

## 선박엔진 부품의 고능률 보수용접기술

김영식<sup>†</sup> · 길상철<sup>1</sup>

(Received November 4, 2016 ; Revised November 25, 2016 ; Accepted November 25, 2016)

### High-efficiency repair welding technology for marine engine components

Young-Sik Kim<sup>†</sup> · Sang-Cheol Kil<sup>1</sup>

**요약:** 현재 국내에서 공장 보수용접이 가장 많이 이루어지고 있는 선박 엔진 부품은 피스톤 크라운과 배기밸브이다. 또한 선박 엔진 밸브와 크랭크 축 등의 경우에는 신규 부품에서도 성능향상을 위해 표면개질방법으로 오버레이 용접이 시공되고 있다. 용착률을 높이는 고능률 오버레이 용접 공정으로 Hot Wire GTAW, Cold Tandem GMAW, Band Arc SAW, Tandem SAW법이 개발되어 있고, 용사방법으로 PTA공정이 현장에서 많이 시공되고 있다. 입열량 제어가 용이한 공정으로 GMAW-Pulse, CMT 용접공정이 있다. 엔진 배기밸브의 보수를 위한 오버레이공정에서 열영향부에 가까운 모재 내에 액화균열이 발생하는 경우가 있어 주의를 요한다. GMAW-Pulse 공정과 CMT공정에서는 입열량 제어가 용이하여 높은 용착속도를 유지하면서도 액화균열의 발생 없이 엔진 밸브의 보수 또는 표면 개질 목적으로 시공이 가능하다. 최근에 국내에서 고능률 용접 공정으로 선박엔진의 보수 또는 표면 개질 목적으로 사용 가능한 Super-TIG 용접공정이 개발되어 있다. 이 공정은 아크를 플라즈마 스트림이라고 보고 전류증가에 따라 커지는 아크압력을 막으면서도 용가재의 용융 효율이 극대화 되도록 폭이 큰 C형의 오목한 용가재를 발명하여 용착률을 획기적으로 향상시킨 용접공정이다.

**주제어:** 보수용접, GMAW-Pulse, CMT, Super TIG

**Abstract:** Of the marine engine components, the piston crown and exhaust valve are repaired most frequently. These works are conducted through conventional welding processes such as GTAW or SAW, domestically in marine engine repair factories. New high-efficiency welding or overlay processes such as tandem SAW, tandem MAG, hybrid TIG-MIG welding, pulsed-GMAW, CMT welding, and super TIG welding have been developed recently. Moreover, the plasma transferred arc (PTA) process is an efficient spray method for overlaying on the exhaust valve. In this review paper, the new high-efficiency repair welding methods are introduced for marine engine components. The problems due to repair welding for marine engine components are also presented.

**Keywords:** High efficiency-repair welding, Pulsed-GMAW, CMT, Super-TIG

### 1. 서론

선박과 선박 엔진 부품의 보수 수리 용접은 합금 성분, 구속조건, 가혹한 작업환경과 같은 요인으로 고난도의 기술이 요구되며, 생산성 향상을 위해서는 고능률 용접기술이 필요하다.

선박 엔진 부품 중 보수 용접이 가능한 부품은 피스톤 크라운, 배기밸브, 실린더 라이너, 피스톤 로드, 크랭크 축 등을 들 수 있으나 현재 국내에서 보수용접이 이루어지고 있는 부품은 주로 피스톤 크라운과 배기밸브에 한정되어 있다. 또한 선박엔진 부품의 성능향상을 위해 엔진 밸브, 크랭크 축 등의 경우에는 신규 부품에서도 표면개질방법으로 오버레이 용접이 시공되고 있다. 현재 이들 엔진 부

품의 보수 또는 표면 개질 목적으로 채용되고 있는 공정은 용접공정과 용사공정으로 크게 구분할 수 있다. 용접공정으로는 GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), GMAW (Gas Metal Arc Welding), SAW (Sub-merged Arc Welding), SMAW (Shielded Metal Arc Welding), CMTW (Cold Metal Transfer Welding), Laser Cladding 등을 들 수 있고 용사방법으로는 PTA (Plasma Transferred Arc)Spraying, HVOF (High Velocity Oxygen Fuel)Spraying, Cold Spraying 등을 들 수 있다. 이 중에서 현재 국내에서 시공되고 있는 공정은 GTAW, GMAW, SMAW, SAW와 같은 기존의 용접공정이 대부분을 차지하고 있다. 그러나 이들 용접공정은 용착률이 낮고 입열량 제어가 어려운 점 등으로 개선이 요

<sup>†</sup> Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5131-6054>): KISTI (Korea Institute of Science and Technology Information) ReSEAT Program, E-mail: yskim@kmou.ac.kr, Tel: 051-416-6264

<sup>1</sup> KISTI, E-mail: kilsc@kisti.re.kr, Tel: 02-3299-6112

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

구되고 있다.

이 해설 논문에서는 최근 새롭게 개발된 용접기술 중에서 선박엔진 부품의 보수용접으로 적용 가능한 고능률의 용접기술들을 소개하고, 또한 선박엔진부품의 보수와 수리 기술에 관한 연구 동향과 특허동향을 분석하여 국내의 엔진부품 보수 수리 산업의 생산성 향상과 기술개발에 기여하고자 한다.

## 2. 선박 엔진부품의 맞춤형 고능률 보수용접방법

### 2.1 선박엔진 부품의 보수 수리에 적용되는 용접기술의 특징

선박엔진의 설계수명은 일반적으로 25~30년으로 긴 것이 특징이다. 이 때문에 장기간의 운전 기간에 걸쳐 안전운전을 가능케 하기 위하여 보수수리가 필요하다. 즉 운전 중 부식에 의한 두께 감소나 균열 등의 열화 손상이 발생하며, 이를 용접보수방법으로 원상태로 복구한다.

보수는 국내의 관련 규격에 합치하도록 해야 하며 그 효과(일시적 처치, 중장기적인 대응, 항구적인 대응)를 고려하여 종합적인 판단하에 결정한다. 보수 방법으로는 용접방법이 외에도 기계적인 공법, 비금속을 이용하는 방법도 있다. 보수해야 할 대상과 범위에 따라서 다르나 운전 중 발견되는 결함이나 열화 손상부는 이들을 완전히 제거한 후에 용접에 의한 보수를 하는 것이 기본이다. 선박 엔진 부품의 보수용접은 부품의 해체 후 공장에서 보수 용접을 실시하는 경우와 선박 내에 엔진이 장착된 상태에서 보수 용접을 시행하는 경우로 나눌 수 있다. 공장에서의 부품 수리 용접은 주로 오버레이 용접에 의해 수행되고 있다. 오버레이 용접에서는 가능하면 용입이 얇고 비드폭이 넓어서 용착률이 높을 것이 필요하다. 또한 용가재와 모재와의 희석에 의해 형성된 용착금속이 모재와 같거나 그 이상의 특성을 발휘할 수 있도록 용가재의 성분조성과 용접조건을 설정해야 한다. 엔진이 장착된 상태에서의 부품 보수용접은 대단히 큰 구속상태에서 용접이 이루어지기 때문에 용접 균열 등의 결함발생이 쉽게되어 철저한 시공관리가 필요하다. 아울러 전자세 용접이 요구되는 경우가 많으며, 고도의 기량이 요구된다.

### 2.2 선박엔진 부품의 고능률 보수 오버레이 용접 방법

#### 2.2.1 고능률 SAW용접

피스톤 크라운(piston crown)부와 같은 파손된 부품의 재생에 적합한 대표적인 용접공정은 서브머지드 아크용접(SAW: Submerged Arc Welding)공정이다. SAW 공정은 아크가 노출되지 않기 때문에 열효율이 높다. 또한 깊은 용입이 얻어져서 이음부의 그루브 간격의 허용오차를 크게 할 수

있어 비용절감을 가져올 수 있다. 또한 용접 속도가 높고, 용접 폼(fume)의 해독을 줄일 수 있다. SAW법의 고능률 용접법으로 최근 SF-SAW법이 개발되어 있다[1]. 이 방법은 용융 플럭스를 와이어 속에 충전하여 이음매 없는 코어드 와이어(Seamless Flux Cored Wire)를 제조하여 이를 이용함으로써 종래의 솔리드 와이어에 비해 동일 용접조건에서 고속 고능률의 용접이 가능하다. 이 방법은 또한 플럭스 속에 유효합금 성분이 첨가됨으로써 탁월한 용접금속의 기계적 성질을 얻을 수 있다.

#### 2.2.2. 탄뎀(Tandem) SAW법에 의한 생산성 개선

최근에는 탄뎀 SAW 용접이 풍력타워 조립과 같은 후판 용접에 사용되고 있다[2]. 탄뎀 SAW 용접은 Figure 1과 같이 선행토치(lead torch), 후행토치(tail torch)로 구성되어 있으며, 두 개의 용접 토치가 같은 방향으로 이동하며 용접을 수행한다. 이와 같은 방식의 용접기법은 용접 공정의 횟수를 줄이고, 열손실을 최소화하여 용접공정에서의 열효율을 높일 수 있다. 다전극 용접은 선행토치(Lead torch)가 용접을 진행하게 되면 일정 간격을 유지한 채 후행토치(Tail torch)가 선행토치가 용접한 모재위에 연속적으로 2차 용접을 수행하게 된다. 높은 전류와 전압을 사용함으로써 용착량을 증가시키고, 빠른 용접속도로 입열량을 감소시켜 생산성을 향상시키는 용접 기법이다.



Figure 1: Tandem SAW torch [2]

용착속도를 더욱 향상시킬 수 있는 용접법으로 탄뎀투윈(Tandem-Twin) SAW법이 최근 개발되어 있다[5]. 이 방법은 Figure 2와 같이 4 개의 전극(보통 전부 2.5mm)이 다 같이 1개의 용융지를 형성한다. 이 용접법은 2대의 용접전원과 2대의 와이어 송급 유닛을 사용한다. 이 용접법은 1,800A를 초과하는 높은 전류로 100cm/min.을 초과하는 속도로 입열량을 제한하여 비드단면적을 감소시킨다. 이 때문에 후속비드에 의한 템퍼링을 빈번하게 시행한다. 이 템퍼링효과에 의해 용접금속이나 열영향부의 기계적 성질이 개선된다. C-Mn합금 와이어 전극을 이용하여 최저 -50℃에서의 저온인성을 만족시키기 위해서는 패스수를 증가하여 다층 용접을 시행하는 것이 바람직하다.

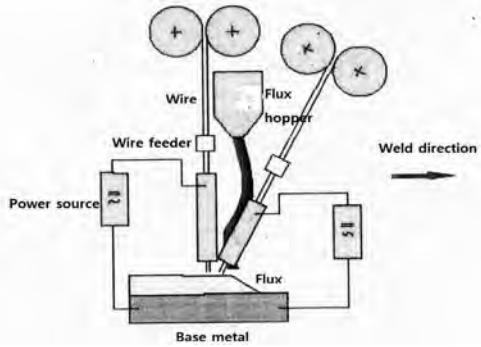


Figure 2: Tandem twin SAW [3]

2.2.3 탄뎀 MAG 용접법

용착량 증대에 의한 고능률 오버레이 용접법으로 탄뎀 MAG 용접법이 개발되어 있다. 이 용접법은 근접한 2분의 용접 와이어로부터 동시에 아크를 발생시켜 1개의 용융 풀에서 2개의 아크열을 효율적으로 이용하는 MAG용접법이다. Figure 3에 탄뎀 MAG 용접법의 개요도를 보인다. 이 용접법에서는 2개의 아크가 같은 극성이기 때문에 전자력에 의해 서로 끌어당겨 용적이 아래쪽으로 이행하지 않고 서로의 아크방향으로 향하는 현상이 나타날 수 있다. 탄뎀 MAG용접법을 이용하여 오버레이 용접 시 적절한 용입 깊이를 확보하면서 스파터의 발생이 없이 용착량을 고능률로 하기 위해서는 선행하는 아크와 후행하는 아크에 있어서 각각 다른 최적의 실드가스 조성의 조정이 필요하다.

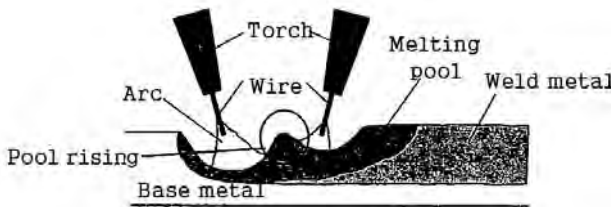


Figure 3: Schematic of Tandem MAG welding [4]

Ar+20%CO<sub>2</sub>의 혼합 가스를 선행, 후행 다 같이 실드가스로 사용 했을 때 비하여 Ar+CO<sub>2</sub> 가스의 혼합비를 선행과 후행에서 최적화 했을 때 스파터의 발생이 현저히 줄어드는 실험결과가 발표되어 있다[4].

2.2.4 TIG - MIG 하이브리드용접

TIG - MIG 하이브리드용접은 MIG 용접법과 TIG 용접법의 장점을 취할 수 있는 용접법으로 그 개요도를 Figure 4에 보인다[4]. 이 용접법은 MIG 용접전원과 TIG 용접전원에 각각 단독으로 전용의 용접초치를 접속하여 전극간 거리도 일정 범위로 배치하고 용접 방향은 TIG용접 선행으로 MIG용접 후행으로 한다. 이 용접의 시공에 있어서는 MIG 용접은 보통의 DCEP로, TIG용접은 보통의 DCEN으로 서로 역극성으로 하기 때문에 서로의 아크가 반발하는 경향

이 있다. 그러나 TIG용접의 전류를 MIG용접의 전류보다도 크게 함으로써 서로 간의 아크를 안정화 시킬 수 있다. TIG-MIG 하이브리드 용접은 재래의 일반적인 TIG 용접법의 품질을 유지하면서도 용접속도나 용착량을 3~4배로 높일 수 있어서 매우 고능률의 용접법이다.

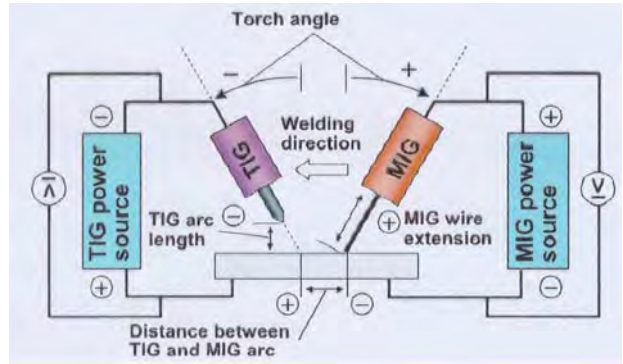


Figure 4: TIG-MIG hybrid welding [5]

2.2.5 펄스 MIG 용접과 CMT 용접

초내열합금과 같은 Ni 기합금계 선박엔진 배기밸브의 오버레이 보수용접 시는 용접 공정으로 희석률이 낮고 저입열화가 요구된다. 이러한 요구에 부합하는 공정으로 펄스 MIG 용접과 CMT 용접이 있다. Figure 5는 펄스 MIG 용접 공정의 펄스 파형을 보인 것이다[6]. 펄스 MIG 용접은 펄스 주기에만 용적 이행이 이루어지기 때문에 일반의 MIG 용접의 단락 이행과 비교하여 입열량 제어가 용이하게 되어 용입이 얇고 희석률을 낮게 유지할 수 있다.

펄스 MIG용접에서의 시공조건 범위가 협소함을 극복하기 위해 CMT(Cold Metal Process) 프로세스가 초내열 합금계 엔진 부품의 오버레이 보수목적으로 이용되고 있다. Figure 6은 CMT 프로세스의 개요를 보인 것이다[7].

CMT 프로세스는 와이어의 전진과 후퇴작용으로 아크기간과 단락기간을 제어함으로써 입열량을 작게 유지할 수 있다. 즉 아크기간에 와이어를 전진시키면서 와이어 선단을 가열하고 와이어 선단이 모재와의 접촉이 일어나 단락이 발생하여 아크가 끊어짐과 동시에 용접전류를 낮춘다.

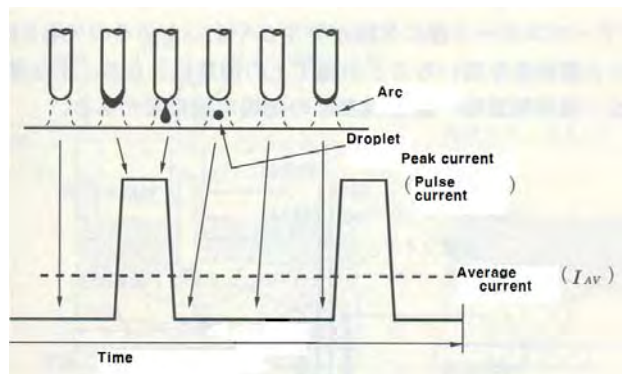


Figure 5: Pulse wave pattern in Pulse MIG welding [6]

다음단계에서 용접와이어를 후퇴시켜 다시 아크를 발생시켜 같은 공정이 반복됨으로서 용입깊이와 회석률, 입열량을 모두 낮게 유지할 수 있다.

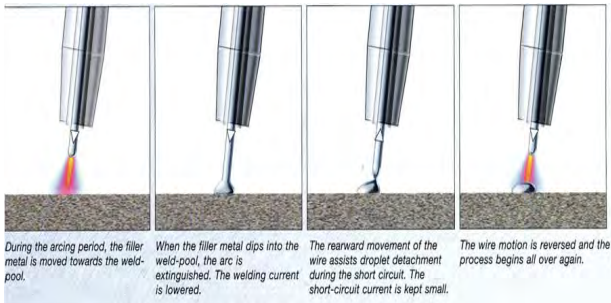


Figure 6: CMT(Cold Metal Transfer) process [7]

CMT 공정을 INCONEL 718 초내열합금의 클래딩에 적용하여 용접공정 파라메타의 적절한 제어를 통해 낮은 회석률과 포로시티(porosity)와 같은 결함이 발생되지 않은 건전한 클래딩부를 얻을 수 있음이 보고되어 있다[8].

2.2.6. 레이저 /아크 하이브리드 용접

레이저/아크 하이브리드 용접은 CO2 레이저, YAG 레이저, 반도체 레이저, 파이버 레이저 등의 레이저와 TIG, MIG, MAG, 플라즈마 등의 아크열원을 하이브리드 화하여 각기 단독의 열원에 의한 용접의 결점을 보완하여 용융성을 배가시켜 고효율, 고품질의 용접법으로 발전시킨 용접법이다. 따라서 레이저/아크 하이브리드 용접은 레이저 단독 용접이나 아크 단독용접에 비해 고능률, 고신뢰성, 저비용의 용접으로 알려져 자동차, 조선, 항공, 철도차량, 가전 산업 등 제조업에서의 응용이 세계적으로 활발히 전개되고 있다. 선박엔진 부품의 고능률 오버레이 용접으로는 레이저/아크하이브리드 공정 중에서도 낮은 회석률, 그리고 저 입열을 실현시킬 수 있는 레이저/ CMT 아크 하이브리드 공정이 바람직하다고 판단된다. Figure 7은 레이저/CMT 아크 하이브리드 용접의 개요도를 보인다.

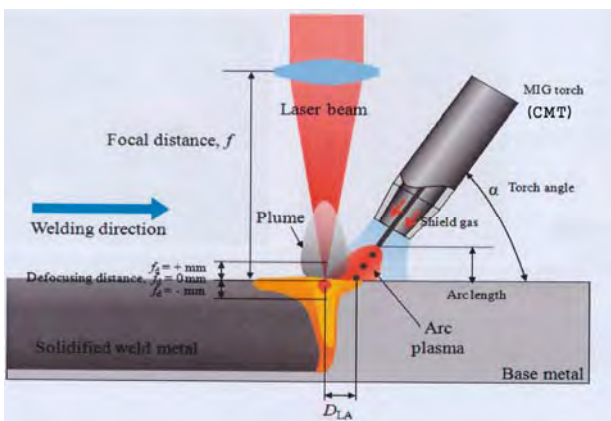


Figure 7: Laser/arc hybrid welding [9]

디스크레이저/ CMT 아크 하이브리드 용접시, 양 열원 간의 거리, 용접전류, 용접속도 등의 각종 변수가 용입깊이, 회석률, 용접 비드 형상에 미치는 영향에 관한 연구 결과가 보고되어 있다[9]. 동 연구에서 오버레이 용접 시는 어스펙트 비(aspect ratio : 용입깊이/ 비드폭)를 작게 유지하는 것이 필요하며 이를 위해서는 입열량을 작게 설정하는 것이 바람직하다는 것이 밝혀졌다.

용착속도를 향상시키기 위해 필러(filler) 병용의 레이저/아크 하이브리드 용접법(FLA : Filler-aided Laser-Arc Hybrid Welding)이 개발되었다. Figure 8은 이의 개요도를 보인 것으로 용접전류를 올리지 않고 용착속도를 일반의 하이브리드 용접법의 2~3배로 향상시킬 수 있음이 밝혀져 있다[10].

필러 병용의 레이저/아크하이브리드 용접법은 용접 입열량을 낮게 유지하면서 용착속도를 높일 수 있어 낮은 회석률이 요구되는 선박용 엔진 밸브와 같은 초내열합금의 고능률 보수 용접으로 양호한 공정이라고 할 수 있다. 더욱 용착률을 향상시키는 방법으로 필러와이어를 가열하여 공급하는 핫 와이어 필러 병용 레이저/아크하이브리드 용접도 생각할 수 있다.

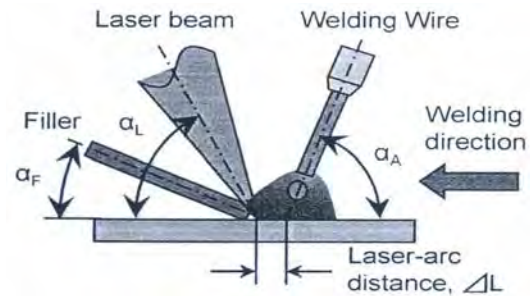


Figure 8: Schematic of Filler-aided Laser-Arc Hybrid Welding [10]

2.2.7. Super TIG 용접

아크 특성에 관한 인식 전환을 통해 재래의 원형 용접 와이어에서 그 형상을 변화시켜 용착효율을 혁신적으로 개선시킨 Super TIG 용접법이 국내에서 최근 개발되었다[11]. Figure 9는 Super-TIG 용접법의 원리를 보인 것으로 와이어 단면이 원형에서 C형으로 변화되었음을 보이고 있다. Super-TIG 용접은 과거에 아크를 플라즈마 기둥(plasma column)으로 인식하고 원형 와이어를 공급하여 왔던 것에서 아크를 플라즈마 스트림(plasma stream)으로 인식하여 그 스트림에 부합하도록 와이어를 C형으로 변화시켜 공급함으로써 용착 효율을 대폭 개선시킨 용접공정이다.

Figure 10은 Super-TIG 용접 시 광폭 C형 용가재(C-srtip)가 아크 안으로 송급되는 모양을 보인 것이다. 용가재의 폭이 3~10mm인 C형 용가재를 공급함으로써 최대 30Kg/hr의 용착속도를 실현시킬 수 있다. 원형 용가재를 사용하는 일반 TIG 용접에서는 0.5~1.0 Kg/hr용착속도를 낼 수 있는 것에 비해 30배의 용착속도를 Super-TIG 용접에서 실현시킬 수 있다. Super-TIG 용접공정은 용착효율이 높으면서도 전 지구적인 환경규제가 심화되어 가고 있어 기존의 고능

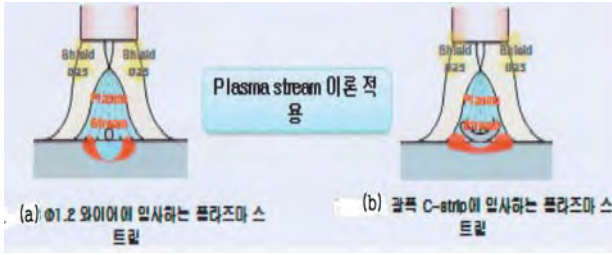


Figure 9: Principle of Super-TIG welding [11]

를 용접방법인 SAW 용접법은 클린 고능률의 GTAW용접 방법으로의 전환이 필요한 시점이다. 이러한 관점에서 새로이 개발된 Super-TIG용접법은 그 적용범위가 매우 확대되어갈 것으로 예견된다.

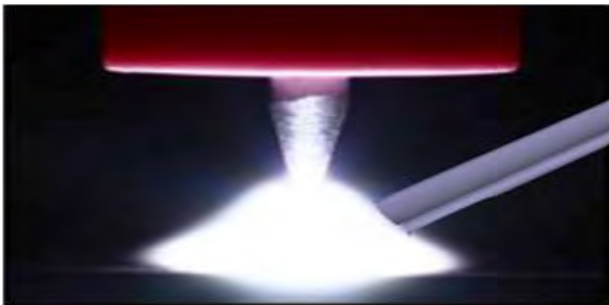


Figure 10: Shape of wide filler wire in Super TIG welding [11]

2.2.8. PTA(Plasma Transferred Arc) 용사 공정

초내열합금제 선박 엔진 밸브의 재생이나 표면개질처리 방법으로 PTA 용사공정이 개발되어 있다[12]. PTA 용사공정의 개요도를 Figure 11에 보인다. 이 방법은 여타의 오버레이 공정에 비해 높은 용착효율과 낮은 희석률을 실현할 수 있는 공정으로 선박엔진 밸브와 같은 고내열 부품의 보수 시 효율적인 공정이라 할 수 있다. PTA 용사공정에 의한 오버레이층은 금속적 결합력이 우수하고 낮은 용착금속량에 의한 잔류응력의 최소화로 오버레이층의 내구성이 탁월하다. 이 방법은 또한 공급분말의 다양화가 가능하여 기능성 표면 개질층의 제작이 가능하며 폼(fume)이나 아크의 섬광이 강하지 않아 친환경적인 공정이라고 할 수 있다.

2.2.9. 레이저를 이용한 부가 제조(Laser Additive Manufacturing : LAM) 공정

레이저를 이용한 3차원 적층 조형을 이용하여 엔진 부품의 손상부에 대한 보수 시공이 가능하다. Figure 12는 레이저를 이용한 3차원 적층 공정의 개요를 보인 것이다[13]. 이 방법은 레이저를 집광시킨 포인트에 실딩 가스와 함께 분말을 공급함으로써 분말을 용융결합 시켜 3차원 조형물을 형성한다. 이 방법은 LAM(Laser Additive Manufacturing) 이라고 한다. LAM은 제1층 위에 제2층이 적층될 때에 금

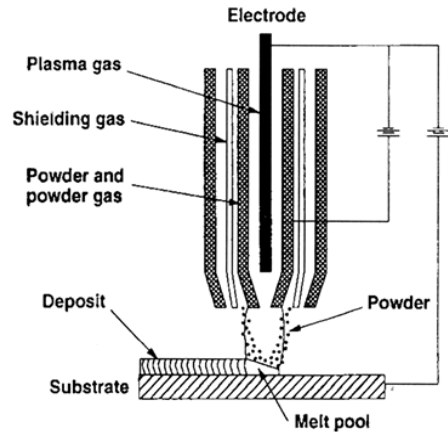


Figure 11: Schematic of PTA Process [12]

속분말이 레이저에 의해 용융분말이 되어 제1층 상면을 용융시켜 제1층과 접합된다. 따라서 금속분말을 용융하여 적층하는 방법은 용접의 일종으로 레이저 열전도형 용접에 상당한다. 제1층의 재료와 제2층의 재료가 같은 재료인 경우 동종재료 용융접합이며, 이것을 여러 층 적층해 가면 같은 재료로 구성되는 조형체가 조형된다.

적층조형 시 제1층은 모재가 되고 제2층에는 모재와는 다른 특성을 지닌 재료, 예를 들면, 내식성, 내마모성의 재료를 형성하는 방법은 클래딩(Cladding)이라고 한다. 이 경우 이종재 용융접합이며, 최근 개최된 레이저가공의 국제 회의에서는 클래딩은 LAM의 범주에 포함시켰다. 레이저를 이용한 3D 적층 공정으로 Incomel 718과 Waspaloy의 Ni기 초내열 합금 엔진부품의 보수사례가 발표되어 있다[14]. 응고균열과 열영향부의 액상균열 방지하여 건전한 보수 수리를 위해서는 레이저의 낮은 레이저 열원 밀도와 빠른 레이저 스캐닝속도와의 조합으로 가능하며 비교적 거친 입자의 분말을 사용하는 것이 바람직하다.

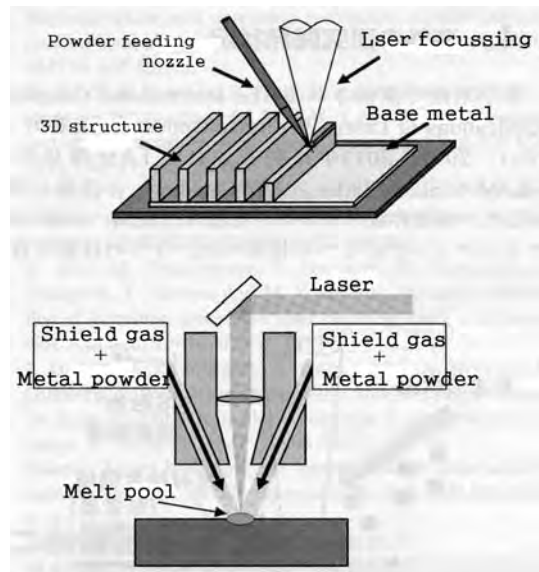


Figure 12: Schematic of LMD(Laser Metal Deposition) [13]

### 3. 보수용접부의 결함 방지 기술

선박엔진에 있어서 공장 보수의 주 대상인 연소실을 구성하는 엔진밸브와 피스톤 크라운 부품은 내열강 또는 초내열합금으로 구성되어 있다. 이들 소재에 대한 오버레이 용접을 시공할 때에 문제되고 있는 주요 결함은 용접균열로, 응고균열과 액화균열 및 재열균열이 있으며, 기타의 결함으로 기공, 산화물계 개재물, 용입 불량 등을 들 수 있다.

#### 3.1. 응고균열

응고균열은 주로 용착금속에서 1,000°C 내외의 고온에서 발생한다. 용융금속의 응고 과정에서 주상 결정이 성장함에 따라 잔류액상의 용질농도의 농도는 점차 높아지고, 응고의 최종단계는 이러한 잔류액상이 주상결정 경계에 저융점의 액막을 형성하게 된다. 저융점의 액막에 인장변형/응력이 작용하게 되면 균열이 발생한다. 응고균열에 관련된 불순물 원소로는 S, P 등이 있다. 따라서 응고균열을 방지하기 위해서는 적절한 용가재를 선택하여 이러한 불순물 원소를 저감시키고 결정립을 미세화 시켜야 한다. 또한 냉각속도를 빠르게 하기 위해 가능한 한 예열을 피하거나 입열량을 작게 유지하는 것이 바람직하다.

#### 3.2. 액화균열

액화균열은 용융경계부에 인접한 HAZ의 결정립계에서 발생하는데 석출물이나 개재물의 국부용해 또는 불순물원소의 입계편석에 의하여 입계에 액막이 존재하고 그 때 한계 값 이상의 인장응력이 존재하여 발생하는 균열이다.

Figure 13은 Nimonic 80A인 Ni기 초내열합금 위에 PTA 오버레이 시공을 하였을 때 HAZ부에 나타난 액화균열 양상이다. 여기서 (b) 그림은 (a)의 균열부분을 확대해서 나타낸 것으로 미세한 균열이 결정립계를 따라 발생하였음을 보이고 있다. 액화균열부의 EDX분석결과를 Figure 14에 보인다. 이결과에 의하면 액화균열부에는 저융점원소인 Si의 편석이 Nimonic 80A 모재의 입계에 존재해 있었고 이 편석이 PTA 공정 중 액막상태로 되어 냉각과정에서 발생하는 응력의 영향을 받아 미세 균열로 발전하였음을 추정할 수 있다.

액화균열을 방지하기 위해서는 결정립을 미세화하거나 모재의 불순물 원소를 적극 억제시켜야 한다. 액화균열은 모재 자체의 문제이므로 방지하기 어려우나 앞에서 서술한 펄스 GMAW용접을 하거나 CMT 용접공정을 이용함으로써 입열량을 최소화시켜 수축응력을 최소화 하는 노력이 필요하다.

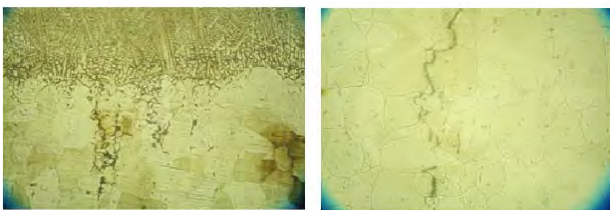


Figure 13: Photo. of liquidation cracking in HAZ of Nimonic 80A [15]

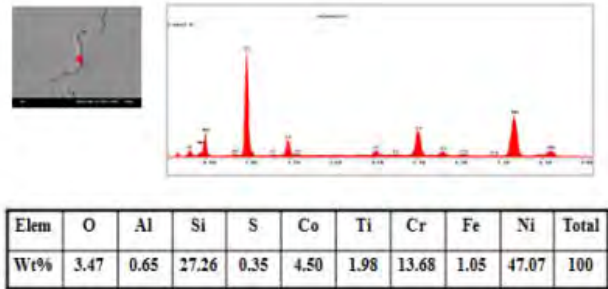


Figure 14: Result of EDX analysis for liquidation cracking [15]

#### 3.3. 재열균열

재열균열은 PWHT 중 또는 고온에서 사용 중에 발생하는 균열이다. 발생하는 원인은 Ti 과 같은  $\gamma'$  상의 석출 촉진원소나 입계취약화의 주원인이 되는 S 함량이 많을수록 발생하기 쉽다. 재열균열 방지를 위해서는  $\gamma'$  상의 석출영역에서 급랭하거나 결정립의 미세화, 최적량의 Ca 이나 Mg를 첨가하는 것, 용접분위기나 PWHT 중의 분위기 산소의 혼입을 억제하는 것과 잔류응력의 저감대책이 필요하다.

#### 3.4 기타결함

내열재료 부품의 오버레이 용접 시 용접균열 외의 결함으로는 기공(blowhole), 산화물계 개재물 생성, 용입불량 등이 있다. 기공의 발생은 용접 금속 중의 가스성분과 가스량에 의해 영향을 받는다. 기공을 방지하려면 플럭스 중에 Al, Ti 등의 탈산제의 첨가가 필요하고 용접재료의 건조가 중요하다.

Ni 초내열 합금은 용탕의 흐름이 불량하므로 용접비드가 평평하게 되지 않은 경향이 있다. GTAW의 경우 과도한 용가재의 공급에 의해 융합불량이 발생하기 쉬우므로 용접전류에 적절한 송급량의 선정이 중요하다. 산화스케일의 혼입은 용접 그루브 근방의 세정이나 용접분위기의 실딩(shielding)에 유의할 필요가 있다.

## 4. 선박엔진 부품의 보수 용접기술의 국내외 동향

### 4.1. 연구동향

Web. of Science 및 NDSL 데이터베이스에서, “Marine engine components, Piston crown, Engine valve, Crank shaft, Repairing or overlaying welding”을 Key words로 사용하여 검색한 결과에 의하면 1996년부터 2016년, 20년간 선박엔진 보수수리와 관련한 논문은 총 16건이 검색되었다. 이들의 각 부품별 분포를 도해하면 Figure 15와 같이 나타났다. 이 중에서 3건이 해외 논문이고 나머지 13건이 국내논문으로 밝혀져 대부분이 국내 논문이었다.

전체 논문 중 60%가 Exhaust valve와 Piston crown의 보수에 관한 것으로 이것은 엔진 수리업체에서 실제로 이 부

품에 대한 보수작업이 가장 많이 이루어지고 있기 때문인 것으로 생각된다.

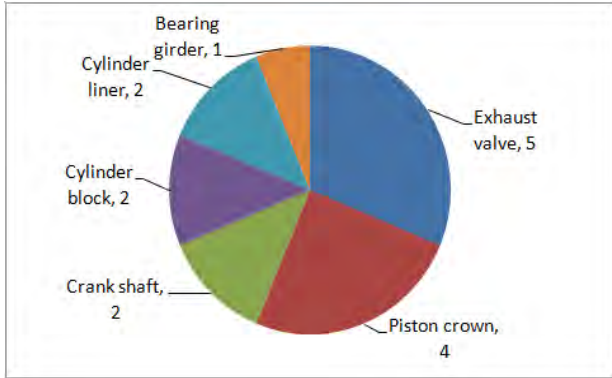


Figure 15: Distribution of research papers related to repairing of marine engine component [16]

이들 연구의 대부분의 연구는 오버레이 법에 의해 Exhaust valve나 Piston crown의 용접 보수를 할 때에 수동 피복아크용접이나 GTAW용접 시공 시 용접금속과 용접열 영향부의 부식특성과 기계적 특성의 변화를 규명한 것이다 [17]-[19]. 내열강 및 Ni기 초내열합금계 Inconel 625와 Inconel 718 용가재를 이용하여 SAW와 GTAW 용접으로 피스톤 크라운부의 오버레이 보수 용접 시 용가재의 종류에 따른 부식특성과 기계적 특성을 조사한 결과 내식성은 Inconel625에서 가장 우수한 한편 경도 값은 Inconel 718에서 가장 우수한 특성을 보인다는 결과를 발표하였다[20]. 이상의 내용을 살펴보면 보수용접 공정에 관한 연구로 플라즈마 아크를 이용하여 보수용접 시 기술적 내용에 관한 1건의 연구가 발표되어 있을 뿐, Exhaust valve나 Piston crown의 오버레이 보수용접을 위해 능률향상이나 용접결함, 잔류응력저감 등 용접 시공에 관한 연구는 발표되어 있지 않은 현상에 있다[21]. 선박 엔진의 크랭크축의 용접 보수에 관한 연구로는 엔진의 제조단계 또는 사용 중 크랭크축에서 발생한 균열을 용접방법으로 보수한 사례와, 균열 부를 레이저 클래딩으로 보수하는 방법에 관한 연구가 발표되어 있다[22][23].

실린더 라이너의 보수 재생방법으로 TPD법 (Thermal Plastic Deformation method)에 관한 연구가 발표되어 있다 [24]. 이 방법은 선급규격의 마모량 이상으로 마모되어 내경이 증가된 실린더 라이너에 대해 그 내부에 고주파 가열 코일을, 외부에 냉각수 코일을 설치하고 내부의 고주파 가열 코일을 통해 750~800℃까지 가열 후 외면의 냉각수 코일을 이용해서 외면을 급랭하게 되면 압축응력이 발생하여 소성변형이 일어나면서 실린더라이너의 직경이 수축하게 되는 원리를 이용한 것이다.

TPD법에 의한 선박엔진의 주철제 실린더 라이너의 재생 방법은 라이너 모재의 고유한 야금학적 특성에 영향을 미치지 않으면서 마모한도를 초과한 내경을 수축시켜 효율적으로 라이너 재생이 가능한 방법임이 실험을 통해 입증되었

다. 용사법에 의한 주철제 실린더 라이너 재생 방법에 관한 연구가 발표되어 있다[25]. 마모량이 초과되어 폐기단계에 있는 주철제 실린더 라이너에 대해 Fe-Ni-Al계 용사분말을 이용하여 플라즈마 용사장치로 그 내면에 용사피막을 형성함으로써 주철제의 자기 윤활성과 침윤성 및 내마모성이 개선됨을 확인하였다. 또한 용사피막 처리된 실린더라이너를 디젤엔진에 장착하여 실기시험을 실시한 결과 실 엔진에 적용할 수 있음을 확인하였다.

선박용 디젤 엔진 블록의 보수용접방법에 관한 연구가 수행되어 주철제 실린더 블록에서 발생한 피로균열을 용접 방법으로 보수가 가능함이 보고되어 있다[26]. 주철제 엔진 블록의 용접 시 예열과 층간온도 유지, 슬래그 혼입방지, 피닝 공작의 적용, 스테르를 이용한 구속 등의 적용에 의해 용접결함이 없는 모재와 동등이상의 용접부를 얻을 수 있음이 확인되었다.

#### 4.2 특허동향

NDSL 데이터베이스로부터 선박엔진 부품의 보수 또는 오버레이 관련 특허 건수를 검색한 결과 Figure 16과 같이 정리되었다. 엔진 밸브의 보수 또는 오버레이 관련 특허가 가장 많은 21건이었고, 실린더라이너 보수 또는 재생이 6건, 피스톤 크라운 보수 건이 2건으로 나타났다.

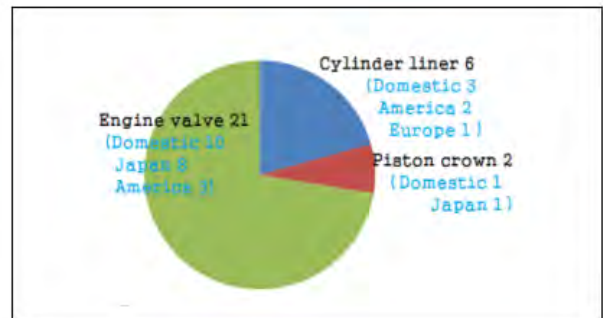


Figure 16: Distribution of number of patents related to repairing of marine engine component [16]

각 부품에 대한 보수 또는 오버레이기술 특허를 국제적으로 살펴보면 국내 특허가 전체의 절반 정도를 차지하고 있어 국내에서 선박엔진부품의 보수용접에 가장 많은 관심을 갖고 있음을 나타낸 것이다. 실린더 라이너 재생 기술은 앞서 연구동향에서 언급한 회주철의 열 소성변형을 이용한 TPD 기술에 관한 것이며[27][28], 피스톤 크라운 오버레이 기술은 사용시간 연장을 목적으로 내식성 용가재를 이용하여 아크용접방법으로 오버레이 용접을 시공하는 방법에 관한 것이다[29].

가장 많은 특허 출원이 이루어지고 있는 엔진 밸브 보수에 관련 특허내용을 정리하면 Figure 17과 같다. 오버레이 재료와 방법 관련이 16건으로 가장 많고, 오버레이부의 비파괴검사로 UT에 관한 특허 3건, 오버레이 장치에 관한 특허가 2건으로 집계되었다.

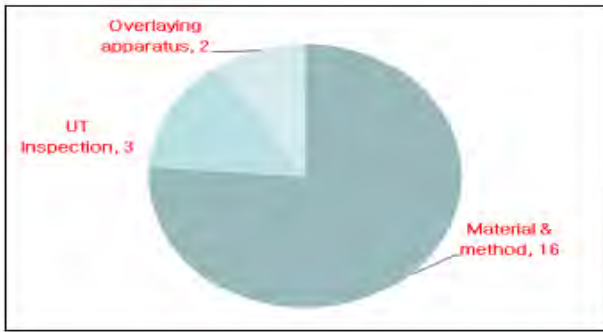


Figure 17: Distribution of patents related to overlaying on exhaust valve [16]

마모된 엔진 배기 밸브와 밸브 시트의 재생 방법으로 Ni 기 초내 열 합금을 이용하여 아크용접방법으로 클래딩 (cladding)하는 방법[30], Co기 분말을 이용한 플라즈마 용사방법으로 재생하는 방법[31], Co 계합금으로 내마모 내부식의 오버레이 하는 방법[32], 분말 합금의 레이저 클래딩[33] 방법 등에 관한 것이 출원되어 있다.

이상의 선박 엔진부품의 보수와 관련한 지난 20년간의 특허 출원 활동을 요약하면 전체 30 건 미만의 저조한 특허 건수를 기록하고 있고 그 중에서도 절반이상이 국내에서 이루어진 국내특허로 파악된다. 그리고 레이저 클래딩을 제외한 대부분의 특허 출원이 20년의 유효기간이 지난 것으로 파악되었다. 따라서 지난 20여 년간 선박엔진 부품의 보수 수리에 대한 기술 혁신이 이루어지지 않고 과거의 기술을 답습해온 것으로 파악되고 있다.

### 5. 보수산업 활성화를 위한 정책제언

○ 현재 조선 산업과 조선기자재산업의 불황속에서 선박 수리 산업은 활성화 가능성이 더 커질 수 있는 환경에 있다. 선박엔진 부품 수리산업은 글로벌 시장규모가 매우 큰 산업으로 글로벌 기술력 경쟁력을 향상시켜 나가야 할 시점에 있다.

○ 국내의 대부분의 선박엔진 수리업체에서는 선박엔진 부품의 보수용접을 전래의 수동 아크용접에 크게 의존하고 있어 기술의 후진성을 벗어나지 못하고 있다. 생산성 향상을 위해 이 연구에서 제시한 탄템 SAW, TIG-MIG 하이브리드용접, 슈퍼 TIG 용접, 레이저-아크 하이브리드용접과 같은 고능률 용접법의 적극적인 도입이 필요하다.

○ 고능률의 새로운 용접공정을 도입하고 수리 기술의 기술개발을 위해서는 수리업체 단독 기업형태로는 재정적 영세성으로 한계가 있다. 따라서 이를 극복하기 위해서는 한국 선박 기관 수리 협동조합 등의 협동화된 기술개발 체제를 마련하고 생산성 향상을 위한 산학 연구협력 체제의 확립과 정부의 정책적 지원이 필요하다.

○ 선박과 선박 엔진 부품의 보수 수리 용접은 합금 성분, 구속조건, 가혹한 작업환경과 같은 요인으로 고난도의 기술이 요구되며, 생산성 향상을 위해서는 고능률 용접기

술이 필요하다. 따라서 이를 수행하는 용접 작업자는 고도의 지식과 기술 적응력을 갖추어야한다. 이를 위해서는 용접작업자의 교육과 인력의 고급화가 필요하다.

○ 선박엔진 부품의 보수 수리 용접 시 그 절차에 대한 구격이나 이를 인증하는 선급규격이 미비된 현상에 있다. 선박 수리 및 선박엔진 수리 산업의 글로벌 시장에서 우리나라가 선도적 위치를 차지하기 위해서는 선박 수리 및 선박엔진 보수기술의 규격이나 선급인증 규격을 국내적으로 정비하고 이를 국제규격으로 확대시켜 나가는 노력이 필요하다.

○ 현재 국산의 발전 플랜트, 석유화학 플랜트, 해수 담수화 플랜트 등 각종 플랜트 구조물의 노후 설비가 국내외에서 다수 가동되고 있어 용접 보수에 대한 수요가 국내외적으로 많이 발생하고 있다. 국내의 조선해양 기자재 관련 중소기업체에서도 현재의 조선 경기 불황 속에서 각종 플랜트 구조물의 보수작업에 관심을 가질 필요가 있다고 생각한다.

### 6. 결 론

1. 선박 엔진 부품 중 보수수리 대상으로 가장 큰 비중을 차지하는 것은 배기밸브와 피스톤 크라운 부품이다. 이들은 내열강 또는 초내열합금으로 엔진 연소실을 구성하는 부품으로 최고 600℃ 이상의 고온 연소가스에 노출되며 심한 충격하중을 반복해서 받게 되어 많은 손상을 받는다.
2. 보수 용접은 오버레이 방법으로 가장 많이 이루어진다. 오버레이 용접에서는 가능하면 용입이 얇고 비드폭이 넓어서 용착률이 높을 것이 필요하다. 또한 용가재와 모재와의 희석에 의해 형성된 용착금속이 모재와 같거나 그 이상의 특성을 발휘할 수 있도록 용가재의 성분 조성과 용접조건을 설정해야 한다.
3. 고능률 오버레이 용접법으로 최근 개발된 용접법은 탄템 SAW 용접, 탄템 MAG용접법, TIG-MIG 하이브리드 용접, 펄스 MIG 용접, CMT용접, 필러 병용의 레이저 CMT 하이브리드용접, Super TIG 용접과 3D 적층방법인 레이저 이용 부가제조(Additive manufacturing)법이 있다.
4. 오버레이 용접 중 발생하는 결함으로 액화균열의 방지에 유의해야한다. 액화균열을 방지하기 위해서는 결정립을 미세화하거나 모재의 불순물 원소를 적극 억제시켜야한다. 액화균열은 모재자체의 문제이므로 방지하기 어려우나 펄스 GMAW용접이나 CMT 용접공정을 이용함으로써 입열량을 최소화시켜 수축응력을 최소화 하는 노력이 필요하다.
5. Web. of Science 및 NDSL 데이터베이스에서, 지난 20년간 선박엔진 보수수리와 관련한 논문은 총 16건이 검색되어 이 분야의 연구는 희박한 것으로 나타났다. 이 중에서 3건이 해외 논문이고 나머지 13건이 국내논문으로 밝혀져 대부분이 국내 논문이었다.
6. NDSL 데이터베이스로부터 선박엔진 부품의 보수 또는



오버레이 관련 특허를 검색한 결과, 엔진 밸브의 보수 또는 오버레이 관련 특허가 가장 많은 21건이었고, 실린더 라이너 보수 또는 재생이 6건, 피스톤 크라운 보수 건이 2건으로 나타났다. 그 중 국내 특허가 전체의 절반 정도를 차지하고 있어 국내에서 선박엔진부품의 보수용접에 가장 많은 관심을 갖고 있음을 나타낸 것이다.

7. 용접 시공 방법으로 오버레이 용접이나 클래딩 시공절차는 DNV GL(노르웨이 독일 선급)에서는 ISO 규격인 ISO 15614-7 규격에 따르도록 지시되어 있다. 현재 선박엔진 부품의 보수용접은 ISO 규격이나 엔진 메이커의 규격이 외에 별도의 품질관리 규격이 미비 되어 있는 현상에 있다. 따라서 선박엔진 부품의 보수용접기술 고도화를 위해서는 이의 품질관리 규격화가 필요하다고 생각한다.
8. 현재 국내의 선박엔진 부품의 보수산업은 영세한 소기업 형태로 대부분 운영되고 있어서 기술혁신을 기대하기 어려운 상황이며, 세계적으로 선박과 선박엔진의 노후화로 인한 보수 수리의 수요가 증대하고 있음에도 해외 시장을 개척하여 사업을 확장시켜 나갈만한 여력이 빈약한 현상에 있다. 따라서 이를 타개해 나갈 산·학·관 연계의 기술적, 재정적 지원이 필요하다.

## 후 기

본 해설 논문은 미래창조과학부 과학기술 진흥기금과 복권 기금을 지원받아 수행하는 ReSEAT 프로그램의 성과물입니다

## References

- [1] H. NAKAZAWA and H. NAGASAKI, "Welding consumables and process for the wind tower structures," *Journal of Japan Welding Society*, vol. 79, no. 7, pp. 648-652, 2010.
- [2] J. S. Kim and I. J. Kim, "A study on characteristic of residual stresses in a wind tower using the tandem circumferential welding process," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, vol. 21, no. 6 pp. 938-945, 2012.
- [3] M. Gehring, "High quality & high efficient welding technology of wind tower," *Welding Technology*, vol. 56, no. 9, pp. 88-93, 2008 (in Japanese).
- [4] T. Sato, "Cost down by improvement of welding efficiency," *Welding Technpoly*, vol. 63, no. 5, pp. 88-97. 2015.
- [5] S. Kanemaru, T. Sasaki, T. Sato, and M. Tanaka, "Basic study on TIG-MIG hybrid welding process," *Quarterly journal of the Japan Welding Society*, vol. 30, no. 1, pp. 29 -34, 2012.
- [6] Japan Welding Society, *Advanced Welding & Joining Technology* (New edition), Japanese book, pp. 49, 2008.
- [7] Fronius Ltd, *CMT Weld Brochure*, 2005.
- [8] O. T. Ola and F. E. Doern, "A study of cold metal transfer clads in nickel-base INCONEL 718 superalloy," *Materials & Design* vol. 57, pp. 51-59, 2014.
- [9] J. D. Kim, "The penetration characteristic with pulse correction and arc voltage during laser/arc hybrid welding for steel," *Spring Conference of the Korean Society for Precision Engineering*, p. 147, 2015.
- [10] J. B Wang, H. Nishimura, S. Katayama, and M. Mizutani, "Welding of aluminum alloy by using filler=Aided laser-arc hybrid eelding process," *Light Metal Welding*, vol. 48, no.11, pp. 424-434, 2010 (in Japanese).
- [11] S. M cho, *Super-TIG Welding conference*, Bukyung University, 2016.
- [12] K. Gurumoorthy, M. Kamaraj, K. P. Rao, and S. Venugopal, "Microstructure and wear characteristics of nickel based hardfacing alloys deposited by plasma transferred arc welding," *MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY*, vol. 22, no. 8, pp. 975-980, 2006.
- [13] T. Masahiro, "3D Printer and Additive Manufacturing with Metal Powder," *Journal of Japan Welding Society*, vol. 83, no. 4 pp. 258-261, 2014.
- [14] D. J. Liu, J. C. Lippold, J. Li, S. R. Rohklin, J. Vollbrecht, and R. Grylls, "Laser engineered net shape (LENS) technology for the repair of Ni-base superalloy turbine components," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 45, no. 10, pp. 4454-4469, 2014.
- [15] Y. S Kim and Y. K Choi, *Experimental Report in PTA Overlay Process*, 2008.
- [16] Y. S. Kim, "High-efficiency repair welding technology for marine engine components," *KISTI ReSEAT Program Report for Emerging Technology*, 2016.
- [17] K. M. Moon, K. H. Lee, H. R. Cho, M. H. Lee, Y. H. Kim, and J. G. Kim, "An electrochemical study on corrosion property of repair welding part for exhaust valve," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, vol. 22, no. 3, pp. 82-88, 2008.
- [18] J. G. Kim, H. R. Cho, M. H. Lee, Y. H. Kim, and K. M. Moon, "Effect of welding method and welding material to corrosion property of repair weld zone for exhaust valve in 5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution -1," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 31, no, 6, pp. 744-752, 2007.

- [19] K. M. Moon, H. R. Cho, M. H. Lee, and Y. H. Kim, "Evaluation of corrosion property for repair welding zone of exhaust valve," *Materials Science Forum*, vol. 575-578, pp. 780-785, 2008.
- [20] J. H. Shin and K. M. Moon, "An electrochemical evaluation on the corrosion resistance of welding zone due to kinds of repair welding filler metals and post weld heat treatment," *Corrosion Science and Technology*, vol. 9, no. 6, pp. 310-316, 2010.
- [21] Y. H. Xiang, B. S. Xu, Y. H. Lv, and D. Xia, "Technical study of exhaust valve overlaying based on micro-plasma arc welding," *Key Engineering Materials* vol. 373-374, pp. 330-333, 2008.
- [22] F. Hui, L. Jianfeng, and S. Jie, "Study on re-manufacturing repair of damaged crank shaft journal surface by laser cladding," *Chinese Journal of Lasers*, vol. 41, no. 8, p. 0803003, 2014.
- [23] C. P. Bork, "Reprint of 'Failure of a Motor Vessel's Crankshaft 1968'," *Engineering Failure Analysis*, vol. 43, no. 8, pp. 77-91, 2014.
- [24] K. Y. Lee, J. H. Kim, and Y. S. Kim, "A study on the restoring method of the abrasives cylinder liner of cast iron using thermal plastic deformation technique," *Proceedings of the KOSME 2002 Spring Conference*, pp. 141-146, 2002.
- [25] K. Y. Lee, Y. K. Choi, and Y. S. Kim, "Development of the renewing method of the scrapped cast iron cylinder liner using the metal spray technique," *Proceedings of the KOSME 2002 Autumn Conference*, pp. 127-133, 2002.
- [26] S. M. Cho, J. H. Kim, and Y. S. Kim, "A study on the repair welding methods for cylinder block of diesel engines," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 23, no. 3, pp. 331-337, 1999.
- [27] Method of revising a cylinder liner in internal combustion engine, KO10-2000-0056823.
- [28] Engine Cylinder liner's regenerating method and apparatus, KO10-0405227-0000.
- [29] PISTON FOR INTERNAL-COMBUSTION ENGINE, JP-0226545.
- [30] METHOD FOR REPAIRING EXHAUST VALVE FOR INTERNAL COMBUSTION ENGINE, JP-0005705.
- [31] Valve welding method and device, KO 10-2004-0088747.
- [32] HIGH HEAT-RESISTANCE EXHAUST VALVE SPINDLE OF MARINE ENGINE HAVING EXCELLENT WEAR RESISTANCE AND CORROSION RESISTANCE, KO10-2011-0096362.
- [33] LASER CLADDING APPARATUS, US-0144455.