

무기바인더의 내수강도 발현에 미치는 식물성 왁스의 영향

배민아¹, 김경호¹, 이만식^{1,2}, 백재호^{1*}

¹한국생산기술연구원 울산본부, ²과학기술연합대학교 청정공정 및 시스템공학

Influence of vegetable wax on the moisture strength development of inorganic binder

Min A Bae¹, Kyeong Ho Kim¹, Man Sig Lee^{1,2}, Jae Ho Baek^{1*}

¹Korea Institute of Industrial Technology, Ulsan

²Green Process & System Engineering Department, University of Science & Technology

요약 무기바인더는 저온에서 경화가 가능하며, 유해가스를 배출하지 않는 친환경성과 중자 조형 시 성형된 제품의 결합이 작다는 장점으로 인해 주조 산업에 적용하고자 관련 연구가 급속도로 진행되고 있다. 그러나 실리케이트($\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$)를 주성분으로 하는 무기바인더는 실리케이트 특유의 흡습성으로 인해 공기 중 수분을 흡습하여 결합력이 약해져 주형의 강도가 급격히 감소하는 문제가 있다. 특히 주강 주조에 사용되는 사형 주형의 경우 알루미늄 주조보다 높은 주입 온도로 인해 고강도의 주물 특성을 요구한다. 이에 본 연구에서는 무기바인더의 강도와 흡습성을 개선하기 위해 에스테르기를 함유하는 왁스를 이용하여 이를 효율적으로 합성하는 방법을 연구하였다. 또한 합성된 무기바인더의 특성을 XRF와 TGA를 통해 확인하고, 일반강도와 내수강도 평가를 진행하여 주형의 강도 개선 여부를 확인하였다. 그 결과 에스테르기를 함유하는 왁스를 포함한 무기바인더의 경우 일반 강도가 증가하였으며, 특히 내수강도가 118 N/cm^2 에서 216 N/cm^2 까지 증가하여 약 55 %의 내수강도 개선 효과를 확인하였다. 또한 실제 주강 제품을 제작한 뒤 주조를 통해 우수한 주조 특성을 확인하였다.

Abstract An inorganic binder is eco-friendly because it can be cured at low temperatures and does not emit harmful gases. In addition, related research is progressing rapidly owing to the small defects in the core. On the other hand, inorganic binders based on silicates ($\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$) have unique absorbent properties. This results in the absorption of moisture from the air and the weakening of the bonding force. In particular, the castings used in cast steel require high-strength properties because of the higher temperatures than aluminum castings. In this study, waxes containing ester groups were selected to improve the absorption of moisture of inorganic binders. The inorganic binder was characterized by X-ray fluorescence and thermogravimetric analysis-differential thermal analysis. The inorganic binder core strength was then evaluated. In the case of an inorganic binder containing wax, the water resistance increased to 216 N/cm^2 , confirming the up to 55% improvement in strength. Excellent casting characteristics were confirmed through steel castings.

Keywords : Inorganic Binder, Wax, Steel Casting, Sand Core, Inorganic core

This work was supported by the Technology Innovation Program(20000126) and (10067386) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea) and the support of the Korea Institute of Industrial Technology as (KITECH EO200014).

*Corresponding Author : Jae Ho Baek(Korea Institute of Industrial Technology)

email: jhbaek@kitech.re.kr

Received July 27, 2020

Revised September 22, 2020

Accepted October 5, 2020

Published October 31, 2020

1. 서론

액체 상태의 재료를 형틀에 부은 후 굳혀서 모양을 만드는 방법인 주조는 뿌리 산업의 원천 기술로 조선, 자동차 부품, 산업기계 등 산업 전반에서 없어서는 안 될 중요한 기술이다. 증자와 주형을 조형 할 시 형틀은 대부분 모래를 사용하여 만들게 되는데, 이 모래를 결합시켜 형틀의 모양을 잡아주는 역할을 하는 것이 바로 바인더이다. 전통적으로 이러한 결합(바인딩) 과정에서 유기바인더를 사용해왔으나, 유기바인더는 증자 조형 시 유리페놀, 벤젠, 포름알데히드 등의 유해가스가 다량 발생하는 문제점이 있다. 특히 유기바인더에서 발생하는 VOCs (Volatile organic compounds)는 주조 산업의 최대 70%까지 차지하며 작업자의 건강에 악영향을 미친다 [1-3].

반면, 현재 개발 중인 무기바인더는 저온에서 경화가 가능하여 유기바인더에 비해 에너지 소모량이 적으며 유해가스를 배출하지 않기 때문에 친환경적이다. 또한 발생하는 가스량이 거의 없기에 주물의 결합이 적을 뿐만 아니라, 환경오염에 대한 부가 장치를 설치 할 필요가 없기에 경제적이다. 이러한 장점으로 인해 실리케이트 ($\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$), 인산, 붕산, 탄산나트륨, 알루미늄, 붕소, 벤토나이트, 클레이 등의 무기화합물을 이용한 무기바인더에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[4-5]. 이 중 실리케이트를 주성분으로 하는 무기바인더는 악취가 발생하지 않아 작업자의 건강과 작업환경을 보전할 수 있고 주조 후 모래를 재사용할 수 있는 이점이 있어 100년 이상 학술연구에서 연구된 것뿐만 아니라 대규모 산업 응용 분야에서도 사용되어 왔다[6]. 하지만 실리케이트 특유의 흡습성으로 인해 바인더 결합력이 약해져 대기 환경에 노출 될 시 강도가 급격히 감소하는 문제가 있다[7].

이에, 본 연구에선 실리케이트가 주성분인 무기바인더를 이용하여 무기 화합물 첨가제(Silicon water, Silica sol, Potassium silicate 등)와 에스테르기를 함유하는 식물성 왁스를 합성하여 기존 무기바인더가 가지는 강도와 내수강도를 개선하여 주조 산업에 적용하고자 하였다. 무엇보다 주강을 포함하는 철계 주조 시장 점유율은 알루미늄 주조 시장의 7배로 주강 주조에 사용 가능한 무기바인더가 개발 된다면 주조 시장의 친환경화에 미치는 파급력은 상당할 것으로 예측된다[8]. 주강은 알루미늄에 비해 높은 용융점을 가지기에 주강 주조 사용되는 주형은 고강도 특성을 가져야하므로 무기바인더의 강도 개선을 위해 식물의 잎이나 열매에서 추출된 식물성 천연 왁

스를 사용하였다. 식물성 왁스는 주로 지방족 에스테르, 4-Hydrocinnamic acid 및 지방 알코올 등을 포함하고 있어 다양한 광택제, 화장품 등에 사용되고 있기에 무기바인더가 경화 될 시 피막형성제로 작용하여 무기바인더의 수분 흡습을 저하시켜 강도를 개선시키는 역할을 할 것으로 기대하였다.

2. 실험 방법

2.1 바인더의 합성 및 특성평가

본 연구에서 식물성 왁스(AAKO.Co.Ltd.)는 분말상태로 사용하였으며, 그 특성은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Physical and chemical properties.

Physical state	Colour	Melting point[°C]	Boiling point[°C]	Density [kg/m ³]
Waxy solid	Colour less	64-90	No data available	982-1000

기존 무기바인더[9]에 식물성 왁스를 첨가하여 무기바인더를 합성하는 방법은 Fig. 1에 나타내었다. 또한 기존 무기바인더의 특성은 Table 3에 나타내었다. 왁스의 melting point를 고려하여 합성 초반에는 90 °C 이상의 온도에서 용해를 진행하였으며, 왁스가 완전히 용해된 후에는 그보다 낮은 60 °C의 온도에서 합성을 진행하였다. 무기바인더의 열적 거동, 수분함량 및 점도를 확인하기 위해 열중량분석(Thermogravimetric analysis, TGA/DSC 3+, METTER TOLEDO, Switzerland) 장치와 점도계(Viscometer, DV2T Viscometer, Brookfield, USA)를 사용하였다. 열중량 분석은 최대 1,000 °C 까지 결과를 나타내었다.

2.2 혼련사 및 주형의 특성평가

합성된 무기바인더는 AFS 55 베트남 사에 3 wt% 함량으로 혼련되어 혼련사의 유동성과 강도, 내수강도 평가에 사용되었다. 사용된 베트남 사의 산도는 pH 6.8이며 염분 함유량은 11 ppm, SiO_2 함량은 97.4 %이다. 베트남 사와 무기바인더를 주물사용 믹서기(YOUNGJIN MACHINERY CO., LTD)를 이용하여 300 rpm에서 150초 혼합하여 혼련사를 제조하였다.

혼련사의 유동성은 PFT(Powder flow test, Brookfield, USA)를 사용하여 분석하였다. PFT 분석은 일정한 힘으

로 분체를 압축해 입자간의 상호 응집력을 측정하고, 압축된 형태가 부서지는 지점을 통하여 분체의 흐름을 파악하여 수치로 나타내었다. 또한 혼련사의 바인더 결합 부분을 확인하기 위해 FE-SEM(HITACHI, Japan)을 사용하여 관찰하였다.

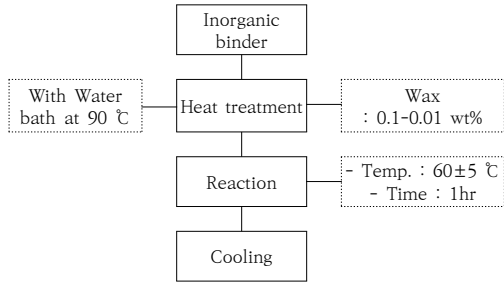


Fig. 1. Preparation procedure of inorganic binders with vegetable wax

강도 및 내수강도 측정을 위해 무기증자 제조 장치(YOUNGJIN MACHINERY CO., LTD)를 이용하여 샘플을 제작하였다. 샘플 크기는 175x22.4x22.4 mm(LxWxH) 직사각형이며, 150 °C 에서 70초로 경화하여 제조하였다. 강도 측정은 범용 시험기(HEUN.IN, Korea)를 사용하여 측정하였다. 일반적으로 주조 현장에서 가열된 증자를 바로 사용하지 않기 때문에 최소 60분의 냉각 시간을 확보한 후 최대 강도를 확인하였으며, 또한 절대 습도 29.9 g/cm³의 대기상태에서 1시간, 3시간 노출 시킨 후 변화되는 시험 증자의 내수강도를 확인하였다.

2.3 주조 특성평가

식물성 왁스를 포함하는 무기바인더로 제작된 시험 증자의 주조 특성을 확인하기 위해 일반 탄소강(ASTM A216 WCB)을 이용하여 주조 평가를 실시하였으며, Table 2에 탄소강의 구성성분을 나타내었다. 주조 평가를 위해 실제 사용 제품인 농기구 엔진커버를 축소하여 증자 및 주형을 제작하였으며, Fig. 2와 Fig. 3에 그 형상을 나타내었다. 완성된 주조품은 모래를 분리하는 탈사 공정을 거친 후 주조품 표면을 확인하였다.

Table 2. Chemical composition of ASTM A216 WCB (%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	V
Max 0.3	Max 0.6	Max 1.0	Max 0.04	Max 0.05	Max 0.5	Max 0.5	Max 0.2	Max 0.3	Max 0.03

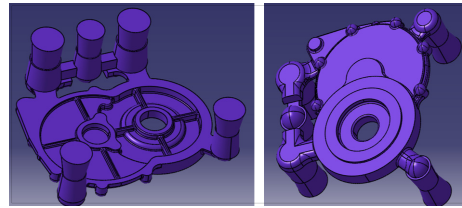


Fig. 2. Mold 3D design

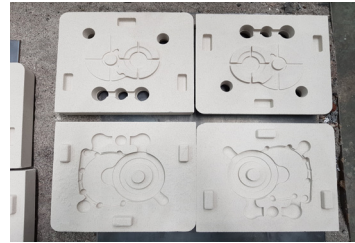


Fig. 3. Manufactured of sample mold

3. 결과 및 고찰

3.1 무기바인더 특성분석

본 연구에서 합성된 무기바인더의 물리화학적 특성을 Table 3에 나타내었다. Table 3에서 나타낸 것과 같이 기존 무기바인더의 SiO₂와 Na₂O 몰 비는 3.5로 나타났으나, 식물성 왁스를 첨가한 경우 4.7로 몰 비가 증가하였고, 이로 인해 바인더의 점도가 높아짐을 확인할 수 있었다. SiO₂와 Na₂O 몰 비가 3.4를 초과하는 경우에는 Na 이온이 작아져 초기 강도가 낮아지는 문제가 발생 [10]하나 본 연구에 사용된 무기바인더의 경우 K 이온이 Na 이온을 대체하여 초기강도를 보상 해 주는 것으로 판단된다.

Fig. 4는 무기바인더를 승온 온도 10 °C/min의 속도로 25~900 °C 범위에서 측정한 열분석 결과이다. 200 °C 이하에서 나타는 급격한 질량 감소는 무기바인더의 주원료인 실리케이트 내의 수분 증발에 의한 질량 감소로 판단되며, 200~400 °C 구간에서는 결정수 증발로 인한 완만한 질량 감소를 보인다. 400 °C 이상에서는 일반 무기바인더는 질량 변화를 확인 할 수 없으나, 식물성 왁스가 첨가된 무기바인더의 경우 350 °C 이상의 온도에서 왁스의 증발로 인한 완만한 질량 감소를 확인 할 수 있다 [11].

Table 3. Physical properties of prepared inorganic binders.

	XRF (%)				Specific gravity	Viscosity (cps)
	Si	Na	K	etc.		
Inorganic binder	65.7	19.4	13.3	1.6	1.34	31.4
Inorganic binder + Wax(1wt%)	66.4	14.0	14.7	4.9	1.35	38.1

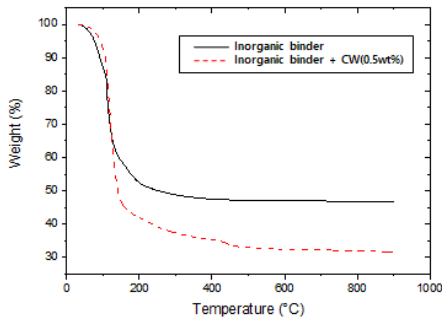


Fig. 4. TGA curves of inorganic binders prepared using vegetable wax

3.2 혼련사 및 주형의 특성분석

혼련사의 유동성은 증자와 주형을 생산하는데 있어 중요한 인자 중 하나이다. 유동성이 좋은 모래는 주형의 충전 밀도를 증가시켜 강도를 증가시키는 효과가 있으나, 유동성이 부족한 경우에는 미충진의 문제가 발생한다. 식물성 왁스의 첨가량 별 혼련사의 유동성 결과를 Table 4에 나타내었다. 여기서 나타낸 Flow index 값은 5 kPa의 압력으로 5번의 consolidation stresses와 3번의 shear stresses를 가하여 혼련사의 무너짐을 수치화한 값으로, 모래에 걸리는 응력에 대해 모래 입자가 무너지는 정도로 혼련사의 유동성을 나타내었다. 이 수치는 상대비교 값으로 결과치가 낮을수록 유동성이 우수하다 판단할 수 있다[12]. 주물사의 경우 flow index 값이 0.02로 낮게 나타나지만, 액체 상태인 무기바인더는 주물사와 혼련되는 동시에 혼련사의 flow index 값을 0.19로 증가시키는 것을 확인할 수 있다. 또한 왁스의 첨가량이 증가 할수록 혼련사의 flow index 값이 증가하는데, 왁스의 첨가가 1 wt%일 때 flow index 값은 0.27로 높게 나타났다. 이는 왁스의 첨가량이 혼련사의 유동성 저하에 영향을 미친다 할 수 있다.

Table 4. Flow Index results of mixed sand using inorganic binders

	Sand	Inorganic binder	Ib*+W** (1wt%)	Ib+W (0.5wt%)	Ib+W (0.1wt%)	Ib+W (0.05wt%)	Ib+W (0.01wt%)
Flow Index	0.02	0.19	0.27	0.23	0.24	0.23	0.2

*Ib : Inorganic binder
**W : Vegetable wax

Fig. 5와 Table 5는 무기바인더로 제작한 샘플 증자의 강도를 측정된 결과이다. 주형이 가지는 강도는 주조품을 생산하는 모든 과정에서 중요한 요소로 작용한다. 주형의 강도가 약하면 주형의 조립, 보관, 이송이 불가능하고 주조 중 용탕의 온도와 압력을 버티지 못해 조기붕괴를 일으켜 주물 결함을 발생시킨다. Fig. 5의 일반강도와 내수강도 결과를 보면 급형 탈형 직후라 할 수 있는 1분에서의 초기강도는 154-176 N/cm³으로 일반 무기바인더에서 왁스가 첨가될수록 소폭 증가하였다. 시험 증자는 성형 후 60분의 방치 시 최대 강도를 발현하게 되는데, 이때 나타난 최대 강도는 일반 무기바인더에 비해 왁스를 첨가한 바인더가 271 N/cm³에서 332 N/cm³로 약 23 % 증가하였다. 왁스의 첨가량이 증가할수록 최대 강도는 유사하나 왁스의 첨가량이 1 wt% 일 소폭 감소함을 확인하였다. 무기바인더의 경우 대기 중 주형을 방치할 시 그 강도는 시간이 지남에 따라 점차 감소하는데 이는 주원료인 물유리(xSiO₂-yNa₂O) 특유의 흡습성으로 인해 대기 중의 수분을 흡수하여 결합력을 저하시키기 때문으로 알려져 있다[12]. 왁스의 첨가량이 0.01 wt% 이상만 되어도 일단 강도와 내수강도가 크게 증가됨을 확인할 수 있었는데, 무엇보다 왁스가 0.05 wt% 첨가될 시 내수 3시간 후 강도가 216 N/cm³으로 일반 무기바인더 118 N/cm³과 비교하여 약 55 % 개선됨을 확인하였다. 그러나 왁스가 1 wt% 이상으로 포함된 경우 내수 3시간 후 강도는 약 86 N/cm³으로 탈형 후 초기 강도보다 낮아지는 결과를 보였는데, 이는 왁스의 과량 첨가로 인해 무기바인더의 결합력이 감소하였음을 의미한다.

증자의 강도가 100 N/cm³ 이하 일 때 핸들링 강도가 확보되지 않아 작업자의 작업이 불가능하기에 식물성 왁스 첨가량이 1 wt%일 시 내수 3시간 뒤 86 N/cm³의 강도를 가지 경우 상용현장에서 사용이 불가능하다 할 수 있다.

Table 5. Strength test results of core prepared using inorganic binders

Sample	General Strength(N/cm ³)		Moisture strength(N/cm ³) 29.9 g/m ³ (38℃, 65RH%)	
	1 min	60 min	1 hr	3 hr
	Inorganic binder	154	271	225
Ib+W ^{**} (1wt%)	165	302	189	86
Ib+W(0.5wt%)	165	327	253	127
Ib+W(0.1wt%)	156	328	294	203
Ib+W(0.05wt%)	182	328	289	216
Ib+W(0.01wt%)	176	332	287	200

*Ib : Inorganic binder
**W : Vegetable wax

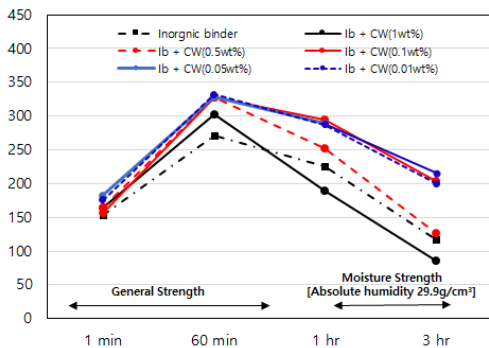


Fig. 5. Strength test results of core prepared using inorganic binders

Fig. 6은 일반 무기바인더와 내수강도가 가장 높은 Ib+W(0.05wt)를 이용하여 제조한 혼련사의 표면을 SEM으로 관찰한 결과이며, 모래와 모래를 연결해 주는 무기바인더의 결합 부위를 확인 할 수 있다. 왁스가 첨가된 결합 부위인 Fig. 6의 C, D를 보면 왁스의 특성으로 결합 부위에 코팅막을 형성한 것을 육안으로 확인 할 수 있다.

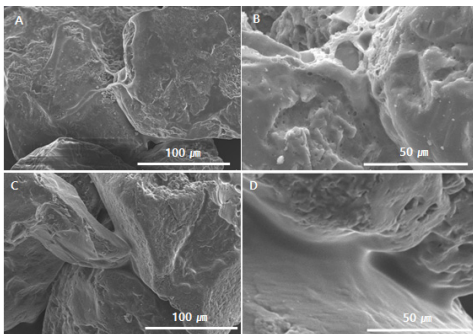


Fig. 6. SEM image of mixed sand prepared using inorganic binders with wax : A, B) inorganic binder bridge and C, D) Ib+W(0.05wt%) binder bridge



Fig. 7. Casting products manufactured using Ib+W(0.05wt%)

3.3 주조품의 특성 분석

혼련사의 유동특성과 중자의 강도 시험결과를 바탕으로 Ib+W(0.05wt) 바인더를 선정하여 농기구 엔진 커버 형상의 주형을 제작하였으며, 일반탄소강(ASTM A216 WCB) 합금을 이용하여 중력 주조를 진행하였다. 이때 출탕 온도는 1,670 ℃ 주입 온도는 1,600 ℃로 측정되었다. Ib+W(0.05wt) 바인더로 제작된 주형은 고강도로, 주조를 진행하는 동안 주강 용탕의 압력을 버티었으며 주형의 형상이 주조 전 후 큰 차이가 없음을 확인하였다. 완성된 주조품을 Fig. 7에 나타내었으며 육안으로 확인 시 주조 후 주형의 붕괴성이 우수하며 표면 형상 또한 우수한 것으로 확인 되었다.

주조 시 용탕 주입 시 유동 및 응고 양상을 확인하였으나 특이 사항은 없었으며 수축결함 및 기포결함이 발생하지 않았다. 또한 3차원 측정기 CMM을 사용하여 치수정밀도를 측정하였다. 전체 형상의 Best-fit align이 spec. in이면 결과 형상이 초록색으로 나타나고 ±7 mm 오차 범위에서 +7 mm일 시 빨간색, -7 mm는 파란색으로 나타난다.

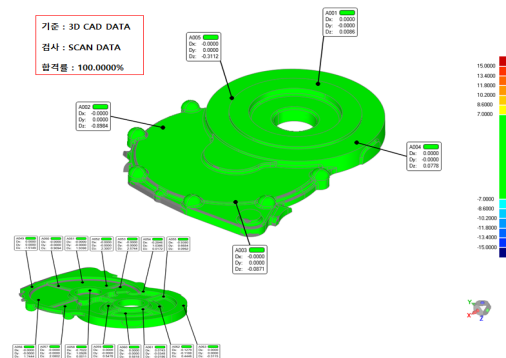


Fig. 8. Results of CMM measurement of casting

측정 결과 전체 형상 치수가 기준이 되는 3D CAD DATA와 비교하여 주조품의 치수가 spec. in(± 7 mm)으로 측정되어 치수 정밀도가 뛰어난 것으로 확인되었으며, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

4. 결론

주강 조주에 사용하기 위해 고강도, 고내수강도 특성을 가지는 무기바인더를 개발하기 위해 천연 왁스를 이용하여 무기바인더를 합성하였으며, 무기바인더와 혼련사의 특성을 평가하였다. 또한 일반 탄소강(ASTM A216 WCB) 주조를 통해 산업현장의 적용 가능 여부를 확인한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 식물성 왁스를 첨가하여 제조된 무기바인더는 왁스의 영향으로 SiO₂/Na₂O 몰 비는 4.7 점도는 38.1 cps로 일반 무기바인더 비해 증가함을 확인하였으며, 열분석 결과로도 350 ℃ 이상의 온도에서 왁스의 증발로 인한 질량감소를 확인하였다.
- 2) 식물성 왁스의 첨가량이 증가할수록 혼련사의 flow index 값은 0.19에서 0.27까지 증가하였다.
- 3) 식물성 왁스가 첨가된 무기바인더의 초기 강도는 소폭 증가하였으나, 최대 강도는 271 N/cm³에서 332 N/cm³로 약 23 % 증가하였으나, 왁스의 첨가량이 1 wt% 일 때, 최대 강도는 소폭 감소하였다. 무엇보다 왁스가 0.05 wt% 첨가 될 시 내수 3 시간 후 강도가 216 N/cm³으로 일반 무기바인더 118 N/cm³과 비교하여 약 55 % 개선됨을 확인하였다.
- 4) 일반 탄소강(ASTM A216 WCB)을 이용하여 증력 주조를 실시하여 왁스가 첨가된 무기바인더가 주강 용탕의 온도와 압력에서 주조가 가능함을 확인하였고, 주조 후 주형의 붕괴성과 표면형상이 우수한 것을 확인하였다.

Reference

- [1] C. R. Glowacki, G. R. Crandell, F. S. Cannon, J. K. Clobes, R. C. Voigt, J. C. Furness, B. A. McComb, and S. M. Knight, Am. "Emissions studies at a test foundry using an advanced oxidation clear water system" *Am. Foundry Soc. Trans.*, Vol.111, pp. 597-598 Jan. 2003.
- [2] Y. Wang, F. S Cannon, M. Salama, J. Goudzwaard and J. C Furness, "Characterization of hydrocarbon emissions from green sand foundry core binder by analytical pyrolysis" *Environ. Sci. Technol.*, Vol.41, No.41, pp.7922-7927, Oct. 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1021/es071657o>
- [3] S. S. Shin, W.-C. Kim, E.-S. Kim, K.-M. Lim, and J. W.Park, "Effects of Organic and Inorganic Binder Core on Microstructure and Mechanical Properties of Al Casting Products", *J. KFS*, Vol.33, No.4 pp.147-156, Aug. 2013.
DOI: <https://doi.org/10.7777/jkfs.2013.33.4.147>
- [4] A Schrey, Noracel* W100 -a new technology to prevent veining defects, *Foseco Foundry Practice* 246 Publishers, 2007 pp. 34.
- [5] U. Nwaogu and N. S. Tiedje, "Foundry coating technology : A review", *Mat. Sci. and Application*, Vol.2, No.8, pp.1143-1160, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.4236/msa.2011.28155>
- [6] I. Sierra, and J.L. Guth, "Synthesis of mesoporous silica with tunable pore size from sodium silicate solutions and a polyethylene oxide surfactant", *Microporous Mesoporous materials*, Vol.27, No.2-3, pp.243-253, Feb. 1999.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S1387-1811\(98\)00258-3](https://doi.org/10.1016/S1387-1811(98)00258-3)
- [7] K. Aramaki, "The inhibition effects of chromate-free, anion inhibitors on corrosion of zinc in aerated 0.5 M NaCl", *Corrosion Science*, Vol.43, No.3 pp.591-604, Mar. 2001.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(00\)00085-8](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(00)00085-8)
- [8] 2019 Ppuri industry white paper, Ministry of trade, Industry and Energy, Korea Institute of Technology, Korea National Ppuri Industry Center , Korea, pp.22-65
- [9] M. A. Bae, M. H. Kim, J. W. Park, and M. S. Lee, "Effect of Additives on the Sand Burning of Inorganic Binder in Al-Si7Mg Alloy Casting", *Korean J. Met. Mater.*, Vol.56, No.4, pp.327-333, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.3365/KJMM.2018.56.4.327>
- [10] W. K Lee and A. R Oh, "Effect of SiO₂/Na₂O Mole Fraction on Geopolymer Foam Block Made from Mine Tailing", *J. Korea Soc. Waste Manag.*, Vol.29 No.2, pp.155-160, Feb. 2012.
- [11] J. Milanovic, V. Manojlovic, S. Levic, N. Rajic, V. Nedovic, and B. Bugarski "Microencapsulation of Flavors in Carnauba Wax", *Sensors*, Vol.10, No.1, pp.901-912, Jan. 2010.
DOI: <https://doi.org/10.3390/s100100901>
- [12] Z. A. Worku, D. Kumar, J. V. Gomes, Y. He, B. Glennon, K. A. Ramisetty, A. C. Rasmuson, P. O'Connell, K. H. Gallagher, T. Woods, N. R. Shastri and A. M. Healya, "Modelling and understanding powder flow properties and compactability of selected active pharmaceutical ingredients, excipients and physical mixtures from critical material properties", *Int. J. of Pharmaceutics*, Vol.531, No.1,

pp.191-204, Oct. 2017.

DOI: <https://doi.org/10.1016/i.ijpharm.2017.08.063>

- [13] J. K. Yoo, Y. H. Keum and B. H. Shon, "A study on the synthesis of porous silica from a sodium silicate", *Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.15, No.4, pp.2519-2525, Apr. 2014.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.4.2519>
- [14] M. A. Bae, M. S. Lee and J. H. Baek, "The Effect of the Surface Energy of Water Glass on the Fluidity of Sand", *Korean J. Met. Mater.*, Vol.58, No.5, pp.319-325, 2020
DOI: <https://doi.org/10.3365/KJMM.2020.58.5.319>
- [15] M. A. Bae, K. H. Kim, M. S. Lee and J. H. Baek "Evaluation of inorganic binder strength properties including vegetable wax", *Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Jeju, Korea, pp454-456, July 2020

배 민 아(Mia A Bae)

[준회원]



- 2011년 2월 : 부산대학교 재료공학 (석사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 한국생산기술연구원 연구원

<관심분야>

무기재료, 3DP

김 경 호(Kyeong Ho Kim)

[준회원]



- 2008년 2월 : 울산대학교 건설환경공학부 (환경공학석사)
- 2012년 6월 ~ 현재: 한국생산기술연구원 연구원

<관심분야>

폐기물 재자원화, 전과정평가

이 만 식(Man Sig Lee)

[정회원]



- 2003년 2월 : 부경대학교대학원 화학공학 (공학박사)
- 2004년 8월 ~ 2005년 7월 : University of British Columbia Post Doc
- 2005년 3월 ~ 현재 : 한국생산기술연구원 수석연구원, 과학기술연합대학교 교수

<관심분야>

환경, 에너지, 재자원화 기술

백 재 호(Jae Ho Baek)

[정회원]



- 2007년 2월 : 부경대학교 공업화학 (공학석사)
- 2015년 2월 : 부경대학교 공업화학 (공학박사)
- 2015년 6월 ~ 현재 : 한국생산기술연구원

<관심분야>

환경, 촉매, 유/무기 합성