

열소성변형공정을 시행한 회주철제 실린더 라이너의 재료물성에 관한 연구

김중호† · 김태형*

(원고접수일 : 2005년 5월 6일, 심사완료일 : 2005년 9월 8일)

A Study on the Material Properties of Grey Cast Iron for Cylinder Liner Treated by Thermo Plastic Deformation Process

Jong-Ho Kim† · Tae-Hyoung Kim*

Abstract : In internal combustion engines the usual material for the cylinder liner is because of its good wear resistance. Apparently this wear resistance arises from the ab iron to form a hard glazed surface when under sliding friction. When the cylinder liner wear limits, it shall be replace with new one according to the classification soci manufacturer's standards. However, adoption of alternative repairing method such a metalizing, thermo plastic deformation process became inevitable taking enormous cost renewal into consideration. In this paper, the material properties of cylinder liner of g discussed on the basis of the results of experimental work of the thermo plastic deforma the worn out cylinder liner made of grey cast iron.

Key words : Thermo plastic deformation(열소성변형), Grey cast iron(회주철), Cylinder liner(실린더 라이너), Graphite size(흑연 크기), Hard phase(경화상)

1. 서 론

디젤기관의 실린더 라이너는 피스톤 및 실린더 헤드와 더불어 연소실을 형성하므로 운전 중에 고온 고압의 연소가스에 의한 반복적인 하중을 받게 되며, 피스톤과의 마찰에 의한 내면의 마모, 연소가스에 의한 내면의 부식 및 냉각수에 의한 외면의 부식 등이 발생하게 된다. 특히 제1번 피스톤

링부근의 실린더 라이너 내면의 마모는 기관의 운전성능에 큰 영향을 미치게 된다. 즉 실린더 라이너 내면의 마모가 과도하게 진행되면 압축압력의 저하로 인한 연소 불량, 최고폭발압력의 저하로 인한 출력 감소, 블로우 바이(blow by)에 의한 시스템오일의 오손 등의 문제를 발생시키게 된다. 따라서 실린더 라이너의 설계단계에서는 상기 하중, 마모 및 부식 등을 고려하여 실린더 라이너

† 책임저자(한국해양대학교 기관시스템공학부), E-mail:kjh@mail.hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4251

* 한국조선기자재연구원

내면의 윤활 방식, 냉각 구조, 사용재료, 두께 등을 결정하고 있다.

한편 실린더 라이너의 내면은 윤활과 냉각에도 불구하고 사용시간의 경과에 따라 일정한 마모와 부식은 불가피하게 발생하므로 기관제작자와 선급단체 등은 실린더 라이너 내경의 4~7/1,000 mm를 마모한도로 규정하고 있다^{[1]-[4]}.

실린더 라이너의 재료로 가장 많이 사용되는 회주철은 우수한 주조성, 흑연에 의한 자기윤활성, 유막 유지성 등의 장점을 가지고 있으므로 사용 목적에 적합한 재료임에 틀림없지만 실린더 라이너의 재료로써 회주철을 사용하는 근본적인 이유는 회주철의 저렴한 가격에 있다고 할 수 있다.

따라서 상기 마모한도를 초과하는 실린더 라이너에 대한 확실한 수리방안은 신품으로 교체하여 사용 환경에서 회주철의 장점이 발휘될 수 있도록 하는 것이다. 그러나 현실적으로 신품 실린더 라이너의 비용은 원재료인 회주철의 저렴한 가격에도 불구하고 상당히 높기 때문에 사용자들은 수리를 통한 재생을 선호하고 있다.

마모한도를 초과한 실린더 라이너 내면을 수리하는 방법으로써 실린더 라이너 내면을 질화처리하거나 크롬도금하는 것은 오래 동안 사용되어 왔고 여러 장점이 있으나, 회주철의 자기윤활성, 유막 유지성 등이 유지되지 못한다는 단점을 가지고 있다. 최근 실린더 라이너 내면에 주철과 탄소강을 클래딩(Cladding)하는 방법, 실린더 라이너 내면에 화염용사를 시행하는 방법 등도 연구되고 있으나 아직 실용화 단계에 이르지 못한 것으로 평가된다^{[5]-[6]}.

본 연구의 목적은 사용 중 마찰 및 마모에 의해 내경이 마모한도를 초과한 회주철제 실린더 라이너의 내경을 줄이기 위하여 열소성변형공정을 시행했을 때 이 실린더 라이너에 발생하는 재료물성의 변화를 평가하는 데에 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 상기 공정을 적용한 회주철제 실린더 라이너의 화학성분, 인장강도, 경도, 흑연의 분포와 크기, 경화상(Hard phase)의 분포 등에 대한 시험과 고찰을 수행하였다.

2. 열소성변형공정

마모한도를 초과한 회주철제 실린더 라이너의 내경을 수축시키는 데에 사용되는 열소성변형공정(Thermal plastic deformation process, 이하 "TPD공정"라 한다)은 온도의 변화에 의한 금속의 수축 및 팽창을 이용하는 것으로 산술적인 계산보다는 상기 금속의 성질에 대한 많은 경험과 노하우를 집약한 것으로 알려져 있다^{[7]-[8]}.

Fig. 2.1-2.4는 TPD공정의 매카니즘을 간단하게 설명한 것이다. 그림에서 "x"으로 표시된 것은 실린더 라이너 내면에 설치한 고주파유도가열코일을 나타내며, "●"으로 표시된 것은 실린더 라이너 외면에 설치한 냉각수코일을 각각 나타낸다.

그림에서 실선은 실린더 라이너의 안쪽면과 바깥쪽면을 각각 의미한다.

이와 같이 실린더 라이너 내면에 설치한 고주파유도가열코일을 통하여 실린더 라이너 내면의 온도를 750~800℃정도까지 가열하게 되면 실린더 라이너 내면과 외면은 Fig. 2.2와 같이 "δ"만큼 반경방향으로 각각 팽창하게 된다.

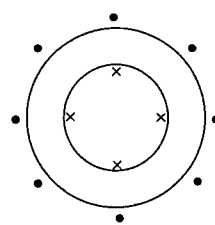


Fig. 2.1 TPD process(i)

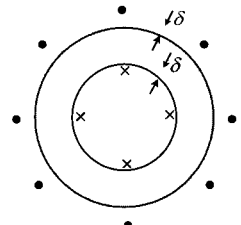


Fig. 2.2 TPD process(ii)

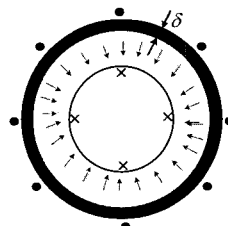


Fig. 2.3 TPD process(iii)

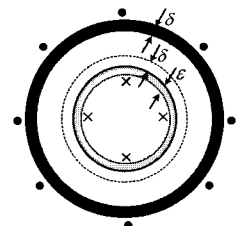


Fig. 2.4 TPD process(iv)

이어서 실린더 라이너 외면에 설치된 냉각수 코일을 통하여 실린더 라이너 외면에 냉각수를 분사시키면 실린더 라이너 외면은 분사된 냉각수에 의해서 급격하게 수축되면서 Fig. 2.3에서 나타낸 바와 같이 " δ "만큼 반경방향으로 수축하게 된다. 또 이때 실린더 라이너 내면쪽으로 압축응력이 발생하게 된다.

한편 실린더 라이너 내면은 아직 750~800℃ 정도의 온도를 유지하고 있으므로 상기 압축응력에 의해서 실린더 라이너 내면은 보다 쉽게 소성변형되게 된다. 즉 Fig. 2.4에서 보이는 바와 같이 냉각이 완료되어 실린더 라이너 내면의 온도가 상온에 이르게 됐을 때 실린더 라이너 내면의 수축 변형량은 " $\delta + \epsilon$ "로 되어 팽창시의 변형량 " δ "보다 " ϵ "만큼 더 수축된다.

결론적으로 TPD공정을 시행한 실린더 라이너 내면은 외면에 비해 상대적으로 높은 온도를 일정기간 유지하는 중에 고온으로 인하여 쉽게 내경방향으로 소성변형함으로써 최종적으로 실린더 라이너는 그 내경이 축소된다.

3. 시험 및 고찰

3.1 시험재의 제작

본 연구에서는 사용 중 그 내경이 마모한도를 초과한 Hanshin 6LUN 28형 디젤기관용 회주철제 실린더 라이너에 대하여 전술한 TPD공정을 시행하고 시험재를 채취하였다.

Fig. 3.1은 시험재의 채취방법을 나타낸 것으로 먼저 실린더 라이너의 원주방향으로 1개의 시험재를 채취하였다.

다음으로 실린더 라이너에 TPD공정을 1회 적용하고 시험재를 채취하고, 이어서 각각 2회 및 3회의 TPD공정을 적용한 후 각각 시험재를 채취하여 최종적으로 4개의 시험재(모재, 1회 TPD, 2회 TPD, 3회 TPD)를 Photo 3.1과 같이 채취하였다.

이렇게 채취한 각 시험재는 실린더 라이너의 내면에 해당되는 부분 즉 TPD공정을 적용하는 경우 고주파코일에 의해서 가열되는 면을 각종 시험면으로 사용하였다.

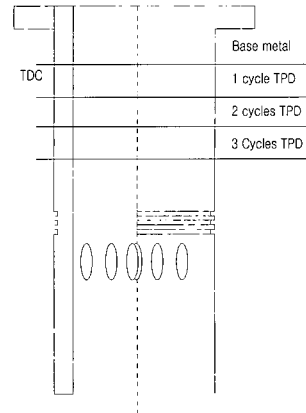


Fig. 3.1 The cutting plan of test piece from a grey cast iron cylinder liner

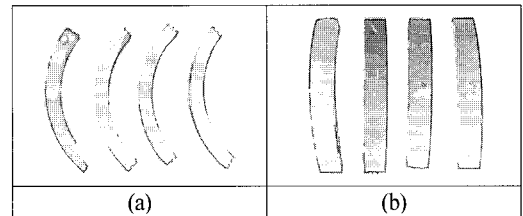


Photo 3.1 Test piece

3.2 시험결과 및 고찰

3.2.1 화학성분

Table 3.1은 상기 4개의 시험재의 화학성분을 분석한 것으로 모재와 TPD공정 적용 회수에 따른 차이는 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있다.

Table 3.1 Chemical composition of test piece sampled from a grey cast iron cylinder liner

Kind	C	Si	Mn	P	S
Base meta	2.92	0.96	0.67	0.098	0.089
1 TPD	2.89	0.96	0.67	0.098	0.089
2 TPD	2.91	0.96	0.67	0.098	0.089
3 TPD	2.92	0.96	0.67	0.098	0.089

3.2.2 인장강도

상기 4개의 시험재를 사용하여 KS규격⁽⁹⁾⁻⁽¹⁰⁾에 적합한 직경 8 mm의 8호 인장시험편을 제작하고 이 규격에 규정된 인장시험방법에 따라 인장시험

을 시행하였다. Table 3.2는 인장시험 결과를 나타낸 것으로 시험결과에서 알 수 있는 바와 같이 모재와 TPD공정 적용 회수에 따른 차이는 거의 나타나지 않은 것을 알 수 있다.

Table 3.2 The Tensile strength of test pieces sampled from a grey cast iron cylinder liner

Kind	Base metal	1 TPD	2 TPD	3 TPD
Tensile strength (MPa)	263	248.4	247.2	247.8

3.2.3 경도

Fig. 3.2는 상기 4개의 시험재에서 채취한 경도 시험편에 기준하중 1000kg 유지시간 15초로 브리넬 경도기를 이용하여 각각 15개소의 경도값을 측정된 것을 나타내고 있다. 경도측정을 브리넬로 한 이유는 마이크로 비커스나 로크웰 경도의 경우 기준하중이 작고 강구가 작아서 회주철과 같이 측정부위에 따라서 경도값의 편차가 매우 큰 재료에 적용하기가 부적절하기 때문이다.

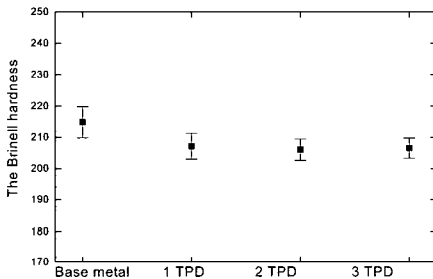


Fig. 3.2 The variation of hardness of test specimens

이 표에서 보면 TPD공정을 행한 시험편의 경도 값이 모재에 비해 낮다는 것을 알 수 있다. 이것은 TPD공정을 적용하게 되면 회주철내의 흑연의 형상이 커지기 때문에 경도값의 감소가 나타나는 것으로 판단된다. 경도값의 감소는 실린더 라이너의 내마모성을 저하시킬 수 있으나 Fig. 3.2와 같이

TPD공정 회수 증가에 따라 감소되는 경도값은 브리넬 경도 5정도로 매우 미미한 값으로 브리넬경도의 측정오차에 범위에 상당하다고 할 수 있다. 따라서 회주철제 실린더 라이너에 TPD공정을 적용하는 경우 발생하는 경도의 감소는 해당 실린더 라이너의 내마모성에 별다른 영향을 미치지 않는 것으로 평가할 수 있다.

3.2.4 TPD공정 적용에 따른 흑연크기의 변화

Fig. 3.3은 상기 4개의 시험재에서 TPD공정 적용에 따른 흑연크기의 변화를 나타낸 것이다. 그림 (a)는 TPD공정을 적용하지 않은 모재의 흑연 형상과 크기를 나타내고 있으며 사진에서 흑연의 크기는 최대 17.2mm로 관찰되었다. 또 흑연의 그 형상과 크기를 ASTM 규격⁽¹¹⁾으로 분류하면 A4(흑연 크기 : 12-25 mm)에 해당된다.

그림(b)는 TPD공정을 1회를 실시한 시험재에서 나타나는 흑연의 형상과 크기를 나타내고 있다. 상기 모재와 비교하면 흑연은 길이 방향과 폭 방향 어느 정도 성장한 것을 알 수 있다. 또 흑연의 분산 양상도 모재에 비해서 고르게 분포되어있지 않아서 경도의 저하를 예상할 수 있다. 흑연의 형상과 크기를 ASTM 규격으로 분류하면 A3(흑연 크기 : 25-50 mm)에 해당된다.

그림(c)는 TPD공정을 2회를 실시한 시험재에서 나타나는 흑연의 형상과 크기를 보여주고 있다. 흑연 형상과 크기는 TPD공정을 1회 실시한 때의 그것과 거의 유사하며 ASTM 규격으로 분류하면 A3(흑연 크기 : 25-50 mm)에 해당된다.

그림(d)는 TPD공정을 3회를 실시한 후 흑연의 형상과 크기를 보여주고 있다. 흑연의 형상과 크기는 모재와 TPD공정을 1회-2회 적용한 경우 비교하면 다소 성장한 것을 알 수 있고 ASTM 규격으로 분류하면 A3(흑연 크기 : 25-50 mm)에 해당된다.

Fig. 3.4는 상기 4개의 시험재에서 TPD공정 적용에 따른 흑연크기의 변화를 전용 해석프로그램인 Image analyzer를 이용하여 분석한 것이다. 그림에서 보면 TPD공정의 적용 회수는 흑연의 크기에 크게 영향을 미치지 않으나 TPD공정을 실행하면 실행하지 않은 경우에 비해서 흑연의 크

기가 커지는 것을 알 수 있다.

이상의 관찰을 통하여 주철제 실린더 라이너에 TPD공정을 적용하게 되면 주철내에서 흑연의 형상은 다소 불규칙하게 분산되고 그 크기도 다소 커지는 알 수 있다. 또 TPD공정의 적용 회수는 흑연의 형상과 크기에 크게 영향을 미치지 않으나 주철내의 흑연의 형상이 커지기 때문에 경도값의 감소가 나타나는 것을 알 수 있다.

3.2.5 TPD공정 적용에 따른 경화상의 분포

주철 조직에서 경화상(hard phase)라고 불리는 것은 시멘타이트와 스테다이트의 혼합조직을 말한다.

여기서 시멘타이트는 경도와 내마모성을 증가시키는 역할을 하며, 스테다이트는 주조 시의 유동성(fluidity)을 증가시키는 역할을 각각 한다.

주철이 갖고 있는 고유의 성질인 유동성과 취성은 경화상의 분포가 많을수록 커지게 된다. 따라서 대형 주조물인 선박용 내연기관의 실린더 라이

너는 주조 시의 유동성과 사용 중의 취성과괴에 대한 고려가 함께 요구된다.

대표적인 선박용 내연기관의 제조자인 MAN B&W사는 7%-8%를 경화상분포의 목표치로 제시하고 있다.

Fig. 3.5는 상기 4개의 시험재에서 TPD공정의 적용에 따른 경화상의 분포를 나타내고 있다.

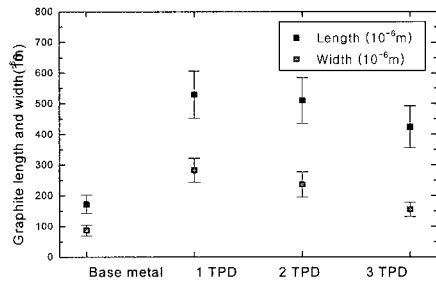
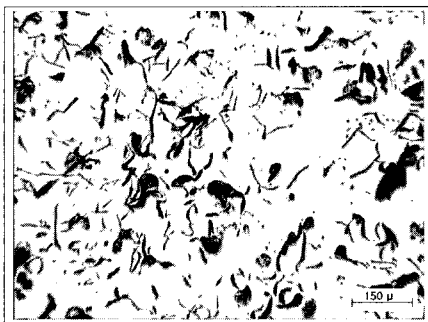
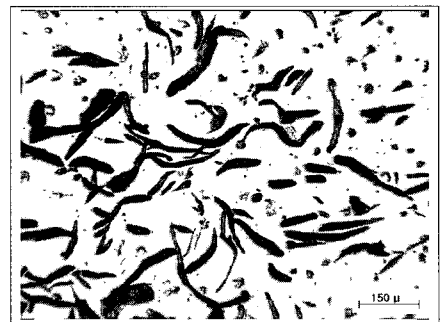


Fig. 3.4 The variation of graphite sizes at inner face of cylinder liner



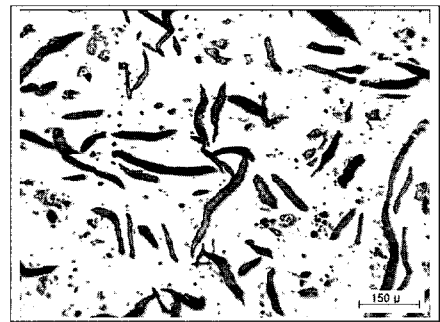
(a) Without TPD process



(b) After 1cycle TPD process

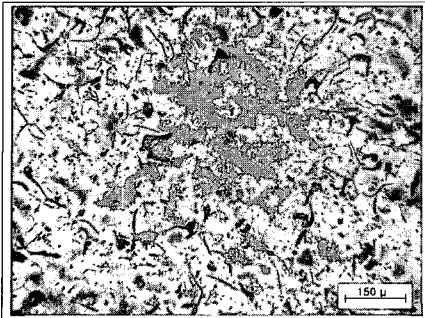


(c) After 2cycles TPD process

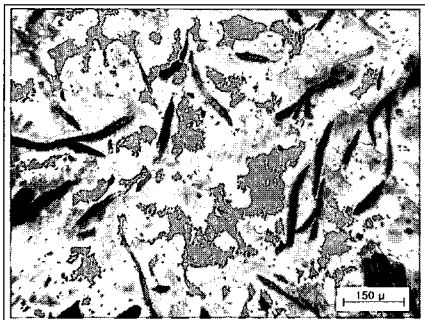


(d) After 3cycles TPD process

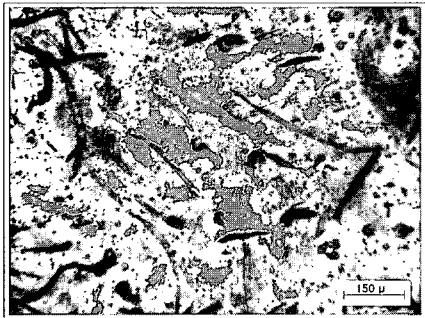
Fig. 3.3 The graphite distribution and size at inner face of a grey cast iron cylinder liner



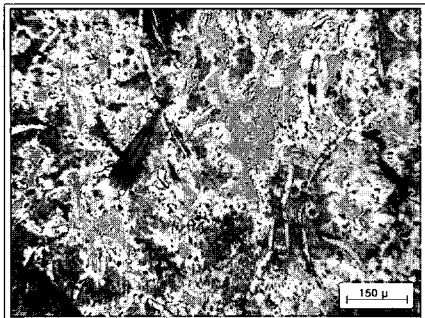
(a) (Inner face, base metal)



(b) (Inner face after 1cycle TPD)



(c) (Inner face after 2cycles TPD)



(d) Inner face after 3cycles TPD

Fig. 3.5 Distribution and marking of hard phase in inner face of cylinder liner

여기서 검은 색으로 채색된 부분은 Image analyzer를 이용하여 경화상을 채색하여 나타낸 것이다.

Fig. 3.6은 Image analyzer를 이용하여 상각 조건에서의 경화상 분포를 분석한 것이다. 이 그림에서 TPD공정의 적용 회수가 증가하게 되면 회주철제 실린더 라이너의 경화상의 분포는 미소하게 증가하지만 모두 기관제작자의 기준인 7%~8%의 범위 내에 있는 것을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서 고찰하고자 하는 TPD공정은 대형 주조물인 회주철제 실린더 라이너의 유동성과 내마모성을 지배하는 경화상의 분포에 별다른 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

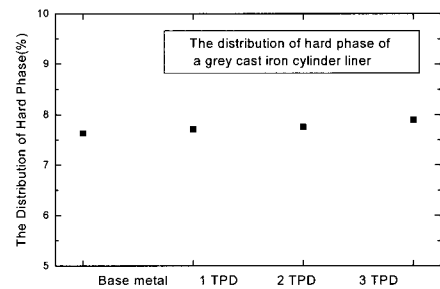


Fig. 3.6 The distribution of hard phase of inner face of a grey cast iron cylinder liner when TPD processes were applied

4. 결 론

본 연구에서는 사용 중 마찰 및 마모에 의해 내경이 마모한도를 초과한 회주철제 실린더 라이너의 내경을 줄이기 위하여 열소성변형공정(TPD공정)을 시행했을 때 이 실린더 라이너에 발생하는 재료물성의 변화를 고찰하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. TPD공정을 1~3회 각각 적용한 실린더 라이너의 화학성분은 TPD공정을 적용하지 않은 회주철제 실린더 라이너의 그것과 거의 차이가 나지 않았다.
2. TPD공정을 적용한 실린더 라이너의 브리넬 경도는 TPD공정을 적용하지 않은 회주철제

- 실린더 라이너의 그것에 비해 브리넬 경도로 5 정도 감소된다. 경도값의 감소는 실린더 라이너의 내마모성을 저하시킬 수 있으나 실제 경도값의 감소 폭이 브리넬경도의 측정오차에 범위에 상당한다고 할 수 있다. 따라서 회주철제 실린더 라이너에 TPD공정을 적용하는 경우 발생하는 경도의 감소는 해당 실린더 라이너의 내마모성에 별다른 영향을 미치지 않는 것으로 평가할 수 있다.
3. TPD공정을 적용한 실린더 라이너의 인장강도는 모재의 그것과 대체로 동등한 수준의 값을 가지고 있다. 또 TPD공정 적용회수에 따른 인장강도의 차이는 거의 미미하다.
 4. TPD공정을 적용한 회주철제 실린더 라이너에서 흑연의 형상은 다소 불규칙하게 분산되고 그 크기도 다소 커지는 알 수 있다. 또 TPD공정의 적용 회수는 흑연의 형상과 크기에 크게 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.
 5. TPD공정을 적용한 경우 경화상 분포는 표준편차를 고려해도 모두 기관제작자가 제시한 7-8%의 범위에 있음을 알 수 있다. 따라서 TPD공정은 대형 주조물인 회주철제 실린더 라이너의 주조 시의 유동성과 내마모성에 관계하는 경화상의 분포에 별다른 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] Nippon Kaiji Kyokai, Rules and Guidance for the survey and construction of steel ships, Part D 3 Internal Combustion Engine, Nippon Kaiji Kyokai, pp.145-151, 2000
- [2] Man B&W Diesel A/S, Instruction for 50-98 MC Type Engines, 707.06-40B, Man B&W Diesel A/S, 1998
- [3] Man B&W Diesel A/S, Cylinder Liner of Centrifugally Cast Iron, Quality Requirement, Man B&W Diesel A/S, 2000

- [4] Man B&W Diesel, Maintenance, Construction and Operation Manual for M.A.N Diesel Engines, Man B&W Diesel A/S, Ch. 23, George Books Ltd., 1985
- [5] Jeorge E. Totten, Steel Heat Treatment Handbook, Marcel Dekker Inc., 1999
- [6] ASM, ASM Handbook Vol. 9 Metallography and micro structure, ASM, 1996
- [7] Jon-Hwan RIM, "Numerical Simulation and Measurement of Cylinder Liner Thermal Deformation", The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol.26 No.2, pp.558-564, 1998
- [8] Francis, "Phenomenological Analysis of Plastic Spherical Indentation", Transactions of the ASME, pp.272-281, 1976
- [9] Korean Standards Association, Test Pieces for Tensile test for Metallic Materials (KS B 0801-2002), Korean Standards Association, 2002
- [10] ASTM, A247-67 Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings, ASTM, 1998

저 자 소 개



김종호 (金宗鎬)

1958년 10월생, 1982년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1995년 동대학원 졸업(박사), 1987년-1996년 3월 한국선급, 1996년 4월-현재 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부 교수



김태형 (金泰亨)

1972년 4월생, 1999년 한국해양대학교 기계소재공학부 졸업(공학사), 2001년 동대학원 졸업(공학석사), 현재 동대학원 박사과정, 현재 한국조선기자재연구원 재직