

# 콘크리트 구조물의 내구성과 알카리 골재반응

연세대 교수	변	근	주
연세대 박사과정	김	영	진
연세대 박사과정	이	상	민
연세대 석사과정	장	진	일

## 1. 서 론

좋은 콘크리트란 소요의 강도, 내구성, 경제성을 가지고 있는 콘크리트를 의미한다. 콘크리트는 사용방법, 사용재료, 배합 및 시공방법이 적절한 경우에는 내구성이 뛰어난 재료라고 할 수 있지만, 부적절한 경우에는 단기간에 열화가 생기고, 열화가 국부적으로 발생하여도 부재의 보수, 교환이 곤란하기 때문에 구조물 전체의 내용 연수를 단축시키는 경우가 많다. 이 때문에 최근 내구성의 확보, 평가, 향상이 사회적으로 중요한 과제로 떠오르고 있다. 종래의 재료로서의 콘크리트 내구성에 관한 신뢰, 콘크리트 구조물의 설계, 시공, 보존에 있어서 내구성에 관한 합리적이고 논리적인 배려가 거론되고 있다. 또한 국가 경제의 성숙과 더불어, 사회 및 개인의 자산으로서의 콘크리트 구조의 내구성이 관심의 대상이 되고, 현존하는 구조를 유지관리하여 그 내구성을 유지시키고, 새로운 구조를 건설할 때는 보다 내구적인 콘크리트 구조가 되도록 설계시공하는 것이 중요한 일이라고 인식되고 있다.

콘크리트 구조의 최대의 특징은 불연성, 경시성능저하가 낮은 점, 유지관리의 용이등의 존속성능에 있다고 할 수 있는데, 근년들어 이

것이 문제가 되고 있는 것이다. 근년들어 철근 콘크리트 건물의 균열의 다발, 콘크리트의 박리탈락, 철도와 도로의 고가 구조물의 손상, 콘크리트의 탈락, 콘크리트 도로의 마모격화등이 그 예이다.

최근 콘크리트 구조물에서 열화현상이 증대되어 내구성이 저하하는 원인을 살펴보면 다음과 같다.

- (a) 골재의 고갈에 따라 품질이 저하하고, 다양한 골재를 사용함에 따른 대응력의 부족
- (b) 콘크리트의 품질향상보다는 작업능률을 중시하는 생각이 앞서고 있기 때문에 생기는 콘크리트 공사의 관행화
- (c) 설계의 합리화에 따른 부재단면의 감소
- (d) 기상이나 환경의 영향을 받기 쉬운 구조의 건설증대
- (e) 철근콘크리트의 사용이 확대되면서 전에 비하여 설계, 시공, 유지관리에 중요구조물로서의 인식결여
- (f) 골재사정등 주변사정의 급변에 대응하는 배려나 연구의 결여

이상의 원인들을 생각할 때 특히 골재의 사정, 설계 및 시공기술의 발달, 환경문제, 인식 및 연구의 결여가 가장 중요한 과제라고 할 수 있다. 따라서 외국에서는 콘크리트의 내구성을 증대시키기 위한 노력으로 콘크리트의 재료,

배합, 환경, 하중의력, 설계, 시공, 유지관리등이 콘크리트의 내구성에 미치는 영향에 관한 연구가 추진되어 실용화단계에 이르고 있다.

이에 따라 본고에서는 최근 일본에서 개최되었던, 콘크리트의 내구성과 수명 예측, 골재의 알카리반응에 관한 학술회의의 결과를 요약하여 보고하고자 한다.

## 2. 콘크리트구조의 내구성과 수명에 측에 관한 기술현황

### 1) 내구성진단의 필요성

선진제국에서는 철근의 염분부식이나 알칼리 골재반응으로 인한 콘크리트의 조기열화가 전국적으로 발생하고 있다고 보고되고 있으나, 국내에서는 아직 충분한 조사가 이루어지지 못하고 있는 실정이다.

콘크리트구조는 원래 70년내지 100년까지 사용하는데는 별 문제가 없는 것으로 인식되어 왔으나, 소재의 품질에 결함이 있는 것을 그대로 두고, 설계와 시공이 행해지는 경우에는 구조물은 완성시까지 많은 결함을 내장하게 된다. 콘크리트 구조는 그 내부결함에 의해서 조기열화를 일으키는 경우, 외부에서 그 결함을 인식하게 되는 시기는 약 10년내지 15년정도후인 경우가 많지만, 문제는 그 시점에서 열화는 손을 댈 수 없는 상태에 있다는 것이다. 즉 열화가 뚜렷이 나타난 시점에서는 응급적인 보수를 하더라도 열화를 완전히 저지하는것이 불가능하다는 것이 문제이다.

여기서 중요한 것은 바로 구조물의 내구성진단이다. 외관상으로는 어떤 변상도 생기지 않은 시점에서, 콘크리트구조에 어떤 결함이 존재하는가를 검사하여, 그 결과를 기초로 구조물의 보전에 관한 최적의 조치를 어떻게 강구해야 하는 것인가가 내구성진단이다. 이에 관하여 외국에서는 소위 “내구성진단연구위원회”를 구성하여 콘크리트구조물의 내구성을 진단

하기 위한 수법에 관한 조사, 연구를 수행하여 진단수법을 확립하는데 심혈을 기울이고 있으나, 국내에서는 이에 관한 연구가 이제 시작단계에 있다. 따라서 우리나라와 여러가지로 상황이 비슷한 일본의 연구동향을 소개하고자 한다.

### 2) 일본의 연구활동

1986년초 일본콘크리트학회에 “내구성진단연구위원회”를 두어 지난 3년간 활동한 내용을 열거하면 다음과 같다.

- 골재로 사용되는 암석·광물에 관한 용어
- 콘크리트구조물로부터 내구성진단을 위한 시료의 채취방법
- 편광현미경에 의한 골재의 품질판정방법
- 알카리 골재반응에 의한 열화된 콘크리트의 초음파에 의한 진단수법
- 철근의 부식경향의 전위 모니터링
- 골재의 품질 판정방법
- 염소이온의 시멘트 조직에의 확산
- 콘크리트구조물의 내구성진단에 관한 심포지움
- 유해광물을 포함하고 있는 골재의 품질판정방법
- 알카리 골재반응에 의한 손상구조물콘크리트의 잔존팽창을 측정방법
- 부식인자의 침투, 확산시험방법
- RC 건물의 내진진단과 보강 현황
- 골재에 함유되어 있는 유해광물의 판별
- 유해광물의 定量방법
- X선 검사에 의한 RC구조물의 조사기술
- 경화콘크리트중의 시멘트량의 추정
- 적외선에 의한 비파괴시험방법
- 시멘트품질이 콘크리트의 제성질에 미치는 영향
- 알칼리 골재반응으로 손상을 입은 RC 구조의 조사
- 채석장 현황
- 콘크리트중의 세공용액이 열화에 미치는

영향

- 시멘트품질이 경화콘크리트에 미치는 영향
- 콘크리트의 중성화
- 산소의 확산시험방법
- RC 건물의 내구성진단
- 공극수와 콘크리트의 열화
- 내구성진단에의 비파괴검사기법 적용
- 알칼리 골재반응의 mechanism
- 콘크리트구조물의 유지관리를 위한 기법
- 알칼리 골재반응의 암석학적 해석

이상의 여러 연구과제의 연구, 토론, 세미나를 통하여 다음과 같은 활동의 중간성과를 이룩하였다.

가) 콘크리트 구조물의 내구성진단, 평가수법에 관한 기준안의 작성

㉠ 콘크리트 구조물로부터 시료를 채취하는 방법

콘크리트 구조물의 내구성을 진단할 목적으로, 구조물의 콘크리트내에 함유되어 있는 염분량의 분석, 알칼리 골재반응등에 관계되는 유해광물의 유무와 그 함유량의 판정, 콘크리트의 배합분석, 강도, 탄성계수, 잔존팽창, 단위체적중량의 측정등에 사용할 콘크리트 core의 측정을 위한 코아채취방법을 규정하였음.

㉡ 알칼리 골재반응을 일으킨 콘크리트 구조물의 코아 시료에 의한 팽창율의 측정방법

알칼리 골재반응을 일으킨 콘크리트 구조물의 반응성 팽창량을 그 구조물로부터 채취한 코아의 팽창율, 즉 해방팽창율과 잔존팽창율의 측정에 의해서 추정하는 시험방법을 규정하였음.

㉢ 골재에 포함된 유해광물의 판별방법

골재중에 존재하는 유해광물을 광물학적 수법을 이용하여 판별하는 방법을 규정하였음.

㉣ 유해광물의 定量方法

판별된 굵은골재, 잔골재중에 포함된 유해광물의 량을 판정하는 수단으로서, 광학적 및 X선을 이용하여 정량하는 방법을 규정하였음.

㉤ 산소의 확산계수 시험방법

콘크리트내에 있는 철근 및 강재의 부식속도를 좌우하는 주 요인인 콘크리트 내의 산소확산계수를 측정하는 방법을 규정하였음.

나) 콘크리트구조의 내구성진단에 관한 심포지움, 강습회 개최

㉠ 편광현미경에 의한 골재의 품질판정

암석 및 광물학 개론, 편광현미경에 의한 암석, 광물의 관찰방법 및 판정방법, 콘크리트 골재로서의 품질판정, 편광현미경의 구조, 기능 및 사용방법, 관찰용 시료의 채취방법 및 시료 관찰, 암석의 육안감정법, 유해광물 및 반응성광물을 포함한 암석의 관찰.

골재에 기인하는 콘크리트의 열화진단, 콘크리트의 조직구조의 진단 및 배합의 추정, 콘크리트중의 강재 부식진단, 콘크리트구조의 비파괴적 검사수법, 환경열화 및 복합열화의 진단.

㉡ 알칼리 골재반응의 mechanism에 관한 연구 토론회

- AAR의 mechanism 해명의 현상
- 암석, 광물학적 접근방법
- 시멘트 화학적 접근방법
- 콘크리트 공학적 접근방법

다) 위원회의 연구보고서

㉠ 콘크리트 구조물의 내구성진단, 평가수법에 관한 기준안

㉡ 내구성진단에 관한 기술현황

- 공극수와 콘크리트의 열화
- 콘크리트 구조물의 내구성진단에 관한 비파괴검사수법의 현황

㉢ 철근부식에 의하여 손상을 받은 콘크리트 구조물의 보수기술

㉣ 콘크리트 구조물의 내구설계지침(시안)

3) 콘크리트 구조물의 수명예측과 내구성설계에 관한 기술 현황

가) 내구성관련 용어

콘크리트구조물의 내구성에 관한 용어를 제

계적으로 표현하면 그림1과 같다.

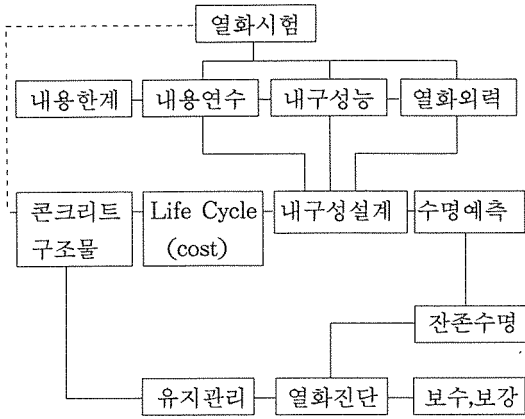


그림1. 내구성설계에 관련된 용어의 상호관계

나) 콘크리트 구조물의 열화현상과 내용한계상태의 대응

콘크리트 구조물의 열화현상으로는 균열, 동결융해, 중성화, 철근부식등의 여러가지가 있으

며, 이들 열화의 진행과정의 시점을 구조적 또는 기능적으로 정량적 평가를 확률통계수법에 의하여 수행하므로써 콘크리트 구조의 수명까지도 예측하려는 시도가 행해지고 있다.

이런 개념하에서 여러 구조물의 열화현상과 내용한계에 관한 기본적인 사고 방법, 문제점등을 정리하면 표1과 같다.

토목, 건축 관련의 콘크리트 구조물에 설정된 내용연수는 일반적으로 타 분야의 제품에 비하여 매우 길고, 더우기 그 구조는 대규모의 단일 생산품인 경우가 많기 때문에, 다양한 열화현상과 각종 한계상태의 상호관계에 대응시키기 위하여는, 기존 구조물에 생긴 열화현상을 조사정리하여 얻어지는 지식과 경험을 계통적으로 축적할 필요가 있다. 또한 현장에서 취득된 자료와 실내에서 실시되는 촉진시험결과와의 대응관계를 명확히 구명하고, 콘크리트 구조의 각종 내용한계상태에 이르는 열화 mechanism을 정확히 표현할 수 있는 model을 구축하는 것이 필요하다.

표 1 콘크리트 구조물의 열화현상과 내용한계의 대응

대상구조물	목 표 성 능	열 화 현 상	특정치와 내용한계상태
토목구조물	단면파괴 변 형 균 열 폭 진 동 피 로 인 성	균 열 철근부식 중 성 화 알카리골재반응 염 해 동 해 강성저하	철근의 항복 및 파단 균열상황 중성화 깊이 덮개의 박리 진동특성(소음) 처짐량
건축구조물	의장·평면계획 단면항복 변 형 균 열 폭 인 성	중 성 화 철근부식 균 열 누 수 강도저하 큰 변 형 표면열화 동 해	철근의 부식면적 균열폭 누수의 유무 설계기준강도비 처짐·지간비 진동수비 잔존처짐율 열화상황

#### 4) 콘크리트 구조물의 내용년수 예측

전자, 전기, 계, 원자력, 항공우주, 화학산업등의 분야에서는 고장의 예지, 예측등이 장치, 부품, 시스템의 신뢰성이나 보전성을 확보하기 위해서 실시되고 있는데, 이는 단순히 생산성 향상만을 위한 것이 아니고, 보전작업의 합리화, 안정성의 확보, 경비절감등의 면에서도 이용되므로써, 이 분야는 하나의 학문체계로서 신뢰성공학 또는 고장물리학 분야로서 자리를 잡아가고 있다.

##### 가) 내용 년수

내구성설계의 기본이 되는 것은 설계내용 년수이고, 이 내용 년수는 물리적 내용 년수, 경제적 내용 년수, 기능적 내용 년수, 사회적 내용 년수가 있다.

- ㉠ 물리적 내용 년수 : 부식등에 의한 재료의 열화, 손상, 마모, 피로등으로 인하여 구조물의 사용성 또는 내하성의 일정 기준을 만족시킬 수 없을때까지의 기간.
- ㉡ 경제적 내용 년수 : 유지 관리상의 경비를 고려하여 신규구조물과 비교할 때 경제적이 될 수 없을때까지의 기간으로서 설비투자의 경제계산법의 견지에서 원가비교법, 이익비교법, 회수기간법, 손익분기점분석, 투자이익률법등에 의하여 평가될 수 있다.

㉢ 기능적 내용 년수 : 기술혁신, 수요의 급격한 변화에 의하여 당초 기대했던 기능과는 상이한 기능이 사회적으로 요청되었기때문에 구조물이 새로 요구되는 기능을 만족할 수 없을 때까지의 기간.

㉣ 사회적 내용 연수 : 다른 인접 project의 영향을 받은 환경의 변화, 새로운 project의 출현으로 당초의 구조물이 계속 사용될 수 없을때까지의 수명.

이상의 것들 중에서 일반적으로는 ㉠, ㉡만을 고려하여 내용 년수를 정의하는 경우가 많다. 이들 설계내용 년수는 각국, 각 구조물의 종류에 따라 다르지만, 20년, 50년, 75년, 100년, 120년 등을 설계내용 년수로 설정하는 경우가 많다. 일본에서 콘크리트 건축물에 사용하는 내용 년수와 영국에서 사용하는 경우를 예시하면 표2와 같다.

##### 나) 열화의외력

설계 내용 년수가 정해진 후 그 년수에 대응하는 열화의외력을 설정할 필요가 있다. 열화의외력으로는 활하중, 지진의 영향, 풍하중, 설하중 외에 기온, 온도, 일사, 중성화, 동해, 염해등이 있는데, 이들 외력을 내용 년수의 크기에 따라 값을 변화시켜야 한다. 이를 위하여는 구조물의 안정성을 확보하기 위하여 내구성과 안정성의 쌍방을 고려한 확률적 수법이 사용되고, 현재 기왕의 신뢰성 이론을 응용하여 내구성의

표 2 계획내용년수와 콘크리트 건물구조체의 상태

	내용 년 수	RC 구조체의 상태
일본의 건축	1급 : 100년	조건1 : 내력성능이 저하하지 않고, 주요부재에서 철근의 부식으로 인한 균열이 생기지 않을 것
	2급 : 65년	조건2 : 공용성, 일상안정성, 사용상의 기본적인 기능이 저하하지 않을 것
	3급 : 30년	조건3 : 내용년수를 저감시키는 열화가 생기지 않을 것
영국의 교량	20-120년	응력수준, 재료의 피로특성, 하중의 조합 및 빈도에 따라 설계

수학적 취급이 가능한 단계에 이르고 있다.

다) 허용수준(한계상태)

한계상태는 내력, 사용성, 미관등의 관점으로 부터 정해진다. 내력은 예를들어 콘크리트 철도교의 철근응력이  $0.7\sigma_y$ 에 이른 경우의 한계치를 말한다. 또한 열화현상별 콘크리트구조의 열화도의 한계를 예시하면 표3과 같다.

표3. 열화현상별 콘크리트구조체의 열화도

열 화 현 상	열 화 상 태
중 성 화	콘크리트의 중성화가 과반의 철근에 도달한 경우
철근부식	콘크리트의 탈락에 의하여 기물, 인간에 손상할 위험성이 발생한 경우
균열 및 큰처짐	구조적 요인, 부동침하에 의하여 중대한 균열이 생겼고, 그 균열이 진행성인 경우
시공 결함에 따른 강도부족	코아에 의한 압축강도 <math>< 0.6</math>인 경우 설계기준강도

라) RILEM의 내용년수 예측모형

1987년 RILEM 회의에서 보고된 "Prediction of service life of building materials and components"에서 기술한 내용년수의 예측법은 그림 2와 같다.

<그림2>

5) 금후의 전망

내구성 설계는 콘크리트구조 이외의 강구조 등에서는 일부 실시되고 있지만, 콘크리트구조의 경우에는 아직도 그 개념, 사고방식, 수법등이 완비되지 못했기때문에 금후 많은 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다. 앞으로 콘크리트구조물을 대상으로 내구성을 설계, 시공함에 있어서 중요한 항목을 열거하면 다음과 같다.

·열화한계상태의 설정

- 내용 년수의 설정
- 각종원인에 의한 열화의 예측
- 구조설계와의 조화

이상과 같이 콘크리트구조물의 내구성 진단 및 수명예측을 확립하기 위하여는 수많은 해결해야 될 문제가 산적해 있다. 그러나, 이런 문제를 빨리 달성하려면 우선 다음 사항을 검토해야 할 것이다.

- ㉠ 기존구조의 열화현상을 조사, 정리하여 얻어지는 지식과 경험을 체계적으로 축적.
- ㉡ 현장실험, 실험실에서의 촉진열화실험을 토대로 하여 콘크리트구조물의 각종 내용한계에 이르는 열화 메카니즘을 정확히 표현할 수 있는 모형을 구축.
- ㉢ 완전한 내구성 설계방법이 완성되지 않은 현 시점에서 기존구조물을 대상으로 실험실 실험을 실시하여 문제점을 도출할 수 있는 기틀을 마련.
- ㉣ 기초적인 연구를 위한 연구진의 편성.

3. 알카리 골재반응에 대한 연구동향

1) 알카리 골재반응에 대한 회고와 전망

알카리 골재반응에 의한 구조물의 손상발생은 구미에 있어서는 이미 1940년대부터 보고가 있었다. 일본에서는 최근 관서지구의 고속도로를 비롯하여 토목구조물에 이 피해가 발생하여 큰 사회문제가 되어왔다. 이러한 알카리 골재반응은 알카리 탄산염반응, 알카리 실리케이트반응, 알카리 실리카반응으로 대별된다. 이중 알카리 실리카반응은 1940-1960년에 걸쳐 미국, 영국, 호주 및 덴마크등에서 관심이 대두되었고, 그 후 1989년까지는 전 세계적인 협력연구와 공학적인 예방조치가 수행된 연구분야이다.

1940-1960년대의 알카리 실리카반응에 대한 각국의 주요 연구동향을 살펴보면, 미국은 1940년 캘리포니아지역 콘크리트에서 알카리 실리

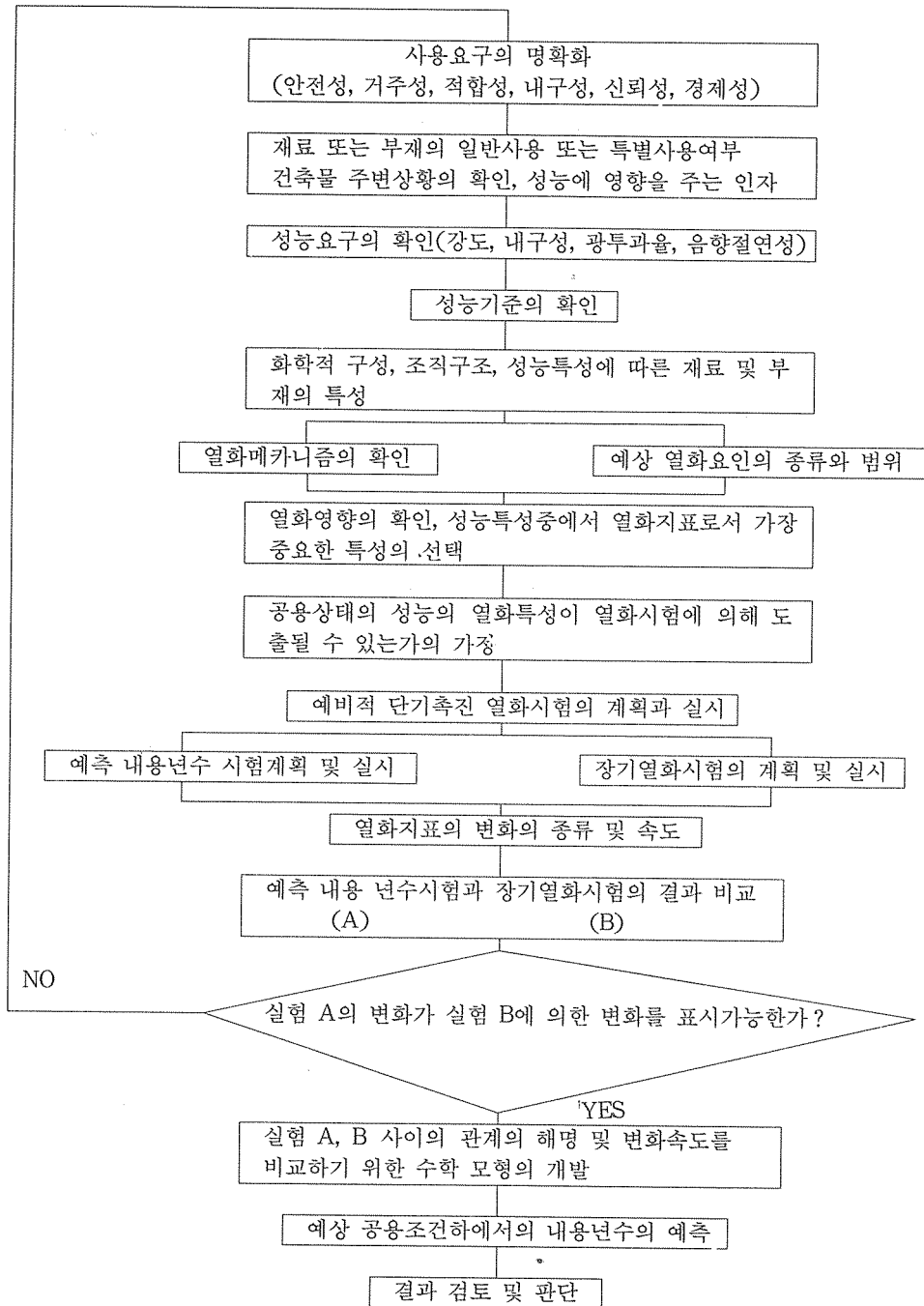


그림 2 내용년수의 예측법

카반응이 발견된 이래 실험적 연구를 통하여  
반응이 발생되기 시작하는 시멘트풀 내의 알카

리 수산화물의 최소농도(pessimum proportion)  
와 반응 매개체인 물의 소요량을 규명하였다.

이러한 연구를 통하여 Round-robin test, 모르터 붕 시험 및 골재의 암석분류법(petrographic examination) 등을 포함하는 평가시스템을 채택하게 되었다. 한편 영국의 CSIRO는 1947년 실리카가 풍부한 화산암(silica-rich volcanic rock)과 2차풍화된 화성암(secondary weathered igneous rock)을 골재로 사용한 콘크리트 구조에서의 알카리 실리카반응의 발생가능성에 관심을 갖기 시작하였으며, 1947년-1961년에 걸쳐 수행된 실험적 연구를 통하여 반응에 대한 물리적, 화학적 영향인자를 규명하였다.

또한 1940년말 영국의 Building Research Station은 알카리 실리카반응에 관심을 기울이기 시작하였으며, 덴마크와의 공동연구를 통하여 영국 남부산 골재에 다량으로 포함되어 있는 flint는 반응성이 없는 것으로 결론지으므로써 1976년까지는 별다른 논쟁의 대상이 되지 않았다. 덴마크의 경우, 해수에 노출된 콘크리트 교각에서 발생한 팽창, 뒤틀림과 같은 구조적 손상과 미소균열, pop-out 과 같은 비구조적 손상이 발생되어 알카리 실리카반응에 관한 연구를 착수하였다. 1952-1954년에는 구조물 조사를 실시하여 알카리 실리카반응에 의한 손상을 평가하였는데, 대부분의 경우 알카리 실리카반응에 의한 손상은 발생되지 않은 것으로 보고되었다. 1957년에는 알카리 실리카반응에 대한 대책의 일환으로 10-20%의 포졸란을 첨가한 저알카리 포틀랜드시멘트인 알카리 저항시멘트를 개발하였다. 그 후 미국, 호주, 영국과의 공동연구를 통하여 체계적인 평가시스템을 개발하게 되었다.

1940-1960년 사이의 알카리 실리카 반응에 관한 연구이후, 공학적인 관심은 주로 콘크리트 설계, 콘크리트생산의 기계화 및 시멘트 생산기술개발등에 집중되다가 1970년말 유럽의 여러 국가에서 콘크리트구조물에 유해한 알카리 실리카반응이 관찰되면서 다시 관심이 집중되기 시작했다. 이렇게 알카리 실리카반응이 재평가되기 시작한 주요한 이유는 첫째 단위체적당의 사용시멘트량이 증가되어 알카리 농도가 증

가되고 둘째, 사용골재량의 증가로 반응성골재의 무분별한 사용이 빈번했기 때문이다.

1960년 이후, 콘크리트 사용의 점진적 증가는 새로운 골재원의 개발을 촉진시켰고 그 결과 사용골재의 특성도 점차 변화되었다. 또한 생산되는 포틀랜드시멘트의 알카리함유량이 증가되어 알카리 실리카반응에 대한 잠재성이 점차 증가되어왔다. 특히 온대지역(warm belt)의 개발도상국의 경우, 잠재적 반응성 골재의 폐기가 경제적으로 곤란하고 골재의 특성과악이 미비하여 지질 및 기후조건이 잠재적 반응성을 촉진시키고 있는 실정이다. 더우기 콘크리트구조물의 설계와 시공의 점진적 개발로 반응성 손상에 민감하게 되었고, 이러한 문제들이 구조신뢰도에 관한 사회적 관심으로까지 확산되었다. 그러나 조사결과에 의하면 알카리 실리카반응에 의한 표면균열은 내부까지 침투되지 않았으며, 균열전 파전에 보수가 가능한 것으로 보고되고 있다.

최근들어 이러한 알카리 실리카반응이 구조물에 미치는 영향을 탐측하고 반응의 진전을 구속하거나 완화시키는 방안에 관심이 집중되고 있으며, 골재의 잠재적 반응성을 밝히기 위한 실험방법의 개발이 강조되고 있다. 또한 콘크리트구조물의 손상 조사방법이 1940-1960년대의 연구이래 상당히 개발되고 있는 실정이다.

한편 알카리 골재반응에 대한 국제회의가 1974년 덴마크의 Koge에서 처음 개최되어 섬록암(diorite)내에 있는 beekite veins와 Schleswig-Holstein의 녹사암(green sandstone) 같은 2차실리카(secondary silica)를 포함하는 반응성 골재를 확인하는 방법을 논의하였다. 1975년 아이슬랜드의 Reykjavik에서 개최된 국제회의에서는 시멘트 생산기술과 알카리 감소방법이 검토되었고 높은 반응성화산회 재료의 이용결과가 논의되었다. 1976년 영국의 Wexham springs에서 개최된 국제회의에서는 pessimum effect의 고려, 동일한 시험법의 사용에 대한 토론이 있었다. 그 후 1978년 미국의



Purdue 대학에서 있었던 회의에서는 표준반응성골재로 Beltane opal을 선정하는 문제를 논의하였고, 1981년 남아프리카 공화국의 Cape town에서 열렸던 회의에서는 저팽창 Malmesbury hornfel의 알카리 실리카 반응, 실험장비의 표준화를 논의하였고 표준반응골재에 대한 토론이 있었다. 1983년 덴마크 Lyngby의 회의에서는 알칼리반응에 대한 전세계적인 인식과 관련 연구노력의 부족, 알카리실리카반응의 영향을 입은 구조물의 진단법등이 논의되었다. 그 후 1986년 캐나다 Ottawa와 1989년 일본 Kyoto에서 국제회의가 계속 개최되면서, 이 분야의 활발한 연구가 진행되고 있다.

## 2) 일본의 연구동향

1950년대초 강자갈에 대한 반응성골재 평가 실험이 실시된 이후, 현재까지 RC구조물의 손상사례를 중심으로 활발한 연구가 진행되고 있다. 일본의 주요 반응성골재로는 수암(chert), 이판암(shale) 및 안산암(andesite)등이 보고되고 있으며, 지금까지 알려진 알카리 골재반응의 원인은 강자갈의 고갈로 인한 많은 종류의 쇄석사용시 반응성골재에 대한 검토부족, 콘크리트의 pumpability를 개선하기 위한 시멘트의 알칼리 성분증가, 사용 시멘트량의 증가 및 해사의 사용증가로 인한 콘크리트의 알카리 함량 증가등으로 평가되고 있다. 알카리 골재반응이 발생하면 시멘트풀에 포함된 반응성 골재표면에 알카리가 급격히 집중하므로 국부적인 미세경화성이 감소되고 이후 알카리 실리카반응의 진행에 따른 연화영역의 확산으로 구조물이 급격히 열화되어간다.

실험결과에 의하면 단백석(opal)입자표면에서  $50\mu\text{m}$ 이내에 형성된 연화영역의 14일 경과 후 응결상태는 다량의  $\text{Ca}^{++}$ 이온함입에 관련되므로, 골재입자에  $\text{Ca}^{++}$ 이온의 함입을 촉진시키는 flyash를 알카리-실리카반응의 제어효과로 이용하는 방안도 제시되고 있다.

반응생성물의 미세조직을 분석한 결과, cris-

tobalite, volcanic glass, cryptocrystalline quartz, chalcedony, stained coarse quartz등이 골재내의 반응성분인 것으로 평가되며, 골재파괴면상의 반응생성물은 젤리형태와 꽃무늬 형태로 분류된다.

한편, 일본에서 산업부산물로 다량 생산되는 고로슬래그와 flyash에 대한 특성분석자료에 의하면 포틀랜드시멘트의 40%이상을 고로슬래그(총알카리 성분, 0.4-0.7%)로, 20%이상을 flyash(총알카리 성분, 0.8-3.5%)로 대체할 경우 알카리-실리카 반응의 억제효과가 발생하는 것으로 보고되고 있다. 또한 silicafume도 단백석(opal)모르터의 알카리-실리카 팽창에 대한 억제효과가 있는 것으로 알려져 있다. 알카리골재반응의 발생정도는 시멘트의 알카리함량과 밀접한 관련을 갖는다. 보통포틀랜드시멘트의 총알칼리 성분이 0.6% 이하이거나 콘크리트내의  $\text{Na}_2\text{O}$  함량이  $3\text{kg}/\text{m}^3$ 이하인 경우에는 반응골재를 포함하여도 반응이 경미하거나 반응이 거의 발생하지 않으므로 일본의 경우 이를 한계함량으로 제시하고 있다.(1987년 일본 시멘트품질통계, 총알카리성분 평균 0.6%)

이외에도 종류에 따라 다소 상이하나 공기연행제, 감수제, 유동화제등과 같이 알카리성분이 많고 시멘트입자의 분산능력이 큰 혼화제의 사용, 해수, 알카리성토양, 온도 및 습도등과 같은 환경조건에 따라서 알카리실리카반응이 촉진되는 것으로 알려져 있다.

일본의 경우, 이러한 알카리골재반응을 예방하기 위하여

- (a) 실험결과 반응이 없는 골재사용
- (b) 총알카리성분 0.6%이하의 저알카리시멘트 사용
- (c) 고로시멘트, flyash 또는 고로시멘트+flyash의 적절한 혼합시멘트 사용
- (d) 콘크리트 내의 총알카리함량  $3\text{kg}/\text{m}^3$  이하등을 제시하고 있다.

한편, 알카리골재반응에 의한 구조물의 손상평가는 손상부위에서 채취된 코아를 이용하여 팽창거동, 알카리성분, 균열폭, 균열깊이, 철근부식정도, 압축강도, 탄성계수 및 탄성파의 속

도측정등으로 열화정도를 평가한다.

손상구조물의 보수를 위하여 효과적인 방법이 제시되고 있지는 않으나, 균열이 0.3mm 이상인 경우 polybutadiene resin, silane resin, epoxy resin, polymer cement등을 이용한 방수 coating에 의한 보수방안이 적용되고 있다.

### 3) 호주의 연구동향

알카리 실리카반응으로 손상된 재령 8-29년의 각종 구조물에 대한 현장정보를 수집하여 안전한 시멘트/골재 조합 예측을 위한 실험자료의 보정자료로 활용하고 있다.

조사결과, 알카리 골재반응 자체가 항상 콘크리트 matrix를 파괴시키는 균열 및 팽창을 수반하는 것은 아니었으며, 열악한 환경인자와 부적절한 설계개념이 알카리 골재반응에 의한 손상정도를 심화시키는 것으로 평가된다.

반응성골재를 화산분출암과 강자갈로 분류하여 연구를 수행하고 있으며 강자갈의 수암, 강모래의 strained quartz, 화산분출암의 미세실리카가 주요 반응 성분인 것으로 보고되고 있다.

손상분석결과, 20Mpa 이하의 저강도 RC구조물의 경우는 알카리 실리카반응으로 발생된 silica gel이 미세공극으로 스며들어 map cracking이 발생하지 않아 콘크리트의 손상이 발생하지 않았으나, 프리스트레스트 빔, 증기양생 프리캐스트 빔과 같이 45Mpa 이상의 고강도 콘크리트구조물에서는 그 손상정도가 심각하였다.

한편, 해수에 보관한 화산분출암 시편이 담수의 경우보다 2배이상의 알카리 실리카팽창을 나타내었다. 현재, 반응성의 기준설정 및 반응성 진행중에 있다.

### 4) 영국의 연구동향

1946년부터 1958년까지 수행된 영국골재와 포틀랜드시멘트의 알카리반응연구 결과 영국골

재는 팽창성반응을 보이지 않는 것으로 평가되었으나, 1970년 겨울에 발생한 콘크리트댐의 손상이 알카리 골재반응으로 판명됨에 따라 관심이 집중되고 있다.

연구결과에 의하면 알카리성분이 많은 구조물이 지하수, 우수 또는 큰 응축상태와 접할때 알카리-실리카반응이 발생하지만 알카리 골재반응의 손상정도가 단지 아교질의 반응생성물, 가시균열 및 콘크리트표면에 노출된 균열골재등으로 평가되기 때문에 파쇄하중, 소성건조수축, 부적절한 철근덮개 또는 습기에 민감한 골재에 의한 손상과의 구별이 어려운 것으로 보고되고 있다.

지금까지 전력구조물, 교량, 하수처리시설물, 저수조, 댐, 방파제, 고층건축물, 고층주차건물 및 통풍통로등에서 알카리 골재반응이 발생되고 있으며, 균열폭 1-4mm, 균열깊이 25-110mm로 측정되었다.

특성분석에 의하면, 유리의 경우 총알카리성분이 0.3-1.0%내외인 영국 포틀랜드시멘트보다 30배 이상의 알카리방출 잠재력이 있는 것으로 평가되었으며, 해사의 경우 직경1-8mm 수암입자의 5-10%에 해당하는 반응성실리카가 존재하는 것으로 분석되었다.

한편, 알카리 실리카반응의 팽창진행은 불명확하나 콘크리트내의 알카리함량이 6-7kg/m<sup>3</sup>(재령3-4년)부터 8-15년까지 지속되는 것으로 평가된다. 영국의 경우, 손상부의 국부적 표면 coating, 균열부의 강재정착봉의 타설, 보조기둥, 보의 가설, 교체등으로 손상구조물을 보수하고 있으며 새로 시공되는 구조물의 알카리 골재반응의 예방을 위하여

(a) 반응성 골재의 분류

(b) 콘크리트의 반응 알카리함량의 한계를 3kg/m<sup>3</sup> 이하로 규정

(c) 시멘트이외에 콘크리트에 가해지는 알카리함량이 0.2kg/m<sup>3</sup>을 초과하지 않을 경우, 시멘트 또는 결합재의 알카리함량의 한계를 0.6% 이하로 규정하고 있다.

## 5) 덴마크의 연구동향

덴마크는 알칼리-실리카반응에 대하여 2단계의 연구를 진행하고 있다. 1단계 연구는 담백석계통 석회석, 결정성 및 다공성의 변화정도가 다른 flint등을 중심으로 주요 반응성골재의 분류를 위한 연구가 수행되었으며, 1단계 연구결과 저알칼리 포틀랜드시멘트 및 반응성골재 2% 이하의 사용이 제안되었다. 2단계 연구는 파손된 콘크리트도로를 중심으로 알칼리 실리카반응기구의 정립 및 전자탐침 미세해석기법에 의한 반응생성물의 화학적 분석에 대한 연구가 진행되었다. 2단계 연구결과, 반응성 모래+슬래그+포틀랜드시멘트시편은 자유  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 를 포함하지 않으므로 팽창이 발생하지 않았지만, 반응성 모래+포틀랜드시멘트시편의 경우 결정상의  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 를 포함하므로 팽창반응이 발생하는 것으로 판명되었다. 즉, 시편의 팽창성, 반응의 범위 및 반응입자의  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{OH}^-$  이온침투는 미소의 반응성실리카가 반응입자를 확산시키기 때문에 결정상의  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 감소함에 따라 감소하는 것으로 분석되었다.

또한, 알칼리성분이  $\text{Na}^+$ ,  $\text{OH}^-$  이온보다 많을 경우 반응입자로  $\text{Na}^+$ ,  $\text{OH}^-$  수화물이온이 지유로 침투하여  $\text{Si-O-Si}$  결합을 붕괴시키기 때문에 반응입자내에서  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{OH}^-$  수화물 이온 및 물입자의 침투율이  $\text{SiO}_2$ 의 확산율을 초과할 때 팽창이 가속되는 것으로 분석되었다. 알칼리수산화물중 염화물, 질산염과 같은 액화상태에서  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 집중을 저해시키는  $\text{NaOH}$ 등은  $\text{NaCl}$ 과 같은 다른 알칼리화합물에 비하여 팽창을 적게 발생시키는 것으로 나타났다.

덴마크의 경우, 0.1% 골재팽창 및 사용기록의 통계적인 상관성을 기준으로 골재의 알칼리 실리카반응 여부를 판단하고 있다. 알칼리 실리카팽창이 발생하기 위해서는 반응성골재+알칼리화합물의 응집+ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ +물이 필요하기 때문에 이들 4요소중 1요소 이상을 제거하여

알칼리 실리카팽창을 감소 또는 방지하기 위한 연구가 현재 진행되고 있다.

지금까지 보고된 방지대책으로는

- (a) 이온 및 물입자의 이동을 둔화시키기 위한 미세실리카, 반응성재료, flyash등의 미세고체입자의 첨가
- (b)  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 를 제거시키기 위한 flyash+시멘트, 슬래그+포틀랜드시멘트, 포졸란의 첨가
- (c) 반응성입자와 matrix를 분리시키기 위한 미세입자의 air bubble system도 입 등이 제시되고 있다.

## 6) 벨기에의 연구동향

1980년, 프리스트레스트 경량콘크리트교량에서 처음으로 알칼리 골재반응이 발견된 이후, 주로 무근콘크리트 고속도로와 사무용 건축구조물에 대하여 손상 사례를 중심으로 연구가 진행되고 있다.

콘크리트포장의 경우, 알칼리 골재반응에 의하여 국부적 swelling 및 폭 8mm 내외의 균열이 발생하였으며, 제방용 비결정소금의 침투로 포장표면에 흰색 꽃무늬가 형성되었다. 흰색꽃무늬의 성분분석결과 팽창된 silica gel에 존재하는 K, Na, Ca,  $\text{SiO}_2$ 가 주요 성분으로 판명되었다.

벨기에의 경우, 콘크리트내의  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ 의 함량, 밀도, 시멘트종류, 시멘트의 알칼리성분등을 분석함으로써 알칼리 골재반응의 유무를 평가하고 있으며, 알칼리 골재반응을 방지하기 위한 시멘트의 알칼리함량의 한계를 0.6%로 규정하고 있다.

한편, 콘크리트기둥에 대한 조사결과 경화된 시멘트 gel이 갖고 있는 흡착수로 인하여 기둥 표면의 방수 코팅만으로는 콘크리트를 완전히 건조시킬 수 없으므로 팽창반응을 억제시키기 힘들뿐만 아니라 손상구조물의 보수에 과도한 경비가 소요되므로, 구조물의 건설계획단계에서 반응성골재 및 고알칼리시멘트의 사용을 피하는 것이 효율적인 방안으로 제시되고 있다.

## 7) 뉴질랜드의 연구동향

골재의 32%가 화성암(rhyolite), 경석질 재료, volcanic glass, 안산암, dacite, tridymite 등의 반응성 골재인 것으로 평가되는 뉴질랜드는 현재 고속도로교량의 20%가 알칼리 골재반응으로 손상 또는 열화된 것으로 보고되고 있다. 특히, 1958-1968년 동안 총알칼리성분이 1.0% 이상되는 고알칼리시멘트가 생산되기 때문에 손상범위가 큰 것으로 평가되고 있다.

현재, 손상구조물의 생태조사, 강골재, 쇄석에 대한 화학성분분석 및 콘크리트의 알칼리 성분평가, 기존 구조물의 골재출처 및 광물분포에 대한 종합적 연구가 진행중에 있으며, 영국 기준을 근거로 콘크리트의 알칼리함량을  $3\text{kg}/\text{m}^3$ 으로 제한하고 저알칼리시멘트의 사용에 대한 설계기준을 설정하고 있다.

## 8) 우리나라의 연구동향

알칼리 골재반응에 의한 피해가 여러나라에서 발견되고 한때 이에 대해서 안전지대로 생각했던 이웃 일본에서도 알칼리 골재반응으로 인한 콘크리트의 파괴가 확인됨에 따라 우리나라에서도 이에 대한 관심이 대두되고 있다. 이는 최근 양질의 천연골재가 대부분 고갈되어 쇄석골재를 사용함에 따라 알칼리 골재반응의 가능성이 상대적으로 증가된데도 원인이 있다고 볼 수 있다. 골재의 화학반응성(알칼리 반응 포함)을 판정하는 방법으로는 광물학적 방법(ASTM C295)과 화학적 방법(KSF 2545, ASTM C 289) 및 모르타르 시험방법(KSF 2546, ASTM C 227)이 있으며 각각의 시험결과를 종합비교하여 판단하는 것이 합리적인 것으로 평가된다. 현재, 국내의 콘크리트에 있어서 알칼리 골재반응의 잠재성을 판단하기 위한 일단계로 광물학적인 방법에 의해 골재로 사용되는 암석에 대한 반응성 물질의 구성비를 분석하기 위한 연구가 수행되고 있다. 즉, 국내의 지질도를 이용하여 암종별, 생성연대별로 암석시료를

채취한 후, 편광현미경법, 분말X선회절시험법에 의한 반응성 암석의 종류, 반응성물질의 양 및 조직성상에 대한 기초적 연구가 진행되고 있다.

편광현미경과 XRD에 따른 암석의 반응성광물 분석결과는 다음과 같다.

- (a) 퇴적암의 H-1 사암, Y-2 사암, H-36 이회암, H-14 혈암은 각각 알칼리 반응성 광물의 총량이 30%에 가깝거나 이를 초과하므로 알칼리 반응의 가능성이 있다는 것으로 판단된다.
- (b) 변성암의 모든 시료에서는 미량의 알칼리 반응성 광물이 검출 되었으며, 화성암 시료중의 홍장석 흑운모 화강암은 알칼리 반응성 광물이 30% 이상 검출되었으므로 알칼리 골재반응의 가능성이 있는 것으로 판단된다.
- (c) 기타 광물이 30%를 넘는 암석(응회암, hornfelse, 유문암질응회암)도 화학반응의 가능성이 있는 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

근년에 들어서 콘크리트 기술자들의 관심은 콘크리트 구조물의 내구성과 잔존수명의 예측, 골재의 고갈에 따른 대체 골재의 활용, 골재의 알칼리 반응에 집중되고 있다. 이런 문제의 해결에는 많은 시간, 노력, 연구인력의 투입을 요구한다. 선진제국에서는 이미 여러 해 전부터 상기의 문제점을 해결하기 위하여 관련되는 기술자, 연구자, 학자들을 총동원하여 현장실험, 실험실 실험 등을 수행하여 실용화 단계에 이르고 있다. 이에 본고에서는 이 분야에 관한 관심도를 제고시키는데 목적을 두고 국제학술회의 토의내용을 소개한 것이다. 가까운 시일 내에 국내에서도 콘크리트 구조의 내구성진단 연구위원회가 구성되고 활발한 연구가 추진될 수 있기를 기대한다.

## 참 고 문 헌

1. 일본콘크리트공업협회, 콘크리트공학 연차논문보고집, 제11권 제11호, 1989, pp. 1-24.
2. 일본콘크리트공업협회, 콘크리트 구조물의 내구성설계(특집), 콘크리트공학 제26권 제11호, 1988, pp. 1-99.
3. 일본콘크리트공업협회, 콘크리트 구조물의 내구성설계(특집), 콘크리트공학 제26권, 제7호, 1988, pp. 1-137.
4. ICAAR, *The Proceedings of 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*, ICAAR held at Kyoto, 1989, pp. 1-58.

## 건강교실 : 건강의 원천

## 5분상식

사람에게 가장 중요한 것은 생명이요, 건강이라고 할 수 있습니다.

“사람이 만일 온 천하를 얻고도 제 목숨을 잃으면 무엇이 유익하리요. 사람이 무엇을 주고 제 목숨을 바꾸겠느냐?” 라는 말이 있습니다.

행복의 조건이 여러가지 있겠지만 생명과 건강이 있는 후에야 딴 것도 필요한 것입니다. 그런데도 인생을 살다보면 눈앞의 유희에 빠져서 소중한 건강과 생명을 버리는 경우가 많습니다. 옛 책을 보면 건강을 지켜나가는 데 다섯가지 어려움이 있다고 했습니다.

첫째는 “명리(名利)”인데 명예와 재물을 얻느라고 무리하다가 건강을 해치는 일입니다. 물론 인생에 있어서 부귀공명이 무엇보다도 좋은 것은 말할 나위도 없지만 높은 자리에 있는 사람치고 마음 편한 사람 드물고, 돈이 많아도 근심 걱정 그칠날이 없으면 그것이 무슨 소용이 있겠습니까?

둘째는 “희노(喜怒哀)”를 조절하지 못하는 일입니다. 사람은 감정의 동물이기 때문에 살아가는 데 있어서 희노애락이 없을 수 없습니다.

기쁨과 노여움, 슬픔과 즐거움이 있게 마련이지만 기쁨과 즐거움도 지나치면 건강과 생명에 해로운데 하물며 노여움과 슬픔이야 말할 나위도 없습니다.

세째는 “성색(聲色)”에 빠지는 일인데 “성색”이란 원래 음악과 여색(女色)을 뜻하는 말이지만, 결국 향락적인 모든 일을 뜻합니다. 사람의 즐거움을 담당한 생활 가운데서 찾아야지 호화찬란한 자극 가운데서 찾는 습관이 붙으면 점점 더 자극을 강렬하게 해주어야만 즐거움을 느끼게 되어 흡사 아편중독자처럼 몸과 마음을 망치게 됩니다.

네째는 “자미(慈悲)”를 탐하는 일로 입에 달콤하고 맛있는 음식만을 숭상하니 설탕과 인공조미료가 판을 치고 고량진미가 입에 익어 자연식은 거들떠 보지도 않는 세상이 되어가고 있습니다.

채근담에 “입에 상쾌한 음식은 모두 창자를 녹이고 뼈를 썩게하는 독약인 것을 알아야 한다”고 적혀 있습니다.

다섯째는 “신허정산(神虛精散)”인데, 신경과 정신을 지나치게 소비하여 허하게 되는 것이 현대인의 생활입니다.

위에서 말한 다섯가지를 “養生五難(건강을 지키는 데 있어 다섯가지 어려운 점)”이라고 하였습니다. 이런 이치를 알고 있던 옛 선비들은 생활이 불편하고 의학이 발달되지 않은 상황에서도 무병장수를 누릴 수 있었던 것입니다.