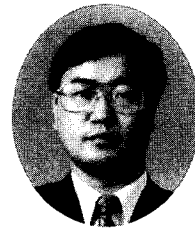
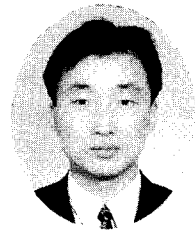


열화 메커니즘과 리해빌리테이션

- Deterioration Mechanism and Rehabilitation on Concrete Structures -



이한승*



안종문*

1. 머리말

콘크리트 구조물의 열화가 진행되면 그 정도에 따라 보수·보강 여부 및 구체적인 공법제안 등 구조물 유지를 위한 중요한 판단을 하지 않으면 안 된다. 그 때, 가장 필요한 정보는 현재 그 구조물이 어떤 성능을 가지고 있고 금후 그 성능이 어떻게 저하하는가를 살펴보는 것이다.

그러나, 현재로는 보수시기나 보수공법을 선택하기 위하여 구조물 손상정도를 조사하는 것은 있어도 열화된 구조물의 성능이나 기능까지 고려하여 평가하는 것은 거의 없는 실정이다.

일반적으로 보수여부는 열화 조사결과를 기초로 目視와 경험적인 판단에 의하여 결정되고 있다. 또한, 보수재료나 공법은 현재의 손상정도에 경제성을 고려하여 선택하게 된다. 한편, 보강에 있어서는 간혹 재하실험에 의해 내하력을 검토하고 보강 여부를 판단하는 것도 있지만, 대부분은 역시 「이상하다」라는 감각적인 판단이 보강여부의 최종적인 결정수단으로 되는 예가 많다.

본고에서는, 보수·보강을 기존구조물의 수명연장을 위한 기능 회복, 즉, 리해빌리테이션(Rehabilitation)으로 간주하고, 이들의 대책을 적재적소에 적용하기 위한 구조물의 열화상태 판정과 그 후의 열화진행을 예측하고 열화에 의한 구조물 성능 혹은 기능 변화를 정확히 파악하는 기술을 확립하는 것이 중요하다는 인식 하에 리해빌리테이션 실시과정 중 열화평가의 위치와 구체적인 평가수법에 대하여 정리하였다.

2. 열화 평가와 리해빌리테이션

2.1 “보수효과 없음”은 누구의 책임인가?

“염해를 받은 구조물을 보수했지만, 10년도 지나지 않아 재열화 했다”라는 이야기를 듣는 때가 있다. 또한, 간혹 “염해를 받은 구조물을 보수해도 소용없음”이라는 논조의 말을 하는 사람이 있다. 확실히 염해는 위험한 열화이며 (사진 1)에서 보는 것처럼 재열화가 발생한 것을 종종 볼 수 있다. 그러나, 보수 후에 재열화가 발생하는 데에는 그 나름대로의 원인이 있다. 그 원인이 정확히 평가된다면 재열화를 최소

한으로 억제하는 것은 가능할 것이다.

한편, 보수 수명이 다 되어도 그 때가 구조물에 있어서는 반드시 수명이라고는 말할 수 없다. 구조물에 있어서 수명이란, “구조물의 어느 성능을 그 기준이상의 상태로 유지할 수 없게 되었다”라는 시기를 말한다. 재열화 후의 구조물성능이 아직 요구성능 이상이라면 보수를 반복하는 것에 의해 구조물을 유지하는 것은 가능하다. 그러나, 여기서 문제로 되는 것이 비용이며, 결과적으로 비용이 필요하기 때문에 이 구조물은 이제 소용없는 것으로 판단되게 된다. 이것은 본래 보수의 문제가 아니고 보수의 선택이나 시공·관리에 문제가 있다고 보아야 한다.

2.2 열화 평가와 리해빌리 계획

지금까지 콘크리트 구조물은 Maintenance Free를 전제로 하여 왔기 때문에 열화가 나타나 서야 비로소 유지관리 행위를 시작하는 것이 많았다. 사후보전이라고 일컬어지는 이 행위는 증상이 일어난 후 실시하는 보수로서, 구조물의 장래를 고려한 보수보다는 우선 현상을 커버하는 보수라고 할 수 있다.

* 정회원, 한양대학교 STRESS 연구조교수

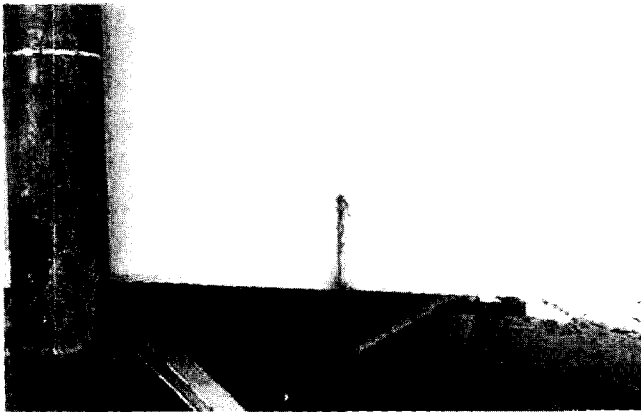
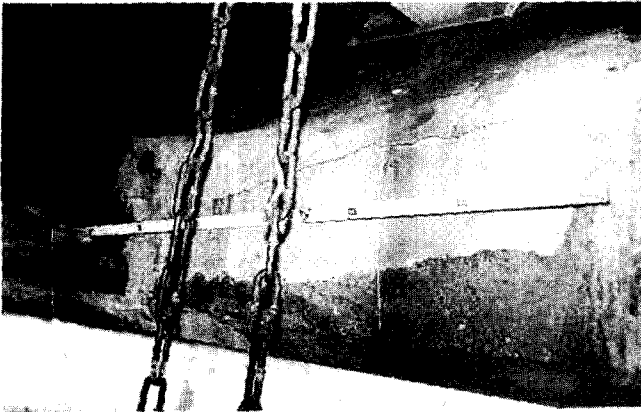
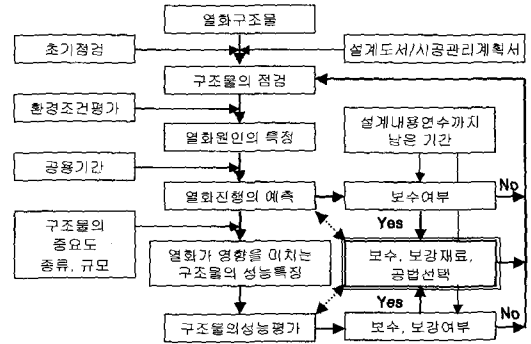


사진 1. 염해 보수에 있어서 재열화의 예



注) → : 평가의 흐름을 나타냄
 ⇨ : 영향요인을 나타냄

그림 1. 구조물의 열화 평가 기본 흐름

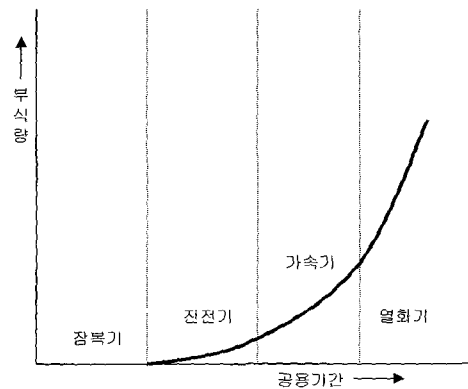


그림 2. 염해 열화 진행 모델 예

염해처럼 열화가 현재화한 후 확실한 보수가 곤란하게 되는 경우는, 사후보존으로는 충분히 치료되기 어려울 뿐만 아니라 경제적으로도 큰 부담을 주는 결과로 되는 경우가 많다.

이 때문에 콘크리트 구조물에 있어서도 열화 하기 전에 보수를 실시하는 이른바 예방보전 관점에서의 유지관리가 필요하다. 이 예방보전의 전제로 되는 것이 구조물을 정기적으로 점검하고 그 결과를 기초로 열화 진행이나 구조물 성능에 대하여 현재상태 및 장래예측을 실시하여 구조물의 열화를 평가하는 것이다. 열화 원인은 무엇인가?, 현재의 열화상황이나 장래의 열화진행은 어떠한가?, 그리고 열화진행에 의해 구조물의 어느 성능에 문제가 생기고 장래 어떻게 되는가를 명확히 파악한다면, 보수 및 보강 여부, 혹은 공법이나 재료에 대한 요구성능을 구체적으로 정하는 것이 가능하다. 또한, 예방보전 생각에 라이프 사이클 코스트 개념을 도입하는 것에 의해 가장 적절하고 경제적인 보수재료 및 공법

선택, 보수 시기 설정도 가능하게 되는 것이다.

2.3 리해빌리테이션을 위한 열화 평가 흐름

〈그림 1〉에 구조물의 열화평가 작업 기본 흐름을 나타낸다. 구조물 열화평가에서는 우선 열화 의심이 있거나 혹은 그 징후가 인정되는 구조물에 대하여 상세 점검을 실시한다. 또한, 점검결과를 열화 모델과 비교 검토하여 현재상태의 열화 진행도를 파악함과 동시에 장래의 열화 진행을 예측하여야 한다. 이 단계까지는 구조물을 구성하는 재료에 발생하고 있는 열화를 파악하는 것으로 해석할 수 있다.

한편, 이들 구성재료의 열화에 따라 구조물의 각종 성능에는 변화가 발생하게 된다. 이들의 성능과 구성재료 열화와의 관계에 대하여는 미리 작성한 정량화 모델에 기초하여 현재의 구조물상태를 평가함과 동시에 필요에 따라 구조물의 성능이 장래

에 어떻게 변화하여 가가를 예측하는 것이 중요하다.

구조물 열화 평가는 이러한 일련의 행위를 총칭하는 것이다. 단, 여기서 문제로 되는 것이 점검결과로부터 구성 재료의 열화를 예측하기 위하여 사용하는 열화 예측 모델과 구성재료의 열화와 구조물의 각종 성능을 유기적으로 연결하는 구조물 성능 평가 모델의 구체적인 내용이 중요하다. 그러므로, 이하에서는 염해를 예로 들어 이들 모델에 대한 기본적인 생각을 간단히 정리하였다.

3. 염해 구조물의 열화 평가

3.1 염해 열화 진행의 예측 모델

3.1.1 열화 예측의 기본

일반적으로 RC구조물에 발생하는 염해 열화 진행은 〈그림 2〉에 나타난 것처럼 잠복기, 진전기, 가속기, 열화기의 4단계로 구분할 수 있다.

구조물이 염해에 의하여 열화 하는 경우, 구조물마다 각 기간의 길이는 다르게 나타나지만, 어느 구조물일지라도 이 4개의 기간을 거쳐서 열화가 진행되는 것은 틀림없다. 그리고, 각 기간의 길이는 그 구조물이 갖는 내구성과 주위 환경조건에 의해 결정된다. 염해를 받고있는 구조물의 열화 진행을 예측한다는 것은 구조물이 현재 어느 기간에 있고 또한 그 다음의 상태에 언제 도달하는가를 예측하는 것이라고 말할 수 있다. 따라서, 이를 위해서는 열화 진행의 구체적 모델을 구축하는 것이 필요하며, 이하에서는 잠복기, 진전기, 가속기에 있어서 열화의 모델화에 대하여 설명한다.

3.1.2 열화의 모델화

(1) 잠복기에 대하여

잠복기란 구조물의 공용개시를 기점으로 하고 콘크리트 중에서 철근 부식이 개시하기까지의 기간을 말한다. 이 경우, 기존 연구결과에 따르면 철근주위 염화물 함유량이 임계함유량을 초과한 경우 철근부식이 개시한다는 것이 가장 일반적인 생각이다. 그리고, 이와 같이 생각할 경우 잠복기간 길이는 콘크리트내로의 염화물 이온 침투속도와 철근위치(피복두께)에 의해 정해지게 된다. 이 중 피복두께에 대하여는 설계도서를 보면 대략 파악할 수 있으며 최근에는 비파괴시험에 의해서 비교적 정밀도 높게 예측하는 것도 가능하다. 따라서, 잠복기의 열화 모델화란 콘크리트 내로의 염화물 이온 침입 현상을 모델화하는 것이라고 말할 수 있다.

일반적으로 콘크리트 내부로의 염화물 이온 침입현상을 설명하기 위하여 확산이론이 이용되고 있다. 그러나, 콘크리트 중의 염화물 이온 거동에는 염화물 이온의 농도 확산만이 아니라 해수의 침투 현상이나 시멘트 경화체에 의한 염화물 이온의 고정화 현상 등 복잡한 현상이 연결되어 있다. 따라서, 잘 알려진 Fick의 제 2법칙으로 표시되는 단순한 확산이론의 적용으로는 어디까지나 매크로적인 시점에서의

계산밖에는 할 수 없게 된다.

단, 리헤빌리테이션을 전제로 하는 경우에 한정하여 실제 구조물에서 채취한 분석용 시료에서 실제의 염화물 함유량을 측정하고, 이것에 의해 확산이론에서 얻어진 해를 수정하는 것이 가능하기 때문에 Fick식의 해를 사용하여도 잠복기를 어느 정도 정확하게 추정하는 것은 가능하다.

(2) 진전기에 대하여

진전기란, 철근 부식이 개시된 시점을 기점으로 콘크리트에 철근부식 균열(이하, 부식균열 이라고 함)이 발생하기까지의 시간으로 정의된다. 진전기의 길이를 결정하는 주된 요인은 철근의 부식속도와 부식균열 발생시의 철근 부식량을 들 수 있다. 철근의 부식속도에 대하여는 콘크리트 내부에서의 산소 확산속도를 고려한 부식 모델이 제안되어 있다³⁾. 단, 모든 부식 과정을 포함할 수 있는 모델화까지는 도달하고 있지 않은 실정이며, 현재로서는 이것을 추적하기 위하여 상세 점검시 전기 화학적 수법에 의해 철근부식상황에 관한 정보수집을 실시하는 것을 생각할 수 있다.

한편, 콘크리트에 철근 부식 균열이 발생할 때의 철근 부식량은 콘크리트의 역학 특성과 구조물의 형상크기에 의해 영향을 받는다. 이것에 대하여는 이러한 요인들을 고려한 유한요소법 모델이 제안되어 있다⁴⁾.

(3) 가속기에 대하여

가속기의 특징은 콘크리트에 철근 부식

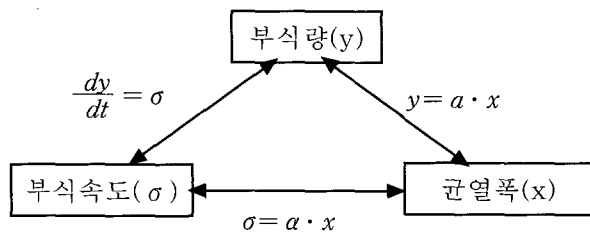
균열이 존재하는 것으로 후술하는 구조물의 성능저하는 일반적으로 이 시기부터 현저하게 나타나기 시작한다. 철근 부식 균열의 규모를 나타내는 파라메타로서 균열 폭을 예로 들어 균열 폭과 부식속도 혹은 철근 부식량과의 유기적인 관계로 생각하면 <그림 3>처럼 삼자의 관계를 나타내는 모델을 생각할 수 있다. 여기서, 「균열 폭이 크게 되면 부식속도도 크게 된다」라는 관계를 만족하는 것으로 이 관계에는 환경 조건이 크게 영향을 미친다. 한편, 부식량과 균열 폭의 관계는 「부식량이 증가하면 균열폭도 크게 된다」라는 관계를 만족하는 것으로 그 관계는 콘크리트의 역학적 특성이나 구조물의 형상 크기 조건에 따라 거의 결정된다^{5),6)}.

이들 관계의 정식화가 가능하게 되면 이를 통합하여 균열 폭과 시간, 부식량과 시간 혹은 부식속도와 시간의 관계를 정량화 할 수 있다. 또한, 이들을 구조물의 성능저하 모델에 적용시키면 성능 저하의 경시변화를 측정하는 것도 가능하다⁷⁾.

3.2 구조물의 성능 저하와 그 평가 방법

3.2.1 구조물의 성능이란

구조물의 성능을 고려하는 데에는 우선 그 요구 성능을 확실히 파악하여 둘 필요가 있다. 구조물이 가지고 있는 성능이 사용자나 관리자의 요구를 만족하고 있으면 문제는 생기지 않지만 그것을 만족하지 못할 경우에는 구조물에 지장이 생기거나 그 구조물은 사용할 수 없게 된다.



주) 그림 중에 나타난 식은 3자간의 관계식의 한 예임
 a : 구조물의 조건에 의해 결정되는 계수
 α : 환경조건에 의해 결정되는 계수

그림 3. 가속기에 있어서 모델 구축의 기본적인 생각

구조물에 대한 요구성능으로서 (표 1)과 같은 성능을 생각할 수 있고 개개의 요구성능 레벨은 사용자와 관리자에 의하여 달라지게 된다.

3.2.2 염해 열화 구조물의 성능 저하 모델

구조물 건설 직후 구조물의 성능은 충분히 확보되어 있지만 년수가 경과하면 여러 가지 열화인자가 작용하여 서서히 혹은 급속히 저하하며, 결국 그 구조물에 부여된 요구 성능은 확보 할 수 없게 된다. 열화 인자는 우선 구조물 구성재료인 콘크리트나 철근에 영향을 미쳐 그 본래 성능을 저하시키며, 이 후 구조물의 성능에 영향을 미치게 된다. (표 1)에 나타난 요구성능에서 알 수 있듯이 철근의 성능저하는 구조물의 성능에 있어 치명적인 것임에 틀림없다. 따라서, 염해에 의해 콘크리트 중의 철근이 부식한 구조물의 성능 저하를 정량적으로 평가하는 것은 매우 중요한 의미를 갖는다. 이하에 철근부식이 영향을 미치는 대표적인 성능으로서 내하성능과 내피로성능을 예로 들어 그 성능저하의 정량화 시도에 대하여 설명한다.

(1) 내하성능(최대 내력)

내하성능에는 주로 부식 균열폭과 철근 부식량이 영향을 미친다고 생각된다. (그림 4)에는 보 부재의 휨, 전단 및 부착과 내력에 미치는 철근부식의 영향에 대하여 실시한 계산예를 나타낸다⁸⁾. 또한, 이 계산에서는 철근의 부식감량률과 철근의 항복점이나 부착강도와와의 관계를 기존 연구결과^{9)~11)}를 참고하여 정량화하고 이것

을 계산에 사용하고 있다.

(그림 5)에는 부식감량률과 항복점과의 관계를 나타낸다. 기존 연구결과에서 콘크리트 압축강도는 해양환경에서 크게 저하하지 않는다고 보고되어 있어 여기서는 콘크리트 압축강도 저하는 고려하고 있지 않다¹²⁾.

이 결과로부터 보 부재는 ① 철근부식에 의한 내력저하는 휨 인장과피로를 일으키는 경우가 가장 큰 점 ② 휨 항복 선형형으로 설계된 부재는 철근부식에 의해 파괴모드가 변하지 않는 점 ③ 철근 이음이 있는 경우, 정착영역의 부식도에 따라 부착응력이 저감되기 때문에 철근부식에 의해 휨과 피에서 정착과피로 이행할 가능성이 있는 점 등을 알 수 있었다. 또한 여기에서는 자세한 설명을 생략하지만 내력벽 등에 부식균열이 생긴 경우, 지진 등의 작용에 의해 피복 콘크리트의 박락이 생기고 인성 저하가 생길 가능성도 지적되고 있다¹³⁾.

(2) 내피로성

평형 철근비 이하의 RC보 휨 피로특성에 있어서는, 저 싸이를 피로의 경우를 제외하면 철근의 피로 특성이 보의 내피로성을 지배한다고 생각해도 과언이 아니다. 한편, 전단 피로특성에 대하여는 부식철근과 콘크리트와의 부착상상이 큰 열쇠를 가지고 있는 것으로 판단된다.

부식한 철근의 피로강도에는

공식의 존재가 현저하게 영향을 미친다.

(그림 6)은 정확히 200만회에서 건전한 철근이 피로 파단하는 RC부재의 휨 피로특성이 철근 부식과 그것에 동반하는 공식의 존재에 의해 어떻게 변화하는 가에 대하여 기존의 연구결과를 기초로 계산한 예이다¹⁴⁾. 단, 콘크리트 중의 철근부식에 있어서 공식발생상황의 정량화에 대하여는 아직까지 충분한 검토가 되어있지 않고 급후의 큰 과제라 할 수 있다.

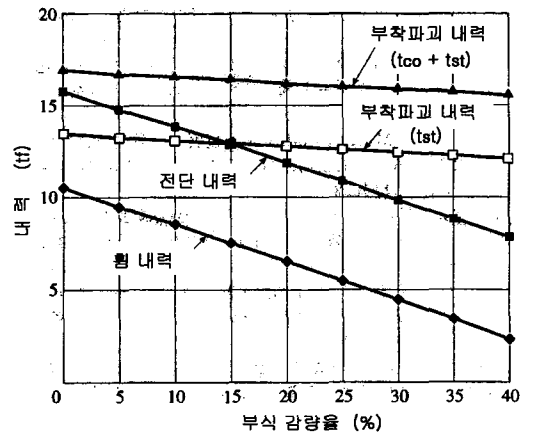


그림 4. 보 부재 내하력과 부식 감량률과의 관계

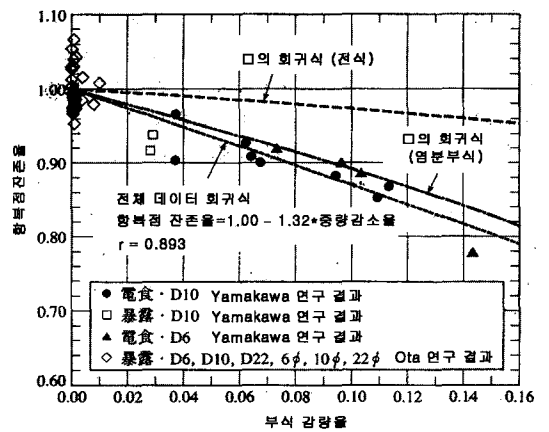


그림 5. 부식 감량률과 항복점 잔존율의 관계

표 1. 구조물의 요구 성능과 성능 레벨

내화성	최대내력이 0.0tonf 이상 일 것
저침성	교량이나 슬래브 하단 등에서의 처짐이 $\Delta\Delta$ mm 이하 일 것
내진성	부재각이 XX%까지는 붕괴하지 않을 것
내피로성	응력비 0.0으로 반복 회수 200만회 까지 견딜 것
수밀성	균열 등으로 누수가 없을 것
대인 안전성	부식균열에 의한 콘크리트의 박락으로 인명손상이 없을 것
미관	철근부식에 의하여 외관을 더럽히지 않을 것 (사람에게 불안감을 주지 않을 것)

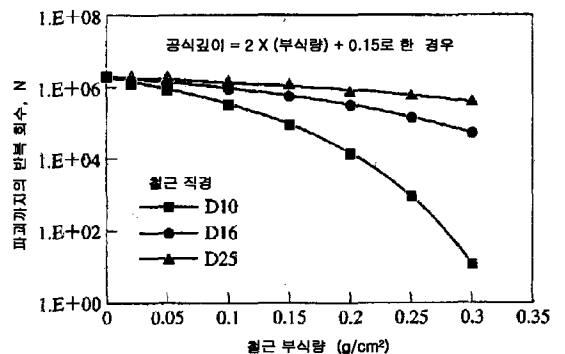


그림 6. 보의 피로 파괴까지의 반복 횟수에 미치는 철근 부식의 영향

3.3 열화 평가에 있어서 점검의 역할

상술한 염해에 의한 열화진행모델 및 구조물의 성능저하모델 기본형이 구축되었다 할지라도 그 중에서 고려되어야만 될 환경조건이나 구조물의 품질은 구조물 고유의 값이고 각기 정할 필요가 생기게 된다. 그러므로, 리해빌리테이션에 있어서는 미리 구조물 점검을 실시하는 것이 가능하므로 이에 따라 환경조건 및 구조물 상황을 가능한 정확하게 파악할 수 있어야 한다.

또한, 점검에서 모델에 필요한 여러 가지 파라미터를 정하는 데에 유익한 정보를 얻는 것이 가능하면 모델에 의한 평가정도를 크게 향상시킬 수 있다. 이점에서 사전의 상세 점검은 매우 중요하게 된다.

<그림 7>에는 염해열화 구조물의 리해빌리테이션 실시에 있어서 열화예측의 구체적인 흐름과 그때에 유효로 되는 점검 정보에 대하여 나타낸다.

4. 결 론

본 고에서는 열화를 일으킨 콘크리트 구조물에 대하여 적재적소의 보수·보강재료 및 공법 선택을 실시하기 위하여 필요한 구조물의 열화평가 개념과 함께, 염해를 예로 들어 구체적인 정량평가 방법을 소개하였다. 콘크리트 구조물의 내구성에 관한 지금까지의 광범위한 연구성과로부터 구조물 열화평가 모델의 구축은 매크로레

벨의 단계에서 메조 레벨의 단계로 향상되고 있다. 그러나 얻어진 결과의 타당성 확인은 아직 충분하다고 말하기는 어렵다. 금후도 열화현상의 해명을 향한 연구가 많이 실시되기를 희망하며, <그림 8>에 참고로 염해열화 연구에 필요한 정보를 정리하여 나타낸다. 마지막으로 번역자 입장에서 최근 철근 콘크리트 구조물의 내구성 문제 및 리모델링이 사회 이슈로 되어있는 만큼, 우리나라도 내구성에 관한 방대한 개별 연구를 종합적으로 분석 정리하는 시스템 연구와 함께 이를 실용화시키기 위한 끊임없는 노력과 투자가 이루어지기를 바라는 바이다. □

참고 문헌

1. 土木學會編 : 콘크리트 구조물의維持管理指針(案), 콘크리트라이브러리-81, 1995
2. 宮川豊章, 小林和夫, 藤井 學 : 鹽分雰圍氣中におけるコンクリート構造物の壽命豫測と耐久性設計. 콘크리트 구조물의壽命豫測と耐久性設計に関する 論文集, pp. 47~54, 1984. 4
3. 土木學會編 : 付録 耐久限界期間に基づく 콘크리트 구조물의耐久設計指針(案), 콘크리트라이브러리-82, 1995.
4. 須田久美子, MISRA Sudhir, 本橋賢一 : 腐食ひびわれ發生限界量に関する解釋的檢討, 콘크리트工學年次論文報告集, Vol. 14, No. 1, 1992.
5. 武若耕司, 松本 進 : 콘크리트中の鐵筋腐食がRC部材の力學的性狀に及ぼす影響, 第6回 콘크리트工學年次講演會論文集, 1984.

6. 知明, 松島 學 : 村上祐治, 關博 : 既設構造物のひびわれ幅から鐵筋腐食量の推定, 콘크리트工學年次論文報告集, Vol. 18, No. 1, 1996.
7. 木村哲士, 丸山久一, 濱田 廣 : RC部材における鐵筋腐食の定量的評價方法に関する研究, 콘크리트工學年次論文報告集, Vol. 18, No. 1, 1996.
8. 堤 知明 : 海洋環境下における鐵筋コンクリート構造物の健全度診斷に関する研究, 東京道立大學學位論文, 1997. 2.
9. 李翰承, 友澤史紀, 野口貴文, 鹿毛忠繼 : 有限要素法による鐵筋の腐食したRC梁の耐力性能評價, 콘크리트工學年次論文報告集, Vol. 19, No. 1, 1997, pp. 1147~1152.
10. 清川耕三, 山川哲雄, 伊良波繁雄, 太田達見 : 電食試驗により損傷したRC柱の耐震性能に関する實驗的研究(その1~2), 日本建築學會九州支部研究報告, 第 36号, pp. 261~268, 1997. 3.
11. 太田達見, 山崎庸行 : 腐食した鐵筋の力學的性質, 日本建築學會大會學術講演梗概集, 1997. 9, pp. 131~132.
12. Odd E. Gjory : Long-Time Durability of Concrete in Seawater, ACI Journal, pp. 60~67, 1971. 1.
13. 山川哲雄, 森永 繁, 藤崎忠志ほか : 亞熱帶の鹽害環境下における耐力壁の耐震性と耐久性に関する實驗的研究(その 1~3), 日本建築學會大會學術講演梗概集, 1993. 9, pp. 269~274.
14. 武若耕司 : 鐵筋腐食により劣化した 콘크리트 구조물의 曲げ疲勞特性評價に関する一試み, 土木學會第53回年次學術講演會.

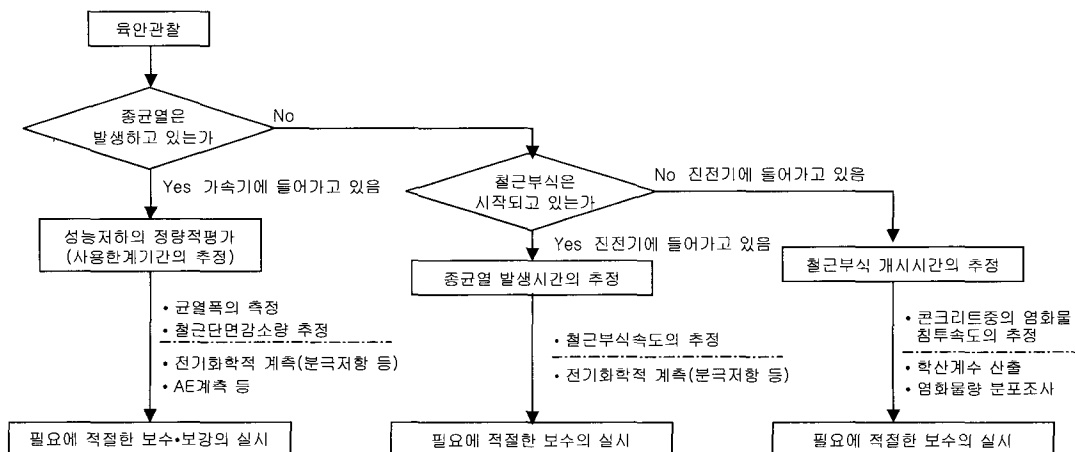
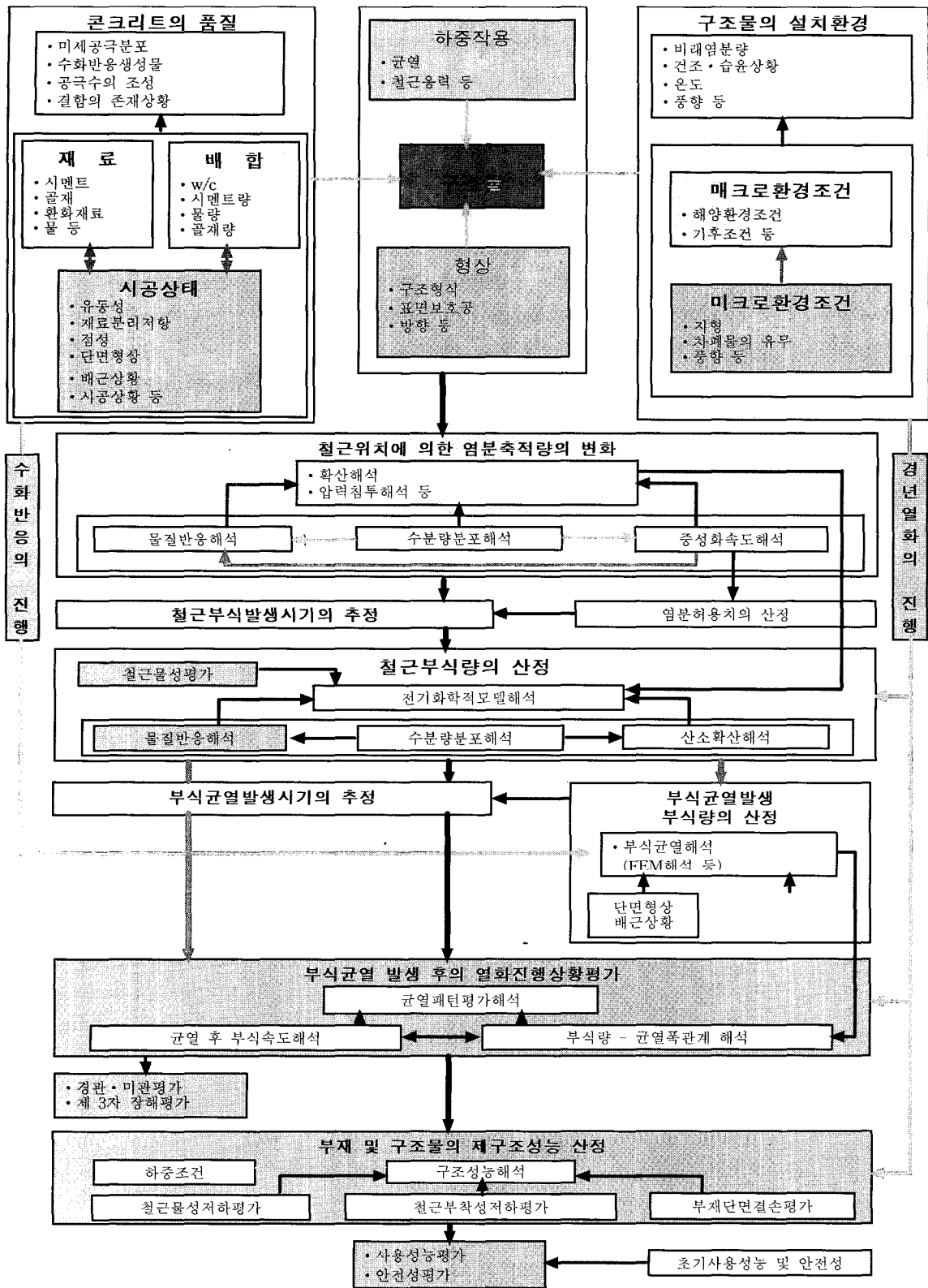


그림 7. 염해 열화 구조물의 열화 평가 흐름



어느 정도의 정밀도로 평가가 가능, 해석계수 1.3~1.5

평가방법에 대해 검토중, 해석계수 1.5~2.0

대부분 검토에 착수하지 않음

그림 8. 염해 열화 현상과 이를 예측하기 위하여 필요한 정보