



생애주기 에너지 분석을 이용한 상수관망의 생애주기 결정

Life cycle determination of water distribution system using life cycle energy analysis

이승엽¹·유도근¹·김중훈^{2,*}

Seung-Yub Lee¹·Do-Guen Yoo¹·Joong-Hoon Kim^{2*}

¹고려대학교 방재과학기술연구소, ²고려대학교 건축사회환경공학부

¹Research Center for Disaster Prevention Science and Technology, Korea University

²School of Civil, Environmental & Architecture Engineering, College of Engineering, Korea University

ABSTRACT

When designing Water Distribution System (WDS), determination of life cycle for WDS needs to be preceded. And designer should conduct comprehensive design including maintenance and management strategies based on the determined life cycle. However, there are only a few studies carried out until now, and criteria to determine life cycle of WDS are insufficient. Therefore, methodology to determine life cycle of WDS is introduced in this study by using Life Cycle Energy Analysis (LCEA). LCEA adapts energy as an environmental impact criterion and calculates all required energy through the whole life cycle. The model is build up based on the LCEA methodology and model itself can simulate the aging and breakage of pipes through the target life cycle. In addition the hydraulic analysis program EPANET2.0 is linked to developed model to analyze hydraulic factors. Developed model is applied to two WDSs which are A WDS and B WDS. Model runs for 1yr to maximum 100yr target life cycle for both WDSs to check the energy tendency as well as to determine optimal life cycle. Results show that 40yr and 54yr as optimal life cycle for each WDS, and tendency shows the effective energy is keep changing according to the target life cycle. Introduced methodology is expected to use as an alternative option for determining life cycle of WDS.

Key words: LCEA, Water Distribution System, EPANET2.0, Life Cycle

주제어: 생애주기 에너지 분석, 상수관망, EPANET2.0, 생애주기

1. 서 론

상수관망은 수요자에게 물을 공급해주는 사회 기반 시설 중 하나로 수많은 관의 조합으로 구성된다. 이러한 상수관망은 효율적인 물 공급을 위해 각 수요 절점에서 수리학적 조건을 만족해야 하고, 동시에 높은 수질을 유지해야 한다. 상수관망의 특성상 매설 직후

각 수요 절점에서 수리학적 조건이 만족해도, 시간이 경과에 따른 관의 노후 및 파손으로 인해 불필요한 에너지의 소비가 증가뿐만 아니라 수질 저하, 통수능 및 요구압력 저감 등 각종 수리학적 조건이 만족하지 않게 된다. 이런 문제들은 상수관망 본연의 기능을 상실하게 할 가능성이 있으므로 설계 시 상수관망의 생애주기 동안의 유지·관리에 대한 계획을 미리 수립하여 이러한 피해를 미연에 방지해야 한다. 여기에서 말하는 생애주기란 어떤 물품 혹은 구조물의 제조부터

Received 01 October 2014; Revised 10 February 2015; Accepted 12 February 2015

*Corresponding author: Joong-Hoon Kim(E-mail: jaykim@korea.ac.kr)

pp. 1-9
pp. 11-21
pp. 23-31
pp. 33-38
pp. 39-46
pp. 47-55
pp. 57-63
pp. 65-75
pp. 77-88
pp. 89-96
pp. 97-106
pp. 107-122
pp. 123-131
pp. 133-138

폐기까지의 전 과정을 의미한다.

상수관망의 유지·관리 계획 수립은 전 생애주기 동안에 각 관들의 상태 변화를 예측해야 하고, 그 중 하나가 관의 파손이다. 관의 파손은 관 내·외부의 요인으로 인해 발생하고, 파손된 부분으로는 누수가 발생하거나 외부의 오염물이 유입되어 수질이 저감될 수 있으며 나아가서는 수리학적 요구 조건이 만족하지 않게 되기에 반드시 고려해야 한다. 관의 파손은 Shamir and Howard (1979)가 관의 파손이 지수함수의 형태로 발생함을 증명하고, 파손율을 식으로 제안한 바 있다. 해당 식은 후에 Walski and Pelliccia (1982), Kleiner et al. (1998), Kleiner and Ranjani (1999)의 지속적인 연구를 통해서 타당성이 입증되었다.

또 다른 하나는 관의 노후로, 매설 후 시간이 지남에 따라 관내에 이물질 혹은 연·경질의 스케일, 녹 등으로 인해 지속적으로 진행된다. 이러한 관의 노후 현상은 관내 통수능에 영향을 미쳐 원활한 물의 공급이 되지 않을 뿐만 아니라 환경의 축소에 따른 유속의 증가로 인한 관의 파괴를 야기할 수 있는 만큼 반드시 고려해야 하는 요소이다. 이에 Sharp and Walski (1988)가 Hazen-Williams 공식과 Darcy-Weisbach 공식, Swamee와 Jain의 공식 간의 관계를 통해 노후도를 간단한 식으로 유도한 바 있으며, 일본 Mononobe (1960)는 기존의 관망 자료를 회귀분석하여 노후도 산정 공식을 제안한 바 있다.

상수관망의 계획 및 유지·관리에 관한 연구는 활발히 이루어져 왔다. Shamir and Howard (1979)는 관 교체주기를 파손 정도에 따라 계획하는 방법을 제안한 바 있으며, Male et al. (1990)는 최소 비용으로 갱생 및 교체주기 산정 방법을 제시하여 이를 뉴욕 시의 관망에 적용해 타당성을 검증했다. Colombo and Karney (2002)는 상수관망에서의 누수와 에너지 소비 간의 관계를 고려하여 상수관망의 유지 및 관리에 대해 연구한 바 있다. 국내에서도 김중훈 등 (1996)은 관망해석 프로그램인 KYPIPE를 사용하여 기존 상수도의 노후에 따른 개량 및 관리 기법을 제시하였다. 백천우 등 (2006)은 EPANET2.0을 연계하여 화음탐색법 (Harmony Search)을 이용한 상수관망의 최적개량 의사결정 시스템을 개발하였다. 박수완 등 (2007)은 관로의 파손 자료를 바탕으로 관로의 최적 교체시기를 산정하는 모형을 제안하였다.

최근에는 상수관망의 계획 및 유지·관리에 환경적,

경제적인 요소도 고려되고 있으며, 많은 상수관망과 다른 많은 사회기반시설 분야의 연구에서 이들 시설을 설계, 유지·관리하는 방법에 있어 생애주기비용 (LCC)과 생애주기분석(LCA)을 적용하고 있다. Kleiner et al. (1998)는 생애주기비용을 이용하여 장기 계획 물 공급 체계의 갱생 시기 결정 기법을 제안하였다. Lundie et al.(2004)은 지속가능한 상수관망의 설계에서 환경 영향이 최소가 되는 생애주기분석 적용 방안을 제시하였다. Filion et al. (2004)는 생애주기 에너지 분석 (LCEA, Life Cycle Energy Analysis) 기법을 상수관망에 적용 가능하도록 제안하고 이를 뉴욕 터널 관망에 적용 민감도 분석을 실시하였으며, Stokes and Horvath (2006)도 상수 관망의 생애주기 에너지 산정 방법을 제시하였다.

본 연구에서는 Filion et al. (2004)에서 제안한 LCEA 방법론을 다양한 관망으로의 적용을 위해 방법론을 수정하고, 매설 전 상수관망의 최적 생애주기를 결정하기 위한 모형을 구축하였다. 개발한 모형은 두 후보 상수관망에 적용하여 최적 생애주기를 각각 결정하였다. 본 연구에서 제안한 방법론은 향후 상수관망의 자산관리 시스템이 일반화 되고 많은 자료들이 수집될 경우, 상수관로 시스템의 전체 생애주기를 전반적으로 고려한 능동적 관로 시스템 운영과 개량/교체 관리를 하는데 효과적인 기반기술로 활용될 수 있을 것이다. 또한 국내의 경우 생애주기를 결정하는 것에 대한 구체적인 기준이 미흡하기에, 설계 시 상수관망의 생애주기를 결정하는 한 대안이 될 수 있을 것으로 생각된다.

2. 방법론

2.1. 모형의 소개

본 연구에서 사용한 모형은 Visual Basic을 프로그램 언어로 구축되었으며, 수리해석 프로그램인 EPANET2.0와의 연동을 통하여 생애주기 동안의 다양한 수리 해석이 가능하도록 하였다. 모형은 Fig. 1에서 나타나는 알고리즘을 따라 진행된다. 최초 모형 실행 시 생애주기 에너지 분석을 실시할 상수관망의 기본 정보를 읽어오고, 각 관 별로 환경에 따른 단위 에너지를 산정한다. 단위 에너지의 산정 후 제조 단계, 유지 및 관리 단계, 해체 단계 총 3단계에 걸쳐 생애주기 에너지 분석을 실시하고, 사용자가 설정한 최대 목표 생애주기

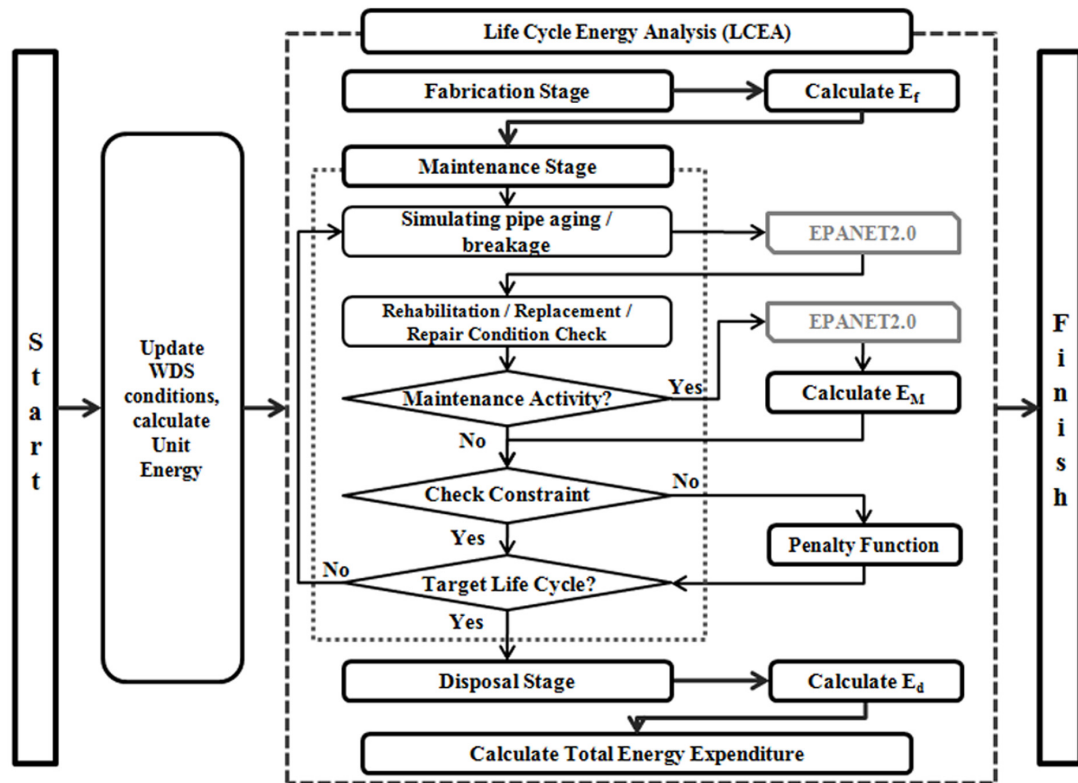


Fig. 1. Algorithm of developed Model.

동안의 모든 목표 생애주기 별 연간 에너지 소비량을 산정한다. 이렇게 산정된 연간 에너지 소비량 중에서 가장 적은 값을 나타내는 목표 생애주기를 최적 생애주기로 결정한다. 이를 식으로 나타내면 아래 식 (1)과 같다.

$$\min E_{tot}$$

$$E_{tot} = [E_f + (E_m - E_{rc}) + E_d + PF] / LC \quad (1)$$

여기에서, E_{tot} 는 총 연간 에너지 소비량(GJ/yr), E_f 는 제조 에너지 소비량(GJ), E_m 는 개량 에너지 소비량(GJ), E_{rc} 는 회복 에너지 소비량(GJ), E_d 는 해체 에너지 소비량(GJ), PF 는 벌점함수, 그리고 LC 는 목표 생애주기(yr)이다. 이때, 상수관망 기능 유지를 위한 최소 수압 조건을 고려하여 주었고, 목표 생애주기 동안 이 최소 수압 조건을 만족하지 않으면 임의의 큰 값을 총 에너지 소비량에 추가하여 해당 목표 생애주기가 선택되지 않도록 유도한다. 이 임의의 값은 식 (1)에서 벌점함수로 수압 조건이 만족하지 않을 때마다 고려해주고 수압조건이 모두 만족하면 0의 값

을 입력한다. 본 모형은 최적 생애주기 결정을 위한 가장 기본적인 모형으로 많은 가정을 포함하고 있지만, 향후 새로운 관망 정보 추가 및 수정된 방법론의 대치가 용이하도록 구성되었다.

2.2. 단위 에너지

단위 에너지는 모든 에너지의 계산을 위한 가장 기본이 되는 값으로, Filion et al. (2004)의 연구에서는 단위 에너지를 Table.1과 같이 제시하였다. Table.1은 EIO-LCA (Environmental Input-Output Life Cycle Assessment) 모델을 기반으로 결정되었다 (Filion et al, 2004).

Table 1. Pipe Diameters and Values of Unit Energy for Pipe Fabrication and Pipe Disposal(Filion et al. (2004))

Diameter (m)	Unit Energy for Fabrication (GJ/m)	Unit Energy for Disposal (GJ/m)
1.52	9.8	0.7
1.83	14.0	1.0
3.35	47.2	3.5
4.57	87.8	6.4
5.18	112.8	8.3



Filion et al. (2004)은 단 5개의 관경에 대해서만 단위 에너지를 제시하였기에 다양한 관경에 대한 적용이 어렵다. 이에, Lee (2014)는 다양한 관경으로의 적용을 위해 관경과 각 단위 에너지의 관계를 유도했으며, 이는 식 (2)~(3)와 같다.

$$e_f = 4.206 \times D^{1.9959} \quad (2)$$

$$e_d = 0.2974 \times D^{2.0248} \quad (3)$$

여기에서 e_f 는 제조 단위 에너지(GJ/m), e_d 는 해체 단위 에너지(GJ/m)이며 D 는 관경(m)이다. 식 (2)~(3)를 통해 다양한 관경의 단위 에너지를 산정할 수 있다.

2.3. 제조 단계

제조단계는 상수관망을 구성하는 관의 제조가 이루어지는 단계로, 원자재를 추출하는 과정에서부터 재료의 가공 및 생산, 관의 제조 및 생성에 해당하는 일련의 모든 과정을 포함한다. 해당 과정에서 소비되는 에너지를 제조 에너지로 정의하고 Filion et al. (2004)는 제조 에너지 소비량을 아래 식 (4)와 같이 제시하였다. 단, 해당 식에서 관의 운송 및 설치에 필요한 에너지는 제외한다.

$$E_f = \sum_i^p L_i e_f \quad (4)$$

여기에서 E_f 는 제조 에너지 소비량(GJ), p 는 총 관의 수, L_i 는 i 번 관의 길이(m), e_f 는 관의 제조 단위 에너지

계수(GJ/m)이다.

2.4. 유지 및 관리 단계

유지 및 관리 단계는 상수관망의 설치부터 폐기까지 상수관망을 실제 운영하는 단계로, 관의 노후 및 파손 모의를 통한 갱생, 교체, 보수와 같은 개량이 실시되는 단계이다. 관이 개량되면 에너지가 소비되고, 이때 개량에 소비되는 에너지를 개량 에너지 소비량으로 정의한다. 또한 개량 시 부수적으로 발생하는 개선이익을 회복 에너지로 정의하고, 회복 에너지와 개량 에너지의 차를 통해 유지·관리 에너지 소비량을 식 (5)와 같이 계산할 수 있다.

$$E_m - E_{rc} = (E_{rep} + E_{rh} + E_{rp}) - E_{rc} \quad (5)$$

여기에서, E_m 는 개량 에너지 소비량(GJ), E_{rep} 는 교체 에너지 소비량(GJ), E_{rh} 는 갱생 에너지 소비량(GJ), E_{rp} 는 보수 에너지 소비량(GJ), E_{rc} 는 회복 에너지 소비량(GJ)이다. 각각의 에너지에 대한 정의는 아래 Table 2와 같다.

2.4.1 관의 노후

앞서 언급한대로, 상수관망의 각 관은 매설 직후 시간이 지남에 따라 관내에 이물질 혹은 연·경질의 스케일, 녹 등으로 인해 지속적으로 노후가 진행된다. 관의 노후는 관내 통수능에 영향을 미치고 관의 파괴를 야기할 수 있을 만큼 생애주기 결정 시 모의를 통해 관의 노후를 고려해 주어야 한다. 본 연구에서는 관의 노후도를 정량화하기 위해 Hazen-Williams C값

Table 2. Definition of Maintenance energy

Type of Energy	Notation	Definition	Formulation
Replacement Energy	E_{rep}	Energy require to replace existing pipe to new pipe. Replacement of pipe will carry out when usability as well as structural intensity of existing pipe is diminished.	$E_{rep} = \sum_i^p L_i (n_{rep} e_f)$
Rehabilitation Energy	E_{rh}	Energy require to rehabilitate existing pipe. Rehabilitation of existing pipe will carry out when structural intensity is still favorable, but usability of pipe is reduced.	$E_{rh} = \sum_i^p L_i (n_{rh} \times 0.65 e_f)$
Repair Energy	E_{rp}	Energy require to repair existing pipe. Repair of pipe is needed when pipe has a crack in small area.	$E_{rp} = \sum_i^p e_{bi} L_i \cdot N(t)$
Recycle Energy	E_{rc}	Energy saving amount after any maintenance activity. Recycle energy is calculated by considering restored rate of hydraulic condition.	$E_{rc} = \frac{1}{p_c} \sum_{i=1}^m (E_{p,i}^r - E_{p,i}^s)$



을 적용하였다. C값의 변화에 관한 연구는 시간 외에도 토양의 상태 및 그 외 기타 환경적인 영향을 고려하는 방법이 많은 연구자들에 의해 제안되었으나, 본 연구에서는 매설 전 상수관망임을 감안하여, 노후도를 Mononobe (1960)가 시간에 대한 함수로 제안한 식을 적용하였고, 이는 식 (6)과 같다.

$$C = 130 \left(1 - \frac{a\sqrt{y}}{D} \right)^b \quad (6)$$

여기에서 C 는 Hazen-Williams C값, D 는 관경(mm), y 는 경과년도(year), a 와 b 는 관경에 따른 계수로 백천우 (2002)의 연구에서는 Mononobe (1960)가 제안한 식 (6)의 a 값과 b 값을 각각 식 (7)와 식 (8)로 제안하였다.

$$a = 0.0961659D + 1.15507 \quad (7)$$

$$b = 0.723076D^{-0.0660117} \quad (8)$$

위의 식 (6)을 통해 산정된 관의 노후도는 EPANET2.0에 입력하여 상수관망의 노후를 모의하였다. 이 때, 모든 관의 초기 C값은 130으로 가정하였다.

이러한 상수관망의 노후는 상수관망의 기능 유지에 지장을 주기에, 적정수량 및 수압 확보, 수질측면의 안정성, 누수 등의 사고예방 목적으로 상수도 관로의 개량을 실시한다. 관의 노후에 의한 개량은 크게 두 가지로 나눌 수 있으며, 관을 교체하지 않고 기존 매설 관의 구조상 기능을 활용하여 보강 기법에 의해 악화된 관로의 기능개선을 도모하는 갱생과, 매설 관의 교체를 포함하는 교체가 그 두 가지이다(이현동, 2007).

관이 갱생 혹은 교체될 때 에너지가 소비되기에 적절한 시기에 이를 시행하여 상수관망의 기능은 최대한 유지하되 에너지 소비는 최소가 되도록 계획을 수립해야 한다. 갱생과 교체 시기의 결정은 그 하나만으로도 큰 연구 주제일 정도로 중요한 부분이다. 지속적인 연구를 통해 좀 더 정확한 방법으로 수정이 필요하지만, 상수관망으로의 생애주기 분석을 위한 가장 기본적인 모형을 구축한 본 연구에서는 이를 최대한 간단한 방법으로 적용하기 위해 갱생 및 교체 시기를 가정하여 사용하였다.

국내 수도사업소는 배수관의 수명을 대략 25~35년 정도로 보고 있다. 관경에 따라 상이하지만 식 (6)에

의하면, 대략 Hazen-Williams C 값이 80~90정도 범위일 때이다. 이러한 근거로, 본 연구에서는 간단히 갱생과 교체 시기를 결정하기 위해서 C 값이 90일 때, 갱생을 실시하는 것으로 가정하였다. 또한 갱생 시 기존 관의 구조적 불이익을 감안하여 갱생 후 C 값은 110으로 회복하는 것으로 가정하여 이를 고려해 주었다. 교체의 경우에는 두 번의 갱생이 이루어지고 C 값이 80으로 감소하면 시행하는 것으로 가정하였고 교체 후에는 신관의 C 값인 130으로 회복된다.

a. 교체 에너지 소비량

관의 교체는 기존의 관이 수요자에게 안정적으로 물을 공급하지 못하거나 관의 구조적 강도가 불충분하여 파손이 우려 될 경우에 실시한다. 교체 공법은 굴착 방식과 비굴착 방식으로 다양하지만, 제조 과정과 마찬가지로 관의 제조가 선행된다. 제조 에너지의 산정에서 관의 운송 및 설치에 필요한 에너지를 제외했기에 교체 시 굴착에 필요한 에너지를 제외한다면 교체 공정이 제조 공정과 유사하다고 할 수 있다. 이에 따라 교체 에너지 소비량은 제조 에너지 소비량과 동일한 것으로 가정하였으며, 교체 에너지 소비량은 식 (9)와 같다. 다만 교체 시에 기존 관의 해체가 포함되어야 하고 이는 후에 해체 에너지 소비량에서 고려하는 것으로 한다.

$$E_{rep} = \sum_i^p L_i (n_{rep} e_f) \quad (9)$$

여기에서, E_{rep} 는 교체 에너지 소비량(GJ), P 는 총 관의 수, L_i 는 i 번 관의 길이(m), n_{rep} 는 관의 교체 횟수, 그리고 e_f 는 관의 제조 단위 에너지 계수(GJ/m)이다.

b. 갱생 에너지 소비량

관의 갱생은 관의 교체를 포함하지 않고 기존 관에 보강공법으로 기능개선을 도모하는 것이다. 다양한 갱생공법이 있지만, 한국건설기술연구원(2001)은 갱생 비용이 교체 비용의 대략 65%라고 제시하였다. 갱생 공법과 교체 공법은 차이가 있지만, 비용 측면에서 갱생 비용이 교체 비용의 65%라고 하면, 갱생 에너지가 교체 에너지의 65% 정도 될 것이라고 예상할 수 있다. 후에 지속적인 연구를 통해 갱생 공법에 따른 갱생 에너지를 산정해야 하지만, 본 연구에서는 갱생 시 소비하는 에너지를 교체 에너지의 65%로 가정하였으

며, 매 갱생마다 고려해주었다. 갱생 에너지 소비량은 식 (10)와 같이 정의한다.

$$E_{rh} = \sum_i^p L_i (n_{rh} \times 0.65 e_f) \quad (10)$$

여기에서, E_{rh} 는 갱생 에너지 소비량(GJ), p 는 총 관의 수, L_i 는 i 번 관의 길이(m), n_{rh} 는 관의 갱생 횟수, 그리고 e_f 는 관의 제조 단위 에너지 계수(GJ/m)이다.

2.4.2 관의 파손

관의 파손이 발생하면 누수 및 오염물의 유입의 영향으로 수질이 저하될 수 있기에 노후와 마찬가지로 파손을 모의하고 관의 파손에 대비를 해야 한다. 많은 연구자들이 파손 확률에 대한 연구를 진행하였지만 근본적으로 파손의 예측이 매우 힘들뿐만 아니라 여전히 많은 불확실성을 가지고 있다. 그 중 Shamir and Howard (1979)는 관의 파손 확률 공식을 제안하였으며, 김한주 (1994)는 해당 공식을 수도권지역의 강관 파손률 자료를 바탕으로 수정하였고, 이는 식 (11)과 같다.

$$N(t) = (0.3882 \times 10^{-5})^{0.165(t-t_0)} \quad (11)$$

여기에서 $N(t)$ 는 해당년도의 관 파손 확률(Breaks/km/year), t_0 는 교체 혹은 설치 연차(year)이며, t 는 현재의 연차(year)이다.

위의 식 (11)은 수도권 지역에만 해당하는 파손률 공식이기에, 수도권 지역 외의 상수관망에 적용하기에 타당성이 부족할 수 있으나, 적용 관망이 매설 전 관망으로 가정할 시 적용에 큰 무리가 없을 것으로 판단하여 사용하였다. 노후와는 다르게 관의 파손은 파손이 발생하면 해당 부분을 보수하는 것이 일반적이다. 보수 시에도 앞서 언급한 갱생 혹은 교체와 같이 에너지를 소비하게 되고 이를 보수 에너지로 정의한다. 생애주기 동안의 관의 파손 모의를 위해 파손 확률 함수 적용하였으며 이를 통해서 보수에너지를 식 (12)과 같이 정의한다.

$$E_{rp} = \sum_i^p e_{bi} L_i \cdot N(t) \quad (12)$$

여기에서 E_{rp} 는 보수 에너지 소비량(GJ), p 는 총

관의 수, L_i 는 i 번 관의 길이(m), $N(t)$ 는 해당년도의 관 파손 확률(Breaks/km/year), 그리고 e_{bi} 는 보수 단위 에너지로 보수 시에 보수에 필요한 단위 에너지이다. Filion et al. (2004)의 연구에서는 보수 단위 에너지를 식 (13)과 같이 정의하였다.

$$e_{bi} = 2L_b e_f \quad (13)$$

여기에서 L_b 는 일반적인 파손 길이(m/Break)이고 e_f 는 관의 제조 단위 에너지 계수(GJ/m)이다.

2.4.3 회복 에너지

갱생, 교체 및 보수와 같은 개량이 진행되면 상수관망의 본연의 기능을 유지하는데 도움이 될 뿐 아니라, 관의 통수능 증가 및 보수로 인한 누수의 감소 등 부수적인 개선 이익이 발생한다. 이러한 개선이익을 생애주기 에너지 분석 시에도 개량을 통한 에너지 측면에서의 개선 이익이 발생한다고 가정하고 이를 회복 에너지로 정의하였다.

본 연구에서는 회복 에너지를 정량화하기 위해 Fig. 2와 같이 각 관에 가상의 펌프를 가정하였다. 각 관은 개량 전후로 수리학적 조건이 차이를 보일 것이고, 개량 전후 각각의 수리학적 조건에 대해 요구되는 펌프 에너지 감소량을 회복 에너지로 제안하였다. 임의 관의 시작 점을 A 끝 점을 B로 정의하면, 이 때 A점에서 B 점으로 물을 공급하기 위해 필요한 펌프의 수두는 아래 식 (14)과 같이 나타낼 수 있다.

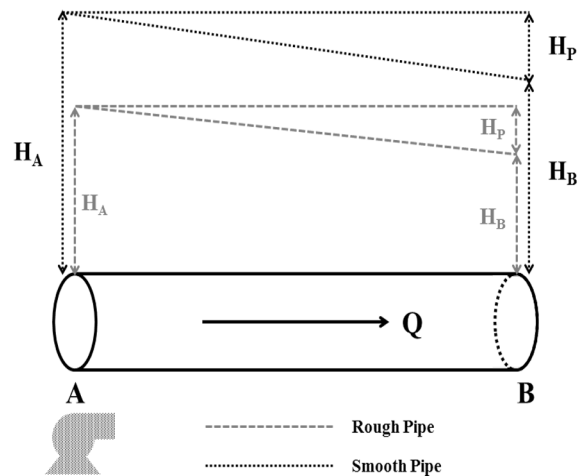


Fig. 2. Illustration of Recovery Energy.



$$H_p = H_A - H_B \quad (14)$$

이 때, H_p 는 필요한 펌프 수두(m)이며, H_A 는 A 지점에서의 전수두(m), H_B 는 B지점에서의 전수두(m)이다. 펌프의 에너지는 아래 식 (15)로 나타낼 수 있다.

$$E_p = RC \cdot (9.8QH_p) \quad (15)$$

이 때, E_p 는 필요한 펌프 에너지(GJ)이며, Q 는 유량(CMS), H_p 는 필요한 펌프 수두(m), RC 는 단위 환산 계수이다. 최종적으로 상수관망의 모든 관의 개량 전후의 E_p 의 차를 계산 후 모두 합친 값을 회복 에너지로 정의한다.

$$E_{RC} = \frac{1}{p_e} \sum_{i=1}^m (E_{p,i}^r - E_{p,i}^s) \quad (16)$$

이 때, E_{RC} 는 회복 에너지(GJ), p_e 는 펌프 효율, m 은 관의 총 개수, $E_{p,i}^r$ 는 갱생 전 거친 관일 때 필요한 펌프에너지, $E_{p,i}^s$ 는 갱생 후 매끈한 관일 때 필요한 펌프 에너지이다.

2.5. 해체 단계

해체 단계는 상수관망의 사용성이 저감되어 철거하는 단계이다. 해체 시 관의 해체 및 처분을 하는 과정에서 에너지가 소비되고, 이 때 소비한 에너지를 해체 에너지 소비량으로 정의한다. 해체 에너지 역시 제조 에너지와 마찬가지로 굴착 및 이송에 소비되는 에너지는 제외하고 순수 관의 폐기에 소비되는 에너지만으로 정의한다. 해체 에너지 소비량은 앞서 언급한대로 구조적 강도가 낮아진 관의 교체 혹은 목표 생애주기 종료로 인한 해체 시에도 발생한다. 해체 에너지

소비량은 식 (17)와 같이 정의한다.

$$E_d = \sum_i^p L_i \{ (n_{rep} + 1) e_d \} \quad (17)$$

여기에서 E_d 는 해체 에너지 소비량(GJ), p 는 총 관의 수, L_i 는 i 번 관의 길이(m), n_{rep} 는 관의 교체 횟수, 그리고 e_d 는 해체 단위 에너지(GJ/m)이다.

3. 적용 관망

본 연구에서는 개발한 모형을 이용하여 생애주기를 결정하기 위한 두 후보지를 선정하였다. 두 후보지는 A 관망(Fig. 3)과 B 관망(Fig. 4)이며 매설 전 상수관망 임을 감안하여 모든 관은 초기 Hazen-Williams C 값이 130인 신관으로 가정하였다. 두 관망은 노드 및 관의 수와 총 연장, 관경의 분포에서 차이가 난다. A 관망은 상대적으로 관로의 연장이 길고 관경의 분포가 비교적 고르고 B 관망은 상대적으로 관로의 연장이 짧고 작은 관경의 관이 많이 분포한다.

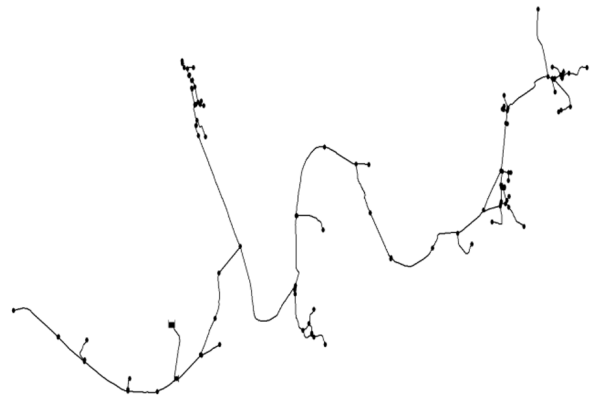


Fig. 3. A WDS.

Table 3. Information of two study WDSs

Diameter (mm)	e_f (GJ/m)	e_d (GJ/m)	Total Length (m)		Rehabilitation time (yr)	Replacement time (yr)
			A WDS	B WDS		
40	0.006819	0.000439	1322.3	0	15,26,59,70	44,88
50	0.010645	0.000690	2349.23	0	17,29,66,78	49,98
80	0.027199	0.001788	2674.49	3615	20,35,78,93	58
100	0.042459	0.002809	1129.76	373	22,38,85	63
150	0.095374	0.006384	5734.98	333	24,41,93	69
200	0.169354	0.011431	1448.03	289	26,44,99	73

pp. 1-9

pp. 11-21

pp. 23-31

pp. 33-38

pp. 39-46

pp. 47-55

pp. 57-63

pp. 65-75

pp. 77-88

pp. 89-96

pp. 97-106

pp. 107-122

pp. 128-131

pp. 133-138

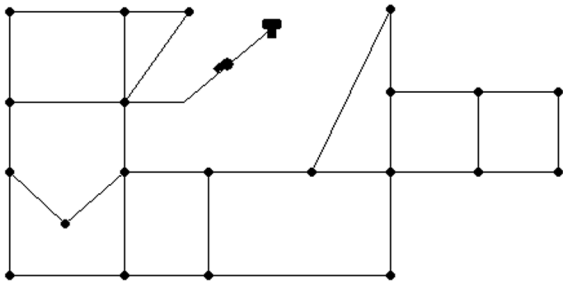


Fig. 4. B WDS.

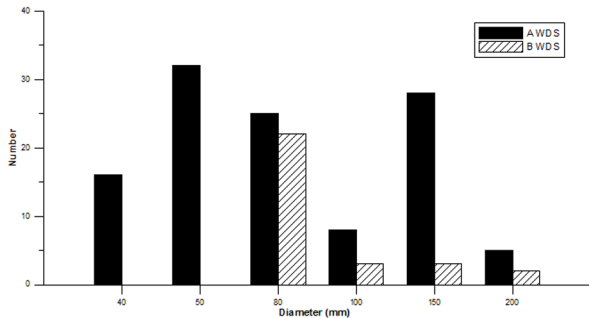


Fig. 5. Diameter distribution of A WDS and B WDS.

A 관망은 관114개, 노드 113개, A 배수지에서 물을 공급받고, 밸브 1 개, 펌프 1개로 구성된다. 40mm에서 200mm까지 총 6개의 후보 관경이 B 관망에 비해 비교적 균등하게 분포하고 있고, 관로의 총 연장은 14658.79m이다. B 관망은 관 30개, 노드 22개, 탱크 1 개, 펌프 1개로 구성된다. 후보 관경은 80mm에서 200mm까지 총 4개로 이루어지며 이 중 가장 작은 관경인 80mm 관이 대부분이고, 관로의 총 연장은 4610m이다. Fig. 5은 각 상수 관망에서의 관경의 분포를 나타낸다.

위의 Table.3은 A 관망과 B 관망에서 사용되는 관경의 제조 단위 에너지, 해체 단위에너지와 각 관경 별 총 연장, 관경 별 갱생 및 교체 시기를 나타낸다.

4. 적용 결과

Table. 4는 개발한 모형을 A 관망 및 B 관망에 적용한 결과이다. 적용 결과 A 관망의 경우 최적 생애주기가 40년이며, B 관망의 경우는 좀 더 긴 54년으로 나타났다. A 관망의 경우 연간 총 에너지 소비량 43.58 GJ/yr로 B 관망의 8.92 GJ/yr에 비해 높게 나타났다. A 관망의 경우 B 관망에 비해 많은 관과 노드로 이루어

져있으며, 관로의 총 연장이 길다. 또한 관경 조합 (Fig.5)을 보면 A 관망의 경우 비교적 고른 분포를 나타내고 있고, B 관망의 경우 상대적으로 작은 관경이 많이 분포하고 있음을 알 수 있다. 이러한 특징으로 인해 A 관망의 총 연간 에너지 소비량은 B 관망에 비해 높은 값을 나타낸다. 회복 에너지의 경우는 관경의 크기 혹은 관로의 연장과는 별개로 수리학적 요소를 바탕으로 계산이 진행되기에 A 관망보다는 B 관망이 더 큰 값을 나타낸다.

각 적용 관망의 각 에너지 별 추세를 살펴보면 Fig.6와 Fig.7과 같으며 모든 에너지는 연간 에너지 소비량으로 나타나있다. 연간 에너지 소비량으로 나타나기에 에너지가 추가로 소비되지 않는다면 그 추세는 시간이 흐름에 따라 감소하는 형태를 나타낼 것이다. 이러한 이유로 제조 에너지 같은 경우 시간이 흐름에 따라 지속적으로 감소하는 형태를 나타내게 된다. 감소폭 역시 처음에는 급격히 감소하고 뒤로 갈수록 적은 감소폭을 나타낸다.

앞서 상수관망을 운영 시 시간의 흐름에 따라 노후화되고 파손되는 관들을, 갱생, 교체 및 보수와 같은 개량을 통해 그 기능이 유지하도록 한다고 언급했다. 즉 각종 개량 에너지들은 어느 시점에서 추가적인 에너지를 소비하면서 증가하게 된다. 갱생 에너지 혹은 교체 에너지의 경우 같은 관경의 관들은 Table.3에 나타난대로 같은 시점에 갱생 혹은 교체가 이루어지기에 두 에너지의 추세는 계단형으로 급증하는 형태를 나타내게 된다. 또한 이 두 에너지들은 관이 갱생되거나 교체될 시에만 고려해주기에, 관이 갱생 혹은 교체되지 않는다면 그 추세는 시간 흐름에 따라 제조 에너지와 같이 점차 감소하는 형태를 나타내게 된다. 보수 에너지의 경우는 파손율 함수가 지수함수를 따르기에 그 추세 역시 지수함수의 형태를 따른다. 다만 파손율 함수가 시간의 흐름에 따라 변하기에 다른 에너지들처럼 감소하는 추세를 나타내지는 않는다. 이러한 개량 에너지들은 총 연간 에너지 소비량의 추세에 영향을 미치며 최적 생애주기를 결정하는데 영향을 준다.

또한 이러한 추가 에너지의 추세는 각 목표 생애주기 구간에 따라 가장 영향력이 있는 에너지 소비량의 종류가 변화하는 추세를 보여준다. 에너지의 추세는 목표 생애주기가 20년 짧은 경우에는 모든 관경에 대해서 갱생이 이루어 지지 않았기에, 제조 에너지 및



Table 4. Summary of Results by developed Model

WDS	Life Cycle (yr)	Total E (GJ/yr)	Ef (GJ)	Erh (GJ)	Erp (GJ)	Ercp (GJ)	Ed (GJ)	Erc (GJ)
A	40	43.58	941.46	711.75	26.87	0.00	63.35	0.07
B	54	8.92	193.60	251.67	55.66	0.00	12.95	32.02

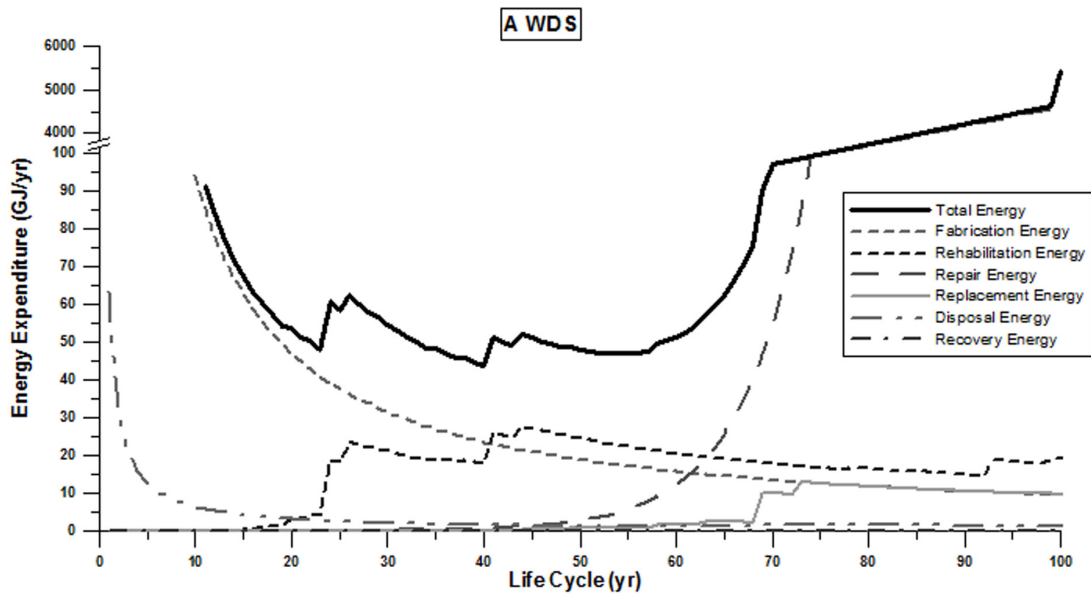


Fig. 6. Trend of Energy Expenditure for A WDS.

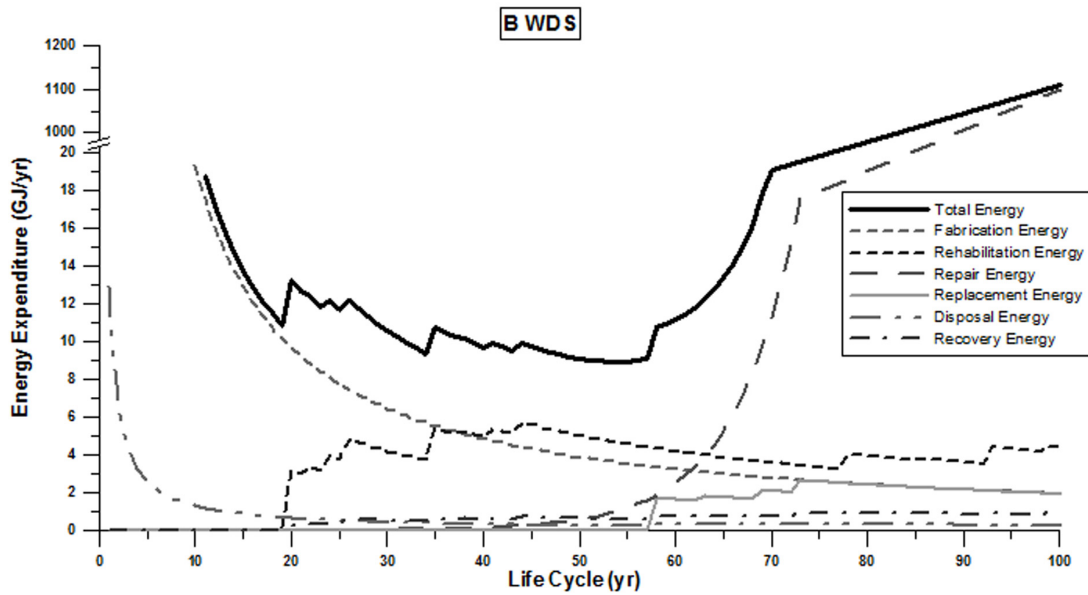


Fig. 7. Trend of Energy Expenditure for B WDS.

해체 에너지가 가장 영향력이 있는 에너지이지만 목표 생애주기가 20년에서 50년 사이에 있을 경우에는 총 연간 에너지 소비량은 그 형태가 갱생 에너지에 가장 영향을 많이 받는다. 목표 생애주기가 50년보다

길 경우에는 보수 에너지가 급격히 증가하면서 다른 에너지보다 그 영향력이 지배적이다. 본 연구에서 사용한 두 후보지의 최적 생애주기는 각각 A 관망 40년, B 관망 54년이다. 즉, A 관망의 경우 갱생 에너지 소

pp. 1-9

pp. 11-21

pp. 23-31

pp. 33-38

pp. 39-46

pp. 47-55

pp. 57-63

pp. 65-75

pp. 77-88

pp. 89-96

pp. 97-106

pp. 107-122

pp. 123-131

pp. 133-138

비량에 의한 영향으로 생애주기가 결정되고, B 관망의 경우는 보수 에너지 소비량에 의해 최적 생애주기가 결정된다.

앞서 Table.3에 각 관경 별 갱생 시기가 나타나 있다. A 관망은 관경의 조합이 비교적 고르지만, 큰 관경인 150 mm 관의 수가 많다. 150 mm 크기의 관은 목표 생애주기가 41년이 되면 갱생된다. 이 때 발생하는 갱생 에너지 소비량의 크기가 우세하기에 갱생이 이루어지기 전인 40년이 최적 생애주기로 결정이 된다. B 관망의 경우 작은 4가지 후보 관경 중에 가장 작은 관경인 80 mm 관이 대부분을 차지한다. 작은 관경은 갱생 시 갱생 에너지 소비량이 큰 관경에 비해 작고, 작은 갱생 에너지 소비량이 추가된 총 연간 에너지 소비량은 일정 시간이 지나면 갱생 직전에 비해 더 적은 크기가 된다.

개발한 모형으로 최적 생애주기를 결정했을 때, 두 상수관망은 수치 상으로 상이한 결과를 나타냈지만, 그 안에 유사한 경향을 가지고 있음을 알 수 있다. 총 연간 에너지 소비량 및 최적 생애주기의 결정은 상수관망의 특징에 따라 결정되는 부분이다. 결과를 통해 보면, 총 연간 에너지 소비량의 경우 관로의 연장 및 관경의 크기 그리고 관과 노드의 수에 의해 영향을 받을 수 있고, 최적 생애주기는 개량 계획에 따라 발생하는 개량 에너지 소비량의 영향을 받아 결정되었다. 두 상수관망의 에너지 경향성은 유사한 결과를 나타냈다. 모두 목표 생애주기에 따라 영향력이 지배적인 에너지의 종류가 변하고, 이러한 경향성을 잘 이용한다면 B 관망과 같이 작은 관경으로 총 연간 에너지 소비량을 줄이면서 긴 최적 생애주기가 되도록 설계가 가능할 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 상수관망의 전체 생애주기에서 소비되는 에너지를 제조단계에서부터 폐기 단계까지 각 단계 별로 에너지 소비량을 산정하고, 그 결과를 바탕으로 해당 관망의 생애주기를 결정하는 방법론을 제안하고 생애주기 에너지 분석을 할 수 있는 가장 기초적인 모형을 구축하였다. 해당 모형을 두 후보지에 적용하였고, 생애주기를 결정한 결과 개량이 생애주기 결정에 가장 중요한 역할을 하였고, 이러한 근거로

상수관망의 설계 시에는 반드시 갱생, 교체 그리고 보수와 같은 개량 계획이 중요함을 확인했다. 모형을 통한 생애주기는 40~50년 사이에 결정되었으며, 이는 실무에서 관행적으로 사용하는 상수관망의 생애주기와 유사함을 알 수 있다.

다만 아직은 방법론에 많은 가정이 포함되어 있어, 더 구체적인 근거를 토대로 방법론의 보완이 필요하다. 실제 상수관망을 설치할 때 매설 및 운송 등의 부분이 비용의 측면에서는 무시하지 못할 부분이라, 지속적인 연구를 통해 해당 과정에 소비되는 에너지를 산정해야 한다. 또한 갱생 및 교체 시기 등과 같은 개량 기준에 관한 추가적인 연구가 필요하고, 관의 노후 혹은 파손 확률에 관한 연구 및 개량에 따른 개선이익에 관한 연구도 보완되어야 할 것이다. 마지막으로 다양한 상수관망으로의 적용을 통해 방법론의 타당성 판단이 추가되어야 할 것이다.

본 연구를 통해 아직 국내에는 소개 되지 않은 상수관망으로의 생애주기 에너지 분석을 하였고, 이를 통해 환경 영향을 줄이는 방향으로의 생애주기 결정이 가능함을 보였다. 아직은 부족한 정보로 인해 많은 가정을 포함하고 있지만, 후에 많은 자료들이 수집될 경우 상수관망의 전체 생애주기를 고려한 능동적 관망 시스템 운영과 개량 및 관리를 하는데 효과적인 기반 기술로 활용될 수 있을 것이라 판단된다. 상수관망의 생애주기를 결정하는 기준 및 연구가 미흡한 우리 나라에 생애주기를 결정하는 한 대안이 될 수 있을 것으로 기대한다. 또한 해당 방법론에 최적화 기법을 도입하면 비용이 아닌 환경 영향을 줄이는 방향으로의 최적 설계도 가능할 것으로 생각된다.

사 사

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다(NRF-2013R1A2A1A01 013886).

참고문헌

Back, C. W. (2002) *Development of Optimal Decision-Making System for Rehabilitation of Water Distribution Systems Using ReHS*, Master's Thesis, Korea University



- Beak, C. W., Kim, S. W., Kim, E. S., Kim, J. H., Park, M. J. (2006) Development of Optimal Decision-Making System for Rehabilitation of Water Distribution Systems Divided by small Division, *Magazine of Korea Water Resources Association*, **39**(7), June, pp.545-552
- Colombo, A. F., and Karney, B. W. (2002) Energy and costs of leaky pipes: Toward comprehensive picture., *J. Water Resour. Plan. Manage.*, **128**(7), pp. 441 - 450
- Filion, Y. R., MacLean, H. L., and Karney, B. W. (2004) Life-Cycle Energy Analysis of a Water Distribution System, *Journal of Infrastructure systems*, **10**(4), pp.120-130
- Kim, H. J. (1994) *A study on the optimal decision-making model for rehabilitation of water distribution systems*, Master's Thesis, Korea University
- Kim, J. H., Geem, Z. W., Lee, H. D., Kim, S. H. (1996) Development of Rehabilitation and Management Techniques, *Magazine of Korea Water Resources Association*, **29**(4), June, pp.197-205
- Kleiner, Y., Adams, B. J., and Rogers, J. S. (1998) Long-term planning methodology for water distribution system rehabilitation., *Water Resour. Res.*, **34**(9), pp.2039-2051
- Kleiner, Y., and Rajani, B. (1999) Using limited data to assess future needs., *J. Am. Water Works Assoc.*, **91**(8), pp. 47-61
- Korea Institute of Construction Technology (2001) *Research for Rehabilitation Methods Characteristic and Usage of Water Distribution System Pipe*
- Lee, H. D. (2007). Renovation technologies in maintenance of water distribution systems, *Journal of Korean society of environmental engineers*, **29**(13), pp. 1297-1309
- Lee, S. Y. (2014) *Research on Life Cycle Energy Analysis of Water distribution System*, Master's Thesis, Korea University
- Lundie, Sven, Gregory M. Peters, and Paul C. Beavis. (2004) Life cycle assessment for sustainable metropolitan water systems planning., *Environmental Science & Technology*, **38**(14), pp. 3465-3473
- Male, J. W., Walski, T. M., Slutsky, A. H. (1990) Analyzing Water Main Replacement Policies, *Journal of Water Resources Planning and Management*, **116**(4), May/June, pp. 362-374
- Mononobe(物部長穂) (1960) 水理学, 岩波書店刊, pp. 155-158
- Park, S.W., Jun, H. D., Kim, J. W. (2007) Modeling of Rate-of-Occurrence-of-Failure According to the Failure Data Type of Water Distribution cast Iron Pipes and Estimation of Optimal Replacement Time Using the Modified Time Scale, *Magazine of Korea Water Resources Association*, **40**(2), January, pp. 39-50
- Shamir, U., and Howard, C. D. D. (1979) An analytic approach to scheduling pipe replacement., *J. Am. Water Works Assoc.*, **71**(6) pp. 248-258
- Sharp, W. W., and Walski, T.M. (1988) Predicting internal roughness in water mains., *J. Am. Water Works Assoc.*, **80**(12) pp. 34-40
- Stokes, J. and Horvath, A. (2006). Life cycle energy assessment of alternative water supply systems. *The international journal of life cycle assessment*, **11**(6), 335-343.
- Walski, T.M., and Pelliccia, A.(1982) Economic analysis of water main breaks., *J. Am. Water Works Assoc.*, **74**(4), pp. 140-147

pp. 1-9

pp. 11-21

pp. 23-31

pp. 33-38

pp. 39-46

pp. 47-55

pp. 57-63

pp. 65-75

pp. 77-88

pp. 89-96

pp. 97-106

pp. 107-122

pp. 123-131

pp. 133-138