

국내 정수장 과다시설용량 실태 분석

Overcapacity of Water Treatment Plants in Korea

이상은^{1)*} · 박희경²⁾

Lee, Sangeun · PARK, Heekyung

1) KAIST 응용과학연구소 2) KAIST 건설및환경공학과

(2008년 12월 23일 접수; 2009년 2월2일 1차수정 ; 2009년 2월12일 2차수정 ; 2009년 2월 12일 채택)

Abstract

Under the supply-oriented policy, efficiency and rationale have not been fully considered in planning of water supply facilities in Korea. As a case, this study shows that large-size systems are suffering from overcapacity problem of water treatment plants, and thus discusses what options should be applied to deal with inefficiency. Water demand of large-size systems has suddenly decreased for the last 10 years while water demand has been often assumed to increase at a regular rate in planning of plants according to excess capacity hypothesis. This inconsistency led to a serious overcapacity. In 2006, total excess capacity of nine large-size systems was more than 1.2 times as large as maximum daily demand of total customers in Seoul. However, their options are expected to stay ex post facto. To prepare the risk of overcapacity, and draw large benefits out of the plants, the authors and other professionals in Korea should further discuss the more adaptive method for prediction of water demand, and systems integration between a large-size system and adjoining systems.

Key words : overcapacity, water treatment plants, excess capacity hypothesis, trend of water demand, scale economies

주제어 : 과다용량, 정수장, 예비용량시설, 물수요 추세, 규모의 경제

1. 배경

공급위주의 정책은 최근까지도 상수도시설의 계획 및 관리에 중요한 원칙이었음은 분명하다. 이론적으로 정립된 표현은 아니지만, 공급위주의 정책이란 의례 상당히 먼 미래에 대한 수요를 예측한 뒤 이를 절대적으로 충족할 수 있는 시설을 대규모로 건설해 온 과거의 사례들을 포괄하고 있다. 또한, 이러한 정책하에서 시설의 계획시 가장 중요한 가치는 효율성 또는 합리성이 아니라, 고객에게 안전한 용수를 얼마

만큼 공급할 수 있는 지, 즉 안전성과 공급능력이라 할 수 있다 (익명의 심사위원의 언급에서 '공급위주의 정책은 이미 1990년대 말과 2000년대 초를 지나면서 질 위주의 정책으로 변경'되었다는 점이 제기되었다. 이는 구체적인 대상과 연구자의 시각차에 따라 다른 판단이 가능할 수 있다. 특히, 특광역시를 중심으로 하는 수질개선사업, 관로정비사업, 관리정보시스템 도입 등을 미루어볼 때 심사위원의 지적을 부분적으로 동의할 수 있다. 그러나 저자들이 박희경 등 [2007]에서 분석한 것처럼, 합리적인 설계를 위한 개념 정

* Corresponding author Tel:+82-33-250-6241, Fax:+82-33-244-6239, E-mail:hyukjae68@hotmail.com(Kwon, H.J.)

립이 미약하고, 침투부하 등 설계를 위한 실증적인 기초 자료를 확보가 부족하며, 물수요의 정체감소 이후에도 계속적으로 증설해 온 여러 정화시설을 볼 때 본 연구에서 초점을 맞추고 있는 상수도 시설의 용량 관리와 관련하여서는 공급 위주의 정책을 벗어나고 있다고 판단하기는 힘들다. 물론, 서비스의 공급위주의 정책이 중요시되었던 표면적인 이유는 상수도 서비스가 공공 서비스의 하나로서, 도시활동의 질적 수준과 고객들의 건강에 큰 영향을 주기 때문이다 [UNESCO-WWAP, 2003]. 그러나 국내의 시설 계획에서 상대적으로 효율성 원칙이 그다지 반영되지 못했던 보다 근본적인 이유는 한국의 도시 발전과도 관련이 있다 [Lee et al., 2005; 이상은, 2008]. 20세기 후반 동안, 많은 도시들, 특히 특광역시들은 전 세계 유래를 찾기 힘든 정도로 빠른 성장 속도를 보였다. 이와 함께, 제한된 중앙 또는 지방정부의 예산내에서 상수도시설을 계획하는 것은 다른 공공 인프라와 뜨겁게 경쟁해왔으며, 시설의 규모는 고객들이 필요로 하는 수준에 비해 부족한 경향이 있었다. 그 결과, 계획의 타당성과 무관하게, 일단 어느 도시에 상수도시설이 대규모로 건설되면 물수요는 빠르게 증가해 이 시설이 제공하는 높은 편익은 효율성에 대한 우려를 불식시켰다. 정리하면, 한국의 경우 도시의 빠른 성장이 효율성을 덜 고려해도 될 충분조건이었던 것으로 판단된다.

하지만 과거의 경험과 달리, 앞으로는 도시 물수요가 증가할 것이라고 가정하는 것은 위험하다고 판단된다. 이상은 [2008] 및 최동진 등 [2008]에서 설명한 것처럼, 최근 출생률이 줄어들면서 많은 도시들의 인구가 더 이상 증가하지 않고 있으며, 특히 대도시 지역은 급수보급률이 거의 포화상태에 도달했다. 그리고 1997년 경제위기 상황에서, 거시적인 경제상황이 악화된다면 공업용수뿐만 아니라 생활용수 또한 물수요가 크게 감소할 수 있음을 확인한 바 있다. 또한 기후변화에 대처하고 수자원을 보호하기 위해 정부에서 계속해서 물수요관리 정책을 발표하고 있다 [일레로, 환경부, 2006]. 이 정책들은 절수기기 및 용수 재이용시설의 설치나 관로 개량 프로그램 추진을 위한 자금 지원 방안이나 요금의 완전회수정책 (full cost-recovery principle)에 따른 공급단가의 인상 등을 포함하고 있으며, 대부분 물수요 감소의 원인이 될 수 있다. 이처럼, 물수요의 최근 상황은 공급위주의 정책과 서로 잘 부합되지 않는 것으로 비춰진다. 그 결과, 최근 전문가 집단 외에도 중앙정부 [감사원, 2005; 국회예산정책처, 2008]에서도 수도사업자들이 상수도시설 계획시 효율성 또는 합리성을 고려하지 않는 것, 특히, 정수장의 불필요한 용량증설에 대해 무겁게 비판을 하고 있는 상황이다. 비슷한 맥락으로, 수도사업자들 또한 정수장 시설용량의 효율성 저하에 대한 대안을 마련하기 위해 노력하고 있는

것으로 비춰진다 [일레로, 한국수자원공사 수도관리처, 2005].

2. 연구의 목적 및 범위

앞에서 설명한 배경에 대해, 국내 정수장 과다시설용량에 대한 현황을 객관적으로 분석하고 합리적인 대안을 마련하기 위한 논의를 전개하는 것은 매우 가치있는 시도라 할 수 있다. 이 목적을 달성하기 위해 본 연구는 다음과 같은 절차 및 범위를 갖는다. 먼저 문헌연구를 통해 현재 정수장의 용량을 증설하는 방법 및 기본 개념을 이론적으로 재검토해보기로 한다. 그 다음, 통계분석을 통해 한국의 물수요에 대한 최근 추세를 정의하며, 현 물수요 추세가 현행 정수장 용량 증설 방법과 잘 부합하는 지 여부를 판별할 것이다. 또한, 예비용량과 가동율을 산정하여 현재 과다시설용량의 문제가 얼마나 심각한지를 정량적으로 제시하고자 한다. 결론적으로는, 과다시설용량 문제를 방지하고 현재의 비효율성을 효과적으로 개선하기 위한 본 저자들의 견해를 제시하고자 한다.

3. 문헌 연구: 예비용량가설 (Excess Capacity Hypothesis)

전통적으로 정수장을 확장하는 일은 설계주기 또는 목표년도 (design period)를 결정된 뒤 물수요 예측 결과에 따라 반복적으로 예비용량을 산출하는 것으로 설명된다. 물수요 예측에 대해서는 매우 복잡하고 다양한 방법들이 많이 있지만, 생활용수를 장기 예측하는 데에는 흔히 1인당 원단위 모델 (per capita water use model)이나 계량경제학 모델 (multivariate model)이 주로 사용되고 있다 [Billings & Jones, 1996]. 위의 모델들은 도시가 증가하는 경우 쉽고 효과적으로 예측 결과를 제공해 왔기 때문에, 물수요는 정수장 설계시 주어진 계수로 간주될 수 있었다. 이에 반해, 설계주기는 장기적인 정수장 건설비용의 최소화, 즉, 효율성을 달성할 수 있도록 결정된다. 건설시 규모의 경제만을 고려한다면, 한 번에 큰 용량 또는 긴 설계주기를 가지고 건설하는 것이 장기적으로는 효율적이다. 그러나 공공투자가 항상 기회비용을 발생시킨다는 점을 고려한다면, 작은 용량 또는 짧은 설계주기를 선택하는 것이 장기적으로 효율적이다. 따라서 설계주기를 결정하기 위해서는, 규모의 경제 효과와 기회비용의 두 요인들이 총 건설비용에 미치는 영향에 대한 이해를 요구한다 [Berthouex, 1971; Lauria, 1973; Lauria, 1983]. Manne [1961]은 다음과 같이 설계주기가 정량적으로 산정할 수 있음을 보인 바 있다 (Figure 1);

$$\begin{aligned}
 P(t_d, D) &= \{f(t_d, D) + f(t_d, D) \times e^{-rt_d} + f(t_d, D) \\
 &\quad \times e^{-2rt_d} + f(t_d, D) \times e^{-3rt_d} + \dots\} \\
 &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n f(t_d, D) e^{-(i-1)rt_d} = \frac{f(t_d, D)}{1 - e^{-rt_d}} \quad (1)
 \end{aligned}$$

단, t_d = 설계주기 (년); D = 물수요 증가율 (m^3 /일);
 r = 할인율; $P(t_d, D)$ = 설계주기 t_d 와 물수요 증가율
 D 로 정수장을 증설할 때 총 건설비용의 현재 (USD);
 $f(t_d, D)$ = 설계주기 t_d 와 물수요 증가율 D 로 정수장
을 증설할 때 1회 건설비용 (USD).

만일, 식(1)에 six tenths rule [Lauria, 1983]을 적용하면
총 건설비는 다음과 같다.

$$P(t_d, D) = \frac{k(t_d D)^m}{1 - e^{-rt_d}} \quad (2)$$

단, k = 단위 건설 비용 (USD/m^3 /일); m = 규모
의 경제 지수.

식(2)는 설계주기 t_d 에 대해 미분가능함수이므로, 총 건설
비용이 가장 효율적인 조건을 다음 식(3)과 같이 얻을 수
있다.

$$m = \frac{rt_d}{e^{rt_d} - 1} \quad (3)$$

단, \hat{t}_d = 효율적인 건설을 위한 설계주기 (년).

위의 식(3)은 설계주기가 단위 건설비나 물수요의 증가율과
무관하며, 할인율과 규모의 경제 지수간의 균형에 의해 결정
됨을 나타낸다. 한편, Manne [1967]에서는 시설확장을 위

한 시기에 대해 검토한 바 있다. 여기서, 정수장의 건설이
효율적이기 위해 기존 시설용량이 완전히 가동되는 시기에
증설되어야 하며, 다음번에 완전히 가동될 때까지 증설되어
서는 안 되는 것이 증명되었다. 위의 두 연구들을 종합하면,
정수장은 물수요가 시설용량과 일치하는 시기에만 규모의
경제 효과와 기회비용을 고려하여 단계적으로 증설할 때 가
장 높은 효율성을 도모할 수 있다. 또한, 정수장 용량 계획시
이전에 건설되었지만 현재 운영되지 않는 용량을 의미하는
예비용량 (excess capacity)의 개념을 편리하게 사용할 수
있다. 이 개념을 이용하여 Figure 1(b)와 같이 용량을 계획
및 관리하는 것이 가장 효율적인 것으로 간주되고 있으며,
이를 예비용량 가설이라 일컫는다. 현재 국내 여러 문헌에서
예비용량과 예비능력 또는 신뢰능력 (reserve margin)에
대해 개념상의 혼돈이 있는 게 사실이다. 예비능력은 고장,
청소, 정비 등 비상시의 잉여 가동능력을 확보해 시설의 신
뢰성을 성능적으로 높이기 위한 것으로 용량산정에 포함되
지 않는다 [박희경 등, 2007]. 이에 반해, 예비용량은 미래
의 수요에 대해 미리 건설되었지만 가동되지 않는 용량으로
위와 같이 경제적인 목적에 의해 보유하는 것이다 (즉, 시설
용량이 25% 여유가 있다고 할 때 이는 모두 미래 수요에
대한 용량이다. 시설의 신뢰성을 25% 추가 확보한다는 의미
는 시설용량이 100%가 되더라도, 125%까지 한시적으로는
가동할 수 있도록 하는 것이다).

정수장의 예비용량가설은 일반적인 플랜트 용량 관리방
식 중 확장주의적 전략 (expansionist strategy)에 해당한
다 [Ritzman & Krajewski, 2003]. 이 방식은 상대적으로
긴 설계주기에 따라 대규모의 용량이 증설되는 특징을 갖는
다. 또한 먼 미래에 대한 수요를 미리 대비하기 때문에, 수요
예측 실패로 인한 과다시설용량, 새로운 사업전략에 따르는
시설의 효용 저하, 기술의 진부화 등의 문제가 발생할 수
있는 단점이 있다. 그러나, 동시에 불충분한 용량에 의한 리

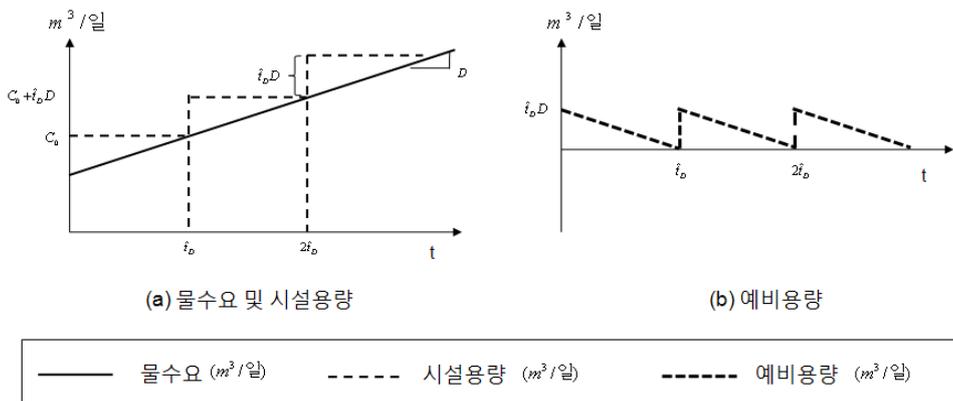


Fig. 1. 예비용량가설

스크를 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 물론 국내외를 막론하고 이러한 장점은 서비스 공급에 신뢰성이 중요하거나 예상한 것 보다 높은 수요의 가능성에 큰 우려를 갖는 상수도 시설에서 중요시되었다. 따라서, 예비용량가설은 정수장 설계시 적용되는 거의 유일한 방법이라 할 수 있다.

4. 물수요의 추세

Figure 1에 나타난 것처럼, 예비용량가설은 물수요가 일정하게 증가한다는 가정을 기초로 한다. 하지만, 최근 물수요를 감소하게 하는 여러 가지 요인이 나타남에 따라 여러 도시들의 물수요 추세가 변하고 있는 것으로 알려져 있다. 이를 명확히 하기 위해, 본 연구에서는 국내 167개 지자체의 수도 시스템 가운데 78개를 통계분석코자 하였다. 선택된 시스템들은 Table 1과 같이 취수에서 급수까지 대부분 자신의 시설만을 가지고 운영하고 있으며, 7개 특광역시도 포함하고 있다. 편의상, 급수인구의 크기에 따라, 10만 명 이하의 시스템들을 소규모 시스템 그룹(group of small-size systems, SG), 10만 명에서 50만 명 사이를 중규모 시스템 그룹(group of mid-size systems, MG), 그리고, 50만 명 이상을 대규모 시스템 그룹(group of large-size systems, LG)로 분류하였다. 위의 분류에 따라 78개 시스템을 구분한 결과 SG, MG, 그리고 LG는 각각 57개, 12개, 9개로 나누어지며, 상수도 통계 [환경부, 연도별]을 이용하여 각 그룹의 최근 10년간 평균 물수요 증가율을 산정한 결과 Table 1과 같은 통계량을 보인다.

물수요의 추세를 체계적으로 분석하기 위해 두 가지 가설

과 통계검증 방법을 적용코자 한다 [Montgomery, 2005]. 첫 번째 가설은 '최근 10년 동안 그룹간에 물수요의 증가율이 같지 않았다'로 그룹간의 물수요의 차이를 명확히 하기 위한 것이며, 가설의 검증을 위해 분산분석(analysis of variance, ANOVA)이 적용된다. 두 번째 가설은 '최근 10년 동안 SG, MG, 그리고 LG의 물수요는 각각 증가, 정체, 감소하였다'로 각 그룹별로 물수요의 추세를 규정하기 위한 것이며, 가설의 검증을 위해 단일 모집단 평균검증(one-sample t test)이 적용된다. 첫 번째 가설에 대해, 귀무가설(H_0)과 연구가설(H_1)은 각각 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$H_0: \mu^{SG} = \mu^{MG} = \mu^{LG}$$

$$H_1: \sim H_0$$

Levene 검증의 유의확률(p-value)은 Table 2와 같이 미리 가정한 type I 오차값인 0.10 보다 큰 값을 갖는다. 따라서, 그룹별로 분류된 자료는 ANOVA 테스트를 위한 등분산성 조건을 만족시키는 것으로 판단된다. 또한 Table 3과 같이 ANOVA의 유의확률은 type I 오차값 보다 적다. 따라서, 귀무가설을 기각하고 연구가설을 채택할 수 있다. 즉, 물수요의 추세는 그룹간에 차이가 없다고 할 수 없다. 사후검증으로 Bonferroni 검증을 수행한 결과, LG의 물수요는 SG 및 MG와 명확히 차이가 있다는 결론을 얻을 수 있다 (Table 4).

두 번째 가설을 검증하기 위해 귀무가설과 연구가설을 각각 다음과 같이 정의할 수 있다.

Table 1. 최근 10년간 평균 물수요 증가율의 기초 통계량

그룹	해당 시스템	샘플수 [n]	평균증가율(%) [$\bar{\mu}$]	표준편차 [S]
SG	과천시, 여주군, 양평군, 가평군, 연천군, 동해시, 속초시, 홍천군, 평창군, 철원군, 화천군, 양구군, 인제군, 고성군, 양양군, 보은군, 옥천군, 영동군, 단양군, 공주시, 금산군, 청양군, 예산군, 무주군, 순창군, 진안군, 당양군, 구례군, 장흥군, 강진군, 해남군, 무안군, 함평군, 영광군, 장성군, 완도군, 진도군, 신안군, 영주시, 상주시, 문경시, 군위군, 의성군, 청송군, 영양군, 영덕군, 고령군, 성주군, 예천군, 봉화군, 울진군, 울릉군, 의령군, 산청군, 함양군, 거창군, 합천군	57	5.23	3.49
MG	김포시, 광주시, 춘천시, 강릉시, 제천시, 여주시, 순천시, 광양시, 포항시, 안동시, 진주시, 김해시	12	3.31	4.86
LG	모든 특광역시, 안양시, 제주도*	9	-0.99	1.96

* 제주도는 운영상의 특성을 고려해 단일 시스템으로 고려

$$H_0: \bar{\mu} = 0$$

$$H_1: \bar{\mu}^{SG} > 0, \bar{\mu}^{MG} \neq 0, \text{ 그리고 } \bar{\mu}^{LG} < 0$$

또한 위 가설에 대해 단일모집단 평균검증을 위한 검증량과 기각역은 다음과 같다.

$$\text{검증량: } t_0 = \frac{\bar{\mu}}{S/\sqrt{n}}$$

$$H_0 \text{의 기각역: } t_0^{SG} > t_{\alpha}(n^{SG}-1), |t_0^{MG}| > t_{\alpha/2}(n^{MG}-1),$$

$$\text{그리고 } t_0^{LG} < -t_{\alpha}(n^{LG}-1)$$

Table 1의 자료를 적용하면 검증량은 각각 다음과 같이 산정된다.

$$t_0^{SG} = 0.198, t_0^{MG} = 0.197, \text{ 그리고 } t_0^{LG} = -0.168 \quad (4)$$

식(4)의 검증량에 의해 기각역은 모두 다음과 같이 만족됨을 알 수 있다.

$$t_0^{SG} > t_{0.10}(56) \approx 1.30, |t_0^{MG}| > t_{0.05}(11) \approx 1.80, \text{ 그리고}$$

$$t_0^{LG} < -t_{0.10}(8) \approx -1.40 \quad (5)$$

단일모집단 평균검증 결과, 모든 그룹에 대해 귀무가설이 기각되고 연구가설이 채택되었다. 이는 본래 MG의 물수요는 정체할 것으로 예상하였으나 SG와 MG 모두 여전히 물수요가 증가하고 있는 것으로 판단된다. 또한 LG의 물수요는 10년 전까지 분명히 증가하는 추세였지만[예를 들어, 부산광역시, 1997], 이제는 감소하고 있는 것을 주목할 필요가 있다. 특히 LG가 전국 급수인구의 절반을 넘는 특광역시들을 모두 포함하고 있음을 고려할 때, 국가전반적인 물수요는 지난 10년 동안 정체 또는 감소하는 것으로 추세가 전환되었다고 판단된다.

5. 과다시설용량

LG의 물수요가 최근 감소하고 있다는 통계분석 결과로부터, 대도시 정수장의 용량설계시 예비용량가설의 일정하게 증가하는 물수요 가정은 타당하지 않다고 할 수 있다. 또한 예비용량가설이 거의 유일한 설계방법이었기 때문에 그 동안 효율성과 관련되어 심각한 문제가 발생한 것으로 예상되었다. 본 장에서는 LG에 속한 시스템들이 얼마만큼 과다시설용량을 겪고 있는지를 이해하기 위해 예비용량과 가동율(system utilization)을 분석하고자 한다.

정수장의 시설용량은 일최대 수요를 만족시키도록 설계되기 때문에 예비용량 또한 같은 단위로 산정되는 것이 적절하다 [박희경 등, 2007]. 따라서, 예비용량의 추세를 파악하

Table 2. 등분산성 검증

Levene 통계량	자유도 1	자유도 2	유의확률
2.083	2	75	0.132

Table 3. ANOVA 테스트

	제곱합	자유도	평균제곱	F ₀	유의확률
그룹간	312.7	2	156.4	12.0	.000
그룹내	974.7	75	13.0		
합 계	1287.4	77			

Table 4. Bonferroni 검증

그룹 (I)*	그룹 (J)*	평균차 (I-J)	표준오차	유의확률
SG	MG	1.92	1.14	.293
	LG	6.22	1.29	.000
MG	SG	-1.92	1.14	.293
	LG	4.30	1.59	.025
LG	SH	-6.22	1.29	.000
	MG	-4.30	1.59	.025

기 위해서 일최대 물수요에 대한 자료의 기록들을 모으거나
첨두부하를 이용하여 일평균 물수요 자료를 조정해야 한다.
일최대 물수요에 대해 국내 자료 축적이 충분하지 않기 때문
에, 본 연구에서는 상수도 통계자료 [환경부, 연도별]에 나
타난 일평균 물수요와 전국수도종합계획 [환경부, 2007]에
서 제시된 첨두부하 값을 이용하였으며, 이에 예비용량은
다음과 같이 정의되었다.

$$C_E = C_D - D_M = C_D - pf \times D_A \quad (6)$$

단, C_E = 예비용량 ($m^3/일$); C_D = 시설용량 ($m^3/일$);
 D_M = 일최대 물수요 ($m^3/일$); D_A = 일평균 물수요
($m^3/일$); pf = 첨두부하.

한편, 가동율은 일반적으로 보유하고 있는 시설용량의 단
기적인 효율을 측정하기 위해 사용되는 간접 지표로 알려져
있다. 마찬가지로 시설용량을 일최대 물수요에 근거해 설계
되기 때문에 가동율을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$U_S = \frac{D_M}{C_D} = 1 - \frac{C_E}{C_D} \quad (7)$$

단, U_S = 가동율.

식(6)과 식(7)을 이용하여 LG에 속한 시스템들의 예비용
량과 가동율을 산정한 결과는 Figure 2와 같다. Figure 2는

이 시스템들의 정수장 용량 계획은 완전히 실패한 것을 보여
준다. 10년 전과 반대로, 수요가 더 이상 증가하지 않았기
때문에 Figure 2(a)에 나타난 예비용량들은 Figure 1(a)과
같은 주기적인 변화를 보이지 않게 되었다. 특히 부산, 인천,
대구, 안양, 제주와 같은 시스템들은 갑작스럽게 물수요가
감소하여 60% 미만의 가동율을 보이고 있다. 더욱 문제가
되는 것은, LG에 속한 9개 시스템의 예비용량만으로 5 백만
 $m^3/일$ 을 넘어섰다는 것이다. 이 규모는 서울시 천만 이상
의 인구에 대한 일최대 물수요의 1.2배에 해당하는 수준이
다. 따라서, 대도시 시스템들은 과다시설용량으로 간주될 수
있으며 효율성을 높이기 위해 대안 마련이 필요하다고 할
수 있다.

6. 과다시설용량에 대한 결정

자체적인 인식에 의해서, 또는 외부의 비판에 의해서든,
과다시설용량으로 인해 위의 시스템들은 더욱더 어려운 의
사결정을 할 수 밖에 없다. 이러한 상황에서 현재 각 시스템
의 수도사업자는 다음과 같이 세 가지 종류의 결정이 자체적
으로 가능하다; (1) 계속해서 용량을 증설, (2) 더 이상 용량
증설을 중단, (3) 불필요한 정수장의 운영으로 인한 비효율
성을 완화하기 위해 일부 정수장을 폐쇄. 첫 번째 결정은
수도사업자가 여전히 예비용량시설을 고수함을 의미한다.
이는 예비용량을 더 늘이고 가동율을 더욱 낮추며, 시스템의
비효율성을 더욱 증가시킬 수 있다. 엄밀하게 말해, 물수요

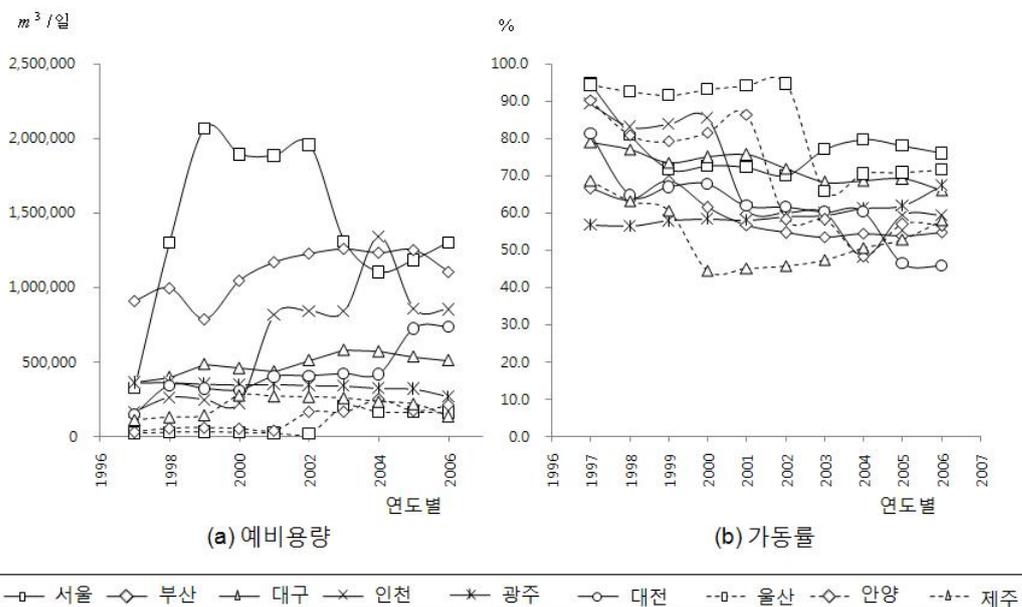


Fig. 2. LG에 속한 9개 시스템들의 정수장 가동 현황

가 감소하는 경우에 예비용량은 전혀 효용을 제공하지 않기 때문에 첫 번째 결정을 선택하는 것은 물수요의 추세 변화에 대한 인식 부족에 의한 것이라 할 수 있다. 두 번째 결정에서도 물수요 감소와 함께 예비용량은 점점 늘어가게 된다. 하지만, 이 결정은 물수요의 추세 변화를 제대로 인식하였기 때문에 더 이상 추가적인 정수장 건설비를 투입하지 않게 된다. 세 번째 결정은 비효율성을 극복하기 위해 어렵지만 활동적인 결정이라 판단된다. 정수장을 폐쇄하는 것은 엔지니어나 경영자가 장래 물수요에 대해서 확실한 판단을 요구할 뿐만 아니라 이전의 불필요한 증설에 대한 책임을 부담해야 한다. 그러나, 이 결정은 장기간 동안 과도한 유지관리비를 감소시키는 경제적 이점이 있다.

다음으로는 LG에 속한 수도사업자들이 실제로 어떠한 결정을 하고 있는 지를 살펴보기로 하였다. 만약 지난 10년 동안 두 번째 결정, 즉, 아무런 용량을 증설하지 않을 경우 추가적으로 정수장이 증설되지 않기 때문에 2006년을 기준으로 예비용량과 가동율은 각각 다음과 같이 산정될 수 있다.

$$\overline{C}_E(2006) = C_D(1997) - pf \times D_A(2006)$$

$$\overline{U}_S(2006) = 1 - \frac{\overline{C}_E(2006)}{C_D(1997)}$$

단, $\overline{C}_E(2006)$ 와 $\overline{U}_S(2006)$ 는 각각 1997년 이후 용량증설을 하지 않을 경우 2006년의 예비용량($m^3/일$)과 가동율(%)을 의미한다.

개략적이지만, 첫 번째 결정을 한 경우 추가적으로 정수장을 증설하였기 때문에 2006년의 예비용량인 $C_E(2006)$ 은 $\overline{C}_E(2006)$ 보다 큰 값을 갖게 되며, 두 번째 결정의 경우

$C_E(2006)$ 은 $\overline{C}_E(2006)$ 과 비슷한 값이고, 세 번째 결정의 경우 정수장을 폐쇄하였기 때문에 $C_E(2006)$ 가 $\overline{C}_E(2006)$ 보다 작은 값을 갖게 되는 것은 당연하다. Table 5는 지난 10년 동안 지자체별로 저마다 다른 결정을 하고 있음을 보여 준다.

Table 5에서는 인천, 대전, 울산 그리고 안양이 지난 10년 동안 용량을 계속 증설하는 결정을 한 것으로 판단되며, 그 결과 가동율이 크게 낮아지고 있다. 즉, 이 도시들은 물수요의 추세 변화에 대한 인식 부족으로 인해 막대한 정수장 건설비를 낭비하고 있는 것으로 분석된다. 광주와 제주의 경우 2006년의 시설용량이 1997년의 시설용량과 비슷한 규모라는 사실에 의해 더 이상 증설하지 않는 결정을 한 것으로 판단된다. 또한 서울, 부산, 그리고 대구는 지난 10년 동안 시설용량이 감소했는데, 유지관리비의 효용을 높이기 위해 불필요한 정수장을 폐쇄하고 생태 공원 등 지역주민들에게 필요한 다른 사업을 시행하고 있다 (예로서, 서울시의 경우 지난 10년 동안 선유정수장, 구의정수장, 뚝도정수장, 신월정수장, 보광정수장 등 비교적 오래된 정수장들을 점차 폐쇄함으로 유지관리비를 절감하고 있다 [서울특별시, 2006]). 현재 대도시들이 과다시설용량의 문제에 대해 위의 어떤 결정을 하더라도 이는 비효율성 극복을 위한 사후적인 접근 (ex post facto)임은 분명하다. 그 결정들은 이미 불필요한 정수장에 대한 자금투자를 실시하였고, 기 보유한 시설중 일부는 장애에도 편익을 제공하지 못하기 때문이다. 즉, 물수요가 감소하는 상황에서 이러한 사후적인 결정에 의존할 경우, 다른 공공투자로 인해 편익을 얻을 기회를 손실하고, 불필요한 정수장의 건설에 대해 요금으로 보상해야 하며, 운영상의 규모의 경제 달성 실패로 인해 물생산 원가가 높아지는 등의 비효율성 문제들은 모두 고객에게 전가된다.

Table 5. 지자체별 용량관련 의사결정 현황

지자체	예비용량 ($m^3/일$)			가동율 (%)		용량관련 의사결정
	$C_E(2006)$	$\overline{C}_E(2006)$	$C_E - \overline{C}_E$	$U_S(2006)$	$\overline{U}_S(2006)$	
서울	1,302,781	2,092,781	-790,000	75.9	66.2	(3)
부산	1,105,471	1,379,471	-274,000	54.8	49.2	(3)
대구	508,425	728,425	-220,000	66.1	57.6	(3)
인천	851,109	281,809	569,300	59.3	81.5	(1)
광주	265,301	285,301	-20,000	67.2	65.6	(2)
대전	732,373	171,373	561,000	45.8	78.3	(1)
울산	158,618	-6,882	165,500	71.4	101.8	(1)
안양	207,764	-14,496	222,260	56.5	105.4	(1)
제주	131,863	156,653	-24,790	57.9	53.7	(2)

7. 논의: 비효율성 극복을 위한 능동적 접근

앞서 설명한 것처럼 사후적으로 어떤 결정을 하는 것은 정수장 시설의 계획시 효율성을 높이는 데에 그리 중요하지 않다. 대신에, 과다시설용량에 대해 사전에 이를 방지하거나 건설된 정수장으로부터 최대한 편익을 얻어낼 수 있는 능동적인 접근이 필요하다. 이를 위해 본 저자들은 다음의 두 가지 사항들에 대한 검토가 필요한 것으로 판단되며, 전문가들의 논의를 더욱 촉구코자 한다.

우선 물수요 예측상의 낮은 적응력(inadaptivity)을 지적할 수 있다. *Gleick* [2003], *이상은* 등 [2007], 그리고 *이상은* [2008]은 물수요 추세가 변할 때 장기 물수요를 예측하는 기존의 기법들이 적절하지 못함을 설명하고 있다. 쉽고 자료요구가 적은 1인당 원단위 모델이 정수장 시설 계획시 큰 문제를 발생시킬 수 있음을 설명하기 위해 실제 자료를 사용하여 다음과 같은 예를 살펴보자. 만일 1997년에 엔지니어가 서울시에 대한 정수장 용량을 계획한다고 하면, 가장 먼저 예측 기법의 적절성을 검토하기 위해 당시까지 물수요와 급수인구간의 관계를 조사할 것이다. Figure 3(a)는 1997년까지 물수요와 급수인구간의 상관관계가 매우 높다는 것을 보여준다. 즉, 결정계수(R^2)가 0.95 보다 높기 때문에 1인당 물사용 계수 $0.426 \text{ m}^3/\text{일}/\text{인}$ 을 가지고 동 기법을 사용할 때 성공적으로 물수요를 예측가능할 것으로 판단할 수 있다. 다음으로는, 이후 10년 동안 급수인구가 어떻게 변할 지를 예측할 것이다. 이는, 건설시 규모의 경제 효과 지수 0.70 [*Koening*, 1967; *Berthouex*, 1972; *Lauria*, 1973]과 할인율 0.075 [*한국개발연구원*, 2001]를 식(3)에 대입할 경우 설계주기를 약 10년으로 하는 것이 가장 효율적

이기 때문이다[*이상은* 등, 2008]. Figure 3(b)은 1차 추세선이 다음 10년까지 급수인구를 추정하기에 통계적으로 적절함을 보여준다. 그러나 이 추세선을 선택하는 것은 직관적으로는 위험할 수 있음을 미리 알아차릴 수 있다. 실제로 1992년부터 5년 동안 급수인구가 실제로 정체 또는 감소하고 있지만 추세선은 1997년 이후에도 급수인구가 증가할 것으로 예측하기 때문이다. 그럼에도 불구하고, 보간법을 이용한 curve fitting시 통계분석상의 확신을 위해 오랜 기간의 급수인구 자료를 포함해야 하며, 또한 오랜 기간 동안 급수인구는 증가했기 때문에 급수인구가 증가할 것으로 예측하게 된다. 그 결과 Figure 1(a)에 나타나듯이, 1997년 이전인 검증구간에서는 결정계수 0.95 이상으로 성공적이었지만, 예측구간에서는 완전히 실패하게 되며 2006년 기준으로 예측 오차는 1.8 백만톤 $\text{m}^3/\text{일}$ 에 달한다.

무엇보다, 1992년부터 5년 동안 물수요와 급수인구가 이미 정체 또는 감소하고 있었던 점은 주목할 필요가 있다. 만약 1997년에 엔지니어가 최근의 추세를 더욱 중요하게 고려할 수 있는 적응력 높은 예측기법을 사용했다면, 예비용량이 전혀 없다고 해도 더 이상 용량을 증설하지 않을 것이기 때문이다. 따라서 첫 번째 대안은 명확하다. 물수요의 추세 변화 가능성이 높다면 통계적으로 curve fitting에 성공하는 것 보다 효과적으로 최근 추세 변화를 설명하는 기법이 중요시 되어야 한다.

또한 과다시설용량이 된 정수장으로 부터 최대한 편익으로 얻는 방안에 대해 활발한 논의가 필요할 것으로 판단된다. 여러 가지 방법이 가능하겠지만 국가적으로 LG에 속한 시스템을 중심으로 SG와 MG에 속한 시스템들을 관로를 통해

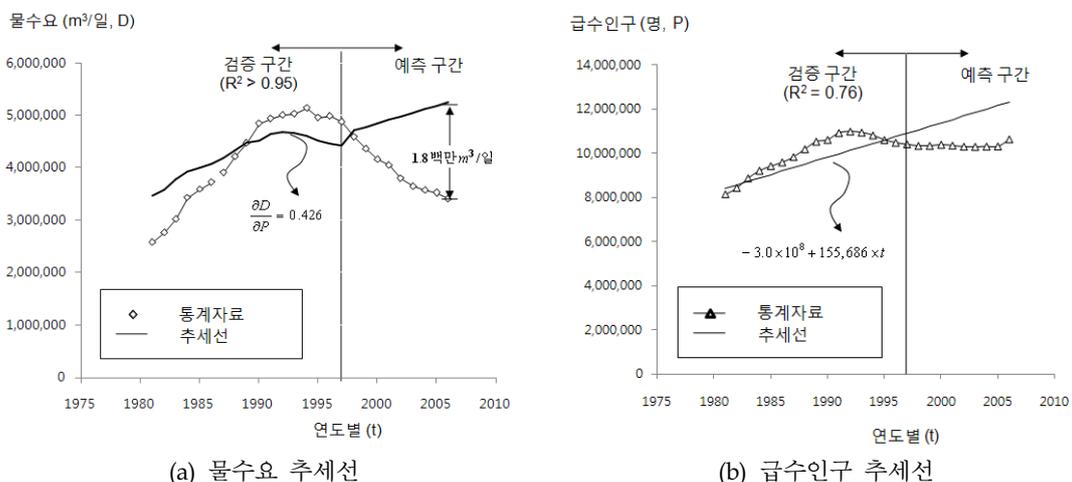


Fig. 3. 서울시 자료를 이용한 물수요 예측 예

연계하여 정수의 도매를 활성화하는 방안에 대해 검토할 필요가 있다. 한 시스템의 과다한 정수장을 다른 시스템에 연계하는 것은 SG와 MG의 시스템들이 과다시설용량의 문제를 미리 방지할 수 있을 뿐만 아니라, 이미 건설된 정수장으로부터 최대한 편익을 얻을 수 있는 방법이기 때문이다. 우선, LG의 입장에서, 계속해서 도시 수요가 감소하는 상황에서 가동률 저하에 대한 비판을 줄이고 물생산에 따른 규모의 경제 효과를 얻기 위해 물공급 범위를 확대하는 것에 대해 긍정적인 의견을 보이고 있다 (일례로, 박희경 · 이상은 [2008]에서 대전시 상수도사업본부 관리자와의 면담 결과에서도 동일한 의견이 확인되었다). 따라서 이 대안은 SG나 MG에 있어서 경제적인 타당성을 확보할 수 있는가에 달려 있다고 판단된다. Bottasso & Conti [2008]이 지적한 것처럼, 여러 시스템을 연계하여 공급규모를 증가시킬 때의 경제성은 물생산 (water production)에서 얻을 수 있는 규모의 경제효과가 물공급 (water distribution)에서 발생하는 규모의 비경제 효과를 상쇄하여 총괄원가를 감소시킬 수 있는가 여부에 의해 달려있다. 또한 이 때 지형적 특징, 수자원의 수량·수질 특성, 도시의 인구분포, 인건비 등과 밀접한 관계가 있기 때문에 대상 지역에 따른 엄밀한 분석이 필요한 것이 사실이다. 그럼에도 불구하고, 미국 [Torres & Morrison, 2006], 프랑스 [Garcia and Thomas, 2001], 영국 [Bottasso & Conti, 2008] 등 최근 해외 사례 연구들은 공통적으로 소규모 상수도 시스템일수록 규모 확대가 총괄원가

의 감소로 이어지는 경향이 분명함을 증명하고 있다. 또한 일본 [Mizutani & Urakami, 2001]에서도 본 연구에서 SG와 MG에 해당되는 시스템들이 비용효율성을 갖는 적정 규모에 도달하기 위해 연계 필요성을 보이고 있다. 비록 추후 엄밀한 분석이 필요하지만, Figure 4는 국내에서도 이러한 대안의 필요성을 잘 시사하고 있다. LG에 속한 대전과는 달리, 인근의 SG에 속한 5개 시스템들은 예비용량이 부족하거나 물수요가 여전히 증가하는 추세에 있다. 또한 이 시스템들은 시설의 대규모 건설을 위한 지방 재원을 조달하려 노력 중이다 [대표적으로, 영동군 상하수도사업소, 2008]. 위에서 언급한 것처럼, SG에 속한 특정 시스템만을 놓고 보면 도매로 물을 공급받는 것 보다 정수장을 증설하는 것이 지리적 또는 수문학적 특징에 의해 다소 경제적인 수 있다. 그러나 보다 포괄적으로, 권역차원에서 볼 때 정수장이 추가되는 것은 좋은 방법일 수 없다. 모든 시스템들이 금강유역 권내에 자리 잡고 있으며 대전의 예비용량이 다른 시스템의 일최대 물수요들을 합한 것의 약 7배에 달하고 있기 때문이다. 즉, 권역에 포함된 전체 시스템들의 효율성을 달성하도록 시스템들간의 관로 연결에 대한 동기가 부여되어야 한다. 따라서 이는 지자체 단위가 아니라 중앙정부 차원에서 능동적으로 지원 및 조정될 필요가 있을 것으로 판단된다 (본 저자의 위 제안은 최근 환경부 [2008]의 통합정책과 매우 유사한 방향을 지향하고 있다. 비록 환경부는 소규모 지자체의 경영 개선이라는 목적을 가지고 있지만, 가장 중요한 정

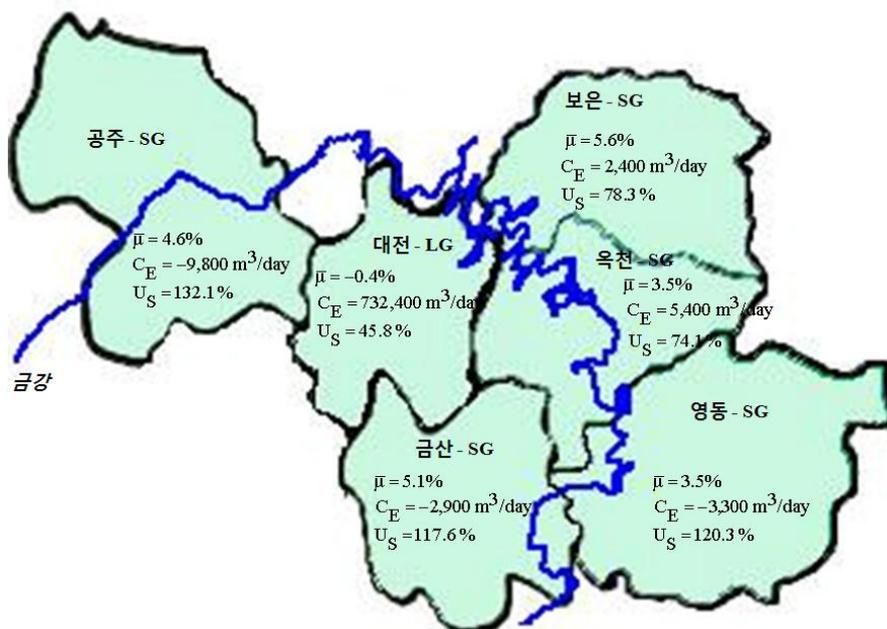


Fig. 4. 금강유역의 시스템간 연계 필요성

부의 역할이 시스템의 규모를 늘리기 위해 필요한 관료연계 비용의 조달임을 설명하고 있다).

7. 결 론

그동안 국내 상수도시설의 계획시 공급위주 정책하에서 효율성과 합리성이 충분히 고려되지 못했다. 본 연구에서는 대표적인 사례로서 정수장의 과다시설용량에 대한 현황 및 대안에 대해 논의하고 있다. 지금껏 예비용량시설에 의해 먼 미래의 물 수요가 일정하게 증가할 것이라 가정하여 대규모 정수장의 용량을 증설해왔지만, 통계분석 결과 대도시의 물수요는 지난 10년간 감소하고 있는 추세였음을 규명하였다. 이로 인해, 대도시들의 예비용량은 점점 늘어가고 있으며 동시에 가동률은 저하되고 있다. 특히, 2006년을 기준으로 9개 대도시의 예비용량을 산정한 결과 서울시 급수인구가 필요한 일최대 물수요의 1.2배에 해당하는 수치였다. 이 같은 상황에서 상수도사업자들은 다양한 결정을 하고 있는 것으로 추론되었다. 일부 상수도사업자들은 여전히 물수요 추세 변화에 대한 인식 부족으로 정수장을 증설하고 있기도 하며, 용량 증설을 더 이상 하지 않기도 하고 서울시 등의 경우에는 유지관리의 효율성을 높이기 위해 비교적 노후화된 정수장을 중심으로 가동 중단을 하고 있는 것으로 파악되었다. 이에 보다 능동적인 접근을 위해, 본 저자들은 물수요 예측시 적응력이 높은 기법을 선호하여 추세 변화에 보다 민감하게 대응해야 함을 논의하였다. 또한 기 건설된 정수장의 편익을 최대한 얻기 위해 대도시를 중심으로 인근의 중소도시와의 연계가 필요하며, 이를 위해 중앙정부 차원의 조정과 지원이 필요함에 대해 촉구하였다.

참고문헌

1. 감사원 (2005) 감사원 보도자료 - 「상수도 개발 및 운영실태 감사 결과」, 12월 15일자
2. 국회예산정책처 (2008) 상수도 개발 및 운영 실태 평가
3. 박희경 등 (2003) 물산업 구조개편 방안 연구, 한국물환경학회, 한국수자원공사
4. 박희경 · 이상은 · 김성훈 · 신은허 · 최동진 (2007) 수도 시설 적정용량 산정을 위한 적용기준 연구, KAIST, 건설교통부 · 한국수자원공사
5. 박희경 · 이상은 (2008) "Kick-off Meeting", 금강유역 맑은물 포럼, 한국상하수도협회, 환경부 (비공개)
6. 부산광역시 (1997) 제36회 부산통계연보 (국회도서관 웹사이트 <http://www.nanet.go.kr>)
7. 이상은 (2008) "물 인프라의 조직화된 복잡성을 다루기 위한 적응형 설계", 박사학위논문, KAIST 건설 및 환경 공학과
8. 이상은 · 최동진 · 박희경 (2007) "시스템 다이내믹스를 이용한 도시 물수요 장기 예측의 동적 모델 연구", 상하수도학회지, 21(1), 75-82
9. 이상은 · 신은허 · 최동진 · 박희경 (2008) "국내 상수도 시설의 과다 용량설계 현황 분석 및 대안 제시", 대한상하수도 학회 · 한국물환경학회 공동 추계학술발표회 논문요약집, 서울, F-20
10. 서울특별시 (2006) 연합뉴스 보도자료 - 「서울시 유수율 향상을 통해 예산절감」, 1월 19일자
11. 상하수도사업소 (2008) 「상하수도사업소 주요업무추진계획」, 영동군 (영동군청 웹사이트 <http://www.yd21.go.kr>)
12. 최동진 · 이상은 · 차동훈 · 박희경 (2008) "인구 구조 변화를 반영한 장기 생활용수 수요의 예측", 대한상하수도 학회 · 한국물환경학회 공동 추계학술발표회 논문요약집, 서울, F-21
13. 한국개발연구원 (2001) 예비타당성조사 수행을 위한 일반지침 연구
14. 한국수자원공사 수도관리처 (2005) 「수도시설 개선 Master Plan 수립 보고서」
15. 환경부 (연도별) 상수도 통계
16. 환경부 (2006) 「환경보전시책 추진상황 보고서」
17. 환경부 (2007) 「전국수도종합계획」
18. 환경부 (2008) 「지방상수도 통합운영 추진방안」
19. Berthouex, P.M. (1971) "Accommodating uncertain forecasts in selecting plant design capacity", *Journal of the American Water Works Association*, 63(1), 14-20
20. Berthouex, P.M. (1972) "Evaluating economy of scale", *Journal of Water Pollution Control Federation*, 44(11), 2111-2119
21. Billings, R.B., and Jones, C.V. (1996) *Forecasting Urban Water Demand*, American Water Works Association, USA
22. Bottasso, A., and Conti, M. (2008) "Scale economies, technology and technical change in the water industry: evidence from the English water only sector", *Regional Science and Urban Economics*, In Press, Corrected Proof (Available online 25 Dec. 2008)
23. Garcia, S., and Thomas, A. (2001) "The structure of municipal water supply costs: application to a

- panel of French local communities", *Journal of Productivity Analysis*, 16(1), 5-29
24. Gleick, P.H. (2003) "Global freshwater resources: soft-path solutions for the 21st century", *Science*, 302(5650), 1524-1527
 25. Koenig, L. (1967) "Cost of water treatment by coagulation, sedimentation, and rapid sand filtration", *Journal of the American Water Works Association*, 59(3), 290-336
 26. Lauria, D.T. (1973) "Water-supply planning in developing countries", *Journal of the American Water Works Association*, 65(9), 583-587
 27. Lauria, D.T. (1983) "Research needs for capacity planning", *Journal of the American Water Works Association*, 75(1), 14-19
 28. Lee, S., Choi, D., and Park, H. (2005) "A benchmarking study for improving governance structure of a Korean water", *Water Science and Technology: Water Supply*, 5(2), 9-15
 29. Manne, A.S. (1961) "Capacity expansion and probabilistic growth", *Econometrica*, 19(4), 632-649
 30. Manne, A.S. (1967) *Investments for Capacity Expansion*, George Allen & Unwin LTD, London
 31. Mizutani, F., and Urakami, T. (2001) "Identifying network density and scale economies for Japanese water supply organizations", *The Journal of the Regional Science Association International*, 80(2), 211-230
 32. Montgomery, D.C. (2005) *Design and Analysis of Experiments*, 6th Edition, John Wiley & Sons, Inc.
 33. Ritzman, L.P. and Krajewski, L.J. (2003) *Foundations of Operations Management*, Prentice Hall
 34. Torres, M., and Morrison, P.C. (2006) "Driving forces for consolidation or fragmentation of the US water utility industry: A cost function approach with endogenous output", *Journal of Urban Economics*, 59(1), 104-120
 35. UNESCO-WWAP (2003) *Water for People Water for Life*, The United Nations World Water Development Report, Barcelona