

부착력과 임피던스를 이용한 에폭시 도장재 열화 특성에 관한 실험적 평가

Experimental Evaluation on Degradation Characteristics of Epoxy Coating by Using Adhesion Force and Impedance

나 환 선* 김 노 유** 권 기 주*** 송 영 철***
Nah, Hwan-Seon Kim, Noh-Yu Kwon, Ki-Joo Song, Young-Chol

Abstract

The purpose of this paper is to quantitatively investigate aging state of epoxy coating on containment structure at nuclear power plant. In order to evaluate an physical bonding of the epoxy coating, adhesion test was performed on a degraded epoxy coating on concrete specimens fabricated by accelerated aging experiment. In addition, impedance data by ultrasonic test were measured to compare with adhesion data. From almost 50 % of the specimens, aging phenomena of epoxy coating such as pin hole, blistering was discovered. To improve reliability on quality degradation of epoxy, co-relation between two kinds of different data was analyzed. By tracing co-related these data, it was possible to figure out physical state of as-built epoxy coating. The possibility to develop new methodology of time - dependent aging state on epoxy coating was found and discussed.

Keywords : Epoxy Coating, Aging acceleration, Impedance, Adhesion, Nuclear Power Plant

1. 서 론

실험연구 대상 원자력발전소 구조물은, 건설된 이후 19년이 경과한 구조물로서 현재, 설계시 예측한대로 건전성이 유지되어 왔는지를 정량적으로 확인하기 위한 다양한 연구가 진행 중에 있다.

본 연구의 목표는 운전중인 원자력발전소 구조물 중

격납건물 내벽에 노출된 에폭시 도료의 일정한 실내 온도 조건 아래 열화정도를 정량적으로 평가하는 유지관리 기법 개발이다. 현재까지 에폭시 도장의 유지관리 방법은 원자력발전소의 특성상, 1 년에 1 회 운전정지 중 보수할 기회가 제공되나, 시간경과에 따른 열화정도를 단기적인 외관검사에 의존할 수 밖에 없었다.

* 한전 전력연구원 선임연구원

** 한국기술교육대학교 교수, 공학박사

*** 한전 전력연구원 책임연구원

**** 한전 전력연구원 책임연구원, 공학박사

E-mail : hsnah@kepri.re.kr 019-463-7363

• 본 논문에 대한 토의를 2003년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2003년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

따라서 에폭시 도료의 품질저하 현상에 대한 정량적인 예측의 필요성이 대두되어 왔다.

본 연구목적은 발전소내부 환경조건내 에폭시도료를 실험을 통해 정량적 평가가 가능한가를 확인하는데 있다. 실험대상 도장시스템은 중수로형 발전소 격납건물 콘크리트 내벽에 적용되는 에폭시 도장시스템이다. 콘크리트 표면에 도포된 에폭시 도장의 열화 특성 분석을 위해 시공 및 유지관리 단계에서 예상되는 주요 열화 촉진 인자를 선정한 다음 열화촉진 실험을 수행하였다. 또한, 열화 촉진된 시편에 대하여 초음파를 이용한 임피던스 변화 측정과 부착력 실험을 수행한 다음, 상호 분석된 결과를 통해 신뢰할 만한 열화도와의 정량적 평가를 수행하였다.

2. 실험개요

2.1 시편제작

콘크리트 시편제작에 사용된 골재 및 시멘트는 Y 원자력발전소 건설현장에서 사용된 재료와 동일한 19mm 굵은 골재와 5종 시멘트를 사용하여 가로 50×세로 50× 두께 50mm의 정육면체로 제작하였다. 양생조건은 겨울철 현장 타설 조건인 대기온도 10℃와 여름철 조건인 30℃로 각각 구분 양생하였다. 양생된 콘크리트 시편은 표면 요철, 레이턴스와 같은 표면 결함을 제거하기 위하여 연마하여 도장전 처리 작업을 하였다. 제작된 콘크리트 시편 위에 원자력발전소 설계조건을 만족하는 한 국내 K사 제품 에폭시 도료를 도포하였다. 도장시의 대기 온도조건은 18℃, 콘크리트 표면의 수분 함유율도 6% 이내의 기준을 만족하였다. 1차 도장은 EP 1120으로 표면에 발생된 작은 공기 구멍등의 표면결함(pin hole)을 제거하고 동시에 부착력을 양호하게 할 목적으로 모래가 함유된 에폭시 그라우트(sand filled epoxy grout)를 적용하였는데 도장전 콘크리트 시편과 도장 후의 시편의 모습은 Fig. 1과 같다. 2차 도장부터 5차 도장까지는 ET 5140 에폭시 도료를 적용하였다. 매회 도장 두께는 3~5 mils로 시방서 기준을 준용하였고 매회 도포 후 충분한 양생을 위해 상온에서 최소한 3일간의 건조기



(a) 시편 양생 (b) 에폭시 도포

Fig. 1 시편제작과정

간을 거쳐 도막 두께 20~24 mils인 표준 도막 두께와 1.5배인 과도막 두께의 두 종류로 구분 제작하였다.

2.2 열화촉진 시험 항목 및 조건

설계 조건이외 시공재료 및 유지관리에서 발생될 수 있는 열화 촉진 인자는 수분, 온도이다. 이러한 점에 착안하여 적용된 열화 촉진 항목은 깨끗한 물 100℃, 80℃, 60℃에서 64일 각각 침적시킨 조건, 염화칼슘 5%, 온도 35℃ 조건에서 64일 염수 분무조건, -20℃에서 12시간 그리고, +60℃에서 12시간을 64일 반복 조건에서 실험을 수행하였다. 각각의 시편 측정 시점은 콘크리트의 경우, 1, 8, 16, 32, 48, 그리고 64일 경과 후, 열화촉진 시험항목별로 각각 채취하여 검사하였다. 각 검사 시편에 대한 자세한 열화조건 및 종류는 Table 1과 같고, 시험 과정은 Fig. 2와 같다.

Table 1 열화촉진 주요인자별 촉진실험 (단위 : 갯수)

열화촉진 시험항목	측정일자 시험조건	최초	1일	8일	16일	32일	48일	64일
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	
부착력	Dolly Test	2	2	2	2	2	2	2
중수침적	60℃	3	3	3	3	3	3	3
	80℃	3	3	3	3	3	3	3
	100℃	3	3	3	3	3	3	3
내한내열	-20℃*12시간 +60℃*12시간	3	3	3	3	3	3	3
고온고습	100℃*95% 상대습도	3	3	3	3	3	3	3



(a) 청수60°C 침적 (b) 항온항습기열화촉진

Fig. 2 열화촉진 광경

2.3 시험방법

(1) 부착력

부착력 시험은 열화촉진 된 시편을 ASTM D4541에 따라 수행하였다. 첫 번째 열화촉진 직후 부착력 측정은 Elcometer 106 모델을 사용하였고, 6개월이후 두 번째 부착력 측정은 측정값의 정밀도를 높이기 위해 Fig 3(a)에 나타난 Elcometer 110 모델을 사용하였다. Elcometer 110 모델을 이용한 부착력 시험에 사용된 압력 매체는 최소 9기압 이상의 압축 산소를 사용하였다. 돌리(dolly)의 접착제는 에폭시 2액형 접착제를 사용하며 Fig. 3(b)에서 보여주는 것과 같이 돌리(dolly) 표면 및 시편에 가볍게 접착을 시킨 후 최소 24시간 이상 상온 경화 후 측정하였으며, 부착력 시험기의 측정 허용오차 $\pm 5\%$ 였다. 설계조건에서 콘크리트에 도포된 재료의 부착력은 최소 방사선 조사량이 2×10^9 rad 에 노출되거나, 충격저항 시험에 통과된 시편의 경우엔 최소 79.7 psi 의 최소 인발 부착력을, 위와 같은 환경 조건이 아닌 경우에는 최소 101.5 psi의 최소 인발 부착력을 각각 지녀야 한다. 부착력의 시험은 각 시편 당 최소 1 개소 이상에서 수행되었으며, 접착제에서 일부 탈락하는 현상의 경우, 또는 너무 턱없이 값이 높거나 낮은 경우에는 재 시험을 수행하였다. 단, 부착력 성능 시험시, 열화 상태의 차이가 많이 나는 곳에서는 외견상 평균적인 상태의 표면을 선택하여 부착력 시험을 수행하였다.

(2) 임피던스

에폭시 도장재의 임피던스를 측정하는 방법은 앞에서 설명한 것과 같이 에폭시 도장재 표면에 초음파를 입사시키면 도장재 표면에서 접촉매질인 물과 에폭시



(a) Elcometer110 부착력 시험기로 수행중인 광경 (b) 돌리 탈착 후 광경

Fig. 3 부착력시험

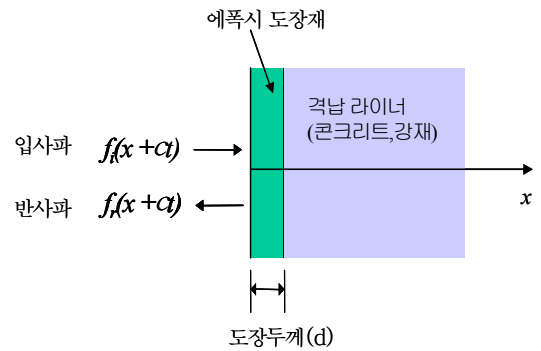


Fig. 4 에폭시 도장재 표면에서의 초음파 반사

사이의 임피던스 차에 의해 반사파가 만들어지는데 이 반사파의 크기를 측정하면 에폭시 도료의 임피던스를 계산할 수 있다. 다음그림은 그 원리를 설명하는데 강재나 콘크리트 라이너 위에 도포된 에폭시에 초음파를 입사시킨 후 반사되는 초음파의 크기를 측정하면 그 반사 에너지의 크기는 식(1)에서 설명한 수학적 관계로부터 에폭시의 임피던스를 구할 수 있다.

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, T = \frac{2 Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (1)$$

$$Z = \rho V$$

ρ : 재료의 밀도, V : 초음파의 속도

Z : 임피던스, R : 초음파의 반사계수

그러나 식(1)에서 정의된 반사계수는 이론적인 것으로 실제 재료에서의 반사계수는 임피던스만의 함수는 아니고 조도나 waviness등과 같은 표면상태에 따라 매우 민감하게 변하므로 이 방법으로 도장재의 임

피턴스를 측정하기는 곤란하다. 에폭시 도장재의 경우 표면 조도는 위치에 따라 크게 변하지 않으나 라이너 표면에 따라 도포되기 때문에 굴곡이 많은데 콘크리트 라이너의 경우는 도장의 두께 자체도 크게 변할 뿐만 아니라 도장두께와 같은 정도까지 표면 굴곡이 심하다. 이 문제를 최소화하기 위해서는 도장재에 입사되는 초음파의 빔(beam) 사이즈를 최소화하는 것이 필요하다. 초음파 빔을 작게 하기 위해 우선 음향렌즈를 사용하는 방법이 있지만 이것 역시 초점거리를 항상 일정하게 유지할 수 있어야 하는데 표면의 굴곡과 렌즈와 도장재 사이의 매질(couplant) 때문에 현장에서의 검사방법으로는 부적절하다. 본 실험에서는 이를 위해 콘(cone)모양의 특수 췌기(wedge)를 제작하여 도장재 표면에 입사되는 초음파의 빔 면적을 대폭 감소시켰는데 Fig. 5에서 그 구조를 보여주고 있다. 췌기(wedge)의 상단부의 지름은 15mm이며 하단부의 지름은 약 1mm이다.

실험장치는 초음파를 수신하는 센서부는 상용 10MHz 종파센서(Panametrics A130)를 콘(cone)형태인 췌기(wedge)의 상단부에 부착하여 일체로 결합시켜 만들어졌다. 검사용 에폭시 열화 시편은 원통형 강봉 시험대 위에 설치되는데 이 시험대는 수직으로 미세하게 이동할 수 있도록 마이크로미터가 설치되어 있으며 두꺼운 평판 내의 원통 홈을 통해 연결되어 상하운동이 가능하도록 제작되었다. 센서부와 췌기(wedge)는 에폭시 도막(film) 표면위에 일정한 간격을 두고 설치하고 췌기(wedge) 끝단과 시편편 사이에는 매질(couplant) (Kraut- kramer ZG)를 얇게 도포하여 초음파가 전달하도록 하였다. 실험방법은 센서를 도막(film)에 근접한 입의의 수직위치에(본 실험에서는

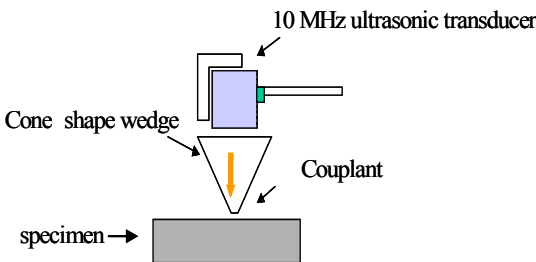


Fig. 5 임피던스 측정장치 개념도



(a) 측정준비작업

(b) 측정장면

Fig. 6 임피던스 측정

1mm) 고정시킨 후 도막시편으로부터의 반사 신호를 우선 측정하여 이것을 기준 반사파라고 정의한다. 그리고 마이크로미터를 이용하여 시편을 매우 미세한 거리(본 실험에서는 $50 \mu\text{m}$)를 움직인 후 반사파를 측정한다. 이것을 측정 반사파라고 한다. 두 반사파의 차이를 비교 반사파라고 하고 이를 근거로 하여 반사계수 R 을 결정하였다. 반사계수 R 을 결정할 때는 표면이 매끄러운 철제 표준시편의 반사파를 위에서 기술한 방법으로 측정한 값을 기준으로 계산하였다. 이런 과정을 통해 반사파를 측정하는 것은 췌기(wedge)의 잠음성분을 제거하여 보다 정확한 측정을 하기 위한 것이다. 반사계수 R 이 결정되면 식(1)에 의해 에폭시 도막의 임피던스를 계산하였다.

실험장치는 평면초음파 센서와 초음파 송수신장치, 디지털 저장형 오실로스코프와 속도계산과 초음파 파형저장, 디스플레이를 위한 컴퓨터로 구성된다. 임피던스는 각각 시편에 대해 최소 3점을 선택하여 각각의 점에서 임피던스를 측정한 후 이 값들을 모두 합산하여 그 시편의 평균값을 취하였다. 그 중 일부 데이터는 각 시편 3점 각각의 임피던스 값을 최소 3개소에서 5개소까지 같은 장치를 이용, 측정하였다.

2.3 분석방법

데이터 취득 시점을 열화 촉진 실험 이후 6개월 경과 전, 후로 구분하여 비교하였다. 에폭시 도료와 같은 고분자 재료의 특성상 수분의 함유 정도에 따라 물성 또는 부착력이 달라질 수 있으므로, 이에 대한 비교와 또한 침적촉진 직후의 결과와 6개월 경과한 기전 상태의 시험 결과가 어찌 다른지를 비교하였다.

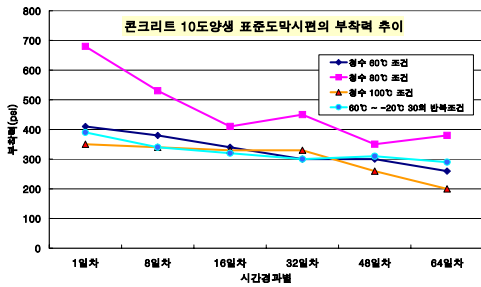
열화된 시편에 대하여 부착력의 변화 추이, 임피던스의 변화 추이를 열화 촉진 인자 즉, 침적 60, 80, 100 °C 조건과 비교하고 도막 두께별로도 어떤 차이가 있는지를 살펴보았다. 또한 부착력과 임피던스 사이에 어떤 상관관계가 있는지를 확인하였다.

3. 실험 결과 분석

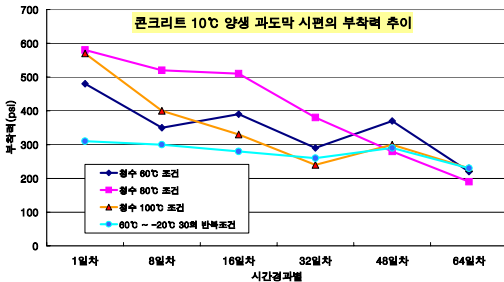
3.1 부착력

(1) 실험직후 부착력

콘크리트를 10°C로 양생하였을 경우 표준도막 시편의 부착력시험 결과를 Fig. 7(a)에 표시하였다. 이 그림으로부터 열화 경향을 가장 잘 나타낸 조건은 청수 80°C 침적 조건에서 확인할 수 있었는데 초기 부착력 대비 감소된 부착력의 비율도 다른 환경조건에 비해 가장 큰 49%로 나타났다.



(a) 표준도막시편



(b) 과도막 시편

Fig. 7 실험직후 부착력

나머지 다른 열화촉진 조건에서도 대체적으로 선형적인 열화가능성을 확인할 수 있었다. 가장 부착력 감소율이 작은 조건은 콘크리트 10°C 양생한 과도막 시편 조건과 마찬가지로, 반복침적조건에서 측정되었는데, 감소율은 26%로 확인되었다.

콘크리트를 10°C로 양생한 과도막 시편의 부착력 분석내용은 Fig. 7(b)에 나타나 있는데 초기 부착력에 비해 6회차 부착력이 가장 급격하게 감소한 청수 80°C 침적 조건에서 보였으며 그 부착력의 감소비율은 67%에 이르렀다. 그러나 청수 100°C 침적조건에서 살펴보면 6회차 부착력까지의 감소비율은 60%에 머물렀지만 2회 차부터 6회 차에 이르기까지 부착력의 감소 경향은 상대적으로 더욱 악화되었음을 알 수 있다. 시편 제작 과정에서 모체 또는 과도막의 상태로 도포하는 일련의 제작과정에서 발생할 수 있는 데이터를 포함하여 6회 차의 부착력의 값이 다소 80°C 침적 조건보다 높게 측정된 점을 감안하더라도 전체적으로 100°C 침적조건에 비해 부착력이 대체적으로 낮은 값을 측정을 보이고 있다.

(2) 6개월 경과후 부착력

수중 침적된 시편의 부착력 분석 시점에 따른 결과는 판이하게 다른 양상을 띠었다. 첫째, 수중 침적된 시편의 열화촉진 시점에 분석된 부착력의 변화는 열화촉진 시간이 길어질수록, 부착력이 감소되는 추세를 보였으나, 6 개월 경과후 수분이 함유된 시편에서 수분이 충분히 증발된 상태인 기건상태에서의 부착력은 오히려 증가한 것으로 나타났다.

시험결과를 Fig. 8에서 보여주고 있는데 콘크리트 10 °C 로 양생한 정상도막 계열의 부착력에 관한 변화 추이를 살펴보면, 60°C 침적조건에서 1일차 열화촉진 시편과 부착력의 값이 최대 62%, 64일 열화촉진 최종 부착력 기준으로 보면 45% 증가되었으며, 80°C 조건의 경우엔 21%, 100°C 조건의 경우엔 26% 각각 증가되는 경향을 보였다.

콘크리트 30°C 양생한 정상도막 계열의 부착력의 경우, 뚜렷한 부착력의 변화 추이를 명백하게 입증하기는 어렵지만 60 및 100°C 침적조건에서 1일차의 부착력 대비 열화 촉진 시편의 6개월 경과후의 부착력

을 비교해보면, 최대 20%, 80°C 침적조건에서 부착력은 7%의 증가 추세를 보였다.

표준도막 두께의 1.5배의 과도막 두께 시편의 6개월 경과 후의 기건 상태에서 측정된 부착력의 분석 결과도 표준도막시편의 양상과 크게 다르지 않았다. 30°C 양생 과도막 두께 시편의 80°C 침적 조건에서 최대 58%의 증가 추세를 보였고, 60°C 침적 조건에서는 19%의 증가, 100°C 침적 조건에서는 초기열화 시편의 결과와 거의 변화가 없는 값을 얻었다. 콘크리트를 10°C로 양생 과도막 두께 시편의 60°C 침적 조건에서 최대 58%의 증가 추세, 80°C 침적 조건에서 29%의 증가, 100°C 침적 조건에서 22%의 부착력 증가 경향을 나타냈다.

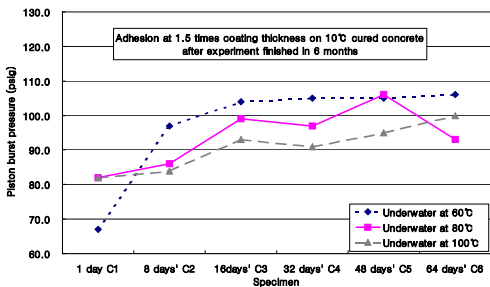
콘크리트 양생 온도 조건에 따른 변화나 특색은 찾기 어려웠다. 초기 열화촉진 시편 대비 부착력의 편차는 과도막 계열에서 훨씬 더 큰 것으로 분석되었다. 열화촉진 직후, 포화된 상태의 수분을 함유한 시편의 경우에 비해 열화촉진 온도인자별로 뚜렷한 경향을 찾

기는 힘들었다. 그러나, 전반적으로 초기 열화 촉진 시편의 경우보다 부착력이 점증적으로 20% 정도 증가된 점은 주목할 만 하다. 에폭시 도장과 같은 고분자 소재의 특성상 수분함유량에 따라 부착력 값의 편차가 심하며, 열, 온도, 수분이 관계된 열화 촉진 실험 직후의 결과는 나름대로의 일정한 경향을 찾을 수 있었으나, 6개월이 경과한 이후의 부착력은 오히려 전체적으로 상승하였다. 이는 열화촉진실험에 사용되었던 침적환경에서 기건상태로 되돌아오는 과정에서 수분이 증발되는 과정에서 일어나는 역현상으로 해석된다. 이 결과와 임피던스 값이 일치하는 경향을 보인다면, 부착력과 임피던스와의 어떤 상관관계를 도출하는 데는 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

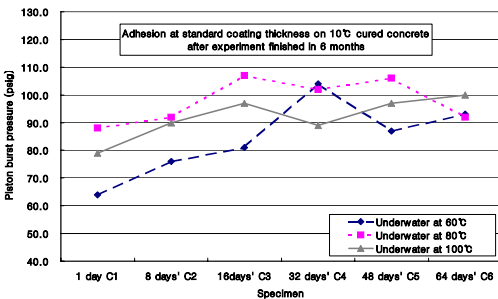
3.2 임피던스 변화 추이에 의한 분석

(1) 촉진실험직후 임피던스

에폭시 도장계의 경우에도 임피던스 값이 위치와 시편에 따라 5-8% 정도 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이 현상은 도막의 두께가 얇아질수록 심하였는데 당연히 도포두께가 작아질수록 모재인 콘크리트나 강제 라이너의 표면특성이 더 많이 도막표면에 영향을 주기 때문이다. 또한 도막의 두께가 두꺼운 경우가 얇은 경우보다 표면의 열화가 상대적으로 더욱 심한 것으로 나타났다. 과도막 시편의 경우는 Fig. 9(b)에서 보여주는 것과 같이 전체적으로 열화시간이 길어질수록 임피던스 값이 감소하는 경향을 잘 보여주고 있다. 청수침적 100, 80, 및 60°C 조건에서 임피던스의 감소가 제일 커서 초기시편에 비해 최대 20% 정도의 임피던스 값의 감소가 32일차, 64일차의 측정점에서 확인되었다. 내한내열 환경조건, 고온고습 환경조건 순서로 임피던스 감소가 확인되었다. 이것은 청수침적에 의한 열화가 고온고습이나 내한내열조건보다 에폭시의 열화에 더 기여한다는 점이다. Fig. 9(a)에 나타난 표준도막 시편의 경우 임피던스 값을 조사해보면 대체로 열화시간이 길어질수록 임피던스 값의 감소경향을 보이지만 국부적으로 경향이 뚜렷하지 않거나 오히려 증가하는 것을 관찰할 수 있는데 신호잡음이라고 판단된다.

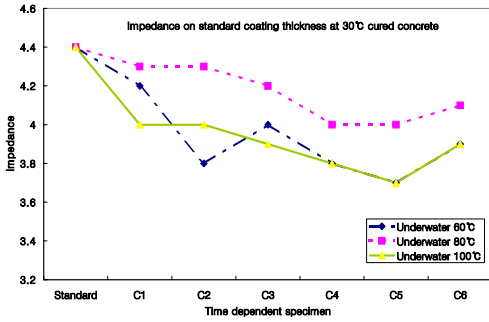


(a) 표준도막시편

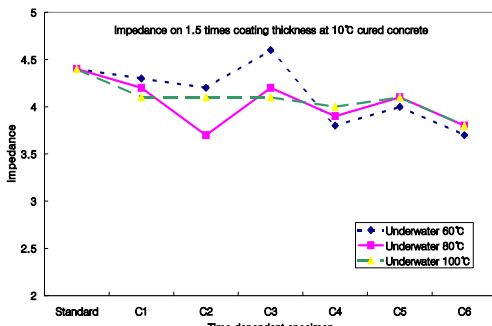


(b) 과도막시편

Fig. 8 6개월 경과후 부착력



(a) 표준도막시편



(b) 과도막시편

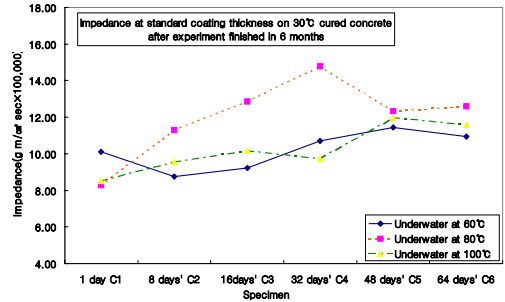
Fig. 9 실험직후의 임피던스

열화시간에 따른 임피던스 감소 폭은 앞서 지적한 대로 과도막에 비해 상대적으로 작아 약 초기시편에 비해 대략 10~15%정도인 것으로 나타났다.

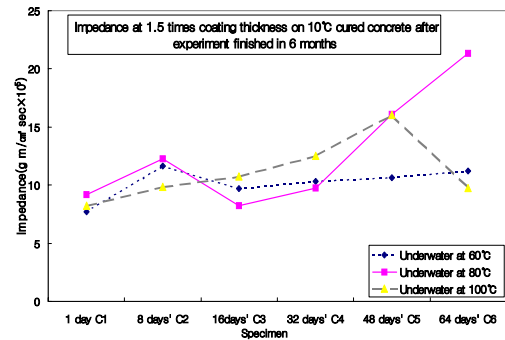
(2) 6개월 경과후 임피던스

6개월이 경과된 임피던스 분석 결과도 부착력 결과와 유사하게 나타났다. 콘크리트를 10°C 양생한 표준도막 계열의 임피던스 변화 추이에서 다른 계열에 비해 가장 이상적인 임피던스 변화 추이를 확인할 수 있었다. 60, 80, 100°C 각각의 침적조건에서, 1 일차 열화 촉진 시편과 최대 임피던스 값과의 편차가 12, 77, 165% 각각 증가되었다.

콘크리트 10°C 양생 과도막 계열의 임피던스 변화 추이를 살펴보면, 60, 80, 100°C 침적조건인 경우, 1일차 열화 촉진 시편과 64일차 열화 촉진 기간중 최대 임피던스 값과의 편차가 45, 133, 95%



(a) 표준도막시편



(b) 과도막시편

Fig. 10 6개월 경과후 임피던스

각각 증가되는 것으로 나타났다.

콘크리트 30°C 양생 표준 도막 계열의 임피던스 변화는 침적온도별에 따라 차이가 있었으나 최소13~최대 78%의 증가 경향을 보였으며, 과도막 계열의 임피던스는 최소 22~최대 112%가 증가되었다. 임피던스 변화 폭이 큰 경향인자는 침적 100, 80, 60°C 순서이며, 시편제작 환경별로는 10°C 양생 정상도막 계열, 30°C 양생 과도막 계열에서 크게 나타났다.

표준도막 계열의 도막두께에 따른 임피던스 비교 결과, 과도막 시편에서 그 임피던스 편차가 훨씬 큰 것으로 분석되었는데, 이는 함유한 수분이 빠져나가면서 밀도 증가가 1.5배 두꺼운 과도막에서 더욱 크게 형성되어 임피던스 증가의 폭이 큰 것으로 판단된다.

3.3 부착력-임피던스 상관열화도

부착력시험 분석결과에 따르면 청수침적 조건에서 초기시편 대비 열화 후 시편에 대한 부착력의 감소율이 증가하였고, 염수분무조건 또는 저·고온 반복 침적조건에서 상대적으로 부착력의 감소 폭이 작았다. 부착력의 감소 폭이 작을 경우엔 측정된 값이 오차범위 구간 내에 있을 개연성을 감안하여 상대적으로 부착력의 감소폭이 큰 청수침적 조건에서 측정된 데이터만으로 분석하였다. 임피던스 측정값의 경우엔 과도막 두께 시편의 데이터만으로 에폭시 도장재의 열화특성에 관한 상관관계를 1대1 대응하는 방법으로 정량적 열화도 대상범위를 축소하였다.

열화축진 직후의 상관열화도 분석결과는 Fig. 11 과 같다. 강제시편의 경우에는 콘크리트 시편보다 비교적 쉽게 열화도의 경향을 확인할 수 있었다. 예를 들어, 청수침적 100℃, 양생온도 10℃의 과도막인 콘크리트시편의 경우 부착강도의 감소율이 초기시편 대비 50% 이상인 시점에서 비록 부착력은 설계 기준값인 101psi를 상회하는 결과를 보였지만 외관검사 결과, 열화가 이미 발생되고 있는 것을 확인할 수 있었다.

청수침적에 의한 열화축진실험 직후와 6개월 경과 후 수분 증발된 기건상태에서 측정된 임피던스 결과 및 그 경향이 상반된 것으로 나타났다. 부착력에 있어서도 수분 함유량에 따라 그 차이가 크게 나타났다. 이는 임피던스 측정값이 청수침적 및 열적열화에 의해 에폭시 도료가 부풀음 현상으로 고분자의 망상구조가 느슨한 상태에서 얻어진 것으로 판단된다. 임피던스에 영향을 미치는 요인은 초음파속도와 밀도이며, 에폭시 도료의 밀도가 저하될 때 표준 시편에 비해 임피던스 값이 떨어지는 경향을 나타냈다. 그러나, 수분증발된 기건상태의 열화시편은 수분증발에 따라 밀도가 증가되어 임피던스 값이 커짐을 확인하였다. 원자력 발전소 격납건물 내부 환경조건을 고려하고 열화축진 인자로 선정된 수분에 의한 영향을 최소화하기 위해서는 임피던스의 정량적 값에 의존하여 열화도를 평가하는 것보다는 기건상태에서 시간에 따른 임피던스 변화율을 고려하는 편이 더 신뢰도가 높다.

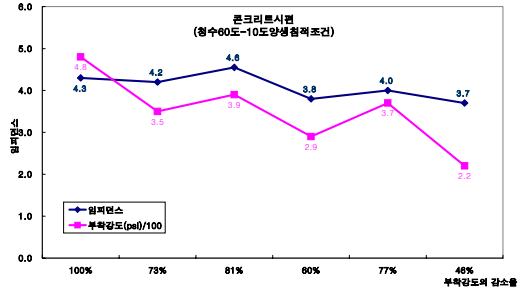


Fig. 11 실험직후 임피던스-부착력 상관도

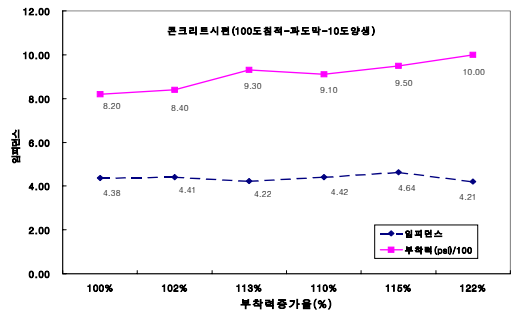


Fig. 12 6개월 경과후 임피던스-부착력 상관도

에폭시도막의 두께에 따른 열화정도를 분석해 볼 때 과도막두께가 두꺼울수록 모체의 표면상태가 균질할수록 유효한 임피던스 값을 얻을 수 있었다. 실제 원자력발전소의 환경은 설계조건이나 시공당시보다 유지관리의 과정에서 보수도장 작업을 수행하면서 도막이 두꺼워질 가능성이 많다는 점을 고려하면 보다 양호한 평가가 가능할 것이다.

콘크리트 시편 10℃ 양생한 경우에 부착력의 감소가 더욱 심한 것으로 확인되었는데 과도막 상태에서는 청수 60, 80 및 100℃ 침적조건에서 부착력의 감소율이 50%를 상회하였고, 표준도막 상태에서는 청수 80 및 100℃ 침적조건에서 50%에 못 미치는 감소율을 보였다. 다만, 10~20% 증가된 표준도막 두께보다는 20~40% 증가된 과도막 두께에서 부착력의 변화가 큰 것으로 나타났고 반대로 임피던스 변화 폭에서는 표준도막 두께에서 0.7 정도의 변화 폭을 과도막 두께에서는 0.4~0.3 정도의 변화 폭을 나타내는 특징을 보였다.

비록 외형상 열화 촉진되어 부풀음 현상이 발생되었다 하더라도, 도포된 도장재 내부에 흡수된 수분이 빠져나간 기건 상태와 초기 실험 직후의 수분 함유량의 차이가 컸기 때문에 측정기간에 따른 결과가 크게 다르게 나타났다. 이는 일반 재료의 특성과 달리 고분자 소재의 특성에 따른 것으로, 건조후 시편의 밀도가 다시 높아졌고 부착력 및 임피던스가 증가된 것으로 판단된다. 그러나 6개월 이후 시편에 대하여 임피던스-부착력 상관열화도를 분석해 보면 6개월 이전 시편에 대한 임피던스-부착력 상관도와 상이한 결과를 나타냈다. 도료시편에 함유된 흡수율에 따라 그 결과에 많은 편차가 있었고, 수분이 에폭시 도료 열화평가에 중요한 영향 인자임을 알 수 있다.

4. 결 론

가속 열화실험에 의해 제작된 에폭시 도장재에 대한 열화조건별 부착력 시험 및 임피던스 측정시험 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 부착력의 경우, 열화촉진 직후 결과는 정상도막, 과도막조건에 따라 각각 평균 35, 60%의 부착성능 감소를 보였다. 이에 비해 열화촉진 후 6개월 경과된 시점에서 측정한 부착력은 오히려 정상도막 조건, 과도막 조건에 상관없이 1일차 열화 시편에 비해 20% 정도 증가되었다. 에폭시 도장재 내부에 흡수된 수분이 미치는 영향이 크다.
- 2) 임피던스의 경우, 열화촉진 직후 결과는 정상도막, 과도막조건에 따라 조금 다르지만, 평균 15 ~ 20%의 임피던스 값의 감소를 보였다. 그러나 열화촉진이후 6개월 경과된 시점에서 측정된 임피던스 결과는 부착력의 경우와 마찬가지로 증가되는 경향을 나타냈다. 열화촉진 온도 조건 및 시편 제작 조건에 따라 크게 차이가 있었고, 최소 12~최대 165 %로 편차가 컸다. 또한 도막두께가 두꺼울수록, 모체의 표면 상태가 균질할수록 유효한 임피던스 값을 얻을 수 있었다.
- 3) 표면건조 내부습윤상태 에폭시의 경우, 설계기준 부착강도에 상관없이 열화시편의 부착력 감소율이 초기상태의 50%를 넘는 시점을 열화판정의 기준

으로 설정하였다. 이 때의 임피던스 값으로 에폭시의 열화도 평가 기준으로 삼았다.

부착력 성능평가, 임피던스 측정, 외관검사와 비교하여 에폭시 도장재의 물리적 특성평가를 부가한다면 그리고 기존 수행했던 분석 방법 중 최소한 두 가지 분석결과간의 상관관계를 정립한다면 에폭시 도장재의 정량적 열화평가가 가능함을 본 실험적 연구를 통해 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력 중장기 연구개발사업의 지원 하에 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국전력공사. "월성 2,3,4호기 비금속라이너의 자연 열화시험 및 평가 연구", 1998.
2. 나환선, 김우범, 송영철, "열중량 분석에 따른 에폭시 도료의 열화 특성 평가", 대한건축학회 추계학술발표, 2000.10.
3. 나환선, 김노유, 송영철, "에폭시 도장재의 정량적 열화도 평가를 위한 실험적 연구", 한국구조물 진단학회 추계학술발표, 2001. 5.
4. 나환선, 김노유, 송영철, "부착력과 임피던스를 이용한 에폭시 도장의 열화에 관한 실험적 평가(II)", 한국구조물 진단학회, 2001. 11.
5. 한국전력공사, "CP-A3 Field Finish Coating" Spec., 1992.
6. Kenneth T. Gillen, "Prediction of Elastomer Lifetimes from Accelerated Thermal-Aging Experiments", ACS, 1996
7. R. Clavreul, "Evolution of ethylene propylene copolymers properties during aging", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 131 192-197, 1997.
8. B. Bartonicek, "Life-assessment technique for nuclear power plant cables", Radia. Phys. Chem. Vol.52,1 Nos 1
9. A. miszyk, H. Szalinska, "Laboratory evaluation of epoxy coatings with an adhesion promoter by impedance", Progress in Organic Coatings 25, 357-363, 1995

(접수일자 : 2002년 8월 5일)