

## 터빈 블레이드 손상원인 및 방지대책

박 기 성 · 전 채 홍 · 김 승 태

한전기공(주) 기술개발실

### Damage Causes and Preventive Measures of Turbine Blade

Ki-Sung Park, Chae-Hong Jeon, Seung-Tae Kim

19th Floor, Han Seong Plaza, 13-1, Heungin-Dong, Jung-Ku, Seoul 100-430, Korea

Turbine blade has been in service under severe condition such as high temperature, high pressure, corrosive and vibratory environment. Recently its frequent failure occurred and sometimes led to unexpected outage which is estimated to cost to several million dollars. In order to prevent blade failure, life assessment technology should be developed and a criteria for replacement of used blade be established. A lot of effort has been made to quantify the damage by using NDE technique and analytical evaluation. In turbine blade, life assessment technology is now well-established in the laboratory but its application to the field is not successful yet due to a lack of accuracy and a difficulty in the field application. Damage type and mechanism of gas turbine blade can be much different depending on operating condition and therefore considering each plant characteristic sufficiently, life assessment method and preventive measure can be properly applied.

*Keywords : turbine blade, blade failure, life assessment, NDE.*

### 1. 서 론

발전설비가 장시간 고온·고압 및 부식환경에서 운전됨에 따라 터빈 주요부품에는 여러 가지 형태의 손상이 발생된다. 특히 터빈 블레이드(turbine blade)의 손상은 불시정지를 야기시킬 수 있어서 사고예방에 관심이 집중되고 있다. 발전용 가스터빈의 경우 고온의 연소가스를 작동유체로 사용하고, 저급연료의 사용, 해수분위 기 운전 등으로 고온부식 및 산화손상이 심각한 문제로 대두되고 있으며 이러한 손상을 방지하기 위하여 다양한 코팅기술이 개발되고 있다.

증기터빈의 경우 국내외 블레이드 사고사례 통계에 의하면 저압터빈 후단(L-0, L-1) 블레이드에서 가장 빈번한 손상이 발생하였고 그 주요원인은 부식/피로(응력부식균열, 부식피로 등)로 알려져 있다. 그러므로 블레이드의 가동중 건전성 확보를 위해서 주기적인 진단 및 검사가 필요하며 또한 손상평가와 더불어 수명예측기술이 확보되어야 한다.

### 2. 터빈 블레이드 적용재료

#### 2.1 가스터빈 블레이드(Gas Turbine Blade)

가스터빈의 성능은 터빈입구온도의 상승에 따라 현저하게 향상되어 왔다. 근래에는 가스터빈 블레이드(moving blade) 제조시 적용되는 정밀 주조 기술의 발달에 따라 일방향용고, 단결정 블레이드가 개발되어 내열성이 크게 개선되었다. 블레이드에는 대부분  $\gamma'$  석출강화형 Ni기 초내열합금이 사용된다. 이 합금은 고온강도 향상을 위하여 Cr량을 저감하고  $\gamma'$  형성원소인 Al, Ti 등을 증가시킨 합금설계가 되어 있기 때문에 내식성이 떨어지는 단점이 있고 이러한 단점을 보완하기 위하여 고온가스가 접촉하는 표면에는 코팅의 적용이 필수적이다. 베인(fixed blade) 재료로는 Co기 초내열합금을 주로 사용하고 있다. 이는 Co기 초내열합금이 다른 초내열합금에 비해서 일반적으로 열피로 저항성, 고온 내식성 및 용접보수성이 우수하기 때문이다. Table 1에는 국내 발전용 가스터빈에 적용된 합금을 나타내었다.

## 2.2 증기터빈 블레이드(Steam Turbine Blade)

증기터빈 블레이드 재료는 주로 12%Cr 마르텐사이트계 스테인리스강(12%Cr강), 석출경화형 스테인리스강(PH alloy), duplex 스테인리스강, 티타늄합금 등이 사용된다. 이들 중에 12%Cr강이 고.중.저압 터빈에 관계없이 가장 빈번히 사용되는 합금이며 1차, 2차 용해 및 정밀단조로 형상을 만들고 austenizing, quenching, tempering의 열처리를 적용하여 최적의 성질과 미세조직(tempered martensite)을 얻게 된다.

## 3. 터빈 블레이드 손상원인 및 방지대책

### 3.1 가스터빈 블레이드

가스터빈 고온부품의 손상 및 재료열화에 영향을 주는 요소로는 사용연료, 운전방식, 대기환경 등이 있다. 가스터빈은 발전특성상 빈번한 기동/정지, 저급연료 사용, 해수분위기 운전 등으로 인해서 여러 가지 형태의 손상이 발생되며

Table 1. Materials used for industrial gas turbine blade

Component		GE MS7EA	GE MS7F	WH	ABB
				W501D5	GT11N
Fixed Blade	1st	FSX-414	FSX-414	ECY-768	IN-738
	2nd	FSX-414	GTD-222*	ECY-768	IN-939
	3rd	FSX-414	GTD-222	X-45	IN-738
	4th			ECY-768	X-45
	5th				St 20
Moving Blade	1st	GTD-111	GTD-111	IN-738	IN-738
	2nd	IN-738	GTD-111	IN-738	IN-738
	3rd	U-500	GTD-111	IN-738	IN-738
	4th			U-520	IN-738
	5th				St 16

\*GTD-222 : Ni-based Superalloy

주요 손상원인은 고온부식, 산화 및 열피로균열이다.

### 3.1.1 블레이드 손상원인 및 방지대책

#### 3.1.1.1 고온부식

가스터빈의 부식손상중 가장 중요한 것은 고온부식이다. 고온부식이란 나트륨(Na), 칼륨(K) 및 바나듐(V)과 같은 알칼리금속이 연료 속의 황(S)과 반응하여  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 로 대표되는 알칼리 유산염(Sulfate)이나 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. 두 가지 종류의 고온부식은 서로 다른 형태의 손상을 일으킨다. Type I의 특징은 입계부식, sulfide particle 및 모재에 합금원소 고갈영역(depleted zone)이 관찰된다는 것이고, Type II의 경우에는 입계부식과 고갈영역이 없는 반면 층상형태의 부식생성물이 형성된다는 특징이 있다.<sup>1)</sup> 발전용 가스터빈에서는 1단 블레이드의 Type I 손상이 심각하며 Fig. 1에는 입계부식 손상을 나타내었다. 고온부식에 대한 방지대책으로는 오염도 감소, 내식재료 사용, 코팅 적용 등이 있다.



Fig. 1. Hot corrosion damage of IN-738 1st stage moving blade.

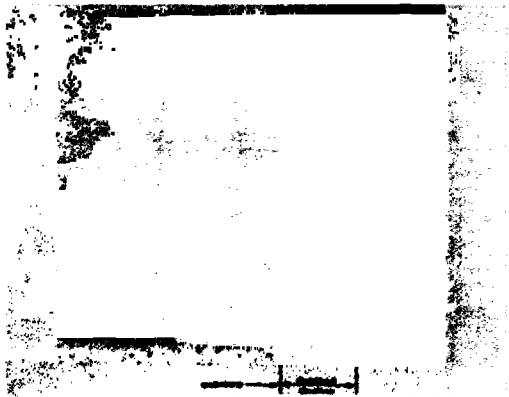


Fig. 2. Internal oxidation of gas turbine moving blade : dark oxide particles in the matrix.

3.1.1.2 고온산화

블레이드의 고온산화 손상은 내부산화의<sup>1)</sup> 특징을 보이며 Fig. 2에 나타난 바와 같이 기지내에 불연속 산화물을 형성한다. 초내열합금의 알루미늄은 고온에서 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.

3.1.1.3 블레이드 손상 방지대책 : 코팅

블레이드 재료인 Ni기 초내열합금은 충분한 내식성을 갖지 못하고 가동중 고온부식 및 산화 손상을 피할 수 없다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 코팅의 적용은 필수적이다. 1단 블레이드에는 가스터빈 제작사 및 모델에 관계없이 거의 모두 코팅이 적용되어 있고 후단 블레이드에는 선택적으로 코팅이 적용된다. 과거 20년 동안 코팅분야에는 큰 발전이 이루어졌고 장시간 동안 사용해도 고온부식과 고온산화에 대한 저항성이 우수한 코팅이 개발되었다. Table 2에는 국내에 적용된 GE(General Electric)사 코팅의 종류를 보여준다. 개선된 기종(가동온도 향상)일수록 overlay 형태의 코팅을 채택하였고 GE 7F 모델의 경우에는 overlay 코팅 위에 확산코팅(diffusion coating)을 추가로 적용하여 내식성과 열피로 저항성을 동시에 향상시켰다.

3.1.2 베인 손상 및 방지대책

가스터빈 베인은 가동중 부식손상을 경험한다. 부식의 특징은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 표면에 NOS(Nitride, Oxide & Sulfide)가 형성되며 그 아래에 조대한 탄화물(coarse carbide)이 형성된다는 것이다.<sup>5)</sup> 조대한 탄화물 생성은 표면에서 NOS가 형성됨에 따라 기지(matrix)로부터 방출된 탄소가 원인이 된다. 표면부위에 형성된 NOS와 탄화물은 베인의 연성을 저하시켜 열피로균열 발생의 원인이 되기도 한다. 그리고 이들은 용접정비시에 hot cracking의 원인으로 작용하기 때문에 표면 NOS는 제거하고, 조대한 탄화물은 용체화처리를 통해서 모양과 크기를 사용전 상태로 복원하여야 한다.

가스터빈 1단 베인은 고온부품중 열변화를 가장 크게 경험하는 부품으로 Fig. 4에 나타난 바와 같이 열피로에 의한 미세균열이 넓은 범위에 다수가 발생된다. 이러한 손상부위에 대하여 용

Table 2. Coatings used for GE gas turbine moving blade<sup>2-4)</sup>

Model	Stage	Material	Coating Name	Coating Material	Coating Type
MS7B	1st	IN-738	Pt-Aluminide	○ Pt, Al	Dhffusion
	2nd	IN-738	N/A	-	-
	3rd	IN-738	N/A	-	-
GE MS7EA	1st	GTD-111	GT29 INPLUS	○ Bond Coat : CoCrAlY	Diffusion+Overlay
	2nd	IN-738	N/A	○ Top Coat : Al	-
	3rd	U-500	N/A	-	-
MS & F	1st	DS* GTD-111	GT29 INPLUS	○ Bond Coat : CoCrAlY ○ Top Coat : Al	Diffusion+Overlay
	2nd	GTD-111	GT29 INPLUS	○ Bond Coat : CoCrAlY ○ Top Coat : Al	-
	3rd	GTD-111	Diffused Cr	○ Cr	Diffusion

\*DS : Directional Solidified.

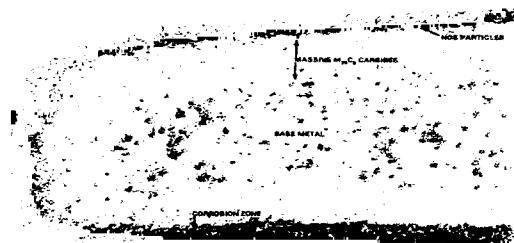


Fig. 3. Surface NOS & coarse carbide formation of FSX-414 vane during the service.

접정비를 수행할 경우 용접열에 의해서 베인의 뒤틀림이 발생되며, 상당한 용접정비 시간을 요하게 되는 단점 때문에 고온 브레이징(brazing) 기술인 ADH(Activated Diffusion Healing) 정비법을 적용한다. ADH는 현재 Co기 초내열합금(FSX-414)에만 적용되며 Ni기 초내열합금에는 현재 개발 중에 있다. ADH는 filler metal을 사용하여 고온에서 처리하는 일종의 브레이징 방법이며 미세한 균열이 다수 존재할 경우 또는 표면에 Cr 고갈층이 발생하였을 경우 효과적인 정비방법으로 알려져 있다.

### 3.2 증기터빈 블레이드

증기터빈 블레이드의 경우 Table 3에 나타난

바와 같이 주로 저압터빈 후단 블레이드에서 손상이 발생되며 그 원인은 대부분 응력부식균열과 부식피로라고 보고되었다.<sup>6)</sup> 터빈에서 부식요인은 염소이온으로 알려져 있다. 복수기 튜브가 파괴되므로서 해수가 유입되면 증기속에 염소이온이 상당량 존재할 수 있으며, 저압터빈 후단에서는 가동온도와 압력이 낮기 때문에 증기가 응축되고 습증기가 되는 과정에서 습증기는 주위의 불순물을 포획(wilson zone)하여 습증기속의 염소이온 농도는 매우 높게 된다. 그러므로 정상가동중에 부식손상 가능성은 저압터빈 후단에서 매우 높을 것으로 생각된다.

#### 3.2.1 블레이드 손상원인

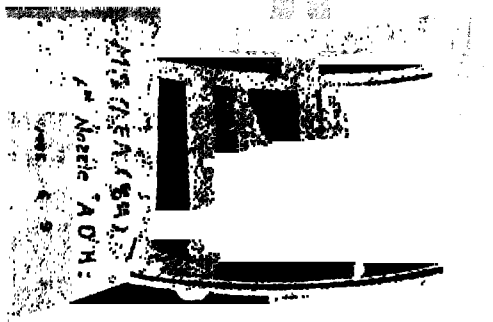
##### 3.2.1.1 응력부식균열

응력부식균열은 가동중 작용하는 원심력과 부식환경이 동시에 작용하므로서 발생되고 균열성장에 대한 임계 응력확대계수인  $K_{ISCC}$ 가 존재한다. 이 값보다 큰 응력확대계수가 작용할 경우에는 응력부식균열 성장속도는 매우 커서 일정 시간 내에 블레이드는 파괴될 수 있다. 블레이드에서 응력부식균열 손상은 주로 고정핀, tie-wire의 silver soldering 부위, 블레이드 루트부 등에서 발생된다.<sup>7)</sup>

저압터빈 최후단 블레이드(last stage blade)



(a)



(b)

Fig. 4. Surface crack damage & ADH repair of FSX-414 vane. (a) thermal fatigue crack : hair crack, (b) repaired vane by ADH.

Table 3. Damage causes of steam turbine blade

	Corrosion /Fatigue	SCC	Design Error	O/M Error	Embrittle-ment	Erosion	Un-known	Total
No.of Damage	47	41	21	6	5	4	4	128
%	36.7	32.0	16.4	4.7	3.9	3.1	3.1	
HP	3	1	4	2	-	-	-	10
IP	1	3	-	1	-	-	1	6
LP	43	37	17	3	5	4	3	112

에는 진동특성을 향상시키기 위하여 tie wire가 설치되어 있다. 설치형태가 silver soldering인 경우 가동중 silver solder가 블레이드로부터 분

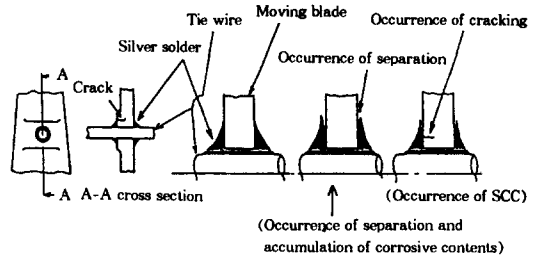


Fig. 5. Stress corrosion cracking of last stage blade due to the separation of silver solder.

리되고 그 사이에 부식 가속화 물질들이 농축되면 응력부식균열이 발생된다. 이렇게 발생한 균열은 가동중 작용하는 반복응력에 의해 성장하게 되고 블레이드의 파괴가 일어날 수 있다 (Fig. 5).

### 3.2.1.2 부식피로

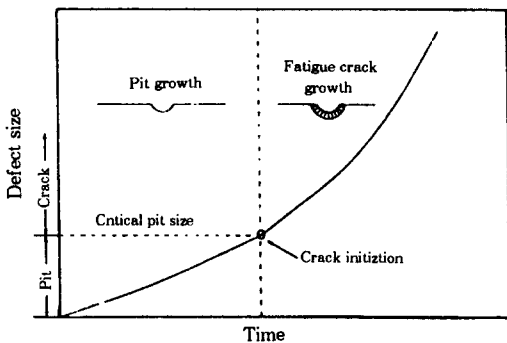
부식피로는 블레이드에서 가장 빈번히 발생하는 주요 손상원인이다. 증기터빈 블레이드는 가동환경에서 passive corrosion과 pitting을 경험한다. 피로한계 감소측면에서 passive corrosion에서 pitting으로의 전환은 블레이드의 부식손상을 평가하는데 있어서 매우 중요한 변수라 할 수 있으며 부식피로는 주로 MnS 입자 위에서 생성되는 것으로 알려져 있다.<sup>8)</sup> Pitting 저항성은 합금의 증가 Cr 농도(Cr equivalent = %Cr + 3.3 × %Mo)에 비례하여 증가하는 것으로 보고되었다.<sup>9)</sup> Table 4에 나타난 바와 같이 블레이드 적용 재료 중에 pitting 저항성은 12%Cr강에서 가장 낮았고 duplex 스테인리스강은 저항성이 우수한 것으로 나타났다.

### 3.2.2 블레이드 손상 방지대책

블레이드는 가동중 주로 부식피로에 의해서 손상되어 갑작스런 파괴가 일어날 수 있다. 부식피로손상은 표면의 부식피트로 부터 시작되어 심각한 손상을 유발할 수 있으며, 반복하중이 작용할 때 부식피트는 균열발생의 원인을 제공

**Table 4. Equivalent chromium content & pitting resistance of steam turbine blade materials**

Blade Material	(wt%) Cr Equivalent		Pitting Resistance	
	Cr	Mo (%Cr+3.3*%Mo)		
12%Cr Stainless Steel (X20CrMoV121)	12	.9	14.97	low
PH Alloy (X5CrNiMoCuNb145)	14	1.6	19.28	low
Duplex Stainless Steel (X4CrMnNiMoN2664)	26	2.2	33.26	medium
29Cr4Mo2Ni	29	4.0	42.2	high



**Fig. 6. Corrosion pit growth and fatigue crack growth.**

한다. 이러한 부식피트의 영향에 대한 조사는 부식피트에서 피로균열로의 성장과 부식피트의 생성 효과를 포함하여 다루어야 한다. 부식피로 균열성장상 Fig. 6에 나타난 바와 같이 피트의 생성 및 성장, 피트에서의 균열발생, 부식피로균열전파의 세단계로 묘사할 수 있다. 전체 부식피로수명 중에 부식피트 생성으로부터 피로균열 생성까지의 시간이 전체 수명의 90% 이상을 차지한다고 알려져 있어 부식피트로부터 피로균열로의 성장평가가 매우 중요하며<sup>8)</sup> 그 후 균열의 성장은 Paris법칙으로부터 계산할 수 있다. 이와 같이 부식피트 생성, 성장 및 부식피로균열 성장을 실험실적으로 모델링하고 이 결과를 현장에 적용하기 위해서는 부식피로손상의 원인이 되는 부식피트의 측정기술도 물론 확보되어야 할 것으로 생각된다. 부식피트의 경우에는 그 크기가 매우 작아서(수백  $\mu\text{m}$ ) 기존의 비파괴검

사법으로는 검출 불가능하며 레이저 등을 이용한 정밀검사기술 개발이 기대된다.

## 4. 결 언

발전설비 효율 및 용량이 증가함에 따라 가동 환경은 날로 극심해지고 설비가 노후화 됨에 따라 빈번한 손상이 발생되고 있는 실정이다. 하지만 국내에서는 이를 예방할 수 있는 체계적인 방지대책이 확립되지 못한 실정이다. 터빈 블레이드는 대형사고의 예방차원에서 그와 관련된 손상평가, 수명관리 및 해석기술이 확보되어야 한다. 증기터빈의 경우 수명평가 기술이 상당히 개발되어 있는 실정이나 현장 적용성(비파괴적 손상측정기술)이 확보되어야 하고, 가스터빈의 경우에는 아직까지 기술이 미확립된 상태로서 특히 발전소별 운전방식에 따라 손상평가 및 방지대책이 적절히 수립되어야 할 것으로 생각된다.

## References

1. A. M. Beltran and et al., *Proceedings of the 37th GE Turbine State-of-the Art Technology Seminar*, GER-3596D, General Electric (1993).
2. J. S. Smith and D. H. Boone, *ASME Paper* 90-GT-319 (1990).
3. J. R. Rairden, III, *U.S. Patent* 4, 101, 715(1978).
4. J. L. Walker and J. R. Ross, *U. S. Patent* 4, 080, 486 (1978).
5. *Advanced Technology Gas Turbine Metallographic Handbook for FSX-414 Nozzle Alloy*, p. 30, General Electric Company, (1984).
6. R. P. Dewey and N. F. Rieger, *EPRI Report* RP 1856-1 (1983).
7. *Deterioration of Steam Turbine Equipment and Preventive Maintenance*, p. 3-27, Hitachi Works (1980).
8. K. Becker and et al., *Materials and Design*, 14, 3, p. 175 (1993).
9. A. Atrens, *Metals Technology*, 9, p. 117 (1982).