

< 기술논문 >

GTD-111DS 가스터빈 블레이드 재료의 열처리에 따른 재료 특성변화

김문영* · 박상열* · 양성호*
(2005년 4월 19일 접수, 2006년 1월 26일 심사완료)

Properties Variation According to Heat Treatment for Gas Turbine Blade(Bucket) Material of GTD-111DS

Moon Young Kim, Sang Yeal Park and Sung Ho Yang

Key Words: After Heat Treatment(후열처리), Blade(Bucket), GTD-111DS(일방향구조), HIP(고온등압압축처리), Pre-heat Treatment(전열처리), WRAP™(Weld Repair Advanced Process)

Abstract

The gas turbine components is used on high temperature conditions which under severely circumstance with start-up and stop several times. Therefore, it is used nickel-base superalloys like and GTD-111DS. Damaged buckets on the blade tip during operating are repaired per 24,000 hr to three times according to repair specification of manufacture. It is applied pre-heat, HIP(hot isostatic pressing) and post-heat treatment to support welding repair on blade tip effectively. On this study, It is utilize of WRAP™(welding repair advanced process) method to make tension test specimens for this study. And then, material strength and characteristic for GTD-111DS was analyzed.

기호설명

γ : 감마프라임

1. 서론

가스터빈 효율증가를 위하여 1950년대 초창기 800℃이던 가스터빈의 터빈입구온도(TIT)가 최근에는 1,300℃를 넘어서 1,500℃에 이르고 있다. 그 이후 효율증가와 함께 블레이드 재료는 거의 10년을 주기로 변천되어져 왔다. 특히 1980년대

말 GTD-111DS 재료의 개발로서 급속한 효율향상을 가져왔으며, 냉각 및 코팅방법의 개선과 함께 현재의 1,500℃의 가스터빈을 가능하게 만들었다.

이 중에서 GTD-111DS 재료의 열처리에 따른 재료의 특성 변화를 보고자 한다. Fig. 1은 GE사에서 사용한 가스터빈 블레이드 재료의 변천을 보여주고 있다.⁽³⁾

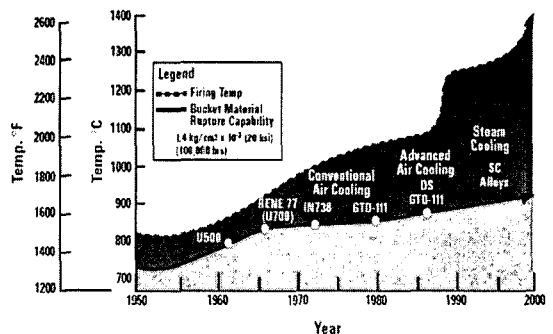


Fig. 1 Blade material trend used by GE

† 책임저자, 회원, 한전기공 GT정비기술센터
E-mail : mykim@kps.co.kr
TEL : (032)580-8221 FAX : (032)580-8282
* 한전기공 GT정비기술센터

이와 같이 가스터빈 효율 향상을 위하여 신소재에 의한 각종 고온 부품이 만들어져 사용되어지고 있다. 특히, 대용량 가스터빈은 효율증가를 위하여 연소온도를 지속적으로 증가시켜 왔으며, 1,300°C 이상의 고온에서 사용되고 있는 블레이드 등과 같은 회전부품은 열악한 운전환경, 온도조건에서 동작되기 때문에 특히 재질의 우수한 크리프 특성과 크리프-피로 특성이 요구되어진다. 외국의 GE, SIEMENS와 ALSTOM 등과 같은 제작사의 가스터빈에 사용되고 있는 대부분 블레이드 재질은 Ni계 초합금으로 제작하여 사용하고 있다. 따라서 과거의 블레이드 재질은 개발 시기에 따라 사용 온도 한계점이 다르며, 점차적으로 사용온도가 증가되어졌다. 이와 같은 운전온도의 증가는 곧 바로 기술개발에 따른 재질특성의 향상으로 재질의 변천을 가져왔다. 주로 이러한 곳에 사용되는 Ni계 초합금은 고용 및 석출강화 열처리를 수행함으로써 고온에서의 기계적 성질이 우수하고 내식 및 내마모성이 아주 뛰어난 재질 특성을 지니고 있다.

가스터빈 블레이드 재질로 주로 많이 사용되고 있는 Ni계 초합금인 IN738은 1970년초 산업용 가스터빈 블레이드에 처음으로 소개되어졌으며, 크리프 파괴강도와 부식저항의 개선으로 현재까지 산업용 가스터빈 재질로서 폭 넓게 사용되어지고 있다.⁽¹⁾ 그리고 최근에 많이 사용되어지고 또 다른 Ni계 초합금인 GTD-111 재질은 1970년대에 설계되었으며, 1980년대에 가스터빈 1단 블레이드에 최초로 적용되어 사용되었다.⁽²⁾ 얼마 후 고온에서 크리프 강도가 훨씬 더 좋은 GTD-111DS (Directionally Solidification) 재질이 1984년과 1990년대에 소개되어 블레이드에 적용되었다. 미국의 가스터빈 제조사인 GE는 2000년부터 신규 가스터빈 블레이드 재질로서 1970년 초에 개발하여 사용된 IN738 재질을 점차적으로 GTD-111DS 재질로 교체 제작하여 사용하기 시작하였다.⁽¹⁾

GTD-111DS 재질의 블레이드는 equiaxed GTD-111보다 10배가 넘는 열피로 또는 변형 조절능력을 가지고 있으며, 충격강도가 33% 이상 향상되었다. Equiaxed GTD-111은 IN738LC 보다 크리프 성질이 35°F(20°C) 개선되었으며, 저주기 피로강도 (L.C.F) 또한 훨씬 우수하다. IN738LC 역시 고온 부식저항 및 내구성능을 증가시키기 위하여 우수한 결합체를 지닌 초합금 중의 하나이

다. 60년대 중반에 사용하기 시작한 GE 7EA 3단의 U500 재질은 현재 제작사에서는 생산하지 않고 있으며, IN738LC 재질로 바꾸어서 제작하여 판매하고 있고, 이 재질은 다른 모델의 후속단 (2, 3단) 블레이드 재질로 사용하고 있다. 따라서 대부분의 블레이드 재질은 효율증가에 따른 연소 온도상승으로 인하여 높은 크리프 강도와 산화저항에 견딜 수 있어야 하므로 이전에는 1단으로 사용되던 재질도 몇 년 후에는 상대적으로 온도가 낮은 마지막 단에서 사용되어진다. 특히, 고온에서 사용되는 가스터빈 블레이드는 제작사에서 규정하고 있는 24,000시간 및 48,000시간 (EOH) 운전시마다 재생정비를 권고하고 있다.

재질 특성상 초합금은 고온에서 일정시간 사용할 경우 재질 및 조직의 물성치가 변화되어진다.^(4,6) 재질은 조직 내에 γ' 입자가 입방체에서 구형으로 변화하면서 γ' 입자들 사이의 조직이 흐트러지며, 입계를 따라 $M_{23}C_6$ 카바이드 상이 계속적으로 성장하고 γ' film들이 두꺼워진다. 이러한 조직 복원을 위하여 HIP을 포함하여 solution & aging 열처리를 수행하며, 일반적으로 이것은 재질 복원을 위한 재생 열처리 (Rejuvenation Heat Treatment) 라고 말한다.

따라서 블레이드 소재의 재질복원을 위하여 전 열처리, HIP 및 후열처리 등과 같은 다양한 열처리를 수행하게 된다.

다양한 블레이드 재질 중에서 대표적으로 적용되고 있는 GE 모델의 GTD-111DS 재질의 블레이드로부터 와이어 가공(Wire Cutting) 방법으로 시편을 채취한 후, 운전 중 손상된 블레이드 팁의 정비 방법인 WRAP™ TIG를 이용하여 실제와 유사한 환경조건의 시편을 제작하였다. 제작된 시편으로 재질복원(Rejuvenation)에 사용되고 있는 다양한 열처리 방법을 적용하여 그에 따른 재질 및 기계적 특성의 변화를 연구하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험에 사용한 블레이드의 특징

2.1.1 대표적인 블레이드 재질의 화학조성도

Fig. 2는 대표적으로 사용된 가스터빈 블레이드

(wt.%)

COMPONENT	Cr	Ni	Co	Fe	W	Mo	Ti	Al	Cb	V	C	B	Ta
BUCKETS													
U509	18.5	BAL	18.5	—	—	4	3	3	—	—	0.07	0.002	—
RENE 72(U702)	15	BAL	17	—	—	5.3	3.25	4.25	—	—	0.07	0.02	—
IN738	16	BAL	6.3	0.2	2.6	1.75	3.4	2.4	0.8	—	0.10	0.001	1.75
GTD111	14	BAL	9.5	—	3.8	1.5	4.8	3.0	—	—	0.10	0.01	2.8

Fig. 2 Chemical composition of GE blade material

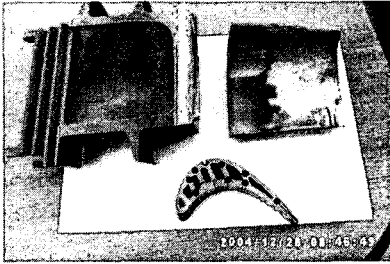


Fig. 3 Blade shape taken test specimens from 1 stage blade

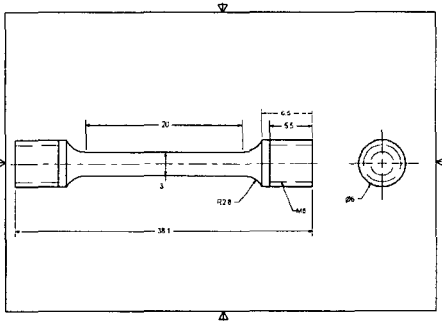
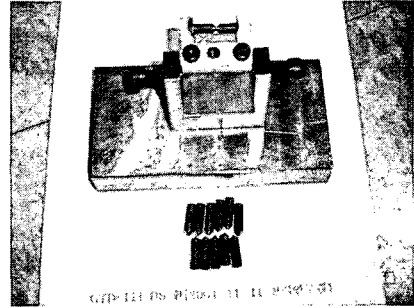


Fig. 4 Dimension of tensile test specimen

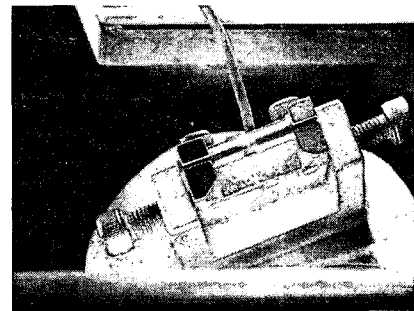
재료의 화학 조성도를 보여주고 있다. 본 연구에서는 현재 국내에서 블레이드 재료로 가장 많이 사용하고 있는 GTD-111DS 재질을 사용하였다.⁽³⁾

2.1.2 시험편 제작 및 운전이력

일반적으로 가스터빈 제작사에서 24,000시간 운전 후 1차적으로 블레이드를 점검하게 되어있는 규정을 고려하여 유사한 운전시간대의 사용 블레이드를 선정하여 단축시험 시험편을 제작하였다. Fig. 3은 시험편 절취 후 남은 블레이드의 형상을 나타내었고, Fig. 4는 시험편의 형상을 보여주고 있다. 7FA 모델의 한정된 블레이드 형상으로 인하여 운전 중 제일 많은 응력을 받는 에어 포일(Airfoil) 하단부로부터 내각 구멍을 제외한 부분에서 10여개 정도의 시험편만을 와이어 가공(Wire Cutting)으로 채취하였으며, 시험편의 인장부는 자동화 가공기(CNC Machine)를 이용하여



(a) Welding jig & specimen



(b) Welding in WRAP box



(c) Specimens after welding

Fig. 5 Welding procedure of tensile test specimens

가공 제작하였다.

용접 시험편 제작을 위해 채취한 시험편 중앙 용접노치(Notch)부를 Jig에 고정하여 WRAP™ Box의 고온, 불활성 가스분위기 속에서 용접작업을 수행하였다. 그리고 중앙 인장시험부 가공은 일반시험편과 마찬가지로 제작하였다. Fig. 5는 용접 Jig와 용접용 시험편, WRAP Box 안에서의 TIG(Tungsten Inert Gas) 용접하는 사진 및 용접된 시험편 형상을 보여주고 있다. 이때 용접봉(filler)은 PMet811을 사용하였고, Table 3에 PMet811의 화학 조성을 나타내었다.

Table 1 Operation hour of test specimens

사업소	재질명	고유번호	운전시간(Hr) (1차/2차)			비 고
			실 운전시간	기동횟수(회)	E.O.H	
-	GTD-111DS	신재	0	0	0	조직분석
서인천	GTD-111DS	C2BM---	15,088	533	25,748	용접시편
서인천	GTD-111DS	C2BM---	15,088	533	25,748	조직분석

* EOH = 실 운전시간 + (기동횟수 x 20)

Table 2 Heat treatment conditions

용접전 · 후열처리				HIP 열처리		Aging 열처리	
전열처리		후열처리		온도 (°F)	시간 (Hr)	온도 (°F)	시간 (Hr)
온도(°F)	시간(Hr)	온도(°F)	시간(Hr)				
2,050	2	2,050	2	2,162	4.5	1,550	4

Table 3 Chemical composition of PMet811 filler metal

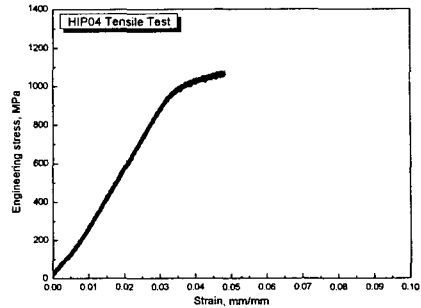
	Cr	Ni	Co	Fe	W	Mo	Ti	Al	V	C	B	Ta	Mn	Si
PMet811	13.72	61.7	9.20	<0.10	3.60	1.50	4.74	2.82	<0.05	0.10	0.01	2.62	<0.10	<0.1

Table 1은 실험에 사용된 시험편의 운전 이력을 보여주고 있다.

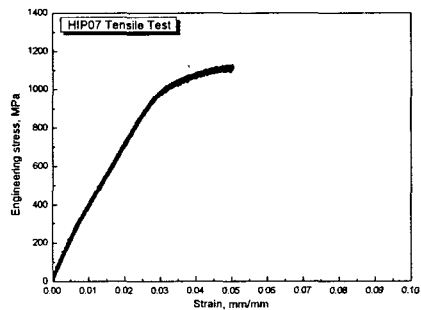
2.2 열처리

가스터빈 정비센터(Repair Center)에서는 정비수행을 위하여 고온에서 사용되는 가스터빈 부품 특성상 열처리 과정을 거치면서 정비를 수행하게 된다. 이것으로 사용되는 대표적인 열처리로서는 전 열처리, HIP(Hot Isostatic Pressing) 및 후열처리가 있다. 이러한 열처리를 수행한 후 재질을 분석하였다. HIP처리를 위해서는 Autoclave Engineering Inc (미국) 장비를 이용하였으며, 후열처리는 Abaripen 장비(미국)를 이용하여 열처리를 수행하였다. 여기에서 후열처리는 Solution & Aging 열처리를 수행하였다. Table 2는 실험에 사용된 열처리 조건을 보여주고 있다.

본 연구에서 사용한 재질은 비파괴 검사 전 잔류응력제거와 용접정비에 따른 문제점을 최소화하기 위하여 전열처리를 수행한 상태에서 HIP처리와 전 · 후 열처리 단계에 따라 기계적인 특성 평가 및 조직분석을 수행하였다.



(a) Pre heat treatment/Welding/post heat treatment



(b) Pre heat treatment/Welding/HIP/post heat treatment

Fig. 6 Tensile test on GTD-111DS used 25,748hrs

3. 실험결과 및 고찰

3.1 기계적 특성

3.1.1 상온 인장시험

상온 인장시험은 ASTM E8의 규정에 따라 3회 이상 실험을 수행하였다. Fig. 6은 열처리 조건에 따라 상온에서 인장시험을 수행한 그래프이다. Table 4는 GTD-111DS 25,748시간 운전된 용접시편의 전열처리/시험편용접/후열처리와 전열처리/시험편용접/HIP처리/후열처리를 수행한 인장시험 결과이다. 상온 인장시험에서는 HIP 처리 없이 후열처리만 수행한 것과 HIP 처리 후 후열처리를 수행한 것의 인장시험 특징은 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 또한 HIP 처리과정을 거친 시험편이나 HIP 처리 없이 후열처리 과정만 거친 시험편 모두 용접부 또는 모재에서 파단이 일어났다. 파단이 용접 열영향부에서 일어나지 않고, 모재나 용접부에서 다양하게 파단된 것으로 보아 상온에서의 인장강도는 HIP처리 여부와 상관없이

Table 4 Tensile test results for before and after HIP treatment used 25,748hrs GTD-111DS material

구분	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	비 고
1	980.3	1,108	전열처리/시험편 용접/후열처리
2	967	1,112	전열처리/시험편 용접/HIP/후열처리

Table 5 Hardness of GTD-111DS test specimen per each condition

재 질	운전시간 (Hr)	조 건	HRC	비 고
GTD-111DS	신재	-	40.5	
	25,748	운전 후	39.9	
	43,614	운전 후	32.8	
	신재	HIP	39.6	
	25,748	전열처리/HIP	39.2	
	43,614	전열처리/HIP	40.6	
	25,748	전열처리/후열처리	43.6	인장시험
	25,748	전열처리/HIP/후열처리	44.5	인장시험

열영향부가 모재에 비해 취약한 상태는 아님을 알 수 있다. 또한, WRAP 용접조건과 후열처리 과정에서 열영향부의 비중이 크게 작용하지 않는다는 것을 알 수 있다.

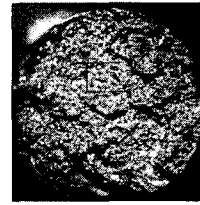
3.1.2 경도시험

Table 5는 GTD-111DS 재료의 각 조건에서 로크웰 경도값 (HRC)으로 측정된 결과를 보여주고 있으며, 용접시편 및 사용재 시편의 각 조건에 따른 경도값을 3회 이상 측정하여 나타낸 것이다.

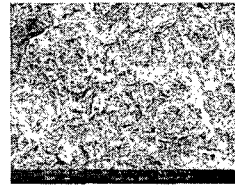
GTD-111DS 재료의 용접시편 및 사용재의 각 조건에 따른 경도값은 사용시간이 길어짐에 따라 γ' 상의 변화에 따라 경도값이 낮아지는 것을 알 수 있다. HIP 처리 후의 경도값은 신재나 사용재 모두 유사하게 나타나며 큰 차이가 없다. 25,748 시간 사용재의 경우 HIP 처리 후 후열처리에 의하여 경도값이 4(HRC)정도 증가하였다.

3.2 미세 조직 분석

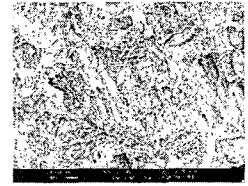
Fig. 7은 GTD-111DS 블레이드의 25,748시간 운전한 재질로서 전열처리/용접/HIP처리/후열처리한 시험편의 파면조직을 보여주고 있다. (a)는 파단면을 나타내고 있으며, (c)는 전형적인 연성파괴인 Dimple 형상을 보여주고 있고, (d)에서는 판상 구조의 γ/γ' 공정 조직, (e)에서는 γ' 이 떨어져 나간 것을 알 수 있다. Fig. 8은 Fig. 7(d)와 (e)의 EDS 분석 결과로 Ti, Ta 및 Al 함량이 GTD 111의 기본 화학적 조성보다 많은 γ/γ' 공정 조직과 γ' 의 전형적인 EDS Peak를 보이고 있다.



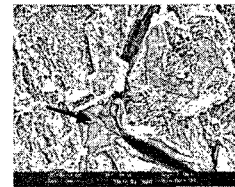
(a)



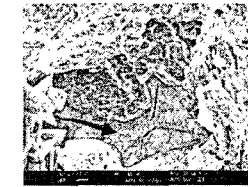
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 7 SEM observation of fracture appearance after HIP/post heat treatment for GTD-111DS used 25,748 hrs

(a) x1,000 (b) x2,000 (c) x5,000 (d) x10,000

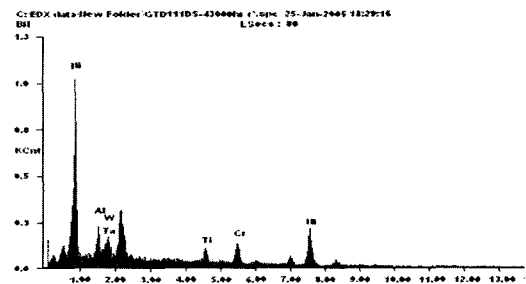
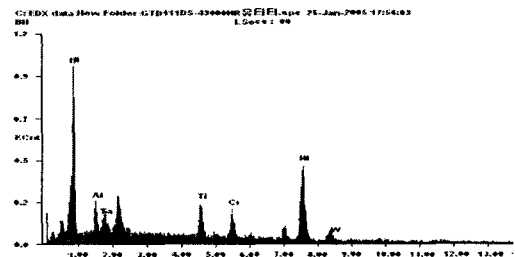


Fig. 8 EDS Peak for γ/γ' eutectic(Top), γ (bottom)

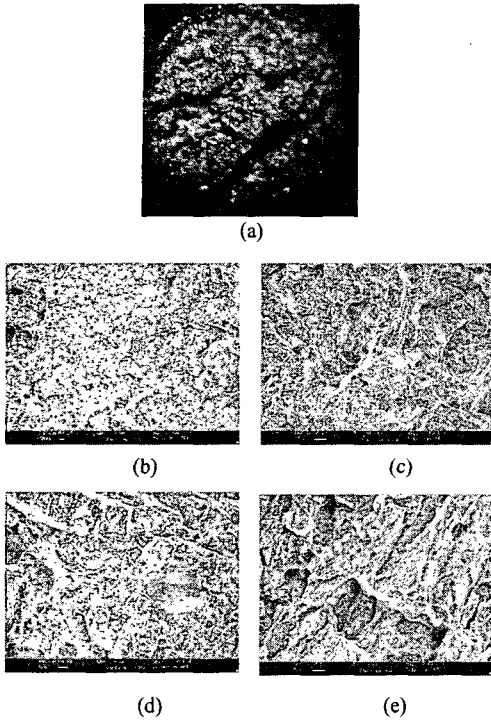


Fig. 9 SEM observation of fracture appearance after post heat treatment for GTD-111DS used 25,748 hrs
(a) x500 (b) x2,000 (c) x5,000 (d) x10,000

Fig. 9는 GTD-111DS 버킷의 25,748시간 운전에 사용된 재질을 전열처리/용접/후열처리한 경우의 파면 조직으로 Fig. 7에서와 마찬가지로 전형적인 연성과괴 양성을 보여주고 있으며 특별한 특이성은 없다.

Fig. 10에는 운전 시간에 따른 GTD-111DS 재질의 미세조직으로서 25,748시간 운전 후 미세조직은 primary γ' 이 약간 구형화 되었으며, 크기는 1 μ m까지 성장하였고, secondary γ' 이 관찰되었다. 43,614시간 운전 후 미세조직에서는 구형화된 primary γ' 이 다른 γ' 과 합쳐지며 성장하고 있음이 관찰되었으며, secondary γ' 은 거의 나타나지 않았다. Table 5에서와 같이 25,748시간에서 43,614시간으로 운전시간이 경과함에 따라 변화하는 γ' 형상이 재질의 경도값에도 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

Fig. 11에는 25,748시간 사용한 GTD-111DS 재질의 HIP처리 유무에 따른 미세조직 변화를 나타내었다. Fig. 11(a)는 HIP처리 없이 전열처리/후열처리만 수행한 미세조직으로 운전 후에 비해

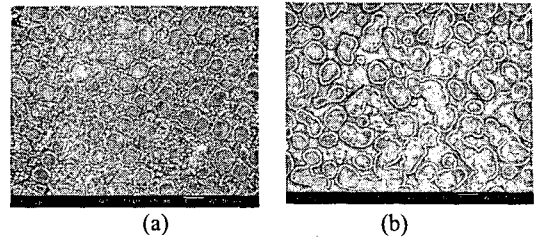


Fig. 10 Microstructure of GTD-111DS after service
(a) 25,748 hrs (b) 43,614 hrs

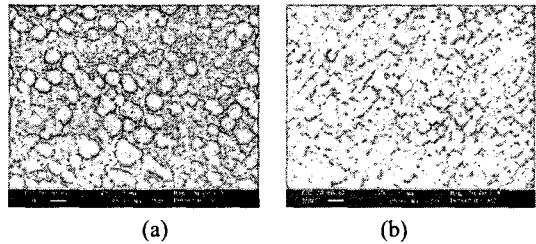


Fig. 11 Microstructure of GTD-111DS after 25,748 hrs of service
(a) pre-heat treatment/post-heat treatment
(b) pre-heat treatment/HIP/post-heat treatment

primary γ' 크기는 약간 작아진 것으로 보이나, 구형의 형상은 그대로이며, secondary γ' 이 고르게 석출된 것을 알 수 있다. Fig. 11(b)는 HIP처리 후 후열처리까지 수행한 것으로 운전 후 미세조직에 비해 primary γ' 크기가 약간 작아졌으며 형상은 입방체에 가깝게 성장하였음이 관찰되었다. 또한 secondary γ' 도 고르게 분포되어 있다. HIP 처리의 주 목적은 내부의 void를 제거하는데 있으나, HIP처리 온도가 일반 solution 열처리 온도에 비해 높기 때문에 HIP처리 동안 일부 γ' 이 용해되어 재석출되는 과정을 거치면서 이러한 미세조직을 나타내는 것으로 보인다.

Fig. 12의 (a)는 전열처리/HIP처리만 수행한 시편의 미세조직을 나타내고 (b)는 전열처리/HIP처리 및 후열처리까지 수행한 미세조직을 보여주고 있다. HIP처리 후에는 γ' 이 매우 불균일한 형상을 보이고 있으나, HIP 및 후열처리를 병행으로 수행한 재질의 γ' 형상은 거의 입방체로 바뀌어진 안정된 상태가 되었으며, secondary γ' 도 고르게 석출되었다. GTD-111DS는 주조 후 표준열처리(1121 $^{\circ}$ C(4시간) + 843 $^{\circ}$ C(24시간))를 하게 되면 γ' 의 volume fraction은 60%이고, 크기는 0.8 μ m 정도이다.⁽⁵⁾

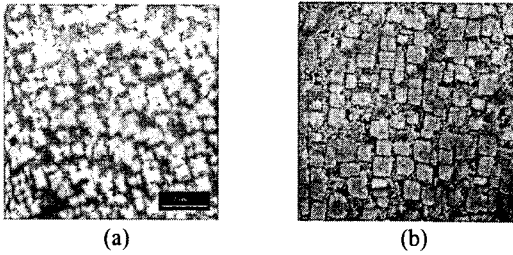


Fig. 12 Microstructure of GTD-111DS after 25,748 hrs of service

- (a) pre-heat treatment/HIP
(b) pre-heat treatment/HIP/post-heat treatment

Fig. 7과 9는 연성파괴의 양상으로 각 시편들의 파면을 EDS로 분석한 결과 큰 차이를 보이지 않고 모재에서 파단이 일어났음을 알 수 있다. 각 조건에 따른 파단면에서의 뚜렷한 차이는 발생하지 않았으며 이는 파단면 파면상으로는 뚜렷한 파괴기구의 차이를 나타낼 정도로 인장강도 값의 차이가 아주 크지 않음을 의미 한다.

4. 결론

장기간 사용된 가스터빈 블레이드 재료의 열처리 공정을 선정하기 위하여 HIP 처리가 주는 기계적 특성의 변화에 대하여 검토하였다.

(1) 25,748시간 사용한 GTD-111DS 재료의 용접 시편을 가지고 HIP처리 없이 후열처리만 수행한 것과 HIP처리 후 후열처리까지 수행한 조건을 적용하여 상온 인장시험을 한 결과, 상온에서는 재료 강도상으로 크게 차이가 없다는 것을 알 수 있었으며, 파단면의 파면 분석결과 연성파괴로서 파단이 열영향부에서 주로 발생하지 않는다는 것을 알 수 있다.

(2) GTD-111DS 재료의 경도는 사용 시간이 길어짐에 따라 γ 의 변화에 따라 경도가 낮아지며, HIP 처리 후의 경도는 신재나 사용재가 크게 차이를 나타내고 있지 않다. 또한 25,748시간 사용재의 경우 열처리(HIP 또는 후열처리 또는 HIP/후열처리)에 의해 더 높은 경도값을 얻을 수 있었다.

(3) 후열처리 없이 HIP 처리만 수행한 시편과

후열처리까지 수행한 시편은 γ 조직상에서 많은 차이를 보이고 있다. 특히 HIP처리만을 수행하였을 때는 불균일한 형상의 γ 미세조직을 보이고 있는 반면에 HIP 및 후열처리를 병행으로 수행한 재료의 γ 형상은 거의 입방체 형태로 성장한 미세조직을 나타내었다.

후 기

본 논문은 산자부에서 주관하는 전력산업연구개발과제(2004. 04. 01 ~ 2007. 03. 31)의 1차년도 연구보고서를 활용하여 작성한 논문입니다.

참고문헌

- (1) Cheruvu, N. S., 2000, "Oxidation and Gamma Particle Coarsening Behavior of IN-738 and GTD-111DS," *Proceeding of 2000 International Joint Power Generation Conference*, pp. 1~8.
- (2) Sajjadi, S. A., S. Nategh, R. I. Guthrie, " Study of Microstructure and Mechanical Properties of High Performance Ni-base Superalloy GTD-111," *Material Science and Engineering*, A325, pp. 484~489.
- (3) Schike, P. W., 2004, "Advanced Gas Turbine Material and Coating," *GE ENERGY, GER-3569G*.
- (4) Daleo, J. A., K. A. Ellison, D. A. Woodford, 1999, "Application of Stress Relaxation Testing in Metallurgical Life Assessment Evaluations of GTD111 Alloy Turbine Buckets," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 121, pp. 129~137.
- (5) Said, N. and Seyed A. S., 2003, "Dislocation Network During Creep in Ni-Base Superalloy GTD-111," *Materials Science and Engineering*, A339, pp. 103~108.
- (6) Daleo, J. A., Wilson, J. R., 1998, "GTD111 Alloy Material Study," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol.120, pp. 375~382.