



원자로 기기의 고령화 대응 기술

와타루 사가와

(주) 히타치제작소 전력그룹 주간기사

일본의 원자력발전소 수명 관리

현재 일본에는 가동된 지 30년이 넘은 원자로 7기를 포함하여 총 53기(비등형 30기, 가압수로형 23기)의 상업용 원자로가 가동되고 있다. 5년 후면 가동된 지 30년이 넘는 원자로의 수가 20개로 증가하게 된다.

에너지의 안정적 공급과 이산화탄소 방출 감축을 도모하기 위해 원자력 발전의 중요성이 점점 증대되고 있다. 따라서 현존하는 원자력 발전소를 장기간 동안 안정적으로 가동하는 것이 필수적이다.

일본 규정에는 인가된 가동 제한이 규정되어 있지 않다. 그 대신 시스템, 구조 및 부품(SSCs: systems, structures, components)을 연간 예방 정비 기간 동안 검사하여 SSCs가 기술 규범과 기준에 따라 유지 보수되고 가동되는 확인하는

방식을 채택하고 있다. 그런 이후에 다음 해 예방 정비 기간까지 발전소 가동이 허용되는 것이다.

연간 예방 정비 기간에는 정기 검사 외에 발전소의 신뢰도를 상향 유지하기 위하여 노후화 가능성에 대한 적절한 검사, 시정 및 예방 조치가 취해지게 된다.

검사 대상 노후화 가능성이 있는 원전을 선별하기 위해 일본 및 외국의 가장 최근의 원전 가동 경험 및 문제점과 R&D 결과를 평가하고 적용하게 된다.

히타치는 원자력 발전소 공급 업체이자 주계약자로서 노후된 원전의 신뢰도를 높은 수준으로 유지하기 위해 첨단 유지 보수 기법을 개발하기 위해 장기간 노력해왔다.

특히 비등경수로(BWR) 오작동의 주요 원인인 응력 부식 균열(SCC)의 발생과 확대를 방지하기 위해 응력 부식 균열의 세 가지 원

인인 재질, 부식 환경, 응력 등에 관해 다양한 대책을 마련해왔다.

본 논문에서는 하타치의 검사 기법, 유지 보수 예방 및 시정 기법 등에 대해 소개해 보고자 한다.

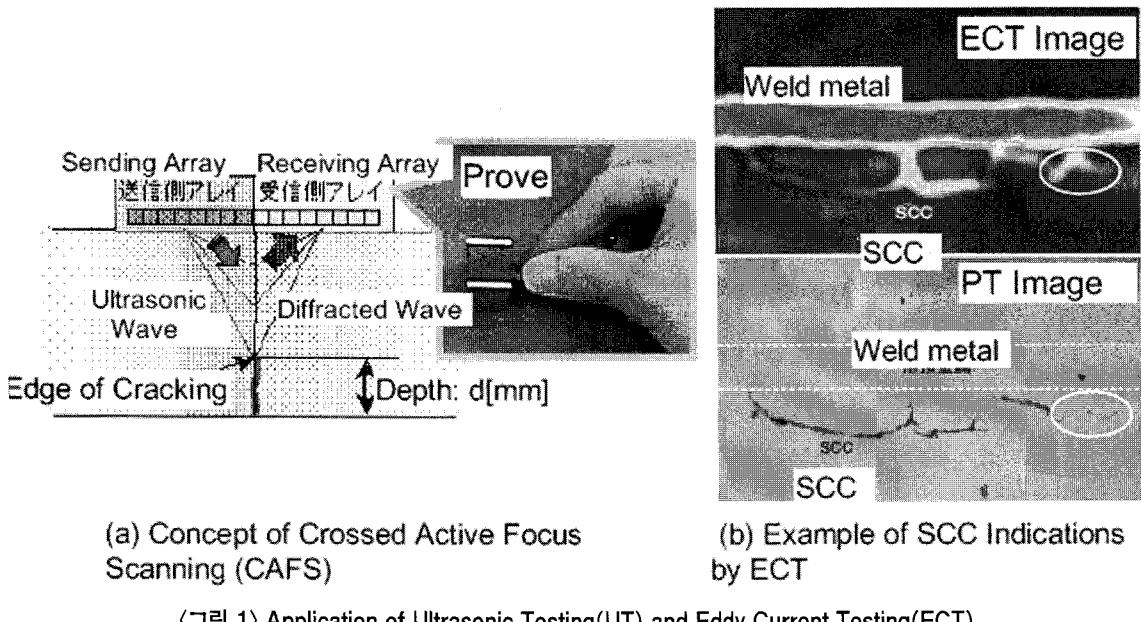
검사 기술과 도구

1. 검사 기술

원자력 발전소의 노후화로 인해 많은 원전에서 다양한 부품 관련 오작동 사례가 보고되어 왔다.

일본에서는 비등경수로의 노심막(Core Shroud)과 원자로 재냉각 재순환 계통 배관에서 응력 부식 균열 사례가 나타난 바 있다.

균열이 발견되었을 경우 균열의 크기를 측정하는 것은 구조 전성성을 평가하고 최근 일본에서 마련된 유지 보수 규정에 따라 추가 유지 보수 프로그램을 수립하기 위해 중요하다.



(a) Concept of Crossed Active Focus Scanning (CAFS)

(b) Example of SCC Indications by ECT

〈그림 1〉 Application of Ultrasonic Testing(UT) and Eddy Current Testing(ECT)

그러나 저탄소 함량의 스테인리스강 재질(316.L S/S)에 나 있는 균열은 패턴이 복잡하고 용접 금속으로 파급되기 때문에 기존의 초음파 검사(UT) 기법만으로 SCC 균열의 크기(깊이)를 정확하게 측정하는 것은 어려운 일이었다.

히타치는 초음파의 감쇠 및 산란을 초래하는 스테인리스강과 니켈 계열 합금 600의 용접 부분 균열 모서리의 탐지율을 증가시킬 것으로 예상되는 Cross Active Focus Scanning(CAFS)라는 기술을 강화 기술의 일환으로 개발했다.

CAFS는 단계별 배열(array) 방법의 하나로 어레이의 형태로 배열된 진동자를 이용하여 원하는 초음파 표면을 형성시키는 것이다.

CAFS의 경우에는 진동자 어레이가 송신 어레이와 수신 어레이

로 나누어진다. 〈그림 1(a)〉은 개념도를 나타낸 것이다.

이 방법은 전산화 제어 장치와 균열의 모서리로부터 회절된 음파를 모니터하여 판 두께의 방향으로 각각 송수신된 음장(sound fields)의 중심점을 스캔함으로써 정확한 깊이 측정이 가능할 것으로 예상되고 있다.

이 방식은 작은 초음파 탐촉자를 이용하며 배관 표면에 최적의 접촉 점을 제공한다. 또한 결합 탐지파형이 실시간으로 스크린에 표시되어 반향의 위치에 대한 정보를 쉽게 얻을 수 있다. 따라서 이 방식은 빠르고 신뢰성 있는 검사를 할 수 있도록 해준다.

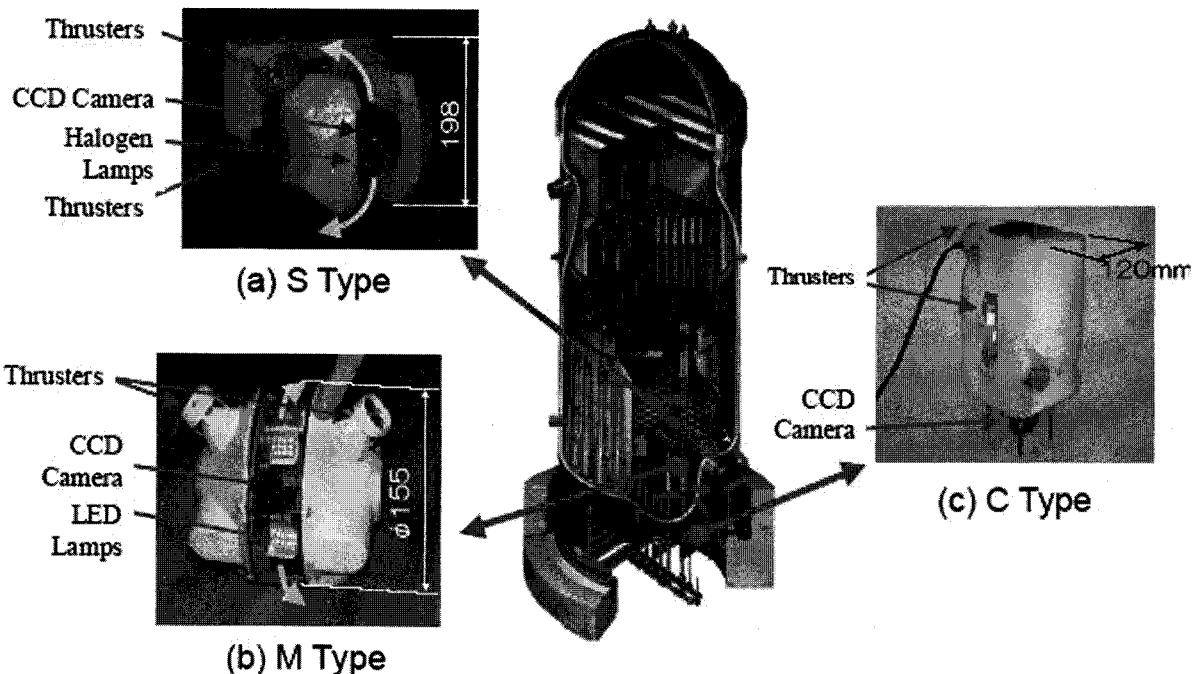
또한 히타치는 노막 표면의 균열의 틈을 탐지하고 크기 측정을 하기 위한 방법으로 와전류 탐상 검사

(ECT: eddy-current testing)의 응용법을 개발하고 있다.

〈그림 1(b)〉은 표본에 인위적으로 주어진 응력 부식 균열(SCC)의 틈의 범위를 ECT의 방식으로 측정하는 법을 나타내고 있다. SCC 균열의 표면 면적을 ECT 센서가 스캔하고 신호는 이미지 처리 기법에 의해 처리되어 SCC와 표본에 주어진 용접 금속의 모양이 뚜렷하게 표시된다.

그림의 원에 둘러싸여 있는 부분에서 살펴 볼 수 있는 바와 같이 액상 침투 탐상(PT) 방식으로는 뚜렷하게 탐지할 수 없는 균열을 나타내는 신호들이 관찰되고 있다.

또한 결점이 관찰될 경우 그 원안을 조사하기 위해서는 금속의 구조와 결함의 특징을 조사해야 한다. 따라서 우리는 결함을 표본화하고



〈그림 2〉 Typical Underwater Inspection Vehicles(ROVs)

그 복제품을 수집하는 기술을 개발해왔다.

수중 복제 기술(underwater replica technology)은 복제 물질을 표본을 추출한 지역에 투입하여 결함을 복제 물질로 이동시키는 것이다.

우리는 복제 물질을 투입하고 원거리로 이동된 결함을 가져오는 수중 복제 표본 장비를 개발하여 이동된 결함이 직접 관찰에 의한 결함과 비슷한 분명한 이미지를 가지고 있음을 시연했다.

결함 표본화를 위한 방법은 방전 가공(EDM: Electro Discharge Machining)으로 결함 수리 방법과 유사하다.

2. 수중 검사 장비(ROV)

원자로 내부 부품의 시각 검사(VT)는 대개 수중에 떠 있는 수중 텔레비전 카메라는 수단을 이용하여 검사관이 실시한다.

추진기(thruster)와 CCD 카메라가 부착되어 있는 원격 작동 무인 잠수함(ROV)이 구조의 수중 원격 검사를 하는 데 사용되어 왔다.

이같은 원자력 발전소용 ROV는 안정된 이미지를 확보하지 못할 뿐만 아니라 카메라 이외의 어떠한 툴(tool)도 없기 때문에 원전의 제한된 검사 업무에만 적용되어 왔다.

히타치는 기존 ROV의 성능을 향상시키기 위하여 제한 구역에 접근 할 수 있을 만큼 소형이며 추가 기

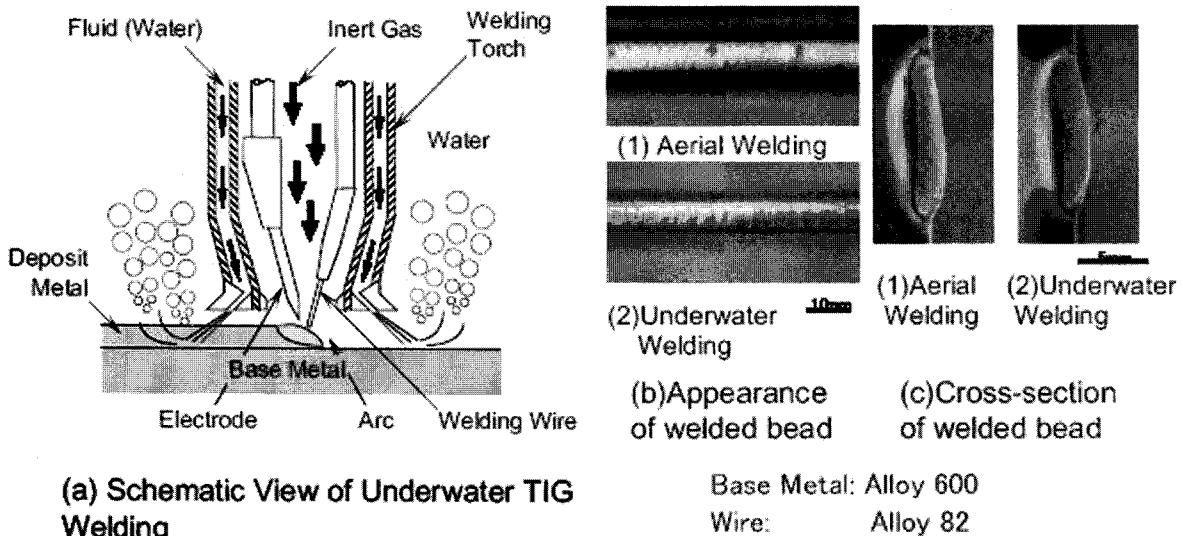
능과 장비를 갖춘 ROV를 개발해왔다. 히타치는 수중에서 비등경수로 주위를 자유로이 움직일 수 있을 만큼 기동성이 있는 시각 검사용(VT) ROV를 개발, 적용해왔다.

그리고 TV에 의해 균열이 발견되었을 경우 균열의 깊이를 초음파 검사(UT)를 통해 측정해야 할 필요가 있기 때문에 소형 초음파 검사용 ROV를 개발했다.

이같은 ROV는 실제 원전에 적용되어 수중 검사를 하는 데 유용하고 효과적이 임증되었다. 〈그림 2〉는 특정 위치와 응용법을 위해 개발된 ROV의 한 예를 보여주고 있다.

가. S형 ROV(표준형)

S형 ROV는 원자로 용기 바닥



〈그림 3〉 Outline of Underwater TIG Welding

(vessel bottom)에 접근하고 leg-형 원자로 압력 용기(RPV)의 노심지지대를 검사할 수 있도록 개발되었다.

원자로 용기 바닥에 접근하기 위해서 ROV는 제거가 불가능하며 용기 바닥까지 ROV가 이동하는 데 있어 가장 폭이 좁은 부분인 톱 가이드(Top Guide)와 코어플레이트(Core Plate)를 지날 수 있도록 소형으로 고안되었다. S형 ROV는 폭 198mm, 높이 198mm, 길이 228mm이다.

동 ROV는 90도까지 경사를 가감 조절할 수 있는 CCD 카메라와 할로겐 램프를 갖추고 있다.

ROV의 몸체는 노란색 부유물(float)에 의해 자연적으로 중립적으로 수면에 뜨게 된다. 네 개의 추진기를 이용해 동 ROV는 전진, 후

진, 상하 좌우 회전이 가능하다. S형 ROV는 네 개의 추진기로 초당 최고 0.6m(0.6m/s)를 이동할 수 있다. ROV를 작동하는 사람은 조이스틱 콘트롤러로 ROV를 원격 조종하게 되며 조이스틱 바를 이용하여 속도 및 방향을 자유로이 조절 할 수 있다.

또한 표준형 ROV는 초음파 검사(UT) 스캐너나 분명한 이미지를 확보하기 위해 ROV를 고정시킬 수 있도록 하는 지지대(support legs) 등 선택 장비를 추가로 장착할 수 있다. S형 ROV는 또한 압력실(suppression chamber)의 수중 페인트벽을 검사하는 데도 사용된다.

나. M형 ROV(소형화 ROV)

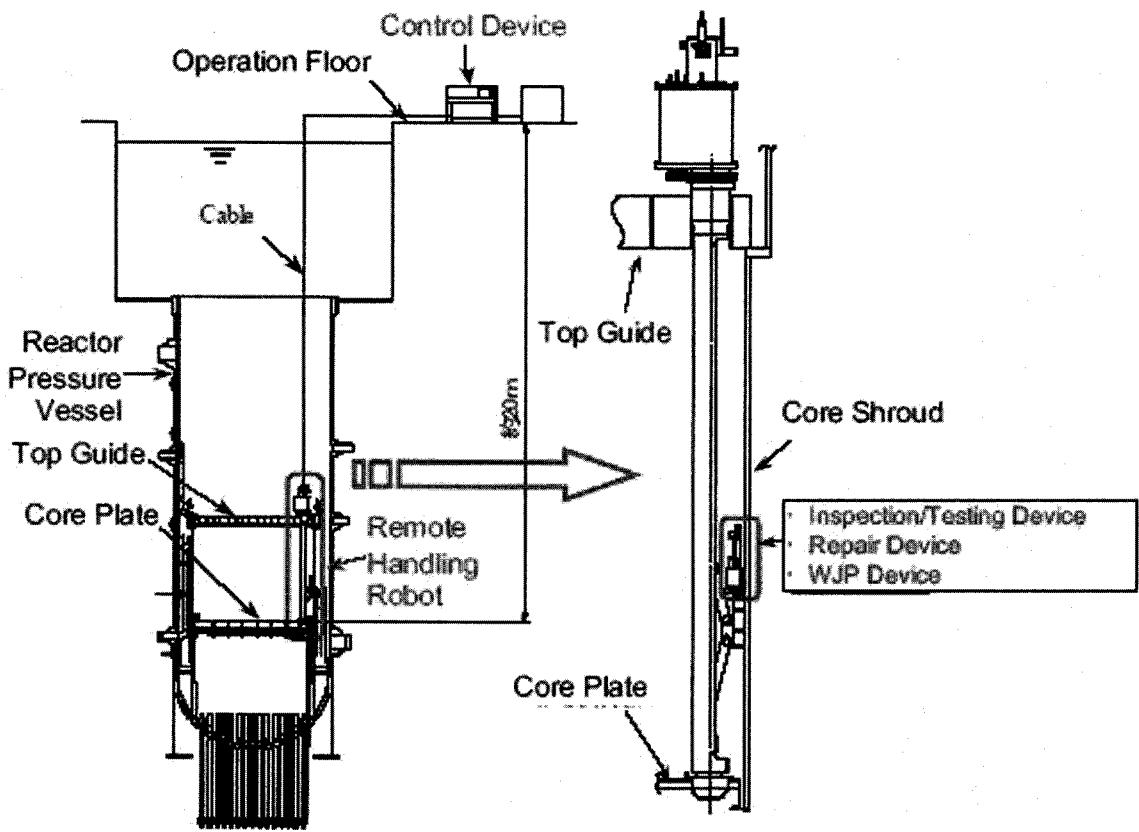
M형 ROV는 Flaw Baffle의 바닥 모서리와 원자로 압력 용기

(RPV) 내벽 사이의 틈 사이를 통해 「비등원자로 2(BWR-2)」의 노심지지대의 아래쪽 측면 접근을 위해 개발되었다.

소형화 ROV는 구 모양으로 생겼으며 직경 155mm로 틈 사이로 지나갈 수 있다. 이 ROV는 부유성을 강화하기 위하여 내관 부품을 이용하고 있는데, 이 부품은 경량의 조건 및 수압에 견디기 위한 충분한 힘을 확보하기 위하여 유리 섬유 강화 플라스틱으로 이루어져있다.

또한 신호선의 수를 줄이기 위하여 다중 송신(multiplex) 회로 시스템을 장착하도록 고안되어 있다. 결과적으로 소형화 ROV의 탱크(umbilical cable)은 현재 직경이 5/9mm에 불과하다.

M형 ROV는 90도까지 경사를 가감 조절할 수 있는 CCD 카메라



〈그림 4〉 Remote Handling Robot for Shroud Inner Surface

와 LED 램프, 및 네 개의 추진기를 갖추고 있어 전진, 후진, 상하 좌우 회전이 가능하다.

다. C형 ROV(원자로 바닥의 제어 봉구동틀(control rod drive housings)용)

C형 ROV는 원자로 바닥을 검사하기 위해 고안되었다. 원자로 바닥에 빼곡히 들어 차 있는 제어봉 구동틀 사이의 좁은 틈 사이로 접근하기 위해서 C형 ROV는 가늘고 폭이 120mm가 되도록 제작되었다.

C형 ROV는 0~ -90도(수평에서 아래쪽까지) 까지의 경사를 조절할 수 있는 CCD 카메라와 360도 상하 좌우 회전 메커니즘(360 pan mechanism), LED 램프 및 여섯 개의 추진기를 갖추고 있어 전진, 후진, 상하 좌우 회전이 가능하다.

보수 기술(repair technology)

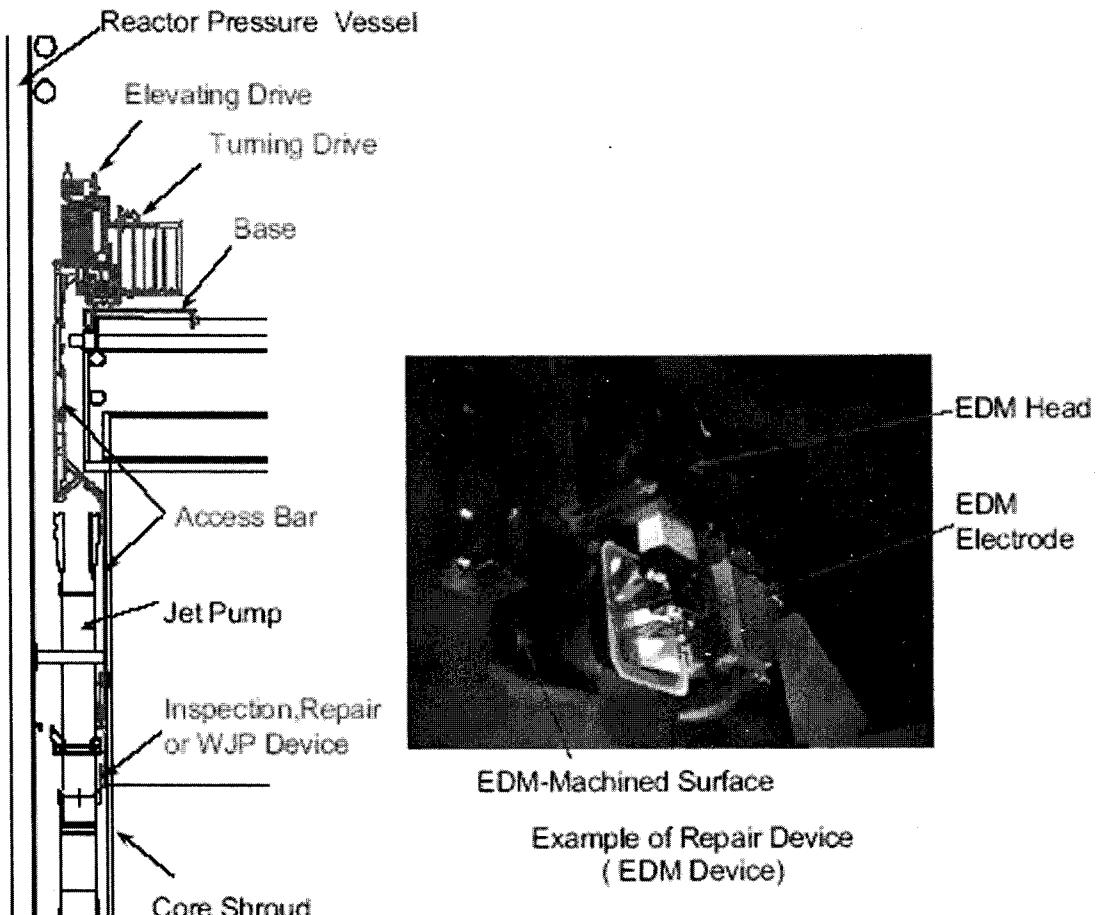
히타치는 노심(shroud)이나 원자로 재부에 균열이 생겼거나 보수

가 필요할 경우를 대비하여 원격 수중 보수 기술을 개발했다.

보수 방법으로는 ① 방전 가공(electric discharge machining)이나 분쇄(grinding) 등의 방법을 이용하여 균열을 완전히 제거하는 방법과 ② 균열을 제거하는 것이 아니라 균열의 확대를 예방하는 밀폐 용접(seal welding) 방법이 있다.

1. 균열 제거 방법

방전 가공법(EDM)은 순수(純水)



〈그림 5〉 Remote Handling Robot for Shroud Outer Surface

에서 전극과 보수될 장비 사이에 방전을 이용하는 표면 처리법이다.

이 방법은 어떠한 기계적 힘도 보수 장비에 영향을 미치지 않으며, 적절한 전극 모양을 선택함으로써 복잡한 부분의 균열이 제거될 수 있다는 특징을 가지고 있다.

분쇄법은 접근 장비에 설치된 회전 수돌(grindstone)을 회전시킴으로써 기계적으로 균열을 제거하는 방법이다. 이 방법은 수중 분쇄

로 가공 곡면(machined surface)의 잔재 응력이 압축 응력으로 변화하는 이점이 있다.

2. 균열 밀폐 용접법 (Crack Seal Welding)

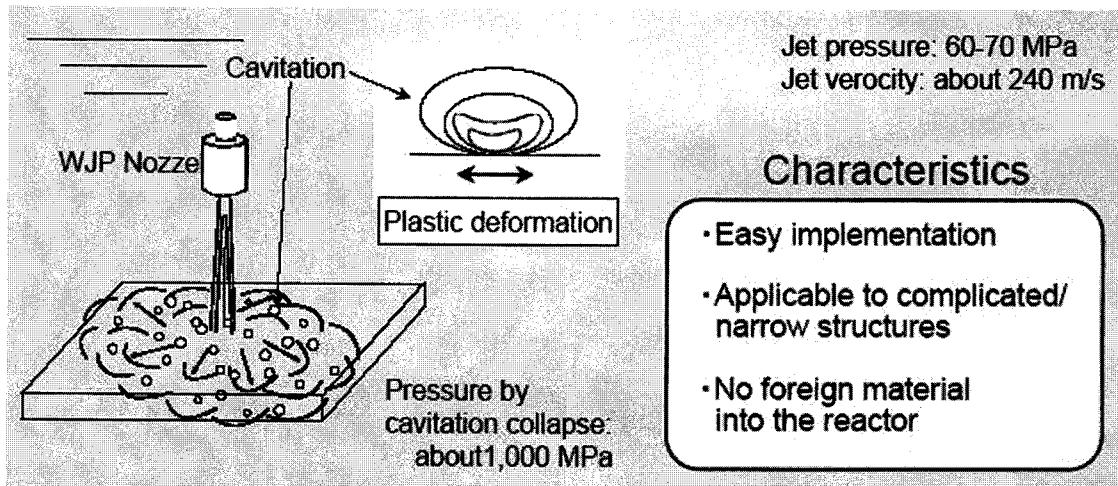
균열 밀폐 용접법은 균열 확대 방지를 위해 SCC 균열을 원자로수 환경에서 분리시키는 것을 목적으로 하는 보수 방법이다.

이 과정에서 균열은 제거되는 것

이 아니라 용접에 의해 클래딩(cladding)으로 밀폐되는 것이다.

이 방법은 노막이나 기타 수중 구조물의 균열 부분 주위에 국지적 기체상 공간(gas phase space)을 형성하고 이 기체상 공간에 용접을 실시하는 것이다.

용접 과정은 폭넓게 사용되는 TIG 용접으로 비교적 광범위한 용접 조건에 고품질의 안정적 용접을 실행할 수 있어 균열 부분을 매우



〈그림 6〉 Principle and Characteristics of WJP

신뢰성 있게 밀폐 용접할 수 있다.

〈그림 3〉은 수중 TIG 용접으로 처리되는 용접 비드의 외부 모습과 단면도를 나타내고 있다. 〈그림 3〉은 이 방법이 수중에서도 만족스러운 용접 결과가 나올 수 있음을 보여주고 있다.

검사 및 보수를 위한 원격 조종 로봇

원자로 내부는 폭이 좁고 비교적 접근이 불가능하기 때문에 우리는 원자로 내부를 검사하기 위한 다양한 원격 조종 로봇을 개발하고 있다.

검사를 통해 결함이 발견될 경우 세부 조사 및 보수 작업과 비슷한 결합의 재발을 방지하기 위한 예방 조치들이 필요하게 될 것이다.

이와 같은 이유로 히타치는 장비 합리화와 과정 최적화를 위해 ① 검

사 장치(초음파 검사(UT), 와전류식 시험 방법(ECT), 복사 표본 추출법(replica sampling) 등), ② 보수 장비(분쇄, 방전 가공(EDM), 용접기 등), ③ 예방 유지 보수 장비(물 분사 피닝(water jet peening)) 등을 원격 조종 로봇에 부착하는 여러가지 장비를 개발하고 있다.

원격 조종 로봇은 작동층에서 20~30m 아래의 수중에서 목표지점에 원하는 장비를 위치시킬 수 있다.

1. 노막 내부를 위한 원격 조종 로봇

〈그림 4〉는 노막 내부를 위해 고안된 전형적인 원격 조종 로봇을 보여주고 있다. 원격 조종 로봇은 작동층(operation floor)로부터 원자로로 설치되거나 코어 플레이트

(Core Plate)나 제어봉 구동틀(Control Rod Driving Housing)에 안착되도록 고안되어 있다.

로봇의 메커니즘은 스윙, 원격 조종 로봇 안에 설치된 각 장비들이 위 아래로 움직이기, 뺏고 굽히기, 흔들기 등의 로봇의 다양한 동작을 통해 목표 지점에 접근하는 방식을 취한다.

2. 노막 외부를 위한 원격 조종 로봇

〈그림 5〉는 노막 외부를 위해 고안된 전형적인 원격 조종 로봇을 보여주고 있다. 원격 조종 로봇은 끝 부분에 설치되어 있는 각 검사 보수 장비가 노막 맨 윗 부분에 설치되어 있는 구동 및 접근 바(bar)를 통해 노막 외부의 목표 지점에 접근할 수 있도록 고안되어 있다.

로봇 끝 부분에 설치되어 있는 장

치들은 제트 펌프나 기타 장비를 간접하지 않고 보수가 필요한 목표 지점만큼 가까이 접근해야 한다. 따라서 이같은 장치들은 가능하게 고안되어 있다.

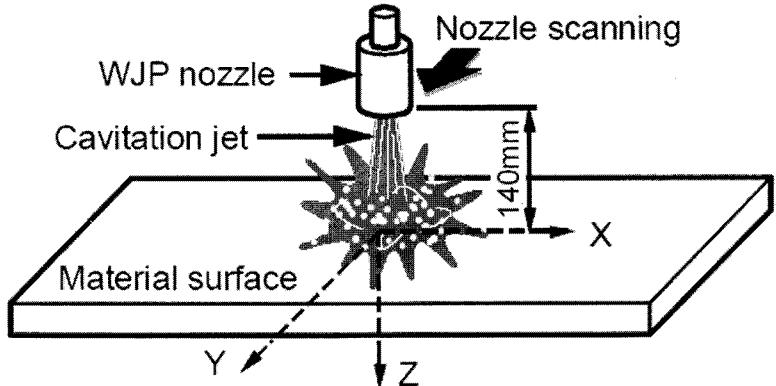
예방 유지 보수 기술: 물분사 피닝 (Water Jet Peening)

장기적인 예방 유지 보수 계획은 경제적인 원전 수명 관리에 있어 중요한 주제이다. 원자로 내부 부품에 있어 재질 노쇠화(degradation) 완화 기술의 응용은 원전 수명 관리의 핵심적인 이슈다.

응력 부식 균열(SCC)은 비동원자로의 원자로 내부 부품에 발생하는 노쇠화 메커니즘 중 하나이다. 응력 부식 균열은 재질 요소, 응력 요소, 환경적 요소가 서로 겹칠 때 발생한다고 알려져 있다. 이같은 요소로부터 벗어나기 위해 SCC 완화 기술이 개발되어 왔다.

노심막(core shroud)은 용접 부분 중 열에 영향을 받는 부분에서 응력 부식 균열 현상이 발생하고 있다. 따라서 용접선에 예방적 유지 보수 기술을 적용하는 것이 중요하다.

히타치는 10년 이상 인장 응력에서 압축 응력에 이르기까지 용접이나 기계 가공에 의해 생성된 표면 잔재 응력을 만드는 물분사 피닝(WJP: water jet peening) 기술



〈그림 7〉 Method of WJP

을 개발해왔다.

1. 원리와 특징

〈그림 6〉은 WJP에 의한 잔재 응력 향상의 도식적인 메커니즘을 나타내고 있다. 캐비테이션 (cavitation: 작은 기포 모양의 기포 공간) 거품은 최소 직경으로 감소되면 붕괴되는데, 붕괴 압력(collapse pressure)이 1000Mpa에 달하며 압력의 전파 속도가 음속을 초과한다고 한다.

극도로 높은 속력으로 물분사를 하게 될 경우 수많은 캐비테이션 거품과 함께 난류가 발생하여 충돌된 표면에서 붕괴되어 재질 표면에 고충격 압력을 발생시킨다.

높은 압력으로 금속 표면이 수평 방향으로 늘어나게 되며, 늘어난 부분을 둘러싸고 있는 탄성 구속(elastic constraint)에 의해 압축 잔재 응력이 생성된다.

캐비테이션 거품의 크기는 매우 작으므로 압축 잔재 응력은 물질의 표면 아래에서 형성된다.

WJP 기술은 다음과 같은 이점이 있다.

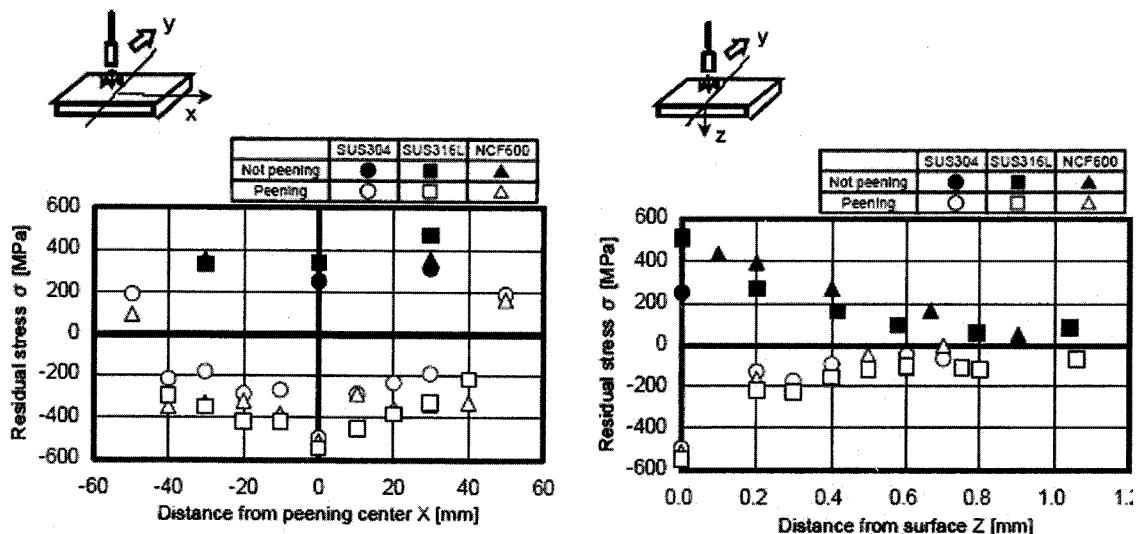
- ① 물만 사용하므로 어떠한 외래 물질도 원자로 내부로 들어올 수 없음.
- ② 외래 물질이 축적될 필요가 없으므로 방사선 구역의 업무 수행에 도움을 줌.

- ③ 투입 거리, 투입 각도 및 기타 균무 조건 등 광범위한 매개 변수에서 효율적이므로 폭이 좁고 복잡한 구조에 응용이 가능함.

- ④ 반력(reaction force)이 작으므로 시스템/장비에서 경량이며 사용이 간편하고 실제 원전에서 응용 시간이 짧음.

2. 잔재 응력 향상

표면과 시험용 플레이트의 표면



〈그림 8〉 Improvement of residual stress by WJP

아래의 잔재 응력을 측정한 결과는 다음과 같다.

길이 140mm, 폭 40mm, 두께 10mm이며 304개의 스테인리스강 316L S/S 및 니켈 계통 600 합금 등 원자로 내부 구조물에 사용되는 주된 구조물 물질로 이루어진 시험 용 플레이트가 준비되어 있다.

〈그림 7〉과 같이 WJP 노즐을 일정 시간 동안 140mm의 거리에서 테스트 피스(test piece) 위에서 스캔을 한 후 잔재 응력을 측정했다.

〈그림 8〉의 (a)와 (b)는 측정된 테스트 피스의 잔재 장력을 나타낸다. 〈그림 8〉의 (a)는 노즐 스캔 방향의 수직 방향(X 방향)의 표면 잔재 응력의 분포를 나타내며, 〈그림 8〉의 (b)는 노즐 스캔 중심의 플레이트 두께(Z 방향)에서의 표면 잔재 응력의 분포를 나타낸다.

플레이트 두께의 잔재 응력은 전

해 연마(electrolytic polishing)의 방법으로 원하는 깊이까지 표면층을 제거함으로써 측정되는 값을 나타낸다.

한편 비교값은 WJP 기법을 사용하지 않은 표면 잔재 응력의 분포와 플레이트 두께에서의 잔재 응력의 분포값을 나타낸다.

〈그림 8(a)〉은 강력한 표면 분쇄로 인해 생성된 테스트 피스 표면의 인장 잔재 응력(300~450 MPa)이 WJP의 노즐 스캔선의 $\pm 40\text{mm}$ 범위내에서 -200MPa 까지의 압축 잔재 응력으로 변화하는 것을 보여주고 있다.

〈표 8(b)〉은 WJP 기법을 사용한 후 잔재 응력이 깊이 1mm까지 압축 응력으로 변화하는 과정을 보여주고 있다. WJP 기법을 사용하지 않은 부분에서 측정된 잔재 응력 수치와 비교하여 볼 때 잔재 응력이

향상된 깊이는 1mm라고 추정할 수 있다.

테스트 피스 표면의 잔재 응력이 향상된 폭과 플레이트 두께에서의 잔재 응력이 향상된 깊이는 304 S/S, 316L S/S, 합금 600 등에서 재질간의 커다란 차이 없이 모두 비슷한 경향을 보였다.

3. 응력 부식 균열(SCC)에 대한 저항성 강화

WJP가 SCC에 대한 저항성 강화에 미치는 영향을 테스트하고 평가하기 위하여 304 S/S 테스트 피스에 끓는 염화 마그네슘 용액을 사용했다.

표면 분쇄에 의해 생겨난 인장 잔재 응력이 있는 테스트 피스의 절반에 WJP 기법을 취하고 24시간 동안 끓는 염화 마그네슘 용액에 담구어 놓았다.

〈그림 9〉는 SCC 검사 후 테스트 피스에 투과 시험을 한 결과를 보여 준다. WJP 기법을 사용한 테스트 피스에는 입계 균열(intergranular crack)이 관찰되지 않은 반면, WJP 기법을 사용하지 않은 부분에는 균열이 발견되었다.

실험 결과에 따르면, WJP가 SCC의 발생을 예방하는 데 유용하다는 것을 보여주고 있다.

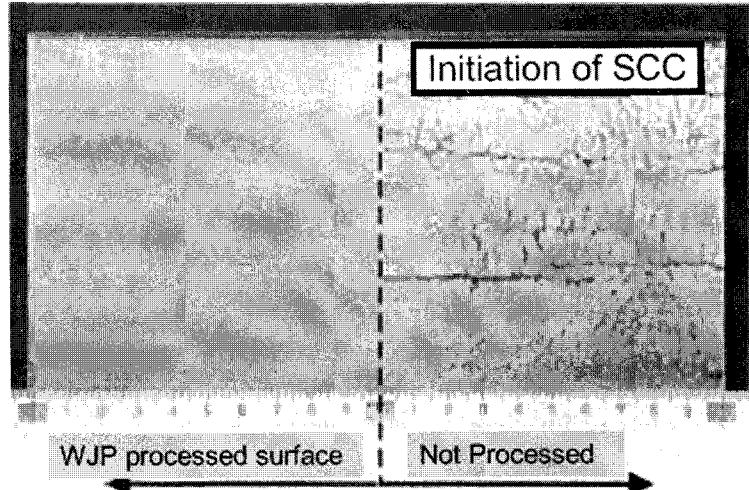
4. 원자로 부품에의 응용

원자로 내부 구조물은 모양이 복잡하고 수많은 비좁은 부분을 포함하고 있다. 원자로 내부 구조물에 WJP 기법을 적용하기 위해서는 모양이 복잡하고 비좁은 공간에 있는 용접물에 응용할 수 있는 투입 기술을 개발할 필요가 있다.

WJP를 원자로 내부 구조물에 적용할 수 있는 기술의 개발 결과로는 다음과 같은 전형적인 예를 들 수 있다.

가. 반사 분사기(reflected jet)의 적용

WJP 내부에서 캐비테이션 거품의 붕괴는 상당한 난류 속에서 발생한다. 결과적으로 분사기가 사선으로 적용되는 경우라 할지라도 워크피스(workpiece) 표면에 수직으로 붕괴하는 수많은 캐비테이션 거품이 발생하게 되어 압축 잔재 응력 생성의 투입 각 의존도가 낮게 형성된다.



〈그림 9〉 Result of Penetration Testing After SCC Testing

이러한 이유로 워크피스 표면과 WJP의 육안으로 보이는 분사기의 충돌 각도는 반드시 수직일 필요가 없다.

워크피스 표면과의 충돌 후에는 워크피스의 벽을 따라 흘러가는 분사기 내에서의 캐비테이션 거품의 붕괴로 인해 압축 잔재 응력이 발생할 수도 있다.

〈그림 10〉은 필렛 용접(fillet weld)을 시뮬레이션한 테스트 피스에서 WJP를 실시한 결과를 보여준다.

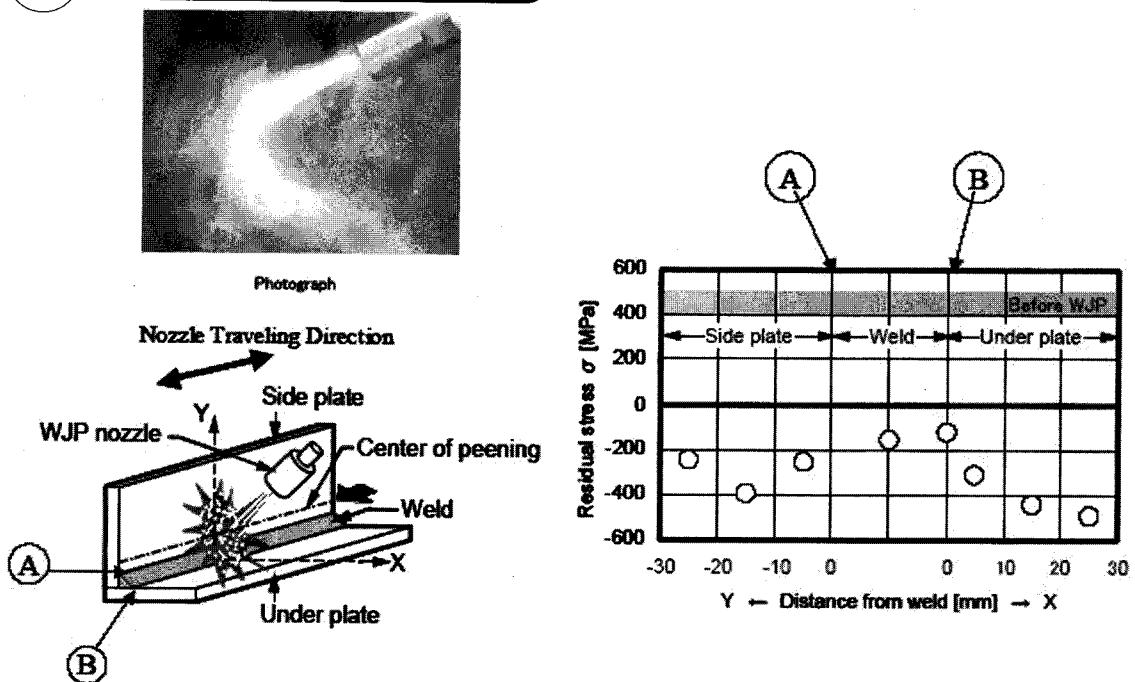
〈그림 10〉의 도식이 보여주는 바와 같이 용접 금속 경계선 근처의 측면 플레이트에 사선으로 적용된 분사기와 충돌 후 바닥 플레이트에 위치한 감싸는 타입의 랩 어라운드 형 분사기(wrap-around)가 측면

과 바닥의 플레이트를 동시에 처리하고 있다(반사 분사기로 알려짐).

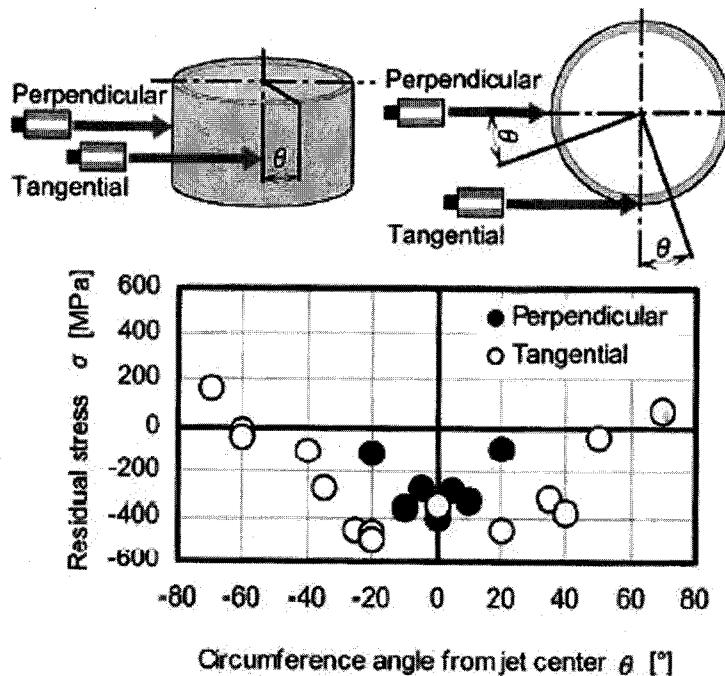
〈그림 10〉에 따르면 바닥 플레이트의 잔재 응력이 -300MPa 이상 압축 응력이며 측면 플레이트의 잔재 응력과 동일한 값을 나타내고 있다. 따라서 반사 분사기는 필렛 용접상의 WJP를 효율적으로 실시하는데 사용될 수 있다.

나. 랩 어라운드형 분사기(대직경 배관 외부의 경우)의 적용
실린더 바깥에 접하는 방향으로 향해 있는 투입 분사기는 실린더의 원주를 감싸게 된다. 이 같은 감싸는 유형의 분사기는 배관의 외부에 WJP를 효율적으로 실시하는 데 사용될 수 있다.

〈그림 11〉은 반경에 수직으로 향한 노즐과 접선 방향을 향한 노즐을



〈그림 10〉 Application of WJP on fillet weld



〈그림 11〉 Application of WJP on Pipe Outside Surface

이용하여 300mm 직경의 배관 외부 표면에 WJP 기법을 사용한 결과를 보여주고 있다.

수직 투입을 할 경우 투입 중심부근에 실효 폭이 약 ± 20 도 향상된 -400MPa의 잔재 장력이 생성된다. 반면, 접선 투입의 경우에는 WJP 기법이 실행된 중심으로부터 ± 40 도의 범위에서 압축 잔재 응력이 생성되어 실효 향상 부분이 두 배도 증가하는 결과를 초래한다.

이는 랩 어라운드형 분사기를 사용하여 실효가 있는 향상 부분이 확대된 결과이다. 따라서 직경이 큰 배관의 외부 표면에 WJP 기법을 사용할 경우 접선 투입이 효과적이다.

다. 반사 분사기 노즐의 적용(소직경 배관 내부의 경우)

In-Core Monitor Guide Tube 와 기타 소직경 배관의 내부를 위한 효과적인 방법은 <그림 12>와 같이 유체 흐름 방해판(flow-baffle)이 장착된 특수 제작된 노즐을 배관에 삽입함으로써 반사 분사기를 사용하는 법이 있다.

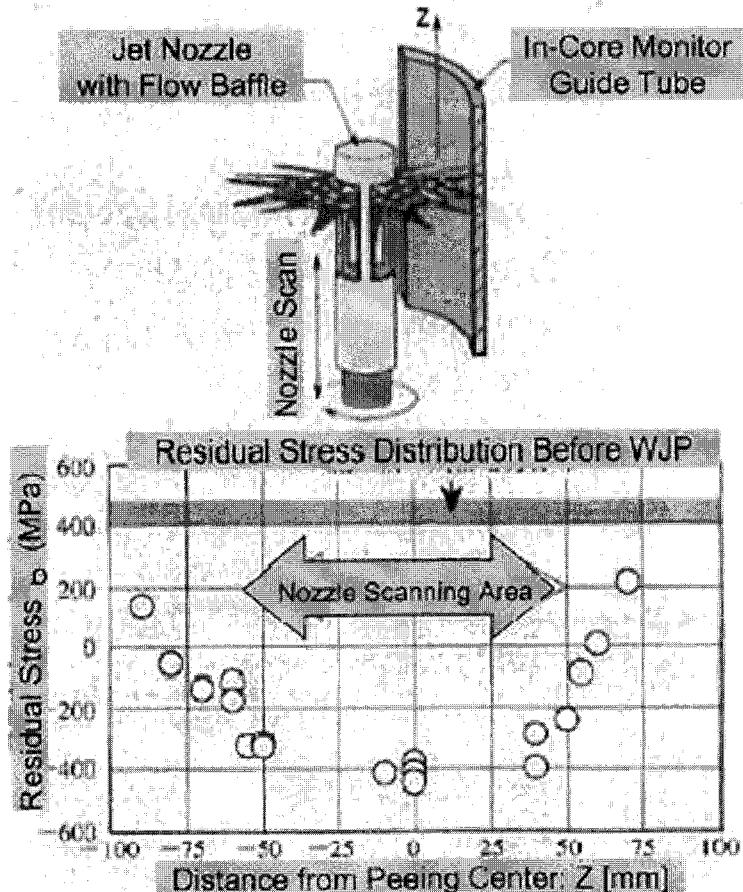
노즐로부터 삽입된 주분사기는 투입 구의 반대편에 마련된 flow-baffle에 의해 반사되고 반사된 분사는 배관 내부에서 방사형으로 충돌한다.

이 노즐을 flow-baffle로 축 모양으로 스캐닝하면 스캐닝의 범위에서 잔재 응력을 약 -300MPa의 압축 응력으로 변환시킬 수 있다.

WJP는 목표 지점의 잔재 응력을 향상시킴으로써 SCC의 저항력을 강화하는 기술이다. WJP를 원자로의 다양한 목표 지점에 적용하기 위하여 히타치는 주분사기뿐만 아니라 반사 분사기, 랩 어라운드형 분사기 등을 이용한 응용 기술을 개발해왔다. 이 기술은 이미 비등원자로(BWR)와 가압수형 원자로(PWR)에 일부 적용된 바 있으며, 더 폭넓은 응용을 할 수 있을 것으로 예상되고 있다.

결여

노후화 원전의 수가 증가함에 따



<그림 12> Effect of WJP on Inner Surface of Small Diameter Piping

라 원자로 내부 구조물과 주루프 배관(PLR: Primary Loop Piping)의 응력 부식 균열(SCC)이 최근 상당한 노쇠화 메커니즘의 원인으로 지목되어 왔다.

이에 대한 대안의 기술로서 ① 균열의 깊이를 정확히 측정하는 강화된 초음파 검사(UT) 방법 등 검사 기술, ② 결함을 제거하거나 결함

확대 방지를 위한 밀폐 용접 등의 보수 기술, ③ 잔재 응력 향상을 위한 WJP 기법 등 예방 유지 보수 기술 등을 제시했다.

유지 보수 기술의 중요성은 더욱 증대될 것으로 예상되고 있으므로 히타치는 향후 더 많은 기술 진보라는 도전 과제를 성공적으로 해결해 나갈 것이다. ☺