

가스터빈 1단 버킷의 국산화 개발

이 글에서는 국내에서 현재 정부연구과제로 추진 중인 개발과제 내용 중에서 가스터빈의 제일 핵심 부품인 가스터빈 버킷(bucket)의 국산화 개발 사항을 소개하고자 한다.

국내의 경우 자동차와 항공기 등과 같은 분야는 정부의 집중적 지원 육성으로 급속한 성장을 보이고 있으나, 대부분의 항공기 엔진과 같은 전기생산업용 가스터빈 분야는 외국의 기술 수준에 비해 상당히 부족한 부분이 많다. 특히, 일본의 경우 5개 이상의 회사가 소형 가스터빈을 포함하여 상업용 가스터빈을 독자적으로 생산하고 있으나, 우리나라는 삼성테크윈(주) 주관으로 1992~1997년도의 연구과제로 수행한 1.2MW급 소형 가스터빈 국산화 개발을 필두로 2005년부터 두산중공업의 5MW급 가스터빈 국산화 개발이

현재 우리의 기술 수준이다. 이것과 더불어 1990년대 초부터 수행해온 가스터빈의 각종 부품 및 요소기술 개발은 현장 적용의 문제점으로 인하여 실제적으로 다른 산업에 비하여 적용에 미진한 부분이 많은 실정이다. 이러한 어려운 환경 속에서 지속적으로 연구개발을 수행하여 2000년 전·후로 개발된 가스터빈의 핵심부품인 버킷은 2004년 9월과 2월에 각각 xx 및 xx복합설비에 설치되어 사용되었으며, 노즐은 2004년 9월에 xx복합화력에 장착되어 사용되고 있는 실정으로 모방에 의한 제작기술은 어느 정도 기술축적이 이루어져 있으나

원천적으로 보유가 불가능한 제작사 기반기술의 부족으로 실제 부품을 역설계(reverse engineering)하여 형상을 수정·변경 개발 후 현장 사용에는 여러 가지 문제점을 안고 있다. 3,600rpm의 고속회전과 1,350℃(TIT : Turbine Inlet Temperature)의 온도조건에서 사용되는 가스터빈의 버킷은 운전 중 재질 및 코팅층의 경년열화나 마모(wear), 탈락 등과 같은 이물질(FOD : Foreign Object Damage)의 충돌에 의하여 인접 부품의 손상을 초래할 수 있으며, 실제로 이러한 사고가 발생하면, 전력공급의 차질은 물론 대부분

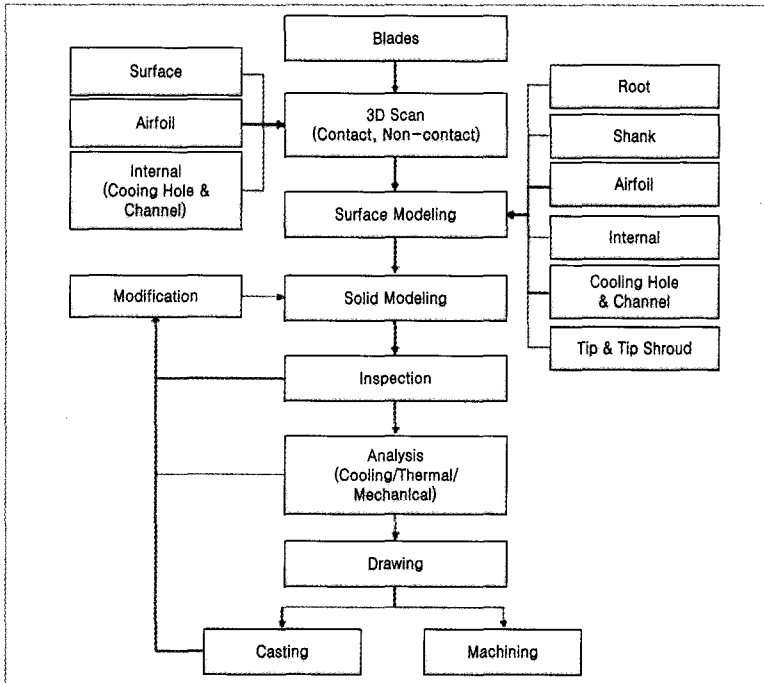


그림 1 버킷 역설계 공정절차

의 부품을 사용할 수 없는 대형 사고로 야기되는 경우가 많다. 이러한 가스터빈의 핵심 부품인 버킷의 역설계에 의한 국산화 개발 공정은 역설계, 냉각시스템 해석 및 적용(cooling system analysis and application), 진공정밀주조(vacuum precision casting), 주조 후 열처리(heat treatment), 냉각공 및 도브테일 가공(cooling hole and dovetail machining), 버킷 팁 커버 부착(attached bucket tip cover), 코팅(coating) 및 마지막 용체화 열처리(solution and aging heat treatment)와 같은 여러 단계의 공정을 거쳐 부품을 제작한다. 여

기에서는 현재까지 진행되고 있는 1,350℃급 버킷의 국산화 개발 방법에 대하여 이야기하고자 한다. 참고로 지면상 여건과 과제 진행상 제외된 부분과 정보 보안상 공정상에서 구체적인 설명 및 적용 모델명 등이 생략되어 있음을 양해드립니다.

역설계

일반적으로 역설계를 위해서는 우선적으로 부품의 형상 모델링을 위하여 비접촉식인 레이저 스캐너(laser scanner)와 3차원 측정기(CMM : Coordinate Measuring Machine)가 대표

적인 장비이다. 이러한 역설계 공정은 i) 그 부품의 기능과 주위 물건들과의 상호관계를 평가하고, ii) 치수를 측정하여, iii) 부품의 물리, 화학적 특성을 분석하고, iv) 도면을 그리고, v) 제작 공정을 정의하고, vi) 품질절차를 수립해서, vii) 생산도면과 품질도면을 만들어 제작에 들어간다. 그림 1은 버킷의 역설계 공정을 요약한 것이다.

제품의 내·외부 형상은 접촉식 또는 비접촉식 측정장비로 점 데이터(point data)를 취득하여, 버킷의 Root, Shank, Airfoil, Tip & Cooling Hole, Shroud 및 버킷 내부 Cooling Channel 등을 표면화(surfacing) 처리를 수행하고, Solid 모델링을 통하여 주소, 가공에 필요한 기초 데이터를 완성해 간다. 또한 이 도면은 치수검사(inspection)를 통하여 도면의 정확도를 검증한다. Solid 모델링이 완성되면 이를 바탕으로 2D 도면을 통해 기초적인 역설계가 완성된다. 이것은 다시 크게 아래와 같이 네 가지로 표현하여 정리할 수 있다.

1) 3D 스캐닝

접촉식 또는 비접촉식 3차원 측정기를 이용하여 제품의 형상을 외형 및 내부를 스캐닝(scanning)하여 점 데이터(point data) 형상을 모델링하게 된다. 그림 2는 스캐닝에서 얻은 점 데이터를 보여주고 있다.

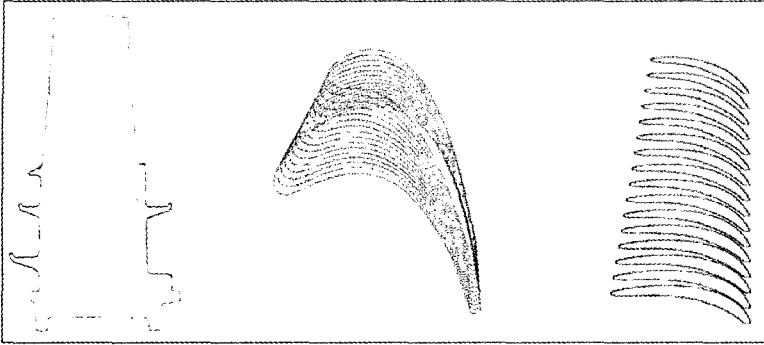


그림 2 버킷 형상을 위한 점 데이터

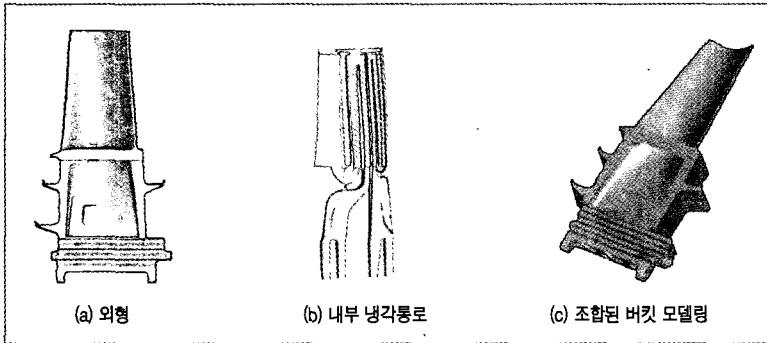


그림 3 내·외부 버킷 모델링과 조합된 모습

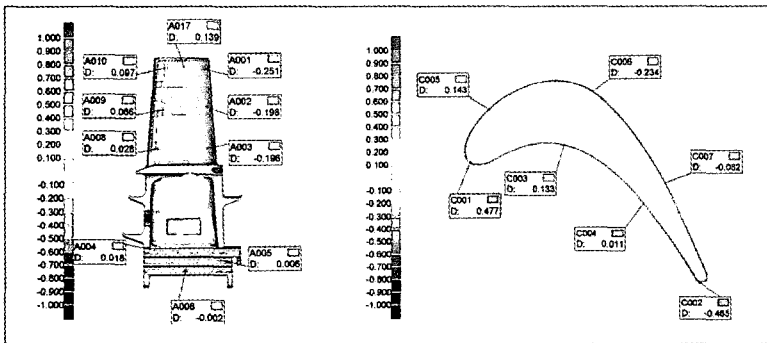


그림 4 버킷의 기준 도면과 모델링한 도면의 치수검사 결과

2) 내·외부 모델링

점 데이터는 UGE 사의 Imageaware라는 프로그램을 이용하여 내·외부 형상을 모델링한다. 내부 모델링을 위해서는 부품 내

부의 치수차를 최대한 줄이면서 절단할 수 있는 와이어 커팅(wire cutting)으로 절단 후 내부 냉각공(cooling hole)을 스캐닝한다. 그림 3은 내·외부 모델

링과 조합된 모습을 보여주고 있는 것으로 내부 스캐닝을 위하여 와이어 커팅으로 shank부를 3등분, airfoil부를 2등분하였다. 또한 이것을 수직으로 2등분한 모습을 보여주고 있다.

3) Solid modeling

Solid modeling을 수행하여 부품의 기능을 부여할 수 있다. 이러한 solid modeling의 장점을 정리하면 다음과 같다.

- 형상 정의(definition) 능력이 탁월하다.
- 정확한 입체형상을 알 수 있다.
- 사전검사 수행이 가능하다.
- History 관리가 가능하다.(model 수정이 용이)
- Modeling 자체를 CAM, CAE, CAT 등에 광범위하게 활용할 수 있다.

4) 치수 검사

모델링 한 도면을 Geomagic Quality라는 프로그램을 활용하여 버킷 외형 및 각 부위별 단면 치수검사(inspection)를 할 수 있으며, 모델링의 치수오차를 찾아내어 부품과 도면간의 오차를 확인할 수 있다. 그림 4는 버킷의 기준 도면과 모델링한 도면의 치수 검사한 결과를 보여주고 있다.

냉각시스템 해석 적용

고온부에서 작동되는 버킷 특

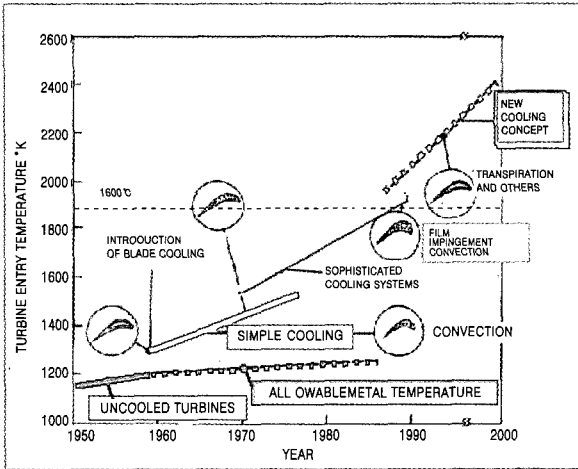


그림 5 50년간 가스터빈 터빈입구온도에 따른 냉각방식의 변천

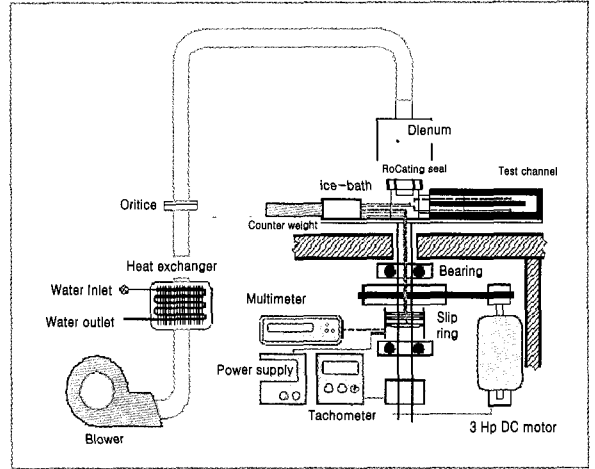


그림 6 버킷 냉각 유로 내 압력강하 특성실험용 장비

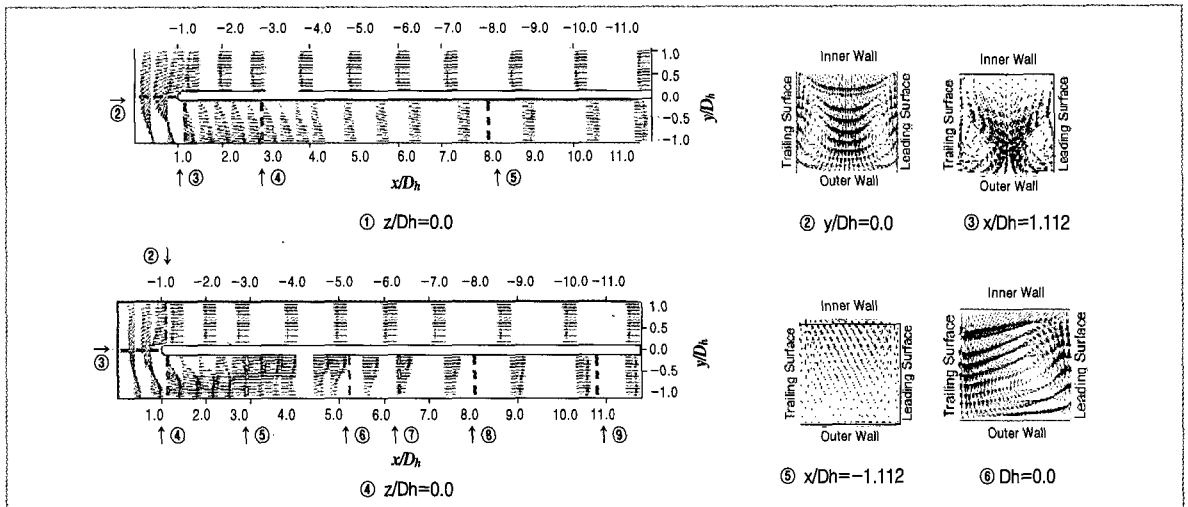


그림 7 냉각채널의 요철의 유무에 따른 냉각공기 유동방향과 속도장

성상 재질 내구성의 한계로 인하여 외부에 코팅은 물론 냉각공을 설치하여 압축기에서 공급된 공기를 이용하여 버킷을 냉각하게 된다. 이러한 버킷에 적용되고 있는 냉각방식은 크게 충돌냉각 (impingement cooling), 막냉각 (film cooling), 전도냉각

(conduction cooling), 대류냉각 (convection cooling)과 같이 크게 네 가지로 구분하며, 버킷에서는 충돌냉각과 막냉각이 주로 많이 사용되고 있다. 그림 5는 지난 50년간 가스터빈 터빈 입구온도(TIT)에 따른 냉각방식의 변천에 대한 것을 보여주고 있다.

이와 같이 냉각 공기를 적게 사용하는 것은 직접적으로 효율과 연계성이 있기 때문에 적은 양으로 최대의 냉각효율을 얻기 위하여 다양한 형상의 냉각 방법 및 구조가 연구되어 적용되고 있다.

1) 내부관 냉각에 의한 유도 및

열전달 특성 연구

버킷 내부 냉각 채널(channel)에 설치된 요철의 유무와 회전 시에 냉각공기가 공급되는 버킷의 경우 유로 내의 압력강하 특성을 연구하기 위하여 실험을 수행한다. 그림 6은 이와 같은 버킷 냉각 유로 내 압력강하 특성실험을 수행하는 장비로서 블로어(blower)를 통하여 냉각공기가 버킷이 있는 테스트 채널(test channel)에 공급된다. 곡관부를 지닌 이중유로에서는 유체가 받는 원심력에 의한 دن와류(Dean Vortex)와 회전에 의해 받는 코리올리력(Coriolis Force)을 받

게 된다. 또한 가스터빈이 3,600rpm으로 회전하는 것과 같이 3HP의 DC 모터에 의하여 회전운동을 하며, 취득된 데이터는 슬립링(slip ring)을 통하여 멀티미터(multimeter)에 저장된다.

그림 7은 요철(rib)이 있는 부분과 요철이 없는 상태에서의 냉각채널에서의 냉각공기의 유동방향과 각 위치별 속도장(velocity vector)을 보여주고 있다. 이것의 자료를 검토하여 와류와 코리올리력을 비교·분석할 수 있다.

이와 같은 연구를 기본으로 냉각유로 내의 요철의 위치 및 크기에 따라서 성능이 다양하게 변

화되는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 실험 결과가 제작사의 특허를 피할 수 있고, 가공 및 주조에 문제가 없다면 최적의 방법으로 도면 수정작업을 실시하여 주조 및 가공에 적용하여 제조한다.

2) 버킷 외부 열부하 측정 및 막 냉각 연구

회전의인 버킷은 매우 높은 고온, 고속의 연소가스 충돌에 의하여 매우 높은 열부하를 받는다. 따라서, 버킷의 열부하를 최소한으로 줄이기 위하여 버킷 외부의 열부하 측정은 물론 버킷 냉각공의 막냉각 유동특성 및 보호효과



그림 8 버킷 외부 열부하 특성을 보기 위한 실험장치

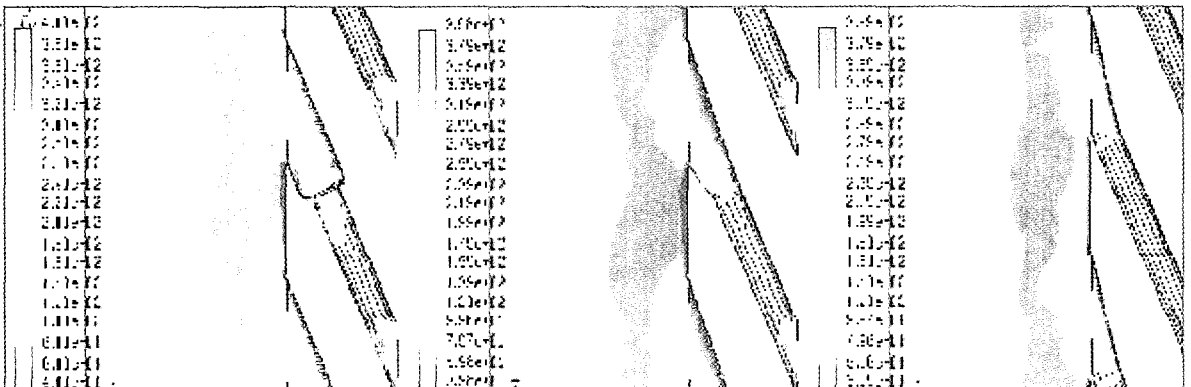


그림 9 버킷 리딩 에지(reading edge) 냉각구멍의 형상에 따른 냉각성능 결과

에 대한 연구를 실험하기 위한 것이다. 그림 8은 버킷의 외부 열부하 특성을 보기 위한 실험장치로서 그림에서와 같이 삽입된 버킷 외부에 오일과 탄소가루를 이용하여 회전 동안 풍동 모터에 의해 가스 공급 시 버킷 외부의 탄소 오일가루 분포되는 형상변

화를 추정하여 열부하 분포를 추정할 수 있다.

버킷 리딩 에지(leading edge)부의 막냉각 특성을 분석하기 위하여 상용 수치코드인 FLUENT라는 프로그램을 이용하였다. 냉각구멍의 형상에 따라 막냉각 성능의 차이가 있음을 알

수 있다. 그림 9는 막냉각 성능에 대한 해석결과로서 그림의 색깔로서 냉각성능을 알 수 있다.

진공정밀주조

가스터빈은 성능은 브레이톤 사이클(Brayton Cycle) 원리에 따라 터빈 입구온도의 증가와 직접적인 연관을 가지고 있다. 이와 같이 고온과 높은 응력 및 부식성 분위기에서 장시간 견딜 수 있는 버킷을 위하여 초내열합금을 개발하게 되었다. 이러한 초내열합금은 초기의 다결정조직(Equiaxed)에서 일방향조직(DS : Directional Singularity), 단결정조직(SX : Single Crystal)으로 발전하였다. 일방향 및 단결정 조직의 버킷을 개발하기 위해서는 진공정밀주조를 사용하여야 한다. 다음과 같은 진공정밀주조 공정을 거친 후 버킷이 만들어지게 된다.

1) 세라믹 코어 제작

주조 시 버킷 내부 냉각 통로를 주조로 제작하기 위하여 우선적으로 세라믹 코어(ceramic core)를 주형 주조 시 내부에 설치하여 내부 냉각통로를 만들고자 하는 것이다. 세라믹 코어 제작을 위해서는 금형을 제작한 후 그곳에 세라믹을 주입하여 응고시켜 코어를 제작하게 된다. 그림 10은 세라믹 코어 제작을 위한 금형 가공과 세라믹 코어를 제작

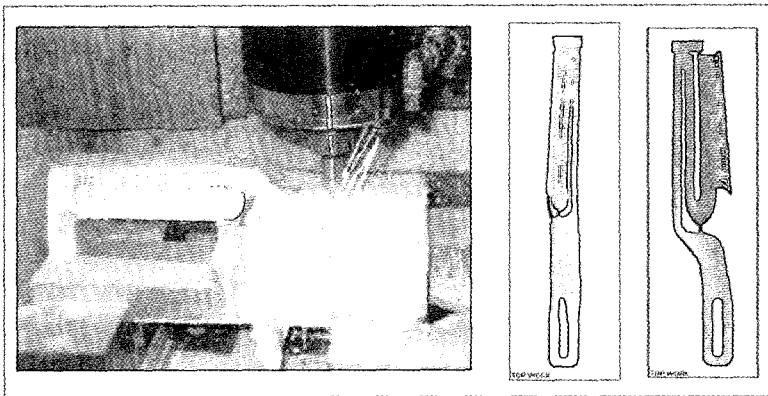


그림 10 세라믹 금형 및 냉각통로 제작용 세라믹 코어

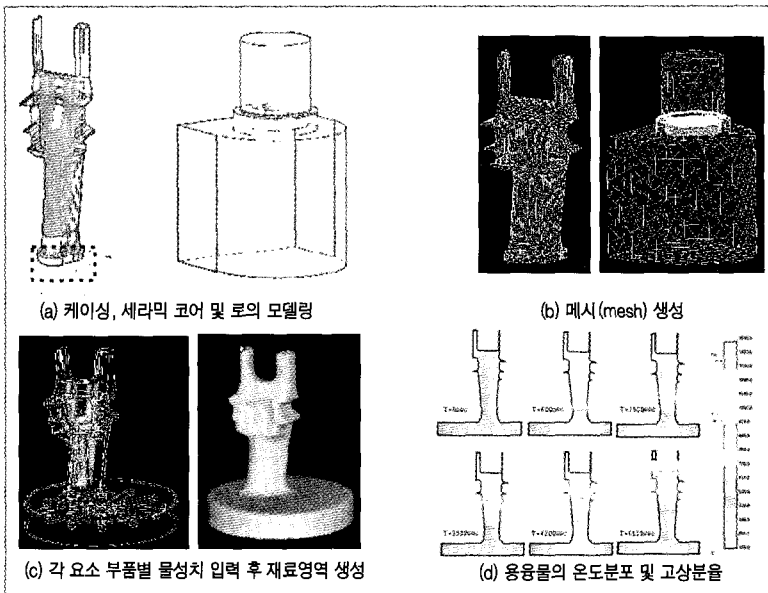


그림 11 ProCAST에 의한 일방향응고 거동

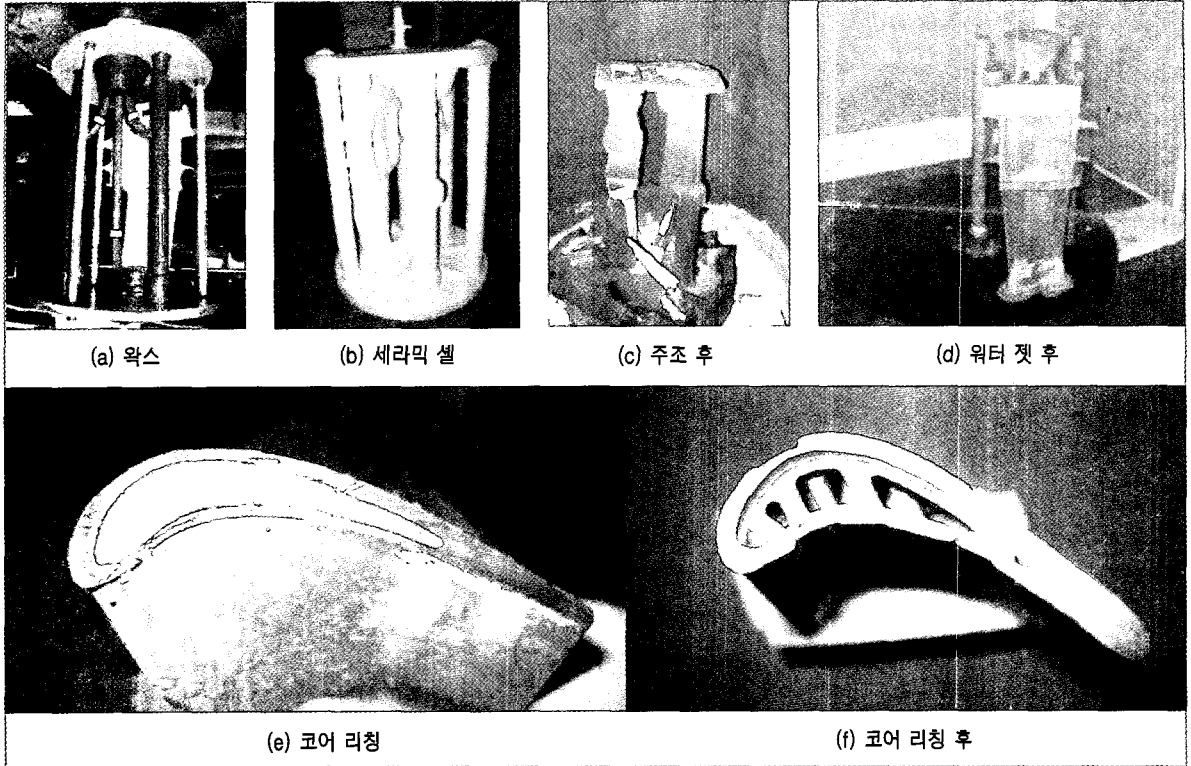


그림 12 버킷 주조를 위한 진공정밀주조 공정 절차

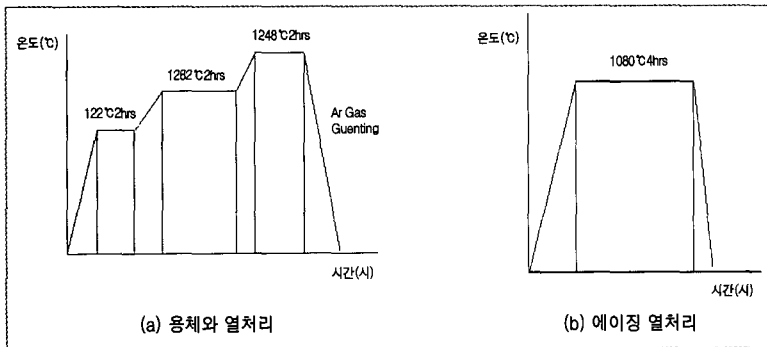


그림 13 용체화와 에이징 열처리 그래프

한 모습을 보여주고 있다.

2) 일방향응고 시뮬레이션 (simulation)

ProCAST를 이용하여 실제 정밀주조를 수행하기 이전 일방향

응고에 대한 응고해석을 실시하여 실제 장비와 동일한 특성으로 응고가 진행될 수 있도록 chill plate, mold chamber, susceptor 및 baffle 등을 각각 모델링하여 응고해석을 실시하여

각각에 대하여 일방향응고의 경계조건 및 응고조건을 설정한다. 이러한 응고해석을 위해서는 케 이싱과 세라믹 코어 그리고 진공 로를 모델링한 곳에 메시(mesh)를 생성한 후 그것을 구성하고 있는 각각의 물질인 주조물, 코어, mold와 chill plate의 물성치를 입력 해석하여 시간에 따른 용융물의 온도분포와 고상분율을 확인할 수 있다. 그림 11은 ProCAST에 의하여 일방향응고 거동을 과정을 보여주고 있다.

이것을 통한 응고조건을 설정한 후에는 봉상, 판상 및 단차시편 제작과 같은 일방향응고 예비시험을 통하여 조건 검증은 물론

실제 실험상에서 발생하는 오차를 보완하여 최종적 예비시험에 추가하여 버킷 주조시험을 수행한다. 검증 완료 후에는 버킷 제

작을 위한 진공정밀주조를 수행하게 된다. 버킷 주조를 위해서는 내부의 냉각 통로를 위한 세라믹 코어를 삽입한 왁스 패턴에 세라

믹 셀 코팅을 수행한 후 내부 왁스를 제거한 후 세라믹 셀을 소결하여 진공정밀주조를 수행하게 된다. 그림 12는 이와 같은 진공정밀주조의 공정절차를 보여주고 있다.

주조 열처리

주조 열처리는 초합금 재질별로 약간의 차이를 가지고 있으나 일반적으로 약 2단계의 절차를 거친다. 우선적으로 초합금의 특성상 primary γ' 생성 및 성장을 위하여 solution heat treatment를 수행하며, secondary γ' 를 생성을 위하여 aging heat treatment를 수행한다. 그림 13은 이와 같은 열처리를 그래프를 보여주고 있으며, 이러한 열처리를 솔루션 및 에이징 열처리(solution and aging heat treatment)라고 말한다. 이와 같이 열처리 후 주조품의 미세조직 및 물성시험을 수행하

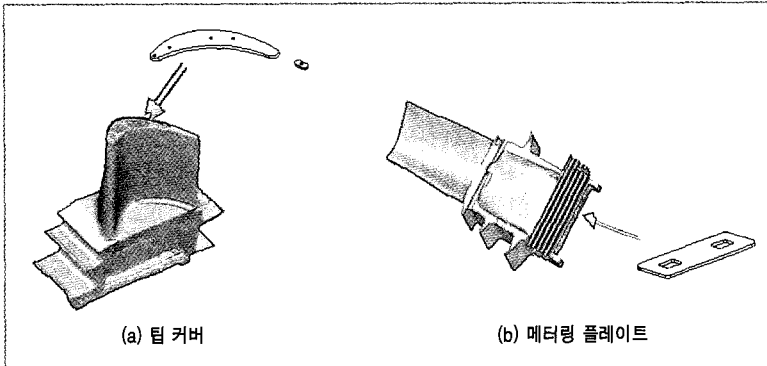


그림 14 1단 버킷의 요소부품 및 용접부착

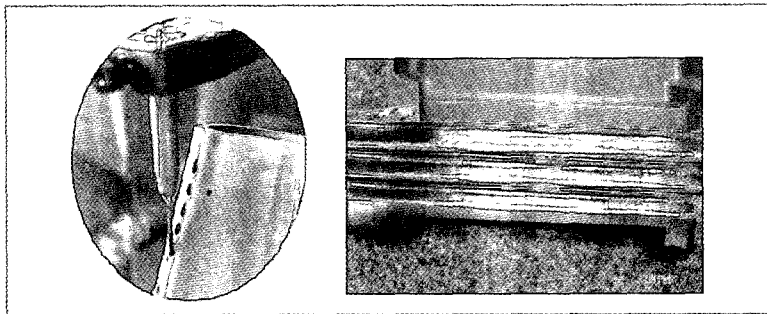


그림 15 1단 버킷의 냉각 홈 및 도브테일 가공

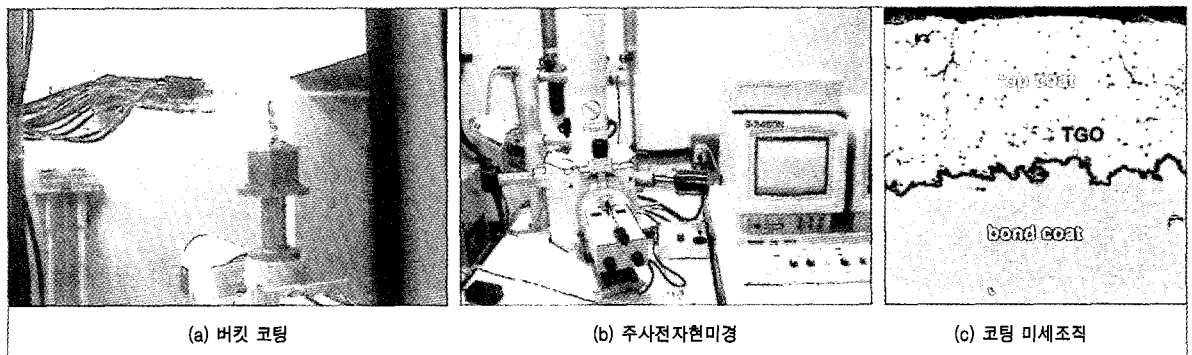


그림 16 버킷 코팅 및 분석

여 재질상태를 분석한다.

요소부품 용접 및 가공 기술

주조가 완료된 후에는 버킷 상부의 덮개 역할을 해주는 팁 커버(bucket tip cover)와 도브테일 하단부의 냉각 공기 통로 입구부분에 있는 미터링 플레이트(metering plate)와 같은 부품을 TIG 용접에 의하여 부착한다. 여기서도 용체화 열처리 같은 조건의 용접전 열처리를 수행하여 용접 중 결함발생을 최대한 축소하도록 한다. 여기까지 제작 작업을 완료하였을 경우 외형상의 버킷이 이루어진다. 그림 14는 버킷 요소 부품을 보여주고 있으며, 요소부품은 모델별로 제작 및 설치방법에 약간의 차이를 가지고 있다.

코팅 및 열처리

코팅은 두 가지 방식에 의하여 수행된다. 일반적으로 내마모성 및 열차단이 우수한 TBC 코팅(Thermal Barrier Coating)을 수행하게 되는데 세라믹 성분의 TBC 코팅은 바로 모재에 사용하였을 경우 접착력이 취약하여 바로 코팅에 사용하지 않는다. 따라서 모재부의 위에 우선적으로 본드 코팅(bond coating)을 수행

한 후 탑 코팅(top coating)을 수행하게 된다. 본드 코팅은 메탈 성분으로서 일정 수준의 접착강도 및 탑 코팅의 접착력을 높여 주기 위하여 코팅 내부의 기공, 거칠기 및 두께 등을 제작사마다 기준으로 제시하여 관리하고 있다. 마찬가지로 본드 코팅 위에 사용하는 탑 코팅도 규정을 정하여 관리하여 일정기간 사용하는데 문제가 없도록 관리하고 있다. 그림 16은 버킷에 코팅 및 SEM을 이용한 코팅 분석을 수행하는 모습을 보여주고 있다.

코팅 후 열처리는 이전에 설명한 주조 후 열처리와 같은 방법으로 수행하게 되는데 재질 및 방법에 따라 다소의 온도 및 시간의 차이가 있을 수 있다. 또한 주조 버킷 내부의 기포 등과 같은 결함을 제거하기 위하여 고온 등방압축(HIP : Hot Isostatic Pressing) 열처리를 용체화 열처리 전에 수행하여 재질을 보다 더 우수하게 만들어 사용하기도 한다. 현재는 일반적으로 제작사에서 버킷 제조 시 이와 같은 고온등방압축 처리를 수행한 후 출고하므로 재생 열처리 시에는 주로 사용하지 않고 있다.

완제품 검사 및 출하

최종적으로 육안검사 및 비파괴 검사를 통하여 품질검사 수행

한 후 출고된 제품은 터빈 로터에 삽입되어 회전익(버킷)으로서의 역할을 수행하게 된다. 매 단계마다 비파괴 검사를 수행하여 문제가 있으면 문제점을 제거하고 다음 단계의 공정을 거치는 과정으로 제품이 만들어지게 된다. 가스터빈 부품의 특성상 운전 및 기동 정치 시간(EOH : Equivalent Operating Hour, 등가운전시간)에 따라 사용 후 재 정비하여 사용하게 된다. 특히, 버킷은 등가운전시간으로 2만 4,000시간 사용하게 되면 분해하여 코팅을 제거하고 모재의 손상에 대하여 평가하여 재정비를 수행한 후 다시 코팅과 열처리를 거쳐 사용하게 된다. 따라서 코팅은 일정주기를 사용하는 소모성 개념으로 사용하게 된다. 이와 같은 복잡한 과정을 거쳐서 고가의 가스터빈 버킷을 제작하게 되는 것으로 현재 최신의 모델에 사용되고 있는 버킷의 국산화 개발에 대하여 전체적으로 설명하고자 하였다. 따라서 부분적으로 설명이 부족한 부분이 있을 것으로 여겨지며, 개인적으로 연락 주시면 아는 범위에서 최대한 자세하게 답변을 드리도록 노력하겠습니다.