

국내 탄산화 실태자료를 이용한 탄산화 예측식의 제안

A Suggestion for Carbonation Prediction Using Domestic Field Survey Data of Carbonation

권성준* 박상순** 남상혁***
Kwon, Seung-Jun Park, Sang-Sun Nam, Sang-Hyeok

Abstract

Among deteriorations of concrete due to environmental exposure, carbonation problems of concrete structures have increased in urban and underground structures. But conventional carbonation-prediction equations that were proposed by foreign references, can not be applied directly to the prediction of carbonation for domestic concrete structures. The purpose of this study is to propose a prediction equation of carbonation depth by considering domestic exposure conditions of concrete structures. For the derivation of the equation, conventional carbonation-prediction equations are analyzed. Through considering the relationship between results of prediction equation and those of various domestic field survey data, the so-called correction factors for different domestic exposure condition of concrete structures are derived. Finally, a carbonation-prediction equation of concrete structures under domestic exposure conditions is proposed with consideration for concrete strength in core and correction factors.

요 지

환경노출로부터 야기되는 콘크리트 열화 중에서, 도심지 및 지하구조물의 탄산화에 대한 문제가 증가되고 있다. 그러나 현재 국내 콘크리트 구조물의 탄산화 예측에 사용되는 예측식은 국내 콘크리트 구조물의 노출 환경을 고려하지 않고 기존 외국의 문헌에 수록되어 있는 예측식을 직접적으로 사용하여 오차를 수반하게 된다. 본 연구의 목적은 국내에서 시공되는 콘크리트 구조물의 노출환경에 따라 탄산화 깊이를 예측할 수 탄산화 예측식을 제안하는데 있다. 이를 위해, 기존 탄산화 예측식을 분석하였으며, 국내에서 광범위하게 시공된 콘크리트 구조물에 대한 실태조사자료를 이용하여 콘크리트 구조물의 노출환경을 고려한 보정계수를 도출하였다. 최종적으로 보정계수를 강도의 함수로 구현하여 국내의 대표적인 콘크리트 구조물의 노출환경에 따른 탄산화 예측식을 제안하였다.

Keywords : Carbonation, Exposure condition, Correction factors, Concrete Strength

핵심 용어 : 탄산화, 노출환경, 보정계수, 콘크리트 강도

* 정회원, 비엔티 엔지니어링 차장, 공학박사

** 정회원, 비엔티 엔지니어링 부장, 공학박사

*** 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 연구교수, 공학박사

E-mail : salute@cmme.yonsei.ac.kr 02-2123-2806

•본 논문에 대한 토의를 2007년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 2008년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

염해와 더불어 탄산화는 국내의 진단조사에서 꼭 필요한 항목이며, 화석연료의 사용증가에 따라 그 피해가 증가하고 있는 실정이다.

탄산화에 대한 연구는 크게 탄산화 자체에 대한 물리-화학적 모델링 분야,⁽¹²⁾ 콘크리트 특성을 고려한 균열부 또는 타설이음부 등의 취약부의 탄산화 거동에 대한 분야,⁽¹⁹⁾ 탄산화된 콘크리트 구조를 대상으로 한 확산 및 투수특성에 대한 분야,⁽³⁾ 실태조사를 기본으로 한 탄산화 평가 분야⁽¹³⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾ 등으로 구분할 수 있다.

이러한 각각의 연구분야는 서로 유기적으로 관련되어지고 있으며, 비교 또는 검증의 대상이 되기도 한다. 물리-화학적인 반응을 고려한 탄산화 모델링 분야는 일반적으로 국소적인 환경 영향을 고려할 수 있으므로 가장 정량적인 결과를 제공할 수 있지만 실무자들이 쉽게 이해하고 사용하기에는 무리가 따른다.

한편 반경험식 형태를 가지고 있으며, 실태조사를 기준으로 한 탄산화 제안식들은 사용하기에는 편하지만 구조물 노출 환경을 세부적으로 고려하지 못하므로, 많은 오차를 발생시키고 있다.

국내에서는 주로 반경험식인 岸谷⁽⁸⁾식을 이용하여 탄산화에 대한 거동을 비교하고 있으며, 피복두께와의 비교를 통하여 콘크리트 구조물의 잔존수명 혹은 내구수명을 산정하고 있다. 기존의 연구(Kobayashi and Uno, 1990)에 의하면 1970년대 이후 일본의 시멘트 제조방식이 습식에서 건식으로 바뀌었으며 이에 따라 시멘트의 알칼리 성분의 증가로 인한 중성화 속도가 증가하고 있음을 지적하고, 岸谷⁽⁸⁾의 예측식이 1960년 이전의 구조물을 대상으로 합리적인 예측을 하고 있음을 제시하였다.

본 연구에서는 국내 시설물에 직접적으로 적용되는 岸谷식의 결과와 기존의 진단자료와의 비교를 통하여 노출환경에 따른 보정계수를 도출하고 이를 적용하여 기존의 탄산화 예측식을 보완하였다. Fig. 1은 본 연구의 개요를 나타내고 있다.

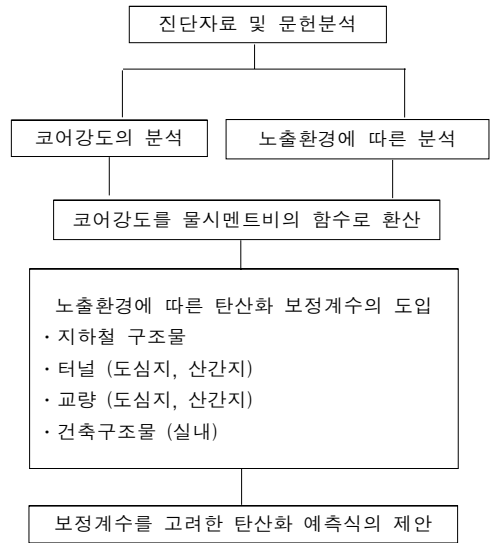
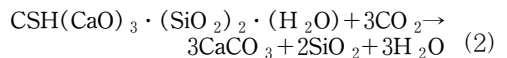


Fig. 1 본 연구의 개요

2. 환경조건에 따른 탄산화 거동의 변화

2.1 탄산화에 따른 철근부식

탄산화는 콘크리트내의 공극수의 pH가 이산화탄소의 유입을 통하여 감소하여 철근부식을 야기할 수 있는 상태로 변화하는 화학적 현상을 의미한다. 유입된 이산화탄소는 내부의 수화물 또는 미수화물과의 반응을 통하여 탄산칼슘을 형성하고 잔존하는 수산화칼슘의 용해와 탄산칼슘의 재용해를 통해 내부의 수소이온이 안정화될 때까지 반응이 진행된다.⁽¹²⁾ 일반적으로 이산화탄소와 수산화칼슘과의 반응을 통한 pH의 저감 현상을 탄산화로 국한하며, 약산 또는 이산화탄소와 CSH와의 반응을 통하여 pH가 저감하는 현상을 광의의 의미로 중성화라는 용어를 사용한다. 식(1)은 탄산화 반응을, 식(1)을 포함한 식(2)는 중성화 반응을 나타내고 있다.



2.2 환경영향인자에 따른 탄산화 거동의 변화

탄산화 거동은 시멘트내의 성분, 구조물의 노출환경에 따라 변하게 된다. 즉 지하철과 같이 상대적으로 습도가 낮고 이산화탄소의 농도가 높은 환경일 경우는 탄산화 진전은 매우 빠르다고 보고되고 있으며, 수중포화된 구조물 또는 매우 건조한 지역에서는 탄산화 진전은 느리다고 보고되고 있다.⁽¹⁴⁾

내부 및 외부환경에 따른 탄산화 거동변화는 다음과 같이 Table 1과 같이 정리할 수 있다.

이와 같이 동일한 배합이라 하더라도 외부 영향인자의 변화에 따라 탄산화 거동은 큰 차이를 보이게 된다. 본 연구에서는 실태조사자료를 기준으로 하여, 지하구조물(지하철, 터널) 및 지상구조물(교량, 건축구조물)의 탄산화 거동을 분석하였다.

3. 탄산화 실태조사 자료 분석

3.1 코어강도 및 탄산화 실태조사의 개요

Table 1 탄산화의 내부 및 외부환경 영향인자

영향인자	낮은 W/C 및 높은 단위시멘트량	· 많은 수화물 및 낮은 공극률로 인해 탄산화 저항성 개선
	내부 영향인자	골재 특성
혼화재료 (슬래그, 플라이애쉬)		· 포졸란 반응에 의해 수산화칼슘량의 감소 · 이산화탄소 확산계수의 감소를 통해 탄산화 저항성 개선
염화물 이온		· 1가 양이온의 해리를 통하여, 초기 공극수의 pH가 높아지고 이에 따라 탄산화 속도의 증가
외부 영향인자	이산화탄소 농도	· 탄산화되는 주원인이므로 높을수록 탄산화 속도 증가
	온도	· 온도 증가에 따른 활성화 에너지의 증가로 탄산화 속도 증가
	습도	· 너무 낮은 경우, 수분의 부족으로 인해 탄산화 반응이 늦어지며 너무 높은 경우, 이산화탄소의 확산이 감소되어 탄산화속도 감소
	외부의 유입된 염화물	· 탄산화 및 염해가 동시에 진행될 경우, 해리된 1가 이온에 따라 탄산화 속도 증가

Table 2 인용된 탄산화 깊이 측정자료 현황

구조물명	구조물 위치		계
	도심지역	산간지역	
지하철	121		121
터널	19	38	57
교량	172	156	328
건축물	91	27	118

콘크리트 구조물의 탄산화 실태조사를 위하여 터널, 교량, 건축물의 경우는 기존의 연구보고서⁽⁷⁾를 이용하였으며, 지하철 구조물은 진단보고서 및 연구보고서⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁵⁾의 자료를 이용하였다. Table 2는 본 연구에서 인용된 총 624개의 탄산화 깊이 측정자료 현황을 나타내고 있다. 탄산화 속도계수란 탄산화 깊이는 노출기간의 제곱근에 비례한다는 일반적인 이론⁽⁸⁾에 따라 선형회귀분석된 비례상수를 나타내는데, 본 연구에서는 코어강도를 5MPa단위로 평균하였으며, 구분하였으며 구간에 속한 탄산화 속도계수 역시 평균하여 하나의 값으로 대표하였다.

3.2 지하구조물의 실태조사 및 분석

3.2.1 지하철 구조물의 실태조사

지하철 구조물은 해안가, 도심지 및 산간지의 구분이 필요 없으므로 합쳐서 정리한 것인데, Table 3과 Fig.2는 지하철 구조물 탄산화 및 강도분포를 나타내고 있다. 강도값은 5MPa의 단위로 구분하였으며, 10MPa 이하, 35MPa 이상의 강도범위는 제외하였다. 콘크리트 코어강도가 클수록 탄산화속도는 감소하였는데, 수화물량의 증가 및 낮은 공극률로 인한 확산계수의 감소가 원인으로 판단된다.

Table 3 지하철 구조물의 탄산화 및 강도분포

강도(MPa)	탄산화 속도계수 (mm/\sqrt{year})	측정시편 갯수
10~15	4.68	4
15~20	4.16	14
20~25	3.30	34
25~30	3.26	29
30~35	2.09	23

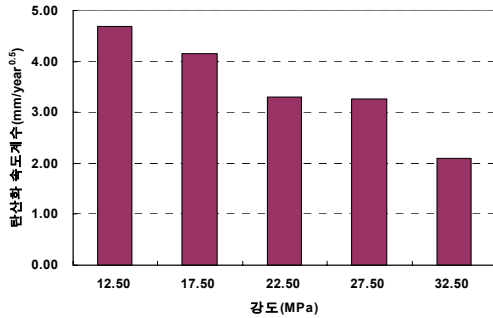


Fig. 2 지하철 구조물의 강도 및 탄산화 분포

3.2.2 터널 구조물의 실태조사

노출환경이 도심지 및 산간지인 터널 구조물에 대하여, 탄산화 깊이 측정자료를 이용하여 탄산화 속도계수를 산출하고 강도분포와 함께 나타내었다. 터널의 경우 탄산화 깊이 측정 자료가 부족하여 강도 25MPa 이상의 콘크리트에서 발생하는 탄산화 속도계수는 도출하지 못하였으나, 강도증가에 따라 탄산화 속도계수는 감소하였으며, 도심지의 터널구조물은 상대적으로 높은 이산화탄소로 인해, 산간지의 터널에 비하여 높은 탄산화 속도계수를 나타내었다. Table 4와 Fig. 3은 터널 구조물의 강도분포 및 탄산화 분포를 노출환경에 따라 나타내었다. 강도분포 20~25MPa의 탄산화속도계수가 15~20MPa의 탄산화 속도계수보다 높게 평가되었는데, 이는 시편수가 작은 것에 기인한 오차이며, 좀 더 많은 시편에 대한 자료가 구축된다면 이러한 경향은 감소되리라 판단된다.

한편 지하구조물(지하철 및 터널 구조물)의 탄산화 거동을 평균 강도 22.5MPa를 기준으로 도시하면 Fig. 4와 같다. 지하구조물 중에 도심지 터널이 가장 탄산화 속도가 빠르고 지하철과 산간지 터널은 비슷하

Table 4 터널 구조물의 탄산화 및 강도분포

지역	강도(MPa)	탄산화 속도계수 (mm/\sqrt{year})	측정 시편 갯수
도심지	10~15	5.14	4
	15~20	4.34	8
	20~25	4.96	7
산간지	10~15	3.80	9
	15~20	3.40	14
	20~25	3.47	6

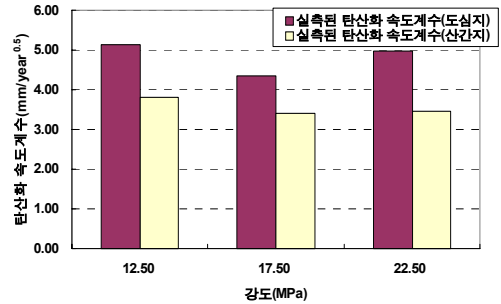


Fig. 3 터널 구조물의 강도 및 탄산화 분포 (도심지 및 산간지)

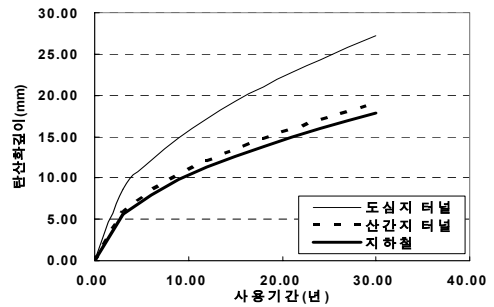


Fig. 4 지하구조물의 탄산화 거동 (평균강도 22.5MPa 기준)

게 나타나는 것을 알 수 있다. 그러나 터널의 측정자료수가 너무 적고, 탄산화 측정 깊이의 분산이 커서 신뢰성이 저하되므로, 보다 신뢰성있는 분석을 위해서는 정확한 배합정보 및 각 입지조건인 기후, CO₂ 농도, 온도, 습도 등이 고려되는 것이 바람직하다.

3.3 지상구조물의 실태조사 및 분석

3.3.1 교량 구조물에 대한 실태조사

Table 5와 Fig. 5는 도심지, 산간지 교량에서 채취한 콘크리트 코어를 이용해 탄산화 깊이와 압축강도를 측정하여 그로부터 도출된 탄산화 속도계수에 대해 정리한 것이다. Fig. 5에서 알 수 있듯이, 강도의 증가에 따라 탄산화 속도는 감소함을 알 수 있었는데, 산간지의 탄산화 속도계수가 12.5MPa를 제외하고는 모두 크게 산정되었다. 온도, 습도, 측정대상면의 상태 등 상세한 노출환경이 고려된다면 명확하게 강도변화에 따른 탄산화 거동의 변화를 판단할 수 있을 것이다.

Table 5 교량 구조물의 탄산화 및 강도분포

지역	강도 (MPa)	탄산화 속도계수 (mm/\sqrt{year})	측정 시편 갯수
도심지	10~15	6.38	6
	15~20	2.95	41
	20~25	2.58	46
	25~30	1.84	42
	30~35	1.26	19
산간지	10~15	3.95	4
	15~20	3.57	23
	20~25	2.73	35
	25~30	2.07	36
	30~35	2.41	33

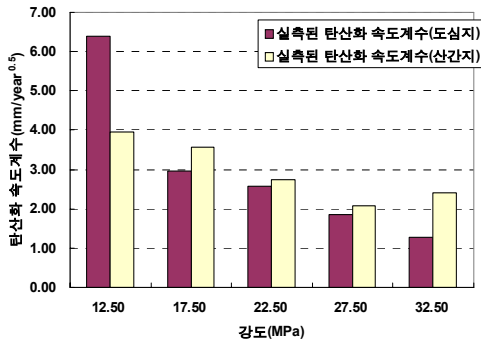


Fig. 5 교량 구조물의 탄산화 거동(도심지 및 산간지)

3.3.2 건축 구조물에 대한 실태조사

Table 6과 Fig. 6은 건축 구조물에 대한 압축강도 및 탄산화 실태조사를 수행한 결과를 나타내고 있다. 전체적인 경향은 강도 증가에 따라 탄산화 깊이의 감소를 나타내고 있다. 평균강도 17.5MPa의 경우, 예상보다 작게 측정되었으나, 이는 실험상의 오차로 판단된다. 한편 실내면에 대한 코어채취를 수행하여 탄산화 깊이를 측정한 결과는 도심지 교량의 탄산화 깊이에 비하여 비교적 높은 탄산화 속도계수를 나타내고 있었다.

4. 탄산화 보정계수 도출 및 보완식의 제안

4.1 보정계수 도출 개요

본 연구에서는 일반적으로 국내에 사용되고 있는岸谷식을 실태조사와 비교하여 적절한 보정계수를 도입

Table 6 교량구조물의 탄산화 깊이 및 강도분포

강도(MPa)	탄산화 속도계수 (mm/\sqrt{year})	측정 시편 갯수
10~15	5.63	4
15~20	3.16	11
20~25	4.34	31
25~30	1.98	38
30~35	1.65	7

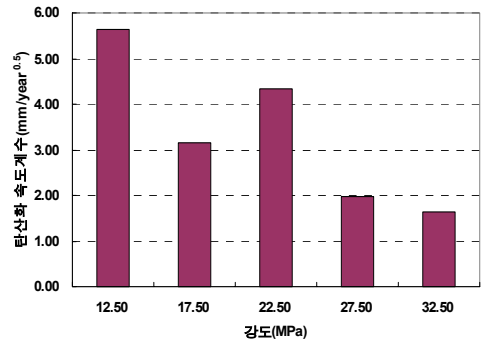


Fig. 6 건축 구조물의 탄산화 거동

하도록 한다. 岸谷⁽⁸⁾는 탄산화 속도식을 물시멘트비 60%를 기준으로 나누어 제시하였는데, W/B가 60%이상일 때와 60%이하일 때 식(3) 및 식(4)와 같다.

$$t = \frac{0.3(1.15+3W/C)}{R^2(W/C-0.25)^2} C^2, \quad W/B > 0.6 \quad (3)$$

$$t = \frac{7.2}{R^2(4.6W/C-1.76)^2} C^2, \quad W/B \leq 0.6 \quad (4)$$

이때 t는 탄산화 도달기간(년), W/C는 물-시멘트비, C는 탄산화깊이(cm), R은 탄산화비율을 나타내며 보통 골재 및 OPC를 사용할 경우는 1.0으로 제시되어 있다.

수집된 코어강도와 기존의 岸谷⁽⁸⁾식을 연결하기 위해서는 강도와 물-시멘트비와의 관계정립이 필요하다. 코어 재령 및 채취각도에 따라 많은 식들이 제시되어 있으나,⁽¹⁵⁾ 채취된 시편의 정보를 명확히 알 수 없었으므로, 본 연구에서는 국내의 지방서⁽⁷⁾에서 제시하는 식을 식(5)와 같이 적용하였다. 재령 및 코어강도를 동시에 물시멘트비의 함수로 환산할 수 있는 식이 개

발된다면 더욱 합리적인 식의 제안이 가능할 것이다.

$$f_{ck} (\text{kgf/cm}^2) = -210 + 215 \cdot C/W \quad (5)$$

여기서, C/W는 시멘트-물비이다.

한편 Fig. 7에서는 보정계수 도출 과정을 나타내고 있다.

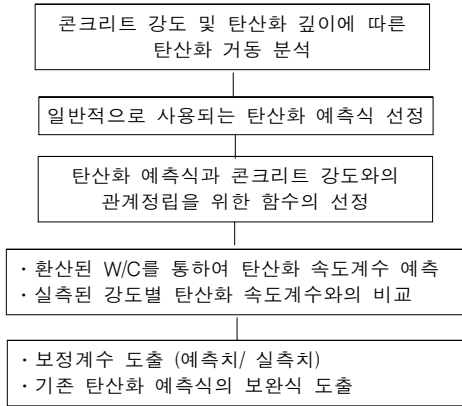


Fig. 7 보정계수 도출 흐름도

4.2 대상 구조물의 보정계수 도출

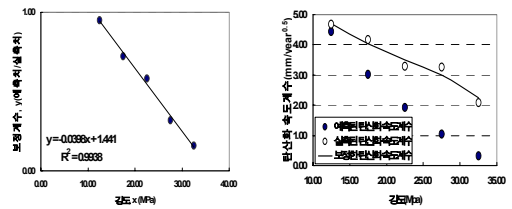
각 대상구조물에 대해서, 환산된 물-시멘트비가 0.4 이하의 값들은 실태조사 결과 많은 표본을 얻을 수 없었으며, 기존예측식에서 오차가 크게 발생하므로 대상에서 제외하였다. Table 7에서는 실태조사결과와 환산된 W/C, 그리고 이 값을 이용하여, 예측된 탄산화 속도계수를 나타내었다.

한편 Fig. 8에서 Fig. 11에서는 지하철, 터널, 도심지 교량, 산간지 교량, 건축물에 대하여 보정계수와 보정 전후의 탄산화 속도식을 각각 나타내고 있다.

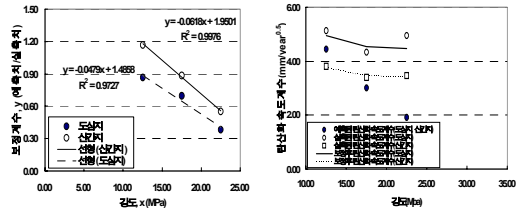
각 구조물에 대한 보정계수(예측값/실측값)에 대하여 선형회귀분석을 강도에 대하여 수행하였으며, 그 보정곡선을 도출하여 함수식으로 나타내었다. Fig. 8~Fig. 11의 그래프에서 (a)에서는 보정곡선의 식을 그래프 내에 표시하였으며, 이 식을 고려하여 보정 전후의 탄산화 속도계수를 비교한 것이 (b)의 그래프이다. 보정후 탄산화 예측식은 비교적 실태결과를 잘 구현하고 있음을 알 수 있다.

Table 7 구조물 실태조사 결과와의 탄산화 속도식의 비교

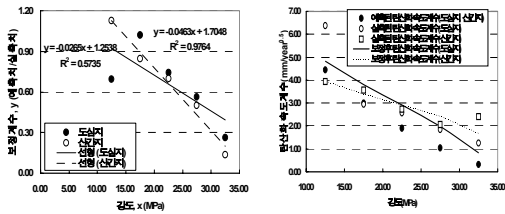
구조물	강도 (MPa)	실측된 탄산화 속도계수	코어채취 강도로 환산한 W/C	예측된 탄산화 속도
지하철	10~15	4.68	0.75	6.37
	15~20	4.16	0.56	3.01
	20~25	3.30	0.49	1.91
	25~30	3.26	0.44	1.04
	30~35	2.09	0.40	0.33
도심지 터널	10~15	5.14	0.75	6.37
	15~20	4.34	0.56	3.01
	20~25	4.96	0.49	1.91
산간지 터널	10~15	3.80	0.75	6.37
	15~20	3.40	0.56	3.01
	20~25	3.47	0.49	1.91
도심지 교량	10~15	6.38	0.75	6.37
	15~20	2.95	0.56	3.01
	20~25	2.58	0.49	1.91
	25~30	1.84	0.44	1.04
	30~35	1.26	0.40	0.33
산간지 교량	10~15	3.95	0.75	6.37
	15~20	3.57	0.56	3.01
	20~25	2.73	0.49	1.91
	25~30	2.07	0.44	1.04
	30~35	2.41	0.40	0.33
건축물	10~15	5.63	0.75	6.37
	15~20	3.16	0.56	3.01
	20~25	4.34	0.49	1.91
	25~30	1.98	0.44	1.04
	30~35	1.65	0.40	0.33



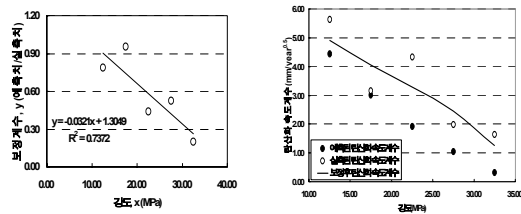
(a) 오차보정곡선 (b) 보정전후의 탄산화 속도계수
Fig. 8 지하철 구조물의 오차보정계수 및 탄산화 속도계수



(a) 오차보정곡선 (b) 보정전후의 탄산화 속도계수
Fig. 9 터널 구조물의 오차보정계수 및 탄산화 속도계수



(a) 오차보정곡선 (b) 보정전후의 탄산화 속도계수
Fig. 10 교량 구조물의 오차보정계수 및 탄산화 속도계수



(a) 오차보정곡선 (b) 보정전후의 탄산화 속도계수
Fig. 11 건축 구조물의 오차보정계수 및 탄산화 속도계수

4.3 보정계수를 고려한 탄산화 예측식의 제안

이상에서 오차에 대한 선형회귀분석을 통하여 노출 환경에 따라 강도별 탄산화 보정계수를 도출하였는데, Table 8과 같이 정리할 수 있다. 하나의 상수로 국한하지 않고 강도의 변화에 따라 고려할 수 있도록 되어 있으므로, 강도별 탄산화 속도계수에 대한 보완이 가능하다. 국내실정에 적합한 식으로 도출된 岸谷식이 물-시멘트비가 60%이상인 경우와 60%이하인 경우로 분류되어 있으므로 원식의 분류를 그대로 사용하여 제안하였다. 한편 실태조사 결과를 이용하기 위한 콘크리트의 강도가 10~35MPa의 범위였으므로 적용대상 콘크리트의 강도 역시, 10~35MPa의 범위로 제한하였다.

5. 결론

국내 탄산화 실태조사를 기준으로 한 탄산화 예측식의 제안을 통하여 도출된 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 광범위한 국내의 탄산화 실태조사자료를 분석하여 노출환경에 따라 지하철 구조물, 터널(도심, 산간

Table 8 보정계수를 고려한 탄산화 예측식

구분	강도에 따른 보정계수 (α)	보정계수를 고려한 탄산화 속도계수 (cm/year ^{0.5})
지하철	$\alpha = -0.0398x + 1.441$	W/C가 0.6이상일 때
터널	도심지 $\alpha = -0.047x + 1.4858$	$\frac{(W/C - 0.25)}{\sqrt{0.3 \cdot (1.15 + 3W/C)}} \cdot \frac{1}{\alpha}$
	산간지 $\alpha = -0.0618x + 1.9501$	
교량	도심지 $\alpha = -0.0265x + 1.2538$	W/C가 0.6이하일 때
	산간지 $\alpha = -0.0463x + 1.7048$	$\frac{(4.6W/C - 1.76)}{\sqrt{7.2}} \cdot \frac{1}{\alpha}$
건축구조물	$\alpha = -0.0321x + 1.3049$	

단, x는 콘크리트 강도(MPa)

지), 교량(도심, 산간지), 건축구조물(살내)에 대한 탄산화 속도계수를 평가하였고 강도를 기준으로 탄산화 속도계수의 변화를 분석하였다.

- 2) 국내 지방서의 물-시멘트비와 강도와의 상관관계를 이용하여 탄산화 실태조사를 위하여 채취된 코어 강도에 해당하는 물-시멘트비를 도출하였으며, 국내실정에 적합한 岸谷⁽⁸⁾식을 대상으로 하여 예측되는 탄산화 속도계수를 도출하였다.
- 3) 탄산화 실측자료와 예측되는 탄산화 속도계수의 오차를 강도에 따라 선형회귀분석하였다. 그 결과 노출환경 및 구조물에 따른 보정계수를 강도에 따른 함수로 나타내었으며, 이를 이용하여 국내 노출환경을 고려한 콘크리트 구조물의 탄산화 예측식을 제안하였다.

참고문헌

1. 건설교통부, "해사 및 일반산골재를 사용한 콘크리트의 품질 및 내구성 향상기술-3세부과제", 한국건설기술연구원, 1999.
2. 건설교통부, "콘크리트 표준시방서-제2장 일반콘크리트", 한국콘크리트학회, 1999.
3. 권성준, 송하원, 박찬규, 변근주, "공극구조를 고려한 탄산화된 콘크리트의 투수 특성에 대한 연구", 대한토목학회 논문집, Vol. 25 No. 3A, 2005, pp. 577-583.
4. 권성준, 송하원, 변근주, 이승훈, "균열을 가진 초기재령 콘크리트의 탄산화 해석", 대한 토목학회 논문집, 제 24권 5-A호, 9월, 2004, pp. 1011-1022.
5. 시설안전기술공단, "서울지하철 1호선-4호선 토목구조물정밀안전진단보고서(탄산화)", 서울시 지하철 공사, 2001.
6. 지하철 건설본부, "지하철 구조물의 내구성 확보방안에 대한 연구", 대한토목학회, 1999.

7. 한국콘크리트 학회, 콘크리트 염해 및 탄산화로 인한 내구성 저하방지대책 연구, 서울특별시, 2001.
8. 和泉意登志, 喜多達夫, 前田熙信, 中性化, 技報堂出版, 1986.
9. 依田影彦, きれつの發生に伴う障害 3 耐久性の低下, 建築雑誌, Vol. 94, No. 1155, 1979, pp. 16~17.
10. 阿部保彦, “ひび割れ幅がコンクリートの中性化深さに及ぼす影響に関する文献調査結果”, 콘크리트構造物のリハビリテーションに 關するシンポジウム論文集, 1998.
11. CEB, Durable Concrete Structures, CEB Design Guide, Thomas Telford, UK, 1992, pp. 3-7.
12. Ishida, T. and Maekawa, K., “Modeling of PH Profile in Pore Water Based on Mass Transport and Chemical Equilibrium Theory”, Concrete Library of JSCE, No. 37, 2001, pp.151-166.
13. Kishitani, K., Durability of Reinforced Concrete, Kibodang Pres., 1963.
14. Metha, P. K. and Monterio, P. J. M., Concrete Durability, Prentice-Hall Inc., 1993, pp. 113-167.
15. Neville, A. M., Properties of Concrete, Pitman Publishing Inc., 1981, pp. 391-395.
16. Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., and Fardis, M. N., “Reaction Engineering Approach to the Problem of Concrete Carbonation,” J. of AICHE, V.35, No. 10, 1989, pp. 1639-1650.
17. Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., and Fardis, M. N., “Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation,” ACI Materials Journal, V. 88, No 4, 1991a, pp. 363-373.
18. Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., and Fardis, M. N., “Physical and Chemical Characteristics Affecting the Durability of Concrete”, ACI Materials Journal, V. 8, No 2, 1991b, pp. 186-196.
19. Song, H. W., Kwon, S. J., Byun, K. J., and Park, C. K.. “Predicting Carbonation in Early-Aged Cracked Concrete”, Cement and Concrete Research, Vol. 36, No. 5, May 2006, pp. 979-989.

(접수일자 : 2006년 10월 9일)