

환경 조건에 따른 교량구조물의 탄산화 현황 및 내구수명 예측

Service Life Prediction and Carbonation of Bridge Structures according to Environmental Conditions

김 훈 겸^{1)*}

김 성 보²⁾

Kim, Hun Kyom

Kim, Sung Bo

Abstract

Carbonation is the results of the interaction of carbon dioxide gas in the atmosphere with the alkaline hydroxides in the concrete. Reinforced steel corrosion due to concrete carbonation is one of main factors on the decrease in durability of RC structure. This study investigates the influence of carbonation on the bridges under various environment condition and quantifies the effect of carbonation various domestic field data. The failure probability of durability is evaluated on the basis of reliability concept. In addition, service life of the structures is predicted based on the intended probability of durable failure in domestic concrete specification. According to experimental results of the carbonation depth, the carbonation depth increased with structural age. It is analyzed that carbonation velocity of the structures under urban area and sea condition is 1.6–1.9 times faster than the river condition. Service life of the bridges under urban area and sea condition is decreased about 2.4–3.3 times than river condition.

Keywords : Carbonation, Service life prediction, Failure probability of durability, Reliability concept

1. 서론

요즘 들어 콘크리트 구조물의 조기 열화 문제가 자주 발생함에 따라 콘크리트 구조물의 내구성 향상 및 장수명화에 대한 관심이 집중되고 사회적으로 콘크리트 구조물의 내구성에 대한 인식이 높아지고 있다. 실제로 현재 국내에서 수행되고 있는 내구성 조사 자료에서는 철근부식으로 인한 구조물이 열화가 많이 발견되고 있고, 이 원인은 주로 피복두께 콘크리트의 탄산화 진행에 의한 것으로 나타나고 있다. 탄산화는 콘크리트 시공시 품질관리와 같은 내적요인과 대기 중 CO₂농도, 온도, 습도 등과 같은 외적환경요인의 영향을 크게 받고 있으며(오병환, 2000; 이창수 등, 2003), 이러한 인자가 탄산화속도에 미치는 영향을 분석하고 구조물의 내구수명을 예측하는 것은 콘크리트 구조물의 효과적인 유지관리를 위해서 매우 중요하다 할 수 있다.

국내 기존 콘크리트 구조물의 탄산화 현황에 관한 연구는 현장실험 및 조사를 바탕으로 기존 모델식을 이용하여 교량구조물과 철도구조물의 탄산화 현황을 분석한 연구

들이 있다(임홍범 등, 2004; 이영재 등, 2003; 이창수 등, 2000). 그러나 이러한 모델 식만으로는 재료의 배합, 시공시의 다양한 변동성을 고려 할 수 없으며, 다수의 생산된 콘크리트 품질의 변동성을 고려할 수 없다.

최근 들어 이런 변동성을 고려하여 신뢰성 개념에 근거한 기존구조물의 내구수명 평가에 대한 관심이 높아지고 있으나 현장계측데이터 축적의 부족 및 관련 연구의 미비로 어려움을 겪고 있다. 또한 신뢰성 개념에 근거하여 실제 구조물이 위치한 다양한 환경(도심지, 해상, 하천 등)에 따른 교량의 내구수명을 비교하고 예측하는 연구는 국내에서 거의 전무한 실정이다. 그러므로 실제 구조물에서 계측된 데이터를 분석 및 통계 처리하여 구조물이 위치한 환경별 탄산화 현황을 분석하고 탄산화 깊이의 변동계수 등을 고려한 구조물의 내구적 파괴확률에 대한 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 다양한 환경(도심지, 해상, 하천)에 위치한 교량구조물의 탄산화 현장실험결과를 토대로 각 환경에 따른 콘크리트 교량의 탄산화 현황을 분석하였다. 또한 신뢰성 이론을 기반으로 하여 교량구조물이 위치한 환경조건에 따른 콘크리트의 내구적 파괴확률을 도출하고,

1) 정회원, 충북대학교 토목공학과 박사 수료

2) 정회원, 충북대학교 토목공학과 교수

* Corresponding author : navykhk@daum.net 031-266-3241

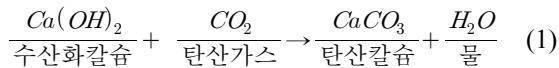
• 본 논문에 대한 토의를 2010년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2010년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

사용기간에 따른 내구수명을 산정하였으며, 목표내구수명을 만족하는 철근 피복두께를 산정하였다.

2. 교량의 탄산화 현황 분석

2.1 탄산화 메커니즘과 철근부식

콘크리트는 시멘트의 수화반응(Hydration)으로 인하여 결합체로서 강도를 발현하게 되는데, 이 시멘트의 수화 반응에서 시멘트양의 약 1/3정도로 생성되는 수산화칼슘은 pH 12-13정도의 강알칼리성을 나타내며 이로 인해 시멘트 수화물 전체의 pH가 결정된다. 수산화칼슘은 대기 중에 포함하고 있는 약 산성의 탄산가스와 접촉하여 식(1)과 같은 반응에 의하여 탄산칼슘과 물로 변화한다.



위의 반응에서 탄산칼슘으로 변화한 부분의 pH가 8.5 - 10 정도로 낮아지는 것을 중성화 또는 탄산화라고 하며(Neutralization or Carbonation)라고 하며, 본 논문에서는 탄산화로 표현하였다. 탄산화는 콘크리트의 표면에서 내부를 향하여 진행하며 콘크리트는 탄산가스와 반응한 만큼 무거워지고 치밀해진다. 탄산화를 유발하는 CO₂는 공기 중의 작은 양에도 반응을 하는데 공기 중의 CO₂ 양은 전원의 경우 0.03%, 환기되지 않은 실험실의 경우 0.1%, 대도시가 0.3%, 특별한 경우 1%까지 그 차이가 크다.

탄산화가 진행함에 따라 콘크리트의 표면에서는 약간의 미세한 균열이 발생하지만 이로 인한 콘크리트의 성능저하는 경미하여 문제가 될 정도는 아니다. 그러나 탄산화에 의하여 발생하는 물리적 성능저하는 철근의 부식과 관련되어 있다고 볼 수 있다(Richardson M.G.). 탄산화된 콘크리트는 내부의 철근을 둘러싼 알칼리성 부동태피막을 불안정하게 하여 부식의 발생을 유발하고 부식된 철근은 그 부피가 수배로 팽창하여 피복에 균열을 일으키는 등 구조물의 성능저하를 일으키게 된다.

2.2 탄산화 계측 대상교량

국내 콘크리트구조물의 탄산화 현황을 파악하기 위하여 국내에서 실시한 교량의 안전진단결과를 수집하여 분석하였다(한국시설안전공단, 1997-2007). 본 연구에 사용된 자료는 국내에 위치한 290개 교량의 하부구조(교각, 교대)를 대상으로 하였으며, 총 탄산화 측정개소는 1122개소이다.

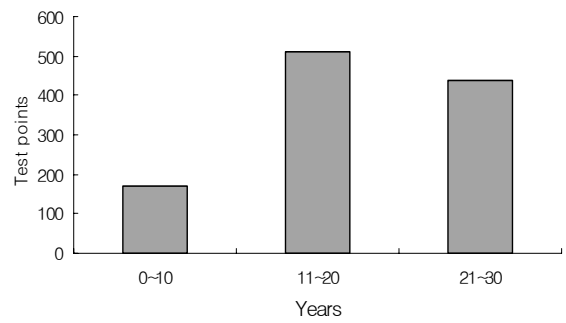


Fig. 1 Test points with age

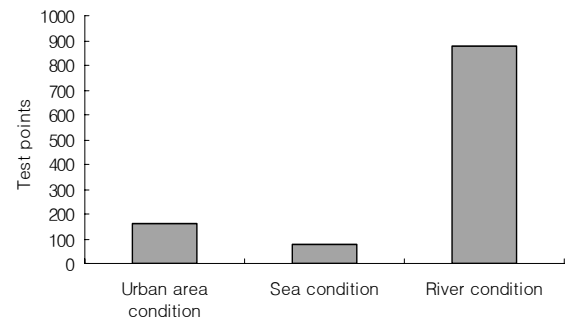


Fig. 2 Test points with environment condition

Fig. 1은 본 논문에서 이용된 교량의 경과연수별 탄산화 측정개소를 나타내는 것으로 경과연수 10년 이하 교량의 측정개소가 172개소, 11-20년 범위의 측정개소는 509개소, 21-30년 범위의 측정개소는 436개소이다. 대상교량 대다수가 10년 이상인 교량으로 전체 개소수의 84%를 차지한다.

Fig. 2는 교량구조물이 위치한 환경에 따른 탄산화 측정개소를 나타낸 것으로 도심에 위치한 교량의 측정개소는 162개소, 해상교량의 측정개소는 79개소, 하천교량은 876개소이다.

2.3 탄산화 계측결과 분석

본 절에서는 교량의 정밀안전진단결과를 토대로 탄산화 깊이 및 탄산화 속도계수를 분석하였다.

탄산화 진행속도는 콘크리트 표면으로부터 탄산화 부분과 비탄산화 부분의 경계면까지의 길이(이하 “탄산화 깊이”로 칭함)와 경과한 시간의 함수로 나타낸다. 탄산화 깊이와 경과연수의 관계는 일반적으로 식(2)와 같이 나타내며 상수 A는 실험에 의하여 구할 수 있다.

$$C_t = A\sqrt{t}, \quad A = \frac{C_t}{\sqrt{t}} \quad (2)$$

여기서 C_t는 탄산화 깊이(mm), A는 탄산화 속도계수, t는 재령(년)을 나타낸다.

Fig. 3은 교량의 사용연수에 따른 탄산화깊이와 선형회귀선을 나타낸 것으로 사용연수가 증가함에 따라 탄산화깊이는 증가하는 경향을 보였다. 구조물이 위치한 환경에 따른 탄산화 속도계수를 파악하기 위해 선형회귀분석을 통하여 식(3-5)와 같은 관계식을 도출하였다,

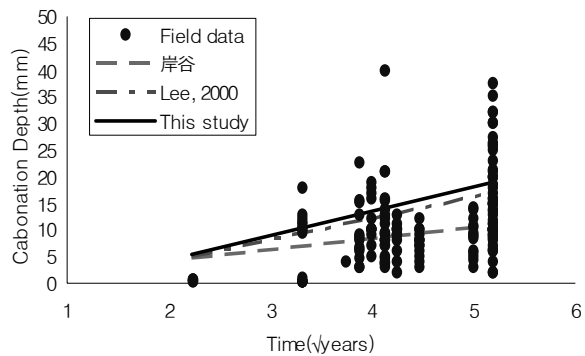
$$C_t = 4.28\sqrt{t}(\text{mm}) \quad (\text{urban area condition}) \quad (3)$$

$$C_t = 5.10\sqrt{t}(\text{mm}) \quad (\text{sea condition}) \quad (4)$$

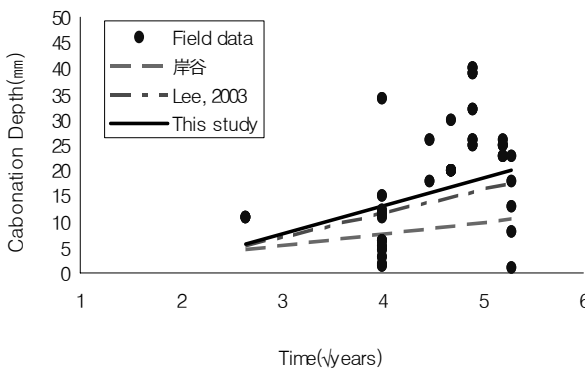
$$C_t = 2.62\sqrt{t}(\text{mm}) \quad (\text{river condition}) \quad (5)$$

Table 1은 국내 교량구조물에 대한 기존 연구자들(임흥범 등, 2004; 이영재 등, 2003; 이창수 등, 2000)의 탄산화 현황분석을 정리한 것이다.

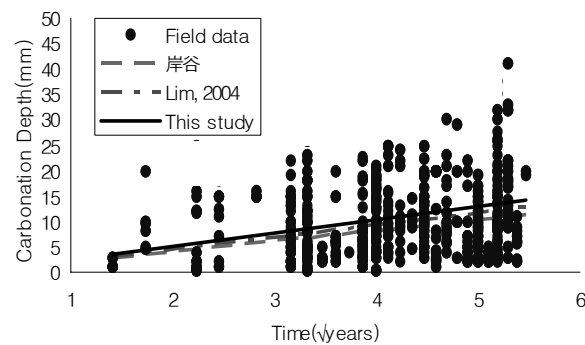
본 논문에서는 국내 기존 연구자들의 모델식 및 일반적



(a) Urban area condition (Test point = 162)



(b) Sea condition (Test point = 79)



(c) River condition (Test point = 876)

Fig. 3 Carbonation depth with age

으로 많이 알려져 있는 岸谷식(岸谷, 1963)을 현장 데이터 분석결과와 비교하였다.

Fig. 3(c)와 같이 하천 교량의 경우 탄산화속도는 국내 기존연구자의 모델식 및 岸谷식(W/C=50%, R=1)식의 결과와 유사한 경향을 보였으며, Fig. 3(a), 3(b)의 도심지와 해상 교량의 경우 탄산화속도는 국내 기존연구자들의 모델식과 유사한 경향을 보였고 岸谷식에 비하여 탄산화 속도가 약 2배 이상 빠르게 나타나, 일반적으로 범용화된 모델식인 岸谷식은 탄산가스의 배출정도가 심하거나 특수한 환경에 노출된 구조물에 대해서는 탄산화 속도의 예측이 어려운 것을 알 수 있다. 여기서, 하천 교량의 경우에 비하여 도심지 및 해상 교량의 경우가 탄산화 속도가 빠르는데, 도심지 교량의 경우는 대기 중의 이산화탄소 농도가 높고 자동차의 배기가스나 공장에서 나오는 가스 등의 산성 화학적 물질이 콘크리트에 침입하기 때문으로 판단된다. 한편 해상교량의 탄산화속도가 빠른 이유는 다음과 같은 복합적인 이유로 추측된다.

첫 번째 본 논문에서 분석한 해상교량의 경우는 산업단지 등이 밀집한 부근의 교량이 다수 포함되어 있고, 교통량(탄산가스 배출량)이 많은 국내 주요교량을 대상으로 분석하였기 때문으로 판단된다. 두 번째는 비례 염분의 의해 탄산화의 진행이 더욱 촉진된 것으로 추측한다. 염화물 이온이 침투할 경우 시멘트 수화물(모노수화물 등)이 염화물 이온을 고정화하면서 세공용액중에 감소한 음이온을 보충하는 형태로 수산기 이온이 증가함에 의해 수산화칼슘의 탄산화가 진행되고 결과적으로 탄산화의 진행이 촉진된다(건설교통부, 2006). 또한 국립기관의 시험 결과 골재중량의 0.2%의 염분을 함유한 콘크리트의 10년 후의 탄산화깊이는 염분을 포함하지 않은 콘크리트 측정값의 2배를 나타내어(박기근, 1995), 교통량이 많은 주요 해상 교량의 경우 염해에 의한 영향이 탄산화를 더욱 가속시킨 것으로 판단된다.

탄산화에 영향을 주는 인자들은 탄산가스 농도, 온도, 습도, 기후, 자세한 배합정보 등 매우 다양하며, 모든 영향인자들을 고려하기 힘들고 당시의 배합비율 등 설계 자료가 불확실하여, 위의 기존연구자들의 연구방법과 동일하게 구조물이 위치한 환경조건을 주요인자로 선별하여 분석하였다. 이 때문에 통계 분포도가 분산형으로 결정계수가 낮아 식(3-5)을 실무에 직접 활용하기에는 충분하지 않다고 판단되며, 본 논문에서는 식(3-5)을 신뢰성

Table 1 Carbonation velocity by researchers

Environment condition	Carbonation velocity coefficient (A)	
	This Study	Researchers
Urban area	4.28	4.10 (Lee,2000)
Sea	5.10	4.64(Lee, 2003)
River	2.62	2.31(Lim, 2004)

이론에 근거한 교량의 내구수명 계산시 각 환경별 대표 탄산화속도계수를 파악하는데 이용하였다.

3. 신뢰성 이론에 의한 탄산화 분석

3.1 콘크리트의 내구성 설계방법

일반적인 콘크리트의 내구성 설계방법은 결정론적 설계법과 확률론적 설계법, 내구수명 안전율 방법 등으로 구분할 수 있다 (RILEM, 1994).

결정론적 설계방법(Deterministic design method)에 서는 시간 의존적 함수로 구성된 외력과 저항응력과의 시간에 따른 성능을 비교한 것으로 식(6)과 같이 주어진다.

$$R(t) - S(t) > 0 \quad (6)$$

여기서, $R(t)$ 는 목표내구수명에서의 저항응력, $S(t)$ 는 목표내구수명에서의 열화외력이다.

확률론적 설계방법(Stochastic design method)에서 는 시간에 따른 열화외력이 확률분포가 고려되며, 시간 의존적으로 변하는 내구적 저항확률이 목표내구수명에 대한 특성 파괴확률보다 작도록 유도하는 것이 기본이다. 확률론적 방법에 대한 평가식은 식(7)과 같다.

$$P_t = P(R - S)_t < P_f \quad (7)$$

여기서 P_t 는 목표내구수명 내에서의 내구적 파괴확률, R 은 저항함수, S 은 외력함수, P_f 은 내구적 허용파괴확률을 나타낸다.

저항응력 및 열화외력에 대한 변수들이 많을 경우, 확률론적인 설계방법의 적용이 어려울 수 있는데 이 경우에는 내구수명 안전율 방법(Lifetime safety factor method)이 사용되기도 한다. 이 방법은 구조설계방법과 유사하며, 내구수명 안전율을 이용하여 식(8)과 같이 나타낸다.

$$t_d = \gamma \cdot t_g \quad (8)$$

여기서 t_d 는 설계수명, γ 는 내구수명 안전율, t_g 는 목표내구수명을 나타낸다.

3.2 내구적 파괴확률

공학문제에서 외부하중이나 재료상수와 같은 해석변수 들은 특정 값으로 고정되어 있는 것이 아니라 일정한 기 대 값을 중심으로 임의적으로 분산되어 있다. Fig. 3과 같이 식(3-5)와 같은 선형회귀식을 사용하여 탄산화 깊 이를 예측하고 이를 토대로 내구성 설계를 한다면, 선형

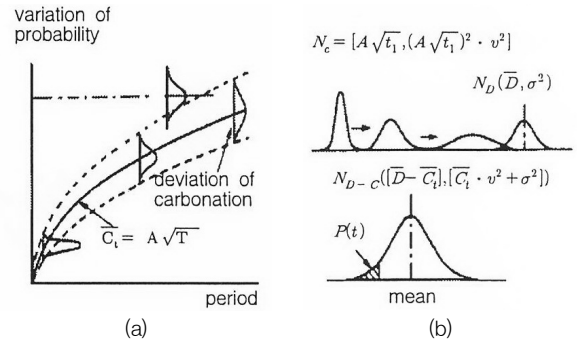


Fig. 4 Failure probability of durability

회귀식보다 큰 탄산화 깊이를 나타낼 확률이나 탄산화 깊이의 측정의 오차 등은 고려할 수가 없다. 이러한 모델식이나 계측 값의 변동성을 고려할 수 있는 것이 신뢰성 이론을 기반으로 한 분석법이다(한상훈 등, 2008).

본 연구에서는 도심지, 해상, 하천 환경에 따른 탄산화에 의한 교량의 내구적 파괴확률을 도출하기 위하여, 화천(和泉, 1988)의 신뢰성 이론에 근거한 확률론적 해석방법을 적용하였으며, 시간에 따라 증가하는 탄산화깊이의 변동성과 피복두께의 변동성을 정규분포로 고려하였다.

편차를 갖는 콘크리트의 탄산화 진행과 철근 피복두께와의 관계를 개념적으로 Fig. 4에 나타내었다. 탄산화 깊이는 재령과 더불어 증가하며 이 편차도 재령과 더불어 증가하게 되지만 철근 피복두께는 재령과 연관성이 없기 때문에 편차는 일정하게 유지하게 된다. Fig. 4(a)에 나타낸 탄산화 깊이 분포의 경사에 따른 진행과 철근 피복두께와의 분포 관계를 보다 알기 쉽도록 하기 위하여 일차적으로 나타낸 것이 Fig. 4(b)이다. 횡축은 탄산화 깊이 및 철근 피복두께를 나타낸 것이며 종축은 이것들의 도수를 나타낸 것이다.

여기서 $P(t)$ 는 철근 피복두께와 탄산화 깊이 차의 분포를 보여주는 것으로, 시간에 따른 내구적 파괴확률(철근 부식확률)이며 식 (9)-(11)으로 표현될 수 있다.

$$f(D - C_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\bar{C}_i^2 v^2 + \sigma^2)}} \exp\left[-\frac{\{(D - C_i) - (\bar{D} - \bar{C}_i)\}^2}{2(\bar{C}_i^2 v^2 + \sigma^2)}\right]$$

$$P(t) = \int_{-\infty}^0 f(D - C_i) d(D - C_i) \text{ (옥외면 풍우에 접한 경우)}$$

$$P(t) = \int_{-\infty}^{-2} f(D - C_i) d(D - C_i) \text{ (옥내면의 경우)} \quad (9-11)$$

여기서, C_i 는 탄산화깊이, \bar{C}_i 는 탄산화 깊이의 평균, A 는 탄산화속도계수, t 는 시간, v 는 탄산화깊이의 변동계수, D 는 피복두께, \bar{D} 는 피복두께의 평균, σ 는 피복두께의 표준편차, N_c 는 탄산화 깊이의 확률분포, N_D 는 피복두께의 확률분포, $P(t)$ 는 시간에 따른 내구적 파괴확률을 나타낸다.

3.3 신뢰성지수에 따른 내구수명

내구적 파괴확률을 이용하여 구조물의 내구수명을 도출하기 위해서는, 목표내구적 파괴확률이 설정되어야 하는데 이를 위해서는 구조물의 등급에 맞는 내구적한계상태 및 목표신뢰도지수(β)가 설정되어야 한다. 국내의 콘크리트 표준시방서(콘크리트 표준시방서 내구성편, 2004)에서는 콘크리트 구조물의 탄산화에 대한 안전율을 1.2로, 목표신뢰도 지수(β)를 1.3으로 제시하고 있다.

콘크리트 구조물의 목표내구수명은 구조물이 특별한 유지관리 없이 일상적인 유지관리 하에서 내구적 한계상태에 도달하기까지의 기간으로 정하며, 높은 내구성이 요구되는 구조물은 65년, 특별히 높은 내구성이 요구되는 구조물은 100년으로 정하고 있다. 이에 본 논문에서는 대상구조물이 교량임을 감안하여 목표신뢰도 지수를 사용년수 100년에서 1.3으로 정하였다.

또한 내구성 설계 및 평가에서 한계상태에 도달하는 확률, 즉 파괴확률은 신뢰도지수(β)로 표현될 수 있는데, $-\infty$ 에서 0까지 정규분포값을 적분한 값이 파괴확률이다. Table 2는 신뢰성지수와 파괴확률의 관계를 보여주고 있다.

3.4 내구적파괴확률 및 내구수명 분석

3.4.1 환경조건에 따른 파괴확률 및 내구수명

구조물이 위치한 환경에 따른 교량의 탄산화에 대한 내구수명을 예측하기 위하여, 계측된 Data를 통계 처리하여 탄산화깊이 평균값과 표준편차, 변동계수를 계산하였고, 계산 값을 이용해 교량의 사용년수에 따른 내구적 파괴확률을 도출하였다. Table 3은 교량의 사용년수에서 탄산화깊이의 변동성이 가장 큰 경우의 탄산화 깊이 평균값, 표준편차, 변동계수를 나타낸 것이다.

내구수명 분석시 피복두께의 변동계수는 일반적으로 내구신뢰성해석에서 사용하는 0.1과 0.3사이의 범위로 간주하였다. 평균 피복두께는 현장구조물의 계측결과를 분석한 결과 교량 하부구조 개별 부재의 피복두께 평균은

Table 2 Reliability index

β	3.8	3.0	2.0	1.8	1.64	1.50	1.30	0.00
$P(t)$ (%)	0.02	0.14	2.28	3.59	5.00	6.68	10.00	50.00

Table 3 Coefficient of variation for carbonation depth

Condition	Test point	Carbonation depth(mm)		
		Average	Stan. Dev.	Cov.
Urban area	162	14.05	7.65	0.63
Sea	79	18.66	10.75	0.58
River	876	11.58	8.25	0.72

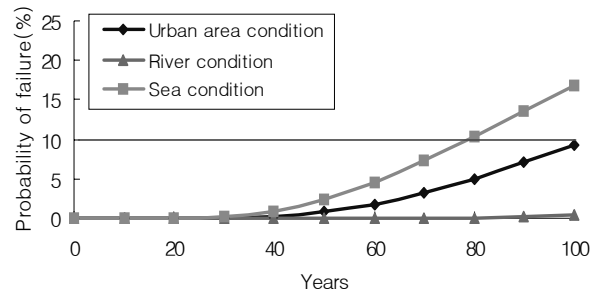
약 75mm-92mm의 범위로 파악 되었으며, 이를 감안하여 80mm를 반영하였다.

Fig. 5는 구조물이 위치한 환경에 따른 내구수명을 그래프로 나타낸 것으로, Fig. 5(a)는 피복두께의 변동계수가 0.1인 경우이며, Fig. 5(b)는 피복두께 변동계수가 0.3인 경우를 나타낸다. 우선 피복두께 변동계수가 0.1일 때, 해상에 위치한 교량의 경우 79년 후에는 파괴확률이 10%(신뢰도지수 $\beta = 1.3$)을 초과하는 것으로 나타났고, 도심지에 위치한 경우는 100년 경과 후 파괴확률이 9.3%, 하천에 위치한 경우는 0.37%로 10%미만으로 나타났다.

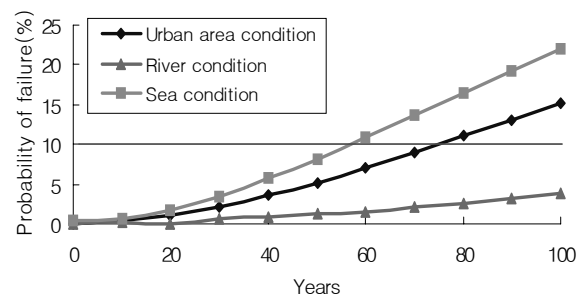
한편, 피복두께 변동계수가 0.3일 때, 해상에 위치한 교량의 경우 56년 후에는 파괴확률이 10%(신뢰도지수 $\beta = 1.3$)을 초과하는 것으로 나타났고, 도심지에 위치한 경우는 75년 경과 후 파괴확률이 10%를 초과하였으며, 하천에 위치한 경우는 100년 경과 후 3.74%로 10%미만으로 나타났다.

피복두께의 변동계수는 콘크리트의 품질과 시공성을 나타내는데, 도심지에 위치한 교량의 경우 피복두께 변동계수가 0.1인 경우에 비해 0.3인 경우는 내구수명이 28년 감소하였고, 해상에 위치한 교량의 경우는 23년, 하천에 위치한 경우는 64년 감소하였다.

결과적으로 피복두께 변동계수가 0.1-0.3범위에 있을 때, 하천교량의 하부구조의 경우는 피복두께가 80mm 확보되면 내구적 파괴확률은 목표 내구적 파괴확률을 초과하지 않지만, 도심지 및 해상교량의 경우는 목표 내구적 파괴확률을 초과하게 되는 것으로 분석되었다.



(a) Cov. of cover depth=0.1



(b) Cov. of cover depth=0.3

Fig. 5 Failure probability by carbonation

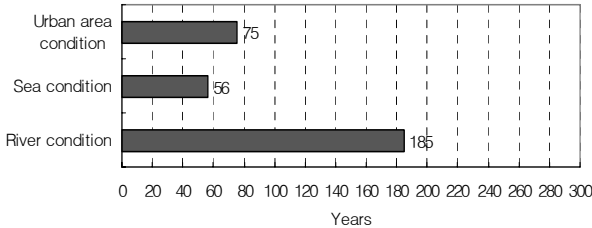
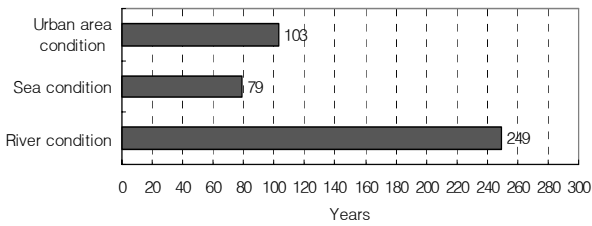


Fig. 6 Service life of structure

Table 4 Service life of structure by cover depth

(a) Cov. of cover depth = 0.1

Cover depth	Service life of structure (years)		
	Urban area condition	Sea condition	River condition
80	103	79	249
90	130	99	315
100	161	123	390
110	194	149	472
120	231	177	560

(b) Cov. of cover depth = 0.3

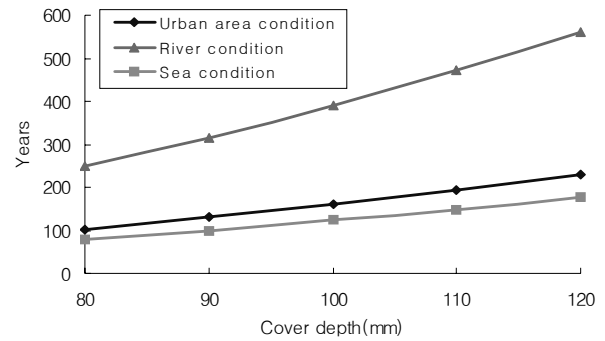
Cover depth	Service life of structure (years)		
	Urban area condition	Sea condition	River condition
80	75	56	185
90	94	71	233
100	117	88	289
110	141	107	350
120	168	127	415

또한 Fig. 6과 같이 교량 하부구조의 내구수명은 평균 피복두께가 80mm, 피복두께 변동계수가 0.1-0.3 범위 일 때 도심지 교량은 75-103년, 해상교량은 56-79년, 하천교량은 185-249년으로 분석되었다.

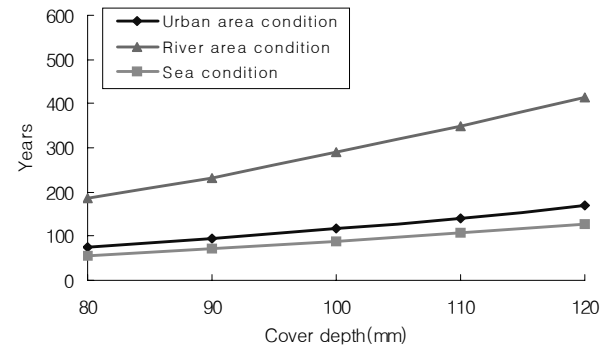
이에 교량 유지관리시 도심지 및 해상에 위치한 교량의 탄산화에 대한 면밀한 검토 및 대책이 필요할 것으로 판단된다.

3.4.2 목표내구수명 확보를 위한 피복두께 산정

각 환경조건에서 목표내구수명(100년)을 만족하기 위한 피복두께를 알아보기 위하여 피복두께의 증가에 대한 내구수명을 분석하였다. Table 4는 피복두께의 증가에



(a) Cov. of cover depth = 0.1



(b) Cov. of cover depth = 0.3

Fig. 7 Relationship between cover depth and service life

다른 내구수명을 분석한 것이며, Fig. 7은 이것을 그래프로 나타낸 것이다.

Fig. 7(a)와 같이 피복두께 변동계수가 0.1일 때, 현장 피복두께의 조사결과를 반영한 피복두께 80mm가 확보되면, 도심지 교량의 하부구조와 하천 교량의 하부구조는 목표내구수명을 만족하는 것으로 분석되었으나, 해상 교량의 하부구조는 목표내구수명을 만족시키기 위해서 피복두께 100mm가 확보되어야 할 것으로 분석되었다.

한편, Fig. 7(b)와 같이 피복두께 변동계수가 0.3인 경우 하천교량의 하부구조는 목표내구수명을 만족하는 것으로 분석되었으나, 도심지 및 해상 교량의 하부구조는 목표내구수명을 만족시키기 위해서 각각 피복두께 100mm, 110mm가 확보되어야 할 것으로 분석되었다.

4. 결론

현장실험결과를 활용한 국내 교량 하부구조물의 탄산화 해석을 통하여 나타난 본 연구의 결론은 다음과 같다.

1) 국내 콘크리트구조물의 탄산화 현황을 파악하기 위하여 국내 290개 교량 하부구조의 안전진단결과를 수집하여 분석하였다. 또한 신뢰성 이론을 기반으로 하여 교량구조물이 위치한 환경에 따른 콘크리트의 내구적 파괴확률을 도출하고, 사용기간에 따른 내구수명을 산정하였다.

2) 국내 교량 하부구조에 대한 탄산화 계측결과와 분석 결과, 재령의 증가에 따라 탄산화 깊이가 증가하는 경향

을 보였다. 또한 탄산화속도계수의 분석결과 도심지 교량은 4.28, 해상 교량은 5.10, 하천교량은 2.62로 분석되어 하천교량에 비해 도심지 및 해상 교량의 탄산화 속도가 빠르게 나타났다. 본 논문에서는 탄산화속도계수 분석시 국내 기존연구자들과 동일하게 구조물이 위치한 환경조건을 주요인자로 선별하여 분석하였다. 향후 탄산화에 영향을 주는 인자(탄산가스 농도, 온도, 습도, 기후, 배합정보 등)들에 대한 구체적인 자료 확보와 다양한 탄산화 영향인자를 고려한 탄산화 해석 및 검토는 필요할 것으로 판단된다.

3) 구조물이 위치한 환경조건에 따른 내구수명 해석결과 교량 하부구조의 내구수명은 피복두께의 평균이 80mm, 피복두께 변동계수가 0.1-0.3 범위일 때 도심지 교량은 75-103년, 해상교량은 56-79년, 하천교량은 185-249년으로 분석되었다. 이에 교량 유지관리시 도심지 및 해상에 위치한 교량의 탄산화에 대한 면밀한 검토 및 대책이 필요할 것으로 판단된다.

4) 목표내구수명(100년)을 확보하기 위한 피복두께의 산정결과 피복두께 변동계수가 0.1-0.3의 범위에서, 현장 피복두께의 조사결과를 반영한 피복두께 80mm가 확보되면, 하천교량의 하부구조는 목표내구수명을 만족하는 것으로 분석되었으나, 도심지 및 해상 교량의 경우 각각 피복두께 100mm, 110mm가 확보되어야 할 것으로 분석되었다.

5) 현재, 국내 구조물에 대한 내구수명 파악시 폭넓은 현장 계측 데이터의 축적 및 내구수명 평가방법에 관한 연구들의 미비로 어려움을 겪고 있다. 특히 신뢰성 개념에 근거하여 실제 구조물이 위치한 다양한 환경(도심지, 해상, 하천 등)에 따른 교량의 내구수명을 비교하고 예측하는 연구는 국내에서 거의 전무한 실정이다. 이에 본 논문의 연구결과는 국내 교량구조물의 탄산화에 대한 유지

관리 및 내구성 설계시 참고자료로 이용될 수 있다고 판단된다.

참고문헌

1. 박기근 “콘크리트의 내구성과 중성화”, 한국콘크리트학회지, 제7권 2호, 1995, pp.74-81.
2. 이영재, 김용희, 이윤영 “동해안 39개 철도구조물의 염화물 함유량과 중성화에 대한 현황분석”, 한국구조물진단학회지, 제7권 1호, 2003, pp.259-266.
3. 임홍범, 박창호, 신재인 “고속도로 교량의 중성화 현황 분석”, 대한토목학회 정기학술대회논문집, Vol-1, 2004, pp.3674-3679.
4. 이창수, 설진성, 윤인석 “서울시내 140개 철근콘크리트 교량의 내구성 현황 분석”, 한국구조물진단학회지, 제4권 3호, 2000, pp.161-168.
5. 이창수, 윤인석 “대기환경변화를 고려한 콘크리트 구조물의 중성화 예측”, 한국콘크리트학회 논문집, 제15권 4호, 2003, pp.574-584.
6. 오병환 “콘크리트 구조물의 탄산화에 대한 내구성 설계 방법”, 한국콘크리트학회 봄 학술 발표회 연구위원회 발표집, 제12권 5호, 2000, pp.69-80.
7. 한상훈, 박우선 “항만 콘크리트 구조물에 대한 탄산화 해석”, 한국해양·해양공학학회논문집, 제20권 제6호, 2008, pp. 575-582.
8. 콘크리트 구조물의 효율적인 유지관리를 통한 내구수명 확보방안 연구, 건설교통부, 2006.
9. 콘크리트표준시방서 내구성편, 건설교통부, 2004.
10. 한국시설안전공단, 정밀안전진단 보고서(289권), 1997-2007
11. 岸谷孝一, “鐵筋コンクリートの耐久性”, 鹿島建設技術研究所出版部, 1963.
12. 和泉意登志, “構造物の耐久設計手法例—鐵筋のがぶり厚さの信頼性設計手法—”, 콘크리트공학, 26, No. 11, 1988, pp.38-42.
13. RILEM, Durability Design of Concrete Structures, Report of RILEM Technical Committee 130-CSL, E&FN SPON, 1994
14. Richardson M. G, Fundamentals of Durable Reinforced Concrete, 2003.

(접수일자 : 2010년 2월 5일)
 (1차수정일자 : 2010년 4월 2일)
 (심사완료일자 : 2010년 4월 21일)

요 지

탄산화는 콘크리트 내부의 알칼리성 수화생성물과 대기 중의 탄산가스가 반응하는 것을 의미하며, 탄산화에 의한 철근부식은 철근 콘크리트의 내구성을 저하시키는 주요원인 중의 하나이다. 본 논문에서는 국내에서 광범위하게 시공된 교량구조물에 대한 실태조사를 이용하여 교량구조물이 위치한 환경에 따른 탄산화의 영향을 파악하였다. 또한 계측결과들을 바탕으로 탄산화에 의한 구조물의 내구적 파괴확률을 신뢰성 이론을 기반으로 하여 분석하고, 국내 시방서에서 제시하는 목표파괴확률을 기준으로 대상구조물의 내구수명을 평가하였다. 현장실험결과를 토대로 한 탄산화의 분석결과 교량의 사용년수가 증가함에 따라 탄산화깊이는 증가함을 보였으며, 교량구조물의 탄산화 속도 분석결과 하천교량에 비하여 도심지 및 해상 교량의 탄산화 속도가 1.6-1.9배 빠르게 나타났다. 또한, 교량구조물의 내구수명을 파악한 결과 하천 교량에 비하여 도심지 및 해상 교량의 내구수명은 약 2.4-3.3배 적게 나타났다.

핵심 용어 : 탄산화, 내구수명, 내구적 파괴확률, 신뢰성 개념