

## 중성자 라디오그래픽을 이용한 콘크리트균열부의 자유수거동에 관한 연구

Quantification of Water Penetration into Concrete Through Cracks by Neutron Radiography



박기봉\*  
Ki-Bong Park

본 논문은 일본 시멘트·콘크리트논문집 No. 61에 'Quantification of water penetration into concrete through cracks by neutron radiography'의 제목으로 M. Kanematsu, I. Maruyama, T. Noguchi and H. Iikura가 발표한 논문을 요약한 것이다. 본 논문은 우수논문상을 수상하였다.

### 1. 서론

콘크리트중의 수분이동은 시멘트 수화현상, 염화물이온 등 열화인자의 물질이동, 동결융해, 알칼리 골재반응, 철근부식 및 누수현상 등 철근콘크리트조 구조물에서 고려해야할 주된 현상과 밀접히 관련되어 있다. 철근콘크리트구조물에 발생하는 균열은 수분 및 열화인자의 이동을 용이하게 하여 구조체의 누수저항성 및 내구성에 커다란 영향을 미친다. 현재 통상의 설계조건하에 있어서 균열은 불가피함으로 균열이 물질이동에 미치는 영향을 파악하는 것은 중요하며, 특히 균열중의 수분이동은 직접누수에 연관되며 또한 철근부식에 필요한 수분의 공급원이 되므로 균열의 영향을 평가하는데 중요하다.

한편 콘크리트중의 수분상태 측정에는 단지 시험체 질량변화를 측정하는 수법이 많이 이용되어왔으나 수분분포 등 국소적인 수분상태를 추적하는 것은 곤란하다. 또한 질량법 이외에 다공질의 세라믹<sup>1)</sup> 및 흡습성의 고분자막 등을 감지기로 하는 습도센서를 매설하는 방법, 미리 매설한 전극을 통해 콘크리트의 전기적성질을 이용해서 측정하는 방법<sup>2)</sup> 등이 일반적이다. 그러나 이러한 매설방법을 이용해도 균열에 의한 결함부위, 골재 및 철근근방 등으로 대표되는 국소부위에 있어서 수분거동의 실태를 정확히 추적하는 것은 곤란하다<sup>3, 4)</sup>.

중성자 라디오그래픽(Neutron Radiography)은 X선 라디오그래픽과 같이 비파괴가시화기술의 하나로 중성자가 물질과

접촉할 때 원자핵과 중성자의 상호작용에 의해 발생하는 감쇠특성의 차를 이용해서 피사체의 투과화상을 얻는 방법이다. 지금까지 시멘트화학, 콘크리트 공학 분야의 적용사례는 산발적으로 시행되었으나 최근 그러한 연구보고사례가 증가하고 있다<sup>5)</sup>.

본 연구는 균열을 가진 콘크리트중의 수분거동을 명확히 하는 것을 목적으로 중성자 라디오그래픽에 의한 콘크리트중의 자유수 정량화방법으로 질량 감쇠율을 이용한 수법을 제안한다. 또한 제안수법에 의해 콘크리트에 인공적으로 만든 균열부 근방의 수분거동을 정량화하고 그 거동에 관해 고찰한다.

### 2. 중성자 라디오그래픽에 의한 자유수 정량

#### 2.1 장치개요

중성자 라디오그래픽 측정은 일본 원자력연구개발기구 JRR-3M 실내에 설치된 열중성자 라디오그래픽 장비실(TNRF; thermal neutron radiography facility)에서 수행된다<사진 1>.

본 장치는 열중성자선을 이용한 라디오그래픽장치로 촬영면에 있어서 열중성자flux는  $1.2 \times 10^8$  (n/cm<sup>2</sup>/sec)이다. 라디오그래픽의 촬영에 사용된 냉각형CCD카메라의 취득 화소수는  $1,008 \times 1,024$  pixel(14 bits)이며, 본 연구에 사용된 105

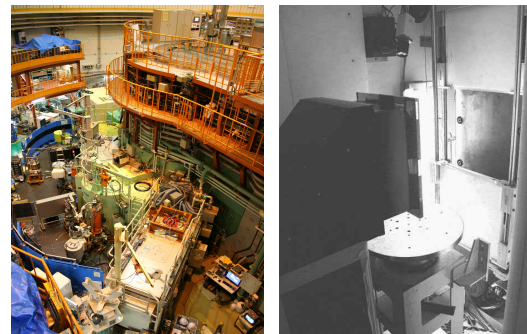


사진 1. JRR-3M and TNRF

\* 정희원, 강원대학교 건축학부 교수  
kbpark@kangwon.ac.kr

mm렌즈와 조합하는 것에 의해 공간해상능은 대략 100 μm/pixel이다.

2.2 촬영방법

<그림 1, 2>는 TNRF의 개념 및 콘크리트 촬영화상의 일례를 각각 나타낸다. 그림과 같이 시료에 조사(照射)된 중성자의 일부는 시료중의 대부분의 수소원자와 상호작용으로 감쇠하며, 잔여분은 시료를 투과하여 시료뒷면의 형광컨버터상(6LiF/ZnS:Ag)에 도달한다. 컨버터에 도달한 중성자는 가시광으로 변환되어 2장의 밀러를 사용해 냉각형CCD카메라에 의해 유도되어 촬영된다. 중성자는 대부분 수소원자에 의해 차단되므로 얻어진 화상은 수소원자의 존재에 대해서 바로 영희(影繪)와 같은 상(像)을 맺는다. 여기서 얻어진 화상의 휘도정보를 이용하여 광량과 중성자강도와와의 상관관계로부터 시료의 중성자투과율을 구해 대상물의 물질량으로 환산한다.

2.3 중성자투과율 산정

상기측정에 의해 얻어진 촬영화상에 대하여 아래의 수순으로 노이즈를 제거해 중성자투과율을 얻는다. 본 수순은 CCD카메라를 이용한 고정도해석에 일반적으로 이용되는 수법이다.

2.3.1 미니멈필터처리

냉각형CCD카메라는 CCD소자가 방사선감수성이 강하므로 실제로 얻어진 화상에는 화이트스팟이라 불리는 노이즈가 발생한다. 따라서 연속 촬영한 여러 장의 화상을 이용하여 각 화상의 동 픽셀의 화소 값을 비교하고 최소치를 채용하는 처리(미니멈필터처리)를 실시하여 화이트스팟 제거처리를 수행한다.

미니멈필터에 이용한 화상매수는 후술하는 질량감쇠율의 측정과 같은 정적인 측정에 있어서는 5장을 1조, 동적측정이 되는 균열중의 수분거동 가시화실험의 경우에는 3장을 1조로 한다. 즉 촬영화상 1매의 전송속도를 고려하면 정적인 측정에 있어서 1장의 촬영에 30초, 동적인 촬영의 경우에는 20초의 시간을 필요로 한다.

2.3.2 다크처리

CCD카메라에 의해 측정된 휘도정보에는 암(暗)전류치가 가산되어있기 때문에 중성자를 조사(照射)하지 않고 촬영한 화상(다크화상)의 수치를 빼어 다크처리를 수행한다.

2.3.3 쉬딩처리

최종적인 중성자투과율은 시료 없이 중성자를 조사(照射)해 촬영한 화상과의 비율(쉬딩처리)로 구한다.

2.4 자유수 정량회수법

일반적으로 입사(入射)중성자강도  $I_0$ 와 시료를 투과해서 측정된 중성자강도  $I$ 와의 사이에는 이하의 관계가 있다.

$$-\ln(I/I_0) = \Sigma \cdot \delta \tag{1}$$

여기서  $I/I_0$  : 중성자투과율(%)

$\Sigma$  : 결보기 거시적단면적[1/cm]

$\delta$  : 결보기 물질두께[cm]

여기서,  $I/I_0$ 는 2.3 (3)에 논한 쉬딩처리에 의해 얻은 중성자투과율 값이다. 또한 결보기 거시적단면적  $\Sigma$ 는 식[2]에 의해 주어진다.

$$\Sigma = \lambda \cdot \rho \tag{2}$$

여기서  $\lambda$  : 결보기 질량감쇠계수[cm<sup>2</sup>/g]

$\rho$  : 결보기 밀도[g/cm<sup>3</sup>]

이때, 결보기의 질량감쇠계수  $\lambda$ 는 화합물고유의 값으로 측정계에 일정한 값을 사용할 수 있다.

더욱이,  $\Sigma \cdot \rho$ 는 시료를 구성하는 원소와 화합물 특성치의

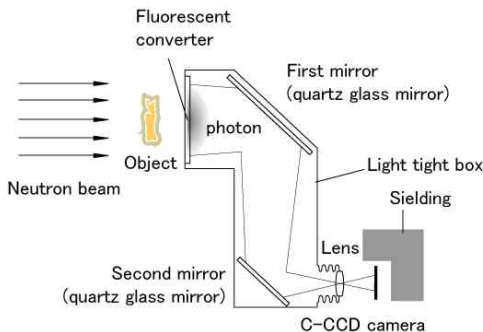


그림 1. Schematic illustration of TNRF

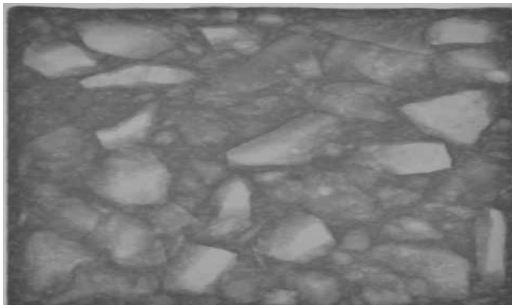


그림 2. Transmitted neutron radiograph of the concrete (w/c 50, 100x100x20mm)

중합이 성립하며, 콘크리트중의 자유수분에 착목하면 이하가 성립된다.

$$-\ln(I/I_0) = \lambda_c \cdot \rho_c \cdot \delta_c + \lambda_w \cdot \rho_w \cdot \delta_w \quad [3]$$

- 여기서  $\lambda_c$  : 콘크리트 질량감쇠계수
- $\rho_c$  : 콘크리트 밀도
- $\delta_c$  : 콘크리트 두께
- $\lambda_w$  : 자유수 질량감쇠계수
- $\rho_w$  : 자유수 밀도
- $\delta_w$  : 자유수 두께

여기서,  $\rho_w \cdot \delta_w$ 는 촬영화상중의 단위면적당 수분량  $w$ 로 고려하면, 식[4]에 의해, 초기상태로 하는 촬영화상과의 차분을 얻는 것으로 각 시점의 자유수 변화량을 추적하는 것이 가능하다.

$$\Delta(-\ln(I/I_0)) = \lambda_w \cdot \rho_w \cdot \Delta(\delta_w) \quad [4]$$

### 2.5 자유수의 질량감쇠계수 실측

기존의 연구에는 물의 질량감쇠계수로 3.48[cm<sup>2</sup>/g]이 주로 사용되었다. 그러나 질량감쇠계수는 측정계 일의의 값임을 고려하면 실험에 의해 구할 수 있다.

실험은 함수율, 시험체 두께를 파라메타로 한 페이스트 및 콘크리트의 중성자 감쇠율을 측정한다. W/C는 페이스트에 관해

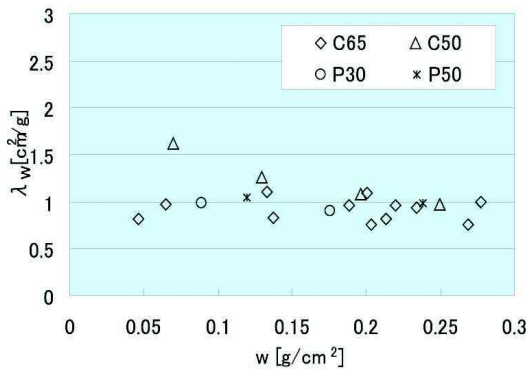


그림 3. Absorption coefficient of water

서 0.3과 0.5, 콘크리트에 관해서 0.5 및 0.65로 한다. 실험에 이용한 콘크리트의 조합을 <표 1>에 나타낸다. 함수율의 조정은 동일 배치의 복수 시험체를 이용하여 포수상태와 105°C 24 시간 건조후의 공시체 질량차에 의해 최대함수량을 구해 이 값을 기본으로 105°C 건조에 의해 초기함수율을 조정한다.

또한 콘크리트가 갖는 물성치  $\lambda_c \cdot \rho_c \cdot \delta_c$ 는 함수율 0% 시험체의 중성자감쇠율 평균값을 이용하여 각 시험체의 촬영화상 별로 식[3]을 적용하고  $\lambda_w$ 을 구해 수분의 질량감쇠계수의 측정 결과와 단위면적당 수분량과의 관계를 나타낸 것이 <그림 3>이다.

<그림 3>에 의해 물-시멘트비 및 골재의 유무, 수분량 등에 관계없이 수분의 질량감쇠율  $\lambda$ 는 거의 일정값이 되는 것이 분명해지며 그 평균값으로써 1.00(cm<sup>2</sup>/g)을 얻었다. 참고로 알루미늄용기를 제작해서 물만을 측정할 경우의 질량감쇠계수는 0.979(cm<sup>2</sup>/g)로 콘크리트 및 페이스트중 수분의 값과 거의 일치하였다.

이것은 본 측정계가 중성자 라디오그래픽에 의해 콘크리트중의 수분상태를 시험체 종류, 수분상태에 관계없이 정량 가능한 것을 의미한다.

### 2.6 시멘트페이스트량 정량

중성자 라디오그래픽에 의해 콘크리트 및 페이스트중 수분량  $w$ [g/cm<sup>2</sup>]의 정량이 가능하였다. 한편 수분거동의 수치해석 및 수분이동모델의 구축에는 상대함수율에 의한 평가가 필요하다<sup>6)</sup>. 이것은 수분이동 등을 기본할 경우, 각 개소의 수분량이 크게 증가하는 것이 아니므로 각 지점의 포수상태를 기점으로 수분상태를 추적하는 것이 요구되기 때문이다.

그러나 본 연구에서 타깃으로 한 해상능으로 수분의 국소성을 기본할 경우 자유수의 주요한 존재영역인 페이스트의 국소성을 평가할 필요가 있다.

수분거동의 기점이 되는 촬영화상을 이용하여 콘크리트중 단면내의 페이스트량 분포를 구하는 것을 검토한다. 식[3]과 같이 화합물에 의해 복합축을 가정하면, 1화소에 해당하는 콘크리트에 점유되는 페이스트량의 비율을  $\psi$ 로 하면 콘크리트의 겉보기 질량감쇠계수  $\lambda$ 는 잔 골재, 굵은 골재 및 동일 물-시멘트비 페

표 1. Mix Proportion

mark	w/c(%)	Air(%)	Proportions(kg/m <sup>3</sup> )				Super plasticizer (ml)
			Water	Cement	Aggregate		
					Fine	Coarse	
C65	65	4.0	185.0	284.6	869.6	925.4	**
C50	50	4.0	175.0	350.0	856.0	911.0	C*0.7%

이스트의 질량 감쇠율  $\lambda_s$ ,  $\lambda_A$ ,  $\lambda_p$ 를 이용해서 식[5]와 같이 표시할 수 있다.

$$\lambda \cdot \rho \cdot \delta = (\lambda_p \cdot \rho_p \cdot \delta_p) + (1 - \phi) \cdot (\lambda_s \cdot \rho_s \cdot \delta_s + \lambda_A \cdot \rho_A \cdot \delta_A) \quad [5]$$

단, 콘크리트중의 페이스트와 동일 물-시멘트비의 페이스트는 양생조건이 다른 경우, 결합수량의 관점에서 단순히 동일하지는 않다. 그러나 별도 각 재료의 원소함유율을 기준으로 겔보기 질량감쇠율을 추정할 때 결과에 있어서 그 영향도는 크게 변화하지 않으므로 여기서는 무시한다. <그림 4>에 페이스트체적비율  $\psi$ 와 겔보기 질량감쇠계수  $\lambda$ 와의 관계를 나타낸다.  $\psi$ 와  $\lambda$ 의 간에는 강한 상관관계를 보이며, 식[5]와 같이  $\lambda$ 는  $\psi$ 의 일차 함수로 표현하는 것이 가능하다.

이와 같이 미리 얻어진  $\psi$ 와  $\lambda$ 와의 관계를 이용하여 초기상태가 되는 촬영화상의 각 지점에 있어서 페이스트의 질량비율  $\psi$ 의 추정이 가능하다. 각 지점의 포수상태 겔보기 함수율이 각 지점의 페이스트량에 비례한다고 가정하면 콘크리트중의 각 지점의 상대함수율  $\Theta$ 는 식[6]에 의해 구해진다.

$$\Theta = \frac{w}{w} \cdot \frac{\bar{\psi}}{\psi} \quad [6]$$

여기서  $\bar{w}$  : 콘크리트 평균포수증량  
 $\bar{\psi}$  : 콘크리트 평균페이스트비율

### 3. 콘크리트 균열부 근방의 자유수거동

#### 3.1 실험개요

인공적으로 제작한 균열표면에 수분을 공급하여 2장에서 소개

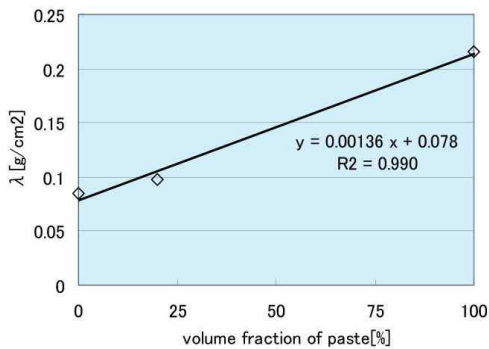


그림 4. Relationship between apparent absorption coefficient of concrete and volume fraction of paste

한 해석방법에 의해 균열부 근방의 수분거동을 정량화한다. 얻어진 결과를 이용하여 균열중의 수분이동 및 균열로부터의 수분공급 상황 각각에 관해 검토한다.

<그림 5>는 균열시험체의 개요를 나타낸다.

시험체크기는 100 × 100 × 20 mm의 방형으로 100 × 100 × 400 mm의 공시체를 타설 후 24시간에 탈형하여 28일간 수중양생한 후, 슬래브 절단기에 의해 절단해 얻는다. 그 후 105°C 건조에 의해 소정의 수분상태가 되도록 조습한 후 균열을 도입해서 시험에 사용한다.

콘크리트조합은 2장과 같으며 <표 1>을 이용한다. 균열시험체는 고강성 압축시험기를 이용하여 시험체 측면부터 휨파괴시켜 제작하고, 특히 균열이 발생할 때 내부가 파괴되지 않도록 배려한다. 크랙스케일을 이용하여 균열폭이 소정의 폭이 되는 것을 확인하며 균열측면을 에폭시 접착제로 수분이 누수 되지 않도록 표면 처리한다. 더욱이 수분의 증발을 방지하기 위해 투과율이 높은 알루미늄테이프를 전체를 밀봉한다. 또한 측면에는 수분공급용의 알루미늄제 수조를 작성하여 접착제로 고정한다.

시험체는 W/C가 0.50, 0.65의 2수준, 초기상대함수율을 0.30, 60%의 3수준, 균열폭을 0.05, 0.3 mm, 균열방향을 타설면(상면)에 대하여 수직(0.05 mm만, 수평)을 설정했다. 여기서 설정하는 상대함수율이란 포수상태와 105°C 건조와의 질량차를 기초로 하여 최대함수량을 구해 그 최대함수량에 대한 함수량의 비율로써 정의한다. 이후 시험체는 C[w/c] - [상대함수율] - [균형방향(V: 중, H: 횡)]로 표시한다.

측정은 시험체를 시료테이블에 설치한 후, 원격조작에 의해 시험체 측면에 설치한 알루미늄제 수조에 비닐튜브로 수분을 공급하여 주수직전부터 중성자 라디오그래픽의 연속촬영을 수행한다. 화상취득속도는 1화상당 약 8초로 30분까지 연속촬영을 행한다. 단 미니멈필터처리에 연속 3장의 사진을 이용함으로써 실제의 시간분해능은 1장당 24초가 된다.

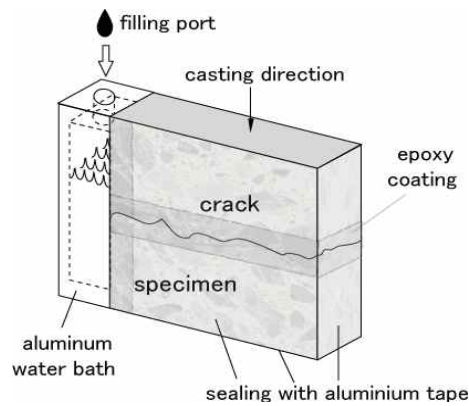


그림 5. Specimens' specifications

### 3.2 실험결과 및 고찰

콘크리트 균열중 수분 침투속도 및 균열로부터 매트릭스로의 침투현상은 2장에 제시한 정량화수법을 이용해 검토했다.

<그림 6>은 실험에서 얻어진 가시화화상의 일례를 나타낸다. 좌상에 표시한 주수직전의 투과화상을 기점으로 하여 각 시점의 차분(差分)화상을 얻었다. 이러한 차분화상은 수분거동만을 표시하고 있으므로 식[4]를 이용하여 수분량으로 변환이 가능하다.

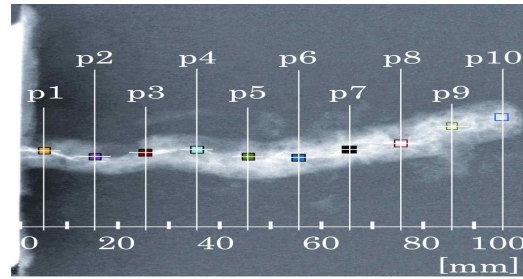


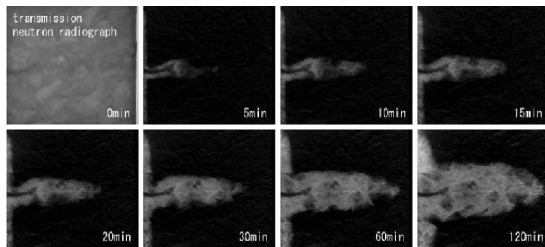
그림 7. Example of calculation point on the crack

#### 1) 균열중에 있어서 수분의 진입

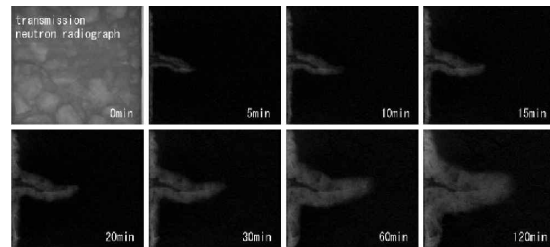
균열부의 주수면으로부터 깊이방향에의 수분침입상태를 분명히 하기위해 <그림 7>에 표시한 p1부터 p10의 균열상 각 해석점에 대한 수분량과 경과시간과의 관계를 유출하고

각 지점의 수분도달시각을 확인한다. 각 해석점은 수분공급면부터 5 mm 지점부터 10 mm 간격으로 정한다.

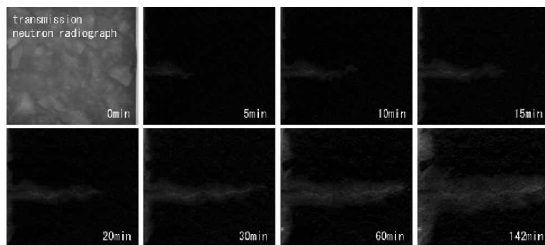
<그림 8>은 일례로 균열폭 0.5 mm, 초기함수율 0%에서 물-시멘트비와 균열방향을 변화시킨 경우의 단위면적당 수



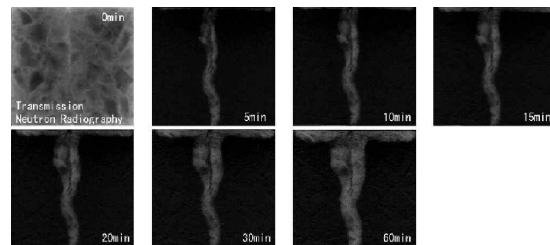
(a) W/C=50%, crack width 0.05 mm, relative water content 0%(105°C oven dry)



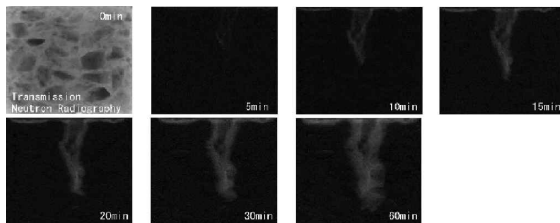
(b) W/C=50%, crack width 0.05 mm, relative water content 30%



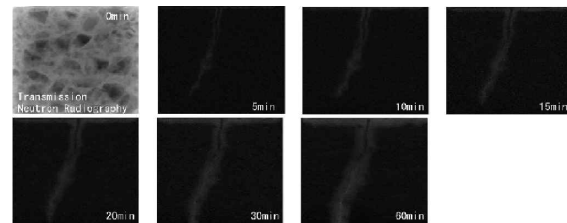
(c) W/C=50%, crack width 0.05 mm, relative water content 60%



(d) W/C=50%, crack width 0.05 mm, relative water content 0% (105°C oven dry)



(e) W/C=50%, crack width 0.05 mm, relative water content 30%



(f) W/C=50%, crack width 0.05 mm, relative water content 60%

그림 6. Visualized water penetration through crack and diffusion from the crack  
(water pool was attached on the left side of the specimen)

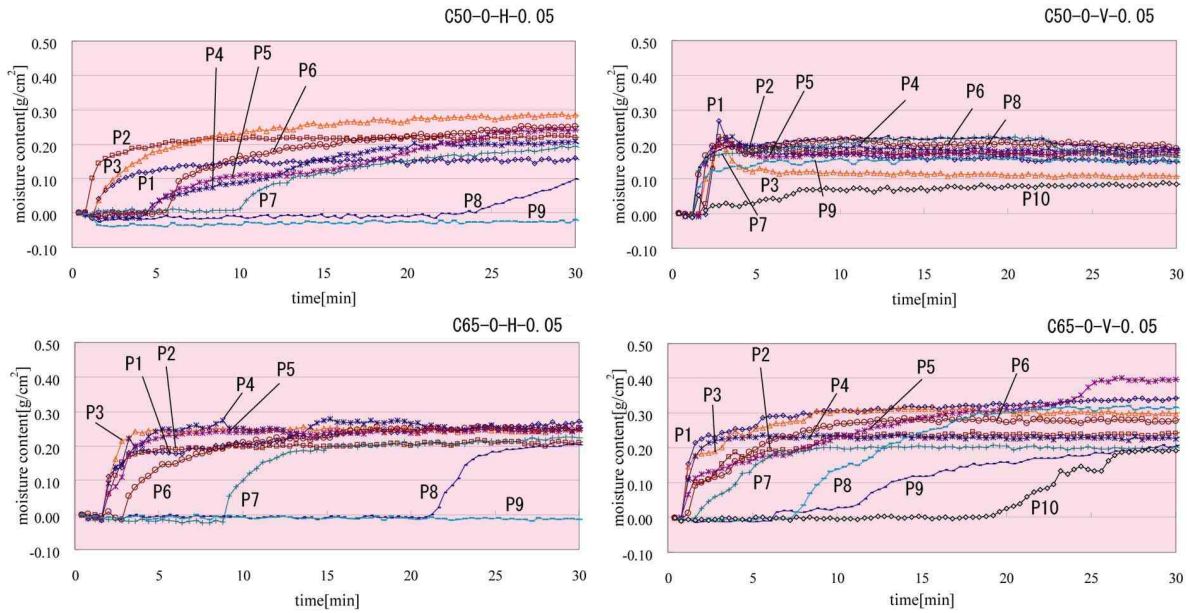


그림 8. Change of moisture content along the crack

분량과 주수시각개시부터의 경과시간과의 관계를 나타낸다. 균열중의 각 지점에 수분이 도달하면 수분이 급격히 상승하는 현상이 관측된다. 또한 종균열 시험체에 있어서는 주수와 거의 동시에 50 mm부터 60 mm 정도의 깊이까지 수분이 도달하는 것을 알 수 있다. 한편 주수직후에 침수하는 균열깊이는 횡균열에 있어서 20 mm부터 30 mm에 머무는 결과를 얻는다. 이러한 수분 도달에 관한 차이를 명확히 하기 위해 각 지점에 있어서 수분이 급격히 상승하는 시각을 수분도달 시간으로 정의하며, 또한 수분이 도달한 최선단지점의 깊이를 균열침투깊이로 정의해 각 지점의 수분도달시간을 지점으로 침수깊이와 경과시간의 관계를 얻는다. 주수시각을 0분으로 한 침투깊이와 경과시간의 관계를 <그림 9>에 나타낸다. 또한 <표 2>는 균열의 형상과 수분도달시간을 나타낸다.

상기 그림과 같이 어떠한 시험수준에 있어서도 깊이 25 mm까지는 주수 후 30초정도 한번에 침수하는 경향을 보이며, 30분 경과 후 깊이 80 mm까지 도달한다. 이것은

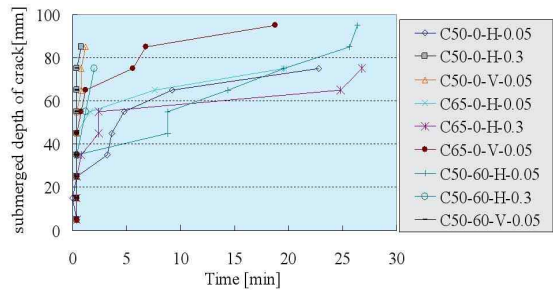


그림 9. Change of submerged depth of crack

일반적으로 말하는 내구설계상 제어해야 할 균열폭 0.3 ~ 0.5 mm에 있어도 철근 근방에 수분이 공급되는 것을 시사한다. 그러나 철근에의 수분도달거동에 관해서는 실제로 철근과 시멘트페이스트의 부착에 의해 철근 주위 균열폭이 작은 것, 균열발생에 의해 생기는 철근 주위의 코니컬크랙 및 프렉처프로세스 존이 형성되는 것 등의 영향을 종합해서 수분일산경향 및 수분공급능력의 철근부식에의 영향에 관해서 검토할 필요가 있다. 또한 중방향과 횡방향의 수분

표 2. Relationship between the shape of crack and moisture arrival time

W/C moisture content crack width direction	0.5						0.65		
	0%		60%				0%		
	0.05	0.3	0.05	H	V	H	0.05	V	H
3 cm arrival time(sec)	108.0	24.0	24.0	24.0	24.0	*	24.0	24.0	36.0
4 cm arrival time(sec)	204.0	24.0	24.0	276.0	24.0	36.0	24.0	24.0	96.0

공급시간은 종방향쪽이 빠르며, 또한 0.05 mm와 0.3 mm를 비교한 경우 0.3 mm의 횡방향 이동보다도 0.05 mm의 종방향 이동쪽이 빠른 경향을 나타낸다. 종래 누수의 한계치로 고려되고 있는 균열폭 0.05 mm에서도 균열 방향에 의해 중력의 영향 차가 나타나는 결과가 보고되어 있다.


2) 매트릭스층의 수분이동의 정량

콘크리트 균열부로부터 매트릭스로 침투하는 수분거동에 관해 정량화한다. 촬영화상중에 측정된 매트릭스 각 지점의 수분량은 각 지점의 그레이스칼에 따라 변화하므로 2장에서 서술한 수법에 의해 상대함수율을 구한다.

<그림 10>는 W/C = 0.5, 함수율 0, 30, 60%, 수평균열, 폭 0.05 mm의 균열에 관해서 수평방향에 있어서 단위 그레이스칼 상대함수율분포의 경시변화를 나타낸다. <그림 10>의 좌측은 우측화상중 백선에 싸여있는 영역에 대해서 각 지점 y축방향의 평균치를 변위에 대해 플롯화 한 것이다. 결과에 의해 초기함수율 0%의 경우 30분에 균열로부터

터 대략 15 mm까지, 60%의 경우 10 mm정도까지 수분 공급이 행해져 매트릭스의 수분이동은 상대함수율에 크게 의존하는 것을 알 수 있다.

4. 결론

- (1) 중성자 라디오그래픽에 의해 콘크리트 균열부 근방에 있어서 수분거동을 가시화·정량화하는 것이 가능하였다.
- (2) 중성자 라디오그래픽에 의해 콘크리트중 수분상태의 정량화수법을 제안했다. 콘크리트중의 수분의 질량감쇠율을 측정된 결과, 콘크리트중의 수분상태를 시험체 종류 및 수분상태와 관계없이 안정적으로 측정이 가능한 것에 의미가 있으며 콘크리트중의 수분상태의 정량화수법으로써 유효함을 나타내었다.
- (3) 균열중의 각 지점에 수분이 도달하면 수분이 급격히 상승하는 현상이 관측되었다.
- (4) 균열중의 수분이동에 관하여 가시화·정량화하여 균열폭, 균열방향 등 영향에 관해 명확히 했다. 그 결과 균열중의 수분거동에는 중력항의 영향이 크며, 중력항은 경우에 따라 균열폭의 영향보다도 큰 것을 알았다.
- (5) 균열부보다 매트릭스에 침투하는 수분거동을 가시화·정량화하여 매트릭스에서 수분거동은 상대함수율에 크게 의존하는 것을 명확히 했다. 

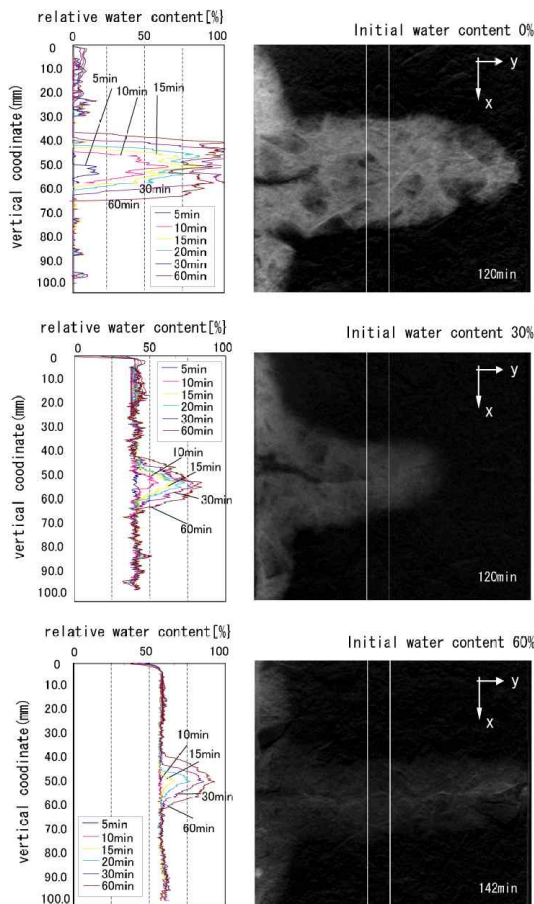


그림 10. Quantitative measurement of water penetration into concrete through cracks

참고문헌

1. Sakai et al., 매설세라믹센서의 전기적특성에 의한 콘크리트 함수율측정방법의 제안, 일본건축학회 구조계, No.498, 1997, pp. 13 ~ 20.
2. Hamada et al., 콘크리트내부의 함수량 측정, 시멘트기술연보, No.30, 1976.
3. Yasida et al., 균열부의 수분이동에 기초한 콘크리트에의 염화물침입에 관해서, Vol.26, No.1, 2004, pp. 879 ~ 884.
4. Sakai et al.: 소스텐레스전극을 이용한 콘크리트의 함수율측정, Vol.17, No.1, 2007, pp. 671 ~ 675.
5. Kanematsu et al., 중성자 라디오그래픽의 콘크리트공학분야에의 적용에 관한 연구동향, 콘크리트공학, 2007.
6. Sakada et al., 건조에 따른 콘크리트중의 수분일산과 건조수축에 관한 연구, 토목학회논문집, Vol.1315 1981, pp. 145 ~ 152.

담당 편집위원 : 박기봉(강원대학교) [kbpark@kangwon.ac.kr](mailto:kbpark@kangwon.ac.kr)