

산업설비 부품소재의 품질검사를 위한 연속압입시험법의 적용

Application of continuous Indentation Technique for quality Inspection of Industrial Facilities, components and materials

김성훈 · 이윤희 · 권동일 · 최열*

서울대학교 재료공학부

*(주) 프론틱스 기술연구소

1. 서 론

산업전반에서 제품의 성능 향상이 요구됨에 따라 각종 설비 및 구조물, 기계부품, 공구, 금형 등의 장수명, 고정밀화, 고성능화가 필요하게 되었고, 이에 부응하기 위해 소재 열처리, 표면 개질 등의 소재 품질 개선방안들이 개발, 적용되고 있다. 따라서 이러한 열처리 등을 통하여 개선된 소재의 기계적 물성을 평가하는 과정이 수반되어야 하며, 특히 현장 산업설비에 설치된 소재의 기계적 물성을 정확히 평가하는 것은 최종적인 설비 및 구조물, 각종 부품 등의 품질관리 및 경년 손상에 따른 건전성 평가에서 가장 필수적인 과정이다. 현재 실구조물의 건전성 평가를 위해 일반적으로 사용되는 방식으로는 크게 결함의 유무 및 정도에 대한 평가와 기계적 성질의 평가의 방법으로 크게 나눌 수 있다. RT, UT, PT 등 다양한 현장 비파괴 시험법은 다양한 대상에 대해 널리 적용되고 있다는 장점에 비해 데이터 해석과 시험법 적용이 경험적이고 간접적이어서 건전성 평가에 적극 활용될 수 없다는 단점을 가지고 있다. 이에 반해 기계적 성질 평가법 중 가장 일반적인 일축인장 시험의 경우 설비, 구조물 및 소재의 기계적 물성을 정확히 제시함으로써 그 결과가 건전성 평가에 직접 활용될 수 있다는 장점에 반해, 일정 크기와 형태를 갖춘 표준시험편의 채취가 필요하고, 채취가 가능하다 하더라도 용접부와 같이 내부에 다양한 미세조직 기울기 및 이에 기인한 물성 변화를 가지는 경우에는 적용되기 어렵다는 단점이 있다.

이러한 문제점에 대해, 현장적용성이 우수하다는 비파괴시험법의 장점을 가짐과 함께 건전성 평가에 직접 활용될 수 있는 다양한 기계적 물성을 제시해 줄 수 있는 시험법에 대한 연구가 다양하게 진행되었다. 그 중

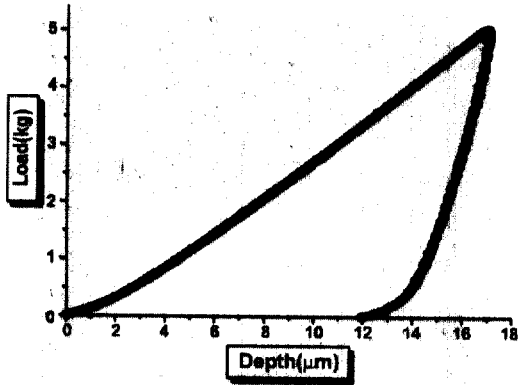
에서도 가장 구체적으로 현장에 적용되고 있는 시험법이 연속압입시험법이다. 이 시험법은 목적에 맞는 여러 가지 압입자를 통해 시험체에 하중을 다중으로 부가함과 동시에 이에 따른 연속적인 압입 변위를 측정함으로써 얻어지는 압입하중-변위곡선의 해석을 통해 경도는 물론 항복강도, 인장강도, 가공경화지수 등의 인장물성과 잔류응력 등 다양한 물성을 획득할 수 있다. 또한 압입자에 의해 시험체에 남겨지는 압흔의 크기는 최대 수백 μm 에 불과해 거의 비파괴적이라는 특징이 있다. 특히 용접부와 같이 국소영역에 걸쳐 물성이 변화하는 소재에 대한 물성평가를 위해 적극 활용될 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 논문에서는 연속압입시험에 대한 소개와 함께 그것의 다양한 활용 사례에 대해 살펴보고자 한다.

2. 연속압입시험기법

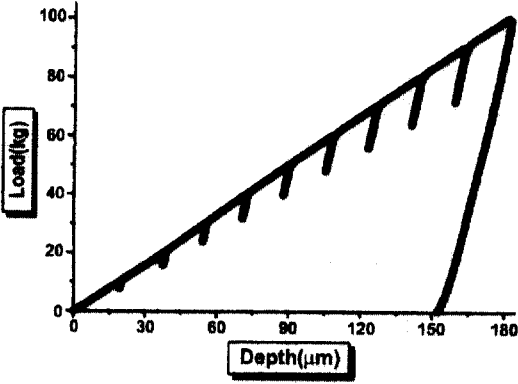
연속압입시험을 통해 얻을 수 있는 압입하중-변위곡선은 일반적으로 단일 압입 시험방식과 다중압입 시험방식을 이용하여 Fig. 1과 같은 곡선을 얻게 된다. 보통 압입깊이는 변위측정센서로 측정된 압입자의 이동거리로 구하게 되는데, 실제 재료와 압입자가 접촉하는 깊이는 압입자 주변 재료의 탄성, 소성 변형에 의해 측정된 압입깊이와 달라지게 된다¹⁾.

압입자 주변의 재료가 탄성적으로 굽혀지는 현상에 의한 접촉깊이의 변화는 재료의 탄성회복에 해당되는 압입하중제거곡선의 초기 접선의 기울기인 $S_{\text{값}}$ 을 이용하여 구하게 된다. $S_{\text{값}}$ 은 재료의 stiffness에 해당되며, 탄성변형을 고려한 접촉깊이 h_c^* 는 다음과 같이 구할 수 있다.

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



(a)



(b)

Fig. 1. Indentation load-depth curves: (a) single indentation curve and (b) multiple indentation curve.

L 은 압입하중이며, ω 는 압입자의 기하학적 형태에 관련된 상수로 flat punch의 경우에는 1, 구형압입자의 경우에는 0.75 그리고 Vickers 압입자의 경우에는 0.72이다.

한편 압입자 주변에 소성변형이 진행됨에 따라 Fig. 2와 같이 변형된 재료가 압입자 주변에 쌓이는 pile-up 현상이나, 압입자 하부로 밀려들어가는 sink-in 현상이 발생한다.

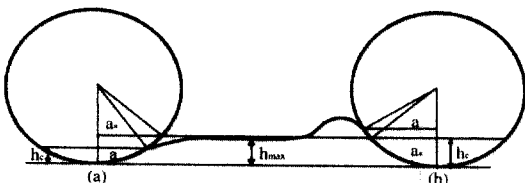


Fig. 2. The (a) sink-in and (b) pile-up phenomena.

이때 pile-up/sink-in 현상에 의한 접촉깊이의 변화는 다음과 같이 나타난다.

$$a^2 = \frac{52-n}{24+n} a_c^2 = \frac{52-n}{24+n} (2Rh_c^* - h_c^{*2}) \dots\dots\dots (2)$$

여기서 n 은 재료의 가공경화지수, R 은 압입자 반경, a 는 실제 접촉반경이며, 식(2)를 통해 얻어진 접촉반경에서 기하학적인 관계를 이용하여 실제 접촉깊이인 h_c 를 구하게 된다.

2.1 유동특성 평가

일축인장시험을 통해 얻어지는 인장곡선의 항복이후의 영역에서 진응력과 진변형률은 일반적으로 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\sigma = K\varepsilon^n \dots\dots\dots (3)$$

(σ :진응력, K :응력계수, ε :진변형률)

구형압입자를 이용한 압입시험에서의 변형률은 재료의 깊이방향으로의 변위를 기하학적인 관계를 이용하여 구한 후 미분하여 얻어지는 변형률 값 중 최대값에 적합화 상수를 적용함으로써 식 (4)와 같이 접촉반경 또는 접촉깊이의 함수로 나타난다²⁾.

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

한편, 압입자 하부의 응력은 압입하중과 접촉면적의 비인 평균압력(P_m)과 일정한 관계를 가지고 있는데, 일반적인 인가하중인 kgf 이상의 하중에서는 일정한 상수비(ψ)를 가지며, 이 상수는 압입시험을 통해 결정된다.

$$\sigma = \frac{P_m}{\psi} \dots\dots\dots (5)$$

Fig. 1(b)와 같이 다중하중제거 시험방식을 통해 얻어진 압입하중-변위곡선에서 각 하중제거곡선을 이용하여 접촉깊이와 접촉반경을 결정하고, 이를 통해 진응력과 진변형률을 구할 수 있다.

2.2 잔류응력 평가

잔류응력이 재료에 가해지고 있을 경우, 압입하중-변위곡선은 Fig. 3과 같이 변화하게 된다. 압축응력이 가해질 때는 일정 압입깊이에 도달하기 위해 인가되는 압입하중이 증가하게 되며, 인장응력이 가해질 때는 그와

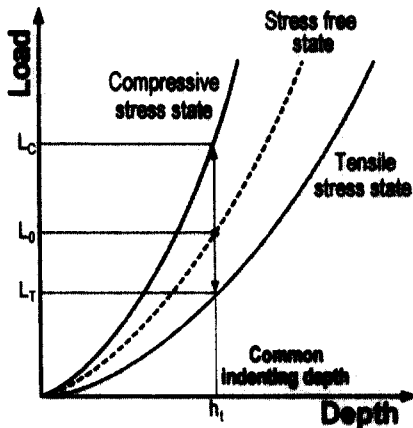


Fig. 3. The schematic diagram showing the variation of indentation loading curves by the change of stress states.

반대가 된다.

Fig. 3에서 최대 압입깊이 h_1 를 유지하면서 인장 잔류응력을 제거하면, h_1 의 최대 압입깊이에 대응하는 무응력 상태에서의 압입하중 L_0 가 발생하여야 하므로 압입자에는 잉여하중 L_{res} 가 추가되어야 된다. 인장 잔류응력 존재시의 압입하중 및 압입깊이 (L_T, h_1)에 대해서 식 (6)의 관계가 성립한다.

$$L_0 = L_T + L_{res} \dots\dots\dots (6)$$

이 잉여하중을 그때의 접촉면적 A_c^0 로 나누어주면 잔류응력은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{res} = \frac{L_{res}}{A_c^0} \dots\dots\dots (7)$$

따라서 무응력상태와 잔류응력 존재시의 압입하중-변위곡선을 구하게 되면 위의 식을 통해 잔류응력을 유도할 수 있다.

2.3 연속압입시험기의 개발

앞서의 이론적 배경을 바탕으로 연속압입시험을 통해 다양한 기계적 물성들을 유도하기 위한 시험기가 국내에서 개발되었다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 (주)프론틱스에서 개발된 AIS 2000 (Advanced Indentation System 2000)은 최대압입하중 300 kgf, 하중 분해능 0.3 kgf, 최대압입깊이 3.0 mm, 깊이 분해능 0.2 μ m의 성능을 갖고 있다. 또한 기기가 가볍고, 실제 구조물에

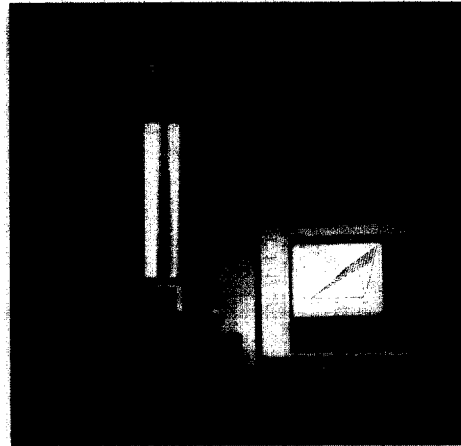


Fig. 4. The photo of AIS 2000(Advanced Indentation System 2000)

부착하여 사용할 수 있도록 체인, U-block, 곡물자석 등의 다양한 부착부를 제작하여, 다양한 형태의 구조물에 직접 적용할 수 있다.

3. 품질검사를 위한 연속압입시험법의 적용

3.1 유통특성 평가

3.1.1 신재 품질 평가

경량 합금에 합금 원소를 첨가함으로써 강도를 향상시킨 신합금의 개발이 지속적으로 진행중에 있다. 이러한 신합금의 개발시에는 강도 향상을 검증하기 위한 인장물성 평가가 요구되고 있으나, 제조공정 상의 한계로 인하여 현재에는 제조시료의 크기가 표준 인장시편규격에 미치지 못하여 인장시험을 실시하지 못하는 경우가 많다. 이와 같이 개발중인 신합금에 대하여 새로운 연속압입시험법을 적용할 경우 좁은 면적의 재료표면에 대한 시험만으로도 인장물성의 평가가 가능하다는 장점을 충분히 활용할 수 있다.

본 논문에서는 그 예로 알루미늄 합금 A2218에 합금 원소를 첨가하고 시효경화시켜 강도를 향상시킨 신합금에 대하여 연속압입시험을 수행한 결과를 소개하였다.

시험에 사용된 재료는 상기에 기술한 바와 같은 알루미늄 합금 A2218과 이에 임의의 합금원소 α 를 첨가하여 용체화 처리 후 시효경화시킨 A2218+ α 이며, Fig. 5에서 보는 바와 같이 제조된 시편들의 크기는 지름 12 mm, 두께 8 mm이다. 연속압입 시험후 실험결과와 정확도 평가를 위하여 압입시험에 사용된 시편과 동일



Fig. 5. A2218/10Cr specimen after testing by AIS 2000.

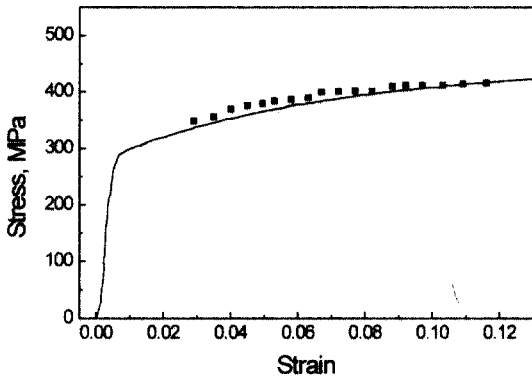


Fig. 6. Comparison between compressive curve from compression test and flow curve from AIS 2000 in A2218.

한 조성과 규격을 가진 시편에 대하여 압축시험을 행하였다. 본 합금과 같이 면심입방결정(face-centered cubic)을 가진 재료의 경우, 체심입방결정(body-centered cubic) 금속에서 관찰되는 쌍정 방향으로의 비대칭성 변형 거동이 없어 인장시험과 압축시험의 결과가 이론적으로는 동일하게 나타나게 되므로 결과의 타당성 검증이 가능하다.

Fig. 6에서 연속압입 시험결과와 압축시험결과를 비교하였다. Fig에서 실선으로 표현한 곡선이 압축시험에서 얻어진 결과이며, 곡선 위에 중첩된 점들은 압입시험을 통하여 얻은 결과로서, 두 결과가 잘 중첩되고 있음을 나타내고 있다. 이러한 결과를 토대로 개발중인 신합금의 인장물성 평가에 새로 개발된 연속압입 시스템이 유효하게 사용될 수 있음을 확인할 수 있다.

3.1.2 연속압입시험을 이용한 용접부의 강도 품질 사전 평가

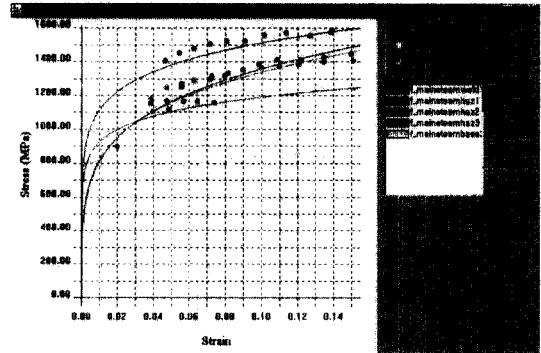


Fig. 7. Comparison of flow curves at base/HAZ/weldment of main steam line in fossil power plant.

용접구조물의 건설시 발생가능한 용접결합은 각종 용접기술기준에 따른 비파괴 검사 실시를 통하여 엄격히 관리되고 있으나, 용접부의 기계적 특성은 사전품질관리 기록서(PQR, Pre-Qualification Record)에만 의존하고 있다. 하지만 PQR은 시간과 비용 및 시험편 채취의 어려움으로 현장 용접조건을 재현한 하나의 시험편에 대하여 실험실적으로 인장시험을 수행한 결과를 기록한 후 동일 용접기준에 모두 적용하기 때문에, 현장 용접부의 다양한 구속조건 및 시공환경에 따른 물성변화를 반영하는데에는 한계가 있다. 그러므로 만일 연속 압입 시험을 통하여 현장에서 각 용접부의 인장물성을 비파괴적으로 평가할 수 있다면, 건설중인 용접부의 품질 향상에 크게 기여할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 그 사례로서 건설중인 화력발전설비의 주증기관(main steam line) 용접부에 대하여 현장에서 연속압입시험을 수행한 결과를 소개하였다. Fig. 7은 가동중인 화력발전설비의 주증기관(main steam line) 용접부에 대한 부착실험을 통하여 얻어진 모재/열영향부(HAZ, heat-affected zone)/용착금속의 인장곡선 그래프이다.

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 분포특성을 가짐을 확인할 수 있었다. 이를 현장실험결과와 PQR(pre-qualification record)에 기록된 물성을 비교한 결과, 거의 유사함을 확인하였고 이에 따라 새로운 PQ 시험의 한 가지 방법으로 연속압입시험이 사용될 수 있다고 판단되었다. 한편 현장에서 수행된 압

Table 1. Comparison of tensile properties obtained by continuous indentation and tension 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

입시험의 신뢰성을 재확인하기 위하여 주증기관 건설 후 잔여자재를 활용하여 PQ 시험시 파단부위로 판명된 모재에 대하여 연속압입시험과 일축인장시험을 실험실적으로 수행하여 그 결과를 비교하였다. AIS 2000을 활용한 5회의 연속 압입시험 결과와 Instron 5582를 사용한 인장시험 결과를 Table 1에 나타내었으며, 두 결과가 정량적으로 잘 일치함을 확인할 수 있다.

3.1.3 기타 응용 분야

상기한 내용들 외에 AIS의 응용분야로는 설비/구조물의 사용적합성(fitness-for-service) 평가를 위한 code 구축, 자동차 · 선박 · 철도차량 · 항공기 등의 점 용접부 및 기타 부위에 대한 품질 관리, 이종 재료의 FEM 분석을 위한 기초 자료 제공, 철강 및 금속가공품 생산 공정시의 경제적인 품질 검사 등 다양한 분야들이 있으나 이들에 대한 자세한 내용은 지면관계상 본 논문에서 생략하였다.

3.2 잔류응력 평가

용접부는 구조물에 있어 가장 취약부임에도 불구하고 국부적으로 변화하는 물성에 의해 신뢰성 평가가 용이하지 않다. 특히 용접 시의 불균일한 열출입에 의해 발생하는 잔류응력은 신뢰성 저하의 주 원인임에도 불구하고 평가할 수 있는 기법이 거의 없는 실정이다. 이에 용접부의 국부 잔류응력을 연속압입시험법을 통해 평가하는 연구를 수행하였다.

SS400 강재를 동종의 재료로 용접한 시편을 제작하였다. 용접비드를 제거한 시편은 기계연마를 거친 후 2% Nital 용액으로 에칭하여 용착금속과 용접 열영향부(HAZ), 모재 간의 경계를 명확히 하였다. 압입시험은 모재로부터 용접부를 가로질러 압흔의 상호영향을 피하

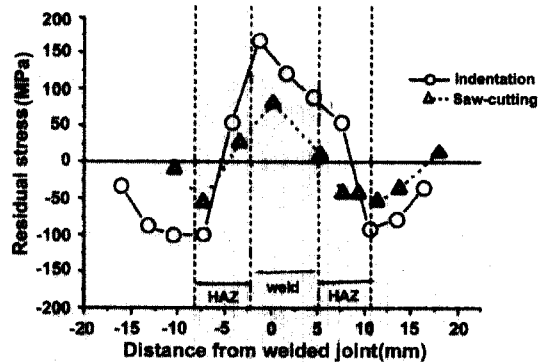


Fig. 8. The residual stress distributions from indentation and saw-cutting.

기 위해 3 mm의 간격을 두고 일직선을 따라서 행하였으며 보다 정밀한 결과를 얻기 위해 각 선 사이에 3 mm 간격을 두고 3회 행하였다. 무응력 상태의 압입 하중-변위곡선은 용접부로부터 충분히 떨어진 모재를 무응력 상태로 고려하여 측정하였다. 절단실험을 병행하여 정확도를 검증하였다.

Fig. 8에 나타난 바와 같이 모재로부터 HAZ, 용착금속을 거치면서 각각 압축-인장-압축의 잔류응력이 존재함을 뚜렷이 볼 수 있었으며 절단 실험과 압입실험에 의해서 측정된 잔류응력값이 동일한 경향을 보임을 알 수 있다. 잔류응력의 부호는 잘 일치하고 있으나, 약간의 절대값이 차이가 남을 알 수 있는데, 이는 접촉면적의 부정확성에서 기인하는 것이며, 이를 보정하기 위한 보다 세밀한 연구가 뒷받침된다면 보다 정확한 결과를 얻을 것으로 판단된다.

3.3 고온 강도특성 평가

발전소 설비나 석유화학설비 등 고온환경 하에서 사용되는 설비 및 구조물용 재료에 대한 수요가 증가하고 있으며, 강의 구성 원소 및 조직 형태에 따라 고온사용으로 인한 강도의 증가나 감소의 경향이 나타나게 된다. 공구강인 STD61강에 대한 고온 압입 시험의 결과에서는 Fig. 9에서와 같이 온도가 증가함에 따라 동일한 압입깊이에서의 하중값이 점차 감소함을 알 수 있다. 하중값이 점차 감소하는 것은 동일한 변형을 유발하기 위한 응력이 감소하는 것을 의미하므로, 온도가 증가함에 따라 재료의 강도가 감소하는 것으로 판단할 수 있다. 이는 고온인장시험결과와도 잘 일치함을 알 수 있다.

이를 바탕으로 RPV강의 용접부에 대한 고온압입시험

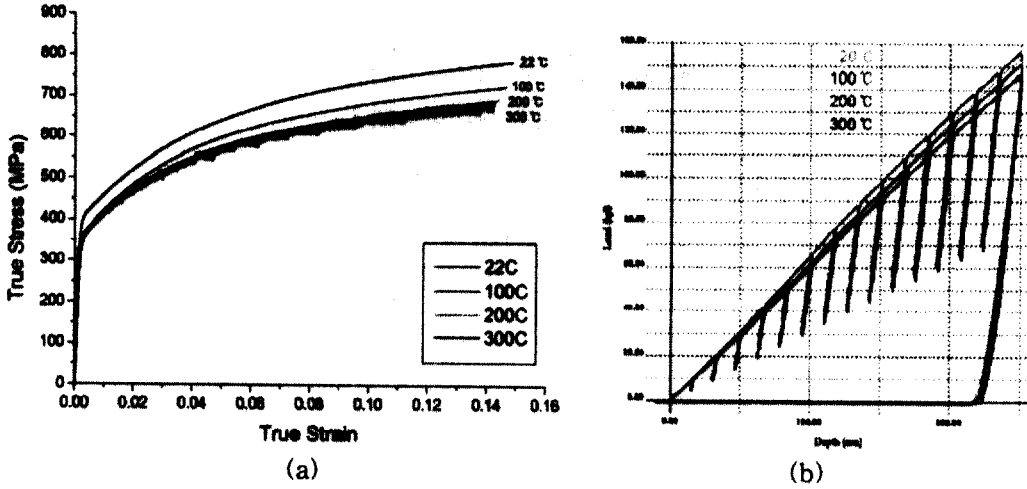


Fig. 9. Experimental results in (a) tensile test and (b) indentation test for various temperatures.

Table 2. Experimental results in indentation test for RPV steel

Testing Condition		Yield Strength	Tensile Strength	Work-hardening exponent
25°C	Base	434	614	0.148
250°C	Base	364	544	0.167
	HAZ	645	924	0.152

을 실시하였으며, 모재와 열영향부에 대해 행해진 압입 시험의 결과는 Table 2에서와 같다. 실험결과는 STD61강에서와 유사하게 온도가 높을수록 강도가 낮게 나타나고 있음과 동시에, 열영향부의 강도가 모재보다 높은 특징이 있음을 알 수 있다. RPV 강 of 열영향부는 마르텐사이트, 베이나이트 등의 다양한 미세구조를 가지고 있으며, 다양한 크기의 결정립과 석출물들이 존재하는 특징을 가지고 있다. 따라서 모재에 비해 상대적으로 높은 강도를 가지는 것으로 알려져 있으며, 위에서 나타난 결과는 이를 잘 만족시키고 있음을 알 수 있다.

4. 맺음말

지금까지 연속압입 시험으로 얻은 각종 물성 데이터의 유용성과 응용분야를 소개하였다. 이러한 방법은 기존의 기계적 물성 평가방법들이 가지는 단점으로 인해 적용될

수 없었던 다양한 분야들에 대해 폭넓게 응용됨으로써, 새로운 공정의 적용이나 가공 전후의 물성 변화를 가장 빠르게 알 수 있는 데이터를 제공할 수 있을 것이고, 결과를 FEM 해석 등에 이용함으로써 새로운 공정 개발에도 많은 기여를 할 수 있을 것이다. 또한 압흔 크기의 미세함으로부터 국부적인 부분에서 발생하는 물성 변화를 비교적 정확히 평가함으로써 취약부를 판단하는 근거로 활용될 수 있을 뿐 아니라 제품의 품질 평가에의 적용도 용이할 것으로 판단된다. 이러한 활용을 바탕으로, 다양한 부착 장치의 도입함으로써 설비 및 구조물에 직접 부착 시험할 수 있어, 현장에서 안전성 진단을 위한 기본데이터인 기계적 물성을 얻을 수 있으며, 데이터 베이스를 충분히 확보할 경우 수명평가에도 적극 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. J.H. Ahn and D. Kwon, "Derivation of plastic stress-strain relationship from ball indentation: Examination of strain definition and pileup effect", J. Mat. Res., Vol. 16, No. 11, pp. 3170-3178 (2001)
2. 안정훈, 최열, 권동일, "압입하중-변위곡선의 해석을 통한 재료의 소성유동특성 평가", 대한금속재료학회지, Vol. 38, No. 12, pp. 1606-1611 (2000)
3. 이윤희, 최열, 권동일, "나노압입시험과 응력완화 모델링을 통한 박막 잔류응력 평가", 대한금속재료학회지, Vol. 39, No. 10, pp. 1101-1107 (2001)