

◆ 특집 ◆ 가스터빈 블레이드 설계 기술 II

GTD111DS 의 기계적 성질 및 미세조직에 대한 열처리의 영향

Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of the Nickel Base Superalloy GTD111DS

양성호¹, 김문영^{1,✉}, 박상열¹, 김상훈¹
Sung Ho Yang¹, Moon Young Kim^{1,✉}, Sang Yeol Park¹ and Sang Hun Kim¹

¹ 한전 KPS GT 정비기술센터 (Department of Gas Turbine Technology Service Center, KPS)
✉ Corresponding author : mykim@kps.co.kr, Tel: 032-580-8221

Key Words: GTD111DS (Directional Solidification, 일방향주조조직), Gas turbine blade, γ (감마프라임), HIP (hot isostatic pressing, 고온동방처리), Mechanical Properties (기계적성질)

1. 서론

발전설비중 가스터빈 발전은 고온 고압에서의 에너지 효율성, 전력부하 조절의 용이성과 청정에너지 사용에 따른 친환경적인 요인 때문에 전세계 여러 나라에서 가장 많이 사용되고 있다. 이러한 가스터빈 발전은 최근 더욱 가속화된 에너지 소비로 인하여, 우수한 성능의 모델개발과 도입이 절실히 요구되고 있으며, 이에 부응할 수 있는 신소재 개발 또한 강력하게 요구되고 있다. 선임연구자들의 보고에 따르면, TIT(Turbine Inlet Temperature)가 1,430°C(2,606°F)까지 적용 가능한 소재와 시스템의 개발이 완료되었으며, GE의 H 모델에 적용하여 운전이 되고 있는데, 효율은 60%에 가깝게 나오고 있다.¹ 또한, 가스터빈 생산국인 미국, 일본과 독일 등은 이 보다 더 진보된 기술을 개발하여, 이미 발전설비에 적용 가능성 여부를 검토중인 것으로 보고되고 있다.

가스터빈 발전은 고온고압에서 사용되는 특수성 때문에 열과 부식환경에 노출되어 Creep이나 Fatigue 등의 결함을 유발할 수 있는 문제점을 갖고 있다.² 이와 같은 결함은 가스터빈 발전설비의 수명에 직접적인 영향을 미치며, 설비의 재사용과 폐기처분 여부를 평가하는데 중요한 요소로 작용

한다. 따라서 이와 같은 결함에 대한 저항성을 향상시키는 연구와 설비의 재사용 가능성을 목적으로 재생열처리에 대한 연구가 다양하게 수행되고 있다. 그 중 HIP(Hot Isostatic Pressing) 처리와 후속열처리에 대한 연구가 주로 수행되고 있으며, HIP 처리의 경우, 사용재의 미세조직 복원에 탁월한 효과를 보임으로서, 설비의 재생가능성을 한 단계 높일 수 있는 것으로 보고된 바 있다.³ 그러나 아직까지 HIP 처리 효과에 대한 Mechanism 이해가 부족하며, 정확한 근거 자료 또한 부족한 실정이다. 따라서 본 연구는 HIP 처리와 후속 열처리 과정 중 관찰되는 미세조직 전개양상과 기계적 물성의 평가를 통해 HIP 처리효과에 대한 구체적인 Mechanism 이해를 도모하고자 수행되었다.

2. 시험편 및 시험방법

2.1 시험편

이 연구에 사용된 실험소재는 실제 발전설비에서 가스터빈 부품으로 사용되는 GTD111DS (Directional Solidification) 소재이다. 그 중 에어포일(Airfoil)에 사용되는 17,208 시간 사용된 GTD111DS 소재를 이용하여 HIP 처리 및 HIP 처리후 열처리 과정 중 나타나는 미세조직 전개양상

과 기계적 특성을 관찰하였다. 시편의 크기는 ASTM E8 의 규격에 따라 봉상 형태의 시편을 제작하여 사용하였다. Figure 1 은 블레이드의 에어포일(Airfoil)에서 채취한 시험편의 형상을 보여주고 있다.

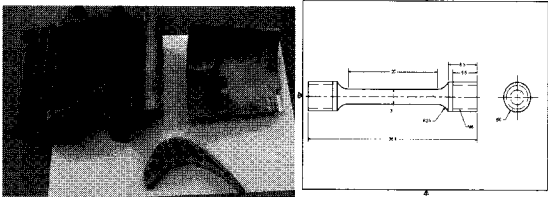


Fig. 1 Shape of specimen

2.2 실험방법

HIP 처리는 알로이틱(㉔)에서 보유하고 있는 XXX™ 장비를 이용하여 1,175℃, 1,204℃, 1,250℃의 온도조건에서 15ksi의 압력으로 수행하였다.⁴ 또한 HIP 처리 후 완전한 재료의 미세조직과 물성의 복원을 위하여 1,204℃/2h, 1,121℃/2h와 843℃/4h로 구성된 3 단계 열처리를 Abar Ipsen Vacuum Furnace를 이용하여 순서대로 수행되었다. 이후 각각의 공정 중에 발생하는 미세조직의 전개양상을 분석하기 위해, HITACHI FE-SEM(S-4300) 장비를 이용하여 입도분포, 입자형상과 상분율을 관찰하였다. 또한 기계적 특성을 평가하기 위해 인장시험과 응력-파단 시험(Stress-rupture Test)를 실시하여 기계적 성질의 변화를 관찰하였다.

3. 실험결과

3.1 GTD111DS의 미세조직

운전하지 않은 신재의 γ' 은 규칙적으로 일정한 형상을 가지고 분포되어 있으며, 크기는 0.4 μm 이고 모양은 입방체 모양을 하고 있다. 그러나 니켈기 초합금에서 관찰되는 2 차(Secondary) γ' 은 관찰되지 않는 것으로 보아 시효(Aging) 열처리를 시행하지 않은 재질이다. 또한 각각의 γ' 이 확실하게 구분된 형태가 아니고 서로 연결된 형태가 관찰되기도 한다.

Figure 3 은 17,208 시간 동안 운전된 블레이드의 미세조직 사진이다. γ' 의 크기는 1.28 μm 이며, 2 차(Secondary) γ' 은 관찰되지 않았다. 오른쪽 미세조직 사진은 γ' 이 서로 연결되어 성장된 모양을 보이고 있으며, 이렇게 응력방향에 수직된 방

향으로 길게 성장한 레프팅(Rafting) 조직이 관찰되었다. 이러한 레프팅(Rafting) 현상은 주로 버켓의 에어포일의 표면에서 관찰된다. 레프팅(Rafting)은 온도와 응력의 영향을 많이 받는 블레이드의 표면에서 나타나고 냉각공기가 지나가는 냉각공 주변에서는 관찰되지 않는다.⁵

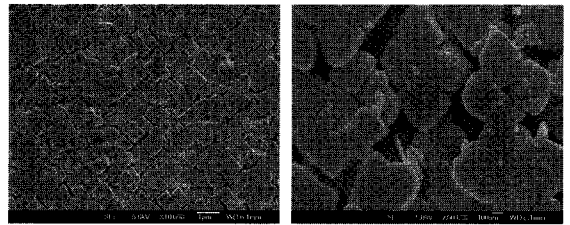


Fig. 2 Microstructure of new material

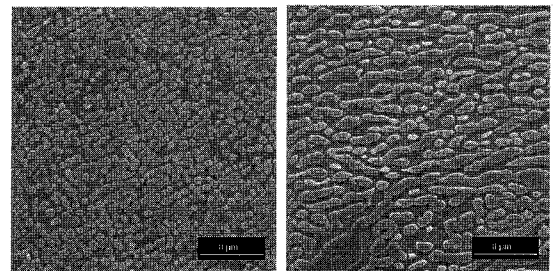


Fig. 3 Microstructure of 17,208 hour operated material

Figure 4 는 17,208 시간 동안 가스터빈에 장착되어 운전된 블레이드 에어포일에 1,121℃/2hr와 843℃/hr의 열처리를 수행한 후의 미세조직이다. γ' 의 크기는 1.0~2.0 μm 사이이며, 모양도 둥근 형태 또는 불규칙한 모양을 하고 있다. 둥근 모양의 크기가 0.1 μm 정도의 2 차(Secondary) γ' 은 관찰은 되나, 그 양이 적고 둥근 형태의 1 차(Primary) γ' 이 서로 연결되어 성장된 듯한 모양이 나타나고 있다.

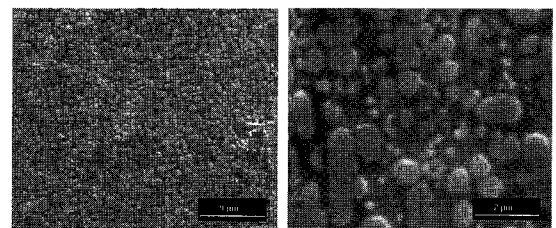


Fig. 4 Microstructure of 1,121℃/2hr and 843℃/hr treated on 17,208 hour operated material

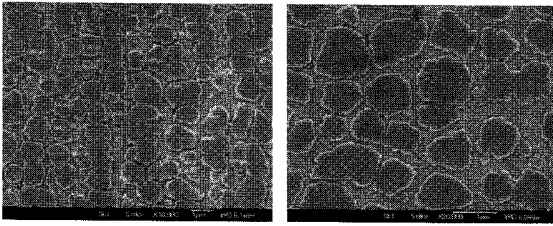


Fig. 5 Microstructure of 1,175°C HIPped on 17,208 hour operated material

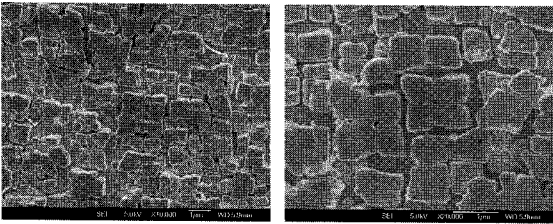


Fig. 6 Microstructure of 1,204°C HIPped on 17,208 hour operated material

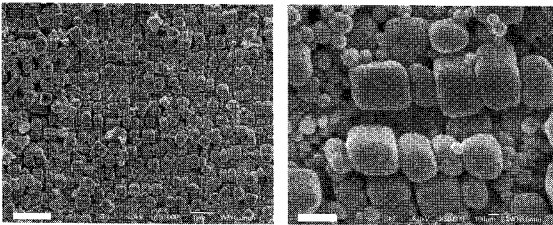


Fig. 7 Microstructure of 1,175 °C HIP with following heat treatment(1,204°C/2h, 1,121°C/2h and 843°C/4h) on 17,208 hour operated material

Figure 5 는 17,208 시간 사용된 소재를 1,175°C 에서 HIP 처리를 실시한 것이다. 이것은 Figure 3 과 같은 모양에서 고용후 재석출한 불규칙한 형태로 변화가 일어났으며, γ' 크기도 0.8~1.3 μm 사이로 측정되었다. 또한, 2 차(Secondary) γ' 은 거의 관찰되지 않았다.

Figure 6 은 17,208 시간 사용된 소재를 1,204°C 에서 HIP 처리를 실시한 것이다. 이것의 모양은 입방체의 형태를 띠고 있으며, γ' 의 크기는 0.6~1.0 μm 사이로 측정되었다. 또한, 2 차(Secondary) γ' 은 거의 관찰되지 않았다.

Figure 7 은 1,175°C 의 HIP 처리후 후속 열처리 (1,204°C/2h, 1,121°C/2h 와 843°C/4h)를 시행한 미세 조직이다. γ' 은 정확한 입방체 모양을 나타내고 있으며, 크기는 0.4~0.5 μm 이다. 2 차(Secondary) γ' 은 입방체 형태의 1 차(Primary) γ' 의 사이에

잘 발달되어 있는 것을 관찰할 수 있다. 1,175°C 에서 수행한 HIP 처리에서 불규칙한 형태로 변경되었던 γ' 은 후속 열처리를 통해 17,208 시간 사용된 소재에서 나타났던 불규칙한 형태가 입방체 모양으로 변경 되었으며, 2 차(Secondary) γ' 도 잘 발달 된 것을 관찰 할 수 있었다.

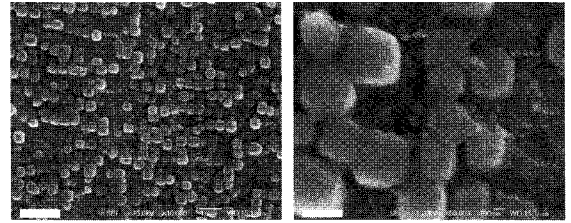


Fig. 8 Microstructure of 1,204 °C HIP with following heat treatment(1,204°C/2h, 1,121°C/2h and 843°C/4h) on 17,208 hour operated material

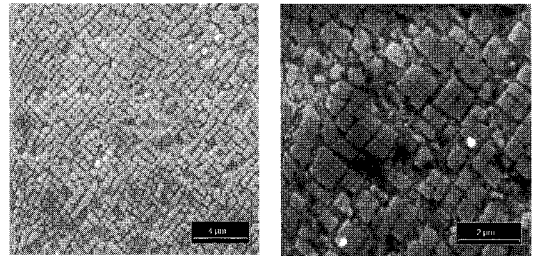


Fig. 9 Microstructure of heat treatment (1,204°C/2h, 1,121°C/2h and 843°C/4h) on 17,208 hour operated material

1,204°C HIP 처리와 후속열처리를 실시하여 Figure 8 과 같은 결과를 얻었다. Figure 6 과 비교할 때 γ' 의 모양은 입방체 모양을 유지하고 있으며, 크기는 0.3~0.5 μm 이며, 1,204°C 의 HIP 처리후 크기 보다 작아진 것을 알 수 있다. 2 차(Secondary) γ' 이 입방체 모양의 1 차(Primary) γ' 의 사이에 잘 발달된 것이 관찰된다.

Figure 9 는 HIP 처리 없이 후속 열처리를 수행하였을 때의 미세조직을 보여주고 있다. γ' 의 모양은 입방체이며, 크기는 0.4~0.6 μm 이다. HIP 처리를 수행한 미세조직에 비해 γ' 의 크기가 0.1~0.2 μm 정도 큰 것을 알 수 있다.

3.2 기계적 시험

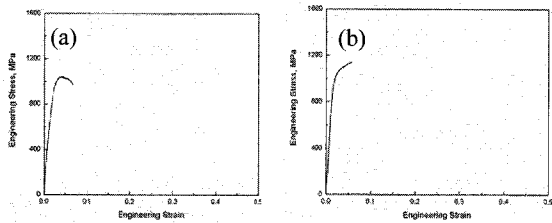
3.2.1 인장시험

GTD111DS 의 17,208 시간 사용된 소재를 이용

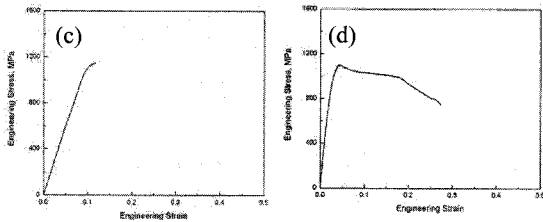
한 HIP 처리, HIP 처리후 후속 열처리의 차이에 따라 인장강도의 변화를 SHIMADZU 사의 AG-25TG 를 사용 검사 하였다. 사용전에 하중, 변위 및 변형율에 대한 교정을 실시하여 정밀도를 확인하였다. 0.2mm/min 의 인장속도로 실험하였고, 시편 직선부의 두께는 3mm 이고 표점거리(Gage Length)는 20mm 이며, 전체길이는 38mm 이다. Table 1 은 인장 시험(Tensile Test) 결과를 보여주고 있다.

Table 1 Tensile test

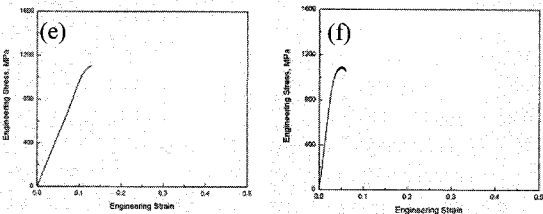
Condition	Tensile Strength(MPa)	
	RT	760 °C
1175 °C HIP + Post Heat treatment	1,139	1,014
1204 °C HIP + Post Heat treatment	1,118	1,098
Post Heat treatment	1,105	1,092



1,175 °C HIP+1,204 °C/2h + 1,121 °C/2h + 843 °C/4h;
(a) Room temperature (b) 760 °C



1,204 °C HIP+1,204 °C/2h + 1,121 °C/2h + 843 °C/4h;
(c) Room temperature (d) 760 °C



1,204 °C/2h + 1,121 °C/2h + 843 °C/4h;
(e) Room temperature (f) 760 °C

Fig. 10 Ultimate tensile strength after HIP and Heat treatment on 17,208 hour operated material

HIP 처리 및 후속 열처리에 따른 인장강도의

실험에서는 각 조건별 차이가 발생하지 않았다. 그러나, 연신율은 HIP 처리를 실시한 조건에서 좀 더 좋은 결과를 얻을 수 있다.

3.2.2 응력-파단(Stress-rupture)

응력-파단 시험(Stress-rupture Test)는 R & B 사의 5 ton 크립 시험기를 이용하여 실시하였다. 시편은 인장시편과 같은 크기의 것을 사용하였다. 시편은 17,208 시간동안 운전된 블레이드에서 채취한 시편을 이용하여 열처리후 응력-파단 시험(Stress-rupture Test)에서 파단 시간이 어떻게 변화하는지를 검사하였다.

17,208 시간 동안 운전된 블레이드에서 채취한 시편을 Table 2 와 같은 조건으로 열처리를 실시한 후 응력-파단 시험(Stress-rupture Test)를 실시하였다. Figure 4 와 Figure 7 에서 볼 수 있듯이 열처리 조건의 변화에 따른 미세조직의 변화를 확인 할 수 있다. Figure 4 에서는 γ' 가 등근 형태를 나타내고 있으며, Figure 7 에서는 γ' 의 형상은 입방체 모양을 하고 있다. Table 3 에서 열처리 조건에 따른 응력-파단(Stress-rupture)의 파단시간을 비교한 결과 입방체 모양의 γ' 이 생성되는 열처리 조건에서 982 °C, 27 ksi 의 응력-파단(Stress-rupture)의 조건일 때 거의 2 배 가까운 차이가 발생하였다.

Table 2 Heat treatment condition

No	Heat treatment	Remarks
1	1,121 °C/2hr + 843 °C/4hr	C
2	1,204 °C/2hr + 1,121 °C/2hr + 843 °C/4hr	S
3	1,220 °C/2hr + 1,121 °C/2hr + 843 °C/4hr	R

Table 3 The result of stress rupture

	Stress (ksi)	Temp (°C)	Rupture Hour	Strain (%)	LMP (=TX(log(tr)+20))
R-1	27	982	53.97	27	49,114.66
R-2	27	982	59.70	23	49,213.70
R-3	27	982	83.15	24	49,538.88
R-4	63.8	816	58.20	16	44,637.46
S-1	27	982	78.63	23	49,484.06
S-2	27	982	92.67	25	49,645.28
S-3	27	982	99.82	21	49,718.23
S-4	27	982	108.97	20	49,804.28
C-1	27	982	44	13	48,905.54
C-2	27	982	51.65	12	49,062.85

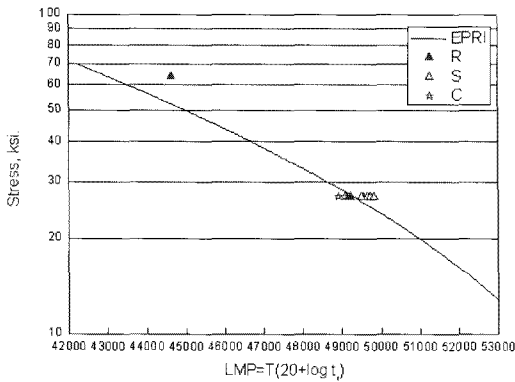


Fig. 11 LMP graph for stress rupture

4. 고찰

사용재에 대하여 HIP 처리와 후속 열처리의 적용은 신재와 동등한 수준의 미세조직과 기계적 물성복원에 효과적이었다. 그러나, 실제적으로 인장강도 값을 비교 했을 때 실험한 조건에서는 HIP에 의한 기계적 물성치의 증가는 확인 할 수 없었다. 그러나, 미세조직에서는 HIP의 온도가 높은 1,204 °C의 조건에서는 γ' 의 크기가 좀 더 작은 것을 알 수 있었다.

후속 열처리 조건에서 2 단계로 구성된 Table 2의 C 조건에서는 γ' 의 변화는 거의 관찰할 수가 없었으나, S 조건에서는 γ' 의 모양과 크기에 많은 변화가 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 응력-파단 시험(Stress-rupture Test)를 통한 두개의 열처리 조건 평가를 실시하여 본 결과 두개의 조건에서 많은 차이를 발견 할 수 있었다. S 조건의 열처리를 실시한 시편은 EPRI의 GTD111DS의 신제품의 응력-파단 시험(Stress-rupture Test) 시간과 거의 같은 값을 갖는 것을 확인 할 수 있었다.⁶

5. 결론

GTD111DS 소재에 대하여 HIP 처리와 후속 열처리 과정 중 관찰되는 미세조직 전개양상과 기계적 물성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 사용재에 대하여 수행된 HIP 처리와 후속 열처리는 균질한 γ' 상을 생성 시킴으로서 퇴화된 미세조직의 복원에 큰 효과를 나타내었다. 그러나, HIP 처리 작업을 하지 않고 후속 열처리만 수행한 작업에서도 같은 HIP 처리와 후속 열처리

를 같이 수행한 것과 같은 미세조직을 갖는 조직을 얻을 수 있었다.

2) 인장강도의 실험에서 HIP 처리에 의한 효과를 찾기 힘들었다. 제작사에서 초기 블레이드 제작시 HIP 처리 수행으로 사용재에 대한 재 HIP 처리의 영향이 미미하다. 따라서, 인장강도의 변화에 크게 영향을 미치지 못하는 것으로 여겨진다.

3) 사용재에 대한 열처리 조건의 변화에 따른 응력-파단 시험(Stress-rupture Test)의 결과 γ' 의 크기와 모양을 신제품과 비슷한 조건으로 변화시킬 수 있는 열처리 조건에서는 신제품과 비슷한 Stress-rupture 파단시간을 갖는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 논문은 지식경제부에서 주관하는 전력산업 연구개발과제의 보고서를 활용하여 작성한 논문입니다.

참고문헌

1. Bartos, F. J., "New, Efficient Industrial Gas Turbine Coming," Control Engineering, Vol. 55, p. 40, 2008.
2. Viswanatn, R., "Damage Mechanism and Life Assessment of High Temperature Component," ASM International, pp. 425-426, 1999.
3. Kim, M. T., Chang, S. Y. and Won, J. B., "Effect of HIP Process on the Micro-structural Evolution of a Nickel-based Superalloy," Material Science and Engineering:A, Vol. 441, Issues 1-2, pp. 126-134, 2006.
4. Wangyao, P., Krongtong, V., Homkrajai, W., Panich, N. and Lothongkum, C., "OM Study of Effect of HIP and Heat Treatments on Microstructural Restoration in Cast Nickel-based Superalloy GTD111," Journal of Metals, Materials and Minerals, Vol. 17, No. 1, pp. 87-92, 2007.
5. Ejaz, N. and Tauqir, A., "Failure Due to Structural Degradation in Turbine Blades," Engineering Failure Analysis, Vol. 13, Issue 3, pp. 452-463, 2006.
6. Viswanathan, R., "Gas Turbine Blade Superalloy Material Property Handbook," EPRI(TR-1004652), pp.17.1-17.16, 2001.
7. Research for Power Industry, "Development of CNC Welding Repair for the Damaged Gas Turbine Blade

Tip,” Report of Third Year, 2007.