

신규건설 / 운영 중 발전소 설비 및 도입부재 의 건전성 평가를 위한 계장화압입기술 도입 및 장비제안

Prepared by



<본사> 서울시 금천구 가산동 481-4 벽산디지털밸리6차 407호
<부설연구소> 서울시 관악구 신림동 서울대학교 신소재공동연구소 313호

Sales: sales@frontics.com / Info: info@frontics.com
TEL: 82-2-884-8025 / FAX: 82-2-875-8018

2012. 4

목차

1.개요	3
2. 계장화 압입시험법	4
(1) 국부적인 부위의 물성 평가	4
(2) 가동중 기기에 대한 시험 가능 - 비파괴 시험	6
(3) 가동중 기기에 대한 시험 가능 - 비파괴 시험	6
(4) 압입 시험 장비	8
(5) 시험 장비의 신뢰성	8
3. 잔존 수명 평가	10
4. 시험법 도입 필요성 및 파급 효과.....	12
(1) 안전성.....	12
(2) 경제성.....	13
5. 계장화 압입 시험법의 절차.....	16
6. 적용 사례.....	20

신규건설/운영중 발전설비 및 도입부재의 건전성평가를 위한 계장화압입기술 도입 및 장비제안

본 자료는 (주)프론틱스의 압입 기술과 제품 사항, 적용 분야에 대하여 기술한 자료입니다.

1. 개요

화력발전소나 석유화학 플랜트의 증기 파이프 등의 설비는 고온, 고압에서 장시간에 걸쳐 가동할 수 있도록 설계되는데, 가동 환경의 특성상 부식 등에 의한 두께 감소나, 용접 및 후열처리 공정에 의해 발생하는 균열, 설비 운용 중의 크리프, 피로 와 같은 미세 손상의 축정에 따라 균열의 발생 및 전파, 재질의 열화와 같은 손상을 입게 된다. 두께 감소나 균열은 육안검사나 초음파 시험 등을 통하여 정량적으로 확인할 수 있다. 하지만, 현장에서 소재의 항복 및 인장강도 등의 기계적 특성을 비파괴적으로 측정하는 것은 실질적으로 불가능한 실정이다. 이러한 한계로 인하여 레프리카, 전기저항 시험, 전기 화학적 분석 시험과 데이터베이스를 통하여 물성 변화를 추정하고 있다. 그러나 이러한 방법은 경험적인 평가에 의존한다는 단점이 있으며, 결과 값의 추정으로 인한 오차가 크게 발생하고 있다. 따라서 비파괴적으로 기계적 물성을 측정하고 이로부터 열화를 정량화 하는 기법의 개발이 시급하다. 이러한 요구에 따라 현장에서 평가할 수 있는 방법으로 최근 압입 하중-깊이 곡선을 이용하여 재료 물성 및 잔류응력, 파괴인성을 얻을 수 있는 계장화 압입 시험법 (Instrumented indentation test)이 부각되고 있다.

계장화 압입 시험법은 현장에서 직접적인 평가가 가능하게 되어, 발생 결함의 사용 적합성 평가에 필요한 평가 시점의 현장 물성을 제시할 수 있게 되었으며 역학적 안정성 해석에 기초 자료를 제공할 수 있게 되었고, 규격과 직접적인 비를 통하여 만족 여부를 현장에서 판단할 수 있게 되었다. 또한, 이러한 결과를 통하여 평가 대상의 잔여수명을 예측할 수 있다.



2. 계장화 압입시험법 (Instrumented Indentation Technique: IIT)

계장화 압입시험은 재료에 가해지는 압입 하중에 따른 압입 깊이를 연속적으로 측정하여 압입하중-변위곡선을 얻고, 이를 분석하여 대상 재료의 기계적 특성을 평가하는 기법이다. 기존의 경도시험과 유사하지만 직접 압흔의 크기를 측정하지 않는다는 차이점과 기존의 경도값 외에 탄성계수, 유동특성, 파괴인성 그리고 잔류응력등 다양한 재료 고유의 물성을 얻을 수 있는 장점이 있다. 또한 최대 수백 마이크로미터 이내의 미세 영역을 평가하므로 용접부와 같은 국부적인 물성변화가 존재하는 재료에 대해서도 그 변화 양상을 평가할 수 있고, 시험 위치에는 미세한 흔적을 남기기 때문에 비파괴적인 시험법이기도 하다. 이에 시험을 위한 표준 시편 채취가 필요 없어 운용중이거나 완료된 구조물에 직접 적용할 수 있는 큰 장점을 가지고 있다.

(1) 국부적인 부위의 물성 평가

압입시험법의 시험 평가 범위는 압입시험부위의 최대 10배 범위에 해당하고 있다. 즉, 압입으로 남은 흔적의 크기가 150um이라면 주위 1.5mm 범위의 물성을 평가할 수 있는 것이다. 이것을 이용하면 용접부 전체의 물성 평가가 아닌 용접부 / 열영향부 / 모재부로 구분하고 이를 또 시험 간격으로 세분화하여 시험이 가능하다. 이러한 점은 기존의 용접부 인장 시험법의 부족한 부분을 보충할 수 있는 특징을 가지고 있다.

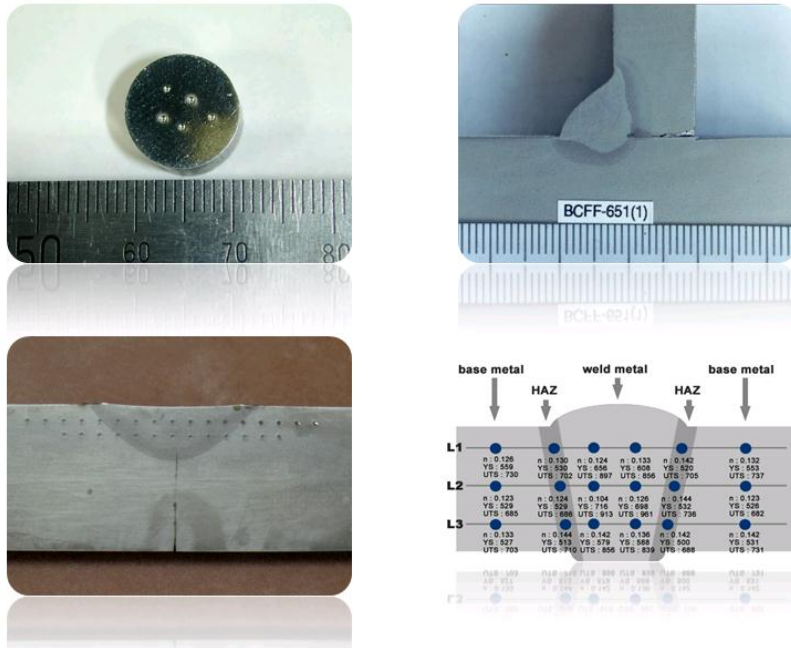


그림 1. 국부적인 물성평가 적용 사례

▶ 용접부 인장시험 방법 (All weld tensile test)

용접부에 대한 인장시험을 위해서는 용접부를 포함하거나 용접부로 구성되어있는 시편을 제작하여야 한다. 이러한 인장시험법을 All weld tensile test라고 하며, 이것은 ASTM A370, ASTM E8, ASTM B557에 의하여 시험 방법이 규정되어 있다. 하지만, 이 시험 방법의 단점은 용접부를 포함하여 가장 약한 부위(일반적인 부위로는 열영향부)에서 파괴가 일어나고 이곳의 강도만 획득할 수 있다. 하지만, 용접부의 강도가 모재부보다 작게 나타나더라도 인장시험에서는 확인이 힘들다. 또한, 용접을 행한 곳의 두께가 얇거나, 곡률이 커서 인장시험편을 제작하지 못하는 경우도 있다.

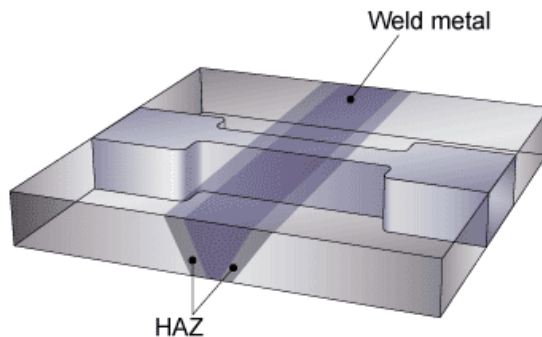


그림 2. All weld tensile testing 시편 제작 방법

이러한 문제점을 확인할 수 있는 방법으로 압입시험법을 이용한 인장물성 시험을 실시하면 용접부 및 열영향부, 모재부에 이르는 물성평가와 아울러 물성의 변화도 확인이 가능하다. 또한, 인장시험편 및 파괴시험편 제작이 힘든 세관에 대한 시험도 적용이 가능한 특징을 가지고 있다.

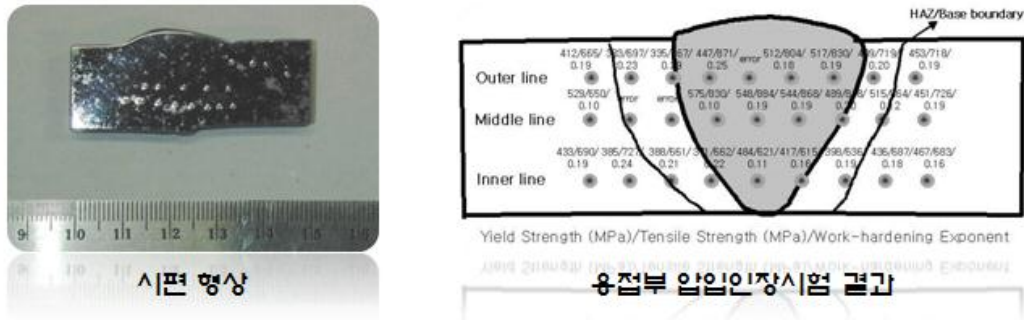
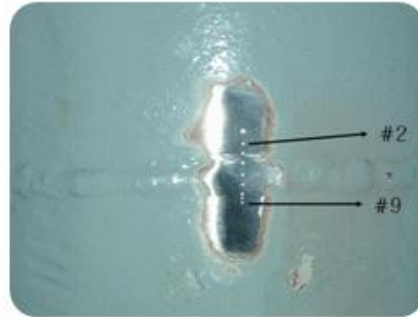


그림 3. 적용 예#1 용접부 강도변화 관찰



시험 대상



시험 부위

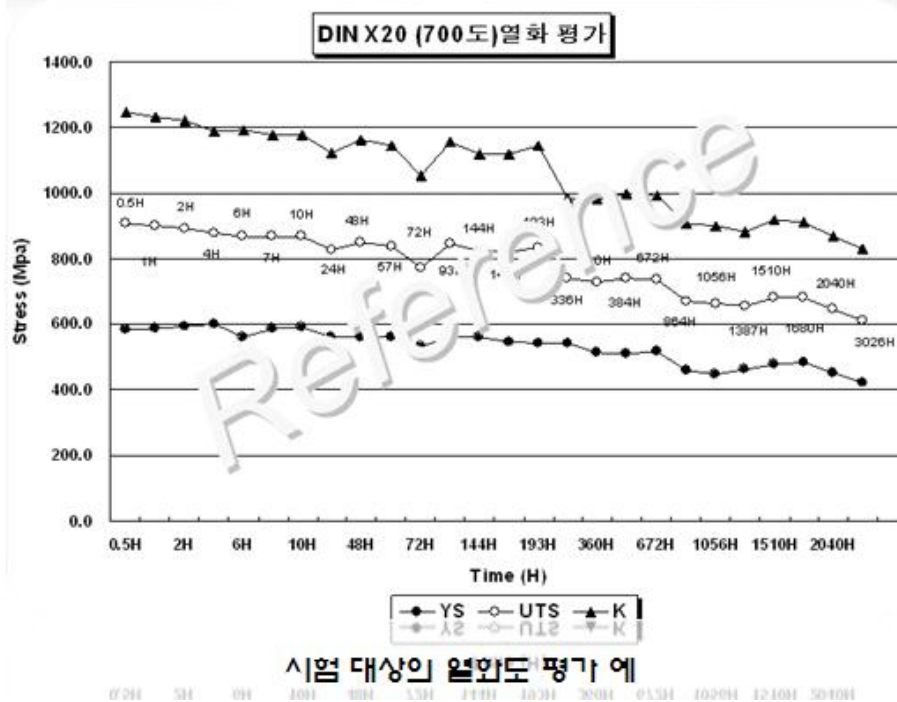


그림 4. 적용 예#2 원자력발전소 보조냉각수 계통 배관 용접부 물성 평가

(2) 가동중 기기에 대한 시험 가능 - 비파괴 시험

현재 설치되었거나 가동중인 대상에 대한 물성평가 방법은 없다. 대상의 파괴 없이는 시험이 어려운 상황이기에 간이적인 방법으로 경도시험을 통한 결과값의 유추하거나, 레프리 카를 통한 조직 분석으로 통하여 열화도평가를 진행하는 방식으로 진행하고 있다. 이 시험 방법은 많은 문제점을 가지고 있기에 1차적인 확인으로만 이용되고 있다.

설치 후, 시간/온도에 의해 재료의 물성은 변화가 나타나며 이로 인하여 문제가 발생되기도 한다. 압입시험법을 적용하면, 설치되거나 가동중인 대상에 대한 물성평가가 가능하다. 대상에 손상을 주지않고 직접적인 기계시험법을 통하여 물성값을 얻을 수 있어, 이를 통하여 시험 대상의 사용가능여부도 판단과 앞서 말한 1차 평가 수단으로도 이용이 가능하다.

(3) 용접부 잔류응력 평가

용접부 손상의 원인 중 한가지로 용접부의 잔류응력이 있다. 기존의 시험 방법으로 용접부의 잔류응력을 측정하기 위해서는 많은 시간이 소요되며, 시험을 하기 위한 준비 단계가 많아 직접적인 적용이 어려운 상태이다. 현재 이러한 잔류응력을 제거하기 위해서는 단지 용접 전후 열처리 조건에 의존하고 있지만, 이러한 조건으로 모든 잔류응력 현상을 제거하기는 힘들다. 주변 환경이나 재료 생산에 의해 나타나는 잔류응력 등의 영향으로 인하여 실제 존재하는 잔류응력 값은 다르게 나타날 수 있기 때문이다.

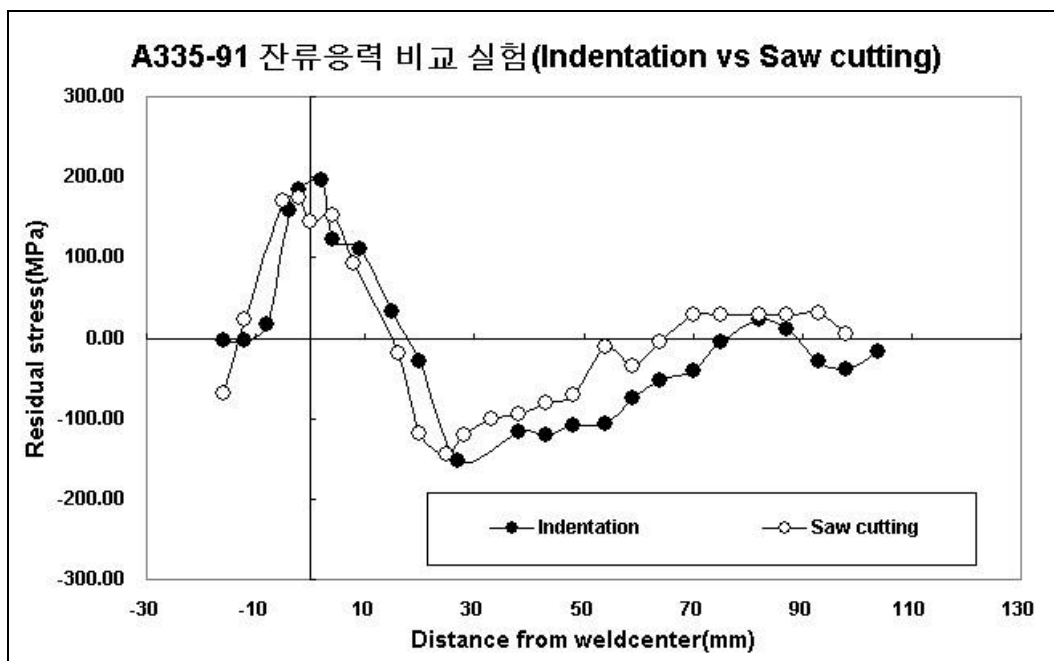


그림 5. A335-91 잔류응력 비교 실험 (Indentation vs Saw-cutting)

압입시험을 이용한 잔류응력 측정은 이러한 문제점을 해결할 수 있다. 열처리를 실시한 후에 이를 검사하여 잔류응력의 측정이 가능하며, 이를 설비 설치뿐 아니라 설비 가동 중에도 검사가 가능하여 손상진단의 또 다른 방법으로 이용이 가능하다. 이 시험법은 한 부분에 대한 잔류응력과 함께 용접부등 전체의 잔류응력 분포를 확인할 수 있는 큰 특징을 가지고 있다.

위 두 가지 시험법(인장물성 측정/잔류응력 평가)을 동시에 적용하게 되면 대상의 설치 및 가동 중 검사에서 기존에 행하지 못하였던 물성평가, 잔류응력 평가를 수행할 수 있다.

(4) 압입 시험 장비

계장화 압입 시험법을 적용한 장비는 크게 2가지로 나누어져 있다. 인장물성을 평가하는 AIS2100과 잔류응력을 평가하는 AIS3000이며 그 특징은 다음과 같다.

① AIS2100 – 계장화 압입형 인장물성 측정 장비

AIS2100 (Advanced Indentation System 2100)은 비파괴적인 방법으로 재료의 물성을 측정하는 압입형 인장 물성 측정 장비이다.

AIS2100은 실험실과 산업현장에서 모두 사용가능 하도록 설계되었으며 가볍고 작은 크기로 휴대가 가능하며 동시에 측정의 정밀성도 보장한다. AIS2100은 연속적으로 가해지는 하중에 대한 변위값을 실시간으로 측정하고 이렇게 얻어진 압입하중-변위곡선을 분석컴퓨터에 설치된 AIS2100 S/W를 통하여 현장에서 즉시 다양한 물성을 평가할 수 있다. 또한 현장에서 빠르고 간편하게 실험할 수 있도록 본체를 경량화 하였으며 강력한 부착도구를 이용하여 다양한 형상의 대상을 실험 할 수 있다.

② AIS3000 – 계장화 압입형 잔류응력 평가 장비

AIS3000 (Advanced Indentation System 3000)은 비파괴적인 방법으로 잔류응력을 측정하는 압입형 잔류응력 측정 장비이다. 잔류응력의 유무에 따른 압입하중-변위곡선의 차이를 비교함으로써 재료 내 잔류응력을 정량적으로 결정하는 측정원리에 기반하여, 기존의 다른 방식에 비해 재현성 있고 보다 정확한 값의 측정이 가능하며, 단지 200 μ m 미만의 깊이를 압입하기 때문에 시험 재료에 손상을 가하지 않고 잔류응력을 측정할 수 있다.

AIS3000은 현장에서 구조물과 시설물의 잔류응력 측정에 용이한 장비이다. 특히 시험 직후 즉시 결과를 확인할 수 있으며, 현장에서 빠르고 간편한 실험을 위하여 기기와 컴퓨터간의 무선 통신 모듈을 채택하였다. 전원 공급이 어려운 상황에서 실험이 가능하도록 경량화된 휴대용 배터리 사용이 가능하다.

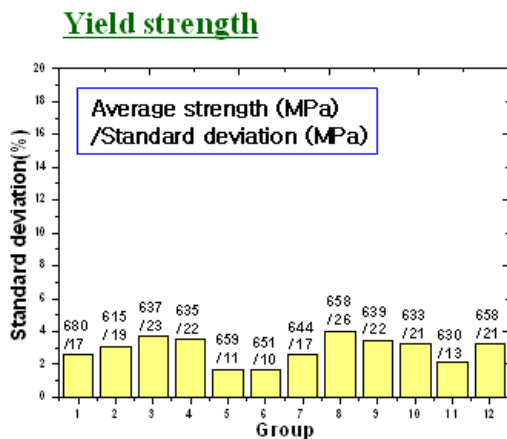
(5) 시험 장비의 신뢰성

시험 장비는 현재 국내뿐 아니라 ISO, ASTM, ASME를 통하여 국제 표준에 적용하기 위하여 위원회가 진행 중에 있다. 특히, ISO의 경우 장비의 신뢰도 평가의 한 항목인 RRT 시험을 수행하여 이 결과에 대한 신뢰도를 인정받아, 현재 ISO/TR 29381로 2008에 publish될 예정이다.

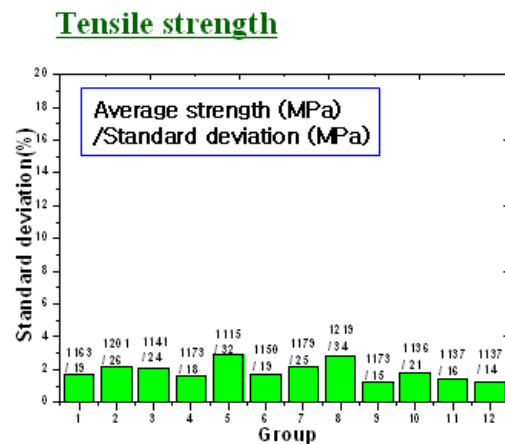
아래의 시험 결과는 국내 12개 연구기관에서 보유한 기기를 이용하여 동일한 소재 시험을 통한 장비의 신뢰도 평가를 실시한 결과이다. 현재 압입시험법을 통한 인장물성 평가에 대한 RRT 시험은 완료된 상태이며, 이를 더 확장하기 위한 시험을 준비 중에 있다. 또한, 잔류응력 평가를 위한 RRT 시험도 계획 중에 있으며 함께 ISO 규격을 위한 draft도 진행 중에 있다.

1	한국가스공사	7	조선대학교
2	기술표준원	8	대우일렉트로닉스
3	한국전력연구원	9	두산중공업
4	한국과학기술연구원	10	한국가스안전공사
5	한국기계연구원	11	현대모비스
6	서울대학교	12	포스كو

- 시험 조건
 - 재료 : YSTL290 HV 표준경도시편
 - 시험 : 구형압입자 (반경250 μ m) 사용
연속압입횟수 15 회 (50% 하중제거)
총 7회 시험
 - 장비 : AIS2000 (Advanced indentation system 2000)



Average standard deviation of
Indentation yield strength
: **2.90%**



Average standard deviation of
Indentation tensile strength
: **1.90%**

그림 6. RRT(Round Robin Tetst) 시험 결과

3. 잔존 수명 평가

기존의 고온 설비의 잔여수명을 정량적으로 평가하는 방법으로 크리프 및 응력 파단 시험법이 존재한다. 크리프 및 응력 파단 시험법은 원재료와 수명예측의 대상이 되는 재료 각각에 대해 일정 응력 조건에서의 크리프 파단시험을 수행함으로써 작용 응력과 크리프 파라미터와의 관계식을 도출하고, 이로부터 현재 작용 응력에서 구조물이 갖는 잔여 수명을 평가하는 기법이다. 크리프 파라미터는 온도와 사용 시간을 동시에 고려하여 손상을 정량화 할 수 있는 변수로서, 일반적으로 Larson-Miller 파라미터가 많이 사용된다.

크리프 파단 시험법은 그 시험 방법이 파괴적이고, 여러 온도와 응력상태에서 크리프 파단시험을 수행해야 하므로 시간과 비용, 방법적인 측면에서 많은 제약이 따른다. 또한 파단이 일어나는데 영향을 끼치는 여러 인자 중 온도와 시간, 인가된 응력만을 고려하기 때문에 열화된 기계적 물성 변화와 관련된 물리적 의미 및 특성을 잔여수명 계산 시 반영하지 못한다. 따라서 간단하고 경제적인 시험법의 적용 및 열화에 따른 재료물성변화를 고려할 수 있는 인자의 사용이 필요하다.

이러한 단점을 보완하는 방법으로 재료의 소성변형에 대한 저항성을 의미하는 경도를 이용하여 잔여수명을 예측하는 연구가 진행되었다. 이 방법은 열처리를 통해 열화 된 재료의 경도를 측정하여 이를 Larson-Miller 파라미터와 연관해 크리프 파단 시험법과 마찬가지로 잔여수명을 평가한다. 그러나 이 방법도 경도가 재료 본연의 기계적 성질이 아니기 때문에, 열화 재료물성의 변화와 관련된 물리적 의미를 충분히 반영하지 못하고, 파단이 일어나지 않으므로 파단 시기를 정량적으로 예측할 수 없다는 한계를 지니고 있다. 이러한 한계를 극복하고자 열화 인장물성과 온도 및 열화 시간을 고려한 Larson-Miller 파라미터와의 관계를 통해 열화 양상을 파악하는 연구가 진행되었다. 그러나, 기존의 연구들은 실험실에서 현장을 모사하여 시편을 제작 시험을 진행하는 한계점을 가지고 있어, 현장 적용에는 하나의 척도로만 사용하였다.

최근 계장화 압입시험법의 개발과 함께 실험실에서 진행된 예측치에서 현장 시험 결과를 이용한 수명평가가 많이 진행되고 있다. 고온에서 여러 시간동안 열처리한 시험편을 통해 Larson-Miller 파라미터를 구하고, 비 파괴적으로 재료의 기계적 물성을 평가할 수 있는 계장화 압입시험기를 이용하여 열화 재료물성을 측정하게 된다. Larson-Miller 파라미터와 열화 인장물성과의 관계를 도출하고, 열화 인장물성의 failure criterion 를 적용하여 잔여수명을 평가하는 모델이 최근 현장에서 적용되고 있다.

< 손상 평가 적용 예 >

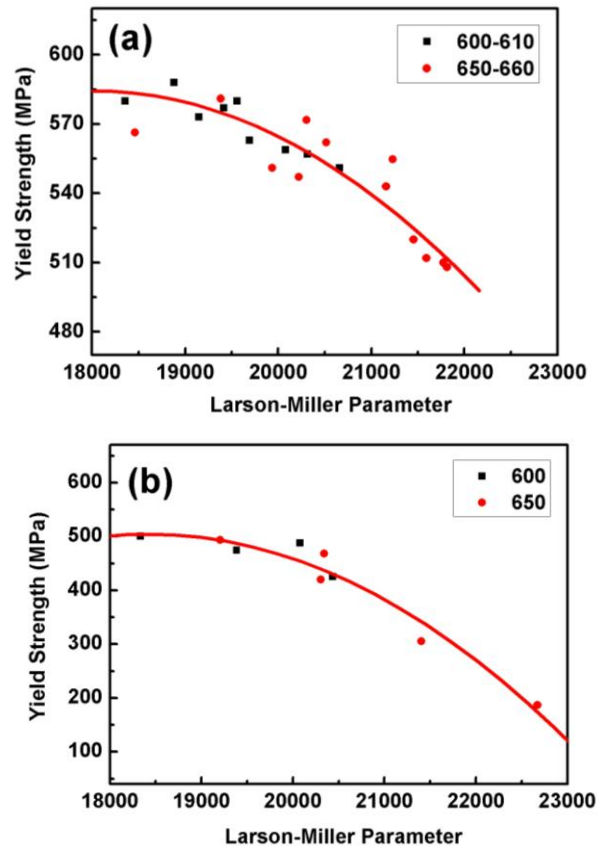


그림 7. Yield strength를 이용한 수명평가 곡선 (a) X20CrMoV12.1 (b) SA213 T23

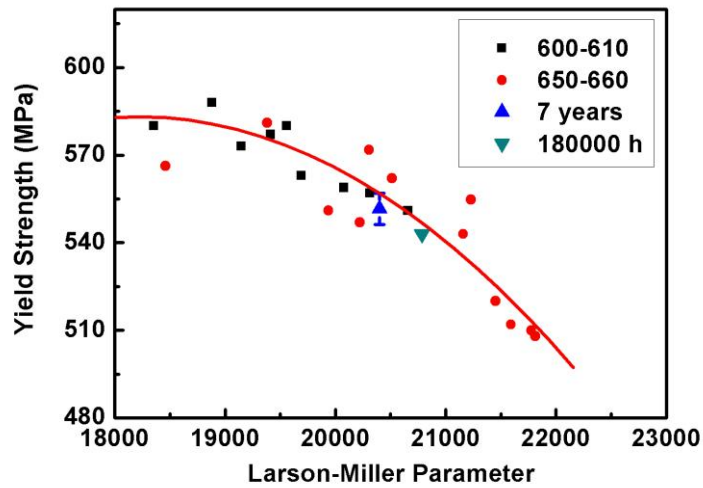
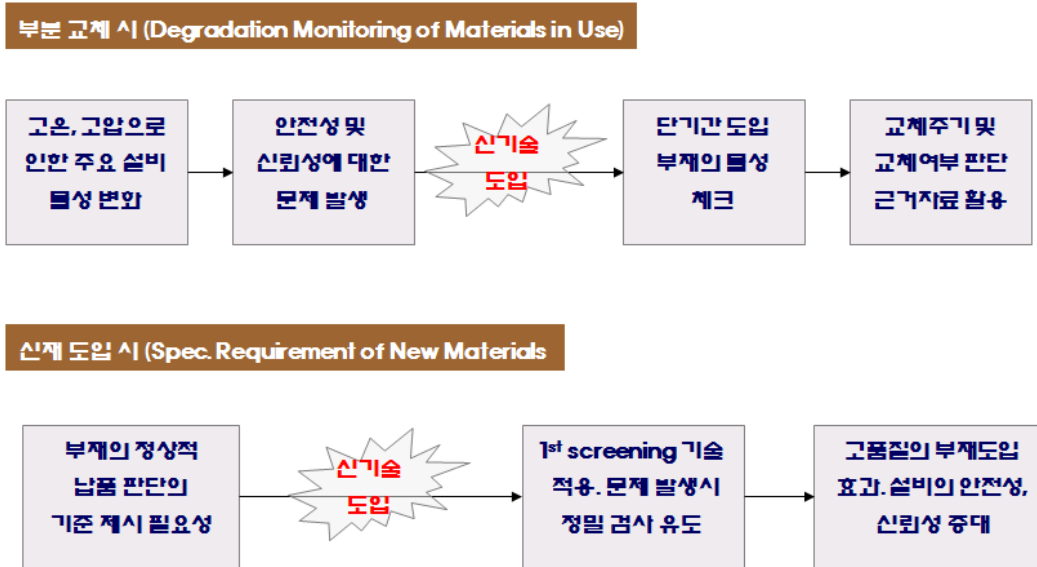


그림 8. 7년 사용한 X20CrMoV12.1소재를 그림 7에 적용한 모습

4. 시험법 도입 필요성 및 파급 효과

(1) 안전성



① 부분 교체 시

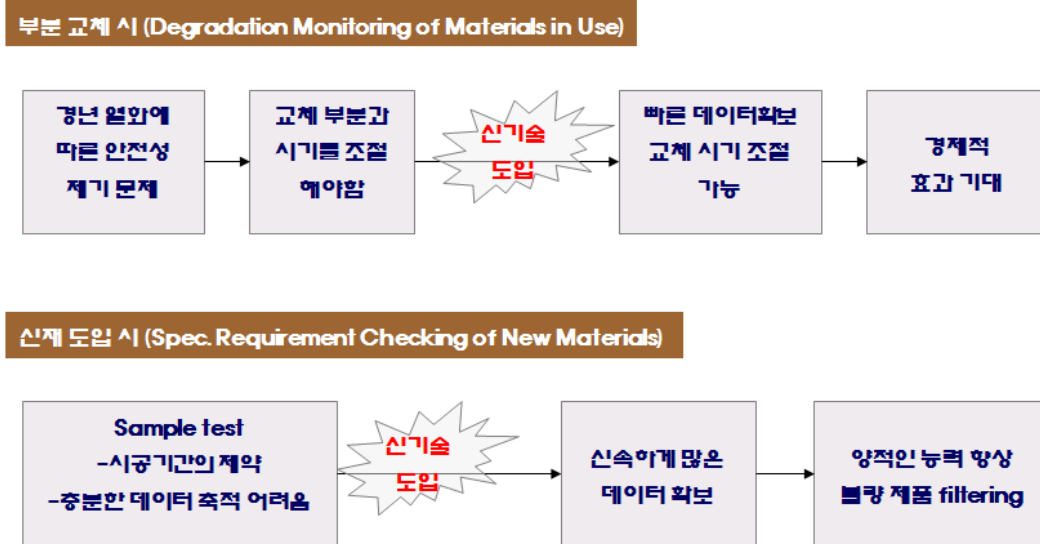
: 고온, 고압에서 운전되는 발전소의 주요 설비의 경우, 이로 인한 영향으로 시간의 경과에 따른 재료 물성의 변화가 예상된다. 이로 인한 안전성, 나아가서 신뢰성에 대한 문제 발생이 끊임 없이 제기되고 있는 상황이다. 따라서 이러한 문제점을 최소화하는 측면에서의 신기술의 도입 필요성이 더욱 높아져가고 있다. 신기술 도입 시, 단시간에 도입 부재의 물성을 체크함으로써 계획된 부재의 도입 효과를 극대화 할 수 있을 것으로 기대하고 있다. 특히 노후설비의 교체 주기 및 교체 여부를 판단할 근거자료로서 활용함으로써 정량적인 교체/수리 기준 설정이 가능하다.

② 신규 건설 시

: 발전소 안전 건설 기준에 합당한 금속 부재의 구입 시, 기준에 적합한 부재가 정상적으로 납품이 되어있는지의 판단을 정확하게 판단할 수 있는 기준 제시의 필요성이 대두된다. 본 기술의 적용 시, 주요 설비 소재에 대한 1st screening 기술로 적용하여, 문제 발생 시 해당 부위의 정밀검사를 유도할 수 있어, 막대한 비용 및 시간이 소요되는 전수검사과정을 생략할 수 있다. 이를 통하여 궁극적으로 고품질의 부재 도입 효과를 기대할 수 있음으로써, 발

전 설비의 안전성, 나아가 신뢰성을 증대시키는 파급 효과를 기대한다.

(2) 경제성



① 부분 교체 시

: 발전소 설비의 경우, 일정 시간이 지난 후에, 경년 열화에 따른 안전성 제기 문제로 인하여 교체 부분과 시기를 조절한다. 이때에 여러 가지 방법을 동원하여, 설비의 상태를 체크하며, 그 내용 중의 하나가 바로 경년 열화에 따른 물성 변화의 체크이다.

이때에 빠르고 정확한 데이터의 확보를 통해, 교체 시기를 조절하고, 이로 인해 궁극적으로 경제적인 효과를 기대할 수 있다.

② 신규 건설 시

: 현재 부재의 도입 후, 검수에 필요한 시험을 진행하고 있으나, 시간적, 경제적 이유로 인해 몇 번의 sample test를 진행하고 있음. 기존의 방법, 즉, 예를 들어 파괴적인 sampling을 통하여 시험을 수행할 경우에는 시공기간의 제약에 의해 검수 후, 판단에 필요한 충분한 데이터를 확보하는 것이 어렵다. 이에 보다 신속하게 많은 데이터를 취득함으로써, 검수 시 양적인 능력 향상과 아울러 불량 제품을 걸러내는 filtering기능을 가진 시험 법의 필요성이 대두된다. 신기술을 도입 할 경우, 이러한 점의 개선 효과를 기대할 수 있다.

표1. 신기술 도입 시 발전소 설비 및 도입부재 검사에 대한 파급 효과

구분 시험법	검사영역		1회 검사 절차 및 기간		비고	
	영역	가능여부	절차	기간	품질관리	비용
파괴적 시험법	가동 중 설비	불가				
	신규 및 교체 부재	가능	시편 채취 후 시험 시	평균 7일 이상	Maker의 mill sheet 정보에 의존 → 품 질 관리의 어려움	Sample test 시 파괴적인 방법에 의존하므로 시간 및 비용이 커짐
비파괴적 시험법 (신기술 도입)	가동 중 설비	가능	직접 부착 시험 시	평균 1~2일	경년 열화에 따른 가동 중 설비의 정 보에 대한 데이터 베이스 구축 → 품질관리	지속적인 품질 관리를 통하여 고품질을 유지함 으로써 품질 저하에 따 른 사고를 예방
	신규 및 교체 부재	가능	시편 채취 후 시험 시 직접 부착 시험 시	평균 5일 이상 평균 1~2일	Maker mill sheet 정보의 타당성 검증 가능	Sample test 시 시간 및 비용 절감

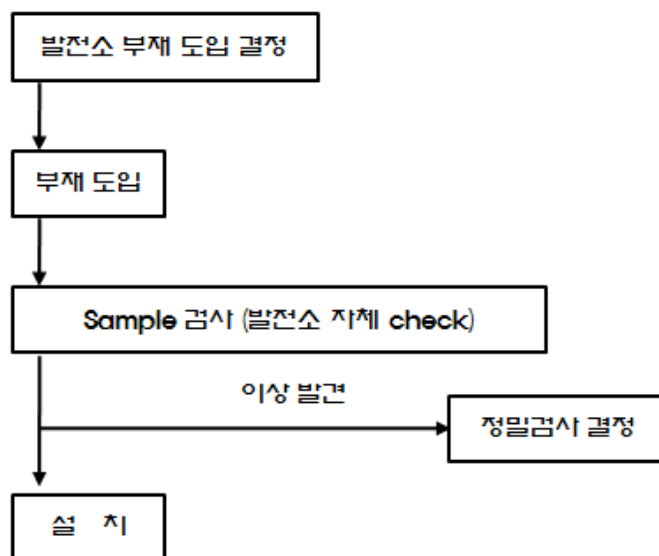


그림 9. 발전소 소요 부재 도입 시, 과정 및 경제적 효과

예정된 부재의 이상 여부를 발전소(갑)가 1차 sample test를 통하여 1차 screen함으로써 품질 유지가 가능하며, 1차 screen의 되지 않고 도입 될 경우, 이후에 일어날 수 있는 사고 및 품질 저하를 예상할 수 있다. 저 품질의 부재 도입에 따른 사고로 인한 피해액은 연간 수억 원 이상으로 추측된다.

5. 계장화 압입 시험법의 절차

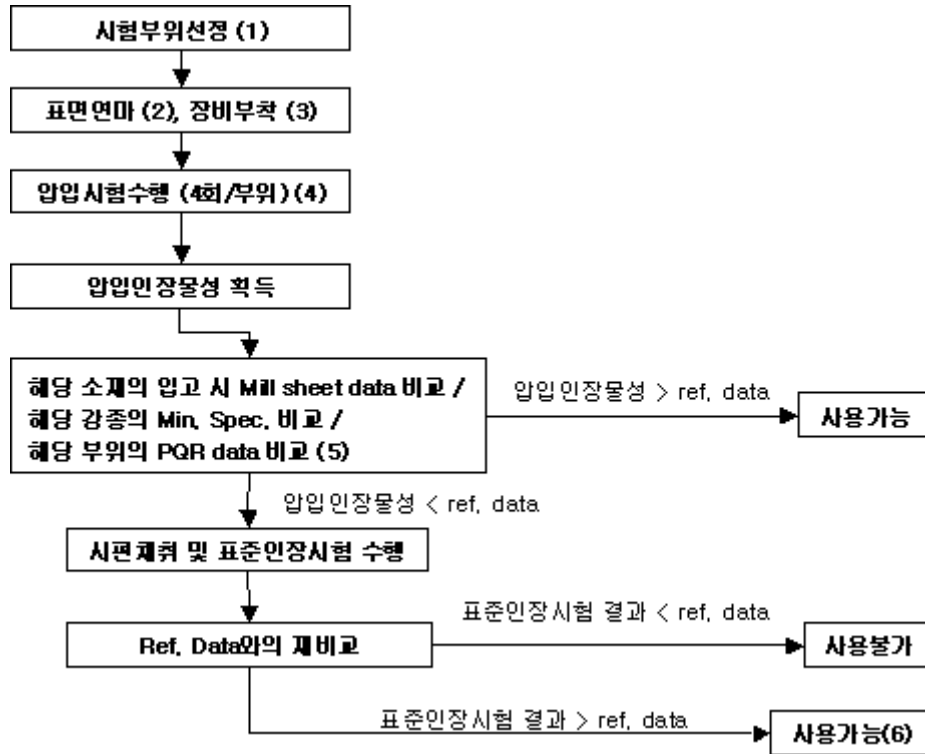


그림 10. 발전설비 기계적 강도 안전성 평가를 위한 압입시험 적용 절차

< 상세 설명 >

- (1) 운용 중 설비의 경우 전체 설비의 안전성에 많은 영향을 주는 자체 주요 점검부 또는 파손 발생 회수가 잦은 부위 우선 선정, 또한 신재 입고의 경우 sampling test 가능



그림 11. 가동 전-후 설비물의 위치선택

- (2) 표면연마의 경우 emery paper 기준 최소 600grit까지. 시간 절감을 위해 portable hand-grinder의 사용가능



그림 12. 대상물의 표면연마 (권장: up to 600grit)

- (3) 장비부착은 시험부위의 형태, 크기, 안전수칙 등에 따라 부착수단을 선택한다. (직경 10in. 이하의 소형 배관의 경우 U-block, 10in. 이상의 경우 curvature magnet system 또는 chain system, 평판의 경우 flat/curvature magnet system 사용 권장)



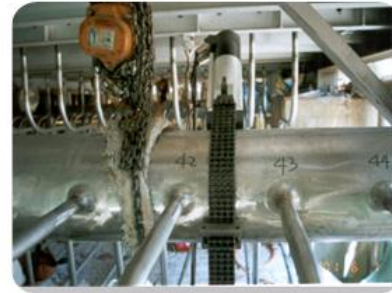
그림 13. 장비 부착 (Chain system 적용 모습)

- (4) 평가 재질 내의 기계적 강도 편차를 고려하여 5회 수행 후 평균값을 해당부위의 압입인장 물성으로 사용한다. 또한 2회 이상 시험 수행 시 압입시험간의 간격은 압흔 직경의 3배 이상을 원칙으로 한다. (한국 표준규격 KS B0950 참조)
- (5) 재질의 입고 시 첨부되는 재질 시험 성적서, 해당 소재의 ASTM/JIS/DIN/KS 등의 항복강도/인장강도 minimum specification 및 WPS내의 PQR 시험결과 등을 의미한다.

- (6) 단, 정상적인 압입시험 수행여부의 판단을 위해 장비부착 및 표면연마 등의 오차요인에 대한 점검을 실시한다. 필요 시 초기 시험 부위의 인근 부위 및 채취된 시편에 대한 압입시험을 각각 실시하여, 결과를 재 검증한다.



다중극롤자석 부착 모습



Chain 부착 모습



U-block 부착 모습



V-block 부착 모습

그림 14. 다양한 형상에 따른 장비 부착 모습

- # 대상물의 형상, 크기, 주변 조건에 의해 장비의 부착도구를 변경할 수 있다.
- # 부착도구는 대상물의 크기(up to 0.75in tube)에 의해 구분하여 적용할 수 있다.
- # 장비 부착 도구: 다중극롤자석(8~18in / 20~48in), 체인 블록(up to 10inch),

U-블록(2~6in), V-블록(2in 이하) (**부착모습 참조**)

부착형상에 따라 평판자석도 사용 가능.

< 발전소 계통 적용모습 >

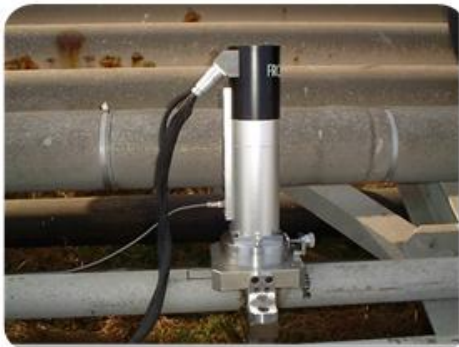


영풍 화력 발전소 기동 전 실험
(Main Steam Line)



보령 화력 발전소
(Hot reheater Line)

그림 15. 압입인장물성 측정시험기의 Pipeline(大) 적용 모습



여수 신탄 XX화학(주) 사업소
(고압가스 배관: A53. Gr.A)



LG Caltex Oil
(Vacuum heater tank pipe: A335 P5)

그림 16. 압입인장물성 측정시험기의 Pipeline(小) 적용 모습



보령 화력 발전소 적용 실험 I
(Turbine Rotor)



보령 화력 발전소 적용 실험 II
(Turbine Rotor)

그림 17. 압입인장물성 측정시험기의 Turbine 적용 시

6. 적용 사례

<App. Case #1: Power Plant>



그림 18. Application cases steam pipeline and turbine at power plant inspection using non-destructive indentation technique (with KEPRI in Korea)

표 2. 건설 중 발전소 주증기관 (재질: ASTM A335 P91)의 압입시험 결과와 PQR records의 비교

Position	YS (MPa)	UTS (MPa)	PQR record
Weld(Av)	1128	1501	1041 1031
HAZ 1	927	1175	
HAZ 2	826	1417	
HAZ 3	815	1455	
Base (Av)	598	810	

표 2에서 나타난 바와 같이, 기존의 laboratory sampling test인 PQR과는 현저히 다른 인장 결과가 현장에서의 비파괴 압입시험을 통해 확인되었다. 즉 PQR record에 비하여 매우 낮은 UTS가 배관의 모재부에서 확인되었으며, 이는 건설을 위해 공급된 해당 재질 불량에 기인한 것으로 사료된다. 이러한 재질 차이를 확인하고자 해당 부위의 배관에서 인장시편을 채취하여 표준일축인장시험을 수행하였고, 3회 평균결과 항복강도 568MPa, 인장강도 769MPa의 값이 얻어졌다. 이는 현장에서 수행된 비파괴 압입시험법의 신뢰도를 뒷받침하는 증거라 할 수 있다.

- 재질 불량, 사용 중 재질 열화, 용접부 및 열영향부 평가 등에 적극 활용
- 주요 부위의 수시 부착시험을 통한 기계적 강도 monitoring 가능

<App. Case #2: Nuclear Power Plant >



그림 19. Application case for main cooling water pipeline at nuclear power plant inspection using non-destructive indentation technique (at Kori in Korea)

20년 이상 사용중인 ASTM A106(base metal)과 AWS E7016 (weld metal)소재의 기계적 강도를 평가하였다. (파이프 라인 내부에 60/90°C 냉각수 수송 중 평가)

표 3. 보조 냉각수 계통 배관 용접부의 물성 평가

position	YS (MPa)	UTS (MPa)	n	K	위치 판독결과
2	359	546	0.173	793.5	BASE
3	398	529	0.127	712.6	HAZ
4	412	576	0.144	797.9	WELD
5	433	526	0.093	664.6	WELD
6	369	583	0.184	862.2	WELD
7	362	549	0.171	795.7	HAZ
8	367	517	0.146	719.9	HAZ
9	321	508	0.185	751	BASE

Reference

AWS E7016: YS(450MPa), UTS(550MPa) All-weld-metal tensile test 결과

ASTM A106B (min. spec.): YS(240MPa), UTS(415MPa), EI(27%)

ASTM A106B (real value): YS(300~360MPa), UTS(480~510MPa)

<App. Case #3: Nuclear Power Plant >



그림 20. Application cases for natural gas pipeline inspection using non-destructive indentation technique (PEMEX pipeline tests with GE PII members in Mexico)

표 4. 천연가스배관 API X65의 비파괴압입시험 및 표준인장시험 결과 비교

압입시험결과 (MPa)		Mill Data (MPa)		Deviation	
항복강도	인장강도	항복강도	인장강도	항복강도	인장강도
469.5	612.9	475.0	615.0	-1.1%	-0.4%
486.7	645.3			+2.5%	+4.9%
499.8	614.3			+5.2%	-0.2%

30 년 이상 사용 중인 천연가스배관의 재질 열화를 평가하기 위해 압입시험장비를 사용 중인 배관에 직접 부착하여, 압입인장물성을 평가할 수 있었다.

<App. Case #4: 양수발전소>

- **Object:** CLG WTR Main / By pass pipe, LO Pump Inlet pipe, Generator Inlet-HDR
변전소 폭발사고로 인한 배관의 건전성 평가(배관 물성 평가)
- **Condition:** 2001년 운전 개시, 4년 미만 운전
- **Material:** ASTM A53 Gr. B (Seamless) , SPW400, STPG 370
- **Remarks:** 폭발사고 인한 배관 손상이 심하였으며, 설치자재의 spec. 문제 발견



그림 21. CLG WTR Main / By pass pipe

폭발사고로 인한 배관들의 손상 및 물성평가 결과가 좋지 않고, 직접적인 폭발사정권에 포함된 1호기의 경우 대부분 교체 대상으로 분류 되었으며, 간접적인 폭발사정권에 포함된 2호기의 경우에는 기계적 물성평가 후 일부 배관만 교체하는 것으로 분류되었다. 그리고 물성평가 중 설치 자재가 입고 대장 및 도면에 표기된 재료와 차이가 나는 것을 발견했다.

<App. Case #5: Oil pipeline>

계장화 압입시험법과 X-ray diffraction 비교 (용접부 잔류응력 평가)

- 시험 대상: API X80 (Natural Gas Pipe)
- Welding: Friction welding (FSW)

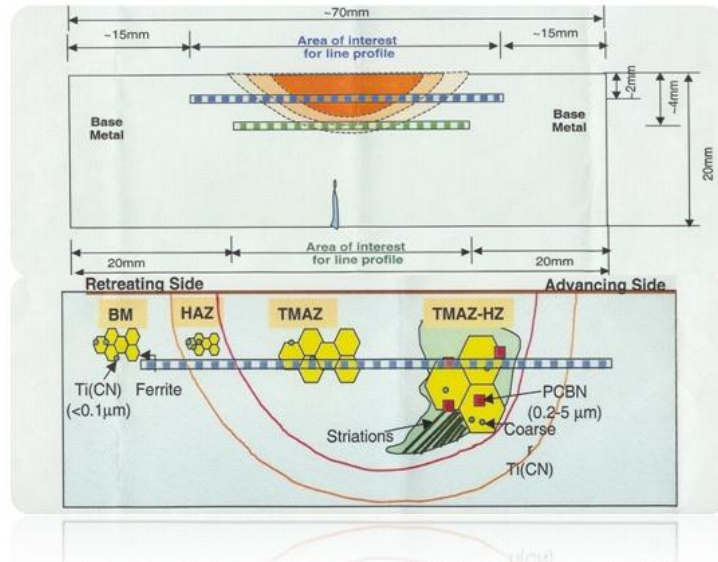


그림 22. Shape of specimen & Distribution of microstructure

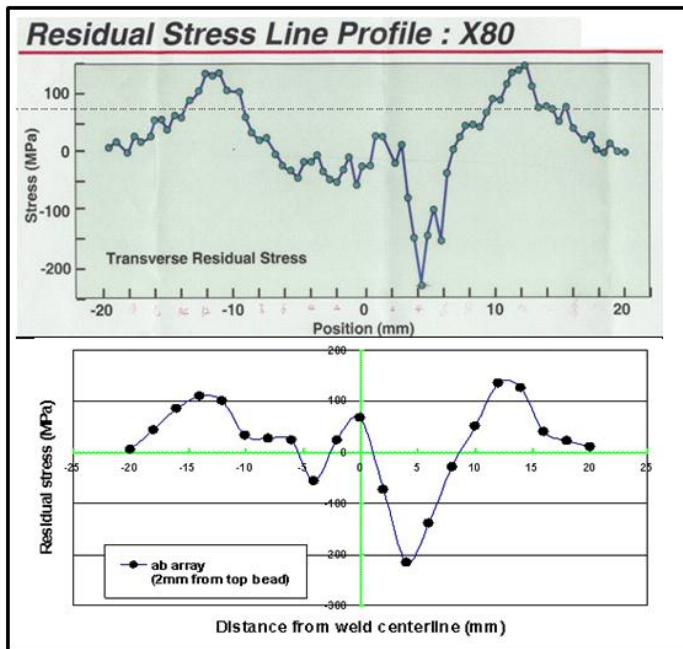


그림 23. X-ray diffraction과 IIT 시험 결과

X-ray Diffraction

최대 인장 잔류응력 : 150MPa
 최대 압축 잔류응력 : 230MPa

Instrumented Indentation

최대 인장 잔류응력 : 136MPa
 최대 압축 잔류응력 : 215MPa

<App. Case #6: Power plant>

보일러 배관의 기계적 물성 측정 (사용온도 측면)

- 대상 재질: 보일러 고온 내열강

재질명	설치장소	사용온도 (관벽허용온도)
X20CrMo12.1	Final S/H, R/H tube	700℃ (660℃)

- Temperature condition

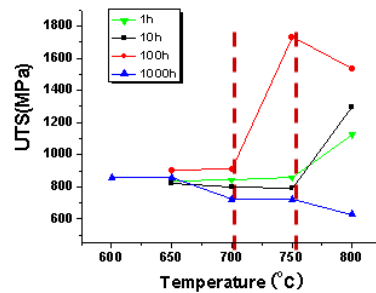
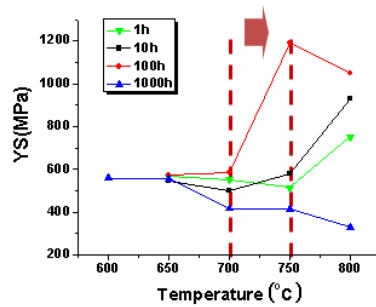
시편	1	2	3	4	5	6
X20CrMo12.1	600 ℃	650 ℃	700 ℃	750 ℃	800 ℃	Max.

- Time condition

조건	1	2	3	4
Hr.	1	10	100	1000

- 시험 결과

인장시험



계장와 압입시험

