

# 하수시설용 콘크리트 구조물의 화학적 침식에 대한 점검 및 진단기술

Inspection of Chemical Attacked Sewage Concrete Structures



오광진\*  
Kwang-Chin Oh



류근준\*\*  
Keun-Joon Ryu



배태호\*\*\*  
Tae-Ho Bae



김대호\*\*\*\*  
Dae-Ho Kim



배정주\*\*\*\*  
Jung-Ju Bae

## 1. 콘크리트의 화학적 침식

산이나 가스등의 화학물질이 콘크리트와 접촉하는 환경에서는 콘크리트가 화학물질과 반응하여 반응생성물의 용출에 의해 조직이 다공화 되고 반응에 따른 팽창이 발생됨에 따라 콘크리트의 연화, 균열, 박리, 박락, 철근부식 등의 열화현상이 발생되며, 이를 화학적침식이라 한다.

이 같은 침식을 일으키는 화학물질로는 산, 동식물기름의 일부, 무기염류, 산화수소와 아황산가스 등이 있으며, 이것들은 콘크리트 중의 수화생성물을 가용성물질로 변화시켜 콘크리트를 약하게 한다. 또한 유산염은 콘크리트중의 칼슘알루미네이트수화물과 미 수화칼슘알루미네이트 페라이트상과 반응하고, 그 외에 생성된 에트린자이트의 팽창에 의해 콘크리트를 열화시킨다. 이 같은 열화는 각종 공업지대나 산성하천 및 하수도 시설 등에서 주로 발생되고 있다.

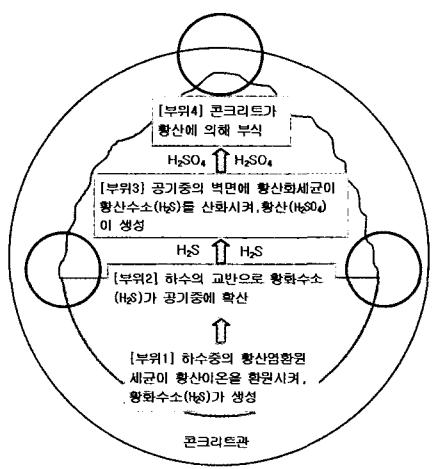
콘크리트의 화학적 침식에 의한 열화의 특징은 다음과 같다.

- 1) 표면열화에 의해 콘크리트 표면에 백화 등의 오염이 발생한다.
- 2) 콘크리트의 박리, 박락 등이 발생한다.
- 3) 콘크리트의 강도 및 탄성계수가 저하된다.
- 4) 유산염에 의한 열화의 경우에는 팽창균열이 발생하는 경우도 있다.
- 5) 열화인자의 침입에 따라 콘크리트가 탄산화된다.
- 6) 열화인자가 철근까지 도달하면 철근이 부식한다.

본고에서는 콘크리트의 화학적 침식 중에서 하수도 구조물에서 발생되고 있는 콘크리트의 열화에 대하여 다루고자 한다.

하수도 보급률이 높은 대도시권에서는 하수도 구조물의 노후화가 많이 진전되어 구조물의 보수나 보강이 시급히 필요한 것으로 보고되고 있다. 하수도 구조물의 콘크리트는 미생물에 의한 열화가 주를 이루고 있어 이에 대한 부식의 메커니즘과 점검·진단방법에 대해 설명하고자 한다.

하수도 시설은 관로와 중간연결펌프장, 하수처리장등으로 구성된다. 이들 시설물의 주요 재료인 콘크리트는 미생물에 의해 생성된 황산에 의한 영향을 받고 있다. <그림 1>은 미생물에 의한 콘크리트의 열화메커니즘을 나타낸다. 미생물에 의한 콘크리트의 부식은 가장 하수나 사업장의 하수 중에 포함된 황산이온이 황화수소로 환원되는 것으로부터 시작되며, 이는 용액 중의 황산염 환원세균이라고 불리는 미생물의 활동에 의해 발생되게 된다. 이 미생물은 산소가 부족한 환경에서 활성화되고, 다음으로 용액 중에서 발생한 황화수소는 공기 중으로 흘어져 콘크리트 표면에 살고 있는 유황산화세균에 의해 황산화 된다. 이 미생물의 활동에는 충분한 산소를 필요로 하고, 황산이 공



\* 정희원, 한국시설안전기술공단 팀장  
okj@kistec.or.kr

\*\* 한국시설안전기술공단 실장

\*\*\* 한국시설안전기술공단 부장

\*\*\*\* 정희원, 한국시설안전기술공단 차장

그림 1. 미생물에 의한 콘크리트 열화 메커니즘

표 1. 하수도 구조물에서의 콘크리트 열화

	반응	현상
공기중	황산에 의한 열화	<ul style="list-style-type: none"> <li>콘크리트중의 알칼리가 소실</li> <li>시멘트경화체가 석고화 하여 강도저하 발생</li> </ul>
	황산이온의 농도 탄산과의 반응	<ul style="list-style-type: none"> <li>팽창성결정의 에트린자이트의 형성으로 팽창파괴 발생</li> </ul>
용액중 칼슘용출	탄산과의 반응	<ul style="list-style-type: none"> <li>콘크리트중의 알칼리가 소실되어 시멘트경화체가 탄산칼슘화 됨</li> </ul>
	칼슘용출	<ul style="list-style-type: none"> <li>위의 반응으로 형성된 탄산칼슘이 가용화하여 용액 중으로 용출</li> <li>강도 저하 및 탄산의 침투 진행</li> </ul>



사진 1. 하수도 구조물의 열화 사례



사진 2. 철근이 노출된 사례

기와 접촉하고 있는 콘크리트를 부식시킨다. 용액 속에서도 미생물의 활동으로 발생된 유기산이나 이산화탄소에 의하여 콘크리트가 열화되는 경우가 있다.

<표 1>은 미생물에 의한 부식패턴을 정리한 것이다. 일반적으로 하수도 구조물에서 미생물에 의한 부식이라고 하면 주로 공기와 접촉하는 환경에서의 현상을 말하지만, 용액중의 부식도 무시할 수 없다. 여기서는 공기 중의 부식이 발생되기 쉽고, 진행속도도 빠르므로 공기와 접촉하고 있는 콘크리트의 부식을 중심으로 설명하고자 한다.

이 단계에서는 전문기술자에게 상담하는 것이 바람직하다. <사진 1>은 미생물에 의해 부식한 하수도 시설의 예로, 사진의 왼쪽에서 오른쪽으로 열화가 진행되고 있으며 공기 중에 있는 전체 면으로 열화가 진행하게 된다. <사진 2>는 철근이 노출된 사례를 나타낸 것으로, 철근이 노출될 정도가 되면 구조내력을 고려한 점검·진단을 실시하여 보수·보강을 실시해야 하며 이 때에는 막대한 비용이 필요하게 되므로 이전에 조기대책을 마련할 필요가 있다.

관로의 점검은 맨홀이나 펌프장과 처리장 등의 점검구의 개구부에서 실시한다. 황화수소 가스는 황화물을 포함하고 있는 물이 교반되는 경우에 발생한다. 발생량은 시간에 따라 변동하기 때문에 단시간의 측정으로 황화수소가스를 확인하는 것은 어렵다. 펌프장은 낙차가 있는 곳이나 펌프가 작동하고 있는 시간대에 측정을 하고, 관로에서는 시간을 변화시켜 측정하는 것이 바람직하다.

황산염환원세균과 유황산화세균의 활동에 알맞은 온도는 30 °C 전후이기 때문에 여름에 점검할 때 황화수소가스를 확인하기 쉽다. 또한 점검을 할 때 구조물내부의 가스는 매우 유독하므로 점검자의 안전대책을 충분히 고려해야 할 필요가 있다.

## 2. 하수도 구조물의 열화 조사 계획

### 2.1 조사 내용

(1) 콘크리트의 화학적 침식에 의한 열화조사를 할 때는 콘크리트 속에 침투된 화학물질에 의한 피해깊이와 철근부식 및 그에 따른 균열, 단면결함 등의 열화에 중점을 두고 조사할 필요가 있다. 콘크리트의 화학적 침식은 화학물질의 침투에 의해 콘크리트 표면에서 내부로 진행되므로 조사에서는 화학물질의 종류와 피해깊이 등 철근의 피복과의 관계 등에 대해서 명확하게 할 필요가 있다. 또한 기존의 철근부식과 단면결손 등이 발생한 경우에는 그 정도를 명확하게 할 필요가 있다.

(2) 조사는 구조물의 중요성, 규모 및 열화상황으로부터 판단되는 열화도 및 그 범위를 파악할 수 있으며, 열화진행을 예측할 수 있는 조사 결과가 얻어지도록 결정한다. 콘크리트의 화학적 침식 진행은 화학물질의 농도와 침투속도, 건습의 반복 등에 관계하여 구조물의 부위마다 오차가 있으므로 부위별 또는 구조물 전체로 하여 평균적인 열화상황을 파악할 수 있는 수량(최저 3 개소)으로 정할 필요가 있다. 그리고 기존의 열화가 진행되고 있

표 2. 열화가 예상되는 시설과 부위

하수처리장	소규모처리시설	관로시설·중간연결펌프장
침사지	유량조정조	단치와 낙자가 있는 부위
분배조	침전분리조	관의 상류 및 출구
최초침전지	접촉폭기조	입송관의 출구
폭기조, 소독조	오니저류조	펌프장의 하수 유입부
오니농축조	오니농축조	
오니저류조	상기시설의 연결수로	
오니소화조		
상기시설의 연결수로		

는 부위에서는 중점적으로 조사 빈도를 증가해야 하며 열화가 진행되지 않은 부위와 상대 비교를 할 필요가 있다. 또한 개략적으로 열화원인을 추정한 후 보다 상세한 원인규명이 필요한 경우에는 대표적인 열화부위에서 중점적으로 조사하는 것이 바람직하다.

## 2.2. 조사 부위 및 빈도

〈표 2〉는 미생물에 의해 부식되기 쉬운 부위를 나타낸 것이다. 이 표에 표기된 부위는 하수 또는 진흙 속에 산소가 결핍되어 황화수소가 발생되기 쉬운 장소이다. 일상점검은 부식되기 쉬운 부위를 위주로 실시한다. 각 부위에 년 1회의 빈도로 점검하는 것이 바람직하다.

## 2.3 조사 항목과 방법

화학적 콘크리트 부식에 관한 조사 항목과 방법은 조사의 목적 및 구조물의 열화 상황에 따라 결정할 필요가 있다. 즉 육안점검에서 열화 현상이 발견된 단계에서는 예방 관리를 목적으로 피해깊이와 피복의 조사를 중점적으로 할 필요가 있으며 열화 현상이 나타난 단계에서는 열화 원인의 추정 또는 확인, 열화도 및 범위를 평가하여 보수의 여부를 판정하는 사후관리를 목적으로 한 조사를 할 필요가 있다. 〈표 3〉에서는 조사 목적에 따른 열화 항목 예를 나타내었으며, 〈표 4〉는 조사 항목과 조사 방법에 대하여 나열하였다.

일상점검으로 부식의 징후가 확인되면 보수여부를 판정하여야 하며, 현실적으로 시설을 사용하는 중에 조사해야 하므로 부식 환경을 파악하는 것은 쉽지 않다. 한편, 조사 부위는 관로에서는 맨홀, 펌프장과 처리장에서는 개구부에 국한되므로 점검 범위나 조사 항목이 매우 제한적이다. 이때는 수위를 저하시켜 작업공간을 확보한 상태에서 조사 대상 범위와 조사 시간을 충분히 확보하는 것이 바람직하다. 예비조사의 포인트는 미생물에 의한 부식인지를 확인하는 것과 부식의 정도와 속도를 넓은 범위로 파악하는 것이다. 황화수소의 가스농도측정은 24시간 정

표 3. 화학적 콘크리트 침식에 관한 조사 항목 예

조사항목	조사목적	예방관리	사후관리
환경	물, 흙, 가스중의 유해물질 유무	◎	◎
외관상태	외관상태	◎	◎
	유해물질함유상황	△	◎
	피해깊이		◎
	피복두께	◎	◎
구조물의 열화상황	철근부식	△	◎
	반발경도	○	◎
	초음파전달속도		△
	압축강도	△	○
	배합비 분석		△
	칠근의 인장강도		○
	탄산화깊이	△	◎

◎ : 중점적으로 조사하는 것이 바람직한 항목

○ : 조사하는 것이 바람직한 항목

△ : 필요에 따라서 조사하는 것이 바람직한 항목

표 4. 조사 항목과 조사 방법

조사항목	조사방법	간편성	효율	신뢰도	경제성
환경 (물, 흙, 가스 중의 유해물질의 유무)	현장답사, 정보수집	-	-	-	-
외관현황	상세육안조사	-	-	-	-
균 열	육안조사, 스케일측정	◎	×	◎	◎
들뜸·박리	적외선법	○	◎	○	×
	타음법	◎	×	◎	◎
	적외선법	○	◎	○	×
	쪼아내기	◎	○	◎	○
	전자유도법	◎	◎	○	◎
	레이더법	◎	◎	○	◎
	탄성파법	○	○	○	○
열화 현황	방사선 투과법	×	×	○	×
	쪼아내기	◎	○	◎	○
	자연전위법	○	◎	○	◎
	분극저항법	×	×	○	×
구조 물성	압축강도	○	○	○	○
	반발경도법	◎	○	○	◎
	초음파	○	○	○	◎
	X선 분석	-	-	-	-
	시계열분석	-	-	-	-
	화학분석	-	-	-	-
칠근의 인장강도	금속재료인장시험	-	-	-	-
	피해깊이	-	-	-	-
	반발경도법	-	-	-	-
	초음파전달속도	-	-	-	-
배합	초음파법	-	-	-	-
	시멘트함유량	-	-	-	-
탄산화깊이	페놀프탈레인법	◎	○	○	◎
	드릴법	◎	○	○	◎
	코어채취	◎	○	○	◎

◎ : 양호, ○ : 보통, × : 불량

도 연속하여 측정하는 것이 바람직하다. 또한 하수 중에 용해된 황화물의 양을 측정하고, 황화수소의 존재와 농도를 확정한다. 또한 가능하면 부식된 콘크리트에서 시험편을 채취하여 pH를 측정하고, 이수석고가 포함되어 있는지를 조사한다. 이수석고는



사진 3. 탄산화 깊이 측정 사례

콘크리트중의 칼슘분이 황산과 반응하여 생성하는 물질이다.

하수중의 황화물이 검출되고, 평균 황화수소농도가 1 ppm<sup>o</sup> 상인 경우는 미생물에 의한 부식의 가능성이 높다. 콘크리트의 pH가 4이하이고, 이수석고가 생성되었다면 확실히 미생물에 의한 부식이다. 보다 정확한 상태를 파악하기 위해서는 콘크리트의 부식면을 쪼아내어 페놀프탈레인 용액을 분무해 탄산화깊이를 측정한다. <사진 3>은 탄산화깊이 측정의 예를 나타낸다. 콘크리트가 pH4이하의 강한 산성인 부위에는 갈색계통의 수산화철 층이 나타나는데, 이때 수산화철은 시멘트중의 철분이 산화되어 생성된다. 탄산화깊이와 수산화철 층의 깊이는 재령을 고려하여 부식속도를 산출 할 수 있다.

한편 일상점검에서 콘크리트의 미생물에 의한 부식여부를 확인 할 수 있으며, 또한 개략적인 부식속도로 보수와 방식이 긴급히 필요하다고 판단된 경우, 상세 조사를 실시한다. 상세 조사는 보수설계에 필요한 상세한 부식 정도와 방식 대책을 세우기 위한 부식 환경의 파악이 목적이다. 특히, 보수를 실시하는 콘크리트의 깊이를 정하고 방식 대책의 선정에 필요한 자료를 획득할 필요가 있다.

상세 조사는 하수처리장 시설의 가동을 중지하고 물을 빼내어 보수 대상이 되는 콘크리트 면을 노출시켜 조사한다. 그 결과로부터 열화된 부위와 범위를 나타내는 도면을 작성해야 한다. 관로에서는 구경이 800 mm 이상이면 사람이 들어가서 실시하는 조사가 가능하지만, 하수처리장과 달리 관로는 현실적으로 물을 빼고 조사하는 것은 어렵다. 안전대책을 충분히 고려하여 조사 계획을 수립 할 필요가 있다. 800 mm보다 작은 관은 맨홀조사로 대체하게 되며, 일반적으로 맨홀에서의 조사 결과는 그 전후 관로의 부식 상황을 비슷한 정도로 반영하는 것이 바람직하다. 맨홀사이의 관로에 대해서는 TV카메라 등을 사용하여 조사할 수도 있다.

하수처리장에서와 마찬가지로 관로의 상세조사에서 가장 중요한 점은 코어 또는 시험편을 채취하는 것과, 그 위치의 철근을 쪼아내어 부식 정도를 확인하는 것이다. 콘크리트의 강도와 정

표 5. 시설물의 상태에 따른 상태평가 등급기준

상태평가등급	시설물의 상태
A	문제점이 없는 최상의 상태
B	보조부재에 경미한 결함이 발생하였으나 기능 별회에는 지장이 없으며 내구성 증진을 위하여 일부의 보수가 필요한 상태
C	주요부재에 경미한 결함 또는 보조부재에 광범위한 결함이 발생하였으나 전체적인 시설물의 안전에는 지장이 없으며, 주요부재에 내구성, 기능성 저하 방지를 위한 보수가 필요하거나 보조부재에 간단한 보강이 필요한 상태
D	주요부재에 결함이 발생하여 긴급한 보수·보강이 필요하며 사용제한 여부를 결정하여야 하는 상태
E	주요부재에 발생한 심각한 결함으로 인하여 시설물의 안전에 위험이 있어 즉각 사용을 금지하고 보강 또는 개축을 하여야 하는 상태

확한 열화깊이, 아울러 철근 현황을 파악할 수 없다면 적절한 보수 계획의 수립이 곤란하게 된다.

부식된 콘크리트를 제거하는 깊이를 판단하는 지표는 두 가지 있다. 첫째는 탄산화깊이와 황산침투깊이 등의 화학적 열화깊이, 둘째는 반발경도로 구한 물리적 열화깊이 즉, 반발경도가 설계기준강도이상을 나타내는 위치로 나타낸다. 이때, 황산침입깊이가 기준이라면 제거 깊이가 지나치게 깊게 되는 경향이 있어, 일반적으로 설계기준강도이상을 나타내고, 시멘트중의 황산 함유량이 1 %이하가 되는 깊이까지를 제거깊이로 고려하고 있다. 또한 철근부식의 정도에 따라 보수로 끝날 것인지, 보강도 필요한지의 대책도 다르게 된다.

### 3. 평가 판정

#### 3.1 일반

콘크리트의 화학적 침식에 관한 조사 결과는 각 열화 현상의 발생 상황을 기초하여 등급으로 분류하여 평가할 필요가 있으며, 구조물의 공용의 가부, 보수여부 등은 내구성, 기능성에 기초한 평가 결과로 구조물 또는 부재의 중요도 및 주변 환경의 영향 등을 고려하여 판정할 필요가 있다.

#### 3.2 평가

본 절에서는 2003년에 개정된 안전점검및정밀안전지단세부지침(하수처리장) 편에 수록된 콘크리트의 상태평가를 기준으로 설명하고자 한다. 각 부재에 발생한 결함 및 손상에 대한 평가는 각 결함 형태별 상태평가 기준 및 상태평가 등급에 따라 결정된다. <표 5>는 시설물의 상태에 따른 상태평가 등급을 결정하는 표준적인 기준이다.

표 6. 콘크리트 탄산화 깊이의 상태평가 기준

상태평가 등급	시설물의 상태
a	미 진행
b	피복두께/2 > 탄산화 깊이
c	피복두께 > 탄산화 깊이 ≥ 피복두께/2 피복두께 > 40 mm인 경우
d	피복두께 > 탄산화 깊이 ≥ 피복두께/2 피복두께 ≤ 40 mm인 경우
e	탄산화 깊이 ≥ 피복두께

표 7. 콘크리트 균열의 상태평가 기준

상태평가 등급	상태평가기준
a	· 균열 폭 0.1 mm 미만
b	· 균열 폭 0.1~0.2 mm 미만이면서 균열 면적률 20 % 미만
c	· 균열 폭 0.2~0.3 mm 미만이면서 균열 면적률 20 % 미만
d	· 균열 폭 0.1~0.2 mm 미만이면서 균열 면적률 20 % 이상
e	· 균열 폭 0.3~0.5 mm 미만이면서 균열 면적률 20 % 미만 · 균열 폭 0.2~0.3 mm 미만이면서 균열 면적률 20 % 이상
	· 균열 폭 0.5 mm 이상 · 균열 폭 0.3~0.5 mm 이상이면서 균열 면적률 20 % 이상

표 8. 콘크리트 박락/층 분리의 상태평가 기준

상태평가 등급	시설물의 상태
a	· 박락/층 분리의 발생이 없음
b	· 박락/층 분리 깊이 15 mm 미만이면서 면적률 20 % 미만
c	· 박락/층 분리 깊이 15~20 mm 미만이면서 면적률 20 % 미만
d	· 박락/층 분리 깊이 15 mm 미만이면서 면적률 20 % 이상
e	· 박락/층 분리 깊이 20~25 mm 미만이면서 면적률 20 % 미만
	· 박락/층 분리 깊이 15~20 mm 미만이면서 면적률 20 % 이상
	· 박락/층 분리 깊이 20~25 mm 미만이면서 면적률 20 % 이상
	· 박락/층 분리 깊이 25 mm 이상이거나 조그마 손실

표 9. 철근노출면적의 상태평가 기준

상태평가 등급	상태평가 기준
a	철근노출 없음
b	철근노출 면적률이 1 % 미만
c	철근노출 면적률이 1 ~ 3 % 미만
d	철근노출 면적률이 3 ~ 5 % 미만
e	철근노출 면적률이 5 % 이상

### 3.2.1 콘크리트 탄산화 깊이

하수처리장 구조물의 콘크리트 탄산화 정도에 따른 평가 기준은 콘크리트의 피복두께를 감안하여〈표 6〉과 같이 정하고 있다.

### 3.2.2 콘크리트 균열

구조물의 콘크리트 균열은 일반손상의 하나로서 구조적 균열과 비구조적 균열로 구분되나 현장조사 시 균열의 종류를 구분하기가 어렵기 때문에 균열의 종류를 구분하지 않고 총체적으로 수밀성을 요구하는 구조물의 콘크리트 허용균열 폭 0.1 mm 규정과 누수발생 균열 폭 약 0.2 mm를 고려하여 콘크리트 균열 폭 및 면적률에 따라 상태평가 기준은 다음〈표 7〉과 같다. 여기서 균열 면적률은 길이 당 0.25 m의 폭을 차지하는 것으로 하고 다음 식에 의해 산출한다.

$$\begin{aligned} \text{균열면적률}(\%) &= \frac{\text{균열발생면적}}{\text{조사단위면적}} \times 100 \\ &= \frac{\text{균열길이}(L) \times 0.25}{A(m) \times B(m)} \times 100 \end{aligned}$$

### 3.2.3 콘크리트 박락/층 분리

구조물의 콘크리트 박락/층 분리는 일반손상으로 손상정도에 대한 상태평가 기준은〈표 8〉과 같다.

### 3.2.4 철근 노출

구조물에서 발생하는 철근 노출은 일반손상으로 손상면적율 기준으로 상태평가 기준을 설정하면 다음〈표 9〉와 같으며 여기서 철근노출면적은 철근노출 길이 당 0.25m의 폭을 차지하는 것으로 하고 철근노출 면적률은 아래 식에 의해 산출한다. ■

$$\begin{aligned} \text{철근노출면적률}(\%) &= \frac{\text{철근노출면적}}{\text{조사단위면적}} \times 100 \\ &= \frac{\text{철근노출길이}(L) \times 0.25}{A(m) \times B(m)} \times 100 \end{aligned}$$

### 참고문헌

- 박승범 등, “콘크리트 진단 및 유지관리”, 한국콘크리트학회, 2002.
- “콘크리트 구조물의 균열누수 보수보강전문시방서 개발(안)”, 시설 안전기술공단, 1999.
- 건설교통부, “안전점검및정밀안전진단세부지침(하수처리장)”, 건설교통부, 2003.
- 野中資博 등, “コンクリート補修実践講座 第11回”, NIKKEI Construction, 2001. 11, pp.84~87.
- 松村 英樹, “コンクリート構造物調査マニュアル”, 日本(財)道路保全技術センター, 2000. 12.