pISSN 1598-2033
eISSN 2233-5706
Journal of the Korea Institute of Building Construction, Vol. 11, No. 4
http://dx.doi.org/10.5345/JKIBC.2011.11.4.371
www.jkibc.org

콘크리트 흡수 수분확산계수 산정을 위한 실험 및 수치해석 모델 개발

Development of Testing and Analysis Model for Evaluation of Absorbed Water Diffusion into Concrete

박 동 천[1] 안 재 철[2*]

Park, Dong-Cheon[1] Ahn, Jae-Cheol[2*]

Department of Architecture and Ocean Space, College of Ocean Science and Technology, Korea Maritime University, Youngdo-Gu, Busan, 606-791, Korea [1]

Sangji Architecture Institute, Jung-Gu, Busan, 136-777, Korea [2]

Abstract

Concrete is affected by various deterioration factors, such as CO_2 and chloride ions from the sea, which cause carbonation and salt attack on concrete. These deterioration phenomena cause steel corrosion in RC structures. Although a great deal of research has been carried out in this area thus far, it is difficult to know the point at which corrosion will occur to a reinforced bar. As the diffusion of deterioration factors depends on the water content in concrete, it is imperative to assess the condition of absorbed water content. A mass measuring method was applied to calculate the absorbed water diffusion coefficient, as well as non-linear finite element method(FEM) analysis. As a result, it was found that W/C and unit water content in concrete mixture affect the diffusion coefficient decision.

Keywords : concrete, water absorption, water diffusion coefficient, compressive strength, finite element method(FEM)

1. 서 론

콘크리트는 다공질 재료로서 타설 직후부터 외부 열화인자의 영향을 받으며, 열화인자의 공극내 침투 정도에 따라 구조물의 성능이 결정되게 된다. 열화현상 중 대표적이라 할 수 있는 것이 중성화와 염해이며[1,2], 대부분의 철근 콘크리트 구조물은 외부의 이산화탄소와 비래염분이 콘크리트 내부로 침투하여 물리 화학적인 단독 또는 복합현상에 의해 철근부식을 유발하게 된다[3,4]. 이러한 대표적 열화현상은 다년간 세계 각국의 수많은 연구자들에 의해 대부분 규명되었지만 아직 실제 구조물의 수명산정에 정확히 반영하기는 무리가 있는 실정이다. 그 이유는 수분의 상태가 정확히 규명되어 있지 않은 상태에서 열화인자의 확산속도가 정의되지 않는 이유라 필자는 생각한다. Papadakis V.G.는 그의 연구[5]에서 이산화탄소의 확산속도를 상대습도와 공극량의 함수로 표현하였으며, Anna V. Saetta[6] 의 연구에서는 부분 포수된 콘크리트의 염소이온 확산에 대한 해석모델을 제안하고 있다. 하지만 모든 연구는 콘크리트 내부 수분의 상태가 파악된 상태라는 가정하의 연구결과로서 실제 구조물의 적용에 한계는 수분상태 평가의 부정확성에 기인한다고 볼 수 있다.

따라서 본 연구에서는 콘크리트의 수분 흡수 계수 산출을 통한 예측을 위하여 일련의 실험을 실시하고 수치해석을 실시함으로써 정확도 높은 1차원적 수분이동 현상 시뮬레이션 실현을 목표로 한다.

Received : April 25, 2011
Revision received : May 26, 2011
Accepted : June 14, 2011
* Corresponding author : Ahn, Jae-Cheol
[Tel: 82-51-410-4587, E-mail: jcan222@nate.com]
ⓒ2011 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

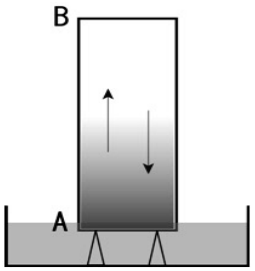

Figure 1. One-dimensional water diffusion concept. capillary potential (ψ) and gravity force potential (z)

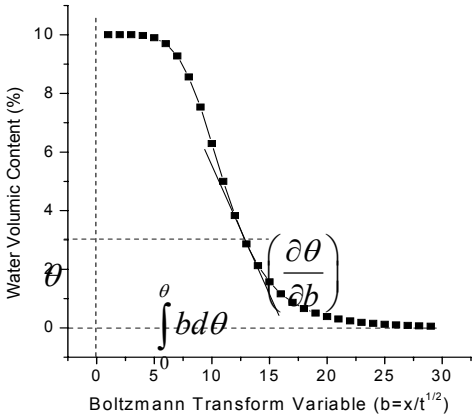

Figure 2 Concept diagram showing the relationship between Boltzmann transfer variable and relative water content ratio

2. 실험개요

2.1 측정원리

불포화상태의 수분의 플럭스는 액상의 수분 플럭스와 수증기 상태의 수분 플럭스로 분류할 수 있으며, 액상의 수분 플럭스는 균일 온도에서의 토탈 포텐셜에 의한 것(리차드 흐름)과 온도차에 의한 것(온도 모세관 작용 등), 용액농도차에 의한 것으로 분류할 수 있다. 수증기 상태의 수분 플럭스의 경우도 온도차에 의한 것(수증기 확산)과 균일 온도에서의 화학적 포텐셜 차에 의한 것(균일온도에서의 수증기 확산)으로 분류가능하다.

여기서는 등온의 조건을 가정한 연구이므로, 액상에서의 수분 플럭스인 리차드 흐름과 수증기 확산이 주요 수분이동의 구동력이 된다고 생각된다.

토탈포텐셜ϕ에 의한 수분이동 현상을 확산계수로서 구하는 측정법 중에 절단질량법의 모식도가 Figure 1이다. 모세관 작용에 의해 윗방향으로의 수분확산은 급수원이 존속함에도 불구하고 수분이동은 서서히 감소해 가며, 마지막으로 토탈포텐셜의 구배가 제로가 되면서 수분이동이 멈추게 된다.

불포화 상태의 시험체를 통하는 수분의 이동현상 및 수분확산 계수의 산출을 위하여 리차드 방정식을 도입하면 식(2)와 같다.

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\nabla\cdot\left[K(\psi)\nabla\phi\right] \tag{1}$$

$$\phi=\psi+z \tag{2}$$

여기서, ψ는 모세관포텐셜, z는 중력포텐셜이다. K는 불포화투수계수(hydraulic conductivity)또는 모관전도도(capillary conductivity)

연직방향 일차원의 경우에는 식(3)와 같이 된다.

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left[K(\psi)\frac{\partial\psi}{\partial z}\right]+\frac{\partial K(\psi)}{\partial z} \tag{3}$$

수분량θ이 단지 하나의 독립변수가 되도록 Klute는 변수변환을 실시하여, 리차드 방정식을 수치해석 가능한 확산형의 방정식으로 식(4)와 같이 고쳤다.

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{K(\theta)}{C(\theta)}\cdot\frac{\partial\theta}{\partial x}\right]=\frac{\theta}{\partial x}\left[D(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial x}\right] \tag{4}$$

여기서, $C(\theta)$는 specific moisture capacity, $D(\theta)$는 이며 수분확산계수(moisture diffusivity)

수분확산계수는 시험체의 함수율의 시간과 변위에 대한 변수 데이터를 이용하여 구할 수 있다. 일차원 확산 방정식 식(4)에 볼츠만 변환[7,8,9]을 실시하면 상미분방정식이 되며, 식(5)과 같이 된다.

$$b=xt^{-1/2} \tag{5}$$

Table 1 Testing parameters

Class	Parameters
Unit water content	165kg/m³, 185kg/m³
W/C	35%, 45%, 55%

Table 2 Concrete mixing design

W/C (%)	Unit water content (kg/m³)	Mass per unit volume (kg/m³)			s/a (%)	Slump value (cm)	Air content (%)	AE water reducing agent (C*%)
		C	S	G				
35	165	471	735	1054	42	16.2	2.0	0.20
45		367	772	1106		13.5	4.0	0.15
55		300	795	1140		12.1	3.3	0.10
35	185	529	693	993	42	15.4	3.5	0.15
45		411	734	1052		13.4	3.3	0.10
55		336	760	1090		12.0	2.9	-

$$-\frac{b}{2}\left(\frac{d\theta}{db}\right)=\frac{d}{d\theta}\left(D(\theta)\frac{d\theta}{db}\right) \tag{6}$$

상대함수율θ 에서의 수분확산계수는 식(7)을 적분하여 구할 수 있다.

$$D(\theta)=-\frac{1}{2}\frac{1}{\left(\frac{\partial\theta}{\partial b}\right)}\int_0^{\theta} b\,d\theta \tag{7}$$

Figure 2은 식(7)의 계산값을 기하학적으로 나타낸 그림이다.

2.2 시험체 작성

2.2.1 실험수준

본 연구의 실험 수준은 Table 1과 같다. 3종류의 물시멘트비와 2종류의 단위수량을 실험변수로 하여 시험체를 작성하였다.

2.2.2 사용재료

본 연구에 사용된 시멘트는 국내 S사에서 제조된 보통 포틀랜드 시멘트이며, 굵은 골재는 용원산 표건밀도 2.63(g/㎤), 조립율 3.51의 것을 사용하였다. 잔골재는 강자갈(표건밀도 2.62(g/㎤), 조립율 3.51)과 쇄석(표건밀도 2.59(g/㎤), 조립율 2.08)을 중량비 50%를 혼입한 것을 사용하였다. 혼화제는 AE감수제로 혼입량은 Table 2와 같다. 실험에 사용된 배합을 Table 3에 나타내었다.

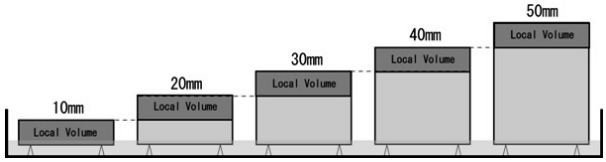

Figure 3 Water absorption test

2.2.3 시험체 제작

콘크리트 시험체의 배합을 Table 2에 나타내었다. 고강도, 보통강도, 저강도의 시험체를 제작하기 위하여 물시멘트 35~55%로 조절하였으며, 페이스트 량의 변화를 꾀하기 위하여 단위수량을 165kg/m³과 185kg/m³의 두 종류를 제작하였다. 시험체의 크기는ϕ100*200mm로 하였으며, 24시간 봉합양생 타설 후, 28일간 20° C의 수중에 양생한 시험체를 사용하였다. 시험체는 Figure 3와 같이 길이 10~50mm로 5종류 길이의 시험체를 배합별로 3개씩 준비하였다. 105° C 건조로에서 48시간 건조시킴으로써 자유수의 수분이 증발된 절건에 가까운 상태로 만들어 함수율에 따른 수분흡수계수 산출이 용이하도록 하였다.

2.3 측정

재령 28일째의 압축강도는 KS F 2405 콘크리트의 압축강도 시험 방법에 준하여 실시하였다. 시간경과에 따른 시험체 높이마다의 함수상태를 평가하기 위하여, ϕ100*200mm 시험체를 길이 10, 20, 30, 40, 50mm로 절단하여 Figure 3와 같이 측면에 에폭시 수지를 도포함으로써 1면만이 흡수가능한 상태가 되도록 만들어 시간경과에 따른 질량변화를 측정하였다. 질량의 증가는 수분흡수에 의한 것으로 높이별 흡수량은 식(8)을 이용하여 산출하였다. 높이별 흡수율$\theta(x,t)$이 Local Volume의 수분량이 되며 이는 바로 앞 작은 치수 시험체를 넘어선 수분의 량이 산출된 값이다.

$$\theta(x,t)=\frac{W(x+10,t)-W(x,t)}{V_{local}}\times 100 \tag{8}$$

여기서, $\theta(x,t)$는 시간t의 높이x 위치에서의 흡수에

의한 함수율(%), $W(x,t)$는 시간t에 있어서 높이x에서의 흡수량(㎤), V_{local}은 함수율 측정대상이 되는 Local Volume (mm^3)

3. 측정결과 및 검토

3.1 압축강도

Figure 4는 재령 28일째 콘크리트의 압축강도로서 물시멘트비가 클수록 강도가 낮아지는 경향을 나타냈으며, 단위수량이 많을수록 강도가 다소 낮았다. 물시멘트비가 같더라도 단위수량의 변화에 따라 단위 시멘트량이 달라지게 되며, 골재량과 천이대의 변화에 의한 결과라 생각된다.

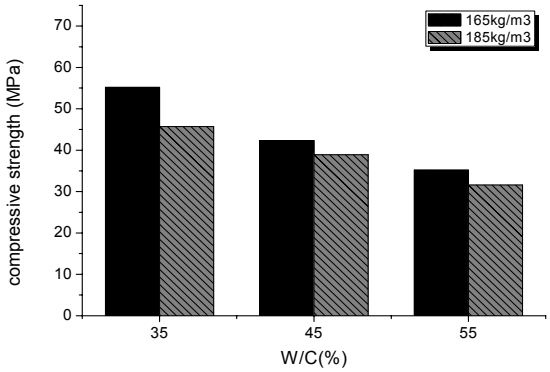

Figure 4 Compressive strength

3.2 흡수수분 확산계수

Figure 5는 각 배합별 길이가 다른 시험체의 흡수 수분

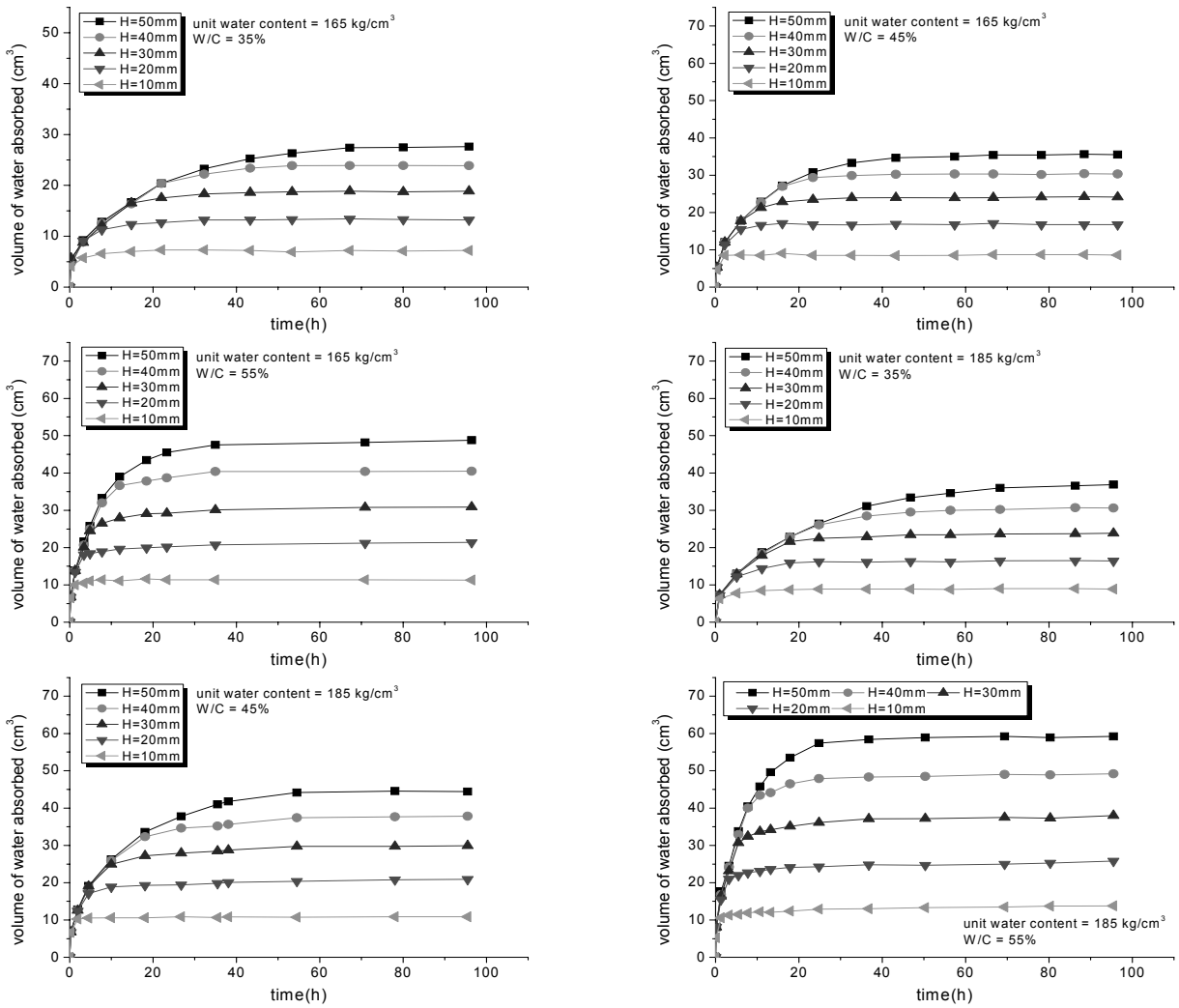

Figure 5 Mass change over time of specimens of different lengths

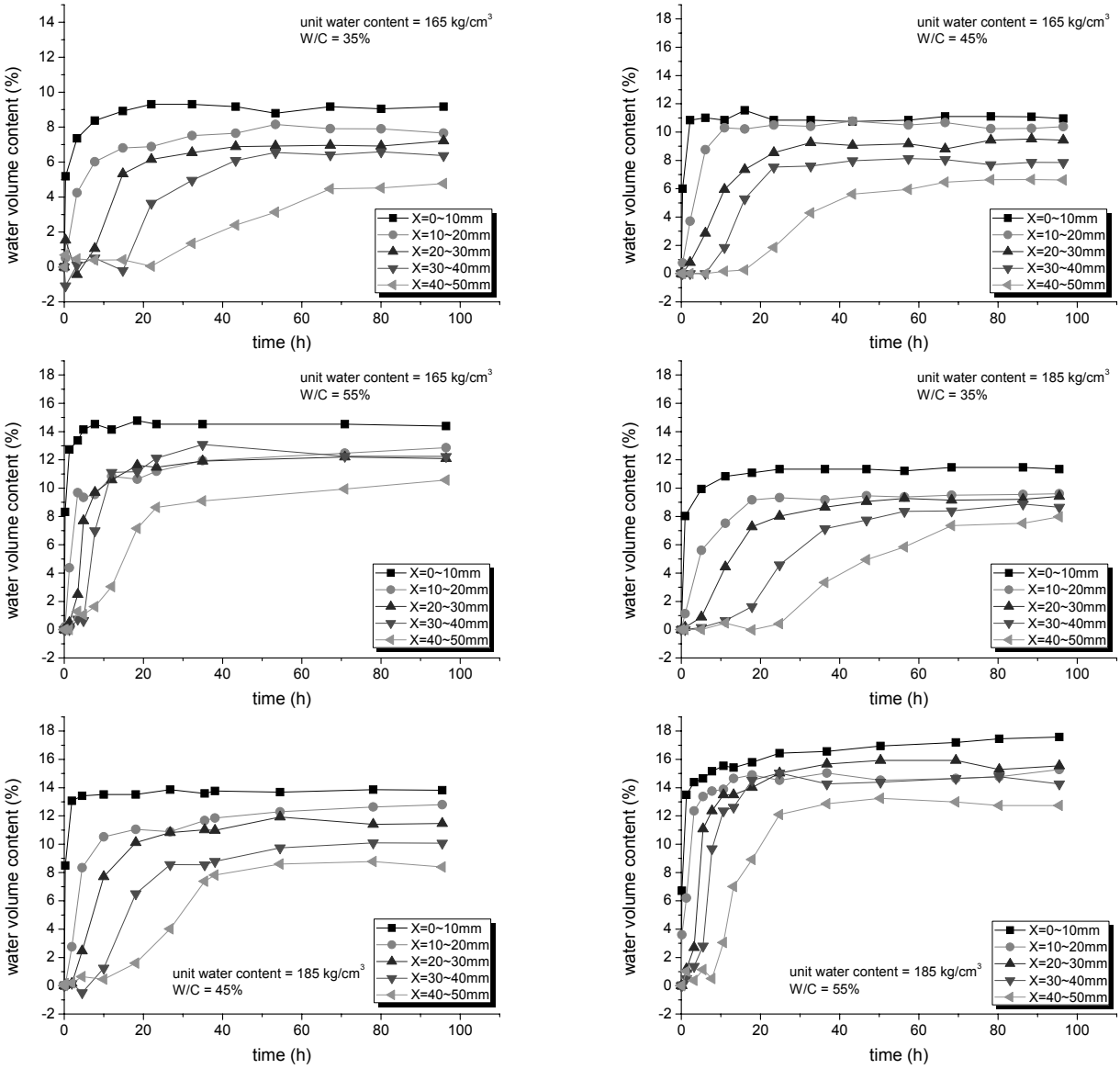

Figure 6 Change of volumetric water content at each height

량을 시간경과에 따라 측정하여 그래프로 나타낸 것이다. 이러한 결과는 다시 식(8)를 이용하여 Figure 6로 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 짧은 시험체가 빨리 포수상태가 되며, 긴 시험체의 Local Volume은 시험이 종료되는 96시간까지 완전히 포수상태가 되지 않는 것을 알 수 있었다. 포수상태의 함수율은 페이스트의 량과 공극량에 좌우되므로 물시멘트별, 단위수량별로 달라졌다. 이 결과를 시간과 측정위치의 함수로 구성된 볼츠만 변수의 함수로 나타내면 Figure 7와 같이 된다.

Figure 7은 볼츠만 변수와 측정대상 높이에서의 흡수 함수율의 관계를 나타내기 위하여 아래의 식을 이용하여 회귀분석한 결과를 나타낸 것이다. 모든 조건에서 상관도R2가 0.9이상으로 높은 상관관계의 정형화가 가능하였다.

이 회귀식을 식 (9)에 대입함으로써 함수율(θ)에서의 확산계수$D(\theta)$를 도출할 수 있다.

$$\theta = m \times \left(1 - \frac{b^n}{k^n + b^n} \right) \tag{9}$$

여기서, b는 볼츠만 변수, k 및 n는 재료정수

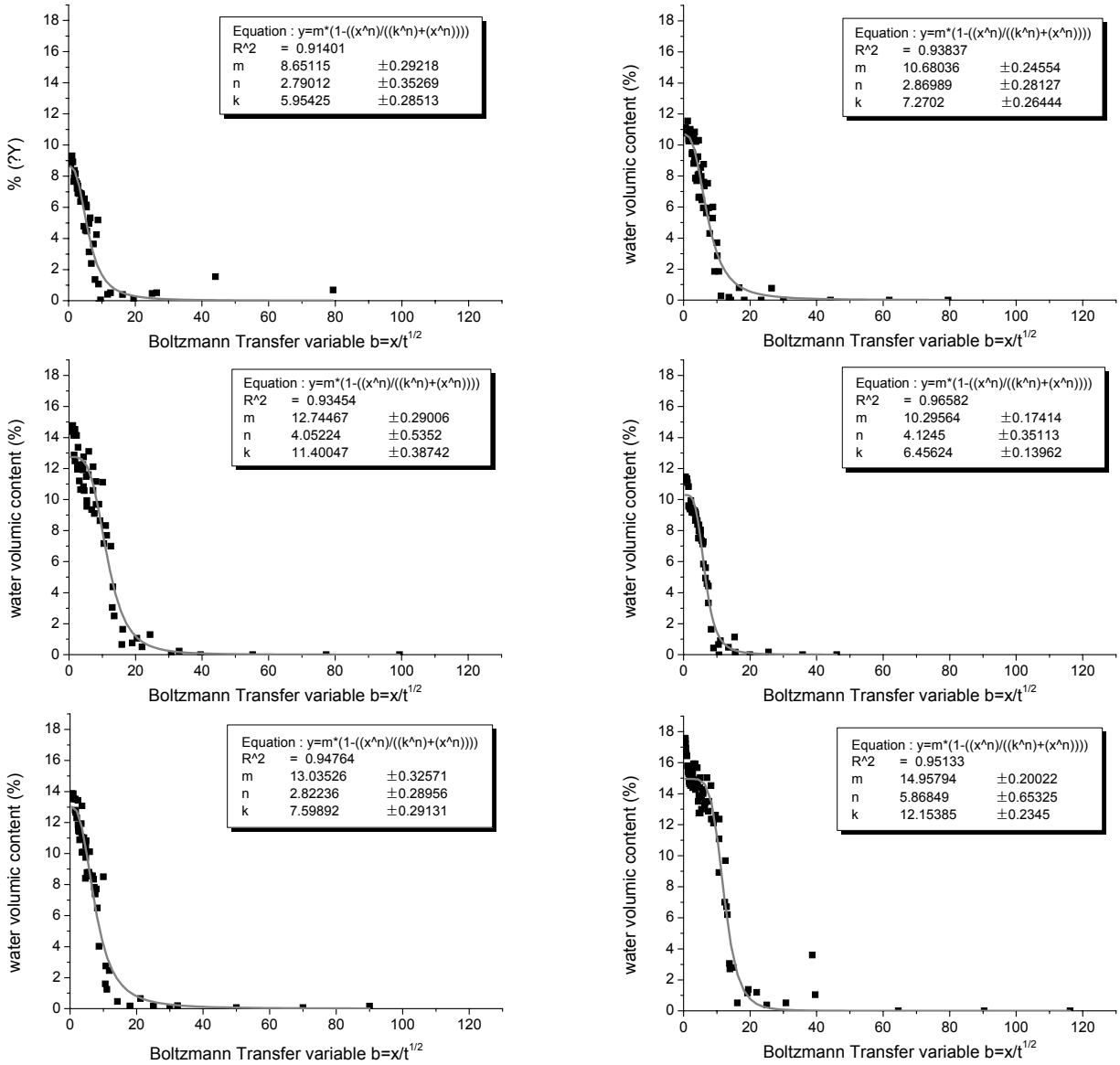

Figure 7 Regression analysis for relationship between Boltzmann transfer variable and volumetric water content

Figure 8에서와 같이 수분 확산계수는 흡수에 의한 함수율에 비선형적으로 변화하는 것을 알 수 있다. 저함수율 영역에서와 고함수율 영역에서 수분확산계수가 높은 U자형 분포를 나타내었는데, 이 값을 임계함수율이라 하며, 이러한 결과는 토질분야의 연구자인 A.Benazzouk[10]및 Takeuchi[11]의 연구에서도 유사한 결과를 발견할 수 있었다. 단위수량이 많을수록 단위체적당 콘크리트 속에 페이스트 부분이 많이 차지하게 되며, 따라서 골재와의 천이대가 감소하여 수분확산이 저해되는 것으로 밝혀졌다. 물시멘트비의 영향에서도 물시멘트비가 낮을수록 공극의 감소로 수분확산속도가 느려지는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과의 모식도는 Figure 9와 같이 나타낼 수 있다. 토탈 포텐셜에 의한 수분확산을 세분화하면 다시 액상수의 확산과 수증기의 확산으로 나눌 수 있으며, 저(低) 수분 함수영역에서는 수증기의 이동이, 고(高) 수분 함수영역에서는 액상수 이동이 지배적으로 작용한 결과라 생각된다.

4. 비선형 유한요소 해석에 의한 실험결과 검증

Figure 8의 흡수수분 확산계수의 타당성을 검증하기 위하여 1차원 비선형 유한요소 모델을 구축하여 비교하였다.

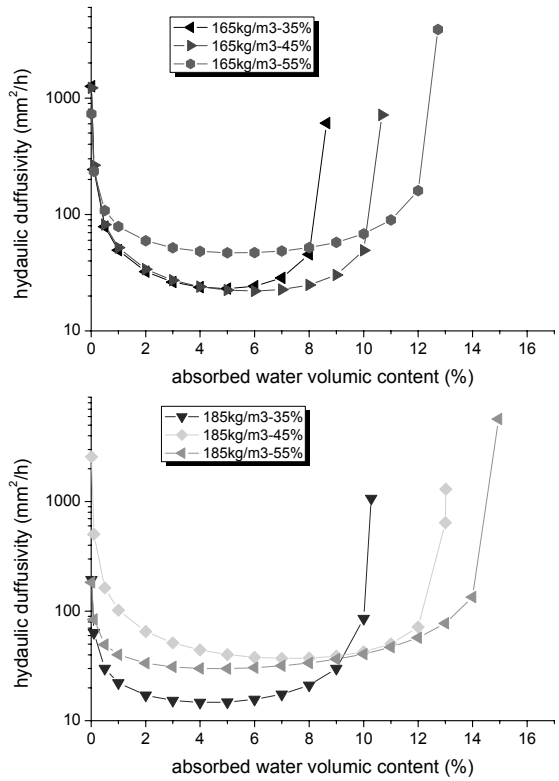

Figure 8 Water diffusion coefficient with absorption

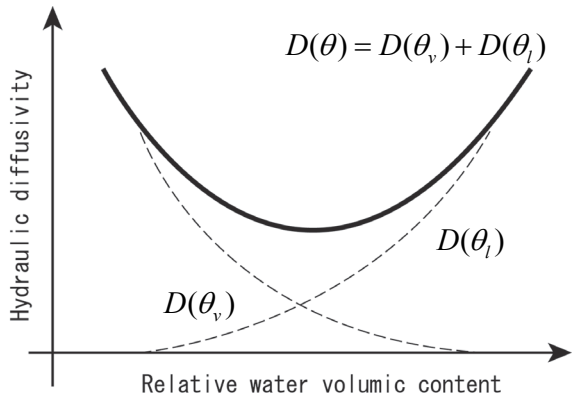

Figure 9 Diagram of water diffusion coefficient depending on the water content in concrete

수분확산 방정식을 매트릭스 형식으로 표현하면 식(10)과 같이 된다.

$$[D]\{\theta\} + [L]\left\{\frac{\partial \theta}{\partial t}\right\} = \{F\} \tag{10}$$

여기서, $[D]$는 흡수 수분확산 매트릭스, $[L]$는 수분용량 매트릭스, $\{F\}$는 외부수분 유속 벡터, $\{\theta\}$는 전체 절점 함수율 벡터시험체의 초기조건은 함수율 0%이며, 수분이 접하는 외부 경계조건은 시험체의 최대함수율인 100%상태의 값을 이용하였다. 흡수 수분확산계수 D는 함수율 θ에 대하여 비선형 함수이므로 Newton-Raphson Method를 이용하여 해석을 실시하였다. 또 흡수수분 확산 방정식의 매트릭스는 공간에 대하여 이산화 되어있지만, 시간에 대해서는 이산화되어 있지 않기 때문에 시간에 대한 이산화 수법으로 Crank-Nicolson 차분법[12]을 이용하였다.

Figure 10은 실험에서 구한 깊이별 함수율과 유한요소 해석에서 구한값의 비교로서 두 값 사이에는 약간의 오차가 보임에도 불구하고 상당히 근사한 값을 실현할 수 있는 것으로 입증되었다. 이러한 오차는 측정값이 충분하지 못했던 점과, 시험체의 길이를 10mm단위로 절단하여 평균값으로 취급하였다는 점, 볼츠만 변수와 함수율의 회귀분석에서 오차가 복합적으로 작용한 결과라 생각되면 향후 보완되어야 할 과제라 생각된다.

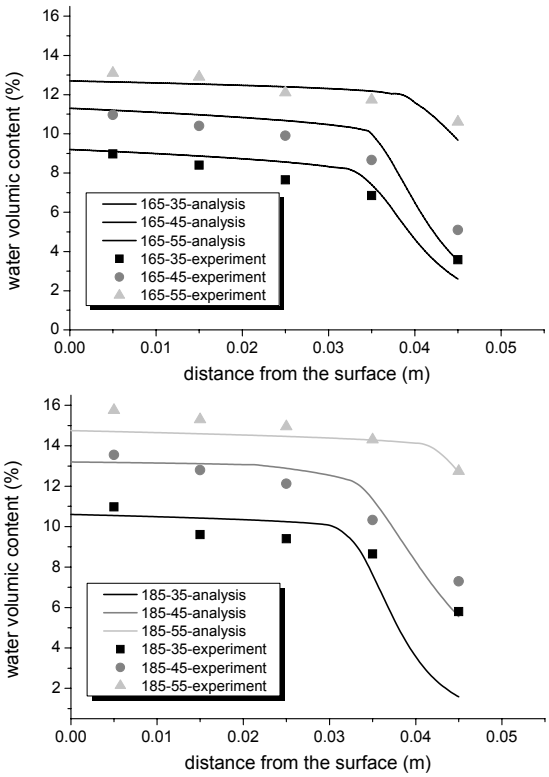

Figure 10 Diagram of water diffusion coefficient depending on the water content in concrete

5. 결 과

1) 콘크리트 시험체의 깊이별 함수율 변화는 길이가 다른

시험체의 시간경과에 따른 질량 측정을 통하여 산출할 수 있다.

2) 수분확산계수는 물시멘트비가 낮을수록, 단위수량이 높을수록 낮은 값을 나타내었다.
3) 볼츠만 변수를 이용한 회귀분석을 통해 산출한 흡수수분 확산계수는 비선형 유한요소 과도해석의 입력값으로 사용되었으며, 상당히 높은 정확도로 실험값을 재현할 수 있었다.

요 약

콘크리트는 다공질로서 수분이 접하게 되면 시간경과에 따라 흡수가 일어난다. 다양한 배합의 콘크리트에서 어느 정도 수분 흡수가 빨리 일어나는가는 흡수수분 확산계수 산출을 통하여 가능하며, 본 연구에서는 길이가 다른 시험체의 질량 경시변화를 통하여 깊이별 흡수 수분량을 산출하였다. 흡수 수분 확산계수는 시간과 깊이의 함수로 이뤄진 볼츠만 변수를 사용하여 실험값과의 회귀분석을 통하여 구하였으며, 그 정확도는 비선형 유한요소 과도해석을 통하여 검증하였다.

키워드 : 콘크리트, 수분흡수, 수분확산계수, 압축강도, 비선형 유한요소 해석

Acknowledgement

This research was supported by a grant(10 RTIP B01) from Regional Technology Innovation Program funded by Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs of Korean government.

References

1. Kim DH, Lim NG, Lee SB. The Study on Salt Injury and Carbonation of Reinforced-Concrete. Journal of the Korea Institute of Building Construction. 2002 June;2(2):165-74.
2. Yoon JH, Jaung JD. An Experimental Study on the Salt Damage Resistance of High Durable Concrete. Journal of the Korea Institute of Building Construction. 2003 Sept;3(3):73-82.
3. Kwon YJ. An experimental study on the Carbonation and Drying Shrinkage of High Strength Concrete According to Kinds and Ratios of Mineral Admixtures. Journal of the Korea Institute of Building Construction. 2003 Sept;3(3):127-34.
4. Park DC. Analytic Research about the Prediction of Long-term Neutralization Forced on the Reaction and Diffusion of Calcium Hydroxide. Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction. 2007 Aug;23(8):99-106.
5. Papadakis VG, Vayenas CG, Fardis MN. Physical and Chemical Characteristics Affection the Durability of Concrete. ACI Materials Journal. 1991 Feb;9(2):186-96.
6. Anna V. Saetta, Roberto V. Scotta, Renato V. Vitaliani. Analysis of Chloride Diffusion into Partially Saturated Concrete. ACI Materials Journal. 1993 May;90(5):441-5.
7. Philip JR. Numerical solution of equations of the diffusion type with diffusivity concentration-dependent. Transactions of the faraday society. 1955 Jul;391(7):885-92.
8. Wang BZ, Fang ZH. Water absorption and measurement of the mass diffusivity in porous media. International Journal of Heat and Mass Transfer. 1988 Feb;31(2):251-7.
9. Wang QG. Determination of the unsaturated hydraulic diffusivity of porous construction materials from transient moisture profiles utilizing pin-type resistance sensor array. Journal of Materials Science. 2005 Apr;40:1013-15.
10. Benazzouk A, Douzane O, Queneudec M. Transport of fluids in cement-rubber composites. Cement & Concrete Composites. 2004 Jan;26:21-9.
11. Takeuchi H, Hara K, Nagano M. Water Retention Curve, Water Diffusivity and Water Movement of Compacted Bentonite. Journal of the Japanese Geotechnical Society. 1995 Mar;35(3):129-37.
12. Yagawa G, Miyazaki N. [Thermal Stress, Creep, Heat Transfer Analysis by FEM & BEM]. 1st Edition. Tokyo (Japan); Saiensu sha Co. Ltd: 1991. 117 p. Japanese