2001 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

중수로 원전 에폭시라이너의 열화도 평가를 위한 실험적 연구

Experimental Study for Quantative Aging Evaluation of Epoxy Liner in BWR Nuclear Power Plant

나환선*, 송영철*, 김노유**

*한전 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

**한국기술교육대학교
충남 천안시 병천면 가전리 307번지

요 약

중수로형 원자력발전소 격납건물 내부 에폭시라이너의 간 경과에 따른 열화 특성을 분석하고, 현 상태의 열화도를 정량적으로 평가할 목적으로 열화촉진 실험을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 열화 촉진 실험은 64 일간 실내에서 수행되었으며, 에폭시 시편에 대한 물리적 특성 변화, 초음파 속도 변화, 열중량 분석 결과와 부착력과의 관계를 상호 비교 분석하였다. 부착력의 경우, 초기부착력 대비 45 ~ 55%의 저하 시점을 에폭시 도장의 열화에 따른 보수 평가 기준으로 하였다. 실내 64 일간의 열화 촉진실험 직후의 초음파 임피던스와 6개월 경과후의 초음파 임피던스의 경향은 전혀 상반된 것으로 나타났다. 고분자 재료의 특성상 6개월 경과후의 시편에서는 함유된 수분이 증발하여 밀도가 증가되고, 측정된 임피던스는 실험직후 측정된 임피던스보다 증가되었다. 향후, 화학적 분석 결과를 토대로 임피던스-부착력-열중량 분석 결과의 상관 관계를 정립하여 정량적 열화도를 판별하는 기법 개발의 신뢰도를 높이고자 한다.

Abstract

The purpose of this study is an experimental approach to quantitatively evaluate the aging status of epoxy coating onto containment structure in BWR nuclear power plant. Based on accelerated aging experiment for 64 days, adhesion test was performed to evaluate an physical bonding. To compare with adhesion data, both impedance data by UT and data by thermal gravimetric analysis were obtained during experiment. At almost 50 % of adhesion force decrease, it was identified that aging phenamena of epoxy such as pine hole, blistering was discovered. coating To establish aging status of epoxy, relations among three kinds of different data were analyze. By compatibility of these data, physical aging situation of as-built epoxy coating was figured out. The possibility to develop new methodology of time-dependent aging status on epoxy coating was identified.

1. 서 론

중수로형 원자력발전소 격납 건물 라이너는 에폭시 도료로 설계 시공되어있다. 그 주된 기능은

콘크리트 격납 외벽에 압축, 인장 응력을 받을 때, 콘크리트의 투과성을 보완하는 기능을 수용하도록 방사능 누설 방지와 설비 수명 기간동안 안정적인 내부환경을 조성하도록 되어있다. 본 연구는 운전중인 발전소 내부에 적용된 에폭시 도료의 열화도를 정량적으로 평가하는 기법 개발을 위한 실험적 연구이다. 대상 도장 시스템은 중수로 형 발전소 격납 건물 콘크리트 위에 적용되는 도장 시스템을 선정하였다. 본 연구에서는 에폭시 도장의 열화 특성 분석을 위해 시공 및 유지관리 단계에서 예상되는 몇 가지 열화 촉진 인자를 추출 선정하여 열화 촉진 실험을 수행하였다. 열화 촉진된 시편 분석을 위해 초음파를 이용한 임피던스 변화와 부착력 실험을 수행한 다음, 상호 분석된 결과 치와 열화도와의 정량적 관계를 규명하고자 하였다. 그리고 열중량 분석법을 이용한 화학적 특성 변화를 통한 열화 평가 가능성을 찾아보았다.. 특히 고분자 소재의 특성상 수분에 영향을 많이 받는다는 점을 고려하여 열화 촉진된 시편의 경우, 촉진된 후와 완전 수분이 증발된 시점인 6 개월 이후에 외관상 열화현상을 보이는 상태의 경우에, 어떤 차이를 지니는 지에 초점을 맞추어 수행하였다.

2. 열화 촉진 실험

가. 시편 제작

시편은 콘크리트 위 에폭시 도장 제작하였다. 콘크리트 시편제작에 사용된 골재 및 시멘트는 실제 원자력발전소 건설현장에서 사용된 재료와 동일한 19㎜ 굵은 골재와 5종 시멘트를 사용하여 가로 50㎜, 세로 50㎜ 두께 50㎜의 정육면체로 제작한 후 겨울철 현장 타설 조건인 대기온도 10℃와 여름철 조건인 30℃로 각각 구분 양생하였다. 양생된 콘크리트 시편은 돌출부, 레이턴스와 같은 작은 표면 결함을 연마하여 도장전 처리 작업을 하였다. 제작된 콘크리트 시편 위에 도포된 에폭시 도료 시스템은 원자력발전소 설계조건을 만족한 국내 K사 제품을 적용하였다. 도장시의 대기 온도조건은 18℃의 실험실에서 수행되었고, 콘크리트 표면의 수분 함유율도 6% 이내의 기준을 만족한 상태에서 도포되었다. 1차 도장은 EP 1120으로 콘크리트 양생도중 표면에 발생된 작은 공기 구멍등의 표면 결함을 도포함과 동시에 부착력을 양호하게 할 목적으로 모래가 함유된 에폭시 도료를 적용하였다. 2차 도장부터 5차 도장까지는 ET 5140 의 에폭시 도료를 적용하였다. 매회 도장 두께는 3~5 mils로 시방서 기준을 준용하였고 매회 분무도포 후 충분한 양생을 위해 상온에서 최소한 3일간의 건조기간을 거쳐 도막 두께 20~24 mils인 표준 도막 두께와 1.5배인 과도막 두께의 두 종류로 구분 제작하였다.

나. 촉진 인자 및 실험 방법

설계 조건이외 시공재료 및 유지관리에서 발생될 수 있는 열화 촉진 인자는 수분, 온도이다. 이러한 점에 착안하여 적용된 열화 촉진 항목은 염화칼슘 5%, 온도 35℃ 상태 하에서 64일 염수 분무조건, 둘째, 깨끗한 물 100℃, 80℃, 60℃에서 64일 각각 침적시킨 조건, 셋째 -20℃에서 12시간 그리고, +60℃에서 12시간을 64일 반복 조건에서 실험을 수행하였다. 부착력 시험은 시험 방법 ANSI N512, CP-A3 Spec 9-191-A610 을 이용하여, 시험 절차 는 각 system당 5장의 도장된 시편을 준비하여 Elcometer adhesion tester로 ASTM D4541에 의거 시험을 수행하였다. 돌리(dolly)의 접착제는 epoxy 접착제를 사용하며 돌리(dolly) 표면 및 시험편에 가볍게 접착을 시킨 후 최소 7일 이상 상온에서 건조 및 경화시킨 뒤 측정하였다. 기기 보정은 검교정된 Elcometer adhesion tester ($500lb/in^2$ 또는 $1000lb/in^2$)를 사용하였다. 강재의 경우 합격 기준은 각 system당 5장의 시험편을 측정하여 그중 4 장 이상이 200 lb/in^2 이상의 부착력을 유지하여야 하며, 콘크리트의 경우 최소 방사선 조사량이 2 × 100,000,000 rad 에 노출되거나, 충격저항 시험에 통과된 시편의 경우엔 최소 550 Kpa 의 최소 인발 부착력을 지녀야 하고, 위와 같은 환경 조건이 아닌 경우엔, 최소 700 Kpa의 최소 인발 부착력을 지녀야 하는 설계 조건으로 되어있다. 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, 부착력의 성능의 경우에, 대상 시편 6개소 표면 중에서 열화 상태가 다소 차이가 많이 나는 경우가 종종 있었는데, 이런 경우엔 외견상 평균적인 상태의 표면을 선택하여 부착력 시험을 수행하였다.

<표-1> 콘크리트 시편 고유번호 체계도

열화촉진 조건	콘크리트 10도 양생 환경		콘크리트 30도 양생 환경	
	표 준 도 막	과 다 도 막	표 준 도 막	과 다 도 막
표준 상태	3 개	3 개	3 개	3 개
청수 침적 60℃ 조건	FW-60-10-C1-1 FW-60-10-C2-1 FW-60-10-C3-1 FW-60-10-C4-1 FW-60-10-C5-1 FW-60-10-C6-1	FW-60-10-C1-E1 FW-60-10-C2-E1 FW-60-10-C3-E1 FW-60-10-C4-E1 FW-60-10-C5-E1 FW-60-10-C6-E1	FW-60-30-C1-1 FW-60-30-C2-1 FW-60-30-C3-1 FW-60-30-C4-1 FW-60-30-C5-1 FW-60-30-C6-1	FW-60-30-C1-E1 FW-60-30-C2-E1 FW-60-30-C3-E1 FW-60-30-C4-E1 FW-60-30-C5-E1 FW-60-30-C6-E1
청수 침적 80℃ 조건	FW-80-10-C1-1 FW-80-10-C2-1 FW-80-10-C3-1 FW-80-10-C4-1 FW-80-10-C5-1 FW-80-10-C6-1	FW-80-10-C1-E1 FW-80-10-C2-E1 FW-80-10-C3-E1 FW-80-10-C4-E1 FW-80-10-C5-E1 FW-80-10-C6-E1	FW-60-30-C1-1 FW-60-30-C2-1 FW-60-30-C3-1 FW-60-30-C4-1 FW-60-30-C5-1 FW-60-30-C6-1	FW-80-30-C1-E1 FW-80-30-C2-E1 FW-80-30-C3-E1 FW-80-30-C4-E1 FW-80-30-C5-E1 FW-80-30-C6-E1
청수 침적 100℃ 조건	FW-100-10-C1-1 FW-100-10-C2-1 FW-100-10-C3-1 FW-100-10-C4-1 FW-100-10-C5-1 FW-100-10-C6-1	FW-100-10-C1-E1 FW-100-10-C2-E1 FW-100-10-C3-E1 FW-100-10-C4-E1 FW-100-10-C5-E1 FW-100-10-C6-E1	FW-100-30-C1-1 FW-100-30-C2-1 FW-100-30-C3-1 FW-100-30-C4-1 FW-100-30-C5-1 FW-100-30-C6-1	FW-100-30-C1-E1 FW-100-30-C2-E1 FW-100-30-C3-E1 FW-100-30-C4-E1 FW-100-30-C5-E1 FW-100-30-C6-E1
-20℃ *12시간 +60℃ *12시간 반복 조건	CY-10-1-1,2 CY-10-2-1,2 CY-10-3-1,2 CY-10-4-1,2 CY-10-5-1,2 CY-10-6-1,2	CY-10-1-E1,2 CY-10-2-E1,2 CY-10-3-E1,2 CY-10-4-E1,2 CY-10-5-E1,2 CY-10-6-E1,2	CY-30-1-1,2 CY-30-2-1,2 CY-30-3-1,2 CY-30-4-1,2 CY-30-5-1,2 CY-30-6-1,2	CY-30-1-E1,2 CY-30-2-E1,2 CY-30-3-E1,2 CY-30-4-E1,2 CY-30-5-E1,2 CY-30-6-E1,2

3. 실험 결과 분석

실험결과 분석은 외관검사, 부착성능 평가, 초음파를 이용한 임피던스 변화, 열중량분석법등 다양한 시도를 하였고, 임피던스와 부착력과의 상관관계, 수분 함유량의 차이에 따른 임피던스 경향 변화를 통해 정량적 열화 평가의 모든 가능성에 대해 시도하였다.

가. 외관 검사와 부착 성능 결과 분석

(1) 콘크리트 10℃ 양생 과도막 시편

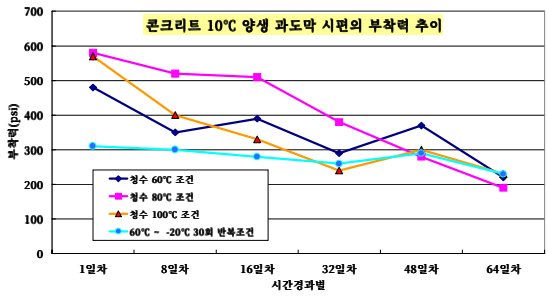
본 시편들은 콘크리트를 10℃ 조건에서 양생시킨후 도막 두께를 표준두께의 1.5배로 도포한 경우의 열화촉진 실험 분석 결과이다. 청수 60℃침적 조건, 청수 80℃ 침적조건, 청수 100℃ 침적조건, -20℃ ~ +60 ℃에서 각각 12시간 침적 반복 조건의 4가지 열화촉진 환경 조건에서 시편의 열화정도를 부착력시험을 통해 각각 비교 분석해 보았다. 초기 부착력에 비해 6회차 부착력이 가장 급격하게 감소한 청수 80℃ 침적 조건에서 보였으며 그 부착력의 감소비율은 67%에 이르렀다. 그러나 청수 100℃ 침적조건에서 살펴보면 6회차 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℃ 침적조건보다 높게 측정되었다 치더라도, 전체적으론 100℃ 침적조건의 부착력이 대체적으로 낮은 값의 측정을 보이고 있음을 알 수 있었다. 이 경우에는 청수 60℃ 침적 조건의 부착력 값으로 판단할 때 정확한 열화경향을 찾을 수 없었으나, 초음파를 이용한 임피던스 분석 값과 그 추이가 동일하게 나타난 점으로 미루어 보아 정량적 열화도의 판별보다는 차라리 시편제작상의 오류 때문에 나타난 현상이라 판단된다.

저온과 고온 반복 침적조건(CY-10)에서는 다른 열화촉진 조건에 비해 부착력의 값이 초기값이 가장 낮은 값에서 측정되었을 뿐더러, 전체적으로 열화전 후의 편차가 가장 작게 나타났다.

<표- 2> 콘크리트 시편의 부착력 추이
(단위: psi)

	1회차	2회차	3회차	4회차	5회차	6회차
청수60℃침적	480	350	390	290	370	220
청수80℃침적	580	520	510	380	280	190
청수100℃침적	570	400	330	240	300	230
-20℃ 12시간 +60℃ 12시간 반복 침적	310	300	280	260	290	230

<그림- 1> 콘크리트 시편의 부착력 추이 곡선



(2) 콘크리트 10℃ 양생 표준도막 시편

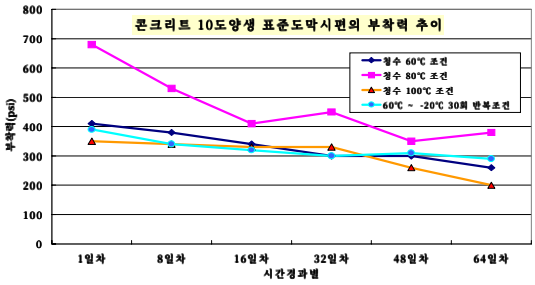
열화 경향을 가장 잘 나타낸 조건은 청수 80℃ 침적 조건에서 확인할 수 있었는데 초기 부착력 대비 감소된 부착력의 비율도 다른 환경조건에 비해 가장 큰 49%에 이르렀다.

나머지 다른 열화촉진 조건에서도 그 경향이 크지는 않지만 대체적으로 선형적인 열화가능성을 확인할 수 있었으며, 나머지 열화촉진환경 조건에서의 부착력의 감소율은 43%, 37%, 26%에 이르렀다. 가장 부착력 감소율이 작은 조건은 콘크리트 10℃ 양생 과도막 시편 조건과 마찬가지로, 반복침적조건에서 측정되었는데, 감소율은 26%로 확인되었다.

<표-3> 콘크리트 10℃ 양생 표준도막 시편의 부착력 (단위: psi)

	1회차	2회차	3회차	4회차	5회차	6회차
청수60℃침적	410	380	340	300	300	260
청수80℃침적	680	530	410	450	350	380
청수100℃침적	350	340	330	330	260	200
-20℃ 12시간 +60℃ 12시간 반복침적	390	340	320	300	310	290

<그림-2> 콘크리트 10℃ 양생 표준도막 시편의 부착력 (psi)



(3) 콘크리트 30℃ 양생 표준도막 시편

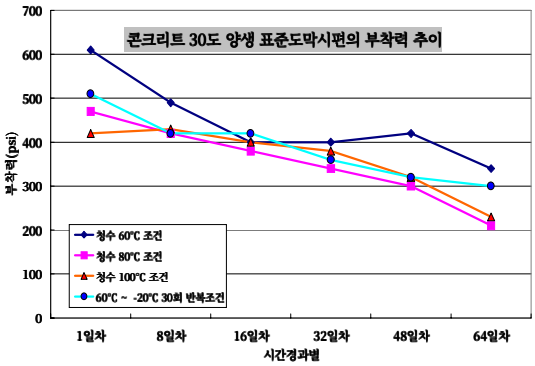
초기 열화 시점에 비해 각각의 촉진환경별 부착력의 감소율은 대체적으로 유사한 경향을 나타내고 있는데, 부착성능의 저하 유형도 1회 차의 경우 최대 610 ~ 최소 420 psi에서 열화 촉진된 6회 차의 경우 최대 340 ~ 최소 230 psi로 부착력의 감소된 것으로 40 ~ 50%의 부착력이 손실된 것으로 판단된다. 다만 실험 결과로 판단할 때 설계기준 부착력인 101 psi를 상회하고 있어서 양호한 것처럼 보일 지 모르나, 실제 외관 검사를 통해 본 결과는 상이한 점에 주목하여야 할 것이다. 부착력 결과와 외관검사의 결과가 다소 상이한 것은 부착력의 측정점은 1 또는 2개소의 측정 결과이며, 외관검사는 시편의 6 면을 통해 나타난 결과이다. 청수 침적 80 ℃의 시편 외관검사 기록에 따르면, FW-80-30-C4-1에서 핀홀 5 군데가 발견되었으며, FW-80-30-C5-1에서도 핀홀 5개소 발견, FW-80-30-C6-1에서 기포가 7 개소 이상 발견되었는데 그 크기는 직경 7 ~ 4mm 였으며 다른 한 면에서는 직경 2 ~ 3mm 기포 7개소가 검사되었다. 청수 침적 100 ℃의 시편 외관검사 기록에 따르면, FW-100-30-C4-1은 양호, FW-100-30-C5-1에서는 기포 1개소 발생되면

서 도장 표면이 주글주글해지는 현상을 보였고, FW-100-30-C6-1에서 기포가 5면에 전반적으로 30개소 이상 발생되었는데 그 크기는 직경 10 ~ 직경 5mm 였다. 이런 외관검사 결과는 부착력 검사 결과에 비교할 때, 환경조건별로 서로 다른 부착력 값만으로 열화정도를 판단하기는 힘들며 단지 그 부착력의 감소 추이로써 열화도를 추정하는 보조수단으로 활용되어야 할 것으로 여겨진다. 그 이유는 시편제작 및 에폭시 도장 도포 작업시 발생되는 수많은 작업 과정 중에서 발생되는 오차 때문에 각각의 시편을 동일한 환경조건에서 정량적으로 동일하다고 판단할 수 없기 때문이다.

<표-4> 콘크리트 30℃ 양생 표준도막 시편의 부착력 (단위: psi)

	1회차	2회차	3회차	4회차	5회차	6회차
청수60℃침적	610	490	400	400	420	340
청수80℃침적	470	420	380	340	300	210
청수100℃침적	420	430	400	380	320	230
-20℃ 12시간 +60℃ 12시간 반복침적	510	420	420	360	320	300

<그림-3> 콘크리트 30℃ 양생 표준도막 시편의 부착력 (단위: psi)



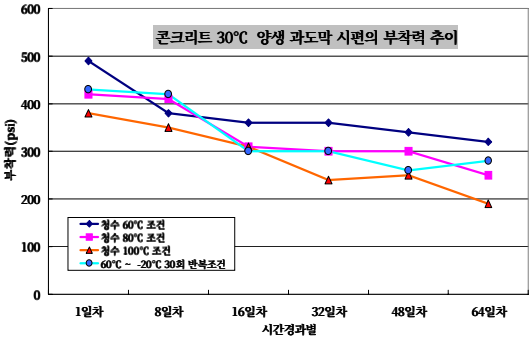
(4) 콘크리트 30℃ 양생 과도막 시편

초기 열화 시점에 비해 각각의 촉진환경별 부착력의 감소율은 대체적으로 유사한 경향을 나타내고 있는데, 부착성능의 저하 유형도 1회 차의 경우 최대 610 psi ~ 최소 420 psi에서 열화촉진된 6회 차의 경우 최대 340 psi ~ 최소 230 psi로 부착력이 감소된 것으로 대체적으로 40% ~ 50%의 부착력이 손실된 것으로 분석되었다.

<표-5> 콘크리트30℃양생 과도막 시편의 부착력 (단위:psi)

	1회차	2회차	3회차	4회차	5회차	6회차
청수60℃침적	490	380	360	360	340	320
청수80℃침적	420	410	310	300	300	250
청수100℃침적	380	350	310	240	250	190
-20℃ 12시간 +60℃ 12시간 반복침적	430	420	300	300	260	280

<그림-4>콘크리트30℃양생 과도막 시편의 부착력



나. 열중량 분석법

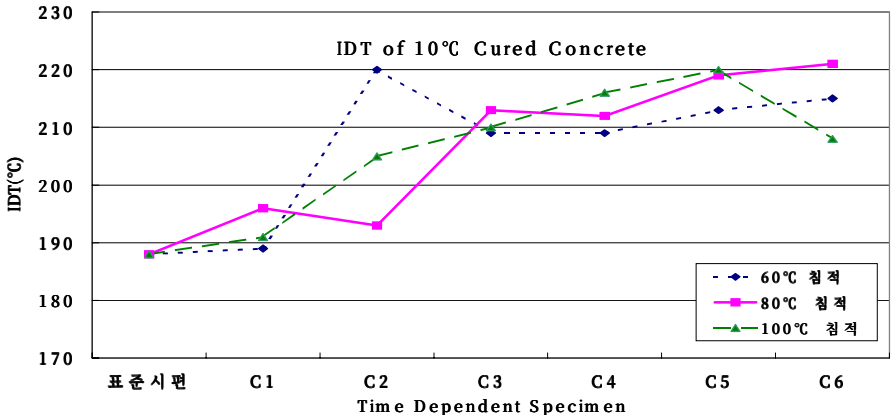
콘크리트 시편의 가속 열화 촉진에 따른 열중량 분석법에 의한 열화의 경향은 찾기 어려웠다. 그 중 아래의 경우는 콘크리트 10 ℃ 양생 시편의 분석결과인데, 초기 열분해 온도 및 최대 중량 감소온도를 기준으로 각각의 시편에 대한 열화도를 평가해 보았다.

(1) 열화 시편의 초기 열분해 온도

표준 시편의 초기 열분해온도는 211℃로써 시간경과별로 1회차는 187℃로 낮아졌으나 2회차, 3회차에는 표준시편의 온도보다 급격히 상승하였고 다시 4회차-6회차에 표준시편의 온도이하로 하락하는 등, 열화의 과정을 일견 확인하기는 어려웠다. 비록 시간경과별로 일정한 품질 저하의 경향을 확인할 수 없었지만 60℃ 침적 조건, 80℃ 침적조건, 100℃ 침적조건에서 아래 그래프

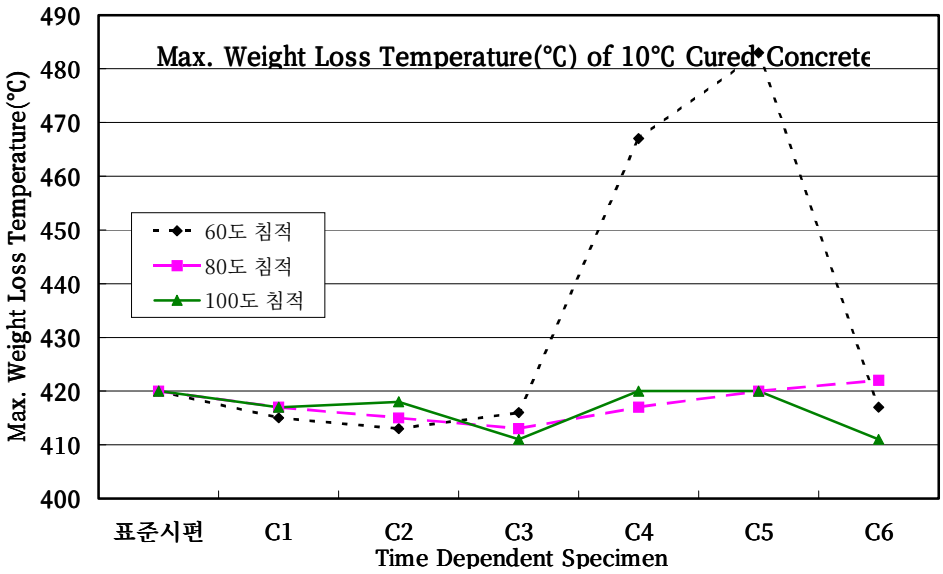
에서 보는 바와 같이 각각의 초기 열분해 온도의 경향이 표준시편의 초기 열분해 온도에 비해 상승하는 동일한 구성을 보이고 있었다. 표준 시편의 초기 열분해 개시 온도 대비 64일차 열화 촉진된 C6 시편의 초기 열분해 개시 온도의 차이가 42 ~ 43 ℃로 상승되고 있음을 확인하였다.

<그림-5> 초기 열분해 온도 변화 추이



(2) 열화 시편의 최대 중량 감소 온도

표준시편의 최대 중량 감소 온도와 비교해 보면, 기준 시편에 비해 온도가 다소 감소했다가 증가를 반복할 뿐 시간경과별로 어떤 경향도 확인하지 못하였다, 특히 청수 침적 60도의 4회차, 5회차의 시편의 최대중량감소 온도는 다른 값과 큰 차이를 보여 최대 중량감소 온도에 의한 에폭시 도료의 열화 특성을 추출해 내기는 어렵다고 판단되었다.



다. 임피던스 변화 추이 분석

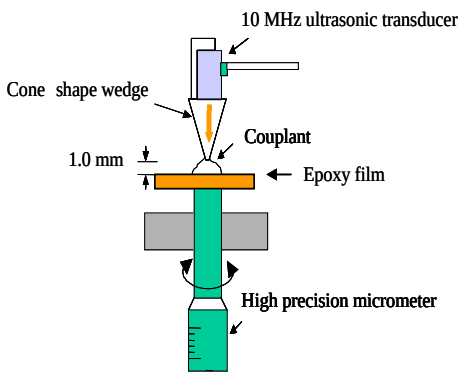
(1) 촉진실험 직후 임피던스

각 조건에서의 시편 수는 2개씩이며 각 시편에 대해 3점을 선택하여 각각의 점에서 임피던스를 측정한 후 이 값들을 모두 합산하여 그 시편의 평균값으로 삼았다. 각 시편에서의 3점 각각의 임피던스 값은 최소 3개소에서 5개소까지 <그림-7>과 같은 장치를 이용하여 측정하였다.

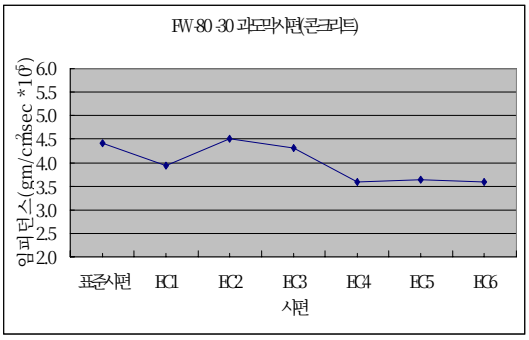
콘크리트 시편의 결과를 검토해보면 과도막의 경우는 전체적으로 열화시간이 길어질수록 임피

던스 값이 감소하는 경향을 그림5, 6, 7과 같이 비교적 잘 나타내고 있다. 청수 침적조건(FW)에서 임피던스의 감소가 제일 커서 열화전 시편에 비해 대략 최대 20%정도의 임피던스 값의 감소가 32 일차, 64 일차의 열화촉진 시간 후에는 측정되었으며 그 다음은 저온과 고온의 12시간 주기적 반복 침적조건(CY) 에서는 물 침적조건보다는 임피던스 값의 감소가 작은 것으로 확인되었다. 이것은 청수침적에 의한 열화가 고온 고습이나 내한내열조건보다 에폭시의 열화에 더 기여하는 것으로 볼 수 있다. 콘크리트의 정상도막의 임피던스 값을 조사해 보면 대체로 열화시간이 길어질수록 임피던스 값의 감소경향을 보이지만 국부적으로 경향이 뚜렷하지 않거나 오히려 증가하는 것을 관찰할 수 있는데 이는 앞서 설명한 이유에서 오는 신호잡음이라고 생각된다. 열화시간에 따른 임피던스 감소 폭은 앞서 지적한 데로 과 도막 두께에 비해 상대적으로 작아 열화 전 시편에 비해 대략 10-15%정도인 것으로 나타났다. 그리고 저온과 고온의 12시간 주기적 반복 침적조건(CY)조건에서도 열화시간에 따른 임피던스 값의 감소는 잘 관찰이 되나 32일이나 64일 이후에 보이는 열화정도가 청수 침적조건(FW)에서 보다 심각하지 않는 것으로 보인다. 그러나 강재시편의 경우는 도막두께가 콘크리트모체의 경우의 1/2에 해당되기 때문에 노이즈가 심하게 나타나서 열화시간이 길어짐에 따라 어떤 시편은 임피던스가 감소하는 경향을 잘 보이는 시편이 있는가 하면 어떤 시편에서는 임피던스 변화가 거의 없는 것처럼 나타나거나 국부적으로 오히려 증가하는 것처럼 나타나기도 하였다.

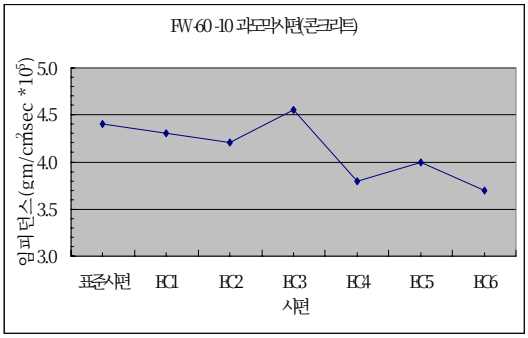
<그림-7> 임피던스 측정장치



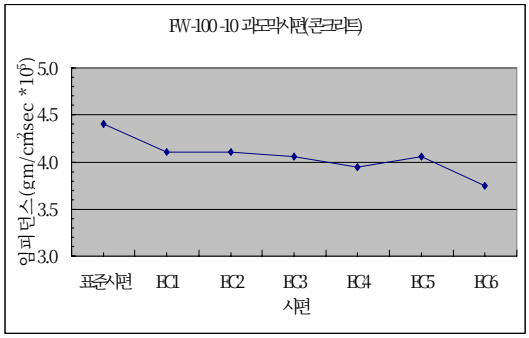
<그림-8>청수 80도 시편의 임피던스 변화



<그림-9>청수 60도 시편의 임피던스 변화 추이



<그림-10>청수100도 시편의 임피던스변화추이



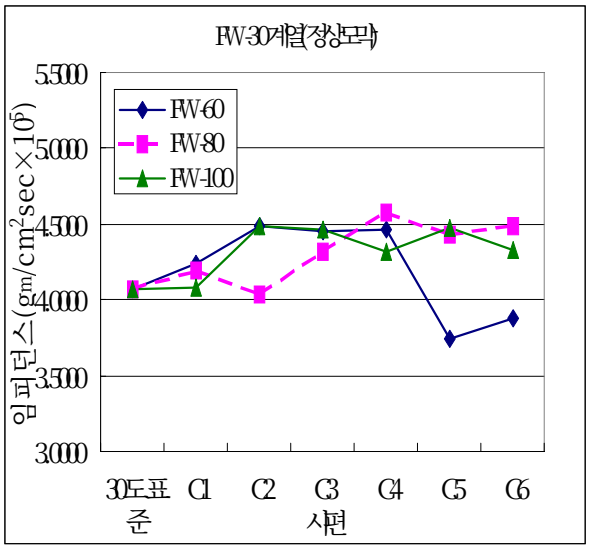
(2) 6개월 경과후의 임피던스

열화촉진 6개월 이후의 초음파에 의한 임피던스 변화 추이 분석 결과

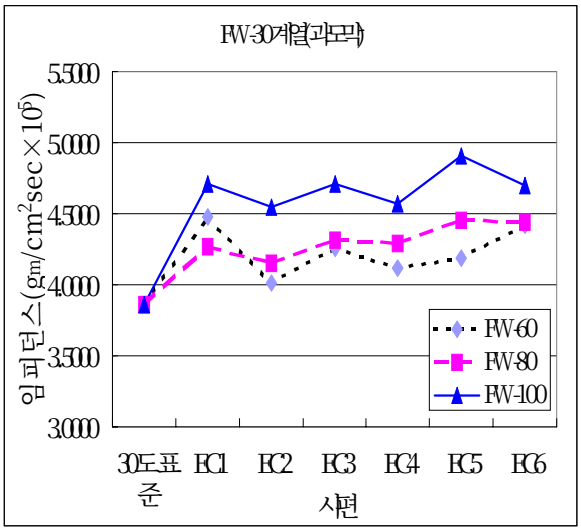
청수 침적 및 온도 변화에 의해 열화촉진 직후의 콘크리트 시편에서 측정된 임피던스 데이터의 경향과, 침적에 의한 수분이 완전 증발된 이후의 기건환경 조건에서의 시편의 임피던스 데이터 변화와는 완전히 상반된 경향을 나타내고 있다. 실험후 6개월 경과후의 임피던스 변화 추이는 표준 시편에 비해 점증적으로 상승된 경향을 나타내고 있다. 이는 고분자 재료에 관한 다른 연구

논문에 따르면 열에 의한 열화, 즉 온도 변화에 따른 열화 촉진실험에 있어서, 온도가 높을수록 밀도가 높아지는 경향을 확인할 수 있었는데, 이와 무관하지 않는 것으로 판단된다. 임피던스는 에폭시 도료에 대한 초음파 속도와 밀도의 곱으로 나타나는데, 수분이 증발되면서, 열적 열화에 따른 변화의 물성만 남게 된 상태에 해당된다. 즉, 온도에 의한 열화현상, 즉 핀홀, 부풀음이 이미 발생된 상태에서, 수분이 증발되면서 밀도는 증가되고 부분적으로 탄성한계를 넘어서 소성 열화의 구조에 이르렀고, 이때의 시편에서 임피던스를 측정한 이유 때문에 열화 촉진 직후의 임피던스 경향과 전혀 상반된 결과를 얻었다고 판단된다. 부착력과 외관검사 결과와 가장 근사한 열화 경향을 나타내고 있는 경우는 콘크리트 양생 30 ℃ 조건의 과도막 두께 시편, 콘크리트 양생10℃ 조건의 정상 두께 도막에서 나타났다. 표준시편에 비해 열화가 진행되면서 점증적으로 임피던스가 증가되는 경향을 보여주고 있는데, 청수 침적 60 ℃ < 침적 80 ℃ < 침적 100 ℃ 조건별로 임피던스 값이 크게 측정되었다. 콘크리트 양생 30 ℃ 조건의 정상 도막 두께 시편에서는 청수 침적 80 ℃ < 침적 60 ℃ < 침적 100 ℃으로 임피던스 값이 크게 나타났고, 콘크리트 양생 10 ℃ 조건의 과도막 두께 시편에서는 청수 침적 60 ℃ < 침적 100 ℃ < 침적 80 ℃으로 임피던스 값이 큰 것으로 분석되었다.

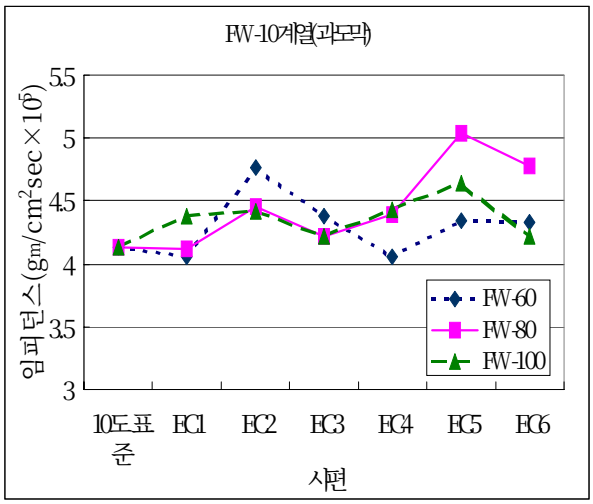
<그림-11> 30도 양생 정상도막 임피던스



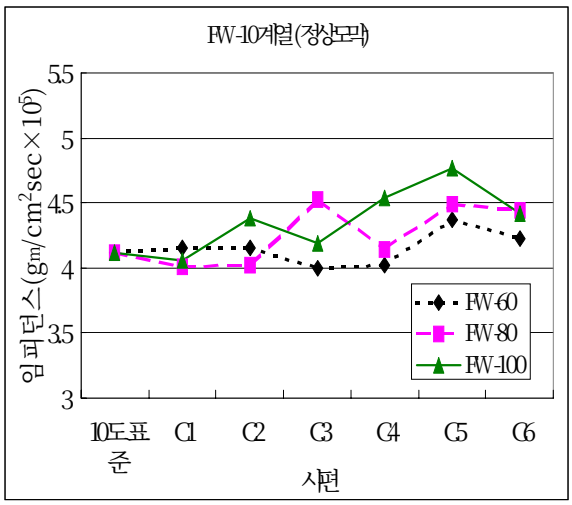
<그림-12> 30도양생 과도막 임피던스



<그림-13> 10도 양생 정상도막 임피던스



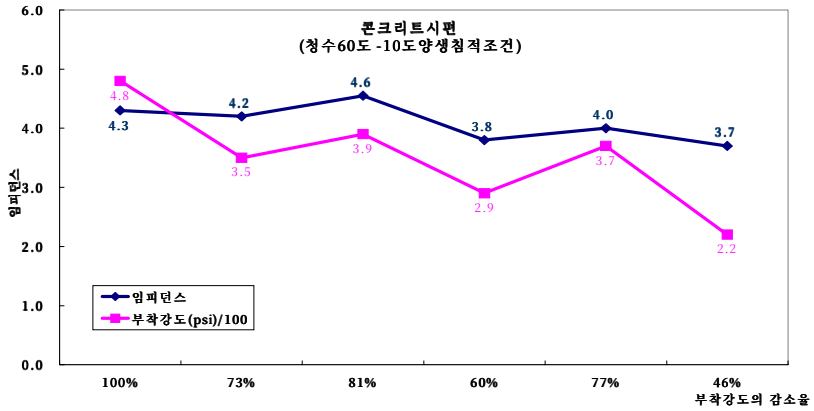
<그림-14> 10도 양생 과도막 임피던스



라. 임피던스와 부착력의 상관 열화도 분석

열화촉진 환경 요인 및 시편 종류에 따른 임피던스 값의 변화에 따른 열화 평가 경우의 수는 30개에 이르렀고, 부착력시험에 의한 열화 평가 경우의 수도 21개나 되었다. 이중 임피던스 변화에 따른 열화도 평가의 경우, 열화 전 표준시편에 비해 그 값이 5 % ~8%의 오차를 보였는데 이는 동일 시편의 경우라도 측정점에 따라 그 값이 달랐고 도막두께가 얇을수록 모체의 표면처리에 기인한 불균일성 때문에 오차의 폭이 컸다고 판단된다. 부착력 시험 분석 결과에 따르면, 청수 침적조건에서 초기시편대비 열화 후 시편에 대한 부착력의 감소율이 증가하였고, 염수 분무 조건 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 감소 폭이 큰 청수 침적 조건에서 측정된 데이터 만으로, 더불어 임피던스 측정된 값의 경우엔 과도막 두께 시편의 데이터만으로 에폭시 도장재의 열화 특성에 관한 상관관계를 일대일 대응하는 방법으로 정량적 열화도 대상 범위을 축소하였다. 이런 방법을 통해 두 가지 분석방법에서 상호 동일한 경향의 열화도를 보이는 경우의 수는 최종적으로 다섯 경우에 서 확인되었다. 콘크리트 시편의 경우, 청수 침적 60℃-10℃ 양생의 과도막 두께 시편, 청수 침적 60℃-30℃ 양생 과도막 두께 시편, 청수침적 80℃-30℃ 양생의 과도막 두께 시편, 청수 침적 100℃- 10℃ 양생의 과도막 시편에서도 임피던스분석 결과와 부착력 분석 결과와 외관검사 기록을 토대로 나타난 대표적인 열화도의 경향은 아래와 같다.

<그림-15> 콘크리트 시편 임피던스-부착력감소율 열화도



콘크리트시편 청수침적 100℃- 10℃ 양생의 과도막 두께 시편의 경우 부착강도의 감소율이 초기시편 대비 약 50%이상 감소할 경우 비록 부착력의 설계 기준값인 콘크리트의 경우 101 psi를 상회하는 결과를 보였지만, 외관검사 결과 실험횟수 4회차(16일 경과)에서 핀홀(pin hole)이 발생되었고, 5회차(32일차)에서는 최소 1면~최대 5면에서 에폭시 도막 표면에 Φ10~Φ2㎜의 부풀음이 5개소~30개소 발생하였다. 강재의 경우에도 청수 80℃ 침적조건의 경우, 4회 차까지는 부착력의 감소율도 66%에 이르렀으나, 설계기준 200 psi를 5회차(32일차)에서 190 psi와 부착력 감소율 30%로써 설계기준 및 본 실험의 열화기준인 부착력 감소율 50%에 미치지 못하였으므로, 5회차, 6회차의 시편은 에폭시 도장재의 기능을 이미 상실했다고 판단된다. 현장 점검시에는 이를 기준으로 적정 임피던스 값을 결정하여 기 시공된 에폭시 도막의 열화정도를 확인할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

중수로형 원자력 발전소 격납건물 에폭시 라이너의 열화 평가를 위해 수행된 열화촉진 실험 분석 결과는 다음과 같다.

가. 청수 침적에 의한 열화 촉진 실험 직후와 6개월 경과 후 수분 증발된 기건 상태에서 측정한

임피던스 결과 및 그 경향이 상반된 것으로 나타났다. 이는 청수 침적 및 열적 열화에 의해 에폭시 도료가 부풀음 현상으로 고분자의 망상구조가 느슨한 상태에서 측정된 임피던스 값이었기 때문이다. 임피던스에 영향을 미치는 요인은 초음파의 속도와 밀도임을 에폭시 도료의 밀도가 저하되어 표준 시편에 비해 임피던스 값이 떨어지는 경향을 나타냈다. 그러나, 수분 증발된 기건 상태의 열화 시편은 수분 증발에 따라 밀도가 증가되어, 임피던스 값이 커졌음을 확인하였다. 원자력 발전소 격납건물 내부 환경조건을 고려하고, 열화촉진 인자로 선정된 수분에 의한 영향을 최소화하기 위해서는 임피던스의 정량적 값에 의존하여 열화도를 평가하는 것보다는 기건 상태에서 시간에 따른 임피던스 변화율을 고려하는 것이 신뢰할 만하다고 판단된다.

나. 에폭시 도막의 두께에 따른 열화 정도를 분석해 볼 때, 도막두께가 두꺼울수록, 모체의 표면 상태가 균질 할수록 유효한 임피던스 값을 얻을 수 있었다. 실제 원자력발전소의 환경은 설계조건이나 시공 당시보다 유지관리의 과정에서 보수도장 작업을 수행하면서 도막이 두꺼워 질 개연성이 많다는 점을 고려하면, 보다 양호한 평가가 가능할 것으로 사료된다.

다. 콘크리트 시편 10도 양생한 경우에 부착력의 감소가 더욱 심한 것으로 확인되었는데, 과도막 상태에서는 청수 60℃침적, 80℃침적 및 100℃침적 조건에서 부착력의 감소율이 50%를 상회하였고, 표준도막 상태에서는 청수 80℃침적 및 100℃침적조건에서 50%에 못 미치는 감소율을 보였다. 과도막 두께 시편이 정상 도막두께 시편보다 부착력의 감소율이 크다는 것을 확인할 수 있었다. 설계기준 부착강도에 상관없이, 측정된 열화된 시편의 부착력 감소율이 초기 상태의 50%을 넘는 시점을 열화 판정의 기준으로 삼아야 함을 알 수 있었고, 이 때의 임피던스 값으로 에폭시의 열화 정도를 비교할 수 있었다.

라. 열중량 분석 결과에 따르면 초기 열분해 개시온도에 의한 열화 정도를 확인할 수 있었으나 최대 중량 감소 온도 기준으로는 열화도를 판별하기 어려웠다. 초기 열분해 온도의 경우, 시간 경과별로 일정하게 품질 저하의 경향을 뚜렷하게 확인하기 힘들었고, 다만 표준시편의 초기 열분해 온도에 비해 전체적으로 열화된 시편의 열분해 온도가 점증적으로 상승하는 경향을 보였다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. 나환선외, “에폭시 도장재의 정량적 열화도 평가를 위한 실험적 연구”, 한국구조물진단학회 춘계학술발표회논문집, 2001.5
2. 나환선외. “에폭시 도장재의 초음파 속도 측정 기술에 관한 연구”, 한국비파괴검사학회 춘계학술발표회논문집, 2001.5
3. 나환선, “비금속 라이너의 열화 평가”, 한국전력공사 전력연구원, 2001. 5
4. 나환선외, “열중량 분석에 따른 에폭시도료의 열화 특성 평가”, 대한건축학회 추계학술발표회논문집, 2000. 10
5. 나환선외, “초음파 탐상 검사에 따른 에폭시도료의 열화 특성 평가”,한국구조물진단학회 추계 학술발표회논문집, 2000. 11
6. 나환선, “원전 에폭시 도료의 열화에 관한 실험적 평가”, 한국전력공사 기술개발지, 2000년 겨울호
7. 한국전력공사, “월성 2・3・4호기 비금속라이너의 자연열화 시험 및 평가”,연구보고서, 1998

8. 한국전력공사, “도장공사”, 원전건설 표준지침서, 1995
9. 한국전력공사, “Field Finish Coating/Painting Work ",Tech. Spec., 1992
10. 한국전력공사, “Testing Requirements for Non-Metallic Containment Quality Liner Systems and Joint Sealant materials", Tech. Spec., 1991
11. R. Clavreul, "Evolution of ethylene propylene copolymers properties during aging", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 131 (1997) 192-197
12. B. BARTONICEK, "Life-assessment technique for nuclear power plant cables", Radia. Phys. Chem. Vol.52,1 Nos 1
13. A. miszcyk, H. Szalinska, "Laboratory evaluation of epoxy coatings with an adhesion promoter by impedance", Progress in Organic Coatings 25 (1995) 357-363