

## 재령 및 하중효과를 고려한 OPC 콘크리트의 탄산화 거동 평가

황상현<sup>1</sup>, 윤용식<sup>2</sup>, 권성준<sup>3\*</sup>

# Carbonation Behavior Evaluation of OPC Concrete Considering Effect of Aging and Loading Conditions

Sang-Hyeon Hwang<sup>1</sup>, Yong-Sik Yoon<sup>2</sup>, Seung-Jun Kwon<sup>3\*</sup>

**Abstract:** The movement of deterioration agents such as a chloride ion, etc. in concrete varies with loading conditions and micro-structure developed by age effect. In this paper, the carbonation behavior by accelerated carbonation test is evaluated considering curing periods(28 days, 91 days, and 365 days) and loading conditions. Carbonation velocity coefficients are obtained referred to KS F 2584. In the control case without loading condition, carbonation velocity coefficient of 91 days decreases to 50.0 % level and that of 365 days decreases to 44.8 % level than that of 28 days curing condition. In 28 curing days, carbonation velocity coefficients changed level of 103.9 ~ 108.8 % in tensile region and 91.9~104.6 % in compressive region by loading conditions. Carbonation velocity coefficients in the 30 % and 60 % tensile loading case at 28 days decreases to 47.3 % and 52.5 % level compared to control case after 1 year. Furthermore, 45.8 % and 44.9 % level of carbonation velocity coefficients are evaluated for 30 % and 60 % compressive loading conditions compared to control case after 1 year. Carbonation velocity coefficient decreases in the 30 % compressive loading level due to effective pore compaction and it increases afterwards due to micro-cracking. In the tensile loading condition, unlike the behavior of compressive region, it linearly increases with increasing loading level.

**Keywords:** Carbonation, Compressive load, Tensile load, Carbonation velocity coefficient

## 1. 서 론

콘크리트는 내화성, 내구성, 재료 수급성, 성형성 등 다양한 공학적 장점으로 인하여 현재까지 가장 많이 쓰이는 건축 및 토목재료이다. 1990년 대 이후 도심지에서는 산성비 및 고농도의 이산화탄소로 인해 지하철 구조, 교량 등의 주요 사회기반시설들의 탄산화가 촉진되어 중요한 사회적 문제로 대두되고 있는 실정이다(Oh, 2002; Kwon et al., 2007). 철근 콘크리트 구조물이 이러한 외부 환경에 의한 여러 유해인자들에 노출될 경우 열화 현상을 나타내게 되는데, 그 중 지구온난화의 주원인인 이산화탄소가 콘크리트 내부로 침투하게 되면 탄산화 반응에 의해 철근부식 발생이 용이해지고 이로 인해 균열의 진전, 피복 콘크리트의 박락이 발생하며, 최종적으로 구조적 안전성에 문제가 된다.

1990년대 이후부터 콘크리트내의 탄산화 거동을 평가하기 위해 탄산화 속도계수를 기반으로 많은 연구가 진행되고 있

다. 탄산화 거동 연구는 실제 환경을 모사하는 경우 장기간의 실험시간을 요하지만 최근 들어 공극률, 수화도, 수산화칼슘 생성, 탄산화 반응률 등 초기재령 거동 모델링과 물리-화학적 연성모델을 이용하여 탄산화 거동을 평가하려는 연구들이 진행되고 있다(Song et al., 2006; Izumi et al., 1986; Song and Kwon, 2007; Papadakis et al., 1991(a); Papadakis et al., 1991(b); Kwon et al., 2014).

시멘트의 수화생성물중 20 % 이상 체적을 차지하는 수산화칼슘(CaOH<sub>2</sub>)은 비교적 공극수에 잘 용해되며, pH 12 ~ 13의 강알칼리를 유지시키는 기본 조성물질이다. 이로 인해 일반적으로 콘크리트 내부에 존재하는 철근에 부식이 발생하지만 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)가 콘크리트 내부로 침투하여 확산될 경우, 수산화칼슘(CaOH<sub>2</sub>)과 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)가 반응하여 탄산칼슘(CaCO<sub>3</sub>)과 물(H<sub>2</sub>O)이 생성되고 내부 공극수의 pH가 10.5 이하로 낮아져 이로 인해 철근에 부식을 유발하게 된다(Izumi et al., 1986). 탄산화 진행 평가 및 제어를 위해 탄산화에 따른 조직 변화에 대한 평가(Song et al., 2006), 혼화재를 활용한 콘크리트의 탄산화 저항성 해석(Yoo and Kwon, 2016), 유지류 도포로 인한 탄산화 저항성(Baek et al., 2017) 등 많은 연구가 진행되고 있다. 또한 최근 들어 하중영향을 고려한 연구가 많이 수행되고 있다.

<sup>1</sup>정회원, 한남대학교 건설시스템 공학과, 석사과정

<sup>2</sup>정회원, 한남대학교 건설시스템 공학과, 박사과정

<sup>3</sup>정회원, 한남대학교 건설시스템 공학과, 부교수

\*Corresponding author: jjuni98@hannam.ac.kr

Department of Civil Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea

• 본 논문에 대한 토의를 2019년 2월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

콘크리트 구조물의 경우 시공 상의 이유 및 부등침하, 온도 변화 및 작용 하중에 따른 다양한 응력에 노출되어 있으며, 구속 정도에 따라 구조물에 영향을 받는다. 콘크리트 구조체는 다공성 매체(Porous media)이므로 외부의 응력은 물질이동 및 확산에 영향을 주게 된다(Yoon, 2007).

탄산화의 주된 침투인자인 이산화탄소의 침투는 압축 및 인장 하중조건에 따라 변화할 수 있다. 질소 및 유체의 투기 및 투수특성에 대해서, 유효공극이 압밀에 의해 감소하기 때문이며 하중이 어느 수준을 넘을 경우 미세균열이 공극의 감소보다 더 영향을 많이 받아 수분 침투 및 기체의 확산이 증가하는 것으로 알려져 있다. 또한 인장과 압축응력 특성에 따라 이러한 이동기구(mechanism)는 변화하게 된다(Oh and Kwon, 2017; Honseini et al., 2009; Banthia et al., 2005).

투수 및 염화물 확산성에 대해서는 응력 및 재령에 변화를 정량적으로 분석한 연구가 있으나(Choi et al., 2015; Yoo and Kwon, 2016), 탄산화 거동에 대해서는 매우 빈약한 수준으로 연구가 진행 중이다. 따라서, 본 연구에서는 OPC(Ordinary Portland Cement) 배합의 콘크리트를 대상으로 재령 28일, 91일, 365일 수중양생을 수행하였으며, 인장 및 압축 하중을 인가하였다. 이후 특수 제작된 프레임을 이용하여 하중을 유지하였으며, 촉진 탄산화 시험을 수행하여 하중 및 재령이 탄산화 속도에 미치는 영향을 평가하였다.

## 2. 실험계획

### 2.1 콘크리트 배합 및 특성

본 연구에 사용된 콘크리트 배합은 설계기준강도 24 MPa, 슬럼프 180 mm, 공기량 4.5 %, 물-시멘트 비(W/C: Water-Cement ratio) 60 %를 적용하였다. 시멘트는 국내 S사의 제품으로 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, Table 1 및 Table 2에서는 사용된 배합표와 사용된 골재의 물리적 특성을 나타내고 있다.

Table 1 Mix proportions for OPC

Slump (mm)	S/a (mm)	Air (%)	W/C (%)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )			
				W	C	S	G
180	41.4	4.5	60.0	180	300	732	1056

Table 2 Physical properties of sand and coarse aggregate

Items Types	G <sub>max</sub> (mm)	Specific gravity (g/cm <sup>3</sup> )	Absorption	F. M.*
Sand	-	2.60	1.00	2.70
Gravel	25	2.62	0.78	6.78

\* F. M. : Fineness Modulus

### 2.2 콘크리트 시편제작

압축응력을 인가하기 위해 100x100x400 mm 빔 몰드를 활용하였으며, 인장응력을 인가하기 위해 Ø100x200 mm 실린더 몰드를 활용하였다. 콘크리트의 촉진 탄산화 실험을 위해 두께 40 mm로 절단하였으며, 이후 재령 1년까지 수중양생을 실시하였다. Fig. 1과 Fig. 2는 압축 및 인장재하를 위한 시편 타설 전경과 압축 및 인장재하 평가를 위한 디스크시편을 나타내었다.



Fig. 1 Photograph of specimen making



(a) A compressive load specimen (b) A tensile load specimen

Fig. 2 Concrete specimens for compressive and tensile load

### 2.3 하중재하 실험방법

하중재하영역에서의 콘크리트 탄산화 거동 평가실험을 위해 하중을 재하 할 수 있는 별도의 강제 프레임을 제작하였고 UTM(Universal Testing Machine)을 이용하여 하중을 인가하였다. 하중재하 여건상 파괴하중의 30 %, 60 %의 조건을 정확히 재하 하는 것은 어려운 일이므로 하중-변형률 그래프를 이용하여 재하 하였다. 하중을 고정할 때, 콘크리트 및 프레임의 탄성으로 인해 하중의 손실이 발생할 수 있기 때문에 기준이 되는 시편에 변형률게이지를 부착하여 그래프를 작성한 뒤 파괴하중의 30 %, 60 %에서 ±5 %에 해당하는 변형률 기준으로 재하 하였다. 파괴하중 대비 도입하중에 대한 비율은 식 (1)과 같다.

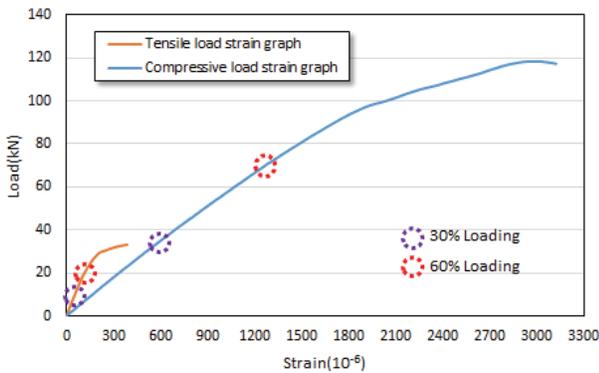
$$R = \frac{P_i}{P_c} \times 100 \quad (1)$$

여기서, R은 압축 및 인장력에 대한 하중비(%), P<sub>i</sub>는 재하

된 하중(kN),  $P_c$ 는 압축 및 인장력에 대한 파괴하중(kN)을 나타낸다. Fig. 3과 Fig. 4에는 하중재하 전경과 하중-변형률 그래프를 나타내었다. 또한 프레임의 릴렉세이션에 따른 하중의 손실을 관측하기 위해 프레임에 별도의 게이지를 부착하여 변형률을 관측한 결과 변형률의 변화가 없어 릴렉세이션에 따른 하중의 손실은 발생하지 않았으며, 이는 기존의 연구에서도 같은 경향을 나타내었다(Yoo and Kwon, 2016).



(a) Compressive load (b) Tensile load  
**Fig. 3** Photograph of load to concrete



**Fig. 4** Load-Strain curve graphs

## 2.4 탄산화 속도계수 평가방법

재령 28일, 91일, 365일 시편을 대상으로 콘크리트의 촉진 탄산화 실험(KS F 2584)을 실시하였다. 시편의 균등한 탄산화 침투조건을 위해 상대습도 (60±5%), 온도(20±2 °C)의 항온항습실에 재령 8주까지 존치하였으며, 촉진 탄산화 시험장비를 통해 조건에 맞추어 촉진 탄산화 평가를 4주 및 8주에 평가하였다. Table 3에는 콘크리트의 촉진 탄산화 실험 조건을 나타내었는데, 이산화탄소의 일방향 침투를 위해 에폭시를 옆면과 밑면에 도포하여 침투할 수 있도록 하였다.

**Table 3** Accelerated carbonation test conditions

Temperature	Relative Humidity	CO <sub>2</sub>
20 ± 2 °C	60 ± 5 %	5 ± 0.2 %

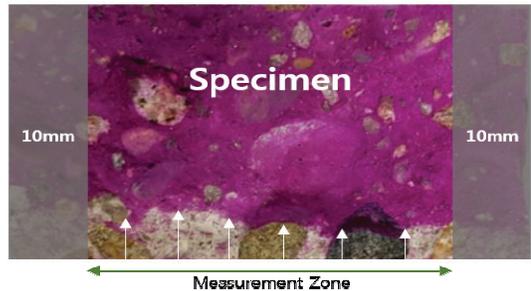
촉진 탄산화 실험 완료 후 시편을 할렬하고 할렬된 콘크리트면에 페놀프탈레인 용액(KS M 8238)을 분무하였다. 콘크리트 탄산화 깊이 측정방법(KS F 2596)을 통해 콘크리트 시편 양측 가장자리 10 mm를 제외하고 5 mm 간격으로 침투 깊이를 평균 측정하였다. 탄산화 깊이를 이용하여 탄산화 속도계수를 식(2)를 통해 회귀분석을 하여 도출하였다. 탄산화 깊이는 시간의 제곱근에 비례하여 증가하는 것으로 많은 문헌에서 이론적, 실험적으로 증명되었다(Papadakis et al., 1991(a); Papadakis et al., 1991(b); Izumi et al., 1986). Fig. 5와 Fig. 6은 촉진 탄산화 시험장비와 탄산화 침투 깊이 측정영역을 나타내었다.

$$D = A \times \sqrt{t} \quad (2)$$

여기서, D는 탄산화 깊이(mm), A는 탄산화 속도계수(mm/week<sup>0.5</sup>), t는 노출시간(week)를 나타낸다.



**Fig. 5** Accelerated carbonation testing equipment



**Fig. 6** Carbonation depth measurement area

## 3. 재령영향을 고려한 탄산화 속도계수 실험결과 및 분석

### 3.1 압축강도 평가

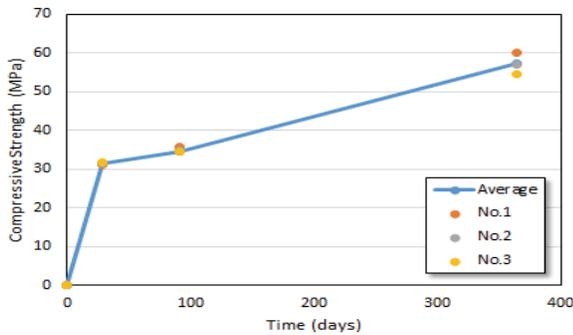
압축강도는 KS F 2405에 준하여 평가하였다. 재령 28일, 91일 365일 압축강도 결과를 Table 4와 Fig. 7에 나타냈으며, 실험을 3회씩 실시하였다.

압축강도 평가 결과 재령이 증가함에 따라 강도가 증가하는 경향을 보였다. 재령 91일에는 재령 28일 대비 10.0%의 강

도가 증가한 반면 재령 365일 압축강도는 81.80 % 가 증가하였다. 이는 재령 365일 수중 양생한 콘크리트는 지속적인 수화반응으로 인해 공극이 감소했기 때문이다.

**Table 4** Result of compressive strength

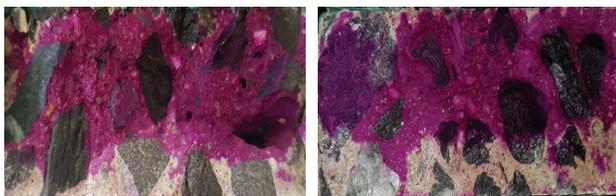
Case	Strength(MPa)				
	No.1	No.2	No.3	Average	
Compressive strength	28days	31.16	31.45	31.87	31.49
	91days	33.49	35.65	34.78	34.64
	365days	60.13	57.08	54.55	57.25



**Fig. 7** Compressive strength

### 3.2 하중을 고려하지 않은 경우의 탄산화 거동

본 연구에서는 재령 365일의 하중을 고려하지 않은 경우의 탄산화 침투가 된 시편의 사진은 Fig. 8에 나타내었다. 탄산화 침투깊이를 이용하여 위의 식 (2)를 통해 회귀분석하여 탄산화 속도계수를 도출하였다. 재령 28일, 91일, 365일 탄산화 속도계수를 Table 5와 Fig. 9에 나타내었다.

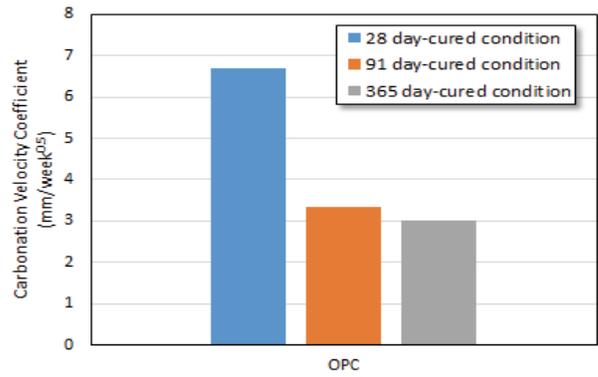


(a) OPC 4 weeks (b) OPC 8 weeks

**Fig. 8** Photograph for depth of penetration

**Table 5** Depth and velocity coefficient of carbonation

Case	Depth(mm)		Carbonation velocity coefficient (mm/week <sup>0.5</sup> )
	4 weeks	8 weeks	
28days	14.63	18.06	6.70
91days	7.35	9.02	3.35
365days	6.24	8.33	3.00



**Fig. 9** Carbonation velocity coefficient

본 연구 실험결과 재령 365일 OPC 콘크리트에서 탄산화 속도계수는 3.00 mm/week<sup>0.5</sup> 로 평가되었으며, 이는 재령 28일 대비 55.22 % 낮게 평가 되었고 재령 91일 대비 10.45 % 낮게 평가되었다. 재령 91일과 비교한 경우 비슷한 탄산화 속도계수를 나타내었다. 재령이 증가 할수록 탄산화 속도계수는 감소하며, 재령 91일 이후 수화반응이 감소하면서 재령 365일과의 탄산화 속도계수의 감소율이 줄어들었다.

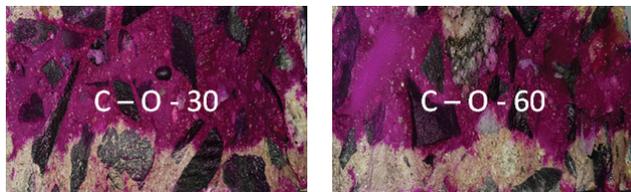
### 3.3 하중을 고려한 경우의 탄산화 거동

#### 3.3.1 압축영역에서 하중에 따른 탄산화 거동

압축재하영역을 고려하여 파괴하중의 30 %, 60 %의 탄산화 속도계수를 평가하기 위해 콘크리트의 축진 탄산화 실험을 실행하였다. 재령 365일 탄산화 침투깊이 사진을 Fig. 10에 나타내었으며, 재령 28일, 91일, 365일의 압축재하영역 30 %, 60 % 탄산화 속도계수를 Table 6과 Fig. 11에 나타내었다.



(a) Depth of carbonation for 4 weeks

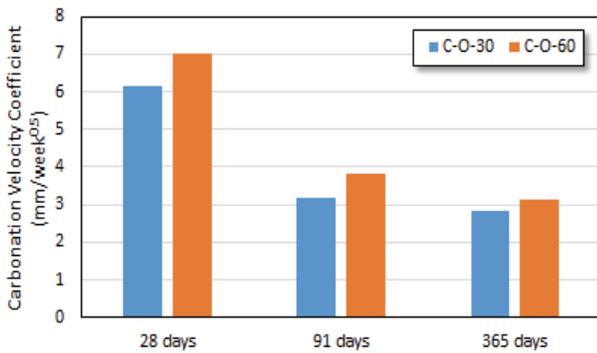


(b) Depth of carbonation for 8 weeks

**Fig. 10** Depth of carbonation in compressive loading conditions (C : Compressive load)

**Table 6** Depth and velocity coefficient of carbonation (Compressive load)

Case		Depth(mm)		Carbonation velocity coefficient (mm/week <sup>0.5</sup> )
		4 weeks	8 weeks	
		Compressive load (30 %)	28days	
	91days	6.62	8.78	3.17
	365days	5.51	8.06	2.82
Compressive load (60 %)	28days	15.60	18.73	7.01
	91days	8.73	10.11	3.84
	365days	6.90	8.49	3.15



**Fig. 11** Carbonation velocity coefficient(Compressive load)

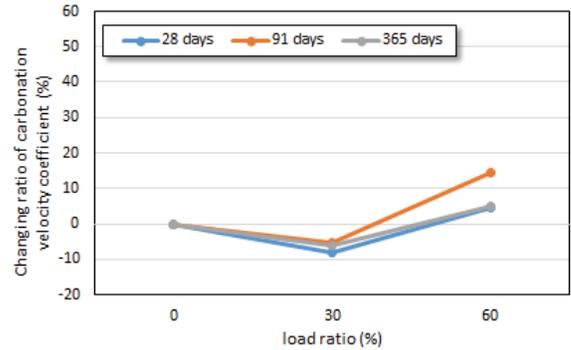
재령 28일, 91일, 365일 압축재하영역에 대한 탄산화 깊이 결과 재령이 증가함에 따라 지속적인 양생의 영향으로 탄산화 깊이가 감소하는 경향을 보였다. 촉진 탄산화 노출 4주보다는 8주에서의 탄산화 깊이가 15.81% ~ 46.28% 더 크게 나타났다. 또한 재령 365일 탄산화 속도계수는 재령 28일, 91일과 마찬가지로 압축재하영역 60%일 때가 30%보다 높게 나타났다.

재령 365일 압축재하영역 30%와 하중을 고려하지 않은 경우 대비 탄산화 속도계수가 6.00% 감소하였고 압축재하영역 30%에서 재령별 탄산화 속도계수가 감소하는 경향을 보였다. 이는 하중 재하에 따른 미세 공극압밀의 영향으로 투기성 및 투수성 시험 결과와 비슷한 경향을 나타낸다(Kermani, 1991; Choi at al., 2015; Kim at al., 2009). 재령 365일 압축재하영역 60%와 하중을 고려하지 않은 경우 대비 탄산화 속도계수가 5.00%가 증가하였다. 이는 압축하중이 일정 수준이상으로 증가하게 되면 압축력에 의한 유효공극의 감소보다는 균열의 영향력이 더 크다고 판단되었다.

Table 5에 나타난 하중을 고려하지 않은 경우의 탄산화 재령별 거동을 기준으로 압축재하시의 탄산화 속도계수 변화비를 Table 7과 Fig. 12에 나타내었다.

**Table 7** Rate of change in carbonation Velocity coefficient

Case	Carbonation velocity coefficient (mm/week <sup>0.5</sup> )		
	Compressive 0 %	Compressive 30 %	Compressive 60 %
	28days	6.70 (100 %)	6.16 (91.94 %)
91days	3.35 (100 %)	3.17 (94.63 %)	3.84 (114.63 %)
365days	3.00 (100 %)	2.82 (94.00 %)	3.15 (105.00 %)

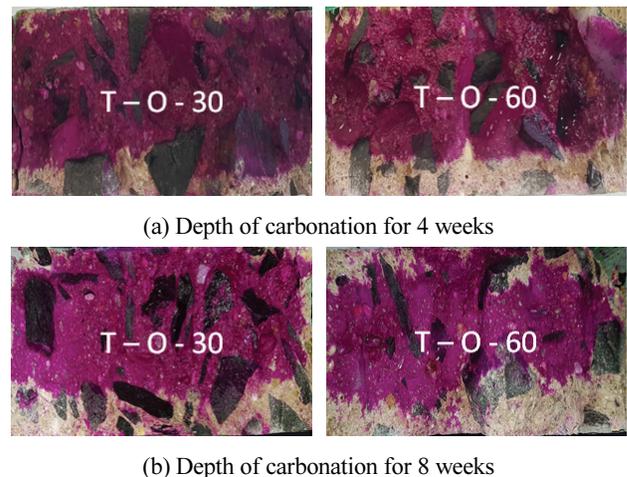


**Fig. 12** Ratio of change graph of velocity coefficient

재령 28일, 91일, 365일 압축재하영역 30%를 비교 평가한 결과 30%에서는 하중을 고려하지 않은 경우보다 -8.06% ~ -5.37%의 탄산화 속도계수 감소율이 나타났으며, 60%에서는 4.63% ~ 14.63%의 탄산화 속도계수 증가율이 나타났다.

### 3.3.2 인장영역에서 하중에 따른 탄산화 거동

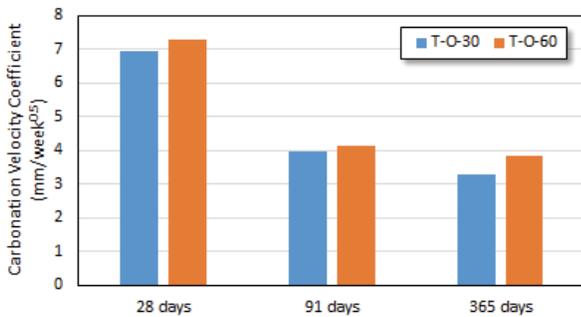
인장재하영역을 고려하여 파괴하중의 30%, 60%의 탄산화 속도계수를 평가하기 위해 콘크리트의 촉진 탄산화 실험을 수행하였으며, 재령 365일 탄산화 침투깊이 사진을 Fig. 13에 나타내었다. 재령 28일, 91일, 365일의 인장재하영역 30%, 60% 탄산화속도계수를 Table 8과 Fig. 14에 나타내었다.



**Fig. 13** Depth of carbonation in tensile loading conditions (T : Tensile load)

**Table 8** Depth and velocity coefficient of carbonation (Tensile load)

Case		Depth(mm)		Carbonation velocity coefficient (mm/week <sup>0.5</sup> )
		4 weeks	8 weeks	
Tensile load (30 %)	28days	15.62	18.49	6.96
	91days	9.24	10.17	3.94
	365days	6.90	9.07	3.29
Tensile load (60 %)	28days	16.22	19.45	7.29
	91days	9.45	10.81	4.12
	365days	8.33	10.35	3.83



**Fig. 14** Carbonation velocity coefficient(Tensile load)

재령 28일, 91일, 365일 인장재하영역에 대한 탄산화 깊이 측정 결과 압축재하영역과 동일하게 재령이 증가함에 따라 탄산화 깊이가 감소하는 경향을 보였고 인장재하영역도 촉진 탄산화 노출 4주보다는 8주에서 탄산화 깊이가 10.06 % ~ 31.45 % 더 크게 나타났다. 또한 탄산화 속도계수도 압축재하영역과 동일하게 재령별 감소하는 경향을 보였다.

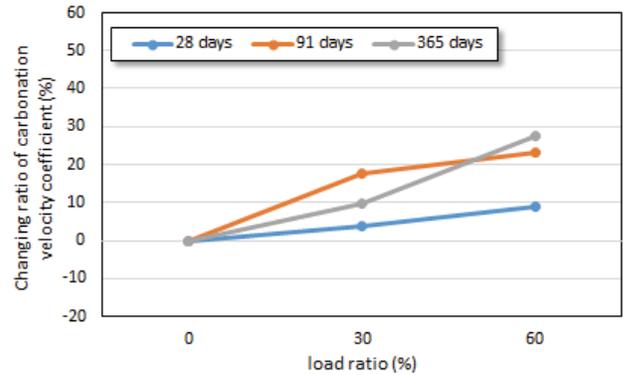
인장재하영역에서는 압축재하영역과는 반대로 인장재하영역 30 %에서 탄산화 속도계수가 증가하는 경향을 보였으며 재령 365일 인장재하영역 30 %와 하중을 고려하지 않은 경우 대비 탄산화 속도계수가 9.67 % 증가하였다. 이는 콘크리트가 인장력에 취약한 재료이기 때문에 비교적 적은크기의 인장력에 의해 발생한 미세균열이 주원인이라고 판단되었다. 재령 365일 인장재하영역 60 %와 하중을 고려하지 않은 경우 대비 탄산화 속도계수가 27.67 %가 증가하였다.

Table 5에 나타난 하중을 고려하지 않은 경우의 탄산화 재령별 거동을 기준으로 인장재하시의 탄산화 속도계수 변화비를 Table 9와 Fig. 15에 나타내었다.

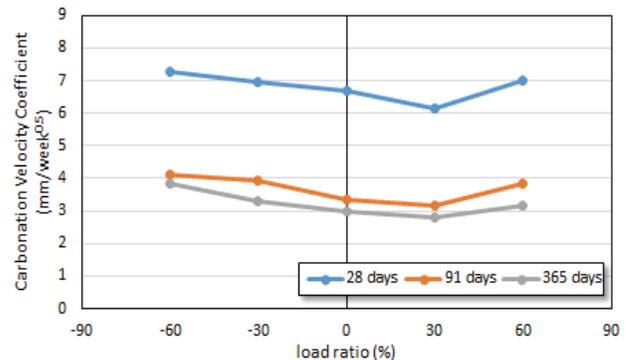
재령 28일, 91일, 365일 인장재하영역 30 %를 비교 평가한 결과 30 %에서는 하중을 고려하지 않은 경우보다 3.88 % ~ 17.61 %의 탄산화 속도계수 증가율이 나타났다. 또한, 60 %에서는 8.81 % ~ 27.67 %의 탄산화 속도계수 증가율이 나타났다. Fig. 16은 재령 28일, 91일, 365일 탄산화 속도계수의 결과를 재하영역에 따라 분류하여 나타내었다.

**Table 9** Rate of change in carbonation velocity coefficient

Case	Carbonation velocity coefficient (mm/week <sup>0.5</sup> )		
	Tensile 0 %	Tensile 30 %	Tensile 60 %
28days	6.70 (100 %)	6.96 (103.88 %)	7.29 (108.81 %)
91days	3.35 (100 %)	3.94 (117.61 %)	4.12 (122.99 %)
365days	3.00 (100 %)	3.29 (109.67 %)	3.83 (127.67 %)



**Fig. 15** Rate of change graph of velocity coefficient (Ratio)



**Fig. 16** Carbonation velocity coefficient considering loading condition and age

하중을 고려하지 않은 경우와 압축재하영역 30 %를 비교 해 보았을 때, 재령 28일에서는 -8.06 %의 감소율을, 재령 91 일에서는 -5.37 %의 감소율을, 재령 365일에서는 -6.00 %의 감소율이 나타났다. 이는 미세 공극압밀의 영향 때문이며, 재령 28일, 91일, 365일 모두 압축재하영역 30 %에서는 탄산화 속도계수가 감소하였고 60 %에서는 탄산화 속도계수가 증가 하였다.

인장재하영역의 경우 하중조건이 증가 할수록 최대 27.67 %가 증가하였으며 재령이 증가 할수록 탄산화 속도계수가 하중조건에 상관없이 감소하는 경향을 보였다. 압축재하영역에서는 비선형적으로 감소이후 증가하는 경향을, 인장재하영역은 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 재령 28일, 91일, 365일 OPC콘크리트의 압축·인장파괴하중의 30%, 60%의 하중조건을 고려하여 촉진탄산화 실험을 실시하였으며, 재령효과와 하중효과가 탄산화 거동에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 본 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 하중을 재하하지 않은 경우의 탄산화 속도계수의 경우, 재령 365일에서 탄산화 속도계수는  $3.00 \text{ mm/week}^{0.5}$ 로 평가되었다. 동일조건에서의 재령 28일을 기준으로 재령 91일에는 50.00%, 재령 365일에는 55.22% 감소율이 평가되었다. 이는 장기재령에 따라 지속적인 수화반응으로 인해 공극률에 따른 이산화탄소의 확산성 저하와 탄산화 저항 수화물(Carbonatable Material)의 지속적인 반응이라고 할 수 있다.
- 2) 압축재하영역 30%에서는 재령 28일, 91일, 365일 모두 하중 재하에 따른 미세 공극압밀의 영향으로 탄산화 속도계수가  $-8.06\% \sim -5.37\%$  감소하는 경향을 나타냈다. 또한 압축재하영역 60%에서의 탄산화 속도계수는 재령 28일을 기준으로 재령 91일에서는 45.22%, 재령 365일에서 55.06% 감소율이 나타났다. 이 또한 장기재령으로 인하여 지속적인 수화반응으로 공극이 감소되기 때문이다. 인장재하영역 30%에서는 압축재하영역 30%와는 다르게 탄산화 속도계수가 지속적으로 증가하는 경향을 나타냈는데, 이는 인장에 취약하므로 미세균열의 증가가 주된 원인으로 판단된다. 압축재하영역에서는 탄산화 속도계수가 30% 수준에서는 동등이하의 값을, 이후 60% 수준에서는 모두 증가하는 경향을 나타내었다. 인장재하영역에서는 재령 28일, 91일, 365일 하중조건에 상관없이 탄산화 속도계수가 선형적으로 증가하는 경향을 나타냈다.
- 3) 탄산화 거동의 해석 및 평가에서는 하중의 영향이 고려되지 않지만, 재하응력상태를 고려한 탄산화 해석이 수행될 경우, 좀 더 합리적인 내구수명을 평가할 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 정부의 재원으로 한국연구재단 기본연구지원사업(후속연구지원) 지원을 받아 수행되었음(NRF-2016R1D1A1A09919224).

## References

1. Baek, C., Kim, T. W., Lee, J. J., Lee, D. Y., Han, M. C., and Han,

- C. G. (2017), Effect of Applying Oil on Carbonation Resistance of Normal Strength Concrete, *Journal of Architectural Institute of Korea*, 37(2), 783-784.
2. Banthia, N., Biparva, A., and Mindess, S. (2005), Permeability of concrete under stress, *Cement and Concrete Research*, 35(9), 1651-1655.
3. Broomfield, J. P. (1997), Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, *Investigation and Repair*, E&FN, 1-15.
4. Choi, S. J., Kang, S. P., Kim, S. C., and Kwon, S. J. (2015), Analysis Technique on Water Permeability in Concrete with Cold Joint considering Micro Pore Structure and Mineral Admixture, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015(610428), 1-10.
5. Choi, Y. J., Lee, K. M., Kim, J. H., Jung, S. H., and Lee, M. K. (2006), Applicability Study of the Rapid Carbonation Test Equipment for Concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 18(2), 601-604.
6. Honseini, M. Bindiganavile, V., and Banthia, N. (2009), The effect of mechanical stress on permeability of concrete: a review, *Cement and Concrete Composites*, 31(4), 213-220.
7. Izumi, I., Kita, D., and Maeda, H. (1986), Carbonation, *Kibodang Publication*, Japan, 35-88.
8. Kermani, A. (1991), Permeability of stressed concrete, *Building Research and Information*, 19(6), 360-366.
9. Kim, D. H., Lim, N. G., and Horiguchi, T. (2009), Effect of Compressive Loading on the Chloride Penetration of Concrete Mixed with 23. Granulated Blast Furnace Slag, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 9(6), 71-78.
10. Kim, J. O., Oh, K. C., and Park, S. B. (2008), A Study on Carbonation Velocity for Concrete Structures, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 12(2), 163-170.
11. Kim, S.S., Lee, J.B., Lee, J.H., and Eom, S.H. (2013), A study on carbonation resistance of NPP concrete utilizing ground granulated blast furnace slag, *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, 2013(5) 97-98.
12. KS F 2584 (2015), Standard Test Method for Accelerated Carbonation of Concrete, *Korean Agency for Technology and Standards*.
13. Kwon, S. J., Park, S. S., Nam, S. H., and Cho, H. J. (2007), A Study on Survey of Carbonation for Sound, Cracked, and Joint Concrete in RC Column in Metropolitan City, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 11(3), 116-122.
14. Kwon, S. J., Song, H. W., Byun, K. J., and Lee, S. H. (2004), Analysis of Carbonation Behavior of Cracked Concrete in Early - Age, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 2004(9), 1011-1022.
15. Kwon, S.J., Lee, B.J., and Kim, Y.Y. (2014), Concrete mix design for service life of RC structures under carbonation using genetic algorithm, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014(653753), 1-13.
16. Lee, H. M., and Lee, Han. S. (2013), Study on the carbonation prediction of concrete using portland blast furnace cement

- hydration model, *Journal of National Digital Science Library*, 2013(7), 64-65.
17. Lee, H. S., Yang, J. K., and Kwon, S. J. (2015), Evaluation of Changes in Composition of Cement Mortar under Carbonation, *Center for Built Environment*, 10(2), 205-212.
  18. Mun, J. M., and Kwon, S. J. (2016), Evaluation of Chloride Diffusion Coefficients in Cold Joint Concrete Considering Tensile and Compressive Regions, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 28(4), 481-488.
  19. Oh, B. H. (2002), Durability Design for Carbonation in Concrete Structures, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 2002(5), 30-60.
  20. Oh, K. S., and Kwon, S. J. (2017), Chloride Diffusion Coefficient Evaluation in 1 Year-Cured OPC Concrete under Loading Conditions and Cold Joint, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 21(5), 21-29.
  21. Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., and Fardis, M. N. (1991a), Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation, *ACI Materials Journal*, 88(4), 363-373.
  22. Papadakis, V.G., Vayenas, C.G., and Fardis, M.N. (1991b), Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete, *ACI Materials Journal*, 88(2), 186-196.
  23. Saeki, T., Ohga, H., and Nagataki, S. (1990), Change in microstructure of concrete due to carbonation, *Concrete Library of JSCE*, 420(13), 33-42.
  24. Song, H. W., Kwon, S. J., Byun, K. J., and Park, C. K. (2006), Predicting carbonation in early-aged cracked concrete, *Cement and Concrete Research*, 36(5), 979-989.
  25. Song, H.W., and Kwon, S.J. (2007), Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure, *Cement and Concrete Research*, 37(6), 909-915.
  26. Yoo, S. W., and Kwon, S. J. (2016), Effects of cold joint and loading conditions on chloride diffusion in concrete containing GGBFS, *Construction and Building Materials*, 115(15), 247-255.
  27. Yoon, I. S. (2007), Effect of Micro-Cracks on Chloride Ions Penetration of Concrete II: Examination of Critical Crack Width, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 19(6), 707-715.

Received : 09/28/2018

Revised : 11/21/2018

Accepted : 11/28/2018

---

**요 지** : 콘크리트에서 염소 이온과 같은 열화물질의 이동은 응력상태 및 재령의 증가에 기인한 공극구조에 따라 변화한다. 본 연구에서는 재령 28일, 91일, 그리고 365일 양생된 OPC 콘크리트의 압축 및 인장 하중조건을 고려하여 촉진탄산화 실험을 실시하였으며, 탄산화 거동을 평가하였다. KS F 2584에 의거하여 탄산화 속도계수를 도출하였는데, 하중을 고려하지 않을 경우 탄산화 속도계수는 재령 28일 대비 재령 91일은 50.0 % 수준으로, 재령 365일에서는 44.8 % 수준으로 감소하였다. 28일 재령 시, 하중의 영향으로 인해 인장재하영역에서는 103.9 ~ 108.8 % 수준으로 압축재하영역에서는 91.9 ~ 104.6 % 수준으로 변화하였다. 재령이 증가함에 따라 탄산화 속도는 크게 감소하였는데, 30 % 인장재하영역에서는 탄산화 속도계수가 1년 경과시 47.3 % 수준으로, 60 % 인장재하영역에서는 52.5 % 수준으로 감소하였으며 30 % 압축재하영역에서는 45.8 %로, 60 % 압축재하영역에서는 44.9 % 수준으로 감소하였다. 압축재하영역 30 %에서는 공극압밀로 인해 탄산화 속도계수가 감소하였으나 하중의 증가에 따라 압축재하영역 60 %에서는 미세균열의 영향으로 탄산화 속도계수가 증가하였다. 또한 인장재하영역은 압축부와는 다르게 탄산화 속도계수가 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다.

**핵심용어** : 탄산화, 압축응력, 인장응력, 탄산화 속도계수

---