

## 화재 가열 환경하에 있는 콘크리트 중의 열·수분 이동 측정 시스템

Measuring System of Heat and Moisture Movement in Concrete under Fire Environment



고정원\*  
Jeong-Won Ko



박상준\*\*  
Sang-Joon Park



오보환\*\*\*  
Bo-Hwan Oh

### 1. 머리말

콘크리트는 다공질 재료이며 함수상태를 유지하고 있다. 이처럼 콘크리트에 존재하는 수분은 콘크리트의 역학적 성능 및 열적 성능에 크게 영향을 미치는 것으로 지적되어 왔다.

일반적으로 상온시 콘크리트의 수분 거동은 외부 환경에 의해서 크게 변화한다. 예를들어, 외기의 온도 및 습도의 변화에 따라 콘크리트부재에 온도 및 습도구배가 발생함으로써 수분 확산이 일어난다. 이러한 콘크리트 중의 수분 확산은 콘크리트의 강도 및 물질 확산 속도에 영향을 미치며, 탄산화 및 염해 등의 내구성에도 큰 영향을 미치게 된다. 수분 확산 속도가 빠르게 발생할 경우, 콘크리트부재의 건조수축 변형이 발생하기 쉬우며, 건조수축균열의 진전 등 내구성능저하에 큰 영향을 미치게 된다.

특히, 화재 가열 환경과 같이 급격한 온도 상승이 발생할 경우, 콘크리트 중의 수분 거동은 상온에서와는 다르게 수분의 증발이 급격하게 일어나며, 수분 이동 측면에 있어서도 수증기압의 압밀 유동 현상이 발생하여 수분 이동의 가속화에 의해 콘크리트의 열전도 특성에도 크게 영향을 미치게 된다.

이처럼, 화재 가열 환경하에 있는 콘크리트 중의 수분 이동 속도를 지배하는 내부 증기압의 형성은 조직의 치밀도에 의해서 다르게 나타난다. 즉, 조직의 치밀도의 차가 수분 이동 저항의 지표가 되며, 조직이 치밀하지 않을수록 수분 이동이 활발하게 일어나며, 반대로 조직이 치밀할수록 수분 이동이 억제됨으로서 내부 증기압이 급격하게 증가한다. 이와 같이 내부 압력이 급격하게 증가하는 경우, 공극중 수분의 상변화에도 관계되어 내부에너지의 증대로 연결되며, 결국 폭렬에 의한 콘크리트의 파괴에까지 이어지는 위험 요소로서 작용한다.

화재 가열 환경하에 있는 콘크리트 중의 수분 이동은 외부 가열 조건에 의해 콘크리트의 표면부터 건조됨으로서 표면부와 중심부간에는 함수구배(습도구배)가 발생하며, 함수평형이 되기 위한 방향으로 수분 이동이 일어난다. 이러한 수분의 거동을 파악함으로써, 콘크리트 중의 내부 증기압의 형성 관계에 대한 구명이 가능할 것으로 생각한다.

따라서, 화재 가열 환경 조건하에 있는 콘크리트 중의 수분 거동을 파악하는 것은 콘크리트의 폭렬 메커니즘을 구명하기 위해서 선결되어야 할 중요한 과제라고 할 수 있다.

이상과 같은 문제점을 해소하기 위하여, 본 고에서는 화재 가열 환경하에 있는 콘크리트 중의 열·수분 동시 이동 측정 방법 및 측정 결과에 관하여 소개하고자 한다.

### 2. 종래의 함수율 측정 방법

종래의 콘크리트 중의 수분 측정법에는 크게 분류하여 상대습도 측정법, 중량 변화 측정법 및 전기저항 측정법의 3가지 방법으로 분류할 수 있다.

#### 2.1 콘크리트 중의 상대습도를 이용한 측정법

콘크리트 중의 자유수량에 따라서 상대습도가 변화하는 것을 이용하여 상대습도의 대소로부터 간접적으로 수분량의 다소를 평가하는 방법이다.

그러나 이 방법은 콘크리트 중의 자유수의 절대량을 알 수 없고 콘크리트부재의 수분 분포를 세부적으로 파악하는 것이 어려우며, 이러한 재질의 소재에서는 내열성을 가지지 못하므로 100℃ 이상의 고온에서의 적용이 불가능 하다. 이와 같은 상대습도의 측정은 감습소자의 구성 재료와 크기가 측정의 감응속도에 영향을 미치며, 측정 가능한 콘크리트 중의 상대습도와 평행 상태가 되기까지 약 20분 정도 소요되며, 급격한 수분량의 변화에도 대응하지 못하는 제약이 있다.

\* 정희원, (주)대우건설 기술연구원 건축연구팀 전임연구원  
jwko@dwconst.co.kr

\*\* 정희원, (주)대우건설 기술연구원 건축연구팀 선임연구원

\*\*\* 정희원, (주)대우건설 기술연구원 건축연구팀 수석연구원

## 2.2 콘크리트의 질량 변화를 이용한 측정법

콘크리트 중의 자유수량에 따라 변화하는 중량을 측정함으로써 수분양의 다소를 평가하는 방법이다. <그림 1>은 양생 방법의 차이에 따른 질량 감소를 나타낸 결과이다<sup>1)</sup>.

이 방법은 건조에 의해 방출되는 콘크리트 중의 자유수량의 변화를 중량 변화로서 알 수 있으나, 건조에 의해 손실된 자유수량을 정량적으로 파악할 수는 없다. 또한, 질량 측정이 가능한 범위의 소형 시험체 크기에 그 사용이 국한되며, 실구조부재 내부의 함수 분포를 파악하는 것은 불가능하다. 통상, 콘크리트의 건조수축, 크리프 등 소형 시험체에 적용되는 시험에 있어서의 수분량 평가는 대부분 이러한 질량 변화를 이용한 측정 방법을 사용하여 평가하고 있다.

## 2.3 콘크리트의 전기저항을 이용한 측정법

함수 상태의 콘크리트가 전해질 재료와 같은 전기적 성질을 보유하고 있다고 가정하여, 자유수의 다소에 따라 변화하는 콘크리트의 전기저항 값으로부터 함수율을 추정하는 방법이다.

이 방법은 콘크리트 중에 소형의 전극단자를 매설함으로써 실부재 단면 내의 수분 분포를 상세히 측정하는 것이 가능하며, 최근에는 전극단자에 내열성 재료를 사용함에 따라 상온으로부터 200℃ 이상의 온도까지의 폭넓게 적용 가능성이 확대되고 있다<sup>2)</sup>. 더욱이 데이터 로거 등의 자동 기록 장치에 의해서 경시적 변화 및 급속하게 변화하는 함수율의 측정도 가능하게 되었으며, 실용적인 면에서도 그 효과가 크게 기대되고 있다.

이상과 같이 콘크리트 구조체의 함수율 측정법을 이용한 기존의 연구를 살펴본 결과, 부재 내부의 함수율 분포 측정 및 상온에서부터 고온 범위까지 폭넓게 적용하기 위하여 전극법에

의한 함수율 측정 방법이 가장 합리적인 것으로서 판단된다.

## 3. 전극법에 의한 콘크리트의 함수율 측정 검토

전극법을 이용하여 콘크리트 중의 함수율을 파악하기 위해서는 전극간저항이 함수율과 온도에 크게 의존하는 것을 사전에 고려할 필요가 있다. 사전에 교정 시험을 행하여 함수율, 온도 및 전극간 저항과의 관계를 명확하게 설정하여 실제 콘크리트 시험체의 함수율 분포를 파악한다. 또한, 철근콘크리트의 경우 철근과 같은 금속재료가 매설되어 있기 때문에 철근이 전극간저항 값에 미치는 영향에 대하여 사전 검토를 행할 필요가 있다.

### 3.1 콘크리트 중의 철근 및 전극의 매설 간격이 전극간저항에 미치는 영향

이와<sup>2)</sup>는 전극의 매설 간격 및 철근 등 다른 물질의 존재가 측정에 미치는 영향에 대하여 검토를 행했다. <그림 2>와 같이 콘크리트 중의 자유수를 가정하여 Ca(OH)<sub>2</sub>용액(물 1L 당 0.82g 용해)에 전극을 넣고, a)전극과 전극, b)전극과 철근, c)전극과 염화비닐용기와의 거리를 3 mm~50 mm까지 변화시키고 동시에 Ca(OH)<sub>2</sub>용액 온도를 20℃, 65℃의 2수준으로 변화시켜 온도의 영향에 대하여 검토하였다.

그 결과, <그림 3>과 같이 전극간저항 값과 a), b), c)의 거리 관계에서 모두 전극간저항 값에 영향을 받지 않았으며, 모든 조건에 있어서 용액온도 20℃에서 약 114Ω, 65℃에서 약 88Ω으로서 일정한 값을 나타내었다. 즉, 콘크리트 중의 철근은 전극간저항 값에 영향을 미치지 않으나, 온도에는 민감하게 영향을 받고 있는 것으로 보고되었다.

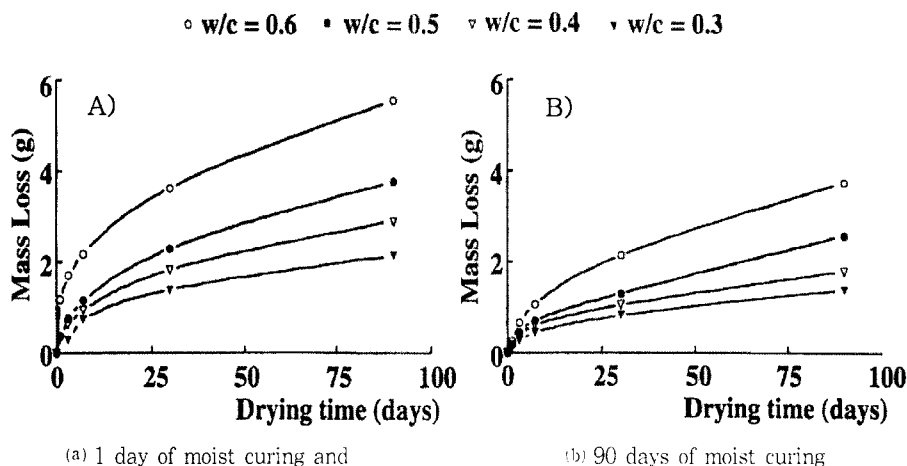


그림 1. 건조환경에 따른 콘크리트의 질량 감소<sup>1)</sup>

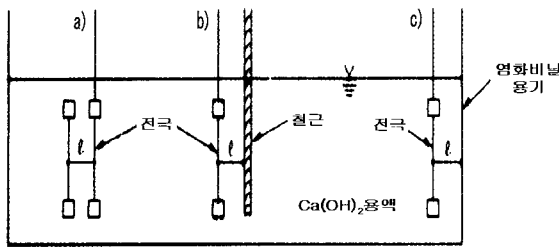


그림 2. 전극과 인접한 이질재료의 영향<sup>2)</sup>

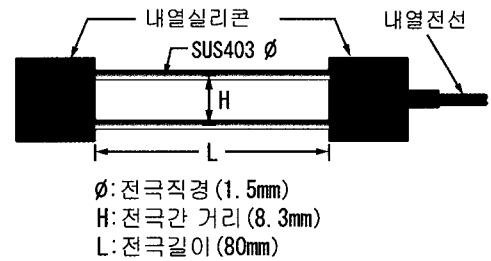


그림 4. 상대습율 측정용 센서

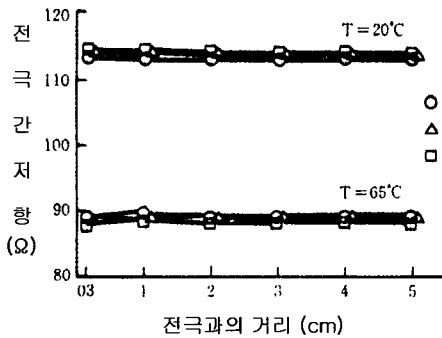


그림 3. 전극간저항 값의 온도의존 관계<sup>2)</sup>

및 80 MPa로써, 크기 40 × 40 × 160 mm의 교정용 시험체를 각각 강도별로 6개씩 제작하였다. 또한, 상대습율을 0% ~ 100%까지 20%의 간격으로 5단계로 분리 조정하여 수분증발에 따른 질량감소가 발생하지 않도록 알루미늄테이프를 봉하고 그 표면을 내열실리콘으로 코팅하였다.

콘크리트의 습율을 상대습율로서 나타낸 이유는 동일한 포수상태에서도 각 시험체에 따라 차이가 발생하므로 교정곡선을 작성하기 위한 각각의 교정용 시험체의 습율 차가 전극간 저항값에 영향을 미치는 것을 고려하여, 수분의 함유 상태를 직접적으로 나타내기 위함이다. 상대습율의 조절 방법은 다음의 식 (1)에 의해서 계산하였다.

#### 4. 전극법의 적용 시험 및 교정 시험의 수행 방법

##### 4.1 콘크리트 중의 상대습율 측정 시험

본 기술의 적용 시험에서는 화재 가열 환경하에 있는 콘크리트 중의 열·수분 거동에 대한 연속적인 파악을 위해 전극법을 적용하였다. 특히 100°C가 넘는 고온환경하에서는 전극 및 전선 등 측정 장치의 내열성이 요구된다. 따라서 상온에서의 적용을 대상으로 高橋 등<sup>3)</sup>이 제안한 방법을 수정하여 고온에 적용 가능하도록 250°C 까지 내열 성능을 확보하는 재료를 사용하였다. 다음의 (그림 4)에 나타난 전극을 콘크리트 중에 매설하였으며, LCR메타를 이용하여 전극간저항 R(Ω)값을 측정하였다. 측정은 분극 발생을 피할 목적<sup>4)</sup>으로 인가전압을 교류 1V, 주파수는 1kHz로 측정했다. 전극의 소재는, 방식성 및 내열성이 우수한 SUS403을 이용하였으며, 전극 양측 선단의 절연처리로서 내열실리콘(내열온도 350°C) 및 전선은 내열성이 우수한 테프론코팅된 전선(내열온도 250°C)을 사용하였다. 또한, 온도의존성을 고려하기 위해서 전극에 열전대를 부착하여 전극간저항의 온도의존성 검토가 가능하도록 제작하였다.

##### 4.2 전극법의 교정 시험

전극법에 의한 측정은 콘크리트 중의 전극간저항 값을 콘크리트의 상대습율로 환산하기 위하여 설계기준강도 40 MPa

$$W_r(\%) = \frac{\text{(기건함수율)}}{\text{(포수시의 함수율)}} = \frac{W_e - W_d}{W_s - W_d} \times 100 \quad (1)$$

여기서,  $W_r$ : 상대습율,  $W_s$ : 포수시험체질량,  $W_e$ : 기건시험체질량,  $W_d$ : 절건시험체질량

한편, 설정한 상대습율에 맞추기 위한 교정용 시험체의 함수조절을 수행하는 과정에서 표면부로부터의 증발에 따른 함수구배가 발생된다.

이처럼 교정용 시험체의 표면부와 중심부의 함수율 차이가 발생할 경우 임의의 상대습율에 있어서의 전극간저항값에 오차가 생길 수 있다. 그래서 표면코팅한 교정용 시험체의 표면부와 중심부가 함수평형에 도달하도록 2일간 40°C의 온도로 가열한 후, 온도 20°C, 상대습도 60%의 항온항습실에 방치하여 시험체의 질량감소가 없도록 하고 전극간저항이 일정한 값을 유지할 때까지 측정함으로써 함수평형에 도달하는 것을 확인하여 교정용 시험체의 상대습율을 조절하였다.

또한, 100°C가 넘는 환경하에서의 전극간저항의 온도의존성을 고려하기 위해서 상대습율을 조절한 교정용 시험체를 이용하여 가열 시험을 진행하였다. 그러나 100°C가 넘는 고온이력을 가함으로서, 일반적인 코팅만으로는 내부로부터 증가하는 수증기압에 견딜 수 없으므로, 一瀬 등<sup>2)</sup>이 제안한 고온·고압용기를 사용하여 20°C ~ 175°C까지 20°C 간격으로 가열을 하였

다. 다음의 <그림 5>는 함수상태에 있는 콘크리트의 온도의존성을 고려하기 위한 교정용 시험체의 각 온도에서의 전극간저항값을 구하는 방법을 개념도로서 나타낸 것이다.

각 온도에서의 전극간저항을 구하는 과정에서 표면부로부터 수분 이동에 크게 영향을 받게 될 것이 예상되므로, 본 연구에서는 각 온도에서의 전극간저항이 일정 값을 나타낼 때까지 온도를 유지하였으며, 그 때의 전극간저항을 그 온도에 대응하는

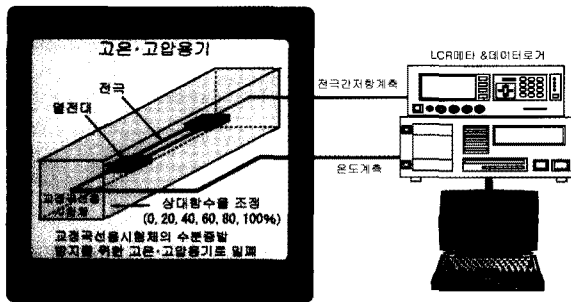
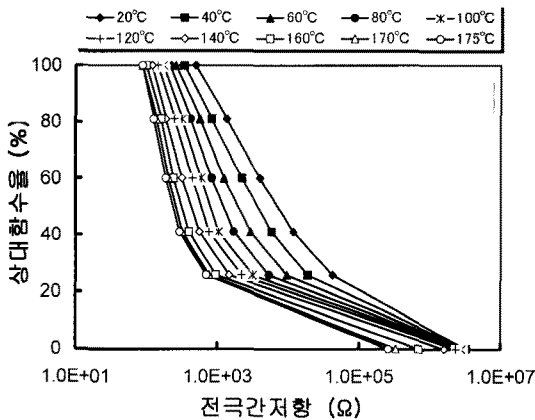
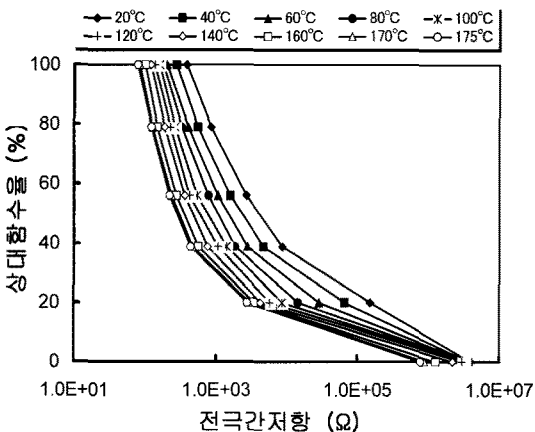


그림 5. 교정곡선 작성용 시험체 및 측정 방법



(a) 설계기준강도 40 MPa



(b) 설계기준강도 80 MPa

그림 6. 교정곡선 작성용 시험체 및 측정 방법

평균값으로서 구하여, <그림 6>에 나타난 교정곡선을 작성하였다. 이러한 방법에 의해서 실제 가열 시험으로부터 얻어진 각 온도에 대응하는 전극간저항 값의 오차를 제어할 수 있을 것으로 기대된다. 작성된 교정곡선을 이용하여 각각의 온도곡선에 대하여, 식 (2)에 나타난 회귀식을 구하여 실제의 가열시험체에서 측정된 전극간저항값을 이용하여 상대함수율로 환산하였다.

$$y = ax^{-b} \quad (2)$$

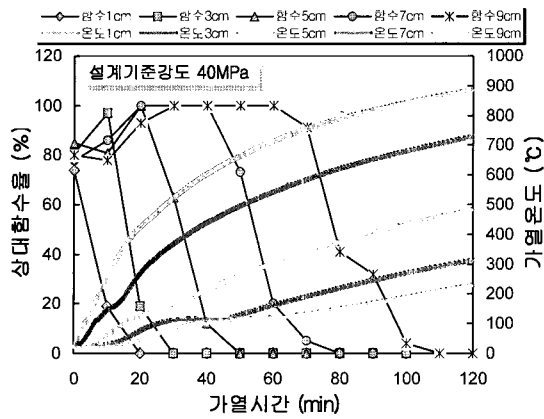
여기서,  $y$ : 상대함수율(%),  $x$ : 전극간저항( $\Omega$ ),  
 $a, b$ : 각각의 온도에 대응하는 실험정수

### 5. 화재 가열 환경하에 있는 콘크리트 중의 열·수분 이동

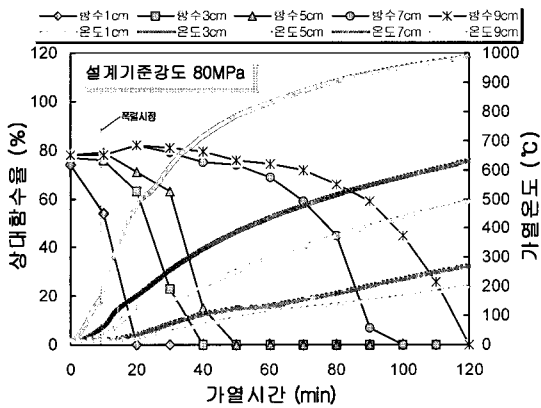
화재 가열 환경과 같은 급격한 온도 상승에 의한 콘크리트 중의 열·수분 이동 현상을 정량적으로 파악하기 위하여 전극법을 적용하였으며, 그 결과 콘크리트 중의 온도 및 함수분포의 모니터링이 가능하게 되었다.

<그림 7>은 화재가열을 받고 있는 콘크리트 중의 경시변화에 따른 온도 및 함수분포에 대한 측정 결과를 나타내었다. 온도구배는 강도가 높을수록 내부로의 열전달속도가 늦어지는 경향을 보였다. 이러한 결과는 일반적으로 조직 구조가 밀실한 고강도 콘크리트의 열전달속도가 빠르다고 인식될 수 있으나, 이는 수분의 거동을 고려하지 않은 것으로서 함수상태의 콘크리트에서는 조직이 치밀할수록 수분의 이동 및 증발이 억제되며, 고온·고압환경하에 있는 수분의 열용량 증대 및 증발잠열에 에너지가 크게 소비됨으로 인한 결과라고 할 수 있다. 설계기준강도 80 MPa의 시험체에서는 가열시간 약 9분경에 발생된 폭발의 영향으로 깊이 10 ~ 30 mm부근에서 설계기준강도 40 MPa보다 큰 온도구배가 발생되었으나, 깊이 30 ~ 50 mm부근에서는 온도정류현상<sup>5)</sup>이 확인되어, 전체 범위에 있어서 표면부와 중심부 간의 온도구배가 크게 나타남을 알 수 있다. 설계기준강도 40 MPa의 시험체에서 등간격의 온도구배를 보인 것은 외부로의 수분증발과 수증기압의 상승에 따른 압밀유동흐름 현상이 쉽게 발생하여 액상수와 수증기의 동시이동이 활발하게 이루어져 고온수의 이동과 함께 현열이 중심부로 유입된 것으로 분석된다.

한편, 화재 가열 환경하에 있는 콘크리트 중의 상대함수율 변화는, 설계기준강도 40 MPa의 경우, 온도의 상승과 함께 가열면 부근인 깊이 10 mm에서는 건조속도가 빠른 속도로 진행됨과 동시에 내부로의 수분이동이 확인되었으며, 깊이 30 mm 이상에서는 상대함수율이 증가하여, 깊이 50 mm이상의 상대함수율이 100%까지 도달하는 경향을 보였다. 이는 급격한 온도상승에 따른 콘크리트 표면부의 수증기압이 증가하여, 그에



(a) 설계기준강도 40MPa



(b) 설계기준강도 80MPa

그림 7. 교정곡선 작성용 시험체 및 측정 방법

따른 압력구배가 구동력으로 작용하여 높은 에너지를 포함하고 있는 수분이 내부 방향으로 이동<sup>6)</sup>하였기 때문인 것으로 분석되었다. 그러나 설계기준강도 80MPa의 경우에는 수분증발에 의한 표면부에서의 급격한 압력 상승에도 불구하고, 현저한 수분이동은 확인되지 않았다. 또한, 폭발 발생에도 불구하고 설계기준강도 40MPa의 콘크리트에 비하여 표면부의 건조속도가 늦은 결과를 보였다. 이처럼, 콘크리트 세공 조직의 치밀도가 높아짐에 따라 수분이동이 억제됨과 동시에, 유동억제 효과에

의한 급격한 압력증대 현상이 콘크리트 표면부의 폭발에 크게 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다.

## 6. 결 언

최근 초고층 콘크리트 구조물에서의 화재 안전성이 부각되고 있는 가운데, 콘크리트의 폭발현상을 구명 및 제어하기 위해서 세계 각국의 연구자들로부터 많은 관심을 기울이고 있다. 그러나 1,000°C 가까운 화재 환경하에서의 측측이 곤란한 이유로 정상적인 실험 평가에 머물러 있었던 것이 현실이다.

본 전극법을 이용하는 기술을 적용함으로써, 화재 환경하에 있는 콘크리트 중의 열·수분 거동에 대하여 정량적인 파악이 가능해짐에 따라 콘크리트의 폭발메커니즘의 구명에도 한발 가까이 다가설 수 있을 것으로 기대된다. 또한 지속적인 개발을 추진함으로써 간편하고 정확도를 보다 높이는 기술 연구를 진행중이며, 이를 통하여 콘크리트의 폭발현상 제어 및 구조내력의 손실을 억제할 수 있는 기술 개발을 추진할 계획이다. □

## 참고문헌

1. Beyea, S. D. etc., "Magnetic Resonance Imaging and Moisture Content Profiles of Drying Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol.28, No.3, 1998, pp.453~463.
2. 一瀬賢一, 他, "高温加熱されるコンクリート中の含水率測定法", 大林組技術研究所報, No.32, 1986.
3. 高橋久雄, 他, "電極法による含水率の測定に関する検討結果", 大林組技術研究所報, No.26, 1983.
4. 大岸左吉, 他, "セメント硬化体の電気抵抗と電気容量に及ぼす測定條件の影響", *コンクリート工學年次論文報告集*, Vol.12, No.1, 1990.
5. 原田和典, 他, "コンクリート壁の耐火性能に及ぼす調合と含水率の影響", *日本建築學會構造系論文集*, No.481, 1996.
6. Bažant, Z. P., "Pore Pressure in Heated Concrete Walls : Theoretical Prediction", *Magazine of Concrete Research*, Vol.31, No.107, 1979, pp.67 ~ 76.

## ◇ 학회지 특집 예고 ◇

특집 기사에 집필을 희망하시는 회원은 특집주간에게 연락 바랍니다.

월 호	특집 주제	특집 주간	원고 마감
2008년 01월호	건설교통기술 국가R&D 추진 전략 및 콘크리트 관련 연구사업	양인환(한국건설교통기술평가원 팀장) ihyang@kictep.re.kr	2007년10월30일
2008년 03월호	저형고 장경간 콘크리트 교량 구조 시스템	박영하(한국도로공사도로교통기술원 책임연구원) younghp@freeway.co.kr	2007년12월30일
2008년 05월호	플랫슬래브 고층 건물 구조 시스템 설계 및 시공 기술	이현호(동양대학교 건축소방행정학과 교수) hlllee@phenix.dyu.ac.kr	2008년02월29일