

항만 콘크리트 구조물에 대한 탄산화 해석 Analysis of Carbonation for Harbor Concrete Structure

한상훈* · 박우선**

Sang Hun Han* and Woo Sun Park**

요 지 : 콘크리트 구조물의 내구성 저하에 큰 영향을 미치는 요인 중의 하나로 인식되고 있는 탄산화가 항만 구조물에 미치는 영향을 현장실험결과를 바탕으로 정량적으로 평가하고자 하였다. 전국 65개 항만시설의 369개소의 탄산화 깊이 측정결과를 이용하여 강도와 탄산화 깊이의 상관관계 및 피복두께와 탄산화 깊이의 상관관계 등에 대해서 고찰하였다. 또한, 기존 탄산화 모델식들과 측정결과들을 비교하고 실험결과들을 바탕으로 신뢰성 이론을 기반으로한 탄산화에 의한 내구성 파괴확률(철근부식확률)을 검토하였다. 현장실험결과에 의하면 대부분의 탄산화 깊이가 피복두께의 0.2배 이하 수준이었다. 또한, 강도의 증가에 따라 탄산화 깊이가 감소하고 재령의 증가에 따라 탄산화 깊이가 증가함을 관찰하였다. 신뢰성이론을 기반으로 탄산화에 의한 내구성 파괴확률을 판단하였는데, 대부분의 경우에 부식확률이 10%미만으로 관찰되었다. 따라서, 탄산화 단일열화조건으로는 항만 콘크리트 구조물의 내구성 저하에 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단하였다.

핵심용어 : 항만 콘크리트 구조물, 탄산화, 내구성, 철근부식, 신뢰성

Abstract : Carbonation is one of major factors influencing on the durability of concrete structure. This paper investigates the effect of carbonation on the soundness of harbor concrete structure and quantifies the influence of carbonation based on in-situation data tested at 369 points in 69 harbor facilities. The relationships between carbonation depth and cover depth, and between carbonation depth and compressive strength are studied and the failure probability of durability, that is the initiation probability of steel corrosion, is evaluated on the basis of reliability concept. The in-situation test results showed that the ratio of carbonation depth to cover depth was less than 0.2, and the carbonation depth increased with age. In most cases, the failure probability of durability by carbonation was less than 10%. Therefore, it can be concluded that the influence of carbonation on the durability of harbor concrete structure is smaller than other factors deteriorating the durability of harbor concrete structure.

Keywords : Harbor concrete structure, carbonation, durability, steel corrosion, reliability

1. 서 론

콘크리트구조물의 내구성 저하요인으로는 염해, 탄산화, 동해, 알칼리 골재 반응 등이 있다. 이 중에서 항만구조물에 치명적인 영향을 미치는 것으로 알려진 것은 염해이다. 염해는 염소이온의 침투로 인해 철근 주변 부동태피막의 파괴로 철근이 부식되는 현상이다. 반면에 탄산화는 대기 중의 이산화탄소가 콘크리트 내부로 침투하여 철근 주변이 중

성화되어 알칼리 상태에서만 존재하는 철근의 부동태 피막이 파괴되어 철근 부식이 발생하는 것이다. 염해와 탄산화는 철근 부식의 발생원인은 다르지만 외부 파괴양상만 본다면 철근부식과 이로 인한 피복의 파괴에 의한 내구성 저하라는 현상은 동일하다(Neville, 1995).

탄산화는 실외보다는 실내에서, 교외보다는 도심에서의 발생가능성이 높다. 이것은 실내와 도심이 이산화탄소의 농도가 높고 습도가 낮기 때문이다. 이러한 기준으로 본다면

*한국해양연구원 연안개발에너지연구부(Corresponding author: Sang Hun Han, Coastal Engineering & Energy Dept. KORDI, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea. shhan@kordi.re.kr)

**한국해양연구원 연안개발에너지연구부(Woo Sun Park, Coastal Engineering & Energy Dept. KORDI, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea. wspark@kordi.re.kr)

항만구조물의 탄산화는 도심의 건축물보다는 낮을 것으로 예상된다(Richardson, 2002). 하지만, 이러한 현상을 정량적으로 평가한 논문은 국내외에 거의 없다.

국내에서의 탄산화에 대한 연구는 도심의 건물과 지하철도에 대한 현장실험을 바탕으로 기존 국외의 모델식들과 실험데이터를 비교하거나 이를 바탕으로 국외 모델식들을 수정한 것이 대부분이다. 신뢰성 이론을 기반으로 계측된 데이터를 통계처리하여 탄산화 깊이에 대한 변동계수나 탄산화에 의한 내구성파괴확률에 대한 연구는 아직 미비한 수준이다.

본 연구에서는 65개의 항만시설의 369개소의 탄산화 현장실험결과(한국건설품질연구원, 2004-2006)를 통하여 항만구조물에서 탄산화 특성을 파악하고 이를 정량화하고자 한다. 또한, 신뢰성 이론을 바탕으로 탄산화에 의한 구조물의 내구성 저하 가능성을 평가하는 기법을 고찰하였고 평가 시에 필요한 핵심자료를 통계적인 분석을 바탕으로 제시하였다.

2. 현장 항만 콘크리트 구조물의 탄산화 계측 결과

2.1 계측 방법

항만구조물에 대한 정기점검과 정밀점검 시에 일반 안전진단회사에서 실시하는 중성화 시험법은 다음과 같다. 먼저 콘크리트면을 도구를 이용하여 절취하고, 페놀프탈레인 용액 1%를 섞은 알코올 용액을 분무기로 살포하여 콘크리트의 표면에서부터 착색 경계선까지의 깊이를 측정한다(한국시설안전기술공단, 2003). 이러한 현장측정법은 실내에서 만큼 정밀한 측정이 이루어질 수 없는 단점을 가지고 있다. 예를 들어, 실내실험에서 실린더를 이용하여 탄산화 깊이를 측정하면, 최소한 3-6개 지점의 착색되지 않은 깊이를 측정하여 평균값으로 탄산화 깊이를 선정하지만 안전진단회사에서의 현장측정에서는 그렇지 못하다. 하지만, 항만구조물에 대한 현장 탄산화시험은 같은 장소와 유사한 구조물에서 상당히 많은 수의 측정이 이루어지므로 이러한 값들을 모두 분석에 사용한다면 실내실험과 비교해서 큰 오차를 가질 것으로 판단되지는 않는다.

2.2 계측 결과

전국적으로 65개 항만시설 369개소에서 측정된 데이터를 재령별로 분류하면 Fig. 1과 같다. 재령 20년 이상은 11개, 재령 10년 이하는 181개임을 알 수 있다. 재령 10년 이상의 데이터가 전체 데이터의 50%정도이고 평균재령은 15년이다. 탄산화 깊이에 대한 계측결과를 깊이별로 분류하

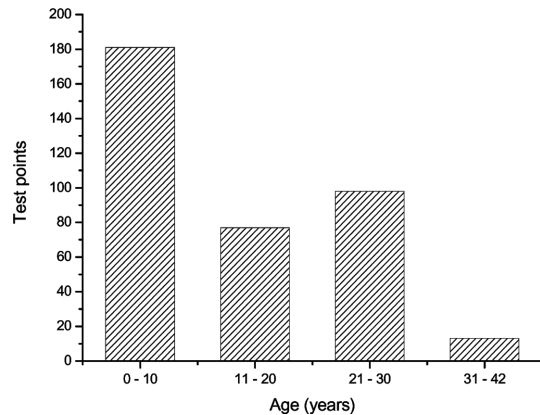


Fig. 1. Test points with age.

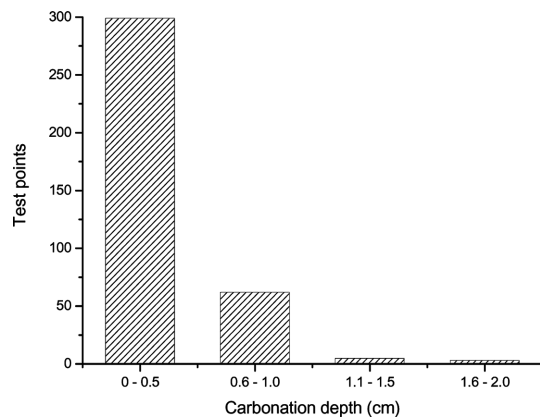


Fig. 2. Test points with carbonation depth.

면 Fig. 2와 같다. 369개의 측정 데이터 중에서 361개의 측정결과가 1 cm 미만의 탄산화 깊이를 나타낸다. 즉 대부분의 탄산화 깊이의 계측결과가 매우 작음을 알 수 있다. 이것은 Fig. 3에 나타낸 탄산화깊이와 피복두께의 비를 나타낸 그림에서도 확인할 수 있다. 369개의 데이터 중에서 347개의 지점에서 측정된 탄산화 깊이가 피복두께의 10%미만이고 나머지 측정 데이터들도 피복두께의 20%미만임을 알 수 있다. 이러한 결과를 종합하면 항만구조물에서의 탄산화 깊이는 내륙에 위치해 있는 구조물에 비해서 작고 재령이 20-30년 경과해도 피복두께의 10-20%에 해당되는 깊이만큼 탄산화가 진행됨으로 탄산화만의 단일요인에 의해서 항만구조물 내부의 철근이 부식되는 경우는 많지 않을 것으로 판단된다(Richardson, 2002).

Fig. 4은 재령에 따른 탄산화 깊이 변화를 나타내고 있다. 탄산화 깊이는 동일한 재료일 경우에는 재령에 따라서 탄산화의 깊이가 증가할 것으로 예측되는데, 실험결과는 이

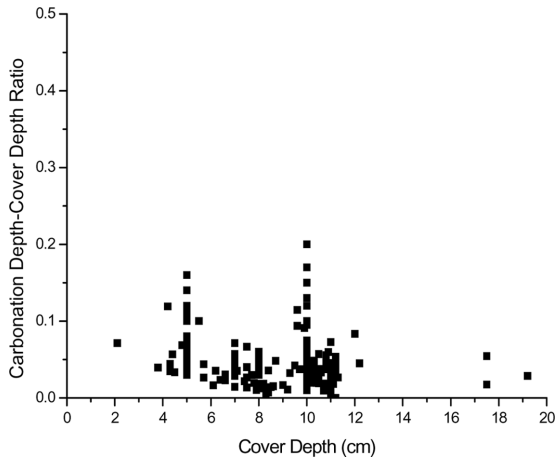


Fig. 3. The ratio of carbonation depth to cover depth.

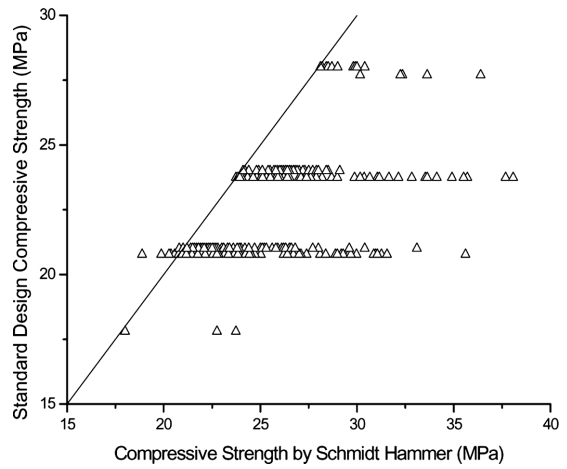


Fig. 5. Schmidt hammer and standard design strength.

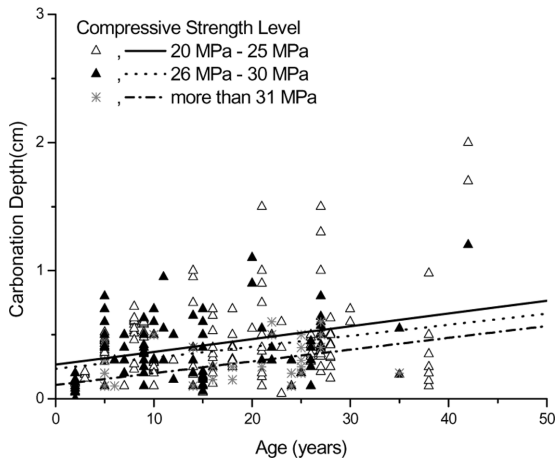


Fig. 4. Carbonation depth with age.

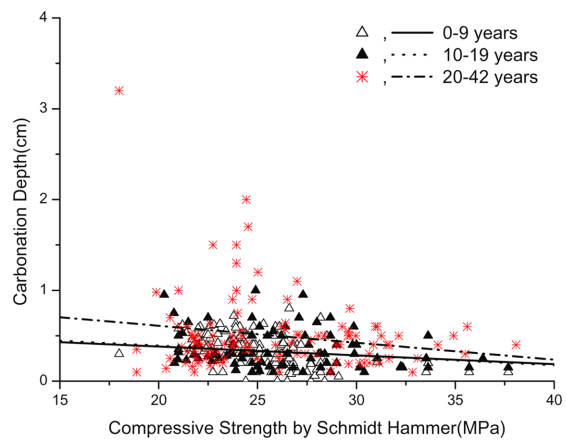


Fig. 6. Schmidt hammer strength and carbonation depth.

러한 예측과 유사한 경향을 제시하고 있다. 그림에서의 경향선은 실험값들을 선형회귀분석한 것으로 데이터들의 경향성을 좀 더 명확하게 확인할 수 있다. 그러나, 대부분의 항만구조물에 대한 탄산화 실험 데이터가 1 cm미만의 탄산화 깊이를 나타내고 있어 현장실험오차 등을 고려하면 재령에 따른 탄산화 깊이의 변화를 정량적으로 추론하기는 어려운 것으로 사료된다. 또한, 슈미트 해머에 의한 강도수준별 재령에 따른 탄산화 깊이변화를 살펴보면 강도수준이 감소할수록 재령에 따른 탄산화의 깊이가 증가함을 관찰할 수 있는데 이러한 경향은 Fig. 6에서 좀 더 분명하게 관찰할 수 있다.

Fig. 5는 슈미트해머법으로 측정된 압축강도와 설계기준 압축강도를 나타내고 있다(직선은 두 강도가 일치하는 지점을 연결한 선). 그림에 나타난 바와 같이 대부분의 실험값

들이 기술기 1인 직선의 오른쪽에 위치하고 있으므로 비파괴 검사법인 슈미트해머법으로 측정된 압축강도는 설계기준강도보다 큰 것을 알 수 있다. 같은 설계기준강도라도 구조물별로 배합과 양생법이 차이가 있어 비파괴 검사법에 의한 강도는 상당히 편차를 나타내고 있다.

Fig. 6은 슈미트해머법에 의한 압축강도와 탄산화 깊이를 재령별로 나타내고 있다. 각 재령영역별로 탄산화 깊이와 압축강도의 상관관계를 보면 강도가 감소할수록 탄산화 깊이가 증가하는 경향을 관찰할 수 있다. 이러한 경향은 10년 이내의 재령보다는 20년 이상의 재령에 해당하는 실험값들에서 좀 더 분명하게 관찰할 수 있음을 경향선 분석(선형회귀분석 결과)을 통해서 확인할 수 있다. 그러나, 기존의 지하철이나 도심의 빌딩 내부에서의 실험값보다는 강도와 탄산화 깊이의 경향성이 떨어진다. 이것은 항만구조

물의 탄산화 깊이의 절대값이 1 cm 이하로 매우 작고, 실내 실험과는 달리 현장실험의 여러 변동요인에 기인한 것으로 판단된다.

2.3 기존모델식과 예측결과의 비교

재령에 따른 탄산화 깊이를 예측하는 여러 가지 모델식이 제시되어 있다. 이러한 식 중에서 일반적으로 많이 알려져 있고 사용되는 JCI와 Kishitani 모델식 및 유럽쪽의 모델식인 RILEM 130 위원회에서 제시한 모델식과 측정된 데이터를 비교하였다(이창수 등, 2007; Sarja 등, 1996).

JCI Model

$$D = (-0.357 + 0.9W/B)\sqrt{t} \quad (1)$$

Kishitani Model

$$t = \frac{0.31(1.15 + 3W/B)}{R^2(W/C - 0.25)} D^2 (W/C \geq 60\%) \quad (2)$$

$$t = \frac{7.2}{R^2(4.6W/C - 1.76)} D^2 (W/C \leq 60\%) \quad (3)$$

RILEM 130

$$t = \left(\frac{D}{c_{env} c_{air} a f_{cm}^b} \right)^2 \quad (4)$$

Fig. 7은 설계기준강도에 따른 실험값과 예측식들의 비교이다. JCI와 Kishitani 모델식에서 사용되는 물-시멘트비는 기존의 현장배합설계와 콘크리트표준시방서(한국콘크리트학회, 2003)를 참조하여 설계기준강도가 21 MPa일 때는 53%, 24 MPa는 47%를 사용한다. 또한, RILEM 130 모델의 평균압축강도는 모델에서 제시하고 있는 설계기준강도에 8 MPa를 더한 값을 사용한다(Sarja 등, 2002). 설계기준

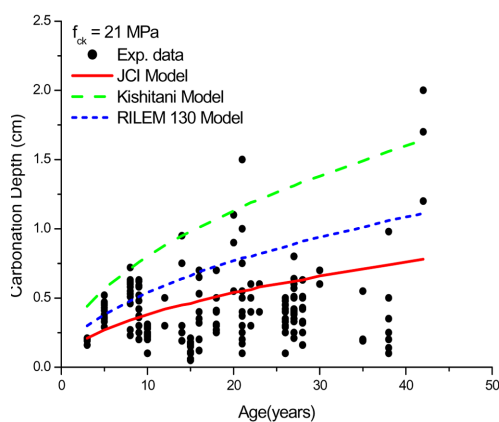
강도가 21 MPa인 경우에는 Kishitani 모델식이 대부분의 실험값들보다도 큰 예측값을 제시하고 있으므로 Kishitani 모델식을 사용하면 일정한 안전율을 가진 탄산화 깊이를 얻을 수 있다. 반면에, 설계기준강도 24 MPa인 경우에는 Kishitani 모델식과 RILEM 모델식이 거의 유사한 결과를 제시하고 있고 일부 실험데이터들(147개의 데이터 중에서 33개)이 모델식보다 큰 탄산화 깊이를 나타내고 있다. 예측식보다 큰 탄산화 깊이를 가진 데이터의 비율이 20% 정도로 Kishitani 모델식이나 RILEM 모델식을 24 MPa를 가진 콘크리트의 탄산화를 예측하면 부분적으로 작은 탄산화 깊이를 예측할 수도 있다.

앞에서 살펴본 바와 같이 기존 모델식으로 탄산화 깊이를 예측하고 이를 바탕으로 내구성 설계를 한다면 모델식보다 큰 탄산화 깊이를 나타낼 확률이나 탄산화 깊이 측정의 오차 등은 고려할 수가 없다. 이러한, 모델식이나 예측값의 변동성을 고려할 수 있는 것이 신뢰성이론을 기반으로 한 분석법이다.

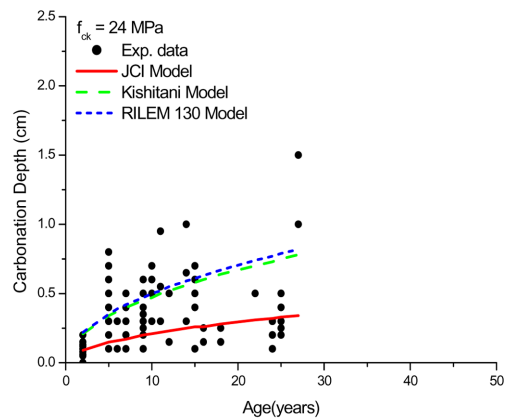
3. 신뢰성 이론 기반 탄산화 분석

3.1 탄산화 깊이에 대한 변동계수

공학문제에서 외부하중이나 재료상수와 같은 해석변수들은 특정값으로 고정되어있는 것이 아니라 일정한 기댓값을 중심으로 임의적으로 분산되어 있다. 또한, 구조해석이론 자체도 여러 가정들을 포함하고 있어 결정론적인 해석방법만으로 공학문제를 해석하는 것은 어려움이 적지 않다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 많은 구조해석과 내구성 해석에서 신뢰성 이론을 기반으로 문제에 접근하고 있다. 이



(a) Standard design strength - 21 MPa



(b) Standard design strength - 24 MPa

Fig. 7. Experimental and analytical carbonation depth.

Table 1. Coefficient of variation of in-situation data

Standard design strength(MPa)	Age (years)		Test Points	Carbonation depth(cm)			Shimdt hammer strength(MPa)		
	Range	Average		Average	Stan.Dev.	Cov.	Average	Stan.Dev.	Cov.
21	8-10	9.2	57	0.35	0.17	0.49	24.5	2.1	0.09
	18-20	20	28	0.44	0.25	0.57	25.2	3.7	0.15
	26-28	27.0	50	0.42	0.13	0.31	25.0	3.1	0.12
24	5-7	6.4	58	0.32	0.16	0.50	26.1	2.3	0.09
	9-12	9.8	32	0.37	0.18	0.49	26.9	1.7	0.06

러한 신뢰성 이론 기반 해석에서 가장 필요한 것 중의 하나가 변수들의 변동계수를 얻는 것이다. 이에 본 연구에서는 현장실험결과를 바탕으로 탄산화 깊이에 대한 변동계수를 고찰해 보았다.

앞에서 언급한 바와 같이 대부분의 현장 구조물의 설계 기준강도는 21, 24, 28 MPa 중의 하나이므로 전체 실험결과들을 설계기준강도별로 분류하고 실험데이터들이 많은 재령을 3에서 4년 정도의 단위로 묶었다. 이러한 데이터 중에서 최소한 데이터 개수가 25개 이상인 그룹들을 가려내고 이 그룹들의 탄산화와 압축강도의 평균값과 표준편차를 구하였다(Table 1). Table 1과 같이 탄산화 깊이의 표준편차는 0.13에서 0.25사이에 있으며 표준편차와 평균의 비로 나타내는 변동계수는 0.31에서 0.57사이에 있음을 알 수 있다. 반면에, 압축강도의 변동계수는 0.06에서 0.15사이에 있어 탄산화 깊이의 변동계수보다는 그 크기가 작다. 이것은 탄산화에 미치는 외부영향요인들의 변동성이 압축강도보다 커서 탄산화 깊이가 압축강도보다 훨씬 더 큰 변동성을 보인 것으로 판단된다. Table 1의 내용을 종합해 본다면 탄산화에 대한 신뢰성 해석 시에 사용되는 탄산화 깊이의 변동계수는 0.5에서 0.6정도를, 압축강도의 변동계수는 0.1에서 0.2정도를 사용하면 될 것으로 사료된다.

3.2 탄산화에 의한 철근부식 확률

신뢰성해석 방법은 구조물의 파괴에 관련된 모든 확률변수의 평균, 분산, 결합확률밀도함수를 이용하여 한계상태식이 0보다 작을 확률을 구하는 것이다.

$$Z = R_{resistance} - L_{loading}, P_f = P[Z \leq 0] \tag{5}$$

확률변수 X_i 를 가진 한계상태방정식이 선형 합으로 구성된다면 다음과 같은 형태로 표현될 수 있다.

$$Z = a_0 + a_1X_1 + \dots + a_nX_n \tag{6}$$

확률변수 X_i 가 정규분포라면 한계상태방정식 Z 도 정규분포이다. 또한, 확률변수 X_i 의 평균과 표준편차가 각각 μ_i, σ_i

라면, 한계상태방정식 Z 의 평균과 분산은 다음과 같은 식으로 계산될 수 있다.

$$\mu_Z = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \mu_i \tag{7}$$

$$\sigma_Z^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j Cov[X_i, X_j] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j \rho_{ij} \sigma_i \sigma_j \tag{8}$$

한계상태방정식이 정규분포이고 파괴확률은 한계상태방정식이 0보다 작을 확률이므로 파괴확률은 다음과 같은 식으로 계산될 수 있다(양영순 등, 1999).

$$P_f = P[Z \leq 0] = \Phi\left(\frac{0 - \mu_Z}{\sigma_Z}\right) = \Phi\left(-\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right) = \Phi(-\beta) \tag{9}$$

여기서, 한계상태방정식의 평균과 표준편차의 비는 신뢰도지수(Reliability Index, β)라고 정의할 수 있다. 한계상태식이 선형적이지 않고 비선형인 경우에는 방정식을 선형식으로 변환해야 일계이차모멘트법이 적용될 수 있다. 각 확률변수의 평균에서 한계상태식을 Taylor 전개를 하여 일차항까지 고려하면 비선형 한계상태방정식을 선형으로 변화시킬 수 있다(Hasofer 등, 1974).

탄산화 깊이 예측식에서 JCI 모델식과 Kishitani(물-시멘트비가 60%보다 작은 경우)식은 선형식이므로 이러한 식들로 한계상태방정식을 구성한다면 식 (7), (8)과 같은 간단한 식으로 신뢰도지수와 파괴확률을 계산할 수 있고 RILEM 130 모델식도 한계상태방정식을 선형화하는 일계이차모멘트법을 이용하면 탄산화에 의한 철근부식확률을 구할 수 있다.

그러나, 이러한 실험 모델식 사용에서의 문제점은 제안식들의 탄산화 깊이의 변동성을 충분히 나타내지 못한다는 것이다. 예를 들어, JCI 모델식의 변수는 물-결합재비인데 일반적인 신뢰성해석에서 사용되는 물-결합재비의 변동계수는 0.02에서 0.1정도로 이러한 수준으로는 Table 1에 나타난 0.3에서 0.6수준의 탄산화 깊이의 변동성을 나타낼 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 일반적으로 사용되는 JCI와 Kishitani 모델식을 바탕으로 탄산화의 철근부식을 확률

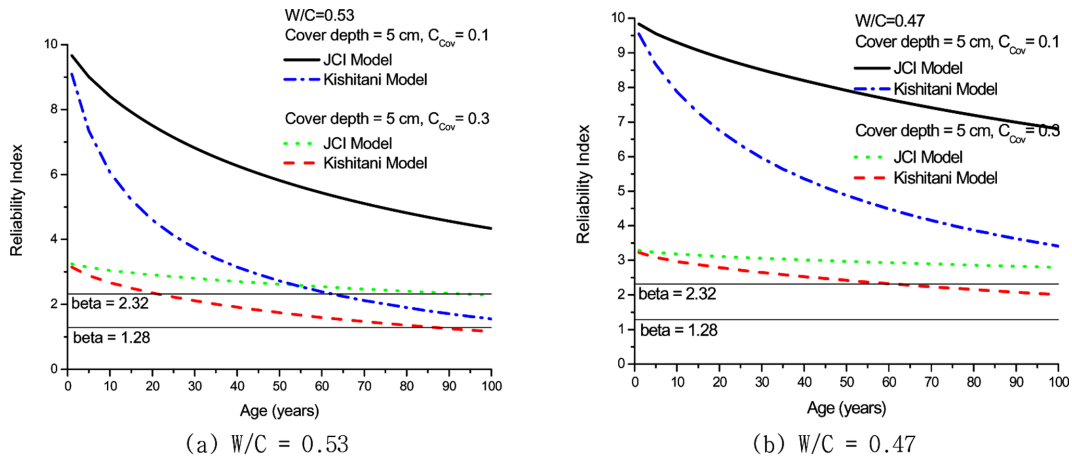


Fig. 8. Reliability index of durability failure by carbonation.

을 평가함에 있어, 평균값은 기존 모델식의 예측값들을 사용하지만 표준편차는 현장실험에서 나타난 변동계수 중에서 가장 큰 값인 0.6정도의 변동계수를 바탕으로 탄산화 예측값의 표준편차를 구하고자 한다. 예측 모델식들은 실험결과를 바탕으로 회귀분석한 것으로 현장실험에 의한 변동계수값을 예측식의 값으로 차용하는 것은 큰 무리가 없을 것을 생각된다. 탄산화에 의한 철근부식 한계상태방정식의 평균과 표준편차는 식 (10-11)로 계산할 수 있고 이 값들을 바탕으로 신뢰도지수를 산정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mu_z &= \mu_c - \mu_d \\ \sigma_z^2 &= \sigma_c^2 + \sigma_d^2 = \sigma_c^2 + (0.6\mu_d)^2 \end{aligned} \quad (10)$$

Fig. 8은 물-시멘트비, 피복두께의 변동계수, 재령에 따른 신뢰도지수 변화를 나타내고 있다. 피복두께는 5 cm이고 일반적으로 내구성해석에서 사용되는 피복두께의 변동계수 범위가 0.1과 0.3사이이므로 변동계수가 0.1과 0.3일 결과를 고찰하였다. 또한, 물-시멘트비는 현장실험분석에서 사용한 0.47과 0.53을 사용하였다. 그림에 나타난 바와 같이 물-시멘트비가 0.53이고 JCI 모델식을 사용한 경우에는 피복두께의 신뢰도지수가 0.3이 되더라도 재령 100년까지 신뢰도지수가 1.28(파괴확률 10%)보다 작은 경우는 없다. 즉, JCI 모델에 의하면 재령 100년까지는 탄산화에 의한 철근 부식의 확률이 10%미만이라는 것이다. 반면에, Kishitani 모델식을 사용한 경우는 재령 85년에서 신뢰도지수 1.28보다 작은 영역이 발생함을 알 수 있고 이것은 재령 85년이 경과하면 Kishitani 모델식에 의하면 탄산화에 의한 부식확률이 10%를 초과한다는 것이다. Fig. 8(b)에 나타난 바와 같이 물-시멘트비가 0.47인 경우에는 모든 경우에서 신뢰도

지수가 1.28보다 크다. 신뢰도지수 2.32(파괴확률 1%)를 기준으로 하면 Kishitani 모델식을 사용하고 피복두께의 변동계수가 0.3인 경우에 재령 60년부터 신뢰도지수 2.32를 초과한다.

일반적으로 내구성해석에서 철근 부식확률에 의한 내구성파괴확률에 대한 한계값은 구조물에 대한 값보다는 엄격하지 않다. Eurocode 1에서 50년의 reference period에 대한 신뢰도지수값을 구조물에 따라 3.3에서 4.3으로 규정하고 있는데, 4.0의 신뢰도지수라면 파괴확률값이 0.0037%로 매우 작은 값이다. 그러나, 일반적인 내구성 해석에서의 목표신뢰도 지수는 재령 65년과 100년정도에서 1.3 수준이다(예, 거가대교 침매터널). 따라서, Fig. 8에 나타난 결과를 종합해보면 0.47정도의 물-시멘트비를 가지면 탄산화에 의한 내구성파괴확률이 무시할 정도로 작으며, 물-시멘트비 0.53인 경우도 특별한 85년 정도의 재령까지는 탄산화에 의한 내구성파괴확률이 상당히 작을 것임을 알 수 있다. 근래에 건설되는 항만구조물들의 피복두께가 7 cm 이상인 것을 감안한다면 이러한 내구성파괴확률은 더 낮아질 것이다. 탄산화 단일열화조건에 대해서는 내구성 파괴확률이 거의 없는 것으로 검토되었지만 탄산화가 염해를 가속화시킬 수 있다는 연구들이 있으므로 향후 이에 대한 세밀한 검토는 필요할 것으로 판단된다(오병환 등, 2005).

4. 결 론

전국 65개 항만시설의 369개소의 탄산화 깊이 측정결과를 이용하여 항만구조물에서 탄산화 특성을 파악하고 이를 정량화하였다. 또한, 신뢰성 이론을 바탕으로 탄산화에 의

한 구조물의 내구성 저하 가능성을 평가하는 기법을 고찰하였고 평가시에 필요한 핵심자료를 통계적인 분석을 바탕으로 제시하였다. 현장실험결과에 의하면 측정된 90%이상의 지점에서 탄산화 깊이가 피복두께의 10%미만이고 나머지 측정데이터들도 피복두께의 20%미만임을 알 수 있었다. 즉, 항만구조물에서는 재령이 20-30년 경과해도 탄산화 깊이는 피복두께의 10-20% 수준인 것으로 파악되었다. 또한, 현장실험결과로부터 강도의 증가에 따라 탄산화 깊이가 감소하고 재령의 증가에 따라 탄산화 깊이가 증가함을 관찰할 수 있었다. 신뢰성이론을 기반으로 탄산화에 의한 내구성 파괴확률을 판단하였는데, 대부분의 경우에 부식확률이 10% 미만으로 평가되었다. 이러한 연구결과를 종합해 볼 때, 단일열화조건외 탄산화만으로는 항만 콘크리트 구조물의 내구성 저하에 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단하였다. 그러나, 탄산화가 염해를 가속화시킬 수 있다는 연구들이 있으므로 향후 이에 대한 세밀한 검토는 필요할 것으로 판단된다.

5. 기 호(Notation)

- a, b : 비례상수
- C_{Cov} : 피복두께의 변동계수
- c_{env} : 환경영향계수
- c_{air} : 연행공기계수
- D : 탄산화 깊이(cm)
- f_{cm} : 평균압축강도
- $L_{loading}$: 하중함수
- N : 표본집단개수
- P_f : 파괴확률(부식확률)
- R : 시멘트, 골재, 혼화제 종류에 따른 계수
- $R_{resistance}$: 저항함수
- t : 재령(years)
- W : 단위수량
- W/B : 유효물-결합재비
- W/C : 물-시멘트비
- Z : 한계상태방정식
- β : 신뢰도지수
- μ_i : X_i 의 평균
- μ_c : 피복두께 평균
- μ_d : 계산된 탄산화 깊이 평균
- μ_z : 한계상태방정식 평균
- ρ_{ij} : X_i 와 X_j 의 상관계수

- σ_i : X_i 의 표준편차
- σ_c : 피복두께 표준편차
- σ_d : 계산된 탄산화 깊이 표준편차
- σ_z : 한계상태방정식 표준편차

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국해양과학기술진흥원에서 위탁시행한 항만리모델링 기반구축연구사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 또한, 주요 항만구조물에 대한 진단보고서를 제공해 주신 한국건설품질연구원에 감사드립니다.

참고문헌

한국건설품질연구원 (2004). 인천항부두설 정밀점검보고서.
 한국건설품질연구원 (2004). 광양항제철부두 정밀점검 및 정밀안전진단보고서.
 한국건설품질연구원 (2004). 동해/속계항 정밀점검보고서.
 한국건설품질연구원 (2004). 부산항시설물 정밀안전진단 및 정밀점검보고서.
 한국건설품질연구원 (2004). 용기포여객부두 정밀안전진단보고서.
 한국건설품질연구원 (2004). 한보철강B지구케이스 정밀안전진단보고서.
 한국건설품질연구원 (2004). SK제3부두 및 제5-5부두 안전진단보고서.
 한국건설품질연구원 (2005). 목포/완도항 정밀안전점검 및 정밀안전진단보고서.
 한국건설품질연구원 (2005). 동해묵호속초항 정밀안전점검 및 정밀안전진단보고서.
 한국건설품질연구원 (2005). 군산항 정밀안전점검 및 정밀안전진단보고서.
 한국건설품질연구원 (2006). 평택/당진항 정밀안전점검 및 정밀안전진단보고서.
 한국건설품질연구원 (2006). 평택/당진항 정밀안전점검 및 정밀안전진단보고서.
 한국건설품질연구원 (2006). 인천정유1,2,3부두 정밀안전점검보고서.
 한국건설품질연구원 (2006). SK가스 부두 정밀안전점검보고서.
 한국건설품질연구원 (2006). 부산항시설물 정밀안전진단 및 정밀점검보고서.
 한국시설안전기술공단 (2003). 항만 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침.

- 한국콘크리트학회 (2003). 건설교통부제정 콘크리트 표준시방서.
- 양영순, 서용석, 이재욱 (1999). 구조 신뢰성 공학. 서울대학교출판부.
- 오병환, 이성규, 이명규, 정상화 (2005). 탄산화 복합환경시 염소이온 확산에 관한 연구. 한국콘크리트학회, 17(2), 170-189.
- 이창수, 김영옥, 김용혁 (2007). 서울지역 고가차도 및 복개 구조물의 탄산화 예측식 제안. 한국콘크리트학회 2007년 봄 학술발표회 논문집, 649-652.
- Hasofer, A. M. and Lind, L. C. (1974). Exact and invariant second moment code format. *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, 100(1), 111-121.
- Neville, A. M. (1995). *Properties of concrete*, Longman, 497-505.
- Richardson, M. G. (2002). *Fundamentals of durable reinforced concrete*. Spon press, 77-100.
- Sarja, A. and Vesikari, E. (2002). *Durability design of concrete structures*. Report of RILEM Technical Committee 130-CSL, Taylor & francis, 131-135.

Received October 13, 2008

Accepted December 9, 2008