

## 2행정 디젤 기관의 배기밸브 재생에 관한 연구

장세현<sup>1</sup> · 최재혁<sup>†</sup>

(Received June 22, 2017 ; Revised July 13, 2017 ; Accepted July 19, 2017)

### Study on reconditioning the exhaust valve of a two-stroke diesel engine

Se-Hyun Jang<sup>1</sup> · Jae-Hyuk Choi<sup>†</sup>

**요약:** 본 연구에서는 2행정 디젤기관의 배기밸브 재생에 관한 연구를 수행하였다. 운항선박에서는 신품의 배기 밸브 스피들을 새로이 구매하는 방안과 기존의 배기 밸브 스피들을 재생하여 사용하는 방안에 대하여 경제성을 평가하게 되며, 재생되는 배기밸브 스피들은 신품의 스피들에 비하여, 구매단가는 70~80% 수준, 납기는 절반수준으로 매우 높은 경쟁력을 갖는 것으로 알려져 있다. 배기밸브 스피들을 재생 수리하기 위해서는 배기밸브 스피들의 상태를 점검하여 재생이 가능한지를 판별하는 초기 검사 공정을 포함하여, 경화된 표면을 제거하는 초기 머시닝 단계, GMAW, 열처리, 배기밸브 스피들이 생산 도면과 동일한 치수를 갖는지를 확인하는 최종 머시닝 및 검사 단계가 필요하다. 재생 수리는 엔진 제조사로부터 FTA를 부여 받은 사업자에 한해 수행 가능하며, Dura spindle의 재생수리를 위해서는 최초 검사 시 재생 가능성을 판별 후 재생수리가 진행되어야 한다. 재생수리는 최초검사 - Machining - Welding(GMAW) - Rolling - Heat treatment - Final machining - Final inspection의 순서대로 수행되어야 한다. 본 연구의 경우 GMAW를 수행하였으며, Inconel 625와 718 공동으로, Wire 직경이  $\varnothing 1.2\text{mm}$ 인 사양을 적용해야 하며, Bead overlap은 각 20%와 25%, shielding gas flow는 15~20 l/min 및 최대 18 l/min 수준을 각각 만족해야 한다. 스피들 디스크부에 한해 열처리를 시행한다.  
**주제어:** 배기 밸브, 재생 수리, Dura spindle, Nimonic spindle, 2행정 디젤 기관

**Abstract:** This study investigates the reconditioning of the exhaust valve of a two-stroke diesel engine. Shipping companies evaluate the economical efficiency of acquiring a new exhaust-valve spindle versus reconditioning the existing exhaust valve in an operating vessel. A reconditioned exhaust-valve spindle has a purchase price of 70-80% of a new one, and half the delivery time; these numbers are very competitive. To recondition an exhaust-valve spindle, its initial condition should be checked to evaluate whether reconditioning is possible, followed by an initial machining step to remove the hardened surface, gas metal arc welding (GMAW), rolling, heat treatment, etc. Final machining and inspection steps are needed to ensure that the spindle is machined to exact dimensions. Reconditioning is only available for a company that has received an FTA from the engine maker. GMAW was applied to the spindle in the study and the diameters were  $\varnothing 1.2$  mm. The bead overlap for the inconel 625 was 20% and 25% that for the inconel 718. The shielding-gas flow for the inconel 625 and inconel 718 was 15-20 l/min and 18 l/min, respectively. Heat treatment was only necessary for the spindle disk.

**Keywords:** Exhaust valve, Reconditioning, Dura spindle, Nimonic spindle, 2-stroke diesel engine

### 1. 서론

최근의 선박용 2행정 디젤기관은 다양한 형태의 기술 진보와 운전 패턴 변화가 발생하고 있다. 초장 행정 엔진의 도입, 전통적 선박연료인 Heavy Fuel Oil(HFO)의 황 함량 제한에 따른 저 황 함량 연료유의 사용, 대체 에너지인 Gas의 연료화[1], NOx 배출 저감을 위한 EGR(Exhaust Gas Recirculation) 혹은 SCR(Selective Catalyst Reduction)의 적용

등이 그 예라 할 수 있다[2].

이러한 디젤엔진의 운전 환경 변화는, 디젤 엔진에서의 연소 제어 필요성을 상승시키고 있으며, 무엇보다 연소실을 구성하는 부품의 운전 신뢰성 확보가 선행되어야 한다. 엔진의 연소특성에 영향을 미치는 부품은 다양하나, 연소 가스에 직접 노출되어, 연소 시간, 연소 압력의 제어에 가장 적극적으로 개입하여 연소를 제어하는 부품은 배기밸브

<sup>†</sup> Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0092-883X>): Division of Marine System Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan, 49112, Rep. of Korea, E-mail: [choi\\_jh@kmou.ac.kr](mailto:choi_jh@kmou.ac.kr), Tel. 051-410-4257

<sup>1</sup> Team Solution Co., Ltd. E-mail: [jangse@teamsolution.co.kr](mailto:jangse@teamsolution.co.kr), Tel. 051-405-9784

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.

라고 할 수 있다. 운전특성, 사용연료, 엔진기종 및 상세 엔진 사양에 따라 상이하나 통상 배기밸브스핀들은 600℃ 이상의 고온에 상시 노출되어 부식과 침식위험에 노출되어 있는 것으로 알려져 있다[3][4].

엔진제조사에서 Time between overhaul에서 규정한 배기밸브 Dura spindle과 Nimonic spindle의 예상 수명은 60 보어 이상의 엔진에 대해, 약 10만 시간으로 규정되어 있다. 또한, 3만 시간 주기의 정기적인 진단을 통하여, burn-off를 측정하여 관리할 것을 권장하고 있다[5]. 이와 같이 정기적인 검사를 통하여 이상을 확인하였을 경우, 선주의 입장에서는 신품의 도입과 기존품의 재생사용을 고민하게 된다. 사용자의 통상 고려사항으로는 구매비용 및 납품기한을 들 수 있으며, 재생 수리 시 구매가가 신품대비 70~80% 수준으로 알려져 있으며, 납품기한 또한 절반수준으로 짧은 것으로 알려져 있어, 재생 수리에 대한 선주 요구가 높은 실정이다.

하지만, 선주의 재생 수리에 대한 요구가 높은 반면 재생 수리 품에 대한 객관적인 가공 절차가 엔진 제조사 차원에서 마련되어 있지 않아, 엔진 제조사가 요구하는 최종 품질을 맞추기 위한 가공 절차를 자체 수립하고 제조사의 승인을 득한 결과를 소개하고자 한다. 참고로, 엔진 제조사의 품질 관리 정책상 60 보어 엔진의 가공 기준만 마련한다면 기종까지 확대 적용이 가능하기에, 본 논문에서는 60 보어 기종에 한하여 기술한다.

## 2. 배기밸브 스피들

### 2.1 2행정 디젤기관에서의 배기밸브 스피들 개요

Figure 1에 2행정 디젤엔진에서 사용되는 배기밸브 스피들의 사진을 표시하였다. 배기밸브 스피들은 엔진내부에서도 가장 높은 열 부하를 받는 부품으로 들 수 있다. 최근 엔진의 운전 패턴을 보자면, 열 부하의 증가원인은 높은 부하 밀도뿐만 아니라 저 부하 운전의 빈도가 높아진 데 있다고 할 수 있다. 저 부하엔진은 연료 소모량을 낮출 수 있다는 장점이 있으나, 배기밸브 스피들의 열 부하를 증가시키는 단점이 있다. 증가된 열 부하로 인하여, 배기밸브 스피들의 서비스 수명 및 내구 연한이 감소될 수 있으며, 그 원인으로 고온 부식을 들 수 있다. 고온 부식은 고온의 작동환경에 의해 미소하게 녹아내린 일부 연소 부산물에 의해 발생되며, 배기 밸브표면에 코팅된 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 층을 용해시키는 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 및 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>가 주요 물질이라고 할 수 있다. 이러한 고온부식은 650-700℃ 온도 구간에서 주로 발생되며, 배기밸브스핀들에서도 하부의 스피들 bottom에서 주로 발생된다. 통상적으로 알려져 있는 고온부식 수준은 0.1~0.4 mm/1,000 hrs 이다. 하지만, 최대 1 mm/1,000 hrs도 관찰된바 있다[6].



Figure 1: Photo of exhaust valve spindles

### 2.2 엔진제조사 배기밸브 스피들 설계 및 기준

현재 엔진제조사 배기밸브 스피들에는 Dura spindle과 Nimonic spindle이 각각 표준으로 적용되고 있다. Dura spindle의 경우, 오스테나이트계인 강제 밸브에 Inconel 코팅을 입힌 형태로서, Dura spindle의 경도 강화를 위하여, 롤링 가공과정을 통하여 가공하고 있다. Figure 2에는 Dura spindle의 롤링 가공과정을 나타내었다.

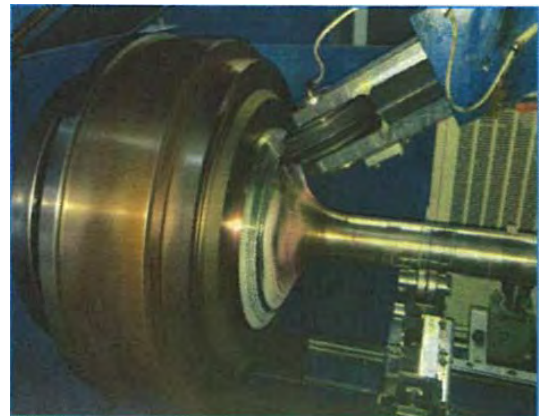


Figure 2: Rolling process of Dura spindle

Nimonic spindle은 통상 Nimonic 80A 소재를 사용하여 단조공정을 거쳐 제조된다. 대형엔진에 있어서 Nimonic과 Dura spindle의 성능은 상호 큰 차이가 없이 유사하며, Dura spindle의 경우 높은 강도와 내 마모 특성이 높으며, Nimonic spindle의 경우, 내 부식성이 우월한 것으로 알려져 있다[6].

엔진제조사 Service letter에 따르면, 스피들의 수명주기와 burn-away 판별 기준을 최신의 엔진 운전 패턴을 분석하여 갱신하였다[7].

Table 1에는 기존의 스피들 수명주기를 표기하였다. 명시된 바와 같이, 기종 별로 burn-away나 수명주기가 다소 상이하나, 60MC-C를 기준으로 burn-away 11mm에 64,000 시간의 운전시간을 기준으로 수립한 바 있었다.

**Table 1:** Previous spindle lifetimes

Engines	Burn away	Running hours	Burn away rate	Spindle lifetime (hrs)
K98ME	9 mm	14,000	0.64	61,000
S60MC-C	11 mm	26,000	0.43	64,000
K98MC-C	7.5 mm	15,000	0.50	78,000
S90MC-C8	14 mm	15,000	0.93	39,000

Burn-away rate = mm / 1,000 hrs  
Normal lifetime = 100,000 hrs including reconditioning of spindle

하지만, 저 부하 운전의 일상화에 따른 배기밸브 스피들에 미치는 열 부하 패턴이 이전과 상이하다는 운전패턴의 분석을 기반으로, 최근의 운전 특성을 반영한 새로운 수명주기와 burn-away 기준을 다음의 **Table 2**와 같이 개정하였다. **Table 1**과 **Table 2**에서 확인할 수 있듯이, burn-away와 운전 시간에 대한 기준 변경은 없으나, 스피들의 수명주기가 늘어난 것을 확인할 수 있다.

**Table 2:** Revised burn-away and spindle lifetime

Engines	Burn-away	Running hours	Spindle lifetime (hrs)
K98ME	9 mm	14,000	124,000
S60MC-C	11 mm	26,000	85,000
K98MC-C	7.5 mm	15,000	160,000
S90MC-C8	14 mm	15,000	73,000

**Table 3**에는 기종별로 최대 burn-away와 허용 가능한 burn-away rate를 표기하였다. 60 및 70 보어 기종에서는 burn-away가 9mm 및 10mm이다. 80, 90 및 98 보어 기종에서는 각각 14mm, 17mm, 20mm까지도 그 제한치를 확대하였다. Burn-away rate 또한 전체 보어에 대해 0.09~0.41 mm/1,000 hrs 수준으로 허용치가 확대되었다.

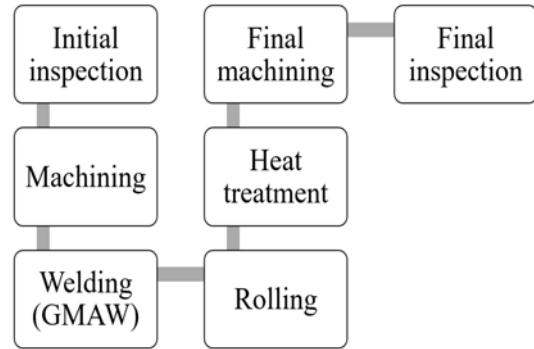
**Table 3:** Maximum burn-away and allowable burn-away rates

Engine bores	Max. burn-away		Allowable burn-away rates (/1,000 hrs)	
	Previous	New	Previous	New
60	9 mm	Unchanged	0.27 mm	0.36 mm
70	10 mm	Unchanged	0.30 mm	0.40 mm
80	11 mm	14 mm	0.33 mm	0.56 mm
90	12 mm	17 mm	0.36 mm	0.68 mm
98	13 mm	20 mm	0.39 mm	0.80 mm

2.3 엔진제조사 Dura spindle 재생 수리 절차

**Figure 3**에 Dura spindle의 재생 수리 절차를 도식화 하였다. 재생 수리가 필요한 Dura spindle이 입고되면, 현 상태를 진단하기 위한 초기 검사가 진행되고, 이의 결과에 따라, 작업 범위가 결정되며, 결정된 범위에 따라 W seat와

접촉하는 밸브 디스크 부분의 가공을 진행하게 된다. 이후, Inconel welding을 실시하고, 경도를 높이기 위해 밸브 디스크 부분의 롤링가공을 실시한다. 열처리를 거쳐, 정확한 가공 치수확보를 위한 최종 가공을 수행하게 되며, 출하 전 최종 검사를 진행한다.



**Figure 3:** Procedure of Dura Spindle reconditioning

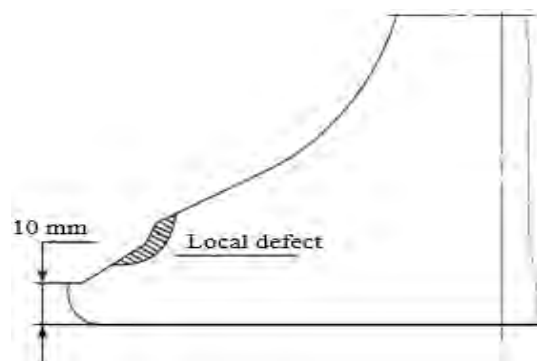
3. Dura spindle의 재생 수리

3.1 재생 수리 전 최초 검사 및 용접 전 Machining

접수된 재생 대상 품에 대하여 최초 소제를 실시하게 되고, 이후 스피들의 스템, 시트 및 디스크 부의 치수를 기록하여, 그 결과를 분석함으로써 스피들을 재생 수리 할 수 있는지를 판단하게 된다.

용접 전에 소재에 대하여 별도의 가공이 수행되어야 한다. 이 가공의 개념은 시트부의 경화된 표면을 제거하고, 디스크의 중앙 홈 및 소재에서 발생될 수 있는 흠집을 제거하는 절차라고 할 수 있다.

시트부의 경화된 표면을 제거하고, 새로운 용접 groove를 적게 해야만 품질을 보증함에 있어 유리하다. 또한 스피들 디스크를 가공할 시, 외경부의 높이는 최소 10mm가 확보되어야 재생 수리를 할 수 있다. 이에 대한 요구 조건을 **Figure 4**에 도식화 하였다. 또한, 기계가공공정만으로 Blow-by 흔적을 충분히 제거하지 못했다면, ground나 milled out 처리하여 완벽히 제거 후 용접 작업으로 진행해야 한다. 시트부의 수리가 용접에 의해서만 복구될 수 있는 경우에는, 용접 전에 경화된 표면을 완벽히 제거해야만 한다.



**Figure 4:** Requirement of the height of the outer diameter face

### 3.2 용접

용접 작업을 위하여 엔진제조사에서는 용접 소모재의 요건을 **Table 4**와 같이 정의하고 있다.

**Table 4:** Requirements of welding consumables

	Requirements for filler metal [Wt%]		
	Inconel 625	Inconel 718	
Ni	Balance(≥64)	Balance	54
Cr	20-23	20-23	19
Fe	1.0 max.	3.0 max.	18 (balance)
Mo	9	9	3
Nb	3.15-4.15	3.15-4.15	5
Ti	0.4 max.		1
Al	0.4 max.		1
C	0.1 max.	0.1 max.	0.8
Si	0.2 max.	0.75 max.	0.2 max.
Standard	AWS A5.14 ERNiCrMo-3	AWS A5.11 ENiCrMo-3	AWS A5.14 ERNiFeCr-2
Shielding gas	GTAW: Ar, 6-10 l/min  GMAW: Ar/15He/20 l/mm		GTAW: Ar, 6-10 l/min  GMAW: Ar/15He/2H2/0 .06CO2/~18 l/mm
Welding process	GTAW, GMAW	SMAW	GTAW, GMAW
Application	Rebuilding	Rebuilding	Hardfacing in seat area

**Table 4**에 기술된 충전재의 사양은, Inconel 625와 Inconel 718에 대해 분리하여 요건을 기술하였다. Inconel 625에 대해서는, GTAW(Gas Tungsten Arc Welding) 및 GMAW(Gas Metal Arc Welding)를 적용할 수 있으며, 이러한 공정은 통상 재생 공정에 흔히 적용될 수 있다. Inconel 718 또한 GTAW와 GMAW 모두 적용가능 하며, 시트부의 표면을 경화시키는 용도로 주로 활용된다. 본 논문의 기반이 되는 재생 작업은 GMAW를 적용하여 재생 작업을 수행하였으며 [8], 이 용접법은 소재의 작은 홈결이나 디스크 하부의 Inconel 625, 시트부분의 Inconel 715 층의 용접에 적합하다. GMAW의 파라미터는 **Table 5**에 정리하였다.

**Table 5**에 기술된 바와 같이, 용접와이어는  $\varnothing 1.2\text{mm}$ 가 적용되며, welding speed는 Inconel 625와 718 각각 최대 270 및 140 mm/min 수준이어야 한다[8]. Shielding gas flow는 15-20 l/min 및 최대 18 l/min이 되어야 한다. **Figure 5**와 **Figure 6**에는 재생 공정 개발 시 수행한 실제 Inconel 용접 상황을 기록하였으며, **Figure 5**에서는 스피들 하부와 측면에 대한 Inconel 625를 **Figure 6**에서는 시트부 표면에 대한 Inconel 718 용접 사진을 나타낸다.

**Table 5:** Welding parameters for GMAW

	Inconel 625	Inconel 718
Wire diameter	$\varnothing 1.2\text{mm}$	$\varnothing 1.2\text{mm}$
Pulse current	~350A	-
RMS mean current	100-130A	~125A
Pulse-time	2.5-3.0ms	
Pulse-frequency	~105Hz	
Polarity	+ on electrode	+ on electrode
Pulse-voltage	39V	39V
Ground level current	40A	-
Wire speed	~6.0m/min	~6.0m/min
Welding speed	~270mm/min	~140mm/min
Torch-oscillation-frequency	~1 Hz	~1.25 Hz
Torch-oscillation-width	8-10 mm	12-17 mm
Stick-out	20-25 mm	15-20 mm
Bead overlap	25%	20%
Shielding gas flow	15-20 l/min	~18 l/min



**Figure 5:** GMAW, Bottom & side with Inconel 625



**Figure 6:** GMAW, Seating surface with Inconel 718

### 3.3 Rolling

밸브 스피들 디스크를 회전판에 고정시키고 롤링공정을 진행시킨다. 롤링공정에 있어 가장 중요한 절차가 롤링 공구를 정확한 가공위치에 두는 절차라고 할 수 있다. **Figure 7**에 롤링 공정에서의 롤링 깊이와 직경의 정의를 표기하였다.

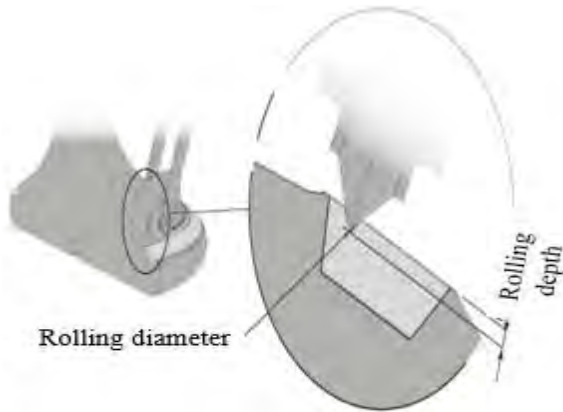


Figure 7: Definition of rolling diameter and rolling depth

일반적으로 롤링 공구 중 롤의 회전축이 스펀들의 축에 대해 반경을 가리키고 동시에 회전축이 스펀들 시트 평면에 평행하도록 롤링 롤을 배치하여 롤링을 수행하여야 한다. Figure 8에 재생작업에 수행한 롤링 공정의 사진을 표기하였다. 롤링은 가장 안쪽 groove부터 시작하여 동심원 바깥방향으로 수행해야 하고, 각 groove의 롤링은 다음 groove의 롤링 전에 마무리되어야 한다. 롤링 속도는 130m/min을, 가해지는 유압은 매 30초마다 2t 수준으로 상승시킬 것을 권고하고 있다.

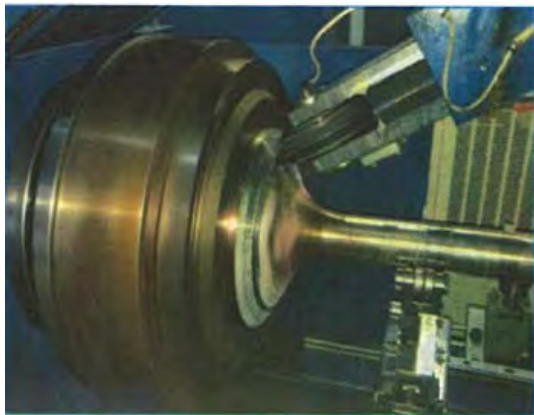


Figure 8: Photo of rolling process

3.4 열처리

롤링 처리된 시트 부위는 노에서 열처리를 하여 시효경화 시킨다. 열처리의 대상은 스펀들 디스크에 한해서만 적용하고 있으며, 밸브 스펀들 전체를 열처리하는 노 보다는 밸브 디스크만을 열처리 할 수 있는 노의 적용을 권장하고 있다. 밸브 스펀들의 베인 휠 하부의 스펀들 스템만을 강제 공랭식 방법으로 생각하는 기법을 적용하였다. Table 6에 열처리 절차를 기술하였다. 열처리 사이클은 상온에서 720℃까지 최대한 신속하게 노의 온도를 상승시키고, 그 온도에서 8시간을 유지하게 된다. 이후, 노의 온도를 620℃까지 낮추고 6시간을 유지하게 된다. 이후 노의 온도를 최대 400℃까지 낮춘 이후에 상온으로 냉각처리하게 된다.

Table 6: Heat treatment cycle for Inconel 718

Heating up	As fast as possible
Stage 1	720 °C
Holding time	8 hours
Intermediate stage	Furnace-cool as fast as possible to 620°C
Stage 2	620°C
Holding time	6 hours
Cooling*	Furnace-cool as fast as possible to max. 400°C
* Subsequent to furnace cooling, cooling to room temperature may be carried as cooling in air	

Figure 9에는 실제 열처리를 수행한 노와 밸브스핀들을 사진으로 기록하였다. 열처리 대상 부품이 스펀들 디스크에 국한되기 때문에, 실제로는 Figure 9의 사진처럼 스펀들 가이드 전체를 열처리하는 설비보다는 스펀들 디스크만 국부적으로 열처리할 수 있는 시스템의 적용이 권장된다. 다만, 본 공정에서는 vane wheel의 열처리만 제외되어야 하므로, 밸브스핀들에서 vane wheel을 제외한 상태에서는 밸브스핀들 전체를 노에서 열처리 하여도 무방하다.



Figure 9: Heat treatment at furnace

3.5 최종 가공 및 검사

배기 밸브 스펀들이 생산도면과 일치하는지 확인하고 수정하기 위한 절차로서, 도면을 기준으로 재생공정을 거친 현품에 대해 치수를 확인한다. 일련의 가공 공정이 완료되면, PT(Penetration Liquid Test) 및 UT(Ultrasound Test)를 통해 전체 시트부 표면을 검사하고 성적서를 발행한다[9].

유의할 점은 일련의 재생 수리 공정들은 엔진제조사가 수립하였으나, 재생 품질을 만족시키기 위한 연구는 재생 수리업체에서 수행해야만 한다. 또한, 재생수리업체라도 엔진제조사의 재생품에 대한 품질 기준을 만족한다는 ‘First Time Approval(FTA)’을 받지 않는다면, 재생수리 작업 권한이 부여되지 않는다. 엔진제조사에서는 FTA 수행 시, 육안 검사, UT, PT, 단면 샘플링 확보 및 이의 경도측정, 용접품질 평가를 FTA 항목으로 선정하고 재생수리업체는 그 기준을 통과해야만 한다. 본 논문에서 기술된 재생 수리 사례는 엔진제조사의 FTA를 수여하였다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 선박 2행정 기관의 배기밸브 주요부품인 Dura spindle의 재생 수리 절차 및 주요 공정의 노하우에 대하여 연구하고 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- (1) Dura spindle의 재생수리를 위해서는 최초 검사 시 재생 가능한 상태인지 재생 불가능한 상태인지를 판별 후 재생수리가 진행되어야 한다.
- (2) 재생수리는 최초검사 Machining - Welding(GMAW) - Rolling - Heat treatment - Final machining - Final inspection의 순서대로 수행되어야 하며, 재생수리 권한은 엔진제조사의 FTA를 보유한 경우에 한한다.
- (3) GMAW를 표준으로 용접을 수행하였으며, 이를 위해 필요한 기본적인 요구사항으로 Inconel 625와 718 공동으로, Wire 직경이  $\varnothing 1.2\text{mm}$ 인 사양을 적용해야 하며, Bead overlap은 각 20%와 25%, shielding gas flow는 15~20 l/min 및 최대 18 l/min 수준을 각각 만족해야 한다.
- (4) 롤링은 가장 안쪽 groove부터 시작하여 동심원 바깥방향으로 수행해야 하고, 각 groove의 롤링은 다음 groove의 롤링 전에 마무리되어야 한다. 롤링 속도는 130m/min을, 가해지는 유압은 매 30초마다 2t 수준으로 상승시켜야 한다.
- (5) 스피들 디스크에 한해 열처리를 시행하며, Inconel 718에 대한 열처리 Cycle은 최대한 빠른 시간 안에 720℃까지 상승시키고 바로 8시간동안 Holding한 후, 노 전체의 온도를 620℃로 최대한 신속하게 조정한다. 6시간 동안 온도를 유지한 후 400℃로 노 전체의 온도를 내려 Cooling 시킨 후, 대기온도 수준으로 낮추도록 한다.

## References

- [1] O. Sørensen, "MAN B&W Two-stroke Engines Latest design development within engine types, Tier III and multiple gas fuels," International Council on Combustion Engines (CIMAC) Congress, paper no. 116, 2016.
- [2] K. Imanaka, "The Latest Technologies of Mitsubishi UEC Engine," International Council on Combustion Engines (CIMAC) Congress, paper no. 149, 2016.
- [3] A. Krytatos, "The Development of the Modern Low-Speed Two-Stroke Marine Diesel Engine," International Council on Combustion Engines (CIMAC) Congress, paper no. 120, 2016.
- [4] 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 (in Korean).
- [5] "Guiding Overhaul Intervals," MAN Diesel & Turbo service letter, SL09-509/SBJ, 2009.
- [6] B. U. Ditlev and H. A. Hoeg, "Future HFO/GI exhaust valve spindle," CIMAC Congress, paper no. 3, 2013.
- [7] "Exhaust valve condition in relation to low load operation," MAN Diesel & Turbo service letter, SL2013-573/JAG, 2013.
- [8] "Dura spindles First-Time Production Approval," MAN Diesel & Turbo, Ident No: 0743687-4, 2015.
- [9] Y. S. Kim and S. C. Kim, "High-efficiency repair welding technology for marine engine components," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 41, no. 1, pp. 21-30, 2017 (in Korean).