

수도사고 분석 및 경제성 평가를 통한 상수관로 최적 교체시기 결정

Determination of Optimal Time to Replace On-S Water Pipeline by Analyzing Water Main Failures and Economical Efficiency

김종신¹ · 정관수² · 배철호¹ · 이두진¹

Jong-Sin Kim¹ · Kwan-Sue Jung² · Chul-Ho Bae¹ · Doo-jin Lee¹

한국수자원공사 K-water연구원¹, 충남대학교 토목공학과²

(2009년 1월13일 접수 ; 2009년 3월30일 수정 ; 2009년 4월10일 채택)

Abstract

In this study, applied to the industrial water service, it is verified feasibility of break-even analysis method which has not been introduced in Korea. The On-san water pipeline of 7.1km among the Ul-san industrial water service is selected and the optimal replacement time calculated by break-even analysis method is year 2033 to 2044 which will be 53 to 67 years since the pipes were buried. If indirect cost such as the value of lost water and traffic disruption, service interruption, etc. is calculated as 30 and 100% of the direct cost, the financially optimum replacement time is advanced 3 to 9 years. These ways present rational criteria to establish long-term plan for budget and to execute the limited budget efficiently.

Key words : Pipe failure, Break-even analysis, Optimal replacement time

주제어 : 관 파손, 손익분기분석, 최적교체시기

1. 서론

상수관로는 지하에 매설되는 시점부터 관 외면은 토양, 내면은 수질에 의해서 부식의 영향을 받는다. 특히 매설년수가 길어질수록 관 내면에 결절(Tubercle)이 생성되어 통수 단면적이 감소하여 압력손실과 유량감소로 인하여 출수불량이 발생된다. 또한 부식에 의한 녹물 등의 수질문제를 유발한다. 이러한 노후화로 인하여 관표면에 편흔이나 균열이 발생하고 이로 인한 누수는 인한 주변지역의 침수와 누수복구를 위한 단수, 굴착공사에 의한 소음, 통행불편 등으로 이어져 국민들에게 직간접적인 피해를 입히게 된다.

따라서 사고가 발생하기 이전에 이들 상수관로 중 사고발

생 가능성이 높은 노후 상수관로를 적절히 찾아내고, 제한된 예산범위내에서 효과적으로 개량하기 위한 방법론들이 개발되고 있다.

AWWA(American Water Works Association)에 따르면 미국에서 향후 25년간 노후관 개량사업에 약 320 billion 달러가 소요될 것으로 전망하고 있다(Deb 등, 2000). 국내에서도 2006년말 기준으로 상수관로 총연장이 138,478 km에 이르고, 이중 경과년수 21년 이상인 노후관로 길이가 23,586 km(17%)에 달하고 있어 향후 상수관로 개량사업에 막대한 재원이 투자될 전망이다.

따라서 국내에서도 상수관로의 물리적인 상태와 경제성 등을 평가하여 한정된 예산을 효율적으로 투자할 수 있는

상수관로 진단 및 의사결정 기법들의 개발이 절실히 필요한 실정이다. 이러한 기법들 중 대표적인 방법으로는 점수평가 방법(Deterioration point assignment method), 파손이력을 통한 손익분기분석 방법(Break-even analysis), 파손확률 회귀분석 방법(Failure probability/regression method), 그리고 물리적인 상태평가 모델(Mechanistic model)을 이용하는 방법 등이 있으며, 최근에도 활발하게 연구가 진행중이다(Andreou 등, 1987; Deb 등, 2002 a,b; Goulter 등, 1988; Logathan 등, 2002; Peter 등, 2006; Mavin 등, 1996).

국내에서는 상수관로의 노후도를 평가하고, 교체나 개보수에 대한 의사결정을 지원하는 방법으로 점수평가방법이 주로 사용되고 있다(환경부, 2002). 점수평가방법은 적용이 매우 간편한 반면, 관 상태와 노후도 점수 간의 상관성, 그리고 객관적인 판단기준 설정 등이 미흡한 것으로 평가되고 있다. 또한 관 상태에 따른 개량시기 예측을 통한 개량계획의 수립이 어렵고, 개량구간에 대한 명확한 범위 설정 등이 곤란한 것도 문제점으로 평가되고 있다(Deb 등, 2002b).

최근 국내에서도 점수평가방법 외에 물리적 모델에 대한 연구가 진행된 바 있다(배, 2007). 이러한 물리적 모델은 상수관로의 물리적인 상태를 기초로 파손위험성을 예측하여 사고발생을 사전에 방지하고, 또한 잔존수명을 예측하여 장단기 개량계획을 수립하는데 매우 유용한 것으로 알려져 있다. 그러나 상수관로는 보수 또는 보강을 통해서 계속 사용 가능한 시설(Repairable system)이므로, 비록 사고에 의한 파손 가능성이 높다 하더라도 전체 관로구간의 교체를 의미하는 것이 아니기 때문에 단순히 물리적인 모델에 의존하여 개량여부를 결정하기에는 무리가 있는 것이 사실이다.

따라서 외국에서는 관로의 Repairable system 적인 특성을 반영하되, 사고에 따른 보수, 보강시 경제적 측면을 고려한 개량시기 도출을 위한 방법으로 손익분기점분석을 이용한 가치분석방법이 도입되고 있다. 이 방법은 비용분석에 기초한 방법으로서, 보수비용과 교체비용을 모두 고려하여 전체 비용이 최소가 되는 시점을 최적 교체시기로 결정하는 방법이다(Deb 등, 2002b).

국내에서는 이 등(2002)이 국내 9개 중소도시의 사고자료를 수집하여 상수관로의 파손특성 및 영향인자를 분석한 바 있다. 그러나 국내 대부분의 수도사업자가 과거 관로 사고이력에 대한 자료를 체계적으로 관리하지 못했기 때문에 그동안의 사고이력을 반영한 교체 및 개량방안을 도출하는데 어려움이 있다.

그러나 최근 GIS의 도입이 확산되고 있고, 체계적인 개량에 대한 근거자료로서 사고이력 관리에 대한 중요성이 커짐

에 따라 이에 대한 과학적인 관리가 이루어질 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 매설연수가 15년 이상으로 노후화가 진행되고 있고, 그동안 관로사고에 대한 이력자료가 확보되어 있는 광역관로(On-S 계통)를 대상으로 기존의 점수평가법 대신에 파손이력/손익분기점 분석을 도입하여 상수관로의 경제적 교체시기를 예측하는 방법에 대하여 적용가능성을 평가하였다.

2. 연구방법

2.1 대상지역

2.1.1 개요

광역상수관로 On-S계통은 정수장에서 1차 처리한 침전수를 산업단지에 공급하는 공업용수관로이다. 이 구간의 총 관로연장은 7.1km이고, 주요 관종은 강관(72%), 프리스트레스트콘크리트관(23%), 주철관(5%) 등으로 구성되어 있다.

관경은 900~1350 mm이며, 매설년도는 1977~1993년(매설년수로는 14~30년)에 매설되었다. 전체연장 중 98%가 왕복 8차선 도로 아래에 매설되어 있고, 나머지 구간은 정수장 인근의 수도부지인 토사구간에 매설되어 있다.

관로시설의 주요현황은 Table 1과 같다.

2.1.2 사고이력 자료 수집

광역상수관로 On-S계통 중 정수장-관말(구간)에 대한 사고이력은 한국수자원공사에서 관리하고 있는 사고이력 자료를 활용하였다(한국수자원공사, 2008b; GIS D/B)

Table 1. Status of On-S water mains

Division		Length (m)	Ratio (%)
Pipe materials	SP (Steel pipe)	5,090	72
	PC (Prestressed Concrete Pipe)	1,638	23
	DIP (Ductile Iron Pipe)	380	5
Pipe diameter (mm)	1350	1,854	26
	1200	1,998	28
	1100	894	13
	1000	1,576	22
	900	786	11
Installation year	1993년	194	3
	1978년	3,256	46
	1977년	3,658	51

2.2 상수관의 경제적 가치 평가

2.2.1 손익분기점 분석 개념

파손이력/손익분기점 분석은 상수관의 경제적 가치를 평가하여 개량을 결정하는 대표적인 방법이다. 본 방법은 비용 분석에 기초한 방법으로, Fig. 1과 같이 보수비용과 교체비용 모두를 동시에 고려한 방법으로 관을 교체하는 비용은 현재 가치로 평가할 때 시간에 따라 감소하고, 누적보수비용은 시간에 따라 증가하는 경향을 갖는다. 따라서 손익분기점 분석에서는 관을 경제적으로 교체하는 최적 교체시기로 전체 비용이 최소가 되는 시점을 교체시기로 결정하는 방법이다.

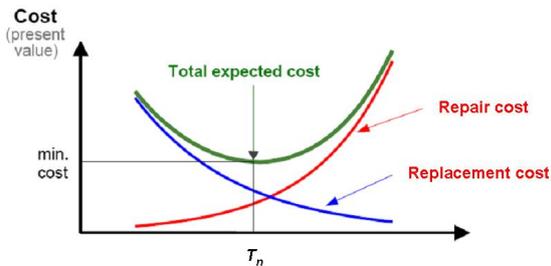


Fig. 1. An concept of economic break-even analysis

Loganathan 등(2002)은 이러한 전체 비용이 최소가 되는 시점을 교체시기로 Eq. (1)로 나타내었다. 본 연구에서도 Loganathan 등(2002)이 제안한 수식을 이용하여 최적 교체시기를 결정하였다.

$$T_n = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(1+R)^{t_i}} + \frac{F_n}{(1+R)^{t_n}} \quad (1)$$

Where, R = discount rate, %

t_i = time of *i*th break measured from the installation year

C_i = repair cost of *i*th break

F_n = replacement cost at time t_n

T_n = total cost at time "0"(present worth)

2.2.2 보수비용과 교체비용 산정 방법

본 연구에서는 일반적인 손익분기 절차에서 사고에 따른 보수비용 등 이력자료가 부재한 경우를 포함하여 손익분기점 분석이 가능하도록 Fig.2와 같이 단계별 절차를 수립하였다. 손익분기점 분석시 사고유형에 따른 보수비용은 현재까지의 실제 보수비용을 누적해야 하는데, 대부분의 사고이력

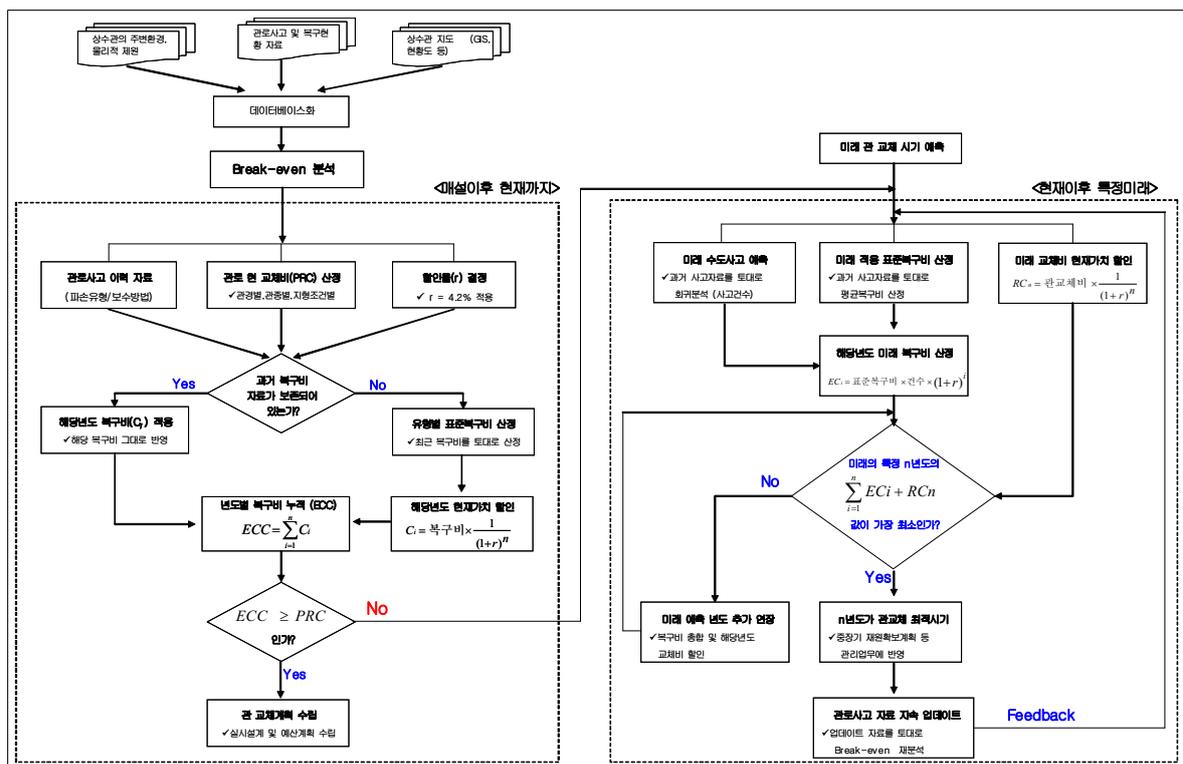


Fig. 2. Break-even analysis procedures in this study

자료에는 파손위치와 조치사항만이 간략히 기록되어 있을 뿐 정확한 보수공법과 보수비용 등의 자료는 남아있지 않아 보수비용의 산정에 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 사고유형에 따른 표준보수비용을 최근 발생한 사고의 보수비용 자료를 근거로 평균값을 구하여 이용하였다.

교체비용은 엔지니어링 표준사업대가(2008)에서 제시한 개략공사비 즉, 관경별, 지형조건별 표준공사비를 이용하여 산정하였다.

3. 연구결과

3.1 사고이력 현황

3.1.1 년도별 사고발생 현황

대상지역의 관로는 1970년대 말에 대부분이 매설되었으며, 1993년에 일부 관로(194m)가 교체되었다. 사고발생은 매설 후 5년만인 1981년을 시점으로 2007년 말까지 총 38건의 사고가 기록되어 있다. 이중 밸브류 및 수용가 분기부위의 사고(총 9건)를 제외하고 본관(Water main)에서 발생한 사고는 29건으로, 연평균 1.23건이 발생한 것으로

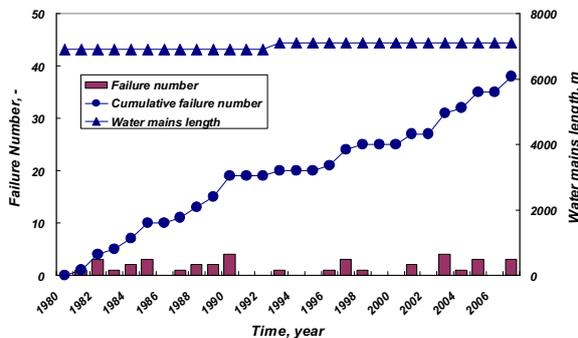


Fig. 3. Failure number and installation length in On-S water mains

나타났으며, km 당 발생한 사고건수는 5.3건으로 나타났다.

3.1.2 사고발생 유형

Fig. 4~5에는 대상관로에서 발생한 사고에 대하여 관종별 비율과 사고유형을 나타내었다. Fig. 4에서 관종별로는 SP(Steel pipe)와 PCP(Prestressed concrete pipe)가 각각 45%로 사고발생에서 차지하는 비율이 높게 나타났다.

Fig. 5에서 이들 사고에 대한 원인을 분석하여 보면, 연결부 누수사고가 22건으로 전체사고의 76%를 차지하였는데, 이러한 사고의 주요원인으로 대상관로 구간이 대부분공단 지역에 매설되어 있어 중차량의 잦은 통행과 해안매립지의 특성인 연약지반의 침하에 의한 것으로 판단된다. 또한 통상 관매설 공사시 관 주변의 다짐이 불량하거나 접합부의 시공 불량이 이러한 누수사고에 영향을 미친 것으로 추정된다.

2004년 이후에는 강관에서 전식 및 토양오염에 의한 국부부식으로 인한 편홀사고가 증가하고 있는 것으로 나타났으며, 전체 사고중 17%를 차지하는 것으로 나타났다.

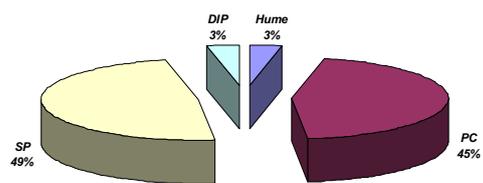


Fig. 4. Failure ratio of pipe materials in On-S water mains

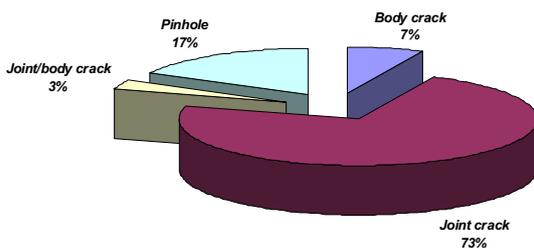


Fig. 5. Failure type of On-S water mains

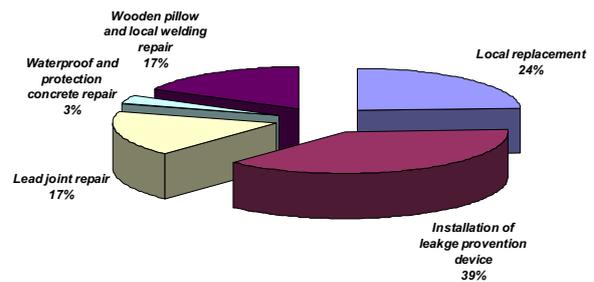


Fig. 6. Repair method for On-S water mains

3.1.3 사고유형에 따른 보수방법

Fig. 6에는 사고유형에 따른 보수방법적용 비율을 나타내었다. 보수방법으로 가장 많이 적용된 것은 누수 방지대 설치가 39%로 높게 나타났으며, 그 다음으로는 부분교체가 24%, 납조인트 보수와 목침처리후 덧데기 용접이 각각 17%, 그리고 방수 및 보호콘크리트 시공이 3%으로 나타났다.

이들 보수방법을 사고유형과 관련하여 분석한 결과, 대부분 몸통균열에 대해서는 강관으로 부분교체, 관연결부 이격 등에 대해서는 강관으로 교체, 납조인트 보수, 누수 방지대 설치, 방수 및 보호콘크리트 시공 등 다양한 보수방법이 이용되었고, 핀홀에 대해서는 주로 목침처리후 덧데기 용접을 하여 보수한 것으로 나타났다.

3.2 보수비용과 교체비용 산정결과

3.2.1 보수비용

본 연구에서는 대상구간에 대하여 사고유형에 따라 당시 소요되었던 보수비용을 기준으로 손익분석을 수행하려 하였으나, 실제 보수비용에 대한 자료가 부재하여 각 사고유형에 대하여 관종과 관경별로 최근 보수자료를 기초로 보수비용을 별도로 산정하였다(Table 2 참조).

Table 2에서 사고에 따른 보수비용은 사고유형, 관종, 관경에 따라서 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. SP의

Table 2. Repair costs for water mains failure types

Repair method	Pipe materials	Pipe diameter(mm)	Repair cost (million won)
Local replacement	SP	1,000	16
Lead joint repair	"	1,000	11
"	"	1,200	13
"	"	1,100	12
"	PC	1,350	15
Installation of leakage prevention device	SP	1,350	17
"	"	1,100	12
"	"	1,200	15
"	SP	1,000	10
"	PC	1,350	18
"	"	1,000	11
"	"	1,200	16
Wooden pillow and local welding repair	SP	900	9
"	SP	1,000	10

부분교체는 1m를 기준으로 16백만원, 납조인트 보수는 SP는 11~13백만원, PC는 15백만원이 소요되는 것으로 나타났다.

누수방지대 설치하는 SP가 관경에 따라 10~17백만원, PC는 11~18백만원으로 동일 보수방법이라도 SP보다는 PC의 보수비용이 더 큰 것으로 나타났다.

목침처리후 덧데기 용접은 SP에 대해서 9~10백만원 정도가 소요되는 것으로 나타났다.

3.2.2 관로교체 비용

대상관로에 대한 교체비용은 관경별, 지형조건별 표준 공사비를 통해서 산정하였고, 그 결과를 Table 3에 나타내었다.

이때 대상관로에 대한 관로 교체시 관경 1,200mm 이하는 주철관을 부설하는 것으로 하였고, 1,350mm 이상은 PE 코팅강관을 설치하는 것으로 하였다. Table 3과 같이 대상관로 7.1km를 전면 교체하는데 총 98억원의 공사비가 소요되는 것으로 나타났다.

3.3 경제적 교체시기 예측 결과

본 연구에서는 상수관로에 대한 경제적 가치를 평가하고, 이를 토대로 경제적인 교체시기를 예측하기 위하여 손익분기점 분석방법을 도입하였다. 이때 경제적 가치에 대한 평가는 현재가치법(Present worth method)을 적용하였다.

경제적인 교체시기를 도출하기 위해서는 현재까지의 사고 발생을 근거로 미래에 발생할 사고에 대한 예측이 수반되어야 한다.

본 연구에서는 미래에 대한 사고발생을 기존 사고이력 자료를 토대로 사고발생 건수를 누적하여 회귀분석을 수행하였고, 매년 누적되는 사고발생 건수를 예측하여, 각 해당년도에 발생하는 사고건수로 하였다. 이때 해당 사고의 유형에 대한 예측이 불가능하기 때문에 미래에 대한 보수비용은 현재까지의 사고유형별 보수비용의 평균 값을 적용하였다.

Table 3. Replacement costs for On-S water mains

Pipe diameter (mm)	Pipe materials	Pipe length(m)			Replacement cost (million won)
		Sum	Soil	Road	
Sum		7,108	120	6,988	9,754
1,350	SP	1,854	120	1,734	3,430
1,200	DIP	1,998	-	1,998	2,756
1,100	DIP	894	-	894	1,117
1,000	"	1,576	-	1,576	1,741
900	"	786	-	786	710

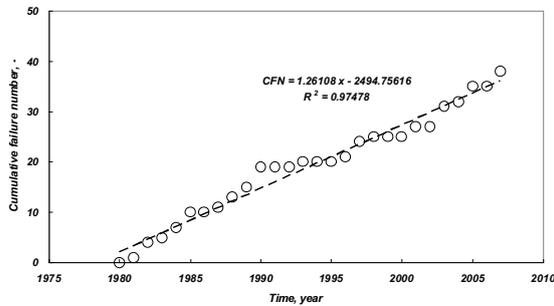


Fig. 7. Cumulative failure number

또한 현재가치법 적용시 할인율은 실질할인율 4.2%(한국 수자원공사, 2006)를 적용하였고, 관로 교체비용도 현재가치법에 의한 실질할인율을 적용하여 연도별 교체공사비를 산정하였다.

경제적 교체시기는 교체비용과 보수비용 등 전체 비용이 최소가 되는 시점을 교체시기로 하였다. 또한 교체시기에 대한 결정에서 보수비용중 직접 공사비만 고려한 경우와 직접 공사비에 간접비용을 고려한 경우로 구분하여 예측하였다.

3.3.1 미래 사고발생에 대한 예측 결과

Fig. 7에는 기존 사고이력 자료를 토대로 하여 누적 사고 발생 건수에 대한 회귀분석을 실시한 결과를 나타내었다. 회귀분석 결과, 누적 사고발생 건수가 선형적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 결정계수(R^2)는 0.97로 높게 나타났다. 따라서 관로 설치 후 누적 사고발생에 대한 예측력은 높은 것으로 판단된다. 향후에도 평균적으로 1.23건이 매년 발생하는 것으로 가정하였다. 이외는 별도로 사고건수가 경제적 교체시기에 미치는 영향을 평가하기 위하여 다음과 같은 사고발생비용을 증가시키는 시나리오를 설정하고 경제적 교체시기를 비교 검토하였다.

Case 1 : 과거 연간 평균 사고건수인 1.23건이 일정하게 발생

Case 2 : 매년 2건씩 일정하게 발생

Case 3 : 매년 3건씩 일정하게 발생

Case 4 : 10년 단위로 0.5건씩 증가

Case 5 : 10년 단위로 1건씩 증가

3.3.2 경제적 교체시기 예측 결과

Table 2와 3을 이용하여 현시점의 교체비용과 누적보수비용을 산정한 결과, 대상관로 7.1km에 대하여 2008년 기준으로 누적보수비용은 약 2.5억원인 반면, 교체비용은 약 98억원이 소요되는 것으로 나타났다.

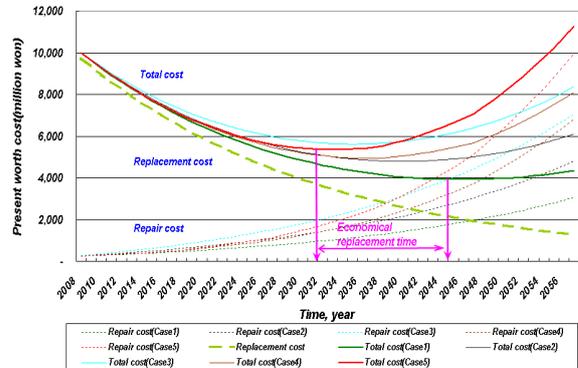


Fig. 8. Optimal time to replace in case of future pipe failures frequency

그러나 관노후화가 진행될수록 사고발생비용이 커질 것으로 예상하여 사고발생 건수 증가 Case별 누적 보수비용과 교체비용에 대한 변화를 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8에서 각 Case별 누적보수비용에 따른 관 교체시기를 보면, 매년 평균적으로 1.23건씩 사고가 발생할 경우, 2046년 정도에 관 교체시기가 도래하는 것으로 나타났으며, 매년 2건씩 발생할 경우에는 2040년 정도가 가장 적절한 교체시기인 것으로 나타났다. Case 3~5일때에는 2033~2037년 정도로 나타났다. 그러므로 전반적으로 경제적인 관 교체시기는 2033년에서 2046년 사이에 도달하는 것으로 보인다. 즉 매설후 56~69년이 경과한 후에 교체하는 것이 경제적으로 유리할 것으로 판단되었다.

또한 Table 4에서와 마찬가지로 수도사고로 인한 사회간접비용을 직접 복구비의 30~100% 범위로 반영할 경우, 상수관로 교체시기가 3~9년 정도 앞당겨지는 것으로 나타났다.

Table 4. Optimal time to replace in case of future pipe failures frequency

Case	Not including indirect cost		Including indirect cost 30%		Including indirect cost 100%	
	Replacement time, year	Age of pipe, years	Replacement time, year	Age of pipe, years	Replacement time, year	Age of pipe, years
1	2046	69	2043	66	2038	61
2	2040	63	2037	60	2032	55
3	2035	58	2032	55	2027	50
4	2037	60	2034	57	2029	52
5	2033	56	2030	53	2027	50

4. 결 론

본 연구에서는 국내 광역상수관로 On-S계통(7.1km)을 대상으로 파손이력/손익분기점 분석을 이용하여 상수관의 경제적인 교체시기를 예측함으로써 본 방법의 적용가능성을 검토하였다. 그 결과는 다음과 같다.

첫째 On-S 계통의 사고는 현재까지 총 38건이며, 이중 관로와 관련된 사고는 총 29건이었으며, 주요 사고원인은 몸통균열, 연결부 이격, 핀홀 등이며, 이들을 보수하는데 소요된 비용은 총 2.5억원, 교체비용은 98억이 소요되는 것으로 나타났다.

둘째 On-S 계통에 대하여 누적 사고이력을 통하여 향후 발생할 사고발생을 예측하여 손익분기점 분석법을 적용한 결과, 이 구간의 적기 관 교체 시기는 2033년에서 2046년 사이이며(배설되어 56~69년이 경과) 사회간접비용을 직접공사비의 30%, 100%를 각각 반영하는 경우, 관 교체시기는 3~9년 정도 앞당겨지는 것으로 나타났다.

이러한 손익분기점분석 방법은 중장기 재원확보 계획과 장 단기 예산 및 인력 운용계획에 유익하게 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- 배철호(2007) **상수도 금속관의 파손위험성 평가에 의한 잔존 수명 예측모델 개발**, 박사학위 논문 숭실대학교.
- 이현동, 정원식, 안윤주 (2002), "국내 중소도시 상수도관의 파손특성 및 영향인자 분석에 관한 연구", **대한상하수도학회지**, 16권 4호, pp. 383~388
- 한국수자원공사(1995), **노후관 개량을 위한 의사결정시스템 개발**
- 한국수자원공사(2004), **울산공업용수도 정밀안전진단 보고서**
- 한국수자원공사(2006), **생애주기비용(LCC)을 고려한 수도시설물 재료 및 공법선정 방안 연구**
- 한국수자원공사(2008), **설계적산지침**
- 환경부(2002), **노후수도관 평가 및 관리 매뉴얼**
- 환경부(2007), **2006 상수도 통계(수정본)**
- Andreou S.A., Marks D.H. and Clark R.M., (1987), A New Methodology for Modelling Break Failure Patterns in Deteriorating Water Distribution Systems, **Advances in Water Resources**, 10, pp.11-20.
- Deb A.K., Hasit Y.T., Schoser H.M., Loganathan G.V., Khambhammettu P(2002a), Decision Support System for Distribution System Piping Renewal, **AWWARF**.
- Deb A.K., Grablutz F.M., Hasit Y.T., Snyder J.K., Loganathan G.V.(2002b), Prioritizing Water Main Replacement and Rehabilitation, **AWWARF**.
- Goulter I.C., and Kazemi A. (1988). "Analysis of Water Distribution Pipe Failure Types in Winnipeg", **Canada Jour. Transportation Engineering**, 15, pp. 91-97.
- Loganathan G.V., Park S., and Sherali H.D.(2002). Threshold Break Rate for Pipeline Replacement in Water Distribution System, **Journal of Water Resources Planning and Management**/ July/August
- Peter D. Rogers and Neil S. Grigg (2006), Failure assessment model to prioritize pipe replacement in water utility asset management, ASCE, **Water Distribution Systems Analysis Symposium**.
- Mavin K.(1996). Predicting the Failure Performance of Individual Water Mains, Research Report No.114. **Urban Water Research Association of Australia**.