

경량기포콘크리트의 편면동결융해 및 탄산화에 관한 연구

A Study on the One Side Freezing / Thaw and Carbonation of Autoclaved Lightweight Concrete

노재성*

황의환**

홍성수***

이범재****

Rho, Jae Seong, Hwang, Eui Hwan Hong, Seong Su Lee, Beom Jae

요 약

경량기포콘크리트(ALC : Autoclaved Lightweight Concrete)의 내구성을 개선하기 위하여 투습 및 투수, 편면동결융해 특성과 탄산화 특성을 실험하였다. 국산 ALC 전용 마감재는 방수용 도장재에 가까운 투습 및 투수 성질을 갖고있어 특성의 개선이 요구된다. 편면동결융해시험에서 마감재의 투습도에 따른 열화위치는 투습도가 클수록 외측에서 발생하였으나 투수에 의한 외부의 박리열화는 관찰되지 않았다. 탄산화는 수분의 함량이 작을수록 빠르게 진행되었으며 탄산화가 진행됨에 따라 기공량은 감소하였다. 탄산화가 완전히 진행되면 부피의 팽창으로 균열이 발생하였다.

Abstract

Vapor and water permeation test, one side freezing /thaw test and carbonation test were carried out to improve the durability of ALC(Autoclaved Lightweight Concrete). The domestic finishing agents for ALC need improvement on the vapor and water permeation properties because those have the quality as a waterproof finishing agent. From one side freezing /thaw test, the finishing agent which has higher vapor permeation located the deterioration crack at close outer wall side. Otherwise, the scaling of finishing agent caused by water permeation was not detected on outer wall. The carbonation of ALC was accelerated in the presence of lower water content and decreased the pore volume in ALC matrix. The crack was occurred in fully carbonated ALC specimen due to crystal conversion of tobermorite to calcium carbonate.

Keywords : ALC, vapor and water permeation, one side freezing /thaw test, carbonation

* 정희원, 충남대학교 공과대학 정밀공업화학과, 교수
** 정희원, 국립전안공업전문대학 공업화학과, 교수
*** 충남대학교 대학원 화학공학과, 공학박사
**** 충남대학교 대학원 공업화학과 박사과정

• 본 논문에 대한 토의를 1995년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 1995년 12월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

ALC(Autoclaved Lightweight Concrete : 경량기포콘크리트)는 고온 고압으로 증기 양생된 콘크리트로서 1.13nm tobermorite가 주결정으로 구성되어 있으며, 경량성(비중 0.5~0.8), 단열성(열전도율 0.08~0.12kcal/mh℃), 차음성, 시공용이성 등 건축재료로서의 뛰어난 특성을 지니고 있다.⁽¹⁾ 현재 ALC는 국내의 8개업체에서 년 130만 m³이 생산 가능하나 동결융해와 탄산화에 의한 내구성의 저하와 물리적 성질이 기존의 콘크리트에 비하여 크게 떨어지기 때문에 수요의 개발이 어려운 실정에 있다.⁽²⁾ 일본에서는 1960년대 초에 ALC를 생산하기 시작한 이후 전용마감재의 개발, 물성의 향상 및 건축기술의 개선등을 통하여 꾸준한 성장을 계속하여 왔으며 총 생산량의 60% 정도가 외벽재로 사용되고 있다.

ALC는 일반콘크리트와는 달리 고온고압으로 양생되어 화학적으로 안정하지만 알루미늄의 발포작용에 의한 기포 50%, 세공 30%, 고체 20% 정도로 구성되어 있는 다공성 재료이기 때문에 흡수성이 비교적 높은 단점을 가지고 있어 방수처리가 필수적이다. 특히 ALC의 이러한 특성은 우리나라와 같은 기후조건에서 겨울철에 다습한 실내공기가 외부로 투과하다 외부의 기온이 영하로 유지되어있기 때문에 0℃가 유지되는 영역에서 결로를 일으키게 되고 결빙과 해빙을 반복하게 되어 내부균열의 원인이 됨을 長谷川壽夫⁽³⁾과 千步修⁽⁴⁾ 등이 보고한 바 있다. 결로에 의하여 동결융해로 발생하는 ALC의 내부균열 및 눈이 녹아서 외부에서 침투하는 물에 의한 외부 박리는 전용 마감재의 사용이나 건축기술의 개발을 통하여 방지가 가능하다. 우리나라에서는 ALC의 후속기술이 적절히 개발되지 못하여 외벽재로의 사용이 제한받고 있으며 거의 전량이 내벽재로만 사용되고 있는 실정이다.

또한 ALC의 주결정 성상인 tobermorite는 일반 콘크리트 보다도 탄산화가 빠르다. CO₂의 농도가 높으면서 적정한 수분이 유지되면 탄산화의 속도가 빠르며, 탄산화가 진행된 ALC는 tobermorite의 파괴로 인하여 현저하게 물성이 저하함을

楊靜⁽⁵⁾ 등이 지적하였다.

따라서 ALC를 건축재료로서 만족하게 사용하기 위해서는 동결융해저항성 및 탄산화에 대한 물성의 개선이 필수적이라 하겠다. 본 연구에서는 내구성의 개선을 위하여 시판되고 있는 마감재에 따른 투습도, 투수도를 측정하였으며 편면동결융해저항성은 겨울철 실건축물의 기후조건을 고려하여 제작한 시험장치를 이용하여 내부균열의 특성을 시험하였다. 또한 탄산화 촉진시험을 통하여 탄산화에 따른 ALC의 특성 변화를 관찰하였다. 이를 기초로하여 기포제로 사용되는 알루미늄 분말의 첨가량과 분말도 및 발수제의 첨가량을 변화시켜 만든 시험체의 내동해성, 강도, 흡수율, 기공 및 세공의 조직등에 대한 결과는 후속하여 발표하기로 한다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 실험재료

마감재는 국내에서 생산된 ALC 전용 마감재 중 H사에서 제조된 마감재(B), S사에서 제조된 마감재(D)에 일본의 F사에서 생산된 ALC 전용 마감재(C)를 사용하였으며, ALC는 국내 S사에서 제조된 비중 0.55의 것을 사용하였다. 각 시험에 사용한 시험체의 형상을 Table 1에 나타냈다.

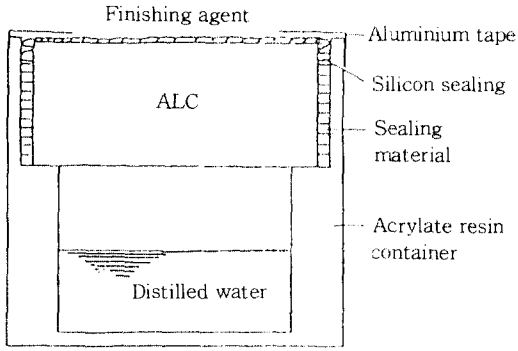
Table 1 Specimen size and water content for each tests

Tests	Size(mm)	Water Content (wt. %)
Normal water permeation	150×150× 50	40±2
Pressurized water permeation	150×150× 50	40±2
Vapor permeation	150×150× 50	40±2
One Side Freezing /Thaw	100×100×200	20±2
Carbonation	80×80×80	15,30,45,60

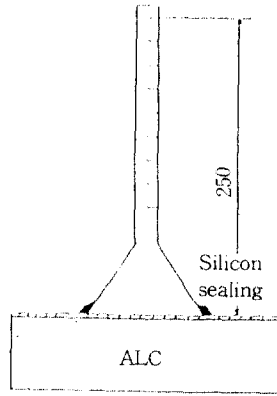
2.2 실험방법

2.2.1 투습시험

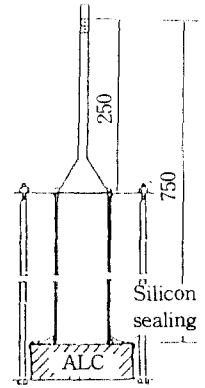
ALC를 150×150×50mm의 크기로 절단하여 105℃에서 절건시킨 후 물에 담가 4주간 완전히



(a)



(b)



(c)

Fig. 1 Schematic diagram of the apparatus of vapor permeation(a), normal water permeation(b) and pressurized water permeation(c)

흡수시킨 다음 40℃로 건조시켜 함수율을 $40 \pm 2\%$ 로 조정하고 랩으로 밀봉하여 2주간 보관함으로써 수분의 균등한 구배를 이루게 하였다. 마감재를 처리하지 않은 ALC(A)와 한면에 국산 마감재 B, D 및 일산 마감재 C를 처리하여 2주 동안 안정화시킨 후 증류수를 넣은 아크릴수지 용기에 마감면을 위로 배치하여 시험체의 끝부분을 실리콘으로 완전 밀봉하여 25℃, 상대습도 50%로 조절된 항온항습조에서 중량의 감소를 측정했다. 용기중의 물이 증발하여 시편을 통과함으로써 중량의 감소를 나타내지만 처음에는 ALC 내부의 함수율 분포가 일정하지 않기 때문에 단위시간당 중량의 변화가 일정하게 되는 시점을 시험의 개시시점으로 하였다.

2.2.2 표준투수 및 가압투수

시험체의 준비는 투습시험에서와 같이 동일하게 하였으며, 표준투수 및 가압투수장치에 위치한 다음 수두의 높이의 감소를 읽어 표준투수 및 가압투수량으로 했다. 이때 가압투수의 수두 높이는 표준투수의 3배로 했다. 투습, 표준투수 및 가압투수에 사용한 실험 장치를 Fig. 1에 나타냈다.

2.2.3 편면동결융해 시험

ALC를 $100 \times 100 \times 200\text{mm}$ 의 크기로 발포방향에 대하여 수직으로 상부, 하부로 절단하여 투습 시험에서와 같이 동일하게 준비하여 한냉지에서 외벽재료의 사용을 모델화한 Fig. 2의 편면동결융

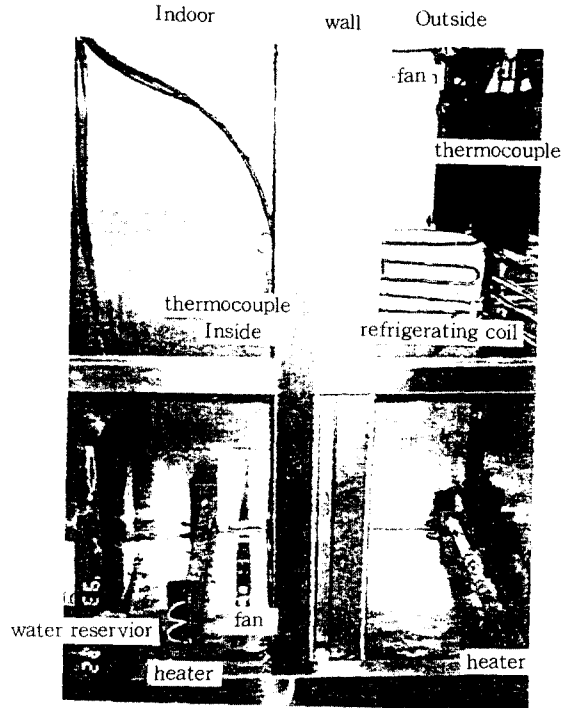


Fig. 2 Apparatus of one side freezing/ thaw test

해시험장치에 넣어 내부균열의 발생을 관찰하였다.

이때 옥내로 상정한 측의 온도는 $+25^\circ\text{C}$ 에서 24시간 지속되며, 습도는 옥내측 실험장치내에 수조

를 두고 수조의 온도를 35℃로 유지시켜 25℃에서 포화 상대습도 상태를 유지시켰다. 그리고 옥외로 상정한 측의 온도는 -18℃에서 18시간, +5℃에서 6시간 유지시켰다. 이것을 1 cycle로 하여 50 cycle 반복하였다.

2.2.4 탄산화

시험체를 80×80×80mm의 크기로 절단하여 물에 4주간 침지시켜 흡수시킨 후, 40℃로 건조시켜 함수율을 15, 30, 45, 60%로 조정된 후 랩으로 밀봉하여 2주간 보관한다. 이 시험체를 탄산화 장치에 넣고 CO₂ 농도 100%의 축진조건에서 대기압하에 노출시켜 0.25, 0.5, 1, 3, 7, 14, 28일에 따른 탄산화를 측정하였다.

소정의 탄산화 기간을 마치면 시험체를 2등분하여 그 절단면에 농도 1% 페놀프탈레인 용액을 분무하여 표면으로부터 발색부분까지의 거리를 서로 다른 8 위치에서 측정하여 평균치를 탄산화 깊이로 하였다. 축진 시험을 마친 시험체를 Fig. 3에서와 같이 표면으로부터 내부로 4mm 간격으로 절단하여 1-5번은 X-선 회절분석에, 1'-5'은 수은압입법에 의한 기공을 측정에 사용하였다. SEM 분석을 통하여 내부조직을 관찰하였다.

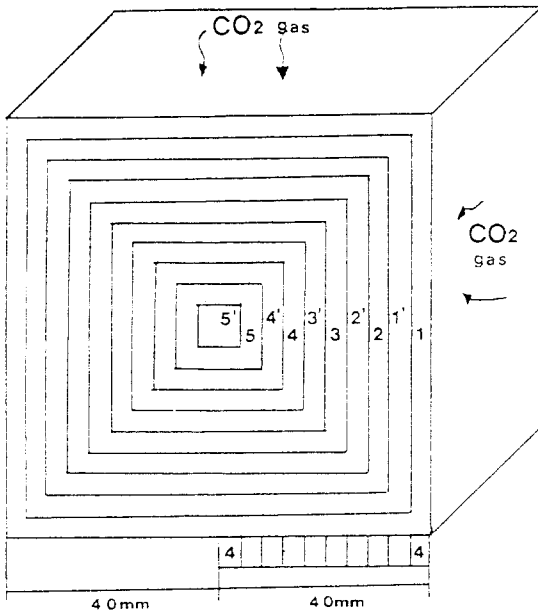


Fig. 3 Cutting design of carbonated ALC specimen

3. 결과 및 고찰

3.1 투습도

경과일수에 따른 투습시험결과를 Fig. 4에 나타냈다. 이때 투습도는 측정된 투습량을 아래의 식에 따라 계산하여 구하였다.

$$\text{투습도}(\text{g}/\text{m}^2\text{h}) = \frac{\text{투습량}(\text{g})}{\text{시험면의 면적}(\text{m}^2) \times \text{방치시간}(\text{h})}$$

마감재를 처리하지 않은 ALC(A)의 투습도가 마감재를 처리한 B, C, D에 비하여 약 3~9배 정도 크게 나타났다. 국산 시판 마감재 D의 투습도는 2.9g/m²h로 일본 마감재 C의 투습도 3.1g/m²h와 비슷한 양상을 나타내고 있다. 그러나 국산 마감재 B는 아주 낮은 투습도를 나타내 안정화되었을 때 1.1g/m²h이었다. 마감재의 투습도가 너무 높으면 외부의 기온이 0℃ 정도를 유지할 때 지나친 투습으로 결로현상이 마감재와 ALC의 접합부에서 집중되며 결국에는 표층박리의 또 다른 원인이 된다. 또한 투습도가 너무 낮으면 ALC가 갖고있는 건축재료로서의 장점인 투기성을 상실하게되는 원인이 된다. 谷川伸⁽⁶⁾의 연구에 의하

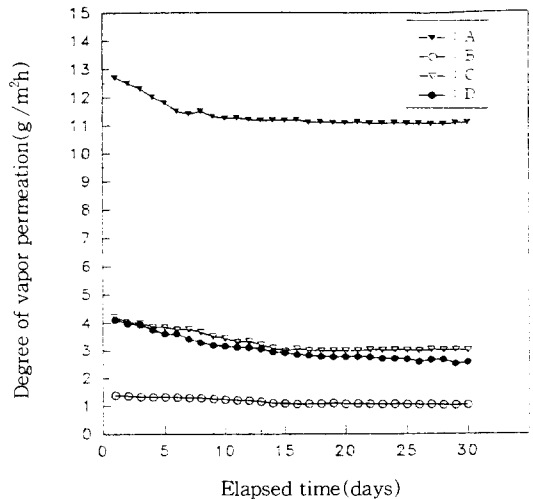


Fig. 4 Degree of vapor permeation of ALC specimen as a function of elapsed time

- A : No finishing agent
- B, D : Domestic finishing agent
- C : Foreign finishing agent(Japan)

면 투습도가 1.6~2.9g/m²h를 갖는 투습·방수형의 마감재가 외부폭로기간 3개월 동안에 방수형의 마감재에 비하여 표면박리에 의한 동결융해가 훨씬 적은 것으로 보고되고 있다. 마감재 유무에 따른 외부폭로시험에서 마감재를 도포하지 않았을 때 옥외측에서 국부적으로 수분의 결로현상이 확인되나 마감재를 도포하면 마감재 도포면 하부에서 결로에 의한 수분의 집중적인 축적이 발생하므로 마감재의 적절한 투습성은 중요하다.

국산 마감재 B는 외벽용 방수마감재에 가까운 투습도를 갖고있어 ALC 전용 마감재로써는 투습도가 너무 낮으며 D는 ALC전용 마감재로 적합한 투습도를 갖고있는 것으로 나타났다.

3.2 표준투수 및 가압투수도

마감재를 처리하지 않은 ALC의 7일 누적 표준투수량은 350.9ml, 7일 누적 가압투수량은 436ml를 나타냈다. ALC 마감재의 표준투수도는 겨울철에 눈이 녹음에 따라 마감재 표면에 물방울이 부착되고, 부착된 물방울이 마감재층을 통과한 다음 결빙(結氷)에 의하여 외부 박리의 형태로 발생하는 동해에 대한 저항성을 개선하는데 중요하다. 가압투수현상은 부착된 물방울이 기온이 강하면 표면부터 결빙현상이 발생하고 결빙에 따른 부피팽창으로 가압에 의한 투수현상이 발생한다. 가압투수에 의하여 발생하는 동결융해 특성을 개선하기 위하여 마감재의 가압투수도를 측정한다.

Fig. 5와 6에 마감재 B, C, D를 처리한 ALC의 표준 및 가압투수량을 나타냈다. 표준 및 가압투수 모두 경과시간에 따라 일정한 속도로 누적투수량이 증가하고 있다. 투습도가 가장 낮은 국산 마감재 B가 표준 및 가압투수에서도 가장 낮은 투수도를 보였으며 투습도에서 큰 차이를 보이지 않았던 국산 마감재 D와 일산 마감재 C는 표준투수 및 가압투수에서는 큰 차이를 나타내고 있다. 즉 국산마감재 D는 투습도에서 ALC 전용 마감재로써 기능이 발휘될 것으로 기대되나 표준투수 및 가압투수량이 많고 시간의 경과에 따른 투과량의 증가속도도 높다. 이러한 마감재는 마감재층을 통한 투수 및 결빙으로 인한 가압투수에 의하여 발

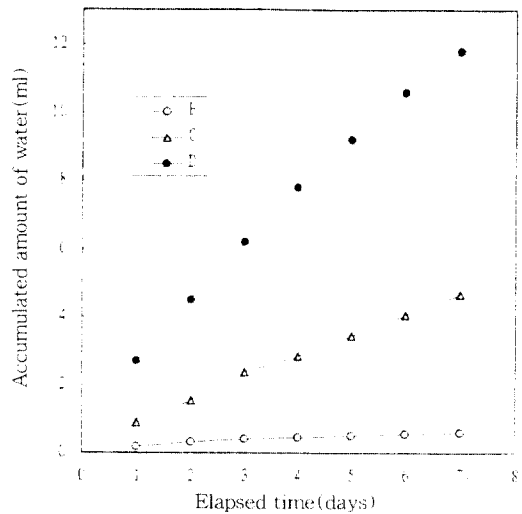


Fig. 5 Accumulated amount of water as a function of elapsed time by normal water permeation test
B, D : Domestic finishing agent
C : Foreign finishing agent(Japan)

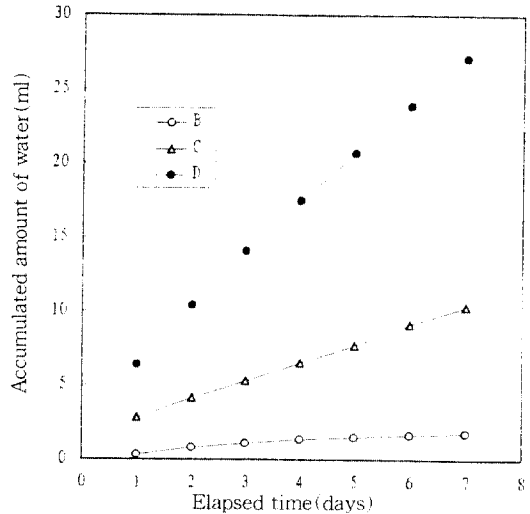


Fig. 6 Accumulated amount of water as a function of elapsed time by pressurized water permeation test
B, D : Domestic finishing agent
C : Foreign finishing agent(Japan)

생하는 박리에 의한 동결융해를 개선하는데 문제를 갖고 있다. 三森敏司⁷⁾의 연구에 의하면 가장 바람직한 ALC 전용 마감재는 가급적 높은 투습율에 낮은 투수율을 갖을 것이 요구된다. 바꾸어 말하면 동일 조건에서 투습 및 투수시험이 진행되었을 때 투습도가 높으면서 투수에 대한 투수의 비 $[(\text{투수도}(\text{ml}/\text{m}^2\text{h}) \times \text{밀도}(\text{g}/\text{nl})) / \text{투습도}(\text{g}/\text{m}^2\text{h})]$ 가 작을수록 ALC 전용 마감재로 적합

하다. 그러나 투습이 높으면 투수도 높은 상관관계와 온도 및 상대습도의 조건에 따라 마감재의 투습·투수 특성이 달라지는 관계로 실질적으로 ALC에 요구되는 이러한 특성을 만족하는 전용 마감재의 제조는 어려운 것이 사실이다. 谷川 申¹⁸⁾ 등은 이러한 문제점을 극복하기 위하여 마감재 도포면의 표면처리제를 포함하여 마감재 종류 및 도장 방법에 따른 투습 및 투수의 관계를 연구한 바 있다.

3.3 편면동결융해시험

ALC의 동결융해 시험법은 크게 폼넘동결융해 시험, 일면동결지속시험 및 전면동결융해시험으로 크게 나누어진다. 편면동결융해시험은 한면지에서 외벽재로 사용된 ALC에 대한 동결융해 시험 방법으로 실내측을 모사한 장치에서 고온다습한 실내측의 공기가 외부로 투과되면서 발생하는 결로에 따른 내부균열의 열화를 평가하는데 이용된다. 편면동결융해시험을 50 cycle 실시한 ALC 시험체를 Photo. 1에 나타냈다. 마감재를 무처리한 시험체(A)는 발포방향에 대하여 수직으로 절단한 상부와 하부 시험체 모두 열화에 의한 균열이 관찰되고 있다. 국내 B, D사의 마감재를 처리한 ALC와 일본에서 제조된 마감재 C를 처리한 시험체에 있어서도 같은 결과를 나타내고 있다. 균열이 발생한 위치는 마감재를 처리한 시험체에서는 마감재를 처리하지 않은 시험체 A에 비하여 상대적으로 옥내측으로 치우쳐 있다. 이러한 현상은 실내측에서 공급되는 수분에 의하여 옥외측에 결로영역(結露領域)이 형성되어 수분의 축적이 일어난다. 이렇게 축적된 수분은 모세관현상에 의해 역방향으로 이동하게 된다. 즉 투습도가 크면 결로영역이 작아 열화에 의한 균열은 옥외측에 위치하고, 투습도가 작으면 결로영역이 커져 옥내측으로 근접하게 된다. 따라서 본 시험에서 관찰된 열화에 의한 균열도 같은 이유로 설명될 수 있으며 앞의 투습시험 결과와 관련지어도 같은 원인으로 설명된다.

옥내측의 다습한 공기중에 함유된 수분의 결로에 의한 동결융해는 투습도가 높은 마감재를 사용

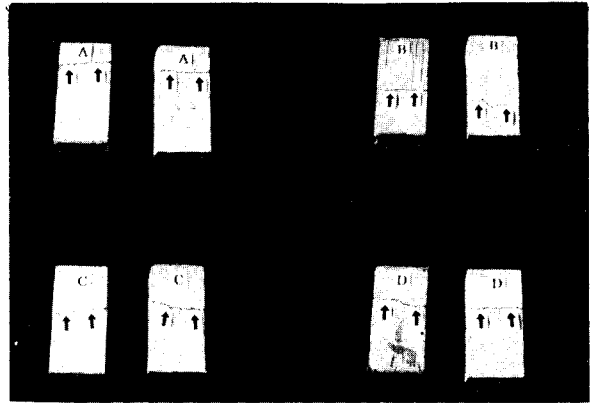


Photo.1 Deterioration of ALC by one side freezing/ thaw test A : No finishing agent B, D : Domestic finishing agent C : Foreign finishing agent(Japan) (Arrows indicate the crack and outer wall side)

하여도 발생하기 때문에 ALC의 투기성을 상실하지 않는 범위에서 투습차단 건축재료를 사용한 건축기법에 의하여 최대한 방지하는 기술이 이용되고 있다.

3.4 탄산화

Fig. 7에 함수율에 따른 탄산화 깊이의 경시변화를 나타냈다. 함수율이 60%에서 15%로 작아질수록 탄산화 진행속도가 빠르게 나타났다. 이는 고함수율의 ALC는 저함수율에 비여 tobermorite

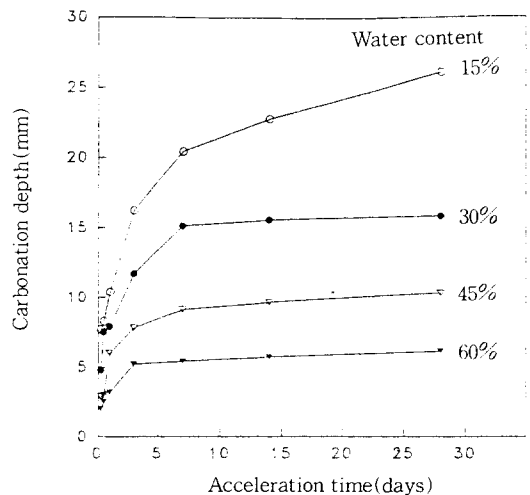


Fig. 7 Progress of carbonation as a function of water content in ALC with elapsed time

결정 표면에 보다 두꺼운 수층이 형성되어 있음으로 CO₂ 개스의 확산 속도가 저해되기 때문으로 판단된다. 中村秀三⁽⁹⁾의 연구에 따르면 탄산화에서 적정량의 수분은 촉매로 작용하여 탄산화 속도를 증진시키기 때문에 절건된 ALC의 탄산화는 대기 중의 CO₂ 농도 약 300ppm 정도에서는 아주 느리다. 반면 CO₂ 개스의 농도가 높은 발효식품공장등에서는 탄산화에 따른 내구성 저하를 방지하기 위한 대책등이 필요하다.

탄산화 진행에 따른 tobermorite 결정의 성장변화에 대한 X-선 회절분석을 Fig. 8에 나타냈다. 깊이에 따른 분석결과 2θ값 11.3 Å(1.13nm)에서 나타나는 tobermorite 결정의 피크가 탄산화가 많이 진행된 표면(a) 및 표면하부층(b)에서는 거의

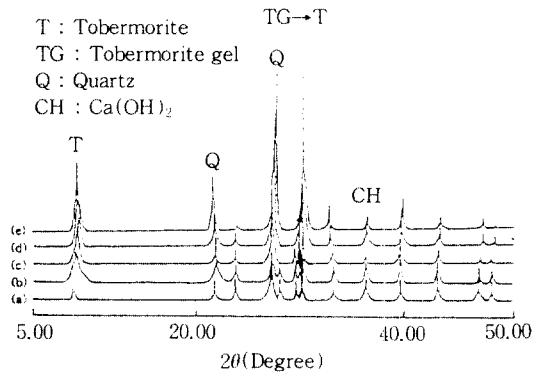


Fig. 8 X-ray diffraction patterns of partially carbonated ALC from surface(a) to core(e)

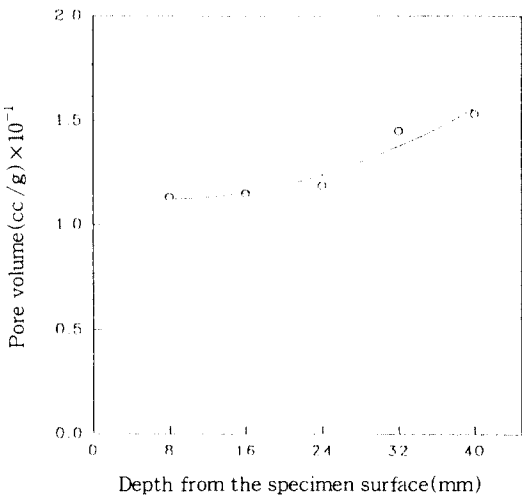


Fig. 9 Variation of pore volume in ALC by carbonation (acceleration time : 3days)

사라졌으며 시험체 내부(f)로 갈수록 뚜렷하게 남아있다. 즉 탄산화가 표면부위부터 진행되어 tobermorite 결정이 파괴되면서 CaCO₃를 생성시키는 것으로 판단할 수 있다. 60% 함수율을 지닌 시험체를 3일 동안 탄산화시킨 후 그 깊이에 따른 기공량의 변화를 Fig. 9에 나타냈다. 탄산화가 어느 정도 진행된 표면부의 기공량이 중심부에 비하여 적은 것을 확인할 수 있다. 이것은 탄산가스가 tobermorite 중의 CaO와 반응하여 CaCO₃를 생성시키면서 ALC 내부의 기공 일부를 채우기 때문인 것으로 고려할 수 있으며, 이것은 Photo. 2의 SEM 사진을 통하여 확인할 수 있다. 미탄산화한 ALC의 SEM 사진과 비교하여 볼 때 탄산화가 진행된 시험체에서는 tobermorite 결정사이에 CaCO₃가 생성되어 있음이 확인되고 있다. 탄산화에 의하여 생성된 CaCO₃는 CaO보다 부피가 증가하여 ALC가 많은 공극을 가지고 있음에도 불구하고

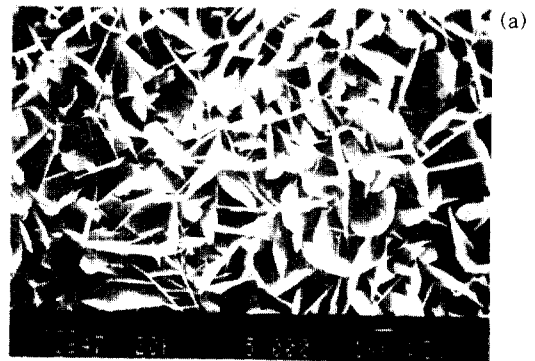


Photo.2 SEM photographs of non-carbonated ALC(a) and calcium carbonate produced in carbonated ALC (b)

고 균열발생의 원인이 되어 탄산화 시험체가 파손된 것을 육안으로 확인할 수 있었다.

4. 결 론

경량기포콘크리트(ALC)의 내구성 개선을 위하여 국산 마감재 2종과 일산 마감재 1종에 대하여 투습 및 투수, 편면동결융해 특성을 살펴봤으며 탄산화 특성에 대하여 실험하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 일산 ALC 전용 마감재에 비하여 국산 마감재는 방수용 도장재에 가까운 투습 및 투수 특성을 나타내 ALC 전용 마감재가 갖추어야 할 고투습·저투수의 특성을 갖추는 방향으로 개선이 요구되었다.
- (2) 편면동결융해시험에서 마감재의 투습도에 따른 열화의 발생위치는 투습도가 클수록 외측에 위치하는데 이는 내부에 축적되는 수분의 양이 마감재의 투습도에 따라 달라지게 되어 투습도가 낮으면 축적량이 많아 결로영역(結露領域)이 내측에 위치하게 되고 균열도 실내측에 가깝게 발생한다.
- (3) 탄산화 속도는 수분 함량에 영향을 받아 수분 함량이 작을수록 속도는 빠르게 나타났으며 탄산화가 진행됨에 따라 기공량은 감소하였다.

감사의 글

본 연구는 통상산업부 공업기반기술과제(과제번호 ; 911-26-23)로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 御代健次郎, 長山毅一, “輕量氣泡コンクリート”, セラミクス, Vol.13, No.2, 1978, pp.96-102.
2. 노재성, “ALC의 제조기술 및 현황 (Ⅰ), (Ⅱ), (Ⅲ)”, 월간세라믹스 Vol.5, No.6, 7, 8, 1992.
3. 長谷川壽夫, 坂東玲一, “寒冷地における ALC外壁構法に関する研究(その1. 實驗概要と外壁構成による水分蓄積量)”, 日本建築學會大會講演梗概集, 1990, pp.53-54.
4. 仵步修, 鎌田英治, 田畑雅幸, “ALCの凍害劣化メカニズムと耐凍害性評價法に関する研究”, 第44回セメント技術大會講演集, 1990, pp.478-483.
5. 楊靜, 大岸佐吉, 小野博宣, “ALCの炭酸化促進による物性變化に関する研究”, 第46回セメント技術大會講演集, 1992, pp.614-619.
6. 谷川伸, 入田一, 鎌田英治, 吉野利幸, 十河哲也, “外装仕上塗材による ALCの凍害防止に関する研究(その2 豫備實驗結果)”, 日本建築學會大會講演梗概集, 1990, pp.51-52.
7. 三森敏司, 大樂隆男, 鎌田英治, 仵步修, “ALCを下地とした仕上塗材の透水, 透濕性狀と耐冬害性の關係”, 日本建築學會大會講演梗概集, 1990, pp.345-346.
8. 谷川伸, 入田一, 鎌田英治, 吉野利幸, 十河哲也, “外装仕上塗材による ALCの凍害防止に関する研究(その3 暴露試験に供した塗材の透濕性, 透水性について)”, 日本建築學會大會講演梗概集, 1991, pp.347-348.
9. 中村秀三, “炭酸化の機構に関する一考察”, 第48回セメント技術大會講演集, 1994, pp.644-649.

(접수일자 : 1995. 6. 9)