

소형펀치 시험을 이용한 API 5L X65 강의 수소취화에 관한 연구 II : 용접부

장상엽[†] · 윤기봉*

중앙대학교 대학원, *중앙대학교 기계공학부
(2009년 4월 28일 접수, 2009년 5월 18일 수정, 2009년 5월 18일 채택)

Study on Hydrogen Embrittlement for API 5L X65 Steel Using Small Punch Test II : Weld Metal

Sang Yup Jang[†], Kee Bong Yoon*

Graduate School of Chung Ang University

*Department of Mechanical Engineering, Chung Ang University

(Received 28 April 2009, Revised 18 May 2009, Accepted 18 May 2009)

요 약

본 연구에서는 X65강의 용접부에 전기화학적 방법으로 수소를 장입한 이후에, 소형펀치시험편을 사용하여 기계적 강도를 평가하고 파면을 분석하였다. 모재부의 경우와는 다르게 용접부에서는 수소장입정도에 따라 강도저하가 민감하게 나타나는 거동을 보였다. 수소장입시 전류밀도, 온도, 장입시간의 변화에 따라 강도 및 연신율 등의 기계적 성질이 민감하게 변화하였다. 특히, 전류밀도가 높고 장입시간이 길어짐에 따라서 강도의 저하가 크게 나타났으나, 상대적으로 전해질 온도의 영향은 비교적 작게 나타났다. 또한 주사전자현미경을 통해 관찰한 시험편의 파면에서 수소침투된 표면근처의 재료에서 취성파면이 발견되었으며, 이는 강도의 저하 거동과 일치되는 경향이다. 수소취화 거동 평가 연구를 위해 본 연구에서 채택한 시험시스템은 재현성이 높게 나타나고 있으며, 이 방법을 이용한 재료의 강도평가 결과 매우 높은 신뢰성을 보이고 있다. 따라서 소형펀치시험과 전기분극법을 이용함으로써 X65강 용접부의 수소취화에 의한 강도변화를 민감하게 평가할 수 있었다. 산출된 데이터의 통계적인 처리를 통해 강도변화값을 예측할 수 있었음도 보였다.

주요어 : 소형펀치시험, 수소취화, X65강, 전기화학시험법, 용접부

Abstract — With weld metal of X65 steel, hydrogen was charged by electro-chemical method and mechanical behavior such as strength was measured by the small punch test. The weld metal was more sensitive to hydrogen charging than the case of base metal. The small punch (SP) strength was decreased as the hydrogen contents increased. Magnitude of strength decrease was dependent on current density, temperature, charging time. Current density and charging time have significant effect on the mechanical properties but temperature of electrolyte has limited effect. Fractured surfaces of the tested specimens were observed by SEM (scanning electron microscope). In the hydrogen charged specimens cleavage fracture were observed, which is consistent with the SP test results. Since the testing procedure for studying hydrogen embrittlement proposed in this study has shown good reproducibility of test results, the proposed method can be assumed to be a reliable test procedure. Using the electrochemical charging and the small punch test, the change of SP strength for X65 weld metal due to hydrogen embrittlement could be evaluated sensitively.

Key words : small punch test, hydrogen embrittlement, X65 steel, electrochemical test, weld metal

[†]To whom correspondence should be addressed
221 Huksuk Dongjak Seoul 156-756 Korea
E-mail : kbyoon@cau.ac.kr

1. 서 론

최근 세계적으로 미래의 수소경제, 수소사회에 대한 청사진이 제시되면서, 활발한 연구가 추진되고 있는데, 특히 수소의 사용과 안전, 인프라 확충에 많은 관심이 집중되고 있다. 대량 생산된 수소의 이송을 위해서는 배관망에 의한 이송이 가장 실용적이며 안정적인 방법이라 할 수 있다. 배관에 의한 수소공급이 관심을 갖게 되면서, 배관재료에 대하여 수소의 침투거동과 취화에 관한 연구가 진행되고 있다⁽¹⁻⁴⁾.

천연가스 배관 X65강의 용접부를 이용하여 수소취화에 관한 연구를 수행하였다. 모재부와는 달리 용접부는 금속의 조직이 균일하지 않으며 모재부에 비하여 강도는 높지만, 파괴인성 등의 기계적인 특성이 좋지 못한 부분 이므로, 많은 재료관련 연구자들의 관심이 되고 있다. 대부분의 수소에 관련된 기계적인 거동을 평가할 때 많이 이용하는 방법은 시험편의 환경을 고압의 수소분위기로 유지하여 표준인장시험 또는 파괴인성시험 등의 방법을 사용하고 있는데, 이러한 방법은 시험편의 두께가 두꺼워 표면으로부터 일어나는 수소취화거동을 평가하기에 적절치 못할 수 있다. 표면에서 침투해가는 수소의 농도에 따라서 표면에서부터 취화가 초래되는데, 수소취화부위의 기계적인 거동을 평가하기 위해서 본 연구에서는 소

형편치시험편을 이용하여, SP강도 등을 평가하였다.

본 연구에서는 소형편치시험편을 이용하여 용접부의 수소취화에 따른 기계적 강도변화 거동을 평가해 보았다. 수소의 장입은 전기화학적인 방법을 이용하여 수행하였으며, 평가된 결과값과 경향을 토대로 장입조건에 따른 경향을 분석하였다. 통계적인 방법을 이용함으로써 수소장입 조건에 따라 수소장입량을 예측할 수 있는지 연구하여 실측값과 비교해 보았다.

2. 시험방법

시험재료는 고압 천연가스 배관재료인 API X65 강 of 용접부이며 시험재료의 화학적 조성과 기계적 물성은 Table 1, 2에 보인 바와 같다.

소형편치 시험편은 10×10×0.5 mm 크기의 시험편을 사용하였으며, 시험표면은 연마지#800까지 연마한 후 수소 장입시험을 수행하였다. 모재부는 공장 내 공정에서 생산되므로 재료가 균일하고 안정적인 조직을 갖는다고 할 수 있으나, 용접부는 배관건설의 현장에서 조직이 만들어지므로 제조과정이 현장여건에 따라 불균일하거나 일정하지 않을 수 있다. 수소의 침투는 불균일한 재료의 조직에서 확산되어 침투하므로⁽⁵⁾, 모재부보다 용접부에서 수소취성이 나타날 가능성이 높다. Fig. 1 및 Fig. 2에 본

Table 1. Mechanical properties of base and weld metal for X65 steel

	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
Base Metal	486	577	27.6
Weld	411	534	35.0

Table 2. Chemical compositions of base and weld metal for X65 steel. (wt.%)

	C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Cu	Fe
Base Metal	0.084	0.279	1.580	0.014	0.001	0.048	0.055	0.019	bal.
Weld Metal	0.073	0.525	1.160	0.021	0.005	0.021	0.016	0.024	bal.

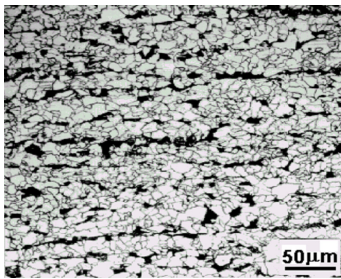


Fig. 1. Microstructure of X65 steel base metal by optical microscopy.

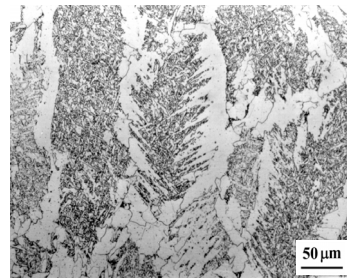


Fig. 2. Microstructure of X65 steel weld metal by optical microscopy.

Table 3. Range of experimental parameters for electrochemical method.

Parameters	Range
Temperature (°C)	24 ~ 75
Current Density (mA/cm ²)	0 ~ 268
Charging Time (min.)	0 ~ 500

연구에서 사용한 모재와 용접부의 조직을 비교했다. 모재부는 균일한 페라이트와 퍼얼라이트 조직으로 이루어져 있다. 용접부는 용접부의 전형적인 특징인 수지상 조직(dendrite)이 보이며, 여러 형상의 조직균이 혼재되어 있다.

수소장입에서는 전기화학적 원리를 이용하여 시험편 표면에 음극반응이 일어나도록 하여 재료의 표면에 수소가 발생토록 한다. 발생된 수소는 금속표면으로 흡착되며, 일부는 기포로 빠져 나가기도 한다. 사용된 전해질용액은 0.5M H₂SO₄+0.1M NaAsO₂이며, 실험 중에는 용액, 전류밀도, 장입시간 등을 변화시켜 수소장입정도를 조정하였다.

Table 3에 수소장입조건을 각 인자별로 나타내었다. 전기화학적 수소장입이 끝나면, 전류를 인가하기 위해 용접했던 리드선 가장자리를 절단한 후, 소형편치시험을 수행하였다. 상세한 실험절차는 모재부 실험논문⁽⁶⁾과 SP시험법을 이용한 강도평가논문⁽⁷⁾에 언급한 바와 동일하다.

3. 실험결과

3-1. 수소장입조건에 따른 X65강 용접부의 기계적 거동변화

Fig. 3에 수소장입 시에 전류밀도를 달리한 경우와 장입시간만을 다르게 한 경우에 소형편치시험을 수행한 결과를 나타내었다. (a)는 수소장입시간 이외에는 모든 조

Table 4. Comparison of mechanical properties among the cases with various hydrogen charging conditions.

Test condition	SP energy (J)	Max. load (N)	Elongation (mm)
60 mA/cm ² , 60 min.	1.940	1689.7	1.757
60 mA/cm ² , 120 min. (decrease ratio,%)	1.245 (-35.8)	1495.4 (-11.5)	1.338 (-23.8)
60 mA/cm ² , 60 min.	1.940	1689.7	1.757
200 mA/cm ² , 60 min. (decrease ratio,%)	1.099 (-43.3)	1328.6 (-21.4)	1.267 (-27.9)

건이 동일한 시편의 거동을 나타냈으며, (b)는 전류밀도만 변화시킨 경우의 SP시험결과이다. 결과를 볼 때 전류밀도가 높을수록, 수소장입시간이 길수록, 수소장입량이 많아져서 SP강도가 저하되고 SP에너지의 감소, 연신율의 저하 현상이 뚜렷이 관찰되었다. 여러 가지 인자 중 1가지 인자만 바꾼 결과이기 때문에 Fig. 3에 나타난 강도 등의 저하는 1가지 인자에 대한 영향을 나타내고 있다.

모재부에 비하여 용접부에서 수소장입에 대한 SP물성(강도 및 연성)이 떨어지는 것은, Fig. 1, 2에 제시한 바와 같이, 용접조직의 미세조직적인 측면에서 기인하는 것으로 추측할 수 있다. SP시험 측정결과는 Table 4에 정리하였다. Table 4에 나타난 바와 같이 수소장입후 SP 시험관련 물성이 모두 저하되었으며, 특히 SP에너지의 감소가 크게 나타났다. SP강도와 SP연신율이 모두 저하되었으므로 이 두 변수의 곱으로 산출되는 SP에너지는 더욱 저하되었다. 120분간 수소를 장입한 시험편에서 60분간 장입한 시편에 비해 35 %의 SP에너지 감소와, 11 %의 강도, 23 %의 연신율 감소가 측정되었다. 인가전류밀도를 3.3배 증가한 시험편에서는 43.3 %의 SP에너지 감소와, 21.4 %의 강도, 27.9 %의 연신율 감소가 나타났

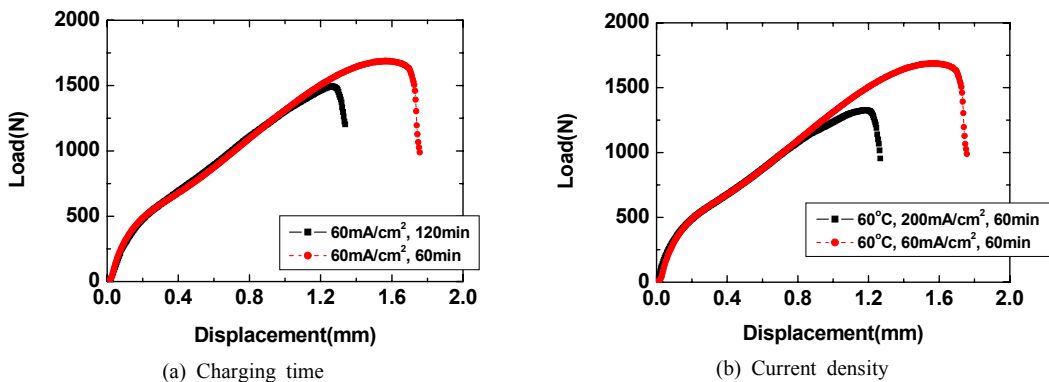


Fig. 3. Dependency of SP behavior on electro-chemical factors for weld metal of X65 steel.

다. 이는 최근의 타 연구에서 보고된 경향^(8,9)과 동일하다. 즉 모재부에서는 수소장입에 의해서 강도저하가 발생되지 않지만 용접부에서는 연성뿐 아니라 강도저하가 나타나, 용접부가 수소취화에 매우 민감함을 알 수 있다.

3-2. 수소장입변수에 의한 수소장입량 조절

용접부에서 SP강도의 저하가 관찰된 원인은 전기분극 시 가해진 전류밀도, 장입시간 등의 조건에 따라 수소장입량이 변화한 점에서 비롯되었다. 따라서 본 연구에서 재료의 수소취화를 평가하기 위하여 제안된 방법의 정량적 수소장입량 예측논리 근거를 확보할 필요가 있다. 여러 가지 전기화학적 수소장입인자를 변화하여도 궁극적으로 시편에 침투된 수소량이 일정하다면 수소취화에 의한 SP강도 감소비율이 동일하다고 볼 수 있다. 따라서 수소침투량이 동일한 유사조건에서 SP강도 감소정도를 실험적으로 측정해 볼 필요가 있다.

Fig. 4의 실험조건에서 전류밀도와 장입시간을 조절함으로써, 시편에 인가된 충전량을 동일하게 설정하였다. 즉, 이 조건에서는 표면에서 발생한 총 수소량이 동일한 조건이란 의미이며 또한 재료내부의 수소 침투량도 동일하다고 가정할 수 있는 것이다. Fig. 4의 실험결과에서 보인 바와 같이 최대강도, 연신율, SP에너지 등에서 거의 동일한 결과를 보이고 있어, 두 시험간의 수소침투량의 차이는 거의 없다고 추측할 수 있다. Table 5에 나타

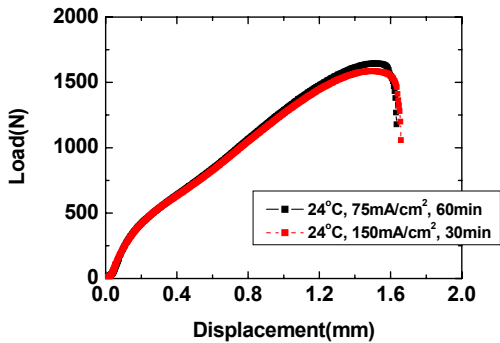


Fig. 4. Comparison of SP test results under equivalent hydrogen charging conditions.

Table 5. Comparison of SP test results under equivalent hydrogen charging conditions.

Tempera-ture (°C)	Current Density (mA/cm ²)	Duration for Hydrogen Charging (min.)	Maximum SP Load (N)	Elongation (mm)	SP energy(J)
24	150	30	1588.4	1.66	1.687
24	75	60	1646.9	1.63	1.685
Percent of Variation(%)			3.5	1.8	0.12

낸 바와 같이, 즉 두 시험에서 측정된 결과 SP강도, SP연신율, SP에너지의 차이가 5 % 이상 차이나지 않으므로, 이 논문의 평가법에 대한 신뢰성은 높다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 전기화학적 수소장입 및 SP 시험에 의한 평가법은 수소취화 거동을 민감하게 평가할 수 있는 방법이며, 제시된 데이터는 타당성이 있는 데이터임을 주장할 수 있다. 앞의 두 실험결과(Fig. 3, 4)에 제시된 바와 같이, 수소취화 평가인자로서 SP에너지가 가장 재현성이 뛰어나며, 신뢰성 있는 반응을 보이는 것으로 판단된다. 그러나 다른 연구^(8,9)에서는 실제 현장에서는 주로 강도를 기준으로 수소취화를 평가하는 경우가 많기 때문에 본 논문에서는 재료의 강도를 기준으로 거동을 비교해 보았다.

Fig. 5 및 Fig. 6에 전해질의 온도에 따른 SP 최대강도 값의 변화와 전류밀도변화에 따른 SP 최대강도값의 변화를 동시에 나타내었다. 두 변수 모두 수소장입량을 증가시키 재료의 SP강도를 저하시키는 요인으로 판단되며, 온도가 높거나 전류밀도가 높을수록 기계적인 물성이 저하되는 현상을 나타내고 있다. 두 변수의 영향에 대하여 비교해 보면, 온도에 의한 영향은 재료의 SP강도를 선형적으로 감소시키는 경향을 나타내는데 비하여 전류밀도에 의한 영향은 SP강도가 지수적으로 감소하는 거동을 나타내었다. 이 결과는 전기화학적 수소장입 초기에는 온도에 의한 영향보다 전류밀도가 SP강도 감소거동에 더 큰 영향을 미치지만 일정시간 지난 후에는 온도가 더 큰 영향을 미치는 것을 의미한다. 이러한 실험결과는 본 논문 뒷부분에 기술된 3차원 데이터(Fig. 9)의 경향과도 일치하였다.

Fig. 7에는 수소를 장입하지 않은 시편과 장입시간을 달리한 시험편의 SP거동을 함께 나타내었다. 수소를 장입하지 않은 시험편에 비해 장입된 시험편의 기계적인 거동에서 물성이 저하된 사실을 확인할 수 있었으며, 장입시간에 따른 기계적인 거동의 차이도 나타나고 있다. 그러나, 수소의 장입시간이 지속됨에도 불구하고, 일정시간이 경과 후 오히려 일부 시험편에서는 SP강도가 증가하는 경향도 관찰되고 있으며 Fig. 8에서 보는 바와 같

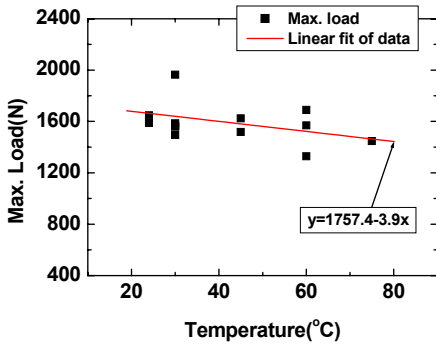


Fig. 5. Dependency of maximum load on electrochemical charging temperature.

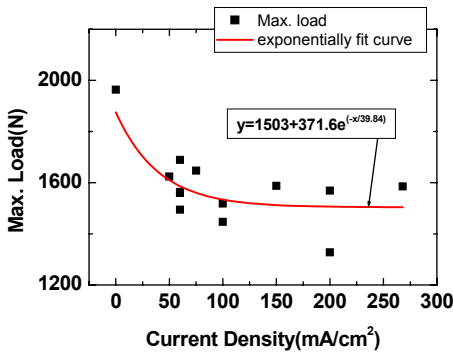


Fig. 6. Dependency of maximum load on electrochemical charging current density.

이 전체 시험편에 대하여 SP시험결과를 비교해보면, 거동의 변화가 한 두가지 인자에 의존하는 패턴으로 나타나지 않는다. 그 이유는 각각의 인자가 독립적으로 영향을 미칠 수도 있지만, 상호작용을 함으로써 발생하는 효과도 존재하기 때문이며, 이 현상을 연구자의 직관을 통해 경향을 찾아낸다는 것은 어려운 일이다. 수소장입 조건은 여러 가지 다양한 조건으로 장입할 수 있지만, 시험편의 수소침투농도가 강도에 영향을 주는 궁극적인 인자이며 이 결과에 따라서 강도시험결과도 다르게 나타날 것이다. 이 논문에서는 여러 가지 인자를 이용하여 제작된 시험편의 SP시험데이터 내에서, 찾아내고자 하는 인자의 영향을 검토하기 위해서는 통계적인 기법을 이용하였다.

3-3. 통계처리를 통한 주요인자의 상호거동 분석

용접부 시험데이터를 통계처리 프로그램⁽¹⁰⁾을 이용하여 처리해서 3차원으로 표현하였다. 이 분석에서는 R2FI (reduced 2 factor interaction) 모델을 이용하여 2가지 인자를 동시에 평가하였으며 SP강도의 경향을 2가지 인자의 함수로 예측하였다. 통계처리 프로그램으로는 Design

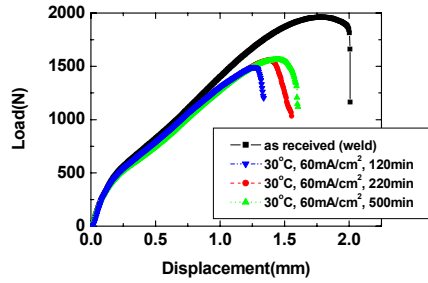


Fig. 7. SP strength behaviors according to hydrogen charging time for weld metal of X65 steel.

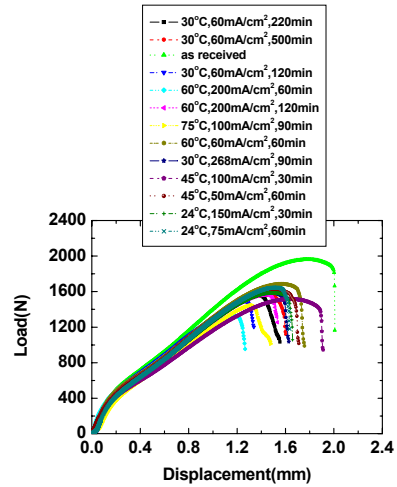


Fig. 8. Variation of SP test behavior at various electrochemical charging conditions.

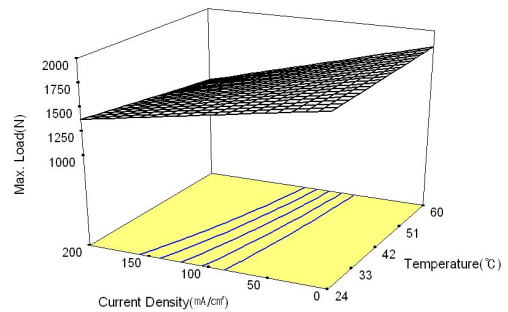


Fig. 9. Prediction of SP maximum strength as a function of two testing conditions. (current density, temperature)

Expert 6.0.3 프로그램을 이용하였다.

Fig. 9는 전류밀도와 온도와의 상호작용에 의해 SP최대강도값의 경향을 도식화한 결과이다. 결과를 관찰해보면 온도와 전류밀도 2개의 인자가 상호작용을 할 때, 강도값의 거동을 3차원 시각적으로 알 수 있다. 전류밀

도값이 증가하는 조건에서는 SP 최대강도값이 떨어지며, 반대로 전류밀도가 낮아질수록 SP 최대강도값이 높아짐을 알 수 있다. 그러나 온도에 대한 영향을 고려해 볼 때, 전류값이 작은 영역에서는 강도의 변화가 발생하지 않으나, 전류값이 커지는 조건에서 강도값이 저하되는 경향이 나타나는 것을 알 수 있다. 본 실험에서 적용한 온도는 최대 75 °C로써 전기화학적인 수소장입에서 다른 인자조건에 비하여 비교적 적은 영향을 미친것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서 수행된 조건에서 고려해 보면, 전류밀도의 인자에 비해서 온도의 인자가 상대적으로 영향이 작은 것으로 판단된다. Fig. 9의 데이터를 표현해주는 3차원 식을 식 (1)에 나타내었다.

$$P_{\max}(N) = 1.815 \times 10^6 + 9.981 \times 10^{-1} \times T - 1.909 \times i - 1.923 \times t - 3.346 \times 10^{-2} \times T \times i - 7762 \times T \times t + 3.080 \times 10^{-2} \times i \times t \quad (1)$$

여기서, P_{\max} : 최대 편치하중, T : 온도(°C), i : 전류밀도 (mA/cm), t : 수소장입시간(min.)이다.

제안된 식은 전체 실험데이터를 이용하여 SP 최대강도값을 예측할 수 있는 식이며, 전류밀도, 온도, 수소장입시간을 대입하면 예상되는 수소장입량을 예측할 수 있는 식이다. 이 식의 타당성을 검증하기 위하여 실제 측정된 값과 비교해 볼 필요가 있고 이러한 결과가 비교적 잘 맞아야만 제안된 예측식에 대해서 신뢰할 수 있다. 본 연구에서 실험한 실험데이터를 입력하여 예측한 식을 바탕으로 실측값과 비교해 보면, Fig. 10과 같은 결과로 나타난다. 그래프에서 직선은 기울기 1을 가진 직선이며, 이 직선상에 정확히 위치하는 값이 많을수록 정확도가 높다고 할 수 있다. 예측값과 실측값을 비교해 보면, 직선값 주위로 실측값이 분포하는 것을 볼 때, 비교적 잘 일치하는 예측식으로 인정할 수 있다.

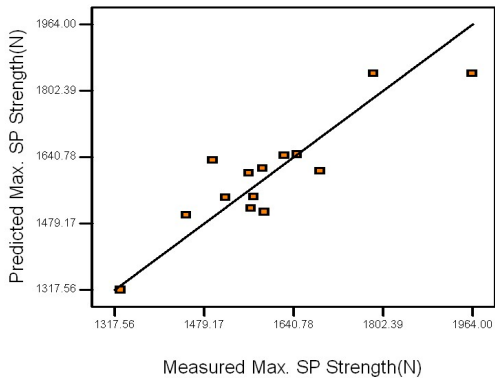


Fig. 10. Comparison between predicted and measured SP maximum strength values.

3-4. 파면분석 및 수소장입 효과

수소장입 유무에 따른 SP강도변화도 취화의 특성으로 인정할 수 있지만, 파단면 형상을 비교해 보는 것도 수소취화정보를 제공해 줄 수 있다. Fig. 11에 시험편의 SP시험이후에 파면을 전자주사 현미경으로 비교해 보았다.

Fig. 11에서 확인할 수 있는 사항은 SP실험에서 연신율, SP에너지 등의 차이를 보이던 결과가 시험편 파단면의 단면 감소도 연관된다는 사실이다. 주사전자현미경을 이용하여 저배율로 측정된 사진에서 수소의 장입 유무에 따라서 단면감소율이 변한다는 사실을 알 수 있으며, 고배율로 관찰한 자료에서는 수소를 장입한 시험편에서 취성파면이 일정영역에서 발견되는 것을 알 수 있다.

본 연구에 사용된 X65 용접부 재료에서는 연성파면만 관찰할 수 있지만, 수소를 장입한 시험편의 파면에는 연, 취성 파면이 동시에 관찰되었다. 따라서 수소의 장입유무에 따라 재료취화의 지표인 단면 감소 현상을 시각적으로 확인할 수 있었으며, 수소장입을 가한 재료의 파면에 취성파면 형태가 나타나는 것은 다른 연구자들^(2,11)의 결과와 일치하고 있다. 이런 원인이 결국 재료의 기계적인 강도 및 파괴인성의 감소로 나타난다고 보고되고 있으므로^(1,2,12) SP실험을 통한 본 논문의 결과와 일치한다. 수소의 침투양상을 고려해 보면, 전위, 소성역, 노치주위, 불연속점등 취약부위에서도 수소가 많이 집중하는 경향이 보고되고 있으며⁽¹³⁾ 용접부도 수소가 확산해 들어갈 가능성이 높기 때문에 이와 같은 결과를 보이는 것으로 판단된다.

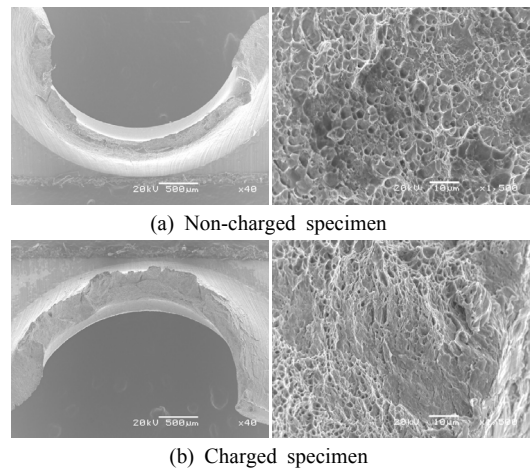


Fig. 11. Comparison of fractured surfaces between non-charged and charged specimens for weld metal.

4. 결 론

API X65강의 용접부에 대하여 전기화학적인 방법으로 수소를 장입한 후 SP시험한 결과를 이용하여 재료의 수소취화정도를 평가하였으며, 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 본 연구를 통해 제안한 수소취화 시험법은 신뢰성이 뛰어나며, 특히 표면에서 발생하는 수소취화에 대한 평가에 민감성을 보여주고 있다. 전기화학법을 이용한 수소장입 조건이 재료의 수소장입량에 영향을 주고 있다. 특히, 전류밀도, 장입시간에 대한 수소장입 정도가 온도에 의한 장입정도보다 크게 나타나고 있다. SP실험이 끝난 시험편을 이용하여 파단면을 조사해 보면, 수소장입시험은 단면감소율이 적게 나타나며 취성파면을 일부 보이고 있으나, 수소를 장입하지 않은 시험편은 단면감소율이 크며 연성파면을 나타내고 있다. 이 결과는 수소장입에 관한 효과를 잘 제시하는 것으로 판단되며, 수소장입 여부에 따라서 결과가 변하는 SP실험결과와도 일치하는 경향이다.
- 2) X65 고압배관 용접부에서 수소취화에 의한 재료물성의 변화가 크게 발생하였으며, 모재부와 달리 용접부에서는 강도저하가 크게 나타났다. 측정된 기계적 물성 중 SP energy의 값이 수소취화 영향을 잘 나타내고 있는 것으로 판단된다. 본 연구의 수소장입조건에서 X65 재료 용접부의 수소장입에 의한 최대 SP강도 저하는 25~30 %까지 발생하였다.
- 3) 통계처리를 통하여, 실험에 관여된 두가지 인자를 동시에 고려하여 수소장입량을 평가할 수 있는 방안을 시도하였으며, 수소장입량을 SP강도로 나타내어 각 인자의 조건에 따른 SP강도값의 예측치를 구하는 식을 제안하였다. 제안된 식을 확인한 결과, 실측치와 예측치가 잘 일치하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부 신재생에너지 기술개발사업의 일환(2006-N-HY12-P-01)으로 수행되었습니다. 이 논문의 일부는 2009년도 중앙대학교 우수연구자 연구비지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. Andrews, P. 외: "Variation of the fracture toughness of a high strength pipeline steel under cathodic protection.", Corrosion, Vol. 57, No. 8, 721~729, (2001).
2. Hagiwara, N. 외: "Fracture toughness(CTOD) of line-pipe materials under cathodic protection", Corrosion 97 paper no. 200, (1997).
3. Vries, De 외: "Safe operation of natural gas appliances fueled with hydrogen/natural gas mixtures(progress obtained in the naturalhy-project)", Second Int. Conference on Hydrogen Safety, paper No. 6.0.00, (2007).
4. Yan, M. 외: "Study on hydrogen absorption of pipeline steel under cathodic charging", Corrosion Science 48, 432~444, (2006).
5. Lunarska, E. 외: "Correlation between critical hydrogen concentration and hydrogen damage of pipeline steel", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 22, No. 2/3, 279-284, (1997).
6. 장상엽 외 : "소형편치시험을 이용한 API 5L X65강의 수소취화에 관한 연구 I :모재부", 한국에너지공학회 논문지 submitted.
7. 마영화 외 : "소형편치시험법을 이용한 AI 2024 ECAP 재료의 강도특성평가", 대한기계학회 논문집 A권, 제 30권, 제 1호, 8~17, (2006).
8. Feng, Z. 외: "Hydrogen embrittlement of pipeline steel weld under high gaseous hydrogen pressure", 2008 ICH conference, 4, (2008).
9. Moro, I. 외: "Interaction between hydrogen, microstructure and damage under high pressure hydrogen environment in a high strength pipeline steel X80", 2008 ICH conference, 29, (2008).
10. Manual for Experimental Design 6.0.3 program.
11. Zhang, T. 외: "Study of correlation between hydrogen-induced stress and hydrogen embrittlement", Material science and engineering A 347, 291~299, (2003).
12. 윤기봉 외 : "개량된 소형편치 시험편을 이용한 금속재료의 전기화학적 수소손상 평가법", 특허출원번호 10-2009-0002073 (2009).
13. Qiao, L.J. 외: "Hydrogen evolution and enrichment around stress corrosion crack tips of pipeline steels in dilute bicarbonate solution", Corrosion, Vol. 54, No. 2, 115-120, (1998).