

# 배관의 품질검사를 위한 연속압입시험법의 적용

김판석, 최열\*, 장재일\*, 권동일

서울대학교 재료공학부

\*(주) 프론틱스 기술연구소

## Application of Continuous Indentation Testing Method for Evaluating the Strength Quality of Pipeline

Pan-seok Kim, Yeol Choi\*, Jae-il Jang\*, Dongil Kwon

School of Materials Science and Engineering, Seoul National University

\*Research Center, Frontics, Inc.

### 1. 서론

일축 인장시험(uniaxial tensile test)은 재료의 기계적 성질을 평가하기 위하여 가장 널리 사용되어온 시험법이다. 인장시험결과는 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, 이중재료 접합부와 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 경도를 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 계장화 장치를 이용하여 연속적으로 측정하는 연속 압입시험법이 개발되어 활발히 연구되고 있다[1-3]. 본 논문에서는 본 저자들 중 일부가 소속한 Frontics 사가 개발한 새로운 연속압입시험 시스템의 이론적 배경 및 얻어지는 데이터의 유용성 평가결과, 그리고 그 시스템을 활용한 응용 연구 사례를 간략히 제시하였다.

### 2. 연속압입시험법의 이론적 배경

다중 압입시험 방식을 사용하는 연속 압입시험법은 일회 시험을 통하여 그림 1에 나

타낸 압입하중-변위곡선을 여러 단계에 걸쳐 얻게 된다. 압입깊이는 변위측정센서로 측정된 압입자의 이동거리로 구하게 되는데, 실제 재료와 압입자가 접촉하는 깊이는 압입자 주변의 탄성, 소성 변형양상에 의해서 측정된 압입깊이와 달라지게 된다.

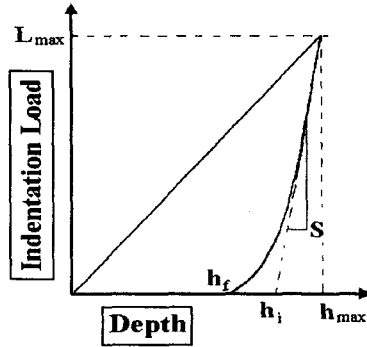


Fig. 1. Schematic illustration of indentation load-depth curve.

압입자 주변의 재료가 탄성적으로 굽혀지는 현상에 의한 접촉깊이의 변화는 재료의 탄성회복에 해당되는 압입하중제거곡선의 초기 접선의 기울기이자 stiffness에 해당하는 값인 S값을 이용하여 구하게 된다. 이때, 하중제거 곡선을 멱함수로 나타내고, 이를 최대 압입깊이에서 미분함으로써 기울기 S를 평가한다. 우선 탄성굽힘을 고려한 압입자와 시편의 접촉깊이  $h_c^*$ 는 elastic flat punch 이론을 이용하여 앞서 결정된 기울기를 따르는 직선을 압입하중 L이 0인 상태까지 외삽하여 평가하게 된다[4]. 그러나 일반적으로 회복과정은 압입자 하부에서도 동반되며, 이에 따라 압입자의 기하학적 형상이 주요한 영향을 끼치게 되고, 이를  $\omega$ 라는 압입자 형태상수로 보정한 식 (1)이 제시되었다[5].

$$h_c^* = h_{max} - \omega \frac{L}{S} \quad (1)$$

L은 압입하중이며,  $\omega$ 는 압입자의 기하학적 형태에 관련된 상수이다.

압입자 주변에 소성변형이 진행됨에 따라 변형된 재료가 압입자 주변에 쌓이는 pile-up 현상이나 압입자 하부로 밀려들어가는 sink-in현상이 발생하는데, 압입자/시편의 접촉반경은 가공경화지수 n과 직접적인 관계를 갖는 압흔주변의 이러한 현상들[6]에 의해서 크게 영향을 받는 것으로 확인됨에 따라 수정된 접촉반경은 식 (2)를 통하여 평가하여야 한다.

$$a^2 = \frac{5}{2} \frac{2-n}{4+n} a_*^2 = \frac{5}{2} \frac{2-n}{4+n} (2Rh_c^* - h_c^{*2}) \quad (2)$$

여기서 n은 가공경화지수, R은 압입자 반경, a는 접촉반경이며, 식 (2)를 통해 얻어진 접촉반경에서 기하학적인 관계를 이용하여 실제 접촉깊이인  $h_c$ 를 구하게 되며, 이를 후속적인 평균 접촉압력 및 압입 변형률 등의 평가에 이용하게 된다.

압입하중의 증가에 따라 압입자 하부에서는 점차 평균 접촉압력과 변형률이 증가하

는데, 압입하중의 증가에 따른 압입자 하부 소재의 변형거동은 탄성, 탄/소성, 완전소성 영역으로 천이됨이 보고되었다[7]. 유동특성의 평가를 위해서는 압입시험 결과에서 유동응력과 압입 변형률의 분석이 필요하다. 우선 유동응력은 식 (3)과 같이 각 세 단계에서 평균 접촉압력과 유동응력의 비인 소성구속인자  $\Psi$ 를 결정함으로써 평가한다.

$$\sigma = \frac{P_m}{\Psi} \quad (3)$$

식 (3)의 비 값은 Francis의 연구식[7]을 포함한 다양한 식들이 있으나 본 연구에서는 압입자 하부 변형상황의 모델링을 통해 제시한 단계 별 모델링 식[1,8]들을 활용하였다.

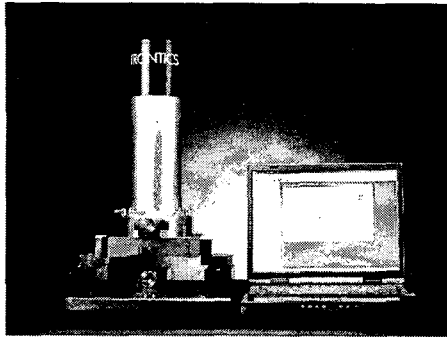
다음으로 구형 압입자 하부의 변형률을 정의하는 초기연구에서는 우선 압입자의 형상과 소성 접촉반경을 관련지어 실험적으로 압입 변형률을  $0.2a/R$ 로 표현하였으나, 실험적인 한계로 인해 몇가지 강제에서만 유효한 결과를 나타내었다. 따라서 본 연구에서 사용한 변형률은 실제적인 압입변위를 미분하여 평가한 변형률 개념에서 식 (4)를 이용하여 압입변형률을 정의하였다[3].

$$\varepsilon = \frac{a}{\sqrt{1-(a/R)^2}} \frac{a}{R} \quad (4)$$

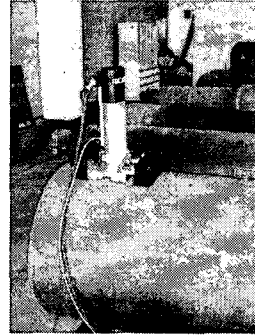
이를 바탕으로 다양한 재료에 대해 시험을 행하였으며, 일축인장 시험결과와 비교할 때 완전 소성영역에서 유동특성을 정확하게 평가함을 확인할 수 있다. 또한 유동곡선을 Hollomon 식에 따라 적합화 하거나, 가공경화지수와 균일연신을  $\varepsilon_u$ 가 동일하다는 연속체 이론을 사용함에 따라 재료의 항복강도와 인장강도 및 가공경화지수를 쉽게 구할 수 있다.

### 3. 연속압입 시스템의 개발

전술한 이론적 배경을 바탕으로 본 저자들 중 일부가 소속한 Frontics사에서 개발한 새로운 연속압입시험 시스템인 Advanced Indentation System (AIS 2000)을 그림 2에 나타내었다. 최적의 default 시험조건 설정과 함께 사용자 편의에 따라 시험조건변환도 용이하므로 현장시험 및 학술연구에의 활용에 모두 적합하도록 하였으며, 다양한 부착장치를 이용하여 현장 구조물/설비에의 적용성을 극대화하였다. 연속압입시험 결과 나타나는 압입하중-변위곡선은 전술한 이론들을 기반으로 프로그래밍한 유동곡선 평가 소프트웨어를 이용하여 분석함으로써 시험과 동시에 항복강도, 가공경화지수 및 인장강도와 같이 일축 인장시험에서 구할 수 있는 전반적인 변형관련 강도 물성을 평가할 수 있게 하였다.



(a)



(b)

Fig. 2. Portable advanced indentation system developed by FRONTICS, Inc.  
 (a) Lab. application and (b) Field application using curved magnetics.

#### 4. 연속압입 시스템을 이용한 응용 연구 사례

##### 4.1. 발전 및 유화 설비의 열화물성 평가를 통한 수명 평가

고온 고압하에서 장시간 운용되는 발전설비와 유화설비의 경우, 사용 온도, 시간, 부하조건, 부식환경 등의 영향에 의해 재질형 열화(연화, 취화, 침부식, 원자력에서의 조사 손상 등)와 균열형 손상(피로균열 및 부식 균열의 성장 등)을 필연적으로 경험하게 된다. 이 중 균열형 손상은 육안검사, 방사선법, 초음파법, 자분 탐상법, 와전류 탐지법, 음향방출법 등의 비파괴적 검사를 통하여 비교적 정확한 균열 크기 진단이 가능하다. 이에 비하여 재질형 열화를 비파괴적으로 평가하는 기술로는 레플리카법, 경도법, 전기 저항법, 초음파법, 전기화학적 분극법 등이 있으나 이들 시험법들은 경험적 비교 데이터(reference data)를 필요로 하고 경험적인 관계식을 활용함에 따른 결과의 부정확성이 평가의 어려움으로 지적되고 있다. 반면에 인장시험, 크리프 시험과 같이 실험실에서 수행하는 기계적 성능 시험은 그 결과치는 정확하지만 시험편 채취에 어려움이 많은 현장 설비에의 적용성은 극히 제한적이다. 그러므로 현장에서 연속압입시험법을 통하여 비파괴적으로 정확한 기계적 열화 물성을 평가할 수 있다면 현장 설비의 건전성 진단에 큰 전기가 마련될 수 있다.

그 일례로서 유화설비의 리포머 튜브(reformer catalyst tube)로 사용되어온 25Cr-20Ni-0.5C 조성의 HK-40 강에 대한 평가결과를 간단히 소개하면 다음과 같다. 이 강의 설계 수명은 10만 시간이고, 본 연구에서는 신재와 4만 시간 사용재, 7만 시간 사용재의 세 종류 시험편에 대하여 평가를 수행하였다. 미세조직을 관찰한 결과, 4만 시간 사용재의 경우 interdendrite 및 결정립계의 1차 탄화물이 조대화되었고 cavity 분율은 0.4%로 관찰되었으며, 7만 시간 사용재의 경우 탄화물 조대화 양상은 비슷하나 cavity 분율이 1.0%에 달하여 과대성장한 cavity의 연결로 인한 균열 발생 양상을 나타

내고 있었다.

이 시험편에 대하여 일반적인 기계적 물성 시험을 수행한 결과를 표 1에 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이 4만시간 사용재와 7만시간 사용재의 경우, cavity의 영향으로 탄성 영역에서 취성 파괴의 양상을 나타냄에 따라 인장 시험이 불가하였고, 마이크로 비커스 경도와 로크웰 경도는 4만 시간 사용재와 7만 시간 사용재 사이에 큰 차이를 나타내지 않았다. 이는 미세조직의 열화 정도가 크게 차이가 나는 두 시험편의 열화 물성을 경도시험이 잘 반영하지 못한다는 것을 의미한다. 이는 무척 흥미로운 결과인데, 기존의 비파괴적 물성 시험법들중에서 경도법이 열화 물성을 측정하는데 있어 상대적으로 가장 정확하다고 알려져 있기 때문이다.

이에 본 저자들은 새로 개발한 연속압입 시스템인 AIS2000을 활용하여 인장 물성치를 비파괴적으로 평가하였고, 그 결과를 표 2에 수치로 나타내었다. 사용시간의 경과에 따라 항복강도가 급격히 증가하는 반면 가공경화지수가 감소함을 알 수 있다. 인장강도의 경우 증가하였다가 감소하는 경향을 나타내었는데, 이는 가공경화지수의 급감에 따른 것이다.

Table 1. Results from conventional tests.

Properties	Virgin Material	40,000h -used	70,000h -used
MicroVickers Hardness	202 Hv	225 Hv	233 Hv
Rockwell B	88 HRB	92.6 HRB	93.2 HRB
Charpy Impact	10.8 J	3.3 J	4.0 J
YS	324 MPa	non-available	
UTS	743 MPa		

Table 2. Results from AIS tests.

Properties	Virgin Material	40,000h -used	70,000h -used
YS (MPa)	327	400	632
UTS (MPa)	751	861	772
n	0.3	0.28	0.09

이러한 결과로부터 새로운 연속압입 시스템을 통해 현장물성으로 측정된 항복강도나 가공경화지수의 변화를 열화도 평가의 기준으로 활용할 경우 기존의 경도법보다 훨씬 정확하고 미세조직의 열화를 민감하게 반영한 수명평가가 가능할 것으로 판단된다.

#### 4.2. 설비/구조물 용접부에 대한 PQ (Pre-Qualification) 시험

강 구조물 또는 설비에서 예상치 못한 파괴가 발생하는 원인은 기본적으로 다음의 세 가지로 나눌 수 있다. 우선 사용재료의 기본적인 강도와 인성의 부족, 둘째로 용접부의 인성열화와 결함 및 역학적 불균질성, 셋째로 구조적 불연속부에서의 응력집중이 그 원인이다. 다양한 공학적 경험을 바탕으로 재료기술과 건축기술을 보유하고 있는 현재에는 구조물의 설계와 재료의 기본적인 성질이 거의 요구환경에서 만족되고 있으며

로, 역시 가장 주의를 기울여 안전성을 평가해야 하는 부위는 용접부이다. 현재의 세계적인 제강 기술의 수준으로 보아서도 모재의 기계적 성질보다 용접부의 파괴인성 및 강도를 적절하고도 합리적으로 평가하는 것이 훨씬 더 중요하다.

하지만 미세조직이 국부적으로 급변하는 용접열영향부(heat-affected zone)의 경우, 기존의 인장시험을 적용하기가 불가능하므로 대부분의 경우 마이크로 비커스 시험(micro-Vickers test)을 통하여 강도의 변화경향 만을 판단하고 있다. 이에 새로운 연속압입 시스템을 활용하여 인장물성을 평가할 경우, 역학적 안전성 평가에 필요한 주요 자료로서 활용할 수 있을 뿐 아니라 용접부에 대한 사용전 시험(pre-qualification test)으로써 구조물/설비의 기본적인 건전성 확보가 가능하게 된다는 큰 장점이 있다.

본 논문에서는 그 사례로서 건설중인 화력발전설비의 주증기관(main steam line) 용접부에 대하여 현장에서 연속압입시험을 수행한 결과를 소개하겠다. 그림 3과 같이 건설중인 주증기관의 용접부에 연속압입시험기를 직접 부착하여 실험을 수행하였고, 연속압입 시험 결과 그림 4(a)와 같이 나타나는 압입하중-변위곡선을, 압입시험 이론을 프로그래밍한 유동곡선 평가 소프트웨어를 이용·분석함으로써 시험과 동시에 항복강도, 가공경화 지수 및 인장강도를 얻을 수 있었다. 그림 4(b)는 가동중인 화력발전설비의 주증기관 용접부에 대한 부착실험을 통하여 얻어진 모재/열영향부/용착금속의 인장곡선 그래프이다.

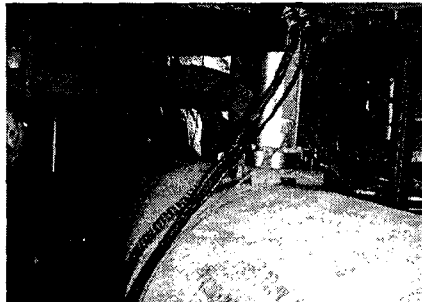


Fig. 3. Advanced Indentation System attached to main steam line in fossil power plant.

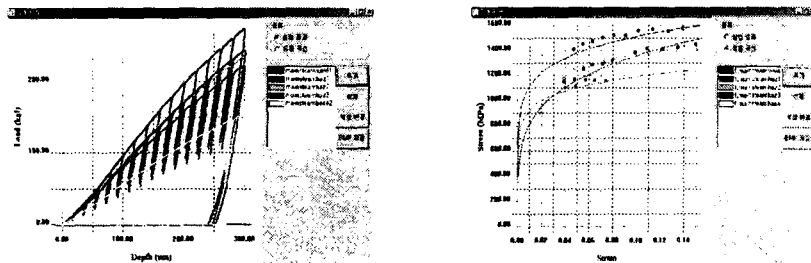


Fig. 4. Comparison of (a)indentation load - displacement curves and (b) flow curves at base/HAZ/weldment of main steam line in fossil power plant.

압입곡선의 분석 결과 동일한 깊이까지 압입하는데 필요한 하중이 용착금속, 열영향부, 모재의 순으로 낮아짐을 알 수 있으며, 이러한 경향성과 일치하여 결과적으로 얻어진 유동곡선, 항복강도, 인장강도 등도 동일한 변화경향을 나타냄을 확인할 수 있었다.

Table 3. Comparison of tensile properties obtained by continuous indentation and tensile test.

시험회수	항복강도(MPa)	인장강도(MPa)
1	541	745
2	594	786
3	589	794
4	579	800
5	581	776
평균	577	780
인장시험결과	539	762

한편 현장에서 수행된 압입시험의 신뢰성을 재확인하기 위하여 주증기관 건설 후 남은 잔여자재에 대하여 연속압입시험과 일축인장시험을 인장시험기 Instron 5582와 연속압입시험기 AIS2000을 이용하여 시험결과를 비교하였다. 5회의 연속압입시험의 결과와 인장시험 결과를 표 3에 나타내었으며, 압입시험결과가 인장시험결과와 잘 일치함을 확인할 수 있다. 또한 현장시험결과와 PQR에 기록된 물성을 비교한 결과, 거의 유사함을 확인하였고 이에 따라 새로운 PQ 시험의 한 가지로 연속압입시험이 사용될 수 있다고 판단되었다.

## 5. 결론

지금까지 새로이 개발된 연속압입 시스템의 데이터 유용성과 본 시스템을 활용하여 연구를 수행하였던 응용 분야의 일부 사례들을 소개하였다. 현재 연속압입시험법을 통한 계장화 정도 측정이 ISO 표준시험법 14577에 새로운 등록을 앞두고 있고, 인장물성 평가 역시 미국 시험 및 재료 협회(ASTM)를 중심으로 표준화에 대한 논의가 활발히 진행중으로, 연속압입시험법은 그 활용범위를 넓혀가고 있고, 크리프 및 피로 성질 평가 등 새로운 분야의 물성 평가에의 활용에 대한 연구들도 수행중이다.

국내에서도 다양한 인프라 구조물의 복합화, 대형화추세에 따라 초대형 구조물/설비의 파괴역학적 안전성 평가에 대한 요구가 급증할 것으로 예상되는 만큼 본 연구에서 소개한 연속압입 시스템과 같이 현장에 적용 가능한 새로운 기술들의 지속적인 개발 및 실용화가 이루어지리라 생각한다.

## 참고문헌

- 1) 이정환, 권동일, “연속압입시험법을 이용한 재료의 진응력-진변형률 곡선 평가”, 대한금속·재료학회지, Vol. 35, No. 12, pp. 1616-1625, (1997)
- 2) Haggag, F. M., Nanstad, R. K., Hutton, J. T., Thomas, D. L., and Swain, R. L., “Use of Automated Ball Indentation Testing to Measure Flow Properties and Estimate Fracture Toughness in Metallic Materials”, ASTM STP 1092, pp. 188-208, (1990)
- 3) 안정훈, 최열, 권동일, “압입하중-변위곡선의 해석을 통한 재료의 소성유동특성 평가”, 대한금속재료학회지, Vol. 38, No. 12, pp. 1606-1611, (2000)
- 4) Doerner, M.F. and Nix, W.D., “A Method for Interpreting the data from depth-sensing indentation instruments”, J. Mater. Res., Vol. 1, pp. 601-607, (1986)
- 5) Oliver, W.C. and Pharr, G.M., “An Improved Technique for Determination Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments”, J. Mater. Res., Vol. 7, No. 6, pp. 1564-1583, (1992)
- 6) Norbury, A.L. and Samuel, T., “The Recovery and Sinking-in or Piling-up of Material in the Brinell Test, and the Effects of These Factors on the Correlation of the Brinell with Certain Other Hardness Tests”, J. Iron steel Inst., Vol. 117, pp. 673-687, (1928)
- 7) Francis, H.A., “Phenomenological Analysis of Plastic Spherical Indentation”, J. Eng. Mater. Technol. Trans. ASME, Vol. 98, pp. 272-286, (1976)