

'99 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

원전 콘크리트구조물의 수명예측을 위한 촉진시험기법의 개발

조명석, 송영철, 방기성
전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16
이종석, 김도겸
한국건설기술연구원
경기도 고양시 일산구 대화동 2311

요 약

원전 콘크리트 구조물의 수명예측은 구조물 이력, 현장 조사 및 시험, 실내 촉진시험 및 결과분석, 수명예측모델의 구성 등을 통하여 이루어질 수 있으며, 본 고에서는 주로 수명예측을 위한 실내촉진시험 기법 및 실험결과 도출과 적용방안에 대해 논한다. 세부항목으로서 해수중 침적 구조물, 조석대, 비말대에 위치한 원전 구조물의 환경적 영향을 고려하여, 현장 조사를 통하여 주요 내구성 인자로 도출된 중성화, 염해, 황산염 침해, 동결융해 및 수축팽창 등에 대한 촉진시험기법을 개발하고자 한다.

Abstract

Service life prediction of nuclear power plants depends on the application of history of structures, field inspection and test, the development of laboratory acceleration tests, their analysis method and predictive model. In this study, laboratory acceleration test method for service life prediction of concrete structures and application of experimental test results are introduced. This study is concerned with environmental condition of concrete structures and is to develop the acceleration test method for durability factors of concrete structures e.g. carbonation, sulfate attack, freeze-thaw cycles and shrinkage-expansion etc.

1. 서론

콘크리트 구조물에서 시간의 경과에 따라 발생하는 각종 열화현상들은 여러 가지 복합적인 요인에 의해 나타나므로 그 원인 분석 및 평가에 많은 어려움이 있다. 특히 원자력발전소 주요 구조물의 대부분을 차지하고 있는 콘크리트 구조물의 경우 이러한 열화현상에 의한 수명저하 및 이에 따른 수명예측은 구조물의 효율적인 수명관리 및 국가 주요시설인 원전의 안전성 확보를 위한 필수적인 조건이라 할 수 있으며, 이러한 필요성에 따라 수명저하 주요인별로 실내촉진시험 기법을 개발하게 되었다. 실내 촉진시험은 대상 철근콘크리트 구조물에 대해서 사용환경을 고려한

실험을 통하여 실제로 발생하는 현상과 상사시키는 기법으로서, 각종 열화요인별로 각종 환경에 의해 장기적으로 발생하는 현상에 대해 각종환경을 실제보다 가혹하게 함으로서 단기적인 실험기간을 통하여 장기적인 열화손상을 정량적으로 평가하는 것이다.

2. 실내 촉진실험

(1) 목적

콘크리트 성능저하 정도는 환경, 구조물의 기하학적 구조, 콘크리트의 특성, 열화 과정, 열화물질의 농도에 의존한다. 그러나, 열화인자의 확산계수는 환경 및 요인별로 다르므로 기본 모델식을 수립하기 위해서는 열화인자의 확산계수를 상수 k_d 로 표현할 수 있다. 계절에 따라 온도가 변화하지만 이러한 변화까지 열화모델에서 모사할 수는 없으므로 시간의 항을 t_y 로 표현하여 일정하다고 보면, k_d 는 변하지 않는다. 따라서, 열화의 정도는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$A_d = k_d \cdot t_y^n$$

여기서, A_d :시간에 따른 열화량, t_y :재령(year), n :시간항의 계수(time order)

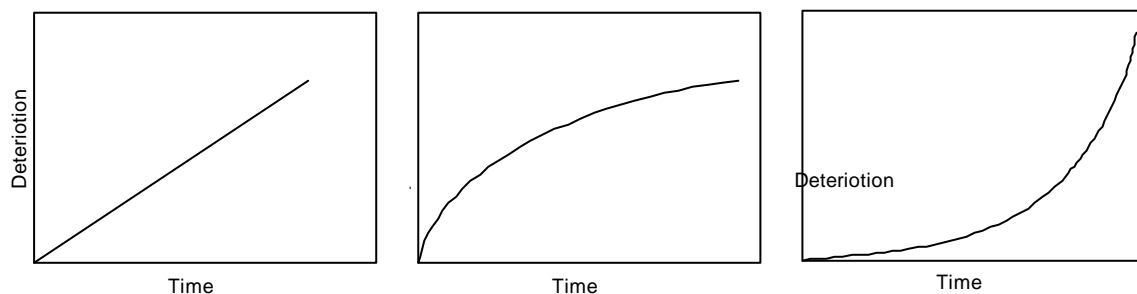
전체의 열화비율 R_d 는 다음과 같이 된다.

$$R_d = nk_d \cdot t_y^{n-1}$$

여기서, $n < 1$ 이면, 열화비율은 시간이 경과함에 따라 감소하는 것을 나타내며, $n = 1$ 이면, 열화비율이 일정하다는 것을 나타낸다. 또한, $n > 1$ 이면 열화비율은 시간이 경과함에 따라 증가함을 나타낸다. 콘크리트의 손상 정도를 A_{cf} 로 정의하면 다음과 같은 모델식이 성립된다.

$$t_{yf} = (A_{cf}/k_d)^{1/n}$$

여기서, t_{yf} 는 수명종결시간을 나타내며, n 값은 열화 메카니즘에 따라 확산이 지배하는 과정일 경우 1/2, 반응이 지배하는 과정일 경우 1로 나타낼 수 있다. 만일 열화 메카니즘이 전달과 확산에 의해 지배된다면, n 값은 1/2~1의 값이 될 것이다. <그림 1>에 시간항의 계수 n 에 따른 성능저하의 경향을 나타내었다.



<그림 1> 시간항의 계수에 따른 성능저하 경향

반면 반복적으로 열화를 받는 경우는 기상자료로부터 콘크리트 구조물이 받았던 열화사이클의 횟수를 평가하므로써 예측이 가능하다. 예를 들어 동해(frost attack)는 콘크리트가 거의 포화되어 있고 지속적으로 동결온도에 노출되어 있을 경우 발생한다. 따라서, 사용기간 중의 그 지역 기상자료가 있다면 콘크리트가 동결온도에 노출되었던 회수를 평가할 수 있으며, 열화의 양을 상호 연관 지을 수 있다. 또한, 미래의 상태예측에서는 미래의 온도패턴을 대략적으로 가정함으로써 수명종결까지의 소요기간을 예측할 수 있다. 즉, 열화요인에 대한 시간항의 계수 n 값을 알고 있고

하나의 과정이 열화비율을 지배하고 있는 경우에는 사용중인 구조물의 잔존수명을 예측하기 위한 모델구성은 쉽게 이루어 질 수 있다고 할 수 있다. 그러나, 구조물의 실제 사용환경은 완전한 침적 또는 완전한 건조상태로 이루어져 있지 않고 열화 메카니즘 또한 하나의 지배요인에 의해 이루어지고 있는 않으므로 현장상태를 적절히 모사할 수 있는 촉진시험에 의하여 n 값을 구성하는 것이다.

(2) 대상구조물의 특성에 따른 촉진시험 항목선정

국내 원전 구조물의 대부분은 해안가에 위치하고 있으므로 다음과 같이 각 구조물의 사용환경을 고려하여 분류할 수 있다.

1) 해수중 침적 구조물

해수중 침적 구조물은 염해 관련실험 및 황산염 침해 관련실험을 실시한다. 원전 구조물은 주로 해안과 인접해 있으며, 이로 인해 구조물이 처해있는 환경은 해수중, 조석대, 비말대, 조풍대 및 기타환경으로 분류할 수 있고, 이들이 구조물에 미치는 영향은 각기 다르다. 구조물이 항상 해수중에 있게 되면 해수의 화학작용을 어느 정도 받지만, 산소와 이산화탄소의 공급이 적어 콘크리트 침식이 적다. 이러한 환경의 구조물은 염해 및 황산염 침해 관련 실험의 완전침적시험으로 환경조건을 모사할 수 있다.

2) 조석대에 위치한 구조물

조석대에 위치한 구조물은 염해, 황산염 침해, 동결융해, 중성화 관련실험을 실시한다. 조석대는 간만의 영향을 받는 부분으로서 콘크리트는 포화상태에 있다가 건조 및 습윤의 반복작용을 받게 되고 또한 산소의 공급도 충분하게 되므로 해수에 의한 마모와 함께 철근콘크리트의 부식 및 침식을 촉진시키게 된다. 따라서 조수간만의 차에 영향을 받는 구조물은 건조를 반복하게 되며, 이는 염해와 황산염 침해의 경우 건조반복시험으로 환경조건을 모사하며, 동결융해 및 중성화 관련 실험은 기본 실험으로 실시한다.

3) 비말대에 위치한 구조물

비말대에 위치한 구조물은 염해, 황산염 침해, 동결융해, 중성화 관련실험을 실시한다. 비말대는 해수에 의한 영향과 황산염에 의한 화학작용을 받을 뿐만 아니라, 모세관 작용에 의하여 하층 콘크리트로부터 해수가 흡수되기도 하고, 또한 증발에 의하여 콘크리트 중의 염화물이 증가하게 되며, 산소의 공급도 활발하여 가장 위험한 환경이라고 할 수 있다. 염해와 황산염 침해의 경우 건조반복시험으로 환경조건을 모사하며, 동결융해 및 중성화 관련실험은 기본 실험으로 실시한다.

4) 조풍대에 위치한 구조물

조풍대에 위치한 구조물은 염해, 중성화 관련실험을 실시한다. 조풍대에는 비말대 윗부분과 해안에 건설되는 구조물도 포함된다. 바람에 따라 운반된 해염입자가 콘크리트 구조물 표면에 부착한 후 내부로 침투하여 철근을 부식시킨다. 염해 관련실험은 염수분무시험으로서 환경조건을 모사하고, 중성화 관련실험은 기본실험으로서 촉진실험을 실시한다.

5) 기타환경

지하구조물과 같은 경우는 동해나 중성화 등이 발생하기 어려운 조건이므로 황산염 침해 및 염해 관련실험을 원칙으로 하지만, 지표면에 위치하는 구조물에서 동결융해의 흔적이 보이는 경우

동결융해 실험도 동시에 실시한다.

구조물 내부에 대해서는 특수한 경우를 제외하고는 동해나 염해, 황산염 침해 등을 받지 않으므로 중성화 관련실험만을 행하며, 이외의 기타 환경조건에서 실험이 필요한 경우 해당구조물에 요구되는 적절한 실험을 행한다.

(3) 중성화 촉진실험

1) 일반

대상 구조물에서 콘크리트의 중성화가 수명에 미치는 영향을 실험하기 위하여 중성화 촉진실험을 실시한다. 철근콘크리트 부재중의 내부철근은 콘크리트의 강한 알칼리성(약 pH 12.6)에 의해 부식으로부터 보호되고 있기 때문에 침식성 가스등과 같은 외부로부터의 침입에 의한 철근부식 촉진요인이 존재하지 않는 한 부식되지 않는다. 그러나 콘크리트 표층부부터 중성화가 서서히 진행되어 철근부재에 도달하면 콘크리트의 강알칼리성에 기초하고 있는 내부철근에 대한 방식기능을 저하시켜 부동태 피막을 파괴하고 물 및 산소의 동시 작용 조건이 성립되어 철근부식이 진행된다.

중성화란 대기 중에 존재하는 이산화탄소(CO₂)등의 침식성 가스가 콘크리트 표면으로부터 확산되어, 콘크리트 내층부에서 역확산하는 Ca(OH)₂와 탄산화반응을 일으켜 콘크리트의 공극수에 용해되어 있는 수산화칼슘으로 인한 강한 알칼리성이(pH 12.6) 중성화(pH 8.3~10.0)되는 현상을 말한다. 콘크리트의 중성화가 철근부분에 이르지 않은 경우에는 콘크리트의 내구성에 문제가 없으나, 중성화가 철근부분까지 도달하면 콘크리트의 강알칼리성을 토대로 한 내부철근의 방식기능이 저하하여 부동태피막이 파괴되며, 물과 산소가 동시에 공급되는 조건이 형성되면 철근의 부식이 진행되기 시작한다.

2) 시험체의 준비

현장 채취 코어공시체와 실험실 제작 공시체를 각각 3개 이상 채취 및 제작한다. 코어공시체는 현장여건을 고려하여 $\phi 10\text{cm}$ 이하로서 채취하며, 제작 공시체는 $\phi 10 \times 20\text{cm}^2$ 의 크기로서 각 공시체는 이산화탄소가스의 측면침투를 방지하기 위해 측면을 고무계 우레탄, 에폭시 등을 도포하며, 각 시험체는 각각 고유의 기호로서 표기한다.

3) 시험조건

① 탄산가스 농도

탄산가스농도 1~20%의 범위에서 중성화속도는 탄산가스 농도의 평방근에 비례하므로, 본 촉진실험에서는 가장 가혹한 환경을 적용하여 탄산가스 농도를 20%로 실시한다.

② 촉진실험온도

촉진실험 온도가 높아질수록 중성화 속도는 빠른 것으로 나타나며, 촉진실험 온도 10~30℃의 범위에서 중성화속도는 거의 직선에 가깝게 증가하고 있는 것으로 알려져 있다. 따라서, 본 실험에서는 촉진실험온도를 20℃로 하여 실시하고자 한다.

③ 촉진실험습도

습도 40~80%의 범위에서는 습도가 낮아질수록 중성화 속도가 빨라지게 되나 그 경향은 일정치 않고, 습도 0% R.H. 및 100% R.H.에서 중성화 속도는 거의 정지하는 것으로 알려져 있다. 따

라서, 본 실험에서는 60% R.H.를 사용하여 촉진시험을 실시한다.

4) 실험장비

본 실험에 사용되는 장비는 온도 범위 0~60℃, 습도 범위(R.H.) 40~99%, CO₂ 농도범위 0~20%를 지속적으로 유지할 수 있는 장비를 사용한다.

5) 측정시기

중성화 깊이 측정주기는 중성화의 진행속도에 따라 결정되어야 하며, 중성화 속도는 CO₂ 농도가 증가함에 따라 큰폭으로 증가하므로 CO₂ 농도 20%를 사용하는 본 실험에서는 1년 이내의 기간 중 초기 2개월까지는 1개월 간격으로 그 이후는 2~4개월의 측정주기를 설정하여, 기본 측정주기를 초기, 1개월, 2개월, 4개월, 8개월, 12개월로 한다.

6) 측정항목

공시체는 CO₂이온 침투면을 제외한 나머지 면을 고무계 우레탄방수제나 에폭시를 도포하여 침투면 이외의 면에서는 CO₂의 확산이 일어나지 않게 하며, 실험오차를 최소화하기 위하여 동일 공시체의 표면을 연마한 후 페놀프탈레인 1% 용액을 분무하여 발색깊이로부터 중성화 깊이를 산출한다. 측정방법은 측면을 연마한 후 페놀프탈레인 용액을 분무하여 발색깊이를 측정한다. 측정후에는 재시험을 위해 고무계 우레탄이나 에폭시를 재도포한다.

(4) 염해 촉진시험

1) 일반

염해란 콘크리트 중에 염화물이 존재하여 철근이 부식함으로써 콘크리트 구조물이 손상을 입는 현상을 말한다. 철근은 산소와 물에 접하면 부식되고 그 표면에 붉은 녹(Fe₂O₃)이 발생한다. 건전한 콘크리트는 pH 12~13으로 강알칼리를 띠고 있어 얇은 부동태 피막(20~60Å 두께의 수산화제2철, γ -Fe₂O₃·nH₂O)을 생성시켜 부식되지 않는다. 그러나 이 부동태 피막도 콘크리트 중에 염화물이 침입하여 염소이온량(Cl⁻)이 일정 값 이상이 되면 부분적으로 부식하게 되는데, 이 부식에 의해 발생된 붉은 녹은 강재의 단면적을 감소시키고 본래 체적의 2.5배까지 팽창하여, 그 팽창압으로 균열을 발생시킨다. 염화물은 철근을 부식시키는데 있어 중요한 요소이지만 수분과 산소의 공급이 없으면 철근의 부식은 발생하지 않는다.

철근콘크리트 구조물에 염분이 침투하는 경로는 해양환경에 구조물이 위치하여 해수중의 NaCl이 침투하는 경우, 염화물이 함유된 해사 또는 혼화제를 사용하는 경우, 융설제, 제설제로 NaCl, CaCl₂등을 사용하여 콘크리트 표면으로부터 염분이 침투하는 경우 등을 들 수 있다. 그러나, 원자력 발전소 구조물의 특성을 감안할 때 두번째, 세번째 경로보다는 첫번째 경로가 가장 문제시된다. 해수에 함유된 염분의 농도는 해양과 해역에 따라 변동이 있으나 NaCl로 환산하여 3~4% 정도의 염분을 함유하고 있다. 철근의 부식을 가장 촉진시키는 염분의 양은 NaCl 농도로 3.6%이며 해수에 노출된 구조물은 지속적으로 철근의 부식을 촉진시키는 염분의 영향을 받고 있다. 해안에서는 파도에 의해 발생한 염분을 포함한 해수입자들이 바람을 타고 날아가는데, 그 범위는 보통의 경우 수십m 정도가 되며 계절풍 또는 태풍의 영향에 따라 수백 m에서 1km 이상까지 이르기도 한다.

2) 시험체의 준비

코어공시체 및 제작 공시체는 20×20×20cm³의 크기로서 각 공시체는 염분의 측면침투를 방지

하기 위해 측면을 고무계우레탄으로 도포하며, 시험체의 개수는 중성화실험과 동일하다.

3) 시험조건

해수에 함유된 염화물의 농도는 해양과 해역에 따라 약간씩 차이가 있으나, 일반적으로 3~4%(NaCl농도) 정도이다. 또한, 일본의 小林明夫에 의하면 염화물에 의한 부식은 염화물 농도 3% 정도(약 3.6%)에서 가장 빠르게 일어난다고 보고하고 있다. 따라서, 본 실험에서는 NaCl 3.6%농도의 염화물 용액을 제조하여 사용한다.

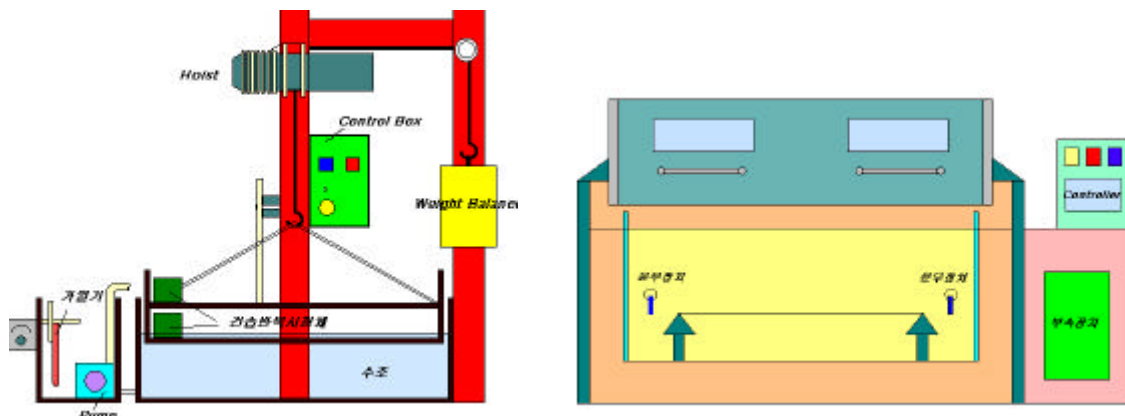
실험환경은 염수분무시험, 건습반복시험, 해수중 침적시험으로 실시한다. 이때 염수분무시험은 대기중의 비래염분이 콘크리트 중으로 침투되는 조건을 가정한 것이며, 건습반복시험은 해양환경에서 조석대와 비말대의 조건을 인위적으로 형성하고 콘크리트 구조물이 해수중에 침지 또는 건조되는 것과 같은 조건을 모사하였다. 또한, 해수중 침적시험은 원자력 발전소 취수구조물의 하단부와 같은 조건을 모사한 것이다.

4) 실험장치

해수중 침적을 위한 장치로서는 시험체를 지속적으로 침적할 수 있는 장치어야 하며, 이때, 완전침적시험의 용액량은 시험체가 충분한 침적상태 유지할 수 있도록 한다.

건습반복시험을 위한 장치로서는 시험체를 상온에서 건조와 습윤을 반복할 수 있는 장치어야 하며, 건습반복시험기에 의해 염수침적과 대기노출을 교대로 하며 침적 12시간, 대기노출 12시간이 1사이클로 설정한다.

염수분무시험을 위한 장치로서는 지속적으로 염수를 분무하고, 분무량을 조절할 수 있는 장치어야 하며, 염수분무량은 사전시험에 의해 일정한 주기(1일 x회, x분간 분무, 혹은 분무 간격과 분무시간만 설정)를 정한다. <그림 2>에 건습반복 및 염수분무 촉진실험 장치의 일례를 나타내었다.



<그림 2> 염해 촉진실험을 위한 건습반복 실험장치 및 염수분무 실험장치

5) 측정시기

기본 측정주기는 초기, 2주, 1개월, 3개월, 7개월, 12개월을 최소 측정일로 하며, 실험의 진행에 따라 추가 측정을 할 수 있다.

6) 측정항목

측정항목은 산에 녹는 염화물량으로 전염분량 측정을 기본으로 하며, 이때, 측정길이는 1.5cm, 3.0cm, 4.5cm, 6.0cm로 한다. 설정된 분무간격과 분무시간에 대해서 80cm²의 면적에서 1시간당 채취한 분무액의 양을 기록한다. 공시체의 염화물량은 산에 녹는 염화물량을 기본으로 측정하지 만 필요시 수용성염분량을 측정할 수도 있다.

(5) 황산염 침해 촉진실험

1) 일 반

황화물은 중공업지역의 배수나 하수 또는 해수에도 포함이 되어 있으며, 시멘트에 대한 황화물 침해는 Ca(OH)₂와 칼슘알루미늄네이트 수화물과 반응하는 황산에 의해 발생할 수 있다. 이러한 반응의 부산물인 석고와 칼슘 설포알루미늄네이트는 원래의 화합물보다 부피가 훨씬 크기 때문에 팽창에 의한 콘크리트의 붕괴가 생기게 된다.

황산염에 의한 콘크리트의 열화는 우선 표면부분에 팽창성의 균열을 발생하고 그 부분이 박리하는 현상을 반복한다. 황산마그네슘의 경우는 Ca(OH)₂와 칼슘알루미늄네이트 수화물뿐 아니라 칼슘실리케이트 수화물과 반응한다. Mg(OH)₂은 용해성이 매우 낮기 때문에 황산마그네슘에 의한 침해는 다른 황산염보다도 더 가혹하다. Mg(OH)₂과 실리카 겔의 반응이 계속적으로 일어날 수 있고, 이 때문에 열화가 발생할 수 있다.

2) 시험체의 준비

현장 채취 코어공시체는 $\phi 10\text{cm}$ 이하로 3개 이상 채취하며, 실험실 제작 공시체는 $10 \times 10 \times 40\text{cm}^3$ 로 6개 이상, $\phi 10 \times 20\text{cm}^2$ 로 12개 이상 제작한다.

3) 시험조건

황산용액의 농도는 황산나트륨 100g에 물 900g을 섞고 나머지 부분을 물로 채워 10% 중량비로 제조한다.(ASTM D 1141) 이때 용액은 화학적 영향을 고려하여 제조 후 제조용액의 pH를 측정하여 6~8 사이에 있어야 한다. 또한, 온도에 의해서 실험이 영향을 받을 수 있으므로 용액은 23°C로서 항온을 유지한다.

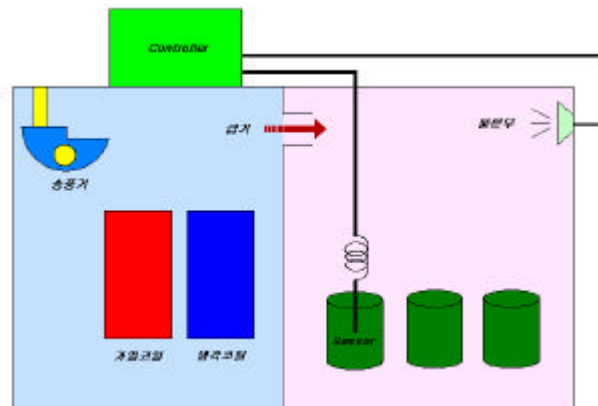
실험환경은 완전침적시험과 건습반복시험으로 하며, 완전침적시험의 경우는 기존의 실험에서 대부분 침적시험을 사용하고 있어, 침적 시험은 건습반복시험에 비해 시험조건이 안정되어 있어 정량적인 데이터를 얻기가 용이하다. 반면, 건습반복시험조건은 12시간 동안 주기적으로 용액을 분사하여 충분히 시험체를 적신 후, 12시간 동안 열풍에 의해 강제적으로 건조시켜 실험조건을 완전침적시험보다 더욱 더 열악한 조건으로 설정할 수 있다. 용액 분사 간격은 시험장비에 시험체를 넣은 후 시험에 의해 조절한다.

4) 실험장치

완전침적시험을 위한 실험장치는 지속적으로 시험체를 침적할 수 있어야 하며, 건습반복시험을 위한 실험장치는 시험체를 항온에서 건조와 습윤을 반복할 수 있는 장치여야 한다. <그림 3>에 황산염 침해 건습반복 촉진시험장치의 일례를 나타내었다.

5) 측정시기

측정주기는 초기, 1주, 2주, 3주, 4주, 8주, 16주를 기본으로 하고, 16주 이후의 기본 측정시기는 6개월, 9개월 12개월로 하며, 시험결과를 확인하면서 시기를 재조정한다.



<그림 3> 황산염 침해 촉진시험 장치

6) 측정항목

측정항목으로서 길이변화, 중량변화, 동탄성계수 변화, 압축강도를 측정하며, 육안검사도 병행한다. 중량변화 측정은 표면부 습기를 닦아낸 후 즉시 측정하며, 견습반복시험에서는 건조사이클이 되기 직전에 시험체를 꺼내어 습기를 닦아낸 후 측정한다. 동탄성계수 측정은 초음파에 의한 동탄성계수 측정방법을 사용하며, 압축강도 측정은 초기값 확보를 위해서 시험장치에 넣기 이전에 1회 측정을 하여야 하며, 각 배합당 측정개수는 2개로 한다. 현재로서는 매 주기별로 모든 실험항목에서 압축강도의 측정이 불가하지만 중성화나 염해에 비해서 본 실험은 압축강도의 측정이 중요하므로 1개월, 4개월, 12개월의 시점에서 강도의 측정이 필요하다. 육안검사는 측정시기별로 육안검사 후 특이사항을 기록하고, 사진을 촬영한다.

(6) 동결융해 및 수축팽창 촉진실험

1) 일반

콘크리트의 동결융해는 콘크리트중의 수분이 동결과 융해를 반복적으로 받고, 균열이 발생하거나 표층부가 박리함으로써 표층부분부터 파괴되어 점차적으로 열화해 가는 현상을 말한다. 물은 동결할 때에 최대 9%의 체적팽창이 발생하며, 시멘트 페이스트 내부에서는 공극의 벽으로 팽창이 구동된다. 이 체적팽창률을 완화하는데 필요한 자유공극(공기로 가득찬 공극)이 존재하지 않을 경우 큰 압력이 발생하고, 이것이 열화의 원인이 된다.

온도가 떨어지면 우선 큰 공극중의 물이 동결하며, 이어서 작은 공극중의 물이 동결된다. 작은 공극중의 물이 동결하는 과정에서는 큰 공극 중에 생긴 얼음결정에 의해 팽창이 구속된다. 이 팽창을 완화하는 만큼의 자유 공극이 존재하지 않는 경우에는 큰 정수압이 공극의 벽에 작용하여 이것이 인장강도에 도달했을 때에 균열이 발생한다. 이러한 팽창압의 반복작용으로 결국에는 콘크리트 표면이 파괴, 또는 박락에 이르게 된다. 이 공극에 작용하는 정수압은 콘크리트가 냉각되는 속도, 함수량 및 콘크리트중의 기포와 기포의 간격에 따라 다르게 나타난다.

2) 시험체의 준비

현장 채취 코어공시체는 3개 이상 채취하며, 실험실 제작 공시체는 $10 \times 10 \times 40\text{cm}^3$ 로 2개 이상, $15 \times 15 \times 60\text{cm}^3$ 로 2개 이상 제작한다. 실험실 제작 공시체는 상부에 철근을 배근하여 구속효과를 주었으며, 철근에 의해 구속된 상태에서 동결융해에 대한 균열폭 변동을 측정한다. 또한, $10 \times 10 \times 40\text{cm}^3$ 를 2개 제작하여 동탄성계수 및 중량변화를 측정한다.

3) 시험조건

-10~40℃를 1 cycle로 하며, 살수는 용해의 상태에서 실시한다.

4) 측정시기

측정은 cycle을 기본 단위로 하며 1cycle은 온도변화 40℃ → -10℃ → 40℃로서 6시간의 주기를 갖는다. 이 주기는 각 시험체의 특성에 따라 최초 시험시에 측정된 탄성계수의 60%가 되는 시점이 다르게 나타나므로 실험결과에 따라 조절한다. 측정간격은 0, 20, 40, 60, 80, 100, 150, 200, 250, 300cycle에서 측정한다. 측정의 종료는 KS F 2456에 준하여 300 cycle의 시점이나, 동탄성계수가 60% 이하로 떨어지는 시점으로 한다.

5) 측정항목

측정항목은 상대동탄성계수, 재령별 중량 및 길이변화(균열폭 변동), 육안검사에 의한 결함조사 및 사진촬영으로 하며, 상대동탄성계수는 10×10×40cm³ 시험체의 10×10cm²면과 10×40cm²면에 대해서 실시한다. 중량변화 측정은 표면부 습기를 닦아낸 후 즉시 측정하며, 견습반복시험에서는 건조사이클이 되기 직전에 시험체를 꺼내어 습기를 닦아낸 후 측정한다. 육안검사는 측정시기별로 육안검사 후 특이사항을 기록하고 사진을 촬영한다.

(7) 복합 촉진실험

복합촉진시험은 실구조물에서 수명저하를 일으키는 내구성 항목중 주요인자라고 판단되는 항목이 2개 이상인 경우 실시한다. 즉, 해수중 침적 구조물의 경우는 염해와 황산염 침해 복합실험을 실시할 수 있으며, 이러한 경우 환경조건은 완전침적시험으로 하여야 한다. 조석대 및 비말대에 위치한 구조물은 염해, 황산염 침해, 동결융해, 중성화 관련실험을 복합적으로 실시할 수 있으며, 염해와 황산염 침해의 경우 견습반복시험으로 환경조건을 모사한다. 조종대에 위치한 구조물은 염해, 중성화 관련 복합실험을 실시할 수 있으며, 염해 관련실험은 염수분무시험으로서 환경조건을 모사하고, 중성화 관련실험은 기본실험으로서 촉진실험을 실시한다.

그러나, 이들 복합 촉진실험은 열화메카니즘에 있어 개별적인 촉진실험에 비해 상당히 복잡하므로, 열화과정을 분석하여 예측하기에 어려움이 있으며, 주로 경험적인 데이터를 얻게 된다.

3. 실험결과 분석

(1) 중성화 촉진실험

1) 촉진시험 자료 분석

탄산가스농도 20%에 대한 실험실 제작 시험체의 중성화 깊이 경시변화를 분석하고, 현장 채취 코어가 중성화 깊이에 도달하는 시간을 비교·검토하여 촉진계수를 산출한다. 또한, 중성화깊이와 강도와와의 관계를 회귀분석을 통하여 분석하고, 중성화깊이가 피복두께를 초과하는 시점에서 TG-DTA 분석에 의한 CaCO₃와 Ca(OH)₂의 mol비 및 탄산가스 이온의 확산계수 분석한다.

2) 계수의 산출

$C=a\sqrt{t}$ 에 의존하므로 4개 원전으로부터 채취한 코어(6종)에 대하여 실제 중성화깊이 및 재령을 확인한 후 시간의 함수인 $C=a\sqrt{t}$ 로부터 역산에 의해 계수 a 를 찾아낸다.

실제 4개 원전에서 채취한 코어에 대한 중성화 촉진시험을 실시하여 각 원전구조물의 중성화 깊이까지 중성화가 진행하는데 소요되는 시간을 산출한다. 중성화깊이는 페놀프탈레인 1% 용액에 의한다. 촉진시험계수는 다음의 식에 의하여 산출한다.

$$K_1 = \frac{R_{LT}}{R_{AT}}$$

R_{LT} : 구조물의 실제재령

R_{AT} : 촉진시험에서 구조물의 중성화깊이까지 소요되는 시간

현장 사용배합으로 제조된 공시체에 대해 촉진시험을 실시하여 실제 원전 구조물에서 채취한 코어의 중성화 깊이까지 중성화하는데 소요되는 시간을 산출한다. 이 결과로부터 실험계수를 다음식에 의해 산출한다.

$$K_2 = \frac{R_{AT}}{RT_{AT}}$$

R_{AT} : 촉진시험에서 채취코어가 구조물의 중성화깊이까지 중성화하는데 소요되는 시간

RT_{AT} : 촉진시험에서 제조 공시체가 구조물의 중성화깊이까지 중성화하는데 소요되는 시간

(2) 염해 촉진시험

1) 촉진시험 자료 분석

각 조건별(침적, 건습반복, 분무조건) 염화물 함유량을 비교하고, 기간별 염화물 함유량의 변화를 분석한다. 이후 실험실 제작 시험체의 깊이별 염분침투량이 현장 채취 코어로부터 측정된 염분량 값과 동일한 염화물량 값이 되는 시점을 분석하여, 철근깊이의 염화물 함유량이 0.03%를 초과하는 시점을 결정하여 수명의 종결로 간주한다. 또한, 각 촉진조건별 촉진속도를 분석하여 완전 침적 시험, 건습반복 시험 및 염수분무시험의 손상비율을 분석하고, 기존 염해 예측식과 비교한다. 분석된 자료로부터 강도별, 침적조건별, 채취코어와 제조 공시체별 염화물 확산계수를 설정하고 각 조건별 염화물 확산계수를 회귀분석하여, 구조물 강도별 열화모델의 구성에 응용한다.

2) 계수의 산출

촉진시험계수 및 실험계수는 중성화 촉진시험의 경우와 동일한 방법으로 아래 식과 같이 산출한다.

$$K_1 = \frac{R_{LT}}{R_{AT}}$$

R_{LT} : 구조물의 실제재령

R_{AT} : 촉진시험에서 염화물이론이 실측량에 이르기까지 소요되는 시간

$$K_2 = \frac{R_{AT}}{RT_{AT}}$$

R_{AT} : 촉진시험에서 채취코어가 실측 염화물함유량에 이르기까지 소요되는 시간

RT_{AT} : 촉진시험에서 공시체가 실측 염화물함유량에 이르기까지 소요되는 시간

(3) 황산염 침해 촉진시험

1) 촉진시험 자료 분석

10% 황산염 용액에 대한 손상곡선을 길이변화, 중량변화, 동탄성계수, 손상깊이, 강도변화의 측면에서 분석하여 그 경향을 파악하며, 시험기간에 따른 동탄성계수 곡선과 길이변화 및 중량변화와의 관계를 분석하고, 동탄성계수가 60%이하로 떨어지는 시점을 결정한다. 또한, 동탄성계수와 길이변화 및 중량변화와의 관계를 회귀분석한다.

조건별 촉진속도는 완전침적 시험과 건습반복 시험의 손상비율을 분석하고, 기존 손상에측식과

비교하여 구조물 강도별 열화모델의 구성의 기초자료로서 활용한다.

2) 계수의 산출

제조된 4000 psi 공시체에 대한 촉진시험값과 실제 원전 구조물에서 채취한 코어의 황산염 침해속도를 비교한다.

$$K_2 = \frac{R_{AT}}{RT_{AT}}$$

R_{AT} : 채취코어의 동탄성계수값이 60%에 이르기까지 소요되는 시간

RT_{AT} : 제조 공시체의 동탄성계수값이 60%에 이르기까지 소요되는 시간

(4) 동결융해 및 수축팽창 촉진시험

1) 촉진시험 자료 분석

동결융해(수축팽창) 사이클수에 따른 동탄성계수, 중량변화, 길이변화의 경시변화를 분석하고, 상대동탄성계수가 60%이하로 떨어지는 시점 및 60%일 때의 중량변화 및 길이변화를 분석하여 이에 따른 손상곡선을 구성한다. 구성된 손상곡선은 기존 손상 예측식과 비교·검토하여, 구조물 강도별 열화모델의 구성의 기초자료로서 활용한다.

2) 계수의 산출

현장 사용배합으로 제조된 공시체에 대한 촉진시험을 실시하여 실제 원전 구조물에서 채취한 코어의 길이변화 및 중량손실률과 비교한 후, 이 결과로부터 시험계수를 다음 식에 의해 산출한다.

$$K_2 = \frac{R_{AT}}{RT_{AT}}$$

R_{AT} : 채취코어의 동탄성계수값이 60%에 이르기까지 소요되는 시간

RT_{AT} : 제조 공시체의 동탄성계수값이 60%에 이르기까지 소요되는 시간

4. 결론

본 연구에서는 콘크리트 내구성 항목별 촉진시험기법을 원전 구조물의 환경조건을 고려하여 각종 시험조건을 설정하므로써 실구조물을 효과적으로 모사하는 촉진시험이 되도록 하였으며, 시험계수의 도출을 통하여 실내시험에서의 열화속도를 실구조물에서도 적용할 수 있도록 하였다. 이러한 촉진시험은 콘크리트 열화메카니즘의 복잡성 및 불확실성으로 인하여 진행과정에서 일부 시행착오가 예상되지만 추후 시험기법의 지속적인 보완을 통하여 신뢰성 있는 결과를 도출할 수 있을 것으로 사료되며, 현장 점검자료와 더불어 원전콘크리트 구조물의 수명예측을 위한 기초자료로서의 활용뿐만이 아니라 기타 콘크리트 구조물에도 응용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 小林 明夫, "콘크리트 구조물의 내구성 시리즈 Ⅰ", 1987
2. 秋葉 徳二, "콘크리트의 해수による浸蝕に関する研究", セメント技術年報 34, 1980
3. ASTM D1141-98e1 "Standard Specification for Substitute Ocean Water"
4. KS F 2456 "급속 동결융해에 대한 콘크리트의 저항 시험방법"

5. J.R. Clifton, James M. Pommersheim, Kenneth Snyder, "Long-Term Performance of Engineered Concrete Barriers", NISTIR 5690, July, 1995
6. J.C. Walton, L.E. Plansky, R.W. Smith, "Models for Estimation of Service Life of Concrete Barriers in Low-Level Radioactive Waste Disposal", NTIS NUREG/CR-554, Sep, 1990