

## 탄산염해에 대한 LNG 저장탱크 PC 외부벽체의 수명평가 및 억제방안

이승림\* · 송일현\* · †김한상

\*한국가스안전공사 가스안전연구원, 가천대학교 기계·자동차공학과  
(2014년 3월 23일 접수, 2014년 4월 28일 수정, 2014년 4월 28일 채택)

### Service Life Assessment and Restrain Methods of Carbonation Attack on PC Outer Wall of LNG Storage Tanks

Seung-Rim Lee\* · Il-Hyun Song\* · †Han Sang Kim

*\*Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation  
Department of Mechanical and Automotive Engineering, Gachon University  
(Received March 23, 2014; Revised April 28, 2014; Accepted April 28, 2014)*

#### 요약

본 연구는 현재 신설 중에 있는 삼척 LNG 저장탱크 콘크리트 배합표의 공시체로부터 획득된 촉진 탄산화 시험 결과를 가지고 탄산염해에 대한 내구수명과 그 억제 방안에 대해 평가한 것이다. 그 결과 재령 7일, 28일, 56일에 대한 촉진 탄산화 침투 깊이는 4.45 mm, 9.19 mm, 13.37 mm로 나타났으며, 실제 운영 중 LNG 저장탱크의 철근피복 두께(최소 70 mm부터 최대 100 mm)를 고려하더라도 큰 여유를 보였다. 그리고 탄산화 침투 깊이로부터 획득된 탄산화 속도계수를 가지고 대기 중 환산 CO<sub>2</sub> 농도 즉, 0.03%와 0.05%를 각각 고려한 LNG 저장탱크 외조 콘크리트의 설계 피복 두께(70 mm, 80 mm, 90 mm, 100 mm)의 내구 수명은 779년, 1,017년, 1,287년, 1,589년과 466년, 609년, 771년, 951년으로 나타났다. 또한, 콘크리트 경화체 내 조직구조의 물질이동성 변화와 세공용액의 이온조성 및 수산화칼슘 등 수화생성물의 변화 등에 영향을 미치는 인자들의 조절을 통하여 탄산염해의 억제가 가능할 것으로 보였다.

**Abstract** - The objective of this paper is to assess the service life and restrain methods of specimens, which were subjected to carbonation attack, obtained from mix proportion of Sam-cheok LNG storage tank under construction. As the results, accelerated-carbonation penetration depths of 7, 28, 56 ages indicated 4.45, 9.19, 13.37mm, and even considering for cover depths of steel of LNG storage tank under real operation, it was enough. In addition, with carbonation velocity coefficient calculated by carbonation penetration depths, the service life to design cover depth(70, 80, 90, 100mm) of PC outer tank of LNG storage tank was 779, 1017, 1287, 1589 years and 466, 609, 771, 951 years, respectively, considering the CO<sub>2</sub> concentration in air which account for the 0.03% and 0.05%. Also, the restrain methods to carbonation attack were feasible through controlling the factors affecting the changes of hydration products such as Ca(OH)<sub>2</sub>, ion composition in pore solution and matter mobility of organization structures within hardened concrete.

**Key words** : service life, carbonation attack, cover depth, penetration depth, carbonation velocity coefficient

†Corresponding author:hskim70@gachon.ac.kr

Copyright © 2014 by The Korean Institute of Gas

## I. 서론

콘크리트의 세공용액은 포화수산화칼슘 용액과 약간의 수산화나트륨, 수산화칼륨 등을 함유하고 있어 용액의 pH가 12~13 정도이므로 콘크리트 중의 철근은 부식하지 않는 것으로 알려져 있다. 즉, 철근은 콘크리트의 강알칼리성에 기인하여 표면에 부동태 피막이라는 20~60Å 두께의 얇은 피막( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )이 형성되어 부식작용으로부터 보호되고 있다 [1]. 그러나 콘크리트는 각종 요인에 의해 세공용액의 알칼리 농도가 낮아지거나, 콘크리트 내에 각종 유해성분( $\text{Cl}^-$  및  $\text{CO}_2$  등)이 혼입되면 철근은 활성화 상태(부동태 피막의 파괴)로 되어 쉽게 부식하게 된다 [2,3].

우리나라의 액화천연가스(Liquefied Natural Gas, 이하 LNG) 저장탱크는 그 특성상 가스인수의 용이를 위해 해수가 직·간접적으로 맞닿아 있는 인천, 평택, 삼척(신설중) 등 주로 해안가 근처에 위치하고 있어 내륙지역의 콘크리트 구조물 보다 염해에 대한 인식이 크며, 관련 연구들이 많이 이루어지고 있다 [4,5]. 그러나 LNG 저장탱크는 원자력 발전소 및 중·저준위 폐기물 처분시설(처분동굴이 위치한 지 중에는 지하수의 존재 및 지하수의 수두차에 의한 해수의 유입 가능)과 달리 해안가로부터 짧게는 100 m, 길게는 수 km 이내의 거리에 위치해 있기 때문에 염해에 대한 피해와 마찬가지로 탄산염해에 대한 피해 또한 함께 분석할 필요성이 있다 [6].

하지만 국내에서 수행된 탄산화 관련 연구는 주로 사용재료(시멘트, 골재의 종류, 혼화재료 및 표면 마감재 등) 및 환경조건을 기반으로 한 탄산화 특성, 탄산화 모델식 및 복합환경에 대한 내용이 주를 이루고 있으며, LNG 저장탱크와 같은 중요 구조물에 대한 연구는 극히 미미한 실정이다 [7-10]. 또한 염해와 관련된 내구수명평가 연구는 일부 진행되고 있지만 탄산화와 관련된 내구수명평가 연구는 극히 드물며, 더욱이 유사구조물인 원전구조물에서 초차 탄산화 자체에 관한 연구는 많이 수행되지 않았다 [11,12].

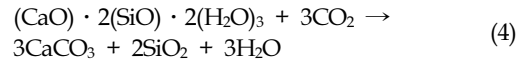
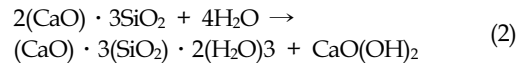
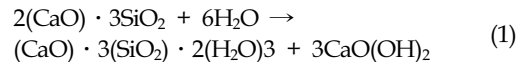
따라서 본 연구에서는 현재 신설 중에 있는 삼척 LNG 저장탱크의 콘크리트 배합 시편으로 획득된 축진 탄산화 시험 결과를 가지고 정량적 탄산화 침투 깊이를 구하고 콘크리트 내부  $\text{CO}_2$  침투에 가장 큰 영향을 미치는 속도 계수를 구하여 LNG 저장탱크 외주 콘크리트 배합의 내구수명을 예측하였다. 아울러 LNG 저장탱크 외주 콘크리트 구조물 시공 전·후 예측되는 탄산화에 미치는 여러 인자를 분석하여 탄산화 억제 방안에 대한 논의를 실시하였다. 또한 본 연구로 도출된 결과는 향후 실제 운영 중 LNG 저

장탱크 콘크리트 시편으로부터 획득된 결과와 비교·분석을 통하여 LNG 저장탱크의 수명평가 기술 개발을 위한 기초자료로 활용 하고자 한다.

## II. 탄산화 메커니즘 및 내구설계

### 2.1. 메커니즘

콘크리트가 공기 중의 탄산가스, 수중에 존재하는 탄산, 그 외의 산성가스 혹은 염류의 작용에 의하여 알칼리성을 상실해 가는 현상을 탄산화라 할 수 있다. 좀 더 구체적으로 말해 시멘트 수화반응(식 (1), (2))에서 시멘트양의 약 1/3이 생성되는 수산화칼슘은 pH 12-13 정도의 강알칼리성을 나타내며, 시멘트 수화물 전체의 pH를 결정하고 있다. 그러나 수산화칼슘은 대기 중에 포함되어 있는 약산성의 탄산가스(약 0.03%)와 접촉하여 식(3), (4)과 같은 반응에 의하여 탄산칼슘과 물로 변해 탄산칼슘으로 변화한 부분의 pH가 8.5-10 정도로 낮아지는 것을 말한다.



### 2.2. 이산화탄소 농도 및 탄산화에 의한 내구 설계지침

18세기의 산업혁명 이전의 이산화탄소( $\text{CO}_2$ ) 농도는 약 280 ppm으로 거의 안정되어 있었지만 1800년 이후 서서히 높아져 2000년에는 368 ppm(산업혁명 이후 약 31% 증가)으로 증가하였으며, 2004년도에는

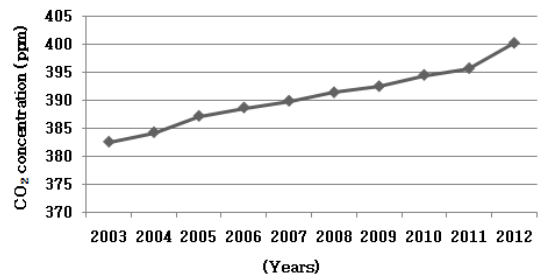


Fig. 1. Change of annual average  $\text{CO}_2$  concentration.

**Table 1.** Performance items considered in durable performance design by carbonation attack [14]

열화 외력	평가항목	설정방법	측정값이 없는 경우
탄산화	대기 중의 CO <sub>2</sub> 농도	건축물의 부지에서 연속적으로 측정	옥외 : 0.05% 옥내 : 0.20%
	대기 중의 유황산물 농도		신뢰성 있는 자료
	대기 중의 질소산화물 농도		
	건축물에 접한 토양 및 물의 탄산농도		

전 지구 평균값은 아니지만 전지구급 관측소인 마우나로아 관측소의 농도가 377 ppm에 이르고 있다. Fig. 1은 세계기상기구(WMO)/지구대기감시(GAW) 지역급 관측소인 안면도 지구대기감시센터에서 측정한 우리나라의 최근 이산화탄소의 연평균 값으로 매년 증가 경향을 보이고 있다[13].

대상 구조물(LNG 저장탱크)의 위치 및 환경조건 등에 따라 열화(탄산화)의 세기(이산화탄소 농도)에는 차이가 있으며, 이러한 열화 세기에 있어서 상정된 열화현상마다 설계자는 설계열화외력의 종류 및 강도를 설정하도록 해야 한다.

한편, 실내의 이산화탄소 농도는 실외보다 약 1,000 ~ 2,000 ppm 높게 나타나고 있으며, 일본건축학회(Architectural Institute of Japan, AIJ) 내구설계 지침에서는 대기 중의 이산화탄소 농도 측정값이 없는 경우, 실외에서는 Table 1에 나타난 바와 같이 500 ppm(0.05%), 실내에서는 2,000 ppm(0.20%)으로 설계하고 있다.

### 2.3. 탄산화 속도

탄산화에 있어서 열화작용의 주요인으로서 이산화탄소가 있고, 구조물의 경우에는 실내와 실외로서 다른 이산화탄소 농도(실내 : 약 0.2%, 실외 : 약 0.05%)가 설정된다. 탄산화의 진행은 콘크리트 내부로 이산화탄소의 침입과정, 이산화탄소와 수산화칼슘과의 반응에 의한 알칼리성의 손실과정 2단계로 구성이 되고 식 (5)과 같이 모델화된다[15]. 그렇지만, 일반적으로는 식 (5)의 이산화탄소와 수산화칼슘의 반응을 포함한 형태의 이산화탄소 확산에 대한 해로서 유도되는 식 (6)의 모델이 이용된다.

$$\frac{\partial CO}{\partial t} = D_{CO_2} \frac{\partial^2 CO}{\partial x^2} - k \cdot CO \cdot CH \quad (5)$$

여기서, CO : 이산화탄소 농도  
CH : 수산화칼슘 농도  
t : 경과시간  
x : 콘크리트표면으로부터의 깊이  
DCO<sub>2</sub>: 콘크리트 중으로 이산화탄소의 확산계수  
k : 이산화탄소와 수산화칼슘의 반응 속도정수

$$X = R\sqrt{t} \quad (6)$$

여기서, X : 기준이 되는 콘크리트 탄산화 깊이 (cm)  
t : 경과연수(년)  
R : 시멘트, 골재의 종류, 환경조건, 혼화 재료, 표면마감재 등의 정도를 나타내는 상수

식 (6)은 일반적으로 탄산화 깊이와 경과 연수와 의 관계로 탄산화 진행속도는 콘크리트 표면으로부터 탄산화 부분과 비탄산화 부분의 경계면까지의 길이와 경과한 시간의 함수로 나타내며, 상수 R은 실험에 의하여 구할 수 있다.

## III. 실험방법

### 3.1. 시료 콘크리트 배합조건

본 연구에 사용된 대상 구조물의 콘크리트 배합은 Table 2와 같으며, 이는 실제 신설 중에 있는 삼척 LNG 저장탱크에 적용된 배합이다. 따라서 본 콘크리트 배합조건으로부터 W/B, FA/B 및 m 값을 유도할 수 있다.

### 3.2. 실험방법

#### (1) 공시체 제작

탄산화 깊이 측정에 사용된 공시체는 KS F 2403에 제시된 방법에 따라 Φ100×200 mm의 원주형 공시체, 3개를 1조로 총 9개가 제작되었다. 또한 탄산화 깊이 측정 전 재령일 동안 20±2℃의 수중양생을 실시하였다.

#### (2) 탄산화 측정 방법

KS F 2596에 명시된 방법에 따라 탄산화 깊이 측정 시험을 실시하였으며, 탄산화 깊이를 측정할 때 이용하는 시약에는 KS M 8238에서 규정하고 있는 페놀프탈레인 용액 또는 이와 같은 성능을 가지는 시약을 이용하였다. 또한, 지시약으로 사용된 페놀프탈

**Table 2.** Mix proportion on PC outer wall of Samcheok LNG storage tank

Types	f <sub>c</sub> (MPa)	W/B	S/a	Slump (mm)	Air (%)	Unit Weight(kg/m <sup>3</sup> )					
						C	FA	W	S	G	AD
Wall	40	39	43.5	150	5.0	319	106	129	759	997	3.83

레인 용액은 95% 에탄올 90 mL에 페놀프탈레인 분말 1 g를 녹여 물을 첨가시켜 100 mL로 하였다. 본 연구에 사용된 탄산화 시험기의 환경조건은 R.H.(상대습도) 60%, 온도 20℃ 및 CO<sub>2</sub> 농도 5%로 축진 탄산화 시험을 실시하였다.

**3.3. 탄산화에 의한 수명평가 방법**

축진 탄산화 시험의 CO<sub>2</sub> 농도는 5%, 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도는 0.03% 또는 0.05%로 축진 시험에 의한 탄산화와 대기 중에서의 탄산화의 관계는 각각 식 (7), (8)과 같다.

$$X_c = b\sqrt{t} \tag{7}$$

$$X_c = b1\sqrt{\frac{CO_2}{5}}\sqrt{t} \tag{8}$$

여기서,

$$X_c = b1\sqrt{\frac{CO_2}{5}}\sqrt{t}$$

X<sub>c</sub> : 탄산화 깊이(mm)

CO<sub>2</sub> : 이산화탄소 농도(%)

b1 : 축진탄산화시험에 대한 정수  
(mm/√주)

t : 재령(주)

또한, 대기 중인 경우 CO<sub>2</sub> 농도 0.03% 또는 0.05%를 각각 적용하여 정리하면 환산식 (9), (10)와 같다.

$$t = \frac{167}{b^2} X_c^2 \tag{9}$$

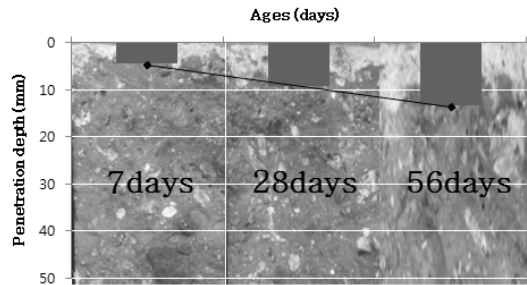
$$t = \frac{100}{b^2} X_c^2 \tag{10}$$

위의 식 (9), (10)는 축진 탄산화 시험의 CO<sub>2</sub> 농도 5%일 때 일반 대기 중(0.03%, 0.05%)의 탄산화에 소요되는 시간의 관계가 각각 약 167배, 100배에 상당하는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이를 고려하여 축진 탄산화 시험으로 측정된 탄산화 깊이로부터 탄산화 내구수명을 예측하였다.

**IV. 결과 및 토의**

**4.1. 탄산화 깊이 결과**

KS F 2403에 제시된 방법에 따라 탄산화 침투 깊이를 발색부와 비발색부의 경계선까지 표시하여 Fig. 2에 재령 7일, 28일, 56일을 각각 나타냈으며, 재령이 증가할수록 탄산화 침투 깊이가 깊어짐을 육안검사로부터 알 수 있었다. 또한 그림 2에 탄산화 침투 깊이 결과를 재령일에 따라 3개의 평균치를 나타냈으며, 탄산화 침투 깊이 측정 결과 7일, 28일, 56일은 4.45 mm, 9.19 mm, 13.37 mm로 나타났다. 따라서 실제 운영 중 LNG 저장탱크의 철근피복 두께는 최소 70 mm부터 최대 100 mm로 축진 탄산화 시험인 점을 고려하더라도 큰 여유를 보이고 있었다. 하지만 탄산화 침투 깊이 시험 결과는 실제 운영 중에 있는 LNG 저장탱크에서 획득된 시편으로 도출된 결과가 아니라 시공 중 콘크리트 배합으로 획득된 공시체로부터 얻어진 결과이기 때문에 실제 운영 중에 있는 LNG 저장탱크로부터의 비교·분석 시험이 필요할 것으로 판단된다. 또한 탄산화 침투 결과로부터 아직 구조물의 내구성에 악영향을 미친다고 판단되지 않으나 구조물의 유지관리 측면에서 지속적인 관리가 필요할 것으로 판단되며, 위의 결과는 LNG 저장탱크의 국부적 손상 및 시공이음부의 열화를 고려하지 않아 향후 정확한 탄산화 깊이 산출을 위해 이와 같은 국부적 열화요인이 고려되어야 할 것으로 판단된다.



**Fig. 2.** Results of accelerated-carbonation penetration depth.

**4.2. 탄산화 속도계수 산정**

탄산화의 진행은 콘크리트 중의 탄산화 영역에서 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)의 확산으로 탄산화 영역과 비탄산화 영역의 경계 영역에서 수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>)과 CO<sub>2</sub>의 2가지 반응 현상을 합친 것으로, 콘크리트가 대기 중에 접하는 면의 평균탄산화 깊이는 콘크리트의 재료, 배합, 환경조건을 근본으로 산정하며, 탄산화 속도계수는 신뢰할 수 있는 자료 또는 시험 등에 기초하여 정한다[16]. 따라서 탄산화 진행속도는 콘크리트 표면으로부터 탄산화 부분과 비탄산화 부분의 경계면까지의 길이와 경과한 시간의 함수로 나타내며, 3.3절의 식 (6)로부터 탄산화 속도계수의 산정 결과는 Fig. 3과 같다. 콘크리트의 재령 7일, 28일, 56일에 대한 각 탄산화 침투깊이 4.45 mm, 9.19 mm, 13.37 mm와 시간의 제곱근( $\sqrt{t}$  법칙)에 의하면 속도계수는  $4.495 \text{ mm}/\sqrt{t(\text{weeks})}$  을 나타낸다.

Osborne의 연구에 의하면 결합재량  $370 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 슬래그 70%를 치환한 실제 수직기둥에 대한 탄산화 속도계수 값은 East side는  $1.16\sim 1.42 \text{ mm}/\sqrt{t(\text{years})}$ , West side는  $1.74\sim 2.74 \text{ mm}/\sqrt{t(\text{years})}$  을 나타냈으며, 결합재량  $390 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 슬래그 70%를 치환한 콘크리트 블록에 대해서는 탄산화 속도 계수를  $1.8\sim 3.2 \text{ mm}/\sqrt{t(\text{years})}$  로 발표하였다[17]. 또한, Colleparidi 등은 결합재  $400 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 슬래그 50%, W/B=0.4에 대한 탄산화 속도를  $4.50 \text{ mm}/\sqrt{t(\text{years})}$  로, Sulapha 등의 연구에서는 W/B=0.5, 슬래그 65%의 슬래그 분말도  $4,500 \text{ cm}^2/\text{g}$ ,  $6,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ,  $8,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 에 대해 각각  $2.34 \text{ mm}/\sqrt{t(\text{years})}$ ,  $1.49 \text{ mm}/\sqrt{t(\text{years})}$ ,  $1.21 \text{ mm}/\sqrt{t(\text{years})}$  및 W/B=0.5, 슬래그/실리카폼 : 55%/10%의 슬래그 분말도  $4,500 \text{ cm}^2/\text{g}$ 에 대해서는  $2.10 \text{ mm}/\sqrt{t(\text{years})}$  을 나타내었다[18,19]. 이를 종합해 보면 탄산화 속도 계수는 실제 구조물로부터 최대  $4.5 \text{ mm}/\sqrt{t(\text{years})}$  에서 최소  $1.16 \text{ mm}/\sqrt{t(\text{years})}$  으로 평균  $2.15 \text{ mm}/\sqrt{t(\text{years})}$  을 나타낸다.

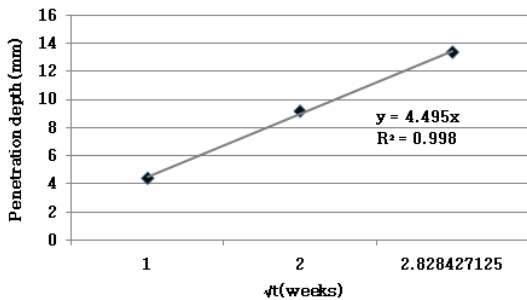


Fig. 3. Calculation result of carbonation velocity coefficient.

그래서 탄산화 속도계수 값은 현장 구조물(운영 중 LNG 저장탱크)의 실태조사 및 그로부터 획득된 시편으로 수행되어야 하나 국내에서는 아직 이에 대한 자료가 턱없이 부족한 것이 현실이다. 따라서 본 연구에 사용된 시편은 시공 중 콘크리트 배합의 촉진탄산화 시험으로 획득된 점을 고려했을 때 시간계수 (t), 즉 weeks와 years 사이의 상관관계를 규명할 필요가 있으며, 실제 운영 중인 LNG 저장탱크에서 획득된 실제 데이터와의 비교·분석 및 그와 관련된 추가 연구가 후행 되어야 할 것으로 판단된다.

**4.3. 탄산화 속도에 의한 수명 예측**

본 절에서는 4.2절에서 획득된 촉진탄산화 속도계수( $4.495 \text{ mm}/\sqrt{t(\text{weeks})}$ )로부터 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도를 고려한 탄산화에 대한 내구수명을 예측하였다. Table 3은 촉진탄산화 시험과 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도의 비교 및 환산식을 나타낸다.

또한, 연구에서 수행된 LNG 저장탱크 외조 콘크리트의 설계 피복 두께는 구조물의 위치별로 70~100 mm를 나타내기 때문에 깊이별 내구수명을 예측하

Table 3. Comparison between accelerated-carbonation experiment and CO<sub>2</sub> concentration in air

구 분	CO <sub>2</sub> 농도 (%)	탄산화식 및 환산식	촉진탄산화 시험과의 CO <sub>2</sub> 농도 차 (배)	비 고
촉진탄산화 시험	5	$X = R\sqrt{t}$	1	식 (6)
대기 중	0.03	$t = \frac{167}{b^2} X_c^2$	167	식 (7), (8), (9)
	0.05	$t = \frac{100}{b^2} X_c^2$	100	식 (7), (8), (10)

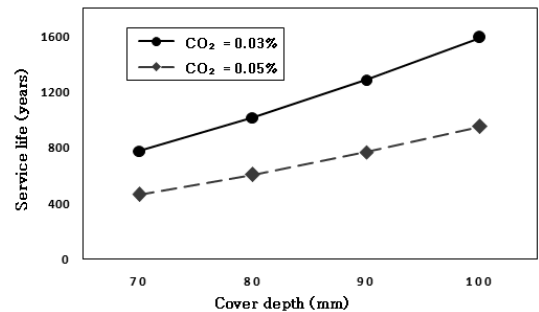


Fig. 4. Results of service life by carbonation attack.

였으며, 그 결과는 Fig. 4와 같다. 결과에 의하면 같은 피복 두께에 대해 CO<sub>2</sub> 농도 0.03%는 0.05% 보다 전체적으로 높은 내구수명을 보였다. 이는 CO<sub>2</sub> 농도가 높을수록 탄산화에 대한 내구수명이 저하되는 것으로 판단된다. 또한 LNG 저장탱크 외주 콘크리트의 설계 피복 두께 70 mm, 80 mm, 90 mm, 100 mm에 대한 대기 중 환산 CO<sub>2</sub> 농도 0.03%의 탄산화 내구수명은 각각 779년, 1,017년, 1,287년, 1,589년으로 나타났으며, 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도 0.05%에 대한 탄산화 내구수명은 466년, 609년, 771년 및 951년을 각각 나타냈다. 특히, 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도가 0.03%에서 0.05%로 증가할 때 각 피복 두께에서의 감소폭은 313년, 408년, 516년, 658년으로 점점 감소하는 것으로 나타나 피복 두께가 증가하면 탄산화 저항성이 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 CO<sub>2</sub> 농도 0.03%에서 각 피복 두께 사이의 증가폭은 238년, 270년, 302년이며, CO<sub>2</sub> 농도 0.05%에 대한 각 피복 두께 사이의 증가폭은 143년, 162년 및 180년으로 나타나 CO<sub>2</sub> 농도가 높을수록 피복 두께에 대한 탄산화 내구수명 변화가 작은 것으로 나타났다. 이는 공기 중에 CO<sub>2</sub> 농도가 높으면 콘크리트 내부로의 침투가 빨라져 탄산화에 대한 내구수명이 빨리 저하되는 것으로 판단된다.

한편, 일반적으로 측진 탄산화 시험으로부터 획득된 데이터에 의한 내구수명 평가는 실제 구조물에서 획득된 장기 데이터 보다 큰 값을 나타내는 것으로 알려져 있으며, 최근에는 탄산화와 염해, 탄산화와 동결융해 및 탄산화와 알칼리골재반응 등 탄산화를 중심으로 한 복합성능저하에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[20]. 따라서 탄산화에 대한 성능저하의 정도를 정확히 평가하기 위해서 또는 명확히 규명하기 위해서는 실제 운영 중에 있는 LNG 저장탱크로부터 획득된 시편의 비교·분석 및 다양한 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

#### 4.4. 탄산화 억제 방안

LNG 저장탱크와 같은 특수 구조물을 설계할 때에는 콘크리트의 성질과 구조물이 놓인 주위환경조건의 영향을 크게 받기 때문에 콘크리트의 사용재료·배합·시공 또는 환경조건 즉, 온도·습도·이산화탄소 농도 등 많은 영향인자를 고려해야 한다. 특히, 염해와 같이 콘크리트의 대표적 열화인자인 탄산화는 일반 철근콘크리트 구조물에서 반드시 생기는 것이며, 콘크리트 내의 철근은 이 탄산화에 의해 연식은 부식하게 된다. 따라서 탄산화에 의한 철근 부식을 억제하는 방법은 탄산염해에 가장 큰 영향을 미치는 탄산화 진행속도의 완화이며, 이는 이산화탄소와 세공용액의 pH 유지능력(12~13)에 관련된 2가지

항목으로 집약될 수 있다. 구체적으로는 균열을 포함한 경화체 조직구조의 변화에 의한 물질이동성의 변화와 세공용액의 이온조성 또는 수산화칼슘 등 수화생성물의 변화 등이며, LNG 저장탱크와 같은 특수 구조물의 설계시 탄산염해의 억제를 위해 다음과 같은 사항이 고려되어야 할 것이다.

시멘트의 경우 1~5종 포틀랜드시멘트에 있어서 각각 2종과 5종을 지칭하는 중용열형 및 내황산염형은 건조하면 콘크리트의 내부 공극을 크게 하여 온도·습도·이산화탄소 등 콘크리트에 유해한 열화인자의 내부 침투가 용이(탄산화 속도 증가)해져 특수한 경우를 제외하고는 이들의 사용을 지양해야 한다. 또한 콘크리트의 초기 및 장기강도 발현을 위해 포틀랜드시멘트에 양질의 포졸란 성분을 10~30% 혼합시켜 만든 혼합시멘트의 경우 시멘트 수화반응시 생성되는 수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>)의 주성분인 CaO 성분이 상대적으로 적어 탄산화 속도를 빠르게 하며, 이 또한 구조물 설계시 고려되어야 한다.

또한, 콘크리트에 사용되는 골재로서 입도(최적 조립율(Fineness Modulus, F.M.) 2.8 정도)가 좋은 강자갈, 강모래, 부순돌 등 조직이 치밀하고 강한 골재는 시멘트페이스트와 골재 사이 천이영역(Interfacial Transition Zone, ITZ) 부분의 부착력을 강화시켜 수밀성 및 기밀성 향상으로 그 사용이 권장되나 천연 골재에 비해 자체공극이 많고 통기성도 큰 경량골재는 사용이 자제되어야 한다.

그리고, 고성능감수제(High-Range Water-Reducing Agent, HRWRA), AE제(Air Entrained), 유동화제(Superplasticizer) 등 화학혼화제(Chemical admixtures)의 사용은 수화반응시 요구되는 최소 사용수량으로 W/C 또는 W/B 비(일반적으로 물시멘트비 또는 물결합재비가 작을수록 상대적으로 공극율이 작아짐)를 줄이며, 시멘트 입자 및 인장강도의 보강 목적으로 사용되는 섬유 분산성을 개선시켜 콘크리트 내부를 치밀하게 만들어 탄산화를 늦추는데 효과적이다.

마지막으로 환경 및 시공 조건으로는 이산화탄소의 농도가 질을수록 또는 산성비의 pH가 낮을수록 탄산화의 속도가 빠르며, 시공시에는 충분한 다짐을 통하여 밀실한 콘크리트 시공에 유의해야 한다. LNG 저장탱크는 해수 또는 해풍의 영향을 직·간접적으로 받는 바다가 근처에 시공되기 때문에 실외 부재에 대한 보수 및 대책 강구가 필요하다.

## V. 결론

본 연구는 현재 신설 중에 있는 삼척 LNG 저장탱

크 콘크리트 배합표의 공시체로부터 획득된 촉진 탄산화 시험 결과를 가지고 탄산염해에 대한 내구수명과 그 억제 방안에 대해 평가 하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 탄산화 침투 깊이 측정 결과 재령이 증가할수록 탄산화 침투 깊이가 깊어짐을 육안검사로부터 알 수 있었으며, 그 때 재령 7일, 28일, 56일의 탄산화 침투 깊이는 4.45 mm, 9.19 mm, 13.37 mm로 각각 나타났다. 이는 대상 구조물의 철근피복 두께(70 mm~100 mm) 및 촉진 탄산화 시험인 점을 고려하더라도 큰 여유를 보이고 있지만 향후 유지관리 측면에서 지속적인 관리가 필요할 것으로 판단된다.

(2) 콘크리트의 재령에 따른 탄산화 침투깊이와 시간의 제곱근( $\sqrt{t}$  법칙)에 의하면 속도계수는  $4.495 \text{ mm}/\sqrt{t(\text{weeks})}$  을 나타냈으며, 기존 연구결과를 고려했을 때 시간계수 (t)의 상관관계를 규명할 필요가 있어 실제 운영 중인 LNG 저장탱크에서 획득된 실제 데이터와의 비교·분석이 필요할 것으로 판단된다.

(3) 탄산화 속도계수를 가지고 대기 중 환산  $\text{CO}_2$  농도 즉, 0.03%와 0.05%를 각각 고려한 LNG 저장탱크 외주 콘크리트의 설계 피복 두께(70 mm, 80 mm, 90 mm, 100 mm)의 내구 수명은 779년, 1,017년, 1,287년, 1,589년과 466년, 609년, 771년, 951년으로 나타났으며, 같은 피복 두께에 대해  $\text{CO}_2$  농도 0.03%는 0.05%보다 전체적으로 높은 내구수명을 보였다.

(4) 탄산염해에 영향을 미치는 인자들을 분석한 결과 콘크리트 경화체내 조직구조의 물질이동성 변화와 세공용액의 이온조성 및 수화생성물 변화 등의 조절을 통하여 탄산염해의 억제가 가능할 것으로 보였다.

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 플랜트기술고도화사업 LNG 플랜트사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### REFERENCES

[1] C.L., Page and K.W.J., Treadaway, "Aspects of the electrochemistry of steel in concrete", Nature, 297(5862), pp.109~15, (1982)  
 [2] Korea Concrete Institute, "Advanced Concrete Engineering", Kimoondang, (2005)  
 [3] P., Mehta and J.M., Monteiro, "Concrete", 3rd ed., The McGraw-Hill Companies, New York (2004)

[4] S.R., Lee and S.H., Hwang, "An Experimental Study on the Estimation of Chloride Diffusion Coefficient of LNG Storage Tanks", Journal of Energy Engineering, Vol.21, No.2, pp.118~23, (2012)  
 [5] S.R., Lee, H.J., Bang and I.C., Kim, "Service Life Assessment of LNG Storage Tank Using Life-365", Journal of Energy Engineering, pp.68, (2012)  
 [6] Korea Radioactive Waste Agency, "Counsel for Deterioration Assessment of Silo Concrete", Final Report, (2011)  
 [7] K.I., Song, K.H., Yang, B.Y., Lee and J.K., Song, "Carbonation Characteristics of Alkali Activated Blast-Furnace Slag Mortar", Journal of Korea Concrete Institute, Vol.24, No.3, pp.315~22, (2012)  
 [8] S.P., Kang, Y.S., Kim, H.W., Song and G.Y., Kim, "The Prediction Model of Carbonation Process by  $\text{CO}_2$  Diffusion Using the Air Permeability Coefficient for Concrete", Journal of Korea Concrete Institute, Vol.22, No.2, pp.209~17, (2010)  
 [9] I.S., Yoon, "Theoretical Analysis of Critical Chloride Content in (Non)Carbonated Concrete Based on Characteristics of Hydration of Cement", Journal of Korea Concrete Institute, Vol.19, No.3, pp.367~75, (2007)  
 [10] B.H., Oh, S.K., Lee, M.K., Lee and S.H., Jung, "Influence of Carbonation for Chloride Diffusion in Concrete", Journal of Korea Concrete Institute, Vol.17, No.2, pp.179~89, (2005)  
 [11] K.H., Kim and S.W., Cha, "Reliability-Based Service Life Estimation of Concrete in Marine Environment", Journal of Korea Concrete Institute, Vol.22, No.4, pp.595~603, (2010)  
 [12] S.W., Kim, J.S., Lee, T.S., Kang, Y.W., Song and C.W., Park, "Service Life Prediction of High Performance Segment Structures under Chloride Environment", Journal of Korea Concrete Institute, Vol.25, No.2, pp.731~2, (2013)  
 [13] Korea Meteorological Administration, "Report of Global Atmosphere Watch", (2012)  
 [14] M.H., Kim, B.C., Song, J.S., Ko, S.C., Jung, Y.J., Kwon, G.Y., Kim and S.P., Kang, "A Study on the Evaluation of Deterioration Degree for Reinforced Concrete Apartments in Korea", Journal of Architectural Institute of Korea,

- Vol.16, No.6, pp.89~94, (2000)
- [15] 梶田佳寛 · 棚野博之, "コンクリートの中性化進行豫測モデル", 콘크리트工学論文集, Vol.2, No.1, pp.125~33, (1991)
- [16] G.Y., Kim, Y.S., Kim, B.S., Cho and M.H., Kim, "Performance Based Durability Design of Concrete Structures Considering Carbonation", Journal of Korea Concrete Institute, Vol.18, No.4, pp.24~31, (2006)
- [17] G.J., Osborne, "Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete", Cement & Concrete Composite, Vol.21, No.1, pp.11~21, (1999)
- [18] M., Collepardi, S., Collepardi, J.J., Ogoumah Olagot and F., Simonelli, "The Influence of Slag and Fly Ash on the Carbonation of Concretes", Proceeding eight CANMET/ACI international conference, Publication SP-211, pp.483~94, (2004)
- [19] P., Sulapha, S.F., Wong, T.H., Wee and S., Swaddiwudhipong, "Carbonation of Concrete Containing Mineral Admixtures", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.15, No.2, pp.134~43, (2003)
- [20] J.S., Ryou, H.S., Kim and J.B., Lee, "Combined Deterioration of Concrete Durability with Respect to Carbonation", Journal of Korea Concrete Institute, Vol.22, No.4, pp.36~8, (2010)