핵융합 발전로 냉각수 연결모듈의 원격 유지보수를 위한 레이저 용접-절단 공정개발

김 용^{*,†} · 박 기 영^{*} · 이 경 돈^{*}

^{*}고등기술연구원 로봇생산기술센터

Development of Remote Laser Welding-Cutting Process for Maintenance of Hydraulic Connection Module on ITER Project

Yong Kim^{*,†}, Ki-Young Park^{*} and Kyoung-Don Lee^{*}

^{*}Institute for Advanced Engineering, Yongin, 449-863, Korea

[†]Corresponding author : welding@iae.re.krr

(Received January 25, 2012 ; Revised February 15, 2012 ; Accepted February 28, 2012)

Abstract

To assess hydraulic connections between sub-components of the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) diagnostic port plug, the laser welding and ablation cutting process were investigated in order to be applied the remote handling maintenance. In this study, laser ablation cutting, which vaporizes a small amount of solid material directly into gas by focusing a laser beam of high density energy, is adopted in order to overcome the limitation of the normal laser cutting technology that the head should be placed as close to the work piece as possible to blow out melt metal at a distance. Complete cutting of a work piece is obtained by repetitive multi-passes of the laser beam. The welding and cutting process were tested on the sample work pieces and finally on a prototype of a hydraulic connection module for remote handling. The results showed that this process can be a promising candidate for hydraulic connections by remote handling.

Key Words : ITER project, Laser welding, Ablation, Stainless pipe, Remote handling

1. 서 론

현재 전 세계적으로 에너지 부족 현상이 심화되고 있음은 누구나 아는 사실이다. 석유의 경우 이제 수십 년 후엔 한계에 도달할 것이고 석탄의 경우 이보다는 풍부하지만 지금처럼 사용할 경우 결국 필연적으로 고갈됨은 물론 이런 화석연료들은 지구 온난화의 주범으로 주목 받는 막대한 양의 이산화탄소를 배출하는 중요한 원인이다. 따라서 현재의 화석연료 보다 풍부하고 고갈되지 않으면서, 이산화탄소 등 오염물질을 최소화 하고 안전하며 자연현상이 아닌 인간의 의지에 따라 조절이 가능한 에너지원이 요구되며, 이런 모든 특징을 가진 발전 방식으로 핵융합 발전이 주목 받고 있다.

ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor) 프로젝트는 이러한 에너지문제의 실질적 해결을 위해 EU를 비롯한 7개국에서 참여하여 핵융합 가능성에 대한 과정을 과학적, 공학적으로 최종 실증하기 위해 만든 국제 공동 프로젝트로서, 본 연구에서는 세부과제 중 하나인 “ITER 진단장치”를 개발하기 위한 과업의 일환으로서 연구를 수행하였다.

진단 포트 플러그(Port plug)는 진공용기 내부의 플라즈마를 관측하기 위해 포트 플러그 내부에 진단모듈을 설치하여 주 장치에 장착함으로써 토카막(Tokamak) 내 외부의 진단장치를 연결하는 역할을 한다. Fig. 1에서 진단용 포트 플러그는 상부와 중간 위치에 각각 12개와 6개가 사용되고 있다. 이는 진공용기 내부에 설치되므로 플라즈마 운전 중에 중성자에 의해 방사화 될 뿐

Fig. 1 Schematics of the ITER main device

Fig. 2 Water cooling channels of one of the ITER upper port plug

만 아니라 운전 중 생기는 유해 물질 입자(베릴륨, 삼중수소 등)를 흡착한다¹⁾. 그러므로 진단 포트 플러그 내부에 설치된 진단장치를 유지보수하기 위해서는 포트 플러그를 핫 셀(Hot cell, 유해물질로 오염되었거나 방사화된 장치들을 보관, 보수 및 테스트하는 특수목적 건물)로 이송하여 원격조작(Remote Handling, 이하 RH) 장치로서 보수작업을 하여야한다²⁻⁵⁾. 진단장치의 세부 구조는 Fig. 2에 나타내었다. 진단장치의 보수를 위해서는 하판(Bottom plate)이 분리되어야 하며, 이를 위해서는 결국 포트 플러그 구조물에서 하판으로 냉각수를 연결하고 있는 냉각수 연결모듈(Hydraulic connection module)에서 파이프가 분리되어야 한다. 모듈의 분리 순서를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 절단에 의한 커버 플레이트 분리
- (2) 파이프 내면 절단으로 연결파이프와 모듈 분리
- (3) 절단 공정에서 발생한 칩(Chip) 제거

또한 모듈을 수리한 후 다시 조립할 때의 순서는 다

음과 같다.

- (1) 연결 파이프를 RH 커넥터에 끼워 넣음
- (2) 파이프 내면 플랜지 용접
- (3) 용접 작업에서 발생한 칩 및 불순물 제거
- (4) 용접 건전성 검사 (NDT)
- (5) 커버 플레이트 재용접

이러한 일련의 작업들은 방사능으로 인해 작업자가 접근할 수 없는 핫 셀이라는 밀폐된 공간에서 이루어지므로 원격조작을 이용한 자동 공정으로 수행되어야 하며, 진단모듈은 이를 고려하여 설계되어야 한다. 기존의 레이저 절단 또는 일반 기계적 절단(커팅, 그라인딩 등)방법은 $\varnothing 50$ mm 이하의 좁은 파이프 내경으로 인해 절단장치 헤드의 접근성이 제한되어 적용이 불가하기 때문에 새로운 개념의 용접 및 절단 공정 개발이 필요하다. 본 연구에서는 이에 따라 Nd:YAG 레이저로 용접 후 펄스 레이저를 이용한 파이프 내면 용접부를 어블레이션(Ablation)하여 절단하는 방안을 검토하였다. 또한 실제 RH 냉각수 연결모듈에 대해 원격조작을 고려한 시제품을 설계, 제작하여 제시된 공정에 대해 검증하였다.

2. 공정개발 방법

RH 모듈 제작 공정기술을 개발하기 위해서는 용접기술, 절단기술 및 효과적으로 이들 공정을 구현하기 위한 설계기술 개발이 요구된다. Fig. 3에는 이러한 일련 기술들을 개발하기 위해 수행한 실험의 순서에 대해 공정도(Flow chart)로 제시하였다.

일단 용접기술을 개발하기 위해 우선적으로 용접방법에 대해 검토하였다. 파이프 내면을 용접하기 위해서는 시스템적으로 용접헤드의 접근성이 고려되어야 하며 또한 자동화도 함께 고려되어야 한다. 이에 가장 적합한 용접법은 레이저 용접으로 최대 500mm 떨어진 곳에서도 원격으로 용접이 가능하며 좁고 깊은 용접부를 얻을 수 있어 최대 3kW 출력을 갖는 Nd:YAG 레이저 자동 용접시스템을 구축하였다. 플랜지 이음부의 용접성을 확인하기 위해 판재의 플랜지 용접실험을 통해 기초실험 후 실제 파이프에 대해 갭과 입열량에 대한 변수를 평가하여 2mm 근방의 용입깊이를 갖는 최종 용접조건을 도출하였다.

또한 절단기술 개발에서는 어떠한 방식으로 효율적이고 깨끗한 절단면을 얻을 수 있는지가 고려되었다. 절단공정에서는 출력, 주파수, 작업속도, 공정형태, 초점

Fig. 3 Flow chart for process development to remote handling

위치 및 빔 크기 등 보다 다양한 변수들이 고려되어야 하며, 이에 따라 평판(Sheet) 상에서 이들 공정변수의 영향을 확인하였다. 이렇게 실험된 결과들을 토대로 하여 실제 $\varnothing 48.6\text{mm}$ 의 원형에 대한 보다 세부적인 공정조건을 도출하여 최종 절단공정을 도출하였다. 이렇게 도출된 조건을 토대로 시제품 파이프에 대한 절단시험을 실시하였으며 실험결과를 토대로 절단면의 특성과 레이저의 시간당 제거효율을 역으로 계산하였다.

마지막으로 RH 모듈의 효율적인 설계기술을 개발하기 위해 우선적으로 사용될 파이프의 규격에 대해 결정하고 ITER 설계초안을 바탕으로 유사한 크기로 시제품을 설계, 제작하였다. 시제품 형상에 맞게 시제품 시험지그도 설계하였으며 이러한 지그는 반복적인 용접/절단 공정이 가능하도록 설계되었다. 각 부품에 대한 가공과 함께 이를 조립하기 위해 저입열 아크 용접(Cold Metal Transfer, 이하 CMT)을 적용하였으며, 최종 조립 후 시제품 단면을 검사하여 건전성을 확인하였다. 제작된 시제품에 대해 기 도출된 용접/절단 공정조건을 적용하여 실제 공정시연을 실시하였고, 이 과정에서 나타난 문제점을 토대로 파이프 설계공차 및 최대 허용값, 조립블록의 설계 개선안을 도출하였다.

3. 용접 실험

3.1 실험장치 및 방법

본 연구에서 파이프 연결부를 용접하기 위해 사용된 레이저는 빔 직경이 $600\mu\text{m}$, 초점거리 200mm 인 최대 3KW 의 CW Nd:YAG 레이저로, 레이저용접 헤드는 6축 로봇에 장착하여 사용하였으며 초점위치는 재료 상부표면에 일치하도록 하였다. 냉각수 연결모듈은 모두 STS 316L로 이루어져 있으며 용접 이음부의 지름은 $\varnothing 48.6\text{mm}$ 이다. 기타 내외면 파이프의 크기 및 두께, 용접 세팅 방법 등은 Fig. 4와 같다. 레이저빔 입사각은 초점거리 200mm 렌즈에서 $\varnothing 48.6\text{mm}$ 의 파이프가 선형적으로 용접될 수 있는 $\tan^{-1}(24.3\text{mm}/200\text{mm}) = 6.93^\circ$ 로 고정하였다. 노즐의 접근성을 고려하여 보호가스는 사용하지 않았으며, 생산성이 요구되는 작업이 아니므로 출력을 2kW 이하로 제한하고 용접속도를 낮춰 2mm 근방의 용입깊이를 갖는 용접조건을 도출하고자 하였다.

파이프 내면 이음부 용접에서 가장 중요한 변수는 목표 하는 용입깊이에 필요한 입열량과 함께 정확한 용

Fig. 4 Set-up of the laser welding experiment

접선 티칭과 이에 따른 빔 위치, 그리고 구조물의 관점에서는 이음부의 정렬(갭) 상태가 있다. 이에 따라 용접 실험은 입열량, 빔 위치 및 갭, 이렇게 세 가지 관점에서 실험하여 최종 공정조건을 도출하였으며, 용접 후 헬륨 기밀시험(He leak)을 통해 그 건전성을 확인하였다.

3.2 용접실험 결과

파이프 용접을 실시하기에 앞서, 본 레이저 용접 시스템에서 STS 강재의 플랜지 이음부 용접성을 확인하고자 평판에 대해 예비실험을 우선하였으며, 이를 통해 도출한 조건(출력1.5kW-용접속도1.5m/min)으로 빔 조사위치를 측벽(Connector pipe) 기준 각각 2:8, 5:5 및 8:2로 달리하여 용접을 실시하였다. 분할은 600 μ m 빔 크기에 대해 육안 상 판단한 기준으로 절대치는 되지 않는다. 실험 결과 Fig. 5와 같이 빔 조사위치가 측벽으로 치우칠수록 측벽 쪽에서의 에너지 손실로 인한 용입깊이의 두드러진 감소와 함께, 외관 또한 그을음이 심한 것으로 나타났다. 이에 따라 빔 조사위치가 용접 품질에 매우 민감하게 반응하며 향후 용접 시 정확한 용접선 티칭이 요구됨을 인지하였다.

또한 모든 레이저 용접에서 이음부 갭 관리는 최우선 해결과제이다⁶⁾. 특히 파이프 용접에서 실제 용접 시 규격 파이프의 편심, 가공오차 등 여러 가지 문제로 인해 파이프의 진원도가 유지되지 않고 한쪽 면에 갭이 발생할 수 있다. 이에 따라 본 실험에서는 인위적으로 0.4mm 까지 갭 영향을 살펴보기 위해 내경 파이프를 0.2mm 외경 선반가공을 하였다. 이후 Fig. 6과 같이 내경 파이프를 연결 파이프에 끼워 넣고 한쪽을 밀착시킨 후 용접하고 세 부분을 와이어커팅 후 각 위치에서의 용입깊이를 측정하였으며 그 결과 또한 Fig. 6에 제

Fig. 5 The results for beam split test

Fig. 6 The results for laser welding depend on gap size

시하였다. 분석 결과 갭 크기에 비례하여 언더컷 결함의 정도 및 용입깊이가 증가되는 경향을 나타내었다. 본 용접 파이프의 헬륨 기밀시험 결과는 초 기밀성을 유지하여 0.4mm 갭에서도 레이저에 의한 용융접합은 가능하였지만 0.2mm 이상의 갭에서는 언더컷이 심하게 발생한 결과가 나타났다. 언더컷 결함은 실제 구조물에 장착되면 반복적인 수충격(Water hammer)과 진동 등에 의해 노치효과로 작용하여 파손의 위험이 있으므로 갭 허용수준은 용접품질 기준 0.2mm 이하로 관리되어야 함을 확인하였다.

앞선 빔 조사위치 및 갭 상태에 대한 결과를 고려하여 내면 이음부에 대한 정확한 로봇 티칭 후 2mm 근방의 용입 깊이를 갖는 최종 조건을 도출하였다. 최종 용접은 그림 4와 함께 1.8kW-1.0m/min의 조건에서 이뤄졌으며 용접 후 임의의 3 곳을 절단하여 용입 깊이를 확인하였고, 전체적으로 1.8t~2.0t 사이에서 안정

Fig. 7 Test results for laser welding of two concentrically overlapped pipes

적인 용입이 형성된 것을 알 수 있었다.

4. 절단 실험

4.1 실험장치 및 방법

본 공정에서 이상적인 절단 기구는 Fig. 8의 점선부와 같이 삼각형 형태의 부피만을 정확하게 기화 제거시키는 것이다. 절단 과정에서 측벽의 손상은 최소화되어야 하며, 구조물의 유지보수 후 재용접이 가능하도록 되어야 한다. 즉, 기화절단에 의한 1차 절단 후, 절단 공정에서 손상된 소재를 포함하여 약 3mm 정도 측면 전체를 기계적 절단하여(Fig. 8의 우측) 제품 초기 용접상태와 동일한 조건으로 만드는 것이다. 일반적으로 레이저를 이용한 절단에는 기화절단, 용융절단 및 연소절단이 있으며⁷⁾ 본 연구에서는 이에 따라 기화절단 방법을 이용하였다. 기화절단에 있어서 절단부는 용융상태를 거의 거치지 않고 바로 기화시키는 원리를 기본으로 하는데, 이를 위해서는 빔의 밀도를 최대로 높여 열전도에 의한 손실을 최소화시키는 것이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 1064nm의 파장을 갖는 펄스형 파

Fig. 8 Proposed process for welding and cutting of RH connection module

Fig. 9 Set-up of the laser ablation cutting test

Table 1 Applied fatigue load level conditions

Parameter	Spec.	Parameter	Spec.
Energy per pulse	0.5mJ	Focal length	100mm
Wavelength	1064nm	Spot size	50.8 μ m
Pulse duration	25nsec.	Peak power	20kW
Pulse repetition rate	60kHz	Power density	2.5 $\times 10^8$ W/cm ²
Average power	30Watt	M ²	1.6

버 레이저를 사용하였다. 본 실험에 사용된 시스템은 Fig. 9와 같이 구성하였다. 레이저는 광케이블을 통해 스캐너로 전송되고, 스캐너는 소프트웨어 설정에 따라 최종적으로 원하는 형상으로 조사된다. 본 시스템은 주로 마킹용으로 사용되며 X-Y 2축 구동, 공랭식으로 최대 스캔속도는 2,000mm/s 이상이다. 스캐너 렌즈는 F-100을 사용, 이에 따른 집속 빔의 크기는 50.8 μ m이다. 보다 자세한 사항은 Table 1에 기술하였다.

실질적으로 파이프 용접 이음부에 대해 원형의 절단 공정이 이뤄지기 위해서는 작업속도, 주파수, 출력 밀도 등 1차적인 조건뿐만 아니라, 작업반경과 초점 간격, 그리고 초점위치가 결정되어야 한다. 본 실험에서는 이와 같은 절단변수를 최적화하기 위한 실험들을 진행하였으며 모든 실험은 제거할 용입 깊이와 동일한 2.0t의 두께를 갖는 STS 316L 평판에서 진행하였다.

4.2 평판 절단실험 결과

4.2.1 작업속도 및 주파수

우선 작업속도 변화에 따른 영향을 확인하기 위하여 출력과 주파수는 각각 30W, 60kHz로 고정한 후 속도만 50, 300, 500 및 1,000mm/s로 변화시켜가며 동일시간 동안 반복절단 후 그 깊이를 측정하였으며, 결과는 Fig. 10에 제시하였다. Fig. 10과 같이 속도가

Fig. 10 Variation of the cutting depth depend on working speed

낮을수록 동일시간 동안 기화(Vaporization)가 많이 일어난 것을 알 수 있는데, 50mm/s 이하 속도에서는 오히려 기화금속이 측벽에 재부착되어 이물질이나 가공 칩(Debris)을 형성시켜 절단 품질이 낮아지는 것을 확인하였다. 이에 따라 이후 실험에서는 작업속도를 50mm/s로 고정하였다.

이후 동일 조건에서 주파수(Pulse repetition rate)만 변화시켜가며 실험한 결과, 어떠한 작업속도에서도 주파수가 높을수록 절단효율이 우수한 것을 확인하였다. 따라서 이후 실험에서는 작업속도와 주파수를 각각 50mm/s, 60kHz로 고정하였다.

4.2.2 초점 간 간격

라인 수가 동일할 경우, 초점 간 간격이 넓을수록 절단 폭 확보에 유리하지만 간격이 너무 넓게 되면 빔 중첩이 일어나지 않으므로 적절한 간격에 대한 검토가 우선적으로 이뤄져야 한다. 본 절단공정에 사용된 빔 크기는 $50.8\mu\text{m}$ 으로 이에 따라 간격을 각각 0.05mm 및 0.1mm로 5개의 라인을 그려 그 효율을 알아보았다. 결과는 Fig. 11과 같으며 0.1mm에서는 중첩이 일어나지 않아 이후 실험에서는 간격을 0.05mm로 고정하였다.

4.2.3 초점위치

레이저의 가공효율은 일반적으로 시편 표면 약간 밑

Fig. 11 Results for multi-passes spot line distance

에 위치시킬 경우 가장 좋은 결과를 나타내는 것으로 보고되어 있다. 앞서 언급한 듯이 최대의 빔 효율을 얻기 위해서는 이와 같은 변수에 대해 정량적인 실험을 통해 위치를 결정하는 것이 필요하다. 따라서 2.0t 두께를 목표로 하여 절단할 경우 가능한 초점위치를 설정하여 동일 조건에서 초점위치만 변화시켜가며 실험하였다. 실험조건은 초점 간격 0.05mm, 30 라인 중첩조건에서 작업속도 50mm/s, 주파수 60kHz로 각 조건에서 30min 및 60min 실험 후 그 깊이를 측정하였다. 결과는 이미 예상한대로 2.0t 기준 시편 중앙에 초점을 위치시킬 경우 동일 시간동안의 제거 깊이가 가장 깊게 나왔으며, 이후 실험은 초점위치를 상부표면 기준 -1mm로 고정하였다.

4.2.4 라인 개수 결정

앞서 기타 공정조건(0.05mm, 30W, 60kHz, 50mm/s, 초점위치:-1mm)을 고정한 뒤 최종적으로 라인의 개수와 시간에 따른 실험을 실시하였다. 그 결과는 Fig. 13과 같으며 Fig. 12에서는 일부 데이터의 추정 값을 통해 시간과 라인 수, 그리고 작업효율에 대한 관계를 그래프로 나타내었다.

Fig. 12를 살펴보면 라인 개수가 증가할수록 초기 작업효율은 떨어지지만 절단 깊이가 증가하여도 비교적 선형적인 제거효율을 유지하는 것을 알 수 있다. 단, 라인 개수가 50개의 경우와 같이 필요이상으로 증가되면, 작업속도 자체가 매우 늦어져 오히려 효율이 감소되는 결과를 나타낸다. 최종적으로 30 라인의 경우 170min에서 $\varnothing 48.6\text{mm}$ 에 대해 완전 절단이 이루어졌으며 상기 여러 실험 결과를 종합하여 볼 때 본 절단시스템 상에서 30개의 라인을 적용하는 것이 최적의 공정조건이라 판단할 수 있다.

Fig. 12 Ablation cutting time for various multi-lines beam

Fig. 13 Cutting efficiency changed by multi-passes line and work time of the beam

4.3 파이프 절단실험

여러 실험결과를 토대로 도출된 최적 공정조건을 이용하여 실제 대상물인 파이프 용접부에 절단실험을 실시하였다. 시스템 상에서 기화금속이 렌즈에 손상을 주는 것을 막기 위해 보조가스를 강하게 불어주었으며 반대편 쪽엔 집진기를 설치하여 유해공기를 차단하였다. 내경 파이프 최외곽 $\varnothing 48.6\text{mm}$ 를 기준으로 0.05mm 간격으로 30 라인을 CAD 상으로 디자인하여 적용하였으며, 예비실험 결과(Fig. 13 참조)를 기준 180min간 작업 후 종료하였다.

실험 결과는 Fig. 14와 같으며, 용입깊이 2.1mm 의 용접면에 대해 연결 파이프와의 완전분리를 성공하였다. 절단 후 연결 파이프 측벽에서 약간의 산화(기화금속의 용착)가 일어났으나, 절단면의 조도는 전반적으로 양호하였다. 절단 면적은 0.98mm^2 으로 총 제거 부피는 149.5mm^3 이었으며, 이를 무게로 환산할 경우 STS 비중 8.0을 적용하여 약 1.2g 정도가 제거되었다. 이

Fig. 14 Ablation cutting test results for two concentrically overlapped pipes

에 따라 최종 공정조건에 의한 효율은 0.4g/hr 로 계산되었다.

5. 시제품 제작 검증

개발 대상 모듈은 모두 STS 316L로 구성되어 있으며, ITER 설계초안¹⁾을 바탕으로 Fig. 15와 같이 시제품을 설계, 제작하였다. 반영구적인 구조물을 이루는 부분인 ④블록과 ②플랜지의 용접, ②플랜지와 ③연결 파이프의 용접은 저입열 아크용접기(CMT)를 사용하였다. ①캡과 ⑤내경파이프는 주기적인 절단-재용접 공정이 요구되는 부위로서 레이저용접을 적용하였다.

Fig. 15와 같이 1차적으로 제작된 시제품의 캡 및 파이프에 대해 앞서 도출된 공정조건을 바탕으로 레이저 절단을 실시하였다. 우선 캡을 제거한 후 동일 조건으로 파이프 용접 이음부를 제거하였다. 절단 후 표면은 산화되었으나 표면은 매끄러웠으며 산화된 폭은

Fig. 15 Schematic design of RH hydraulic connection module

Fig. 16 Laser welding and ablation cutting results for the prototype of the RH hydraulic connection module

3mm 이하였다. 이후 절단으로 분리된 내경 파이프에 대해 절단공정으로 인해 손상된 끝단 3mm 정도를 기계적으로 완전 절단한 뒤(Fig. 8 참조), 기존 용접 위치 바로 아래에 재용접을 실시하였다. 캡의 경우 분리된 것은 폐기 후 새 것으로 용접하였다. Fig. 16은 이러한 시제품 제작 검증에 대한 결과를 보여준다.

본 시제품은 앞서 설명했듯이 포트 플러그 구성품 사이의 냉각수 파이프를 연결하는 부품으로서 Fig. 2와 같이 하판에 있는 총 8개로 구성된 매니폴드 중 한 개를 대상으로 제작한 결과이다.

6. 결 론

본 연구에서는 대상물과 장치의 접근성 및 사용 환경의 특수성으로 인해 기존 방식의 절단 공정이 불가하여 용접-절단-재용접 공정을 원격으로 수행할 수 있는 시스템을 구축하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) “ITER 진단장치”의 원격조작 유지보수를 위해 RH 냉각수 연결모듈에 대한 시제품을 제작하였고, 이를 대상으로 용접/절단 및 재용접 공정을 이용해 분리 및 재조립에 성공하였다.

2) 본 연구에 사용된 시험 장치로 시제품 모듈 조립은 저입열 아크 용접, 파이프 용접은 산업용 고출력 Nd:YAG 레이저 그리고 절단은 펄스형 파이버 레이저를 각각 적용하였으며, 그 결과 각각의 장치들이 공정에 적합한 것으로 판명되었다.

3) 파이프 내면 용접 시 빔 조사위치가 용접 품질에 매우 민감하게 반응하며 향후 용접 시 정확한 용접선

티칭이 요구됨을 인지하였으며, 가공 공차 및 정렬 불량으로 인한 갭 허용수준은 용접품질 기준 0.2mm 이하로 관리되어야 함을 확인하였다.

4) 목표하는 절단 폭(라인 수)이 증가할수록 초기 절단효율은 떨어지지만 절단 깊이가 증가하여도 비교적 선형적인 제거효율을 유지하였다. 반면에 절단 폭이 작은 경우 어느 한계 깊이 이상에서는 더 이상 절단이 진행되지 않는 것을 확인하였다.

5) 절단공정에서의 효율(기화량)은 0.4g/hr로 나타났으며, 실제 작업시간으로 180min 정도가 소요되었다.

참 고 문 헌

1. R. Haange : Remote handling maintenance of ITER, Nuclear Fusion **39** (1999), 2043-2050
2. C. I. Walker et al. : ITER diagnostics: maintenance and commissioning in the hot cell test bed, Fusion Engineering and Design **74** (2005), 685-690
3. L. P. Jones et al. : Assembly of ITER blanket module to vacuum vessel experimental investigations, Fusion Engineering and Design **58** (2001), 567-571
4. S. I. Park et al. : A conceptual design of the ITER upper port plug structure and its cooling channels, Fusion Engineering and Design **83** (2008), 1594- 1599
5. S. I. Park et al. : Laser welding and ablation cutting process for hydraulic connections by remote handling in the ITER diagnostic port plug, Fusion Engineering and Design **85** (2010), 190-196
6. Y. Kim et al. : Study on the process parameters for laser welding of coaxial circular pipe inner flange, Journal of KSLP, **12-3** (2009), 14-17 (in Korean)
7. Y. H Han : Laser beam processing technique, Journal of KWS **8-3** (1990), 13-23 (in Korean)