

12Cr강의 피로특성에 미치는 Ni+Mo 첨가의 영향

Effect of Ni and Mo Addition on Fatigue Property in 12Cr Steel

이진경¹, 배동수^{2*}

Jin-Kyung Lee¹, Dong-Su Bae^{2*}

〈Abstract〉

This research was performed to study the effect of the Ni + Mo addition on the fatigue properties in 12Cr steel. After heat treatment of 12Cr steel and 12Cr-Ni-Mo steel, tensile tests, impact tests, hardness tests, and rotary bending fatigue tests were performed, respectively. The fatigue fracture surface was observed and analyzed using SEM and EDS. The fatigue limit of 12Cr steel was 554 MPa, which was 49 MPa higher than 505 MPa of 12Cr-Ni-Mo steel. Striations, which are the shape of the typical fatigue fracture surface, were observed at the fracture surface near the starting point of fatigue fracture in the 12Cr steel and 12Cr-Ni-Mo steel. However, unlike the case of 12Cr steel, 12Cr-Ni-Mo steel also had a mixed fracture surface with the fatigue and the ductile fracture surface. When brittle non-metallic inclusions exist near the starting point of fatigue failure, the crack propagation was further promoted and the fatigue life was drastically reduced.

Keywords : 12Cr Steel, Fatigue Property, Mechanical Property, Ni and Mo Addition, SEM

1 정회원, 이진경, 동의대학교 기계자동차로봇부품공학부, 조교수, 공학박사, 부산대, 051-890-1665
E-mail: leejink@deu.ac.kr

1 Division of Mechanical, Automobile, Robot Component Engineering, Donggeui University, 051-890-1665

2* 정회원, 배동수, 동의대학교 신소재공학부, 교수, 공학박사, 나고야대학, 051-890-2288 E-mail: dsbae@deu.ac.kr

2* Division of Advanced Materials Engineering, Donggeui University, 051-890-2288

1. 서론

대표적인 마르텐사이트계 스테인리스강종인 12Cr강은 주로 증기터빈의 날개 및 제트엔진 링, 펌프 축, 보울트, 부싱 등 높은 응력을 받는 부품에 사용된다[1,2]. 이러한 부품들은 고온이나 상온의 사용환경 조건에서 높은 반복응력을 받거나 고속회전체로 사용되며, 그들의 역학적인 파괴 원인의 90% 정도가 피로현상에 의해서 파괴가 발생하게 된다[3]. 금속부품이 반복하중을 받으면 단일하중에 의해 파괴가 일어나는 응력보다 훨씬 작은 응력에서 파괴가 발생하는 것을 피로파괴라 하며, 어떤 임계응력이하에서는 재료가 파괴되지 않고 무한한 수명을 가지게 되는데, 이 임계응력을 피로한도라고 한다. 금속의 피로강도에 영향을 미치는 인자는 제조공정에 따른 표면거칠기정도, 표면의 경도, 표면의 잔류응력 성분, 비금속 개재물, 표면의 탈탄층, 전기도금층 등의 존재에 의해 상당한 영향을 받는다[4-7]. 12Cr강은 일반적으로 12%Cr과 최대 0.15%C를 함유하므로 등온변태도의 노즈부가 오른쪽으로 이동하여 경화능이 높아져 공냉으로도 마르텐사이트 조직을 얻을 수 있어, 높은 강도와 경도를 요구하는 부품에 사용된다[8]. 그러나, 내식성은 페라이트계 스테인리스강이나 오스테나이트계 스테인리스강에 비하여 나쁘며, 충격인성도 낮은 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여, C함량조절, Ni 단독첨가, Ni + Mo 복합첨가 및 Ni + Mo + V 복합첨가에 대한 연구결과에 따르면, C함량은 낮을수록(최소 0.13%) 그리고, Ni + Mo 복합첨가한 경우가 내식성도 증가시키며 충격인성도 가장 우수한 특성을 가지는 것을 알 수 있다[9]. 12Cr강의 피로특성에 미치는 Ni, Mo, W, V 등의 합금원소와 산화물분산강화(ODS)의 영향에 대한 연구는 다수 발표되었으나, Ni + Mo 복합첨가의 영향에 대한 연구결과는 아

직 없다[7,10-13] 따라서, 본 연구에서는 Ni + Mo 복합첨가가 12Cr강의 피로특성에 미치는 영향에 대한 기초자료를 확보하고자 하였다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 시편은 마르텐사이트계 스테인리스강종 중의 하나인 12Cr강(화학조성(wt%): 0.13C - 0.45Si - 0.55Mn - 0.022P - 0.012S - 0.22Ni - 11.6Cr - Bal. Fe)을 기본재료로 이용하였다. 그리고, 이 강종에 Ni과 Mo을 첨가한 12Cr-Ni-Mo강(화학조성(wt%): 0.04C - 0.44Si - 0.79Mn - 0.023P - 0.001S - 3.8Ni - 12.9Cr - 0.62Mo - Bal. Fe)을 이용하였다. 12Cr강의 시험편은 1010 °C에서 노말라이징(Normalizing)처리를 행한 후 580 °C에서 템퍼링(Tempering) 처리를 행하였다. 그리고, 12Cr-Ni-Mo강의 시험편은 970 °C에서 유냉(Oil quenching)처리 후 550 °C에서 템퍼링처리를 행하였다. 열처리가 마무리된 각각의 시험편에서, 인장시편, V-노치 샤르피 충격시험편과 피로시험편을 제작하여, 상온 인장시험, 저온(-12 °C) 충격시험, 브리넬 경도시험을 행하였으며, 이 결과를 Table 1에 나타내었다.

Table 1. The results of hardness test, tensile test and V-notch Charpy impact test

| 재료 | 경도 (HB) | 인장 강도 (MPa) | 항복 강도 (MPa) | 연신률 (%) | 단면 감소율 (%) | 충격 인성 (J, -12°C) |
|-------------|---------|-------------|-------------|---------|------------|------------------|
| 12Cr강 | 274.3 | 955.7 | 839.3 | 22.3 | 70.7 | 11.0 |
| 12Cr-Ni-Mo강 | 265.7 | 911.0 | 835.0 | 22.0 | 62.0 | 156.7 |

Table 1에서, 12Cr강의 인장강도가 12Cr-Ni-

Mo강의 값보다 약 5% 더 높으며, 12Cr-Ni- Mo 강의 충격인성은 12Cr강의 경우보다 약 14배의 아주 높은 값을 가지는 것을 알 수 있다. 마르텐 사이트계 스테인리스강인 12Cr강은 강도나 경도는 높으나, 재료의 충격흡수능이 낮아 템퍼링처리를 행하여도 충격인성은 크게 개선되지 않는다. 따라서, 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 12Cr강에 적정량의 Ni과 Mo을 첨가하여 템퍼링 처리를 행하면, Table 1에 나타난 것처럼 강도나 경도의 큰 감소없이 재료의 충격인성을 크게 개선할 수 있는 것을 알 수 있다[9]. 피로시험의 결과는 피로시험편의 표면거칠기에 영향을 많이 받으므로, 기계가공의 가공흔적에 의한 응력집중효과를 최소화시키기 위하여, 시험편의 표면을 광택연마(polishing)를 행하여, 표면거칠기는 0.5~0.8 μm 이내가 되도록 하였다. 피로시험편의 형상 및 크기는 Fig. 1에 나타내었다.

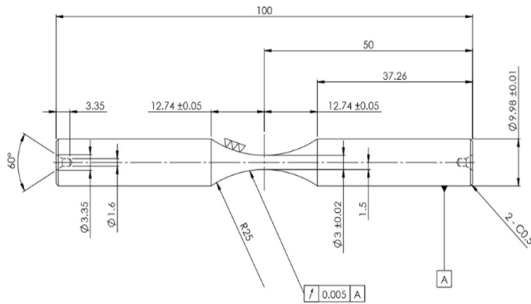


Fig. 1 Shape and dimension of specimen for rotary bending fatigue test

Table 2. The conditions of fatigue test

| 항목 | 조건 |
|------------|--------------------------|
| 피로시험 방법 | 회전굽힘 피로시험 |
| 피로시험 온도 | 실온 |
| 반복cycle 속도 | 3,150 rpm으로 고정 |
| 반복하중 범위 | 인장강도의 45~75% |
| 피로한도 설정 | 10 ⁷ cycle 이상 |

피로시험은 회전 굽힘 피로시험기(모델명: YRB200)를 이용하였으며, 그 시험조건은 Table 2에 나타내었다.

피로파괴된 시험편의 파단면을 전계방사형 주사전자현미경(FEG-SEM, 모델명: Quanta 200 FEG)을 이용하여 관찰하였으며, 파면에 존재하는 이물질들의 화학성분 분석은 에너지분산형 분광분석기(EDS, 모델명: Genesis XM2, 분해능 129eV 이하)를 이용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 S-N 곡선

Fig. 2는 12Cr강(a)과 12Cr-Ni-Mo강(b)의 피로 시험 결과를 S-N 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이, 554 MPa의 응력이하에서는 회전수가 10⁷ cycle 이상에서도 피로파괴가 발생하지 않아 피로시험을 중지한 것을 나타낸다. 그러나, 약 561 MPa이상의 응력에서는 피로파괴가 발생하는 것을 알 수 있어, 12Cr강의 피로한도는 554 MPa으로 정할 수 있다. Fig. 2(b)에서, 505 MPa의 응력이하에서는 회전수가 10⁷ cycle 이상에서도 피로파괴가 발생하지 않으나, 약 512 MPa이상의 응력에서는 피로파괴가 발생하므로, 12Cr-Ni-Mo강의 피로한도는 505 MPa인 것을 알 수 있다. 그러나, Fig. 2(b)의 화살표로 표시한 데이터(응력; 491.94 MPa, 파단 cycle; 945,630 cycle)는 피로한도인 505 MPa 이하의 응력인 491.94 MPa에서도 945,630 cycle에서 파단이 발생하였다. 그래서, 그 원인을 규명하기 위하여 그 파단면을 FEG-SEM 및 EDS로 분석한 결과를 Fig. 3~6에 나타내었다. 그리고, Table 3은 12Cr강과

12Cr-Ni-Mo강의 피로비(피로한도/인장강도)를 정리한 것이다. Fig. 2에서도 알 수 있었듯이, 두 강종의 피로한도는 12Cr강은 554 MPa이며, 12Cr-Ni-Mo강은 505 MPa를 가지므로, 12Cr강의 피로한도가 49 MPa 더 큰 값을 가지는 것을 알 수 있다.

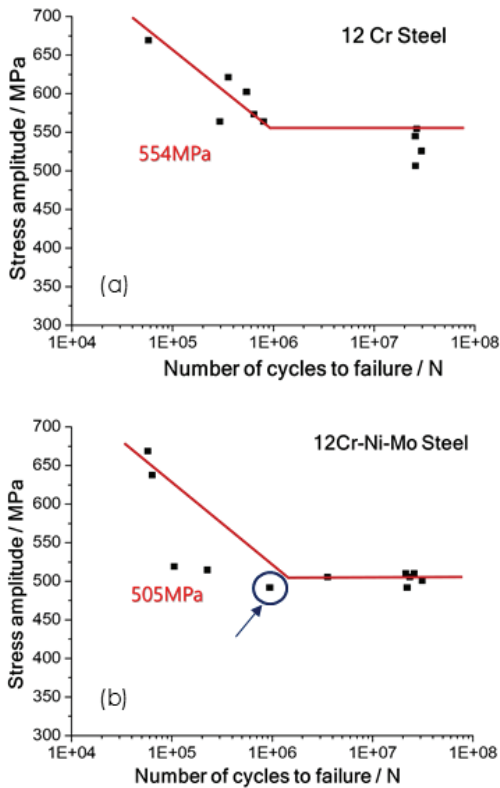


Fig. 2 Comparison of S-N curves of (a) 12Cr steel with (b) 12Cr-Ni-Mo steel

Table 3. Comparison of fatigue ratio of 12Cr steel with 12Cr-Ni-Mo steel

| | 12Cr강 | 12Cr-Ni-Mo강 |
|------|-----------|-------------|
| 인장강도 | 955.7 MPa | 911.0 MPa |
| 피로한도 | 554 MPa | 505 MPa |
| 피로비 | 0.58 | 0.55 |

일반적으로, 재료의 인장강도와 피로한도는 직선적인 비례관계가 있다[15]. 즉, 인장강도가 증가할수록 피로한도 역시 증가하며, 대부분의 피로파괴는 재료의 인장강도 이하의 응력에서 발생한다. 그리고, 동일한 재료에서의 피로비(피로한도/인장강도)는 열처리방법이나 소성가공량을 달리하여, 그 재료의 인장강도를 증가시킬수록 피로비는 감소하는 반비례의 관계를 가진다[15]. 그러나, 본 연구에서는 12Cr강에 인성특성을 부여하기 위한 Ni과 Mo을 첨가하면, 항복 및 인장강도가 감소하는 결과를 나타내므로, 12Cr-Ni-Mo강의 피로비는 증가할 것으로 예상되지만, 오히려 감소하는 것을 알 수 있었다. 즉, 본 연구에서도 기존에 알려진 바와 같이 피로비의 크기 비교는 동일한 재료의 경우에만 적용이 가능하다는 것을 알 수 있다.

3.2 피로파면

Fig. 3은 각각 12Cr강과 12Cr-Ni-Mo강의 피

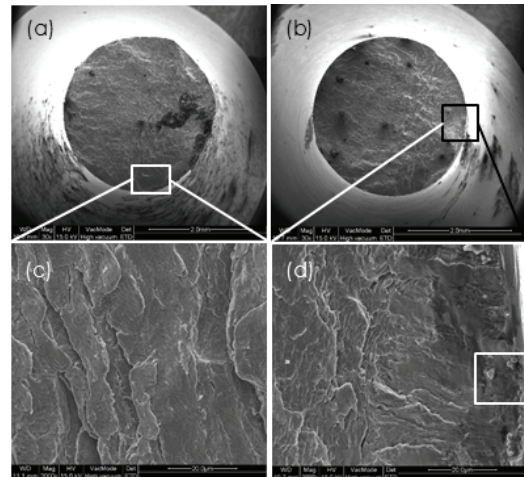


Fig. 3 SEM images of fatigue fractured surfaces of (a) 12Cr steel and (b) 12Cr-Ni-Mo steel, and its enlarged images of (c) and (d), respectively

로파면을 관찰한 결과를 나타낸다. Fig. 3(a),(c)의 12Cr강의 시편은 피로한도 이상의 응력에서 파단된 일반적인 거동을 일으킨 것을 관찰하였다. 반면, Fig. 3(b),(d)의 12Cr-Ni-Mo강의 파면 관찰에는 Fig. 2(b)에 화살표로 표기한 것과 같이, 피로한도 이하의 응력에서도 파괴되는 특이한 거동이 발생한 시편을 사용하였다. Fig. 3(a)와 (b)의 사각형 부분이 피로파괴가 시작된 부분으로, 이 부분을 확대하여 관찰하면 Fig. 3(c)와 (d)와 같이, 전형적인 피로파면의 형상인 줄무늬(striation)가 관찰된다.

12Cr강의 시편의 피로파괴의 시작점 부근 및 그 주변에서도 이러한 줄무늬가 관찰되었으나, 12Cr-Ni-Mo강은 이와는 다른 양상(Fig. 5)이 관찰되었다. 잘 알려진 바와 같이, 피로하중을 받는 재료의 표면에 존재하는 노치, 나사산, 단면의 예리한 변화, 거친 표면 등에서 응력이 집중되는 현상이 발생한다[4,7]. 항복강도 이하의 응력이 작용하여도 이들 표면결함의 끝부분에는 그 재료의 항복강도보다 큰 응력이 집중하게 되어, 소성변형이 발생하게 된다[12,13]. 소성변형으로 인하여 전위의 밀도는 증가하게 되어, 전위 상호간에 전위의 이동을 방해하게 되므로 가공경화현상이 발생하게 된다[12]. 따라서, 노치와 같은 균열 선단부는 가공경화에 의한 국부적인 강도와 경도가 증가하여 연성은 감소하게 된다. 그러므로 피로응력이 가해지면, 균열 선단부의 가공경화된 부분은 쉽게 균열이 전파되면서, 균열의 길이는 그 전파된 길이만큼 증가하게 된다[12,13]. 즉, 인장응력이 가해지는 동안에는 균열이 열리면서 균열 선단부는 응력집중에 의한 소성변형으로 가공경화되어 균열의 전파가 발생하게 되고, 압축응력이 가해지는 동안에는 균열이 닫히는 현상이 1 cycle동안에 발생하게 되어, 매 cycle이 증가할 때마다 균열의 표면에 Fig. 3(c)와 (d)와 같은 줄무늬 모양으로 나타

나게 된다[7,12,13]. 그리고, Fig. 3(d)의 사각형 부분인 피로발생원의 표면부에 다량의 불순물들이 존재하는 것을 알 수 있다.

Fig. 4에 이 불순물들 중 일부를 EDS로 분석한 결과의 한 예를 나타내었다. 피로파괴 시작지점 부근의 구형과 삼각형의 불순물입자들은 각각 (Fe, Cr, Mn, Si)계 및 (Al, Fe, Si)계의 취성의 산화물계 비금속재질들인 것으로 분석되었다.

Fig. 5는 Fig. 3의 12Cr강의 피로파면특성과 달

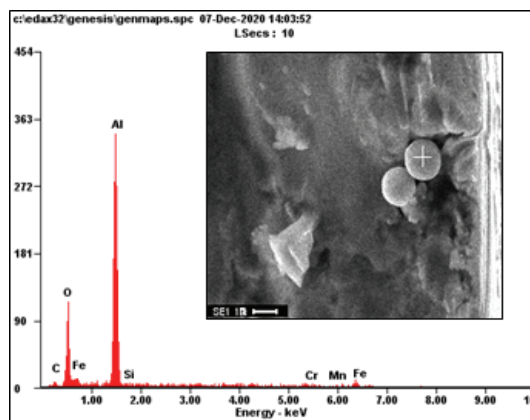


Fig. 4 An example of EDS analysis results of enlarged area marked as rectangular box in Fig. 3(d)

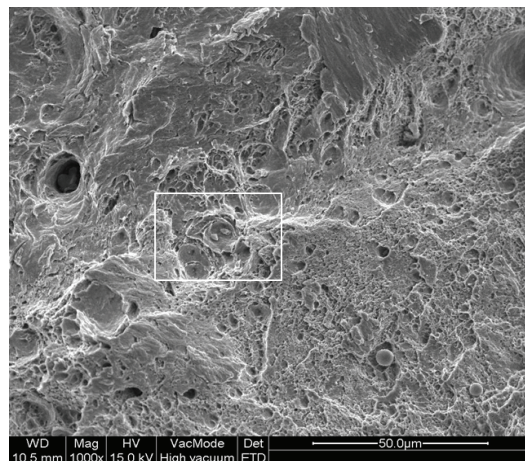


Fig. 5 SEM image of near the origin of fatigue fracture in 12Cr-Ni-Mo steel

리, 12Cr-Ni-Mo강은 피로파괴의 시작점 부근 및 그 주변에서도 피로파면과 연성파면이 혼재하는 특이한 파면양상의 영역이 존재하는 것을 나타낸다. Table 1에 나타낸 바와 같이, 12Cr-Ni-Mo강의 기계적 특성은, 12Cr강에 비하여 항복 및 인장강도와 경도가 낮고 충격인성은 14배 높아, 피로균열이 전파됨에 따라 균열이 생성되지 않고 남아 있던 시편의 잔여 단면적이 피로하중을 지탱하지 못한 결과, 전단 연성파괴가 발생하기 때문으로 판단된다. 즉, 12Cr-Ni-Mo강의 경우 일정한 피로균열이 진전된 이후에는 잔여 단면적으로 주어진 피로하중을 견디는 특성이 12Cr강에 비하여 감소한 것을 알 수 있다. 따라서, 12Cr-Ni-Mo강의 피로한도는 12Cr강의 것보다 낮아진 것으로 판단된다.

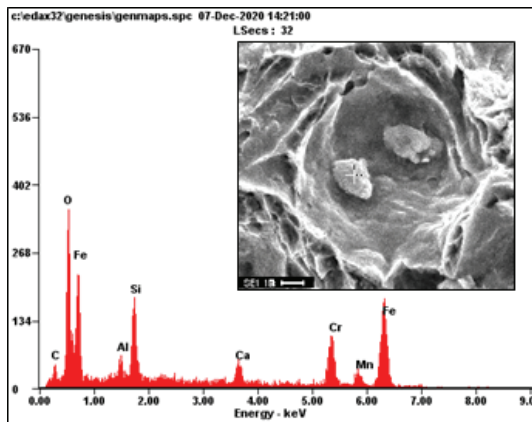


Fig. 6 An example of EDS analysis results of enlarged area marked as rectangular box in Fig. 5

Fig. 6에 연성파면의 딴플(dimple)내에 존재하는 불순물들(Fig. 5의 사각형으로 표시한 부분)을 확대하여 분석한 결과들의 한 예를 나타내었으며, 이들은 (Fe, Cr, Si, Mn, Al)계의 산화물계 비금속 개재물들이었다.

Fig. 4와 6의 분석결과에서 알 수 있듯이, 피로파괴의 시작점 부근에 존재하는 취성특성을 가진 산화물계 비금속개재물로 인하여, 피로하중하에 균열이 진전할 때 균열선단부에 존재하는 산화물은 취성특성을 가지고 있으므로 균열생성을 더욱 촉진시키게 되어 피로수명을 급격하게 감소시킨다 [12,13]. 그래서, Fig. 2(b)의 화살표로 나타내었듯이, 12Cr-Ni-Mo강의 경우 피로한도 이하의 응력에서도 피로파괴가 발생하는 특이한 파괴거동의 원인으로 판단된다.

4. 결론

- (1) 12Cr강의 피로한도는 554 MPa로 12Cr-Ni-Mo강의 505 MPa보다 49 MPa 더 높은 값을 가졌다.
- (2) 12Cr강과 12Cr-Ni-Mo강은 피로파괴의 시작점 부근의 파단면에서 전형적인 피로파면의 형상인 줄무늬가 관찰되었다.
- (3) 12Cr-Ni-Mo강은 12Cr강의 경우와 달리 피로파면과 연성파면이 혼재하는 파면 또한 존재하였다. 그리고, 피로파괴의 시작점 부근에 취성의 비금속개재물이 존재하는 경우, 균열진전을 더욱 촉진시켜 피로수명은 급격하게 감소되었다.

참고문헌

- [1] ASM Databook, Metal Progress, Vol. 116, (1979).
- [2] 손인수, 한국산업융합학회 논문집, 24, 2, 183, (2021).
- [3] Metals Handbook, Vol. 10, 8th Ed., American

- Society for Metals, Metals Park, Ohio, (1975).
- [4] Trantina G. G., *J. Test Eval.*, 9, 44-49, (1981).
- [5] Cameron T. B., Diesburg D. E., and Kim C., *J. Metals*, 7, 37-41, (1983).
- [6] Hammond R. A. R. and Williams C., *Metall. Rev.*, 5, 165-223, (1960).
- [7] Turnbull A., Crocker L., and Zhou S., *Intern. J. Fatigue*, 116, 439-447, (2018).
- [8] *Isothermal Transformation Diagrams*, United States Steel Co., pp. 48, (1963).
- [9] *The Making, Shaping, and Treating of Steel*, 9th Ed., United States Steel Co., pp. 1178, (1971).
- [10] Vogt J.-B., Bouquerel J., Carle C., and Serre I. P., *Intern. J. Fatigue*, 130, 105265, (2020).
- [11] Sun L., Bao X.-G., Guo S.-J., Wang R.-Z., Zhang X.-C., Tu S.-T., *Intern. J. Fatigue*, 147, 106187, (2021).
- [12] Chauhan A., Litvinov D., Aktaa J., *Intern. J. Fatigue*, 93, 1-17, (2016).
- [13] Abe F., *Engineering*, 1(2), 211-224, (2015).
- [14] Rietema C.J., Hassan M.M., Anderoglu O., Eftink B.P., Saleh T.A., Maloy S.A., Clarke A.J., and Clarke K.D., *Scripta Materialia*, 197, 113787, (2021).
- [15] Suresh S., *Fatigue of Materials*, 2nd Ed., Cambridge Univ. Press, (1998).

(접수: 2021.05.21. 수정: 2021.06.08. 게재확정: 2021.06.09.)