

Preparation of lightweight fireproofing concrete with high impact strength

Seok Ju Jeong, Joo Eun Kim, Seo Lin Jeong and Byeong Woo Lee[†]

Department of Ocean Advanced Materials Convergence Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

(Received September 30, 2024)

(Revised October 21, 2024)

(Accepted October 21, 2024)

Abstract In order to solve the problems of low strength and brittle fracture of conventional concretes, ordinary cement was used as the main material of concrete binder, and porous glass beads processed from waste glass were used as aggregates to provide lightweight and fireproof insulation, and functional organic binding additives (including polymers) were added to improve concrete strength. Additional binding agents, such as silanes, were used to produce concrete-type lightweight materials with a specific gravity lower than water. The resulting materials thus manufactured have solved the problems of low work-ability and brittle fracture of conventional (ceramic) concretes, and exhibited excellent mechanical and thermal properties, with good fireproofing properties and low thermal conductivity at high temperatures. In addition, it can be molded into a certain space like conventional concrete, processed into bricks or thin boards in molds, or applied like paints, so it is believed that it can be applied to various structural materials.

Key words Concrete, Lightweight, Polymer, Fireproof, High impact strength

고 충격강도의 경량 내열 내화 콘크리트 제조

정석주, 김주은, 정서린, 이병우[†]

한국해양대학교 해양신소재융합공학과, 부산, 49112

(2024년 9월 30일 접수)

(2024년 10월 21일 심사완료)

(2024년 10월 21일 게재확정)

요약 일반적 콘크리트의 낮은 강도와 취성파괴의 문제점을 해결하기 위해 일반 시멘트를 콘크리트 결합제의 주 소재로 하되, 여기에 경량화와 내화 단열성을 부여하기 위한 골재로 폐유리를 가공한 다공성 유리 비드(porous glass beads)와 콘크리트의 강도 증진을 위한 기능성 유기 결합첨가제(폴리머)를 첨가하고, 추가 결합제를 사용하여 비중이 물보다 낮은 콘크리트형 경량 소재를 제조하였다. 이렇게 제조된 소재는 기존 콘크리트 등 세라믹이 가지는 낮은 작업성과 취성파괴의 문제점이 해결되었으며 내화성도 우수하였고 고온에서의 낮은 열전도도를 보이는 등 기계적 및 열적으로 우수한 물성을 보였다. 또한, 기존 콘크리트와 같이 일정한 공간에 주입 성형할 수 있으며, 몰드에 넣어 벽돌과 같은 블록(브릭) 형태 또는 얇은 보드 형태로 가공하여 사용할 수 있으며, 페인트와 같이 발라서 사용도 가능하므로 다양한 구조재 형태로 적용이 가능할 것으로 여겨진다.

1. 서론

자갈 및 모래를 사용하는 일반적 콘크리트는 도로, 교량, 건물, 터널 등 현존하는 대부분의 건축 및 토목 분야에 널리 사용되는 물질로서 높은 압축 강도와 내구성 및 경제성 등의 장점이 있는 물질이다. 하지만 이러한 일반적인 콘크리트를 구조물로 적용할 때, 비중이 2~3

로 상당히 높아 무겁고, 수분 및 기타 외부 조건에 대한 내구성 저하, 동결융해에 대한 저항성이 적고, 내화확성도 낮고, 충격강도에 약해 건축이나 토목 분야를 제외하고는 경량구조물이 요구되는 선박이나 해양(플랜트)구조물에는 사용이 되기 힘들다.

따라서 비중이 낮은 경량 콘크리트가 개발되어 사용되고 있다[1-4]. 경량콘크리트란 콘크리트의 단위 중량을 줄임으로써 단면과 기초의 크기를 축소하고 이를 통해 구조물의 효율성을 높이며 단열, 방음성능 등의 개선과 같은 부수적인 효과를 얻고자 개발된 콘크리트이다. 경

[†]Corresponding author
E-mail: bwlee@kmou.ac.kr

량 콘크리트는 제조공법의 차이에 따라 경량골재 콘크리트와 기포 콘크리트로 분류된다. 경량골재 콘크리트는 저 비중 골재나 인공적으로 비중을 낮춘 골재를 사용하여 중량을 줄인 콘크리트를 말하며 기포 콘크리트는 콘크리트 내에 기포를 발생시켜 중량을 낮춘 콘크리트이다. 이에 더해 초경량 콘크리트란 개념적으로 비중이 물의 비중 $1(1,000 \text{ kg/m}^3)$ 이하인 물에 뜰 수 있는 콘크리트를 의미한다. ASTM C 330-77[5]에 명시되어 있는 경량 콘크리트란 구조물로 사용할 경우, 우선 비중이 $1,850 \text{ kg/m}^3$ 이하여야 하고 28일 압축강도가 167 kg/m^2 이상이 되어야 한다. 하중을 받지 않는 방음벽 등의 경우에는 단위 중량이 800 kg/m^3 이하, 28일 압축강도는 $6.9\text{-}68.7 \text{ kg/m}^2$ 로 규정되어 있다.

경량 콘크리트의 가장 큰 사용상 한계는 기본적으로 강도 및 충격강도가 낮아 그 사용처가 제한된다는 점이다. 일반적인 경량 콘크리트도 소결체 세라믹스와 같이 낮은 강도와 취성파괴의 문제점을 가지고 있어 얇은 보드 형태로 제조 시 충격을 견디기 힘들어 경량화가 필요한 부분에 사용하기 쉽지 않다. 따라서 강도가 크게 떨어지지 않으면서 구조물의 자중을 줄일 수 있다면 콘크리트의 활용 범위는 상당히 넓어지게 될 수 있으며 구조물 전체의 효용성이 커지게 되어, 특히 경량 콘크리트가 필요한 선박이나 해양플랜트용으로 사용이 가능해지게 된다[6,7].

기존의 폴리머 시멘트 콘크리트(polymer-modified concrete, PMC)의 경우 폴리머가 10% 내외로 포함되어 폴리머의 낮은 밀도로 인해 첨가량을 부피로 보면 상당한 다량이 포함되며, 기존의 콘크리트보다 높은 마모저항, 충격저항, 내수성, 내구성 등을 위해 제조된다[8-10]. 경량 콘크리트에 폴리머를 첨가하여 내 충격저항이 높아지고, 폴리머를 첨가하고도 내화성까지 갖추게 되면 구조재는 물론 단열재나 방음재로도 사용할 수 있다는 장점이 있을 수 있다. 특히 최근 화재나 폭발이 잦은 ESS(Energy Storage System)나 지하 전기자동차 충전구획의 방화·방폭용 벽체 등으로의 사용도 기대된다.

특히 경량화가 요구되는 선박의 경우 탄소 저감을 위한 파리조약[11]의 이행과 IMO의 해양환경 규제 강화 등의 정책적 이슈와 세계 각국의 해양환경보호 운동 등의 요인을 바탕으로 전기추진 선박의 성장 가능성[12]이 매우 크다고 여겨지며 이러한 선박용 ESS 시장도 커나갈 것으로 예상된다. 고립된 환경에서 운용되는 선박의 경우 화재에 매우 취약하고, 따라서 선박용 ESS의 경우 불연성 화재전파 방지구획이 필요하며 그 구조물의 경량화 또한 필수적이라 생각된다.

본 연구는, 일반적인 시멘트를 결합제의 주 소재로 하되, 여기에 경량화와 내화 단열성을 부여하기 위한 골재로 폐유리를 가공한 다공성 유리 비드(porous glass beads)

와 강도 증진을 위한 기능성 유기 결합첨가제(폴리머)를 첨가하고, 방수와 결합력 등 추가적 기능을 부여하기 위한 실란계 첨가제를 추가로 첨가하여 비중이 1 이하로 물에 뜨는 경량화를 달성하며, 이를 통해 일반적 콘크리트의 낮은 충격강도와 취성파괴의 문제점도 해결하고 고온에서도 낮은 열전도도와 내화 및 내열 성능이 우수한 콘크리트형 소재를 개발하는 것에 그 목적이 있다.

2. 실험 방법

2.1. 조성 및 배합

본 연구에서 경량 고강도 및 내화성을 갖춘 콘크리트형 조성물을 제조하기 위해, 콘크리트 조성 중 무기바인더로 포틀랜드 시멘트(한일)를 사용하였으며, 경량화를 위한 골재로 다공성 팽창유리(Poraver, 입경 $0.4\text{-}5 \text{ mm}$, 비중 $0.3\text{-}0.4$, 흡수율 $\sim 20\%$ [13]), 세라믹의 취성파괴를 방지하기 위한 유기 결합제들로 재분산형 수성폴리머인 polyvinyl acetate-co-versatate(AXILAT HP 8029)와 수용성 폴리머인 polyvinyl alcohol(PVA) 및 메틸셀룰로스(methyl cellulose)를 사용하였고, 이들의 추가 가교를 돕기 위한 가교제로 triethyl amine(TEA), N,N-methylene-bis-acrylamide(MBA) 및 glutaraldehyde를, 세라믹의 취성파괴를 줄이기 위한 유리 섬유(길이 $\sim 10 \text{ mm}$), 방수 및 추가 결합기능부여를 위한 silane으로는 methyltrimethoxysilane(MTMS) 및 3-glycidoxypropyltrimethoxysilane를 사용하였다. 여기에 각성분들의 분산과 점도 조절을 위해 Na-polyacrylate를 사용하였다. 각 조성에 따른 배합비율은 Table 1과 같다.

이들 조성을 1.0에서 1.2 Water/Cement(W/C, weight ratio)의 물을 섞어 반죽하였으며 두께 10 mm 의 보드형과 $140 \times 200 \times 50(\text{mm})$ 의 블록(또는 브릭)형으로 성형한 후 자연 양생시켜 제조하였다. 콘크리트들의 일정한 물성측정을 위해 시멘트 강도를 고려하여 모든 물성은 28일 동안 양생한 후 측정하였다. 본 연구에서는 일반 시멘트 보드도 제조하여 경량 콘크리트와 물성을 비교 측정하였다. 시멘트에 W/C 0.5로 물을 첨가하여 두께 10 mm 로 제조하였으며 동일한 양생 기간을 통해 물성을 비교하였다.

2.2. 경량 콘크리트 물성측정

각 조성별 양생된 콘크리트형 소재들의 비중은 양생된 상태 그대로 무게와 치수를 재어 측정하였고, 흡수율은 본 소재들이 물에 뜬으로써 물속에 담갔다가 측정하는 기존의 콘크리트 흡수율 측정법을 사용하지 않고 기존 소결된 세라믹 흡수율 측정법과 같이 물에 넣어 3시간

Table 1
Chemical composition of the modified concretes

| Components | Ingredients | Contents (wt.%) | | |
|---------------------------|---|-----------------|------|------|
| | | C1 | C2 | C3 |
| Binder 1 | Portland cement | 38.0 | 50.0 | 50.0 |
| Binder 2 (Organic binder) | Redispersible vinyl acetate-versatate copolymer | 5.0 | 1.3 | 1.3 |
| | Poly vinyl alcohol | 2.0 | - | - |
| | Methyl cellulose | 0.8 | 0.8 | 0.8 |
| Foamed glass | Expanded glass (Poraver Co.) | 50.0 | 35.0 | 43.0 |
| Crosslinkers | Triethyl amine (TEA) | - | 0.8 | 0.8 |
| | N,N-methylene-bis-acrylamide | - | 0.1 | 0.1 |
| | Glutaraldehyde | - | - | - |
| Glass fiber | Glass fiber | 2.0 | 1.8 | 1.8 |
| Silanes | Methyltrimethoxysilane | - | 5.0 | 1.0 |
| | 3-Glycidoxypropyltrimethoxysilane | - | 5.0 | 1.0 |
| Dispersants | Na-polyacrylate | 1.2 | 0.2 | 0.2 |
| W/C | Water/Cement (weight ratio) | 1.0 | 1.2 | 1.2 |

동안 끓인 후 소재들의 수중 안정성과 흡수율을 측정하였다. 충격강도 측정을 위해 제조된 보드들에 대해서는 다공성 유리가 2 cm 두께로 깔린 판 위에 제조된 보드를 위치시킨 후 200 g 강구 낙하 방법을 시행하였으며, 브릭에 대해서는 2층 높이에서 콘크리트 바닥에 3회 떨어뜨려 그 강도를 시험하였다. 대략적인 압축강도는 지름 38 mm 프레스에 끼워 수동으로 압력을 가해 측정하였다. 또한, 제조된 콘크리트 보드의 불연성 및 단열성능을 측정하기 위해 최고온도 1,300°C에 이르는 토치로 가열하면서 보드의 앞 뒷면 온도를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

본 연구를 통해 개발된 콘크리트형 소재는 다공성 유리비드를 사용하여 경량성을 가지며 유기 결합제를 사용하여 높은 충격강도도 동시에 가지는 복합형 소재로써 기존의 경량 콘크리트 구조물이 사용되는 어디에도 대체 사용이 가능하며 특히 난연성과 내충격성이 필요한 구조물에 발라져 사용되거나 보드 또는 브릭형으로 만들어 사용할 수 있다.

본 연구에 사용된 세라믹 결합제로 사용된 시멘트는 가장 일반적인 포틀랜드시멘트를 사용하였다. 시멘트와 함께 가장 많은 양을 차지하는 조성은 다공성 유리비드로 경량성 및 차열성(insulation)을 제공한다. 다공성 유리비드로는 Poraver사 팽창유리를 사용하였으며 경량화를 위해 시멘트보다 많이 첨가할 경우 강도가 떨어지고 다공성으로 인해 흡수율이 높아져 좋지 못한 물성값들을 보여줌으로써 50 % 이내의 첨가가 적절하였다.

일반적인 폴리머 시멘트 콘크리트(PMC)의 경우 폴리머가 10 % 내외로 부피 비로 볼 때 다량 포함되나 본 연구에서는 내화, 난연성을 해치지 않으면서 내충격성을 높이기 위해 폴리머 첨가량을 5 % 이하로 최소화하였다. 고 충격저항을 위해 C1의 경우 비교적 다량인 5 %를 첨가하였으며 C2와 C3의 경우 폴리머의 양을 2 % 이내로 최소화하였다(Table 1). 기존의 PMC의 경우 폴리머가 비교적 다량 첨가되어 내수성이 증진되게 된다. 하지만 본 연구에서는 내화성능 증진을 위해 비교적 낮은 폴리머를 첨가하여 내수성이 충분하지 않아 실란을 추가로 첨가한 조성(C2, C3)도 제조하여 내수성과 추가 결합성을 부여하였다. Figure 1은 이렇게 하여 제조된 C1, C2 및 C3 샘플을 보여주고 있다. 이들 각각 비중이 0.50, 0.55, 0.53으로 물에 넣으면 뜨게 된다.

실란을 첨가할 경우 결합력이 증진되고 방수성도 증가하게 된다. 실란을 첨가하지 않은 C1의 경우 물에 넣고 끓였을 경우 물을 흡수하여 3시간 끓인 후에는 물에 잠기게 되었다. 실란을 첨가한 C2 및 C3의 경우에는 물에 담가 3시간 끓여도 비중이 1보다 작아 Fig. 2와 같이 물

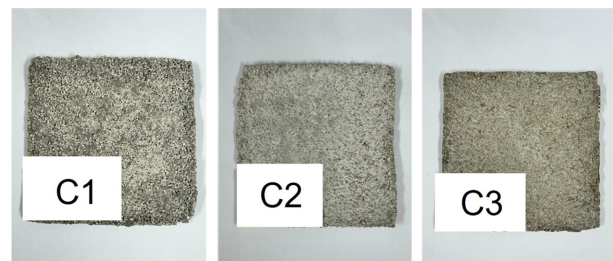


Fig. 1. The lightweight concrete boards prepared from the composition C1, C2 and C3 in Table 1.

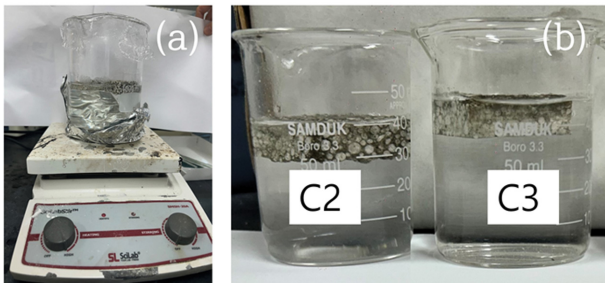


Fig. 2. (a) Boiling 3 hrs of a concrete specimen and (b) the floating of the specimens from the composition C2 and C3 after boiling.

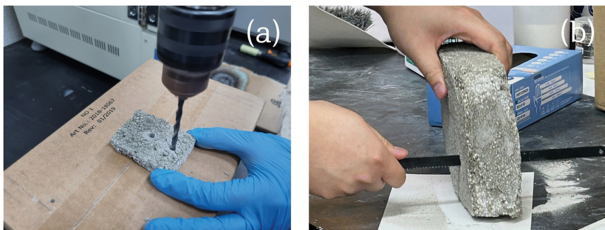


Fig. 3. (a) Drilling and (b) cutting of a board and a brick prepared from the composition C1 and C2, respectively, without cracks.

에 뜨는 결과를 보여 가혹한 실험 조건에서도 수중 안정성이 매우 우수함을 보여주었다. 이와 같이 물에 끓여 측정된 흡수량은 일반 시멘트와 C1은 각각 24, 23%였으며 C2 및 C3은 각각 19, 21%였다. 이때 일반적인 시멘트의 흡수율은 끓이지 않고 24시간 동안 물에 담근 후 측정(KS F 4004)하는 방법에 비해 세 배 정도 높은 값을 나타내었다. 이는 끓여서 측정한 방법에 따른 차이로 여겨지며 본 연구개발 소재와 같은 물에 잘 젖지 않고 물에 뜨는 초경량 폴리머 콘크리트 물성측정 방법이 명확히 정해져 있지 않아 물성을 비교하는 의미 정도로 여겨야 할 것으로 생각된다.

폴리머 같은 유기물 바인더를 함유한 콘크리트의 경우 세라믹의 취성과괴를 방지할 수 있으며 본 소재들과 같이 다공성 유리비드를 폴리머와 같이 함유한 경우 그 가공성이 획기적으로 높아져 C1, C2, C3 모두 일반적인 공구를 이용하여 균열 없이 드릴 및 절단 가공이 가능하였다(Fig. 3).

Figure 4는 강구 낙하법에 의한 내충격성을 시험한 결과를 보여주고 있다. 모래가 깔린 판 위에 제조된 보드들을 배치한 후 강철구를 떨어뜨려 내충격성을 측정하여 일반 시멘트 보드와 비교하였다. 일반 시멘트 보드의 경우 200 g 강구 낙하 실험에서 강구를 20 cm 높이에서 떨어뜨리면 균열이 발생(Fig. 4(a))하였으며 경량성 콘크리트의 경우 동일한 높이에서의 강구실험에서 균열이 관찰되지 않았다(Fig. 4(b)). Figure 5는 C1 조성의 보드에 대해 1 m 높이에서 강구를 낙하시킨 결과를 보여준다. 강

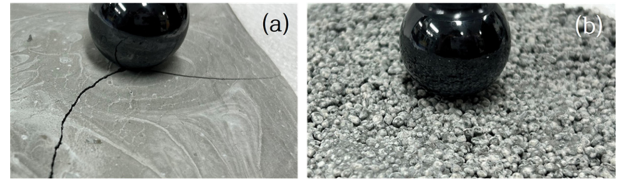


Fig. 4. Dropping-ball test on (a) a portland cement board and (b) a C2 board from a height of 20 cm.

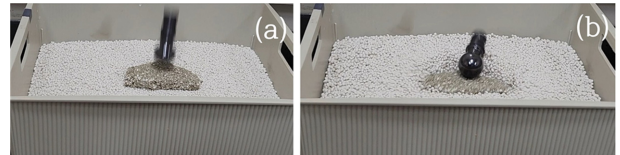


Fig. 5. Dropping-ball test on a C1 board (a) before and (b) after impact from a height of 1 m.

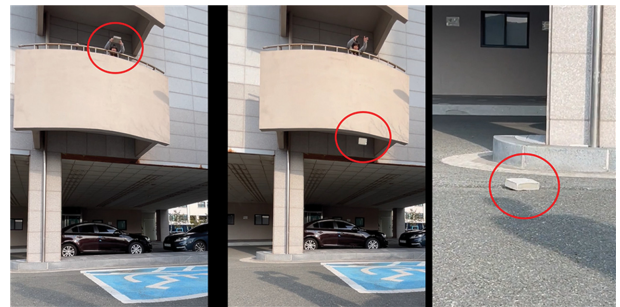


Fig. 6. Free drop test of a C2 brick on concrete road from two story building height.

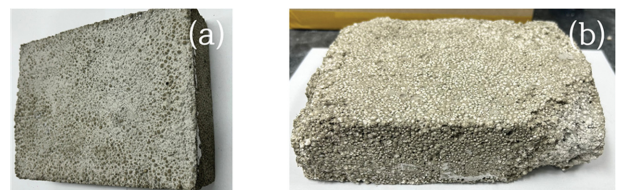


Fig. 7. Shapes of the C2 brick (a) before and (b) after 3-times of the free drop test.

구가 낙하하는 순간(Fig. 5(a))과 낙하 직후(Fig. 5(b))의 결과를 보면 균열 없이 우수한 내 충격성 결과를 보임을 알 수 있다.

C2 조성으로 제조된 브릭에 대한 충격강도 실험 사진을 Fig. 6에 나타내었다. 건물 2층 높이에서 콘크리트 바닥에 3회 자유낙하로 떨어뜨려 충격강도를 측정하였다. Figure 7에 나타낸 결과를 보면 3회 반복실험으로 모서리가 약간씩 깨져 나가는 했지만, 일반적인 콘크리트 브릭에서 보일 수 있는 취성과괴 현상은 보이지 않아 C1 조성에 비해 유기 결합체의 함량이 비교적 적은 C2 브릭의 충격강도도 매우 높음을 알 수 있었다.

압축강도의 경우 폴리머가 함유된 본 초경량 콘크리트

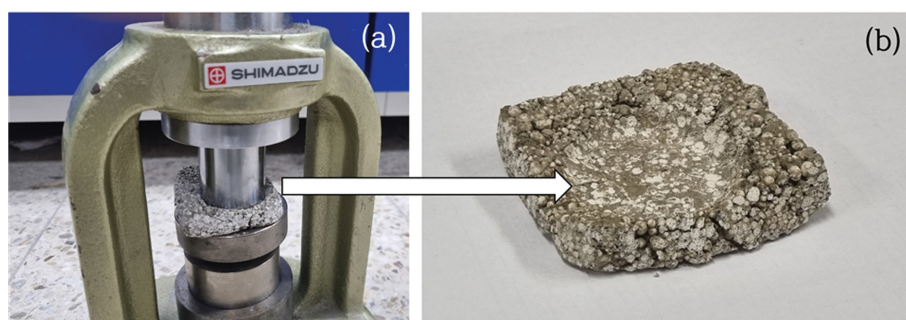


Fig. 8. (a) Press test on the C1 board and (b) the test specimen after the press test.

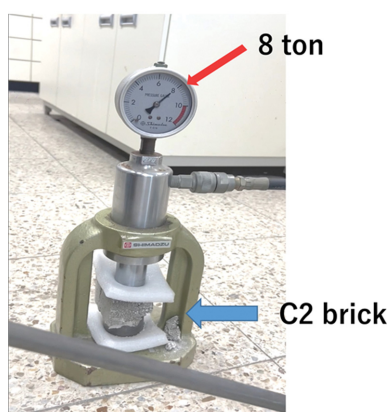


Fig. 9. Press test on the C2 brick.

는 높은 가공성에 맞물려 깨지지 않고 플라스틱과 같이 프레스 축에 의해 Fig. 8과 같이 움푹 들어가게 되어, 깨어져 조각나는 일반 콘크리트와 물성이 달라 기존의 측정방법으로는 정확한 압축강도 결정이 어렵다. C2 조성으로 제조된 브릭의 경우 지름 38 mm 실린더형 프레스에 끼워 압력을 가할 때 금이 가고 조그만 조각이 떨어지지만 8 Ton의 압력에도 그 형태가 유지되고 있음을 보여준다(Fig. 9).

C2 조성의 두께 10 mm 보드에 대한 내화 및 단열 특성을 Fig. 10에 나타내었다. 가스 토치를 이용하여 800~1,100°C에 걸쳐 한쪽 면을 가열하면서 동시에 뒷면 온도

를 7분간 측정하였다. 3분여 동안 뒷면의 온도는 100°C 이하를 유지하였으며 그 이후에도 4분여간 추가 가열 시 최대온도가 300°C를 넘지 않아 양면의 온도 차이가 600~1,000°C 정도로 단열성능이 매우 높았으며 가열 후에도 쉽게 부서지거나 하지 않아 그 강도도 유지가 됨을 알 수 있었다. 하지만 비교하기 위해 제조된 시멘트 보드의 경우 토치를 대는 순간 곧바로 깨져 온도 특성을 측정할 수 없었다.

본 연구의 결과들을 종합하면 실란이 다량 포함된 C2의 수분 안정성이 가장 우수하였으며 충격 저항성은 다공성 유리 비드와 폴리머가 가장 많이 포함된 C1이 가장 우수하였다. 내열 및 단열성은 C1, C2, C3 조성 모두 우수한 결과를 보였다.

4. 결 론

본 콘크리트형 구조물은 다공성 소재를 사용하여 0.5 정도의 저비중으로 제조됨으로써 물에 뜨는 경량성을 갖추고, 5% 이하로 폴리머 결합제를 첨가하여 내충격성과 내수성을 부여하였다. 내화 및 단열성능 증진을 위해 비교적 낮은 폴리머 함량을 가진 경우 내수성이 충분하지 않아 실란을 추가로 첨가하여 내수성과 추가 결합성을 부여하였다.

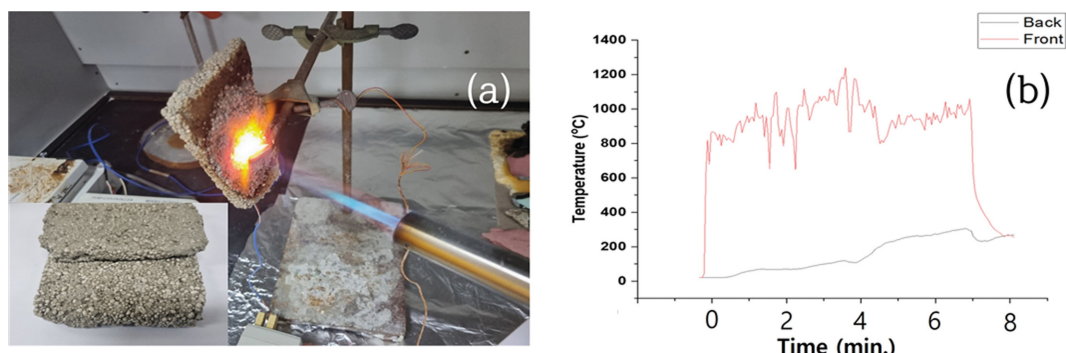


Fig. 10. (a) Inflammability test using a gas torch and (b) temperatures of front and back surface during the firing on the C2 board.

이러한 콘크리트형 조성과 구조물은 경량성을 갖추고도 유기 결합제와 추가적인 가교제들의 영향으로 유기물 함량을 최소화하면서도, 강도가 높고 세라믹의 취성파괴가 없어 공구를 사용한 가공이 가능하며, 충격 저항성도 갖추고, 토치 화염을 이용한 고온에서도 낮은 열전도 특성과 내화성을 갖춰 방화 구조물의 최소 두께를 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라, 내충격성이 커 방폭 성능도 발휘할 수 있는 효과가 있다.

이러한 물성으로 인해 본 조성이 개선된 콘크리트형 소재는 화재 발생 가능성이 큰, Li-전지를 탑재하여 사용하는 ESS 시설의 구조재로도 사용할 수 있을 것으로 여겨지며 특히 지속적인 진동과 뒤튐림이 발생하여 구조물의 기계적 안정성이 무엇보다도 중요한 요소인 선박이나 해양플랜트의 ESS나 기타 시설의 내화 또는 난연 보온재로도 응용할 수 있을 것으로 여겨진다.

References

- [1] K. Thienel, T. Haller and N. Beuntner, "Lightweight concrete from basics to innovations", *Mater.* 13 (2020) 1120.
- [2] J.H. Mohammed and A.J. Hamad, "Materials, properties and application review of Lightweight concrete", *Rev. Tec. Ing. Univ. Zulia.* 2 (2014) 10.
- [3] A. Nirbhavane, S. Pingat, S. Khaire, P. Bharati, K. Dahiphale and S. Patil, "Lightweight concrete", *IJA-RIIT* 10 (2024) 94.
- [4] N. Narayanan and K. Ramamurthy, "Structure and properties of aerated concrete: a review", *Cem. Concr. Compos.* 22 (2000) 321.
- [5] ASTM C 330-04, *Lightweight Aggregates for Structural Concrete*, 2004.
- [6] Ship Structure Committee, *Survey of experience using reinforced concrete in floating marine structures*, 1984.
- [7] M. Tadros, M. Ventura and C. G. Soares, "Management of the properties of shipbuilding expanded clay lightweight concrete", *International Journal of Engineering & Technology* (2018) 245.
- [8] R. Bedi, R. Chandra and S.P. Singh, "Mechanical properties of polymer concrete", *J. Compos.* 2013 (2013) 948745.
- [9] A. Ali and A.A. Ansari, "Polymer concrete as innovative material for development of sustainable architecture", *2nd International Conference on Emerging Trends in Engineering & Technology Proc.* (2013) 1.
- [10] ACI Committee 548 Report, *Guide for the use of polymers in concrete*, ACI 548.1R-97, 1997.
- [11] *The Paris agreement*. New York, UNFCCC (2016).
- [12] M.V. Nikolenko, K.V. Vasylenko, V.D. Myrhorodska, A. Kostyniuk and B. Likozar, "Review of the IMO initiatives for ship energy efficiency and their implications", *Int. J. Mar. Sci.* 22 (2023) 662.
- [13] *Technical data sheet, Lightweight aggregate according to DIN EN 13055-1, Poraver expanded glass.*