

매설관의 구조적 안전성 평가에 관한 연구

Assessment of Structural Safety of Buried Water Mains

배철호¹ · 김주환^{1,*} · 김정현¹ · 홍성호² · 이경재¹

Chul-Ho Bae¹ · Ju-Hwan Kim^{1,*} · Jung-Hyun Kim¹ · Sung-Ho Hong² · Kyung-Jae Lee¹

1 한국수자원공사 수자원연구원

2 숭실대학교 환경화학공학과

(2006년 6월 21일 논문 접수; 2007년 4월 11일 최종 수정논문 채택)

Abstract

Criteria for rehabilitation priority are discussed to evaluate structural stability of deteriorated water transport and transmission pipes, in this study.

For the purposes, safety factor is introduced and estimated by measuring tensile strength and by analyzing stress caused by the internal-external loads working on buried pipe body. Related informations are surveyed and collected under various conditions in the fields by digging out and the structural stability is assessed.

In the evaluation results of structural safety, it is shown that steel pipe is more affected by external load than internal load.

The average external load is estimated as 53.7 kg/cm² and total hoop stress is estimated by 2676.5 kg/cm². Also, Poisson effect into longitudinal direction due to internal and external loads is most influential on hoop stress.

The calculated safety factors of hoop stress are ranged from 0.7 to 5.2 with average value of 2.1, considering a bending stress to longitudinal direction.

The decision of rehabilitation priority by safety factors show that structural safety of CIP sample 1(S1) was assessed at the lowest order with safety factor value, 0.7 and that of DI sample 15(S15) was evaluated as the most stable in structural aspect.

Key words: Safety factor, Surge pressure, Internal-external load, Longitudinal stress

주제어: 안전계수, 수충격, 내부하중, 외부하중, 축방향 응력

*Corresponding author Tel: +82-42-870-7501, FAX: +82-42-870-7549, E-mail: juhwan@kwater.or.kr (J.H. Kim)

1. 서 론

국내의 상수관로 진단, 평가기술은 대부분 관 파손과 연관된 인자들 즉, 매설년수, 관종, 관경, 토양종류, 매설위치, 수압, 파손이력 등으로 각 인자별 중요도에 따라 점수가 부여되고, 이를 종합적으로 평가하여 노후도 등급을 부여하는 점수평가방식(Deterioration point assignment method)이 중심으로 되어 있다(Det et al., 2002). 이들 평가방법은 평가하는 방식은 매우 쉬우나 개량우선순위 결정을 위한 관 상태에 대한 객관적인 판단기준 설정 등이 미흡하다. 또한, 관 상태에 따른 개량시기 예측을 통한 개량계획의 수립이 어렵고, 정확한 개량구간에 대한 범위 설정 등이 곤란하다.

현재 노후도 추정에 이용되는 인자들의 신뢰성을 높이기 위하여 인공신경망을 포함한 다양한 기법(Failure probability and regression methods)들이 개발(Det et al., 2002; Agbenowosi, 2000)된 바 있다. 또한, 파손이력 등에 대하여 단순 보수비용 등(Break-even analysis)을 통하여 경제적인 교체시기를 예측하기도 하지만, 관에 대한 직접적이고 정확한 상태 평가 부재, 정량화 미흡(관 안전 상태와 파손횟수 또는 관로 길이 등)으로, 적절한 개량구간 설정과 기술 선정은 쉽지 않은 실정이다.

현재 상수관망에서 관 파손(Failure)을 유발하는 가장 큰 원인은 부식으로 인한 수도관의 노후화(Deterioration)에 기인한다. 노후화 원인중 부식(Corrosion)은 자연발생적인 현상이며, 동시에 매우 다양한 인자들로부터 영향을 받는다. 상수도관의 경우, 관 외부로는 주로 토양과 접촉하고 있고, 관 내부로는 공급되는 수도물과 접촉하고 있다. 따라서 이들 토양 또는 물과 관련된 다양한 물리·화학적 인자들에 의해서 영향을 받는다(이 등, 2004).

그리고 이러한 부식으로 인해서 관의 두께가 감소하며, 관 자체가 가지고 있는 강도가 저하되면서 결국 파손(Failure)이 된다. 즉 파손은 관에 응력을 유발하는 외부부하가 주로 관이 가지는 잔존강도(Residual strength)를 초과할 때 발생한다. 내·외부부하는 매설 후 크게 변화하지 않는 것으로 알려져 있으나(Moser, 2001), 매설 후 관이 가지는 잔존두께, 그리

고 이들 잔존두께에서 관이 가지는 잔존강도를 추정한다면, 파손에 대한 시기, 즉 수명을 정확하게 예측할 수 있을 뿐 만 아니라 파손이 가능한 관 또는 관로를 구별해내는 것이 가능하므로 이러한 관을 대상으로 하여 우선순위화(Prioritization)하고 교체 계획을 쉽게 수립할 수 있다. 이를 위한 대표적인 모델 또는 방법이 역학적 또는 물리적인 평가방법(Mechanical 또는 Physical model)이다.

그러나 국내의 경우에는 아직 이러한 구조적인 안전성 평가에 의한 개량우선순위결정 기법에 대한 연구 또는 이들 자료를 토대로 한 역학적 모델 개발에 관한 연구가 거의 전무한 실정이다. 이는 구조적 안전성 평가를 하기 위해서는 관에 영향을 주는 다양한 하중, 그리고 하중으로 인한 관 자체에 발생하는 응력에 대한 평가 등이 매우 복잡하기 때문에 쉽게 접근하기가 어려운 특징이 있다.

또한 안전계수를 평가하기 위해서는 단수를 하고 굴착을 통하여 관을 절단해서 관의 부식상태, 즉 잔존두께와 잔존강도에 대한 기계적 강도 등을 평가하여야 하므로 기존 점수평가방식 또는 파손이력 등을 이용한 평가에 비하여 다소 제약이 따르기 때문으로 보인다.

따라서 국내에서는 주로 점수평가방식에 의존한 관 노후도 평가방법만이 연구되어 왔고, 비록 굴착을 통하여 관 자체에 대한 두께 또는 강도 등을 평가하고는 있으나(김 등, 2003; 정 등, 2003), 하중과 응력 등을 포함하여 안전계수 평가를 통한 파손에 대한 위험성을 평가하는 연구는 진행된 바 없으며, 이에 대한 적용성 또는 타당성 등에 대한 평가도 이루어진 바가 없다.

따라서 본 연구에서는 국내 실정에 맞는 구조적인 안전성 평가 모델(Mechanical model)의 개발에 앞서, 도·송수관로로 사용되고 있는 상수관로에 대하여 하중과 응력을 각각 평가하고, 물리적인 강도 등을 평가에 의한 안전계수 추정을 통하여 관의 파손위험성을 판단하기 위한 구조적 안전성 평가방법을 제안하였고, 이에 적용결과를 제시하였다.

2. 연구방법

2.1. 안전성 평가방법

매설관은 다양한 내·외면 하중(Load)에 대하여 발생하는 원주방향(Ring and Hoop stress)과 축방향 응력(longitudinal stress and Flexural stress)과 같은 응력을 견딜 수 있도록 안전계수(Safety factor, SF)를 적용하고 이를 바탕으로 한 안전율을 고려하여 설계된다(Rajani et al., 2000, Det et al., 2002). 그러나 시간이 지나감에 따라 부식 등으로 관의 두께가 감소되고, 결국 관 자체가 가지는 강도는 감소하게 되므로, 초기 설계시 고려된 안전계수는 감소하게 되고, 결국 내·외부 하중에 대한 관 자체의 저항력(Resistance)이 약해지면서 결국 파손(Failure)에 이르게 된다(Moser, 2001). 그러므로 구조적인 안정성 평가(Structural safety assessment)는 현재 내·외부 하중(External and Internal loads)으로 관에 발생하는 응력에 대하여 관이 가지는 강도를 평가함으로써 매설관에 대한 안전계수를 재평가하여 안전성을 평가하는 방식이다.

따라서 본 연구에서는 현재 매설관(CIP, DI, SP 등)에 작용하는 내·외면 하중, 그리고 내·외면 하중으로 관에 발생하는 축방향 응력(Longitudinal stress)과 휨 응력(Flexural stress) 등을 계산하였고, 이들 응력과 관련이 있는 관의 강도(인장강도)를 평가하여 안전계수를 산정하고, 매설관의 축방향에 대한 구조적인 안전성을 평가하였다. 각 하중과 응력에 대한 평가방법은 다음과 같다.

2.1.1. 내·외면 하중

매설관에 대한 외부하중은 일반적으로 되메움 흙의 무게(Earth loads)와 더불어 차량하중(Truck load), 동결부하(Frost load), 토양팽창(Soil expansions) 등이 동시에 영향을 준다. 본 연구에서 토양팽창은 제외하였다. 이는 Agbenowosi(2000)에 의하면, 토양팽창 부하의 평가에 적용되고 있는 Issa model이 대체적으로 과도하게 산정될 가능성이 높기 때문이다. 이 중 토압에 대한 계산은 일반적으로 Marston 식이 매설관 주위 토양에 의해서 가중되는 하중을 결정하는데 사용되고 있으며, 관 재질이 강성 또는 연성에 구분없

이 사용이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 매설관에 미치는 토압은 Eq. (1)과 (2)의 Marston 식을 이용하였다. Eq. (1)에서 토양에 대한 무게는 직접 측정을 하지 않은 경우에는 일반적으로 설계에서 적용하는 $0.0018\text{kg/cm}^3 (=18\text{kN/m}^3)$ 을 적용하였고, 흙의 마찰 각으로는 40°C 을 적용하였다(상수도시설기준, 2004).

차량하중으로는 국내에서 설계시 사용하는 분산각법(상수도시설기준, 1997)으로 Eq. (2)을 이용하였다. 이때 후륜하중은 DB-24인 9,600kg을 적용하였다.

겨울철 동결부하는 매설관에 대하여 수직하중을 증가시킨다. 이러한 동결부하는 굴착폭, 동결깊이, 그리고 토양 특성의 함수로서 산정이 가능하다(Rajani and Zhan 1996). Monie and Clark(1974), 그리고 Field and Cohen(1979) 등의 연구에 따르면, 이들 동결부하로 인하여 겨울철에 토압이 2배 가까이 도달하는 것으로 보고하였다. 이러한 결과를 토대로 외부 부하(토피) 2배로 하여 최대동결부하(Maximum frost load)를 고려해주는 방법이 있다(Rajani and Maker 2000, AWWARF 2002). 본 연구에서는 겨울철 동결 부하에 따른 토압증가에 대하여 최대동결깊이에 해당하는 토피에 해당되는 정도의 토압만을 고려하였다.

내부압력은 실제 관에 작용하는 압력으로 운전수압(Working pressure), 수충압(Surge pressure) 등이며, 이들 내부압력은 원주방향 응력(Hoop stress)와 축방향 응력(Longitudinal stress) 등을 유발한다(AWWARF, 2002). 이 중 운전수압은 현재 관로내 수압을 의미한다. 또한, 관로내 급격한 손실수두로 인한 수충압은 다음의 Eq. (3)을 통하여 평가할 수 있다(AWWA, 1989). 그리고 수충압이 발생하였을 때의 압력과의 전파속도는 Eq. (4)과 같다(Det. et. al., 2002; AWWA, 1989).

본 연구에서는 최대 수충압을 고려하기 위하여 관로내 최대 유속변화를 $60\text{cm/sec}(2\text{ft/sec})$ 를 고려하였다. 일반적으로 상수관로에서의 유속변화는 60cm/sec 을 초과하기가 어렵기 때문이다(AWWA, 1980).

또한, 조사대상 매설관에 대해서는 조사당시의 여건상 조사지점이 맨드릴 내 또는 수도부지 내, 그리고 기타 지역에 매설되어 있다하더라도, 이는 매우 국부적이고, 전체적인 관로는 토압, 차량하중, 동결

Table 1. External and internal loads on buried pipes

Loads		Equations									
External loads	Earth loads	$W_e = C_d \gamma B_d^2$ (Rigid pipes) or $W_e = C_d \gamma B_c B_d$ (Flexible pipes) where, W_e = Earth loads, kg/lin. cm C_d = A calculation coefficient $C_d = \frac{1 - e^{-(2K_r \mu' \frac{H}{B_d})}}{2K_r \mu'}$	Eq.(1)								
		K_r = Ratio of active horizontal pressure at any point in the fill to the vertical pressure which causes the active horizontal pressure $K_r = \left(\frac{1 - \sin \theta}{1 + \sin \theta} \right)$ θ = Soil friction angle of backfill, equals to friction angle(θ') between backfill and sides of trench μ' = Coefficient of sliding friction between fill materials and sides of trench $\mu' = \tan \theta'$ H = Height of fill above the top of pipe, cm γ = Unit weight of soils overlying pipe, kg/cm ³ B_d = Width of trench at top of pipe, cm (Outside diameter + 50cm)									
Truck loads		$W_t = \frac{2np \cdot (1 + i)}{[nL + (n - 1) \cdot C + b + 2H \tan \theta] \cdot (a + 2H \tan \theta)}$ where, W_t = Truck loads, kgf/cm ² P = A rear axle loads of truck wheel, kg n = Numbers of truck in a line to contact width L = Interval between rear axes of truck wheel, cm (general, application of 175cm) C = Distance between rear axes of adjacent trucks (general, application of 100cm) b = Wheel contact width of rear axle, cm (general, application of 50cm) θ = A dispersion angle, ° (generally, application of 45°) a = Wheel contact length of rear axle, cm(generally, application of 20cm) i = Impact factor <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>Height of fill above the top of pipe (m)</th> <th>i</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$H \leq 1.5$</td> <td>0.5</td> </tr> <tr> <td>$1.5 < H < 6.5$</td> <td>$0.65 - 0.1H$</td> </tr> <tr> <td>$H > 6.5$</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table> H = Height of fill above the top of pipe, cm	Height of fill above the top of pipe (m)	i	$H \leq 1.5$	0.5	$1.5 < H < 6.5$	$0.65 - 0.1H$	$H > 6.5$	0	Eq.(2)
Height of fill above the top of pipe (m)	i										
$H \leq 1.5$	0.5										
$1.5 < H < 6.5$	$0.65 - 0.1H$										
$H > 6.5$	0										
Surge Pressure		$h = \frac{aV}{g} \quad \text{or} \quad P = \left(\frac{a}{g} \right) \left(\frac{spgr}{1000} \right) V$ Where, h = Surge pressure, cm of water, cm P = Surge pressure, kgf/cm ² a = Velocity of pressure wave, cm/sec, $a = \frac{4660 \times 30.48}{\sqrt{\left(1 + \frac{kd}{Et} \right)}}$ k = Fluid bulk modulus, kgf/cm ² d = Inside diameter of the pipe, cm E = Modulus of elasticity of the pipe t = Pipe wall thickness, cm V = Change in velocity of fluid, cm/sec. g = Acceleration of gravity, 980cm/sec ²	Eq.(3) Eq.(4)								

부하의 영향 아래에 있는 연장선상에 있으므로, 이들 외부하중의 영향을 모두 받고 있는 것으로 간주하여 각 매설관에 대한 외부하중을 평가하였다.

2.1.2. 휨 응력, 축방향 응력

관은 매설할 때 과도한 Beam stress가 발생되지 않도록 설치되어야 한다. 즉, 관을 설치할 때 최소한 기초가 연속적으로 균일한 상태하에서 매설되어야 한다. 이 경우, Beam stress에 의한 영향은 무시할 수 있다(Moser, 2001). 그러나 만약 기초가 적절하게 이루어져 있지 않다면, Longitudinal Beam Stress 휨응력(Bending stress)이 발생할 수 있으며, 관 파손은 물론 접합부 이탈로 인한 누수가 발생할 수도 있다. 이러한 상황이 발생되었을 때, 수직 외부부하는 관을 따라 작용하면서 Beam으로서, 관을 굽히게 된다. 이러한 경우에 관에서의 휨응력(Flexural stress)은 Eq. (6)로 정의된다(Det et al., 2002, Agbenowosi, 2000)

축방향 인장응력을 유발하는 인자들의 종합적인 영향을 고려하기 위해서는 산정된 휨응력에 미치는 내부압력(Eq. (7)), 급격한 수온변화에 의해서 발생(24시간 이내)되는 원주방향 또는 축방향의 응력(Eq. (8), (9)), 원주방향 인장응력(Ring plus hoop stress)에 대한 프와송효과(Eq. (9))(Det et al., 2002, Agbenowosi, 2000), 열 팽창과 수축(Eq. (10))(Det et al., 2002, Agbenowosi, 2000, Moser, 2001, AWWA 1989) 등으로 발생하는 축방향 응력 등을 모두 합해야 한다. 최근 Det et al.(2002)과 Agbenowosi(2000) 등의 연구에서는 외부하중도 고려하여 평가하고 있다. 따라서 본 연구에서도 프와송효과로 인한 축방향 응력의 평가에 있어서 내부압력에 의한 원주방향 응력(Hoop stress)뿐만 아니라 외부하중으로 인한 원주방향 응력(Ring stress)을 함께 고려하였다. 또한, Timoshenko and Goodier(1987) 등은 빠른 온도변화(24시간 이내)로 관내에 축방향 응력이 발생한다고 보고한 바 있으며, Agbenowosi(2000) 등은 수도사업자들의 의견을 통하여 상수관망에서의 갑작스런 온도변화를 최대 6°F(≈3°C)로 보았다. 따라서 본 연구에서도 Eq. (8), (9) 등의 관로 내 급격한 온도변화로 인한 원주방향과 축방향 응력에 대하여 물의 급격한 온도변화로 3°C를 적용하여 응력을 평가하였다.

2.1.3. 안전계수

일반적으로 안전계수는 응력(Stress)에 대한 매설관의 강도(Strength) 비이다(Det et al., 2002). Rajani 등은 파손에 대한 안전성을 확보하기 위해서는 외부부하와 내부부하의 동시 작용으로 인한 효과에 대한 분석을 Combined loading analysis을 통한 안전계수가 1 이상이어야 하고, 또한 응력에 대한 인장강도의 비가 1 이상이어야 하는 것으로 평가하였다(Rajani et al., 2000). Combined loading analysis 등은 관로에 대한 Ring bearing test 또는 Pipe bursting test 등에 관이 내외부 하중에 의하여 파괴가 일어나는 축정 값이 필요하나, 현장 여건상 이에 상응하는 관체를 확보하기는 매우 어려운 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 휨 응력, 축방향 응력, 축방향에 휨응력을 동시에 고려한 응력에 대해서 인장강도의 비, Eq. (11) 분석을 통하여 매설관의 축방향 성분에 대한 안전성을 평가하였다(Det et al., 2002).

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_l} \geq 1.0 \quad \text{Eq. (10)}$$

Where, σ_t = Total longitudinal stress

σ_l = Uniaxial tensile strength of the pipe material

$$SF_{flex_long} = \frac{\sigma_{res(ts)}}{\sigma_{flex_long}} \quad \text{Eq. (11)}$$

where, SF_{flex_long} = Safety factor due to flexural plus longitudinal stresses, kgf/cm²

$\sigma_{res(ts)}$ = Residual tensile strength, kgf/cm²

$\sigma_{l,t}$ = Sum of flexural and longitudinal stresses, kgf/cm²

2.2. 조사대상관로 현황

본 연구에서는 2001년부터 2004년까지 총 61회에 걸쳐 도·송수관로에 대한 노후상태를 조사하였다. 조사한 총 61개 관로에 대한 관종, 관경, 그리고 매설년수 등 관로에 대한 일반현황은 Table 1과 같다. Table 1에서 매설년도로 보면, 1964~2001년까지로 매설년수로는 2년에서 39년이다. 관종은 도복장강관(SP, Steel pipe), 닥타일주철관(DI, Ductile cast iron pipe), 회주철관(CIP, Cast iron pipe)이다. 이중 SP가

Table 2. Flexural stress and total longitudinal stress on buried pipes

Flexural Stress		$\sigma_f = \frac{(1.273)w(D)L^2}{(D^4 - d^4)}$	Eq.(5)
<p>Where, σ_f = Flexural stress, kgf/cm² w = Effective vertical load distributed along the unsupported pipe length, kg/linear cm L = Length of unsupported span, cm(120cm(=4ft)) span based on recommendation of O'day(1985) D = Outside diameter of the pipe, cm d = Inside diameter of the pipe, cm</p>			
Longitudinal stress	Longitudinal pressure stress	$\sigma_l = \frac{Pd}{4t}$	Eq.(6)
<p>Where, σ_l = Longitudinal pressure stress P = Water pressure, kgf/cm² t = Pipe thickness, mm d = Inside diameter of the pipe, cm</p>			
Longitudinal thermal Stress due water temperature change		$\sigma_t = \frac{\alpha E \Delta T}{2(1-\nu) \log(b/a)} \left[1 - 2 \log \frac{b}{r} - \frac{2a^2}{(b^2 - a^2)} \log \frac{b}{a} \right]$	Eq.(7)
<p>Where, σ_t = Longitudinal thermal Stress due water temperature change, kgf/cm² a = Distance from center to inner wall, cm b = Distance from center to outer wall, cm ν = Poisson's ratio r = Distance of any point from the center, cm α = Linear expansive coefficient of pipe materials, cm/cm/°C E = Modulus of elasticity of the pipe ΔT = Temperature difference between the inner and outer walls taken to be the water temperature change in, °C</p>			
Longitudinal stress component of hoop stress		$\sigma_v = \nu (\sigma_{\theta, \text{total}} + \sigma_h)$	Eq.(8)
<p>where, σ_v = Longitudinal component of hoop stress, kgf/cm² $\sigma_{\theta, \text{total}}$ = Total ring stress, kgf/cm² $\sigma_{\theta, \text{total}} = \frac{0.954w(d+t)}{t^2} + \frac{E\alpha\Delta T}{2(1-\nu) \log(b/a)} \left[1 - \log \frac{b}{r} - \frac{a^2}{(b^2 - a^2)} \left[1 + \frac{b^2}{r^2} \right] \log \frac{b}{a} \right]$ t = Pipe wall thickness, cm d = Inside diameter of the pipe, cm w = External loads, kgf/linear cm σ_h = Hoop stress, kgf/cm² $\sigma_h = \frac{Pd}{2t}$ where, t = Pipe wall thickness, mm d = Inside diameter of the pipe, cm P = Water pressure, kgf/cm² (P_w, working pressure, P_s, Surge pressure)</p>			
Thermal Expansion and Contraction		$\sigma_{1,T} = E\alpha \Delta T$	Eq.(9)
<p>Where, $\sigma_{1,T}$ = Longitudinal stress due to thermal contraction E = Modulus of elasticity of the pipe, kgf/cm² α = Coefficient of thermal contraction, cm/cm/°C ΔT = Temperature change, °C</p>			

Table 3(a). Status of water mains investigated

ID	Pipe materials	Nominal diameter (mm)	Lining materials		Installation year (Year)	Pipe age (Years)	Outside diameter (D)(cm)	Pipe thickness (t)(mm)	Trench depth (H)(cm)	Trench width (Bd)(cm)
			Internal	External						
S1	CIP	400	None	None	1982	19	42.9	8.7	250	93
S2	CIP	700	None	None	1975	26	73.8	11.0	120	124
S3	CIP	600	None	None	1975	26	63.5	9.8	120	114
S4	CIP	400	None	None	1983	19	43.0	10.1	120	93
S5	CIP	350	None	None	1983	19	37.9	8.9	120	88
S6	CIP	350	None	None	1979	23	38.0	9.8	100	88
S7	CIP	700	None	None	1975	28	73.9	12.2	160	124
S8	CIP	500	None	None	1982	21	53.2	10.5	170	103
S9	CIP	600	None	None	1975	29	63.2	11.1	130	113
S10	CIP	450	None	None	1979	25	47.9	12.3	150	98
S11	CIP	600	None	None	1975	29	62.7	10.4	140	113
S12	DCIP	700	None	None	1978	23	73.8	11.0	180	124
S13	DCIP	350	None	None	1979	22	37.7	9.0	120	88
S14	DCIP	250	-	-	1985	16	27.8	8.8	150	78
S15	DCIP	450	None	None	1979	22	48.1	10.7	200	98
S16	DCIP	400	None	None	1979	23	42.6	9.9	120	93
S17	DCIP	300	Cement mortar	None	1995	7	32.5	15.5	250	83
S18	DCIP	250	Cement mortar	None	1987	15	27.4	6.7	115	77
S19	DCIP	250	Epoxy	Coal-tar enamel	1987	15	26.6	9.9	115	77
S20	DCIP	350	Cement mortar	Coal-tar enamel	1996	6	36.8	8.0	400	87
S21	DCIP	700	Cement mortar	None	1989	13	73.0	19.0	120	123
S22	DCIP	450	None	None	1979	24	48.0	10.5	180	98
S23	DCIP	600	Cement mortar	None	1997	6	61.3	11.0	110	111
S24	DCIP	300	None	None	1979	24	32.3	8.5	110	82
S25	DCIP	500	None	None	1982	21	52.7	10.4	120	103
S26	DCIP	450	Cement mortar	bitumen	1995	9	46.3	10.3	120	96
S27	DCIP	300	Cement mortar	bitumen	1987	17	41.3	6.8	120	91
S28	DCIP	700	Cement mortar	bitumen	1987	17	72.2	14.8	200	122
S29	DCIP	250	Cement mortar	bitumen	1987	17	26.2	9.0	170	76
S30	DCIP	450	Cement mortar	bitumen	1994	10	46.8	9.0	140	97
S31	SP	2200	Coal-tar enamel	Coal-tar enamel	1979	23	225.3	24.1	350	275
S32	SP	1200	Asphalt	Coal-tar enamel	1993	9	121.6	18.0	150	172
S33	SP	1100	Coal-tar enamel	Coal-tar enamel	1965	37	111.3	11.5	150	161
S34	SP	1100	Asphalt	Asphalt	1989	13	110.3	11.3	90	160
S35	SP	900	Asphalt	Asphalt	1989	13	90.8	8.7	170	141
S36	SP	800	Asphalt	Asphalt	1989	13	82.4	7.2	350	132
S37	SP	1350	Asphalt	Asphalt	1980	22	137.4	12.0	550	187
S38	SP	1350	Epoxy	Coal-tar enamel	1997	5	136.9	12.5	200	187
S39	SP	1650	Coal-tar enamel	Coal-tar enamel	1988	14	167.6	14.0	200	218
S40	SP	800	Coal-tar enamel	Coal-tar enamel	1989	13	81.0	7.6	180	131
S41	SP	1100	Coal-tar enamel	Coal-tar enamel	1985	17	111.8	8.6	250	162
S42	SP	2000	Coal-tar enamel	Asphalt	1992	11	208.2	15.0	200	258
S43	SP	900	Coal-tar enamel	Asphalt	1997	6	90.9	8.2	250	141
S44	SP	1200	Epoxy	Coal-tar enamel	1997	6	121.1	9.3	100	171
S45	SP	500	Epoxy	Polyethylene	2001	2	50.8	6.0	150	101
S46	SP	1500	Coal-tar enamel	Asphalt	1984	19	151.8	13.3	170	202
S47	SP	1500	Coal-tar enamel	Coal-tar enamel	1984	19	151.5	12.6	500	202
S48	SP	1100	Epoxy	Coal-tar enamel	1991	12	114.4	10.0	250	164

Table 3(a). continued

ID	Pipe materials	Nominal diameter (mm)	Lining materials		Installation year (Year)	Pipe age (Years)	Outside diameter (D)(cm)	Pipe thickness (t)(mm)	Trench depth (H)(cm)	Trench width (Bd)(cm)
			Internal	External						
S49	SP	800	Coal-tar enamel	Coal-tar enamel	1987	16	80.4	7.9	160	130
S50	SP	900	Coal-tar enamel	Coal-tar enamel	1987	16	91.3	9.4	200	141
S51	SP	450	Coal-tar enamel	Coal-tar enamel	1979	24	45.8	6.4	200	96
S52	SP	900	Unidentified	Coal-tar enamel	1978	25	94.5	8.0	100	145
S53	SP	1100	None	Coal-tar enamel	1996	7	114.4	10.0	400	164
S54	SP	1200	None	None	1964	39	125.5	11.0	110	176
S55	SP	1650	Epoxy	Coal-tar enamel	1998	6	167.2	13.5	200	217
S56	SP	600	Coal-tar enamel	Asphalt	1982	22	60.9	6.2	75	111
S57	SP	2800	Coal-tar enamel	Asphalt	1978	26	284.6	22.9	150	335
S58	SP	1000	None	None	1971	33	104.8	9.0	500	155
S59	SP	2200	Coal-tar enamel	Asphalt	1979	25	228.8	16.0	260	279
S60	SP	800	Coal-tar enamel	Asphalt	1991	13	80.8	7.9	120	131
S61	SP	900	Coal-tar enamel	Coal-tar enamel	1984	20	90.5	6.0	120	140

Table 3(b). Status of water mains investigated

ID	Traffic environment			Frost depth (df), cm	weight of soils(γ) (kg/cm ³)	Soil friction angle (θ)	Impact factor (i)	Temperature(°C) (Avg.)		Pit corrosion depths, (mm)	
	Road lines	buired place	Distance from road to of buired pipe, (m)					Difference between max. and min water temp.	Sudden water temp change	External	Internal
S1	4	A bicycle road	1.0	70	0.0018	40	1.15	34	3	5.0	6.3
S2	8	Adjacent road	1.0	70	0.0018	40	1.35	34	3	0.9	6.3
S3	6	Pavement	3.0	70	0.0018	40	1.35	34	3	1.5	4.5
S4	2	Ground around road	30.0	78	0.0018	40	1.35	30	3	4.7	3.4
S5	2	Ground around road	0.0	78	0.0018	40	1.35	30	3	1.5	6.5
S6	2	Adjacent road	0.0	64	0.0018	40	1.50	27	3	2.1	3.2
S7	8	Adjacent road	1.0	70	0.0018	40	1.35	34	3	1	2
S8	6	Pavement	3.0	70	0.0018	40	1.35	34	3	1.3	1.9
S9	6	Pavement	0.0	70	0.0018	40	1.35	34	3	2.0	5.7
S10	1	Adjacent road	0.0	64	0.0018	40	1.35	27	3	0	8.3
S11	6	Adjacent road	0.0	70	0.0018	40	1.35	34	3	0.8	2.9
S12	6	A bicycle road	1.0	70	0.0018	40	1.35	34	3	0.0	1.8
S13	4	Around road(v/v)	0.0	64	0.0018	40	1.35	27	3	0.0	1.9
S14	2	Ground around road	5.0	64	0.0018	40	1.35	27	3	0.0	6.7
S15	2	Around road(v/v)	0.0	64	0.0018	40	1.35	27	3	-	2.0
S16	2	Around road	0.0	78	0.0018	40	1.35	30	3	2.9	4.5
S17	4	Around road	2.0	64	0.0018	40	1.15	27	3	0.0	0.0
S18	Not road	v/v	-	64	0.0018	40	1.35	27	3	1.2	1.6
S19	Not road	v/v	-	6	0.0018	40	1.35	27	3	2.5	0.0
S20	4	Ground around road	10.0	78	0.0018	40	1.00	30	3	0.0	0.0
S21	Not road(v/v)	a grassy place	-	64	0.0018	40	1.35	27	3	0	0
S22	Not road	Ground around road	5.0	64	0.0018	40	1.35	27	3	-	-
S23	4	Adjacent road	0.0	78	0.0018	40	1.35	30	3	0	0
S24	4	Adjacent road	0.0	64	0.0018	40	1.50	27	3	0	0
S25	4	Adjacent road	1.0	78	0.0018	40	1.35	30	3	0	4
S26	4	Adjacent road	10.0	64	0.0018	40	1.35	27	3	0	0

Table 3(b). continued

ID	Traffic environment			Frost depth (df), cm	weight of soils(γ) (kg/cm ³)	Soil friction angle (θ)	Impact factor (i)	Temperature(°C) (Avg.)		Pit corrosion depths, (mm)	
	Road lines	buired place	Distance from road to of buired pipe, (m)					Difference between max. and min. water temp.	Sudden water temp. change	External	Internal
S27	Not road	Water utility	-	102	0.0018	40	1.35	24	3	0	0
S28	Not road	Water utility	-	102	0.0018	40	1.35	24	3	0	0
S29	Not road	Not road	-	102	0.0018	40	1.35	24	3	0	0
S30	2	Ground around road	20.0	64	0.0018	40	1.35	22	3	0	0
S31	5	Ground around road	10.0	99	0.0018	40	1.00	25	3	0.0	0.0
S32	2	Around road	0.0	74	0.0018	40	1.35	28	3	0.0	0.0
S33	2	Ground around road	5.0	70	0.0018	40	1.50	34	3	0.0	3.0
S34	4	Ground around road	15.0	64	0.0018	40	1.50	27	3	0.0	-
S35	2	Ground around road	50.0	64	0.0018	40	1.35	27	3	0.0	-
S36	4	Around road	3.0	64	0.0018	40	1.00	27	3	0.0	-
S37	4	Ground around road	15.0	104	0.0018	40	1.00	24	3	-	-
S38	4	Ground around road	10.0	45	0.0018	40	1.35	21	3	0	0
S39	Not road	Water utility	-	64	0.0018	40	1.35	28	3	0	0
S40	4	Adjacent road	2.0	64	0.0018	40	1.35	27	3	0	0
S41	2	Adjacent road	20.0	74	0.0018	40	1.15	24	3	0	0
S42	Not road	Water utility(v/v)	-	64	0.0018	40	1.35	22	3	-	-
S43	4	A bicycle road	-	64	0.0018	40	1.15	22	3	0	0
S44	-	Around road	-	45	0.0018	40	1.50	28	3	0	0
S45	-	Farmland	-	119	0.0018	40	1.35	21	3	-	-
S46	Not road	Intake place	-	87	0.0018	40	1.35	24	3	-	-
S47	Not road	Water utility	-	87	0.0018	40	1.00	24	3	0	-
S48	4	Ground around road	10.0	45	0.0018	40	1.15	28	3	-	-
S49	4	Ground around road	30.0	64	0.0018	40	1.35	27	3	-	-
S50	4	Ground around road	5.0	64	0.0018	40	1.35	27	3	-	-
S51	Not road	Water utility	-	64	0.0018	40	1.35	28	3	0	-
S52	-	-	-	45	0.0018	40	1.50	27	3	-	-
S53	-	-	-	45	0.0018	40	1.00	28	3	-	-
S54	Not road	Water utility	-	45	0.0018	40	1.35	28	3	-	1.6
S55	1	Around road	0.0	102	0.0018	40	1.35	24	3	0	0
S56	3	Pavement	2.5	78	0.0018	40	1.50	30	3	0	0
S57	6	Adjacent road	0.0	99	0.0018	40	1.35	25	3	0	0
S58	2	Under river	-	68	0.0018	40	1.00	23	3	0	-
S59	4	Adjacent road	5.0	99	0.0018	40	1.15	25	3	0	0
S60	6	Pavement	0.0	70	0.0018	40	1.35	34	3	0	0
S61	Not road	Water utility	-	64	0.0018	40	1.35	22	3	-	-

50.8%로 가장 많았으며, DI가 31.1%, CIP가 18.1% 등 이다. 관경은 250~2,800mm이다. 이들 관의 내외면 부식깊이는 각각 0~6.7mm, 0~5mm이었으며, 주로 내·외면 도장이 안된 CIP 관의 부식깊이가 높았다. 본 연구에서는 하중과 응력을 산정할 때 측정된 내·외면 공식중 최대 값을 고려한 두께를 적용하였다.

2.3. 물리적 특성 평가

본 연구에서는 각종 관경, 관두께 등에 대한 치수 측정은 버니어 캘리퍼스 등 정밀자를 사용하였고, 공식깊이 등은 Dial depth gauge를 이용하였다. 노후관의 매설후 부식에 따른 물리적인 특성의 변화를 고찰하기 위하여 각 관체에 대하여 KS 규격에 따라 인장강도(Nominal tensile strength)(KS D 0802) 측정하였

다. 인장강도를 측정된 매설관은 현장여건상 61개소 중 37개소(CIP 5개소, DI 13개소, SP 19개소)에 한하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 내·외부 하중 평가

Fig. 1과 Fig. 2에는 각각 조사대상 매설관(CIP, DI, SP 등)에 대한 외부하중과 내부압력을 평가한 결과이다. Fig. 1의 총 외부하중은 평균적으로 53.7 kgf/lin. cm (19.8~165.9kgf/lin. cm)이었으며, 이중 CIP는 41.8kgf/lin. cm(32.7~53.0kgf/lin. cm), DI는 36.3kgf/lin. cm(22.1~57.1kgf/lin. cm), SP는 68.6kgf/lin. cm(19.8~165.9kgf/lin. cm)으로 매설깊이가 깊을수록 외부하중이 증가하는 경향을 보였다. 따라서, 외부하중으로 인한 원주방향 응력(Ring stress) 또는 휨 응력(Flexural stress) 등이 SP에 크게 작용할 것으로 판단된다.

그러나 이들 응력은 외부하중 뿐만 아니라 관 두께와 관경 등 따라 영향을 받기 때문에 외부하중이 크다고 해서 반드시 크게 작용하는 것은 아니다.

또한, 매설관에 작용하는 외부하중에 영향을 주는 토압이 평균 kgf/lin. cm로, 동결부하 kgf/lin. cm, 차량 하중 kgf/lin. cm에 비하여 각각 2.57배, 2.28배 정도 높게 영향을 주고 있는 것으로 나타났다.

Fig. 2에서 내부압력은 운전수압이 평균적으로 4.23kgf/cm²(0.3~13.50kgf/cm²)이었으며, 관내 최대유속변화로 0.6m/sec를 가정한 수충압은 6.04kgf/cm²(4.03~7.78kgf/cm²)으로 총 내부압력이 관에 미치는 수압의 영향은 10.27kgf/cm²인 것으로 나타났다. 매설관의 관종별로는 CIP가 총 내부압력이 평균적으로 8.24kgf/cm²(4.53~11.05kgf/cm²), DI는 10.71kgf/cm²(8.31~13.34kgf/cm²), 그리고 SP가 10.71kgf/cm²(6.38~19.93 kgf/cm²)로 CIP에 비하여 DI와 SP에 작용하는 내부압력이 더 높게 나타났다. 따라서 내부압력으로 인한 원주방향 응력(Hoop stress)에 미치는 영향도 더 크게 작용할 것으로 판단된다.

3.2. 응력 평가

3.2.1. 휨 응력(Flexural stress)

Fig. 3에는 외부하중으로 인한 휨 응력에 대한 평가

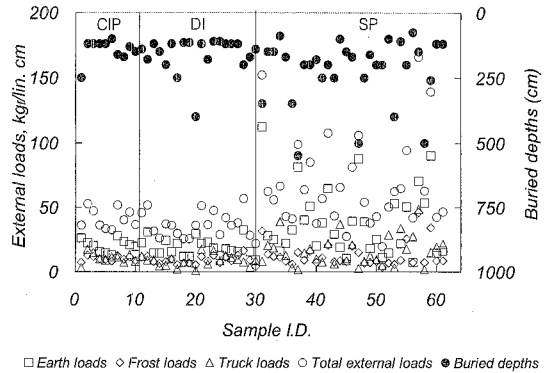


Fig. 1. External loads of large water mains.

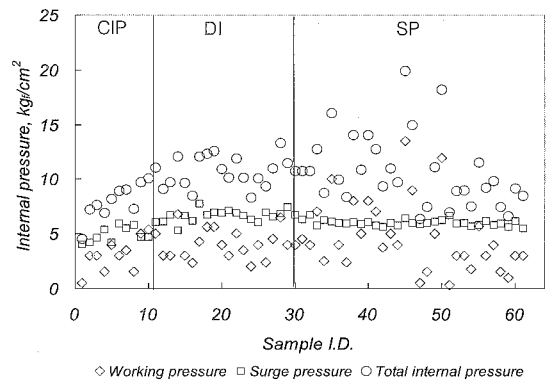


Fig. 2. Internal pressure of large water mains.

결과이다. 축방향으로의 휨 응력은 기초가 적절하게 이루어져 있지 않을 경우 발생될 수 있다. Agbenowosi(2000)은 이러한 관로에 대하여 Effective beam span, 즉 지지되지 않는 관의 길이(Length of unsupported span)에 대하여 조사한 관의 파손모드, 그리고 안전계수를 통한 파손모드와의 비교를 통해서 지지되지 않는 관의 길이를 4ft로 추정하여 모사한 결과, 가장 정확도가 높은 것으로 보고하였다. 따라서 본 연구에서도 축방향 휨 응력에 대한 평가, Eq. (6)에서 Effective beam span 등을 120cm로 간주하여 평가하였다. 또한, 본 연구에서는 유효수직부하로서는 외부하중과 동시에 관체와 관체내부에 포함된 물로 인한 하중으로 관 자체가 축방향 휨에 영향을 주므로(AWWA, 1996) 각 관체의 단위길이 당 무게, 그리고 관내 물의 부피도 동시에 고려하였으며, 그 결과는 Fig. 3과 같다.

Fig. 3에서 휨 응력은 매설관 전체에 대하여 평균적

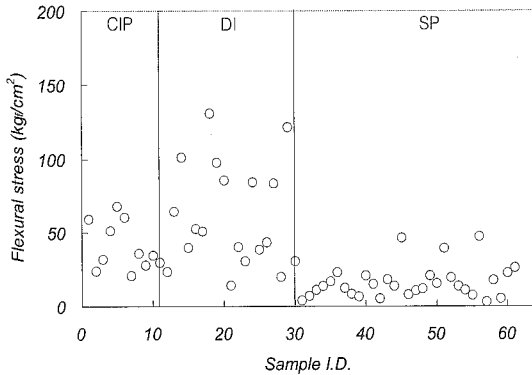


Fig. 3. Flexural stress of large water mains.

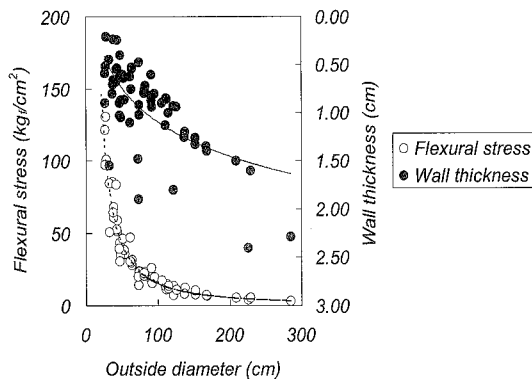


Fig. 4. Relationship of flexural stress and outside diameter.

으로 34.5kgf/cm²(3.1~130.7kgf/cm²)으로 나타났으며, 이 중 CIP는 41.3kgf/cm², DI는 60.6kgf/cm², SP는 16.3 kgf/cm²로 DI가 CIP 또는 SP보다는 휨 응력을 더 많이 받고 있는 것으로 나타났다.

또한 Fig. 4에서 환경에 따른 축방향으로의 휨 응력을 보면, 환경이 클 수록 축방향으로의 휨 응력은 상대적으로 감소하는 것으로 나타났다. Eq. (5)에서 (D⁴-d⁴)은 beam 작용하에서 하중에 대한 휨 저항에 필요한 관의 두께를 의미한다(Agbenowosi, 2000). 따라서, 관 두께가 클수록 휨에 대한 저항력이 커지기 때문에 판단된다.

3.2.2. 축방향 응력 (Longitudinal stress)

Fig. 5에는 내·외부하중으로 인한 축방향 응력에 대한 평가 결과를 나타내었다. Fig. 5에서 총 축방향 응력은 평균적으로 2676.5kgf/cm²(687.1~7023.8kgf/cm²)으로 나타났으며, 축방향 응력에 영향을 주는 인

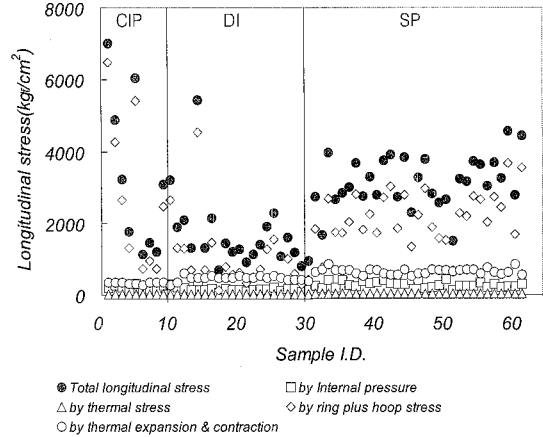


Fig. 5. Longitudinal stress of large water mains.

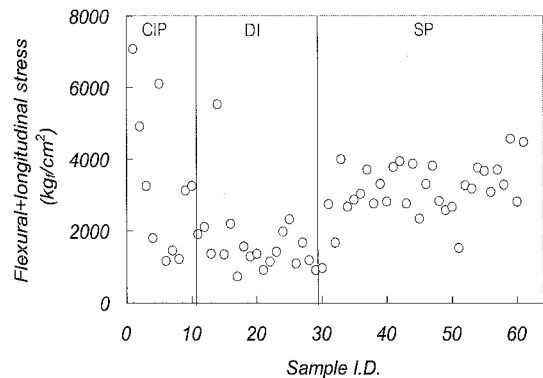


Fig. 6. Longitudinal stress including flexural stress of large water mains.

자들 중 내부압력이 축방향 응력에 미치는 영향은 231.8kgf/cm²(57.3~433.4kgf/cm²), 관내 급격한 수온변화로 인한 축방향 응력은 22.5kgf/cm²(11.1~28.4kgf/cm²), 내외부하중에 대한 프와송효과로 인한 축방향 응력은 1881.7kgf/cm²(135.6~6476.4kgf/cm²), 여름철과 겨울철 온도 차로 발생하는 열팽창과 축소(Thermal expansion and contraction)로 인해 발생하는 축방향 응력은 540.5kgf/cm²(270.0~856.8kgf/cm²)으로 나타났다. 따라서, 내외부 하중에 대한 프와송효과가 총 축방향 응력중 70.3%을 차지하여 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 앞서 언급한 바와 같이, 프와송효과로 인한 축방향 응력에 대하여 내부압력에 의한 원주방향 응력(Hoop stress)과 외부하중으로 인한 원주방향 응력(Ring stress)를 모두 고려하였기 때문으

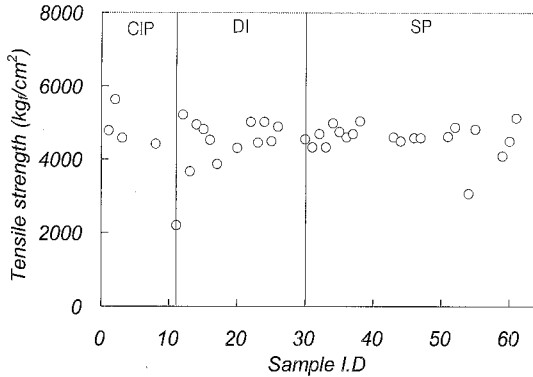


Fig. 7. Tensile strength of large water mains.

로 판단된다.

관종별로 보면, CIP에 발생하는 총 축방향 응력이 평균적으로 3170.3 kgf/cm^2 ($1120.3 \sim 7023.8 \text{ kgf/cm}^2$), DI가 1583.2 kgf/cm^2 ($687.1 \sim 5422.3 \text{ kgf/cm}^2$), SP가 3171.0 kgf/cm^2 ($1502.4 \sim 4571.5 \text{ kgf/cm}^2$)로 DI에 비하여 CIP와 SP에 발생하는 축방향 응력이 다소 높게 나타났다.

Fig. 6에 휨 응력을 고려한 축방향 응력도 총 축방향 응력과 유사한 경향을 보였다. 이는 축방향 응력에 비하여 휨 응력이 상대적으로 크지 않기 때문인 것으로 보여진다.

3.3. 물리적강도

Fig. 7에는 매설관(CIP, DI, SP 등)에 대하여 채취한 시편에 대한 인장강도를 측정된 결과이다. 전체 매설관의 평균적인 인장강도는 $4,537.4 \text{ kgf/cm}^2$ ($2,211.9 \sim 5,635.8 \text{ kgf/cm}^2$)이었으며, 이 중 CIP가 $4,318.8 \text{ kgf/cm}^2$ ($2,211.9 \sim 5,635.8 \text{ kgf/cm}^2$), DI는 $4,591.6 \text{ kgf/cm}^2$ ($3,656.2 \sim 5,211.6 \text{ kgf/cm}^2$), SP는 $4,557.8 \text{ kgf/cm}^2$ ($3,070.4 \sim 5,120.7 \text{ kgf/cm}^2$)로 DI와 SP가 CIP에 비하여 인장강도가 높게 나타났다. 또한, CIP는 CIP 관중 S-11을 제외한 연신율(Elongation)이 10~20%이 상대적으로 높게 나타나는 특성을 보였다.

3.4. 안전계수

Fig. 8에는 조사대상 매설관에 대한 내외면 하중으로 인해 발생하는 휨응력과 축방향 응력의 합에 대한 인장강도 비로 정의되는 안전계수를 나타내었다. Fig. 9에는 관종과 관계없이 매설년도에 따른 매설관의 안전계수를 나타내었다. Fig. 10에서 조사대상 매

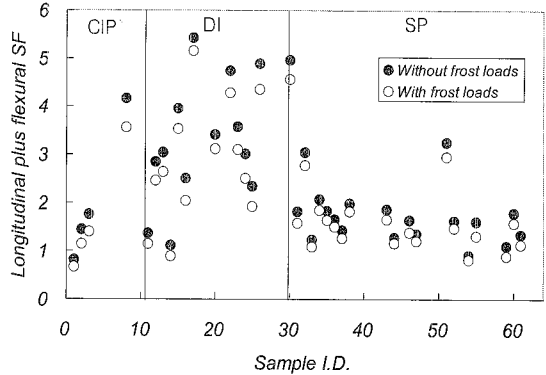


Fig. 8. Longitudinal plus flexural safety factor (SF) of large water mains.

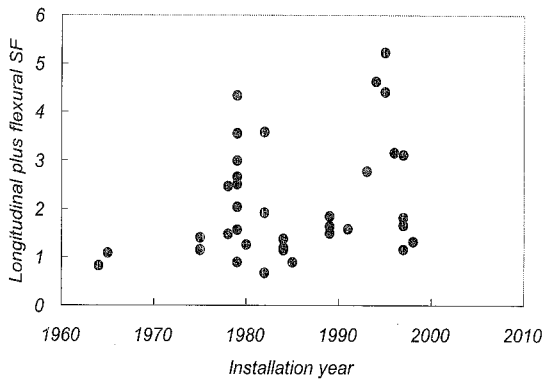


Fig. 9. Longitudinal plus flexural safety factor (SF) of large water mains.

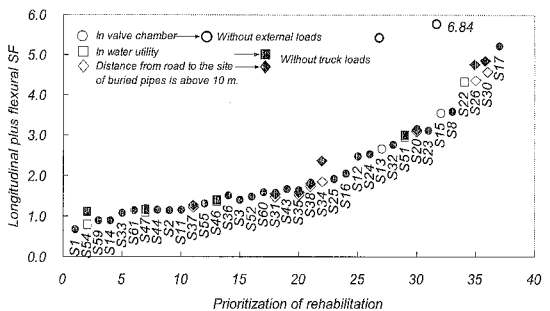


Fig. 10. Prioritization of rehabilitation of large water mains.

설관의 안전계수는 0.7~5.2로 평균적으로 2.1인 것으로 나타났으며, CIP는 1.6(0.7~3.6), DI는 3.1(0.9~5.2), 그리고 SP는 1.5(0.8~3.0)로 DI가 CIP 또는 SP보다는 안전계수가 전체적으로 2배 이상 높아 구조적으로 안전성이 높은 것으로 나타났다. 조

사대상 관로중 안전계수가 1 이하로 나타난 매설관 (인장강도 측정이 가능했던 37개소)은 CIP인 S1, DI는 S14, SP는 S54, S59 등으로 4개소 약 10.8%인 것으로 나타났으며, 이들중 S54는 수도시설 내부에 매설된 관로이고, S1을 제외하고는 도로로부터의 이격 거리가 5m 이상으로 차량하중에 의한 외부부하가 크지 않을 것으로 추정되므로, 이를 고려한다면 안전계수는 다소 높아질 수 있을 것으로 판단된다.

또한, 현재 국내에서는 설계시 동결부하를 고려하고 있지 않고 있다. 따라서 동결부하에 대한 하중을 제외한다면 전체적인 안전계수는 평균적으로 0.4 정도 상승하게 된다. 그러나 기존 국내에서 연구된 바에 따르면 동결부하는 실제 토압에 미치는 영향은 본 연구에서 적용한 동결부하보다는 크다. 김 등(2001)이 수행한 온도, 함수비 변화(10~20%)에 따른 위치별 토압 분포에서 높이 30cm에 설치한 토압계로부의 토압은 0~-15°C의 온도변화에서 최대 5.7배까지 증가되는 것으로 평가한 바 있다.

따라서 향후에는 설계에서부터 이들 동결부하로 인한 토압의 증가는 매우 중요하게 고려되어야 할 것으로 판단된다.

3.5. 안전계수에 의한 개량우선순위결정

Fig. 10에는 안전계수에 따른 개량우선순위를 나타내었다. 그러나 실제 개량우선순위 결정은 이러한 관 노후상태에 더불어 경제성, 긴급성, 사고의 위험성 등 다양한 인자들에 대한 평가도 필요하다. Fig. 10에서는 구조적 안전성 검토만을 고려한 개량우선순위이다.

Fig. 10에서 보면 가장 구조적인 안전성에 문제가 되는 매설관은 CIP인 S1으로 나타났다.

또한, 밸브 실에 위치한 S13, S15의 경우 외부하중이 없는 것으로 간주할 경우, SF는 각각 2.64, 3.50에서 5.21, 6.84로 두 배 이상 크게 증가되는 것으로 나타나, S15가 구조적으로는 가장 안전한 것으로 평가되었다. 수도부지내 또는 도로로부터 10m 이상 이격되어 도로외에 매설된 지점에 위치한 S20, S22, S26, S30, S31, S34, S35, S37, S38, S46, S47, S51, S54 등도 차량하중을 고려하지 않을 경우에는 SF가 0.015~0.904 정도 상승하는 것으로 나타났다. 따라서 S1 이후에는 S59, S14, S33, S61, S47, S54 ..., 순

으로 나타났다.

3.6. 구조적 안전성 평가의 적용성

본 연구에서는 안전계수를 통하여 관의 구조적인 안전성을 검토하였다. 현재 안전계수는 1.0 이하인 경우에는 응력이 관이 가지는 강도보다 커지므로 이론적으로는 파손에 도달한다. 그러나 안전계수가 1.0이라고 해서 반드시 관이 파손되는 것은 아니다. 다만 구조적으로 관이 파손될 위험성이 있는가에 대하여 이론적이고, 과학적인 접근이 가능하므로, 안전계수에 의한 파손위험성을 토대로 개량이 필요한 관로 구간 선정이 용이한 것으로 판단된다.

특히 기존의 관 노후상태 평가를 통하여 제시되고 있는 교체 또는 갱생의 개량방안 제시에 비하여 구조적 안전성 평가를 수행할 경우에는 추가적으로 파손 위험성에 따라서는 교체(SF < 1.0), 파손위험성은 없으나 일정 안전계수이하에 대해서 구조보강이 필요한 경우에는 구조보강에 대한 갱생조치, 그리고 구조적인 문제가 없는 구간에 대해서는 별도의 구조적인 보강이 필요 없으므로 세관을 통한 예폭시 등과 같은 방식라이닝을 통한 개량방안 제시 등 좀 더 점수평가 방식보다는 상세한 개량방안의 제시가 가능할 것으로 판단된다. 그러나 이에 대한 명확한 기준은 아직 마련되어 있지 않다.

따라서 향후 관에 대한 직접적인 조사를 통하여 정밀진단을 할 경우에는 구조적인 안전성 평가가 수반되어야 할 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서 수행된 하중 또는 응력 수식들에 대해서도 각 관종에 대한 적정성 등에 대한 검토도 지속적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다. 더불어 안전계수를 통하여 적절한 교체, 구조보강 또는 세관 후 방식라이닝 등 세부적인 개량방안 제시를 위한 판단기준에 대해서도 향후 면밀한 검토가 이루어진다면, 관 노후도 평가의 하나의 방법으로서 활용이 기대된다.

4. 결론

본 연구에서는 도·송수관로를 대상으로 매설환경 하에서 작용하는 내·외부 하중으로 인해 발생하는 응력을 분석하고, 매설관의 인장강도를 측정하여 측 방향에 대한 안전계수를 산정함으로써 상수도관의 구

조적인 안전성을 평가하였고, 이의 적용성을 평가하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 전체 조사대상 매설관에 대한 외부하중은 평균적으로 53.7kgf/lin. cm이었으며, 매설된 깊이가 높은 SP가 외부하중에 의한 영향이 큰 것으로 나타났다. 내부압력은 운전수압이 평균적으로 4.23kgf/cm², 수충압이 6.04kgf/cm²이었다.

(2) 외부하중으로 인한 축방향 휨 응력은 매설관 전체에 대하여 평균적으로 34.5kgf/cm²이었으며, 총 축방향 응력은 2676.5kgf/cm²으로 나타났으며, 내·외부하중으로 인한 원주방향에 대한 프와송효과가 축방향 응력에 미치는 영향이 가장 큰 것으로 나타났다.

(3) 매설관에 대한 축방향 휨 응력을 고려한 총 축방향 응력에 대한 안전계수는 0.7~5.2이었으며, 평균적으로 2.1로 나타났으며, 안전계수를 통한 개량우선순위를 평가한 결과 CIP인 S1의 안전계수가 0.7로 가장 구조적인 안전성이 떨어지는 것으로 평가되었으며, DI인 S15가 구조적으로 가장 안전성이 높은 것으로 평가되었다.

(4) 안전계수에 의한 구조적 안전성 평가는 파손위험성을 토대로 하여 관의 개량우선순위결정이 용이한 것으로 기대되며, 향후 개량방안을 위한 적절한 기준 마련도 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부 Eco-STAR Project인 수처리선진화사업단(과제번호: I2WATERTECH 04-3)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김영진 등, 차량하중 등에 의해 동결지반 매설관에 작용하는 응력분포에 관한 실험적 연구, 한국건설기술연구원, 2001.
2. 김주환, 성권식, 상수관 노후도 평가방법, 한국수처리기술학회지, 11(2), pp.63~73, 2003.
3. 이현동, 배철호, 홍성호, 황재운, 박필재, 상수도관로 주철관종의 잔존수명 평가에 관한 연구, 한국물환경학회지, 20(3), pp.206~214, 2004.
4. 정원식, 이현동, 김이태, 유명진, 상수도관의 노후도에 대한 환경영향인자의 상관성 분석, 상하수도학회지, 17(2), pp.242~249, 2003.
5. 한국상하수도협회, 상수도시설기준, 2004.
6. 홍성경, 김준호, 정석영, 연약지반 배관응력 모니터링 시스템 개발 및 적용, 한국안전학회지, 21(1), pp.41~47, 2006.
7. Agbenowosi N.K., A mechanistic analysis based decision support system for scheduling optimal pipeline replacement, September, Virginia Polytec Institute and State University, 2000.
8. AWWA, PVC Pipe-Design and installation, AWWA M23, 1980.
9. AWWA, Steel Pipe-A Guide for Design and installation, AWWA M11, 1989.
10. AWWA, Ductile-iron pipe and fittings, 1996.
11. Cohen, A., and M.B. Fielding, Prediction of frost depth:Protecting underground pipes, Jour. AWWA. 71(2), pp. 113~116, 1979.
12. Deb A.K., Grablitz F.M., Hasit Y.J., Snyder J.K., Prioritization water main replacement and rehabilitation, AWWARE, 2002.
13. Monic, W.D. and C.M. Clark, Loads on underground pipe due to frost penetration, Jour. AWWA. 66(6), pp. 353~358, 1974.
14. Moser, A.P., Buried pipe design, Second edition, McGraw-Hill, 2001.
15. Rajani B., Maker J., A methodology to estimate remaining service life of grey cast iron water mains, Can. J. Civ. Eng. 27, pp. 1259~1272, 2000.
16. Rajani B., Maker J., Investigation of grey cast iron water mains to develop a methodology for estimating service life, AWWARE, 2000.
17. Seica, M.V., Packer J.A., Grabinsky M.W.F., Adams B.J., Karney B.W., Evaluation and testing of cast iron and uctile iron water main samples, Final report to city of Toronto, June, 2000.
18. Timoshrnko S.P., Goodier J.N, Theory of elasticity, 1985.