

이산화탄소 흡수량 정량분석을 통한 콘크리트의 친환경성능에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Sustainable Performance of Concrete through the Quantitative Analysis of Carbon Dioxide Absorption

최진영* 이한승** 경제운*** 이상현**** 양내원*****
Choi, Jin Young Lee, Han Seung Kyung, Je Woon Lee Sang Hyeon Yang, Nae Won

Abstract

From the construction material the cement and the concrete which will reach to 90% are used to construction. But the cement occurrence (from the whole industry 4.4% of carbon dioxide exhaust quantity) makes the carbon dioxide of manufacture hour and anti- the recognition which is an environment industry. The cement absorbs the carbon dioxide during life period of the life time. It calls carbonation. In this study in order to evaluate the carbon dioxide absorption of the cement test produced the mortar specimens which it follows in the W/C. And carbonatable material of mortar specimens (calcium hydroxide) the quantity it measured, reference study it led and absorption of carbon dioxide quantity it produced. Finally two result comparisons leads and it is a fundamental study which does the test evaluation possibility and a propriety investigation of carbon dioxide absorption quantity in objective.

키워드 : 탄산화, 물시멘트비, 수산화칼슘, 친환경성능

Keywords : carbonation, water cement ratio, calcium hydroxide, Sustainable performance

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

건설산업에서 주요 구조재료로써 사용되는 콘크리트는 시멘트를 주원료로 하여 제조되며, 건설산업의 쌀이라고 불리워질 만큼 매우 중요한 건축재료이다. 이러한 콘크리트는 주로 철근콘크리트 형태로 사용되며 내구성 관점에서 보면 콘크리트는 시멘트가 수화반응을 통해 고알칼리의 수산화칼슘을 생성하므로 콘크리트의 고알칼리화로 인해 철근에 부동태피막이 생성되어 철근의 부식을 억제하는 것이 중요한 내구성 향상 메커니즘이다. 그러나, 대기 중의 이산화탄소가 콘크리트 공극 속으로 침투하여 수산화칼슘과 반응하게 되면 콘크리트의 pH가 12.5에서 약 pH 10.0이하로 중성화되기 때문에(이러한 현상을 탄산화라 함) 이러한 조건에 있는 철근은 부식할 위험성이 높게 된다. 따라서, 이러한 콘크리트의 알칼리도 저하를 방지하는 것이 건축구조물에서는 매우 중요한 기술이다. 한편, 콘크리트의 친환경성측면에서 보면, 주요 사용재료

인 시멘트는 약 1500℃의 고온으로 소성되므로 석회석(CaCO₃)으로부터 다량의 이산화탄소(CO₂)가 배출되게 되며 이는 전체산업에서 발생하는 이산화탄소배출량의 약 4.4%에 해당되므로 지구온난화를 방지하기 위하여 시멘트산업에서의 이산화탄소 배출억제는 매우 중요하다. 그러나, 콘크리트가 탄산화되면서 이산화탄소를 흡수하기 때문에 콘크리트의 이산화탄소 흡수량을 정량적으로 평가하는 것은 콘크리트의 이산화탄소 배출 및 흡수의 수지평가를 통한 친환경재료 성능평가에서 매우 중요하나 이에 관한 연구는 거의 전무한 실정이다.

이러한 배경하에 본 논문에서는 콘크리트의 이산화탄소 흡수량을 실험적으로 평가하기 위하여 우선, 물시멘트비에 따른 모르타르 시험체를 제작하여, 모르타르 시험체 내 탄산화 가능 물질 중 수산화칼슘의 양을 정량적으로 측정하고, 기존 논문 고찰^{1),2),4)}을 통하여 이론적으로 이산화탄소 흡수량을 산출하여 실험과 이론계산의 결과 비교를 통해 이산화탄소 배출 및 흡수의 수지평가에 관한 기초자료를 제공하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

시멘트의 이산화탄소 흡수량을 실험을 통하여 정량적으로 측정하기 위하여 탄산화 가능한 물질인 CSH,

* 한양대학교 대학원 건축환경공학과 석사과정
** 교신저자, 한양대학교 건축학부 부교수
(ercleehs@hanyang.ac.kr)
*** 한양대학교 대학원 BK21 Post Doc
**** 한양대학교 대학원 건축환경공학과 박사과정
***** 한양대학교 건축학부 교수

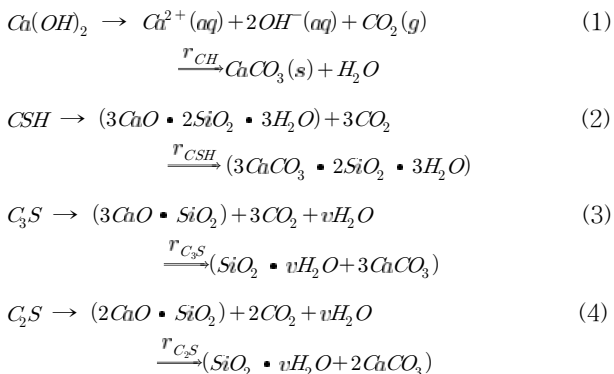
Ca(OH)₂, C₃S, C₂S 중 Ca(OH)₂의 함유량만을 측정하였 으며, 그 이유는 CSH가 화학식이 아직까지 정확히 밝혀 지지 않아 정량적 평가가 어렵고, C₂S, C₃S는 이산화탄 소 함유량에 미치는 영향이 미비하기 때문이다]

이산화탄소 흡수량 평가 방법은 물시멘트비에 따른 모 르타르 시험체를 제작하여 TG./DTA 분석을 실시하여 Ca(OH)₂ 함량을 정량적으로 측정하였고 이산화탄소 흡 수량의 이론적 평가는 기존 논문¹⁾²⁾⁴⁾의 식을 이용하여 계 산하였다.

2. 탄산화에 관한 기존 연구¹⁾²⁾⁵⁾

2.1 콘크리트의 탄산화 메커니즘

1ton의 시멘트는 1.2ton의 석회석과 0.3ton의 점토(주성 분은 Al₂O₃)를 소성하여 만들어진다. 이 경우 석회석은 800℃의 고온 하에서 45wt %의 이산화탄소를 방출하고 산화물인 CaO로 되며 소성에 의하여 점토의 구성성분과 결합하고 이것들은 물과 반응하여 시멘트 수화물을 생성 한다. 이들 시멘트 수화물은 공기 중의 이산화탄소(약산 성으로 중량의 0.035% 정도임)와 반응하여 아래와 같이 탄산칼슘과(CaCO₃) 기타 물질로 분해한다. 이러한 현상 을 탄산화(Carbonation)라 한다. 탄산화 과정은 식(1) ~ 식(4)와 같다.



탄산화를 통한 이산화탄소량을 산출하기 위해서는 탄 산화 가능한 물질인 CSH, Ca(OH)₂, C₃S, C₂S의 정량적 으로 산출해야 한다.

2.2 C₃S와 C₂S의 물농도 산정⁵⁾

C₃S와 C₂S의 물농도를 구하기 위해서 보통 포틀랜드 시멘트의 산화물을 분석하고 이를 통해 Bogue's equations을 이용, 화합물 구성 성분을 구한다.

표 1. 시멘트 화합물의 구성

산화물	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	나머지
보통 포틀랜드 시멘트	21.1	6.2	2.9	65.0	2.0	2.0

* Bogue's equations

$$\% C_3S = 4.071C - 7.600S - 6.718A - 1.430F - 2.850SO_3$$

$$\% C_2S = 2.876S - 0.7544C_3S$$

$$\% C_3A = 2.650A - 1.692F$$

$$\% C_4AF = 3.043F$$

표 2. 포틀랜드 시멘트의 화합물 구성

화합물 성분	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
보통 포틀랜드 시멘트(%)	53.7	19.9	11.4	8.8

보통 포틀랜드 시멘트는 믹싱 후 화합물의 구성 물 농 도가 아래의 식을 따라 계산된다.

$$[i]_0 = \frac{m_i m_{cl} c}{MW_i} \quad (5)$$

$$[CSH_2]_0 = \frac{m_{gy} c}{MW_{gy}} \quad (6)$$

i는 C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF의 초기 물 농도이고 M_{cl} 은 클링커의 질량비, C는 1m³ 에 콘크리트의 질량, MW_i는 i 성분의 분자량이다. [i]₀ 를 계산한 것과 같이 석고의 초 기 물농도를 다음과 같이 구할 수 있다. m_{gy}는 석고의 질량비이고 그 값은 m_{gy} = 1 - m_{cl} 로 계산된다.

2.3 Ca(OH)₂ 와 CSH의 물농도 산정

Ca(OH)₂ 와 CSH의 물농도 산정을 위해서는 수화과정 을 살펴보아야 한다. 수화반응 (7) ~ (10)은 석고가 존재 하는 경우의 수화반응 식이고, (10) ~ (11)은 석고가 소 진 되고 난 다음의 수화 반응식이다. 석고 유무에 따라 C₄AF와 C₃A의 수화 반응 차이를 고려해야 한다.

표 3. 석고 존재 유무에 따른 수화 반응의 차이

석고 존재	
$2(C_3S) + 6H \xrightarrow{r_{H,C_3S}} C_3S_2H_3 + 3CH$	(7)
$2(C_2S) + 4H \xrightarrow{r_{H,C_2S}} C_3S_2H_3 + CH$	(8)
$C_4AF + 2CH + 2\bar{C}SH_2 + 18H \xrightarrow{r_{H,C_4AF}} C_6AF\bar{S}_2H_{24}$	(9)
$C_3A + \bar{C}SH_2 + 10H \xrightarrow{r_{H,C_3A}} C_3A\bar{S}H_{12}$	(10)
석고 소진	
$C_4AF + 4CH + 22H \xrightarrow{r_{H,C_4AF}} C_6AF2CHH_{26}$	(11)
$C_3A + CH + 12H \xrightarrow{r_{H,C_3A}} C_3ACHH_{12}$	(12)

석고 소진 시간은 아래 식(13)을 통해 구할 수 있고 이 것은 화합물의 질량을 계산할 수 있다.

$$t^* = \frac{1}{k_{H,C_3A}(1-n_{C_3A})} \left[1 - \left(1 - \frac{[\overline{CSH}_2]_0}{[C_3A]_0} \right)^{(1-n_{C_3A})} \right] \quad (13)$$

t^* 의 계산 후 수화물의 화학적 반응을 이용하여 각 구성요소의 몰 농도를 계산 할 수 있다.

$$\begin{aligned} [Ca(OH)_2]^0 &= \frac{3}{2}[C_3S]_0 + [C_2S]_0 - 2[C_4AF]_0 F_{C_4AF}(t^*) \\ &\quad - 4[C_4AF](1 - F_{C_4AF}(t^*)) \\ &\quad - [C_3A]_0(1 - F_{C_3A}(t^*)) \\ &= \frac{3}{2}[C_3S]_0 + \frac{1}{2}[C_2S]_0 - 4[C_4AF]_0 - [C_3A]_0 \\ &\quad + (2[C_4AF]_0 F_{C_4AF}(t^*) + [C_3A]_0 F_{C_3A}(t^*)) \\ &= \frac{3}{2}[C_3S]_0 + \frac{1}{2}[C_2S]_0 - 4[C_4AF]_0 - [C_3A]_0 \\ &\quad + [\overline{CSH}_2]_0 \end{aligned} \quad (14)$$

$$[CSH]^0 = \frac{1}{2}[C_3S]_0 + \frac{1}{2}[C_2S]_0 \quad (15)$$

$$[C_3S]^0 = 0 \quad (16)$$

$$[C_2S]^0 = 0 \quad (17)$$

2.4 콘크리트의 탄산화에 의한 흡수량 과정

콘크리트 탄산화를 깊이에 따른 계산이 식(19)에 제시되어 있다.

$$x_c = \sqrt{\frac{2D_{e,CO_2}^c [CO_2]^0}{[Ca(OH)_2]^0 + 3[CSH]^0 + 3[C_3S]^0 + 2[C_2S]^0}} t \quad (18)$$

여기서 $[Ca(OH)_2]^0 + 3[CSH]^0 + 3[C_3S]^0 + 2[C_2S]^0$ 는 1m²의 콘크리트에 흡수된 CO₂와 반응하는 탄산화 가능 물질의 몰 농도이고(mol/m²) D_e는 CO₂의 유효 확산계수이고 식(20)에서 제시한다.

$$D_e = 1.64 \times 10^{-6} \cdot \varepsilon_p^{1.8} \left(1 - \frac{RH}{100} \right)^{2.2} \quad (19)$$

여기서 ε_p 는 콘크리트의 공극, RH는 상대습도를 나타낸다. [CO₂]는 대기 중 CO₂의 초기 몰 농도이고, T=25°C, R=0.08206, C₀는 0.03% 이다. 시간과 깊이를 알면 CO₂의 몰농도를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} m_{CO_2} &= [CO_2] \times A \times B \times Depth \times 44 \\ &= \frac{mol}{m^3} \times m \times m \times m \times \frac{g}{mol} = g \end{aligned} \quad (20)$$

3. 실험개요

3.1 실험내용

물시멘트비 변화에 따른 이산화탄소 흡수량 측정을 위해 그림 2와 같은 시험체를 제작하여 촉진 탄산화 시켜 pH, 탄산화 깊이, 시험체 성분 분석을 실시하였다.

3.2 시험체 일반사항

그림2, 표 5와 같이 시험체 크기는 50×50×50mm, 배합비는 C : S = 1 : 2.45 로 물시멘트비 40%, 50%, 60%로 제작하였다. 모르타르의 혼합은 KS L5109에 준하여 실시하였다. 제작한 시험체는 타설 1일 후에 탈형하여 2주 습윤 양생, 2주 기건 양생 후, 습도 40%, 온도 20°C, CO₂ 농도 20%의 탄산화 촉진 환경에서 실험하였다. 실험체는 탄산화 촉진 실험 전 미리 시험체 6면 중 4면에 에폭시를 도포하여 이산화탄소가 2면으로 침투하도록 하였다. 실험체는 재령 28일과 탄산화 촉진 재령 7일, 14일, 28일로 총 4번 pH, 탄산화 깊이, 탄산화 깊이별 성분 분석이 실시하였다. 이 실험 결과를 토대로 이산화탄소 흡수량 예측 및 이론에 의한 이산화탄소 흡수량 비교를 하였다.

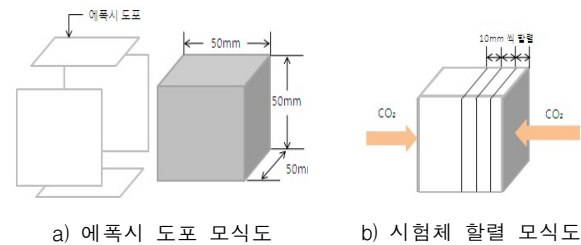


그림 1. 시험체 모식도

표 4. 시험체 인자

No	시험체명	물시멘트비 (W/C)	배합 (kg)			탄산화 촉진 환경
			시멘트	모래	물	
1	OPC40	40	3.49	10.34	1.40	온도 : 20°C 습도 : 40% CO ₂ 농도 : 20%
2	OPC50	50	3.49	10.34	1.75	
3	OPC60	60	3.49	10.34	2.09	

3.3 탄산화 촉진 실험방법 및 실험인자

일반적인 환경에서 대기 중 이산화탄소 농도는 약 0.03%로 낮게 되기 때문에 실제 이산화탄소 침투를 확인하기 위해서는 실험에 오랜 시간이 걸린다. 그렇기 때문에 인공적으로 이산화탄소 농도를 높여 촉진 탄산화 실험을 실시하였다.

탄산화깊이 측정은 탄산화 한 시험체를 이산화탄소 침투면에 직각으로 할렬 한 후(2개시험체-양쪽면) KS F2596에 따라 1%의 페놀프탈레인 용액으로 분무하여 침투면으로 부터 발색되지 않은 부분까지 30개소의 침투깊이를 측정하여 평균값으로 하였다.



그림 2. 시험체 할렬

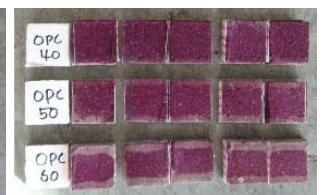


그림 3. 페놀프탈레인 분무

시험체의 pH 측정은 우선, 시험체의 이산화탄소 침투면에 평행하게 10mm, 20mm, 30mm 할렬하여 각각 위치의 시험체를 분쇄한다. 분쇄한 시험체를 표준체 No. 10으로 거르고 난 뒤 얻어진 시료를 증류수 10ml 당 시료 1g와 혼합하여 잘 저어준 다음 pH측정기를 넣은 뒤 1분간 그대로 두어 수치가 변하지 않을때 까지 기다린 다음 측정값을 기록한다. 측정값은 TG/DTA 시험체 별 인자당 3개의 시험체를 측정하여 평균값으로 하였다.

시험체 성분분석은 pH측정 시료를 TG/DTA장비를 사용하여 실시하였다. 성분 분석은 시험체에 열을 가해 열변화에 따른 질량변화를 관찰함으로써 특정 온도 범위에서 상태 변화하는 성분을 찾아내어 온도에 따른 질량 감소를 확인하는 방법이다. 약 450℃ ~ 500℃ 사이에서는 Ca(OH)₂ 를 확인할 수 있으며 650℃ ~ 900℃사이에서는 CaCO₃ 를 확인 할 수 있다. 측정은 Alumina 펜을 사용하고 가열 속도는 분당 10℃씩 인자별 측정하였다.

4. 실험 결과 및 분석 고찰

4.1 물시멘트비에 따른 탄산화 깊이 변화

물시멘트비에 다른 재령별 탄산화 깊이를 그림 5에 나타내었다. 촉진 탄산화 시간이 길어질수록 탄산화 깊이는 비례하여 증가하나, 탄산화 속도는 둔화된다. 물시멘트비 변화에 따라서 물시멘트비가 낮을수록 탄산화 깊이가 작고, 물시멘트비가 높은 시험체의 경우 탄산화가 다른 시험체에 비교하여 빠르게 진행되는 것을 알 수 있다.

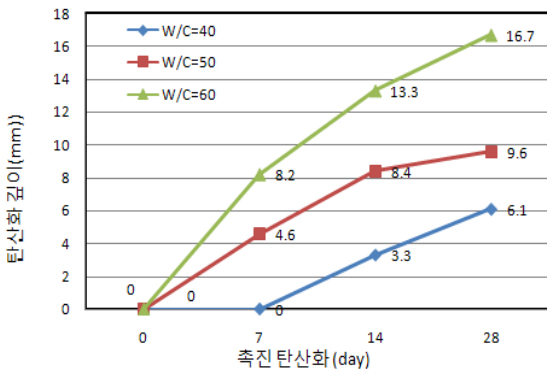


그림 4. 탄산화 재령에 따른 탄산화 깊이

4.2 물시멘트비에 따른 pH 변화

물시멘트비에 따른 시험체의 pH 측정 결과는 그림6 ~ 그림 9에 나타내었다. 그림 8은 타설 후 촉진 탄산화 실시 전 재령 28일의 시험체로 pH는 물시멘트비가 높아질수록 그 값이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그림 7 ~ 9는 촉진 탄산화 시간에 따른 시험체 별 pH 변화를 나타낸다. pH는 이산화탄소 침투면으로 부터 내부로 들어갈수록 증가하나 물시멘트비가 커질수록 측정된 pH가 비례하여 같이 커지는 경향을 보이진 않고 있다. 이는 시험체 양생 시 수화가 충분히 이루어 지지 않았기 때문에 생긴 결과라 사료되어 추후 수화 반응에 관한 연구가 필요하다고 판단된다.

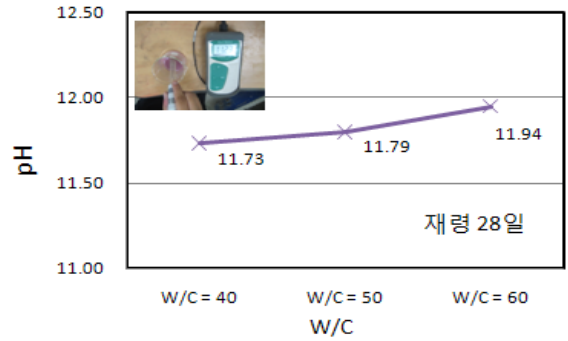


그림 5. 물시멘트비 변화에 따른 pH (미탄산화)

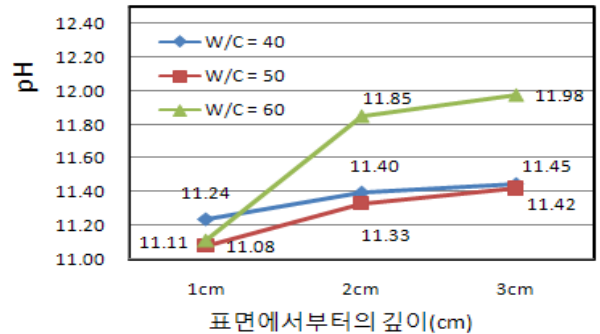


그림 6. 탄산화 깊이에 따른 pH (탄산화 7일)

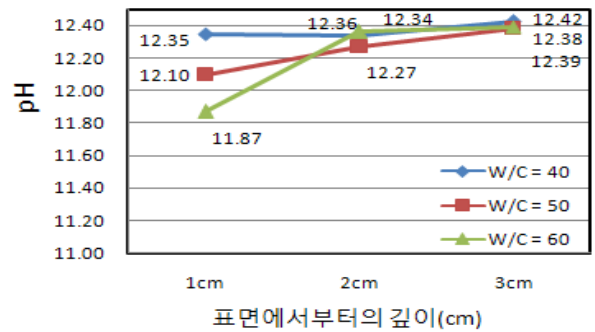


그림 7. 탄산화 깊이에 따른 pH (탄산화 14일)

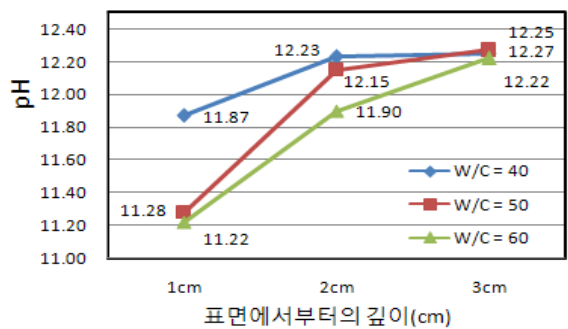


그림 8. 탄산화 깊이에 따른 pH (탄산화 28일)

4.3 물시멘트비에 따른 성분 변화

전체 시료 질량에 대한 각 성분의 질량비를 그림10 ~ 그림15 에 나타내었다. 이산화탄소 침투면으로 부터 내부로 들어갈수록 수산화칼슘의 양은 증가하는 반면, 탄산칼슘의 양은 감소하는 경향을 보였다. 탄산화 결과 수산화칼슘이 이산화탄소와 결합하여 탄산칼슘을 생산하였기 때문에 탄산화 된 영역에서는 수산화칼슘의 양이 적고, 상대적으로 탄산칼슘의 양은 많은 것으로 판단된다.

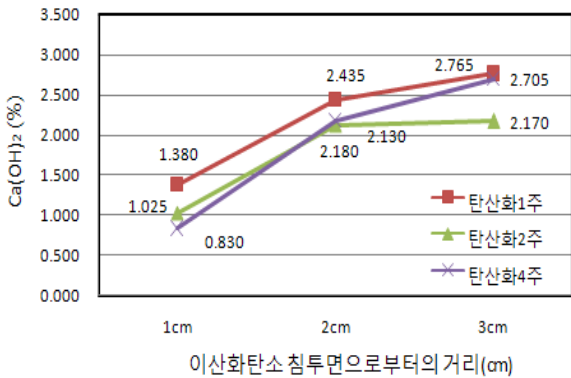


그림 9. 탄산화 깊이에 따른 수산화칼슘 양 (W/C = 40)

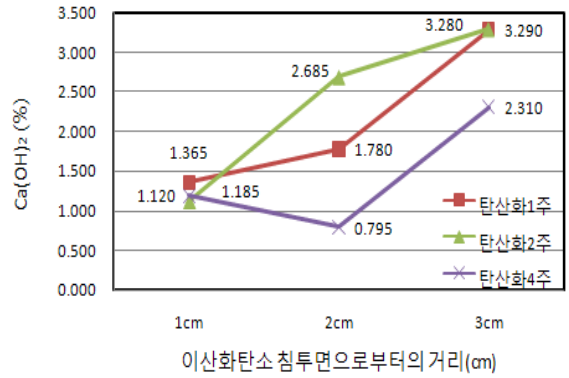


그림 13. 탄산화 깊이에 따른 수산화칼슘 양 (W/C = 60)

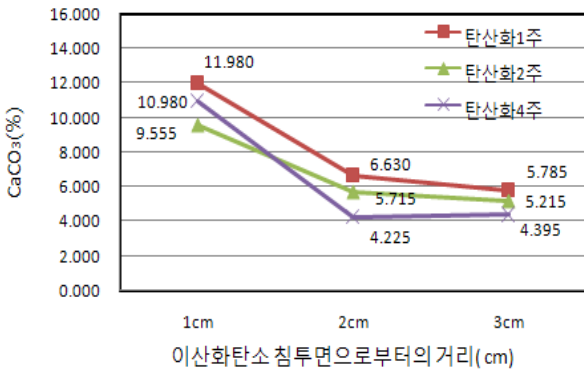


그림 10. 탄산화 깊이에 따른 탄산칼슘 양 (W/C = 40)

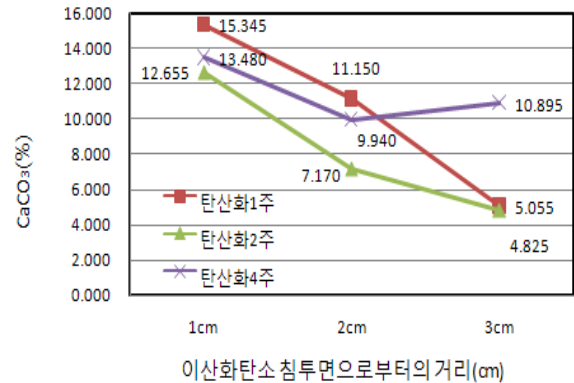


그림 14. 탄산화 깊이에 따른 탄산칼슘 양 (W/C = 60)

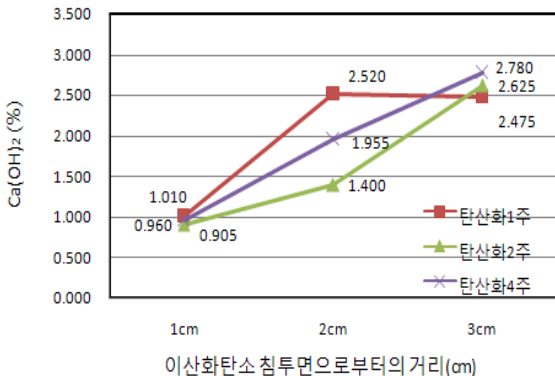


그림 11. 탄산화 깊이에 따른 수산화칼슘 양 (W/C = 50)

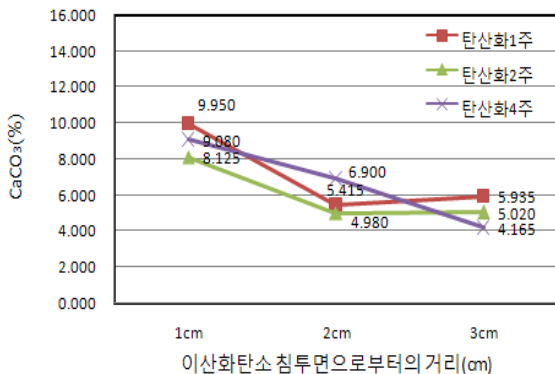


그림 12. 탄산화 깊이에 따른 탄산칼슘 양 (W/C = 50)

4.4 이론에 의한 이산화탄소 흡수량 계산결과와 실험 결과의 비교

열분석을 실시하여 물시멘트비 변화에 따른 시험체의 이산화탄소 흡수량을 정량적으로 분석하였다. 기존 이론식을 사용한 탄산화 깊이 계산 및 이산화탄소 흡수량은 표6 과 그림 18을 통해 알 수 있다. 이론을 통한 계산에서는 탄산화 가능 물질 CSH, Ca(OH)₂, C₃S, C₂S 4가지 중 실제 시험체에서 측정이 가능한 Ca(OH)₂의 양만을 고려하였고, 제작된 된 본 실험체는 탄산화 가능 물질인 CSH, C₃S, C₂S의 양을 고려하지 않고 Ca(OH)₂만을 고려하여 계산하였다.

표 5. 계산에 의한 탄산화 깊이와 이산화탄소 흡수량의 계산

측진 탄산화 제령(day)	탄산화 깊이 (mm)	CO ₂ 흡수량 (g)
7	8.81	1.95
14	12.46	2.76
28	17.62	3.91

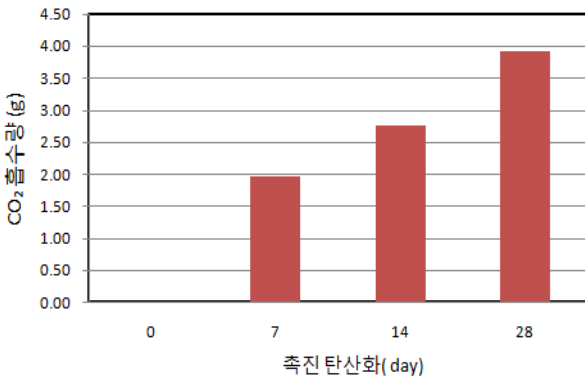


그림 15. 계산에 의한 이산화탄소 흡수량

촉진 탄산화 재령 28일에 탄산화 깊이 약 17.62mm, 이산화탄소 흡수량 약 3.91g 이다. 실험체 분석에 의한 결과 탄산화 깊이는 최대 16.7mm 이고 이산화탄소 흡수량은 최대 37.76g 된다.

표 6. 실험에 의한 탄산화 깊이와 이산화탄소 흡수량의 계산

촉진 탄산화 재령 (day)	탄산화 깊이(mm)			CO ₂ 흡수량(g)		
	W/C =40	W/C =50	W/C =60	W/C =40	W/C =50	W/C =60
7	0	4.6	8.2	0.00	1.00	1.85
14	3.3	8.4	13.3	0.56	1.82	3.01
28	6.1	9.6	16.7	1.034	2.08	3.78

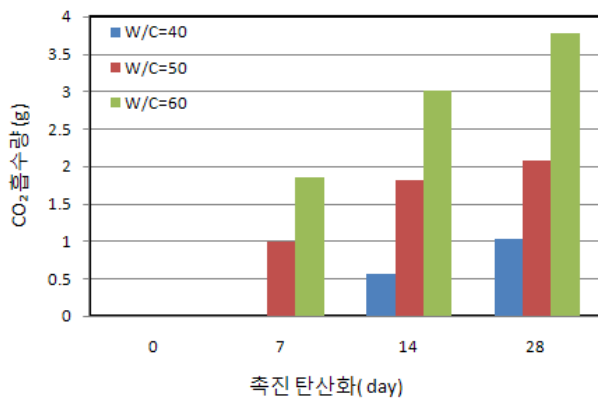


그림 16. 실험에 의한 이산화탄소 흡수

이론에 의한 결과는 물시멘트비에 대한 고려가 없기 때문에 탄산화 깊이가 비슷한 영역에서의 이산화탄소 흡수량을 비교하였다. 계산에 의한 탄산화 깊이 17.62mm에서는 이산화탄소 흡수량이 3.91g 이고, 실험에 의한 탄산화 깊이 16.7mm (W/C = 60, 촉진 탄산화 재령 28일)에서 3.78g이 얻어진다. 분석 결과를 살펴보면 이론을 통해 계산되어지는 이산화탄소의 양이 실험을 통해 구해지는 이산화탄소의 양이 0.13g으로 두 값의 차이가 미미하다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 콘크리트 탄산화에 의한 대기 중의 이산화탄소 흡수량을 Papadakis 이론 및 탄산화된 콘크리트 부분의 열분석 실험을 통하여 정량화함으로써, 이산화탄소 흡수에 따른 콘크리트의 친환경성능을 실험적으로 검증하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 모르타르의 탄산화 깊이는 촉진탄산화 재령이 클수록, 물시멘트비가 클수록 증가하였고, 탄산화속도는 재령의 증가에 따라 감소하였다.
- 2) 탄산화부분의 pH는 미탄산화부분의 pH보다 작게 나타났으며 이는 탄산화부분의 수산화칼슘이 이산화탄소와 반응하여 탄산칼슘으로 변하였기 때문임을 열분석을 통하여 확인할 수 있었다.
- 3) 탄산화부분의 열분석을 통한 이산화탄소 흡수량은 Papadakis 이론을 통해 얻어진 이산화탄소 흡수량과 비교하여 거의 일치하는 것을 알 수 있었으며, 이를 통한 콘크리트의 이산화탄소 흡수를 예측하는 것의 타당성과 함께 콘크리트의 이산화탄소 흡수측면에서의 친환경성을 검증할 수 있었다.
- 4) 금후, 실험체의 성분분석을 통한 보다 정확한 이산화탄소 흡수량 계산을 위해서는 Ca(OH)₂뿐만이 아니라, 실제 탄산화 가능물질인 CSH, C₃S, C₂S의 값을 고려한 검토가 수행되어야 한다고 판단된다.

감사의글

본 연구는 과학기술부 우수연구센터육성사업인 한양대학교 친환경건축 연구센터의 지원(#R11-2005-056- 04003-0)과 “건설생산성 향상을 위한 건설자재 표준화 연구”(과제번호 : 06기반구축A02)의 일환으로 건설교통부 건설기술기반구축사업의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Physical and Chemical Characteristics Affecting the Durability of Concrete(1991), Papadakis, Vagelis G.; Vayenas Costas G.; and Fardis, Michael N., ACI Materials Journal. Mar-Apr, 186-196
2. Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonatio(1991), Papadakis, Vagelis G.; Vayenas Costas G.; and Fardis, Michael N., ACI Materials Journal. July-August, 186-196
3. 중성화측정을 통한 콘크리트 잔존수명 예측모델(2003), 이준구의 3인 콘크리트학회 Vol 45, No.4 pp529 ~ 540
4. CO₂ 배출량 및 흡수량을 중심으로 한 콘크리트의 친환경성능 평가에 관한 문헌적 연구(2006), 이한승 외 4인, 한국 콘크리트 학회 Vol 18, No2, pp737 ~ 740
5. CONCRETE, P.Kumar Mehta, Paulo J.M. Monteiro, Mc Graw Hill