

콘크리트의 내구성이 구조물에 미치는 영향

서 치 호

〈건국대학교 건축대학 교수〉

신 상 태

〈수원과학대 건축설비과 겸임교수〉

- | | |
|--------------------------|-----------------------|
| 1. 머릿말 | 3.2 탄산화에 의한 영향 |
| 2. 콘크리트의 내구성 | 3.3 염해에 의한 영향 |
| 2.1 내구성의 정의 | 3.4 동해에 의한 영향 |
| 2.2 탄산화 | 3.5 기타 |
| 2.3 염해 | 4. 콘크리트 내구성 평가 및 증진대책 |
| 2.4 동해 | 4.1 내구성 판정기준 |
| 2.5 기타 | 4.2 내구성 평가방법 |
| 3. 콘크리트 내구성이 구조물에 미치는 영향 | 5. 맺음말 |
| 3.1 내구성의 상호관계 | |

1. 머릿말

고대 로마의 판테온이나 몇몇 유럽의 수도 관과 같이, 천천히 경화하는 석회-포졸란 시멘트를 이용한 무근 콘크리트 구조물은 2,000여 년 전에 지은 것임에도 아직도 우수한 상태인데 반해, 포틀랜드 시멘트를 이용하여 만든 20세기의 철근콘크리트 구조물은 빠른 속도로 성능저하가 나타나고 있다.¹⁾ 제빙제나 바닷물과 같은 부식성 환경에 노출된 20년도 채 되지 않은 교량바닥판, 주차빌딩, 해저터널이나 다른 해양 구조물에서도 심각한 내구성의 문제

가 발생하고 있다.

콘크리트는 시멘트, 골재 및 기타 혼화재료와 물을 이용한 습식혼합형 성형재료라 할 수 있다. 특히 구조물의 대부분을 차지하고 있는 구조재료로서 성능과 활용도에 있어서 우수성을 입증받고 있는 재료이다. 그러나 콘크리트의 성능과 수명에 대한 많은 의문과 연구가 이루어지고 있으며, 이중 특히 콘크리트 구조물의 내구성이 수명을 좌우한다는 이론이 현재 지배적이라고 할 수 있다. 따라서 본문에서는 콘크리트의 내구적인 측면에서의 수명에 대한 이해와 내구성이 구조물에 직·간접적으로 미치

(표 1) 콘크리트구조물의 수명⁵⁾

용도	구조	내용연수
사무소, 미술관 등		65
점포, 주택, 기숙사, 숙박, 학교, 체육관		60
극장, 연수장, 영화관, 무용장		50
병원		47
발전소, 변전소, 송수신소, 정차장, 차고, 격납고		45
공장, 작업장을 포함한 창고		26~45
교량(철도업 또는 궤도업용)		50
터널(철도업 또는 궤도업용)		60

는 영향을 서술하여, 보다 내구성에 대한 정확한 이해를 도모함에 그 목적을 두고자 하였다.

일반적으로 볼 때 건축 및 토목구조물의 수명은 [표 1]에서와 같이 보통용도의 경우 60~65년, 교량의 경우 50년, 터널의 경우 60년으로 나타난다. 내구성의 문제가 과거에는 구조물의 설계나 재료의 문제에서 기인하기보다는, 대부분의 경우 시공상에 문제가 있는 것으로 나타나며, 콘크리트의 적절하지 못한 양생이나, 다짐, 충분하지 못한 철근의 피복, 줄눈부의 누수 등이 그러한 예이다. 그러나, 오늘날의 심각한 문제는, 최신의 시공기술로 지어진 최근의 구조물에서도 조기성능 저하가 발견되는 경우가 늘어난다는 것이다. 따라서 이것은 시공뿐만 아니라 설계, 재료부분에까지 내구성에 대한 직접적인 영향이 미치고 있다는 것을 말하며, 이것은 우리가 현재 건설에서의 제반사항을 보다 깊이 연구하여, 콘크리트의 내구성을 저해하는 주요요인들을 발견하고 제어하지 않는 이상, 콘크리트의 조기 성능저하는 우려해야할 정도의 높은 비율로 계속 일어날 것이란 뜻으로 해석될 수 있다.

2. 콘크리트의 내구성 요인

2.1 내구성의 정의

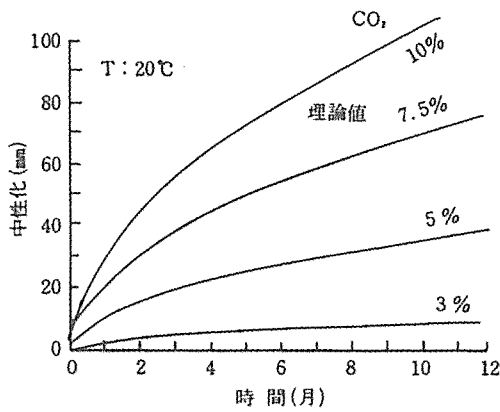
콘크리트의 내구성이란 “동결융해, 한서, 건습 등이 반복하여 작용하는, 즉 기상작용을 받는, 황산염, 산류 등의 화학물질에 의한 침식작용, 차량이나 흐르는 물이나 모래 등에 의해 마모되는 작용, 탄산화, 강재의 부식, 반응성골재 등의 영향, 그 외의 콘크리트 사용상 발생하는 다양한 작용에 저항하는, 장기간에 걸친 사용에 견디는 성질”³⁾이라고 정의할 수 있다.

다른 건설재료에 비해서 콘크리트라는 재료는 내구성이 우수한 재료로서 장기간에 걸쳐 사용되고 있으며, 콘크리트 구조물의 내구성이 우수한 것은 이미 많은 부분에서 증명되었다.

내구성에 관련된 요인으로는 콘크리트의 재료요인, 배합, 환경조건 및 기타요인으로 들 수 있다. 또한 콘크리트 구조물의 수명에 영향을 미치는 요인으로는 내적인 요인과 외적인 요인으로 구분할 수 있다. 즉, 재료적, 시공적인 요인은 콘크리트의 경화전후를 통해서 경화된 콘크리트의 개개의 성질인 강도, 중량, 흡수율, 표면구조 및 수밀성 등을 좌우하는 요인으로 작용된다. 이는 곧 콘크리트 자체의 품질을 말하기도 하며, 기본적인 설계에 반영되게 된다. 외적인 요인은 환경조건으로서 탄산화, 염해, 동해, 알칼리골재반응, 화학저항성 등을 들 수 있다. 이외에도 복합적으로 작용하는 균열, 박리, 누수 등도 외부적인 요인으로 포함시킬 수 있다. 본문에서는 세분화된 것들을 묶어서 탄산화, 염해, 동해, 기타 등으로 분류하고자 한다.

2.2 탄산화

콘크리트의 내구성에서 탄산화가 우선적으로 거론되는 것은 수명결정의 주된 결정인자



(그림 1) CO₂농도와 탄산화 깊이

가 되기 때문이다.

탄산화란 상온하에서 안정한 암석인 석회석을 소성하여 이산화탄소를 유리시켜 만든 시멘트 수화물이 다시 이산화탄소를 흡수하여 안정한 탄산칼슘으로 돌아가는 현상이며, 철광석을 고온에서 환원하여 산소를 유리시켜 만든 철이 다시 산소와 반응하여 안정한 산화철로 돌아가는 현상과 같은 원리이다.

탄산화를 설명하는 화학반응식은 ① 규산칼슘수화물의 탄산화, ② 수산화칼슘의 탄산화, ③ 에트링가이트의 탄산화, ④ 프리텔씨염의 탄산화의 4가지 식으로 표현된다. ②의 수산화칼슘은 공기중의 이산화탄소와 반응하여 탄산칼슘으로 되고 pH 8.5~10정도로 된다. 이는 콘크리트 자체에 유해하지는 않지만 콘크리트중의 철근의 부식하기 때문에 문제가 되고 있다. 즉, 경화전의 콘크리트는 약 pH 13의 강알칼리성을 지니며 이로인해 철근은 부동태피막을 형성하고 부식이 일어나지 않으나 탄산화로 인하여 알칼리성을 상실하면 이 부동태피막이 파괴되어 부식이 진행되며, 이 부식이 시작되는 시점이 철근콘크리트의 수명으로서 결부되어지기 때문이다.

탄산화를 촉진시키는 환경조건으로서는 온습도와 대기중 이산화탄소함유량이 지배적이

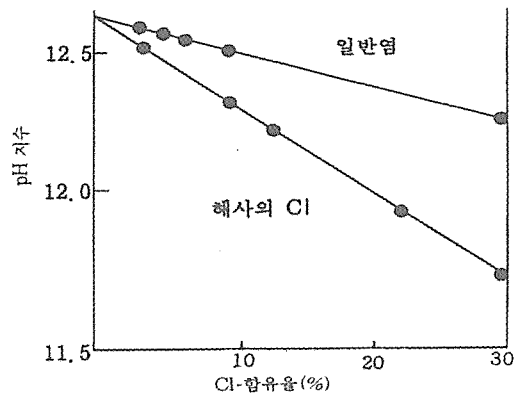
다. 건물의 실내와 실외간의 차이는 실외가 0.02~0.05%, 실내는 0.1%정도이며, 가정의 경우는 0.3%정도로 상당한 차이가 나기 때문에, 실내가 실외에 비해 1.5~3배정도 빠른 것으로 조사되고 있다.

2.3. 염해

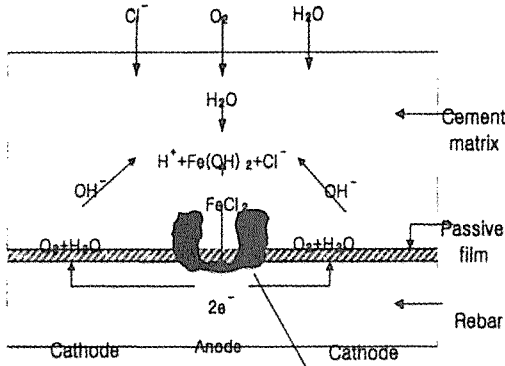
구조물에 있어서 성능저하의 또다른 주원인은 염소이온의 침입에 의한 철근부식이다. 염소이온의 침입은 크게 나누어, 해사나 배합수 등에 의하여 직접적으로 콘크리트 중에 유입되는 것과, 해양환경하의 비래염분이나 해수의 직접적인 접촉이나 동절기 용빙제의 살포 등으로 인하여 염소이온 등이 콘크리트 중으로 침투, 확산되는 것으로 구분된다.

철근부근에 소정의 염화물이 존재하면, 세공용액의 pH가 9이하정도로 되지 않아도 염소이온이 강재표면의 부동태피막을 파괴하게 되고 그 결합 부분에서 물의 존재하에 국부전지를 만들어 철근의 부식반응이 진행되며, 이들의 반응생성물로 수산화제 1철 또는 수산화제 2철의 녹을 발생시킨다.

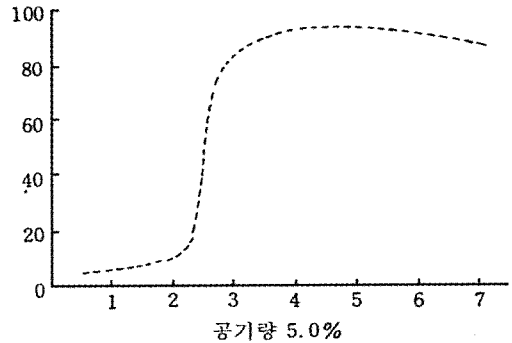
보다 정확하게 말하자면 염해는 Cl⁻이 철근 보호막을 국부적으로 파괴하는 경우와 콘크리



(그림 2) pH와 Cl⁻ 함유율과의 관계



(그림 3) 염소이온에 의한 철근부식 메커니즘



(그림 4) 콘크리트 동결융해 저항성과 공기량

트의 pH를 저하시키는 두 경우로 나눌 수 있다. 즉, 다량의 염소이온이 콘크리트 내에 존재하거나 침입하거나 하면, 철근의 부동태피막이 파괴되는데 이것은 염소이온이 강재표면의 산소이온 및 수산화이온과 가역적으로 치환하여 부동태화된 강재표면을 국부적으로 활성화하기 때문에 철근의 보호역할이 실패한다.

전자의 경우는 산화피막설로서 그 원리를 설명할 수 있는데, 산화피막설이란 Cl^- 이 다른 이온보다 쉽게 산화피막에 침투하여 콜로이드상으로 분산시켜 투과성을 좋게 함을 말하며, 흡착설은 Cl^- 이 용존산소 및 수산화 이온과 경쟁적으로 금속면에 흡착하여, 일단 표면에 접촉하면 금속이온의 수화를 도와 이것이 용액 중에서 용출하는 것을 용이하게 함을 말한다.²⁾

또한 Cl^- 이온이 콘크리트의 pH를 저하시키는 경우 [그림 2]는 염소이온이 $Ca(OH)_2$ 포화용액의 pH를 저하시키는 것을 보여주는 것으로서 콘크리트중의 잔골재 및 해수침입의 경우 콘크리트의 pH를 저하시켜 철근보호능력을 감소시키는 것을 나타낸다.

2.4 동해

동해란 모세관 공극내의 자유수가 동결하여

얼음으로 변화되면서 약 1.09배의 체적팽창을 하고 그 체적팽창으로 미동결수가 모세관공극을 통하여 내부로 이동하고 그 때문에 수압구배에 따른 압력에 의하여 조적이 파괴되는 것을 말한다.

또한 상기의 팽창요인 이외에도 박리, 팍아웃, 초기동해 등의 요인이 있다. 또한 동결융해에 의한 콘크리트 열화메커니즘은 수압설, 정수압에 의한 설, 침투압에 의한 설, 골재의 팽창에 의한 설 등으로 해명되고 있으며, 동해를 발생시키는 요인으로는 기온, 일조 및 눈, 수분, 해수, 제설제 등이다.

상기이론에 의하면 가장 큰 영향인자는 W/C이다. W/C가 클수록 시멘트 페이스트 경화체의 모세관공극내의 물의 양이 많아져 체적이 팽창되기 때문이다. 다음의 영향인자로 는 공기량이며, 콘크리트가 냉각되면 모세관내에 있던 수압을 공기포가 수용하게 되어 수압의 악영향을 효과적으로 처리하게 된다.

2.5 기타

기타 내구성요인으로서 는 화학적 침식과 알칼리 골재반응이 있다. 콘크리트구조물의 화학적침식이란 콘크리트의 시멘트 수화물이 어떤 종류의 화학물질(부식성물질)과 반응하여

용출됨에 의하여 조직이 다공화되거나 반응에 의하여 팽창을 일으켜 구조물의 성능이 저하하는 현상을 말한다. 부식성 물질에는 산, 동식물성기름, 황산염, 기타의 염류, 부식성 가스, 당류 및 강알칼리 등이 있다.⁴⁾

알칼리 골재반응이란 시멘트중의 알칼리성분(Na_2O , K_2O)이 시멘트 페이스트의 모세관 공극중의 수산화칼슘을 함유한 고알칼리성의 공극용액과 골재중에 함유된 반응성 실리카질 광물에 의해 일어나는 화학반응으로써, 반응 생성물의 형성과 알칼리 실리카겔의 흡수에 따라 콘크리트 내부에서 국부적인 체적팽창이 생기므로, 콘크리트 균열 및 박리현상 등이 유발되어 이것과 다른 성능저하 요인이 상승적으로 작용하면, 콘크리트의 내구성이 현저하게 저하된다.⁵⁾ 특히 철근의 부식이나 황산염 침식과 같은 성능저하는 콘크리트의 내부로 물과 이온이 침투할 때 일어나는데, 미세균열들과 가시적 균열, 공극들이 서로 연결될 때 침

투가 일어난다.⁵⁾

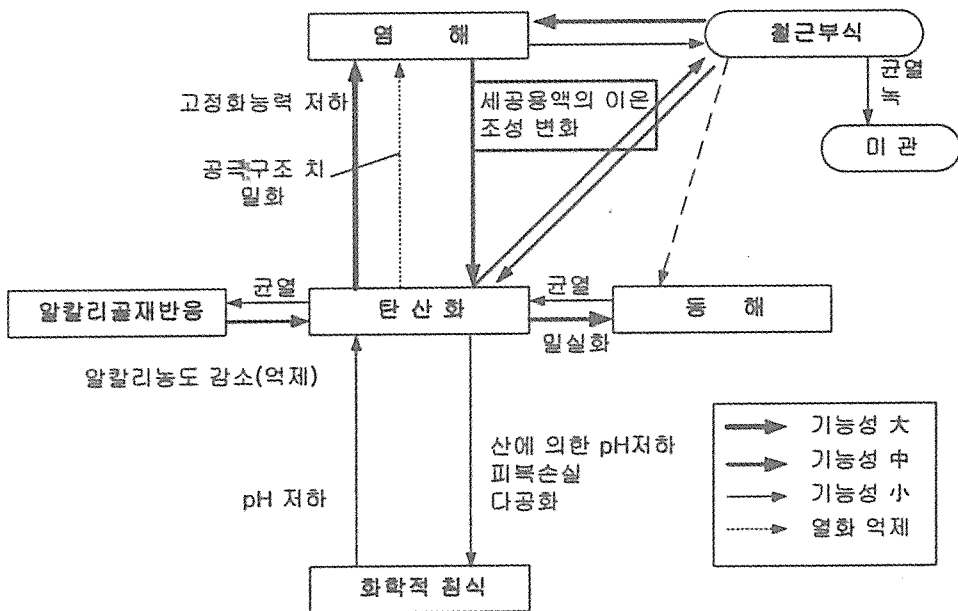
3. 구조물과 내구성의 영향

3.1 내구성의 상호관계

콘크리트는 여러 가지 환경이 동시에 작용하며, 상기의 내구성요인이 각각 단독으로 작용하기도 하지만, 대부분은 요인들이 상호 복합적으로 작용하여 구조물의 내력을 저하시키기 때문에 정확한 원인규명이 어렵게 된다. 이와 같은 각 열화현상의 상호작용을 도식화하여 나타내면 (그림 5)와 같다.

3.2 탄산화에 의한 영향

콘크리트가 탄산화되면 철근의 부동태 피막이 파괴되므로 철근의 부식이 시작되어, 구조내력의 저하, 철근의 피복콘크리트의 균열, 박



(그림 5) 콘크리트 내구성의 상호관계

리 등을 발생시켜 미관, 기능 및 안정성이 저하된다. 대한주택공사의 조사자료⁶⁾에 의하면 도심부에서 20년이상 경과된 콘크리트 구조물의 탄산화 깊이는 2~3cm 정도로 조사 보고되고 있다. 이것은 탄산화와 콘크리트의 피복두께 및 내구수명과 밀접한 상관성이 있음을 나타내어 주고 있다.

탄산화는 콘크리트에 직접적인 영향은 없으며, 콘크리트내에서는 탄산화가 진행되면서 피복면으로부터 멀어질수록 진행속도가 둔화되어진다. 이는 탄산화로 인한 조직내에 화합물인 탄산칼슘으로 인하여 조직구조가 수밀해 진다는 일부 주장이 있다. 이러한 이론을 가정으로 한다면 무근콘크리트인 경우에는 탄산화는 내부의 조직구조를 치밀하게 할 수도 있다는 양면적인 특성을 보여주고 있다.

특히 탄산화를 억제하기 위해서는 W/C를 낮게하여 세공량을 감소시켜 콘크리트를 CO₂ 가스가 침투하기 어렵게 함으로써 탄산화를 방지할 수가 있다. 통상 W/C가 40%이하에서 탄산화에 대한 내구성이 양호한 것으로 보고되고 있으므로 참고하도록 한다.

3.3 염해에 의한 영향

염화물이온이 콘크리트의 역학적 성질에 미치는 영향은 적기 때문에 일반적으로는 염화물이온의 침입에 의해 야기되는 철근부식을 중요하게 다루고 있다.

염해가 구조물에 미치는 영향은 ① 녹물의 용출에 의한 콘크리트 표면의 오염, ② 철근부근에 균열의 발생, ③ 발생된 균열에 의한 부식 가속화, ④ 피복콘크리트의 탈락, ⑤ 철근단면적 감소 및 중량감소 등이 있다.

염해에 의한 구조물의 피해를 방지하기 위해서는 물시멘트비를 작게하고, 밀실한 콘크리트 제조, 방청제의 사용, 아연도금 철근의

이용, 수밀성이 높은 표면마감 등의 조치가 필요하다.

3.4 동해에 의한 영향

콘크리트의 동해는 크게 팽창에 의한 열화를 들 수 있으며, 그 외에도 표면층이 박리하는 열화현상인 표면층의 박리(Scaling), 골재중의 수분의 동결에 의해 팽창 박리되는 팝아웃(Pop-out), 경화초기단계에서 콘크리트의 동결에 의해 손상을 입을 수 있는 초기동해 등으로 구분될 수 있다.

콘크리트가 동해를 입을 경우 유효단면이 크게 감소하여 내하력에 영향을 미치며, 콘크리트 피복의 감소로 인하여 철근과의 부착강도 손상형태 저하 및 변형의 증대 등이 문제가 된다. 해안부근에서는 콘크리트 피복두께의 감소와 콘크리트 조직의 느슨함 때문에 염화물 이온의 침투속도가 빠르게 되고, 철근의 부식도 촉진되어 내구성이 현저하게 저하된다.

건축구조물 등에 일반적으로 보여지는 동해는 초기에는 균열도 관측되어지나 보다 진행된 단계에서는 전체적으로 붕괴한다. 균열은 거북이등 형태의 균열로, 이것은 시멘트의 안전성 시험에서 보여지는 불안정한 시멘트의 균열패턴과 유사하다.

동결융해작용에 미치는 영향은 복잡하며, 이런 동해를 방지하기 위한 대책도 상당히 복잡하다. 주요 대책을 정리하면 ① 적절한 콘크리트 배합 및 재료사용, ② 적절한 시공 및 동결융해 작용을 받기 전까지 충분한 양생, ③ 수분노출을 최소화 할 수 있는 구조설계로 나누어 요약될 수 있다.

3.5 기타

화학적 침식은 산, 알칼리, 염류를 사용하는

[표 2] 내구성 시험항목

시험항목	손상형태			
	염해	탄산화	동해	기타
정밀외관조사	◎	◎	◎	◎
코어의 채취조사	◎	◎	◎	◎
탄산화 깊이조사	◎	◎	○	
철근부식 상태조사	◎	◎	○	◎
피복두께, 철근위치의 측정	○	○	○	○
슈미트해머 반발도 시험	○	○	○	○
초음파전달속도의 측정	○		○	
염화물이온 함유량의 측정	◎	○	○	○
압축강도 및 정탄성계수 시험	○	○	◎	○
XRD 및 SEM분석	▲	○	◎	◎
경화콘크리트의 배합추정	○	○		▲
알칼리 골재 반응 관련시험			◎	
동해관련시험				◎

주) ◎, ○, ▲는 각각 필수, 권장, 생략가능 항목임.

각종공업, 동 식물성기름, 유기산 및 당류를 사용하는 식품공업, 온천지대, 산성, 하천유역, 및 하수도, 하수처리시설 등의 콘크리트

구조물에서 나타나고 성능저하의 상황은 각각 다르다. 알칼리 골재반응에는 알칼리-실리케이트반응, 알칼리-실리카반응과 알칼리 탄산염반응의 3종류가 알려져 있고 대부분은 알칼리 실리카반응(ASR)으로 알려져 있다.⁵⁾

ASR을 일으키면 ① 콘크리트 내부의 골재 주변이 흑색으로 테두리가 쳐지는 반응환이 관찰되며, ② 계속 반응이 진행되어 표면으로부터 알칼리실리카겔이 얼룩져 나와 백색물질로 변화하며, ③ 표면에 균열이 나타난다.

화학적저항성을 위해서는 혼합시멘트나 알루미늄 시멘트가 효과가 있으며, 콘크리트제조시 기본적으로 W/C를 작게함으로서 수밀성을 향상시켜 유해한 내물질이 침투되지 못하도록 하는 것이 중요하다.

4. 콘크리트구조물의 내구성 평가

4.1 내구성 판정기준

[표 3] 내구성 진단평가방법

시험항목 구분	1차 내구성진단	1차 내구성진단		3차 내구성진단
		(실내시험)	(현장시험)	
공 통	비파괴강도/염화물량 철근 및 균열탐사 자연전위측정 현장탄산화측정	코어강도 및 탄성계수 배합추정 철근의 단면감소	정밀외관조사 (균열간격, 폭, 길이, 방향성) 자연전위측정	외관조사망도
염 해	-	코어의 탄산화 코어의 염화물량	쪼아내기 조사 (철근의 부식상태)	자연전위에 의한 전위지도
탄 산 화	-	코어의 탄산화 코어의 염화물량	쪼아내기 조사 (철근의 부식상태)	자연전위에 의한 전위지도
동 해	-	깊이별 세공량 측정 콘크리트 함유량	정밀외관조사 (+들뜸, 박리, 박락면적)	반발도에 의한 압축강도 분포도
기 타	-	부위별XRD/SEM분석 골재의 암종, 반응성 코어의 팽창량, 알칼리함유량	정밀외관조사 (+변색부위 등)	침식깊이 분포도

탄산화, 염해, 동해, 기타 등의 내구성 저하 요인에 의하여 성능이 저하된 콘크리트 구조물의 성능저하 예측을 실시하는 경우는 콘크리트 내외부의 평가를 통해서 성능저하지표를 산정한다. 예로서 염해를 입은 구조물의 경우 표면의 염화물이온 및 콘크리트중의 염화물이온을 성능저하요인으로 하고, 한계염화물 이온농도에 도달하고 있는 부위의 깊이 또는 철근의 부식량 등을 성능저하지표로 하는 것이 좋다. 또한 콘크리트의 화학적 침식에 의한 성능저하가 예측되는 경우에는 표면으로부터 침식깊이 등에 주목하여야 한다. 성능저하기구로서 콘크리트의 화학적 침식에 예측되는 경우에는 영향을 받기 쉬운 개소를 중점적으로 나타낸 차트에 따라서 진단한다.

건설교통부에서 작성한 건축물의 내구성평가를 위한 시험항목을 요약하면 [표 2]와 같이 나타낼 수 있다.

4.2 내구성 평가방법

건설교통부의 1999년 자료에 의하면 내구성평가방법은 상기 [표 3]과 같이 1차, 2차(실내, 현장), 3차 내구성평가로 구분하여 실시하도록 권장하고 있으며, 각 부문별로 공동적으로 실시해야 할 사항과 개별적으로 실시해야 할 사항을 구체적으로 기술하고 있다. 따라서 내구성조사가 필요한 경우에는 상기 항목별로 참고하여 조사계획을 세울 수 있다. 즉, 구조물의 1차 내구성결과로서는 손상도를 4단계로 표시하고, 일정한 손상이 인정되는 경우에 2차 내구성조사를 실시하며, 이를 토대로 종합결과를 토대로 보수필요성이 요구될 때 보수범

위의 결정을 위하여 3차 내구성조사의 실시 등을 제시하고 있다.

5. 맺음말

콘크리트는 이제 강도가 높은 것이 좋은 것 많은 아니다. 강도가 높을수록 내구성도 좋을 것이라는 통념은 이제 바뀌고 있다. 조강 및 초조강 콘크리트는 균열의 발생이 더 쉬우며, 부식성 환경에서의 콘크리트 성능저하가 더 빨리 일어난다. 따라서 구조물은 이제 강도 및 강성뿐만 아니라 사용성, 경제성 및 내구성 등을 만족하는 시공이 이루어져야 할 것으로 기대되며, 여러 설계기준은 이 점을 제대로 부각할 수 있도록 적극적으로 반영되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 1) Cerwick. B.C., "A Holistic Approach to concrete technology for major bridges", Concrete Technology, 1994. pp. 41-59.
- 2) 福島敏夫, 鐵筋コンクリト造建築物の壽命, 技報堂出版, 1990
- 3) 岡田 清, 콘크리트의耐久性, 朝倉書店, 1986
- 4) 김맹기, 해사품질과 각국의 염분염해에 의한 콘크리트 철근부식에 대한 고찰, 레미콘 제 37호, 1993. 10. pp.55
- 5) 건설교통부, 콘크리트내구성 평가절차수립, 건설교통부, 1999. 12. pp.15-21
- 6) 대한주택공사 주택연구소, 염해구조물 진단 및 보수기술서, 과학기술처, 1993. 11.
- 7) 角彰, "建築構造物-設計の立場から-, 21世紀のコンクリト建築構造の課題", 콘크리트工學, Vol 39. No. 1, 2000, 1. pp 26-30.