



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

각종 주물사의 특성과 주강품 구조에
적합한 인공사 선택



2023년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

신소재시스템 공학과

김 재 형

공학석사학위논문

각종 주물사의 특성과 주강품 구조에
적합한 인공사 선택



지도 교수 김성규

이 논문을 공학석사학위논문으로 제출함

2023년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

신소재시스템 공학과

김 재 형

김재형의 공학석사학위논문을 인준함

2023 년 2월 17일



위 원 장 공학박사 서 원 찬 (인)

위 원 공학박사 김 성 규 (인)

위 원 공학박사 임 영 수 (인)

목 차

I. 서 론	1
II. 실험방법	
1. 실험용 주물사 준비	7
2. 물성 비교 평가	10
3. 주형강도 시험	11
4. 주물사 내구성 평가	13
5. 주물사의 내열 특성 평가	15
6. 주강 시험편 주조 소착결함 발생을 비교 시험	17
III. 실험결과 및 고찰	
1. 각종 주물사의 물성	19
2. 주형강도 특성	37
3. 주물사 내구성	40
4. 주물사의 내열 특성	49
5. 주강시험편 주조 소착결함을	56
IV. 결 론	62
V. 참고문헌	64
VI. 학술발표 실적	71

Abstract

Natural silica sand was commonly used for sand casting of steel castings, and chromite sand was also used to suppress sand burn-on defect due to the lack of thermal properties of silica sand.

However, there are disadvantages such as deterioration by repeated use, problems with mixing system sand, difficulty in separation and removal, increased load during molding due to high density, and waste containing chromium.

Recently, industrial waste reduction and atmospheric environment improvement have been highlighted as important tasks in the casting industry.

In order to solve the problems that occur when using conventional foundry sand and to improve the environment of casting factories, various artificial sands that can be applied instead of natural sands have been developed and introduced.

Artificial sands can be classified into artificial sand manufactured by the Electric Arc Gas Atomization or Powder Flame Gas Atomization, artificial sand manufactured by the Spray Drying & sintering Process, artificial sand manufactured by the sintering & grinding Process.

And exhibit different physical properties depending on the type of raw-minerals and manufacturing method.

In this study, foundry sands suitable for casting steel products were selected through comparative evaluation tests on the physical properties of various foundry sands, mold strength, physical durability, thermal durability, casting of sand burn-on test piece.

표 목 록

- Table. 1 Types of foundry sand used in the test
- Table. 2 Comparison of manufacturing methods and major
Manufacturing processes schematic for each spherical
artificial sand
- Table. 3 Physical properties of alkaline self-hardening phenolic
resin binders
- Table. 4 Evaluation results of various foundry sand properties
- Table. 5 Table of results of evaluation of burn-on defect rate of
Cast steel test pieces of various foundry sands

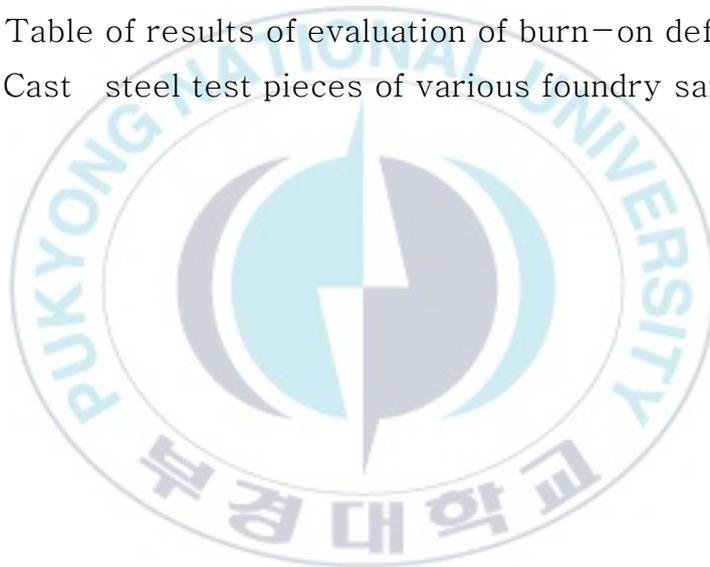
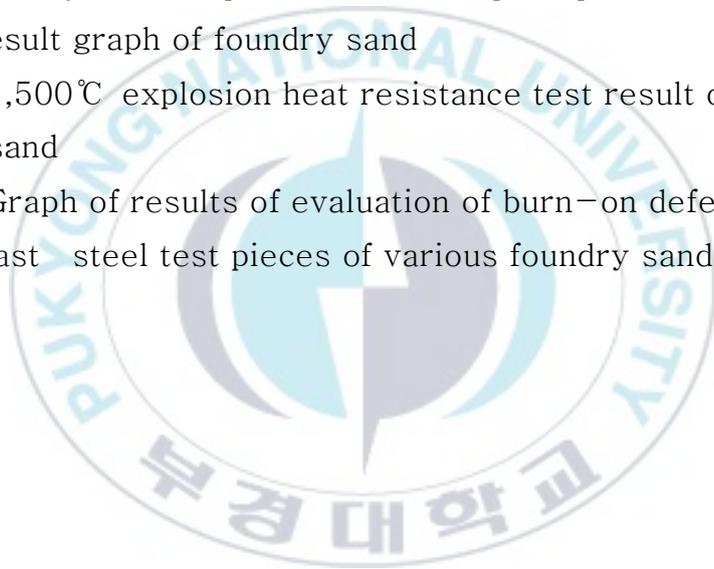


그림 목록

- Fig. 1 Uses of Large Steel Castings.
- Fig. 2 Model drawing and foundry sand compaction tester for the production of test pieces for measuring the compressive strength of the mold
- Fig. 3 Pot mill used in the foundry sand breakage test
- Fig. 4 Example of sand burn-on and sand burn-in of foundry sand
- Fig. 5 An example of a cast steel test piece drawing, a mold schematic diagram, and a cast test test process for comparative evaluation of burn rate by casting sand
- Fig. 6 Al_2O_3 content of various artificial sand and refractoriness relationship graph.
- Fig. 7 SiO_2 content of various artificial sand and refractoriness relationship graph.
- Fig. 8 SEM observation photos of various foundry sands
- Fig. 9 SEM observation results of sintered artificial sand manufactured by the spray drying sintering method and molten artificial sand manufactured by the melt spraying method
- Fig. 10 Mold strength after 24 hours after molding various foundry sands with alkaline self-hardening phenolic resin
- Fig. 11 Crushing test results in pot mill for comparative evaluation of the physical durability of foundry sand
- Fig. 12 Heat and quench fracture rate calculated by 1,100 °C heat and quench test

- Fig. 13 SEM pictures of molten artificial sand tested by heating and quenching at 1,100 °C
- Fig. 14 TMA (Thermo Mechanical Analysis) results of melting artificial sand A3 and melting artificial sand B
- Fig. 15 DSC (Differential Scanning Calorimetry) results of Melting artificial sand A3 and melting artificial sand B
- Fig. 16 Results of evaluation of sintering phenomenon occurrence temperature of foundry sand and sinter fusion production rate by test temperature sintering temperature evaluation result graph of foundry sand
- Fig. 17 1,500°C explosion heat resistance test result of foundry sand
- Fig. 18 Graph of results of evaluation of burn-on defect rate of Cast steel test pieces of various foundry sands



I. 서론

뿌리산업은 ‘뿌리산업 진흥과 첨단화에 관한 법률’ 시행령에 의해 정의되어 있으며, 주조산업을 포함하여 금형산업, 소성가공산업, 용접·접합산업, 열처리산업, 표면처리산업 등으로 구성되는 제조업 전반의 기간산업이다 [1, 2].

6대 뿌리산업별로 전방 및 후방산업에 대한 연쇄효과를 살펴보면, 주조산업은 6대 분야 중 가장 높은 수준의 중간투입율 및 중간수요율을 보이고 있으며, 생산유발계수도 다른 뿌리산업 대비 월등히 높은 값을 가진다 [2].

주조산업은 철강, 기계, 조선, 화학 산업에 필요한 각종 주물 제품을 제공해 왔으며, 디스플레이, 스마트기기, 자동차, 의료용구, 방산 제품까지 그 응용 제품은 거의 전 산업에 망라하고 있다 [3].

2018년 기준 세계 주물 생산량은 약 1억 1,300만톤이며, 그 중 국내 주물생산량은 252만톤으로 세계 8위의 위치이며, 전세계 주물생산량의 2.2% 차지하고 있다. 세계 주물 생산비율(중량)은 철계 주물이 약 80%, 비철 주물이 약 20%로 집계되며, 국내의 주물 생산 비율(중량)은 철계 주물이 약 75%, 비철 주물이 25%로 집계 된다 [3].

철계 주물인 주강품은 해양플랜트 부품 [4, 5], 산업기계부품 [6, 7], 발전 부품 [7, 8], 선박부품 [9], 교량 구조재 [7], 건축물 구조재 등에 활용되며, 그림 1은 다양한 산업에 사용되고 있는 주강품을 나타낸 것이다. 대형선박, 산업기계, 플랜트용 대형 구조재 등은 형상이 복잡하고, 주입금속인 주강의 주입온도가 높으며, 주입중량도 크기 때문에 사형주조로 제조된다.



Fig. 1. Uses of Large Steel Castings

사형 주조는 저렴한 원료와 가공 비용, 높은 생산 효율성, 대량 생산에서의 우수한 치수 정밀도 등의 다양한 장점을 가진다 [10]. 사형 주조로 주조품을 제조하는 과정에 있어서 주형 및 중자는 주조품의 품질에 크게 영향을 미치는 등 주물의 제조에 중요한 역할을 하고 있다 [11].

주형 및 중자는 주물사와 점결체가 혼련된 조형사로 제작 되어진다. 조형사는 적정한 주형 강도(Mold Strength), 통기도(Permeability), 열적 안정성(Thermal stability), 내화도(Refractoriness), 유동성(Flowability), 주물표면 미려성(Produced good casting finish), 붕괴성(Collapsibility), 복용성(Is reusable), 주물사 처리 및 관리의 용이성(Offer ease of sand preparation and control), 냉각능(Removes heat from the cooling casting)이 요구되며, 이러한 특성은 사용되는 주물사와 점결체의 종류 및 특성에 따라 결정된다.

주물사를 결합하는 역할의 점결체는 점토질 점결체, 화학점결체 등이 개발 되어, 여러 가지 주형 제조법으로 발전하고 있다 [11]. 최근 주조공장의

환경문제 대응을 위한 유기점결체에 비해 유해가스 발생이 적거나, 없는 친환경 무기점결체가 개발, 소개되고 있다 [10, 12, 13].

한편, 알카리자경성페놀수지주형법(Alkali Phenol Resin No-Bake Process, Alpha set)은 알카리페놀수지 점결체와 경화제로서 유기에스텔을 사용하는 유기자경성주형법이다. 이 프로세스의 경화속도는 속경성으로부터 지경성까지 대단히 폭이 광범위하게 조절이 되어 심부경화성이 양호하여 가사기간에 대한 발형 시간비가 양호하다. 고온특성으로 주형의 붕괴성이 양호하고 주형의 조형성이 우수하기 때문에 박육주강품의 열간균열이 적고 또한 주형의 팽창이 적고 베이닝 결함이 적은 특성을 갖고 있다 [11].

국내의 경우, 대형주강품의 제조를 위한 주형법으로 알카리자경성페놀수지주형법을 주로 적용하고 있다.

고사(폐주물사)는 폐사, 재생사를 불문하고 주조공장에서 사용이 끝나 배출되는 주물사를 총칭한다 [14]. 고사를 폐기물로 처리할 때, 특수강을 생산하는 경우, 화학물질을 점결사로 사용하기 때문에 유해물질을 일정량 포함하고 있어 지정폐기물로 분류되지만, 벤토나이트를 점결체로 사용하는 폐주물사는 일반폐기물로 분류된다 [15]. 알카리자경성페놀수지주형법으로 주강품을 제조할 때, 발생하는 고사(폐주물사)는 점결체가 화학물질이므로써, 지정폐기물로 분류되며, 시멘트 원료, 성토재 등으로의 재활용과 폐기물처리장으로의 매립에 어려움이 있다. 주물공장에서 발생하는 고사의 처리에 상당한 비용이 요구되며, 환경오염문제로까지 발전 가능성이 있으므로, 주물공장에서 배출물을 극소화하기 위한 고사의 재생 사용이 필수 조건으로 되고 있다 [11, 16, 17, 18, 19].

사재생은 사용된 주형사에서 점결체를 제거하는 기술로써, 점결체와 첨가제의 종류에 따라 여러 가지 방법으로 사재생기가 개발되어 사용되고 있으며, 사재생은 건식법(기계식), 습식법(수세식), 소성법(배소법)으로 분류된다 [17, 20]. 소성법은 에너지비용과 환경규제 측면에서 활용에 제한이 있고, 습식법의 경우 사재생에 사용된 물과 재생된 주물사의 중화 및 건조처리 문제로 활용이 제한 되고 있어, 국내의 경우 기계식 사재생법이 주로 이용되고 있다.

한편, 종래 주물사로서는 규사, 지르콘샌드, 크로마이트샌드, 올리빈샌드 등이 있고, 주철이나 주강등의 주조 재질 등에 의해, 각각의 모래 특징을 살려 선정하고 사용 되고 있으며 [21], 일반적으로 규사가 풍부한 자원과 저렴한 비용으로 주형을 제조하는데 널리 사용되고 있다 [10].

규사의 경우, 국내 산출량 한계로 인해 수입규사에 대한 의존도가 높고 [15, 17], 천연규사의 채굴 및 수출을 규제하는 국가가 점점 늘어나고 있다 [15, 22]. 규사는 기계적 파쇄가 발생하기 쉬운 골재로써, 주조 공장에 있어서의 환경 악화 및 산업 폐기물의 증가를 초래하고 [23], 높은 열팽창율에 의한 베이닝 결함, 낮은 내화도에 의한 소착 및 융착결함 등이 발생하는 단점이 있다.

소착결함 억제를 위해, 크로마이트사가 사용되고 있으나, 크로마이트사의 경우, 반복 사용에 의한 골재 열화가 발생하고, 이를 위한 오염 문제와 분리 제거의 과제도 현안이 되고 있으며, 용적비중이 높아 조형 시 하중증가와 실질 수지 첨가량이 증가하고 크롬함유 폐기물이 되는 단점이 있다 [24].

종래의 주물사 사용 시 발생하는 문제점 해결과 주조공장의 환경개선을 위한 인공사가 개발되어 소개 및 연구 되고 있다 [21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32]. 일반적으로 인공사는 규사에 비해, 내파쇄성 및 열적특성이 우수하며, 구형의 형상으로 점결제 사용량 감소와 유동성이 우수한 것으로 알려져 있다.

일본의 경우, 주철 주조 업체 등에 인공사를 적용하여, 신사투입량 절감, 산업폐기물 감소, 작업장 대기환경 개선, 주형제작시간 단축, 재생력 향상, 사회수율 향상, 주조결함 감소에 의한 후처리 감소, 생산성 향상 등 인공사 적용 효과와 다양한 적용사례가 보고 되고 있다 [7, 22, 27, 28, 29, 30, 33]. 특히, 폐기물 저감 및 주물 품질의 향상을 목표로, 점결제는 알카리자경성페놀수지주형법으로, 주물사는 구형의 인공사를 이용한 원샌드 프로세스(One Sand Process)로 전환하는 주조 공장이 증가하고 있다 [34].

국내의 경우에도 알카리자경성페놀수지주형법과 기계식 사재생설비가 도입된 주강 주조 업체에 구형의 인공사가 적용 되고 있다.

주강은 합금재질에 따라 차이가 있으나 주입온도(1,540~1,580℃)가 높고, 비중(7.8~8.0g/cm³)이 크며, 주강품이 대형화 될수록 응고시간이 느리기 때문에 [9], 대형 주강품을 주조하는 주형의 주형강도와 내열특성 확보가 중요하다.

주물의 품질은 용융금속이 냉각되는 과정에서 주로 결정 되며, 주형에서 특히 용융금속과 접하는 주형의 표면이 충분히 강하지 못하면, 유입된 용융금속에 의해 부스러질 수 있다. 이 경우, 주물의 형상이 원하는 형상에서 벗어나게 되어 불량 제품이 될 수 있고 [35], 주강품을 사형주조로 제조할 때, 주형강도, 주형의 수축량, 주물사 및 점결제 종류는 제품 표면의 열간균열 결함과 주물사 소착 결함 발생량에 영향을 준다 [8]. 한편 사재생을 통해 반복 사용에서도 파쇄가 발생하지 않는 주물사가 중요한 골재로 요구되고 있다. 또한, 열적인 내구성도 중요한 과제이며, 반복 사용해도 용융·융착 하지 않고 모래입자로 돌아가는 특성을 가지는 주물사가 요구 된다 [23].

그러므로 주조결함이 없는 품질이 우수한 주강품 제조와 기계식 사재생을 통한 반복 사용에도 내구성이 우수한 주물사의 선택이 요구된다. 즉, 주강품 주조를 위한 인공사 선택에 있어, 주형강도, 기계적 재생 시의 내파쇄성(주물사 재생 회수율), 고온의 온도에 오래 유지 됨에 따른 내열성 등이 매우 중요하다. 따라서 주강품 주조에 적합한 인공사 선택에 있어 천연사 및 각각 다른 제조공법으로 제조된 여러 가지 인공사의 특성 차이를 파악해야 하며, 그에 따른 사용방법에 대한 변경이 필요할 수 있다.

그러나 각종 인공사 특성에 대해 요약한 문서나 연구는 부족하다. 특히, 주강품 주조에 적합한 인공사 선택을 위한 자료가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 주강품 주조공장 관리자의 인공사 선택을 돕기 위해 천연규사, 크로마이트사와 국내에 소개된 각종 인공사에 대해서, 물성 평가, 점결제별 주형강도 시험, 불밀에서의 파쇄시험, 소착평가 시험편 주조 등을 실시하여, 비교평가 하였다.

당사는 당초 알카리자경성페놀수지주형법에 크로마이트사와 규사를 적용한 Two-Sand System 으로 주강품을 제조하고 있었으나 주물사 구입비 절감,

조형작업 효율 향상, 작업장환경개선, 폐주물사 및 폐분진 절감을 목표로 아크용사법으로 제조된 구형 인공사를 2009년 도입하게 되었다.

인공사 도입으로부터 13년 경과 후, 재생사에 대한 시험결과 추이와 관리항목, 주물사 결합에 대해 보고하고자 한다.



II. 실험방법

2.1. 실험용 주물사 준비

본 연구에 사용한 주물사 종류는 천연사는 3종류이고, 인공사는 14종류로 총 17종류이다. 국내 및 국외에 판매 또는 소개되고 있는 천연사 및 상용 인공사를 제조사 및 국내 수입원을 통해 구입하거나, 제공받아 본 연구에 사용하였다. 표 1은 본 연구에서 평가된 각종 주물사 제품별 제조법, 원료광물, 제조국 정보를 나타낸 것이고, 표 2는 구형의 인공사 제조법의 제조공정 모식도를 나타낸 것이다.

Table 1. Types of foundry sand used in the test

구분	인공사 제조법 분류	제조국	원료광물	제조사	제품명	
인공사 (구형)	조립 소결법	분무건조 소결법	Japan	Kaolin, Alumina	A	소결인공사 A
			China	Bauxite, Kaolin	B	소결인공사 B
		펠릿화 소결법	China	Flint clay	C	소결인공사 C1, C2
		China	Bauxite	D	소결인공사 D1, D2	
	용융 분사법	아크용사법	China	Bauxite	E	용융인공사 A1
			China	Bauxite	F	용융인공사 A2
			China	Bauxite	G	용융인공사 A3
			China	Bauxite	H	용융인공사 A4
		분말식화용사법	China	Bauxite, Kaolin	I	용융인공사 B
		인공사 (각형)	분쇄법	China	Bauxite, Kaolin	J
China	Bauxite, Kaolin			K	분쇄인공사 B	
France	Amdalusite			L	분쇄인공사 C	
구분		제조국	제조사	제품명		
천연사 (완형, 각형)	천연규사	Vietnam	M	규사 (베트남산)		
		Australia	N	규사 (호주산)		
	특수사	Rep. South Africa	O	크로마이트사 (남아공산)		

Table 2. Comparison of manufacturing methods and major Manufacturing processes schematic for each spherical artificial sand

제조법 분류	제조프로세스 모식도	제조국	원료광물	제조사	제품명
조립소결법		Japan	Kaolin, Alumina	A	소결인공사 A
		China	Bauxite, Kaolin	B	소결인공사 B
펠릿화 소결법		China	Flint clay	C	소결인공사 C1 소결인공사 C2
		China	Bauxite	D	소결인공사 D1 소결인공사 D2
용융분사법		China	Bauxite	E	용융인공사 A1
		China	Bauxite	F	용융인공사 A2
		China	Bauxite	G	용융인공사 A3
		China	Bauxite	H	용융인공사 A4
분말식 화염용사법		China	Bauxite, Kaolin	I	용융인공사 B

인공사 제조법은 조립소결법(造粒燒結法), 용융분사법(鎔融噴射法), 분쇄법(粉碎法)으로 분류할 수 있다. 주조업계에서 인공사로 명명하는 제품은 구형(球形)의 특징을 가진다.

소결인공사 A는 원료광물인 고령토(Kaolin) 및 알루미나 분말에 결합제(Binder), 가소제(可塑劑, Plasticizer), 분산제(分散劑, Dispersant) 등을 배합한 슬러리(Slurry)를 분무건조기(Spray dryer)에서 구형입자로 조립화 한 후, 회전로(回轉爐, Rotary kiln)에서 소성하는 분무건조소결법으로 제조된 것이다. 소결인공사 B는 원료광물을 보크사이트(Bauxite)와 고령토로 달리하여, 분무건조소결법으로 제조된 것이다.

소결인공사 C1 및 C2는 원료광물인 플린트클레이(Flint clay)를 원반형 조립기(Disc pelletizer)에서 구형입자로 조립화 한 후, 회전로에서 소성하는 펠릿화 소결법으로 제조된 것이며, 소결인공사 D1과 D2는 원료광물을 보크사

이트로 달리 하여, 펠릿화 소결법으로 제조된 것이다.

용융인공사 A1, A2, A3, A4는 원료광물인 보크사이트를 직접식 아크로 (Directly heated arc furnace)에 장입하여, 흑연전극(黑鉛電極, Graphite electrode) 사이에 형성된 아크(Arc)로 용융 시키고, 출탕구에서 출탕되는 용탕을 고압의 공기로 분사 및 냉각 시켜, 구형입자를 제조한 것이다. 중국에 여러 제조사가 있으며, 제조사에 따라 원료광물인 보크사이트의 산지, 화학성분 등이 상이하며, 후속공정의 설비 구성과 공정 및 품질관리 기준과 제조 사양 등이 상이하다.

용융인공사 B는 원료광물인 보크사이트 및 고령토를 분쇄, 정제, 배합, 압출, 하소 등의 전처리 공정으로 원료분말(소성플라이트)로 제조한 다음, 화염용사로에서 연료가스와 조연가스로 형성된 고온의 화염속으로 원료분말을 공급하여, 용융 및 분사 시켜 구형입자로 제조된 것이다.

반면, 분쇄법으로 제조된 인공사는 천연상태의 단순 분쇄한 것과 원료광물을 하소 또는 소성처리 후 분쇄한 것, 원료광물 분말을 혼합하여, 원하는 광물질로 합성한 후 소결하여 제조된 중간재를 분쇄 처리한 것 등이 있다. 분쇄법으로 제조된 인공사는 제조공법 특성상 각형 또는 준각형의 형상을 가진다.

분쇄인공사 A는 원료광물인 보크사이트 및 고령토를 분쇄, 정제, 배합, 압출, 하소 등의 공정으로 소성 플라이트 분체로 제조한 다음, 분급하여 주물사 입도분포로 구성하여 제조된 것이고, 분쇄인공사 B는 보크사이트를 하소, 분쇄, 소성, 분급 등의 공정으로 주물사 입도분포로 구성하여 제조된 것이며, 분쇄인공사 C는 홍주석(Andalusite)을 하소, 분쇄, 소성, 분급 등의 공정으로 주물사 입도분포로 구성하여 제조된 것이다.

또한 물성 비교 평가를 위한 천연사로는 베트남산 규사, 호주산 규사, 남아프리카공화국산 크로마이트사를 활용하였다.

2.2. 물성 비교 평가

각종 주물사 샘플에 대해서 ASTM E11규격의 표준체(Tyler, Standard Sieves)와 체진동기(CISA, RP200N)로 입도시험 하였다.

충진밀도(Tab Density)는 탭밀도시험기(Bettersize Instruments Ltd. BeDensi T1 Pro)을 사용하여 측정하였다. 겉보기밀도(Apparent density)는 비중병에 주물사 시료를 투입하고, 증류수를 투입한 후, 초음파세척기에서 5분간 초음파 진동을 줘서, 주물사 입자 사이에 존재하는 공극(Air gap)과 주물사 입자 표면의 개기공(Open pore)에 증류수가 채우는 방식으로 겉보기부피(Apparent volume)를 산출하여, 측정하였다.

XRD(PANalytical, X'Pert3-Powder)를 이용한 물질동정을 통해 광물질 분석을 하였으며, WD-XRF(Shimadzu, XRF-1800)로 화학성분을 분석 하였다.

KS규격(KS L3113 - 내화물 및 내화 원료의 내화도 시험방법, KS L ISO1146 - 내화도 시험용 표준콘)의 내화도 시험을 실시하였다.

형상계수(Aspect ratio)는 주물사 시료의 입형을 주사전자현미경(Hellios, Nanolab600)에서 관찰하고, 100개의 입자를 무작위 선정하여, 장축과 단축의 길이를 측정하여, 산출하였다.

2.3. 주형강도 시험

사형주조로 주강품을 제조하기 위해서 사용되는 사형 주형을 제작하기 위한 주형법으로 알카리자경성페놀수지주형법이 주로 활용되고 있으며 이를 적용하여 주물사 종류에 따른 주형강도를 비교 평가하였다.

표 3는 주형강도 시험에 사용된 알카리자경성페놀수지 점결제의 물성을 나타낸 것이다.

Table 3. Physical properties of alkaline self-hardening phenolic resin binders

고형분 (%)	41.4	135°C X 1Hr
점도 (cps)	B-C ² (87)	25 °C
비중	1.19	25 °C
Free Formaldehyde (ppm)	95	HPLC 측정 (DNPH 법)
Na (%)	2.83 [18 % ▼]	-
K (%)	2.06 [16 % ▼]	-

그림 2는 각종주물사의 알카리자경성페놀수지주형법에서의 주형시편의 압축강도측정을 위한 주형시험편 제작에 사용된 시험편 제작용 모형과 주물사 다짐시험기를 나타낸 것이다.

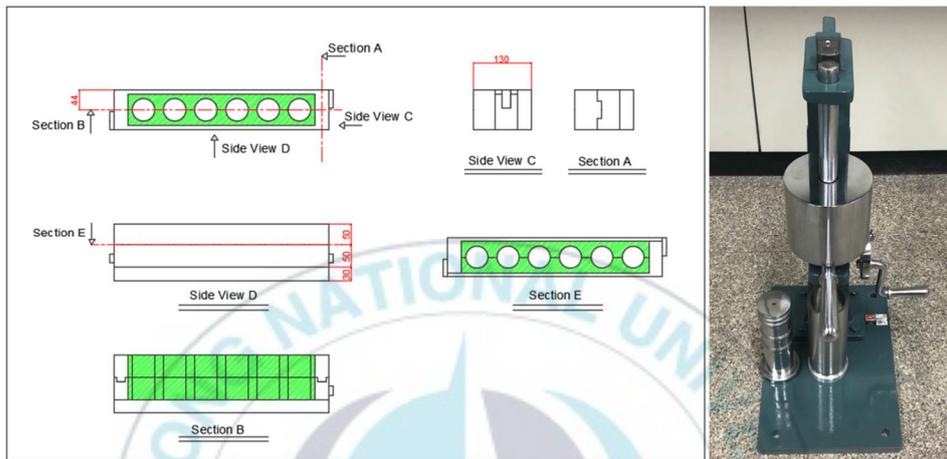


Fig. 2. Model drawing and foundry sand compaction tester for the production of test pieces for measuring the compressive strength of the mold

알카리자경성페놀수지주형법으로 조형된 주형의 압축강도 평가를 위한 주형 시험편은 탁상형 주물사 혼련기(SPAR, SP-800A)에 평가 대상 주물사 4kg를 투입한 후, 알카리자경성페놀수지(HAKOREA, FO-1815) 투입량의 20% 중량비율에 해당되는 중량의 에스테르 경화제(HAKOREA, FO-3460)를 투입하고, 주물사 혼련기를 132RPM으로 가동시켜 1분간 혼합한 후, 실험조건에 해당되는 중량의 알카리자경성페놀수지를 투입하고, 주물사 혼련기를 132RPM으로 가동시켜 1분간 혼합하여, 제조된 조형사를 압축강도 시험편 제작용 모형에 투입하고, 주물사 다짐시험기(KS A 5301, 흥진정밀, HJ-510)로 10회 다짐을 실시한 후, 상온(25 °C)으로 유지되는 실험실에 24시간 보관한 후, 시험편 제작용 모형에서 발형하여, 직경 50mm, 높이 50mm인 시험편을 제작하였다. 제작된 시험편은 만능재료시험기(R&B사, UNITECH RB-305)에서 압축강도시험을 실시하였다.

2.4. 주물사 내구성 평가

2.4.1. 주물사의 물리적 내구성 평가 - 포트밀에서의 주물사 파쇄시험

주물사 반복 재사용하기 위한 주물사 재생법으로 주물사 입자간 또는 충격 또는 마찰시키는 물리적인 힘으로 주물사 입자 표면의 잔류 점결체를 제거하는 방식의 기계식 재생법이 주로 활용되고 있다. 이때 주물사 입자의 파쇄가 발생될 수 있으며, 반복 재생하여 사용하여도, 파쇄가 작은 주물사가 재생 회수율이 높은 주물사라고 할 수 있다.

각종 주물사의 내구성을 비교 평가하기 위해 포트밀(WISEMIX, BML-2)에서의 파쇄시험을 실시 하였다. 그림 3은 주물사 파쇄율 시험에 사용된 포트밀을 나타낸 것이다.



Fig. 3. Pot mill used in the molding sand breakage test

파쇄율 시험을 위한 각종 주물사를 표준체와 체진동기로 분급을 통해, #50(체목 300 μm) 표준체를 통과하여, #60(체목 250 μm)표준체에 걸린 주물사 시료를 준비하였다.

준비된 시험용 주물사 주물사 시료 100g과 알루미늄재질 볼(∅10mm)90개(약 200g)를 내부 체적 1 Liter 용량의 알루미늄재질의 원통형 용기 넣고, 포트밀에서 400RMP으로 30분간 가동한 후, 파쇄시험된 주물사 시료를 #60 표준체 위에 넣고, 주물사 시료가 담긴 표준체를 체진동기에 장착하고, 체진동기를 20분간 가동한 후, #60 표준체를 통과된 주물사 중량을 전자저울(SATORIUS, A120S)로 측정하여 파쇄율을 아래 계산식으로 산출하였다.

$$\text{파쇄율 (\%)} = \frac{\text{\#60 표준체 통과 주물사의 중량 (g)}}{\text{포트밀에서 파쇄 시험 전 주물사 중량 (g)}} \times 100$$

2.4.2. 주물사의 열적 내구성 평가 - 가열 급냉 시험 (Heating and quenching test)

주물사가 사형주조에 사용될 때, 주입금속의 재질에 따라 상이하나, 금속용탕이 주입 된 후, 주물사는 고온에 노출된 후, 냉각되게 된다. 주물사의 가열 급냉각의 열변화에 대한 저항성을 평가할 필요가 있다. 내화물의 가열 급냉 시험은 가열한 내화물 시료를 기체 또는 액체의 냉각매체에서 급냉시키는 열 충격 시험법의 하나로써, 일반적으로는 가열과정 보다 냉각과정에 발생하는 열응력이 크기 때문에 열응력에 의한 내화물의 강도를 평가하는 방법 중 하나이다.

본 연구에서는 각종 주물사의 가열 급냉 시험의 내구성 비교 평가를 위한 1,100℃ 가열 급냉 시험을 실시하였다. 가열 급냉 시험을 위한 각종 주물사를 표준체와 체진동기로 분급을 통해, #50(체목 300 μm) 표준체를 통과하여, #60(체목 250 μm) 표준체에 걸린 주물사 시료를 전기로에서 135℃로 1시간 동안 건조하여 준비하였다. 준비된 시험용 주물사 시료 10g을 알루미늄 도가니(10ml)에 투입하고, 각종 주물사 시료가 투입된 알루미늄 도가니들을 전기로(제이오텍, MF-32H)에 넣고, 승온속도 100℃/Hr로 가열하여, 1,100℃에서 1시간 유지시킨 후, 1500ml의 증류수가 담긴 스테인리스 비커에 투입하여 급냉 시켰다. #325(체목 45 μm) 표준체로 냉각된 주물사 시료만 걸러낸 후, 135℃로 1시간 동안 건조한 후, 가열 급냉 시험된 주물사 시료를 #60 표준체 위에 넣고, 주물사 시료가 담긴 표준체를 체진동기에 장착하고, 체진

동기를 20분간 가동한 후, #60 표준체를 통과된 주물사 중량을 전자저울로 측정하여, 가열 급냉 파쇄율을 아래 계산식으로 산출하였다.

$$\text{가열 급냉 파쇄율 (\%)} = \frac{\text{\#60 표준체 통과 주물사의 중량 (g)}}{1,100^\circ\text{C 가열 급냉 시험 전 주물사 중량 (g)}} \times 100$$

2.5. 주물사의 내열 특성 평가

2.5.1. 소결현상 발생온도 평가

주강은 합금재질에 따라 차이가 있으나 주입온도(1,540~1,580℃)가 높다, 또한 주강품이 대형화 될수록 응고시간이 느려진다. [9] 즉, 주형의 냉각속도도 느려진다. 따라서 주강품 사형주조에 사용된 주물사는 금속용탕의 주입증량에 따라 노출되는 온도는 상이하나, 고온에 장시간 노출되게 되며, 주물사의 종류에 따라 소결현상이 발생되어, 주물사 소착(sand burn on) 또는 용착(sand burn in) 결함이 발생 될 수 있다. 그림 4는 대형주강품 표면에 발생된 주물사 소착 및 용착 결함의 일례를 나타낸 것이다.



Fig. 4. Example of sand burn-on and sand burn-in of foundry sand
(a) Sand burn-on, (b) Sand burn-in

본 연구에서는 각종 주물사에 대한 주물사 소착 또는 용착 결함 발생 가능성에 대한 비교 평가를 위해서, 각종 주물사 시료에 대한 소결현상 발생온도를 평가 하였다. 주물사 시료 10g을 알루미늄 도가니(10ml)에 투입하고, 각

중 주물사 시료가 투입된 알루미늄 도가니들을 시험온도(1,100℃, 1,200℃, 1,300℃, 1,400℃, 1,500℃)로 가열된 전기로에 넣고, 1시간 유지 후, 상온까지 로냉하였다. 시험된 주물사 시료를 #20(체목 850 μ m) 표준체 위에 넣고, 주물사 시료가 담긴 표준체를 체진동기에 장착하고, 체진동기를 5분간 가동한 후, #20 표준체를 통과하지 못하고 남은 소결 용착물을 전자저울로 측정하여, 소결 용착물 생성율을 아래 계산식으로 산출하였다.

$$\text{소결 용착물 생성율 (\%)} = \frac{\text{\#20 표준체를 통과하지 못한 소결 용착물의 중량 (g)}}{\text{시험 전 주물사 중량 (g)}} \times 100$$

2.5.2. 1,500℃ 폭열 내열성 시험

앞서 서술한 바와 같이 주강품 사형주조에 사용된 주물사는 고온 노출되며, 주물사 재생장치를 이용하여, 반복 재사용하게 되므로, 고온에 반복 노출된다.

또한 유기계점결제를 사용하는 경우, 회수사 표면에 잔류하는 점결제를 고온의 화염으로 제거하는 소성법(배소법)으로 재생처리하는 경우에도 주물사는 고온에 반복 노출되게 된다.

본 연구에서는 각종 주물사에 대해 1,500℃로 1~5회 반복하여 폭열 및 로냉 되었을 때, 주물사 소결현상 발생량을 평가하였다. 주물사 시료 10g을 알루미늄 도가니(10ml)에 투입하고, 각종 주물사 시료가 투입된 알루미늄 도가니들을 시험온도인 1,500℃로 가열된 전기로에 넣고, 1시간 유지 후, 상온까지 로냉하였다. 시험된 주물사 시료를 #20(체목 850 μ m) 표준체 위에 넣고, 주물사 시료가 담긴 표준체를 체진동기에 장착하고, 체진동기를 5분간 가동한 후, #20 표준체를 통과하지 못하고 남은 소결 용착물을 전자저울로 측정하여, 1,500℃ 폭열 용착물 생성율을 아래 계산식으로 산출하였다

$$1,500\text{℃ 폭열 용착물 생성율 (\%)} = \frac{\text{\#20 표준체를 통과하지 못한 용착물의 중량 (g)}}{\text{시험 전 주물사 중량 (g)}} \times 100$$

2.6. 주강 시험편 주조 소착결함 발생을 비교 시험

대형 주강품의 사형주조 시, 주조품의 열집중부에 주물사의 소착 또는 용착 결함이 발생될 수 있다. 이러한 주물사 소착 결함은 주조품 표면에 접합되어 있어 쇼트블라스트, 가우징 등으로 제거가 용이하지 않아 주조품의 후처리 공수를 증가시키며, 주조품에서 제거된 주물사 소착층은 주물사가 소결된 상태가 대부분이라서 회수하여 재사용되지 못하고, 폐주물사 또는 광재로 폐기처리 하게 된다.

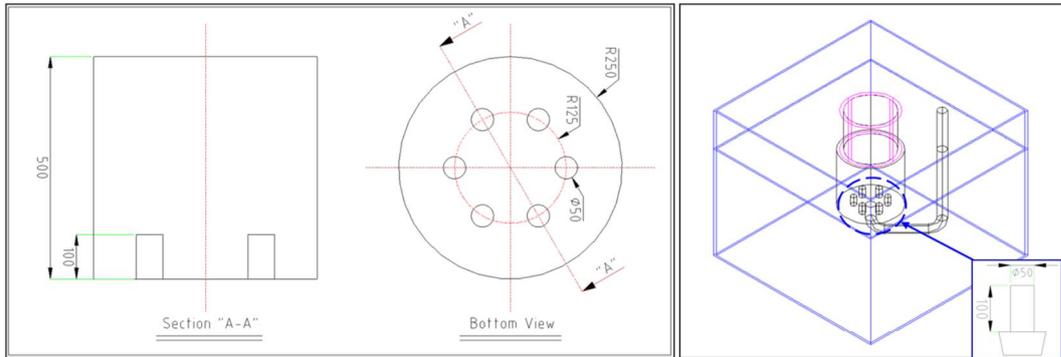
본 연구에서는 주강품 주조 시에 주물사별 소착 결함 발생 정도를 비교 평가하기 위해, 주물사 종류별로 제작된 중자가 설치된 주강 시험편 주조시험을 실시하였다. 그림 5는 주물사별 소착을 비교 평가를 위한 주강 시험편 도면과 주형 모식도 및 주강 시험편 주조 시험과정의 일례를 나타낸 것이다.

주강 시험편은 직경 500mm, 높이 500mm의 원통형이며, 내부에 시험용 주물사로 제작된 중자(core)가 설치되어 형성된 직경 50mm × 높이 150mm의 오목부 6개가 형성된다. 주강시험편 상부에는 직경 400mm x 높이 400mm의 압탕(Riser)을 설치하였다.

주형은 재생인공사를 사용하여, 알카리자경성페놀수지 조형법으로 제작하고, 각각의 시험용 주물사를 알카리자경성 페놀수지 점결제로 조형하여, 중자부 직경 50mm, 높이 150mm의 소착시험용 중자를 제작하였다. 제작된 중자는 외형 주형에 중자본드(현진산업, 에어셋)를 사용하여, 조립하고, 상형에는 내경 400mm, 외경 460mm, 높이 400mm의 발열슬리브(현진산업, P400)로 압탕부를 형성하여, 주강 시험편 주조를 위한 주형을 제작하였다. 제작된 주형에 저탄소주강(KS, SCW-480 재질) 용탕을 주입하여, 주조하였다. 이때, 주입온도는 1,570℃이고, 주입중량은 약 1.2톤으로 하였다.

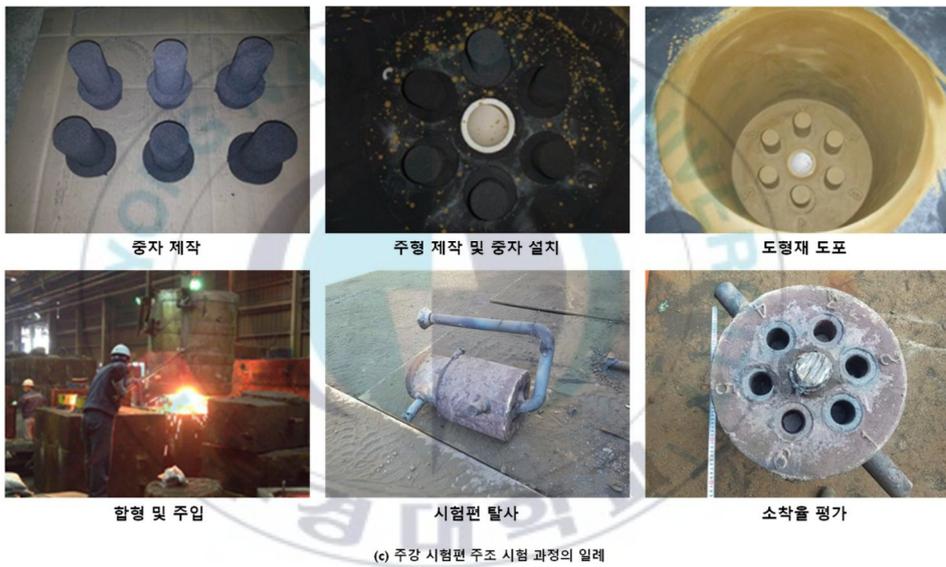
주조 후, 형해체 및 탈사된 주강시험편에 대해서 쇼트블라스트 전·후에 주물사 중자에 의해 형성된 오목부에 주물사 소착 결함 발생여부를 육안으로 관찰한 후, 증류수를 투입하고, 그 체적으로부터 비소착 부피를 측정하여, 소착 결함율을 아래 계산식으로 산출하였다.

$$\text{소착 결함율 (\%)} = \frac{\text{중자부 부피(ml)} - \text{비소착부 부피(ml)}}{\text{중자부 부피 (ml)}} \times 100$$



(a) 주강 시험편 도면

(b) 주강 시험편 주형 모식도



(c) 주강 시험편 주조 시험 과정의 일례

Fig. 5. An example of a cast steel test piece drawing, a mold schematic diagram, and a cast test test process for comparative evaluation of burn rate by casting sand

- (a) A cast steel test piece drawing
- (b) A mold schematic diagram
- (c) A cast test test process

III. 실험결과 및 고찰

3.1. 각종 주물사의 물성

표 4는 본 연구에서 비교 평가된 각종 주물사의 입도지수, 미분함량(#270 Pass), 형상계수, 탭밀도, 걸보기밀도, 내화도, 광물계, 화학성분을 나타낸 것이다.

Table 4. Evaluation results of various foundry sand properties

제품명	입도 지수(AFS GFN)	미분 함량 (wt.%) #270 pass	탭밀도	걸보기 밀도	주요 화학성분 (wt. %)								광물계 (XRD)	내화도 (SK, °C)	형상 계수
					Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	TiO ₂			
소결인공사 A	58.8	0.02	1.69	2.72	60.10	35.90	1.09	0.45	0.37	0.00	0.44	0.74	Mullite	SK37 (=1830°C)	0.95
소결인공사 B	66.3	2.80	1.71	2.65	62.17	33.03	1.40	0.01	0.20	0.22	0.26	2.71	Mullite	SK37 (=1840°C)	0.92
소결인공사 C1	65.8	0.03	1.62	2.66	43.20	47.70	5.01	0.53	0.16	0.68	0.79	0.87	Mullite, Quartz	SK32 (=1720°C)	0.93
소결인공사 C2	65.3	0.03	1.21	1.89	49.50	43.60	2.47	0.75	0.15	0.85	0.84	0.69	Mullite, Quartz	SK36 (=1810°C)	0.93
소결인공사 D1	42.8	0.05	1.86	2.93	68.20	19.30	3.26	0.17	0.71	1.39	2.44	3.12	Corundum, Mullite	SK28 (=1640°C)	0.92
소결인공사 D2	49.3	0.02	1.94	3.22	74.10	12.40	2.96	0.11	0.50	0.25	0.84	3.28	Corundum	SK37 (=1840°C)	0.94
용융인공사 A1	67.0	0.43	2.08	3.01	78.54	15.12	1.79	0.06	0.50	0.26	0.36	3.37	Corundum, Mullite	SK38 (=1850°C)	0.95
용융인공사 A2	62.8	0.10	1.98	2.95	73.55	20.75	2.01	0.01	0.31	0.21	0.33	2.83	Mullite	SK37 (=1830°C)	0.95
용융인공사 A3	65.0	0.90	2.01	2.99	77.86	14.23	3.05	0.00	0.14	0.06	0.19	4.31	Mullite	SK36 (=1810°C)	0.94
용융인공사 A4	63.6	0.96	2.03	2.94	75.03	18.78	2.28	0.01	0.28	0.18	0.31	3.13	Corundum, Mullite	SK36 (=1810°C)	0.95
용융인공사 B	64.8	0.20	1.82	2.74	61.20	32.30	1.57	0.06	0.21	0.30	1.24	2.87	Mullite	SK37 (=1830°C)	0.97
분쇄인공사 A	44.0	0.20	1.34	2.68	48.33	46.94	0.91	0.04	0.46	0.45	0.17	2.83	Mullite, Quartz	SK36 (=1810°C)	0.74
분쇄인공사 B	51.7	0.71	1.88	3.02	78.72	15.51	1.41	0.05	0.27	0.25	0.55	3.24	Corundum, Mullite	SK37 (=1830°C)	0.75
분쇄인공사 C	55.5	0.90	1.79	3.1	60.8	38.1	0.45	0.10	0.15	0.10	0.05	0.15	Mullite	SK38 (1860°C)	0.79
규사 (베트남)	58.43	0.34	1.63	2.46	0.63	98.98	0.01	0.01	0.15	0.02	0.01	0.02	Quartz	SK34+ (1,760°C)	0.82
규사 (호주)	34.9	0.09	1.59	2.45	0.67	99.12	0.01	0.01	0.14	0.02	0.01	0.02	Quartz	SK34+ (1,760°C)	0.83
크로마이트사 (남아공)	42.9	0.05	2.82	4.39	Cr ₂ O ₃ 51.4%, Fe ₂ O ₃ 19.3%, Al ₂ O ₃ 17%, MgO 9.9%, SiO ₂ 1%								Chromite	SK39 (1,880°C)	0.87

3.1.1. 입도지수 및 미분 함량

주물사의 입도분포, 입도지수, 미분함량은 주형의 통기도와 주형강도, 조형 작업성 및 주형충진도, 주물제품의 표면조도에 영향을 주는 매우 중요한 인자이다. 또한 미분함량은 주형의 통기도 뿐만 아니라, 주형강도에도 좋지 못한 영향을 미친다.

폐사(弊社)의 신사 구입사양인 입도지수(AFS GFN) 65 기준의 제품을 비교 평가하고자 하였으나, 소결인공사 D1 및 D2와 분쇄인공사 A, B, C와 규사, 크로마이트사의 경우에는 국내에 판매 또는 소개된 제품의 입도지수로서, 요구하는 입도지수 65의 제품을 평가하지 못하였다. 단, 입도분포와 입도지수의 경우, 주물사 제조과정의 분급 및 혼합공정에서 조정 가능한 것으로서, 제조사측에 구매사양 제시 또는 협의를 통하여, 변경 가능한 제조 사양이다.

주물사에 포함된 미분은 주형강도 하락의 원인이 될 수 있다. 또한, 주물사 사용 중 비산되어, 대기환경을 악화시키거나, 보건 측면에도 좋지 못하다. 따라서 주물사 선택에 있어, 주물사의 미분함량은 고려 되어야 할 사항이다.

미분함량(표준체 #270 통과)의 경우, 조립소결법 및 용융분사법으로 제조된 인공사 및 천연사와 비교하여 분쇄인공사의 미분함량이 높은 것으로 보아 분쇄공정상에 발생된 미분 유입에 의한 것으로 판단 된다.

3.1.2. 밀도

탭밀도는 주물사가 밀충진 되었을 때의 용적밀도이고, 겉보기밀도는 용적부피에서 공극을 제외한 겉보기부피를 기준으로 환산된 밀도이다. 용적밀도는 주물사 화학성분조성, 입도 분포 및 지수, 미분함량, 폐기공율과 관계되며, 겉보기밀도는 주물사 화학성분과 폐기공율과 개기공율과 관계되는 값이다. 특히, 용적밀도(탭밀도)는 주물사 입도분포에 따라 값이 변화한다. 즉, 동일한 종류의 주물사에서 입도지수 값이 높을수록 용적밀도(탭밀도)도 상승하게 된다. 따라서, 주물사 입자들 자체의 경중(輕重)은 겉보기밀도로 비교할 필요가 있다.

표 4에 각종 주물사의 탭밀도와 겉보기밀도 평가 결과를 나타내었다. 크로마이트사의 겉보기밀도가 4.39로써 가장 높은 값을 가지며, 소결인공사 C2를

제외한 그 외 알루미나실리카계의 인공사는 겔보기밀도가 천연 규사의 겔보기밀도 2.45~2.46에 비해 높았다. 또한, 소결인공사 대비 Al_2O_3 및 Fe_2O_3 함량이 높고, SiO_2 함량이 낮은 용융인공사의 겔보기밀도가 소결인공사의 겔보기밀도보다 높았다.

주물사로 주형을 제조할 때, 주물사는 주형의 체적을 채우는 구조재 역할을 한다. 따라서 동일한 체적의 주형을 제작할 때, 주물사 밀도가 낮을수록 작은 량의 주물사가 필요하며 즉, 주물사의 밀도는 주형제작에 필요한 주물사 사용량과 관계된다. 또한 주형제작에 사용된 주물사 중량에 따라 제작된 주형의 중량, 용융금속 주입 후, 형해체 전까지의 주형과 주물이 합산된 중량에 영향을 주므로, 주형을 운반 및 이송에 필요한 기중기, 지게차, 대차 등의 견인중량 또는 적재중량과 관계된다. 따라서, 인공사 선정에 있어, 밀도는 주조공장의 여건에 따라 고려되어야 될 사항이다.

3.1.3. 물질동정, 화학성분, 내화도

표 4에 본 연구에서 평가된 각종 주물사의 WD-XRF 화학성분 분석결과, XRD 물질동정을 통한 구성 광물상 분석결과, 내화도를 나타내었다.

베트남산 규사와 호주산 규사의 SiO_2 은 각각 98.98%, 99.12%이며, Al_2O_3 는 각각 0.63%, 0.67%, K_2O 은 0.15%, 0.14%이며, 그 외 Fe_2O_3 , Na_2O , MgO , CaO , TiO_2 를 각각 0.01 ~ 0.02%를 함유하고 있다. 미국주강협회 (Steel Founder's Society of America) 세척·건조사 규격[37]의 화학성분 사양인 SiO_2 96% 이상, Fe_2O_3 0.5% 이하, CaO 0.6% 이하를 충족 한다.

남아공산 크로마이트사는 Cr_2O_3 51.4%, Fe_2O_3 19.3%, Al_2O_3 17%, MgO 9.9%, SiO_2 1.0%로써, 미국주강협회 크로마이트사 규격[38]의 화학성분 사양인 Cr_2O_3 44% 이상, Fe_2O_3 26% 이하, SiO_2 3%이하, CaO 1% 이하를 충족 한다.

본 연구에서 평가된 소결인공사, 용융인공사, 분쇄인공사 모두 주성분은 Al_2O_3 및 SiO_2 로써, 알루미나실리카계 내화물 성분계에 속한다. 소결인공사 A는 Al_2O_3 60.1%, SiO_2 35.9%, Fe_2O_3 1.09%, TiO_2 0.74% 이며, 그 외 Na_2O , K_2O , CaO 는 각각 0.45%, 0.37%, 0.44% 이다. 반면, 소결인공사 B는

Al_2O_3 62.17%, SiO_2 33.03%, Fe_2O_3 1.40%, TiO_2 2.71% 이며, 그 외 Na_2O , K_2O , CaO , MgO 는 각각 0.01%, 0.2%, 0.26%, 0.22%로써, 소결인공사 A와 비교하여, 화학성분 조성이 일부 상이함을 알 수 있다. 즉, 동일한 제조공법인 분무건조소결법으로 제조되었지만, 소결인공사 A의 원료광물은 고령토와 알루미나, 소결인공사 B의 원료광물은 보크사이트와 고령토로써, 원료광물의 광종에 기인한 화학성분차이 따라 인공사의 화학성분이 상이한 것으로 판단 된다.

펠릿화소결법으로 제조된 소결인공사 C1, C2, D1, D2의 화학성분은 각각 Al_2O_3 는 43.2%, 49.5%, 68.2%, 74.1%이고, SiO_2 는 47.7%, 43.6%, 19.3%, 12.4%이며, Fe_2O_3 는 5.01%, 2.47%, 3.26%, 2.96%이고, Na_2O 는 0.53%, 0.75%, 0.17%, 0.11%이고, K_2O 는 0.16%, 0.15%, 0.71%, 0.5%이며, MgO 는 0.68%, 0.85%, 1.39%, 0.25%이고, CaO 는 0.79%, 0.84%, 2.44%, 0.84%, TiO_2 0.87%, 0.69%, 3.12%, 3.28% 로써, 인공사 제품별 화학성분 조성차이가 크다. 소결인공사 C1 및 C2의 원료광물은 플린트크레이이며, 소결인공사 D1 및 D2의 원료광물은 보크사이트이다. 따라서 원료광물의 광종 및 등급차이에 기인한 화학성분차이에 의한 것으로 판단 된다.

아크용사법으로 제조된 용융인공사 A1, A2, A3, A4의 화학성분은 각각 Al_2O_3 는 78.54%, 73.55%, 77.86%, 75.03%이고, SiO_2 는 15.12%, 20.75%, 14.23%, 18.78%이며, Fe_2O_3 는 1.79%, 2.01%, 3.05%, 2.28%이고, Na_2O 는 0.06%, 0.01%, 0.01%, 0.01%이고, K_2O 는 0.5%, 0.31%, 0.14%, 0.28%이며, MgO 는 0.26%, 0.21%, 0.06%, 0.18%이고, CaO 는 0.36%, 0.33%, 0.19%, 0.31%, TiO_2 3.37%, 2.83%, 4.31%, 3.13% 이다. SiO_2 , Fe_2O_3 , TiO_2 함량이 높을수록 Al_2O_3 함량이 낮은 경향이 있다. 동일한 제조법 및 원료광물의 광종으로 제조되었으나, 제조된 인공사 제품의 화학성분차이의 발생원인은 원료광물의 보크사이트 산지 및 등급 차이에 의한 것으로 판단 된다.

용융인공사 B의 화학성분은 Al_2O_3 61.7%, SiO_2 32.8%, Fe_2O_3 1.57%, Na_2O 0.06%, K_2O 0.21%, MgO 0.3%, CaO 0.24%, TiO_2 2.87%로써, 소결인공사 B와 유사한 화학성분 조성을 가진다. 즉, 제조공법은 상이하나, 원료광물이 보크사이트와 고령토로써, 광종이 동일하고, 유사한 화학성분 조성을 가

지는 광물이 사용된 것으로 판단 된다.

분쇄인공사 A, B, C의 화학성분은 각각 Al_2O_3 는 48.33%, 78.72%, 60.8% 이고, SiO_2 는 46.94%, 15.51%, 38.1%이며, Fe_2O_3 는 0.91% 1.41%, 0.45% 이고, Na_2O 는 0.04%, 0.27%, 0.15%, K_2O 는 0.46%, 0.27%, 0.15%이며, MgO 는 0/45%, 0.35%, 0.1%이고, CaO 는 0.17%, 0.55%, 0.05%이며, TiO_2 는 2.83%, 3.24%, 0.15% 이다. 분쇄인공사 A와 B의 원료광물은 보크사이트 및 고령토이며, 분쇄인공사 C의 원료광물은 홍주석으로 상이 함에 따라 화학 성분도 상이한 것으로 판단 된다.

위 결과를 통해 인공사의 화학성분은 제조법 보다 원료광물의 화학성분에 의해 결정 되며, 또한, 원료광물의 광종 및 등급에 따라서도 화학성분에 차이가 있는 것으로 판단 된다.

인공사의 원료광물로 보크사이트가 단독 사용되었을 때, Al_2O_3 함량이 높으며, 원료광물로 보크사이트가 사용된 경우, 다른 원료광물일 사용된 인공사 대비 높은 TiO_2 함량을 나타내었다. 알루미늄 및 홍주석이 원료광물로 사용된 인공사가 Al_2O_3 와 SiO_2 를 제외한 Fe_2O_3 , TiO_2 등의 기타성분의 함량이 낮았다.

XRD 물질동정을 통해서, 각종 주물사의 결정질광물(結晶質鑛物, crystalline mineral) 조성에 대한 분석 결과, 베크남산 규사 및 호주산 규사의 광물상(鑛物相, mineral facies)은 석영(quartz, SiO_2), 남아공산 크로마이트사는 광물상은 크로뮴철석(chromite, FeCr_2O_4)로 분석 되었고, 소결인공사 A와 B, 용융인공사 A2, A3 및 B, 분쇄인공사 C의 광물상은 물라이트(mullite, $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)로 분석 되었으며, 소결인공사 C1과 C2 및 분쇄인공사 A의 주요 구성 광물상은 물라이트이며, 석영이 일부 포함된 것으로 분석 되었으며, 소결인공사 D2의 광물상은 코런덤(corundum, Al_2O_3)으로 분석 되었고, 소결인공사 D1, 용융인공사 A1, 용융인공사 A4, 분쇄인공사 B는 코런덤과 물라이트가 혼재된 광물상으로 분석되었다. 단, 용융분사법으로 제조된 인공사는 결정 피크의 세기가 낮았다.

아크용사법으로 제조된 인공사는 용융 분사 시에 급랭으로 인해 재결정화 하기 전에 응고함에 따라 비결정질상이 많고, 그에 따라 재가열 시, 재결정화

에 의해 코런덤양이 증가한다고 알려져 있다 [23]. 따라서, 아크용사법 및 분말식 화염용사법으로 제조된 용융인공사 A1~4 및 용융인공사B도 비결정질 (非結晶質, noncrystalline. Amorphous)를 함유하고 있는 것으로 판단 된다.

정량 X선 회절분석에 의한 인공광물 혼합시료에 대한 결정질광물 및 비결정질실리카 조성 분석[38] 정량 X선 회절분석에 의한 소결광 구성광물 분석 [39], 정량 X선 회절분석에 의한 점토광물 분석[40], 정량 X선 회절분석에 의한 인공사 분석[26]과 불산을 이용한 화학적 정량법으로 인공사에 대한 결정질광물 및 비결정질광물 조성에 대한 정량평가 방법[S14]이 보고 되었으나, 본 연구에서는 각종 인공사의 결정질광물 및 비결정질광물 함량에 대한 정량 평가는 수행되지 못하였다. 각종 인공사에서 상온 및 온도변화에 따른 결정질광물 및 비결정질광물의 함량에 대한 후속연구가 필요하다.

한편, 각종 주물사의 결정질광물 성분인 코런덤, 플라이트, 석영에 대한 특성을 알아보면, 코런덤은 α -알루미나로써 1,000℃ 이상에서 안정한 알루미나의 유일한 형태의 광물상이며, 순수한 코런덤의 내화도는 SK42(2,000℃)이다. [41] 플라이트는 자연상태로는 발견되기 흔하지 않지만, 전통요업 분야에서 매우 중요한 광물상으로 내화물, 화학용자기, 전자재료용 부품의 소재로써 널리 사용된다. [42, 43] 플라이트는 고용점($1,828 \pm 10^\circ\text{C}$)을 갖고, 내 Creep성이 뛰어나며, 고온에서 산화에 의한 열화가 없으며, 경량으로 열팽창·열전도율이 작으며, 화학적으로 안전하고, 내식성이 뛰어나며, 전기절연성이 우수하다. [42, 43, 44] 단일상의 플라이트 합성은 1,700℃ 이상의 고온에서 장시간 소결할 때만 가능하며, 그 이하의 온도에서는 미반응 Silica와 Corundum이 존재하여, 고온특성 및 물리적 특성을 저하시킨다. [44] 순수한 Quartz(석영)의 비중은 2.65이며, Quartz의 안정온도는 870℃까지 이며, 이 온도에서부터 1,470℃까지는 Tridymite의 안정온도 범위이며, 1,470℃ 이상에서 Crystobalite로 안정온도이다. Quartz는 온도상승 및 상변태에 따른 용적팽창도 일어난다. [45] 따라서, 인공사의 결정질광물 조성으로 석영을 함유한 경우 바람직하지 않고, 코런덤 단일상 또는 플라이트 단일상 또는 코런덤 및 플라이트 혼합상인 경우가 내화도가 양호 할 것으로 판단된다. 내화도 평가 결과에서도 광물조성에서 석영을 포함한 베트남산규사, 호주산규사, 소결

인공사 C1, 소결인공사 C2 및 D1, 분쇄인공사 A의 내화도가 코런덤 단일상 또는 플라이트 단일상 또는 코런덤 및 플라이트 혼합상을 가지는 인공사 보다 낮았다.

각종 주물사의 내화도 평가 결과, 크로마이트사의 내화도가 SK39(1,880℃)로써 가장 높고, 소결인공사 C1 및 D1를 제조한 인공사의 내화도는 SK36(1,810℃)~SK38(1,860℃)로써, 베트남산 규사 및 호주산 규사의 내화도 SK34+(1,760℃) 대비 높은 값을 나타내었다. 반면, 소결인공사 C1 및 D1의 내화도는 각각 SK32(1,720℃), SK28(1,640℃)로써, 천연규사의 내화도보다 낮았다.

인공사에 있어, 원료광물 종류 및 제조공정에 따라 변화하는 인공사의 화학 성분 및 광물조성은 내화도, 밀도 등의 물리적 성질에 직접적으로 관계 된다. 주입금속 재질에 따라 상이하나, 고온의 금속용탕이 주입되는 주형은 고온에 노출되므로, 주형을 구성하는 주재료인 주물사의 내화도가 중요하다. 내화물의 내화도는 화학성분조성, 광물조성 등과 관계된다. 알루미나실리카계 인공사와 유사한 화학성분계인 점토질 및 고알루미나질 내화벽돌의 내화도는 SiO_2 와 Al_2O_3 이외의 성분이 일정할 때, Al_2O_3 가 많을수록 높은 것으로 알려져 있다 [45]. 하지만, 인공사의 화학성분조성에 따른 내화도관계에 대한 연구는 부족하다. 따라서, 인공사의 주요 화학성분에 따른 내화도와의 관계를 고찰해 볼 필요가 있다.

그림 6은 각종 인공사의 Al_2O_3 함량과 내화도의 관계를 그래프로 도시한 것이다.

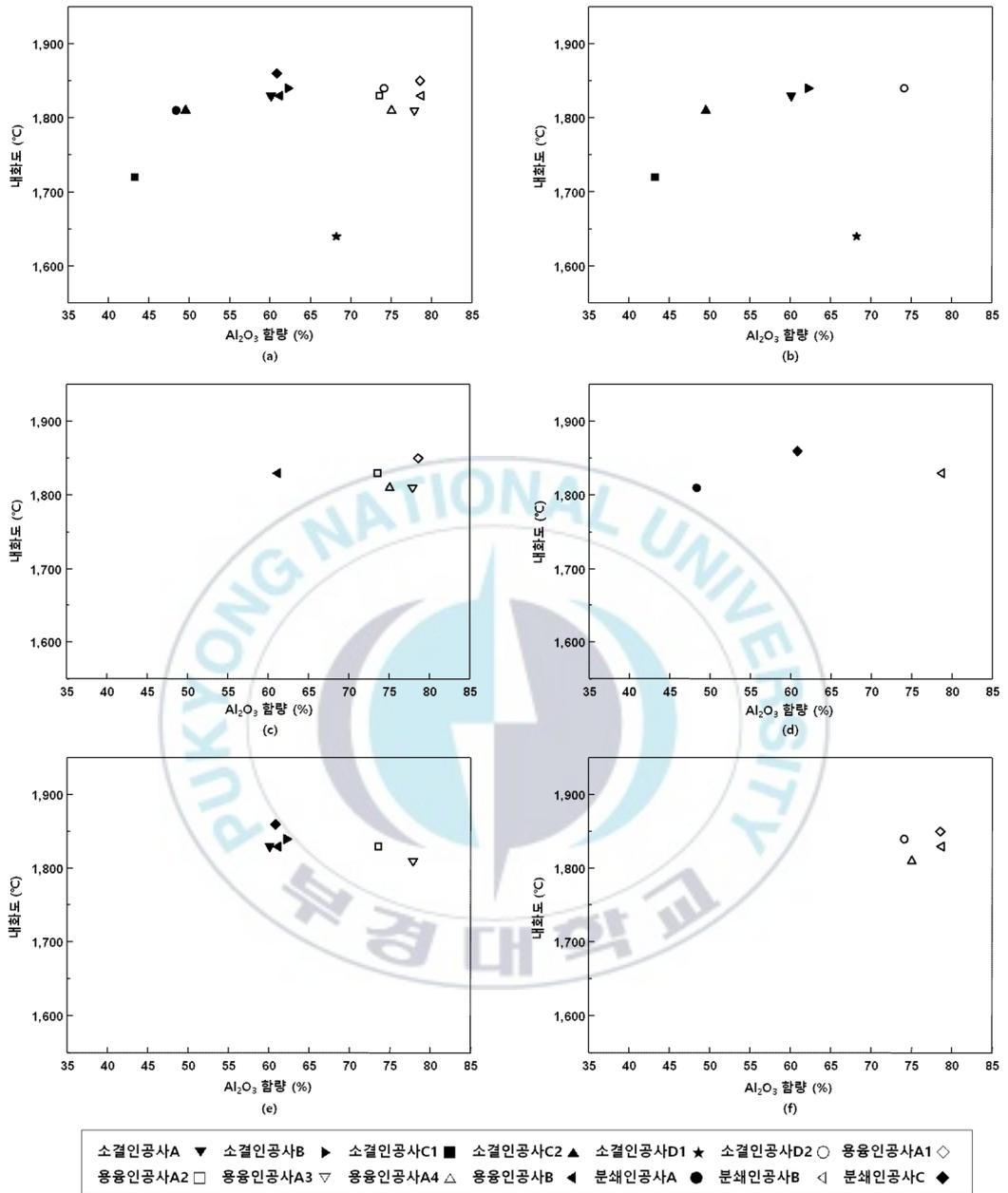


Fig. 6. Al_2O_3 content of various artificial sand and refractoriness relationship graph

- (a) Al_2O_3 content and refractoriness of various artificial sand
- (b) Al_2O_3 content and refractoriness of artificial sand manufactured by granulation and sintering
- (c) Al_2O_3 content and refractoriness of artificial sand manufactured by melt spraying
- (d) Al_2O_3 content and refractoriness of artificial sand manufactured by the crushing method
- (e) Al_2O_3 content and refractoriness of artificial sand which is a single mineral composition of mullite
- (f) Al_2O_3 content and refractoriness of artificial sand with mineral composition of corundum or corundum + mullite



표 4 및 그림 6-(a)를 통해서, Al_2O_3 함량이 48.33% 이상인 인공사의 내화도는 SK36(1,810℃)이상 이며, Al_2O_3 함량이 60.1~78.54% 범위에 있는 인공사의 내화도는 SK37(1,830℃)~38(1,860℃)이다. 즉, Al_2O_3 가 일정 함량 이상일 경우 인공사의 내화도가 높다고 할 수 있다. 소결인공사 C1의 Al_2O_3 는 43.2%로 낮고, Fe_2O_3 는 5.01%로 그 외 인공사 대비하여 높아 내화도가 SK32(1,720℃)로 낮은 값을 보인다. 또한 소결인공사 D1의 경우, Al_2O_3 함량이 68.2%이나 내화도가 SK28(1,640℃)로 낮게 측정되었다. 소결인공사 D1의 Fe_2O_3 는 3.26%이며, K_2O 는 0.75%이고, MgO 는 1.39%이며, CaO 는 2.44%로써, 그 외 인공사에 대비하여 높은 것으로 보아 Fe_2O_3 , K_2O , MgO 및 CaO 가 인공사의 내화도를 저하시키는 것으로 판단된다.

동일한 제조공법으로 제조된 인공사의 Al_2O_3 함량과 내화도의 관계는 그림 6-(b)와 6-(c)에 나타낸 바와 같이, 소결인공사 및 분쇄인공사에서는 Al_2O_3 함량이 증가함에 따라 내화도가 증가하는 경향(단, 소결인공사 D1 제외)을 나타내었다. 용융인공사의 경우, Al_2O_3 함량이 가장 낮은 값이 61.7%로써, 그림 6-(d)에 나타낸 바와 같이, 용융인공사에서는 Al_2O_3 함량과 내화도와의 관계를 특정할 만한 경향을 확인할 수 없었다. 단, 상대적으로 내화도가 낮은 용융인공사 A3 및 A4의 경우, Fe_2O_3 는 각각 3.05%, 2.28%, TiO_2 는 각각 4.31%, 3.13%로써, 그 외 용융인공사와 비교하여 높은 값을 나타내므로, Fe_2O_3 및 TiO_2 는 용융인공사의 내화도를 저하 시키는 것으로 판단된다.

그림 6-(e)는 결정질광물 조성이 플라이트 단일상인 인공사의 Al_2O_3 함량과 내화도의 관계를 도시한 것이다. Al_2O_3 함량이 가장 높지만, Fe_2O_3 및 TiO_2 함량이 높아 내화도가 저하되어, SK36(1,810℃)인 용융인공사 A3 제외하고, 앞서 서술한 바와 같이 내화도가 SK37(1,830℃) 이상으로 양호한 Al_2O_3 함량 범위에 있으며, 내화도는 SK37(1,830℃)~SK38(1,860℃)이다. 그림 6-(f)는 결정질광물 조성이 코런덤 단일상이거나, 코런덤과 플라이트가 혼재된 인공사의 Al_2O_3 함량과 내화도의 관계를 도시한 것이다. 내화도가 양호한 Al_2O_3 함량 범위에 있으나, Fe_2O_3 및 TiO_2 함량이 높은 용융인공사 A4를 제외하고, 내화도가 SK37(1,830℃) 이상으로 양호한 Al_2O_3 함량 범위에 있으며, 내화도는 SK37(1,830℃)~SK38(1,850℃)이다.

그림 7은 각종 인공사의 SiO_2 함량과 내화도의 관계를 그래프로 도시한 것이다. 표 4 및 그림 7-(a)를 보면, SiO_2 함량이 46.94% 이하인 인공사의 내화도는 SK36(1,810°C)이상이며, SiO_2 함량이 12.4~38.1% 범위에 있는 인공사의 내화도는 SK37(1,830°C)~38(1,860°C)이다. 즉, SiO_2 의 함량 감소에 따라 Al_2O_3 가 함량이 증가 되는 경향으로 인해, 인공사의 내화도가 높다고 할 수 있다. 단, 앞서 언급한 바와 같이, 소결인공사 C1은 Al_2O_3 함량이 낮고, Fe_2O_3 함량이 높고, 소결인공사 D1는 Fe_2O_3 , K_2O , MgO 및 CaO 가 높아 그 외 인공사와 달리 내화도가 낮은 것으로 판단된다.

동일한 제조공법으로 제조된 인공사의 SiO_2 함량과 내화도의 관계는 그림 7-(b)와 7-(c)에 나타난 바와 같이, 소결인공사 및 분쇄인공사에서는 SiO_2 함량이 감소함에 따라 내화도가 증가하는 경향(단, 소결인공사 D1 제외)을 나타내었다.

용융인공사의 경우, SiO_2 함량이 가장 높은 값이 32.3%로써, 그림 7-(d)에 나타난 바와 같이, 용융인공사에서는 SiO_2 함량과 내화도와의 관계를 특정할 만한 경향을 확인할 수 없었다. 단, 앞서 언급한 바와 같이 상대적으로 내화도가 낮은 용융인공사 A3 및 A4는 Fe_2O_3 및 TiO_2 가, 그 외 용융인공사와 비교하여 높은 값을 가져 내화도가 저하된 것으로 판단 된다.

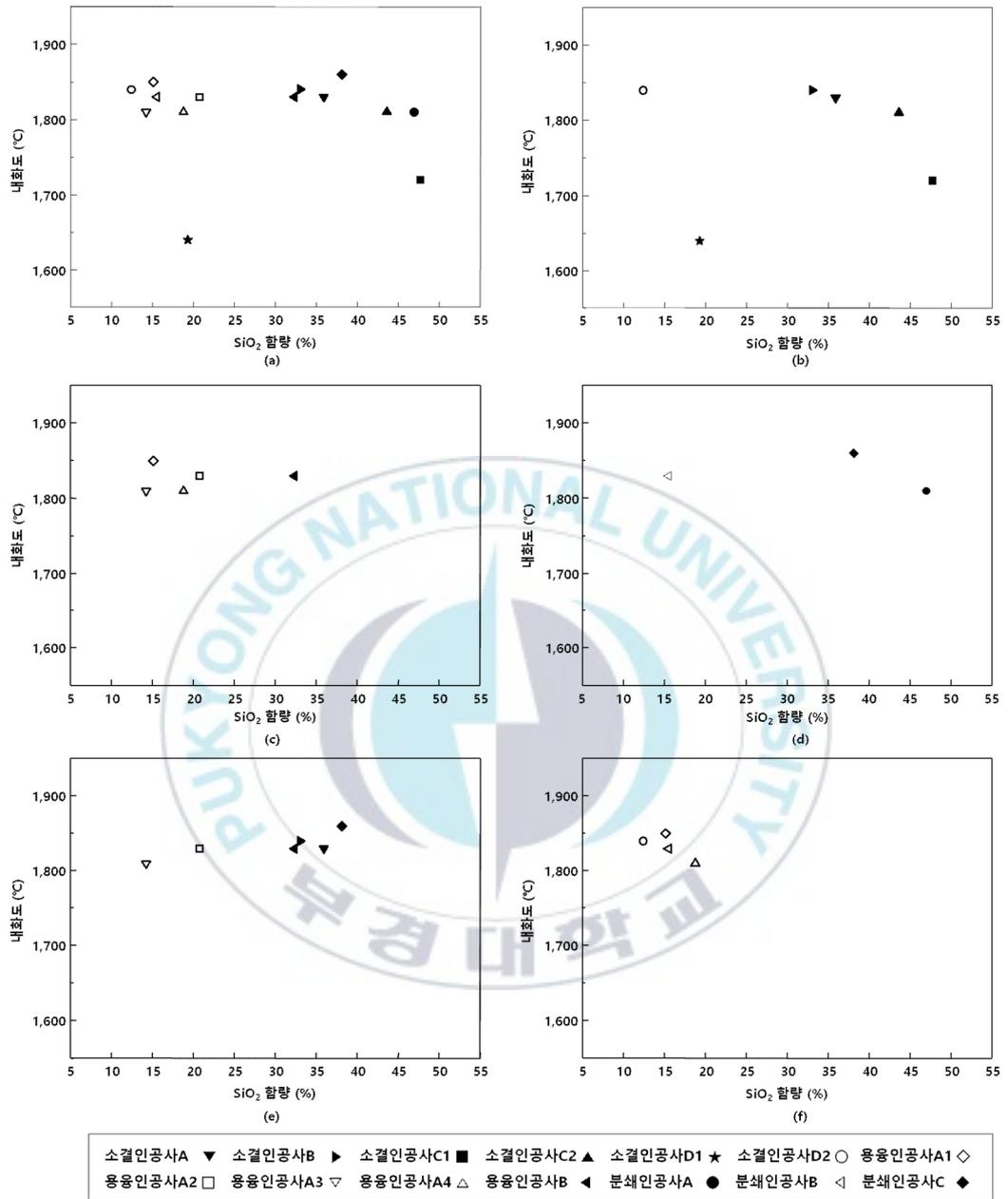


Fig. 7. SiO₂ content of various artificial sand and refractoriness relationship graph

- (a) SiO₂ content and refractoriness of various artificial sand
- (b) SiO₂ content and refractoriness of artificial sand manufactured by granulation and sintering
- (c) SiO₂ content and refractoriness of artificial sand manufactured by melt spraying
- (d) SiO₂ content and refractoriness of artificial sand manufactured by the crushing method
- (e) SiO₂ content and refractoriness of artificial sand which is a single mineral composition of mullite
- (f) SiO₂ content and refractoriness of artificial sand with mineral composition of corundum or corundum + mullite

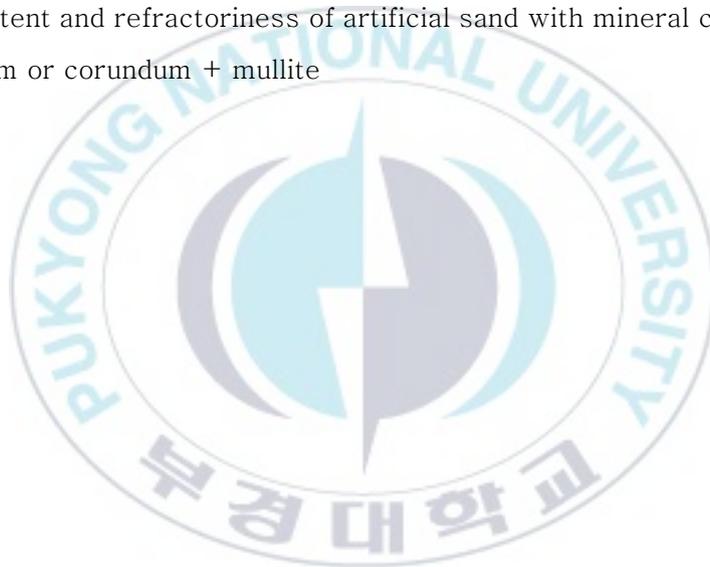


그림 7-(e)는 결정질광물 조성이 플라이트 단일상인 인공사의 SiO_2 함량과 내화도의 관계를 도시한 것이다. SiO_2 함량이 가장 낮지만, Fe_2O_3 및 TiO_2 함량이 높아 내화도가 상대적으로 낮은 용융인공사 A3 제외하고, 앞서 서술한 바와 같이 내화도가 SK37(1,830℃) 이상으로 양호한 SiO_2 함량 범위에 있으며, 내화도는 SK37(1,830℃)~SK38(1,860℃)이다. 그림 7-(f)는 결정질광물 조성이 코런덤 단일상이거나, 코런덤과 플라이트가 혼재된 인공사의 SiO_2 함량과 내화도의 관계를 도시한 것이다. 내화도가 양호한 SiO_2 함량 범위에 있으나, Fe_2O_3 및 TiO_2 함량이 높은 용융인공사 A4를 제외하고, 내화도가 SK37(1,830℃) 이상으로 양호한 SiO_2 함량 범위에 있으며, 내화도는 SK37(1,830℃)~SK38(1,850℃)이다.

그러므로 알루미나실리카계 인공사의 내화도는 Al_2O_3 함량 증가 및 SiO_2 함량 감소에 따라 증가하는 경향이 있으나, Al_2O_3 함량 60.1% 이상(시험사 기준)과 SiO_2 함량 38.1%이하(시험사 기준)일 때, 내화도가 SK37(1,830℃)~SK38(1,850℃)로써 양호하며, Fe_2O_3 , K_2O , MgO , CaO 및 TiO_2 등의 함량이 높을수록 내화도가 저하되었다. 단, 주성분이 Al_2O_3 및 SiO_2 인 인공사에서 Fe_2O_3 , K_2O , MgO , CaO 및 TiO_2 등의 함량에 따른 내화도 및 열적특성에 대한 명확한 규명을 위해서는 후속연구가 필요하다.

3.1.4. 형상 계수 및 구형도

점결제를 사용하여 주물사로 주형을 제작할 때, 주물사 형상은 주형강도, 통기도에 영향을 준다. 특히, 주물사 입자의 형상이 구형에 가깝고, 표면이 평활할수록, 그렇지 못한 주물사에 보다 높은 주형강도를 나타낸다. 따라서 인공 주물사 선택에 있어 주물사 형상계수 및 구형도에 대한 비교평가가 필요하다.

그림 8은 본 연구에서 비교 평가된 각종 주물사의 SEM 사진이다. 소결인공사 및 용융인공사는 구형의 형상을 나타내며, 소결인공사에 비해 용융인공사의 표면이 평활하고, 진구에 가까운 특징이 있었다. 반면, 소결인공사의 경우, 표면에 평활하지 못하고, 요철이 많고, 제품에 따라 미세한 기공이 분포하고 있었다.

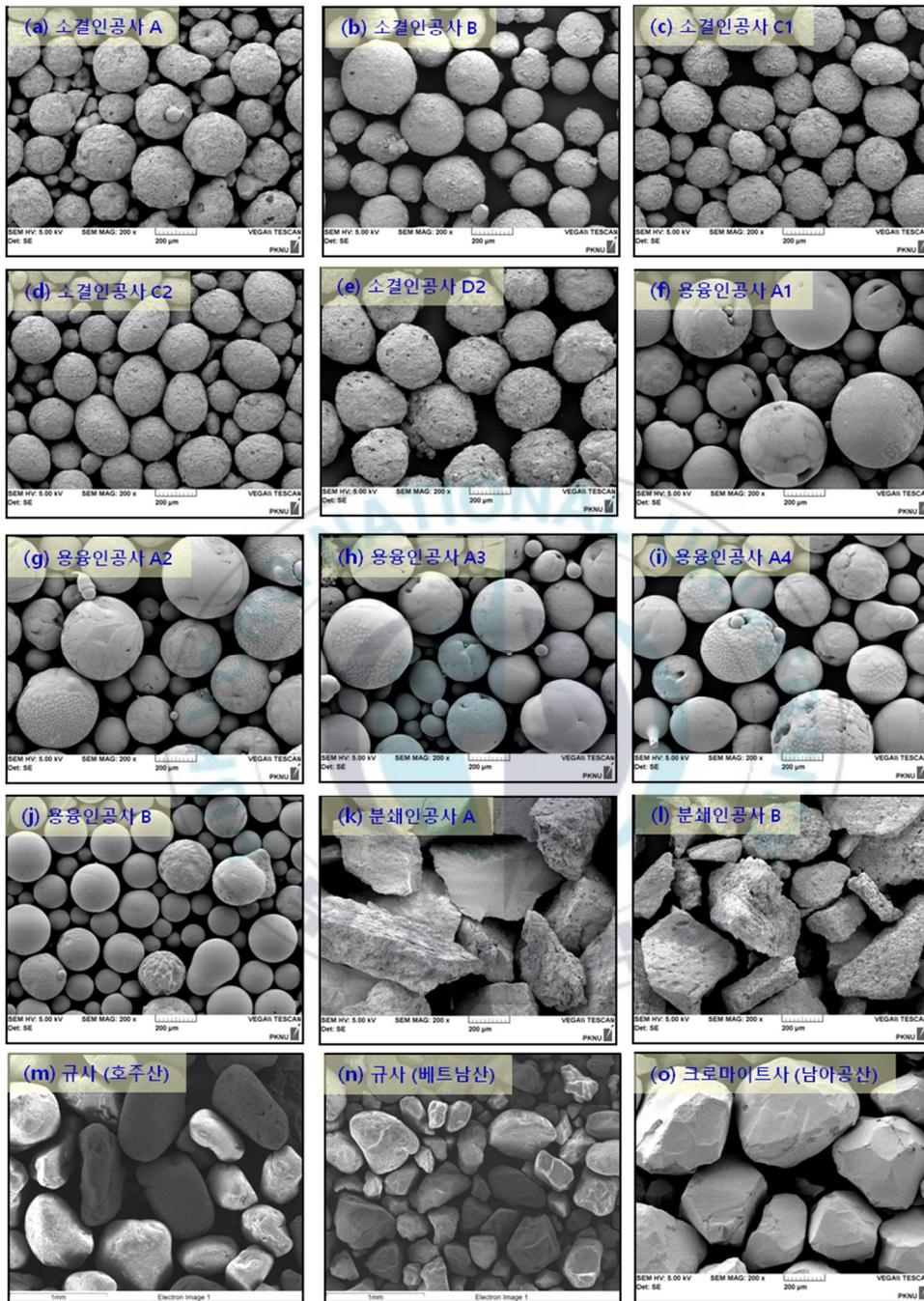


Fig. 8. SEM observation photos of various foundry sands

표 4에 나타낸 바와 같이, 소결인공사의 형상계수는 0.92 ~ 0.95 이고, 용융인공사의 형상계수인 0.94 ~ 0.97 으로써, 소결인공사 대비 용융인공사의 구형도가 높았다. 반면, 분쇄인공사의 형상계수는 0.74 ~ 0.79로써, 천연사(규사, 크로마이트사)의 형상계수 0.82 ~ 0.87 보다 낮았으며, SEM 관찰 결과상으로도 천연사의 형상이 준각형 또는 환형인데 반해, 분쇄인공사의 형상은 각형이며, 예각을 가지고 있거나, 표면 요철이 많은 특징을 나타내었다. 이러한 특징은 인공사 제조공법 차이에 의한 것으로 판단 된다.

구형의 인공사의 형상계수는 분말식화염용사법으로 제조된 용융인공사 B, 아크용사법으로 제조된 용융인공사 A1~4, 분무건조소결법으로 제조된 소결인공사 A 및 B, 펠릿화소결법으로 제조된 소결인공사 C1~2 및 D1~2 순으로 1에 가까운 형상계수 값을 나타내었다.

또한, 그림 9의 (a)와 (d)에 나타낸 바와 같이 분무건조소결법으로 제조된 소결인공사 A 및 B, 아크용사법으로 제조된 용융인공사 A1~4, 분말식화염용사법으로 제조된 용융인공사 B에서는 입자간 결합된 형상의 주물사 입자가 관찰되었다. 이러한 입자가 발생된 원인은 용사법에서는 용융 분사된 액상의 입자가 비행과정 중에 결합되면서 응고되어 생성된 것이며, 분무건조법에서는 콜로이드상태의 입자가 비행과정 중에 결합되면서 건조·성형되거나, 성형된 입자간 결합에 의해 생성된 것으로 판단 된다. 그림 9의 (e)~(k)는 용융인공사 A1~4에서 관찰된 독특한 형상의 주물사 입자들 나타낸 것으로써, 혜성처럼 꼬리가 달린 형상, 땅콩형상 등의 독특한 형상의 주물사입자의 생성 원인도 용탕이 비산되어 비행하면서 발생된 형상으로 판단되나, 용탕의 화학성분 즉, 원료광물의 화학성분, 용탕온도 등에 의한 영향 등에 따른 발생원인에 대해서는 후속 연구가 요구된다.

그림 9의 (i)는 용융인공사 B에서 관찰된 미용융된 각형의 원료분말이 용융된 액상의 입자와 결합되어 발생된 것으로 판단된다.

이와 같이 독특한 형상의 주물사 입자가 소량 함유됨에 따라, 최종 제품의 형상계수(구형도)를 낮추게 된다. 단, 그림 8에서 볼 수 있듯이, 용융분사법으로 제조된 용융인공사가 조립소결법으로 제조된 소결인공사 대비 구형도가 우수하다.

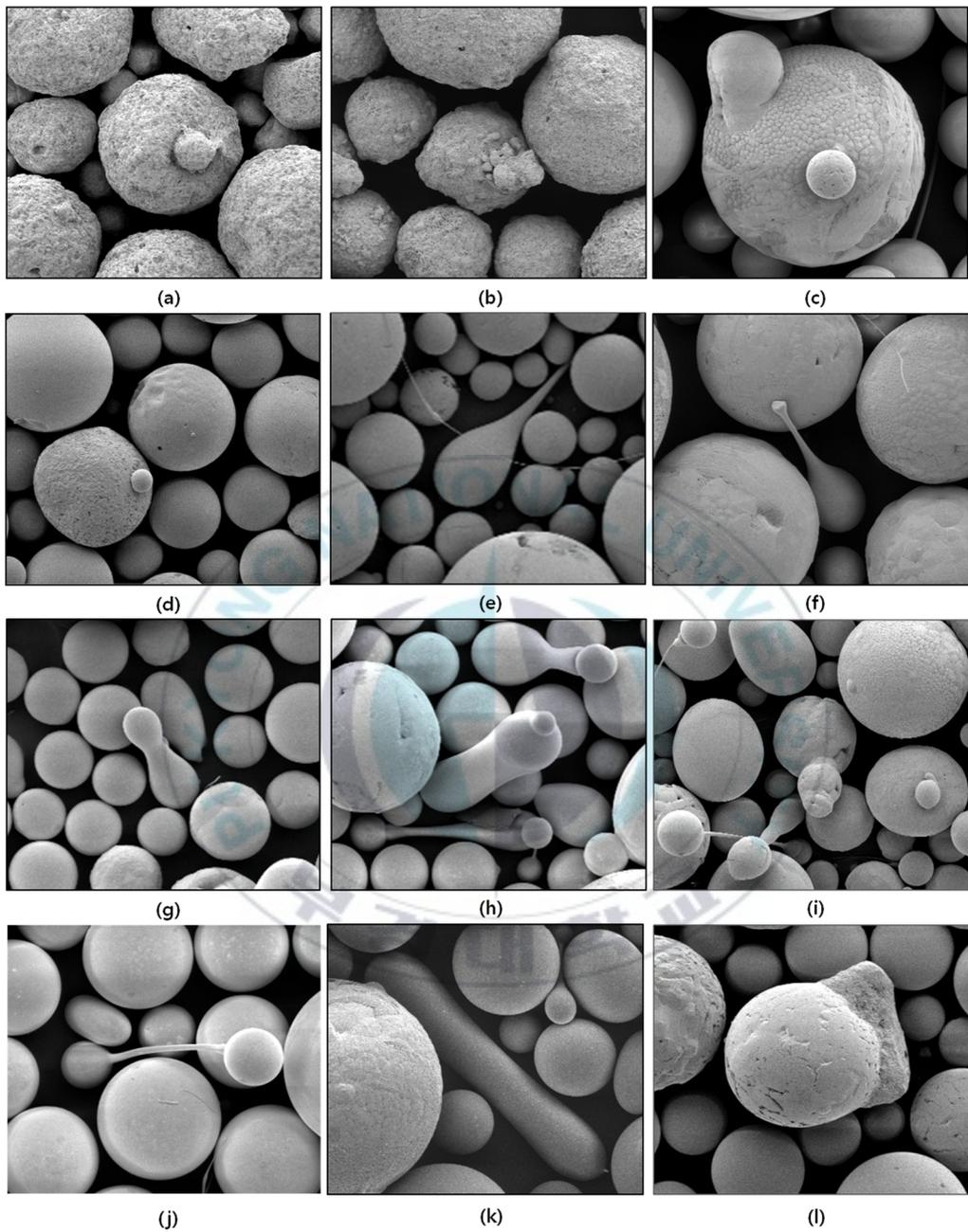


Fig. 9. SEM observation results of sintered artificial sand manufactured by the spray drying sintering method and molten artificial sand manufactured by the melt spraying method

- (a) Sintered artificial sand A, (b) Sintered artificial sand B,
(c) (f) (g) Molten artificial sand A3, (d) (i) Molten artificial sand B
(e) (j) Sintered artificial sand A2, (h) (i) Sintered artificial sand A4
(k) Molten artificial sand A1



3.2. 주형강도 특성

주형을 만들 때 사용되는 점결제는 주물사를 결합시키는 결합제의 용도로 중자 및 주형을 조형하는 과정에서 형틀의 모양을 잡아주는 중요한 역할을 한다. [13] 주형에서 특히 용융금속과 접하는 주형의 표면이 충분히 강하지 못하면, 주입된 용융금속에 의해 파손되어, 주물의 형상이 원하는 형상에서 벗어나게 되어 불량 제품이 된다. [37] 따라서, 사형주조에 있어, 주형강도는 중요하게 관리되어야 할 공정조건이다. 산업현장에서 주형강도는 입도분포, 미분함량, 잔류점결제 함량(재생사의 경우), 수분함량, 입형의 형상, 사온(자경성점결제의 경우) 등의 주물사 물성, 점결제 종류 및 첨가량, 조형설비의 혼련 성능 및 이상 유·무, 조형사의 다짐 방식 및 다짐 정도 등의 다양한 조형작업의 공정조건에 따라 달라진다. 따라서 일정한 주형강도 확보를 위해, 위와 같은 다양한 공정변수에 대한 관리를 위해 정기적인 주물사 시험, 조형설비 및 주물사 재생설비 점검이 필요하다. 또한, 주물사 물성을 제외한 조형공정 변수가 일정할 때, 요구하는 수준의 주형강도 확보를 위해서 주물사의 종류 및 품질에 따라 점결제 비율이 달라진다. 점결제 비율(사용량)은 주조품 제조원가, 주입 시의 주형의 가스발생량, 회수사 및 재생사의 잔류점결제 함량 등과 관계된다. 따라서 요구하는 주형강도가 확보되는 수준에서 점결제 사용량을 줄이기는 것이 바람직하다.

구형의 인공사는 천연규사 대비 높은 주형강도가 발현 되는 것으로 알려져 있다. [10, 13, 32, 34]

국내의 경우, 주강품 사형주조를 위한 점결제로 알카리자경성페놀수지가 주로 사용되고 있으며, 당사에서도 알카리자경성페놀수지주형법으로 대형주강품을 제조하고 있다. 따라서, 각종 주물사의 알카리자경성페놀수지 점결제로 조형하였을 때, 주형강도를 비교평가 하였다.

앞서 기술한 바와 같이, 주물사는 주형의 체적을 채우는 구조재 역할을 하며, 동일한 체적의 주형을 제작할 때, 주물사 밀도에 따라 사용량이 달라진다. 따라서, 주물사에 대한 중량비로 점결제 비율을 동일하게 할 경우, 동일한 체적의 주형을 제작할 때, 사용되는 점결제 사용량도 주물사 밀도에 따라 달라지게 된다. 즉, 주물사 밀도가 증가할수록, 점결제 사용량도 비례하여 증가하

게 된다. 그러므로 동일한 체적의 주형 제작에 사용되는 점결제 비율을 동일하게 적용하여 주형강도가 비교평가 되어야, 주물사 종류에 따라 예상되는 점결제 사용량 증감이 비교 될 수 있다. 그림 10은 본 연구에서 평가된 주물사의 단위체적(1L)당 알카리자경성페놀수지 점결제를 17.94g 첨가(ester 류 경화제 첨가량은 점결제 중량비의 20%)하여, 조형한 후 24시간이 경과 후, 주형의 압축강도를 도시험한 것이다. 주형강도가 높은 순으로 나열하면, 용융인공사 A2 32.3 Kgf/cm², 용융인공사 B 30.2Kgf/cm², 용융인공사 A1 30.2Kgf/cm², 용융인공사 A4 28.0Kgf/cm², 용융인공사 A3 24.5Kgf/cm², 크로마이트사 22.8Kgf/cm², 소결인공사 C2(제외 고려 필요) 13.1Kgf/cm², 소결인공사 D1 12.7Kgf/cm², 소결인공사 B 8.4Kgf/cm², 규사 6.0Kgf/cm², 소결인공사 D2 4.2Kgf/cm², 소결인공사 C 1 3.9Kgf/cm², 분쇄인공사 B 1.3Kgf/cm²이며, 분쇄인공사 A의 경우 주형강도가 발현되지 못하였다.



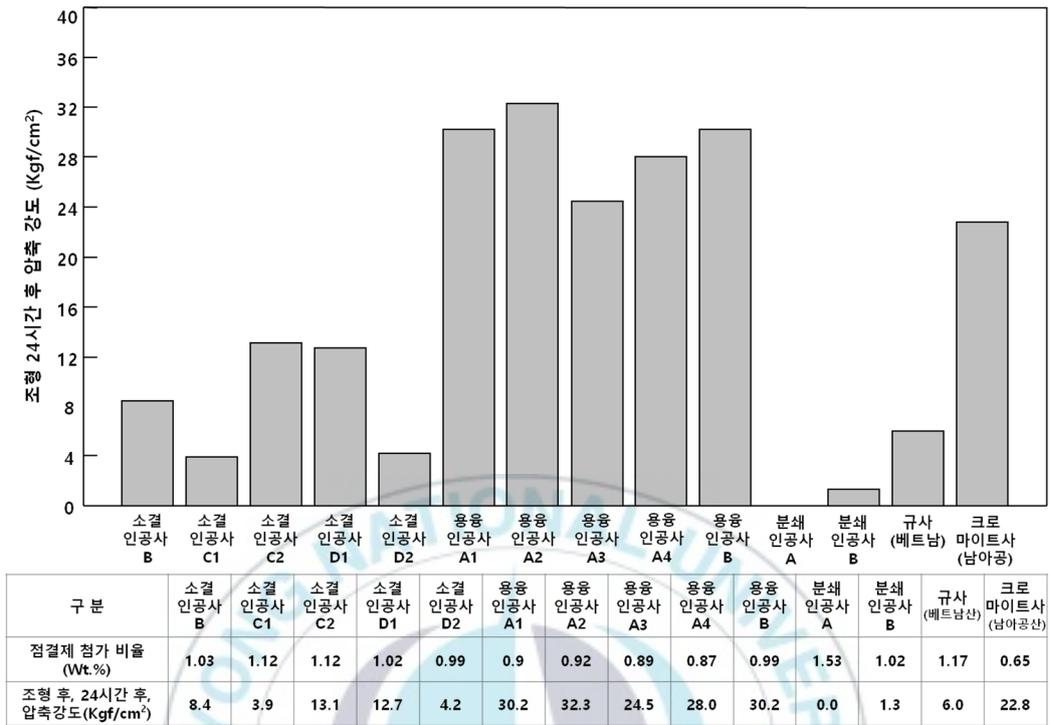


Fig. 10. Mold strength after 24 hours after molding various foundry sands with alkaline self-hardening phenolic resin

형상이 구형이고 형상계수가 1에 가까우며, 표면이 평활한 용융인공사들의 주형강도 평균 값은 29.04Kgf/cm²로써, 형상이 구형이나 표면의 요철로 매끄럽지 못하고 다수의 기공이 있는 소결인공사들의 주형강도 평균 값 8.46Kgf/cm²에 비하여, 243.3% 높다. 또한, 각형의 천연규사(베트남산 규사) 및 크로마이트사의 주형강도와 비교하여, 각각 384.0%, 27.4% 높으며, 분쇄인공사에 비해 월등히 높다.

반면, 소결인공사 C1과 D2는 크로마이트 및 천연규사 보다 주형강도가 낮았으며, 소결인공사 B, C2, D1의 주형강도 평균 값은 12.9Kgf/cm²로써, 천연규사의 주형강도에 비해 115% 높은 수준에 불과하였다. 그리고, 각형의 분쇄인공사 A 및 B는 크로마이트 및 천연규사 보다 주형강도가 낮았다.

즉, 구형의 형상을 가지고, 형상계수가 1에 가까우며, 표면조도가 좋을수록

표면적이 감소되며, 점결제가 충분히 도포 되므로 주형강도가 상승하게 되며, 형상이 구형이더라도 표면 요철로 매끄럽지 못하고, 다수의 개기공을 포함하고 있거나, 각형에서는 예각부가 많을수록, 표면 요철로 매끄럽지 못하고, 다수의 개기공을 포함하면, 표면적이 증가하게 되어, 점결제가 충분히 도포되지 못하기 때문에 주형강도가 하락하게 되는 것으로 판단 된다.

그러므로 주형강도 향상 또는 점결제 사용량 절감을 위해서는 아크용사법 또는 화염용사법으로 제조된 인공사를 선택하는 것이 적합할 것이다. 그리고, 조립소결법으로 제조된 소결인공사는 기계적 재생에 따라 표면 요철부가 제거되어, 신사대비 재생사의 주형강도가 상승된다는 연구결과[25]도 있고, 소결인공사 제품 중에는 천연규사에 비해 높은 주형강도를 나타내는 것들도 있으며, 용융인공사에 비해 밀도가 낮아 주형제작에 필요한 주물사 사용량이 저감되는 특징도 있으므로, 주조공장의 현장여건 및 니즈에 따라 선택 가능할 것으로 판단 된다.

3.3. 주물사 내구성

3.3.1. 주물사의 물리적 내구성 - 포트밀에서의 파쇄율

일반적으로 대형주강품 사형구조를 위한 주형은 고정형 또는 이동식 연속식조형믹서(fixed continuous mixer or mobile continuous mixer)에서 주물사와 알카리자경성페놀수지 또는 후란자경성페놀수지 점결제가 혼련된 조형사로 제작 된다. 연속식조형믹서의 믹서하우징(mixer housing) 내부에서 고속으로 회전하는 블레이드에 의해 주물사와 점결제가 혼련될 때, 블레이드와 주물사 입자간 충돌 과 마찰 및 주물사 입자들끼리의 마찰이 발생된다. 또한, 조형사로 사용된 주물사를 회수한 후, 주물사 표면에 잔류하는 점결제를 제거하여, 반복하여 재사용하기 위한 기계적 재생법이 주로 이용되고 있다. 주조공장에 따라 재생장치 형식 및 구성은 다르지만, 기본적으로 재생장치 내부 구조물과 주물사 입자간 마찰 및 충돌과 주물사 입자끼리의 마찰 및 충돌이 발생된다.

따라서 이러한 마찰, 충돌 등의 물리적인 힘의 작용에 의해 주물사 입자의

마모 및 파쇄가 발생되며, 주물사 입도의 변화와 분진이 발생이 수반된다. 주물사 파쇄로 인해 발생된 분진은 대기로의 비산 방지를 위해 조형설비, 주물사재생설비, 주조공장동에 집진덕트 및 집진기를 설치하여 포집하고, 포집된 분진은 폐기물로 배출되게 되며, 일부 분진은 공장 내 대기로 비산되어 대기환경을 악화시킨다. 주물사 파쇄에 의한 부족분은 신사를 투입하여 보충하게 된다. 그러므로 주조공장의 폐기물 배출량 저감, 대기환경 개선, 신사보충량 절감을 위해서는 조형과정 및 주물사 재생 시에 파쇄가 작은 주물사 선택이 중요하다.

본 연구에서는 물리적인 힘에 의한 주물사의 내구성을 비교평가하기 위해서, 각종 주물사에 대한 포트밀에서의 파쇄시험을 실시하였다. 그림 11에 주물사를 포트밀에서 파쇄시험 결과를 나타내었다. 파쇄율이 낮은 순으로 나열하면, 용융인공사 B 6.39%, 용융인공사 A1 7.45%, 용융인공사 A2 8.78%, 용융인공사 A3 9.58%, 용융인공사 A4 10.83%, 소결인공사 D2 12.18%, 소결인공사 C1 13.70%, 소결인공사 D1 14.67%, 소결인공사 B 19.74%, 소결인공사 A 20.31%, 소결인공사 C2 22.80%, 분쇄인공사 C 23.50%, 호주산 규사 25.98%, 베트남산 규사 27.86%, 크로마이트사 35.13%, 분쇄인공사 B 45.78%, 분쇄인공사 A 47.05% 이다.

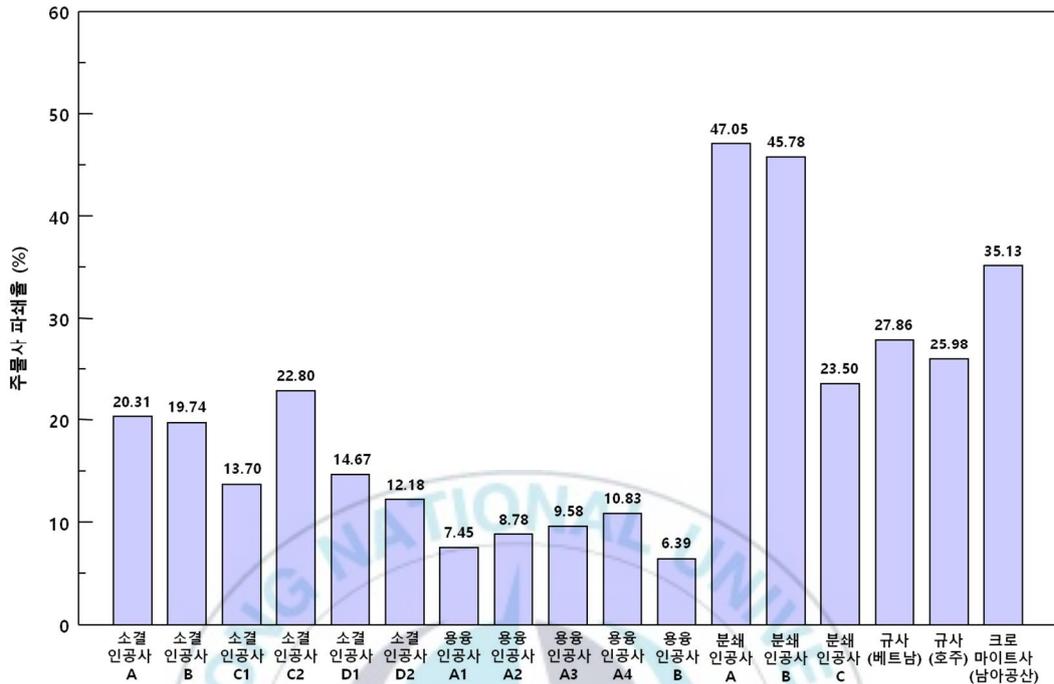


Fig. 11. Crushing test results in pot mill for comparative evaluation of the physical durability of foundry sand

구형의 용융인공사와 소결인공사가 천연규사, 크로마이트사, 분쇄인공사에 비해 파쇄율이 낮았다. 그리고 용융인공사들의 파쇄율 평균값은 8.61%이며, 소결인공사들의 파쇄율 평균값 17.23%로써, 용융인공사가 소결인공사대비 파쇄율이 낮았다. 또한 분쇄인공사 C를 제외한 분쇄인공사 2종은 천연규사 및 크로마이트사 보다 파쇄율이 높았다. 그리고 크로마이트사가 천연규사대비 파쇄율이 높았다. 모래입자는 입자의 입경이 클수록, 각이 많아지고 뾰족할수록, 입자강도와 모래의 균등계수가 작을수록, 입자의 광물성분의 경도가 낮을수록, 파쇄되기 쉬우며, 동일한 광물성분에서는 입자형상이 각이 있을수록 예각부에 응력 집중이 쉽기 때문에 입자파쇄가 쉽게 된다 [46]. 따라서, 구형의 형상을 가진 용융인공사 및 소결인공사가 각형의 천연규사, 크로마이트사, 분쇄인공사에 비해 파쇄율이 낮았으며, 형상계수가 1에 가까우며, 표면이 평활한 용융인공사가 상대적으로 형상계수가 낮고, 표면에 요철부가 많은 소결인

공사에 비해 파쇄율이 낮은 것으로 판단 된다. 또한, 다른 각형의 주물사 등에 비해 형상계수가 낮고, 예각부가 많은 분쇄인공사 A와 B의 파쇄율이 높은 것으로 판단된다. 모암을 인위적으로 파쇄하여 만들어진, 인조규사에서는 천연규사와 달리 강도가 낮고, 여러 단계의 파쇄과정에서 발생한 미세크랙이 존재하는 것으로 알려져 있다 [47]. 따라서, 인조규사에서처럼 원료광물 또는 원료내화조성물의 분쇄공정으로 만들어진 분쇄인공사들의 경우에도 미세크랙이 존재하고 있어, 파쇄율의 증가에 영향을 미쳤을 것으로 판단 된다.

한편, 포트밀에서의 파쇄시험을 위해 주어진 물리적인 힘과 조형과정과 기계적 재생에 의한 물리적인 힘이 동일하진 않지만, 어떤 종류이던지 물리적인 힘이 작용했을 때, 쉽게 파쇄되지 않는 주물사가 내구성이 좋다고 볼 수 있다. 따라서 포트밀에서의 각종 주물사의 파쇄되는 정도를 비교평가 한 결과를 통해서, 구형의 용융인공사 및 소결인공사가 천연규사, 크로마이트사에 비해 물리적인 힘에 대한 내구성이 좋다고 할 수 있으며, 소결인공사에 비해서는 용융인공사들의 내구성이 좋다고 할 수 있다. 그러므로 천연규사 또는 크로마이트사를 사용하는 주조공장에 구형의 용융인공사 또는 소결인공사로 대체 적용 할 경우, 폐기물 배출량 저감, 대기환경개선, 신사보충량 절감 등이 달성 가능할 것으로 판단된다. 반면, 화학성분상으로는 구형의 인공사와 유사한 알루미나실리카계이나 각형의 형상을 가지는 분쇄인공사의 경우에는 천연규사 및 크로마이트사보다 내구성이 좋지 못하므로, 대체 사용 시에 위와 같은 효과를 기대하기 어려울 것으로 판단된다.

3.3.2. 주물사의 열적 내구성 - 가열·급냉시험 주물사 파쇄율

일반적으로 내화물 사용 중에 급격한 온도변화에 따라 발생하는 열응력(thermal stress)의해서, 내화물에 균열이 생기든가 박리하는 현상을 스포링이라고 하는데, 이에 견디는 성질을 열충격저항(thermal shock resistance)이라고 하고, 이런 현상이 일어나는 내부적 응력의 원인에 따라서 열적스포링(thermal spalling), 기계적스포링(mechanical spalling), 조직적스포링(structural spalling)의 세가지로 분류하고 있다. [48]

주물사의 경우에도 고온의 금속용탕이 주입 될 때, 고온에 노출로 급열(急

熱) 된 후, 주조공법에 따라 상이하나, 일반적으로 대기 중에서 서냉 되나, 이상스테인리스합금 재질의 대형주강품의 경우에는 탈사 전에 주형을 함께 수냉시키는 공법이 적용 됨에 따라 급냉 되는 경우도 있다. 또한 알루미늄 급형 주조에서는 중자 제작에 사용된 주물사는 알루미늄 주물과 함께 열처리되어, 고온으로 가열된 후, 수냉되는 경우도 있다. 그리고 주물사재생에 있어서, 기계적 재생이 아닌 소성법(배소법)을 사용할 때, 주물사 표면의 점결체를 제거하기 위한 고온의 화염에 노출 됨에 따라 급열 된 후, 공냉식 또는 수냉식 또는 복합식 샌드쿨러에서 냉각되기도 한다. 따라서 주물사에서도 가열 및 냉각이 반복적으로 이루어지며, 그에 따라 스폴링 현상이 발생될 수 있다.

스폴링은 열응력을 발생하는 외적 조건과 내화물 자체의 물리화학적 특성 등 여러 가지 인자가 서로 얽힌 복잡한 원인에 의해서 발생하는 현상이다 [48]. 주물사 물성평가 결과에서 기술한 바와 같이 주물사에 따라 물리화학적 특성이 상이하므로, 스폴링이 현상이 발생 될 수 있는 동일한 외적 조건에서의 열적 내구성에 대한 비교 평가가 요구된다.

그림 12는 본 연구에서 평가된 각종 주물사의 1,100 °C 가열 급냉 시험에 의해 산출한 가열 급냉 파쇄율을 도시한 것이다. 가열 급냉 파쇄율이 낮은 순으로 나열하면, 호주산 규사 0.19%, 베트남산 규사 0.21%, 소결인공사 A 0.29%, 크로마이트사 0.35%, 소결인공사 B 0.36%, 소결인공사 C2 0.39%, 소결인공사 D1 0.39%, 소결인공사 D2 0.41%, 소결인공사 C1 0.45%, 분쇄인공사 B 1.98%, 분쇄인공사 A 2.45%, 분쇄인공사 C 2.85%, 용융인공사 A1 3.26%, 용융인공사 A2 3.43%, 용융인공사 A4 3.52%, 용융인공사 A3 3.65%, 용융인공사 B 3.85%로써, 구형의 소결인공사, 천연규사 2종, 크로마이트사는 비슷한 수준의 가열 급냉 파쇄율 값을 가지며, 용융인공사 및 분쇄인공사에 비해 낮은 가열 급냉 파쇄율을 나타내었다. 가열 급냉 파쇄율 값이 높다는 것은 열적 내구성이 떨어진다는 것으로써, 아크용사법 또는 화염용사법으로 제조된 용융인공사들과 분쇄법으로 제조된 분쇄인공사들의 열적내구성이 소결인공사, 천연규사, 크로마이트사 대비 열적 내구성이 떨어질 것으로 판단된다.

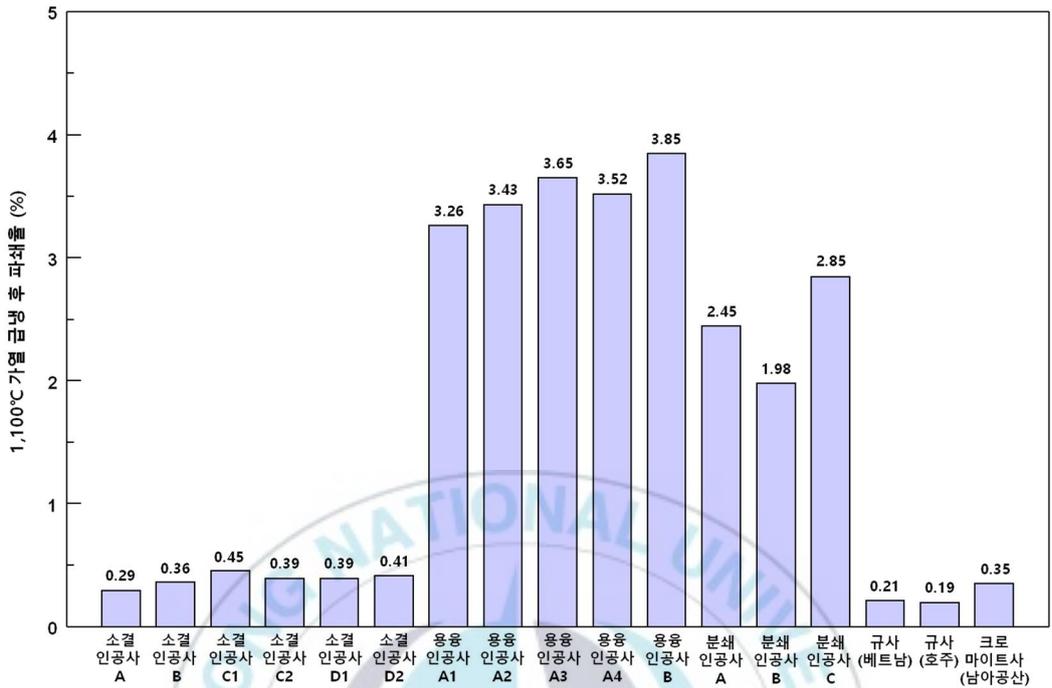


Fig. 12. Heat and quench fracture rate calculated by 1,100 °C heat and quench test

아크용사법 또는 화염용사법으로 제조되어, 제조과정에서 급열·급냉과정을 거쳤기 때문에, 용융인공사들의 가열·급냉 시험 결과가 양호 할 것으로 예상 하였으나, 그렇지 않은 결과에 대한 고찰을 위해서, 가열·급냉 시험 된 주물사들에 대한 SEM 관찰하였다. 그림 13은 1,100°C 가열·급냉 시험 된 용융인공사들의 SEM 사진이다. 용융인공사의 일부 주물사 입자에서 균열 및 박리 흔적이 관찰 되었다. 반면, 소결인공사, 천연규사, 분쇄인공사, 크로마이트사에서는 시험 전·후 특이한 변화사항을 관찰 할 수 없었다.

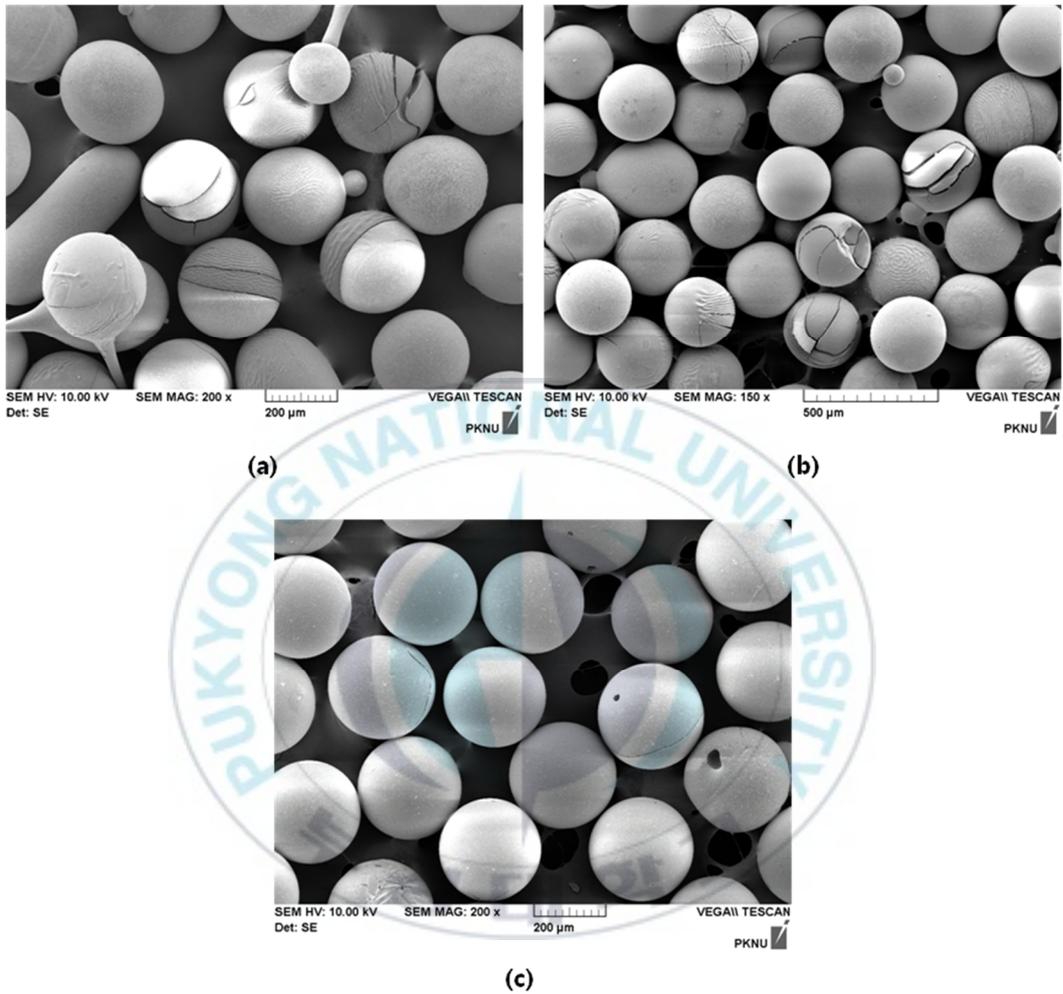


Fig. 13. SEM pictures of molten artificial sand tested by heating and quenching at 1,100 °C

- (a) Molten artificial sand A3
- (b) Molten artificial sand A4
- (c) Molten artificial sand B

용융인공사에서 균열 및 박리는 가열 급냉 시험 전에는 관찰할 수 없었으므로, 가열 또는 급냉 과정에서 생성된 것이다. 용융인공사에서 이러한 균열 및 박리가 발생된 원인을 고찰하기 위해서, 용융인공사가 가열될 때, 체적변화량 측정을 위한 열기계분석(TMA, Thermo Mechanical Analysis)을 하였다. 그림 14는 용융인공사 A3와 용융인공사 B의 TMA 결과이다. 용융인공사 A3와 용융인공사 B는 가열에 따라 약 200℃에서 300℃ 부근까지 급격히 팽창이 이루어진 후, 600℃부근까지 서서히 팽창하다가, 600℃에서 900℃ 부근까지 수축하고, 950℃ 내외에서 잠시 팽창한 후 다시 수축하는 형태를 보였다.

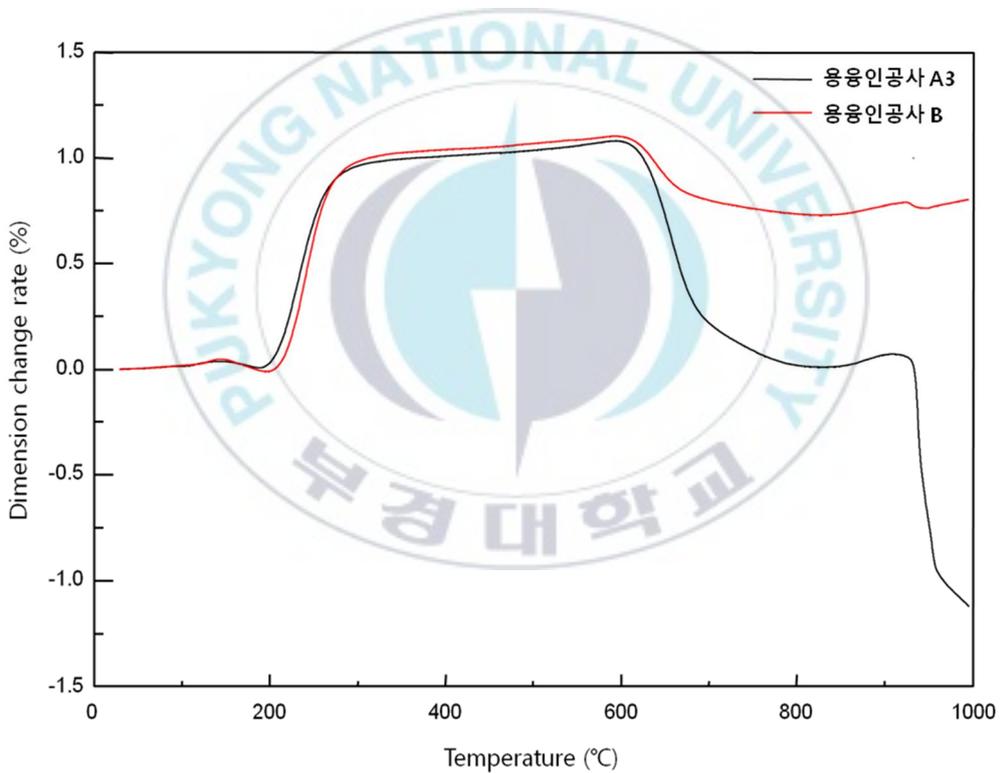


Fig. 14. TMA(Thermo Mechanical Analysis) results of melting artificial sand A3 and melting artificial sand B

그림 15는 용융인공사 A3와 용융인공사 B의 시차주사열량측정(DSC, Differential Scanning Calorimetry) 결과이다. 용융인공사 A3와 용융인공사 B는 약 950°C 부근에서 발열피크가 관찰되었다. 앞서 기술한 바와 같이 아크 용사법 또는 분말식화염용사법으로 제조된 용융인공사는 제조공법 특성상 용융 분사되어 급냉되어 주물사입자가 생성 됨에 따라 비결정질상을 다수 함유하고 있으며, 이러한 비결정질상들은 용융인공사가 가열될 때, 950°C 부근에서 결정화(結晶化, crystallization)되고, 비결정질상들의 결정화에 따른 수축 현상이 발생하는 것으로 판단 된다.

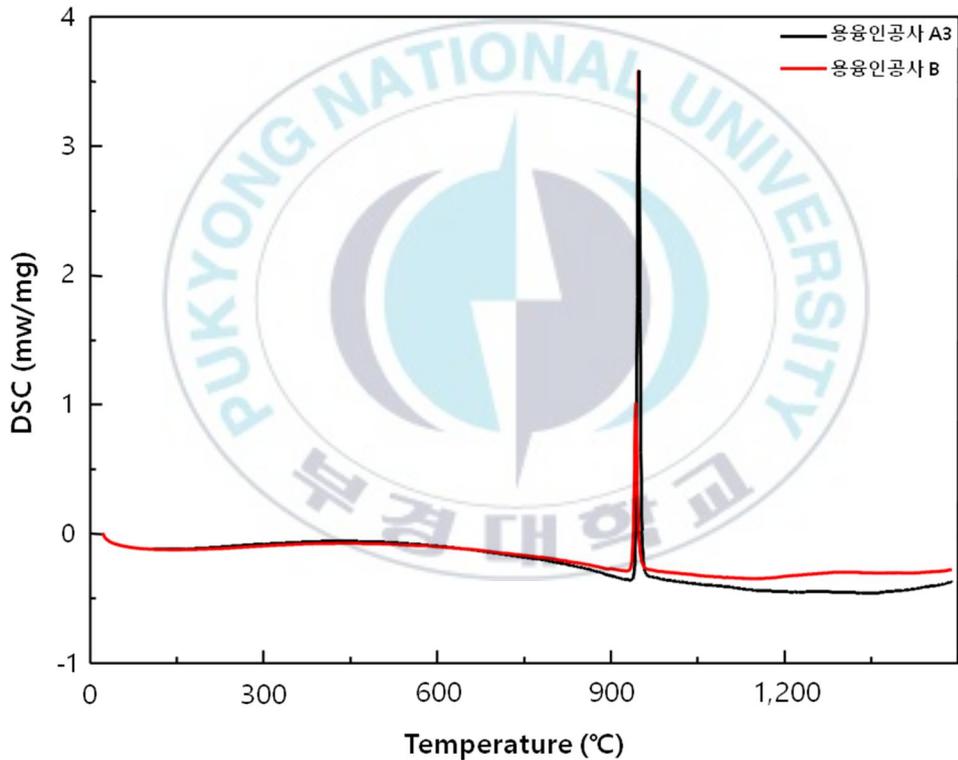


Fig. 15. DSC(Differential Scanning Calorimetry) results of melting artificial sand A3 and melting artificial sand B

앞서 기술한 XRD 물질동정을 통한 인공사의 결정질광물 분석 결과에서 알 수 있듯이, 용융인공사는 100% 비결정질광물로 이루어진 것이 아닌 플라이트, 코런덤과 같은 결정질광물상을 함유하고 있다. 따라서, 비결정질상들의 수축에 따라 결정질광물상들과의 수축율 및 팽창율에 차이가 존재 할 것이며, 그러한 비결정질상과 결정질광물상간의 수축율 및 팽창율 차이에 의해 응력이 발생되었을 것이며, 그로 인해 주물사 입자의 균열 및 박리 현상이 발생되었을 것으로 추정되며, 이러한 메커니즘에 대한 명확한 원인 규명을 위한 후속연구가 필요하다.

그리고, 용융인공사의 체통과율(가열 급냉 파쇄율)이 소결인공사, 분쇄인공사, 천연규사 보다 높은 이유는 위와 같은 현상으로 주물사 입자의 체적수축과 박리되어 떨어져나간 입자에 의한 것으로 판단 된다.

앞서 언급한 바와 같이, 마찰, 충돌 등의 물리적인 힘에 대한 주물사의 물리적 내구성도 중요하며, 주형에 고온의 용탕 이 주입 될 때, 또는 가열된 후 급냉 될 때의 주물사의 열적 내구성도 중요하며, 주형강도도 중요하다. 물리적 내구성 및 주형강도는 소결인공사 대비 용융인공사가 우수하나, 열적 내구성은 용융인공사 대비 소결인공사가 우수하였다. 또한 주조공장에 따라 주조 공정 및 후처리공정, 재생설비 형식이 상이하다. 따라서 현장 여건 및 중요하게 판단하는 주물사 특성을 나타내는 구형의 인공사를 선택하면 될 것으로 생각된다.

3.4. 주물사의 내열특성

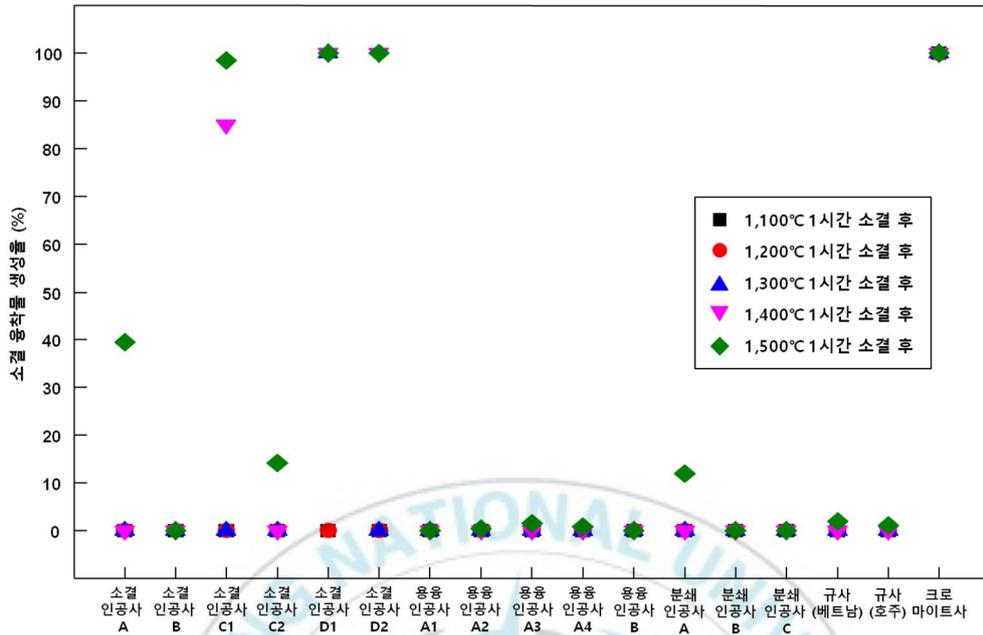
3.4.1. 주물사의 소결현상 발생온도

소결(燒結, sintering)은 분체와 같은 비표면적이 넓은 입자들이 열적 활성화 과정을 거쳐 하나의 치밀한 덩어리로 되는 과정을 말하며, 분체를 압축한 성형체를 용점 이하의 온도로 가열 했을 때, 분체가 용융되어 서로 밀착하여 고결(固結)되는 현상으로 정형 내화물, 도기 등의 요업 제품이나, 세라믹 제품의 제조에 응용된다. 소결의 구동력은 열역학적으로 시스템 전체의 표면에너지를 줄이는 것이며, 벌크에 비해 계면(interface)에는 잉여에너지(excess

energy)가 있으므로 소결 중 표면에너지는 입자들이 치밀화, 조대화 되는 과정에서 감소된다. 소결 공정상 변수에는 온도, 시간, 분위기, 소결 압력 등이 있다. 입자가 소결되는 과정은 입자들이 서로 붙어서 목이 형성되는 초기 단계, 기공이 고립되기 전까지 상대밀도가 약 93% 가량 되는 중기 단계, 그 이후를 말기 소결이라고 한다 [49]. 내화물의 경우에는 소결에 영향을 미치는 인자로는 원재료의 특성, 첨가제, 소결온도 및 유지시간, 소결 분위기, 성형방법 및 압력 등으로 알려져 있다.

주강품을 사형구조로 제작할 때, 주강품의 열집중부(hot spot zone)를 비롯한 후육부 등에서는 주물사가 고온이지만, 주물사의 내화온도보다 낮은 온도에 노출 되어, 주물사 입자끼리 고결되는 소결현상이 발생되고, 주물사 소결층을 형성하고, 심한 경우에는 주강품 표면에 소착 또는 용착되는 주물사 결합을 야기시키기도 하며, 주물사재생장치를 거친 후에도 본래의 주물사 입자로 쉽게 되돌아가지 못하여, 광재 또는 폐주물사로 처리 됨에 따라 주조공장의 폐기물 배출량을 증가시키고, 반복 재사용을 위한 회수사의 중량을 감소시키게 되어, 보충용 신사투입량의 증가를 야기한다. 이러한 주물사 소결층 발생 정도는 동일한 주조법으로 동일한 주조품을 제조할 때, 주물사 종류에 따라 발생 정도가 다르다. 따라서, 소결현상이 발생할 수 있는 동일한 환경 및 조건에서 주물사의 입도, 미분함량, 화학성분, 광물상 등의 물성 및 특성에 따라 소결 현상이 발생하는 온도가 다를 것으로 판단된다.

본 연구에서는 각종 주물사가 주강품 사형구조에서 사용될 때, 주물사 소결층 발생 정도를 예측하기 위해, 각종 주물사에 대해서 시험온도 1,100℃, 1,200℃, 1,300℃, 1,400℃ 및 1,500℃ 에서 소결현상 발생에 따른 주물사의 소결 용착물 생성율을 평가하였다. 그 결과를 그림 16에 나타내었다.



주물사명	소결 용작물 생성률 (%)				
	1,100°C, 1Hr. 유지-로냉 후	1,200°C, 1Hr. 유지-로냉 후	1,300°C, 1Hr. 유지-로냉 후	1,400°C, 1Hr. 유지-로냉 후	1,500°C, 1Hr. 유지-로냉 후
소결인공사 A	0	0	0	0	39.36
소결인공사 B	0	0	0	0	0
소결인공사 C1	0	0	0	85.00	98.48
소결인공사 C2	0	0	0	0	14.10
소결인공사 D1	0	0	100	100	100
소결인공사 D2	0	0	0	100	100
용융인공사 A1	0	0	0	0	0
용융인공사 A2	0	0	0	0	0.35
용융인공사 A3	0	0	0	0	1.57
용융인공사 A4	0	0	0	0	0.82
용융인공사 B	0	0	0	0	0.00
분쇄인공사 A	0	0	0	0	11.90
분쇄인공사 B	0	0	0	0	0
분쇄인공사 C	0	0	0	0	0
규사 (베트남)	0	0	0	0	1.88
규사 (호주)	0	0	0	0	1.06
크로마이트사 (남아공)	100	100	100	100	100

Fig. 16. Results of evaluation of sintering phenomenon occurrence temperature of foundry sand and sinter fusion production rate by test temperature sintering temperature evaluation result graph of foundry sand

소결인공사 B, 용융인공사 A1 및 B, 분쇄인공사 B, 분쇄인공사 C는 시험온도 범위(최대 1,500℃)에서 주물사의 소결이 없었다. 반면, 용융인공사 A2, A3 및 A4, 천연규사 2종은 시험온도 1,100 ~ 1,400℃에서는 주물사의 소결이 없었으나, 1,500℃에서만 소결되어, 시험사에 따라 0.35 ~ 1.88%의 소결 용착물이 생성되었다. 그리고, 소결인공사 A 및 C2, 분쇄인공사 A는 1,100~1,400℃에서는 소결이 없었으나, 1,500℃에서만 소결되어, 각각 39.36%, 14.1% 및 11.9%의 소결 용착물이 생성되었다. 또한, 소결인공사 C1 및 D2는 1,100 ~ 1,300℃에서는 소결이 없었으나, 1,400℃ 및 1,500℃에서 소결되었고, 1,400℃에서는 각각 85% 및 100%, 1,500℃에서는 각각 98.48% 및 100%의 소결 용착물이 생성되었다. 그리고, 소결인공사 D1은 1,100 및 1,200℃에서는 소결이 없었으나, 1,300℃, 1,400℃ 및 1,500℃에서 소결되었고, 각각 시험온도에서 100%의 소결 용착물이 생성되었다. 크로마이트사의 경우 모든 시험 온도(1,100 ~ 1,500℃)에서 소결되어, 100%의 소결 용착물이 생성되었다.

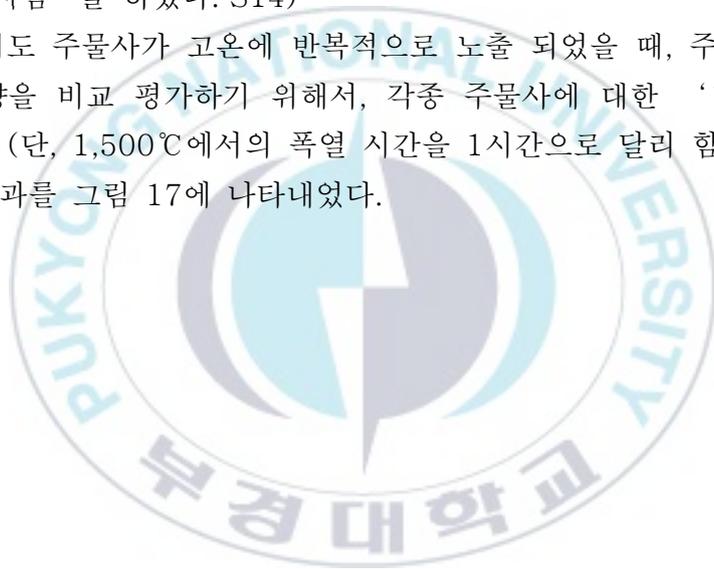
따라서, 주물사의 소결현상이 발생되기 시작하는 온도는 용융인공사 A2, A3 및 A4, 천연규사 2종은 1,500℃ 부근일 것으로 예상되며, 소결인공사 A, C2 및 분쇄인공사 A는 1,400 ~ 1500℃ 범위에 존재할 것으로 예상되고, 소결인공사 C1 및 D2의 소결인공사 D1는 1,300 ~ 1,400℃ 범위에 존재할 것으로 예상되며, 소결인공사 D1는 1,200 ~ 1,300℃ 범위에 존재할 것으로 예상되고, 크로마이트사는 1,100℃ 이하에 존재할 것으로 예상된다. 단, 주물사별 정확한 소결현상 개시온도 확인을 위해서는 동일한 시험방법에서는 시험온도를 더욱 세분화하거나, 다른 시험방법 고안한 후속연구가 필요하다. 단, 상기 시험 결과만으로도 각종 주물사의 소결 현상이 발생되기 시작하는 온도의 고저(高低)가 판단가능하며, 해당 특성의 우열(優劣)을 가능할 수 있다.

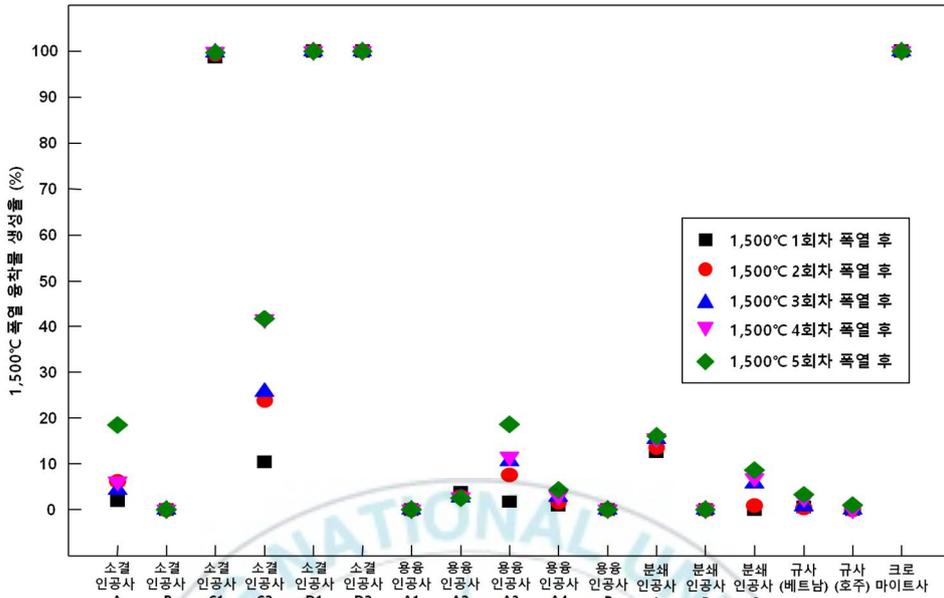
소결 현상이 발생되기 시작하는 온도가 높은 주물사 일수록 주물사 소결층 발생량 및 소착·용착 결함 발생량도 작을 것으로 예상된다. 이러한 측면을 고려하여, 주물사를 선택할 경우, 구형의 형상을 가지는 용융인공사 A1 또는 용융인공사 B가 주강용 주조용 주물사로 적합할 것으로 판단 된다.

3.4.2. 1,500℃ 폭열 내열성

앞서 기술한 바와 같이 주조공장의 폐기물저감, 신사 사용량 절감에 의한 제조원가 절감 등의 목적으로 사용된 주물사를 회수하여, 주물사재생설비로 재생처리를 통해 반복 재사용함에 따라 주물사는 금속용탕이 주입될 때, 고온에 반복 노출 되게 된다. 또한, 국내에서는 잘 활용되고 있지 않지만, 배소법(소성법)으로 주물사를 재생처리하는 경우에도 주물사는 고온에 반복 노출되게 된다. Makoto는 기존 내화도 시험과는 다른 주물사의 반복적으로 열처리하였을 때, 주물사의 용착량을 측정하여 주물사의 내열성 비교하는 ‘1,500℃ 폭열 내열성 시험’ 을 하였다. S14)

본 연구에서도 주물사가 고온에 반복적으로 노출 되었을 때, 주물사 소결 용착물 생성량을 비교 평가하기 위해서, 각종 주물사에 대한 ‘1,500℃ 폭열 내열성 시험(단, 1,500℃에서의 폭열 시간을 1시간으로 달리 함)’ 를 실시하였다. 그 결과를 그림 17에 나타내었다.





주물사명	1,500°C 폭열 용작물 생성률 (%)				
	1,500°C, 1Hr. 유지.로냉 후 [1회차]	1,500°C, 1Hr. 유지.로냉 후 [2회차]	1,500°C, 1Hr. 유지.로냉 후 [3회차]	1,500°C, 1Hr. 유지.로냉 후 [4회차]	1,500°C, 1Hr. 유지.로냉 후 [5회차]
소결인공사 A	1.87	6.24	4.28	6.17	18.48
소결인공사 B	0	0	0	0	0
소결인공사 C1	98.66	99.36	99.65	99.76	99.73
소결인공사 C2	10.44	23.87	25.67	41.52	41.71
소결인공사 D1	100	100	100	100	100
소결인공사 D2	100	100	100	100	100
용융인공사 A1	0	0	0	0	0
용융인공사 A2	3.67	2.95	2.76	2.73	2.59
용융인공사 A3	1.77	7.64	10.58	11.52	18.59
용융인공사 A4	0.92	1.60	2.78	3.03	4.42
용융인공사 B	0	0	0	0	0
분쇄인공사 A	12.65	13.57	15.35	15.59	16.04
분쇄인공사 B	0	0	0	0	0
분쇄인공사 C	0	0.90	5.81	6.91	8.60
규사 (베트남)	0.56	0.44	0.69	2.48	3.26
규사 (호주)	0	0	0	0	1.06
크로마이트사 (남아공)	100	100	100	100	100

Fig. 17. 1,500°C explosion heat resistance test result of foundry sand

주물사 소결 용착물 생성량이 작은 주물사에 대한 시험 결과 순으로 기술하면, 소결인공사 B, 용융인공사 A1 및 B, 분쇄인공사 B는 1~5회 폭열시험 모두에서 주물사 입자간 용착에 의한 소결 용착물이 생성되지 않았으며, 호주산 규사는 1 ~ 4회 폭열 시에는 주물사 입자간 용착에 의한 소결 용착물 생성이 없었으나, 5회차 폭열 후, 1.06%의 소결 용착물이 생성 되었다. 그 외 주물사들은 1~5회 폭열시험 후 모든 시험 회차에서 주물사 입자간 용착에 의한 소결 용착물 생성량이 생성되었으며, 각각의 주물사별 소결용착물 생성량은, 베트남산 규사는 1회차 0.56%, 2회차 0.44%, 3회차 0.69%, 4회차 2.48%, 5회차 3.26% 이고, 용융인공사 A4는 1회차 0.92%, 2회차 1.6%, 3회차 2.78%, 4회차 3.03%, 5회차 4.42% 이며, 용융인공사 A2는 1회차 0.56%, 2회차 0.44%, 3회차 0.69%, 4회차 2.48%, 5회차 3.26% 이고, 분쇄인공사 C는 1회차 0%, 2회차 0.9%, 3회차 5.81%, 4회차 6.91%, 5회차 8.6% 이며, 소결인공사 A는 1회차 1.87%, 2회차 6.24%, 3회차 4.28%, 4회차 6.17%, 5회차 18.48% 이고, 용융인공사 A3는 1회차 1.77%, 2회차 7.64%, 3회차 10.58%, 4회차 11.52%, 5회차 18.59% 이며, 분쇄인공사 A는 1회차 12.65%, 2회차 13.57%, 3회차 15.35%, 4회차 15.59%, 5회차 16.04% 이고, 소결인공사 C2는 1회차 10.44%, 2회차 23.87%, 3회차 25.67%, 4회차 41.52%, 5회차 41.71% 이었다. 반면, 소결인공사 C1은 1회차 98.66%, 2회차 99.36%, 3회차 99.65%, 4회차 99.76%, 5회차 99.73%이며, 소결인공사 D1 및 D2, 크로마이트사는 최초의 1회차 폭열에 의해 시험사 전량이 용착 되어, 소결용착물 생성율이 100%이고, 2~5회차 시험에서도 소결 용착물 생성율이 100%로써 변화가 없었다.

이상의 결과로부터 소결온도 발생 시작온도가 낮았던 주물사들이 1,500℃ 폭열 내열성 시험에서도 주물사의 소결 용착물 생성율이 높은 경향을 나타내었다.

또한, 크로마이트사와 같이 내화도가 높은 주물사가 높은 소결현상 발생 온도를 갖는 것도 아니며, 1,500℃ 폭열 내열성 시험 시의 주물사의 소결 용착물 발생량이 작은 것도 아니었다. 반대로 내화도가 낮은 주물사 중에서 규사의 경우에는 소결현상 발생 시작온도가 높고, 1,500℃ 폭열 내열성 시험 시

의 주물사 소결 용착물 발생량도 작았다. 그리고, 소결인공사 C1, C2, D1 및 D2의 경우에는 내화도가 각각 SK32, SK36, SK28, SK37이지만, 소결현상 발생 시작온도도 낮은 편이며, 1,500℃ 폭열 내열성 시험 시의 주물사 소결 용착물 발생량은 많은 편이었다. 즉, 이러한 시험 결과를 통해서 알 수 있듯이, 반드시 내화도가 주물사의 반복사용에 대한 내열성을 의미하는 것은 아니라고 할 수 있다.

소결인공사 B, 용융인공사 A1 및 B, 분쇄인공사 B의 경우에는 내화도도 SK37이상으로 높고, 소결현상 발생 시작온도가 1,500℃ 이상이며, 1,500℃ 폭열 내열성 시험에서도 주물사 소결 용착물 생성이 없었다. 따라서 위 4종의 주물사가 내열특성이 우수하여, 주강품 주조에 사용할 경우, 주물사 소결층 발생량 및 소착·용착 결합 발생량도 작을 것으로 예상되며, 여기에 주물사별 주형강도 특성까지 고려하여, 주물사를 선택할 경우, 구형의 형상을 가지는 용융인공사 A1 또는 용융인공사 B가 주강품 주조용 주물사로 적합할 것으로 판단 된다.

3.5. 주강 시험편 주조 소착결합율

소착 결합은 철 주물 제품의 표면에 나타나는 대표적인 주조 결합으로, 정도가 상대적으로 경미 할 경우 사용가능한 제품이 되지만 장비로도 제거 할 수 없는 경우 폐기가 된다. 따라서 소착 결합의 발생 요인을 알고 결합의 생성을 막는 것은 마무리 공수의 감소와 생산성을 향상시키기 위해 중요한 대책이 된다 [50].

철계 주물인 대형주강품은 주입온도가 높고, 주입중량이 크기 때문에, 주형 재료로 사용된 주물사는 고온 및 고압환경에 오랜 시간 노출된다. 따라서, 실제 주강품 주조공장에서 주물사가 사용되는 환경(온도, 압력, 고온에서의 노출시간)은 위 두 가지 시험의 환경조건 보다 가혹하다 할 수 있다. 대형주강품을 제조하는 당사에서는 제품의 열집중부, 코너부, 후육부 표면에 있어서 충분히 방열할 수 없어 소착이 발생하는 경우가 있어, 그 대책이 과제가 되고 있다. 따라서 소착결합부에 대한 신사 적용이나, 도형체의 다층 도장 등의 대

책을 강구하고 있으며, 동일한 주조공정조건이나 동일한 제품에서 주물사 종류에 따라서 발생하는 소착결함 발생량에 차이가 있어, 주물사 선택에 있어 소착 결함을 발생량에 대한 객관적인 비교 평가가 필요하다. 따라서, 실제 주조품에서 주물사 소착·용착 결함 발생량에 대한 비교 평가를 위한 주장시험 주조 소착율평가 시험을 고안하고, 실시하게 되었다.

본 연구에서는 각각의 주물사로 제작된 중자가 6개씩 설치된 주형을 활용하여, 개당 주입중량 약 1.2톤의 주장 시험편 4개를 주조하여, 각각의 주물사 및 도형제 적용 Type별 소착 결함을 비교 평가하였다. 표 5은 주장 시험편의 중자부에 증류수 투입량으로 비소착부 부피를 측정하여, 주물사 및 도형제 type별 소착결함을 산출한 결과 이며, 그림 18은 그것을 도시한 것이다.



Table 5. Table of results of evaluation of burn-on defect rate of cast steel test pieces of various foundry sands

도형 방법	주물사명	중자 번호	비소착 부피(ml)		소착율 (%)	
			주방 상태	쇼트 블라스트 후	주방 상태	쇼트 블라스트 후
알루미늄 마그네시아계 도형재 2회 붓질 도장 후 화염 건조	용융인공사 A3	M1	측정불가	24	100.0	90.9
	크로마이트사	M2	275	286	3.8	0.0
	소결인공사 D2	M3	측정불가	10	100.0	96.2
	소결인공사 D1	M4	측정불가	측정불가	100.0	100.0
	소결인공사 C1	M5	측정불가	측정불가	100.0	100.0
	소결인공사 C2	M6	측정불가	25	100.0	90.5
	용융인공사 A1	M7	250	262	4.6	0.0
	소결인공사 A	M8	80	57	80.9	78.2
	용융인공사 B	M9	225	243	8.2	0.8
	용융인공사 A2	M10	139	140	43.0	43.0
	용융인공사 A4	M11	120	120	51.0	51.0
	소결인공사 B	M12	200	211	18.0	14.0
알루미늄 지르콘계 도형재 2회 붓질 도장 후 화염 건조	용융인공사 A3	Z1	245	281	12.8	0
	크로마이트사 (남아공산)	Z2	250	275	11	2.1
	소결인공사 D2	Z3	측정불가	10	100	96.4
	소결인공사 D1	Z4	측정불가	12	100	95.7
	소결인공사 C1	Z5	측정불가	29	100	89.7
	소결인공사 C2	Z6	220	220	21.7	21.7
	용융인공사 A1	Z7	245	250	12.8	11
	소결인공사 A	Z8	160	177	43.1	37
	용융인공사 B	Z9	240	257	14.6	8.5
	용융인공사 A2	Z10	245	250	0	0
	용융인공사 A4	Z11	140	140	43	43
	소결인공사 B	Z12	111	115	55	53

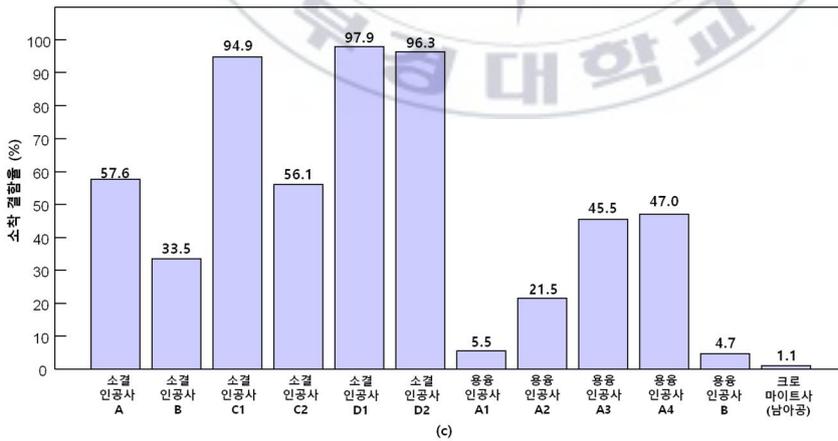
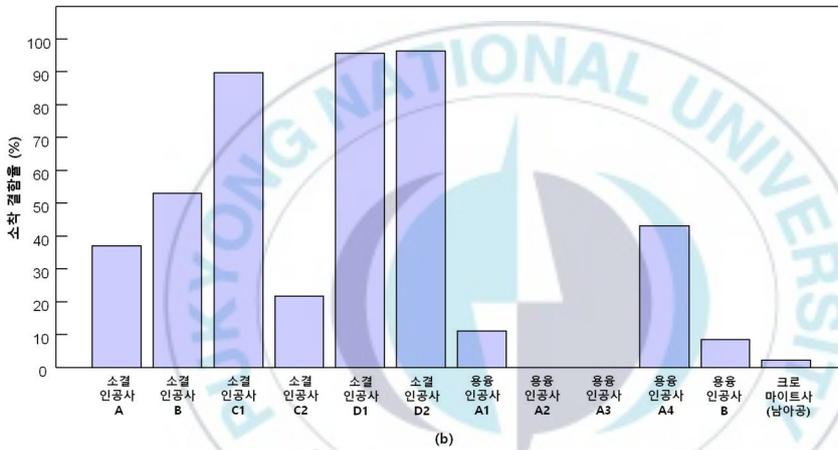
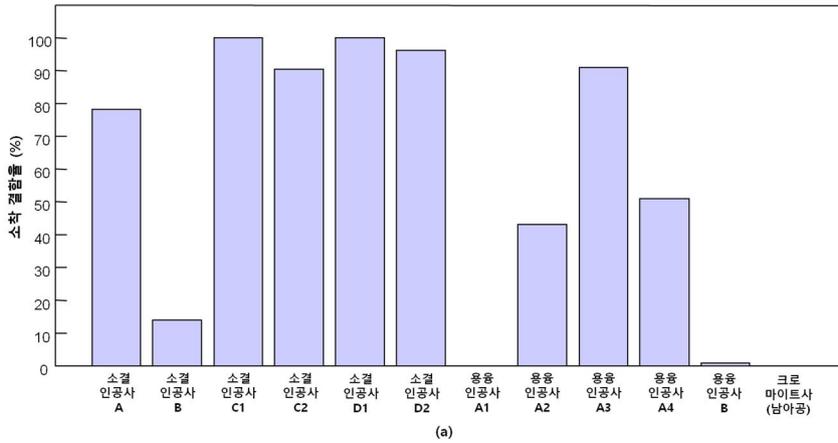


Fig. 18. Graph of results of evaluation of burn-on defect rate of cast steel test pieces of various foundry sands

- (a) Two coats of alcoholic magnesia-based coating agent
(after shot blast)
- (b) Two coats of alcoholic zircon-based coating agent(after shot blast)
- (c) Average rate of burn-on defects by various foundry sands

주물사 소착결함율이 작은 주물사에 대한 시험결과순으로 나열하면, 마그네시아계 도형제 2회 도장 조건에서, 용융인공사 A1 및 크로마이트사에서는 주물사 소착결함이 없었으며, 그 외 주물사에서는 소착결함이 발생되었고, 주물사별 소착결함율은 용융인공사 B 0.8%, 소결인공사 B 14%, 용융인공사 A2 43%, 용융인공사 A4 51%, 소결인공사 A 78.2%, 소결인공사 C2 90.5%, 용융인공사 A3 90.9%, 소결인공사 D2 96.2%이고, 소결인공사 C1 및 D2는 100% 였다. 지르콘계 도형제 2회 도장조건에서, 용융인공사 A2, 용융인공사 A3에서는 주물사 소착결함이 없었으며, 그 외 주물사에서는 소착결함이 발생되었고, 주물사별 소착결함율은 크로마이트사 2.1%, 용융인공사 B 8.5%, 용융인공사 A1 11%, 소결인공사 C2 21.7%, 소결인공사 A 37%, 용융인공사 A4 43%, 소결인공사 B 53%, 소결인공사 C1 89.7%, 소결인공사 D1 95.7%, 소결인공사 D2 96.4%였다.

도형조건에 따라 소착결함율 평균 값은 마그네시아계 도형제 도장 조건은 55.38%이고, 지르콘계 도형제 도장조건에서는 38.18%로써, 주물사 소착결함 억제를 위해서는 마그네시아 도형제를 도장하는 것보다, 지르콘계 도형제를 도장하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

그리고 동일한 주물사에서 도형제 Type에 따라 소착결함율 발생율에 차이가 나타나므로, 도형조건을 고려하지 않고 주물사별 소착결함율에 대한 비교를 위해 주물사별 평균 소착결함율을 산출하여 평균 소착결함율이 낮은 순으로 나열하면, 크로마이트사 1.05%, 용융인공사 B 4.65%, 용융인공사 A1 5.5%, 용융인공사 A2 21.5%, 소결인공사 B 33.5%, 용융인공사 A3 45.45%, 용융인공사 A4 47%, 소결인공사 C2 56.1%, 소결인공사 A 57.6%, 소결인공사 C1 94.85%, 소결인공사 D2 96.3, 소결인공사 D1 97.85%이다. 따라서 주강품 구조를 위한 주물사 선택에 있어, 주물사 소착결함 발생을 억제하기

위해서는 크로마이트사, 용융인공사 A1 및 용융인공사 B가 그 외 주물사에 비해 적합할 것으로 판단된다. 또한, 앞서 기술한 바와 같이 밀도에 따른 주물사 실사용량, 주물사 형상에 따른 주형강도, 주물사의 물리적 및 열적 내구성, 주물사의 내열특성을 종합적으로 고려하였을 때에 용융인공사 A1 또는 용융인공사 B가 대형주강품 주조에 가장 적합한 구형의 인공사로 판단된다.



IV. 결론

대형주강품 구조에 적합한 인공사 선택을 위해, 조립소결법으로 제조된 소결 인공사 6종, 용융분사법으로 제조된 용융인공사 5종, 분쇄법으로 제조된 분쇄 인공사 3종, 천연규사 2종, 크로마이트사에 대한 주물사 물성, 주형강도, 물리적 내구성, 열적 내구성, 내열특성, 소착평가 주강시험편 구조시험 결과는 다음과 같다.

- 1) 주물사 입형 및 구형도 평가 결과, 천연규사, 크로마이트사, 분쇄인공사는 형상이 환형 또는 다각형이고, 용융인공사, 소결인공사는 형상이 구형이며, 소결인공사에 비해 용융인공사의 표면이 평활하고, 구형도가 높았다.
- 2) 알카리자경성폐놀수지 적용 주형강도 평가 결과, 용융인공사의 주형강도가 소결인공사, 분쇄인공사, 크로마이트사 대비 높았다.
- 3) 물리적 내구성 평가 결과, 분쇄인공사, 크로마이트사, 천연규사에 비해, 소결인공사, 용융인공사의 주물사 파쇄율이 낮았으며, 용융인공사의 주물사 파쇄율이 가장 낮았다.
- 3) 열적 내구성 평가 결과, 분쇄인공사, 소결인공사, 천연규사, 크로마이트사의 가열·급냉 파쇄율은 0.5%이하인 반면, 용융인공사의 가열·급냉 파쇄율은 2.0~3.8% 수준으로 높았다.
- 4) 용융인공사의 가열·급냉 시의 파쇄 원인은 비결정질상과 결정질 광물상의 수축 및 팽창을 차이에 의해 주물사 입자에 균열 및 박리가 발생되었기 때문인 것으로 판단 된다.
- 5) 주물사별 소결현상 발생 시작온도는 크로마이트사 1,100℃ 이하, 소결인공사 D1 1,200~1,300℃, 소결인공사 C1, D2 1300~1,400℃, 소결인공사 A, C2, 분쇄인공사 A 1,400~1,500℃, 베트남사, 호주사, 용융인공사 A1, A2, A3 약 1,500℃ 이었으며, 소결인공사 B, 용융인공사 A1, B는 1,500℃ 이하에서 소결현상이 발생되지 않았다.
- 6) 1,500℃ 폭열 내열성 평가 결과, 소결인공사 B, 용융인공사 A1 및 B, 분쇄인공사 B에서는 소결 융착물 생성이 없었으며, 그외 주물사에서는 소결 융착물이 생성되었다.

- 7) 주장시편 주조 소착율평가 시험 결과, 크로마이트사, 용융인공사 A1 및 용융인공사 B의 소착결함율이 그외 주물사에 비해서 현저히 낮았다.
- 8) 여러가지 특성을 종합적으로 비교 했을 때, 용융인공사 A1 또는 용융인공사 B가 대형주강품 주조에 가장 적합한 것으로 판단되었다.



V. 참고문헌

- [1] Jisuk Lee, Hanwoong Lee, Sungduk Kim, Sangmok Lee. “Analysis Of Current Status of Ppuri industry in Korea (2009 ~ 2018).” *Journal of Korea Foundry Society* v.41, no. 1 (February, 2021): 26-38
<https://doi.org/10.7777/jkfs.2021.41.1.26>
- [2] 김상훈. “주조 분야 현황 및 미래 전망과 시사점.” *Journal of Korea Foundry Society* v.42 no.1 (February, 2022): 15-31.
- [3] Minsu Cho, Jisuk Lee, Sanghwan Lee, and Sangmok Lee. “Survey of Current Status of Casting Industry in Korea.” *Journal of Korea Foundry Society* v.41, no. 2 (April, 2021): 144- 152.
- [4] Woo-Jin Jung, Dae-Ho Jeong, Young Chul Lee, Jehyun Lee, and Sang Sik Kim. “Mechanical and Corrosion Properties of A487 Cast with Different C and Cr/Mo Contents.” *Journal of Korea Foundry Society* v.35, no. 3 (June, 2015): 45- 52
<https://doi.org/10.7777/jkfs.2015.35.3.045>
- [5] Woo-Jin Jung, Dae-Ho Jeong, Young Chul Lee, Jehyun Lee, and Sang Sik Kim. “Effect of Quenching and Tempering Temperatures on Mechanical Properties of A487 Cast with Different C Contents.” *Journal of Korea Foundry Society* v35, no. 4 (August, 2015): 88- 98.
<https://doi.org/10.7777/JKFS.2015.35.4.088>
- [6] Naotoshi Kurusu, Liu Zhimin, Takao Kuruzumi. “Vacuum Degassed and Controlled Atmosphere Casting Process Applied in High Alloyed Steel Casting.” *Journal of Japan Foundry Engineering Society* v.82 no.1, (2010): 43-46
- [7] Atsushi Nakahashi, Hiroaki Kudo, Daisuke Tomigashi, Yoshinao Fukuma, “A Property Transition of the Artificial Sand and Correspondence to Metal Penetration in the Cast Steel Products.”

- Journal of Japan Foundry Engineering Society* v.89 no.8, (2017):
498–503
- [8] Osamu Tsumura, Kazuo Yoshimoto, Sigeru Yamakuro.
“Development and Utilization of Manufacturing Technique for Large
Steel Casting.” *Journal of Japan Foundry Engineering Society* v.75
no.2, (2003): 141–147
- [9] Heung–Il Park, Woo–Yeol Kim, Cha–Hurn Bae, Chang–Gyu Kim,
Sung–Kil Kim, Ho–Gyu Kwon, Chang–Suk Jeon, Jin–Suk Oh.
“A Case Study on the Solidification Behavior and Defects of Heavy
Steel Castings.” *Journal of Korea Foundry Society* v.26, no. 2
(April, 2006): 57–62.
- [10] Hyeon Gon Oh, DongKook Park, Yangdo Kim, Man Sig Lee. “Effect
of P/Al Molar Ratio and Curing Conditions of CBAPC Binder on
Flexural Strength and Moisture Resistance of Artificial Sand Core.”
Korean journal of metals and materials v.57 no.12 (2019):
808–816.
<http://dx.doi.org/10.3365/KJMM.2019.57.12.808>
- [11] 최창욱, 김종현, 길상철. “주형재료 및 주형제조법과 리사이클링
기술동향.” *Journal of Korea Foundry Society* v.32, no. 5
(October, 2012):241–253.
- [12] Min A Bae, Kyeong Ho Kim, Man Sig Lee, Jae Ho Baek. “Influence
of vegetable wax on the moisture strength development of inorganic
binder.” *Journal of the Korea Academia–Industrial cooperation
Society* v.21 no.10, (2020 년): 574–580
<https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.10.574>
- [13] Min A Bae, Pan Seong Kim, Kyeong Ho Kim, Man Sig Lee, Jae Ho
Baek. “Characterization of the Strength of a Natural Sand and
Artificial Sand Core Manufactured with Inorganic Binder.” *Korean
journal of metals and materials* v.59 no.4 (April, 2021): 273–280.

<http://dx.doi.org/10.3365/KJMM.2021.59.4.273>

- [14] Won-Sub Chung, Dong-Jun Min, Yong-Ha Kim. "Computer Simulation for Smelting Treatment of Waste Casting Sand." *Journal of the Korean Institute of Resources Recycling* v.5 no.3 (1996): 24-30
- [15] Young-Jun Kim, Myung-Hee Chung. "Study on the reuse and recycling of the used foundry sands." *Journal of the Korea Organic Resource Recycling Association* v.18 no.4 (2010): 38-44
- [16] Takashi Kanamori. "Technical Review for Methods and Materials of Green Sand Molding Process." *Journal of Japan Foundry Engineering Society* v.75 no.7, (2003): 504-510
- [17] Chang-Ock Choi, San-Cheol Kil. "The Trend of development Technology for Recycling and Re-use of Foundry Waste." *Journal Of Korea Foundry Society* v.30, no. 1 (February, 2010): 14-21.
- [18] Jun-Oh Choi, Min-Seop Kim, In-Seok Choi, Byung-Wook Cheon, Chang-Ock Choi. "Investigation of Reclamation for Waste CO₂ Mold Sand of Steel Foundries in Busan and Gyeong Area." *Journal of Korea Foundry Society* v.22 no.3, (June, 2002): 121-129
- [19] Eigo Shibuya, Shinichi Sekine. "Reclamation for Foundry Sand and Establishment of Application System to Ester Hardening Process." *Journal of Japan Foundry Engineering Society* v.70 no.10, (1998): 733-739
- [20] Takafumi Oba. "Reclamation of Artificial Sand Using Roller Squeezing Type Sand Reclamation." *Journal of Japan Foundry Engineering Society* v.89 no.8, (2017): 493-497
- [21] Ichiro Hachiya, Mikio Sakamoto, Yoshitaro Matsukawa. "Application of Mullite Ceramic seeds to Mold Sand." *Journal of Japan Foundry Engineering Society* v.64 no.8, (1992): 562-567
- [22] Sadatoshi Koroyasu, Mitsuo Norikuni, Yusuke Shimada. "Cooling

- Capacity of Mold and Effect of Pattern Deformation on Sand Fluidity in Expendable Pattern Casting Process using Artificial Sand.” *Journal of Japan Foundry Engineering Society* v.89 no.8, (2017): 510–515
- [23] Makoto Matsubara. “Characteristics of Artificial Ceramic Sand and its Behavior after Heat Treatment.” *Journal of Japan Foundry Engineering Society* v.76 no.7, (2004): 777–782
- [24] Makoto Matsubara. “Study on Application of Japanese Spherical Ceramics in Latest Sand Reuse Loop System.” *Journal of Japan Foundry Engineering Society* v.77 no.7, (2005): 478–481
- [25] Shunichi Sato, Shota Hori, Shoichi Murata, Hiroshi Makinoz. “Strength Characteristics of Inorganic Thermosetting Mold Using Water Glass Binder and Sintered Spherical Artificial Sand.” *Journal of Japan Foundry Engineering Society* v.93 no.3, (2021): 128–131
- [26] Yutaka Kurokawa. “Properties of Artificial Sand.” *Journal of Japan Foundry Engineering Society* v.89 no.8, (2017): 464–469
- [27] Shoichi Murata. “Properties and Application of Mullite Base Sintered Artificial Ceramic Sand.” *Journal of Japan Foundry Engineering Society* v.89 no.8, (2017): 477–481
- [28] Ryuya Ogusu, Yuya Hamasaki, Manabu Kawakami, Koji Eki. “Properties and Application Techniques of Fused Alumina Artificial Sand.” *Journal of Japan Foundry Engineering Society* v.89 no.8, (2017): 482–486
- [29] Katsunori Kosuge, Motoo Sunaga, Ryuhei Goda, Hiroshi Onodera, Toshimitsu Okane. “Cure and Collapse Mechanism of Inorganic Mold Using Spherical Artificial Sand Water Glass Binder.” *Journal of Japan Foundry Engineering Society* v.89 no.8, (2017): 470–476
- [30] Tohru Mizuki, Yusuke Katayama, Toshinari Sudo, Toshitake Kanno.

- “Establishment of Casting Manufacturing Technology by Introducing Artificial Sand and Realizing Clean Foundry.” *Journal of Japan Foundry Engineering Society* v.89 no.8, (2017): 487–492
- [31] Makoto Matsubara, Shougo Yasukawa. “On the Durability of Ceramics Sand and Various Foundry Sands from the Point of View of Its Mechanical Strength.” *Journal of Japan Foundry Engineering Society* v.66 no.7, (1994): 501–505
- [32] Osamu Tsumura, Daisuke Tomigashi, Hideki Narita, Misao Okino, Keiji Miyauchi. “Influence of Low Thermal Expansion Ratio of Artificial Sand Mold on Open Shrinkage of DCI.” *Journal of Japan Foundry Engineering Society* v.81 no.7, (2009): 337–343
- [33] I. Ikunan, S. Tsuchuya, T. Aizawa, M. Aojima, and Y. Katayama, J. “구조현장의 분진대책.” *Journal of Korea Foundry Society* v.32, no. 4 (August, 2012): 196– 199.
<https://doi.org/10.7777/jkfs.2012.32.4.196>
- [34] Masayuki Kato, Yoshimitsu Ina, Nobuyuki Tanaka, Hidekatsu Abe. “Development of New Sand Reclaiming System for Artificial Sand.” *Journal of Japan Foundry Engineering Society* v.89 no.8, (2017): 504–509
- [35] Steel Founder's Society of America. “Standard Specification for Washed and Dried Sand.” (1967)
- [36] Steel Founder's Society of America. “Tentative Specification for Chromite Sand and Flour.” (1967)
- [37] Woo Chun Choi, Pyung Gyun Shin. "Sand Behavior in Casting Mold Fabrication." *Journal of the Korean Society of Precision Engineering* v.17 no.1 (January, 2000): 164–170.
- [38] Chul–Min Chon, Sujeong Lee, Sung Woo Lee. “Quantitative X–Ray Diffraction Analysis of Synthetic Mineral Mixtures Including Amorphous Silica Using the PONKCS Method.” *Journal of the*

- Mineralogical Society of Korea* v.26 no.1 (March, 2013): 27–34.
doi:10.9727/jmsk.2013.26.1.27.
- [39] Duock Nam Kim, Syung Sun Kim. “Quantitative analysis of iron ore sinter by X-ray powder diffraction method.” *Journal of the Korean crystal growth and crystal technology* v.10 no.3 (March, 2000):264–270
- [40] Jung Ho Ahn. “Application of an XRD–Pattern Calculation Method To Quantitative Analysis of Clay Minerals.” *Journal of the Mineralogical Society of Korea* v.5 no.1 (1992): 32–41
- [41] Hong Bong Park, Sook Moon Kwon, Bae Young Park, Sang Eun Sin. “A Study on the Genesis and Distribution of High Refractory Ore Minerals in Jeonnam Province, Korea.” *Journal of the Korean Institute of Mining Geology* v.15 no.2 (1982): 89–102
- [42] Hojin Ryu, “Mixed Grinding Effect on Kaolinite–Aluminum Trihydroxide Mixture and Its Influence on Mullite Formation.” *Journal of the Korean Ceramic Society* v.34 no.2 (1997): 195–201
- [43] Hyunho Shin, Chool–Soo Kim, Chang Wook Kim, Soon–Nam Chang, Wan Sung, Dong–Hwan Chang, Suk–Won Kang, Suk–Hong Choi. “Quantitative Analysis of High–Temperature Mullitization from a Multicomponent Oxide System.” *Journal of the Korean Ceramic Society* v.35 no.1 (1988): 5–10
- [44] In–Sub Kim, Se–Hoon Kim, Joo–Seok Park, Ji–Yeon Kang, Kyung–Hee Lee and Byung–Ha Lee. “Effect of Mullite on High Alumina Refractory (II).” *Journal of the Korean Ceramic Society* v.38 no.3 (2001): 238–244
- [45] Won Ho Kang. “Refractories of Glass Tank Furnace.” *Journal of The Korean professional engineers association* v.20 no.1 (March, 1987):38–43
- [46] Jung–Min Kwag. “A Basic Study on Crushability of Sands and

- Characteristics of Particle Strength.” *Journal of the Korean geotechnical society* v.15 no.5, (October, 1999): 193–204
- [47] Yong–Soon Cho, Raehyun Kim, Jae–Jung Kim, Woojin Lee.
“Confirmation of particle crushing on the vibrating table test of artificial sand.” *International Symposium on Urban Geotechnics* (September, 2009): 1391–1398
- [48] 이종근. ‘요업개론(4).’ *Journal of the Korean Ceramic Society* v.9 no.1 (1972): 10–17
- [49] 지영아, 강석중. “소결의 기본현상과 이론.” *요업재료의 과학과 기술 (the Korean Ceramic Society)* v.8 no.3 (1993): 290–299
- [50] Yutaka Kurokawa, Hitosh Kambayashy, Masyoshi Ichioka, Hideaki Ota, Hidekazu Miyake.
“Observation of Penetration Defects Cccuring in Cast iron Cast Steel.” *Journal of Japan Foundry Engineering Society* v.74 no.5 (2002): 298–304

VI. 본 연구와 관련된 저자의 학술발표

1) 김광식, 김지태, 김명준, 김창희, 황의경, 김성규, 양시영. “각종 주물사의 파쇄 특성에 대한 연구.” 한국주조공학회 2020 년 추계학술발표대회.

2) 김명준, 김광식, 김지태, 김재형, 김창희, 황의경, 김성규. “각종 주물사의 내열 특성에 대한 연구.” 한국주조공학회 2021 년 추계학술발표대회.

