

論 文

18 Ni 마르에이징 강의 기계적 성질에 미치는 시효처리의 영향

김 학 모 · 김 인 배 · 박 세 윤
부산대학교 공과대학 금속공학과

Effect of Aging Treatment on the Mechanical Properties of a 18 Ni Maraging Steel

Hak-Mo Kim, In-Bae Kim and Se-Yoon Park

Dept. of Metallurgical Engineering, Pusan National University

ABSTRACT

Effects of aging treatment on the mechanical properties of a 18 Ni maraging steel were investigated by considering the reverted austenite. Specimens were heat treated by austenitizing at 840°C for 1 hr and then aged for various times at 480°C and 520°C.

The main results obtained are as follows :

- 1) The amounts of reverted austenite are increased up to about 4% at 480°C and about 22% at 520°C with 1 to 48 hrs aging time.
- 2) Decreasing tendencies of impact energy and fracture toughness with increasing aging time are diminished after aging for 2 hrs at two aging temperatures of 480°C and 520°C.
- 3) Peak hardness and yield strength are obtained after aging for 4 hrs at 480°C and 2 hrs at 520°C respectively.

From the above results, it was concluded that the optimum aging condition with which showed good strength and toughness combination are given to be 480°C for 4 hrs and 520°C for 2 hrs.

1. 서 론

마르에이징 강은 Fe-Ni 마르텐사이트 기지 내에 석출 경화성 합금원소를 고용하고 있기때문에 시효에 의해서 쉽게 금속간화합물이 석출됨으로서 강화된다.

이 강은 1959년 International Nickel Company에서 20Ni 및 25Ni 강의 개발로 공업화 되었으나 이들 강은 입계에 Ti(C, N)과 Ti₂S 등의 석출로 인한 인성저하 및 응력부식 등의 문제로 난관에 봉착하게 되었다. 그러나 고Ni합금강에서는 Co, Mo 등 합금원소가 인성 증가에 기여할 수 있다는 데¹⁻⁵⁾ 착안하여 Ti, Al함량을 다소

줄이는 대신 Co, Mo를 다량 첨가하고 Ni함량을 18% 수준으로 줄임으로서 문제점을 개선하였으며 그 결과 18Ni-Co-Mo계 마르에이징 강이 상품화 되기에 이르렀다.

18Ni 마르에이징 강은 고강도임에도 불구하고 고인성을 가지며 가공성과 용접성도 좋아 항공기, 로켓트, 우주선의 부품재료 뿐만 아니라 일반 생산기기의 각종 공구 및 다이스용으로 수요가 급격히 신장하게 되었다. 18Ni 마르에이징 강이 우수한 강인성을 가지고 있다는 사실이 밝혀진 이래 이 강에서의 석출현상, 강화기구 및 기계적 성질에 대해서 많은 연구가 수행되었으며⁶⁻¹³⁾

더구나 이 강의 개발은 금속간화합물에 의한 석출강화의 우위성을 인식하는 계기가 되어 마르텐사이트 기지에서의 석출 경화를 대상으로 하여 광범위한 합금에 대해서도 연구가 이루어 졌으며⁶⁻¹³⁾ 보다 높은 강도와 인성을 겸비한 마르에이징 강의 개발에 관심이 집중됨에 따라 강인성에 미치는 인자에 관한 연구가 활발히 수행되었다^{14,15)}.

이와 같은 연구와 관련하여 Florren 등¹⁴⁾은 시효처리에 따라 역변태 오스테나이트가 형성됨으로서 인성을 증가시킨다고 하였으나 이에 관한 계통적인 연구는 아직 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 300 KSI급 18 Ni 마르에이징 강을 시료로 하여 시효에 따른 역변태 오스테나이트의 양을 조사하고 역변태 오스테나이트의 양의 변화를 기본변수로 하여 그에 따른 기계적 성질의 변화를 석출물의 거동과 관련하여 고찰하고자 한다.

2. 실험방법

2.1. 시편제작

본 연구에 사용한 시편은 18 Ni 마르에이징 강으로서 1톤 진공유도용해로 (VIM)에서 용해한 후 다시 ESR 정련과정을 거쳐 재용해 주조함으로써 인성에 해로운 P, S, N 등의 양을 최소화하였으며 Table 1에 그 화학조성을 나타내었다.

주조한 주괴는 70 mm \times 85 mmW \times 1,400 mmL의 각재로 열간단조하였으며 이 각재로부터 각 실험에 사용하는 시편을 제작하여 840 $^{\circ}$ C에서 1시간 용체화 처리한 후 480 $^{\circ}$ C와 520 $^{\circ}$ C에서 각각 1, 2, 4, 12, 48시간 시효처리하였다. 인장시험, 충격시험, 파괴인성시험(K_{IC})용 시편은 각재의 횡방향으로 채취하였고 조직 및 경도시험용 시편은 충격시편을 이용하였다.

2.2. 역변태 오스테나이트 양의 측정

역변태 오스테나이트의 측정은 X-Ray Diffractometer (Shimadzu사, Model: XD-3 A)를 이용하여 각 시효온도 및 시간에 따른 오스테나이트 양을 α' γ 의 적분

Intensity 비로써 측정하였으며 측정조건은 다음과 같다.

Target	: MoK α 1
Volt-Amp	: 40 KV-20 mA
Filter	: Zr
Receiving Slit	: 0.30 mm
Divergence Slit	: 0.60 mm
Scan Speed	: 2 $^{\circ}$ /min
Chart Speed	: 20 mm/min
Full Scale	: 5 KCPS

Fig.1은 520 $^{\circ}$ C에서 12시간 시효하였을 때의 X-Ray diffraction pattern을 나타낸 것으로서 (200) α' , (211) α' 는 마르텐사이트 피크를 나타내며 (220) γ , (311) γ 는 오스테나이트 피크를 나타낸다.

이때 오스테나이트 volume fraction은 다음 식에 의하여 계산하였다¹⁶⁾.

$$V\gamma = \frac{100}{1 + 1.193 I\alpha'/I\gamma}$$

I γ : (220) γ , (311) γ 의 적분 Intensity

I α' : (200) α' , (211) α' 의 적분 Intensity

2.3. 인장시험

시편은 Fig.2(a)와 같이 ASTM E8 subsize 시편이며 사용한 인장시험기는 Amsler Universal Testing Machine(Germany, Cap. 30 Ton)으로서, 10톤 load

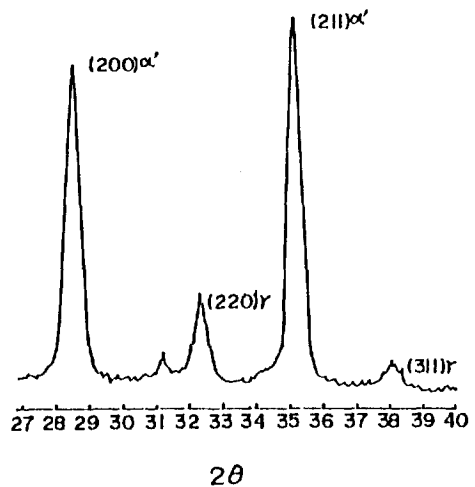


Fig.1. X-Ray diffraction pattern(diffractometer trace after for 12 hours at 520 $^{\circ}$ C).

Table 1. Chemical Composition of Samples.

Chemical Composition (wt %)									
C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Co	Al	Ti
0.0040	0.0170	0.0460	0.0120	0.0030	18.84	4.97	7.92	0.56	0.95

cell을 사용하여 2 mm/min으로 인장하였으며, 각 시효 온도 및 시간에 대해 항복강도는 0.2% offset법으로 구했다.

2.4. 충격시험

시편은 Fig.2(b)와 같이 ASTM 23-72에 의한 Charpy V-Notch 표준시편이며 사용한 충격시험기는 Amsler Impact Tester(Germany, Cap. 500 J)로서 시효 온도 및 가열시간에 대해 -40°C에서 충격시험을 실시하였다.

2.5. 경도시험

시편은 충격시편을 이용하였고 Micro Vickers Hardness Tester(시험하중 : 0.3 kg)로서 각 시효 온도 및 시간에 따른 경도변화를 측정하였다.

2.6. 파괴인성시험

ASTM E-399의 compact 시험편을 사용하였으며 Fig.2(c)와 같이 두께 B=25 mm, 길이 W=50 mm인 시험편에 wire cutting기에서 노치 길이를 22.5 mm로 하고 피로시험기에서 균열길이를 노치 끝부분으로부터

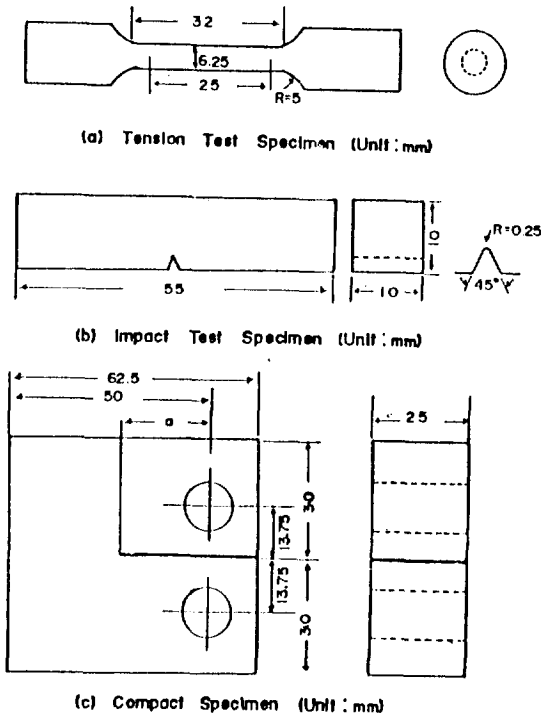


Fig.2. Standard specimen geometry.

2 mm($0.45 W < a < 0.55 W$) 정도로 양편에 균일하게 성장시켰다.

피로시험기는 Shimadzu Electro-Hydraulic Servo-Pulsor (EHF-E 20)를 이용하였고 시험조건으로는 파형은 sine wave이며 frequency는 3~4 Hz, 최대피로하중은 1,500 kg이며 최소는 110 kg이고 피로균열길이 측정장비는 100 배의 digital travelling microscope를 사용하였다. 파괴인성시험은 15 톤 dynamic 만능시험기에서 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 시효에 따른 역변태 오스테나이트 양의 변화

Fig.3은 840°C에서 용체화 처리한 시편을 480°C, 520°C에서 시효하였을 때 시효시간에 따른 역변태 오스테나이트 양의 변화를 나타낸 것으로서 480°C에서 4 시간 동안 시효시에는 약 2%이고 48 시간 시효시에는 약 4% 정도로서 큰 변화를 보이지 않았으나 520°C에서는 1 시간 시효할 경우 약 2%이나 그 이후 부터는 급속히 증가하여 12 시간 시효시에는 16%, 48 시간 시효시에는 22%까지 증가하였다.

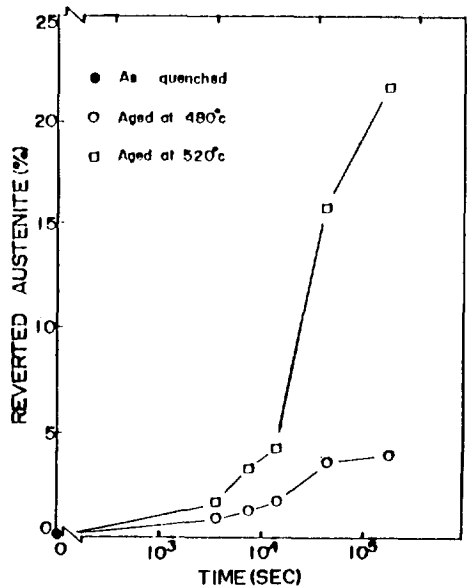


Fig.3. Volume fraction of reverted austenite as a function of aging time.

이와같이 오스테나이트 역변태는 마르텐사이트 기지의 과시효가 일어나는 시효조건에서 급격히 일어난다.

3.2. 기계적 성질에 미치는 시효의 영향

3.2.1. 경도에 미치는 영향

Fig.4는 840°C에서 용체화 처리한 시편을 480°C 및 520°C에서 시효하였을 때 시효시간에 따른 경도 변화를 나타낸 것으로서 480°C 시효의 경우 4시간 시효시 최대 경도값을 보이고 이후 서서히 감소하였으며, 520°C 시효의 경우 2시간 시효시 최대 경도값을 나타낸 후 급격히 감소하였음을 알 수 있다.

480°C에서의 피크 경도값은 Hv 631, 520°C에서의 피크 경도값은 Hv 611로서 두 경우 모두 역변태 오스테나이트 양이 적은 시효조건에서 최대 경도를 나타내었으며, 역변태 오스테나이트 양의 증가 정도에 따라 경도값의 변화 정도가 달라졌음을 알 수 있다. 즉, 480°C 시효의 경우 역변태 오스테나이트 양의 증가가 적은 반면에 520°C 시효의 경우에는 그 증가가 컸으며 경도값의 변화 정도도 480°C의 경우는 적은 반면에 520°C의 경우는 상당히 컸다.

이러한 결과는 18Ni 마르에이징 강의 경도값 변화는 주석출상인 orthorhombic Ni₃Mo는 물론 Ni₃Ti 등의 정합 석출물의 미세 분산 석출 및 과시효에 의한 이들

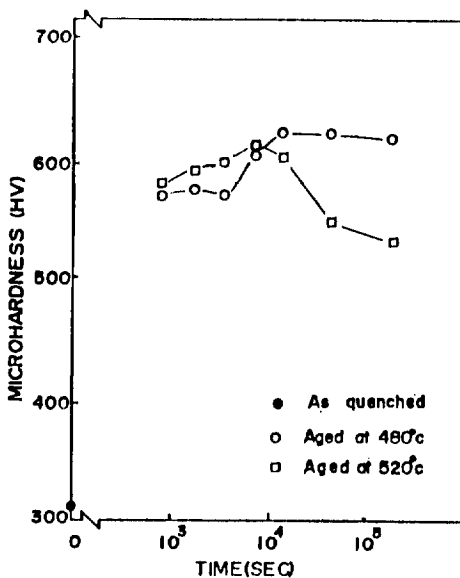


Fig.4. Microhardness of 18Ni maraging steel as a function of aging time.

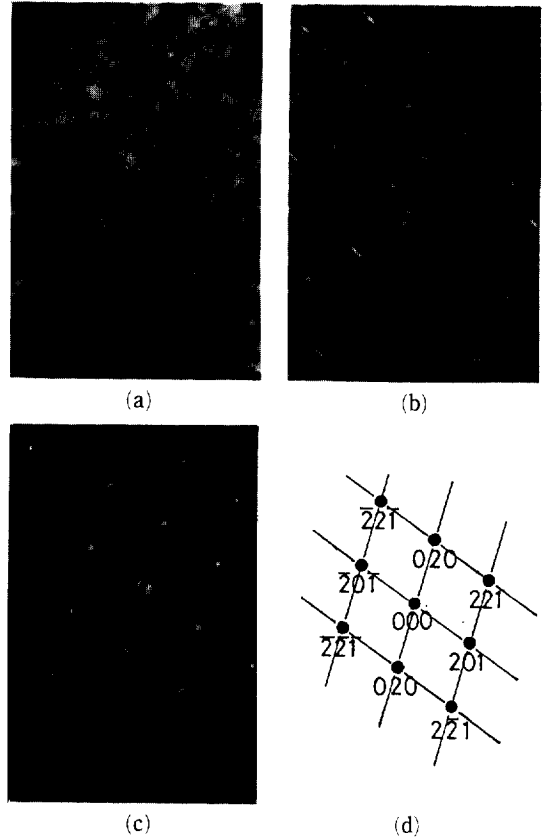


Photo.1. Transmission electron micrograph aged at 520°C for 2 hrs.

(a) Bright field image of Ni₃Mo precipitate, (b) Dark field image of Ni₃Mo precipitate, (c) SADP of precipitate, (d) index of SADP (c).

석출물의 성장 거동에 따라 달라지지만 여기에 역변태 오스테나이트의 영향이 복합 작용된 결과라고 생각되며 Photo.1은 Ni₃Mo 석출물을 나타낸 TEM 사진이다.

Fig.5는 Fig.4의 결과를 역변태 오스테나이트의 양에 따라 나타낸 것으로서 480°C 피크 경도치에서의 역변태 오스테나이트의 양은 약 2%이었으며, 520°C의 경우는 약 3%임을 알 수 있으며 역변태 오스테나이트의 양이 적은 피크 경도까지의 경도는 주로 석출물의 석출에 의한 것으로 생각되며 피크 경도 이후의 경도값의 감소는 석출물의 조대화 효과에 마르텐사이트 기지의 오스테나이트 역변태의 영향이 추가된 결과로 생각된다. Photo.2는 조대화된 Ni₃Mo 석출물의 TEM 사진

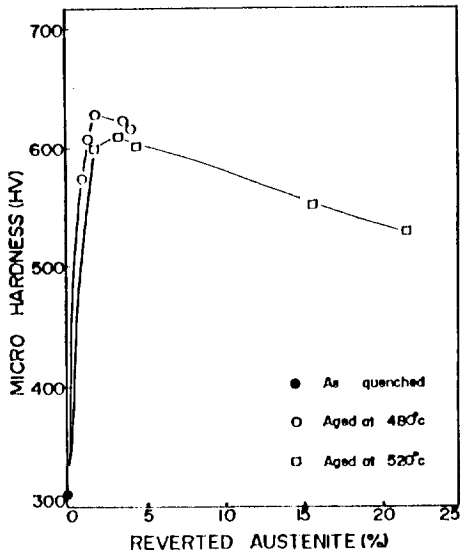


Fig. 5. Influence of amount of reverted austenite on microhardness after aging for different times.

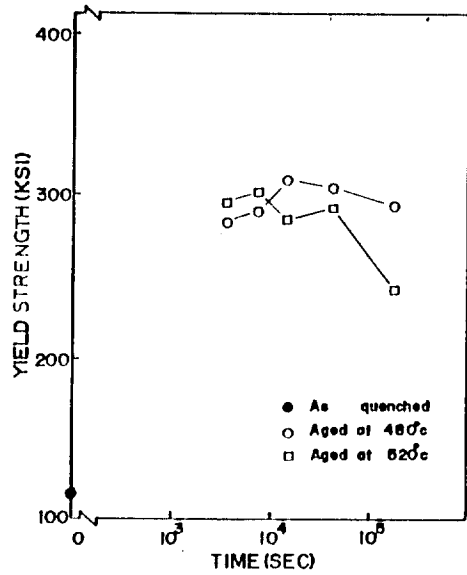


Fig. 6. Yield strength of 18Ni maring steel as a function of aging time.

을 나타낸 것이다.

3.2.2. 항복강도에 미치는 영향

Fig. 6은 840°C에서 용체화 처리한 시편을 480°C, 520°C에서 시효하였을 때 시효시간에 따른 항복강도의 변화를 나타내고 있다. 480°C에 4시간 동안 시효하였을

때 최대값인 309.9 KSI에 도달되고 520°C에서는 2시간 동안 시효하였을 때 최대값인 302.9 KSI에 도달한 후 점차 시효시간이 길어짐에 따라 항복강도는 감소하게 된다. 이러한 항복강도 변화추이는 3.2.1에서의 경도의 변화추이와 같은 경향을 보인다.

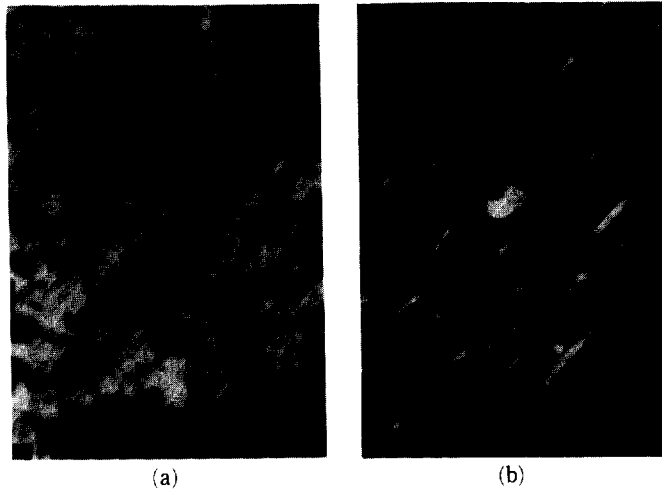


Photo. 2. Transmission electron micrograph aged at 520°C for 48 hrs.

(a) Bright field image of Ni₃Mo precipitate, (b) Dark field image of Ni₃Mo precipitate.

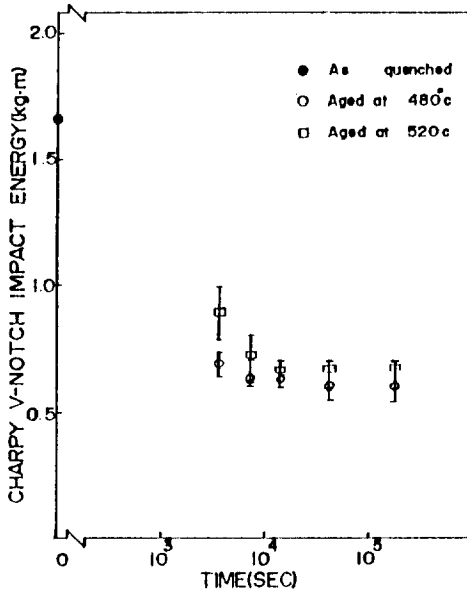


Fig. 7. Impact energy of 18Ni maraging steel as a function of aging time.

즉, 역변태 오스테나이트의 양이 아주 적은 시효의 초기 단계에서는 석출물의 석출에 의하여 강도가 증가하다가 피크 강도값에 이르고 피크 강도값 부근에서도 역변태 오스테나이트 양은 3%미만으로 적기 때문에 강도값은 석출물의 석출에 의한 영향으로 생각되나 피크 강도 이후의 강도값 하락은 석출물의 조대화 효과에 역변태 오스테나이트의 영향이 복합 작용된 결과라고 생각되며 520°C 시효의 경우가 강도값의 감소가 더 컸다.

3.2.3. 충격치에 미치는 영향

Fig. 7은 -40°C에서 충격시험하여 C.V.N 충격흡수 에너지의 시효시간에 따른 변화를 나타낸 것으로서 480°C 및 520°C 모두 약 2시간 시효시까지의 급격히 감소하다가 그 이후는 큰 변화가 없었다. 이와 같은 결과는 석출물의 조대화에 의한 인성 감소에 역변태 오스테나이트가 보완함으로써 충격흡수에너지가 시효시간의 증가에도 크게 감소되지 않은 결과를 나타낸 것으로 생각된다. 즉, 과시효 상태에서의 조대 석출물이 공동 형성의 핵으로 작용하여 인성치를 감소시키는 인성저하의 영향에 $\alpha' \rightarrow \gamma$ 역변태에 따른 인성개선의 효과가 복합된 결과라고 생각된다.

3.2.4. 파괴 인성치에 미치는 영향

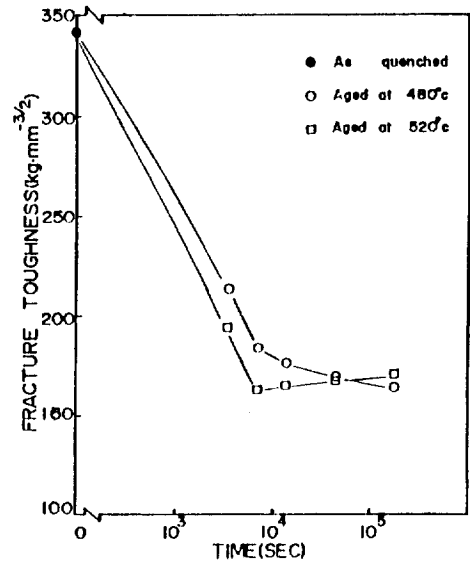


Fig. 8. Fracture toughness of 18Ni maraging steel as a function of aging time.

Fig. 8은 시효시간에 따른 K_{IC}의 변화를 나타낸 것으로서 480°C 시효의 경우 2시간 시효할 때까지 파괴인성치는 급격히 감소하다가 그 이후의 시효에서는 서서히 감소하는 경향을 나타내었으며 520°C 시효의 경우에는 2시간 시효할 때까지 감소하다가 그 이후에는 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 충격치 변화의 결과에서와 같이 장시간 시효의 경우 석출물의 조대화에 의한 인성 감소보다 역변태 오스테나이트에 의한 인성 증가 효과가 컸다는 것을 의미하며 이러한 설명은 520°C 장시간 시효의 경우 석출물의 조대화에도 불구하고 역변태 오스테나이트의 양이 많아져 파괴 인성치가 증가되었다는 사실이 잘 뒷받침해 주고 있다.

4. 결 론

300 KSI급 18Ni 마르에이징 강을 시료로 하여 840°C에서 용체화 처리 시킨 후 시효에 따른 기계적 성질의 변화를 조사한 결과 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 시효에 따른 역변태 오스테나이트의 양은 480°C 시효의 경우 약 2~4%로서 시효시간에 따른 큰 변화를 보이지 않았으나 520°C 시효의 경우 1시간 시효에서는

약 2%로 작았으나 48 시간 시효에서는 22%까지 증가하였다.

2) 480°C, 520°C 시효온도 모두 2 시간 시효 이후에는 충격치 및 파괴 인성치의 감소가 둔화되었는데 이것은 석출물의 조대화에 의한 인성 감소보다 역변태 오스테나이트에 의한 증가 영향이 컸기 때문이라고 생각된다.

3) 480°C에서는 4 시간 시효시 최대 경도 및 항복강도를 나타내었으며 520°C에서는 2 시간 시효시 최대 경도 및 항복강도를 나타내었다. 따라서 인성을 크게 떨어뜨리지 않고 최대 강도를 얻을 수 있는 시효 조건은 역변태 오스테나이트의 양이 약 2~3%인 480°C 4 시간 혹은 520°C 2 시간 시효조건이었다.

5. 참고문헌

1. S. Florren and R.F. Decker : Trans. ASM ; 1962, Vol.55, p518 and 1069.
2. S. Florren : Trans. ASM ; 1964, Vol.57, No.1, p38.
3. G.P. Miller and W.I Mitchell : J. Iron and Steel Inst. ; 1965, Vol.203, No.9, p899.
4. A.J. Baker and P.R. Swann : Trans. ASM ; 1964, Vol.57, No.4, p1008.
5. D.T. Peters and C.R. Cupp : Trans. AIME ; 1965, Vol.236, p1420.
6. S. Florren : Metallurgical Reviews ; 1968, Vol.55, p106.
7. 河部義邦, 宗木政一, 高橋順次 : 鐵と鋼 ; 1983, Vol.69, p1551.
8. 添野 浩, 土屋正利, 田口和夫, 黒田哲郎 : 鐵と鋼 ; 1983, Vol.69, No.7, p815.
9. S. Jin, D. Huang, J.W. Morris : Met. Trans ; 1976, Vol.7A, May, p637.
10. L.F. Van Swam, R.M. Pelloux, N.J. Grant : Met. Trans ; 1975, Vol.6A, January, p45.
11. 岡田康孝 : 鐵と鋼 ; 1986, Vol.72, No.7, p839.
12. 岡田康孝, 遠藤丈, 仲山剛 : 鐵と鋼 ; 1983, Vol.69, No.6, p703.
13. A. Wirth, J. Bickerstaffe : Met. Trans ; 1974, Vol.5, April, p799.
14. S. Florren : Met. Rev ; 1968, Vol.13, p115.
15. C.A. Pampillo and H.W. Paxton : Met. Trans ; 1973, Vol.3, p2895.
16. B.D. Cullity : Elements of X-ray Diffraction ; Addison-Wesley Co., 1956, p391.