

## 콘크리트 코어 분석을 통한 복합열화 평가와 잔존수명 예측 연구

# A Study on Evaluation of Complex Deterioration evaluation and Prediction of Residual Life through Concrete Core

Jaeyoung Shim<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> *Ph.D Student of Urban Construction Engineering, Incheon National University, 119 Academy-ro Yeonsu-gu, Incheon 406-772, Republic of Korea*

---

### ABSTRACT

In the case of aged structures, the information of the structure is often lost after the completion of construction, and there is a great difficulty in predicting the durability life of the structure due to the lack of information on concrete formulations.

In this study, the durability of concrete specimens was evaluated by various field and indoor test methods based on the core specimens collected from the field, and the durability life of the concrete structures was predicted by using the FEM analysis technique. As a result, the neutralization rate coefficient was  $5.38E-6$  (cm<sup>3</sup>/day) and the rate of progress was low. And the possibility of complex deterioration due to carbonation and salting was found to be very low.

---

### KEYWORDS

Speed Factor  
Durability Life  
(Remaining  
Lifetime  
Prediction)  
Fick's law

---

노후화된 구조물의 경우 준공 후 시간이 지나 구조물의 정보가 유실되는 경우가 많으며, 시공관련 자료에 대한 정보 부족으로 인해 구조물의 잔존수명을 예측하는데 큰 어려움이 있다. 본 연구에서는 현장에서 채취한 코어 시험체를 기반으로 각종 현장 및 실내시험법을 통한 내구성을 평가하고 이를 토대로 FEM 해석기법을 활용하여 콘크리트 구조물의 내구 수명을 예측하였다. 그 결과, 중성화 속도계수는  $5.38E-6$ (cm<sup>3</sup>/day)로 매우 진행 속도가 낮은 것으로 나타났으며, 탄산화 및 염해에 의한 복합열화의 발생 가능성은 매우 낮은 것으로 확인되었다

---

속도계수  
내구수명  
잔존수명 예측  
Fick의 법칙

---

© 2017 Society of Disaster Information All rights reserved

---

\* Corresponding author. Tel. 82-10-3350-6352.  
Email. [ibytech@inu.ac.kr](mailto:ibytech@inu.ac.kr)

---

### ARTICLE HISTORY

Received Jun. 10, 2017  
Revised Jun. 13, 2017  
Accepted Sep. 20, 2017

## 1. 서론

노후화된 구조물의 경우 준공 후 시간이 지나 구조물의 정보가 유실되는 경우가 많으며, 시공관련 자료에 대한 정보 부족으로 인해 구조물의 잔존수명을 예측하는데 큰 어려움이 있다. 콘크리트의 진단 업무에서 주요한 정보에는 강도 조사, 철근 부식 관련 위험성 조사, 알칼리 골재 반응 위험성 조사, 미시구조 분석을 통해 현재의 열화정도의 평가는 가능하다. 그러나 잔존 수명 예측을 위해 구조물의 정보가 없을 경우에는 실험적인 접근을 통한 콘크리트의 배합설계 정보를 도출하고 이를 통한 콘크리트의 잔존수명을 예측하는 것이 요구된다.

본 연구에서는 콘크리트 구조물의 내구성 저하 요인을 조사, 분석함은 물론, 현장에서 채취한 코어 시험체를 기반으로 각종 현장 및 실내시험법을 활용하여 콘크리트 구조물의 내구성을 평가하고자 한다. 또한, 이를 토대로 FEM 해석기법을 활용하여 지하 콘크리트 구조물의 내구수명을 예측하였다.

## 2. 콘크리트 경화체의 기본물성 및 미세분석 평가

본 연구에서의 구조물의 내구성 평가와 잔존 수명을 예측하기 위한 기초 자료를 수집하고, 아래와 같이 각 사이트(지하역사)별로 시설물의 내부와 외부 2개소에서 콘크리트 경화체를 채취하고 기본 물성실험을 실시하였다. 시료채취현황은 Table 1과 같다.

Table 1. Sampling status of structure subject to measurement

Site	Sum Total			Structure 1			Structure 2		
	Sum	Inside	Outside	Sum	Inside	Outside	Sum	Inside	Outside
A	4	2	2	-	-	-	4	2	2
B	3	1	2	2	1	1	1	-	1
C	6	2	4	3	2	1	3	-	3
D	3	2	1	3	2	1	-	-	-
E	5	2	3	3	2	1	2	-	2
F	5	2	3	3	2	1	2	-	2
G	3	2	1	3	2	1	-	-	-
Sum total	29(ea)	13	16	17(ea)	11	6	12(ea)	2	10

Sampling status of structure subject to measurement

### 2.1 압축 강도(정탄성계수) 측정 결과

#### (1) 압축강도 특성

전 구역의 압축강도 평균값은 37.85 MPa로 나타났으며, 내부 공간과 외부 공간의 압축강도는 각각 39.44 MPa과 36.26 MPa로 나타나 외부 공간에 비하여 내부 공간의 압축강도의 건전성이 우수한 것으로 나타났다.

#### (2) 정탄성계수

콘크리트 코어의 정탄성계 시험 결과, 전반적으로 표준값과 거의 동등한(표준값의 80%이상)으로 조사되었으며, 전체적으로 정탄성 계수의 변동계수도 15%로 나타나 콘크리트 품질관리 부분에서도 양호한 것으로 확인되었다. 시료의 정탄성계수는 Table 2, 각 구역별 정탄성계수는 Table 3과 같다.

Table 2. Statistics of static elastic modulus

EC Max (N/mm <sup>2</sup> )	EC Min (N/mm <sup>2</sup> )	Ave. (N/mm <sup>2</sup> )	x-3on (N/mm <sup>2</sup> )	Coefficient of variation (%)
2.8 × 10	1.6 × 10	2.2 × 10	1.2 × 10	15

Table 3. Results of static elastic modulus test for each zone

Site	Location	Elastic modulus test results (N/mm <sup>2</sup> )	
		1 time	2 times
A	structure II inside	2.1 × 10	1.6 × 10
	structure II outside	2.4 × 10	-
B	structure I inside	1.8 × 10	1.7 × 10
	structure I outside	1.7 × 10	-
	structure II outside	2.1 × 10	-
C	structure I inside	2.3 × 10	1.9 × 10
	structure I outside	2.6 × 10	-
	structure II outside	2.4 × 10	-
D	structure I inside	2.2 × 10	2.2 × 10
	structure I outside	2.1 × 10	-
E	structure I inside	2.1 × 10	2.2 × 10
	structure I outside	1.8 × 10	-
	structure II outside	2.3 × 10	-
F	structure I inside	2.2 × 10	2.8 × 10
	structure I outside	1.7 × 10	-
	structure II outside	2.6 × 10	-
G	structure I inside	1.9 × 10	2.2 × 10
	structure I outside	1.9 × 10	-

2.2 SEM분석, X선 회절분석

(1) SEM

외부 열화 인자에 노출된 콘크리트 시편내의 수화물은 탄산화에 의한 탄산칼슘 결정의 석출과 염화물에 의한 에트링가이트 결정의 변이 등이 관찰된다. 아래 각 구역별 SEM 사진에서는 각각의 수화물 조직의 변이는 관찰되지 않았다. 에트링가이트 초기 생성에서는 침상형 조직이 다발로 구성되나 수화가 진전됨에 따라 다른 수화물과 혼성된 상태로 밀도가 상승하게 되는데 SEM사진의 판독 결과 수화정도가 이미 상당 수준에 도달한 것을 관찰 할 수 있었다. 외부열화인자 중 가장 침식이 용이한 기체상태의 CO2로 수산화칼슘의 변이를 빠르게 촉진시킨다. 그러나 탄산칼슘은 나타나지 않아 탄산화의 영향이 받지 않음을 알 수 있었다.

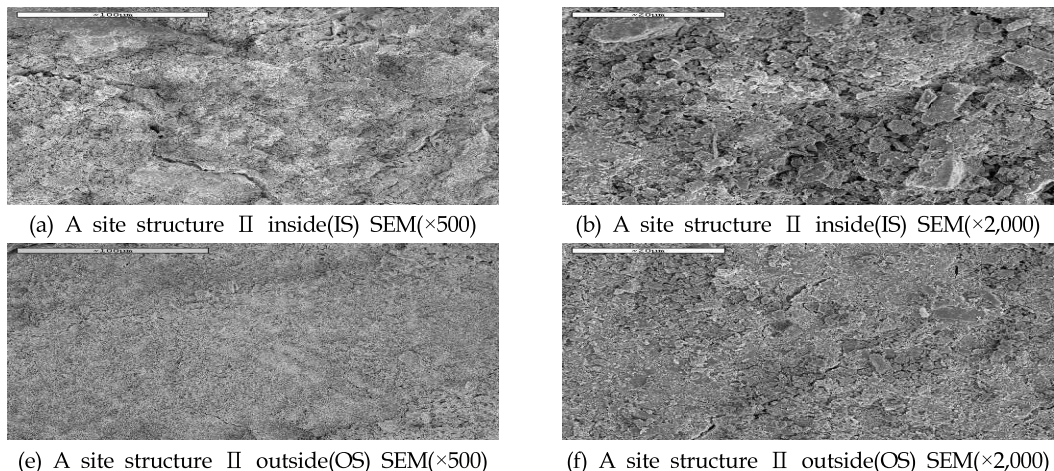


Fig. 1. SEM - A site

(2) XRD

각 구역별 피크는 잔골재의 영향으로 인해 석영 피크가 높게 나타났으며, 수산화칼슘과 CSH, 모노설페이트 등이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 각 구역별 회절 피크상에서는 이미 에트링가이트 피크는 모노설페이트상으로 전환되거나 석고 피크가 소실된 상태로 나타나 수화의 정도는 양호한 것으로 나타났으며 탄산염과 염화물에 의한 고용체는 나타나지 않았다. 탄산화에 의한 칼사이트피크는 23.0°와 29.4°에서 나타나는 주요 피크로 이와 관련된 피크 또한 관찰되지 않았다.

따라서 각 구역별 콘크리트의 수화는 상당 수준에 도달한 것을 유추할 수 있었으며, 외부 열화인자에 의한 침식 상태는 나타나지 않은 것을 확인하였다.

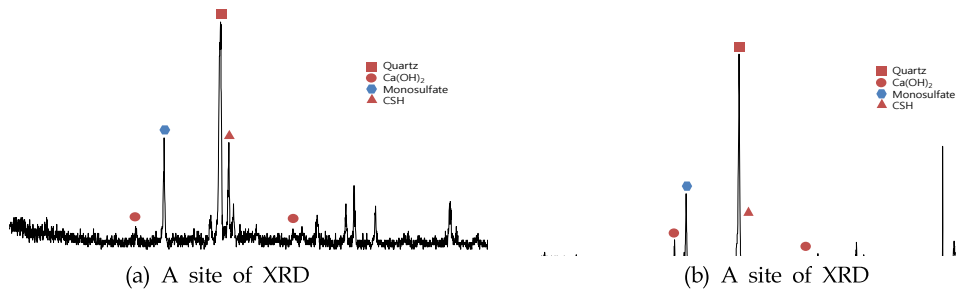


Fig. 2. A site of XRD

3. 구조물의 복합열화 평가

3.1 탄산화 측정을 통한 탄산화 속도 계수 측정

탄산화 깊이의 측정결과를 기초로 다음 식에 의해 탄산화속도 계수를 추정한다.

$$X_c = \alpha \sqrt{t} \tag{1}$$

여기에서,  $X_c$  : 탄산화 침투깊이(mm)

$\alpha$  : 측정값으로부터 구한 탄산화 속도계수

$t$  : 재령(경과년수)

각 구역별 탄산화를 측정한 결과 평균 0.11cm로 콘크리트 염분 함유량 기준내에 있는 것으로 나타났다.

평균값의 오차가 거의 없는 구역의 경우 외장마감재 등에 따라 표면의 탄산화가 억제되면서 탄산화진행이 이루어지지 않은 것으로 판단된다. 그러나 외부의 공간의 경우 대체로 외부공간의 강수 등에 의해 이온화된 탄산이온의 침투로 탄산화 정도가 빠른 것으로 판단된다. 탄산화 속도계수 추정결과는 다음 Table 4과 같다.

Table 4. Carbonation speed coefficient estimation result

Site	location	Carbonation depth	Carbonation speed coefficient
		(cm)	(cm <sup>2</sup> /day)
A	structure II inside	0.00	0.00
	structure II outside	0.13	5.40E-06
B	structure I inside	0.05	7.98E-07
	structure I outside	0.22	1.55E-05
C	structure I inside	0.00	0.00
	structure II outside	0.05	7.98E-07
	structure II outside	0.09	2.59E-06

D	structure I inside	0.035	3.91E-07
	structure I outside	0.23	1.69E-05
E	structure II inside	0.165	8.69E-06
	structure II outside	0.18	1.03E-05
	structure II outside	0.14	6.26E-06
F	structure I inside	0.05	7.98E-07
	structure I outside	0.02	1.28E-07
	structure II outside	0.10	3.19E-06
G	structure II outside	0.16	8.17E-06
Average			5.38E-06

### 3.2 염화물 함유량 측정을 통한 복합열화평가

각 구역별 염화물량을 측정한 결과 평균 0.232kg/m<sup>3</sup>로 콘크리트 염분 함유량 기준 내에 있는 것으로 나타났다. 각 구역별 염화물량이 가장 높은 곳은 A구역으로 0.284kg/m<sup>3</sup>이었으며, 가장 낮은 구역은 G구역으로 0.15kg/m<sup>3</sup>으로 나타났다.

내부와 외부의 염화물량의 평균값은 각각 0.216kg/m<sup>3</sup>과 0.249kg/m<sup>3</sup>으로 나타났다. 염화물 함량이 가장 높은 A구역의 내부와 외부 염화물 함량은 각각 0.268kg/m<sup>3</sup>과 0.299kg/m<sup>3</sup>로 나타났다.

이는 외부 공간에서는 대기 중의 염소이온이나 먼지 등이 구조물의 표면에 부착되면서 표면의 염소 이온의 농도가 상승하면서 염화물 이온의 침투가 좀 더 높은 것으로 판단된다.

## 4. 유한요소해석을 활용한 내구성평가

### 4.1 염해에 의한 구조물의 잔존수명 예측

#### (1) 콘크리트내의 염화물량

콘크리트 내에 잔존하는 염화물량은 측정된 개소 대부분이 0.3kg/m<sup>3</sup>이하로 나타났다. 일부지역에서 0.7kg/m<sup>3</sup>이상인 곳이 있지만 이는 극히 일부분이므로 전체를 대표하는 수치라 여길 수 없다. 따라서 본 장에서 FEM해석을 통한 염화물의 확산예측에서는 콘크리트 내부의 초기 염화물량을 0.3kg/m<sup>3</sup>로 설정하여 해석하기로 한다.

#### (2)대기중의 염화물량

한국콘크리트학회의 「콘크리트 표준시방서-유지관리편(안)」에서 염화물 이온의 확산 예측시, 염해환경하의 콘크리트 구조물의 표면염화물량을 Table 5과 같이 설정하도록 하고 있다.

Table 5. Chlorine ion concentration on the surface (kg/m<sup>3</sup>)

Splash zone	Distance from the coast(km)				
	Near the coastline	0.1	0.25	0.5	1.0
13.0	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5

본 장에서의 염화물 확산에 의한 철근부식시기를 예측함에 있어서 콘크리트 구조물의 표면 염화물 이온 농도를 해안으로부터 1km 떨어진 곳의 염화물 농도와 같은 1.5kg/m<sup>3</sup>과 이의 2/3인 1.0kg/m<sup>3</sup>를 해석변수로 하여 철근 부식시기를 예측하기로 한다.

#### (3)FEM 해석

해석시 주요 변수는 표면 염화물이온 농도를 변화시켜가며 해석을 수행하도록 한다. 대상구조물은 슬래브와 벽체로 하고, 철근의 위치에서의 염화물 이온 농도가 임계치에 도달하는 시기를 파악하도록 한다. <Table 6>는 해석을 수행한 해석모델의 일람이다.

Table 6. FEM interpretive variable (Chloride penetration)

Interpretation model name	Surface chloride concentration (kg/m <sup>3</sup> )	Diffusion coefficient (× 10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /day)	Covering thickness (cm)	Remarks
Case1-S	1.5	1.72	5.0	Slab
Case2-S	1.0			
Case1-W	1.5		8.0	Wall
Case2-W	1.0			

해석은 2차원의 염화물이온의 확산을 고려하였으며, 모델은 철근의 피복두께(슬래브 5cm, 벽체 8cm)를 포함하도록 길이 15cm, 높이 5cm, 각 요소의 길이는 1cm 정방형이 되도록 메쉬분할 하였다.

해석모델의 경계조건은 Fig. 3 에서와 같이 왼쪽 표면에서 염화물이온이 침투하며 기타 외부면은 비투면으로 설정하였다. 침투면에서의 각 절점의 표면 염화물이온의 농도는 각 변수별 표면 염화물이온 농도를 고정으로 하여 침투하는 것으로 설정 하였다. 콘크리트 요소의 염화물 이온의 확산은 x, y방향으로 같은 확산계수를 갖는 등방성 물질로 모델링 하였다.

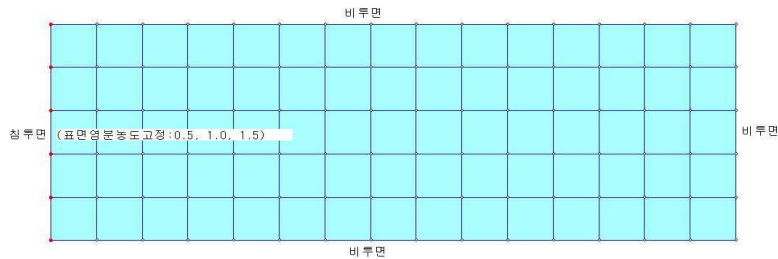


Fig. 3. Boundary condition of analytical model

(3) 해석결과

피복두께가 5cm인 슬래브에 대하여 염해환경조건이라고 할 수 있는 해안으로부터 1km거리에 있는 콘크리트 구조물의 표면 염화물이온량인 1.5kg/m<sup>3</sup>과 이에 대하여 2/3 정도의 표면 염화물이온량에 대하여 65년까지 철근위치에서의 염화물이온의 침투량을 FEM해석을 통하여 알아보았다.

Fig. 4, Fig. 5에는 각각 표면 염화물이온량이 1.5kg/m<sup>3</sup>, 1.0kg/m<sup>3</sup>을 적용하여 해석한 결과를 나타낸 것이다.

표면 염화물이온량이 1.5kg/m<sup>3</sup>인 경우에는 약 15년 경과후, 철근의 위치에서 철근의 부식이 발생하기 시작하는 염화물 임계농도에 도달하는 것으로 나타났다.

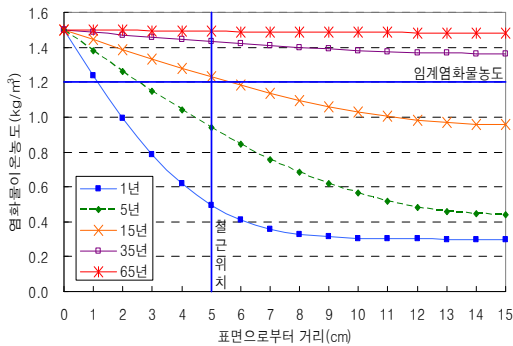


Fig. 4. Salinity distribution when the amount of surface chloride is 1.5kg/m<sup>3</sup>(Covering thickness 5cm)

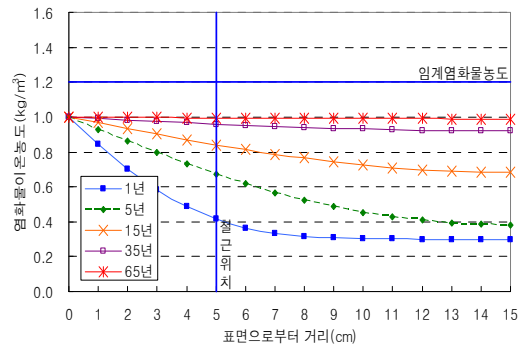


Fig. 5. Salinity distribution when the amount of surface chloride is 1.0kg/m<sup>3</sup>(Covering thickness 5cm)

Fig. 5에서 보는 바와 같이 표면 염화물이온량이 각각  $1.0\text{kg/m}^3$  인 경우에는 65년이 경과한 이후에도 철근의 위치에서 임계농도에 도달하지 않는 것을 관찰할 수 있다.

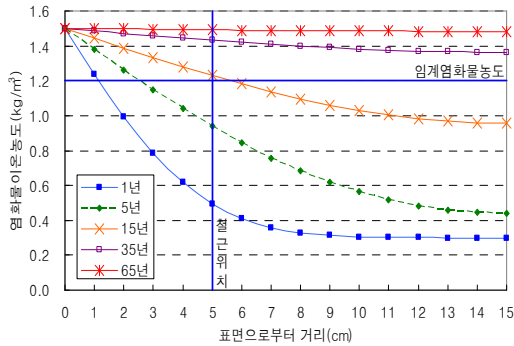


Fig. 6. Salinity distribution when the amount of surface chloride is  $1.5\text{kg/m}^3$ (Covering thickness 8cm)

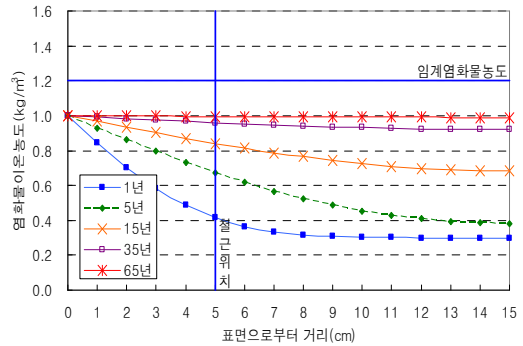


Fig. 7. Salinity distribution when the amount of surface chloride is  $1.0\text{kg/m}^3$ (Covering thickness 8cm)

따라서 대기 중의 염화물이온량이 극소량인 서울의 경우를 고려할 때, 염해에 의한 콘크리트 구조물의 내구성 저하 즉, 구조물의 사용기간 중에 염해에 의한 본 연구의 대상 구조물의 열화가 발생할 우려는 거의 없는 것으로 판단된다.

피복두께가 8cm인 벽체에 대해서도 슬래브와 마찬가지로 염해환경조건이라고 할 수 있는 해안으로부터 1km거리에 있는 콘크리트 구조물의 표면 염화물이온량인  $1.5\text{kg/m}^3$ 과 이에 대하여 2/3정도의 표면 염화물이온량에 대하여 65년까지 철근위치에서의 염화물이온의 침투량을 FEM해석을 통하여 알아보았다.

Fig. 6, Fig. 7에는 각각 표면 염화물이온량이  $1.5\text{kg/m}^3$ ,  $1.0\text{kg/m}^3$  을 적용하여 해석한 결과를 나타낸 것이다.

표면 염화물이온량이  $1.5\text{kg/m}^3$  인 경우에는 약 19년 경과 후, 철근의 위치에서 철근의 부식이 발생하기 시작하는 염화물 임계농도에 도달하는 것으로 나타났다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 표면 염화물이온량이 각각  $1.0\text{kg/m}^3$ ,  $0.5\text{kg/m}^3$  인 경우에는 65년이 경과한 이후에도 철근의 위치에서 임계농도에 도달하지 않는 것을 확인할 수 있다.

따라서 앞의 피복두께가 5cm인 슬래브의 경우와 마찬가지로, 대기중의 염화물이온량이 극소량인 서울의 경우를 고려할 때, 염해에 의한 콘크리트 구조물의 내구성 저하 즉, 구조물의 사용기간 중에 염해에 의한 벽체 콘크리트의 열화가 발생할 우려는 거의 없는 것으로 판단된다.

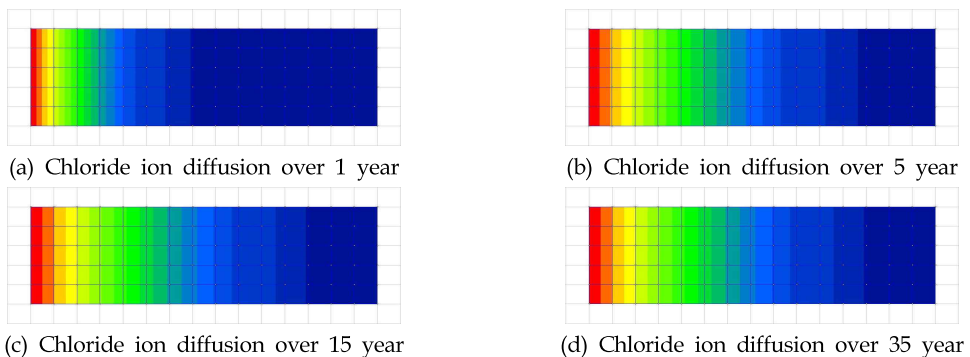


Fig. 8. Salinity distribution If Surface chloride content is  $1.0\text{kg/m}^3$

## 5. 결론

본 연구에서는 콘크리트 구조물의 내구성을 평가를 목적으로 콘크리트의 다양한 성능저하 메커니즘을 규명하고 콘크리트 구조물의 내구성 저하 요인을 조사·분석하였으며, 현장에서 채취한 코어 시험체를 기반으로 각종 현장 및 실내시험법을 실시하여 콘크리트 구조물의 내구성을 평가하였다. 또한, 이를 토대로 FEM 해석기법을 활용한 콘크리트 구조물의 내구수명을 예측한 결과, 탄산화 속도계수는  $5.38E-6(\text{cm}^2/\text{day})$ 로 매우 진행 속도가 낮은 것으로 나타났으며, 탄산화 및 염해에 의한 복합열화의 발생 가능성은 매우 낮을 것으로 판단된다.

SEM 분석 시험결과, 부분적으로 시멘트 수화물 결합 상태가 좋지 못한 부분이 있으나, 대체적으로 수화생성물인 칼슘실리케이트 등이 관찰된 것으로 보아 전반적으로 양호하다고 판단된다. X선 회절 분석 시험결과, 콘크리트의 수화 생성물 및 반응 생성물은 골재의 성분인 Q(Quartz; 석영)류의 피크가 주를 이루고 있으며, 시멘트수화물인 P(Potlandite;  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )와 C-S-H(칼슘실리케이트계 수화물)이 대부분 존재한 것을 알 수 있다.

염해와 탄산화에 대하여 각종 실험 및 FEM 해석을 통하여 잔존수명을 예측해 본 결과, 대상 구조물은 염해에 의한 잔존수명이 구조물의 공용기간과 같다고 하여도 무방하리라 사료된다. 시험대상 콘크리트 공시체를 채취한 부위가 구조물 내부의 벽과 슬래브의 부위로서, 내구성 조사 결과는 일부에 국한된 조사이므로 추후 환경의 변화 및 사용상의 변동이 발생할 시, 내구성에 영향을 미치는 요인이 변화할 수 있기 때문에 지속적인 모니터링과 유지관리가 필요할 것으로 판단된다.

## References

- Kim, Joo-Ho. Lee, Ho-Nam. Jeon, Chan-Ki and Eum, Jea-Ok. "A Study for Expressway Bridge subjected to Chloride Attack from De-icing Agent", The Korean Society of Disaster Information. (2014) E-15 91~92
- Chang, C. F. and Chen, J. W., "The experimental investigation of concrete carbonation depth", Cement and Concrete Research. 36 (2006) 1760~1767.
- Tang, L. and Nilsson, L. O.(1992), Rapid Determination of the Chloride Diffusivity in Concrete by Applying an Electrical Field, ACI Materials Journal, 89(1)