



한남대학교  
Hannam University



# 지속가능성 기반 상수도 관망 자산관리

이승엽

한남대학교 토목환경공학과

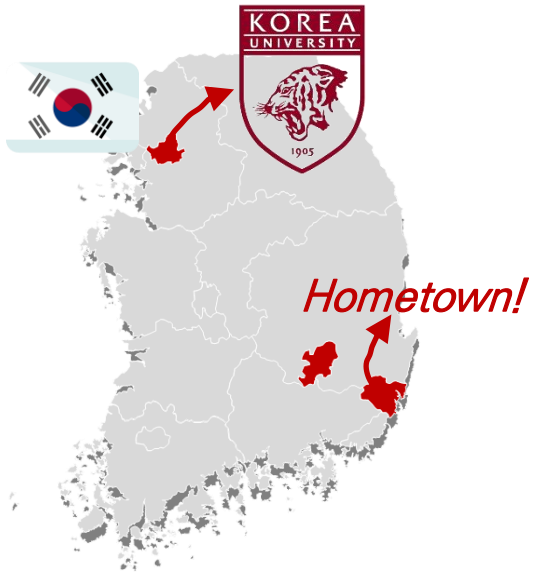


0. 개인 소개
1. 상수도 관망 노후 문제
2. 지속가능성 정량화
3. 지속가능한 자산관리
4. 핵심 결과
5. 향후 개선 방향

00

개인 소개

# Seungyub Lee (이승엽)



*Hometown!*



Mar. 06-Feb. 12



B.S.

Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea University

\*Including military service (Sep. 07 – Aug. 09) Served as KATUSA soldier at Camp Walker (Daegu)

Mar. 12-Feb. 14



M.Eng

Hydraulics/Hydrology Engineering, Korea University

Thesis: Research on **Life Cycle Energy Analysis** of Water Distribution System

Advisor: Dr. Joong Hoon Kim ([jaykim@korea.ac.kr](mailto:jaykim@korea.ac.kr))

Aug. 15-Dec. 19



Ph.D

Water Resources Engineering, University of Utah

Dissertation: Triple Top Line Based Asset Management Analysis Approach to Enhance **Sustainability** of Water Distribution Systems

Advisor: Dr. Steven J. Burian ([steve.burian@utah.edu](mailto:steve.burian@utah.edu))

Sep. 19-Aug. 20



Postdoctoral  
Research  
Associate

Dept. Civil and Architectural Engineering and Mechanical, University of Arizona

Main Project: An Integrated **Contaminant Warning System** for Contamination Response and Recovery

Advisor: Dr. Dominic L. Boccelli ([dboccelli@arizona.edu](mailto:dboccelli@arizona.edu))

Aug. 20-Current



Research  
Professor

Future and Fusion Lab of Archi., Civil and Env. Eng., Korea University

Current Project: Establishment of Original Technology and Globalization Strategy of **Harmony Search Algorithm**



## 지속가능하고 탄력적인 도시 수자원 계획 및 유지 관리

<p><b>수자원 시설 자산 관리</b></p> <p><b>System Dynamics!</b></p> <p><b>Sustainability!</b></p>	<p><b>비상 사고 대응을 위한 탐지 및 지역화</b></p> <p><b>Cyber Attack!</b></p> <p><b>Big Data!</b></p> <p><b>Deep Learning!</b></p> <p><b>Bayesian Inference!</b></p>
<p><b>수자원 시설 최적화</b></p> <p><b>Smart sensing!</b></p> <p><b>Optimization!</b></p>	<p><b>방재 저감을 위한 수자원 시설 활용 및 고도화</b></p> <p><b>GoldSim</b></p> <p><b>Climate Change!</b></p> <p><b>Optimization!</b></p> <p><b>Prediction!</b></p> <p><b>Real-time operation!</b></p>

### ❖ 지속가능하고 탄력적인 도시 수자원 계획 및 유지 관리

- 수자원 시설 자산 관리(구성요소 노후도 추정, 교체/갱생, 예산 편성)
- 비상 사고(누수, 오염물 유입, 사이버 공격, 등) 대응을 위한 탐지 및 지역화
- 수자원 시설 최적화 (도시 수자원 시설 설계 및 운영)
- 방재 저감을 위한 수자원 시설 활용 및 고도화

## 도시 수자원 시설 첨단화

AICBM (AI, IoT, Cloud, Bid Data, Mobile) 기술을 활용한 수자원 시설 자동운영시스템 고도화

디지털트윈 플랫폼을 활용한 매설 구조물 시각화 및 상태 추정

수자원 시설 내 에너지 생산

### ❖ 도시 수자원 시설 첨단화

- 디지털트윈 플랫폼을 활용한 매설 구조물 시각화 및 상태 추정
- AICBM\* 기술을 활용한 수자원 시설 자동운영시스템 고도화
- 수자원 시설 내 에너지 생산 (마이크로 터빈, Pump As Turbine)

# 01

## 상수도 관망 노후 문제

# 상수도 관망의 노후화

: 북미의 경우 16%의 관이 useful life를 지남



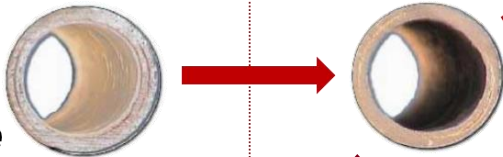
*Drinking Water Infrastructure Installation Era*



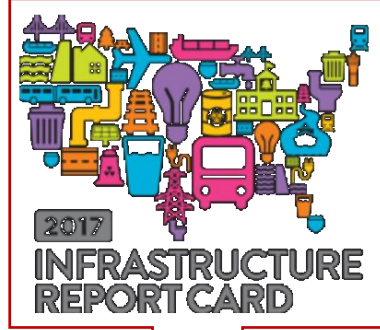
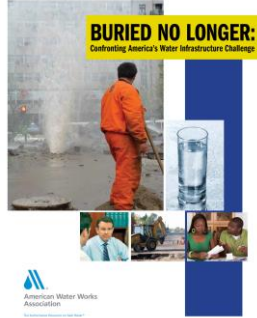
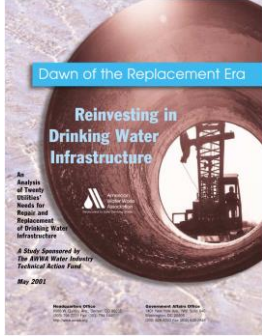
1800s Phase 1    1900-1945 Phase 2    1945- Phase 3

Time →

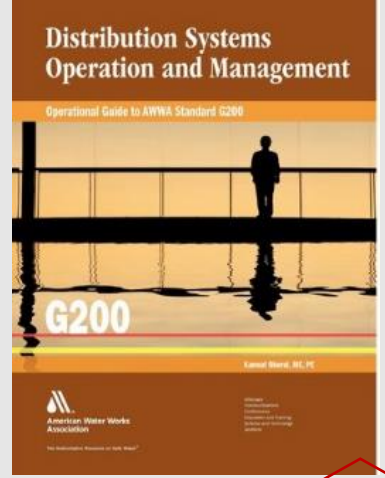
*Pipe Condition Change as time*



# 상수도 관망 자산관리



- Main break density
- Age of Main
- Loss of Effective Pipe Size
- Corrosion status-soil condition
- Water quality concerns
- Hydraulics-Pressure, Flow, C-Value
- Appurtenance Condition Code
- Pipe Material
- Zone code
- **Maintenance Cost**



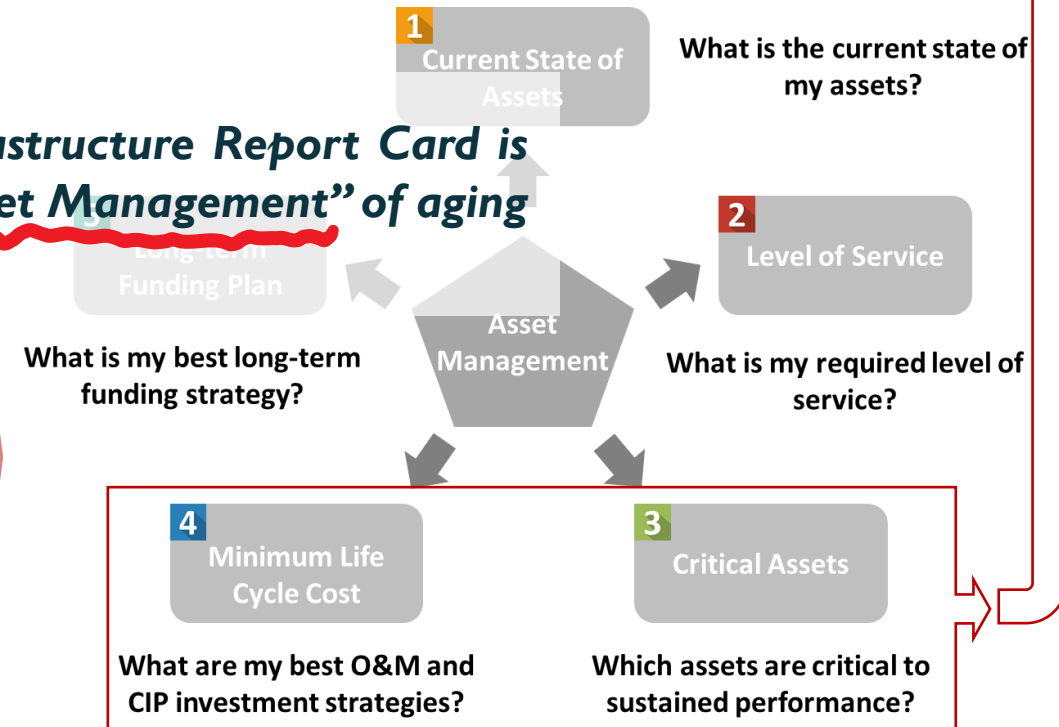
CATEGORY	1988	1998	2001	2005	2009	2013	2017
Drinking Water	B-	D	D	D-	D-	D	D



A lesson from the ASCE Infrastructure Report Card is the need for **"Sustainable Asset Management"** of aging WDSs...

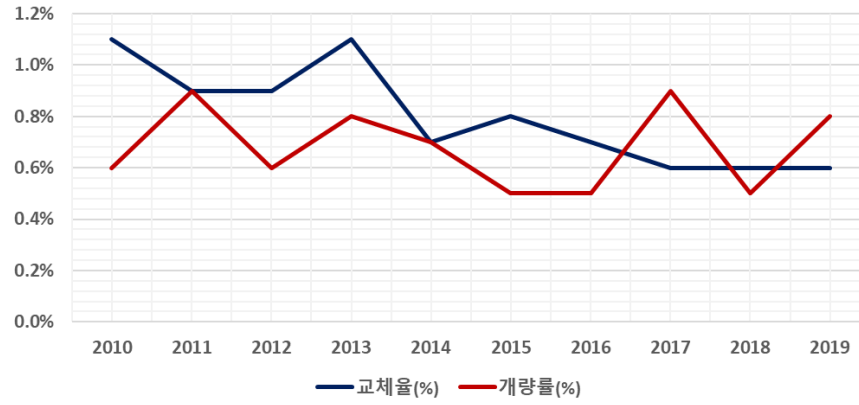
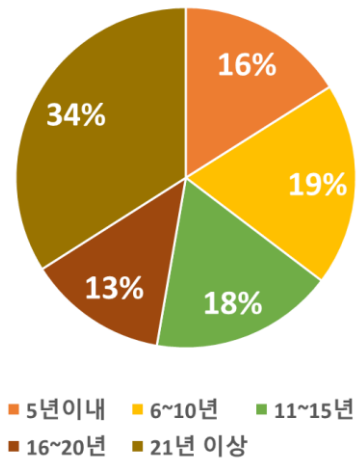
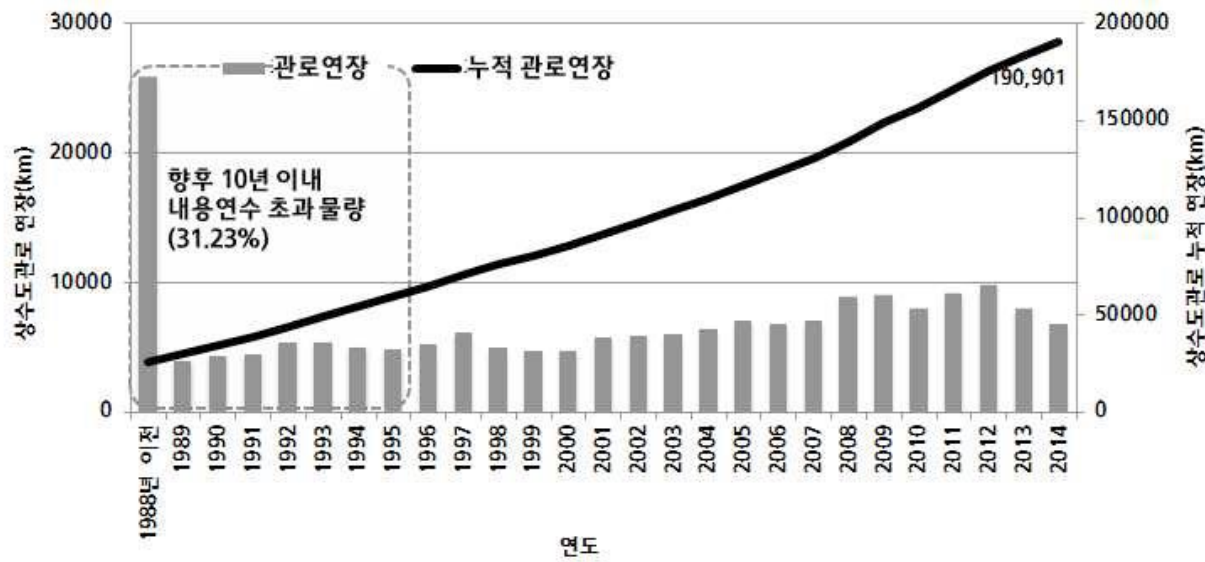
**Asset management is...**

integrated, multidisciplinary set of strategies employed to sustain public infrastructure assets and generally focuses on the later stages of a facility's life cycle, *specifically where it concerns areas of maintenance, rehabilitation, and replacement* (AWWA 2018)





# HANAM | 국내 상수도 관망의 노후화



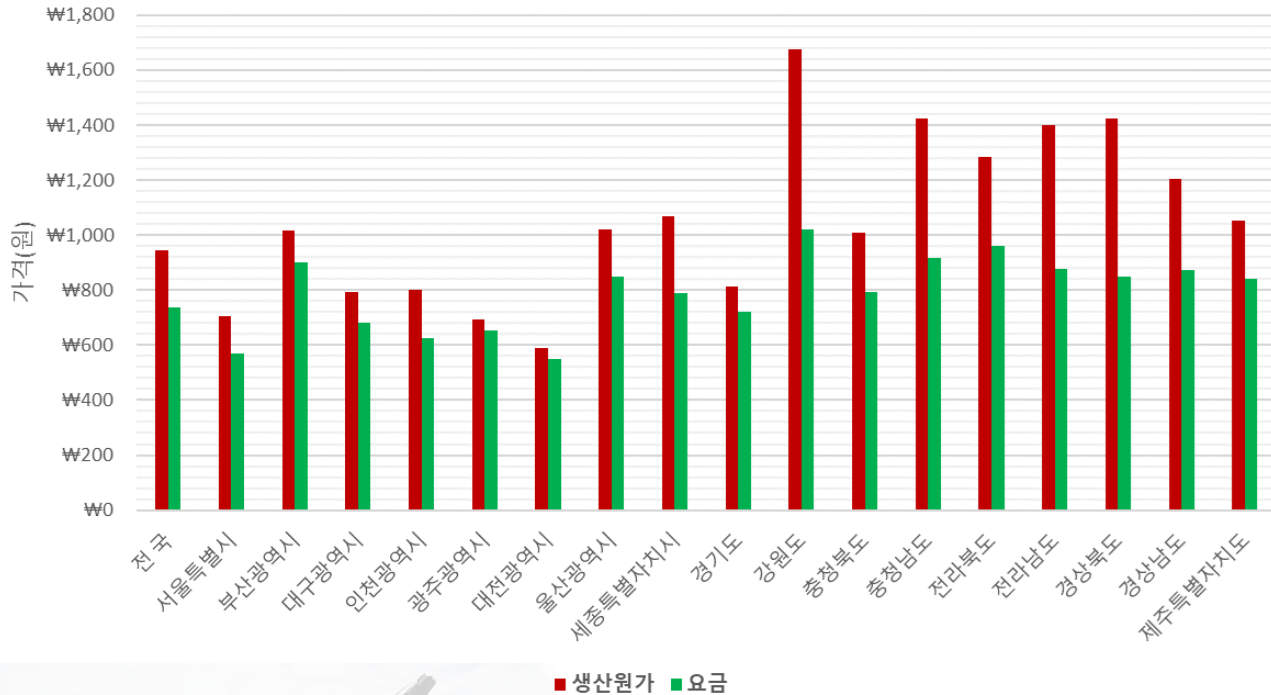
〈국내 상수도 관로 현황〉\*, \*\*

- ✓ 34% 이상 관로가 매설된지 21년이 경과
- ✓ 상수관망의 노후는 성능 및 수질 문제, 잦은 관 파단의 원인이 됨
  - 인천시, 서울시 문래동 적수 사고도 노후에서 기인
- ✓ 교체율은 2010-19년 0.8% 개량은 0.7%에 불과
- ✓ 우리나라의 경우 노후관 개량을 위해 4,680억원 예산 책정 (환경부)\*\*\*
- ✓ 한정된 예산에서 최대의 효과를 얻기 위해서 대부분 경제적인 해결책을 제시함



〈국내 노후 상수도 관로 관련 뉴스〉

\* 환경부, 2019, 2019 상수도 통계  
 \*\* 환경부, 2017, 상수도시설의 운영 및 자산관리 통합시스템 개발  
 \*\*\*환경부, 2020년도 환경예산, 환경권 보장에 집중 투자한다, 2019년 8월 29일



## 저렴한 수도요금

- ✓ 2019년 전국 평균 수도요금은 738.6원/m<sup>3</sup>이며 생산원가 944.6원/m<sup>3</sup>임\*
- ✓ 평균 현실화율은 78.2% 수준으로 현실화율은 전년대비 2.4%p 감소함\*
- ✓ 우리나라의 수도세는 선진국과 비교 시 저렴한 편
- ✓ 장기적인 측면에서 수도세를 인상하여 경제적 운영을 할 필요가 있음



# 02

## 지속가능성 정량화

# 지속가능성이란?

Sustainability?

→ Sustain+Ability



Report of the World Commission on Environment and Development

Our Common Future



United Nations  
1987

UN Document: Gathering a Body of Global Agreements has been compiled by the NGO Committee on Education of the Conference of NGOs from United Nations web sites with the invaluable help of information & communications technology

Brundtland Report\*



현시대 사람의 니즈(경제, 사회, 환경 측면)를 충족하며 동시에 후손들의 니즈도 충족할 수 있도록 유지하는 능력



\*Brundtland, G. H. (1987). "The Brundtland Report, World Commission on Environment and Development." Oxford University Press

# 지속가능성 정량화 방법

**Table 1.** Summary of problems considered, their proposed solutions, and the sustainability evaluation method of the selected literature.\*

Reference	Problem	Proposed Solution	Evaluation
Aydin et al. [23]	Pressure deficit and water age issue	Add booster pump	Reliability, resilience, and vulnerability
Ramesh et al. [24]	Water scarcity	WDS design (rural)	Measure of sustainability of the system
Lee and Burian [25]	Aging	NA	Triple top line
Filion et al. [26]	N/A	Pipe replacement	Life-cycle energy analysis
Wu et al. [27]	Environmental impact	Pipe and pump design	Life-cycle cost (LCC) and greenhouse (GHG) emissions
Wu et al. [28]	Environmental Impact	Pipe and pump design and tank location determination	LCC and GHG emissions
Wu et al. [29]	Environmental Impact	Pipe and pump design	LCC, GHG emissions, and carbon pricing
Herstein et al. [30]	Environmental impact	Pipe and pump design	LCC and Environmental Impact Index
Kang and Lansey [31]	Water supply shortage	Dual water distribution network	LCC, GHG emissions, and reliability
Arif et al. [32]	Environmental impact	Pipe and pump design	LCC and life-cycle emissions with node pressures and reliability constraints
Nault and Papa [33]	Inefficient energy consumption (pumping)	Determine operational practices	LCA (net present value, LCC, energy consumption, GHG emissions)
Lee and Burian [7]	Aging	Pipe replacement	Triple top line
Lee et al. [34]	Aging and insufficient fund	User fee adjustment	Triple top line
Koo and Ariaratnam [35]	NA	Pipe replacement	Environmental impacts, economic benefits and outputs, social and cultural conservation and promotion, and structural soundness
Farmani and Butler [36]	Urban planning	WDS design with different Urban form (layout)	LCC, resilience, and water quality (water age)
Aydin et al. [37]	Water scarcity	Reclaimed water for non-potable water	Reliability, resilience, vulnerability, and energy intensity
Piratla [38]	Environmental Impact	Pipe and pump design	LCC, life-cycle CO <sub>2</sub> emissions, resilience, and cost of reducing CO <sub>2</sub> emission
Cunha et al. [39]	Uncertainties in future scenario	Phase design (pipe design)	Investment cost, CO <sub>2</sub> emissions, and resilience/reliability

\*Lee, S., & Kim, J. H. (2020). Quantitative Measure of Sustainability for Water Distribution Systems: A Comprehensive Review. Sustainability, 12(23), 10093.

# 지속가능성 정량화 방법

Triple Bottom Line (TBL)

John Elkington이  
1994년도에 제안한 방법론



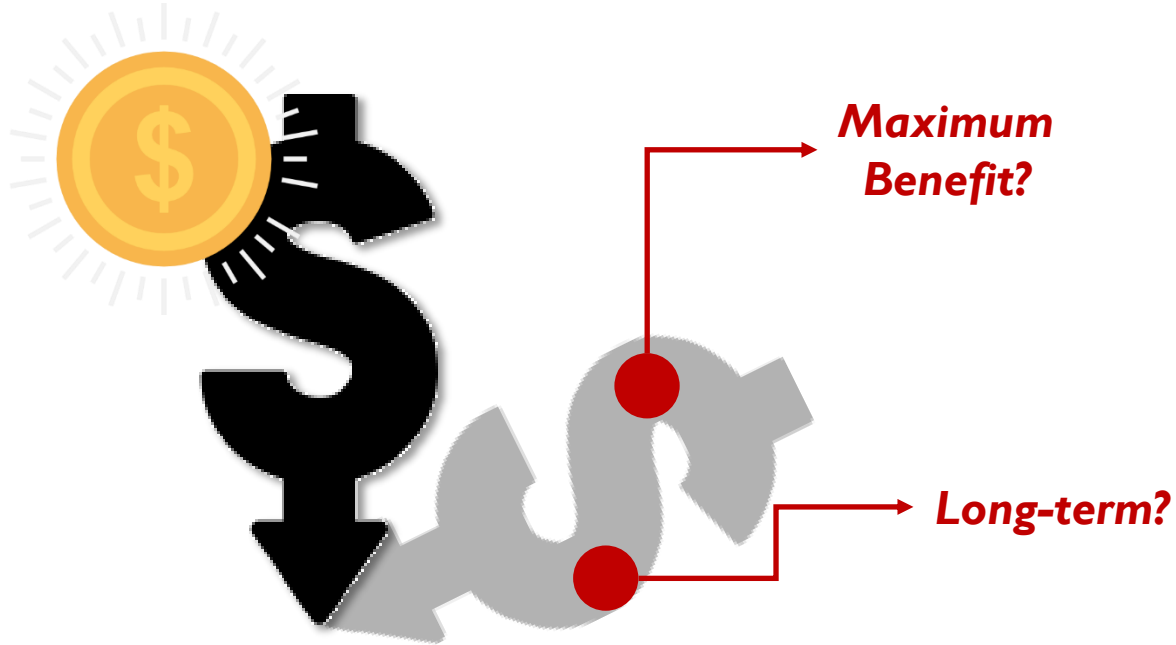
지속가능성 3요소로 알려진  
경제, 사회, 환경에 대한 **영향을**  
**최소화**함



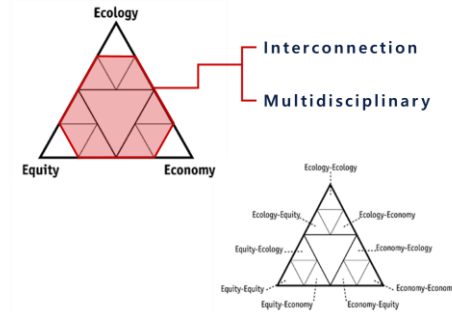
즉, 부정적 영향을 최소화  
“**덜 나쁜**“ 것 선택

• Elkington, John. 1994. "Towards the sustainable corporation: Win-win-win business strategies for sustainable development." *California management review* 36 (2):90-100.

# 덜 나쁜 것이 최선인가?



8년 후 중고차는 4100만원, 신차는 4000만원  
중고차에 비해 신차의 편안함이 큼  
신차의 경우 환경 부담이 없음



편익을 최대화 하는 Triple Top Line 방법!



〈중고차〉

차량 가격: 100만원  
1년 기름값: 300만원  
유지관리비: 200만원

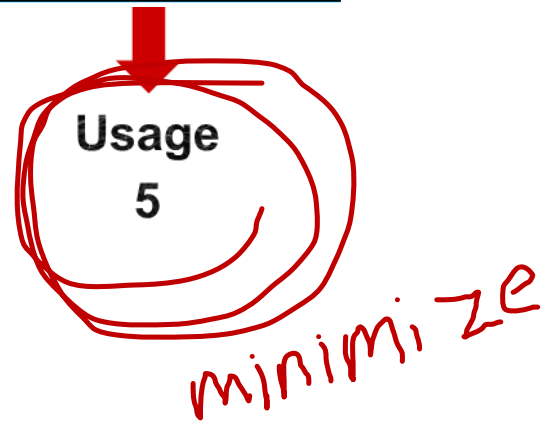
차량 가격: 4000만원  
1년 기름값: 0만원  
유지관리비: 0만원



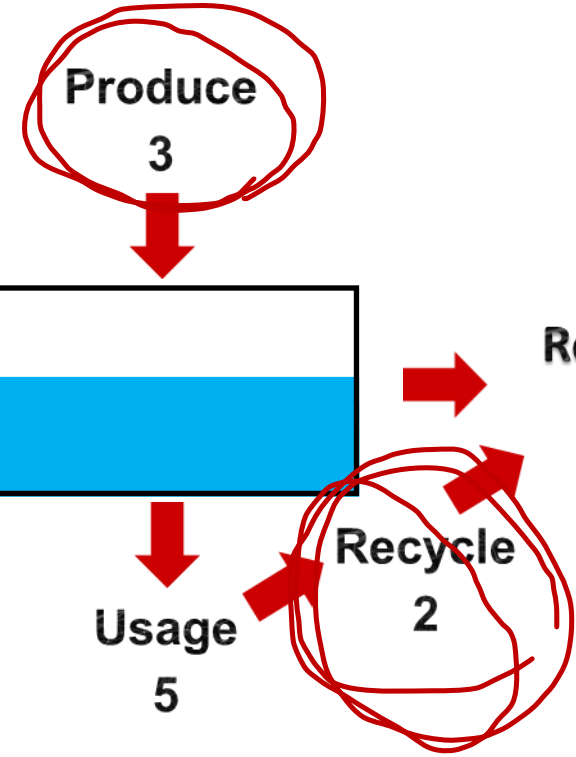
〈신차〉

# TTL vs. TBL

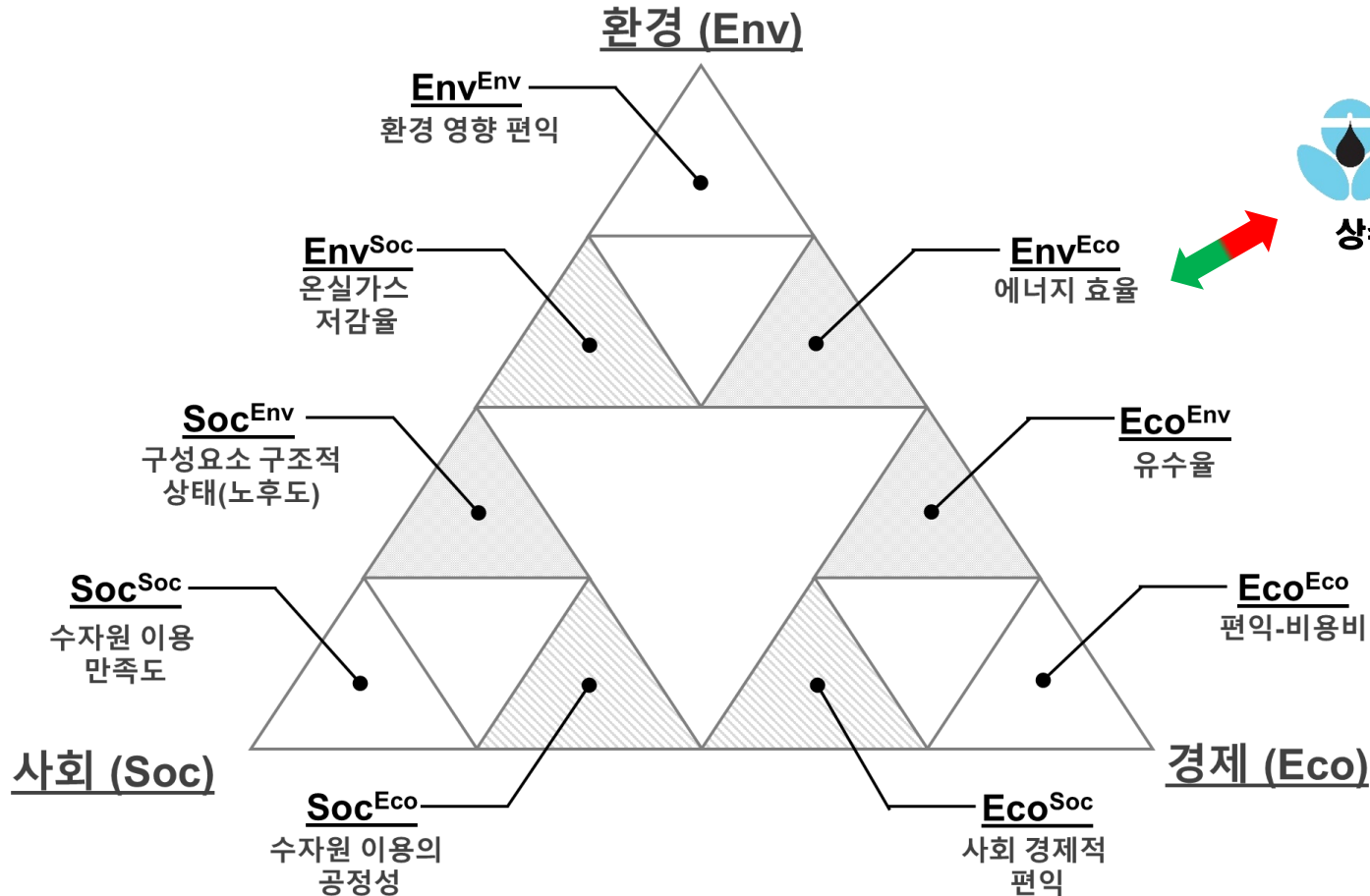
## TBL mind



## TTL mind





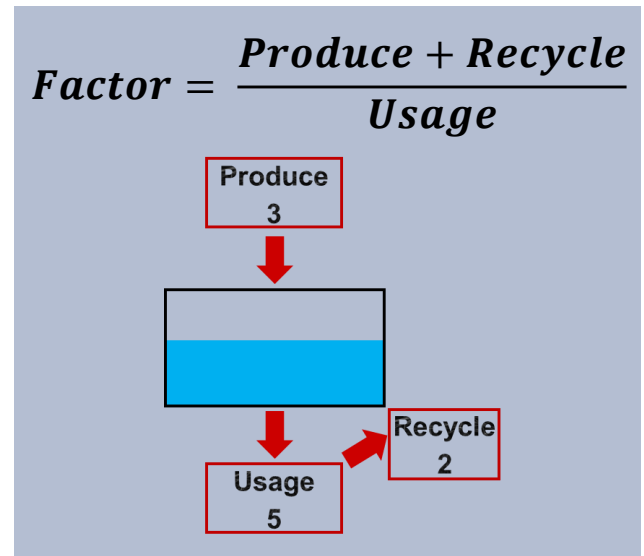


〈상수관망의 지속가능성 평가를 위한 Triple Top Line 모형 구조〉



$$SI_t = \left( \prod TTL_f \right)^{1/9}$$

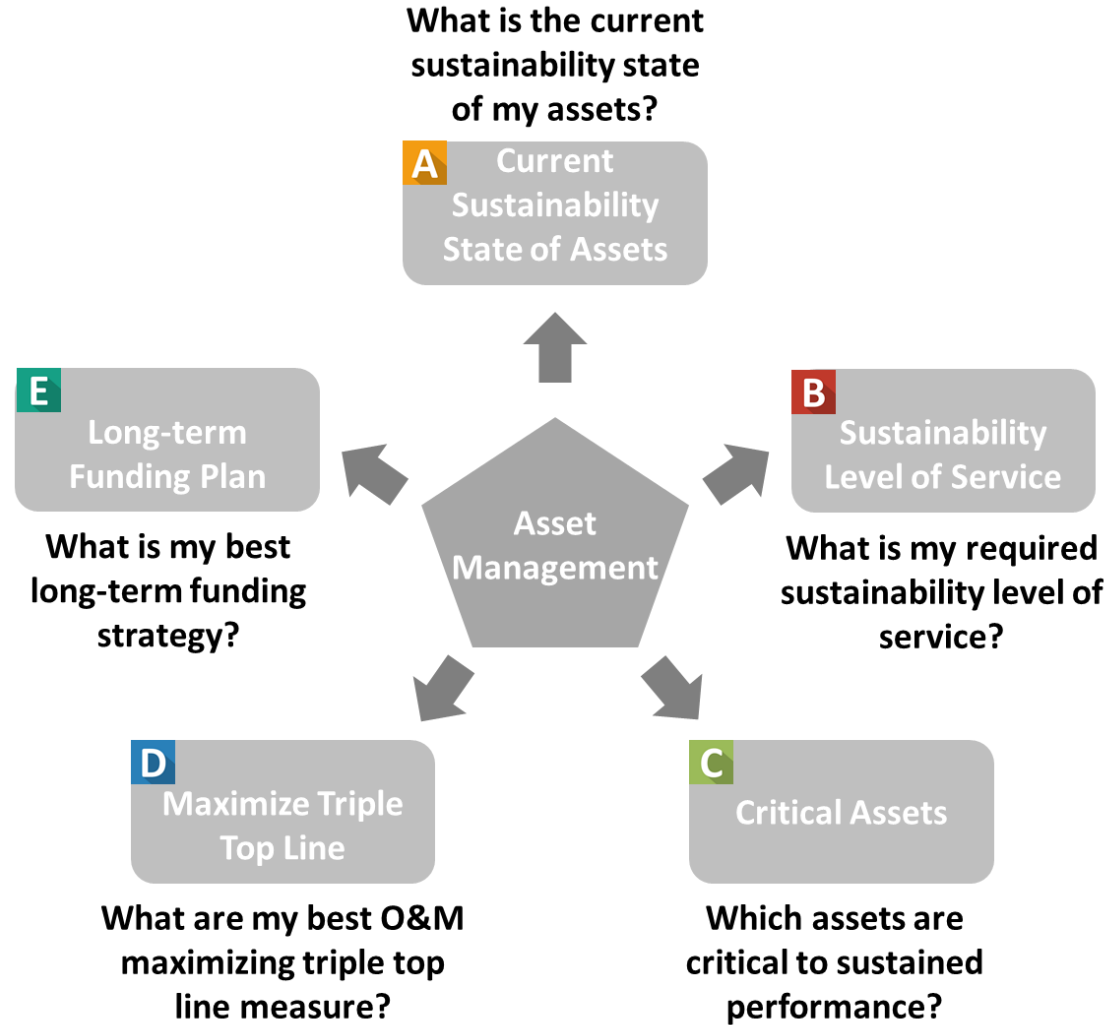
How to quantify?



# 03

## 지속가능한 자산관리

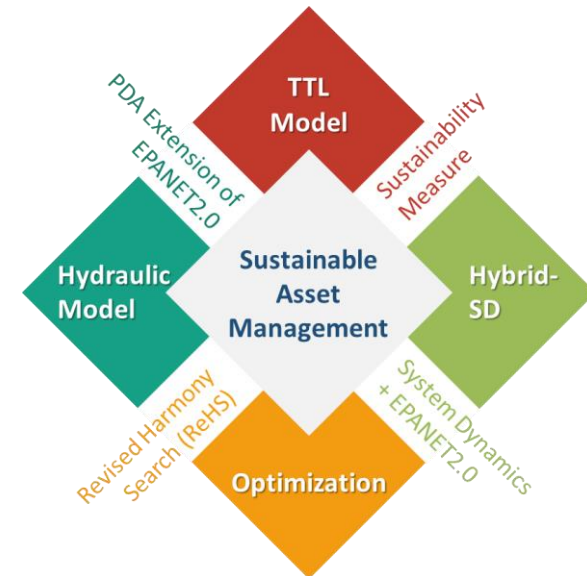
# 지속가능한 자산 관리

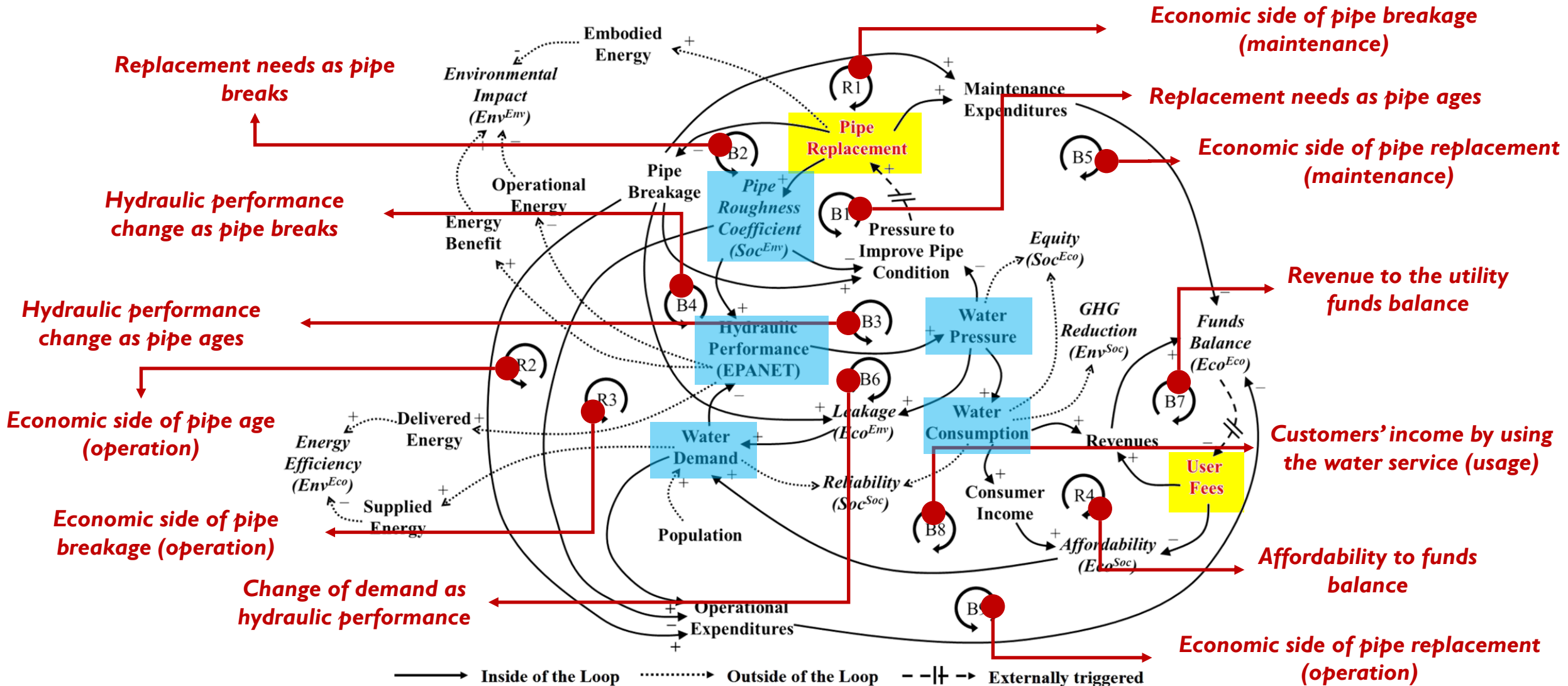


〈상수관망의 지속가능성 자산관리 순서〉

## 상수관망의 노후 문제를 해결하기 위한 지속가능한 자산관리 체계

1. 네트워크 해석 프로그램 연계 상수관망 수리상태 고려 지속가능성 정량화 방법 제안
2. 지속가능성 극대화 위한 관 교체 전략 수립
3. 관 교체 비용 회수를 위한 예산 편성 전략 수립

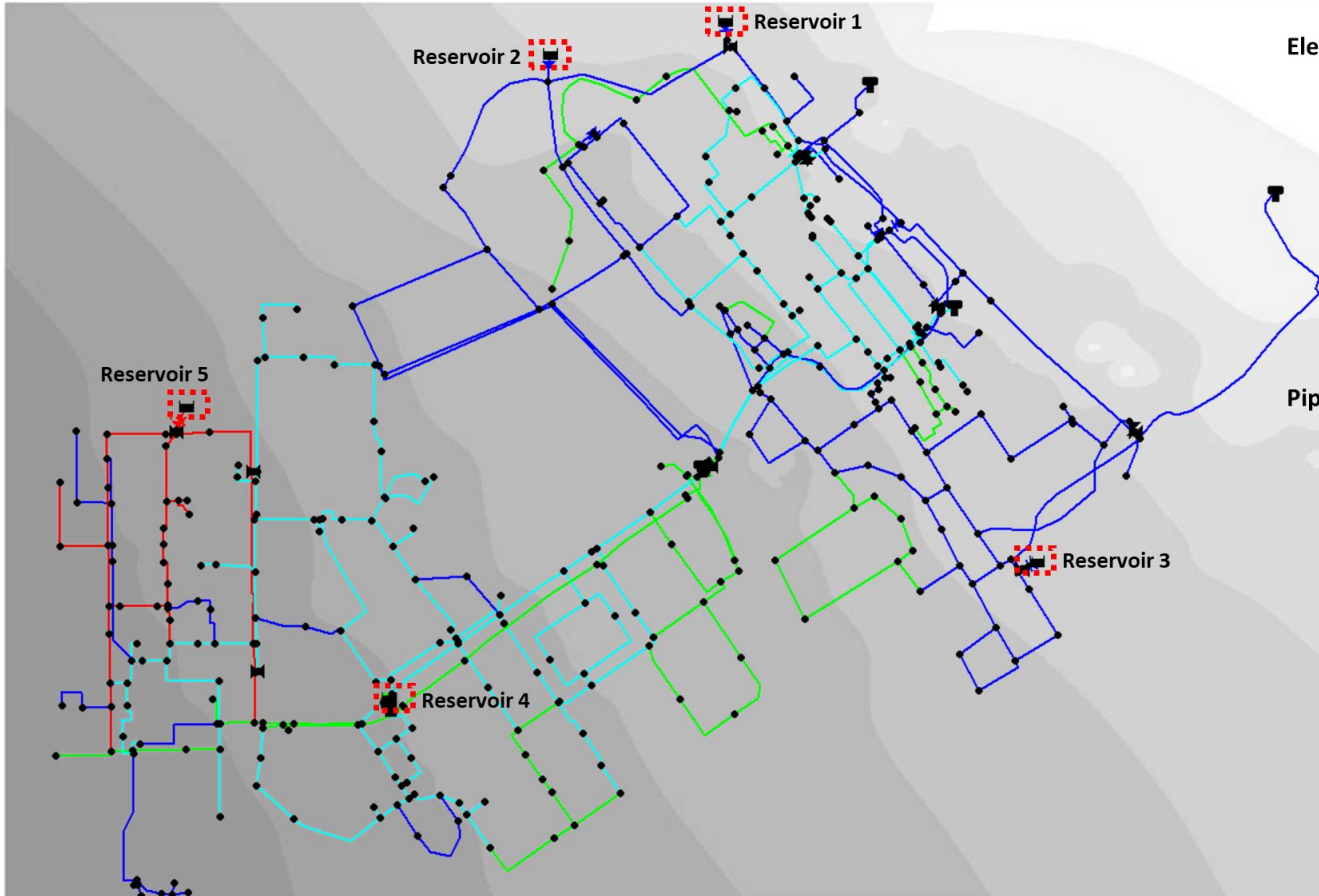




<상수도 관망 하이브리드 시스템다이나믹스 모형>

# 04

## 핵심 결과



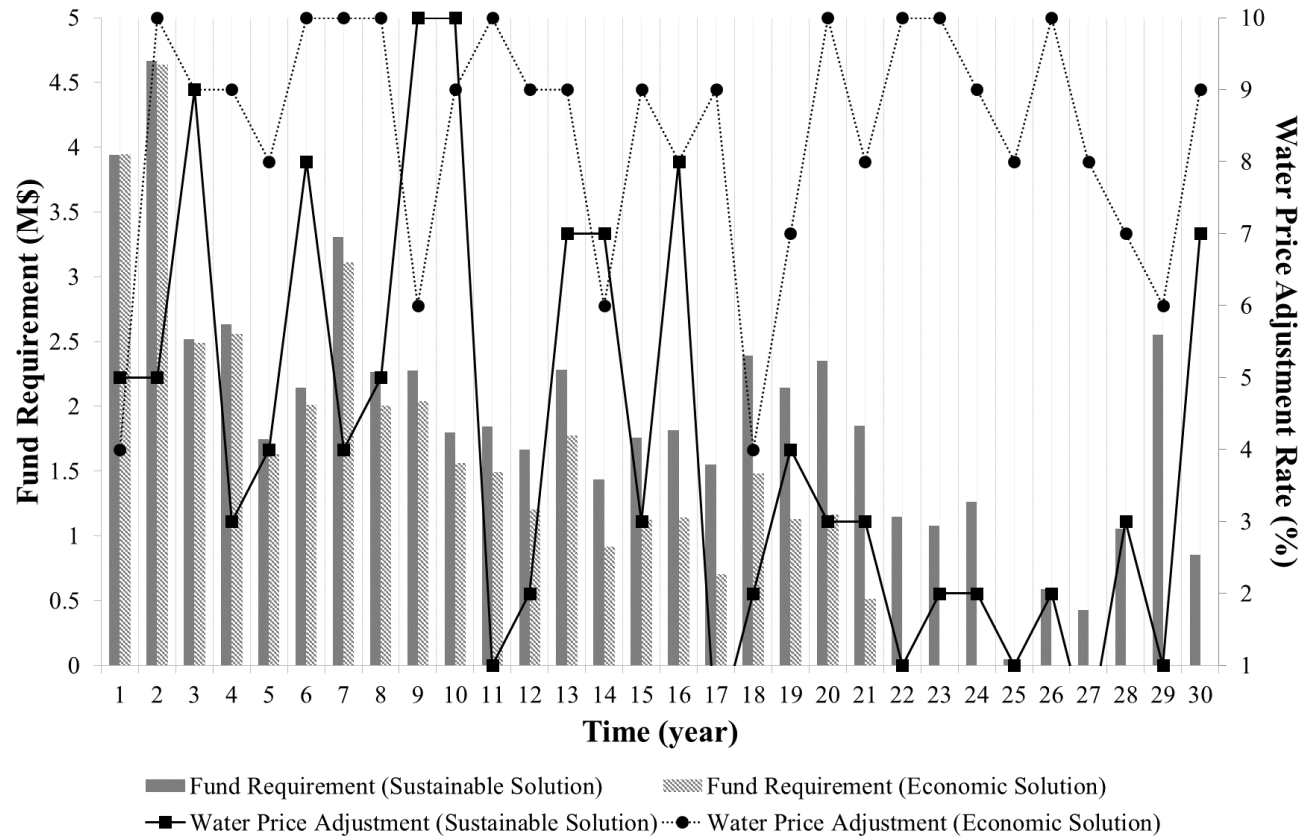
〈U-City 관망도〉

- 수원: 5개
- 탱크: 4개
- 수용가: 441개 (총 수요량 5,096.2 gpm)
- 관: 514개 (2 in에서 32 in 사이의 관으로 이뤄짐)
- 펌프: 5개 (비상 시만 가동)
- 감압밸브: 13개
- 최소 요구 수압: 40 psi

**Problems...**

- 관의 평균 수명은 대략 61년, 최대 수명은 140년으로 관의 노후 문제가 심각한 수준
- 경제 성장 및 도시화의 영향으로 대략 연간 2% 수준의 인구 증가가 예상

# 핵심 결과



## 〈예산 부족분 및 수도세 인상률 결과〉

지속가능한 관 교체 전략은 경제적인 관 교체 전략보다 이른 시기에 관을 교체할 것을 제안함

수도세는 대략 4% 정도 수준으로 인상률을 유지하는 것이 좋은 것으로 나타남 (낮은 인상률로 자주 인상하는 것)

이는 실제 솔트레이크시티의 수도세 인상률과 유사한 값임

대략 12% 정도의 예산이 부족할 것으로 예측함



이른 관 교체, 낮고 잦은 수도세 인상이 필요

# 05

## 향후 개선 방향



# 향후 개선 방향

- ✓ 상수도 관망은 일상생활에 필요한 물을 공급해주는 사회기반 시설임 - 경제성장, 국민 보건 등에 관여하는 부분도 상당함
- ✓ TTL은 상수도 관망의 역할을 종합적으로 평가해줄 수 있는 지속가능성 평가 체계임
- ✓ 이를 활용한 하이브리드 시스템다이내믹스 모형은 상수도 관망의 거동에 따른 **공학적 근거**에 기반한 자산관리의 방향성을 제안해줄 수 있음
- ✓ 나아가 정확한 상황에 대한 모의 및 예측은 향후 전반적인 **물관리 정책 결정의 근거를 제시**해줄 수 있음



POLICY



ENGINEERING



**감사합니다**