TPD법에 의해 재생된 실린더 라이너의 야금학적 고찰

◦ 이광렬* · 김종호** · 김영식***

A study on the restoring method of the abrasived cylinder liner of cast iron using thermal plastic deformation technique

Kwangryeol lee*, Jongho Kim** and Youngsik kim***

* 한국해양대학교 대학원 재료공학과
** 한국해양대학교 기관시스템공학부
*** 한국해양대학교 기계소재공학부

Abstract : The cast iron cylinder liner of the marine engine must be scrapped after its inner surface was definitely worn out due to the friction between the surface and piston ring during the operating. In this research, the restoring method of the worn out cast iron cylinder liner are discussed based on the results of experimental work of the thermal plastic deformation technique.

Key words: cylinder liner(실린더 라이너), induction heat treatment (고주파 유도가열), thermal plastic deformation(열소성변형:TPD), hard phase(경화상)

1. 서 론

내연기관의 실린더 라이너는 피스톤과 실린더 헤드와 더불어 연소실을 형성 하므로 운전 중에 고온 고압의 연소가스에 의한 반복적인 열응력과 원환응력을 받게 되며, 피스톤과의 마찰에 의한 내면의 마모, 연소가스에 의한 내면의 부식 및 냉각수에 의한 외면의 부식이 발생하게 된다. 특히 제1번 피스톤 링 부근의 실린더 라이너 내면의 마모는 기관의 운전성능에 큰 영향을 미치게 된다. 즉 압축압력의 저하로 인한 연소 불량, 최고 폭발압력의 저하로 인한 출력 감소, 블로우 바이(blow by)에 의한 시스템 오일의 오손 등의 문제를 발생시키게 된다. 한국선급의 경우 내경 ×7/10000㎜를 마모한도로 정하고 있다. 실린더 라이너의 재료인 주철은 우수한 주조성, 흑연에 의한 자기윤활성, 유막 유지성 등을 가지고 있으므로 사용 목적에 적합한 재료이며 무엇보다 저렴한 가격이 큰 장점이다.

따라서 상기 마모한도를 초과하는 실린더 라이너에 대한 확실한 수리방안은 신품으로 교체하는 것이지만 수리하여 재사용 하는 것 보다 가격이 높기 때문에 대부분의 사용자는 수리를 통한 재사용을 선호하고 있다. 실린더 라이너를 수리하는 방법은 내면을 질화처리하거나 크롬도금 하는 것은 오랫동안 사용해 왔고 여러 장점이 있으나 주철의 자기윤활성을 유지하지 못한다는 단점이 있다. 최근에는 주철과 탄소강을 클래딩(cladding)하는 방법, 실린더 라이너 내면을 화염용사를 시행하는 방법이 연구되고 있으나 아직 실용화 단계에 이르지 못한 것으로 평가된다.

본 연구의 목적은 사용중 마찰 및 마모에 의해 내경이 증가된 실린더 라이너에 고주파 유도가열 설비를 이용한 가열 및 수냉공정을 부여하여 전술한 주철의 자기 윤활성을 유지하면서 실린더 라이너를 재생하는 공법을 검증하는데 있다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실린더 라이너 재생공법

2.1.1 시스템의 구성

본 연구에서의 실린더 라이너 재생공법은 금속재료의 열탄소성을 이용하는 것으로 사용되는 시스템의 모식도는 Fig.1과 같다.

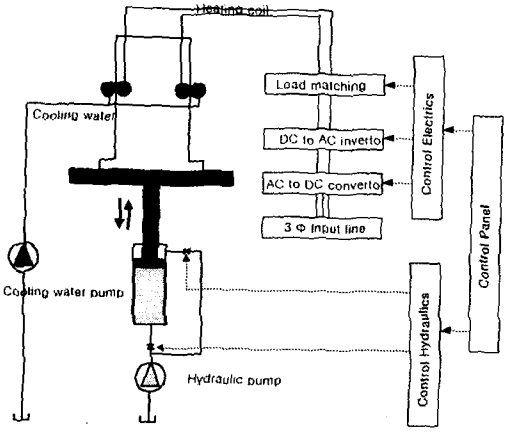

Fig.1 Schematic diagram of cylinder liner restoration system

2.2 내경 수축의 개념

마모한도를 초과한 실린더 라이너의 내경을 수축시키는 공법은 온도의 변화에 의한 금속의 수축 및 팽창을 이용하는 것이다. 유압실린더를 작동

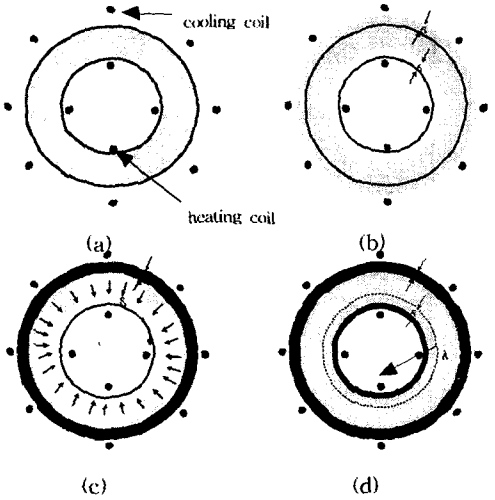

Fig.2 Contraction principle of the cylinder liner by the heating and cooling thermal cycle.

시켜 Fig. 2의 (a)와 같이 실린더 라이너 내면에 고주파가열코일, 외면에 냉각수 코일을 위치시키고 고주파 가열코일을 통하여 실린더 라이너 내면의 온도를 30~60℃/초의 가열 속도로 대략 750~800℃정도까지 가열하게 되면 Fig. 2의 (b)와 같이 내면과 외면이 δ만큼 팽창하게 되고 이어서 외면의 냉각수 코일을 이용해서 실린더 라이너 외면에서 급냉하게 되면 외면이 원주방향으로 δ만큼 수축하게 되면서 실린더 라이너 내면 쪽으로 압축응력이 발생하게 된다. 실린더 라이너 내면은 아직 대략 750~800℃정도의 온도를 유지하고 있으므로 Fig. 2의 (c)와 같이 상기 압축응력에 의해서 쉽게 소성변형 된다. 냉각이 완료되어 실린더 라이너 내면의 온도가 상온에 이르게 됐을때 실린더 라이너 내면의 수축 변형량은 팽창시의 변형량 "δ"보다 λ 만큼 더 크게 된다. 결국 상기 실린더 라이너 내면은 고온에서 쉽게 소성변형 함으로써 실린더 라이너 내경은 Fig 2.의 (d)와 같이 그 직경이 축소된다.

2.3 시험체의 제작

본 연구에서는 실린더 라이너의 재생공법을 검증하기 위해서 사용 중 내경의 마모한도를 초과한 *Mitsubishi 45/115H*형 디젤기관용 실린더 라이너에 대하여 상기 재생공법을 적용하고 시험재를 채취하였다.

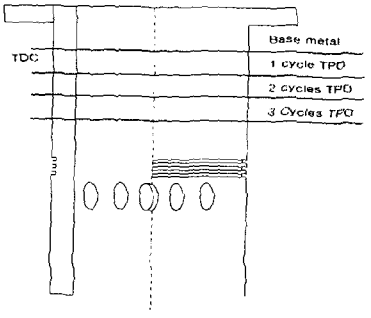

Fig. 3 Selection of test piece

Fig. 3과 같이 먼저 실린더 라이너의 원주방향으로 1개의 시험체를 채취하여 모재의 각종 성질을 분석하는데 사용하고 다음으로 제1회의 열소성변형(Thermal Plastic Deformation:이하 TPD라함)을 실시하여 시험재를 채취하고, 이어서 각각 2회 3회의 TPD를 시행한 후 시험재를 채취하였다.

3. 시험 및 고찰

3.1 시험결과

3.1.1 화학성분

Table. 1은 상기 4개의 시험재의 화학성분을 분석한 것으로 모재와 TPD 적용 회수에 따른 차이는 거의 나타나지 않는다.

Table.1 Chemical composition of test piece

Kind	C	Si	Mn	P	S
Base metal	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

3.1.2 인장강도

상기 4개의 시험재로부터 제작한 인장시험편(JIS No.8 test specimen)의 시험결과는 Table.2와 같다. 시험결과에서 알 수 있는 바와 같이 모재와 TPD 적용 회수에 따른 차이는 거의 나타나지 않는다.

Table. 2 The mechanical properties of substrate material

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

3.1.3 경도

Table.3은 상기 4개의 시험재에서 채취한 각 시험편에 기준하중 1000kg 유지시간 15초로 브리넬 경도기를 이용하여 경도값을 측정한 것을 나타내고 있다. TPD를 행한 시험편의 경도값이 전체적으로 그 회수와 무관하게 모재에 비해 낮은 것을 관찰할 수 있다. 이것은 모재의 기지 조직인 펄라이트의 층상간격은 TPD를 실행할수록 감소하나 그 입자 크기가 커지고, 주철내의 흑연의 형상이 TPD를 실행하면 커지기 때문에 경도값의 감소가 나타나는 것으로 판단된다.

Table.3 The Brinell hardness of test specimens

	Measuring points							
Kind	1	2	3	...	14	15	Mean	Std.
Base metal	217	217	217	...	212	217	214.8	4.99
1 TPD	207	207	207	...	201	217	207.1	4.14
2 TPD	207	212	201	...	207	207	206.0	3.47
3 TPD	212	212	207	...	207	207	206.5	3.20

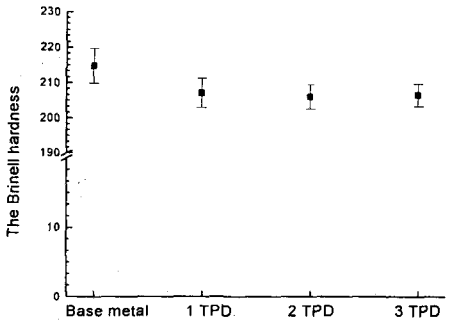

Fig. 4 The variation of hardness of test specimens

3.2 TPD 적용에 따른 그라파이트크기(Graphite size)변화

Fig. 5, 6, 7은 라이너벽의 안쪽, 중간, 바깥쪽에서 그라파이트 크기 형상을 나타낸 사진이다. TPD를 적용하지 않은 모재에서는 흑연의 형상은 내부나 중간부 외면부에서의 형상이나 크기의 차이는 거의 없고 ASTM으로 구분하면 ASTM A4에 해당한다.TPD 1회 실시후는 모재와 비교하면 길이와 폭방향으로 모두 성장된 것을 볼 수 가 있으며 흑연의 분포가 고르지 않아 경도의 저하가 예상된다. ASTM으로 구분하면 ASTM A3에 해당한다. TPD 2회 실시 후는 1회 실시 후와 크게 다르지 않으며 역시 모재 보다는 흑연의 성장이 일어났고 전체적으로 흑연의 분포가 고르지 않으므로 경도의 저하가 예상된다.TPD 3회 실시 후를 보면 TPD 1회 2회 실시한 경우 보다 흑연의 폭의 감소가 보이나 전체적으로 모재의 흑연의 형상을 비교해 보면 다소 성장한 것으로 보인다.

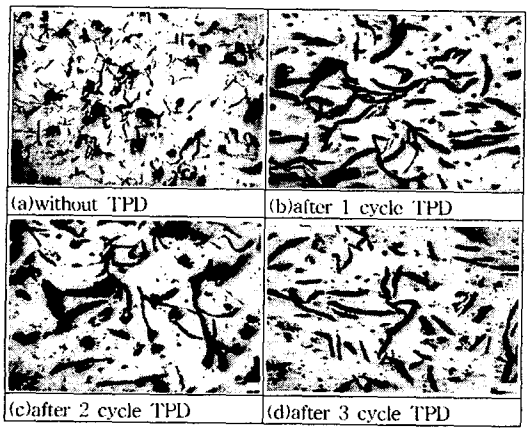

Fig. 5 The graphite size in heating side(×100)

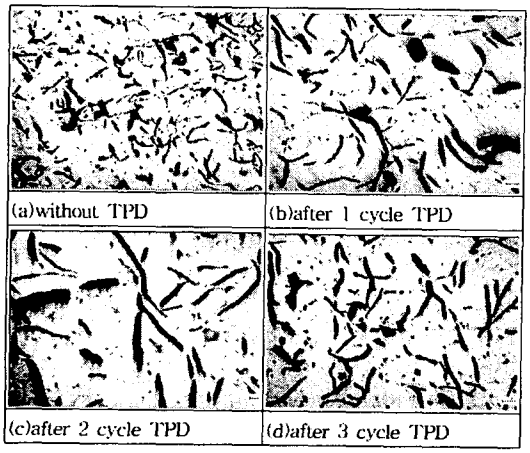

Fig 6 The graphite size in middle section(×100)

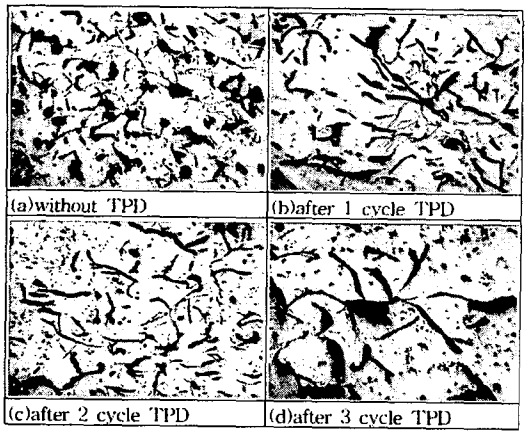

Fig 7 The graphite size in cooling side(×100)

흑연의 분포가 모재에 비해 고르지 않으므로 경도의 저하가 예상된다. ASTM으로 구분하면 ASTM A3로 분류된다.

Table.4는 상기의 사진에서 관찰한 흑연크기와 면적비를 Image analyzer를 이용하여 분석한 것을 요약하여 정리 한 것 이다.

Table 4로부터를 TPD를 적용한 경우 흑연의 비율은 모재에 비해서 크게 나타나고 있으나 TPD 적용 회수에 관계없이 흑연의 크기는 거의 일정하다고 할 수 있다. 또한 실린더 라이너의 가열부와 급랭부 모두 모재에 비해서 흑연의 크기가 증가함을 보이고 있으며, 흑연의 길이는 TPD 회수에 따른 특정변화를 보이지 않으나 TPD를 실행하면 실행하지 않는 경우에 비해서 증가하는 것을 관찰할 수 있다.

Table.4 The variation of graphite size

		per-area (Std.Dev.)	max size length ㎛ (Std.Dev.)	max size width ㎛ (Std.Dev.)
Base metal without TPD	heating side	0.1466964 (0.00117412)	172.02307 (30.173018)	86.941177 (17.591673)
	cooling side	0.16933569 (0.00169063)	284.9436 (40.26173)	206.18921 (24.882839)
1cycle TPD	heating side	0.23399417 (0.00513704)	529.10126 (77.034416)	282.86313 (38.826988)
	cooling side	0.18909264 (0.002887768)	642.51581 (67.743553)	229.33057 (30.5261)
2cycles TPD	heating side	0.19639716 (0.00496592)	510.13892 (74.852127)	236.58026 (41.00219)
	cooling side	0.1357387 (0.00136973)	348.71832 (54.616688)	354.09537 (24.069115)
3cycles TPD	heating side	0.18526554 (0.00225704)	424.14401 (68.711632)	155.46582 (22.769814)
	cooling side	0.16062546 (0.00384592)	704.52026 (76.111511)	354.09537 (38.747246)

3.3 TPD 적용에 따른 펄라이트의 변화

펄라이트의 층상간격을 자세히 고찰하기 위해서 배율 1000배의 SEM 사진을 중앙부에 대하여 촬영하여, 그 결과를 Fig. 8에 보인다

모재의 경우 층상간격은 전반적으로 넓은 것을 알 수가 있다. TPD 1회 실시 후는 펄라이트 간격이 부분적으로 좁아진 것을 볼 수가 있었다. TPD 2회 실시후 펄라이트의 층상간격은 1회때에 비해서 전체에 걸쳐 현격한 감소를 보이고 있다.

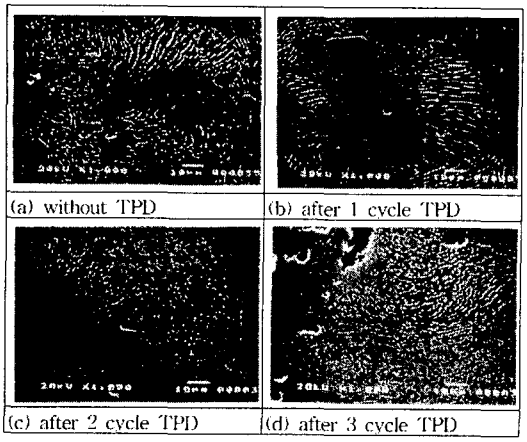

Fig.8 The variation of layer distance of pearlite in middle part (×1000)

TPD를 3회 실시한 후의 펄라이트의 층상간격은 2회에 비해 더 치밀하게 되었다. 펄라이트 결정의 크기는 그 방향성이 달라지는 부위를 입계로 보고 관찰하면 전체적으로 입자 크기는 증가하는 경향을 보이고 있다.

3.4 TPD 적용에 따른 경화상(hard phase)

주철 조직에서 경화상(hard phase)이라고 불리는 것은 시멘타이트와 스테다이트의 혼합조직을 말한다. 여기서 시멘타이트는 경도와 내마모성을 증가시는 역할을 하며 스테다이트는 주조시의 유동성(fluidity)과 취성(brittleness)를 증가시키는 역할을 한다. 주철이 갖고 있는 고유한 성질인 유동성과 취성은 경화상의 분포가 많을수록 커지게 된다. 그러나 지나치게 경화상의 분포가 많을 경우에는 시멘타이트에 의한 가공성 저하 및 스테다이트에 의한 취성 증가의 위험이 있으므로 대형 주조물로써 취성파괴에 대한 고려가 필요한 선박용 내연기관의 실린더 라이너에 대해서는 일정한 경화상 분포를 규정하고 있으며 MAN B&W의 경우 6~7%를 경화상 분포를 목표치로 제시하고 있다. Fig 9는 실린더 라이너 내면(heating side)과 외면(cooling side)에 대하여 TPD 적용전과 TPD 적용회수에 따른 경화상의 분포를 나타내고 있다. Image analyzer로 분석한 결과 TPD 적용 후에도 표준편차를 고려하여도 기관제작자가 제시한 6%를 넘어서고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 검증하고자 하는 TPD 공법은 실린더 라이너 모재의 고유한 야금학적 특성에 영향을 미치지 않으면서도 마모한도를 초과한 내경을 수축 시킬 수 있다는 것을 알 수 있다.

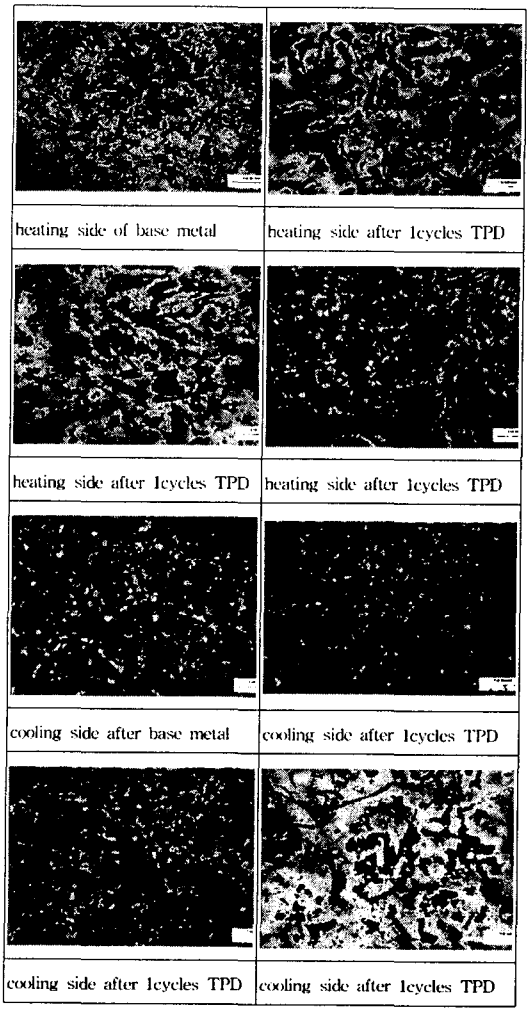

Fig.9 Distribution of hard phase(×100)

3.5 TPD 적용에 따른 내경 수축량 관찰

Table.5는 Hanshin 6LU28BG(1200 ps @ 395 r.p.m,440mmL)형 디젤기관에 TPD를 적용한 후 실린더 라이너 내경 및 외경을 계측한 것을 나타내고 있다. 내경의 경우 TPD를 적용하면 피스톤 상하 운동 구간에 해당하는 실린더 라이너 내경은 수축되며, 진원도도 전반적으로 개선되는 것을 알 수 있다.

Table.5 The varitions of inner diameter before and after TPD

	Before TPD			After TPD			Deformed amount, mm/100 (%)	
	Inner diameter							
Position	F-A	P-S	Round-ness	F-A	P-S	Round-ness	F-A	P-S
a(TDC)	284.39	281.36	3.03	279.54	277.44	2.1	-4.85 -1.71%	-3.92 -1.39%
b (100mm from TDC)	283.48	281.55	1.93	278.44	276.88	1.56	-5.04 -1.78%	-4.67 -1.66%
c (200mm from TDC)	282.1	281.46	0.64	279.55	278.54	1.01	-2.55 -0.90%	-2.92 -1.04%
d (300mm from TDC)	281.1	280.88	0.22	279.53	278.94	0.59	-1.57 -0.56%	-1.94 -0.69%
e (400mm from TDC)	280.63	280.44	0.19	278.72	278.15	0.57	-1.91 -0.68%	-2.29 -0.82%
	Outer diameter							
Position	F-A	P-S	Round	F-A	P-S	Round	F-A	P-S
A	345.9	345.85	0.05	343.13	342.75	0.38	-2.77 -0.80%	-3.1 -0.90%
B	334.91	334.86	0.05	334.62	334.6	0.02	-0.29 -0.09%	-0.26 -0.08%
C	334.86	334.83	0.03	334.94	334.86	0.08	0.08 0.02%	0.03 0.01%

4. 결 론

본 연구에서는 마모한도를 초과한 실린더 라이너의 내경을 수축시켜서 재생하는 공법이 실린더 라이너의 사용목적에 적합한가를 검증하기 위하여 시험 및 검사, 실린더의 응력해석 등을 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. TPD를 1~3회 각각 적용한 실린더 라이너의 화학성분은 TPD를 적용하지 않은 주철의 고유한 특성인 유동성, 자기윤활성 등을 해치지 않는 범위에서 적용되고 있다는 것을 알 수 있다.

2. TPD를 적용한 실린더 라이너의 브리넬 경도는 TPD를 적용하지 않은 주철제 실린더 라이너의 그것에 비해 7 H_B 만큼 감소된다. 경도값의 감소는 실린더 라이너의 내마모성을 저하시킬 수 있으나 실제 경도값의 감소 폭이 브리넬경도의 측정오차 범위에 상당한다고 할 수 있다. 또 TPD 적용회수에 따른 경도 변화는 거의 없는 것을 알 수 있다. 따라서 경도 감소에 대한 별도의 고려는 필요하지 않은 것으로 사료된다.

3. TPD를 적용한 경우 흑연의 비율은 모재에 비해서 크게 나타나고 있으나, TPD 적용 횟수에 관계없이 흑연의 크기는 거의 일정 하다고 볼 수 있다. 흑연의 크기가 커지는 경우 발생하는 경도 저하는 전술한 바와 같이 실린더 라이너의 사용에 영향을 미치지 않을 것으로 사료된다.

4. TPD를 적용한 경우 경화성 분포는 표준편차를 고려해도 모두 기관 제작자가 제시한 6%를 넘어서고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 TPD 공법은 실린더 라이너 모재의 고유한 야금학적 특성에 영향을 미치지 않으면서 마모한도를 초과한 내경을 수축 시킬 수 있다는 것을 알 수 있다.

5. TPD 적용에 따른 내경 수축량은 요구되는 1%에 거의 만족 한다고 할 수 있다.

참고문헌

(1) 김영식,김윤해 공저 : 최신기계재료학:1998
(2) 양훈영 :신 금속 재료학 :1996
(3) 강춘식 : 주조공학 :2000
(4) ASM: ASM Handbook Vol. 1 (Properties and selection: Ferrous alloys and special-purpose materials) ASM (1997)
(5) ASM: ASM Handbook Vol. 2(Properties and selection :Non-Ferrous alloys and special-purpose materials) ASM (1997)
(6) ASM: ASM Handbook Vol. 9(Metallography and micro structure) ASM (1996)