

피스톤 링그루브의 레이저 열처리

송영기, 서성재
쌍용중공업(주) 엔진기술연구소

Laser Hardening of Piston Ring Groove

Y.K. Song and S. Suh
Engine Research Institute
Ssangyong Heavy Industries Co. Ltd., Changwon, Kyungnam 641-050

ABSTRACT

Laser hardening for the piston ring groove of ductile cast iron was tried. Mechanical and microstructural investigation for the hardened area indicated that the laser heating technique could replace conventional induction hardening process completely and further showed that post grinding process would be eliminated by minimizing bulging of heat treated area. In laser hardening, the volume increase caused by martensitic phase transformation proved to be less than $10\mu\text{m}$, which insures no post machining on the hardened surface. As expected, the depth of hardening was inversely proportional to the beam scanning velocity and the highest surface hardness was obtained at the beam velocity of 0.75m/min. Heat treatment using phosphate coating demonstrated quite comparable result to the case of graphite susceptor.

1. 서 론

선박용이나 산업용(발전용) 중속 디젤엔진의 피스톤에는 연소실로부터의 열용력과 기계응력에 대해 충분한 내구성을 갖는 구상흑연주철이 주로 사용된다.¹⁾ 그러나 대부분 엔진에 사용되는 연료가 저질유이기 때문에 연소 부산물인 황화물에 의한 부식은 물론 탄소의 침적에 따른 피스톤 구성품, 즉 피스톤링과 링그루브의 마모가 촉진되어 피스톤 사용 수명에 직접적인 영향을 미친다. 이러한 마모를 최소화시키기 위해 피스톤링과 접촉하는 링그루브 양면에 경화열처리를 하게 되는데 일반적으로 고주파경화처리가 사용되어왔다. 그러나 피스톤 링그루브의 간극이 약 4mm 정도로 좁은 중속디젤엔진의 피스톤에 고주파경화처리를 할 경우 피스톤 예상 사용수명인 약 60,000시

간²⁾ 유지를 위해 필요한 경화두께보다 깊게 열처리가 되며 그 결과 열처리된 부분의 소재용기가 발생한다. 열처리후의 이와 같은 원소재 변형은 과도한 양의 마르텐사이트 변태에 의한 것으로서 열처리공정 이후에 용기부분에 대한 가공공정이 추가되어야 하므로 피스톤 제조원가의 상승요인으로 작용한다. 그러나 링그루브 간극이 4mm로 매우 좁아 최적의 열처리 결과를 얻기 위한 소형 코일제작이 현실적으로 어려워³⁾ 따라서 링그루브의 고주파경화처리에는 원소재 변형이 항상 수반된다. 이러한 문제를 근본적으로 해결할 수 있는 방안이 레이저를 이용한 표면열처리이며 본 논문에서는 실제 1,000kW급 디젤엔진에 사용되는 피스톤의 링그루브에 대한 레이저 열처리 시험 내용을 다루고자 한다.

레이저를 이용한 재료의 열처리에는 고밀도의 에너

지 열원이 사용되기 때문에 종래의 고주파경화 처리를 통해서 얻어 수 없었던 여러가지 유용한 성질들을 실제 응용할 수 있다.” 우선 고밀도의 열원에 의해 재료의 표면을 급속히 가열하기 때문에 소재 내부로의 열확산이 억제되며 따라서 상변태량이 많은 고주파경화처리에 비해 내부응력과 열처리에 따른 재료변형이 최소화된다. 즉 경화깊이를 용이하게 제어할 수 있어 필요 이상의 열처리가 됨으로 인해 발생하는 원소재 변형을 방지할 수 있으며 결과적으로 후연마 공정을 생략할 수 있다는 큰 장점이 있다. 실제 피스톤 사용 수명을 보증하기 위해 일반적으로 요구되는 피스톤 링그루브의 경화깊이는 최소 0.3mm 정도이나 기존의 고주파경화처리에 의한 경화깊이는 1.0mm 이상으로서 약 3배 이상의 경화층이 형성된다.⁵⁾ 또한 요구되는 경화폭인 최소 5.2mm를⁶⁾ 얻기 위해 열처리 코일이 피스톤 링그루브 안쪽까지 접근해야 하기 때문에 고주파경화처리의 경우 링그루브 바깥쪽과 안쪽의 경화깊이 및 경화폭이 균일하지 않아 그만큼 소재변형 발생율이 높다. 레이저열처리를 이용함으로써 얻을 수 있는 잇점은 균일한 경화패턴 형성 이외에도 빠른 시간내에 열처리가 가능하다는 것을 들 수 있으며 이는 작업생산성 향상과도 직결된다.

본 논문의 내용은 시제 생산하고 있는 디젤엔진 피스톤 링그루브에 레이저열처리를 적용하기 위한 기본 실험을 다루고 있으며 경화깊이, 경화폭에 영향을 미치는 레이저빔의 이송속도 및 빔흡수계 등의 변수에 대한 정량적 고찰을 하고 있다. 미세조직 변화의 측면과 기계적 성질 관점에서 레이저열처리에 대한 적용성 평가가 추가되고 있다.

2. 실험방법

2.1 피스톤 링그루브 구조

효율적인 연소가 이루어질 수 있도록 피스톤 상단부에 세개의 압축링(Compression Ring)이 위치하며 세번째링 바로 밑에 한개의 Oil Scraper Ring이

추가되는데 이 Scraper Ring은 매 연소사이클마다 실린더라이너 벽면의 윤활유를 회수하는 기능을 갖는다. 그러나 실제로 상부 두개의 링이 압축기능을 갖기 때문에 열처리하는 링그루브는 상부의 두개이며 세번째 압축 링그루브와 Scraper Ring Groove는 열처리하지 않는다. 다만 세번째 링그루브는 두번째 링그루브의 열처리에 따른 소재변형(Bending)을 방지하기 위해 링그루브의 윗쪽면을 열처리 한다. 개략적 형상 및 치수, 그리고 해당 피스톤에서 요구되는 열처리시양은 Fig. 1과 같다.

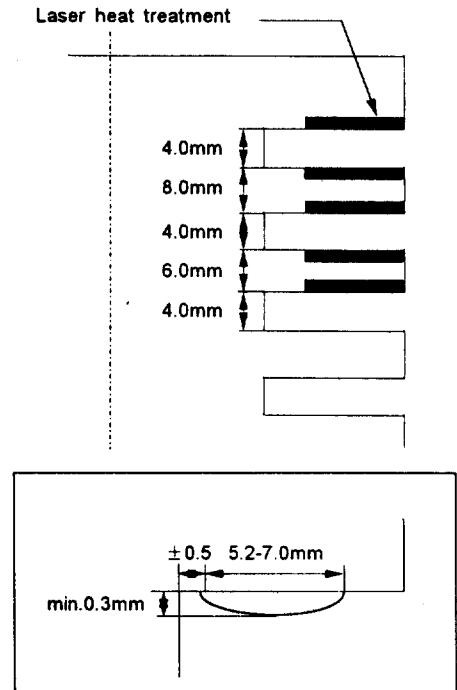


Fig 1. Hardening specifications and piston ring groove geometry

2.2 실험시편

링그루브 레이저열처리시 실험에 사용된 시편은 약 1,000kW 급 엔진에 사용되는 피스톤으로서 국내에서 역설계되어 제작된 국산시제작품이며 그 재질은 구상흑연주철(JIS, FCD 60)로서 화학조성은 Table 1.과 같다.

Table 1. Chemical composition of FCD 60

(wt.%)

	C	Si	Mn	P	S
FCD 60	3.24	2.28	0.4	0.05 이하	0.02 이하

시편의 기지조직은 10% 미만의 페라이트와 90% 이상의 펄라이트로 이루어진 혼합조직이다. 흑연의 구상화율은 85% 이상이며 흑연의 크기는 평균 60 μm이었다. 피스톤 주조후 용력제거 열처리를 하였으며 피스톤에 링그루브를 조도 Rz 1.8로 가공한 후 가공부위를 아세톤으로 레이저열처리면의 이물질 제거하였다.

2.3 실험장치

실험은 한국기계연구원(KIMM, 창원)이 보유하고 있는 절단, 용접용 헤드와 열처리 헤드를 갖고 있는 다목적 1.5kW급 CO₂레이저(미국, Rofin-Sinar 1500) 시스템을 사용하였다. 본 실험에 사용된 레이저 열처리 시스템의 구성은 Fig. 2와 같다. 이 열처리 시스템은 레이저 열처리의 열원을 공급하는 레이저 발전기, 집광렌즈를 가지고 있는 로타리 헤드, 그리고 피스톤의 이송 및 회전속도를 정확하게 조절할 수 있는 보조장치로 이루어져 있다.

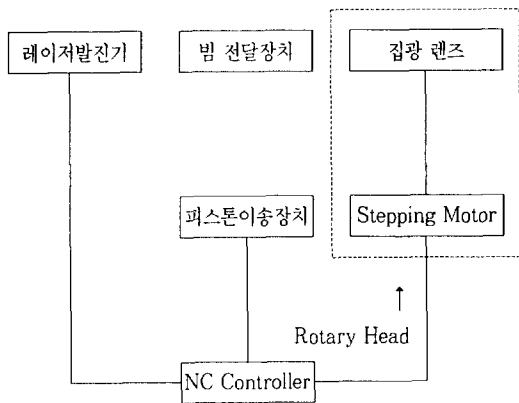


Fig. 2 Schematic diagram of the laser heat treatment

2.4 레이저 열처리

본 실험에서는 경화패턴 즉 경화깊이, 경화폭, 표면경도의 사양 만족과 열처리의 연마가공을 생략하기 위해 링그루브의 표면온도가 용융점까지 상승하지 않는 실험조건에 초점을 맞추어 실험하였다. 레이저 표면경화 처리시 경화패턴에 미치는 주요 인자는 레이저빔 모드, 빔직경, 빔이송속도, 레이저빔출력이다.⁷⁾ 이들 가운데 빔모드와 빔직경을 일정하게하고 빔이송속도는 0.5m/min, 0.68m/min, 그리고 0.75m/min에서 실험하였으며 레이저 출력은 1.2kW로 고정하였다. 피스톤 링그루브와 빔의 설치는 그림 3과 같으며 반대면을 열처리할 경우 Rotary Head를 조정한다. 빔흡수체는 일반적으로 사용되는 알코올에 흑연분말을 혼합(흑연 30% by vol.)시킨 용액을 1차 실험대상으로 하였다. 이에 부가해서 피스톤 최종가공후 피스톤 외부표면에 인산염 피막처리를 하는데 이 인산염코팅을 빔흡수체로 이용하는 방안, 즉, 레이저열처리를 피스톤 가공의 마지막 공정으로 변경하는 방안을 열처리를 통해 시험하였으며 각 흡수체에 따른 경화패턴 및 표면상태를 관찰하였다.

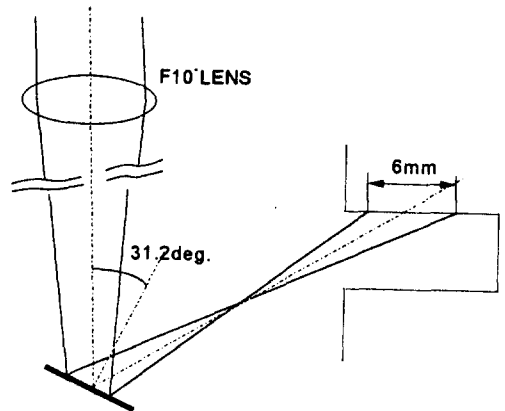


Fig. 3 Laser beam set-up

2.5 기계적 성질 및 조직관찰

레이저 열처리된 피스톤 링그루브를 절단하여 기계적으로 연마한 후 미소경도 시험기(독일, ZWICK)를 사용하여 경화층 최외부 표면으로부터 0.05mm 간격으로 측정하여 들어가 경도값이 HV 450이 되는 곳까지를 경화깊이로 정하였으며, 경화폭은 광학현미경을 이용하여 측정하였다. 열처리후의 미세조직은 2% Nital 부식액을 이용하여 관찰하였다. 레이저 열처리 전후의 표면조도 및 표면용기량은 Rank Taylor Hobson사 S6P(영국) 표면조도 측정기를 사용하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 경화깊이와 빔이송속도

Fig. 4는 레이저 열처리한 시편의 단면조직에 대한 광학현미경 사진으로 경화패턴을 나타낸다.

Fig. 3과 같은 형태로 소재에 레이저빔이 조사되었기 때문에 빔 중앙부에 해당하는 부분이 가장 깊게 열처리되며 양쪽으로 경화깊이가 감소하는 Profile을 보여주고 있다. 이러한 Profile은 고주파경화처리의 경우에도 유사하게 나타나나 그 깊이에 있어서 최

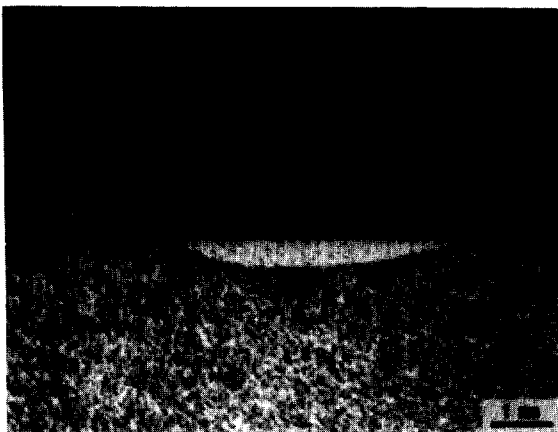


Fig. 4 Microsection of laser hardened specimen (P : 1.2kw, V : 0.68m/min)

소 3배 가량 깊다. 레이저 열처리에서 경화깊이에 영향을 주는 가장 큰 요인은 레이저 출력과 빔이송속도이다. 이들은 가열 및 냉각속도를 결정하고 미세조직 변화량 및 경도분포, 그리고 열처리 후의 잔류응력에도 영향을 미친다. 본 실험에서는 레이저 출력을 일정하게 하고 빔이송속도(피스톤 회전속도)를 0.5~0.7m/min 까지 변화시키면서 이에따른 경화깊이의 변화를 관찰하였다. 레이저 출력 1.2kW로 일정할 때 빔이송속도에 따른 경화깊이는 Fig. 5와 같다.

Fig. 5에서 볼 수 있듯이 빔이송속도가 낮을수록 경화깊이는 깊어짐을 알 수 있다. 이는 레이저와 재료의 작용시간(Interaction Time, 빔의 한면길이를 이송속도로 나눈 값)이 길어져 소재내부로 입열량이 증가하기 때문이며 따라서 열처리표면의 용기량도 증가한다. 각각의 이송속도에서의 표면경도는 빔이송속도가 빠를수록 높게 나타났는데 작용시간이 짧을수록 냉각속도가 빠르다는 사실과 연관지어 설명할 수 있다. Fig. 6은 레이저 열처리시 발생하는 경화부의 용기를 표면조도 측정기로 측정한 것으로 총 변화량은 열처리 조건에 따라 5 μ m 에서 10 μ m가 되었다. 이

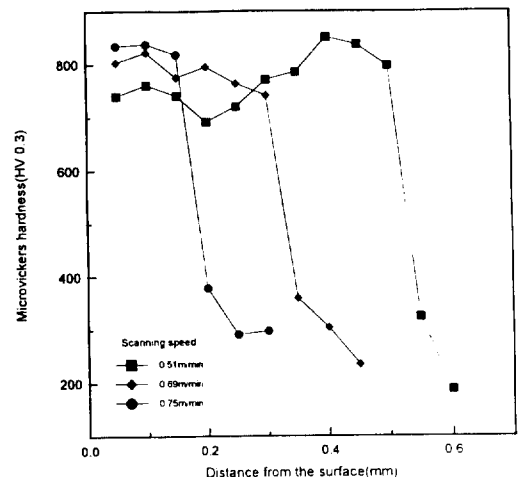


Fig. 5 Microhardness profile of laser hardened zone for various scanning speed at the laser power 1.2kw.(Coating : Graphite)

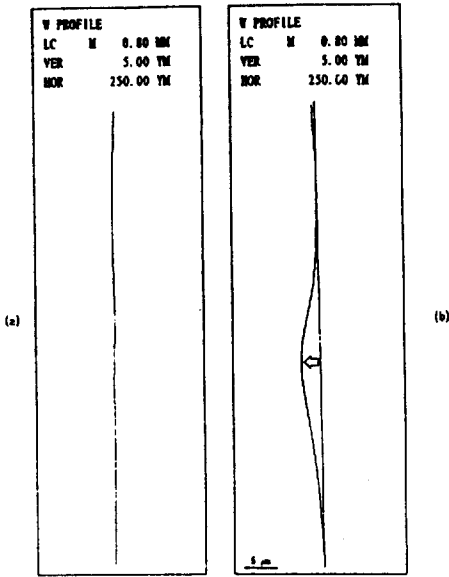


Fig. 6 Surface profile
a) before as b) after heat treatment

는 피스톤 링그루브와 링 사이의 적정간극인 0.45mm를 유지하는데 전혀 영향을 주지 않는 미소량이기 때문에 고주파경화처리에 반드시 수반되는 후연마공정을 생략할 수 있다. 이 변형량에는 레이저 열처리시 마르텐사이트로의 변태에 수반되는 조직팽창에 의한 변형분, 즉, 링그루브에 수직한 방향으로의 용기량과 반경방향으로의 동일한 팽창에 따른 굽힘변형분(Bending)이 혼합되어 있으나 위에 언급되었듯이 굽힘에 의한 변형은 반대면을 열처리하여 역방향의 굽힘변형을 일으킴으로써 상쇄시킬 수 있다. 동일 피스톤의 열처리에 관한 유한요소법을 이용한 해석에서는⁸⁾ 상변태에 의한 용기량보다 굽힘에 의한 변형분이 더 큰것으로 추정하고 있어 실제 반대면을 열처리하여 굽힘변형량을 최소화할 경우 상변태만에 따른 열처리부위 용기량은 위의 측정치 5 μ m이나 10 μ m보다 적어질 것으로 판단된다.

3.2 미세조직의 변화

Fig. 7은 레이저 열처리된 구상흑연주철에 대한 광학현미경 조직사진으로서 흑연으로부터 페라이트 쪽으로 탄소가 확산되어 들어가는 현상을 분명히 확

인할 수 있으며, 구상흑연이 표면에 그대로 존재하는 것으로 보아 레이저 빔의 흡수로 인한 표면용융은 전혀 발생되지 않은 것으로 판단된다. Fig. 8, 9는 레이저 열처리된 구상흑연 주철의 단면조직을 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 경화층의 표면 및 중간부분을 관찰한 조직사진이다. Fig. 8에서는 모든 펄라이트조직이 플레이트(Plate 또는 Accicular)마르텐사이트로 변화된 것을 관찰 할 수 있다. 경화층의 중

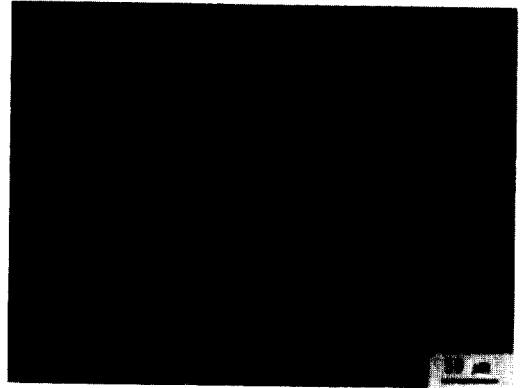


Fig. 7 Bull's eye structure after laser heat treatment



Fig. 8 Scanning Electron Micrograph of hardened area near surface

간부분을 관찰한 Fig. 9에서는 마르텐사이트와 펄라이트조직의 양이 각각 약 50% 가량임을 알 수 있다. 또한 이곳의 펄라이트는 모재의 펄라이트가 잘게 끊어져 불규칙적으로 배열된 것을 알 수 있다.

위에서 알 수 있듯이 레이저 열처리에 의해 마르텐사이트 조직으로의 상변태가 일어나기 위해서는 탄소의 확산 작용이 일어날만한 충분한 온도와 작용시간 그리고 펄라이트로의 변태를 피할 수 있는 빠른 냉각 속도가 필요하다. 페라이트상으로 탄소가 확산되는 거리는 온도의 함수인 확산계수와 작용시간의 제곱근에 비례한다. 따라서 마르텐사이트의 생성 비율을 높이기 위해서는 Fe-C-Si 상태도에서⁹⁾ 알 수 있듯이 820~1170℃ 사이의 온도에서 가능한 한 높은 온도가 필요하며, 작용시간도 가능한 한 긴 시간이 필요하다. 그러나 작용시간이 길어지면 표면이 용융되고 후 연마가공이 필요하게 되므로 작용시간, 즉, 열처리 속도를 늦추는 데는 제한이 따르게 된다. 본 실험 결과에 의하면 구상흑연주철(FCD 60)의 경우에는 작용시간을 1초 이하로 하는 것이 바람직하다. 따라서 펄라이트조직이 미세하고, 구상흑연의 크기가 작고 균일하게 분포할 수 록 균질한 마르텐사이트 조직과 균일한 경화깊이를 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 모재의 펄라이트와 페라이트의 면적비율도 레이



Fig. 9 Scanning Electron Micrograph of inside hardened layer

저 열처리에 큰 영향을 미친다. 페라이트 면적율이 30% 이상이면 1초보다 긴 작용시간이 필요하다. 이 경우 열처리 표면의 용융으로 인해 열처리후의 연마가공이 반드시 필요하게 되며 따라서 레이저 열처리의 가장 큰 장점을 살릴 수 없게될 뿐만 아니라 경화된 부분의 마르텐사이트 조직도 불균일하게 된다. 구상흑연주철에서 표면이 용융되지 않는 레이저 열처리를 위해서는 반드시 원소재의 페라이트 면적비를 약 30% 이하로 관리하는 것이 요구된다.

3.3 인산염 피막처리된 시편의 열처리 특성

인산염 피막처리된¹⁰⁾ 시편의 레이저 열처리를 실시한 목적은 피스톤 링그루브 레이저 열처리시 흑연 빔흡수제를 도포하는 공정의 생략과 피스톤의 가공공정 순서를 결정함에 있어서 마지막 공정으로의 적용 가능성을 검토하는 것이었으며 이를위해 레이저 열처리후의 표면경도, 경화깊이, 경화폭, 표면조도, 표면용기량을 조사하였다. 레이저출력 1.2kW, 빔이송속도 0.5~0.75 m/min.로서 실험한 결과 Fig. 10에서 볼 수 있듯이 흑연과 알콜용액의 빔흡수제를 사용하였을 때와 동일한 열처리 경도분포를 얻을 수 있었

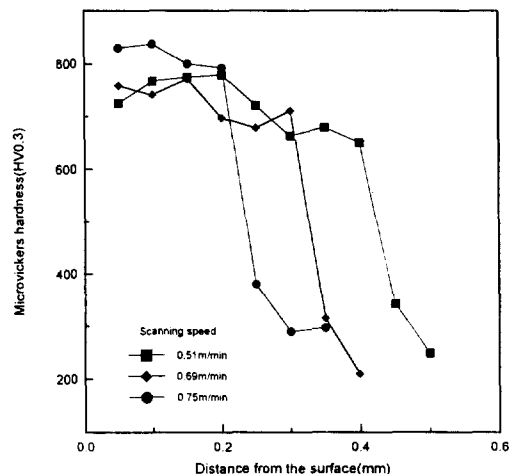


Fig. 10 Microhardness profile of laser hardened zone for various scanning speed at laser power 1.2kw.(Coating : Manganese phosphate)

다. 경화깊이는 표면용융이 없는 조건에서 0.35mm 이상이었고, 경화폭은 5.3~6.1mm로서 열처리사양을 만족하였다. 또한 레이저 열처리후의 표면조도는 Ra 0.5, Rz 4.14였으며, 표면용기량은 약 3.25 μ m이었다. 이러한 결과로 볼 때 인산염 피막으로도 흑연 빔흡수제를 대신할 만한 충분한 빔 흡수효과가 있음을 확인 하였다. 그러나 열처리된 부분의 인산염피막이 제거됨으로 인해 피스톤에 있어서 인산염피막의 가장 중요한 기능인 피스톤링과 링그루브간의 마찰계수 감소효과를 기대할 수 없을 뿐 아니라 피스톤 운송이나 보관중에 열처리된 부분에서의 부식발생이 용이하므로 레이저 열처리를 피스톤의 최종공정으로 선택하는 것은 부적절하다.

4. 결 론

상기 실험을 통하여 국산시제생산한 중속디젤엔진 피스톤의 링그루브에 대한 레이저열처리 적용가능성을 평가하였으며 그 결과 레이저빔을 이용한 열처리로 해당 피스톤에 요구되는 열처리사양을 충분히 만족시킬 수 있음을 확인하였다. 결론은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 1) 1.2kW CO₂ 레이저를 이용하여 구상흑연주철 피스톤 링그루브의 요구되는 경화패턴(경화깊이 최소 0.3mm, 경화폭 5.2~7.0mm)을 얻을 수 있었다.
- 2) 빔이송속도와 경화깊이는 반비례하며 마르텐사이트 생성율을 높이기 위해서는 본 재료의 경우 원소재의 페라이트 면적율을 30% 이하로 제어해야 한다.
- 3) 레이저열처리 후의 표면용기량은 약 5 μ m에서 10 μ m의 미소량으로서 레이저열처리에는 고주파경화 처리에서 요구되는 후연마공정이 불필요하다.
- 4) 인산염피막 처리된 시편에서도 흑연 빔흡수제를 사용하였을 때와 동일한 열처리 효과를 얻을 수

있었으나 인산염 피막이 손상되므로 레이저 열처리를 피스톤 가공의 최종공정으로 하는것은 부적절하다.

후 기

본 연구는 통상산업부 공업기반기술과제 연구비에 의하여 이루어진 것으로서 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Y. Asaka, H. Kobayashi and S. Arita : Proceeding of LAMP'87, Osaka(Japan), pp. 555~560.
2. "L23/30H Project Guide", MAN B&W, 1994.
3. D.N.H. Trafford, T. Bell, J.H.P.C. Megaw and A.S. Bransden : Metals Technology, 1983, Vol.10, pp. 69~77.
4. 황경현 외 : "레이저 표면경화 기술개발", 공업기반기술과제 3차년도 최종보고서, 1995, pp. 11~16.
5. 황경현 외 : 제4차 레이저 가공기술 심포지움초록, 대전, 1993, pp. 31~36.
6. "L23/30H Instruction Manual", MAN B&W Holeby, 1994.
7. 김도훈 : 레이저 가공학, 경문사, 1990. pp. 201~202, 244~248.
8. K.K. Yoon, W.B. Kim and S.J. Na : Surface and Coatings Technology 78, 1996, pp. 157~167.
9. Metals Handbook, 8th Edition, vol. 8, 1973, pp. 413~414.
10. 금속표면처리 편람위원회, 금속표면처리편람, 세화, 1987, pp. 717~719.