포넌트의 수도 지속적인 증가 추세에 있어서 보다 빠른 감육 예측 수단이 요구되고 있다.

본 연구자들에 의해 개발된 등전위 교번식 직류 전위차법(ES-DCPD, equipotential switching direct current potential drop)을 이용한 배관 감육 감시 방법은 넓은 영역의 배관의 두께 변화를 빠르게 스캔할 수 있는 방법인 광역감시(WiRM, wide range monitoring)와 국부적인 와류 발생 가능 지역인 엘보우등의 피팅영역에서 감육을 집중적으로 스캔하는 협역감시(NaRM, narrow range monitoring)에 모두 적용될 수 있으므로, UT검사의 검사 포인트 선정과 UT 검사 누락부에 대한 배관 건전성 확보에 도움이 크게 되는 기술이다[3]. 또한 고온 배관의 단열재를 제거하지 않고도 배관 감육 감시가 가능하며[4], 한 번의 검사로 비교적 넓은 영역을 검사하므로 검사에 소요되는 시간을 줄일 수 있고, 온라인 적용성이 좋은 기술이다[4]. ES-DCPD를 현장에 적용할 경우, 진단이 가능한 감육의 깊이는 측정 신호의 크기와 신호 잡음 세기의 비율에 의해 결정된다. 본 연구에서는 장기간 신호를 측정하여, 잡음을 줄이기 위한 신호처리 기법을 이용하여, 도

달할 수 있는 감육의 심도와 이의 검증에 목적을 두었다.

2. ES-DCPD법을 이용한 배관 감육 감시

직류전위차법(DCPD, direct current potential drop)은 재료 물성치 실험을 위한 균열 길이의 온라인 진단에 널리 사용되어 온 방법이다[5]. 직류 전류를 흘려 재료 열화에 따른 전위차의 변화(DCPD, V/V_0)를 측정하게 되는데, 배관에 이러한 기법을 적용하기 위하여 등전위를 이용한 직류전위차법이 개발되었다[3]. 발전소 배관은 그라운드 및 배관 고정을 위한 지지대가 서로 연결되어 있고 복잡한 배관에 의해서 전기적으로 닫힌회로(closed loop)를 형성하고 있어 검사 영역 외부로 전류의 누설이 발생할 가능성이 있는데, 이러한 누설 전류는 발전소 제어 및 감시를 위한 센서들에 영향을 줄 수 있고, 직류전위차법 신호의 오차를 야기할 수 있다. 검사 대상 배관의 양단에 독립된 전기회로를 구성하여 포텐셜을 동일하게 유지시키고, 전류의 스위칭을 동기화 시키면 이러한 누설 전류를 제거할 수 있음이 실험 및 유한 요소 해석을 통해 검증되었다[3].

2.1. ES-DCPD법을 이용한 감육 진단시의 신호 특성 분석

ES-DCPD는 재료 열화에 따른 포텐셜의 변화(DCPD, V/V_0)를 측정하기 때문에 대상 시편의 종류에 관계없이 전류가 흐르는 모든 강종에 적용될 수 있다. 초기 측정 시점의 퍼텐셜과(V_0) 열화가 발생한 시점의 퍼텐셜(V) 사이에는 온도 변화에 의한 대상 시편의 비저항 변화가 존재 하게 된다. 이 경우 식 (1)과 같이 DCPD 값이 단순히 대상 시편의 형상 정보만을 의미하지는 않는다.

$$\frac{V}{V_0} \Big|_{i=const} = \frac{\rho L/A}{\rho_0 L/A_0} = \frac{\rho A_0}{\rho_0 A} \quad (1)$$

이 식에서 V 는 측정된 포텐셜, V_0 는 기준 시점에($t=0$) 측정된 포텐셜, $\frac{V}{V_0}$ 는 포텐셜 변화(DCPD), ρ 는 측정 시점에서의 비저항값, ρ_0 는 기준 시점에서의 비저항값, A 는 측정 시점에서의 형상

정보, A_0 는 기준 시점에서의 형상 정보, L 은 측정 거리 (상수) 이다.

기준 영역(reference section)을 배관 자체로 선택하여 측정 신호를 기준 영역에 대해서 정규화(normalization) 시켜주면 대상 시편의 종류, 그리고 온도에 따른 비저항 변화등에 의한 세부적 차이를 보정해 줄 수 있다. 즉 식 (2)와 같이 표현될 수 있는 기준 영역의 DCPD를 이용하여 식 (1)을 식 (3)과 같이 정규화 시킬 수 있다. 따라서 DCPD 방법은 식 (3)과 같이 온도나 재질 등에 영향을 받지 않고, 대상 시편의 형상 정보만을 나타내게 된다. DCPD 방법은 형상 정보와 DCPD의 상관식을 이용하여 열화에 따른 구조물의 형상 변화를 측정하게 되는데[6-8], 배관 감육의 경우 DCPD와 감육 형상 사이의 상관관계는 식 (4)와 같음을 보였고, 실험과 유한요소 해석을 통해 검증하였다[3].

$$\frac{V_{ref}}{V_{ref,0}} \Big|_{i=const} = \frac{\rho L / A_{ref}}{\rho_0 L / A_{ref}} = \frac{\rho}{\rho_0} \quad (2)$$

이 식에서 V_{ref} 는 기준 시편에서 측정된 포텐셜, $V_{ref,0}$ 는 기준 시간에 기준 시편에서 측정된 포텐셜, $\frac{V_{ref}}{V_{ref,0}}$ 는 기준 시편에서의 포텐셜 변화 (DCPD in reference coupon) 이다.

$$\frac{V / V_0}{V_{ref} / V_{ref,0}} = \frac{A_0}{A} \equiv \frac{V}{V_0} \quad (3)$$

이 식에서 $\frac{V / V_0}{V_{ref} / V_{ref,0}}$ 는 온도 효과가 보정된 포텐셜 변화(potential drop)이다. 일반적으로 DCPD (V / V_0)는 온도 효과가 보정된 이 값을 의미한다.

$$\frac{\Delta V}{V_0} \Big|_{i=const} = \frac{\Delta R}{R_0} = b/L \cdot \left(\frac{a/t \cdot \Theta}{A - a/t \cdot \Theta} \right) \quad (4)$$

이 식에서 b 는 감육이 발생한 길이, L 은 DCPD를 이용한 측정 길이, a 는 감육이 발생한 깊이, t 는 감육이 없는 경우의 배관 두께, Θ 는 원주 방향으로의 감육이 발생한 넓이($=\theta/2\pi$), 그리고 A 는 배관의 두꺼운 정도를 나타낸다. [$A=(1+t/D)/(1-a/D)$, D 는 배관의 내경]

기본적으로 열화가 진행되지 않는 시편에서 ES-DCPD 값은 1로 일정하게 유지되어야 하며 이

를 전제로 DCPD 값이 증가 된다면 DCPD의 변화를 통해 재료의 열화 정도를 평가하게 된다. 본 연구에서 제안된 ES-DCPD 기법은 신호 특성을 향상시키기 위해서 직류의 방향을 스위칭하게 되는데, 이 방법을 통하면 포텐셜 측정 시에 발생할 수 있는 열전기 노이즈(thermoelectric noise)가 제거된다[9].

Fig. 1은 ES-DCPD 기법의 신호 특성을 보여 준다. 2.5 인치(63.5 mm) 외경의 탄소강 배관에 10A의 전류를 흘려주면서 퍼텐셜의 변화를 24시간 동안 측정하였다. 측정된 ES-DCPD 값은 일교차에 의해 밤이 되어 기온이 떨어지면 '1'을 기준으로 음의 값으로 바뀌게 되고 기온이 올라가면 양의 값으로 바뀌게 되는데, 이러한 온도에 의한 ES-DCPD의 변화를 기준 시편을 이용하여 식 (3)에 의한 방법으로 보정 하였다. 보정 후의 ES-DCPD의 평균 값은 전류를 스위칭 시킨 경우 1.0002를 보임을 확인하였고, 전류를 스위칭 하지 않은 경우에도 1.0006으로 비교적 1과 일치하게 유지됨을 확인하였다. 전류를 스위칭 시키며 측정한 ES-DCPD값의 표준편차는 0.0003351로 스위칭이 없는 경우의 ES-DCPD 표준편차 0.001186에 비해 상대적으로 신호의 질이 크게 향상되었음을 확인하였다. 실험을 통해 확인된 ES-DCPD의 최대 오차(maximum error)는 0.001347이었다.

실제 배관 두께 진단에 적용될 경우에는 장시간에 걸친 많은 데이터의 습득이 어렵고 적은 표본수의 데이터만으로 감육을 진단하게 될 것으로 예상된다. 따라서 최대 오차인 0.1347% 보다 작은

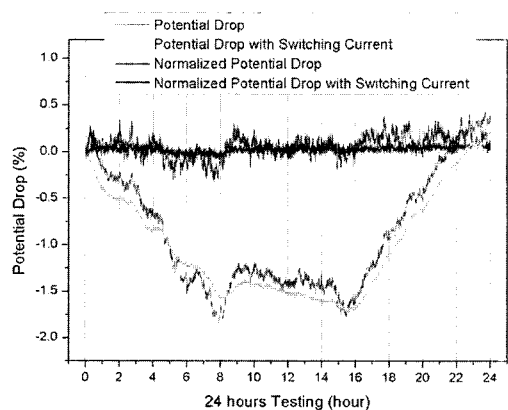


Fig. 1 Measured ES-DCPD signal applied to off-line monitoring for piping thickness inspection

ES-DCPD 변화는 에러 범위에 포함된다고 추정하고 음과 양의 최대 오차를 고려하여 최대 오차의 2배 이상, 약 0.3% 이상의 ES-DCPD의 변화가 측정된다면 충분한 신뢰도를 가지며 감육 발생의 확실한 지시가 가능하다.

ES-DCPD를 배관 감육 감시를 위해 온라인으로 적용하는 경우에는 배관 내부의 유동에 의한 진동에 의한 영향과 출력 변화에 따른 온도 변화의 폭이 크다. ES-DCPD의 온라인 배관 감육 감시 적용시의 신호 특성을 Fig. 2에 제시하였다. 본 연구에서는 수확화 조건을 조절하여 감육을 가속화시키는 기법을 개발하여 13,000분 동안의 (약 9일) 실험으로 23.7%의 감육을 모사하였고, 이 기간 동안의 두께 변화를 UT와 ES-DCPD를 이용하여 온라인으로 측정하였다[10]. Fig. 2는 실험 시작 단계의 1시간 동안의 ES-DCPD 신호를 보여준다. 1시간 동안 실험 온도는 47.2 °C (±1.1 °C)에서 129.7 °C (±1.1 °C) 까지 지속적으로 올라갔고, 배관 내부에는 5 m/s 유속의 유동이 존재하였다. 스팟 웰딩 등의 방법을 통해 시편에 신호선을 접착하여 측정하는 일반적인 DCPD 측정 시에는 진동에 의한 DCPD에의 영향은 고려하지 않는다. 그러나 본 연구에서 개발된 ES-DCPD 방법의 경우 배관 적용의 편의성을 향상시키기 위해 끝이 날카로운 구리봉을 배관에 접촉시키는 일체화된 탐촉자 유니트를 [10] 사용하여 진동 등에 의해 측정 위치가 미세하게 변할 수 있는 가능성이 있다. 측정된 ES-DCPD 데이터의 표준 편차는 0.001267로 오프라인상에서의 검사보다 신호의 질은 다소 떨어졌다. 그러나 배관 감육에 따른 ES-DCPD의 신호대비를 고려해 보았을 때 대체로 우수한 신호 특성을 보여준다고 할 수 있다. 측정된 ES-DCPD의 최대 오차는 0.248% 임을 확인하였다. 온라인 검사 시 최대 오차인 0.248% 보다 작은 ES-DCPD 변화는 에러 범위에 포함된다고 추정하고 음과 양의 최대 오차를 고려하여 최대 오차의 2배 이상, 약 0.5% 이상의

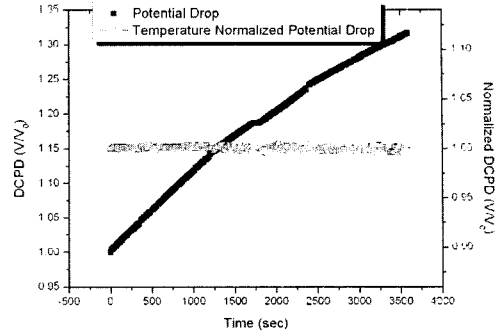


Fig. 2 Measured ES-DCPD signal applied to on-line monitoring for piping wall thickness inspection

ES-DCPD의 변화가 측정된다면 온라인 적용 시 충분한 신뢰도를 가지며 감육 발생의 확실한 지시가 가능하다고 추정할 수 있다.

2.2. ES-DCPD를 이용한 광역 감시

ES-DCPD 방법을 이용한 배관 두께 검사는 배관에 전류를 흘려 두께 변화에 따른 DCPD를 측정하여 두께 변화로 환산한다. 직관부 배관의 감육은 넓은 영역에 걸쳐서 발생하므로 신호의 변화가 크기 때문에 광역에 대한 감육 감시(WIRM)가 가능하다.

국내 한 발전소의 feedwater-pump와 HP-feedwater-heater사이의 한 직관을 선택하여 ES-DCPD를 적용할 경우의 측정 효율을 식 (4)를 이용하여 계산하였고 결과를 Table 1에 제시하였다. 적용된 배관은 20인치(508 mm) 외경의 A106 grade B 탄소강 배관으로 공칭 두께(t_{norm})는 38.1 mm이고 설계최소두께(t_{crit})는 32.9184 mm이다.

ASME Boiler & Pressure Vessel Section III에 의해 설계최소두께(t_{crit}) 이하로 감육이 진전되었을 경우 배관을 교체하는 것이 원칙이지만 ASME Boiler & Pressure Vessel Code Case N-597에서는 이 기준을 완화하여 12.5%까지의 감육은 일반적

Table 1 ES-DCPD (%) with ES-DCPD WIRM technique in the straight pipe

Thinning Area		Whole Thinning	Partial Thinning induced by Hydrodynamic Effecting Bead (Length of Thinning Area is assumed as 2.5 Diameter)				
Detection Length			5 m	7.5 m	10 m	12.5 m	15 m
Thinning Rate	0.875 t_{norm}	14.286	3.6286	2.4190	1.8143	1.4514	1.2095
	t_{crit}	15.741	3.9981	2.6654	1.9991	1.5993	1.3327
	t_{cutoff}	50.000	12.700	8.4667	6.3500	5.0800	4.2333

으로 사용 가능하도록 하는 사용 가능 두께 기준인 $0.875t_{norm}$ 과 응력 기준 (stress criteria) 검토 후 국부적인 감육의 경우 t_{crit} 이하의 두께에서도 사용이 허가되는 국부허용두께 $0.9t_{crit}$ 그리고 즉시 교체에 해당하는 $t_{cutoff}(=0.2/0.3t_{norm})$ 의 3가지 두께 기준을 제시하고 있다. Table 1에서는 대상 직관에서 사용 가능두께기준인 $0.875t_{norm}$ 과 설계최소두께(t_{crit}), 그리고 t_{cutoff} 3가지의 두께 기준 만큼의 감육이 진전될 경우 얻어지는 ES-DCPD 변화율을 나타내었다.

일반적으로 직관부의 경우 큰 수력학적 변동이 없을 것으로 기대되므로 감육이 배관의 전체를 통해 발생하는 것이 일반적이다[11]. 이러한 whole thinning의 경우에는, 검사 영역 범위에 무관하게 주어진 감육에 대한 ES-DCPD 변화량(%)은 동일하고, 변화의 폭이 사용가능두께인 12.5% 감육의 경우에도 14% 이상으로 상당히 크다. 따라서 검사 범위에 구애받지 않고 대단히 넓은 범위의 직관을 한 번에 커버하여 전체적인 감육을 진단할 수 있다.

경우에 따라서 직관에서도 용접부 비드 등에 의해 국부적인 감육이 발생할 수 있는데, 이러한 경우 역시 광역에서의 감육 감시가 가능함을 확인하였다. 10 m 길이의 넓은 영역을 한 번에 검사하는 경우, 국부적인 감육이 발생한다면 사용 가능 두께인 12.5% 감육에 대해서 1.8%의 ES-DCPD 변화가 기대되고, 즉시 교체 기준인 33.3%의 감육에 대해서는 6.35%의 ES-DCPD 변화가 기대된다. 일반적으로 직관부의 감육은 whole thinning이 대부분이지만, 국부적인 감육의 발생 가능성도 역시 존재하므로 10 m 정도의 범위를 감시할 경우 1.8% 이상의 ES-DCPD 변화가 보고된다면 배관의 교체 내지는 UT에 의한 정밀 검사를 검토해 볼 수 있다.

제시된 배관의 경우 Checworks 프로그램[13]을 통한 예측 평균 감육율(predicated average wear rate)은 0.195453 mm/year로 주어지는데, 이러한 감육 속도로 실제 배관에서 감육이 발생할 경우의 각 발전 주기별 ES-DCPD의 변화량을 Fig. 3에 제시하였다.

Checworks는 약 26.5년이 지나면 설계최소두께 (t_{crit})까지 감육이 진행될 것으로 예상하고 있다. 배관의 전체적인 감육을 고려하여 식 (4)를 통해 ES-DCPD를 계산하면 t_{crit} 까지 감육이 진전될 경우 15.74%의 ES-DCPD 신호를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 그리고 각 주기 별 감육에 (0.195453 mm/yr) 따른 ES-DCPD의 변화율은 0.52 % 정도

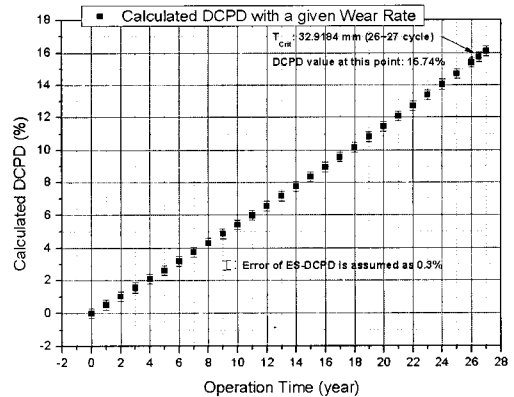


Fig. 3 DCPD changes (%) with plant cycles for WIRM in the straight pipe

로 기대되는데 ES-DCPD의 최대 오차의 2배 (0.3%)를 고려하여도 각 주기별 감육의 경향을 분명히 지시해 줄 수 있으리라 기대된다.

2.3. ES-DPCD를 이용한 협력 감시

발전소 배관의 감육 문제는 주로 곡관, 분기관, 밸브 등 국부적인 수력학적 변동을 야기하는 피팅 부위에서 주로 발생하므로 현재 UT를 통한 두께 검사도 이들에 한정하여 수행되고 있다. UT 검사는 감육의 정도와 형상을 비교적 정확히 알 수 있는 장점이 있지만, 검사를 위해서 단열재의 제거가 필요하고, point 두께 측정에 의한 full grid 방식을 적용하고 있어 검사 포인트가 많고, 따라서 검사에 많은 시간이 소요되는 문제가 있다. 배관 두께 검사를 위해 할당되는 시간은 한정되어 있으므로, 빠른 스크리닝 기법으로 이러한 컴포넌트에 대한 감육의 스캐닝이 가능하다면 UT진단을 위한 컴포넌트를 정확히 한정할 수 있고, 검사 미수행 컴포넌트에 대해서도 신뢰성을 확보할 수 있다.

ES-DPCD를 이용한 배관 감육 감시 기법은 Fig. 4와 같이 상류측 용접부로부터는 1D까지 하류측 용접부에서부터는 2D까지의 비교적 넓은 범위를 한 번에 빠르게 검사하게 된다. 비교적 넓은 감육 발생 가능 부위를 한 번에 검사할 뿐 아니라 단열재의 제거가 필요없어[4] 검사에 소요되는 시간을 상당히 줄일 수 있다. 그리고 광역 감시에 비해서는 검사 영역이 상당히 한정되므로 ES-DCPD의 신호 효율이 커져 정밀한 감육 감시가 가능하다. Fig. 4에는 UT의 full grid 방식이 함께 표시되어

있다[12]. ES-DCPD를 이용한 협역 감시를 통해 단열재의 제거 없이 비교적 넓은 부위에 대한 감육을 한번에 빠르게 검사하고 ES-DCPD의 결과가 감육의 진전을 보고하고 있다면 UT의 정밀 검사가 수행될 수 있을 것이다.

발전소 컴포넌트 중 2부분의 곡관을 선택하여 앞에서 제시한 3가지 두께 기준에 대한 ES-DCPD의 측정 효율을 식 (4)를 이용해 계산하여 Table 2에 제시하였다. 곡관에서의 감육은 곡관의 내호곡면이 아닌 외호곡면과 하류측에 걸쳐서 주로 발생하므로 [11], 곡관의 외호곡면과 하류측 2D 길이에 걸쳐 감육이 발생한 경우를 대상으로 계산을 수행하였다. 사용가능두께인 12.5% 감육에 대해서도 5% 이상의 비교적 높은 효율로 감육을 진단할 수 있음을 확인할 수 있고, 국부허용두께인 $0.9t_{crit}$ 의 감육의 경우 엘보우 #1의 경우 10% 이상의 DCPD 변화가 예상된다. 고압부 배관인 엘보우 #2의 경우에는 $0.9t_{crit}$ 의 두께 기준이 12.5% 감육 기준과 큰 차이가 없으므로 5.4%정도의 DCPD 변화가 예상된다.

제시된 두 곡관의 Checworks 예측 평균 감육을

은 각각 0.267843 mm/year와 0.1968754 mm/year인데, 이러한 감육율을 따라 감육이 진행되는 경우의 ES-DCPD의 변화율을 Fig. 5에 제시하였다. Checworks는 두 엘보우가 31~33년 사이에 국부허용두께 $0.9t_{crit}$ 까지 감육이 진전될 것으로 예측하고 있다. 이 국부허용두께 만큼의 감육이 진전된다면 ES-DCPD는 Table 2에 제시된 것처럼 10.175%, 5.431% 정도의 값을 보일 것으로 예상된다. 각 주기별 ES-DCPD의 변화율은 0.2869%와 0.1579%가 될 것으로 기대된다. 각 주기별 기대되는 ES-DCPD의 변화율은 최대 오차의 2배(0.3%)보다 작아 충분한 신뢰성을 확보하기는 어려우나 발전 주기 전체를 고려하면 감육의 경향을 보여주는 것이 가능하리라 생각된다. ES-DCPD의 변화가 5% 이상이 된다면, 엘보우#1의 경우 사용 가능 두께인 $0.875t_{norm}$ 이상의 감육을 예상할 수 있으므로 교체 혹은 UT 검사를 통한 정밀 검사의 필요성을 검토할 필요가 있고, 엘보우 #2의 경우에는 국부허용두께인 $0.9t_{crit}$ 정도의 감육을 예상할 수 있으므로 UT를 통한 정밀검사가 수행되어야 한다.

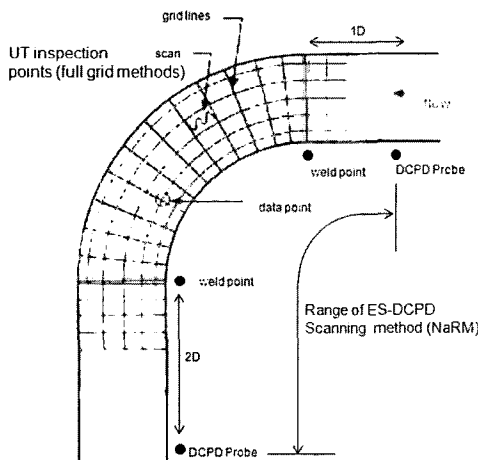


Fig. 4 NaRM application method

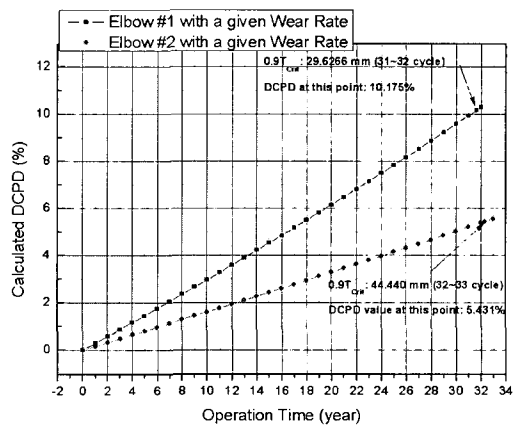


Fig. 5 DCPD changes (%) with plant cycles for NaRM in elbows

Table 2 ES-DCPD (%) with ES-DCPD NaRM technique in elbows

Geometry Type	Material	Pipe OD (inches)	t_{norm} (mm)	t_{crit} (mm)	Pred. Ave. Wear rate
90-Deg Elbow #1	A234 WPB	20	38.1	32.9184	0.010545 mm/year
90-Deg Elbow #2	A234 WPB	30	50.8	49.3776	0.007751 mm/year
Geometry Type	Calculated Potential Drop (%)				
	$0.875t_{norm}$	$0.9t_{crit}$	t_{cutoff}		
90-Deg Elbow #1	5.4217	10.175		16.265	
90-Deg Elbow #2	5.4217	5.431		16.265	

3. ES-DCPD를 이용한 배관 감육 관리 절차

현재의 감육 관리 절차는 감육 예측 프로그램과 발전소 운영 경험에 의해 감시 컴퍼넌트를 선정하고 이들 컴퍼넌트 중 일부를 선별하여 UT에 의한 정밀 검사를 수행하는 내용으로 이루어진다. 최근에는 감육 예측 프로그램의 불확실성[11]과 발전소의 노후화를 고려하여 선정 개소를 기존의 개소보다 증대하여 발전소 배관의 건전성을 확보할 필요성이 제기되고 있다. 일본의 경우 미하마 원전 배관 파단에 의한 인명 사고 이후 감육 감시 대상 개소를 3000개소에서 8000개소까지 확대한 것으로 보고되고 있다[14].

본 연구에서 개발된 ES-DCPD를 이용한 새로운 감육 관리 절차를 Fig. 6에 나타내었다. 감육의 불확실성을 고려하여 감육 관리 대상을 확대 선택한다. UT의 경우 감육에 대한 비교적 정밀한 감시가 가능하지만 검사에 다소의 시간이 소요되기 때문에 확대 선택된 관리 대상을 모두 검사하기는 어려움이 따를 수 있다. 따라서 광역감시 기법과 협역감시 기법을 사용하여 스크리닝하여 일차적으로 감육의 유무를 선별한다. ES-DCPD를 이용한 감육감시는 비교적 넓은 부위를 단열재의 제거 없이도 빠르게 검사할 수 있어 빠른 감육의 스캐닝이 가능하다. ES-DCPD의 진단 결과 감육이 기대 이상으로 발생하였을 것으로 보고되어지는 컴퍼넌트에 대해서는 UT 정밀 검사를 수행하여 배관의 신뢰성을

확보한다. 그리고 이러한 스크리닝 기법을 통해서 UT 미검사 컴퍼넌트에 대해서도 신뢰성을 확보할 수 있다. 미하마 원전 사고의 경우 다음 주기 검사 수행을 결정한 부분에서 파단 사고가 발생했던 점을 고려해 볼 때[14] 이러한 UT 검사 누락부의 신뢰성 확보가 발전소 배관의 안전성에 크게 기여할 것으로 생각된다. 본 논문에서는 언급하지 않았으나, 현재 일부 CANDU 피더 배관에 적용되고 있는 온라인 감육 감시의 경우 ES-DCPD를 이용한 방법이 효율적임을 확인하였다[10]. UT 정밀 검사 결과 감육이 필요 이상으로 진전되었으나 교체가 이루어지지 않은 컴퍼넌트에 대해서 그리고 캔두 피더 배관과 같은 안전 관리 배관에 대해서는 ES-DCPD를 이용한 온라인 감시를 통해 그 신뢰성을 확보할 수 있다.

4. 결론

배관의 감육을 비교적 넓은 범위에 대해서 빠르게 진단할 수 있는 ES-DCPD 방법이 제시되었다. ES-DCPD를 이용한 광역 감시 기법은 상당히 넓은 배관 영역을 대상으로 감육의 정도를 빠르게 스크리닝할 수 있는 기술이고, 협역 감시 기법은 감육이 발생할 것으로 기대되어지는 충분한 영역을 한번에 커버하면서도 대상 컴퍼넌트에서의 국부적인 감육을 상당히 정확히 진단할 수 있음을 확인하였다. ES-DCPD의 최대 에러는 오프라인 적용 시에는 0.1347%, 온라인 적용 시에는 0.248%를 넘지 않음을 실험을 통해 확인 하였다. 실제 배관에 이 방법을 적용할 경우 충분한 데이터를 장시간에 걸쳐 취득하기는 어려우므로 최대 오차의 2배 이상의 신호 변화(0.3%, 0.5%)가 있다면 충분한 신뢰성으로 감육을 판별해 낼 수 있을 것으로 추정한다. 실제 발전소 배관의 Checworks에 의한 감육율을 바탕으로 매 주기 감육에 의한 ES-DCPD의 신호 변화가 이러한 최대 오차를 고려하여도 어느 정도 감육의 경향을 지시할 수 있음을 확인하였다. ES-DCPD를 이용한 광역 및 협역 감시 기술을 이용하여 새로운 감육 관리 절차를 제시하였다. 이 절차는 ES-DCPD에 의한 감육 발생부의 일차적인 스크리닝 기법과 스크린 된 영역에 대한 UT 정밀 검사, 그리고 필요한 경우 ES-DCPD를 이용한 온라인 감육 감시 방법으로 구성되어 있다.

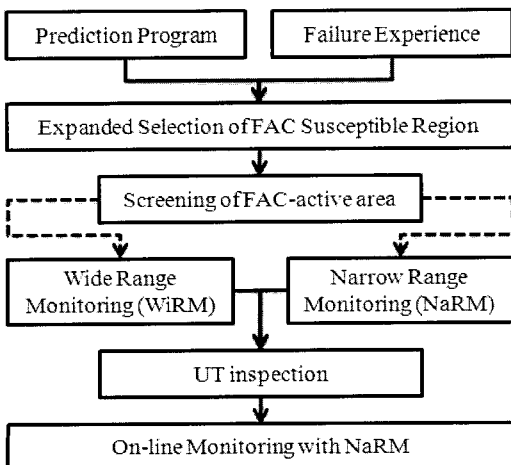


Fig. 6 Suggested FAC management program with ES-DCPD technique

참고문헌

- [1] J. Ducreux, "Theoretical and experimental investigation of effect of chemical composition of steel on their erosion-corrosion resistance," Paper 19 presented to the Specialists Meeting on "Corrosion-Erosion of Steels in High Temperature Water and Wet Steam," (1982)
- [2] A. Machiels, Recommendations for an Effective Flow-Accelerated Corrosion Program (NSAC-202L-R3), EPRI 1011838 Final Report, Electric Power Research Institute, (2006)
- [3] Kyung Ha Ryu, Na Young Lee and Il Soon Hwang, "A study on the equipotent switching direct current potential drop method for the monitoring of piping thinning," Key Engineering Materials, Vols. pp. 345-346, (2007)
- [4] Kyung Ha Ryu, Il Soon Hwang, Na Young Lee, Young Jin Oh, Jin Ho Park and Chang Ho Sohn, "Screening method for pipe wall loss by flow accelerated corrosion," Paper 89 presented on "13th International Conference on Environmental Degradation in Nuclear Power Systems," (2007)
- [5] American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, ASTM Method E1820-01, Annual Book of ASTM Standards, Document Number E1820-01, (2003)
- [6] H. H. Johnson, "Calibrating the electric potential method for studying slow crack growth," Materials Research and Standards, Vol. 5, No. 9. pp. 442-445, (1965)
- [7] U. S. N. R. C. An Evaluation of J-R Curve Testing of Nuclear Piping Materials Using the Direct Current Potential Drop Technique, NUREG/CR-4540 Report, (1986)
- [8] G. M. Wilkowski and J. O. Wambaugh, "Single-specimen J-resistance curve evaluations using the direct current potential method and a computerized data acquisition system," Fracture Mechanics: Fifteenth Symposium, ASTM STP 883, R. J. Sanford, American Society for Testing and Materials, pp. 553-576 (1984)
- [9] Kyung Ha Ryu, Na Young Lee and Il Soon Hwang, "Development of a piping thickness monitoring system using equipotent switching direct current potential drop method", Paper 7226 presented on "International Congress on Advances in Nuclear Power Plants" (2007)
- [10] Kyung Ha Ryu, Il Soon Hwang, Na Young Lee, Ji Hyun Kim, Jin Ho Park and Chang Ho Sohn, "Online monitoring method using equipotent switching direct current potential drop for piping wall loss by flow accelerated corrosion", Paper presented on "International Conference on Flow Accelerated Corrosion," Vol. 1-3, pp. 132-144, (2008)
- [11] Bindi Chexal, Jeffrey Horowitz, Robin Jones, Barry dooley, Chris Wood, Michel Bouchacourt, Francois Remy, Francis Nordmann and Pierre St. Paul, Flow-Accelerated Corrosion in Power Plants, EPRI 106611 Technical Report, Electric Power Research Institute, (1996)
- [12] R. B. Doolwy, R. M. Tilley, V. K. Chexal, J. S. Horowitz and D. P. Munson, Guidelines for Controlling Flow-Accelerated Corrosion in Fossil Plants, EPRI 108895 Final Report, Electric Power Research Institute, (1997)
- [13] A. Machiels, Guideline for Plant Modeling and Evaluation of Component Inspection Data, EPRI 1009599 Final Report, Electric Power Research Institute, (2004)
- [14] Secondary Piping Rupture Accident at Mihama Power Station, Unit 3, of Kansai Electric Power Co. Inc. Final Report," The Nuclear and Industrial Safety Agency, (2005)