

주철관의 잔존강도 평가에 관한 연구

Assessment of Residual Tensile Strength on Cast Iron Water Pipes

배철호¹ · 김주환^{1*} · 김정현¹ · 홍성호²

Cheol-Ho Bae¹ · Ju-Hwan Kim^{1*} · Jeong-Hyun Kim¹ · Seong-Ho Hong²

1 한국수자원공사 수자원연구원 상하수도연구소

2 숭실대학교 환경화학공학과

(2006년 8월 22일 논문 접수; 2006년 11월 24일 최종 수정논문 채택)

Abstract

The goal of this study is to assess cast iron pipes (CIPs) and present a residual tensile strength prediction model using pit characteristics and fracture toughness. The results is the followings. First, average pit depths of collected CIPs were in the range from 0.63 to 6.49 mm, loss of tensile strength compared with net metallic tensile strength were from -7.06 to 67.91 percent. Second, fracture toughness for NS-CR-1, NS-CR-2, and NS(2)-CR-1 were in the range from 62.85 to 89.39 kgf/mm² √mm, and average of those samples was 73.69 kgf/mm² √mm on CIPs. Third, the models developed in this study by using pit characteristics and fracture toughness showed a little good correlation for measured residual tensile strength, and the results will be expected to help for water utilities to manage CIPs in the aspect of rehabilitation and assessment of structural safety on CIPs

Key words: Water pipe, Pit corrosion, Residual strength, Fracture toughness

주제어: 상수도관, 공식, 잔존강도, 파피인성

1. 서 론

상수도관 노후상태에는 일반적으로 단일 인자보다는 매설 후 시간에 따른 설계, 시공, 그리고 운영상에서 다양한 인자가 영향을 주어 발생된다. 이중 대표적인 것이 바로 부식(Corrosion)에 의한 관 손상이다. 즉 관의 두께가 감소하게 되고, 결국 관의 강도 감소로 인해 내·외부 하중에 대한 저항력이 감소되어 결

국 파손에 도달하게 된다.

따라서 현재까지 많은 국·내외 연구자들이 부식이 노후 상수도관의 파손에 미치는 영향에 대한 평가를 수행하였다(이 등, 2004; Rajani et al., 2000, Rajani B. and Maker, 2000; Atkinson et al., 2002; Seica et al., 2000, 2004). 이를 위하여 다양한 노후 상수도관에 대한 부식깊이(Pit corrosion) 또는 부식으로 인한 기계적인 시험을 통한 강도저하 등을 평가하였고, 부식으로 인한 관체의 잔존강도를 예측하기 위한 실험적

*Corresponding author Tel: +82-42-860-0387, Tel: +82-42-860-0399, Email: juhwan@kwater.or.kr (Kim, J.H.)

모델 등을 제안하고 있다.

이중 상수관로에 대한 구조적인 안전성을 평가할 때 사용되는 안전계수(Safety factor)는 내외부 하중으로 인한 응력(Stress)과 강도의 비로서 표현되므로 부식으로 인한 잔존강도의 예측은 상수관로의 구조적인 안전성을 예측하고, 평가하는데 큰 이점을 준다. 그러나 이러한 모델을 개발하기 위해서는 상수관로에 대한 굴착과 시편제작, 가공 등에 따른 복잡한 절차, 그리고 비용이 수반되는 등 다소 어려움이 있는 것도 사실이다.

상수관로에 대한 잔존강도 예측모델은 크게 두 가지 접근방법이 있다. 이들 방법으로 주로 공식의 기하학적 특성이 상수관로의 강도에 미치는 영향에 대한 기계적인 특성을 평가하여 기계적인 강도와 공식의 기하학적 특성에 대한 실험적 상관관계를 도출하거나 또는 파괴인성(Fracture toughness)을 이용하는 방법이다.

이들 공식에 대한 기하학적인 특성이 강도에 미치는 영향에 대한 평가는 주로 주철관(Cast iron pipe, CIP)을 중심으로 이루어지고 있다. Secia et al.(2000) 등은 캐나다 Toronto 지역내 파손 또는 부식이 진행되고 있는 CIP에 대한 인장강도(Tensile strength), 휨 파괴강도(Modulus of rupture), 압축강도(Compressive strength), 휨 강도(Bending strength) 등을 평가하였다. 이때 공식을 고려한 잔존강도(Residual strength)와 부식 또는 관체 자체가 가지고 있는 결함(Graphite flakes) 등을 배제한 순 금속(Net metal)에 대한 각각의 평가를 통하여 공식이 관체의 강도손실에 미치는 영향을 평가하였다.

Atkinson et al.(2002) 등도 공식의 기하학적 특성과 관체 강도간의 상관관계를 평가하였고, 또한 파괴인성을 이용한 잔존강도 예측 값과 이를 비교한 바 있다.

파괴인성을 이용한 잔존강도에 대한 예측도 이전 연구자들에 의해서 많은 연구가 진행되었다(Rajani et al., 2000; Det et al., 2002; Smith, 1977). 상수관로의 파손은 허용 응력하에서 운영이 되더라도 많은 요소에 의해서 파손은 일어난다. 이는 파손이 주로 관로 상의 불연속적인 상태가 존재하여 응력이 집중되어 발생 되는 파괴인성과 관련이 깊기 때문이다. 즉 잔존강도에 대한 예측은 주로 공식의 기하학적 형상을

토대로 한 파괴인성에 대한 평가를 통해서도 가능하기 때문이다(Det et al., 2002).

Rajani와 Maker(2000) 등은 Pit, Spun 주철관에 대한 시편에 대하여 공식이 존재할 때 또는 없을 때 등을 구분하여 평가하였다. 이를 통해서 공식의 차원과 기하학적 특성 등이 주철관의 강도에 어떠한 영향을 주는가를 평가하였고, 파괴인성을 이용한 잔존강도 예측모델을 제안한 바 있다.

또한 Det et al.(2002) 등은 Smith(1977)가 제안한 방법을 수정하여 잔존강도 예측모델을 제안하였고, 파괴인성, 재질의 피로강도, 그리고 Notch 깊이 사이의 깊이 등을 고려하였다.

그러나 국내에서는 주로 노후 상수관로에 대한 기계적인 평가가 일부 수행은 되었으나 아직까지 공식의 기하학적인 특성을 고려한 잔존강도에 대한 평가는 이루어진 바가 없다. 따라서 상수관로에 잔존강도를 예측하기 위한 모델에 대한 접근도 미흡한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 주철관에 한하여 공식의 기하학적 특성이 강도손실에 미치는 영향을 평가를 통하여 잔존강도를 예측할 수 있는 실험적 모델을 제안하고, 파괴인성에 대한 평가를 통하여 잔존강도를 예측할 수 있는 모델을 제안하였다.

2. 연구방법

2.1. 대상관체

본 연구에서는 N, G지역의 배수관로로 사용중인 주철관 9개를 수집하였다. 9개 관체의 매설년도는 1970~1983년도 범위이었으며, 관경은 80~200mm이

Table 1. Characteristics of pipe samples

No.	Specimen name	Pipe type	Age of pipe (years)	Nominal diameters (mm)
1	NS-C-1	CIP	1970	80
2	GM-C-3	CIP	1974	200
3	GM-C-4	CIP	1974	150
4	NS(2)-C-1	CIP	-	150
5	NS(2)-C-2	CIP	-	250
6	GM-CR-1	CIP	1974	150
7	NS-CR-1	CIP	1975	200
8	NS-CR-3	CIP	1983	150
9	NS(2)-CR-1	CIP	-	200

었다.

2.2. 기계적 강도 측정방법

2.2.1. 인장강도 측정

일반적으로 재료에 대한 인장강도에 대한 평가는 인장시험(Tensile test)을 통해서 구할 수 있다. 본 연구에서는 ASTM E8-96a(ASM 1996a)에 따라 인장시험을 수행하였고, 이를 통해서 잔존 인장강도, 순수금속에 대한 인장강도, 그리고 공식 등으로 인한 강도손실 등을 평가하였다(Seica et al., 2000).

이때 인장시험을 위한 시편은 Fig. 1과 Fig. 2와 같이 ASTM E8-96a의 시편제작 규격에 따라 관 측면을 축 방향으로 절단하여 Flat coupons을 제작하였다(관 두께가 20mm 이하인 경우).

인장시험을 위한 장비로는 만능시험기(DTU 900 MHB, 100ton, Daekyeng Tech)을 사용하였다. 이때 인장속도는 0.02mm/sec.으로 하였고, 시편이 파괴될 때까지 지속하였다. 시편이 파괴된 후에는 시편 절단면에 대하여 두께(t)와 폭(w) 등을 각각 측정하였다. 인장시험에 따른 잔존 인장강도의 계산은 시편이 파괴가 일어날 때의 하중으로 시편 단면적으로 나누어 계산하였다. 이는 실제 부식이 포함된 시편이 갖는 진강도(True strength)인 동시에 잔존강도에 해당한다(Seica. et al., 2000).

$$\sigma_{residual\ ts} = \frac{W_b}{A_g} \tag{Eq. (1)}$$

Where, $\sigma_{residual\ ts}$ = residual tensile strength, kgf/mm²

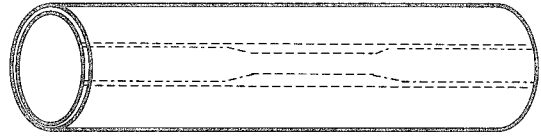


Fig. 1. Location from which longitudinal tension test specimens are to be cut from large-diameter tube (ASTM E8-96a).

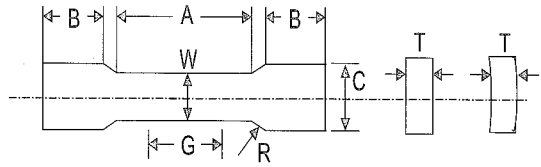


Fig. 2. Specimen for tension test (Flat coupon).

W_b = breaking loads, kgf

A_g = gross area including pit corrosion, mm²

공식이 강도손실에 미치는 영향을 평가하기 위하여 순 금속에 대한 인장강도는 Eq. (2)를 통하여 구하였다(Seica et al., 2002; Rajani et al., 2000). 이때 순 금속에 대한 두께를 측정하기 위하여 절단된 시편에 대한 부식표면에 대하여 표면연마(Shot blasting)를 하였고, Eq. (3)을 통하여 계산하여 순 금속에 대한 두께를 구하였으며, 이를 통하여 순 금속에 대한 단면적($t_{eff} \times w = A_n$)을 구하였다. 공식으로 인한 강도손실은 Eq. (4)를 통하여 계산하였다(Seica et al., 2000)

$$\sigma_{metalic\ ts} = \frac{W_b}{A_n} \tag{Eq. (2)}$$

Table 2. Specimen standards for flat coupons (ASTM E8M-04)

	Dimension						
	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5	Specimen 6	Specimen 7
	12.5	40	40	20	20	25	25
G - Gage length	50.0 ± 0.1	50.0 ± 0.1	200.0 ± 0.1	50.0 ± 0.1	100.0 ± 0.1	50.0 ± 0.1	100.0 ± 0.1
W - Width	12.5 ± 0.2	40.0 ± 2.0	40.0 ± 0.2	20.0 ± 0.7	20.0 ± 0.7	25.0 ± 1.5	25.0 ± 1.5
T - Thickness	Thickness of pipe						
R - Radius of fillet, min	12.5	25	25	25	25	25	25
A - Length of reduced section, min	60	60	230	60	120	60	120
B - Length of grip section, min	75	75	75	75	75	75	75
C - Width of grip section, approximate	20	50	5	25	25	40	40
			0				

Where, $\sigma_{netmetallic\ ts}$ = net metallic tensile strength,

$$\text{kgf/mm}^2$$

W_i = breaking loads, kgf

A_n = net metallic area, mm²

$$t_{eff} = t - \frac{\sum_{i=1}^8 p_c^i}{8} \quad \text{Eg. (3)}$$

Where, t = gross thickness including pit corrosion, mm

t_{eff} = the net metallic mean-effective thickness
along the fracture is determined by
measuring the pit depths, mm

p_c = pit depth, mm

Loss of strength =

$$\sigma_{residual\ ts} = \frac{\sigma_{residual\ ts} - S_{netmetallic\ ts}}{\sigma_{netmetallic\ ts}} \quad \text{Eg. (4)}$$

2.2.2. 파괴인성 측정

파괴인성 시험은 ASTM E399(ASM 1990)에 준하였다. 일반적으로 파괴인성 시험은 SENB(Single-edge notched bend) 시편 또는 CT(Compact tension) 시편을 사용한다(ASM E399). 그러나 SENB는 주철관에 존재하는 Graphite flakes 등으로 파괴인성에 큰 차이가 있는 것으로 평가받고 있으며, CT 시편은 관으로부터 표준 CT 시편 자체를 가공하여 제조하기 어렵다라는 단점이 있는 것으로 보고한 바 있다(Rajani et al., 2000). 이는 시편 제작을 위한 관의 두께가 불충분하고, 곡률(Curvature)을 가지고 때문이다. 따라서 본 연구에서는 Rajani et al.(2000) 등이 적용한 DENT(Double-edge notch tensile)로 Simple tension test를 하여 파괴인성을 측정하였다. 이때 파괴인성 시험을 위한 장비로는 만능시험기 MTS-810(100ton, MTS)를 이용하였다.

파괴인성 시험을 위한 DENT 시편은 Fig. 3과 같다. 두께는 7mm이고, 폭은 20mm이며, 길이는 180mm로 대칭면으로 각도가 60°이고 깊이가 5mm인 노치(Notch)를 양면에 각각 하나씩 만들었다. 이후 DENT 시편을 Hydraulic grips로 고정하고, 시편이 파손 될 때까지 인장하였다. 이때 인장은 0.00245 mm/sec 속도(Stroke rate)로 시편이 파손될 때까지 인

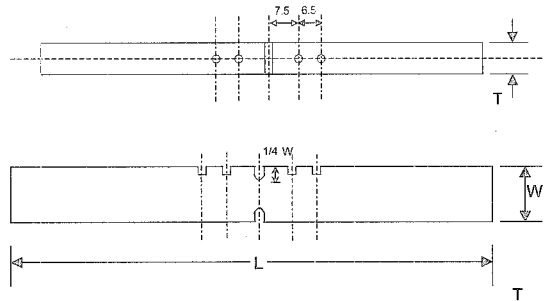


Fig. 3. DENT specimen for fracture toughness test.

장하였다. σ_n (Nominal stress)의 계산은 하중-COD에서 갑작스럽게 하중이 감소하는 지점에 대하여 앞서 작용한 파괴하중을 토대로 산정하였다.

측정된 결과를 통하여 파괴인성은 다음의 식을 통하여 계산하였다(Rajani et al., 2000).

$$K_I = \beta \sigma_n \sqrt{\pi a_n} \quad \text{Eq. (5)}$$

여기서, σ_n 은 파손시 공칭 응력(Nominal stress), a_n 은 노치의 길이, β 는 시편의 형상에 따른 기하학적 상수(Geometric factor)이며, 노치깊이(a_n)와 시편 폭(w)의 함수이다.

3. 연구결과

3.1. 공식이 강도 저하에 미치는 영향 평가

3.1.1. 공식특성

Table 3에는 CIP 시편에 대한 부식을 포함한 두께(Gross thickness)와 인장시험 후 파괴된 단면에 대하여 표면연마를 한 후 측정된 순 금속 두께, 그리고 공식깊이 등을 함께 나타내었다. Table 3에서 부식을 포함한 시편 전체 두께는 9.07~15.0mm이었다. 그러나 인장시험 후 파괴된 단면에 대하여 표면연마를 한 후 측정된 평균 공식깊이가 0.63~6.49mm로 실제 순 금속에 대한 평균두께는 3.08~13.33mm로 감소되어 관 자체가 갖는 강도에 미치는 영향이 다소 클 것으로 판단된다.

Table 3에서 보면, 시편 NS-C-1의 평균 공식깊이가 6.49mm로 부식의 영향이 가장 컸으며, GM-CR-1이 0.63mm로 가장 낮은 것으로 나타났다.

Table 3. Pit characteristics of tensile specimen

ID	Nominal diameter, mm	Specimen width, mm	Gross thickness, mm	Avg. pit depth, mm	Net metallic thickness, mm	Gross area, mm ²	Net metallic area, mm ²
NS-C-1	80	12.62	9.57	6.49	3.08	120.77	38.76
GM-C-3	200	12.73	11.92	3.49	8.43	151.74	106.64
GM-C-4	150	12.64	10.10	4.10	6.01	127.66	75.54
NS(2)-C-1	150	12.46	11.95	1.42	10.54	148.90	131.16
NS(2)-C-2	250	12.48	16.35	3.23	13.12	204.05	163.74
GM-CR-1	150	12.50	9.07	0.63	8.44	113.38	105.37
NS-CR-1	200	12.61	9.60	1.73	7.87	121.06	99.02
NS-CR-3	150	12.60	9.62	1.58	8.04	121.21	101.34
NS(2)-CR-1	200	12.55	15.00	1.67	13.33	188.25	166.34

3.1.2. 하중-변위 곡선

각 시편에 대하여 인장시험에 따른 하중-변위 곡선을 Fig. 4에 나타내었다. 변위(Strain)는 초기 시편길이(Gauge length, 50mm)에 대하여 하중에 따른 길이 변화의 비에 해당한다. Fig. 4에서 보면 각 시편이 하중이 증가함에 따라 시편의 길이변화도 선형적으로 증가하다 파괴하중에 도달하게 되면, 시편이 파괴되는 것으로 보인다. 주철관의 하중과 변위 곡선의 이러한 특징은 주철관이 다른 금속 재질인 닥타일주철관(Semi-flexible) 또는 강관(Flexible)과는 달리, 재료적으로 단단하고(Rigid), 취성(Brittleness)의 성질을 가지고 있기 때문이다. 따라서 주철관은 하중이 어느 이상 증가하게 되면, 하중에 대한 완충효과(Buffering effect) 없이 바로 균열로 이어져 파손에 이를 가능성이 높을 것으로 판단된다.

또한 Fig. 5에서 파괴하중과 공식을 포함한 두께, 그리고 순 금속 두께 간의 상관성을 보면, 실제 시편의 파괴는 공식을 포함한 경우 보다는 순 금속과 관련성이 높은 것으로 판단된다. 이는 바로 부식 등으로 관체 내에 포함된 흑연화 된 부식물 자체가 관의 강도에 미치는 영향이 매우 작음을 의미하는 것으로 볼 수 있다. 이 등(2004)도 일반적으로 이러한 관체 내 흑연부산물은 관 체 내에 관의 일부분으로 남아 있으나 구조상 강도는 가지지 못하는 것으로 보고한 바 있다.

따라서 관이 갖는 강도는 이러한 부식깊이를 제외한 강도로 평가하는 것이 바람직하며, 실제 관이 갖는 강도는 부식깊이 등을 제외하여 고려하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

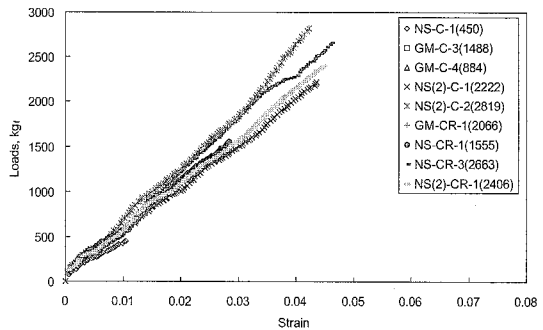


Fig. 4. Loads-strain plot of tested tensile specimen.

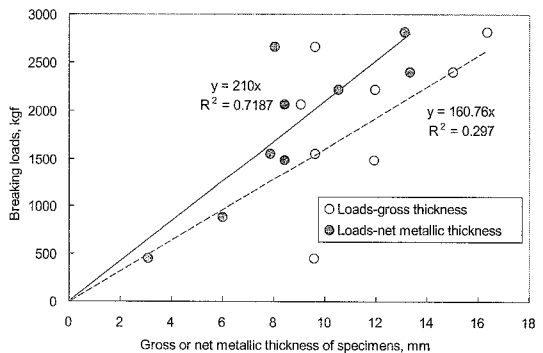


Fig. 5. Breaking loads versus gross or net metallic thickness.

3.1.3. 잔존강도

Fig. 6에는 CIP 9개 시편에 대한 부식을 포함한 두께, 순 금속에 대한 두께, 그리고 파괴하중을 고려하여 산정한 순 금속 인장강도와 잔존 인장강도, 그리고 강도손실 등을 함께 나타내었다.

Fig. 6에서 9개 시편의 순 금속 인장강도는 11.61~26.28kg/mm²(평균 16.39kg/mm²)이었고, 공식을 고

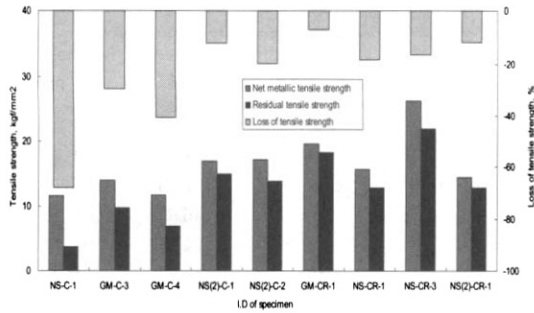


Fig. 6. Residual and net metallic tensile strength of CIPs.

려한 잔존 인장강도는 $3.73 \sim 21.97 \text{ kg}_f/\text{mm}^2$ (평균 $12.78 \text{ kg}_f/\text{mm}^2$)로 나타났다.

특히 순 금속이라 하더라도 인장강도의 차이가 나는 것으로 비록 동일 재질이기는 하나 현재 이들 주철관의 제조사는 알려지지 않았으나 제조에 따른 품질(Quality)적 차이(화학적 성분, Graphite flakes비율, 제조시기 등)에 기인하거나 또는 장기간 매설에 따른 하중으로 인한 응력 등으로 인한 피로(Fatigue) 등의 영향일 것으로 판단된다(Rajnai et al., 2002).

Fig. 6에서 공식 등으로 인한 각 관체의 손실강도는 $-7.06 \sim 67.91\%$ 로 NS-C-1의 강도손실이 -67.91% 가 가장 높았으며, GM-CR-1가 -7.06% 로 가장 낮은 것으로 나타났다.

3.2. 공식특성을 이용한 잔존강도 예측

Fig. 7에는 공식특성(공식깊이/관 초기두께)에 따른 잔존 인장강도를 나타내었다. Fig. 7에서 보면, 관 두께에 대하여 공식깊이가 커질수록 인장강도가 비선형지수함수 형태로 감소하는 것으로 나타났다. 또한, Fig. 8에서 실측 값과 예측 값에 대한 상관계수가 $R^2=0.5978$ 로 Alkinson et al.(2002) 등 연구한 0.5106 보다는 다소 높게 나타났다. 따라서 주철관종에 대한 이러한 측면의 자료가 더욱 축적이 된다면 해당 관체에 대한 잔존강도도 예측도 가능할 것으로 판단된다.

현재 미국 AWWA 또는 캐나다 NRC 등에서는 이러한 공식깊이 등을 관체절단 없이 비파괴적으로 측정하기 위하여 기술개발에 상당한 노력을 기울이고 있으며(Rajani et al., 2000), 국내에서도 이러한 측면의 연구가 활발히 진행되어야 할 것으로 판단된다.

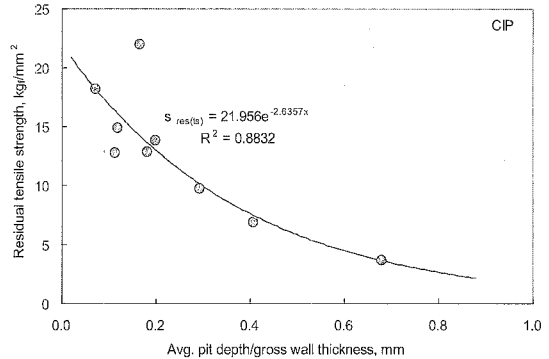


Fig. 7. Pit characteristics(pc/t) versus residual tensile strength.

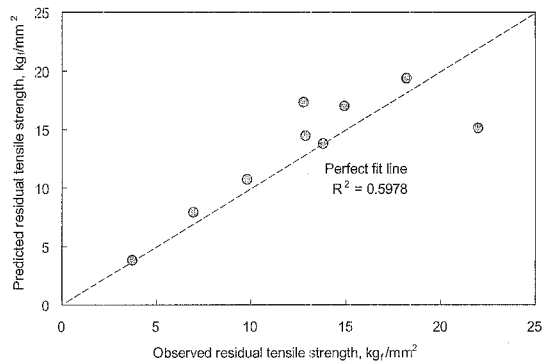


Fig. 8. Observed and predicted residual tensile strength considering pit characteristics.

3.3. 파괴인성을 이용한 잔존강도 예측

3.3.1. CIP의 파괴인성

Fig. 9에는 파괴인성 시험에서 DENT 시험에 대한 하중-COD 곡선을 나타내었다. Fig. 8에서 보면, NS-CR-3, NS(2)-C-1, 그리고 NS-CR-1 등이 각각 하중에 따른 서로 다른 COD 변화를 보이는 것으로 판단된다. 이는 앞서 언급한 바 같이 이들 시험이 동일 주철관이기는 하나 제조시기 또는 매설지역 등에 따라 재질적으로는 다소 차이가 있기 때문으로 판단된다(Rajani et al., 2000).

이들 하중-COD 곡선으로부터 측정된 파괴인성 값을 Fig. 10에 나타내었다. NS-CR-1이 62.85 , NS(2)-CR-1이 76.93 , NS-CR-3가 $89.39 \text{ kg}_f/\text{mm}^2 \sqrt{\text{mm}}$ 로 NS-CR-3의 파괴인성 값이 가장 높게 나타났다. 이는 NS-CR-3가 파괴에 대한 저항력이 가장 높음을 의미한다. 이들 각 CIP 시험에 대한 평균 파괴인성은 $76.39 \text{ kg}_f/\text{mm}^2 \sqrt{\text{mm}}$ 으로 Rajani et al.(2000) 등이 미국

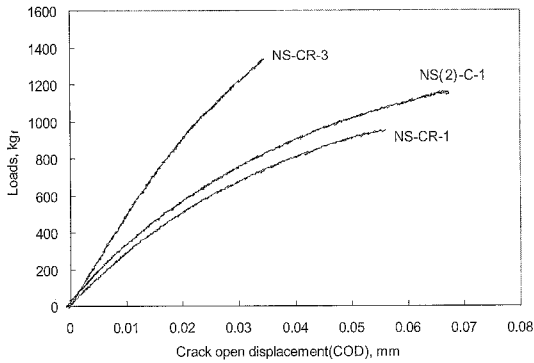


Fig. 9. Loads versus crack opening displacement.

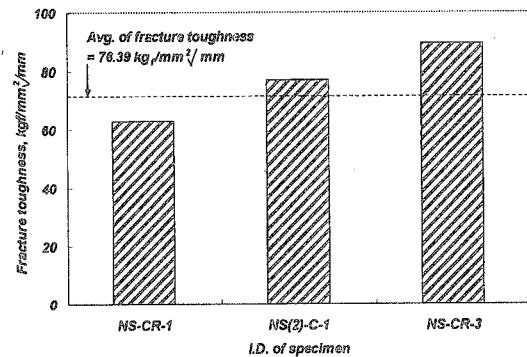


Fig. 10. Results of fracture toughness test.

과 캐나다에서 수집한 Pit 또는 Spun CIP에 대하여 수행한 파괴인성 값은 Pit CIP(1880년 초반에서 1930년대 매설된 관)의 경우 $5 \sim 15 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ($= 80.6 \sim 160.12 \text{kg}/\text{mm}^2\sqrt{\text{mm}}$), Spun CIP(1920년대 초반부터 1970년대 초까지 매설된 관)는 $10 \sim 15 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ($= 160.2 \sim 285 \text{kg}/\text{mm}^2\sqrt{\text{mm}}$)이었다.

따라서 본 연구에서 측정한 파괴인성 값이 전체 CIP를 대표할 수는 없으나 Rajani et al.(2000) 등이 수행한 미국 또는 캐나다 등으로 수집한 CIP 관체에 대한 파괴인성 값보다는 상대적으로 낮은 것으로 나타났다.

3.3.2. 파괴인성을 이용한 잔존강도 예측

Fig. 11에는 실측 값과 공식특성과 파괴인성을 이용하여 예측한 잔존 인장강도를 나타내었다.

Fig. 11에서 파괴인성을 이용한 모델은 Rajani et al.(2000) 등이 제안한 파괴인성을 이용한 모델형태를

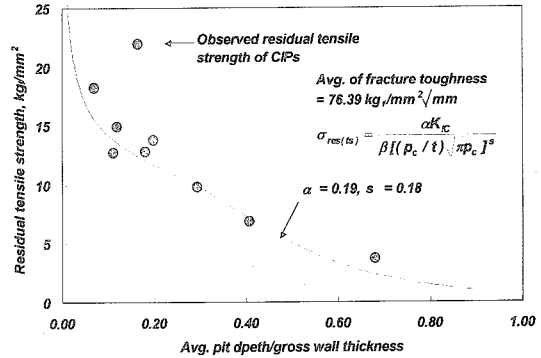


Fig. 11. Prediction of residual tensile strength by fracture toughness and pit characteristics.

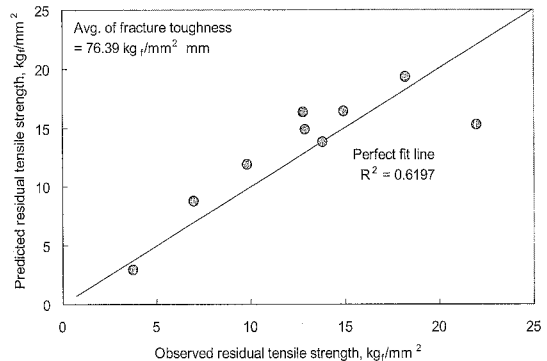


Fig. 12. Observed and predicted residual tensile strength by fracture toughness.

이용하였다. 파괴인성 값은 본 연구에서 측정한 파괴인성 값의 평균 값($= 76.39 \text{kg}/\text{mm}^2\sqrt{\text{mm}}$)을 적용하였고, 모델 내 상수인 $\alpha (= 0.19)$ 와 $s (= 0.18)$ 는 최소제곱법(Method of least squares)를 이용하여 구하였다. Rajani et al.(2000)에 따르면, α 와 s 는 이론적으로는 1이어야 하나 이러한 값의 차이는 파괴인성 시편과 실제 공식이 갖는 형상 간의 반영이 충분히 이루어지지 못하기 때문으로 보았다. 그럼에도 불구하고 본 연구에서 도출한 값들을 적용한 파괴인성, 그리고 공식특성을 이용한 잔존강도 예측 값과 실측 값 간의 상관계수는 $R^2 = 0.62$ 등으로 다소 높게 나타났다.

현재 본 연구에서 수행한 이러한 파괴인성을 이용한 노후 상수관로에 대한 잔존강도에 대한 예측은 매우 초보적인 수준으로 향후에도 이러한 부분에 대한 연구가 다른 금속관종에 대해서도 더 활발히 진행되어야 할 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서 공식특성 또는 파괴인성을 이용한 각 모델에서의 상관계수

가 높지는 않으나 수도사업자가 각 지역에 매설된 CIP에 대한 부식속도를 평가하여 부식깊이에 대한 예측이 가능하다면, CIP에 대한 강도손실을 통한 잔존강도의 예측에 도움을 주어 CIP의 개량 등 유지관리에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서는 주철관에 한하여 공식특성과 파괴인성 평가를 통하여 잔존강도를 예측할 수 있는 Model을 제안하였고 그 결과는 다음과 같다.

첫째, 수집된 관체의 평균 공식깊이는 0.63~6.49 mm이었고, 공식으로 인한 강도손실은 -7.06~67.91%로 나타났으며, 강도손실로 인한 잔존강도는 3.73~21.97kgf/mm²이었다.

둘째, 외부하중에 대한 파괴저항력을 나타내는 CIP에 대한 파괴인성 값은 62.85~89.39kgf/mm²√mm으로 평균적으로 73.69kgf/mm²√mm이었다.

셋째, 공식특성(Pit characteristics)을 이용한 잔존인장강도 예측 값과 실측 값 간의 상관계수(R²)는 0.5978로 나타났으며, 파괴인성을 이용할 경우에는 0.6197로 유사하게 나타났다.

넷째, 공식특성 또는 파괴인성을 이용한 각 모델에서의 상관계수가 높지는 않으나 수도사업자가 CIP에 대한 강도손실을 통한 잔존강도의 예측을 통하여 매설된 CIP의 유지관리 계획에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부 Eco-STAR Project인 수처리 선

진화사업단(과제번호: I2WATERTECH 04-3)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 이현동, 배철호, 홍성호, 황제윤, 박필재 (2004) 상수관로중 주철관종의 잔존수명 평가에 관한 연구. 한국물환경학회지, 20(3), pp. 206-214.
2. Rajni B., Maker J. (2000), Investigation of grey cast iron water mains to develop a methodology for estimating service life, AWWARF, pp. 1-249.
3. Seica, M.V., Packer, J.A., Grabinsky, M.W.F., Adams, B.J., Karney, B.W., Evaluation and testing of cast iron and ductile iron water main samples, Final report to city of Toronto, Department of civil engineering, University of Toronto, Ontario, pp. 1-203.
4. Seica M.V., Packer J.A. (2004) Mechanical properties and strength of aged cast iron water mains, *Journal of materials in civil engineering*, 16(1), pp. 69-77.
5. Atkinson K., Whiter J.T., Smith P.A., Mulheron M. (2002) Failure of small diameter cast iron pipes, *Urban Water*, pp. 263-271.
6. Deb A.K., Grablitz F.M., Hasit Y.J., Snyder J.K. (2002) Prioritization water main replacement and rehabilitation, AWWARF, pp. 1-113.
7. Smith, R.A. (1977) A simplified method of predicting the rates of growth of cracks initiated at notches, *Fracture mechanics in engineering practice*, P. Stanley, Ed. Applied Science, London, pp. 173-182.
8. ASTM (1996a) Standard testing methods for tension testing of metallic materials, ASTM E8-96a. New York: ASTM.
9. ASTM E8-96a (1996) Standard testing methods for tension testing of metallic materials, New York: ASTM.
10. ASTM E399 (2005) Standard test method for Linear-elastic plane-strain fracture Toughness KIC of metallic materials, New York: ASTM.