

기술자료

# 로스트왁스 정밀주조 공정 기술 현황

최봉재 · 성시영 \* · 김명균 \*\* · 김영직 †

성균관대학교 신소재공학과, \*자동차부품연구원 소재공정센터, \*\*포항산업과학연구원 신금속연구본부

## Development and Technology of Lost-Wax Investment Casting Process

Bong-Jae Choi, Si-Young Sung\*, Myoung-Gyun Kim\*\*, and Young-Jig Kim†

School of Advanced Materials Science and Engineering, Sungkyunkwan University

\*Metal Materials & Processing Engineering Center, Korea Automotive Technology Institute

\*\*New Materials Research Department, Research Insotitute of Industrial Science and Technology

**Key words :** Investment casting, Lost wax, Net shape.

### 1. 서 론

최근 지구환경에 친화적이며, 효율 향상을 통한 에너지 사용량 및 폐기물 배출량 저감을 기할 수 있으며, 동시에 고품위, 고기능, 저비용인 부품소재·공정기술 개발이 중요하게 되었다. 이러한 관점에서, 재료 측면에서는 다양한 소재에 대해 적용할 수 있고, 제조기술 측면에서는 복잡한 형상의 일체형 부품을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 후 가공 공정을 생략하면서 정형(Net-shape)부품으로 제조할 수 있는 정밀주조기술의 중요성이 점차 증대되고 있다. 정밀주조기술은 1회 소모성 패턴(모형)과 1회 소모성 주형을 사용하여, 제조 및 가공이 어려운 정교한 형태의 금속 부품을 높은 정밀도로 제작할 수 있는 특수주조기술의 한 방법으로, Fig. 1에 나타나 있듯이, 3차원 곡면의 복잡한 형상 때문에 종래의 기술로는 제작이 어려운 터빈 블레이드 및 내열 특성이 요구되는 항공기 부품을 제작할 경우에 적용된다. 특히, 21세기 문명은 항공 운송 및 세계 전력생산의 상당 부분을 차지하고 있는 가스터빈엔진에 의존하고 있으며, 가스터빈엔진 개발과 정밀주조 산업과의 관계 및 그에 따른 시너지는 아무리 강조하여도 지나치지 않다. 이와 같은 관점에서, 정밀주조

적용부품 중, 항공부품은 중국의 ARJ21-700 상업생산 개시 및 2014년 C919 점보기 생산, Boeing Dreamliner 생산이 예정되어 있고, A380, A350, 787, 748 등 신 모델 도입이 이루어지고 있으며, 산업용 가스터빈부품의 경우 2009년 4분기 이후 30%정도의 생산량 감소가 있었으나, 전력수요의 지속적 증가가 필연적이므로, 장기적으로 볼 때 이 부품의 시장규모는 이전으로 회복될 것으로 판단된다. 한편, 자동차부품의 경우, 2008년 2분기부터 시작된 승용차 및 상용차 판매 부진을 타개하고자, 2009년 미국 및 유럽에서 정부차원의 자동차 판매 부양책에 힘입어 소형 고효율 승용차 판매가 증가하고 있으며, 일본에서는 터보차저 휠 생산량이 증가하고 있다. 또한 첨단 연료 및 배기 시스템, 다중 터보차저, 직접 연료분사 시스템, 하이브리드 및 전기 자동차 부품에 정밀주조 부품이 적용될 가능성이 높다. 의료산업에 있어서는 외과수술의 감소에 따라 힘 조인트 등 정밀주조 부품 판매가 부진하였으나, 예약이 점차 증가하고 있고 세계적으로 고령화 진행속도가 빨라지고 소득증가에 따라 점진적인 상승이 기대되며, 임플란트, 진단기기 및 치료기기 등에 정밀주조 부품 적용이 확대되고 있다. 뿐만 아니라, 최근, 국내에서는 본 공정을 적용하여 제 5기 대한민국 국새를 제작하고 있다.

정밀주조부품으로 적용되는 재료는 강(Steel)을 위시하여 초내열합금, Ti합금, Al 및 Mg합금 등 모든 금속재료가 대상이 되며, 부자재로 패턴용 고분자재료와 주형용 세라믹재료가 사용되고 있으므로, 재료분야에서 취급하는 모든 재료를 적절히 활용하여야 최적의 정밀주조 부품제조가 가능하게 된다.

세라믹 주형을 제작 공정 중 첫 단계인 소모성 패턴은 소모성 패턴용 재료로는 다양한 종류의 왁스, 플라스틱 및 금속속형(RP)에 사용되는 고분자 물질 같은 열가소성 물질이 사용되며, 이들 중에서, 왁스 패턴이 주로 사용되므로, 로스트왁스법이라고도 알려져 있다. 이러한 소모성 패턴은 탈 패턴 과정 중 용융하여 제거한다. Fig. 2에 나타난 로스트왁스 공정 단계를 살펴



Fig. 1. 정밀주조 부품 (터빈블레이드, 터보차저, 배기밸브). (<http://www.access.rwth-aachen.de>)

†E-mail : yjk1122@skku.ac.kr

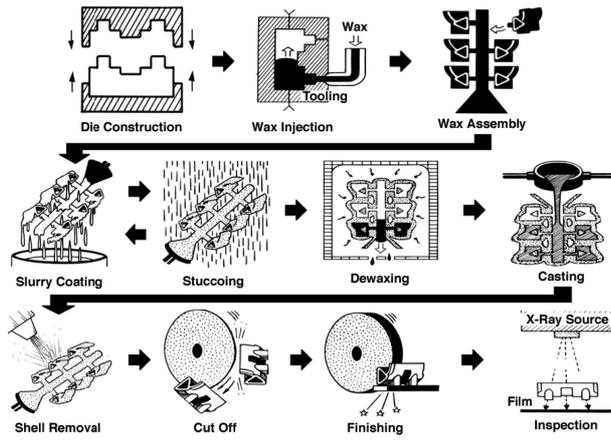


Fig. 2. 정밀주조 공정 모식도.

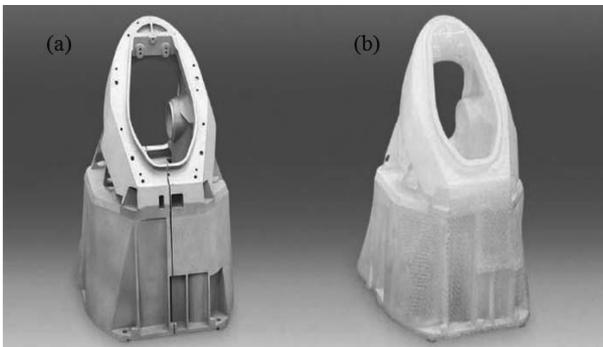


Fig. 3. 정밀주조 부품의 급속조형 적용 예, (a) 정밀주조 부품 (b) 급속조형. (<http://www.alcoa.com/howmet>)

보면, 소모성 왁스 패턴은 내화재인 세라믹 슬러리에 침지, 코팅하여 표면층을 형성한 후, 건조하는 과정을 반복하여 견고한 두께를 갖는 외층을 만든다. 그 후, 외형과 패턴을 함께 오븐 혹은 오토클레브에 넣고 외형 내의 왁스를 용융하여 제거한다. 마지막으로 주형 내에 잔존하는 왁스의 제거 및 바인더의 경화를 통하여 충분한 주형의 강도를 부여하기 위하여 소성과정을 거친다. 주형은 일체형이며, 언더 컷(역 구배)이 있는 매우 복잡한 형상의 부품을 제작할 수 있다. 다음으로, 용탕의 주형 내 완전 충전을 피하기 위해 주입 전에 주형을 예열하며, 용탕 주입은 중력, 기압 또는 진공조건에서 행할 수 있다. 정밀주조 주형으로 사용하기 위해서는 다음의 항목을 충족시켜야 한다.

- ① 왁스 제거 후 파괴되지 않을 정도의 충분한 생형강도
- ② 소성 후 주물의 무게를 견딜 수 있을 정도의 주형강도
- ③ 용탕 주입 시 균열 방지를 위한 열 충격 저항성 및 화학적 안정성
- ④ 표면조도 및 치수정밀도 향상을 위한 용탕과의 낮은 반응성
- ⑤ 용탕의 유동성 향상을 위한 적절한 주형 통기도 및 열전도도

본 정밀주조 공정기술을 통해, 중량 2g 정도의 소형부품부터, 알루미늄의 경우 35,000g, 주강의 경우 300,000g의 대형

부품까지 제작이 가능하며, 최소 두께는 0.5mm 정도이다. 치수 오차는  $\pm 0.5\%$ 가 일반적이나, 소형 부품은  $\pm 0.15\%$  이하도 가능하다.

## 2. 정밀주조 공정기술 동향

### 2.1 정밀주조 공정기술 개발 주요 이슈

정밀주조법은, ① 설계 유연성이 좋음, ② 철계 및 비철계 합금에 걸쳐 폭 넓은 적용 가능성, ③ 제조비용 저감, ④ 조립공정 축소, ⑤ 정밀한 재현성, ⑥ 높은 치수 정밀도, ⑦ 급속조형(RP) 기술적용을 통한 공정 단순화 등의 장점을 융합하여, 복수의 부품을 일체형 부품으로 제조가 가능하며, 비용이 많이 드는 기계가공 공정을 축소 혹은 생략할 수 있도록 기술 개발이 진행되고 있다. 주요 연구개발 분야를 크게 나누면 다음과 같다.

- ① 정밀주조 설비 대형화 및 안정화기술
- ② 특수 용도에 부합하는 합금 개발
- ③ 급속조형 공정 개발
- ④ 공정 품위 향상기술
- ⑤ 공정 비용 절감기술
- ⑥ 복잡한 형상의 박육부품 제조기술
- ⑦ 부품 최적화기술

이와 같은 정밀주조 공정 기술개발 현황을 환경적 측면, 부품 효율향상 측면, 단가저감 측면 및 공정개발측면에서 검토하고, 이들 각각에 관한 구체적 이슈들을, 대표적 고부가가치 적용부품인 가스터빈엔진 부품을 중심으로, 설명하면 다음과 같다.

#### 2.1.1 환경적 측면

셀 주형 제조에 있어서 결합재를 HES (Hydrolysed Ethyl Silicate)에서 실리카 졸로 대체할 때 나타나는 문제점들인 탈왁스 과정 시 셀 균열의 방지, HES주형과 동일한 치수 일치성을 갖는 셀 제작, 내부균열·개재물·표면조도와 같은 구조결함을 야기하지 않는 셀 제조에 관련된 기술개발이 필요하다. 또한 실리카 결정질인 크리스토퍼라이트(Cristobalite)는 발암물질로 알려져 있으므로, 분진제어 및 작업자 보호 장비개발도 필요하다. 셀 주형재료에 관련된 사항으로, 규산 알루미늄, 산화 알루미늄, 지르콘( $ZrSiO_4$ )과 같은 주형재료들이 철, 소듐 등의 불순물에 오염되면 슬러리 수명과 품질이 저하되므로, 이를 억제하기 위한 기술과 환경 친화적 대체재료 개발이 요구되며, 특히, 지르콘을 사용할 경우, 방사성 물질을 허용량 이상 함유할 가능성이 있으므로, 사용 후 원활한 폐기를 위한 기술개발이 필요하다. 아울러, 주조 후 주형 스크랩의 재활용에 관한 연구개발도 함께 이루어져야 한다.

#### 2.1.2 효율향상 측면

가스터빈의 효율은 가스온도 상승에 비례하여 향상되므로, 새로운 경량 내열재료 개발과 냉각설계기술 개발이 필요하다. Ti 합금의 경우, 세라믹 주형과 용탕 간의 반응으로 인하여 부품표면에 형성되는 계면반응층(알파케이스)을 제어할 수 있는 세라믹 주형 제조 기술개발이 필수적이다. 특히, 비중이 Ti의 65% 수준이며 동시에 가공비용이 높은 열간가공재와 동등한 수준의 기

계적 특성을 갖는 TiAl 금속간화합물 주조재개발이 필요하다. Ni계 초내열합금의 경우, 백금족 원소인 루테튬(Ru)첨가로 내열특성과 열처리특성을 향상시키고, TCP상들을 제어한 4세대 단결정합금에 관련한 기술개발이 이루어지고 있다. 또한, 내부냉각과 관련하여, 익형 구조를 한 세라믹 중자에 관한 개발이 진행되고 있다.

2.1.3 단가저감 측면

가스터빈과 터보차저용 초내열합금 단가는 원소재의 가용성과 시장 조건에 따라 큰 폭으로 변화하며, 특히, 가스터빈용 Ni계 초내열합금 단결정제조에 필수적 합금원소인 레늄은 2000년에 비해 8배의 가격상승이 있었다. 따라서 원소재 가격의 75% 수준인 스크랩 사용비율을 향상시킬 수 있는 용융공정 개발과 질소 함유량을 5ppm이하로 제어할 수 있는 제조기술 개발이 필요하다. 터보차저는 정밀주조산업에 있어서 매우 큰 시장 규모를 나타내고 있는데, 합금 단가 및 관리가 가격 저감에 직접적이며 중요한 역할을 한다. 따라서 주조 후 중심 스프루 부위의 용융 재사용은 가격 감소에 효과적이다. 셀 주형재료의 재사용 및 염가의 주형재료 기술개발과 함께 셀 조형, 왁스 조립공정 자동화 기술개발이 필요하다.

2.1.4 공정개발 측면

산업용 가스터빈 부품의 대형화 추세에 따라, 정밀주조용 용융, 주조설비의 대형화 및 결합제어 안정화기술개발이 필요하며, 단결정과 방향성 정밀주조품 제조에 있어서는, 큰 온도구배를 갖는 용융·주조설비 기술개발이 중요하다. 또한, 적정한 단가와 요구 품질을 유지하면서, lead time을 단축할 수 있는 Rapid Pattern Making(급속 패턴 제작) 상용화기술이 필요하다 (Fig. 2). 현재까지 제안된 급속 패턴 제작기술로는, FDM (Fused Deposition Modelling), SLS (Selective Laser Sintering), 3DP (3D Printing), SLA (Stereolithography), MM2 (Ink Jet Plotting), LOM (Laminated Object Manufacturing), Multi-jet modelling 등이 있으며, 급속 셀 및 중자 제작기술로는 규산지르코늄(ZrSiO<sub>4</sub>)과 같은 세라믹 분말을 사용하여 주형을 직접 제작하는 기술인 CLS (Ceramic Laser Sintering)가 제안되어 연구 중에 있다. 중자의 위치나 부품 내부결합 검사를 위한 비파괴 검사기술개발이 필요하며, 현재, X선, 초음파, 레이저 등을 활용한 첨단 영상촬영 및 해석기법에 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다. 이 외에, 왁스와 중자 설계, 탕구계 설계, 용탕 충전 및 응고거동에 관한 주조공정변수의 영향을 체계적으로 체계화한 공정 시뮬레이션기술개발이 매우 중요하며, 향후 정밀주조산업의 장래는 이 기술개발 정도에 따라 큰 영향을 받을 것으로 판단된다.

2.2 국내·외 정밀주조 공정기술 현황

정밀주조기술과 관련된 기술개발, 통계는 각국의 학회 및 조합, 선도연구기관, 각 기업을 통해 이루어지고 있으며, 각국별 대표적 기관으로는, 미국의 ICI (Investment Casting Institute), 유럽의 CAFE (Casting Association of European Foundries), EICF (European Investment Casting Federation), 일본의 JFS (Japan Foundry Society), 영국의 CMF (Cast Metals Federation), 중국의 CFA (China Foundry Association) 등이 있다.

2.2.1 국외

미국은 자국의 3대 항공엔진 제조회사인 General Electrics, Pratt & Whitney 및 Rolls-Royce의 주도 하에 가스터빈 및 에어포일 등과 같은 정밀주조 엔진 부품 전문 제조회사인 Precision Castparts Co., Alcoa Howmet Co. 및 Hitchiner Manufacturing Co. 등을 중심으로 생산 및 연구개발이 진행되어 왔다(Table 1). 특히, 최근에는 항공우주관련 대형부품 뿐만이 아니라, 임플란트 및 힙 조인트와 같은 의료용 정밀주조 부품도 생산함으로써 그 영역을 점진적으로 확대해 나가고 있다. 미국의

Table 1. 미국 및 EU 의 정밀주조 공정기술 선도 기관

기관명	주요내용
Precision Castparts	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ni계 초합금 정밀주조 기술 개발</li> <li>컴프레서, 가스터빈, 에어포일 등 생산</li> </ul>
Alcoa Howmet	<ul style="list-style-type: none"> <li>급속조형 및 방향성 응고/단결정 제어 주조기술 개발</li> <li>Al, Ti 합금 및 Ni 기 초합금 Airfoil, Airframe, Case 생산</li> </ul>
Hitchiner Manufacturing	<ul style="list-style-type: none"> <li>반중력 주조 공정기술 개발</li> <li>터보차저 휠, 로커암, 터빈 블레이드, 베인 등 생산</li> </ul>
Wisconsin Precision Casting	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fe, Al 합금 및 Ni, Co 기 초합금 정밀주조 기술 개발</li> <li>위생기기, 의료기기, 발전기기 등 생산</li> </ul>
UES	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gamma TiAl 합금 설계 및 정밀주조 공정기술 개발</li> <li>Ni 기 초합금 조직제어 및 공정기술 개발</li> </ul>
Doncasters Precision Castings (영국)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ni/Co계 초합금 방향성 응고/단결정 제어 기술 개발</li> <li>Air foil, 엔진 부품, 가스터빈, 임펠러 등 생산</li> </ul>
Feinguss Blank GmbH (독일)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fe, Al 합금 및 Ni계 초합금 정밀주조 공정기술 개발</li> <li>급속조형에 의한 정밀주조용 마스터패턴 기술 개발</li> </ul>
Zollern Foundry Technology (독일)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fe, Al 합금 및 Ni, Co 기 초합금 정밀주조 기술 개발</li> <li>임플란트, 전자부품 하우징, 기어 박스 등 생산</li> </ul>
Tital GmbH (독일)	<ul style="list-style-type: none"> <li>급속조형에 의한 정밀주조용 마스터패턴 기술 개발</li> <li>Al 및 Ti 합금 정밀주조 공정 기술 개발</li> <li>항공기용 도어프레임, 하우징, 브라켓 등 생산</li> </ul>
Access (독일)	<ul style="list-style-type: none"> <li>TiAl 합금 및 Al 합금의 정밀주조 전산모사 기술 개발</li> <li>내열 Ti 합금 및 Al 합금 설계 및 원심주조 기술 개발</li> </ul>
Birmingham Univ. (영국)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ti 합금 및 Ti 금속간화합물의 MIM/HIP 공정기술 개발</li> <li>정밀주조 주형의 고효율 급속 제조공정 개발</li> </ul>
Brno Univ. (체코)	<ul style="list-style-type: none"> <li>급속조형에 의한 정밀주조용 마스터패턴 기술 개발</li> <li>TiAl 합금 정밀주조 기술 개발</li> </ul>

정밀주조 부품 전문 제조 회사는 1920년대부터 설립되어 공정에 대한 기술력이 안정화에 접어든 단계로 볼 수 있다. 또한, 미국 내 대형 엔진제조회사의 수요를 만족시키기 위하여, Precision Castparts Co., Alcoa Howmet Co., Hitchiner Manufacturing Co. 및 Wisconsin Precision Casting Co. 등을 중심으로 요구 특성에 맞는 엔진 부품의 대량생산에 초점이 맞추어져 있다. 특히, Hitchiner Manufacturing Co.은 저압주조와 정밀주조 공정을 결합한 반중력주조(CLV, Counter Low-Pressure Vacuum Casting)공정기술을 개발하여 용융금속의 난류형성을 배제하고 안정적인 주입을 유도하여 고품위의 정밀주조 부품을 생산하고 있다.

EU의 정밀주조 기술 개발은 영국, 독일 및 프랑스와 같은 서유럽국가 중심으로 이루어지고 있다. 특히, 정밀주조 공정에 필요한 세라믹 분말, 점결제 및 왁스와 같은 원자재 개발뿐만 아니라, 급속조형에 의한 마스터 패턴 모델링, 정밀주조 공정의 효율 향상을 위한 코팅 자동화기기 및 급속 건조기기 등의 장비 설계에 대한 연구개발이 활발히 이루어지고 있다. EU는 Doncasters Precision Castings Co., Feinguss Blank GmbH, Zollern Foundry Technology 및 Tital GmbH 등을 중심으로 정밀주조 부품의 연구개발 및 생산 규모가 대형부터 소형 부품까지 폭넓게 형성되어 있다(Table 1). 최근에는 3D 모델링을 통한 급속조형 기술 개발을 바탕으로 다품종 소량생산에 적합한 공정기술 개발이 이슈가 되고 있다. 또한, 영국의 Birmingham Univ.는 정밀주조 주형제작 시간을 절감할 수 있는 급속 주형제작 공정 기술 개발에 대한 연구가 수행 하고 있고, 독일의 Access 연구소는 Rolls-Royce, Tital GmbH 및 ALD GmbH 와 같은 정밀주조 관련 업체와 연계하여 정밀주조 공정을 기반으로 하는 원심주조 공정 기술을 개발 중에 있다.

일본은 1970년대 이후부터 정밀주조 기술이 점차적으로 발전되어 왔다. 특히, 미국 및 EU에 비하여 업체 규모가 상대적으로 작고, 대형 부품보다는 중/소형 부품 위주의 생산 및 연구개발이 이루어지고 있다. 일본은 미국 및 유럽과는 달리 독자적인 정밀주조 업체로 존재하는 것이 아니라, 대부분 대기업 산하의 자회사로 운영이 되면서 모기업에 구축되어 있는 생산 시스템과 연계되어 생산 및 연구개발을 수행하고 있다. 또한, Daido Casting Co., Hitachi Metal Precision Co. 및 IHI Castings Co. 등의 주도 하에 Fe계 합금뿐만 아니라, Ni계 초합금, Al, Mg 및 Ti 합금을 기반으로 하는 우주항공, 가스터빈 및 자동차 부품의 정밀주조 공정 개발이 주를 이루고 있다(Table 2). 특히, Daido Casting Co.는 미국의 Hitchiner Manufacturing Co.와 유사한 반중력주조 공정을 개선한 LEVICAST 공정 기술을 개발하여 TiAl 합금과 같은 고용점 활성금속의 자동차용 터보차저 정밀주조 부품을 생산하고 있다.

중국은 1980년대 이후부터 노동 집약적인 정밀주조 공정의 특색에 맞게 풍부한 인적/물적 자원을 바탕으로 비약적인 성장을 이루어 현재까지 이르고 있다. 하지만, 고부가가치 부품의 비중이 매우 높은 미국 및 유럽과 같은 정밀주조기술 선진국과는 달리, Giayoung Precision Metal Co., Beijing Changhang Investment Casting Co. 및 Ningbo HongYi Machinery Co. 등을 중심으로 생산되고 있는 대부분의 생산부품은 기술력을 상

Table 2. 일본 및 중국의 정밀주조 공정기술 선도 기관

기관명	주요내용
Daido Casting (일본)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cold Crucible을 적용한 반중력주조 공정 (LEVICAST)</li> <li>• Fe, Al, Mg, Ti 합금 터보차저 및 밸브 등 생산</li> </ul>
Hitachi Metal Precision (일본)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 급속조형에 의한 정밀주조용 마스터 패턴 기술 개발</li> <li>• Fe 합금 터빈 휠, 베인노즐, 터빈하우징 등 생산</li> </ul>
IHI Castings (일본)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 주조공정 전산모사를 통한 결정조직 예측 기술 개발</li> <li>• Fe, Ti 합금 및 Ni, Co 기 초합금 정밀주조 기술 개발</li> <li>• 항공엔진 및 산업용 가스터빈 부품 등 생산</li> </ul>
NIMS (일본)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ni계 초합금 및 NiAl 금속간화합물 정밀주조 기술 개발</li> </ul>
Giayoung Precision Metal (중국)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fe, Al, Cu 합금 및 Ni, Co 기 초합금 정밀주조 기술 개발</li> <li>• 산업용 펌프 임펠러 및 하우징, 자동차 밸브 부품 생산</li> </ul>
Beijing Changhang Investment Casting (중국)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fe (산업용) 및 Co (의료용) 합금 정밀주조 기술 개발</li> <li>• 산업용 터빈, 임펠러 및 의료용 인공관절 등 생산</li> </ul>
Ningbo HongYi Machinery (중국)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fe, Al 합금 정밀주조공정 기술 및 CNC 정밀가공기술 개발</li> <li>• 산업용 밸브, 터빈 하우징, 브라켓 등 생산</li> </ul>

대적으로 적게 요하는 산업용 부품에 치중되어 있다(Table 2).

### 2.2.2 한국

미국 및 EU의 정밀주조 공정 기술에 비하여 상대적으로 낮은 국내의 경우 1980년대 초반부터 정밀주조 공정 기술에 대한 연구개발보다는 다품종 소량 생산위주로 이루어져 있었다. 특히, 1990년대 중반부터 산업용 Fe계 터빈 임펠러 및 임플란트 제조 기술개발을 시작으로 최근에는 고용점 활성 금속인 Ti 합금 및 Ni, Co계 초합금의 정밀주조 기술을 개발 중에 있다. 국내의 정밀주조 공정 기술은 대기업보다 중소기업 및 연구소를 중심으로 연구개발이 진행되고 있다(Table 3). 국내의 정밀주조 공정 기술은 규모나 기술력이 선진국에 비하여 아직 열악한 수준이다. 미국 및 유럽의 경우에는 General Electrics, Pratt & Whitney, Rolls-Royce 및 MTU와 같은 항공엔진 전문 대기업의 존재로 인한 거대 수요가 있는 반면, 국내는 그렇지 못한 실정이기 때문에 국외 선진국에 비하여 대량생산 보다는 다품종 소량생산으로 이루어질 수밖에 없는 한계가 있다. 특히, ① 적정한 단가 및 요구 품질을 유지하면서, lead time 을 단축할 수 있는 급속패턴 제작 기술, ② 중차 설계, 탕구계 설계, 용탕 충전 및 응고거동에 관한 주조공정변수의 영향을 계통적으로 체계화한 공정 시뮬레이션 기술 및 ③ 공정의 효율성 향상을 위한 장비 설계 기술의 측면에서는 아직 국외 선진국에 비하여 기술력이 부족하기 때문에 이에 대한 연구개발이 필요하다.

Table 3. 국내의 정밀주조 공정기술 선도 기관

기관명	주요내용
한국로스트왁스	<ul style="list-style-type: none"> <li>Al, Fe 및 Ni 기 초합금 정밀주조 기술 개발</li> <li>항공/선박용 터빈 블레이드, 가스 터빈, 하우스 등 생산</li> </ul>
천지산업	<ul style="list-style-type: none"> <li>Al, Fe 및 Cu 합금 정밀주조 기술 개발</li> <li>항공/자동차용 하우스, 임펠러, 밸브 등 생산</li> </ul>
한일정밀주조	<ul style="list-style-type: none"> <li>탄소강 및 스테인레스강 정밀주조 기술 개발</li> <li>펌프, 밸브, 하우스, 컴프레서, 임펠러 등 생산</li> </ul>
케이피씨	<ul style="list-style-type: none"> <li>타이타늄 VAR-스킬 유도용해 및 주조 기술 개발</li> <li>타이타늄 밸브, 임펠러, 임플란트 등 생산</li> </ul>
엔아이비	<ul style="list-style-type: none"> <li>Al, Fe, Ti 합금 및 Ni/Co계 초합금 정밀 주조 기술 개발</li> <li>블랙박스 하우스, 밸브, 임펠러, 플랜지 등 생산</li> </ul>
캐스텍	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ni/Co계 초합금 방향성 응고/단결정 제어 기술 개발</li> <li>가스터빈 벡켓, 노즐, 블레이드, 임펠러 등 생산</li> </ul>
KIMS	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ni계 초합금 및 고온용 합금설계 및 평가 기술 개발</li> <li>Ni 기 초합금 진공 유도 용해 및 정밀 주조 기술 개발</li> </ul>
성균관대	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ti 및 Ti 합금 정밀주조 기술 개발</li> <li>정밀주조 계면반응 제어 주형 제조 기술 개발</li> </ul>

3. 정밀주조 공정기술 시장 동향

정밀주조업체는 전 세계적으로 약 1,600여개가 파악되고 있으며, 분포는 북미에 13%, 유럽 12%, 아시아 72%, 기타 3%로써, 10개 업체 중 7개가 아시아에 배치되어 있으며, 그 중에서 중국에 4개 업체 정도가 생산 활동에 참여하고 있다. 2007, 2008년 정밀주조 부품별 생산 비율을 정리하면 Table 4와 같다. 이에 비해, 2009년 국내 생산부품(매출액 1.26억\$)을 살펴보면, 밸브류 25%, 자동차부품 22%, 기계 공구류 20%, 기타 33%로, 일반 산업부품 비율이 높은 반면, 일본은 매출액 4.30억\$ 중, 가스터빈 52%, 자동차부품 22%, 기계류 11%, 항공부품 7%, 기타 8%로, 고부가가치 부품 생산비율이 높다.

Table 4. 정밀주조 부품의 국내·외 생산비율

적용부품	미국		유럽		일본		한국	
	2007 (%)	2008 (%)	2007 (%)	2008 (%)	2007 (%)	2008 (%)	2007 (%)	2008 (%)
고부가가치 부품 (우주항공, 가스터빈, 의료용 부품 등)	77	80	70	74	35	39	8	8
자동차 (엔진용 터보차저, 밸브 등)	8	7	16	14	37	37	22	26
기타 (기계 공구, 밸브 부품 등)	15	13	14	12	28	24	70	66

(참조. Investment Casting Market Overview, Blayson Group)

Table 5. 정밀주조기술의 국내·외 시장규모(억 \$)

구분	실적				전망		
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
세계	102	105	89	80	82.5	85	87.5
국내	1.68	1.82	1.26	1.13	1.17	1.20	1.24

(참조. Investment Casting Market Overview, Blayson Group, 전망은 연 3%의 성장을 예상한 수치임.)

판매액 기준으로 전 세계 시장규모를 정리한 Table 5를 살펴보면, 2008년도 기준으로 105억\$ (11조원)이었으며, 이는 2007년도 대비 2% 상승하였다. 구체적으로 살펴보면, 북미시장이 39%, 서유럽시장이 27%, 중국시장이 20%, 중국을 제외한 한국, 일본, 대만 등의 아시아시장이 13%, 기타 1%이다. 한편, 2008년 말의 세계경제위기는 정밀주조업체에도 영향을 끼쳤으며, 그 결과, 2009년 시장규모는 89억\$ (9.4조원)로, 전년대비 14% 감소하였고, 특히 북미 및 유럽시장에서 15%이상의 감소가 있었다. 리먼 브라더스 파산보호신청에 시초한 국제금융위기, 그리스 재정위기에서부터 확대되어가는 유럽공동체 경제위기, 일본과 미국의 신용평가등급 하락 등 세계경제문제는 정밀주조산업에 큰 영향을 끼치고 있으며, 원소재 값의 상승 문제와 부품 가격적인 압박도 악영향을 끼쳐, 정밀주조산업의 시장 규모는 2006년 수준으로 떨어졌다. 그러나 항공 산업, 가스발전 산업 및 자동차산업, 일반산업부분이 회복조짐을 보이고 있고, 의료산업 등에도 적용 확대가 기대되고 있어, 정밀주조산업의 장래는 밝다고 할 수 있다. 다만, 시장 규모가 2008년 수준까지 도달하는 데에는 상당기간이 소요될 것으로 예상된다.

4. 미래의 연구방향 및 제언

정밀주조산업에 있어서, 부품재료로는 강(steel)을 위시하여 초내열합금, Ti합금, Al 및 Mg합금 등 모든 금속재료가 대상이 되며, 부자재료는 패턴용 고분자재료와 주형용 세라믹재료가 사용되고 있으므로, 재료분야에서 취급하는 모든 재료를 적절히 활용하여야 최적의 정밀주조 부품제조가 가능하게 된다는 것은 전술한 바와 같다. 이러한 관점에서, 매년 예상되는 원소재 가격상승 과 지구상에 제한된 금속 및 비금속자원의 사용규제강화에 대비한 원소재 재활용기술개발과 대체재료 개발이 필요하다. 또한, 환경보존, 건강 및 안전규정 적용에 관한 요구가 증가할

것으로 예상되며, 현재 특별한 문제없이 사용되고 있는 재료에 관해서도 규제가 따를 수 있으므로, 이에 관한 대비도 필요할 것으로 판단된다. 한편, 치수 제어기술 및 복잡 형상부품의 수요 증가가 예상되며, 정보화 및 지식기반사회 구축 추세에 맞추어, 정밀주조산업에 있어서도 자동화, 전문화를 통한 부품단가 저감 요구도 예상되므로, 이에 관련된 기술개발도 필요할 것으로 판단된다. 이와 같은 미래기술개발을 통하여, 정밀주조산업은 지속적으로 발전할 가능성이 크며, 핵심적 전략산업의 일익을 담당할 것으로 예견된다.

### 참고문헌

[1] P. R. Beeley and R. F. Smart: "Investment Casting", Institute of Materials (1995)

[2] J. Batt et al.: "Investment Casting Handbook", Investment Casting Institute (1968)

[3] W. G. Wood and E. L. Langer: ASM Handbook Vol.15, ASM International, USA, pp. 253-269

[4] S. Jones and C. Yuan: J. Mater. Process. Tech., "Advances in shell moulding for investment casting", 135 (2003) 258-265

[5] R. A. Harding: Int. J. Cast. Met. Res., "Towards more reliable investment castings", 19 (2006) 289-301

[6] Technical Report: M. Flemings et. al.: "WTEC Panel Report on Advanced Casting Technologies in Japan and Europe", (1997)

[7] Technical Report: D. A. Ford: "Future Trends in Investment Casting - Drivers for Development" (2008)

[8] Technical Report: Blayson Group, Investment Casting Market Overview (2010)