

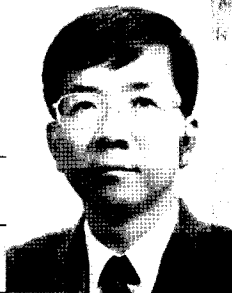
가스터빈 엔진의 내열, 내식, 내마모 코팅기술 현황



변 응 선

(KIMM 표면기술연구부)

- '81 - '88 강원대학교 재료공학과 (학사)
- '88 - '90 강원대학교 재료공학과 (석사)
- '91 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



남 기 석

(KIMM 표면기술연구부)

- '77 - '81 충북대학교 금속공학과 (학사)
- '81 - '83 연세대학교 금속공학과 (석사)
- '89 - '95 연세대학교 금속공학과 (박사)
- '85 - '86 인천제철(주) 기술개발부 대리
- '96 금속재료 기술사
- '87 - 현재 한국기계연구원 선임연구원

1. 서 론

가스터빈 엔진은 일반적으로 말해서 열역학적 사이클에 의해 작동하는 기계장치로써, 가스상태의 작동유체(working fluid)를 압축 및 팽창하는 과정에서 동력을 연속적으로 얻어내는 엔진을 말한다. 연속적인 동력이라는 조건은 가스터빈 엔진이 왕복기계나 등용적연소(等容積燃燒)사이클을 사용하지 않는다는 것을 자동적으로 의미하며, 회전식 부품이 주요 구성요소가 되어 있음을 내포하고 있다. 주요 구성부품에 왕복운동이 없기 때문에 piston-cylinder와 같은 상호 마찰부분이 없어서 윤활유의 소비가 극히 적으며, 왕복운동기계의 특징인 진동이 대폭 감소되고, 따라서 회전운동이기 때문에 고속운전이 가능하다. 또한 터빈은 압축된 가스의 팽창에 의해서 작동을 하기 때문에 부하의 변화에 대한 반응이 빠르다. 이러한 장점 때문에 가스터빈엔진은 항공기의 동력기관으로 아주 적합하며, 선박용 엔진과 산업용에도 그 응용이 증가하고 있다.

이와 같은 가스터빈 엔진의 hot section은 1,100°C 내외의 고온에서 작동되기 때문에 극심한 부식, 산화와 함께 매우 큰 회전응력 상황에 노출되게 되며 이러한 상황에서 수천-수만 시간 동안 원래의 기계적 성질과 표면특성이 유지되어야 한다. 이외에도 압축기 블레이드(또는 버킷) 등의 cold section도 공기중의 수분이나 염분 등에 의한 부식 및 particle erosion, wear와 같은 다양한 형태의 손상을 받게 되므로 엔진의 안정

성 및 수명향상을 위하여는 이들 부품의 특수 표면처리는 필수적인 기술일 뿐만 아니라 엔진 (또는 부품) 수명이 코팅의 수명에 의하여 결정 되는 시점에 이르러 있다.

이에 본고에서는 항공용 및 육상용 가스터빈의 종류 및 특징에 대해 간략히 살펴보고 이들 엔진에 사용되는 보호코팅의 기술현황을 소개하고자 한다.

2. 가스터빈 엔진의 종류와 특징

2.1 가스터빈 엔진의 종류와 특징

가스터빈 엔진은 연소기, 압축기와 터빈으로 구성된 가스발생기와 동력발생기 부분으로 구분된다. 모든 가스터빈 엔진에 있어서 가스발생기는 모두 같지만 동력발생 부분의 형태와 구조에 따라 터보프롭(turbo-prop), 터보 축(turbo-shaft), 터보 제트(turbo-jet), 바이패스(by-pass) 엔진으로 분류를 한다.

터보 프롭엔진은 그림 1에 나타낸 것과 같이 동력발생 부분에 동력터빈과 배기노즐을 장치하여 동력터빈으로는 프로펠러를 돌리고 나머지 가스에너지는 노즐을 통해 분사시켜서 추력으로 활용하는 형태의 엔진을 말한다. 기계적 에너지와

제트추진 에너지의 2 형태를 동시에 사용하는 것이 특징으로 추진효율은 시속 800 km/h이하에서는 터보제트기보다 우수하다. 따라서 업무용 항공기, 소형운송기, 초동훈련기 등 비교적 저속의 항공기에 사용된다. 엔진의 굉음과 진동은 적으나 프로펠러에서 발생하는 소리가 비교적 크다.

터보 축 엔진은 순전히 회전식 기계에너지만을 공급하는 것으로써 가스발생기 하류에 동력터빈만을 연결시키고 감속장치를 통해서 동력을 전달한다. 이 엔진은 주로 지상, 선박, 차량등의 동력원으로 사용되며 고속응용이 아니므로 공기 흡입구는 bell-mouth 형태로 되어 있다. 동작가스는 터빈에서 대기압으로 팽창하기 때문에 제트 추력은 생기지 않는다. 헬리콥터용 동력으로는 제트추력이 별도로 필요하지 않기 때문에 터보 프롭보다는 터보 축 엔진을 사용하여 회전익을 돌린다.

터보제트 엔진은 배기노즐을 가스발생기의 하류에 부착하여 순전한 제트추력을 동력으로 사용하는 엔진을 말하며 가스발생기와 배기 노즐 사이에 후방연소기(after-burner)를 추가하여 가스를 재가열한 후에 배기노즐로 분사시켜 추력을 증강하는 것을 후방연소 터보제트(afterburning turbo-jet)라고 하며 전투기와 같이 짧은 시간에 급속한 추력의 증가를 필요로 하는 경우에 응용된다. 터보제트기는 고속에서 추진효율이 우수하나 저속비행시의 성능은 좋지 않다. 항공기는 이륙시에 가장 무겁고 최고의 추력이 필요한 것을 감안하면 터보 제트의 가장 큰 단점이라 하겠다. 항공기 산업에 커다란 혁신을 불러 일으킨 터보 제트 엔진은 성능이 더 우수하고 경제적인 바이패스 엔진의 출현으로 인해 민항기에서는 완전히 자취를 감추었고 군용기에서도 일부 제한된 분야에만 응용되고 있다.

터보프롭과 터보제트의 특성을 합한 것과 같은 바이패스 엔진은 동력발생부분이 동력터빈과 배기노즐로 구성되어 있다. 여기서 동력터빈은 저온저압이지만 다량의 공기흐름을 발생하는 팬

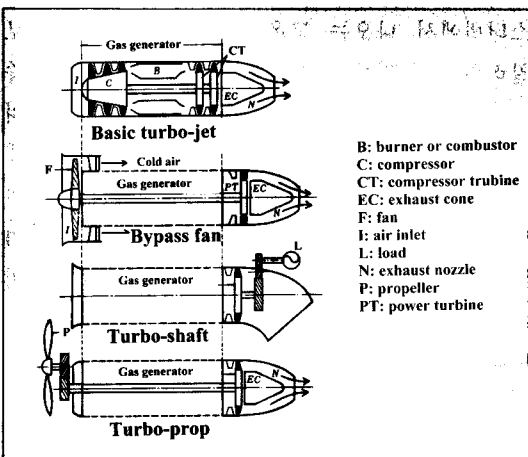


그림 1. 가스터빈 엔진의 4가지 기본형태

(fan)을 회전시킨다. 제트의 추력은 가스의 유량과 흐름속도를 곱한 것이기 때문에 팬에서 나오는 흐름은 속도는 적지만 유량이 커서 상당한량의 추력을 얻을 수 있다. 배기노즐에서 분사되는 가스는 속도는 크지만 유량이 비교적 적다. 근래의 모든 민항기용 엔진은 바이패스비(팬에서 외부로 분사되는 저속저온의 공기량/엔진내부를 통하여 배기노즐로 분사되는 고속고온의 가스유량)가 높은 엔진으로 대체되어 가고 있으며 최신편 전투기인 F-16, F-18 등은 저 바이패스비의 엔진을 채택하고 있다.

2.2 산업용 가스터빈 엔진의 활용분야

가스터빈 엔진은 경량, 고성능, 원주형태 등의 특성 때문에 항공기의 엔진으로 가장 널리 사용되어 왔다. 그러나 항공기 이외의 응용에서는 이러한 가스터빈 특성이 그다지 중요하지 않지만 아래와 같은 일부 특정분야의 경우 동력기관으로서 널리 사용되고 있다. 산업용으로는 앞서 설명한 대로 터보 축 엔진이 주로 사용된다.

- 1) 발전용
- 2) 가스화 기름 운송동력(송유관의 운전)
- 3) 선박과 공기부양선의 추진기관
- 4) 차량전인용
- 5) 전에너지 활용시스템(total energy system)

2.2.1 발전용 터빈엔진

발전용으로 가스터빈의 타당성은 지리적 여건, 경제적 조건, 전력수요변화의 양상에 따라서 많이 좌우된다. 통상 산업지역에서 매일 매일 적용되는 기본부하 이외에 전력소모가 많은 작업 시간에는 추가 전력요구가 생기는데 이의 추가소요는 보통 보조발전기를 하루 수분-수시간 가동해서 해결하게 된다. 이 추가전력의 변동은 거의 정확한 예측이 가능하며 소요량과 사용시간이 비교적 적다. 또한 예기치 못하게 돌발적으로 생기는 첨단부하 (peak-loading)는 가스터빈 발

전기를 사용하는데 첨단부하는 통상적으로 양이 적을 뿐 아니라 단시간 동안 하루에 2-3번 정도만 소요가 생기는 것이기 때문에 낮은 운영유지비 보다는 낮은 초기투자가 바람직하다.

가스터빈 발전기는 화력전력이나 수력발전시설과는 달리 수원(水源)이 필요하지 않고 크기가 적기 때문에 전력 소요지역 내에 직접 가설함으로써 송전에 필요한 여러 시설을 절감하고 손실을 크게 감소시킬 수 있다. 이러한 류의 발전기는 또한 시동이 빠르고 부하변동에 대한 출력의 자체조정에 민감하며 소음과 공해정도가 적고 발전소 건물도 그 지역의 타 건물에 조화시킬 수 있다는 등의 장점이 있다.

대표적인 가스터빈 발전방식은 기본 고정축 사이클방식으로써 외부공기는 흡입구와 필터를 통한 후 소음기에서 소음을 감소시키고 가스터빈으로 들어가 작동한 후 배기부분에 장착되어 있는 소음기를 통해서 대기로 배출된다. 가스터빈은 교류발전기에 직결되어 있으며 부분품의 공냉 및 환기장치도 동시에 작동된다. 이러한 기본 사이클 가스터빈을 이용한 발전소는 비교적 구조가 간단하기는 하지만 많은 열량이 배기로 나가므로 주입된 연료열량의 31.5% 만이 출력의 형태로 나타나기 때문에 시스템 효율은 비교적 낮다.

배기열을 회수 재사용해서 시스템의 열효율을 향상시키는 것이 병합사이클로써, 기본사이클 가스터빈에서 나오는 고온의 배기가스를 활용 보일러의 수증기를 발생시키게 되며 발생한 수증기는 수증기 터빈을 작동시키고 응축기를 거쳐 다시 보일러에 들어가 수증기가 되는 과정을 계속한다. 가스터빈과 수증기 터빈은 각각 별도의 발전기에 연결되어 발전한다. 이렇게 배기가스의 열량을 회수사용함으로써 주입된 연료열량의 46.7%를 출력으로 사용할 수 있어 기본사이클에 비해 열효율이 우수하다.

2.2.2 기름과 가스의 운송

가스터빈엔진은 기름과 가스산업에서 많이 활

용되고 있다. 이의 주요분야는 천연가스의 배송, 원유의 펌핑, 유정(油井)의 물 재주입 등이다. 이 중에서도 천연가스의 배송은 그 규모가 가장 크고 또 가스터빈이 가장 많이 응용되고 있는 분야이다.

송유관이나 가스파이프 라인은 그 길이가 길어짐에 따라서 손실이 증가하여 압력이 떨어진다. 이들은 사막, 바다 등에 걸친 장거리이기 때문에 그 압력저하는 대단하다. 따라서 중간 적재적소에 여러개의 pumping station을 설치하여 압력을 다시 올려준다. 가스는 보통 68배의 대기압력으로 수송되지만 송가스관은 가스저장소로서의 기능 때문에 이 압력은 크게 변동한다. 이 경우 흔히 분리축사이클 가스터빈이 사용되며, 송가스관에서 가스를 빼내에 엔진연료로 사용하기 때문에 사람없는 격리된 곳에서도 수주-수개월씩 자체 운행하며 주 가스장에서 원격조정으로 제어한다. 대부분의 원유 송유관은 송출압력이 45-70 기압일 때에 적합하도록 설계된다. 양유장(揚油場) 입구에서의 원유압력은 보통 3-10기압 범위에 있으며 이를 증압시키기 위해서 가스터빈으로 펌프를 작동한다. 대표적인 송유관의 직경은 450-750mm이며 펌프의 용량은 대체로 4000-5000 kW로서 가스터빈을 동력으로 사용하기에 이상적인 크기이다.

유정의 재주입(re-injection 또는 re-pressurization)은 원유의 양유량(揚油量)을 증가시키기 위한 방법으로써 1954년부터 널리 사용되어 왔는데, 기름 생산과정에서 얻어진 물이나 기름 분리가스로 유정내부를 압축시켜서 천연상태의 원유가 지구표면으로 펌핑되기 쉽도록 하는 것이다.

2.2.3 선박 및 공기부양선

선박의 주 추진기관으로서 가스터빈의 응용은 전세계적으로 급증하고 있다. 현재로서는 가스터빈 추진은 대부분이 군용선박에 사용되고 있고 상선응용은 아직 제한되어 있다. 그림 2와 같은

가스터빈을 선박추진용으로 사용하는데 있어서 가장 큰 단점은 값싼 연료를 사용하는 steam 엔진에 비해 운행비가 더 많이 든다는 것이다. 주로 이러한 경제적인 이유 때문에 상선 운송업계에서는 가스터빈 추진을 반대하고 있지만 성능이 더 중요한 군용선박에 있어서는 이것이 커다란 문제는 되지 않는다.

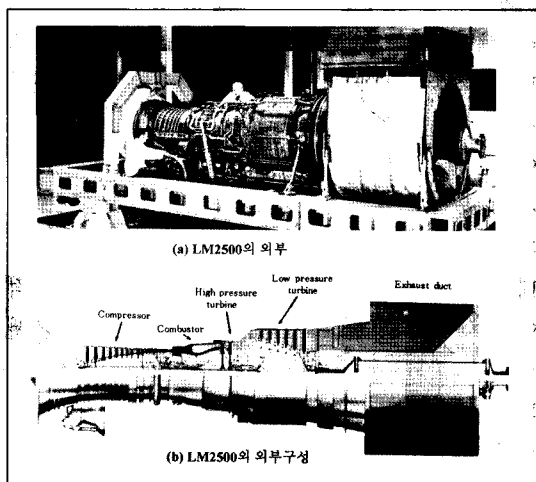


그림 2 LM2500 선박용 가스터빈엔진(General Electric, U.S.A)

일반상선은 실질적으로 일정 순항속도로 항해를 하지만 해군함정은 저속으로 장시간 항해하다가 갑자기 고속으로 단시간 달려야 하는 등 급격하고 폭넓은 속도의 변화가 가능하여야 한다. 가스터빈의 성능특성으로 볼 때 고속 sprint 항해에 충분한 출력을 공급할 수 있도록 설계된 엔진은 순항상태에서의 저출력동작 즉, 부분 부하상태에서는 효율이 상당히 저하된다. 이를 보완하기 위해 통상 저출력엔진과 고출력엔진을 혼성운용하기도 한다.

공기부양선은 공기방석을 선체하부에 형성하여 움직이는 것이므로 선체 및 엔진의 중량이 다른 선박에 비해 특히 중요하다. 따라서 항공기용 엔진과 똑같은 엄격한 요구조건이 적용될 뿐만 아니라 이들의 동작이 지상표면이나 수면 가까이서 이루어지기 때문에 먼지등의 오염 및 수

분에 의한 침식으로부터 보호되어야 한다. 따라서 이상적인 추진기관은 항공기용 엔진을 내식성이 우수하도록 개조하고 엔진입구에 먼지와 해수의 유입을 막기 위한 필터를 부착한 것이다.

3. 가스터빈 엔진의 구성

가스터빈 엔진은 연료의 연소에 의해 발생하는 에너지를 축이나 프로펠러 등을 구동하기 위한 기계적인 힘 또는 고속의 제트추력으로 변환시킬 수 있도록 설계된 동력발생장치로 그림 3에 나타낸 바와 같이 기본적으로는 가스발생장치와 동력변환장치로 구성되어 있다. 가스발생장치는 압축기, 연소실, 그리고 터빈으로 구성되는데 가스발생장치의 입구와 출구부분을 사용목적에 알맞는 다양한 기능을 추가함으로써 2장에서 설명한 바와 같이 여러형태의 가스터빈이 개발되어 있다.

3.1 압축기부

가스터빈 엔진에서 압축기의 역할은 제한된 체적의 연소실에서 가열되어 터빈을 통과하면서 팽창하게 될 공기에 최대한의 압력을 주는 것으로서, 터빈에서 공급되는 기계적에너지를 공기의 압력에너지로 전환시켜 공기의 포텐셜을 높이는

것이다. 압축기는 공기를 압축할 때 최소한의 온도상승으로 최대한의 압축을 얼마나 효율적으로 할 수 있는가 하는 것이 전체 엔진성능을 결정하는 주요 인자가 되기 때문에 가스터빈 엔진에서 가장 중요한 구성요소중 하나이다. 압축기 효율은 일정유량 공기의 압력상승에 요구되는 동력에 따라 결정되며, 연소실 내부에서 발생하는 온도변화에도 상당한 영향을 주게된다.

3.2 연소기

외부 대기의 공기를 흡입하여 작동유체로 사용하는 가스터빈 엔진에 있어서 연소기는 많은 열에너지를 공기흐름에 공급하여 연소가스로 하여금 터빈입구에서 적당한 온도와 적절한 온도분포를 갖도록 하여야 한다. 가스터빈 엔진의 성능은 온도와 압력비가 증가함에 따라서 향상되므로 현대의 가스터빈엔진은 내열재료 및 내열코팅의 개발과 냉각방법의 개량연구가 계속되어 오고 있으며 이에 따라서 터빈입구온도가 1250℃ 이상의 고온인 엔진도 개발되어 있다.

연소기에서는 액체연료 또는 기체연료가 노즐에 의해서 주입되어 분무되며 분무된 증기상태의 연료가 공기와 혼합되어 연소한다. 연소기 내부에서는 turbulent mixing이 이루어 지고 연소기 내부의 좁은 공간에서 연소가 동시에 일어나

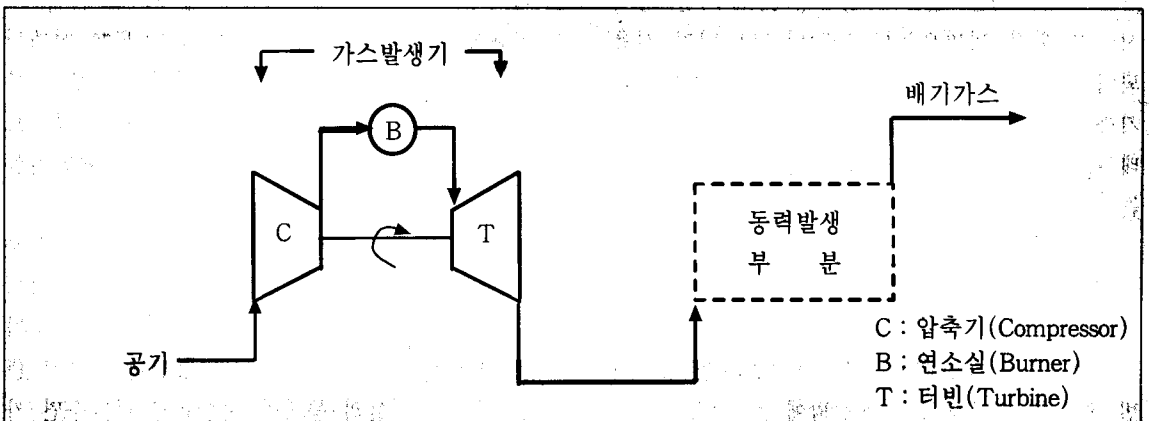


그림 3. 가스터빈 엔진의 구성

기 때문에 열유체역학적인 면에서 상당히 해석하기 어려운 흐름을 형성한다.

3.3 터빈부

대부분의 가스터빈 엔진은 axial flow turbine 형태로서 그림 4와 같이 stationary blade(또는 nozzle) stage와 moving blade(또는 bucket) stage 그리고 한 개 또는 몇 개의 stage로 구성된 rotor로 구성되어 있다. 고온고압의 연소가스는 노즐에서의 팽창으로 운동에너지는 증가하고 엔탈피는 감소하게 된다. Turbine wheel 에서는 연소가스를 버킷으로 통과시켜 이 운동에너지의 일부를 축일(shaft work)로 전환시킨다. 또한 연소가스는 노즐뿐만 아니라 버킷에서도 부수적인 팽창을 하여 엔탈피의 감소와 운동에너지의 증가를 가져오며, 이 운동에너지의 일부도 마찬가지로 축일로 바뀐다.

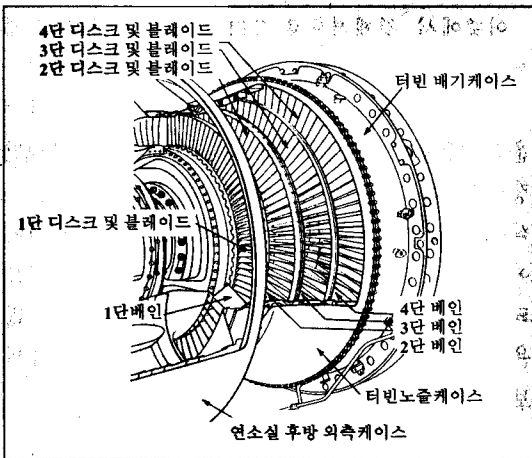


그림 4. 터빈부분의 절단면(Pratt & Whitney JT3D)

3.3.1 터빈의 구성

터빈의 구성부품은 두 개의 주요부, 즉 디스크와 버킷으로 구성되어 있다. 디스크(disk 또는 wheel)는 보통 크롬, 니켈 및 코발트를 많이 함유하는 특수 내열합금강으로서 정적으로는 물론이고 동적으로도 평형을 이루고 있다. 디스크는

단조를 한 후 기계가공을 하는데 구조적 결함을 탐지하기 위해 X-ray, 자기탐지 등 비파괴 검사를 거친다. 버킷은 원심력에 의한 하중을 견뎌내고 디스크와 버킷간의 서로 다른 팽창율을 감안할 수 있도록 fir tree 형태로 만들어 디스크에 장착한다. 이때 리벳, 특수 고정탭 또는 다른 터빈 stage(단)를 이용하여 축방향으로 이동하지 못하도록 고정한다.

어떤 버킷들은 바깥쪽 원주가 열려있지만 그림 5 처럼 슈라우드(shroud)에 버킷이 붙어있는 경우도 있다.

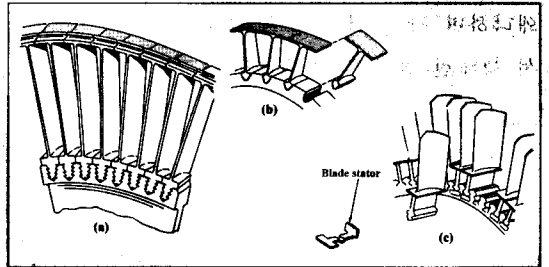


그림 5. (a) 슈라우드가 있는 터빈블레이드
(b) Fir-tree 접합부를 분리한 것
(c) 슈라우드가 없는 터빈블레이드

슈라우드는 버킷 선단에서의 가스 누설손실을 막고 과도한 진동을 방지하며 과도한 하중으로 버킷의 피치가 적어지는 방향으로 비틀어지는 뒤틀림 현상에 대한 저항체의 역할을 한다. 슈라우드를 사용하면 보다 얇은 버킷재료를 사용할 수 있고 공기역학적으로 선단부에서 knife edge 모양의 사용이나 밀봉으로 선단손실을 감소시킬 수 있다. 그러나 선단부에 질량이 부가되는 결과를 가져오므로 터빈의 온도와 회전속도가 낮아지는 단점이 있다.

다단 터빈은 압축기 구동에 요구되는 동력이 커져 매우 큰 터빈디스크가 필요한 경우에 사용한다. 다단터빈은 터보프롭 엔진에도 사용되는데, 터보프롭 엔진의 터빈은 압축기와 프로펠러를 구동할 수 있는 충분한 동력을 얻을 수 있어야 한다. 두 개 이상의 터빈 디스크가 사용되는

경우 노즐 다이어프램(nozzle diaphragm)은 각 터빈디스크 바로 앞에 위치하여 연소실에서 분출되는 연소가스를 버킷에 적절한 방향으로 유입시켜 주는 역할을 한다. 이것을 노즐(nozzle)이라고 하며 그림 6과 같은 형태를 가진다. 다만 터빈의 작동은 연속된 단(stage)들이 비교적 낮은 가스속도, 압력 및 온도에서 작동된다는 점을 제외하면 1단 터빈(one-stage turbine)과 유사하다. 제일 앞에 있는 단에 비해 그 뒤의 터빈단들은 보다 낮은 압력의 연소가스를 받으므로 각 단 사이의 하중을 균일하게 만들기 위해서는 뒷단으로 갈수록 큰 버킷면적을 필요로 하게 된다. 왜냐하면 각 단에서 흡수되는 에너지는 각 단에서 행해진 일의 양에 비례하기 때문이다.

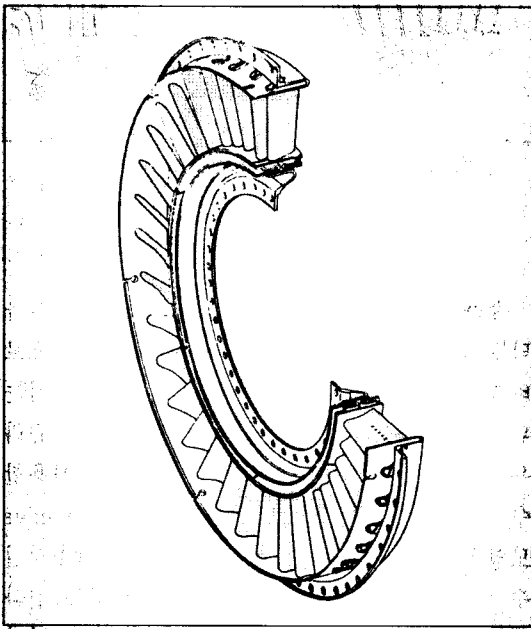


그림 6. 전형적인 노즐 다이어프램

터빈디스크는 엔진에서 가장 응력을 크게 받는 부분중의 하나로서 약 930°C 정도의 고온에서 작동해야 할 뿐만 아니라 작은 엔진에서는 40,000rpm, 큰 엔진에서는 80,000rpm 정도의 높은 회전수로 인해 발생하는 큰 원심하중을 받으면서 작동해야 한다. 따라서 터빈을 안전 작동한

계대로 유지시키기 위해서는 엔진회전속도와 터빈입구온도(TIT)를 정밀하게 제어할 수 있어야 한다. 이와 같은 터빈디스크의 높은 회전속도와 온도조건에 기인해 버킷은 길이가 길어지거나 또는 뒤틀리거나 피치가 변하는 등의 크립(creep)현상이 일어 날 수 있다. 이러한 변형은 엔진작동한계를 초과할수록 심각해 지므로 제작자에 의해 정해진 온도와 회전속도 범위내에서 작동하는 것이 중요하다.

4. 가스터빈 엔진부품의 코팅기술 현황

터빈엔진을 제조하는데 있어 중요한 것은 엔진효율의 향상 즉 출력을 증가시키는 것으로서 엔진의 무게나 크기를 증가시키지 않고 출력을 증가시키기 위해서는 운전온도의 상승(터빈입구 온도, TIT의 고온화)이 필요한데 이를 위해서는 새로운 내열재료의 개발, 냉각기술의 개선, 그리고 열차폐 등의 코팅방법이 있다.

이중에서 경제적으로 TIT를 상승시키기 위해서는 값비싼 내열재료 보다는 값싼 열차폐코팅 기술이 효율적이며 1200°C 이상의 고온이라는 운전상황을 고려할 때 재료의 우수한 크립파단 강도와 내열피로성 외에도 고온산화 및 고온부식(hot corrosion)에 대한 MCrAlY코팅 및 TBC이 필수적이다. MCrAlY 및 TBC 이외에도 적용되고 있는 가스터빈부품의 보호코팅은 매우 많은데 본 장에서는 이와 같은 가스터빈용 부품의 보호코팅에 대한 기술현황을 살펴보았다.

4.1 압축기부

1축 압축기의 운전효율은 전적으로 버킷(또는 블레이드)의 적합한 공기 역학적 설계와 부품간의 정밀한 치수공차 유지에 좌우되고 있다. 부식이나 침식에 의한 작은 치수의 변화라도 급격한 운전효율의 저하를 가져오며 동시에 진동을 발생시키게 된다. 또한, 피팅은 버킷에 국부적인

정적, 동적 응력집중을 가져오게 되어 수명의 급격한 단축을 초래할 수도 있다. 이를 극복하기 위해 공급되는 공기의 여과, 압축기 블레이드의 세척, 그리고 보호코팅 등의 다양한 예방 방법이 적용되고 있다. 압축기 부문에 사용되고 있는 특수코팅에 대해 기능별로 분류하여 그 현황을 요약하면 다음과 같다.

공기 중에 포함된 염분이나 수분에 의해 발생하는 부식에 대한 저항성을 부여하기 위한 내식 코팅에는 내식코팅, 모재에 대한 희생보호 코팅으로 구분된다. Ni-Cd코팅은 내식을 목적으로 한 방법으로 Ni-Cd전기도금 후 확산열처리를 행하는 것으로서 미처리재에 비해 염수에 대한 저항성이 현저히 개선될 뿐 아니라 침식저항성도 만족할 만한 수준이 된다. 그러나 산성분위기에 대한 저항성은 기대하기 어렵다. 모재인 음극에 비해 우선적으로 부식되어, 즉 희생양극으로 작용하여 모재를 보호하게 되는 희생양극 코팅기술은 Chromalloy A12와 SermeTel system 등이 사용되며, 상세한 내용은 표 1에 나타내었다.

그림 7과 같은 압축기 부문에서 일어날 수 있는 마모의 종류로는 크게 에로우전/충격 손상과 슬라이딩/러빙 마모이며, 베인(또는 노즐), 블레이드(또는 버킷) 등은 주로 에로우전/충격 손상에 노출되어 있다. 그 부품으로 disk, bushing, shaft, hub, seal, bearing journal, mid-span shroud등으로 chromium carbide 또는 tungsten

carbide와 같은 세라믹을 이용한 경질코팅이 주로 적용되고 있다. 코팅의 재료와 방법은 적용부품과 요구성능에 따라 달라지며, 그 일부를 표 2에 요약하였다.

4.2 연소기부

연소기부는 압축기와 터빈 사이에 위치한 부분으로서 크게 fuel nozzle, combustion liner, transition pieces의 3 부분으로 구성되어 있다. 이 부품들은 연소반응에 의한 매우 높은 열과 조악한 분위기 그리고 높은 진동응력 등의 극한 환경에 노출되어 있다.

Fuel nozzle의 경우 마모가 일어나는 부분에만 코팅을 적용하게 되며, GG-CC-100과 같은 (75-80)CrC/(20-25)NiCr계 분말을 HVOF 용사하여 내마모성을 향상시킨다.

Combustion liner의 경우 통상 코팅을 적용하지 않는 경우도 있으나 최근 제조된 엔진의 경우 세라믹 단열코팅이 적용되고 있다. 금속모재에 가해지는 열 부하를 경감시키고, 불균일한 온도분포에 대한 보호를 목적으로 하며, 금속 접합층과 세라믹 층의 2중층으로 구성되어 있다.

Transition pieces(그림 8)는 매우 뛰어난 크립 및 고온산화에 대한 저항특성을 필요로 하며, 따라서 combustor liner와 같은 정도의 단열코팅

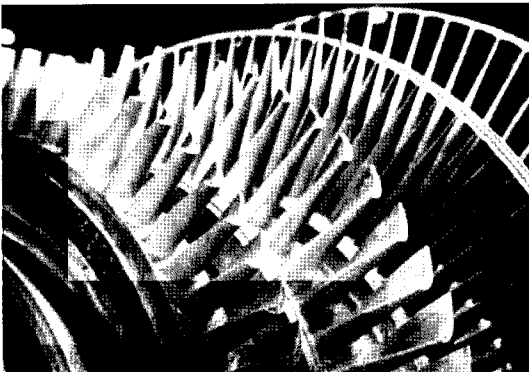


그림 7. 가스터빈 엔진의 압축기부

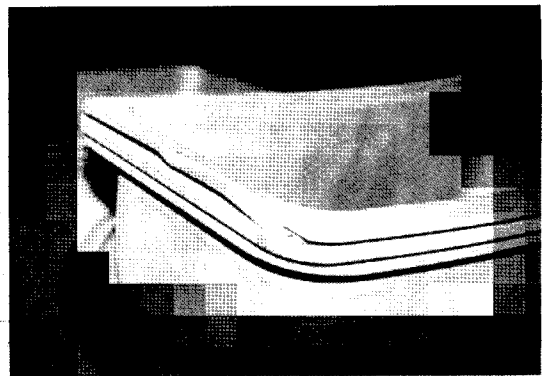


그림 8. Side seal slot이 마모된 transition piece (G.E, MS7001EA)

표 1. 터빈엔진의 압축기부에 사용되는 코팅

Coating	Type	Range of Thickness, μm	Operating Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Typical components	Characteristics
Ni-Cd	Electrodeposited layers of Ni & Cd, followed by diffusion heat treatment		<150	blades, vanes, components which can be electroplated	provides corrosion resistance in all except acidic environ.
Chromally A12	pack cemented (iron-) aluminide coating, followed by slurry applied conversion topcoat though to be silica rich (eq. to PWA-77)	7-15	540	martensitic and precipitation hardening steels used in high pressure blade, vanes, shrouds	corrosion resistance, anti-fouling; better erosion resistance than Ni-Cd
SermeTel W	inorganic water-base containing chromate and Al powder			iron, steel, heat treated STS, Ti & Ti alloy used in compressors	applied by spraying brushing, or dipping
Class 1	2 coat, no post curing or surface burnishing required				
Class 2	Class 1 + Post curing				
Class 3	Class 1 + burnishing before the final coat				
Class 4	Class 1 + burnishing after the final coat				
SermeTel 725	inorganically bonded Al coating with inorganic chromate/phosphate top coating				similar to SermeTel W
SermeTel 1101	advanced version of SermeTel Class 4	13-150	650	compressor shaft spacers, hubs, etc	uses most recent advanced in coating material and application tech. to ensure optimal corrosion protection and adhesion
SermeTel 1141	sacrificial base coat + topcoat	20-150	650	disk, shafts, spacers, hubs, etc	max. corrosion and erosion protection. improved protection over SermeTel 1101.
SermeTel 1142	sacrificial base coat + topcoat	20-150	650	complex geometry components capable of withstanding 1000 F cure	Eq. erosion/corrosion protection to SermeTel 1141
SermeTel 2241	sacrificial base coat + topcoat (advanced version SermeTel 725)	20-150	650	compressor gas path surface of larger turbine engines blade, vanes etc.	best surface finish available for large components. excellent corrosion and erosion resistance.
SermeTel 3300	coating to provide greatest sacrificial galvanic corrosion resistance without postcure or burnish	40-150	750	very large components where 1000 F cure or burnishing is impractical. exhaust ducts, cases, shrouds, seals etc.	becomes sacrificial without post curing or burnishing. most galvanically active of the SermeTel coatings.
SermeTel 5	abrable seal material of Al particles in an inorganic matrix	75-1500	540	areas where reduced clearances are desired. knife-edge seals, impeller housings.	corrosion resistance, high bond strength, machinability and compatibility with SermeTel coating system.
SermeTel SRC	Al filled inorganic compound used for restoring a continuous surface profile to pitted or blemished components.	250-7,600	540	inlet cases of all turbine engines; corrosion pitted blades, vanes and diaphragms.	restore surface profile for improved aerodynamics of airflow

표 2. 터빈엔진의 압축기부에 적용되고 있는 내마모 코팅

Coating	Type	Eq. Specification	Operating Temp.(°C)	Typical components	Characteristics
Union Carbide LA-2	> 99 w/o Al ₂ O ₃	AMS 2436A DDA EOPS 14091A GE F50T19B	540	Turbine area	D-Gun, has ceramic-like properties
LC-1B	65 Cr ₃ C ₂ 35 (Ni-20Cr)	PWA 49 GE F50T19G RR RPS 487	540	porous metal coating, fuel nozzle	D-gun, prevents rubbing wear
LC-1C	80 Cr ₃ C ₂ 20 (Ni-20Cr)	PWA50 RR RPS 487	540	turbine section seal(carbon graphite)	D-gun, good high-temp. wear resistance
LCN-1	Cu-42Ni-3In	PWA 269 GE F50T19H DDA EPS 10489 RR RPS 487	540	roots of compressor blade	anti-galling
LN-2B	>99 w/o Ni	GE B50TF17			Plasma, repair, build-up
LN-5A	Ni-5Al	PWA 53-37			
LW-IN30	87WC-13Co	PWA 52 RR RPS 487 GE F50T19E		air foil, bearing, seal housing	D-gun, excellent erosion wear resistance
LW-IN40	85WC-15Co	PWA 46 GE F50T19D RR RPS 487		compressor mid-span shrouds, hubs	D-gun, greater resistance to impact and fretting than LW-IN30
LW-5	73WC-20Cr-7Ni	PWA 51 DDA EPS 10492	760		D-gun, increased oxidation and corrosion resistance than LW-IN30
L-103	(C0-28Cr-19.5W-5Ni)+4Cr ₂ O ₃		1100	coated, self mating surfaces	D-gun, corrosion and fretting resistance
SermeTec GG-CC-100	75-80CrC/20-25 NiCr		<900	seal seats, bearing houses and liners, fuel nozzle nuts	fretting resistance hot wear resistance
GG-CN-20	60Cu-40Ni		<500	blade roots	fretting/galling resistance
GG-WC-101	85WC-15Co		<600	seals, ribs, bearing journal, bushings, face seals	
GG-WC-102	85WC-15Co		<600	fan blade mid-span shrouds, pins, knife-edge seal	wear/impact resistance
Other PWA 26	PWA 26	diffusion Al		Ni-base burner components	corrosion/wear resistance

표 3. 터빈엔진의 연소기부에 적용되는 Thermal barrier coatings.

Coatings	Compositions	Thickness(mm)	Process	Characteristics
TBC(GE)	ZrO ₂ -Y ₂ O ₃ with NiCrAlY	250-380	Plasma sprayed in air	porous
GG-M-106 (SermeTec)	ZrO ₂ -MgO	250-380		
Rolls-Royce	MgZrO ₂ , ZrO ₂	250-380		
CPW 385	MCrAlY-ZrO ₂	250-380	Plasma sprayed	Used on Ni-base burner components
PWA261	MCrAlY-ZrO ₂ -Y ₂ O ₃	250-380		
LZ-2 (Union Carbide)	ZrO ₂ -22MgO	250-380	Co-base alloy undercoat	

기술이 적용되고 있다. 연소기부품에 적용되고 있는 열차폐 코팅에 대한 예를 표 3에 나타내었다.

4.3 터빈부

고온의 연소가스가 가지고 있는 열에너지가 이 터빈부에서 기계적 에너지로 변환되는데 보통 2-4단으로 구성되어 있다. 일반적으로 전체 에너지의 2/3가 압축기를 회전시키는데 소모되며 나머지 1/3만이 이 터빈 부에서 전력생산을 위한 기계적 에너지로 변환된다. 따라서 이 부분의 효율이 전체 시스템의 효율과 직결되는 터빈엔진의 핵심부분이다.

그동안 터빈부 버킷의 고온강도를 높이기 위한 많은 연구개발이 진행되어 왔으며, 이 과정에서 필수적으로 합금조성의 변화가 이루어졌다. 그 과정에서 고온강도의 상승과 함께 초래된 내고온부식성의 저하를 극복하게 위해서 코팅기술을 적용하지 않으면 안되게 되었다. 그러나 각각의 운전환경과 부하 그리고 접하고 있는 부식환경은 서로 달라 적용되고 있는 코팅특성은 서로 다르다.

모재의 화학조성, 부품의 크기, 형상에 따라 다르나 Al, Cr 확산 코팅방법이 쓰이고 있으며, Al-

Cr, Pt-Al 등과 같은 다소 복잡한 코팅의 경우 한 원소씩 분리하여 확산시키거나 먼저 Pt와 같은 원소를 표면에 도포한 다음 Al을 확산 침투시키는 등의 방법을 이용한다. 이 방법은 새로운 코팅 방법에 비하여 생산비가 가장 적고, 또한 냉각공 내면에만까지 코팅할 수 있는 등 여러 장점이 있어 현재까지도 적용되고 있는 버킷의 주된 코팅방식이며 제1세대 코팅기술이라 일컬어지고 있다.

코팅재료의 조성이 매우 복잡한 경우는 보통 overlay방법을 사용한다. 모재의 화학조성과 무관하게 코팅을 할 수 있으며, 또한 확산코팅에 비해 두께조절이 자유롭고 다양한 형태의 코팅방법을 필요에 따라 적용할 수 있는 장점이 있다. 전자빔 및 스퍼터링 방법을 이용한 PVD법과 CVD법, VPS, LPPS 및 cladding법 등이 있으며, MCrAlY라 부르는 다성분 재료가 쓰이고 있다.

그외에 TIT항상에 필수적인 열차폐코팅은 MCrAlY bond coat위에 ZrO₂-Y₂O₃ 세라믹 코팅을 대기 plasma 용사법으로 제조하는 것으로서 대부분의 가스터빈 1, 2단 버킷에 적용되고 있다. 최근에는 LPPS, 또는 shrouded plasma로 MCrAlY코팅을 한 것이 일반 대기plasma 용사(그림 9)한 것보다 특성이 우수한 것이 입증되어 고온부품에 대부분 적용되고 있다.

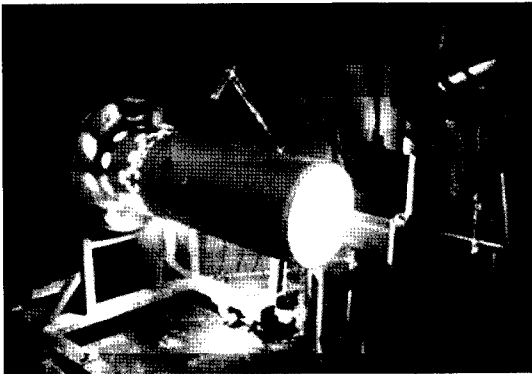


그림 9. 가스터빈 엔진부품의 용사

EB-PVD에 의한 TBC는 70년대 후반에 Pratt & Whitney, Airco-Temescal과 Chromalloy등이 각각 개발하였으며, 80년대 초까지는 생산성이 낮아 적용이 이루어지지 않았으나 중반부터 일방향 응고 초내열합금의 적용과 함께 고속증착기술이 개발되고 수명도 긴 장점이 있어 실용화되기 시작하였다.

1, 2단 노즐용 코발트기 초내열합금은 버킷용 니켈기 초내열합금에 비해 Cr 함량이 높기 때문에 고온내식성이 우수하다. 따라서 노즐에 적용되는 코팅기술은 버킷에 적용되는 것 만큼 엄격하지 않으며, 이에 버킷용 고온내식, TBC코팅과 유사하나 등급이 다소 낮은 코팅기술을 적용하고 있다. 표 4는 상업적으로 이용될 수 있는 버킷의 코팅기술이나 이중 OEM사의 코팅기술은 승인이 사용할 수 없다.

5. 국내·외 관련기술의 현황

5.1 국내 현황

5.1.1 고온내식용 코팅

S항공이 1984년 미국 General Electric사의 Codep기술을 도입하여 항공기용 가스터빈 엔진의 터빈블레이드에 pack cementation을 시작하였으며, H기공도 1985년 미국 General Electric사의 기술을 도입하여 발전용 가스터빈 엔진의 터

빈 버킷 등에 pack cementation을 하고 있다. 이에 앞서 한국기계연구원에서는 1984년 초내열합금인 IN 713C에 고온내식성을 목적으로 확산피복법의 개발연구를 수행하여 그 개발된 기술을 1988년 SJ사에 이전하였으며 현재까지 선박용 엔진의 보수에 이 기술을 적용하고 있다.

이상과 같이 국내의 터빈블레이드에 실용화되어 있는 고온내식용 pack cementation은 터빈블레이드(버킷) 코팅기술의 4단계 발달과정에서 1단계에 속하는 1960년대의 고전적 기술로서 균일 피복과 밀착성이 우수하고 작업이 간단하여 현재까지 보수공정에 널리 사용되고 있는 실정이다. 그러나 최근에 1세대의 6배의 수명을 갖는 새로운 재료와 신 공정기술인 4세대에 비교하면 기술수준이 매우 낮으며 원료분말도 고가의 수입품에 의존하고 있으며 희생양극에 의한 내식 코팅인 SermeTel과 같은 코팅기술은 국내에 전무한 실정이다.

Pack cementation이외에 4세대 내열, 내식코팅인 MCrAlY의 경우 1000°C까지의 고온내식성을 갖기 때문에 국내에서도 많이 사용되고 있으나 대부분 APS(air plasma spray)에 의한 코팅이 주종을 이루고 있으며 VPS(vacuum plasma spray), LPPS(low pressure plasma spray)나 Ar 보호분위기의 용사법 및 HVOF(high velocity oxy fuel)등의 기술기반이 취약하여 대부분 해외 기술에 의존하고 있는 실정이다.

5.1.2 열차폐코팅

열차폐 코팅기술 개발을 위해 finned segment 및 combustion linear에 적용되는 내열합금인 Hastelloy-X모재에 다층 코팅을 실시한 후 결합강도 측정, 등은 및 주기산화실험, 열충격시험등이 현재 전력연구원에서 진행중에 있다. 부하변동과 기동정지시 열응력의 발생을 줄이기 위하여 코팅층과 모재사이의 열팽창계수 차이를 줄이거나 변화를 완만히 하는 경사코팅기술 또는 다층기술은 조성이 코팅층 전체에 걸쳐 연속적

표 4-1. 터빈부품 코팅기술

Supplier	Designation	Nominal Composition	Application Process	Alloy Compatibility	Remarks
Alloy Surfaces	HI-15	Cr-Aluminide	Pack cementation	Ni, Co, Fe base	Pack cementation up to 2000°F
	HI-26/HI-29	Cr(up to 60 wt%)	Pack cementation	Ni, Co, Fe base	Pack temp. 1650-2200°F
	HI-32	Cr-Aluminide	Duplex pack cementation	ODS Ni alloy	
	Hi-275	Aluminide (30wt% max)	Gas phase	Ni base	Pack cementation up to 2000°F Cooling hole protection
Chromalloy	RT-5A-1	Chromium	Pack cementation	Ni base	
	RT-6	Chromium	Pack cementation	Ni base	Higher Cr
	RT-11	Aluminide	Pack cementation		Sheet metal component
	RT-19	Aluminide	Pack cementation	Co base	
	RT-21	Aluminide(26%Al)	Pack cementation	Ni base	
	RT-573	Aluminide	Pack cementation	Ni base	Low temp. aluminide
	RT-5A-1/ RT-573	Cr-Aluminide	Duplex Pack cementation	Ni base	
	RT-1700	Cr-Aluminide	Pack cementation	Ni base	Thoria dispersed Ni
	RT-4339	Aluminide	Pack cementation	Ni base	Low temp. aluminide
	UC	Aluminide	Pack cementation	Co base	
	SUD	Fe-Aluminide	Pack cementation	Ni,Co base	
	RT-40	Aluminide-Silicide	CVD	Ni base	
	RT-41	Silicide	CVD	Ni base	
	RT-42	Silicon carbide	CVD	Ni,Fe base	
	RT-47	Aluminide	CVD	Ni base	
	RT-69	Aluminide	Gas phase	Ni base	
	RT-22	Pt-Aluminide (40Pt23Al)	Plating/Pack cementation	Ni base	
	RT-22B	Pt-Rh Aluminide	Plating/Pack cementation	Ni base	
	RT-23	Pt-Rh Aluminide	Plating/Pack cementation	Ni base	
	RT-44	Pt-Rh Aluminide (42Pt12Rh22Al)	Plating/Pack cementation	Co base	
	RT-95	Aluminide	Slurry		
	RT-30	Co-26Cr-9Al-0.3Y	EB PVD	Ni, Co base	
	RT-31	Co-32Ni-22Cr-8Al-0.5Y	EB PVD	Ni base	
	RT-32	NiCrAlY	EB PVD	Ni base	
	RT-33	ZrO ₂ -8Y ₂ O ₃	EB PVD	Ni, Co base	TBC, base load production with clean fuels
	RT-39	CoNiCrAlYSi	EB PVD	Ni, Co base	
RT-100	NiCrAlY	LPPS	Ni base		
RT-119	Co-31Cr-6Al-0.5Y-1.25Si	LPPS	Ni, Co base		

Supplier	Designation	Nominal Composition	Application Process	Alloy Compatibility	Remarks
Chromalloy	RT-122	Co-32Ni-21Cr-8Al -0.7Y	LPPS	Ni, Co base	
	RT-175	ZrO ₂ -6Y ₂ O ₃	LPPS	Ni, Co base	TBC, base load production with clean fules
	RT-20	Aluminum-Silicide	Pack cementation	Ni, Co base	
	RT-57	Chromium	Gas phase	Ni, Co base	
Electron Beam Vacuum Coatings (Airco Temescal)	ATD-1	Ni-38Cr-11Al -0.25Y	EB PVD	Ni base	
	ATD-2	Co-25Cr-12.5Al -0.35Y	EB PVD/ Plasma	Co, Ni base	
	ATD-2B	Co-21Cr-10Al -0.3Y	EB PVD	Co, Ni base	
	ATD-2C	Co-23Cr-12Al -0.3Y	EB PVD	Co, Ni base	
	ATD-4	Co-22Cr-13.5Al -0.3Y	EB PVD	Co, Ni base	
	ATD-6	Co-18Cr-9Al -0.3Y	EB PVD	Co, Ni base	
	ATD-6B	Co-18.5Cr-7Al -0.3Y	EB PVD	Co, Ni base	
	ATD-6C	Co-18Cr-7.5Al -0.3Y	EB PVD	Co, Ni base	
	ATD-6D	Co-18.5Cr-5Al -0.3Y	EB PVD	Co, Ni base	
	ATD-12	Co-28Cr-12Al -0.3Y	EB PVD	Co, Ni base	
	ATD-14	Co-31Cr-5Al -0.3Y	EB PVD	Co, Ni base	
	ATD-15	Co-25Cr-11	EB PVD	Co, Ni base	
	ATD-30	Co-26Cr-10Al	EB PVD	Co, Ni base	
	ATD-41	Co-17Cr-5Al -0.3Y	EB PVD	Co, Ni base	
	ATD-42	Co-21Cr-10Al -0.3Y	EB PVD	Co, Ni base	
	ATD-63	Ni-33Co-28Cr-8Al -0.3Y	EB PVD	Co, Ni base	
	ATD-70	Co-30Cr-10Al -0.3Y	EB PVD	Co, Ni base	
	ATD-71	Co-35Cr-10Al -0.3Y	EB PVD	Co, Ni base	
	ATD-71	ZrO ₂ -20Y ₂ O ₃	EB PVD	Co, Ni base	Protection under base load with clean fules
RT-39	NiCoCrAlYSi	EB PVD	Co, Ni base		

Supplier	Designation	Nominal Composition	Application Process	Alloy Compatibility	Remarks
Howmet	MDC-1	Aluminide	Slurry/Pack	Ni, Co base	Slurry contains Al ₂ O ₃ cementation particles
	MDC-1A	Aluminide	Pack cementation	Ni, Co base	MDC-1 without Al ₂ O ₃
	MDC-1C	Aluminide	Slurry/CVD	Ni base	Contains Al ₂ O ₃ particles
	MDC-3	Chromium	Pack cementation	Co base	High Cr
	MDC-9	Cr-Aluminide	Duplex Pack cementation	Ni, Co base	Uses MDC-15 for aluminide
	MDC-15	Aluminide	Pack cementation	Ni base	
	MDC-42	Aluminide	Pack cementation		
	MDC-46	Si-Aluminide	CVD	Ni base	
	MDC-46C	Si-Aluminide	Slurry/CVD	Ni base	Contains Al ₂ O ₃
	MDC-143	Aluminide	CVD	Ni base	
	MDC-150	Pt-Aluminide	CVD	Ni base	
	MDC-210	Aluminide	CVD	Ni base	
	MDC-2E	Pt-Aluminide	Plating/Pack cementation	Ni base	Uses MDC-15 for aluminide
	PX-100 Series	MCrAlY	VPS	Ni, Co base	
	VPX-102C	NiCoCrAl+TaMnHfLa	VPS	Ni, Co base	High temp. protection
	PX-200 Series	MCrAlY	VPS	Ni, Co base	Higher Cr than PX-100
	VPX-206	NiCrAl-Ta,Mn,La	VPS	Ni, Co base	Low temp. protection
VPX-252	CoCrAl+Ta,Mn,La	VPS	Ni, Co base	Medium temperature protection	
Plasma Technics	PT-013	Magnesium Zirconate	APS, VPS	Ni, Co base	IBC, base load production with clean fuels
	PT-014	Si-Aluminide	APS		
	PT-015	Ni-Aluminide (95%Ni)	APS		Bond coat for TBC
	PT-032	ZrO ₂ -20Y ₂ O ₃	APS, VPS	Ni, Co base	Base load production with clean fuels
	PT-037	ZrO ₂ -8Y ₂ O ₃	VPS	Ni, Co base	Base load production with clean fuels
	PT-048	ZrO ₂ -13Y ₂ O ₃	APS, VPS	Ni, Co base	Base load production with clean fuels
	PT-103	Ni-Cr-Si-B	APS	Ni, Co base	
	PT-108	HCrAlY	APS, VPS	Ni, Co base	
	PT-112	Ni-17Cr-6Al-0.5Y	APS, VPS	Ni, Co base	
	PT-114	MCrAlY	APS, VPS	Ni, Co base	
	PT-142	ZrO ₂ -8Y ₂ O ₃	APS, VPS	Ni, Co base	Base load production with clean fuels

Supplier	Designation	Nominal Composition	Application Process	Alloy Compatibility	Remarks
Sermatech	Sermaloy J	Si-Aluminide (30Al-11.5Si)	Slurry Diffusion	Ni,Co&Fe base	Diffusion between 1600-2100°F
	GGH-106	ZrO ₂ -20MgO	APS	Ni, Co bae	Gator-Gard process, TBC
Turbine Metal Technology	TMT2413 /2813	Aluminide	Pack cementation	Ni, Co base	Low potential system
	TMT2413A	Cr-Aluminide		Ni base	
	EC 114	Aluminide	Pack cementation	Ni base	Variable Al
	KS 138	Aluminide	Pack cementation	Co base	Coatins Al ₂ O ₃ dispersed phase
	PS 138	Pt-Aluminide	Plating or ESD/ Pack cementation	Ni base	Al ₂ O ₃ dispersed phase
	PR 138	Pr-Rh-Aluminide	Plating or ESD/ Pack cementation	Ni base	Al ₂ O ₃ dispersed phase
	TMT24	Chromium	Pack cementation	Fe, Ni, Co base	High Cr
	TMT1314	Si-Aluminide	Pack cementation	Ni base	
	KS136	Aluminide	Pack cementation		Contains SiC
TMT3940	Zirconia-Ytria	Plasma spray	Co base	TBC with clean fuels	
Union Carbide	LCOS	Co20Cr-10Al-0.5Y	Inert Plasma spray	Co, Ni base	
	LCO 7	Co23Cr-13Al-0.6Y	Inert Plasma spray	Co, Ni base	
	LCO 17	Co25Cr-10Ta-7.6Al-1-0.8Y-0.75Si-2C	Detonation-Gun	Ni, Co & Fe base	30 Vol% Al ₂ O ₃ dispersed phase(10w%)
	LCO 22	Co32Ni-21Cr-8Al-0.5Y	Inert Plasma spray	Ni, Co & Fe base	heat treated at 1975°F base
	LCO 29	Co18Cr-8Al-0.5Y	Inert Plasma spray	Co, Ni base	
	LCO 37	Co23Ni-30Cr-3Al-0.5Y	Inert Plasma spray	Co, Ni base	
	LN 11	Ni-23Co-17Cr-12Al-0.3Y	Inert Plasma spray	Ni base	
	LN 21	Ni-22Co-21Cr-7.5Al-0.5Y	Inert Plasma spray	Ni base	
	LN 34	Ni-20Cr-11Al-0.5Co-0.5Y-0.5Mo		Ni base	
	LTB 8	LCO22 + ZrO ₂ -24MgO	Plasma spray		Protection under base load with clean fuels
	LTB 12	LCO22+ZrO ₂ -MgO /6-8Y ₂ O ₃	Plasma spray	Ni, Co & Fe base	Protection under base load with clean fuels
	LTB 13	LCO22+ZrO ₂ -MgO /6-8Y ₂ O ₃	Plasma spray	Ni, Co & Fe base	Controlled microcrack density, resistant to cycling
	L 103	Co-26Cr-26W-4Ni-3.5C-2.4Fe-1.1V.0.55Si	Detonation gun	Ni, Co & Fe base	10 Vol% Al ₂ O ₃ dispersed phase(4w%)

Supplier	Designation	Nominal Composition	Application Process	Alloy Compatibility	Remarks
Walber	RB-70	Chromium	Pack cementation	Ni, Co base	
	RB-101	Aluminide	Pack cementation	Ni base	
	RB-202	Aluminide	Pack cementation	Co base	
	RB-505	Cr-Aluminide	Pack cementation	Ni base	Co-deposition of Cr-Al
	RB-514	Si-Cr-Aluminide	Pack cementation	Ni base	
	RB-578	Pt-Cr-Aluminide	Plating/Pack cementation	Ni base	
	RB-606	Cr-Aluminide	Duplex Pack cementation	Ni, Co base	
	RB-707	Ni-Cr-Al	Pack cementation	Co base	Resistant to cycling(spallation)
	RB-808	Cr-ALuminide	Duples Pack cementation	Ni base	High Cr
			MCrAlY	APS	Co, Ni base

표 4-2. OEM사의 터빈부품 코팅기술

OEM	Designation	Nominal Composition	Application Process	Alloy Compatibility	Remarks
General Electric	BC-21	Co-23Cr-10Al-0.35 Y			Aircraft Engine Coating
	BC-22	Hf-Aluminide	Pack Cementation	Ni base	Includes CoCrAl bond coat Aircraft Engine Coating
	BC-23	Pt-Hf-Aluminide	Plating Pack Cementation	Ni base	Includes CoCrAl bond coat Aircraft Engine Coating
	PBC-22	CoCrAlHf	VPS	Ni base	Replacement for BC-22 Aircraft Engine Coating
	PBC-23	CoCrAlHfPt	VPS	Ni Base	Replacement for BC-23 Aircraft Engine Coating
	BC-29	Co-31Cr-5Al-0.3Y			Aircraft Engine Coating
	P16TE6	Aluminide	Pack Cementation	Co, Ni base	Aircraft Engine Coating
	P16CA62	Pt-Aluicide	Plating Pack Cemenation	Ni base	Aircraft Engine Coating
	GT-29 Plus	Co-29Cr-6Al-0.3Y+ Aluminide Top Layer	VPS+Pack Cementation	Co, Ni base	Over Aluminised Coation
	GT-29	Co-29Cr-6Al-0.3Y	VPS	Co, Ni base Discontinued	Discontinued
	GT-43	Co-43Cr-0.3Y	VPS	Co, Ni base	
	GT-20	Co-32Ni-21Cr-8Al-0.5Y	VPS	Co, Ni base	For Shrouds
	CoDep A	Aluminide	Pack Cementation	Ni base	Aircraft Engine Coating
	CoDep B	Aluminide	Pack Cementation	Co, Ni base	Aircraft Engine Coation
	CoDep B1	Aluminide	Pack Cementation	Ni base	Slurry contains Al ₂ O ₃ particles Aircraft engine Coating

OEM	Designation	Nominal Composition	Application Process	Alloy Compatibility	Remarks
General Electric	GT-29 Plus	Co-29Cr-6Al-0.3Y+Aluminide Top Layer	VPS+Pack Cementation	Co, Ni base	Over Aluminised Coation
	GT-29	Co-29Cr-6Al-0.3Y	VPS	Co, Ni base Discontinued	Discontinued
	GT-43	Co-43Cr-0.3Y	VPS	Co, Ni base	
	GT-20	Co-32Ni-21Cr-8Al-0.5Y	VPS	Co, Ni base	For Shrouds
	CoDep A	Aluminide	Pack Cementation	Ni base	Aircraft Engine Coating
	CoDep B	Aluminide	Pack Cementation	Co, Ni base	Aircraft Engine Coation
	CoDep B1	Aluminide	Pack Cementation	Ni base	Slurry contains Al ₂ O ₃ particles Aircraft engine Coating
Pratt & Whitney	PWA-73	Si-aluminide	Pack Cementation	Ni base	
	PWA-252	Cr-aluminide	Duplex Pack Cementation	Co base	
	PWA-264	ZrO ₂ -Y ₂ O ₃	LPPS	Co, Ni base	TBC,base load protection with clean fuels
	PWA-268	Co-18Cr-11Al-0.3Y	PVD	Ni, Co base	Lower Cr
	PWA-270	Ni-23Co-18Cr-12.5Al-0.3Y	PVD	Ni, Co base	
	PWA-273	Aluminide	Pack Cementation	Ni base	PWA73+2nd aluminizing cycle
	PHA-275	Aluminide	CVD	Ni base	
	PWA-276	NiCoCrAlY	LPPS	Co, Ni base	
	PHA-286	NiCoCr AlYsHf	LPPS	Ni base	
	PWA-545	Aluminide	Slurry Pack Cementation		
	PWA-36095	Pt-Aluminide	Plating Pack Cementation	Ni base	
	IM 6250	Co-22Cr-12Al-0.5Y	PVB		
	IM 6255	Rh-Aluminide	Plating Pack Cementation	Co base	
	IM 6257	Pt-Aluminide	Plating Pack Cementation	Ni base	
	IM 6258	Pt-Rh-Aluminide	Plating Pack Cementation	Ni base	
	IM 6268-1	NiCrSi			
	IM 6268-2	NiCrAlYSi			
	32Ni-29Co-21Cr-8Al-0.5Y	VPS	Co, Ni base		

으로 변화하므로 열팽창계수 변화가 급격하게 일어나지 않아 기동정지시 온도구배가 가해지더라도 계면이 파손되는 것을 방지 할 수 있는데 현재 서울대, RIST, 포항공대 등에서 연구를 하고 있으며 KIST에서 분말공급방법을 개조하여 경사코팅을 하는 방법을 개발한 바 있다.

가스터빈 버킷/블레이드의 열차폐 코팅층의 파손이 일어나는 원인은 기본적으로 모재, bond coat층, 세라믹 코팅층의 열팽창계수가 서로 다르기 때문이며 이외에도 열차폐층이 사용도중 계속 소결이 되어 기공도가 감소하고 밀도가 증가하여 열충격에 약해지는 것과 bond coat층과 모재부가 creep변형되어 박리가 일어나는 경우가 있다. 또한 bond coating에 산화층이 형성되어 이로 인한 부피변화가 추가응력을 발생시키는 경우를 들 수 있다. 이러한 열차폐층의 다양한 파손원인에 대해 급작스런 파손을 방지하기 위한 인성향상 방법으로는 ZrO_2 에 Y_2O_3 대신에 MgO 등을 소량 첨가하는 방법과 Y_2O_3 양을 조정하는 방법이 연구되고 있으며 최근에는 최외각 코팅층을 lamella에서 columnar로 변화시키는 등의 방법이 연구되고 있다. 또한 전력연구원에서는 burner rig tester를 제작하여 운용함으로써 코팅층의 최적 특성을 도출하고 향후 도입될 가스터빈 설비의 각종 코팅층 평가기술을 확보할 계획으로 다양한 프로그램이 진행중에 있다.

국내의 내열·내식 및 열차폐코팅 현황을 요약하면 내열·내식코팅의 경우 1세대기술인 pack cementation법과 3세대 기술인 MCrAlY코팅의 일부가 APS법에 의해서 적용되고 있으며 1, 2단 터빈블레이드와 같은 고온부의 부품 등에 적용되고 있는 MCrAlY코팅의 LPPS기술은 전무한 실정다. 열차폐 코팅의 경우 MCrAlY의 bond 코팅과 $ZrO_2-8Y_2O_3$ 의 top코팅은 가스터빈 부품들 뿐만 아니라 화력발전소의 연소기 내벽 등에게까지 활발하게 적용되고 있으며 그 기술수준도 상당히 안정되어 있다. 이외에 EB-PVD법으로 단열층인 zirconia층을 columna로 만들어

각 columna사이가 서로 떨어지게 하여 단열층을 형성하도록 함으로써 열전도도를 현저히 줄이는 최신기술에 대해서는 현재 전력연구원과 한국과학기술 연구원에서 기초연구가 진행중이며 본격적인 실용화와는 다소 거리가 있다.

5.2 국외 현황

5.2.1 고온내식코팅

1960년대 초 터빈버킷(블레이드)에 Al pack cementation이 실용화 된 후, 점차 그 개량형이 개발되어 코팅층의 인성을 향상시키는 Al-Mn, 내식성 향상을 위한 Cr-Al이층확산 피복과 Al-Si 코팅 등이 개발되었다. 이 공정은 이후 개발된 신 코팅공정에 비하여 생산비가 가장 적고 또한 냉각공 내면에까지 코팅할 수 있는 유일한 방법으로 현재까지도 주된 터빈버킷(블레이드) 코팅방식이며 제1세대 코팅기술이라 일컬어지고 있다.

귀금속(Pt)도금과 제1세대의 Al확산피복코팅과의 조합으로 1세대의 코팅수명의 3배 연장한 제2세대 코팅기술은 표면의 단단하고 취약한 $PtAl_2O_3$ 상에 기인된 피로수명의 저하 때문에 항공기 등에는 적용이 제한되지만, 고온 및 저온 hot corrosion에는 모두 좋은 내식성을 갖기 때문에 선박용과 발전용에 널리 사용되었다.

1970년대 초부터 본격적으로 여러 종류의 코팅재 및 코팅공정의 개발이 이루어졌으며 제 3세대 코팅이라 일컬어지는 MCrAlY 합금 코팅에 의해 1세대의 코팅에 비해 4-5배의 수명향상이 이루어 졌다. 대표적인 MCrAlY wt.조성은 Cr(18%), Co(23%), Al(12%), Y(0.5%), Ni(Bal.)로 산업적으로 NiCoCrAlY로 부르며 코팅 법으로는 LPPS, EB-PVD외에 sputtering의 세방식이 사용되고 있다.

한편 제4세대의 코팅은 MCrAlY에 귀금속 또는 Ta, Si등을 합금 첨가하거나 2층코팅으로 내식성을 개선시키며 코팅법은 제3세대와 같음. 제4세대의 코팅은 수만 시간의 수명이 요구되는

발전용에 주로 적용되고 있으며 미국에서는 NASA의 주도로 개발되어 적용되고 있으며, 구미에서는 ABC의 전신인 BBC와 Schulzer가 주도하고 있다.

5.2.2 열차폐코팅

열차폐코팅기술은 미국의 NASA전신인 NACA와 NBS주관으로 항공우주용 코팅으로 frit enamel을 활용하면서 시작되었고 그후 화염용사법에 의한 세라믹 코팅이 개발되면서 여러 가지의 세라믹재료에 대한 응용이 이루어 졌다. 이후 plasma 용사법이 개발되면서 1970년에 이 방법에 의한 상업용 가스터빈 엔진의 고온부의 부품에 실용화되기 시작하여 오늘에 이르렀다. 현재의 열차폐코팅은 1970년 중반에 NASA-Lewis에서 개발된 MCrAlY bond coat상에 $ZrO_2-Y_2O_3$ 세라믹 코팅을 대기 plasma 용사법으로 제조하는 것으로서, J-75 가스터빈 엔진의 터빈블레이드에 적용하여 그 우수성이 입증되었다. 이러한 새로운 열차폐코팅은 그후 NASA에서 Y_2O_3 를 6-8%로 낮추어 더욱 우수한 성능이 얻을 수 있었으며 80년대 초에는 LPPS나 90년대 초의 shrouded plasma로 MCrAlY코팅을 한 것이 일반 대기plasma 용사한 것보다 우수한 것이 입증되어 고온부품에 대부분 적용되고 있다.

EB-PVD에 의한 TBCs는 70년대 후반에 Pratt & Whitney, Airco-Temescal과 Chromalloy등이 각각 개발하였으며 1980초까지는 생산성의 저조하여 적용이 보류되었으나 80년대 중반부터 고속 증착기술의 개발 및 긴 수명이라는 장점 때문에 실용화 되기 시작 하고 있으며 국내에도 일부 군용기에 적용되고 있다.

5.2.3 해외 가스터빈 개발 현황

일본 미쓰비시 중공업은 98년 TIT 1,500°C급인 G형을 개발 실증시험에 착수하였다. 이의 개발 속도는 미국 GE 보다도 빠른 것으로 판단되는데 미쓰비시 중공업은 96년도 세계 전체에서

의 증기터빈 수주점유율에서 31%를 차지, 압도적인 1위였으나, 가스터빈의 수주에서는 10%에 그쳐 4위에 머물렀다. GE의 강력한 가스터빈이 1위를 유지하고 있으나 이제 기술력에서는 GE의 아성에 육박, 차이가 없어졌다고 자체 판단하고 있다. 또한 80만kW 규모의 설비를 '96년에 착공하여 '99년 7월 완성을 목표로 건설 중에 있고, 영업 운전에서는 1,450°C 급으로는 처음으로 발전 효율 52% 이상을 목표로 하고 있다. 운전이 능숙해지면, 수년 후에는 1,500°C로 높여, 세계 최고 효율의 G형을 완성시킬 계획이다.

GE의 발전용 가스터빈은 이제까지 누계 5,700대, 누적 용량은 1억 4,200만kW에 이르고 있으며 경험과 기술의 집적으로 이제 'GE의 제품이라면' 하는 인식이 전세계 전력회사에 깔려있는 실정이다. 1,500°C 타입은 독일의 지멘스도 2000년을 목표로 개발하고 있으며 1,300°C의 2단 연소 방식에서 실적을 내놓기 시작한 ABB는 온도 경쟁에 참가하지 않고, 효율 경쟁에서 리드해 나가겠다고 방침을 정하였다. ABB는 입구온도를 올리는 것보다도, 48년에 이미 개발한 실적이 있는 2단 연소방식의 기술을 베이스로, 1,300°C급의 최신예의 GT24, 26를 완성시켰는데 복합화력에서는 열효율 58~59%(저위발전량)로 세계 최고 레벨을 실현하고 있다.

6. 맺음말

지금까지 가스터빈 엔진의 종류 및 특징 그리고 구성에 대해 간략히 알아보았으며 가스터빈 엔진의 주요 구성품인 공기압축기, 연소실 및 터빈부품의 고온부식, 산화, 마모를 방지하고 열차폐를 위한 각종 코팅기술 사례 및 국내외 연구 개발 현황을 살펴보았다.

코팅기술은 가스터빈의 유지보수에 절대로 필요한 기술로 앞으로 가스터빈 설비의 국내 보수 물량은 잠재수요를 포함하여 매년 약 1000억 이상으로 추산된다. 국내에서 외국기술을 일부 도

입하여 제한된 가스터빈 핵심부품의 코팅과 보수를 수행하고 있지만 아직 선진국에 비하면 기술수준이 매우 낮아 가스터빈 부품의 유지보수에 해외 의존도가 높다.

앞으로 독자 가스터빈 엔진개발에는 지적재산권 문제등으로 기확보한 외국기술을 사용하는데 문제가 예상되므로 독자적인 코팅공정 기술개발은 반드시 필요하며 국내의 가스터빈 운전방식에 알맞는 코팅기술의 개발로 부품수명의 향상을 꾀할 필요가 있다.

참 고 문 헌

- [1] Chester T. Sims, Norman S. Stoloff, William C. Hagel, Superalloys II, John Wiley & Sons ed.
- [2] 홍용식 저, 가스터어빈 엔진, 청문각, 1997.
- [3] 부준홍 외, 분사추진기관, 청문각, 1997.
- [4] 竹田 博光, ガスタービンへの應用, 工業材料, Vol. 41, No. 11, 69, 1993.
- [5] W.P. Parks, E.E.Hoffman, W.Y Lee and I.G. Wright, Thermal barrier coatings issues in advanced land-based gas turbines, J. of Thermal Spray Technol., Vol. 2(2), 187, 1997.
- [6] EPRI report AP-4475s, Combustion turbine materials problem, 1986.
- [7] Gas turbine blade and vane coatings technology, [Http://www.instepsw.com/abcdemo/gtbvct.htm](http://www.instepsw.com/abcdemo/gtbvct.htm).
- [8] 김창주 외, 초내열합금의 Pack cementation에 관한 연구, 과학기술처 연구보고서 UCN 185-503.C