

가스터빈의 운전유지비 절감을 위한 고온부품의 운영방안에 관한 연구 - 사례중심으로

유 원 주* · 조 지 운**

*한국동서발전(주) · **울산대학교 산업경영공학부

Study on Operational Plan of Hot Gas Parts for Cost Reduction of Gas Turbine with Cases Oriented

Wonju Yu* · Chiwoon Cho**

*Korea East-West Power Co., Ltd.

**School of Industrial Engineering, University of Ulsan

Abstract

The use of the gas turbine for power supply is increasing recently. Accordingly, the operation and maintenance cost of the gas turbine is gradually increasing and the various efforts to cut the cost are needed.

For an operation and maintenance cost saving of the gas turbine, reductions of the new purchasing charge and the reproduction repair cost of the hot gas parts are required through more effective operation and life management methods for the hot gas parts. The hot gas parts are the main parts of the gas turbine and they are replaced with the periodic. In this research, efficient operation and life management methods for the hot gas parts were presented with the cases. The methods were analyzed and verified based on real data and the cases for improving a lifetime were utilized in the field.

Keywords : Gas turbine, Hot gas parts, Operational plan, Life management.

1. 서 론

최근, 전력공급을 위한 대용량 가스터빈의 보급이 증가함에 따라 특히 주기적으로 교체해야 하는 고온부품(연소기와 터빈 내부에 설치된 부품)의 운전유지비용(Operation and maintenance cost)이 급격히 증가하여 원가절감 노력이 절실한 실정이다.

가스터빈 운전유지비의 주된 증가 원인을 살펴보면 가스터빈의 설비구성을 나타낸 <그림 1>의 터빈 회전익(회전날개, Blade)과 고정익(고정날개, Vane) 손상에 따른 교체비용 증가, 고온부품 재설계로 인한 구입비용 증가, 그리고 연료성분 변화에 따른 연소장치 손상 등을 꼽을 수 있다. 특히 우리나라에서는 가스터빈이 주로 전력소비가 많은 시간대를 중심으로 매일 운전과

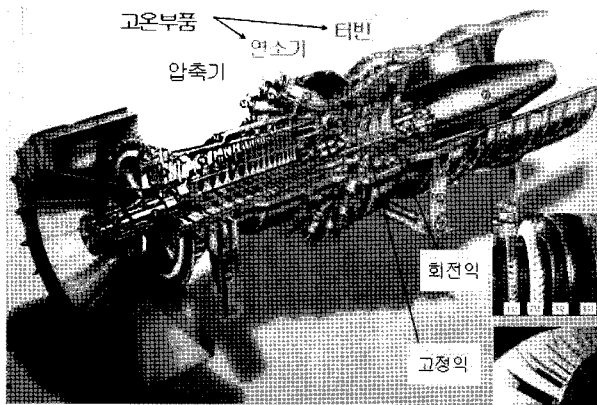
정지를 반복함으로써, 연속적으로 운전하는 다른 나라에서는 보기 힘든 다양한 손상이 발생되어 운전유지비 부담을 가중시키고 있다. 그러므로 전력산업의 치열한 경영환경에서 발전설비를 경제적으로 운영하기 위해서는 가스터빈 고온부품의 운영과 수명관리를 통한 새로운 시각의 원가절감 노력이 필요하다.

이와 관련된 주요 연구 분야 및 사례로는 산업설비 수명평가 및 수명연장 기술[8, 13], 가스터빈 고온부품의 수명과 성분특성 분석[3, 6, 10, 18], 재생정비 기술[1, 2, 9] 등이 있다. 이와 같이 가스터빈 고온부품의 수명평가와 수명연장에 관한 연구는 다수 있었으나, 이러한 연구결과를 바탕으로 실제 현장의 원가절감에 적용된 사례는 없었다.

† 교신저자: 조지운, 울산광역시 남구 대학로 102 울산대학교 산업경영공학부

M · P: 011-714-9428, E-mail: chiwoon6@mail.ulsan.ac.kr

2009년 1월 접수, 2009년 3월 수정본 접수, 2009년 2월 게재확정



<그림 1> 가스터빈의 설비 구성

본 연구에서는 기존 연구결과와 적용 사례 data, 그리고 경험 등을 바탕으로 보다 실적이 가능한 고온부품 운영 및 수명관리 방안을 사례와 함께 제시함으로써, 가스터빈 발전설비 운영자와 유지관리자들에게 고온부품 관리에 대한 새로운 방향의 원가절감 가능성을 제공하고자 한다.

운영 측면에서는 고온부품의 수명소비를 줄이기 위한 설비운전 방안과 재고관리 방안을 제시하였고, 수명관리 측면에서는 효과적인 운영을 위한 수명관리 방안과 수명연장의 경제성 평가방법 등을 사례와 함께 제시하였다.

2. 가스터빈 고온부품의 운영 및 관리

2.1 고온부품의 수명결정 지표

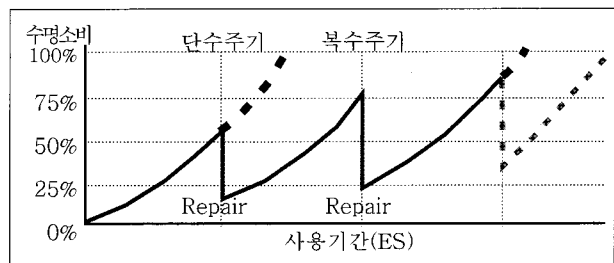
가스터빈 고온부품이란 연소기와 터빈 내부에 설치된 부품을 말하며, 일반적인 발전설비와는 달리 연소가스가 직접 접촉하는 고온의 조건에서 운전되므로 이러한 고온부품은 일정시간 사용 후 주기적으로 교체해야 하는 특징이 있다. 따라서 제작사는 그 중요성을 설비 사용자에게 알리기 위하여 수명소비를 결정하는 계산 방법과 교체 및 점검주기 기준을 제공하고 있다.

주로 많이 사용되는 등가 기동횟수(ES : Equivalent Start)는 SIEMENS사에서 제시하는 가스터빈 고온부품의 소비된 수명을 계산하는 방법으로, 주로 매일 운전과 정지가 반복되거나 간헐적으로 운전되는 설비에 주로 적용한다[15]. ES는 실제의 기동횟수와 부품수명에 영향을 미치는 요인들을 환산계수로 전환하여 점검주기를 정하는 지표인데 계산식은 식 1과 같고 관련된 주요 수명 소비요인들은 <표 1>에 나타나 있다.

$$ES = ((SS \times SF) + FA + (TL \times TF) + LC) \times FF \quad (1)$$

<표 1> ES 요인 및 환산계수

기호	단위	내 용	환산계수
SS	회수	정상기동	1
SF	-	기동시간 환산계수 (Start Factor)	Normal(20분이상): 1 Inter. (10~20분): 10 Fast (10분이하): 20
FF	-	연료 가중치 (Fuel Factor)	Natural Gas : 1.0 Distillate Oil : 1.3 Crude/Residual : 1.8
FA	회수	기동실패 (Fired Abort)	1
TL	회수	Trip 및 부하차단	1
TF	-	Trip 및 부하차단 환산계수 (Trip Factor)	51%~100% Load: 20 31%~ 50% Load: 14 16%~ 30% Load: 7 Up to 15% Load : 4
LC	-	Load Change 환산계수	76%~100% Load: 6 51%~ 75% Load: 4 26%~ 50% Load: 2 20%~ 25% Load: 1



<그림 2> 고온부품의 점검주기

위의 식 1을 통해 알 수 있듯이 가스터빈 고온부품의 수명은 일반적으로 기동횟수에 비례하지만, 고온부품의 온도를 급변하게 하는 기동방법, 출력변화, 그리고 정지 시 부하, 즉 운전온도에 더 많은 영향을 받는다. 예를 들면, 운전 중 출력 급변 시에는 수명소비가 6배까지 증가하며, 정상적인 정지가 아닌 고출력에서 급격한 부하차단이 일어날 경우 20배의 수명소비가 발생하게 된다.

2.2 고온부품의 점검 주기

일반적으로 고온부품의 점검 주기는 <그림 2>와 같이 단수주기와 복수주기로 나눈다.

단수주기 운영은 고온부품을 한번(한 주기 혹은 cycle)만 사용하고 폐기하는 형태의 운영방식이다. 다시 말하면 이들 부품을 설비에 설치한 후, 안전운전이 허용하는 범위에서 최대로 사용하고 교체하여 폐기하는 것이다.

일반적으로 발전소 내에 부품을 공통적으로 사용할 설비가 없는 경우, 부품의 재생정비가 어려운 재질일 경우, 또는 재생정비가 비경제적일 경우에 채택된다.

<표 2> 고온부품 복수주기 운영기준(SIEMENS사)

품 명		운영기간 (ES)		사용 횟수
		재생정비	교 체	
연소실	노즐	400	1,600	4
터빈 고정익	1단	800	1,600	2
	2단	800	1,600	2
	3단	800	1,600	2
	4단	800	3,200	4
터빈 회전익	1단	800	1,600	2
	2단	800	1,600	2
	3단	800	1,600	2
	4단	1,600	3,200	2

부품 관리가 매우 간편하다는 장점이 있으나, 부품 폐기량의 증가로 비경제적일 수 있다.

복수주기 운영은 부품을 적절한 기간의 범위까지 사용하고 정비후 재사용하는 형태의 운영방식이다. 재사용 회수는 제작사에 따라 다르나 대체로 1~5회의 범위이다. 복수주기 운영에서는 부품의 점검 및 재생정비가 필수인데, 설비 사용량을 기준으로 이를 일정한 주기로 시행해야 하며 다음 한 주기운전을 안전하게 할 수 있는가를 확인하는 것이 주된 목적이다. 복수주기 운영에서는 점검과 재생정비를 거치게 됨에 따라 부품마다 수명이 같지 않을 수 있으므로, 이들 부품의 수명을 관리하고 적기에 양호한 부품을 조달할 수 있도록 별도의 부품의 운영과 수명관리가 필요하다.

<표 2>는 고온부품별 복수주기 운영기준의 사례를 보여주는 것으로 일반적으로 재생정비를 거쳐 2~4회 재사용함을 알 수 있다[15]. 연소실 노즐의 경우, 본 운영기준에 의하면 4회 재사용할 수 있다.

2.3 복수주기 운영을 위한 재생정비

2.3.1 재생정비 기술

재생정비 기술은 고온부품 관리의 경제성에 큰 영향을 미치는데, 재생정비 기술이 발전하면 폐기되는 부품이 감소하고 재사용 횟수가 증가하여 전체적인 수명이 늘어난다. 일반적으로 손상을 입은 고온부품 재생정비를 위해서는 다음과 같은 분야의 기술이 요구된다[19].

- 재질의 금속조직 및 강도 복구 기술
- 두께 육성 기술(Heavy Section 및 얇은 벽두께)
- 균열 접합 기술
- 설계 Profile(Aerodynamic) 복구기술
- Re-coating 기술

2.3.2 재생정비 가능성과 수명평가

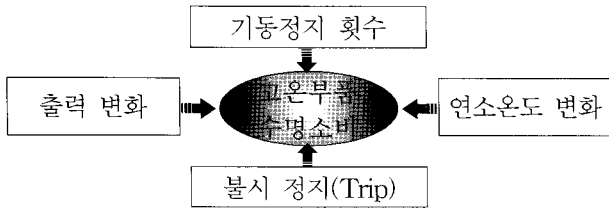
가스터빈 고온부품을 재사용하기 위해서는 사용된 부품의 신뢰성 확인을 위한 수명평가가 선행되어야 한다[16]. 일반적으로 이러한 수명평가는 제작사의 부품 교체 주기를 기준으로 실시하게 되는데, 이를 통해 부품의 재생정비 가능 여부와 다음 교체 주기까지 사용 가능성 등을 판단하게 된다.

기존의 잔존 수명 계산을 위한 수명평가 방법은 크게 해석적 방법, 파괴적 방법, 그리고 비파괴적 방법으로 구분한다. 해석적 방법은 각 부위에서의 온도 분포와 열응력 해석 등을 실시하고 이를 바탕으로 재료 특성에 따른 컴퓨터 시뮬레이션으로 수명을 계산하는 방식이며, 비파괴적 방법은 표면조직 상태 등을 비교하여 재료 수명의 진행정도를 평가하는 기술이며, 파괴적 방법은 금속조직을 절단하여 재료특성을 시험하는 방식이다. 고정익의 경우는 열팽창에 의한 압축이나 인장응력을 많이 받으므로 미세조직 검사를 통한 해석적 방법 등을 주로 사용하나, 회전익의 경우는 회전에 의한 원심력이 작용하므로 Creep 수명예측[16, 17] 방법들이 주로 적용된다.

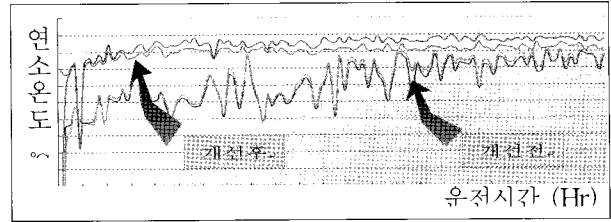
2.4 고온부품의 폐기 판정

단수주기 운영에서는 해당 부품을 설계기준 만큼 1회 사용하고 폐기하지만, 복수주기 운영에서는 점검주기 시에 부품의 종합적인 상태를 분석하여 폐기 또는 재생정비 가능 여부를 판정한다. 일반적인 재생정비 가능 여부의 판단기준은 재생정비 과정을 거쳐 해당 부품의 상태가 다음 한 주기를 안전하게 사용할 수 있는가이다. 그러나 고온부품의 재생정비에는 손상형태가 다양하므로 완전한 정비가 불가능한 부품이 발생될 수 있으며, 손상된 부품이 재생정비 불가로 판단되면 다음 복수주기 운전을 포기하고 폐기로 처리된다.

부품의 폐기판정은 기술 수준이나 정비방법 등에 따라 달라질 수 있는데, 일반적인 폐기 여부의 판단 기준은 재질의 금속 조직적 상태, 두께, 구조적 강도 상태 등이다. 고온부품의 경우, 조직 입자의 심한 부풀음, 기준치 이상의 Carbide 적층, 산소 침투로 인한 모재의 산화, 냉각 Hole 벽두께의 불규칙, Root 부위의 Hair Crack 이상의 균열 등의 손상이 나타날 때 재생정비 한계에 이른 것으로 판단하여 폐기 판정한다[19].



<그림 3> 고온부품 수명소비 요인



<그림 4> 개선전·후 연소온도 비교

3. 원가절감을 위한 운영방안 연구

3.1 수명소비 감소 운전방법 적용

가스터빈의 운전유지비 증가는 고출력 시 고온영역에 장시간의 노출, 기동정지 반복에 따른 열 피로 누적, 연료 성분 변화와 연소 조건 변화에 따른 저주파 피로 현상 등으로 인해 고온부품이 손상되어 교체하는 비용에 기인하는 경우가 대부분이다. 따라서 고온부품이 제작사의 설계수명 이전에 손상되는 문제점을 줄이고 수명을 연장하기 위한 방안으로 <그림 3>과 같이 고온부품의 운전특성에 맞는 수명소비 요인을 분석하여 현장설비 운전 및 유지관리에 적용하였다.

분석되어진 수명소비 요인들은 <표 1>의 고온부품 수명 결정지표들과 거의 동일하게 나타났으며, 결국 효율적인 설비 운전 방안은 식 1에 나타난 수명소비 요인을 줄이도록 하는 것을 의미한다. 즉 가스터빈 내부의 온도변화를 최소화하여 수명소비를 감소시키는 방안으로, 이를 위해서는 기동정지 횟수를 줄이고 운전시 지나치게 연소온도가 높게 유지되지 않도록 적절히 조정하여 고온부품의 온도가 급변하지 않도록 운전하는 것이 중요하고, 운전 중 발생할 수 있는 불시 정지 요인을 분석하여 제거하는 것이 필요하다.

기동정지 횟수의 감소를 위해서는 각종 보조설비의 신뢰도를 높게 유지하여 기동 시 오동작에 의한 기동실패 요인을 줄이고, 기동 후 가능하면 일정시간 이상 안정되게 운전하여 기동정지 횟수와 발전출력 변화를 줄여야 한다.

실적용 사례로, 출력변화를 줄이기 위해 새로운 제어 기술을 적용하여 연소온도를 일정하게 조정하였다. 즉, 출력에 따라 연소 공기량과 연료량이 빠르고 정확하게 조절되도록 연소온도를 일정하게 유지하도록 개선하였다. 그 결과 <그림 4>와 같이 개선 전에는 출력 변동 시 연소온도가 급격히 변했으나 개선 후에는 출력 변동 시 연소 공기량과 연료량이 빠르게 조절되어 완만하게 연소온도가 변하는 효과가 있었다. 연소온도 변화 감소에 따라 고온부품의 재질변화와 Coating의 열변형이 감소되고 결과적으로 고온부품의 수명 전 손상도 많이 감소하여 원가절감에 크게 기여하였다.

3.2 복수주기의 효율적인 재고관리 방안

국내 대부분의 가스터빈 발전설비들은 전력수요가 많은 시간에 매일 기동 및 정지가 이루어지며, 대체로 1~3년 주기로 고온부품을 교체하고 재생 정비하는 특징을 가지고 있다. 이러한 복수주기 운영체계에서 효율적으로 고온부품을 운영하기 위해서는 경제적, 또는 보관상의 문제로 가능하면 소량의 재고를 운영할 필요가 있다. 즉, 다량의 재고를 확보할 경우에는 많은 경비가 소요되고 넓은 보관 장소가 필요하며, 또한 보관기간이 길어짐에 따라 보관 중 손상되거나 하자 보증기간이 도래하는 문제점이 발생하게 된다.

그러나 가스터빈의 고온부품 재고량은 다른 형태의 발전설비 부품과 달리 운전 시간에 따라 소모성이 매우 크고 손상사고에 대비하여 일정량의 확보가 반드시 필요하다. 따라서 설계수명에 따라 주기적으로 발생하는 정상적인 교체 수요 및 사고 시의 긴급 수요에 대처할 수 있고, 또한 원가 절감에도 기여할 수 있는 고온부품의 효율적인 재고관리 방안이 필요하므로, 그 방안을 다음과 같이 제시한다.

첫 번째, 가스터빈 설비의 보유대수에 상관없이 비상 상황에 대비하여 현재 운전 중인 부품들을 언제라도 교체 설치할 수 있도록 최소한 전체 부품 1 set가 발전소 내에 반드시 준비되어 있어야 한다. 두 번째, 신품 구매 시 약 1년이 소요되는 일정을 감안하여 기존 예비품 1 set와는 별도로 고온부품 교체주기 이전에 예비품이 도착하도록 구매 주문을 미리 진행하여야 한다. 즉, 창고에 재고로 쌓아두지 않고 점검주기 또는 교체주기에 맞춰 예비품이 도착하도록 구매 일정을 적절히 조정하는 것이다. 세 번째, 점검주기에 교체된 고온부품을 재생 정비할 경우 정비기간이 약 3~5개월 소요되는 일정을 감안하여 기존 예비품 1 set와는 별도로 점검주기 전에 정비되어 현장에 도착하도록 재생정비 일정을 조정하여야 한다. 즉, 신품조달과 유사한 방식으로 창고내 보관 재고를 최소화하면서 안정적인 재고를 유지할 수 있도록 재생정비 일정과 재고량을 연관시켜 효율적으로 관리하는 것이 필요하다. 이를 기반으로 안정적인 설비운영을 위해서 요구되는 고온부품의 재고량을 <표 3>과 같이 정리하였다.

<표 3> 고온부품의 요구 재고량 (단위 : set)

가스터빈 설비대수	제조사 제시기준 재고량	효율적인 재고관리를 통한 필요 재고량
n = 1~2	n × 2	1 = (S = 1) + (N* or R* = 1)
n = 3~4		1 = (S = 1) + (N* = 1) + (R* = 1)
n > 4	n × 1.5	(S = 1) + (N* = n × 0.5) + (R* = 1)

n : 가스터빈 대수 S : 재고품 수량
 N : 신제품주문 수량 R : 재생정비 수량
 * : 주문 중이거나 재생정비 중인 고온부품으로 실제 창고에 보관되는 재고는 아님

위의 <표 3>에서와 같이 일반적으로 제작사가 제시하는 고온부품의 재고량은 가스터빈 대수에 의해 결정되는데, 가스터빈 대수가 1~4대일 경우에는 설비 대수의 2배, 그리고 가스터빈 대수가 4대를 초과할 경우에는 설비 대수의 1.5배만큼 확보하도록 제시한다[19]. 그러나 앞에서 설명한 재고관리 방안을 적용하면, 가스터빈 대수가 1~2대일 경우, 비상시에 대비할 재고 1set와 점검주기 일정에 맞추어 교체하기 위해 주문한 신제품 1set 또는 재생정비 후 입고 될 고온부품 1 set를 필요로 하게 되어 창고에는 실제 1set의 재고만을 보관하게 됨으로써 기존의 방식보다 1/2 이하의 재고량으로도 효율적인 운영이 가능하다.

가스터빈 대수가 3~4대일 경우에도 비상시에 대비할 재고 1 set를 보관하고, 점검주기 일정에 맞추어 교체할 신제품을 1set 주문하며, 점검 후 재생 정비하여 입고될 부품 1set을 반출하여 정비토록 운영하면 이때에도 창고에는 1set의 재고만 보관하게 되어 매우 효율적인 재고 운영이 이루어질 수 있다.

가스터빈 대수가 4를 초과할 경우에는 비상시에 대비할 재고 1 set와 점검주기 일정에 맞추어 교체할 신제품을 설비대수의 1/2 만큼 주문하고, 점검 후 재생 정비할 부품을 1 set이상 반출하여 정비토록 운영하면 이때에도 창고에는 최소의 재고만 보관하게 되어 매우 효율적인 재고 운영이 이루어질 수 있다.

이러한 방안은 설비의 특성과 운전패턴에 따라 조금씩 달라질 수 있으나, 이 경우에도 창고에 최소한의 재고만이 유지되도록 하는 방안을 연구하여 적용하는 것이 가장 경제적인 재고운영 방법이 될 것이다.

실적용 사례로, 가스터빈 4대를 운영하는 OO복합 발전소는 효율적인 재고관리 방안을 적용하여 <표 4>와 같은 경제적인 효과를 얻었다. 즉, 제작사 권고 기준으로 재고를 관리할 경우(set당 10억원 적용)에는 재고 총 금액이 약 640억원이지만, 변경된 재고관리 방안을 적용하여 실제 90억원의 재고만을 보관하고 동시에 70억원의 재생정비 및 90억원의 신제품구매를 진행함으로써 전체적으로 약 390억원의 경제적 효과를 거둘 수 있었다.

<표 4> 효율적인 재고관리 사례 (단위 : set)

고온부품명	제조사 제시기준 재고량	개선된 재고량			비 고
		저장 중	구입 중	재생 중	
1단 회전익	8	1	1	2	제조사 제시량 대비 1/4로 운영
1단 고정익	8	1	1		
2단 회전익	8	1	1	2	
2단 고정익	8	1	1		
3단 회전익	8	1	1	1	
3단 고정익	8	1	2		
4단 회전익	8	1	1	2	
4단 고정익	8	2	1		
합계	64	9	9	7	

3.3 수명연장 재생정비를 통한 원가절감

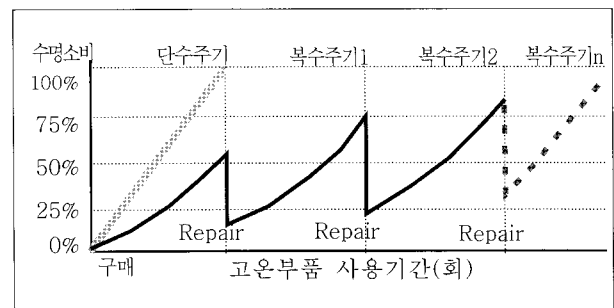
3.3.1 수명연장의 경제성 평가방법

가스터빈 고온부품의 복수주기 운영에 있어서는 재생정비 과정이 필요하므로 이에 대한 비용과 경제성 평가가 이루어져야 한다. <그림 5>는 고온부품 운영주기와 그에 따라 발생하는 비용을 나타낸 것이다.

우선 단수주기 운영에서는 해당 부품을 설계수명(X1)의 100% 만큼 1회 사용 후 폐기하게 되고 따라서 단위 수명에 대한 비용은 구매 비용 자체가 됨으로 식 2와 같이 간단하게 얻어진다.

여기서 X1 · T1은 단수주기에서 사용된 총 수명을 의미하며 이 경우 1회에 설계 수명의 100%를 모두 사용하였으므로 1이다.

$$C(0) = \frac{P_0}{X_1 \cdot T_1} \quad (2)$$



구 분	단수주기	복수주기1	복수주기2	복수주기n
설계수명(%)	X ₁	X ₂	X ₃	X _{n-1}
사용횟수 ^회	T ₁	T ₂	T ₃	T _{n-1}
발생비용(원)	P ₀	R ₁	R ₂	R _n

P0 : 구매비용 R : 재생비용

<그림 5> 고온부품 운영주기와 발생비용

복수주기 2회 운영의 경우 총 발생 비용은 T1에서의 신규 부품 구매 비용과 T2, T3에서의 수명연장을 위해 필요한 재생정비 비용을 합친 P0+R1+R2이다. 따라서 단위 수명에 대한 비용은 다음 식 3과 같이 얻어진다.

여기서 분모는 총 사용 수명이며, 사용 수명이 길어질수록 경제성은 높아진다. 여기서 X1 · T1는 단수주기에서 사용한 수명(%)을 의미하고 X2 · T2는 재생정비 후 복수주기 1st에서 추가로 사용된 수명(%)을 의미하며 X3 · T3는 복수주기 2nd에서 추가로 사용된 수명(%)을 의미한다.

$$C(2) = \frac{(P_0 + R_1 + R_2)}{(X_1 \cdot T_1 + X_2 \cdot T_2 + X_3 \cdot T_3)} \quad (3)$$

또한, 재생정비를 계속하여 복수주기가 반복될 경우 C(n)는 식 4와 같이 일반화되어 표현될 수 있다.

$$C(n) = \frac{P_0 + \sum_{n=1} (R_n)}{\sum_{n=1} (X_{n+1} \cdot T_{n+1})} \quad (4)$$

그리고 복수주기 운영에서 폐기 판정된 부품이 항상 된 재생정비 기술로 수명연장의 가능성이 있다면, 추가 수명연장에 따른 경제성 평가 기준은 다음 식 5와 같이 정의할 수 있다.

$$\frac{[P_0 + \sum_{n=1} (R_n)]}{\sum_{n=1} (X_{n+1} \cdot T_{n+1})} \times (1 + \text{폐기율}) \geq \frac{R_e}{X_e \cdot T_e} \quad (5)$$

여기서 Re : 수명연장 비용, Xe · Te : 연장수명

즉, 복수주기에서 추가로 수명을 연장할 경우, 총 수명기간에 소요된 비용보다 연장되는 수명기간에 발생되는 비용이 적어야 경제성이 있다는 것이다.

3.3.2 폐기 고온부품 수명연장 사례

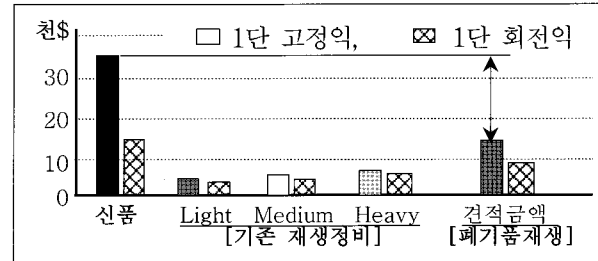
가. 폐기 고온부품 보유현황

00복합화력 가스터빈 4기는 '97년도에 준공하여 10여년간 운전하면서 매년 약 150~200억원의 고온부품을 구매하여 유지정비에 사용하고 있다. 다음의 <표 5>는 현재 보유중인 폐기 고온부품 현황을 나타낸 것이다.

따라서 경과연수에 따라 수명이 소진된 부품이 다량 발생되고, 특히 고온부(1단 고정익 및 회전익)의 경우에는 열화에 의한 손상으로 제작사 설계 수명전에 폐기 판정을 받는 경우가 많아 창고에 보관해야 할 폐기 고온부품이 <표 5>와 같이 증가됨으로써 적절한 처리방안의 필요성이 대두 되었다.

<표 5> 00복합화력 폐기 고온부품 보유현황

부품명	고정익			회전익		
	보유 수량	설계수명 (ES)	사용실적 (ES)	보유 수량	설계수명 (ES)	사용실적 (ES)
1 단	126개	1,600	1,208	703개	1,600	482
2 단	65개	1,600	1,306	275개	1,600	688
3 단	21개	1,600	1,852	328개	1,600	1,125
4 단	없음	3,200	-	없음	3,200	-



<그림 6> 수명연장을 위한 재생비용 비교

나. 수명연장에 따른 경제성 평가

일반적인 고온부품은 재생정비시 소요 단가의 기준을 손상정도에 따라 Light/Medium/Heavy 등급으로 구분하여 정비가 이루어지지만, 폐기 판정된 부품은 재생이 가능하더라도 손상 정도가 더 크므로 Extra Heavy 등급으로 분류되어 정비에 많은 비용이 소요된다. <그림 6>과 같이 제작사와 재생정비 회사들이 제시한 수명연장을 위한 재생정비 비용을 분석한 결과, 폐기 고정익은 신품 구매비용 대비 41%의 비용으로 수명연장이 가능한 것으로 분석되었으나, 폐기 회전익은 재생시 신품 구매비용 대비 59%의 비용이 소요되는 것으로 나타났다.

예를 들어, <표 2>에서 설계수명이 복수주기 2회 (1,600ES) 사용 기준인 1단 고정익 신품 1 set를 10억원에 구매한 후 1회 사용(800ES, 50% 수명)하고, 2억원에 재생정비하여 다시 1회(800ES, 50% 수명)를 더 사용한 경우, 이를 폐기하지 않고 추가적인 1회 사용(800ES, 폐기율 0% 적용)을 위한 수명연장에 대한 경제성은 식 5에 의해 다음과 같이 평가된다.

$$\frac{[신품금액+재생비용]}{(800+800)ES} \times (1 + \text{폐기율}) \geq \frac{\text{수명연장 비용}}{800ES}$$

$$\frac{[10억원 + 2억원]}{100\% \text{ 사용}} \times 1 \geq \frac{\text{수명연장 비용}}{50\% \text{ 연장}}$$

∴ 추가 수명연장 비용 ≤ 6억원

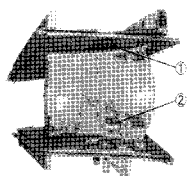
즉, 복수주기로 이미 2회 사용한 폐기 고온부품의 1주기 추가 수명 연장을 위한 재생비용은 신품단가(10억원)의 60% 이하가 되어야 하며, 신품의 안정성을 감안하면 그 이하가 되어야 경제성이 있는 것으로 판단된다. 그러

므로 <그림 6>의 결과와 같이 경제성이 보다 높은 폐기 고정익에 대해 우선 수명연장을 위한 경제성 평가를 실시하고, 폐기 회전익은 향후 신상품가가 상승하거나 또는 새로운 정비기술 개발에 따른 비용 하락으로 경제성이 확보될 경우 수명연장을 시행하는 것이 타당하다.

다. 재생정비 후 수명평가

수명연장 재생정비를 위한 폐기 고정익은 각단마다 샘플을 선정하여 <그림 7>과 같이 재질상태에 대한 경도시험과 SUMP (Suzuki's Universal Micro Print)법에 의한 미세조직 검사를 실시하였다[20, 21]. 1, 2단 고정익 ECY768 재질[11]은 발전설비 고온부에 주로 사용하는 Co기 초내열 합금으로, 사용전 원상태의 조직을 살펴보면 거친 1ry Carbide와 미세 2ry Carbide가 조직 결정체 경계면 주변에서 관찰되고, 조직 결정체내에서는 변형되지 않은 결정체와 미세 2ry Carbide가 관찰된다. 재생전 폐기품 상태에서는 조직 결정체 속에 많은 2ry Carbide 미세 침전물과 축적된 결함이 많이 발견되었는데, 이는 높은 온도에서 장시간 운전시 나타나는 경년열화 현상이다. 폐기 부품은 정도 측정에서도 그 값이 비교적 높게 나타났으나 재생 과정을 통하여 재질을 복원한 조직에서는 미세 침전물이 거의 보이지 않고 축적된 결함이 거의 사라졌으며, 정도도 재생전보다 10~30% 정도 낮게 개선되었다.

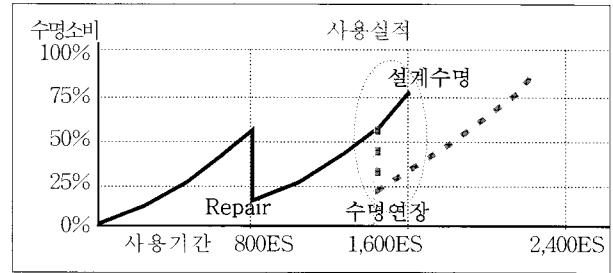
제작 및 재생정비 전문회사인 MHI사에서 재생과정을 통하여 복원한 고온부품에 대해 수명을 평가한 결과, <그림 8>과 같이 약 75%의 잔존수명이 있으며 추가적인 1주기 사용이 충분히 가능한 것으로 평가되었다[20, 21, 22]. <표 5> 및 <그림 8>과 같이 기존의 1, 2단 고정익은 통상 설계수명 대비 약 75~80% 정도를 사용하였으나, 재생정비 후 1주기 추가 사용 시에는 전체적으로 설계수명 대비 약 125%를 사용하게 된다.



구 분	①	②
폐기품	364 HV	440 HV
재생후	321 HV	322 HV
신 품	300 HV(경도단위)	

	신 품	폐기 부품	폐기품 재생후
저 배 율			
고 배 율			

<그림 7> 1단 고정익 재생전.후 재질상태 비교



<그림 8> 수명연장 재생정비 후 잔존수명

<표 6> 부품별 효과산출(단위 : 백만원)

부품명	수량 (set)	기존 비용			추가 재생비	절감액
		구입	폐기율 (%)	재생		
1단	3	3,389	10	647	810	1,477
2단	2	2,106	10	532	512	1012
3단	1	768	10	101	102	480
합 계			8,169		1,424	2,969

라. 수명연장 결과 및 효과

가스터빈의 운전유지비 절감방안으로 수명이 이미 소진되었거나 수명전에 과도한 손상으로 인해 폐기 판정을 받아 창고에 보관 중이던 가스터빈 고온부품중 경제성과 안정성이 확인된 폐기 고정익에 대해 수명평가를 실시하고, 최신 기술의 열처리 및 손상부 복원과 Coating 작업을 활용하여 수명연장 재생정비를 시행한 결과 다음과 같은 만족할 만한 성과를 거두었다. 정비 단가 절감을 위해 국제입찰을 통하여 MHI사에서 약 1년간 시행한 재생정비를 통해 폐기 고정익 6 set(1단 3set, 2단 2set, 3단 1set)의 수명연장을 성공적으로 완료하였다.

수명연장을 통해 기존의 복수주기 2회 사용(1,600ES) 후 폐기되던 고온부품이 복수주기 3회 사용(2,400ES)으로 1회의 추가 사용(800ES)이 가능하게 되었고 이에 따른 효과를 식 5에 근거하여 계산한 결과를 <표 6>에 요약하였다.

이 경우 수명연장에 대한 경제성은 다음과 같이 평가될 수 있다.

$$\frac{[\text{신품금액} + \text{재생비용}]}{(800+800)\text{ES}} \times (1 - \text{폐기율}) \geq \frac{\text{수명연장 비용}}{800\text{ES}}$$

$$\frac{8,169\text{백만원}}{100\% \text{ 사용}} \geq \frac{\text{수명연장 비용}}{50\% \text{ 연장}}$$

∴ 경제적인 수명연장 비용 ≤ 4,493백만원

즉, 추가적인 재생정비 비용은 1,424백만원으로 위 조건을 만족하고 있어 재생정비를 통한 1회 연장 사용에

대해 경제성이 있다고 판단되었고, 전체적으로 경제적인 수명연장 한계 비용과 재생정비에 실제 소요된 비용의 차(4,493백만원-1,424백만원)인 약 30억원 정도의 신품 구입비용 대비 원가 절감효과가 있는 것으로 나타났다.

3.4 기타

실제로 발전회사에서 표준적인 설비 운영만을 통해 가능한 수명연장에는 한계가 있으며, 또한 제작사는 특정 운전조건 및 환경을 고려하여 설비를 설계하지 않기 때문에 설계조건과 운전형태가 다를 경우 다양한 형태의 손상이 발생될 수 있다. 만약 연속운전에서 장기간의 수명이 보장되도록 설계 되었다면, 매일 기동정지를 하는 운전형태에서는 열팽창 반복에 의한 비틀림 현상으로 균열이 발생하거나 설계와는 다른 형태의 수명전 손상[20]이 발생할 수 있다. 그러므로 손상된 부품의 형태를 정확히 분석하여 현재 설비의 운전조건에 맞도록 고온부품의 설계변경을 요구하는 것이 필요하다.

하지만 가스터빈 고온부품은 외국회사에서 기술을 독점하고 있으며, 공급계약에 있어서도 우월적 지위를 가지고 가격과 수명에 대한 하자보증 조건을 제작사에서 결정하는 것이 일반화되어 있다. 그러나 여기에는 발전회사 입장에서 고온부품의 점검주기 동안에도 수명에 대한 보증을 받지 못하는 치명적인 문제점이 있다. 따라서 제작사가 운전특성에 따른 손상형태에 대해 보다 적극적으로 설계개선에 임하도록 하기 위해서는, 동종업체간의 경쟁을 유도하여 신품 구매 계약시 수명전 손상에 따른 하자 보증조건을 명확히 제시하고, 가능한 하자보증 기간을 최소한 고온부품 점검주기 또는 수명기간 동안 유지되도록 하여야 한다.

수명보증 조건 개선 사례로, 00복합화력의 경우 '97년 건설이후 출공 제작사 위주로 가격과 수명보증 조건 등이 결정 되어왔으나, 2005년부터 기존 수명보증 조건의 심각성을 인식하고 동종업체의 경쟁을 유도하여 기존의 계약들보다 기간 측면에서 2배로 늘어난 수명보증을 받음으로 인해 공급가격 대비 약 30%의 절감효과가 있었다. <표 7>은 제작사와 부품 공급계약시 하자 보증조건을 연장하여 개선한 내용을 나타낸 것이다.

<표 7> 가스터빈 고온부품 하자보증 조건 비교

구 분	기존	개선	비 고
보증수명(ES)	400	800	선도래 적용 *점검주기: 800ES 수명주기: 1600ES
보증기간(월)	24	48	

<표 8> 하자보증조건 개선전후 효과 비교

고온부품명	기존실적(ES)	예상효과(ES)	비 고
1단 회전익	482	800이상	40% 연장
2단 회전익	688	800이상	14% 연장

기존에는 점검주기 수명이 800ES이지만 수명전 400ES에서 손상이 발생하더라도 하자보증을 받지 못하였으나, 계약조건 변경후에는 기존보다 2배로 연장된 기간 동안 보증을 받을 수 있게 되어 수명전 손상부품 감소에 따른 원가 절감효과를 기대할 수 있다. <표 8>은 하자 보증조건을 개선할 경우 기대할 수 있는 수명 연장효과를 요약한 것이다.

특히 수명전 손상이 심한 터빈 1, 2단 회전익의 경우, 1단 회전익은 40% 이상, 2단 회전익은 14% 이상의 수명연장 효과가 있었다. 즉, 수명보증 기간이 연장됨에 따라 수명전 손상에 대해 보증을 받을 수 있는 조건이 성립되고, 실제 설비를 안정적으로 사용할 수 있는 기간이 연장되어 원가절감 효과를 거두게 되었다.

4. 결론 및 향후 연구과제

일반적으로 고온의 조건에서 운전되는 특성으로 인해 주기적인 점검과 교체가 필요한 가스터빈 고온부품의 운전유지비 절감을 위해서는 점검주기나 복수주기 사용 횟수의 연장이 필요하지만 무엇보다 설비의 안정적인 운전이 우선되어야 하므로, 이러한 목적을 달성하기 위해서는 설비의 운영과 수명관리에 대한 이론적 기반을 정립하고 설비의 상태를 반영한 효율적인 관리 모델을 만드는 것이 필수적이다.

고온부품의 효율적인 운영과 수명관리 방안을 실제 현장에 적용하고 그 사례를 분석해본 결과, 고온부품의 수명전 손상 감소, 수명연장, 그리고 원가절감 등의 효과를 확인할 수 있었다. 그러므로 향후 다양한 방향으로 고온부품 운영과 수명관리 기술을 개발하고 적용한다면 발전회사의 경영수지 개선에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

발전회사들은 향후 가스터빈 고온부품의 운영 및 수명관리 방안과 더불어 재생정비 장기계약을 통한 물량 확대, 동일 기종 고온부품의 공동 계약을 통한 단가 인하 유도, 그리고 고가 부품의 공동 저장을 통한 예비품 공유 방안 등의 추진이 필요하다고 본다. 더 나아가 국산화를 통한 구매 비용절감과 기술자립도 향상을 위한 노력 또한 수반되어야 할 것으로 본다. 그러나 비용절감 과정에는 반대급부로 품질확보 문제가 수반됨으로

가스터빈 고온부품 관리자는 품질확보를 위한 기술력 향상과 성능보증을 위한 전략수립에 보다 많은 관심과 노력이 요구된다.

5. 참 고 문 헌

[1] 강신호, 최희숙, 양성호, 이정혁 (2006), “대용량 가스터빈 고온부품을 위한 최신정비기술”, 연세대학교 공학박사학위논문.
 [2] 강신호, 최희숙, 김대은 (2003), “니켈기 초합금 소재 고온부품의 재생정비기술” 대한기계학회 추계학술대회 논문집.
 [3] 공유식 (2001), “ISM에 의한 항공기용 가스터빈 재료의 크리프 수명예측”, 한국해양공학회지 제15권 제3호, p 43~48.
 [4] 권진오, 윤기봉, 백운봉, 이해무 (1997), “터빈 케이싱의 균열성장 수명평가방법의 연구”, 대한기계학회 추계학술대회논문집 A, p 1058~1064.
 [5] 김현수, 서명원, 김영진, 허성강, 홍경태 (1997), “터빈 로터의 수명예측을 위한 프로그램 개발”, 대한기계학회 추계학술대회논문집 A, p 244~249.
 [6] 남승훈, 박종화, 김종엽 (2002), “Retirement For Cause 개념에 의한 가스터빈 디스크 수명의 평가”, 대한기계학회논문집 A 26(2), p 365~373.
 [7] 박노광 (2004), “고온소재 특성 및 제조공정”, 서울대학교 발전설비시스템 기술교육과정 교재.
 [8] 백운봉, 박종서, 이해무, 윤기봉 (1997), “터빈설비의 정밀진단 및 잔여수명평가”, 대한기계학회 추계학술대회논문집 A, p 1036~1042.
 [9] 송오승, 윤우생 (1995), “용사 코팅층의 내마모 수명 향상에 관한 연구”, 항공산업기술연구소 연구지 제5집, p 101~113.
 [10] 에릭플러러, 하정수, 현중섭, 장석원, 정훈 (2000), “가스터빈 블레이드용 IN738LC의 열기계 피로수명에 관한 연구”, 대한기계학회 추계학술대회논문집 A, p 188~193.
 [11] 이정석 (2003), “Co기 초합금 ECY768에서 응고조직 및 탄화물 형성거동” 창원대학교 공학석사학위논문.
 [12] 임종순, 허승진, 정경렬, 이규봉, 유명면 (1990), “발전용 터빈 로우터의 수명예측을 위한 열응력 해석”, 대한기계학회 논문집 14(2), p 276~287.
 [13] 정순호 (1992), “터빈부품의 수명평가와 주요재료 특성”, 대한기계학회지 32(4).

[14] 창원대학교 (2002), “가스터빈 재료 열화평가에 관한 기술개발”, 전력산업 연구개발사업 보고서.
 [15] 한국동서발전(주) (2006), “가스터빈(W501F) 고온부품 손상내용 분석”, 기술정보 제19호.
 [16] 한전KPS(주) GT정비기술센터 (2005), “가스터빈 고온부품 수명평가 기술”.
 [17] 한전 전력연구원 (2005), “가스터빈 블레이드 수명평가 기술”.
 [18] 현중섭, 김범신, 강명수, 하정수, 이영신 (2002), “터빈 블레이드의 열응력해석 및 열피로 수명예측”, 산학연 연합 심포지엄, 대한기계학회 편.
 [19] ITP사 (2008), “가스터빈 성능 및 고온부품 관리”, ITP 발전설비고급 교육과정.
 [20] MHI사 (2007), “Shop inspection & test report”.
 [21] MHI사 (2007), “Quality assurance for hot gas path parts”.
 [22] SERMATECH사 (2003), “Presentation of rejuvenation heat treatment and role in the repair”.

저 자 소 개

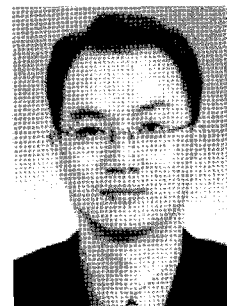
유 원 주



울산대학교 산업대학원에서 석사 학위를 취득하였으며, 현재 한국동서발전(주) 과장으로 재직 중이다. 관심분야: 6시그마, 발전설비 운영, 발전설비 신기술 개발, 복합 발전설비 운영

주소: 울산광역시 남구 남화동 1번지 한국동서발전(주)

조 지 운



미국 Iowa State University에서 산업공학 박사 학위를 취득하였으며, 현재 울산대학교 산업경영공학부 교수로 재직 중이다. 관심분야: BPM, SCM, RTE, PI, Material Handling

주소: 울산광역시 남구 무거2동 산29 울산대학교 산업경영공학부