

Ti-6Al-4V 합금의 단시간 고온 노출 시 모재 및 용접부의 인장강도 특성

채 병 찬^{*,1)}

¹⁾ 국방과학연구소 제1기술연구본부

Effects on Tensile Strength of Base and Weld Metal of Ti-6Al-4V Alloy in Short Time Exposure to High Temperature

Byoung-Chan Chae^{*,1)}

¹⁾ The 1st Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 24 March 2014 / Revised 20 May 2014 / Accepted 13 June 2014)

ABSTRACT

Since the structural temperature of a flight vehicle flying at high speed rises rapidly due to aerodynamic heating, it is necessary for optimum structural design to obtain proper material properties at high temperature by taking into account of its operational environment. For a special alloy, analysis data on strength change due to exposure time to high temperature are very limited, and most of them are for an exposure time longer than 30 minutes for long term operations. In this study, base and weld metal samples of Ti-6Al-4V alloy had been prepared and high temperature tensile tests with induction heating were performed, and then high temperature strength characteristics and strength recovery characteristics through cooling have been analyzed. Pre-tests to determine maximum heating rate were performed, and response characteristics for temperature control were confirmed. As a result, high temperature tensile strength appeared to be lower than that of room temperature, but it was higher than that of high temperature of 30 minute exposure listed in MMPDS. In strength recovery through cooling Ti-6Al-4V alloy has shown higher recovery rate compared with other alloys.

Key Words : High Temperature(고온), Tensile Strength(인장강도), Strength Recovery(강도회복)

1. 서론

고속으로 비행하는 비행체의 경우 공력가열에 의해

구조물의 온도가 급격히 상승한다. 그로 인해 극심한 비대칭 온도분포가 발생하기도 하고, 재질의 한계 온도를 초과하여 균열, 삭마로 인한 구조물 손실, 파괴 등과 같은 구조적, 열적 불안전성 및 기능상 결함을 초래할 수 있다. 따라서 운용 환경을 고려하여 강도가 높으면서 적당한 연성과 인성을 보유하는 합금을 선

* Corresponding author, E-mail: bcchae@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

정해야 하고, 고온 노출 시 재료의 강도 특성을 명확히 파악하여 구조물 설계 시 고려해야 한다. 일반적으로 주로 사용하는 알루미늄 합금의 경우 용융점이 낮기 때문에 고온에서 취약한 특성이 있고, 열처리 및 가공 경화형 알루미늄 모두 고온에 노출될 경우 강도가 저하되는 현상이 나타난다. 그러나 티타늄 합금의 경우에는 500℃ 이상의 고온에서도 상온 강도의 약 55% 정도의 강도를 보유하는 매우 우수한 특성을 보인다. 하지만 노출 시간에 따라 저하되는 정량적 강도 변화에 대한 분석이 폭넓게 이루어지지 않고 있고, 대부분 노출 시간 30분 이상의 장시간 운용 조건에 대해서만 명시되어 있다^[1-5]. 따라서 30분 이하의 짧은 시간 동안 고온에 노출되는 운용 조건에서는 30분 노출에 대한 강도 자료를 이용하여 구조물 설계에 적용해야 하는 어려움이 있다. 또한 고속 비행체의 급격한 기동이나 비행 환경 변화 등으로 인해 노출 온도가 낮아져서 생각될 경우에는 재료의 강도 회복 여부가 매우 중요한 설계 사항이 될 수 있으므로, 관심 온도 변화 구간에 대한 고온 강도 회복 특성을 파악하는 것도 중요하다. 그리고 용접 구조물과 같이 국부적으로 재료 변형이 가해진 경우에는 모재와 다른 강도 특성을 나타낼 수 있기 때문에 시험을 통해 이를 확인하고 적정 안전 계수를 설정하여 설계에 적용해야 한다.

Ti-6Al-4V는 α - β 계열의 티타늄 합금으로서 α 와 β 상이 적절한 비율로 조직을 구성하고 있으며, 상온에서는 강도가 높고 깨지기 쉬운 α 상으로 존재하다가 β transus 온도(약 995℃) 이상이 되면 β 상이 나타나게 되고, 급속 냉각을 통해 상온에서도 α 와 β 상을 가지는 α - β 합금이 생성된다.

Ti-6Al-4V는 α - β 계열 합금 중에서 가장 용접성이 우수하고 알루미늄 합금에 비해 강도는 매우 높으나 제작 가공이 어려운 것이 단점으로 알려져 있다^[6,7]. 그러나 최근 들어서는 기계 가공 및 용접 기술의 발전과 함께 많은 분야에 널리 사용되고 있다.

따라서 본 연구에서는 유도가열 방식을 사용하여 Ti-6Al-4V 합금의 30분 이하 단시간 고온 노출 조건에서 노출시간 변화에 따른 모재와 용접부의 고온 강도를 평가하고, 대표적인 온도 구간 및 시간에서 급격한 온도 냉각이 발생할 경우의 고온 강도 및 회복 특성을 확인하고자 하였다.

2. 본 론

2.1 시험 장치 및 시편 형상

Ti-6Al-4V 합금의 고온 환경을 모사하기 위해 Fig. 1과 같이 급속 유도 가열 장비를 사용하여 시험을 수행하였다. 시편의 가열방식에는 여러가지가 있으나 크게 전기로(furnace)와 유도 가열(induction heating) 방식으로 구분할 수 있다. 그 중 전기로를 사용하는 경우에는 시편 전체의 온도 균일성은 우수하지만 가열 속도가 제한적이고 정확한 온도 제어가 불가능하다는 단점이 있다. 이에 비해 유도 가열 방식은 급속 가열이 가능하고 시편의 상/하부에 열전대를 부착하여 비교적

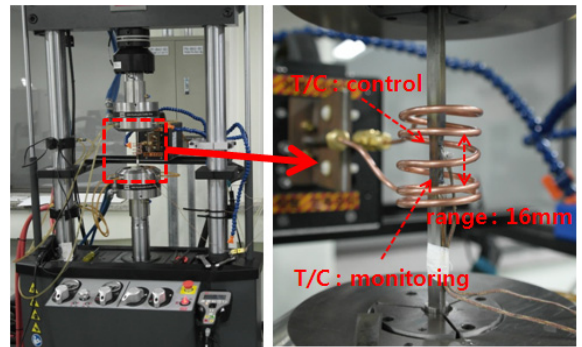


Fig. 1. Induction heating(MTS, land mark)

Table 1. Subsize tension test specimen^[8]

Dimensions (Subsize specimen)	
Gage length (G)	25.0 ± 0.1mm
Width (W)	6.0 ± 0.1mm
Thickness (T)	3.0mm
Radius of fillet (R)	5.0mm
Overall length (L)	200mm
Length of reduced section (A)	32mm
Length of grip section (B)	30mm
Width grip section, approximate (C)	10mm

정확한 온도 제어가 가능하다. 그러나 열전대 부착이 불가능한 비철 금속의 경우에는 사용이 불가능하고 온도 균일 구간이 일부 제한적인 것이 단점이라고 볼 수 있다. 따라서 목표 온도까지 일정한 가열속도와 비교적 빠른 가열 및 냉각 조건을 만족시킬 수 있는 온도 제어가 용이한 유도 가열 방식을 채택하여 고온 인장시험을 수행하였다. 시험편의 형상은 Table 1과 같이 ASTM E 8M에 규정된 판상형 축소 시험편(subsize)의 요구 조건을 만족하도록 하였고, 용접 시험편의 경우에는 맞대기 형상의 sheet 소재를 전자빔 용접을 사용하여 제작하였다.

2.2 고온 강도 특성 시험

고온 인장 시험을 수행하기에 앞서, Fig. 2~4와 같이 최대 가열 속도를 선정하기 위한 예비 시험을 수행하였다. 최대 가열 속도를 15, 20, 30°C/sec로 증가시켜가며 시험편의 상/하부에 열전대(thermocouple)를 부착하여 온도 제어 명령에 대한 응답 특성을 확인하였다. 최대 가열 속도 선정을 위한 기준으로는 가열 과정 중 시험편 온도의 오버슈트(overshoot)가 10°C 이상 발생하지 않고 안정적인 온도 유지가 가능해야 한다. 최대 가열 속도 선정을 위한 예비 시험을 수행한 결과, 가열속도 20°C/sec에서 가장 안정적인 온도 제어 및 급속 가열 조건을 충족하는 것으로 나타났다. 가열속도 15°C/sec 일 경우에는 오버슈트는 10°C 이내로 만족할만한 수준이었지만 급속 가열 조건을 충족하지 못했고, 가열속도 30°C/sec에서는 오버슈트가 50°C 이상으로 온도 응답 특성이 떨어지는 것으로 확인되었다. 따라서 예비 시험 결과를 통해 선정된 최대 가열속도 20°C/sec로 최대 노출 온도 500°C에 대한 모재와 용접 시험편의 노출 시간 변화에 따른 고온 강도 시험을 수행하였다. 500°C에 도달하는 데 걸리는 시간은 상온 기준으로 약 25초 이내이며, 도달한 시점을 기준으로 하여 0, 2, 4, 6, 8, 10, 20, 30분에 대해 각각 인장시험을 수행하였다. 인장 속도는 시간 경과에 따른 강도 저하 효과를 최소화하기 위해 10mm/min으로 비교적 크게 설정하였다. Table 2는 MMPDS^[9]에 명시된 Ti-6Al-4V의 30분 노출 조건에 대한 온도별 인장 강도를 나타낸다.

Table 3과 Fig. 5는 노출 온도가 500°C일 경우 노출 시간 변화에 따른 모재와 용접 시험편의 고온 강도 시험 결과이며, 상온 대비 약 46% 이상 강도 저하가 발생한 것으로 나타났다. 또한 고온에 노출되는 시간에 따라 강도 저하 차이가 크게 발생할 것으로 예상하였

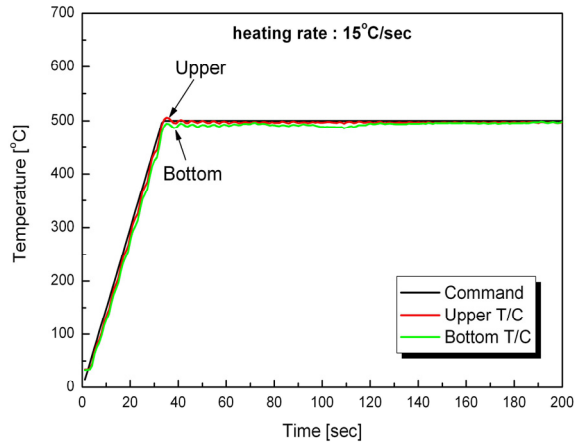


Fig. 2. Pre-test(heating rate : 15°C/sec)

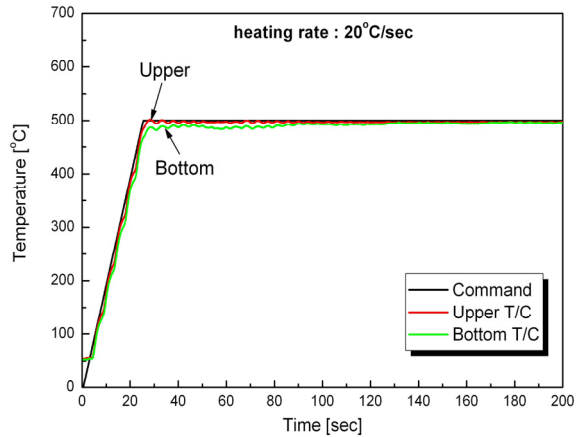


Fig. 3. Pre-test(heating rate : 20°C/sec)

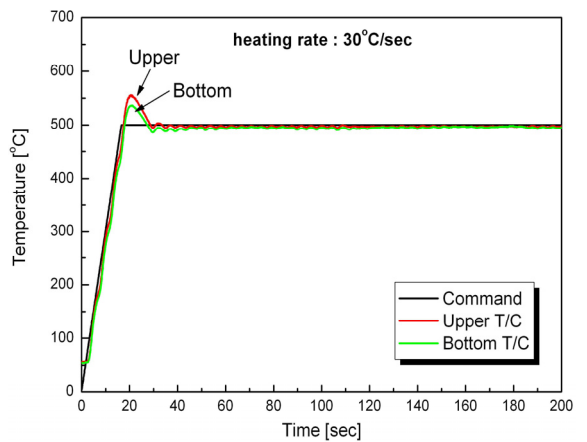


Fig. 4. Pre-test(heating rate : 30°C/sec)

Table 2. Ti-6Al-4V tensile strength^[9]

Temperature [°C]	Time [min]	*UTS [MPa]	0.2% offset [MPa]
500	30	511	407
400	30	605	480
300	30	642	512
RT	-	896	813

*UTS : Ultimate Tensile Strength

Table 3. Tensile test result at 500°C

Exposure time [min]	Base metal		Welded
	0.2% offset [MPa]	UTS [MPa]	UTS [MPa]
RT	989	1001	1041
0	476	558	595
2	454	562	601
4	466	566	601
6	471	560	612
8	482	563	617
10	492	577	612
20	492	580	620
30	481	576	620

으나, 노출 시간 10분 이하 구간에서는 노출 시간이 길어질수록 오히려 강도가 소폭 상승하는 결과가 나타났다. 이러한 원인으로서는 유도 가열 방식을 사용하였기 때문에 노출 시간이 매우 짧은 구간에서는 시편 전체의 온도 균일성 문제로 인한 시험 오차가 반영된 결과라고 판단된다. 또한 일반 인장 시험에 비해 상대적으로 빠르게 설정한 인장 속도의 영향일 수도 있으나, 고온 시험일 경우 상온에 비해 상대적으로 가공 경화에 의한 영향이 적기 때문에 인장속도로 인한 강도 편차는 비교적 작을 것이라고 판단된다. 그리고 노출 온도가 Ti-6Al-4V 합금의 beta transus 온도이거나 상회하는 경우에는 합금의 조직 특성에 의한 영향으로 인해 결과가 달라질 수 있으나, 500°C의 경우에는 전반적으로 노출 시간 변화에 따른 강도 차이는 크지 않았으며, 모든 시험 조건에서 MMPDS^[9]에 제시된 규격 강도 대비 10% 이상 높게 나타났다.

용접 시편의 경우, 고온 인장시험 결과에서 강도가 모재 대비 약 7% 높게 나타났다. 일반적으로 알루미늄 합금의 경우 용접부가 모재 강도와 비교하여 낮게 나타나는 것에 비해, Ti-6Al-4V 합금의 용접부는 모재에 비해 Table 4와 같이 높은 강도를 가지는 것으로 나타났다. 용접부는 용접에 의한 열 및 냉각에 노출된 결과로서 강도, 연성(ductility), 인성(toughness)의 특성이 상당히 변화할 수 있고, Ti-6Al-4V 합금과 같이 대부분의 α - β 계열 합금은 용접부에서 연성

Table 4. Typical tensile, hardness data for titanium alloy (Ti-6Al-4V)^[7]

Material condition	Ultimate strength [MPa]	Yield strength [MPa]	Elongation [%]	Hardness [HRC]	
				Knoop	Rock well
base	1000	945	11.0	320	32.2
single bead weld	1060	920	3.5	350	35.9
Multiple bead weld	1090	945	3.2	.	.
Transverse weld	1015

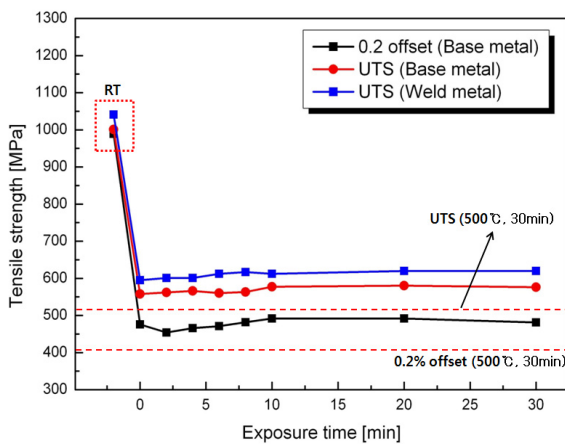


Fig. 5. Tensile test result at 500°C

이 낮은, 즉 경도가 높은 특성을 보인다. Ti-6Al-4V 용접부의 기계적 물성은 크게 용접 에너지와 냉각속도에 따라 달라질 수 있는데, 티타늄 합금 용접 시 주로 사용하는 전자 빔, 레이저 빔 용접은 타 용접에 비해 낮은 용접 에너지와 높은 냉각속도를 가지므로 매우 조밀하고 높은 경도와 강도를 가지는 마르텐사이트(martensite) 조직이 생성되어 모재에 비해 높은 강도를 가지게 된다. 그러나 용접부의 경도가 높아지게 되면 금속의 연성이 떨어지게 되며, 용접 공정으로 인한 결함 등이 발생할 수 있으므로 설계 시 이를 고려한 적정 안전 계수를 적용해야 할 것으로 판단된다.

Fig. 6, 7은 용접 시편의 단면을 확대하여 미세 조직을 촬영한 것으로 sheet 소재의 제작 특성으로 인해 모

재부의 경우 조직이 적층된 형태로 나타났다. 또한 열영향부(Heat Affected Zone) 근처에서부터 조직이 점차 성장하고 용접부로 갈수록 조대 결정립(coarse grain)이 나타나는 것을 알 수 있다.

Table 5는 노출 시간 30분일 때 노출 온도 별 고온 강도 시험 결과이다. 노출 온도 500°C 조건에서의 고온 강도 시험 결과에서 노출 시간 변화에 따른 강도 차이가 크지 않았기 때문에 400°C와 300°C의 경우에는 규격에 제시된 자료와의 비교 및 온도 냉각 시 강도 회복율을 판단하기 위한 기준 데이터로서 사용하고자 하여, 노출 시간 30분에 대해서만 고온 인장시험을 수행하였다. 시험결과, 노출 온도 500°C 조건과 마찬가지로 규격에 제시된 강도의 10% 이상을 상회하는 결과를 나타냈다.



Fig. 6. Microstructure in weld metal of an electron beam welded Ti-6Al-4V

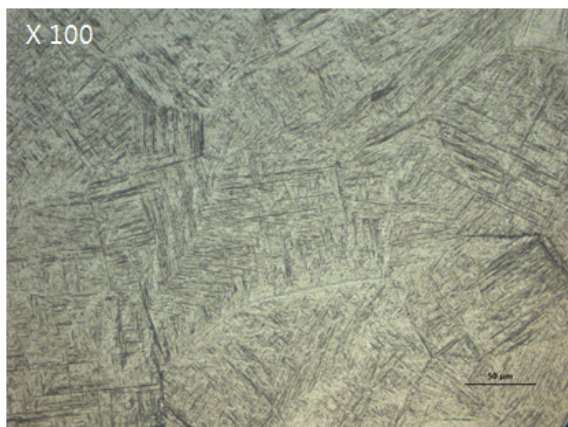
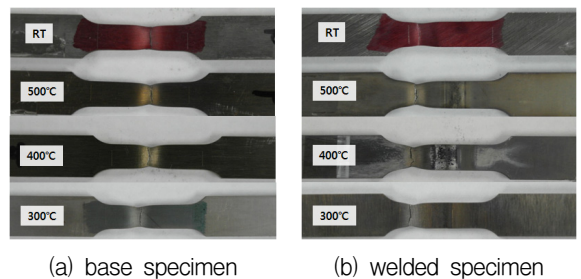


Fig. 7. Microstructure in weld zone

Table 5. Tensile test data(30min)

Temp. [°C]	Base				welded
	0.2% offset [MPa]		UTS [MPa]		UTS [MPa]
	MMPDS	Test	MMPDS	Test	Test
500	407	481	511	576	620
400	480	561	605	694	695
300	512	650	642	717	718
RT	813	989	896	1001	1004

Fig. 8은 고온 강도 시험 후 파단된 실제 시편을 나타낸다. 모재의 경우 gage length의 중심에서 대부분 파단이 발생하였으나, 용접 시편에서는 용접부가 모재에 비해 강도가 높기 때문에 열영향부 근처 모재부분에서 파단이 일어난 것으로 판단된다.



(a) base specimen

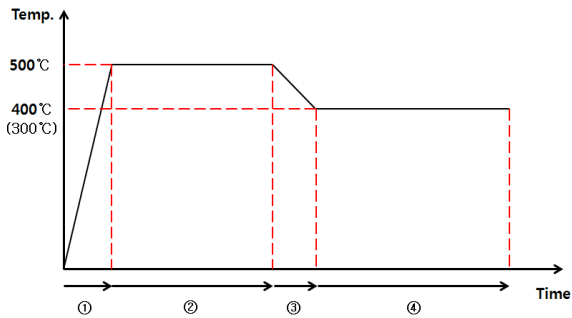
(b) welded specimen

Fig. 8. Test rupture specimen

2.3 노출 온도 냉각에 따른 강도 회복특성

Fig. 9는 노출 온도 냉각 시 Ti-6Al-4V 합금의 강도 회복 특성 시험을 위한 온도 프로파일로서 최대 가열 속도 20°C/sec로 30초 이내에 최대 노출 온도 500°C에 도달하고 10분을 유지한 뒤 400°C 또는 300°C로 냉각 되는 조건으로 설정하였다. 그리고 400°C 또는 300°C 냉각 완료 시점을 기점으로 하여 0, 2, 4, 6, 8, 10, 20, 30분으로 노출 시간을 변경하면서 모재와 용접시편의 인장 시험을 수행하였다. Fig. 10과 11은 각각 500°C에서 400°C, 500°C에서 300°C로 노출 온도를 변화시켰을 경우에 대한 예비 시험 결과이며, 가열과 냉각 시 모두 오버슈트 없이 안정적인 온도 제어가 가능한 것으로 나타났다.

예비 시험을 통해 확인한 온도 프로파일을 통해 고온 인장시험을 수행한 결과, Fig. 12~17에서 보는 바



- ① : 30초 이내로 시험 온도 도달 (heating rate : 20°C/sec)
- ② : 10분 유지(500°C)
- ③ : 70초 이내로 시험 온도 도달 (cooling rate : 3~4°C/sec)
- ④ : 0, 2, 4, 6, 8, 10, 20, 30분 유지 후 인장시험

Fig. 9. Temperature profile

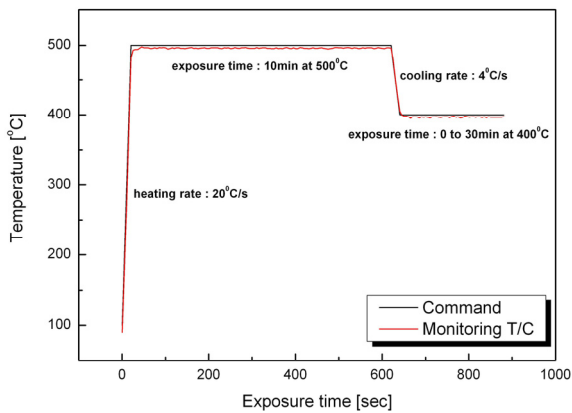


Fig. 10. Pre-test(500°C to 400°C)

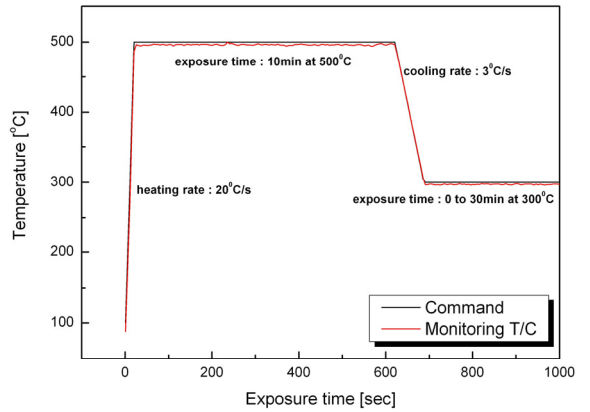


Fig. 11. Pre-test(500°C to 300°C)

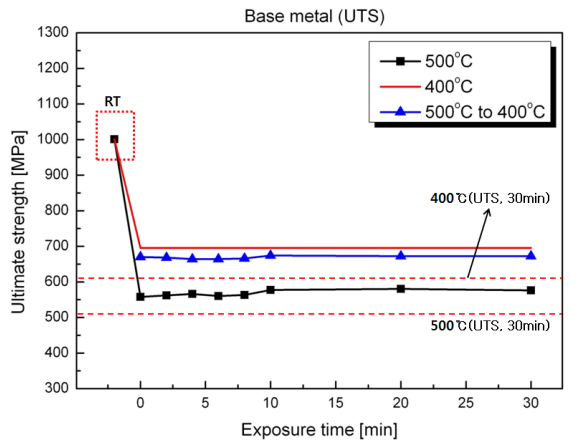


Fig. 12. Ultimate strength for base specimen (500 to 400°C)

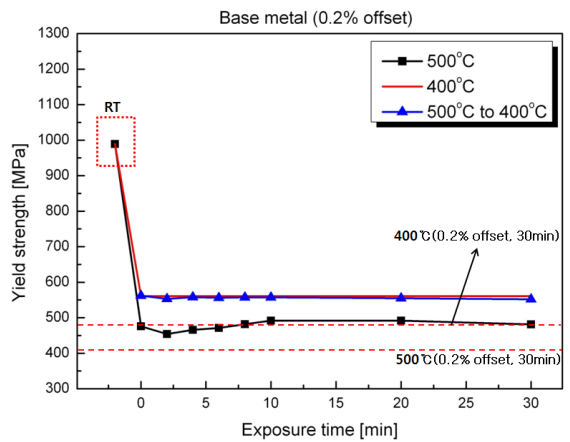


Fig. 13. Yield strength for base specimen(500 to 400°C)

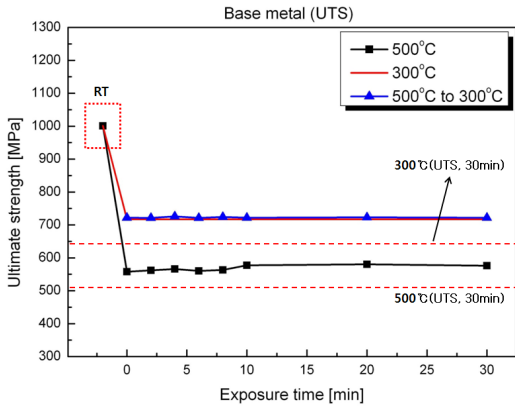


Fig. 14. Ultimate strength for base specimen (500 to 300°C)

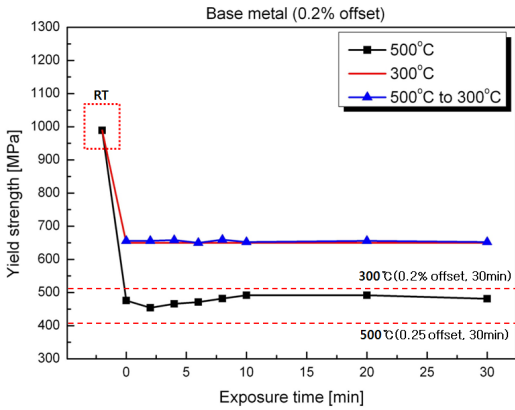


Fig. 15. Yield strength for base specimen (500 to 300°C)

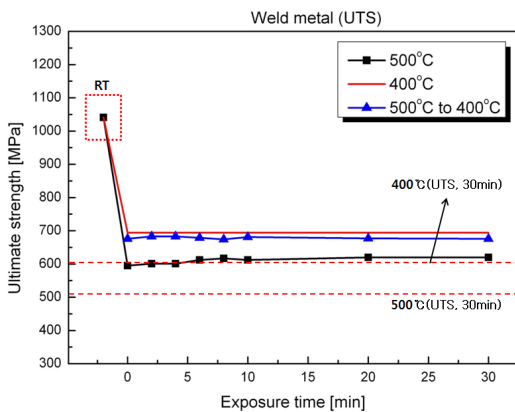


Fig. 16. Ultimate strength for welded specimen (500 to 400°C)

와 같이 모재와 용접 시편에서 모두 상당한 강도 회복이 발생하는 것으로 나타났다.

앞서 언급하였듯이, 400°C와 300°C에 해당하는 강도 값은 30분 노출을 기준으로 표기하였으며, 그래프의 점선은 MMPDS에 제시된 규격 값을 나타냈다. 또한 노출 시간이 10분 이상으로 증가하게 되면 더 이상의 강도 회복은 발생하지 않고 거의 일정한 상태로 유지되는 것으로 판단되므로, 노출 시간 30분 강도를 기준으로 하여 노출 온도가 500°C에서 400°C 또는 300°C로 냉각되었을 때의 인장 시험결과와 해당 온도에서의 고온 강도 시험 결과를 비교하여 Table 6에 정리한 바와 같이 강도 회복율을 계산하였다. 노출 온도가 500°C에서 400°C로 냉각되었을 때, 30분 노출 시 극한 강도 기준으로 모재는 약 96.8%, 용접 시편은 약 97.3%의 강도 회복을 보였고, 노출 온도가 500°C에서 300°C로 냉각되었을 경우에는 모재와 용접시편 모두에서 30분

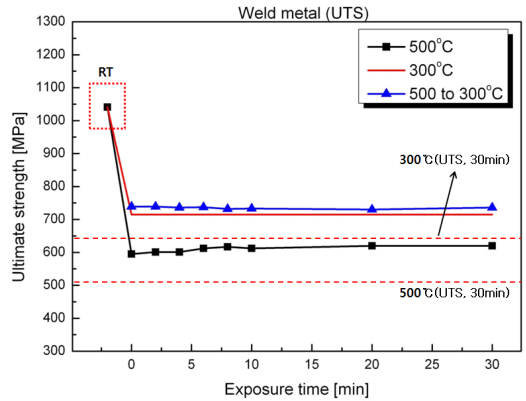


Fig. 17. Ultimate strength for welded specimen (500 to 300°C)

Table 6. Comparison of recovery effects for base and welded specimen(30min)

Temperature [°C]	Base metal		Welded
	0.2% offset [MPa]	UTS [MPa]	UTS [MPa]
500 > 400*	552 (98.4%)	672 (96.8%)	676 (97.3%)
500 > 300*	652 (100.3%)	722 (100.7%)	736 (102.5%)

*test cooling condition

노출, 300℃의 고온 강도 시험 결과를 상회하는 강도 회복 결과를 보였다. 유사한 시험 조건에 대해서 알루미늄 합금(AI2219)의 경우 약 50% 수준의 강도 회복을 나타낸 것과 비교하면 Ti-6Al-4V 합금의 경우 상당히 높은 강도 회복 결과라는 것을 알 수 있다. 합금의 종류에 따라 많은 차이를 보일 수 있지만, 온도 조건 및 시간에 따라 잔류 응력 풀림과 같은 후 열처리(post heat treatment) 효과가 나타날 수 있고, 특히 일정 온도 구간에서 냉각속도가 빠를 경우 Ti-6Al-4V 합금의 조직을 조밀하게 유지하는데 도움을 주게 되어 기계적 물성이 향상될 수 있다고 판단된다. 또한 Ti-6Al-4V 합금의 aging 온도가 약 540℃임을 감안하면 노출 온도 및 시간, 냉각 속도가 기계적 물성 회복 및 상승에 일정 부분 영향을 주었을 것이라고 판단된다.

3. 결론

고속 비행체 구조물 설계를 위한 30분 이하 단기 노출 환경에서의 고온 강도 및 노출 온도 냉각에 따른 강도 회복 특성을 확인하고자 유도 가열방식을 사용하여 모재 및 용접부의 고온 인장 시험을 각각 수행하였다.

최대 가열 속도를 선정하기 위해 시험의 상/하부에 열전대를 부착하여 온도 제어 명령에 대한 응답 특성을 확인한 결과, 20℃/sec에서 오버슈트 없이 가장 안정적인 온도 제어가 가능한 것으로 나타났다.

고온 강도 시험 결과, 모든 시험 조건에서 노출 시간 30분 규격에 제시된 강도에 비해 10% 이상 높게 나타났다. 500℃ 온도 조건의 경우에는 노출 시간 변화에 따른 고온 강도 시험을 수행하였고, 10분 이하 구간에서 강도가 소폭 상승하였으나 이후 구간에서는 일정하게 유지되는 경향이 나타났다. 400℃와 300℃의 경우에는 MMPDS의 값과 비교를 위해 노출 시간 30분에 대해서만 고온 강도 시험을 실시하였고, 500℃ 온도 조건과 유사하게 규격 강도 대비 10% 이상을 상회하는 결과를 보였다. 용접 시험의 경우에는 동일 온도 조건에서 모재 대비 약 7% 강도가 높게 나타났으며, 이는 Ti-6Al-4V 합금의 경우 용접 시 주로 사용하는 전자 빔, 레이저 빔 용접이 타 용접에 비해 낮은 용접 에너지와 높은 냉각 속도로 인해 매우 조밀하고 높은 경도와 강도를 가지는 마르텐사이트 조직을 생성하여 모재에 비해 높은 강도를 가지는 것으로 판단

된다.

노출 온도 냉각에 따른 강도 회복 시험 결과, 500℃에서 400℃로 냉각되었을 경우에는 400℃ 고온 강도 시험결과 96.8~97.3%까지 강도 회복이 나타났다. 노출 온도가 500℃에서 300℃로 냉각되었을 때는 300℃ 고온 강도 시험결과를 기준으로 강도 회복율이 100.3% 이상으로 확인되었다. AI2219 합금의 경우 유사 시험 조건에서 강도 회복율이 약 50% 수준인 것을 고려하면 온도 냉각 시 Ti-6Al-4V 합금의 강도 회복 특성이 상당히 우수한 것으로 확인되었다.

Ti-6Al-4V 합금의 경우 일반적으로 타 금속에 비해 고온 강도 특성이 매우 우수하고, 강도 회복이 상당히 빠르게 진행되는 것으로 확인되었다. 또한 노출 시간의 변화보다는 노출 온도에 따라 기계적 강도 영향이 크게 작용하는 것으로 확인되었다. 따라서 기존 단기 노출 환경 조건에 대한 설계 적용 시 노출 시간 30분 강도를 적용하는 것에 대한 타당함을 확인할 수 있었다.

References

- [1] H. Rosenberg, H. Cox, E. Erbin, "Stress Corrosion and Titanium Alloy Design for High Temperature Applications," Aircraft Design and Technology Meeting, AIAA 1965-764.
- [2] J. C. Ekvall, R. A. Rainen, D. J. Chellman, "Elevated Temperature Aluminum Alloys for Advanced Fighter Aircraft," 30th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, AIAA 1989-1407.
- [3] Robert A. Edahl, Jr. and Marcia S. Domack, "Effect of Thermal Exposure on the Tensile Properties of Aluminum Alloys for Elevated Temperature Service," NASA/TP-2004-212988.
- [4] David L. Ellis, "Effects of Long Term Thermal Exposure on Chemically Pure(CP) Titanium Grade 2 Room Temperature Tensile Properties and Microstructure," NASA/TM-2007-214968.
- [5] Howard L. Price, "Tensile Properties of 6Al-4V Titanium-alloy Sheet under Rapid Heating and Constant Temperature Conditions," NASA/TN-D-121.
- [6] Matthew J. Donachie, Jr., "Titanium a Technical Guide," American Society for Metals, Second Edition.

- [7] Metals Handbook, "Properties and Selection ; Stainless Steels, Tool Materials and Special Purpose Metals," American Society for Metals, Vol. 3, Ninth Edition.
- [8] ASTM, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials," American Society for Testing and Materials, E8/E8M-11.
- [9] FAA, "Metallic Materials Properties Development and Standardization," Federal Aviation Administration, MMPDS-01, 2003.