韓國水資源學會誌 論文
第29卷 第4號·1996年 8月
pp. 223~231

주변환경을 고려한 상수관망의 관 마찰손실계수 산정

Predicting Flow Resistance Coefficients in Water Supply Mains

孫 廣 翼*
Son, Kwang-Ik

Abstract

For the most efficient operation of water mains, 124 head losses in domestic water supply steel mains were measured to provide the values of friction coefficient and the variables affecting the deterioration rate of Hazen Williams' and Darcy-Weisbach's friction coefficient. The experimental results show that pipe age is governing the friction coefficient of large mains (Diameter > 1100 mm). On the other hands, pipe age and pipe diameter are affecting the variation of carrying capacity for small mains (Diameter < 1100 mm). The friction coefficient of water mains in foreign countries is higher than that in Korea by about 5 to 10 in Hazen Williams' C value. The growing rate of roughness height of domestic water main is about 0.41 mm/year which is higher than the average of United States of America. So further study is required to find out what causes the serious deterioration rate.

요 지

보다 효율적인 관로운영에 필수적인 통수능 변화 및 영향인자 산정을 위하여 국내 도송수강관에 대하여 124개의 Hazen Williams 및 Darcy-Weisbach 마찰계수를 실측, 분석하였다. 그 결과 국내 도송수강관은 국외의 마찰계수 변화형태와 유사한 경향을 보이며 관경이 클수록 (Diameter > 1100 mm) 통수능은 관령에 많은 영향을 받으나 관경이 작을수록 관경과 관령에 동시에 영향을 받는다는 사실을 알았다. 또한 Hazen Williams의 C 값은 외국에 비해 약 5-10 정도 작은 것으로 나타났으며, 조도높이의 성장률은 약 0.41 mm/년으로 관의 통수능이 외국에 비해 빨리 저하한다는 사실이 밝혀져 그 원인 파악 및 통수능 산정기준을 재 검토해야 할 것으로 판단되었다.

* 영남대학교 토목공학과 전임강사

1. 서 론

우리나라의 관로 총연장은 10만 km에 이르고 있으나 전국 평균 무수율이 35 %에 이르고 우리나라의 실정에 적합한 관로의 마찰손실계수의 기준이 없어 상수도 관련 기술자들이 관로의 관리 및 운영상 문제점을 사전에 찾아내는 일이 용이치 못한 실정이다. 또한 컴퓨터의 급속한 발전과 함께 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 관로의 최적운영을 꾀하고 있는 국제적 추세에 비추어 볼때 관의 마찰손실계수는 정확한 수치해석학적 시뮬레이션의 성패를 좌우하는 대단히 중요한 인자이다. 국내 일부 상수도시스템의 경우 구축과정에서 설계 마찰손실계수의 과대 책정 결과 설계공급량과 시공후 실제 공급가능량 사이에 현격한 차이가 발생한 경우도 있었다. 이러한 통수능과 관련하여 국내실정에 적합한 관로의 물리적인 특성은 장기간의 현장계측 자료를 통하여 얻을 수 있으며 이와 같은 자료들이 외국에서는 보편화되어 있으나 국내에는 거의 없는 실정일 뿐만 아니라 외국자료의 국내 관로에 대한 적용 타당성 마저도 파악되지 않은 실정이다. 이와 같은 자료의 수집을 위해서는 체계적으로 많은 시간 및 예산등이 따라야 하나 국내 현실을 감안할때 단시간내에 실현되기는 어려운 실정이다. 따라서 많은 자료가 축적되기 전까지 국외에서 발표된 관로의 통수능 변화 기준과 국내 도수 및 송수관의 통수능 변화를 비교 분석하여 국외자료의 국내 관로에 대한 적용 타당성 및 국내 실정에 적합한 관로의 마찰손실계수의 산정기준을 위하여 향후 축적되어야 할 자료 종류의 제시가 요구된다.

1.1. 연구목적 및 내용

관의 재질 및 관 연령은 물론 송수되는 수질 또한 관의 마찰손실계수를 결정하는 중요한 인자임은 명백한 사실이나 송수되는 수질 등 각종 관로의 주변특성까지 고려된 관의 마찰손실계수의 산정 기준에 관한 국내연구는 거의 없는 실정이다. 따라서 충분한 현장실험과 국내의 실측자료를 이용한 통계학적인 해석절차를 거쳐 보편적으로 인정될 수 있는 관 마찰손실계수의 산정기준이 요구된다. 국제적으로 발표된 각종 관의 노후화 산정방법중 관의 통수능 변화에 미치는 영향인자 등 외국의 문헌, 자료 및 실측된 국내 자료의 심도있는 비교 분석 및 보정을 통하여 통수능 변화에 미치는 영향 인자들을 검토하여 관의 마찰손실계수 산정기준 및 향후 지속적으로 계측되어야 할 관로 운영자료의 종류를 제시하고자 한다.

이를 위해서는 외국의 문헌 및 자료조사뿐만 아니라 국내의 관 마찰손실계수 측정이 가능한 기관이나 이와 같은 자료를 보유한 기관을 통한 자료를 수집, 정밀분석을 실시하여 통수능 지배인자를 선정하고 이상의 지배인자를 독립변수로 하는 통수능 예측결과를 유도, 국내의 통수능을 산정하고 외국의 기준과 비교하고자 한다.

1.2. 국내외 연구동향

해외에서는 관로의 노후화 인자를 선정, 이를 이용한 관로의 파손빈도 예측식을 도출하여 경제성 분석을 통하여 관로의 교체시기를 결정하거나 각종 노후화에 영향을 미치는 인자들에 부여된 가중치를 이용하여 관로별 인자들의 가중치 총합을 산정하여 관로의 노후화 정도의 우선순위를 산정하는 연구가 진행되고 있으며 관 마찰손실계수는 관 노후화에 영향을 미치는 인자로 이용되고 있다. 관의 마찰손실계수는 관 재질 및 관 연령 뿐만 아니라 송수수질에도 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있으나 이상의 인자들과 관 마찰손실계수와의 상관관계를 규명한 국내연구는 아직 없는 실정이다. 최근 국내에서는 한국수자원공사에서 관의 노후화 기준산정에 관한 연구가 수행되었으나 이 연구에서도 역시 관로 통수능과 관련된 관내의 마찰손실계수를 노후화 인자로 선정하고 통수능 산정에 대해서 필요성을 언급하였을 뿐 통수능 산정기준에 대한 연구는 수행되지 않았다.

관 마찰손실계수는 관로의 통수능을 정량화시킨 것으로 크게는 전기, 화학 또는 물리적인 작용에 의하여 관재질이 점진적으로 악화되는 관내외부의 부식에 의한 관내부 표면의 조도(roughness)변화 및 산화칼슘이 관에 누적되는 스케일링에 의한 내

부단면의 축소, 이물질의 관내 퇴적 그리고 관내부에 서식하는 민물담치와 같은 패류의 서식으로 인한 관로의 단면 축소에 기인하는 경우가 있다. 이들중 패류의 서식으로 인한 관로 단면의 축소에 기인하는 통수능 변화는 수원의 생태계 및 잔류 염소농도에 따른 도 송수관 또는 배 급수관에 따라 달라질 수 있으며 이같은 원인에 의한 통수능의 저하는 물리적 관로갱생기법의 일종인 피깅(pigging)을 이용하여 정기적으로 해결할 수도 있으며 염소를 이용한 담치서식 방지기법도 연구된 바 있어(윤용배 등, 1993) 본 연구에서는 생물학적인 지배인자에 대한 문헌검토는 수행하지 않았다.

AWWA(1989)에 의하면 Langelier는 라이닝(lining)이 되어있지 않은 관에서의 부식정도를 나타내는 지수를 수질을 이용하여 산정하는 공식을 개발하였고 Weir는 각종 관내의 라이닝이 부식에 미치는 영향에 대하여 연구하여 Langelier와 Weir의 공식 등 수질에 따른 부식정도를 나타내는 부식지수를 산정한 식들이 발표되었다(Rossum과 Merill, 1983; Sharp와 Walski, 1988). AWWA Research Foundation(1981)은 관내부의 부식을 지배하는 영향인자를 pH, D.O., Buffering Capacity (Alkalinity), T.D.S., Silica , Phosphate , Temperature, Flow rate, Chroline, Hardness, Iron, Sulfate (Mineral acid/alkalinity), Microorganism 등으로 결론짓고 있다. 관의 통수능은 관의 부식 및 스케일링과 밀접한 관련이 있고 관의 부식은 수질과 밀접한 관계가 있어 통수능은 수질과 밀접한 관계가 있는 것으로 유추할 수 있다. 그러나 국내에서는 통수능의 변화는 통상 관종과 관 연령에는 관련이 있으나 수질과는 무관한 통수능 예측공식이 활용되어 왔다.

Hazen Williams의 C 값은 유속에 따라 달라지며 C값이 100 이하에서는 Hazen Williams 공식의 적용이 부적절한 것으로 연구 발표되었으며(Walski, 1987) 372개의 자료를 근거로 한 관종과 관경별 C값 및 유속에 따른 보정방법이 Lamont(1981)에 의해 제시되기도 하였다. 일본의 Mononobe(物部)는 주철관에 대하여 Hazen Williams의 경험식에서 유도된 관경별 C값을 이용하여 회귀분석에의한 방정식을 다음과 같이 유도하였다(이재명, 1995).

$$C=Ci(1-\frac{A\sqrt{y}}{D})^{B} \quad (1)$$

여기서 A = 0.0961659 D + 1.15507, B = 0.723076 D-0.0660117, Ci는 설치초기 관의 C 계수, D는 관경(mm)이며 y는 경과년도(year)이다.

Sharp와 Walski(1988)는 조도변화를 고려하여 관 연령 및 관경에 따라 아래와 같은 C 값의 변화 공식을 제시하였다.

$$C=18.0-37.2\log\{a(T-T_1)/D+10^{(18-c_1)/37.2}\} \quad (2)$$

여기서 a는 조도 성장율(ft/year), C_1은 설치 T_1 년 후의 C 계수, D는 관경(ft)이며 T는 경과년도(year)이다.

조도성장율은 pH 또는 Langelier Index(LI)를

표 1. Hudson의 자료로부터 산정한 조도성장율(Sharp와 Walski, 1988)

도 시	조도성장율 ft/yr. (mm/yr.)	수원 및 수질
Atlanta, Georgia	0.002 (0.61)	soft river water
Forth Worth, Texas	0.0018 (0.55)	carrying capacity lost even in concrete & cement mortar lined mains
Denver, Colorado	0.0006 (0.18)	mountain reservoir
New Orleans, Los Angeles	0.00052 (0.16)	river water
Cincinati, Ohio	0.00043 (0.14)	river water
Chicago, S. Illinois	0.00033 (0.10)	lake water, alum treated
St. Paul, Minnesota	0.00015 (0.045)	unsoftened surface water
Chicago, N. Illinois	0.00009 (0.027)	lake water, no alum
San Antonio, Texas	0.00005 (0.15)	wells in limestone

이용하여 산정이 가능하며 Lamont는 LI < 0에 대하여 조도성장율 $a=10^{-(4.08+0.38LD}$라는 식을 제시하였다.

Sharp와 Walski(1988)는 또한 Hudson의 자료를 이용하여 조도성장율과 수원과의 관계를 아래 표 1과 같이 정리하여 발표하였으나 수질과는 연계시키지 못하였다.

2. 통수능 변화 지배인자 선정 및 통수능 C 산정

Walski(1987)는 Hazen Williams의 통수능계수 C의 속도에 따른 변화 및 C와 관로의 조도(roughness)와의 상관관계를 수식화 하였으며 Lamont(1981)는 관종에 따라 정수인 경우 관령과 물의 부식성(corrosive attack)에 따라 관의 통수능이 달라진다고 하였다. AWWA Research Foundation(1981)은 수질과 통수능의 변화는 상관이 없다고 하였다. 일반 참고문헌에서도 관종과 관연령에 따라서만 Hazen Williams의 통수능계수 C를 산정하고 있어 통수능과 수질과는 무관하다는 것을 간접적으로 암시한다. Medlar 등(1989)은 Hazen Williams의 통수능계수 C 가 100 이하인 경우 부식이 심한것으로 주의를 요한다는 보고서를 제출하여 부식과 통수능은 밀접한 관계가 있음을 암시하고 있다.

부식을 나타내는 부식지수에 대한 연구는 Singley(1981)가 요약, 발표하였으며 이들은 pH, Hardness, Alkalinity, D.O., Ca^{2+}, CO_3^{2-}, SO_4^{2-}, HCO_3^-, Cl^-, N 등 각종 수질관련 항목중 몇가지 항목만을 이용하여 부식뿐만 아니라 스케일링을 예측하고 있다. 이 방법은 수질에 의한 부식정도를 나타내는 기법이다.

이상의 여러 연구들의 검토결과 통수능과 수질과의 관계에 대한 견해가 상반된다는 것을 알 수 있으며 따라서 본 연구는 수질이 통수능에 영향을 미친다는 가정하에 관종, 유량, 압력, 관 연령 및 부식발생 인자들이 통수능의 변화에 영향을 미치는 인자들로 고려한 연구를 수행함으로써 통수능 지배인자를 선정하고자 한다.

본 연구는 강관에 대한 124개의 통수능 실측치를 기본자료로 사용하였으며(표 5 참조) 대부분의 자료는 대구경 도송수관으로부터 계측된 자료이다. 통수능 산정을 위하여 관로의 각종 정보(관령, 재질, 표고, 관경 등), 측점간의 관로거리, 수압계 설치표고, 그리고 관내수압 측정자료를 이용하여 측점간 에너지 손실을 산정하였다. 수압자료로는 최소 1일 이상의 유량변동 범위에 대한 각종 유량 및 각 유량에 대한 측점별 수압을 계측한 자료를 이용하였으며 각종 유량에 대하여 산정된 에너지 손실 수두들로부터 구한 통수능의 평균치를 측정구간에 대한 하나의 통수능 자료로 채택하였다. 이러한 통수능 산정을 위한 자료는 한국수자원공사 산하 각 사업소에서 현장운영을 위하여 실측된 자료 및 보고서로부터 인용, 취합하였다. 보고서 형태로 기록되지 않은 자료들은 일반적으로 정리되지 않은 상태로 서류창고에 일정기간 보관되었다가 폐기처분

표 2. Cast Iron관의 연령, 관경, Lining 상태에 따른 C의 변화(California Section Committee Report, 1962)

year	Diameter (mm)							
	Unlined Cast Iron					Lined Cast Iron		
	100	150	200	300	350	150	200	300
2								146
3						133		137
5						155	134	130
6						145	156	
9						125.7		
10						133	152.3	
12						141.5		
13							130	
14						139	155	
17						149		
18						125		
20		65	65	80				
25	55	60	60	75				
30	51.5	57.5	57.5	72	80			
35	49	55	53.5	69				
40	47.5	54		66	80			
45	47	53		62				
50	46	52		60				
55		51		56				
60		50						
65		49						

표 3. 배수관 부식에 영향을 미치는 관 재질별 수질 (Rossum과 Merill, 1983)

재 질	관 련 성 질
닥타일 및 주철관	색도, 전도도, 용존산소, 철, 망간, pH, 알카리도, 칼슘
강관	색도, 전도도, 용존산소, 철, 망간, pH
콘크리트관	알카리도, 칼슘, 전도도, pH
석면시멘트관	석면섬유, 철, 실리카
아연도금강관	알카리도, 카드뮴, 색도, 전도도, 용존산소, 철, 납, pH, 아연

표 4. 수질의 침식성에 관한 평가식(Singley, 1981; Rossum과 Merill, 1983)

발표년	제안자	제 안 식	비 고
1936	Langelier	$L.S.I. = pH - pHs$ 여기서 $pHs = p[Ca^{2+}] + p[HCO_3^-] + p[K_2/K_s]$ $K_s = [Ca^{2+}][CO_3^{2-}]$ 그리고 $K_2 = [H^+][CO_3^{2-}]/[HCO_3^-]$ 이다.	
1942	Larson, Buswell	$pH_s^* = pHs + \frac{2.5\sqrt{I}}{1+5.3\sqrt{I}+5.5I}$ 여기서, I ; Ionic strength	L.S.I.의 개량식
1944	Ryznar	SI = 2pHs-pH	Stability Index
1944	Riddick	C.I.*	Corrosion Index
1948	Loschiavo	$C.I. = Ca + Mg + H\ SiO_3 - \frac{Anions}{2}$	*Casil Index*
1958	Dye	*M.E.*	*Momentary Excess*
1960	McCauley	$D.F.I. = \frac{[Ca^{2+}][CO_3^{2-}]}{K_s' \cdot 10^{10}}$ 여기서, K_s'; Ks corrected for temperature and ionic strength	Driving Force Index
1976	Merrill	Calcium Carbonate Precipitation Potential CCPP = 50,000 ($ALK_i - ALK_{eq}$) 여기서, ALK ; Alkalinity	
1978	Feigen baum 등	Y	
1980	Millette 등	A.I. = pH + log([ALK][Ca hardness])	Aggressive Index

註) $C.I.^* = \frac{75}{ALK}\left(CO_2 + \frac{Hardness - ALK}{2} + Cl^- + 2N\right)\left(\frac{10}{SiO_2}\right)\left(\frac{DO+2}{DO_{sat}}\right)$,

$$M.E. = \frac{Ca^{2+} + CO_3^{2-}}{2} - \sqrt{\left[\left(\frac{Ca^{2+} + CO_3^{2-}}{2}\right)^2 - (Ca^{2+} \cdot CO_3^{2-}) + (K_s \cdot 10^{10})\right]}$$

$$Y = A \cdot H + B[Cl^- + SO_4^{2-}]e^{-1/AH} + C,\ AH = 3.5 \times 10^{-4} \cdot \frac{[Ca^{2+}][HCO_3^-]^2}{CO_2}$$

되거나 분실되어 측정당시의 업무담당자를 통하지 않고는 이러한 자료를 확보하여 정리하는데 많은 애로가 따랐으며 실제로 귀중한 많은 현장자료를 찾을 수 없었다. 따라서 추후 지자체를 포함한 상수도 유관기관들은 일정기간에 대한 운영자료를 이용한 보고서 발간 등을 통하여 귀중한 현장기술자료를 체계적으로 보관하는 방안을 모색해야 할 것으로 사료된다.

표 5. 관경별 인용자료 數 및 流水의 종류

관 경 (mm)	유수의 종류		비 고
	원수	정수	
3500 이상	9		터널포함
2400	6		
2200	7		
2000	21		
1800	7		
1650	7		
1500		34	
1350	7		
1100 이하	5	21	
계	69	55	

통수능 지배인자를 추출하기 위하여 우선 관로의 통수능과 관로내 수질 및 압력과의 상관관계를 알아보았다. 표 4에서 나타난 바와 같이 수질을 나타내는 지표는 여러가지가 있으나 전국 모든 정수장에 대한 내부부식과 관련된 각종 수질자료가 대부분 비공개하에 있고 수질자료 취득이 가능한 일부 지점에 대해서는 통수능 자료의 결핍으로 인하여 각종 수질지표를 이용한 수질과 통수능과의 상관관계의 규명은 사실상 불가능하였다. 따라서 정수와 원수를 송수하는 관로들간의 통수능을 그림 1과 같이 도표로 비교하여 봄으로써 수질이 통수능변화에 미치는 영향 유무의 가능성을 검토하였다. 본 연구에 이용된 자료만으로는 세부적인 비교가 곤란하였으나 측정된 분포를 보면 통수능 변화가 수질에 영향을 받는다고 결론짓기는 곤란하였다. 보다 상세한 상관관계를 규명하기 위해서는 충분한 수질 관련 자료가 요구되며 이와 같은 연구를 위해서는 정수장별 수질을 대표할 수 있는 각종 항목의 정기

적 측정은 물론 이들 자료의 공개가 요구된다.

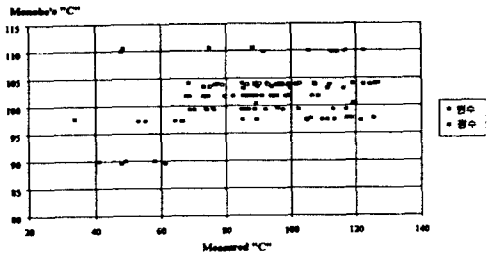

그림 1. 원수와 정수 이송관로의 통수능 비교

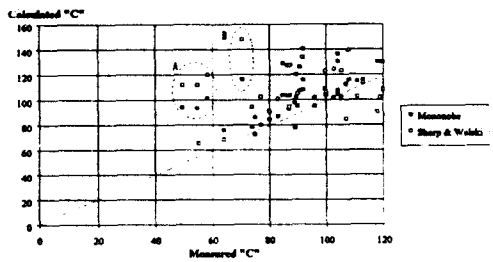

그림 2. 실측 통수능과 타 연구자들의 예측 통수능의 비교

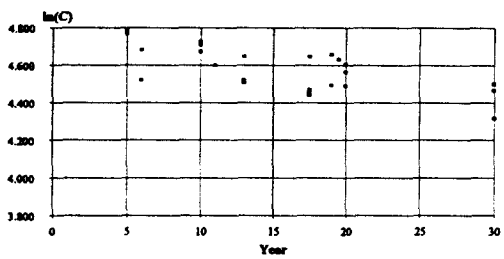

그림 3. 통수능과 관령과의 상관관계

그림 2는 실측 통수능을 Hazen Williams의 통수능계수 "C"로 환산한 값과 실측된 관로의 주변 여건을 기본자료로 취하여 物部 및 Sharp와 Walski가 예측하는 통수능치를 산정, 비교하였다. 그림 2에 나타난 타원형 A 내의 통수능은 민물담치의 관로내 부착으로인하여 통수 단면이 좁아진 경우이며 타원형 B내의 통수능의 경우 원형관로가 아닌 터널의 경우 이다. 윤용배 등(1993)에 따르면 관로내 민물담치를 제거하여 관로연장 475 m에 대하여 평균 0.7 m의 손실수두 감소효과를 얻었으며 이로인한 전력비 또한 연간 3500만원 이상 절감된 것으로 보고되었다. 원수가 흐르는 관로내 민물담치는 주변 환경에 대단히 민감하며 성장 1, 2년후 생존율이 격감하는 특성을 나타내고 주변 유속에 따라 서식정도가 달라져 담치에 의한 관로단면의 축소는 특정치에 접근할 것으로 예상된다. 염병호(1993)에 의하면 민물담치는 평균 10 cm 까지 관로단면을 축소시킨 경우도 있는 것으로 나타나 수중생물에 기인된 통수능 저하는 관로의 부식과는 별도로 고려되어야 할 것으로 사료되며 따라서 본 연구에서는 민물담치에 의해 저하된 통수능 및 tunnel 통수능 자료는 분석대상에서 제외시켰으며 전체적으로는 우리나라의 통수능치가 외국치보다 작게 나타나는 것에 유의할 필요가 있다. 또한 Sharp와 Walski공식에 의한 통수능이 분산되어 있는 반면 物部공식은 우리나라의 통수능 실측치와 대단히 유사한 변화형태를 보이고 있음을 알 수 있다.

그림 3은 통수능과 관령과의 관계를 도시화한 것이며 통수능 C와 관령 사이에는 높은 상관관계가 있을 가능성을 암시하고 있다. 통계학적 자료분석을 실시한 결과 관로의 통수능 C와 관령과는 상관관계가 있는 것으로 판명되었으나 단계적 회귀분석을 실시한 결과 통수능과 관경과의 상관관계는 거의 없는 것으로 판명되었다.

관로의 부식 및 파손관련 연구에서는 관로의 노후화는 대부분 관경과 비교적 밀접한 상관관계가 있는 것으로 기술하고 있으나 실측된 자료의 검토결과는 통수능과 관경은 상관관계가 없는 것으로 나타나 본 연구의 전체자료를 이용한 통계학적인 결과와는 상이한 결과를 나타내고 있다. 그러나 관경과 통수능과의 관계를 도시한 그림 4에서 나타나는 바와 같이 관경이 작아질 수록 통수능의 변화폭이 넓어져 통수능 지배인자가 다양해지고 관경이 커질수록 통수능의 변화 폭이 좁아져 관경과 통수능의 상관관계가 약해진다는 것을 알 수 있다. 이는 관경 및 관로의 수명은 관로의 통수능을 지배한다는 Sharp와 Walski 의 연구와 동일하며 物部공식에서 나타나는 바와 같이 관경이 커지면 커질

수록 관경과 통수능과는 무관해지며 관로의 수명과 밀접한 관계가 있다는 결과와도 일치한다. 따라서 자료들 중 소구경(1100 mm 이하) 자료들만을 상대로 통계학적 분석을 재실시하였으며 그 결과 관로의 통수능 C와 관 연령 및 관경과의 상관계수는 $r^2=0.895$ 라는 비교적 높은 상관관계를 보였다. 이와같은 결과는 관경의 크기에 따른 연결방법이나 시공정도의 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

대부분의 국외 통수능 자료는 주철관에 대한 것이므로 본 연구에서 채택한 강관에 대한 실측 통수능과의 비교를 위해서는 관재질에 대한 자료의 수정이 필요하였다. Morris(1971)는 강관의 부식 진행은 주철관에 비해 약 5년정도 더 빠르다는 연구결과를 발표하였으며 본 연구에서는 이 결과를 이용하여 관재질에 따른 자료의 이질성은 통수년도의 조정을 통하여 보정하였다.

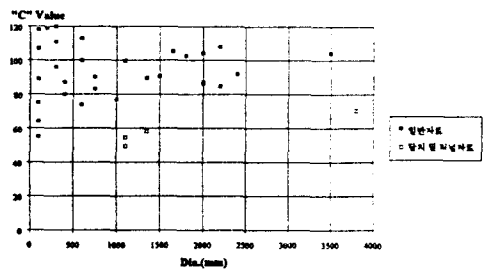

그림 4. 통수능과 관경과의 상관관계

그림 5에서는 문헌 조사에서 언급한 바 있는 각종 연구결과의 보정치와 실측된 자료를 도식적으로 비교하였다. 그림 5에 나타나는 바와 같이 비교 결과 Morris와 物部의 통수능 예측은 거의 동일하게 나타나고 있다. 또한 관로내 생물의 서식등과 같은 특별한 경우를 제외하면 외국의 통수능에 비해 국내 관로의 통수능이 다소 낮은 경향을 보이고 있다는 것을 알 수 있다. Lamont는 대부분이 600 mm 이하의 lined, unlined 주철관에 대한 통수능 예측치를 연구하여 배급수관이 연구의 주 대상이었음을 알 수 있다. Sharp와 Walski의 예측치 역시 배수관을 대상으로 조사 분석된 결과로 그림 5에서 보는바와 같이 Lamont의 연구결과와 유사한 경향을 보이고 있다. 이는 Morris와 物部의 통수능 예측치를 중심으로 관부설 직후에는 배수관의 경우 통수능이 더 높으나 배급수관의 통수능 저하가 도송수관 보다 빨리 진전된다는 것을 암시한다. 이상의 비교검토 결과 국내 도송수관의 관령에 따른 통수능의 변화는 외국의 연구결과에 비하여 국내만의 특수한 변화경향을 나타내고 있다고 단정짓기 어려우나 전체적으로 통수능 계수가 약 5 - 10 정도 낮은 것으로 판단되어 보다 자세한 통수능의 재 검토와 그 문제점을 파악해야 할 필요성이 있다. Morris의 통수능 예측은 표의 형태로, 物部는 수학적 공식을 이용하여 예측하고 있어 Hazen Williams 공식을 이용하여 관수로 계산을 할 경우 物部공식을 이용하여 장래의 통수능을 예측하는 것이 편리할 것으로 보이나 위에서 언급한 바와 같이 국내실정에 적합한 통수능의 산정이 이루어지기 전까지는 Morris 또는 物部공식의 예측치보다 최소 5-10 정도 작은 값으로 채택하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

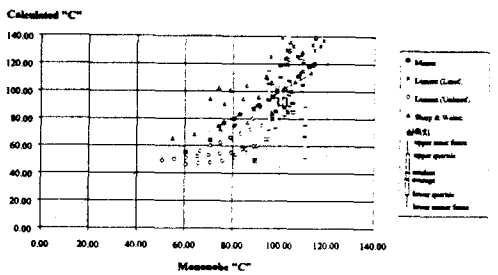

그림 5. 物部식에 의한 통수능과 실측치 및 각종 예측치와의 비교

3. 관내부 조도높이 e의 산정

Hazen Williams 공식 대신 Darcy Weisbach의 공식을 이용하기 위해서는 조도높이 e의 변화를 알아야하며 이를 산정하기 위해서는 통수능 측정시의 측정구간내의 손실수두, 유속, 관경 외에도 수온 등의 기록이 필수적이나 수온의 기록이 없는

자료가 대부분이었기 때문에 평균수온은 15℃로 가정 하였다. 또한 측정기록으로부터 Darcy Weisbach의 마찰계수 f의 산정후 Moody Diagram으로부터 상대조도 e/D를 구하여 조도높이 e를 구하는 번거로움을 줄이고 Moody Diagram의 독해에서 발생하는 오차를 줄이기 위하여 조원철 등(1993)이 소개한 바 있는 Churchill의 외삽적 수식을 이용하여 조도높이 e를 산정하였다.

조도높이 역시 관경과는 상관관계가 미약한 것으로 통계학적 해석결과 나타났으며 관령과 조도높이의 상관관계는 아래식으로 표현할 수 있었다.

$$e=0.614\ \exp(0.154\ T) \qquad (3)$$

여기서 e는 조도높이(mm), T는 관령(year)을 나타낸다.

위 수식은 단순히 조도높이의 평균적 변화경향을 설명할 뿐 수식이 나타내는 바와 같이 관의 초기 조도높이가 0.614 mm라는 식의 확대해석은 곤란하다 하겠다. 관령 20 년 이하에 대한 평균적인 조

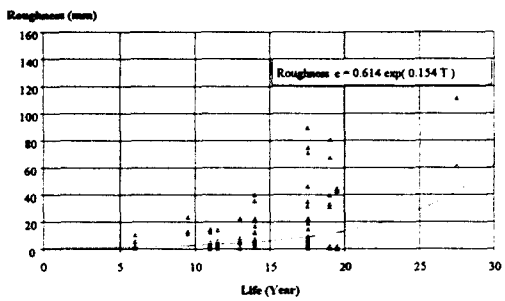

그림 6. 강관의 조도높이(mm)와 관령과의 상관관계

도성장율을 산정한 결과, 약 0.41 mm/year로 나타났으며 관령 20 년 이후의 급격한 조도높이의 증가는 민물담치의 서식에 영향을 받은 관로의 측정자료에 기인하는 것으로 판단된다. 이같은 연구결과는 Sharp와 Walski의 연구 결과중 강물과 저수지 원수를 이송하는 송수관로의 평균 조도성장율 0.29 mm/year보다 높아 우리나라의 관로 통수능이 외국 관로에 비해 빨리 저하하는 것으로 나타나 Hazen Williams 공식의 통수능 C값이 외국에 비해 낮다는 전절의 연구결과와도 일치한다.

4. 결 론

(1) 소구경(1100 mm 이하) 관로의 경우 통수능 C와 관령 및 관경과는 밀접한 상관관계를 보였으며 관경이 커지면 커질수록 관경과 통수능과는 무관해지며 관로의 수명과 밀접한 관계가 있었다.

(2) 수질이 관로의 부식에 미치는 영향에 대한 검토를 위하여 축적해야 할 각종 수질자료 관련 항목을 선정, 나열하였다.

(3) 국내 도송수관의 관령에 따른 통수능의 변화는 외국의 연구결과에 비하여 국내만의 특수한 변화경향을 나타내고 있다고 단정짓기는 어려우며 특히 物部공식이나 Morris의 연구결과와는 동일한 경향을 나타내는 것으로 판명되었다. 국내 도 송수강관의 통수능 실측 결과 통수능계수 C값은 외국 평균치에 비해 약 5-10 정도 작은 것으로 나타났다.

(4) 조도높이 역시 관경과는 상관관계가 미약하며 관령 20년 이하에 대한 평균적인 조도성장율은 약 0.41 mm/year로 외국의 경우보다 높은 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 1994년도 영남대학교 학술연구조성비에 의한 것이며 자료 수집에 많은 도움을 주신 정인호 전 한국수자원공사 수도본부장과 김성한 대리께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

염병호 (1993). "창원 공업용수도 도수관로 통수능력 조사보고서." 연구보고서, 한국수자원공사.

윤용배, 노희수, 최영철, 이강희 (1993). "도송수관내 민물담치 제거에 관한 조사보고서." 연구보고서, 한국수자원공사.

이재명 (1995). "수도관 개량을 위한 의사결정시스템 개발." 연구보고서, 한국수자원공사.

조원철, 이종설, 박환철 (1993). "관 마찰계수 산정을 위한 Moody 도표와 최근의 공식들과의 비교연구." 제35회 수공학 연구발표회 논문집, 한국수문학회, pp. 467-474.

AWWA Research Foundation. (1981). *Water main evaluation for rehabilitation/replacement.* AWWARF and EPA.

AWWA (1989). *Manual of water supply practices, steel pipe: A guide for design and installation,* M11.

California Section Committee Report (1962). "Loss in capacity for water mains." *J. of AWWA,* Vol. 54, pp. 1293-1312.

Lamont, P.A. (1981). "Common pipe flow formulas compared with the theory of roughness." *J. of AWWA,* Vol. 73. No. 5, pp. 274-280.

Medlar, S.J., Marabello, D.A., and Gearhart, R.R. (1989). "Corrosion control in drinking water systems." *Reference manual of commonwealth of Pennsylvania,* Dept. of Environmental Resources, Bureau of Community Environmental Control, Harrisburg, PA, U.S.A.

Morris (1971). *Applied hydraulics in engineering.* Wiley, U.S.A.

Rossum, J.R., and Merrill, D.T. (1983). "An evaluation of the calcium carbonate saturation indexes." *J. of AWWA,* Vol. 75, No. 2, pp. 95-100.

Sharp, W.W., and Walski, T.M. (1988). "Predicting internal roughness in water mains." *J. of AWWA,* Vol. 80, No. 11, pp. 34-40.

Singley, J.E. (1981). "The search for a corrosion index." *J. of AWWA,* Vol. 73, No. 11, pp. 579-582.

Walski, T.M. (1987). *Water supply system rehabilitation.* ASCE.

〈접수 : 1996년 5월 20일〉