

# 7FA/FA+급 1 단 버켓 위한 신정비기법 개발

강 신 호<sup>†</sup> · 정 길 진<sup>\*</sup> · 김 대 은<sup>\*\*</sup>

## New Repair Technologies for 7FA/FA+ Class Stage 1 Buckets

Sin Ho Kang, Kil Jin Chung, Dae Eun Kim

**Key Words :** Bucket(버켓), Coating(코팅), Cutback Machining(컷백가공), Electrical Discharge Machining(방전가공), Ni based superalloy(니켈기 초합금)

### Abstract

The 1st stage bucket of the 170MW simple cycle gas turbine is one of the components that is normally run in exposed state at the highest thermally stressful environment while the turbine is operating. After certain period operation, various type of damages are easily found and the damages are identified as due to the turbine operating mode of which the demand of the electricity power is very peaking and cyclic. Since this trend is more evident at some part of power plants in Korea and it has caused higher scrap rate of the bucket at the first repair interval than other country. Therefore, demand for the higher capability and alternative technologies which allow salvaging more buckets and preventing from severe damages is always high. In this study, a review and estimation of the repair technologies for the past 5 years to present have been conducted and show results.

## 1. 서 론

### 1.1 버켓의 재질

가스터빈에서 연소가스의 운동에너지를 받아 회전에너지로 전환시켜 주는 부품을 회전익(Rotating Blade) 또는 버켓(Bucket)이라고 하는데, 이는 제작사마다 다르게 불린다. 1 단 버켓은 가스터빈 부품 중에서 가장 극심한 열응력과 고온피로를 받는 부품이다. 가스터빈의 효율과 출력이 크면 클수록 1 단 버켓에 가해지는 온도와 열응력은 증가할 수 밖에 없다. 현재 연소온도가 100F(56C) 증가하면 단순사이클에서 출력이 8~13% 향상되고, 효율은 2~4% 증가한다<sup>(1)</sup>. 따라서 버켓의 온도능력(20ksi 응력에서 100,000 시간 파단수명을 주는 온도를 말한다)이 오를수록 보다 대형화된 가스터빈을 만들

수 있으므로 어떤 버켓 재질을 채택할 것인가는 매우 중요한 설계변수라 할 수 있다. GE 에서 제작하여 현재 국내에서 상용 중인 가스터빈들의 1 단 버켓은 모두 니켈기의 고용강화형 또는 석출경화형 합금을 쓰고 있으며, 주요 버켓용 초합금과 성분을 Table 1 에서 나타낸다.

한편 합금의 첨가원소를 조절하여 고온에서의 요구하는 성질을 얻고자 하던 것에서 결정입계 혹은 결정방위를 조절하여 보다 높은 온도에서 내식성과 고온강도를 얻고자 하는 노력으로 바뀌기 시작하였는데, 이로 인한 결과로써 GTD-111DS 나 Single Crystal 과 같은 재료가 본격 선보이기 시작했다. 이러한 재료들은 스트레스나 부식등에 취약한 결정입계를 재료내부에서 감소시키거나 없앴으로써 고온에서 손상없이 보다 장시간 사용가능토록 개발된 것이다.

### 1.2 냉각 및 코팅기술

버켓 재질적인 개량 및 발전과 더불어 가스터빈 성능을 향상시키기 위한 또다른 핵심기술로써 첫째로는 냉각기술의 등장이고, 둘째로는 코팅기술의 발달을 들 수가 있다<sup>(2)(3)</sup>.

<sup>†,\*</sup> 한전기공주식회사 G/T 정비센터

E-mail : shkang@kps.co.kr

TEL : (032)580-8245 FAX : (032)580-8283

<sup>\*\*</sup> 연세대학교 기계공학과

Table 1 Chemical composition of various blade materials<sup>(1)</sup>

Buckets	Cr	Ni	Co	Fe	W	Mo	Ti	Al	Cb	V	C	B	Ta	비고
Udimet 500	18.5	Bal	18.5	-	-	4	3	3	-	-	0.07	0.006		
Rene 77(U700)	15	Bal	17	-	-	5.3	3.35	4.25	-	-	0.07	0.02		
IN 738	16	Bal	8.3	0.2	2.6	1.75	3.4	3.4	0.9	-	0.10	0.001	1.75	
GTD 111	14	Bal	9.5	-	3.8	1.5	4.9	3.0	-	-	0.10	0.01	2.8	

온도가 높은 유닛에서 운전되는 버켓일수록 복잡한 유로를 내부에 형성하고 있고, 에이포일 표면에 냉각공기구멍도 한층 많음을 알 수 있다.

7FA+급 모델인 경우 날개부위(airfoil)의 구멍을 통해 바깥으로 배출되는 냉각공기가 냉각막을 형성하여, 버켓이 고온의 연소가스와 직접적으로 접촉되지 않게 하는 냉각기법을 채택하고 있다. 또한 내부 유로벽 표면에는 못형 돌기나 주름벽 형식으로 하여 열전도가 일어나는 단면적을 증가시키고 있으며, 내부를 돌고 난 냉각공기는 날개의 후연(Trailing Edge)을 구멍을 통해 바깥으로 배출된다. 이렇게 복잡한 형상의 버켓은 정밀주조법의 하나인 인베스트먼트 캐스팅법을 이용함으로써 제작이 가능하다.

뿐만 아니라 연소가스에 노출되는 에이포일 표면에 열차폐코팅과 내산화 코팅을, 냉각공기가 흐르는 내부 유로벽에는 내산화코팅을 적용하여 재질의 용융온도보다도 높은 온도 범위 내에서의 운전을 가능하게 하며, 산화성분위기로부터 부품을 보호하기도 한다<sup>(4)(5)</sup>.

## 2. 버켓정비공정소개

### 2.1 입고검사 및 세정단계

입고된 버켓의 운전 및 정비이력을 검토함과 동시에 운전 중 발생한 결함의 유형을 파악한 후 표면의 오염물질 뿐만 아니라 코팅층 등을 제거하는 공정으로 기계적 또는 화학적 방식을 이용한다.

### 2.2 재생정비단계

2.2.1 열처리 공정 : 운전 중 부품이 겪게 되는 극심한 스트레스를 제거하는 공정으로써 대개 용체화 열처리(Solution Heat Treat)를 진공 중에서 수행한다.

2.2.2 결함제거공정 : 가공을 통해 표면의 정비 가능한 균열이나 찍힘, 부식 등의 결함을 없애는 과정으로써 회전익의 경우 고도로 제한된 기준과 절차에 따라 수행해야 한다.

2.2.2 비파괴검사(NDT) 공정 : 비파괴검사법으로 결함제거 상태를 확인한다.

2.2.3 용접 및 기계가공 공정 : 버켓의 결함부위를 용접으로 육성하고 가공하는 공정으로써 극도로 정밀하게 입열량을 제어하는 방식의 용접기법을 채택하고 있다.

2.2.4 열처리공정 : 결함제거 및 형상복원이 완료된 버켓의 정비 중 생긴 응력을 제거함과 동시에 재질적 기계적 성질을 복원해주는 열처리로써 대개 진공의 분위기에서 수행한다.

### 2.3 코팅단계

버켓 외부표면에 MCrAly 코팅과 Aluminide 층을, 냉각유로 내부에 Aluminide 층을 입히기 위한 공정으로 재생 정비된 버켓의 향후 수명을 보장하는 중요한 표면처리공정이다.

### 2.4 마무리 단계

2.4.1 모멘트무게분석 및 배열 : 정비된 버켓을 로터에 조립하기 전에 균형적인 무게배분을 고려해야 하는데, 이를 위해 버켓의 휠 조립순서 혹은 위치를 분석하여 정하는 공정으로써 전용 장비와 프로그램을 사용하여야 한다.

2.4.2 포장 및 출하 : 정비된 부품을 고객측에 인계하는 최종단계이다.

## 3. 1 단 버켓의 손상유형

### 3.1 산화, 부식 및 침식

고온에서 장시간 운전에 노출되는 부품들의 표면에 흔히 나타나는 결함 유형의 하나이다. 산화성 분위기의 연소가스와 접할 때 고온으로 인해 재질의 내식성이 저하되며 화학적으로 표면이 부식되는 현상으로써 심각한 감육현상을 초래하기도 한다. 이로 인해 스트레스에 취약한 부위에서는 산화나 부식이 진전되는 곳에서 결정경계면을 타고 균열이 진행되는 경우가 있다.

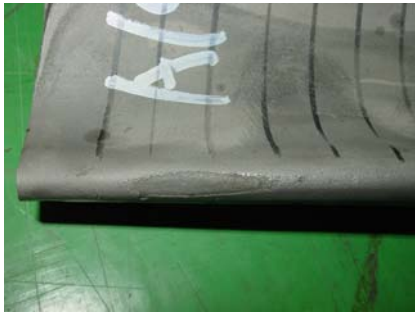


Fig. 1 Oxidized leading edge of the 7FA stage 1 bucket

3.2 피로(Fatigue)

재료의 항복응력보다 낮은 범위의 하중이 반복적으로 작용했을 때도 부품은 파단 될 수 있는 경향을 가지며, 특히 고온부 부품의 경우에는 잦은 기동정지와 같은 가열과 냉각이 반복되는 주기적인 운전조건 하에서 부품은 팽창과 수축을 반복하게 되고 오래 노출될수록 피로균열 또는 피로파단이 일어나기 쉽다.

피로는 반복주기의 크기에 따라 대략 100,000 cycle 을 기준으로 하여 이상이면 고주기피로(High Cycle Fatigue), 이하이면 저주기 피로 (Low Cycle Fatigue)로 구분할 수가 있다.

3.2.1 저주기 피로(LCF)

Cyclic Stress(주기적 응력)가 주원인데, 열응력을 일으킬 수 있는 잦은 기동정지, 급작스런부하 변화, 트립, 난폭스런 운전 등이 있다. 대개의 고온부 부품이 이 영향을 받는 것으로 알려져 있으며, 특히 버켓 뿐만 아니라 컴버스천 라이너와 트랜지션 피스 등에도 손상을 주는 주원인이 된다. 터빈 버켓의 경우에는 형상디자인 결과에 따라 다르게 되는데, 이를테면 Non-Shroud Type Blade 는 로터의 회전주기 영역과 블레이드 자체의 공진주기가 겹치지 않도록 검사하고 교정하는 Frequency Test 공정이 매우 중요하다.

3.2.2 고주기 피로(HCF)

탄성의 영역에서 높은 사이클의 진동이 반복될 때 재료는 피로파단을 일으킬 가능성이 있다. 특히 블레이드의 세장비가 큰 대신에 날개부위의 체적이 작은 콤프레서 블레이드의 경우 고주기 피로에 의해 손상을 입는 경우가 많다. 공진이 일어나는 경우 파손이 가속화되기도 한다.

3.3 재질적 불안정(Metallurgical Instabilities)

터빈 블레이드의 주요 재료로 쓰이는 니켈기 초합금에서 많이 발생하고 있으며, 고온에 장시간 노출되면 재료조직 내부에서 결정이 성장한다든지

혹은 석출물의 규모나 분포정도가 많아진다든지 하는 시효(Aging)현상이 생기게 되는데, 적당한 시효효과는 바람직할 때도 있으나 지나칠 때에는 과시효(Over Aging)라 하여 이롭지 못하다.

초합금에서 시효가 발생하였을 때 주로 발견되는 징조로는, 감마 프라임의 성장, 불순물로써의 2차상 석출물들의 성장 및 조대화, 결정입계에 집중되는 탄화물 석출등이 발견되고 이 결과로 입내산화, 응력부식균열 등에 취약해지며, 크리프저항성이 낮아진다든지 연성을 감소시키고 응력-파단특성에 악영향을 주게 된다<sup>(7)</sup>.

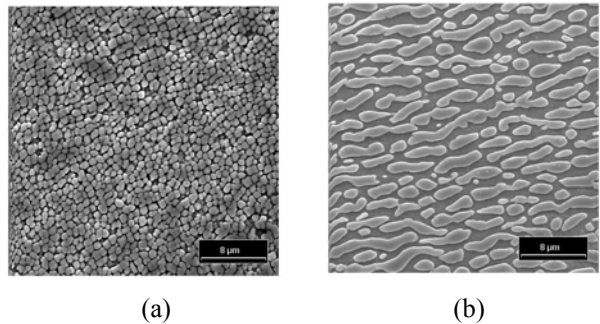


Fig. 2 GTD-111DS 조직: 비교적 정상적인  $\gamma'$ (a)과 장시간 운전으로 시효가 진행된  $\gamma'$ (b)

3.4 1 단 버켓의 손상 모드

가스터빈 유닛의 운전조건에 따라 버켓에 나타나는 손상유형은 매우 달라지게 된다. 운전 시 출력의 가감이라든지 기동 및 정지의 빈번함 등에서 오는 열충격은 그 횟수 및 노출시간에 따라 재료에 치명적이 될 수 있다. 따라서 가스터빈 제작사에서는 운전시간과 기동정지횟수에 따라 부품의 정비나 교체주기를 규정해 놓고 이에 따라 정비나 부품을 교체할 것을 고개측에 권고하고 있다.

Table 2 에서는 운전모드에 따른 고온부 부품의 손상유형을 구분하여 놓고 있다.

Table 2. Tabulated damage modes varied by operation modes

Operation Mode	Typical Damage Mode
Base Load	1. Oxidation/Corrosion/Erosion 2. Metallurgical Instabilities 3. Degradation of Material Properties 4. Creep Deflection
Cyclic Load	1. Fatigue - HCF/LCF 2. For TBN Blades/Buckets : - Low Cycle Fatigue -Thermal Stress - Centrifugal Stresses

3.5 버켓 손상사례 별 정비방법

3.5.1 팁 반경방향크랙(Tip radial crack)

버켓 Airfoil 의 오목면과 볼록면간의 압력차이 때문에 발생하는 것으로 스트레스가 많이 걸려있는 Pressure 가 높은 쪽에 발생한다. 대개 결합제거 가공후 실시하는 용접에 의해 복원이 가능하고 재질이 일방향성이라 할지라도 입열량을 정밀하게 제어하는 용접법을 채택하면 상온의 불활성분위기에서도 성공적으로 재생정비가 된다<sup>(8)</sup>. 용접 후에는 본래의 Tip cavity 형상을 갖도록 하기 위한 정밀한 가공공정이 필요하다.

버켓의 냉각유로를 Tip 부위에서 막고 있는 것이 Tip Cover 로써 이 이하로 크랙이 진행되었을 경우에는 용접을 수행하지 않는다. 같은 1 단 버켓이라 할지라도 상단에서 일정범위 내까지는 크랙을 허용하는 경우도 있고, 브레이징 공법을 적용하여 크랙을 채우는 경우도 있다.



Fig. 3 Tip radial cracks occurred on the pressure side of bucket

3.5.2 버켓 날개부위 크랙(Airfoil crack)

전형적인 저주기피로(LCF)에 의한 손상으로써 깊이가 깊지 않은 크랙들이 방향성을 가지며 표면에 분포한다. 주로 스트레스가 많이 걸리는 부위, 예를 들면 suction side 의 leading edge 가까운 곳에서 airfoil 높이의 중간 위치(50% Span) 되는 곳에 집중적으로 생겨나는데, 원인으로는 높은 열이 집중적으로 작용하는 곳에서 재료의 표면에 지속적으로 팽창과 수축이 반복됨으로써 피로균열이 생겨난 때문인 것으로 알려져 있으며, 이 경우 균열은 코팅층을 관통하여 모재로까지 진행된다.

재생정비작업 시에는 표면균열을 연삭가공으로 완전히 제거해야 하며, 이 과정에서 균열의 잔류여부는 형광침투 탐상법(Fluorescent Penetrant Inspection)으로 확인하며, 필요 시에는 열세정(Heat Tint)공정을 수행하여 표면에 감추어진 균열을 보다 정확하게 확인하는 공정을 거치기도 한다. 표면균열을 없애는 과정에서 불가피하게 Airfoil 의 두께감육이 초래되며, 잔류두께가 일정기준치 이내일 경우에는 재사용이 불가하다.



Fig. 4 Crazy cracks concentrated on the suction side airfoil and middle span of the bucket

현재 재생정비 대상에서 제외되는 스크랩 버켓은, 상당부분이 잔류두께를 만족하지 못함으로 인해 발생한다.

3.5.3 냉각구멍 크랙(Cooling hole crack)

냉각을 위하여 형성한 유로 주변에 응력이 집중하게 되면 균열과 같은 손상을 초래하게 되는데, 날개 표면의 냉각구멍에서 발생하여 세로방향으로 진행되는 균열이 있고, 날개후연(Trailing Edge)과 몸통(Shank)이 만나는 첫번째 냉각구멍(Root Cooling Hole)의 지점에서 세로방향으로 균열이 발생하는 경우도 있다. 전자의 경우 깊지않고 표면에 머무는 경향이 높은 반면, 후자의 경우에는 10mm.깊이까지 모재 내로 진행된 사례가 종종 발견되고 있다.

결함이 일어나는 원인으로는 운전시 생크부위와 날개부위가 노출되는 환경이 다름으로써 온도구배가 생기게 되고, 이는 버켓형상의 틀어짐(Curling)을 유발하여 첫번째 냉각구멍에 크랙이 발생하는 것으로 분석된 바 있다.



Fig. 5 No.1 Cooling hole crack

유효한 정비방법으로는 날개 표면 균열의 경우 핸드그라인더를 이용한 연삭가공으로 미세한 부분까지 제거할 수 있으며, 날개 후연의 첫번째 냉각구멍의 경우에는 관통크랙이 대부분이므로 손상부위를 포함한 날개 후연의 일정부분을 방전가공 등으로 절삭해냄으로써 재생정비 뿐만 아니라 예방차원에서의 개조가 가능하다.

3.5.4 플랫폼 크랙 (Platform crack)

저주기피로(LCF)에 의해 발생하는 결합중의 하나로 날개몸체 크랙과 마찬가지로 취약한 알루미늄 나이드 코팅층에서부터 발생한 균열이 모재로 전파하는 것으로 분석되고 있다. 잦은 기동정지로 인해 균열발생이 가속화되는데 경우에 따라서는 관통크랙이 보고되기도 한다. 특히 7FA급 보다는 운전온도가 더 높은 7FA+급 유닛에서 보다 심각한 플랫폼 균열이 발견되기도 한다.

정비방법으로는 가능한 한 크랙을 모두 제거하는 방식을 택하되 향후의 운전 중 심각한 결함을 초래하지 않는 범위 내에서 잔류두께가 유지되어야 하며, 또한 현저한 형상 변화를 초래하지 않도록 유의하여야 한다.



Fig. 6 Typical platform crazy cracks

4. 신정비 기법 개발

4.1 배경

가스터빈 유닛을 운용하는 각 발전소별 특성과 운전모드 등에 따라 부품에 나타나는 손상유형이 달라지고 있는 것이 사실이며<sup>9)</sup>, 재생을 위한 정비 기준은 모든 부품에 대해 동일하게 적용된다고 할 때, 결국 운전모드가 곧 부품의 재생정비 성공율을 결정짓는다고 해도 과언이 아니다.

실제로 대략 5년전쯤, 첨두부하형으로 운전되는 7FA 급 복합화력 발전처의 각 유닛에서 나온 버킷들은 당연히 정비작업 시마다 스크랩률이 높았고, OEM 제작사에서 경험하지 못한 유형의 심각한 결함을 보이고 있었다.

Figure 8 에서는 96년 11월부터 02.10월 사이에 재생정비공정에 투입된 21개 버킷 세트들의 운전 이력을 분석한 것으로, 기동횟수와 가동시간을 각각 X-Y 축에 두고 그 교점을 점으로 표시하였을 때 그 분포경향이 그래프의 우측 코너상부를 향하고 있으므로 가동시간이 길 뿐만 아니라 기동정지도 동시에 빈번하게 운전되었음을 알 수 있다.

이후로 국내에 7FA+급 모델이 도입되어 인천지역의 발전소와 광양제철소 내에서 운용하고 있고

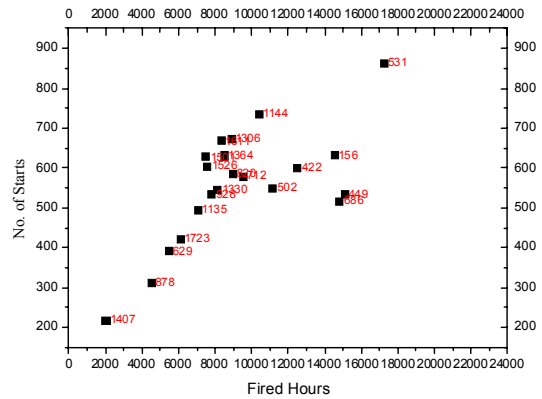


Fig. 7 Starts-fired hours based repair interval of the 1st stage bucket from the 7FA units power plant

2002년 이후 최근에는 부산지역에서 모두 8기의 7FA+e 급 모델을 이미 시운전하고 있는 상황이므로 96년과는 전혀 다른 상황이라 할 수 있다.

즉, 모델의 업그레이드가 국내에서도 진전을 이룬 만큼 기존의 1단 버킷 정비기술도 7F 급 뿐만 아니라 7FA+e 급 까지도 감당할 수 있을 만큼의 기술적 진보를 이뤄온 것이다. 정비기술 측면에서 뿐만 아니라 제작 기술에 있어서도, 특히 코팅기술에 있어서도 OEM 측의 괄목할 만한 기술개발이 있었고 국내도입을 눈앞에 두고 있다. 이후의 각 절에서는 신기술과 신정비 기법에 대해 소개하고자 한다.

4.2 날개후연 컷백(Trailing edge cutback)가공정비

버킷의 생크부위와 날개부위에서 온도구배가 크게 나타남으로 인해 뒤틀림현상이 발생하고 이는 첫번째 냉각구멍 부위에 응력집중을 유발하는 것으로 분석됨에 따라, 이를 근본적으로 개선하고자 하는 대책으로 제시되었고 현재 제작 및 정비 단계에서 적용되고 있다.

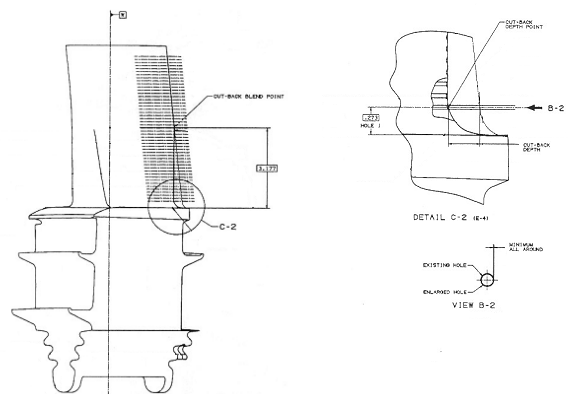


Fig. 8 Schematic of the cutback repair

즉, 크랙이 발생한 냉각구멍 부위를 일정한 형상을 갖도록 절삭가공으로 제거한 뒤 성형 완성하는데, 7FA+급 버켓은 표면코팅을 DVC-TBC 로 대체하여 정비를 완료한다.

#### 4.3 DVC-TBC Coating (Dense Vertically Cracked - Thermal Barrier Coating)

최근에 개발되어 2001년 후반기에 국내에 제품을 선보인 신코팅기법으로써 7FA+e 모델에 적용하고 있다. 기존 열차폐코팅 방식으로부터 코팅층의 두께와 형식(Morphology)을 개선하여 내산화성과 내균열성을 혁신적으로 개선한 기술이다.

아래 그림에서 보는 바와 같이 기존 TBC 체 비해 코팅두께를 고밀도로 두텁게 하여 열차폐효과를 높이고, 한편으로는 수직방향의 미세한 크랙을 코팅층에 미리 형성시켜 놓음으로써 코팅층의 응력을 이완시키는 효과를 얻고자하는 방식이다.



Fig. 9 Cross-sectional micrograph of the DVC-TBC coated layer (—— 0.3mm)

#### 4.4 Airfoil 감육손상 정비대책

1 단 버켓이 가장 많이 스크랩 되는 손상유형으로 현재까지는 Airfoil 의 wall 두께 손실이다. 이의 원인으로는 지적인 바와 같이 저주기 피로에 의한 표면균열의 발생 때문인데, 크랙이 깊을수록 정비되어지고 난 후의 버켓의 잔류두께는 얇아지기 마련이며 이를 무작정 얇게 할 수는 없는 실정이다.

따라서 현재로는 표면크랙이 모두 제거되고 난 후의 날개부위 잔류두께를 측정하여 일정치수 이하의 버켓들은 재생을 보류하고 있는 실정이다.

현재까지 세계 유수의 정비업체와 연계하여 개발하고 있는 정비 방법을 소개하면 아래와 같다.

- ☐ Powder Metallurgy를 이용한 두께보전방법
- ☐ 진공코팅기법을 이용한 두께보전 방법

상기의 기법을 7F 급에 적용하여 성공을 거둔 사례는 해외에서 보고된 바 있으나 아직 국내에는 없다. 국내의 운전조건이 해외와는 많이 다르다는 점을 감안할 때, 새로 개발된 기법으로 정비완료

된 버켓이라 할 지라도 레인보우 테스트를 거쳐야 할 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

7FA급 1단 버켓은 재질 특성이나 기존의 코팅 기법 등이 우수한 것으로 알려져 왔으나, 기동정지횟수가 많은 국내의 운전모드에서는 결합의 정도가 외국의 경우보다 심각하여 재생정비율이 낮을 수 밖에 없었다. 이러한 경향은 운전온도가 업그레이드된 7FA+급 유닛에서 더욱 높아졌었는데, 최근 2년간 제작사와 연계하여 결합원인을 규명하고 적절한 정비기법을 구축하는 프로젝트를 지속적으로 수행, 현재에는 정비범위를 조정하고 정비기법을 다양화하여 2차 재생시 재생수율을 약 70% 이상 높일 수 있게 되었다.

또한 국내에 7FA+e 급 모델로 상향 조정되려는 추세가 두드러짐에 따라 DVC-TBC 와 같은 GE 의 최신 코팅기술뿐만 아니라 적용가능한 선진 기술을 도입 접목하고자 하는 방향으로 기술개발 및 연구활동을 전개 중이다

## 참고문헌

- (1) Schilke, P.W., *Advanced Gas Turbine Materials and Coating*, GER-3569F, GE Power System, pp.3~6.
- (2) Lee, D.H. and Cho, H.H., 2000, "Heat Transfer Characteristics on Effusion Plate in Impingement /Effusion Cooling for Combustor", *Proceedings of KSME*, Vol.24, 3, pp.435~442.
- (3) El-Wakil, M.M., 1984, *Powerplant Technology*, McGraw-Hill International Editions.
- (4) Bradley, E. F., 1988, *Superalloy-A Technical Guide*, ASM International, pp.233~240.
- (5) Schilke, P.W., *Advanced Gas Turbine Materials and Coating*, GER-3569F, GE Power System, pp.8~12.
- (6) Viswanathan, R., 1987, "Corrosion of Combustion Turbines", *ASM Metals Handbook*, 19<sup>th</sup> Ed. Vol.13, pp.999~1001.
- (7) Bradley, E. F., 1988, *Superalloy-A Technical Guide*, ASM International, pp.18~20.
- (8) Crimi, P.V., Bezner, J.K., Grossman, T.R., Nash, A.E. and Porish, A.J, GER-3957, *Gas Turbine Repair Technology*.
- (9) Hoef, R., Gebhardt, E., *Heavy-Duty Gas Turbine Operating and Maintenance Consideration*, GER-3020G, GE Power System.