



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

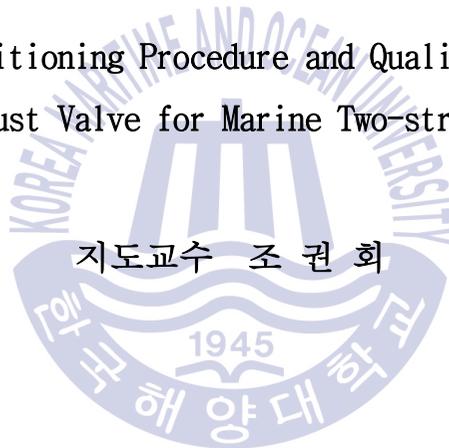
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

선박용 2행정 디젤엔진의 듀라스핀들 배기밸브의
재생 절차 및 품질 기준에 관한 연구

A Study on Reconditioning Procedure and Quality Requirements of
DuraSpindle Exhaust Valve for Marine Two-stroke Diesel Engine



지도교수 조 권 회

2018 년 2 월

한국해양대학교 해사산업대학원

기관시스템공학과

강 수 미

본 논문을 강수미의 공학석사 학위논문으로 인준함.



위원장 최재성 (인)

위원 조권희 (인)

위원 이원주 (인)

2017년 12월

한국해양대학교 해사산업대학원

목 차

List of Tables	ii
List of Figures	iii
Abstract in Korean	v
Abstract	vi
제 1 장 서 론	1
제 2 장 본 론	5
2.1 2행정 디젤엔진에서의 배기밸브 스핀들 개요	5
2.2 2행정 디젤엔진에서의 배기밸브 스핀들 관련 개발 동향	7
2.3 엔진제조사 배기밸브 스핀들 설계 및 기준	10
2.4 엔진제조사 듀라스핀들 재생수리 절차	14
2.5 용접 재질에 대한 요건	15
2.6 용접절차서의 유효성	17
2.7 용접공의 인증	18
제 3 장 듀라스핀들의 재생 수리	19
3.1 재생 수리 전 최초 검사 및 용접 전 기계가공(machining)	19
3.2 용접	22
3.2.1 SMAW	25
3.2.2 GTAW	25
3.2.3 GMAW/GMAW-P	26
3.3 압연	33
3.4 열처리	38
3.5 최종 가공 및 검사	40
제 4 장 결 론	45
참고문헌	46

List of Tables

Table 2.1 DuraSpindle and Nimonic spindle	6
Table 2.2 Required mechanical properties for SNCrW	10
Table 2.3 Required hardness for SNCrW	11
Table 2.4 Required chemical composition for SNCrW	11
Table 2.5 Heat treatment for SNCrW	11
Table 2.6 Required physical properties for SNCrW	12
Table 2.7 Previous spindle lifetimes	12
Table 2.8 Maximum burn-away and allowable burn-away rates	13
Table 2.9 Updated spindle lifetimes	13
Table 2.10 Welding requirements for spindle materials	15
Table 3.1 Requirements of welding consumables	24
Table 3.2 Welding parameters for Inconel 625 & Inconel 718	26
Table 3.3 Requirements for welding consumables	27
Table 3.4 Filler metal sample analysis	28
Table 3.5 Rolling parameters	36
Table 3.6 Heat treatment cycle for Inconel 718	38

List of Figures

Fig. 1.1 FBIV principles	1
Fig. 1.2 TCEV details	2
Fig. 1.3 Traditional ME engine exhaust concept(left) and newly developing TCEV(right).....	2
Fig. 2.1 History of exhaust valve spindle	5
Fig. 2.2 Photo of exhaust valve spindles	6
Fig. 2.3 HIP sheet metal capsule production	9
Fig. 2.4 Rolling process of DuraSpindle	10
Fig. 2.5 DuraSpindle reconditioning procedure	14
Fig. 2.6 Hardening depth	16
Fig. 3.1 Incoming base material and machining prior to welding	19
Fig. 3.2 Requirement of the height of the outer diameter face	20
Fig. 3.3 Welding positions	22
Fig. 3.4 Welding specifications on base metal	23
Fig. 3.5 GMAW, bottom & side with Inconel 625	29
Fig. 3.6 GMAW, Seating surface with Inconel 718	29
Fig. 3.7 Non-destructive test(PT,UT) after welding (Inconel 625)	30
Fig. 3.8 Machining - The welding groove is machined	31
Fig. 3.9 PT & UT prior to rolling	32
Fig. 3.10 Position of rolling tool	34
Fig. 3.11 Requirements of rolling on production drawing	34
Fig. 3.12 A section of the rolled seat area	35
Fig. 3.13 Definition of rolling diameter and rolling depth	36
Fig. 3.14 Non-destructive PT test after rolling	37

Fig. 3.15 Heat treatment cycle	39
Fig. 3.16 Heat treatment exhaust valve spindle	39
Fig. 3.17 Non-destructive test after final machining	40
Fig. 3.18 Position on base metal for hardness test	41
Fig. 3.19 The half-spindle disc for the evaluation of reconditioning quality.....	42
Fig. 3.20 Penetration test for half-spindle disc at engine manufacturer.....	42
Fig. 3.21 Cracks and microstructure investigation at the interface	43



선박용 2행정 디젤엔진의 듀라스핀들 배기밸브의 재생 절차 및 품질 기준에 관한 연구

강 수 미

한국해양대학교 해사산업대학원
기관시스템공학과
(지도교수 : 조 권 회)

요약문

선박용 2행정 디젤엔진의 듀라스핀들 배기밸브 재생수리 절차 및 품질 요건을 연구하였다. 운항선박들은 배기밸브의 신품교환 혹은 재생수리의 경제성을 상호 비교하여 그 결과를 도출하는데 대부분, 재생수리를 선호한다는 결론이 도출되고 있다. 재생수리를 수행하게 될 경우, 신품 나이모닉 스프indel 배기밸브 구매가격의 70%~80% 수준에 달하는 경제성을 확보할 수 있을뿐더러 납기일 또한 신품에 비해 절반수준으로 단축되는 등의 경쟁력을 가지고 있다.

배기밸브 스프indel을 재생하기 위해서는 초기에 재생가능한 수준의 배기밸브인지를 확인하는 절차가 필요 하며, 이후에 경화된 표면을 제거하는 초기 가공, GMAW 공정, 열처리를 거치게 된다. 초기 가공의 기초소재는 인코넬 625 혹은 309L을 사용해야 하고, 시트면의 그루브는 인코넬 718로 코팅한다. GMAW와 GTAW 모두를 인코넬 625와 718 코팅에 적용할 수 있다. 압연속도는 130 m/min의 속도로 진행해야 하며, 매 30초마다 2톤씩의 하중 증가가 필요하고 최종 하중은 8~9톤 수준이어야 한다. 인코넬 718의 열처리는 시간 당 100°C 수준으로 가열하여, 720°C에서 8시간, 620°C에서 6시간, 400°C에서 공기를 냉각시킨다.

주제어: 2행정 디젤엔진; 듀라스핀들; 배기밸브; 재생수리; 나이모닉 스프indel

A Study on Reconditioning Procedure and Quality Requirements of DuraSpindle Exhaust Valve for Marine Two-stroke Diesel Engine

Kang, Su Mi

Department of Marine System Engineering
Graduate School of Maritime Industrial Study
Korea Maritime and Ocean University
(Supervisor : Prof. Kwon-Hae Cho)

Abstract

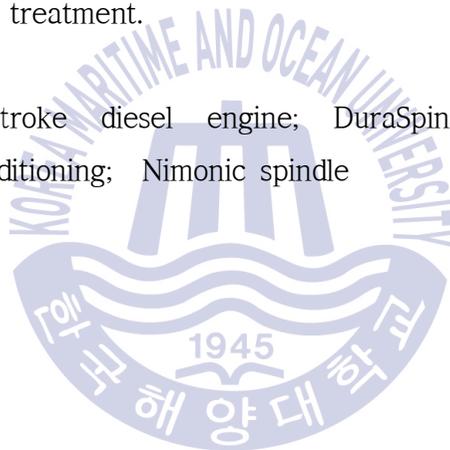
In this study, the DuraSpindle exhaust valve reconditioning of a two-stroke diesel engine was studied. In the operating vessel, the economical efficiency of the new exhaust valve spindle and the reconditioning of the existing exhaust valve has been evaluated. The reconditioned exhaust valve spindle has a low purchase price of 70%~80%, and reduced delivery time half of the new nimonic exhaust valve, which are very competitive.

In order to recondition the exhaust valve spindle, it is necessary to initially check the condition of the exhaust valve spindle to evaluate whether reconditioning is possible, and additional following processes of initial machining step to remove the hardened surface, GMAW, heat treatment. There is a need for final machining and inspection steps to ensure that the spindle machined to exact dimensions.

Reconditioning is only available for a company that have receiver FTA from engine maker. Initial evaluation of availability of reconditioning during initial inspection, machining, welding(GMAW), rolling, heat treatment, final machining and final inspection steps are recommended.

Inconel 625 or 309L should be used as the base material for the initial processing, and grooves of the sheet surface should be coated with Inconel 718. Both GMAW and GTAW can be applied to Inconel 625 and 718 coatings. The rolling speed should be at a speed of 130m/min, a 2 ton increase in load every 30 seconds and a final load should be of 8-9 tons. Heat treatment of Inconel 718 should be initially heat up 100°C per hour, maintain 8 hours at 720°C, 6 hours at 620°C and initiate air cooling at 40 0°C and finalize heat treatment.

Key Words: Two-stroke diesel engine; DuraSpindle; Exhaust valve; Reconditioning; Nimonic spindle



제 1 장 서 론

선박에서의 다양한 규제 강화와, 이에 발맞추기 위한 엔진 제조사의 끊임없는 노력이 이어지고 있다. 선박 추진 기관에서 기인하는 오염물질 저감, 선박기관의 경량화와 제조 원가 절감 추진 노력, 다양한 운전 패턴 개발 등은 비단 선박엔진 제조사뿐만 아니라, 선주와 국제기구까지 포함한 공통의 노력이라고 할 수 있다.

최근의 선박용 2행정 디젤엔진은 기술진보에 따라 초장행정 엔진이 도입되고, 다양한 연료를 사용하며, 환경에 대한 고려로 환경기기가들이 부가되고 있다. 전통적 선박연료인 중유(HFO, Heavy Fuel Oil)의 황함량 제한에 따른 저 황함량 연료유의 사용, 대체 에너지인 가스의 연료화(Andreas Kyratatos et al., 2016), NOx 배출 저감을 위한 EGR(Exhaust Gas Recirculation)장치 혹은 SCR(Selective Catalyst Reduction)장치의 적용 등이 그 예라 할 수 있다 (Susanne Kindt et al., 2016).

MAN Diesel & Turbo(MDT)에서는 기존 전자제어 엔진의 핵심부품인 연료분사와 배기밸브 구동 메커니즘을 획기적으로 개선하는 노력을 추진하고 있다. TCEV(Top Controlled Exhaust Valve)와 FBIV(Fuel Booster Injection Valve)가 전자제어 엔진에 도입되면서 전통적인 HCU(Hydraulic Cylinder Unit)가 부품에서 빠

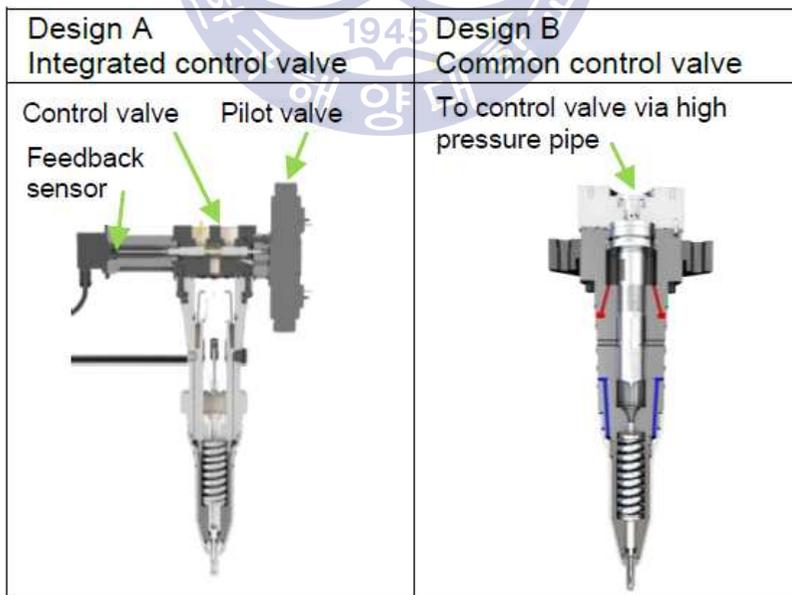


Fig. 1.1 FBIV principles

저 경량화 설계를 달성하면서 동시에 보다 정확한 제어를 달성하였다(Susanne Kindt et al., 2016). Fig. 1.1과 Fig. 1.2는 MDT가 시도하고 있는 FBIV와 TCEV에 대한 기술을 묘사한 그림이다. 또한, Fig. 1.3은 기존의 ME엔진의 배기밸브와 TCEV간의 차이점을 비교하고 있다.

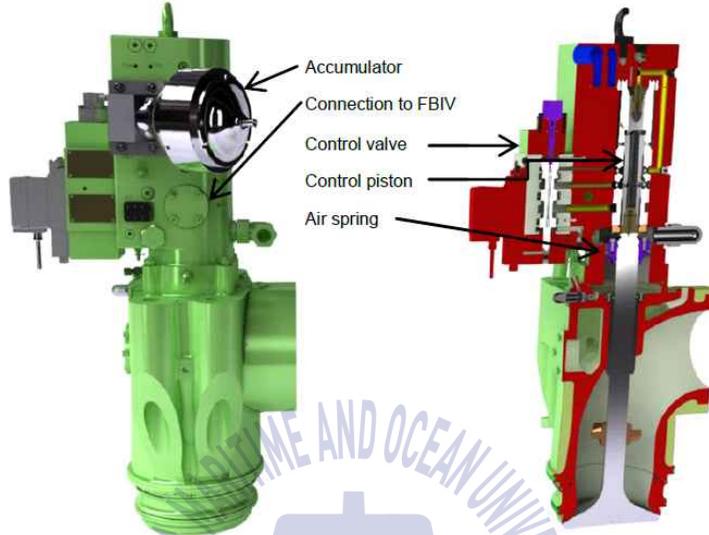


Fig. 1.2 TCEV details



Fig. 1.3 Traditional ME engine exhaust concept(left) and newly developing TCEV(right)

배출저감 기술측면에서는 EGR 기술과 SCR 기술을 이미 표준으로 채택한바 있으며, 이들 기술이 저 황함량 연료유를 사용했을 때 정상 운전이 되도록 최적화 되어 있으며, 시장의 요구에 부응하여 초기 모델 대비 사이즈가 감소하여 선주들의 요구에 부응하고 있다(Susanne Kindt et al., 2016).

이러한 디젤엔진의 기술 진보 및 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 배기밸브라고 할 수 있다. 운전특성, 사용연료, 엔진기종 및 상세 엔진사양에 따라 상이하나 통상 배기밸브스핀들은 600℃ 이상의 고온에 상시 노출되어 부식과 침식위험에 노출되어 있는 것으로 알려져 있다 (Katsumi Imanaka et al., 2016)(N. Srinivasan et al., 1995)(Dong Kwon Kim et al., 2001).

Win-GD의 주요 엔진 부품의 설계 지침 중, 배기 밸브 설계에 대한 규정을 Andreas 등이 CIMAC(The International Council on Combustion Engines) 발표한 바 있다(Andreas Kyratos et al., 2016). 이에 따르면, 고온 부품의 설계에서 가장 염두에 두는 부분은 적합한 소재의 선정 및 냉각 기술이 고려되어야 한다. 온도 구배에 따른 열 부하를 감안해야 하고, 주변 부품과의 조립시에도 탄성을 지닌 스투드(stud)를 활용하여, 누설(leakage)에 대비하고 부품간의 동적 거동이 발생하지 않도록 설계하고 있다. 결국에는 압축 및 연소에 의해 발생하는 동적 하중이 기준치를 넘지 않도록 설계해야 한다. 배기밸브의 설계 시 밸브의 크기는 엔진의 열역학적 레이아웃을 결정하는 중요한 인자로 작용한다. 전통적으로 다양한 설계 기준이 존재해왔으나, 최근에는 실린더 보어의 절반수준으로 밸브 치수를 산정하고 있는 추세이다. 이로써, 엔진의 요구 성능 달성 및 원가절감을 동시에 달성할 수 있다. 통상 배기밸브 스펀들은 고온에 노출되어 있고 그 자체로 냉각 기능이 부재하다. 따라서, 고온 부식에 대처하기 위한 방안으로는 크롬합금강을 사용하거나 용접을 통한 표면 방지층을 확보하는 기술이 거의 유일하다고 할 수 있다 (N. Srinivasan et al., 1995).

엔진제조사 분해점검기간(TBO, Time Between Overhaul) 계획에서 규정한 배기밸브 듀라스핀들과 나이모닉 스피들의 예상 수명은 실린더 직경(bore) 60 cm 이상의 엔진에 대해, 약 10만 시간으로 규정되어 있다. 또한, 3만 시간 주기의 정기적인 진단을 통하여, 소실량(burn-off)를 측정하여 관리할 것을 권장하고 있다. 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 현실이다.

하지만, 선주의 재생 수리에 대한 요구가 높은 반면 재생 수리 품질에 대한 객관적인 가공 절차가 MDT 차원에서 마련되어 있지 않아, MDT가 요구하는 최종 품질을 맞추기 위한 가공 절차를 자체 수립하고 제조사의 승인을 득한 결과를 그 절차 및 품질관리 지표와 함께 본 논문에서 연구하였다. 참고로, MDT의 품질 관리 정책상 60 보어 엔진의 가공 기준만 마련하면 타 기종까지 확대 적용이 가능하기에, 본 논문에서는 60 보어 기종에 한하여 기술한다.



제 2 장 본 론

2.1 2행정 디젤엔진에서의 배기밸브 스피들 개요

Fig. 2.1은 배기밸브 스피들의 디자인 변화에 대한 그림이다. 초기 소형 보어 엔진에는 SNCrW 소재 시트면에 Alloy 50이 적용된 스피들이 사용되었고 2002년 이후 시트면에 인코넬 718이 적용된 듀라스피들이 도입되었다. 듀라스피들은 밸브 스피들 시트에 블로우 바이(blow-by) 및 균열이 발생하는 중요한 압흔을 방지하기 위해 특허를 득한 용접, 압연 및 열처리 공정을 통해 내구성 강한 합금 하드페이싱(hardfacing) 가공을 기반으로 한다. 대형 보어 엔진에서는 초기에 표준으로 지정되었던 나이모닉 스피들의 대안으로 2008년 이후 대형 엔진용 듀라 스피들을 도입하였다. 이는 SNCrW 밸브 소재를 사용함으로 원가를 절감하였고, 스피들 디스크 표면을 인코넬 625코팅하는 새로운 하드페이싱 기술을 도입하여 대형 보어 엔진에도 적용하게 된다(Marinelog, 2005). Table 2.1에 듀라스피들과 나이모닉 스피들을 정리하였다.

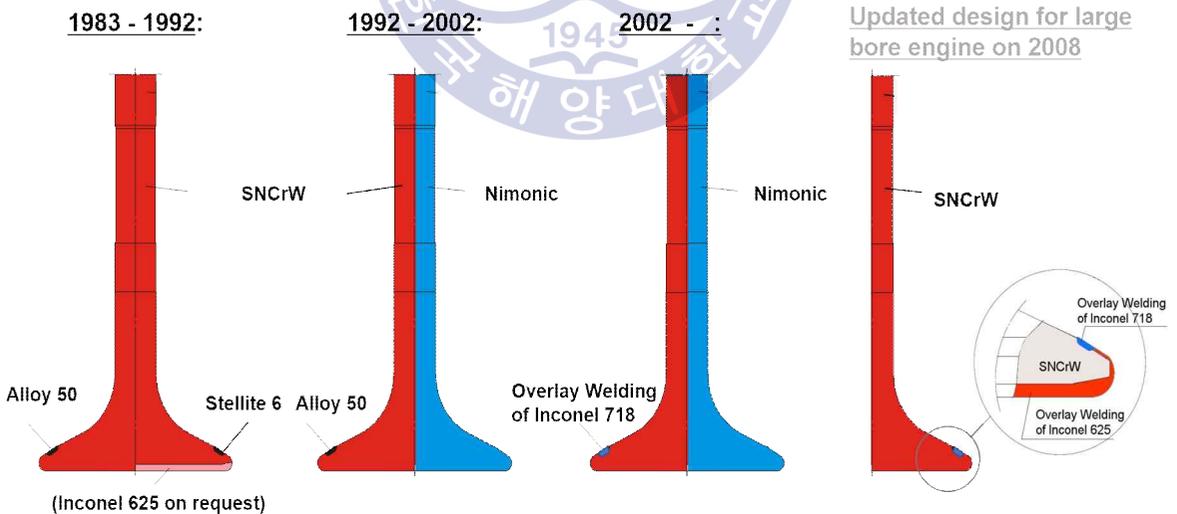


Fig. 2.1 History of exhaust valve spindle

Table 2.1 DuraSpindle and Nimonic spindle

	Bore	Seat face	Stem & bottom
Dura	Small bore	Inconel 718	SNCrW
	Large bore	Inconel 718	SNCrW + Inconel 625
Nimonic	-	Nimonic	Nimonic

Fig. 2.2에 2행정 디젤엔진에서 사용되는 배기밸브 스피ndl의 사진을 표시하였다. 배기밸브 스피ndl들은 엔진내부에서도 가장 높은 열 부하를 받는 부품으로 들 수 있다. 증가된 열 부하로 인하여, 배기밸브 스피ndl들의 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_2O_3 층을 용해시키는 Na_2SO_4 및 V_2O_5 가 주요 물질이라고 할 수 있다(H.S. Jeong et al., 2005). 이러한 고온부식은 $650^{\circ}C$ - $700^{\circ}C$ 온도 구간에서 주로 발생되며, 배기밸브 스피ndl들에서도 스피ndl 하부(bottom)에서 주로 발생된다.



Fig. 2.2 Photo of exhaust valve spindles

통상적으로 알려져 있는 고온부식 수준은 $0.1\text{ mm} \sim 0.4\text{ mm}/1,000\text{h}$ 이다. 하지만, 최대 $1\text{ mm}/1,000\text{h}$ 도 관찰된바 있다(H.S. Jeong et al., 2005).

최근 엔진의 운전 패턴 중에, 배기밸브 스피ndl들의 열화(degradation)의 증가원인으로 작용할 수 있는 원인으로서는 높은 부하 밀도뿐만 아니라 저 부하 운전의 빈도가 높아진다고 할 수 있다. 저 부하엔진은 연료 소모량을 낮출 수 있다는 장점이 있으나, 배기밸브 스피ndl들의 열화를 촉진시키는 단점이 있다.

2.2 2행정 디젤엔진에서의 배기밸브 스핀들 관련 개발 동향

Kim 등은 선박엔진 부품의 보수 용접기술에 대해 연구한바 있다 (Young-Sik Kim et al., 2017). 국내에서 공장 보수 용접이 가장 많이 이루어지고 있는 선박엔진 부품은 피스톤 크라운과 배기밸브이며, 일부부품에서는 신규 부품에서도 성능향상을 위해 표면 개질방법으로서 오버레이 용접을 시공하고 있다. 용착율을 높이는 고능률 오버레이 용접 공정으로는 열선(hot wire)을 적용한 공정으로 Hot Wire GTAW(Gas Tungsten Arc Welding), Cold Tandem GMAW(Gas Metal Arc Welding), Band Arc SAW(Submerged Arc Welding), Tandem SAW법이 개발되어 있고, 용사방법으로 PTA(Plasma Transferred Arc)공정이 현장에서 많이 시공되고 있다. 입열량 제어가 용이한 공정으로 GMAW-Pulse, CMT(Cold Metal Transfer) 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.

Uffe 등은 MDT사의 배기밸브 스핀들의 향후 개발 방향을 제시한바 있다(Bihlet Uffe Ditlev et al., 2013). 이들의 연구에 따르면, 배기밸브 스핀들은 열부하를 가장 많이 받을 수밖에 없는 부품이다. 열부하의 증가 원인으로서는, 증가하고 있는 엔진 비출력과 함께, 저 부하 운전시간이 증가되는데 있다. 이러한 환경변화는 연료 소모량의 감소라는 장점과 함께 스핀들시트의 국부손상과 가스누설로 인한 배기밸브의 온도증가라는 단점 또한 야기하게 되는 것이다. 배기밸브의 온도증가는 수명의 단축과 고온부식에 대한 저항성의 지표로 활용되는 내구성에 영향을 미친다.

우려스러운 점은, 저부하 운전을 주로 하는 기관에서 상기한 바와 같이 극한 부식율이 발생했다는 점이다. 이러한 누설 연소가스에 의한 고온 부식 증상은 스핀들 시트에도 영향을 미쳐, 시트부의 온도상승 및 가스 누설을 초래하기도 한다.

최근의 2행정 디젤엔진에서는 LNG를 비롯한 다양한 대체 에너지원의 연소를 염두에 두어야 한다. 통상적으로 디젤유의 연소시보다 가스 연료를 연소시킬 경우에는 연소 부산물의 생성이 감소하게 되고, 배기 밸브 시트부에 생성될 수 있는 부착물(deposit) 또한 감소될 것으로 예상된다. 이 때문에 밸브 시트(seat)와 스프린들의 시트(valve face) 사이에 윤활효과가 감소될 것으로 예상되며, 이 때문에 스프린들 시트부에 새로운 윤활 메커니즘을 도입해야 할 필요성도 염두에 두어야 한다.

극한의 운전조건에서도 부식이 적게 일어나는 금속에 대한 특성은 이미 지난 50여년간 충분히 연구 되었고, 나름 많은 기술들이 축적되어있다. 그중에서도 가장 확실한 재질은 Cr 베이스에 Ni 합금을 첨가하던지, Ni 베이스 Cr 합금을 첨가하는 기술이 가장 확실한 것으로 알려져 있다. 이러한 금속들은 전통적인 가공방식에 따르면 700°C에서 취성을 보이게 되는 것으로 알려졌다(Bihlet Uffe Ditlev et al., 2013).

1990년대 중반에 이르러 MDT는 금속파우더를 활용한 기술을 엔진에 적용하였다. Ni48Cr을 열간 등방압 가압법(Hot Isostatic Processing, HIP)으로 제조하여 700°C 온도에서 4,000 시간을 넘게 운전하여도, 충분히 양호한 기계적 특성을 유지하고 있음을 확인하였다(Bihlet Uffe Ditlev et al., 2013).

HIP 공정은 저탄소강이나 오스테나이트계 스텐인레스 스틸에도 적용이 가능하다. 공정에 대한 개략도는 Fig. 2.3에 명시하였다. 금속 파우더가 캡슐에 저장되면, 캡슐을 진공상태로 만든다. 이 캡슐을 HIP 챔버내에서 처리하게 되고, 처리 조건은 1,150°C, 1,000 bar, 3시간이다. 캡슐을 HIP 처리하고 나면, 체적은 약 30% 감소되는데 이는 금속분말간 생성되었던 공극이 채워지면서 감소하는 체적과 일치하게 되는 것이다.

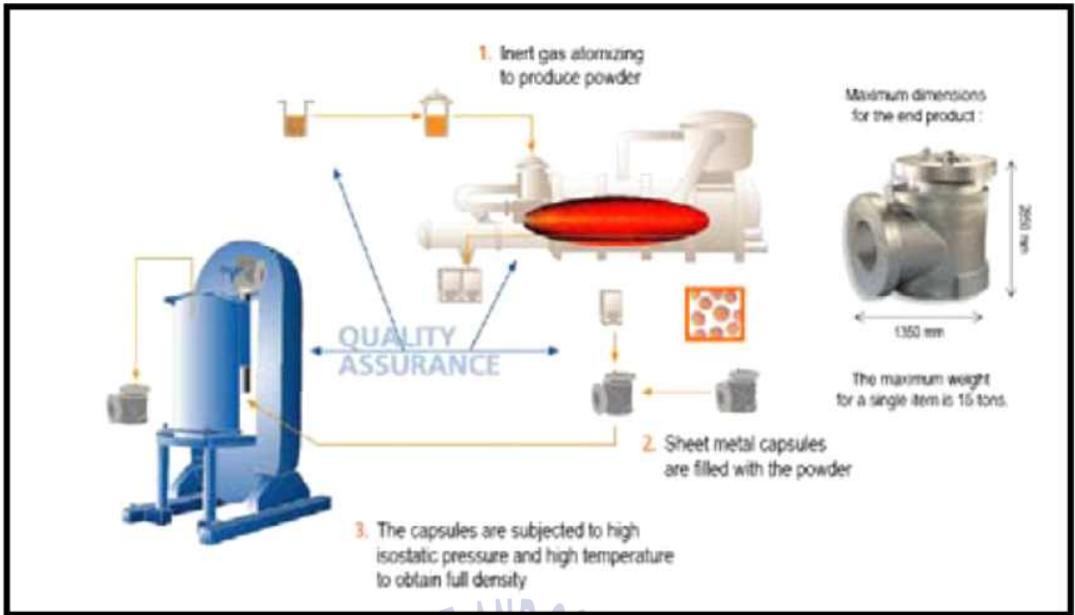


Fig. 2.3 HIP sheet metal capsule production



2.3 엔진제조사의 배기밸브 스피들 설계 및 기준

현재 엔진제조사의 배기밸브 스피들에는 듀라스핀들과 나이모닉 스피들이 각각 표준으로 적용되고 있다. 듀라스핀들의 경우, 오스테나이트계인 강제 밸브에 인코넬 코팅을 입힌 형태로서, 듀라스핀들의 경도 강화를 위하여, 압연 가공과정을 통하여 가공하고 있다. Fig. 2.4에는 듀라스핀들의 압연 가공과정을 나타내었다.



Fig. 2.4 Rolling process of DuraSpindle

듀라스핀들의 기본적인 모재는 60MC 엔진 기준 현재로서는 SNCrW 내열강 소재를 사용하고 있다. Table 2.2에는 SNCrW의 기계적인 요구치를 기술하였고, Table 2.3에는 요구되는 경도, Table 2.4에서는 화학적 조성을 서술 하였다.

Standard test method	Condition	Position	Temperature [°C]	Re min [MPa]	Rp min [MPa]	Rm min [MPa]	A min [%]	Z min [%]
ISO6892 (2009)	+AT	Forging	20	-	350	700	26	45
ISO6892 (2009)	AC+AT	Casting	20	280	-	550	-	-
ISO6892 (2009)	AC+AT	Casting	20	-	-	-	25	-

화학적 조성에 있어서 공칭(Nominal)값은 통상 평균값을 의미하고 있으며, **Table 2.2**의 기계적 요구치를 만족하는 경우에는 화학적 조성을 필수적으로 맞출 필요는 없다. 또한, 화학적 조성의 각 구성성분은 공칭값 기준 약 +/-10%까지는 함유율이 상이하더라도 인정이 되고 있다. SNCrW는 열처리 및 담금질(quenching)을 통하여 내부응력을 완화하고, 베인 휠(vane wheel)에 대해서는 **Table 2.5**에 서술될 열처리 공정을 반드시 거치도록 명시하고 있다. **Table 2.6**에는 요구되는 물리량을 기록하였다.

Table 2.3 Required hardness for SNCrW

Standard test method	Condition	Position	Temperature [°C]	HB min	HB max
ISO 6506-1 (1999)	+AT	Forging	-	190	240
ISO 6506-1 (1999)	AC+AT	Casting	20	150	220

Table 2.4 Required chemical composition for SNCrW

Limits	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Ni%	W%
Nominal	0.25	1	1	-	-	20	10	2
Max	0.30	-	-	0.04	0.03	-	-	-

Table 2.5 Heat treatment for SNCrW

Treatment	Temperature[°C]	Holding time min [h]	Cooling media	Application
Solution heat treatment	1,000	-	Air or water	Raw material
Stress relieving	700-750	1	Air	Valve spindles; Forgings
Solution heat treatment	1,150	2	Water	Cast vane wheel

Table 2.6 Required physical properties for SNCrW

Temperature[°C]	Density [kg/m ³], Nom	Mean expansion [10 ⁻⁶ /K], Nom	Thermal conductivity [W/(m · K)], Nom
100	-	-	12.5
200	7900	-	-
700	-	-	21
800	-	19	-

나이모닉 스피ndl들은 통상 Nimonic 80A 소재를 사용하여 단조공정을 거쳐 제조된다. 대형엔진에 있어서 나이모닉과 듀라스피ndl들의 성능은 상호 큰 차이가 없이 유사하며, 듀라스피ndl들의 경우 높은 강도와 내 마모 특성이 높으며, 나이모닉 스피ndl들의 경우, 내 부식성이 우월한 것으로 알려져 있다.

엔진제조사 Service letter에 따르면, 스피ndl들의 수명주기와 소실량(burn-away) 판별 기준을 최신의 엔진 운전 패턴을 분석하여 갱신하였다. **Table 2.7**에는 기존의 스피ndl 수명주기를 표기하였다. 명시된 바와 같이, 기종 별로 소실량이나 수명주기가 다소 상이하나, 60MC-C를 기준으로 소실량 11 mm에 64,000 시간의 운전 시간을 기준으로 수립한 바 있었다.

Table 2.7 Previous spindle lifetimes

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

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

하지만, 저 부하 운전에서의 배기밸브 스피들에 대한 비용 증가를 막기 위해 배기 밸브의 재 용접 가능성을 검토한 결과 최대 재 용접 횟수가 2회인 현재 표준 대신 최대 3회까지 가능하다는 것을 확인하였다. 또한 대형 보어 엔진의 경우 최대 소실량이 증가하였다. **Table 2.8**에는 기종별로 최대 소실량과 허용 가능한 소실률 (burn-away rate)을 표기하였다. 60 및 70 보어 기종에서는 소실량이 9 mm 및 10 mm이다. 80, 90 및 98 보어 기종에서는 각각 14 mm, 17 mm, 20 mm까지도 그 제한치를 확대하였다. 소실률 또한 전체 보어에 대해 0.36~0.80 mm/1,000h 수준으로 허용치가 확대되었다.

Table 2.8 Maximum burn-away and allowable burn-away rates

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

이러한 새로운 허용치로 인해, **Table 2.7**에 나온 스피들 수명 주기는 최대 소실량 기준으로 **Table 2.9**와 같이 늘어난 것을 확인할 수 있다.

Table 2.9 Updated spindle lifetime

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

2.4 엔진제조사의 듀라스핀들 재생 수리 절차

Fig. 2.5에 듀라스핀들의 재생 수리 절차를 도식화 하였다. 재생 수리가 필요한 듀라스핀들이 입고되면, 현 상태를 진단하기 위한 초기 검사가 진행되고, 이의 결과에 따라, 작업 범위가 결정되며, 결정된 범위에 따라 W 시트와 접촉하는 밸브 디스크 부분의 가공을 진행하게 된다. 이후, 인코넬 용접을 실시하고, 경도를 높이기 위해 밸브 디스크 부분의 롤링가공을 실시한다. 열처리를 거쳐, 정확한 가공 치수확보를 위한 최종 가공을 수행하게 되며, 출하 전 최종 검사를 진행한다.

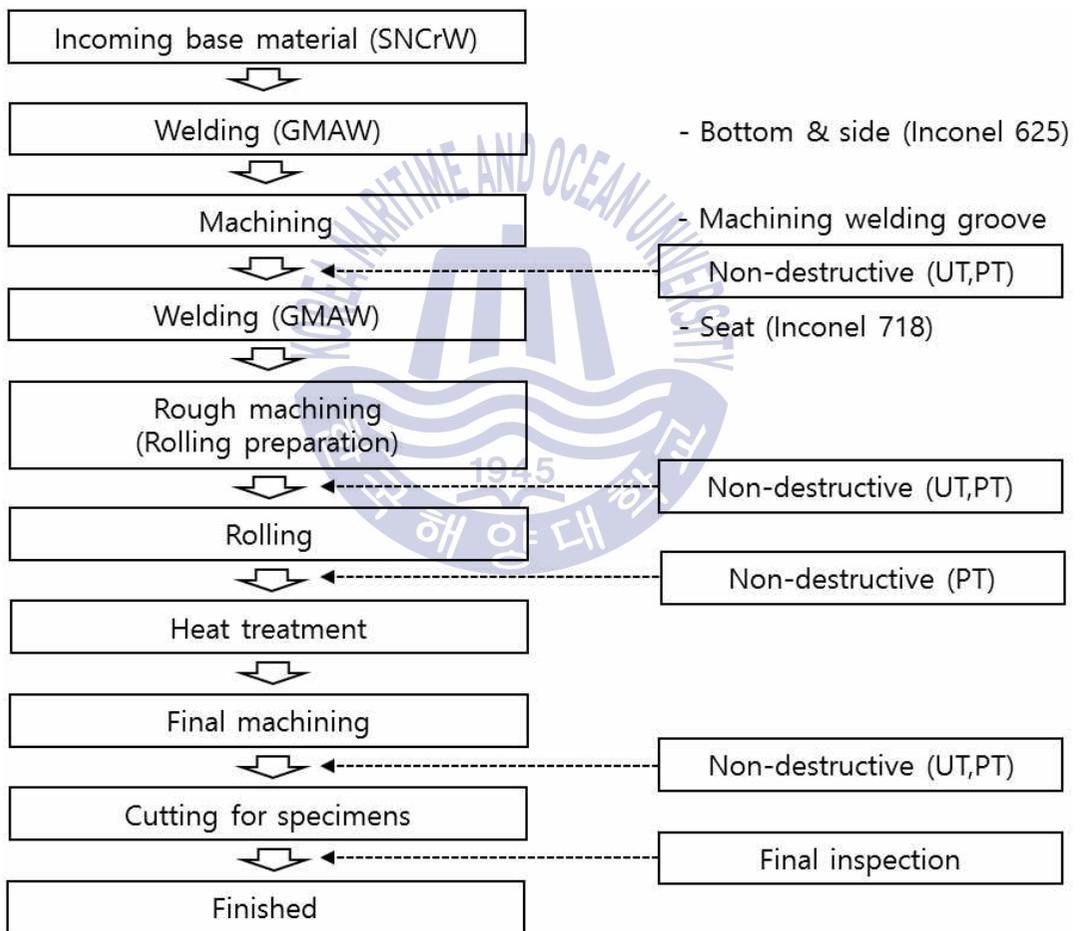


Fig. 2.5 DuraSpindle reconditioning procedure

2.5 용접 재질에 대한 요건

용접재는 다음의 Table 2.10에 기술한 요건을 필수적으로 충족해야만 한다.

Table 2.10 Welding requirements for spindle materials

Weld metal properties - Values are guidance only	Hardness as welded [HV20]	Hardness heat treated	Surface hardness rolled, heat treated and finished machining [HV20]
Inconel 625	200	N/A	N/A
Inconel 728	240-280	400-420	540-580
309L	200	N/A	N/A

Welding quality	Penetration/dilution of base material	Bonding	Defects
Inconel 625	Max. dilution 5% on final machined surface	No lack of bonding allowed	No cracks allowed
			Pores max. ϕ 1 mm
Inconel 718	Max. dilution 2% on final machined surface	No lack of bonding allowed	No(heat) cracks allowed
	Max. dilution 25% in 1 st layer		Pores allowed if max. ϕ 0.5 mm
309L	N/A	No lack of bonding allowed	No cracks allowed
			Pores max. ϕ 1 mm

Rolling quality	Rolling depth (mm)	Hardening depth, rolled and heat treated
Inconel 625	N/A	N/A
Inconel 718	2.0-2.2	1.5 mm, min 470 HV
309L	N/A	N/A

Fig. 2.6에서는 경화(hardening) 공정에서의 깊이(depth) 요건을 명시하였다.

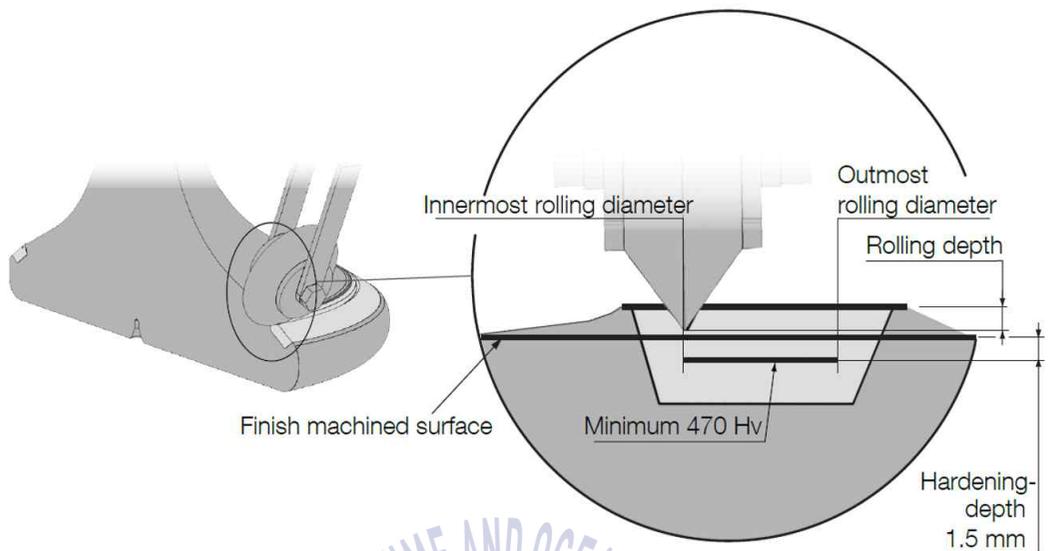
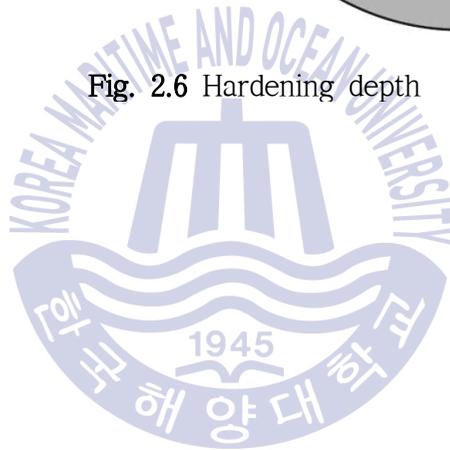


Fig. 2.6 Hardening depth



2.6 용접절차서의 유효성

재생 수리공정에 있어서, 매우 중요한 기본 기술이 용접 기술의 확보이다. 따라서 재생수리 전에 용접절차서(Welding Procedure Specification, WPS)를 MDT로부터 승인받는 것 또한 매우 중요한 절차이다. MDT와 협의를 통하여 WPS를 승인 받고, 승인받은 사항이라도 다음의 사항들이 발생하게 되면 다시금 MDT와 협의 하여 재 승인을 받아야 한다.

- 소재의 화학적 조성변화가 있거나, 사용되는 가스가 변경된 경우
- 용접소모재료 공급사가 변경된 경우
- 적용될 용접 절차가 변경된 경우
- 전극을 추가하였거나, 전위를 제거한 경우
- 충전재의 단면적이 10% 이상 변경된 경우
- 입력 열량값이 10% 이상 변경된 경우
- 예열 온도가 40℃ 이상 감소한 경우
- 압연공정에 변화가 있을 경우

상기의 경우 수정된 WPS로 MDT의 승인을 득하고 난 후 재생수리를 하여야 공식적으로 인정될 수 있으며, WPS는 사업자의 공장이나 소재지등 사업장과 동일한 품질관리가 가능한 곳에 한하여 유효하게 된다.

2.7 용접공의 인증

니켈합금의 용접은 매우 고난도의 기술을 요하는 공정이다. 따라서, 항상 주의 깊은 시공이 이루어져야 하며, 작업자 또한 충분한 경력과 용접 기능을 확보하고 있어야 한다. 더불어, 용접 장비들은 높은 수준의 표준을 만족해야하고, 각각의 용접 파라미터들을 충분히 만족할 수 있도록 잘 유지 보수 절차가 마련되어 있어야 한다.

용접공들이 실제 작업에 투입되기 위해서는 국제 표준에 의거하여 인증이 된 작업자들만 재생작업공정에 투입해야 한다. 이래야만, 재생공정의 품질이 확보될 수 있기 때문이다.



제 3 장 듀라스핀들의 재생 수리

3.1 재생 수리 전 최초 검사 및 용접 전 기계가공(machining)

접수된 재생 대상 품에 대하여 최초 소제를 실시하게 되고, 이후 스피들의 스템(stem), 시트(seat) 및 디스크(disc) 부의 치수를 기록하여, 그 결과를 분석함으로써 스피들을 재생 수리할 수 있는지를 판단하게 된다.

용접 전에 소재에 대하여 별도의 가공이 수행되어야 한다. 이 가공의 개념은 시트부의 경화된 표면을 제거하고, 디스크의 중앙 홀 및 소재에서 발생될 수 있는 흠집을 제거하는 절차라고 할 수 있다. Fig. 3.1은 실제 용접 전 기계가공 된 상태의 듀라스핀들의 사진을 나타내었다.

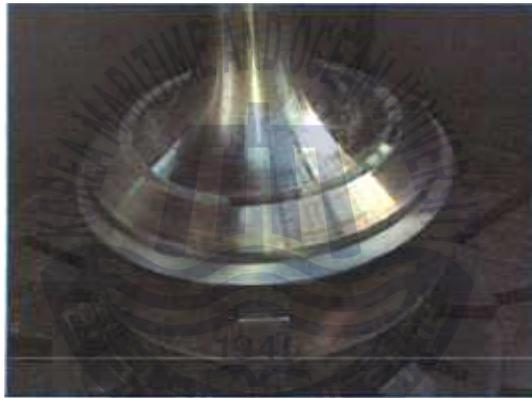


Fig. 3.1 Incoming base material and machining prior to welding

시트부의 경화된 표면을 제거하고, 새로운 용접 그루브(groove)를 적게 해야만 품질을 보증함에 있어 유리하다. 또한 스피들 디스크를 가공할 시, 외경부의 높이는 최소 10 mm가 확보되어야 재생 수리를 할 수 있다. 이에 대한 요구 조건을 Fig. 3.2에 도식화 하였다. 또한, 기계 가공공정만으로 블로우바이(blow-by) 흔적을 충분히 제거하지 못했다면, 연삭(ground)나 밀링(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.

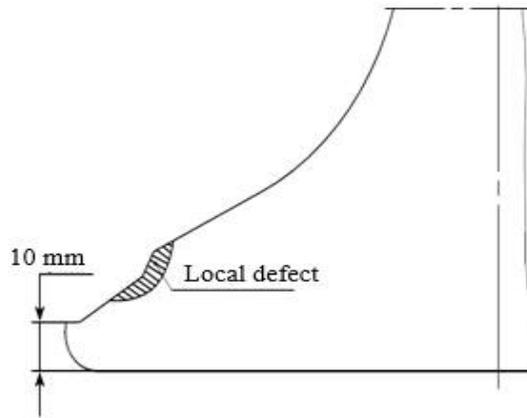


Fig. 3.2 Requirement of the height of the outer diameter face

디스크 하부를 재 용접해야하는 경우에는, 디스크 하부를 청정 소재로 가공해야만 한다. 스피들을 압연공구에 올리기 위해서는 디스크 하부의 외경을 증가시켜야 한다. 스피들 디스크가 EN44L에 근거한 표준 홀이라면 60° 카운터 싱크와 적합한 치수를 활용하여 홀을 확보한다.

초기 가공된 표면은 침투탐상법(Penetrant Testing, PT)을 활용하여 확인해야 한다. 손상징후가 발견되면, 추가적인 가공이나 그라인딩 작업을 통하여 손상을 제거해야 하고 이후 PT를 반복하여 상태를 최종 확인해야 한다.

고온에서 니켈은 황, 인, 납, 주석 및 아연의 영향으로 취성을 띠기 쉽다. 통상 저 용점을 형성하는 모든 원소는 매우 적은 양이 함유되어 있더라도 유해 물질로 간주해야 한다. 유해물질이 함유될 경우 취성이 증가하게 되어 용접부 및 열 영향부에 심각한 균열을 초래하기 때문이다. 취성을 증가시키는 원소들은 용접공장 내에 다양한 형태로 존재하기 십상이다. 공장의 먼지, 그리스, 오일, 페인트, PT 잔재, 절단용액, 마킹용 잉크, 화학약품, 윤활제, 온도계, 납, 황동 해머 및 압축기의 오일 미스트 혹은 기타 기계류로부터 발원할 수 있으며, 취성을 일으킬 수 있는 원소들이다.

클리닝 방법은 제거해야 할 원소를 염두에 두고 잘 선정해야만 한다. 오일이나 그리스를 함유하고 있는 경우에는 보푸라기가 발생하지 않는 천을 사용하여 증기용 탈지 또는 아세톤이나 알코올과 같은 용매를 활용하여 닦을 수 있다. 청정면

은 용접면 보다도 50 mm 이상 더 넓은 거리를 청정해야 한다. 와이어를 활용한 솔질은 이물질 제거에 적절치 않다. 용접 비드의 표면에 있는 산화물 또는 슬래그는 후속 용접 작업 중에 소모되지 않으며 용해 불량과 같은 결함을 초래할 수 있다. 무거운 표면 산화물 및 슬래그는 그라인딩을 통하여 제거함이 바른 방법이다. 니켈 산화물은 인코넬보다 높은 온도에서 녹게 된다. 따라서 불순물에 의한 산화물은 용해 불량 및 산소층 함유와 같은 문제를 야기할 수 있으며, 일반적으로 이때의 결함은 NDT로는 감지되지 않는다.



3.2 용접

작업을 위하여 용접예열이 필요하지는 않다. 단, 소재의 온도가 0℃ 혹은 그 이하라면, 스피들 디스크의 온도를 20℃-25℃ 수준으로 올려 응축수의 생성을 방지하여야 한다. 이러한 응축수 혹은 습도는 용접재료에 공극을 발생시킬 수 있기 때문이다. 따라서, 가스버너를 활용하여 스피들 디스크의 표면온도를 최대 100℃로 올려 수분을 제거하고 응축을 방지할 필요가 있다. 더불어 층간온도를 초기 층에서는 최대 200℃, 이후의 층에서는 최대 350℃로 규정하고 있음을 참조해야 한다. 용접은 다음의 Fig. 3.3과 같이 부위를 구분하여 그 부위를 규정하고 있다. 더불어, Fig. 3.4에서는 Fig. 3.3에서 기술한 각 위치(position)를 참조하여, 각 위치별로 인코넬 625나 718용접을 한 사양을 표시하였다.

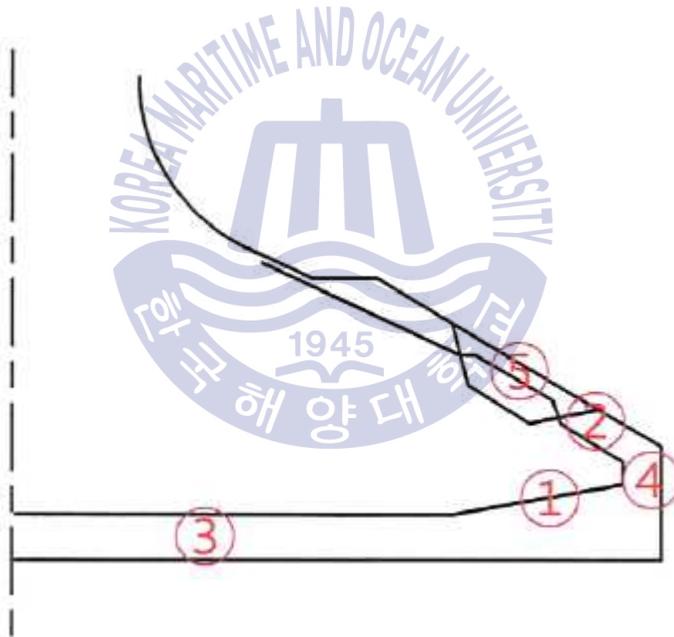


Fig. 3.3 Welding positions

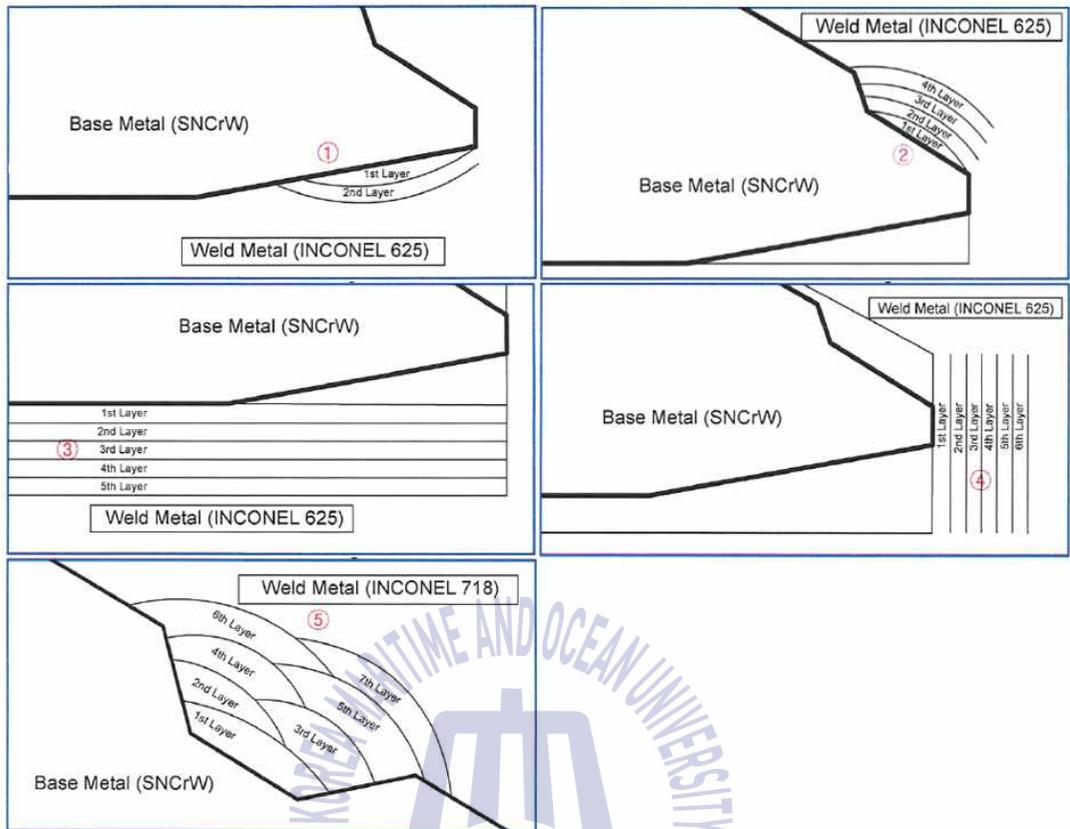


Fig. 3.4 Welding specifications on base metal

제조사에서는 용접 소모재의 요건을 Table 3.1과 같이 정의하고 있다. 기초 소재를 복구하기 위하여 인코넬 625 혹은 309L을 사용할 것을 권장하고 있고, 인코넬 626을 보완하기 위해서는 인코넬 625를 반드시 사용해야 한다. 시트면의 그루브를 코팅하기 위해서는 인코넬 718을 사용해야 한다.

철과 규소의 함량은 적을수록 좋으며, 전극 및 와이어 소모품은 제조업체의 요구 사항에 따라 건조한 상태로 보관해야 한다. 과도한 수분을 흡수한 전극은 열기 건조하여 재생할 수 있다.

Table 3.1 Requirements of welding consumables

	Requirements for filler metal [Wt%]				
	309L		Inconel 625		Inconel 718
Ni	13	13	Balance(≥ 64)	Balance	54
Cr	24	24	20-23	20-23	19
Fe			1.0 max.	3.0 max.	18 (balance)
Mo	max. 0.3	max. 0.3	9	9	3
Nb			3.15-4.15	3.15-4.15	5
Ti			0.4 max.		1
Al	1	1	0.4 max.		1
C	max. 0.03	max. 0.03	0.1 max.	0.1 max.	0.8
Si	0.5	0.7	0.2 max.	0.75 max.	0.2 max.
Mn	1.8	0.9			
Standard	AWS A5.9 ER309L	AWS A5.4 E309L	AWS A5.14 ERNiCrMo-3	AWS A5.11 ENiCrMo-3	AWS A5.14 ERNiFeCr-2
Shielding gas	GTAW: Ar/30He 6-10 L/min GMAW: Ar/30He /2CO ₂ 12-16 L/min	-	GTAW: Ar, 6-10 L/min GMAW: Ar/15He 20 L/mm	-	GTAW: Ar, 6-10 L/min GMAW: Ar/15He/2H ₂ / 0.06CO ₂ ~18 L/mm
Welding process	GTAW, GMAW	SMAW	GTAW, GMAW	SMAW	GTAW, GMAW
Application	Rebuilding base material	Rebuilding base material	Rebuilding	Rebuilding	Hardfacing in seat area

Table 3.1에 기술된 충전제의 사양은, 인코넬 625와 인코넬 718에 대해 분리하여 요건을 기술하였다. 인코넬 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. 인코넬 718 또한 GTAW와 GMAW 모두 적용가능 하며, 시트부의 표면을 경화시키는 용도로 주로 활용된다. 본 논문의 기반이 되는 재생 작업은 GMAW를 적용하여 재생 작업을 수행하였으며, 이 용접법은 소재의 작은 흠결이나 디스크 하부의 인코넬 625, 시트부분의 인코넬 718 층의 용접에 적합하다. 다음은 듀라스핀들의 재생공정에 활용될 수 있는 용접 절차들이다.

3.2.1 SMAW

블로우바이(blow-by)와 같이 중공을 메꾸거나 국부적인 수정이 필요한 경우에 사용되는 공정으로서, 모재의 작은 손상 그리고 디스크 하부의 인코넬 625층 및 디스크의 중공을 메꾸는 적합하다.

용접 비드가 생성되면, 슬래그를 제거해주는 것이 기본 공정이다. 또한, 아크를 재가동하기 전에 용접 끝단 및 크레이터를 연마해야 할 수도 있다. 전극의 직경이 $\varnothing 2.5$ mm 일 때와 $\varnothing 3.2$ mm 일 때 각각 최대 운봉(weaving)은 7 mm 및 9 mm가 되어야 한다. 비드가 너무 넓은 경우에는 슬래그를 함유할 수 있게 되며, 용융부가 너무 크면 비드의 형상이 바르지 못하게 된다. 아크의 주요 힘은 용접 금속이 전극의 최소 운봉만으로 강재에 침착 될 수 있도록 이전 비드의 가장자리를 향해야 한다.

하향 용접을 권장하며, 하향 용접시의 전극 위치는 수직방향으로부터 20° 앞쪽으로 기울어져 있다. 작업 각도는 0° 여야 하며, 이는 용융 플럭스의 제어 및 슬래그의 제거를 용이하게 한다. 용접시에는 스파터링(spattering)이 없어야하며, 과도한 스파터링이 발생한 경우에는 대부분, 아크가 과도하게 길거나, 전류가 과도하게 큰 경우, DECP 극성이 아닌 경우, 전극 코팅제가 수분을 머금은 경우에 해당된다.

3.2.2 GTAW

모재 및 디스크 하부의 인코넬 625층, 시트부의 인코넬 718부의 작은 손상이 있으며, 압연 혹은 열처리 되기 전에 적합한 절차이다.

전류는 직류 85 A-100 A, 음극전극 이면서 6-10 L/min 수준의 가스유량이 주요 파라미터가 된다. 작업 각도와 Travel 각도 모두 0° , 50% 오버랩되는 직선비드로 용접해야 한다.

용접시에는 용접작업자와 가스컵간의 실질적인 안전거리를 확보해야 하고, 환기 팬과 같은 곳과 일정 거리를 유지하여 용접공정을 보호해야 한다. 보호 가스의 순도 유지를 위하여 주의를 기울여야 하고, 공기 또는 물의 함유로 인한 오염

을 방지해야 한다. 용접 장비와 가스 호스간 느슨한 연결부나 핀홀은 없는지를 정기적으로 검사해야 한다. 수냉식 장비는 정기적으로 누출여부를 점검해야 한다.

3.2.3 GMAW/GMAW-P

Table 3.2에는 인코넬 625와 인코넬 718에 대한 용접 파라미터들을 나열하였다.

Table 3.2 Welding parameters for Inconel 625 & Inconel 718

	Inconel 625	Inconel 718
Pulse current	~350 A	~125 A
RMS mean current	100 A~130 A	-
Pulse time	2.5 ms~3.0 ms	-
Pulse frequency	~105 Hz	-
Polarity	+on electrode	+on electrode
Pulse voltage	39 V	39 V
Ground level-current	40 A	-
Wire speed	~6.0 m/min	~6.0 m/min
Welding speed	~270 m/min	~140 m/min
Torch oscillation frequency	~1.0 Hz	~1.25 Hz
Torch oscillation width	8 mm~10 mm	12 mm~17 mm
Stick out	20 mm~25 mm	15 mm~20 mm
Bead overlap	25%	20%
Shielding gas flow	15~20 L/min	18 L/min

Table 3.3에 기술된 바와 같이, 용접와이어는 $\varnothing 1.2$ mm가 적용되며, 용접속도 (welding speed)는 인코넬 625와 718 각각 최대 270 및 140 mm/min 수준이어야 한다. 실딩가스유량(shielding gas flow)은 15-20 L/min 및 최대 18 L/min이 되어야 한다. Fig. 3.5와 Fig. 3.6에는 재생 공정 개발 시 수행한 실제 인코넬 용접 상황을 기록하였으며, Fig. 3.5에서는 스펀들 하부와 측면에 대한 인코넬 625를 Fig. 3.6에서는 시트부 표면에 대한 인코넬 718 용접 사진을 나타낸다.

Table 3.3 Requirements for welding consumables

	Inconel 625	Inconel 718
Wire diameter	∅1.2 mm	∅1.2 mm
Pulse current	~350 A	-
RMS mean current	100 A-130 A	~125 A
Pulse-time	2.5 ms-3.0 ms	-
Pulse-frequency	~105 Hz	-
Polarity	+ on electrode	+ on electrode
Pulse-voltage	39 V	39 V
Ground level current	40 A	-
Wire speed	~6.0 m/min	~6.0 m/min
Welding speed	~270 mm/min	~140 mm/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

본 논문에 서술된 공정은 GMAW-P(Gas Metal Arc Welding -Pulse)로 시공되었으며, 용접와이어는 현대용접의 SMT-625와 SM-718을 사용하였다. 용접모재를 샘플링하여 분석한 결과를 **Table 3.4**에 표기하였다.

배기 밸브 스핀들이 가변 속도 제어 기능을 구비하면서도 틸팅 회전기에 장착될 수 있는 자동 GMAW를 사용해야 한다. 와이어 공급 유닛, 진동 유닛 및 용접 토치는 용접 로봇 상에 장착되어야 한다. 일정한 오버랩(overlap)이 발생되고 융합 결함이 생길 위험을 줄이기 위해 자동으로 스테핑을 제어할 것을 권장한다.

인버터 제어 전원을 활용한 GMAW를 사용하고, 용접 와이어 및 접촉 튜브는 깨끗하게 유지되어야 한다. 접촉 튜브와 라이너는 주기적으로 교체하고 사용하지 않을 때는 용접 와이어의 코일을 덮어서 보관해야 한다. 적절한 가스 차폐는 안정적인 용접 공정을 달성하는 데 매우 중요하다.

과도한 가스 유속은 아크를 방해하여 용접 비드의 산화를 발생 시킬 수 있다. 차폐 가스를 가스 컵으로부터 용접 폴로 저속으로 전달하는 것이 중요하다.

Table 3.4 Filler metal sample analysis

		SMT-625	SM-178
C	Specification	≤ 0.1	≤ 0.08
	Result	0.01	0.07
Mn	Specification	≤ 0.5	≤ 0.35
	Result	0.03	0.11
Fe	Specification	≤ 5.0	Rem.
	Result	0.14	20.45
P	Specification	≤ 0.02	≤ 0.015
	Result	0.003	0.008
S	Specification	≤ 0.015	≤ 0.015
	Result	0.001	0.001
Si	Specification	≤ 0.5	≤ 0.35
	Result	0.04	0.16
Cu	Specification	≤ 0.5	≤ 0.3
	Result	0.01	0.03
Ni	Specification	≥ 58.0	50.0~55.0
	Result	64.7	52.3
Al	Specification	≤ 0.4	0.2~0.8
	Result	0.1	0.41
Ti	Specification	≤ 0.4	0.65~1.15
	Result	0.19	0.92
Cr	Specification	20.0~23.0	17.0~21.0
	Result	22.3	17.42
Nb+Ta	Specification	3.15~4.15	4.75~5.5
	Result	3.62	5.12
Mo	Specification	8.0~10.0	2.8~3.3
	Result	8.68	2.96
B	Specification	-	≤ 0.006
	Result	-	0.001

Fig. 3.5에서 사용된 용접공구들의 사양은 다음과 같다. 용접 공구는 Miller사의 Invision 456MP를 사용하였으며, 이 공구는 380 V 전압을 소모하는 장비이다. 소모성 용접자재인 용접 Wire는 현대용접의 SMT-625를 사용하였으며, 직경이 1.2 mm인 wire이다. 실드가스(shield gas)는 Ar/15He를, 예열온도는 최대 66°C로 하였다. 층간 온도조건으로는 첫 번째 층(layer)에 대해서 최대 105°C로 후속층으로는 277°C로 하였다. Fig. 3.6 또한 동일한 용접 공구를 사용하였으며, 이때 용접 Wire는 직경이 1.2mm인 현대용접의 SMT-718을 사용하였다. 실드가스는 Ar/15He/2H₂/0.06CO₂를,

예열온도는 최대 88℃로 하였다. 층간 온도조건으로는 첫 번째 층(layer)에 대해서 최대 120℃로 후속층으로는 258℃로 하였다.



Fig. 3.5 GMAW, bottom & side with Inconel 625



Fig. 3.6 GMAW, Seating surface with Inconel 718

이와 같은 용접작업이후, PT나 UT와 같은 방법을 통하여 용접 품질을 점검하게 되는데 다음 Fig. 3.7에 실제 용접 후 수행한 테스트(test) 사진을 기입하였다.

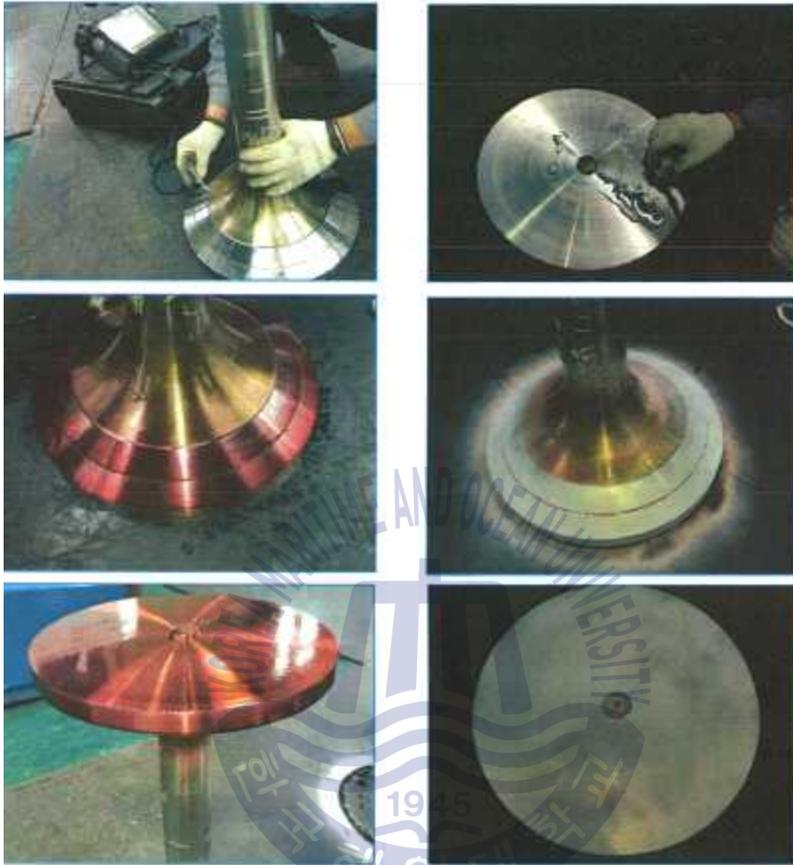


Fig. 3.7 Non-destructive test(PT,UT) after welding (Inconel 625)

하부와 측부(bottom and side)의 인코넬 625 용접 후 상기와 같은 검사를 진행하며 이후 시트면을 인코넬 718 용접 전에 그루브를 가공하게 된다. Fig. 3.8에 그루브 가공 공정 사진을 나타내었다.

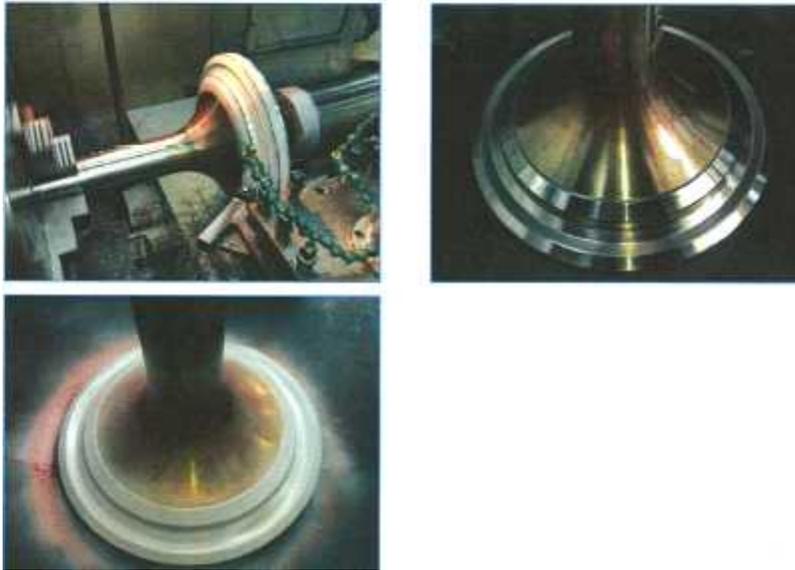


Fig. 3.8 Machining - The welding groove is machined

시트부에 대해서는 인코넬 718을 용접하였으며, 이때 사용된 용접기는 Miller사의 Invision 456MP이다. 용접봉은 현대용접의 SM-718을 사용하였고, 1.2 mm 직경을 가지고 있는 용접봉이다. Ar/15He/2H₂/0.06CO₂를 활용하였고, 최대예열온도 88℃, 첫 번째 층에 대해서는 최대 120℃, 이후 층에 대해서는 최대 258℃를 유지하였다.

Fig. 3.9는 용접 그루브를 가공한 이후, 롤링 전 PT와 UT를 활용한 비파괴 검사를 수행한 실적 사진을 게시하였다.

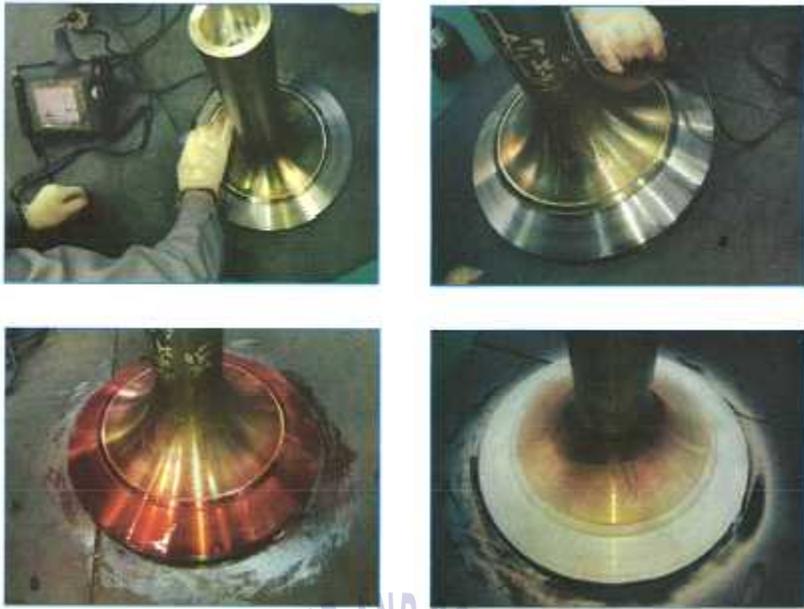


Fig. 3.9 PT & UT prior to rolling



3.3 압연(rolling)

압연 공정을 수행하기 위해 필요한 기본적인 공구들은 다음과 같다. 특히, 베어링의 턴테이블과 롤링 공구의 관리가 매우 중요하다.

- 적절한 갈고랑쇠(claw)가 장치되어 있는 턴테이블을 활용하여, 벨브 스펀들 디스크를 고정 시킨다. 최소 축 방향 부하 용량은 15톤, 속도 범위는 50 rpm- 400 rpm, 최소 요구되는 턴테이블 구동력은 5 kW급을 적용해야 한다.
- 유압 실린더에 장착 된 콘솔, 유압 실린더 및 브래킷으로 구성된 롤링 공구는 라운딩 반경 $\varnothing 2.5$ mm, 90° 대칭이 되며 회전이 가능한 $\varnothing 160$ mm 롤을 구비하여야 한다. 최소 유압 부하 용량은 15톤 이다.
- 공구는 턴테이블 및 유압 공구 및 스펀들 스템을 지지할 수 있는 구조를 가져야 한다.
- 작업자의 안전 확보를 위하여, 실딩(shielding) 및 안전 커버를 구비하여야 한다.

압연 공정의 개시 전에는 롤의 외경 표면을 확인하여야 하며, 표면에 결함이 없어야, 회전 공구와 스펀들 디스크가 심각한 손상을 방지할 수 있다.

스펀들 디스크는 턴테이블에 견고하게 고정시키기 위해 최종 시트 표면에 대해 2.5 mm의 롤링 여유를 뒤야 한다. 또한, 적절한 디스크의 형상대로 가공될 수 있도록, 명확한 도면을 활용하고 이에 준하여 가공을 시행해야 한다. 경험적으로 이 단계에서 용접 시트부와 디스크 하부의 UT 검사를 시행하면 우수한 품질을 확보할 수 있다.

압연 공정 중에 가해지는 운동량을 확실하게 전달하기 위해서는 벨브 스펀들 디스크를 턴테이블에 확실하게 고정해야 한다. 또한 벨브 스펀들의 위치를 견고하게 고정하기 위해 스펀들 스템을 지지해야 한다. Fig. 3.10에서는 압연 공구의 벨브 스펀들 가공에 적합한 위치를 그림으로 도식화 하였다. 일반적으로 롤링공구의 롤은 회전축이 스펀들의 축에 대해 반경 방향을 가리키고 동시에 회전축이 스펀들 시트 평면에 평행하도록 롤링 롤을 배치하여 공정을 진행해야 한다. 참고로, 본 연구에 활용된 롤링장비는 항일 AW사에서 제작한 HGRP-2698-1을 사용하였으며, 3상 380 V, 40 kVA의 전력을 소모하게 된다.

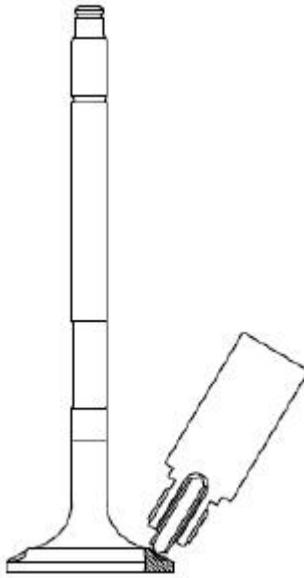


Fig. 3.10 Position of rolling tool

Fig. 3.11에는 본 연구의 대상이 된 엔진의 생산도면에 표기된 롤링 요구조건을 발췌하였다.

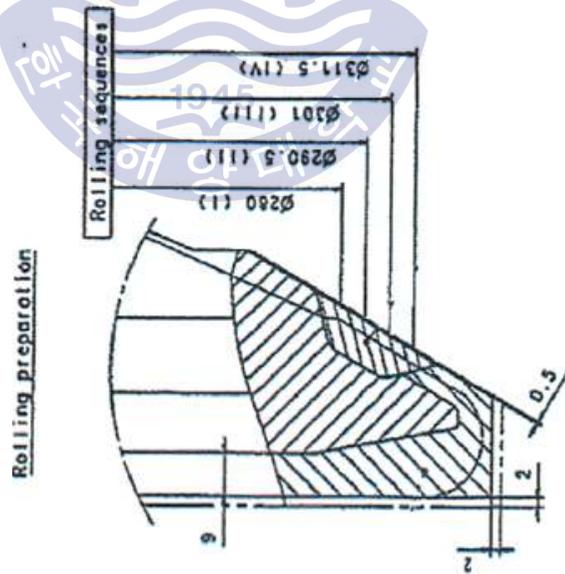


Fig. 3.11 Requirements of rolling on production drawing

롤링은 항상 동심원의 그루브(groove)의 중에서 가장 안쪽 그루브로부터 가공되어야 한다. 각 그루브의 공정은 후속 그루브의 공정 개시 전에 마무리하고 후속 그루브의 공정을 개시해야 한다. 롤링공정을 완료한 시트부의 다면은 다음 Fig. 3.12와 같은 형상을 띄게 된다.

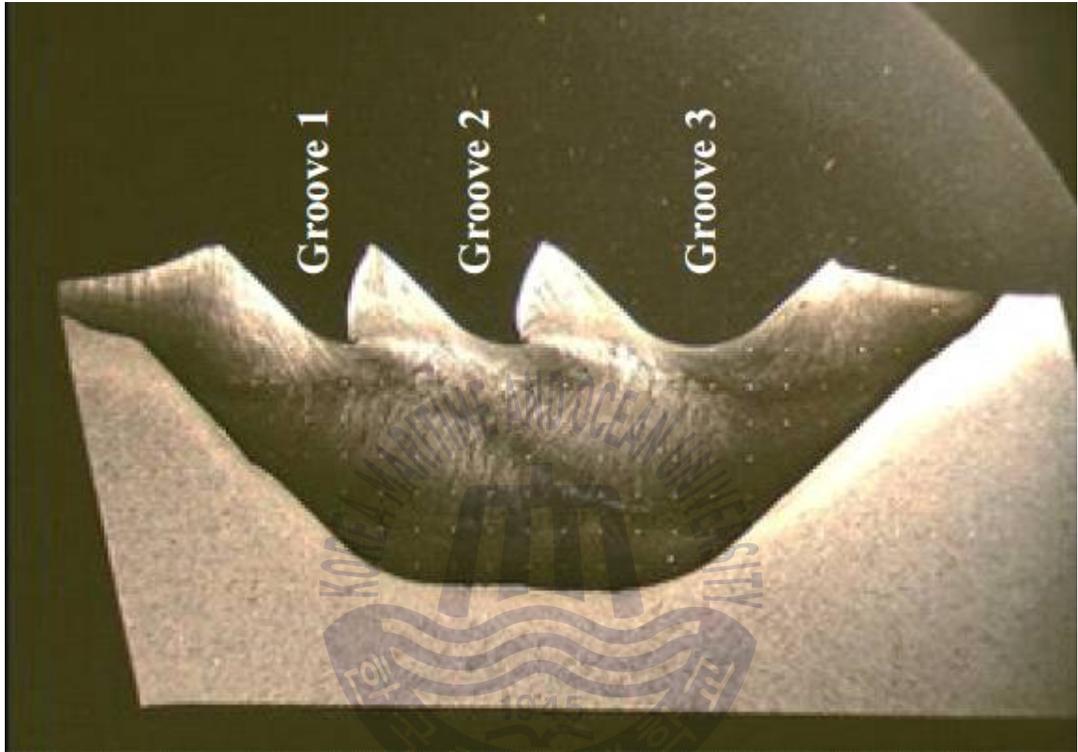


Fig. 3.12 A section of the rolled seat area

롤링의 시작 위치에서의 반경 방향 거리는 시트 평면에서 6.0 mm이다. 공구의 올바른 위치를 확인하기 위해 롤이 스펀들과 살짝 접촉 할 때까지 유압 장치를 가동시켜야 한다. 이러한 방법을 사용하면, 접촉 지름을 나타내는 원형 마크가 생기게 된다. 일반적으로 롤링이 완료된 그루브의 깊이는 2.0 mm-2.2 mm 수준이다. 그루브의 수와 위치는 실제 생산도면에 표기되어 있으므로 이를 참조해야 한다. Fig. 3.13에는 압연 직경 및 압연 깊이에 대한 정의를 그림으로 표하였다.

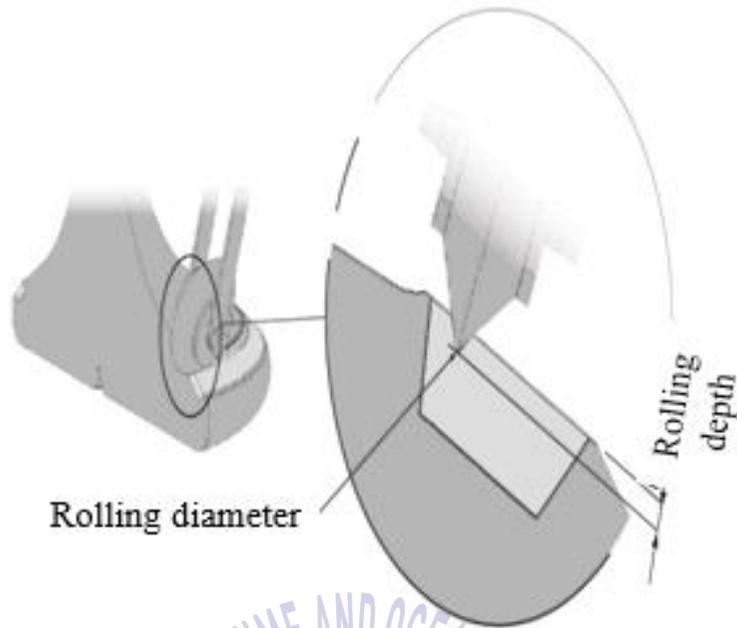


Fig. 3.13 Definition of rolling diameter and rolling depth

롤링 공정을 통하여 만족시켜야 하는 롤링 파라미터들을 Table 3.5에 표기하였다.

Table 3.5 Rolling parameters

Number of grooves	Turn table rotational speed(rpm)	Position of grooves (ϕ mm)			
		1	2	3	4
4	130	280.0	290.5	301.0	311.5

롤링공정은 롤링 공구를 첫 번째 그루브에 위치시킨 후에, 회전 테이블은 스핀들 크기를 고려하여 이에 상응하는 소정의 회전 속도로 시동한다. 권장 압연 속도는 130 m/min이다. 압연 공구의 유압 장치를 작동시키기 전에 시트 영역은 전체 외경에 대해서 Molycote 페이스트 혹은 유사한 것을 도포해야 한다. 결과적으로 유압 장치가 작동되고 매 30초마다 2톤씩 단계적으로 하중을 증가 시킬 것을 권장하고 있다. 각 공정 별로 몰리코테(Molycote)를 재 도포하고, 위에서 언급 한 압연 면에 가해지는 최종 하중은 일반적으로 시트부의 경우 8 - 9톤 범위이다. 단, 압연 공정에 의해 가해지는 소성 변형량 (Groove의 깊이)은 인코넬 718 용접 금속의 기계적 특성에 따라 달라지게 된다. 표면의 소성 변형 또한 시간에 따라 상이하므로 공구의 하중은 시간이 지나면서 다소 감소하게 된다. 최종 압연 깊이

에 도달하면 1 분 동안 최종 하중을 지속적으로 재조정하거나 자체 조정 시스템을 활용 할 것을 권고하고 있다. 후속 그루브는 상기한 절차에 따라 동일하게 가공된다. 압연 깊이는 원래 표면 위치대비 상대적인 측정을 하게 된다.

시트 영역의 압연 및 청소 후 압연 그루브에 인접한 영역의 육안 검사를 수행 하도록 되어 있다. 균열의 징후가 있는 경우 균열 여부를 확인하기 위해 염료 침투 탐상 검사를 시행하고, 균열이 발견되면 해당 스펀들은 폐기해야 한다.

Fig. 3.14에는 압연 공정 후 PT를 수행한 사진을 기록하였다.

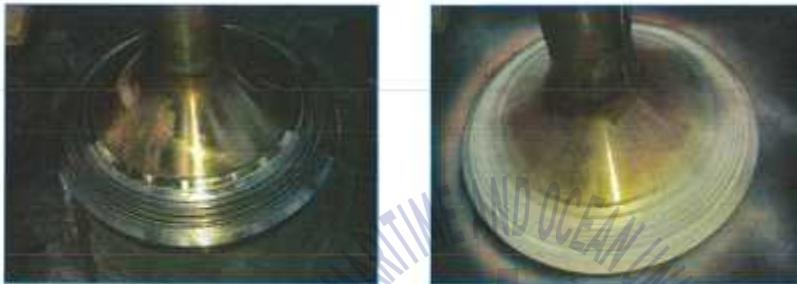


Fig. 3.14 Non-destructive PT test after rolling

3.4 열처리

압연 된 시트 영역은 노에서의 열처리를 통하여 시효 경화 시킨다. 열처리는 스핀들 디스크에만 해당되는 공정이며, 벨브 디스크만을 열처리 할 수 있도록, 노의 외부로 배인 휠이 나올 수 있는 형상의 노의 사용을 권장하고 있다. 배인 휠 하부의 스핀들 스템부에는 강제 공기 냉각을 적용할 것을 권장하고 있다.

열처리 전 스핀들 디스크 표면은 기계 가공 및 압연 작업 과정에 인입된 모든 잔여물을 제거해야 한다. 인코넬 718의 열처리 사이클은 Table 3.6과 Fig. 3.15에 따라 2 단계의 공정이 필요하다. 열처리1) 사이클은 상온에서 720°C까지 최대한 신속하게 노의 온도를 상승시키고, 그 온도에서 8시간을 유지하게 된다. 이후, 노의 온도를 620°C까지 낮추고 6시간을 유지하게 된다. 이후 노의 온도를 최대 400°C까지 낮춘 이후에 상온으로 냉각처리하게 된다. 하기 Table 3.6에 부여된 온도는 노의 온도를 기준으로 한다. 스핀들 전체를 열처리한 경우, 배인 휠과 HVOF 코팅부는 신환해야 한다.

Table 3.6 Heat treatment cycle for Inconel 718

	Heating up	Stage 1	Holding time	Intermediate stage	Stage 2	Holding time	Cooling
Inconel 718	As fast as possible	720°C	8 hours	Furnace-cool as fast as possible to 620°C	620°C	6 hours	Furnace-cool as fast as possible to max. 400°C

Fig. 3.16에는 실제 열처리를 수행한 노와 벨브스핀들을 사진으로 기록하였다. 열처리 대상 부품이 스핀들 디스크에 국한되기 때문에, 실제로는 Fig. 3.16의 사진처럼 스핀들 가이드 전체를 열처리하는 설비보다는 스핀들 디스크만 국부적으로

- 1) 항온열처리: 변태점 이상으로 가열한 재료를 연속적으로 냉각하지 않고, 어느 일정한 온도의 열욕 중에 냉각하여 그 온도에서 일정한 시간 동안 유지시킨 뒤 냉각시켜 담금질과 뜨임을 동시에 할 수 있는 방법으로, 온도, 시간, 변태의 3가지 변화를 도표(항온변태곡선)로 표시하여 목적인 조직 및 경도를 얻을 수 있다. 특징으로는 계단 열처리보다 균열 및 변형이 감소하고, 특수강 및 공구강에 좋다. 본 열처리는 항온풀림으로 풀림온도로 가열한 강재를 펄라이트 변태가 진행되는 온도(600°C~700°C)까지 열욕 중 냉각시켜 그 온도에서 항온변태시킨 후 공기 중 냉각한 열처리이다.

로 열처리할 수 있는 시스템의 적용이 권장된다. 다만, 본 공정에서는 베인 훔의 열처리만 제외되어야 하므로, 밸브스핀들에서 베인 훔을 제외한 상태에서는 밸브스핀들 전체를 노에서 열처리 하여도 무방하다.

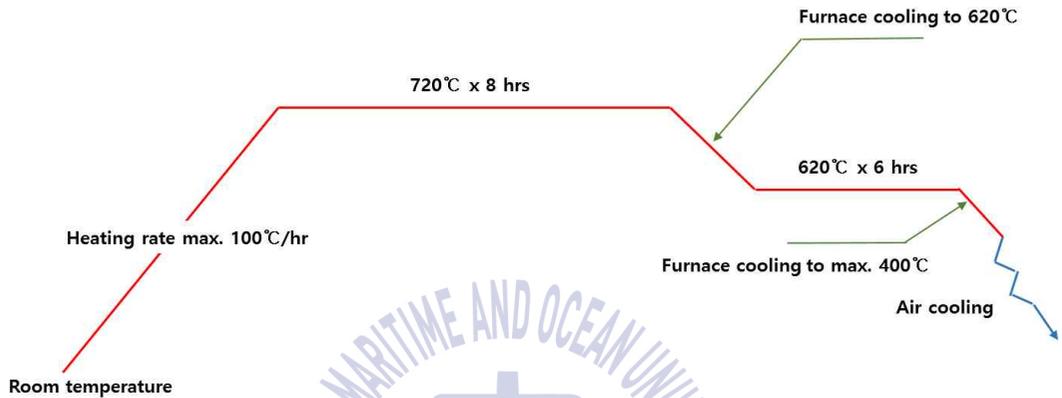


Fig. 3.15 Heat treatment cycle



Fig. 3.16 Heat treated exhaust valve spindle

3.5 최종 가공 및 검사

배기 밸브 스핀들이 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. Fig. 3.17에는 최종 가공이후 수행한 검사장면을 표시하였다. 최종 가공이후에 수행하는 검사는 앞서 언급한 비파괴 검사를 수행하며, MDT의 수리품에 대한 품질승인을 득하기 위하여 경도, 화학적 분석, 미세현미경 분석을 수반하고 있다.

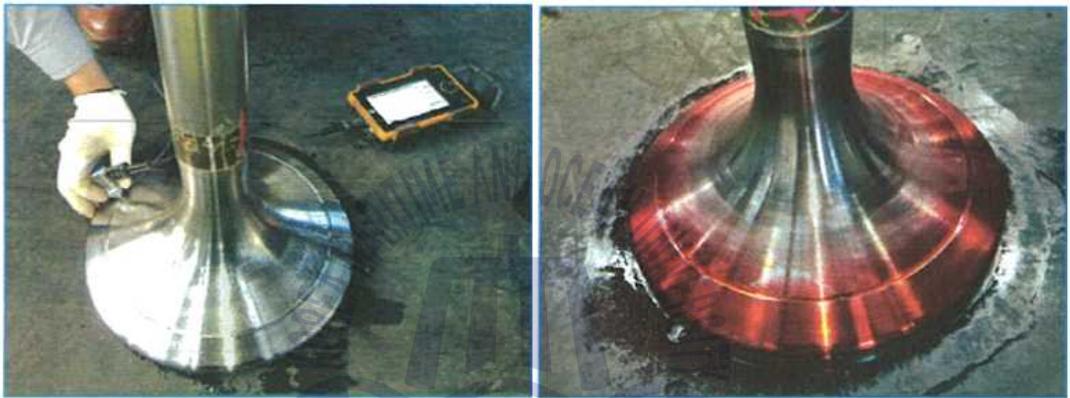


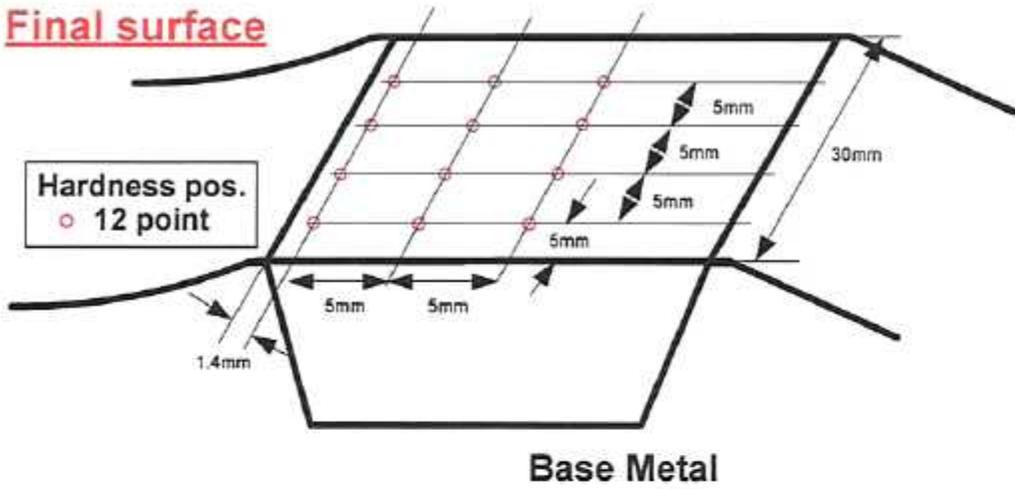
Fig. 3.17 Non-destructive test after final machining

경도요건은 최종표면부의 경도는 540-480 HV20이고, 표면부 1.5 mm 내부에서는 최소 470 HV20이 나와야 한다. 표면부의 경도를 측정하기 위해서는 통상 등 간격으로 배치된 12개의 위치와, 1.5 mm 하부의 위치에서의 경도를 기준으로 하며, 이와 같은 기준을 Fig. 3.18에 도시하였다.

화학적 분석을 수행할 경우 주요 판단 기준은, 인코넬 625로 가공한 최종 표면에서 최대 5%의 희석률이 허용되며, 인코넬 718에서는 첫 번째 층에서 25%의 희석률만이 허용된다.

본 논문에서는, 앞서 언급한 일련의 공정들을 수행하기 위해 MDT의 승인이 필요하며, MDT 품질 검사원이 현장에 입회하였다더라도, 공정이 완료되면 그 시편을 엔진제조사의 연구소로 보내어 재확인을 받아야지만 이러한 일련의 공정을 수행할 수 있게 된다. MDT로 보낸 시편은 아래의 Fig. 3.19와 같이 양분절단하게 된다.

Final surface



1.5mm Under

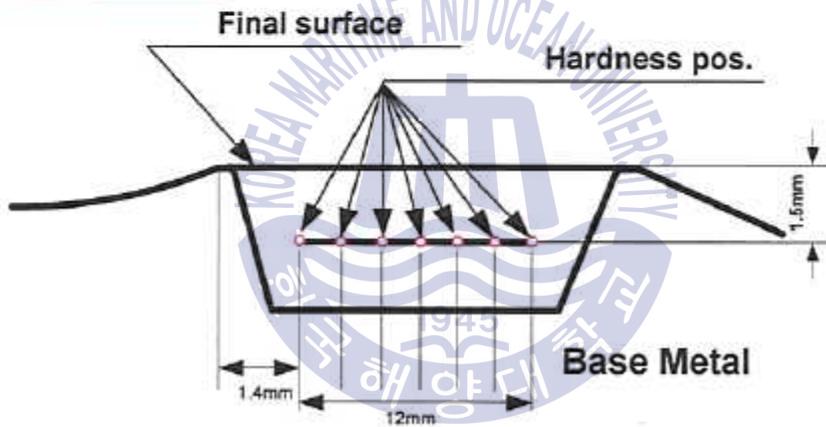


Fig. 3.18 Positions on base metal for hardness test



Fig. 3.19 The half-spindle disc for the evaluation of reconditioning quality

시편을 수령한 MDT가 맨 처음 수행하게 되는 시험은 아래의 Fig. 3.20과 같이 PT를 수행하게 된다.



Fig. 3.20 Penetration test for half-spindle disc at engine manufacturer

이외에도 크랙이나 미세구조가 생성되었는지를 판별하기 위하여, 모재와 인코넬 층간의 용접상태를 현미경 분석을 통하여 판별하도록 하고 있으며, 그 예를 다음의 Fig. 3.21에 표하였다. 참고로, 본 논문에 활용된 사례는 미세현미경분석결과까지 모두 양호하다고 판단되어, 최종 재생(reconditioning) 품질을 만족한 사례를 명시하였다.

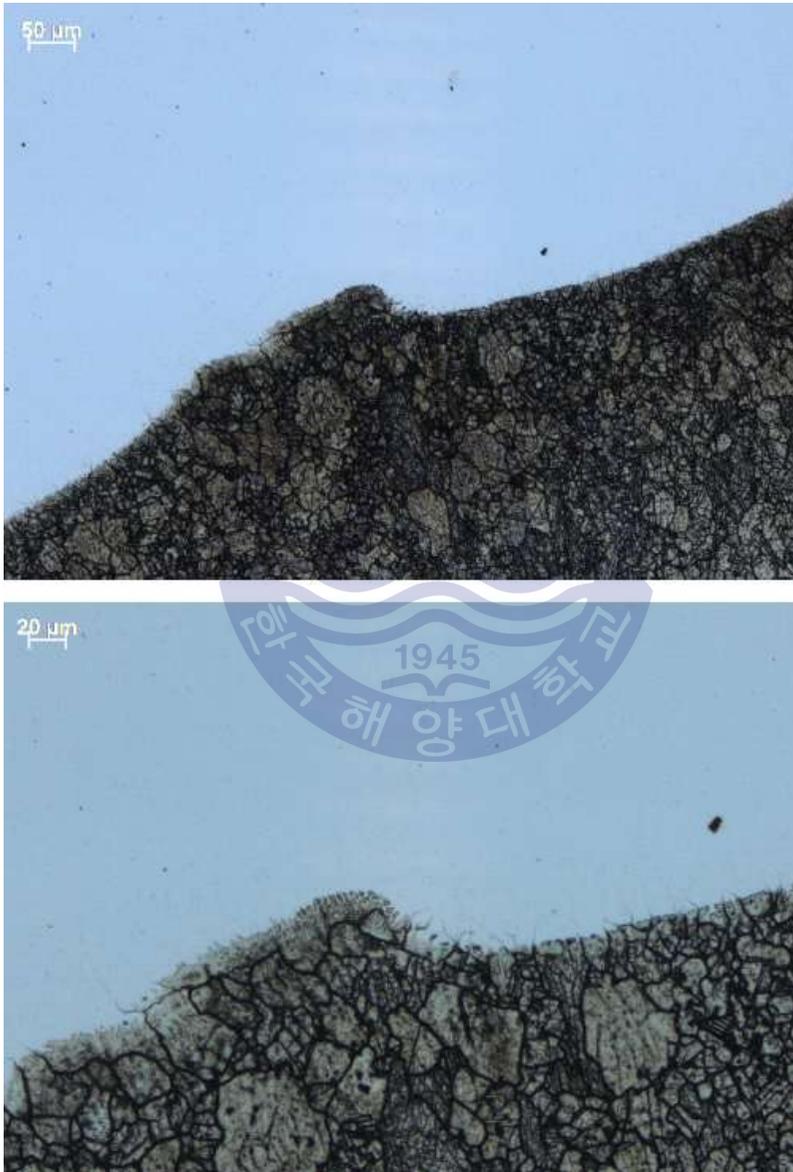


Fig. 3.21 Cracks and microstructure investigation at the interface

유의할 점은 일련의 재생 수리 공정들은 엔진제조사가 수립하였으나, 재생 품질을 만족시키기 위한 연구는 재생수리업체에서 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, 육안검사, 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.



제 4 장 결론

선박용 저속 2행정 기관의 배기밸브 재생사용 요구가 많음에도 불구하고, 명확한 재생가공 품질 기준이 정립되어 있지 않고 있었다. 본 논문에서는 배기밸브의 재생가공 품질 기준을 MDT 승인 실적을 바탕으로 정립하였다. 듀라스핀들의 재생수리 품질을 확보하기 위해서는 기본적으로 초기 검사, 가공, 인코넬 용접, 압연가공, 열처리, 최종가공, 최종 검사로 구성되는 공정 진행 순서를 기본적으로 준용하여야 한다. 더불어, 용접 절차서의 준용 및 공인된 용접공의 작업 참여는 품질 확보의 전제 조건이 되어야 하며, 본 연구를 통하여 도출한 결론은 다음과 같다.

1. 저 부하운전의 일상화로 소실량 허용기준을 새로이 갱신하였고, 이를 통해 스피들의 수명주기가 증가되었다. 또한 소실률 허용기준을 0.36-0.8 mm/1,000h 수준으로 확대하였다.
2. 초기 가공시의 기초소재는 인코넬 625 혹은 309L을 사용해야 하고, 시트면의 그루브는 인코넬 718로 코팅한다.
3. 인코넬 625와 718 모두 GTAW 및 GMAW 용접을 적용할 수 있고, 본 연구에서는 GMAW를 적용하였다.
4. 압연은 130 m/min 의 속도로 진행해야 하며, 매 30초마다 2톤씩, 단계적인 하중의 증가가 요구된다. 또한 최종하중은 8~9톤 수준이 되어야 한다.
5. 인코넬 718의 열처리는 상온에서 시간당 100℃ 수준으로 가열시키고 720℃ 분위기에서 8시간을 유지한 후 노의 온도를 620℃로 냉각시켜서 6시간을 유지시키고 다시 노의 온도를 400℃로 낮춘 이후, 공기를 냉각시켜 열처리를 마무리 한다.

참고문헌

- [1] Andreas Kyrtatos, Marc Spahni, Sebastian Hensel, Reto Zuger and Gregory Sudwoj, The development of the modern low-speed two-stroke marine diesel engine. CIMAC Congress, Helsinki, June 6-10, 120, 2016.
- [2] Bihlet Uffe Ditlev and Hoeg Harro A., Future HFO/GI exhaust valve spindle, CIMAC Congress, Shanghai, 3, 2013.
- [3] Dong Kwon Kim, Dong Young Kim, Seog Hyeon Ryu and Dong Jin Kim, Application of nimonic 80A to the hot forging of an exhaust valve head, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 113, pp.148-152, 2001.
- [4] H.S. Jeong, J.R. Cho and H.C.Park, Microstructure prediction of Nimonic 80A for large exhaust valve during hot closed die forging, Journal of Materials Processing Technology, Vol.162, pp.504-511, 2005.
- [5] Katsumi Imanaka, Chikara Matsuda, Akihito Aota and Koji Edo, The Latest Technologies of Mitsubishi UEC Engine. CIMAC Congress, Helsinki, June 6-10, 149, 2016.
- [6] MAN Diesel & Turbo, DuraSpindles: Reconditioning of Exhaust Valve DuraSpindle - First-Time Production Approval, Ident No.: 0743687-4, 2015.
- [7] MAN Diesel & Turbo, DuraSpindles: Reconditioning of DuraSpindels, Ident No.: 0743794-0, 2013.
- [8] N. Srinivasan and Y.V.R.K Prasad, Hot working characteristics of nimonic 75, 80A and 90 superalloys: a comparison using processing maps, Journal of Materials Processing Technology 51, pp.171-192, 1995.
- [9] Susanne Kindt and Ole Sorensen, MAN B&W Two-stroke engines latest design development withing engine types, Tier III and multiple gas fuels. CIMAC Congress, Helsinki, June 6-10, 116, 2016.
- [10] Young-Sik Kim and Sang-Cheol Kil, 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.

[11] MarineLog, 2005. <http://www.marinelog.com/DOCS/PRODSMMV/2005prod520.html>
[Accessed 04 Dec. 2017].

