2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

원전 콘크리트 구조물을 위한 황산염 침해 예측 모델의 구성에 관한 연구

Establishment of Sulfate Attack Prediction Model for Concrete Structures of N.P.P.

조명석*, 김영인**, 김성욱***, 김도겸*, 이종석***

* 한국전력공사 전력연구원, 대전광역시 유성구 문지동 103-16
** 한국전력공사 원자력발전처, 서울특별시 강남구 삼성동 167
*** 한국건설기술연구원, 경기도 고양시 일산구 대화동 2311

요 약

황산염에 의한 원전 콘크리트 구조물의 침해를 예측하기 위하여 Mechanistic 모델을 적용하였다. 적용배합은 설계강도 5500, 4000, 3000psi의 3종으로 하였으며, 시멘트는 1종과 5종을 사용하였다. 시멘트 종류 및 설계강도별로 1년간 10% 황산나트륨 용액에서 침지실험을 실시하였으며, 확산계수, 압축강도, 길이변화율, 중량변화율을 검토하였다. 실험결과를 토대로 기본 모델의 구성에 필요한 배합별 확산계수값을 구하였으며, 이를 근거로 배합별 예측모델을 구성하였다. 또한 이 예측모델의 현장 적용을 위한 방안을 검토하였다.

Abstract

In this paper, mechanistic model is applied to predict the deterioration of concrete structures of the nuclear power plant due to sulfate attack. Mix design for the test was three kinds of specified strength 5500, 4000, 3000psi, and cement was type I and V. To investigate the diffusion coefficient, compressive strength, the change in length and mass according to cement type, strength, we performed the immersion test with 10% Na_2SO_4 solution for 12 months. The diffusion coefficient of each concrete mix based on the results of immersion test, is calculated, and the sulfate attack prediction model using the diffusion coefficient is constituted. And the Method for field application of the model is also investigated.

1. 서론

황산염 침해에 의한 콘크리트의 수명저하는 콘크리트 내부로 황산염이 침투하여 팽창반응을 일으키고 이로 인한 팽창성 응력이 콘크리트에 균열을 발생시킨다. 이러한 균열의 발생은 유해이온의 확산과 수분의 침투율을 증가시켜 열화속도를 더욱 가속화할 수도 있다. 황산염 침해에 의한 콘크리트 손상 범위는 표면에서부터 진행하며 황산염 침해에 의한 콘크리트의 손상은 침해 깊이 혹은 침해에 의한 팽창량 및 진행속도 등으로 표현을 할 수 있다.

황산염 침해에 의한 수명저하를 예측하기 위해서 여러 가지 모델들이 제시되어 있으나, 기존의 모델식들은 주로 황산염의 침투깊이로서만 수명을 예측하고 있으며, 배합조건 등을 고려할 수 없는 문제점이 있다. 그러나, 최근의 연구에 의하면 황산염에 의한 콘크리트의 침해는 반응의 결과

로서 나타나는 팽창응력에 의해서 발생되며 이때 열화 진행속도는 재령에 비례하는 것으로 보고되고 있다.[1)2)3)] 따라서 본 연구의 황산염 침해 수명저하 예측모델에서도 이를 반영할 수 있는 모델을 구성하였다. 또한 원전 콘크리트 구조물에 사용된 배합으로서 촉진실험을 실시하여 각 인자들이 황산염 침해속도에 미치는 영향을 도출하고 이를 모델에 반영 최종적인 황산염 침해에 의한 수명저하 예측모델을 구성하고자 한다.

2. 기본 모델식 구성

(1) 구성방향

황산염 침해는 반응의 부산물인 석고(gypsum)와 에트린가이트(ettringite)가 콘크리트 내부의 공극을 채움으로서 생기는 내부응력의 증가로서 발생되며, 그 결과는 주로 팽창에 의한 콘크리트의 박리·박락으로 나타나므로 이를 수명평가시 고려할 필요가 있다.[4)] 이러한 현상은 확산계수와 밀접한 관계가 있으므로 황산염 이온의 확산계수는 침해의 정도에 미치는 영향이 크고 이 때문에 기존의 경험식 및 수학적 모델식에서 중요한 인자로 고려되어졌다. 따라서 팽창과 확산계수는 본 연구에서의 수명저하예측 모델 구성에서도 중요한 인자가 된다.[5)] 이에 본 연구에서는 Mechanistic 모델을 기본으로 황산염 침해 모델식을 구성하였으며, 모델에 필요한 각종 인자들은 실내시험, 현장조사 및 문헌조사를 통하여 구하였다.

(2) 기본 모델식

1) 기본가정

- ○ 황화물에 의한 수명저하는 반응에 따른 콘크리트의 단면 손상에 의해 발생한다.
- ○ 황산염이 침투된 피복콘크리트는 원래의 성능을 완전히 상실했다고 가정한다.

2) 적용 모델식

황산염에 의한 열화 깊이를 산정하기 위하여 Atkinson-Hearne의 Mechanistic 모델[6)]을 사용하였다. 본 모델에서는 토양이나 해수 등의 이동특성은 콘크리트보다 훨씬 크기 때문에 콘크리트의 외부 경계조건은 황산염 침해가 진행된 깊이까지 이동하여 새로운 경계조건을 생성한다고 본다. 즉, 황산염 침해가 진행된 콘크리트부는 콘크리트 외부의 토양이나 해수와 같은 조건으로 간주하는 것이다.

이 모델은 반응이 지배적인 열화의 과정이며, 황산염 이온에 의한 콘크리트의 열화 속도는 (식 1)로 나타낸다.

$$R = \frac{X_{spall}}{t_{spall}} = \frac{E B^2 c_o C_E D_i}{\alpha \gamma (1-\nu)} \qquad \text{(식 1)}$$

여기서, R : 황산염 이온에 의한 콘크리트의 열화 속도(m/sec)
X_{spall} : t 시간에서의 침해깊이
t_{spall} : 침해깊이 X에서의 시간
c_o : 용액중의 황산염 농도 (mol/m^3)
C_E : 에트린가이트로 반응하는 황산염의 농도(mol/m^3)
D_i : 콘크리트에서의 황산염 이온 확산계수(m^2/s)
E : 탄성계수(20GPa)
α : 열화가 일어나는 영역의 조도계수
(roughness factor, 1.0으로 가정)
B : $1m^3$에서 반응하는 황산염 1mol의 응력($1.8\times10^{-6}m^3/mol$)
γ : 콘크리트 표면이 파괴되는 필요한 에너지($10J/m^2$)
ν : 포아슨비 (0.2)

3) 에트린가이트로 반응하는 황산염의 농도 C_E의 산정

콘크리트 외부에서 공급되는 황산염의 양이 일정하다고 가정하기 때문에 C_E는 시멘트의 C_3A의 양에 의해서 계산되어 질 수 있다. 에트린가이트 1몰이 생성되기 위해서는 Al_2O_3 1몰이 필요하므로, Al_2O_3의 몰농도는 에트린가이트의 몰농도가 될 수 있다고 볼 수 있다. 따라서, 주어진 콘크리트 배합에서 콘크리트 1m^{3}당 시멘트량(x_{cem}), 시멘트의 산화알루미늄 함량($\phi_{Al_2O_3}$)에서 콘크리트 1m^{3}당 형성되는 에트린가이트의 몰량 C_E는 (식 2)로서 구할 수 있다.

$$C_E = \frac{x_{cem}\,\phi_{Al_2O_3}}{0.10196} \qquad \text{(식 2)}$$

여기서, x_{cem} : 콘크리트 1m^{3}당 시멘트량(kg/m^3)

$\phi_{Al_2O_3}$: 시멘트의 산화알루미늄 함량(%)

0.10196: Al_2O_3 1몰의 중량(kg/mol)

따라서, 기본 모델식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{X_{spall}}{t_{spall}} = \frac{E B^2 c_o D_i x \phi}{0.10196 \alpha \gamma (1-\nu)} \qquad \text{(식 3)}$$

3. 촉진시험

(1) 개요

본 촉진시험은 황산염 침해를 받고 있는 콘크리트가 재령, 설계강도, 시멘트종류에 따라 길이변화율, 중량변화율, 압축강도 측면에서 어떠한 경향을 가지고 있는지를 검토하고, 황산염 이온의 확산계수를 도출하여 예측모델에 반영하는 것을 목적으로 한다. 촉진시험에 사용되는 배합은 원전콘크리트 구조물에 사용되고 있는 것으로 5500 psi, 4000 psi, 3000 psi 3종의 설계강도로서 대표적인 배합을 선정하여 국내 원전 구조물에 가장 적합한 형태로 수명저하 예측모델을 구성하고자 하였다. <표 1>에 본 시험에 사용된 배합표를 나타내었다.

<표 1> 콘크리트 배합표

강도 (psi)	W/C (%)	S/a	W (lb)	C (lb)	S (lb)	G (lb)	WRA (ml)	AEA (ml)	배합근거
5500	42	46	285	678	1275	1505	923	16	영광 3,4호기
4000	48	46	300	625	1303	1505	852	16	〃
3000	62	45	278	448	1359	1657	813	31	월성 2,3,4호기

(2) 시험방법

시험체는 10×10×40cm의 직육면체 시험체 6개에 대하여 재령별 길이변화, 중량변화를 측정하였으며, 실험이 종료된 1년의 재령에서 깊이별로 시료를 채취하여 황화물의 침투량을 측정하였다.

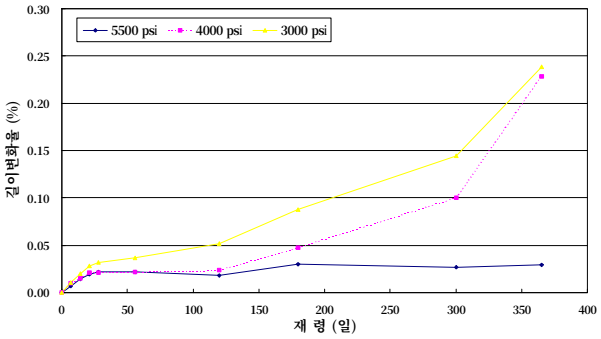
시험조건은 완전침적시험으로 하였으며, 시험에 사용된 침적수는 황산나트륨 10% 용액을 사용하였다.

측정주기는 초기, 1주, 2주, 3주, 4주, 8주, 16주, 6개월, 10개월, 12개월로 하였으며, 측정항목은 길이변화, 중량변화, 압축강도, 확산계수로 하였다.

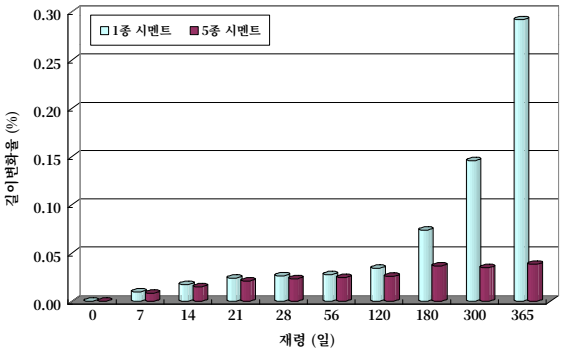
(3) 시험결과

1) 길이변화율

국내 원전 콘크리트 구조물의 대표적인 배합설계로서 제작된 시험체를 재령에 따라 길이변화율을 측정한 결과, 압축강도가 높을수록 길이변화율은 적게 나타났으며, 1종 시멘트가 5종 시멘트에 비해 상대적으로 높은 길이변화율을 보였다.



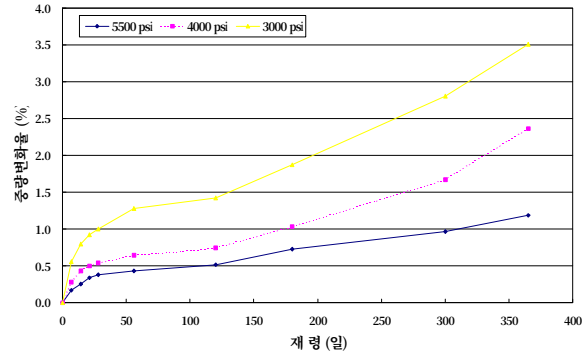
<그림 1> 설계강도별 길이변화율



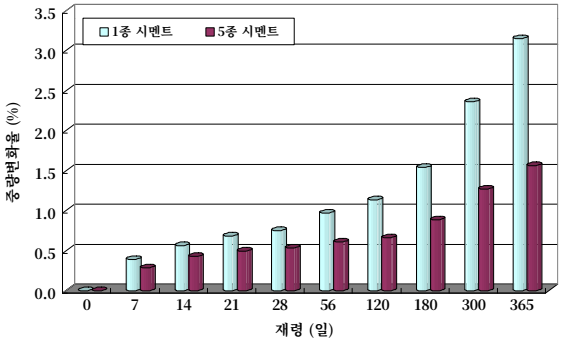
<그림 2> 시멘트종류별 길이변화율

2) 중량변화율

재령에 따른 중량변화율을 측정한 결과, 시간이 경과함에 따라 중량은 점차 증가하였고, 초기 재령에 비교적 높은 중량감소율을 보였으며, 그 경향은 <그림 3>~<그림 4>와 같다.



<그림 3> 설계강도별 중량변화율



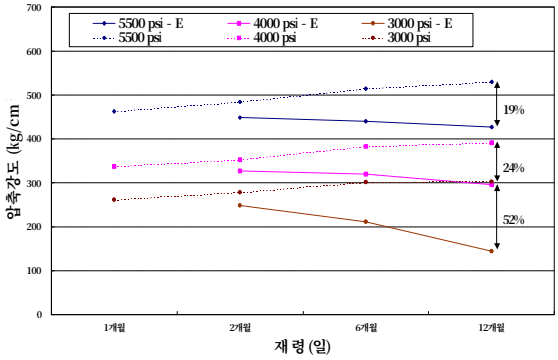
<그림 4> 시멘트종류별 중량변화율

3) 압축강도

황산염 침해를 받는 콘크리트의 재령별 압축강도 시험 결과, 일반 수중에서 침지된 시험체는 점진적인 강도의 증가를 보였다. 반면, 황산염 용액에 침지된 시험체는 재령에 따라 오히려 강도가 감소하였고, 재령이 지남에 따라 일반 수중에서 양생되는 시험체와의 강도차이가 점점 커지는 것으로 나타났으며, 그 경향은 <그림 5>와 같다.

4) 확산계수

본 실험에서는 깊이별 황화물 침투량 분석을 위해 Leco Instrument사의 탄소/유황분석기를 사



<그림 5> 재령별 압축강도 비교

용하였으며, 황화물 확산계수는 Fick의 제 2 법칙에 따라 황화물의 이동 비율로부터 계산하였다.
사용시멘트 종류 및 설계강도별 황화물 확산계수는 <표 2>와 같으며, 1종 시멘트를 사용한 시험체가 5종 시멘트에 비해 높은 확산계수를 나타내었고, 설계강도가 높을수록 확산계수는 낮게 나타났다.

<표 2> 공시체 종류별 황화물 확산계수

공시체 No.	황화물 확산계수 ($10^{-12}m^2/sec$)	공시체 No.	황화물 확산계수 ($10^{-12}m^2/sec$)
1종-5500psi	0.8161	5종-5500psi	0.5763
1종-4000psi	1.1633	5종-4000psi	1.0002
1종-3000psi	3.9002	5종-3000psi	2.1341
현장코어(고리)	0.8861		

(4) 수명저하 예측모델로의 적용

1) 황산염 침해 추정을 위한 자료

황산염 침해 정도를 추정하기 위한 자료는 <표 3>과 같다. 대상 콘크리트 구조물 외부의 황산염 농도 C_o의 범위를 0~25 mol/m^3, 확산계수는 0~4 $\times 10^{-12} m^2/sec$를 적용하여 황산염 농도와 확산계수에 따른 전반적인 침해 속도를 산정하였다. 탄성계수, 조도계수, $1m^3$에서 반응하는 황산염 1mol의 응력, 콘크리트 표면이 파괴되는 필요한 에너지, 포아송비는 기본값을 사용하였다. 또한, 단위시멘트량은 본 연구의 실험에서 사용된 설계강도 4000psi의 배합을 적용하여 371 kg/m^3으로 하였으며, 산화알루미늄의 함량은 일반적인 1종 보통포틀랜드시멘트의 함량인 5%를 적용하였다.

<표 3> 황산염 침해정도 추정을 위해 필요한 기본 자료 항목(예시)

항 목		적용 값
c_o : 외부의 황산염 농도	기본 분석 범위	0~35 mol/m^3
	ACI 규제값	Mild : 0~150ppm Moderate : 150~1500ppm Severe : 1500~10000ppm Very Severe : 10000ppm 이상
	해수중의 황산염 농도	35 mol/m^3
D_i : 콘크리트에서의 황산염 이온 확산계수		0~4 $\times 10^{-12} m^2/sec$
E : 탄성계수		20 GPa (2039440000 kgf/m^2)
α : 열화가 일어나는 영역의 조도계수		1
B : $1m^3$에서 반응하는 황산염 1mol의 응력		0.0000018 m^3/mol
γ : 콘크리트 표면이 파괴되는 필요한 에너지		10 J/m^2 (1.01972 kgf·m)
ν : 포아송비		0.2
x_{cem} : 대상 구조물의 단위시멘트량		371 kg/m^3
$\phi_{Al_2O_3}$: 대상 구조물의 산화알루미늄 함량		5% (18.5 kg/m^3)

또한, <표 4>의 국내 해안 해수의 성분 분석표를 근거로 하여 <표 3>의 외부 황산염 농도의 기본 분석 범위 상한값을 정하였다. 아래 표에서 보면 국내 해안의 해수중 동해안의 경우 황산마그네슘($MgSO_4$) 2.168 g/l, 황산 칼슘($CaSO_4$) 1.491 g/l으로 조사되었으며, 황산칼륨의 경우는

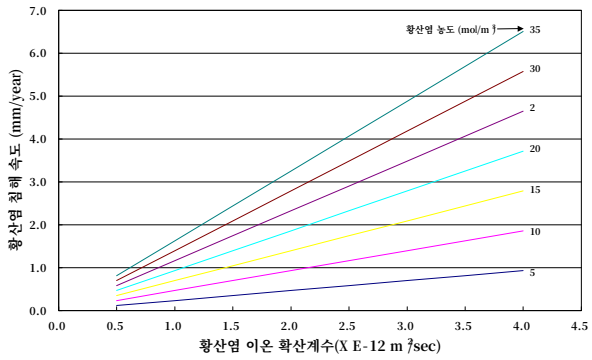
서해안의 성분에 준하여 0.863 g/l로 하여 해수의 황산염 함량을 계산하면 동해안 해수의 황산염의 몰농도는 0.0339M이며, 이것은 약 35 mol/m^3으로 환산될 수 있다.

<표 4> 국내 해안 해수의 성분 분석표[7)]

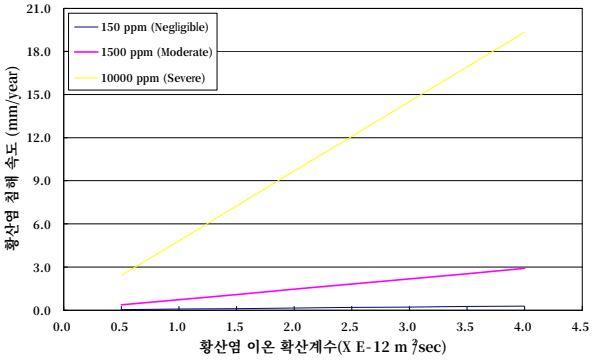
성분	서 해 안		남 해 안		동 해 안	
	g/l	wt(%)	g/l	wt(%)	g/l	wt(%)
$NaCl$	27.213	2.721	27.326	2.733	27.081	2.708
$MgCl_2$	3.807	0.381	3.858	0.386	3.084	0.308
$MgSO_4$	1.658	0.169	1.672	0.167	2.168	0.217
$CaSO_4$	1.266	0.126	1.269	0.127	1.491	0.149
K_2SO_4	0.863	0.086	0.731	0.073	-	-
$CaCO_3$	0.133	0.013	0.149	0.015	-	-
$MgBr_2$	0.076	0.007	0.024	0.002	0.174	0.017
KCl_2	-	-	-	-	0.818	0.082
-	35.016	3.502	35.029	3.503	34.816	3.482

2) 황산염 농도와 확산계수에 따른 침해속도

<그림 6>은 콘크리트 외부의 황산염 농도를 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 mol/m^3인 경우, 확산계수의 변화에 따른 황산염 침해속도를 나타낸 것이다. 황산염 침해 속도는 황산염 농도가 높을수록 직선적인 증가를 하였다.



<그림 6> 확산계수와 황산염농도에 따른 침해속도



<그림 7> ACI 규준 황산염 농도를 적용한 침해속도

3) ACI 황산염 노출조건 규준에 따른 침해속도

<그림 7>은 ACI Committee 201.2R과 ACI Building Code 318R의 황산염에 노출된 콘크리트에 요구되는 조건에서 콘크리트와 접하는 토양의 수용성 황산염 이온이 0.1%이하인 경우, 지하수의 황산염 이온이 150ppm(0.00156M)이하인 환경을 황산염의 영향이 거의 없는 "Mild" "Negligible"과 황산염 침해를 받는 조건이 되는 "Moderate" 1500ppm(0.01561M), 열악한 조건인 "Severe" 10000ppm(0.10410M)에 대하여 확산계수에 따른 황산염 침해속도를 추정하였다. 그림에서 보듯이 황산염 농도 150ppm의 경우는 확산계수에 상관없이 거의 영향을 받지 않는 것을 볼 수 있다. 그러나, 10000ppm인 경우는 황산염 이온 확산계수에 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다.

4) 기존 모델들의 비교

기존 모델중 Atkinson & Hearne의 경험적 모델, Shuman의 경험적 모델, 본 연구에 적용된 모델을 재령별 침해 깊이의 항목으로 비교하여 <그림 8>에 나타내었다. 각 모델에 적용된 조건은 <표 5>와 같다.

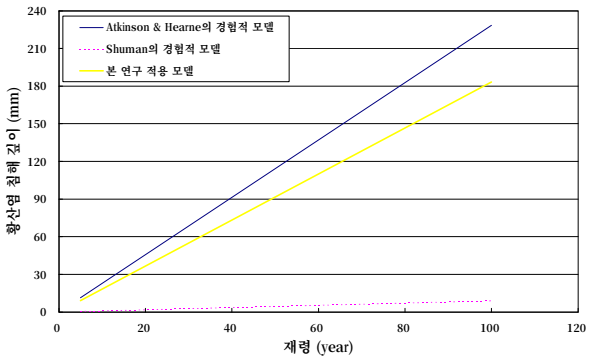
<표 5> 모델식 비교에 사용된 자료

시멘트 종류	설계 강도	Water (lb/yd^3)	Cement (lb/yd^3)	Sand (lb/yd^3)	Gravel (lb/yd^3)	C_3A (%)	Mg (mol/L)	SO_4 (mol/L)	SO_4 (mol/m^3)	확산계수 ($\times 10^{-12} m^2/sec$)
1종	4000	300	625	1303	1505	8	0.018	0.0339	33.9	1.163

<그림 8>에서 보면, Atkinson & Hearne의 경험적 모델 〉 본 연구 적용 모델 〉 Shuman의 경험적 모델 순으로 침해깊이가 크게 나타났다.

5) 촉진실험결과의 적용

본 촉진실험의 주요 측정인자는 길이변화율, 중량변화율, 확산계수이다. 이 중 길이변화율, 중량변화율 항목을 통해서는 기본 모델식에 의해 추정된 열화속도를 검증하는 기초적 자료를 얻을 수 있으며, 확산계수는 황산염 침해에 의한 열화속도를 추정하는 직접적인 자료로서 활용된다. 따라서, 황산염 확산계수에 대해서 대상 원전 콘크리트 배합 즉, 시멘트 종류별(1종시멘트, 5종시멘트), 설계강도별(5500psi, 4000psi, 3000psi)에 대한 고유값을 도출하여 기본모델식에 적용할 수 있도록 하였다.



<그림 8> 각 모델별 침해속도의 비교

<표 6> 황산염 침해정도 추정을 위해 필요한 기본 자료 항목

조사항목 \ 조사방법	현장조사	실내시험	문헌조사	기본자료
c_o : 토양중의 황산염 농도	✓			
D_i : 콘크리트에서의 황산염 이온 확산계수		✓		
E : 탄성계수		✓		
ν : 포아송비		✓		
α : 열화가 일어나는 영역의 조도계수				✓
B : $1m^3$에서 반응하는 황산염 1mol의 응력				✓
γ : 콘크리트 표면이 파괴되는 필요한 에너지				✓
χ_{cem} : 대상 구조물의 단위시멘트량			✓	
$\phi_{Al_2O_3}$: 대상 구조물의 산화알루미늄 함량			✓	

6) 현장점검 자료의 활용

본 황산염 침해 모델은 기본적으로 지하구조물이나 해수에 접한 구조물에 적용한다. 따라서, 대상 구조물 주변의 지하토양이나 지하수 혹은 해수의 황산염 농도를 먼저 조사하여야 한다. ACI Committee 201.2R과 ACI Building Code 318R에서는 콘크리트와 접하는 토양의 수용성 황산염 이온이 0.1% 이하인 경우, 지하수의 황산염 이온이 150ppm이하인 환경을 황산염의 영향이 거의 없는 "Mild"로 분류한 것과, <그림 7>에서의 실험결과로 미루어 볼 때, 대상 구조물 주변의 황산염 농도가 150ppm 이하인 경우 황산염 침해가 없는 것으로 간주할 수 있다.

또한, 황산염 침해 관련 현장 자료는 구조물의 위치 특성상 매우 제한적이므로, 앞서 언급한 토양이나 지하수, 해수의 황산염 농도외의 현장 점검 자료는 입수하기 곤란하다. 다만, 황산염 침해 추정 기본 모델식에서 필요한 항목 중 원전 관리자료를 통해서 대상 구조물의 콘크리트 $1m^3$당 형성되는 에트린가이트의 몰량 C_E를 추정하기 위하여 건설당시 사용된 시멘트의 산화알루미늄 함량 ($\phi_{Al_2O_3}$) 및 단위시멘트량을 조사하여야 한다. 또한, 조사된 대상 구조물의 배합으로서 시험체를 제작하여 확산계수를 실내시험에 의해서 구해야 한다.

4. 잔존수명 예측 모델의 구성

본 연구에서는 Atkinson & Hearne의 Mechanistic 모델을 기초로 하여 에트린가이트의 생성과 산화알루미늄과의 관계를 고려하여 아래와 같은 황화물 침해 예측 모델식을 구성하였으며, 모델식의 계수값은 현장조사, 실내시험, 문헌조사, 기본자료 등을 통하여 구할 수 있다.

$$R = \frac{X_{spall}}{t_{spall}} = \frac{E B^2 c_o D_i x \phi}{0.10196 \alpha \gamma (1-\nu)} \quad (m/\sec) \qquad \text{(식 4)}$$

<표 7> 황산염 침해 예측 모델에 필요한 계수값

조사항목 \ 조사방법	단위	자 료	비 고
c_o : 토양중의 황산염 농도	mol/m^3	-	현장조사
L : 콘크리트 덮개깊이 (cover depth)	mm	-	
D_i : 콘크리트에서의 황산염이온 확산계수	m^2/s	1종 5500psi 0.8161×10^{-12}	실내시험
		1종 4000psi 1.1633×10^{-12}	
		1종 3000psi 3.9002×10^{-12}	
		5종 5500psi 0.5763×10^{-12}	
		5종 5500psi 1.0002×10^{-12}	
		5종 5500psi 2.1341×10^{-12}	
E : 탄성계수	kgf/m^2	2039440000	
ν : 포아송비	-	0.2	
α : 열화가 일어나는 영역의 조도계수	-	1	기본값
B : $1m^3$에서 반응하는 황산염 1mol의 응력	m^3/mol	1.8×10^{-6}	
γ : 콘크리트 표면이 파괴되는 필요한 에너지	kgf·m	1	
x : 대상구조물의 단위시멘트량	kg/m^3	-	문헌조사
ϕ : 대상 구조물의 산화알루미늄 함량	%	1종 시멘트 : 0.05(5%)	
		5종 시멘트 : 0.04(4%)	

5. 결론

(1) 원전 콘크리트 구조물에서 황산염에 의한 침해 속도를 추정하기 위해서는 $R = \frac{EB^2 c_o D_i x \phi}{0.10196 \alpha \gamma (1-\nu)}$ $(m/\sec)$의 식을 사용한다.

(2) 황산염에 의한 침해 속도 R을 추정하기 위해서는 대상 구조물이 접한 토양이나 지하수 혹은 해수중의 황산염 농도를 측정하여야 하며, 실내시험을 통하여 대상 구조물에 사용된 배합의 탄성계수, 포아송비, 황산염 이온 확산계수를 구하여야 하며, 문헌을 통해 시멘트사용량 및 시멘트의 Al_2O_3함량을 조사하여야 한다.

(3) 본 실험의 조건에서는 콘크리트의 압축강도가 높을수록 길이변화, 중량변화의 측면에서 황산염 침해에 유리함을 알 수 있었으며, 1종 시멘트를 사용한 경우가 5종 시멘트를 사용한 경우보다 황산염 침해 저항성이 뛰어났다.

(4) 황산염 침해를 받는 콘크리트는 본 실험의 조건에서 탈락이 발생하기 전 즉, 콘크리트 내부에 반응부산물이 생기는 단계 혹은, 미세균열이 발생하는 단계, 박리가 발생하는 단계까지는 계속적으로 중량이 증가하였다.

(5) 본 연구에서의 대상 배합은 1종 5500 psi, 1종 4000 psi, 1종 3000 psi, 5종 5500 psi, 5종 4000 psi, 5종 3000 psi의 6개 종류였으며, 이들의 황화물 확산계수는 각각 0.8161, 1.1633, 3.9002, 0.5763, 1.0002, 2.1341($\times 10^{-8} cm^2/sec$)로 나타났다.

(6) 고리 현장 채취 코어 시험체의 황화물 확산계수는 0.8861($\times 10^{-8} cm^2/sec$)로 나타났으며, 이는 본 연구의 대상 배합에서 1종 5500 psi보다 약간 낮은 값을 5종 4000 psi보다 약간 높은 값을 나타내어 확산계수의 측면에서 매우 양호한 상태를 보였다.

참고문헌

1) James R. Clifton, James M. Pommersheim, "Sulfate Attack of Cementitious Materials Volumetric Relations and Expansions", 1994
2) E.F. Irassar, A. Di Maio, O.R. Batic, "Sulfate Attack on Concrete with Mineral Admixtures", Cement & Concrete Research, Vol. 26, No. 1, pp.113~123, 1996
3) K. Torii, K. Taniguchi, M. Kawamura, "Sulfate Resistance of High Fly Ash Content Concrete", Cement & Concrete Research, Vol. 25, No. 4, pp.7595~768, 1995
4) Kurt F.von Fay, "Effect of Various Fly Ashes on Compressive Strength, Resistance to Freezing and Thawing, Resistance to Sulfate Attack, and Adiabatic Temperature Rise of Concrete", (U.S.) Bureau of Reclamation, Denver. Co, 1995
5) Fikret Türker, Fevziye Aköz, Sema Koral, Nabi Yüzer, "Effects of Magnesium Sulfate Concentration on the Sulfate Resistance of Mortars with and without Silica Fume", Cement & Concrete Research, Vol. 27, No. 2, pp.205~214, 1997
6) A. Atkinson, J.A. Hearne, "Mechanistic Models For the Durability of Concrete Barriers Exposed to Sulfate-Bearing Groundwaters," MRS Proc., 176, 1990.
7) 박기근외, "콘크리트 내구성에 관한 조사 연구", 구국립건설시험소, 1998