

군산복합화력 가스터빈 고온부품 국산화 사례

김 용 섭 한국서부발전(주) 발전처 발전운영팀 차장 | e-mail : y0048s@westernpower.co.kr

이 글에서는 군산복합화력의 가스터빈 구성부품 중 고온에서 운용되는 Ring Segment 1,2단 국산화 사례를 소개하고자 한다.

군산복합화력은 2010년 5월에 준공된 총 718.4MW (가스터빈 2대, 스팀터빈 1대)의 복합설비로서 가스터빈 정비에 사용되는 정비자재들은 대부분 수입에 의존하고 있다. 특히 준공 이후인 2010년부터 2015년 현재까지 투자된 정비비용 중 고온부품 구매와 재생정비로 해외 제작사에 지출되는 비용이 총 정비비용의 54%를 차지하고 있어 고온부품에 대한 국산화 개발이 발전소 운영에 중요한 경영요소로 부각되고 있다.

부품 국산화의 의미는 자국 내에서 어떤 기기의 부품을 생산하여 공급 받을 수 있는 것을 말한다. 부품의 자립은 수입을 통한 외화 유출을 방지할 뿐만 아니라 부품 교체의 신속성, 재고의 최소화, 조립기술 확보 등 많은 파급 효과를 불러 일으킨다. 결국 부품 국산화의 완성은 해당 기기의 자체 생산을 가능케 하며 나아가 개선 응용된 새로운 모델을 창출하여 국내는 물론 해외에 역수출 할

수 있는 기반을 만들어준다. 물론 국산화 과정에서 부품의 설계, 제작, 조립 등 제품의 노하우를 축적하게 되며, 부품의 성능향상을 꾀할 수도 있다. 따라서, 국내 기업들의 국산화 개발과 해외시장 진출이 가능하도록 Track-record 기반 조성이 필요하며, 본 사례 소개를 통해 보다 많은 기업들이 국산화 개발이 이루어지기를 기대한다.

링세그먼트 제품 특성

그림 1~3과 같이 링세그먼트(Ring segment)는 발전기의 중심 회전체인 Rotor의 Blade 끝 단을 감싸 안은 형태로 조립되는 부품이다. 즉 1단 Blade 끝 단과 2단 Blade 끝 단을 막아서 기체와 열의 손실을 최대한 막아 주는 역할을 한다. 발전기의 기종은 M501G로 연소온도 1,500℃, 배기온도 609.7℃, 터빈단수는 4단으로 이루어져 있으

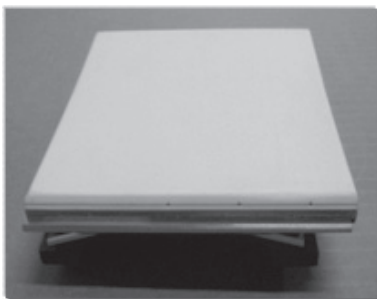


그림 1 Ring Segment 전면



그림 2 Ring Segment 후면

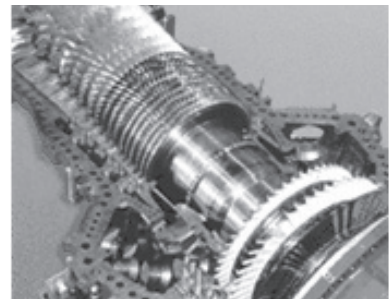


그림 3 Ring Segment 장착위치

며, 개발 대상품인 1단 및 2단 Ring Segment는 한 호기당 각 48개가 설치되어 있으며, 인접 Ring Segment와는 Seal plate로 조립되어 있다. 제품의 측면에는 냉각용 Hole이 있으며 Gas Path 면에는 TBC Coating이 적용되어 있고, 재질은 MGA2400으로서 Inconel 939와 유사재질이다. 제품 설치 시에는 Rotor나 Blade와의 misalignment에 의한 Rubbing 방지를 위해 약 2.5mm의 간극을 둔다.

국내외 관련기술 현황

국내에서 운영 중인 1,500℃급의 가스터빈에 사용되는 Ring Segment는 현재 국내 개발사례는 없으며, MHI 및 SIEMENS 등 해외 제작사에서는 국가적 차원에서 기술이전을 회피하는 고가의 제품으로 전량 수입하여 사용하고 있는 실정이다. 따라서, 본 제품의 개발 내용을 설명하기에 앞서 가스터빈 고온부품 제조에 사용되는 몇 가지 기술들에 대해 알아보자.

○ 정밀주조 기술

발전용 가스터빈의 버킷과 노즐 및 Ring Segment 같은 대형 부품의 국산화는 항공기용의 소형 터빈과는 다른 대형 진공용해주조장비의 확보, 주조에 따른 주조변형의 제어, 주조품 내의 잔류응력 최소화, 편석 및 주조 결함제어 등 여러 가지 해결해야 할 기술이 요구된다.

○ 세라믹 주형기술

세라믹 주형기술의 핵심은 각 내화물의 혼합비율, 주형을 만들기 위한 슬러리의 관리기술, 주조 시 세라믹주형에 의한 결함발생 최소화를 위한 cleaning 기술이다. 이러한 세라믹 주형기술은 가스터빈 부품의 발전, 합금의 개량과 더불어 끊임없이 발전되고 있다.

○ 주조방안 최적화를 위한 응고해석기술

최근의 정밀주조관련 연구학술발표는 응고해석에 관한 논문이 거의 주류를 이루고 있으며, 제품의 생산성과 품질을 높이는 데 매우 효과적임을 나타내고 있다. 이러한 응고해석을 통한 주조결함 예측에는 합금의 응고거동, 주형재의 열화학적 특성, 열전달 해석 등에 필요한

데이터베이스의 구축이 필수적이며 데이터베이스의 정밀도와 예측의 정확성은 직접적으로 비례한다.

○ 세라믹코어 제조기술

세라믹코어는 저압법 또는 고압법 두 가지 방법이 사용되고 있다.

○ 비파괴검사기술

주조품의 비파괴 검사항목은 결정립 육안검사, 형광 침투검사, X-ray 검사, Eddy current 검사, 결정방위검사 등이 있으며 가스터빈 제조업체마다 검사기준이 다르고 부품의 부위별로도 다르므로, 제품의 기능, 특성 및 요구 수준을 고려한 검사기준 확립이 필요하다.

○ 가스터빈 부품 코팅기술

Combustor Section의 경우 현재 각 OEM들은 연소실 부품에 TBC 코팅을 적용하여 점검기간을 12,000EOH 이상으로 권장하고 있으나, 최근 GE측에서는 점검기간을 늘린 24,000EOH를 권장하는 “Super B” 코팅을 개발하여 운용하고 있다. 이는 기존의 TBC 코팅의 두께 개념을 초월한(약 1mm까지 가능) 것이며 모재의 온도를 약 500℃ 정도 낮출 수 있는 것이어서 향후 대용량 가스터빈 연소실 부품의 코팅은 대부분 Super B 코팅으로 대체될 것이다.

○ 신합금 기술

선진국의 경우 특수 부품에 대해서는 적합한 소재를 개발하여 이를 지적재산권으로 보호하는 것이 일반적인 추세이다. 따라서 이들 부품소재의 구입부터 원천사의 승인을 받아야 하므로 결과적으로 부품의 국산화에 어려움이 발생한다. 따라서, 이러한 신합금 소재가 적용되는 부품 국산화에 있어서는 해당 소재에 대한 충분한 데이터 확보 및 특성 분석을 위한 연구개발이 요구된다.

○ 가스터빈 부품 재생기술

가스터빈 부품의 재생정비 가격은 통상 신품가격의 20~40% 미만의 비용으로 가능하기 때문에 결과적으로 가스터빈 부품의 수명을 연장하는 효과를 가져와 가스터빈 User의 유지비용을 절감하는 데 큰 기여를 하므로, 국산화 개발을 통하여 상용화하는 데 반드시 개발하여

야 할 필수 기술이다.

○ 현 기술상태의 취약성

현재 장착되어 사용되고 있는 터빈 버킷 및 노즐의 소모성이 높기 때문에 이 부품들의 제조기술의 확립이 가장 시급한 것으로 판단된다. 따라서 이와 관련된 세라믹 주형 기술, 세라믹코어 기술, 구조방안 최적화를 위한 응고해석 기술의 개발이 함께 진행되어야 할 것이다.

링세그먼트 국산화 개발 과정

본 연구과제에서 수행되었던 국산화 개발과정은 아래와 같이 설명된다.

○ 제품 분석

이 부품은 고온에 노출되어 사용되어 지는 부품이므로 금속의 소재는 고온 내열에 탁월한 니켈베이스의 초

내열합금(Super alloy)을 사용한다. 그리고 고온 기체가 닿은 표면부는 열차폐코팅(TBC)을 하여 초내열합금의 소재를 보호하고 부품의 내부로 냉각공기가 흐를 수 있도록 구멍을 만들어 냉각공기에 의한 부품 냉각을 추구하고 있다. 이상의 방법으로 최대한 부품이 고온에서 오래 견딜 수 있도록 설계되어 있으며, 소재의 재질과 형상, 표면상태 그리고 현미경 조직관찰로 미루어 제작공법은 진공정밀주조로 기초 형상을 만들고 가공과 열차폐 코팅으로 마무리 되었음을 알 수 있었다. 아울러 소재 물성치 검사와 NDT를 통하여 열처리조건과 코팅조건 그리고 결함의 수준 등을 파악할 수 있었다. 위와 같은 제품의 특성을 파악하기 위하여 시행되었던 시험은 표 1과 같다.

○ 부품도면설계

부품 도면설계는 부품 여러 개를 스캐닝하여 3D 파일

표 1 제품 특성 분석

구 분	분석항목	시험(장비)
기계적 특성	인장강도, 항복강도, 파단시간, 연신률	상온 및 고온 인장시험, Creep Rupture 시험
화학성분 분석	화학조성	ICP 성분분석
비파괴 분석	AMS 2175에 따른 등급	방사선투과검사
열차폐코팅 분석	표면조도, 코팅층 미세구조, 코팅방법, 구성성분, 코팅층 기공 및 산화물 함량, 코팅두께, 코팅결합력, 미세조직	표면조도계(SJ-301), 광학현미경, EDS 정성분석, 이미지 분석장비, 미세구조 분석, 코팅층 결합력 Test

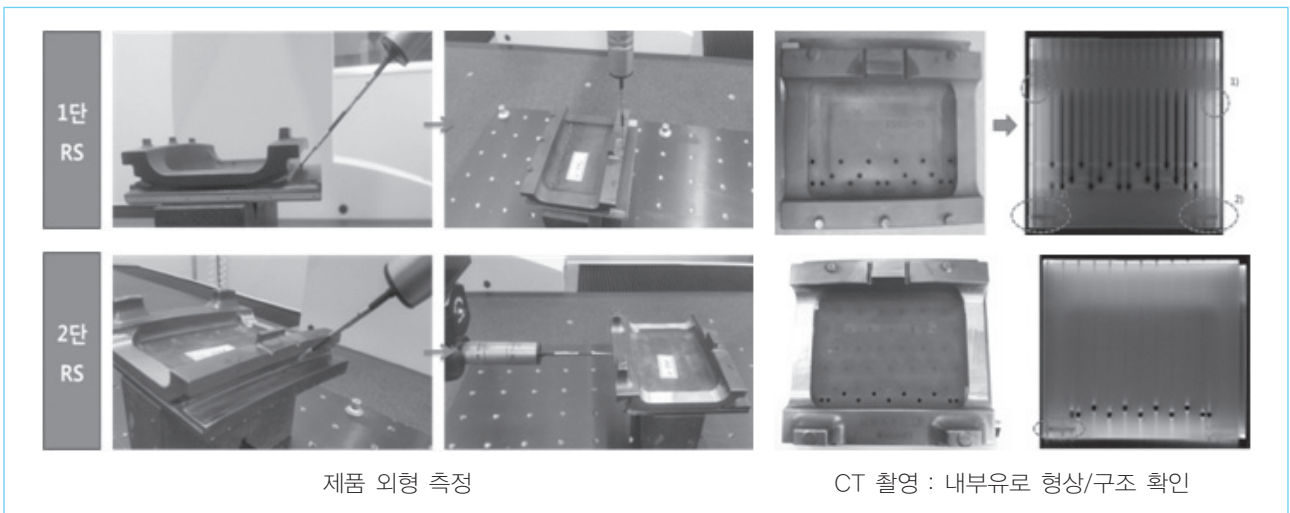


그림 4 부품 도면 설계

을 완성한다. 한 개의 부품으로는 부품의 치우침 정도를 파악하기 어려우므로 최소 3개 이상의 제품을 이용하여 평균 3D 파일을 완성한다. 내부 형상은 X-RAY와 부품 절단으로 형상을 파악한다. 파악된 형상을 치수화시키는 도면작업은 부품의 기능과 조립 특성을 고려하여 치수화시켜야 한다. 이때 정확한 기준면과 Tooling Point를 명시하여 금형 제작 및 가공 그리고 치구, 지그 제작에 어려움이 없도록 해야 한다. 어느 정도 완성된 도면을 Revision 0로 하여 부품개발을 시작하며 개발과정에서 변경되는 치수는 계속 도면에 Update시켜 도면을 완성해 나간다.

○ 금형제작

정밀주조 공법으로 부품을 만들기 위해서는 우선 왁스 패턴이라는 중간 매개체 역할을 하는 소모성 소재부품이 필요하며 이 소모성 소재부품을 만들기 위해서는 금형이 필요하게 된다. 금형은 알루미늄이나 강으로 만들며 수지나 목형으로는 만들지 않는다. 금형 제작시 반드시 소재도(주조도)를 기준으로 3D파일을 만들어 적용하여야 한다. 그리고 이 3D에 최종 주조품의 수축률을 적용하여 금형 제작에 적용되어야 한다. 이 수축률은 부품의 원재질과 공정 부자재에 따라 회사마다 달리 적용되고 있다.(그림 5)



그림 5 왁스 패턴

○ 정밀주조 부품생산

정밀주조 부품생산은 완성된 왁스패턴 금형을 사용하여 정밀주조 공정으로 부품 생산을 시작한다. 정밀주조 공정을 간략하게 소개하면 ① 왁스패턴 사출 → ② 왁스트리 조립 → ③ 왁스트리 슬러리 코팅(셸 또는 몰드) → ④ 왁스제거 → ⑤ 소성작업 → ⑥ 용탕주입(진공주조) → ⑦ 후처리 작업 → ⑧ 검사 → ⑨ 입고 과정으

로 구성된다.

○ 기계가공

입고된 주조품은 기계가공을 시행한다. 가공 방법은 미리 작성한 공정도에 따라 실시하며, 제품도(가공도)에 준하여 완성한다. 밀링, 연마를 통하여 면삭을 완료하고 내부구멍 작업은 슈퍼드릴(방전드릴)을 통하여 총 47개의 홀 작업을 한다. 그리고 용접을 통하여 내부 유로를 완성한다.(그림 6)

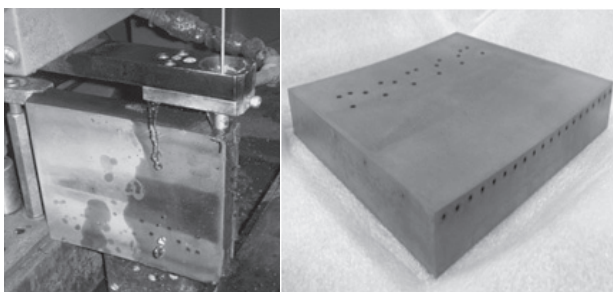


그림 6 슈퍼드릴 가공테스트

○ TBC 코팅

다음으로 TBC(Thermal Barrier Coatings)를 시행하는데, 1단과 2단 Ring Segment 중 비교적 높은 온도에 노출되는 1단은 세라믹 분말을 표면에 코팅하고, 2단은 세라믹 분말 코팅은 하지 않고 기초 코팅인 Bond 코팅만 적용한다. 즉 1단 Ring Segment는 HVOF 방법으로 금속 분말인 CoNiCrAlY를 용착시키는 Bond 코팅과 그 위에 APS방법으로 세라믹 분말인 Y₂O₃-ZrO₂를 밀착시키는 Top 코팅을 실시한다. 2단은 Bond 코팅만 실시하고 Top 코팅은 실시하지 않는다.

코팅작업의 중요한 검사 항목은 ① 표면조도 ② 코팅 두께 ③ 기공률 및 산화물 ④ 결합력이다.(그림 7, 8)



그림 7 Bond Coating

그림 8 Top Coating

○ Air Flow Test

마지막으로 Air Flow Test를 시행하는 데 냉각유로를 가지고 있는 부품은 반드시 공기유량을 측정하여 일정 이상의 유량이 흘러야 한다. 당사가 보유한 Air Flow Tester를 통하여 1, 2단 Ring Segment의 유량을 측정하였으며 측정기준은 OEM 사의 제품과 비교하여 결정하였다.

맺음말

이상에서 기술한 바와 같이 가스터빈 고온부품 국산화를 위해 본 연구과제에서는 정밀주조 공법을 이용하였으며, 특히 진공 정밀주조 공법은 가스터빈의 고온 부품을 개발 생산하는 데 필수적인 공법으로 자리 잡고 있으므로 이에 대한 기술개발은 국내 정밀주조 기술을 한

단계 진보시킬 것으로 판단된다.

그 동안 서부발전과 정밀주조 전문기업인 성일터빈은 군산복합화력 가스터빈 고온부품 국산화개발뿐만 아니라 대용량 가스터빈 국산화 개발 등 다양한 분야에서 공동으로 연구개발을 추진하고 있다. 특히 상기에 기술한 Ring Segment는 물론 현재 진행중인 연소기 Bypass Elbow 개발품은 2015년 10월에 장착되어 실증이 진행될 예정이며 원천사의 부품과 동일 이상의 성능을 기대하고 있다.

이와 같은 국산화 개발 노력들이 결실을 맺어 가스터빈의 부품들이 국내 생산으로 자리매김하고, 최고의 기술을 요구하는 최신 가스터빈 Blade와 Vane의 국산화 기술까지 확보된다면 국내 가스터빈 개발과 해외 시장진출 등 국내 경제발전에 크게 일조할 것으로 기대해 본다.