

Nb 함량에 따른 마르에이징강의 유한요소해석에 관한 연구

최병기[†] · 최병희* · 권택용**

조선대학교 기계공학과 · *조선대학교 대학원 기계공학과 · **전북기능대학 산업설비자동화과
(2005. 4. 26. 접수 / 2005. 11. 21. 채택)

A Study on the FEM Analysis of Maraging Steel according to Nb content

Byung-ky Choi[†] · Byung-hui Choi* · Tack-yong Kwon**

Department of Mechanical Engineering, Chosun University

[†]Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Chosun University

^{**}Department of Automation of Industrial Installation, Jeonbuk Polytechnic College

(Received April 26, 2005 / Accepted November 21, 2005)

Abstract : Effects of Nb(Niobium) contents and solution annealing on the strength and fatigue life of 18%Ni maraging steel commonly using in aircraft, space field, nuclear energy, and vehicle etc. were investigated. Also the fatigue life stress intensity factor were compared experiment result and FEA(finite element analysis) result.

The more Nb content, the higher or the lower fatigue life on base metal specimens or solution annealed specimens showing that the fatigue life was almost the same.

The maximum stresses of X, Y, and Z axis direction showed about 2.12×10^2 MPa, 4.40×10^2 MPa and 1.32×10^2 MPa respectively. The Y direction stress showed the highest because of the same direction as the loading direction. The fatigue lives showed about 7% lower FEA result than experiment result showing almost invariable error every analyzed cycle. Stress intensity factor of the FEA result was lower about 3.5~10% than that of the experiment result showing that the longer fatigue crack length, the higher error. It considered that the cause for the difference was the modeled crack tip having always the same shape and condition regardless of the crack growth.

Key Words : Nb content, solution annealing, fatigue life, fatigue crack, stress intensity factor, FEA, base metal

1. 서 론

최근 항공, 우주산업의 발달로 고강도 및 고인성을 갖는 신뢰성 높은 소재의 수요는 꾸준히 증가하고 있다¹⁾. 마르에이징강의 특징은 고강도임에도 불구하고 고인성을 갖는 회백색 금속으로서 성형성, 가공성, 내식성, 고온강도 및 용접성 등이 우수하며, 열처리가 간편하고 열처리 후 치수변화가 거의 없는 등의 장점을 들 수 있다²⁾. 이 강은 미국이 로켓의 모터 케이스에 최초로 적용한 이래 항공·우주분야에서는 제트엔진과 헬리콥터 구동축, 랜딩기어 등에, 자동차분야에서는 각종 구동축, 커넥팅로드 및 엔진벨브 등에, 공구분야에서는 압출 램, Al 및 Zn 캐스팅 다이 및 압연기 등 해양, 원자력 분야 및 산업기계

의 특수부품 등 그 용도가 급격히 신장하고 있다³⁾.

초고강력강인 마르에이징강은 저탄소($C \leq 0.03\%$)의 Fe-Ni 마르텐사이트 기지에 석출경화성 합금원소인 Co, Mo, Ti 등을 고용하고 있기 때문에 시효에 의하여 쉽게 금속간화합물이 석출됨으로서 강화된다. 이 강은 1958년경 미국의 INCO社에서 개발, 공업화되었는데, 초기에는 20%Ni, 25%Ni 강이라 불리는 두 강종에 대하여 개발되었으나, 고강도에서의 취성 문제로 인하여 통상적인 표준 열처리 외에 심냉처리나 중간소둔처리 등의 후속 열처리가 더 필요하였다. 그러나 고 Ni합금에서 Co나 Mo 등의 합금원소의 상호작용에 의하여 석출경화 시 인성증가에 기여할 수 있다는데 착안하여 Ti 및 Al 함량을 다소 줄이는 대신에 Co와 Mo를 다량 첨가하고 Ni 함량을 18% 수준으로 낮춤으로서 인성저하 및 응력부식 등의 문제를 개선하였다. 그 결과 1960년대 초에 18%Ni-Co-

[†]To whom correspondence should be addressed.
bkchoi@chosun.ac.kr

Mo-Ti계 마르에이징강이 상품화되기에 이르렀다. 마르에이징강에 대한 최근의 국내·외 연구동향을 살펴보면, 18%Ni이 함유된 마르에이징강의 용접 및 시효처리에 대한 연구^{4,7)}, Mo 및 Co 등의 원소를 첨가하여 제조한 마르에이징강의 연구⁸⁾, 마르에이징강의 기계적성질에 관한 연구^{9,10)} 등이 있다.

본 연구에서는 Nb의 첨가량 및 용체화처리에 따른 피로수명을 고찰하고 유한요소해석을 병행하여 실험으로부터 얻어진 결과치와 비교·평가하고자 한다.

2. 시험편 및 실험방법

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

Table 1은 습식분석장치(Maker : METROHM)를 이용하여 제조된 잉곳의 화학적 성분분석 결과를 나타내고 있으며, 연고자 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 이러한 성분들은 의도적인 첨가는 아니지만 잔류되어 있던 공기 등으로부터 유입된 결과로 판단되나, 극소량 이므로 탄소가 강도 등에 미치는 영향은 없었다고 판단된다.

Table 2는 제조된 판재의 기계적 성질을 나타내고 있다. 표에 나타난 바와 같이 항복강도 및 인장강도는 0.00%Nb, 0.06%Nb, 0.03%Nb 순으로 다소 증가하였으나 큰 차이가 없었으며, 연신을 및 탄성계수는 Nb의 함량이 높아질수록 증가하여 0.06%가 가장 높게 나타났다.

Table 1. Chemical compositions of manufactured steels

Materials	(wt.%)					
	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

Table 2. Mechanical properties of base metals

Materials	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elong. (%)	Young's modulus (MPa)
0.00% Nb	892.16	980.13	21.16	8362.97
0.03% Nb	900.17	986.45	21.40	8407.56
0.06% Nb	894.95	982.84	23.12	8606.28

용체화처리는 815℃에서 1시간 실시하였으며, 사용된 진공로의 진공도는 질소를 이용하여 10⁻³Torr로 유지되었고 온도편차는 ±1.6℃ 이내로 유지되었으며, 열처리 후 시료를 공냉으로 실온까지 냉각시켰다.

Fig. 1은 ASTM E-8¹¹⁾에 따라 subsize로 제작한 인장시험편의 형상 및 치수를 나타내고 있으며, 사용한 시험기는 UH-F50(Shimadzu, 50ton)이다. 또한 Fig. 2는 피로시험을 위한 C(T) 시험편의 형상 및 치수로서 ASTM E647-83¹²⁾의 규격에 따라 와이어 방전 가공기(와이어 직경 0.2mm)를 사용하여 가공하였다. 예비 노치는 0.15mm 두께의 다이아몬드 휠 커터를 사용하여 3mm 깊이로 해당 위치에 가공하여 완성하였으며, 실험조건은 최대하중 800kg, 주파수 10Hz, 응력비 0.1로서 모든 시험편에 동일하게 적용하였으며, ASTM standard E647-88의 규정¹³⁾에 준하여 실시하였다.

유한요소해석은 SolidWorks, TrueGrid 및 Cosmos Works 등의 소프트웨어를 이용하여 시험편의 모델링, 메시 및 해석 등을 통하여 시험편의 응력분포를 고찰하였으며, 피로수명 및 응력확대계수를 구하여 실험으로부터 얻은 결과값과 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 피로수명 및 조직의 관찰

Fig. 3과 4는 Nb를 0.00%, 0.03% 및 0.06%를 함유하고 있는 모재 및 815℃에서 1시간 용체화처리가 된 시험편에 대한 a-N선도로서 피로크랙길이 및 반복수와의 관계를 나타내는 대표적인 그림이다.

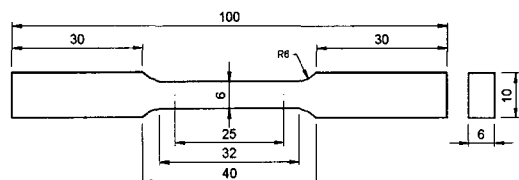


Fig. 1. Rectangular tensile test specimen, sub-size.

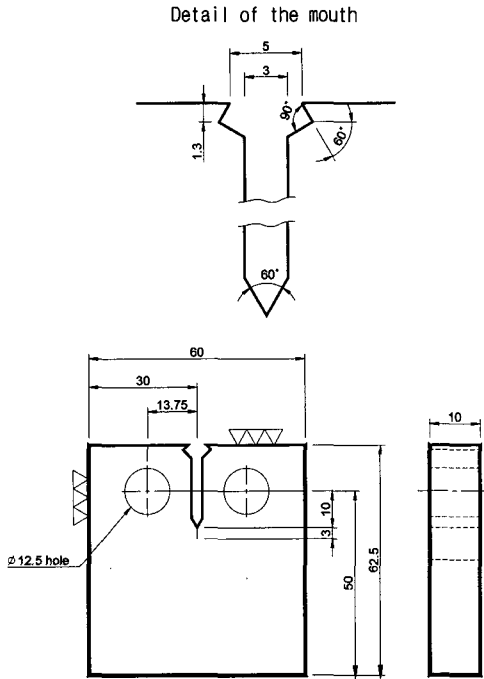


Fig. 2. Standard compact-tension C(T) specimen for fatigue crack growth rate testing.

Fig. 3에서 용체화처리를 실시하지 않은 모재의 피로수명을 살펴보면, 0.03%Nb와 0.06%Nb 시험편들의 피로수명은 거의 유사하였으나 0.00%Nb 시험편의 피로수명보다 약 4% 정도의 증가하였다. 따라서 모재의 경우 Nb 첨가는 피로수명을 향상시키나 Nb 함량의 변화에 따른 피로수명의 변화는 크지 않은 것으로 나타났다.

그러나 Fig. 4에 나타난 용체화 처리된 시험편에서는 Nb가 첨가된 시험편의 피로수명이 첨가되지 않은 시험편의 피로수명보다 약 6%정도 낮게 나타났으며, 0.06%Nb, 0.03%Nb 및 0.00%Nb 시험편의 순으로 증가하였다. 따라서 용체화 처리시 Nb의 첨가는 피로수명의 감소를 가져올 수 있다고 사료된다.

결과적으로 815°C에서 1시간 용체화 처리된 시험편과 열처리를 실시하지 않은 모재와의 피로수명을 비교하여 보면, 모재에서 0.00%Nb 시험편보다 Nb를 함유한 시험편의 피로수명은 증가한 반면 용체화 처리된 시험편에서는 감소하였다. 따라서 용체화 처리는 피로수명의 감소를 보였으며 Nb의 함량이 0.03% 및 0.06%로 증가할수록 피로수명은 다소 감소하였다.

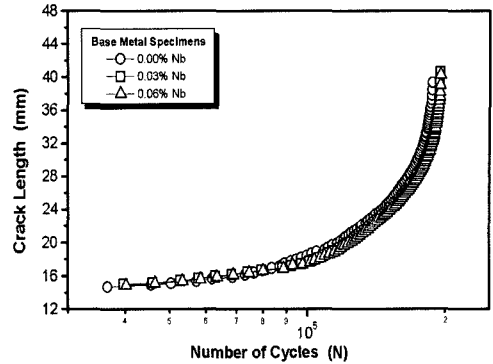


Fig. 3. Relations between crack length and number of cycles for base metal.

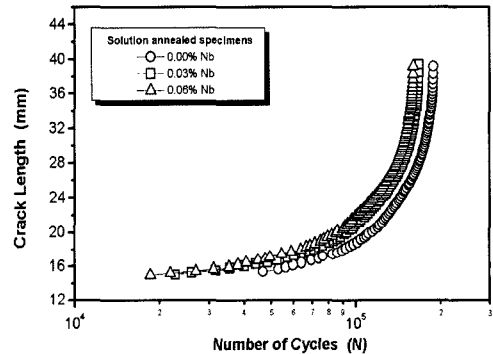


Fig. 4. Relations between crack length and number of cycles for solution annealed specimens.

Photo. 1과 2는 광학현미경으로 촬영한 열처리가 되지 않은 모재 및 용체화처리를 실시한 시험편의 조직사진을 나타내고 있다. 사진에 나타난 바와 같이 모재는 Nb의 첨가에 따른 조직의 변화가 거의 없다고 볼 수 있으나 815°C에서 1시간 용체화처리를 한 경우 입자크기는 다소 작아짐을 알 수 있으며, 특히 Nb가 0.03% 첨가된 시험편의 입자가 가장 미세하였다. 또한 모재 및 용체화처리 시험편에서 입자들 사이에 탄화물 등은 없었다고 볼 수 있다.

3.2. 유한요소 해석

3.2.1. 응력 해석

해석을 위한 모델링은 실제적인 실험과 동일하게 하중을 가할 수 있도록 실물형상 및 치수와 동일한 지그 및 핀을 함께 모델링하여 조립하였다. 지그는 40mm×20mm×45mm(b×h×l)이며 핀은 직경 12.5mm, 길이는 40mm이다. 시험편, 지그 및 핀을 이와 같이 각각 형상을 만든 다음 결합을 하였다. 구속조건은



(a) 0.00% Nb

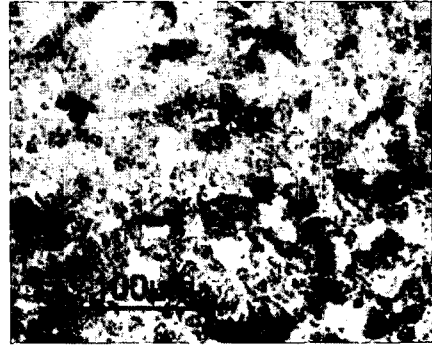


(b) 0.03% Nb

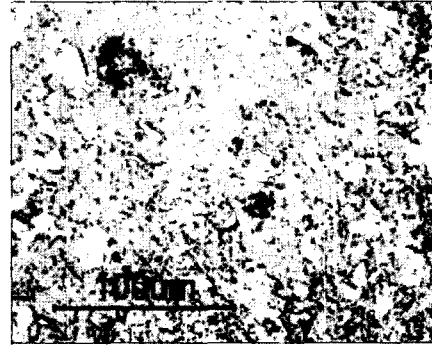


(c) 0.06% Nb

Photo 1. Micro structure of base metal specimen.



(a) 0.00% Nb



(b) 0.03% Nb



(c) 0.06% Nb

Photo 2. Micro structure of solution annealed specimen.

지그의 하단을 UX, UY, UZ를 구속하였으며 회전 구속은 모델이 3차원 형상이므로 구속을 하지 않아도 무방하므로 따로 구속조건에 넣지는 않았으나 지그 밑부분은 완전히 고정된 상태이다. 하중은 실제 시험에서 가한 800kg에 해당하는 7,840N을 지그 중앙에 집중되도록 가하였다. 따라서 하중 전달은 피로시험기를 이용한 실제실험과 동일하게 지그 및 핀을 통하여 시험편에 부과되는 방식이 적용되었다. Fig. 5는 위와 같은 형상과 구속조건 및 하중조건에 의하여 해석을 수행한 결과를 대표적으로 나타내고 있는 그림이다.

응력분포를 고찰하기 위하여 사용된 모델에서 element type은 solid 45 brick을 사용하였고 시험편의 element의 수는 16,390개, node의 수는 81,384개로 모델링 되었다.

Figs. 6~8은 각각 X, Y 및 Z축방향의 응력분포를 나타내고 있다. 각 그림의 우측에 표시된 값은 시험편에 발생한 응력의 값을 색깔과 함께 나타내고 있으며, 프로그램의 입력파일에 SI단위를 사용하였으므로 나타난 값의 단위는 Pa이 된다. 또한 각 축의 방향은 시험편의 길이방향이 X, 폭방향이 Y, 두께방향이 Z를 나타내고 있다. 따라서 응력분포는

각 방향으로 나타나며 해석결과 X, Y, Z축 방향의 최대응력을 살펴보면 X축 방향의 최대응력은 약 2.12×10^2 MPa, Y축 방향의 최대응력은 약 4.40×10^2 MPa, Z축 방향의 최대응력은 약 1.32×10^2 MPa로 나타남을 알 수 있다. 즉, 하중의 방향이 Y축이므로 Y축방향의 최대응력이 상대적으로 높게 나타났다고 볼 수 있다.

Fig. 9는 Von Mises 응력분포를 나타내고 있는 그림으로서 최대 응력은 약 2.86×10^2 MPa로 분석되었다.

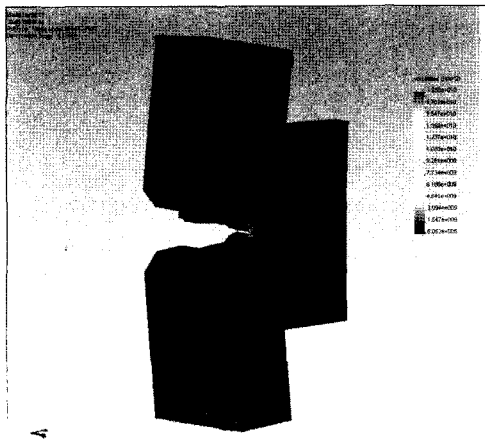


Fig. 5. Modeling, loading and restraint condition for the analysis.

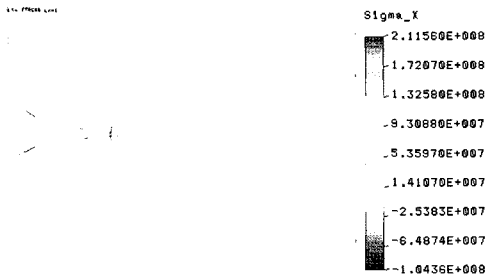


Fig. 6. X-direction stress distribution.

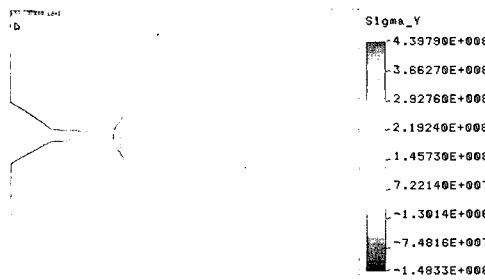


Fig. 7. Y-direction stress distribution.

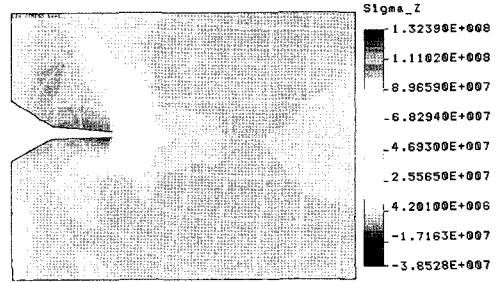


Fig. 8. Z-direction stress distribution.

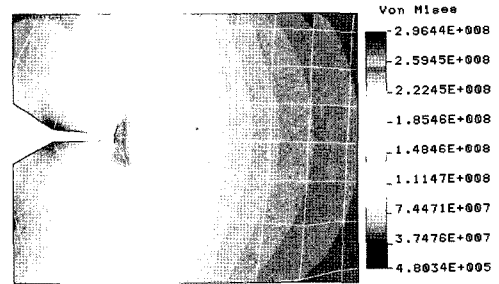


Fig. 9. Von Mises stress distribution.

3.2.2. 피로수명 해석

피로수명 해석을 위한 모델, element type, 구속 조건 및 경계조건 등은 응력해석 시 적용한 것과 동일하게 적용하였으나 물성치는 Nb를 0.03% 함유하고 있는 시험편의 기계적성질을 이용하여 50,000cycles에서부터 190,000cycles까지 10,000cycles 간격으로 해석을 각각 수행하였다.

피로수명 해석은 응력차, 국부적인 불연속, 피로 한도, 탄성계수 및 누적손상 등에 의하여 영향을 받으며, 누적손상을 나타내는 누적손상계수(cumulative usage factor) U는 다음과 같은 단계를 거쳐 구해진다^{14,15}.

Designate the specified number of times each type of stress cycle of types 1, 2, 3, ..., n, will be repeated during the life of the component as $n_1, n_2, n_3, \dots, n_n$, respectively



For each type of stress cycles, determine the alternating stress intensity S_{alt} by the procedures of NB-3216. Call these quantities $S_{alt1}, S_{alt2}, S_{alt3}, \dots, S_{altn}$



For each value $S_{alt1}, S_{alt2}, S_{alt3}, \dots, S_{altn}$, use the applicable design fatigue curve to determine the maximum number of repetitions which would be allowable if this type of cycle were the only one acting. Call these values $N_1, N_2, N_3, \dots, N_n$



For each types of stress cycle, calculate the usage factors $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$, from $U_1 = n_1/N_1, U_2 = n_2/N_2, U_3 = n_3/N_3 \dots U_n = n_n/N_n$

↓

Calculate the cumulative usage factor U from $U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n$ and The cumulative usage factor U shall not exceed 1.0

Fig. 10은 이들 해석결과의 대표적인 결과에서 크랙선단 부분을 확대하여 나타내고 있다. 각 그림들에서 우측에 색상과 함께 기입된 숫자는 누적손상계수를 나타내며 cycle이 증가할수록 최고값은 증가함을 알 수 있다. 특히 190,000cycles에서는 최고값이 1.04660으로 나타나고 있는데 이는 1보다 큰 값으로서 이 상태에서는 파괴가 발생함을 의미한다¹⁴⁾. 따라서 이 시험편의 피로수명을 유한요소해석 결과로 보면 약 190,000cycle 이하로 판단될 수 있다. 그러나

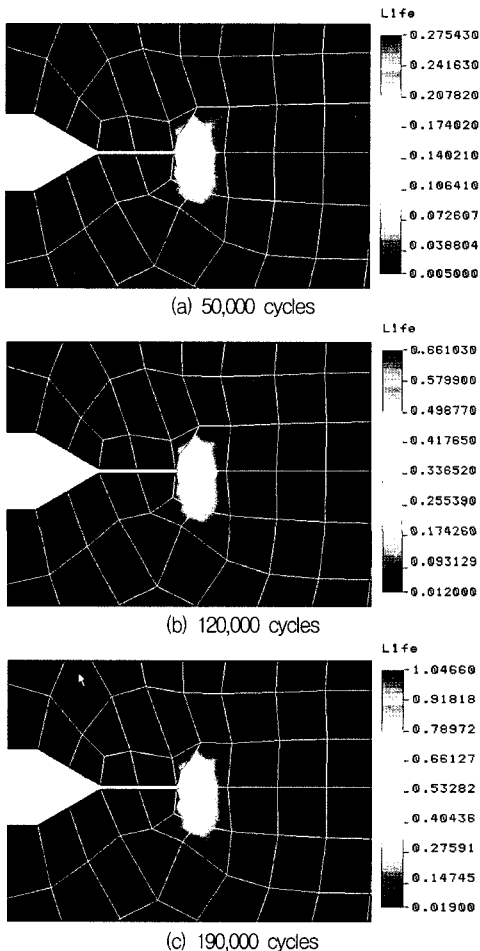


Fig. 10. Representative results of the fatigue life analysis.

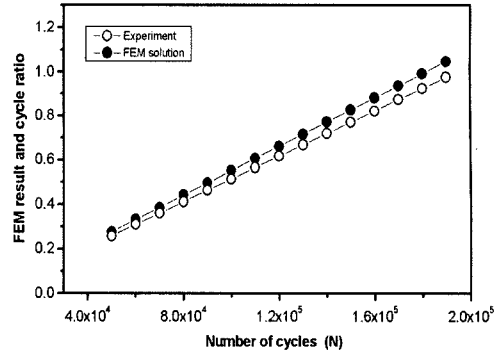


Fig. 11. Comparison of the fatigue life between FEA result and experiment result.

실험에 의한 피로수명은 194,850cycles로서 유한요소해석 결과와 약 7.25% 정도 차이가 있음을 알 수 있다.

이러한 오차의 원인은 실제적인 실험에서는 크랙이 발생하게 되면 크랙선단은 아주 예리한 형상이 되며 응력집중에 의하여 응력은 크게 상승하게 되지만 유한요소 해석에서의 모델은 크랙이 진전한 것은 기능하나 크랙선단의 형상을 실험과 동일하게 모델링하기가 곤란하기 때문으로 판단된다. 또한 실제 재료는 제조 시 계재물 또는 이상조직 등이 포함될 가능성이 큰 반면 유한요소해석에서는 재료 전체가 균질하다는 가정 하에 수행되는 등 몇 가지 원인에 기인한 결과라고 생각된다.

이와 같은 차이의 정도를 알아보기 위하여 유한요소해석에 의한 수명해석 시 제시되는 누적손상계수를 판단수명비와 비교한 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 초기에는 실험 결과치와 유사한 값을 보이다 크랙이 진전할수록 차이는 커지고 있음을 알 수 있다.

따라서 이를 보완하기 위한 방법에 대하여 더욱 세밀한 고찰이 필요하리라 판단되나 본 연구에서 수행한 수명해석 결과 각 cycles에서 약 7.3% 이내로 거의 일정한 차이를 보였으므로 이러한 차이만큼의 보정 등을 한다면 일정 수준의 수명평가는 가능하리라고 사료된다.

3.2.3. 응력확대계수 해석

응력확대계수 해석에서는 시험편의 1/2 형상을 2차원으로 모델링 하였는데 일정한 크기의 크랙이 진전된 상태에서 응력확대계수를 구하기 위하여 크랙길이 3mm부터 13mm까지 1mm 간격으로 총 11개의 시험편을 각각 크랙이 해당 길이까지 진행된

상태로 모델링하여 mesh, 하중조건 및 구속조건을 적용하였다. 사용된 소프트웨어는 응력해석에서 사용한 것과 동일하나 element type은 2D plane을 사용하였다. 이렇게 완성된 모델에서 총 element의 수는 738개, 총 node의 수는 841개였다.

Fig. 12는 응력확대계수 해석을 위한 시험편의 형상 및 하중조건과 경계조건을 나타내고 있으며, Fig. 13은 3, 6 및 10mm의 크랙길이를 갖는 시험편의 대표적인 해석결과로서 크랙선단 부분만을 확대하여 나타내고 있다.

Fig. 14는 유한요소 해석 및 실제적인 실험을 통하여 구한 응력확대계수를 서로 비교하고 있다. 이때 실제적인 실험에서는 유한요소에 적용한 크랙길이에서의 응력확대계수를 정확히 알 수 없으므로 보간법을 이용하여 계산하였다. 그림에 나타난 바와 같이 유한요소해석에 의해 구해진 값이 실제 실험에 의해 구해진 값보다 낮게 조사되었는데 크랙이 증가할수록 그 차이는 커지고 있다. 즉, 크랙길이 3mm에서는 약 3.5%의 오차가 있었으나 크랙이 진전할수록 증가하여 13mm에서는 약 9.96%의 오차를 보였다. 또한 실제실험으로부터 구한 응력확대계수값

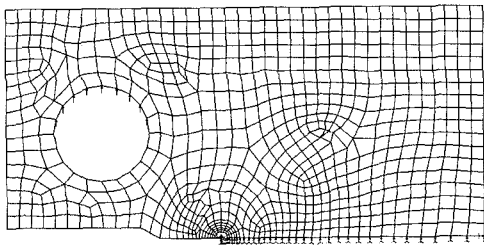


Fig. 12. Modeling, meshing, and restraint condition.

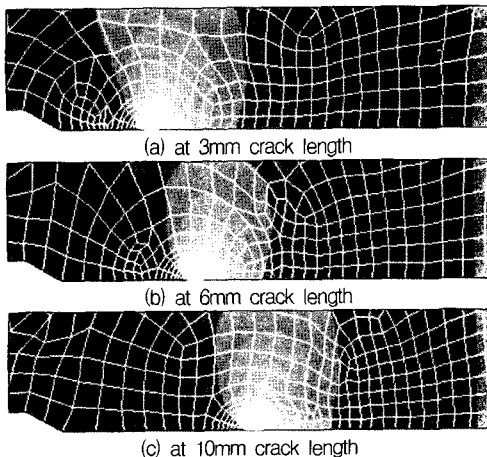


Fig. 13. Plots of the delta K analysis result.

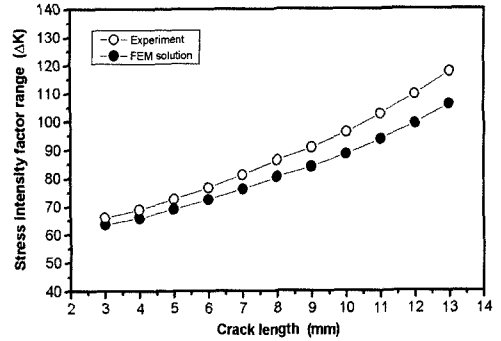


Fig. 14. Comparison of stress intensity factor range between FEA result and experiment result.

의 그래프는 곡선형태를 보이며 크랙이 진전할수록 가속되는 모습을 보이는 반면 유한요소해석에 의해 구해진 결과는 거의 직선적으로 상승하고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 유한요소해석 결과가 직선적으로 나타나는 원인은 해석 시 크랙길이는 다르게 모델링 하였지만 크랙선단 부분의 형상 및 조건은 모두 동일하게 실시하였기 때문에 나타난 결과로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 초고장력 18%Ni 마르에이징강의 기계적성질 및 피로수명 향상을 도모하고자 Nb의 함량 및 용체화처리가 피로수명에 미치는 영향을 조사하고 유한요소해석을 통한 피로수명 및 응력확대계수를 구하여 실제 실험결과와의 비교를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 피로수명은 Nb 첨가량이 증가할수록 모재의 경우 증가하고 용체화처리 시험편은 감소하나 큰 차이 없이 거의 유사하였다.
- 2) 유한요소해석에 의한 X, Y, Z축 방향의 최대 응력은 각각 $2.12 \times 10^2 \text{MPa}$, $4.40 \times 10^2 \text{MPa}$ 및 $1.32 \times 10^2 \text{MPa}$ 로 나타남을 알 수 있었다. 여기에서 Y축 방향의 최대응력이 상대적으로 높게 나타난 것은 하중방향과 동일하기 때문으로 생각된다.
- 3) 유한요소해석에 의한 피로수명은 실험에 의한 결과치보다 약 7%정도 낮게 나타났으며, 해석된 각 cycle에서 거의 일정한 비율의 오차가 나타남을 알 수 있었다.
- 4) 또한 응력확대계수 값은 실험에 의한 값보다 약 3.5~10% 정도 낮게 나타났으며 크랙이 진전할

수록 오차는 증가함을 알 수 있었다. 이는 해석 시 크랙이 일정한 길이만큼 성장된 것으로 모델링을 하였으나 크랙선단 부분의 형상 및 조건은 모두 동일하였기 때문으로 생각된다.

참고문헌

- 1) Kim, W. Y., Hisao Tanaka, Kim, M. S., and shuji Hanada, "High Temperature Strength and Room Temperature Fracture Toughness of Nb-Mo-W Refractory Alloys with and without Carbide Dispersoids", *Material Science and Engineering A346*, pp. 65~74, 2003.
- 2) Decker, R. F. and Floreen, S., "Maraging Steels", *Recent Developments and Applications*, R. K. Wilson(Ed.), TMS, p. 1, 1998.
- 3) Shiang, L. T. and Wayman, C. M., "Maraging Behavior in an Fe-19.5Ni-5Mn Alloy I", Published in *METALLOGRAPHY* 21, Vol. 399, No. 423, pp. 529~553, 1998.
- 4) Moriyama, M. and Takaki, S., "Influence of Reversion Austenite on Fatigue Property of 18% Ni Maraging Steel", *International Journal of Fatigue*, Vol. 19, No. 3, pp. 266~267, 1997.
- 5) Tsay, L. W., Lee, W. C., Luu, W. C., and Wu, J. K., "Effect of Hydrogen Environment of the Notched Tensile Properties of T-250 Maraging Steel Annealed by Laser Treatment", *Corrosion Science*, Vol. 44, No. 6, pp. 1311~1327, 2002.
- 6) Hussain, K., Tauqir, A., and Khan, A. Q., "Influence of Gas Nitriding on Fatigue Resistance of Maraging Steel", *International Journal of Fatigue*, Vol. 21, No. 2, pp. 163~168, 1999.
- 7) Shamantha, C. R., Narayanan, R., Iyer, K. J. L., Radhakrishnan, V. M., Seshadri, S. K., Sundararajan, S., and Sundaresan, S., "Microstructural Changes During Welding and Subsequent Heat Treatment of 18Ni (250-grade) Maraging Steel", *Material Science and Engineering A*, Vol. 287, No. 12, pp. 43~51, 2000.
- 8) Stiller, K., Hattestrand, M., and Danoix, F., "Precipitation in a 9Ni-12Cr-2Cu Maraging Steels", *Acta Materialia*, Vol. 46, No. 17, pp. 6063~6073, 1998.
- 9) Nagayama, K., Terasaki, T., Tanaka, K., Fischer, F. D., Antretter, T., Cailletaud, G., and Azzouz, F., "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, 2001.
- 10) Yi He, Ke yang, Wenshen Qu, Fanya Kong and Guoyue Su, "Strengthening and toughening of a 2800-MPa grade maraging Steel", *Materials Letters* 56, pp. 763~769, 2002.
- 11) Annual Book of ASTM Standards, "Section 3 Metals Test Methods and Analytical Procedures", E 8M-96, Standard Test Methods for Tension of Metallic Materials, pp. 76~96, 1996.
- 12) Annual Book of ASTM Standards, "Section 3 Metals Test Methods and Analytical Procedures", E 647-95a, Standard Test Methods for Measurement of Fatigue Crack Growth rates, pp. 565~601, 1996.
- 13) ASTM, "Standard Test Method for Constant-Load Amplitude Fatigue Crack Growth Rate Above 10^{-8} mm/Cycle", E647-83, pp. 765~783, 1985.
- 14) ASME, "Boiler and Pressure Vessel Code an International Code III, Division 1 - Subsection NB, Class 1 Components", Rules For Construction of Nuclear Power Plant Components, pp. 81~130, 1998.
- 15) ASME, "COSMOSM Theory", A Brief Theoretical Background for simplified Elastic-Plastic Formulation, Part 2 FSTAR/Fatigue Analysis, pp. 5-11~6-8, 1998.