

대형 상수관로 노후상태 조사 및 평가에 관한 연구

Investigation and Assessment of the Deterioration on Aging Large Water Mains

김주환¹ · 배철호^{1,*} · 김정현¹ · 홍성호² · 이경재¹

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

1 한국수자원공사 수자원연구원 상하수도연구소
2 숭실대학교 환경화학공학과

(2006년 3월 13일 논문 접수; 2006년 8월 7일 최종 수정논문 채택)

Abstract

The current conditions of large water mains are evaluated by deteriorations and the causes of deterioration are investigated through visual assessments in the field, mechanical tests and analysis of chemical compositions in laboratory for each pipe material, unlined cast iron pipes (CIPs), ductile iron pipes (DCIPs) and steel pipes (SPs)

Tubercles and scales from internal and external corrosion of unlined cast iron pipes were identified as the causes of functional performance limitations in large water mains.

It is investigated that main causes of internal and external corrosion of water pipes are from lots of depositions of organic and inorganic substances on pipe surface, concentrated pitting, and uniform corrosion by local or global exfoliation or detachment of lining and coatings of DCIPs and SPs.

Internal and external corrosion depths of CIPs were higher than those of DCIPs and SPs. Consequently, total corrosion rate summed internal and external corrosion rates of CIPs also were shown to be higher than those of DCIPs and SPs. The failure time from hole generation of CIPs by total corrosion rate was predicted to be taken sixteen years, and DCIPs and SPs were twenty-six years and one hundred and fifty three years. And longitudinal deflection of investigated water mains were not happened and mechanical strengths such as tensile strength, elongation, and hardness also were mostly suited to Korea Standards. It was thought that the weakness of tensile strength of one sample(S-11) was, however, due to higher carbon contents(%) in CIPs. Pipe deterioration score of S-46 was 55.2 and was preferentially assessed to be rehabilitated.

Key words: Large water mins, Deterioration, Assessment, mechanical strength

주제어: 대형상수도관로, 노후, 평가, 기계적강도

*Corresponding author Tel: +82-42-860-0440, FAX: +82-42-860-0399, E-mail: baech@kowaco.or.kr (Bae, C.H.)

1. 서론

먹는 물의 수송 및 수질 유지기능을 담당하고 있는 상수도 관로는 방대한 양의 급수체계로 성장하면서 누수, 부식, 노후화 등의 문제점이 드러나 이를 설계하고 운영하기 위한 기법 뿐만 아니라 이를 유지관리하기 위한 시설의 진단과 평가 체계의 확립이 요구되고 있다(김 등, 2002). 이는 노후화된 수도관 판정기법 등이 개발되어야만 노후화된 수도관 개량을 한정된 예산 범위에서 개량효과가 큰 것부터 우선순위를 결정하여 사업을 추진할 수 있기 때문이다.

관의 노후화는 여러 가지 복합적인 인자에 의해서 발생되므로, 노후관에 대한 개량사업을 추진하기 위해서는 관로에 대한 정보수집 또는 상태에 대한 조사가 선행되어야 한다. 그러나 국내에서는 자료축적이 매우 미비한 상태이며, 관로의 노후도 평가를 위한 관 노후진척 원인 또는 파손특성에 관한 정보가 거의 없는 실정이다. 반면, 선진국에서는 특히 상수관로의 사고를 사전에 예방하기 위하여 다양한 수도관의 노후상태에 대한 평가, 그리고 자료수집과 분석 등이 활발히 진행되고 있는 실정이다.

현재 노후상태에 대한 평가방법으로는 점수평가법(Deterioration Point Assignment Methods), 파손이력 분석법(Break-even Analyses), 파손확률과 회귀방(Failure Probability and Regression Methods), 그리고 역학적 모델(Mechanistic Models) 등이 대표적으로 활용되고 있으며, 주요 수집자료로는 관로 현황자료(Background data), 현장관측자료(Field observations), 사고이력(Pipe history), 경제성 평가 관련 항목(Cost data), 기존 평가자료(Testing results) 등이다(Det et al.) 특히 최근에는 관 노후상태(Deterioration) 또는 파손(Failure) 등에 영향력이 높은 간접인자를 통한 평가에서 하중과 응력에 대한 평가와 잔존강도 추정 모델 등을 개발하여 안전계수를 통하여 구조적인 안전성을 평가하는 연구도 활발히 진행되고 있다(Det et al, 2002).

또한 Rajani et al.(2000) 등은 CIP에 대한 금속학적인 측면에서 관체에 대한 화학적 조성뿐만 아니라 표면분석 등을 통한 Flakes 등 금속학적분석을 체계적으로 수행하면서 관체의 건전성과 강도 간에 미치는 영

향에 대하여 평가한 바 있다.

국내에서는 상수관로의 노후 상태조사 또는 평가 방법 등이 주로 배·급수관(300~400mm 이하)에 대하여 연구가 일부 진행되었다. 이들 배·급수관은 주로 회주철관(CIP) 또는 닥타일주철관(DCIP), 그리고 PVC, 스테인레스 관이 주를 이루고 있으나, 주로 CIP 또는 DCIP에 대한 연구가 이루어져 왔다(이 등 1996, 이 등 2002, 김 등 2002, 정 등 2003).

이 등(1996)이 수행한 대도시 수도관의 파손특성에 따르면, 관의 파손원인인 관의 노후, 진동, 부등침하, 전식, 시공불량중 파손에 있어 관의 노후가 가장 큰 비율을 차지하고 있는 것으로 평가하였으며, 이후 수행한 국내 중소도시 상수관의 파손특성에 따르면, 관종별로는 CIP는 부식으로 노후, DCIP, PVC, PE 등은 수격압, 그리고 아연도강관은 부식 등 시설 노후화에 의한 것으로 나타났으며, 매설년수와 이들 관종 간에 상관성은 크지 않은 것으로 보고 한 바 있다(이 등, 2002).

이후 김 등(2002)은 노후도 평가에서 중요한 노후도 평가항목에 대하여 매설환경, 육안분석, 토양분석, 관체분석, 설문조사 등 노후도 조사항목 50개 항목을 제시하였고, 특히 이들 노후도 항목에 대하여 굴착을 통해서 확보할 수 있는 자료들과 기존 자료를 토대로 확보할 수 있는 노후도 인자로 매설지역, 도록 폭, 관종, 매설년수 등을 포함한 9개 항목에 대하여 선형회계법과 중회귀분석 등을 이용한 관 노후도 항목에 대한 가중치 산정 방법 등을 체계화하였으며, 이때 관 노후상태와 관련이 깊은 인자로 관종, 되메움 토양, 기초공사 및 파손 등이 가장 큰 영향을 주는 것으로 보고하였고, 또한 김 등(2002)은 기존 점수평가모형을 개선한 종합점수균등모델 등을 제안하는 등 상수관로 노후도 조사방법 등을 개발한 바 있다.

반면 도·송수관로 등은 주로 대형상수관로로 파손시 미치는 영향이 배급수관에 비하여 수도물의 안정적 공급에 커다란 영향을 미침에도 불구하고 현장 조사를 통한 노후상태에 대한 조사가 미흡할 뿐만 아니라 연구가 미흡한 실정이다. 따라서 이들 관로가 매설후 어떠한 상태로 악화가 되고 있으며, 그 원인은 무엇인지에 대한 현장조사 또는 노후상태의 주요 원인 등에 대한 규명이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 현재 도·송수관로와 같은

대형상수관로에 대하여 매설후 관로 내 내·외면 상태에 대한 육안조사를 통하여 관로의 직접적인 노후상태 등을 조사하였고, 채취 가능한 관체에 대해서는 화학적 조성과 물리적인 강도 등의 분석을 통하여 관의 건전성 등을 평가하였고, 기존 종합점수균등 모델을 수정하여 관 노후상태를 평가하였다.

2. 연구방법

2.1. 조사대상 관로현황

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 1**과 같다. **Table 1**에서 매설년도로 보면, 1964~2001년까지로 매설년수로는 2년에서 39년이다. 이중 경과년수가 15년이상된 관로는 약 75%이었다. 관종은 도복장강관(SP, Steel pipe), 닥타일주철관(DCIP, Ductile cast iron pipe), 회주철관(CIP, Cast iron pipe)이었다. 이중 SP가 50.8%로 가장 많았으며, DCIP가 31.1%, CIP가 18.1% 등이었다. 관경은 250~2,800mm이었으며, 이중 1,000mm 이상 대형관은 약 31%이었다. 이들 대상관로의 내·외면 도장형태로 보면, 미도장된 관로가 34%로 높았으나, 이들 대부분은 CIP관으

로, 도장은 되어있지는 않으나 대부분 역청질계도로로 도색은 되어 있다. 외면 도장재로는 아스팔트(Asphalt, 18%), 콜타르에나멜(Coal-tar enamel, 31%)이었으며, 내면은 시멘트모르타(Cement mortar, 16.4%), 콜타르에나멜(27.9%), 에폭시수지(Epoxy resin, 9.8%) 순이었다.

관로는 주로 2~4차선에 이르는 도로하부에 매설된 경우가 많았으며, 매설된 토양은 주로 사질토이었다. 매설깊이는 75~500cm 정도로 나타났다. 또한, 조사가 이루어진 관로중 단 15개소, 24.6% 정도만이 회생양극 또는 외부전원에 의한 방식이 이루어지고 있는 것으로 나타났다. 접속방식은 SP의 경우 용접후 도장형태이었고, CIP와 DCIP는 모두 메카니칼 접합이었다. 조사대상 관로의 누수, 파손 등에 대한 사고이력은 25개소를 제외하고는 최근 5년간 발생한 사례가 없는 것으로 나타났으며, 수질 또는 수압문제로 인한 민원도 발생한 사례가 없어, 현재까지 매우 안정적으로 운영되고 있는 것으로 나타났다.

2.2. 조사항목

본 연구에서는 수행한 조사대상관로에 대한 조사항목은 기존 연구(김 등, 2002; 이 등 2002)를 토대로 제시된 노후도 평가항목들을 토대로 구성하였고, 특히 대형상수관로는 주로 회주철관, 닥타일주철관,

Table 1. General pipe and environmental characteristics of investigated large water mains

ID	Pipe materials	Buired year	Diameter (mm)	Ling or coating materials		Buried depth (m)	Electrical corrosion protection (Yes/No)	No. of Road lane	Type of joint
				Internal	external				
S-1	CIP	1982	400	None	None	250	N	4	Mechanical
S-2	CIP	1975	700	None	None	120	N	8	Mechanical
S-3	CIP	1975	600	None	None	120	N	6	Mechanical
S-4	CIP	1983	400	None	None	-	N	2	Mechanical
S-5	CIP	1983	350	None	None	120	N	2	Mechanical
S-6	CIP	1979	350	None	None	100	N	2	Mechanical
S-7	CIP	1975	700	None	None	160	N	8	Mechanical
S-8	CIP	1982	500	None	None	170	N	6	Mechanical
S-9	CIP	1975	600	None	None	130	N	6	Mechanical
S-10	CIP	1979	450	None	None	150	N	1	Mechanical
S-11	CIP	1975	600	None	None	140	N	6	Mechanical
S-12	DCIP	1978	700	None	None	180	N	6	Mechanical
S-13	DCIP	1979	350	None	None	120	N	4	Mechanical
S-14	DCIP	1985	250	-	-	150	N	2	Mechanical
S-15	DCIP	1979	450	None	None	200	N	2	Mechanical

Table 1. Continuation

ID	Pipe materials	Buried year	Diameter (mm)	Ling or coating materials		Buried depth (m)	Electrical corrosion protection (Yes/No)	No. of Road lane	Type of joint
				Internal	external				
S-16	DCIP	1979	400	None	None	120	N	2	Mechanical
S-17	DCIP	1995	300	Cement mortar	None	250	N	4	Mechanical
S-18	DCIP	1996	350	Cement mortar	None	400	N	4	Mechanical
S-19	DCIP	1987	250	Epoxy	Coal-tar enamel	115	N	-	Mechanical
S-20	DCIP	1987	250	Cement mortar	Coal-tar enamel	115	N	-	Mechanical
S-21	DCIP	1989	700	Cement mortar	None	-	N	1	Mechanical
S-22	DCIP	1979	450	None	None	180	N	-	Mechanical
S-23	DCIP	1997	600	Cement mortar	None	110	N	4	Mechanical
S-24	DCIP	1979	300	None	None	110	N	4-	Mechanical
S-25	DCIP	1982	500	None	None	120	N	4	Mechanical
S-26	DCIP	1995	450	Cement mortar	bitumen	-	N	4	Mechanical
S-27	DCIP	1987	300	Cement mortar	bitumen	120	N	-	Mechanical
S-28	DCIP	1987	700	Cement mortar	bitumen	200	N	4	Mechanical
S-29	DCIP	1987	250	Cement mortar	bitumen	170	N	-	Mechanical
S-30	DCIP	1994	450	Cement mortar	bitumen	140	N	2	Mechanical
S-31	SP	1979	2200	Coal-tar enamel	Coal-tar enamel	350	N	5	Welding+painting
S-32	SP	1993	1200	Asphalt	Coal-tar enamel	150	Y	2	Welding+painting
S-33	SP	1965	1100	Coal-tar enamel	Coal-tar enamel	150	N	2	Welding+painting
S-34	SP	1989	1100	Asphalt	Asphalt	90	Y	4	Welding+painting
S-35	SP	1989	900	Asphalt	Asphalt	170	Y	2	Welding+painting
S-36	SP	1989	800	Asphalt	Asphalt	350	Y	4	Welding+painting
S-37	SP	1980	1350	Asphalt	Asphalt	550	N	4	Welding+painting
S-38	SP	1997	1350	Epoxy	Coal-tar enamel	200	Y	4	Welding+painting
S-39	SP	1988	1650	Coal-tar enamel	Coal-tar enamel	200	N	-	Mechanical
S-40	SP	1989	800	Coal-tar enamel	Coal-tar enamel	180	Y	4	Welding+painting
S-41	SP	1985	1100	Coal-tar enamel	Coal-tar enamel	250	Y	2	Welding+painting
S-42	SP	1992	2000	Coal-tar enamel	Asphalt	200	Y	-	Welding+painting
S-43	SP	1997	900	Coal-tar enamel	Asphalt	250	Y	4	Welding+painting
S-44	SP	1997	1200	Epoxy	Coal-tar enamel	100	N	-	Welding+painting
S-45	SP	2001	500	Epoxy	Polyethylene	150	N	-	-
S-46	SP	1984	1500	Coal-tar enamel	Asphalt	170	Y	-	Welding+painting
S-47	SP	1984	1500	Coal-tar enamel	Coal-tar enamel	500	N	-	Welding+painting
S-48	SP	1991	1100	Epoxy	Coal-tar enamel	250	N	4	Welding+painting
S-49	SP	1987	800	Coal-tar enamel	Coal-tar enamel	160	Y	4	Welding+painting
S-50	SP	1987	900	Coal-tar enamel	Coal-tar enamel	200	Y	4	Welding+painting
S-51	SP	1979	450	Coal-tar enamel	Coal-tar enamel	200	N	-	Welding+painting
S-52	SP	1978	900	Unidentified	Coal-tar enamel	100	-	-	-
S-53	SP	1996	1100	None	Coal-tar enamel	400	-	-	-
S-54	SP	1964	1200	None	None	110	N	-	Mechanical
S-55	SP	1998	1650	Epoxy	Coal-tar enamel	200	Y	1	Mechanical
S-56	SP	1982	600	Coal-tar enamel	Asphalt	75	Y	3	Mechanical
S-57	SP	1978	2800	Coal-tar enamel	Asphalt	-	N	6	Welding+painting
S-58	SP	1971	1000	None	None	500	N	2	Welding+painting
S-59	SP	1979	2200	Coal-tar enamel	Asphalt	260	N	4	Welding+painting
S-60	SP	1991	800	Coal-tar enamel	Asphalt	120	N	6	Welding+painting
S-61	SP	1984	900	Coal-tar enamel	Coal-tar enamel	-	Y	-	Welding+painting

Note) - ; it means Not measured or identified

Table 2. Investigation items of the field

Items		Category
General pipe and environmental characteristics		Pipe materials, Buried year, Diameter, Lining or coating materials Buried depth, Soil type, Electrical corrosion protection, No. of Road lane, Type of joint, Failure or leakage history, etc
Inner and outer deteriorated state of pipe		Diameter, Pipe wall thickness, Lining and coating thickness and damage, Area of external corrosion, Depth of pitting corrosion, Thickness and area ratio(TA) of tubercle, Thickness and area ratio of sludge(Deposits), CML neutralization, CML damage, etc.
Physical and chemical properties of pipe	Chemical composition	Iron(Fe), Carbon(C), Manganese(Mn), Magnesium(Mg), Silicates(Si), Phosphorous(P), Sulfate(S), etc.
	Mechanical Strength	Tensile strength, Elongation, Hardness, etc.

그리고 도복장강관 등으로 구성되어 도복장강관에 대한 항목으로 도복장의 종류, 탈리 정도, 그리고 슬라임 축적량(크기, 비율 등) 등을 추가하여 관로현황과 관의 부식에 영향을 미치는 영향인자(매설환경), 관내·외면 악화상태 정도를 보여주는 상태인자, 그리고 관의 건전성을 평가할 수 있는 관체의 화학적 조성과 물리적강도 등을 중심으로 조사하였다.

2.3. 관체 노후상태 평가방법

본 연구에서는 현장조사를 바탕으로 관체의 노후상태를 평가하기 위한 방법으로 김 등(2002) 등이 기존의 배·급수관로 중심으로 개발한 종합점수관등 모델을 **Table 3**과 같이 수정·변경하여 사용하였다. 이는 본 연구에서 조사한 관로는 광역상수도로 사용되는 도·송수관로로서, 주로 도복장강관의 비율이 높은 특징을 지니고 있어 평가항목 일부에 대하여 이러한 특징이 반영되도록 하였다. 즉 도복장 손상에 따른 노후특성을 반영하였고, 수질특성 등에 영향을 줄 수 있는 인자로서, 슬라임 등의 크기, 분포 등도 포함하였다. 또한, 수리적인 악화특성을 반영하기 위하여 사용수압 또는 C값 등의 평가항목을 포함하였다. 관체 노후상태에 대한 평가에서 김 등(2002)은 관체 노후상태에 대한 평가항목을 기본항목, 주변환경, 물성 시험, 화학적조성, 부식속도, 육안분석 등으로 구분하고, 이를 각 소항목을 20점으로 하여 평가하였으나, 본 연구에서는 각 평가항목의 최대값을 1로 하여 총점을 26점으로 하고, 이를 100점으로 환산하여 노후상태를 평가하였다.

2.3. 분석방법

본 연구에서는 각종 관경, 관두께 등 치수측정은 버니어 캘리퍼스 등 정밀자를 사용하였고, 공식깊이 등은 Dial depth gauge를 이용하였다. 노후관의 매설 후 부식에 따른 물리적인 특성의 변화를 고찰하기 위하여 각 관체에 대하여 KS 규격에 따라 인장강도(Tensile strength)(KS D 0802), 연신율(Elongation)(KS B 0802), 그리고 경도(Hardness) 등을 측정하였고, 관체 자체의 화학적 조성을 분석하였다. 화학조성은 C를 포함하여 6개 항목을 분석하였다(KS D 0001).

3. 결과 및 고찰

3.1. 도복재 손상 상태, 내부 결절크기, 침적물 상태

3.1.1. 도복재 손상 상태

조사대상관로중 DCIP와 SP의 도장재에 대한 두께를 측정한 결과는 **Table 4**와 같다. **Table 3**에서 DCIP의 일부 외면 도장재로 사용된 콜타르 에나멜의 두께는 평균 0.44mm로 매우 얇게 나타났으며, 내면 도장재 시멘트모르터 또는 에폭시수지 등은 각각 5.5, 0.48mm이었다. 특히 DCIP의 주 내면도장재인 시멘트모르터의 두께가 0.6~8.7mm로 최소와 최대 두께 차이가 14.5배 이상으로 시멘트모르터에 대한 두께 편차가 매우 심한 것으로 나타났다. SP의 내·외면 도장재로 사용되었던 콜타르 에나멜 또는 아스팔트도 도장 두께에 대한 편차도 큰 것으로 나타났다. **Fig. 1**에는 조사대상 관로중 DCIP, SP 등 도장관

Table 3. Pipe deterioration assessment items

No.	detail factor	range	weight	No.	detail factor	range	weight
1	inner diameter	over 4%	0.00	14	depth of inner corrosion	over 20%	0.00
		4~3%	0.25			20~15%	0.25
		3~2%	0.50			15~10%	0.50
		2~1%	0.75			10~5%	0.75
		below 1%	1.00			below 5%	1.00
2	thickness	over 10%	0.00	15	circumference of inner corrosion	over 80%	0.00
		10~7.5%	0.25			80~60%	0.25
		7.5~5%	0.50			60~40%	0.50
		5~2.5%	0.75			40~20%	0.75
		below 2.5%	1.00			below 20%	1.00
3	clothing thickness	over 10%	0.00	16	Tensile strength (KS standards)	No	0.00
		10~7.5%	0.25			Yes	1.00
		7.5~5%	0.50				
		5~2.5%	0.75				
		below 2.5%	1.00				
4	area of exterior corrosion	over 80%	0.00	17	Chemical compositions (KS standards)	> 3	0.00
		80~60%	0.25			2	0.50
		60~40%	0.50			1	0.25
		40~20%	0.75			0	0.00
		below 20%	1.00				
5	depth of exterior corrosion	over 20%	0.00	18	CML neutralization (concrete neutralization)	over 80%	0.00
		20~15%	0.25			80~60%	0.25
		15~10%	0.50			60~40%	0.50
		10~5%	0.75			40~20%	0.75
		below 5%	1.00			below 20%	1.00
6	circumference of exterior corrosion	over 80%	0.00	19	CML damage	over 80%	0.25
		80~60%	0.25			80~60%	0.50
		60~40%	0.50			60~40%	0.75
		40~20%	0.75			40~20%	1.00
		below 20%	1.00			below 20%	0.00
7	fissure size	over 0.0mm	0.00	20	exfoliation of inner clothing	over 80%	0.00
		0.0mm	1.00			80~60%	0.25
						60~40%	0.50
						40~20%	0.75
						below 20%	1.00
8	depth of pin-hole	over 20%	0.00	21	H-WC value (roughness)	below 60	0.00
		20~15%	0.25			60~80	0.25
		15~10%	0.50			80~100	0.50
		10~5%	0.75			100~120	0.75
		below 5%	1.00			over 120	1.00
9	exfoliation of outer clothing	over 80%	0.00	22	hydraulic pressure	over 7.0kg/cm ²	0.00
		80~60%	0.25			7.0~6.0kg/cm ²	0.25
		60~40%	0.50			6.0~5.0kg/cm ²	0.50
		40~20%	0.75			5.0~4.0kg/cm ²	0.75
		below 20%	1.00			below 4.0kg/cm ²	1.00

Table 3. Continuation

No.	detail factor	range	weight	No.	detail factor	range	weight
10	scale area	over 80%	0.00	23	inhabitation of clam	group	0.00
		80~60%	0.25			separate	0.50
		60~40%	0.50			no	1.00
		40~20%	0.75				
		below 20%	1.00				
11	scale thickness	over 20mm	0.00	24	mud accumulation on pipe floor	over 3cm	0.00
		20~15mm	0.25			3.0~0.5cm	0.50
		15~10mm	0.50			below 0.5cm	1.00
		10~5mm	0.75				
		below 5mm	1.00				
12	sludge area	100%	0.00	25	operative condition of valves	no work	0.00
		100~75%	0.25			not enough	0.50
		75~50%	0.50			good work	1.00
		50~25%	0.75				
		below 25%	1.00				
13	sludge thickness	over 4mm	0.00	26	penetration of ground water	Yes	0.00
		4~3mm	0.25			No	1.00
		3~2mm	0.50				
		2~1mm	0.75				
		below 1mm	1.00				

로에 대한 도장재 탈리 또는 박리 상태에 대한 비율을 나타낸 것이다. Fig. 1에서 외면보다는 내면 도장재 탈리가 심한 것으로 판단된다. 관 입구를 통하여 내부로 들어가 직접 확인한 관로(31개)중 약 25% 정도가 내부에 도장재가 평균적으로 43%(0.1~ 100%) 정도가 탈리되었다. 외면 도장재는 18개 관로중 약 16%정도가 평균적으로 10%(5~15%)가 탈리된 것으로 나타났다.

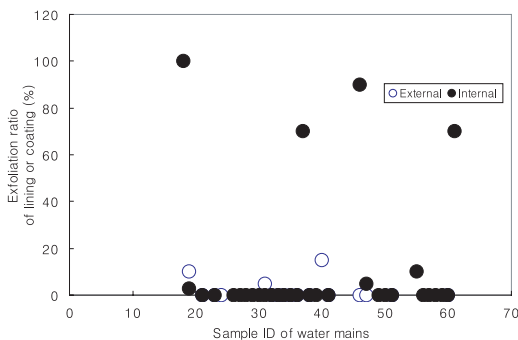


Fig. 1. Exfoliation ratio of external and internal lining or coating on large water mains.

관종별로 보면, DCIP는 S-19의 콜타르 에나멜이 약 10% 정도 탈리가 된 것으로 나타났으며, 내면 도장재 시멘트모르터의 탈리는 없었으나(S-19의 경우 3%박리), 에폭시수지로 도장된 S-18은 100% 탈리된 것으로 나타났다.

SP는 S-31, S-40만이 외면도장재로 사용된 콜타르 에나멜이 각각 5, 15%정도가 탈리되었을 뿐 대부분 도장재 상태가 온전한 것으로 나타났다. 반면 내면은 S-37의 아스팔트가 약 70%, S-55의 Epoxy resin이 10%, 그리고 콜타르 에나멜로 도장된 S-46, S-47, S-61 등이 90%, 5%, 70%가 탈리되어, 외면보다는 내면 도장재 탈리가 심한 것으로 나타났다.

Fig. 2~Fig. 3에서 도장재 두께 편차이외에도 내·외면 도장재 탈리의 주요 원인으로 내면 도장재는 첫째, 제조과정과정에서 수행되는 표면연마(Shot blasting) 미흡(S-53)으로 관표면-도장재 간 부착력 약화로 인한 전면 탈리, 두 번째는 도장재 표면 핀홀 발생 부위 금속표면의 결결성장에 따른 부분 탈리(S-1, S-54), 셋째로는 용접부위 마감 미흡 또는 미도장 등 영향으로 도장재 내부로 물이 침투된 후 부식에 의한 탈리(S-39) 등으로 판단된다. 그리고 외압하중

Table 4. Lining or coating thickness of investigated large water mains

Pipe materials		Lining or coating materials	Lining or coating thickness(mm)
CIP	External	None	-
	Internal	None	-
DCIP	External	Coal-tar enamel	0.442(0.4~0.48)
		Cement mortar	5.5(0.6~8.7)
	Internal	Epoxy	0.48
SP	External	Coal-tar enamel	5.9(1.7~13)
		Asphalt	2.9(0.1~4.8)
	Internal	Coal-tar enamel	2.10(0.12~3.4)
		Asphalt	2.6
		Epoxy	1.16(0.6~2.1)

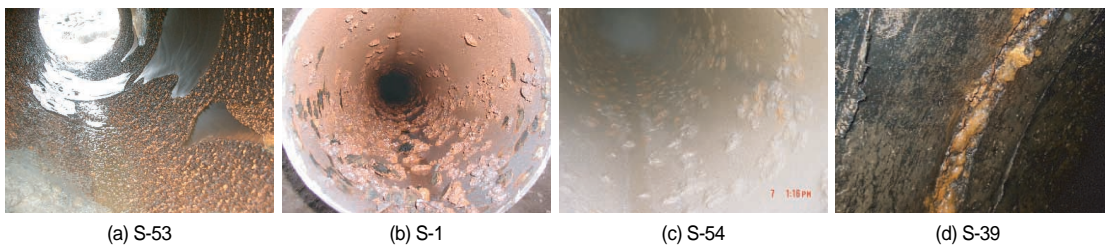


Fig. 2. Examples of Internal lining or coating damages of large water mains.

으로 인한 변형에 의한 도장손상은 거의 없는 것으로 판단된다(3.3절 참조). 외면 도장재는 매설과정 상에서 퇴폐에 의한 손상, 또는 관 하역시 와이어로프 사용 미흡에 따른 관 하부손상, 자연적인 물성악화 등으로 판단된다(Fig. 3 참조)

3.1.2 내부 결절크기, 침적물 상태

조사대상관로에 대한 내부 결절크기, 침적물 축적

상태 등에 대한 관내면 상태는 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서 CIP는 74.2% (5~100%)의 내부표면이 스케일 또는 결절 등이 생성되어 있는 것으로 나타났으며, 이들 크기는 평균적으로 35.8mm(2.6~63.0mm)로 나타났다. Fig. 4에서 미도장 또는 도장이 탈리된 DCIP 또는 SP 등에서는 부식이 진행되고 있었으며, 이들 DCIP 관내부 스케일 분포면적은 52.2%(0~100%), SP는 21.8%(0~100%)로 나타났다. 이러한



Fig. 3. Examples of Internal lining or coating damages of large water mains.

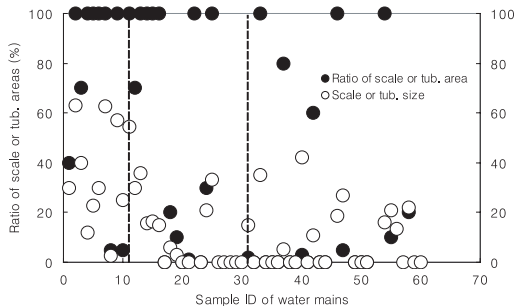


Fig. 4. Internal scale or tubercle distribution.

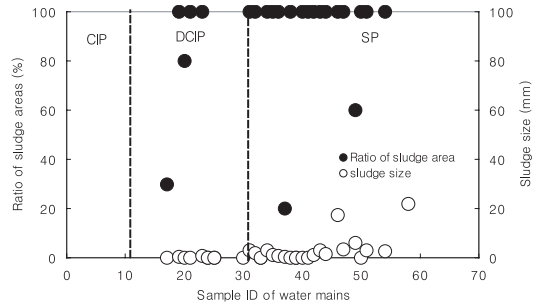


Fig. 5. Internal sludge distribution and maximum size of large water mains maximum size of large water mains.

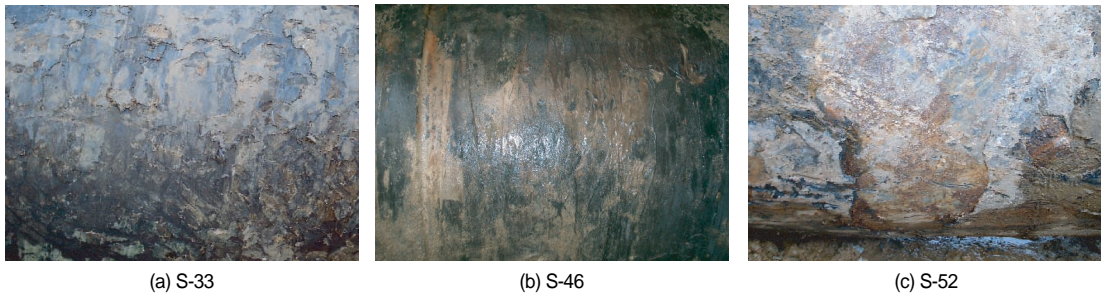


Fig. 6. Examples of sludge deposited on pipe internal surface of large water mains.

스케일 또는 결절 등 내부 부식생성물은 관의 통수단면적에 크게 영향을 줄 뿐만 아니라 수질에 미치는 영향도 심각할 것으로 판단된다.

내부도장이 양호한 DCIP 또는 SP 등에는 주로 슬라임(Slime) 또는 슬러지(Sludge) 등이 축적되거나 망간 등이 축적되어 있는 것으로 나타났다. 이들 이물질이 축적된 면적분포는 DCIP가 58.6% (0~100%), SP는 84% (0~100%)이었다. 이들 축적된 이물질의 크기는 DCIP가 0.1mm(0~0.6mm), SP가 3.4mm(0~22mm)로 DCIP보다는 SP 내부에 슬러지가 상당히 축적된 상태인 것으로 나타났다. 특히, 최근 망간 축적물 등은 관내부 수류변동이 발생할 경우, 폭수를 유발하는 주요 원인으로 이들 침적물들에 대한 대책이 시급한 것으로 판단된다.

3.2. 부식면적 비율, 부식깊이, 부식속도

조사대상관로에 대한 부식면적 비율, 부식깊이, 부식속도 등은 Fig. 7~Fig. 9와 같다. Fig. 7에서 보면, 미도장 상태인 CIP가 DCIP, SP보다 내·외면 부식

면적 비율이 평균적으로 높게 나타났다. Table 5에서 CIP의 내·외면 부식면적 비율은 외부가 32%, 내부는 51.6%로 DCIP, SP보다 높게 나타났다. CIP, DCIP, 그리고 SP 등 전체적인 내·외면 부식면적 비율이 내면 13.7%, 외면 27.1%로 나타나 외면보다는 내면이 부식에 의한 영향을 더 크게 받고 있는 것으로 판단된다.

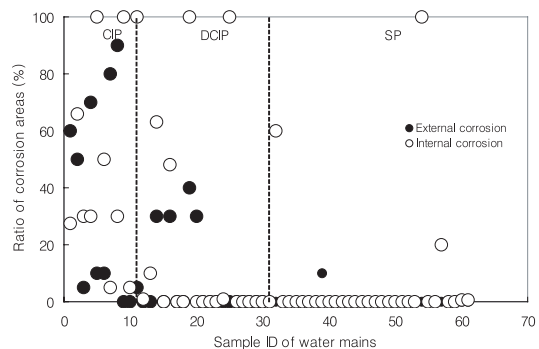


Fig. 7. Ratio of external and internal corrosion areas of large water mains.

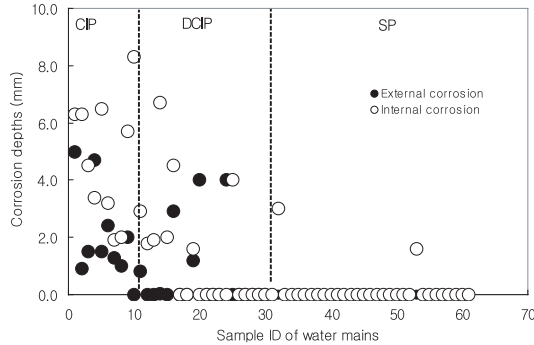


Fig. 8. External and internal corrosion depths of large water mains.

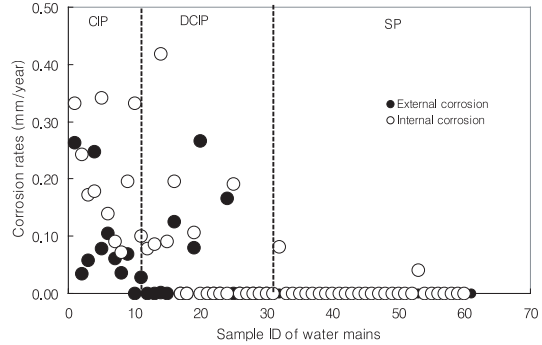


Fig. 9. External and internal corrosion rate of large water mains.

부식으로 인한 부식깊이도 CIP는 외면이 1.61mm, 내면은 4.47mm로 전체 CIP의 평균두께가 10.4mm Table 4이므로, 부식에 의한 내·외면 평균 침식율은 58%에 달하는 것으로 보인다. 반면, DCIP와 SP는 내·외면 도장재로 인하여 외면부식이 없거나 미미한 것으로 나타났으며, 내부 도장재 탈리로 인해 내부부식이 진행된 지점에서 DCIP의 내·외면 평균부식 깊이의 합이 1.25mm(DCIP), SP가 0.31mm로 CIP에 비하여 상대적으로 낮게 나타났다.

부식속도는 Table 5에서 CIP가 내·외면 부식속도 (=내·외면 부식깊이/매설년수)를 합한 총 부식속도 (이 등, 2004)가 0.26mmpy (= mm/year)로 가장 높았다. 이 등(2004)이 국내 B시에서 수집한 배·급수관로 CIP에 대한 부식속도 평가결과에 따르면, 내면부식속도가 외면부식속도에 비하여 2배정도 빠른 것으로 나타났다. 본 연구에서도 내면부식속도가 0.19mmpy, 외면부식속도는 0.07mmpy로 내면부식속도가 2배 이상 빠른 것으로 나타났다. 그러나 이 등(2004) 수행한 연구에서 CIP의 내·외면 부식속도를 합한 최대부식속도는 0.39mm(평균적으로 내·외면 최대부식속도가 각각 0.26mmpy, 0.13mmpy)이었다.

따라서 배·급수관로로 사용되는 CIP에 비해서 도·송수관로로 사용되는 CIP의 부식속도보다는 다소 낮은 것으로 나타났다.

Table 5에서 DCIP는 내외면 부식속도를 합한 최대부식속도가 0.1mmpy로 CIP 부식속도 0.26mmpy 보다 크게 낮은 것으로 나타났다. 이 등(2004)이 수행한 연구에서도 DCIP의 최대부식속도는 0.13mmpy 이었다.

SP는 0.01mmpy로 CIP와 DCIP에 비하여 부식속도가 매우 낮은 것으로 나타났다.

그러나 SP는 내외부 도복장의 대형관으로 실제 손상된 부위에 대한 측정이 현장여건상 곤란하여 주로 보수공사시 관 내부 진입을 위한 절단면에서 측정된 값으로 실제 부식 깊이를 반영한 것으로 보기에는 어렵다. CIP, DCIP, SP 중 개량이 시급한 관종은 CIP인 것으로 판단되며, DCIP와 SP 등은 미도장 또는 부분 탈리가 진행된 관로에 대해서는 내부 갱생 또는 집중부식에 대한 보수가 시급히 필요한 것으로 판단된다.

Table 5. Avg. ratio of corrosion areas, avg. corrosion depths and rate of investigated large water mains

Pipe Materials	Avg. Pipe thickness (mm)	Avg. ratio of corrosion areas (%)		Avg. corrosion depths (mm)		Avg. corrosion rate (mmpy)		
		External	Internal	External	Internal	External	Internal	Total
CIP	10.4	32.0	51.6	1.61	4.47	0.07	0.19	0.26
DCIP	10.5	7.6	19.0	0.67	1.25	0.04	0.06	0.10
SP	10.3	0.5	10.6	0.00	0.31	0.00	0.01	0.01
Avg	10.45	13.4	27.1	0.76	2.01	0.04	0.09	0.12

3.3. 외압에 의한 축방향 변형률

일반적으로 매설관에 작용하는 총하중에 의해서 관은 변형을 한다. 시간이 지나감에 따라 되메우기 토양침하(Settlement) 또는 압밀화(Consolidation)로 인한 장기적인 변형(long-term deflection)이 이루어진다(Moser, 2001). 현재 상수도시설기준(2004)에서는 외부하중에 의한 변형률에 대하여 DCIP에 대해서는 관내부 Cement mortar 보호를 위하여 3%이내, 도복장강관은 5% 이내가 되도록 설계하도록 권고하고 있다.

조사대상관로에 대하여 수평방향 변형률은 Fig. 10과 같다. Fig. 10에서 보면, 대부분 관로가 수평방향으로 변형이 진행되었으나 일부 관체는 수직방향으로 변형률이 더 높게 나타났다. 수평방향으로의 변형률은 CIP 또는 DCIP 등은 거의 변화가 없었으나 SP 등은 변화의 폭이 CIP 또는 DCIP에 비하여 다소 크게 나타났다. 수평·수직 변화율이 평균적으로 CIP/DCIP는 0.24, SP는 0.97 등으로 SP가 높게 나타났다. 이는 SP CIP/DCIP에 비하여 SP가 Flexible 하기 때문인 것으로 판단된다.

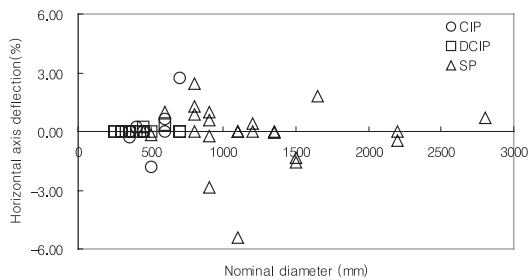


Fig. 10. Deflection of horizontal axis according to nominal diameter of large water mains.

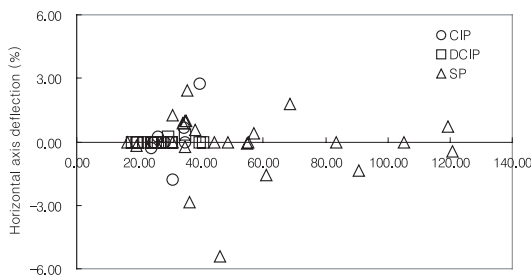


Fig. 11. Comparison between earth loads and deflection of horizontal axis.

Fig. 11에 외부하중(토압과 차량하중 등)으로 인한 외압에 따른 수평방향으로의 변형률을 나타내었다. Fig. 11에서 토압이 높게 작용한다고 보기는 어려운 것으로 판단된다. 이는 관중에 따른 Flexibility, 관두께, 관경, 매설토양 무게, 토양의 Stiffness, 그리고 관매설에 따른 시공방법 상의 차이 등 다양한 요인이 영향을 줄 수 있기 때문이다.

3.4. 물리적강도

조사대상관로에서 채취한 관체에 대한 물리적강도(인장강도) 측정결과는 Fig. 12와 같다.

Fig. 12에서 CIP의 인장강도는 평균적으로 41,905kgf/mm²(21,462~54,684kgf/mm²)이었고, DCIP는 44,552kgf/mm²(35,476~50,568kgf/mm²), SP는 44,224kgf/mm²(29,792~49,686kgf/mm²)로 일부 관체를 제외(S-11, S-54)하고는 대부분 매설년수가 2~39년이지만, 전체적으로 43,560kgf/mm²으로 물리적인 강도가 KSD 규격에 대하여 적합한 것으로 나타났다(CIP KS D 4306, DCIP는 KS D 4311, SP는 KS D 3565). 그러나 대부분 도복장강관을 포함하여 관체에 대한 부식손상이 미도장 또는 도장이 되어있더라도 국부적인 탈리 등으로 공식(Pitting corrosion)으로 비균질적인 부식이 진행되므로, 관체의 국부적인 강도저하 또는 구멍(Hole) 발생에 따른 악화(누수 등)가 발생할 가능성은 상존하므로 이에 대한 대책은 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 13에는 관종별로 인장강도, 연신율, 그리고 경도 등을 비교하여 도시하였다. Fig. 13에서 연신율, 경도 등은 CIP < DCIP < SP 순으로 높게 나타났다. 이는 일반적으로 CIP는 Rigid한 pipe로 분류되나, DCIP는 Simi-Rigid, SP는 Flexible한 관으로 분류되고 있어(AWWAF, 2004) CIP보다는 DCIP와 SP가 더 Flexible한 성질을 갖고 있기 때문으로 판단된다.

3.5. 화학적조성

관 재질적인 측면에서 CIP과 SP의 가장 큰 차이는 바로 C(Carbon)의 함유량의 차이에 있다. 강(Steel)은 C함유량이 무게비로 약 1.2wt% 이하이거나 또는 Si(Silicon)이 없거나 있더라도 매우 미량이 포함된다. 주철의 경우에는 2.5~4.5wt%이고, Si는 1~3% 정도를 함유한다. 또한, 주철은 때때로 강에 비하여

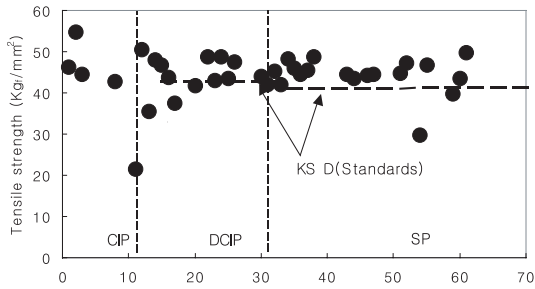


Fig. 12. Tensile strength of large water mains.

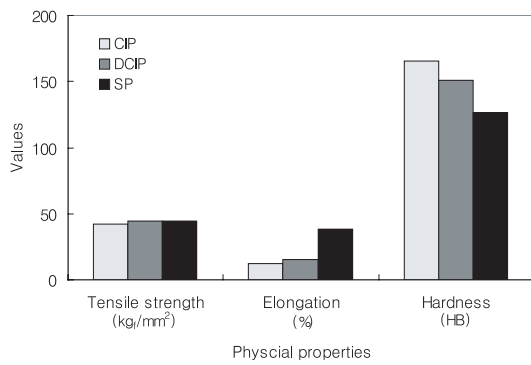


Fig. 13. Comparison of physical properties on large water mains.

S(Sulphur) 또는 P(Phosphorus)의 함유량이 높고, Mn(Manganese) 등은 주철과 강관에서 매우 중요하다. 이러한 금속원소들은 그 함유량에 따라서 금속의 물리적인 성질에 영향을 주거나 또는 금속내에 균열의 원인으로 작용할 수 있는 Inclusion 등을 형성하는 것으로 알려져 있어, 관의 파손 메커니즘을 규명하는 데에도 도움을 준다(Maker et al., 2000).

C 또는 Si 등이 과도하게 되면, 금속의 물리적인 용융점(Melting point)에 영향을 주어, 금속의 유동성(Fluidity)이 향상시키기도 하지만, 금속이 응고(Solidification)될 때 Graphite flakes 등을 형성하게 된다. 주철관 등은 닥타일주철관 또는 강관에 비하여 C 또는 Si의 함유량이 높기 때문에, 이들 함유량이 과도하게 되면 Graphite flakes 등이 형성되어 균열의 Initiator가 될 수 있다. DCIP는 제조과정상에서 Mn을 소량 넣어 이러한 Graphite flake을 구형의 형태로 조직이 변화되어 더 높은 항복강도(Yield strength)와 변형(Strain)이 가능하다. 이로 인해 CIP에 비하여 DCIP의 두께가 다소 얇아도 동일한 강도를 가지게

된다. 또한 Mn은 금속내 포함된 S의 제거 또는 관리에도 도움을 주는 것으로 알려져 있다(Maker et al., 2000). 즉, Mn이 없는 경우 금속의 Grains boundary에 Brittle iron sulphide가 형성되고, SP는 때때로 균열을 유발하는 원인이 될 수 있으며, CIP에서는 Inclusions 등과 같은 금속에 유해한 MnS(Managnese sulphide) 등이 생성될 수 있다. P 또한, 금속관종에는 매우 치명적으로, SP 또는 CIP 등에 Brittle iron phosphide(Steatite) inclusions을 형성하여 함유량이 0.5wt% 이상에서는 금속의 균열의 원인이 된다(Maker et al., 2000).

그러므로 현재 생산되고 있는 금속관은 이러한 화학적 조성에 대해서 재질에 따라 적정 함유량을 갖도록 제조되어야 한다.

본 연구에서 조사한 대상관로에 대한 관체의 화학적 조성 분석결과는 Table 6과 같다. C함유량은 평균적으로 CIP 3.396wt%, DCIP 3.294wt%, SP 0.144wt%로 CIP에서 C함유량이 높게 나타났다. 특히 Fig. 11에서 인장강도가 21.462kgf/mm²으로 가장 낮은 인장강도를 보였던 S-11(600mm)은 C함유량이 조사대상관로중 가장 높은 4.240wt%로 나타났다. 비록 관체에 대한 심도있는 재료분석은 이루어지지 않았으나 동일 관종중 매설년수가 동일하고 관경이 유사한 S-8(500mm)의 인장강도 42.7kgf/mm²(C함유량은 3.20wt%)에 비하여 1/2배 이상 낮은 것으로 나타나 이러한 강도저하 원인은 C함유량이 상대적으로 높았기 때문으로 판단된다. 또한, S-8과 S-11 두 관종의 내·외면 부식깊이는 각각 내면이 1.0, 0.8mm 이었고, 외면은 2.0, 2.9mm로 비슷하였다.

Si 함유량은 평균적으로 CIP 1.996wt%, DCIP 2.222wt%, SP 0.144wt%로 DCIP에서 함유량이 높게 나타났으며, Mn은 CIP 0.263wt%, DCIP 0.279wt%, SP 0.702wt% 등으로 SP의 Mn 함유량이 CIP 또는 DCIP에 비하여 2.5배 이상 높은 것으로 나타났다. 금속관 내 Inclusions을 유발하는 P 또는 S 등은 DCIP 또는 SP에 비하여 CIP가 전반적으로 높은 것으로 나타났다.

3.6. 관체 노후상태 평가 결과

본 연구에서는 김 등(2002) 등이 제안한 종합점수 균등 모델을 도·송수관로에 적합하도록 일부 수정

Table 6. Average chemical compositions of investigated large water mains

Pipe Materials	Chemical compositions(%)						
	C	Si	Mn	P	S	Fe	Mg
CIP	3.396 (3.130~4.240)	1.996 (1.600~2.330)	0.263 (0.024~0.600)	0.036 (0.018~0.061)	0.060 (0.006~0.230)	93.720 (92.700~94.300)	0.020 (0.000~0.030)
DCIP	3.294 (3.170~3.540)	2.222 (2.000~2.440)	0.279 (0.180~0.530)	0.033 (0.018~0.052)	0.008 (0.001~0.014)	93.654 (92.700~94.000)	0.018 (0.010~0.020)
SP	0.144 (0.050~0.220)	0.144 (0.010~0.330)	0.702 (0.320~0.980)	0.017 (0.006~0.023)	0.0179 (0.005~0.090)	8.511 (96.200~99.000)	0.005 (0.000~0.020)

개선하여 현장조사를 토대로 하여 수집된 자료를 이용하여 노후상태를 평가한 결과를 Fig. 14에 나타내었다. 단 현장여건 상 측정자료가 50% 미만인 경우에는 평가에서 제외하였다. Fig. 14에서 CIP는 전체적인 관체 노후상태 점수가 평균적으로 67.8, DCIP는 80.5, SP는 83.6 점으로 CIP가 가장 노후된 상태로 나타났으며, SP와 DCIP는 비슷한 노후상태를 보여주는 것으로 나타났다. 따라서 개량계획 수립시 우선적으로 CIP에 대한 개량이 필요할 것으로 판단된다.

또한 Fig. 15에는 노후상태에 대한 평가점수 순으로 각 관로에 대하여 개량우선순위를 나열해 보면, 강관인 S-46의 관체에 대한 노후 점수가 55.2로 개량이 가장 시급한 것으로 나타났으며, 그 다음으로는 CIP인 S-9, S-2, S-11 순으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 현재 도·송수관로와 같은 대형관로에 대하여 매설후 관로의 내·외면 상태에 대한 육안조사를 통하여 관로의 노후상태 등을 평가하였고, 채취 가능한 관체에 대해서는 화학적 조성과 물리적인 강도 등의 분석을 통하여 관의 노후상태 등을 고찰하였고, 수정 종합점수균등 모델을 이용한 관체 노후상태를 평가하였고, 그 결과는 다음과 같다.

(1) 현재 도·송수 상수관로의 대형관로의 경우, CIP는 내·외면 부식, DCIP 또는 SP 등은 도장재 탈리 등으로 인한 손상과 이들 부위에서 집중적으로 진행되고 있는 공식, 그리고 망간, 그리고 기타 이물질 축적 등이 관의 기능을 저해하는 가장 큰 원인인 것으로 나타났다.

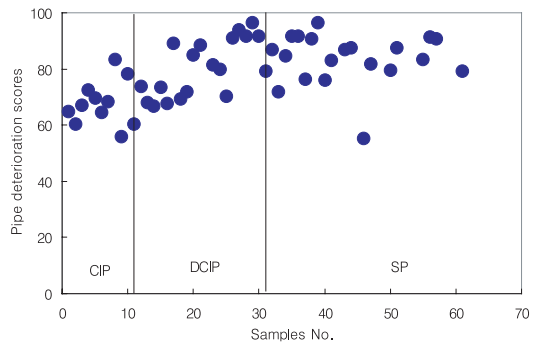


Fig. 14. Pipe deterioration scores by point assignment methods.

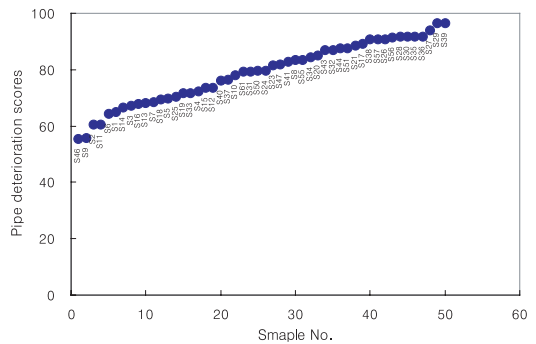


Fig. 15. Prioritizing water mains by pipe deterioration scores.

(2) 부식으로 인한 부식깊이는 내·외면 미도장 상태인 CIP의 부식깊이가 가장 컸으며, 이로 인해 부식속도도 가장 높았다. 그 다음으로는 DCIP, SP의 순이었다. 이들 부식깊이에 근거하여 산정된 내·외면 부식에 대한 총 부식속도는 CIP, DCIP, SP순으로 나타났다.

(3) 외부하중으로 인한 수평방향 변형은 거의 발생되지 않았으며, 기계적인 특성인 물리적강도도 대부분 건전한 것으로 나타났다. 그러나 일부 관체(S-11)

의 경우, 화학적 조성에서 C함유량이 상대적으로 높아 인장강도의 감소를 초래하였던 것으로 판단된다.

(4) 관제 노후상태에 대한 평가 결과, CIP의 노후상태가 가장 심한 것으로 나타났으며, 조사대상관로로 보면, S-46이 55.2로 개량이 가장 시급한 것으로 나타났으며, 그 다음으로는 CIP인 S-9, S-2, S-11 순으로 나타났다.

사 사

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

참고문헌

1. 김주환 등 (2002) 매설관의 내외부 실사를 통한 관 노후도 평가기준 개선연구, 한국수자원공사, pp. 1-122.
2. 정원식, 이현동, 김이태, 유명진 (2003) 상수도관의 노후도에 대한 환경영향인자의 상관성 분석, *상하수도학회지*, **17**(2), pp. 242-249.
3. 이현동, 정원식, 안윤주 (2002) 국내 중소도시 상수도관의 파손특성 및 영향인자 분석에 관한 연구, *상하수도학회지*, **16**(4), pp. 383-388.
4. 이현동, 안윤주(1996)국내 대도시 수도관의 파손특성에 관한 연구, *상하수도학회지*, **10**(1), pp. 96-111.
5. 이현동, 배철호, 홍성호, 황재운, 박필재 (2004) 상수도관로중 주철관종의 잔존수명 평가에 관한 연구, *한국물환경학회지*, **20**(3), pp. 206-214.
6. 이현동, 박필재, 정원식, 배철호 (2002) "상수관로의 관체부식 평가모델 개발에 관한 연구", *한국물환경학회 대한상하수도학회 공동춘계학술발표회 논문집*, pp. 309-313.
7. 김용석, 김중훈, 이현동 (2002) "상수관로 노후도 영향인자 및 가중치 산정에 관한 연구", *상하수도학회지*, **16**(6), pp. 686-699.
8. 김용석, 김중훈, 박무중, 김정환 (2002) "상수관로의 노후도 조사방법 개발", *대한토목학회지*, **22**, pp. 657-670.
9. 한국상하수도협회 (2004) *상수도시설기준*.
10. Det A.K., Grablutz F.M., Hasit Y.J., Snyder J.K., (2002) Prioritizing water main replacement and rehabilitation, *AWWARF*, pp. 1-185.
11. Dempsey, P., Manook, B.A. (1986), Assessing the condition of cast iron pipes, WRc United Kingdom
12. Moser, A.P. (2001) *Buried pipe design*, pp. 1-40.
13. Maker, J.M., Rajani, B.B., (2000) Grey cast iron water pipe metallurgy, *Journal of materials in Civil Engineering*, **12**(3), pp.245-253.
14. AWWARF (2004) *Techniques for monitoring structure behaviour of pipeline systems*, pp. 1~241.