

Multiple Light Scattering 분석법을 이용한 천연수경성석회의 초기경화 거동

문기연* · 조계홍* · §조진상* · 홍창우**

*한국석회석신소재연구소 연구개발실

**한국교통대학교 토목공학과

Early Hardening Behavior of Natural Hydraulic Lime Paste by Multiple Light Scattering Analysis

Ki-Yeon Moon*, Kye-Hong Cho**, §Jin-Sang Cho* and Chang-Woo Hong**

*Korea Institute of Limestone and Advanced Materials

**Department of Civil Engineering, Korea National University of Transportation

요 약

본 연구에서는 무기질 첨가제를 혼합한 천연수경성석회의 초기경화 거동분석을 위해 multiple light scattering 분석법을 이용하였다. 자체 제조한 천연수경성석회의 물성향상을 위해 고로수쇄슬래그 및 3종류의 석고를 혼합비에 따라 혼합하였으며 물-고체비 0.6으로 페이스트를 제조하였다. 제조한 페이스트를 이용하여 원통형의 용기에 일정량을 담아 장비(Turbiscan LAB, Formulaction)에 장입하여 분석을 실시하였다. 페이스트로부터의 backscattering flux(BS, %)는 23°C의 온도에서 분석용기 전체높이(55 mm)에 대해 24시간 동안 10분 간격으로 측정되었다. 모든 시료에서 전체적으로 BS는 시간경과에 따라서 증가하는 경향성을 보였다. 고로수쇄슬래그와 석고를 첨가함에 따라서 시간에 따른 BS의 증가 속도는 0.02에서 0.38 BS %/hour 까지 증가하였다. 반수석고를 혼합하였을 경우 가장 높은 backscattering flux와 BS의 증가속도를 보였다.

주제어 : 천연수경성석회, 초기경화, multiple light scattering, 고로수쇄슬래그, 석고

Abstract

In the present study, the multiple light scattering method was used for analysis of early hardening behavior of natural hydraulic lime (NHL) containing inorganic additives. In order to improve the properties of self-manufactured NHL, blast furnace slag and three types of gypsum were mixed with mixing ratio, and a water/solid ratio of fresh NHL paste was fixed 0.6. The fresh pastes in flat-bottomed cylindrical glass tubes were placed in the instrument. The backscattering flux (BS) of light from fresh pastes was then periodically measured at 10 minutes intervals the entire length of the sample (55mm) at 23°C for 24 hours. The rate of increase of BS, slope of a linear equation to the mean value of BS (%) as a function of hydration time, was increased from 0.02 to 0.38 BS %/hour due to addition of blast furnace slag and gypsum. In the case of addition of hemi-hydrate, BS (%) and rate of increase in BS were highest.

Key words : Natural hydraulic lime, early hardening, multiple light scattering, blast furnace slag, gypsum

· Received : December 9, 2016 · Revised : January 18, 2017 · Accepted : February 2, 2017

§ Corresponding Author : Jin-Sang Cho (E-mail : chsang@kilam.re.kr)

R&D Department, Korea Institute of Limestone and Advanced Materials, 18-1, Udeok-gil, Maepo-eup, Danyang-gun, Chungcheonbuk-do, 27003, Korea

© The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. 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.

1. 서 론

천연수경성석회(Natural Hydraulic Lime, 이하 NHL로 칭함)는 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 를 주성분으로 하는 응결경화 재료로서 제조 형태에 따라서 시멘트 광물상인 C_2S , C_3S 및 C_3A 등을 함유시킬 수 있다. 또한, 사용하는 용도에 따라 응결 및 강도특성 개선을 위한 무기질 혼화제를 첨가하여 사용하기도 한다. 유럽에서는 NHL의 구성성분에 따라 종류를 구분하고 있으며 그 종류에 따라서 응결, 압축강도, 안정도, 수분함량 등 부합되어야 하는 품질특성을 규정하고 있다¹⁾. 이러한 특성은 수경성석회의 구성성분과 첨가되는 혼화제의 종류에 따라 다르게 나타나며 이를 분석하기 위한 다양한 방법이 여러 연구자들에 의해 보고되어 왔다²⁻⁵⁾. 수경성석회는 수경성 및 기경성을 동시에 발현시키는 재료로서 일정 시간이 지나 경화된 이후의 미세구조 분석으로 물리적 특성을 유추하여 해석할 수 있다. 대표적인 방법으로 X선 회절분석, 시차주사열량계분석, 전자현미경 분석 등이 있다. 이와 같은 기기분석을 통해 생성되는 광물상의 함량 및 종류와 시간에 따른 생성속도 그리고 경화체 조직변화를 관찰 할 수 있으며 분석 결과를 토대로 발현되는 압축강도, 휨강도 특성 등과 장기적인 내구성을 예측할 수 있다. 응결경화재료의 경화체에 대한 화학적 특성뿐만 아니라 주수 직후 응결과정을 거쳐 경화되는 초기수화 거동도 매우 중요한 요소 중의 하나이다. 초기 수화 반응에 대한 분석방법으로 미소수화열분석⁵⁾, 임피던스 분광분석⁶⁾, 응결측정 및 NMR(nuclear magnetic resonance spectroscopy) 측정⁷⁾ 등이 보고되어 왔으나 초기 경화에 대한 미세구조 변화를 실시간으로 분석한 예는 거의 찾아볼 수 없다. Formulation사의 Turbiscan LAB이란 분석장치는 현탁액의 종류에 관계없이 분산 또는 유화 안정성을 분석할 수 있는 장비로서 응결경화 재료의 주수 직후 굳지 않은 상태에서 시간에 따라 경화되는 과정을 실시간으로 분석할 수 있다. NHL의 초기경화에 대한 특성은 주로 점도측정 및 응결시험 등의 방법으로 연구되어 왔다. 이러한 분석법은 경화가 진행되고 있는 재료의 미세구조를 실시간으로 모니터링 하는데 한계가 있어 본 연구에서는 multiple light scattering(이하 MLS라 칭함) 분석법이 적용된 Turbiscan LAB 장비를 활용하여 NHL의 초기경화 거동을 조사해 보고자 하였다.

2. 실험방법

2.1. 사용재료

국내 저품위 석회석을 이용하여 NHL을 제조하였다. Table 1의 화학성분 분석결과에서와 같이 CaO 함량이 42.8%로 상대적으로 품위가 낮은 석회석을 알 수 있으며 SiO_2 13.8%, Al_2O_3 3%로 시멘트 광물상을 생성시킬 수 있는 성분이 포함되어 있다. 저품위 석회석을 전기로를 이용하여 1250°C에서 2시간 동안 소성하여 클링커를 제조하였으며 수화, 건조 및 분쇄 공정을 통해 최종 NHL을 제조하였다. 제조된 NHL의 광물상 분석결과를 Fig. 1(a)에 나타내었다. 주 광물상은 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, C_2S , C_3S , SiO_2 및 gehlenite ($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSiO}_7)$)이었으며 NHL의 주요 광물상인 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 및 C_2S 가 다량 포함되어 있어 기경성 및 수경성을 동시에 발현시킬 수 있을 것으로 보였다. 무기질 첨가제로서 고로수쇄슬래그(Blast Furnace Slag, 이하 BFS로 칭함), 이수석고(Dihydrate), 반수석고(Hemi-hydrate) 및 무수석고(Anhydrite)를 이용하였다. Fig. 1(b) 및 (c)에 광물상 분석결과를 나타내었다. BFS의 경우 비정질 상임을 알 수 있었으며 석고의 경우 H_2O 의 결합 형태에 따라 이수석고는 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 반수석고는 $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$, 무수석고는 CaSO_4 로 구성되어 있음을 알 수 있었다.

2.2. 페이스트 제조

총중량 50g을 기준으로 NHL, BFS 및 종류별 석고를 배합비에 따라 볼밀로 10분 동안 혼합하여 NHL 조성물을 제조하였다(Table 2). 준비된 조성물을 스테인리스 용기에 넣은 다음 물/고체비 0.6으로 증류수 첨가 후 3분 동안 교반을 실시하여 페이스트를 제조하였다.

2.3. MLS analysis by Turbiscan LAB

2.3.1. 측정이론

Formulation사의 Turbiscan LAB 분석 장치는 현탁액과 에멀전 형태인 일정 농도로 처리된 용액의 초기 불안정성을 보다 빠르게 분석할 수 있게 제작된 것이다.

Table 1. Chemical composition of low-grade limestone (unit: %, by weight)

MgO	Al_2O_3	SiO_2	CaO	Fe_2O_3
1.32	3.04	13.8	42.8	0.98

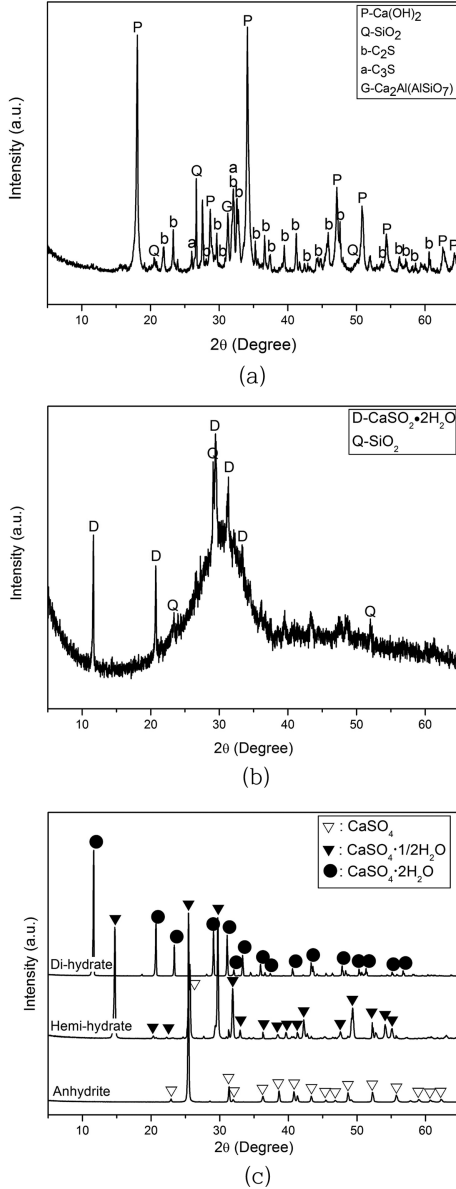


Fig. 1. XRD patterns of raw materials. (a) NHL, (b) BFS, (c) Gypsum.

현탁액의 경우 부피비로 20%까지 고농도 미디어에서 발생하는 입자간 상호반응을 이 기기를 통해 정량적으로 측정할 수 있다. 측정원리는 분산매가 담긴 column의 높이에 따라 투과되거나 반사되어 나오는 light flux를 검출하는 것이다. 장치는 샘플이 담겨있는 직경 15 mm, 높이 55 mm인 실린더 형태 셀의 바닥부터 위쪽으

Table 2. Mixing ratio of raw materials and designation (unit : %, by weight)

No.	NHL	BFS	DH ¹⁾	HH ²⁾	AH ³⁾	Designation
1	100	-	-	-	-	Plain
2	70	20	-	-	-	NB20
3			3	-	-	NB20DH03
4			10	-	-	NB20DH10
5			-	10	-	NB20HH10
6			-	-	3	NB20AH03
7			-	-	10	NB20AH10

¹⁾: Di-hydrate, ²⁾: Hemi-hydrate, ³⁾: Anhydrite

로 매 40 μm 간격으로 이동하는 detection head로 구성된다. 광원으로 파장이 880 nm인 근적외선(Near Infrared)을 사용하며 광원의 반대편(180°)에 위치한 transmission detector, 그리고 입사각과 45° 뒤쪽에 위치한 backscattering detector로 측정되며 이를 통해 입자크기(d)와 농도(Φ)에 따른 transmission과 backscattering intensity(%)가 동시에 분석된다. 식 (1)과 (2)에 따르면 입자의 부피분율 및 평균입도와 같은 파라미터와 반사되어 나오는 빛의 강도(backscattered light intensity) 사이에 관계가 있음을 알 수 있다^{8,9)}.

$$BS \approx \frac{1}{\sqrt{l^*}} \quad (1)$$

$$l^*(\Phi, d) = \frac{2d}{3\Phi(1-g)Q_s} \quad (2)$$

여기서 BS는 backscattered light의 강도(%), l^* 는 photon의 이동 경로, d는 입자의 평균입도, Φ 는 고체의 부피분율, g는 asymmetry factor, Q_s 는 scattering efficiency factor이다.

g와 Q_s 는 Lorentz-Mie 이론에 의한 광학적 파라미터이다. 식 (3)과 (4)는 투과되는 빛의 강도(transmitted light(T_r))와 위에서 말한 파라미터 사이에 관계를 나타낸다.

$$T_r \approx \exp\left[-\frac{r_i}{l}\right] \quad (3)$$

$$l = l^*(1-g) = \frac{2d}{3\Phi Q_s} \quad (4)$$

여기서 r_i 는 측정 셀의 내부 직경 이다.

검출된 데이터를 이용하여 시간에 따른 함수로 계산을 하면 분산 또는 응집에 의한 입도 변화를 알 수 있으며, 측정 셀 내에서 입자가 침강되는 정도를 높이의 함수로 계산하여 입자이동을 정량적으로 해석할 수 있다. 아울러, 시간에 따라 용매와 고체간 반응에 의해 조직 치밀해 지는 경우 광을 조사하였을 때 반사되어 나오는 빛과 지지내부로 흡수되는 빛이 발생하게 되며 반사되는 flux를 시간에 따른 함수로 표현할 경우 조직이 치밀해 지는 반응속도를 정량화 할 수 있다.

2.3.2. 측정조건

NHL의 초기경화에 대한 조직 변화를 관찰하기 위해 Trubiscan LAB을 이용하였다. 분석 시 분위기 온도는 23 °C로 하였으며 측정시간은 24시간, scan speed는 10 분 간격으로 하여 총 145회 측정을 실시하였다. 제조된 페이스트를 측정 셀에 50 mm 정도 높이로 채우고 내부 공극을 없애기 위해 5회 다짐 후 기기에 장입하여 분석을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

실험실에서 제조한 NHL을 주원료로 무기질 첨가제가 배합된 조성물의 초기수화 거동을 분석하기 위해 배

합비 별 페이스트를 제조하여 MLS 분석을 실시하였다. 준비된 페이스트를 측정용기에 약 50 mm 높이 정도로 주입 후 측정기기에 장입하여 5분 간격으로 총 24시간 동안 측정하였다. Fig. 2는 NHL에 BFS를 20% 혼합하여 준비한 페이스트의 backscattering flux(이하 ‘BS’라 칭함)를 나타낸 것이다. 그림 하단은 측정 셀을 나타낸 것이고 근적외선은 셀 하단인 왼쪽부터 오른쪽으로 높이 55 mm까지 40 μm 간격으로 측정된다. 셀 높이에 따른 측정 단위는 초기 투입광의 세기를 100%로 할 때 반사되는 빛(Backscattering light)의 세기를 %로 나타내게 된다. 반사되는 빛은 시료에 투입 시 간섭현상으로 인해 초기 값보다 낮게 나타나게 된다. 그림에서와 같이 측정 초기부터 24시간 까지 지속적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 측정 초기 BS는 약 55% 정도에서 약 58%까지 증가하였으며 높이 2.5 mm에서 33.5 mm까지 profile을 확대해 보면 더 확실하게 증가하고 있음을 볼 수 있다. 이러한 BS값의 시간에 따른 변화가 나타나게 되는 현상을 Fig. 3과 같이 NHL 모르타르로 예를 들어 나타내었다. Fig. 3(a)는 NHL 조성물에 물을 투입한 직후의 모식도로 광원으로부터 빛이 시료 내에 조사되면 아직 수화초기로서 수화반응 및 탄산화 반응이 일어나기 전이고 주입된 물이 잔존하고 있기 때문에 빛이 반사되기 보다는 시료 내부로 흡수되

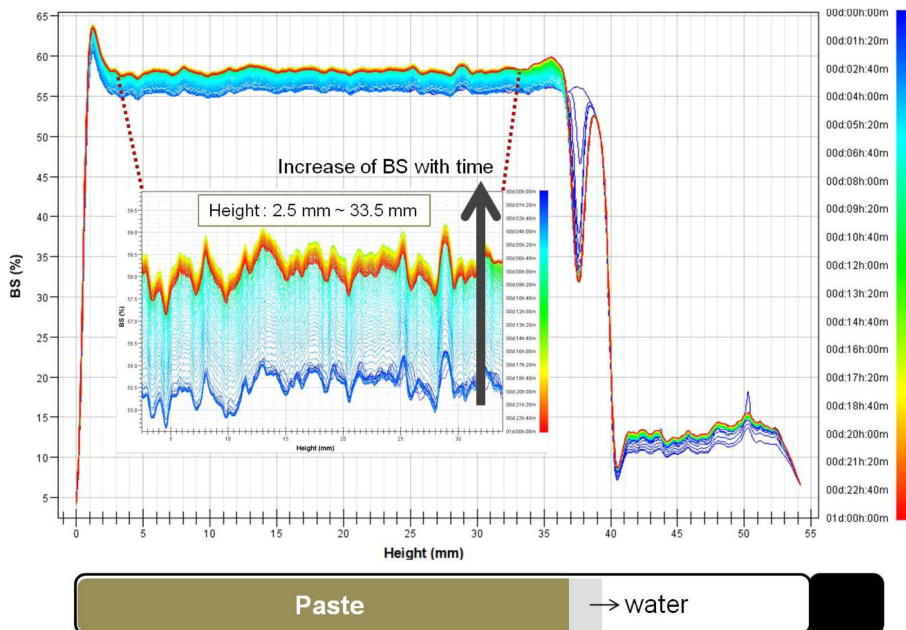


Fig. 2. Backscattered light of NHL paste mixed with 20% of BFS.

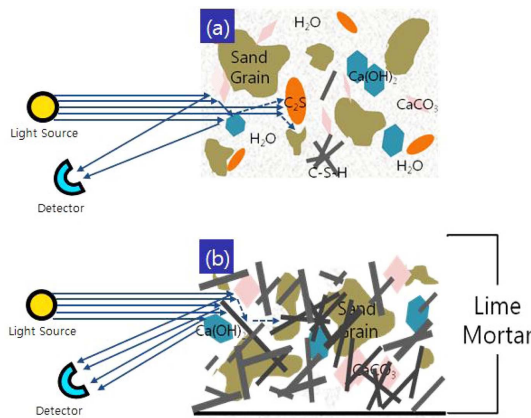


Fig. 3. Schematic representation of the backscattered phenomena of light in the natural hydraulic lime mortar from TURBISCAN apparatus. (a) Fresh mortar, (b) Hardened mortar.

는 양이 많은 것으로 판단된다. 이 때 시료내부에는 아직 반응하지 않은 Ca(OH)_2 및 C_2S 가 많이 남아있게 된다. 수화시간이 경과됨에 따라서 Ca(OH)_2 의 탄산화 반응과 C_2S 의 수화반응에 의해 반응물이 생성되고 입자간 공극을 채워주면서 경화가 일어나게 된다(Fig. 3(b)). 생성되는 수화물의 종류는 첨가되는 혼합재의 종류에 따라 달라질 수 있으며 경화속도도 각기 다르게 발현된다. 그림에서와 같이 반응생성물에 의해 경화체 조직은 초기에 비해 점점 치밀해 질 것이며 이로 인해 조사되는 빛이 다시 반사되어 나오는 확률이 높아 질 것으로 판단된다. 이와 같이 측정직후에 비해 시간경과에 따라 BS는 증가하게 되고 증가되는 속도와 BS 값은 물/고체비, 수화온도, 첨가되는 혼합재의 종류 등에 따라 다른 경향을 보이게 될 것이다. 이러한 경향성에 대한 차이점을 확인하고자 BFS와 형태별 석고를 일정 배합비로 혼합하여 실험을 실시하였다. BFS는 석고가 없을 시 시료내 Ca(OH)_2 와 반응하여 C-S-H 수화물과 C-A-H 수화물을 생성시킴으로서 응결 및 경화가 빠르게 진행된다. 이 조성물에 석고를 배합하였을 경우 석고의 SO_3 와 BFS가 반응하여 ettringite 또는 monosulfate 수화물을 생성시켜 경화체의 조직을 더욱 치밀하게 하고 내구성 증진에 큰 역할을 하게 된다¹⁰⁾. Fig. 4는 NHL 원시료에 BFS 20%를 혼합한 경우와 이 조성물에 세 가지 종류의 석고(이수석고, 반수석고, 무수석고)를 각각 10% 혼합하였을 경우 시간에 따른 BS의 변화를 그래프로 나타낸 것이다. NHL이 100%인

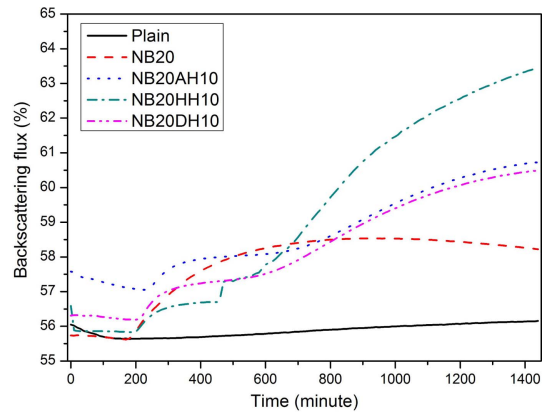
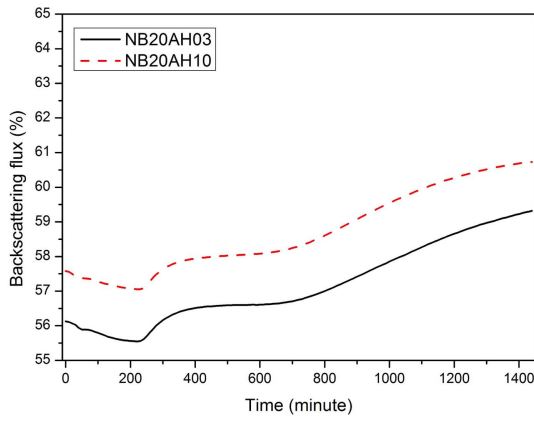
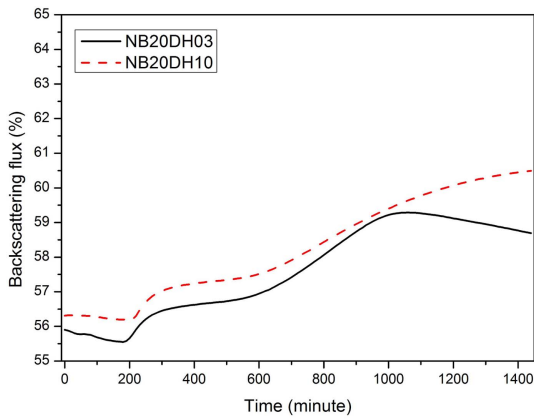


Fig. 4. Backscattering flux (%) of NHL paste mixed with different types of gypsum 10%.

Plain은 측정 초기부터 수화 24시간 까지 BS가 증가하기는 하나 그 정도가 상당히 미비한 것을 볼 수 있다. 그러나 석고를 혼합한 경우를 포함하여 BFS를 첨가한 경우 모두 뚜렷한 경화 특성을 보이고 있다. BFS를 혼합한 경우 200분 전후로 초기경화가 진행되기 시작하는 것으로 판단된다. BFS만 혼합한 NB20은 200분 정도에서 BS가 급격히 증가하면서 경화가 진행되어 최대 약 58%까지 BS가 증대 되면서 이후 일정한 수준을 유지하고 있음을 알 수 있다. 석고를 종류별로 첨가함에 따라서 BS가 빠르게 증가되는 시점은 다소 지연되고 있으며 NB20시료의 BS가 최대값을 보이는 약 600분에서 모두 낮은 BS 값을 보였다. BFS는 주수직 후 초기에 빠른 이온용출로 인해 일시적으로 반응이 진행되지만 이후 BFS 입자 표면에 불투수성 막이 생성되어 서서히 수화반응이 진행되기 때문이다¹¹⁾. 수화 600분 이후 약 800분 이상에서는 석고를 혼합한 경우 모두 NB20보다 높은 BS 값을 보이며 석고의 종류에 따라서도 차이를 보였다. BFS와 석고를 같이 혼합하였을 때는 초기에 고허산염 수화물인 ettringite를 생성시키게 되며 이런 수화물 생성으로 인해 응결시간은 다소 늦어지게 된다. 그러나 수화가 진행됨에 따라서 지속적으로 침상형의 ettringite 수화물이 생성되고 이 수화물은 수화시간에 따라 조직을 더욱 치밀하게 하는 역할을 하게 된다¹⁰⁾. 장기적으로 보았을 때 경화체는 더 높은 강도와 내구성을 보이게 된다. 이와 같은 원인으로 Fig. 4와 같은 경향이 나타난 것으로 보이며 석고 종류에 따라서는 반수석고를 혼합한 NB20HH10 시료가 600분 이후 가장 빠른 BS 상승률을 보이고



(a)



(b)

Fig. 5. Backscattering flux (%) of NHL paste mixed with contents of gypsum. (a) Anhydrite, (b) Di-hydrate.

최대 BS값이 약 63% 이상을 나타내 수화반응속도가 다른 석고 혼합의 경우보다 빠른 것으로 판단된다. 다만, 이러한 결과는 NHL의 초기수화에 해당하는 24시간까지의 경향을 나타낸 것으로 장기적 강도발현 특성과의 연관성 규명은 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 5는 무수석고 및 이수석고의 혼합비에 따른 BS 변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 각 석고별 혼합량이 증가함에 따라서 전체적인 BS값은 증대됨을 알 수 있으며 Fig. 5(a)의 무수석고를 혼합한 시료가 이수석고를 혼합한 시료보다 증가폭이 더욱 커 수화물 생성을 위한 석고의 활성화도가 더 높다는 것을 간접적으로 유추할 수 있었다. 그와 반대로 이수석고는 혼합량 증가에 따라 초기수화에 기여하는 정도는 낮을 것으로 판

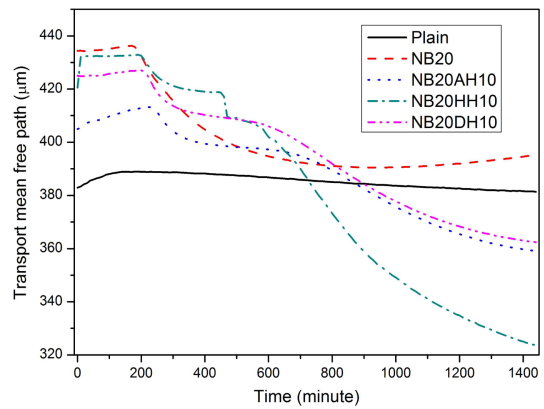
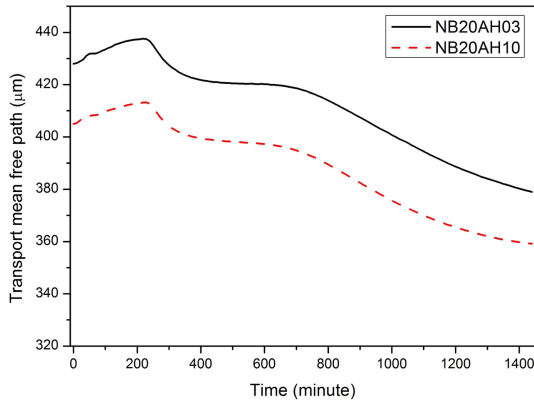


Fig. 6. Transport mean free path of NHL paste mixed with different types of gypsum 10%.

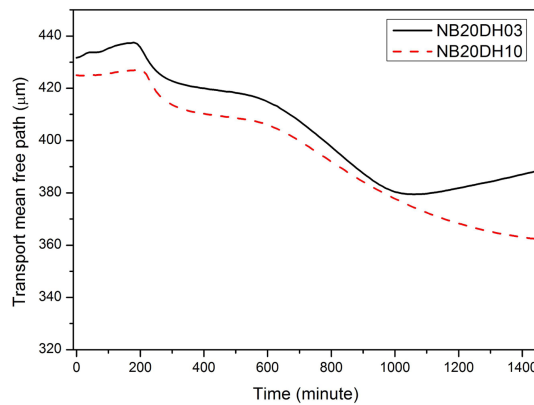
단되었다¹²⁾.

앞 절의 MLS 측정이론에서 제시한 바와 같이 BS값은 빛의 평균 이동경로와 연관이 있으며 빛의 이동경로가 짧을수록 BS 강도는 더 높게 된다. Fig. 6과 Fig. 7은 배합비별 시간에 따른 Transport mean free path 값의 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 각각의 변화값은 BS의 경향성과 비교하여 반대의 경향을 보이는 것을 알 수 있다. Plain 샘플은 약 390 μm 전후의 값으로 큰 변동이 없어 초기경화가 더디게 진행됨을 알 수 있다. 무기질 혼합재를 첨가한 모든 시료의 경우 수화시간에 따라 반응생성물 생성에 의해 그 변화폭이 큰 것을 알 수 있으며 BS 변화 그래프에서와 같이 반수석고를 혼합한 경우 최소 320 μm 정도의 이동경로를 보여 조직의 치밀화가 빠르게 진행됨을 보였다.

각 배합비 별 시간에 따른 BS 및 transport mean free path 변화 데이터를 기초로 구동 소프트웨어를 이용하여 시간에 따른 변화속도, 최대/최소값 및 각각의 평균값을 산출하였으며 그 결과를 Table 3 및 Table 4에 나타내었다. Table 3은 배합비에 따른 BS 산출값을 나타낸 것으로 slope는 시간에 따른 BS 변화에 대한 속도를 나타낸 것이다. 앞서 설명한 바와 같이 반수석고를 혼합한 경우 최대 0.38%의 BS 변화속도를 보여 빠른 수화가 진행됨을 알 수 있으며 평균값도 59.25%로 가장 높았다. Table 4의 빛의 이동경로에 대한 결과도 마찬가지로 전체적으로 마이너스 값을 보이며 빛의 이동경로가 짧아지게 되며 반수석고를 혼합한 경우가 -5.49 μm/h로 가장 빠른 감소폭을 보였다. 최대값은 432.9 μm로 다소 높았지만 전체 평균값을 보았을 때



(a)



(b)

Fig. 7. Transport mean free path of NHL paste mixed with contents of gypsum. (a) Anhydrite, (b) Di-hydrate.

Table 3. Backscattering flux value of NHL paste mixed with different types of gypsum

Sample name	Slope (%/h)	Max. (%)	Mean (%)	Min. (%)	R ²
Plain	0.02	54.16	53.88	53.64	0.773
NB20	0.12	58.54	57.76	55.62	0.666
NB20DH03	0.18	59.29	57.62	55.55	0.898
NB20DH10	0.20	60.49	58.27	56.18	0.981
NB20HH10	0.38	63.43	59.25	55.83	0.968
NB20AH03	0.16	59.32	57.18	55.55	0.942
NB20AH10	0.17	60.73	58.72	57.05	0.952

381.94 μm 가장 짧은 빛의 이동경로를 보였다. 이와 같이 MLS 분석 결과로 부터 NHL 조성물에 대한 시간

Table 4. Transport mean free path value of NHL paste mixed with different types of gypsum

Sample name	Slope (μm/h)	Max. (μm)	Mean (μm)	Min. (μm)	R ²
Plain	-0.31	388.96	385.40	381.36	0.773
NB20	-1.85	436.31	402.43	380.46	0.662
NB20DH03	-2.74	437.51	404.84	379.43	0.900
NB20DH10	-3.07	426.98	395.06	362.44	0.982
NB20HH10	-5.49	432.90	381.94	323.76	0.971
NB20AH03	-2.47	437.56	411.51	379.00	0.945
NB20AH10	-2.43	413.20	388.10	359.17	0.955

에 따른 경화체의 조직변화 및 수화진행 정도를 실시간으로 확인 할 수 있었다. 그러나 이러한 경향성에 대한 좀 더 정량적인 해석을 위해서는 측정을 위한 샘플 제조의 최적 전처리 방법, 초기수화 거동에 대한 다른 기기분석결과와의 비교검토를 위한 추가적인 정밀 분석이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

무기질 혼합재를 첨가한 NHL의 초기경화 거동을 분석하기 위하여 multiple light scattering 원리를 적용한 Turbiscan LAB 장비를 이용하였다. NHL 조성물별 샘플을 제조하여 24시간까지 측정을 실시한 결과 전체적으로 BS가 증가하는 경향을 보였다. 주수 직후 초기 굳지 않은 상태에서 경화가 진행됨에 따라 조직이 치밀해 지고 이로 인해 조사된 빛의 반사율이 증가되기 때문인 것으로 판단된다. BFS를 첨가한 NHL 조성물에 종류별 석고를 10% 첨가한 경우 BS는 Plain 샘플에 비해 모두 증가하였다. 수화 24시간에서 반수석고를 혼합하였을 때 가장 높은 약 63%의 BS를 나타내었으며, transport mean free path 값도 최소 약 320 μm 정도의 이동경로를 보여 조직의 치밀화가 빠르게 진행되고 있음을 알 수 있었다. BS 및 transport mean free path 변화를 속도론적으로 고찰해 보았을 때 반수석고 10%를 혼합하였을 경우 각각 0.38%/h, -5.49 μm/h를 나타내 가장 빠른 변화를 보였다. 이러한 결과를 토대로 multiple light scattering 분석법을 이용하여 응결경화 특성을 보이는 NHL 조성물의 초기 경화특성에 대한 속도론적 경향성의 상대적 비교평가가 가능할 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술지역특성화사업 연구개발사업의 연구비지원(15RDRP-B066780)에 의해 수행되었습니다.

References

1. BS EN 495-1:2015, Building lime – Part 1 : Definitions, specifications and conformity criteria
2. El-Shimy, E. et al., 2000 : Physico-chemical and thermal characteristics of lime-silica fume pastes, J. Therm. Anal. Calorim., 60, pp549-556.
3. Amer, A. A., 1998 : Thermal analysis of hydrated fly ash-lime pastes, J. Therm. Anal., 54, pp837-843.
4. Bakolas, A. et al., 2006 : Evaluation of pozzolanic activity and physico-mechanical characteristics in metakaolin-lime pastes, J. Therm. Anal. Calorim., 84, pp157-163.
5. Tydlit, V. et al., 2015 : Application of isothermal calorimetry and thermal analysis for the investigation of calcined gypsum-lime-metakaolin-water system, J. Therm. Anal. Calorim., 122, pp115-122.
6. Pesce, G. L. et al., 2014 : Monitoring hydration in lime-metakaolin composites using electrochemical impedance spectroscopy and nuclear magnetic resonance spectroscopy, Clay Miner., 49, pp341-358.
7. Frias, M. et al., 2013 : Evolution of mineralogical phases by ^{27}Al and ^{29}Si NMR in MK-Ca(OH) $_2$ system cured at 60°C, J. Am. Ceram. Soc., 96, pp2306-2310.
8. Mengual, O. et al., 1999 : TURBISCAN MA 2000: multiple light scattering measurement for concentrated emulsion and suspension instability analysis, Talanta, 50(2), pp445-456.
9. Mengual, O. et al., 1999 : Characterization of instability of concentrated dispersions by a new optical analyser: the TURBISCAN MA 1000, Colloids and Surfaces A: Physico-chemical and Engineering Aspects, 152(1-2), pp111-123.
10. Ki-Yeon, M. et al., 2015 : Effect of gypsum on hydration properties of natural hydraulic lime, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 24(1), pp12-20.
11. Hee-Sup, C. et al., 2009 : A experimental study on the ready-mixed shotcrete using granulated blast furnace slag, Journal of Korean Geotechnical Society, 25(6), pp31-45.
12. Jong-Tac, P. et al., 2009 : Experimental study on the material characteristics of slag cement with various phosphogypsum materials, Journal of the Korea Concrete Institute, 21(6), pp729-735.

문 기 연



- 2011년 한국교통대학교 공과대학 신소재공학과 공학사
- 2015년 한국교통대학교 신소재공학과 공학석사
- 현재 한국석회석신소재연구소 연구개발실 연구원

조 계 홍



- 1984년 인하대학교 무기재료공학과 공학사
- 1988년 인하대학교 요업공학과 공학석사
- 2010년 광운대학교 화학공학과 공학박사
- 현재 한국석회석신소재연구소 연구개발실 책임연구원

조 진 상



- 1999년 단국대학교 재료공학과 공학사
- 2001년 단국대학교 재료공학과 공학석사
- 2013년 강원대학교 지역기반공학과 공학박사
- 현재 한국석회석신소재연구소 연구개발실 선임연구원

홍 창 우



- 1994년 강원대학교 공과대학 토목공학과 공학사
- 1996년 강원대학교 대학원 토목공학과 공학석사
- 1999년 강원대학교 대학원 토목공학과 공학박사
- 현재 한국교통대학교 토목공학과 교수