



공학석사 학위논문

Ni-16Cr-17Mo-4W초합금의 열처리 싸 이클에 따른 고온 기계적 특성에 관한 연구



재료공학과

유 병 기

공학석사 학위논문

Ni-16Cr-17Mo-4W초합금의 열처리 싸 이클에 따른 고온 기계적 특성에 관한 연구

지도교수 배 차 헌



부경대학교 산업대학원

재료공학과

유 병 기

유병기의 공학석사 학위논문을 인준함.

2010년 08월 25일



Abstract	

제	1 장 서 론	1
제	2 장 이론고찰	2
제	3 장 실험방법	6
	3.1 시험편 제작	6
	3.1.1 시험편 몰드 제작	6
	3.1.2 시험편 주조	9
	3.1.3 시험편의 열처리	11
	3.2 물성치 시험 및 미세조직	13
	3.2.1 물성치 시험	13
제	4 장 결과 및 고찰	18
	4.1 기계적 특성	18
	4.1.1 상온특성	18
	4.1.2 고온특성	24
	4.2 조직	30
	4.2.1 상온조직	30
제	5 장 결 론	34
제	6 장 참고문헌	35

차 례

A study of High-Temperature Mechanical Properties of Ni-16Cr-17Mo-4W Superalloy by Heat-Treatment Cycles Byungki Yoo

Department of Materials Engineering, The Graduate School of Industry Pukyong National University

Abstract

One of the main aim of heat-treatment are applied to nickel-base super-alloys is to development the full mechanical property capabilities of casting or age-hardening alloys. It usually consists of a solution-treatment followed by one or more precipitation treatments.

In order to ascertain which of the temperature of solution-treatment plays the major role in controlling the mechanical behavior a series of heat treatment cycles experiments have been carried out on three superalloys with different contents of Cr and Mo produced by lost wax process.

The optimum mechanical properties of Ni-16Cr-17Mo-4W-base superalloys has been achieved by water quenching from 1180°C to room temperature. The mechanical properties(tensile strength, yield strength, elongation) at 750°C, 800°C and 850°C have been found to be improved by the amount of Mo-carbide (Mo₂₃C₆, Mo₆C) more than that of Cr-carbide (Cr₂₃C₆) by variation of contents of Mo and Cr.

제1장서론

앞으로 소재산업은 기능, 효율성 등의 감소를 억제시키면서 라이프 싸이클 을 얼마나 증대시키느냐가 중대한 과제일 것이다. 특히 이중에서도 석유화학 플렌트 설비, 원자력발전 설비, 화력발전용 설비, 고온 플렌트 설비, 항공산업 등에서의 라이프 싸이클을 증대 시킨다는 것은 부연 설명하지 않더라도 충분 히 이해가 될 것으로 판단한다.

지금까지의 일반적 추세는 일반강¹⁾에서 스테인레스강²⁾으로의 발전이 이루 어졌으며 앞으로는 보다 더 Super-alloy로의 양적, 질적인 증대가 일어날 것으 로 판단된다. 이는 고가의 소재이면서 반면에 Super-alloy의 재료가 가진 소재 특성, 즉 고온내식성, 고온 Creep강도, 내산화성 등의 효용가치로 인하여 그 사용의 빈도가 폭발적으로 증가할 것으로 판단한다.

고온특성 및 내식성이 우수한 대표적인 Ni기 합금에는 약 30%Mo, 5%Fe가 함유되어 있는 Hastelloy-B³⁾가 있으며 이는 비산화성의 산 인염산에서는 이의 끓는점까지의 모든 농도에서 견디며, 염화수소 가스나 환원성 용액에도 견딘 다. 반면에 산화성 분위기의 질산이나 염소 등에서의 내식성을 개선한 것에는 Cr을 첨가한 Hastelloy-C⁴⁾가 있다.

이와 같은 특성을 가진 소재의 기본적인 연구에서 Cr, Mo 등의 함량 변화 에 따른 기지의 조직변화를 관찰하고 아울러 이를 통한 물성치 변화의 관계를 연구함으로써 실질적인 재료의 특성치를 보다 효율적으로 적용할 수 있는 결 과치를 찾아낼 수 있을 것으로 판단한다. 또한 이 경우의 시험에서는 각각의 재료에 대한 열처리 특성도 같이 연구하여 상관관계를 밝힐 것이다.

- 1 -

제 2 장 이론고찰

일반적으로 내열강에는 Fe-base, Ni-base, Co-base⁵⁾등이 있으며 사용특성 에 적합한 재료를 선택적으로 적용하게 된다.

Fe-base내열강에는 HF(19%Cr-9%Ni), HH(25%Cr-12%Ni), HI(28%Cr-15% Ni)⁶⁾등이 있으며 Ni-base에는 Inconel-713C(12.5%Cr-4%Mo-6%Al-2.5% Fe), Inconel-718(19%Cr-3%Mo-5%Nb-18.5%Fe)⁷⁾, Hastelloy-B, Hastelloy-C등이 있다. Co-base에는Haynes-21, Stellite-6⁸⁾등 여러 종류가 있다.

초기의 Ni-base 초합금은 영국에서 개발되었으며 Ni-20%Cr(Nimonic 80) 고용체며 Ni₃(Al,Ti)석출물을 만들기 위하여 2.25%Ti, 1%Al을 함유하고 있다. 이후 여기에 Mo, Co, Cb, Zr, B 및 기타합금원소⁹를 첨가하여 성능을 개선하 였다.

super-alloy를 가장 많이 사용하는 분야는 항공기용 및 가스터빈이며 기타 의 고온용도에도 상당히 적용되고 있다. 이들 재료는 고용강화 및 석출경화를 증가시키고 적당한 탄화물의 분포를 통하여 기계적 성질이 개선된다.

Ni-base에 존재하는 주요한 상은 일반적으로 matrix는 FCC배열¹⁰⁾의 austenite조직이며 g'의 석출상 및 각종의 금속탄화물 M₂₃C₆ 및 M₆C¹¹⁾ 등이다. Ni-base 합금개발의 초기에는 조직 내에 문제의 조직이 있는데 세포상의

M₂₃C₆탄화물 및 σ상이라는 것을 알 수 있다. 세포상 탄화물은 파괴가 빨리 일 어나게 하고 σ상은 파괴를 빨리 일으킬 뿐 아니라 저온 취성을 갖게 한다. 열처리를 개선하여 세포상 탄화물 문제를 해결하였으며 또한 합금의 화학조성 을 변화시켜 σ상¹²⁾이 없는 새로운 Ni-base 합금을 개발하였다.

상기에서 언급한 각각의 상에 대하여 알아보면

- 2 -

求상은 Ni-base 초합금의 연속적인 기지를 이루고 있으며 Cr, Mo, W, Co, Fe, Ti, Al 등과 같은 합금원소를 첨가하여 강화시킬 수 있다. 석출경화를 일 으키는 Al은 또한 강력한 고용강화제이며 W, Mo, Cr도 또한 강력한 고용강 화제이다. 원자크기인자 이외에도 주기율표에서 원소의 위치가 고용강화에 영 향을 미친다. Electron hole의 수가 증가하면 stacking fault 에너지를 감소시 키게 되므로 cross slip이 더욱 일어나기 어렵게 된다.

고온 creep 온도범위인 0.6Tm 이상인 온도에서 강화현상은 확산의존성이다. 이러한 합금에서 확산이 느린 Mo 및 W 이 고온 creep를 감소시키는데 가장 좋은 요소이다. Co는 부분전위(partial dislocation) 사이의 적층결함 에너지를 감소시켜 교차슬립이 더욱 어렵게 되므로 합금의 고온안정성을 증가시킨다.

(2) ૪'상

austenite Ni-base 합금을 석출경화 처리하면 y'상을 석출시킬 수 있다. 고 Ni 기지에 석출되는 y'상은 FCC인 A3B형¹³⁾화합물이다. A는 비교적 음전성 (negative-electron)원소인 Ni, Co, Fe로 이루어지며, B는 Al, Ti, Cb 등과 같 은 양전성(positive-electron)원소로 된다. Ni-base에서 전형적인 y'상은 Ni₃(Al,Ti)이지만 Co를 첨가하면 약간 Ni이 대치되어 (Ni,Co)₃(Al,Ti)와 같이 될 수 있다.

(3) 탄화물

금속탄화물은 결정립과 결정입계에 형성되며 matrix 보다 단단하고 취약하 므로 결정립계를 따라서 탄화물이 분포되면 Ni-base 내열합금의 고온강도, 연 성, creep 성질에 영향을 미친다. 따라서 결정립계에 석출하는 탄화물의 양과 분포상태가 가장 알맞아야 한다.

만일 결정립계에 탄화물이 없다면 공공(void)이 고온 변형할 때 서로 유착 되어 입계슬라이딩이 지나치게 일어나게 된다. 한편 결정입계를 따라서 탄화 물이 연속된 사슬 같이 펼쳐져 있게 되면 연속적인 파괴경로를 마련하게 되어 내충격성이 떨어진다. 따라서 입계 슬라이딩이 방해되므로 응력이 생겨 파괴 가 빨리 일어나게 된다. 입계에 불연속 된 사슬모양의 탄화물이 가장 바람직 하며 이러한 상태의 탄화물은 입계균열을 억제하는 동시에 입계 부근에서의 변형에 의한 연성도 제한을 받지 않는다.

또한 탄화물의 종류에는 MC, M₂₃C₆, M₆C등이 있다. MC 탄화물은 일탄화 물이며 Ti ,Ta, Cb, W과 같은 금속과 탄화물을 만든다. 이러한 탄화물은 대단 히 안정되어 있으며 응고가 시작하는 온도 바로 밑에서 형성된다고 생각하며 고용화처리 시 고상에 고용되기 힘들며 결정립 성장을 억제한다.

M₂₃C₆ 탄화물은 주로 Cr이지만 Fe로 대치될 수도 있으며 합금에 따라서 소 량의 W, Mo, 또는 Co를 함유하기도 한다. M₂₃C₆ 탄화물은 저온 열처리 시 형 성되며 760~980℃온도 구간에서 사용된다. 탄화물은 MC 탄화물이 변질되어 형성되기도 하며 또는 합금기지 중의 고용탄소로부터 형성되기도 하는데 보통 결정립계에 석출한다.

M₂₃C₆ 탄화물은 복잡한 입방조직을 하고 있다. M₆C 탄화물은 815~980℃구 간에서 형성된다. 이 탄화물은 M₂₃C₆과 비슷하며 기본 합금에 Mo 및 W 함량 이 높을 때 형성되려는 경향이 있다. 이 탄화물은 M₂₃C₆과 비슷하게 복잡한 입방조직을 하고 있다. 6[~]8%이상의 Mo 또는 W을 함유할 때 결정립계의 M₂₃C₆ 탄화물이 형성된다.

Ni-base 내열합금의 일반적인 열처리¹⁴⁾에 대하여 알아보면 다음과 같은 조 건으로 실시할 수 있다.

- ¹⁵⁾고용화온도(1040℃이상) 이상에서 충분히 가열 유지 후 급냉처리를 함으 로써 austenite 기지 내에 y' 석출상을 석출시킬 수 있으며
- 2) 탄화물 형성 및 안정화를 시키기 위하여 940~990℃구간에서 충분히 가열
 유지 후 급냉처리를 실시한다.

이와 같은 열처리의 조건은 내열강의 성분구성이 어떻게 되어 있는가에 따 라 적절히 선택되어 져야 한다.



제 3 장 실험방법

3.1 시험편 제작

3.1.1 시험편 몰드 제작

본 연구의 시험편 제작을 위하여 다음과 같은 정밀주조(lost wax process) 공법을 충분히 이용하여 시행하였다. 다음의 공정사진에서 보는 바와 같이 금 형을 이용하여 우선 wax 모형을 사출 및 조립하여 1차적으로 wax mold를 제 작한다. 이후 본 wax mold에 특정의 내화물로 세라믹 코팅을 시행하며 이 경 우 사용한 코팅 재료는 1차 코팅에 대하여는 지르콘계 내화물을 이용하였다. 이후 백업코팅은 샤모트계 분말 및 샌드를 사용하여 일정한 장도를 유지할 수 있도록 반복코팅한 후 이 몰드를 24시간 건조시킨 후 세라믹 몰드 내부의 왁 스를 auto-clave를 이용하여 탈왁스를 실시하여 인장시편 제작용 세라믹몰드 를 얻었다.

여기에 대한 구체적인 공정은 Fig. 1~Fig. 4에 나타내었다.

ot u



Fig. 2 Assembled wax pattern



Fig. 3 Ceramic coat of wax mold



Fig. 4 Ceramic mold

3.1.2 시험편 주조

1) 사용장비 및 원재료

본 연구를 위하여 사용한 모합금의 Ingot는 전기로에서 장입이 가능한 정도 의 크기를 갖는 bar를 준비하여 100Kg의 고주파 유도 용해로를 이용하였으며 세라믹 몰드는 우선 몰드의 충분한 강도와 잔류왁스를 제거하기 위하여 전기 소성로에서 1050℃에서 2시간정도 실시한 후 용탕을 주입하였으며 출탕온도는 고주파 유도로에서 약 1530℃에서 이루어 졌다. 출탕 전에 본 연구를 위한 소 재의 합금을 실시하여 각각의 조건에 대한 분석과 모든 작업은 양산작업과 동일한 조건으로 시행하였다. 용탕의 성분 조정은 Ni-base alloy에서 Cr과 Mo의 함유량 변화를 주어 합금하여 시편을 준비하였다.

2) 표준 SPEC 및 시편 화학조성¹⁶⁾

				or spor				20	
	С	Si	Mn	Cr	Mo	V	W	Fe	Ni
표준 SPEC	0.12 Max	1.0 Max	1.0 Max	17.5 15.5	18.0 16.0	0.40	5.25 3.75	7.5 4.5	bal.
SMPL #1	0.016	0.34	0.44	15.86	16.34	0.26	3.87	7.24	bal.
SMPL #2	0.008	0.17	0.47	17.52	16.94	0.25	4.06	7.24	bal.
SMPL #3	0.010	0.19	0.40	16.72	17.24	0.27	4.54	6.33	bal.

Table 1 Chemical compositions of specimens

상기의 화학조성 조정에는 용탕이 완전히 용해된 이후 분석용 시편을 채취하 여 분석한 이후에 조성에 필요한 합금철, 즉 Metal Cr, Metal Mo¹⁷⁾, Metal W¹⁸⁾을 사용하였으며, 이는 시편의 카본조성비를 높이지 않도록 하기 위하여 전량 순금속을 사용하였다.



3.1.3 시험편의 열처리

제1장 연구배경의 이론적인 설명에서 언급한 바와 같이 Ni-base superalloy 의 고온특성, 내열성 등의 기계적 특성치를 향상시키기 위하여 이들의 재료적 인 특성에 가장 적합한 열처리가 필요로 하며 이에 따른 열처리 방법은 Table 2에 정리하였다.

본 재료(16Cr-17Mo-4W,Ni-base)의 일반적인 열처리는 2150°F(1,175℃)¹⁹⁾ 이상의 온도에서 충분한 시간 가열 유지한 후 water-quenching 또는 이에 상 응하는 급냉을 요구한다. 따라서 본 연구에서는 일반적인 요구조건의 온도 (1,175℃)를 기준으로 하여 위아래의 온도 구간에서 열처리를 실시하였다.

본 시험 재료의 각 시편에 대한 열처리 싸이클은 Fig. 5에 나타난 바와 같다.

Specimem No.	Temperature	Holding Time	Quenching Method	Quantity
	1,050℃	1 Hour	Water	6 pcs
#1	1,180℃	1 Hour	Water	6 pcs
	1,250℃	1 Hour	Water	6 pcs
	1,050℃	1 Hour	Water	6 pcs
#2	1,180℃	1 Hour	Water	6 pcs
	1,250℃	1 Hour	Water	6 pcs
	1,050℃	1 Hour	Water	6 pcs
#3	1,180℃	1 Hour	Water	6 pcs
	1,250℃	1 Hour	Water	6 pcs

 Table 2
 Heat treatment cycles of 3-other
 specimems



Fig. 5 Heat treatment cycle

3.2 물성치 시험 및 미세조직

3.2.1 물성치 시험

1) 상온 인장시험 (Tensile test at room temperature)

상온 인장시험을 위하여 각각의 시편(#1, #2, #3)에 대하여 1,180℃에서 한 시간 유지 후 수냉처리를 실시하여 만능재료 시험기에서 인장시험이 가능토 록 JIS14A호²⁰⁾인장시편을 가공하여 3개씩 시험하였으며 이들 결과 값의 평균 을 정리하였다. JIS 14A호 인장시편의 구체적인 가공치수는 Fig. 6에 나타난 바와 같이 가공을 하였으며 가공면의 표면조도는 0.8Rmax정도로 하였다.

인장시험의 장면은 Fig. 7과 같다.

2) 충격시험 (Charpy impact test)

충격시험은 주조한 시편을 이용하여 열처리 후 Fig. 8에서 보는 바와 같이 Charpy충격시험을 위하여 V-notch 시편²¹⁾을 가공하여 20℃의 상온에서 충격 시험을 각각의 조건에 대하여 6회 실시하여 나온 결과치의 평균치를 정리하였 다. 또한 Charpy 충격시험²²⁾의 장면은 Fig. 9에서 보는 바와 같으며 본 시험 에서는 에너지 흡수율을 계기판을 읽고 계산하여 그 값을 표시하였다.



Fig. 6 Tensile test specimen



Fig. 7 Tensile test at room temperature



Fig. 8 Charpy impact test specimen



Fig. 9 Charpy impact test

3) 고온 인장시험(High-temperature tensile test)

고온인장 시험은 주조한 시편을 이용하여 열처리한 후 Fig. 10에서 보는 바 와 같이 고온 인장시험에 용이한 형태로 가공²³⁾하여 850℃에서 인장시험을 행 하였으며 각각에 시편에 대하여 3회 실시하여 이들 측정값의 평균치를 정리하 였다. 또한 고온인장 시험의 장면은 Fig. 11에서 보는 바와 같다.





- 17 -

제 4 장 결과 및 고찰

4.1 기계적 특성

4.1.1 상온특성

상온에서 실시한 인장시험 및 충격시험에 대한 결과치를 정리하면 아래의 Table 3 과 같이 요약할 수 있다.

상기의 상온 인장시험에서 보는 바와 같이 Ni-base super-alloy는 일반적인 사용조건이 고온인 관계로 상온에서의 인장시험은 본 재료가 갖는 특성을 발 휘하는 열처리 온도구간인 1,180℃의 온도구간에 대해서만 시험을 실시하였다. 반면에 고온에서의 인장시험에 대하여는 뒤에서 보는 바와 같이 각각의 조건 에 대하여 시험을 실시하였다.

상온 인장시험에 대한 결과 그래프는 Fig. 12~Fig. 14에 나타난 바와 같다.

or u

Specimen No.	Heat-treat	Ţ	영균 물성	평균충격		
	temperature	T.S (N/mm²)	Y.S (N/mm²)	E(%)	J	비고
#1	$1050^{\circ}C \times 1$	n	n	n	n	
	$1180^{\circ} C \times 1$	565.2	316.9	27.7	43.1	
	$1250^{\circ} \text{C} \times 1$	n	n	n	n	
	$1050^{\circ}C \times 1$	n	n	n	n	
#2	$1180^{\circ} C \times 1$	533.0	346.6	26.5	25.5	
	$1250^{\circ} C \times 1$	n	n	n	n	
#3	$1050^{\circ}C \times 1$	n	TIO	An	n	
	$1180^{\circ}C \times 1$	557.2	380.0	13.7	20.9	
	$1250^{\circ} C \times 1$	n	n	n	n	3

Table 3 Tensile test results at room temp.

A W Z

CH OT IN



Fig. 12 Tensile test result #1



Fig. 13 Tensile test result #2



Fig. 14 Tensile test result #3

상기의 시험결과를 보면 #2는 #1에 비하여 1.7%Cr, 0.6%Mo 성분이 많이 함 유되어 있으나 인장강도, 항복강도, 연신율 등에는 큰 변화가 없으나 충격치는 급격히 떨어진다(약 40.8%). 반면에 #3은 #1에 비하여 0.9%Cr, 0.9%Mo 성분 이 많이 함유되어 있으나 TS, YS의 변화는 미미하나 연신율(50%), 충격치 (51.5%) 등은 50% 이상 감소하는 것으로 나타난다. 이는 Austenite기지에서 주조 및 열처리 과정에서 형성된 금속탄화물의 설명으로 이해해야할 것으로 보이며 Fig. 15에 나타내었다.

각각의 시편에 대한 현미경 조직사진과 대조하여 설명하면 궁극적으로 #3의 경우가 전체적으로 탄화물이 가장 많이 존재한다는 것을 알 수 있다. 탄화물 의 종류로는 WC 탄화물, Cr₂₃C₆ 탄화물, Mo₆C 탄화물 등이 존재하고 이중에 서 물성치의 영향에 크게 미치는 원소는 Cr 보다는 Mo이 더 강한 것 같다.



4.1.2 고온특성

1차적으로 고온특성 시험을 위한 시편의 열처리는 Fig. 5 (c)와 같은 싸이클 로 열처리를 실시하였다. 고온특성 시험은 각각의 시편에 대하여 750℃, 80 0℃, 850℃로 구분하여 실시하였으며 이는 합금의 성분과 온도에 따른 기계적 특성치의 변화관계를 알기 위함이다.

고온시험의 결과는 아래의 Fig. 15에 나타난 바와 같다.



(a) High-temperature tensile test of #1



(c) High-temperature tensile test of #3



- 25 -

상기의 시험결과를 정리하여 Table 4에 나타내었다.

시험결과의 내용을 인장시험 온도에 따른 시편별 인장강도, 항복강도, 연신 율, 단면수축률 등을 Fig. 16에 나타내었다.

Specimen	test	Σ	평균 물성	단면수축율	u) –			
No.	temperature	T.S (N/mm²)	Y.S (N/mm²)	E(%)	(%)	미고		
	750℃	288.2	189.3	13.9	16.8			
#1	800℃	317.6	172.2	36.2	34.1			
	850℃	264.2	174.8	35.6	41.0			
#2	750℃	402.4	232./8	32.2	46.1			
	800℃	321.5	182.2	66.9	65.5			
	850℃	295.7	195	76.3	70.9			
	750℃	357.1	225.1	38.8	45.7			
#3	800℃	321.3	207.1	48.8	54.6			
	850℃	308.3	204.7	33.4	43.5			
(시편의 열처리는 1,180℃×1h → Water cooling)								

Table 4 Tensile test results at high-temp.



(b) Variation of yield strength.



(d) Variation of reduction area.

Fig. 16 Variation of mechanical propertis on high temp.

이와 같은 고온 인장시험에서 알 수 있는 내용을 정리하여 보면 다음과 같다.

1) 고온 인장시험에서의 인장강도 및 항복강도 변화

- a) 750℃의 저온에서의 인장강도 및 항복강도는 #2의 시편에서 가장 높게
 나타난다. 반면에 온도가 증가함에 따라서 급격한 감소가 일어남을 알
 수 있다.
- b) #3 시편의 경우 온도가 증가함에 따라서 인장강도 및 항복강도의 감소가 다른 시편에 비하여 상당히 적게 감소함을 알 수 있다. 이는 앞에서 언 급한 바와같이 Mo의 적당량 첨가로 인한 탄화물의 증가가 다른 성분에 의한 것보다 많이 작용한 것으로 여겨지며 이결과 인장강도 및 항복강도 의 감소가 적게 일어나는 것으로 해석할 수 있을 것이다. 이는 고온인장 시험편의 현미경 조직사진에서도 확인할 수 있으며 Fig. 17에 나타내었 다.

2) 고온 인장시험에서의 연신율 및 단면수축율 변화

이 실험에서 연신율과 단면수축율은 비례관계가 성립한다는 것을 잘 알 수 가 있다. 그러나 여기서 특이할만한 하나의 현상을 알 수가 있는 데 그것은 #3의 시편에 대하여만 유독 온도에 따른 연신율과 단면수축율의 비례관계가 성립하지 않는다는 것이다.

일반적인 현상은 온도가 상승하면 연신율과 단면수축율이 상승을 하게 되는 데 #3의 경우는 일정한 온도까지는 상승을 하며 그이상이 되었을 경우는 반 대로 감소하는 것을 알 수가 있다.

4.2 조직

4.2.1 상온조직

각각의 시편에 대하여 1,180℃에서 열처리 실시한 후 상온조직을 관찰하면 다음 Fig. 17과 같다.

앞의 현미경 조직사진에서 보는 바와 같이 #3의 시편이 대체적으로 인장강 도, 항복강도가 온도상승에 따라 하락률이 낮고 반면에 연신율, 단면수축율 등 에서는 오히려 감소한다는 것을 알 수 있다. 이는 #3의 경우가 다른 시편에 비하여 오스테나이트 기지 내에서 훨씬 많은 금속탄화물로 인하여 전위 (Dislocation)의 이동이 시험온도가 증가하여도 쉽게 이동할 수 없음을 추측할 수 있으며 이는 인장시험 후 보다 더 고배율의 조직사진을 통하여 확인할 수 있을 것으로 판단된다. 이에 대하여는 향후에 좀 더 깊은 연구가 필요하다고 생각한다.

아울러 기지 및 입계에 존재하는 탄화물의 형태와 양을 보다 더 정확히 알 수 있도록 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단되며 실제로 고온 인장시험 한 이후의 파단면 및 내부조직을 좀 더 정확히 관찰함으로서 이들 재료의 강화 메카니즘의 해석에 많은 도움이 될 것으로 사료된다.

CH OT W



(b) #1 Specimen , x400



(d) #2 Specimen, x400



(f) #3 Specimen, x400

Fig. 17 Micro-structure of each specimen.

제 5 장 결 론

Ni-16%Cr-17%Mo-4%W 초합금의 열처리 싸이클에 따른 고온 기계적 특 성에 관한 연구를 위하여 각 시편에 대하여 1,050℃, 1,180℃, 1,250℃ 등의 온 도 구간에서 1시간 유지 후 급냉(Water quenching) 처리를 하고 난 이후 상 온인장시험 및 750℃, 800℃, 850℃로 온도변화를 줄 경우 기계적 성질의 변 화와 조직과의 관계를 연구한 결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 동일한 열처리 온도에서의 상온 인장시험에서는 Cr의 인자보다는 Mo성분 이 물성치에 크게 관여한다고 예측된다. 이는 Cr 탄화물 Cr₂₃C₆ 보다는 Mo 탄화물인 Mo₂₃C₆, Mo₆C 등이 훨씬 강하게 오스테나이트 기지에서 전위의 이동을 방해한다고 보인다. 이는 상온인장 시험후의 조직사진에서도 탄화물 의 양이 훨씬 많이 생성되어 있다는 것을 볼 수 있다.
- 온도의 변화에 따른 고온 인장시험의 경우 일반적으로 온도가 상승함에 따 라 인장강도 및 항복강도의 급격한 감소가 이루어지나 Mo을 일정량 이상 첨가함으로써 고온 물성치의 감소율은 크게 줄어드는 것을 알 수 있다.
- 3. 온도변화에 따른 연신율 및 단면 수축율은 일정온도 구간까지는 상승을 하며 그 이상의 고온 구간에서는 다시 일반적인 재료와는 반대로 급격히 감소함을 알 수 있다.
- 4. 800℃ 이상의 고온 구간에서는 #3의 재료는 오히려 연신율이 감소하면서 상당기간 동안 인장 및 항복강도를 유지함을 알 수 있다. 이는 사용온도가 아주 고온일 경우 충분히 선택 가능한 재료가 될 수 있을 것이다.

제 6 장 참고문헌

- 1) Annual book of ASTM standards, 2008, Vol.01.02 A356
- 2) Annual book of ASTM standards, 2008, Vol.01.02 A351 Annual book of ASTM standards, 2008, Vol.01.02 A494
- 3) ASTM Handbook Vol.9 p820
- 4) ASTM Handbook Vol.9 p820
- 5) ASTM Handbook Vol.9 pp.820~822
- 6) Annual book of ASTM standards, 2008, Vol.01.02 A297
- 7) ASTM Handbook Vol.9 pp.820~822
- 8) ASTM Handbook Vol.9 p821
- 9) Annual book of ASTM standards, 2008, Vol.01.02 A132 Annual book of ASTM standards, 2008, Vol.01.02 A323
- 10) ASTM Handbook Vol.9 p857
- 11) ASTM Handbook Vol.9 p857
- 12) ASTM Handbook Vol.9 p857
- 13) ASTM Handbook Vol.9 p857
- 14) Metal Handbook 9th.ed. Vol.4
- 15) 금속재료 (한봉희저) pp.464~473
- 16) Annual book of ASTM standards, 2008, Vol.01.02 A751-07a
- 17) Annual book of ASTM standards, 2005, Vol.02.04 B387
- 18) Annual book of ASTM standards, 2005, Vol.02.04 B777
- 19) Annual book of ASTM standards, 2008, Vol.01.02 A494
- 20) JIS철강, 2008, JIS Z 2201

- 21) Annual book of ASTM standards, 2008, Vol.01.02 A370
- 22) Annual book of ASTM standards, 2008, Vol.01.02 A370
- 23) Annual book of ASTM standards, 2008, Vol.01.02 A370



감사의 뜻을 전하며

몸이 불편하시어 수술을 받고 병원에 입원하고 계신 어머니를 생각하면 더 욱 열심히 해야 된다고 느끼며, 항상 자식의 안녕만을 위해주시는 그분에게 더더욱 감사한 마음을 느낀다.

또한 보다 많은 배움의 길로 안내해주신 배차헌 지도교수님께 무엇보다 감 사를 드리며 학기동안 내내 좋은 말씀과 본 논문의 심사를 맞아 주신 정해용 교수님, 몸이 불편하시면서도 지식전달과 논문의 심사를 맞아주신 박화순 교 수님, 항상 하나의 지식이라도 똑바로 알아야 한다면서 항상 열정으로 강의하 신 안용식 교수님, 그리고 생산현장에서의 경험을 중요시하시는 정호신 교수 님께도 감사의 마음을 전합니다.

아울러 생산현장이 항상 바쁜 와중에도 열심히 하라고 격려해주신 김준년 사장님께도 감사의 마음을 전하며, 무엇보다 제가 할 수 있도록 저의 빈 공간 을 항상 채워주신 김정룡 이사님, 변종렬 이사님, 오명한 부장님, 이병주 공장 장님, 김정년 금형실장님, 정세은 대리님, 그리고 모든 심부름을 마다 않고 웃 으면서 하시는 엄성용 기사님, 전수현님, 이경미님께도 감사를 드립니다.

항상 바쁜 와중에서도 수업 및 학사일정에 관련하여 도움을 주신 최진수 조 교님, 김태균 조교님께도 감사의 뜻을 전합니다.

또한 학기동안 함께 배움의 열정을 가지며 서로의 미래를 위하여 격려와 도 움을 주신 김형두 학형, 임동소 학형, 정영식 학형, 김영수 학형, 김길태 학형 님께도 감사의 마음을 전합니다.

아침저녁으로 가족의 건강과 어머님의 건강을 항상 걱정하며 본인의 아픈 몸을 뒤로 한 채 어머님과 두 딸을 위하는 부인께 진정어린 감사를 드리며, 부모의 마음을 거스르지 않고 스스로 자신의 미래를 위하여 노력하는 정은이

- 37 -

에게도 감사의 마음을 전하며 끝으로 막내이면서도 때로는 의젓하고 배려 깊 게 행동하는 재은이에게도 감사의 뜻을 전합니다.

위와 같은 분들의 배려와 격려, 관심을 통하여 오늘이 있다고 생각하며 이 모든 것에 보답하기 위하여 보다 더 국가와 사회를 위하여 열심히 노력할 것 이며 이에 거듭 감사의 뜻을 전합니다.

