

가스터빈 고온부품 정비기술

김승태
한전기공(주)

1. 서론

가스터빈 발전소는 부지확보, 건설공기 및 환경 오염 측면에서 장점을 갖는 발전소이다. 우리나라의 복합화력 발전소는 총 74기, 발전용량은 7,819 MW(S/T포함)로서 전체 발전용량의 24.5%를 차지하고 있으며 표 1에는 현재 국내에서 운전되고 있는 대표적인 가스터빈의 주요 규격을 나타내었다. 각 기종 공히 점차 대용량·고효율화를 위한 개발이 진행되고 있고, 고성능화를 위한 터빈입구 온도의 증가가 필수적이며, 따라서 이를 극복할 수 있는 고온재료와 냉각기술의 개발에 노력하고 있다. 발전설비가 장시간 고온, 고압 및 부식환경에서 운전됨에 따라 터빈 주요부품에는 여러 가지 형태의 손상이 발생된다. 특히 터빈 동익 블레이드 (이하 동익)의 손상은 불시정지를 야기시킬 수 있어서 사고예방 차원에서 관심이 집중되고 있다. 발전용 가스터빈의 경우 고온의 연소가스를 작동유체로 사용하고, 저급연료의 사용, 해수분위기 운전 등으로 고온부식 및 산화손상이 심각한 문제로 대두되고 있으며 이러한 손상을 방지하기 위하여 다양한 코팅기술이 개발되고 있다. 국내의 블레이드 사고사례 통계에 의하면 정익 블레이드

(이하 정익)의 열피로균열, 동익의 균열 및 크리프 손상이 가장 빈번히 발생하였고, 그 주요 원인은 잦은 기동/정지 및 고온에서의 장시간 사용으로 알려져 있다. 그러므로 가스터빈 고온부품의 가동중 건전성 확보를 위해서 주기적인 진단, 검사 및 정비 또는 교체가 필요하며 이를 위하여 정비 및 교체 주기를 예측하기 위한 수명평가 기법 개발이 요구되고 있다.

2. 가스터빈 고온부 적용 재료 및 냉각기술

가스터빈의 성능은 터빈입구온도 상승에 따라 현저하게 향상되어 왔다. 단순사이클(simple cycle)의 경우 터빈입구온도 55°C상승은 출력 10~12%, 효율 2~4% 정도 향상시키는 것으로 알려져 있다. 초기 무냉각 터빈단계에서는 내열재료의 고온강도 개선에 의해 연평균 10°C정도, 그 후에는 냉각기술 발전에 따라 연평균 20°C정도로 상승되어 왔다. 그림 1에는 동익재료 및 냉각기술에 발달에 따른 터빈입구온도의 상승추이를 나타내었다. 동익의 냉각방식은 냉각매체를 통로 내에 흐르게 하는 대류냉각, 층들을 이용한 냉각, 동익 표면을 냉각공기막으로 덮는 필름냉각으로 분류되며 후자로 갈수록 냉각효율이 높다.

표 1. 국내 가스터빈 발전 현황

제작사	모델	발전소	출력 (MW/1 Unit)	효율(%)	터빈입구 온도(°C)
GM	MS7B	군산, 영월	50	28	985
	MS7EA	평택	88	29.38	1,104
	MS7F	서인천 1,2	155	33.15	1,260
	MS7FA	서인천 3,4	150	33.29	1,288
ABB	GT11N	안양, 분당	79	29.01	1027
WH	W501D5	부천, 일산	105	29.75	1118

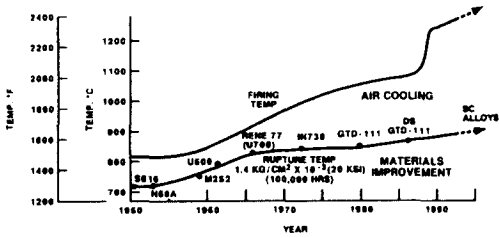


그림 1. 터빈 동익 재료 및 냉각기술 개발에 따른 연소온도의 상승¹⁾

1단 정익은 열피로 저항성이 우수하고 고온 내식성 및 용접보수성이 우수한 Co기 초내열합금을 주로 사용하고 있다. 정익 2,3단과 같이 높은 크리프파단강도가 요구되는 경우에는 Ni기 초내열합금을 사용하는 예도 있다. Ni기 초내열합금은 일반적으로 용접보수성에 어려움이 있기 때문에 최근에 GE(General Electric, 이하GE)사는 용접성을 개선한 정익용 Ni기 초내열합금(GTD-222)을 개발 적용하였다. 동익은 가스터빈에서 가장중요한 부위로 우수한 크리프파단강도를 가진 석출경화형 Ni기 초내열합금이 주로 사용되고 있다. Ni기 초내열합금은 금속간화합물 γ' 상 석출강화에 의해 높은 크리프파단강도를 가지고 있다. 표 2에는 발전용 가스터빈 고온부품에 사용되는 재료를 나타내었다.

터빈입구 가스온도의 상승에 따라 더욱 복잡한 냉각구조로 제작이 가능한 주조합금이 사용되게 되었다. 정밀주조에는 로스트왁스법이 적용되고, 냉각통로는 세라믹코아를 사용해서 형성한다. 이

와 같이 정밀주조로 제작된 동익은 등축결정립으로 형성되어 있으나, 결정을 일방향으로 성장시켜 작용응력의 직각방향 결정립계를 없도록 하여 고온강도를 향상시킨 일방향응고 합금, 혹은 한개의 결정립만을 성장시켜 결정립계를 완전히 없앤 단결정 합금이 개발되어 주목받게 되었다. 일방향응고 합금의 경우 등축결정립 합금에 비해서 터빈입구온도를 20~30°C상승시키는 효과를 보았으며 발전용 가스터빈 동익에 이미 사용되고 있고 이를 그림 2에 나타내었다. 또한 동익재료로 사용되는 γ' 석출강화형 합금은 고온강도 향상을 위하여 Cr량을 감소시키고 γ' 형성원소인 Al, Ti등을 증가시킨 형태로 합금설계가 되어 있기 때문에 내식성이 떨어지는 단점이 있고, 이러한 단점을 보완하기 위하여 고온가스가 접촉하는 표면에 코팅이 절실히 필요하게 되었다.

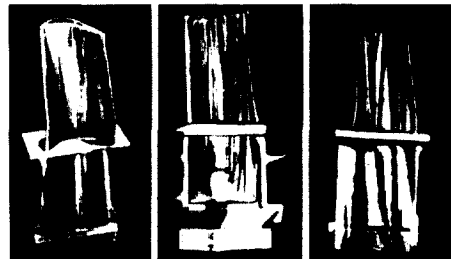


그림 2. 일방향응고합금 : GE사 동익¹⁾

3. 가스터빈 고온부품 손상

가스터빈은 금속의 용점을 상회하는 고온의 연소가스를 작동유체로 사용하기 때문에 연소가스와 직접 접촉하는 연소기, 정익 및 동익 등의 고온부

표 2. 발전소 가스터빈의 주요부품 재료

구 분		GE MS 7001 E	GE MS 7001 FA
터빈정익	제1단	ESX-414	FSX-414
	제2단	ESX-414	GTD-222
	제3단	ESX-414	GTD-222
터빈동익	제1단	GTD-111	GTD-111
	제2단	IN-738	GTD-111
	제3단	U-500	GTD-111
연소기	liner	Hastelloy-X, HS-188	Hastelloy-X, HS-188
	transition piece	N-263	N-263

품은 손상 및 재료열화에 대하여 특히 주의를 기울일 필요가 있고, 수명관리도 매우 중요하다. 가스터빈 고온부품의 손상 및 재료열화에 영향을 주는 요소로는 사용연료, 운전방식, 대기환경, 연소진동 등이 있다. 가스터빈은 발전특성상 빈번한 기동/정지, 저급연료의 사용, 해수분위기에서의 운전 등에 의하여 여러 가지 형태의 손상이 발생된다. 그림 3에는 일본 가스터빈 발전소에서 1970~1979년 동안 발생한 손상부위 통계를 나타낸 것으로 동익과 정익에서 가장 많은 손상이 발견되었다.

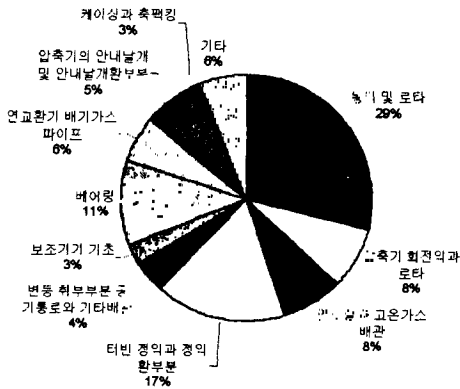


그림 3. 가스터빈 손상 부위별 빈도

3.1 가스터빈 고온부품 손상원인 및 형태

가스터빈 고온부품의 손상은 그 운전환경에 따라 고온 연소가스에 의한 산화 및 부식, 고응력하의 크리프, 빈번한 기동/정지에 의한 열피로, 연소진동에 의한 마모 등 여러 가지 원인으로 발생된다.

가스터빈 고온부품의 손상형태는 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 하나는 균열, 침식, 마모 등 부품의 표면에 발생하며 육안검사를 포함한 비파괴검사로 파악이 가능한 외형적 손상이 있고, 또 하나는 재료내부에 발생하는 손상이다. 장시간가동시 고온 고응력하에 노출되는 재료는 경년열화를 경험하며 이러한 경년열화는 재료내부의 석출물의 형상변화, 재료의 인성을 저하시키는 상의 생성, 크리프기공의 생성 등을 야기시키는 특징이 있다. 이러한 종류의 손상은 재료의 파괴검사를 통해서 평가되어야 한다. 표 3에는 고온부품별 주요 손상원인을 나타내었다.

3.2 가스터빈 정익 손상원인 및 형태

3.2.1 부식손상

가스터빈 정익은 가동중 부식손상을 경험한다. 부식의 특징은 그림 4에 나타낸 바와 같이 표면에 Nos(Nitride, Oxide & Sulfide)가 형성되며 그 아래에 조대한 탄화물이 형성된다는 것이다.³⁾ 조대한 탄화물은 표면에서 NOS가 형성됨에 따라 기지로부터 방출된 탄소가 원인이 된다. 표면 부위에 형성된 NOS와 조대 탄화물은 베인의 연성을 저하시켜 열피로균열 발생의 원인이 되기도 한다. 그리고 이들은 용접정비시에 균열발생의 원인으로 작용하기 때문에 정비 시에 표면 NOS는 연삭하여 제거하고, 조대한 탄화물은 용체화처리를 통해서 모양과 크기를 사용전 상태로 복원하여야 한다.

표 3. 발전용 가스터빈 고온부품의 손상 형태²⁾

고온부품	재료열화	균열	마모	산화	부식	침식	크리프
연소기 liner	△	○	○	△	×	×	△
Transition piece	○	△	○	△	×	×	○
연료노즐	×	△	○	×	×	△	×
화염전파관	×	×	○	×	×	×	×
터빈 제1단 정익	○	○	×	○	×	×	○
터빈 제2,3단 정익	△	○	×	×	×	×	○
연료노즐	○	○	×	○	×	×	○

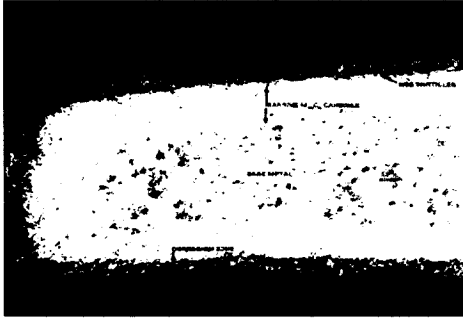


그림 4. FSX-414 정익의 운전중 표면 NOS와 조대한 탄화물 형성

3.2.2 열피로균열 손상

정익은 가스터빈 고온부품중 열피로균열 손상이 가장 심각하게 발생하는 부품이다. 빈번한 기동/정지에 따라 재료는 열사이클을 경험하며, 팽창/수축에 의해 반복변형이 일어난다. 특히, 급격한 열변화시에는 미량원소의 편석 및 국부적인 용융이 열피로균열 발생원인을 제공할 수 있다. 정익에는 그림 5에 나타낸 바와 같이 열피로에 의한 미세균열이 넓은 범위에 다수 발생하는 특징이 있다.

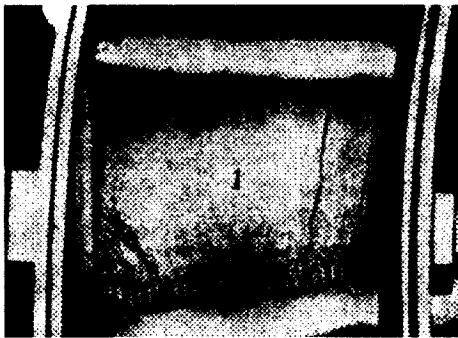


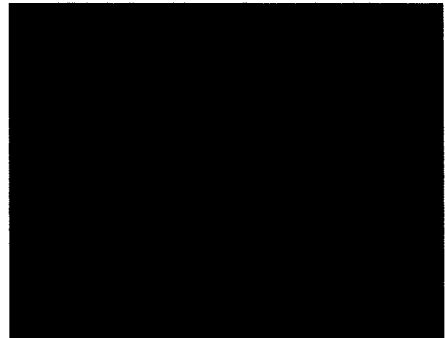
그림 5. FSX-414 정익 표면 열피로균열

3.2.3 재료열화 : 미세구조 변화

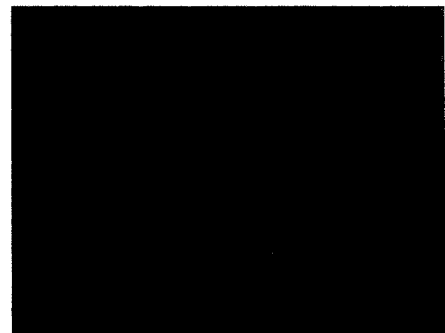
사용하지 않은 정익(FSX-414)재료의 미세구조는 그림 6(a)에 나타낸 바와 같이 기지(γ 상), 공정라멜라 탄화물(eutectic lamellar carbide) 및 입내 탄화물로 구성된다. 공정라멜라 탄화물은 γ 와 M23C6(M은 금속)의 층상구조이고 응고시 가장 마지막으로 형성되는 상으로서 1차석출물이라 하

고, 입내 탄화물은 응고후 냉각되는 과정에서 생성되며 2차석출물이라 한다.

정익을 고온에서 장시간 사용하면 그림 6(b)에 나타낸 바와 같이 입내에 미세한 탄화물이 생성되고, 또한 판상형태의 취화상이 형성된다. 입내 미세 탄화물은 1차석출물이 분해되거나 기지내 과포화고용되어 있던 탄소가 석출되어 생성되며 신재의 2차석출물 보다는 그 크기가 매우 작다. 이러한 미세구조는 정익재료의 강도, 연성 및 열피로 저항성을 저하시킨다. 따라서 주기적인 정비 수행시 열처리를 통해서 미세구조를 신재 상태로 복원하여야 한다. 하지만 그림 7에 나타낸 바와 같이 입계 연속공정탄화물(continuous eutectic carbide)과 기공이 형성된 미세조직은 열처리로 회복 불가능하여 이러한 미세구조를 갖는 정익은 교체되어야 한다.³⁾ 이러한 미세구조는 상당히 높은 온도로 과열되었을 경우 형성될 수 있다. 표 4에는 신재, 사용재 및 회복 불가능 정익 재료의 미세구조적



(a)신재



(b)사용재

그림 6. FSX-414 정익재료 미세구조

특징과 경도범위를 나타내었다.

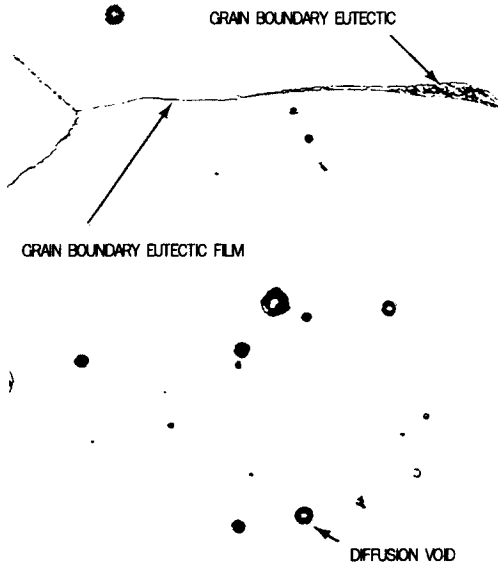


그림 7. FSX-414 정익재료 회복 불가능 미세구조

표 4. FSX-414 정익 재료상태에 따른 미세구조적 특징 및 경도범위

재료 상태	미세구조 특징	경도 범위
신재	○공정라멜라 탄화물 ○2차 석출물	25<Rc<30
사용재	○미세 탄화물 생성 ○취화상 생성	Rc>40
회복 불가능재	○신재 탄화물조직이 없음 ○입계 공정탄화물 생성 ○기공 생성	Rc<20

3.3 가스터빈 동익 손상원인 및 형태

동익은 가동 중에 고온산화, 고온부식, 열피로, 크리프 및 침식에 의해서 주로 손상된다. 항공기 가스터빈의 경우 연료의 순도가 높고 가동중 사용되는 공기가 깨끗하여 주된 손상원인은 산화, 열피로 및 크리프이지만, 발전용 가스터빈의 경우에는 고온부식, 산화, 열피로, 크리프 및 침식이 복합적인 손상을 준다. GE사 가스터빈 7F/7FA 모델 1단 동익의 손상형태는 그림 8에 나타낸 바와

같이 tip 및 trailing edge에 발생하는 균열, leading 및 trailing edge tip의 고온산화이고, 2,3 단 동익의 경우에는 손상이 대부분 shroud 부분에서 발생되며 고온산화/부식에 의한 손상은 거의 없는 것으로 알려져 있다.

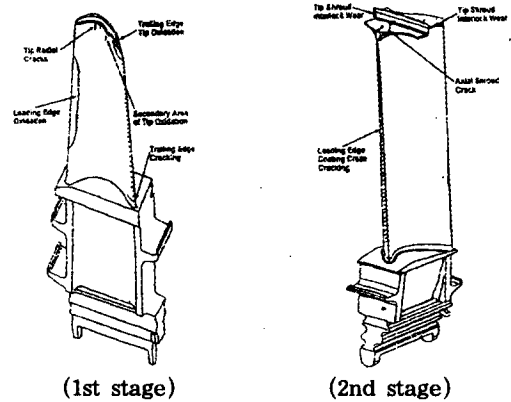


그림 8. GE MS7F/FA 터빈 동익의 손상부위 및 형태

3.3.1 고온부식(hot corrosion)

고온부식이란 나트륨(Na), 칼륨(K) 및 바나듐(V)과 같은 알칼리금속이 연료 속의 황(S)과 반응하여 Na_2SO_4 로 대표되는 알칼리 유산염이나 Na-V-O 화합물을 형성하면서 빠른 속도로 모재가 손상되는 것을 말한다. 고온부식은 발생온도에 따라 두 가지 형태로 구분된다. 하나는 고온유화부식(Type I)이고 또 하나는 저온유화부식(Type II)이다. 두가지 종류의 고온부식은 서로 다른 형태의 손상을 일으킨다. Type I의 특징은 입계부식, 황화물입자 및 모재에 합금원소 고갈영역이 관찰된다는 것이고, Type II의 경우에는 입계부식과 고갈영역이 없는 반면 층상형태의 부식생성물이 형성된다는 특징이 있다. 발전용 가스터빈에서는 1단 동익의 Type I 손상이 심각하다. 고온부식에 대한 방지대책으로는 오염도 감소, 내식재료 사용, 코팅 적용 등이 있다.

3.3.2 고온산화

동익의 고온산화 손상은 내부산화의¹⁾ 특징을 보이며 그림 9에 나타낸 바와 같이 기지내에 불연속 산화물을 형성한다. 초내열합금의 알루미늄은 고

온에서 표면에 치밀하고 안정한 산화막을 형성하여 산소확산의 장애물로 작용한다. 최근에 사용되는 초내열합금은 고온부식 및 고온산화 저항성 뿐만 아니라 강도와 상안정성과 같은 성질도 충분히 고려되어야 하기 때문에 합금성분의 함량조절이 필요하게 되었고 충분한 양의 알루미늄을 함유하지 못하게 되어 가동중 안정한 보호피막을 형성하기는 어렵다.



그림 9. 터빈 동익 재료의 내부산화 손상(dark particles)

고온부식 및 고온산화 손상은 가스터빈의 연소온도, 효율 및 운전시간의 저하를 초래할 뿐만 아니라 정비비용에도 추가적인 부담이 되었다. 그럼에도 불구하고 발전용 가스터빈의 이용을 향상을 위하여, 때로는 불순물이 상당량 포함된 저급연료를 사용하는 실정에서 동익 손상을 방지하기 위해서 코팅의 적용은 필연적이라 하겠다. 동익에 적용되는 코팅으로는 확산코팅 및 overlay coating이 있다.

4. 국내 발전용 가스터빈 동익 코팅

가스터빈 1단 동익에는 가스터빈 제작사 및 모델에 관계없이 거의 모두 코팅이 적용되어 있고 후단 동익에는 선택적으로 코팅을 적용한다. 과거 20년 동안 코팅분야에는 큰 발전이 이루어졌고 장시간 동안 사용해도 고온부식과 고온산화에 대한 저항성이 우수한 코팅이 개발되었다. 표 5에는 상업운전 중인 국내 발전용 GE사 가스터빈 동익에 적용된 코팅의 종류이다. 개선된 기종일수록 overlay 형태의 코팅을 채택하였고 GE 7F 모델의 경우에는 overlay와 확산코팅을 병행 채택하였다. 이러한 확산코팅은 내부 냉각통로에도 적용되었다.

표 5. 국내 발전용 GE사 가스터빈 동익 적용 코팅⁵⁻⁷⁾

가스터빈 모델	단	동익재료	적용 코팅명	코팅재료
MS7B	1st	IN-738	Pt-Aluminide	○Pt, Al
	2nd	IN-738	N/A	-
	3rd	IN-738	N/A	-
MS7EA	1st	GTD-111	GT29 INPLUS	○Bond Coat : CoCrAlY ○Top Coat : Al
	2nd	IN-738	N/A	-
	3rd	U-500	N/A	-
MS7F	1st	DS*GTD-111	GT29 INPLUS	○Bond Coat : CoCrAlY ○Top Coat : Al
	2nd	GTD-111	GT29 INPLUS	○Bond Coat : CoCrAlY ○Top Coat : Al
	3rd	GTD-111	Diffused Cr	○Cr

*DS:directionally solidified

GE사는 1980년대 중반에 PtAl확산코팅, GT-29 코팅 및 GT-29 PLUS 코팅이 각각 적용된 1단 동익들을 동시에 한 터빈에 장착하여 12,590시간 동안 운전한 다음 육안검사와 미세구조 검사를 수행하였다.⁴⁾ 그 결과 overlay 코팅 위에 확산코팅을 적용한 GT-29 PLUS가 가장 우수한 성능을 보였다. 이 코팅은 내식성과 열피로저항성을 동시에 향상시킨 특징이 있다. GT-29 INPLUS 코팅은 동익내부 냉각통로의 산화손상을 억제하기위해서 내부통로에 추가적으로 확산코팅이 적용된 것이다.

최근에는 열피로균열 생성 및 성장 저항성이 매우 우수한 GT-33 코팅 (NiCoCrAlY overlay)이 개발되어 기동/ 정지 및 부하변화가 심한 발전소에 GT-29 PLUS 코팅을 교체하여 적용되고 있으며 GT-29 PLUS코팅은 가동조건이 부식환경인 가스 터빈에 적용된다. 최근 기종인 MSTF/FA의 1단 동익에는 고온산화 손상을 고려하여 GT-33 PLUS 코팅이 적용될 예정이다. 이와 같이 코팅을 적용할 때는 가동환경을 충분히 고려해서 선택하여야 한다. 표 6에는 위에서 언급한 코팅의 성능을 비교하였다.

5. 가스터빈 정비기술

가스터빈 동익을 포함한 고온부품은 가동중 고온, 고응력 등의 극심한 조건을 경험하게 되고 여러 가지 형태의 손상이 발생한다. 손상이 지속될 경우 발전효율 저하 및 불시정지사고로 이어져서 막대한 경제적 손실을 입게 된다. 그러므로 손상

된 고온부품에 대하여 주기적 정비를 수행하여 손상 부품의 외형 및 재질을 복원하여야 하며 신제품으로 교체하는 것보다 현저하게 낮은 가격으로 안전하게 정비할 수 있는 장점이 있다. 그러나 가스 터빈 고온부품의 재생복원은 무한정으로 가능하지 않다. 그림 10에서 볼 수 있는 바와 같이 열처리 등으로 재질을 복원할지라도 재질이 완전히 복원되지 않고 가동시간 및 정비횟수에 따라 정비비용은 점차 증가하게 되며 부품의 수명에는 한계가 있다. 손상된 부품의 정비에 있어서 초내열합금의 특성 때문에 용접하기 매우 어렵고 엄격한 용접환경이 필요하며, 코팅 적용시 특수한 장비가 요구되고, 고난이도 정비작업을 소화해 낼 수 있는 숙련된 작업자가 요구되기 때문에 가스터빈 고온부품의 정비는 공인된 정비센터에서만 가능하다.

Gas fired - continuous duty - base load

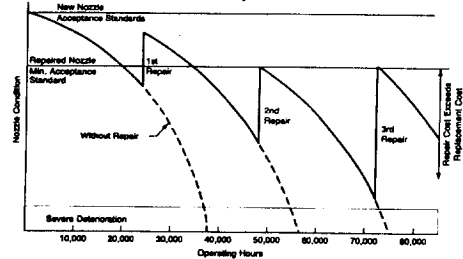


그림 10 가동시간 및 정비횟수에 따른 1단 터빈 정익의 상태

5.1 정비절차

손상된 가스터빈 고온부품의 정비는 검사, 정비 및 성능시험으로 크게 구분할 수 있다. 우선 파괴 및

표 6. GE사 터빈 동익 코팅성능 비교

코팅 \ 성능	저항성			
	고온산화	고온부식	열피로 균열파괴	표면균열 성장
PtAl	중상	중	중하	하
GT-29	중하	상	중상	중상
GT-29 PLUS	중상	상	중하	중
GT-33	중	중상	상	상
GT-33 PLUS	상	중상	중하	중

비파괴 검사를 통해서 표면균열을 포함한 외형적 손상과 재료내부의 손상상태를 파악한 다음 손상 정도에 따라 정비방법, 범위 및 절차를 선정하며 정비후 각 부품의 고유성능이 발휘되는지를 시험하게 된다. 표 7에는 고온부품 정비절차 및 방법을 나타내었다. 비파괴검사법으로는 표면균열 검사를 위해 액체침투탐상법과 형광침투탐상법을 주로 적용하고 내부균열 검사에는 초음파탐상법 등을 사용한다. 동익에는 tip 부위 미세균열의 존재 여부를 검사하기 위해서 형광침투탐상법이 주로 적용된다. 동익 및 정익은 외형적으로 손상이

심한 것을 선택한 후 절단하여 재질분석(미세구조 검사의 기계적시험)을 수행하게 되는데 그 이유는 다음 주기에 그 부품의 계속사용여부(serviceability)를 판정하기 위한 것이다. 검사결과 최소기준치를 만족하지 못하면 그 부품은 신품으로 교체되어야 한다.

5.2 정비기술

5.2.1 용접정비

가스터빈 고온부품에 사용되는 초내열합금의 용

표 7. 고온부품 정비절차 및 방법

절차 순번	정비방법	Combustion Liner	Transition Piece	정익	동익
1	입수검사	X	X	X	X
2	부품 분해	X	X	X	X
3	재질분석: 미세구조, 크리프시험	X	X	X	X
4	부품세척 및 코팅제거	X	X	X	X
5	용체화처리	X	X	X	X
6	플로라이드 세척	-	-	-	-
7	액체침투탐상검사	X	X	X	X
8	초음파세척	-	-	-	X
9	치수검사	X	X	X	X
10	손상부위 제거	X	X	X	X
11	냉간/열간가공 ; 치수교정	X	X	X	X
12	용접	X	X	X	X
13	브레이징	X	-	X	X
14	진공확산접합	-	-	X	X
15	HIP	-	-	-	X
16	기계가공	X	X	X	X
17	코팅	X	X	X	X
18	최종열처리 ; 용체화 및 시효	X	X	X	X
19	치수검사	X	X	X	X
20	Shot Peening	-	-	-	X
21	Moment Weight	-	-	-	X
22	Harmonie Analysis	-	-	X	-
23	최종검사	X	X	X	X

접은 비교적 까다롭다. Co기 초내열합금을 주로 사용하는 정익은 용접성에 큰 문제가 없으나 Al과 Ti 함량이 많은 석출강화형 Ni기 초내열합금을 사용하는 동익은 그림 11에 나타낸 바와 같이 용접하기가 매우 어렵다. 이러한 용접성의 저하는 γ' 석출물과 관련된다. γ' 석출물에 의해서 주로 강화되는 Inconel 718은 용접성이 우수하며 그 이유는 γ' 이 낮은 온도에서 느린 속도로 석출되기 때문에 용접시 발생하는 변형이 용접부 및 열영향부에 쉽게 재배열되기 때문이다. 용접균열은 주로 용접 조건 및 용접 후 열처리 조건과 관련된다. 모재의 용접조건을 용체화처리조건으로 하고 용접시 입열량을 최소화하는 것이 바람직하며 균열발생도 막을 수 있다. GE사는 Wrap TIG welding을 개발하여 동익 용접시 tip부위를 적외선 가열하여 용체화처리 조건에서 직접 용접한다. 따라서 γ' 에 의한 문제점을 해결하였다. 하지만 모재 및 용가재의 유동성 때문에 고난이도의 기능이 요구된다. 그리고 용접균열은 주로 용접 후 열처리 단계에서 발생하게 되는데 용접 후 열처리시 가열속도를 증가시켜 γ' 석출곡선(C curve)의 코(nose)를 지나지 않도록 하면 균열의 생성을 억제할 수 있다.

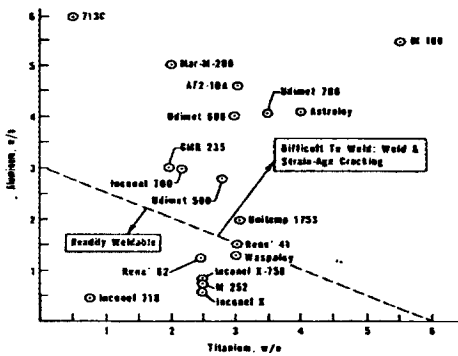


그림 11. Al 및 Ti 함량에 따른 초내열합금의 용접성

5.2.2 고온브레이징 정비

정익은 앞서서도 언급하였던 바와 같이 열피로에 의한 미세균열이 넓은 범위에 다수 발생된다. 이러한 손상 부위에 대하여 용접정비를 수행할 경우 용접열에 의해서 정익의 뒤틀림이 발생되며, 상당한 용접정비 시간이 소요되는 단점 때문에 고온

브레이징 기술인 ADH(Activated Diffusion Healing) 정비법을 적용한다.

ADH는 1979년 미국 GE사에서 개발하여 주로 Co기 초내열합금 (FSX-414)에 적용되며 Ni기 초내열합금에는 현재 개발 중에 있다. ADH는 삼입금속을 사용하여 고온에서 처리하는 일종의 고온 브레이징 방법이며 미세한 균열이 넓은 범위에 다수 존재할 경우 또는 표면에 Cr 고갈이 발생하였을 경우의 정비방법으로 추천된다. 그러나 높은 응력을 받는 부위에 발생한 큰 균열은 강도를 유지하기 위해서 용접정비를 적용한다.

미세균열부위를 연삭하여 최대깊이 1/8" 정도로 제거한 다음 삼입금속이 흐르는 것을 방지하기 위하여 용접으로 댐을 형성시킨 후, 진공로(2100° F, 10⁻⁴torr)에서 4시간 가량 진공세정한다. 진공세정 후 X-40 분말과 결합제(D-15)를 원하는 비율대로 충분히 혼합한 페이스트를 주사기를 이용하여 연삭 부위에 적당량 바른다. 페이스트를 건조시킨 후 진공열처리 한다. 그림 12에는 진공세정과 ADH

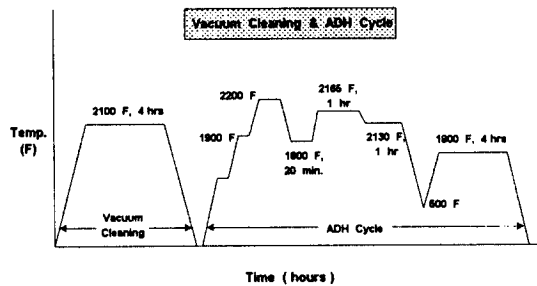


그림 12. 진공세정 및 ADH 열처리 Cycle

열처리 조건을 나타내었다. ADH 열처리는 분말 계면 용해 및 원소간 확산이 일어날 수 있도록 하는 온도조건에서 수행한다. 열처리 후 과잉으로 흡착된 삼입금속을 blending으로 제거한다

5.2.3 열처리

열처리는 정비공정중 진공조건에서 여러 차례 수행하게 되며 용접전 용체화처리, 코팅후 열처리 및 최종열처리로 구분할 수 있고 그 적용 목적은 각각 다음과 같다.

(1) 용접전 용체화처리

정익 및 동익은 가동중 탄화물의 분해에 의한 기지내 미세한 탄화물형성, σ 상과 같은 취화상의 생성, γ' 조대화 등 미세구조가 매우 불균일한 상태가 된다. 이러한 조건에서 용접정비를 수행할 경우 재료의 취화에 의한 균열 및 고온균열이 발생되므로 용접성 향상을 위하여 용체화처리를 적용하여야 하며 그 외에 표면 및 균열 내부의 세정효과도 있다. (2) 코팅후 열처리

코팅후 열처리는 주로 overlay 형태의 코팅 적용후에 실시하며 그 목적은 용사후에 코팅층이 접착강도를 향상시키기 위한 것이다.

(3) 최종열처리

정비공정이 거의 완료된 후 정익 및 동익을 가동시 작용하는 극심한 온도 및 응력조건에 견딜 수 있도록 하기 위하여 최종열처리를 수행한다. 최종열처리는 용체화처리와 시효처리로 구성되며 시효처리 시에 정익 및 동익 재료내부에 석출물을 가동조건에 적절한 조건으로 만들어 준다. 그림

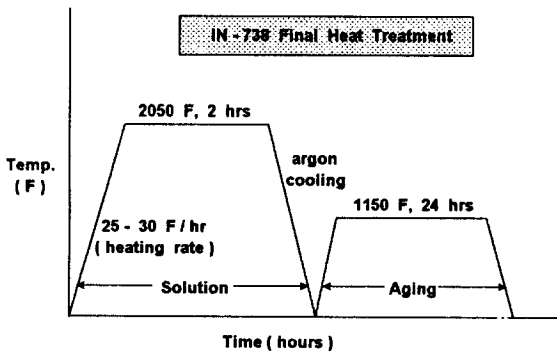


그림 13. IN-738 동익의 최종열처리(용체화처리 및 시효처리) 사이클

13에는 IN-738 동익의 최종열처리 사이클을 나타내었다.

5.2.4 동익 재생화처리

동익은 크리프온도영역에서 높은 원심력을 연속적으로 받고 있어서 크리프손상으로부터 수명이 소비된다. 따라서 수명시간에 도달하는 시점에서 새로운 동익으로 교환하거나 재생화처리하는 것이 필요하다. 현재 적용되고 있는 재생화처리에는 HIP(Hot Isostatic Press)이 있다. 고온고압 조건하에서 크리프 손상된 동익을 재생화하는 기술로서 HIP은 γ' 분포를 최적화시킬 수 있을 뿐만 아니라 사용중 발생한 크리프기공을 제거하여 신재와 근접한 강도상태로 회복시킬 수 있다. 최근에는 동익 생산과정에서도 주조기공을 제거하기 위해서 적용되고 있다.

6. 터빈 정익 및 동익 정비한계

손상된 동익 및 정익은 손상상태에 따라서 정비할 수 있는 한계가 있다. 전술하였던 바와 같이 재질분석으로 다음주기 사용 적정성이 입증되었다 할지라도 외형적 손상에 따라 정비 가능성을 판정하여야 한다. 정익의 정비한계는 거의 없다고 말할수 있으나 통상적으로 정비한계는 정비비용이 신제품비용의 40% 이하라고 알려져 있다. 1단 동익의 경우에는 회전체로서 엄격한 정비한계를 적용하여 매우 제한된 범위 (tip 부위)만을 정비한다. 특히 tip 부위라 할지라도 axial crack은 허용되지 않으며 또 trailing edge에는 어떠한 형태의 균열도 정비할 수 없고 균열 발견시 신제품으로 교체하여야 한다. 최근에는 동익 airfoil부에 발생한 균열을 정비할 수 있는 고온브레이징 정비법이 활발

표 8. GE사 7F/FA 1단 터빈 동익 정비한계

손상형태 Limit	고온산화	Trailing Edge Crack	Impact Damage	Tip Radial Crack	Tip Axial Crack
Repair Limit (Serviceability)	Perforation of Cooling Passage at Tip	Trailing Edge로 부터 15mm 내에 존재하는 균열	-	Tip의 높이	균열 허용치 없음

히 개발되고 있다. 2.3단 동익은 가동조건이 덜 열악하여 1단에 비해서는 그 정비한계가 완화된다. 표 8에는 GE사 7F/FA 1단 터빈 동익의 정비한계를 나타내었다.

7. 고온부품 수명관리 및 열화진단

가스터빈 고온부품의 수명결정 주요인으로는 운전시간에 비례하는 크리프 및 기동/정지 횟수에 비례하는 저주기 피로가 있다. 수명소진 가속요인으로는 고온부식, 고온산화 및 고온에서 장시간 가동에 의한 재료열화 등이 있고 이는 발전 unit 별 가동환경에 따라 달라지며 주로 운전시간에 비례한다. 고온부품의 수명은 발전소별 운영에 따라 다르다. 고온부품으로 사용되는 초내열합금에 대한 수명예측은 현재 확립되어 있지 못하다. 따라서 고온부품의 수명관리란 단순히 부품의 사용시간에 따라 제한하는 방식이 주류이다. 최대 허용 사용시간은 운전시간만을 고려하는 방식과 운전시간과 기동/정지 횟수를 조합해서 고려하는 등가 운전시간방식이 있다. 가스터빈 재료의 손상특성은 크리프 혹은 저주기피로가 독립적으로 영향을 주기보다는 두가지 요인의 상호작용에 의해 영향을 받으므로 등가운전방식으로 수명을 예측하는 것이 적합하다. 고온부품의 수명은 각 unit의 운전조건 및 환경조건에 따라서 크게 달라지기 때문에 보다 실제적인 수명예측을 위해서는 운전실적에 기초한 손상자료의 축적이 필요하며 각 발전소에 맞는 수명관리 방법을 확립할 필요가 있다.

최근에는 사용시간의 경과에 따라 고온부품 재료의 미세구조가 변화함에 착안하여 재료열화정도를 진단하는 수명평가 기법들이 활발히 개발되고 있다. 이 기법은 사용재의 미세구조로부터 금속온도, 상온강도 및 크리프파단시간을 추정하는 기법으로 정비주기 판정 및 잔여수명 예측에 적용된다. 현재 모든 재료에 적용되지는 못하지만, IN-738, Hastelloy-X, Nimonic-263 등의 Ni기 초내열합금에서는 유효성이 보고되었으며 다음과 같다.

7.1 금속온도 추정기법

동익의 잔여수명평가의 정확도를 높이기 위하여

재료가 경험한 온도를 추정하는 것이 중요하다. 석출강화형합금인 IN-738은 γ' 상 ($Ni_3(Al,Ti)$)이 주강화상이며, 사용시간이 경과하면서 석출물은 체적확산율속에 따라 구상조대화되는 것으로 알려져 있다. 성장속도식을 실험실적으로 구하고, 실제의 미세구조와 비교하여 금속온도를 추정한다. 또한 Hastelloy-X의 입내 석출물의 석출량, Nimonic-263의 γ' 상의 크기 또는 η 상(Ni_3Ti)의 석출간격을 변수로 하는 온도추정이 검토되고 있다.

7.2 기계적강도 추정기법

미세구조로 부터 재료특성을 추정하는 기법으로서, 사용온도 영역에서 강화기구를 규명하고, 입계 및 입내의 석출물과 재료특성의 상관관계를 수식화하여 기계적 강도를 추정하는 기법이다. 동익재 IN-738LC의 상온인장강도, 경도 및 인성은 석출강화상인 γ' 의 입자간 거리의 역수에 비례하는 것으로 알려져 있다.

7.3 크리프특성 추정기법

동익재 IN738LC의 석출강화상 γ' 의 입자크기 와 입자간거리를 파라메타로하여 크리프 파단수명을 수식화하여 구하는 기법으로, 열화재의 파라메타

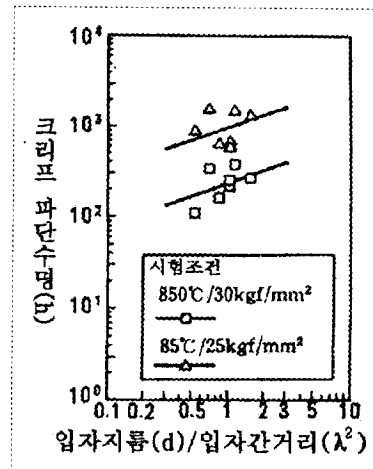


그림 14. γ' 입자크기 및 입자간 거리에 따른 크리프특성

로부터 잔여수명을 예측하는 기법이다. 파괴검사를 하지 않고 크리프강도를 미세구조관찰로부터 파악하는 것이다. 그림 14에는 IN-738LC 재료에서 γ' 의 입자크기 와 입자간거리에 따른 크리프파단 특성변화를 나타내었다. 또한 Hastelloy-X, Nimonic-263의 크리프특성은 입내석출 및 입계석출의 기여정도를 고려하여 강화기구를 규명하고, 이를 수식화한 크리프평가식으로부터 Hastelloy-X로 만들어진 transition piece의 차기 정기점검까지의 변형 예측이 가능해졌다.

8. 결 언

가스터빈 발전 용량 및 효율의 향상에 따라 고온 부품은 더욱 극심한 가동환경에 놓이게 되고 그로 인해서 부품의 손상은 더욱 심화된다. 따라서 주기적인 정비가 요구되며 정비품질의 향상은 필수적이고 더욱더 나아가 고온브레징, HIPP 등의 정비신기술의 개발이 요구되고 있다. 이러한 정비신기술은 정비한계를 확대할 수 있는 기술로서 고온 부품의 가동중 건전성 확보는 물론 운전/유지비용 측면에서도 이점을 줄 수 있을 것으로 기대한다. 그리고 가스터빈 고온부품의 최적 정비주기 및 교체주기를 결정하기 위해서는 고온부품의 수평평가 기술을 확보하여야 할 것으로 생각된다.

9. 참고문헌

- 1) P.W. Schilke, A.M.Beltran, A.D. Foster and J.J. Pepe, 1993, "Advanced Gas Turbine Materials and Coatings," 37th GE Turbine state-of-the Art Technmology Seminar, GER-3569D
- 2) 近藤卓久, 1997, : 最近の ガスタービン保守技術", 火力原子力発電, Vol. 48, No. 11, pp. 26
- 3) Advanced Technology Gas Turbine Metallographic Handbook for FSX-414 Nozzle Alloy, General Electric Company, (1984)
- 4) J.H. Wood and S.T.Swede, 1993, "Comparison of coating performance and degradation modes in heavy duty land-based gas turbines", Surface and Coating Technology, Vol.61, pp. 1-5
- 5) J.S.Smith and D.H. Boone, ASME Paper 90-GT-319(1990)
- 6) J.R. Rairden, , U.S. Patent 4, 101, 715(1978)
- 7) J.L. Walker and J.R. Ross, U.S. Patent 4, 080, 486(1978)
- 8) R.F. Hoefft, 1993, "Heavy-Duty Gas Turbine Operating and Maintenance Consideration," 37th GE Turbine State-of-the Art Technology Seminar, GER-3620B