

연속압입 시험에 의한 발전설비 배관 용접부 물성평가

2001. 06

전 력 연 구 원

발전연구실 발전기계그룹

목 차

1. 개 요

2. 발전소 건설중 용접관리 및 문제점

가. 용접관리절차

나. 문제점

다. 개선대책

3. 연속압입시험법의 기술

가. 연속압입시험법의 개발배경

나. 연속압입시험법의 원리

다. 연속압입시험법의 신뢰도 분석

라. 표준인장시험과 연속압입시험 결과 비교

4. 화력발전소 배관 용접부 인장물성시험 적용결과

가. 시험목적

나. 시험방법 및 시험장비

다. 태안화력 제6호기 배관 용접부 연속압입시험 결과

라. 현장시험 신뢰도 확인을 위한 재확인 시험

마. 시험결과 분석 및 평가

5. 결론

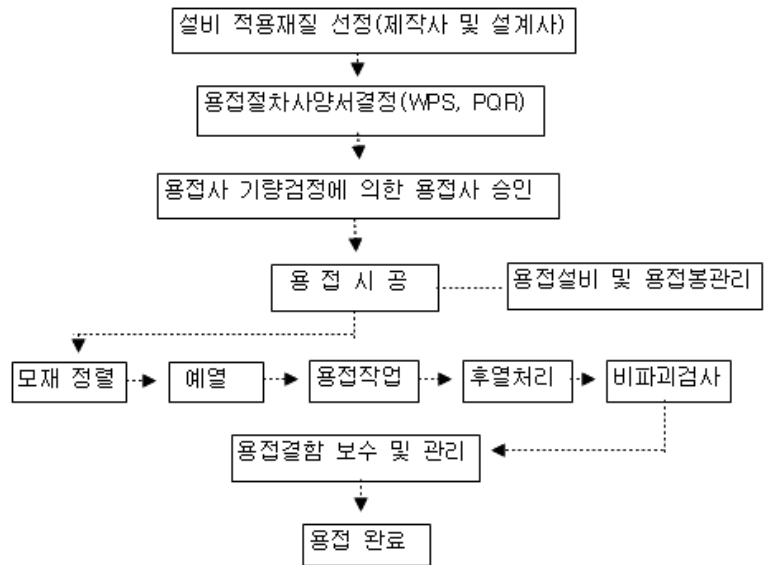
연속압입시험에 의한 발전설비 배관 용접부 물성평가

1. 개요

금속재료 기술이 발달한 현재도 강 용접 구조물/설비의 용접부는 건전성을 확보하기 위해서 가장 주의를 기울여야 하는 평가 대상 부위이다. 국내외 제강 기술의 수준으로 보아서도 모재의 기계적 성질보다 용접부의 기계적 성질을 적절하고도 합리적으로 평가하는 것이 훨씬 더 중요하다. 특히 화력발전소는 수만 개소의 용접부로 이루어져 있어 용접품질이 발전설비의 품질과 직결되므로 전기사업법 용접기술 기준으로 정하고 있다.

용접부의 품질은 용접 시공시에 결정되므로 발전소 건설중 용접품질관리 정도에 따라 발전설비의 품질이 정해진다고 할 수 있다.

용접부 기계적 특성을 평가하기 위해 일축인장시험(uniaxial tensile test)은 재료의 탄성 및 소성 성질 전반에 관한 자세한 정보를 제공해 주므로 설비/구조물의 건전성을 평가시에는 필수적으로 인장시험이 수행되고 있다. 또한 발전소 건설중 용접부는 각 용접조건에 대한 인장강도를 표기한 PQR (Pre-Qualification Record)이 작성되어 제출된다. 그러나 PQR은 현장 용접조건을 재현한 한 가지 시험편에 대하여 실험실적으로 수행한 결과를 기록한 것이기에 현장 용접부의 각 구속조건



및 시공환경에 따른 물성 변화를 반영하기에는 한계가 있다. 그러므로 현장에서 비파괴적으로 용접부의 인장물성을 평가할 수 있다면 발전설비의 건설중 용접부의 품질향상에 크게 기여할 수 있어 운전중 설비 신뢰도 확보가 가능해 질 것으로 예상된다.

이와 같이 현장에서 비파괴적으로 인장물성을 평가하기 위한 노력의 일환으로써, 최근에는 소재에 압입하중을 다중 인가 및 제거(multiple loading and unloading)와 압입하중에 따른 압입깊이의 변화를 계측하여 인장 물성을 평가하는 연속압입시험법(continuous indentation test)에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

본 연구에서는 연속압입시험의 기술적 원리를 조사하였고 적용의 신뢰성을 평가하기 위하여 현재 건설중인 태안화력 제6호기 배관 용접부에 국내 Frontics사가 개발한 연속압입시험 시스템을 이용하여 인장물성을 비파괴적으로 측정하고 적용의 신뢰성을 평가하고자 하였다.

2. 발전소 건설중 용접관리 방법 및 문제점

발전설비의 용접부는 전기사업법 용접기술기준에 의해 용접부에 비파괴검사를 실시하여 용접부내의 결함에 대해서는 엄격히 관리되고 있으므로 용접부 내의 결함으로 인한 용접손상사고는 거의 발생하고 있지 않으나 용접 열영향부와 용입부 물성변화에 의한 손상은 계속적으로 발생되고 있다.

가. 발전소 건설 용접관리 절차

나. 문제점

용접부 제반사항을 엄격히 관리감독 함으로서 용접결함은 엄격히 관리되고 있으나 용접부 기계적 강도나 물성관리에는 미약함

- 용접 기계적 특성은 사전품질관리기록서(PQR)에 의존
- PQR은 현장 용접조건 반영이 충분히 안된 용접결과를 기계적 시험한 결과 임
- 건설현장에 적용하는 WPS, PQR은 타 현장에서 만들어진 것을 그대로 사용하는 경우가 많음
- 용접부 열영향부등 물성 부적정에 의한 용접 사고는 계속 발생

다. 개선대책

용접제작중 기계적 특성시험은 직접 용접성 시험(Direct Weldability Test)이 가장 바람 직하나 이는 용접부를 파괴하여 검사하는 법으로 현실적으로 실행하기는 곤란하다.

따라서 비파괴적인 방법에 의한 용접부 물성평가 기법을 개발.적용하는 것이 시급함

2. 연속압입시험법의 기술 개요

가. 연속압입시험법의 개발 배경

일축 인장시험(uniaxial tensile test)은 재료의 기계적 성질을 평가하기 위하여 가장 널리 사용되어 온 시험법이다. 인장시험결과와 재료의 탄성 및 소성 성질 전반에 관한 자세한 정보를 제공해 주므로 재료의 강도(strength) 및 인성(toughness)과 관련한 연구에는 필수적으로 인장시험이 수행되고 있다. 하지만 인장시험을 수행하기 위해서는 일정 크기와 형상을 가진 시험편이 필수적으로 요구되므로 그 시험편 요구조건을 만족하지 못하는 대상 소재의 경우에는 적용이 불가능하다는 점이 인장시험의 불가피한 제약조건으로 인식되어 왔다. 즉, 일정크기 이상의 시험편 수급이 어려운 경우나, 용접열영향부와 같이 미세조직이 국부적으로 급변하는 경우, 나아가서 인장 시험편 채취가 불가능한 현장 설비 소재에 대해서는 표준 인장시험을 사용할 수 없다. 그러므로 이러한 소재의 경우에는 주로 간편한 경도시험(hardness test)을 수행함으로써 또 다른 강도 기준치인 경도

를 평가하여 평가 목적의 기준값과 비교하는데 만족하고 있다. 그러나 경험적인 물성치에 불과한 경도의 경우 단순히 그 자체의 비교 기준만을 제시할 수 있을 뿐 인장 시험 결과와 같이 역학에 기반한 계산 및 응용에 적용할 수 없고, 제공하는 정보의 단순함으로 인하여 재료의 화학조성 및 미세조직의 변화에 의한 영향을 반영하는데 한계가 있다는 단점들이 있다.

이러한 인장시험의 한계 및 대안의 부재를 극복하기 위한 노력의 일환으로써, 최근에는 소재에 압입하중을 다중 인가 및 제거하고 압입하중에 따른 압입깊이의 변화를 계측화 장치를 이용하여 연속적으로 측정하는 연속 압입시험법이 개발되어 활발히 연구되고 있다.

나. 연속압입시험법의 원리

연속압입시험 시, 구형 압입자/시편 간의 접촉깊이는 그림 1에 나타나 있는 압입하중 제거곡선을 분석하여 평가한다. 이는 최대 압입깊이에서 하중제거에 따른 탄성회복을 묘사한 것이며, 이에 추가적으로 탄성급힘 및 pile-up 현상에 의한 오차가 보정되어야 실제 접촉깊이가 결정된다. 우선 하중제거 곡선을 역함수로 나타내고, 이를 최대 압입깊이에서 미분함으로써 기울기 S 를 평가한다. 압입자와 시편의 접촉깊이 h_c^* 는 elastic flat punch 이론을 이용하여 앞서 결정된 기울기를 따르는 직선을 압입하중 L 이 0인 상태까지 외삽하여 평가하게 된다. 그러나 일반적으로 회복과정은 압입자 하부에서도 동반되며, 이에 따라 압입자의 기하학적 형상이 주요한 영향을 끼치게 되고, 이를 ω 라는 압입자 형태상수로 보정한 아래의 식 (1)이 제시되었다.

(1)

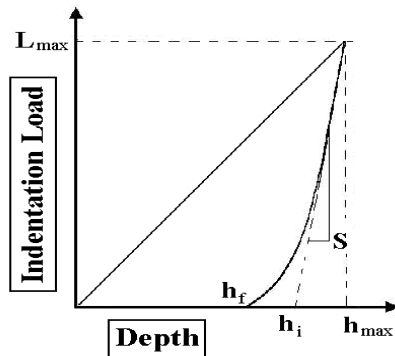
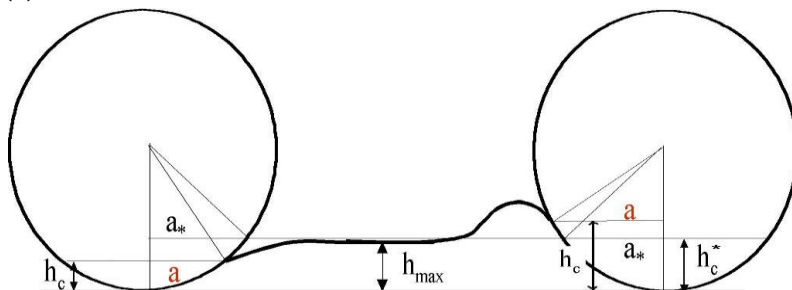


그림 1. 압입하중 변위곡선의 분석

구형 압입자의 형태상수인 0.75를 대입하고, 압입자의 기하학적 형상을 고려하면 압입자/시편의 접촉반경 a^* 를 평가할 수 있다. 그러나 최근 연구에 따르면, 그림 2와 같이 압입자/시편의 접촉

반경은 가공경화지수 n 과 직접적인 관계를 갖는 압흔주변의 pile-up/sink-in 양상에 의해서 크게 영향을 받는 것으로 확인되었고, 이로부터 식 (2)와 같이 수정된 접촉반경 a_c 를 평가할 수 있다.

(2)



(a) (b)

그림 2. 압입 시험 후 발생하는 pile-up, sink-in 현상 (a) sink-in and (b) pile-up.

압입하중의 증가에 따라 압입자 하부에서는 점차 평균 접촉압력과 변형률이 증가하기 때문에 이로부터 일축 인장시험과 마찬가지로 유동특성을 평가하는 연구가 진행되었다. 압입하중의 증가에

따른 압입자 하부 소재의 변형거동은 탄성, 탄/소성, 완전소성영역으로 천이됨이 보고되었다. 유동 특성의 평가를 위해서는 압입시험 결과에서 유동응력과 압입 변형률의 분석이 필요하다. 우선 유동응력은 식 (3)과 같이 각 세 단계에서 평균 접촉압력과 유동응력의 비인 소성구속인자 Ψ 를 결정함으로써 평가한다.

(3)

소성구속인자 Ψ 은 Francis의 연구와 압입자 하부 변형상황의 모델링을 통해 제시된 탄성, 탄소성, 완전소성의 각 단계 별 모델링 결과가 제시되어 있으나, 소성변형 영역까지의 천이 속도가 빨라서 현재 유동응력의 분석에는 주로 Ψ 값을 3으로 하는 식을 사용하고 있다. 다음으로 구형 압입자 하부의 변형률을 정의하는 초기연구에서는 우선 압입자의 형상과 소성 접촉반경을 관련지어 실험적으로 압입 변형률을 $0.2a/R$ 로 표현하였으나, 실험적인 한계로 인해 몇 가지 강재에서만 유효한 결과를 나타내었다. 따라서 최종적으로는 압입자 반경가 압입깊이와의 기하학적 관계를 이용하여, 압입 방향인 z축 방향의 변위를 정의하고 이를 미분하여 변형률을 얻게된다. 이 때 압입시험시의 대표적인 변형률은 압입변형이 최대가 되는 지점으로 정의하여 최종적으로는 아래의 식 (4)와 같은 압입변형률을 정의하였으며, 이때 요구되는 상수 α 는 재료에 상관없이 0.1로 정의하였다.

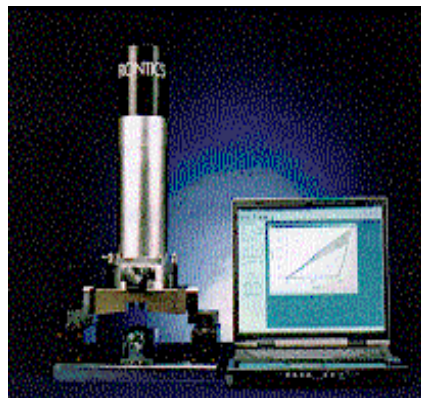
(4)

이와 같이 정의된 응력 및 변형률을 Hollomon 식에 적용함으로써 일축인장 시험결과와 비교할 때 완전 소성영역에서 유동특성을 정확하게 평가함을 확인할 수 있었다. 또한 앞서 구해진 유동곡선을 항복변형률 지점까지 외삽하거나, 일축 인장강도의 평가는 가공경화지수와 균일연신율 ϵ_u 이 동일하다는 연속체 이론을 사용하여 재료의 항복강도와 인장강도를 평가할 수 있다.

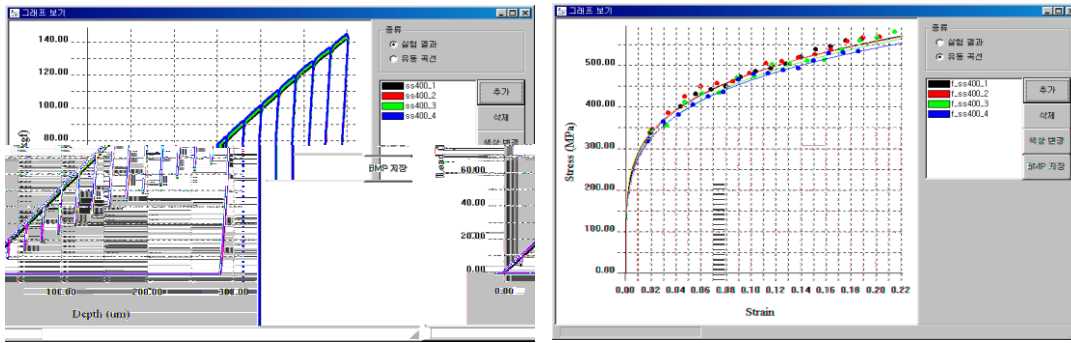
다. 연속압입시험 시스템의 신뢰도 분석

1) 시험장비 및 시험방법

- 연속압입시험 시스템 : AIS 2000 (산업자원부 NT인증제품 , New Technology)
- 제작사 : (주) 프론틱스(국내 벤처사)
- 시험종류 : 변위제어유동곡선실험
- 압입속도 : 0.3mm/min
- 최대압입깊이 : 300m
- 다중압입회수 : 15회
- 하중제거율 : 50%

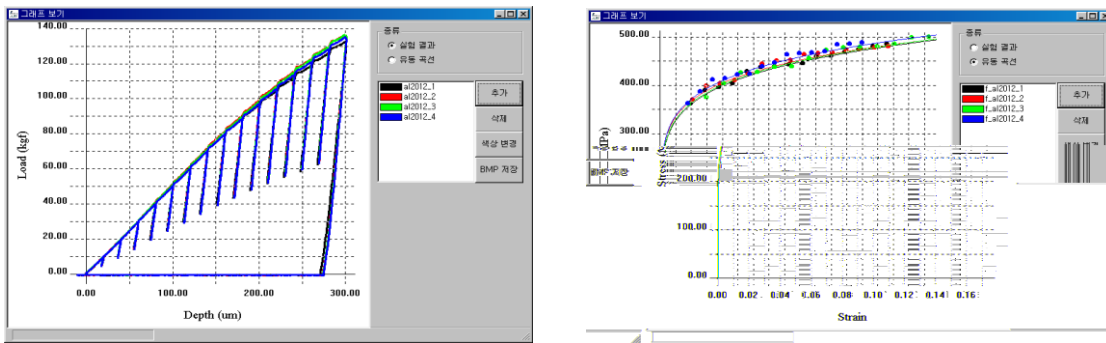


본 연속압입시험 시스템을 통하여 얻어진 인장물성의 신뢰도를 평가하기 위하여, 강도특성 별로 대표적인 세가지 재료를 선정하고(고강도강 SCM4, 저강도강 SS400, 비철금속 알루미늄 Al 2012), 이들을 각각 압입시편과 표준인장시편으로 가공하여, 4회의 연속압입시험과 2회의 표준인장시험을 수행하였고, 최종적으로는 두 결과들(항복강도, 인장강도, 가공경화지수) 사이의 오차를 분석하였다. 또한 비교시험의 공정성을 위하여 시험재의 선정, 시험편의 가공, 연속압입시험 및 표준인장시험 수행은 산업자원부 기술표준원에 의뢰하여 실시하였다. 우선 그림 3과 4에 중첩해서 나타낸 바와 같이 4회의 연속압입시험결과와 2회의 표준인장시험결과 모두 시험회수와 무관하게 재현성있는 시험결과를 나타내어, 연속압입시험이 표준인장시험만큼 재현성을 가짐을 확인할 수 있다.



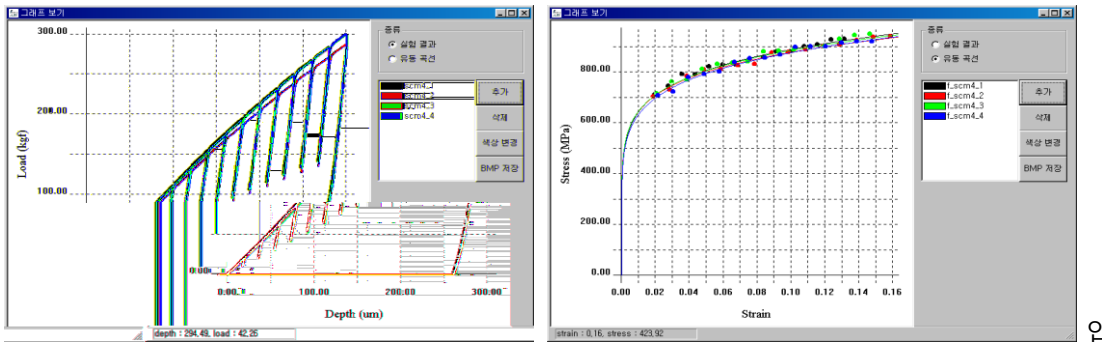
압입하중-변위곡선 유동곡선

(a) 저강도강, SS400



압입하중-변위곡선 유동곡선

(b) 비철 금속, AI2012



변위곡선 유동곡선

(c) 고강도강, SCM4

그림 3. 연속압입 시험 결과.(각 재료에 대하여 4회 수행한 시험결과를 중첩한 경우)

(a) 저강도강, SS400

(b) 비철 금속, AI 2012

(c) 고강도강, SCM4

그림 4. 표준 인장시험 결과.(각 재료에 대하여 2회 수행한 시험결과를 중첩한 경우)

라. 표준인장시험과 연속압입시험 결과의 인장물성의 비교.

1) 저강도강, SS400의 경우

시험회수	YS	UTS	n
------	----	-----	---

압입하중-

1	282.4	520.7	0.23662
2	285.8	540	0.21906
평균치	284.1	530.4	0.228

시험회수	YS	오차율	UTS	오차율	n	오차율
1	288.6	1.6%	572.1	7.9%	0.221	3.0%
2	293.5	3.3%	566.6	6.8%	0.215	5.8%
3	275.6	3.0%	571.7	7.8%	0.232	1.8%
4	278.8	1.9%	555.3	4.7%	0.222	2.4%
평균치	284.1		566.4		0.222	
평균 오차율	0.0%		6.8%		2.4%	

2) 비철금속 AI 2012의 경우

시험회수	YS	UTS	n
1	334.9	489.2	0.13692
2	332.1	480.3	0.13627
평균치	333.5	484.8	0.137

시험회수	YS	오차율	UTS	오차율	n	오차율
1	327.2	1.9%	479.4	1.1%	0.143	5.0%
2	335.3	0.5%	478.5	1.3%	0.136	0.3%
3	329.6	1.2%	480.8	0.8%	0.142	4.1%
4	338.0	1.3%	487.9	0.7%	0.139	2.0%
평균치	332.5		481.6		0.140	
평균 오차율	0.3%		0.6%		2.7%	

3) 고강도강, SCM4의 경우

시험회수	YS	UTS	n
1	681.23	967.95	0.12925
2	687.4	975.24	0.13068
평균치	684.3	971.6	0.130

시험회수	YS	오차율	UTS	오차율	n	오차율
1	642.7	6.1%	933.4	3.9%	0.141	8.5%
2	644.8	5.8%	913.0	6.0%	0.134	3.1%
3	645.7	5.6%	924.2	4.9%	0.137	5.4%
4	632.0	7.6%	921.2	5.2%	0.142	9.3%
평균치	641.3		923.0		0.139	
평균 오차율	6.3%		5.0%		6.6%	

양 시험결과 나타난 인장물성의 비교치를 표 1에 나타내었다. 표에서 YS는 항복강도를 나타내고, UTS는 인장강도이며 각각의 단위는 MPa이다. 또, n은 가공경화지수로서 무차원 단위이다. 연속압입시험결과의 오차율은 표준인장시험결과의 평균치와의 차이를 %로 나타낸 것이며, 평균오차율은 연속압입시험결과의 평균치와 표준인장시험결과의 평균치와의 차이를 %로 나타낸 것이다. 표에서

알 수 있듯이 세가지 재료 모두 압입시험으로부터 얻어진 항복강도, 인장강도, 가공경화지수가 최대 7% 이내(최소 0.0%)에서 표준인장시험결과와 일치하여 나타낸 인장물성이 충분한 신뢰도를 가짐이 확인되었다.

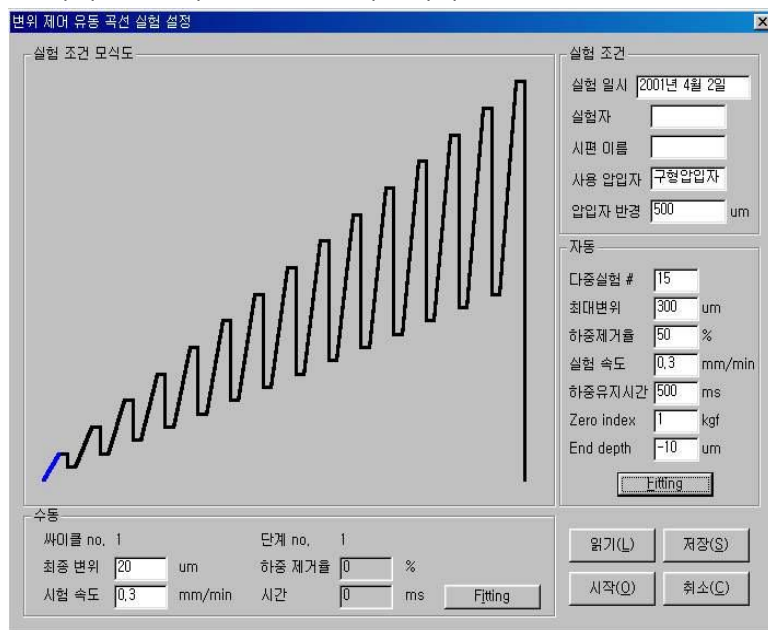
3. 화력발전소 배관 용접부 인장물성 평가시험 결과

가. 시험 목적

연속압입시험의 정확성과 발전설비에 대한 적용성 여부를 확인하기 위하여 현재 건설 중인 태안화력 6호기의 주요 배관인 Main steam line, Cold reheater line, Hot reheater line에 대한 인장물성(항복강도, 인장강도)을 측정하기 위하여 연속압입시험을 실시하고 그 결과와 표준인장시험에 의한 시험결과를 비교 분석하였다.

나 시험장비 및 시험방법

- 연속압입시험 시스템 : Advanced Indentation System 2000 (AIS 2000)
- 제작사 : (주) 프론틱스(국내 벤처사)
- 시험종류 : 변위제어유동곡선실험
- 압입속도 : 0.3mm/min ○ 다중압입회수 : 15회
- 최대압입깊이 : 300m ○ 하중제거율 : 50%



연속압입시험을 통하여 그림 6과 같은 압입하중-변위곡선을 얻을 수가 있으며, 이를 분석하면 그림 7과 같은 유동곡선을 유도할 수 있다.

열영향부(HAZ)의 경우 용착금속에서 모재로 방향으로 1, 2, 3..의 일련번호가 부여하고 모재(Base)와 용착금속(Weld)의 경우에는 부위별로 각각 2~3회의 시험이 이루어졌으나, 아래의 그림 8 및 그림 9와 같이 결과가 균일한 관계로 평균값을 사용하였다

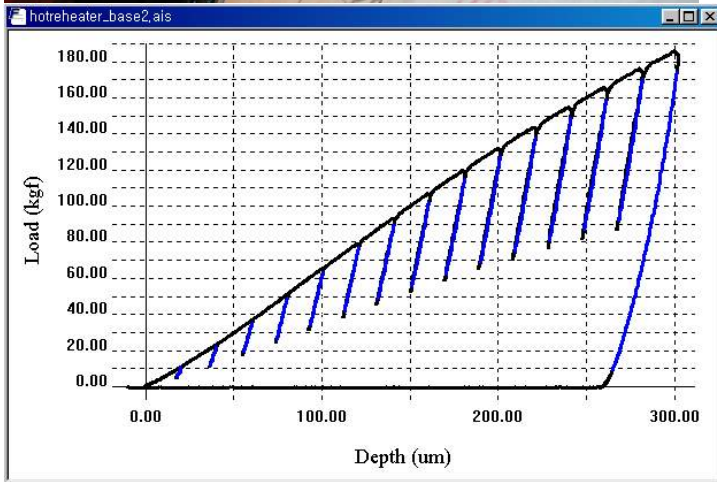


그림 6. 압입하중-변위곡선(Hot reheat line base부)

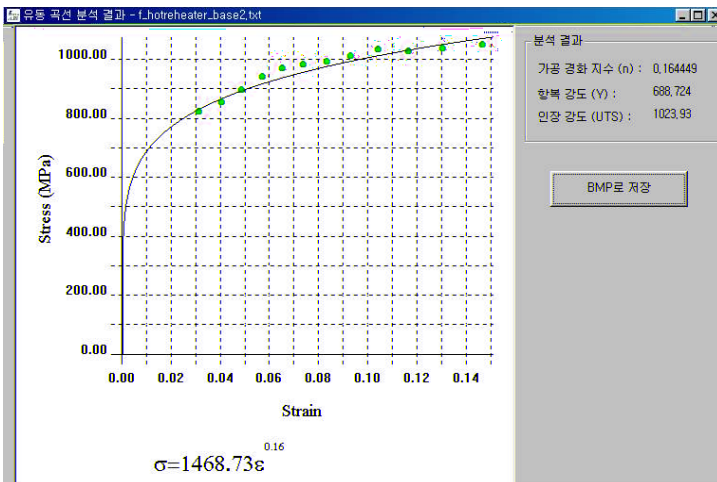
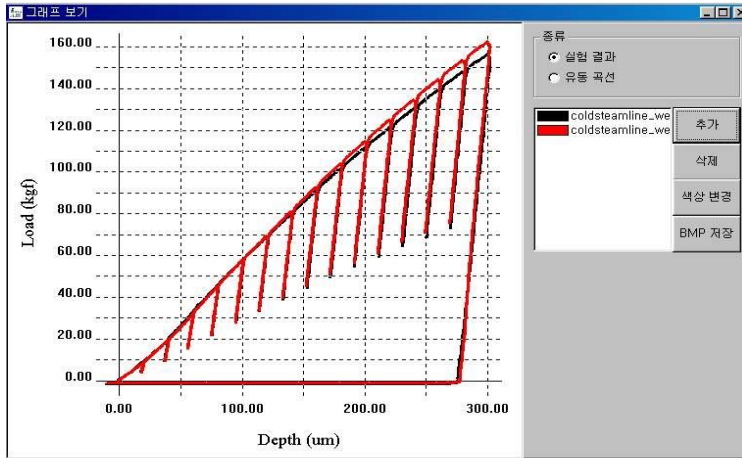
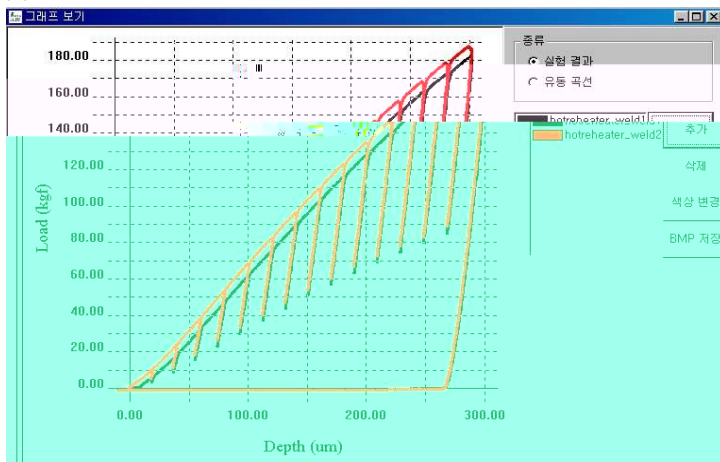


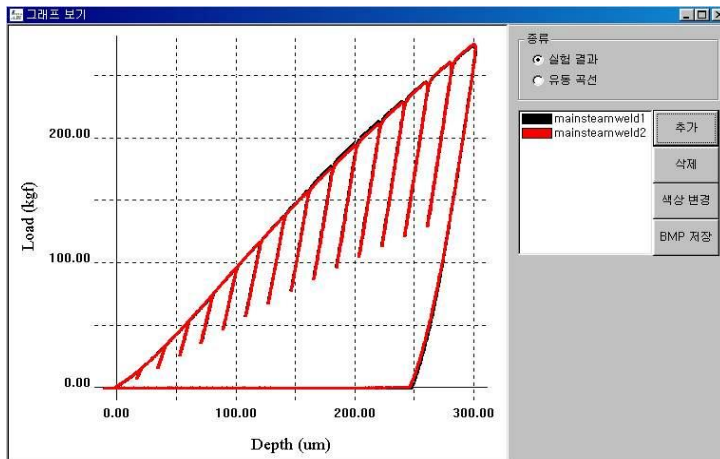
그림 7. 유동곡선(Hot reheat line base부)



(a)



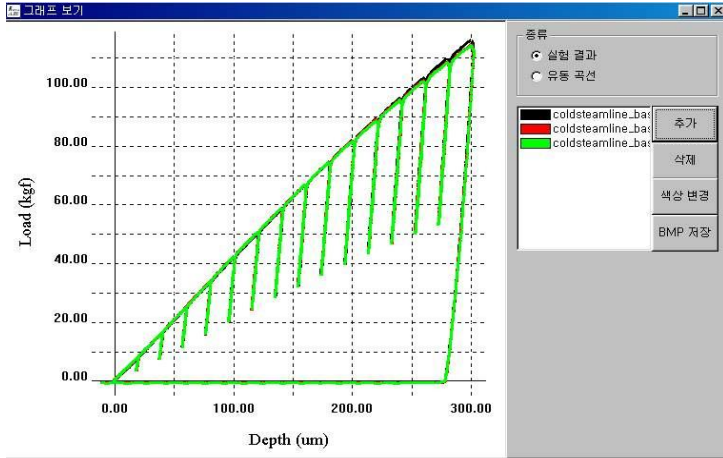
(b)



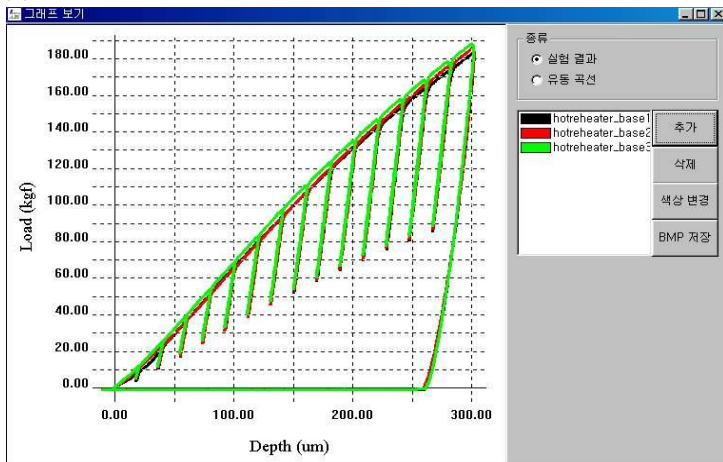
(c)

그림 8. Weld 부 압입하중-변위곡선 중첩;

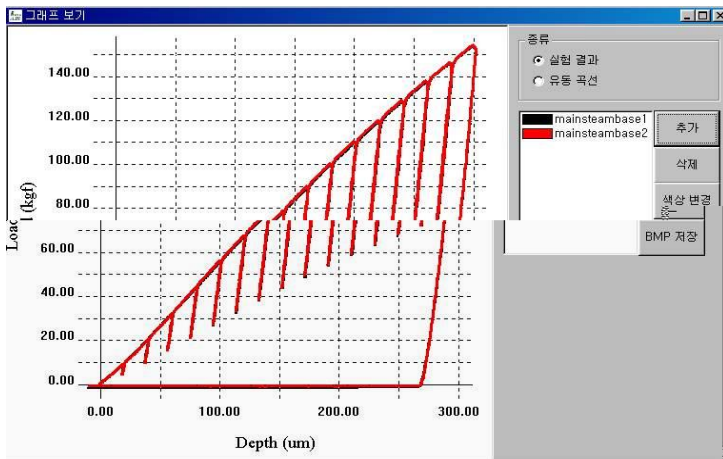
(a)Cold reheater, (b)Hot reheater, and (c)Main steam line



(a)



(b)



(c)

그림 9. Base 부 압입하중-변위곡선 중첩;
 (a)Cold reheater, (b)Hot rehaeater, and (c)Main steam line
 다. 태안화력 제6호기 배관 용접부 연속압입시험
 1)Cold reheater Steam line

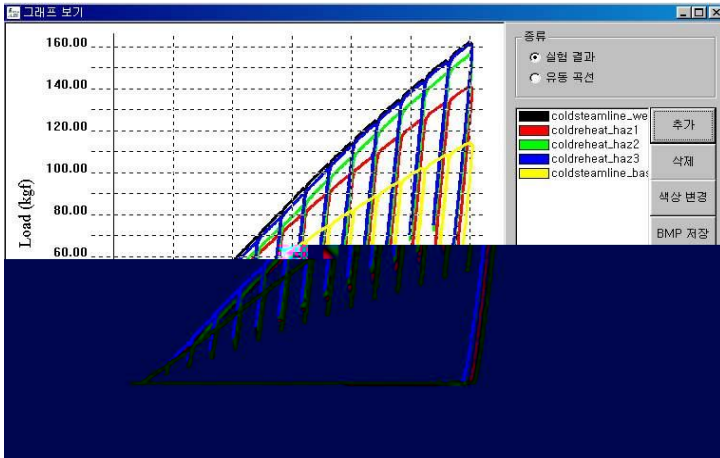


그림 10. Cold reheater line 압입하중-변위곡선 중첩(weld/haz/base)

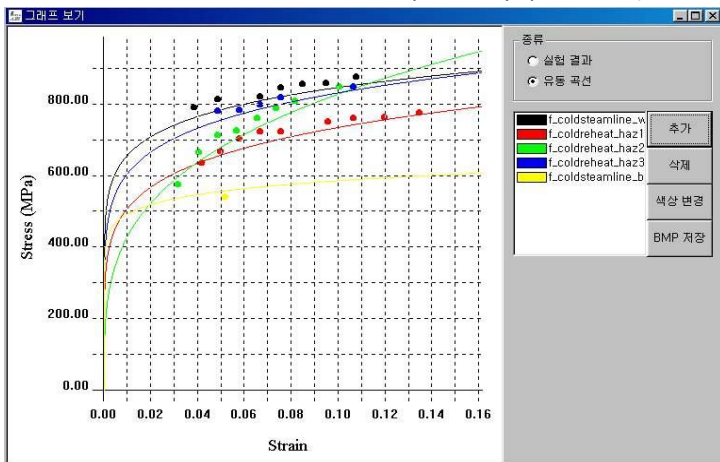


그림 11. Cold reheater line 유동곡선 중첩(weld/haz/base).

	평가부위	항복강도	인장강도
Cold reheater line	Weld(평균)	632	838
	Haz1	508	746
	Haz2	429	950
	Haz3	605	832
	Base(평균)	477	567

Cold reheater line pipe에 대한 연속압입시험 결과를 표 2에 나타내었다. 압입하중-변위곡선 및 유동곡선의 중첩결과 용착금속의 경우 평균 632MPa의 항복강도와 838MPa의 인장강도를 갖고, 모재의 경우 항복강도 평균 477MPa, 인장강도 평균 567MPa를 갖음을 확인할 수 있다. 열영향부의 경우에는 고유특성인 미세조직의 혼재로 인하여 불균일한 값의 분포를 보이지만, 인장강도는 모두 모재보다 높음을 확인할 수 있다. 이러한 강도 특성은 아래의 압입하중-변위곡선 상에서도 잘 나타나고 있다.

2) Hot reheater Steam line

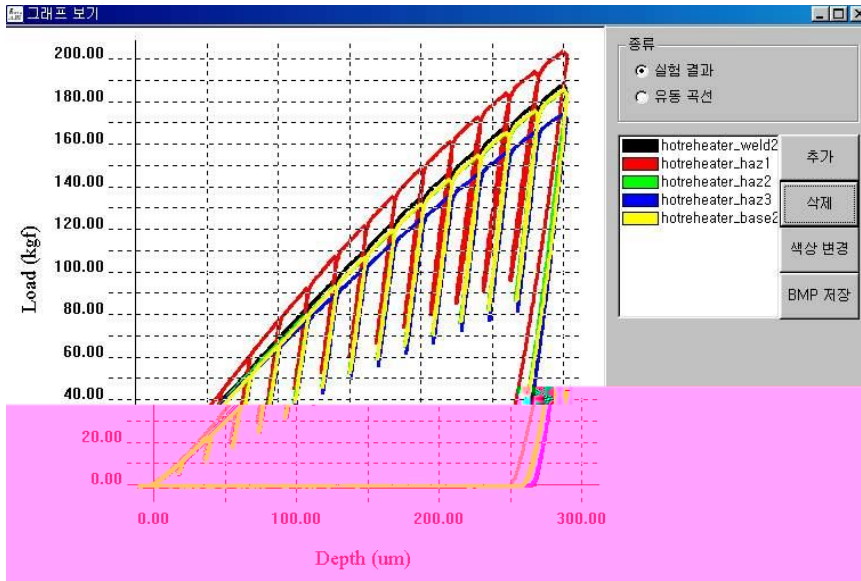


그림 12. Hot reheater line 압입하중-변위곡선 중첩(weld/haz/base).

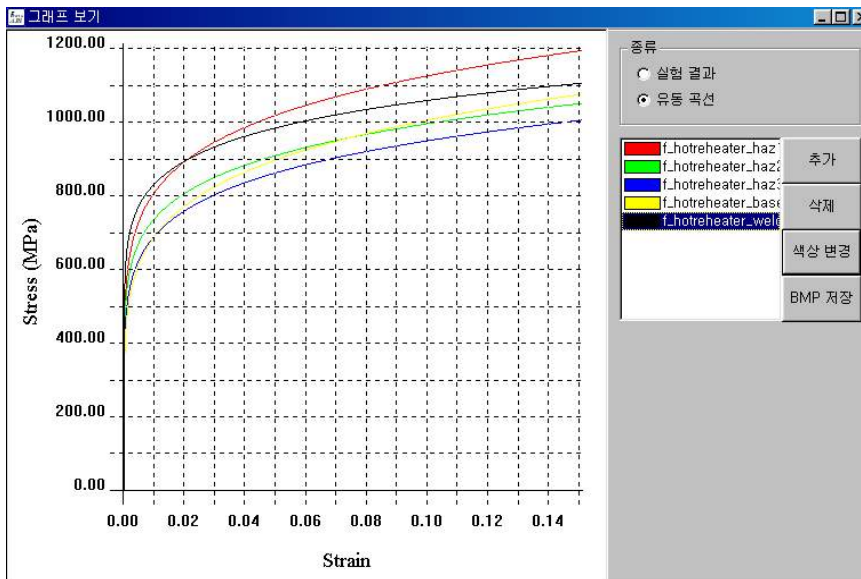


그림 13. Hot reheater line 유동곡선 분석결과 중첩(weld/haz/base).

평균값	평가부위	항복강도	인장강도
Hot reheater line	Weld(평균)	850	1022
	haz1	808	1131
	haz2	734	992
	haz3	690	951
	Base(평균)	674	1067

Hot reheater line pipe에 대한 연속압입시험 결과를 표 3에 나타내었다. Hot reheater line의 경우, 앞서의 cold reheater line 과는 약간 다른 양상을 보이고 있다. 항복강도는 용착금속에서 열영향 부, 모재로 갈수록 낮아지는 양상을 보이지만, 인장강도의 경우 용착금속과 모재의 경우 동일한 값을 갖는 것으로 나타났다. 한편 haz1의 경우 용착금속 및 모재의 인장강도 이상의 값을 갖지만, haz3의 경우에는 인장강도가 모재 및 용착금속의 인장강도 이하로 낮아짐을 확인할 수 있다. 이러한 강도 분포는 아래의 압입하중-변위곡선 상의 경향성과도 잘 일치함을 알 수 있다.

3) Main steam line

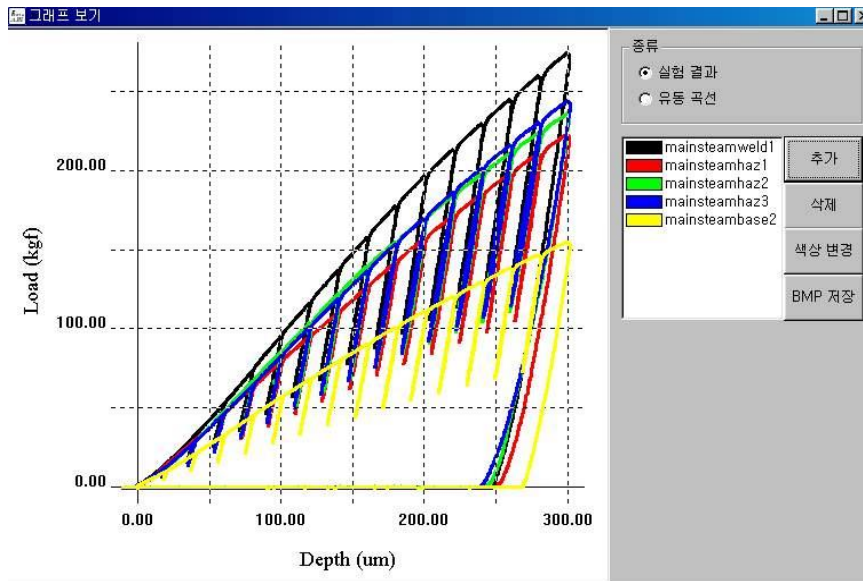


그림 14. Main steam line 압입하중-변위곡선 분석결과 중첩(weld/haz/base).

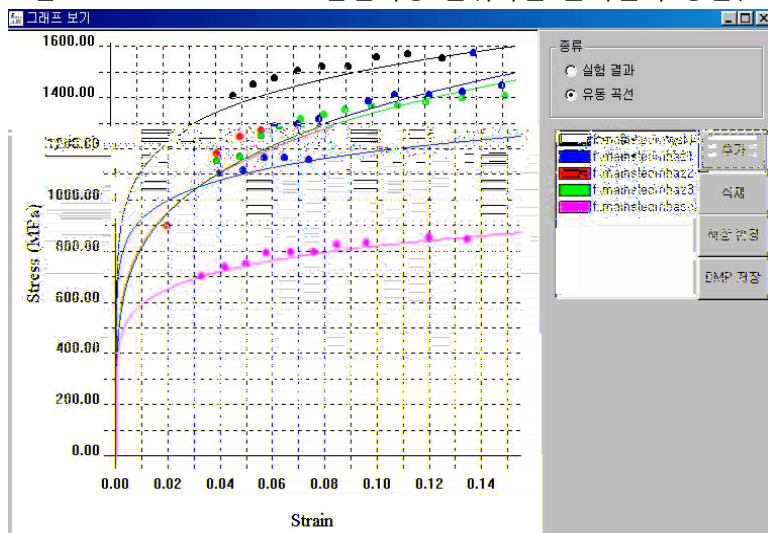


그림 15. Main steam line 유동곡선 분석결과 중첩(weld/haz/base).

평균값	평가부위	항복강도	인장강도
Main steam line	Weld(평균)	1128	1501
	haz1	927	1175
	haz2	826	1417
	haz3	815	1455
	Base(평균)	598	810

Main steam line pipe에 대한 연속압입시험 결과를 표 9에 나타내었다. 항복강도의 경우 hot reheater line 과 동일한 양상을 나타내고 있다. 용착금속, 열영향부, 모재의 순으로 항복강도가 낮아지고 있음을 확인할 수 있다. 인장강도의 경우에는 용착금속이 1500MPa정도의 높은 값을 갖고, 열영향부의 경우에는 용착금속의 인장강도보다는 낮지만 모재의 인장강도(평균 810MPa) 보다는 높음을 확인할 수 있다. 아래의 압입하중-변위곡선 변화 양상은 이러한 강도 분포의 경향성과 잘 일치하고 있다.

4) 시험결과의 종합

라. 현장 시험 신뢰도 확인을 위한 재확인 시험

배관명칭	사 양		PQR강도 (kg/cm ²)	연속압입시험		
	재 질	치 수		용착금속 (kg/cm ²)	열영향부 (kg/cm ²)	모재부 (kg/cm ²)
Main Steam Line	A335-P91	φ 406×53	106.12 105.11	153.1	119.9 144.6 148.5	82.7
Hot Reheater Steam Line	A335-P91	φ 722×21	106.12 105.11	104.3	115.4 101.2 97.0	108.9
Cold Reheater Steam Line	A335-P12	φ 710.2× 17.9	78.11 79.27	85.5	76.1 96.9 84.9	57.9

현장에서의 연속압입시험 결과, Main steam line pipe과 Hot reheater Steam line Pipe의 모재는 동일 재질인데 다른 물성을 나타내서 압입시험의 신뢰성을 확인하기 위하여 태안화력 6호기 main steam line 설치후 잔여자재로서 연속압입시험과 일축인장시험을 인장시험기 Instron 5582과 연속 압입시험기 AIS2000를 이용하여 시험결과를 비교하였다.

5회의 연속 압입시험을 통하여 그림 16과 같은 압입하중-변위곡선을 얻었으며, 이를 분석하여 그림 17과 같은 유동곡선을 유도하였다. 그림에서 보는 바와 같이 5회의 압입시험결과는 잘 일치하는 것으로 확인되었다.

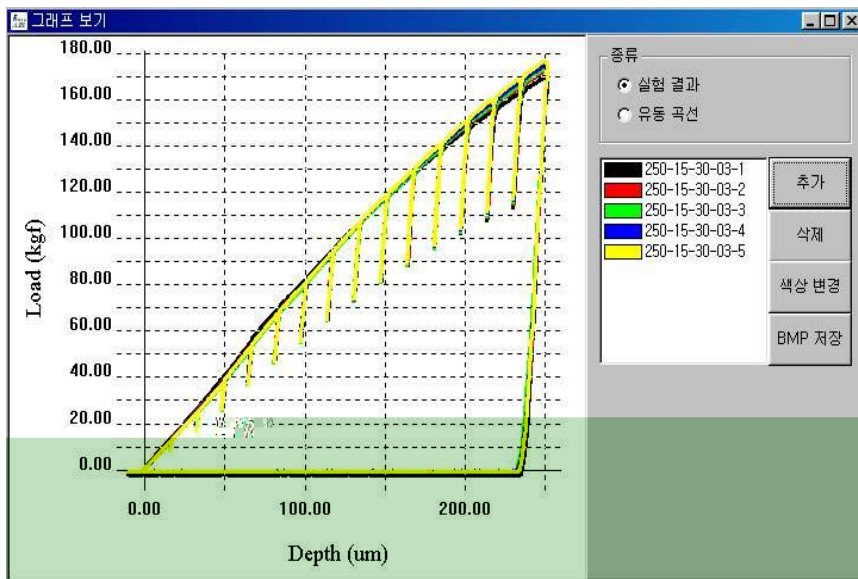


그림 16. 압입하중-변위곡선

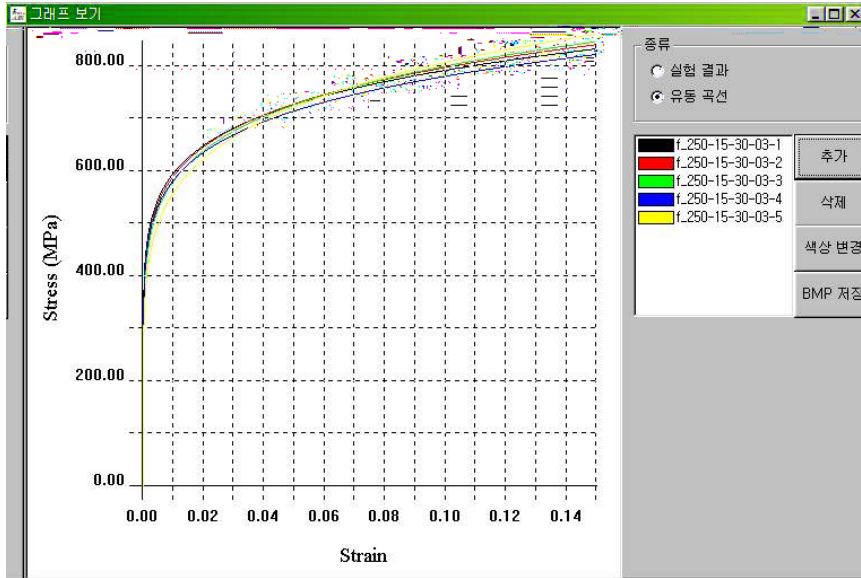


그림 17. 압입하중-변위곡선을 분석하여 얻은 유동곡선

연속 압입시험으로 얻은 유동곡선을 분석한 항복강도와 인장강도는 표 11과 같다.

표 11 연속압입시험을 통해 얻어진 main steam line pipe 모재의 인장물성.

1	541	745
2	594	786
3	589	794
4	579	800
5	581	776
평균	577	780

연속압입 시험결과의 정확도를 평가하기 위해 채취 시험편을 이용한 표준인장시험을 3 회 실시하였으며 결과는 아래의 그림 18 및 표 12과 같다.

그림 18 표준인장시험을 통하여 얻은 유동곡선

표 12. 표준인장시험을 통해 얻어진 main steam line pipe 모재의 인장물성.

	항복강도(MPa)	인장강도(Mpa)
1	569	776
2	560	762
3	576	768
평균	568	769

연속 압입시험법을 통하여 평가된 인장물성과 표준인장시험에 의하여 얻어진 물성간의 오차는 항복강도의 경우 1.6%이고, 특히 PQR에서 요구하는 인장강도의 경우 1.4%에 불과한 것으로 분석되었다. 따라서 main steam line의 실제 물성이 연속압입시험 결과가 나타낸 바와 같이 기존 PQR에서 나타낸 값보다 실제로 많이 낮음을 알 수 있다.

상기한 결과들을 종합할 때, 연속압입시험을 건설중인 발전설비에 적용할 경우 PQR 또는 spec.에서 제시한 인장강도의 만족여부를 현장에서 쉽고 정확하게 평가할 수 있어 발전설비 용접부의 정확한 품질관리와 건전성 확보가 가능함을 확인할 수 있었다.

마. 시험결과의 분석 및 평가

시험결과를 통해서 알 수 있듯이, 용착금속과 모재의 시험결과는 재현성있게 얻을 수 있어서 평균값으로 나타낼 수 있으나, 열영향부(HAZ)의 경우는 상당한 변화폭을 확인할 수 있다. 이는 아래 그림 19에서 나타낸 바와 같이 다층 용접(multi-pass welding)을 수행한 HAZ내에는 다양한 미세조직이 좁은 범위에서 혼재하기 때문이다.

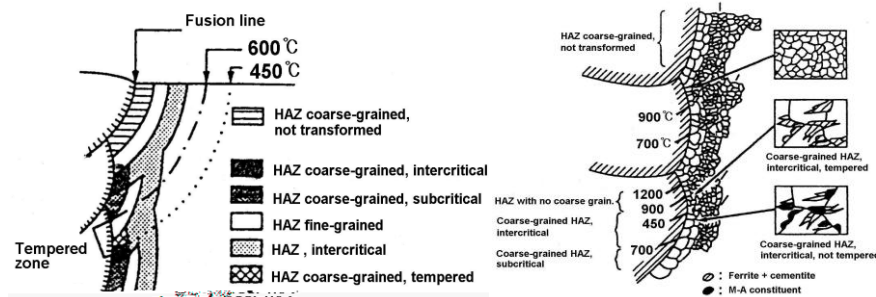


그림 19. 구조용 강재의 다층용접열영향부내 미세조직 변화의 전형적인 예
 세 가지의 배관에 대한 압입시험 결과, 구조 강도 측면에서 상대적으로 비교할 때는 main steam line > hot reheater line > cold reheater line 순으로 용접부의 인장강도가 작아짐을 확인할 수 있다. 이중 cold reheater line과 main steam line의 경우 용접부(용착금속 및 열영향부)의 인장강도가 모재에 비하여 높은 것으로 관찰되었고 hot reheater line의 경우도 용접부의 인장강도가 모재와 거의 비슷한 수준으로 확인되어 용접부의 안전성 측면에는 큰 문제가 없다고 판단된다. 또 용착금속과 모재의 항복강도도 비슷한 수준이어서 80년대 이후 구조물 용접부의 건전성 평가에 중요 이슈로 등장한 강도적 불균질 (strength mismatch) 측면에서도 문제는 없을 것으로 판단된다. 참고로 용착금속과 모재의 항복강도비($Sr=Y, WM/Y, BM$)가 1보다 너무 크거나(경질이음부-overmatched joint-의 경우) 너무 작으면(연질이음부-undermatched joint-의 경우) 역학적 측면에서 구조물의 건전성에 악영향을 미치게 된다. 이러한 사실들을 종합할 때, 본 시험대상인 용접부들은 건전성에 큰 문제가 없다고 판단된다.

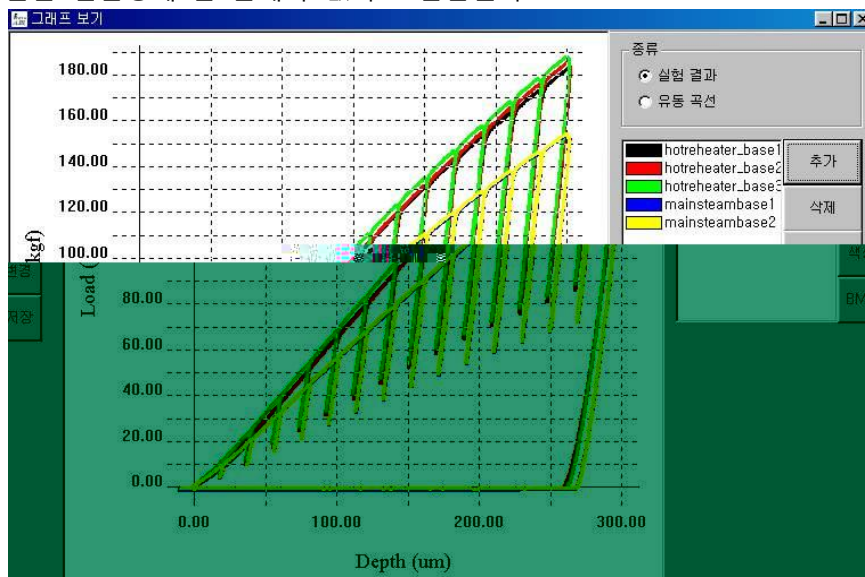


그림 20. Hot reheater line과 main steam line의 모재부 압입하중-변위곡선 비교
 (그림에서 동일한 압입깊이를 누르는데 필요한 하중값이 main steam line에서 재현성 있게 낮은 값을 나타내며, 이는 곧 강도의 저하를 의미한다.)

다만 연속압입시험 결과를 통하여 생기는 의문은 동일한 재료(A335- P91)를 사용한 hot reheater line과 main steam line의 용접부에 대한 현장 PQR에서는 두 가지 용접부의 경우 모두 인장시험 시 모재에서 파단되며 그 강도가 1,040 MPa로 동일한 것으로 기록되어 있으나 본 연속압입시험 결과 얻어진 모재의 인장강도는 동일하지 않다는 점이다. 즉, hot reheater line의 모재가 나타낸 인장강도의 경우 1,067 MPa로 PQR에 나타난 값과 거의 일치하고 있으나, 같은 재질로 알려진 main steam line의 모재는 810 MPa로서 PQR 제시 값과 큰 차이를 보이고 있다. 특히, 연속압입시험에서 이루어지는 인장물성 해석절차를 거치지 않더라도 재료의 반응을 순수하게 반영하는 하중-깊이변위 곡선을 비교할 때도 두 가지 line의 모재에 대한 평가결과가 아래 그림 20과 같이 다르게 나타나는 것으로 보아 두 모재는 서로 다른 물성을 가진 것이 확실하다고 판단된다.

또한 현장에서의 압입시험결과의 신뢰성을 재확인하기 위하여 시험실내에서 태안화력 6호기 main steam line 설치 후 잔여 자재를 이용하여 파괴적인 인장시험을 하여 비교한 결과 연속압입시험 결과와는 항복강도는 1.6% 인장강도는 1.4%의 오차가 확인되었으며 현장의 시험결과가 신뢰성이 있는 시험결과임을 확인되었다.

4. 결론

본 보고서에서는 연속압입시험의 원리를 응용한 비파괴적 인장물성 평가 시스템인 Advanced Indentation System을 활용하여 건설중인 화력발전소의 주요 배관 용접부에 대해 PQ(Pre-qualification) 시험을 수행한 결과를 소개하였다. 본 문에서 나타낸 바와 같이 현장에서 손쉽게 인장물성을 평가할 수 있었으며, 그 결과는 새로운 Pre-qualification test 자료로서 활용될 수 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 현재 발전소 건설중 현장 용접부의 기계적 성질에 대해서는 PQR(Pre-qualification Record)로서 간접적으로만 관리가 되고 있으나 본 연속압입시험 시스템을 건설중인 발전설비의 주요 용접부에 적용할 경우, 기존의 PQR 자료보다 정확도를 높인 현장 물성 자료를 얻을 수 있어 발전설비 용접부 품질관리 향상에 의한 설비 운전시 신뢰도를 보다 향상시킬 것으로 예상된다. 또, 최근 국내에서도 구조물/설비의 용접부에 대한 안전성 및 수명 평가에 대한 요구가 급증하고 있는 만큼 운용중인 발전설비의 사용적합성(fitness-for-service) 평가 및 수명 예측에도 본 연속압입시험법의 확대 적용이 기대된다.