

배기 매니폴드용 박육 고규소 구상흑연주철의 내열 특성

Heat Resistance Properties of Thin Section HiSiMo Ductile Iron for Exhaust Manifold

이도경* · 김성규** · 이병우****

Do-Kyung Lee*, Sung-Gyu Kim** and Byung-Woo Lee****

(접수일 : 2013년 04월 19일, 수정일 : 2013년 05월 24일, 채택확정 : 2013년 06월 11일)

Abstract: In this study, the microstructure, mechanical properties and high temperature oxidation characteristics of HiSiMo and HiSiMoM ductile iron for exhaust manifold were investigated. The HiSiMoM ductile iron was developed by optimization of alloying element addition and casting design. The exhaust manifold prototype was fabricated using the HiSiMoM iron and this resulted in the weight saving of 0.73kg. The microstructures of the HiSiMo and HiSiMoM irons were similar each other and graphite nodularity was 89% and 93% respectively. Tensile strengths of them were 663.5 and 674.4 MPa and Brinell hardness were 235.3 and 243.9 respectively. Both irons showed parabolic weight gain behavior in high temperature oxidation atmosphere. Oxidation layer was divided into external and internal layers. The weight gain of the HiSiMoM iron was lower than that of the HiSiMo iron after isothermal oxidation test at 900C. This should be rationalized by higher Si enrichment at the interface of the matrix and internal layer of the HiSiMoM iron.

Key Words : Exhaust Manifold, HiSiMo Ductile Iron, Graphite Nodularity, Tensile Strength, Brinell Hardness, High Temperature Oxidation

1. 서 론

자동차 산업에서 엔진의 고효율화 및 연비향상은 에너지 소비의 절감과 지구환경 보전을 위해 반드시 달성되어야 할 과제이며 최근 유가가 급등함과 더불어 배기가스규제 및 연비규제는 세계적으로 엄격해지고 있어 자동차 부품의 경량화 및 고성능화가 요

구되고 있다. 엔진의 효율향상과 배기가스 절감을 위해 배기온도가 점차 증가하고 있으며 이에 따라 터빈하우징이나 배기 매니폴드와 같은 배기시스템의 부품에 대해서도 경량화 및 고온에서 우수한 내열성이 요구되고 있다. 배기 매니폴드 소재로는 고규소계 구상흑연주철과 함께 페라이트계 또는 오스테나이트계 내열주강이 사용되고 있으나 제조원가가 비

**** 이병우(교신저자) : 부경대학교 신소재시스템공학과
E-mail : leebw@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6378

*이도경 : 부경대학교 대학원 신소재시스템공학과

**김성규 : 부경대학교 신소재시스템공학과

**** Byung-Woo Lee(corresponding author) : Department of Materials System Engineering, Pukyong National University.
E-mail : leebw@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6378

*Do-Kyung Lee : Department of Materials System Engineering, Graduate School, Pukyong National University.

**Sung-Gyu Kim : Department of Materials System Engineering, Pukyong National University.

싼 내열주강 보다는 구상흑연주철제 배기 매니폴드가 주로 사용되고 있다. 구상흑연주철은 주조성과 가공성이 우수하여 널리 사용되고 있는 주철재료로 최근에는 다량의 Si를 첨가하여 내열 즉, 고온 내산화성을 향상시킨 고규소계 구상흑연주철이 주목을 받고 있으며 구상흑연주철의 경량화 주조기술개발과 더불어 고온특성 향상을 위한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.^{1,2)}

본 연구에서는 기존의 HiSiMo 구상흑연주철을 기본으로 제품의 두께를 감소시켜 박육화 하고, 우수한 내열성과 함께 저렴한 제조원가를 가진 배기 매니폴드를 개발하기 위해 Si의 함량을 적절히 조정하여 최적합금 및 주조방안을 설계하였으며 이렇게 개발된 HiSiMoM 구상흑연주철제 배기 매니폴드 시제품을 제작하여 조직적, 기계적 성질 및 고온에서의 산화특성 등을 검토하였다.

2. 실험방법

2.1 주조품 제작의 최적 주조방안 설계

기존의 HiSiMo 보다 박육화 및 경량화 된 배기 매니폴드 주조품 제작을 위해 설계된 HiSiMoM 구상흑연주철의 화학조성을 Table 1에 나타내었다. 주조품의 응고 시뮬레이션은 Anycasting 소프트웨어를 사용하였으며, 입체 모식도를 Fig. 1에 나타내었다. 몰드는 사형을 사용하였고, 주입금속의 조성은 C는 2.5~3.0로 Si는 4.5~5.0 범위로 적절히 조정하였다. 용탕의 주입온도는 1450℃로 하였고, 주입시간 등을 검토하여 최적의 주조방안을 설계하였다.

Table 1 Chemical composition of HiSiMo and HiSiMoM(wt.%)

specimen	C	Si	Mn	Mo	Cu	Mg
HiSiMo	2.8-3.7	4.0-4.5	0.3 max.	0.8-1.2	0.1 max.	0.025 min.
HiSiMoM	2.5-3.0	4.5-5.0	0.35 max.	0.6-0.8	0.1 max.	0.025 min.

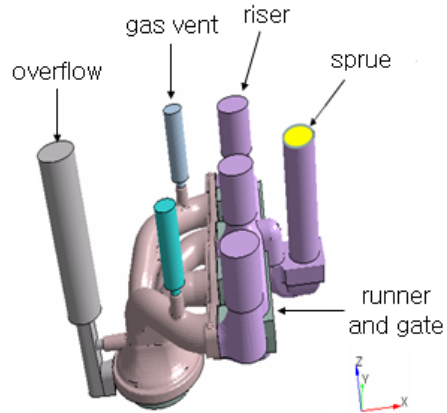


Fig. 1 3D schematic diagram of exhaust manifold for solidification simulation

2.2 미세조직 관찰 및 흑연 구상화율 측정

주조된 시제품에서 시험편을 채취하여 미세조직을 관찰하였으며 KS D 4302 규격에서 명시한 흑연 구상화율 판정방법³⁾에 따라 시험편 피검부에 대해 100배의 조직사진을 촬영하고, 흑연 구상화율을 산출하여 평균값을 구하였다.

2.3 인장시험 및 경도측정

인장시험을 실시하기 위해 주조된 시제품에서 인장시험에 사용할 시험편은 KS D 4302 규격에 따라 채취하였으며, 인장시험편의 형상 및 치수는 Fig. 2에 나타내었다. 시험기는 국내에서 제작된 만능재료시험기를 사용하였으며 20mm/min의 시험 속도로 인장시험을 실시하였다.

경도시험은 KS B 0805에서 명시한 브리넬경도시험 방법⁴⁾에 따라 압자는 Ø10mm의 강구, 시험하중은 3000kgf로 하였으며 총10회 측정결과의 평균값을 구하였다.

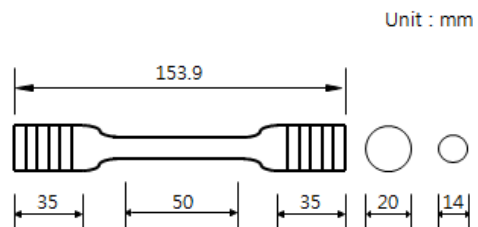


Fig. 2 Shape and dimension of tensile test specimen

2.4 TGA 및 등온산화실험

고온산화 특성을 평가하기 위해 TGA(Thermal Gravity Analysis) 및 등온산화실험을 실시하였다. TGA 분석은 상온의 대기 분위기에서 10℃/min의 속도로 800℃까지 승온 시켰으며, 800℃에서 7시간 유지하는 동안의 초기의 산화거동을 알기위하여 무게변화를 측정하였다. 등온산화실험은 10×10×2mm크기의 시험편을 제작하여 전기로에서 실시하였으며, 일반적인 대기분위기에서 5℃/min의 속도로 900℃까지 승온하고, 900℃에서 12시간부터 72시간까지 구간별로 무게변화를 측정하였다. 산화실험 후에 산화층의 구조 및 산화물의 성분 분석을 위해 산화층의 단면에 대한 SEM/EDX 분석을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 제품의 최적 주조방안 및 경량화

응고 시뮬레이션을 통한 유동해석의 결과 용탕은 1450℃에서 주입시간은 약 2초로 하여 완전 충전되어 응고 되어진 시간은 약 330초 정도 소요될 것으로 예측되었다. 건전한 구상흑연주철 제품의 제조를 위해 최적의 주조방안 설계를 통해 시제품을 주조하였으며, HiSiMoM 구상흑연주철로 주조된 시제품의 무게는 3.77kg, HiSiMo를 사용한 구상흑연주철 제품은 4.5kg으로 HiSiMoM이 0.73kg의 중량이 감소되어 경량화 주조성을 만족한 것으로 나타났다.

3.2 미세조직 특성 및 흑연 구상화율

Fig. 4는 HiSiMo와 HiSiMoM 구상흑연주철의 미세조직으로 구상의 흑연을 페라이트가 반지 모양으로 감싸고 있는 전형적인 황소 눈 조직(Bull's eye structure)으로 조직적 특성⁵⁾은 유사하였고, 흑연 구상화율 측정결과 HiSiMo는 약 89%, HiSiMoM은 약 93%였다. HiSiMo 구상흑연주철에 비해서 HiSiMoM의 구상의 흑연 입자가 보다 미세한 것으로 관찰되었으며, 매니폴드와 같은 구상흑연주철의 미성형 불량량의 주원인이 되는 백산화 조직(Cementite)은 관찰되지 않았다.

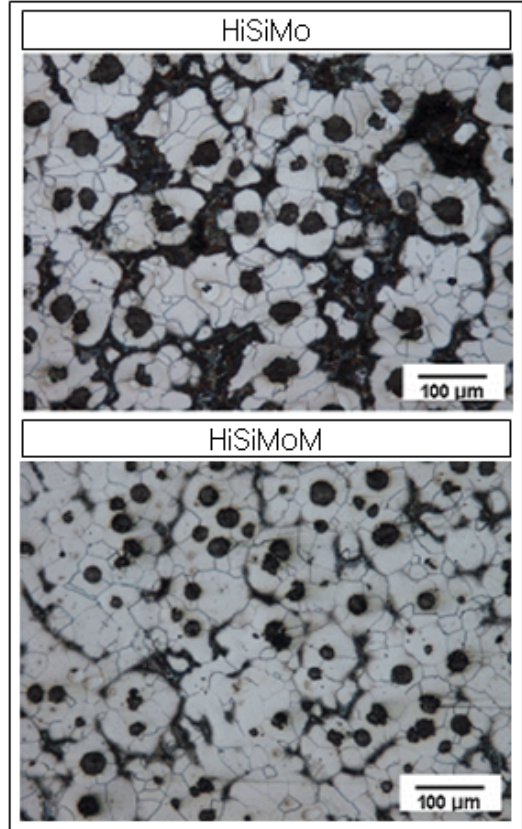


Fig. 3 Microstructure of HiSiMo and HiSiMoM

3.3 기계적 성질

기계적 성질 검토를 위해 실시한 인장시험 및 브리넬경도 측정 결과를 Table 2에 나타내었으며 HiSiMoM이 항복강도(Y.S), 인장강도(T.S), 파단연신율(B.E), 브리넬경도(HB) 등의 모든 항목에서 HiSiMo에 상회하는 기계적 물성치를 나타내었다.

Table 2 The result of mechanical property tests

Classification	HiSiMo	HiSiMoM
Section Area (mm ²)	153.9	153.9
Gage Length (mm)	50.0	50.0
Yield Strength (MPa)	548	564
Tensile Strength (MPa)	663.5	674.4
Break Elongation (%)	11.15	12.75
Brinell Hardness (HB)	235.3	243.9

3.4 고온산화 특성

Fig. 4는 800℃의 대기분위기에서 7시간 등온 산화한 TGA 결과로 HiSiMo와 HiSiMoM 구상흑연주철은 800℃ 도달 후 1.5시간까지는 2개의 구상흑연 주철 모두 무게가 급격히 증가하다가 이후부터 무게 증가가 둔화되는 포물선 형태의 무게증가 거동을 나타내었다. 800℃에서 7시간 유지후의 무게증가율은 HiSiMo가 약 100.18%, HiSiMoM은 약 100.16%의 결과를 나타내었다.

Fig. 5는 배기 매니폴드의 사용온도로 알려진 850℃보다 50℃ 높은 900℃의 온도에서 등온산화실험 후

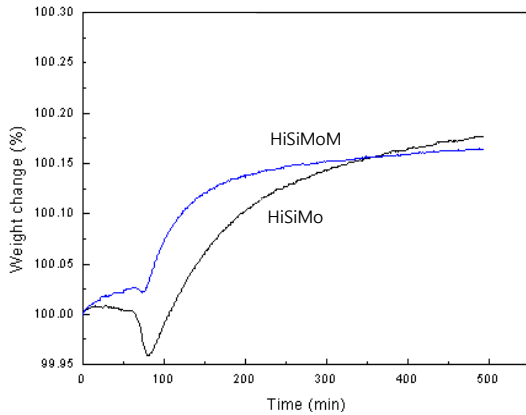


Fig. 4 The results of weight change of HiSiMo and HiSiMoM at 800℃ in air by TGA

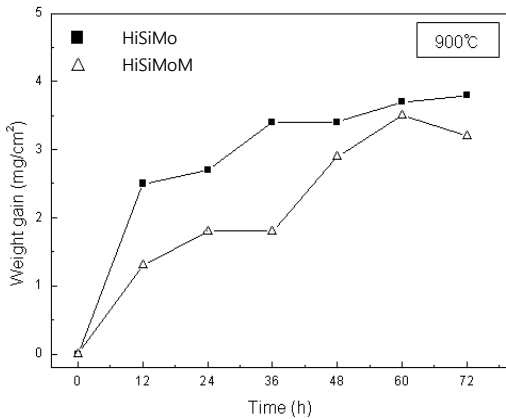


Fig. 5 Weight gain of HiSiMo and HiSiMoM after isothermal oxidation test at 900℃

무게증가를 측정된 결과이다. 72시간 등온산화 후 HiSiMo와 HiSiMoM의 단위면적당 무게 증가량은 각각 3.8mg/cm², 3.2mg/cm²로 HiSiMoM이 약 0.6 mg/cm² 더 작은 무게증가를 나타내었다. Fig. 6은 시간에 따른 단위면적당 무게증가를 시간의 평방근 함수로 나타내면 그림과 같이 직선적인 관계를 나타내어 포물선적 성장법칙(Parabolic rate law)을 따르고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 6에서 직선의 기울기에 해당하는 포물선 속도상수(Parabolic growth rate) K_p값은 HiSiMo가 9.0 × 10⁻³ mg²cm⁻⁴sec⁻¹, HiSiMoM은 6.3 × 10⁻³ mg²cm⁻⁴sec⁻¹로 HiSiMoM이 HiSiMo 보다 약 2.6 × 10⁻³ mg²cm⁻⁴sec⁻¹ 더 작은 값을 나타내었다. 900℃에서 실시한 등온산화실험 후 무게증가 및 포물선속도상수 K_p값으로 볼 때 HiSiMoM이 HiSiMo 보다 양호한 내열성을 가질 수 있을 것으로 생각된다.

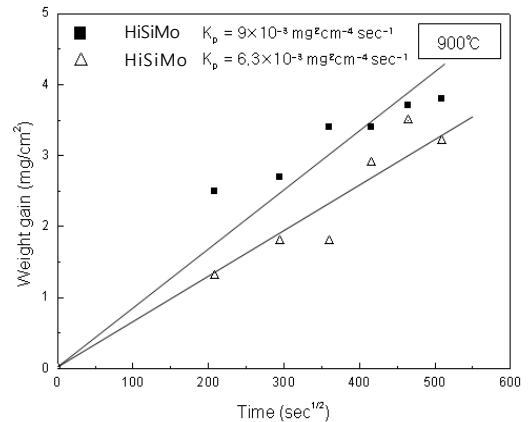


Fig. 6 Relation between weight gain and time(sec^{1/2}) of HiSiMo and HiSiMoM after isothermal oxidation test at 900℃

Fig. 7은 900℃의 대기분위기에서 100시간 등온산화실험 후 산화층의 단면에 대한 SEM/EDX 분석 결과이다. HiSiMo와 HiSiMoM은 산화시험 결과 내부 및 외부 산화층으로 구분되는 2개 구조의 산화층을 가지는 것으로 관찰되었다. EDX 면분석 결과 내부 산화층과 외부 산화층에서 Fe원소 및 O원소의 농도가 높은 농도를 나타내었으므로 산화층은 FeO계

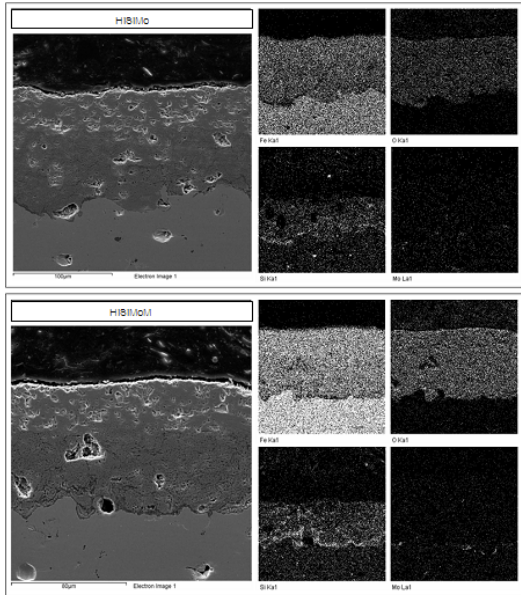


Fig. 7 SEM micrograph and EDX mapping of cross section of oxidation layer after isothermal oxidation test at 900°C

산화물로 확인되었다. Si 원소는 내부 산화층과 소재 기지 사이의 계면에 집적되는 경향을 나타내었고, HiSiMoM은 기지의 계면에 Si 원소가 더욱 농축되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 일반적으로 소재 기지의 금속 원소는 외부로 확산 유출되어 산소와 반응하고, 외부의 산소는 금속 내부로 확산 유입되어 금속 원소와 반응하는 과정을 통해 산화층이 성장하게 된다.^{6,7)} 특히, HiSiMoM의 무게증가가 HiSiMo 보다 감소한 것은 내부 산화층과 구상흑연주철 기지의 계면에 Si 원소가 높은 농도로 농축되어 있는 것과 연관된 것으로 생각된다. 이는 합금원소 및 산소가스의 확산을 방해하여 산화층의 성장을 둔화시키는 요인으로 작용하였을 것이라 생각된다.⁸⁾

4. 결 론

본 연구에서는 고규소 구상흑연주철 배기 매니폴드 소재인 HiSiMo의 Si 함량을 조절하고 최적의 구조 방안 설계를 통해 두께가 얇고 경량화된 HiSiMoM 배기 매니폴드 시제품을 제작하였으며 시제품의 미

세조직 관찰, 기계적 성질 및 고온산화 특성을 검토하였다.

1. Si 함량이 조정된 HiSiMoM 구상흑연주철로 배기 매니폴드 시제품을 제작하여 기존의 제품보다 0.73kg의 중량감소를 나타내어 경량화 효과를 얻을 수 있었다.

2. 기계적 성질 시험결과 HiSiMoM 구상흑연주철은 HiSiMo 보다 향상된 기계적물성치를 나타내었으며 미세조직적 특성은 유사하였다.

3. HiSiMo와 HiSiMoM 구상흑연주철의 등온산화 실험 결과 포물선적 무게증가 거동을 나타내었으며, 내부 및 외부 산화층으로 구분되는 산화층 구조를 나타내었다. 900°C의 대기분위기에서 실시한 등온산화 결과 HiSiMoM의 무게증가량 및 포물선속도상수인 K_p 값이 HiSiMo 보다 감소하였으며, 이는 내부 산화층과 기지 사이의 계면에 높은 농도의 Si 원소가 농축되어 있기 때문인 것으로 생각된다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2013년)에 의하여 연구되었음.

References

1. T. Kurikuma. et al., 2004, "Latest Ferrous Castings Manufacturing Technologies in Automobile Industries", J. of JFS, pp.972-978.
2. M. Park, et al., 1990, "Properties and Selection: Irons, Steels and High-Performance Alloys", ASM International, Metals Handbook, OH 44073, Vol. 1, pp.33-55.
3. KS D 4302, 2011, "Spheroidal graphite iron Castings", pp.1-17.
4. KS B 0805, 2000, "Metallic materials: Test of method brinell hardness", pp.1-15.
5. H. I. Park and H. Y. Jeong, 2007, "High Temperature Properties of Vanadium and Molybdenum Added High Silicon Ductile Iron", J. of KFS, Vol. 27, No. 5, pp.203-208.

6. N. Birks and G. H. Meier, 1983, "Introduction to High Temperature Oxidation of Metals", University of Pittsburgh, pp.30-65.
7. H. J. Kim. et al., 2006, "Effect of Grain Size on Corrosion Resistance and High Temperature Oxidation Behavior of 22Cr-15Ni-5W Super Austenitic Stainless Steels", J. of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 10, No. 3, pp.51-57.
8. Y. K. Ju. et al., 2009, "Comparative Evaluation of the Characteristics of High Si-High Mo Ductile Cast Iron, High Si-High Mo C. V. Cast Iron and Ni-resist Cast Iron", J. of KFS, Vol. 29, No. 3, pp.120-127.