

1.4% Mn 강의 동·정적 물성에 미치는 미세조직의 영향 Effect of Microstructure on Dynamic and Static Property in 1.4% Mn Steel

신성하* · 박영태* · 이병찬**†

Sung-Ha Shin*, Young-Tae Park* and Byoung-Chan Lee**†

(Received 9 July 2020, Revision received 9 November 2020, Accepted 8 November 2020)

Abstract : This study was carried out to investigate the effect of homogeneous microstructure and inhomogeneous microstructure on the mechanical properties and fatigue property of 1.4% Mn steel. After 88% forging and heat treatment, the microstructure of 1.4% Mn steel consisted of homogeneous and inhomogeneous of pearlite and ferrite structure. inhomogeneous microstructure has thicker eutectoid cementite and more Mn and P content than homogeneous microstructure. Tensile strength and elongation of homogeneous microstructure have the similar level with inhomogeneous microstructure. Tensile strength of homogeneous microstructure and inhomogeneous microstructure is slightly lowered from surface area to the core area, but it is not that seriously different. Elongation shows no difference in value from core and surface. In a condition of 293MPa fatigue strength, homogeneous microstructure is failed at 33,730 cycles and inhomogeneous microstructure is failed at 47,191 cycles. In a condition of 253MPa fatigue strength, both homogeneous microstructure and inhomogeneous microstructure run out of 2×10^6 cycles. Also, with increasing the fatigue strength, the fatigue limit of homogeneous microstructure and inhomogeneous microstructure decreased. The static and fatigue strength of the inhomogeneous microstructure specimen are slightly high, but the degree of segregation is not large, so the presence of inhomogeneous microstructure does not have a big effect.

Key Words : Fatigue property, Mn steel, Mn microsegregation, Inhomogeneous, Open die forging

1. 서 론

최근 선박의 대형화에 따라 선박엔진 출력을

높이기 위해 엔진 부품도 대형화 되고 있다. 특히 엔진 출력을 높이기 위해 엔진 회전수는 낮추는 반면에 피스톤 로드(Piston Rod) 길이를 길게 하여

*† 이병찬(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-1291-1056) : 교수, 한국폴리텍대학 울산캠퍼스 신소재응용과
E-mail : laemian@kopo.ac.kr, Tel : 052-290-1597

*신성하(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6399-8021) : 교수, 한국폴리텍대학 울산캠퍼스 신소재응용과

*박영태(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-4625-0430) : 교수, 한국폴리텍대학 울산캠퍼스 신소재응용과

**† Byoung-Chan Lee(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-1291-1056) : Professor, Department of Applied Advanced materials, Ulsan campus Korea Polytechincs.

E-mail : laemian@kopo.ac.kr, Tel : 052-290-1597
*Sung-Ha Shin(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6399-8021) : Professor, Department of Applied Advanced materials, Ulsan campus Korea Polytechincs.

*Young-Tae Park(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-4625-0430) : Professor, Department of Applied Advanced materials, Ulsan campus Korea Polytechincs.

엔진 회전 스트로크(Stroke)를 높이고 프로펠라(Propeller)에 동력을 전달하는 샤프트(Shaft)와 프로펠라의 직경을 크게 함으로써 엔진 출력을 높이는 추세이다.¹⁾²⁾

엔진 출력을 높이기 위한 중요한 부품 중 하나인 피스톤 로드는 경화능을 증대시키기 위하여 오스테나이트 안정화 원소인 Mn³⁾을 0.7~1.5%까지 함유한 잉고트(Ingot)나 슬래브(Slab) 형태의 원소재를 사용한다. 그리고 피스톤 로드 제품 표면부터 중심부까지 균일한 기계적 성질을 확보하기 위하여 단조한 다음 퀴칭과 템퍼링 열처리하여 제조되며, 기지 조직은 펄라이트와 페라이트 조직으로 나타난다. 하지만 피스톤 로드 제품의 대형화에 따른 질량 효과에 의해 원소재에서 발생하는 Mn과 P의 미세 편석이 단조와 열처리를 통해 대부분 균질화 되어 균일한 펄라이트와 페라이트 조직으로 존재 하지만 일부 제품은 화학 성분의 미세 편석에 의해 국부적으로 불균질한 펄라이트와 페라이트 조직이 방향성을 가지고 존재한다. 이러한 불균질한 조직이 방향성을 가지고 존재할 경우 반복적인 인장과 압축 응력 환경에서는 피로강도가 낮아지는 경향을 나타나지만, 불균질 조직의 원인인 편석의 정도에 따라 대형 선박에 사용되는 피스톤 로드에는 미치는 피로강도 영향에 대해 현재까지 연구가 수행되지 않고 있다.

따라서 본 연구는 경화능을 높이기 위해 1.4% Mn을 함유한 슬래브 소재를 단조한 다음 퀴칭과 템퍼링 열처리를 통해 만들어진 펄라이트와 페라이트의 균질 조직(Homogeneous Microstructure, 이하 HM)과 불균질 조직(Inhomogeneous Microstructure, 이하 IHM)이 인장과 압축 응력 환경에서 사용되는 피스톤 로드에는 미치는 영향을 동적 및 정적 시험을 통해 조사하였다.

2. 시험 방법 및 절차

Table 1 Chemical composition of specimen (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe
0.33	0.26	1.40	0.001	0.003	0.02	0.01	0.01	Bal.

본 연구에서 사용한 시료는 POSCO에서 제조한 1.4% Mn을 함유한 슬래브 소재로 단조와 열처리한 후 HM과 IHM로 존재하는 두 가지 시료를 사용하였다. 이때 사용한 시료의 화학 조성은 Table 1에 나타내었다.

1.4% Mn을 함유한 슬래브를 1,250℃로 가열한 다음 단조를 88%로 단조하여 직경 250 mm 샤프트 형태로 제작하였다. 단조한 샤프트 시료를 250℃까지 공냉한 다음 880℃에서 수냉으로 퀴칭하였고, 550℃에서 템퍼링 열처리를 하였다.

열처리한 시험편의 HM과 IHM을 광학현미경으로 관찰하였다. 또한 펄라이트 조직 내 공석 시멘타이트 두께와 층간 간격을 분석하기 위해 주사전자현미경(SEM, Hitachi S-2400)으로 관찰하였으며, IHM 내에 미세 편석을 정량적으로 분석하기 위하여 EPMA로 관찰하였다.

HM과 IHM이 인장성질에 미치는 영향을 조사하기 위해 인장시험은 50 mm의 표점 거리를 갖는 ASTM-E8의 규격을 따라 시험편을 제작한 다음 Cross head speed를 1 mm/min으로 하여 시험하였다. 또한 조직 균질성에 따라 충격 성질에 미치는 영향을 조사하기 위해 충격시험은 2 mm V 노치를 갖은 샤르피 충격 시험편으로 제작한 다음 상온에서 시험하였고, 경도 측정은 브리넬 경도 시험기를 사용하여 5회 측정하여 평균으로 구하였다.

조직 불균질성이 피로 성질에 미치는 영향을 조사하기 위해 KS B ISO 1099:2002 규격으로 피로 시험편을 제작하였다. 고주파 피로시험(High cycle fatigue test)은 하중제어 방식으로 일정진폭 하중 응력비 -1(압축 응력 : 인장 응력 비), 피로시험 주파수(Frequency)는 15Hz, 시험편에 파단이 발생하거나 파단이 발생할 않을 경우, 최대 수명을 2×10⁶ Cycle까지 제한하여 시험하였고, 최초 하중은 인장강도의 36% 하중으로 시험하였으며, 2%씩 하중을 증가하여 최대 42%까지 시험하였다.

3. 시험 결과 및 고찰

Fig. 1은 단조한 다음 열처리 후 미세조직에 미치는 영향을 알아보기 위하여 1.4% Mn을 함유한 강을 1,250℃에서 단조를 시작하여 900℃에서 단조를 마무리 하였으며, 단조율 88%로 단조하였고, 단조한 후 880℃에서 수냉으로 퀴칭 열처리를 하였으며, 550℃에서 템퍼링 열처리한 시료의 HM과 IHM을 광학현미경과 주사전자현미경으로 관찰하였다. Fig. 1의 (a) 광학현미경 조직사진에서는 기지 조직이 펄라이트와 페라이트 조직이 균질하게 존재하고 있으나, Fig. 1의 (b) 광학현미경 조직사진에서는 일부 펄라이트 조직과 페라이트 조직이 방향성을 가지고 불균질하게 존재하고 있다. 또한 Fig. 1 (c)와 (d)의 주사전자현미경 조직사진에서는 기지 조직은 펄라이트와 페라이트 조직로 동일하게 존재하지만 HM의 기지 조직보다 IHM의 기지 조직이 더 미세하게 존재하는 것을 알 수 있다.

이러한 결과는 원소재에서 발생한 Mn과 P의 편석이 단조 및 열처리 중 오스테나이트 영역 내에서 C의 확산에 영향을 미치고,^{4,8)} 이는 결국 C의 함량 차이로 인해 국부적으로 IHM이 단조 방향으로 방향성을 가지며 나타나게 되는 원인으로 판단된다.

Fig. 2는 Mn과 P의 미세 편석이 HM과 IHM에 미치는 영향을 알아보기 위해 주사전자현미경으로 관찰하였다.

Fig. 2에서 HM의 펄라이트 내 공석 시멘타이트의 두께보다 IHM의 공석 시멘타이트가 더 두꺼우며, 공석 시멘타이트의 라멜라 간격(lamellar spacing)은 IHM이 HM보다 더 미세한 것으로 알 수 있다.

또한 Fig. 3은 HM과 IHM의 공석 시멘타이트 두께와 층간 거리를 정량적으로 측정하였다. HM의 공석 시멘타이트 두께는 0.103 μm인 반면에 IHM의 공석 시멘타이트 두께는 0.195 μm로 IHM의 공석 시멘타이트 두께가 더 두꺼우며, 라멜라 간격은 HM은 0.138 μm, IHM은 0.119 μm로 IHM이 더 미세한 것으로 나타났다. 이러한 이유는 Mn과 P의 편석이 C의 확산에 영향을 미쳐 C의 함량 차

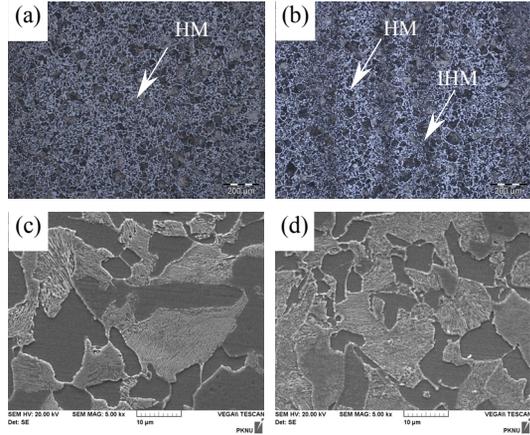


Fig. 1 Optical micrographs and SEM micrographics after forging and heat treatment.
(a) (c) HM, (b) (d) IHM

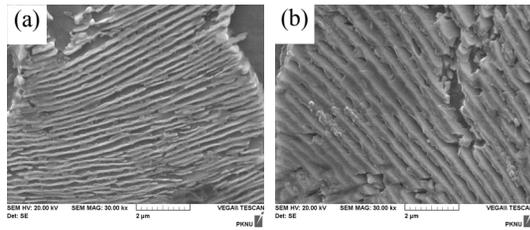


Fig. 2 SEM micrographics showing the effect of Mn and P microsegregation in 1.4% Mn Steel. (a) HM (b) IHM

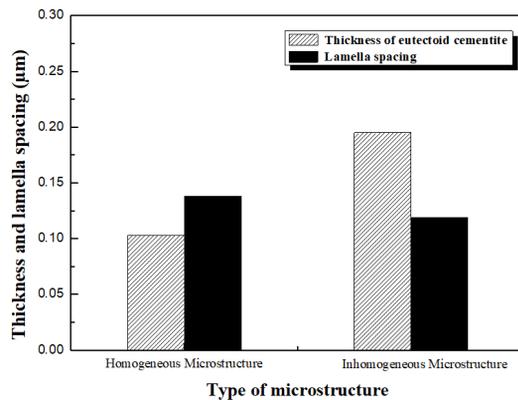
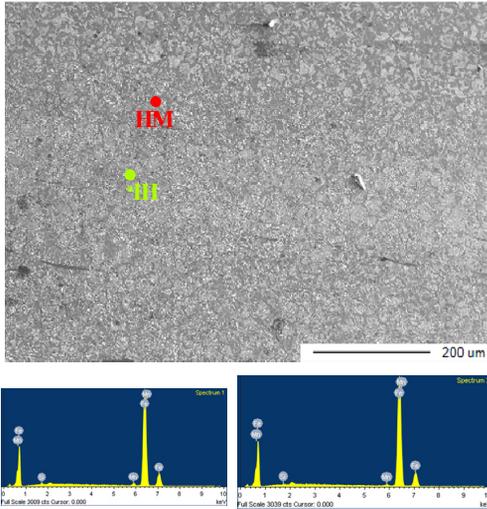


Fig. 3 Effect of Mn and P microsegregation on thickness of eutectoid cementite and lamella spacing of HM and IHM



Contants(%)	HM	IHM
Mn	1.34	2.11
P	0.005	0.068

Fig. 4 EPMA showing the effect of Mn microsegregation on HM and IHM

이에 의해 공석 시멘타이트 두께 및 라멜라 간격의 차이가 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 4는 HM과 IHM의 미세 편석을 정량적으로 분석하기 위하여 EPMA로 성분 분석을 하였다.

HM은 Mn 함량이 1.34%와 P 함량이 0.005%로 시료의 화학 조성과 유사하게 나타난 반면에 IHM은 Mn 함량이 2.11%와 P 함량이 0.068%로 시료의 화학 조성보다 높게 나타났다. 이러한 결과는 치환형 고용체 원소인 Mn과 P의 미세 편석이 단조 및 열처리 후에도 그대로 존재하는 것으로 판단된다.

Fig. 5는 HM과 IHM의 인장 강도 및 연신율에 미치는 영향을 알아보기 위해 직경 250 mm로 단조한 후 열처리한 시료의 표면으로부터 40 mm, 70 mm, 100 mm 위치에서 인장 시험편을 채취하여 인장 시험을 실시하였다. HM과 IHM 시료의 인장 강도는 표면에서 중심으로 갈수록 미세하게 낮아지는 반면에 연신율 변화가 없는 것을 확인할 수 있다. 그리고 HM과 IHM 시료의 인장강도와 연신율은 큰 차이 없이 대등한 것으로 알 수

있다. 이와 같은 이유는 Mn과 P의 미세 편석에 의해 국부적으로 C 함량 차이가 발생하나 IHM이 미세하게 존재하고 있어 인장 강도 및 연신율에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다.

Fig. 6은 HM와 IHM의 충격인성과 경도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 표면으로부터 40 mm, 70 mm, 100 mm 위치에서 시험편을 채취하여 조사하여 나타낸 것이다. 충격값은 표면에서 중심부로 갈수록 미세하게 낮아지는 반면에 표면과 중심부의 경도값은 큰 변화가 없는 것을 알 수 있다. 이 또한 IHM이 미세하게 존재하고 있기 때문이라 판단된다. 하지만 IHM이 HM보다 경도값이 높게 나타나는 이유는 Mn과 P의 미세편석으로 C의 확산을 방해하여 IHM 내 공석 시멘타이트가

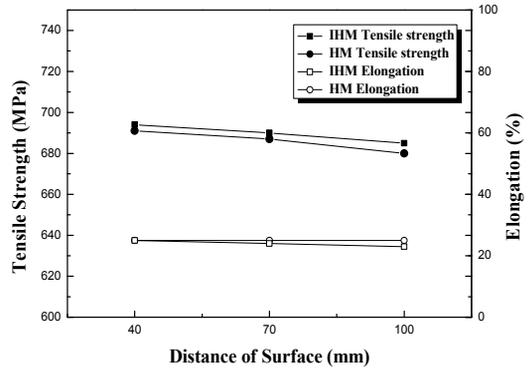


Fig. 5 Mass effect of HM and IHM on the tensile properties and elongation in 1.4%Mn steel

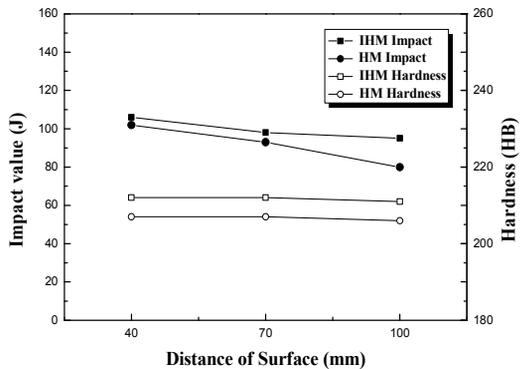


Fig. 6 Mass effect of HM and IHM on impact and hardness in 1.4% Mn steel

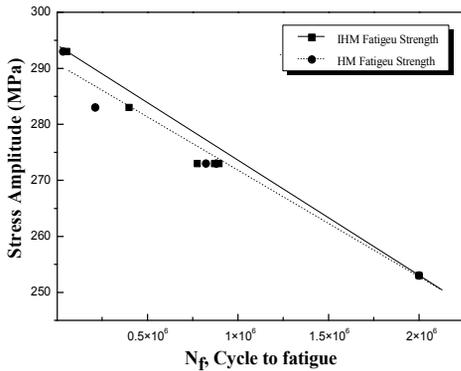


Fig. 7 Comparison of S-N Curve for HM and IHM on 1.4% Mn steel after hot forging and heat treatment

HM의 공석 시멘타이트보다 두꺼우며, 라멜라 간격도 미세하게 존재하기 때문이라 판단된다.

Fig. 7은 HM과 IHM의 피로 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 동일한 피로 응력으로 고주 기 피로 시험을 실시하였다.

최초 하중은 인장강도의 36% 하중으로 시험하였으며, 2%씩 하중을 증가하여 최대 42%까지 시험하였다. 그리고 피로 시험 중 파단되지 않을 경우 2×10^6 cycle까지 파단 최대 사이클로 시험하였다.

피로 응력이 가장 높은 293 MPa에서는 HM과 IHM은 각각 33,730 cycle과 47,191 cycle로 유사하게 시험 초기에 파단 되었으며, 피로 응력이 가장 낮은 253 MPa에서는 2×10^6 cycle까지 파단 되지 않고 Run out 되었다. 또한 HM과 IHM은 피로 응력이 높아질수록 피로 한도(Fatigue Limit)는 동일하게 감소하였다. 이전에 많은 연구에서는 C의 편석이 심할 경우 페라이트 조직과 펄라이트 조직이 전단 밴드(Shear band)가 형성되고, 이로 인해 기계적 성질의 이질성이 발생하여 응력비 -1 조건으로 피로 시험을 할 경우 밴드 영역에서 하중을 견딜 수 있는 능력이 급격히 저하되어 크랙의 원인이 되는 것으로 알려져 있다.^{9),10)} 그러나 본 연구에서는 Mn과 P의 미세 편석이 국부적으로 C의 편석을 발생시켰지만 그 정도가 미비하여 IHM이 미세하게 존재하여 피로 특성에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다.

5. 결론

1.4% Mn을 함유한 강의 미세 편석에 의해 발생한 HM과 IHM의 영향을 알아보기 위해 단조율 88%로 단조한 후 열처리한 다음 나타난 HM과 IHM의 미세 조직이 인장 및 피로 특성에 미치는 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 1.4% Mn 강의 단조 및 열처리한 다음 나타난 HM과 IHM의 조직은 펄라이트와 페라이트로 나타났으며, HM은 균질한데 반하여 IHM은 방향성을 가지며 국부적으로 존재하였다. 또한 HM 보다 IHM의 공석 시멘타이트 두께가 두꺼우며, 라멜라 간격은 치밀한 것으로 나타나며, HM 보다 IHM에서의 Mn과 P 함량이 높게 나타난다.

2) HM과 IHM의 위치에 따른 인장 강도와 연신율은 동일하게 나타나며, 인장 강도는 표면에서 중심부로 갈수록 미세하게 낮아지지만 큰 차이가 없으며, 연신율은 표면과 중심부가 동일하게 나타났다. 또한 충격값은 표면에서 중심부로 갈수록 미세하게 낮아진 반면에 경도값은 큰 변화가 없었다. 하지만 경도값은 위치와 관계없이 IHM이 HM보다 높게 나타났다.

3) 피로 응력 293MPa에서 HM은 33,730 cycle에서 파단 되었으며, IHM은 47,191 cycle 파단되었고, 피로 응력 253 MPa에서는 HM과 IHM은 파단 되지 않고 Run out 되었다. 또한 피로 응력이 증가할수록 피로한도는 동일하게 감소하였다.

4) 질량 효과에 의한 C의 미세 편석은 IHM을 나타나게 하였고, 그로인해 IHM이 존재하는 시험편의 정적강도와 피로강도는 미세하게 높게 나타나지만, 편석의 정도가 크지 않아 미세한 IHM이 존재하여도 큰 영향을 주지 않았다.

Author contributions

S. H. Shin; Conceptualization, Writing - original draft, Formal analysis and Project administration. Y. T. Park; Data curation and Validation. B. C. Lee; Structural analysis and Supervision.

References

1. Diesel School, 2012, "Structure of two stroke cycle diesel engine", National Human Resource Development Consortium, pp. 5-8.
2. J. Ellio, 2006, "Practicalities of serving very large container vessels", TOC ASIA.
3. A. Itami, M. takahashi and K. Usida, 1995, "Plastic Stability of Retained Austenite in the Cold-rolled 0.14%C-1.9%Si-1.7%Mn Sheet Steel", ISIJ. International, Vol. 35, No. 9, pp. 1121-1127.
4. J. Krawczyk, B. Pawlowski and P. Bala, 2009, "Banded microstructure in forged 18CrNiMo7-6 steel", Metallurgy and Foundry engineering, Vol. 35, pp. 45-53.
5. P. G. Bastien, 1957, "The mechanism of formation of banded structure", Journal of Iron and steel institute, Vol. 187, pp. 281-291.
6. C. F. Jaczsk, D. J. Girardi and E. S Rowland, 1956, "On banding in steel", Transactions of the ASM, Vol. 48, pp. 279-305.
7. J. Marcisz, B. Garbarz and A. Zak, 2007, "Causes of banded microstructure formation in hot rolled ferrite-pearlite steel products", Metallurgy and Metallurgical Engineering News, Vol. 74, pp. 655-665.
8. J. Marcisz, A. Zak and B. Garbarz, 2007, "Methods for improving of homogeneity and plasticity of continuous cast steel semi-product and products hot rolled of forged with small degree of reduction ratio", Transactions of the Institute for Ferrous Metallurgy, Vol. 1, pp. 51-53.
9. K. Cho, S. Lee and I. M. Park, 1991, "Localized Plastic Deformation in a Cold Rolled Steel during Dynamic Torsional Test", J. Kor. Inst. Met. & Mater, Vol. 29, pp. 73-79.
10. D. K. Kim, S. Y. Kang, S. H. Lee, K. J. Lee and J. W. Kim, 1998, "Cracking Phenomena during Cold Forging of Low Carbob Steels", J. of the Korean inst. of Met.&mater, Vol. 36, pp. 853-863.