

비등수형 원자로 발전소에의 레이저 피닝 적용기술

김 중 도*[†] · 유지 사노**

*한국해양대학교 기관공학부

***(株)東芝 電力システム社 電力・社會システム技術開發センター*

Laser Peening Application for PWR Power Plants

Jong-Do Kim*[†] and Yuji SANO**

*Division of Marine Engineering, Korea Maritime & Ocean University, Busan 49112, Korea

**Power and Industrial Systems Research and Development Center, Toshiba Corporation,
Yokohama-shi, 235-8523, Japan

[†]Corresponding author : jdkim@kmou.ac.kr

(Received September 18, 2016 ; Revised September 26, 2016 ; Accepted September 29, 2016)

Abstract

Toshiba has developed a laser peening system for PWRs(pressurized water reactors) as well after the one for BWRs(boiling water reactors), and applied it for BMI(bottom-mounted instrumentation) nozzles, core deluge line nozzles and primary water inlet nozzles of Ikata Unit 1 and 2 of Shikoku Electric Power Company since 2004, which are Japanese operating PWR power plants. Laser pulses were delivered through twin optical fibers and irradiated on two portions in parallel to reduce operation time. For BMI nozzles, we developed a tiny irradiation head for small tubes and we peened the inner surface around J-groove welds after laser ultrasonic testing (LUT) as the remote inspection, and we peened the outer surface and the weld for Ikata Unit 2 supplementary. For core deluge line nozzles and primary water inlet nozzles, we peened the inner surface of the dissimilar metal welding, which is of nickel base alloy, joining a safe end and a low alloy metal nozzle. In this paper, the development and the actual application of the laser peening system for PWR power plants will be described.

Key Words : Fiber delivered laser peening, Pressurized water reactors, Primary water stress corrosion cracking, Reactor vessel, Laser ultrasonic testing

1. 서 론

원자력 발전에 있어서 원자로의 안전하고 안정적인 운영은 매우 중요한 사안이다. 하지만 원자로 노심 내의 응력부식균열(SCC)은 내부 부품에 대한 신뢰성을 저하시키는 주요 요인 중 하나이다. 이러한 응력부식균열을 예방하기 위한 대책으로 일본의 도시바사는 레이저 피닝(laser peening) 시스템을 1999년부터 일본의 비등수형 원자로(boiling water reactor)에 적용하여 왔다¹⁾. 레이저 피닝은 수중에서 높은 피크출력의 펄스 레이저를 조사하여 재료 표면층의 응력을 인장에서 압축 잔류응력으로 개선하는 기술이다.

Fig. 1은 2002년 도시바사에서 개발한 FLP(fiber delivered laser peening) 원격 프로세싱 시스템을 나타낸다^{2,3)}. 이 시스템은 실제 비등수형 원자로의 원자로 노심 슈라우드(core shroud)와 원자로 하부의 J형 용접부에 적용되고 있다.

한편 가압수형 원자로(pressurized water reactor)의 경우에는 니켈기반 합금(alloy600 및 182)에서 일차수응력부식균열(primary water stress corrosion cracking)로 인한 문제가 발생하고 있다. 1991년 프랑스 Bugey 3호기의 원자로 용기 헤드의 침투부에서 일차수응력부식균열에 의한 누수가 발생하였으며, 그로 인해 많은 가압수형 원자로의 용기 헤드가 교체되었다. 2003년 미국의 사우스 텍사스주 프로젝트 1호기의

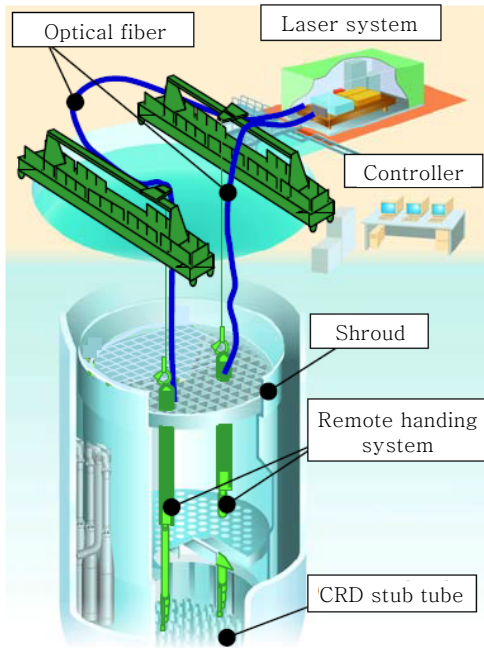


Fig. 1 Fiber-delivered laser peening system for CRD stub tube of BWR

BMI(bottom-mounted instrumentation) 노즐에서 비슷한 문제가 발생하였다. 2000년에는 미국의 V C. Summer 프로젝트에서 원자로 일차수 배출 노즐에서 누설이 발견되었으며, 이 노즐의 교환을 위해서 원자로 용기헤드에 비해 많은 시간과 비용이 소비되었다. 이상의 이유로 인해 편리하고 비용이 적게 드는 일차수용력 부식균열의 해결 방안이 요구되었다. 이러한 요구를 충족하기 위하여 도시바에서는 가압수형 원자로에 적용하기 위한 FLP 시스템을 개발하였으며, 니켈 합금의 테스트 샘플을 사용하여 다양한 실험을 실시하였다^{4,5)}. 레이저 조사 변수들에 대한 실험을 실시한 결과 일차수용력부식균열에 대한 FLP의 유효성을 확인하였다. 현재는 일본에서 운용중인 가압수형 원자로 중 시코쿠 전력사의 Ikata 1호기와 2호기의 BMI 노즐, core deluge line 노즐 그리고 일차수 유입 노즐에 FLP 시스템을 적용하고 있다.

본 저자는 지난 해설 논문에서 레이저 피닝 처리의 원리와 특징 그리고 적용 효과에 대하여 서술하였다⁶⁾. 본 해설 논문에서는 지난 논문에 이어서 원자로 발전소에서 적용되는 레이저 피닝 기술의 실제 사례⁷⁾에 대하여 서술한다.

2. 레이저 피닝 프로세스의 원리 및 효과

Fig. 2는 레이저 피닝의 기본적인 프로세스를 나타낸다. 수중의 금속재료 표면상에 높은 피크 출력의 펄스 레이저를 조사하면 표면은 레이저 에너지를 흡수하여

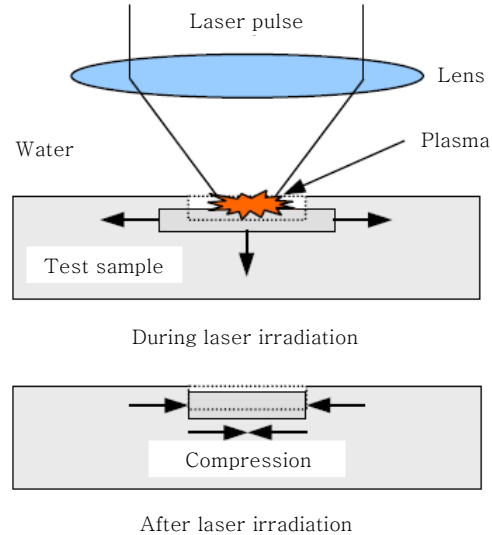


Fig. 2 Fundamental process of laser peening¹⁾

강렬한 상호작용으로 인해 순간적으로 증발한다¹⁾. 하지만 금속 증기는 주변의 물로 인해 팽창하는데 방해를 받아서 좁은 영역에 집중된다. 그 결과 고밀도의 금속 증기는 이온화되어 억제동 방사에 의해 플라즈마를 형성하게 된다. 그 후 플라즈마로의 레이저 에너지 흡수는 충격파를 형성하고, 금속의 항복강도를 초과하는 수 GPa의 강도로 금속 재료의 표면에 영향을 준다. 충격파는 금속 내부로 전파되고, 금속 재료의 영구변형을 일으킨 후 에너지가 손실된다. 영구변형된 금속 재료 주변은 탄성변형에 대한 반응으로써 변형 영역을 억제하고, 그로 인해 재료 표면에 압축 응력을 형성하게 된다.

Fig. 3은 레이저 피닝된 alloy 600 샘플의 표면방향에 대한 잔류응력의 프로파일을 나타낸 것이다. 레이저 열원은 수중 투과가 가능한 532nm의 Q스위치 Nd:YAG 레이저이며, 레이저 펄스 에너지 80mJ, 초점 직경 0.4mm 그리고 펄스 수 밀도 70pulses/mm²의 조건에서 작은 수조 탱크에 Fig. 4와 같이 수평 및 수직방향으로 레이저 피닝을 적용하였다^{4,5)}. 잔류응력은 X-ray 회절법을

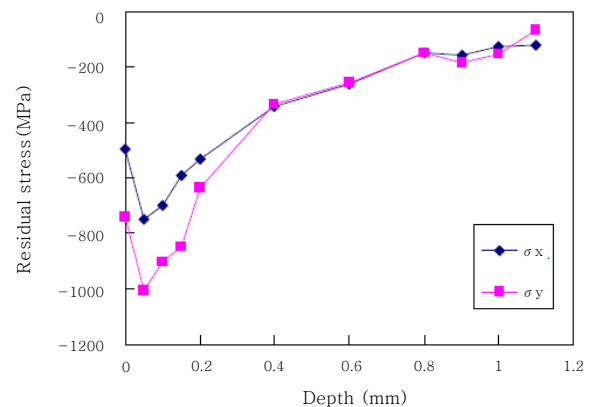


Fig. 3 Depth profile of a laser-peened sample^{4,5)}

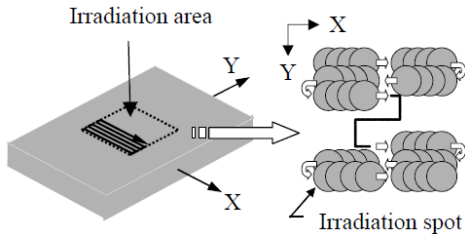


Fig. 4 Test sample and scan method^{4,5)}

이용하여 X 및 Y 방향으로 측정하였다. 그 결과 압축 잔류응력은 표면으로부터 1mm 깊이 이상까지 생성되었다.

3. 가압수형 원자로의 레이저 피닝 적용기술

가압수형 원자로의 잔류응력 개선을 위하여 도시바사는 최초로 원자로에 레이저 피닝을 적용하였다. Fig. 5는 레이저 피닝이 적용된 노즐을 나타낸다. BMI 노즐의 경우는 J형 그루브 용접부 주위의 내면과 외면 및 용접부를 피닝하였다. Core deluge line 노즐과 일차수 유입 노즐의 경우에는 니켈 기반 금속과 저합금 금속 노즐간 이중금속 용접부의 내부 표면을 피닝하였다.

가압수형 원자로를 위한 FLP 시스템에서 레이저 발전기와 제어 장치는 원자로 격납 용기 내의 작업 공간에 2개의 컨테이너로 적재되었다. 초당 120 펄스의 반복율을 가진 펄스 레이저는 작업 시간을 단축하기 위해서 두 개의 광파이버를 통해 전송되어 두 영역에 동시에 조사된다.

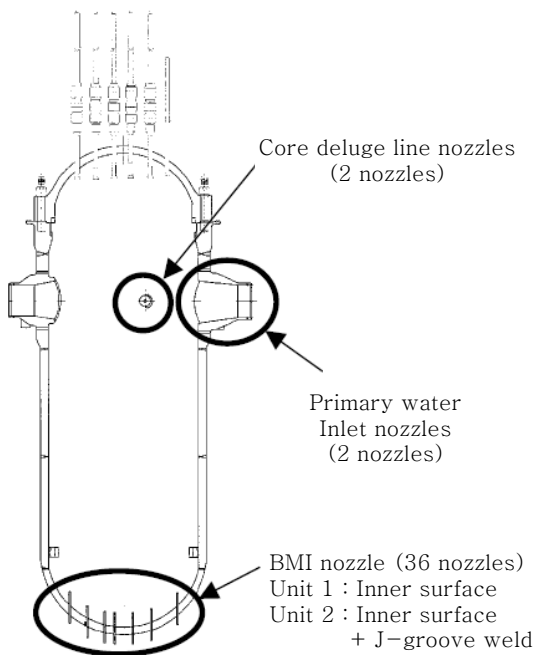


Fig. 5 Peened nozzles of reactor vessel

3.1 BMI 노즐에의 적용

가압수형 원자로는 노심 내에 중성자를 검출하기 위한 36개의 BMI 노즐이 있다. 이 튜브의 재질은 alloy 600이며, 원자로 용기 내에 용접되어 있다. 내면에 용접된 부분과 J형 그루브 용접부는 잠재적으로 일차수응력부식균열의 발생 가능성을 내포하고 있다. Fig. 6은 BMI에 적용되는 레이저 피닝 영역의 모습을 나타낸다. BMI 노즐 내부의 직경이 9.5mm로 매우 작기 때문에 FLP는 이 노즐 내부의 일차수응력부식균열을 예방하기 위한 가장 적합한 기술 중 하나라고 할 수 있다. FLP를 적용하기 위하여 소형의 레이저 조사 헤드가 개발되었으며, 조사 헤드는 BMI 내부 표면에 펄스 레이저를 반사하고 집속하기 위한 오목 미러로 구성되어 있다. Fig. 7은 BMI 내부 표면을 처리하기 위한 FLP 시스템의 개념도를 나타낸 것이다. 작업대 아래에 매달린 FLP

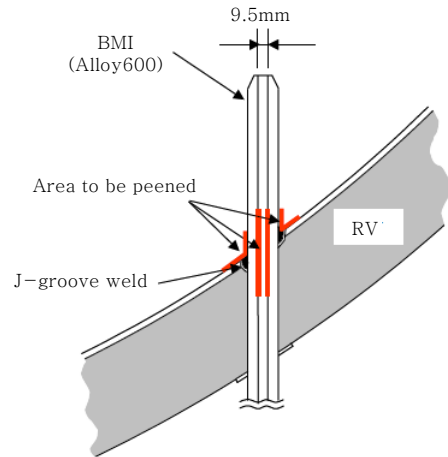


Fig. 6 Peened area of BMI inner surface

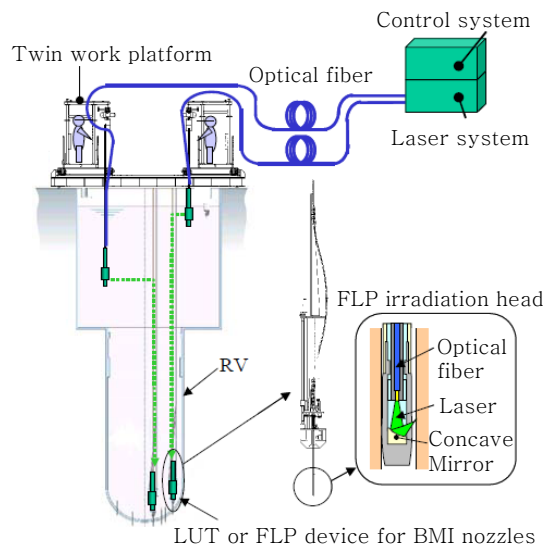


Fig. 7 FLP system concept for the inner surface of BMI

장비는 BMI 상부에 설치되어 있다. BMI 내부에 투입된 조사 헤드는 회전하면서 수직으로 이동하여 나선형으로 내부 표면에 펄스 레이저를 조사한다.

BMI 내면에 FLP 처리를 실시하기 전에 금속 표면의 균열을 검사하기 위하여 레이저 초음파 테스트(laser ultrasonic testing, LUT)가 적용된다^{8,9)}. LUT를 통해 표면의 균열을 감지할 수 있으며, 1mm 이하 깊이의 균열 사이즈를 평가할 수 있다. Fig. 8는 레이저 피닝과 같이 펄스 레이저와 재료간의 강렬한 상호작용에 의해 발생하는 LUT 초음파의 기본적인 프로세스를 나타내는 것으로, 광수신기를 통해 균열에 의해 반사되거나 투과된 표면파를 탐지할 수 있다. FLP 장비와 거의 동일한 크기의 LUT 장비의 검사 헤드는 FLP 조사 헤드의 위치에 부착될 수 있게 설계되었다. Fig. 9에 나타낸 바와 같이 두 개의 미러가 부착된 LUT 헤드 중 하나의 미러는 초음파를 발생시키기 위한 532nm(FLP와 동일한) 파장의 레이저빔을 반사시키고, 다른 미러는 초음파를 감지하기 위한 1,064nm 파장의 레이저빔을 반사시킨다. 두 레이저빔은 모두 하나의 파이버를 통해 전송된다. FLP 장비와 LUT 장비는 작업 시간을 단축하기 위하여 원자로 용기 내에 설치되어 동시에 운영된다.

Fig. 10은 BMI의 J형 그루브 용접부에 대한 FLP 장비를 나타낸다. 이 장비는 6축 모션 제어가 가능하여 BMI 노즐과 J형 그루브 용접부의 외부 표면에 레이저빔을 정확하게 조사한다. BMI 내면용 LUT/FLP 장비와 J형 그루브 용접부용 FLP 장비가 설치되어 동시에

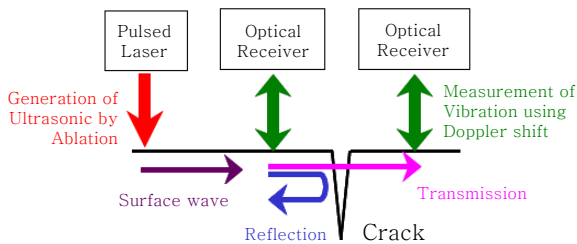


Fig. 8 Fundamental process of LUT

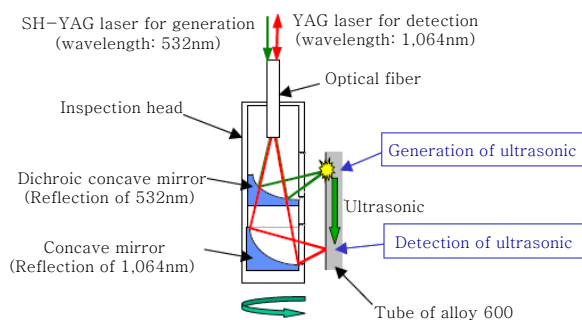


Fig. 9 Concept of the LUT inspection head

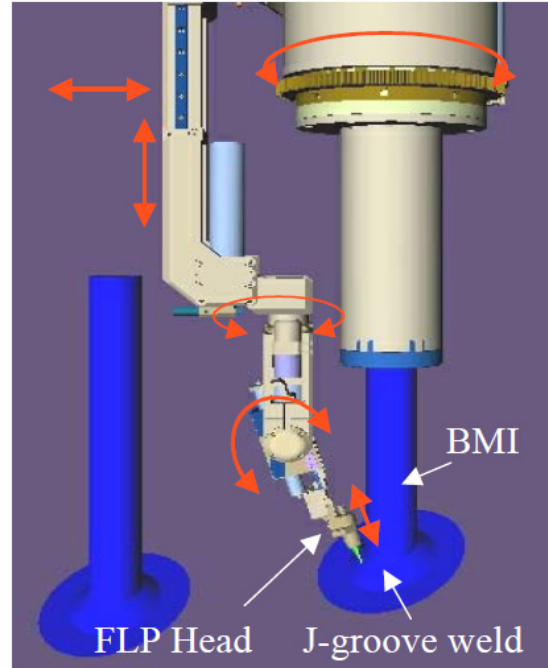


Fig. 10 FLP device for J-groove welds of BMI

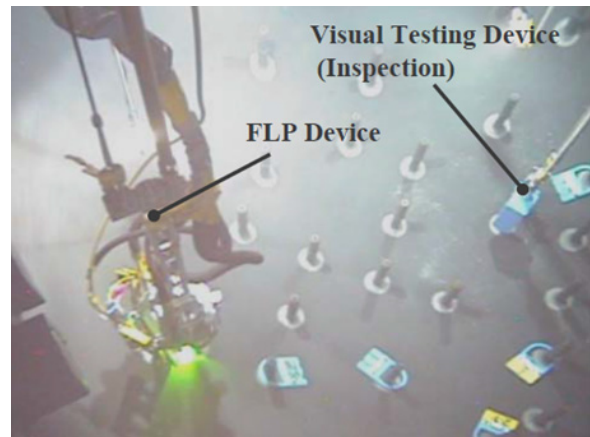


Fig. 11 Photo of FLP device for J-groove welds of BMI

운영된다. Fig. 11는 Ikata 2호기의 실제 FLP 운영 모습을 나타낸 사진이다. FLP 처리 후 피닝된 영역의 표면은 CCD 카메라를 통해 검사된다. FLP는 레이저 조사에 의해 불순물 등을 제거함으로써 표면 균열 검사를 더 용이하게 한다.

3.2 Core deluge line 노즐에의 적용

Core deluge line 노즐의 경우에는 니켈 기반 합금인 안전단부(safe end)와 저합금 금속 노즐간 이중 금속 용접부의 내부 표면이 피닝처리 된다. Fig. 12은 FLP 장비 및 피닝 영역을 나타낸다. FLP 장비는 원자로 용기를 가로지르는 한 쌍의 core deluge line 노

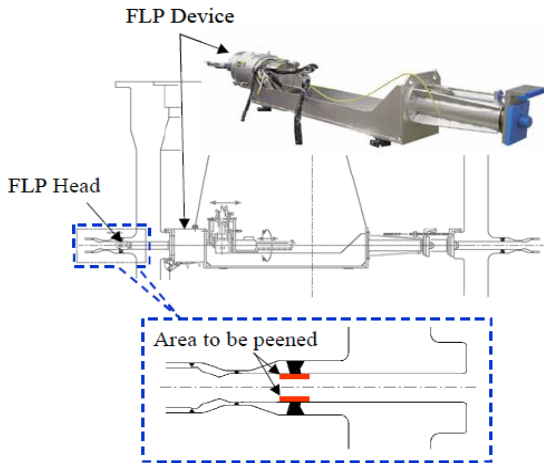


Fig. 12 FLP device for core deluge line nozzles

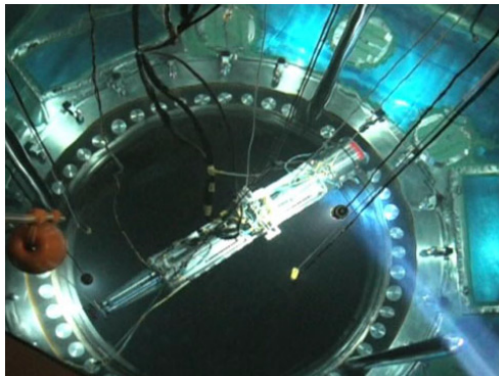


Fig. 13 Photo of FLP device for core deluge line nozzles

줄에 설치되며, 조사 헤드는 하나의 노즐에 삽입된다. 조사 헤드는 용접부를 축방향으로 설치되어 용접부 전체를 피닝하기 위하여 회전한다. 피닝 처리 후 FLP 장비는 회전하여 반대편의 노즐을 피닝한다. Fig. 13는 FLP 장비의 사진을 나타낸다.

3.3 일차수 유입 노즐에의 적용

일차수 유입 노즐의 경우 core deluge line 노즐과 같이 니켈 기반 합금인 안전단부와 저합금 금속 노즐이 접합된 이중 금속간 용접부의 내부 표면이 피닝 처리된다. Fig. 14는 FLP 장비와 피닝 처리된 영역을 나타낸다. 이 노즐에 설치된 FLP 장비는 넓은 영역에 대한 작업 시간을 단축하기 위하여 두 개의 조사 헤드로 두 부분을 동시에 처리한다. 하나의 노즐에 두 개의 조사 헤드를 가진 장비가 설치되며, 조사 헤드는 용접부를 축방향으로 용접부 전체를 피닝하기 위하여 회전한다. 피닝 처리 후 FLP 장비는 회전하여 다른 노즐을 처리한다. Fig. 15은 일차수 유입 노즐의 FLP 장비의 사진을 나타낸다.

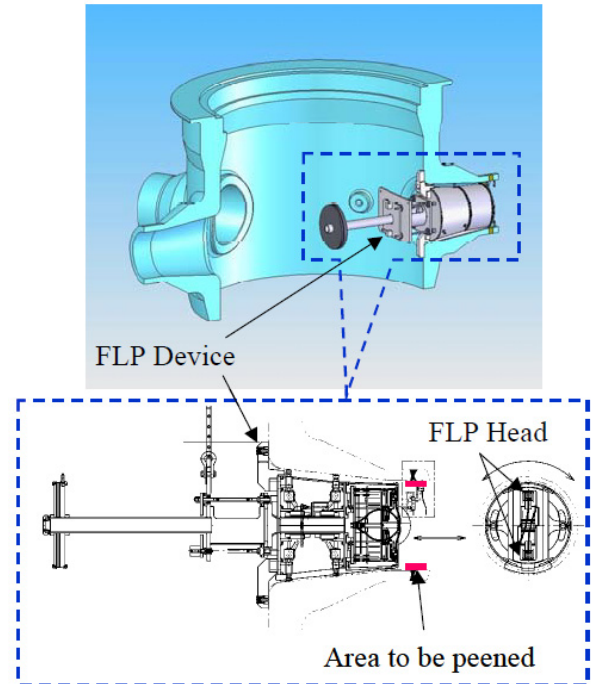


Fig. 14 FLP device for primary water inlet nozzles

4. 결 론

가압수형 원자로형 발전소의 원자로 용기내에 일차수 응력부식균열의 예방에 대한 대책으로 일본의 도시바사는 세계최초로 파이버 전송용 레이저 피닝 시스템을 적용하였다. 원자로 용기 내의 BMI 노즐 내부 표면과 J-그루브 용접부 그리고 core deluge line 노즐 및 일차수 유입 노즐의 이중금속간 용접부에 레이저 피닝 처리를 하였다. 그 결과 가압수형 원자로형 발전소를 위한 FLP 시스템의 신뢰성과 적용 가능성을 보일 수 있었다.

References

1. Sano, Y., Kimura, M., Sato, K., Obata, M., Sudo, A., Hamamoto, Y., Shima, S., Ichikawa, Y., Yamazaki, H., Naruse, M., Hida, S., Watanabe, T. and Oono, Y., Development and Application of Laser Peening System to Prevent Stress Corrosion Cracking of Reactor Core Shroud, *Proceedings, 8th International Conference on Nuclear Engineering(ICONE8)*, Baltimore, ICONE- 8441., (2000)
2. Sano, Y., Kimura, M., Yoda, M., Mukai, N., Sato, K., Uehara, T., Ito, T., Shimamura, M., Sudo, A. and Suezono, N., Development of Fiber-delivered Laser Peening System to Prevent Stress Corrosion Cracking of Reactor Components, *Proceedings, 9th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE9)*, Nice, ICONE9-29. (2001)

3. Yoda, M., Mukai, N., Sano, Y., Ogawa, K., Kimura, M., Sato, K., Uehara, T., Sudo, A. and Suezono, N., Fiber delivered Laser Peening System to Improve Mechanical Properties of Metal Surface, *Surface Treatment V*,(2001), 233-242
4. Yoda, M., Mukai, N., Ochiai, M., Tamura, M., Okada, S., Sato, K., Kimura, M., Sano, Y., Saito, N., Shima, S., Yamamoto, T., Laser-based Maintenance and Repair Technologies for Reactor Components, *Proceedings, 12th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE12)*, Arlington, ICONE12-49238., (2004)
5. Chida, I., Yoda, M., Mukai, N., Sano, Y., Ochiai, M., Miura, T., Saeki, R., Laser Based Maintenance Technology for PWR Power Plants, *Proceedings, 13th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE13)*, Beijing, ICONE13-50334., (2005)
6. Jong-Do Kim, Kutsuna M., Sano Y., Laser Peening Process and Its Application Technique, *J. of Welding and Joining*, 33(4) (2015), 1-6(in Korean)
7. Yoda M., Chida I., Okada S., Ochiai M., Sano Y., Mukai N., Komotori G., Saeki R., Takagi T., Sugihara M., Yoriki H., Development and Application of Laser Peening System for PWR Power Plants, *Proceedings, 9th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE14)*, Miami, ICONE14-89228, (2014)
8. Ochiai, M., Mukai, N., Sano, Y. and Nakano, H., Compact and Robust Inspection System for Micro Cracking Detection using Laser-induced Surface Waves, *Proceedings, 10th International Symposium on Nondestructive Characterization of Materials*, Karuizawa(2000), 305-310
9. Miura, T., Ochiai, M., Kuroda, H., Soramoto, S. and Kanemoto, S., Laser-induced Surface Wave Testing: A New Method for Measuring the Depth of Cracks, *Proceedings, 9th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE9)*, Nice, ICONE9-93., (2001)