

가스터빈 고온부품 및 소재의 국내외 현황

조창용 재료연구소 신금속연구본부 본부장 | e-mail : cyj20@kims.re.kr
 김인수 재료연구소 신금속연구본부 내열재료연구실 책임연구원 | e-mail : kis@kims.re.kr
 최백규 재료연구소 신금속연구본부 내열재료연구실 책임연구원 | e-mail : choibg@kims.re.kr

이 글에서는 가스터빈 부품/소재 분야의 현황과 국산화 방안에 대해 소개하고자 한다.

1937년에 독일에서는 오히인 엔진을 장착한 하인켈 HE 178제트기가 성공하였고, 1941년 Whittle 엔진을 장착한 글로스터 E 28/39 영국 최초의 제트기가 비행에 성공한 후 가스터빈이 항공기 엔진으로 가장 중요한 위치를 차지하게 되었다. 이후 전투기 엔진으로 제트엔진이 현재까지 독보적 위치를 차지하게 되었으며, 제2차 세계대전을 거치면서 제트엔진의 개량 개발과 함께 많은 기술적 발전을 이룩하였다. 유사한 기술을 산업적으로 활용한 가장 대표적인 것이 발전용 대형 가스터빈이다.

그림 1과 같이 지난 50년에 걸쳐 가스터빈 엔진의 효율이 TET(Turbin Entry Temperature)의 상승과 함께 개선된다는 개념은 터빈에 사용되는 고온 소재의 온도수용성(temperature capability)을 증가시키기 위한 고온용 초내열합금 개발과 부품의 제조공정을 개선하기 위한 기술 개발의 자극제가 되었다. 이에 따라 1940년 Whittle의 첫 가스터빈에 비해 60년에 걸쳐 TET를 약 700℃ 증가시킬 수 있게 되었다.

역사적으로 살펴보면 1940년대에 고온 소재로 초내열합금(superalloy)이 처음으로 등장한 후 합금과 공정 개발이 진행되어 오고 있다. 터빈 블레이드용 소재와 공정의 기준이 되는 온도수용성은 크리프 수명이

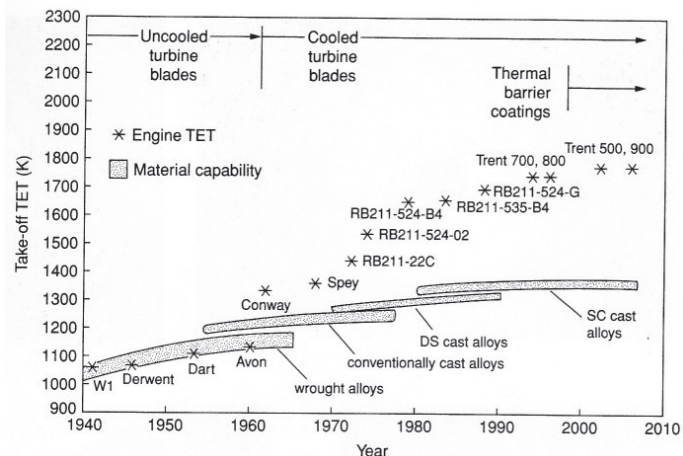


그림 1 롤스로이스 항공엔진의 개발과 작동온도 및 적용 고온 재료(R. Reed: The Superalloys)

137MPa의 하중에서 1,000시간을 유지할 수 있는 최대 온도를 의미한다. 크리프 수명의 관점에서만 보면 주조 합금(cast superalloys)이 단련합금(wrought super alloys)에 비해 터빈 블레이드용 합금으로 선호된다. 초기 가스터빈이 도입될 1940년대에는 단련합금인 Nimonic 합금들이 터빈 블레이드에 적용되었다. 초내열합금은 주로 강화상인 γ' (Ni₃Al)의 석출에 의해 고온 강도를 가지게 된다. 단련합금의 경우 강화상이 존재하는 구간에서는 단조가 거의 불가능하다. 따라서 단조를 위해서는 강화상을 재고용시켜야 한다. 단조가 가능한 온도구간(forging window)은 강화상이 고용되는 온도

와 초기 용융이 일어나는 온도 구간이다. 새로운 엔진의 개발에 따라 높은 온도에서 사용될 수 있는 초내열 합금의 개발이 요구되었고 이에 따라 γ' 강화상을 보다 많이 함유한 합금이 요구되었다. 이는 대기 중에서 용해하여 합금을 제조할 경우 산화되기 쉬운 원소들인 Al, Ti, Nb, Ta 등의 첨가가 필요하게 된다. 진공용해법(VIM: Vacuum Induction Melting)의 도입은 γ' 강화상을 형성할 수 있는 원소의 다량 첨가가 가능하여 합금의 제작에는 제약이 없으나 강화상인 γ' 강화상이 많을 경우 고온도가 상승하고 반대로 합금의 용융점이 낮아져 단조가 가능한 온도 구간이 극히 좁아지는 문제가 발생하였다. 따라서 단조에 의한 터빈 블레이드의 제작이 불가능하여 1950년대 진공유도용해주조법(vacuum induction melting and casting)의 도입과 함께 진공정밀주조가 터빈 블레이드 제조공정으로 일반화되었다.

강화상인 γ' 을 많이 형성시킨 합금의 개발에 따라 고온 특성을 크게 향상시킨 주조용 합금이 개발되었으나 터빈 블레이드가 실제 사용되는 고온 조건에서 가장 크게 작용하는 응력은 원심력으로 터빈 블레이드의 길이 방향 즉 로터의 반경 방향이다. 소재의 결정립이 미세할수록 일반적인 구조재료에서 항복강도가 증가한다. 하지만 일정 온도 이상(equi-cohesive temperature)에서 결정입계의 강도는 결정입 내부에 비해 약하게 되고 이에 따라 원심력과 수직으로 만나는 결정입계에서 균열이 생성되는 문제점이 있다. 이와 같은 결정립의 문제를 개선하기 위해 결정립을 원심 응력과 평행하게 성장시키는 방향성응고법(DS : Directional solidification)과 결정입계가 터빈 블레이드 내에 생성되지 못하도록 하는 단결정(single crystal)응고법이 도입되어 대부분의 항공용 가스터빈과 고효율 발전용 가스터빈의 고압부 터빈 블레이드 제조에 적용된다. 터빈 블레이드의 제조공정과 결정립의 형상은 그림 2와 같다. 각각의 응고법에 따른 크리프 특성 및 결정입계의 효과는 그림 3과 같다. 초내열합금의 개발은 항상 터빈 블레이드의 제조공정의 개발과 병행하여 진행되었다. 즉, 단

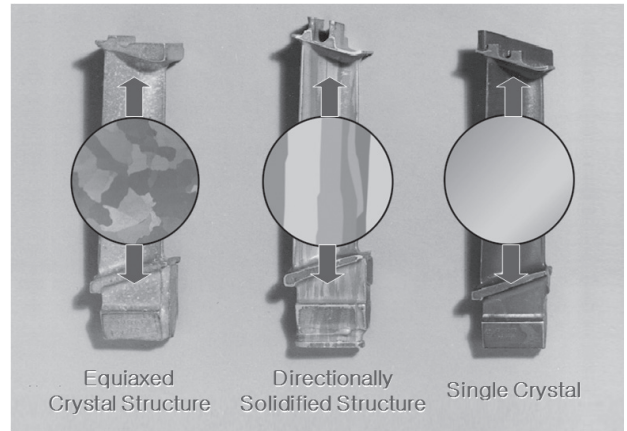


그림 2 터빈 블레이드의 제조공정(롤스로이스 자료)

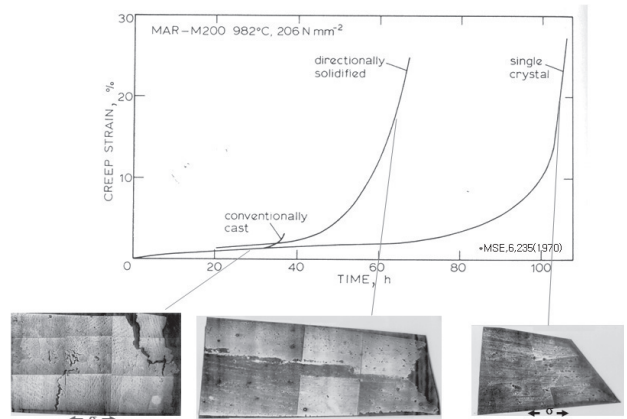


그림 3 결정립의 형태에 따른 크리프 수명 영향 (G.W.Meetham The Development of Gas Turbine Materials)

조용 합금을 주조공정으로, 다결정용 합금을 단결정으로 제조하는 것이 아닌 각 공정에 적합한 합금이 필요하다. 특히, 합금과 터빈 블레이드의 온도수용성을 향상시키기 위해서는 단결정주조와 단결정 초내열합금의 적용이 필요하고 단결정합금의 온도수용성을 향상시키기 위한 연구들이 현재도 각국에서 경쟁적으로 진행되고 있다. 단결정 초내열합금은 합금원소와 온도수용성에 따라 1세대부터 6세대 합금이 개발된 상태이며, 일본의 NIMS(National Institute of Materials Science)에서 개발한 합금이 온도수용성이 가장 높다. 차세대 합금들은 고가의 원소인 Re, Ru 등의 함량이 높음에 따라 터빈

블레이드의 가격이 1세대 합금으로 제조하는 경우에 비해 수십에서 수백 배 높음에도 불구하고 롤스로이스의 경우 일부 엔진의 터빈 블레이드에 적용하고 있다. 이는 설계에 의해 터빈 블레이드의 온도(metal temperature)를 더 이상 낮추기 어려운 경우 온도수용성이 높은 합금이 비록 비쌀지라도 사용할 수밖에 없음을 의미한다. 향후 효율과 성능이 우수한 새로운 가스 터빈의 개발에 따라 터빈의 작동온도는 지속적으로 상승할 수밖에 없을 것이고 이에 따라 터빈 블레이드의 소재 온도도 지속적으로 올라갈 수밖에 없을 것이다. 그러나 최근의 고효율 발전용 가스터빈의 경우 1단 터빈 블레이드의 단위 중량이 10kg 정도로 고가의 차세대 단결정 초내열합금(next generation single crystal superalloys: 3-6세대 단결정 합금을 의미)을 소재로 적용할 경우 개당 가격이 소재 비용만 최소 1억 원 정도로 단가가 너무 높아질 수 있다. 따라서 발전용 가스터빈의 터빈 블레이드 소재는 비록 온도수용성은 약간 차세대에 비해 낮고 조직의 안정성과 가격이 상대적으로 저렴한 합금으로의 개발이 진행될 것으로 판단한다.

가스터빈의 개발 역사와 함께 터빈용 고온부품과 소재인 초내열합금의 해외에서의 개발 역사와 방향은 언급한 바와 같으나 가스터빈의 활용이 가장 많은 곳이 항공용 제트 엔진이다. 민항기 엔진도 군용기 엔진의 기술이 파생되었지만 이는 군용기 엔진의 개발 역사와 함께 했다고 볼 수 있다. 발전용 가스터빈 역시 항공엔진에서 파생된 기술이다. 따라서 일부 강대국들은 공개적으로 군사용으로 개발하고 있고 일부 국가는 산업용으로 포장하여 개발을 추진하고 결국에 군사적으로 활용할 수 있는 기반을 구축하는 것으로 개인적으로 판단하고 있고 이와 같이 연구개발을 국가가 전략적으로 지원하고 있음을 짐작할 수 있을 것으로 본다. 각국의 현황을 살펴보면 대략 다음과 같다.

미국

미국은 지금까지 이 분야를 주도해 왔으며, 군사용,

민수용 모든 분야의 시장을 거의 독점하고 기술을 선도하였다. 미국은 이론적으로나 생산 측면에서 가장 기술의 완성도가 높은 국가이다. 각종 군사용 장비의 부품 소재와 공정을 주도적으로 개발해 왔으나, 새로운 엔진의 개발에 신공정 및 설계에서 보완할 수 있는 기술을 보유하여 최근에는 초내열합금 개발보다 새로운 개념의 극한재료 개발이나 엔진 개발을 보다 강하게 추진하고 있다. 물론 미국에서는 현재 일본 등 타 국가에서 진행하고 있는 연구개발 등을 이미 진행한 것으로 판단된다. 미국에서는 가스터빈의 효율 향상을 위해 새로운 모델의 발전용 대형 가스터빈 개발과 함께 신개념의 고온 특성이 우수한 합금 개발 및 최근에 개발된 초내열합금들의 특징인 초고가의 희귀원소들을 다량 함유하고 있는 단결정 합금들을 대체할 희귀원소 저감형 단결정 초내열합금을 개발하는 추세이다.

유럽의 경우

▶ 영국은 가스터빈을 최초로 개발한 나라로 고온 재료의 필요성을 가장 잘 인식하고 있다. 그러나 초내열합금 개발은 미국에 비해 상대적으로 많은 투자를 하지 못하였으며, 미국의 회사들과 공동으로 합금 개발을 추진하고 있는 경우가 많다. 과거 RR99와 같은 단결정 초내열합금을 개발한 실적은 있으나 Rolls-Royce 고유의 합금을 적용하는 것은 상대적으로 적고 상용화된 합금을 적용하는 경우가 많다. 특히, 일본에서 개발한 차세대 합금을 TRENT series 엔진의 핵심부품에 적용하는 등 특성이 우수한 합금은 글로벌소싱(global sourcing)하여 사용하는 점이 다른 나라와는 차별성이 있는 것으로 판단된다.

▶ 프랑스는 독자적으로 모든 기술을 개발한 대표적인 국가이다. 특히, ONERA(Office Nationale Etude et de Recherche Aerospatial)를 중심으로 독자 조성의 초내열합금과 독자 공정을 개발하여 자국 항공기의 엔진에 주로 사용하는 경향을 갖는다. 발전용 가스터빈을 생산하는 ALSTOM(프랑스 기업이나 생산지는 스위스)의 경

우, 초내열합금의 개발에 의한 새로운 엔진에 적용보다는 상용 합금을 사용하고 냉각 성능을 개선시키는 방향으로 연구개발을 진행하고 있다. ONERA를 중심으로 AM1, AM3, MC2, SC16, MC-NG 등의 합금을 개발하였으며, 고온부품의 단열코팅도 독자 기술로 개발하여 실용화시킨 바 있으며 이에 대한 연구개발을 지속적으로 추진하고 있다.

주변국의 합금 개발 및 공정 설비 현황

▶ 중국은 독자적으로 군용 전투기와 엔진을 개발한 국가이다. 개발 초기 제트엔진의 성능이 크게 못 미쳐 사고도 많고 많은 시행착오를 거쳤지만 현재는 J-10, J-15, J-17, J-20, J-25 등 군용기를 자체적으로 개발하여 일부는 실전 배치하였고 일부는 시험 비행 또는 실전배치 중이다. 따라서 고유모델의 제트엔진을 독자적으로 개발하였고 모든 부품을 자체적으로 제조하고 있다. 중국은 중소 국경분쟁 이후 제트엔진에서 가장 핵심부품인 고온부품과 그 소재 개발을 국가연구소가 주도하고 있다. 초내열합금을 전문적으로 생산할 수 있는 초대형 설비들을 일부 기업에 설치하여 제트엔진 및 가스터빈의 모든 부품을 생산할 수 있는 능력을 보유하고 있다. 이외에도 1956년 이래 중국에서는 최소 196종의 초내열합금이 개발되어졌으며, 주로 IMR, BIAM, CISRI 등이 국가의 지원 하에 주도하고 있다.

▶ 일본의 경우: 지금까지 일본은 초내열합금 개발을 1979년 MOONLIGHT project로 산업통상성에서 시작할 당시부터 가스터빈의 개발과 함께 고온 재료 개발을 시작한 것으로 알려져 있었다. 실제 일본은 Moonlight plan 훨씬 이전인 1960년대부터 주조용 초내열합금의 개발을 진행해 왔다. 현재도 한국에서는 가스터빈 및 초내열합금의 중요성에 대해 제대로 인식하지 못하고 있으며, 당시 한국에서는 전혀 개념도 없는 상태였지만 일본 정부에서는 가스터빈과 고온용 소재인 초내열합금의 중요성을 이미 파악한 것으로 판단되며 MOONLIGHT project을 기획할 당시에 이미 가스터빈

과 함께 고온용 Superalloy 개발을 시작한 점이 현시점에서 볼 때 아주 정확한 예측이었음을 알 수 있다. 이제껏 일본은 이 분야 연구를 하지 않았을 뿐 아니라 미국이나 유럽에 비해 초내열합금(superalloy) 분야는 최소 20년 이상 뒤진 상태였을 것으로 추측하였으나, 이미 1980년대에 현재 개발된 합금들을 개발하였으며, 특히 일본 정부는 당장의 성과가 없는 초내열합금 개발에 50년 이상 지속적으로 지원하였고 단기간 내의 성과를 고려하지 않고 투자하였고 그 결과, 온도수용성이 가장 높은 초내열합금을 개발하였으며, 현재 고온 재료 개발을 주도하고 있다. MHI는 일본 산업통상성 지원하에 차세대 가스터빈(1,700℃급) 개발을 공동으로 추진하고 있으며, 개발 목표는 주요한 6항목이 있으며 이들 중 내열 신소재 기술과 코팅(TBC), 터빈 냉각 기술 등 재료와 관련된 기술의 향상이 절반 이상을 차지할 정도로 집중하고 있다. 특히, 1,700℃급 가스터빈은 기존 MHI가 적용하고 있는 일방향 응고 합금으로는 불가능하고 반드시 단결정 합금을 사용해야 하는데, 이에 따라 1,700℃급 가스터빈에 적용할 단결정 초내열합금을 개발 중에 있다. 또한 초내열합금의 고온 특성의 한계성이 있음에 대한 인식과 함께 차세대 무냉각 터빈 블레이드에 사용할 수 있는 차세대 고온소재(alternative high temperature materials)개발에 산업통상성이 NIMS에 연구개발비를 지원하고 있다.

국내의 경우

국내에는 초내열합금을 생산할 수 있는 기반과 그 기술이 거의 전무한 상태이다. 다만, 초내열합금 모 합금을 수입하여 진공 정밀주조 공정을 거쳐 일부 부품을 제작할 수 있는 설비를 한국로스트웍스, 성일터빈, 삼정터빈, 천지산업, STX중공업 등에 갖추고 있다. 그러나 이들 업체들은 과거 정밀주조를 하던 업체로서 제트엔진이나 발전용 가스터빈의 터빈 블레이드를 제조할 수 있는 충분한 기술력을 갖추지 못하고 있는 현실이다. 그동안 국내에서 운전되고 있는 발전용 가스터빈

소모성 터빈 블레이드를 수입 대체하기 위해 국산화 개발을 시도하였지만 아직 완전히 국산화 대체를 한 것은 거의 없다. 안전 문제가 상대적으로 약한 발전용 가스 터빈 블레이드의 국산화도 어려운데 인명과 직접 관련이 있고 국방과 밀접한 관련이 있는 제트엔진용 터빈 블레이드의 국산화 대체란 거의 불가능한 실정이다. 이런 국내 상황에서 부품 개발도 아닌 당장 실용화가 불가능한 초내열합금을 연구자 개인 또는 기업이 개발하는 것은 현실적으로 불가능하다.

현재 초내열합금개발이나 초내열합금을 연구하는 팀은 재료연구소 내열재료연구실이 유일하다. 상기 연구실은 1982년부터 초내열합금과 공정을 연구해 왔으며, 본격적으로 초내열합금을 개발하기 시작한 것은 6년 전인 2008년부터이다. 본 연구실이 개발한 KMX-2, KMX-3 단결정 초내열합금들은 외국의 합금들보다 실제 가장 많이 사용되는 온도 구간에서 특성이 우수한 특징을 갖고 있다. 일본이 이미 많은 연구개발비를 투자하여 왔지만 아직도 많은 연구개발비를 초내열합금 개발이 투입하고 있는 것에 비하면 우리는 아직 중요성조차도 인식하지 못하고 있는 걸음마 단계이다. 본 소재는 단기간에 개발하여 단기간에 실용화할 수 있는 것이 아니고, 군사적 경제적 중요성을 고려하여 국가 차원에서 반드시 개발을 지속적으로 추진해야 하는 구조용 금속재료 중 한국에서 국산화하지 못한 마지막 남은 재료이다.

결론적으로 초내열합금에 대한 국내 현황은 국산 고유 제트엔진이나 국산 고유 발전용 가스터빈이 없는 상황을 고려하면 아직 그 중요성을 느끼지 못하고 있고 정책적 입안이나 고려는 아직 요원하다고 볼 수 있다. 최근 들어 일부 독자 엔진의 개발을 추진 또는 계획 중이다. 제트엔진이나 발전용 가스터빈의 개발에서 설계를 진행하여도 제작의 어려움에 봉착하는 부분이 고온 부품 특히 터빈 블레이드와 베인의 제작과 그 소재이다. 아직 여건이 성숙되지 않은 국내 현실에서 설령 가스터빈의 개발이 시작되어도 그동안 부품을 수입에 의존해 오고 소재를 해외에 의존해 온 습관으로 인해 설계자들 역시 고온용 소재의 중요성에 대해 단순히 해외에서 수입하면 가능하다는 생각으로 국내 개발이 부정적이다. 이는 역설적으로 일본이 단순히 우방인 미국에서 초내열합금을 수입하지 않고 자체 개발을 50년 넘게 지원하고 독자적으로 가스터빈과 제트엔진을 만들 수 있는 능력을 갖춘 이유를 고려해 보면 쉽게 해답을 찾을 수 있다. 한국에서 제트엔진을 개발하여 군사용으로 적용하면 설계된 엔진을 실제 제작함에 분명한 어려움을 겪을 것으로 판단한다. 현재 선진국의 수출 금지 품목에 단결정 초내열합금 관련 기술이 포함되어 있다. 이는 엔진 개발 과정에는 초내열합금 모 합금의 수입이 가능할 것이나 양산 과정에 들어가면 아마도 선진국의 제재로 인해 수입이 불가능하고 특정한 합금에 대해 특허권을 행사하여 사용을 금지시킬 것으로 예측된다.



기계용어해설

파커홀더(Packer Holder)

계란선별기의 부품으로서 중량에 따라 선별된 계란을 계란판으로 이송하는 장치.

판재 굽힘 가공(Sheet Metal Bending)

평평한 판재나 반듯한 봉, 관 등을 입체적인 형상으로 가공하는 가공.

판재성형(Sheet Metal Forming)

판재의 평면에 인장력을 가함으로써 이루어지는 소성가공.

플라이휠 에너지저장장치(Flywheel Energy Storage System)

플라이휠을 이용하여 전기에너지를 기계에너지 형태로 저장하고, 필요시 이를 다시 전기에너지로 변환하는 장치.