

150 MW급 가스터빈 저압 1단 회전익 교체주기 연장 가능성 연구

임종호, 이재현*[†]

현대그린파워, *한양대학교 기계공학부

Extension Feasibility on Replacement Cycle of Rotor Blade Equipped for Low Pressure First Stage in a 150 MW Gas Turbine

Jong-Ho Lim, Jae-Heon Lee*[†]

Hyundai Greenpower, Dangiin 343-831, Korea

*School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received November 8, 2013; revision received November 18, 2013)

초록 : 국내 A 복합발전소에서 운전 중인 150 MW급 가스터빈 저압 1단 회전익의 교체주기 연장가능성을 다각적으로 모색하였다. 제작사가 추천한 24,000 등가운전시간 이상을 사용한 저압 1단 회전익의 외관검사, 열차폐코팅 제거 후 모재의 표면검사 및 균열검사를 각각 실시하였다. 또한 제작사별 150 MW급 가스터빈의 교체주기를 비교 분석하였다. 제작사가 추천한 24,000 등가운전시간 이상이 경과하여 27,000 등가운전시간을 운전한 저압의 외관을 검사한 결과 냉각홀 부위에 다수의 균열이 관찰되었다. 그러나 열차폐코팅을 제거한 상태에서 실시한 모재의 표면검사에서는 균열이 거의 관찰되지 않았으며, 모재까지 진행된 일부 미세 균열에 대해서는 절단면 검사를 통하여 균열깊이가 기능에 영향을 미치지 않는 수준임을 확인하였다. 따라서 본 연구대상 가스터빈 저압 1단 회전익의 교체정비주기는 현행 24,000 등가운전시간에서 3,000 등가운전시간의 연장이 가능할 것으로 보인다. 또한 연구대상 저압 1단 회전익에 대하여 제작사가 추천한 교체주기는 타제작사 1단 회전익 교체주기의 2/3 수준으로 짧게 설정되어 있어 교체주기 연장이 가능할 것으로 판단된다.

ABSTRACT : In order to extend a hot gas parts replacement cycle of a gas turbine, blade row 1 from low pressure turbine, which has a significant impact on the cycle, has been selected from stored set after one cycle use. Taking into account the status of the first stage moving blade in LP turbine operated more than 27,000 equivalent operating hours(EOH) and the replacement cycle in the same type of gas turbine, the replacement of the high temperature components installed on the GT, a study subject, can be extended from 24,000 to 27,000 EOH.

Key words : rotor blade equipped for low pressure first stage(저압터빈 1단 회전익), equivalent operating hours(등가운전시간), replacement cycle(교체주기)

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

국내 A 복합발전소 가스터빈은 입구온도 1,300℃의

150 MW급으로서 2단 연소시스템이 적용된 재열가스터빈이며 고압 1단 회전익 및 고정익과 저압 1단 회전익은 단결정으로 제작된 특징이 있다. 가스터빈 저압 1단 회전익은 1,280℃의 고온영역에서 운전되기 때문에 주기적으로 교체가 필요하고 등가운전시간으로 저압 1단 회전익 교체를 시행하고 있으며, 제작사 추천교체주기는 24,000 등가운전시간이다.

저압 1단 회전익의 구매 가격은 회전익 한개 당 대략 2

[†] Corresponding author
Tel. +82-2-2220-0425; Fax. +82-2-2220-4424
E-mail address: jhlee@hanyang.ac.kr

천만 원으로 값이 비싸며, 저압 1단 회전익의 개수는 88개로써 17억 6천만 원 정도 된다. 이렇게 고가의 부품이 제작사에서 추천한 24,000 등가운전시간, 대략 2~3년의 주기로 교체하여야 하고 전량 제작사로부터 구입하고 있기 때문에 막대한 비용의 외화가 소요되고 있는 실정이다. 따라서 고온부품을 제작 공급하고 있는 제작사에서 추천하는 교체주기가 적정한지를 확인할 필요가 있으며, 24,000 등가운전시간 이상을 사용한 부품의 손상 상태를 점검하여 교체주기 연장이 가능한지를 확인해 볼 필요가 있다.

1.2 연구내용

2006년 10월 장착되어 2009년 6월 교체되어 약 27,000 등가운전시간을 사용한 가스터빈 6호기 저압 1단 회전익 1개를 임의로 선정하여 외관 상태를 현미경을 이용하여 균열, 산화, 코팅 박리상태를 검사하고, 금속 및 열차폐코팅을 제거하여 회전익의 모재 표면상태 및 모재 균열검사를 실시하였다. 또한 복수의 성능이 공인된 타제작사의 150 MW급 가스터빈과의 운전특성 비교 및 교체주기를 비교 분석하여 교체주기 연장 가능성을 논의하였다.

2. 가스터빈 저압 1단 회전익

2.1 설계특성

Fig. 1은 본 연구 대상인 A 복합발전소의 가스터빈 및 저압 1단 회전익의 사진이며 고압 터빈 입구에 설치된 연소실에서 연소하여 고압 1단 회전익을 회전시키고, 고압

터빈을 통과한 가스가 고압터빈과 저압터빈 1단 사이에 설치된 연소실에서 2차로 연소시켜 가스의 온도를 올려 저압 1~4단 회전익을 회전시키는 2단 연소 구조로 되어 있는 재열 가스터빈의 형태이다. 또한 고압 회전익과 고정익, 저압 1단 회전익의 금속 조직이 단결정으로 제작되었다. 단결정 조직의 경우 등방향 조직이나 일방향 조직보다 크리프 강도와 열피로 내구성이 우수하고, 고온산화 특성이 우수한 장점이 있으나, 제작이 어렵고 재생 정비가 어렵다는 단점을 가지고 있다.

2.2 운전특성

가스터빈은 압축기, 연소기, 터빈으로 구성되어 있는데, 고온부품(hot gas parts)이라 함은 연소기 부품을 포함하여 연소기 이후의 터빈 고정익과 회전익, 터빈 내부의 열차폐막(heat shield) 등의 각종 부품을 말한다. 일반적으로 가스터빈 고온부품의 교체정비주기는 고온부품 중 가장 중요한 부위의 부품을 기준으로 결정되며, 보통 최고 고온영역에서 회전되는 저압 1단 회전익에 의해 결정된다.

2단 연소 시스템으로 구성되어 있는 A 복합발전소 가스터빈은 고압터빈 회전익 입구 온도가 1,140℃, 저압터빈 1단 회전익 입구 온도가 1,280℃로 운전된다. 고압터빈과 저압터빈 회전익은 압축기 출구 공기를 외부에서 냉각시켜 약 350℃의 공기로 냉각된다.

A 복합발전소 가스터빈에서 가장 고온영역에서 회전하고 있는 저압 1단 회전익은 1,300℃급으로 분류될 수 있으며, 실제로 1주기 사용한 부품의 상태를 보면 고온산화 및 열화, 냉각홀 균열 등이 많이 발생되고 있다.

2.3 교체주기 결정방법

고온부품의 교체주기 결정방법은 실제 사용시간 또는 기동정지 횟수 중 선도래를 적용하는 미국계열과 기동정지 횟수를 등가운전시간으로 환산하여 적용하는 유럽계열의 두 가지 방식이 있다. 등가운전시간은 가스터빈 고온부품의 수명관리와 정비주기 설정을 위해 실제운전시간과 기동횟수, 부하조건 등 열화발생요인 등의 보상시간을 합하여 계산된다. 등가운전시간으로 계산하는 방식은 실제 사용시간 또는 기동횟수 선도래 방식보다 운전시간

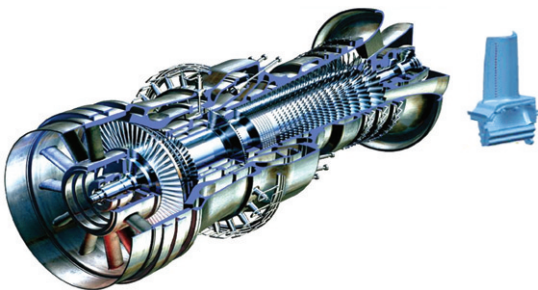


Fig. 1 Gas turbine and low pressure first stage rotor blade for the present study

150 MW급 가스터빈 저압 1단 회전익 교체주기 연장 가능성 연구

이 짧으며, 어느 방식이 더 적절한가는 실제 사용 후의 부품 상태, 재생회수율, 재생정비 기술의 한계, 경제성 분석 결과 등에 따라 다르다. 가스터빈 저압 1단 회전익은 등가운전방식으로 교체주기를 결정하며 제작사에서 추천한 교체주기는 24,000 등가운전시간이다.

3. 가스터빈 저압 1단 회전익의 상태평가

3.1 평가방법

1주기 사용 후 보관 중인 가스터빈 저압 1단 회전익 1개의 외관 상태를 40배 현미경을 이용하여 각 부위별 균열, 산화, 코팅 박리상태를 검사하였다.

회전익 외관검사 시에 측정된 표면 균열과 고온산화가 실제 모재에 어느 정도까지 진전되었는지, 모재에 어느 정도의 영향을 주었는지 확인하기 위하여 금속 및 열차폐

코팅을 제거하고 회전익의 모재 표면 및 균열 상태를 검사하였다.

3.2 평가진행

3.2.1 외관검사

Fig. 2는 저압 1단 회전익 외관의 40배 현미경을 이용한 검사 결과이며 각각 점검부위 결과는 아래와 같다.

Fig. 2(a)는 입구부의 외관을 검사한 결과이며 주된 손상 형태는 냉각홀 균열과 코팅 표면 미세 균열이며, 냉각홀이 서로 연결된 균열은 상하 방향으로 발생되었다. Fig. 2(b)는 날개바깥쪽(suction side)의 외관을 검사한 결과이며 열차폐코팅이 적용되지 않은 냉각홀 주변에서 코팅 균열이 발생되었다. Fig. 2(c)는 날개안쪽(pressure side)의 외관검사 결과이며 날개 전면에 열차폐코팅이 도

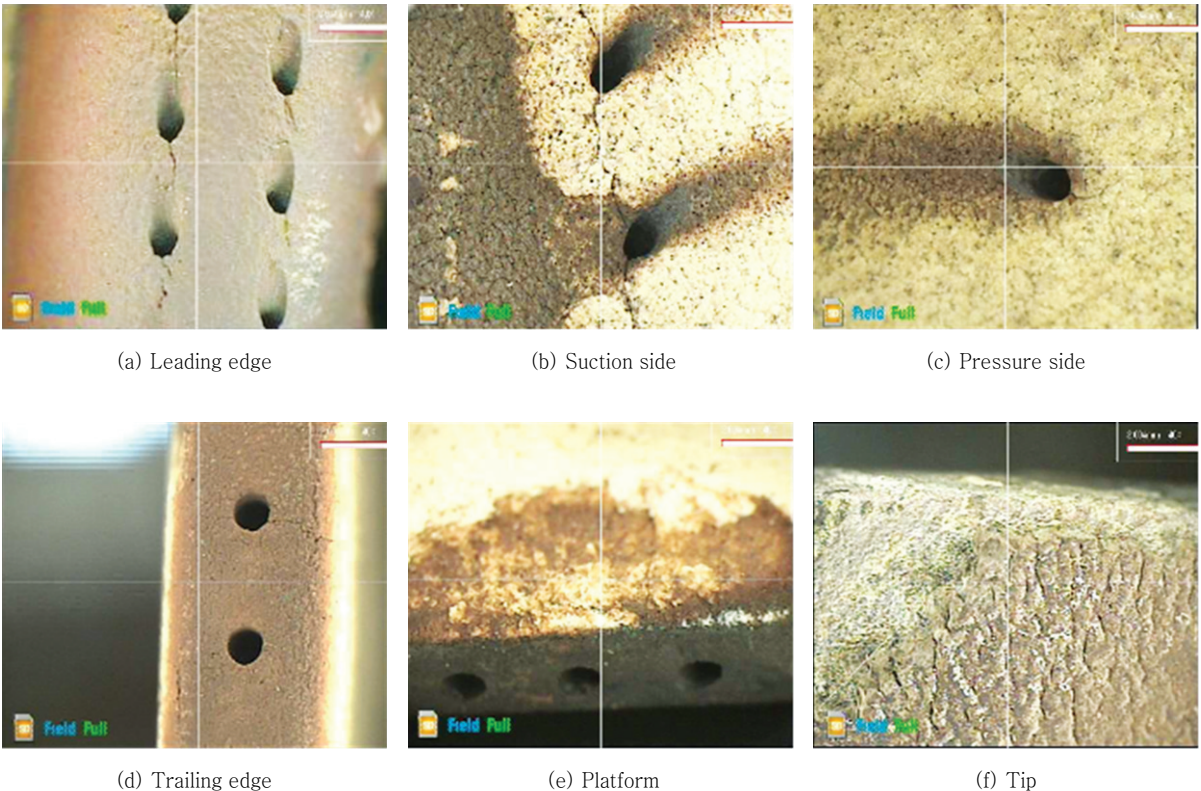


Fig. 2 The picture of visual inspection

포되어 있어 대체로 양호한 상태였으며, 최상부 냉각홀에 균열이 발견되기도 했으나, 미세한 크기였다. Fig. 2(d)는 출구부(trailing edge)의 외관검사 결과이며, 팁 부위가 고온산화로 인한 감육 현상이 거의 공통적으로 나타났으며 간혹 상부 측에 가공된 냉각홀에 미세 균열이 발견되었으나, 미세한 크기였다. Fig. 2(e)는 플랫폼(platform) 부위의 외관검사 결과이며 열차폐코팅이 박리 탈락된 부위의 금속코팅 부위에서 균열이 불규칙적으로 나타났다. Fig. 2(f)는 팁(tip) 부위의 외관검사 결과이며 덮개판(cover plate) 부위에 고온산화, 용융, 균열 등의 손상이 다수 발생되었다.

3.2.2 모재 표면검사

Fig. 3은 저압 1단 회전익의 열차폐코팅 제거 후 모재의 현미경 검사 결과이며 각각 점검부위 결과는 아래와

같다

Fig. 3(a)는 입구부의 모재 표면검사 결과이며 열차폐코팅 제거 후와 같이 입구부의 냉각홀 주변에 잔류 균열은 없었으며, 금속코팅이 완전히 제거되지 않은 부위에는 코팅 균열의 흔적이 남아 있으나, 모재에는 영향이 없었다. Fig. 3(b)는 날개바깥쪽의 검사 결과이며 냉각홀 주변의 홀 간 연결 균열은 대부분 제거되었으며 일부 냉각홀에 미세한 균열 흔적이 남아 있으나, 일반적인 자국이 간간이 이어지는 형태이므로, 금속코팅 균열 사이로 표면이 산화된 흔적이다. Fig. 3(c)는 플랫폼 부위의 검사결과이며 열차폐코팅을 일부 제거했을 때에는 외관 검사 시에는 발견되지 않았던 축직각 방향 균열이 다수 발견되었고, 완전 제거 후에는 대다수의 균열이 제거되었으나, 플랫폼 표면에 일반적인 형태의 균열 흔적이 일부 남아 있는 상태였다. Fig. 3(d)는 출구부 검사 결과

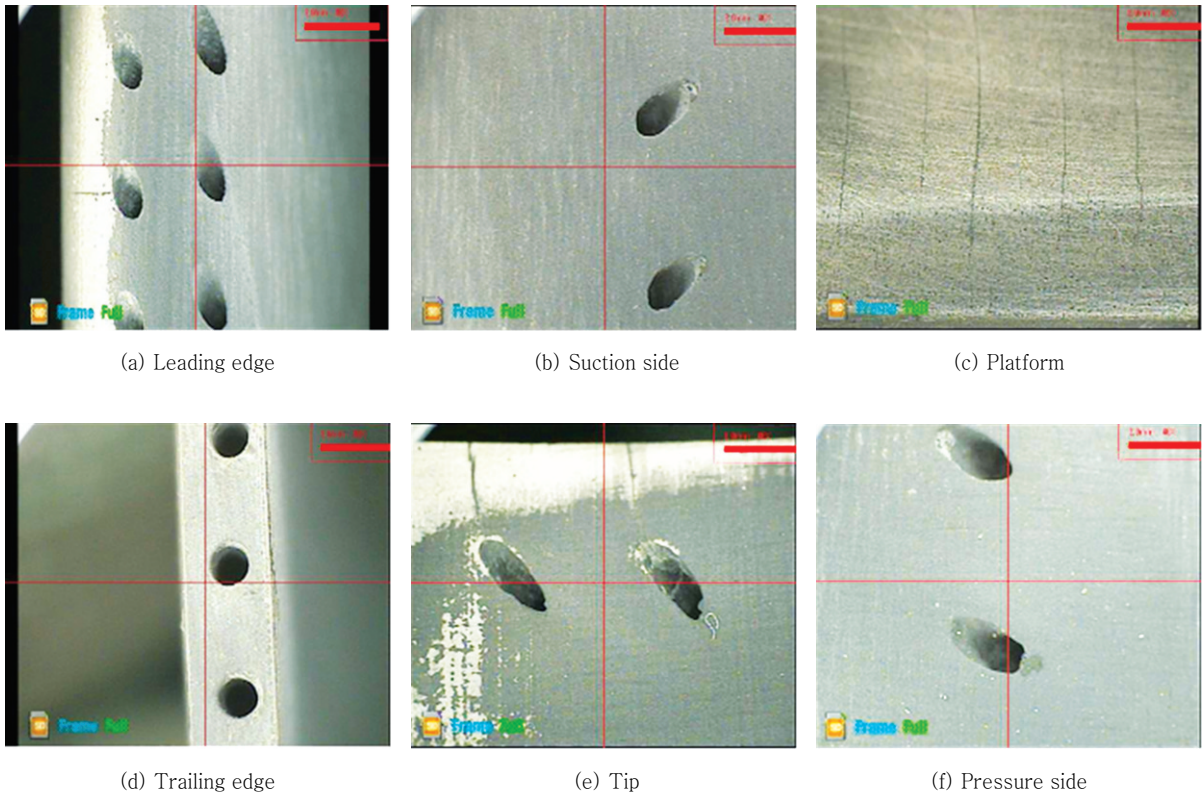


Fig. 3 The picture of microscopic inspection for base metal

며 열차폐코팅 제거 후 냉각홀 주변이나 모서리 부위에 균열 흔적이거나 모재 손상이 전혀 없었다. Fig. 3(e)는 팁 부위의 검사 결과이며 모서리에 균열이 발생되어 있는 상태였으며 저압 1단 회전익에서 공통적으로 발생하는 현상이며 정비 가능할 것으로 판단된다. 냉각홀 하부로 균열이 진전될 경우 재생정비에 한계가 있는데 검사 결과 균열은 발견되지 않았다. Fig. 3(f)는 날개안쪽의 검사 결과이며 표면 및 냉각홀 주변의 모재 상태는 양호하였다.

3.2.3 모재 균열검사

외관검사 시에 측정된 표면 균열이 코팅층과 모재층에 어느 정도 깊이까지 진전되었는가를 확인하고, 외관검사 시에 도출된 취약 부위의 균열 양상을 정밀 분석하였다.

입구부와 날개바깥쪽 냉각홀 부위의 금속코팅 부위에 발생된 균열을 분석한 결과, 냉각홀이 모재 표면을 관통하는 모서리 부위에 미세 균열이 간혹 발견되고 있으나, 샌드 블라스팅으로 쉽게 제거 가능한 정도인 것으로 확인되었다. 날개바깥쪽 냉각홀 부위에서는 냉각홀이 서로 연결되는 금속코팅 균열이 발생되었는데, 대부분 금속코팅과 모재 경계면까지 발생되어 있고, 모재에는 약 0.03 mm 정도 영향을 준 것으로 보이므로, 샌드 블라스팅만으로도 제거 가능할 것으로 판단된다. 입구부 이외의 부위를 검사한 결과, 날개바깥쪽 냉각홀 금속코팅 부위에 많은 미세 균열이 발생되어 있고, 모재 부위까지 진전된 균열은 발생되지 않았다.

3.3 평가결과

외관검사 결과와 열차폐코팅 제거 후 모재 표면의 상태를 서로 비교하여 코팅층 균열 양상이 실제 모재 표면에서 어느 정도의 크기인지 확인하고, 부위별 코팅층 균열의 크기가 모재에 미치는 영향의 정도를 확인하였다.

입구부의 축방향 균열은 열차폐코팅 제거 후 완전히 제거되었고, 입구부의 루트 부위 냉각홀 균열은 입구부의 루트 부위 최하부 냉각홀에서 균열이 시작되어 날개 필렛방향으로 진전되어 있는 균열이 발생되었다. 그러나 남아 있는 균열의 깊이가 매우 작고 길이가 짧아진 상태였다. 날개바깥쪽의 하부 균열은 외관검사 시 날개바깥쪽 냉각홀의 최하부에 길이 약 6~8 mm의 균열이 발견되었는데, 열차폐코팅 제거 후 이 부위의 상태를 확인하였다.

회전익의 열차폐코팅 제거 후 냉각홀 하부 균열이 완전 제거되었으며 일부 균열 흔적이 남아 있으나, 깊이가 얇고 일반적인 형태를 띠고 있으며, 간간이 이어지는 형태이므로 균열이 아닌 산화 흔적으로 판단되며 이 정도의 흔적은 재생정비과정에서 시행되는 샌드 블라스팅으로 완전 제거될 것이다. 길이 36 mm의 코팅 균열이 열차폐코팅 제거 후 일정한 폭과 깊이를 가진 일반적인 형태의 산화 흔적으로 남아 있으며 이 정도의 흔적은 재생정비과정에서 시행되는 샌드 블라스팅으로 제거될 것으로 보인다. 팁 부위의 균열은 재생정비가 가능한 것으로 알려져 있으나, 냉각홀 하부로 균열이 진전되었을 경우에는 재생정비에 제약 조건이 될 수 있어 냉각홀 하부로 진행

Table 1 Comparison of replacement period between gas turbine manufacturer

Manufacturer	Replacement period
Alstom	24,000 EOH [EOH = Operation Hours + (Start Time × 20)]
GE	First of 24,000 Operation Hours and 900 time Start
Westing House	First of 24,000 Operation Hours and 800 time start
Siemens	25,000 EOH [EOH = Operation Hours + (Start Time × 10)]
EPRI	$EOH = \sqrt{Operationhours^2 + (20 \times Start\ time)^2}$

Table 2 Comparison of EOH between gas turbine manufacturer with various operation hour per 1 start-up

Manufacturer	Operation hour per 1 start-up					
	10	15	20	23	25	30
Alstom	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000
GE	27,000	31,500	36,000	38,700	40,500	40,000
Westing House	24,000	28,000	32,000	34,400	36,000	40,000
EPRI	32,199	33,600	33,941	33,859	33,734	33,282
Siemens	37,500	35,000	33,333	32,576	32,143	31,250

된 코팅 균열은 열차폐코팅 제거 후 제거되었으며 일부 회전익에 흔적이 남아 있으나, 균열이 아닌 표면산화 흔적으로 확인된다. 플랫폼 부위는 열차폐코팅이 박리된 부위에 균열이 발생되어 열차폐코팅 제거 후 확인한 결과 균열 흔적이 남아 있었으나 일반적인 형태였으며, 금속코팅의 균열로 인해 모재 표면이 산화된 것이다. 출구부 냉각홀 주변의 미세 균열은 열차폐코팅 제거 후 완전 제거되었다.

4. 교체주기 연장 가능성 검토

4.1 교체주기 산정방법 비교

기동회수당 운전시간 즉 운전패턴의 변화에 따른 제작사별 교체주기를 비교 검토하였다. 입구온도 1,300°C급의 가스터빈 중에서 Siemens, Westinghouse, GE, 단결정부품에 적용하는 EPRI의 계산 방식을 연구대상 가스터빈에서 사용 중인 등가운전시간 계산방식으로 환산하여 비교하였다.

Table 1은 불시정지, 부하변화 등의 세세한 변수를 무시하고 운전시간 및 기동횟수만 고려하여 동일한 조건으로 단순화하여 비교 계산한 교체정비 주기이다.

Table 2는 연구대상 가스터빈의 2004년~2005년 평균 운전패턴은 1회 기동 시 약 23시간 운전하였고, 이러한 운전패턴을 기준으로 다른 교체기준과 비교한 결과이다. 연구대상 가스터빈의 경우 동급 타 기종 가스터빈보다 입구 온도가 낮고 단결정부품을 사용하였음에도 불구하고 타 기종에 비해 교체주기가 약 2/3 정도 짧은 것으로 확인되었다.

5. 결론

국내에서 운전 중인 150 MW급 가스터빈 저압 1단 회전익의 교체주기 연장 가능성을 다각적으로 모색하였다. 최고온부로서 교체주기 결정의 지표가 되는 가스터빈 저압 1단 회전익을 대상으로 제작사가 설정한 1주기 이상을 사용한 상태에서 외관검사, 열차폐코팅 제거 후 모재의 표면검사 및 균열검사를 각각 실시하였다. 또한 동급 타 기종 가스터빈과의 교체주기와 비교 분석을 통하여 아래와 같은 결론에 도달하였다.

제작사가 설정한 24,000 등가운전시간 이상이 경과하여 27,000 등가운전시간을 운전한 연구대상 가스터빈의 저압 1단 회전익의 외관을 검사한 결과 냉각홀 부위에 다수의 균열이 관찰되었다. 그러나 열차폐코팅을 제거한 상태에서 실시한 모재의 표면검사에서는 균열이 거의 관찰되지 않았으며, 모재까지 진행된 일부 미세한 균열은 기능에 영향을 미치지 않을 것으로 판단되어 연구대상 가스터빈의 고온부품의 교체주기는 현행 24,000에서 최소 3,000 등가운전시간은 연장될 수 있을 것으로 보인다.

또한 타제작사의 동급 가스터빈과 교체주기를 비교 분석한 결과 연구대상 가스터빈 저압 1단 회전익의 교체주기는 타제작사 1단 회전익에 비하여 2/3 수준으로 짧게 설정되어 있다. 타 기종과의 비교를 통해서도 교체주기 연장 가능성을 확인할 수 있다.

참고문헌

1. EPRI, 2008, Combustion Turbine Repair Guidelines : Alstom GT24 - Volume 13 : Alstom GT24 Model 1016362.