

시스템 다이내믹스를 이용한 도시 물수요 장기 예측의 동적 모델 연구

Dynamic Model of a Long-term Water Demand Using System Dynamics

이상은¹ · 최동진² · 박희경^{1,*}

Lee, Sangeun¹ · Choi, Dongjin² · Park, Heekyung^{1,*}

1 한국과학기술원 건설 및 환경공학과

2 국토환경연구소

(2006년 10월 31일 논문 접수; 2007년 1월 8일 최종 수정논문 채택)

Abstract

When one forecasts urban water demand in a long-term, multivariate model can give more benefits than per capita requirement model. However, the former has shortcomings in that statistically high explanatory power cannot be obtained well, and change in customer behavior cannot be considered. If the past water consumption effects the future water demand, dynamic model may describe real water consumption data better than static model, i.e. the existing multivariate model. On these grounds, this study built dynamic model using system dynamics. From a case study in Seoul and Busan city, dynamic model was expected to forecast water demand more descriptively and reliably.

Key words: urban water demand, dynamic model, system dynamics, multivariate model

주제어: 도시 물수요, 동적 모델, 시스템 다이내믹스, 인과/구조 모델

1. 서 론

도시 물수요 예측은 보통 과거의 물사용 패턴 자료에 근거하여 장래의 물수요를 예측하는 과정을 의미한다. 물수요 예측은 2차 대전 이후 본격적으로 공급적인 측면에서 새로운 투자의 규모, 순서, 시간을 결정하기 위해 필요한 작업이었지만 최근 들어 각종 수

요관리 정책의 영향을 예측하기 위해서도 필요하기 때문에(Howe et al., 1967, Hanke et al., 1982; Billing et al., 1996) 더욱 정교하고 정책적으로 큰 의미를 주는 방법론을 찾기 위한 연구가 계속해서 진행되고 있다. 특히, 원수 조달 계획이나 전체 시설 용량의 투자를 결정하기 위해 물수요를 장기 예측해야 함에도 불구하고, 여전히 부정확한 예측을 낳고 있어 수도사업자에게 그리고 고객에게 불필요한 비용을 부담시키고

*Corresponding author Tel: +82-42-869-3620, FAX: +82-42-860-3610, E-mail: hkpark@kaist.ac.kr (Park, H.K.)

있다(Billing et al., 1996).

장기 예측 기법은, 정책적인 의미를 분석하기 위해 보다 정교하게 발전되고 있지만, 60년대에 이미 기본적인 개념이 완성된 두 가지가 여전히 가장 광범위하게 활용되고 있다. 우선, '필요량 개념(requirement concept)'에 따르는 1인당 원단위 모델(per capita requirement model)은 인구증가가 필요한 물수량을 결정한다는 가정에 따라 미래 물수요는 인구나 도시 발전만의 함수로 나타내고 있다. 외삽법으로 구한 1인당 원단위 계수(lpcd)에 예상되는 인구를 곱하여 물수요를 예측하고 있다. 이러한 원단위 모델은 예측이 용이하고 비교적 많은 자료를 요구하지 않기 때문에 여전히 많은 사업자들이 활용하고 있다. 또한 인구나 도시발전이 계속적으로 이루어지는 도시의 경우, 관련 시설 투자 또한 이에 대응해야 하기 때문에 결과적으로 신뢰할 수 있는 예측 결과를 제시할 수 있었다.

한편, 60년대 이후부터 근대적인 소비자 행동 이론에 따라 물사용을 재화의 구입이라는 경제적인 관점으로 해석하려는 연구가 주로 진행되고 있다. 이를 위해 다양한 사회 경제적 원인들을 설명변수로, 물수요를 종속변수로 하여 인과/구조 모델(multivariate model)을 구축하였다. 특히, 가격 또는 수입과 같은 경제적 원인에 대한 물사용 변화를 분석하기 때문에 실용적으로, 정책적으로 활용할 수 있는 탄력도를 찾을 수 있다.

2. 연구의 목적

장기 예측에 이용되는 대표적인 두 가지 기법은 Table 1과 같은 문제를 갖고 있는 것으로 판단된다. 우선, 1인당 원단위 모델의 경우 수도 요금이나 고객의 수입이 물수요에 영향을 주지 않는다고 내부적으로 가정되어 있다(Headley, 1963). 그러나 물이 뚜렷

한 대체제가 없음에도 불구하고, 수많은 연구(Gottlieb, 1963; Headley, 1963; Foster et al., 1979)에서 귀무가설이 기각되어 고객의 경제적 여건과 물사용량간의 관련성을 부인하기 힘들다는 결론을 얻은 바 있다. 또한 이러한 관련성은 물사용을 경제적으로 분석하여 정책적으로 활용할 수 있는 여지를 제공하지만, 1인당 원단위 모델을 이용할 경우 이러한 기회는 제한된다. 게다가 1인당 원단위 모델은 물수요를 과다하게 산정하는 경향이 있다. 우선, 최근 들어 수도사업자는 지속가능한 서비스 공급을 위해 비용회수의 관점에 따라 수도요금을 크게 인상하고 있다(Lee et al., 2005). 그러나 1인당 원단위 모델은 수도요금으로 인한 소비위축을 설명할 수 없다. 그리고 인구나 도시 개발이 정체되고 있는 상황 또한 이 기법의 한계를 시사하고 있다. 곡선은 통계적으로 평균제곱오차(mean square error)를 최소화하도록 조정되기 때문에 도시 인구 패턴이 정체 또는 감소할 경우에도 기존의 패턴으로 인해 과다 추정을 피할 수 없다(Billing et al., 1996).

한편, 인과/구조 모델은 갖고 있는 많은 장점에도 불구하고 현장에서 적용이 잘 되지 않는다. 많은 자료를 수집해야 한다는 점 외에도, 기존의 원단위 모델에 비해 신뢰할 수 있는 수준으로 모델을 구조화시키기 힘든 것이 단점이다. 모델의 결정계수를 높이기 위해서는 설명변수들을 가능한 많이 포함시켜야 함에도 불구하고 변수들간에 발생하는 다중 공선성은 모델의 결정계수를 통상적으로 0.5 수준에 머무르게 한다(Billing et al., 1996). 그 결과 인과/구조 모델을 이용한 연구와 적용은 장래 수요를 예측하기 보다는 경제적인 요인이 물사용에 미치는 효과를 분석하는 데에 더욱 집중하고 있음을 알 수 있다(Myolpoulos et al., 2004). 또한 모델은 소비자 행동 이론에서 출발하였음에도 불구하고 정태적인 특징이 있다. 만약 재화의 구매가 과거 소비자의 경험, 인식 등으로 인한 습

Table 1. 대표적인 장기 예측 기법의 특징

예측 기법	장점	단점
1인당 원단위 모델	- 방법이 용이 - 비교적 높은 신뢰도	- 경제적으로 의미를 제공하지 못함 - 인구 정체 또는 감소시 과다 추정
인과/구조 모델	- 경제적인 의미 제공	- 모델의 설명력이 낮음 - 고객 행동 변화를 반영하지 못함

성변화와 관련 있다면 모델은 동적으로 구조화할 때 더욱 현실을 잘 설명할 수 있다. 동일한 인식에 따라 Agthe et al.(1980)는 물수요를 동적 회귀모델로 예측하려는 시도를 한 바 있다. 그러나 구축한 여러 가지 모델들은 자기공선성, 유의확률 등의 통계적 문제로 인해 정태적 모델에 비해 만족할 만한 결과를 얻지 못했다. 그럼에도 불구하고 Agthe et al.(1980)에서 성공하지 못한 것은 정형화된 회귀모델을 통계적으로 해결하지 못한 것이지 물사용에 있어서 과거와 미래의 관련성이 있음은 직관적으로 부정하기가 힘들다. 오히려 회귀모델이 아닌 과거와 미래의 인과관계를 보다 유연하게 구조화할 수 있는 방법론을 적용할 필요가 있다고 판단된다.

논의를 종합해보면, 물수요를 장기 예측하기 위해 1인당 원단위 모델 보다는 인과/구조 모델이 정책적, 실용적 효용을 더 많이 제공할 수 있다. 그러나 인과/구조 모델은 통계적으로 설명력 높은 모델을 구현하기 힘들고 고객의 습성변화를 반영하지 못하는 단점이 있다. 만일 보다 유연한 방법을 통해 설명력 높은 모델을 구현할 수 있다면 장래 수요를 예측하는 데에 큰 효용을 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 방법론

모델의 위상적 관점에서 특정 시스템을 회귀모델로 구조화하는 것은 시스템 해석에 있어서 입/출력 함수 수준(I/O function level)에 국한된다(Ziegler, 1976). 이 단계만으로 통계적인 방법을 통해 물수요의 원인이 무엇인지 발견할 수는 있지만 물수요와 설명변수와의 관계가 일정하지 않을 경우 적절한 모델을 구조화하기 매우 힘들다. 적합한 모델을 구조화하기 위해서는 요소 관계성 수준(coupled component level)에 따라 물수요라는 시스템 내부의 요소들이 어떻게 관계되어 있는지를 규명해야 한다. 이러한 인식에 따라 본 연구는 인과/구조 모델의 개념들을 시스템 다이내믹스 기법을 활용하여 요소 관계성 수준으로 확장하려는 목적을 갖는다. 시스템 다이내믹스는 본래 대부분의 실제 시스템의 동태가 시스템의 구조에서 발견되는 것이라는 관점에 따라 구조적으로 의미있는 피드백 루프 분석에 초점을 맞추고 있다(Richmond, 2003). 또한 시스템의 공통 언어인 stock

과 flow를 통해 다양한 학문의 이론들을 통합하여 표현할 수 있는 장점이 있다(Forrester, 1973; Richmond, 2003).

장기적인 물수요를 예측하는 데에 기존에 시스템 다이내믹스가 적용된 시도는 많이 있다(Stave, 2003; Simonovic, 2002; Xu et al., 2002). 그러나 기존 연구들은 주로 1인당 원단위 모델을 적용하여 물수요를 인구나 도시성장의 결과로 해석하고 있어서 앞에서 언급한 바와 같이 정책적으로 의미있는 시사점을 제시하기에 부족하다. 또한 시스템 다이내믹스는 시스템의 구조적 분석에 장점이 있기 때문에 원인과 결과에 초점을 두고 있는 인과/구조 모델을 발전시키기에 더욱 적합하다고 판단된다.

4. 변수 정의 및 자료

본 연구의 모델 구조화에는 Foster et al.(1979)의 경험이 이용되었다. 그 이유는 동 연구의 모델이 비교적 적은 자료를 요구할 뿐만 아니라, 상당히 많은 도시에 적용되어 모델의 설명변수들이 대표성을 띤 것으로 판단되기 때문이다. Foster et al.(1979)에서 수행한 모델을 참고로 하여 다음과 같이 변수를 정의하였다.

$$Q = f(P, Y, R, N) \quad (1)$$

단, Q = 가구당 물소비량(m³)

P = 평균 수도요금(원/m³)

Y = 가구수입(백만원)

R = 여름철 강수량(mm)

N = 평균 가구인구(명)

본 연구에서는 구축한 모델의 타당성을 분석하기 위해 한국의 가장 큰 두 도시인 서울특별시와 부산광역시 연도별 자료를 이용하였으며 수집가능한 자료의 부족으로 두 도시의 자료를 교차하여 검증하려 하였다. 물론 물수요는 도시성격에 따라 차이가 나기 때문에 모델을 지역별로 각각 구축하여 이용하는 것이 올바르다. 그러나 자료부족으로 인해 통계적으로 신뢰하기 힘든 모델들을 각각 만드는 것보다는 비교적 비슷한 성격의 두 지역의 자료를 교차시켜 유용한 단일 모델을 만드는 것이 보다 적절한 것으로 판단되

었다.

앞선 변수정의를 토대로, 두 도시의 1992년에서 2003년까지의 자료를 **Table 2**와 같이 수집하였다. 이 중 curve fitting에는 1992~1999 자료(N=16)를 이용하고 검증을 위해서는 2000~2003 자료(N=8)를 이용기로 하였다. 각각의 자료는 다음과 같이 수집하였다.

- Q: 부산통계연보, 서울시 상수도사업본부 웹사이트 공개자료와 환경부의 상수도 통계에 나타난 요금을 징수한 수량을 기준으로 같은 문헌에 나타난 가구수를 나누었다.
- P: 인구는 부산통계연보와 서울시 상수도사업본부 웹사이트 공개자료에 나타난 급수인구를 기준으로 하였다.

- Y: 한국에서 가구조사를 5년마다 시행하기 때문에 연도별로 지자체의 가구수입을 파악할 수 없다. 따라서 가구수입과 상관관계가 큰 자료로 대체하려 하였다. 전국적으로 가구수입은 가구당 총생산량과 매우 높은 상관관계(Pearson R = 0.992)를 갖고 있음을 확인하였으며 이를 이용기로 하였다. 가구당 총생산량은 부산통계연보, 상수도사업본부 웹사이트 공개자료, 그리고 통계청 웹사이트를 통해 필요한 자료를 구하였다.
- R: 통계청 웹사이트에 나타난 여름철의 강수량 자료를 이용하였다.
- N: 부산통계연보, 서울시 상수도사업본부 웹사이트 공개자료, 환경부 상수도 통계를 이용하여 필요한 자료를 구하였다.

Table 2. 수집된 통계 자료

연도별	부산시				
	Q(㎡)	P(원/㎡)	Y(백만원)	R(mm)	N(명)
1992	329.9	278.3	16.5	1,308.9	3.52
1993	332.2	290.6	18.0	1,615.3	3.48
1994	355.0	301.9	20.6	959.9	3.43
1995	325.7	319.6	23.1	1,005.7	3.35
1996	333.4	353.0	25.2	1,289.6	3.30
1997	324.0	400.9	26.0	1,598.1	3.23
1998	305.9	401.2	25.2	2,028.8	3.21
1999	303.6	475.4	26.9	2,396.7	3.16
2000	295.2	537.8	28.2	1,248.5	3.13
2001	293.1	566.4	31.1	1,171.3	3.08
2002	288.0	592.0	32.9	2,085.2	3.03
2003	283.0	586.8	34.7	2,328.3	2.97

연도별	서울시				
	Q(㎡)	P(원/㎡)	Y(백만원)	R(mm)	N(명)
1992	322.0	185.8	20.0	1,454.9	3.24
1993	329.9	201.9	22.6	1,292.7	3.18
1994	339.1	233.9	25.8	1,055.8	3.12
1995	344.0	250.3	29.7	1,598.6	3.07
1996	325.0	290.6	32.3	1,256.6	3.07
1997	322.7	298.1	34.3	1,210.2	2.97
1998	310.4	393.6	33.1	2,349.1	2.98
1999	311.1	446	35.8	1,733.1	2.96
2000	309.9	453.1	39.2	1,186.8	2.93
2001	309.9	489.6	42.0	1,386.0	2.89
2002	306.0	500.5	47.1	1,388.0	2.88
2003	297.2	507	47.2	2,012.0	2.77

5. 모델 구조화

5.1. 인과/구조 모델

본 연구에서 구축할 시스템 다이내믹스 모델과 특징을 살펴보기에 앞서 먼저 기존의 방법에 따라 인과/구조 모델을 만들었다. 인과/구조 모델에서 물소비는 여러 가지 외부 요인들의 영향들의 합으로 간주되기 때문에 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q(t) = b_0 + \sum_{j \in Z} E_j(t) \quad (2)$$

$$E_j(t) = b_j I_j(t) \quad (3)$$

단, b_0 = intercept of the model

b_j = estimated slope coefficients

Z = {수도요금, 가구수입, 강수량, 가구인구}

E_j = j번째 외부요인에 대한 물수요의 영향

I_j = j번째 외부요인의 연도별 자료

Table 2의 자료를 식 (2)와 식 (3)에 적용하여 만든 물수요 예측 모델은 다음과 같다.

$$Q = -107.808 - 0.145P + 3.420Y + 122.136N, \\ (-4.090) \quad (2.469) \quad (2.874) \\ \text{Adjusted } R^2 = 0.570 \quad (4)$$

단, 괄호는 t-values

모델의 각 외부요인들은 모두 허용 유의수준 5%를 만족하고, 다중 공선성 또한 VIF의 최대값이 10 수준으로 그리 크지 않음을 확인하였다. 회귀모델의 결정계수는 0.570으로 통상적인 장기 예측 모델의 수준이라 판단되었다. 단, 강수량은 회귀식에 포함되지 않았다. 원래 강수량을 포함시키는 것은 주로 특정 계절에 옥외용수 이용량이 증가하기 때문인데 (Billings et al., 1996), 한국의 가옥형태와 생활습관을 볼 때 옥외용수 이용량이 매우 적으므로 강수량이 반영되지 않은 결과 또한 의미있는 것으로 판단된다.

5.2. 시스템 다이내믹스 모델

인과/구조 모델에서 각종 설명변수는 시스템 관점

에서 볼 때 외부 요인으로 해석할 수 있다. 외부요인으로는 앞에서 정의한 4가지 중 한국의 경우에 유의하지 않은 것으로 분석된 강수량은 제외시켰다.

본 연구에서 시스템 다이내믹스 모델을 이용하는 것은 과거의 물소비가 미래의 물소비에 영향을 주는 것을 구조화하기 위함이다. 따라서 본 모델을 구축하기에 앞서, 모델에 물소비 습성을 반영하기 위해 물수요의 개념을 다시 정의하였다. 소비자 행동 이론에서 많은 자극이 투입될 때 한 재화의 소비는 각각적 구성요소와 학습의 구성요소를 통해 누적된 결정의 산출로 해석된다(Howard, 1969). 같은 의미로, 미래의 물소비는 과거의 물소비와 함께 미래의 각종 외부요인들에 의한 영향이 더해져서 형성된 것으로 가정하는 것은 무리가 없다고 판단된다. 따라서 각종 외부요인들의 영향들은 과거의 물소비와 함께 물소비의 새로운 목표, 즉 가상의 물 요구량을 만들어 낸다고 볼 수 있으며 미래의 물소비량은 변화하는 목표에 계속해서 적응하는 것으로 간주할 수 있다. 이 같은 점들은 기존의 시스템 다이내믹스 모델 중 Hill-Climbing Optimization Model(Sterman, 2000)과 매우 흡사하며 이 모델을 응용하여 Fig. 1과 같이 물수요 모델을 구조화하였다.

Fig. 1의 모델에서, 물소비량은 각 요인들의 함수이므로 새로운 목표는 각 요인의 탄력도를 이용하여 다음과 같이 관계식을 유도할 수 있다.

$$\frac{dQ}{dt} = \sum_{j \in Z} \frac{\delta Q}{\delta I_j} \times \frac{dI_j}{dt} \quad (5)$$

$$= \sum_{j \in Z} \frac{e_j \times Q}{I_j} \times \frac{dI_j}{dt} \quad (6)$$

$$Q^* = Q + dQ \quad (7)$$

$$= Q + \sum_{j \in Z} \frac{e_j \times Q(t)}{I_j} \times dI_j \quad (8)$$

$$= Q + \sum_{j \in Z} \frac{e_j \times Q(t)}{I_j} \times [I_j(t) - I_j(t - dt)] \quad (9)$$

단, Q^* = 새로운 목표(changing goal)

e_j = j번째 요인의 탄력도

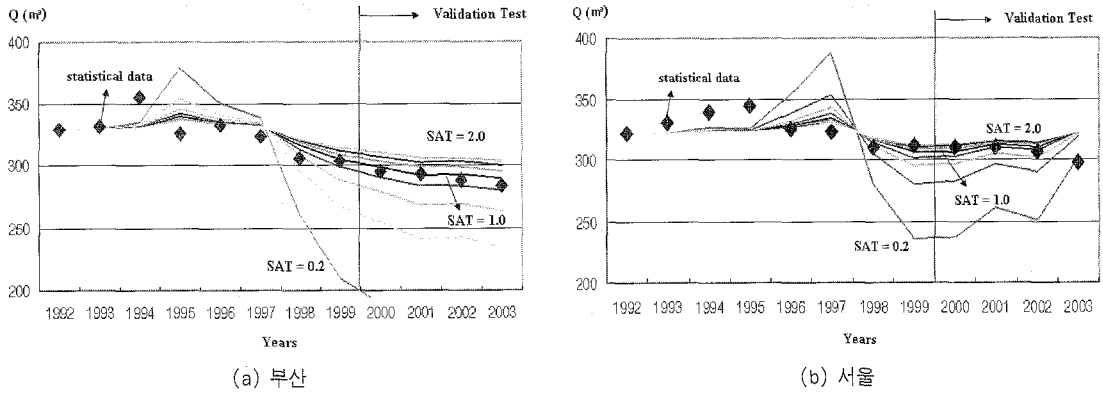


Fig. 2. SAT에 따른 도시별 시뮬레이션 결과.

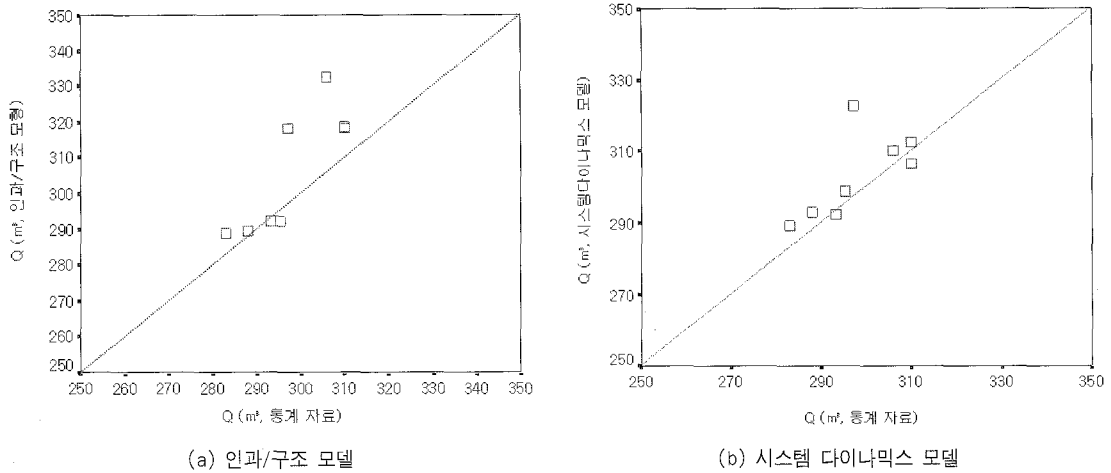


Fig. 3. 산점도 비교.

있었다. 결과분석에 필요한 SAT는 물소비 패턴을 가장 잘 설명하는 것이므로 SAT에 대해 민감도 분석을 실시하였다. 분석 결과, 두 도시 모두 공통적으로 SAT가 1.0일 때 통계자료를 가장 잘 설명할 수 있음을 알 수 있었다(이는 시스템 내 물소비 주체들이 외부환경의 변화에 대해 통상적으로 1년의 적응시간을 요한다는 의미를 갖는다).

6.2. 두 모델의 비교 검토

두 도시의 시계열 자료를 교차하여 얻은 인과/구조 모델은 curve fitting 영역에서 통상적인 장기 예측 모델의 결정계수(adjusted $R^2 = 0.570$) 수준에 만족하였다. 그러나 시스템 다이내믹스 방법론을 통해 얻은 모델은 이 보다 개선된 결정계수(adjusted $R^2 = 0.650$)

를 얻을 수 있었다. 이는, 물소비 습성을 반영할 때 모델은 더욱 정교한 예측 곡선을 얻을 수 있음을 의미한다.

또한 Fig. 3과 같이 검증 영역에서 각각의 모델별로 물소비 예측 결과와 실측 자료를 비교하였다. Fig. 3의 산점도는 모든 점들이 대각선상에 위치한다면 모델의 예측 결과는 실측 자료와 완전히 일치함을 의미하며, 대각선상에서 벗어날수록 모델의 예측 결과가 실측 자료간의 차이가 커짐을 의미한다. 두 모델 모두 검증 영역에서 비교적 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 단지, 시스템 다이내믹스 모델이 대각선상에서 보다 일정한 패턴을 보이고 있으며 편향도가 상대적으로 적기 때문에 보다 안전한 예측이 가능한 것으로 판단된다.

7. 결 론

상당히 많은 도시들의 성장은 안정화되고 수도요금 또한 높은 수준으로 인상되고 있으며 가옥의 핵가족화가 심화되고 있다. 이런 주변환경 변화로 인해 더 이상 도시의 물수요가 과거와 같이 일정하게 증가할 것이라고 예측되지 않는다. 도시계획의 중요한 기능인 물공급을 효과적으로 하기 위해서는 장기적인 물수요 예측 기법은 더욱 개선되어야 한다고 생각된다. 본 연구에서는 이 같은 필요성에 의해 기존의 예측 기법을 진보시키고자 하였다. 특히, 과거의 물소비가 미래의 물소비에 영향을 주는 것이 직관적으로 타당함에도 그 동안 이에 대한 연구는 거의 진행되지 않았다. 따라서 본 연구에서 시스템 다이내믹스 방법론을 활용하여 동적 모델을 구조화하였고 기존의 모델에 비해 다소 정교한 예측곡선을 제시할 수 있음을 증명하였다.

한편, 동 모델이 충분히 예측을 안전하게 할 수 있다는 주장을 하기에는 대상지역의 이용 가능한 자료가 부족하였다. 본 연구를 통해 동적 모델에 대한 적용가능성을 인식하게 됨에 따라 추후 대상지역을 달리해 검증영역에서 충분한 통계분석을 할 필요가 있을 것으로 판단된다. 또한 실제로 많이 적용되고 있는 1인당 원단위 모델과 시스템 다이내믹스 모델을 여러 가지 대상지역들에 대해 비교하는 연구 또한 필요할 것이라고 판단된다. 1인당 원단위 모델이 도시의 특성에 따라 여전히 실용적으로 큰 편익을 제공할 수 있음은 부정하기 힘들다. 따라서 시스템 다이내믹스 모델의 효과가 어떤 도시지역에 특히 큰 의미를 갖는 지에 대해서도 고찰해 볼 필요가 있다.

참고문헌

1. 부산광역시 (연도별) 부산통계연보.
2. 서울특별시 상수도사업본부 웹사이트, <http://water.seoul.go.kr>.
3. 통계청 웹사이트, <http://www.nso.go.kr>.
4. 환경부 (연도별) 상수도 통계.
5. Agthe, D.E. and Billings, R.B. (1980) Dynamic Models of

- Residential Water Demand, *Water Resource Research*, **16**(3), pp. 476-480.
6. Billings, R.B. and Jones, C.V. (1996) Forecasting Urban Water Demand, American Water Works Association, USA, pp. 53-71.
7. Forrester, J.W. (1973) Principles of Systems, Wright-Allen Press, Massachusetts, pp. 1-10.
8. Foster, H.S. and Beattie, B.R. (1979) Urban Residential Demand for Water in the United States, *Land Economics*, **55**(1), pp. 43-58.
9. Gottlieb, M. (1963) Urban Domestic Demand for Water : A Kansas Case Study, *Land Economics*, **39**, pp. 204-210.
10. Hanke, S.H. and de Mare, L. (1982) Residential Water Demand : A Pooled, Time Series, Cross Section Study of Malmö, Sweden, *Water Resources Bulletin*, **18**(4), pp. 621-625.
11. Headley, C. (1963) The Relation of Family Income and Use of Water for Residential and Commercial Purposes in the San Francisco-Oakland Metropolitan Area, *Land Economics*, **39**, pp. 441-449.
12. Howard, J.A. (1969) The Theory of Buyer Behavior, Wiley.
13. Howe, C.W. and Linaweaver, F.P. (1967) The Impact of Price on Residential Water Demand and Its Relation to System Design and Price Structure, *Water Resource Research*, **3**(1), pp. 13-32.
14. Lee, S., Choi, D., and Park, H. (2005) A Benchmarking Study for Reforming a Korean Water Department, *Water Science and Technology: Water Supply*, **5**(2), pp. 9-15.
15. Richmond, B. (2003) An Introduction to System Thinking, High Performance Systems, Inc., pp. 3-34.
16. Simonovic, S.P. (2002) World water dynamics: global modeling of water resources, *Journal of Environmental Management*, **66**(3), 249-267.
17. Stave, A.S. (2003) A system dynamics model to facilitate public understanding of water management options in Las Vegas, Nevada, *Journal of Environmental Management*, **67**(4), pp. 303-313.
18. Sterman, J.D. (2000) Business Dynamics : Systems Thinking and Modeling for a Complex World, McGraw-Hill, pp. 537-543.
19. Xu, Z.X., Takeuchi, K., Ishidaira, H. and Zhang, X.W. (2002) Sustainability analysis for Yellow river water resources using the system dynamics approach, *Water Resources Management*, **16**(3), pp. 239-261.
20. Zeigler, B.P. (1976) Theory of Modelling and Simulation, John Wiley & Sons, Inc., USA., pp. 255-257.