

< 기술논문 >

## 모델 변천에 따른 가스터빈 1단 버켓의 손상경향 분석

김문영<sup>†</sup> · 박상열\* · 양성호\* · 최희숙\* · 고원\* · 송국현\*  
(2006년 11월 22일 접수, 2007년 4월 24일 심사완료)

### Analysis of Damage Trend for Gas Turbine 1st Bucket Related to the Change of Models

Moon Young Kim, Sang Yeol Park, Sung Ho Yang, Hee Sook Choi, Won Ko and Kuk Hyun Song

**Key Words** : DS(Directional Solidification : 일방향응고), EA(Equiaxed : 다결정), FOD(Foreign Object Damage : 이물질), EOH(Equivalent Operation Hour : 상당운전시간), TMF(Thermo-Mechanical Fatigue : 열피로)

#### Abstract

Some of gas turbine model of 7F-Class has constructed and is operating with units domestically. Non-destructive testing (NDT) is one of the methods being used to inspect damage 1<sup>st</sup> stage bucket and review damage trends. We also analyze damage configuration and microstructure according to material and compare with paper of electric power research institute (EPRI). The damaged mode could be determined by leveraging failure analysis. Especially, configuration uprate of bucket is not only to prevent damage during operation but also avoid domestic manufacturing by the competitors. Modifications were mainly concentrated on surfaces such as cooling hole and bucket tips. Analyzing of bucket damage, the earlier model of 7F-Class used with one cycle with equivalent operation hour (EOH), has various cracking of the bucket surface. Bucket damage of new model is centered on tip area (54%) as analyzed by EPRI research. We conclude that improving bucket configuration would increase repair rate on the bucket tip.

#### 1. 서론

국내 발전설비의 약 27%를 점유하고 있는 가스터빈 발전은 에너지 효율, 환경 친화도와 전력 부하조절이 용이하여 1990년대 이후 꾸준히 증가하고 있다. 그 중 150MW급 이상의 대용량 설비가 현저하게 증가되고 있으며, GE사에서 제조된

MS7001F-Class 가스터빈 발전이 국내 발전설비에 서 가장 큰 비중을 차지하고 있다. MS7001F-Class 발전설비는 1992년 11월 서인천 복합화력발전소가 완공되면서 최초 도입되어, 현재 한전발전회사에 24기(서인천 8기, 신인천 8기, 부산 8기)와 민간발전회사에 4기(광양 Posco 2기, 광양 K-Power 2기)가 도입되어 운전되고 있다.

MS7001F-Class 기종은 에너지 효율 증대를 위하여 MS7001F에서 MS7001FA, MS7001FA+, MS7001FA+e로 모델이 점차적으로 변경되었다. 그 결과 초기 MS7001F 모델의 터빈입구온도(TIT : Turbine Inlet Temperature)가 1,260℃로 운전되었

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한전KPS(주) GT정비기술센터  
E-mail : mykim@kps.co.kr

TEL : (032)580-8221 FAX : (032)580-8282

\* 한전KPS(주) GT정비기술센터

으나, 변경된 MS7001FA+e 모델은 터빈입구온도가 1,327℃ 증가되어 운전되었다. 그러나 이러한 가스터빈의 운전온도 상승에 따른 효율증가는 버킷손상경향의 변화를 가져왔으며, 또한 정비방향의 변화에 따라 설비 운영 경제성 측면에서도 커다란 영향을 초래하였다.

본 연구에서는 실제 운전되고 있는 MS7001F-Class 가스터빈의 모델 변천에 따른 1단 버킷의 손상유형의 추이를 체계적으로 관찰하고자 한다.

## 2. 버킷 손상원인과 데이터 취득

### 2.1 버킷 손상원인

일반적으로 가스터빈 발전기는 크립손상(Creep Damage)을 많이 받는 기저부하용(Base Load)과 열 피로(Thermal Fatigue)를 많이 받는 첨두부하용(Pick Load)으로 구분하며, 국내는 주로 첨두부하용으로 사용되어지고 있다. 고온에서 사용되는 버킷은 운전 특성상 고온부식(Hot Corrosion), 고온산화(High Temperature Oxidation), 열피로(Thermal Fatigue) 및 이물질의 타격 등에 의한 손상을 많이 받는다. 1970년대 산업용 가스터빈 버킷은 주로 부식에 의한 손상에 의하여 재정비를 수행하였으나, 2000년 이후 가스터빈 운전온도의 상승에 따른 효율증가로 인하여 고온산화가 손상의 주류를 이루며, 코팅도 이것과 더불어 개발되었다.<sup>(1)</sup> 이러한 손상의 원인에 의하여 가스터빈 버킷의 재질의 운전중 미세조직열화는 재료의 Creep, Fatigue 및 취성 파괴 등과 같은 손상을 가속시켜 설비사고를 야기시킬 수 있다.<sup>(2)</sup>

### 2.2 데이터 취득

모델별 가스터빈 1단 버킷의 손상 유형분석을 위하여 주기적으로 입고, 검사 및 정비되는 버킷을 기준으로 하였다. 버킷의 정기적인 정비는 상당운전시간(EOH)으로 약 24,000시간(1주기) 운전 후 정기적으로 수행하며, 분해된 버킷은 정비시 정비절차에 따라 입고검사, 스트리핑(Stripping) 및 비파괴 검사 등과 같은 순으로 정비하게 된다.<sup>(3)</sup> 여기서 상당운전시간은 운전시간과 기동정지 횟수와 관련되어 있으며, 정비를 위한 주기는 제작사 관련문서(GER-3620K)의 정비주기(HGPI : Hot Gas Pass Inspection Interval)에서 권고하고 있다. 본 자료 분석을 위하여 실제 운전한 GE F-Class

모델의 버킷을 사용하였다. 또한, 가스터빈 운전여건상 24,000시간에 가까운 시간대를 사용한 버킷을 선정하여 정비절차상에 규정되어 있는 육안검사와 형광침투탐상검사를 병행 수행하여 위치별 손상 데이터를 취득하였으며, 24,000시간으로 보정하여 데이터를 작성하였다.

## 3. 가스터빈 운전 중 발생하는 손상유형 분류

3.1 부위별 손상유형과 형상변경에 따른 모델변화  
국내에서 운전중인 GE의 MS7001F-Class 가스터빈은 효율증가를 위하여 MS7001F, MS7001FA, MS7001FA+, MS7001FA+e 모델 순으로 점차 변화되었다. 이 과정에서 제작사에서는 다결정 구조인 GTD 111EA 버킷 재질을 고온물성 및 크리프 강도 등이 개선된 일방향 조직인 GTD 111DS 재질을 개발하여 현재까지 사용하고 있다. 또한, 운전중 버킷에 발생하는 손상을 최소화하기 위하여 냉각 구멍(Cooling Hole)과 같은 외형과 코팅 공정 조건 등을 개선 적용하였다. 모델의 변천에 따른 정비검사를 통하여 버킷 전체의 부위별 손상유형과 외형의 변화과정을 검토하였으며, 부분적으로는 스트리핑(Stripping)에 의한 코팅층 제거 후 모재에 발생하는 손상유형을 확인하였다.

### 3.2 모델변화에 따른 손상 유형

#### 3.2.1 버킷 팁(Bucket Tip)

버킷 압력측(Pressure Side)의 팁에서 축을 기준으로 반경방향으로 균열(Radial Crack)과 트레일링 에지(Trailing Edge)의 산화부식은 버킷의 가장 심한 손상 형태중의 하나이다. Fig. 1은 모델 변천에 따른 버킷 팁의 형상 및 특징을 보여주고 있다. Fig. 1(a)은 MS7001F-Class 초창기 모델로서 산화에 취약한 트레일링 에지의 솔리드 팁(Solid Tip) 구조를 하고 있다. Fig. 1(b)는 MS7001FA의 팁 형상으로서 압축기에서 추기된 냉각 공기가 공기 유입 구멍(Injection Hole)을 통하여 일부가 트레일링 에지 방향으로 흘러갈 수 있도록 팁 구조를 개선하였으나, 팁 부분의 산화부식 현상의 개선효과는 크지 못한 것으로 알려져 있다. 최신 모델인 Fig. 1(c) MS7001FA+e는 버킷 트레일링 에지를 솔리드 팁으로 다시 전환하는 대신 스퀴

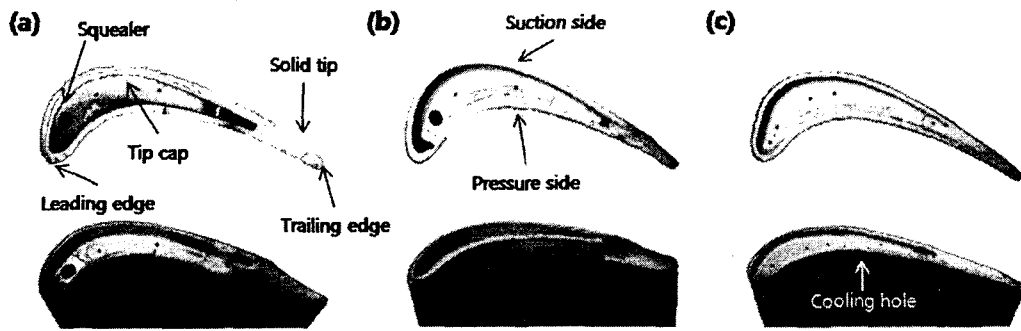


Fig. 1 Tip configuration and feature of bucket

일러 팁(Squealer Tip)의 높이가 7mm에서 4mm로 줄어들었으며, 압력측의 팁 아래에 일정한 방향성을 두고 20개의 냉각구멍을 만들어 냉각 공기가 트레일링 에지 부분의 팁 온도의 감소는 물론 스퀘일러 팁 내부에 코팅을 수행하여 팁 부분의 모재 온도를 낮추어 산화부식 속도를 감소시키고자 하였다. 이와 같은 모델의 변경에 따른 냉각 시스템 개선과 코팅 공정의 개선은 팁 부분의 산화부식 억제에 따른 팁부분의 균열이 팁 플레이트(Tip Plate or Tip Cap) 이하로 내려와 용접정비 기준치를 벗어나 폐기처분되는 것을 최소화 하였다.

3.2.2 트레일링 에지(Trailing Edge)

버킷 트레일링 에지의 냉각 구멍 손상은 정비 과정에 중요한 폐기(Scrap) 처분요소로서 제작사에서 이를 지속적으로 개선하고 있다. Fig. 2(a)는 초기 트레일링 에지의 원형(Round Type) 냉각 구멍 구조를 보여주고 있으나, Fig. 2(b)의 MS7001FA와 Fig. 2(c) MS7001FA+, MS7001FA+e 모델로 변천하면서 점차적으로 타원형(Elliptical Type)으로 변형되었다.

초기모델인 MS7001FA는 트레일링 에지 원형 홀 주변의 균열은 다양한 위치와 형상으로 발생하였으나, Fig. 2(b) MS7001FA는 냉각 구멍과 플랫폼(Platform) 사이의 코너부위에 균열이 주로 발생하였다. 따라서, Fig. 2(c)의 MS7001FA+와 MS7001FA+e에서는 냉각 홀이 더 긴 타원형으로 변경하였다. 제작사에서는 이 부분의 손상이 지속적으로 발생하여 Fig. 3에서 보는 것처럼 트레일링 에지 언더컷(Undercut)을 실시하여 손상을 줄이고자 하였다. 또한, 지속적인 손상방지 및 수명연장을 위하여 그라인딩을 이용하여 컷백

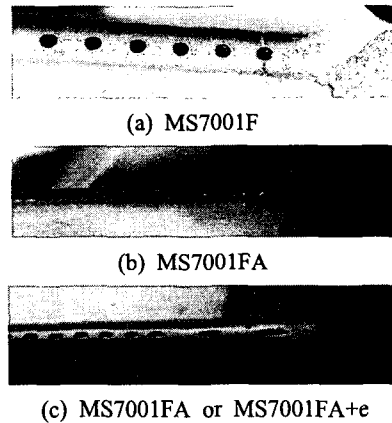


Fig. 2 Trailing edge configuration and feature comparison of models

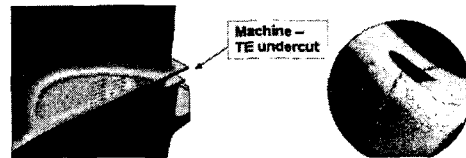


Fig. 3 Trailing edge undercut

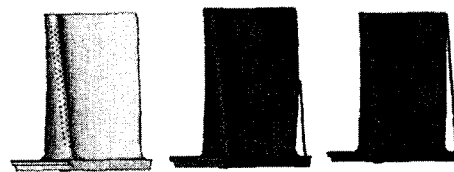


Fig. 4 Trailing edge cutback procedures

(Cutback)이라는 정비방법을 통하여 트레일링 에지 하단 손상부를 단계적으로 제거하여 사용하였다. Fig. 4는 이와 같은 모델에 적용한 컷백을 보여주고 있다.



Fig. 5 1st bucket leading edge damage of MS7001F and MS7001FA model



Fig. 6 1st bucket leading edge cooling hole damage of MS7001FA+ and MS7001FA+e model

3.2.3 리딩 에지(Leading Edge)

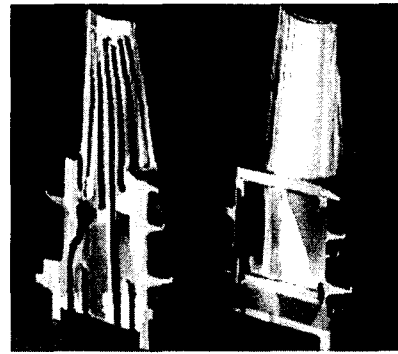
MS7001F와 MS7001FA 모델의 가스터빈 버켓의 리딩 에지는 같은 형상으로 회전력을 얻기 위하여 고온·고압의 연소 가스가 직접 부딪히는 부분이다. 이것은 운전중 고온 산화부식과 TMF 등에 의한 부식 및 크랙 손상이 많이 발생되고 있다. Fig. 5는 이러한 원인에 의한 축방향의 크랙 손상을 보여주고 있다.

MS7001FA+와 MS7001FA+e 모델의 리딩 에지는 21~23개의 냉각 구멍이 3열로 구성되어 있다. 이 냉각 구멍을 통하여 나온 공기는 에어 포일부의 필름 냉각(Film Cooling)을 통하여 리딩 에지 뿐만 아니라 압력측과 흡입측(Suction Side)의 산화 부식에 따른 모재의 균열손상을 감소시켜주고 있다. Fig. 6은 이곳의 냉각구멍 형상을 보여주고 있다.

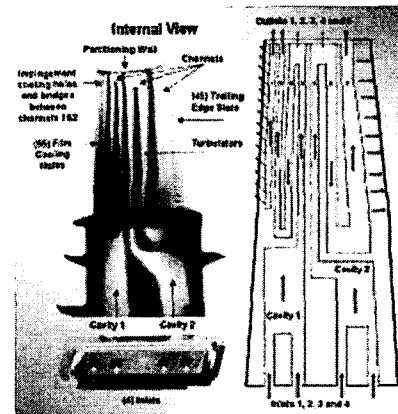
Fig. 7(a), (b)는 MS7001FA와 MS7001FA+e 모델 버켓 내부의 냉각 시스템 구조를 보여주고 있으며, Fig. 7(b)로부터 MS7001FA+에서는 리딩 에지부에 샤워 헤드(Shower Head) 냉각방식이 새롭게 도입 적용되고 있다.

3.2.4 에어포일(Airfoil)

버켓 에어포일의 주요 손상원인은 고온부식, 산화진전 및 열피로(Thermal Fatigue) 등과 같은 것이 있다. 이것에 의하여 에어포일 흡입측 중심부는 반경방향의 균열이, 리딩 에지부분에는 축방향의 균열이 주로 많이 생긴다. 또한 압력측 중심부와 리딩 에지부는 주로 반경방향의 균열이 발생하며, 플랫폼 위의 트레일링 에지 부분에는 축 방향의 균열이 발생한다. Fig. 8은 에어포일부의 대표적인 반경방향의 균열을 보여주고 있으며, Fig. 2(a), (b)는 리딩 에지의 축 방향의 균열을 보여주고 있다.



(a) MS7001FA internal cooling channel



(b) MS7001FA+e internal cooling channel

Fig. 7 Internal cooling system configuration of MS7001FA and MS7001FA+e model



Fig. 8 Radial crack of 1st bucket for MS7001F model

MS7001F와 MS7001FA 모델의 GTD 111DS 버켓 재질은 흡입측의 축방향 균열의 모재의 DS 방향성을 중단하는 열피로 균열이 전체적으로 심하게 나타났으나, MS7001FA+e에서 리딩 에지 냉각 구멍의 시스템 변경으로 산화부식 및 열피로 손상이 많이 개선되었다.

### 3.2.5 플랫폼(Platform)

버킷 플랫폼의 주요 손상원인은 기동정지 및 갑작스런 고장정지에 의한 플랫폼의 과도한 응력 발생으로 균열이 발생하게 된다. 특히, 효율을 높이기 위하여 운전온도가 높고, 냉각 시스템이 복잡한 기종에서 주로 많이 발생하고 있다. 이러한 플랫폼의 균열이 많이 발생함에 따라 냉각방식의 개선은 물론 다양한 정비방법이 제안되어 사용되고 있다. 이중 미쓰비시(MHI)는 501G 모델의 정비를 위하여 브레이징(Brazing)을 이용한 정비방법을 사용하고 있으며, GE의 MS7001FA+e의 경우는 유도 가열기를 이용해 용접전 가열후 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding)를 이용하여 정비를 실시하고 있다. Fig. 9는 플랫폼 부분의 손상 형상을 보여주고 있다.

또한 버킷 플랫폼의 손상을 줄이기 위하여 냉각 시스템을 변경하여 사용하고 있다. 플랫폼이 받는 열응력을 줄이기 위하여 냉각공기를 생크(Shank)로 유입시킬 수 있도록 형상을 변경시킴으로써 재료의 강성을 향상시키고자 한 것으로 판단된다. Fig. 10은 위와 같이 플랫폼 손상을 줄이고자 생크부분에 만들어진 냉각구멍을 보여주고 있다.

### 3.2.6 기타 손상

가스터빈은 여러 원인에 의해서 기계적 손상 및 파괴가 발생하지만, 정비의 잘못이나 조립 불량에 의한 손상이 발생하기도 한다. Fig. 11은 이와 같은 사례로서 터빈 로터에서 공급되는 냉각공기가 조립 불량으로 인하여 냉각공기의 양이 줄어들어 버킷 리딩 에지 부분의 온도가 상승하여 이 부분이 녹아내린 것으로 추정되고 있다.

또 다른 사례로 Fig. 12는 버킷 1 Set 중에서 2~3개 정도가 발생하는 경우로 버킷 리딩 에지가 부풀어 오르면서 균열이 발생한 형태를 나타내고 있다. 손상의 원인으로서는 리딩 에지의 냉각 구멍이 이물질에 의한 막힘 현상이나 코팅처리시 잘못 처리하여 부분적으로 냉각 구멍이 막혔을 경우, 그 부분의 온도가 상승하게 된다. 온도 상승에 따라 재료의 열팽창이 증가하고, 냉각공기의 통로가 막힘으로 냉각공기의 압력 상승과 더불어 산화부식에 의하여 코팅층이 손상되고 취약해진 모재 부분이 응력해소를 위하여 부풀어 오르면서 크랙이 발생된다.



Fig. 9 Damage configuration on bucket platform

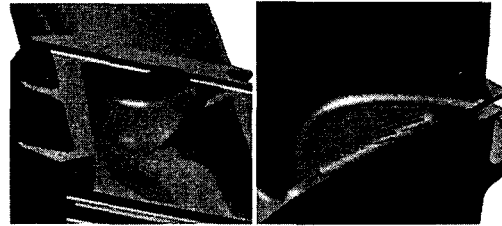


Fig. 10 Modification of bucket shank area



Fig. 11 Damage on leading edge



Fig. 12 Damage of leading edge because of blocking cooling hole

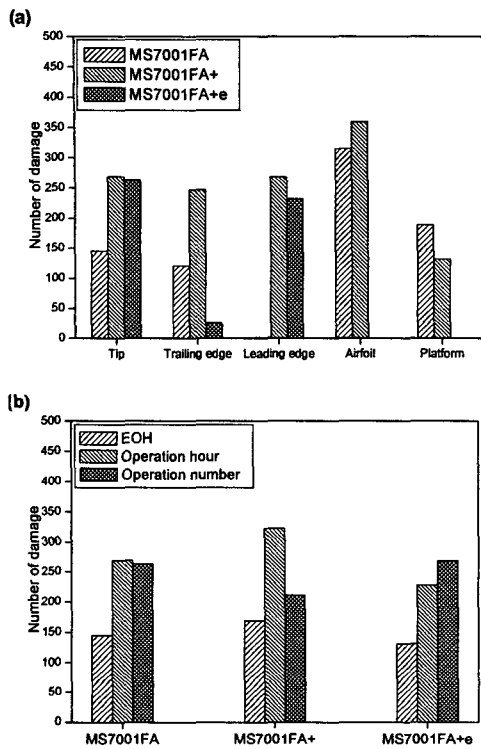


Fig. 13 Number of damage according to (a) position of bucket surface and (b) model type

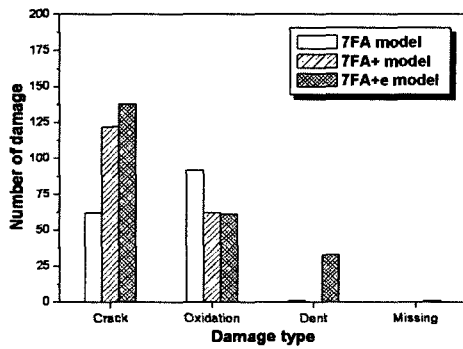


Fig. 14 Damage distribution according to position of Tip

#### 4. 모델별 손상분포 검토 및 고찰

초기의 가스터빈 모델은 다양한 위치와 형상의 손상을 가지고 있었으나, 최신의 모델로 변천하

는 과정에서 다른 부분의 손상은 감소하였으며 팁부분의 손상으로 비중이 커져갔다. Fig. 13은 24,000시간 상당의 시간을 작동한후 부위별 손상을 모델별로 손상의 개수를 측정하여 나타낸 그래프로 Fig. 13(a)에 도시한 것과 같이 MS7001FA 모델은 에어 포일부에 결함 발생 빈도수가 320여건으로 많으며, 플랫폼에서는 190여건과 팁과 트레일링 에지도 120여건의 결함이 발생된 것으로 확인되었다. MS7001FA+의 경우, 팁, 트레일링 에지와 에어포일 부위에 310여건 이상으로 증가하여 모델 개선에 따른 감소효과가 없는 것으로 나타났다. 또한 MS7001FA+e에서와 같이 모델 변경에 따른 에어포일과 플랫폼에 전혀 손상이 나타나지 않았다. Fig. 13(b)는 24,000시간의 상당운전시간, 정상운전시간 및 기동정지횟수에 따라 가동시킨후 팁부분의 손상을 나타낸 것으로 일반적으로 MS7001FA와 MS7001FA+에서는 증가하나 MS7001FA+e에서는 다소 감소하는 경향을 보이고 있다. 이 중에서 가스터빈에서 가장 중요한 손상요소인 기동정지횟수에 따라서는 단계적으로 증가하여 MS7001FA+e에서 최고를 이루고 있다. 상기 MS7001FA는 팁 손상이 전체손상율이 18%를 차지하고 있으나, MS7001FA+e의 경우 54%로 크게 증가하였다.

특히, MS7001FA+와 MS7001FA+e 모델은 운전 중 플랫폼 이하(생크 및 도브테일) 부분의 손상을 줄이고자 냉각구멍과 통로를 가공하여 외부형상은 변경시켰으나, 플랫폼 윗부분인 에어포일과 팁부분은 똑같은 외형 구조를 가지고 있다. 따라서, 이곳은 단순히 코팅사양 및 방법만을 변경하여 손상을 줄이고자 하였다. Fig. 13(a)에서 보듯이 전체적으로 손상율이 줄어들었으며, 또한 MS7001FA+e 모델에서는 팁과 팁주변의 손상이 주류를 이루고 있다는 것을 알 수 있다. Fig. 13(b)에서 두 모델은 팁부분의 손상이 기동정지에 의한 것은 다소 증가하였으나, 상당운전시간이나 정상운전시간에 따른 것은 감소하였다. 이와 같은 것은 에어포일부의 코팅방법의 변경은 물론 팁부분의 코팅을 초기 적용하여 손상원인과 수량이 변경되어진 것으로 여겨진다.

EPRI의 연구보고서 TR-1004345, TR-113748에 따르면 버킷 팁부위가 운전 중 응력집중을 제일 작게 받으며, 허용응력(Allowable Stress) 분포가 제일 커 다른 부분에 비해 안정적이기 때문에<sup>(4),(5)</sup>

대부분 제작사에서도 팁 부분의 정비만을 고려하여 권고하고 있다. 특히, MS7001FA+e와 같이 버켓의 손상을 팁에서 수용할 수 있도록 개선하여 대부분의 손상이 팁 부분에서 발생하면 폐기 처리비율이 적어지며 재정비하여 사용할 수 있도록 하고 있다.

일반적으로 가스터빈의 모델이 변천함에 따라 팁부위의 결함 발생빈도 비중이 증가하였다. 초기의 MS7001FA 모델의 가스터빈은 산화손상(Oxidation)이 제일 많이 발생하였다. 또한 손상중에는 60여건과 균열과 88여건의 산화가 발생하였으나, 찌그러짐(Dent)과 탈락(Missing)은 거의 발생하지 않은 것으로 나타났다. MS7001FA+와 MS7001FA+e 모델로 발전하면서 산화손상 발생량은 줄어든 반면에 균열 발생량은 상대적으로 증가하였다. 전체적으로 균열, 산화, 찌그러짐 및 탈락순으로 감소되어져 있는 경향을 알 수 있다. Fig. 14는 이와 같이 가스터빈 모델 변천에 따라 손상의 주 원인을 보여주고 있다.

대부분의 가스터빈 제작사들은 버켓의 재질, 형상 및 냉각방법 등과 같은 것을 지속적으로 연구 개선하여 좀 더 높은 온도에서 사용할 수 있도록 하고 있으며, 버켓 특성상 팁부분의 손상 빈도를 낮게 하여 재 사용할 수 있도록 하였으며, 정비 시스템도 이부분에 집중되어 자동화되어지고 있다.

## 5. 결론

가스터빈 모델 변천에 따라 1주기(약 24,000시간) 사용후 정비를 위하여 입고한 1단 버켓의 비파괴 검사를 통한 손상유형의 분석으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 전체적으로 초기 모델은 다양한 손상위치 및 모양을 가지고 있었으나, 최신의 모델인 MS7001FA+e 경우 팁부분의 손상이 주류를 이루며, 주로 반경방향의 균열을 가지고 있다.

(2) MS7001FA+와 MS7001FA+e의 버켓은 외형의 형상 변경없이 코팅사양 및 적용방법의 변경으로 전체적인 손상 발생율을 감소 시켰다.

(3) EPRI 자료에서와 같이 제작사들도 허용응력이 제일 작게 작용하는 팁부분의 손상을 제일 많이 발생하게 하여 폐기처분 비율을 낮추었으며, 재정비하여 사용할 수 있게 하여 경제적 손실을 작게 만들었다.

(4) Fig. 14의 주요 손상원인에서와 같이 산화손상(Oxidation)에 의한 손상도 많지만 부식 및 TMF 등과 같은 복합적인 원인에 의하여 크랙이 주원인 것을 알 수 있으며, 이것 역시 팁부분의 손상이 주류를 이루고 있는 것을 알 수 있다.

## 후 기

이 연구는 산업자원부에서 주관하는 '전력산업 연구개발' 과제의 재정적인 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Meherwan P. Boyce, "Gas Turbine Engineering Handbook," Gulf Professional Publishing, Second Edition, pp. 431~432.
- (2) Viswanatan, R., "Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components," *ASM International*, pp. 422~448
- (3) David Balevic, Robert Burger and David Forry, "Heavy-Duty Gas Turbine Operating and Maintenance Considerations," *GER 3620K*, GE Power, pp. 32~33.
- (4) Frederick, G., 2003, "Laser Welding Repair of Service Exposed IN 738 and GTD 111 Buckets" *EPRI TR-1004345*, pp. 1-5~1-8.
- (5) Viswanatan, R., 1999, "Assessment of the Laser Welding Process for Superalloy Gas Turbine Blade Welding," *EPRI TR-113748*, pp. 2-8~2-10.