

GTD-111DS 소재의 고온 인장 특성 평가

박홍선*, 김형익, 이영민(성균관대학교 대학원)
석창성(성균관대학교 기계공학부), 김문영(한전기공)

Evaluation of High Temperature Tensile Properties in GTD-111DS

H. S. Park, H. I. Kim, Y. M. Lee(Department of Mechanical Design, Sungkyunkwan Univ.)
C. S. Seok(School of Mechanical Engineering., Sungkyunkwan Univ.), M. Y. Kim(KPS)

ABSTRACT

The Ni-base superalloy GTD-111DS was designed in the 1970s and is widely used as the material of the first stage blade under a severe combination of temperature and pressure in gas turbines. But because GTD-111DS is distributed in the shape of blade and blade has a unique figure and many cooling channels, it is hard to manufacture the test specimen. In this reason, there are little data on the microstructure and mechanical properties of the alloy. Therefore through the microstructure analysis, present paper observed that the shape of γ' did not change even if aging time was increased but the amount and volume of the deposition of secondary γ' rose and secondary γ' grew among primary γ' . Also, by tensile test for different temperature, there was difference between yield strength and tensile strength in room temperature on heat treatment and extracting region but the more increasing temperature, the more decreasing difference between yield strength and tensile strength.

Key Words : Gas turbine (가스터빈), GTD-111DS, Tensile property(인장 특성), γ' phase (γ' 상)

1. 서론

현재까지 가스터빈 고온부품의 수명연장에 대한 지속적인 연구개발이 수행되어 왔다. 가스 터빈에 사용되는 부품들은 고온에 장시간 노출되며, 노출 시간에 따른 재료의 미세 조직 변화에 의하여 강도나 연성이 저하된다. 특히 고온에서 하중을 받는 경우에는 조직변화가 가속화되어 강도나 연성의 저하는 더욱 심해진다. 이러한 가혹한 환경 조건에서 가스터빈의 운전이 무리가 없도록 하기 위해서는 보다 높은 내크리프 강도, 내열강도, 우수한 고온 피로특성들이 확보되어야 한다.

니켈기 초합금인 GTD-111DS는 1970년대에 개발되어 가스터빈에서 고온, 고압을 받는 1단 블레이드 소재로써 사용된다[1]. 이 소재는 블레이드 형태로 제공되어 블레이드의 특이한 형상과 냉각 채널 등으로 인하여 시편 채취의 어려움이 있어 관련 물성 데이터가 많지 않은 실정이다. 하지만 기계적 특성을 파악하기 위해서는 재료에 실질적인 하중을 가하여

고온에서의 응력 상태를 파악하는 시험이 이루어져야 한다.

또한 GTD-111DS 조직에서 γ' 상의 함유율이 60% 이상을 차지하고 있으며, 대부분의 니켈기 초합금과 같이 고온에서의 거동은 정연한 f.c.c 구조를 갖는 γ' 상의 영향을 받는다[2]고 보고되어 있다.

이에 본 논문에서는 가스터빈 1단 블레이드부에 많이 사용되는 재질인 GTD-111DS 소재에 대해서 열처리에 따른 미세 조직을 분석하고, 인장 시험을 통해 고온에서의 기계적 특성을 파악하고자 한다.

2. 사용 재료 및 시험 방법

2.1 화학 조성비

GTD-111DS 소재의 화학 조성비는 성분 분석기를 이용하여 구했으며, 그 결과를 Table 1에 나타내었다. 성분 분석한 결과를 보면, GTD-111DS의 성분 원소 중 Cr이나 Al 등이 기준 범위를 벗어난 것으로 나타났다.

2.2 시편

고온 물성 평가를 위해 Ingot과 사용 블레이드 (E.O.H = 25,748hr)에서 시편을 채취하였다. 사용 블레이드의 실온전시간은 15,088시간, 기동횟수는 533회이며, 등가 운전 시간은 25,748시간이다.

블레이드 내의 특이한 형상과 냉각 채널 등으로 인하여 ASTM E8(Standard Test Methods for Testing of Metallic Materials)에서 규정하고 있는 소형 시편을 제작할 수 없기 때문에 평행부의 길이 20 mm, 평행부 직경 3 mm인 시편을 가공하였다. 시편 도면은 Fig. 1에 나타내었다.

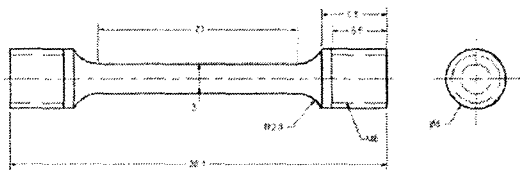


Fig. 1 Specimen for evaluation of high temperature properties

2. GTD-111DS 신재의 Microstructure 분석

2.1 GTD-111DS

주조상태에서 GTD-111DS의 dendrite와 inter dendrite에 생성되어 있는 γ/γ' eutectic을 Fig. 2를 통해 관찰할 수 있다. 주조 과정 후 용융금속이 냉각되어 소재의 고상선에 도달하면, matrix에 γ 조직에서 우선적으로 핵이 생성되어 γ 조직이 응고하기 시작하고, 이에 따라 matrix의 형성원소가 소모되어 용질원소의 농도가 증가한다. 그리고 용질원소의 농도가 높아지면서 용질원소를 다량 함유한 석출물이 생성된다. 응고 후 확산이 진행되지만, 액상에 비해 확산 속도가 매우 느리므로 가장 늦게 응고하는 γ/γ' eutectic에는 편석이 일어난다. 주조 조직에서 etching을 하면 명암차이가 있다. 이는 용질원자의 편석 때문이다. 응고가 진행되면서 dendrite사이에 마지막으로 응고하는 γ/γ' eutectic의 주변에 void가 생성된다. 이것은 마지막 응고 시 용탕이 적절하게 공급되지 못해서 발생한다. GTD-111DS의 carbide는 MC와 $M_{23}C_6$ 둘 수 있는데, 여기서 M은 금속원소를 뜻한

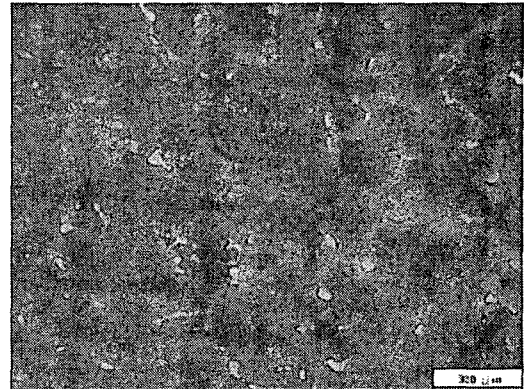


Fig. 2 Dendrite of GTD-111DS (z-Axis view)

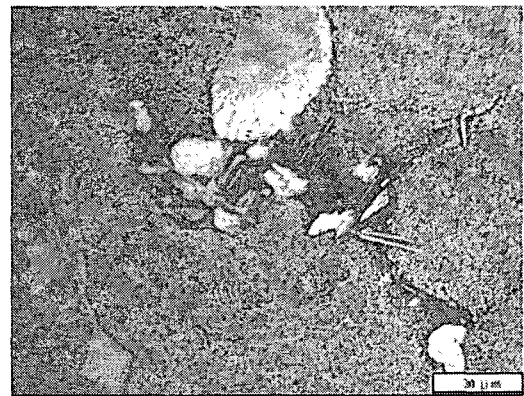


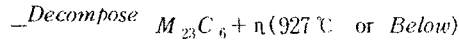
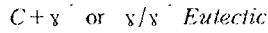
Fig. 3 η (Eta) phase and γ/γ' Eutectic

다. MC의 M은 Ti, Ta, W이며, $M_{23}C_6$ 의 M은 Cr이 주 성분이다. 주조상태에서 η (eta) phase가 생성되는데, 이것은 주조상태에서 생성되는 phase라기 보다는 응고 후 냉각과정에서 Ti이 많은 γ/γ' eutectic이나 γ' 상으로 형성되었던 조직에서 η phase형성온도에 도달함에 따라 Ti이 많은 γ/γ' eutectic이나 γ' 상으로 형성되었던 조직이 변태하여 나타나는 것으로 알려져 있다. Fig. 3에서 확인할 수 있듯이 γ/γ' eutectic의 가장자리에서 η phase를 볼 수 있다. η phase는 주조상태에서 나타나는 γ/γ' eutectic주위에 석출상이 적은 영역의 무석출대(PFZ ; Precipitation Free Zone)와 유사한 조직을 보인다.. 이것은 η phase으로 변태 성장에 따라 이 영역에 존재하는 $Ni_3(Al,Ti)$ 의

Table 1 Chemical compositions of GTD-111DS (in wt.%)

Element	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Ti	Al	Co	W	Ta	Zr	P	S	B
min	0.07	-	-	Bal	13.70	1.40	4.80	2.95	9.10	3.60	2.40	0.008	-	-	0.005
max	0.10	0.10	0.005	Bal	14.10	1.70	5.10	3.10	9.70	4.20	3.00	0.02	0.010	0.005	0.020
result	0.11	0.02	0.001	Bal	14.26	1.36	4.77	2.33	9.92	3.07	2.37	0.001	0.027	0.007	0.005

γ' 상에서 Ni₃Ti의 조성이 소모되므로 γ' 상의 양이 상대적으로 줄어들게 되므로 생성되게 된다. 운전 중에는 η phase는 MC의 분해로 생성되는데 아래의 식을 따른다.



GTD-111DS는 주조 후 표준열처리(1121°C(4시간) + 843°C(24시간))를 하면, γ' 상의 volume fraction은 60%이고, 크기는 0.8 μm 정도이다.

2.2 Solution(2050°F, 2hr) + Aging(1550°F, 4hr)

Fig. 4를 살펴보면, γ' 상은 입방체 모양을 하고 있으며, 열처리(Solution(2050°F, 2hr) + Aging(1550°F, 4hr))후에도 무석출대와 η phase는 변화가 없다. 그리고 η phase의 옆에 존재하는 불규칙한 모양의 γ' 상의 모양도 변화가 없다.

γ' 상의 크기는 0.6 ~ 1.1 μm 정도이며, 표준열처리를 한 후의 크기인 0.8 μm 와 비교했을 때 변화가 크지 않음을 알 수 있으나, secondary γ' 은 석출하여 primary γ' 의 사이에 나타나 있다.

2.3 Solution(2050°F, 2hr) + Aging(1550°F, 24hr)

Aging시간을 증가시켜도 불규칙한 모양의 γ' 상의 형태는 변하지 않으나, secondary는 석출하여 primary γ' 의 사이에 나타나 있다.

Primary γ' 의 크기는 0.6 ~ 1.1 μm 이다. Aging 시간에 따른 primary γ' 의 크기는 변화가 없는 것을 확인할 수 있다. 즉, Aging온도인 1550°F에서는 primary γ' 상은 성장하지 않는 것으로 보인다. 그러나, secondary γ' 상은 석출량도 증가를 하고, 크기도 성장한 것을 Fig. 5를 통해 관찰 할 수 있다.

3. GTD-111DS 고온 인장 특성 평가

3.1 시험 방법

재료 물성치를 얻기 위한 가장 일반적인 방법으로 인장 시험이 있다. 인장 시험을 수행함으로써, 상온 및 고온에서의 항복 강도, 인장 강도 등의 재료 물성치를 얻을 수 있다.

인장 시험은 ASTM E8(Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials)과 ASTM E21(Standard Test Methods for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials)에 따라 인장시험을 실시하였다. 고온 시험시 열전대를 이용하여 온도를 측정하고 ? °C에서 정상상태로 10분간 유지시킨 후에 실시하였다. 시험 전 #300 ~ #1200 연마지로 연마(polishing)하고 시험 속도 0.1 mm/min으로 시험

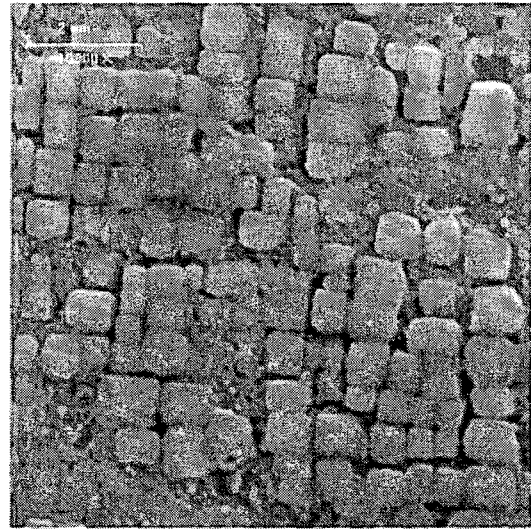


Fig. 4 The size of γ' and secondary γ' after Solution(2050°F 2hr)+Aging(1550°F 4hr)

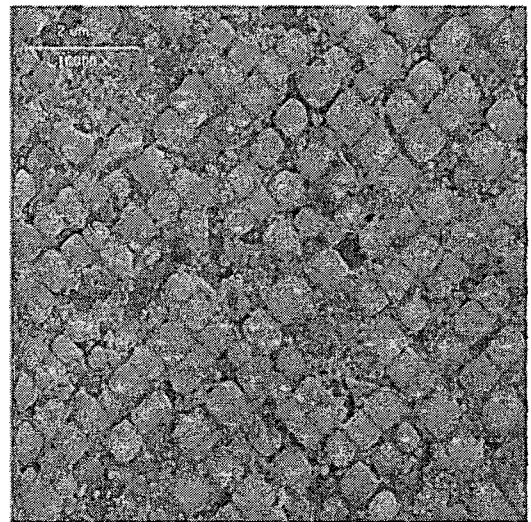


Fig. 5 The figure of primary γ' and secondary γ' after Solution(2050°F 2hr)+ Aging(1550°F 24hr)

하였으며, 하중-변위 선도, 항복강도, 인장강도 등을 구하였다.

0.2% offset 법을 사용하여 항복강도를 결정하였다. 그리고 ASTM E8에 따라 최대하중을 원단면적으로 나누어 인장강도를 결정하였으며, 시험에서 얻어진 하중-변위 선도로부터 공칭 응력-공칭 변형률 선도를 얻었다.

시험의 제어, 데이터 처리 및 결과 해석은 전용 프로그램을 이용하였으며, 인장 시험이 진행되는 동안 하중 신호와 변위 신호를 제어기(controller)를 통하여 컴퓨터에 연속적으로 기록하였다.

GTD-111DS 소재의 Ingot과 사용 블레이드에서 채취한 시편을 이용하여 상온(15°C)과 760°C(1,400°F), 872°C(1,600°F), 982°C(1,800°F), 총 4단계에서 열처리에 따라 각각 인장 시험을 수행하였다. 또한, 시편 채취의 어려움으로 인하여 각 조건에서 1 개의 시편으로만 시험을 수행하였다.

3.2 결과 및 고찰

GTD-111DS의 상온 인장 시험의 결과를 살펴보면, Ingot이나 블레이드는 열처리 후에 항복강도 이후의 연신률이 증가하여 인장 강도가 높아지는 것으로 나타났다. 그리고 파단 강도와 인장 강도가 같은 것으로 나타나 파단면의 형상에서는 네킹 현상 등이 나타나지 않았다. 760°C에서는 인장 강도 이후 네킹 현상이 발생하면서 인장 강도까지의 연신률과 인장 강도 이후의 연신률이 비슷하게 나타났다. 특이한 사항은 871°C 이후에서는 인장 강도 후에 네킹 현상이 발생하면서 하중이 '0' 가까이 되어 파단 시까지 연신이 계속되는 현상이 발생하였다.

Ingot에서 채취한 시편의 경우, 열처리가 된 시편들이 상온에서는 강도값이 크게 나타났지만, 고온으로 올라가면서 그 차이는 감소하는 것으로 나타났으며, 사용 블레이드 시편의 경우에는 오히려 열처리를 한 시편의 강도값이 적은 것으로 나타났다.

Fig. 6의 선도를 보면, 열처리 여부와 채취 부위에 따라서 상온에서는 항복 강도와 인장 강도가 차이를 보이지만, 고온으로 올라갈수록 항복 강도와 인장 강도의 차이가 줄어든다. 이러한 이유는 고온으로 올라갈수록 전체 연신률에서 네킹 이후의 연신률이 차지하는 비율이 높아지면서, 항복강도와 인장 강도의 차가 줄어드는 것으로 생각된다.

관련 문헌과 논문에 나타나 있는 GTD-111DS 소재의 온도별 항복 강도와 인장 강도[3, 4]의 평균값을 Fig. 6에 함께 나타내었다. 본 논문에서 실시한 인

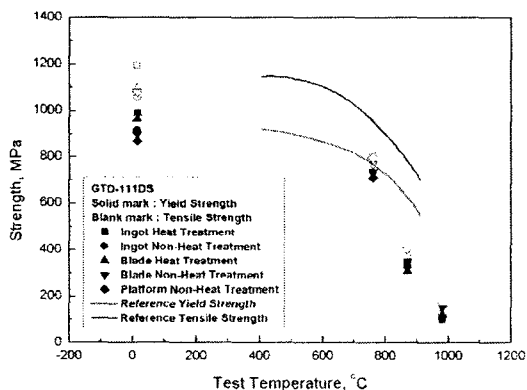


Fig. 6. Tensile Properties of GTD-111DS for different temperature

장 시험 결과는 관련 문헌의 결과보다 적게 나타났다. 특히 상온에서의 항복 강도와 인장 강도는 관련 문헌과 비슷하지만 고온에서는 그 차이가 크다. 이는 블레이드 소재의 열처리 조건에 따른 강도값의 변화가 매우 큰 것에 기인하는 것으로 생각된다

4. 결론

가스터빈 블레이드 소재인 GTD-111DS 소재의 고온 물성평가를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. GTD-111DS 소재의 Solution(2050°F, 2hr) + Aging(1550°F, 4hr), Solution(2050°F, 2hr) + Aging(1550°F, 24hr)의 비교 결과, primary γ' 의 크기는 0.6 ~ 1.1 μ m이다. Aging 시간에 따른 primary γ' 의 크기는 변화가 없는 것을 확인하였다. 즉, Aging온도인 1550°F에서는 primary γ' 은 성장하지 않는 것으로 보이지만, secondary γ' 은 석출량도 증가하고, 크기도 성장한 것을 관찰 할 수 있다.

2. GTD-111DS 소재의 상온 인장 시험의 결과를 살펴보면, Ingot이나 블레이드는 열처리 후에 항복강도 이후의 연신률이 증가하여 인장 강도가 높아지는 것으로 나타났다. 파단 강도와 인장 강도가 같은 것으로 나타났으며, 파단면의 형상에서는 네킹 현상 등이 일어나지 않았다.

3. 760°C이상의 고온 인장 시험에서는 인장 강도 이후 네킹 현상이 발생하면서 인장 강도까지의 연신률과 인장 강도 이후의 연신률이 비슷하게 나타났다. 특이한 사항은 871°C 이후에서는 인장 강도 후에 네킹 현상이 발생하면서 하중이 '0' 가까이 되어 파단 시까지 연신이 계속되는 현상이 발생하였다.

4. GTD-111DS 소재의 경우, 열처리 여부와 채취 부위에 따라서 상온에서는 항복 강도와 인장 강도가 차이를 나타낸다. 하지만, 고온으로 올라갈수록 항복 강도와 인장 강도의 차이가 줄어든다. 이러한 이유는 고온으로 올라갈수록 전체 연신률에서 네킹 이후의 연신률이 차지하는 비율이 높아지면서, 항복강도와 인장강도의 차가 줄어드는 것으로 생각된다.

5. 인장 시험 결과들은 관련 문헌의 결과보다 적게 나타났다. 특히 상온에서의 항복 강도와 인장 강도는 관련 문헌과 비슷하지만 고온에서는 그 차이가 크다. 이는 블레이드 소재의 열처리 조건에 따른 강도값의 변화가 매우 큰 것에 기인하는 것으로 생각된다.

후기

이 논문은 두뇌한국21사업과 전력산업연구개발 사업에 의하여 지원되었습니다.

참고문헌

1. S. A. Sajjadi, S. Nategh, "A high temperature deformation mechanism map for the high performance Ni-base superalloy GTD-111," *Material Science and Engineering*, A307, pp. 158-164, 2001.
2. S. A. Sajjadi, S. Nategh, M. Isac, S. M. Zebarjad, "Tensile deformation mechanisms at different temperatures in the Ni-base superalloy GTD-111", *Journal of Materials Processing Technology* vol. 155-156, pp. 1900-1904, 2004.
3. V. P. Swaminathan and N. S. Cheruvu, J. M. Klein, and W. M. Robinson. "Microstructure and Property Assessment of Conventionally Cast and Directionally Solidified Buckets Refurbished After Long-Term Service," 98-GT-510, The American Society of Mechanical Engineers, 1998, presented at the International Gas Turbine and Aeroengine Congress & Exhibition, Stockholm, Sweden, June 2-5, 1998.
4. N. S. Cheruvu and V. P. Swaminathan, "Physical and Mechanical Properties of GTD-111DS Bucket Material," Southwest Research Institute Draft Final Task Report, SwRI Project 18-7297, April 1999.