<기술논문>

모델 변천에 따른 가스터빈 연소기 라이너의 부위별 손상유형 분석

김문영† · 양성호* · 박상열* · 김상훈* · 박혜숙* · 원종범**

Analysis of Damage Patterns for Gas Turbine Combustion Liner according to Model Change

Kim Moon-young, Yang Sung-ho, Park Sang-yeol, Kim Sang-hoon, Park Hye-sook and Won Jong-beom

Key Words: High-Temperature components(고온부품), Combustion Liner(연소기 라이너), Low Cycle Fatigue(저주기피로), Creep(크리프), Wear(마모)

Abstract

High-temperature components of gas turbine operated for certain period of time can be reused by being repaired or rejuvenated. In case of the gas turbine combustion liners, the biggest and the most important one in the high-temperature components, come in a repair shop after operated for 8,000 or 12,000 hours according to the model and go through the repair and rejuvenation in order to be reused. A stated combustion liner is the first channel which has the combustion gas reached a nozzle from a fuel nozzle. Materials and coating properties of old and new model combustion liners were investigated. To repair these components after the visual inspection, the coatings of combustion liners were removed and then FPI(Fluorescent Penetrant Inspection), a kind of the NDI(Non-Destructive Inspection), was conducted. Damage patterns and the number of the damaged components were classified and analyzed based on data provided from the visual inspection over a long period of time. Focusing on the difference between old model and new model combustion liners, we analyzed the damage distribution and changes and consequently concluded that new model combustion liner would increase repair rate.

1. 서 론

국내 가스터빈은 1967년 전력사정이 어려운 당시에 건설된 울산 공단 내의 용량 1만 5천kW 10대(15만kW)를 제한송전 해제용으로 건설하여 운전 되었으며, 1978년 영월과 군산에 각각 가스터빈 5만kW 4기와 10만kW 1기는 긴급 전원공급용으로 건설·운영되었다. 이것이 초기의 첨두부하(Pick Load)용 개념으로 운영되기 시작하였다. 국내는 출력 조절에 어려움이 많은 원자력과 대용량의 화력발전설비가 차지하는 비중이 높고, 가스터빈의 짧은 기동·정지 시간과 도시 근교에 인접해 건설되어 있는 특성으로 인하여 대다수 가스터빈이 주파수 조절용인 첨두부하용으로 운영되고 있다.

가스터빈은 이론상 입구온도가 높고 배기온도가 낮을수록 발전기기의 효율이 증가하기 때문에 운전온도를 향상시키는 방향으로 기술개발이 이

† 책임저자, 회원, 한전KPS(주) GT정비기술센터
E-mail : mykim@kps.co.kr
TEL : (032)580-8294 FAX : (032)580-8283
* 한전KPS(주) GT정비기술센터
** KPRI

루어지고 있으며, 입구온도(TIT, Turbine Inlet Temperature)가 50℃ 증가하면 8~12% 출력증가와 2~4% 효율증가를 가져오게 된다. 현재 국내에서 운전되는 가스터빈의 입구온도는 1,350℃까지 운전되고 있으며, 선진국에서는 지속적인 터빈 입구온도의 상승으로 1,500℃급 가스터빈 설비가 실용화되어 사용되고 있으며, 1,700℃급 차세대 가스터빈에 대한 연구개발도 진행되고 있다. 이러한 입구온도의 상승은 고온의 연소가스가 노출되는 터빈부품의 손상을 초래하게 되며, 이와 함께 잦은 기동정지로 인해 냉간 가동시 급격한 온도변화로 모든 고온부품에 열피로 및 변형, 균열 등의 크리프 손상을 초래할 수 있다.

특히 가스터빈의 고온부품 중 가장 큰 부품인 Combustion liner는 연소된 고온의 가스가 이동하는 경로로 고온의 응력과 로터의 3,600rpm 회전에 따른 고정체 진동이 발생하게 된다. 특히 국내의 가스터빈은 하루 2~3회의 기동정지가 이루어지고 있으며, 이 부품은 고온가스의 접근에 의한 손상은 물론 버킷과 같이 회전을 하는 부품은 아니지만 회전에 의한 진동을 이겨내야 하므로 손상이 많이 발생된다. 이와 같은 연소실 부품은 운전중 부품의 신뢰도를 위하여 매주기마다 정비공장에 입고되며, 사용품의 손상 여부를 비파괴(FPI: Fluorescent Penetrant Inspection)에 의하여 점검하여 재사용 여부를 결정하고 재생정비를 수행하게 된다.

본 논문을 통해서는 모델에 따른 형상의 변화에 대하여 재질 및 코팅의 사양을 검사하였으며, 비파괴 검사시 크랙 크기에 대한 기준을 제시하였다. 또한 입고 검사시 수행한 데이터를 기준으로 구모델과 신모델의 Combustion liner의 특성과 손상유형의 차이를 분석하였다.

2. 손상원인(1)

2.1 크리프 및 크리프 파단(2)

고온, 고응력에 연속하여 노출된 설비에서 주로 발생하며, 파손이 일어나지 않을 정도의 치수변화, 크리프 파단 및 크리프 균열성장에 의한 국부적인 파괴의 3가지 형태가 있다. 가스터빈 고온부에 작용하는 온도와 응력 하에서 크리프 현상이 작용하게 되면 입계를 따라 미세 공공(Voids)이 축적되며, 이러한 공공이 서로 연결되어 균열이 생기고 결국에는 파단에 이른다.

2.2 열피로 및 저주기피로

피로파괴는 인장응력 하에서의 반복적, 유동적인 응력변화로 인해 발생된다. 일반적인 저주기 피로파괴는 가스터빈의 기동과 정지 과정에서 발생되는 부품의 상태에 따라 발생하는 열팽창의 차이에 의한 결과로 발생한다. 여기서 소성변형을 동반하며 결정입계의 공공에서 균열이 시작되어 파괴가 일어난다. 하지만 실질적인 고온부품의 파괴현상을 분석해보면 많은 사례에서 피로와 크리프의 영향이 동시에 작용하여 파괴가 일어난다. 가스터빈 부품의 재료에 대한 크리프 피로 상호작용 데이터는 매우 빈약한 편이다. 크리프가 발생할 수 환경에 노출되었던 재료의 경우 재료의 피로수명이 심하게 줄어드는 것을 여러 실험을 통하여 알 수 있다. 이러한 원인으로 크리프에 의한 표면의 균열이 초기 피로균열의 발생확률을 높여 피로 수명을 감소시키는 메카니즘으로 받아들여지고 있다. Fig. 1은 저주기피로에 의해 손상된 Combustion liner의 사진이다.

2.3 고온부식

니켈기지 초내열합금은 좋은 내산화성을 갖고 있지만, 장시간 운전에 따라 보호피막(Scale)의 손상, 혹은 열사이클이나 침식에 의해 생긴 결함으로 산화현상이 확산된다. 이러한 원인으로 표면

Fig. 1 Failure of combustion liners

가까운 부위에 산화물 형성원소가 지속적으로 감소되어 미세조직 변화가 일어난다. 표면산화로 인하여 재질의 입계나 보호피막의 결핍부위에 내부 산화가 일어나게 되며, 이러한 산화물 내에 예리한 균열이 생기거나 끝단에서 응력집중이 일어나 크리프 및 피로수명을 줄인다. 고온부식은 산화보다 몇 배 빠른 속도로 진행되므로 고온부식으로 인해 갑작스럽게 동익을 교체해야 할 경우가 있고 때때로 급격한 고온부식 파단이 일어난다(3).

고온부식을 방지하기 위해서는 재료의 성분 중 Cr의 양이 많아야 한다. 그러나 Cr의 양을 늘리게 되면 고온에서 재료의 기계적 성질이 저하된다. Cr의 양이 늘어남에 따라 고온에서 재료에 기계적 성질 향상을 도모하는 원소의 양이 줄어들기 때문이다(4).

2.4 경년열화

경년열화는 고온부품의 강도에 영향을 주는 인자이다. 일반적으로 고온에서 장시간 노출이 될수록 열화에 의해 인장강도 등이 감소하는 것을 관련 자료에서 찾아볼 수 있다(5). 고온에서 노출시간이 길수록 강도의 감소가 크다. 니켈기지 석출 경화형 합금의 경우 인장강도의 감소원인은 γ′의 조대화가 가장 큰 원인이다. 일반적으로 고온에서 운전된 블레이드의 경우 충격값이 감소한다고 알려져 있으며, 이로 인해 블레이드의 결함범위가 매우 엄격해지며, FOD(Foreign Object Damage)의 저항성도 감소하게 된다. 경년열화에 의하여 열적 피로강도와 더불어 인장 및 연성 등이 감소하게 된다. 이는 TCP(Topologically Close Packed)상의 석출이나 결정입계의 탄화물 조대화가 하나의 원인으로 알려져 있다.

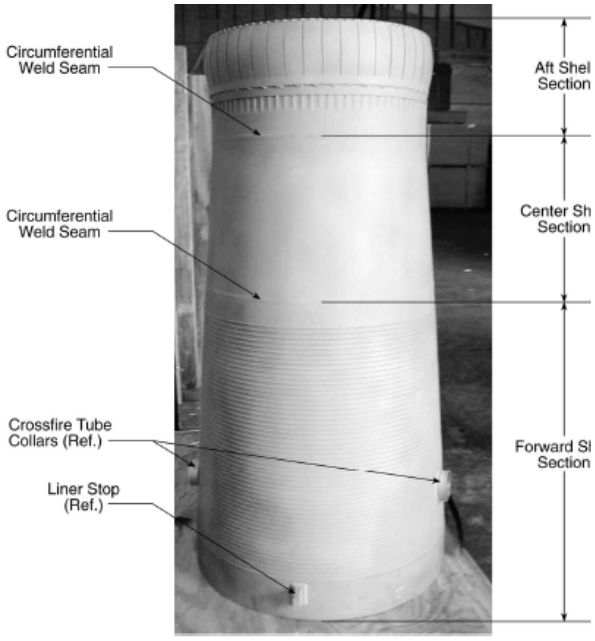

Fig. 2 Configuration of a combustion liner

2.5 FOD(Foreign Object Damage)

FOD는 마모입자나 헐거워진 부품 등의 이탈에 의해 일어나기 때문에 이러한 문제의 발생을 예측하기는 매우 어렵다. 결국 정비할 때 보다 세심한 작업이 필요하다. 즉, FOD에 의한 손상을 피하기 위해서는 블레이드가 FOD에 취약하게 되는 시기와 블레이드의 내충격에 취약하게 되는 때를 결정하기 위해 블레이드를 추적하는 것이 중요하다. 운전 중 FOD에 의한 손상은 대형사고로 이어질 수 있으므로 체계적인 관리시스템에 의해 관리 · 운영되어져야 한다.

3. 형상 및 검사부품의 특징

3.1 검사부품의 외형명칭

본 연구에서 활용하여 검사할 Combustion liner의 외형 명칭은 크게 Forward, Center 및 After 부분으로 구분되어 있다. 또한 각 부분의 주요부분은 Liner Stop, Crossfire Tube, Crossfire Tube 등과 같은 부분이 있다. Fig. 2는 검사에 사용된 Combustion liner의 외형형상을 보여주고 있다.

3.2 부품의 이력

실험방법에 사용한 Combustion liner는 xx 제작사의 구모델과 신모델을 선택하여 사용하였다. 구모델의 Combustion liner는 Hastelloy X 재질을 사용하였으며, 신모델은 Nimonic 263 재질을 사용하여 제작하였다. 각각의 부품은 제작사에서 권고하는 정비운전시간(구모델: 8,000시간, 신모델: 12,000시간)에 준하거나 450회의 기동정지 횟수에 가까운 운전시간대의 부품을 선택하려고 하였으나 첨두부하로 운전하는 국내사정을 고려하여 EOH (Equivalent Operating Hours)에 가깝게 1주기 운전한 부품을 사용하였다. 여기에 적용한

Table 1 Specification of old and new models

Model Type	Substrate	Coating	EOH(Hr)/ Sart & Stop	Repair Interval
Old	Hastelloy X	Level B	8,000/450	5
New	Nimonic 263	Level C	12,000/450	5

Table 2 Coating specification of old and new models

Coating Level	Powder material		Thickness(mm)	
	Bond	Top	Bond	Top
B	AMDRY xxx	ZrO_2 $8Y_2O3$	0.006"	0.014"
C	AMDRY xxx	ZrO_2 $8Y_2O3$	0.011"	0.022"

내열코팅은 제작사 사양인 Level B와 Level C의 코팅을 적용하였다. 또한 제작자에서 5번에 걸쳐 재생정비를 수행하여 사용하도록 권고하고 있다.

Table 1은 모델변천에 따른 재질 및 코팅 사양의 변경을 나타내고 있다. 또한 이렇게 변경, 개선됨으로서 주기운전시간이 8,000시간에서 12,000시간으로 변경된 것을 보여주고 있다. Table 2는 TIT(Turbine Inlet Temperature)가 1,316℃에서 1,327℃로 11℃ 증가됨에 따라 다르게 적용되는 구모델과 신모델의 내열성 코팅의 특성변화를 보여주고 있다.

4. 실험방법

4.1 검사수량 및 항목

검사항목에 적용된 손상의 형태는 각 부분에서 주로 발생하는 부풀음(Bulge), 크랙(Crack), 마모(Wear), 부식(Corrosion) 교체(Replace) 등과 같이 구분하였다. 이 중에서 교체는 부분적으로 과도하게 손상되어 그 부분을 교체한 후 전체를 재생정비한 후 사용하는 것을 말한다. Table 3은 정비를 위하여 입고한 Combustion liner의 주요 검사부위 및 검사 수량을 보여주고 있다. 여기서 N사의 것은 구모델이고, S사와 B사는 신모델을 사용하고 있다.

4.2 검사기준 및 절차

일반적으로 제작사가 제시하는 검사기준은 부품의 외형에 나타나는 크랙이나 부풀음 크기 및

Table 3 Inspected combustion liner's counter and parts

Inspected combustion liner		Inspected combustion liner parts
Owner(model type)	Counter(EA)	
N(Old model) S(New model) B(New model)	126 14 28	- Forward - Center - After - Crossfire Tube - Stopper - Cooling Hole - Spring Seal

Table 4 Inspection criterion of damage size

Remark	Repair divider		
	Light	Medium	Heavy
Crack Size	<400mm	40~60mm	60mm>
Bugle Size	1,400cm^2	1,400~1,800cm^2	1,800cm^2>

형상 등과 같은 외형을 보고 판단한다. Table 4는 이 검사기준의 치수범위를 보여주고 있다.

부품의 모재를 보호하기 위하여 3.2절의 정비운전시간에서와 같이 Combustion liner를 정기정비시마다 입고 후, 재정비를 수행한다. 이때 정비공장에 입고 후, 우선적으로 코팅층을 제거한 후 NDT 방법에 의하여 외형검사를 수행하게 된다. 외형검사 후 재사용 여부에 따라 재생정비후 사용되게 된다. 주로 이때에 사용된 검사 데이터 기록을 이용하여 자료화 하였다. 검사방법은 주로 FPI(Fluorescent Penetrant Inspection)검사를 적용하였으며, 최종으로 구모델과 신모델의 Combustion liner 손상형태와 두 모델간의 차이점을 비교 분석하였다.

5. 실험결과

Table 1에서와 같이 구모델의 Combustion liner는 제작사에서는 EOH 8,000시간씩 5주기 재사용을 권고하고 있다. 그러나 실제 현장에서 사용한 결과를 분석해 본 결과 1, 2주기 사용 후에도 각각 12% 정도가 재사용을 못하고 폐기(Scrap)되고 있으나, 4% 정도는 사용 주기인 5주기를 지나 6주기까지 사용되었다. 또한 47%가 3, 4주기에 폐

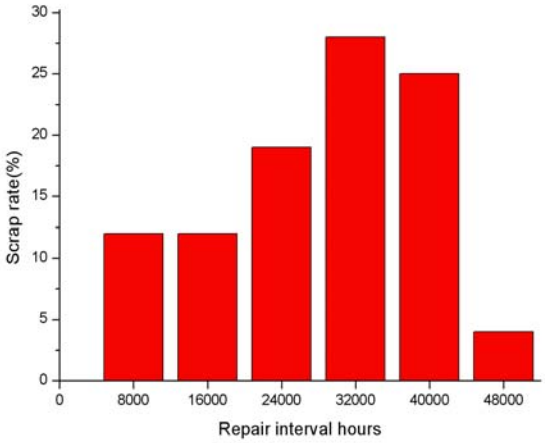

Fig. 3 Scrap rate according to repair interval hour

기되는 것으로 나타났다. Fig. 3은 구모델의 매 정비주기(EOH 8,000시간)마다 공장검사 후 부품의 폐기율을 나타내고 있다.

Table 5는 각 발전소별 Combustion liner의 손상 횟수를 정리한 표이다. 이 표를 통해서 구모델의 N발전소의 손상의 형태와 횟수가 많은 것을 알 수 있다. 좀 더 구체적으로 살펴보면 손상의 형태가 가장 심한 부분은 교체된다. 교체 손상은 손상부를 용접이나 다른 방법을 통해 정비가 불가능하여 부분품을 새로 제작하여 교체하는 방식을 말하는 것으로 부분품 제작이 불가능 할 때는 부품을 폐기해야 한다. 이런 교체 손상이 N발전소는 Combustion Liner 126개중에서 총 116건이 발생하고 있는 것을 볼 수 있다. 이에 반해 신모델의 S발전소와 B발전소는 교체와 같은 중대한 손상은 발생하지 않고 있다.

두 모델의 손상원인 분석에서 거의 유사하게 인접한 부품과 연결되거나 구속되는 부위에서 발생하는 마모부분으로 거의 전체의 절반 이상으로 54%를 차지하고 있다. 그 다음으로 구모델의 경우 부분적 교체정비에 의한 재생정비를 수행하는 교체부분이 20%를 차지하고 있다. 또한 신모델은 고열부의 응력에 의한 크랙이 39%를 차지하고 있다. 구모델은 손상의 분포가 다양하게 분포되어 있는 반면 신모델은 마모와 크랙이 손상의 대부분을 차지하고 있다.

Fig. 4는 구모델과 신모델의 Combustion liner의 손상원인에 따른 부품당 손상율을 보여주고 있다

Table 5 Research for damage of combustion liner

		Bulge	Crack	Wear	Corrosion	Replace	other
N사 (126 EA)	Forward	82	53	0	0	27	1
	Center	0	1	0	0	45	0
	After	0	6	0	0	44	0
	Cross Fire Tube	0	2	27	0	0	0
	Stopper	0	0	162	0	0	0
	Cooling Hole	0	8	0	0	0	0
	Spring Seal	0	0	130	0	0	0
S사 (14 EA)	Forward	50	8	0	0	0	0
	Center	0	0	0	0	0	0
	After	0	8	0	0	0	0
	Cross Fire Tube	0	10	0	0	0	0
	Stopper	0	0	25	0	0	0
	Cooling Hole	0	0	0	0	0	0
	Spring Seal	0	0	0	0	0	0
B사 (28 EA)	Forward	10	21	0	0	0	0
	Center	0	0	0	0	0	0
	After	0	1	0	0	0	0
	Cross Fire Tube	0	21	5	0	0	0
	Stopper	0	0	84	0	0	0
	Cooling Hole	0	0	0	0	0	0
	Spring Seal	0	13	0	0	0	0

크랙의 경우, 실제 정비시 문제가 심하게 발생하는 관통 균열이 발생하나, 운전중 Liner Part가 위험할 정도의 균열은 발생되지 않는 것이 특징이다. 그래프 상에서 볼 때 불안정한 연소온도 분포에 의한 손상인 부풀음은 구모델에서 많이 발생한다. 부풀음 현상은 정비하기가 제일 곤란한 손상원인중의 하나이다.

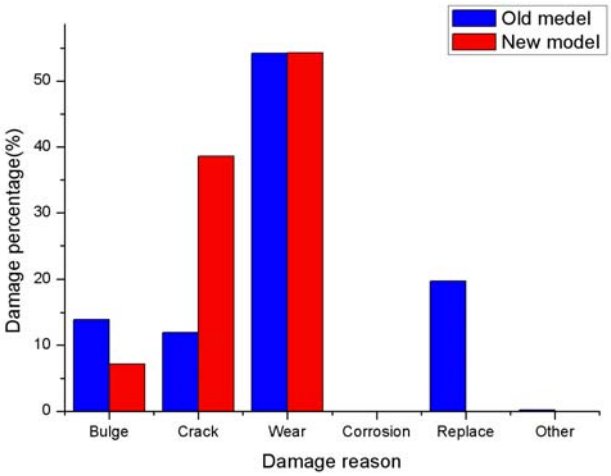

Fig. 4 Analysis for damaged area

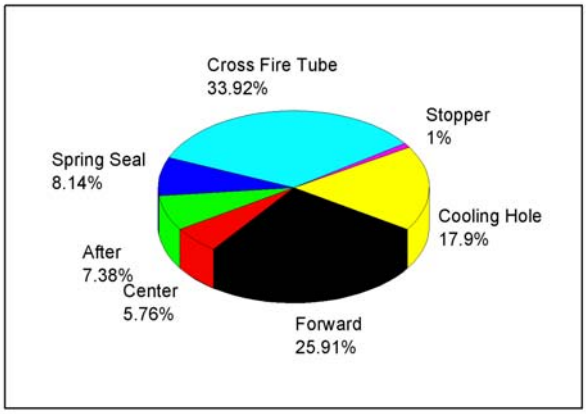

Fig. 5 Distribution of damaged areas

구모델이 신모델로 변경됨에 따라 TIT온도가 11℃(A:1,316℃, B:1,327℃) 상승되었음에도 불구하고, 부품의 취약부 개선(Modification)에 의하여 손상 개수와 정도는 많이 줄었다는 것을 알 수 있다. 일예로 교체손상은 한건도 없었으며, 부풀음의 경우 약 50% 감소된 것을 알 수 있다.

지금까지의 데이터 분석을 통하여 Combustion liner의 주요 위치별 손상형태는 Crossfire Tube, Forward 부분이 33.92%, 25.91% 순으로 많은 손상율을 보이고 있으며, 냉각을 효율적으로 수행하기 위한 Flow Sleeve를 고정하는 Stopper 부분이 1%로서 가장 작게 나타났다. Fig. 5는 Combustion liner의 각 주요 부분의 손상비율을 나타내고 있다.

5. 결 론

비파괴 검사를 통하여 가스터빈 Combustion Liner의 모델 변천에 따른 손상유형 분석으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

○ 전체적으로 볼 때 손상이 가장 적은 부위는 Flow Sleeve와 결합되는 Stopper이며, Crossfire Tube, Forward 순으로 손상이 많았다.

○ 구모델과 신모델 둘 다 마모가 가장 많은 손상 형태이다. 구모델은 마모 다음으로 교체와 정비시 까다로운 부풀음 현상을 많이 가지고 있다. 또한, 신모델에서는 크랙이 구모델의 두배 이상을 차지하고 있다.

○ TIT온도가 11℃(A:1,316℃, B:1,327℃) 상승되었음에도 불구하고 부품의 취약부 개선(Modification)에 의하여 부품의 전체적인 손상 개수와 정도는 많이 줄었다는 것을 알 수 있다.

○ 신모델에서의 크랙은 실제 정비시 문제시 될 정도로 심한 관통 균열이나, 라이너 부분이 분해 될 정도의 균열은 발생되지 않는 것이 특징이다.

후 기

이 연구는 지식경제부에서 주관하는 “전력산업연구개발” 과제의 재정적인 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) M. Kim, S. Park, S Yang, H. Choi, W. Ko, K. Song, 2007, “Analysis of Damage Trend for Gas Turbine 1st Bucket related to the Change of Models,” *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 31, No. 6, pp. 718~724.

(2) R. Viswanatan, 1989, "Damage Mechanism and Life Assessment of High Temperature Components," *American Society for Metals*, pp. 425 ~ 426.

(3) J. H. Bulloch, A. G. Callagy, 1999, "Assessment of a Premature Failure in Gas Turbine Part," *Engineering Failure Analysis*, pp. 411 ~ 426.

(4) M. R. Khajavi, M. H. Shariat, 2004, "Failure Analysis of Gas Turbine Blade," *Engineering Failure Analysis*, pp. 589 ~ 597.

(5) C. Seok, H. Kim, S. Kim, 2003, "Evaluation of the Ductile-Brittle Transition Behavior of Fracture Toughness by Material Degradation," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering* Vol. 20, No. 5, pp. 140~147.