

가스터빈 내부 냉각계통 발화에 의한 고온부품 손상의 현상학적 고찰

A Phenomenological Review on the Damage of Hot Gas Parts caused by Explosion of Gas Turbine Cooling System

유 원 주*·이 승 현*

Won-Ju Yu*·Seong-Hyun Lee*

Abstract

Gas turbines generating power operate in high temperature condition and use natural gas as fuel. For that reason, there are many cases where damage is done to the hot gas parts caused by the high temperature and many accidents occur like gas explosions, then various efforts are needed to maintain the hot gas parts and prevent accidents. It is difficult to find the root causes of damage to the hot gas parts from the gas explosion caused by gas leakage through rotor cooling air line from fuel gas heat exchanger during the shut down.

To prevent gas turbine from damage, removal of gas leakage inside of gas turbine is required by purging the turbine before firing, improving the fuel gas heating system and installing alarm systems for detecting gas leakage from stop valve to turbine while the gas turbine has shut down.

Keywords : Gas turbine, Hot gas parts, Gas explosion, Cooling Air

1. 서 론

가스터빈 발전설비는 고온의 연소 조건에서 운전될 뿐만 아니라 주로 천연가스를 연료로 사용하기 때문에, 고온에 의한 내부 부품 손상과 가스 발화에 의한 대형사고 위험이 상존하므로 이를 근본적으로 방지하기 위한 노력이 필요하다.

* 한국동서발전(주)

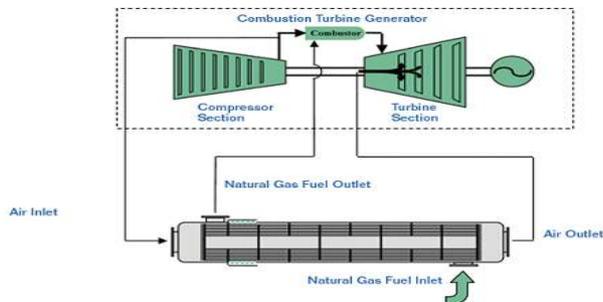
가스터빈에서 주된 손상원인을 살펴보면, 설비 구성을 나타낸 <그림 1>과 같은 연소실과 터빈실 내부 고온부품에서 발생하는 고온에 의한 열화 손상과 외부 이물질에 의한 회전체 충격 손상, 재질 선택과 설계오류에 의한 균열 등을 들 수 있다[1, 2, 4, 7, 11]. 또한 가스터빈 복합 발전설비에서 연료가스에 의해 일어날 수 있는 사고 원인을 살펴보면, 2010년 2월 미국 Connecticut주 발전소에서 발생한 폭발사고와 같이 주로 연료가스 누설에 의한 발화와 폭발이라 할 수 있다.

가스터빈 고온부품 손상에 대해 원인을 연구한 사례로는, 가스터빈 고온부품 손상사례 파악[1, 2, 11], 가스터빈 소재 특성[4, 7] 등이 있다. 이와 같이 가스터빈 고온부품의 손상에 대한 연구사례는 다수 있으나, 터빈 내부로 연료가스가 누설된 발화에 의해 가스터빈 고온부품이 손상된 사고를 바탕으로 원인을 규명하고 연구한 사례는 없었다.



<그림 1> 가스터빈 내부부품 구성

따라서 본 연구에서는 <그림 2>와 같이 연료가스와 터빈 내부 냉각용 공기가 직접 열교환하는 형식으로 구성된 00복합 가스터빈 발전설비에서, 각기 다른 시기에 발생된 고온부품 손상형태도 달라 발생당시 기존의 손상이론으로는 근본원인을 규명하지 못하였던 고온부품 손상사례에 대해 현상학적 고찰을 통하여 연료가스 발화와의 관련성을 명확히 규명함으로써, 연료가스 누설에 의해 발생할 수 있는 고온부품 손상과 설비 사고를 근본적으로 방지하기 위한 방안을 제시하고자 한다.



<그림 2> 압축공기와 연료가스 열교환기 구성

2. 가스터빈 고온부품의 손상 경향

가스터빈 설비에서 발생하는 손상의 분포를 살펴보면, J. Leafold가 1970~1979년 설비보험에 가입된 산업용 가스터빈 사고 240건을 정리한 <표 1>과 같이 다양하게 일어나고 있다. 그 중에서 가장 큰 비율을 차지하고 있으며, 실제 교체비용의 대부분을 차지하는 고온부품 손상에 대하여 이론적 배경을 살펴보고자 한다[1, 2].

<표 1> 가스터빈 부품별 손상 분포

손상부위		손상비율	비 고
터빈부	회전날개	29%	가장 많음
	고정날개	17%	
연소실과 가스배관		8%	
베어링		11%	
압축기 회전날개		8%	
열교환기, 배기가스 계통		6%	
기타		21%	

2.1 열화에 의한 소손

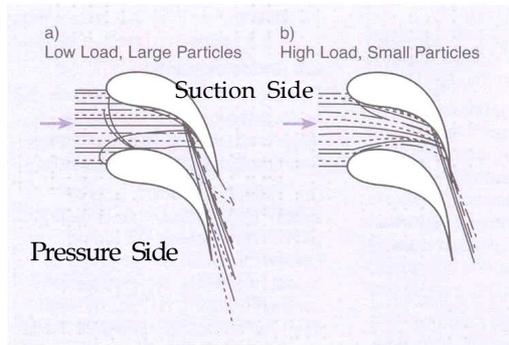
연소시 화염온도가 재질이 견딜 수 있는 온도를 초과하여 운전되거나, 모재를 냉각시키는 냉각 공기량 부족으로 인해 국부적으로 과열될 경우 과열부가 용융되는 손상이 발생하게 된다.

이러한 손상은 운전 조건이나 냉각 조건에 따라 서서히 발생할 수도 있지만, 재질이 사용 한계를 초과하거나 재질 자체결함, 제작결함 등의 부적합한 조건이 가중될 경우에는 짧은 시간에도 소손되는 손상이 발생할 수 있다.

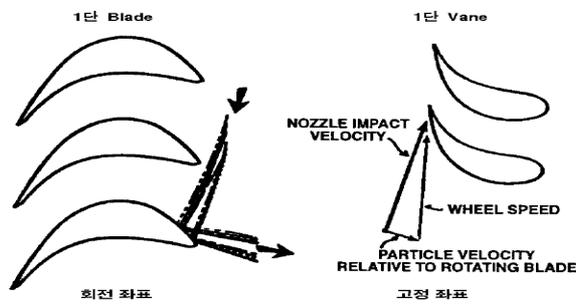
2.2 이물질 충격에 의한 물리적 손상

회전하고 있는 터빈으로 어떤 외부 유입물체가 통과하게 되면 회전 날개와 유입 물체와의 큰 속도차이 때문에 충격 손상이 발생된다[11].

터빈 입구에서 이물질이 유입될 경우에는 반드시 <그림 3>에서와 같이 고정날개의 오목 면을 치게 되어 고정날개에 충격 또는 굽힌 흔적을 남기게 된다. 그러나 고정날개 후단에서 생긴 이물질의 경우에는 <그림 4>와 같이 고정날개의 뒷쪽 볼록 면에 충격 흔적이 남거나 Coating이 벗겨지게 된다. 이러한 현상은 회전날개 입구 Leading Edge에서 생긴 조각이 고정날개 쪽으로 건너오거나 서로 튕겨서 생긴 흔적으로 나타난다.



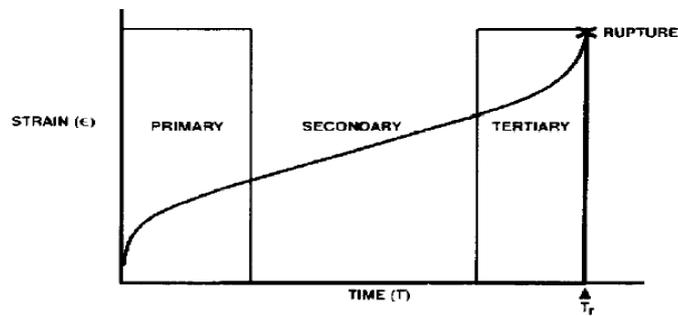
<그림 3> 이물질의 고정날개 통과 경로



<그림 4> 회전날개와 고정날개 충격 경로

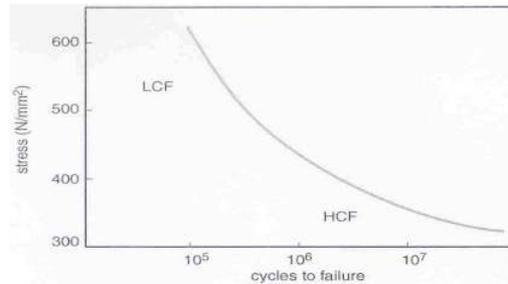
2.3 크리프 및 피로에 의한 균열손상

크리프란 재료가 고온에서 일정한 응력을 받고 서서히 변형되는 현상으로, 시간이 경과되면서 재료가 <그림 5>와 같은 특정 강도의 한계선을 넘게 될 경우 파단으로 이어진다.



<그림 5> 피로/파단 변형률과 시간관계 특성

피로 손상은 반복적인 Cyclic 응력에 의해 발생되며, 비교적 고주파인 기계적인 진동과 부품의 온도 차이에 의해 발생하는 저주기 응력 변화로 구분되는데, 피로응력이 가진되어 <그림 6>과 같은 재료의 피로 한계선을 국부적으로 초과할 경우 균열과 파단 등의 손상이 발생한다.



<그림 6> 고주기/저주기 피로 특성

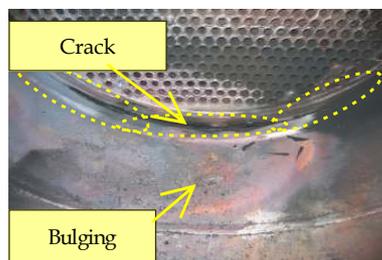
3. 부품별 손상형태와 원인분석

3.1 연료가스 열교환기 손상

3.1.1 손상 형태

연료가스 열교환기는 <그림 2>에서와 같이 가스터빈 압축기에서 나오는 고온 공기(400℃)를 이용하여 연료가스(15℃)를 가열하고 냉각된 공기(200℃)는 다시 터빈 내부로 들어가 터빈부품 냉각용 공기로 사용되며, 가열된 연료가스는 발전설비의 효율을 상승시키는 역할을 하게 된다. 연료가스 열교환기 손상은 본 논문의 연구대상 설비에서 외부에 가장 먼저 나타난 손상현상으로, 정상 운전중 Air 입구측 하부 Drain Plug에 화염이 분출되는 균열 손상이 발생되었다.

손상 형태를 보면, <그림 7>에서와 같이 Hot Air Inlet측 Shell 하부에는 과열에 의한 국부적인 변색 및 Bulging이 발생되었고, <그림 8>에서와 같이 하부 Drain Port와 용접된 Shell 부분에는 균열이 발생되어 외부로 누설되었다.



<그림 7> 내부 균열

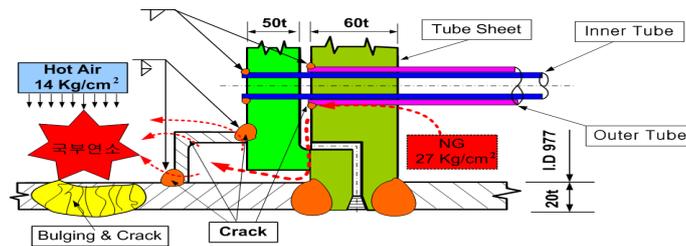


<그림 8> 외부 균열

3.1.2 손상 원인분석

가스터빈이 기동정지를 반복하면서 열교환기에 유입되는 압축공기와 연료가스 온도가 변함에 따라, <그림 2>와 같은 Strait Type의 취약부에서 열팽창으로 인해 <그림 9>와 같은 Inner Tube Sheet와 Seal Angle 용접부 균열이 발생되었다.

이러한 균열부에서 Inlet Shell Cover 하부로 연료가스가 누설되어 이물질과 접촉하거나 고온 압축공기와 접촉되면서 국부적인 연소가 발생되었고, 열교환기 하부를 가열하여 Bulging 손상이 발생한 것으로 추정하였다[3, 5, 9].



<그림 9> Bulging 및 Crack 발생 개념도

3.1.3 근본원인에 대한 오류가능성 분석

연료가스의 발화 원인으로서 누설 공기나 가스중의 이물질에 의해 점화될 가능성에 대해 살펴보면, 열교환기에서 발생한 형태의 최초 용접부 균열 틈새는 μm 단위로 미세하여 이물질이 불꽃을 일으킬 만큼 빠른 속도로 통과하기는 어렵다.

또한 천연가스는 자연발화 온도가 537°C 로[13] 점화원이 없는 상태에서 온도가 400°C 인 압축공기로는 착화될 수 없으므로, 정상적인 운전중에 발생한 열교환기의 손상은 다른 요인의 발화원에 의한 것으로 새로운 방향의 고찰이 필요하다.

3.2 연소실 고온부품 손상

3.2.1 손상 형태

정상운전중 연소불안정 현상 발생으로 내부 점검결과 <그림 10>과 같이 연소실과 터빈 통로인 Transition Piece가 균열되는 손상이 발생되었다.



<그림 10> 연소기 균열 손상 상태

3.2.2 손상 원인분석

가스터빈 연소기의 손상은 주로 과열에 의한 소손이나 연료가 연소되면서 발생하는 압력변화에 의한 연소진동 균열로 발생되는데, <그림 10>과 같은 균열손상의 경우 연소 진동에 의해 피로한계를 초과할 때 발생하는 전형적인 손상 현상으로 판단하였다 [6, 8, 11, 12].

3.2.3 근본원인에 대한 오류가능성 분석

<그림 10>과 같은 손상은 전형적인 연소진동에 의한 피로한계 초과로 발생하는 손상형태이나, 연소실 부품은 터빈측과 바로 연결되어 있으므로 조립간극이 좁거나 지나치게 근접해 있을 경우 터빈측의 진동과 충격이 전달되어 피로수명을 가진시키면서 균열발생의 근본원인이 될 수 있다

그러므로 일반적인 연소진동에 의한 재질의 피로손상 가능성과 함께, 터빈측에서 발생된 충격이 1단 고정날개와 바로 연결되어 있는 연소기측으로 전달되어 피로한계를 초과할 경우에 일어날 수 있는 균열 손상에 대해서도 근본원인 규명이 필요할 것으로 본다.

3.3 터빈 고온부품 손상

3.3.1 손상 형태

가스터빈 내부 중간점검중 <그림 11>과 같은 터빈 1단 회전날개 Tip 부분에서의 손상이 발견되어 점검 결과, <그림 12>와 같이 고온의 열에 의한 재질 산화손상 또는 이물질 충격에 의한 모재 탈락 손상이 발생되었다.



<그림 11> 회전날개 손상부



<그림 12> 손상 형태

고정날개에도 <그림 13>과 같이 외부에서 유입된 이물질 또는 회전날개에서 떨어진 조각에 의하여 부딪힌 충격으로 Coating이 손상되고 모재 재질이 탈락되는 손상이 발생되었다. 고정날개에서의 손상 또한 터빈 회전날개의 원심력에 의하여 이물질이 바깥쪽으로 밀리면서 전체적으로 가장자리를 충격하는 손상발생의 특징이 있었다.

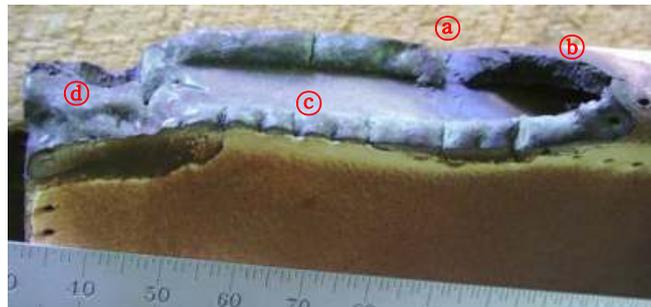


<그림 13> 고정날개 손상상태

3.3.2 손상 원인분석

가스터빈 1단 회전날개의 손상현상을 살펴보면, 회전날개 입구 Leading Edge 부분에서 <그림 14>와 같이 이물질에 의한 타격이 ㉠ 부분에 발생하여 ㉡ 부분까지 모재가 탈락되었고, 이로 인해 회전날개의 끝부분까지 흘러가야 하는 냉각공기가 모재 탈락부분에서 옆으로 새면서 이에 영향을 받은 ㉢, ㉣ 부분은 과도하게 냉각되어 주변의 색깔과 차이를 보이면서[10] 모재 탈락 당시의 금속면이 그대로 있는 반면, 냉각이 되지 못하고 과열된 ㉤, ㉥ 부분은 연소가스에 의해 모재가 소손되면서 매끄러운 면으로 변화하였다[10, 11].

회전날개 손상부분에서 모재가 녹은 범위와 변색 상태로 볼 때 손상진행이 상당기간 경과된 것으로 분석하였다.[6, 10, 11].



<그림 14> 1단 회전날개 손상부 상세

또한 외부 이물질 유입과 관련한 이론적인 측면을 살펴보면, 일반적인 외부 이물질 유입 손상에서는 <그림 3>과 같이 입구 고정날개에 먼저 타격흔적을 남기게 되지만, <그림 15>와 같이 본 논문의 사례에서는 고정날개 오목면에 이물질 유입흔적이 없었다. 따라서 외부 이물질 유입에 의한 손상보다는 자체 결함에 의해 Metal Loss로 손상이 진행되었다고 분석하였다[11].



<그림 15> 고정날개 손상 상태

3.3.3 근본원인에 대한 오류가능성 분석

가스터빈 내부에서 금속 소재의 산화는 냉각공기 조건과 연소온도에 따라 나타날 수 있는 변수가 많으므로, 손상 범위가 넓게 분포하고 많이 녹았다는 현상으로 상당기간 경과되었다고 판정하는 관점과 함께 냉각공기 유실에 의해 짧은 기간에 일어날 수 있는 고온 산화현상을 고려하여 근본원인을 판단해야 할 것으로 본다.

또한 1단 고정날개 내측 Pressure Side에 타격 손상 흔적이 없다는 것으로 이물질 타격에 의한 손상이 원인이 아니라고 판정하는 것은 1단 고정날개 이후에서 발생한 이물질에 의해 손상될 경우를 배제하는 문제점이 있으므로, 근본원인 규명을 위해서는 내부에서 발생 가능한 이물질에 대해서도 고려해야 할 것으로 본다.

3.4 터빈 냉각용 공기 Filter 손상

3.4.1 손상 형태

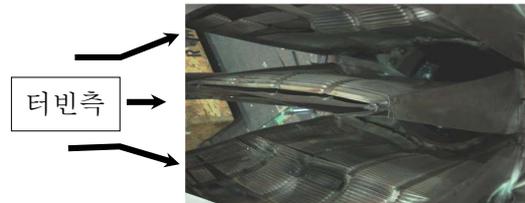
가스터빈 내부 회전날개와 Rotor 냉각용 공기 계통에 유입될 수 있는 이물질을 차단하기 위하여 <그림 16>과 같은 형상의 금속판형 Filter가 설치되어 있으며, 계획에 방정비공사 작업중 분해 결과 내부에서 Filter Panel이 변형되고 Element가 일부 탈락된 손상이 발생되었다.



<그림 16> 정상 상태와 손상된 Filter 상태

3.4.2 손상 원인분석

<그림 17>에서와 같이 가스터빈 내부 냉각용 공기 Filter의 Plate가 터빈 방향에서 바깥쪽으로 팽창한 것을 볼 때, 터빈측에서 충격 압력이 작용하여 팽창하면서 변형된 것을 알 수 있다.



<그림 17> Filter 압력팽창 손상방향

손상된 Filter는 <그림 18>과 같이 Plate 전체가 팽창에 의한 용접부 탈락과 변형이 발생되었고, Plate 표면에는 <그림 19>와 같은 연료의 연소에 의한 가열변색과 그을음 흔적이 발생되었다.



<그림 18> 용접부 파열



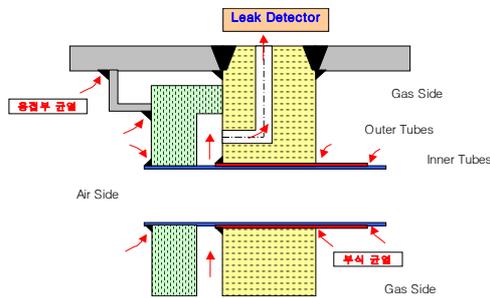
<그림 19> 그을음 발생

4. 현상학적 고찰을 통한 손상 메커니즘 규명

4.1 가스 누설 과정

본 사례에서의 연료가스 열교환기 형식은 2중 튜브의 Strait Type으로 "U" Type과 달리 기동정지시 온도차가 가장 큰 입구 Tube 연결부에서 열응력에 의한 균열과 누설이 발생하게 된다. 이러한 누설을 감시하기 위하여 <그림 20>과 같이 감시장치(Leak Detector)로 배출하고 일정압력(8kg/cm²)이상일 경우 경보를 울리도록 되어있다.

또한 정상 운전중에는 압축 공기측의 압력(14kg/cm²)이 감시장치 배출 압력보다 높기 때문에 가스가 누설되더라도 압축공기 배관측으로 유입되지 않고 감시장치측으로 모두 배출하게 된다.



<그림 20> 누설감시 및 배출 경로

그러나 가스터빈이 정지할 경우에는 압축 공기측 배관의 압력은 없어지게 되고 연료 가스측의 압력은 $27\text{kg}/\text{cm}^2$ 으로 그대로 유지되므로, 누설된 가스가 대기압 상태인 공기측 배관으로 이동하게 된다. 감시장치에는 압력조정용 Regulator($5.6\text{kg}/\text{cm}^2$)가 경보값($8\text{kg}/\text{cm}^2$)보다 낮게 조정되어 있지만, 오히려 이로 인해 미세한 누설 압력이 감시장치측으로 배출되지 못하고 압력이 없는 공기배관으로 흐르게 되었다. 실제 손상전 측정값에서 정지중에는 누설 감시장치의 압력이 검출되지 않았으며, 가스 검출기능은 없고 압력 검출기능만 있어서 연료가스 누설여부를 감지하지 못하였다.

<표 2> 열교환기 누설시험 결과

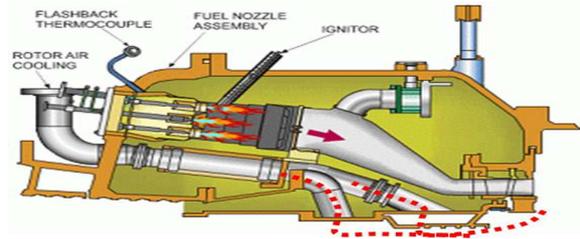
구 분	압력감소	시 간	판 정
연료가스	$3 \Rightarrow 0.5\text{kg}/\text{cm}^2$	60분	소량누설
압축공기	$3 \Rightarrow 0 \text{ kg}/\text{cm}^2$	10초이내	다량누설

누설시험 결과 <표 2>에서와 같이 연료가스는 소량 누설된 반면 압축공기의 누설량은 훨씬 더 많았던 것을 알 수 있다.

결과적으로 소량씩 누설된 연료가스는 정지시 압력이 없는 냉각용 공기배관을 통하여 터빈측으로 유입되었으며, 배기가스 통로로 개방된 연소실과 터빈실에서는 비중이 가벼운 천연가스가 배기가스 덕트로 배출되어 잔류량이 미세한 상태였으나, 터빈 냉각유로 내부에 연결되는 배관에서는 연료가스가 배출되지 못하고 가득 차게 되었다.

4.2 발화 과정

가스터빈 정지중 냉각용 공기배관으로 유입되어 터빈실과 연소실에 잔류해 있던 소량의 연료가스는 기동시 점화속도(600rpm)에 이르기 전(약 60초) 대부분 배기가스 통로로 Purge 되었으나, <그림 21>에서와 같이 터빈 Rotor Air Cooling 배관의 유로 내부는 공간이 거의 밀폐상태이므로 짧은 시간에 완전한 Purge가 이루어지지 않았다.



<그림 21> Cooling Air 배관 발화 경로

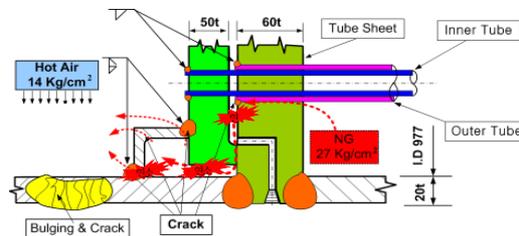
또한 공기보다 비중이 가벼운 천연가스의 특성상 기동시에도 배관 유로의 상층부에는 발화범위인 5~15%이상[13] 잔류한 상태에서 점화시점에 도달하였고, 연료 연소에 의해 생성된 1,300℃의 고온 화염이 터빈 냉각용 공기배관 내부로 전달되면서 발화하게 되었다.

4.3 터빈 냉각공기용 Filter 손상 과정

연소실에서 터빈 내부 냉각공기 유로에 잔류해 있던 연료가스가 발화되면서 비교적 공간이 큰 냉각공기 배관 내부에서는 폭발적으로 연소하여 터빈 냉각공기용 Filter 측으로 충격압력이 전달되었고, <그림 17>과 같이 Filter Plate가 터빈 방향에서 바깥쪽으로 팽창하는 손상이 발생되었다. 그 근거로서 <그림 18>과 같은 급격한 압력팽창에 의한 용접부 Rupture와 <그림 19>와 같은 Filter 표면 그을음 흔적을 들 수 있다.

4.4 연료가스 열교환기 손상 과정

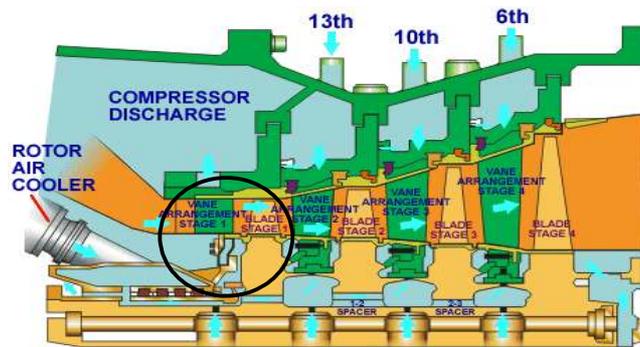
터빈 내부 냉각공기 배관에서 확산된 충격 압력이 연료가스 열교환기의 가장 취약한 부분인 압축공기 입구 튜브측 용접부에 균열을 확대하였으며, 이때 전달된 화염이 연료가스 누설부분까지 확산되어 <그림 22>와 같이 연료가스 누설처에 점화원으로 작용하면서 산소 공급원인 압축공기 누설방향으로 화염을 생성하였고, 압축공기 누설부인 하부 Drain Port 부분을 장시간 가열하여 용접부 Crack 및 Bulging 손상으로 확대되었다.



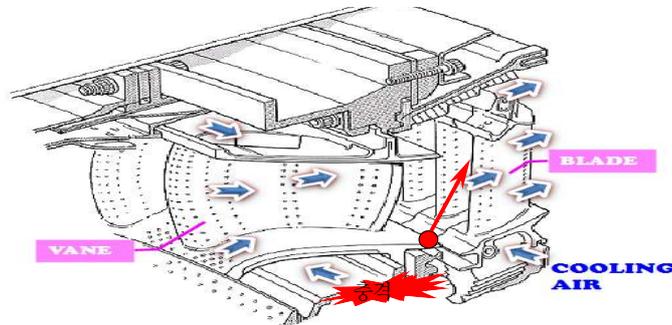
<그림 22> Bulging 및 Crack 발생 과정

4.5 터빈과 연소실 고온부품 손상 과정

터빈 냉각공기용 배관에서 발생한 발화 충격압력은 터빈 본체 방향으로도 작용하였으며, 그 충격은 가장 먼저 <그림 23>에서와 같이 Cooling Air 배관과 연결된 터빈 1단 고정날개 하부로 전달되어 <그림 24>와 같은 경로로 고정날개 Root부 Plate에 충격을 주었다. 이러한 충격은 전체 고정날개에서 발생되었으나 비교적 조립간극이 큰 부분에서는 대부분의 충격을 흡수하였으며, 조립간극이 좁은 부분에서는 근접한 고온 부품과 부딪히면서 큰 충격이 가해지게 되었다.



<그림 23> 1단 고정날개 충격 전달부분



<그림 24> 1단 고정날개 손상부 개념도

또한 터빈 1단 고정날개에서의 충격은 이와 연결된 연소실에도 전달되었고, 조립간극이 좁은 상태로 1단 고정날개와 연결되어 있던 일부 연소기 Transition Piece에도 큰 충격이 가해지게 되었다.

현상학적 고찰 결과를 바탕으로 정밀한 재조사 결과 <그림 25>와 같이 1단 고정날개 하부에서의 충격으로 1개소의 Root부 Platform 모서리 조각이 약 15mm 탈락된 손상이 발견되었고, 1단 회전날개에서 발생한 충격부와 크기가 거의 일치하였다.



<그림 25> 1단 고정날개 탈락부 상태

1단 고정날개에서 탈락된 조각은 입구부분에 흔적을 남기지 않고 원심력에 의해 바깥쪽으로 튀기면서 1단 회전날개의 전면 상부 Tip 부분을 타격하여 모재 일부가 탈락되어 Cooling Air가 누설되는 1차적인 손상을 유발하였다. 또한 Cooling Air 누설부 이후에서는 냉각공기 부족 현상으로 고온의 연소가스에 의해 짧은 기간에 급격하게 열화현상이 진행되는 손상을 가져왔다.

연소실 고온부품 균열 손상은 1단 고정날개에서의 강한 충격현상이 직접 전달되어 1차적인 피로한계 초과 손상을 유발시켰으며, 이후 운전시 연소진동이 가진되어 모재가 파단되는 손상이 발생되었다. 이로 인해 최종적인 손상 형태가 전형적인 연소진동에 의한 손상과 동일한 형태로 나타나게 되었다.

5. 결 론

가스터빈 발전설비의 경우 천연가스를 주된 연료로 사용함에 따라, 연료가스가 누설로 다양한 손상사고가 발생할 수 있으므로 이를 방지할 수 있도록 설계되고 운영되어야 한다. 특히 본 연구사례에서와 같이 정지중 가스터빈 내부로의 누설은 장기간 발전을 정지해야하는 치명적인 손상을 유발할 수 있으므로, 이를 방지할 경우 연료가스에 의한 원인 불명의 고온부품 손상사고 방지에 많은 기여를 할 것으로 기대된다.

연속 운전하는 가스터빈의 경우는 압축공기에 의해 터빈 내부의 냉각유료로 연료가스가 누설되지 못하지만, 정지시에는 터빈 내부로 누설될 경우 연료가스가 냉각공기 배관에 잔류하여 기동시 손상사고를 일으킬 수 있는 위험성이 있으므로, 기동전에는 반드시 일정 시간이상 Purge를 하고, 정지시에는 연료가스 차단밸브 이후에서의 압력 상승 감시와 누설되는 가스를 검출하는 경보장치를 설치하고, 연료가스 차단밸브는 정기적으로 점검하는 등 가스터빈 내부로의 누설과 관련된 설비를 항상 확인하고 점검할 필요가 있다.

또한 본 연구에서의 사례와 같은 냉각공기 배관으로의 연료가스 누설을 방지하기 위해서는, 압축공기와 연료가스의 직접 연교환하는 형식보다 물과 같은 다른 유체로 가열하는 간접가열 방식으로 개선하여 연료가스가 터빈내부로 누설될 수 있는 요인을 차단하여야 한다.

6. 참 고 문 헌

- [1] 김성욱, 최철, 김재철, 이창희, “가스터빈 고온부품의 재생 접합을 위한 손상부 파악”, 한국기계동력공학학회지 제7권 22호 (2003), p 73~79
- [2] 김용건, “가스터빈 핵심부품 손상사례 조사 및 가스터빈 1단 Blade의 열응력 해석적 연구 비교”, 연세대학교 석사학위청구논문 (2002)
- [3] 동화엔텍(주), “00화력 Air Cooler/Fuel Gas Heater 기술검토”, 손상분석 보고서 (2006)
- [4] 박노광, “고온소재 특성 및 제조공정”, 서울대학교 발전설비시스템 기술교육과정 교재 (2004)
- [5] 범우이엔지(주), “NG Heater 문제점 현황 및 개선안”, 손상분석 보고서 (2006)
- [6] 삼성테크윈, RIBURDI사, “고온부품 손상원인 분석 보고”, 손상분석 보고서 (2006)
- [7] 창원대학교, “가스터빈 재료 열화평가에 관한 기술개발”, 전력산업 연구개발사업 보고서 (2002)
- [8] 한국동서발전, “고온부품 손상에 따른 정비결과 및 향후대책”, 손상분석 보고서 (2006)
- [9] 한국동서발전, “00화력 NG Heater 손상원인 및 대책수립 검토”, 기술지원 보고서 (2006)
- [10] 한전전력연구원, “00복합 1단 Blade 손상 대책”, 손상분석 보고서 (2006)
- [11] IPT사, “00화력 가스터빈 고온부품 점검관련 기술지원 용역 보고서”, 손상분석 용역보고서 (2006)
- [12] SIEMENS사, "Fact finding report", Fact Finder 보고서 (2006)
- [13] 한국가스공사, www.kogas.or.kr