

기술논문

샌드 3D프린팅 기반 디지털 주조의 개념 정립과 산업 적용: 현장 작업의 디지털 공간 이전을 통한 인력난 대응

한국현[†] · 임태완 · 박주민 · 반성식 · 고호준 · 경세윤

삼영기계(주)

Conceptualization and Industrial Application of Digital Casting Based on Sand 3D Printing: Transferring Foundry Operations from Physical to Digital Space

Kuk-Hyun Han[†], Tae Wan Lim, Ju Min Park, Seongsig Bahn, Hojun Goh and Seyun Kyoung
Samyoung Machinery Co., Ltd., Gongju 32528, Republic of Korea

초 록

본 연구는 현장 수작업을 디지털 공간 작업으로 이전하는 샌드 3D프린팅 기반 디지털 주조 개념을 정립하였다. 이는 작업자의 숙련도에 의존하던 물리적 작업을 디지털 공간의 설계·해석·제조 데이터 기반 작업으로 전환하여 공정 구조를 변화시키는 생산 방식이다. 샌드 3D프린팅 적용 시 공정 단계 수 기준으로 디지털 또는 디지털 연계 공정은 18개 주요 공정 중 2개 (11%)에서 10개 (56%)로 증가하였으며, 이를 통해 작업 중심이 현장 수작업에서 설계 단계로 이동할 수 있음을 확인하였다. 엔진 블록 사례에서는 개발 소요기간 (lead time)이 기존 대비 65% 이상 단축되고, 현장 수작업 시간이 약 50% 감소하였다. 이는 디지털 주조가 현장 수작업 총량을 줄여 주조산업의 인력난에 대응할 수 있는 실질적인 공정 전환 기술임을 시사한다.

핵심용어; 디지털 주조, 샌드 3D프린팅, 공정 전환, 중자 일체화, 인력난.

Abstract

This study establishes the concept of sand 3D-printing-based digital casting, in which manual field work is transferred to digital-space work. Digital casting changes the process structure by transforming physical tasks dependent on operator skill into operations based on design, simulation, and manufacturing data in digital space. The application of sand 3D printing increased the number of digital or digitally linked process items from 2 of 18 steps (11%) to 10 of 18 steps (56%), indicating that the work focus can shift from manual field work to the design stage. In a case study involving an engine block, the development lead time was reduced by more than 65% compared to the conventional process, and manual field work time was reduced by approximately 50%. These results suggest that digital casting is a practical process transformation technology for responding to labor shortages in the foundry industry by reducing the total amount of manual field work.

Key words; Digital casting, Sand 3D printing, Process transformation, Core integration and Labor shortage.

- 한국현: 사장, 임태완: 기술이사, 박주민: 수석연구원, 반성식, 고호준, 경세윤: 선임연구원

Received: May 27, 2026 ; Revised: Jun. 9, 2026 ; Accepted: Jun. 22, 2026

[†]Corresponding author: Kuk-Hyun Han (Samyoung machinery Co., Ltd.)

Tel: +82-41-840-3076, Fax: +82-41-853-4855

E-mail: khhan@sym.co.kr

Journal of Korea Foundry Society

2026. Vol. 46 No. 4, pp. 93~103

<http://dx.doi.org/10.7777/jkfs.2026.46.4.93>

pISSN 1598-706X / eISSN 2288-8381

© Korea Foundry Society, All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

주조산업은 자동차, 조선, 건설기계, 발전·에너지 등 주요 제조업에 핵심 부품을 공급하는 기반 산업이다. 그러나 주조 공정은 고온, 분진, 소음, 중량물 취급 등 열악한 작업환경을 포함하고 있으며, 목·금형 제작, 중자 제작 및 조립, 합형, 가스빼기, 사상 (fettling) 등 다수의 공정이 작업자의 경험과 숙련도에 의존해 왔다. 이러한 공정 특성은 청년층의 현장 유입을 어렵게 하고, 숙련공 고령화에 따른 기술 단절 위험을 높이며, 다품종 소량 및 단납기 수요에 대한 대응력을 저하시키는 요인으로 작용한다. 따라서 주조산업의 인력난은 단순한 인력 수급 문제가 아니라, 현장 숙련작업에 대한 의존도가 높은 공정 구조의 문제로 이해할 필요가 있다.

최근 주조공정에서도 3D CAD, 주조해석, 생산관리 시스템, 품질 데이터 관리 등 다양한 디지털 기술이 활용되고 있다. 그러나 이러한 기술의 활용이 곧바로 주조공정의 디지털 전환을 의미하지는 않는다. 기존의 디지털 기술은 주로 설계 검토, 주조방안 수립, 해석 또는 관리 업무에 활용되어 왔으며, 실제 작업 부하가 집중되는 목·금형 제작, 중자 조립, 주형 제작, 합형, 사상, 검사 등은 여전히 현실 공간의 현장 작업으로 남아 있다. 즉, 디지털 도구가 기존 공정을 보조하더라도 물리적 작업 자체가 유지된다면 현장 수작업 총량과 숙련도 의존성을 줄이는 데에는 한계가 있다.

본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위한 공정 전환 모델로 샌드 3D프린팅 기반 디지털 주조를 검토한다. 본 연구에서 디지털 주조는 현실 공간의 숙련 현장작업을 디지털 공간의 설계·해석·제조 데이터 기반 작업으로 이전하여, 주조공정을 제거·통합·자동화 또는 축소하는 생산 방식으로 정의된다. 이때 디지털 주조의 핵심은 CAD 파일 작성이나 주조해석 수행 자체가 아니라, 사람이 직접 수행하던 물리적 작업의 일부를 설계, 해석 및 출력 데이터 중심의 디지털 공간으로 이전하여 공정 구조를 변화시키는 데 있다.

샌드 3D프린팅은 이러한 디지털 주조를 구현하기 위한 대표적인 공정기술 중 하나이다 [2-5]. 기존 사형주조에서는 제품 형상 구현을 위해 목형 또는 금형을 제작하고, 중자를 개별 제작한 뒤 조립·합형하는 절차가 필요하다. 제품의 내부 형상이 복잡하거나 중자 수가 증가할수록 조립 오차, 분할선 (parting line)에 의한 플래시 (flash) 및 지느러미 (fin) 발생 가능성이 증가하며, 이는 사상 작업량과 품질 편차로 이어진다. 반면 샌드 3D프린팅을 적용하면 3D 모델을 기반으로 주형과 중자를 직접 설계·출력할 수 있으므로, 목·금형 제작을 생략하거나 축소하고, 빼기구배와 분할 구조에 따른 형상 제약을 완화하며, 중자 구조를 일체화하고, 가스빼기 홀과 주조방안을 설계 단계에서 반영할 수 있다 [6]. 이러한 변화는 기존 공정의 단순 자동화가 아니라, 공정의 수행 위치와 역할을 재구성하는 공정 전환에 해당한다.

본 연구는 샌드 3D프린팅 기반 디지털 주조의 기술적 의

미와 산업 적용 가능성을 분석하기 위해 기존 사형주조 공정을 As-Is 공정으로, 샌드 3D프린팅 적용 디지털 주조 공정을 To-Be 공정으로 구분하였다. 또한 전체 공정을 18개 주요 단계로 나누고, 각 단계를 디지털 공간 작업과 현실 공간 작업으로 분류하여 공정 구조의 변화를 비교하였다. 산업 적용 사례로는 복잡 형상의 엔진 블록 사례를 분석하였으며, 목·금형 제작 여부, 중자 조립 및 합형 시간, 사상 시간, 현장 수작업 시간, 중자 수량, 개발 소요기간을 중심으로 공정 전환 효과를 확인하였다.

다만 본 연구에서 제시하는 정량 결과는 자체 적용 제품 기준의 사례 기반 분석이며, 적용 제품의 형상, 생산 수량, 품질 요구조건 및 공정 조건에 따라 달라질 수 있다. 또한 AI 기반 주조 지능화와 자율화는 본 연구의 직접적인 실증 결과가 아니라, 디지털 주조를 통해 형성되는 데이터 기반 공정 구조의 향후 확장 방향으로 다룬다. 따라서 본 연구의 목적은 디지털 주조를 단순한 설계도구 활용이나 생산관리 시스템이 아니라, 현실 공간의 현장 작업을 디지털 공간의 설계·해석·제조 데이터 기반 작업으로 이전하는 주조 생산방식의 전환으로 정의하고, 그 기술적 효과와 산업 적용 가능성을 제시하는 데 있다.

2. 디지털 주조의 개념 정의

2.1 주조공정에서의 디지털 전환 의미

제조업에서 디지털 전환은 일반적으로 데이터 수집, 공정 모니터링, 생산관리 시스템, 자동화 설비 도입 등 다양한 의미로 사용된다. 그러나 주조공정에서 디지털 전환의 핵심은 디지털 장비나 소프트웨어의 도입 자체가 아니라, 현실 공간에서 수행되던 현장 작업을 디지털 공간의 설계·해석·제조 데이터 기반 작업으로 이전하여 현장 수작업과 숙련도 의존성을 줄이는 데 있다.

본 연구에서 현실 공간 작업은 작업자가 실제 주형, 중자, 용탕, 주물 및 검사 대상물을 취급하면서 손, 눈, 경험, 신체적 노동에 의해 수행하는 작업을 의미한다. 반면 디지털 공간 작업은 3D 모델링, 공정 설계, 주조해석, 출력 데이터 생성, 설계 변경, 검사 데이터 분석과 같이 컴퓨터 기반 환경에서 수행되는 작업을 의미한다. 이러한 구분은 주조공정에서 어떤 작업이 현장 숙련공에게 의존하고 있으며, 어떤 작업이 설계 및 데이터 기반 공정으로 이전될 수 있는지를 판단하기 위한 기준이다.

주조공정의 디지털 전환은 기존 현장 작업을 보조하는 수준과 현장 작업 자체를 줄이는 수준으로 구분할 수 있다. 컴퓨터 이용 설계 (Computer-Aided Design, CAD), 컴퓨터 이용 공학 (Computer-Aided Engineering, CAE), 전사적 자원관리 (Enterprise Resource Planning, ERP), 제조실행시스템 (Manufacturing Execution System, MES) 등은 공정 설계의 정확도와 생산관리 효율을 높일 수 있으나, 목·금형

제작, 중자 조립, 합형, 가스빼기, 사상 등 물리적 작업이 그대로 유지된다면 현장 인력 의존성을 낮추는 데에는 한계가 있다. 본 연구에서 다루는 디지털 주조는 디지털 설계와 제조 데이터를 활용하여 물리적 공정의 일부를 제거하거나 통합함으로써 공정 구조를 변화시키는 디지털 전환에 해당한다.

선행 연구에서는 현장 작업이 디지털 공간으로 이전되는 공정 구조 변화 자체를 체계적으로 정의하지는 못하였으나, 샌드 3D프린팅을 실린더 헤드 및 피스톤 주조공정에 적용하여 중자 일체화, 합형 시간 단축, 가스빼기 작업 감소, 품질 개선 및 제조비용 절감 가능성을 제시한 바 있다 [1,2].

2.2 디지털 주조의 정의

본 연구에서 디지털 주조는 다음과 같이 정의된다.

디지털 주조는 현실 공간의 숙련 현장작업을 디지털 공간의 설계·해석·제조 데이터 기반 작업으로 이전하여, 주조공정을 제거·통합·자동화 또는 축소하는 생산 방식이다.

본 연구에서 이전은 현장 작업의 가상 재현이 아니라, 그 발생 원인을 설계·해석·출력 데이터 단계에서 선행 반영하여 물리적 작업을 제거·통합·축소하는 것을 의미한다.

이 정의는 디지털 주조를 특정 장비나 단일 공법에 한정하지 않는다. 디지털 주조의 핵심은 현실 공간에서 사람이 직접 수행하던 물리적 작업을 디지털 데이터와 연결된 설계·해석·제조 과정으로 이전하여 주조공정의 구조를 바꾸는 데 있다. 따라서 3D CAD, CAE, 주조해석, 3D 스캐닝, 샌드 3D프린팅, 디지털 검사, 공정 데이터 관리 등은 디지털 주조를 구성하거나 확장하는 기술 요소로 이해될 수 있다.

이 중 샌드 3D프린팅은 디지털 모델을 실제 주형과 중자로 직접 변환할 수 있다는 점에서 디지털 주조를 구현하는 대표적인 공정기술이다. 샌드 3D프린팅을 적용하면 3D 모델과 출력 데이터를 기반으로 주형과 중자를 직접 제작할 수 있으므로, 목·금형 제작을 생략하거나 축소하고, 중자 구조를 일체화하며, 가스빼기 홀과 주조방안을 설계 단계에서 반영할 수 있다.

디지털 주조의 개념에서 중요한 점은 공정의 디지털 보조와 디지털 이전을 구분하는 것이다. CAD로 설계하고 CAE로 해석하더라도, 이후 목·금형 제작, 중자 조립, 합형, 사상 작업이 기존과 동일하게 수행된다면 이는 기존 주조공정의

디지털 보조에 가깝다. 반면 디지털 주조는 설계와 해석 결과가 제조 데이터로 연결되어 현장 공정의 일부를 실제로 제거하거나 통합한다. 따라서 디지털 주조는 디지털 기술의 사용 여부보다, 현실 공간의 작업을 얼마나 디지털 공간으로 이전하고 공정 구조를 변화시키는가에 의해 판단되어야 한다.

2.3 기존 CAD/CAE 활용 및 스마트 공장과의 차이

디지털 주조는 기존의 CAD/CAE 활용 또는 스마트 공장 관리 시스템과 구분될 필요가 있다. CAD와 CAE는 주조방안 설계, 충전·응고 해석, 결함 예측, 설계 검토에 중요한 도구이다. 그러나 그 결과가 현장 작업의 축소나 공정 제거로 이어지지 않는다면, 공정 구조는 기존 방식과 크게 달라지지 않는다. 즉, CAD/CAE는 디지털 주조를 구성하는 요소일 수 있으나, 그 자체만으로 디지털 주조라고 보기는 어렵다.

스마트 공장 역시 디지털 주조와 동일한 개념은 아니다. 스마트 공장은 생산계획, 설비 상태, 재고, 품질 정보, 작업 지시 등을 데이터로 관리하여 공장 운영 효율을 높이는 데 초점을 둔다. 이러한 시스템은 생산관리와 공정 추적성 향상에 기여하지만, 목·금형 제작, 중자 조립, 합형, 사상과 같은 현장 작업이 그대로 유지된다면 수작업 의존 구조를 충분히 개선하기 어렵다. 따라서 스마트 공장이 공장을 관리하는 체계라면, 디지털 주조는 주조공정의 일부를 설계·해석·출력 데이터 기반 작업으로 선행 반영하여 공정 자체를 줄이고 바꾸는 생산 방식이라고 구분할 수 있다.

디지털 주조의 기술적 차별성은 물리적 공정의 대체성에 있다. 목·금형 제작은 3D 주형 설계와 샌드 3D프린팅으로 대체될 수 있고, 가스빼기 작업은 3D 모델링 단계에서 반영될 수 있으며, 중자 조립과 합형은 일체화 설계와 출력으로 축소될 수 있다. 또한 분할면과 이음선 위치를 설계 단계에서 조정하면, 분할선 및 이음선 부위의 플래시와 지느러미 발생 요인을 줄여 사상 작업량을 감소시킬 수 있다. 이러한 변화는 단순한 정보화나 관리 효율화가 아니라, 현장 작업을 디지털 설계와 제조 데이터로 전환하는 공정 혁신이다.

3. 기존 주조공정의 As-Is 분석

3.1 분석 대상 및 공정 분류 기준

본 장에서는 샌드 3D프린팅 기반 디지털 주조와 비교하기 위해 기존 사형주조 공정을 As-Is 공정으로 정의하고, 이를 디지털 공간 작업과 현실 공간 작업으로 구분하였다. 여기서 As-Is 공정은 도면 접수 이후 주조방안 설계, 중자 박스 제작, 중자 제작·조립, 외형 목·금형 제작, 주형 제작, 합형, 용해·주입, 탈형, 사상 및 품질검사에 이르는 일반적인 주조품 생산 흐름을 의미한다.

공정 분류의 기준은 해당 작업이 주로 수행되는 공간과 작업자의 숙련도 의존성이다. 디지털 공간 작업은 3D CAD, 주조해석, 공정 설계, 데이터 검토와 같이 컴퓨터 기반 환경



Fig. 1. Conceptual definition of digital casting as the transfer of skilled field operations from physical space to digital space.

에서 수행되는 작업으로 정의하였다. 반면 현실 공간 작업은 목·금형, 중자, 주형, 용탕, 주물, 검사 대상물을 실제로 취급 하면서 작업자의 손, 눈, 경험 및 신체적 노동에 의해 수행 되는 작업으로 정의하였다. 이 구분은 단순히 컴퓨터 사용 여 부를 판단하는 것이 아니라, 해당 공정이 현장 수작업과 숙련 도 의존성을 얼마나 포함하는지를 분석하기 위한 기준이다.

3.2 기존 주조공정의 18단계 구성

기존 사형주조 공정은 본 연구에서 18개 주요 공정으로 구 분하였다. 이 중 도면 집수 및 검토, 주조방안 설계 및 주조해 석은 주로 디지털 공간에서 수행되는 작업이다. 그러나 이후 단계인 목·금형 제작, 중자 조형 및 조립, 주형 조형, 가스빼기 홀 드릴 작업, 도형 및 건조, 주형 합형, 용해, 주입, 탈형, 탈

사, 사상, 품질검사는 대부분 현실 공간에서 수행된다.

본 연구의 공정 단계 수 기준 분류 결과, 기존 사형주조 공정에서는 전체 18개 공정 중 2개 공정 (11%)만 디지털 공간 작업으로 분류되었고, 나머지 16개 공정 (89%)은 현실 공간 작업으로 분류되었다. 이는 기존 주조공정에서 디지털 기술이 주로 공정 전단부의 설계·검토 단계에 집중되어 있으 며, 실제 작업 부하가 큰 물리적 공정은 여전히 현장 작업으 로 남아 있음을 보여준다.

Table 1은 기존 사형주조 공정의 18개 주요 단계를 작업 공간 기준으로 분류한 결과이며, Fig. 2는 이를 공정 흐름 관점에서 나타낸 것이다. 기존 공정에서는 디지털 작업이 초 기 설계·검토 단계에 제한되고, 이후 대부분의 공정은 현실 공간 작업으로 이어진다.

Table 1. Classification of As-Is conventional casting process.

No.	Process step	Main operation	Work space	Main characteristics
1	Drawing review	Product drawings, specifications and requirements are reviewed	Digital	Design-data-based review
2	Casting method design and simulation	Gating, riser, solidification and defect risk are reviewed	Digital	CAD/CAE can be applied
3	Core box fabrication	Core boxes are fabricated to make cores	Physical	Fabrication time and tooling cost are required
4	Core making	Cores are made to form internal geometry	Physical	Workload increases with the number of cores
5	Vent hole drilling for cores	Vent holes are drilled in cores	Physical	Hole location and size may depend on operator experience
6	Core assembly	Cores are positioned and assembled	Physical	High-skill work with risk of positional error
7	Core coating and drying	Cores are coated and dried	Physical	Quality variation may occur
8	Mold pattern fabrication	Mold patterns are fabricated to form the mold cavity	Physical	Fabrication time and tooling cost are required
9	Mold making	Sand molds are formed using mold patterns	Physical	Equipment- and operator-dependent process
10	Vent hole drilling for molds	Vent holes are drilled in molds	Physical	Hole location and size may depend on operator experience
11	Mold coating and drying	Molds are coated and dried	Physical	Quality variation may occur
12	Mold assembly, main venting and mold closing	Core and mold assemblies are combined, main venting is performed and the mold is closed	Physical	High-skill work affecting dimensional accuracy and defect risk
13	Melting	Metal is melted and composition is controlled	Physical	High-temperature operation and safety control are required
14	Pouring	Molten metal is transferred and poured	Physical	Affected by process conditions and operator skill
15	Cooling and shakeout	Casting is solidified and removed from the mold	Physical	Affected by product size and process conditions
16	Sand removal and gate removal	Sand, gates and risers are removed	Physical	Pre-fettling operation
17	Fettling	Parting-line flash, fins and remaining projections are removed	Physical	Labor-intensive and undesirable operation
18	Quality inspection	Appearance, dimensional accuracy and defects are inspected	Physical	May depend on visual inspection and operator judgment

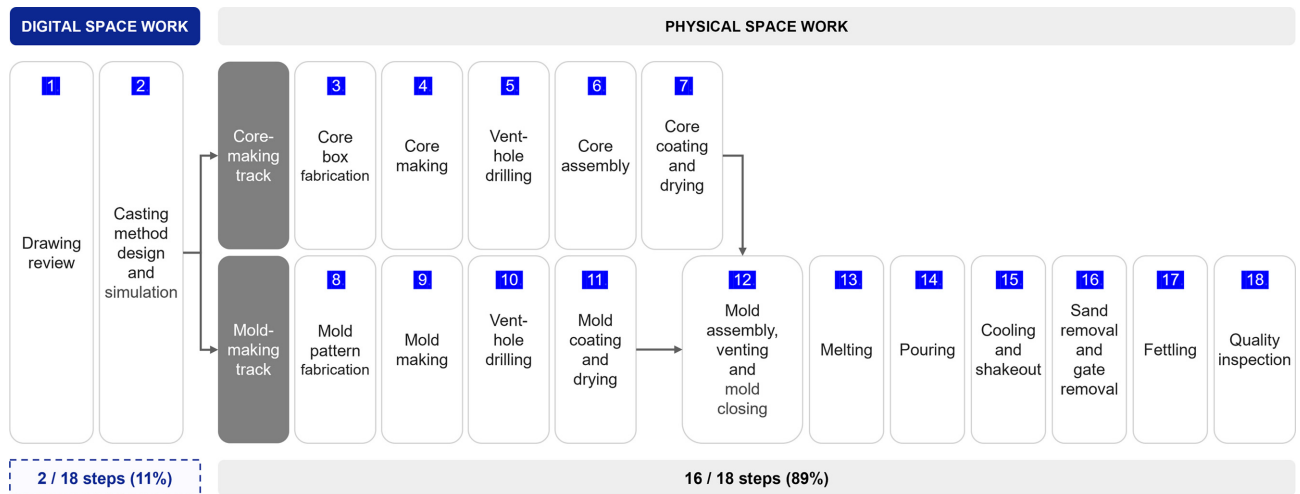


Fig. 2. As-Is process structure of conventional sand casting classified by digital and physical work spaces.

3.3 현실 공간 작업 중심 구조와 주요 병목

기존 사형주조 공정에서 현실 공간 작업 비중이 높은 이유는 제품 형상 구현이 물리적 목·금형, 중자, 주형 및 작업자의 조립 작업에 의존하기 때문이다. 이 과정에서 형상 구현은 디지털 데이터만으로 완결되지 않고, 물리적 형과 현장 숙련 작업을 통해 이루어진다.

대표적인 병목은 목·금형 제작, 중자 조립 및 합형, 가스빼기 홀 가공, 사상 공정이다. 목·금형 제작은 개발품이나 다품종 소량 제품에서 제작 기간과 비용 부담을 증가시키며, 설계 변경 시 수정 또는 재제작이 필요하다. 중자 조립과 합형은 복잡한 내부 형상 구현을 위해 높은 숙련도를 요구하며, 중자 수가 증가할수록 조립 공수, 위치 오차 및 파손 위험이 커진다. 가스빼기 홀 가공은 위치와 크기가 작업자 경험에 의존하기 쉽고, 사상 공정은 분할선, 중자 이음선, 탕구 및 압탕 제거부에서 발생한 플래시와 지느러미를 제거하는 고강도 작업이다.

이와 같이 As-Is 공정의 한계는 특정 단일 공정의 비효율보다, 목·금형 제작에서 중자 조립, 합형, 사상으로 이어지는 현실 공간 작업의 누적 구조에서 발생한다. 따라서 기존 공정의 디지털 전환을 평가할 때에는 CAD/CAE 활용 여부뿐 아니라, 물리적 현장 작업이 실제로 제거·통합·축소되는지를 함께 검토할 필요가 있다.

4. 샌드 3D프린팅 기반 디지털 주조 To-Be 공정

4.1 To-Be 공정의 기본 구조

샌드 3D프린팅 기반 디지털 주조의 To-Be 공정은 기존 사형주조에서 현실 공간의 현장 작업으로 수행되던 일부 공정을 설계·해석·출력 데이터 기반 작업으로 선행 반영하는 데 특징이 있다. 기존 공정이 물리적 목·금형, 주형, 중자 및 합

형 작업을 거쳐 형상을 구현하는 반면, To-Be 공정은 3D 모델을 기반으로 주형과 중자를 직접 설계·출력하여 공정 구조를 단순화한다.

To-Be 공정의 핵심은 단순한 자동화가 아니라 공정의 재배치이다. 즉, 기존에는 현장에서 수행되던 형상 구현, 가스 배출 경로 형성, 중자 위치 맞춤, 분할면 관리, 플래시 및 지느러미 발생 요인 제거가 설계 단계에서 사전 반영된다. 이에 따라 작업의 중심은 현실 공간의 반복 수작업에서 디지털 공간의 모델링, 구조해석, 출력 데이터 생성 및 설계 검증으로 이동한다.

공정 단계 수 기준으로 기존 사형주조 공정에서는 18개 공정 중 2개 공정 (11%)만 디지털 공간 작업으로 분류되었다. 반면 샌드 3D프린팅 기반 To-Be 공정에서는 목·금형 제작, 가스빼기 홀 가공, 중자 제작·조립, 주형 제작 및 일부 검사 항목이 디지털 또는 디지털 연계 공정으로 전환되면서 10개 공정 (56%)이 디지털 또는 디지털 연계 공정으로 분류되었다. 이는 기존 현장 작업이 모두 제거된다는 의미가 아니라, 일부 물리적 작업의 발생 원인이 설계·출력 데이터 기반 공정으로 이전된다는 의미이다. 품질검사는 검사 대상을 취급하는 현실 공간 작업과 검사 결과를 디지털 모델 및 공정 데이터와 연결하는 디지털 공간 작업이 결합된 하이브리드 공정이다. 본 연구에서는 To-Be 공정에서 새롭게 강조되는 데이터 연계 기능을 기준으로 이를 디지털 연계 공정에 포함하였다.

Fig. 3은 To-Be 공정에서 디지털 공간 작업과 현실 공간 작업의 배치 변화를 나타낸 것이다. 기존 공정에서는 디지털 작업이 초기 설계 단계에 제한되었으나, To-Be 공정에서는 주형·중자 설계, 가스빼기 설계, 출력 데이터 생성, 주형·중자 출력 및 검사 데이터 연계가 디지털 공간 작업으로 확장된다.

Table 2. Transformation of As-Is process steps into To-Be digital casting process.

No.	Process step(As-Is)	Process step(To-Be)	Work space in To-Be	Change status
1	Drawing review	Drawing review	Digital	Maintained
2	Casting method design and simulation	Casting method design and simulation	Digital	Maintained
3	Core box fabrication	Core structure design from 3D data	Digital	Process elimination
4	Core making	Core printing from digital data	Digital	Automated fabrication
5	Vent hole drilling for cores	Core venting path modeling	Digital	Digitalization
6	Core assembly	Integrated or minimized core assembly design	Digital	Process integration and reduction
7	Core coating and drying	Coating and drying of printed cores, if required	Physical	Maintained or reduced
8	Mold pattern fabrication	Mold structure design from 3D data	Digital	Process elimination
9	Mold making	Mold printing from digital data	Digital	Automated fabrication
10	Vent hole drilling for molds	Mold venting path modeling	Digital	Digitalization
11	Mold coating and drying	Coating and drying of printed molds, if required	Physical	Maintained or reduced
12	Mold assembly, main venting and mold closing	Reduced mold assembly and mold closing	Physical	Process reduction
13	Melting	Melting	Physical	Maintained
14	Pouring	Pouring	Physical	Maintained
15	Cooling and shakeout	Cooling and shakeout	Physical	Maintained
16	Sand removal and gate removal	Sand removal and gate removal	Physical	Maintained
17	Fettling	Reduced fettling after design-stage optimization	Physical	Process reduction
18	Quality inspection	Quality inspection linked with digital model and process data	Physical+Digital	Data integration

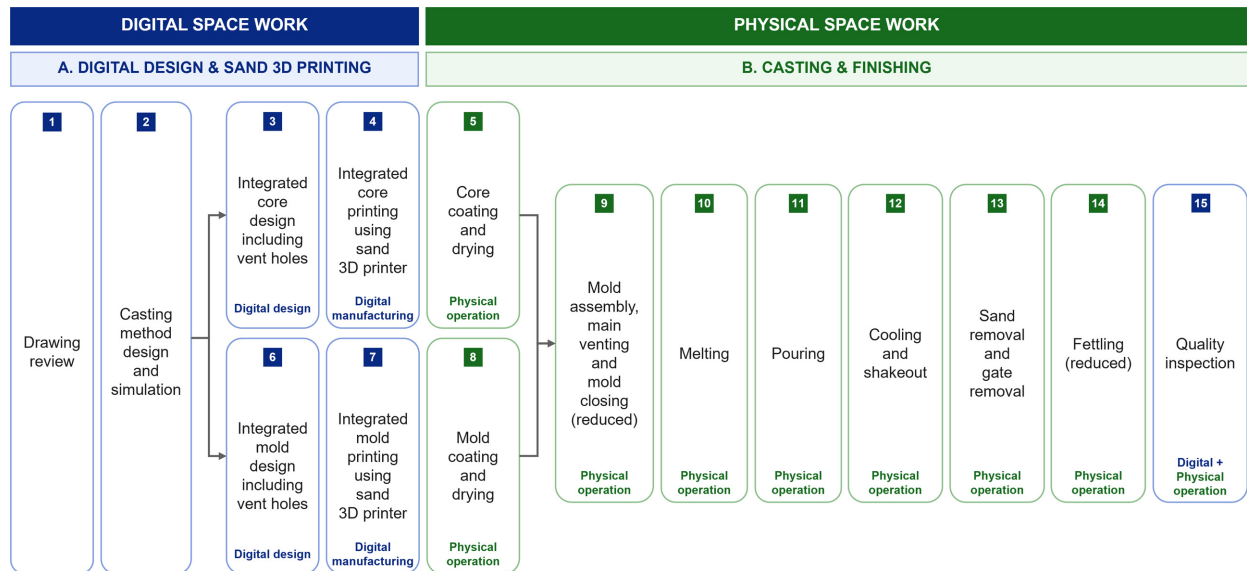


Fig. 3. To-Be process structure of sand 3D printing-based digital casting with transferred digital-space work.

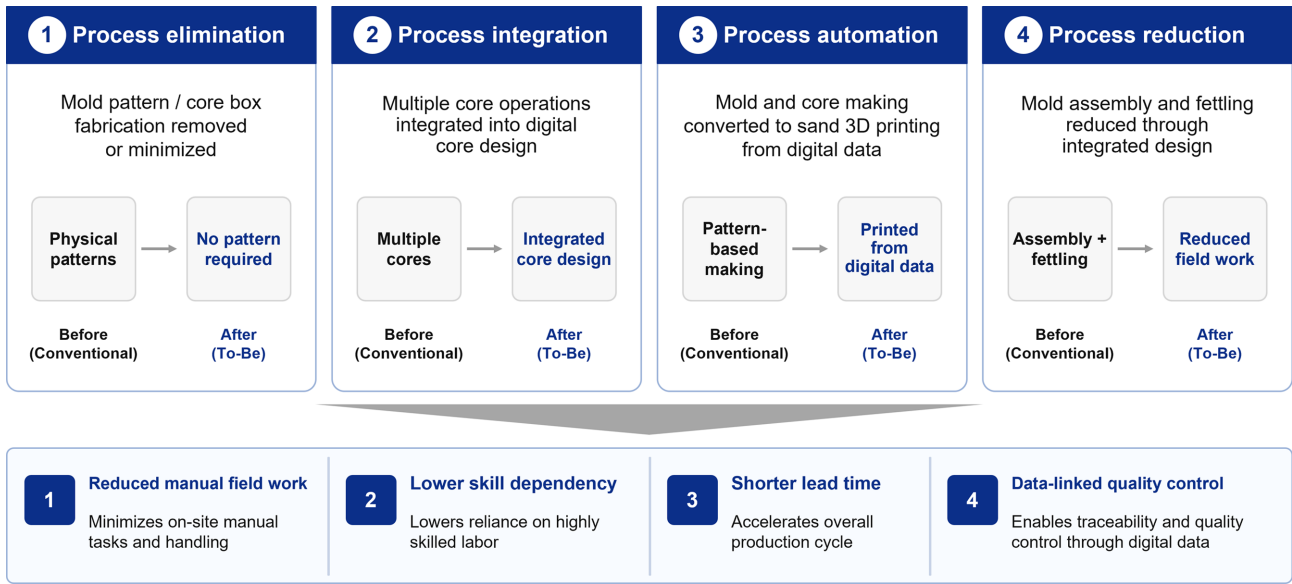


Fig. 4. Four process transformation mechanisms enabled by sand 3D printing-based digital casting.

4.2 디지털 주조의 공정 전환 메커니즘

샌드 3D프린팅 기반 디지털 주조의 공정 전환은 공정 제거, 공정 통합, 공정 자동화, 공정 축소의 네 가지 메커니즘으로 설명할 수 있다.

첫째, 공정 제거이다. 개발품 또는 다품종 소량 제품에서는 3D 모델과 출력 데이터를 기반으로 주형과 중자를 직접 제작할 수 있으므로, 목·금형 제작 공정을 생략하거나 축소할 수 있다. 또한 설계 변경 시 물리적 목·금형 수정이 아니라 데이터 수정과 재출력으로 대응할 수 있다.

둘째, 공정 통합이다. 기존 공정에서는 복잡한 내부 형상을 구현하기 위해 여러 개의 중자를 제작하고 조립해야 했다. To-Be 공정에서는 중자 구조를 3D 설계 단계에서 일체화하거나 최소 조립 단위로 구성할 수 있어, 중자 조립 공수와 위치 오차 발생 가능성을 줄일 수 있다 [5].

셋째, 공정 자동화이다. 샌드 3D프린팅은 디지털 파일을 기반으로 주형 또는 중자를 적층 제조하므로, 주형·중자 제작 과정의 반복성과 재현성을 높일 수 있다. 다만 이는 전체 주조공정의 완전 자동화를 의미하지 않으며, 디지털 데이터 기반 제작이 가능한 일부 공정의 자동화로 이해해야 한다.

넷째, 공정 축소이다. 사상 작업은 완전히 제거되기 어렵지만, 주형과 중자의 분할면, 이음선 위치, 탕구·압탕 배치 및 가스 배출 구조를 설계 단계에서 조정하면 플래시와 지느러미 발생 요인을 줄일 수 있다. 이는 사상 작업을 빠르게 수행하는 것이 아니라, 사상 발생 원인을 설계 단계에서 줄이는 접근이다 [7].

Fig. 4는 샌드 3D프린팅 기반 디지털 주조에서 나타나는 네 가지 공정 전환 메커니즘을 정리한 것이다.

4.3 To-Be 공정의 적용 효과와 한계

To-Be 공정은 일부 현장 작업의 발생 원인을 설계·출력 데이터 단계에서 선행 반영함으로써 현장 수작업 부담과 숙련도 의존성을 낮출 수 있다. 또한 물리적 목·금형 없이 주형과 중자를 제작할 수 있어 설계 변경과 반복 검증에 대한 대응 속도를 높일 수 있다.

그러나 이러한 효과가 모든 제품과 생산 조건에서 동일하게 나타나는 것은 아니다. 샌드 3D프린팅 기반 디지털 주조는 목·금형 제작 부담이 큰 개발품, 복잡 형상 제품, 단납기 제품, 다품종 소량 제품에서 효과가 크지만, 단순 형상의 대량 반복 생산에서는 기존 금형 기반 공정이 경제성을 가질 수 있다. 또한 출력 가능 크기, 출력 시간, 소재 및 바인더 특성, 모래 강도, 표면 조도, 사상 요구 수준, 용탕 주입 조건 등 기술적 제약도 고려해야 한다.

따라서 샌드 3D프린팅 기반 디지털 주조는 기존 주조공정을 전면 대체하는 단일 해법이 아니라, 제품 특성과 생산 목적에 따라 선택적으로 적용되는 공정 전환 모델로 이해할 필요가 있다.

5. 복잡 형상의 엔진 블록에 대한 디지털 주조 적용 사례

5.1 적용 대상 및 분석 범위

본 장에서는 샌드 3D프린팅 기반 디지털 주조의 산업 적용 효과를 검토하기 위해 복잡 형상의 엔진 블록 사례를 분석하였다. 해당 제품은 복잡한 내부 형상, 다수의 중자 적용 가능성, 높은 치수 안정성 요구 및 반복 설계 검토 필요성을 갖는 주조품으로, 기존 사형주조 공정에서는 목·금형 제작,

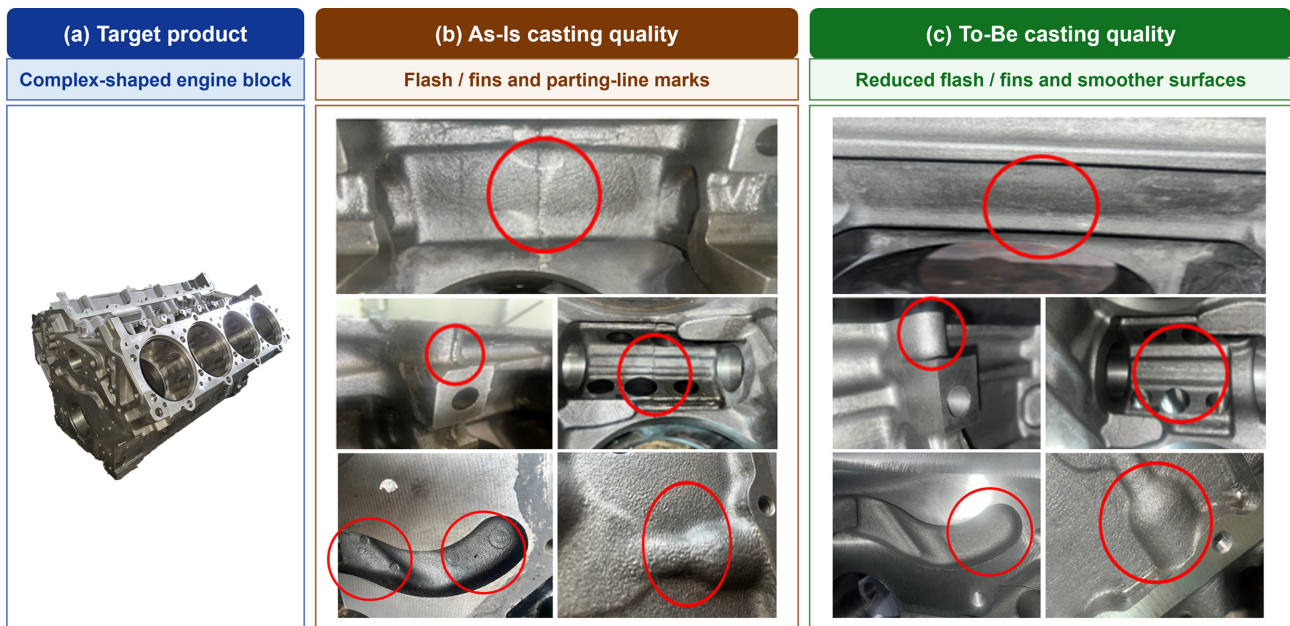


Fig. 5. Engine block case study; (a) target product, (b) As-Is casting quality, and (c) To-Be casting quality after applying digital casting.

중자 제작 및 조립, 합형, 사상 작업의 부담이 크게 나타나 는 대상이다.

본 사례의 분석 범위는 제품의 상세 설계조건이 아니라 공정 전환 효과에 있다. 따라서 제품 식별이 가능한 세부 형상, 치수, 고객 정보, 구체적 주조조건 및 검사기준은 분석 대상에서 제외하고, 공개 가능한 범위에서 공정 변화와 정량 성과를 중심으로 정리하였다. 분석 항목은 목·금형 제작 여부, 중자 수량, 합형 시간, 사상 시간, 현장 수작업 시간 및 개발 소요기간으로 구성하였다.

성과 데이터는 자체 적용 제품 기준의 작업시간 측정과 공정 기록을 기반으로 하였다. 따라서 본 결과는 특정 제품군에 대한 사례 기반 성과로 해석해야 하며, 모든 주조품에 동일한 비율로 일반화하기에는 한계가 있다.

5.2 디지털 주조 적용 내용

본 사례에서는 기존의 목·금형 기반 공정을 3D 주형 및 중자 설계 기반 공정으로 전환하고, 샌드 3D프린팅으로 주형과 중자를 직접 제작하였다. 이를 통해 목·금형 제작을 생략하고, 중자 조립과 합형 작업을 축소하였다.

가스빼기 구조는 현장 드릴 작업 대신 3D 모델링 단계에서 위치와 형상을 결정하고 출력 데이터에 포함시켰다. 이에 따라 가스빼기 작업의 현장 의존성을 줄이고, 동일한 구조를 반복 구현할 수 있도록 하였다.

중자 구조는 가능한 범위에서 일체화 또는 최소 조립 단위로 설계하여 조립 공수와 위치 오차 발생 가능성을 줄였다. 또한 주형과 중자의 분할면, 중자 조립부 이음선 및 탕구·압

탕 배치를 조정하여 플래시와 지느러미 발생 요인을 설계 단계에서 줄이고자 하였다.

Fig. 5는 복잡 형상 엔진 블록 사례의 적용 대상과 As-Is 및 To-Be 주조 품질을 비교하여 나타낸 것이다.

5.3 적용 결과

본 사례의 정량 결과는 자체 적용 제품의 공정 기록과 작업시간 측정값을 기준으로 산정하였으며, 공개 가능한 항목은 실제 수량으로, 제품 식별 가능성이 있는 작업시간 항목은 기존 공정 대비 감소율로 제시하였다.

복잡 형상의 엔진 블록 사례에서 샌드 3D프린팅 기반 디지털 주조를 적용한 결과, 목·금형 제작 없이 개발을 진행할 수 있었다. 기존 공정에서 목·금형 제작은 개발 초기의 주요 병목이었으나, 본 사례에서는 3D 모델과 출력 데이터를 기반으로 주형과 중자를 직접 제작함으로써 목·금형 제작 기간을 제거하였다. 그 결과 개발 소요기간은 기존 대비 65% 이상 단축되었다.

중자 조립 및 합형 공정에서는 일체화 설계와 조립 단위 축소의 효과가 확인되었다. 기존 방식에서 다수의 중자를 정렬하고 합형하는 작업은 높은 숙련도를 요구하였으나, 디지털 주조 적용 후 중자 수량과 조립 부담이 감소하였다. 본 사례에서는 중자 수량이 17개에서 6개로 감소하였으며, 합형 시간은 기존 대비 57% 단축되었다.

사상 공정에서도 작업량 감소 효과가 나타났다. 주형과 중자의 분할면을 설계 단계에서 조정하고, 일체화 설계를 통해 이음선과 분할선 발생 요인을 줄임으로써 사상 시간이 기존

Table 3. Process transformation and quantitative results in the complex engine block case.

Process item	Conventional process	Digital casting process	Main effect	Quantitative result	Data characteristics
Pattern fabrication	Physical patterns are fabricated before mold making	Molds and cores are designed and printed from 3D data	Elimination of pattern fabrication and lead-time reduction	Omitted in this case	Case-based process records
Core making / Core integration	Multiple cores are individually made	Integrated cores or minimized assembly units are designed	Reduction in core number and assembly burden	17 → 6 cores (approximately 65% reduction)	Case-based man-hour comparison
Vent hole machining	Vent holes are drilled after core or mold making	Venting paths are modeled at the design stage	Reduction in field drilling work and improved repeatability	Field drilling work was replaced by design-stage venting path modeling	Case-based process records
Core assembly and mold closing	Cores are manually positioned, assembled and closed	Assembly is reduced through integrated design and printing	Reduction in mold closing time and positional error	57% reduction in mold closing time	Measured data from internal application
Fettling	Flash, fins and remaining projections are removed after casting	Flash and fin generation factors are reduced by design optimization	Reduction in fettling time and workload	Approximately 40% reduction in fettling time	Measured and case-based work records
Development response	Pattern modification or refabrication is required	Design changes are reflected by data modification and reprinting	Improved response to design changes	More than 65% reduction in development lead time	Case-based schedule comparison
Manual field work	Multiple physical operations are performed in sequence	Some operations are transferred to digital design and printing data	Reduction in total manual workload	Approximately 50% reduction in manual field work time	Case-based process analysis

대비 약 40% 감소하였다. 현장 수작업 시간은 전체적으로 약 50% 감소하였으며, 이는 목·금형 제작 제거, 중자 조립 공수 감소, 합형 시간 단축 및 사상 작업 축소가 복합적으로 작용한 결과로 해석된다.

5.4 사례 분석의 기술적 의미와 한계

본 사례는 샌드 3D프린팅 기반 디지털 주조가 복잡 형상 주조품의 개발 공정에서 현장 수작업을 줄이는 공정 전환 모델로 활용될 수 있음을 보여준다. 목·금형 제작 제거, 중자 수량 감소, 합형 시간 단축, 사상 시간 감소는 현장 작업의 일부가 설계·출력 데이터 기반 작업으로 선행 반영되면서 나타난 결과로 해석된다.

다만 본 사례의 성과는 복잡 형상의 엔진 블록이라는 특정 제품군에 기반한 결과이므로 일반화에는 제한이 있다. 디지털 주조의 효과는 제품 크기, 형상 복잡도, 중자 수, 생산 수량, 표면품질 요구수준, 검사 기준, 출력 가능 크기, 출력 시간, 소재 및 바인더 특성 등에 따라 달라질 수 있다. 특히 단순 형상의 대량 반복 생산 제품에서는 기존 금형 기반 공정이 경제성을 가질 수 있으므로, 디지털 주조 적용 여부는 제품 별로 판단해야 한다.

또한 본 사례는 공정 시간과 공수 저감 효과를 중심으로 분석하였으므로, 향후 반복 생산 조건에서 작업자별 편차, 불량률, 재작업률, 치수검사 결과 및 경제성 데이터를 추가로

확보할 필요가 있다.

6. 고찰 및 결론

6.1 공정 전환 효과의 기술적 의미

본 연구에서 제시한 디지털 주조의 핵심은 디지털 기술의 단순 추가가 아니라, 현장 작업의 발생 원인을 설계·해석·출력 데이터 단계에서 선행 반영하여 공정 구조를 바꾸는 데 있다. 기존 사형주조 공정은 도면 검토와 주조방안 설계·해석을 제외한 대부분의 공정이 현실 공간 작업으로 남아 있었으며, As-Is 공정의 디지털 공정 비율은 공정 단계 수 기준 2/18개 (11%)로 분석되었다.

반면 To-Be 공정에서는 주형·중자 설계, 가스빼기 구조, 중자 일체화 및 분할면 조정이 설계·출력 데이터 단계에서 선행 반영되며, 10/18개 공정 (56%)이 디지털 또는 디지털 연계 공정으로 분류되었다.

복잡 형상의 엔진 블록 사례에서는 이러한 공정 전환 효과가 정량적으로 확인되었다. 자체 적용 제품 기준의 작업시간 측정과 공정 기록에 따르면, 목·금형 제작 없이 개발이 진행되었고, 중자 수량은 17개에서 6개로 감소하였다. 또한 합형 시간은 57%, 사상 시간은 약 40%, 현장 수작업 시간은 약 50% 감소하였으며, 개발 소요기간은 기존 대비 65% 이상 단축되었다. 이는 특정 단일 공정의 자동화 효과라기보다, 목

·금형 제작 제거, 중자 조립 단위 축소, 합형 시간 단축 및 사상 작업 저감이 복합적으로 작용한 결과로 해석된다.

따라서 디지털 주조의 기술적 의미는 사람을 단순히 대체하는 데 있지 않다. 보다 중요한 점은 현장에서 작업자가 수행해야 할 물리적 작업의 수와 시간을 줄이고, 제한된 현장 인력을 용해, 주입, 탈형, 품질 안정화, 안전관리 등 핵심 공정 에 집중시킬 수 있는 공정 구조를 제공한다는 데 있다. 이 관점에서 디지털 주조는 주조산업의 인력난에 대응하기 위한 공정 구조 개선 모델로 이해할 수 있다.

6.2 적용 범위와 한계

샌드 3D프린팅 기반 디지털 주조의 효과는 모든 제품과 생산 조건에서 동일하게 나타나는 것은 아니다. 본 공정은 목·금형 제작 부담이 크고, 내부 형상이 복잡하며, 다수의 중자와 빈번한 설계 변경이 요구되는 개발품, 단납기 제품, 다품종 소량 제품에서 상대적으로 큰 효과를 기대할 수 있다. 반면 단순 형상의 대량 반복 생산에서는 기존 금형 기반 공정이 비용과 생산성 측면에서 여전히 경제성을 가질 수 있다.

또한 샌드 3D프린팅 적용 여부는 출력 가능 크기, 출력 시간, 소재 및 바인더 특성, 모래 강도, 표면 조도, 사상 요구 수준, 주입 조건 등을 함께 고려하여 판단해야 한다. 특히 대형 주물이나 높은 치수 안정성이 요구되는 제품에서는 출력물의 취급 안정성, 주입 중 변형 가능성, 후처리 조건 및 검사 기준을 충분히 검토할 필요가 있다.

본 연구의 산업 적용 사례 역시 특정 제품군에 대한 사례 기반 분석이라는 한계를 갖는다. 합형 시간, 사상 시간, 현장 수작업 시간, 중자 수량, 개발 소요기간에서 감소 효과가 확인되었으나, 결과를 모든 주조품에 동일하게 일반화하기는 어렵다. 향후에는 다양한 제품군과 반복 생산 조건에서 공정 시간, 작업자별 편차, 불량률, 재작업률, 치수검사 결과, 경제성 및 작업환경 개선 효과에 대한 추가 데이터 확보가 필요하다.

6.3 데이터 기반 품질관리 및 AI 확장 방향

디지털 주조는 AI 적용 자체를 의미하지는 않지만, 향후 데이터 기반 품질관리와 주조 지능화로 확장될 수 있는 공정 구조를 제공한다. 샌드 3D프린팅 기반 공정에서는 제품 형상, 주형·중자 설계, 주조방안, 주조해석 결과, 출력 조건, 검사 결과 및 불량 이력을 디지털 데이터로 연결할 수 있다 [8]. 이러한 데이터가 축적되면 결함 발생 위치와 공정 조건 간의 관계를 분석하고, 품질 문제의 원인을 보다 체계적으로 추적할 수 있다 [9]. 특히 샌드 3D프린팅 중자의 내부 공간을 가스 배출, 보온, 냉각 및 압탕 설계 영역으로 활용하는 접근은 주조방안 설계가 물리적 형상 제약을 넘어 디지털 설계 공간으로 확장될 수 있음을 보여준다.

향후에는 축적된 데이터를 활용하여 주조방안 최적화, 주형 및 중자 설계 지원, 결함 예측, 비전 검사, 자동 견적 및 설

비 예지보전 등으로 확장할 수 있다 [10]. 다만 이러한 AI 기반 지능화와 자율화는 본 연구의 직접 실증 결과가 아니라, 디지털 주조를 통해 형성되는 데이터 기반 공정 구조의 후속 확장 방향으로 이해해야 한다. 이를 위해서는 제품군별 데이터 축적, 품질 결과와 공정 조건의 연결, 반복 검증, 현장 자동화의 안전성 및 경제성 검토가 선행되어야 한다.

6.4 결론

본 연구는 샌드 3D프린팅 기반 디지털 주조를 현실 공간의 숙련 현장작업을 디지털 공간의 설계·해석·제조 데이터 기반 작업으로 이전하여, 주조공정을 제거·통합·자동화 또는 축소하는 생산 방식으로 정의하고, 기존 사형주조 공정과의 비교 및 산업 적용 사례를 통해 그 기술적 의미를 분석하였다.

As-Is 분석 결과, 기존 사형주조 공정은 도면 검토와 주조방안 설계·해석 등 일부 전단부 공정만 디지털 공간에서 수행되고, 대부분의 형상 구현과 후처리 공정은 현실 공간 작업에 의존하는 구조를 보였다. 반면 To-Be 공정에서는 일부 현장 작업의 발생 원인이 설계·출력 데이터 단계에서 선행 반영되면서, 공정 단계 수 기준 디지털 또는 디지털 연계 공정 비율이 확대될 수 있음을 확인하였다.

복잡 형상의 엔진 블록 사례에서는 목·금형 제작이 생략되었고, 중자 수량, 합형 시간, 사상 시간, 현장 수작업 시간 및 개발 소요기간이 감소하였다. 이는 샌드 3D프린팅 기반 디지털 주조가 복잡 형상 주조품에서 현장 수작업과 숙련도의 의존성을 줄일 수 있는 공정 전환 모델임을 보여준다.

다만 본 연구의 정량 결과는 자체 적용 제품 기준의 사례 기반 분석이며, 적용 효과는 제품 형상, 생산 수량, 품질 요구조건 및 공정 조건에 따라 달라질 수 있다. 따라서 향후에는 다양한 제품군과 반복 생산 조건에서 품질 안정성, 불량률, 재작업률 및 경제성 데이터를 추가로 확보할 필요가 있다. 결론적으로 샌드 3D프린팅 기반 디지털 주조는 현장 작업의 발생 원인을 설계·출력 데이터 단계에서 선행 반영함으로써 인력난, 개발 소요기간 단축 요구, 다품종 소량생산 수요에 대응할 수 있는 유효한 주조공정 전환 기술로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국방기술진흥연구소의 방산혁신기업100 기술개발 전용지원사업의 지원을 받아 수행되었으며 [과제번호: R240209], 본 연구의 디지털 주조 적용 사례는 중소벤처기업부의 중소기업기술개발지원사업의 지원을 받아 수행되었습니다 [과제번호: S3223256].

References

- [1] K.H. Han, J.W. Beak, S.Y. Park, T.W. Lim and J.M. Park, J. Korean Soc. Precis. Eng., **38**(9) (2021) 651.

- [2] K.H. Han, J.W. Baek, T.W. Lim and J.M. Park, *Int. J. Metalcast.*, **17** (2023) 2674.
- [3] Sivarupan T, Balasubramani N, Saxena P, Nagarajan D, El Mansori M, Salonitis K, Jolly M and Dargusch MS, *Addit. Manuf.*, **40** (2021) 101889.
- [4] Upadhyay M, Sivarupan T and El Mansori M, *J. Manuf. Process.*, **29** (2017) 211.
- [5] Sama SR, Badamo T and Manogharan G, *Int. J. Metalcast.*, **14**(1) (2020) 12.
- [6] Wang J, Sama SR and Manogharan G, *Int. J. Metalcast.*, **13**(1) (2019) 2.
- [7] Hawaldar N and Zhang J, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **97** (2018) 1037.
- [8] Walker JM, Harris E, Lynagh C, Beckermann C and Williams CB, *Int. J. Metalcast.*, **12**(4) (2018) 785.
- [9] Walker JM, Prokop A, Lynagh C, Beckermann C and Williams CB, *Addit. Manuf.*, **27** (2019) 54.
- [10] Uyan T, Otto K, Silva MS, Vilaça P and Armakan E, *Int. J. Metalcast.*, **17**(1) (2023) 414.