

A182 F6A Class4 재료의 피로특성과 피로해석에 대한 연구

A Study on Fatigue Characteristics and Analysis for A 182 F6a Class 4 Materials

이진경*

Jin-Kyung Lee*

〈Abstract〉

Unlike general carbon steel, stainless steel's mechanical properties change depending on the content of chromium and nickel. In this study, since stainless steel for high-temperature pressure container parts is used as shafts, the fatigue strength and fatigue limit of the materials were evaluated using a rotational bending fatigue test. Meanwhile, fatigue analysis was conducted under the same conditions as the specimen for structural analysis and fatigue analysis of stainless steel for high-temperature pressure container parts. Using the fatigue analysis results, we tried to derive the life of the material and the safety factor for each part. As a result of performing a fatigue test by processing a specimen for the fatigue test of A182 F6A stainless steel, the fatigue limit was 548 MPa. The ratio between the tensile strength and fatigue limit of the material was 0.545, representing 54.5% of the tensile strength.

Keywords : Carbon Steel, High Temperature Pressure Container Part, Fatigue Limit, Fatigue Test, Fatigue Analysis, Safety Factor

* 정회원, 동의대학교 기계자동차로봇부품공학부, 부교수,
공학박사, 부산대학교
E-mail: leejink@deu.ac.kr

* Division of Mechanical, Automotive, Robot Component
Engineering, Dongeui University
E-mail: leejink@deu.ac.kr

1. 서론

일반 탄소강과 달리 스테인레스강에는 크롬과 니켈의 함유량에 따라 기계적 특성이 변한다. 특히, 크롬으로 인해 강의 표면에 산화크롬이 형성되어 표면에 녹이 슬지 않기 때문에 다양한 기계부품 및 일반소재용품으로 많이 사용된다[1]. 일반적인 스테인레스강은 18 %의 크롬과 8 %의 니켈의 성분으로 구성되어진 STS 304의 오스테나이트계 스테인레스강으로 가정용 식기, 건축물 내외장재 및 화학 플랜트 등에 많이 이용된다[2-4]. 그리고 마르텐사이트계 스테인레스강은 13 %의 크롬이 함유되고 니켈의 함유량이 0.5 %정도로 건축재부품, 자동차 부품, 사무기기 및 주방기구, 식기류 등에 사용된다. 특히, 고온압력용기 부품용 스테인레스 단조품(F6A)은 마르텐사이트계 스테인레스강으로 오스테나이트계에 비해 크롬의 함량이 적고 니켈은 거의 없기 때문에 내식성이 낮고 가공성 및 용접성이 떨어지는 성질을 가지고 있다. 그러나 담금질과 풀림 처리를 하면 인성이 높아져서 체결용 기계부품과 축으로 많이 사용된다. 따라서 고온압력용기 부품용 스테인레스 단조품에 대해 축으로 사용될 경우 고속회전으로 인한 재료특성을 아는게 대단히 중요하다. 또한 재료의 피로특성을 평가하여 피로수명에 대해 평가하였다. 특히, 대부분의 구조물 및 축은 피로에 의해 파손되는 경우가 많기 때문에 피로에 의한 재료의 특성 및 피로한도를 정확히 평가하는 것은 대단히 중요하다. 피로시험은 대표적으로 회전굽힘 피로시험과 인장 압축응력을 가하는 형태로 구분할 수 있다[5-7]. 축으로 사용되는 재료는 회전굽힘 피로시험을 통해 응력진폭과 수명과의 관계를 평가하는 것이 필요하다. 또한 스테인레스강에 대하여 구조해석 뿐만 아니라 피로해석에 대해서도 다양한 방법으로 연구되어 왔다[8-9]. 본 연구에서는 고온압력용기 부품용 스테인레스 단조품

이 축으로 사용되기 때문에 회전굽힘 피로시험을 이용하여 재료에 대한 피로강도 및 피로한도 등을 평가하고자 하였다. 한편 고온압력용기 부품용 스테인레스 단조품에 대한 구조해석 및 피로해석을 위해 시험편과 같은 조건으로 피로해석을 실시하였다. 피로해석 결과를 이용하여 재료의 수명 및 각 부분에 대한 안전계수를 도출하고자 하였다.

2. 재료 및 시험방법

본 연구에 사용된 고온압력용기 부품용 스테인레스 단조품은 담금질(Quenching) 온도는 980°C에서 5시간 동안 유지하여 냉각하였으며 뜨임(Tempering) 온도는 560°C로 6시간동안 유지시켜 스테인레스강을 제작하였다. 이 재료의 화학적 특성은 Table 1에 나타난 것처럼 크롬의 함유량이 13 %이며 재료의 강도에 많은 영향을 미치는 탄소의 함유량은 0.15%이다. 그리고 니켈은 0.60 %의 함유량을 가지고 있는 압력용기 부품용 스테인레스강이다. Table 2에서는 재료의 기계적 특성을 나타낸 것으로 항복강도는 865 MPa, 인장강도는 959 MPa, 연신율 26 % 및 브리넬경도는 291 HB를 나타내고 있다.

Table 1. Chemical properties of A182 F6A (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
0.15	1.00	1.00	0.04	0.04	0.50	13.00

Table 2. Mechanical properties of A182 F6A

Item	Value
Yield strength(MPa)	865
Tensile strength(MPa)	959
Strain(%)	26
Hardness(HB)	291

Fig. 1에서는 피로시험에 대한 전체적인 그림을 나타낸 것으로 Fig. 1(a)에서 보여주는 바와 같이 최대 4개의 피로시험을 할 수 있는 시험기(YAMAMOTO)를 이용하였으며 회전시험속도는 3000 rpm, 척(collet nut)의 직경은 10mm의 조건으로 시험을 실시하였다. 그리고 Fig. 1(b)에서 보여주는 바와 같이 최대응력과 최소응력의 비인 응력비(stress ratio, R)는 -1, 평균응력(σ_m)은 0의 피로시험조건으로 실시하였다. 그리고 시험편의 규격은 전체 100 mm, 중심직경은 3 mm로 제작하여 피로시험을 실시하였다. 본 연구에 사용된 시험편은 S-N 곡선을 도출하기 위해 총 10개의 시험편이 사용되었다. 또한 본 연구에서는 시험기의 규격 및 시험편의 규격을 고려하여 아래의 식을 이용하여 응력을 계산하였다[10].

$$\sigma = \frac{32P \cdot l}{\pi \cdot d^3}$$

여기서, P : 하중, l : 거리, d : 시험편 지름

3. 결과 및 토의

본 연구에서는 A182 F6A 재료에 대한 피로시험을 실시하여 S-N 곡선을 도출하였다. Fig. 2에서는 고온압력용기 부품용 스테인레스강에 대한 S-N 곡선을 나타낸 것으로 하중 657 MPa에서는 약 56920 cycles에서 파단이 발생하였으며 575 MPa에서는 약 387650 cycles의 수명을 나타내었고 약 563 MPa에서는 479580 cycles의 수명을

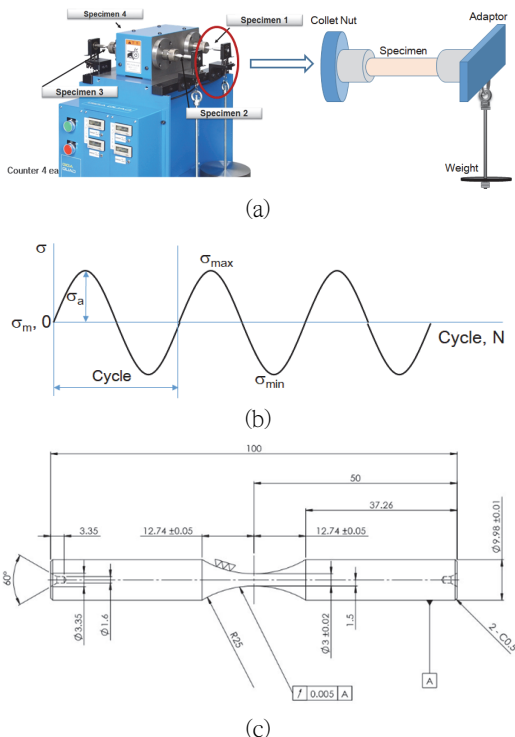


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental test(a), fatigue test condition(b) and specimen(c)

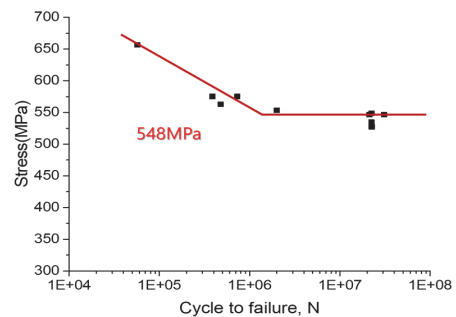


Fig. 2 S-N curve on A182 F6A material

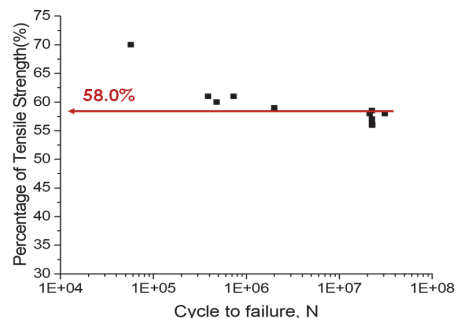


Fig. 3 The percentage of tensile strength and fatigue life

나타내었다. 그리고 553 MPa에서는 1,998,980 cycles 이상의 피로수명을 나타내었으며 약 549 MPa 이하의 응력에서는 22,413,610 cycles 이상

의 수명을 나타내었다. 본 연구에서는 10^6 cycle 를 피로한도의 피로수명으로 설정하였으며 A182 F6A 재료는 약 548 MPa이 피로한도로 나타났다. Fig. 3에서는 굽힘응력이 인장강도의 어느정도인 지를 나타낸 것으로 657 MPa인 경우 인장강도의 약 69 %의 응력으로 약 56920 cycles의 사이클 에서 파단이 발생함을 알 수 있었으며 약 575 MPa에서 563 MPa인 경우 인장강도의 59-60 % 정도의 굽힘응력으로 이 영역에서는 300,000 - 500,000 cycles 정도의 피로수명을 나타내었다. 따라서 인장강도의 약 58 % 정도에서 10^6 이상의 피로수명을 나타냄을 알 수 있었다.

Fig. 4에서도 피로실험을 실시한 스테인레스강 에 대한 구조해석 및 피로해석을 실시한 결과를 나타낸 것이다. 본 연구에 이용된 프로그램은 ANSYS Workbench R2 버전이다. 해석을 위해 재료의 기계적 특성 및 S-N 곡선에 대한 데이터 가 필요하다. 본 연구에서는 실험을 통해 도출한 S-N 곡선(Fig. 2)의 자료를 활용하여 해석을 수행 하였다. 그리고 Fig. 4(a)에서는 경계조건 및 하중 조건을 나타낸 것으로 왼쪽 A부분에서 고정을 시 키고 반대편 B부분에서 하중이 가해지는 조건으로 설정하였다. B부분은 실제 하중이 가해지는 부분 으로 42N의 하중을 아랫방향으로 가하였다. Fig. 4(b)에서는 해석결과를 나타낸 것으로 변형을 나 타낸 것이다. 변형은 끝부분에서 가장 큰값을 나 타내었으며 아랫방향(y)으로 0.87mm의 값을 나타 내었다. 그리고 Fig. 4(c)는 Von Mises 응력을 나 타낸 것으로 최대응력은 시험편 중앙에서 나타나 며 약 647MPa의 값을 나타내었다. Fig. 4(d)는 피로해석 결과를 나타낸 것으로 하중형태는 완전 교번하중을 가하고 평균응력은 Goodman 이론식 의 조건으로 해석하였다. 본 연구에서의 결과는 42N의 하중에 최소수명은 71817 cycles로 중앙 에서 파괴되는 것으로 나타났다. 마지막으로 안전 계수는 중앙에서 최소 0.87에서 최대 15까지의

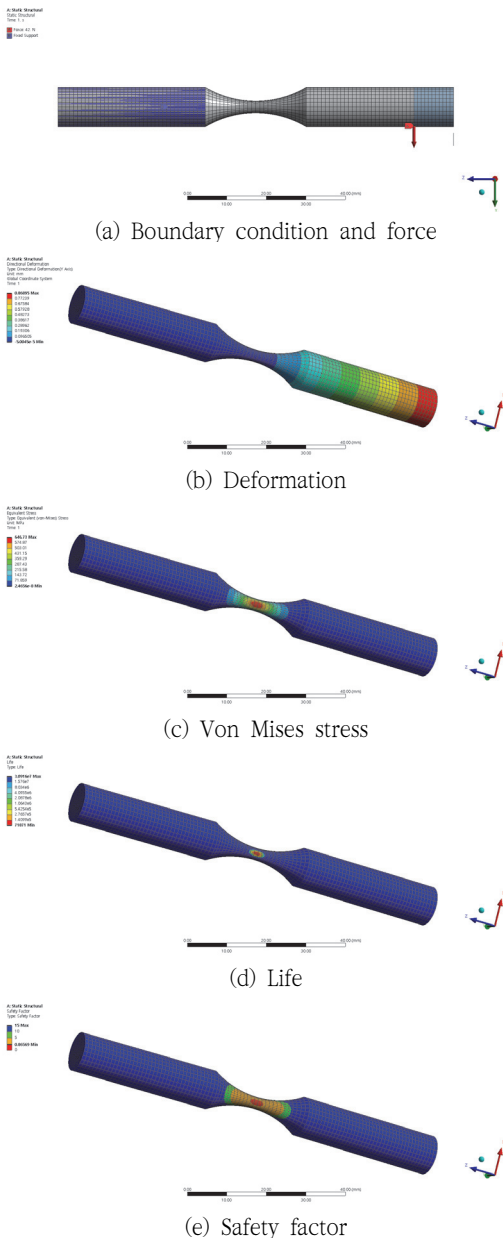


Fig. 4 Structural and fatigue analysis on the specimen

Table 3. Boundary condition and loading conditions

Item	Value
Boundary condition	Fixed support
Force(N)	42

Table 4. Fatigue solutions results

Item	Value
Deformation(mm)	0.87
Stress(MPa)	647
Life(cycle)	71817
Safety factor	0.87

값을 나타내었다(Fig. 4(e)). 이와 같은 결과는 재료의 피로시험결과와 매우 잘 일치함을 알 수 있었다. 따라서 A182 F6A 스테인리스강을 이용한 고온압력용기 부품에 피로해석의 타당성을 검증하였다. Table 3에서는 본 연구에 사용된 경계조건과 하중조건을 나타내었으며 Table 4에서는 피로해석 결과를 요약한 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 A182 F6A 스테인레스강에 대한 피로특성을 평가하고 구조해석을 평가하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) A182 F6A 스테인레스강 시험편 10개를 사용하여 피로시험을 실시하여 S-N 곡선을 도출하였으며 피로시험 결과 피로한도는 548 MPa을 나타내었다.
- (2) 재료의 인장강도와 피로한도의 비는 0.545로써 인장강도의 54.5 %를 나타내어 일반적인 스테인레스강에 비하여 높게 나타내었다.
- (3) 사용된 시험편에 대한 구조해석을 실시한 결과 42N의 하중에서 시험편의 변형은 최대

0.87mm, 그리고 Von Mises 응력은 647MPa을 나타내었으며 시험에서 구한 S-N 곡선의 자료를 이용하여 피로해석을 한 결과 피로수명은 71817 cycle, 마지막으로 안전계수는 시험편 중앙에서 0.87의 값을 나타내어 시험결과와 매우 잘 일치하였다.

참고문헌

- [1] Y. Song, M.C.H. Yam, J. Wang, *Engineering Structures*, 275, 115337, (2023).
- [2] W. Li, J. Chen, J. Tatman, Z. Feng, M. Latour, R. Miller, L. Walters, T. M. Rosseel, G. Frederick, *Journal of Nuclear Materials*, 574, 154193, (2023).
- [3] J. Kim, Y. Choi, K. Okamoto, B. Jo, *Engineering Failure Analysis*, 139, 106480, (2022).
- [4] S.G. Wang, S.Y. Liu, M. Sun, B.H. Tian, Z.D. Zhang, *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 331-347, (2023).
- [5] J. Wan, J. Zhao, L. Zhou, S. Zhang, H. Zhao, *International Journal of Fatigue*, 170, 107562, (2023).
- [6] J. Yang, X. Men, P. Rong, J. Cao, W. Guo, G. Li, H. Li, *Engineering Failure Analysis*, 145, 107000, (2023).
- [7] Q. Li, *Journal of Materials Research and Technology*, 20, 4306-4317, (2022).
- [8] H. M. Nia, A. A. Aghakouchak, *Ocean Engineering*, 246, 110233, (2022).
- [9] Q. Gao, H. Xin, J.A.F.O. Correia, A.S. Mosallam, F. Berto, *International Journal of Fatigue*, 162, 106951, (2022).
- [10] D.S. Bae, J.S. Kwack, J.K. Lee, *Journal of the Korean Society of Industry Convergence*, 26(6), 987-992, (2022).