

# 콘크리트 구조물의 탄산화속도에 관한 연구

## A Study on Carbonation Velocity for Concrete Structures

김 종 호\*

오 광 진\*\*

박 승 범\*\*\*

Kim, Jong Ho Oh, Kwang Chin Park, Seung Bum

### Abstract

The carbonation velocity is produced an effect on carbon dioxide(CO<sub>2</sub>) density of surrounding near structures, the concrete quality and types of structures and this study was accomplished to draw a conclusion for estimated formula of carbonation velocity coefficient with various factors by the concrete quality on the base of the data of the durability surveyed in Korea. From the results of analysis of carbonation velocity, the followings were appeared. It is analyzed that carbonation velocity of the structures under urban area is 1.5 times faster than the rural area in the bridges case and it is 2.5 times faster than the rural area in the tunnels case. And the order of carbonation velocity of the structures under urban area is the buildings, the tunnels, the bridges and they are evaluated to progress about 2.7 times and 1.3 times faster than the bridges. In the rural area, the bridges are evaluated to progress about 1.3 times faster than the tunnels and it is analyzed that the carbonation velocity of the upper structures of the bridges under urban area is about 1.3 times faster than lower structures. The results which is compared to estimated formula of carbonation velocity coefficient of Kishitani equation which is generally applied for convert compressive strength into W/C ratios, most of those velocity of structures is faster than the results of Kishitani equation.

### 요 지

탄산화속도는 구조물이 위치한 환경의 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 농도, 콘크리트 품질, 구조물의 형상 등에 의해 영향을 받게 되며, 본 연구에서는 국내의 내구성 조사자료를 토대로 하여 콘크리트 품질에 따른 각종 인자를 고려한 탄산화속도계수 추정식을 도출하고자 수행되었다. 수행결과, 도심지역이 산간지역에 비해 교량의 경우 약 1.5배, 터널의 경우 2.5배 탄산화가 빠르게 진행되는 것으로 분석되었으며, 도심지역에서는 건축물, 터널, 교량의 순서로 교량에 비해 약 2.7배, 1.3배 탄산화가 빠르게 진행되는 것으로 평가되었다. 산간지역에서는 교량이 터널보다 약 1.3배 빠르게 진행되는 것으로 평가되었으며, 도심지역에서 교량의 상부구조가 하부구조보다 약 1.3배 빠르게 진행되는 것으로 분석되었다. 한편 압축강도를 물·시멘트비로 환산하여 일반적으로 적용하고 있는 기존의 일본 기시타니식 탄산화속도계수 추정식과 비교한 결과 대부분이 기시타니식 보다 빠른 것으로 평가되었다.

**Keywords** : Carbon dioxide, Carbonation velocity, Concrete quality

**핵심 용어** : 이산화탄소, 탄산화속도, 콘크리트 품질

\* 정회원, 한국시설안전기술공단 과장

\*\* 정회원, 한국시설안전기술공단 팀장

\*\*\* 정회원, 충남대학교 토목공학과 교수, 교신저자

E-mail : jhkim@kistec.or.kr 031-910-4071

• 본 논문에 대한 토의를 2008년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 2008년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

# 1. 서론

## 1.1 연구배경

우리나라의 경우 구조물의 상당수가 콘크리트 재료로 구성되어 있어 오래전부터 콘크리트가 건설재료로 각광 받고 있음을 알 수 있다. 과거 콘크리트는 내구성이 우수하여 유지관리가 거의 필요 없는 영구구조물로 인식되었으나 근래에 들어 유지관리가 소홀한 콘크리트에서 성능저하현상이 나타나고 있고 산업사회에 직·간접적으로 영향을 미치게 되어 이제 콘크리트에 대한 유지관리 중요성이 부각되고 있다. 이러한 콘크리트 성능저하요인은 크게 재료조건, 시공조건, 환경조건, 구조·외력조건으로 분류되며, 특히 기존 구조물의 동결융해작용, 탄산화, 염해, 알칼리 골재반응 등 환경요인에 의한 성능저하는 최근 많은 관심이 집중되고 있는 상황이다. 실제로 현재 국내에서 수행되고 있는 내구성 조사 자료에서는 철근부식으로 인한 구조물 열화가 많이 발견되고 있고, 이 원인은 주로 피복두께 콘크리트의 탄산화 진행에 의한 것으로 나타나고 있다.

탄산화는 크게 콘크리트 시공시 품질관리와 같은 내적요인과 대기 중 CO<sub>2</sub>농도, 온도, 습도 등과 같은 외적환경요인의 영향을 크게 받고 있으며, 이러한 인자가 탄산화속도에 미치는 영향을 분석하는 것은 콘크리트 구조물의 효과적인 유지관리를 위해서 중요하다고 할 수 있다.

더구나, 2006년도 기상청에서 발표한<sup>(1)</sup> Fig. 1과 같은 CO<sub>2</sub>농도 분포에서와 같이 최근에 우리나라는 봄철의 황사현상으로 인한 산성비와 지속적으로 증가하는 이산화탄소의 영향으로 탄산화가 심화되고 있는 실정이다. 한반도 지구대기감시보고서와 세계기상기구(WMO) 지구대기감시(GAW) 온실가스연보에 따르면 2005년 기준 한반도의 탄산가스 평균농도는 379.1 ppm으로 나타나 전 세계 평균값보다 10ppm 많게 나타나 최고조를 이루고 있는 것으로 보고되고 있다.<sup>(2)</sup>

이러한 탄산가스로 인한 콘크리트 구조물의 탄산화에 대한 연구동향을 살펴보면 경화된 콘크리트를 가정하여 간단한 반경험식의 함수형태로 제안되었으며,<sup>(3)</sup> 최근 들어 물리화학적인 반응을 고려한 해석기법이 제

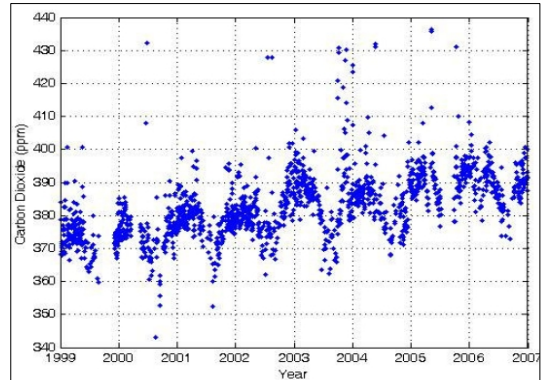


Fig. 1 1999년~2006년까지 일별 CO<sub>2</sub>농도 분포(안면도)

안되고 있는 실정이다.<sup>(4)</sup> 그 뿐만 아니라, 건전부 콘크리트 및 취약부 콘크리트에서 대해서도 해석기법이 제안되고 있다.<sup>(5)</sup>

## 1.2 연구목적

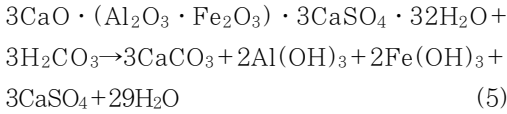
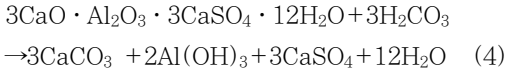
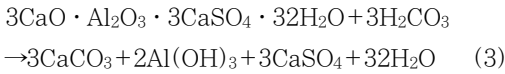
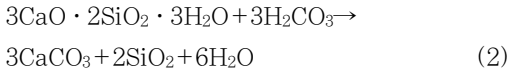
본 연구에서는 기존에 실시한 국내 콘크리트구조물의 탄산화깊이조사 자료를 수집·분석하여 철근부식환경파악, 잔존수명예측 등에 활용할 수 있도록 시설물별, 구조물이 놓여진 지리적 위치, 강도별, 부재종류 등 주요 인자별로 콘크리트탄산화 속도계수를 제시하고자 한다.

# 2. 탄산화

## 2.1 탄산화 메카니즘

수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>)은 경화 시멘트페이스트 중에 존재하며, pH는 공극 중의 포화수용액의 형태로 존재한다. 수산화칼슘의 포화수용액은 pH 12.6의 강알칼리성으로 경화시멘트페이스트의 pH를 결정한다. 콘크리트가 대기 중에 있을 때 대기 중의 탄산가스가 콘크리트 내부로 확산되어 발생하는 탄산화 반응에 대한 화학식은 식(1)~(5)와 같다.<sup>(3)</sup>





일반적으로 콘크리트의 탄산화는 상기 화학반응식 가운데 식(1)과 같이 수산화칼슘이 탄산화되는 것을 말하며, 포괄적인 의미의 탄산화는 식(2)~(5) 모두를 포함한다. 참고로 탄산화는 시멘트의 수화생성물이 이산화탄소와 반응하여 탄산화합물 및 그 밖의 물질로 분해되는 현상이라 할 수 있으며, 중성화는 시멘트 경화체의 알칼리성이 저하되는 현상이라 할 수 있다.

가장 일반적인 탄산화는 콘크리트가 대기 중에 있는 경우이다. 대기 중의 탄산가스가 콘크리트 내부로 확산되어 탄산화가 콘크리트 표면에서 내부로 진행해 간다. 그러나 모든 수산화칼슘이 탄산화된 영역과 탄산칼슘이 생성되지 않은 영역 사이에 명확한 경계는 존재하지 않는다. 이 2개의 영역 사이에는 Fig. 2에 표시한 수산화칼슘과 탄산칼슘의 혼재영역이 있다.

이러한 탄산화는 콘크리트 표면경도가 커지는 등 콘크리트 자체에 유해하지는 않지만 알칼리성을 저하시

켜 콘크리트 중의 철근이 부식하기 때문에 문제가 된다. 따라서 철근콘크리트 구조물의 내구성 문제에서 탄산화는 중요하다.

## 2.2 탄산화의 속도평가

대기 중의 탄산가스와 콘크리트내의 수산화칼슘의 반응에 의해 콘크리트표면으로부터 탄산화가 진행되어 가며, 이를 경과시간의 함수로서 표현한 것이 탄산화 속도식이다. 「탄산화가 정상상태에서 탄산가스의 콘크리트내부 확산에 따라 생긴다고 가정하면, 탄산화깊이  $C$ 는 경과시간  $t$ 의 제곱근에 비례한다」라고 하는 식(6)이 도출된다. 이것을  $\sqrt{t}$ 법이라 하고 가장 일반적으로 사용되고 있다.<sup>(9)</sup>

$$C = A\sqrt{t} \quad (6)$$

이 식에 있어서 계수  $A$ 는 탄산화속도계수라고 하며,  $A$ 의 값이 클수록 탄산화속도가 크게 된다. 계수  $A$ 는 환경조건(대기 중의 탄산가스농도, 온도, 습도, 마감재)의 외적조건과 콘크리트 자체의 품질(기공, 함수율, 강도 등)의 내적조건에 따라 정해지는 복잡한 함수이다. 일반적으로 알려진 탄산화 예측에 대한 모델 식은 Table 1과 같다.

Table 1 탄산화예측식<sup>(3)</sup>

연구자	탄산화예측식
白山	$t = \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \delta \cdot \epsilon \cdot \frac{5000}{(x-38)^2} \cdot C^2$
岸谷	$t = \frac{0.3(1.15+3x)}{R^2(x-0.25)^2} \cdot C^2$ : (물·시멘트비 60% 이상)
	$t = \frac{7.2}{R^2(4.6x-1.76)^2} \cdot C^2$ : (물·시멘트비 60% 이하)
浜田	$t = \frac{k}{R} \cdot C^2$
依田	$t = \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \frac{Pt^2}{(100x-Q)^2} \cdot C^2$

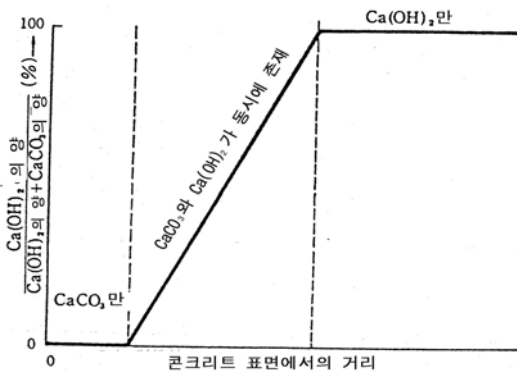


Fig. 2 콘크리트 탄산화 모델

### 3. 탄산화의 속도분석

#### 3.1 자료수집 현황

국내 콘크리트구조물의 탄산화 속도를 평가하기 위하여 국내에서 실시한 구조물의 내구성 조사자료를 수집하여 분석하였다. 본 연구에 사용된 자료는 교량 89개소, 건축물 30개소, 터널 21개소를 대상으로 실시하였으며 Table 2는 시설물별 자료수집 현황이다.

Table 2 시설물별 자료수집 현황

구 분	도심지역	산간지역
교 량	38	51
건축물	25	5
터 널	8	13

국내 기존 구조물의 내구성 조사 자료 중 콘크리트의 압축강도는 현장에서 채취된 실측 코어강도를 이용하였으며, 탄산화 깊이는 코어채취 후에 현장에서 페놀프탈레인법에 따른 실측자료를 이용하였다.

Table 3 탄산화 깊이측정자료(중략)

구 분	도심지역			산간지역			
	강도(MPa)	탄산화깊이(mm)	재령(년)	강도(MPa)	탄산화깊이(mm)	재령(년)	
교 량	9.5	36	17	13.7	7	5	
	10.3	36	22	16.8	16	13	
	13	39	31	17	3.5	4	
	13.4	26	17	17.1	2	11	
	15	10	18	17.1	1	2	
	15.9	26	30	17.3	11	5	
	∴	∴	∴	∴	∴	∴	
	42.2	4	5	42.6	1	5	
	43.9	3	5	43.3	2	5	
	46	6	5	44	2	6	
	48.8	1	11	54.5	4	5	
	54	3	10	56	3	5	
	건축물	13.1	34	21	21.3	25	20
		15	12	11	22.3	27	20
15		5	11	22.5	35	20	
∴		∴	∴	∴	∴	∴	
32.4		5	10	29.6	1.8	6	
33.8		0.5	2	30.6	19	20	
33.9		8	17	32.2	27	20	
터 널	35.9	0.5	2	33	28	20	
	9.5	15	18	6.2	1	69	
	10.3	28	19	6.6	0.8	69	
	11.6	28	19	7.3	1	69	
	13.2	19	19	7.3	4	29	
	13.5	25	12	7.7	45	39	
	∴	∴	∴	∴	∴	∴	
	28	14.7	11	33.4	3	37	
	30	11.3	11	33.5	1	54	
	33	3	13	33.7	4.4	10	
33.7	2.3	17	35	3.8	10		
38	15.6	11	36.3	4	10		

### 3.2 탄산화 속도 분석방법

본 연구에서는 진행된 실측 탄산화깊이와 재령을 고려하여 역으로 산정한 식 7의 탄산화속도계수(A)를 주요인자로 선정하여 시설물별, 도심지역 및 산간지역별, 콘크리트부재별로 구분하여 각각 비교·평가하였으며, 기존의 추정식과 비교하기 위하여 물·시멘트비(w/c)에 따른 탄산화속도계수를 각각 비교·분석하였다.

$$A = C/\sqrt{t} \quad (7)$$

여기서, C는 cm, t는 년을 사용하였다.

Table 3은 본 연구를 위해 수집된 교량, 터널, 건축물의 내구성 조사결과에서 도출한 압축강도, 재령, 탄산화깊이를 나타낸 것이다.

### 3.3 탄산화 속도분석

#### 3.3.1 시설물별 탄산화속도 분석

본 절에서는 시설물의 종류에 따른 탄산화속도의 경향을 분석하고자 교량, 터널, 건축물로 분류하여 압축강도를 횡축으로, 분석된 탄산화속도계수를 종축으로 도시하고 1차 회귀분석을 실시하여 평가하였다. 이때 교량과 터널의 경우는 도심지역과 산간지역으로 분류하여 평가하였으며, 건축물의 경우 대부분 도심지역에 위치하여 산간지역은 제외하여 평가하였다. Fig. 3과 Fig. 4는 산간지역에서의 교량과 도심지역에서의 건축물에서 분석된 압축강도에 따른 탄산화속도계수 추정식의 산출 예를 보인 것이다.

Fig. 5와 Fig. 6은 1차 회귀분석을 통하여 도출된 시설물별 탄산화속도계수 추정식을 산간지역과 도심지

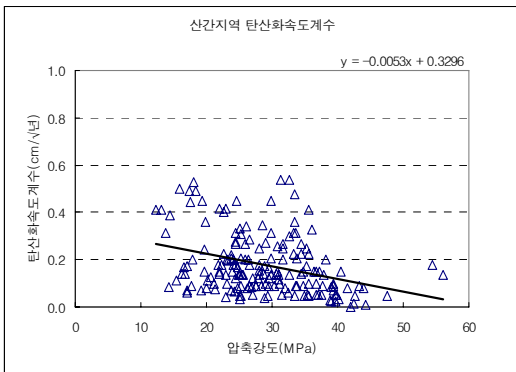


Fig. 3 산간지역 교량 탄산화속도계수

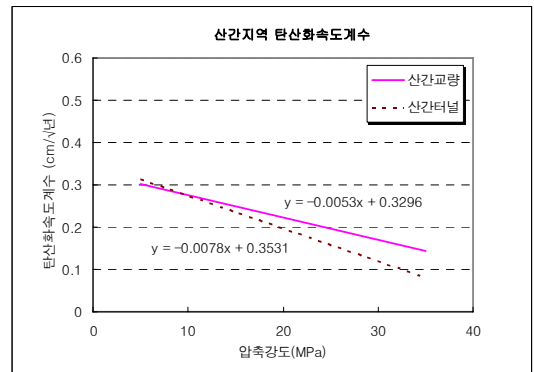


Fig. 5 산간지역 시설물별 탄산화속도 계수

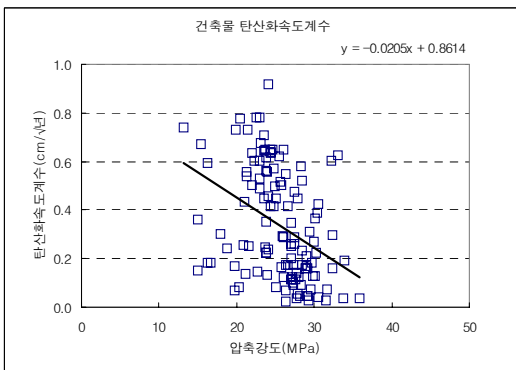


Fig. 4 도심지역 건축물 탄산화속도계수

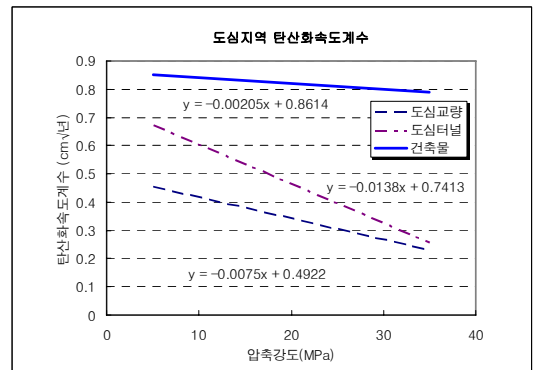


Fig. 6 도심지역 시설물별 탄산화속도계수

역으로 분류하여 비교한 그림이다. 대부분 콘크리트 강도의 범위가 10~50MPa인 점을 감안하여 모집단의 중간압축강도인 25MPa의 경우에 대해 분석해 보면 산간지역교량에서의 탄산화속도계수는 터널의 약 125% 수준인 것으로 나타났다. 반면에 도심지역에서의 탄산화속도계수는 건축물, 터널, 교량의 순서로 빠르고 교량에 비하여 터널의 경우 약 130%, 건축물의 경우 약 266% 수준인 것으로 분석되었다. 이는 건축물의 경우 실내에서의 CO<sub>2</sub> 농도가 실외보다 높은 것에 기인한 것으로 판단되며, 터널의 경우는 터널내에 CO<sub>2</sub>가 체류됨으로 교량의 경우보다 다소 높은 것으로 판단된다.

### 3.3.2 지역별 탄산화 분석

탄산화는 대기 중의 탄산가스 농도의 영향을 받게 되어 본 절에서는 탄산가스농도가 높은 광역시 이상의 도심지역과 탄산가스농도가 상대적으로 낮은 광역시 이외의 산간지역으로 구분하여 분석하였다.

Fig. 7 및 Fig. 8은 도심지역과 산간지역을 분류하여 콘크리트의 압축강도별 탄산화속도계수를 나타낸 것이다. 이를 분석하여 보면 콘크리트의 강도가 증가함에 따라 도심지역과 산간지역 모두 탄산화 속도계수가 저하되는 경향을 나타내었다. 이를 1차회귀식을 이용하여 강도별 탄산화속도계수를 분석한 결과 다음과 같이 나타났다.

① 도심지 교량의 경우 :

$$\text{탄산화속도계수} = -0.0075f_c + 0.4922$$

② 도심지 터널의 경우 :

$$\text{탄산화속도계수} = -0.0138f_c + 0.7413$$

③ 산간지 교량의 경우 :

$$\text{탄산화속도계수} = -0.0053f_c + 0.3296$$

④ 산간지 터널의 경우 :

$$\text{탄산화속도계수} = -0.0078f_c + 0.3531$$

여기서,  $f_c$ 는 코어강도(MPa)

탄산화속도계수는  $\text{cm} / \sqrt{t}$

대상시설물을 지역별로 압축강도 25MPa에서 비교하여 보면 교량의 경우, 도심지역이 산간지역에 비해 약 155% 수준인 것으로 나타났으며, 터널의 경우 약 251% 수준인 것으로 나타났다. 이 결과는 도심지역

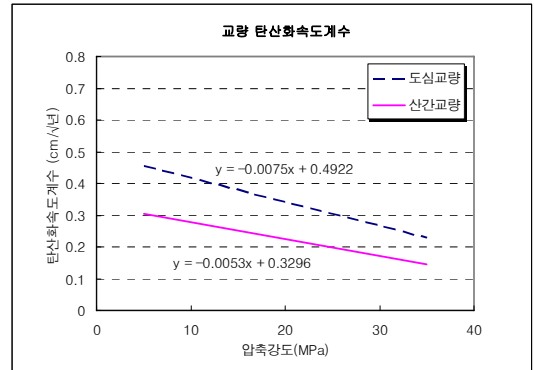


Fig. 7 지역별 교량 탄산화속도계수

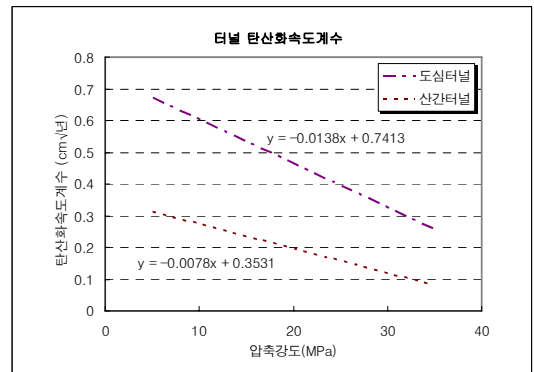


Fig. 8 지역별 터널 탄산화속도계수

에서의 CO<sub>2</sub>농도가 산간지역에서의 농도보다 높기 때문인 것으로 판단된다.

### 3.3.3 부재별(교량) 탄산화속도계수 분석

구조물 중 교량의 경우는 크게 상부구조와 하부구조로 분류되며, 이는 공용시 각기 다른 성능저하의 환경에 접하게 된다. 따라서 본 절에서는 상부구조의 대표 부재인 슬래브와 하부구조의 교대·교각으로 각각 구분하여 평가하였다.

Fig. 9~Fig. 11은 수집한 자료를 근거로 교량의 부재별, 지역별, 탄산화속도계수를 산출하고 예를 나타낸 그림이다. 이를 1차회귀식으로 나타내면 다음과 같다.

① 산간지 상부구조의 경우 :

$$\text{탄산화속도계수} = -0.0054f_c + 0.3343$$

② 산간지 하부구조의 경우 :

$$\text{탄산화속도계수} = -0.0053f_c + 0.3280$$

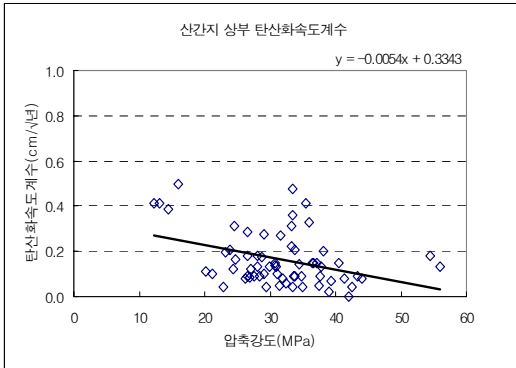


Fig. 9 산간지역 교량 상부 탄산화속도계수

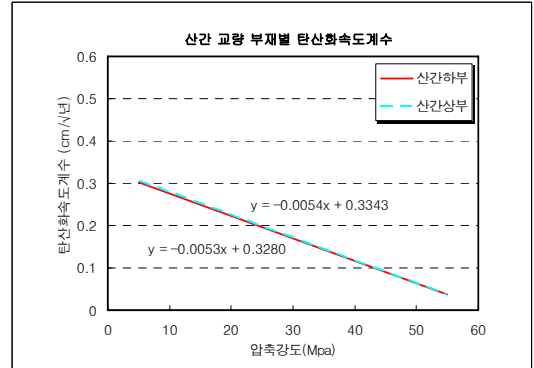


Fig. 11 산간지역 교량부재별 탄산화속도계수

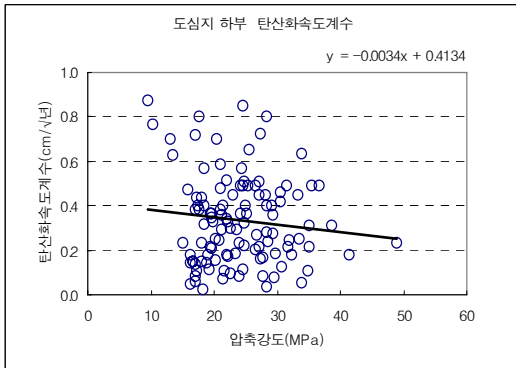


Fig. 10 도심지역 교량 하부 탄산화속도계수

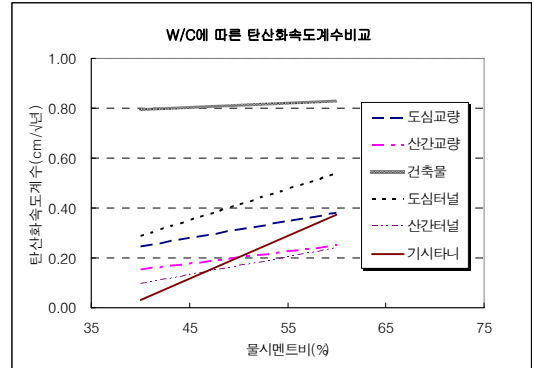


Fig. 12 w/c에 따른 탄산화속도계수 비교

③ 도심지 상부구조의 경우 :

$$\text{탄산화속도계수} = -0.0081f_c + 0.4616$$

④ 도심지 하부구조의 경우 :

$$\text{탄산화속도계수} = -0.0034f_c + 0.4134$$

여기서,  $f_c$ 는 코어강도(MPa)

$$\text{탄산화속도계수는 } \text{cm} / \sqrt{t}$$

이를 분석해보면 압축강도 25MPa의 경우 도심지의 경우는 상부구조가 하부구조에 비해 약 134%, 산간지역의 경우는 하부구조가 상부구조에 비하여 약 102% 높은 것으로 나타났다.

이는 도심지의 상부는 빈번한 차량통행에 의한 콘크리트 피로에 의한 열화의 촉진과 구조상 CO<sub>2</sub>가 하부구조에 비해 체류할 수 있는 구조 때문인 것으로 판단된다.

### 3.3.4 물시멘트비에 따른 탄산화속도계수 분석

본 절에서는 대상시설물들이 시공연도가 1996년 이전인 점을 감안하여 『콘크리트 표준시방서, 1996』의 토목학회 물·시멘트비 공식을 SI단위로 환산( $f_c = -21 + 21.5 c/w$ , MPa)하여 탄산화속도계수를 도출하였으며, 탄산화속도계수 추정에 일반적으로 적용하고 있는 일본 기시타니(岸谷)식과 비교·분석하였다.

기시타니(岸谷)식에서 탄산화비율 R값은 보통 포틀랜드시멘트와 강모래, 강자갈에 플레인 표면활성제인 경우로 가정하여 1.0을 적용하였다. Fig. 12는 물·시멘트비에 따른 탄산화속도계수의 추정식을 나타낸 그림이며, 분석결과, 물·시멘트비가 증가함에 따라 탄산화속도계수가 증가하는 것으로 나타났으며 일본의 기시타니(岸谷)식과 비교결과 물·시멘트비가 50%이상인 경우의 산간교량 및 터널을 제외한 대부분 구조물에서는 탄산화속도가 빠른 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 국내 콘크리트구조물을 조사한 자료를 수집·분석하여 탄산화속도를 시설물별, 탄산가스 농도에 따른 지역별, 부재별(교량), 물·시멘트비에 따른 분석을 실시하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 시설물별로 탄산화속도를 비교한 결과 도심지역이 산간지역에 비해 교량의 경우 약 1.5배, 터널의 경우 2.5배 탄산화가 빠르게 진행되는 것으로 분석되었으며, 도심지역에서는 건축물, 터널, 교량의 순서로 교량에 비해 약 2.7배, 1.3배 탄산화가 빠르게 진행되는 것으로 평가되었다.
- 2) 산간지역에서는 교량이 터널보다 약 1.3배 빠르게 진행되는 것으로 평가되었으며, 도심지역에서 교량의 상부구조가 하부구조보다 약 1.3배 빠르게 진행되는 것으로 분석되었다.
- 3) 물·시멘트비에 따른 탄산화속도계수 분석결과, 물·시멘트비가 증가함에 따라 탄산화속도계수가 증가하는 경향을 나타냈으며 일본의 기시타니(岸谷)식과 비교결과 물·시멘트비가 50%이상인 산간교량 및 터널을 제외한 대부분의 구조물에서 탄산화속도가 빠른 것으로 나타났다.

본 연구에서 수행된 탄산화속도계수 분석은 탄산화에 미치는 매우 다양한 영향인자 모두를 고려하기 곤란하여 주요 인자를 선별하여 분석한 관계로 분산된 형태의 분포도로 상관계수가 다소 낮아 이를 실무에 직접 활용하기보다는 참고용으로 활용하는 것이 바람직하다고 판단되며 향후 보다 신뢰성 있는 탄산화속도 계수를 제시하기 위해서는 상세한 환경조건(대기 중 CO<sub>2</sub>농도, 온도, 습도 등) 및 이 고려된 분석이 추가로 이루어져야 할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

이 연구의 일부는 SISTeC(R11-2002-101-01005-0)의 지원에 의하여 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 기상청, “지구대기감시보고서 2006 - 온실가스 및 반온가스”, 2006, pp. 17-20.
2. WMO, “Greenhouse Gas Bulletin - The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Using Global Observations through 2005”, NO. 2:1, 2006. 11.
3. 한국콘크리트학회, “콘크리트 염해 및 탄산화로 인한 내구성 저하 방지대책 연구” 연구보고서, 2001. 10. pp. 131-193.
4. 오광진, “콘크리트구조물의 탄산화깊이 측정방법 및 평가방법”, 구조물진단학회지, 제5권 제4호, 2001. 10. pp. 11-18.
5. 권성준, 송하원, 변근주, 이승훈, “균열을 가진 초기재령 콘크리트의 탄산화 해석”, 대한토목학회 논문집, 제24권 5-A호, 2004. 9. pp. 1011-1022.
6. 권성준, 박용교, 송하원, 변근주, “국내실정을 고려한 콘크리트탄산화 예측식의 제안”, 대한토목학회 2002년도 학술발표회, 2002. pp. 739-742.
7. 권성준, 박상순, 남상혁, 조호진, “국내 도심지 콘크리트 교각 취약부의 탄산화조사에 대한 연구”, 한국구조물진단학회지 제11권 제3호, 2007. 5. pp. 116-122.
8. 시설안전기술공단, 콘크리트 내구성 평가절차 수립, “연구보고서”, 1999.
9. 岸谷孝一, “コンクリートの 耐久性 ツリズ 中性化.”, 1986.
10. 日本土木學會, “コンクリト耐久設計指針(案),” 1993.
11. 日本土木學會, “コンクリト標準施工書-施工編,” 2000.
12. Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., and Fardis, M. N., “Reaction Engineering Approach to the Problem of Concrete Carbonation.” J. of AICHE. Vol. 35. No. 1989. 10, pp. 1639-1650.
13. Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., and Fardis, M. N., “Physical and Chemical Characteristics Affecting the Durability of Concrete.” ACI Materials Journal, Vol. 8. No. 2. 1991b, pp. 186-196.

(접수일자 : 2007년 7월 18일)