

중성화 측정을 통한 콘크리트의 잔존수명 예측 모델

이준구^{1)*} · 박광수¹⁾ · 김한중²⁾ · 이정재²⁾

¹⁾ 농업기반공사 ²⁾ 서울대학교 농공학과

(2002년 11월 21일 원고접수, 2003년 7월 10일 심사완료)

Prediction Model of Remaining Service Life of Concrete for Irrigation Structures by Measuring Carbonation

Joon-Gu Lee^{1)*}, Kwang-Soo Park¹⁾, Han-Joung Kim²⁾, and Joung-Jae Lee²⁾

¹⁾ KARICO RRI, Ansan, 425-170, Korea

²⁾ Dept. of Agricultural Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

(Received November 21, 2002, Accepted July 10, 2003)

ABSTRACT

Recently, the researches on the durability design of concrete structures have been studied. As the examples, models to evaluate the service life prediction of the structure have been developed. The purpose of this article is to develop the model for predicting remaining service life. The final aim is to provide the user time for repairing the concrete structures. In addition, it makes possible to maintain the concrete structure economically.

70 reservoirs out of the inland concrete structures were selected and concrete structures of their components were surveyed. Two methods were used for measuring carbonation; TG/DTA method and Phenolphthalein indicator and, the value of pH was measured by the pH meter. After deriving correlations of calcium carbonate and used year, duration from completion year to 2002, pH value, and concrete cover depth the model was developed for predicting remaining service life by measuring data as small as possible.

The conventional models had been developed on the basis of experiment data obtained from the restricted lab environment like as carbon gas exposure. On the other hand this model was developed on the basis of measuring data obtained from the real field that the complex deterioration actions are occurred such as freezing and thawing, carbonation, steel corrosion, and so on. The reliability of the developed model will be evaluated high in this point and this model can help to maintain concrete structures economically by providing the manager time to repair the deteriorated concrete structures in site of facility management.

Keywords : remaining service life, carbonation, passive protective oxide film, calcium carbonate, pH value

1. 서 론

콘크리트 구조물은 뚜렷한 목적에 의해 설계, 시공, 사용되며, 계획 시 목표로 한 내구연한 동안 그 기능을 유지할 것으로 기대한다. 그러나 여러 해 동안 사용되면서 구조물은 점차 노후화 되어 설계당시의 목적에 맞는 기능을 유지하기 어려울 정도로 악화되는 일련의 과정을 거치게 된다. 구조물이 설계당시의 목적에 맞는 기능을 발휘할 수 없을 때, 구조물로서의 가치를 상실한다. 콘크리트가 설계조건하에서 시간경과에 따른 열화가 적고, 소요의 사

시간 중 요구되는 성능의 수준을 지속시킬 수 있는 성능을 내구성이라 하며¹⁾, 콘크리트의 내구성 저하원인으로 동결융해, 중성화, 철근부식, 알칼리골재반응 등을 꼽는다. 콘크리트 구조물이 내구성을 잃어 가는 과정에서 적정시기에 유지보수를 할 경우 내구성을 회복하여 경제적 구조물 활용이 가능하나, 적정시기를 놓칠 경우 열화작용은 사용연한이 거듭할수록 가속화되어²⁾ 대규모의 보강공법을 적용해야 하거나 구조물을 교체해야 하는 시점에 이르게 된다. 따라서 유지보수의 적정시점을 예측하는 것은 매우 중요하다. Tuutti^{3,29)}는 콘크리트속 철근의 부식발생을 그 모델에서 휴지기(initiation period)와 부식진전기(propagation period)로 나누어 설명하였다. 본 연구에서는 철근콘크리트 구조물의 유지보수를 위한 진단개념에서 구조물의 수명을 철근부식의 시작 시점으로 정의하며, 구조

* Corresponding author
Tel : 031-400-1793 Fax : 031-400-1897
E-mail : leejk@karico.co.kr

물의 철근부식 시작시점까지 남아있는 기간을 잔존수명으로 정의한다. 철근의 부식시작시점을 예측하기 위한 정밀 조사와 조사자료를 분석하여 철근부식 시작시점까지 남아있는 잔존수명을 예측하는 모델을 소개하고자 한다.

철근콘크리트 구조물에서 철근이 부식되는 원인을 굳이 나눈다면 크게 염화물 이온에 의한 부식과 콘크리트의 중성화에 의한 철근의 양극부위 용존산소로 인한 부식으로 나누어 볼 수 있다. 본 연구에서는 대상 구조물을 내륙에 있는 구조물로 하였으므로 염화물 이온에 의한 철근의 부식은 고려하지 않았다.

콘크리트는 제조 당시 강한 알칼리성을 띠지만 주로 대기중의 탄산가스에 의해 중성으로 변해간다. 강한 알칼리성을 갖는 콘크리트 속에 묻혀있는 철근은 그 주위에 부동태 피막이 형성되어 부식에 대해 안전하였으나 콘크리트가 중성으로 바뀌어 감에 따라 부식환경에 노출되기 시작한다. 현장에 사용중인 콘크리트는 중성화작용만을 받는 것이 아니다. 특히 본 연구에서 대상구조물로 정한 저수지의 여수로 방수로 용벽과 같은 구조물은 연중 물에 젖어있는 기간이 많아 동절기에 동해로 인하여 그 조직이 표면에서부터 서서히 조금씩 이완되어 가는 과정을 겪는다. 대기중의 탄산가스와 콘크리트중의 수산화 칼슘의 화학적 반응으로 알려진 중성화반응은 온도가 약 20℃ 상대습도가 약 60%정도일 때 주로 일어난다고 한다^{16,28)}. 즉, 동절기의 동결과 용해작용으로 이완되어 있는 콘크리트 조직사이로 봄, 여름, 가을 동안 탄산가스의 확산, 수분의 침투로 콘크리트가 서서히 조금씩 표면에서부터 중성으로 바뀌어 가고 있는 것이다. 콘크리트의 피복두께가 두꺼우면 철근이 있는 위치까지 진행해 가는데 시간이 많이 걸릴 것이며, 반대로 얇으면 짧게 걸릴 것이다. 물론 동결용해작용은 표면에서부터 시작되어 조직이 이완되기 시작하면 점점 이완되는 속도가 빨라지는 특징을 갖는다. 콘크리트의 중성화 진행속도, 철근이 위치한 콘크리트깊이, 그리고 현재의 중성화 진행위치를 알 수 있다면 남아있는 기간, 잔존수명을 예측하는 것이 가능하며 언제 철근콘크리트 구조물이 보수·보강되어야 할 것인지를 예측할 수 있을 것이다. 유지관리 전담부서에서는 보수·보강을 위한 예산을 미리 배정하여 적기에 집행함으로써 구조물을 가장 경제적으로 유지관리 할 수 있을 것이다.

현장 구조물에서 사용연한에 따른 중성화변화를 측정하기 위해 오래된 구조물에서 최근에 만들어진 구조물까지 교루 분포되어 있으며, 비교적 콘크리트 재료의 변화가 적은 저수지의 여수로방수로 용벽구조물을 대상구조물로 하였다. 여·방수로 용벽구조물은 사용환경이 중성화가 촉진되는 환경이다. 상시 습한 배면토와 접하고, 관개기에는 용수를 공급하기 때문에 콘크리트 표면이 물에 포화되며, 급수기와 비급수기에 따라 건조와 습윤이 반복되는 구간도 있다. 또한 그늘에 놓여있는 구간이 많아 습한 표면이

장시간 유지되는 경우도 발생된다. 지역적 배분, 준공년도별 배분, 조사를 위한 접근의 용이성 등을 고려하여 준공년도가 1962년부터 1993년 사이에 분포하는 총 70개 지구를 조사대상으로 선정하였다.

岸谷⁴⁾은 '중성화 깊이가 사용연한의 제곱근에 비례한다'는 연구결과를 발표하고, 중성화 깊이를 측정하여 구조물의 수명을 예측하는 연구를 수행하였다. Browne⁵⁾은 염소이온 농도(0.4%)가 철근깊이까지 미치는 시점을 내구연한으로 설정하였으며, Andrade⁶⁾는 Tuutti³⁾의 모델을 적용하여 철근단면감소에 의한 역학적 구조저항성의 감소로서 한계상태를 모사하였다. Hookham⁷⁾은 중성화 깊이 모델로 콘크리트 피복두께가 모두 중성화되는 시점을 내구연한으로 정의하였다. Clifton^{8,9)}에 의해 내구연한 예측기법에 대한 체계적 정리가 이루어지기도 하였다.

본 연구에서는 조사대상지구의 현장정밀조사로서 비파괴강도측정, 코어강도측정, 배면토양화학분석, 수질 분석, 구조물의 설치환경조사 등을 실시하고, 실내실험으로서 콘크리트 깊이별 중성화 정도 측정을 위해 시차열 중량분석법을 통해 탄산칼슘(CaCO₃)과 수산화칼슘(Ca(OH)₂)의 함량을 정량적으로 측정하였으며, 중성화 깊이 측정을 위해 페놀프탈레인을 이용하였다. 또한 중성화 정도를 측정하는 깊이와 동일한 위치에서 pH미터를 이용하여 pH값을 측정하였다. 실내실험자료를 분석하여 세 가지 관계식을 유도하고, Paubaix¹⁰⁾의 연구결과와 Weyers¹¹⁾의 연구결과를 인용하여 콘크리트 구조물의 잔존수명예측 모델을 개발하였다.

2. 실험개요

2.1 콘크리트의 중성화

콘크리트는 제조 당시 강한 알칼리성(pH=12~13)을 띠는데, 이는 콘크리트중의 시멘트 광물이 물과 반응하여 수화물을 형성할 때 다량의 수산화 칼슘(Ca(OH)₂)이 생성되어 콘크리트 속에 남아 있으며 강한 알칼리성을 띠기 때문이다^{12,26)}. 이 수산화칼슘은 강도발현에는 기여하지 않지만 부동태 피막(passive protective oxide film)을 형성하여 콘크리트 내부에 배근되어 있는 철근의 부식을 방지하는데 중요한 역할을 한다. 이러한 역할을 하는 콘크리트가 중성화되어 가는 과정을 보면 대기중의 약산성 탄산가스(약 0.035%)가 콘크리트 표면에서부터 모관공극을 통해 침투하여 수산화 칼슘이 용해되어 있는 콘크리트 내부의 세공용액(pore solution)과 접촉하면서 안정한 탄산칼슘과 물로 변화되어 탄산칼슘은 콘크리트 내부 공극벽면에 침착하여 콘크리트 조직을 치밀하게 하고, 물은 증발하거나 화학반응에 계속 사용된다. 특히, 콘크리트가 충분히 습하여 콘크리트 조직내부에서 표면으로 콘크리트 공극 중에 존재하는 물이 흘러나올 때 탄산칼슘이나 알칼리 탄산염,

즉, 나트륨염($NaCO_3$), 칼륨염(KCO_3) 등이 함께 흘러나와 콘크리트 표면에 조금씩 계속 침착하여 백화현상(efflorescence)이라 불리는 하얀색 물흐름 모양을 형성하기도 한다. 콘크리트 내부 공극 벽면에 침착한 탄산칼슘은 중성을 띄므로 수산화칼슘이 탄산칼슘으로 변화되어가는 정도에 따라서 폐하(pH)는 점차 강알칼리성에서 중성으로 변화되어간다. 탄산가스와 물이 침투하기 쉬운 표면부터 점차 중성화된다. 이러한 중성화 과정을 통하여 콘크리트의 중성화는 콘크리트의 품질측면에서 볼 때 공극이 크고, 수밀성이 낮은, 높은 물시멘트의 콘크리트와 고로슬래그미분말이나 플라이애쉬와 같은 포졸란을 혼합한 시멘트를 사용한 콘크리트에서 촉진되며, 환경측면에서 볼 때 탄산가스의 농도가 높고, 적정 습도(50~75%)가 유지되는 환경에서 촉진된다. 습도가 너무 높은 경우, 탄산가스가 유입되는 콘크리트의 내부 공극을 막는 효과가 있어 오히려 중성화를 저해하며, 건조와 습윤이 반복되는 환경에서 빠른 속도로 중성화가 진행된다¹³⁾.

이종득¹⁴⁾은 탄산화를 시멘트의 생산과정에서부터 수화반응을 거쳐 탄산화에 이르기까지의 일련의 과정을 이론적 화학반응식의 도움을 빌어 Fig. 1과 같이 설명하고 있다. 식 (1), (2)는 실제 콘크리트 구조물에서 발생한 것을 확인할 수 있으나, 식 (3), (4)는 실제 콘크리트 구조물에서나 실험적으로도 거의 규명하기 어려운 반응이라고 한다.

콘크리트의 탄산화(carbonation)과정에서 나타나는 중성화(neutralization) 현상은 콘크리트 자체에는 문제가 되는 것이 아니고, 콘크리트 내부에 보강근으로 사용한 철근에 부식을 유발시키는 환경을 만들기 때문에 문제가 된다. 철근이 부식되는 환경은 부동태 피막이 형성되어 있더라도 염화물이온의 침투에 의해 부식이 일어날 수 있으며, 이상에서 설명한 것처럼 철근 주위 콘크리트의 중성화에

의해 철근이 부식되는 경우가 있을 수 있다. Pourbaix¹⁰⁾는 콘크리트내 철근 표면의 부동태피막은 폐하(pH) 10.4이하에서 파괴되어 철근의 부식이 시작된다고 하였고, Shalon, R. & Raphael, M.¹⁵⁾은 Fig. 2와 같이 pH가 중성으로 변화되어 감에 따라 녹발생량이 증가해 감을 그림으로 설명하였다. 강알칼리성 콘크리트가 중성화되어 pH 10.4이하로 떨어졌다는 점은 곧 탄산가스, 산소, 물분자가 침투했음을 의미하는 것이다. 시멘트 화학에서 콘크리트의 탄산화 과정에서 탄산칼슘과 물이 생성되는 것으로 알려져 있다. 즉, 철근이 위치한 깊이까지 중성화가 진행되어 pH 10.4를 나타내면 이 철근은 부식이 진행될 수 있는 환경에 노출된 것으로 볼 수 있다.

Parrott¹⁶⁻¹⁸⁾은 중성화에 의한 부식은 수분과 산소의 공급이 중요한 요소이기 때문에 상대습도 95~98%에서 가장 빠르다고했으며, 상대습도 60%미만에서는 중성화가 일어나도 부식이 거의 일어나지 않는다고 했다. 철의 녹은 원래부피의 약 2.5배에서 최대 7배까지 체적이 팽창하여 콘크리트 내부에 균열이 발생되고¹⁸⁾, 철근의 부착강도 저하, 피복콘크리트의 탈락, 철근 단면적의 감소 등 구조물의 내구성 저하를 초래하게 된다. 이러한 원인으로 내구성 측면에서 중성화를 파악하는 것이 중요하다.

2.2 철근의 부식

콘크리트 속에 묻혀있는 철근은 콘크리트가 강한 알칼리성을 갖기 때문에 철근표면에 부동태피막(passive protective oxide film)을 형성하여 부식에 저항하는 것으로 알려져 있다. 따라서 철근주위에 산소가 있더라도 철근은 부식되지 않는다²⁵⁾. 그러나 콘크리트가 중성화되어알칼리성을 잃고 중성으로 바뀌면 이 부동태 피막은 파괴

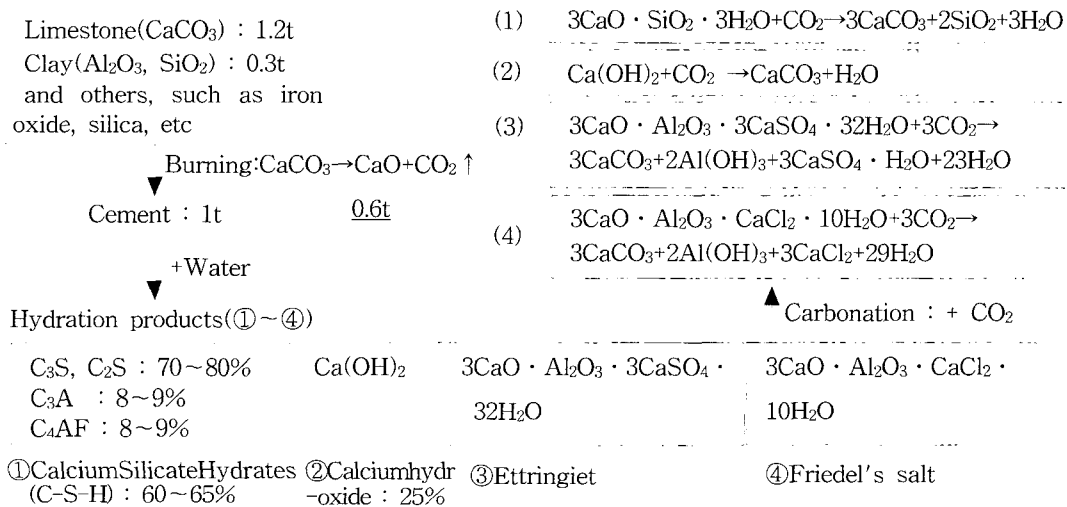


Fig. 1 The Flowchart of chemical reaction from cement manufacture, hydration to carbonation

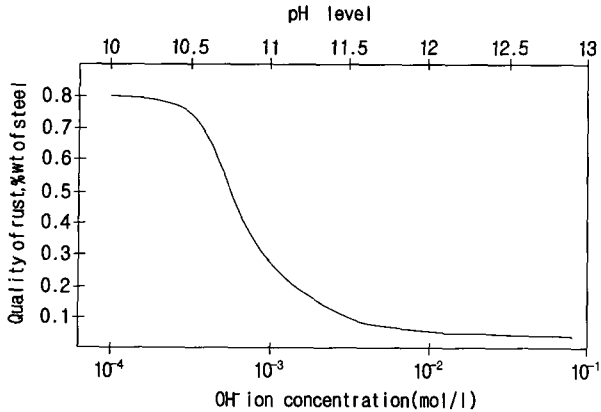


Fig. 2 Corrosion of steel in water solutions as a function of OH⁻ ion concentration and pH level; the reduced corrosion at pH 12.5 is the result of formation of effective passivation film.

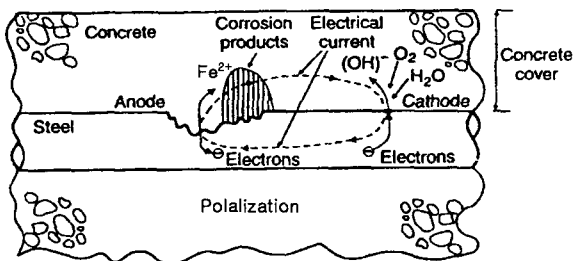


Fig. 3 Corrosion processes by reactions at anodic and cathodic sites on the surface of steel

된다. Fontana^{12,30)}는 이러한 현상을 Fig. 3과 같이 화학적으로 설명한다. 부동태 피막은 콘크리트중의 Ca(OH)₂가 전리되어 생성된 OH⁻와 철근의 극화현상(polarization)으로 인하여 음극에서 생성된 Fe²⁺(ferrous)가 공극수(pore solution)내에서 화학적으로 안정한 Fe(OH)₂를 생성함으로써 형성되며, Fe(OH)₂는 시간이 경과함에 따라 O₂와 결합하여 화학적으로 보다 안정된 Fe³⁺(ferric) 산화물(γ -FeOOH, 혹은, Fe₂O₃)로 변화되어 철근의 표면을 보호하는 것으로 알려져 있다. 피막의 파괴를 지배하는 것은 콘크리트 표면에서부터 콘크리트 내부공극을 통해 확산되는 탄산가스와 해수·해풍, 제설용 염화칼슘 등으로부터 용해되어 수용액 상태로 콘크리트내부 공극을 통해 철근이 있는 곳으로 확산되는 염화물 이온이며, 부식의 전 단계를 지배하는 것은 염화물 이온과 철근의 양극주위(cathodic sites)의 용존산소의 유효성(availability)이다.

탄산가스는 개스 상태로 콘크리트 내부 공극조직을 통해 확산되며, 산소는 개스상태로 확산되거나 수용액에 용존상태로 확산된다. 개스상태로 확산되더라도 양극주의 용존산소로서 반응하기 위해서는 반응 전 반드시 용해되어야 한다. 염화물 이온이 침투할 경우 그 농도가 높은 경우 pH가 높더라도 부분적으로 철근이 부식지만 탄산가스

의 확산에 의한 pH의 점진적 감소는 부동태 피막의 파괴로 이어지고 양극부 용존산소에 의해 Fig. 3과 같이 부식된다. 본 연구에서 대상으로 한 구조물은 내륙 평야부나 산간에 위치해 있으므로 해사 등의 사용으로 인하여 콘크리트 내부에 함유되어 있을 경우를 제외하고는 해수·해풍이나 염화칼슘 등에 노출될 확률은 극히 작다. 따라서 염화물 이온이 콘크리트 내부로 침투할 가능성은 거의 없다고 가정하였다. 즉, 대상구조물에서 부동태피막을 파괴시킬 인자는 이산화탄소와 산소의 확산에 의한 것으로 판단하여 중성화를 수명예측의 근거로 사용한 것이다.

2.3 중성화 측정

콘크리트의 탄산화(carbonation)는 알칼리성인 콘크리트가 탄산가스(CO₂)에 의해 탄산화되는 현상을 일컬으며, 중성화(neutralization)는 탄산가스 뿐만 아니라, 황산염 등에 의해 콘크리트의 pH가 중성으로 되는 모든 현상을 일컫는 것으로 한국콘크리트학회 내구성분과 위원회에서 발표한 바 있다. 콘크리트의 탄산화 깊이를 측정하는 방법은 시차열중량분석법(TG/DTA)²⁷⁾, 지시약에 의한 측정법, X선회절분석법, 현미경분석법, 화학적 분석법, 적외선흡수 스펙트럼 분석법 등이 있다. 본 연구에서는 첫 번째와 두 번째 방법을 사용하여 중성화를 측정하였다.

2.3.1 시차열중량분석(TG/DTA)

시멘트 화학에서 사용되는 방법으로서 가열 또는 냉각하는 과정에서 결정구조가 변화할 때에 흡수 또는 방출하는 에너지를 열량으로 변환하는 열변화를 통해 결합수와 흡착수 등의 이탈과정의 열변화를 측정하는 방법으로, 온도변화에 따라서 일어나는 반응이 흡열인가 발열인가를 조사하는 시차열분석(DTA: differential thermal analysis), 열변화에 의한 중량변화를 측정하는 열중량분석(TGA: thermo gravimetric analysis)을 동시에 실시한다²²⁾.

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 Ca(OH)₂와 CaCO₃의 정량적인 측정이 가능하다.

경기 안성 노곡지(68년 준공)의 분석 예를 들어 설명하면 다음과 같다. 시차열중량분석을 위해 Fig. 4와 같이 코어를 대기와 접한 부분부터 0.5cm의 두께로 절단하여, 3단계의 깊이로 4개의 코어에서 절단하였다. 깊이별로 4개의 슬라이스를 잘게 부수어 150 μ m체(No.100)로 미세분말

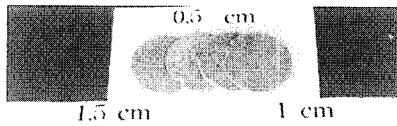


Fig. 4 Concrete slice specimen for carbonation measurement(pH, TG/DTA)

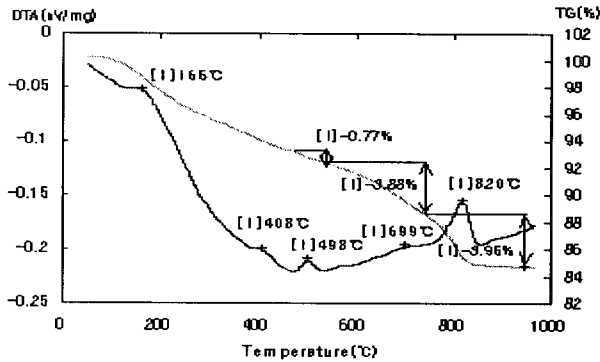


Fig. 5 TG/DTA results curve (Nogok-Gi, built in 1968, An-sung Kyung-gi province)

Table 1 pH indication value of several indicators

Indicator	pH range
Tropaeolin O	pH 11.1~12.7
Alizarin yellow R	pH 10.2~12.2
Thymolphthalein	pH 9.3~10.5
Phenolphthalein	pH 8.3~9.5

을 선별하여 시차열중량분석을 실시하였다. Fig. 5는 샘플 저수지의 TG/DTA분석 예를 보여준 것이다. 실선은 DTA(시차 열 변화)를 나타내는 곡선으로서 피크가 있는 부분에서 흡열인지 발열인지를 알 수 있다. 점선은 TG(중량변화)를 나타내는 곡선으로서 흡열과 발열에 의해 변화되는 중량차를 알 수 있다. DTA 곡선(실선)을 보면 400~500°C 사이에 위로 돌출된 두 개의 피크가 있는데 이는 흡열피크이며, 수산화칼슘의 탈수가 일어난 것이다. 이 때 TG곡선(점선)을 보면 탈수에 의한 0.77%의 중량 감소가 일어남을 알 수 있다. 또한 650~900°C 사이에 두 곳의 피크점을 발견할 수 있다. 이는 탄산칼슘에서 이산화탄소가 이탈하는 흡열반응이 일어났음을 의미하며, 이로 인해 7.83%의 중량감소가 일어남을 TG곡선을 통해 알 수 있다.

200°C 이하에서는 165°C에서 작은 피크가 있는데 이는 수분의 탈수가 일어나는 피크로 볼 수 있다. 미세분말시료를 분석하기 전 105°C로 건조를 시키기 때문에 탈수에 의한 중량감소는 거의 일어나지 않음을 알 수 있다. 이

분석결과를 통하여 분석대상 콘크리트에 함유된 수산화칼슘의 함량은 다음 식 (5)에 의해 계산되어지며, 분석대상 총 시료중량 대비 $W_{Ca(OH)_2}$ 는 3.166(% wt)으로 분석되었다. 탄산칼슘의 함량은 수산화칼슘과 같은 의미의 식 (6)에 의해 W_{CaCO_3} 는 17.81(% wt)로 분석되었다.

$$\left(\begin{array}{l} Ca(OH)_2 \\ \text{의 함량} \end{array} \right) = \frac{Ca(OH)_2 \text{ 분자량}}{H_2O \text{ 분자량}} \times \left(\begin{array}{l} H_2O \text{ 이탈에} \\ \text{의한 중량감소율} \end{array} \right)$$

즉, $W_{Ca(OH)_2}(\%, wt.) = 4.112 \times 0.77(\%, wt.)$ (5)

$$\left(\begin{array}{l} CaCO_3 \\ \text{의 함량} \end{array} \right) = \frac{CaCO_3 \text{ 분자량}}{CO_2 \text{ 분자량}} \times \left(\begin{array}{l} CO_2 \text{ 이탈에} \\ \text{의한 중량감소율} \end{array} \right)$$

즉, $W_{CaCO_3}(\%, wt.) = 2.2743 \times 7.83(\%, wt.)$ (6)

2.3.2 지시약에 의한 측정

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 콘크리트 표면에서 중성화된 부분까지의 깊이를 측정할 수 있는 방법이다. 일반적으로 페놀프탈레인의 지시범위는 pH 8.3~9.5의 범위에 있으며, Table 1과 같이 pH지시약에 따라 pH의 지시범위가 다르다^{19,20}. 콘크리트 품질이 낮고 사용연한이 많이 경과한 구조물에서 채취한 콘크리트 코어일수록 코어를 채취한 날로부터 시간이 경과함에 따라 절단면에서부터 중성화깊이를 판별하기 어렵게 된다. 코어 채취 시 발생하는 미립분이 코어 표면이나 공극에 남아있어 색의 변화를 관찰하기 곤란하다. 따라서 가급적 코어채취 직후에 현장에서 코어절단면에 페놀프탈레인용액을 분무하여 중성화 깊이를 측정하는 것이 바람직하며, 부득이하게 현장에서 측정하지 못한 경우는 반드시 할렬인장시험법과 같은 방법을 택하여 코어의 중심부를 절개한 후 콘크리트 절개면에 페놀프탈레인용액을 분무하여 측정하여야 한다.

본 연구에서는 할렬인장시험법을 이용하여 중성화를 측정하였다. 중성화가 진행된 부분은 콘크리트의 색이 변하지 않았으며 아직 알칼리성인 부분은 적색으로 변화하였다. 버니어캘리퍼스를 이용하여 중성화된 부분의 깊이를 최대깊이, 최소깊이, 평균깊이로 나누어 측정하였다. 본 연구에서는 저수지 지구당 여수토 방수로의 옹벽에서 콘크리트 코어를 6개씩 채취하였으며, 중성화이외에, 압축강도, 탄성계수 및 초음파 등을 측정하였다. 코어채취는 습도 등의 환경적인 영향을 고려하여 여수토 방수로 옹벽의 만수위선을 기준선으로 하여 기준선 부근에서 채취하였다.

2.4 pH(폐하) 측정

콘크리트의 pH는 콘크리트가 만들어질 당시는 강알칼리성을 띄지만 대기중의 탄산가스에 의해 중성화되어 중

성을 띄게된다. 콘크리트의 pH는 콘크리트내에 수산화칼슘의 함량에 따라 달라진다. 수산화칼슘은 중성화에 의해 탄산칼슘으로 변화되고 pH도 중성으로 변화되어간다. 콘크리트가 중성화되어가는 정도를 측정하는 지표로 활용할 수 있으며, 콘크리트내에 묻혀있는 철근의 부식과 관련되는 부동태피막의 파괴정도를 측정할 수 있다. 이러한 콘크리트의 pH를 측정하는 방법은 콘크리트가 경화하기 전에는 콘크리트의 블리딩 수를 측정할 수 있으나, 경화 후에는 고압추출법을 통해 콘크리트내의 세공용액을 추출하여 pH를 측정할 수 있다. 경화콘크리트에서 세공용액을 추출하는 방법은 고난도의 기술과 고가의 장비가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 경화콘크리트를 얇게 절단하여 미세분말로 만든 후 증류수를 사용하여 측정하였다.

본 연구에서 사용한 분말회석수의 pH측정 장치는 탁상용 pH 메타로서 교정데이터를 자동으로 기억하며, 측정하고자 하는 pH범위를 미리 선정하여 그 정확도를 높일 수 있는 장비이다. 또한 온도센서가 pH프로브(전극)와 동시에 측정용액에 들어가기 때문에 온도에 따른 보정이 이루어지며, 자동 정지기능이 있어 측정값이 안정되면 자동으로 정지(auto hold)하여 계속값 판독이 용이하다.

콘크리트의 깊이에 따른 pH값을 측정하기 위해 콘크리트 코어 4개를 표면에서부터 0.5cm두께로 3겹 절단하고, 4개의 코어에서 절단한 동일한 깊이의 박편 4개를 잘게 부수어 굵은골재를 선별한 후 모르타르 부분을 조크라서에 넣고 조심스럽게 부수어 잔골재와 페이스트가 격리되도록 하였다. 잘게 부수워진 모르타르분말을 150 μm (No.100)체로 쳐서 미세분말을 선별하였다. 한 개의 지구당 각 깊이 별로 세 점의 분말시료를 만들었으며, 미세분말 1그램(g)과 증류수 10cc를 잘 섞어 교정액으로 교정한 pH 메타를 통해 깊이별 pH를 측정하였다.

3. 모델의 구성

3.1 사용연한과 탄산칼슘

본 연구에서 정밀분석대상으로 한 사용연한 10~40년 된 총 70개 저수지의 여수토방수로 옹벽으로부터 콘크리트 코어를 채취하고, 이로부터 TG/DTA법으로 탄산칼슘을 중량대비 백분율로 분석하여 사용연한에 따른 탄산칼슘의 함량변화 경향을 분석코자 Fig. 6과 같이 도시하였다. 탄산칼슘의 함량분석에 사용된 콘크리트 코어는 대기와 접한 표면에서 5mm깊이까지를 절단하여 사용하였다. 조사대상지구에서 준공연도가 동일한 지구는 그 평균값을 대표값으로 하였다. 사용연한에 따른 탄산칼슘의 함량변화는 회귀식 (7)과 같이 유도되었다. 탄산칼슘의 함량은 콘크리트의 품질 즉, 공극률, 조직의 치밀한 정도 등과 중성화 촉진환경 즉, 사용환경에 따라 달라질 수 있으나 이러

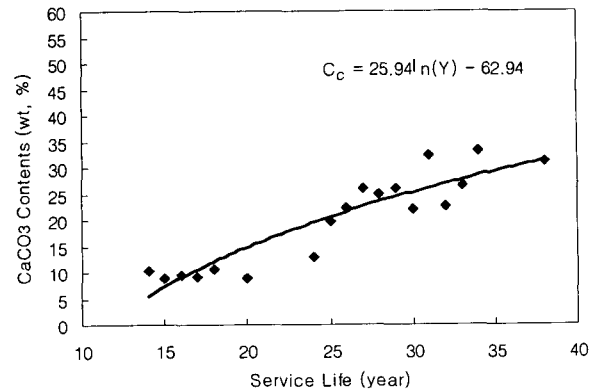


Fig. 6 The contents of Calcium Carbonate along the service life

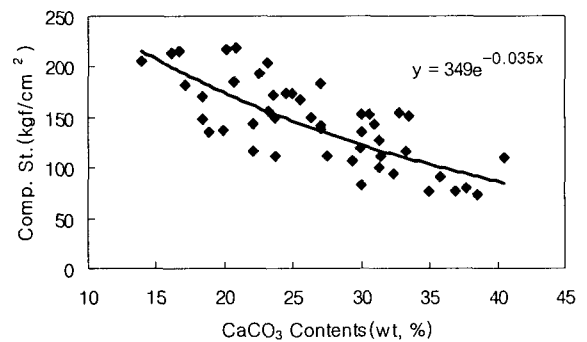


Fig. 7 The relationship between contents of Calcium Carbonate and core compressive strength

한 조건들을 가능한 동일하도록 하기 위해 대상구조물의 선정 시 설계서를 검토하여 가능한 동일한 설계기준강도가 되도록 선정하였으며, 콘크리트 코어채취 위치선정 시 접근이 가능한 한 물넘이의 양단 옹벽을 선정하였다. 옹벽의 코어채취 지점 선정 시 물넘이의 높기와 동일선상의 높이를 선정하여 저수지 만수 시 수위와 동일하게 하였다. 중성화와 동결융해 작용이 잘 일어나는 위치가 수면과 접하는 부위로 조사되었으므로 중성화와 동결융해작용을 사용연한에 가장 비례하게 받았을 가능성이 높은 위치로서 이곳을 선정하였다. 동일한 설계기준강도와 준공연도를 갖는 콘크리트 구조물일지라도 서로 다른 콘크리트 코어의 압축강도와 탄산칼슘의 함량을 갖는 것으로 나타났으며, 이들 둘은 서로 Fig. 7과 같이 반지수비례 관계를 갖는 것으로 나타났다.

$$C_c = 25.94 \ln(Y) - 62.94 \quad (7)$$

여기서, C_c : 탄산칼슘(% wt.), Y : 사용연한(년), 단, $Y \geq 14$

3.2 pH값과 탄산칼슘

콘크리트는 배합직 후 수산화칼슘($Ca(OH)_2$)과 수산화

알칼리(Na^+ , K^+)성분의 영향으로 강알칼리성(pH=13정도)을 띠는 것으로 알려져 있으며, 사용연한이 경과함에 따라 콘크리트 구조물이 처하는 여러 가지 환경여건 하에서 탄산화(혹은, 중성화)가 이루어져 콘크리트내부 세공에 탄산칼슘(pH=8.5~10)이 침착하는 것으로 알려져 있다. 콘크리트가 중성화되는 유리한 조건은 습도($60 \pm 5\%$ RH), 온도($20 \pm 1^\circ C$)가 적정수준을 유지하고, 탄산가스(실외 0.03%, 실내 0.1% 정도)의 농도가 높은 경우이다.

TG/DTA법에 의해 탄산칼슘을 분석하기 위해 깊이 5mm까지의 시료에서 채취한 미세분말시료를 사용하여 콘크리트의 pH를 측정하였다. 미세분말시료에 증류수를 희석시켜 pH를 측정하였다. 탄산칼슘의 함량변화에 따른 pH 변화경향을 분석하기 위해 Fig. 8과 같이 도시하고, 탄산칼슘의 함량과 pH값의 관계를 회귀분석하여 반지수 비례관계임을 알 수 있는 회귀함수 식 (8)을 유도하였다.

본 연구에서는 콘크리트의 중성화를 측정하는 방법으로 pH 8.3~9.5의 범위를 지시하는 페놀프탈레인 지시약 측정법과 TG/DTA법을 사용하였으며, 지시약 측정법을 통하여 얻은 중성화 깊이와 TG/DTA법을 사용하여 측정된 탄산칼슘의 중량대비 함량비율의 관계를 분석하여 Fig. 9에 도시하였다. 중성화깊이가 깊은 경우는 탄산칼슘의 함량이 많은 것으로 나타났으며, 얇은 경우는 탄산칼슘의 함량이 비교적 적게 분포함을 알 수 있었다. 즉, 콘크리트의 중성화깊이는 사용연한의 제곱근에 비례하는 것으로 알려져 있으며, 사용연한이 경과함에 따라 중성화 깊이가 깊어지는 경우 콘크리트 표면의 탄산칼슘의 함량은 증가하는 것으로 판단할 수 있었다.

옹벽에서 채취한 콘크리트 코어의 압축강도 시험결과와 페놀프탈레인 지시약을 뿌려 측정된 콘크리트 중성화 깊이를 Fig. 10과 같이 도시하여 서로의 상관관계를 분석하였다. 콘크리트 코어의 압축강도가 작은 경우 중성화 깊이는 깊은 것으로 나타났으며, 강도가 큰 경우 중성화 깊이가 작은 것으로 나타났다. 콘크리트의 압축강도는 사용연한이 증가함에 따라 동결융해 등의 다양한 열화작용에 의해 감소되는 것으로 알려져 있으며, 그 감소폭은 사용환경에 따라 다를 수 있지만, 사용연한이 경과함에 따라 중성화 깊이와 탄산칼슘의 함량은 증가할 것으로 판단할 수 있었다.

$$C_c = 121.17 \exp(-0.15k) \quad (8)$$

여기서, C_c : 탄산칼슘(% wt.), k : 폐하(pH)

3.3 깊이에 따른 탄산칼슘의 함량 관계식

콘크리트 구조물의 사용연한의 증가에 따른 탄산칼슘의 함량변화와 탄산칼슘의 함량변화에 따른 pH의 변화를 분석하였으며, 본 절에서는 콘크리트의 깊이가 증가함에 따

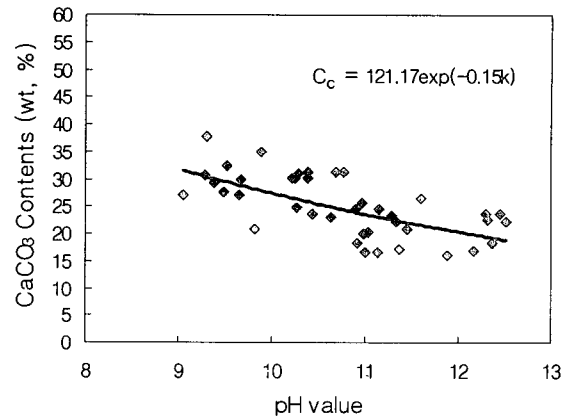


Fig. 8 pH value according to the contents of calcium carbonate

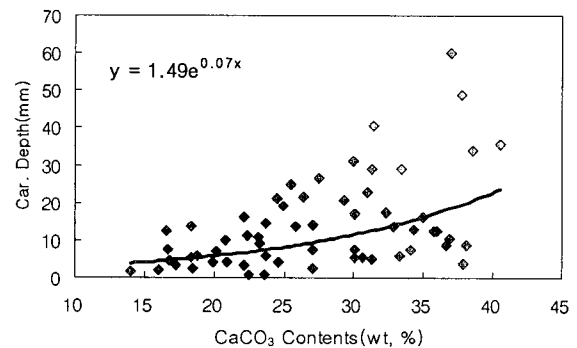


Fig. 9 The relationships between carbonation depth and calcium carbonate contents

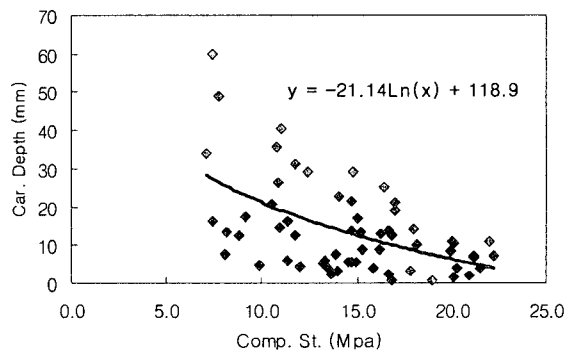


Fig. 10 The carbonation depth and core compressive strength.

라 변화되는 탄산칼슘의 함량을 분석하였다. 콘크리트의 깊이는 표면으로부터 두께 0.5cm씩 증가시켜가며 3점의 깊이에서 탄산칼슘의 함량을 측정하였다. 깊이별 탄산칼슘의 함량변화를 도시한 결과 Fig. 11, 12와 같이 나타났으며, 이 그래프는 탄산가스, 산소, 물 등의 침투를 묘사하는 Fick의 제 2법칙과 유사한 그래프이다. 제2법칙은 시간변화 확산을 묘사하는 함수로서 콘크리트내 초기의 탄산칼슘의 함량(C_o)을 무시할 경우 $C_x = C_s(1 - \text{erf}(z))$ 로

표현될 수 있다. 여기서, C_s 는 콘크리트의 피복두께 0.25cm에서의 탄산칼슘의 농도, C_x 는 t시간(sec) 후에 깊이 x 에서의 농도, $z = (\frac{x}{2\sqrt{Dt}})$, D 는 확산계수, 에라 함수 $erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ 이다. 깊이 0.75cm과 1.25cm에서의 탄산칼슘의 함량 $C_{0.75}$, $C_{1.25}$ 를 C_x 에 대입하여 계산한 평균 D 를 Table 4에 제시하였다. z 에 따른 에라함수 $erf(z)$ 는 Gaussian곡선의 적분을 통해 산정된 표를 이용하였다. Tuutti는 공극구조와 간극의 포화 정도에 따라 다르지만 산소와 이산화탄소의 확산계수는 $0.1 \times 10^{-8} m^2/sec$ 에서 $10 \times 10^{-8} m^2/sec$ 의 범위에 있다고 하였는데, Table 4에 제시한 D 의 값도 이와 유사하게 나타났다. 물리적 의미는 다르지만 D 값은 확산계수의 영향을 받아 Fick의 제 2법칙을 따르고 있음을 확인할 수 있었다. 콘크리트의 깊이에 따른 탄산칼슘의 함량변화를 나타내는 함수를 얻었으며, 이 함수를 통해 임의의 깊이에서 탄산칼슘의 함량추정이 가능할 것이다. 따라서 철근의 유효피복두께만큼의 깊이에서 함량을 추정할 예를 Fig. 11에 도시하였으며, 외삽법으로 추정할 결과 대동지에서는 4.2 (% wt.)를 얻었다.

70개 지구에서 깊이가 변화에 따른 탄산화의 변화를 분석한 결과 Fig. 12와 같이 지수함수 관계를 갖는 것으로 나타났다. 식 (9)와 같이 대표함수로 나타낼 수 있었다. 추정 회귀함수의 정확도를 높이기 위해서는 측정점수를 3점 이상으로 늘릴 수 있으나 최소 3점은 측정하여야 한다.

$$C_c = 14.64x^{-0.6} \quad (9)$$

여기서, C_c : 탄산칼슘(% wt.), x : 측정깊이(cm)

3.4 회귀식의 검정

콘크리트 잔존수명예측에 사용될 회귀함수의 신뢰성 검증을 위해 목적 함수인 평균제곱근오차(root mean square error, RMSE), 상대평균절대오차(relative mean absolute error, RMAE), 그리고 결정계수(coefficient of determination)등의 통계적 변량을 사용하였다. Table 2는 사용연한의 변화에 대한 탄산칼슘의 함량을 나타내는 회귀함수 식 (7), 탄산칼슘의 함량변화에 따른 pH값을 나타내는 회귀함수 식 (8), 철근피복두께 콘크리트의 깊이변화에 따른 탄산칼슘의 함량을 나타내는 회귀함수 식 (9)에 대한 신뢰성 검정 결과를 타내었다.

3.5 내구수명 추정 모델

사용연한 동안 대기중의 탄산가스에 의해 증가되는 콘크리트 내부의 탄산칼슘이 사용연한의 증가에 따라 변화

되는 경향을 분석하고, 탄산화가 콘크리트 내부 철근의 부식에 미치는 영향을 분석하여 사용 중에 있는 콘크리트 구조물의 현재상태를 정밀분석한 후 남아있는 수명을 추정하는 잔존수명 예측 모델을 개발하였다. 40mm 강가철을 사용하여 현장에서 타설·제작된 저수지의 여수토 방수로 옹벽을 대상으로 TG/DTA법을 통해 탄산칼슘을 정량적으로 분석하여 콘크리트 구조물의 잔존수명을 예측하는 모델 Fig. 13을 개발하였다. 본 모델의 적용가능 대상 구조물에 대한 기본 가정은 앞서도 언급하였지만 염화물이온의 영향을 받지 않는 내륙의 콘크리트 구조물이라는 점과 구조물의 사용환경이 동결융해 작용과 같은 열화작용이 중성화작용과 복합적으로 동시에 받는 구조물이라는 점이다.

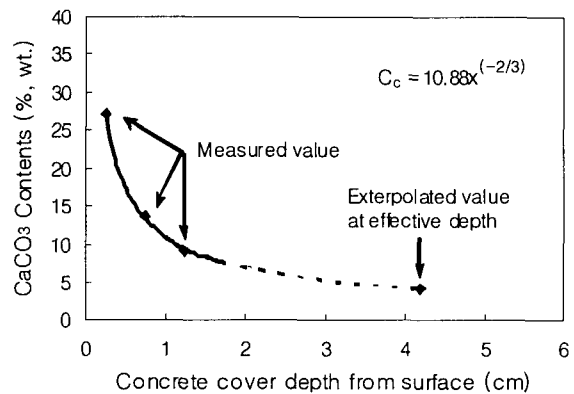


Fig. 11 Calcium carbonate contents according to concrete cover depth(Sample region)

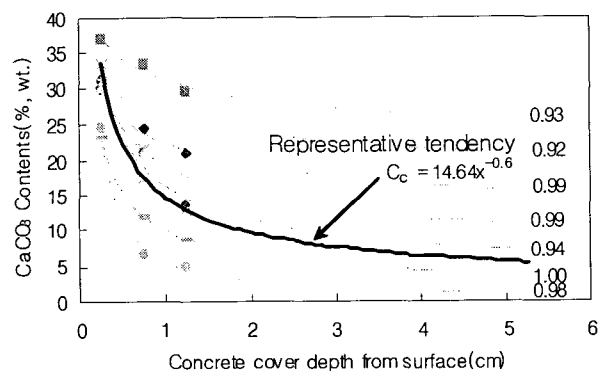


Fig. 12 Calcium carbonate contents according to concrete cover depth(representative tendency)

Table 2 The statistical variables

Regression function	RMSE	RMAE	R ²
Service life and calcium carbonate contents(eq.(7))	3.38	0.37	0.83
pH value and calcium carbonate contents(eq.(8))	4.14	0.75	0.44
Concrete cover depth and calcium carbonate contents (eq.(9))	0.40	0.02	0.99

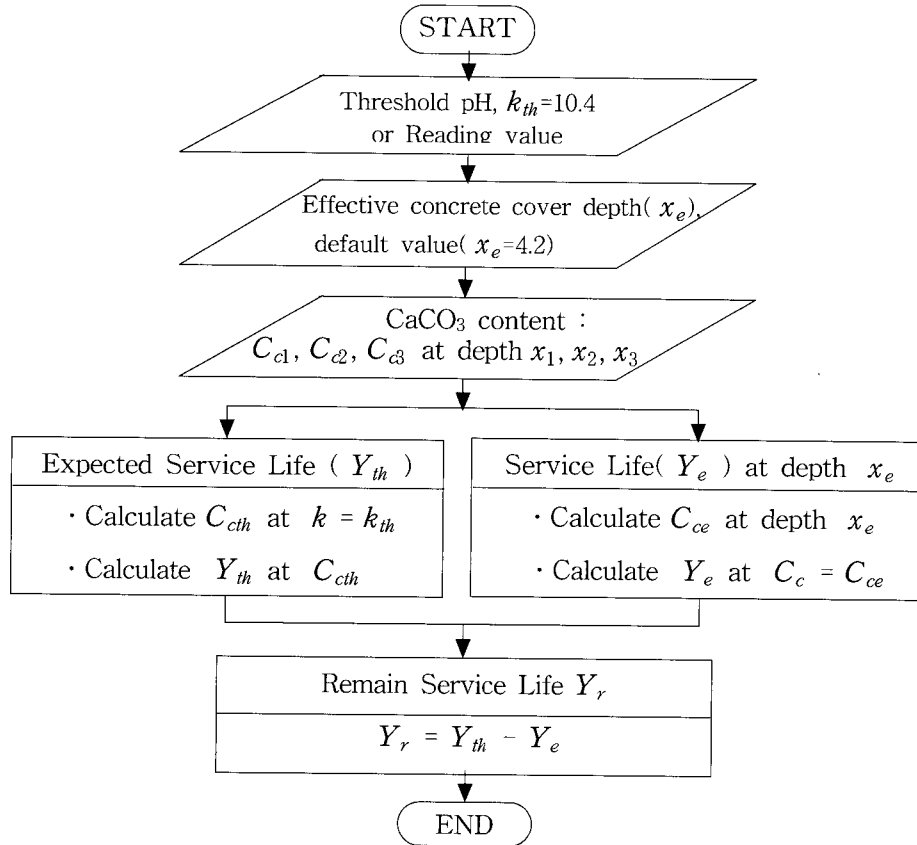


Fig. 13 Remaining service life prediction model

Table 3 Detail examination results (one part)

The name of reservoir	Completion year	pH value			Calcium carbonate (% wt.)			Calcium hydroxide (% wt.)			Core strength	Carbonation depth	Diffusion coefficient (m ² /sec)
		0.25	0.75	1.25	0.25	0.75	1.25	0.25	0.75	1.25			
S.S.	68	9.3	9.72	9.72	37.73	35.34	34.23	0.00	0.00	0.00	7.7	48.98	4.70 × 10 ⁻⁸
D.D.	69	9.05	9.81	11.99	27.06	13.71	9.12	0.00	2.34	3.62	13.6	-	7.35 × 10 ⁻¹⁰
O.R.	75	10.38	11.3	12.25	31.27	25.52	17.90	0.00	3.74	3.33	12.5	29.13	4.45 × 10 ⁻⁹
D.S.	81	9.65	11.36	11.41	27.04	14.26	10.35	0.00	3.62	3.82	13.8	7.50	1.05 × 10 ⁻⁹
W.P.	90	10.73	11.81	12.62	36.68	26.59	15.19	0.00	4.15	4.65	16.2	8.70	2.10 × 10 ⁻⁹

* Unit : Concrete core strength : Mpa, Carbonation depth(average depth) : mm, Remaining service life : year, Measuring depth : 0.25, 0.75, 1.25 cm

Pourbaix¹⁰⁾의 연구결과(Fig. 2)에 의하면 콘크리트가 중성화되어 콘크리트 속에 묻힌 철근이 부식될 수 있는 환경은 pH값에 의해 예측이 가능하며, 철근부식 임계 콘크리트 pH값은 실험을 통한 연구자의 실측자료가 있을 경우, 실측값을 사용할 수 있을 것이며, 본 연구에서는 Pourbaix의 연구결과인 10.4를 임계값으로 사용하였다.

콘크리트속에 묻혀있는 철근은 피복두께의 크기에 따라 부식환경에 노출되기까지의 기간이 달라진다. 열악한 환경에 콘크리트 표면부터 노출되기 때문에 잔존수명예측 대상구조물의 실측 피복두께를 측정하여 모델에 적용하여야 하나, 본 연구에서는 코어채취 시 구조물 손상의 최소화를 요구하는 구조물관리자의 요청으로 실측하지 못해 「콘크리트 구조설계기준」²⁴⁾의 철근 피복두께 편과 Weyers¹¹⁾의

연구결과를 이용하여 유효철근피복두께를 4.2cm으로 결정하였다. 철근주변의 콘크리트의 pH값이 임계값에 이를 때 철근은 부식환경에 노출되었다고 볼 수 있다. 그러나 철근주변 콘크리트의 pH값을 측정하기는 어렵다. 따라서 콘크리트의 표면에서부터 깊이방향으로 세 점의 측정값을 통하여 철근이 위치한 곳에서의 pH값을 추정하였다. 조사 대상구조의 정밀분석 결과를 Table 3과 같이 그 일부를 정리하였다.

4. 모델의 적용 및 검증

부식임계 pH값의 결정을 위한 별도의 실험을 수행하지 않았기 때문에 10.4를 k_{th} 로 사용하였으며, 콘크리트 피

Table 4 The remaining service Life and diagnosis of current status

The name of reservoir	Used year	$Y_{th} - Y_e$	$Y_{th} - Y_{used}$	Diagnosis of current status
S.S.	34	-8.42	-3.80	Accelerated
D.D.	33	16.90	-2.80	Retarded
O.R.	27	11.44	3.20	Retarded
D.S.	21	16.44	9.20	Retarded
W.P.	12	14.01	18.20	Accelerated

복두께도 별도로 측정하지 않았기 때문에 4.2를 x_e 로 결정하였다. 콘크리트 표면으로부터 깊이방향으로 x_1, x_2, x_3 에서 TG/DTA방법으로 측정된 탄산칼슘의 함량, C_{a1}, C_{a2}, C_{a3} 로부터 회귀함수를 유도하였다. 회귀함수로부터 유효깊이, x_e 에서 외삽법으로 탄산칼슘 C_{ce} 를 계산하였다. 유효깊이에서의 탄산칼슘, C_{ce} 를 식 (7)에 대입하여 Y_e 를 계산하였다. 동시에 부식임계 pH값, k_{th} 를 식 (8)에 대입하여 C_{ch} 를 계산한 후 이를 다시 식 (7)에 대입하여 Y_{th} 를 계산하였다. 끝으로, 잔존수명, Y_r 를 Y_{th} 에서 Y_e 를 제함으로서 계산하였다.

조사대상구조물의 정밀조사 자료의 일부인 Table 3에서 샘플지구 S.S.의 잔존수명을 예측하여 보았다. 표면에서부터의 깊이 0.25, 0.75, 1.25 cm에서 측정된 탄산칼슘, 37.73, 35.34, 34.23(% wt.)로부터 회귀함수, $C_c = 34.71x^{-0.06}$ 를 유도하고, 유효깊이, $x_e = 4.2$ cm에서 외삽법으로 $C_{ce} = 31.84$ (% wt.)를 계산하였다. 철근이 위치한 유효깊이, x_e 에서 탄산칼슘, C_{ce} 를 갖기까지 소요되는 기간, $Y_e = 38.62$ (yr)를 식 (7)로 계산하였다. 동시에 $k_{th} = 10.4$ 를 식 (8)에 대입하여 $C_{ch} = 25.46$ (% wt.)를 계산한 후 이를 다시 식 (7)에 대입하여 $Y_{th} = 30.2$ (yr)를 계산하였다. 끝으로, Y_{th} 에서 Y_e 를 제함으로서 잔존수명, $Y_r = -8.42$ (yr)을 추정하였다. 동일한 방법으로 D.D.의 잔존수명을 추정하면 17(yr)을 얻는다. 샘플지구 S.S.는 준공연도 1968년부터 정밀조사시점인 2002년까지의 기간을 고려하면, 사용연수 Y_{used} 는 34(yr)가 되며, D.D.는 33(yr)가 된다.

샘플지구 S.S.는 동종 구조물의 평균적인 부식시작 년보다 부식이 일찍 시작되었으며, 이미 약 8년 전부터 부식이 진행되어왔을 것으로 추정할 수 있으며, D.D.는 부식이 시작되면 아직도 약 17년 정도의 기간이 남아 있을 것으로 추정할 수 있다. Table 4에는 잔존수명($Y_{th} - Y_e$)과 조사대상 구조물의 평균적인 부식시작 년과 사용연한의 차($Y_{th} - Y_{used}$)를 비교함으로써 해당 구조물의 열화속도가 동종구조물의 평균적인 열화진행속도보다 빠르게 진행되는지 혹은 완만하게 진행되는지를 추정할 수 있다.

샘플지구인 S.S.는 34년 동안 사용되면서 동종구조물의 평균적인 부식발생가능연수인 30.2년을 약 3년 경과하였으나 정밀분석에 의한 실측 부식발생 잔여기간(본 연구에서, 잔존수명)은 이미 8년을 경과한 것으로 조사되었으므로 일반적인 경우보다 5년 정도를 빠르게 열화되었다고 볼 수 있다. 반면, D.D.는 33년 동안 사용되면서 약 2년을 경과하였으나, 잔존수명은 17년이 남아있는 것으로 조사되었으므로 19년정도 완만하게 진행되는 것으로 볼 수 있다.

이러한 차이는 Table 3에서 코어강도나 중성화깊이의 차이에서도 나타나듯이 S.S.에 비해 D.D.의 콘크리트 압축강도가 76% 더 높으며, 잔존수명 예측결과는 코어의 강도와 비례적이며, 중성화깊이에 반비례하는 경향으로 나타났다.

5. 결 론

지금부터 약 10~40년 전 강자갈 40mm의 골재를 사용하여 설계기준강도 17.7MPa 정도의 현장타설 콘크리트로 만들어진 저수지 70개의 여수도 방수로 옹벽 부의 콘크리트를 대상으로 현장 및 실내실험을 통하여 얻은 자료들 중 콘크리트 중성화관련 자료를 분석하여 콘크리트의 잔존수명을 예측하였다. 콘크리트의 중성화 분석은 시차열중량분석(TG/DTA), 페놀프탈레인 지시약 분석 및 pH값 측정을 통하여 콘크리트 깊이별로 정량적인 탄산칼슘, 수산화칼슘 및 pH값 측정으로 실시하였다. 콘크리트의 잔존수명을 예측하는 본 연구에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 탄산칼슘의 함량은 사용연한 초기에는 증가율이 크고, 25년을 경과하면 증가율이 둔화되는 대수비례관계를 갖는 것으로 나타났으며, 탄산칼슘의 함량과 사용연한의 관계함수를 유도할 수 있었다.
- 2) 콘크리트의 pH는 탄산칼슘의 함량이 많을수록 중성에 가까워졌으며, 콘크리트가 탄산화됨에 따라 콘크리트의 pH는 중성으로 변화됨을 정량적으로 나타낼 수 있었다.
- 3) 콘크리트의 깊이가 깊어질수록 탄산칼슘의 함량은 대수 비례적으로 감소하는 것으로 나타났으며, 탄산가스의 확산과 물의 침투가 Fick의 확산 제2법칙을 따르고 있기 때문인 판단되었다.
- 4) 콘크리트의 중성화 깊이 측정에 가장 많이 사용되는 지시약 측정법이 지시약에 따라 지시되는 pH의 범위가 다르기 때문에 열적변화를 통한 성분함량분석에 주로 쓰이는 시차열중량분석(TG/DTA)법에 의해 탄산칼슘의 함량을 정량적으로 측정하여 중성화 정도를 측정할 수 있었다.
- 5) 잔존수명($Y_{th} - Y_e$)과 조사대상 구조물의 평균적인 부식시작 년과 사용연한의 차($Y_{th} - Y_{used}$)를 비교함으로써 해당 구조물의 열화속도가 동종구조물의 평균적인

열화진행속도보다 빠르게 진행되는지 혹은 완만하게 진행되는지를 추정할 수 있었다.

- 6) 제안하는 잔존수명예측 모델은 현장의 환경적 영향을 그대로 반영한 실 구조물을 대상으로 분석하여 모델링한 것으로서 탄산가스 등에 의한 실내축진실험을 바탕으로 제안한 모델에 비하여 그 신뢰성을 높게 평가받을 수 있을 것이며, 시설물 유지관리 시 적정 보수보강의 시점을 예측하게 하여 경제적인 구조물 사용 실현이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 농림기술관리센터(ARPC)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사한다.

Notation

- Y : Service life (year)
 Y_r : Remaining service life (year)
 Y_{th} : Service life at the threshold of corrosion (year)
 Y_e : Service life when C_{ce} measured at depth x_e
 Y_{used} : Used year
 C_c : $CaCO_3$ concent in concrete (weight percent)
 C_{ce} : $CaCO_3$ concent predicted from regression function at depth x_e
 C_{ch} : $CaCO_3$ concent at the k_{th} of pH value
 C_{c1}, C_{c2}, C_{c3} : $CaCO_3$ concent measured at depth x_1, x_2, x_3
 x : Concrete cover depth(cm)
 x_e : Effective concrete cover depth
 x_1, x_2, x_3 : Depthes of $CaCO_3$ concent measuring points.
 k : pH value of concrete.
 k_{th} : pH value of concrete at service life, Y_{th}

참고문헌

1. 콘크리트 표준시방서, 건설교통부, 1999, pp.30.
2. Neville, "Properties of Concrete," Pitman, Toronto, 1981, pp.359~528.
3. Tuutti, K., "Corrosion of Steel in Concrete," Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1982.
4. 岸谷孝一等, "中性化(コンクリート構造物の耐久性シリス)," 技報堂, 1988, pp.21~40.

5. Browne, R.D., "Mechanisms of Corrosion of Steel in Concrete in Relation to Design, Inspection, and Repair of Offshore and Coastal Structures," In Performance of Concrete in Marine Environment, ed. V.M. Malhotra. ACI Publication SP-65, 1980, pp.169~204.
6. S. Feliu, J. A. Gonzalez, S. feliu, Jr., and M. C. Andrade, "Confinement of the Electrical Signal for in Situ Measurement of Polarization Resistance in Reinforced Concrete," *Materials Journal*, Vol. 87, September-October, 1990, pp.457~460.
7. Charles J. Hookham, "Service Life Prediction of Concrete Structures-Case Histories and Research Needs," *Concrete International*, Vol. 14, November, 1992, pp.50~53.
8. James R. Clifton, "Predicting the Service Life of Concrete," *Materials Journal*, Vol. 90, November-December, 1993, pp.611~617.
9. James R. Clifton, "Predicting the Remaining Service Life of Concrete," NISTIR 4712, National Institute of Standards and Technology, Nov. 1991, 24pp.
10. Pourbaix M., "Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions," Pergamon Press, Oxford, 1966, pp.307~321.
11. Weyers, R.E "Service Life Estimates (SHRP-S-668)," Strategic Highway Research Program. National Research Council, 1993.
12. S. K. Roy, K.B Poh, D.O Northwood "Durability of concrete - accelerated carbonation and weathering studies," *Building and Environment* 34 1999, pp.597~606, pp.57~60.
13. ACI. 201.2R-11~12, chap. 2, 1992.
14. 이종득, "콘크리트 구조물의 조기열화 내구성 진단," 도서출판일광, 1996, pp.120~137.
15. Shalon, R. & Raphael, M., "Influence of Sea Water on Corrosion of Reinforcement," *J. of Am Concrete Inst.*, 30(12), 1959, pp.1251~1268.
16. A. Bentur, S. Diamond and N.S. Berke, "Steel Corrosion in Concrete," E&FN SPON, 1997, pp.41~49, 158.
17. P. J. Parrott, "Design for Avoiding Damage Due to Carbonation-Induced Corrosion (SP-145)," Vol. 145, pp.283~298.
18. D. C. Killoh, L. J. Parrott, and R. G. Patell, "Influence of Curing at Different Relative Humidities on the Hydration and Porosity of a Portland/Flyash Cement Paste (SP-114)," Vol. 114. Special publication, May, 1989, pp.157~174.
19. 김영의, "콘크리트의 강도, 중성화, 화재손상부 비파괴 검사 방법," 콘크리트 학회지 제 10권 2호, 1998, pp. 50~64.

20. 정우용의 3인, “철근부식에 의한 육지 콘크리트 잔존 수명 예측”, 콘크리트 학회논문집 제12권 5호 2000, pp.69~80.
21. 김도겸, “콘크리트 구조물의 사용수명 평가 프로그램 개발”, 건설기술정보, 2001, pp.9~17.
22. 박성계, “열분석기의 원리 및 응용”, 울산대학교, 공동 기기센터 1998,
23. 이준구의 4인, “콘크리트의 사용연한에 따른 중성화 진행에 관한 실험적 연구”, 한국농공학회 학술발표회 논문집, 2001, pp.123~28.
24. 콘크리트 구조설계기준, 건설교통부, 1999, pp.77~120.
25. 이학렬, “금속부식공학”, 연경문화사, 1997.
26. 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, pp.57~60.
27. V.S. Ramachandran, M. Sc., D.Phil., “Applications of DIFFERENTIAL THERMAL ANALYSIS in Cement Chemistry,” CHEMICAL PUBLISHING COMPANY, INC NEW YORK, 1969, pp.81~110.
28. G.S.T. Armer, J.L.Clarke, F.K.Garas, “The Life of Structures,” Butterworths, 1989.
29. Tuutti, K., “Service Life of Structures With Regard to Corrosion of Embedded Steel. In Performance of Concrete in Marine Environment,” ed. V. M. Malhotra, ACI Publication SP-65, 1980, pp.223~36.
30. Fontana, M.G., “Corrosion Engineering,” McGraw-Hill, 1986.

요 약

최근 콘크리트 내구성설계에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 사용수명 예측이 핵심인 내구성 평가모델 개발이 그 좋은 예이다. 본 연구에서는 콘크리트 구조물의 잔존수명예측 모델을 개발하여 적정시기의 유지보수를 통한 경제적 구조물 사용을 목적으로 하였다.

육지 콘크리트 구조물인 저수지의 콘크리트 구조물 부분을 대상으로 전국 70개 지구를 선정하고, TG/DTA법과 페놀프탈레인 지시약법으로 중성화를, pH메타법으로 pH값을 측정하여 탄산칼슘함량 대비 사용연수, pH값, 콘크리트 피복 두께의 관계함수를 각각 유도한 후 가능한 최소의 자료측정으로 잔존수명을 예측할 수 있는 모델을 개발하였다.

개발된 잔존수명예측 모델은 탄산가스등의 고정변수에 의한 실내축진실험 자료기반 모델과 달리 동결융해작용, 중성화, 철근 부식 등 복합적인 열화작용이 동시에 일어나는 현장의 환경적 영향을 받은 구조물에서 측정한 자료를 기반으로 개발되었다. 이러한 점에서 그 신뢰성을 높게 평가 받을 수 있을 것이며, 시설물 유지관리자에게 적정 보수보강 시점을 제공하여 경제적인 구조물 사용에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 잔존수명, 탄산화, 부동태피막, 탄산칼슘, pH값