

콘크리트의 강도, 중성화, 화재손상부 비파괴검사 방법

Nondestructive Testing of Concrete for its Strength,
Chemical Degradation, and Damage due to Fire



김영의*

1. 콘크리트 시험의 응용 및 적용

구조물의 내구성 진단시 노후 및 손상정도를 보다 엄밀히 평가하기 위해서는 근접 육안조사에 의한 상태조사 이외에 구성재료의 성능과 구조체의 거동을 정량화시키기 위한 각종 비파괴 계측장비의 사용이 불가피하게 된다.

일반적으로 구조물은 미시적 개념에서 콘크리트 철근 및 강재 등과 같은 다양한 재료로 구성된 조합체이며 거시적 개념에서 경계조건을 갖는 구조체로 정의되므로 비파괴 계측장비도 크게 구성재료의 성능과 상태평가를 위한 장비와 구조체의 거동평가를 위한 장비로 구분할 수 있다.

구조체의 손상 및 노후는 구조물의 하중저항 성능 저하 및 구성재료의 내구성능 저하와 상호 밀접한 관계가 있으므로 비파괴 계측장비의 운용시는 구조거동과 재료거동의 역학적 체계를 염두에 두어야 한다.

구조물은 하중을 안전하게 지지하고 그 기능을 충분히 완수하여야 하며 역학적으로도 충분한 강도와 강성을 갖는 것이 필요하다. 따라서 구조의 각 부분이 균형잡힌 안전도를 가지며, 내구성을 갖는 것이 요구된다.

본 논고에서는 현장에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 콘크리트 강도 조사를 위한 비파괴시험법인 반발경도 시험, 초음파탐상 시험, 코어채취 및 콘크리트의 화학적·물리적 손상에서 철근부식도 시험, 중성화 조사 등에 대해서 현장 조사와 분석에 있어서 발생될 수 있는 문제점들을 경험적으로 서술하였고 콘크리트 화재 손상부 조사 방법의 일반에 대해서 기술하고자 한다. 아쉽게도 아직까지 외국에서 제안된 공식을 사용하고 있는 실정으로서, 국내에서도 많은 연구자들에 의해 제안된 각종 비파괴시험에 의한 강도평가에 대하여 연구자들이 회합을 통하여 우리의 여건에 맞는 추정식을 빠른 시일내에 제시하는 것이

* 정회원, 시설안전기술공단 교량본부 1실장

바람직할 것으로 생각된다.

2. 콘크리트 강도조사를 위한 비파괴 시험법

2.1 비파괴 시험법

콘크리트 구조물의 공사중 품질관리에 대한 비파괴시험은 콘크리트의 사용재료, 조합, 양생방법 등 콘크리트에 관한 제반 정보가 이미 알려져 있고, 강도측정용의 공시체도 준비되어 있는 것이 보통이다. 또 시험시의 콘크리트와 조기재령 강도추정을 위한 기존의 실험자료도 풍부하다. 이 때문에 강도추정용 실험식과 실험도표를 그대로 혹은 실측한 강도추정식을 사용하여 이것들을 수정하여 사용함으로써 상당히 좋은 정도로 강도측정을 할 수 있다. 이에 비해 이미 설치되어 있는 장기재령의 콘크리트 구조물에서 비파괴시험에 의한 강도추정은 콘크리트 사용재료, 조합 등의 정보가 적고 장기재령시의 강도추정을 위한 실험식과 실험도표가 부족한 실정이어서 신뢰성있는 강도추정은 어려운 상태이다.

그러므로 장기재령의 콘크리트 강도추정시 기존의 조기재령 콘크리트에 대한 강도추정식과 도표를 그대로 쉽게 이용하는 것은 강도추정에서 많은 오차를 유발할 수 밖에 없다.

비파괴검사를 통한 콘크리트 강도추정은 코어에 의한 국부파괴시험과 적당히 조합하여 이용하여야 하나 국부파괴검사는 많이 수행 할 수 없으므로 비파괴검사에서 보다 광범위한 조사를 실시하고 많은 정보를 입수하는 것을 원칙으로 한다.

2.2 콘크리트 비파괴강도

2.2.1 반발경도 시험법

가. 개요

반발경도 시험은 콘크리트 구조물의 압축강도를 비파괴시험으로 추정하는 방법의 하나로 슈미트 해머(Schmidt Hammer)법이 가장 널리 사용된다. 슈미트 해머로 경화된 콘크리트 표면을 타격시, 반발도(R)와 콘크리트의 압축강도(F_c)와의 사이에 특정 상관관계가 있다는 실험적 경험을 기초로 한다.

콘크리트의 반발경도 시험은 측정이 비교적 용이하고 간편하여 시험 대상구조물의 형상 및 크기에 관

계없이 적용이 가능하나 콘크리트와 같은 균일하지 못한 재료에 있어서는 슈미트 해머처럼 재료 표면의 국소적인 타격에 의한 반발도는 타격면에 의한 골재의 유무, 건습상태, 콘크리트의 재령 등에 의해 달라지며, 콘크리트 표면 상태에 국한되고 콘크리트 내부의 강도를 추정할 수 없다는 단점을 가지고 있기 때문에 강도추정시의 유일한 지표로 사용하는 것은 정확도나 신뢰성에 많은 한계점이 있겠다.

슈미트해머법에 의한 강도추정시 콘크리트 반발도 R 과 압축강도 F_c 와의 관계는 다음에 나타나는 각종 영향인자에 의해 달라진다. 강도추정 정도를 향상시키기 위해서는 영향인자에 관한 정보를 입수하고 강도추정에 이용하는 것이 바람직하다.

- ① 콘크리트의 재료와 조합-시멘트종류, 골재종류, 시멘트량, 골재량 등
- ② 콘크리트의 양생방법과 재령-혼합상태, 재령 등
- ③ 타격면의 상태-표면상태, 두께, 우각부, 측정높이, 구속도, 탄산화의 정도 등
- ④ 타격방법-타격방향, 동일부위의 연속타격 등

나. 슈미트해머의 교정

반발경도 측정기들에 대한 측정 용도를 정확히 인식하여 사용하는 것이 필요하다. 현장에서 사용되고 있는 일반적인 반발경도 측정기인 N형, L형, P형들은 사용전에 반드시 다음의 사항을 유의하여 현장조사에 이용하는 것이 필수적이다.

앤빌 위의 리바운드 번호 R_o 가 액면 수치에서 더 벗어났을 경우에는 콘크리트에 의해서 측정된 R 은 동일 비율상에서 왜곡될 수 있으므로 다음의 공식을 이용하여 테스트에 적용된다.

$$R = \frac{\sum_v}{N} \times \frac{\text{액면수치}}{R_o}$$

여기서, N = 콘크리트에서 이루어진 개별적인 측정치수

R_o = 앤빌에서 테스트용 해머의 리바운드 치수

이 공식은 $R_o=72$ 에 이르기 까지 유효하며 R_o 치수가 낮을 때에는 이 도구를 깨끗이 청소하고 눈금을 다시 매겨야 한다.

R 값이 Test Anvil의 액면수치에 못미치거나 초과할 경우 측정기를 조정하여야 한다. 해머를 정확히

조정했는데도 불구하고 최소한 가장 낮은 수치로 표시하지 않을 경우 아마도 해머가 더러울 것이므로 깨끗이 닦아주어야 하며 테스트용 앤빌과 충격 플랜지의 접촉면 역시 깨끗해야 한다.

사용할 수 있는 앤빌이 없을 경우 간접 보정 방법으로는 모든 테스트용 해머의 새것이나 새로 조정된 테스트용 해머와 비교하면서 최소한 가끔씩 점검해 보아야하며 비교 충격 테스트는 가능한한 표면이 단단한 물체 위에서 실시하여야 한다. 대장장이의 모루나 표면이 다듬어진 단단한 동종의 자연석의 무거운 덩어리가 이 목적에 적합하다.

Test Anvil의 측정기별 보정 특성의 액면수치는 해머 종류별 Anvil별 차이가 있으므로 유의하여 적용하여야 한다. 특히 제조사가 서로 틀리는 슈미트해머와 Anvil을 이용할 경우에는 그 결과값(R_o)이 상이하게 나타나므로 특별한 주의가 필요하며 이에 따른 주의가 없을 경우 추정강도의 신뢰성이 문제점으로 나타난다.

일례로 스위스 Proseq사의 NR형 슈미트해머를 이용하여 동일사 Anvil에 타격을 할 경우 치수 $R_o = 80$ 으로 나타났을 때 일본 KAMEKURA사의 NK-80(Anvil)에 타격하였을 경우 $R_o = 83$ 으로 나타난다.

따라서, Anvil에 의한 반발도의 보정은 동일한 제작사의 것으로 이용하여야 한다.

다. 강도추정 (N형)

슈미트 해머로 경화된 콘크리트 표면을 타격시 내부에 중추의 반동량을 반발도(R)로 표시하며, 이 반발도의 크기에 따라 콘크리트의 압축강도를 추정한다.

외관조사 결과에 의해서 선정된 측정개소에 대해서 반발경도 측정은 선정된 부위에 그라인딩으로 표면의 요철 부분등을 매끈하게 정리하며 타격점 상호간은 종·횡으로 간격을 3cm 기준으로 그어 직교되는 부분에 25점 타격하여 반발경도 값의 산술 평균값 R_m 을 구한다.

산술평균값 R_m 에 대해서 RILEM Recommendation에 따라 각 반발경도의 값이 $R_m \pm 7$ 의 범위 (또는 $R_m \pm 15 \sim 20\%$)를 벗어나는 값들은 제외시키고 나머지 값들을 다시 산술평균하여 반발경도 R을

결정한다.

한편, ASTM C 805에서는 한 개의 cube나, cylinder에서 10개의 타격치로 $R_m \pm 7$ 의 범위를 벗어나는 값들이 2개 이상이면 그 공시체(반발도) 값을 버린다고 하였다.

따라서, 실험실(연구실)이 아닌 현장 구조물에 직접적으로 적용하는 경우에는 경험적으로 반발치를 제외시킨 타격치가 4개 이상일 때는 측정지점의 반발경도값(R)은 버린다. 여기서 측정된 반발치의 값들이 많은 편차를 보이고 있으면 보편적으로 콘크리트의 품질이 불균질하게 평가될 수 있을 것이다.

측정된 반발도(R)를 이용하여 콘크리트의 압축강도(F_c)를 추정하는 기법은 타격방향에 따른 보정과 콘크리트가 타격방향에 직각인 압축응력을 받고 있는 경우 및 시공 후 공용 중에 건조상태로 보호된 콘크리트의 추정강도는 실제보다 상당히 큰 값으로 나타나므로 장기재령의 콘크리트인 경우 시간경과 계수를 곱한 값을 측정 부위 압축강도 추정치로 한다.

장기재령의 콘크리트 구조물은 표면강도가 높기 때문에 재령에 의한 보정계수를 환산한 압축강도로

표 1 재령보정계수

재령(일)	10	20	28	50	100	150	200	300	500	1000	3000
α	1.55	1.12	1.00	0.87	0.78	0.74	0.72	0.70	0.67	0.65	0.63

수정하여 콘크리트의 압축강도를 추정한다.

여기서 3,000일 이상의 장기재령의 콘크리트에는 재령보정계수를 아무런 비판없이 무조건적으로 0.63을 적용하여 비파괴강도를 산출하고 있는 실정이다.

콘크리트 구조물은 시간이 경과됨에 따라 대기 중이나 유입수의 CO₂ 성분과 반응하여 중성화가 진행되고 이의 영향으로 인해 반응한 중량만큼 무거워지고 치밀해진다고 보고 되었으며, 이러한 원인으로 장기재령의 콘크리트에서 반발경도 시험으로 비파괴강도를 추정하려고 할 때 재령계수를 적용하고 있다. 따라서 콘크리트의 반발경도를 통하여 압축강도를 추정하는 반발경도법의 경우 중성화로 인한 반발경도의 증가에 대한 영향을 고려해야 되는데 중성화 깊이가 20mm 이상 진행된 경우 반발계수가 50% 정도 초과하여 나오는 것으로 보고된 바도 있다.

콘크리트의 탄산화의 영향에 대한 규준을 살펴보면 ASTM C 805에서는 재령 6개월 이상 콘크리트

의 반발경도를 조기재령의 콘크리트와 비교할 때에는 표면을 5mm 연마하는 것이 바람직하다고 하였으며 BS 및 RILEM에서도 탄산화층 10~20mm의 제거를 추천하고 있다. 탄산화층을 연마하지 않을 경우에는 재령에 의한 보정을 하는 방법이 제안되어 있지만 이 보정계수는 Frank Hammer에 의한 재령 28일 강도추정을 위한 보정계수를 기초로 하고 있기 때문에 콘크리트의 강도추정의 정도는 그다지 좋지 않다는 현상이라고 하였다.

그러므로, 같은 공용기간의 구조물일지라도 환경조건과 구조물의 구성하는 인자들로 인하여 중성화 진행깊이는 다르게 형성될 수 있으므로 반발경도 시험을 수행함에 있어서 반드시 중성화 시험도 병행하여 실시하여야 하며 대상 구조물의 중성화 진행속도 식에서 계산된 깊이와 측정치의 비교를 통해 재령보정계수의 α 를 비례적으로 적용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 또한 현장 여건을 고려하여 선정지점에서 측정된 중성화 깊이 만큼 연마하여 반발경도 시험을 행하면 재령보정계수를 적용하지 않고 기존의 제안식들을 적용할 수 있을 것이다.

한편, 이러한 원인으로 인하여 재령보정계수에 상관없이 시간(년)과 중성화 깊이를 함수로 하는 비파괴강도 추정식들이 제안되기도 한다.

반발경도법에 의한 콘크리트 추정강도의 정도를 향상 시키기 위하여 반발경도 시험을 수행한 동일 부위에서 채취한 코어 압축강도 시험 결과 값과 서로 상관분석을 통한 상관관계 유도로 회귀 1차 직선식을 구하여 대상 구조물에 대한 실험자 스스로가 일련의 현장조건과 코어강도 등을 고려한 도출식을 적용하는 것도 신뢰성을 높이는 데 바람직하다고 하겠다.

2.2.2 초음파탐상 시험법

가. 개요

콘크리트는 금속재료와는 달리 재질적으로 불균질하여 초음파의 감쇄가 많아 20~200KHz의 저주파수의 초음파를 사용하게 된다. 이에 따라 지향성이 나빠져 특히, Massive한 콘크리트의 내부 균열이나, 공동의 탐사는 곤란한 실정이다.

주요 조건이 비슷한 경우에는 음속과 강도사이에서 거의 일정한 상관관계가 있는 것으로 보이므로 어느 정도 강도추정이 가능하다. 이 때문에 초음파법에 의

해 콘크리트 강도를 추정 할 때는 다음에 제시되는 각종 영향인자에 따라 상이하게 되므로 강도추정 정도를 향상시키기 위해서는 반드시 이들 인자에 관한 정보를 입수하여 강도추정에 반영하는 것이 바람직하다.

- ① 콘크리트의 재료, 조합, 재령 - 골재의 종류, 시멘트량, 굵은골재량, 재령 등
- ② 측정부위의 상태 - 콘크리트 표면의 상황, 콘크리트의 함수율, 공극율, 균열과 틈 등
- ③ 내부 철근의 상태 - 철근량, 철근방향 등
- ④ 측정기기 및 측정요령 - 적용주파수, 사용시 온도, 단자 접촉요령 등

나. 초음파 전달속도의 측정과 강도추정

초음파속도를 측정하여 재료의 특성을 파악하기 위한 측정은 고도의 정확성이 있어야 한다. 이것은 적당한 파를 생성하고 재료를 통하여 전달되는 시간을 정확하게 측정하는 기구를 사용하여 수행한다. 파의 속도를 결정하기 위해서는 콘크리트에서 파가 전달되는 거리가 측정되어야 한다.

초음파탐사를 위한 탐촉자의 배열은 직접법, 사각법 및 간접법이 있으며 직접법에서 구한 초음파 전달속도(종파)를 강도추정에 이용하나 보통 현장에서 직접법으로 적용할 수 없는 측정 부분들에 대해서는 간접법(표면법)으로 초음파 전달속도를 측정한다.

초음파 전달속도 측정시 콘크리트 내부에 매입된 철근의 pules속도는 대체로 콘크리트 보다 높은 관계로 보강철근이 가까운 곳에서 측정한 진동속도는 높아질수 있으며 탐상기는 수신 변환기에 맨 처음 도달한 진동시간을 나타내 주기 때문에 콘크리트의 pules속도를 나타내주지 않는다. 따라서, 초음파 전달속도의 측정에 있어서 탐촉자가 매입철근이 측정방향에 가로로 놓여 있는 경우와 매입철근이 측정방향과 평행하게 놓여 있는 경우 등에 대해서는 초음파 전달속도에 대한 보정이 필요하므로 철근구조가 조밀한 구조체에서는 시험의 주의가 요구된다. 또한 습윤상태와 건조상태에서의 초음파 전달속도는 서로 차이를 보이므로 대상 표면이 습윤일 때와 우기시에도 주의가 필요하다.

강도추정식은 원칙적으로 실험자 자신이 동종의 콘크리트에 대하여 미리 일련의 실험을 실시한 후 작성하는 것이 바람직 하다. 단 이 방법에 의한 강도추

정 정도가 높지 않기 때문에 콘크리트의 사용재료, 배합, 재령, 함수율 등의 정보가 그다지 얻어지지 않는 경우는 어디까지나 참고치의 정도로 한다.

현장에서 수행한 방법이 표면법(간접법)일 경우에 있어서 국·내외적으로 제안되고 있는 강도추정식들의 적용에 필요한 초음파 전달속도를 산출하는데 있어서 직접법과는 달리 어려움이 내되고 있는 것으로 판단된다

표면법에 의한 초음파 전달속도는 콘크리트 내부의 구성요소와 결합 등에 의해 분산이 되는 경우가 있으며 경험적으로 3점 이상의 회귀직선식에서 분석된 γ 값이 99% 이상이 되는 것을 전달속도 V_d 를 계산한다.

직접법과 표면법의 전달속도는 재료의 종류, 배합, 함수율 등 여러 가지의 원인으로 변동을 나타내고 있으며, 보편적으로 $V_d \approx 1.05 \sim 1.15V_i$ 의 사이에 있다고 경험적으로 보고되고 있으며 초음파 비파괴시험 장비의 일종인 PUNDIT 사용 설명서에서는 정량적인 콘크리트에 다음과 같은 근사적인 관계를 나타내고 있다고 하였다.

$$V_d \approx 1.05V_i$$

여기서, V_d = 직접법(Direct method)에 의한 초음파 전달속도

V_i = 간접법(Indirect method)에 의한 초음파 전달속도

한편, 현장 구조물의 환경조건과 구성재료의 인자들로 각기 다른 형태를 결정하고 있는 상태로 표면법(간접법)으로 측정된 초음파 전달속도를 비파괴강도로 추정하기 위하여 무조건적으로 $V_d \approx 1.05V_i$ 를 적용하는 것은 분석결과의 큰 편차를 동반 할 수 있으므로 표면법을 수행한 동일 지점에 최소한으로 채취한 코어를 이용하거나 현장여건을 고려한 직접법을 탐사하여 직접법의 속도를 구하여 표면법속도와 직접법속도의 서로 상관분석을 통해 대상 구조물에 적합한 관계계수를 파악하여 적용하는 것이 바람직하다. 이러한 원인으로 표면법에 의한 전달속도(V_i)로 비파괴강도의 추정식이 제안되기도 한다.

초음파 전달속도법에 의한 콘크리트 추정강도의 정도를 향상 시키기 위하여 초음파탐상 시험을 수행한 동일 부위에서 채취한 코어 압축강도 시험 결과값과 서로 상관분석을 통한 관계 유도로 회귀식을 구하

여 대상 구조물에 대한 실험자 스스로가 일련의 현장 조건과 코어강도 등을 고려한 상관계수를 정립하여 작성한 도출식을 적용하는 것이 바람직하다.

다. 초음파 전달속도를 이용한 균열깊이 추정

일반적으로 초음파 전달속도를 이용하여 균열을 측정하는 방법은 T-법, Tc-To법, BS법 등이 있으며, 추정정도는 T-법 < Tc-To법 < BS법의 순으로 나타내고 있다. 여기서 Tc-To법에 의한 균열깊이 추정은 약 15%정도의 오차로 보고되고 있다.

현재 통용되고 있는 콘크리트 비파괴시험에 관한 책들의 내용에서 서술되고 있는 Tc-To법, BS법에 관한 적용 그림이 잘못 명기되어 있는 경우가 상당히 많은 상태로 Tc-To법 및 BS법을 이용한 균열깊이 추정이 과대 평가되고 있다. 이는 Tc-To법 및 BS법을 적용할 때 탐촉자(균열) 간의 거리는 단자 중간까지의 거리가 아니고 단자 전면까지의 거리를 적용하여 균열깊이를 추정하여야 한다.

2.2.3 조합법에 의한 압축강도의 추정

가. 개요

2종류 이상의 비파괴시험을 조합해서 콘크리트 강도를 추정하는 방법으로 비파괴시험법은 그 자체가 가지고 있는 한계로 인하여 측정 기법에 따라 변동성을 가지고 있기 때문에 상관성 정립에는 제한 사항이 있다. 그래서 현장 콘크리트 강도추정의 정도를 향상시키기 위해서 각각의 방법이 갖고 있는 제한 사항을 서로 보완할 수 있는 조합법에 대한 연구가 시작 되었다.

초음파속도와 반발경도의 조합을 가장 유망한 조합법으로 제안하기에 이르렀으나 이 방법에도 현장 구조물에 적용하는데는 한계가 있는 실정으로 콘크리트 강도추정을 위한 각 비파괴시험법은 콘크리트 배합조건, 사용이력 및 현장상태, 사용자의 전문성 등에 따라 압축강도와와의 상관관계에 많은 영향을 받는다.

본 논고에서는 반발경도법과 초음파 전달속도법을 조합하여 강도를 추정하는 방법에 대해서 기술하며, 동일 부위에서 반발경도법을 우선적으로 측정하는 것을 원칙적으로 한다.

나. 강도추정

조합비파괴시험법(조합법)에 의한 강도추정은 콘

크리트의 압축강도와 일정한 관계가 있는 각 비파괴 시험치를 강도추정식 중에 순차적으로 변수를 추가함에 따라 강도의 추정정도는 향상할 것이라는 전제에 근거하고 있다.

현재 통용되고 있는 콘크리트 비파괴시험에 관한 책들의 내용에서 서술되고 있는 국·내외 제안식들은 장기재령의 콘크리트 비파괴강도 추정에 조합법을 적용하는 문제에 있어서 탄산화(중성화)에 영향 즉, 반발경도(R)의 보정에 관하여 기본적인 문제에 대한 해결 방안의 언급없이 단순히 제안식들만 기재하고 있는 상태로 이러한 제안식들을 그대로 적용하는 것은 무리가 있는 것으로 판단된다.

일례로 일본건축학회 NDT 소위원회 공동실험결과 「콘크리트 강도추정을 위한 비파괴시험 방법 매뉴얼」에서는 제안된 조합법공식에서 보통콘크리트에서는 재령이 6개월 넘으면 압축강도의 저하가 보이는데 비해 반발도는 재령에 따라 서서히 증대하는 경향을 보이기 때문에 각 비파괴시험법에 의한 추정강도치는 실측치보다 커진다. 이것을 보정하기 위해서는 조합법의 경우에서도 반발도의 경과년수에 대한 보정을 행할 필요가 있다고 하며, 이 매뉴얼 강도추정식을 위한 시험 공시체의 최대 양생 시험기간이 1년으로 재령이 1년을 초과한 콘크리트에 관해서는 실험 데이터가 아주 부족하기 때문에 본 매뉴얼에서는 코어시험을 병행하여 실시하는 것으로 하고 있으며, 이때의 강도추정식 정수항 값(C)을 변화시키는 것으로 하였다. 또한 반발경도에 대해서 안전한 값으로 재령 3개월 이상인 콘크리트에 대해서는 $k=0.9$ 를 채용하는 것으로 장기재령의 강도추정식은

$F_c = 10.2 \times (k \cdot R) + 233 \cdot V_p - C$ 으로 보고하고 있다.

따라서, 기존의 제안식들을 적용함에 있어서 각각의 제안식들이 가지고 있는 시험의 특성을 유념하여 적용하는 것이 필요하다. 이는 현재 이용되고 있는 대부분의 제안식들의 시험 공시체는 90일~1년 사이에 있다고 보여지기 때문이다. 한편, 이러한 문제점을 해소하기 위하여 장기재령(공용기간 10년 이상)의 콘크리트 구조물에 대한 재령계수 보정이 없는 강도추정식도 제안되기도 한다.

조합법에 의한 콘크리트 추정강도의 정도를 향상시키기 위하여 반발도시험+초음파시험을 수행한 동일 부위에서 채취한 코어 압축강도 시험 결과값과 서

로 상관분석을 통한 관계 유도로 다중회귀식을 구하여 대상 구조물에 대한 실험자 스스로가 일련의 현장 조건과 코어강도 등을 고려한 상관계수를 정립하여 작성한 도출식을 적용하는 것이 바람직하다.

2.3 코어 압축강도 시험

가. 코어 채취방법

코어의 채취위치는 조사목적에 따라 다르므로 적절한 평가가 얻어지도록 충분히 배려하여야 한다. 코어채취는 철근을 포함하지 않는 곳, 작업이 용이한 곳, 가능한한 구조내력에 영향을 주지 않는 곳에서 채취한다.

채취 코어의 직경은 굵은골재 최대치수의 3배 이상으로 하며, 길이는 적어도 10cm 이상으로 직경의 2배로 하는 것이 바람직하다. 이는 빗드와 코어강도와 관계에 있어서 일반적으로 공시체 치수가 적어질수록 그 콘크리트 강도는 증대한다고 한다. 또한 코어 직경이 적어질수록 표준공시체의 용적에 비해서 측표면의 면적이 크게되는 것에서 코어 절단면의 손상이 크게되어 코어강도의 변동도 크게된다. 따라서 코어채취 빗드경은 $\phi 10$ 이상이 바람직하다. 코어강도는 채취한 코어의 상태에 의해서 큰 편차를 나타내므로 보링기술은 극히 중요하게 된다. 아무리 성능이 좋은 빗드나 코어 채취기를 사용해도 채취기 설치가 미흡하거나, 냉각수의 공급부족이든가, 작업능률을 올리기 위해서 불필요한 하중 등으로 절단작업을 행하면 코어 공시체는 극도로 손상을 받아 코어강도가 저하한다.

특히 현장에서 작업할 경우에는 이러한 영향이 크게 나타나므로 코어드릴을 소정의 위치에 확실하고 정시키고 조심스럽게 채취한다. 채취한 코어는 형질 또는 물로 깨끗이 세척하여 채취위치, 번호 등의 필요한 사항을 기입한 후 비닐봉지에 넣어 인봉하고 직사광선이 닿지 않도록 보관한다.

또한 코어의 외관, 구조물의 환경, 채취위치의 방향, 건습의 조건 등에 대해서도 기록해 두며 코어 채취한 부위에는 팽창재를 혼입한 모르타 등을 이용하여 즉시 보수한다.

나. 압축강도 시험

현장 조사시 구조체에서 콘크리트의 품질 상태를

파악하기 위해 선정된 부위에 비파괴 시험(Schmidt Hammer, 초음파탐상, 철근상태 등)을 실시한 후 동일지점에서 코어를 채취하여 압축강도 시험을 KS F 2405, 2412, 2422 규정에 의한다.

현장에서 채취한 코어로 부터 압축강도를 추정하는 방법은 국부파괴 시험으로 비파괴 시험과는 구별되지만, 구조물의 실제 강도를 추정한다는 관점에서 비파괴적인 방법과 함께 실시한다. 그러나 내하 콘크리트 구조물에 있어 휨부재에 대한 적용은 제한적이며 구체 콘크리트 구조물에 한정 적용이 가능하다는 단점이 있다.

(1) 높이/직경비에 의한 강도 보정

코어 공시체의 높이/직경비(h/d)가 작아질수록 겉보기 압축강도는 커진다. 공시체 높이가 직경의 2배보다 작을 경우에는 시험으로부터 얻은 압축강도에 보정계수를 곱하여 공시체의 높이가 직경의 2배가 되는 코어 공시체의 압축강도로 환산한다.

(2) 절단 torque가 강도에 미치는 영향

절단토크는 코어 불링중의 절삭, 마모(다이아의 집중도, 특성 및 피트의 구속과 절단속도, 피절단물의 성질에 따라 다름.)와 코어 채취기의 진동 파괴 등에 의해서 생기는 비틀어진 전단력이 원동기의 구속에 걸리는 전단저항으로 드릴링시 토크(Torque)가 크면 클수록 코어강도는 저하되며 드릴링 속도도 빠르면 코어강도는 작아지게 된다. 또한 드릴링작업에 의해서 코어시료가 어느 정도 교란되기 때문에 코어 공시체의 압축강도는 동일 조건의 표준공시체의 압축강도보다 항상 작은 값을 나타내게 된다.

그러므로 절단토크와 코어강도의 관계는 절단토크에 반비례해서 코어강도가 감소한다. 절단토크 1.8kg·m 까지의 것은 구속 600cm/min으로 절단 폭이나, 절단면의 요철은 0.1~0.3mm의 정도로 적고 강도저하도 0~4% 정도로 나타낸다. 그러나 300cm/min 이하의 저속으로 절단속도를 올리면 비트가 진동이나 흔들림을 일으키기 시작하고 절단토크는 1.8kg·m 이상으로 되어 코어강도는 10%에 가까운 강도저하로 되어 흐트러짐도 크게 나타나며, 이때의 절단면의 요철은 0.5~1.0mm 정도이다.

(3) 매입철근이 실측강도에 미치는 영향

철근콘크리트 구조물에서 철근을 절단하지 않고 코어채취 하는 것이 불가능한 경우가 있으며 이 철근

의 영향에 관한 연구 실적이 적고, 그 결과도 상당히 상이하다.

철근을 절단하는 경우에는 재하축과 수직인 방향으로 철근이 있는 경우에는 묻혀진 철근의 직경이 클수록 강도의 저하는 현저해진다. 철근의 직경이 19mm 이상의 경우 강도저하율은 약 10%에 달하기 때문에 이러한 코어는 제외하는 것이 좋지만 어쩔수 없이 강도시험을 하는 경우에는 겉보기 강도가 저하하는 것에 유의할 필요가 있다.

콘크리트협회에서는 코어강도 감소는 철근의 위치와도 관계있는 것으로 발표하였으며 철근의 위치가 코어의 단부에서 멀어질수록 영향은 커진다. 이런 이유 때문에 가로지르는 철근은 5~10%의 적당한 강도감소를 가져오는 것으로 가정하는 것이 합리적이라고 했다.

(4) 코어 채취위치와 방향의 영향

코어는 일반적으로 구조물의 최상단에서 가장 낮은 강도를 갖고 밑으로 깊이가 커질수록 코어의 강도는 증가하지만 300mm 이상의 두께에서는 더 이상의 강도증가는 없는 것으로 보고되고 있으며 수평방향으로 코어를 채취하면 수직으로 채취한 경우보다 전형적으로 8%가량 강도가 감소한다는 사실이 실험적으로 입증되었다.

(5) 재령의 영향

실제의 구조물에서는 표준공시체의 양생조건과 동일한 양생방법을 기대할 수 없기 때문에 콘크리트 구조물이 재령이 경과함에 따라 강도가 증가한다 할지라도 표준양생한 공시체의 28일 압축강도보다 항상 크지는 않다. 따라서, 현장 양생한 구조물의 코어강도는 표준공시체의 28일 압축강도와 같게 보는 것이 일반적이며 코어강도에 대해서는 재령에 대한 보정은 하지 않는다.

(6) 콘크리트 강도와 흡수율과의 관계

콘크리트는 일반적으로 압축강도가 높고 흡수율이 낮은 물리적 성질이 바람직하다. 그러나 콘크리트의 사용 목적이나 입식적 조건 등에 따라 물리적 성질 뿐만 아니라 화학적 저항성도 요망되는 것이다.

콘크리트의 압축강도와 흡수율간에는 회정기선 관계가 성립되나 이는 각 재령에 따라 일직선화되지 않고 조기재령에 비하여 장기재령일수록 더욱 급격한 강도의 변화율을 나타낸다.

3. 철근부식 및 중성화 조사

3.1 철근부식도 시험

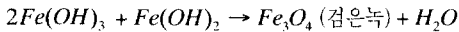
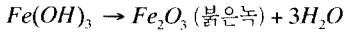
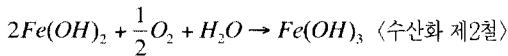
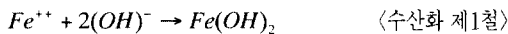
3.1.1 개요

철근콘크리트 구조물의 열화원인으로 철근부식에 수반하는 팽창압에 의한 균열, 녹물에 의한 오염을 발생시켜 구조물의 미관을 크게 손상시키며 강재와 콘크리트와의 부착력 저하, 단면결손에 의한 철근강도의 감소 등에 의해 구조물의 내력 그 자체를 현저하게 저하시킨다.

철근부식의 조사는 먼저 외관조사에 의하여 표면에 나타난 열화상향을 파악하며, 그 결과에 근거하여 기기를 사용하여 보다 상세한 조사가 이루어져야 한다.

활성태에 있는 철근은 물과 용존산소의 작용으로 부식을 일으킨다. 이때 철근표면에는 철이 이온화되는 애노드(anode) 반응(산화반응)과 산소가 환원하는 캐소드(cathode) 반응(환원반응)이 진행하여 부식전지가 형성된다.

일반적으로 강재의 부식반응은 다음과 같다.



3.1.2 비파괴 조사

녹물의 유출과 철근방향의 균열 발생은 철근의 부식이 상당히 진행된 단계에서 나타나는 현상이다. 따라서 콘크리트 중의 철근부식은 전기화학적 현상이므로 초기단계의 철근부식을 비파괴적으로 검출할 수 있는 유일한 방법이 전기화학적 방법이다.

콘크리트 내부에 매입된 철근의 부식상황을 파악하는 비파괴검사법에는 자연전위법, 분극저항법, 콘크리트 비저항 측정법의 3종류가 있지만 자연전위법 이외에는 아직 실용적 단계에 도달하지 못한 실정이므로 현재 일반적으로 이용되고 있는 자연전위법에 대해서 기술한다.

자연전위란 존재환경에서 유지하고 있는 전기적 위상을 말한다. 부식환경에 있는 강재에서는 부식전지(부식회로)가 형성되고 애노드 반응을 유발하는 부식부(양극부)와 캐소드 반응을 유발하는 피부식부(음극부)로 나뉘어져 자연전위가 변화한다. 자연전위법

은 부식환경에서의 전위변화를 계속하여 철근의 부식 경향을 판정하는 방법이다. 전위측정의 오차 요인으로서 철근의 피복두께, 피복 콘크리트의 수분 함유량, 부식진행 위치 등에 따라 많은 영향을 받게 된다.

전위측정은 기준전극과 전압계를 사용하여 실시한다. 기준전극은 실내에서는 포화염화은전극(AgCl) 혹은 포화칼로멜전극(SCE)이 사용되며, 실제 구조물에서는 측정에는 안정성이 충분하지 않지만 제작이 용이하고 부서지기 어려운 포화황산동전극(CSE)이 사용되는 경우가 많으며 포화황산동전극을 사용할 경우 황산용액과 콘크리트 속의 알칼리성 세공액 사이에 이온 확산속도의 차에 기초를 두고 비교적 큰 액간전위차를 일으켜 이것이 측정 오차가 되는 것이 지적되고 있다.

표 2 표준 전위 측정표 (ASTM Test Method C876-80)

전극의 종류	COPPER ELECT (Cu/CuSO ₄) 유산동 전극	SILVER ELECT (Ag/AgCl) 염화은 전극	CALOMEL ELECT (Hg/HgCl) 염화수은 전극
Normal	> -0.20V (-200mV)	> -0.106V (-106mV)	> -0.126V (-126mV)
Suspicious	-0.20V ~ -0.35V (-200mV ~ -350mV)	-0.106V ~ -0.296V (-106mV ~ -296mV)	-0.126V ~ -0.276V (-126mV ~ -276mV)
Corroding	< -0.35V (350mV)	< -0.296V (296mV)	< -0.276V (276mV)

상기의 <표 2>에서 나타난 바와 같이 사용 장비의 전극종류를 정확히 파악하여 적절한 전위 측정표를 이용하여야 매입 철근에 대한 부식평가의 측정 오차를 줄일 수 있으므로 주의하여야 한다.

일반적으로 ASTM C 876에서는 자연전위법과 철근부식의 관계에 대하여 판정 기준(기준전극:CSE)을 작성하여 검사에 적용하고 있으나 최근에는 ASTM 기준에 약간의 수정을 가하여 실구조물에 적용하고 있으며 최근의 자료에 의하면 ()내의 값이 더 타당한 것으로 알려지고 있다.

콘크리트에 매입된 철근의 부식성을 자연전위법에 의하여 판정하는 방법을 적용하고 있는 국가는 미국, 영국, 일본 등이 있다.

표 3 준ASTM에 의한 자연전위와 부식확률평가

부식성 등급	자연전위 E(mV)	부식의 확률
I	E ± 0 (-100)	부식 없음(0%)
II	(-100) 0 ≥ E > -200	10%이하의 확률로 부식 발생
III	-200 ≥ E > -350	50%의 확률로 부식 발생
IV	-350 ≥ E > -500	90%이상의 확률로 부식 발생
V	-500 ≥ E	100%의 확률로 부식 발생

또한 철근부식도 측정장비를 사용함에 있어서 측정장비의 충분히 이해하여 대상 구조물 콘크리트에 적용하는 것이 필요하며 대상 콘크리트의 환경, 시공 여건 등에 따른 측정 전위차의 영향을 받는데 경험적으로 대표적인 사항은 다음과 같다.

- ① 대상 지점의 표면 요철과 이물질 제거 필요
- ② 대상 지점의 매입철근들에 대한 통전시험 필요
- ③ 대상 표면과 매입철근 사이는 습윤상태 유지 필요
- ④ 대상 콘크리트의 비저항(저항율) 보정
- ⑤ 대상 콘크리트의 염화물량 보정
- ⑥ 대상 콘크리트의 표면과 내부 전위차 보정

상기의 인자들이 전위차 측정결과에 중대한 영향을 미치게 되므로 세심한 주의를 하여 측정결과를 분석하는 것이 필요하다.

3.2 중성화 조사

3.2.1 콘크리트의 중성화

중성화란 콘크리트의 탄산화(Carbonation) 과정에서 나타나는 현상으로 중성화에 의해서 문제가 발생하는 것은 콘크리트 자체에서 생기는 것이 아니고 콘크리트 중의 철근에 녹이 발생함으로써 문제를 일으키는 것이다.

중성화가 일어나는 메카니즘을 보면 시멘트의 수화 반응에서 생성되는 수산화칼슘 $[Ca(OH)_2]$ 은 pH 12~13정도의 강알칼리성을 나타지만 대기중에 포함되어 있는 약산성의 탄산가스(약 0.03%)와 접촉하면 탄산칼슘과 물로 변화하고 탄산칼슘으로 변화한 부분의 pH가 8.5~10정도로 낮아지게 된다. 따라서 콘크리트의 중성화는 일반 환경하에서도 확실하게 진행되기 때문에 매입된 철근의 부식에 따른 문제가 가장 기본적인 중요하다.

콘크리트 내부의 pH가 11이상에서 철근은 표면에 부동태막을 형성하므로 산소 침입을 막아 철근의 부식을 방지하지만 중성화에 의하여 pH가 11보다 낮아지면 부동태막이 파괴되면서 철근에 녹이 발생하게 된다. 이러한 녹은 원래부피의 약 2.5배에서 최대 7배까지 체적이 팽창하여 팽창압력에 의하여 내부에는 균열이 발생하게되며 철근의 부착강도 저하, 피복 콘크리트의 탈락, 철근 단면적의 감소 등 구조물의 내구성 저하를 초래하게 된다. 이러한 원인으로 내구성면에서 중성화를 파악하는 것이 중요하다.

3.2.2 중성화 깊이의 측정

콘크리트 중성화 시험은 페놀프탈레인법, 시차열중량분석에 의한 방법, X-선회절에 의한 측정 방법, 전기화학적 방법, X선 마이크로아나라이자(주사형전자현미경)에 의한 방법 등이 있으며, 일반적으로 현장에서 간편하게 이용되어지는 페놀프탈레인법(페놀프탈레인법은 pH 지시약의 일종으로 1% 알칼리용액)에 대하여 대상 구조물 콘크리트의 중성화 진행 정도를 측정한다.

콘크리트 구조물에서의 중성화 시험은 구조체에서 채취한 코어 또는 구조체 안전(내하력 등)에 영향을 미치지 않는 부위를 선정 일부분을 파손하여 노출된 대상 측정면의 중성화 깊이를 측정하며, pH 8.2~10.0 이상의 알칼리측에서 홍색으로 발색하며 중성측에서는 무색으로 나타나게 되는데 중성화 진행 깊이의 측정은 콘크리트 표면에서 발색점까지의 깊이를 깊이계, 버니어캘리퍼스 등으로 무색 부분의 깊이를 측정한다.

표 4 콘크리트의 종류별 중성화 비율 (R)

골재의 종류 1 혼화제 종류 시멘트의 종류	자연(하천)골재			강지관 & 쇄석모래			쇄석골재		
	Plain	AE제	AE 감수제	Plain	AE제	AE 감수제	Plain	AE제	AE 감수제
보통포틀랜드 시멘트	1.0	0.6	0.4	1.2	0.8	0.5	2.9	1.8	1.1
조강포틀랜드 시멘트	0.6	0.4	0.2	0.7	0.4	0.3	1.8	1.0	0.7
고로 시멘트 (slag 30~40%)	1.4	0.8	0.6	1.7	1.0	0.7	4.1	2.4	1.6
고로 시멘트 (slag 60% 전후)	2.2	1.3	0.9	2.6	1.6	1.1	6.4	3.8	2.6
silica 시멘트	1.7	1.0	0.7	2.0	1.2	0.8	4.9	3.0	2.0
fly-ash 시멘트 (fly-ash 20%)	1.9	1.1	0.8	2.3	1.4	0.9	5.5	3.3	2.2

일반적으로 중성화 속도식을 단순히하여 계산하면 공용기간의 중성화 예측심도가 오차를 나타낼 수 있기 때문에 상기의 <표 4>에서 보여주는 것과 같이 골재, 혼화제, 시멘트 등의 종류에 따라 상이하게 되므로 대상 콘크리트의 이력을 정확히 파악하여 적용하는 것이 대단히 중요한 문제이다.

또한, 현장에서 중성화 심도를 측정하는 경우에 있어서 그 대상이 코어일 때는 코어표면을 깨끗이 세척하는 것은 필수적으로 코어 표면에 미세분말이 있으면 중성화 조사에 영향을 주기 때문이다. 정이나 브레이크 등을 이용하여 국부 파손한 경우에도 동일하다.

4. 콘크리트의 화재 손상부 조사

4.1 철근콘크리트 구조의 고온시 특성

콘크리트 구조물은 화재 피해를 받았을 때 먼저 외관상태를 관찰한다.

고온을 받은 콘크리트의 표면의 특징은 다음과 같으며 조기재령 고강도 콘크리트는 잘 폭열하는 것으로 알려져 있다.

- ① 300℃ 이하에서는 표면에 그을음이 부착되고 그을음 밑의 콘크리트 색은 보통의 콘크리트 색
- ② 300~600℃에서는 복숭아색으로 변색
- ③ 600~950℃에서는 회백색
- ④ 950℃ 이상이면 담황색
- ⑤ 1200℃에서는 용해되는 것으로 되어 있다.

골재의 공극율이 작은 경우는 고열에 대하여 비교적 안정하나 공극율이 큰 골재는 팽창하며 특히 화강암, 사암 등 석영질을 포함한 골재는 온도가 약 575℃ 이상이 되면 갑자기 체적이 1.085배 정도 팽창하여 불안정한 상태에 이른다.

피복두께 2cm 정도의 철근은 500℃ 열에서 50분 정도 견딜 수 있으나, 철근의 항복강도는 200℃ 이상의 고온에서 급격히 저하하므로 500℃ 이상의 온도에서는 철근의 항복으로 구조내력 부족에 의한 피해를 아울러 입게된다.

화재에 의한 콘크리트 구조물의 손상으로서 가장 많은 것은 콘크리트의 탈락이며, 이에 따라 철근이 노출되어 항복되기 쉬운 상태에 이르고 철근에 의한 빠른 열전도로 구조 단면에 결손된다.

콘크리트의 탈락에 대한 원인은 다음과 같이 요약된다.

- 골재의 물리, 화학적 변화
- 공극 중의 수분 증발에 의한 인장응력
- 콘크리트 내부와 표면의 온도차 또는 철근과 콘크리트의 변형도 차에 의한 응력

화재구간에 대한 콘크리트의 손상정도를 분석하기 위하여 대상 부위에서 초음파탐사와 콘크리트의 코어 공시체 및 콘크리트시료를 채취하여 시차열분석에 의한 화재온도 분석, 편광현미경에 의한 화재손상 분석, 주사현미경 관찰에 의한 미세구조 분석, EDS에 의한 반응원소 분석 및 X-Ray에 의한 반응생성물 분석 등을 통하여 종합적인 화재손상 정도를 평가

한다.

4.2 비파괴 시험에 의한 조사

4.2.1 초음파 전달속도와 가열온도와의 관계

대상 콘크리트의 온도는 5℃~30℃ 까지는 pules 속도에 중대한 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 그래서 비정상적인 극단적인 온도를 제외하고는 온도가 미치는 영향은 무시될 수 있다.

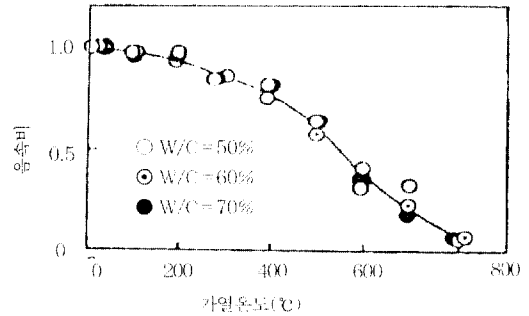


그림 1 음속비와 가열온도와의 관계

谷川은 화재를 입은 콘크리트의 추정강도에서 콘크리트의 음속비($V/V_0 : V_0 =$ 상온시의 음속)와 가열온도(T)와의 관계에서 화재를 입은 콘크리트에서는 압축강도와 음속간에 밀접한 관계가 있어 초음파 전달속도법이 적용될 수 있는 것으로 판단하고 있다.

4.2.2 반발경도와 가열온도와의 관계

谷川은 화재피해를 입은 콘크리트 구조물의 강도 추정에 있어서 콘크리트 압축강도비($F_c/F_{c0} : F_{c0} =$ 상온시의 강도) 및 반발경도비($R/R_0 : R_0 =$ 상온시 반발경도)와 가열온도(T)의 관계에서 압축강

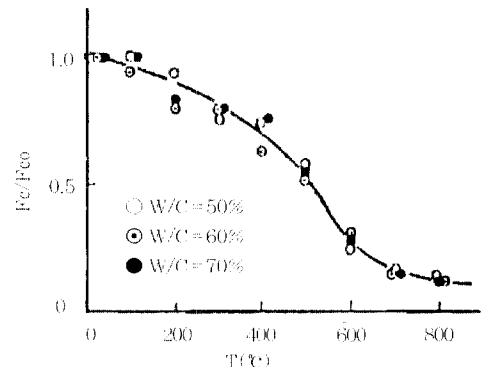


그림 2 압축강도비(F_c/F_{c0})와 가열온도(T)의 관계

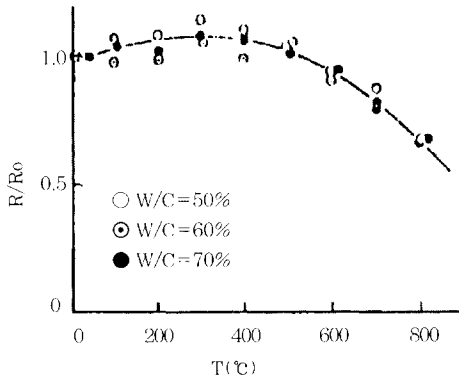


그림 3 반발경도비(R/R0)와 가열온도(T)의 관계

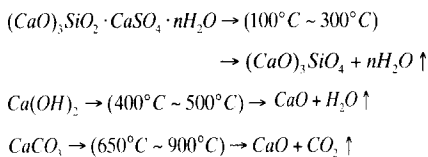
도는 가열온도의 상승과 더불어 점차 저하하지만, 반발경도는 가열온도가 약 300°C 이하의 범위에서는 가열온도의 상승과 더불어 증대하는 경향을 나타낸다. 따라서, 화재피해를 입은 콘크리트의 강도추정에 반발경도를 사용하는 것은 피해야 할 것이다.

4.3 시차열 분석

4.3.1 개요

시멘트 수화물의 온도가 올라가면 100°C 부근에서 자유수의 탈수, 100°C~300°C 부근에서 mono-sulphate 등의 탈수, 400°C~500°C에서 수산화칼슘의 탈수, 650°C~900°C에서 탄산칼슘의 脫炭酸이 일어난다.

이것을 화학식으로 표시하면, 다음과 같다.



시멘트 수화물의 조성은 복잡하여 반드시 이것의 반응만이 일어나서 있는 것은 아니지만, 이것의 반응이 지배적으로 열변화에 의한 중량변화에 의해 $Ca(OH)_2$, $CaCO_3$ 의 량을 측정하는 것이 가능하다. 이러한 온도에 의한 중량변화를 측정하는 방법으로서 열중량분석(TG)이 있다. 또한, 온도변화에 따라서 일어나는 반응이 흡열인가, 발열인가를 조사하는 시차열분석(DTA)이 있다.

여기서, 열중량분석은 중성화 조사에 이용되며, 시차열분석은 온도손상의 피해 분석에 이용되고 있다.

4.3.2 중성화 분석

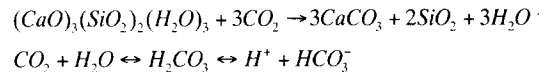
시차열중량 분석에서 얻은 탄산칼슘을 수산화칼슘에 mol 환산하고, 수산화칼슘과의 관계를 T-Ca로서 표시하면 중성화하지 않았던 경우 어느 정도의 수산화칼슘이 존재했는가를 추정 가능하고 편리하다.

콘크리트 수열온도의 추정에 이용한다. 예를 들면 페놀프탈레인 시약에서 적색 반응을 나타내지 않은 부분은 500°C 이상의 가열에 의해 중성화가 진행되고 있어 내구성에 문제가 있다.

이 시험에 사용되는 시료는 공기체 혹은 보링 코어를 표면으로부터 매 10mm 간격으로 절단하여 그 중앙부를 파쇄하여 0.3mm체를 통과한 분말을 사용하게 되며, 중성화 영역과 미중성화 영역에 있어서의 탄산칼슘과 수산화칼슘의 상대적 존재량으로서 중성화 여부를 판단하게 된다.

시차열중량분석에서 다음의 사항을 분석할 수 있다.

① 중성화는 다음식과 같이 진보한다.



- ② 수산화칼슘은 콘크리트 내부에서 이동한다.
- ③ 일반의 환경하에서는 표면 가까이에서 탄산칼슘의 고농도층이 형성된다.
- ④ 수중에서는 칼슘의 용출이 인정될 수 있다.
- ⑤ 페놀프탈레인법과 시차열중량분석에서는 결과가 다르게 되는 것이고, 정량적으로 파악하는 것에 는 시차열중량분석방법이 우수하다.

4.3.3 화재온도 분석

콘크리트는 시멘트의 수화반응에 의해 많은 수화생성물을 함유하고 있으며, 이들 수화생성물은 온도의 변화에 따라 결정구조가 변화하며, 변화할 때 에너지를 흡수 또는 방출한다. 또한, 수화물의 결합수와 흡착수 등이 이탈하는 과정에서도 열변화 등을 일으키기 때문에 미리 열변화를 일으킨 시료를 열분석할 경우 그 온도에서는 특별한 에너지의 흡수나 방출은 발생하지 않는다.

따라서, 열변화를 일으키지 않은 시료를 열분석하고 열변화를 일으킨 시료를 열분석하여 비교 분석함으로써 콘크리트의 화재온도를 추정할 수 있다.

다음의 <그림 4>에서 200℃까지는 모세관수 및 겔수의 증발로 인한 강한 흡열피크가 일어나고 400℃ 부근에서 흡열피크가 발생되며, 520℃정도에서 Ca(OH)₂의 분해로 인하여 강한 흡열피크가 생성되고, 800℃정도에서 칼사이트(CaCO₃)의 분해로 인하여 또 한번의 강한 흡열반응이 발생한 것을 알 수 있다.

따라서, 화재에 의해 고온을 받은 콘크리트는 그 온도에서 미리 흡열반응을 일으키기 때문에 다시 열을 가하여 시차적열분석을 실시하면 흡열반응의 피크가 없거나 적게 나타난다. 즉 온도가 400℃를 미리 받은 경우 400℃부근에서 발생하는 흡열피크가 없으며, 600℃를 받은 경우에는 520℃정도에서 나타나는 Ca(OH)₂의 분해로 인한 강한 흡열피크가 생성되지 않음을 알 수 있다.

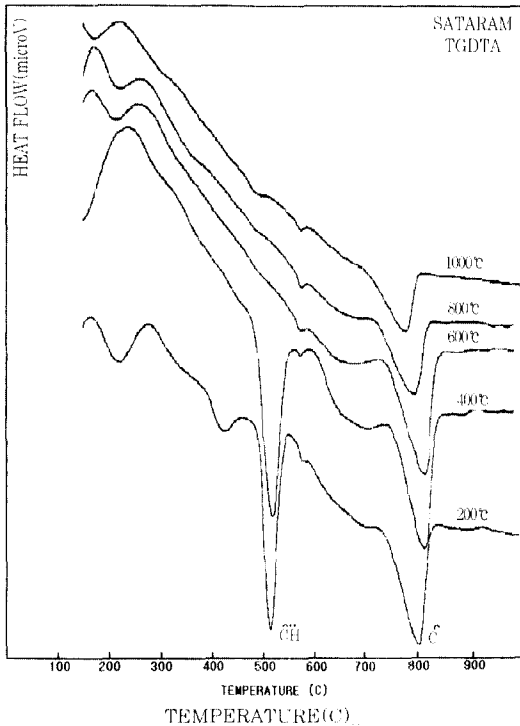


그림 4 가열온도에 따른 열분석 결과

4.4 편광현미경에 의한 화재손상 분석

콘크리트가 고온의 영향을 받은 경우에는 수화물의 결합수와 흡착수 등이 이탈하는 과정에서 경화체에 수축과 팽창이 발생하여 균열을 발생시킨다. 또한

열변화 등을 일으키기 때문에 콘크리트의 표면색이 변화되어 여러 가지의 색상을 띄게 되는데 이것을 상대비교함으로써 콘크리트가 받은 온도를 추정할 수 있으며, 열화상태도 평가할 수 있다.

다음의 <그림 5>에서 건전부위의 콘크리트 시료를 채취하여 전기로에서 각각 200℃, 400℃, 600℃, 800℃, 1,000℃로 30분간 가열한 결과이며, 200℃까지는 콘크리트의 조직이 크게 변화되지 않고, 가열하지 않은 시료의 조직과 표면색이 거의 같으나, 400℃이상 가열한 시료부터는 균열과 표면조직의 변화를 뚜렷이 관찰할 수가 있다.

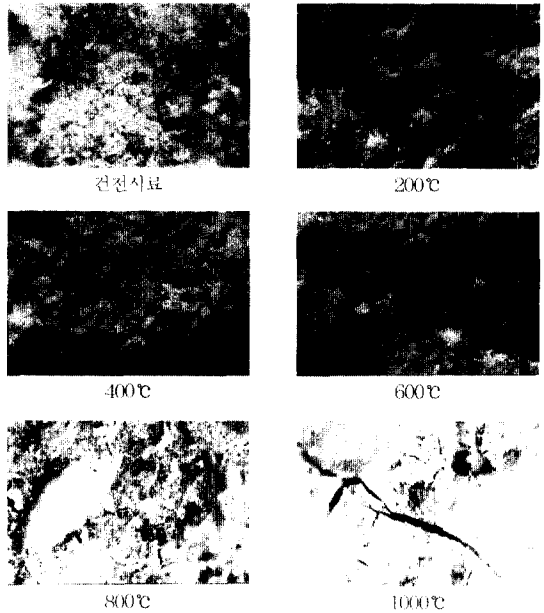


그림 5 건전부위 콘크리트의 가열온도에 따른 현미경 분석결과

4.5 SEM에 의한 미세구조 분석

주사형현미경에 의한 콘크리트의 열화상태의 판정은 콘크리트 미세조직의 치밀성, 다공성, 모세관 및 겔공극의 분포정도, 미세균열의 발생현황, 팽창성물질의 생성에 의한 균열발생 등을 관찰함으로써 콘크리트의 건전성을 평가할 수 있다.

특히, 화재에 의한 콘크리트의 열화정도를 고찰하기 위해서는 고온에 의한 수화생성물의 분해정도에 따른 균열발생 정도를 관찰하는 것이 중요하다고 할 수 있다.

다음의 <그림 6>은 건전부위에서 채취한 시료에 대

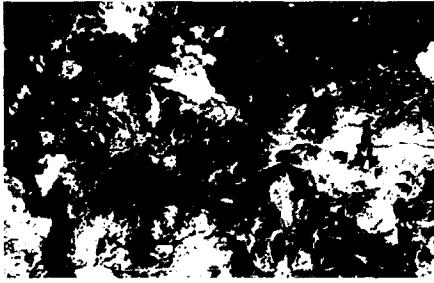


그림 6 건전부위의 SEM 사진

한 SEM사진이다. 이 사진에서 보면 알 수 있듯이 건전부위의 시료는 콘크리트가 상당히 치밀한 구조를 형성하고 있어 수화반응이 잘된 콘크리트로 생각된다.

다음의 <그림 7>은 화재 손상구간의 시료로 화재에 의해 콘크리트가 탈락된 부위의 깊이에 따른 미세구조를 관찰하여 보면 표면부위에서는 균열이 심하고, 콘크리트의 결합상태가 좋지 못하다.



그림 7 화재 손상부위의 SEM 사진

4.6 EDS에 의한 반응원소 분석

에너지분산형 분석장치를 EDS(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)형 EPMA라고 한다. 이것은 분석전자현미경이라고도 하며, SEM의 내부에 분석장치를 조합하고 전자현미경관찰을 하면서 미소영역의 원소분석을 하는 장치이다. 즉 가속된 전자가 시료에 충돌하여 2차적으로 방사하는 특정 X 선을 검출하고 그 시료의 원소성분을 정성, 정량적으로 조사하는 방법이다.

화상을 입은 콘크리트의 미세구조를 이루는 원소를 분석하기 위하여 조사대상 교량의 표면부위에서 채취한 콘크리트 시험편의 단면을 금으로 코팅한 후 SEM에 의하여 확대하여 그 구성원소를 분석한다. 시멘트 수화조직에 대한 원소성분의 변화 원소성분을

정성, 정량적으로 조사하여 건전한 시료와 화상을 입은 시료와의 차이를 분석함으로써 콘크리트 열화정도를 판정한다.

다음의 <그림 8>은 건전부위에서 채취한 시료에 대한 EDS 분석결과로서 콘크리트 중의 원소피크가 일반적으로 수화가 잘되고 건전한 콘크리트의 전형적인 피크를 나타내고 있다.

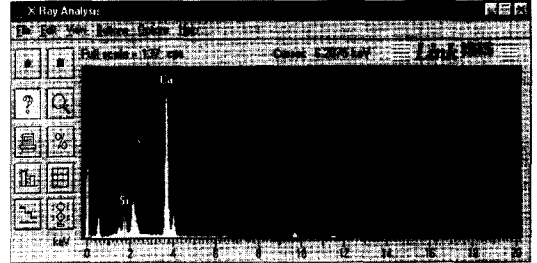


그림 8 건전부위 시료의 EDS 분석결과

다음의 <그림 9>은 화재구간의 표면에서 채취한 시료는 고온에 의해 칼사이트가 분해되어 많은 함량의 탄소가 검출되고 있음을 알 수 있다.

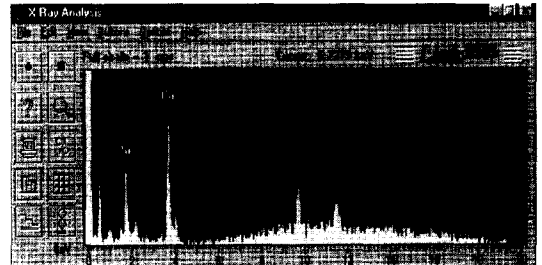


그림 9 화재구간 시료의 EDS 분석결과

4.7 X-Ray에 의한 반응생성물 분석

4.7.1 개요

X선회절법은 결정의 구성을 분석한다. 결정에 X선이 照射했을 때, 결정격자면에서 반사하며, 서로 간섭하여 합치기 때문에 다음의 식을 만족시키는 회절선의 강도만이 증대하고, 나머지는 좀 꺼져서 합쳐진다.

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

여기서, 2θ (혹은 d)와 회절X선의 강도이다. 이 패턴은 광물에 고유의 것으로 JCPDS(Joint Committee on Powder Diffraction Standards)에 의해 수집 정리된다. 콘크리트를 측정할 경우는 재가기의 패턴이 성분비에 반응해서 혼합된 패턴으

로서 관측된다.

4.7.2 중성화 분석

X선회절을 이용해 중성화를 측정하는 것은 수산화칼슘과 탄산칼슘의 주피크 강도의 변화를 깊이로 측정하는 방법을 취할 수 있다. 그러나 피크 강도는 측정물의 조성만으로는 관수가 아니고, 그 결정도에 의한 어느곳도 큰것이기 때문에 반정량분석밖에 실시할 수 없다. 특히 수산화칼슘은 CS의 겔(수산화칼슘과 반정형 실리카와의 겔)의 형상으로 존재하는 것도 많다. CS의 겔이 많은 플라이애쉬 시멘트를 사용한 콘크리트의 분석에는 부적당할 것이다.

X선회절이 활약하는 것은 탄산 이외의 산과 반응하거나, 탄산칼슘의 결정이 칼사이트 이외로 되었을 때이다.

시험 방법은 시차열분석기와 마찬가지로 적당한 깊이에서 채취된 시멘트 경화체를 분쇄하여 X선회절 분석기의 시료로 사용하며 수산화칼슘과 탄산칼슘의 피크 강도의 비고로서 중성화 부분을 판별할 수 있다.

4.7.3 화재온도 분석

콘크리트의 X선 회절분석은 고온에 의하여 콘크리트 중의 시멘트수화물의 변화를 정량적으로 추정하여 화재온도와 온도의 작용시간을 추정하기 위하여 각 부위별 표면에서부터 깊이별로 미분말로 채취하여 X선 회절분석을 실시한다.

콘크리트의 반응생성물을 정성적으로 분석하여 시멘트 수화물이 고온에 의하여 어떤 물질로 변하고 얼마나 변하였는지를 정량적으로 분석하여 콘크리트가 화재에 의해 받은 온도와 가열된 시간을 추정한다.

다음의 <그림>은 건전한 부위에서 채취한 시료를 전기로에서 각각 200℃, 400℃, 600℃, 800℃ 및 1000℃로 가열한 시료를 X-Ray 회절분석한

결과로 400℃까지는 CH ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)가 존재하지만, 600℃ 이상부터는 CH성분은 거의 소멸되고, CaO의 성분이 나타났으며, 온도가 높을수록 생성량이 증가하고 있다. 이것은 화재시 콘크리트의 온도가 증가될수록 수산화칼슘이 분해되고, 또한 칼사이트(CaCO_3)가 분해되어 CaO로 변환되기 때문이다.

따라서, 콘크리트의 화재온도에 따른 반응생성물의 피크강도의 변화를 나타낸 것이 <그림10>으로 온도의 증가에 따른 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 분해 및 CaO 생성량의 피크강도를 가지고 화재온도를 추정한다.

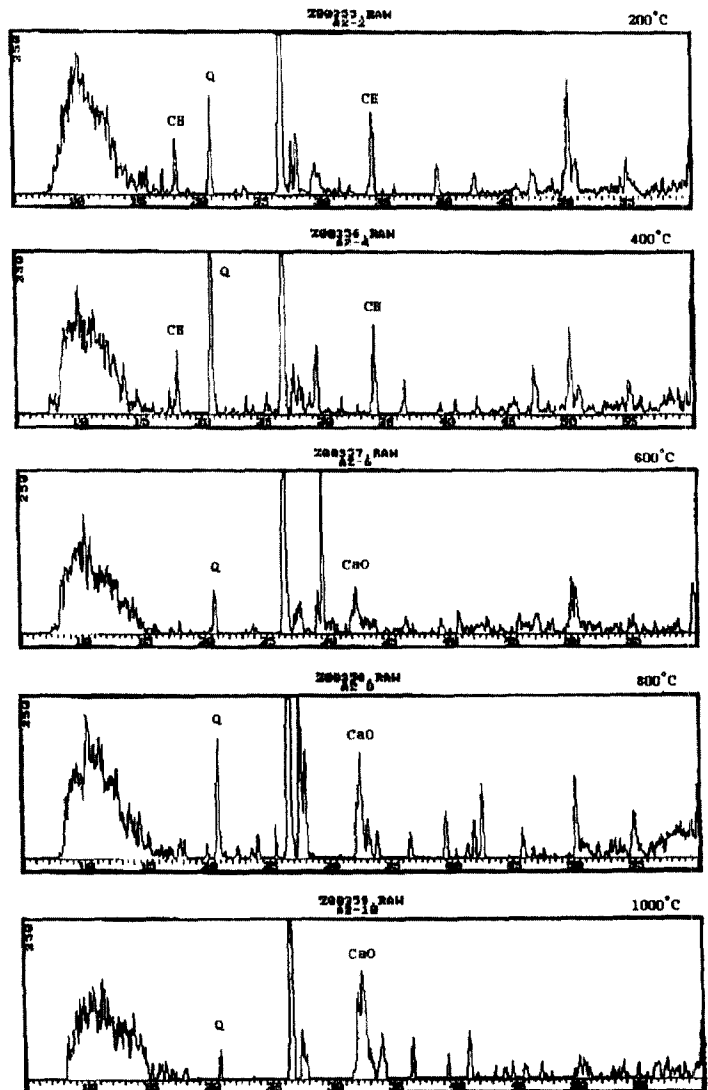


그림 10 건전부위 콘크리트의 가열온도에 따른 X-Ray 회절분석

5. 맺음말

현재 각 현장이나 실내시험에서 많이 활용되고 있는 각종 비파괴시험법의 적용에 있어서 일반적인 기술이라고 생각하기 쉬우나 이러한 기법은 객관적이고 신뢰성 있게 활용되기 위해서는 많은 경험과 테크닉이 절대적으로 필요하다고 본다.

더구나 표준규정에 의한 실내시험에서 실시되어지는 것 보다 환경조건이 열악하고 조건이 틀리는 현장 구조물에 적용한다는 것은 예기치 못한 어려운 상황에 접하는 경우가 종종있다.

향후 현장에서 적용했을 때 실내시험과 상이할 경우는 현장경험이 많은 연구자들과의 토의가 필요할 것이며 앞에서 언급한 내용은 기존의 보통 철근콘크리트 품질평가에 많은 도움이 되었으면 한다.

또한, 현재 건설되는 각종 구조물의 특성에 맞는 몇가지의 연구 업무가 수행되어져 보다 정확하고 신

뢰성 있는 구조물 평가가 이루어 지리라고 생각된다.

- 설계강도가 $300\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상의 고품질 콘크리트에 효율적으로 적용될 수 있는 비파괴 강도추정식의 도출

- 공장지대 하수시설 등 열악한 환경조건 및 오염이 많은 지역에서 공용되고 있는 콘크리트 구조물에서의 비파괴 강도추정식 도출

- 건설중이거나 건설된 시설물에 대하여는 시공당시 현장 품질을 고려한 시험과 병행하여 그 시설물에 적용할 수 있는 비파괴 강도 추정식의 도출

- 무엇보다도 중요한 것은 현장 품질관리 시험에 포함하여 현장조건과 동일한 많은 시험체(공시체)를 제작하여 해당 구조물의 현장에서 보관 관리하도록 하는 것이 필요하며, 향후 수년이 경과된 후에도 현장 구조물의 품질관리의 상태를 평가하는데 효율적이고 정확성과 신뢰성이 유지될 것으로 생각된다. 