발전 구조물의 안전성 평가를 위한 고효율 진단기술

계장화 압입시험법[1]은 기존의 경도 시험에 비해 한 차원 발전된 평가 방법 중 하나이며, 측정 방법은 연속적으로 가해지는 하중에 대한 변위값을 실시간으로 측정하고, 이로부터 얻어진 압입하중-변위곡선을 분석하여 기계적 특성을 평가할 수 있는 방법이다. 또한 각종구조물 및 다양한 산업설비의 사용 중 건전성 평가 및 역학 특성 평가에 활용되고 있다. 특히, 발전, 가스, 철도시설물과 관련된 구조물이 오랜 기간 사용되어짐과 동시에 외부에 충격 및 사고로 인해 발생될 수 있는 피해를 예측하기 위한 구조물의 수명평가에 적용할 수 있다. 또한 기존 파괴적인 측정방법과는 다르게 실제 산업 구조물을 파괴하지 않고 비파괴적인 방법으로 건전성 평가에 사용할 수 있다.

그림. 1 계장화압입시험 적용 모습
(영흥 화력 발전소 가동 전 Main Stream Line 용접부 강도 평가)

발전설비는 고온과 고압의 환경에서 운전됨으로 결함 발생 가능성이 높으며, 이에 따른 사고 발생 시에는 국내 산업전반에 미치는 파급 여파가 크고, 많은 경제적 손실도 뒤따르게 된다. 따라서 사용 중인 설비의 신뢰성 평가는 그 중요성이 더해지고 있으며, 이를 통해 얻을 수 있는 경제적 효과도 크게 증가하고 있다. 그리고 산업설비의 안전한 사용을 위한 재료의 신뢰성 유지 문제, 즉 재료의 열화도에 대한 정확한 평가는 설비 가동의 효율성을 매우 증대시키므로 경제에 미치는 긍정적 영향이 매우 크다고 할 수 있다. 대표적인 발전설비인 보일러 및 압력용기 등은 수많은 배관들로 용접되어 설치되어 있는데, 이들 배관들은 고온의 화염, 증기들과 접촉되어 가동되고 있다. 배관의 주요 손상원인은 고온에 의한 재료의 열화에 따른 손상과 취약부인 용접손상이 주류를 이루고 있어 발전소 유지보수업무 중에서 주요관심분야이다. 또한 최근 대두되고 있는 신재 불량 문제와 가동 중 설비에 대한 주기적 검사 방법도 많은 관심을 받고 있는 부분이다. 특히 용접 시의 열적 처리과정을 통해 발생하는 용접 잔류응력은 설비 구조물의 파괴를 유발할 수 있는 중요한 영향인자이므로, 설비 건설 시 및 운용 중 정량적인 평가를 통한 관리가 필수적이다. 신재의 도입이 이루어 질 때에는 함께 들어오는 서류(CMTR, CC, WPS등[2])와 동일한 결과를 나타내는지 알 수 있는 방법이 없어 시공 후 문제가 발생하는 경우가 많으며, 가동 중인 설비에 대한 기계적인 시험을 통한 수명평가가 아닌 화학적이거나 경험적인 시험법을 통하여 평가가 이루어지고 있다. 정확한 평가를 위해서는 기계적인 시험법이 필요한 상태이다. 하지만 사용 중인

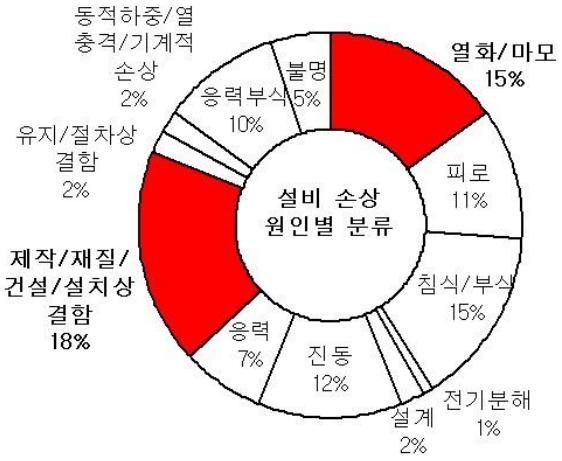
설비의 재료 적합성과 용접의 적정성을 평가하기위해서는 크리프시험, 기계적 강도시험, 잔류응력시험 등 각종 파괴적인 시험법을 실시해야 하는 문제점이 있으므로, 현장에서의 활용 가능성이 떨어져 이를 대체하고자 경도 및 조직복제시험과 같은 방법을 적용하고 있으나, 상기 시험법들은 비교적 정확도가 낮고, 엔지니어링 자료로 활용할 수 없다는 것이 가장 큰 문제점으로 되어 왔다. 또한 실제로 파괴적 표준 시험법이 가장 정확하지만, 인장시험이나 파괴시험법 등을 용접부에 적용할 때에도 다음과 같은 어려움이 존재한다. 첫째, 표준화된 시편 형상을 만들기 어렵다. 대체로 용접부의 형태는 불특정하며, 곡률을 갖고 있는 경우가 대부분이다. 시편을 채취하기 위해 용접부를 가공할 경우, 가공하는 과정에서 강도 특성이 변화가 올 가능성이 높기 때문에 시편 채취가 어렵다. 둘째, 불균질한 미세조직으로 인하여 시편 채취 위치에 따라 강도 특성이 달라진다. 하지만, 지금까지는 방법이 없어 발전소 현장 실 용접부에 대한 인장강도 측정은 이루어지지 않고 있으며, 용접부에 대한 기계강도는 용접시험편을 인장시험으로 얻은 결과로 용접절차검정서(Procedure Qualification Record)를 작성하여 발전소 현장 용접부에 대한 기계 강도를 간접적으로 보증하고 있다. 이를 보완하기 위해 All weld tensile testing이 보충되었지만, 건설 중 발전 설비 경제적/효율적 운영에 실질적인 도움이 되어 주지 못하고 있다. 다시 말해, 기존의 역학시험법들을 이용할 경우에는 적합한 형태의 시편을 채취하기가 곤란하고 시험방법이 파괴적이므로 시험에 소요되는 시간과 비용이 많이 들어간다는 단점을 가지고 있다. 따라서 시편 채취의 제한이 적으며, 국소 부위의 강도 특성과 용접부 잔류응력 효과를 정확히 평가할 수 있는 시험법인 계장화 압입시험법이 폭넓게 활용되는 계기가 되었다.

앞서 기술한 대로, 계장화 압입시험법은 구조적으로 시편수급이 곤란한 용접부 및 취약적 국부 영역의 기계적 특성 평가 및 잔류응력의 평가에 유리하고, 가혹한 환경 하에서의 사용시간 증가로 인한 재료열화에 따른 재료물성치의 변화를 연속적으로 측정하기에 매우 적합하다. 또한 긴 시험시간이 필요하지 않으므로 기존의 시험법들에 비해 시간 및 비용의 절감을 꾀할 수 있다. 본 시험법의 활용가치를 발전설비 적용에 따른 경제적인 효과로 산출함에 있어서 주된 근거는 설비 파손 확률 경감(자재 불량 확률 감소) 및 설비 파손 대책 기간의 연장을 들 수가 있다. EPRI 통계자료[3]에 의하면 원자력 발전 설비 배관의 손상율의 가장 큰 원인은 재질열화 및 초기 입고 자재 불량 손실이 가장 높다고 기술되고 있다. 본 기술 도입에 따른 경제적인 효과는 아래의 표에서 설명되어 있듯이, 전체 발전소를 대상으로 적용할 경우, 연간 수백억 원 이상의 효과를 얻을 수 있다. 세부 산출 근거는 아래와 같다.

<세부 산출 근거>

- 판매 전력량(발전원가) 대비 설비 수선 유지비 비율: 평균 8.5% (2002년도 기준)
- 판매 전력량 증가율: 평균 10% (1998~2002년 증가율 평균)
- 재질 열화 및 초기 입고 자재 불량 손실액: 총 수선 유지비의 33% (EPRI 통계자료 기준)
- 압입시험 적용 시 손상방지 비용 (가정):
  재질열화 및 초기입고 자재불량 손실액의 5~10%
- 가정 근거:
  압입 시험 적용에 따른 설비 파손확률 경감 및 설비 검사 주기 연장 효과 등 고려 시

원자력 발전설비 배관의 손상율 현황 (EPRI 통계 자료)



설비 손상 원인 중 30% 이상이 재질 열화 및 초기 입고 자재의 불량 등에 기인!

그림.2 발전 설비 배관의 손상률 현황

표 1. 경제적 기대 효과 (단위 : 억원)

연도	2005년	2006년	2007년	2008년	2009년	2010년
수선 유지비	21,741	23,915	26,306	28,937	31,830	35,013
재질열화 또는 초기 입고 재질 결함에 의한 손실액	7,174	7,892	8,681	9,549	10,504	11,554
화력	4,663	5,130	5,643	6,207	6,828	7,510
수력	143	158	174	191	210	231
원자력	2,368	2,604	2,865	3,151	3,466	3,813
압입시험 적용 시 손상방지 예상금액[A)]	계장화 압입시험법의 현장 적용하여 재질열화 및 초기 입고재질에 대한 손상진단의 가치를 약 5~10%정도로 설정한다면 약 350억~1000억에 이르는 비용 절감 효과 기대					

◆ 압입시험 적용 시 손상방지 예상금액[A)]: 계장화 압압시험법(Instrumented Indentation technique, IIT)외 재질열화 및 초기 입고 재질에 대한 진단 방법이 다양하지만, 실제 현장에서 정량적으로 평가할 수 방법이 계장화압입시험법(IIT)외 기타 방법들은 제한적이므로 활용하기가 쉽지 않다. 산업현장에서 발전설비(보일러, 터빈 등)측정을 주기적으로 모니터링 및 측정한다면 재질 열화 및 손상에 의한 위험도(Risk)를 줄일 수 크게 줄일 수 있을 것으로 판단됨.

경제적인 절감효과 외 재료의 잔여수명 예측에 이은 신뢰성 평가에 있어서 중요한 변수인 기계적 물성에 대해 고온·고압의 사용 환경 및 경년열화에 따른 물성 변화에 대한 데이터베이스를 구축하는데 있어서 계장화 압입시험법은 매우 유용하게 이용될 수 있다. 이러한 데

이터베이스의 구축은 사용 중인 재료의 신뢰성에 대한 기준을 제공하고 수리·교환시기의 적절한 선택을 가능하게 하여, 엄청난 물적·인적 피해를 일으키는 재료의 파괴를 미연에 방지하는데 큰 도움을 준다.

---

1) 본 시험법은 이미 KS규격(KS B0950, KS B0951), 한국전력산업기술기준(KEPIC MDF-A370), ISO/TR29381 등을 획득하여 산업전반에 활용되고 있다.

2) 자재시험 검수용 자료(설계자 또는 시공자가 발주자에게 제출해야 하는 필수자료)
   # CMTR (소용자재시험성적서): Certificate of Mill Test Report
   # CC or C of C (품질보증서): Certificate of Compliance
   # WPS (용접인정시방서): Welding Procedure Specification

3) EPRI 통계 자료 - [출처: 전력연구원- 화력발전소 장수명화 기술연구 2000]