

배수시설의 최적 관개량 시기 의사결정모형에 관한 연구  
( A Study on the Optimal Decision-Making Model for  
Rehabilitation time in Water Distribution Systems )

김중훈\* 김한주\*\* 이현동\*\*\* 김성한\*\*\*\*

1. 서론

배수시설에 있어서, 관로는 시간이 경과함에 따라 내외부에 여러가지 요인에 의해 노후화가 발생된다. 이로인해 수리적 통수능이 저하되어, 수요절점에 요구수압과 요구수량의 양적 측면과 요구수질의 질적측면을 만족시키지 못하게 된다.

일반적으로 배수시설내의 노후된 관의 처리방법은 크게 교체(Replacement), 갱생(Rehabilitation), 유지보수(Maintenance & Repair)의 3가지가 있다. 교체는 기존관을 철거하고 새관을 매설하는 것이고, 갱생은 관내부에 발생하는 부식이나 돌기 등의 이물질을 제거하고 피복하여 통수능력을 향상시키는 것이며, 유지보수는 단순히 누수나 파손에 대해 보수하는 것이다.

본 논문에서는 관로의 수리, 환경적 특성을 저하시키는 노후화에 대해 적절한 시기에 경제적으로 관을 교체하기 위한 방법을 제시하고자 한다.

2 기본이론

우선 경제적 분석에 의하여 각관들의 최적교체시기를 결정한다. 최적교체시기를 구하는 식은 다음과 같다.

---

\* 고려대학교 토목환경공학과 교수

\*\* 현대엔지니어링 상하수도부 사원

\*\*\* 한국건설기술연구원 환경연구실 선임연구원

\*\*\*\* 한국수자원공사 수도운영처 대리

$$\begin{aligned} \text{Min}_{t_r} [ P_T(t_r) ] &= \text{Min}_{t_r} \left[ \sum_{t=t_r}^{t_d} \frac{C_m(t)}{(1+R)^{t-t_r}} \right. \\ &\quad \left. + \left\{ \frac{C_r}{(1+R)^{t_r-t_r}} - \sum_{t=t_r}^{t_r+t_d} \frac{C_p}{(1+R)^{t-t_r}} \right\} \right] \end{aligned} \quad \text{---(1)}$$

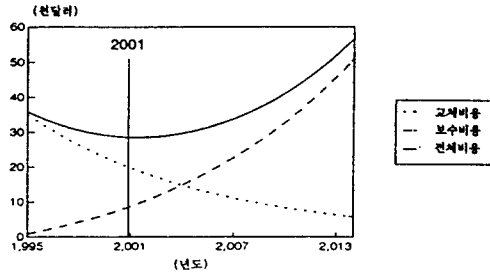


그림 1. 경제성분석에 의한 관의 최적교체시기의 결정 (예)

여기서  $t_r$ 은 최적교체시기이고  $t_p$ 는 현재시점,  $t_d$ 는 계획기간,  $C_m$ 은 연간파손보수비용,  $C_r$ 은 관교체비용,  $C_p$ 은 교체후 절감되는 연간양수비용,  $R$ 은 할인율이다.

$C_m$ 은 연간파손보수비용으로서 관파손율과 파손건당의 보수비용의 곱으로 표현된다. 경과년수에 따른 누적파손율식은 한국수자원공사가 보유하고있는 수도권지역의 강관자료 33개를 대상으로 분석하였다.

$$N = 3.882 \times 10^{-6} \times e^{0.165y} \times L \quad (\text{건/년}) \quad \text{---(2)}$$

(  $y$  : 경과년수(년),  $L$  : 관로길이(m) )

그리고 파손건당 보수비용은 국내자료 부족으로 인하여 미 육군공병단의 관경별 보수비용자료를 환산하여 사용하였다.

$$C_B = 1300 \left( \frac{D}{304.8} \right)^{0.62} \times 800 \quad (\text{원/건}) \quad \text{---(3)}$$

(  $D$  : 관경(mm) )

$C_r$ 은 관교체비용으로서, 한국종합기술개발공사가 보유하고 있는 자료를 이용하여 토사구간에 대해 다음과 같은 교체비용 회귀식을 구했다.

$$C_r = (0.225D^2 + 269.09D + 9859.21) \times L \text{ (원)} \quad \text{---(4)}$$

( D : 관경(mm), L : 교체길이(m) )

$C_p$ 은 교체후 절감되는 연간양수비용으로서, 관 교체 전후의 Hazen-Williams 조도계수 C에 의해 손실수두차이를 계산하고, 이 차이를 동력으로 환산한 후, 단위동력당 연간의 양수비용을 곱해주면 교체후의 연간양수비용 절감분을 구할 수 있다. 연간양수비용식은 다음과 같다.

$$C_p = 323,770 P \text{ (원)} \quad \text{---(5)}$$

( P : 펌프의 동력(kW) )

각관에 대해 식(1)에 의해 최적교체시기를 구하고 나면, 현재부터 계획기간동안 했수를 증가시키며 수리적 타당성을 검토한다. 했수가 증가함에 따라 C값이 하락하므로 관내부의 통수능이 저하되는데, 만약 이러한 통수능의 저하 때문에 배수시설내의 절점에 부압이 걸리게 되면 수리적 타당성을 만족시켜주지 못하게 되는 것이다. 이에 대처하기 위해서 최적교체시기가 빠른 순서부터 미리 교체하면서 수리적 타당성을 검토하고, 만족시키게 되면 다음연도로 넘어가며, 계획기간동안 반복한다. 여기서 수리적 타당성을 검토하기 위해서 관망해석 프로그램인 KYPIPE를 이용하였다.

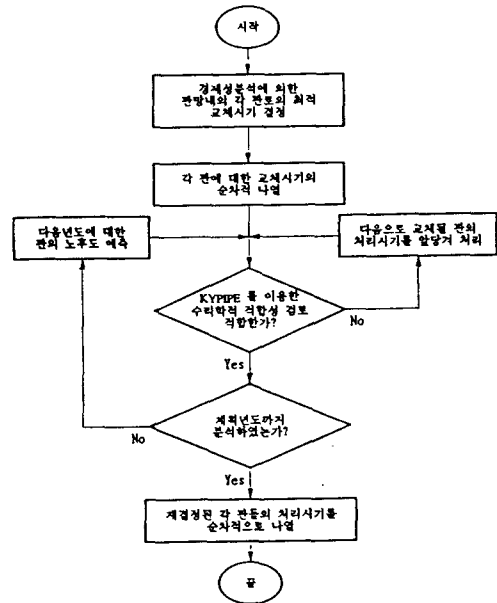


그림 2. 모형의 흐름도

### 3 모형의 적용과 결과

모형에 적용한 관망은 수도권 광역상수도 제1단계로서 일최대 공급량이 120만톤이고, 팔당 취수장에서 시작하여 성남, 노량진, 선유, 영등포, 김포, 부천으로의 분기점이 있고, 최종적으로 부천까지 연결되며, 팔당에 취수장, 김포에 가압장이 설치되어 있다.

대상관망에 대하여 유지보수비용, 할인율, 터널수리, 최소허용압력, 관의 내부노후도 등의 측면에서 계산에 필요한 가정을 하였다.

유지보수비용 측면은, 관 파손 복구시 단수를 하게 되는데 이때에 사회, 경제적인 피해비용을 유지보수비용에 추가하는 것이며, 정확한 계산이 불가능하여 피해비용을 대략 2억원으로 가정하였다.

할인율은 현가산정에 있어 중요한 요소로서 14.0%로 가정하였다.

대상관망내에는 직경 3500mm의 터널이 3개 있다. 그런데 수리학적 타당성 검토시의 관망으로 가정했으며, 교체비용산정과 관 파손을 예측에도 강관에 준하였다.

절점의 최소허용압력은 보통 급수관망에서는 1.5 kg/cm<sup>2</sup>이다. 그런데 광역상수도 같이 대규모 원수를 송수하는 관로에는 뚜렷한 기준치가 없는 관계로 최소허용압력을 급수관망에서와 같이 1.5 kg/cm<sup>2</sup>을 사용하였다.

관번호	관경(mm)
1	2800
2	3500
3-4	2200
5	3500
6-7	2200
8	3500
9-20	2200
21	2800
22-23	2200
24	2800
25	2500
26-32	1800
33	1500
34-37	2000
38	2200
39-40	2000
41-43	1800

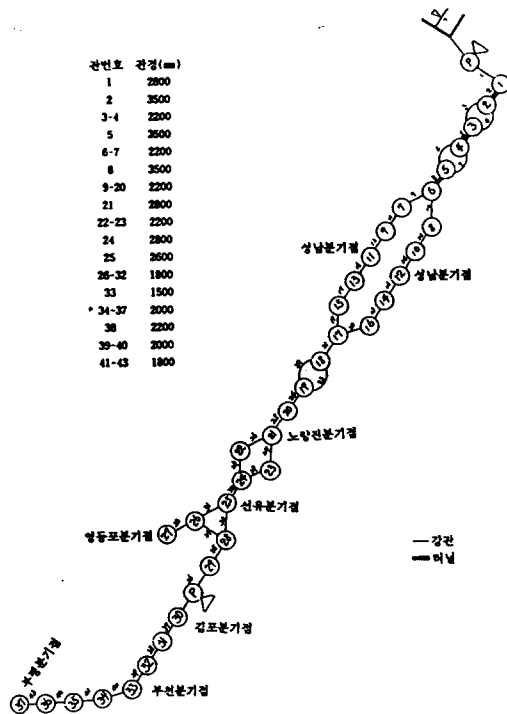


그림 3. 광역상수도 1단계 관망도

관 내부노후도의 지표로는 Hazen-Williams의 C값을 사용하며 경과년도에 따른 변화를 추정하기 위해서 일본의 物部가 만든 식을 사용하였으며 다음과 같다.

$$C = 130(1 - \frac{2.68\sqrt{y}}{D^{0.7}})^{2.63} \quad \text{---(6)}$$

( y : 경과년수(년), D : 관의 직경(mm) )

#### 4. 결과검토

현상태의 수도권 광역상수도 1단계 관망은 수리학적으로 문제가 없어 경제성분석에 의해 결정된 관의 처리시기를 변경시키지 않아도 되었다.

표 1. 계산결과(최대공급량)

관번호	교체시기	교체비용(원)	전체소요비용(원)
1	2011	474,506,320	1,401,399,224
2	2014	1,044,980,352	3,584,455,680
3	2009	331,554,048	943,178,560
4	2009	331,554,048	943,178,560
5	2014	211,292,976	724,667,908
6	2009	726,329,408	2,066,203,904
7	2009	726,329,408	2,066,203,904
8	2014	203,706,624	698,747,456
9	2009	795,272,064	2,262,326,528
10	2009	795,272,064	2,262,326,528
11	2009	938,306,560	2,669,219,840
12	2009	938,306,560	2,669,219,840
13	2009	546,391,336	1,554,332,160
14	2009	546,391,336	1,554,332,160
15	2009	840,823,376	2,387,041,536
16	2009	840,823,376	2,387,041,536
17	2011	900,948,416	2,708,384,512
18	2011	900,948,416	2,708,384,512
19	2011	764,039,552	2,296,816,128
20	2011	754,039,552	2,296,816,128
21	2016	29,873,862	98,344,168
22	2011	348,896,704	1,048,835,200
23	2011	348,896,704	1,048,835,200
24	2016	418,233,216	1,376,818,432
25	2016	142,081,792	514,527,616
26	2012	432,778,880	1,325,505,152
27	2012	432,778,880	1,325,505,152
28	2012	275,404,736	843,503,296
29	2012	275,404,736	843,503,296
30	2010	53,232,436	163,150,096
31	2012	75,045,936	225,759,776
32	2012	75,045,936	225,759,776
33	2011	96,779,824	301,254,816
34	2014	5,567,540	19,568,212
35	2013	512,613,152	1,595,691,392
36	2013	406,556,264	1,265,548,288
37	2013	35,729,256	110,424,304
38	2009	196,429,088	552,110,656
39	2008	81,760,864	220,527,040
40	2008	31,052,596	83,453,808
41	2007	54,476,928	1,337,000,272
42	2007	1,177,852,160	3,061,019,648
43	2007	819,496,192	2,129,718,912
합계		20,407,777,280	59,900,654,664

표 2. 계산결과(94/9/13 유량)

관번호	교체시기	교체비용(원)	전체소요비용(원)
1	2011	680,311,616	1,407,201,792
2	2014	1,047,170,176	3,586,645,504
3	2009	334,689,408	946,313,920
4	2009	334,689,408	946,313,920
5	2014	211,705,696	725,109,696
6	2009	733,197,952	2,073,072,512
7	2009	733,197,952	2,073,072,512
8	2014	204,133,504	699,174,336
9	2009	802,792,976	2,269,847,040
10	2009	802,792,976	2,269,847,040
11	2009	947,179,712	2,678,083,056
12	2009	947,179,712	2,678,083,056
13	2009	551,558,912	1,559,499,264
14	2009	551,558,912	1,559,499,264
15	2009	848,007,296	2,394,219,520
16	2009	848,007,296	2,394,219,520
17	2011	908,632,768	2,716,068,864
18	2011	908,632,768	2,716,068,864
19	2011	770,556,160	2,303,332,864
20	2011	770,556,160	2,303,332,864
21	2016	30,138,652	98,609,032
22	2011	351,872,480	1,051,810,944
23	2011	351,872,480	1,051,810,944
24	2016	421,941,120	1,380,526,464
25	2016	144,331,024	516,776,832
26	2012	436,945,184	1,329,671,424
27	2012	436,945,184	1,329,671,424
28	2012	278,058,032	846,154,560
29	2012	278,058,032	846,154,560
30	2010	58,847,664	168,765,344
31	2012	75,242,664	225,362,688
32	2012	75,242,664	225,362,688
33	2011	97,718,432	302,153,408
34	2014	5,566,247	19,553,920
35	2013	512,243,872	1,595,321,984
36	2013	406,282,400	1,265,255,424
37	2013	35,741,696	110,436,144
38	2009	196,465,536	552,147,072
39	2008	81,792,664	220,568,832
40	2008	31,058,244	83,459,456
41	2007	54,675,136	1,337,228,672
42	2007	1,178,306,920	3,061,473,792
43	2007	819,811,904	2,130,634,816
합계		20,555,673,600	60,048,564,224

표 3. 연도별 교체관및 비용(최대공급량)

연도	교체해야할관	교체비용(원)
1994		
1995		
1996		
1997		
1998		
1999		
2000		
2001		
2002		
2003		
2004		
2005		
2006		
2007	41 42 43	2,511,825,000
2008	39 40	112,813,500
2009	3 4 6 7 9 10 11 12 13 14 15 16 38	8,553,797,000
2010	30	53,232,440
2011	1 17 18 19 20 22 23 33	4,599,065,000
2012	26 27 28 29 31 32	1,566,453,000
2013	35 36 37	954,897,700
2014	2 5 8 34	1,465,517,000
2015		
2016	21 24 25	590,188,800
2017		
2018		
2019		
2020		
2021		
2022		
2023		
합계		20,407,780,000

표 4. 연도별 교체관및 비용(94/9/13 유량)

연도	교체해야할관	교체비용(원)
1994		
1995		
1996		
1997		
1998		
1999		
2000		
2001		
2002		
2003		
2004		
2005		
2006		
2007	41 42 43	2,512,793,000
2008	39 40	112,850,900
2009	3 4 6 7 9 10 11 12 13 14 15 16 38	8,631,316,000
2010	30	58,847,660
2011	1 17 18 19 20 22 23 33	4,640,153,000
2012	26 27 28 29 31 32	1,580,480,000
2013	35 36 37	954,247,400
2014	2 5 8 34	1,468,576,000
2015		
2016	21 24 25	596,410,800
2017		
2018		
2019		
2020		
2021		
2022		
2023		
합계		20,555,670,000

최대공급량과 94년 9월 13일유량의 두개의 유량에서 비용이 다른 것은, 관 교체로 인해 절약되는 양수비용이 유량이 클 수록 더욱 절감되기 때문이다.

수도권 광역 상수도 관로내의 관들은 대부분 20년정도 경과된 것이어서 강관의 수명을 대략 25년으로 보는 국내의 현실에 비추어 보면 모형의 적용으로 결정된 최적교체시기 이전에 관이 교체되어야하나 본 연구에서 수리적 검토를 해본 결과 관의 수명이 초과하더라도 굳이 교체할 필요가 없음을 보여준다.

## 5. 민감도 분석

### 5.1 할인율 변화에 따른 민감도 분석

모의실험에 사용한 할인율은 0.05, 0.08, 0.11, 0.14이고 유량은 1994년 9월 13일의 것을 사용하였으며, 관 파손으로 인한 피해비용은 2억원으로 가정하였다.

이자율이 증가함에 따라 사업비용은 감소하고 최적교체시기는 증가함을 알 수 있다.

### 5.2 피해비용의 변화에 따른 민감도 분석

모의실험에 사용한 피해비용은 1억원, 1억5천만원, 2억원, 2억5천만원이며 이자율은 14.0%로 가정하였다.

피해비용이 증가함에 따라 사업비용은 증가하며 최적교체시기는 앞당겨짐을 알 수 있다.

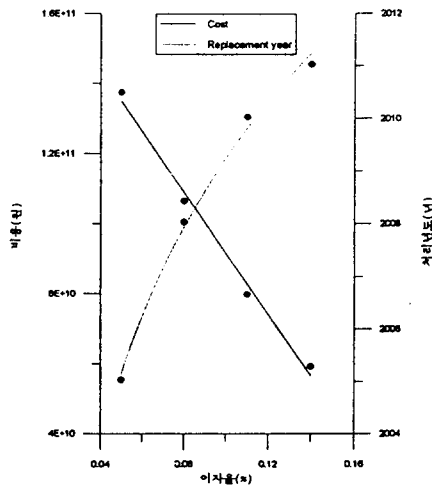


그림 4. 이자율에 따른 변화

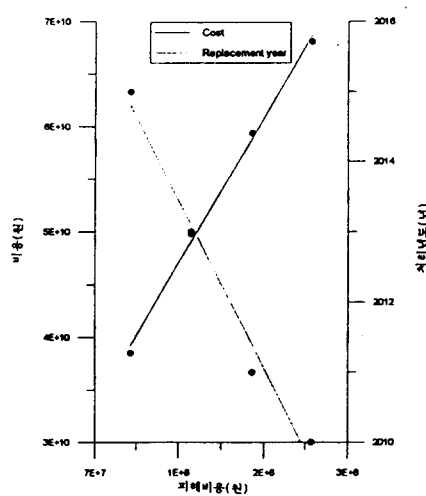


그림 5. 피해비용에 따른 변화

## 6. 참고문헌

1. 김한주, "물분배시스템의 최적 관개량 의사결정 모형에 관한 연구", 고려대학교 석사학위논문, 1994
2. 한국건설기술연구원, "수도관개량 의사결정지원시스템 프로그램 개발", 1995
3. 윤용남, "수리학", 청문각, 1989
4. 건설부, "수도권 광역상수도(5단계) 타당성조사 및 기본계획 보고서", 1993
5. Kim, J.H., Optimal Rehabilitation/Replacement Model for Water Distribution Systems, Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, Austin, Texas, December, 1992.
6. Kim, J.H. and Mays, L.W., "Optimal Rehabilitation/Replacement Model for Water Distribution Systems.", Journal of Water Resources Planning and Management, Vol.120, No.5, pp.674-692, ASCE, September, 1994
7. Shamir, U. and Howard, C.D., "An Analytic Approach to Scheduling Pipe Replacement," Journal of the American Water Works Association, Vol.71, No.5, p.248, May, 1979.
8. U.S. Army Corps of Engineers, Engineering and Design-Evaluation of Existing Water Distribution Systems, Engineer Technical Letter No. 1110-2-278, Washington, D.C.20314, May 16, 1983
9. Walski, T. M., "Economic Analysis of Reliabilitation of Water Mains," Journal of the Water Resources Planning and Management Division, ASCE, Vol. 108, No.WR3, pp.296-308, October, 1982.
10. Walski, T.M., "Replacement Rules for Water Mains," Journal of the American Water Works Association, Vol.79, No.11, pp.33-37, November, 1987.
11. Wood, D. J., Computer Analysis of Flow in Pipe Networks Including Extended Period Simulations(KYPIPE user's manual), Reference Material for a Three-Day Short Course and Correspondence Course, office of Continuing Education and Extension of the College of Engineering at the University of Kentucky, Lexington, Kentucky, September, 1980.