

200 Grade 마르에이징강의 기계적성질 향상을 위한 연구

장경천*, 국중민⁺, 이동길⁺⁺, 최병기⁺⁺⁺

A Study on the Promotion of Mechanical Properties for 200 Grade Maraging Steel

K.C. Jang*, J.M. Kuk⁺, D.G. Lee⁺⁺, B.K. Choi⁺⁺⁺

Abstract

Hardness value decreased about 3% for annealed specimens and increased about 60% for one hour aged specimens. But the values of the other specimens aged two hours or more showed almost the same. The yield strength was the highest about 1,800MPa in 0.06%Nb specimen having twice as much as the base metal specimen. Also, the elongation was the highest in 0.03%Nb specimen showing the same as base metal specimen. The higher aging temperature and the longer aging time, the higher fatigue life. On the other hand, the 0.03%Nb specimen showed the highest fatigue life which increased about 12% more than base metal specimen. 0.06% Nb specimen aged at 482°C for 8 hours simultaneously satisfied the 250 grade strength and 200 grade elongation having the most superior mechanical properties.

Key Words : Nb content, Solution annealing, Aging time, Aging temperature, Yield strength, Elongation, Fatigue life

1. 서론

마르에이징강이란 명칭은 마르텐사이트를 시효하여 고강도가 얻어진다는 의미에서 붙여진 이름으로서 이 강도의 특징은 고강도임에도 불구하고 고인성을 갖는 회백색 금속으로서 성형성, 가공성, 내식성, 고온강도 및 용접성 등이 우수

하며, 열처리가 간편하고 열처리 후 치수변화가 거의 없는 등의 장점이 있다¹⁾.

이 강은 미국이 로켓의 모터 케이스에 최초로 적용한 이래 항공·우주, 자동차해양, 원자력 분야 및 산업기계의 특수 부품 등 그 용도가 급격히 신장하고 있다²⁾.

* 장경천, 한국생산기술연구원 (kcjang@kitech.re.kr)

주소: 광주광역시 광산구 첨단동 우체국 사서함 1호

+ 한국생산기술연구원

++ 한국생산기술연구원

+++ 조선대학교 공과대학 기계공학과

마르에이징강은 0.03% 이하 저탄소 Fe-Ni 마르텐사이트 기지에 석출경화성 합금원소인 Co, Mo, Ti 등을 고용하고 있기 때문에 시효에 의하여 쉽게 금속간화합물이 석출됨으로서 강화된다³⁾. 이 강은 1958년경 미국의 INCO社에서 초기에는 20%Ni, 25%Ni 강이라 불리는 두 강종에 대하여 개발되었으나, 취성문제 해결을 위해 통상적인 표준 열처리 외에 심냉처리나 중간소둔처리 등의 후속 열처리가 필요하였다. 그 후 석출경화를 이용하여 Ti 및 Al 함량을 줄이는 대신에 Co와 Mo를 다량 첨가하고 Ni 함량을 18% 수준으로 낮춤으로서 인성저하 및 응력부식 등의 문제를 개선하였다. 그 결과 1960년대 초에 18%Ni-Co-Mo-Ti계 마르에이징강이 상품화되기에 이르렀다.

마르에이징강은 화학성분에 따라 코발트에 의해 강화된 C-type과 타이타늄에 의해 강화된 T-type이 있으며, 1980년대 초에는 Co를 함유하지 않은 Co-free 마르에이징강도 상품화 되었다. 그리고 각 화학성분에 따른 타입에서 강도 수준에 따라 각각 200, 250, 300 및 350 grade로 다시 분류되어 C-200 또는 T-200과 같이 명명되고 있다.

이 강에 대한 국내·외 연구동향을 살펴보면, 18%Ni이 함유된 마르에이징강의 용접 및 시효처리에 대한 연구⁴⁾, Mo 및 Co 등의 원소를 첨가하여 제조한 마르에이징강의 연구^{5, 6)}, 마르에이징강의 기계적성질에 관한 연구^{7, 8)} 등이 있다. 또한 Co를 저렴한 합금원소로 대체하면서 기존의 Co 함유 마르에이징강과 동등한 기계적 특성을 유지하는 합금 개발 연구 등이 이루어져 Ti이 다량 함유된 T300강 등에 대한 연구 등⁹⁾이 수행되었다.

그러나 국내에서 마르에이징강에 대한 연구를 비롯하여 제조 및 적용분야는 대단히 부족하다고 할 수 있다. 이 강의 제조는 200 grade C-type 한 종류만 생산되고 있으며, 그 외의 grade 및 타입은 전량 수입에 의존하여 기계가공만을 통한 부품이나 구조물을 제작하거나 일부는 연구용으로 사용되고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 18%Ni 마르에이징강을 대상으로 지금까지 일반적으로 사용하고 있는 용체화처리 및 시효처리조건을 그대로 적용하여 200 grade 조성에 가깝지만 250 grade 이상의 강도 및 인율 등의 기계적 성질을 얻을 수 있는 방법에 대하여 고찰하고자 한다. 또한 Nb의 첨가량 및 시효조건에 따른 강도평가 등을 수행하여 최적의 시효처리 온도 및 시간을 고찰하여 특별한 설비투자나 공정변화 등이 필요 없는 기존의 제조방식에 적용 가능한 실질적인 연구를 수행하고자 한다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편

본 연구에 사용한 시험재료는 18%Ni 마르에이징강으로서 Nb 첨가 및 시효처리 조건이 강도에 미치는 영향 등을 분석하고자 표준 화학적성분에 Nb를 전혀 함유하지 않은 강 및 Nb를 각각 0.03% 및 0.06% 첨가시켜 진공유도용해로(VIM)에서 잉곳을 제조하였다. 사용된 진공유도용해로는 30kg의 용량에 최고 가열온도는 1650℃이며, 진공도는 10⁻³Torr, 용해시간은 45 min/charge이었다. 제조된 3가지의 잉곳을 모두 동일하게 7단 자동 열간압연을 실시하여 최종 두께 12mm를 얻었다.

Table 1은 습식분석장치를 이용하여 제조된 잉곳의 화학적 성분분석 결과를 나타내고 있으며, 얻고자 한 합금성분과 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한 C/S동시분석기(Maker : LECO)를 이용하여 탄소 및 황을 분석한 결과 C는 0.0022wt%, S는 0.0007wt%로 분석되었는데 극소량이므로 탄소가 강도 등에 미치는 영향은 없었다고 판단된다.

Table 1 Chemical compositions of manufactured steels

| Materials | Ni | Co | Mo | Al | Ti | Nb |
|-----------|-------|------|------|------|------|-------|
| 0.00%Nb | 18.03 | 8.42 | 4.99 | 0.10 | 0.41 | 0 |
| 0.03%Nb | 17.96 | 8.39 | 4.94 | 0.09 | 0.39 | 0.033 |
| 0.06%Nb | 17.98 | 8.43 | 4.96 | 0.10 | 0.40 | 0.068 |

일반적으로 마르에이징강의 마르텐사이트 기지는 용체화처리 후에 시효경화 시킨다. 200 grade 18%Ni 마르에이징강의 적절한 시효처리의 온도 및 시간을 찾기 위하여 우선 보편적인 815℃에서 1시간 용체화 처리를 먼저 실시하였다. 이 때 사용된 진공로의 진공도는 질소를 이용하여 10⁻³Torr로 유지되었으며, 온도편차는 ±1.6℃ 이내로 유지되었으며, 열처리 후 시료를 공냉으로 실온까지 냉각시켰다. 용체화처리 후의 전형적인 시효경화 처리는 통상 60%KNO₃와 40%NaNO₃ 또는 48%KNO₃와 52%NaNO₃ 염욕을 사용하여 455℃ ~ 510℃의 온도범위에서 3~12시간 유지하고 실온에 공냉시키거나 grade에 따라서 시간과 온도는 달라지는데 18%Ni 마르에이징강의 200, 250 및 300 grade의 표준 시효처리는 480℃에서 3~8시간 유지 후 공냉시키는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 Nb함량에 따른 시효온도 및 유지시간에 대한 영향을 고찰하고자 시효온도 설정은 가장 일반적인 온도인 482℃를 기준으로 약 ±30℃씩 하여 455℃, 482℃ 및 510℃ 3가지로 하였으며, 각 온도에서 유지시간은 1시간, 2시간, 4시간 및 8시간으로 늘려가며 4가지로 변화시켜

시효처리 시간이 마르에이징강의 강도 등에 미치는 영향을 고찰하고자 하였다.

Fig. 1은 ASTM E-8¹⁰⁾의 subsize로 제작한 인장시험편의 형상 및 치수를 나타내고 있다. 피로시험편 가공을 위한 시료 채취 역시 가공여유를 충분히 두고 입체가 피로균열 전파를 저지시키는 역할을 하도록 균열 진행방향이 압연방향과 직각방향이 되도록 채취하였으며, ASTM E647-83¹¹⁾의 규격에 따라 와이어 방전가공기를 사용하여 가공하였다. 예비 노치는 0.15mm 두께의 다이아몬드 휠 커터를 사용하여 3mm 깊이로 해당 위치에 가공하여 완성하였다. Fig. 2는 피로시험을 위한 CT 시험편의 형상 및 치수이다.

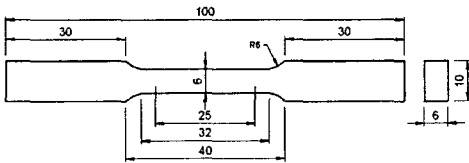


Fig. 1 Rectangular tensile test specimen, sub-size

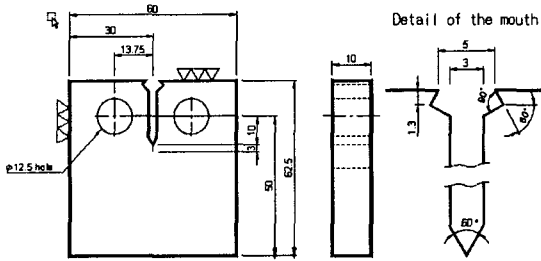


Fig. 2 Standard compact-tension (CT) specimen

3. 결과 및 고찰

3.1 경도에 미치는 영향

Fig. 4는 각 시험편의 시효시간에 따른 로크웰 경도변화를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 18%Ni 마르에이징강의 기본조성에 Nb이 0.03% 첨가된 모재는 약 HR_C29.4의 경도값을 나타냈으며, 0.06% 첨가된 모재는 약 HR_C29.0으로서 Nb첨가에 따른 경도 차이는 크지 않은 것으로 분석되었다. 또한, 815°C에서 1시간 용체화처리를 실시한 시험편의 경도는 모재보다 약 3% 낮은 HR_C25.1~28.8의 경도분포를 보였다. 그러나 시효시간이 증가할수록 경도는 높아지는 경향을 보이며, 시효 1시간의 경우 모재 및 용체화 시험편보다 약 47%, 60% 및 63%의 큰 증가를 나타내었으며 그 순서는 455°C, 482°C 및 510°C 순으로

증가하여 시효온도가 높을수록 경도는 높게 조사되었다. 이러한 경향은 시효시간이 길수록 각 시험편의 경도차이는 감소하여 시효시간 2~4시간에서는 거의 유사한 경도값을 보이다 510°C에서 8시간 시효한 시험편은 동일조건인 다른 시험편들보다 경도가 낮아짐을 알 수 있다. 이러한 원인은 일반적으로 마르에이징강의 열처리에서 시효온도가 높을수록 시효시간은 줄어들며, 너무 높은 온도에서 장시간 시효할 경우 과시효 효과가 나타나 역변태 마르텐사이트 조직이 나타나기 때문으로 분석된다¹²⁾.

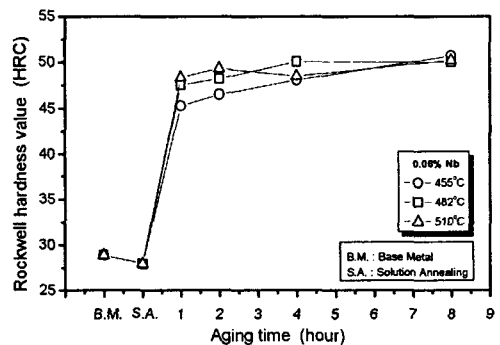
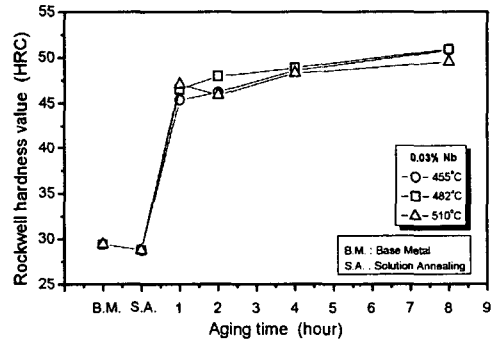
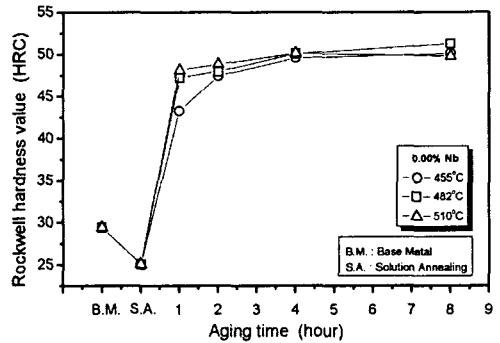


Fig. 4 Rockwell hardness distribution

3.2 항복강도 및 연신율에 미치는 영향

Fig. 5와 6은 Nb 첨가량 별로 분류하여 열처리 온도 및

시간이 강도 및 연신율에 미치는 영향을 나타낸 그림이다.

0.00% 시험편의 인장강도 및 항복강도는 모재보다 용체화처리된 시험편이 다소 낮게 나타났으나 큰 차이는 보이지 않고 있다. 그러나 용체화처리 후 1시간 시효 시 강도는 크게 증가하였으며 시효시간이 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었다. 시효 1시간, 2시간, 4시간까지 강도는 455°C, 482°C, 510°C 순으로 시효온도가 높을수록 강도는 증가하였으나 그 차이는 점차 줄어들어 8시간 시효 시 거의 동일한 강도를 나타내고 있다. 그러나 8시간 시효 시 510°C의 온도에서는 다른 온도보다 강도가 낮게 나타나고 있다. 이러한 원인은 일반적으로 시효온도가 높을수록 시효시간은 줄어들며, 고온에서 장시간 시효 시 오히려 강도는 낮아진다는 결과와 잘 일치하고 있다. 연신율은 용체화처리한 시험편이 모재보다 약 5% 증가 한 후 1시간 시효처리 시 크게 낮아져 4시간 까지는 거의 유사한 연신율을 보이다 8시간 시효하면 다시 낮아지는 경향을 나타내고 있다.

0.03% 및 0.06% Nb를 함유한 시험편의 경우 전체적인 경향은 0.00% Nb와 유사한 모습을 보이고 있으며, 인장강도 및 항복강도는 510°C에서 8시간 시효한 경우 과시효 현상에 의하여 가장 낮은 강도를 보이고 있다. 연신율은 대체적으로 455°C의 경우가 시효 4시간까지는 가장 높게 나타났으나 8시간 시효에서는 510°C에서 가장 높고 482°C에서 가장 낮게 나타났다.

이상의 인장시험 결과를 종합하여 보면 용체화처리는 강도에 큰 영향을 미치지 않았으나 연신율은 약 4~5% 증가하였으며, 시효 1시간에서 강도는 용체화처리 보다 455°C에서는 약 450MPa, 482°C에서는 약 550MPa, 510°C에서는 약 580MPa 정도 증가하여 시효온도가 높을수록 강도는 증가하나 연신율은 낮아지는 경향을 알 수 있었다. 그리고 시효 1시간 이후부터는 강도 및 연신율의 변화가 급격히 둔화되어 시효 4시간과 8시간과의 차이는 거의 없음을 알 수 있었다. 한편 510°C에서 8시간 시효할 경우 동일조건인 다른 시험편들 보다 낮은 강도를 나타냈는데 이러한 원인은 고온에서 장시간 시효 시 과시효 현상에 기인한 것으로 분석된다. 따라서 가장 우수한 항복강도와 연신율을 갖는 시험편을 살펴보면, 가장 높은 항복응력은 0.06%Nb 시험편을 482°C에서 8시간 시효한 경우로서 모재보다 약 2배 이상 증가한 것으로 나타났다. 또한, 모재 및 용체화처리 시험편을 제외한 시험편 중 가장 높은 연신율을 나타낸 것은 0.03%Nb 시험편을 455°C에서 1시간 시효한 경우로서 모재의 약 97%로 나타났다.

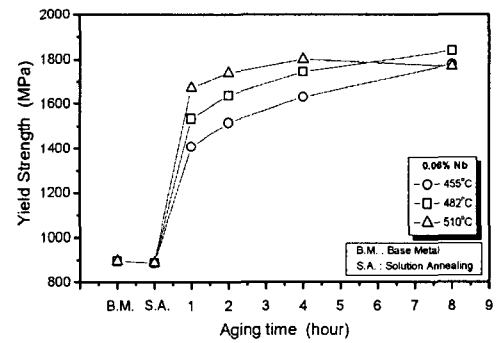
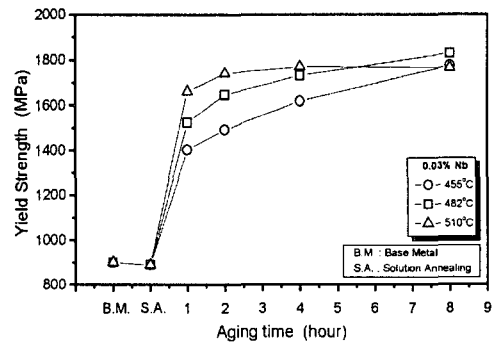
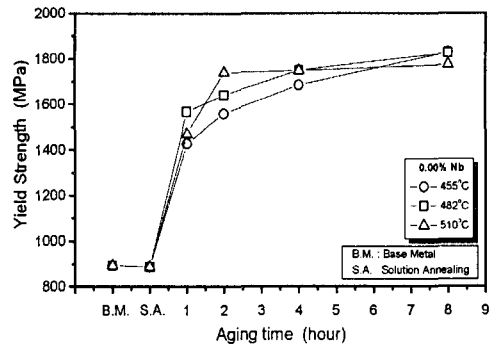
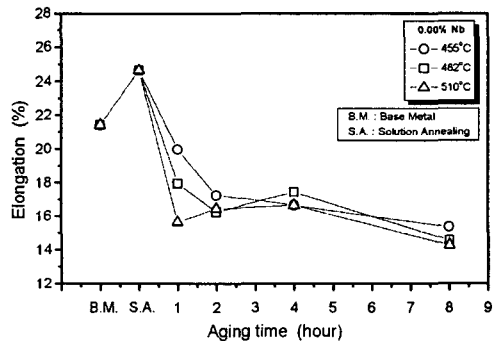


Fig. 5 Yield strength



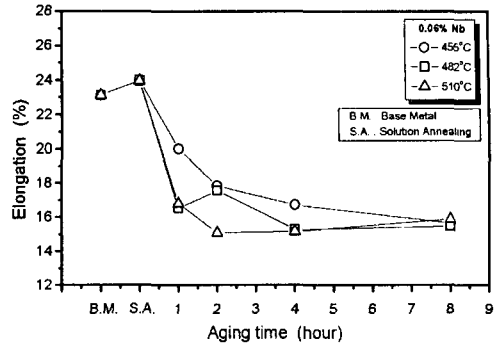
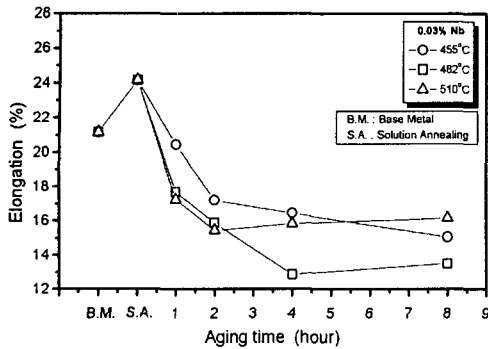
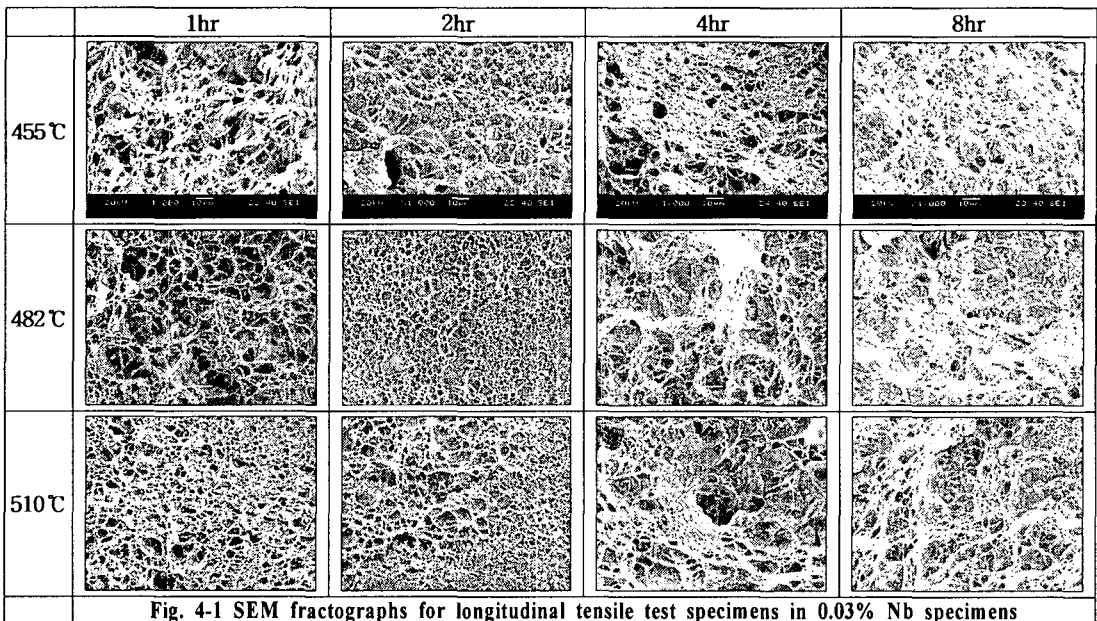


Fig. 6 Elongation



인장 파단면에서 뒹플의 크기는 일반적으로 microvoid의 수와 분포에 의해 지배된다. microvoid는 이상입자, 계재물, 입계, 집적전위 등과 같이 국부적으로 변형된 불연속지역에서 생성되는데, 이러한 microvoid들이 성장하여 합체될 때 파단면을 형성하게 된다¹³⁾. 따라서 강도 및 연신율과 축방향 정하중에 의한 인장시험편의 파단면과의 관계를 고찰하고자 인장시험이 끝난 시험편의 파단면을 SEM을 이용하여 고찰하였으며, Photo. 1은 0.03%의 Nb를 함유한 마르에이징강의 시효온도 및 시효시간에 따른 인장파면을 나타내고 있다. 우선, 특정한 시효온도에서 시효시간이 증가할수록 뒹플의 수는 증가하고 크기는 작아져 연성파면을 보이나 그 이상의 시효시간에서는 뒹플의 수는 감소하고 크기는 커지는 현상을 알 수 있다. 사진에서 음영으로 표시된 부

분을 보면 455°C에서는 약 4시간의 시효시간에서 뒹플의 크기는 최소가 되며 수효는 최대가 뒹플을 알 수 있으며, 482°C에서는 2시간, 그리고 510°C에서는 1시간 시효 시 이러한 현상이 나타남을 알 수 있다. 즉, 시효온도가 높을수록 뒹플의 최대수를 나타내는 시효시간은 단축되었다고 말할 수 있다. 이러한 결과는 시효온도가 높을수록 단시간 내에 시효가 완료되며, 일정 시간 이상 계속적인 시효 시 과시효가 발생하여 다시 입자가 성장한다고 할 수 있다. 따라서 과시효가 된 것으로 판단되는 455°C에서 8시간, 482°C에서 4, 8시간 및 510°C에서 2, 4, 8시간 시효한 파면은 거의 유사하였다.

3.3 피로수명에 미치는 영향

Fig. 7은 Nb의 함량이 피로수명에 미치는 영향을 분석하기 위한 선도로서 시효 처리된 시험편들의 피로수명과 비교를 위하여 Nb는 첨가되어 있으나 열처리를 하지 않은 모재와 시효처리는 하지 않고 용체화처리만 실시한 시험편들의 피로수명을 각 선도들에 모두 나타냈다.

455℃에서 시효처리가 된 시험편들의 피로수명을 전체적으로 보면, Nb의 첨가량이 0.00%에서 0.03%로 함량이 증가하면 1시간 및 4시간의 시효에서는 피로수명이 증가하나 그 밖의 시간에서는 감소하였으며, 특히 8시간의 시효에서 11.8%의 감소율을 보였다. 그러나 Nb의 첨가량이 0.03%에서 0.06%로 함량이 증가한 경우에는 피로수명 감소율은 크게 줄어들어 455℃ 시효의 경우 Nb첨가가 오히려 피로수명 감소의 결과를 나타내고 있다고 할 수 있다.

또한, 동일 함량의 Nb에서 각 수명을 비교하여 보면 Nb가 포함되지 않은 모재 보다 용체화처리된 시험편의 피로수명은 낮게 나타났으며 시효처리 된 시험편의 피로수명은 모재 및 용체화처리된 시험편보다 크게 감소하였다. 그러나 시효처리 된 시험편끼리만 비교하면 시효시간이 증가할수록 피로수명은 증가하였다.

455℃에서 시효처리 된 경우 Nb의 첨가량이 피로수명의 감소를 보였으며, 모재 및 용체화처리된 시험편의 피로수명이 시효처리된 시험편의 피로수명보다 크게 높게 나타났다.

또한, 482℃에서 시효처리하였을 경우를 살펴보면 8시간 시효처리 결과에서는 용체화처리 시험편보다 피로수명은 높게 나타났으나 모재보다는 다소 낮게 나타났다. 그리고 0.00%에서 0.03%로 Nb의 첨가량이 높아지면 2시간 이상 시효에서 피로수명의 증가를 보였으나 0.06%로 높아지면 다시 다소 감소하는 경향을 나타냈다. 그러나 동일 한 Nb의 첨가량에서 시효시간이 증가할수록 피로수명은 증가하는 경향을 보였다. 따라서 482℃에서 Nb의 첨가량이 피로수명에 미치는 영향을 종합하면 455℃의 경우보다 전체적으로 피로수명은 향상되었으며 특히, 8시간 시효처리된 시험편의 피로수명은 모재보다는 낮으나 용체화처리된 시험편보다 높게 나타났다.

510℃에서 시효한 Nb의 첨가량이 피로수명에 미치는 영향을 살펴보면 482℃의 결과와 유사하게 0.03%Nb 시험편의 피로수명이 가장 높게 나타났다. 또한 0.00%Nb 시험편을 1시간 시효한 경우를 제외한 모든 시험편들의 피로수명이 용체화처리된 시험편의 피로수명보다 높게 나타났다. 이 중에서도 특히 4시간 및 8시간 시효된 시험편의 피로수명은 모재보다 높게 나타남을 알 수 있다.

Nb 첨가량이 피로수명에 미치는 영향을 종합하여보면 시

효온도가 높을수록 Nb가 첨가된 시험편의 피로수명은 모재의 피로수명에 근접하여 510℃에서 4시간 및 8시간 시효한 모든 시험편은 모재의 피로수명보다 높게 나타났다. 또한 482℃ 및 510℃ 시효온도에서 Nb가 첨가된 시험편의 피로수명이 Nb를 함유하지 않은 시험편의 피로수명보다 향상되어 Nb첨가에 따른 피로수명 향상을 위한 Nb첨가의 효과는 있었다고 판단된다. 한편, 가장 우수한 피로수명을 나타낸 조건은 0.03%Nb 소재를 482℃에서 8시간 시효한 시험편으로서 모재보다 약 12% 피로수명이 향상되었다.

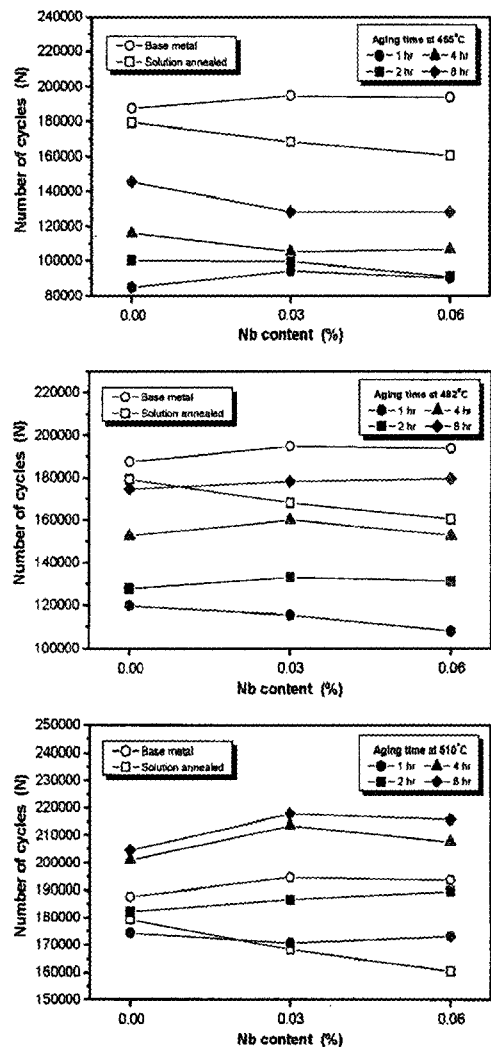


Fig. 4-1 Effect of Nb content and aging temperature on the fatigue life

4. 결 론

본 연구에서는 항공·우주분야, 원자력 및 자동차분야 등의 용도로 주목받고 있는 초고장력 18%Ni 마르에이징강의 기계적성질 및 피로수명 향상을 도모하고자 Nb의 함량 및 시효조건에 따른 영향을 고찰한 결과는 다음과 같다.

경도값은 모재보다 용체화 처리된 시험편이 약 3% 감소하였으나 1시간 시효처리한 시험편은 약 60% 정도 크게 증가하였으며 그 이후의 시간에서는 거의 비슷한 값을 나타내었다.

항복응력은 0.06%Nb 시험편에서 약 1,800MPa로 가장 높게 나타났으며 이는 모재보다 약 2배 이상 증가하였다. 한편 연신율은 0.03%Nb 시험편에서 가장 높게 나타났으며 이는 모재와 거의 비슷함을 알 수 있다.

피로수명은 시효온도가 높아질수록 그리고 시효시간이 증가할수록 증가하였다. 한편 가장 양호한 피로수명을 나타낸 시험편은 0.03%Nb 시험편으로서 모재보다 약 12% 증가하였다.

참 고 문 헌

- (1) Decker, R. F. and Floreen, S., 1988, "Maraging Steels", Recent Developments and Applications", R. K. Wilson(Ed.), TMS, p.1
- (2) Shiang, L. T. and Wayman, C. M., 1998, "Maraging Behavior in an Fe-19.5Ni-5Mn Alloy I", Published in METALLOGRAPHY 21, Vol. 399, No. 423, pp. 529~553
- (3) Moriyama, M. and Takaki, S., 1997, "Influence of Reversion Austenite on Fatigue Property of 18% Ni Maraging Steel", International Journal of Fatigue, Vol. 19, No. 3, pp. 266~267
- (4) Zhang, J. S., Liu, X. J., Cui, H., Duan, X. J., Sun, Z. Q., and G. L. Chen, 1997, "Ageing Behaviour of Spray-deposited 18Ni(250) Maraging Steel+10vol.% Al₂O₃", Material Science and Engineering A, Vol. 225, Nos. 1-2, pp. 96~104
- (5) Krystyna Stiller, Frederic Danoix and Mats Hattestrand, 1998, "Mo Precipitation in a 12Cr-9Ni-4Mo-2Cu Maraging Steel", Material Science and Engineering A, Vol. 225, No. 1, pp. 22~26
- (6) Tewari, R., Mazumder, S., Batra, I. S., Dey, G. K., and Banerjee, S., 2000, "Precipitation in 18 wt% Ni Maraging Steel of Grade 350", Acta Materialia, Vol. 48, No. 5, pp. 1187~1200
- (7) Kim, S. J. and Wayman, C. M., 1996, "Strengthening behaviour and Embrittlement Phenomena in Fe-Ni-Mn-(Ti) Maraging alloys", Materials Science and Engineering A, Vol. 207, pp. 22~29
- (8) Nagayama, K., Terasaki, T., Tanaka, K., Fischer, F. D., Antretter, T., Cailletaud, G., and Azzouz, F., 2001, "Mechanical Properties of a Cr-Ni-Mo- Al-Ti Maraging Steel in the Process of Martensitic Transformation", Material Science and Engineering A, Vol. 308, Nos. 1-2, pp. 25~37
- (9) Floreen, S., 1987, Metals handbook, 9th ed., B. P. Bardes(Ed.), ASM, 1, p. 445
- (10) Annual Book of ASTM Standards, 1996, Section 3 Metals Test Methods and Analytical Procedures, E 8M-96, Standard Test Methods for Tension of Metallic Materials, pp. 76~96
- (11) ASTM, 1985, Standard Test Method for Constant Load Amplitude Fatigue Crack Growth Rate Above 10⁻⁸mm/Cycle, E647-83, pp. 765~783
- (12) Kim H. M., Kim I. B. Park S. Y., 1991, "Effect of Aging Hardening on the Strength of 18Ni Maraging Steel", Journal of the Korean Society for Heat Treatment, Vol. 4 No. 1, pp. 30~36
- (13) Victor Kerlin, 1987, Metal HandBook, 9th ed., (Metal Park, OH, ASM), p.12