J Rec Const Resources 8(4)537-544(2020)
https://doi.org/10.14190/JRCR.2020.8.4.537

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

나노 인덴테이션을 통한 경량 고강도 콘크리트 Interfacial Transition Zone (ITZ)의 역학적 특성에 관한 연구

A Study on the Mechanical Properties of Interfacial Transition Zone (ITZ) of Lightweight High Strength Concrete Via Nanoindentation

임수민[1] · 배성철[2*]
Su-Min Im[1] · Sung-Chul Bae[2*]

(Received November 9, 2020 / Revised November 11, 2020 / Accepted November 12, 2020)

The interfacial transition zone(ITZ) which is the boundary layer between cement composites and aggregates is considered to be the region of gradual transition, heterogeneous, and the weakest part of concrete. For the development of lightweight high strength concrete, it is essential to evaluate the mechanical properties of ITZ between high strength concrete with low water-binder ratio and lightweight aggregates. However, the mechanical properties of ITZ are not well established due to its high porosity and complex structure. Furthermore, the properties of ITZ in concrete using lightweight aggregates are dominated by more various variations (e.g. water-binder ratio, water absorption capacity of aggregate, curing conditions) than normal-weight aggregate concrete. This study aims to elucidate the mechanical properties of ITZ in lightweight high-strength cement composites according to the types of aggregates and the aggregate sizes. Nanoindentation analysis was used to evaluate the elastic modulus of ITZ between high strength cement composites with the water-binder ratio of 0.2 and normal sand, lightweight aggregate with different aggregate sizes of 2mm and 5mm in this study.

키워드 : 경량골재, Interfacial transition zone(ITZ), 나노 인덴테이션, 고강도 콘크리트
Keywords : Lightweight aggregate, Interfacial transition zone(ITZ), Nanoindentation, High strength concrete

1. 서 론

최근 구조물의 고층화 및 대형화에 효과적으로 대응하기 위해 콘크리트 재료 경량화, 고강도화 등 성능 개선이 필수적이다. 콘크리트는 크게 시멘트 복합체, 골재, 골재와 시멘트 복합체 사이의 계면 전이 영역인 Interfacial transition zone (ITZ) 3가지로 구성되어 있다. 그중 ITZ는 콘크리트의 가장 취약한 부분으로 알려져 있으며, 콘크리트 균열은 이 영역을 따라 발생한다. 따라서 콘크리트의 경량화 및 고강도화를 위해 ITZ의 역학적 특성 개선은 필수적이다(Kong et al. 2015). 기존 문헌에 의하면 일반 콘크리트 ITZ의 평균 두께는 대략 50μm 이며, 골재의 종류 및 크기, 표면의 거칠기와 시멘트 복합체의 물–바인더 비 등에 의해 그 특성이 변화하는 것으로 알려져 있다(Ke et al. 2010). 또한, 콘크리트 경량화를 위해 경량골재를 적용한 콘크리트는 일반 콘크리트보다 단위질량을 감소시킬 뿐만 아니라, ITZ의 역학적 특성도 개선되는 것으로 알려져 있다(Huang et al. 2019). 흡수율이 일반골재보다 높은 경량골재는 시멘트 수화가 진행됨에 따라 내부 습도가 떨어지는 것을 막아주며, 서서히 수분을 시멘트 경화체 부위로 공급해주는 내부양생 효과(Internal curing effect)로 인해 ITZ에 밀도 높은 수화물을 형성시켜 주는 것으로 알려져 있다. 그리고 경량골재의 표면은 일반골재보다 거칠어 시멘트 복합체와의 부착성능이 증진되어 ITZ의 역학적 특성이 향상된다고 알려져 있다(Huang et al. 2019). 하지만 이는 물–바인더 비가 0.35-0.45의 시멘트 복합체와 경량골재 사이 ITZ의 역학적 특성이며, 물–바인더 비가 0.30이고 플라이

* Corresponding author E-mail: sbae@hanyang.ac.kr
[1]한양대학교 건축공학과 석사과정 (Department of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea)
[2]한양대학교 건축공학과 조교수 (Department of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea)

Copyright ⓒ 2020 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

애시와 실리카퓸 등을 혼입한 시멘트 복합체와 경량골재 사이 ITZ의 역학적 특성은 정반대의 경향을 나타내기도 한다(Ke et al. 2010). 이처럼 수많은 ITZ 관련 연구에도 불구하고, 경량골재 ITZ의 탄성계수를 직접적으로 도출하는 등 역학적 특성에 관한 정량분석은 아직 부족하다. 특히, 낮은 물-바인더 비(0.2)를 갖는 Ultra-high-performance concrete(UHPC)의 시멘트 복합체와 경량골재 간 ITZ의 역학적 특성에 대한 조사도 미비한 상태이다(Yang et al. 2019). 따라서 경량 고강도 콘크리트의 내구성 향상을 위해서 경량골재와 고강도 시멘트 복합체 간의 ITZ 특성 분석은 필수적이다.

ITZ의 두께는 50μm 전후이며, 잔골재의 경우 그 영역이 더 감소하므로, 서브마이크론 혹은 나노 스케일로 접근해서 ITZ의 특성을 분석하여야 한다(Xiao et al. 2013). Rossignolo et al.(2017)의 연구를 포함한 최근 연구에 의하면, 나노 인덴테이션 분석 기법은 ITZ의 탄성계수를 직접적으로 측정하여 역학적 특성 파악이 가능한 것으로 보고되었다(Xiao et al. 2013; Li et al. 2019). 나노 인덴테이션 분석 기법은 기존 콘크리트 특성 분석을 위해 많이 사용되었던 마이크로-비커스 경도 시험에 비해 작은 압입하중(10μN-500mN)을 적용하여 매크로 단위 경도부터 나노 단위 경도까지 정밀하게 측정할 수 있다(Xiao et al. 2013).

본 연구에서는 경량 고강도 콘크리트의 역학적 특성을 이해하기 위한 기초적 자료 수집을 목표로, 골재의 종류 및 경량골재의 크기에 따른 ITZ의 역학적 특성 분석을 실시하였다. 표준사와 크기가 다른 두 가지 경량골재를 물-바인더 비가 0.2인 고강도 시멘트 복합체와 배합하여 시편을 제작하였으며, 제작한 시편은 Scanning electron microscopy-Energy dispersive X-ray spectroscopy(SEM-EDS)를 통해 측정한 Ca/Si 값을 통해 각 3가지 골재 ITZ의 두께를 산출하고, 나노 인덴테이션 분석 기법을 통해 ITZ의 탄성계수를 측정하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 사용재료 및 배합비

경량 고강도 콘크리트 ITZ의 역학적 특성 분석을 위해 본 연구에서는, 표준사(Sand)와 골재 입경의 최대 치수가 각각 2mm 이하(LWA2), 5mm 이하(LWA5)인 두 종류의 경량골재를 사용하였다. 표준사와 경량골재의 밀도는 각각 2.6g/cm^3, 1.7g/cm^3 이다. 해당 골재들은 Table 1과 같이 물-바인더 비가 0.2인 고강도 시멘트 복합체와 혼합하여 Φ20 × 20mm 크기의 시편을 제작하였다. 수화

Table 1. Mix proportion of Sand, LWA2, LWA5

Label	Mass of raw materials(g)							
	W	C	SF	SP1	Samd	LWA2	LWA5	SP2
Sand	104	416	104	104	457.6	-	-	4.8
LWA2	104	416	104	104	-	293.5	-	4.8
LWA5	104	416	104	104	-	-	293.5	4.8

W=Water, C=Cement, SF=Silica fume, SP1=Silica powder, SP2=Superplasticizer

반응에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 고성능 감수제(SP)는 동일한 양을 사용하였다. 제작한 시편은 온도 20℃, 상대습도 95% 환경에서 48시간, 온도 90℃, 상대습도 95% 환경에서 48시간 양생을 진행하였다. 그 후, 온도 25℃, 상대습도 65% 항온항습실에서 28일 양생을 실시하였다.

2.2 연마공정

SEM-EDS 분석 및 나노 인덴테이션 분석의 정확도와 재현성 향상을 위해서는 기계적 연마공정을 거쳐 시편의 표면거칠기가 일정하도록 하는 것이 중요하다. 각 시편은 다공성 재질인 콘크리트의 기공을 채우기 위해 에폭시 레진을 이용한 Cold mounting을 수행하였으며, 아래와 같이 총 9단계의 연마공정을 수행하였다.

- 차례대로 #400, #600, #800, #1200 SiC Paper를 사용하여 약 60 min 정도의 연마작업을 수행하였다. 시편 냉각 용액 및 윤활제는 물에 대한 영향을 최소화하기 위해 isopropanol 용액을 사용하였다.
- 다음으로 #2000, #3000, #4000 SiC Paper을 사용하여 약 70 min 정도의 연마작업을 수행하였으며, 이 과정에서 시편 냉각 용액 및 윤활제는 isopropanol 용액을 사용하였다.
- 1μm, 0.25μm oil-based 다이아몬드 서스펜션을 이용하여 약 90 min 이상 마무리 연마작업을 수행하였다.
- 각 연마과정 중 표면에 있는 오염 물질을 제거하기 위해 ultrasonic-bath에서 약 10 min 정도 세정 공정을 수행하였다.

연마공정을 마친 시편은 원자간력 현미경(Atomic force microscopy, AFM)을 통해 표면거칠기를 확인하였다(Fig. 1). Fig. 1에서 어두운 부분은 경량골재의 표면을 나타내며, 이 영역은 다른 영역에 비해 표면의 높이 차가 다소 큰 것을 확인할 수 있었다. 이는 경량골재가 다공성이므로 골재 자체의 표면이 일정하지 않은 것으로 인해 나타나는 현상으로 보인다. 하지만 골재를 제외한 영

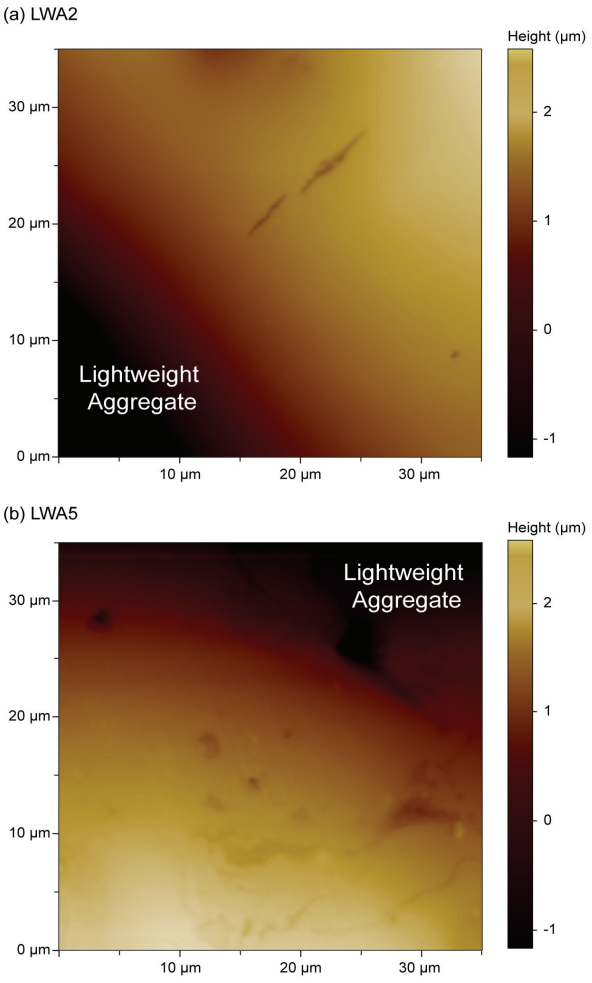

Fig. 1. AFM image of (a) LWA2, (b) LWA5

역의 표면거칠기는 3가지 시편 모두 300nm 이하로써, 나노 인덴테이션 분석에 적합하다고 판단하였다.

2.3 SEM-EDS

SEM-EDS(S-4300, Hitachi, Japan, 1.5nm, 15kV) 분석은 위의 연마공정을 마친 시편을 이용하였으며, 별도 코팅 작업 없이 수행하였다. 측정 위치는 각 시편에 포함되어 있는 골재를 선정한 후, 골재-ITZ-고강도 시멘트 복합체에 걸친 영역의 Ca/Si 몰 비율을 얻어 골재 종류 및 크기에 따른 ITZ 두께 변화를 도출하였다.

2.4 나노 인덴테이션

Fig. 2는 나노 인덴테이션 실험개요도를 나타낸다. 나노 인덴테이션은 Fig. 2와 같이 일정한 기하하적 형상을 가지는 압입자를

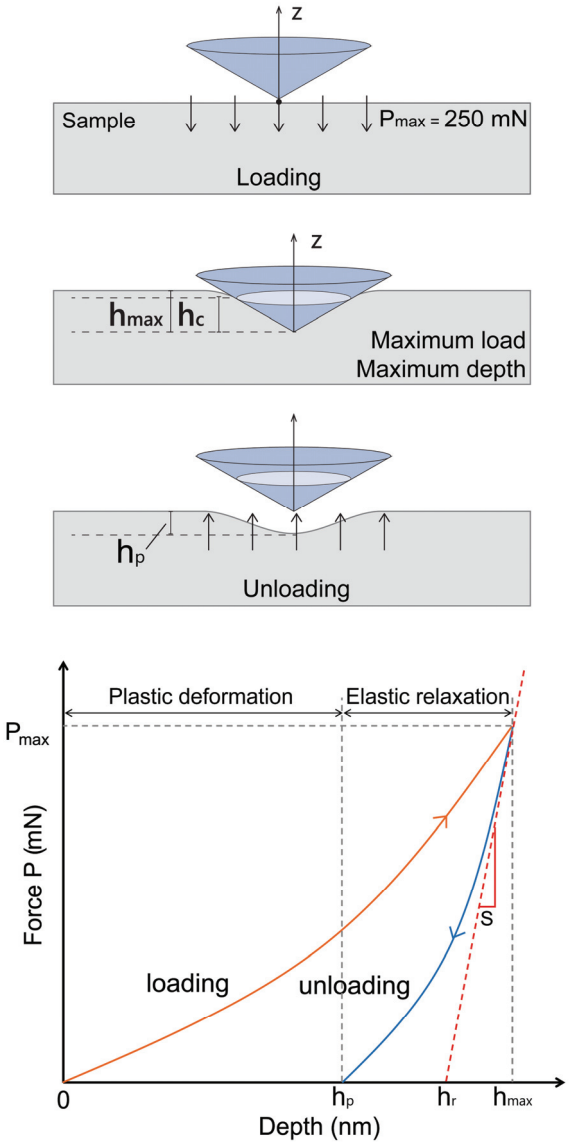

Fig. 2. The experiment schematic of nanoindentation

이용하여, 특정 포인트에서 하중 적용(loading) 및 제거(unloading)하는 중 압입하중과 변위를 연속적으로 기록하여 얻어지는 곡선을 통해 재료의 강성, 탄성계수와 잔류응력 등 다양한 재료의 국부적인 물성 평가를 측정하는 기법이다. 따라서 압입자와 재료의 접촉형상을 파악하는 것이 중요하다. 접촉형상은 Oliver et al.(1992)이 Sneddon의 탄성 접촉해석에 기반하여 도출한 식 (1)을 통해 압입자와 재료의 정확한 접촉깊이(h_c) 및 접촉면적 (A)를 계산해서 얻을 수 있다. 재료의 강성(S)은 최대 압입하중($P_{\max}$) 및 최대 압입깊이($h_{\max}$)에 도달하였을 때, unloading 곡선의 접선 기울기를 통해 구할 수 있다. 식 (2)에 대입하여 환산탄성계수(E_r)

을 얻을 수 있다(Fu et al. 2018). 환산탄성계수는 식 (3)에 대입하여 최종적으로 재료의 탄성계수(E)를 얻을 수 있다.

$$h_c = h_{\max} - \epsilon \frac{P_{\max}}{S} \quad (1)$$

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{S}{\sqrt{A}} \quad (2)$$

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-v^2}{E} + \frac{1-v_i^2}{E_i} \quad (3)$$

여기서, ϵ는 압입자의 형상에 따라 결정되는 계수로써, Berkovich 압입자를 사용하는 본 실험에서는 0.75를 적용하였다(Fu et al. 2018). 또한, 식 (3)에서 v는 재료의 프와송비(Poisson's ratio)이다. 본 실험에서 골재–ITZ–고강도 시멘트 복합체의 프와송비는 차례대로 0.15, 0.30, 0.25를 적용하였다(Li et al. 2019). v_i 와 E_i는 각각 압입자의 프와송비와 탄성계수를 나타내며, 각각 1141GPa, 0.07을 적용하였다.

이와 더불어 loading 곡선의 넓이와 unloading 곡선의 넓이를 통해 재료의 소성 변형 에너지 및 탄성 변형 에너지를 도출할 수 있다(Fu et al. 2018). 현재 나노 인덴테이션 측정 기법은 일정한 최대 압입하중을 적용하였을 때 최대 압입깊이 측정 또는 일정한 최대 압입깊이를 얻기 위해 필요한 최대 압입하중 측정 두가지 방법이 있다. 이때 적용할 수 있는 하중의 범위는 μN–mN이며, 측정할 수 있는 변위는 대략 nm–μm이다.

본 연구에서는 최대 압입하중 250mN에 도달하였을 때, 최대 압입깊이를 측정하여 나노 인덴테이션 분석을 진행하였다. SEM–EDS 분석을 바탕으로 ITZ 두께가 최대 50μm인 것을 고려하여 측정 위치를 설정하였으며, 골재–ITZ–고강도 시멘트 복합체 3가지 영역에 걸쳐 총 8개의 포인트로 설정하였으며, 각 포인트 간의 간격은 10μm가 되도록 하였다(총 측정 거리 = 70μm). 또한, 골재 표면에 발생한 균열이 측정 위치가 되지 않도록 설정하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 골재 종류 및 크기에 따른 ITZ의 두께

콘크리트를 배합하는 과정에서 골재 표면에 수막이 형성되어 큰 결정의 $Ca(OH)_2$가 다량 생성된다(Nili et al. 2015). 따라서 ITZ 영역의 Ca/Si 몰 비율은 다른 영역에 비해 높게 나타나기 때문에 ITZ 두께를 추측할 수 있다. 우선, Fig. 3의 Sand, LWA2, LWA5의

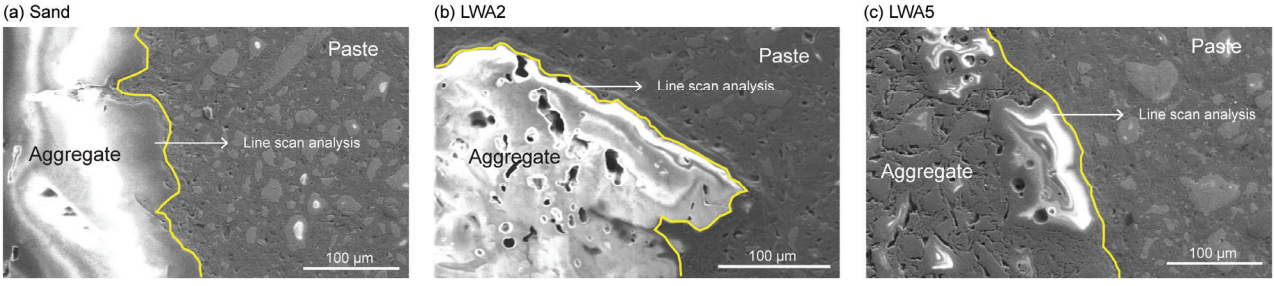

Fig. 3. SEM image of (a) Sand, (b) LWA2, and (c) LWA5

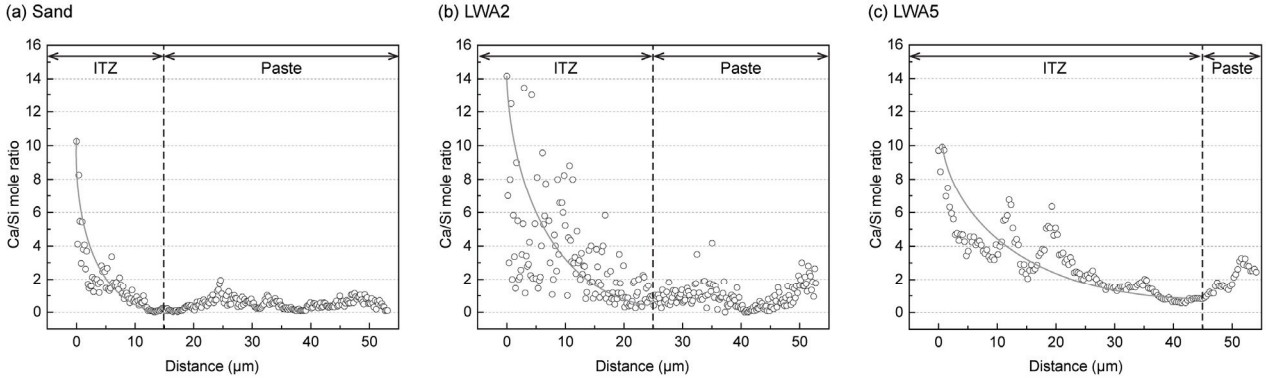

Fig. 4. The result of Ca/Si ratio of interfacial region around (a) sand, (b) LWA2, and (c) LWA5

SEM 이미지를 통해 경량골재는 표준사에 비해 다공성인 것을 알 수 있다. Fig. 4는 SEM-EDS를 통해 Fig. 3에 표시된 각 골재 표면으로부터 80-100μm 떨어진 거리까지 Ca/Si 비율을 측정한 결과를 나타낸다. 각 골재 표면의 Ca/Si 비율은 6-15 의 범위로 측정되었으며, 골재 표면에서 멀어질수록 그 값이 감소하여 1-4까지 낮게 나타난 것을 확인할 수 있었다. 골재와 가장 가까운 부분의 Ca/Si 비율은 기존 연구에서 보고한 물-시멘트 비가 0.5인 콘크리트 골재 표면의 Ca/Si 비율보다 낮게 나타났다. 이는 실리카퓸의 사용 및 낮은 물-바인더로 인해 골재 표면에 칼슘 실리케이트 수화물(C-S-H)의 비율이 비교적 높기 때문에 나타난 현상으로 보인다(Kong et al. 2015; Huang et al. 2019).

Fig. 4의 Ca/Si 비율이 감소되는 경향을 통해 Sand, LWA2, LWA5의 ITZ 두께는 각각 12-15μm, 25-30μm, 35-40μm으로 추정된다. 이전에 보고한 연구 결과에서 기존 Sand의 ITZ가 16.7-25.0μm 로 나타난 것에 비해 감소한 것을 확인하였으며, 이는 본 연구에서 사용한 시멘트 복합체의 낮은 물-바인더 비(0.2)로 인해 발생한 것으로 추측된다(Li et al. 2019; Elsharief et al. 2003). 또한, 경량골재 ITZ는 Sand ITZ보다 넓어진 것을 알 수 있었다. 이는 경량골재의 흡수율이 Sand보다 높아 콘크리트 배합 시 생성되는 수막이 경량골재 표면에 더 두껍게 생성됨으로 인해 발생한 것으로 보인다.

LWA2와 LWA5의 ITZ 두께 값 비교를 통해 경량골재의 크기가 증가할수록 ITZ 영역이 증가하는 것을 알 수 있었다. 이 결과는 일반골재 크기와 ITZ 두께의 상관관계와 일치한다(Li et al. 2019; Elsharief et al. 2003).

3.2 골재 종류 및 크기에 따른 ITZ의 탄성계수

Fig. 5는 나노 인덴테이션을 통해 얻은 Sand, LWA2, LWA5를 측정한 압입하중-변위 곡선을 나타낸다. 골재 자체의 탄성계수는 Sand, LWA2, LWA5 순서로 크게 나타났으며, 그 값은 각각 119.2, 80.6, 40.6GPa이다. 또한, 경량골재의 탄성계수 측정 시, 다공성의 재질로 인해 미끄러지는 현상이 발생하여 동일한 최대 압입하중 적용 시 최대 압입깊이가 증가하여 측정 결과에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. Fig. 6은 나노 인덴테이션을 통해 측정한 각 시편의 골재-ITZ-고강도 시멘트 복합체 3가지 영역에 탄성계수를 나타낸다. 측정 결과에 의하면 Sand, LWA2, LWA5 ITZ의 평균 탄성계수 값은 각각 50.1, 32.7, 24.5GPa이다. SEM-EDS(§ 3.1)를 통해 도출한 ITZ 두께와 역학적 특성의 상관관계를 분석한 결과, 기존 연구와 동일하게 ITZ 두께가 증가할수록 역학적 특성은 감소

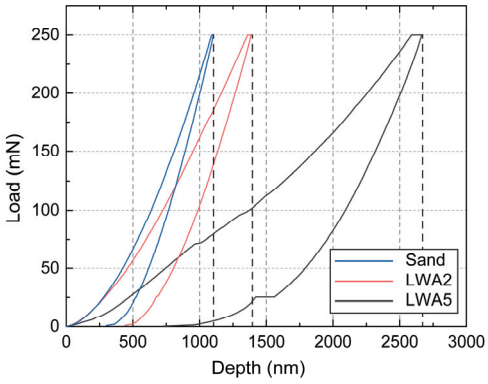

Fig. 5. The nanoindentation results of 3 types of aggregates

하는 것을 알 수 있었다.

입자크기가 다른 두가지 경량골재 LWA2(Fig. 6(b))와 LWA5(Fig. 6(c))를 사용한 경우를 서로 비교한 결과, 입자크기가 커질수록 ITZ의 탄성계수는 감소하는 것을 확인하였다. 이는 일반골재의 결과와 유사한 경향을 나타낸다(Li et al. 2003). SEM-EDS 결과에 나타난 바와 같이(Fig. 4), 골재의 종류와 상관없이 모두 입자의 크기가 커질수록 ITZ의 두께는 증가하며, ITZ의 두께가 증가할수록 탄성계수는 감소하는 것을 확인하였다.

입자크기가 유사한 Sand(Fig. 6(a))와 LWA2(Fig. 6(b)) ITZ 역학적 특성을 분석한 결과, 경량골재 ITZ의 탄성계수는 Sand의 탄성계수보다 감소하였다. 본 연구 결과는 Huang et al.(2019)이 마이크로-비커스 경도 시험 및 SEM을 통해 도출한 물-바인더 비가 대략 0.5인 시멘트 복합체와 경량골재 및 일반골재 사이의 ITZ 결과와 정반대 경향인 반면, 물-바인더 비가 0.3인 콘크리트와 유사한 경향을 나타내었다(Ke et al. 2010). 물-바인더 비에 따라 콘크리트 내부 습도 차이가 변화하여 정반대 경향성이 나타난 것으로 추측된다(Ke et al. 2010). 물-바인더 비가 0.35 이상인 비교적 높은 시멘트 복합체와 일반골재 간의 ITZ는 다른 영역에 비해 수분 함량이 높아 공극이 많다. 하지만 경량골재 ITZ는 높은 흡수율 및 내부 양생 효과로 인해 골재 주변에 밀도 높은 수화물이 형성되어 역학적 특성이 증가한다(Huang et al. 2019). 하지만 물-바인더 비가 낮은 시멘트 복합체와 일반골재 간의 ITZ에는 수막이 거의 형성되지 않고, ITZ 탄성계수가 시멘트 복합체의 80% 정도로 거의 유사하게 발현된다(Mondal et al. 2009). 이를 통해 경량골재와 물 -바인더 비가 낮은 고강도 시멘트 복합체와 배합할 경우, 수화가 끝난 후 여분의 수분이 경량골재로부터 배출되어 ITZ의 역학적 특성을 저하시키는 것으로 추정된다. 따라서 나노 인덴테이션을 통해 측정한 낮은 물-바인더 비의 고강도 시멘트 복합체와 일반골

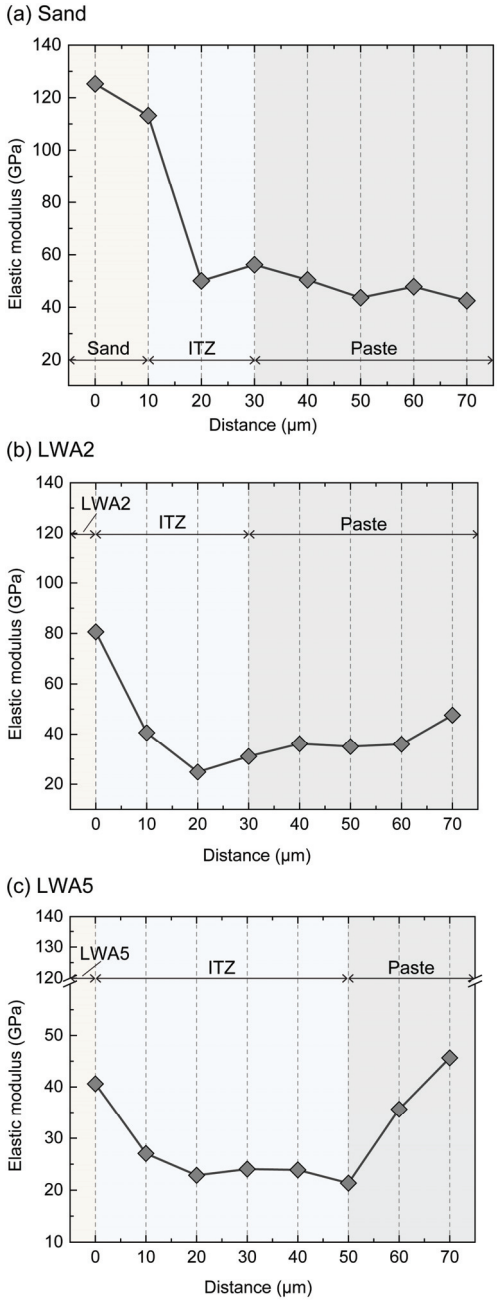

Fig. 6. The results of nanoindentation in the region across aggregates, ITZ, cement paste: (a) Sand; (b) LWA2; (c) LWA5

재 및 경량골재 간의 ITZ의 탄성계수는 일반 콘크리트 ITZ와 반대의 경향을 나타내는 것으로 추정된다.

나노 인덴테이션을 통해 측정한 Sand, LWA2, LWA5 내 고강도 시멘트 복합체의 탄성계수는 대략 38–50GPa로 나타났다. 각 시험체의 물–바인더 비는 동일함에도 불구하고, 시멘트 복합체 탄성계수는 골재 종류에 따라 차이가 발생하였다. 이는 경량골재를 사용하여 콘크리트를 배합할 경우, 경량골재에 흡수되어 있던 수분이 시멘트 복합체 영역으로 배출됨으로 인해 LWA2, LWA5의 시멘트 복합체의 물–바인더 비가 Sand 시멘트 복합체보다 증가하였기 때문에 나타난 현상으로 보인다. 하지만 LWA2와 LWA5의 시멘트 복합체 탄성계수는 각각 38.7, 40.6GPa로 유사한 값을 나타내었다. Sand의 ITZ는 시멘트 복합체와 거의 유사한 거동을 보였으며, LWA2 ITZ는 시멘트 복합체 탄성계수 값의 대략 80%이다. 또한, LWA5 ITZ는 시멘트 복합체의 탄성계수 값의 60% 정도로 측정되었다. 본 연구 결과에서 골재의 입자 크기가 작을수록, 경량골재보다 일반골재 ITZ의 탄성계수가 시멘트 복합체와 유사한 것을 확인하였다(Table 2).

Table 2. Mechanical properties of each phase in Sand, LWA2, LWA5

Label	Phase	Poisson's ratio	Elastic modulus(GPa)
Sand	Aggregate	0.15	119.2
	ITZ	0.30	50.1
	Paste	0.25	51.5
LWA2	Aggregate	0.15	80.6
	ITZ	0.30	32.7
	Paste	0.25	38.7
LWA5	Aggregate	0.15	40.6
	ITZ	0.30	24.5
	Paste	0.25	40.6

4. 결 론

본 연구에서 SEM–EDS와 나노 인덴테이션 분석 기법을 통해 종류 및 크기가 다른 골재와 고강도 시멘트 복합체 간 ITZ의 두께와 탄성계수를 도출하였다. 이를 통해 고강도 시멘트 복합체와 일반골재 및 경량골재 ITZ 특성의 차이점과 경량골재 입자 크기에 따른 ITZ 특성 변화에 대해 검토하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. Sand, LWA2, LWA5 ITZ의 두께는 각각 12–15μm, 25–30μm, 35–40μm이며, LWA의 ITZ 두께가 Sand보다 증가하였다. 이는 경량골재가 Sand에 비해 흡수율이 높고, 골재 주변에 다량의 수분을 방출하기 때문이다.
2. 입자크기가 대체적으로 비슷한 Sand, LWA2 ITZ 탄성계수 값은 각각 50.1, 32.7GPa이다. 이를 통해 고강도 시멘트 복합체와 경량골재 간 ITZ의 역학적 특성은 Sand ITZ의 역학

적 특성보다 감소한다. 이는 ITZ의 두께가 증가하는 동시에 역학적 특성이 감소하기 때문이다.

3. 크기가 다른 두 가지 경량골재 LWA2, LWA5 ITZ의 탄성계수는 각각 32.7, 24.5GPa으로 나타났다. 이를 통해 골재의 종류와 상관없이 골재의 입자크기가 증가할수록 ITZ 두께는 증가하는 반면, 탄성계수는 감소하는 것으로 확인되었다.
4. 골재, ITZ, 고강도 시멘트 복합체 영역에 걸친 나노 인덴테이션 측정 결과, Sand ITZ는 시멘트 복합체와 유사한 탄성계수 값을 보였으나, LWA2와 LWA5 ITZ는 시멘트 복합체의 60-80% 정도만 발현되는 것으로 확인되었다.

위의 결과들을 통해 경량골재가 경량 고강도 콘크리트 ITZ 역학적 특성에 미치는 영향을 추측할 수 있으며, 균질화 기법(Homogenization method)을 이용해서 ITZ 역학적 특성에 따른 콘크리트 압축강도 변화에 대한 상관관계 도출이 가능할 것으로 사료된다. 이를 위해 보다 정확한 ITZ의 역학적 특성을 도출하고자 나노 인덴테이션 측정 위치 및 측정 횟수를 추가한 연구가 필요할 것으로 사료된다. 또한, 물-바인더 비에 따른 골재 주변 상대습도 변화와 시멘트 복합체 상대습도 변화 측정도 필요한 것으로 사료된다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 20NANO-B156177-01).

References

Elsharief, A., Cohen, M.D., Olek, J. (2003). Influence of aggregate size, water cement ratio and age on the microstructure of the interfacial transition zone, Cement and Concrete Research, **33(11)**, 1837-1849.

Fu, J., Kamali-Bernard, S., Bernard, F., Cornen, M. (2018). Comparison of mechanical properties of CSH and portlandite between nano-indentation experiments and a modeling approach using various simulation techniques, Composites Part B: Engineering, **151**, 127-138.

Huang, H., Yuan, Y., Zhang, W., Liu, B., Viani, A., Mácová, P. (2019). Microstructure investigation of the interface between lightweight concrete and normal-weight concrete, Materials Today Communications, **21**, 100640.

Ke, Y., Ortola, S., Beaucour, A.L., Dumontet, H. (2010). Identification of microstructural characteristics in lightweight aggregate concretes by micromechanical modelling including the interfacial transition zone (ITZ), Cement and Concrete Research, **40(11)**, 1590-1600.

Kong, L., Hou, L., Bao, X. (2015). Application of AC impedance technique in study of lightweight aggregate-paste interface, Construction and Building Materials, **82**, 332-340.

Li, Y., Li, Y., Wang, R. (2019). Quantitative evaluation of elastic modulus of concrete with nanoidentation and homogenization method, Construction and Building Materials, **212**, 295-303.

Mondal, P., Shah, S.P., Marks, L.D. (2009). Nanomechanical properties of interfacial transition zone in concrete, In Nanotechnology in Construction 3, Springer, Berlin, Heidelberg, 315-320.

Nili, M., Ehsani, A. (2015). Investigating the effect of the cement paste and transition zone on strength development of concrete containing nanosilica and silica fume, Materials & Design, **75**, 174-183.

Oliver, W.C., Pharr, G.M. (1992). An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments, Journal of Materials Research, **7(6)**, 1564-1583.

Xiao, J., Li, W., Sun, Z., Lange, D.A., Shah, S.P. (2013). Properties of interfacial transition zones in recycled aggregate concrete tested by nanoindentation, Cement and Concrete Composites, **37**, 276-292.

Yang, L., Shi, C., Wu, Z. (2019). Mitigation techniques for autogenous shrinkage of ultra-high-performance concrete-a review, Composites Part B: Engineering, **178**, 107456.

나노 인덴테이션을 통한 경량 고강도 콘크리트 Interfacial Transition Zone (ITZ)의 역학적 특성에 관한 연구

Interfacial transition zone (ITZ)은 골재–시멘트 복합체 사이의 영역으로써, 콘크리트에서 가장 취약한 영역으로 알려져 있으며, 이는 점진적으로 변화하는 불균질한 상으로 이루어져 있다. 경량 고강도 콘크리트 개발을 위해 물–바인더 비가 낮은 고강도 시멘트 복합체와 경량골재 사이의 Interfacial transition zone (ITZ)의 역학적 특성 평가는 필수적이다. 하지만 ITZ는 복잡하고 다공성 구조를 가지고 있기 때문에, 이의 역학적 특성은 아직 명확하지 않다. 또한, 경량골재 ITZ는 일반골재보다 다양한 변수 (물–바인더 비, 골재의 흡수율, 양생조건 등)에 의해 변화한다. 따라서 본 연구에서 골재의 종류 및 크기에 따른 ITZ의 역학적 특성을 분석하고자 한다. 이를 위해 나노 인덴테이션 기법을 이용하여 물–바인더 비가 0.2인 고강도 시멘트 복합체와 표준사 및 최대치수가 각각 2mm, 5mm인 경량골재 ITZ의 탄성계수를 측정하였다.