J Rec Const Resources 5(4)421-426(2017)
https://doi.org/10.14190/JRCR.2017.5.4.421

Print ISSN : 2288-3320
Online ISSN : 2288-369X

초음파 속도 측정을 통한 동결·융해 작용을 받는 시멘트 모르타르의 공극 구조 예측

Prediction for Pore Structure of Cement Mortar Exposed to Freezing-Thawing Action by Ultrasonic Pulse Velocity Measurement

방기성[1] · 이광명[2]*
Gi-Sung Pang[1] · Kwang-Myong Lee[2]*

(Received September 22, 2017 / Revised November 16, 2017 / Accepted November 16, 2017)

In this paper, the effect of freezing-thawing action on the dynamic modulus and porosity was examined by ultrasonic pulse velocity (UPV) measurement. UPV was measured every 30 cycles during the freezing-thawing test, and dynamic modulus and porosity of cement mortar were calculated by relationship among UPV, porosity and dynamic modulus. Porosity analysis was also performed to compare with calculated porosity by mercury intrusion porosimetry (MIP). From the test, it was found that dynamic modulus of cement mortar was decreased 13% after 300 cycles. The calculated porosity was increased about 30% compared with the initial porosity before freezing-thawing action. The calculated porosity showed similar increase tendency with the porosity measured by MIP. So, it can be concluded that the porosity change of cementitious materials by freezing-thawing action can be predicted by UPV measurement.

키워드 : 동결융해, 공극 구조, 내구성, 시멘트 복합체
Keywords : Freezing-thawing action, Pore structure, Durability, Cementitious materials

1. 서 론

콘크리트는 저렴한 비용 및 상대적으로 뛰어난 내구성 등의 이유로 지난 수십년간 가장 널리 사용되어온 건설재료이다. 하지만 콘크리트 구조물의 노후화에 따른 내구성능의 감소로 인해 유지보수 비용이 증가함에 따라 콘크리트 구조물의 내구성능에 관한 관심이 높아지고 있는 추세이다. 특히 최근에 건설되고 있는 사회기반 시설물의 목표 수명이 70~100년으로 증가하고 있어 콘크리트 내구성능을 확보하는 것이 매우 중요한 이슈이다.

염소이온은 콘크리트의 내구성능을 감소시키는 대표적인 유해이온으로 콘크리트 내부에 위치한 철근 주변의 염소이온 농도가 임계치 이상인 경우 철근의 부식을 야기하여, 구조물의 안정성을 저해하게 된다(Pradhan et al. 2014). 콘크리트 내부에서의 염소이온 이동 속도는 염소이온 확산계수를 이용하여 표현하며, 염소이온 확산계수를 산정하기 위한 다양한 방법이 제시되어 있다(NT Build 443; NT Build 492; ASTM C 1202). 콘크리트 구조물에서의 염소이온 침투 속도는 콘크리트의 노출 환경 및 배합 재료 등에 따라 달라지는 것으로 알려져 있는데(Oh et al. 2006), Choi et al.(2017)은 콘크리트의 공극 구조 및 굵은 골재의 비를 이용하여 콘크리트의 확산계수를 예측하는 연구를 수행하였다.

국내의 경우 겨울철 기온이 영하로 떨어지는 경우가 잦기 때문에 많은 수의 콘크리트 구조물이 동결 융해 작용에 의한 내구성능 감소가 발생하게 된다(Park et al. 2011; Kim et al. 2010; Cho et al. 2008). 동결 융해 작용을 받는 경우 콘크리트 공극 구조가 변화

* Corresponding author E-mail: leekm79@skku.edu

[1]성균관대학교 건설환경시스템공학과, 박사과정 (Architectural and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Rep. of Korea)
[2]성균관대학교 건설환경시스템공학과, 교수 (Architectural and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Rep. of Korea)

Copyright ⓒ 2017 by Korean Recycled Construction Resources Institute
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

하게 되고, 최종적으로 균열 발생 및 피복 탈락 등의 문제가 발생하는데, 기존의 연구에 따르면 콘크리트의 염소이온 확산계수는 공극 구조 변화 및 균열 발생에 따라 변화하는 것으로 알려져 있다(Liu et al. 2017; Kwon et al. 2016).

본 연구에서는 초음파 속도 측정(Ultrasonic Pulse Velocity) 방법을 이용하여 동결 융해 작용을 받는 모르타르 시편의 공극 구조 변화를 예측하기 위한 연구를 수행하였으며, MIP 실험을 통해 예측 결과를 검증하였다. 또한 동결융해에 의한 porosity 변화에 따른 콘크리트의 diffusion coefficient 변화를 확인하였다.

2. 실험 계획

본 연구에서는 동결 융해 작용을 받는 모르타르 시편의 동탄성계수 및 porosity 변화를 예측하기 위해 초음파 속도 측정(Ultrasonic Pulse Velocity) 실험을 수행하였다. 실험에는 Table 1과 같은 배합비로 제작한 모르타르 시편을 이용하였으며, 잔골재로는 최대 지름 크기 5mm의 강모래를 사용하였다. 시편의 크기는 76mm×76mm×412mm 각주형 시편으로 제작하였으며, 이는 KS F 2456 급속 동결 융해에 대한 콘크리트 저항 시험 방법에 따른 것이다. 시편 제작 후 실험을 수행하기전 28일간 수중 양생하였으며, 초음파 속도는 매 30cycle 마다 측정하였다. 초음파 측정에 의한 porosity 예측 결과를 분석하기 위한 MIP test를 수행하였다.

2.1 초음파 속도 측정 실험

동결 융해 실험은 온도를 조절할 수 있는 챔버에서 수행하였다. 챔버의 온도는 KS F 2456 급속 동결 융해에 대한 콘크리트의 저항 시험 방법에 제시되어 있는 방법을 토대로 최저 −18°C에서 최고 +4°C 사이를 왕복하도록 조절하였다. 동결 융해 1cycle이 3시간이 되도록 조절하여 24시간에 6cycle이 돌아가도록 실험을 수행하였다. Fig. 1은 본 연구에서 수행한 동결 융해 실험의 온도 범위 및 cycle을 나타내는 그래프이다. 동결 융해 실험은 총 300cycle 동안 수행하였다.

Table 1. Mixture proportion

Specimen	W/C	Water(kg)	Cement(kg)	Sand(kg)
Mortar	0.4	120	300	300

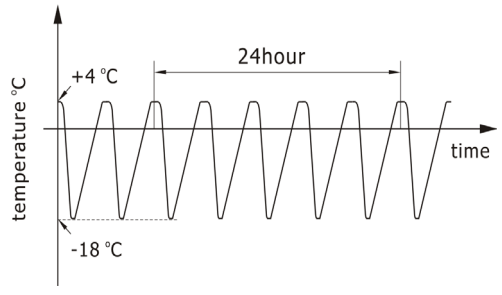

Fig. 1. Cycle of freeze-thawing

초음파 속도는 모르타르 시편의 길이 방향으로 측정을 수행하였으며, 동결융해 cycle에 따른 공극구조 변화를 측정하기 위해 동결융해 실험 시작 전에 첫 초음파 속도 측정을 하였다. 동결융해 실험 중 매 30cycle 마다 시편을 꺼내 초음파 측정 실험을 수행하였으며, 초음파 속도는 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$V_p = L/t_p \tag{1}$$

여기서, L은 초음파가 통과하는 시편의 길이를 나타내며, t_p는 통과하는데 소요된 시간을 의미한다. 초음파 속도 측정은 동결 융해 시험 챔버에서 꺼낸 직후 측정하였다.

2.2 수은압입법

MIP는 콘크리트 내부 공극의 pore size distribution을 측정하는 방법으로 동결 융해 전후의 공극 구조 변화를 확인하기 위해 수행되었다. 실험에는 Fig. 2의 Mercury Intrusion Porosimeter(Autopore IV)를 이용하였다. 동결 융해 시험 중 매 30cycle 마다 MIP 실험을 수행하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 동탄성계수 및 공극 분석

초음파 속도 측정 결과를 이용하여 동탄성계수와 porosity를 예측하기 위한 연구들이 수행되어 왔다(Ramakrishnan et al. 1990).

Fig. 2. Mercury Intrusion Porosimeter(Autopore IV)

Neville(1997)에 따르면 homogeneous, isotropic and elastic medium의 경우 초음파 속도(v)를 이용하여 동탄성 계수(E_d)를 정의할 수 있다. 모르타르 시편을 homogeneous, isotropic and elastic medium로 가정한다면, zero-porosity materials과 porosity materials에서 medium의 밀도가 동일한 경우에는 동탄성계수와 porosity의 관계를 식 (2)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$\frac{E_d}{E_{d0}} = \frac{v^2}{v_0^2} \tag{2}$$

여기서, E_{d0}는 초음파 속도가 v_0인 경우의 동탄성 계수를 의미한다.

Kendall(1984)에 따르면 동탄성계수와 porosity의 관계가 식 (3)과 같은 관계식을 가진다.

$$\frac{E_d}{E_{d0}} = \left(\frac{1-\phi}{1-\phi_0}\right)^3 \tag{3}$$

여기서, ϕ_0는 동탄성계수가 E_{d0}인 경우의 porosity를 나타낸다. 식 (2)와 식 (3)으로부터 porosity와 초음파 속도의 관계식을 식 (4)으로 정리할 수 있다.

$$\frac{\nu^2}{\nu_0^2} = \left(\frac{1-\phi}{1-\phi_0}\right)^3 \tag{4}$$

M.G. Hernández et al.(2004)의 실험 결과를 이용하여 식 (4)의 타당성을 검증하였다. Table 2는 M.G. Hernández et al.(2004)의 실험 결과로 시멘트 종류 및 잔골재율에 따른 초음파 속도 및 porosity를 나타낸다. 표를 보면 w/c 비 증가에 따라 초음포 속도가 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 이를 통해 porosity가 증가하는 것을 계산할 수 있었다. 또한 고강도 시멘트를 사용하는 경우 porosity 감소가 나타났으며, 잔골재 혼입량이 증가하는 경우 porosity 또한 감소하는 것을 확인하였다. Fig. 3은 식 (4)에 Table 2의 데이터를 대입하여 계산한 결과이며, 그래프로부터 약 0.92~0.99의 비율이 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 이로부터 식 (4)을 통해 초음파 속도로부터 porosity를 계산할 수 있는 것을 알 수 있었다.

Table 2. Measured porosity and ultrasonic velocity(M.G. Hernández et al. 2004)

ID		Cement type	w/c	S/C	Porosity (%)	Velocity (m/s)
A	CI-04 1/1	32.5MPa	0.4	1/1	12.6	4281
	CI-05 1/1	32.5MPa	0.5	1/1	18.2	4035
B	CII-04 1/1	42.5MPa	0.4	1/1	10.7	4384
	CII-05 1/1	42.5MPa	0.5	1/1	14.8	4136
C	CI-04 2/1	32.5MPa	0.4	2/1	10.3	4544
	CI-05 2/1	32.5MPa	0.5	2/1	13.6	4334
D	CII-04 2/1	42.5MPa	0.4	2/1	8.6	4625
	CII-05 2/1	42.5MPa	0.5	2/1	12.5	4347

3.2 상대동탄성계수

Fig. 4는 동결 융해 cycle에 따른 relative dynamic modulus 측정 결과를 나타낸다. Relative dynamic modulus는 식 (2)를 통해 계산하였다. 그래프로부터 cycle이 증가함에 따라 relative dynamic modulus slope가 감소하는 것으로 나타났다. 초기 30cycle까지는 변화량이 작았으나, 90cycle 이후 급격하게 감소

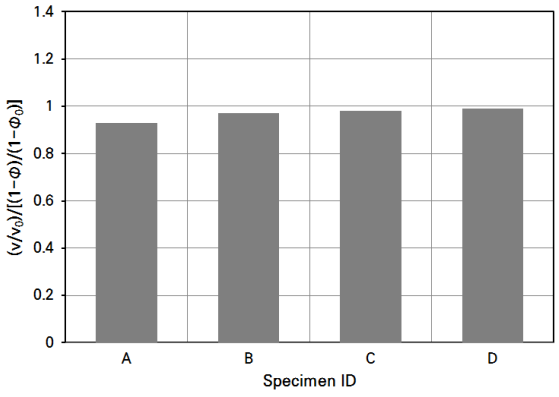

Fig. 3. Relative relation between ultrasonic velocity and porosity (M.G. Hernández et al. 2004)

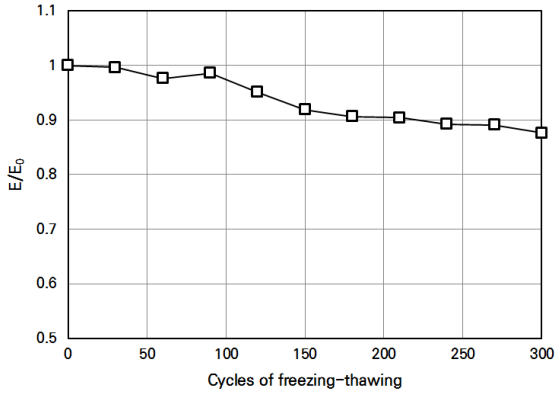

Fig. 4. Relative dynamic modulus vs. cycles of freezing and thawing

하여 실험이 종료되는 300cycle까지 지속적으로 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 60cycle에서 90cycle까지 부분적으로 증가하는 것으로 확인되었는데, 이는 wave velocity 측정 상의 오차로 판단된다.

3.3 공극

Fig. 5는 동결 융해에 따른 porosity 변화를 나타내는 그래프이다. 그래프에서 measured data는 MIP를 이용하여 측정한 전체 porosity를 나타내며, calculated data는 wave velocity 측정 결과를 식 (4)에 대입하여 계산한 결과이다. 그래프를 보면 measured data의 경우 60cycle까지 porosity가 증가하다가 90cycle 째 감소한 후 다시 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 실험과정에서 발생한 오차로 판단된다. MIP를 활용한 동결 융해에 의한 porosity 변화를 측정하는 실험은 같은 샘플의 공극 변화를 지속적으로 측정할 수 있는 것이 아니라 같은 시편에서 채취하는 샘플이기는 하나 매번 다른 위치에서 샘플을 채취하기 때문에 위치에 따라 초기 porosity가 달라질 수 있으며, 이에 따라 측정 결과에 편차가 발생할 수 있다. 하지만 전체적인 경향을 살펴보면 cycle이 증가할수록 전체 porosity가 증가하는 것을 확인할 수 있다. calculated data는 measured data에 비해 변동폭은 작았으나 동결융해 cycle이 증가함에 따라 porosity가 증가하는 경향은 동일한 것으로 확인되었다. calculated data의 경우에도 measured data와 유사하게 60cycle에서의 90cycle로 넘어가면서 porosity가 감소하는 것으로 나타났는데, 감소량은 크지 않았으며, 이는 90cycle을 측정한 시편의 문제로 판단된다. 결과적으로 measured data와 calculated date 모두 동결 융해 cycle 증가에 따라 porosity가 증가하는 경향을 동일하게 확인되었다.

3.4 확산계수

Fig. 6은 동결 융해 cycle 증가에 따른 콘크리트의 염소이온 확산계수 예측 결과이다. 콘크리트의 확산계수는 Choi et al.(2017)이 제시한 porosity와 골재의 혼입량으로부터 염소이온 확산계수 산정하는 방법을 이용하였다.

$$D_c = \frac{2(1-v_a)}{2+v_a} \times D_0 \times 10^{-3.52\phi^2+7.52\phi-4} \quad (5)$$

여기서, D_c는 콘크리트의 염소이온 확산계수를 나타내며, v_a는 골재의 혼입량, ϕ는 콘크리트의 porosity, D_0는 25°C의 수중에서의 염소이온 확산계수인 2.032×10^{-9} m^2/s를 적용하였다(Handbook of chemistry and physics, 81st ed.).

그래프를 보면 동결 융해 cycle이 증가함에 따라 염소이온 확산계수가 증가하는 것을 확인할 수 있었는데, 90cycle 이전에는 확산계수 변화 폭이 작았으나, 90cycle 이후에는 큰 폭으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 확산계수의 증가 폭은 porosity에 비해 상당히 큰 폭으로 증가하는 것을 확인할 수 있었는데, porosity는 초기 값 대비 약 30% 가량 증가한 반면 확산계수는 600% 이상 증가한 것으로 나타났다. 이를 통해 porosity의 증가 폭이 작은 경우에도 확산계수는 큰 폭으로 증가할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 7은 동결 융해 작용을 받기 전 후의 pore size distribution을 나타내는 그래프이다. 그래프를 보면 동결 융해를 반기 전에 비해 동결 융해를 받은 이후의 pore size가 전체적으로 증가한 것을 확인할 수 있는데, 특히 10nm 이하의 pore는 거의 없어졌으며, 동결 융해를 받기 전 가장 높은 비율을 차지했던 10~20nm의 pore

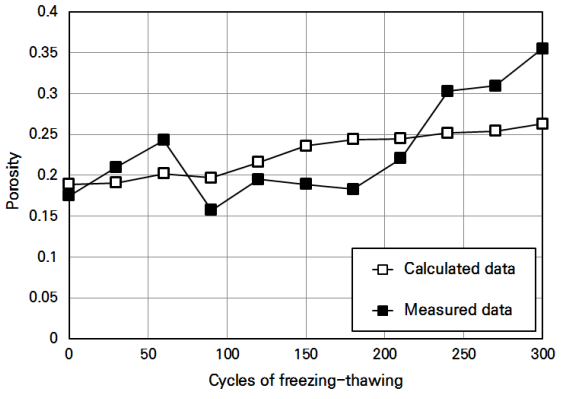

Fig. 5. Porosity vs. cycles of freezing and thawing

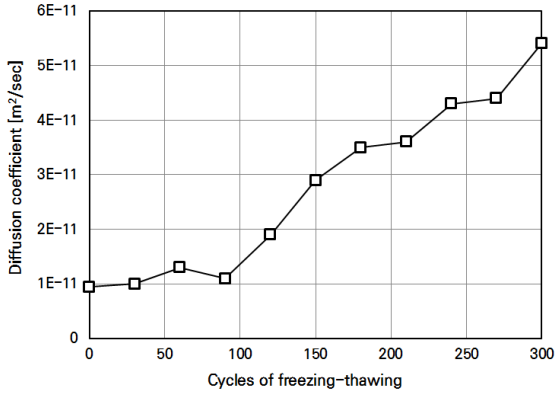

Fig. 6. Diffusion coefficients vs. cycles of freezing and thawing

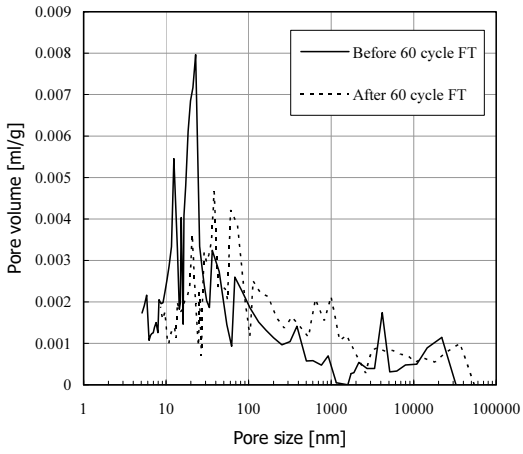

Fig. 7. Pore size distribution before and after freeze and thawing action

Table 3. Measured porosity and ultrasonic velocity(M.G. Hernández et al. 2004)

Cycles of freezing-thawing	E/E_0	ϕ_{MIP}	ϕ_{calc}	D_{calc} (m^2/sec)
0	1	0.175	0.189	9.4E-12
30	0.996	0.2101	0.191	1E-11
60	0.976	0.2427	0.202	1.3E-11
90	0.986	0.1573	0.197	1.1E-11
120	0.951	0.1948	0.216	1.9E-11
150	0.919	0.1888	0.236	2.9E-11
180	0.906	0.1827	0.244	3.5E-11
210	0.904	0.2205	0.245	3.6E-11
240	0.892	0.3029	0.252	4.3E-11
270	0.891	0.3093	0.254	4.4E-11
300	0.876	0.355	0.263	5.4E-11

는 60cycle의 동결 융해 이후 크게 줄어드는 것으로 나타났다. 또한 최대 pore 크기도 약 20,000nm에서 40,000nm로 증가하였는데, 이를 통해 동결 융해에 의해 전체 porosity가 증가하였음을 알 수 있다. 이러한 전체적인 pore size의 증가로 인해 콘크리트의 염소이온 확산계수가 증가한 것으로 판단된다.

Table 3은 초음파 실험을 식에 대입하여 계산한 동탄성계수 및 porosity와 MIP를 통해 측정한 porosity, porosity를 이용하여 예측한 확산계수를 정리한 결과를 나타낸다. 표로부터 동탄성계수는 최종적으로 약 13% 감소한 것을 확인할 수 있었으며, porosity 측정 결과는 실험 결과와 예측 값이 약 6~30% 정도까지 차이를 보이는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 초음파 측정 시험을 이용하여 동결융해 작용이 시멘트 복합체의 동탄성계수 및 porosity 변화에 미치는 영향을 분석하였다. 먼저 초음파 측정 결과로부터 동탄성 계수 및 porosity를 계산하기 위한 이론식을 제시하였으며, 문헌 조사를 통해 얻은 데이터를 이용하여 이론식이 타당하다는 것을 확인하였다.

실험에는 모르타르 시편을 이용하였으며, KS F 2456에 제시된 방법을 참조하여 동결 융해 온도 및 cycle 당 시간을 결정하였다. 최종적으로 300cycle 동안 동결 융해 실험을 수행하였는데, 동결 융해 실험 중 30cycle 마다 초음파 속도 측정 및 MIP를 이용한 porosity 측정을 수행하였다. 초음파 속도 측정 결과 cycle이 증가함에 따라 초음파 속도가 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 이론식에 대입하여 동탄성계수 및 porosity를 계산할 수 있었다. 초음파 속도 측정 결과를 이론식에 대입하여 porosity를 계산한 결과 동결 융해 cycle이 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났으며, MIP를 통해 측정한 결과와도 유사한 경향을 보이는 것이 확인되었다. 동결융해에 의한 내구성능 변화를 확인하기 위해서 Choi et al.(2017)이 제시한 porosity와 확산계수의 관계식을 이용하여 확산계수를 계산해보았다. 동결 융해 cycle이 증가함에 따라 확산계수가 큰 폭으로 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 초기 확산계수 대비 약 6배 정도 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

References

Kwon, S.J., Na, U.J., Park, S.S., Jung, S.H. (2009). Service life prediction of concrete wharves with early-aged crack: Probabilistic approach for chloride diffusion, Structural Safety, **31**, 75-98.

Pradhan, B. (2014). Corrosion behavior of steel reinforcement in concrete exposed to composite chloride-sulfate environment, Construction and Building Materials, **72**, 398-410.

NT Build 443. Concrete, Hardened: Accelerated Chloride Penetration, Nordtest, Finland, 1995.

NT Build 492. Concrete, Mortar and Cement-based Repair Materials: Chloridemigration Coefficient from Non-steady-state Migration Experiments, Nordtest, Finland, 1999.

ASTM C 1202. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. Annual book of ASTM standards. American Society for Testing and

Materials; 2005.

Oh, B.H., Jang, S.Y. (2007). Effects of material and environmental parameters on chloride penetration profiles in concrete structures, Cement and Concrete Research, **37(1)**, 398–410.

Choi, Y.C., Park, B., Pang, G.S., Lee, K.M., Choi, S. (2017). Modelling of chloride diffusivity in concrete considering effect of aggregates, Construction and Building Materials, **136**, 81–87.

Park, K.P., Kim, S.S., Lee, S.T., Kim, J.P., Jung, H.S. (2011). Properties on the freeze–thaw of concrete subjected to seawater attack, Journal of the Korea Concrete Institute, **23(1)**, 23–30 [in Korean].

Kim, S.W., Choi, K.B., Yun, H.D. (2010). Effect of freeze–thaw cycles after cracking damage on the flexural behavior of reinforced concrete beams, Journal of the Korea Concrete Institute, **22(3)**, 399–407 [in Korean].

Cho, T.J., Kim, L.H., Cho, H.N. (2008). Development of deterioration prediction model and reliability model for the cyclic freeze–thaw of concrete structures, Journal of the Korea Concrete Institute, **20(1)**, 13–22 [in Korean].

Pang, G.S., Chae, S.T. Chang, S.P. (2009). Predicting model for pore structure of concrete including interface transition zone between aggregate and cement paste, International Journal of Concrete Structures and Materials, **3(2)**, 81–90.

Lide, D.R. (2000). CRC Handbook of Chemistry and Physics, 81st Edition. CRC Press, Boca Raton, USA.

Hernandez, M.G., Anaya, J.J., Ullate, L.G., Cegarra, M., Sanchez, T. (2006). Application of a micromechanical model of three phases to estimating the porosity of mortar by ultrasound, Cement and Concrete Research, **36(4)**, 617–624.

Kendall, K. (1984). In Physics and Chemistry in Porous Media, Johnson, American Institute of Physics, New York, USA.

초음파 속도 측정을 통한 동결·융해 작용을 받는 시멘트 모르타르의 공극 구조 예측

본 연구에서는 초음파 속도 측정 실험을 이용하여 동결 융해 작용을 받는 시멘트 모르타르의 동탄성 계수 및 공극 구조 변화를 평가하기 위한 연구를 수행하였다. 초음파 속도는 동결융해 시험 중 매 30cycle마다 시편을 꺼낸 후 측정하였으며, MIP를 이용한 porosity 분석도 수행하였다. 초음파 속도 측정 결과를 이용하여 동탄성계수를 계산한 결과 300cycle 이후 약 13%가 감소하는 것으로 나타났다. porosity는 초기에 대비해서 약 30%가량 증가하였으며, 초음파 속도 측정으로부터 계산된 porosity는 MIP를 통해 측정한 porosity와 약 5~30% 차이를 보였지만 유사한 증가 경향을 보이는 것으로 확인되었다. 이를 통해 초음파 속도 측정 결과를 이용하여 시멘트 모르타르의 porosity 변화를 예측하는 것은 타당한 방법으로 볼 수 있으며, 이를 이용하여 확산계수 등 내구성 평가 지수를 예측할 수 있는 것을 확인할 수 있었다.