Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers 27:4 (2018) 383~390

https://doi.org/10.7735/ksmte.2018.27.4.383

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.
ISSN 2508-5107(Online)

Technical Papers

상용 디젤엔진 실린더 블록 재제조 기술에 관한 연구

이충근[a*], 이정호[b], 이한홍[c], 손민호[d], 이대엽[e]

A Study on Remanufacturing Technology of Commercial Diesel Engine Cylinder Block

Chunggeun Lee[a*], Jeongho Lee[b], Hanhong[c], Minho Son[d], Daeyup Lee[e]

[a] *Graduate School of Construction Machinery Engineering, Inha University, 100, Inharo, Nam-gu, Incheon 22212, Korea*
[b] *Graduate School of Mechanical Engineering, Inha University, 100, Inharo, Nam-gu, Incheon 22212, Korea*
[c] *Automotive Technology Center, IBITP, 36, Gaebeol-ro, Yeonsu-gu, Incheon 21999, Korea*
[d] *Extreme Technology R&D Center, KATECH, 303, Pungse-ro, Pungse-myeon, Dongnam-gu, Cheonan, Chungnam-do, 31214, Korea*
[e] *Mechanical Engineering, Inha University, 100, Inharo, Nam-gu, Incheon 22212, Korea*

ARTICLE INFO

Article history:

Received	26	June	2018
Revised	30	June	2018
Accepted	3	July	2018

Keywords:
Cylinder block
Cylinder head
Nickel
Corrosion
Remanufacture
Wear

ABSTRACT

As the mass production and mass consumption industries are settled, they are promoting depletion of natural resources and causing the problem of global warming. Therefore, various studies are under way to pursue resource utilization and environmental protection at the same time. In Europe and the United States, the remanufacturing industry, which was settled early, has emerged as an alternative industry to mitigate resource and environmental problems. In this research after using a diesel engine, the engine parts were restored just before disposal. The cylinder block was selected according to weight and economic value. The mass of the selected cylinder block is about 246 kg. When the worn parts were restored, the restoration process used about 200 g of mass. as the result of restoration process, weight 246 kg cylinder block was prolonged the lifetime by using 200g.

1. 서 론

오늘날 화석연료의 지속적인 사용으로 인하여 세계적으로 자원 고갈과 지구기후변화 등 여러 가지의 문제가 발생되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 각 국의 대표단이 2015년 프랑스 파리에 모여 지구온난화에 대처하기 위한 다자간 협상을 진행하였다. 최근 전 세계적으로 자동차 신흥시장에서 자동차에 대한 수요증가로 인하여 자동차 생산 및 자동차 부품 제조과정에서 발생하는 온실가스가 증가하고 있다. 따라서 본 연구에서는 사용 후 자동차 부품들에 대한 재제조 기술을 연구하여 고갈 자원 절약과 탄소 가스 배출 감소라는 큰 효과를 얻기 위하여 연구하였다. 약 10년 전부터 생산자가 자사 폐자동차 중량기준으로 연간 최소 80% 재사용과 재활용을 포함하여 최소 85%의 재자원화율 달성을 요구받아왔으며, 2015년부터는 재자원화 달성율을 95%로 강화하고 있다. 재제조란 사용 후 제품 또는 부품(중고부품 포함)을 주원료로 하여 분해-세척-검사-보수 및 조정-재조립 등 일련의 과정을 거쳐 신품과 대등한 성능을 유지할 수 있는 상태로 만드는 공정을 말하며, 소비자 입장에서 High quality의 제품을 Low cost로 사용할 수 있다는

* Corresponding author. Tel.: ※개인정보 표시제한
Fax: +82-50-4479-7764

E-mail address: chung541@naver.com (Chunggeun Lee).

장점이 있다[1].

본 연구에서는 자동차 엔진의 마모 부품에 대한 성능 복원에 관한 연구를 하였다. 연구 대상 자동차 엔진은 실린더 블록, 실린더 헤드, 크랭크샤프트, 캠 샤프트, 연료분사장치 등 약 200가지들로 이루어져 있지만, 특히 실린더 블록은 엔진 작동의 핵심적인 구조물 역할을 하기 때문에 강하고 단단한 재질로 구성되어야 한다. 그러나 엔진의 실린더 블록은 피로, 충격, 진동, 마찰 등의 다양한 원인으로 마모, 부식, 비틀림, 균열 등의 현상이 나타난다. 실린더 블록을 신품으로 제작할 경우 많은 자원과 에너지가 투입되어야 한다. 따라서 엔진 핵심부품인 실린더 블록의 마모 부분을 성능 복원하여 재사용한다면 자원과 에너지를 절약하는데 많은 기여를 할 수 있다. 코어부품들을 신품처럼 성능 복원하기 위해서 정밀 복원 기술이 필요하며 본 논문에서는 코어 부품의 수명을 연장하기 위한 복원 기술로써 용접접합 기술을 이용하였다[2].

2. 실린더 블록 고장분석 및 고장형태

2.1 실린더 블록 고장 분석

본 연구에서는 상용 디젤엔진 실린더 블록을 대상으로 고장원인을 분석하였다. 실린더 블록은 사용 중에 냉각수 순환으로 인하여 캐비테이션이 발생하여 실린더 내부가 부식되고 마모되는 현상이 빈번하게 나타나 폐기 하게 된다.

이러한 부분을 복원하여 경제적 가치와 자원 절약 효과를 얻기 위하여 연구를 진행하였다. 이러한 형식의 실린더 블록은 대부분 대형 상용차량에 장착되며, 실린더 블록에 실린더 라이너가 삽입되어 조립되는 구조로 되어 있다.

따라서 재제조 분해공정(Disassembly)에서 실린더 블록과 라이너를 분리하여야 하며, 사용 후 실린더 블록에 다양한 마모 형상에 따라 성능 복원 기술이 약간씩 다르게 적용된다. 실린더 블록 고장 모드 분석을 통해, 실린더 블록 마모와 연관성 있는 부품들을 우선적으로 확인하였다. 확인 결과 실린더 블록 고장 현상은 대부분 마모, 부식, 비틀림, 균열 등으로 파악되었다.

Table 1은 사용 후 엔진코어 부품을 회수하여 진행한 엔진 실린더 블록의 고장 원인과 고장 분석에 대한 결과이다. 피로와 냉각수에 의해서 실린더 블록의 내부가 부식되고, 캐비테이션 현상에 의해서 분화구 형태로 마모가 진행되었다. 장시간 사용으로 인하여 피로가 누적된 실린더 블록은 특정 부분이 파손, 마모 형태로 변형이 나타난다. 또한, 엔진오일 관리 소홀로 인하여 이물질이 함유되고 오염으로 인해 엔진오일이 변질 되어 윤활라인이 막히는 현상이 나타나게 된다. 각종 가스켓 불량과 밀봉불량으로 인한 엔진오일

Table 1 FMEA of cylinder block

Cause	Symptom	Parts failure mode
Coolant leak	- Engine deterioration	- Cylinder block torsion
Engine oil leak	- Engine oil decrease - Output degradation	- Cylinder block wear - Inside Scratch wear - Internal block wear
Fatigue and aging	- Output degradation - Blowby gas occur	- Cylinder block inner wear
Head gaskit damage	- Water pump impeller damage	- Water pump impeller Corrosion

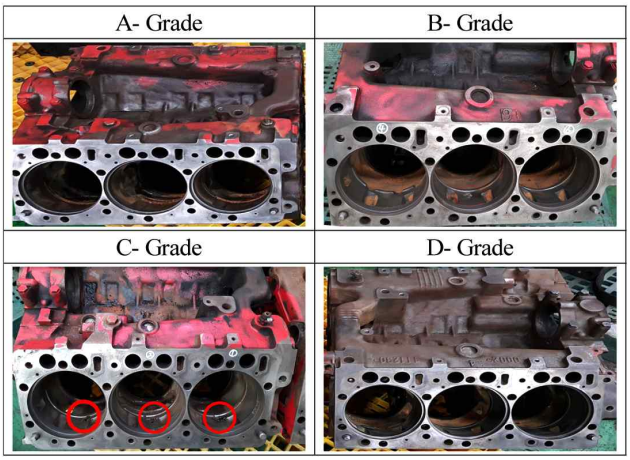

Fig. 1 Classification of used cylinder block

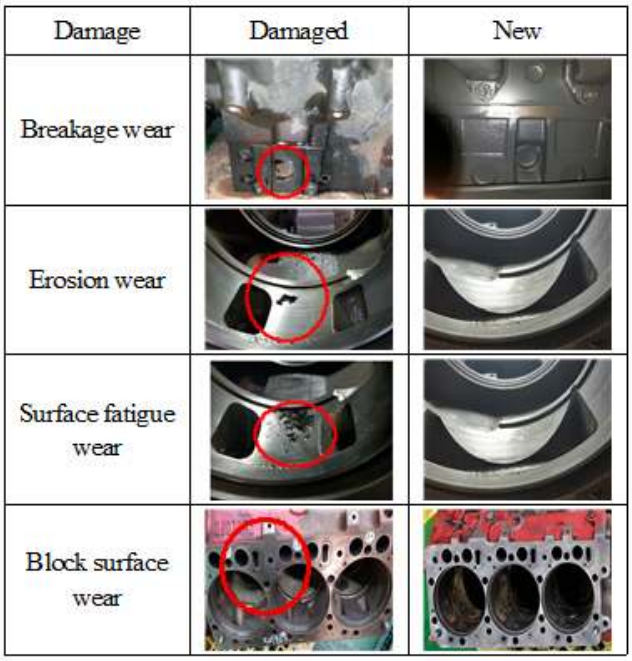

Fig. 2 New and damaged cylinder block

누유가 발생되어 엔진오일이 부족하게 되면 실린더 내부가 마모되거나 피스톤 고착으로 인한 내부 및 외부파손이 발생되며, 실린더 블록 오일라인 막힘과 마모, 그리고 냉각계통 불량상태가 엔진의 온도를 상승시킴으로 인해 실린더 블록에 치명적인 손상을 주는 주원인으로 파악 되었다.

실린더 블록에 성능 복원 가능 유무를 판단하기 위하여 수거된 실린더 블록을 다음과 같이 분류하였다. 엔진 실린더 블록의 고품(Core)의 분류기준은 통상 A, B, C, D의 4 등급으로 Fig. 1과 같이 나누어 연구를 진행 하였다. A등급의 경우 세척 공정 후 그대로 사용 가능한 상태이며, B 및 C등급의 경우 마모 상태에 따라 복원이 가능한 상태이고, D등급의 경우는 부식, 마모, 파손이 심하여 성능 복원이 어렵고 재사용이 불가능한 상태로 폐기 처리 한다.

2.2 실린더 블록 고장 형태

Fig. 2는 고장 부분을 육안으로 확인한 후 확대한 사진으로서 같은 부분의 신품 사진과 노후 된 부품에 대한 비교하여 나타냈다. Fig. 2에 적색으로 표시된 부분이 육안으로 확인된 주요 고장부분이며 주로 실린더 블록 내부에 부식으로 인하여 마모되거나 파손되는 경우가 많이 관찰되었다.

3. 디젤엔진 실린더 블록 복원 공정

3.1 실린더 블록 재제조 공정도

본 연구에서는 사용 후 노후 된 차량에서 엔진 Assy코어 부품들을 회수하여 재제조의 공정 순서에 따라 완전 분해, 부품 세척, 검사, 보수 조정, 재조립, 성능검사 등의 과정을 거쳐 원래의 성능을 유지 할 수 있도록 성능 복원에 대하여 연구하였다. 디젤엔진 재제조 공정에 실린더 블록의 성능을 복원하는 용접접합 기술과 가공 연마 기술을 적용하여 코어 부품을 신품과 유사한 수준으로 복원 시켜 경제적 가치와 CO_2절감 효과를 얻을 수 있도록 연구를 진행하였다. 재제조(Remanufacturing)과정은 일반적으로 Fig. 3과 같이 5단계의 공정으로 분류 할 수 있다. 상용 디젤엔진 실린더 블록을 성능 복원하기 위하여 1단계 완전 분해(Disassembly)공정으로 엔진 Assy코어 부품을 분해하고, 2단계 부품세척(Cleaning)공정으로 1차 일반 세척공정과 2차 초음파 세척 공정으로 이물질을 제거한 후, 3단계 검사(Inspection)공정으로 육안 검사 및 마모 측정 검사를 실시한다. 4단계 보수조정 공정에서 실린더 블록에 대한 성능 복원 기술 중 용접접합 기술과 가공연마가 이루어지며, 최종 5단계의 재조립 과정을 거친다. 본 연구에서는 4단계 보수조정(Reconditioning)공정에서 주로 이루어지는 용접접합 기술과 가공연마에 대한 연구를 진행 하였다[3].

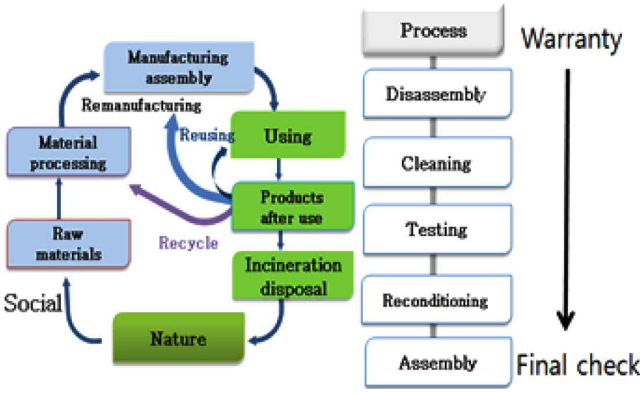

Fig. 3 Remanufacturing process

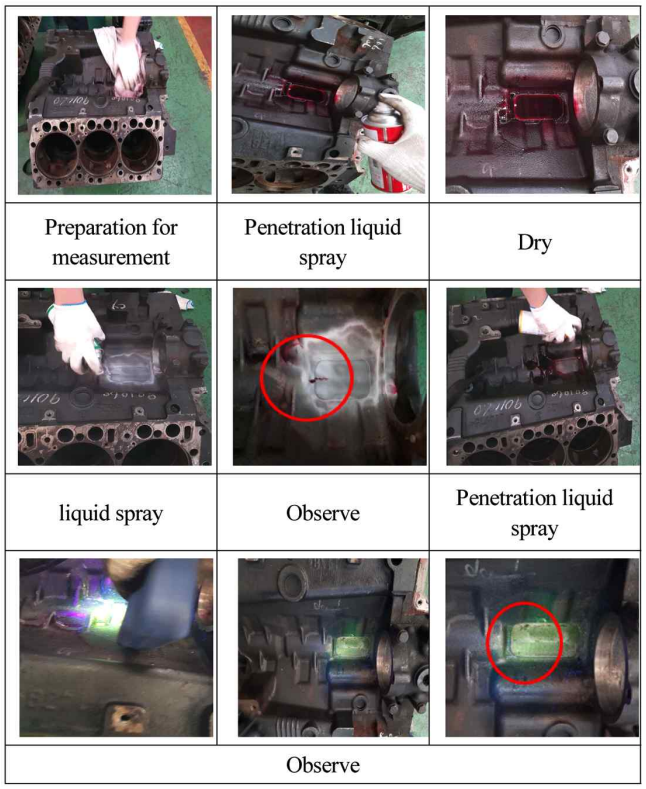

Fig. 4 Cylinder block fluorescence defect inspection

앞서 Fig. 1의 엔진 실린더 블록의 고품(Core) 부품 분류기준에 의거하여 A 등급 실린더 블록은 재조립하여 신품과 동등한 수준의 성능을 유지하는지 확인하고, B, C 등급으로 분류된 부품은 육안검사와 침투액, Fluorescent defect inspection을 적용하여 균열부분을 Fig. 4와 같이 최종검사 확인하였다. 성능 복원이 불가능한 경우 D 등급으로 판정하여 폐기처분 하였다. 따라서 B, C등급으로 분류된 고품은 복원기술에 적용 대상이 되며, 재제조 과정을 거쳤으나 최종 성능 검사를 통과하지 못한 제품의 경우 재제조 과정을 다시 적용하여 복원을 진행하게 된다.

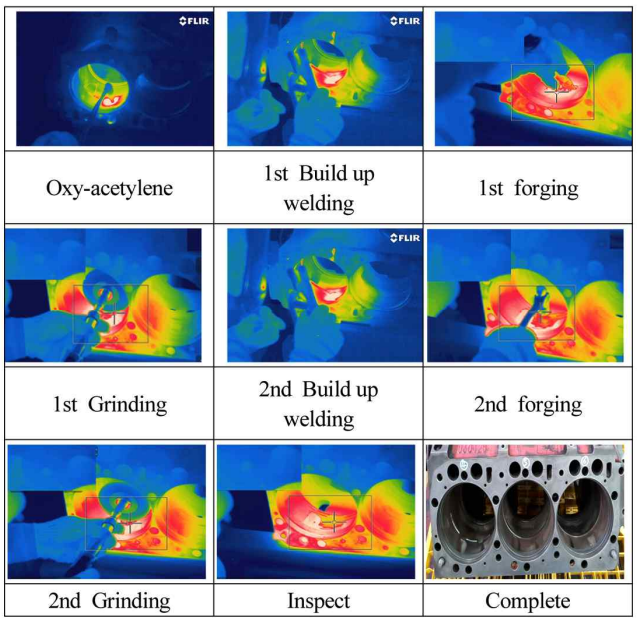

Fig. 5 Thermal imaging of restore performance

보수 조정 공정은 Fig. 5와 같이 200°C 산소-아세틸렌을 이용하여 예열하면서 용접할 면을 부식생성물, 이물질 또는 산화물 등을 제거하는 공정을 진행하며 그라인더와 초경 로터리버로 마모와 부식된 부위를 일정부분 가공하여 살을 덧씌워 복원하는 과정을 수행하였다. 1차 용접 접합 기술과 단조 과정 및 연삭 과정을 수행하며 미세 부분의 복원에는 2차 반복 과정을 수행한다. 복원 부위의 파손 정도에 따라 여러 차례 반복으로 진행 할 수도 있다. 또한 용접접합기술을 적용 할 때는 용융된 물질이 옆 소재에 붙는 것을 방지하기 위하여 접합부 주변에 방청액을 도포 후 진행하였다. 용접과정에서 사용된 용접 소재는 아크 안전성 및 용접성이 우수하고 , 우수한 용착 금속의 기계적 성질을 얻을 수 있는 니켈(Ni) 함유량이 91%인 Super-N 니켈합금 용접봉을 이용하였다[4].

Fig. 5은 각 공정에서 온도 분포를 열화상 카메라로 촬영한 사진이다. Fig. 6은 열화상 촬영 자료를 근거로 온도 분포의 편차를 확인할 수 있었다.

3.2 실린더 블록 성능 복원 과정

실린더 블록 마모 부위의 재질을 분석하여 원 재질 이하로 변질이 되었을 경우에는 성능복원에 부정적인 영향을 미치므로, 1차로 마모부위를 풀림 처리를 진행하였으며 가공과 연삭 및 폴리싱 작업을 거쳐 성능 복원 공정을 진행하였다. 마모 부위가 10~20mm일 경우 가공 부위 범위를 조금 더 크게 확대 가공하였다. Fig. 7과 같이 니켈 접합 작업 후 가공연마와 폴리싱 작업을 거친 다음 방수제를 도포하고 표면 연마 작업하여 성능 복원을 진행하였다.

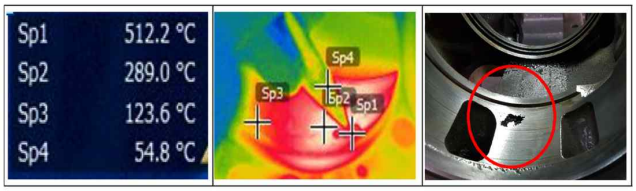

Fig. 6 Temperature distribution

Process	Photo	Contents
Core		- check
Disassembly		- Eye check
Wash		- Removal of impurities - Wear check - Bit removal
Base check		- Wear measure - Removal of impurities
Heat treatment operation		- Wear check - Heat treatment operation
Nickel join		- Restore work
Block grinding		- Whetstone processing - Waterproof work
Water pressure test		-Confidentiality check - Leak check

Fig. 7 Remanufacturing process

실린더 블록 불량 시 엔진출력저하, 시동성능저하, 냉각계통저하, 윤활라인 저하 등 엔진에 치명적인 결함이 발생하며 정상적인 엔진의 작동이 어렵게 된다. 따라서 실린더 블록에 불량이 있을 시 실린더 블록에 대한 복원과 교체가 반드시 필요하다. 그리고 재제조 공정을 통해 실린더 블록의 성능이 정상적으로 복원이 되었는지 검사가 반드시 필요하다.

3.3 성능복원 시편 분석

실린더 블록에 대한 재질 분석 결과는 Table 2과 같이 확인할 수 있으며 접합 시 사용되는 용접봉(Super-N)의 재질을 분석한 결과에는 Table 3와 같이 구성되어 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 실린더 블록의 마모 또는 파손된 부위에 대하여 1차 용접접합 사진이다.

Fig. 9은 용접 접합 부위의 접합 층 구조를 나타내며 용접접합 작업을 한 시편 모재를 절단하여 접합 층의 재질 접합성에 대하여 경도를 분석하였다[5].

Table 4는 접합 층에 따른 재료시편의 재질분석 결과를 도출하였다. 용접접합 시 사용되는 접합봉 재료로 용융부분의 재질을 분석한 결과로써 모재를 복원하는 과정에서 재질의 변화가 발생되었음을 확인할 수 있다. Filler metal의 재질조성이 모재와 다른 경우 용접 및 접합과정에서 발생되는 열확산에 의하여 상호재료간의 원자가 상호 확산 작용을 하게 됨에 따라 모재의 재질구성이 달라진 것으로 분석된다[6-8].

Fig. 10은 모재 분석과 측정에 사용된 SEM 장비 사진이다. Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13는 접합부위의 접합 층에 따른 재료의 SEM측정 분석 그림이다.

접합부위의 물리적 특성을 파악하기 위해 접합 시편의 접합 층에 따른 비커스 경도(HV)를 측정하였다. 비커스 경도(HV)를 측정할 때 Filler metal의 경도측정 간격은 400 um, 하중은 HV0.5 (4.930) 측정배율은 40배로 측정하였으며, HAZ profile의 경도측정 간격은 150 um, 하중은 HV0.5 (4.903), 측정배율은 40배로 측정하였다. 또한 Base metal의 경도측정 간격은 1000 um, 하중은 HV0.5 (4.903) 측정배율은 40배로 하였으며 접합 시편의 용접 접합 층에 따른 비커스경도(HV)는 Fig. 14와 같이 확인하였다. 실린더 블록의 마모와 균열부분의 용접접합 복원을 위하여 접합 복원 부위에 열을 가열한 후 작업이 진행되기 때문에 접합 작업 후 복원 부위의 접합된 모재부분에서 열 풀림 현상이 나타나서 모재의 경도보다 접합부분의 경도가 약 2배정도 증가한 것으로 나타났다[9,10].

Fig. 14에서 원자간 상호 작용확산에 의해 모재의 경도가 크게

Table 2 Cylinder block base material analysis

Element	Fe	C	Si	Mn	P	Cr	Mo	Cu	Sn	S
Composition ratio (%)	93.42	3.3	2.27	0.66	0.03	0.14	0.03	0.03	0.01	0.11

Table 3 Filler (Super-N) base material analysis

Element	Ni	C	Si	Mn	P	S
Composition ratio (%)	91	1.12	1.80	0.15	0.02	0.01

Table 4 Analysis of specimen material

Element	Atomic %		
	Filler metal	HAZ profile	Base metal
C	32.84	33.59	29.18
Si	1.95	1.93	3.27
Fe	30.94	36.14	67.55
Ni	34.27	28.34	-

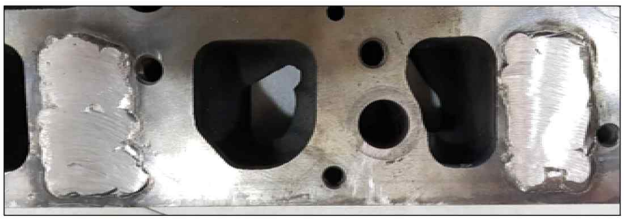

Fig. 8 Cylinder block filler

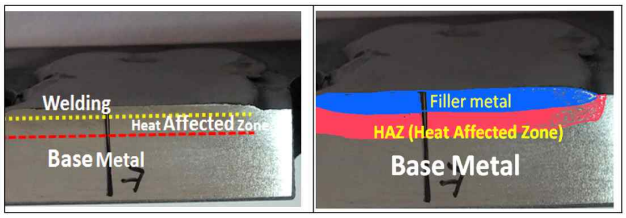

Fig. 9 Analysis of specimen material

Fig. 10 Scanning electron microscope (SEM) device

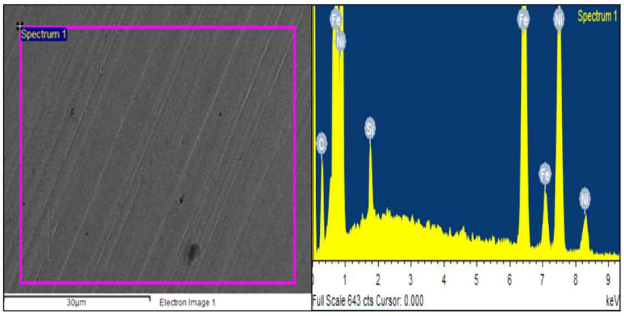

Fig. 11 Filler metal

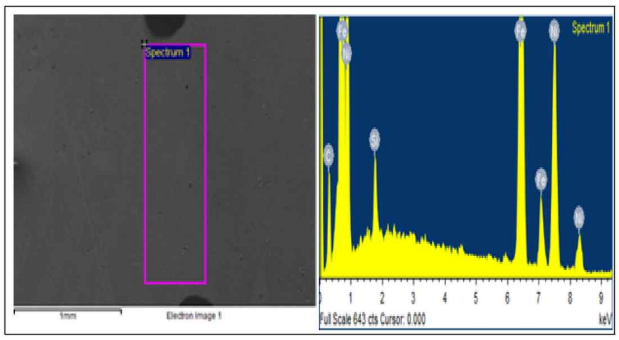

Fig. 12 HAZ profile

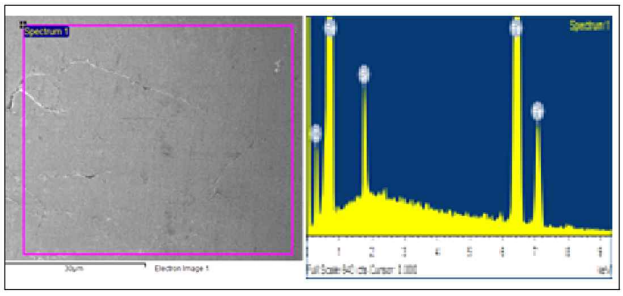

Fig. 13 Base metal

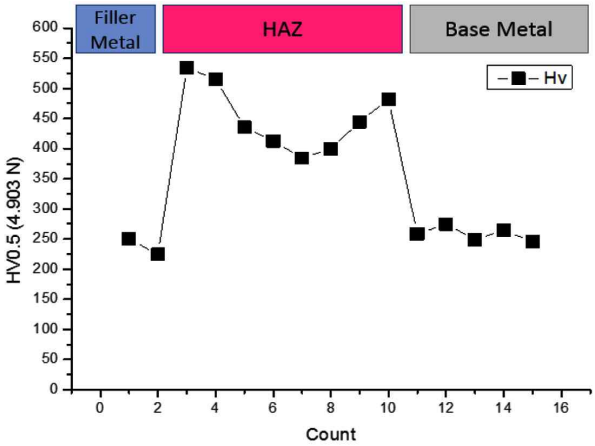

Fig. 14 Hardness vickers analysis of specimens material

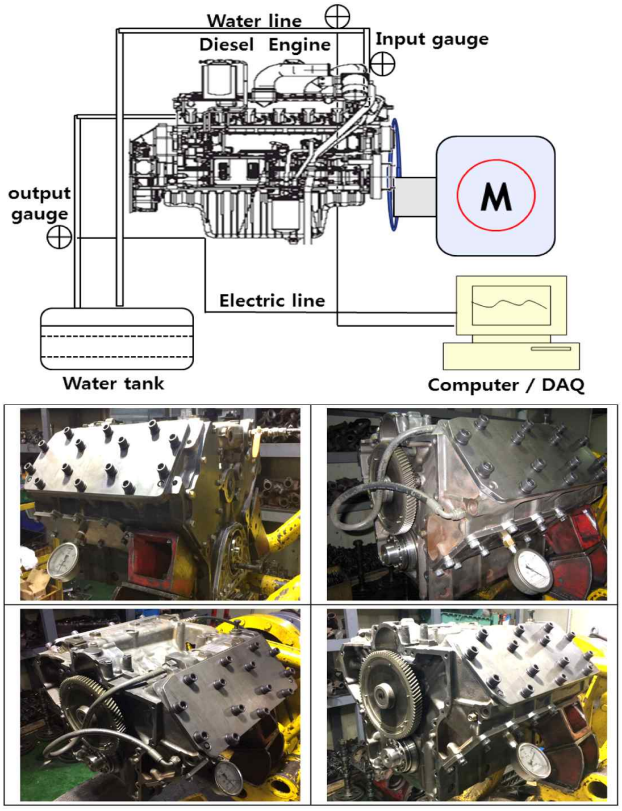

Fig. 15 Water pressure test process

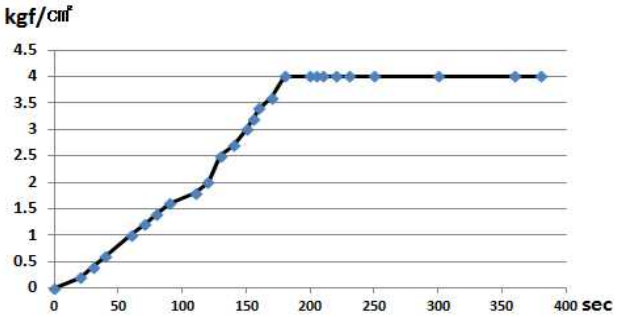

Fig. 16 Cylinder block water pressure test

변화하는 것을 확인하였다. HAZ 부분에서 미세한 조직학적 변화가 발생되었다. 이는 용접 및 접합 시 원자 간의 상호 확산작용에 의한 고용강화효과로 파악되었다.

4. 실험 결과

캐비테이션 현상으로 인하여 마모와 부식된 부위를 용접 복원과 가공 연마 작업을 걸쳐 최종적인 Fig. 15와 같이 수압 성능 시험평가를 수행하였다. 디젤엔진 실린더 블록 라이너에 삽입된 오링이 기밀 유지되지 못함에 따라 냉각수가 누설되어 윤활유와 섞이면서 각 윤활유부에 손상이 발생할 수 있으며, 회주철인 실린더블록은 연성이 부족하고 취성이 강하기 때문에 용접 복원시 열응력이 발생함으로 용접 후 수축응력에 의한 저온균열이 발생할 수 있기에 4bar의 수압으로 공급하여 3분간 유지하는 방식으로 시험을 진행하였다. 또한, 시험 수압력이 4bar 이상 실험할 경우에 엔진 실린더 블록 내부의 실린더 라이너에 장착된 오링이 수압력에 견디지 못하여 위치를 이탈 할 가능성이 있기 때문에 최대 시험 허용 압력을 4bar로 제한하여 실험을 진행하였다.

Fig. 16과 같이 시험결과로써 접합한 부위의 기밀 누수현상이 발생하지 않고 기준의 최고압력 4bar까지 상승과 3분 이상 유지하는 실험 그래프이다.

Fig. 17과 같이 일반적인 작업장에서 수동으로 니켈 용접 접합하여 신품에 준하는 실린더 블록 성능 복원이 가능하다는 사실을 연

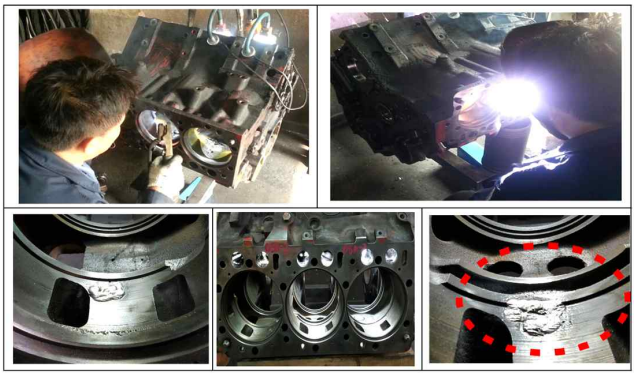

Fig. 17 Nickel join result

구결과를 통해서 얻을 수 있었다. 니켈 용접 접합기술에서 완벽한 접합을 위해서는 소재의 성분 분석과 접합에 대한 용접봉 선택이 매우 중요하다. 실린더 블록 복원에 다양한 용접접합기술을 적용하기 위해서 더 많은 연구가 필요하다고 판단된다. 따라서 용접접합 기술은 접촉식 공정으로 불순물의 유입이 적기 때문에 상대적으로 우수한 표면을 얻을 수 있는 장점이 있다. 따라서 자동차 산업과 발전기 설비산업, 방산산업, 그리고 항공 우주산업 등에 크게 활용 될 것이라 예상된다.[11]

5. 결 론

본 연구에서는 사용 후 노후 된 상용 디젤엔진을 재제조 대상으로 선정하여 상용 디젤 엔진의 실린더 블록 마모와 부식으로 인하여 성능복원이 필요한 부분을 니켈 용접접합 기술을 통하여 신품과 동등한 수준의 성능 복원하는 기술을 연구하였다. 현장 적용 가능성을 평가하기 위하여 수압 성능 평가를 진행하였으며 기계적 성질에 대한 모재에 경도 실험을 수행하였다. 그 후 단면 분석을 통하여 가공성을 평가하여 아래와 같은 결론을 도출하였다.

(1) 고품(Core) 디젤엔진 실린더 블록을 수거하여 고장유형과 원인을 분석하였다. 실린더 블록 내부의 마모, 과도한 피로, 냉각수와 직접 접촉에 의한 캐비테이션 마모, 부식을 확인 하였다.

(2) 엔진의 과다 운행에 따른 피로 누적과 냉각계통, 냉각수 불량으로 인하여 냉각수 성능 저하에 따른 마모와 부식이 주요 고장원인임을 확인하였다.

(3) 재제조 과정에서 5단계의 공정 프로세스를 적용하여 재제조 성능 복원 가능성을 확인하였다. 일반적인 니켈 (Ni)용접접합 작업으로 신품과 유사한 성능 복원이 가능함을 확인하였다.

(4) 코어 부품 복원으로 재제조율(%)을 향상시키며 경제적 가치와 에너지 절약, 온실가스의 주범인 CO_2가 감소 할 수 있을 것으로 예상된다.

(5) 실린더 블록은 용접접합 작업 후 복원 부위의 접합된 모재부분에서 열 풀림 현상이 나타났으며 모재의 경도보다 접합부분의 경도가 약 2배정도 강한 것으로 확인 되었으며 용접할 때 원자 간의 상호 확산작용에 의한 고용강화효과가 확인되었다. 본 연구에서는 상용디젤엔진 실린더 블록 복원에 관한 재제조 공정과 니켈 (Ni)용접접합 기술의 적용 가능성을 확인하였다. 재제조 실린더 블록 뿐만 아니라, 다른 중요부품의 성능 복원 요소 기술로 활용 될 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 한국 에너지기술평가원(과제번호20165010300800) 및 방위사업청(UD180018AD)의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

References

[1] Mok, H. S., Jeon, H. S., Han, C. H., Song, M. J., Park, B. S., Kwak, H. S., Park, S. J., 2008, A Study on Remanufacturing Industry for Automobile Parts, Transactions of KSAE, 19:6 184-191.

[2] Lee, C. G., Lee, J. H., Lee, D. U., 2017, A Study on Restoration Technology of Unit Injector Spill Valve for Injection System of Commercial Diesel Engine, Transactions of KSAE, 25:3 389-396.

[3] Nam, C. G., Lee, H. K., Kim, H. J., Kim, R. M., Song, H. S., Ha, C. S., Kang, C. K., 2015, A Study of Failure Analysis of Used Common Rail Diesel Engine and Performance Comparison Remanufactured Engine, Transactions of KSAE, 1048-1054.

[4] Joo, J. H., Lee, C., Nemati, N. G., Oh, J. T., Kim, D. E., 2014, Investigation of Frictional Characteristics of Cast Iron Under Various Conditions, The Korean Society of Mechanical Engineers, 2242-2243.

[5] Ryu, J. T., 2016, A Study on the Effect of Welding Wire Diameter on the Welding Quality Detection, Journal of the Korea Industrial Information Systems Research, 21:2 39-44.

[6] Lee, J. H., Choi, K. H., 2013, A Study on the Activation of Remanufacturing Industry According to the Korean Automobile Cultures, Korea Science & Art Forum 12, 229-236.

[7] Yeo, T. W., Jeong, H. S., Jeong, B. H., 1999, Study on Metallurgical Characteristic of Weld Metal for Gray Cast Irons, The Korean Welding & Joining Society, 10-12.

[8] Cho, S. M., Kim, J. H., Kim, Y. S., 1999, A Study on the Repair Welding Methods for Cylinder Block of Diesel Engines, Journal of

the Korean Society of Marine Engineering, 23:3 331-337.

[9] Kim, J. G., Kang, M. S., Kim, Y. S., 2006, A Study on Characteristics of Repair Welding for Cast iron Part of Diesel Engine for Ship, Journal of Ocean Engineering and Technology, 20:2 41-45.

[10] Lee, H. K., Woo, J. W., Jung, D. Y., Song, H. S., Ha, C. S., Kang, C. K., 2014, A Study of Remanufacturing Technology for Performance Restoration of Used Common Diesel Engine, Transactions of KSAE, 1367-1372.

[11] Jeong, H. D., Lee, J. H., Hong, M, S., 2011, Influence of Nickel Alloy Weld on the Mold Surface Cracks, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 20:4 478-483.