

# 내화 캐스타블의 도예적 가능성에 관한 고찰

황 세 훈

(서울과학기술대학교 도예학과 박사과정)

## I. 머리말

## II. 내화 캐스타블의 기본 이해

- 용어 정의 및 분류 체계
- 전통 도자 재료와의 차이점
- 선행 연구 고찰

## III. 재료의 구성과 특성

- 기본 조성비와 각 성분의 역할
- 물리적·화학적 특성
- 재료 구성 및 특성

## IV. 제조 공정과 작업 방법

- 기본 제작 공정
- 성형 기법

## V. 맺음말

# I. 머리말

현대 도예는 전통적인 점토 재료의 한계를 넘어 새로운 재료적 가능성을 모색해야 하는 시대적 요구에 직면해 있다. 특히 대형 설치 작품이나 물성 실험적 작품의 수요 증가는 기존 재료의 물리적·화학적 한계를 뛰어넘을 수 있는 새로운 소재에 대한 필요성을 부각시키고 있다. 산업용 내화재료로 널리 사용되어 온 내화 캐스타블(refractory castables)은 이러한 요구에 부응하여 도예 분야에 새로운 재료적 전환점을 제시할 수 있는 소재로서, 무궁무진한 공예적 가능성을 지니고 있다. 내화 캐스타블은 고온에서 사용 가능한 무정형 내화재료로 높은 압축 강도와 내열 충격성을 갖추고 다양한 성형이 가능하다는 특징이 있으며, 특히 극미한 수축률(0.1-0.5%)과 우수한 기계적 강도는 전통 도자 재료와 차별화되는 장점을 제공한다. 이러한 특성은 전통적인 도자 재료로는 구현하기 어려운 새로운 조형 언어를 창출할 잠재력을 지닌다.

본 연구의 목적은 내화 캐스타블의 독특한 물리적·화학적 특성을 도자공예적 관점에서 재해석하고, 이를 통해 현대 도예의 창작 범위를 확장하는 것이다. 즉, 내화 캐스타블을 단순한 산업 소재가 아닌 공예적 표현 매체로 전환함으로써 새로운 표현 가능성을 모색하고자 한다.

## II. 내화 캐스타블의 기본 이해

### 1. 용어의 정의와 산업적 배경

내화 캐스타블은 글자 그대로 주조(cast)할 수 있는(able) 내화재료를 의미하며, 입도가 조정된 내화 골재(refractory aggregate)와 적절한 결합재(binder)를 배합하고 물을 첨가하여 혼합, 성형함으로써 내화 구조체를 얻는 무정형 내화물을 지칭한다.<sup>1</sup> 반죽 상태로 부어 넣거나 진동 성형, 펌핑, 분사 등 여러 방식으로 시공이 용이한 캐스타블의 뛰어난 시공성 덕분에 철강 산업 등에 널리 보급되며, 산업 전반에서 그 활용 빈도가 꾸준히 증가해왔다.<sup>2</sup>

최근 들어 체철, 시멘트 소성로, 소각로 등의 고온 및 화학적 조건에 대응하기 위해 치밀한 구조와 우수한 내구성을 지닌 내화 라이닝이 요구되면서, 저시멘트 캐스타블 등의 고성능 캐스타블 내화물이 전통 벽돌을 빠르게 대체하고 있다.<sup>3</sup>

1 박홍채 『내화물공학개론』(두양사, 2008), p. 105.

2 Mitsuo Sato, Akira Ishikawa, "Construction Technology of Monolithic Refractories", *Nippon Steel Technical Report* 125(2020), p. 74.

## 2. 전통 도자 재료와의 차이점

세라믹스는 열 또는 압력을 가해 제조되는 비금속 무기 재료이다.<sup>4</sup> 전통 도자 재료와 내화 캐스타블은 이러한 세라믹스의 정의를 공유한다. 그리고 두 재료 모두 알루미나( $Al_2O_3$ )와 실리카( $SiO_2$ ) 등이 추가 되는 화학적 조성을 지니고 있다. 또한 소성을 통해 결과물을 만들어 낸다는 제작 과정 등 또한 유사하다. 하지만 사용 온도, 내열성, 결합 메커니즘, 물리적 강도, 성형 방법 등 여러 측면에서 근본적인 차이가 있다. 이러한 차이점은 다음과 같이 정리할 수 있다.

### 1) 사용 온도

전통 도자 재료의 소성온도가 보통 1200-1300°C인 반면, 내화 캐스타블은 1400-1800°C의 초고온 환경에서도 사용될 수 있도록 설계된다. 캐스타블의 사용 온도를 결정하는 요소는 다양하지만 일반적으로 구성 성분에 의해 결정된다. 이는 캐스타블의 구성 비율 중 높은 비율을 차지하는 골재의 성분에 따라 결정되는 경우가 많으며, 크게 고온을 위한 알루미나계와 상대적으로 낮은 온도의 클레이계로 구분할 수 있다.

### 2) 화학 조성

내화 캐스타블은 고순도 알루미나 함량이 매우 높다. 고알루미나 캐스타블의 경우 알루미나 함량이 80% 이상에 이른다. 동국R&S의 CA-180의 경우 알루미나 함량은 88% 이상이며 실리카 함량은 0%이다. 반면 도자기는 알루미나 함량이 낮고 실리카 함량이 높으며 알칼리 산화물의 영향으로 내화 온도에 한계가 있다. 즉, 내화 캐스타블은 화학적 조성 측면에서 고알루미나 저규산질 구조로 전통 도자 재료보다 우수한 내화도를 지닌다.

### 3) 결합 메커니즘

전통 도자 재료는 소성 과정에서 점토 내의 규소-알루미나 성분이 부분 용융되어 유리질

3 이상암 홍윤철 「치밀질 캐스타블의 사용조건과 특성 이해」, 『시멘트 심포지엄』 37(한국시멘트협회 2010), p. 188.

4 한국세라믹기술원에 따르면 세라믹이란 광물에 열을 가해 만든 비금속 무기재료를 의미한다. 부정형 내화물은 도자기와 같이 전통세라믹 소재로 분류된다. 한국세라믹기술원 <https://www.kicet.re.kr/00016/00045.web> (최종검색일 : 2025.7.10.)

을 형성하여 강도를 얻는다. 반면 내화 캐스타블은 수경성 알루미나 시멘트의 수화 반응과 고온에서 발생하는 세라믹 결합 등으로 강도를 얻는다.<sup>5</sup> 시멘트가 물과 반응하여 초기 강도를 발현하고, 이후 소성 단계에서 알루미나 입자 간 세라믹 결합을 통해 최종 강도가 발현되는 이중 메커니즘이다.<sup>6</sup> 캐스타블은 양생 단계에서도 강한 강도를 갖는 반면 도자기는 그린웨어(greenware) 단계에서 강도가 매우 약하다. 또한 흙은 건조 및 소성 시 수분 증발과 소성 수축에 의해 변형되지만, 캐스타블은 초기 경화 과정에서의 건조 수축이나 소성 중 수축 및 뒤튐림이 거의 발생하지 않는다. 고로 대형 작품도 형태 변형 없이 제작 가능하다. 실제로 산업용 내화 콘크리트는 수축률이 0.5% 미만이기에 건조 및 소성 수축이 경우에 따라 최대 14%에 달하는 도자기에 비해 안정적이다.

#### 4) 성형 및 시공 방법

도자기는 일반적으로 물레, 판 작업, 코일링, 핀칭, 캐스팅과 같은 방법으로 형태를 성형한다. 내화 캐스타블은 주조, 프리캐스트, 거닝, 래머블 등의 제작 방법이 사용된다.

캐스팅 기법은 도자 성형과 내화 캐스타블 주조에서 둘 다 사용되는 기법이지만 재료의 특성으로 인해 서로 상이한 방식을 갖는다. 내화 캐스타블의 주조는 진동이 필요하다. 슬러리 또는 몰드에 진동을 가해 몰드 내부에 고루 분산되도록 해야한다. 캐스타블은 석고 몰드처럼 흡수성이 있는 몰드를 활용하지 않기에 속을 비워내는 드레인 기법을 적용시킬 수 없고 솔리드 캐스팅 기법만 가능하다. 내화 캐스타블은 건조 중 변형과 소성 중 폭발에 영향을 크게 받지 않으므로 두께 제한이 없다. 양생 후 높은 강도를 얻기에 선택 가능한 몰드 폭도 넓다. 실리콘 몰드를 사용하여 언더컷과 무관하게 캐스팅을 할 수 있기 때문이다.

핸드빌딩 측면에서도 뚜렷한 차이가 나타난다. 전통적인 도자기 제작에서 핸드빌딩은 가장 상징적이고 중요한 제작 방법으로서 습도만 잘 관리한다면 시간이 오래 걸리더라도 차근 차근 작품을 완성할 수 있는 기법이다. 이와 달리 캐스타블은 물과 시멘트가 만나게 되면 수화 반응을 통해 경화되므로 핸드빌딩을 통해서 제작할 수 있는 시간이 60분을 넘길 수 없다.<sup>7</sup>

5 박홍채 『내화물공학개론』(두양사, 2008), p. 106.

6 최종 강도가 발현되는 이중 메커니즘이 제대로 작동하기 위해서는 캐스타블의 소성 온도와 온도 유지가 중요하다. 일반적으로 1500°C에서 3시간 유지하는 소성 그래프에서 높은 강도가 나타난다. CA-160을 예로 들면 110°C에서 24시간 유지할 경우 압축(곡) 강도는 200(40)kg/cm<sup>2</sup>이다. 1200°C에서 3시간 홀딩 시에는 150(35)kg/cm<sup>2</sup>로 압축과 휨 강도가 감소하고 1500°C에서 3시간 홀딩 시에는 400(70)kg/cm<sup>2</sup>으로 높아진다. 일반적인 도예 스튜디오 환경에서는 1300°C 내외가 최고 소성 온도 범위이므로 제품을 사용할 때는 압축(곡)강도를 확인하는 것이 좋다.

7 일반적인 내화 캐스타블의 경화 시간은 30분 내외이나 핸드빌딩 용으로 제작된 플라스틱 캐스타블은 가소성을 위한 증점제가 들어감에 따라 경화시간이 더 길어진다. 하지만 이는 일반 캐스타블에 비해 비교적 더디다는 것일 뿐 경화가 발생하지 않는다는 것은 아니다.

다행히 건조 수축률이 거의 없다는 장점을 활용하여 양생이 끝난 후에도 핸드빌딩을 계속할 수는 있지만, 도자기처럼 자유롭게 형태를 수정하기는 어렵고 작업 시간도 상당히 오래 걸린다는 한계가 있다.

이상의 차이점들은 내화 캐스타블이 전통 도자 재료와는 다른 독특한 표현 가능성을 갖고 있음을 보여준다. 특히 높은 내열성과 강도, 미비한 수축률, 그리고 다양한 성형 방법의 적용 가능성은 기존 도자 제작의 한계를 뛰어넘는 새로운 창작 영역을 제시한다. 무엇보다 캐스타블의 우수한 안정성은 대형 작품을 비교적 쉽게 구현할 수 있게 해준다. 이는 대형 도자 작품의 선구자인 준 카네코(Jun Kaneko)의 작품 제작 과정을 떠올리면 쉽게 비교가 된다. 그의 작품의 제작 기간을 보면 조형 과정은 몇 주에서 몇 달이 소요되고 건조 기간은 무려 1년이 소요된다. 초벌은 6주의 기간이 소요되며 유약 작업은 7개월이 소요된다. 그리고 끝으로 최종 소성은 6주의 긴 시간 동안 진행된다.<sup>8</sup> 이와 달리 내화 캐스타블은 애초에 산업용 로(爐)와 같은 규모있는 산업 구조물을 위해서 개발된 만큼 준 카네코의 작품만 한 사이즈는 제작 소요 시간이 그리 길지 않다. 로버트 브루스 데이비스(Robert Bruce Davis)의 고성능 캐스타블 내화 재료의 설계 및 개발에 관한 박사 논문에 따르면, 산업용 로(爐)와 같은 두께 20-30cm의 대형 구조물의 초기 경화 시간은 24시간이다.<sup>9</sup> 전체 건조 및 소성 시간은 2-5일이면 완료가 된다.<sup>10</sup> 준 카네코의 대형 도자 작품을 제작하는데 1년-3년의 시간이 소요된다고 생각해보는다면 내화 캐스타블을 통해 제작되는 시간이 얼마나 짧은지 실감할 수 있다.

표 1 전통 도자 재료와 내화 캐스타블의 특성 비교

구분	전통 도자 재료	내화 캐스타블
사용 온도	1200-1300℃	1400-1800℃
수축률	10-14%	0.1-0.5%
화학조성	SiO <sub>2</sub> 60-70%, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 15-25%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 30-88%, SiO <sub>2</sub> 0-60%
결합 메커니즘	소성 시 유리질화	수화 반응 및 세라믹 결합
그린 강도	매우 낮음(취급 주의)	높음(15MPa 이상)
기공률	0.5%(치밀질)	10-20%(다공질)
건조 후 강도	거의 없음	15-25MPa
소성 후 강도	20-40MPa	60-100MPa

<sup>8</sup> Jun Kaneko, *Special Project Catalogue* (Ree & Jun Kaneko Foundation, 2008), p. 2.

<sup>9</sup> Robert Bruce Davis, "Design and Development of Advanced Castable Refractory Materials", Oregon Health & Science University Ph.D thesis (2015), pp. 88-90.

<sup>10</sup> Robert Bruce Davis, 위의 논문 p. 104.

구분	전통 도자 재료	내화 캐스타블
작업 시간	적정 습도 유지 시 제한 없음	30분 내외
성형 방법	몰레, 판성형, 핸드빌딩, 캐스팅 등	주조, 분사, 가압성형, 핸드빌딩 등
재소성 가능성	제한적(변형, 파손 위험성)	다회 소성 가능
두께	5-15mm 권장	산업용 200mm 권장, 제한 없음

### 3. 선행 연구 고찰

내화 캐스타블의 도예적 활용에 대한 선행 연구는 전 세계적으로 매우 드물다. 하지만 이정표가 되어줄 만큼 중요한 연구자가 있는데, 바로 영국의 친환경 건축 소재 분야의 기업가인 앨러스테어 브렘너(Alasdair Bremner)이다.<sup>11</sup> 그의 연구는 “산업용 내화 콘크리트가 도예가에게 어떠한 이점을 제공할 수 있는가?”, “내화 캐스타블로 대형 세라믹 작품의 잠재력을 넓힐 수 있는가?” 등의 질문을 제기하면서 시작되었다.<sup>12</sup> 이러한 문제의식을 바탕으로 그는 2008년 박사학위 논문 「An Investigation into the Potential Creative Applications of Refractory Concrete」(2008)에서 내화 콘크리트의 도예 가능성을 전문적으로 연구했다.

#### 1) 브렘너 연구의 의의

첫 번째는 내화 콘크리트를 전통 도예 맥락에 도입함으로써 새로운 재료적 접근을 개척했다. 그는 내화 콘크리트는 기존의 점토가 지닌 한계를 넘어서는 새로운 조형 가능성을 제공한다고 주장하며, 높은 강도와 열충격 저항성, 급속 경화 등의 독특한 물성을 강조하였다.<sup>13</sup>

두 번째는 다양한 성형 기법(실리콘 몰드 주조, 직접 모델링 등)을 체계적으로 실험하고 그 결과를 정리하여 실용적인 작업 지침을 제시하였다. 세 번째는 구체적인 예술 작품 제작 과정을 통해 내화 콘크리트의 특성을 실증적으로 검증하였다. 이를 통해 내화재료가 예술품 제작에 적용될 때 나타날 수 있는 미적, 기술적 효과를 기록하였다. 네 번째는 유약과의 반응을 실험함으로써 유약 호환성을 일부 데이터화 시켰다. 같은 유약이라도 일반 도자 소지와 내화 캐스타블에서 다른 반응이 나타남을 발견하였다.

11 앨러스테어 브렘너(Alasdair Bremner)는 영국 프레스턴을 기반으로 한 친환경 건축 소재 회사인 Alusid의 공동 창립자이자 CEO이다. 그는 글래스고 예술학교(Glasgow School of Art)에서 세라믹을 전공했고 중앙 랭커셔 대학교(University of Central Lancashire)에서 내화 콘크리트의 창의적 응용에 관한 연구를 통해 박사 학위를 받았다.

12 Alasdair Bremner, “New Possibilities for Refractory Castable”, *Atoms to Art Conference*, University of Central Lancashire (2005), p. 4.

13 Alasdair Bremner, “An Investigation into the Potential Creative Applications of Refractory Concrete”, The University of Central Lancashire Ph.D thesis (2008), p. 9.

## 2) 브렘너 연구의 한계점

브렘너의 선행 연구가 중요한 개척적 역할을 했음에도 불구하고, 다음과 같은 한계점들이 지적될 수 있다.

첫 번째는 도예 스튜디오 환경에서의 활용 방안을 논하지 않았다는 점이다. 브렘너의 연구는 주로 대형 조형물과 건축적 설치 작품에 초점을 맞추었기 때문에 섬세한 공예 작품에 적용하는 구체적 기법에 대한 논의는 상대적으로 부족했다. 두 번째는 기성 제품에 대한 의존성과 조성 조절의 한계이다. 브렘너의 연구는 Jon Flo 90, Greentech 170 등 기성 상업용 내화 캐스타블 제품을 그대로 사용하는 데 그쳤으며, 작가의 의도에 맞춘 재료 조성 연구는 시도되지 않았다. 세 번째는 재료과학적 접근의 부재이다. 브렘너의 연구는 박사학위 논문으로서 기대되는 재료에 대한 과학적 분석과 체계적 접근이 부족하다는 아쉬움이 있다.

본 연구는 브렘너 연구의 한계와 브렘너 이후의 연구자가 없는 공백을 메우고자, 내화 캐스타블의 조성비와 특성을 분석하여 도예적 활용을 위한 구체적인 방향을 제시하려 한다.

## Ⅲ. 재료의 구성과 특성

### 1. 기본 조성비와 각 성분의 역할

내화 캐스타블의 기본 구성 성분은 내화 골재, 내화 미분, 결합재, 첨가제의 조합으로 구성되는 복합재료이다.<sup>14</sup> 일반적으로 캐스타블 배합에서 골재는 약 70% 내외로 가장 큰 비중을 차지하며, 여기에 내화 미분이 5-15%, 알루미늄 시멘트 결합재가 10-15%가 포함되고, 작업 특성에 따라 다양한 첨가제가 추가된다. 예를 들어 도자기 가마 내벽 보수를 위한 표준 배합을 보면, 0-6mm의 고알루미나 골재 72-75%, 알루미늄 미분말 등 내화 미분 8-10%, 알루미늄 시멘트 12-14%, 물 6.5-8.5%가 사용된다.

<sup>14</sup> 콘크리트의 구성 성분을 골재, 결합재, 혼화재로 분류하기도 한다. 혼화재로는 그 사용량의 많고 적음에 따라 혼화제와 혼화제로 구별된다. 일반적으로 내화 미분을 혼화재로, 그 외의 화학 첨가제를 혼화제로 부른다. 한국콘크리트학회 『최신콘크리트공학』 (기문당, 2024), pp. 164-165.

표 2 일반 내화 캐스타블의 평균 조성비와 각 성분의 역할

성분	함량(wt%)	역할	도예적 활용 시 유의점
내화 골재	60-85%	주골격 형성, 사용 온도 결정	입도 조절로 표면 질감 제어
내화 미분	5-15%	유동성 개선 및 치밀화	B2C 공급망 미비, 자가 제작 필요
결합제	10-15%	초기 경화, 그린 강도	수화물 탈수 분해시 강도 저하
첨가제	0.1-2%	유동성 조절, 경화 제어	소량으로도 극적인 효과
물	6.5-8.5%	수화반응 및 작업성 부여	위커빌리티에 직접적인 영향을 줌

### 1) 내화골재

내화 골재는 캐스타블 전체 조성의 60-85wt%를 차지하는 주골격 성분으로, 입도 분포와 재료 특성이 성능을 결정하는 핵심 요소이다. 일반 캐스타블에는 주로 고알루미나계 골재들이 사용된다. 보크사이트 클링커, 안달루사이트, 용융 알루미나 등이 주로 사용된다. 골재는 여러 가지 입도의 입자를 배합하여 사용하는데, 큰 입자는 강도를 담당하고 작은 입자는 빈틈을 메워 조밀한 입자 충전을 실현한다.<sup>15</sup> 일반적으로 5mm 체가름에서 중량으로 85% 이상 통과한 골재를 잔골재로, 5mm 체가름에서 중량으로 85% 이상 남는 골재를 굵은골재라 칭한다.<sup>16</sup> 일반 캐스타블에서는 연속 입도 골재 배합이 기본 원칙이며, 이를 통해 수축 및 균열 위험을 감소시키고 강도를 높인다.

### 2) 내화 미분

초미세 알루미나, 실리카 흙, 플라이애쉬 등 골재 간 공극을 치밀하게 메워 시멘트의 필요 수량을 낮추고 흐름성을 개선하는 매트릭스 성분의 미세 내화 분말을 의미한다. 실리카 흙은 혼합시 점도를 높이고 소형 입자로서 유힬작용을 하여 진동 및 자가 유동 캐스타블 구현을 돕는다.<sup>17</sup>

### 3) 결합제

내화 캐스타블의 결합제로는 주로 칼슘 알루미네이트 시멘트(CAC)가 사용된다. 이 시멘

<sup>15</sup> Alasdair Bremner, Fahad Alkandari, "Refractory Concrete: A Material that Offers New Ceramic Opportunities", *ICS 2011 Conference Proceedings* (2011), p. 4.

<sup>16</sup> 한국콘크리트학회 『최신콘크리트공학』(기문당 2024), p. 55.

<sup>17</sup> Alasdair Bremner, Fahad Alkandari, 앞의 논문 p. 4.

트는 수화 반응을 통해 단시간에 고강도를 발현하는 특징이 있는데, 24시간 양생 후 얻는 압축강도가 포틀랜드 시멘트의 28일 강도보다 높은 정도로 빠르게 경화한다.<sup>18</sup> 현대 캐스타블 기술에서는 알루미늄 시멘트의 수분 증축량으로 인한 품질 저하로 인해 시멘트 양을 최소화한 저시멘트 캐스타블이나 시멘트 프리 시스템을 연구하는 추세이지만, 도예에서는 알루미늄 시멘트를 결합제로 사용하는 것이 가용성이나 경제성 측면에서도 적합하다.<sup>19</sup>

#### 4) 첨가제

첨가제는 소량으로 배합 성능과 고온 특성을 조정하는 물질로, 유기계와 무기계로 나뉘며 기능적으로는 유동성 개선, 경화 제어, 기포 제어, 침강 방지 등으로 분류된다.

## 2. 물리적·화학적 특성

내화 캐스타블의 주요 물리적 특성으로는 강도, 기공률 및 흡수율, 열적 특성이 있고, 화학적 특성으로는 화학적 안정성을 들 수 있다.

#### 1) 압축강도

캐스타블은 압축강도가 특히 높은 재료이다. 상온 경화 후의 압축강도는 배합과 양생 조건에 따라 달라지지만, 보통 110℃에서 24시간 건조하면 수십 MPa 수준에 이른다. 예를 들어 앞서 제시한 HACT-160 캐스타블은 건조 후 약 15-25MPa의 압축강도를 보이며, 1350℃로 소성하면 미세구조 치밀화로 인해 강도가 더욱 증가한다. 산업용 고강도 캐스타블 제품의 경우 100MPa에 육박하는 압축강도를 가지는 사례도 보고되고 있으며, 통상 60-80MPa 수준은 비교적 용이하게 달성된다.<sup>20</sup> 또한 초기 강도인 그린 강도(green strength)도 중요한데, 손상 없이 탈형하고 운반하려면 최소 1.5 MPa 이상이 확보되어야 한다.<sup>21</sup> 건조만으로도 약 20 MPa 내외의 강도가 확보되므로, 두께가 충분한 실리콘 몰드를 사용하면 언더컷이 있는 복잡한 형태라도 비교적 수월하게 탈형할 수 있다.

18 최상훈 「알루미나 시멘트」, 『시멘트 심포지엄』 131(한국시멘트협회, 1993), pp. 107-108.

19 Alasdair Bremner, Fahad Alkandari, 위의 논문 p. 4.

20 <https://krref.com/ko/refractory-castable/#:~:text=%2A%206> (최종검색일 2025.7.25.)

21 J. Kasper et al., "Influence of the type of phosphate additive and its concentration on the setting kinetics of CA cement bonded refractory castables with special regard to the resulting pH value", *Open Ceramics*, 15 (2023), p. 2.

## 2) 흡수성 및 기공률

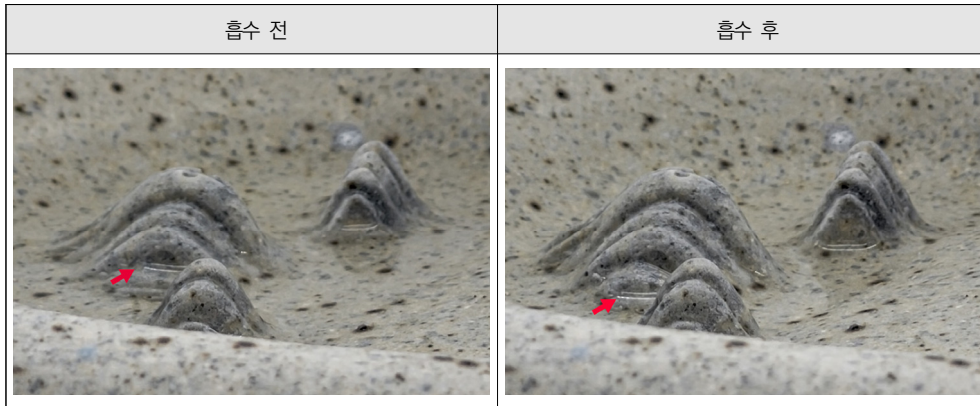
내화 캐스타블의 흡수성은 재료 내 기공률과 밀접한 관련이 있다. 일반적으로 캐스타블은 경화 및 건조 후 10% 내외, 1000℃ 열처리 후에는 20%를 상회하는 개방 기공을 가진다. 물을 많이 사용하여 배합한 전통적인 캐스타블일수록 잔류 기공이 늘어나고, 이는 강도와 내열 성능 저하로 이어진다.<sup>22</sup> 이러한 흡수성은 기능적 단점으로 인식되기 쉽지만, 공예적 관점에서



도 1 황세훈, 〈overflow-tea tray〉, 2025, castable, 28×21.5×4.5H(cm)

접근하면 오히려 독특한 기능적 장점이 된다. 캐스타블로 만든 티 트레이 〈overflow-tea tray〉가 좋은 예인데, 이 소재의 흡수성을 통해 차의 향을 자연스럽게 머금으면서, 표 3에서 확인할 수 있는 것처럼 차를 마실 때 생기는 물기를 흡수하여 배수 문제를 해결한다. 이는 전통 도자기로는 구현하기 어려운 내화 캐스타블만의 기능적 특성이다(도 1).

표 3 내화 캐스타블로 제작된 티 트레이의 흡수 과정



<sup>22</sup> Ibrahim M.I. Bayoumi et al., "Rheology of refractory concrete: An article review", *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 61 (2022), p. 454.

물을 흡수하는 티 트레이 외에도 향을 서서히 흡수하고 지속적으로 발향하는 액자형 디퓨저 〈잔향殘香〉, 물을 흡수시켜 냉동한 후 사용하여 냉기를 유지하는 와인 쿨러 〈overflow-wine cooler〉, 물을 흡수하여 별도의 받침 없이도 뿌리 썩음을 방지하는 화분 〈분재盆栽〉 등 다양한 응용 제품을 제작하였다(도 2,3,4). 내화 캐스타블의 흡수성과 투습성은 전통 도자기의 매끄럽고 밀폐된 표면과는 정반대의 성질이지만, 바로 이 차이점이 현대 생활에 필요한 기능성 디자인의 새로운 가능성을 열어준다.



도 2 황세훈, 〈잔향殘香〉, 2024, castable, gloop glaze, guaiac wood oil, 22×17×2.5H(cm)



도 3 황세훈, 〈overflow-wine cooler〉, 2025, castable, 20×17×24H(cm)



도 4 황세훈, 〈분재盆栽〉, 2025, castable, gloop glaze, 37×36×13H(cm)

### 3) 열적 특성

내화 캐스타블은 본래 고온에서도 구조적 안정성을 유지하도록 개발된 재료인 만큼 극한의 열환경에서도 견딜 수 있다. 일반 캐스타블은 알루미늄이나 시멘트계이기에 가열 시 결합 상의 변화로 일시적으로 강도가 감소할 수 있지만, 충분히 높은 온도에 도달하면 도자기와 유사한

소결 결합이 형성되어 오히려 강도가 회복되고 증가하는 경향을 보인다.<sup>23</sup> 또한 열전도도 측면에서, 캐스타블은 미세 기공 덕분에 동일 조성의 조밀한 소성체보다 열전도도가 낮아 단열 성능이 우수하다. 한 연구에서는 특수 배합한 내화 콘크리트가 상온에서 약 1.7W/m·K의 열전도도를 보였으며, 25회의 300-600℃ 열사이클 후에도 열전도도의 변화가 미비하여 초기 성능을 거의 유지한 것으로 나타났다.<sup>24</sup> 이러한 열적 안정성은 반복적인 가열과 냉각 과정에서 발생하는 열팽창과 수축을 견디는 뛰어난 열충격 저항성으로 이어진다. 이를 통해 반복 소성이 가능하게 되며 점진적인 유약 변화를 관찰하고 추적할 수 있게 된다.

#### 4) 화학적 안정성

내화 캐스타블은 안정된 산화물로 구성되어 고온과 부식성 환경에서도 화학적 안정성이 도자기보다 우수하며, 이로 인한 수축 변형이 거의 없어 대형 조형물에서도 균열이나 뒤틀림이 발생하지 않는다.<sup>25</sup> 소결 과정에서 형상이 안정적으로 유지될 뿐만 아니라 높은 기계적 강도를 가져 소성 후 연마나 접합 같은 후가공 작업이 수월하다. 특히 완전 소결된 도자기로는 구현하기 어려운 모듈 접합 방식을 통해 대형 구조물을 만들 수 있다는 장점이 있다.<sup>26</sup> 내후성과 내식성 또한 우수해 실외 환경에서 동결과 해동이 반복되거나 산성비에 노출되어도 오랫동안 본래의 형태와 강도를 잃지 않는다.<sup>27</sup> 금속, 유리, 천연석 등과 함께 사용할 때도 화학 반응에 의한 부식이나 변색 위험이 적어 다양한 재료를 조합한 설치 작품에서 재료 간 접촉 부위가 안정적으로 유지된다.<sup>28</sup>

요약하자면, 내화 캐스타블은 높은 압축강도와 우수한 그린 강도를 통해 복잡한 형태의 대형 조형물 제작을 가능하게 하며, 적절한 기공률로 인한 흡수성은 전통 도자기와는 차별화된 기능성 제품 개발의 새로운 가능성을 제시한다. 뛰어난 내열성과 열충격 저항성은 반복적인 고온 소성과 다양한 온도 대를 오가는 실험적 소성 방식을 가능하게 하여 창작의 자유도를

23 Ibrahim M.I. Bayoumi et al., 앞의 논문 p. 456.

24 J. Ramon Castro et al., "Innovative refractory concrete for high temperature thermal energy storage", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 285 (2025), p. 1.

25 M. Rimoldi et al., "Refractory castables for civil use: main properties depending on its application", *Procedia Materials Science*, 1 (2012) p. 379.

26 Alasdair Bremner, "An Investigation into the Potential Creative Applications of Refractory Concrete", The University of Central Lancashire Ph.D thesis (2008), p. 279.

27 M. Rimoldi et al., 앞의 논문 p. 379.

28 Ibrahim M.I. Bayoumi et al., 위의 논문 p. 457.

크게 확장시킨다. 또한 알루미늄, 실리카 등 안정된 산화물 조성으로 인한 화학적 안정성은 장기간 옥외 설치에도 견딜 수 있는 내구성과 다른 재료와의 안정적 결합을 보장한다. 다음 장에서는 이러한 내화 캐스타블의 잠재력을 실현하기 위한 실제 제작 공정과 새로운 기법들에 대해 구체적으로 살펴보고자 한다.

## IV. 제조 공정과 작업 방법

### 1. 기본 제작 공정

일반 내화 캐스타블로 작품을 제작할 때는 재료 조성 설계, 배합 및 혼련, 주조(타설), 양생, 건조 및 소성의 단계를 거친다. 단계별로 전통 도자 제작과 유사해 보이는 부분이 있지만 접근 방법과 활용 방안에서 근본적인 차이가 있으므로 이를 충분히 이해하고 작업에 임해야 한다.

#### 1) 재료 조성 설계

캐스타블의 재료 조성 설계는 작품에 요구되는 특정 물성을 구현하기 위해, 각 구성 원료의 종류와 배합비를 체계적으로 결정하는 과정이다.

##### (1) 골재 입도

일반적인 내화 캐스타블의 골재 함유량이 75% 내외이다. 이 비율 내에서 굵은 골재와 잔 골재의 비율을 조정해야 한다. 골재를 세분화하면 조립, 중립, 세립으로 구분할 수 있다. 조립(3-6mm)은 골격을 형성하고 공극의 기본 틀을 결정하므로 35-45%의 비율로 설정한다. 중립(1-3mm)은 조립과 세립 사이의 간극을 채우며 포장 곡선을 완만하게 만드는 역할을 하므로 30-40%로 설정한다. 세립(0-1mm)은 미세 간극을 충전하고 유동성과 점성 조절에 도움이 되므로 15-25%로 조절한다.

##### (2) 혼화재

혼화재란 포졸란 활성을 가지며 주로 시멘트의 대체재료로 이용되는 것을 일컫는다. 일반적으로 플라이 애시, 고로 슬래그, 실리카 흙, 천연 포졸란(규조토, 화산재), 기타 규산질미분말(왕겨재) 등이 대표적이다.<sup>29</sup> 작품 제작 시에는 표현 의도와 사용 환경을 고려하여 혼화재의

종류와 첨가량을 결정하되, 전체 중량의 5-15% 범위에서 조절하는 것이 일반적이다.

### (3) 바인더

일반 캐스타블의 바인더는 주로 알루미늄 시멘트를 사용한다. 알루미늄 시멘트로는 유니온사의 제품인 UAC50, UAC70, UAC80 등이 있다. 숫자가 높을수록 알루미늄 함유량과 순도가 높아지므로, 골재와 적합한 알루미늄 시멘트를 선택해 배합하여 사용하면 된다.

## 2) 혼련

먼저 골재, 결합재, 혼화제 등 모든 건식 재료를 정확히 계량하여 건식 선 혼합을 실시한다. 이 과정에서 재료들이 고르게 분산되도록 충분히 혼합해야 균질한 캐스타블을 만들 수 있다. 건식 선 혼합이 완료된 원료에는 정량의 깨끗한 물을 천천히 부어가며 혼합한다. 물은 한꺼번에 붓지 말고 재료를 저속으로 저어 주면서 여러 차례에 나누어 첨가하여 습식 혼련을 진행한다. 이때 물의 양 조절이 매우 중요한데, 물을 의도적으로 늘리면 반죽이 묽어져 주형에 부을 때 유동성은 좋아지지만 경화 후 강도가 저하되고 기공률이 높아지는 등 물성 약화가 발생한다. 반대로 물을 지나치게 적게 넣으면 작업성이 떨어지고 내부 공기 제거가 어려워진다.

혼합은 가능하면 강제식 믹서나 몰타르 믹서와 같은 장비를 사용하여 2-3분 이상 충분히 실시하는 것이 좋다. 혼합이 잘된 반죽은 전체가 균질한 페이스트 상태가 되며, 손으로 쥐어 보아 한 덩어리로 뭉쳐지지만 과도한 물기가 흘러내리지 않을 정도의 농도가 적당하다. 이렇게 준비된 반죽은 시간 경과에 따라 점차 응결이 시작되므로 가능한 30분 이내에 모든 타설을 완료해야 한다.

## 3) 주조(타설)

혼합된 캐스타블 반죽을 준비된 주형에 부어 넣는 단계이다. 주형 사용 전 내부에 이형제를 도포해 두어야 한다. 복잡한 형상의 몰드라면 배합한 반죽을 한 번에 부을 수 있도록 주입 순서와 속도를 미리 계획하는 것이 좋다. 타설 시에는 재료를 부으면서 동시에 가볍게 진동을 주어 반죽이 몰드의 구석까지 충전되고 내부 공기가 빠져나오도록 해야 한다. 작은 작업은 주형을 탁자 위에서 두드리거나 소형 마사지 건을 사용하는 것만으로도 충분하며, 큰 작업은

29 한국콘크리트학회 『최신콘크리트공학』(기문당, 2024), p. 90.

콘크리트 바이브레이터를 층층이 활용하여 내부까지 골고루 다지는 것이 효과적이다. 과도한 진동은 재료 분리를 일으키므로, 반죽 표면에 더 이상 큰 기포가 올라오지 않을 때까지만 진동을 시행한다. 이미 굳기 시작한 반죽을 다시 휘저어 재사용하거나, 표면에 물을 뿌려 다지려고 하는 행위는 미세 균열이나 층 분리를 유발하여 최종 작품의 결함으로 이어질 수 있으므로 피해야 한다. 캐스타블은 가능한 한 연속해서 완료하는 것이 바람직하며, 부득이 중간에 작업을 멈춰야 한다면 접합 경계면에 요철을 만들어 균열이 집중되지 않도록 설계한다.

#### 4) 양생

타설 완료 후에는 표면 평활 작업을 위한 과도한 문지름이나 마감을 피해야 한다. 또한 초기 경화가 진행되는 수 시간 동안은 작품에 충격을 가하거나 위치를 이동시켜서는 안 된다.

타설된 캐스타블은 충분한 그린 강도를 확보할 때까지 습윤 상태를 유지하며 양생해야 한다. 일반적으로 상온 20-25℃에서 최소 24시간 동안 습윤 양생을 실시하는 것이 권장된다. 이 기간 동안 시멘트 결합재가 물과의 화학 반응을 통해 수화물 결정을 형성하면서 강도를 발현하게 된다.<sup>30</sup>

양생 중에는 수분 증발을 방지하기 위해 비닐시트나 젖은 거즈 천으로 표면을 덮어주어야 한다. 주변 온도가 5℃ 이하로 낮을 경우 경화 반응이 지연되므로 가열기 등을 이용한 보온 조치가 필요하다. 표면을 손으로 눌러도 자국이 남지 않을 정도로 경화가 진행되면 탈형을 진행할 수 있다. 일반적으로 소형 작품은 24시간 후, 대형이나 두꺼운 작품은 2-3일 후 탈형이 가능하다. 탈형 후 즉시 소성하기보다는 1-2일간 추가 습윤 양생을 실시하면 초기 강도가 더욱 향상되어 후속 공정에서의 안정성을 높일 수 있다.

#### 5) 건조

충분한 양생이 완료된 후에는 본소성에 앞서 작품을 완전히 건조시켜 잔류 수분을 제거해야 한다. 캐스타블 내부에 수분이 남아있는 상태에서 급격히 가열하면 물이 수증기로 변하면서 내부 압력이 상승하여 증기 폭발이 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위해서는 소성 전 실온에서 충분히 건조시키거나 50-60℃의 낮은 온도에서 장시간 예열하여 수분을 완전히 제거해야 한다.

<sup>30</sup> Marion Schnabel et al., "The Influence of Curing Conditions on Cement Hydration and Strength", *57th International Colloquium on Refractories*, EUROGRESS Aachen (2014), p.19.

## 6) 소성

충분한 건조가 완료된 후 소성 단계에서는 200-600℃ 구간의 초기 가열 과정을 특히 신중하게 진행해야 한다. 100-110℃에서 수 시간 이상 유지하며 자유수를 완전히 증발시키고 250℃와 550℃ 부근에서 각각 수 시간씩 유지하여 화학 결합수를 단계적으로 제거한다. 이러한 저온 탈수 과정을 통해 내부 수분을 완전히 제거한 후에야 600℃ 이상으로의 승온이 안전하다. 최종 소성 온도는 사용된 캐스타블 제품의 내화도에 따라 약 1300℃ 내외로 설정하여 소결을 완성한다.

내화 캐스타블의 소성 과정은 재료의 두께와 투수성에 의해 좌우된다. Brimstone STS 연구는 핫페이스 벽돌 9인치, 치밀 캐스타블 3인치, 단열 캐스타블 3인치로 구성된 총 15인치(약 381mm) 두께의 다층 라이닝 시스템을 분석하였다.<sup>31</sup> 연구 결과 두께와 재료 조합이 증기 배출을 제한할수록 더 느린 승온 속도와 더 긴 유지 시간이 필요함을 확인하였다.

캐스타블 소성에 있어 보편적으로 적용 가능한 표준 스케줄은 존재하지 않는다. 일반적으로 램프-홀드 방식이 권장되며, 14-42℃/h의 승온률과 함께 화학결합수가 집중적으로 방출되는 204-316℃ 구간에서의 충분한 유지 시간 확보가 필수적이다.<sup>32</sup>

Brimstone STS 연구에서는 설비 제약이 있는 현장을 위한 스케줄로 260℃ 12시간, 371℃ 12시간, 760℃ 24시간 유지 방식을 제시하고 있다.<sup>33</sup> 하지만 Brimstone STS가 제시한 승온 스케줄은 절대적인 것이 아니다. 따라서 작가는 자신의 작업 스타일과 스튜디오 환경에 적합한 최적의 소성 스케줄을 체계적인 실험을 통해 찾아 적용하는 과정이 필수적이다. 표 4는 10cm 두께의 작품을 제작할 시 본 연구자가 사용하는 소성 스케줄이다.

표 4 내화 캐스타블 소성 스케줄 (두께 10cm 내외, 자체 제작 캐스타블)

단계	온도 구간(℃)	승온률(℃/h)	유지 시간(h)	주요 목적
1	상온 → 110	25-40	12-24	자유수 완전 제거
2	110 → 250	25-40	4-8	1차 수화물 분해
3	250 → 550	25-40	4-8	2차 수화물 분해
4	550 → 800	50-75	2-4	구조 안정화
5	800 → 1000	75-100	1-2	고온 결합 형성
6	1000 → 1300	75-100	1	최종 소결

31 J. Jenkins, "Important Considerations for Refractory Dryouts, Startups & Shutdowns", *Sulfur Recovery Symposium* (2011), pp. 4-6.

32 J. Jenkins, 앞의 논문 p. 5-6, p. 15.

33 J. Jenkins, 앞의 논문 p. 8.

## 7) 유약

브렘너의 연구에 따르면 소지와 유약 간의 화학적 상호작용이 제한적인 저화도 유약 (earthenware glaze, 1060-1160°C)이 안정적인 결과를 보인다고 보고되었다.<sup>34</sup> 캐스타블 소지의 높은 알루미늄 및 칼슘 함량은 유약의 용융 거동과 색상 발현에 예상치 못한 영향을 미칠 수 있으므로, 초벌 소성(화학 결합수가 제거된 상태) 후 소규모 시험편을 통한 유약 적합성 검증이 선행되어야 한다.

이상의 기본 공정을 통해 내화 캐스타블 작품을 성공적으로 완성할 수 있다. 핵심 요소는 적절한 배합과 혼수량 조절, 충분한 습윤 양생, 그리고 단계별로 진행되는 점진적 건조 및 소성 과정이다. 이러한 원칙들을 준수하면 캐스타블을 비교적 안정적으로 다룰 수 있으며, 기존 도자 재료로는 구현하기 어려운 대형 작품이나 복합 구조물 제작이 가능하다. 다음 절에서는 이러한 기본 방법론을 바탕으로 내화 캐스타블의 조형적 가능성을 확장하는 다양한 성형 기법들을 살펴보고자 한다.

## 2. 성형 기법

앞서 살펴본 바와 같이 내화 캐스타블의 독특한 물리적 성질은 기존 점토 재료로는 시도하기 어려웠던 다양한 성형 기법을 가능하게 한다. 본 절에서는 캐스타블의 유동성, 조기강도, 미세 수축률, 내열 특성 및 화학적 안정성 등을 활용한 구체적인 성형 방법들을 학술적으로 정리하고자 한다.

내화 캐스타블의 공예적 활용을 위한 성형 기법은 재료의 고유한 특성을 바탕으로 정리할 수 있다. 기본적으로는 몰드를 활용한 전통적 주조 방식과 증점제를 첨가하여 가소성을 높인 플라스틱 캐스타블의 핸드빌딩 기법이 있다. 본 연구에서는 두 가지 방법을 발전시켜 세 가지의 창작 방법을 새롭게 개발하였다. 소각 가능한 틀을 이용한 복합 구조 제작, 내화 접착제를 활용한 모듈식 접합 제작, 소성 안정성을 기반으로 한 반복 소성 및 재료 혼용 조형 방법 등이다. 이와 같은 성형 기법을 몰드 주조, 핸드빌딩, 이형 몰드, 내화접착제, 소성 안정성 다섯 가지로 분류하여 정리하였다.

<sup>34</sup> Alasdair Bremner, "An Investigation into the Potential Creative Applications of Refractory Concrete", The University of Central Lancashire Ph.D thesis (2008), pp. 190-191.

표 5 5가지 성형 기법의 특징과 활용

성형 기법	원리	주요 장점	적용 유형	고려 사항
몰드 구조	유동성, 자체 경화	복잡한 형태 제작 가능, 언더컷 극복, 정밀한 복제	대형 타일, 복잡한 조형	이형제 필수, 진동 탈포
핸드빌딩	증점제, 가소성	직접 조형, 필요에 따른 조형 가능	표면 장식, 가압 성형	경화에 따른 작업 계획 필요
이형 몰드	소각, 변형 가능 재료	언더컷 제한 없음, 내부 공간 형성과 우연적 효과	복합 구조물, 실험적 조형	환기 필수, 열충격 주의
내화 접착제	접착제	대형화 가능, 수리 가능	대형 구조, 모듈, 복원 작품	접합면 키, 하중 고려, 건조 관리
소성 안정성	반복 소성	반복 작업, 재료 혼용, 시간적 변화 추적 가능	적층 구조, 혼합재료	소성 그래프, 재료 호환성

### 1) 몰드 구조

몰드 구조는 실리콘, 플라스틱, 목재 등 다양한 재료의 거푸집에 캐스타블을 주조하여 형태를 얻는 기법이다. 이 기법은 캐스타블의 고유한 경화 특성과 물리적 성질을 활용하여 전통적인 도자기 제작 방식을 뛰어넘는 조형 가능성을 제공한다.

이러한 특성을 통해 기존 점토 슬립 주입으로는 제작이 어려웠던 두껍고 복잡한 일체형 구조를 한 번의 주조로 완성할 수 있다. <surface>의 지름 55cm 대형 벽 작품은 이를 잘 보여주는 사례다. <surface>는 발포 폴리스티렌에 열선 커터로 음각 패턴을 조각한 후 캐스타블을 주조하여 제작하였다. 몰드와 가마의 크기에 따라 작품 규모를 자유롭게 확장할 수 있으며, 도자기와 달리 건조 및 소성 시 갈라짐이나 휨 현상을 걱정할 필요가 없다(도 5). 또한 <Hera>의



도 5 황세훈, <surface>, 2024, castable, gloop glaze, 55Ø×5H(cm)      도 6 황세훈, <Hera>, 2024, Castable, glaze, 13×13×20H

홍상처럼 석고 몰드에서는 언더컷으로 인해 제작이 불가능한 복잡한 형태나 정밀 공예품 제작에 높은 활용도를 보인다(도 6).

주조 작업 시에는 몇 가지 중요한 주의사항이 있다. 먼저 이형제 도포가 필수적이며, 특히 목재나 석고 등 수분을 흡수할 수 있는 재질의 몰드에서는 더욱 중요하다. 복잡한 형태일수록 진동을 통한 기포 제거와 완벽한 주조가 이루어져야 한다. 대규모 작업의 경우 필요한 캐스타블 양이 증가하므로 훈련과 주조에 대한 체계적인 계획이 필요하다.

## 2) 핸드빌딩

핸드빌딩은 증점제를 첨가하여 캐스타블에 가소성을 부여하는 기법이다. 볼 클레이, 벤토나이트와 같은 가소성 점토나 CMC와 같은 셀룰로스계 증점제를 첨가하면 반죽의 점성과 응집력이 크게 향상되어 흘러내리지 않는 점토상의 질감을 얻을 수 있다. 점토계는 5% 내외, 유기 증점제는 2% 내외를 첨가하면 적절한 가소성을 확보할 수 있다.

표 6 플라스틱 캐스타블 제조시 첨가제별 특성

첨가제	첨가량(wt%)	장점	단점
볼 클레이	5-10%	우수한 가소성, 높은 점토 비율	수축률 증가, 내화도 저하
벤토나이트	2-5%	소량으로 높은 가소성	과량 시 균열 발생 위험
CMC	0.5-2%	균일한 점도	초기 강도 약화 가능성
PVA	1-3%	강한 접착력	건조 속도 느림, 습도에 민감

충분한 점성을 가진 캐스타블은 몰드에 압력을 가해 성형하는 가압 성형도 가능하다. <overflow-pot>은 HACT-160에 청자토 분말을 섞어 플라스틱 캐스타블을 제작하여 석고 몰드에 가압 성형한 화분이다. 돌 질감에 적합한 표현을 위해 가소성을 높여 작업하였고, 이로 인해 러프한 표면 텍스처가 돋보이게 되었다(도 7).

주의사항으로는 점토처럼 매우 고운 상태의 반죽이 아니기 때문에 숙련도가 부족하면 기포나 빈틈이 발생하기 쉽다는 점이다. 가압 성형 시에도 주조와 마찬가지로 수분을 흡수하는 재질에는 이형제를 반드시 도포하여 비흡수성 몰드 상태에서 작업해야 한다.



도 7 황세훈, <overflow-pot>, 2024, castable, 25×23×27H

플라스틱 캐스타블의 반죽 역시 혼합 후 30분부터 경화가 시작되므로 제작 계획을 철저히 수립한 후 작업에 착수해야 한다. 그렇지 않으면 경화 과정에서 그린 강도를 얻기 전에 충격이 가해져 최종 결과물의 내구성 저하로 이어진다. 콘크리트 지연제를 사용하여 경화를 지연시키는 경우에는 반드시 철저한 사전 테스트를 거친 후 사용할 것을 권장한다.

### 3) 이형 몰드(異型mold)

이형 몰드는 자유로운 형상 구현이나 작품 형태의 변형이 가능한 비정형적 몰드를 의미한다.<sup>35</sup> 이형 몰드는 소각 및 파괴를 통해 제거되는 일회성 몰드와 형태가 변형되는 가변형 몰드로 분류한다.

#### (1) 일회성 몰드

일회성 몰드 중 소각 가능한 몰드는 발포 폴리스티렌, 왁스, 커피가루뿐만 아니라 종이, 골판지, 목재 등의 재료로 제작된 몰드를 포함한다. 해당 재료로 틀을 제작한 후 캐스타블을 주조하여 작품을 완성한다. 경화 완료 후 가열 과정을 통해 내부의 몰드 재료를 연소시켜 제거하면, 몰드가 완전히 소실되면서 캐스타블 내부에 그 형상이 빈 공간으로 남게 된다.



도 8 캐스타블 슬러리에 발포 폴리스티렌 볼을 넣어 양생 후 소성한 샘플

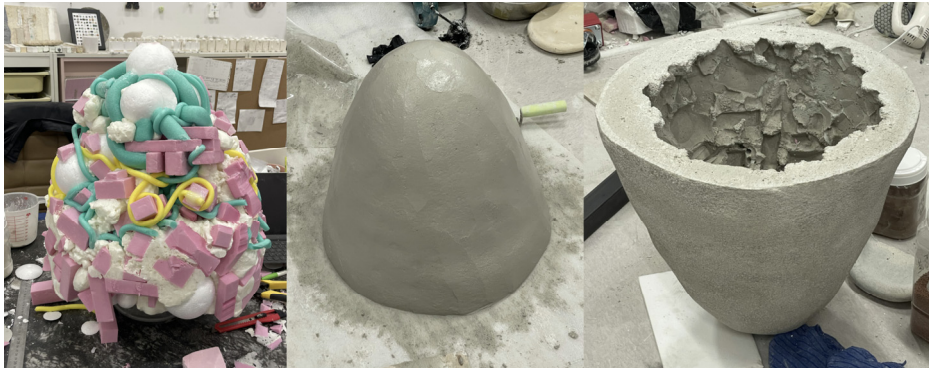
이러한 소각 기법은 전통적인 석고 몰드와 달리 몰드를 분리하여 제거할 필요가 없어 언더컷이나 복잡한 내외부 구조를 지닌 형태도 구현할 수 있다. 도 8은 작은 발포 폴리스티렌 볼을 내부에 삽입하여 소성한 후 소각으로 발생한 공간에 글루프 유약을 넣어 유약 샘플을 테스트하는 용도로 활용한 사례이다. 이 샘플을 통해 외부와 연결되지 않은 내부의 발포폴리스티렌도 폭발을 일으키지 않고 완전히 소각됨을 확인하였다(도 8).

〈내재內在〉는 이형 몰드 기법과 내화 접착제 기법을 순차적으로 활용하여 복합적 내부 구조를 구현한 작품이다. 발포폴리스티렌을 적층·교

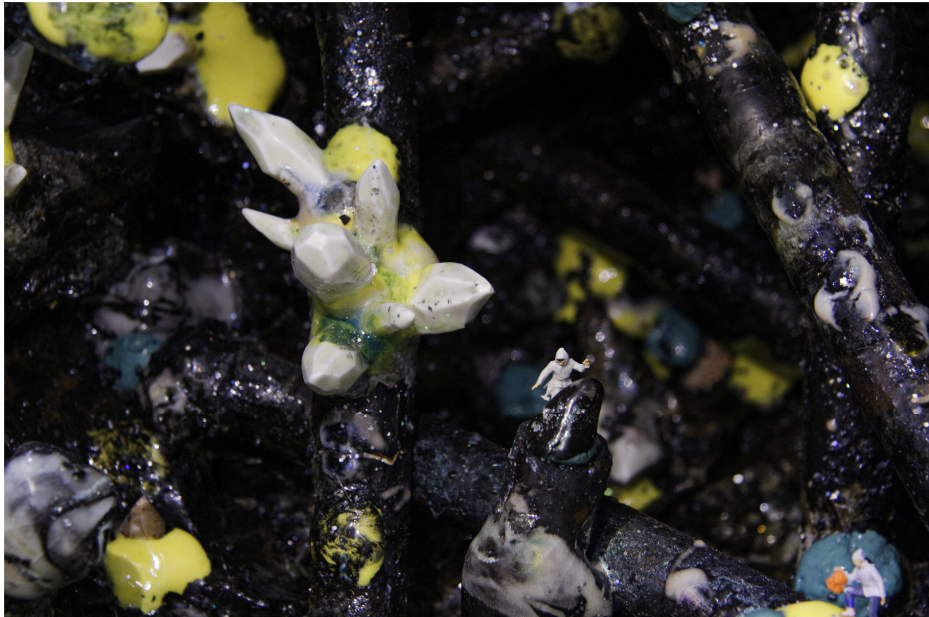
35 본 연구에서는 전통적인 석고 몰드와 상이한 재료적 특성 및 기능적 메커니즘을 갖는 몰드를 이형 몰드(異型mold)로 정의한다.

차 배열하여 3차원 골격을 구축한 후, 흙손 시공으로 외부 형태를 조형하고 경화시켰다(도 9).

경화 완료 후 접근 가능한 부분은 물리적 분해로, 접근이 제한된 영역은 제어된 열처리로 발포폴리스티렌을 제거하였다. 이론적으로는 전면 소각이 효율적이거나 유해 가스 발생을 고려하여 물리적 제거를 우선하였다. 발포폴리스티렌 제거로 형성된 내부 공간에 내화 접착제를 활용하여 추가적인 구조 요소를 단계적으로 접합하였다. 이는 내화 접착제의 우수한 접착력과 고온 안정성을 활용하여 경화된 캐스타블 표면에 새로운 형태를 덧붙일 수 있음을 보여주는 사례다(도 10).



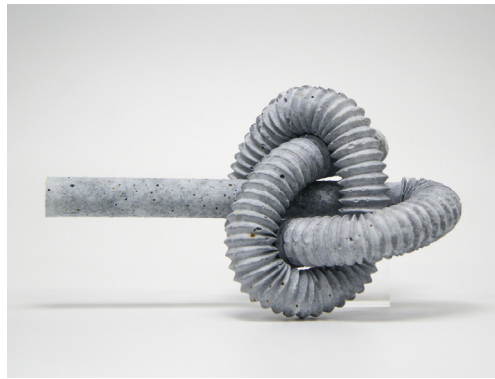
도 9 발포 폴리스티렌을 활용한 달거 및 소각 기법의 제작 과정



도 10 황세훈, <내재內在>, 2025, castable, gloop glaze, ceramic, glass, 55×53×53H(cm) 내부 디테일 샷

## (2) 가변형 몰드

가변형 몰드는 PVC 시트, 비닐, 패브릭, 고무, 섬유 등 신축성이나 변형성을 가진 재료로 제작된 거푸집을 의미한다. 재료의 흐름에 몰드가 대응하여 형태를 형성한다는 점에서 독특한 조형 원리를 보여준다. 이러한 원리를 확장하여 PVC 파이프를 활용한 작업도 가능하다. <knot 1>과 <knot 2>는 PVC 파이프에 내화 캐스타블을 압입하여 제작한 작품으로, 초기 경화가 일어나기 전에 파이프를 다양한 형태로 조절할 수 있다는 점을 활용하였다. <knot 1>은 중력과 재료의 흐름에 따른 자연스러운 곡선을 구현했으며, <knot 2>은 의도적인 조작을 통해 파이프의 유연함을 시각적으로 강조한 결과이다.(도 11,12).



도 11 황세훈, <knot 1>, 2025, SiC castable, 45×20×30H    도 12 황세훈, <knot 2>, 2025, SiC castable, 30×15×15H



도 13 황세훈, <transform>, 2025, castable, gloop glaze, 37×38×16H

<transform>의 경우 잔의 단면 형상으로 PVC 시트를 재단하고 이를 봉합하여 제작하였다. 이렇게 만들어진 PVC 시트 틀에 캐스타블을 주입하여 확장된 잔 형태의 작품을 완성하였다. 이 작품은 캐스타블의 무게로 PVC 틀이 신장되고 전개되며 자연스러운 확장과 접합부의 주름을 형성한다. 몰드의 유연성으로 인해 형태는 완전히 예측되기보다는 약간의 우연적 변형을 수반하며, 이러한 불확정성이 오히려 새로운 조형미를 부여한다(도 13).

<torus>에서는 중력으로 인한 예상치 못한 굴곡 및 표면 효과가 더욱 명확히 드러난다. 주병

의 단면 형상으로 재단한 PVC 시트 8개를 접합하여 틀을 제작하고, 폐도자기를 골재로 활용한 캐스타블을 주입하여 순환의 의미를 강조한 토러스 구조물을 완성하였다. 재료의 움직임을 부분적으로 허용함으로써 통제된 우연과 같은 효과를 창출하며, PVC 자체의 매끄러운 질감과 주름이 캐스타블 표면에 그대로 전사되어 독특한 표현 효과를 생성하였다(도 14).



도 14 <torus> 제작 과정: 가변형 몰드(PVC 비닐)에 주조

#### 4) 내화 접착제

내화 접착제는 내화 캐스타블과 마찬가지로 골재, 가소제, 그리고 결합제의 조합으로 구성되는 부정형 내화물이다. 다른점은 골재의 크기이다.  $75\mu\text{m}$  이하 미세분을 60-80%의 비중으로 맞추고 최대 입경을 0.3-0.5mm로 제한하여 제작된다. 결합제는 크게 유기계와 무기계로 구분되는데, 유기 결합제는 주로 건조 후 점착성과 접착 시간 조절, 그리고 초기 취급강도 확보에 활용되며, 무기 결합제는 고온 강도와 장기 내구성을 담당한다.<sup>36</sup>

내화 접착제는 독립적인 조형 재료로서의 가능성을 보여준다. 고온 상태의 부정형 내화물로 구성된 접착제는 그 자체로 수축이 작고 다양한 표면 텍스처 표현이 가능하다. 소성된 접토체 위에 화장토처럼 얇게 도포해 석질이나 콘크리트 질감을 부여하거나, 캐스타블 조형의 이음부를 의도적으로 드러내 구조적 서사를 표면에 기록할 수 있다.

<내재内在>는 내화 접착제의 활용 가능성을 보여주는 사례로 10회에 가까운 고온 소성을 거친 작품이다. 내화 접착제를 이용해서 도자 파편을 붙이고, 그 위에 글루프 유약을 올려서 소성시켜 접합부를 시각화하는 독특한 효과를 창출하였다(도 15).

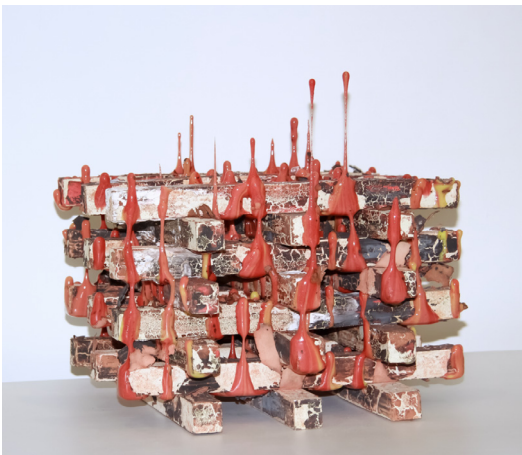
<sup>36</sup> 박홍채 『내화물공학개론』(두양사, 2008), p. 154.



도 15 황세훈, 〈내재內在〉, 2025, castable, gloop glaze, ceramic, 33×33×35H(cm)

### 5) 소성 안정성

내화 캐스타블의 가장 핵심적인 특성은 고온에서의 열적 내구성과 화학적 안정성이다. 이러한 소성 안정성은 일반 도자기 재료로는 불가능한 새로운 조형 가능성을 열어준다. 특히 작품을 적층하여 소성하거나 이질적인 재료와 혼합하여 소성해도 캐스타블 자체는 형태적 변화를 거의 일으키지 않는다는 점이 중요하다.



도 16 황세훈, 〈잔향殘香〉, 2024, castable, gloop glaze, guaiac wood oil, 40×40×45H(cm)

〈잔향殘香〉 시리즈는 이러한 소성 안정성을 활용한 대표적 사례로, 내화 콘크리트 막대를 개별적으로 제작하고 소성한 후 이를 적층하여 복합 구조물을 완성한 작품이다. 내화 캐스타블은 소성 중 변형이 거의 없어 기존 도자기로는 시도하기 어려운 위험한 형태의 소성도 안전하게 수행할 수 있다(도 16).

소성 안정성은 도자기와 캐스타블의

혼합 조형에서도 독특한 가능성을 제시한다. 도 17은 얇게 성형한 도자 파편을 캐스타블에 규칙적으로 삽입하여 성형한 뒤 소성한 작품이다(도 17). 도 18은 내화 콘크리트, 도자기, 글루프 유약 세 가지 재료를 동시에 활용한 복합 샘플로 캐스타블의 미세한 수축률을 명확히 보여준다. 소성 과정에서 캐스타블이 거의 수축하지 않았기 때문에 삽입된 도자기에는 변형이나 균열이 발생하지 않았으며, 글루프 유약만이 열에 의해 용융되어 흘러내린 모습을 확인할 수 있다. 이러한 방식을 통해 도자기와 내화 캐스타블의 물성 차이를 조형적 요소로 활용하는 다양한 기법을 개발할 수 있다(도 18).

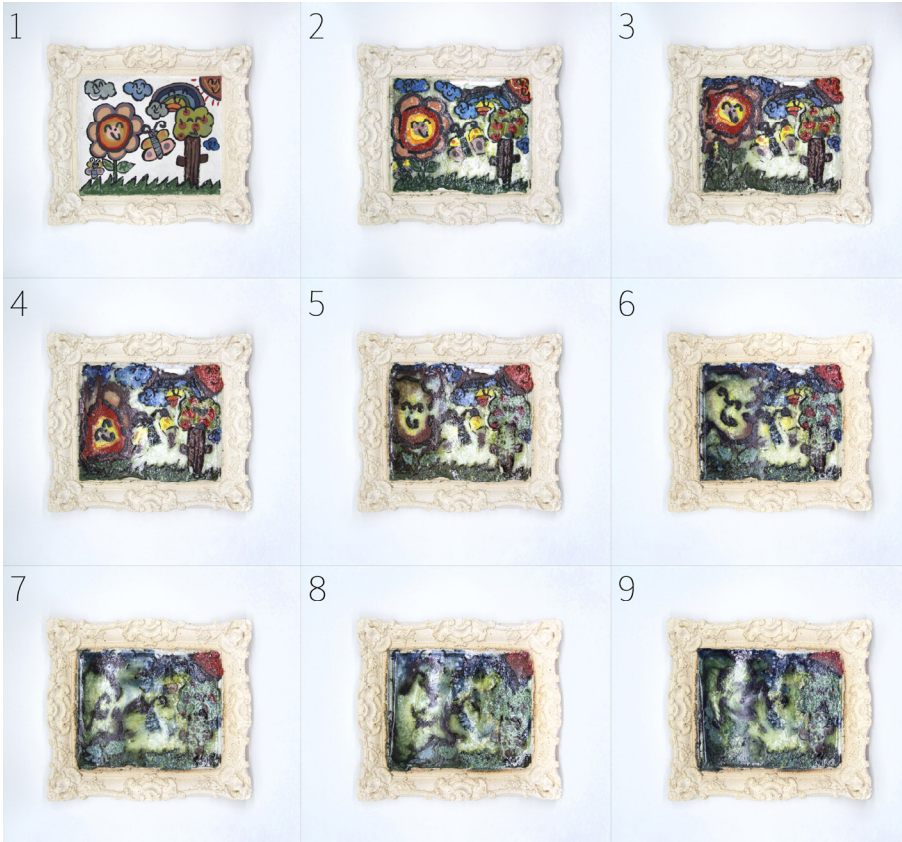


도 17 내화 캐스타블에 도자 편 삽입 후 소성한 실험 샘플



도 18 미비한 수축율을 활용한 혼합 샘플  
(내화 캐스타블, 도자기, 유약)

〈동화童話/動畫/同化〉 9회의 반복 소성 과정을 거친 작품이다. 이 작품은 ‘동화(童話)’를 모티프로 서사적 이미지를 구현하였다. 반복되는 소성 과정을 통해 작품은 점진적으로 변화하며 움직이는 그림인 ‘동화(動畫)’가 된다. 소성이 거듭될수록 유약이 서로 어우러지면서 서로 ‘동화(同化)’ 된다(도 19). 이렇게 하나의 작품 제목에 세 가지 층위의 의미를 담아내는 개념적 깊이는 내화 캐스타블의 열적 안정성과 화학적 내구성이 있어야만 가능한 것이다. 만약 내화 특성이 부족하다면 다회 소성 자체가 불가능할 것이고, 화학적 내구성이 결여된다면 유약과의 상호작용으로 인해 예측 불가능한 변화가 발생할 수 있기 때문이다. 이러한 고유한 특성들을 바탕으로 앞으로도 무궁무진한 창작 기법이 개발될 수 있을 것으로 기대된다(도 20).



도 19 <동화 童話/動畫/同化>의 소성 변화 과정 기록



도 20 황세훈, <동화 童話/動畫/同化>, 2025, castable, gloop glaze, 9 multiple firings, 37.5×42.5×5H(cm)

## V. 맺음말

본 연구는 산업용 소재인 내화 캐스타블을 도예 분야에 도입함으로써 전통 도자 재료의 한계를 극복하고 현대 도예의 표현 영역을 확장하는 새로운 가능성을 체계적으로 탐구하였다. 연구 결과를 통해 내화 캐스타블이 단순한 산업 소재를 넘어서 독창적인 조형 언어를 창출할 수 있는 예술적 매체로서의 잠재력을 확인할 수 있었다.

내화 캐스타블의 기본적 특성 분석을 통해 전통 도자 재료와의 근본적 차이점을 명확히 규명했다. 특히 1400-1800°C의 극고온 내열성, 0.1-0.5%의 미세한 수축률, 그리고 수정성 알루미늄 시멘트를 통한 이중 결합 메커니즘은 기존 점토 기반 소지와 완전히 차별화되는 독특한 물성을 제공한다. 이러한 특성은 대형 작품의 제작에서부터 기능성 생활 도자기에 이르기까지 다양한 응용 영역에서 가능성을 제시하였다.

재료의 구성과 특성 연구에서는 내화 골재, 내화 미분, 결합재, 첨가제로 구성된 복합재료 시스템의 각 성분별 역할을 체계적으로 분석하였다. 특히 골재 입도 분포의 최적화를 통한 표면 질감 제어, 혼화재 선택을 통한 작업성 개선, 그리고 알루미늄 시멘트 함량 조절을 통한 강도 특성 변화 등은 작가의 의도에 따라 재료를 미세 조정할 수 있는 구체적 방법론을 제공하였다. 이는 브렘너의 선행 연구가 기성 제품에 의존했던 한계를 극복하고, 작가 개별 맞춤형 조성을 가능하게 하는 중요한 진전이라 할 수 있다.

제조 공정과 작업 방법 연구를 통해서 도예 스튜디오 환경에 적합한 단계별 제작 프로세스를 확립하였다. 또한 몰드 주조, 핸드빌딩, 이형 몰드, 내화 접착제, 소성 안정성의 다섯 가지 성형 기법을 통해 캐스타블 고유의 특성을 최대한 활용한 새로운 조형 방법론을 제시하였다.

본 연구의 가장 중요한 학술적 기여는 산업용 내화재료를 공예적 매체로 전환하는 방법론을 제시한 것이다. 브렘너의 개척적 연구 이후 10여 년간 공백으로 남아있던 이 분야에서, 재료 과학적 접근을 바탕으로 한 심층적 분석과 실용적 응용 방안을 동시에 제공함으로써 후속 연구의 토대를 마련하였다.

내화 캐스타블은 전통 도자 재료와 현대적 기술의 만남을 통해 도예 분야에 새로운 패러다임을 제시할 수 있는 매체이다. 본 연구를 통해 확인된 바와 같이, 캐스타블은 단순한 재료 대체를 넘어서 독창적인 조형 언어와 새로운 표현 가능성을 창출하는 예술적 도구로서의 가치를 지니고 있다. 산업용 소재의 공예적 전용이라는 관점에서 본 연구는 현대 공예가 직면한 재료적 한계 극복과 표현 영역 확장이라는 시대적 과제에 대한 하나의 답을 제시한다.

앞으로 내화 캐스타블을 활용한 도예 작품들이 미술관과 갤러리를 넘어서 공공공간과 일

상생활 속으로 확산되고, 이를 통해 현대 도예의 사회적 역할과 의미가 새롭게 정립되기를 기대한다. 동시에 본 연구에서 제시한 방법론들이 후속 연구자들에 의해 더욱 발전되고 세분화되어, 내화 캐스타블이 현대 도예의 주요한 한 축을 담당하는 성숙한 분야로 자리 잡기를 희망한다. 결국 내화 캐스타블의 도예적 활용은 전통과 현대, 기술과 예술, 기능성과 심미성 사이의 경계를 허무는 융합적 사고의 산물일 것이다. 이러한 통섭적 접근이야말로 21세기 공예가 나아가야 할 방향을 제시하는 중요한 이정표라 할 수 있으며, 본 연구가 그 출발점으로서의 역할을 다할 수 있기를 바란다.

주제어(key words):

내화 캐스타블(Refractory Castables), 캐스타블(Castables), 부정형 내화물(Monolithic Refractories), 세라믹스(Ceramics), 현대 도예(Contemporary Ceramics), 조형 매체(Sculpture Medium), 공예(Craft)

## 참고문헌

---

### 한국어 문헌

- 박홍채, 『내화물공학개론』, 서울:두양사, 2008.
- 이상암, 홍윤철, 「치밀질 캐스타블의 사용조건과 특성 이해」, 『시멘트 심포지엄』 37, 한국시멘트협회, 2010.
- 최상훈, 「알루미나 시멘트」, 『시멘트 심포지엄』 131, 한국시멘트협회, 1993.
- 한국콘크리트학회, 『최신콘크리트공학』, 서울:기문당, 2024.

### 서양어 문헌

- Bayoumi. Ibrahim M.I. et al., “Rheology of refractory concrete: An article review” *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 61, 2022.
- Bremner. Alasdair, “An Investigation into the Potential Creative Applications of Refractory Concrete”, The University of Central Lancashire Ph.D thesis, 2008.
- \_\_\_\_\_, “New Possibilities for Refractory Castable”, *Atoms to Art Conference*, University of Central Lancashire, 2005.
- Bremner. Alasdair, Alkandari. Fahad, “Refractory Concrete: A Material that Offers New Ceramic Opportunities”, *ICS 2011 Conference Proceedings*, 2011.
- Castro. J. Ramon et al., “Innovative refractory concrete for high temperature thermal energy storage”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 285, 2025.
- Davis. Robert Bruce, “Design and Development of Advanced Castable Refractory Materials”, Oregon Health & Science University Ph.D thesis, 2015.
- Jenkins. J., “Important Considerations for Refractory Dryouts, Startups & Shutdowns”, *Sulfur Recovery Symposium*, 2011.
- Kaneko. Jun, *Special Project Catalogue*, Ree & Jun Kaneko Foundation, 2008.
- Kasper. J. et al., “Influence of the type of phosphate additive and its concentration on the setting kinetics of CA cement bonded refractory castables with special regard to the resulting pH value”, *Open Ceramics*, 15, 2023.
- Rimoldi. M. et al., “Refractory castables for civil use: main properties depending on its application”, *Procedia Materials Science*, 1, 2012.
- Sato. Mitsuo, Ishikawa. Akira, “Construction Technology of Monolithic Refractories”, *Nippon Steel Technical Report*, 125, 2020.
- Schnabel. Marion et al., “The Influence of Curing Conditions on Cement Hydration and Strength”, *57th International Colloquium on Refractories*, 2014.

### 웹사이트

- <https://www.kicet.re.kr/00016/00045.web>
- <https://krref.com/ko/refractory-castable/#:-:text=%2A%206>

## 국문초록

본 연구는 산업용 내화재료인 내화 캐스타블(refractory castable)을 현대 도예의 새로운 조형 매체로 전환하여 전통 도자 재료의 한계를 극복하고 표현 영역을 확장하는 가능성을 체계적으로 탐구하였다. 내화 캐스타블은 1400-1800℃의 극고온 내열성, 0.1-0.5%의 미세한 수축률, 알루미나 시멘트를 통한 이중 결합 메커니즘 등 전통 점토 기반의 소자와는 근본적으로 차별되는 독특한 물성을 지니고 있다.

연구 방법으로는 내화 골재, 내화 미분, 결합재, 첨가제로 구성된 복합재료 시스템의 각 성분별 역할을 분석하고, 골재 입도 분포 최적화, 혼화재 선택, 알루미나 시멘트 함량 조절 등을 통해서 작가의 의도에 따른 조성을 가능하게 하는 방법론을 구체적으로 제시했다. 이는 앨리스테어 브렘너(Alasdair Bremner)의 선행 연구가 기성 제품에 의존했던 한계점을 넘어선 것이다. 제조 공정의 연구에서는 100℃, 250℃, 550℃의 온도 구간에서의 단계별 소성을 통해 증기 폭발을 방지하면서 충분한 강도를 발현시키는 도예 스튜디오 환경에 적합한 소성 스케줄을 확립하였다. 성형 기법으로는 몰드 주조, 핸드빌딩, 이형 몰드, 내화 접착제, 소성 안정성 활용 등 다섯 가지 새로운 방법론을 개발하여 캐스타블 고유 특성을 활용한 조형 가능성을 제시하였다. 특히 소각 가능한 몰드를 활용한 복잡한 구조물 제작, 내화 접착제를 활용한 모듈 조립, 반복 소성을 통한 시간적 서사 구현 등, 전통적인 도자 제작 방식과의 차별점을 확인하였다. 또한 캐스타블 흡수성을 역이용한 티 트레이, 디퓨저, 와인 쿨러, 화분 등의 기능성 제품 개발은 소재의 한계를 역이용하여 제품 개발에 응용하는 방향도 제시하였다.

연구 결과, 내화 캐스타블은 대형 설치 작품 제작, 건축 도자 분야로의 확장, 일상생활과 관련된 기능성 제품 개발 등 다양한 응용 가능성이 있다. 미미한 수축률과 높은 강도는 기존 도자기로는 불가능했던 규모와 복잡한 작품을 가능하게 하며, 열적 안정성은 반복 소성과 다층 구조 제작이라는 기법을 실현시켰다. 그러나 캐스타블의 다공성 구조로 인한 유약 접착성 문제와 B2B 시장 중심의 재료 유통으로 인한 접근성 제약은 여전히 해결해야 할 과제로 남아있다.

본 연구는 산업용 내화재료를 공예적 매체로 전환하는 방법론을 제시함으로써 전통과 현대, 기술과 예술 사이의 경계를 허무는 융합적 접근이자, 현대 도예의 발전 방향을 제시하는 기초 연구로서 의의를 갖는다.

Abstract

## **Refractory Castables for Ceramic Craft: An Exploratory Study of Material Potential**

**Hwang, Sehoon\***

This study explores the transformation of refractory castable, an industrial material, into a sculptural medium for contemporary ceramics to overcome traditional material limitations and expand artistic expression.

Refractory castable exhibits distinct properties from clay-based materials: extreme temperature resistance (1400-1800°C), minimal shrinkage (0.1-0.5%), and dual bonding mechanisms through alumina cement.

The methodology analyzed composite material components including refractory aggregates, fines, binders, and additives. Through optimization of particle distribution, admixture selection, and cement content adjustment, a compositional approach was developed that surpasses previous research limitations of using only pre-manufactured products.

A firing schedule suitable for studio environments was established using stepwise heating at 100°C, 250°C, and 550°C intervals to prevent steam spalling while achieving adequate strength. Five forming techniques were developed: mold casting, hand building, release molds, refractory adhesives, and firing stability utilization.

Key innovations include complex structures using combustible molds, modular assembly with refractory adhesives, and temporal narratives through repeated firing. Functional products such as tea trays, diffusers, and planters demonstrated active utilization of material porosity.

Results show diverse applications including large installations, architectural ceramics, and functional products. Minimal shrinkage and high strength enable unprecedented scale and complexity, while thermal stability allows repeated firing and multi-layered construction techniques.

This Study holds significance as foundational research that presents the developmental direction of contemporary ceramics through a convergent approach that breaks down the boundaries between tradition and modernity, technology and art, by proposing a methodology for transforming industrial refractory materials into artistic media.

---

\* Ph.D. Student, Department of Ceramic Art and Design, Seoul National University of Science and Technology