니켈기 초합금 소재 고온부 부품의 재생정비기술

강신호† · 최희숙* · 김대은**

Rejuvenation Technologies for Hot Gas Path Components made of Nickel Based Superalloys

Sin Ho Kang, Heui Sook Choi and Dae Eun Kim

Key Words : Creep strength(크리이프 강도), Carbide precipitation(탄화물 석출), Nickel based superalloy(니켈기 초합금), Rejuvenation heat treatment(재생열처리)

Abstract

Hot gas path components, which are made of nickel based superalloys, are subject to periodic replacement due to degradation of thermomechanical properties that might bring catastrophic failure during normal operation of gas turbine units. In order to rejuvenate the metallurgical condition of the serviced components, heat treating techniques such as solution annealing and aging heat treatments have widely been employed. However, the effectiveness of those typical heat treatments is not apparent enough in terms of quantitative grounds. On the other hand the demand of the rejuvenation heat treatment and hot isostatic pressing (HIP) have constantly been raised by the end users. Therefore it is necessary to verify how the typical heat treating techniques affect to the aged and degraded material. As the result of experimental work in this study, GTD-111 and GTD-222 Ni-based superalloys were collected and analyzed quantitatively through microscopic observation, microhardness evaluation and creep test.

1. 서 론

최근의 가스터빈 관련 기술은 고출력 대용량화의 추세가 두드러진다. 국내에도 1998 년 이후부터 단일 사이클의 출력이 150MW 를 초과하는 가스터빈 모델이 등장하여 현재 상업운전 중에 있고, 성능개선 되는 모델까지 감안하면 그 수는 더욱 늘어날 전망이다.

국내의 이러한 추세 뿐만 아니라 외국에서는 시험운전 단계를 넘어서 상용화된 모델의 연소가스 온도가 이미 합금소재의 용융온도를 넘어선 섭씨 1450 도에 이르고 있는데, 이는 부품냉각기술 및 열차폐 코팅기술의 발달에 힘입은 바 크지만 무엇보다도 고온의 가혹한 환경 속에서도 재질적 기계적 특성을 잃지 않을 수 있는 소재 개발이 뒷받침 되었기 때문이다.

현재 가스터빈의 부품용 소재로 널리 사용되는 니켈기 합금은 제조방식에 따라 주조용(casting alloy)와 단련용(wrought alloy)으로 나뉘며, 강화방식에 따라서는 고용체 강화형(solid–solution strengthening type), 탄화물 강화형(carbide strengthening type), 석출물 강화형(precipitation strengthening type)의 세가지로 구분한다. 이러한 구분은 각각의 초합금들에 원하는 재질적 특성을 부여하기 위해 제조단계에서 뿐만 아니라 재생단계에서 필수적으로 거쳐야 하는 공정을 규정하며, 결과적으로 이에 따라 각 합금들의 용도를 결정짓는데 도움이 된다.

일반적으로 가스터빈용 고온부 부품으로 연소실 부품용으로는 고용체 강화형이, 고정익과 회전익용으로는 석출물 강화형이 많이 쓰이고 있는 것으로 구분할 수 있다. 어떤 소재를 쓰느냐에 따라

† 연세대학교 대학원, 한전기공주식회사
E-mail : shkang@kps.co.kr
TEL : (032)580-8245 FAX : (032)580-8283
* 한전기공주식회사 G/T 정비센터
** 연세대학교 기계공학과

Table 1. Application examples of typical materials for hot gas components

합금명칭	대 표 부 품 명	제작사 모델	종 류 및 강화기구	주 요 성 분
GTD-111DS	Stage 1/2/3 Bucket	GE7F/FA/FA+	석출강화형	60.4Ni-14Cr-9.5Co-1.5Mo-3.8W-4.9Ti-3Al
Inconel 738	Row 1(2,3) Blade Shroud Segment	WH,ABB(GE) GE7FA/FA+	석출강화형	61Ni-16.0Cr-8.5Co-1.7Mo-2.6W-1.7Ta-3.4Al-3.4Ti
Udimet 500 Udimet 520	Row 2/3 Blade	GE,WH,ABB	석출강화형	48Ni-19Cr-19Co-4.0Mo-3.0Ti-3.0Al 57Ni-19Cr-12Co-6.0Mo-1.0W-3.0Ti-2.0Al
GTD-222	Stage 2, 3 Nozzle	GE7EA/F/FA	석출강화형	51Ni-22.5Cr-19Co-2.3Ti-2W-1.2Al-0.8Nb
Nimonic 263	Stage 2 Nozzle	GE7E	석출강화형	51Ni-20Cr-20Co-5.9Mo-2.1Ti-0.5Al
Hastelloy -X	Combustion Liner Combustor Basket Heat Shield Segment	GEMS5/6/7 W501D/F WH,ABB	고용강화형	48Ni-22Cr-18Al-1.5Co-9.0Mo-3Ti-1.3Al
Inconel 617	Inner Liner Hot Gas Casing Conbustor Transition	GT11/11N W501D5/F	고용강화형	54Ni-22Cr-12.5Co-9.0Mo-1.0Al-0.3Ti-0.07C
Inconel X-750	Spring Seal	GE/WH	석출강화형	73.5Ni-15.5Cr-1.0Nb-0.7Al-2.5Ti-7.0Fe-0.2Si
Inconel 939	Vanes, Blades	GE,ABB,WH	석출강화형	48.2Ni-22.5Cr-19Co-3.7Ti-2.0W-1.9Al

가스터빈의 운전 성능 뿐만 아니라 부품 제조방식이 달라지고 재생수리 가능 범위가 좌우되므로 설계당시에서부터 소재의 선택은 매우 중요한 요소라 할 수 있다. 본 논문에서는 국내에서 상용화되고 있는 니켈기 초합금 소재별로 재생정비에 요구되는 주요공정 중 용체화 열처리에 의한 재질복원 특성을 분석하고, 특히 운전주기가 과다하여 수명이 다한 재료에 대한 복원방안을 강구하고자 하였다. Table 1 은 주요 니켈기 초합금 소재별로 고온부 부품을 구분 정리한 것이다.

2. 실 험

주요 가스터빈 제작사에서 추천하는 부품의 운전수명은 연소온도, 사용연료 및 운전조건 등을 고려하여 결정되나, 실제부품의 재질적 상태와는 차이가 있다. 따라서 본 논문에서는 운전수명을 훨씬 초과했거나 육박한 부품으로부터 시편을 채취하여 열처리를 수행하여 재질적인 변화상태를 분석하고, 고온수명을 판단하기 위하여 크리이프 시험을 하여 특성변화상태를 관찰하였다. 실험에 적용된 조건 및 분석방법은 Table 2 와 같다.

Table 2. Summary of test parameters

Mat'l	History	Process	Parameter	Evaluation
GTD-111	98,000EOH (EOH:등가 운전시간)	Solution heat treat	1121C/2hr Rapid Cool	-SEM -Optical Micrography -Microhardness Measurement -Creep Strain-Time Curve
		Aging heat treat	843C/4hr	
		Rejuvenation heat treat	1177C/2hr Rapid Cool	
		Creep test	982C,27ksi	
GTD-222	50,000EOH	Solution heat treat	1150C/4hr Rapid Cool	
		Aging heat treat	800C/8hr	

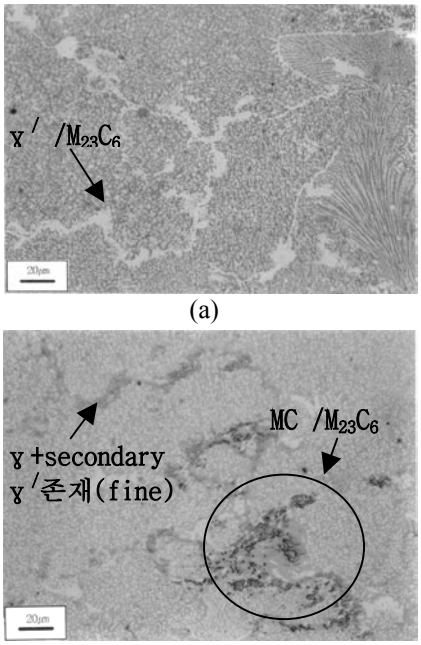
3. 실험결과 및 고찰

3.1 회전익 재료

고온부 부품은 장기적인 운전에 의하여 점진적으로 재질적 열화를 경험하게 된다. 이는 결국 해당 부품의 수명을 제약하는 요소가 되며, 다른 결함이 없는 한 제작사가 추천한 수명기준을 따르거나 재생정비 과정에서의 판단에 의하여 이후의 진로를 결정짓게 마련이다.

재질적 열화에 의해 그 성능이 현저히 저하되는 첫번째 항목으로는 크리이프 수명 감소를 들 수 있다. 특히 팁 쉬라우드와 같이 체적변화를 유발하는 형상일 경우 원심력이 집중되는 곳이 생기게 되어 고온의 분위기 속에서 꾸준히 크리이프 응력을 받게 된다. 이로 인해 가장 취약한 부분에서 삼차 크리이프(tertiary creep)으로의 진행이 가속화되고, 결정립계면에서는 크리이프 공동부(creep void)가 발달하여 균열로 성장하다가 결국 파단을 일으키는 사례가 보고되고 있다. 뿐만 아니라 과시효 (over age), 입계내 탄화물 석출, 혹은 σ 나 μ 와 같은 2 차상의 석출물이 생성되어 파단강도 및 연성을 저하시키는 결함을 유발한다. 따라서 재생정비 과정에서의 재질적 복원은 이후의 수명을 보장할 수 있는 매우 중요한 인자가 된다.

상기의 결함을 제거하고 초기상태에 가까운 재질특성으로 복원하기 위해서는 우선 열처리가 필수적인데, 보통의 진공로에서 수행하는 용체화 풀림 열처리 (solution annealing heat treatment) 와 시효 경화 열처리(aging heat treatment)가 가장 일반적인 것이라 할 수 있다. 연구결과에 따르면, 이 기본적



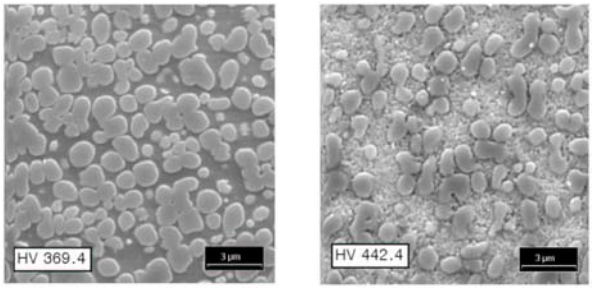
(a) (b)

Fig. 1 Optical micrography of GTD-111 equiaxed material: (a) as serviced for 98,000hrs (b) as solution heat treated at 1121C/2hrs

인 두 열처리 방법에 의해서도 잔류응력을 제거함은 물론, 초기 단계에 있는 크리이프 공동까지도 제거할 수 있는 것으로 보고되고 있다[1,2].

실제로 98,000 hrs(EOH) 동안 연속 운전에 노출된 GTD-111 소재의 블레이드의 경우, 용체화 열처리 및 시효경화 처리에 의해서 미세조직과 경도값이 개선됨을 확인하였으며, 크리이프 수명 또한 일정값 회복됨을 확인할 수 있었다. Figure 1 의 (a)는 운전되고 난 직후의 광학현미경 조직으로써 결정립계 부근에서 카바이드가 넓게 석출되어 있음을 볼 수가 있었으며, (b)와 같이 열처리를 거치고 난후에는 감마 프라임(γ')과 카바이드가 분해되고 결정립계가 얇아져 있는 것이 확인되었다.

Figure 2 에서는 전자현미경에서 배율을 높여 관찰한 것인데, 운전직후에는 구상의 감마프라임



(a) (b)

Fig. 2 SEM micrography of GTD-111 equiaxed material: (a) as serviced for 98,000hrs (b) as solution heat treated

이 높은 밀도로 분포하고 있었으나 열처리 후에는 크기와 밀도가 감소한 것을 확인할 수 있었다. 또한 Figure 3 에서 위와 동일 재료인 경우 크리이프 강도시험을 통해서 크리이프 수명이 회복됨을 보여 주고 있다.

그러나 이러한 열처리에 의한 회복 경향은 재료마다 또 부품의 운전 조건 마다 다르게 나타나므로 열처리 조건이나 방식을 선정하는데 있어 주의를 요하며, 일반적인 열처리 방법으로는 특성복원에 한계가 있고 그 정도가 미흡한 것으로 파악된다. 즉 기존의 용체화 열처리 조건으로는 운전중 생성된 카바이드나 이차상의 석출물을 충분히 녹이지 못하므로 이들이 용해되는 온도 이상에서 열처리를 하는 재생열처리(rejuvenation heat treatment)의 필요성이 대두되었고 또한 연구결과도 있다[3, 4].

Figure 4 에서는 감마프라임 용해온도 이상에서 행한 재생열처리에 의해서 GTD-111DS 소재의 미세조직 변화를 관찰한 것이다. 용체화 풀림 열처리를 거친 시편보다 재생열처리를 거친 시편의 조직에 입계가 훨씬 얇아지고 감마프라임의 형상도 입방형으로 회복되었음을 확인할 수 있었다.

하지만 고온에서 수행하는 재생열처리를 통해서 크리이프 변형에 기인한 전위나 미세공동부와 같은 물리적인 결함까지도 완벽하게 제거할 수 있을 지에 대해서는 좀더 연구가 필요하다. 또한 내부에 복잡한 유로를 형성하는 부품의 경우 기하학적인 변형이나 처짐 등의 결함을 초래할 수 있으므로 이 공정의 선택에는 신중할 필요가 있다.

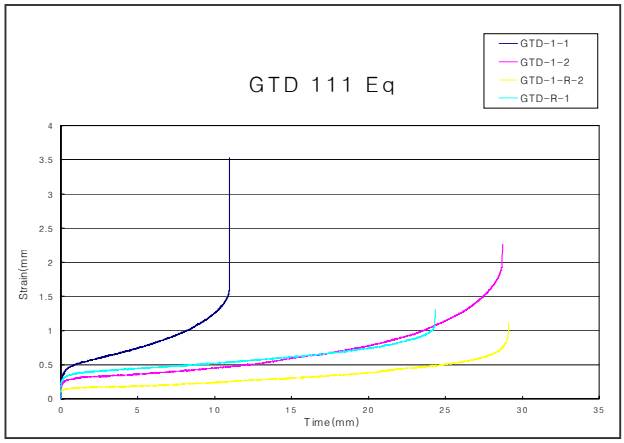


Fig. 3 Creep test results of GTD-111 equiaxed blade (Specimen condition: 1.GTD-1-1 taken from airfoil before heat treatment, 2. GTD-1-2 taken from airfoil after solution & age heat treated, 3. GTD-1-R taken from shank root after solution & age heat treated, 4. GTD-R-1 taken from shank root before heat treatment

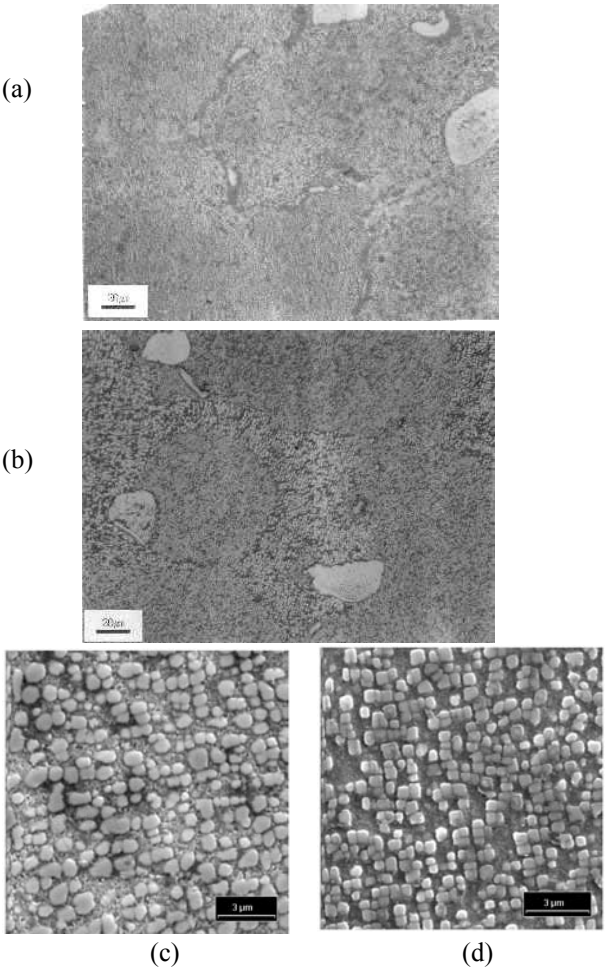


Fig.4. Comparison of microstructures of GTD-111DS specimens between after conventional solution annealing H.T and after rejuvenation H.T, (Operational history: 22,399/1,059/43,579(Actual hrs/Starts/EOH)) (a)(c) After conventional solution annealing H.T (b)(d) After rejuvenation H.T

등방향 가압 열처리(hot isostatic pressing : HIP)의 경우, 개발된 초기 목적은 분말 야금을 위한 것이었으나 현재는 제조공정에서부터 재생공정에 이르기 까지 다양한 목적으로 적용되고 있다[5]. 조직 내부에 생긴 일정 크기 이하의 공동이나 미세균열과 같은 결함을 제거하거나, 저하된 파단-응력 한도를 높이고 연성을 회복하기 위해서도 적용될 수 있다. 그러나 내부에 냉각구멍을 가진 블레이드에는 신중히 적용해야 할 것으로 보고되고 있다[5,6,7].

고정익과는 달리 회전익류는 운전 중 매우 가혹한 스트레스에 지속적으로 노출된다. 국내에서는 대개 3600rpm 으로 대표되는 회전수로 회전하는 과정에서 원심응력을 받게 되며 수요에 따라 운전여부가 결정되는 첨두부하형 운전(peaking load operation)으로 운전되기 때문에 기계적 열적 응력은 기저부하(base load operation)로 운전되는 유닛에 비하여 극대화 된다.

따라서 회전익류의 부품의 수명에 영향을 주는 결정적 손상유형은 저주기 피로에 의해서 발생한 표면의 크레이지 크랙이다. 대략 날개부 표면으로부터 최대 1.5mm 정도까지 침투해 들어간 크랙들은 응력이 집중되는 부위인 날개 전연(airfoil leading edge)과 날개의 압력측(suction side)에 넓게 분포하며, 이는 운전시간과 기동정지횟수의 관계에 따라 달라지는 것으로 판단된다.

3.2 고정익 재료

고정익은 회전익보다는 낮은 응력환경에 노출된다고 할 수 있으나, 유형이 조금 달라질 뿐 손상정도는 훨씬 심각한 것으로 관찰되어진다. 멀티 세그멘트형 고정익의 경우 날개부와 내외측 벽면에 걸쳐 크레이지 크랙이나 관통 크랙이 발생하며, 단일 세그멘트형 고정익의 경우에도 크랙으로부터 자유로울 수는 없다. 이러한 손상의 원인은 회전익과 마찬가지로 대부분 저주기 피로에 기인하는 것이며, 심한 열응력에 노출된 결과로 보인다.

그러나 고정익의 경우 부품의 사용환경이 회전익과는 달리 안정적이므로 재생가능 기준이 넓고 적용할 수 있는.가공기법도 다양하다는 점에서 근본적인 차이가 있다.

회전익과 마찬가지로 운전모드에 따라 고정익이 겪게 되는 손상 유형도 달라지며 국내의 대부분 발전업체들이 기동정지가 잦은 형식의 운전(cyclic operation)을 유지함에 따라 기동정지 횟수가 크랙에 영향을 주는 주요변수로 표현되고 있으며, 연구에 따르면 7E 모델의 nozzle 의 경우 크랙 손상과 기동횟수는 다음과 같은 함수관계를 이룬다고 보고되고 있다.[8]

$$\text{Cracking} = A\,(\text{fired starts})^{B}(\text{Damage})^{C}$$

고정익의 재생에는 주로 기계가공과 용접에 의한 결함 제거 및 육성공정이 적용되는데, 이 경우에도 소재의 재질적 건전성은 여전히 중요하다. 건전하지 못한 모재 위에 용접을 가하였을 경우 기존 조직의 재질적 불안정성으로 인해 용접부와의 경계면에서 결함이 재발할 수 있고, 용접이 적용된 부위에서 2 차적으로 생긴 응력을 충분히 없애주지 않으면 변형과 같은 공정 중 결함을 유발하기 때문이다.

따라서 주기적인 재생정비 과정에서의 용체화 풀림 열처리와 시효경화 열처리는 운전 중에 열화

된 재질적 특성을 복원시켜 주고 안정된 성능과 품질을 확보할 수 있다는 점에서 매우 중요하다.

Figure 5 는 GE 모델의 대표적인 고정익 소재인 GTD-222 의 용체화풀림 열처리 전후의 변화를 비교한 사진이다. (a)와 (c)는 열처리 전의 시편 상태를 보이고 있는 것인데, 크롬카바이드가 결정립 경계에 석출되어 연속적으로 두터운 띠를 형성하고 있음을 볼 수 있으며, 경도측정을 해본 결과 HV362.0~402.0(HRC 36.9~41.0)으로 부위에 따라 편차를 보이고 있었다.

Figure 5 의 (b)와 (d)는 용체화 풀림 열처리 후의 조직 사진인데, 결정립계에 쌓여 있던 크롬카바이드가 상당 부분 용해되어 들어가 불연속적인 형태로 거의 식별이 곤란한 형태로 존재하고 있는 것을 볼 수 있으며, 경도값도 편차가 줄어들어 HV347.7(HRC 35.3)부근에서 균일하게 회복되어 있었다.

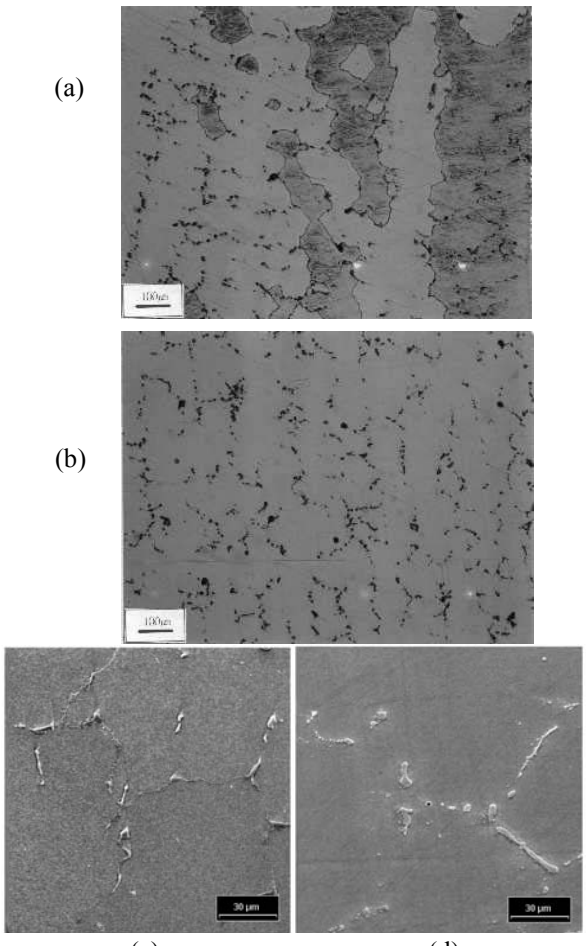


Fig 5. Comparison of microstructures of GTD-222 specimens between before and after conventional solution annealing H.T (Operational history: 49,993 EOH)) (a) (c) Before conventional solution annealing H.T (b)(d) After conventional solution annealing H.T + aging H.T

기저부하용으로 장시간 지속적인 운전을 하는 유닛의 고정익에는 크랙 결함보다는 산화나 부식, 변형이 주도적인 결함임과 동시에, 장시간 고온에 노출됨으로써 생기는 재질적 열화도 주요 결함유형이 된다. 따라서 이러한 재질적 결함을 재생공정 전에 적정 열처리 공정을 수행하여 제거하고 본래의 모재특성을 갖도록 회복시켜 주어야 한다.

3.3 연소기(Combustor) 재료

산업용 가스터빈의 연소기 부품은 대개 두가지의 주요 부품으로 구분할 수 있는데, 연료노즐과 결합되어서 화염을 형성시켜주는 컴버스쳔 라이너(combustion liner)류와 팽창된 연소가스를 터빈측으로 안내해주는 트랜지션 피스(transition piece)류가 그것이다. 이 두 부품의 손상유형은 열적 기계적 피로에 의해서 생기는 균열과, 진동에 의한 조립부 접촉면의 마모, 고온에의 장시간 노출에 기인한 크리이프 변형 등이 주요 손상유형이다. 특히 변형 손상의 경우, 중대형 구조물 형태인 연소실 부품으로써는 조립성에 영향을 주기 때문에 운전중 생긴 일차 변형이든, 재생정비공정에서 생긴 이차 변형이든 매우 예민한 문제가 아닐 수 없다

반면 대개 두께가 얇은 판재 구조물로 된 연소기 부품들은 기본적으로 용접방식에 의해 제조된 형태로써 재질적인 열화나 크랙이 문제될 경우 부분적인 교체가 가능하기 때문에 오히려 용접공정을 전후하여 크리이프 변형을 제어하여 조립성을 확보하려는 과정이 가장 중요하다 할 수 있다. 이 경우 굳이 재생열처리나 HIP 처리와 같은 특수열처리공정을 필요로 하지는 않으나, 일반 열처리 중에 일어날 수 있는 변형 등을 예방하거나 기발생한 변형을 교정하기 위한 보강기법이 요구된다.

열처리 과정 중에서 부품을 고정하고 보강하기 위한 툴링 설계시 고려하여야 할 점은 부품 소재의 고온강도를 고려하여 보강재를 선택하여야 하되, 응력과 자중의 방향, 재료별 열팽창계수의 차이, 노내에서 두꺼운 부분과 얇은 부분에서의 온도구배 등이 충분히 고려되어야 하며, 일회성으로 사용하기 쉬운 보강재의 재료 선정시 경제적인 측면도 고려가 되어야 할 것이다.

4. 결 론

니켈기 초합금으로 제조된 가스터빈의 회전익과 고정익류의 재생공정에 있어서 필수적인 열처리 기술에 대하여 재질복원적 관점에서 그 효과를

분석하였다. 그 시도로써, 운전시간이 94,000hrs 까지 경과하여 잔존수명이 의심되는 소재로부터 시편을 채취하여 일반적인 용체화 풀림 열처리와 시효경화 처리를 한 후 조직과 크리이프 시험을 하였다.

그 결과, 과시효 효과로 인해 카바이드와 2 차상의 감마프라임이 결정립내와 결정경계 부근에 많이 석출되어 있던 것이, 열처리 후에는 결정경계가 얇아지면서 불연속적으로 되거나 카바이드가 분산되어 있음을 확인할 수 있었다. 경도값의 변화면에서도 GTD-111 은 HRC37 에서 HRC45 정도로 증가하였으며, GTD-222 는 부위마다 편차 보이던 것이 HRC35 정도로 균일해졌다. 또한 GTD-111 소재의 크리이프 수명에 미치는 영향을 분석한 시험에서는, 열처리를 하였을 때 크리이프 강도가 두배 이상 증가함을 확인할 수 있었다.

그러나 감마프라임이 원형으로 변형된 형태를 보이는 시편에 대한 실험에서는, 일반적인 용체화 풀림 열처리로는 효과가 미흡했으며, 재생열처리에 의해서 초기의 모양에 근접한 입방형으로 회복되었음을 확인할 수 있었다. 보다 심각한 결함, 즉 삼차 크리이프 단계까지 진행한 재질 내부적 결함에 대해서는 재생열처리나 등방향 가압 열처리(HIP) 등으로도 완전 회복시키는데 한계가 있는 것으로 보고되고 있으며[6, 9], 장비면에서나 경험측면에서 미진한 국내에서는 정확한 실험적 데이터와 분석이 뒷받침이 되어야 상용화 단계에 이를 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

(1) Davies, P.W., Dennison, J.P. and Evans, H.E., 1966, J of. Inst. Met.,. No.94, pp.270~275.

(2) Davies, P.W., Dennison, J.P. and Evans, H.E., 1967, J. of Inst. Met., No.95, pp.231~234.

(3) Storey, I.J., Klarstrom, D.L., Hoback, G.L., Ishwar, V.R., and Qureshi, J.I., 2001, “The Metallurgical Background to Rejuvenation Heat Treatments and Weld Reparability Procedures for Gas Turbine Sheet Metal Components,” Materials at High Temperatures, 18(4), pp.241-247.

(4) Daleo, J.A., Ellison, K.A. and Boone, D.H., 2002, “Metallurgical Considerations for Life Assessment and the Safe Refurbishment and Requalification of Gas Turbine Blades,” J of Engineering of Gas Turbines and Power, Vol.124, pp.571-579.

(5) Burgel, R., Koromzay, T., Redecker, R., “Repair Procedure for Stationary Gas Turbine Blades” Conference Proceedings of .ASM, 14-

(6) James, A., “Review of Rejuvenation Process for Nickel Base Superalloys,” 2001, Materials Science and Technology” Vol.17, pp.481-486.

(7) Baldan, A., 1991, “Rejuvenation Procedures to Recover Creep Properties of Nickel-base Superalloys by Heat Treatment and Hot Isostatic Pressing Technique – A Review,” J of Materials Science, Vol.26, pp3409-3421.

(8) Berntein, H.L., McClung, R.C., Sharron, T.R., Allen, J.M., 1994, “Analysis of General Electric Model 7001 1st Stage Nozzle Cracking,” J of Engineering for Gas Turbines and Power, T of ASME, Vol.116, pp.207~216.

(9) 박영규, 김수형, 김재철, 이영찬, 김두수, 최철, 김길무, 1999, “HIP 처리에 의한 가스터빈 블레이드용 IN738LC 초합금의 내부결함 소멸효과,” 한국주조공학회지, 제 19 권, 제 5 호, pp.427-432 .