

# 원자로 냉각재 계통 내 기기의 이종금속 용접부에 대한 예방정비 방안 고찰

김 중 성

## Investigation on the Preventative Maintenance Schemes for the Dissimilar Metal Welds of Components in Nuclear Reactor Coolant System

Jong-Sung Kim

### 1. 서 론

응력부식균열(SCC: stress corrosion crack)이 발생하기 위한 필요조건은 세가지 주요인자들 (인장응력, 민감한 재질, 부식 환경)이 동시에 만족하는 경우이다<sup>1)</sup>. 이러한 조건은 가압 경수로 (PWR: pressurized water reactor) CRDM(control rod drive mechanism) 관통노즐 용접부, 가압기 분무 노즐-안전단 용접부 등과 같은 PWR 원자로 냉각재 계통 내 기기들의 Alloy 600 계열 이종금속 용접부에 존재한다<sup>2)</sup>. 이러한 이종금속 용접부는 SCC에 민감한 Alloy 600 계열 재질로 제작되어 있고 용접 후열처리 미실시에 따라 인장 잔류응력이 발생할 뿐만 아니라 고온고압 수화학 부식환경 하에서 운전되고 있으므로 상기 필요조건을 만족한다. 이러한 특성에 기인하여 일차수 응력부식 균열(PWSCC: primary water stress corrosion cracking)의 발생 잠재성이 높을 뿐만 아니라 실제 몇몇 이종금속 용접부에서 PWSCC들이 발생되고 있다<sup>3)</sup>. 국내의 경우에도 최근 증기발생기 저온수실 배수 노즐 이종금속 용접부<sup>4,5)</sup>와 원자로 상부헤드 배기관 노즐 이종금속 J-그루브 용접부<sup>6)</sup>에서 PWSCC가 발생하였다.

해외의 경우, PWSCC 발생과 관련된 주요인자를 선제적으로 처리하여 PWSCC를 예방하는 MSIP (mechanical stress improvement process), PWOL (preemptive weld overlay), Laer Peening, Waterjet Peening, IHSI (induction heating stress improvement), Inlay/Onlay Welding 등의 정비 방안이 개발 적용되었다. 국내에서도 고리 1호기 가압기 노즐들의 이종금속 용접부들에 대해 PWOL을 적용하였다<sup>7)</sup>. 현재 고리 2호기 가압기 노즐들의 이종금속 용접부들에 대해 PWOL을 적용 중에 있으며 향후 다른 원전들에 대해서도 확

대 적용을 검토하고 있다<sup>8)</sup>.

국내 가동 원전의 열화 추세와 해외의 사례를 보았을 때 보다 다양한 이종금속 용접부에서 PWSCC의 발생이 예상되며 예방정비 방안별 특성 및 적용상 장단점이 있다. 따라서 국내 가동 원전의 건전성 유지와 계속운전의 성공을 위해서는 다양한 이종금속 용접부 별 최적의 예방정비 방안을 선정하는 것이 필요하다.

따라서 본 논문의 목적은 PWSCC 발생을 선제적인 측면에서 발생 억제하는 예방정비 방안들을 고찰하는데 있다. 특히, 각 방안 별 작용기구, 특성 및 장단점을 제시하여 향후 적용될 수 있는 다양한 이종금속 용접부들에 대해 최적의 예방정비 방안을 결정할 때 유용한 참고 지침을 제시하고자 한다.

### 2. PWR 이종금속 용접부

Fig. 1은 국내 표준형 원자로 냉각재 계통 Alloy 600 계열 이종금속 용접부의 위치를 나타내고 있다<sup>2)</sup>.

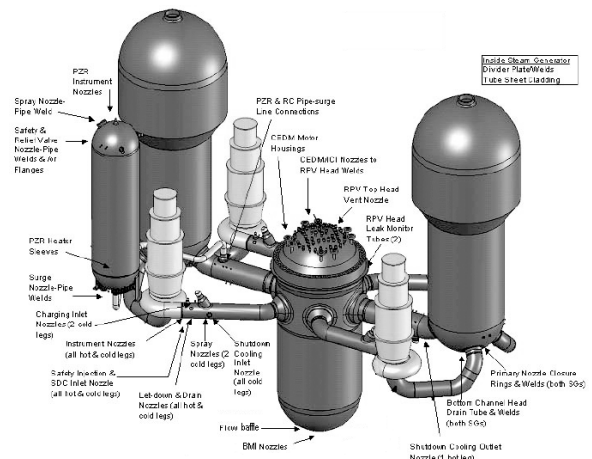


Fig. 1 DMW locations in RCS of KSNP

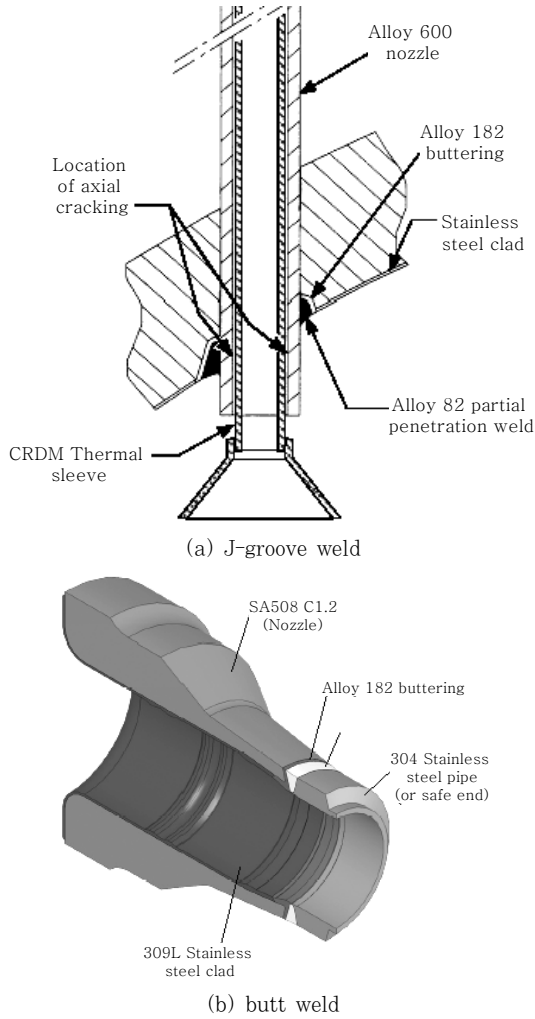


Fig. 2 Dissimilar metal welds in reactor coolant system

Fig. 2는 대표적인 이종금속 용접부의 형상을 보여주고 있다. Fig. 2에서 보이는 바와 같이 원자로 냉각재 계통 이종금속 용접부는 J-그루브 용접부와 맞대기 용접부로 크게 구분할 수 있다.

### 3. MSIP

MSIP는 비등 경수로 (BWR: boiling water reactor) 원전 기기의 용접부에 발생한 IGSCC (inter-granular stress corrosion cracking)을 예방하기 위해 개발된 기술로서 PWR의 원자로 냉각재 계통 기기의 Alloy 600 계열 이종금속 용접부에 확대 적용되어졌다<sup>9)</sup>. AEA Technology Engineering Service, Inc.에서 개발 특허 등록한 기술로서 기본 개념은 Fig. 3에 개략적으로 제시된다<sup>10)</sup>. 원주방향 용접부 근처에 직접적으로 배관을 국부적으로 압축하는데 간단한 유압 작동 클램프 장비를 이용한다. 장비에 의한 영구적인 압축은 용접부

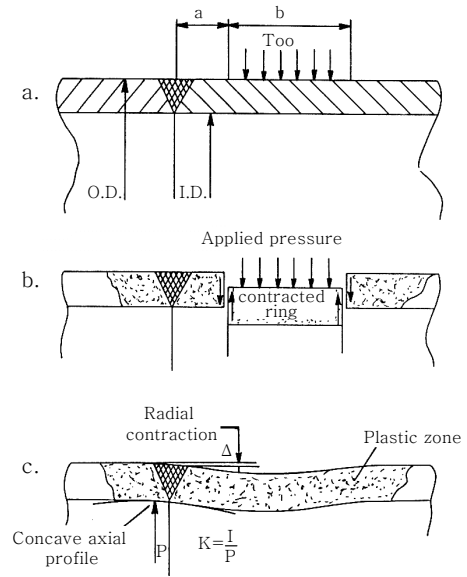


Fig. 3 Basic concept of MSIP

위치에 오목한 형상을 발생시키며 결국 배관 원주에 상응하는 감소를 야기 시킨다. 장비를 제거하자마자, 용접부의 축방향 응력은 개략적으로 두께의 반만 압축인 상태로, 원환응력은 거의 모든 두께에 걸쳐 압축인 상태로 남게된다.

Westinghouse가 PWR 원자로 출구 노즐 이종금속 용접부에 대한 MSIP의 유용성을 유한요소 해석을 통해 입증한 결과를 Fig. 4에 제시하였다<sup>9)</sup>. 여기서 빨간색은 인장을, 파란색은 압축을 의미한다. As-welded

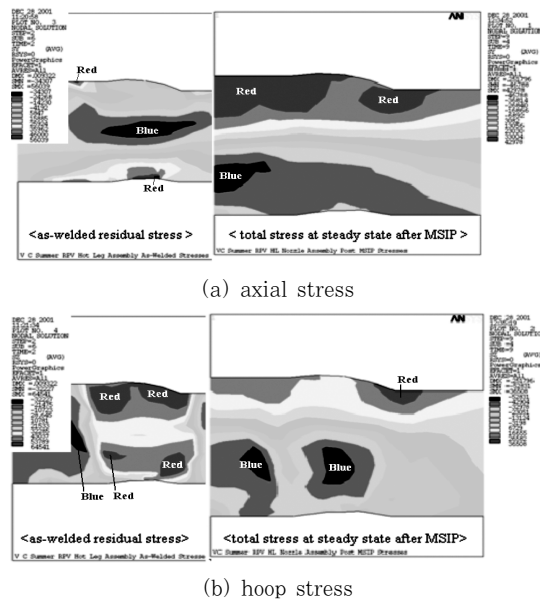


Fig. 4 Finite element stress analysis for reactor vessel outlet nozzle to identify effectiveness of MSIP



Fig. 5 MSIP application at Salem unit 1

상태에서 내면에 인장응력이 작용하였으나 MSIP 작용 이후 정상 운전 동안에도 내면에 압축응력이 작용함을 알 수 있다.

PWR 원전에 대해서는 Westinghouse에 의해서 2002년 V.C. Summer 원자로 출구 노즐 이중금속 용접부에 적용한 이래, Harris 원자로 노즐, Cook 1호기 원자로 노즐 및 Salem 원자로 노즐 이중금속 용접부에 적용되어왔다. Fig. 5는 Salem 1호기 원자로 노즐 이중금속 용접부에 MSIP를 적용하는 모습을 보여주고 있다.

MSIP는 간단한 장비만으로 단시간 내에 간단히 효과적으로 잔류응력을 이완시켜 압축 응력화하는 장점이 있다. 전체적인 형상/영구 소성 변형을 야기시킬 뿐만 아니라 소성 변형에 따른 탄소강/저합금강 모재부의 연성/인성을 저하시키므로 MSIP 수행에 따른 추가적인 재료물성 평가가 요구되는 단점이 있다. 따라서 주로 형상이 단순한 대구경 노즐의 이중금속 용접부에 적용되고 있다.

#### 4. PWOL

PWOL은 1980년대 미국 내 BWR 원전에서 결함을 가지는 배관 용접부를 잠정적으로 보수하는 방법으로 처음 사용된 이래 PWR의 안전 1등급 기기의 Alloy 600 계열 이중금속 용접부에 확대 적용되어졌다<sup>11)</sup>. ASME B&PV Code, Sec.XI, Code Case N-740은 이중금속 용접부에 PWOL을 사용하여 PWSCC에 의한 균열을 보수하거나 예방하는 방법을 제시한다<sup>12)</sup>.

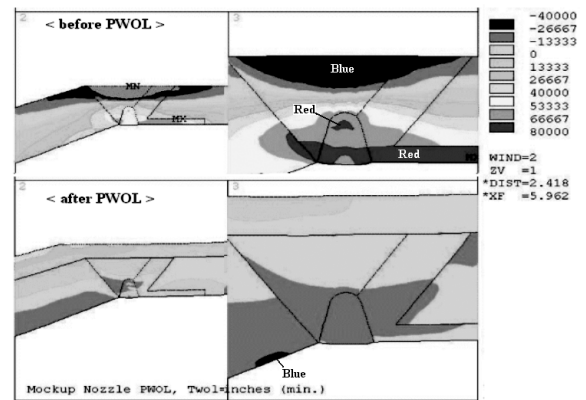
PWOL은 PWSCC 발생을 가정한 이중금속 용접부 외면에 선제적으로 Weld Overlay를 실시하는 것으로 외부에 Overlay 용접된 용착부는 응고되면서 수축된다. 이러한 수축은 용접부 내면의 인장 잔류응력을 감

소시키고 압축 응력화시킨다.

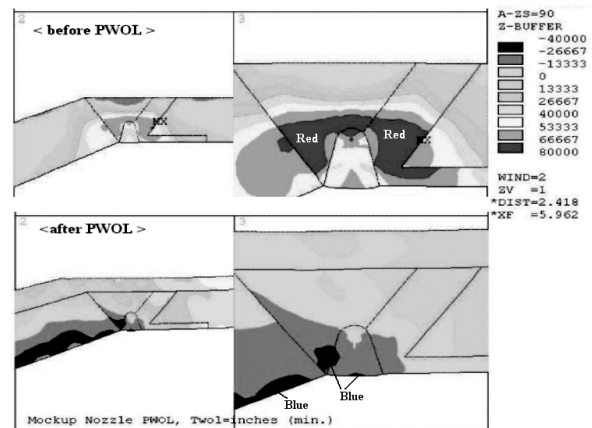
WSI (Welding Service Inc.)의 지원을 받아 SI (Structural Integrity)가 가압기 노즐에 대한 PWOL의 유용성을 유한요소 해석을 통해 평가한 결과를 Fig. 6에 나타내고 있다<sup>13)</sup>. PWOL 적용에 따라 내면 쪽 잔류응력이 축방향/원환 모두 상당히 저감하여 압축응력이 작용함을 알 수 있다.

PWOL은 2006년 1월 기준으로 25년 동안 BWR에 800여번 이상, PWR 가압기 노즐에 130번 이상 적용되었다<sup>11)</sup>. Fig. 7은 전형적인 PWOL 적용 모습을 보여주고 있다.

PWOL은 전체적인 형상/소성 변형을 야기시키지 않고 용접시 Purge 방법과 자동용접기 설치가 용이하며 내표면에 신뢰성 높은 압축응력을 발생시켜 영구적으로 PWSCC 문제를 제거시키는 장점이 있다. PWOL 이전 및 이후에 검사, 설계 변경 사항 평가 등 수행할 절차가 복잡하며 PWOL 실시를 위한 별도의 용접 장비를 개발하여야 하는 단점이 있다. 또한, 용접하는데 상당한 시간이 소요되므로(피폭량도 증가) 최근에 Overlay



(a) axial stress



(b) hoop stress

Fig. 6 Finite element stress analysis for pressurizer nozzle to identify effectiveness of PWOL



Fig. 7 PWOL application to field

용접 두께를 최적화하여 용접하는 기법(OWOL)을 개발 적용하려는 시도가 있다. 따라서 PWOL은 대구경 노즐의 이중금속 용접부 보다는 주로 가압기 노즐 이중금속 용접부와 같은 상대적으로 작은 구경 노즐의 이중금속 용접부에 적용되고 있다.

### 5. Laser Peening

1963년 미국의 White가 충격파를 발생시키고 금속 재료의 소성 변형을 야기시킬 수 있는 레이저의 능력을 첫번째로 확인한 이래<sup>14)</sup>로 Toshiba는 원전 이중금속 용접부의 인장 잔류응력을 이완하여 압축 응력화시키는 Laser Peening 방안 및 장비를 개발하였다<sup>15)</sup>.

Fig. 8은 Laser Peening에 의한 압축 잔류응력 발생기구를 개략적으로 보여주고 있다<sup>16,17)</sup>. 재료 표면에

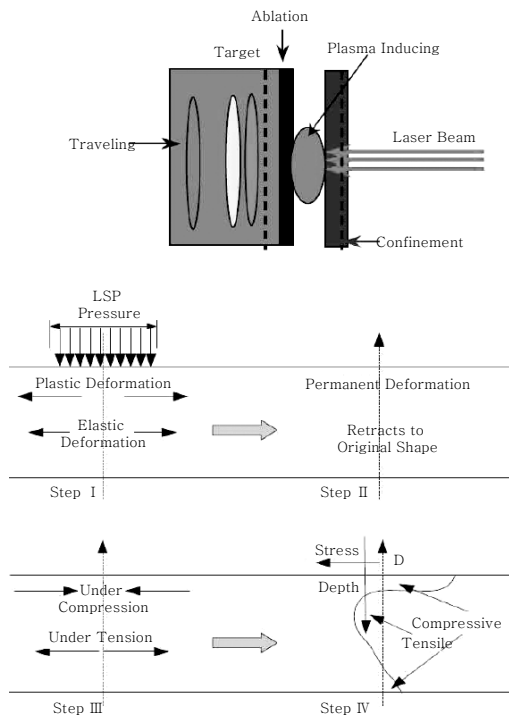
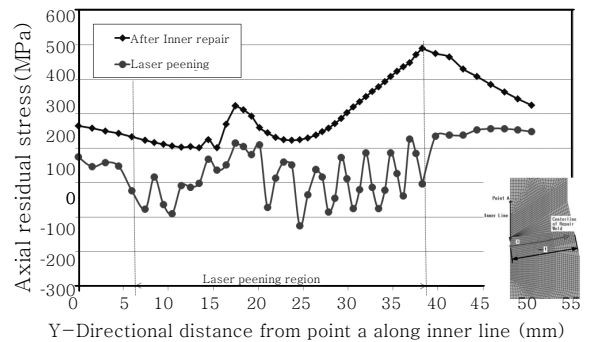


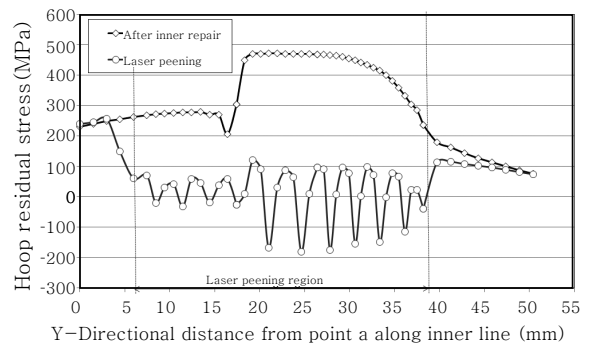
Fig. 8 Overview of laser peening process

매우 짧은 시간(약 25-50nsec) 동안 고에너지 레이저 펄스가 가해진다. 표면은 레이저 펄스에 의해 가열되며 재료 표층은 10,000℃를 초과하여 기화된다. 갑작스러운 고온화는 플라즈마를 형성시키고 가열된 플라즈마의 빠른 팽창은 GPa 크기의 매우 높은 압력 충격파를 발생시킨다. 플라즈마의 고온에 의한 손상으로부터 보호하기 위해 표면은 불투명하게 코팅되거나 검은색으로 칠해진다. 직접적인 Ablation Mode와 비교시 높은 충격과 압력을 얻기 위해 플라즈마를 제한하기 위한 Confinement로서 투명한 Overlay를 사용한다<sup>16)</sup>. 발생한 충격 압력과는 목표물의 표층을 탄성 한도 이상으로 팽창시킨다. 압력 크기에 종속적으로, 표층 아래의 층 또한 팽창하나 탄성한도 내에 있다. 감쇠율에 따라 팽창은 목표물의 깊이에 따라 줄어든다. 특정 깊이에서 팽창은 탄성적이 된다. 탄성적으로 변형된 부분은 원래 형상으로 복귀하나 소성 변형된 부분은 영구적인 것이므로 표층은 압축응력이 작용하고 표층 아래의 층은 외력이 작용치 않아도 인장응력 상태를 유지한다<sup>17)</sup>.

김중성이 PWR 원전 가압기 안전방출 노즐 이중금속 용접부에 대한 Laser Peening의 유용성을 유한요소 해석을 통해 예비 평가한 결과를 Fig. 9에 나타내고 있다<sup>18)</sup>. Fig. 9에서 보이는 바와 같이 Laser Peening의 적용에 따라 내표면 쪽의 잔류응력이 축방향 및 원



(a) axial



(b) hoop

Fig. 9 Finite element stress analysis for pressurizer safety/relief nozzle to identify effectiveness of laser peening

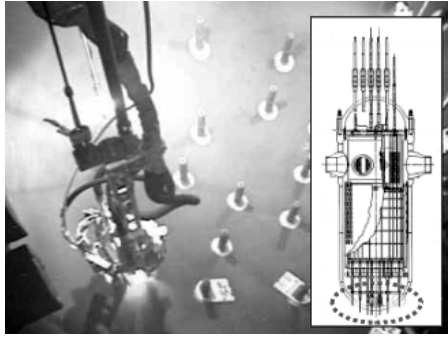


Fig. 10 Application of laser peening to J-groove weld of bottom mounted nozzle

환 모두 상당히 저감하는 것을 알 수 있다.

Toshiba는 1999년 BWR Core Shroud 용접부에 대해 Laser Peening을 처음 적용한 이래 비등 경수로 용접부에 대해 총 11번의 수행 사례가 있다. 또한 2002년 PWR 원자로 Bottom Mounted 노즐 이종금속 J-그루브 용접부에 대해 처음 적용한 이래 PWR 용접부에 대해 총 3번의 적용 사례를 확인할 수 있다<sup>15)</sup>.

Fig. 10은 Toshiba에서 Laser Peening을 PWR 원자로 Bottom Mounted 노즐 이종금속 J-그루브 용접부에 적용하는 모습을 보여주고 있다<sup>15)</sup>.

Laser Peening은 전체적인 형상/소성 변형과 야금학적 조직 변화를 야기시키지 않으며 내표면 근처에만 압축응력을 발생시키는 장점이 있다. 유연한 광학 Fiber 전달 시스템을 사용하므로 J-그루브 용접부와 같이 복잡한 용접부에도 적용할 수 있다. 진동을 발생시키지 않으며 육안으로 용이하게 Peening 처리된 영역을 확인할 수 있다. 최근에는 Laser 주사 이전/이후에 어떠한 표면처리도 요구치 않는다. 그러나, 고에너지 Laser를 발생시키기 위한 고가의 장비가 필요하며 Laser를 목표 용접부까지 전달시키기 위한 복잡한 장비를 개발하여야 하는 단점이 있다. 가압기 밀림 노즐 이종금속 용접부에 적용하려는 시도도 있었으나 주로 일본에서 Bottom Mounted 노즐 이종금속 J-그루브 용접부에 적용하고 있다.

### 6. Water Jet Peening

Water Jet Peening은 의료, 공학 및 상업적 용도로 폭 넓게 이용되고 있는 Water Jet Abrasion의 확장된 기술의 하나로서 Hitachi와 Mitsubishi 중공업은 원전 용접부의 SCC를 예방하는데 적용할 수 있는 Water Jet Peening 기술과 장비를 개발하였다<sup>19)</sup>.

Fig. 11은 Water Jet Peening에 의한 압축 잔류응력 발생기구를 개략적으로 보여주고 있다<sup>20)</sup>. 매우 고압

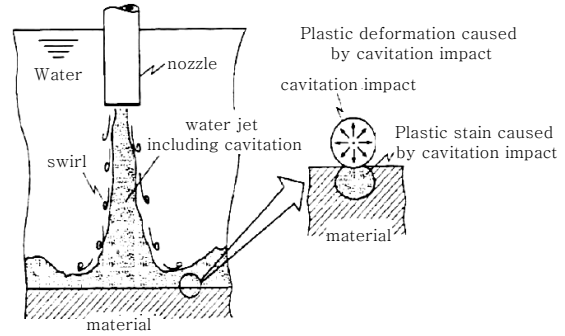


Fig. 11 Mechanism of residual stress mitigation by water jet peening

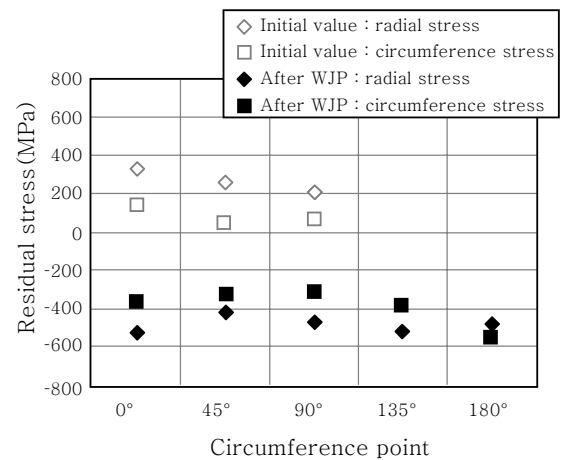


Fig. 12 Results of residual stress improvement effect on BMI J-groove weld

의 물이 Water Jet Peening 노즐을 통해 뿌려질 때, 고속의 Water Jet는 Cavitation을 발생시킨다. Water Jet 내 Cavitation은 순간적으로 붕괴되고 그때 강렬한 압력파(약 1,000MPa)가 발생된다<sup>19)</sup>. 그 이후의 과정은 Laser Peening과 동일하다.

Mitsubishi 중공업이 PWR 원자로 하부헤드 BMI 이종금속 J-그루브 용접부에 대한 Water Jet Peening의 유용성을 실험을 통해 측정된 결과를 Fig. 12에 나타내고 있다<sup>21)</sup>. Water Jet Peening의 적용에 따라 용접부 표면의 반경 방향/원환 잔류응력이 모두 저감되어 압축 응력화된다.

Fig. 13은 PWR에 적용할 수 있는 이종금속 용접부 부위들을 보여주고 있다<sup>21)</sup>. 즉, Water Jet Peening은 원자로 입출구 노즐 안전단-배관 이종금속 용접부, 원자로 하부헤드 BMI 이종금속 J-그루브 용접부, BMI 노즐 표면, 원자로 안전주입 노즐 안전단-배관 이종금속 용접부에 적용할 수 있다. 주로 일본에서 소구경 노즐의 제작 및 보수시 적용하고 있다.

Water Jet Peening은 전체적인 형상/소성 변형과

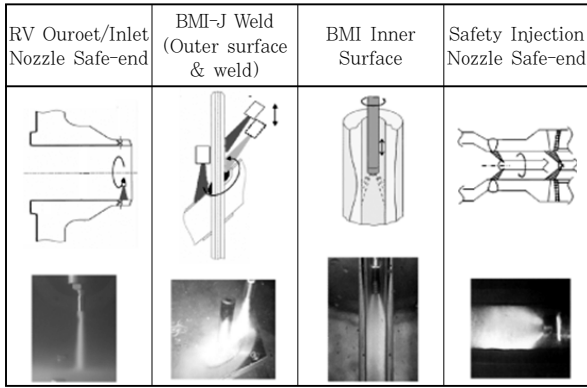


Fig. 13 Water jet peening situations for PWR

야금학적 조직 변화를 야기시키지 않으며 내표면 근처에만 압축응력을 발생시키는 장점이 있다. 한번의 패스만으로 폭 넓고 깊은 영역에 위치한 재료 표면 상의 잔류응력을 향상시킬 수 있다. 또한 적용 조건 범위가 넓으므로 J-그루브 용접부와 같이 복잡한 용접부에도 적용할 수 있으며 처리를 위해 물만을 사용하기 때문에 어떠한 이물질도 전달되지 않으며 어떠한 열 영향도 없다<sup>21)</sup>. 그러나, Water Jet Cavitation을 발생시키기 위한 복잡한 장비의 개발하여야 하며 Cavitation 발생 및 붕괴 제어가 용이하지 않다는 단점이 있다.

### 7. IHSI

IHSI는 1980년대 일본에서 Hitachi, IHI 등의 협동연구를 통해 BWR Primary 루프 순환 배관의 용접부에서 발견되는 IGSCC의 발생을 예방하기 위해 개발되었으나 아직까지 PWR에는 적용되지 않고 있다<sup>22)</sup>.

Fig. 14는 IHSI에 의한 압축 잔류응력 발생기구를 개략적으로 보여주고 있다<sup>23)</sup>. 고주파 유도 가열법에 의한 외면의 특정 온도 (500~550℃) 가열과 동시에 용접부 내면을 물로 냉각함으로써 배관 벽을 통해 큰 온도 차이가 발생한다. 이러한 상태에서 외면은 압축 항복 상태이며 내면은 인장 항복 상태이다. 가열이 정지될 때 (내면 냉각은 계속됨), 온도 차이는 적어지며 가열 과정에서 발생한 외표면 상의 응력은 인장으로 변화한다. 내면의 응력은 압축 잔류응력으로 변화된다<sup>23)</sup>.

Shimizu 등이 BWR 원전 스테인리스 강 배관 Girth 맞대기 용접부에 대한 IHSI의 유용성을 절단법을 통해 내표면 잔류응력을 측정된 결과를 Fig. 15에 나타내고 있다<sup>24)</sup>. Fig. 15에서 보이는 바와 같이 IHSI의 적용에 따라 용접 열영향부의 내표면 잔류응력은 상당히 저감되어 압축 응력화됨을 알 수 있다.

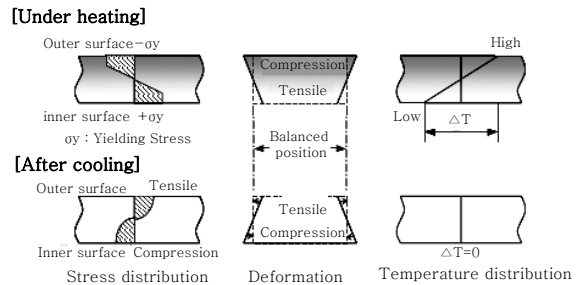
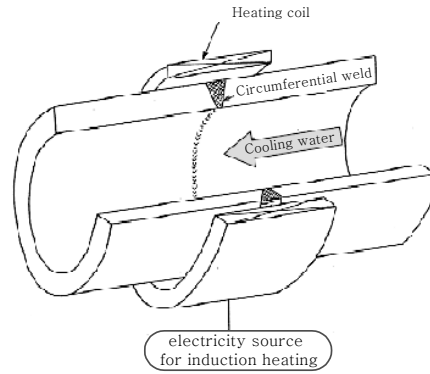


Fig. 14 Residual stress mitigation by IHSI

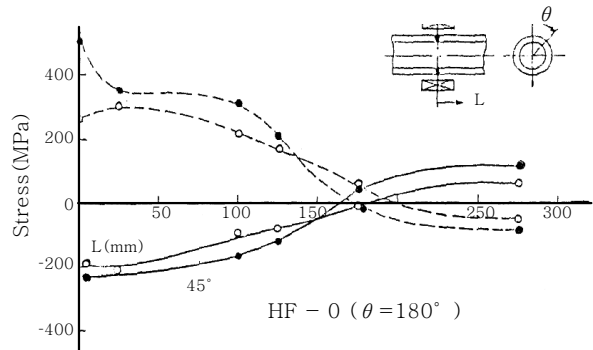


Fig. 15 Effect of IHSI on residual stress of inner surface in girth butt weld of stainless steel piping

IHSI는 용접부 근처 내면쪽의 잔류응력을 효과적으로 완화시키며 운전 중 내부의 냉각재를 배수하지 않고도 수행할 수 있는 장점이 있다. 외면에 열을 가함으로써 온도 제어 실패시 오스테나이트 스테인리스 강과 니켈기 합금 등 내식성 재료의 야금학적 조직 변화를 야기시킬 수 있는 단점이 있다.

BWR Primary 루프 순환 배관과 같은 스테인리스 강 배관과 노즐/안전단 용접부에 적용<sup>25)</sup>되나 일부 BWR 원전(Browns Ferry 3호기)의 IHSI 시행 용접부에서 IGSCC 발생 사례가 있어 US NRC의 승인을 받지 못한 상태이며 아직까지 PWR에는 적용하지 않고 있다<sup>25,26)</sup>.

### 8. Inlay/Onlay Welding

앞에서 설명한 예방정비 방안들은 원자로 냉각재와 접하는 내표면의 인장 잔류응력을 압축응력으로 변화시켜 PWSCC 발생을 예방하는 방안들이다. 이에 반하여, Inlay/Onlay Welding은 SCC 발생의 세가지 주요 인자들 중 또 다른 하나인 SCC 민감 재료를 PWSCC 저항성이 우수한 재료로 대체시키는 방안이다. 즉, PWSCC에 민감한 모재 Alloy 600 및 용접금속 Alloy 82/182를 PWSCC 저항성이 월등히 우수한 Alloy 690 계열 용접금속 Alloy 52/52M으로 대체 용접하거나 덮어서 용접하여 PWSCC에 민감한 Alloy 600 계열 합금을 부식 환경으로부터 차단하는 방안이다. Inlay Welding과 Onlay Welding의 차이는 기존 모재와 용접금속의 제거여부이다. 기존 모재와 용접금속을 일부 제거한 후 Alloy 52 또는 52M을 용접하면 Inlay Welding이며 제거하지 않고 용접하면 Onlay Welding이다<sup>27,28)</sup>.

Fig. 16은 Inlay Welding과 Onlay Welding 방안을 도식적으로 설명하고 있다<sup>27,28)</sup>.

AREVA와 Mitsubishi 중공업에서 적용 방안 및 장치를 개발하여 각각 스웨덴 Ringhals 원전 원자로 노즐 용접부와 일본 Ohi 3호기 원자로 입출구 노즐 용접부에 Inlay Welding을 수행하였다.

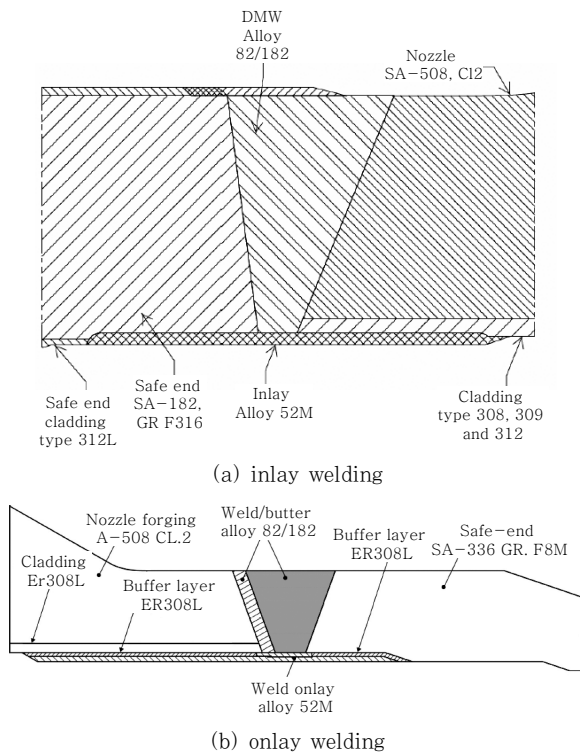


Fig. 16 Illustrations of inlay and onlay welding

원자로, 가압기 등 용기에 물이 채워진 상태에서도 적용이 가능하며 텀퍼 비드 용접과 동일한 효과를 가져다 줄 수 있다<sup>29)</sup>. 용접 전후 검사, 설계 변경 사항 검토 등 수행할 절차가 복잡하며 용접 실시를 위한 별도의 용접 장비를 개발하여야 하는 단점이 있다. 또한 내면 용접을 수행하여 발생할 수 있는 내면의 인장 잔류응력은 PWSCC 이외의 다른 원인으로 균열이 발생한다면 균열 진전력의 하나로 작용할 수 있다. 내면에서 모든 처리 과정이 이루어지는 Inlay/Onlay Welding 방안 특성상 대구경의 원자로 입출구 이종금속 용접부에 주로 이용될 것으로 예상된다.

### 9. 결 론

국내 가동 원전의 원자로 냉각재 계통 Alloy 600 계열 이종금속 용접부에 대한 PWSCC 발생을 사전에 대비하여 예상 가능한 예방정비 방안들을 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) MSIP, PWOL, Laser Peening, Water Jet Peening 및 IHSI는 원자로 냉각재와 접하는 내표면의 인장 잔류응력을 압축 응력화시켜 PWSCC 발생을 예방함
- 2) Inlay/Onlay Welding은 원자로 냉각재와 Alloy 600 계열 합금의 접촉을 차단하여 PWSCC 발생을 예방함
- 3) MSIP, Laser Peening과 Water Jet Peening은 기계적 응력(압력)에 의해 잔류응력을 압축 응력화시키며 PWOL과 IHSI은 열적 구배에 의해 잔류응력을 압축 응력화시킴

### 참 고 문 헌

1. [http://www.metal.or.kr/college/m\\_surface/corrosion/m\\_corrosion7.html](http://www.metal.or.kr/college/m_surface/corrosion/m_corrosion7.html)
2. EPRI : MRP-126, Generic Guidance for Alloy 600 Management Program, 2004
3. USNRC : NUREG-1823, U.S. Plant Experience with Alloy 600 Cracking and Boric Acid Corrosion of Light-Water Reactor Pressure Vessel Materials, 2005
4. KHNP: Structural Integrity Report for Dissimilar Metal Welds on SG Drain Nozzle of Y#3, 2007
5. KHNP: Structural Integrity Report for Dissimilar Metal Welds on SG Drain Nozzle of Y#4, 2009
6. KHNP: Structural Integrity Report for Dissimilar Metal Welds on RPV Upper Head Vent Nozzle of Y#3, 2010
7. [www.kins.re.kr/nsic2010/present/Tech/5-2\\_3.pdf](http://www.kins.re.kr/nsic2010/present/Tech/5-2_3.pdf)
8. [http://ebiz.khnp.co.kr/MB\\_ENG/B/mqb110.jsp?depart=0370&number=K10S033000](http://ebiz.khnp.co.kr/MB_ENG/B/mqb110.jsp?depart=0370&number=K10S033000)

9. E.A. Ray, K. Weir, C. Rice, and T. Damico: First Use of Mechanical Stress Improvement Process (MSIP) to Prevent and Mitigate Primary Water Stress Corrosion Cracking (PWSCC) in Reactor Vessel Piping at VC Summer, Proceedings of the 18th KAIF-KNS Annual Conf., 2003
10. <http://www.ltbweb.com/msip.htm>
11. P. Riccardella: Nozzles and Penetrations in PWR Nuclear Power Plants, Expert Seminar of Structural Integrity Associate, Suzhou, China, 2009
12. ASME B&PV Code Committee: ASME B&PV Code, Sec.XI, Code Case N-740, Dissimilar Metal Weld Overlay for Repair of Class 1, 2, and 3 Items, Section XI, Division 1, 2007
13. EPRI: Material Reliability Program: Technical Basis for Preemptive Weld Overlays for Alloy 82/182 Butt Welds in PWRs(MRP-169) Revision 1, EPRI, Palo Alto, CA, 2008
14. R.M. White: Elastic Wave Generation by Electron Bombardment or Electromagnetic Wave Absorption, J. of Applied Physics, **34**(1963), 2123-2124
15. Y. Sano: Development and Applications of Laser Peening System for Field Operation, Proceedings of the First Int. Conf. on Laser Peening, 2008
16. M. Srinivasan: Finite Element Simulation of Laser Shock Peening Process, a Thesis for Master of Science, University of Cincinnati, 2008
17. G. Singh: Effective Simulation and Optimization of a Laser Peening Process, a Thesis for the Ph.D., Indian Institute of Technology, India, 2003
18. J.S. Kim: Investigation on the Effect of Laser Peening Variables on Welding Residual Stress Mitigation Using Dynamic Finite Element Analysis, Proceedings of the Korean Welding and Joining Society Spring Conference, **53**, 2010
19. Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd. and Mitsubishi Heavy Industry, Ltd.: Water Jet Peening Technology for Preventing Stress Corrosion Cracking by Using Cavitations, E-Journal of Advanced Maintenance, **1-2**, NT7, 2009
20. G.G. Elder and M. Taniguchi: Mitigation of PWSCC on Reactor Vessel Bottom Mounted Nozzles by Waterjet Peening, Proceedings of EPRI Int. PWSCC of Alloy Conf., 2005
21. Mitsubishi Heavy Industry, Ltd.: Water Jet Peening as Residual Stress Improvement Method for Alloy 600 PWSCC Mitigation, E-Journal of Advanced Maintenance, **1-2**, NT7(2), 2009
22. Y. Ando, G. Yagawa, and Y. Hayase: Evaluation of Induction Heating Stress Improvement (IHSI) Treatment Applied to Nuclear Primary Piping, Int. J. of Pressure Vessels and Piping, **10-5**(1982), 399-406
23. T. Sato, K. Yonekura, S. Hongo, S. Hayashi, and H. Saito: Introduction of Repair/Maintenance Techniques for SCC in Primary Loop Recirculation System Piping, Maintenance, **3-3**, 2004
24. T. Shimizu, K. Enomoto, and S. Sakata: Residual Stresses in Girth Butt Welded Pipes and Treatments to Modify These, Int. J. of Pressure Vessels and Piping, **16-4**(1984), 299-319
25. Toshiba Corporation: IHSI (Induction Heating Stress Improvement) Preventive Maintenance Technique for Primary Loop Recirculation Piping, E-Journal of Maintenance, **1-2**, NT6, 2009
26. J. Wilson and M. Arey: Overview of Industry Activities on Mitigation of PWSCC in NI-Basec RCS Components, MRP/PWROG Briefing to NRC RES, 2007
27. US NRC: Slide Presentation-Inlay Mitigation, Public Meeting with Nuclear Energy Institute and Industry Regarding Inlay and Onlay Applications on DMBW, 2008
28. US NRC: Slide Presentation-Weld Onlay, Mitigation and Repair, Public Meeting with Nuclear Energy Institute and Industry Regarding Inlay and Onlay Applications on DMBW, 2008
29. Kansai Electric Power Co., Inc. and Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.: Inlay Method Using the Cylindrical Container for Reactor Vessel of PWR, E-journal of Advanced Maintenance, **2-1**, NT19, 2010



- 김종성(金種聖)
- 1968년생
- 순천대학교 기계우주항공공학부
- 용접부 손상평가, 구조해석, 피로파괴
- e-mail : kimjsbat@sunchon.ac.kr