

소형펀치 시험을 이용한 내sour API X65 강관 소재의 수소환경 하 파괴인성 예측

Prediction of Fracture Toughness of API X65 Pipe Steel for Sour Condition Using Small Punch Test in Hydrogen Environment

정상현* · 황진하*† · 김윤재** · 김기석*** · 이승건****

Sang-Hyun Jung*, Jin-Ha Hwang*†, Yun-Jae Kim**, Ki-Seok Kim***,
and Seung-Gun Lee****

(Received 09 December 2025, Revision received 17 March 2026, Accepted 17 March 2026)

초록 : 본 연구에서는 소형펀치 시험을 이용하여 API X65 강관 소재 일반 강재와 내sour 강재에 대한 파괴인성을 예측하였다. 소형펀치 시험은 공기 및 5, 10 MPa 수소압 조건에서 in-situ로 수행되었다. 공기 중에서는 두 강종 모두 최대하중 이후 완만한 하중 저하를 보였으며, 연성파손 기구가 관찰되었다. 수소환경에서는 두 강종 모두 최대하중 이후 간헐적 하중 감소와 하중 유지를 보였으며, 연성-취성 복합파손이 관찰되었다. 파괴인성은 인장물성, 소형펀치 시험기 규격 및 시험 결과를 수식에 적용하여 계산되었다. 인장물성은 소형펀치 시험을 유한요소 해석으로 모사하여 얻어졌으며, 얻어진 인장선도는 인장시험 결과를 이용하여 검증되었다. 공기환경에서, 내sour 강재의 파괴인성은 일반 강재와 유사하거나 작은 값이 예측되었고, 수소환경에서는 내sour 강재가 일반 강재보다 큰 파괴인성을 보였다.

키워드 : In-situ 소형펀치 시험, 내sour 강재, 수소가스환경, 파괴인성

Abstract : In this study, the fracture toughness of API X65 pipeline steel was predicted using the small punch (SP) test. The SP tests for conventional and sour-resistant steels were conducted in air and in hydrogen gas environments. In air, the load-displacement curves of both steels show a gradual load drop after reaching the maximum load. In contrast, under hydrogen gas environments, the load-displacement response exhibits intermittent load decreases and load-holding behavior after the peak load. The fracture mechanisms observed in the tested specimens indicated ductile fracture in air, whereas a combined ductile-brittle fracture occurred in hydrogen gas environments. Fracture toughness was estimated using an energy-based theoretical equation. The

*† 황진하(<https://orcid.org/0000-0003-3863-2575>) : 교수, 국립
부경대학교 기계공학부

E-mail : jhhwang@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6164

*정상현(<https://orcid.org/0009-0008-1914-4246>) : 학사과정,
국립부경대학교 기계공학부

**김윤재(<https://orcid.org/0000-0001-9884-8939>) : 교수, 고려
대학교 기계공학부

***김기석(<https://orcid.org/0000-0003-1524-5564>) : 수석연구
원, POSCO

****이승건(<https://orcid.org/0000-0001-6030-2703>) : 책임연
구원, 한국재료연구원

*† Jin-Ha Hwang(<https://orcid.org/0000-0003-3863-2575>) : Professor,
Department of Mechanical Engineering, Pukyong National
University.

E-mail : jhhwang@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6164

*Sang-Hyun Jung(<https://orcid.org/0009-0008-1914-4246>) : Bachelor
program, Department of Mechanical Engineering, Pukyong
National University.

**Yun-Jae Kim(<https://orcid.org/0000-0001-9884-8939>) : Professor,
Department of Mechanical Engineering, Korea University.

***Ki-Seok Kim(<https://orcid.org/0000-0003-1524-5564>) : Senior
Researcher, POSCO.

****Seung-Gun Lee(<https://orcid.org/0000-0001-6030-2703>) :
Principal Researcher, Korea Institute of Materials Science.

required input data for the equation include the SP test results and the tensile properties of the materials. The tensile properties were determined through finite element simulation of the SP test and validated against platetensile test data. In air, the sour-resistant steel exhibits lower fracture toughness than the conventional steel, while in hydrogen gas environments, it shows superior resistance to fracture.

Key Words : In-situ Small Punch Test, Sour-resistant Steel, Hydrogen Gas Environment, Fracture Toughness

— 기 호 설 명 —

H_m	: 최대하중 시점 변위 [mm]
H_t	: 최대하중 80 % 감소 변위 [mm]
J_{lc}	: 파괴인성 [kJ/m^2]
K	: 강도계수
K_p, n_p	: 소성 재료상수
n	: 변형률경화지수
P	: 적용 가스압력 [MPa]
P_{H_2}	: 수소분압 [MPa]
P_m	: 소형펀치 시험의 최대하중 [N]
r_b	: 시험기 펀치볼 반경 [mm]
r_d	: 시험기 다이 반경 [mm]
t	: 소형시편 두께 [mm]
W_f	: 파괴 에너지 [N·mm]
W_g	: 가스압력 에너지 [N·mm]
W_m	: 최대하중 에너지 [N·mm]
W_p	: 소성변형 에너지 [N·mm]
W_t	: 소형펀치 에너지 [N·mm]

그리스 문자

β_u	: 재료상수
$\bar{\varepsilon}$	: 유효 소성변형률
ε_p	: 진소성변형률
σ	: 진응력 [MPa]
σ_0	: 탄성한계 [MPa]
σ_y	: 항복강도 [MPa]

1. 서 론

최근 천연가스 배관을 수소운송 배관으로 전환하기 위한 연구가 활발히 수행되고 있다. 이때, 유

정용 및 수소용 강관 내부에서 존재하는 황화수소에 의한 응력부식균열(Hydrogen Sulfide Stress Corrosion Cracking, H_2S SCC)은 배관 건전성에 중대한 영향을 미친다.¹⁾ 황화수소는 다양한 조건에서 금속의 부식과 열화를 가속하는 인자로,²⁾ 이러한 특성은 배관 강재의 SCC 발생을 촉진시킨다. 이런 H_2S SCC 억제를 위해 불순물을 엄격히 제한한 황화물 내성강(내sour 강재)이 개발되었다.³⁾

SCC와 같은 부식에 의한 배관 결함건전성을 확보하기 위해서는 파괴인성 시험⁴⁾이 필수적이나, 수소환경에서는 시설 구축 비용 및 안전 문제 등 여러 제약이 존재한다. 표준시편을 이용한 시험법⁵⁾은 수소환경에서 파괴인성을 직접 획득할 수 있지만, 변수별 영향을 체계적으로 분석하기에는 많은 시험이 요구되어 실질적 한계가 있다. 따라서 비파괴검사를 활용해 수소 장입 시간에 따른 미시적 손상거동을 분석한 연구도 수행되었으나,⁶⁾ 파괴인성을 직접 도출하지는 않았다. 따라서 수소환경의 파괴인성 확보를 위한 공학적 접근법 개발이 필요하다.

소형펀치(Small Punch, SP) 시험은 얇은 디스크 형태의 소형시편을 이용하여 재료의 파손 거동을 평가할 수 있는 시험법이다. Misawa⁷⁾은 극저온, 중성자 환경과 같이 시편 채취가 제한된 환경에서 재료의 취성파손 거동을 평가하였으며, Chang⁸⁾은 하중-변위 선도를 이용하여 연성 및 취성 파손의 전이 특성을 분석하였다. 최근, 수소환경 하 재료 거동 분석을 위하여 in-situ SP 시험기가 개발되었다.⁹⁾ 이 시험기는 시험 중 혼합가스를 주입하여 수소분압, 변형률 속도, 온도환경 등이 재료 파손거동에 미치는 영향을 분석하였다.¹⁰⁾ 그러나 해당 연구들은 하중-변위 선도로부터 계산된 SP 에너지를 기반으로 분석되었으며, 재료의 고유한 기

계적 물성보다는 파괴 특성의 정성적 변화에 중점을 두었다.

기존 연구에서는 수소환경의 파괴인성을 정량적으로 예측하기 위하여 in-situ SP 시험 결과를 이용한 이론식이 개발되었다.¹¹⁾ 파괴인성은 SP 시험 결과(하중-변위 선도), 시험기 형상, 인장물성을 기반으로 이론적으로 계산된다. 예측식은 파손 기구에 따라 달라지며, 기존 연구에서는 API X42 및 X70 강관 소재를 대상으로 수소분압에 따른 파괴인성을 예측하고, 표준 C(T) 시험 결과¹²⁾와 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

본 연구에서는 SP 시험을 활용하여 API X65 강관 소재 일반 강재 및 내sour 강재의 수소 환경에 따른 파괴인성 감소율을 정량적으로 평가하고, 소재별 저항성 차이를 분석하였다. Fig. 1은 SP 시험 기반 파괴인성 예측 절차를 나타낸 것이다. SP 시험은 공기 환경과 5 MPa 및 10 MPa의 상온 고압 수소조건에서 수행되었으며, 획득한 하중-변위 선도와 파면 관찰을 통해 시험 조건별 파손 기구를 분석하였다. 파괴인성은 선행 연구¹¹⁾에서 제안된 에너지기반 이론식으로 평가되었다. 이때 요구되는 인장물성은 유한요소(Finite Element, FE) 해석을 통해 SP 시험으로 추정되었으며, 추정된 인장물성은 표준 인장시험 결과와 비교하여 타당성

을 검증하였다. 최종적으로 공기 환경 대비 수소 환경에서의 소재별 파괴인성 저하 경향을 정량적으로 분석하였다.

2. 소형펀치 시험 요약

2.1 소형펀치 시험

시험에 사용된 재료는 API X65 강관 소재로, 일반 강재(conventional steel)와 내sour 강재(sour-resistant steel)가 적용되었다. 내sour 강재는 일반 강재에 비해 낮은 P와 S의 조성을 보인다. 두 재료의 화학조성은 Table 1에 요약되었다. Table 2는 재료의 재료물성을 요약한 것이다. 내sour 강재는 일반 강재에 비해 낮은 항복강도를 보였다.

SP 시험은 판재에서 가로 10 mm, 세로 10 mm, 두께 0.5 mm로 와이어 커팅 방식으로 가공되었다. Fig. 2는 in-situ 수소환경을 적용 가능한 SP 시험기를 나타낸 것이다. 소형시험편은 상부 다이와 하부 다이 사이에 고정되며, 가스 누출 방지 및 시험편 고정을 위해 O-링을 설치하였다. 모든 SP 시험은 유럽 표준화 위원회 기준(CWA 15627)을 따라 동일한 상온 조건에서 수행되었으며,¹³⁾ 공기환경에서 3회, 5 MPa와 10 MPa 100% 수소환경에서 각 1회 실시되었다. 펀치 속도는 공기환경에서 0.2 mm/min로, 수소환경에서는 0.004 mm/min으로 설정되었다. 시험기 내부는 30분간 0.05 torr 이하의 진공 상태로 유지하여 잔류 가스와 수분을 완

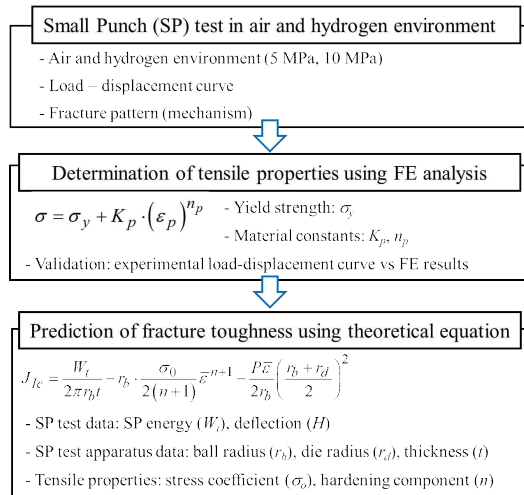


Fig. 1 Flowchart summarizing the procedure for predicting fracture toughness

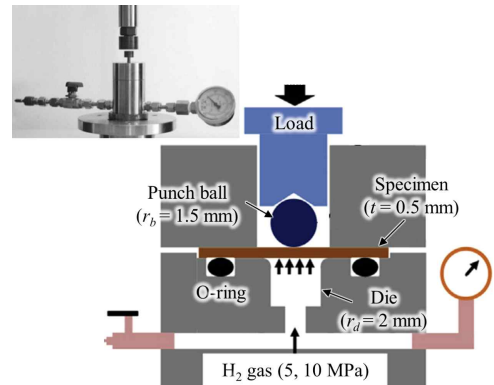


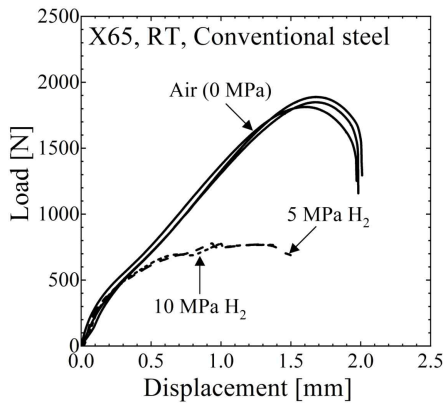
Fig. 2 In-situ small punch test apparatus

Table 1 Chemical composition for test steel (wt%)

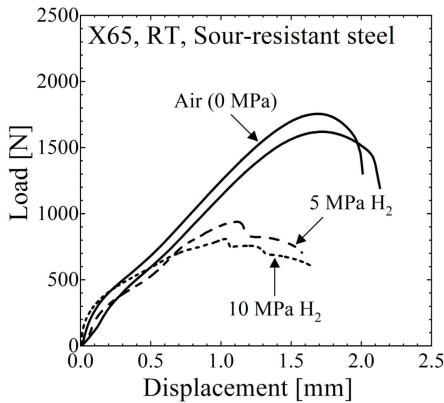
Steel	C	Si	Mn	P	S
Conventional	0.058	0.247	1.343	0.0094	0.0009
Sour-resistant	0.040	0.250	1.250	0.0050	0.0005

Table 2 Material properties for test steel

Steel	E	Elastic limit σ_0	YS (0.2 %) σ_y	EL	RA	n
	[GPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	
Conventional	231	429	536	46.5	65.0	0.115
Sour-resistant	-	406	507	-	-	0.144



(a)



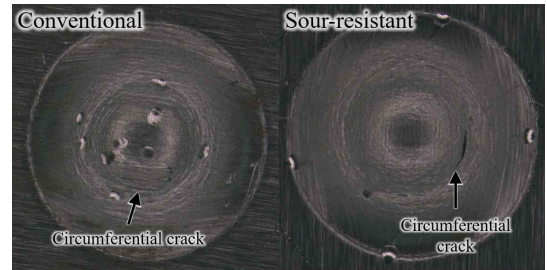
(b)

Fig. 3 Experimental load-displacement results in small punch test: (a) conventional, and (b) sour-resistant steel

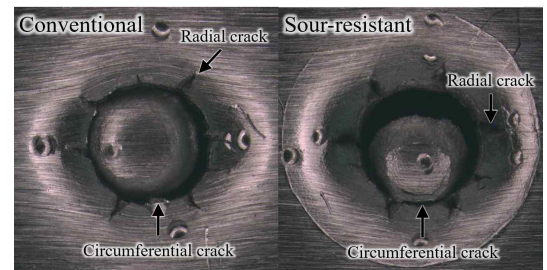
전히 제거하였다. 이후 시험 시작 전 30분 동안 99.99%의 수소가스에 노출시킨 후 시험을 수행하였다. 해당 노출시간은 선행 연구에서 API강 수소 취화에 영향이 미치지 않는 시간이다.¹⁴⁾

Fig. 3은 공기 및 수소환경에서 수행된 SP 시험으로 도출된 API X65 일반 강재와 내sour 강재의 하중-변위 선도를 나타낸 것이다. 공기환경에서 두 재료는 지속적으로 하중이 증가하였으며, 최대 하중 이후에는 점진적인 하중 저하 이후 파손이 관찰되었다. 반면, 수소환경에서는 최대하중 이후 하중이 유지되거나 부분적인 감소가 나타나다가, 가스 누출(관통)이 발생하였다.

Fig. 4(a)와 (b)는 공기 및 10 MPa 수소 환경에서 두 강재의 SP 시험 파면을 비교한 것이다. 두 강재 모두 공기 중에서는 연성 파손의 특징인 원주 방향 균열이 관찰되었다. 하지만 10 MPa 수소 환경에서는 연성-취성 복합 파손으로 인해 원주 방향뿐만 아니라 반경 방향 균열이 함께 발생했다. 소형펀치 시험에서 나타나는 반경 방향 균열은 주로 세라믹이나 유리 같은 취성 재료에서 보



(a)



(b)

Fig. 4 Fracture surface after SP test: (a) air, and (b) 10 MPa hydrogen environment

이는 파면 형태이다.¹⁵⁾ 따라서 수소 환경에서 수소취화로 인해 재료의 파손 기구가 변화했음을 확인하였다.

2.2 소형펀치 에너지

Fig. 5(a)는 공기환경 SP 시험에서 얻어진 하중-변위 선도를 도식화한 것이다. ASTM E3205에서는 최대하중 80% 감소 변위 (H_t)까지의 아래 면적을 SP에너지 (W_t)로 정의하고 있다. Fig. 5(b)는 수소환경 SP 시험에서 얻어진 하중-변위 선도를 도식화한 것이다. 수소환경에서의 하중-변위 선도는 연성-취성 복합파손으로 인하여 최대하중 이후 80% 하중 감소가 나타나지 않고 관통(가스누출)이 되는 경우가 발생한다. 따라서 ASTM E3205에서 제시된 SP 에너지를 적용할 수 없는 경우가

존재한다. 기존 연구에서는 수소환경에서 연성-취성 복합파손이 발생되는 API X70 강재에 대하여, SP 시험의 주요 균열 성장이 최대하중 지점에서 발생함을 확인하였으며,¹¹⁾ 수소환경에서는 SP 시험의 최대하중 에너지 (W_m)와 최대하중 시점 변위 (H_m)를 이용하여 분석이 수행되었다.^{9,10)}

Fig. 6(a)는 공기 및 수소환경에서 API X65 강재의 SP 에너지(W_t)와 최대하중 에너지(W_m)를 나타낸 것이다. 공기환경에서는 SP 에너지와 최대하중 에너지를 나타냈으며, 수소환경은 최대하중 에너지만 표기하였다. 공기환경에서 내sour 강재의 SP 에너지와 최대하중 에너지는 일반 강재보다 작은 값을 보였다. 반면, 수소환경에서 최대하중 에너지는 내sour 강재가 일반 강재보다 높은 값을

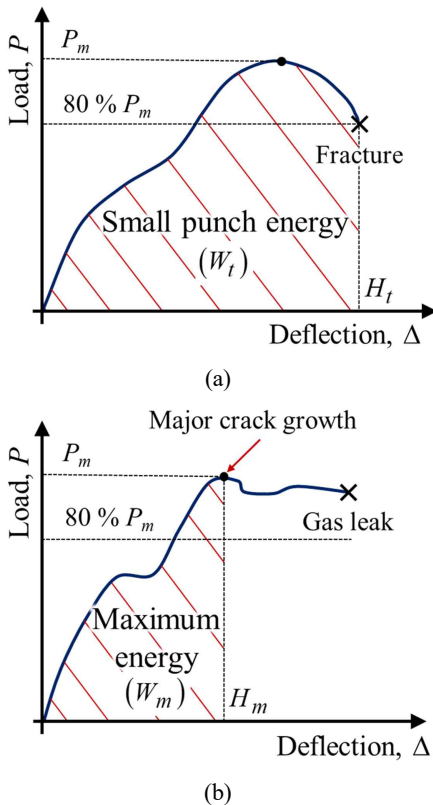


Fig. 5 Definition of SP energy: (a) air condition showing ductile behavior, and (b) hydrogen condition exhibiting ductile-brittle behavior

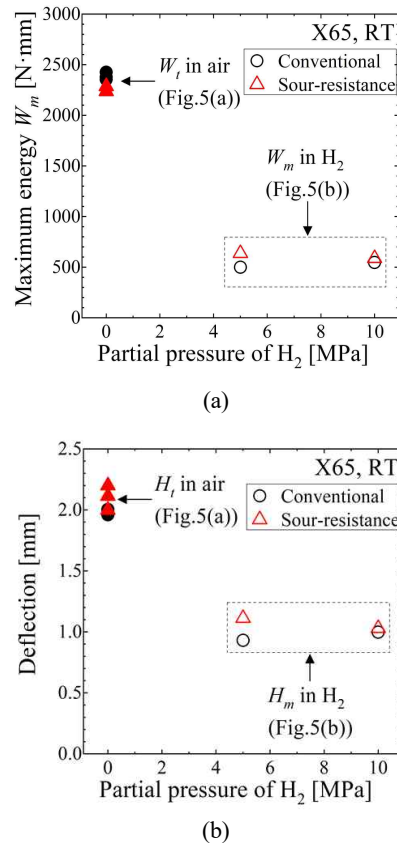


Fig. 6 Comparison of small punch test results: (a) calculation of small punch energy and (b) deflection

Table 3 Summary of the results of small punch test

Steel	P_{H2}	W_i	W_m	H_i	H_m
	[MPa]	[N·mm]	[N·mm]	[mm]	[mm]
Conventional	0 (Air)	2378	1754	1.961	1.598
		2426	1833	2.004	1.675
		2355	1822	1.979	1.677
	5	-	499	-	0.931
	10	-	547	-	0.998
Sour-resistant	0 (Air)	2286	1746	2.000	1.677
		2236	1602	2.113	1.704
	5	-	637	-	1.112
	10	-	588	-	1.030

보였다. Fig. 6(b)는 공기 및 수소환경에서 API X65 강재의 최대하중 80% 감소 변위(H_i)와 최대 하중 시점 변위(H_m)을 제시한 것이다. 일반 강재와 내sour 강재의 최대하중 80% 감소 변위와 최대하중 시점 변위는 두 환경 모두 유사하였다. 공기 및 수소환경에서 에너지와 변위 결과를 Table 3에 요약하였다.

3. 공기 중 SP 시험을 통한 인장물성 예측

3.1 SP 시험 모사를 통한 인장물성 도출

Fig. 7은 SP 시험 모사를 위한 FE 해석모델을 나타낸 것이다. FE 해석은 상용 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 수행되었다. SP 시편은 8 절점 축대칭 적분 저감 요소(CAX8R)를 적용하여

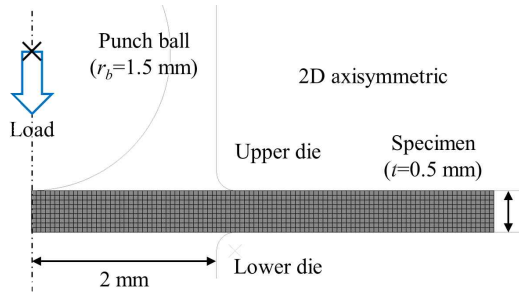


Fig. 7 2D axisymmetric FE mesh of SP test

절점 1,565개와 요소 1,450개로 구성되었으며, SP 시험의 볼과 다이는 2절점 축대칭 강체 요소(RAX2)를 적용하였다. SP 시험기와 시편 사이의 접촉 조건은 마찰 계수 0.05를 적용하였다. FE 해석은 탄소성을 고려하여 대변형 옵션(NLGEOM)을 적용하여 수행되었다.

기존 연구에서는 SP 시험의 하중-변위선도와 FE 해석을 이용하여 재료의 인장선도를 예측하는 기법이 개발되었다.¹⁶⁾ FE 해석에 적용된 재료 인장물성은 아래의 식과 같이 가정된다.

$$\sigma = \sigma_y + K_p (\epsilon_p)^{n_p} \quad (1)$$

여기서, σ 와 ϵ_p 는 각각 진응력과 진소성변형률을 의미하며, K_p 와 n_p 는 소성 재료상수이다. 인장물성 결정을 위해 항복강도 σ_y 는 Table 2에 제시된 시험값을 적용하였고, 재료상수 K_p 와 n_p 는 각 재료의 SP 시험 하중-변위 선도를 적합하게 모사하는 값으로 시행착오를 통해 결정되었다. 결정된 소성 재료상수는 일반 강재의 경우, $K_p=400$, $n_p=0.49$, 내sour 강재의 경우, $K_p=350$, $n_p=0.55$ 로 결정되었다.

Fig. 8은 결정된 인장물성을 적용한 FE 해석 결과를 SP 시험 결과와 비교한 것이다. 결정된 인장물성을 적용한 해석 결과는 시험 하중-변위 선도

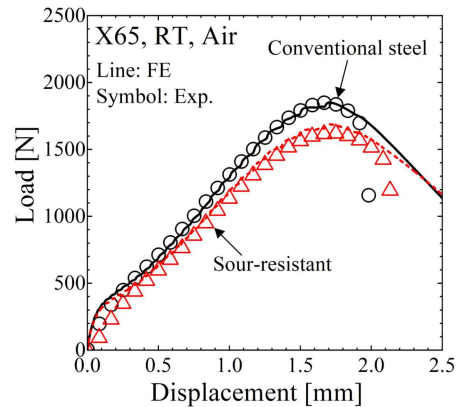


Fig. 8 Comparison of small punch test analysis and experimental results for conventional and sour-resistant steel under air condition

를 유사하게 모사하였다. 결정된 인장물성에 대한 검증은 다음 3.2 절에서 수행되었다.

3.2 인장물성 검증

SP 시험을 통해 도출된 재료 인장물성의 신뢰성을 확보하기 위해, 해당 물성을 적용하여 표준 인장시험 FE 해석을 수행하였다. 인장시험 실험이 확보된 일반 강재를 대상으로 검증을 수행하였으며, SP 시험 기반의 인장물성 도출 절차에 대한 유효성을 대표적으로 검토하였다. Fig. 9(a)는 FE 해석모델은 3차원 2차-응력적분점-감쇠요소(C3D20R)를 적용한 1/8 대칭을 고려한 FE 해석모델이다.

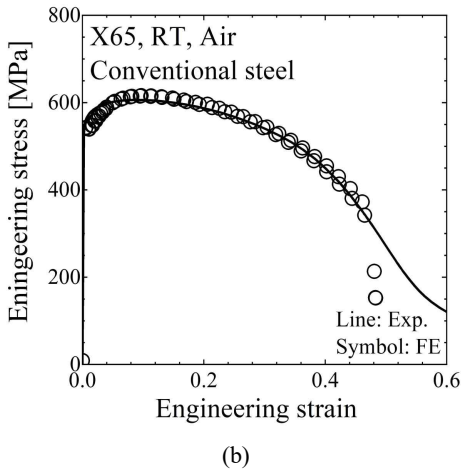
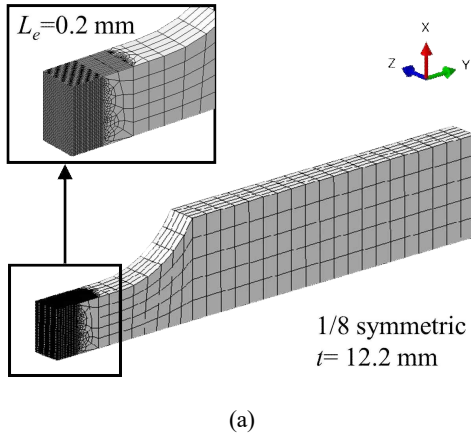


Fig. 9 (a) FE tensile specimen mesh, and (b) comparison of FE analysis and experimental results of conventional steel

Table 4 Experimental and predicted tensile strengths

Tensile strength	Tensile test		SP test
	Exp.	Prediction (FE)	Exp. (ASTM 3205)
Conventional	619	606	621

FE 해석은 대변형을 고려하여 탄소성 조건에서 수행되었다. Fig. 9(b)는 일반 강재의 실험값과 FE 해석을 통해 얻은 공칭응력-변형률 선도를 비교한 것이다. 해석 결과, 소성 영역에서의 가공경화 거동을 포함한 전반적인 선도의 경향성이 실험 결과와 잘 일치함을 확인하였다. 이를 통해 SP 시험으로 결정된 재료 인장물성 산출 과정의 타당성을 검증하였다.

ASTM E3205에서는 SP 시험을 이용한 인장강도 추정식을 아래와 같이 제시하고 있다.¹⁷⁾

$$\sigma_u = \beta_u \left(\frac{P_m}{t H_m} \right) \quad (2)$$

여기서, P_m , t , H_m 은 각각 SP 시험에서의 최대하중, 시편 초기 두께, 최대하중 시점 변위를 의미하며, β_u 는 재료상수, 강재는 0.277로 알려져 있다.¹⁸⁾ Table 4는 인장시험과 SP 시험에서 얻은 실험값 및 FE 해석으로 모사한 최대인장강도를 요약한 것이다. 표준 인장시험 결과를 기준으로 비교했을 때, SP 시험에서 얻어진 최대인장강도와 FE 해석에 의한 추정값은 약 2% 이내의 오차를 보여 인장선도 도출 절차가 유효함을 확인하였다.

4. SP 시험을 이용한 파괴인성 예측

4.1 SP 에너지를 통한 파괴인성 예측식

SP 에너지 W_t 는 하중-변위 선도의 아랫면적으로 정의되며, 파손까지의 총 에너지이다. SP 에너지는 아래와 같이 구성된다.

$$W_t = \int_0^H P d\Delta = W_p + W_f + W_g \quad (3)$$

여기서, W_p 는 소성변형 에너지, W_f 는 파괴 에너지, W_g 는 가스압력 에너지이다. 상대적으로 작은 탄성 에너지는 무시된다. 기존 연구에서 소성변형 에너지 W_p 는 재료물성 및 시험기 형상정보를 이용하여 아래와 같이 주어진다.¹⁹⁾

$$W_p = (\pi r_b^2 t) \cdot \left(\frac{\sigma_0}{n+1} \right) \cdot \bar{\epsilon}^{n+1} \quad (4)$$

여기서, σ_0 는 응력계수, n 은 재료경화지수, $\bar{\epsilon}$ 는 유효 소성변형률이다. 파괴 에너지 W_f 는 파괴인성 J_{Ic} 와 시험기 형상정보를 이용하여 아래와 같이 주어진다.

$$W_f = 2\pi r_b t \cdot J_{Ic} \quad (5)$$

여기서, r_b 는 편치볼 반경, t 는 시편의 두께이다. 가스압력 에너지 W_g 는 아래와 같이 주어진다.

$$W_g = P\pi t \left(\frac{r_b + r_d}{2} \right)^2 \cdot \bar{\epsilon} \quad (6)$$

여기서, P 는 적용 가스압력, r_d 는 SP 시험기의 다이 반경이다. 따라서 파괴인성 J_{Ic} 계산식은 식 (3)~(6)을 이용하여 다음과 같이 도출된다.

$$J_{Ic} = \frac{W_t}{2\pi r_b t} - r_b \cdot \frac{\sigma_0}{2(n+1)} \bar{\epsilon}^{n+1} - \frac{P\bar{\epsilon}}{2r_b} \left(\frac{r_b + r_d}{2} \right)^2 \quad (7)$$

유효 소성변형률 $\bar{\epsilon}$ 은 편치볼 반경과 시험환경 (공기, 및 수소환경)에 따라 아래와 같이 기존에서 연구에서 도출되었다.¹¹⁾

$$\bar{\epsilon} = \begin{cases} 0.231H_t + 0.128H_t^2 & (\text{Air}) \\ 0.256H_m + 0.104H_m^2 & (\text{H}_2) \end{cases} \quad (8)$$

여기서, H_t 는 공기환경의 최대하중 80% 감소 변위, H_m 은 수소환경의 최대하중 시점 변위이다.

4.2 공기 및 수소환경의 파괴인성 J_{Ic}

파괴인성 예측식에 필요한 재료물성은 응력계수 σ_0 와 재료경화지수 n 이다. 응력계수 σ_0 는 Table 2에 제시된 탄성한계(elastic limit)를 적용하였다. 재료경화지수 n 은 인장강도 이후 높은 소성변형률 구간의 재료경화를 반영하며 진응력-진소성변형률 선도에서 아래의 식을 이용하여 결정된다.²⁰⁾

$$\sigma = K \cdot \epsilon_p^n \quad (9)$$

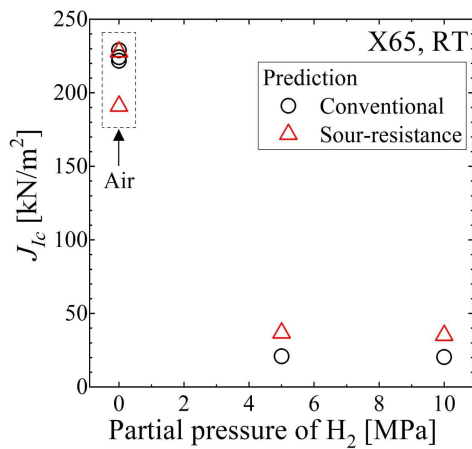
여기서, σ 와 ϵ_p 는 진응력과 진소성변형률이고, K 와 n 은 각각 재료의 강도계수와 변형률경화지수이다. 인장선도로부터 결정된 재료물성은 일반 강재는 $K=890$, $n=0.115$, 내sour 강재는 $K=850$, $n=0.144$ 이다. API 강재의 인장시험 결과²¹⁾에 따르면, 수소 환경에서의 항복강도와 인장강도는 공기 중과 유사하며, 수소취화로 인해 연신을 감소만이 관찰되었다. 이러한 실험적 근거를 바탕으로 공기 환경에서 결정된 재료 물성을 수소환경 예측에 동일하게 적용하였다.

파괴인성 예측식에 필요한 시험 결과는 하중-변위 선도에서 계산된 에너지와 변위이다. 공기환경 파괴인성 예측에는 SP 에너지 W_t 와 최대하중 80% 감소 변위 H_t 를 적용하였으며, 수소환경은 최대하중 에너지 W_m 과 최대하중 시점 변위 H_m 을 이용하였다. API X65 강재의 예측된 파괴인성 계산 결과를 Table 5에 요약하였다.

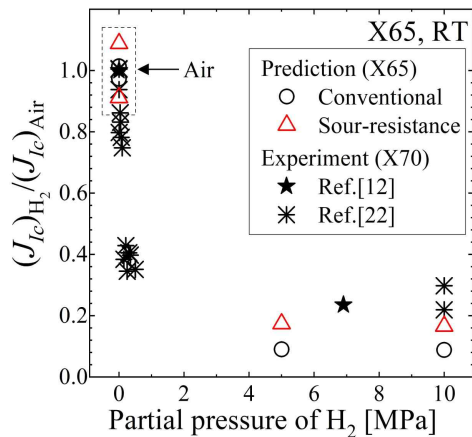
Fig. 10(a)는 일반 강재와 내sour 강재의 예측 파괴인성을 비교한 것이다. 공기 중에서는 내sour 강재의 파괴인성이 일반 강재보다 낮았으나, 수소 환경에서는 오히려 높게 나타났다. 특히 5 MPa와 10 MPa 조건에서 두 재료 모두 수소압과 관계없이 유사한 파괴인성 값을 보였으며, 이는 해당 압력 범위에서 수소취화가 이미 포화 상태에 도달했음을 말한다. 서로 다른 높은 압력 조건에서 일관된 경향을 유지한다는 점에서 수소 취화에 따른 두 강재의 파괴저항성 감소를 예측하기에 충분하였다.

Fig. 10(b)는 수소환경에서 예측된 파괴인성을 공기환경의 평균 파괴인성으로 정규화하여 나타

낸 것이다($(J_{Ic(H_2)})/(J_{Ic(Air)})$). 수소환경의 파괴인성은 공기 환경 대비 일반 강재 약 90%, 내sour 강재 약 85% 감소하여, 일반 강재의 저하율이 더 크게 나타났다. 이러한 예측 결과는 API X70 강재의 C(T) 시험¹²⁾ 및 CTOD 시험 기반의 파괴인성²²⁾와 비교하여 타당성을 검토했다. 본 연구에서 예측된 높은 수소압 조건에서 내sour 강재의 감소율은 선행 연구의 API X70 감소율(약 80%)과 유사하였으며, 이를 통해 수소 환경에 따른 파괴인성 저하 예측 결과의 신뢰성을 확인하였다.



(a)



(b)

Fig. 10 Comparison of predicted result and experimental reference values^(12,22): (a) fracture toughness J_{Ic} , and (b) normalized fracture toughness

본 연구를 통해 수소환경에서 내sour 강재의 파괴인성 감소율이 일반 강재보다 낮아 우수한 것을 확인하였다. 이는 내sour 강재 제조 시 P와 S의 함량이 제한되어, 수소 유기 균열(Hydrogen Induced Cracking)의 기점인 비금속 개재물 형성을 억제했기 때문으로 판단된다. 또한 Fig. 4의 파면 분석 결과, 공기 중에서는 연성 파손 특유의 원주 방향 균열이 지배적이었으나 수소 환경에서는 반경방향의 직선형 균열이 복합적으로 관찰되었다. 이는 수소 장입에 의해 재료의 파손 모드가 연성-취성 복합파손으로 변화했음을 명확히 보여 준다. 특히, 5 MPa 이상의 높은 수소압 조건에서 파괴인성이 일정 수치로 수렴하며, 이는 재료 내부의 수소 농도가 취화 현상을 극대화하는 포화 상태에 도달했음을 의미한다. 따라서 본 연구에서 도출된 결과는 해당 환경에서의 파괴인성 하한값으로, 수소 배관의 건전성 평가에 필요한 파괴인성 감소율을 정량적으로 도출하는 데에 유효한 지표가 됨을 확인하였다.

Table 5 Summary of calculated fracture toughness J_{Ic} of API X65 under air and hydrogen condition

Steel	Partial pressure	Predicted fracture toughness
	P_{H_2} [MPa]	J_{Ic} [kJ/m²]
Conventional	0 (Air)	233.9
		233.8
		224.6
	5	20.86
Sour-resistant	10	20.34
	0 (Air)	227.2
		190.3
		36.27
	5	34.64
	10	34.64

5. 결론

본 연구에서는 SP 시험을 이용하여 API X65 강관 소재 일반 강재와 내sour 강재의 수소환경

조건 하 파괴인성을 예측하였다. SP 시험은 공기와 수소환경(5, 10 MPa)에서 in-situ 조건으로 수행되었다. 두 재료 모두 공기 중에서 최대하중 이후 완만한 하중저감을 보였으며, 연성파손이 관찰되었다. 수소환경에서는 최대하중 이후 간헐적 하중 감소 및 하중유지 거동이 관찰되었으며, 연성-취성 복합파손이 발생되었다. 공기 및 수소환경 하 파괴인성은 기존 연구에서 제안된 수식을 이용하여 예측되었다. 예측에 필요한 정보는 SP시험의 하중-변위 선도에서 얻어진 에너지와 변위, 그리고 재료 인장물성이며, 재료 인장물성은 FE 해석을 이용하여 SP시험을 모사하여 얻어졌다. 공기 중에서 내sour 강재의 파괴인성은 일반 강재와 비교하여 낮은 파괴인성이 예측되었으나, 반면 수소환경에서는 일반 강재 대비 높은 파괴인성 값이 예측되었다. 이를 통해 개발된 내sour 강재의 파괴인성을 간단한 SP시험을 이용하여 수소환경에서 일반 강재보다 향상된 파괴인성을 정량적으로 확인하였다.

후 기

The Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (KAIA) grant funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport (Grant RS-2023-00245737) and by Korea Evaluation Institute of Industrial Technology (KEIT) grant funded by the Korea government(MOTIE) (RS-2024-00444679).

Author contributions

S. H. Jung; Writing - original draft, Validation, Software. J. H. Hwang; Writing-review & editing, Conceptualization, Supervision. Y. J. Kim; Methodology. K. S. Kim; Investigation, Resources. S. G. Lee; Investigation, Funding acquisition.

References

1. H. J. Kim, B. Y. Kang and Y. R. Park, 2004, "Mechanism and characteristics of hydrogen

- induced cracking of welded pipe", Journal of The Korean Welding and Joining, 22(1), 14-17.
2. Y. H. Lee, Y. J. Son and B. W. Lee, 2017, "High temperature corrosion characteristics of Al-Si-Mg Alloy in O₂ and H₂S/H₂ environments", Journal of the Korea Society for Power System Engineering, 21(2), 14-19.
(<http://dx.doi.org/10.9726/kspse.2017.21.2.014>)
3. H. G. Jung, S. H. Kim, B. Y. Yang and K. B. Kang, 2008, "High strength low alloy steel for sour service", Corrosion Science and Technology, 7(5), 293-300.
4. J. D. Son and M. B. Lim, 2007, "A Study on Fatigue Crack Growth Behavior and R-Curve Characteristics of Gas Piping Material", Journal of the Power System Engineering, 11(1), 127-133.
5. M. S. Kim and K. W. Cheon, 2023, "Tensile Behavior and Fracture Toughness Evaluation of 304L Stainless Steel at Cryogenic Temperature (20 K)", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, 47(11), 875-883.
(<https://doi.org/10.3795/ksme-a.2023.47.11.875>)
6. J. K. Lee, S. K. Hwang, S. P. Lee, D. S. Bae and Y. S. Son, 2015, "Application of Nondestructive Technique on Hydrogen Charging Times of Stainless Steel 304L", Journal of the Power System Engineering, 19(5), 60-66.
(<http://dx.doi.org/10.9726/kspse.2015.19.5.060>)
7. T. Misawa, S. Nagata, N. Aoki and J. Ishizaka, Y. Hamaguchi, 1989, "Fracture toughness evaluation of fusion reactor structural steels at low temperatures by small punch tests", Journal of Nuclear Materials, 169, 225-232.
([https://doi.org/10.1016/0022-3115\(89\)90538-2](https://doi.org/10.1016/0022-3115(89)90538-2))
8. Y. S. Chang, J. M. Kim, J. B. Choi, Y. J. Kim, M. C. Kim and B. S. Lee, 2007, "Estimation of fracture resistance curves of nuclear materials using small punch specimen", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, 31(1), 70-76.

- (<https://doi.org/10.3795/ksme-a.2007.31.1.070>)
9. H. S. Shin, K. O. Bae, U. B. Baek, S. H. Nahm, 2019, "Establishment of an in-situ small punch test method for characterizing hydrogen embrittlement behaviors under hydrogen gas environments and new influencing factor", *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(41), 23472-23483.
(<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.07.029>)
 10. H. S. Shin, S. Kang, R. Pascua, K. O. Bae, J. Park and U. B. Baek, 2023, "Effect of Hydrogen Pressure and Punch Velocity on the Hydrogen Embrittlement Susceptibility of Pipeline Steels Using Small Punch Tests under Gaseous Hydrogen Environments at Room Temperature", *Metals*, 13(12), 1939.
(<https://doi.org/10.3390/met13121939>)
 11. J. H. Hwang, K. W. Seo, Y. J. Kim and K. S. Kim, 2024, "Fracture-toughness estimation from small-punch test in hydrogen exhibiting ductile and ductile-brittle fracture modes", *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 103, 105193.
(<https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2023.105193>)
 12. H. J. Cialone and J. H. Holbrook, 1988, "Sensitivity of steels to degradation in gaseous hydrogen, Hydrogen embrittlement: prevention and control", ASTM International.
(<https://doi.org/10.1520/stp45297s>)
 13. European Committee for Standardization, 2007, "Small punch test method for metallic materials", CEN Workshop Agreement, CWA 15627:2007 E.
 14. T. T. Nguyen, J. S. Park, W. S. Kim, S. H. Nahm and U. B. Baek, 2020, "Environment hydrogen embrittlement of pipeline steel X70 under various gas mixture conditions with in situ small punch tests", *Materials Science and Engineering: A*, 781, 139114.
(<https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139114>)
 15. S. Arunkumar, 2020, "Overview of small punch test", *Metals and Materials International*, 26(6), 719-738.
(<https://doi.org/10.1007/s12540-019-00454-5>)
 16. J. M. Lee, J. H. Hwang, Y. J. Kim and J. W. Kim, 2021, "Predicting ductile fracture of cracked pipes using small punch test data", *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 87, 104211.
(<https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2021.104211>)
 17. E3205-20. A, 2020, "Standard Test Method for Small Punch Testing of Metallic Materials", ASTM Int, West Conshohocken, PA.
 18. T. E. Garcia, C. Rodriguez, F. J. Belzunce, C. Suarez, 2014, Estimation of the mechanical properties of metallic materials by means of the small punch test, *Journal of alloys and compounds*, 582, 708-717.
(<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.08.009>)
 19. J. S. Ha and E. Fleury, 1998, "Small punch tests to estimate the mechanical properties of steels for steam power plant: II. Fracture toughness", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 75(9), 707-713.
([https://doi.org/10.1016/s0308-0161\(98\)00075-1](https://doi.org/10.1016/s0308-0161(98)00075-1))
 20. M. Kamaya, Y. Kitsunai and M. Koshiishi, 2015, "True stress-strain curve acquisition for irradiated stainless steel including the range exceeding necking strain", *Journal of Nuclear Materials*, 465, 316-325.
(<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.05.027>)
 21. T. T. Nguyen, J. Park, W. S. Kim, S. H. Nahm and U. B. Baek, 2020, "Effect of low partial hydrogen in a mixture with methane on the mechanical properties of X70 pipeline steel", *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(3), 2368-2381.
(<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.11.013>)
 22. T. T. Nguyen, H. M. Heo, J. Park, S. H. Nahm and U. B. Baek, 2021, "Fracture properties and fatigue life assessment of API X70 pipeline steel under the effect of an environment containing hydrogen", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 35(4), 1445-1455.
(<https://doi.org/10.1007/s12206-021-0310-0>)