

중성화 측정을 통한 콘크리트의 잔존수명 예측

A Prediction of Remaining Service Life of Concrete for Irrigation Structure by Measuring Carbonation

이준구* 박광수** 신수균*** 김관호* 윤성수****

Lee, Joon Gu Park, Kwang Su Shin, Su Kyun Kim, Kwan Ho Yoon, Seong Soo

ABSTRACT

The variance characteristics of the calcium carbonate contents along to the concrete cover depth takes the prediction method of remaining service life of concrete. Calcium carbonate contents were measured by the Thermo Gravimetric/Differential Thermal Analysis method at three point, depth of 0.25cm, 0.75cm, 1.25cm from the surface of concrete. This prediction method contain some assumption that the chemical protection conferred on steel is through a passive protective oxide film which forms on steel in an environment at or above a pH of 10.5⁴⁾

1. 서론

콘크리트 구조물은 뚜렷한 목적에 의해 목표내구연한을 가지고 설계되고, 시공되어, 그 목적에 맞도록 쓰여진다. 다년간의 사용에 의해 구조물이 점차 열화되어 그 기능을 유지하기 어려울 정도로 열화되는 과정을 거치게 된다. 설계당시의 소기의 목적에 맞는 기능을 발휘할 수 없을 때, 구조물로서의 가치를 상실한다. 콘크리트 구조물이 다양한 기상작용과 유해한 환경에 견뎌내는 성질을 내구성이라 칭하며, 콘크리트의 내구성 저하원인으로 동결융해, 중성화, 철근부식, 알칼리골재반응 등을 꼽는다. 콘크리트 구조물이 내구성을 잃어 가는 과정에서 적정시기에 유지보수를 할 경우 내구성을 회복하여 경제적인 구조물의 활용이 이루어지는 경우가 많다. 그러나 콘크리트의 내구성을 평가하기란 쉽지 않는 문제다. 본 연구에서는 중성화로 인한 콘크리트의 열화과정을 분석하고, 기존 콘크리트 구조물의 중성화를 측정하여 잔존내구연한을 추정하였다. 즉, 잔존내구연한이 끝나는 시점에서 적정유지보수를 실시하여 경제적인 구조물 활용이 본 연구의 목적이다. 본 연구에서는 농업용수의 주 수원공인 저수지의 콘크리트 구조물 부분을 정밀분석하고, 그 자료를 데이터베이스로 구축하여 복합적으로 작용하는 내구성 저하 원인들을 서로 비교·분석하였다. 특히, 중성화 측정부분은 지시약인 페놀프탈레인 용액을 사용하여 중성화깊이를 측정하였으며, 시차열중량분석(TG/DTA)을 통해 탄산칼슘(CaCO₃)과 수산화칼슘(Ca(OH)₂)을 깊이별로 분석하였다. 또한, 시차열중량분석을 실시한 콘크리트 깊이와 동일한 깊이에서 pH를 측정하였다.

2. 중성화 깊이의 추정

콘크리트의 중성화를 측정하기 위해 가장 많이 사용되는 중성화 측정법인 페놀프탈레인에 의한 지시약 측정법과 흡열과 발열의 특성을 활용하는 시차열중량분석법을 사용하였다.

* 정회원, 농업기반공사 농어촌연구원 주임연구원
** 정회원, 농업기반공사 농어촌연구원 수석연구원
*** 정회원, 농업기반공사 농어촌연구원 책임연구원
**** 정회원, 충북대학교 농과대학 농공학과 전임강사

2.1 중성화 측정(시차열중량분석법(TG/DTA))

시차열 중량분석법은 시멘트 화학에서 사용되는 방법으로서 가열 또는 냉각하는 과정에서 결정구조가 변화할 때 흡수 또는 방출하는 에너지를 열량으로 변환하는 열변화를 통해 결합수와 흡착수 등의 이탈과정의 열변화를 측정하는 방법이다. 온도변화에 따라서 일어나는 반응이 흡열인가 발열인가를 조사하는 시차열분석(DTA : Differential Thermal Analysis), 열변화에 의한 중량변화를 측정하는 열중량분석(TG : Thermo Gravimetric analysis)을 동시에 실시한다.

시멘트 수화물의 온도를 높이면 100℃ 부근에서 자유수의 탈수, 100~300℃ 부근에서 모노설페이트(mono-sulfate) 등의 탈수, 400~500℃에서 수산화칼슘의 탈수, 650~900℃에서 탄산칼슘의 탈탄산이 발생한다. 물론 시멘트 수화물의 조성은 복잡해서, 반드시 이러한 반응들만이 일어나는 것은 아니지만, 이들 반응이 지배적이므로, 시멘트 수화물에 열을 가하여 400~500℃에서 수산화칼슘의 탈수와 650~900℃에서 탄산칼슘의 탈탄산 시의 중량변화를 측정함으로써 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 CaCO_3 의 정량적인 측정이 가능한 시험법으로 지시약에 의한 측정법보다 복잡하나 그 신뢰도가 높다.

본 연구에서는 저수지의 여수토 방수로의 웅벽에서 콘크리트 코어를 6개씩 채취하여 그 중 3개는 중성화 측정, 나머지 3개는 압축강도, 탄성계수 및 초음파 등을 측정하였다. 코어채취는 습도 등의 환경적인 영향을 고려하여 여수토 방수로 웅벽의 만수위선을 기준선으로 하여 기준선 부근에서 채취하였다. 시차열중량분석을 위해 코어를 대기와 접한 부분부터 0.5cm의 두께로 절단하여, 3단계의 깊이로 3개의 코어에서 절단하였다. 깊이별로 3개의 슬라이스를 잘게 부수어 150 μm 체(No.100)로 미세분말을 선별하여 시차열중량분석을 실시하였다.

2.2 중성화 측정(지시약(페놀프탈레인))

탄산화 깊이를 측정하는 가장 간단한 방법으로 99%의 알콜에 1%의 페놀프탈레인을 용해한 지시약을 콘크리트에 분무하면 중성화된 부분은 무색, 중성화되지 않은 부분 즉, 알칼리성을 갖는 부분은 적색으로 변화되어 콘크리트표면에서 중성화된 부분까지의 깊이를 측정할 수 있는 방법이다. 페놀프탈레인은 pH 8.3~9.5의 범위를 지시하는 것으로 알려져 있다.

콘크리트 품질이 낮고 사용연한 많이 경과한 구조물에서 채취한 콘크리트 코어일수록 코어채취 일의 경과에 따라 코어표면에서부터 코어 중심으로 중성화가 빨리 진행되는 것으로 계속되었다. 따라서 이의 영향을 없애기 위해 할렬인장으로 코어를 쪼개어 절개면에 페놀프탈레인용액을 충분히 분무하여 버니어캘리퍼스를 이용하여 중성화된 부분의 깊이를 최대깊이, 최소깊이, 평균깊이로 나누어 측정하였다.

2.3 페하(pH) 측정

시차열중량분석을 위해 채취한 미세 분말(150 μm 체통과)에서 깊이별로 각각 1g 씩을 채취하여 시약 병에 담는다. 1g의 분말시료에 10cc의 증류수를 넣어 잘 혼든 후 pH메타를 통해 측정하였다.

3. 결과분석 및 고찰

3.1 사용연한에 따른 탄산칼슘의 함량변화

콘크리트의 사용연한에 따른 콘크리트 표면(깊이 0.5cm)의 탄산칼슘의 함량을 정량적으로 분석하여 그래프로 도시한 것이 그림 1이다. 본 연구를 위한 분석대상 지구는 사용연한 10~40년 된 구조물로 총 100개 지구이며, 현재 분석이 완료되어 그래프에 도시한 것은 80개 지구이다. 동일한 준공

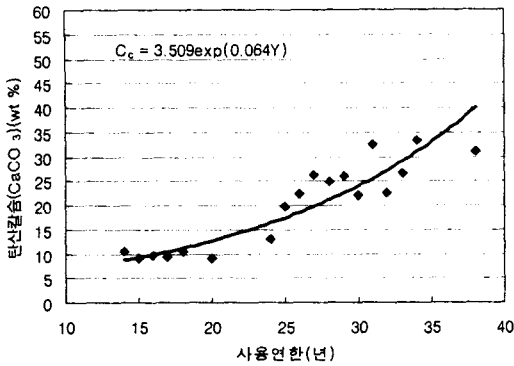


그림 1 사용연한에 따른 탄산칼슘함량 변화

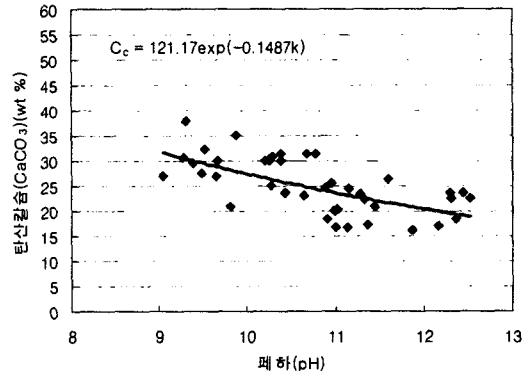


그림 2 탄산칼슘함량에 따른 페하(pH)

연도를 갖는 지구에서 측정된 탄산칼슘의 함량은 그 평균치를 사용하였다. 사용연한에 따른 탄산칼슘의 함량변화 관계식이 (식 1)과 같이 도출되었다.

$$C_c = 3.509 \exp(0.064 Y) \quad (1)$$

여기서, C_c : 탄산칼슘(wt %), Y : 사용연한(년)

3.2 탄산칼슘의 함량에 따른 pH변화

콘크리트는 배합직후 수산화칼슘($Ca(OH)_2$)과 수산화 알칼리(Na^+ , K^+)성분의 영향으로 강알칼리성(pH=13정도)을 띄는 것으로 알려져 있으며, 사용연한이 경과함에 따라 콘크리트 구조물이 처하는 여러 가지 환경여건 하에서 탄산화(중성화)가 이루어져 콘크리트내부 세공에 탄산칼슘(pH=8.5~10)이 침적하는 것으로 알려져 있다. 콘크리트가 중성화되는 유리한 조건은 습도(60±5%RH), 온도(20±1℃)가 적정수준을 유지하고, 탄산가스(실외 0.03%, 실내 0.1%)의 농도가 높은 경우이다.

본 연구에서는 시차열중량분석 시 채취한 미세분말시료를 증류수에 희석시켜 깊이별로 페하를 측정하였다. 탄산칼슘의 함량과 페하의 관계를 유도하기 위해 깊이 0.5cm인 위치의 측정값을 그림 2와 같이 도시하였다. 탄산칼슘의 함량과 pH의 관계는 지수함수인 (식 2)와 같이 나타났다.

$$C_c = 121.17 \exp(-0.1487k) \quad (2)$$

여기서, C_c : 탄산칼슘(wt %), k : pH

3.3 깊이에 따른 탄산칼슘 함량의 변화

콘크리트 코어의 표면에서부터 깊이 0.25cm, 0.75cm, 1.25cm에서 미세분말을 채취하여 시차열중량분석법을 통하여 탄산칼슘($CaCO_3$)과 수산화칼슘($Ca(OH)_2$)을 측정하였다. 콘크리트 깊이에 따라 탄산화의 경향을 분석하기 위해 전남지역 대동지(1969년 준공)를 대상으로 깊이별 탄산칼슘의 함량을 도시한 결과 그림 3과 같이 나타났다. 깊이에 따른 탄산화는 지수함수 관계를 갖는 것으로 나타났으며, 80개 지구의 깊이의 변화에 따른 탄산화의 변화를 분석한 결과 그림 4와 같이 지수함수 관계를 갖는 것으로 나타났으며, (식 3)과 같이 대표함수로 나타낼 수 있었다. 깊이 4cm에서 탄산칼슘의 함량을 추정된 결과 그림 3에서 보는 바와 같이 4.18wt%로 추정할 수 있었다.

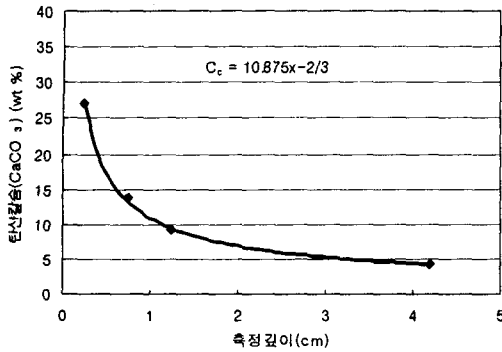


그림 3 측정깊이에 따른 탄산칼슘의 변화
(샘플 지구 추세식)

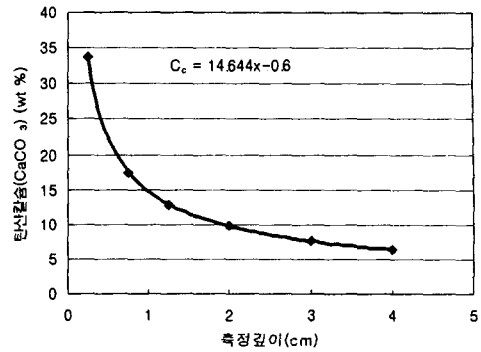


그림 4 측정깊이에 따른 탄산칼슘의 변화
(종합 제안식)

임의의 깊이에서 탄산칼슘의 함량을 추정하기 위해선 콘크리트 표면에서부터 깊이별 3점 이상의 측정값을 통한 추세식을 통하여 추정하여야 그 신뢰도가 높을 것이다.

$$C_c = 14.644x^{-0.6} \quad (3)$$

여기서, C_c : 탄산칼슘(wt %), x : 측정깊이(cm)

3.3 잔존수명 예측

콘크리트의 수명 및 잔존수명을 예측하는 많은 연구 결과를 살펴보면 '중성화깊이는 사용연한의 제 공급에 비례한다'는 연구결과와 '콘크리트의 중성화로 인한 부동태 피막의 파괴와 더불어 철근의 부식이 시작된다'는 연구결과를 기초로 하여 콘크리트의 수명평가가 또는 잔존수명을 예측하는 연구가 대부분을 차지하는 것으로 문헌조사 되었다. 본 연구에서는 준공연도별로 구조물을 선정하여 사용연한에 따른 중성화의 진행과정을 분석하고, 이를 토대로 콘크리트가 가진 잔존수명(잔존내구연한, 잔존공용기간)을 추정하였다.

Pourbaix⁴⁾에 따르면 콘크리트의 부동태피막은 pH 10.4이하에서 파괴되어 철근의 부식이 시작된다. 강알칼리성 콘크리트가 중성화되어 pH 10.4이하로 떨어졌다는 점은 곧 탄산가스와 습기가 침투했음을 의미하는 것이다. 시멘트 화학에서 콘크리트의 탄산화 과정에서 탄산칼슘과 물이 생성되는 것으로 알려져 있다⁷⁾. 즉, 철근이 위치한 깊이까지 중성화가 진행되어 pH 10.4를 나타내면 이 철근은 부식이 진행될 수 있는 환경에 노출된 것으로 볼 수 있다. 본 연구에서는 철근이 위치한 깊이에서 페하 10.4가 측정되기까지의 시간을 콘크리트 구조물의 공용연수로 산정하였다. 콘크리트 구조설계기준에 의하면 흠에 접하거나 옥외의 공기에 직접 노출되는 콘크리트의 경우 D25이하의 철근에서는 최소 피복두께를 5cm로 규정하고 있다. 본 연구의 분석대상인 저수지의 여수도 방수로의 옹벽에서 피복두께는 5cm로 설계되고 있으며, Weyers³⁾에 의하면 시공 시 오차에 의해 유효 피복두께는 4.2cm로 추정할 수 있다. 잔존수명예측 순서와 적용사례를 표 1에 나타내었으며, 정밀조사 대상지구의 정밀조사자료의 일부와 추정 잔존내구연한을 표 2에 나타내었다. 추정 내구연한이 영보다 작은 경우는 그만큼의 기간동안 부식이 진행중임을 의미한다.

표 1 잔존수명 예측 순서 및 적용 예

| 잔존수명 예측 순서 | 적용 예(1969년 준공 대동지) |
|--|---|
| 1) 유효 피복두께 산정 (대상구조물에서 실측을 통한 측정자료가 없는 경우 4.2cm로 적용) | 1) 유효피복두께, $X = 4.2\text{cm}$. |
| 2) 콘크리트 코어의 깊이별, 최소 3점에서 탄산칼슘함량 측정 | 2) $C_{c\ 0.25} = 27.06$, $C_{c\ 0.75} = 13.71$, $C_{c\ 1.25} = 9.12$ |
| 3) 3점에서 얻은 추세식을 통해 유효 피복두께에서의 탄산칼슘 함량 추정, 추정된 탄산칼슘 함량을 (식 1)에 대입하여 사용연한 산출. | 3) 추세식 $C_c = 10.875x^{-\frac{2}{3}}$, $C_{c\ 4.2} = 4.18$, $Y_{X=4.2} = 2.73$ |
| 4) (식 2)를 통해 pH 10.4에서의 탄산칼슘함량 산출, 산출한 탄산칼슘을 (식 1)에 대입하여 사용연한을 산출. (부동태피막이 파괴되는 폐하를 10.4로 볼 경우) | 4) $C_{c\ pH=10.4} = 25.81$, $Y_{pH=10.4} = 31.18$ |
| 5) 4)에서 얻은 사용연한에서 3)에서 얻은 사용연한을 제하면 잔존수명이 된다.(잔존수명이 영보다 작은 경우는 동일한 기간동안 철근의 부식이 진행되었음을 의미함.) | 5) $Y = 28.44\text{년}$ (잔존수명) |

표 2 정밀조사 자료와 추정 잔존수명(일부분)

| 도별 | 저수 지명 | 준공 년도 | pH | | | 탄산칼슘(wt %) | | | 수산화칼슘(wt %) | | | 코어 강도 | 중성화 깊이 | 추정잔존 수명 |
|----|-------|-------|--------|--------|--------|------------|--------|--------|-------------|--------|--------|-------|--------|---------|
| | | | 0.25cm | 0.75cm | 1.25cm | 0.25cm | 0.75cm | 1.25cm | 0.25cm | 0.75cm | 1.25cm | | | |
| 전남 | 서상 | 68 | 9.3 | 9.72 | 9.72 | 37.73 | 35.34 | 34.23 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 79 | 48.98 | -3.28 |
| 전남 | 대동 | 69 | 9.05 | 9.81 | 11.99 | 27.06 | 13.71 | 9.12 | 0.00 | 2.34 | 3.62 | 139 | - | 28.46 |
| 전남 | 오류 | 75 | 10.38 | 11.3 | 12.25 | 31.27 | 25.52 | 17.90 | 0.00 | 3.74 | 3.33 | 127 | 29.13 | 10.59 |
| 전북 | 덕산 | 81 | 9.65 | 11.36 | 11.41 | 27.04 | 14.26 | 10.35 | 0.00 | 3.62 | 3.82 | 141 | 7.50 | 25.43 |
| 전남 | 월평 | 90 | 10.73 | 11.81 | 12.62 | 36.68 | 26.59 | 15.19 | 0.00 | 4.15 | 4.65 | 165 | 8.70 | 48.30 |

※ 단위 : 코어강도 : kgf/cm², 중성화 깊이 : 평균깊이 mm, 추정잔존내구연한 : 년

4. 결 론

농업용수의 주 수원공인 저수지의 여수토 방수로 옹벽 부의 콘크리트를 대상으로 현장 및 실내실험을 통하여 얻은 자료들 중 콘크리트 중성화관련 자료를 분석하여 콘크리트의 잔존내구연한을 예측하였다. 콘크리트의 중성화 측정은 시차열중량분석장치와 pH측정장치를 이용하여 콘크리트의 깊이별로 탄산칼슘과 수산화칼슘 및 폐하를 정량적으로 측정하여 콘크리트의 중성화 특성을 분석함으로써 콘크리트의 잔존수명을 예측할 수 있었다. 콘크리트의 잔존수명 예측과정에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 콘크리트의 깊이별 탄산칼슘의 함량을 측정함으로써 콘크리트 수리시설물의 잔존내구연한을 예측하는 기법을 제안하였다.

2) 콘크리트의 중성화진행 정도는 콘크리트 표면에서부터 진행되어 깊이가 증가함에 따라 대수감소 비례 관계를 갖는 것을 알 수 있었다.

3) 다양한 콘크리트의 중성화 측정방법 중 시차열중량분석법에 의한 탄산칼슘의 함량을 정량적으로 측정하는 방법이 신뢰도가 높은 것으로 나타났다.

4) 현장구조물의 중성화 촉진환경 변수를 고려한 잔존수명 예측 방법에 대한 추가적인 연구가 이어져야 할 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

1. Ali A. Ramezani-pour, A. Tarighat, A. Miyamoto "Concrete Carbonation Modelling and Monte Carlo Simulation Method for Uncertainty analysis of Stochastic Front Depth" Mem Fac Eng Yamaguchi Univ. Vol.50 No.2, 2000
2. S. K. Roy, K.B Poh, D.O Northwood "Durability of concrete - accelerated carbonation and weathering studies", Building and Environment 34 1999.
3. Weyers, R.E "Service Life Estimates (SHRPS-668),"Strategic Highway Research Program. National Research Council, 1993.
4. Pourbaix M. Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions, Pergamon Press, Oxford, 1966. p. 307-21
5. 김도겸, "콘크리트 구조물의 사용수명 평가 프로그램 개발", 건설기술정보. 2001. 9.
6. 정우용의 3인, "철근부식에 의한 육지 콘크리트 잔존수명 예측", 콘크리트 학회논문집 제12권 5호 2000. 10.
7. 이종득, "콘크리트 구조물의 조기열화 내구성 진단", 도서출판 일광.pp 120~137. 1996. 5.
8. 박성계, "열분석기의 원리 및 응용", 울산대학교, 공동기기센터 1998.
9. 이준구의 4인, "콘크리트의 사용연한에 따른 중성화 진행에 관한 실험적 연구", 한국농공학회 학술발표회 논문집, 2001.
10. 김영의, "콘크리트의 강도, 중성화, 화재손상부 비파괴검사 방법", 콘크리트 학회지 제 10권 2호, 1998. 4.