

Nd:YAG 레이저를 이용한 디젤 엔진 실린더 보어 열처리 기술 개발

The development for the heat treatment of diesel engine cylinder bore with Nd:YAG LASER

현대자동차 (주) 공장자동화개발팀 도 성섭, 김 재선, 정 대현, 최 종범

I. 서론

상용 디젤 엔진은 운전 중 발생하는 고온, 고압에 의한 실린더 보어 벽면과 피스톤 링의 마찰로 인해 실린더 보어 벽면에 이상 마모와 스커핑(Scuffing)현상이 일어나며, 엔진의 내구성 및 출력저하를 가져온다.

따라서, 디젤 엔진은 이러한 마모를 최소화하기 위해

- (1) 실린더 블록 재질(FC250)보다 경질의 주철(FC250B)로 슬리브를 만들어 실린더 보어 내부에 삽입하는 방법
- (2) 실린더 보어 내면을 직접 열처리하는 방법

을 사용하여 보어 내면의 경도를 높임으로서 마모를 억제하는 방법이 실용화 되어 있다.

조사된 개발 사례에 따르면, 실린더 보어 내부에 슬리브를 삽입하는 방법에 비해 보어 내면을 직접 열처리하는 방법은 제조 원가를 크게 낮출 수 있으며, 출력 상승을 위해 동일 크기 블록에서 배기량을 증가 시키는 것이 가능하고, 엔진 오일 소모량도 감소하는 것으로 나타나 있다.

따라서, 당사에서는 디젤 엔진의 성능 향상 및 제조 원가를 절감하고자 실린더 보어를 직접 열처리하는 기술을 개발하고 있으며, 그 내용을 간략히 소개한다.

II. 개발 배경

실린더 보어를 직접 열처리하는 방법에는 고주파 열처리, 레이저 열처리, 전자빔 열처리 등이 있으며, 현재 일부 해외 자동차 메이커들이 고주파 열처리, 레이저 열처리 기술 등을 실용화하여 양산 라인에 적용하고 있다.

실린더 보어를 직접 열처리할 수 있는 시스템 개발은 대상 가공물의 형상 및 열처리 사양, 생산성 등과 같은 조건을 만족할 수 있어야 한다. 표 1)은 디젤 엔진 실린더 보어 열처리 시스템이 갖추어야 할 요구 성능이다.

항목	품질 기준				생산성 기준
	열처리 깊이 (mm)	열처리 폭 (mm)	경도 (Hv0.2)	열 변형량 (μm)	가공 속도 (EA/min)
기준 값	최소 : 0.3 최대 : 0.2	3.5 +0.5	550 ~ 650	10 ~ 15	1

표 1) 열처리 시스템 선정 기준

당사는 디젤 엔진 실린더 보어 열처리 시스템으로 레이저 가공법을 선정하였으며, 이는 다른 방법에 비해 아래와 같은 장점이 있다.

- 1) 가열부 면적이 전체 면적에 비해 미소하고, 순간 가열에 의한 비 가열부와 온도 차가 커, 자연 냉각 효과가 크므로 별도의 냉각 장치가 불필요하다.
- 2) 다양한 열처리 형상의 제작이 용이하다.

3) 열처리가 필요한 부위만 가열할 수 있어, 열처리에 의한 가공물의 변형을 최소화 할 수 있다.

레이저 열처리 방법은 CO₂ 레이저와 Nd:YAG 레이저에 의한 방법이 있으며, 현재 CO₂ 레이저 열처리 방법은 실용화된 사례가 있으나, Nd:YAG 레이저 열처리 시스템은 아직 개발 되어 있지 않다.

레이저로 실린더 보어를 열처리하기 위해서는 아래와 같이 선결되어야 할 여러 가지 기술적인 사항이 있다.

No	항 목	목 적	관련 인자
1	레이저 빔 에너지 분포 균일화	1) 균일한 경화 깊이 확보 2) 에너지 집중으로 인한 용융 방지	1) 레이저 빔 모드
2	레이저 빔 에너지 흡수율 최대화	1) 경화 깊이 품질 확보 2) 가공 속도의 고속화 3) 최적 열처리 온도 확보 4) 레이저 발전기의 저 출력화	1) 표면 가공 조도 2) 레이저 빔의 파장 3) 흡수재
3	레이저 조사 속도의 고속화	1) 고 효율 생산성 2) 열처리 품질 확보	1) 레이저 발전기 출력 2) 에너지 흡수율

표 2) 레이저 열처리를 위한 선결 과제

표 2)와 같이 레이저에 의한 열처리 방법은 여러 인자에 의해 많은 영향을 받는다.

레이저 열처리로 균일한 열처리 깊이를 얻기 위해서는 열처리부를 균일한 레이저 빔 에너지 분포로 가열하는 것이 필요하다. 이를 위해 멀티 모드의 레이저 빔 모드가 필요하나, 일반적으로 CO₂ 레이저는 단일 모드(Gaussian mode)로서 멀티 모드를 얻기 위해서는 다면경(Kaleidoscope)과 같은 특수 미러가 필요하다. 그러나, Nd:YAG 레이저의 빔 모드는 다중 모드(Multi mode)로서 균일한 에너지 분포를 얻기 위한 별도의 미러가 필요치 않다.

또한, 최적 열처리 깊이, 경도를 얻기 위해서 금속의 변태점 온도에 맞추어 열처리하는 것이 필요하다. 금속의 표면 온도는 레이저 에너지 흡수율에 따라 달라지며, 저 출력으로 최대의 열처리 효과를 내기 위해서는 보어 표면의 레이저 에너지 흡수율을 극대화해야만 한다. 금속의 레이저 에너지 흡수율은 레이저 빔의 파장 및 표면 가공 조도, 흡수재의 사용 여부에 따라 달라진다. 그림 1)은 동일한 레이저 출력에 대해서 재질에 따른 Nd:YAG 레이저와 CO₂ 레이저의 흡수율을 비교한 것이다. 그림 1)에서 보는 바와 같이 철이나 강에 대하여 Nd:YAG 레이저의 흡수율이 CO₂ 레이저에 비해 월등히 우수 함을 알 수 있다. 이는 CO₂ 레이저 발전기를 이용하여 열처리를 할 경우, 동일 출력의 Nd:YAG 레이저 발전기와 같은 에너지 흡수율을 내기 위해, 별도의 흡수재를 사용해야만 한다는 문제점이 있다. 그러므로, 실제 생산 라인에 적용 할 경우 넓은 공간의 확보 및 공정 추가 및 흡수재 도포 품질 확보 등과 같은 관리 항목이 늘어남으로서 생산의 비효율성을 초래하게 된다. 그림 2)는 공정 구성의 관점에서 Nd:YAG 레이저 열처리 공정과 CO₂ 레이저 열처리 공정을 비교하였다. 공정 구성시 CO₂ 레이저 열처리 공정이 Nd:YAG 레이저 열처리 공정에 비해서 공정수가 많음을 알 수 있으며, 이는 투자비의 상승을 의미한다.

따라서, 당사에서는 품질 관리 및 공정 관리 측면에서 Nd:YAG 레이저 열처리 공정이 CO₂ 레이저 열처리 공정 보다 유리하다는 결론을 얻었으며, 디젤 엔진 실린더 보어 열처리 시스템 개발을 위하여 Nd:YAG 레이저 발전기를 사용하기로 하였다.

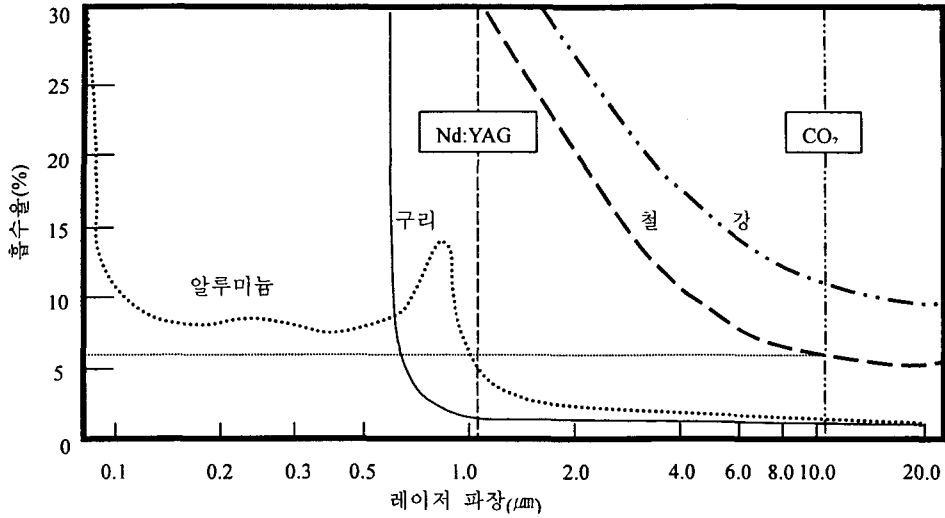
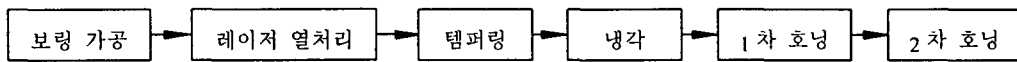
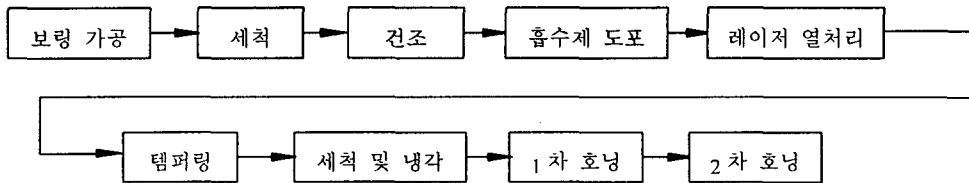


그림 1) Nd:YAG 레이저와 CO₂ 레이저의 재질에 따른 흡수율 비교(Trumpf Korea 제공)



a) Nd:YAG 레이저에 의한 열처리 가공 공정



b) CO₂ 레이저에 의한 열처리 가공 공정

그림 2) 레이저 열처리 공정 비교

III. 개발 단계 별 내용

Nd:YAG 레이저를 이용하여 디젤 엔진 실린더 보어 열처리 시스템 개발하기 위하여 표 3)과 같은 내용으로 개발 중이다.

현재, 당사가 연구용으로 보유하고 있는 Nd:YAG 4kW 레이저 발진기를 사용하여 레이저에 의한 열처리 시 생산성 및 품질 확보 가능성을 1차 검증하였으며, 그 검증된 결과는 표 4)와 같다.

실험은 실린더 블록과 동일 재질의 평판 시편에 대해서 용접용 옵틱 헤드를 이용하여 수행하였으며, 충분한 경화 면적을 내기 위하여 옵틱 헤드의 초점을 디포커싱(defocusing)하여 실험하였다. 실험 결과 양산 품질 및 생산성 확보가 가능하다는 것을 검증 하였다.

열처리용 옵틱 헤드의 레이저 빔 조사 방법은 그림 3)과 같다.

No	단 계	내 용
1	품질 기준 및 사양 선정	1. 사례 연구 2. 경화부 치수(면적, 깊이) 및 경도 선정 3. 레이저 종류 선정 4. 열처리 품질에 영향을 주는 변수 및 제어 방법 검토 (레이저 빔 조사 방법, 온도, 가공 조도, 출력의 안정성 등)
2	품질 확보 가능성 및 양산 가능성 검증	1. 레이저 열처리 속도별 실험 - 실린더 블록과 동일 재질의 평판 시편 사용 2. 실험 결과 분석 - 경화 조직 및 경화부 치수, 경도
3	오탁 헤드 설계 및 제작	1. 레이저 빔 치수 계산 2. 레이저 빔 조사 각도 검토 3. 반사 미러 이송 장치 설계 4. 제작
4	열처리 온도 모니터링 및 제어 방법 개발	1. 보어 표면의 가공 상태에 따라 흡수율이 달라지므로서 발생하는 온도 변화 모니터링 2. 모니터링된 온도에 따라 레이저 출력을 조정
5	엔진 내구 시험 및 양산 품질 확보	1. 실린더 블록을 직접 열처리, 경화부 조직 및 치수 검사 2. 디젤 엔진 제작 내구 시험
6	전수 품질 검사 시스템 개발	1. 비파괴 검사 시스템 선정 2. 검사 방법 선정 3. 시스템 구성 4. 시험
7	양산 적용	1. 가공 라인 재구성 2. 설치 3. 시운전 및 품질 확보 4. 양산 적용

표 3) 단계 별 개발 계획


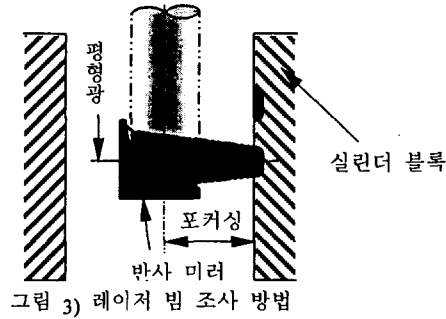
레이저 발전기		Nd:YAG, 4kW		
실험 조건	사용 출력 (kW)	1.0	1.7	1.7
	빔 직경 (mm)	1.6	2.0	2.0
	조사속도(mm/sec)	50	60	70
열처리 조직 현미경 사진 (500 배)				
결과	평균 경도 (Hv0.2)	587	563	572
	경화깊이 (mm)	0.31	0.29	0.29

표 4) 평판 시편에 대한 열처리 결과



IV. 향후 계획

현재까지 진행 단계는 레이저 빔 옵틱 헤드와 옵틱 헤드를 이송하는 직교 장치를 제작하는 단계에 있으며, 향후 추진되어야 할 과제는 표 3)의 단계별 개발 내용에 따라 다음과 같은 내용으로 진행 될 것이다.

1. 실린더 블록 표면 온도 모니터링 및 제어 방법 개발

실린더 블록의 레이저 열처리 전 공정의 보링 가공 공정의 가공 상태에 따라 실린더 보어 표면 온도가 달라 지므로, 주철의 변태점 온도를 유지하기 위해서 표면온도를 모니터링하고, 모니터링 결과에 따라 레이저 출력을 조정할 수 있는 방법이 필요하다. 이를 위해 고속 응답 특성 및 고정도의 비 접촉 온도 센서 및 모니터링 소프트웨어를 개발한다.

2. 실린더 블록의 열처리 및 엔진의 내구 시험

열처리 결과의 실용성 확인을 위해 실린더 블록을 직접 열처리하고, 열처리된 블록으로 엔진을 조립하여, 다이내모 시험 및 실차 시험을 거쳐 엔진의 성능을 검증한다.

3. 온 라인 전수 품질 검사 시스템 개발

열처리된 결과는 육안 검사가 불가능하여, 생산 중 품질 확인을 위한 비파괴 검사 장치가 필요하며, 라인 전체 생산량을 검사하기 위해 고속 응답 특성과 내구성, 신뢰성을 갖춘 품질 검사 시스템을 개발 중이다.

V. 참고 문헌

1. Yoshio SUZUKI 외 4 명, "Laser-Hardening of Cylinder-Bores for Diesel Engines", MITSUBISHI MOTORS TECHNICAL REVIEW, No. 6 (1994)
2. James T. Luxon, David E. Parker, Industrial Laser and Their Applications(2nd ed), Prentice Hall, pp 267 ~ 273
3. 西森廉夫 외 3 명, "실린더블록보어의 라이나레스화의 - 液中高周波焼入れ의實用化-", 마쯔다技報, No 14(1996)
4. 김도훈, 레이저 가공학, 경문사