

## 나노버블수를 활용한 시멘트 복합체의 작업성 증진에 대한 실험적 연구

이난경<sup>1</sup>, 강성훈<sup>2</sup>, 문주혁<sup>3\*</sup>

### Experimental Study on the Improvement of Workability of Cementitious Composites Using Nano-bubble Water

Nankyung Lee<sup>1</sup>, Sung-Hoon Kang<sup>2</sup>, Juhyuk Moon<sup>3\*</sup>

**Abstract:** This study was conducted to improve the workability of cementitious composites using nano-bubble water. The used nano-bubble water contains 7% of nano-sized bubbles with an averaged bubble size of 750 nm. Various different types of cementitious composites including ultra-high performance concrete, lightweight cementitious composites, and high-strength mortar have been tested to identify the changes of material properties. From the use of nano-bubble water, it was confirmed that workability has been improved by 3-22%. On the other hand, other material characteristics such as compressive strength did not have noticeable changes. Therefore, it was proposed that the use of nano-bubble water can enhance workability of cementitious composites without having significant impact on other material properties.

**Keywords:** Nano-bubble water, Workability, Cementitious composites, Lightweight concrete

## 1. 서론

건설재료는 시대의 발전에 따라 함께 성장해왔다. 고대에는 자연재료를 그대로 이용한 건설이 주를 이룬 반면, 산업혁명 이후에는 건설 재료의 발전에 힘입어 고강도 콘크리트, 고강도 강재 등의 재료들이 적용되어 왔다. 특히, 초고층빌딩이나 초장대교량과 같은 랜드마크로서의 기능을 지닌 건설 프로젝트들의 수요가 증가함에 따라 보다 우수한 성능을 가지는 고성능 콘크리트의 개발이 필요해 지고 있다. 이러한 거대 구조물에는 기존에 사용되는 일반 콘크리트의 성능을 획기적으로 개선하기 위해 다양한 복합재료를 개발하고 적용하려는 노력이 활발한 상황이다.

고강도 또는 고성능 시멘트계 건설재료에는 높은 압축강도의 발현과 동시에 작업성 증진을 위해 필연적으로 혼화제와 혼화제가 첨가된다. 특히 거대 구조물 제작에 사용될 수 있는 초고성능콘크리트(UHPC)에는 일반 콘크리트와는 달리 굵은 골재가 혼입되지 않으며 높은 강도 발현을 위해 실리카폼 및 석영분말과 같은 혼화제가 추가된다. 또한 높은 압축강도 발

현을 위하여 0.3 이하의 낮은 물-시멘트비가 요구되고 그에 따른 작업성 감소를 개선하고자 고성능감수제의 사용이 필수적이다(Kang et al., 2018).

물-시멘트를 낮추는 방법과 더불어 압축강도증진을 위하여 실리카폼을 다량 첨가하여 물리적인 채움효과(filler effect)와 함께 포졸란반응(pozzolanic reaction)을 유도하여 수화반응생성물인 규산칼슘수화물(Calcium Silicate Hydrate, C-S-H)를 생성하여 압축강도를 향상시킬 수 있다(Lee et al., 2020).

하지만, 여러 혼화제 또는 혼화제의 사용은 작업성을 개선시켜주고 압축강도의 증진을 도울 수 있지만 다량으로 첨가될 경우 건설현장에서의 적용이 어렵다는 한계점이 있다. 예를 들어, 고성능감수제의 경우 시멘트입자의 정전기적 인력을 감소시켜 입자들이 뭉쳐있는 현상을 완화시키므로 적은 물에도 충분한 작업성을 지닐 수 있게 돕지만 지나친 감수제의 사용은 단가를 상승시키고, 콘크리트의 응결을 지연시켜 공기를 늦추는 원인이 된다(Chiocchio et al., 1985).

실리카폼과 석영분말의 경우 UHPC 배합에서 차지하는 중량비가 시멘트 대비 25~35% 정도의 양으로 구성되어있지만 대부분의 입자가 1  $\mu\text{m}$  이하의 미세한 평균 입경을 지니고 있어 실제적으로 많은 부피가 배합 시 추가되게 되어 낮은 물-시멘트비를 지닌 초고성능콘크리트의 배합에서 오히려 작업성을 떨어뜨리게 되는 결과를 가져온다.

때때로 작업성 증진을 위하여 공기연행제가 첨가되기도 한다. 이는 동결융해 저항성을 높이고, 생성된 기포들의 불-배어

<sup>1</sup>정회원, 서울대학교 건설환경공학부 박사과정

<sup>2</sup>정회원, 서울대학교 건설환경공학부 박사후연구원

<sup>3</sup>정회원, 서울대학교 건설환경공학부 부교수

\*Corresponding author: juhyukmoon@snu.ac.kr

Department of civil and environmental engineering, Seoul National University, 08826, Seoul

•본 논문에 대한 토의를 2022년 1월 31일까지 학회로 보내주시면 2022년 2월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

링 효과를 통해 작업성을 증진시켜준다. 하지만 공기연행체의 경우 다량으로 사용할 시 압축강도의 저하를 야기하기에 우리나라를 포함한 각 국의 설계기준에서는 이를 고려하여 공기연행체의 혼입량의 최대치를 규정하고 있다(KCI, 2012).

본 연구에서는 공기연행재사용으로 인한 마이크로 사이즈의 버블이 작업성에 도움을 준다는 기존 경험을 바탕으로 나노버블수를 배합수로 사용하여 다양한 시멘트 복합체에 대하여 그 효과를 분석하였다. 매크로 버블수 안에 포함되어있는 기포인 마이크로버블은 물 속에서 마이크로 사이즈를 유지하다가 Henry's law에 의해 내부에서 소멸한다(Ferraro et al., 2020). 하지만 일부의 소멸되지 않은 기포들은 자기가압 효과로 기포 내부 압력에 의해 안 쪽에서 바깥으로 형태를 유지하려는 에너지를 발생시킨다. 따라서 기포들이 소멸되지 않고 마이크로 사이즈보다 더 미세하게 감소하게되며 마이크로 사이즈보다 작은 입경을 가진 버블로 발전한다. 이렇게 생성된 나노버블들은 표면의 전하가 (+) 혹은 (-)로 대전되어 기포 간 병합이 일어나지 않기 때문에 물 속에서 안정적으로 존재하게 된다(Takahashi et al., 2007; Agarwal et al., 2011). 이런 방식으로 생산된 나노버블수는 주로 수처리분야에서는 기포의 병합을 유도하여 산화공정에 이용하거나 오염물질을 처리하는데 사용될 수 있으며 생물학에서는 식물이나 어패류를 키우는데 사용된다(Park et al., 2009).

이 뿐만 아니라 콘크리트의 성능 증진을 위한 방안으로도 나노버블수의 사용이 연구된 바 있다. 일반 수돗물과 비교하여 나노버블수를 적용한 시멘트 모르타르 시편의 압축강도가 증가되는 것이 확인되었다(Han et al., 2015). 하지만, 해당 연구의 경우 시멘트 모르타르의 압축강도의 증진만 보고되었으며, 그 물리·화학적 기작 또는 작업성 증진여부는 보고되지 않았다.

본 연구에서는 자체적으로 제작한 나노버블수를 활용하여 대표적인 고성능 시멘트계 건설재료들의 다양한 특성에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 적용된 시멘트계 건설재료로는 초고성능콘크리트(UHPC), 고강도 경량 시멘트 복합체 및 시멘트 모르타르로 구성하였다.

## 2. 사용 재료 및 시편제작

### 2.1 나노버블수 제작

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 splitting-type의 발생 장치를 사용하여 나노버블이 포함된 나노버블수를 제작하였다. 해당 장치는 기체와 액체를 혼합하는 장치가 격벽으로 분리되어 이루어져있으며 mixing chamber를 관통하며 혼합된 유체를 고속으로 통과시키는 splitter로 구성되어있다(Kim, 2018).

나노버블의 생성을 위하여 수조에 물을 채운 후 유속을 300mL/min으로 일정하게 설정하였다. 이후 펌프를 이용해 수조에 담긴 물을 안정적으로 10분 동안 유입한 뒤, 30mL/min의 일정한 유속으로 기체를 발생 장치에 유입시켜 매크로 사이즈의 기포를 발생시켰다. 발생된 매크로 사이즈의 기포를 전단력을 이용하여 보다 작은 기포로 쪼개어 나노버블을 제조하였다(Kim, 2010; Kim, 2014; Kim et al., 2017; Kim, 2018). 이 때, 나노버블 발생 장치 안으로 유입되는 물과 제작되는 물이 서로 상호 순환되는 방식을 통하여 수조에 담겨있는 물이 모두 나노버블수로 제작되었다. 생성된 나노버블수는 5 L 크기의 부피플라스크에 담아 질소기체를 주입하였고 나노버블이 소멸되지 않는 것을 확인하기 위해 30분간 뚜껑을 열어 두지 않는 것을 확인한 후에 실험에 사용할 양 만큼 보관하여 준비하였다(Kim et al., 2019).

이러한 방법으로 생성된 나노버블수는 자연 발생하는 나노버블수와 같이 그 생존시간이 충분히 길어 시멘트 복합체 재료에 작업성을 증진시킬 수 있을 것이라 판단하여 실험을 진행하였다. Fig. 2에 도시된 바와 같이 기존의 매크로 버블이 빠르게 상승하다 수면에서 압력차로 인하여 소멸되고 마이크로 버블은 자기압력으로 인해 작아지다 소멸하지만 소멸되지 않고 남은 나노 버블이 물 속에 존재하게되어 나노버블수를 구성하기 때문이다(Takahashi et al., 2007; Cha, 2011; Song et al., 2013).

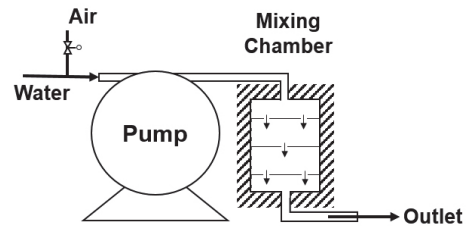


Fig. 1 Formation of nano bubble water

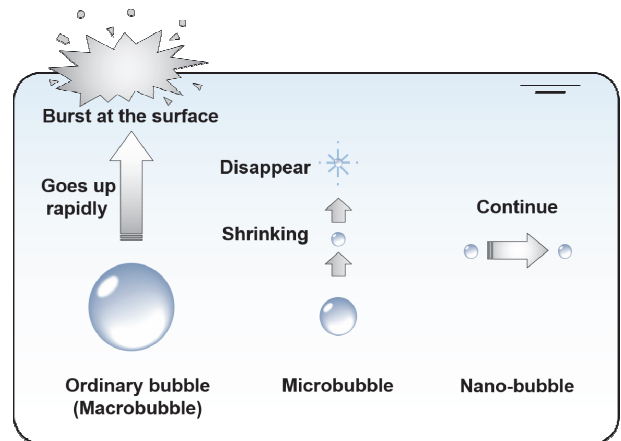


Fig. 2 Characteristics of fabricated bubbles (Takahashi et al., 2007)

## 2.2 사용된 재료, 시편 제작 및 양생 조건

본 연구에서는 U사의 시멘트, E사의 실리카폼, S사의 규사, 그리고 D사의 고성능 감수제를 사용하여 시멘트계 건설재료를 제작하였으며 각각 원재료들의 X-선 형광분석 결과는 Table 1에 나타내었다. 원재료들의 입자 크기 분석을 위해 마이크로입도 분석장비를 활용하여 입도를 분석하였으며 재료의 구성성분에 따라 이소프로필알코올과 증류수를 분산매로 사용하였다. 위 과정으로 얻은 측정결과는 Fig. 3에 도시되어 있다.

사용된 배합비는 Table 2에 나타나있다. 배합비는 기존 선행연구를 참고하여 설정하였으며(Kang et al., 2019; Lee et al., 2020) 특히 경량 시멘트 복합체의 배합비는 재료의 경량화를 위하여 잔골재로 사용되는 규사 대신 T사에서 제작된 중공입자를 사용하여 제작되었다. 규사대신 포함된 중공입자가 물을 흡수하여 유동성이 감소하는 효과를 방지하기 위하여 기존 초고성능 콘크리트 대비 많은 양의 고성능감수제가 사용되었다. 시멘트 모르타르 시편은 현장에서의 유동성을 고려하여 물-시멘트 비를 0.4로 설정하였다. 압축강도 측정은 ASTM C 109의 기준에 따라 50 × 50 × 50 mm<sup>3</sup>의 정육면체의 큐브 시편을 사용하였으며 각각 3개의 시편을 시험한 후 3개의 시편들의 평균값을 사용하였다(ASTM, 2012).

제조한 시멘트 복합체, 경량시멘트복합체, 모르타르 샘플 그리고 초고성능콘크리트는 타설 후 24시간 이후에 탈형하여 20 °C의 온도와 60%의 상대습도로 설정된 항온항습기에서 양생되었으며, 실험 변수는 나노버블수의 사용 유무로서 Fig. 4에 도시되어 있다. 시편명 설정은 CC는 시멘트복합체, CM은 시멘트 모르타르, UHPC는 초고성능 콘크리트, Lw는 경량시멘트복합체 그리고 나노버블수를 사용한 시편은 NB로 나타냈다.

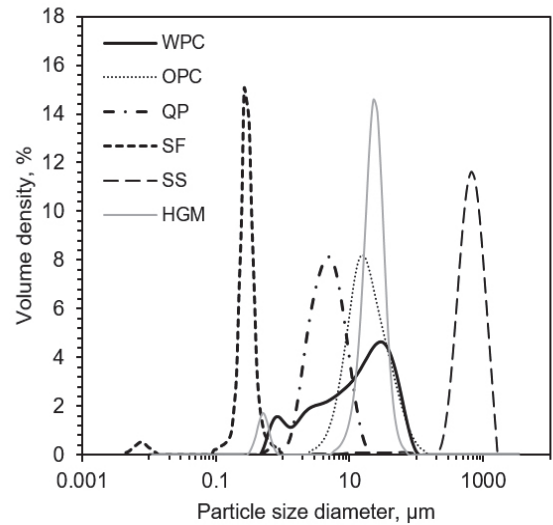


Fig. 3 Particle size distribution of raw materials

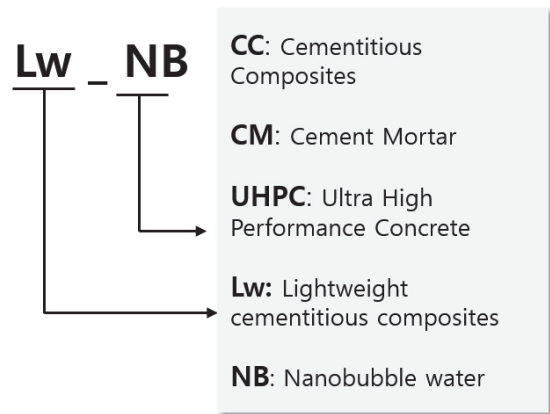


Fig. 4 Notation of specimens

Table 1 X-ray Fluorescent (XRF) results of raw materials

Chemical Compositions	SiO <sub>2</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	MnO
White Portland Cement	15.38	73.64	0.28	0.06	4.21	3.54	2.07	0.41	0.08	-	0.15	0.05
Silica Fume	96.90	1.54	0.16	0.05	-	0.29	0.18	0.15	0.01	-	0.64	0.03
Quartz Powder	97.70	1.37	0.02	-	-	0.49	0.21	0.05	0.08	-	0.02	0.01
Hollow Particles (K42HS)	80.58	13.54	4.48	0.81	0.23	0.14	0.06	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01

Table 2 Mix proportion of specimens (weight ratio of cement; steel fiber follows volume ratio of specimen)

시편	Water	Cement	Silica Fume	Fine aggregate	Quartz Powder	Superplasticizer	Hollow Particles	Steel Fiber
CC	0.23	1	0.25	-	0.35	0.06	-	-
Lw							0.2	-
CM	0.4	1	-	3	-	-	-	-
UHPC	0.215	1	0.25	1.1	0.35	0.04	-	2 vol.%

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 나노버블수 제작결과

일반적으로 나노버블수를 제작할 시에 나노버블수는 부상 공정에서 버블의 크기가 작을수록 접촉단계에서 버블과 플록 간의 충돌효율이 상승한다. 또한 한 개의 플록에서 여러 개의 버블이 부착되어 플록-버블 결합체의 상승속도가 빨라지므로 이로 인해 분리효율이 증가된다는 장점이있다. 즉, 버블의 크기가 작을수록 높은 충돌효율로 인하여 플록-버블 결합체에 부착된 버블의 수가 많아지기때문에 결국 큰 버블만큼 상승속도가 증가하게된다(Kim et al., 2007). 하지만 본 연구에서는 나노사이즈의 작은 버블을 필요로하기에 이를 발생시키기 위해서는 많은 에너지와 정밀한 조작이 필요하며 이는 비용의 증가를 야기한다. 따라서 본 연구에서는 저비용-저에너지로 버블의 크기를 자유롭게 변화시킬 수 있도록 제작된 선행 연구에 따라 나노버블수를 제작하였으며, 제조된 나노버블수 내의 버블의 평균크기는 약 750 nm의 입자크기를 지니고 있으며 배합수 내에서 나노버블의 혼입률은 약 7%로 분석되었다. 나노버블의 입도 사이즈는 나노버블의 이미지를 촬영하여 기포의 개수와 크기를 분석하여 대략적인 값으로 파악하고 실험에 활용하였다. 또한 제작한 정육면체 시편이 포함하고있는 나노버블의 양은 약 8.75 ml로 계산되었다(Fan et al., 2010)

#### 3.2 압축강도 및 플로우 실험결과

압축강도 측정 결과를 Fig. 5에 나타냈다. 나노버블수를 사용한 시편과 그렇지 않은 control 샘플의 압축강도 차이가 모든 재령에서 거의 나타나지 않음을 확인하였다. 일반적으로 제작된 UHPC 시편이 가장 높은 압축강도를 발현하였으며 CM 시편 세트가 가장 낮은 압축강도를 발현하였다.

Fig. 6은 나노버블수의 작업성 증진 효과를 확인하기 위한 플로우 실험 결과이다. 플로우 실험 값을 확인하여보면 CM시편에서 가장 낮은 플로우 값이 측정된 것을 확인할 수 있다. 이는 실리카퍽과 석영질이 혼입된 UHPC, CC, Lw 시편의 경우 구형인 실리카퍽과 석영질의 불-베어링 효과로 인해 실리카퍽과 석영질이 혼입되지 않은 CM시편보다 높은 플로우값을 지닌 것으로 파악된다. 샘플에 나노버블이 첨가된 경우 적게는 3%(CC), 많게는 22%(UHPC)까지 플로우가 증진됨을 확인하였다. 이는 추가적인 혼화제 사용없이 배합수만 나노버블이 포함된 나노버블수의 효과로 볼 수 있으며, 나노버블이 배합시까지 사라지지 않고 존재한다면 공기연행체와 유사하게 작업성 증진에 매우 효과적일 수 있음을 보여주고 있다. 이러한 플로우 증진효과는 물-시멘트비가 낮은 UHPC의 경우에 매우 두드러지게 나타났으며, 추후 나노버블수 사용으로

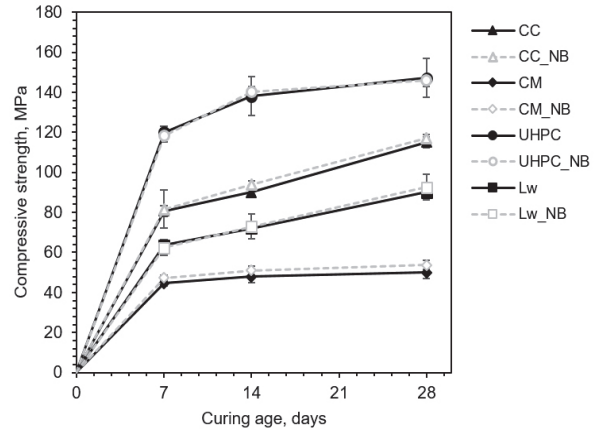


Fig. 5 Compressive strength results of specimens

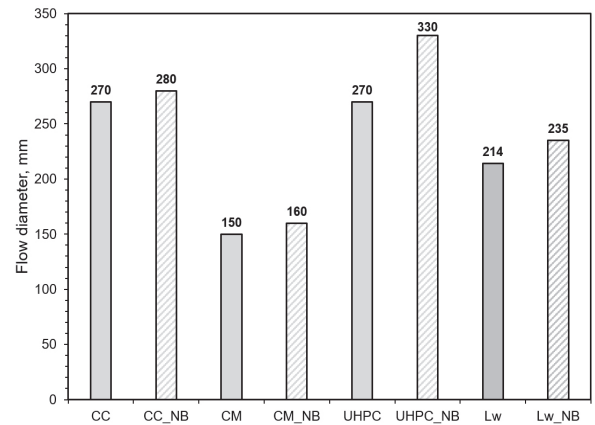


Fig. 6 Flow table results of specimens

인한 플로우 증진을 고려하여 고성능유동화제의 양을 줄이거나, 다른 물리적인 혼화제를 줄일 수 있는 여지를 제공해 줄 수 있을 것으로 판단된다.

하지만, 선행 연구의 경우 나노버블수를 사용할 시 플로우 값이 감소하는 연구결과를 보였다(Kim et al., 2021). 이는 나노버블의 입자 크기와 관련이 있는 것으로 보이며, 마이크로버블과 나노버블은 입자 크기가 작아지며 물 속에서 안정적으로 용해되는 과정 속에서 표면장력으로 인한 자기가압효과와 동시에 정전기력이 발생하게되어 대전체가 된다. 이때 발생한 정전기력은 Eq. 1의 식을 따르게된다(Takahashi et al., 2020).

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (\text{Eq. 1})$$

F=정전기력, k=쿨롱상수  
 $q_1, q_2$ =전하량, r=전하와 전하 사이의 거리

이때 작은 사이즈의 나노버블과 0.1 $\mu$ m(100nm)의 입자 크기를 가진 실리카폼의 관계는 나노버블의 크기가 커질수록 실리카폼 입자간의 간격이 줄어들게되고 이로인해 정전기력 F가 증가하게된다. 따라서 나노버블의 크기가 작아질수록 단위부피당 나노버블의 개수가 증가하게되고 나노버블들이 높은 정전기력으로 실리카폼에 끌어당겨 오히려 불-베어링 효과를 저지하게 될 수 있다. 반대로 나노버블의 입자 크기가 지나치게 큰 경우는 높은 부력과 낮은 자기가압으로 배합수 내에서 떠올라 소실되게된다.

플로우 값과 앞서 기술한 압축강도 결과와의 연관성을 확인하여보면 모든 시편에서 나노버블수를 활용하였을 때 플로우 값이 증가하였고 압축강도에 미치는 영향은 미세한 것으로 나타났다. 이는 파우더 재질의 여러 재료로 이루어지는 시멘트계 건설재료의 특징 상 각각의 재료들이 고르게 혼합되어야 높은 작업성과 압축강도를 발휘하게 되는데 나노버블수는 나노미터에서 마이크로 미터 사이의 미세한 버블들이 배합수 안에 분포하고 있으며 분포된 버블들은 불-베어링 역할을 하게 되어 작업성을 증진시킨 것으로 판단된다(Asadollahfardi et al., 2019; Maruyama et al., 2015; Grzegorzczak-Frańczak et al., 2021).

#### 4. 결 론

나노버블수를 활용하여 제작한 시멘트계 건설재료는 압축강도의 저하 없이 유동성이 증진되는 것을 확인하였다. DAF 공정을 통하여 나노버블수를 제작하였으며 이를 건설재료 제작에의 사용 가능성을 확인하였다. 물-시멘트비, 양생 방법 등 제한조건 하에서 나노버블수로 인한 압축강도 저하가 발생되는지를 확인하기위해 시멘트모르타르 시편, 시멘트 복합체, 경량시멘트복합체, 초고성능콘크리트 등 다양한 시편을 제작하였으며 제작된 시편들은 모든 시편에서 압축강도의 저하를 보이지 않음을 확인하였다. 연구의 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 나노버블수를 활용하여 제작된 시편들은 일반 배합수로 제작된 시편들과 동등한 압축강도를 발휘하였다. 또한 낮은 물-시멘트비로 설정된 Lw 시편에서도 일반 배합수로 제작된 시편보다 높은 압축강도를 보였다. 다량의 중공입자가 첨가된 경량 시멘트 복합체(Lw시편)의 특성상 압축강도 저하 없이 유동성 증진이 가능하여 나노버블수는 다양한 배합을 갖는 시멘트 복합체에 활용될 수 있다.
- 2) 나노버블수의 유동성 증진 매커니즘은 나노버블들이 배합재료를 사이에서 불-베어링 역할을 하는 것으로 설명되며, 이러한 현상은 제작된 모든 시편에서 동일하게 나타

났다.

- 3) 나노버블수 사용시 압축강도 저하 없이 유동성 증진이 가능한 것이 확인되었다. 이는 연행된 경기에 의해 공극 구조에 영향을 미치는 기존의 유동화제(공기연행제)와 달리 유동성 증진에 필요한 시간대에만 나노버블을 형성시키는 나노버블의 특성으로 설명 될 수 있다. 또한, 이 결과는 폴리카본산계 유동화제와 달리 수화 및 강도 발현을 지연시키지 않는 부배합 재료를 위한 전용 유동화제 개발에도 응용될 수 있을 것으로 기대 된다.

#### 감사의 글

본 논문은 국토교통과학기술부(KAIA)의 지원사업에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다(21NANO-B156177-02).

#### References

1. Kang, S.-H., S.-G. Hong, and J. Moon. (2018), Importance of drying to control internal curing effects on field casting ultra-high performance concrete, *Cement and Concrete Research*, 108, 20-30
2. Lee, N., Jung, Y., Kang, H., and Moon, J. (2020), Heat-Induced Acceleration of Pozzolanic Reaction Under Restrained Conditions and Consequent Structural Modification, *Materials*, 13(13), 2950.
3. Chioocchio, G., and A. Paolini. (1985), Optimum time for adding superplasticizer to Portland cement pastes, *Cement and Concrete Research*, 15(5), 901-908
4. Korea Structural Concrete Design Code 2012 (2012), *Korea Concrete Institute*.
5. Ferraro, Gianluca, Ananda J. Jadhav, and Mostafa Barigou. (2020). "A Henry's law method for generating bulk nanobubbles." *Nanoscale* 12.29, 15869-15879.
6. Takahashi, M., K. Chiba, and P. Li. (2007), Free-radical generation from collapsing microbubbles in the absence of a dynamic stimulus, *The Journal of Physical Chemistry B*, 111(6), 1343-1347
7. Agarwal, A., W. J. Ng, and Y. Liu. (2011), Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment, *Chemosphere*, 84(9), 1175-1180.
8. Park, J.-S., and K. Kurata. (2009), Application of microbubbles to hydroponics solution promotes lettuce growth, *HortTechnology*, 19(1), 212-215.
9. Han, J.-G, Jung, D.-H, Kim, Y.-H, Jeong, S.-H, Hong, K. (2015), Experimental study of compressive strength of Ash-Mortar, *Proceedings of Korean Society of Civil Engineers Annual Conference*, 83-84.
10. Cha, H.-S. (2011), New Technology-Application of Microbubble Technology in Foods, *Bulletin of Food Technology*, 24(3), 410-414.
11. Song, H.-J., Oh, S.-H., Lim, B.-S., Lee, J.-I., Lee, B.-H., Kim, J.-M. (2013), A study on existence and lifespan of O nano-bubbles in water, *Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference*, 453-454.
12. Kim, T.-I (2010), Analysis of Bubble Potential Energy and its



Application to Disinfection and Oil Washing, *Seoul National University: Seoul*.

13. Kim, H.-J. (2014), A Study on the Development of Sub-micron Bubble Generator and Characterization of Sub-micron Bubble, *Seoul National University: Seoul*.
14. Kim, E. (2018), Substantial enhancement of dissolved gas concentration in the presence of ultrafine bubble, *Seoul National University: Seoul*.
15. Kim, S.-B., Lee, E.-O., Lee, S.-H., Han, M.-Y., Park, H.-J., Kim, T.-I. (2017), Determination of Flocculation Design and Operating Condition of Bubble Generating System for High Rate DAF, *Journal of Korean Society of Water Science and Technology*, 25(5), 67-75.
16. Kim, S., Kim, H., Han, M., and Kim, T. (2019), Generation of sub-micron (nano) bubbles and characterization of their fundamental properties, *Environmental Engineering Research*, 24(3), 382-388.
17. Materials, A.S.o.T. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars, ASTM C-109. 2016. American Society of Testing Materials USA.
18. Kim, T.-I., Han, M.-Y., Kim, H.-R., Kim, Y.-H. (2007), Development of Optimum flocculation process in DAF process, *Journal of Korean Society on Water Environment* (2005~), 37-44.
19. Fan, M., Tao, D., Honaker, R., and Luo, Z. (2010), Nanobubble generation and its application in froth flotation (part I): Nanobubble generation and its effects on properties of microbubble and millimeter scale bubble solutions, *Mining Science and Technology (China)*, 20(1), 1-19
20. Kim, W.-K., Kim, Y., Hong, G., Kim, J., Han, J., and Lee, J. (2021), Effect of Hydrogen Nanobubbles on the Mechanical Strength and Watertightness of Cement Mixtures, *Materials*, 14(8), 1823
21. Endo-Takahashi, Yoko, and Yoichi Negishi. (2020), Microbubbles and nanobubbles with ultrasound for systemic gene delivery, *Pharmaceutics* 12(10), 964.
22. Asadollahfardi, G., P. MohsenZadeh, and S. F. Saghravani. (2019), The effects of using metakaolin and micro-nanobubble water on concrete properties, *Journal of Building Engineering*, 25, 100781.
23. Maruyama, T., N., Takahashi, and S., Hashimoto. (2015), Effect on the Flow Properties of the Mortar Using Micro-Nano Bubbles, *In Advanced Materials Research*. Trans Tech Publ.
24. Grzegorzczak-Frańczak, Hunek. D.B., Andrzejuk, W., Zaburko, J., Zalewska, M., and Lagod, G. (2021), Physical Properties and Durability of Lime-Cement Mortars Prepared with Water Containing Micro-Nano Bubbles of Various Gases, *Materials*, 14(8), 1902.

Received : 07/08/2021

Revised : 08/27/2021

Accepted : 11/09/2021

---

**요 지** : 본 연구는 시멘트계 건설재료의 작업성 증진을 위하여 나노버블수의 사용을 시도하였다. 사용된 나노버블수는 약 750 nm의 입경을 지닌 나노버블이 7% 포함된 배합수를 사용하였다. 초고성능콘크리트, 경량시멘트 복합체, 고강도 모르타르 등 다양한 시멘트 복합체에 나노버블수가 배합수로서 사용될 때 미치는 영향을 실험하였다. 작업성을 대표할 수 있는 플로우 값이 시편에 따라 3-22%정도 증진됨을 확인하였다. 하지만 압축강도에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다. 따라서 재료의 균은 성질에 큰 영향 없이 시멘트 복합체의 작업성을 증진시킬 수 있는 새로운 방법으로 나노버블수의 사용이 다양한 시멘트 복합체에 활용될 수 있음을 제시하였다.

**핵심용어** : 나노버블수, 작업성, 시멘트 복합체, 경량 콘크리트

---