

낙동강 유역의 지속적인 이용을 위한 미래예측

김진이·이석모
부경대학교 환경공학과
(2001년 3월 2일 접수)

Simulating the Future of Nakdong River Basin for the Sustainable Use

Jin-Lee Kim and Suk-Mo Lee

Department of Environmental Engineering, Pukyong National University of Pusan, Pusan 608-737, Korea
(Manuscript received 2 March, 2001)

A macroeconomic minimodel was simulated to suggest the public policy for sustainable use of Nakdong River Basin. The minimodel for the simulation shows the interrelationships between natural environment and economic activity. Topsoil, water, economic assets, and money stock are plotted for 300 years, beginning with 1996 in each simulation.

The computer simulation runs suggest that the Nakdong River Basin system in the near future may strongly be influenced by the favorable availability of outside resources, while the economic assets and money stock may be declined by indigenous environmental stock depletion. The simulation run made under the constant decrease in systems purchased inputs with investment ratio of developed country and for sustainable use. The results of simulation shows the recover of natural environment and decrease of economic activity under these condition.

Therefore, the economic structure of Nakdong River Basin should be transformed from the present industrial structure to the social-economic structure based on an ecological-recycling concept which depend on renewable resources rather than industrial structural which depend on outside resources.

Key words : macroeconomic minimodel, sustainable use, Nakdong River Basin, simulation, social-economic structure

1. 서론

낙동강은 영남 주민의 약 80%에 의해 상수원수로 이용되고 있을 뿐만 아니라 유역 전체의 자연환경과 경제 활동을 하나의 시스템으로 묶어 주는 역할을 하고 있다. 최근 들어 낙동강의 수질악화와 수자원 부족과 관련하여 이를 해결하기 위한 여러 가지 환경정책들이 계획·적용되고 있다. 그러나 이러한 정책들의 적용과 효과는 수질·수량 문제와 경제성 차원에서만 논의될 뿐이며 유역 전체 시스템의 자연환경과 경제활동에 어떠한 결과를 가져올지를 파악하고 예측하려는 연구는 없는 실정이다.

최근 환경회계의 개념을 도입하여 낙동강 수자원의 진정한 가치를 평가하고, 수량·수질관리대책의 대안을 평가하여 낙동강을 지속적으로 이용할 수 있는 정책대안을 도출하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다.¹⁾ 그러나 이러한 개념과 관련하여 현재의 낙동강에 대한 접근은 포괄적인 의미 중 부분에만 기초하고 있어, 때로는 경제의 지속적인 발전가능성이 환경 또는 세대간의 지속적인 발

진가능성과는 다르게 정의될 수도 있다.²⁾

따라서 지속적인 발전가능성의 평가는 자연환경과 경제 시스템을 포괄할 수 있는 보다 더 과학적인 지표에 의해서, 전체 시스템의 현재 상태를 모니터링하는 것과 외부에너지원의 변화에 따른 시스템의 거동에 대한 예측을 필요로 한다.

시스템 생태학은 보편적인 시스템 이론,³⁾ 에너지 언어, 생태학 등을 기초로 자연환경과 경제활동을 포함하는 시스템의 합성, 분석 그리고 시뮬레이션에 이용되고 있으며, 현재 지구 전체 시스템, 국가단위 시스템, 지역 단위 시스템, 그리고 생태계 등의 특성과 예측 평가에 적용되고 있다.⁴⁾

따라서, 본 연구에서는 낙동강 유역의 지속가능한 이용을 위한 EMERGY 분석⁵⁾을 기초로 하여 낙동강 유역의 자연환경과 경제활동에 대한 에너지 시스템 시뮬레이션을 실시하였다. 이러한 시뮬레이션을 통하여 진정한 수질관리는 물론이고, 낙동강 유역의 자연환경과 경제활

등의 상호관계를 분석하고, 유역 외부의 환경요인 변동에 따른 자연환경과 경제활동의 변화를 예측하여 낙동강 유역의 지속적인 이용을 위한 방안을 제시하고자 하였다.

2. 연구방법

에너지 시스템 모델링은 에너지 언어에 의한 다이어그램 작성, 수식화, 프로그램작성 및 시뮬레이션을 통해, 시스템의 시간에 따른 변화 양상을 예측하는 것이다.^{6~8)}

첫째, 낙동강 유역을 대상 시스템으로 시·공간적 경계를 설정하고, 낙동강 유역의 자연환경과 경제활동을 하나의 시스템으로 파악할 수 있도록 외부에너지원, 시스템 내의 주요 생산, 보유량 그리고 소비과정을 에너지 시스템 언어로 나타내며, 최종적으로 각 요소를 에너지, 물질, 그리고 화폐의 흐름에 따라 연결하여 에너지 시스템 다이어그램을 작성한다.

둘째, 에너지 시스템 다이어그램으로부터 에너지 및 질량보존의 법칙에 따라 방정식을 도출하고, 각종 계수(K)를 부여한 다음 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 차분방정식을 유도하여 Basic program 언어에 의한 모델의 프로그램을 작성한다.

셋째, 관련 자료를 이용하여 현상을 재현하도록 조절하는 과정인 모델의 보정은 1996년 각종 통계연감 자료를 이용하여 모델을 보정한다.

넷째, 현재의 조건에 대한 낙동강 유역의 미래예측과 선진국 수준의 개발강도와 투자수준 그리고 낙동강 유역의 지속적인 이용을 위한 투자수준에 따른 유역의 자연환경과 경제활동의 변화를 시뮬레이션한다.

3. 결과

3.1. 낙동강 유역의 자연환경과 경제활동에 대한 에너지 모델

낙동강 유역의 자연환경과 경제활동에 대한 에너지 시스템 다이어그램은 Fig. 1과 같다. 시스템 외부로부터의 유입에는 태양, 비를 포함하는 자연에너지가 영속적으로 유입되고 있고, 교역과 교환을 통하여 화석연료를 비롯한 각종 재화와 용역이 유입된다. 유역 내의 생산활동을 통한 상품의 일부는 유역내에서 이용되고 나머지는 수출과 유역외로 유출된다. 한편 물자의 흐름과는 반대방향으로 화폐가 유통되고 있다.

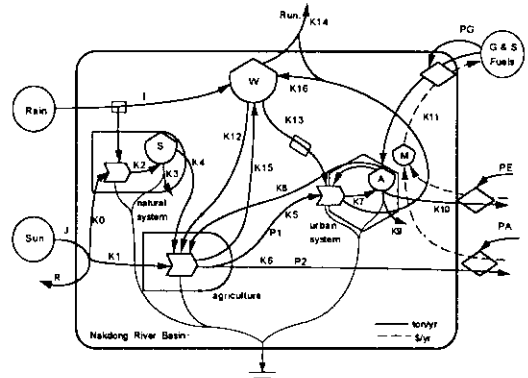
시스템 내부에서는 자연에너지를 이용한 환경자원의 생산과 이를 기초로 유입된 화석연료와 재화와 용역이 상호작용하여 자산을 생산한다. 이러한 생산소비과정에는 에너지 및 물질 보존의 법칙이 성립되며 열역학 제2법칙에 따라 사용된 에너지는 더 이상 이용할 수 없는 형태로 시스템 경계 밖으로 빠져나간다.

3.2. 모델의 수식화

시스템의 외부에너지원, 내부의 보유량, 그리고 각각의 에너지 경로에 부호를 부여하였으며, 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 차분방정식은 Fig. 1과 같다.

각종 관련상수(K)를 산정하기 위한 보정자료는 Table

1과 같이 1996년 자료로서, 먼저 환경자원은 이용가능한 에너지원(R)에 비례하여 형성되며 형성된 환경자원은 그 양과 경제적 자산의 크기에 비례하여 이용된다. 경제적 자산은 기형성된 자산과 환경자원을 이용하여 새로운 자산을 형성하고 교역을 통해 유입되는 증가분과 감가상각과 수출 및 유역외의 유출을 통한 감소에 의한 수지로 계산된다.



$$\begin{aligned}
 P1 &= K5 \cdot R \cdot S \cdot W \cdot A, & P2 &= K6 \cdot R \cdot S \cdot W \cdot A \\
 R &= J / (1 + K0 \cdot I + K1 \cdot S \cdot W \cdot A) \\
 DS &= K2 \cdot R \cdot I - K3 \cdot S - K4 \cdot R \cdot S \cdot W \cdot A \\
 DW &= I - K12 \cdot R \cdot S \cdot W \cdot A + K15 \cdot R \cdot S \cdot W \cdot A \\
 &\quad - K13 \cdot P1 \cdot W \cdot A + K16 \cdot W \cdot A \cdot P1 - k14 \cdot W \\
 DA &= K7 \cdot P1 \cdot W \cdot A - K8 \cdot R \cdot S \cdot W \cdot A - K9 \cdot A \\
 &\quad - K10 \cdot A + K11 \cdot M / PG \\
 DM &= P2 \cdot PA + K10 \cdot A \cdot PE - K11 \cdot M
 \end{aligned}$$

Fig. 1. Energy system diagram of Nakdong River Basin with letters for each storage and pathway for writing model equations with symbols explained in Table 1.

시스템 내부의 초기보유량의 경우, 자연환경자원인 표토층(S)은 7.06 E+09 ton, 수자원(W)은 3.30 E+09 ton이고 산업 및 상업활동 그리고 지역소비활동에 따른 경제적 자산(A)은 2.53 E+08ton이며 화폐보유량(M)은 1.69E+10 \$이었다.

자연환경자원인 표토층(S)의 시간에 따른 변화는 지질학적 작용에 따른 표토층의 생성(K2*R*I), 1.41 E+07 ton/yr에 의해 증가되고 자연손실(K3*S), 8.46 E+06 ton/yr과 농경지 이용(K4*R*S*W*A), 5.64 E+06 ton/yr에 의해서 감소된다.

경작활동에 기초한 농산물은 영속성 에너지원인 태양에너지(K1*R*S*W*A), 3.73 E+18 J/yr과 농경지에 이용되는 표토층(K4*R*S*W*A), 5.64 E+06 ton/yr과 농업용수 사용(K12*R*S*W*A), 3.20 E+09 ton/yr과 경제적 자산의 이용(K8*R*S*W*A), 8.10 E+05 ton/yr의 상호작용으로 생산되고 생산량의 일부는 유역내의 이용(P1, K5*R*S*W*A), 2.23 E+05 ton/yr과 유역의 유출(P2, K6*R*S*W*A), 2.23 E+05 ton/yr로 구성된다.

대상 시스템의 수자원(W)은 강우량(I)에 의존하며, 시간에 따른 수자원의 변화는 농업용수 사용($K12 \cdot R \cdot S \cdot W \cdot A$), $3.20 \text{ E}+09 \text{ ton/yr}$ 및 회수($K15 \cdot R \cdot S \cdot W \cdot A$), $1.30 \text{ E}+09 \text{ ton/yr}$, 도시 용수로 이용되는 취수($K13 \cdot P1 \cdot W \cdot A$), $1.80 \text{ E}+09 \text{ ton/yr}$ 및 회수($K16 \cdot P1 \cdot W \cdot A$), $1.44 \text{ E}+09 \text{ ton/yr}$ 그리고 바다로의 유출, 유역 외로의 유출, 증·발산량을 모두 합한 양($K14 \cdot A$), $2.48 \text{ E}+10 \text{ ton/yr}$ 의 변화에 의하여 결정된다.

산업 및 상업활동 그리고 지역소비활동에 따른 경제적 자산(A) 변화는 생산활동($K7 \cdot W \cdot A \cdot P1$)인 $1.03 \text{ E}+07 \text{ ton/yr}$ 와 유역내로 유입되는 화석연료와 재화와 용역($K11 \cdot M \cdot PG$), $5.09 \text{ E}+07 \text{ ton/yr}$ 에 의하여 증가되고 외부와의 교역과 교환에 의한 유출($K10 \cdot A$), $5.09 \text{ E}+07 \text{ ton/yr}$, 유역내 농업활동의 이용($K8 \cdot R \cdot S \cdot W \cdot A$), $8.10 \text{ E}+05 \text{ ton/yr}$ 와 자산의 감가상각($K9 \cdot A$), $5.07 \text{ E}+06 \text{ ton/yr}$ 에 의하여 감소된다.

또한 화폐보유량(M)은 생산된 자산의 판매($K10 \cdot A \cdot PE$), $2.46 \text{ E}+10 \text{ \$/yr}$ 및 농산물의 판매($P2$, $K6 \cdot R \cdot S \cdot W \cdot A$), $2.23 \text{ E}+05 \text{ ton/yr}$ 에 의해 증가되고 외부로부터의 구매($K11 \cdot M$), $2.46 \text{ E}+10 \text{ \$/yr}$ 에 의해서 감소된다.

Table 1. Calibration values of sources, storages, and flows for the model, Nakdong River Basin, 1996

Item	Description	Symbol or Eqn.	Value	Unit
Environmental inflows:				
1.	Energy inflow	J	$1.38 \text{ E}+19$	J/yr
2.	Energy usable	R	$1.38 \text{ E}+18$	J/yr
3.	Resource used in natural system	$K0 \cdot I \cdot R$	$869 \text{ E}+18$	J/yr
4.	Resource used in agriculture	$K1 \cdot R \cdot S \cdot W \cdot A$	$373 \text{ E}+18$	J/yr
5.	Rain inflow	I	$2.70 \text{ E}+10$	ton/yr
Environmental storages and flows:				
6.	Top soil	S	$7.06 \text{ E}+09$	ton
7.	Production of top soil	$K2 \cdot R \cdot I$	$1.41 \text{ E}+07$	ton/yr
8.	Natural top soil losses	$K3 \cdot S$	$8.46 \text{ E}+06$	ton/yr
9.	Agricultural top soil losses	$K4 \cdot R \cdot S \cdot W \cdot A$	$5.64 \text{ E}+06$	ton/yr
10.	Average water resources	W	$3.30 \text{ E}+09$	ton
11.	Water used in agriculture	$K12 \cdot R \cdot S \cdot W \cdot A$	$3.20 \text{ E}+09$	ton/yr
12.	Water used in urban	$K13 \cdot W \cdot A \cdot P1$	$1.80 \text{ E}+09$	ton/yr
13.	Outflow of water resources	$K14 \cdot W$	$2.48 \text{ E}+10$	ton/yr
14.	Return water from agriculture	$K15 \cdot R \cdot S \cdot W \cdot A$	$1.30 \text{ E}+09$	ton/yr
15.	Return water from urban	$K16 \cdot W \cdot A \cdot P1$	$1.44 \text{ E}+09$	ton/yr
Assets storage and flows:				
16.	Average assets store	A	$2.53 \text{ E}+08$	ton
17.	Production of assets	$K7 \cdot W \cdot A \cdot P1$	$1.03 \text{ E}+07$	ton/yr
18.	Output of assets	$K8 \cdot R \cdot S \cdot W \cdot A$	$8.10 \text{ E}+05$	ton/yr
19.	Depreciation	$K9 \cdot A$	$5.07 \text{ E}+06$	ton/yr
20.	Export	$K10 \cdot A$	$5.09 \text{ E}+07$	ton/yr
21.	Input from the import	$K11 \cdot M \cdot PG$	$5.09 \text{ E}+07$	ton/yr
Money storage and flows:				
22.	Average money store	M	$1.69 \text{ E}+10$	\\$
23.	Income from export	$K10 \cdot A \cdot PE$	$2.46 \text{ E}+10$	\\$/yr
24.	Spent on import	$K11 \cdot M$	$2.46 \text{ E}+10$	\\$/yr
25.	Income from agriculture	$I2 \cdot PA$	$1.08 \text{ E}+08$	\\$/yr
26.	Price of inflow	IG	483.30	\\$/ton
27.	Price of urban outflow	IP	483.30	\\$/ton
28.	Price of agri. outflow	IA	483.30	\\$/ton
Agriculture Products and flows:				
29.	Outflow of agri. product	$I2 \cdot K5 \cdot R \cdot S \cdot W \cdot A$	$2.23 \text{ E}+05$	ton/yr
30.	Agri. product used in basin	$P1 \cdot K6 \cdot R \cdot S \cdot W \cdot A$	$2.23 \text{ E}+05$	ton/yr

*** Footnote for Table 1**

1. Energy inflow from Annual Climatological Report, 1996
2. Energy usable from assuming, 10% 3~4. Resource used from assuming, 90%
5. Environmental inflow from water resources, 1996
6. Storage of top soil
= red and yellow($0.89 \text{ E}+04 \text{g organic/m}^3$) \times Nakdong River Basin area($2.38 \text{ E}+10 \text{ m}^2$) \times ($1 \text{ ton/1 E}+06 \text{ g}$)
= $2.12 \text{ E}+08 \text{ ton/organic fraction}(0.03 \text{ g/1 g soil})$
= $7.06 \text{ E}+09 \text{ ton}$
7. Top soils formation - time of formation :
500years(1982, Jenny) = $1.41 \text{ E}+07 \text{ ton/yr}$
8. Top soils losted in natural system
= (Total top soils formation) \times 60%
= $8.46 \text{ E}+06 \text{ ton/yr}$
9. Top soils losted in agricultural system
= (Total top soils formation) \times 40%
= $5.64 \text{ E}+06 \text{ ton/yr}$
10. Average water resources from MOE, 1996
- 11~14. Data from MOE, 1996
15. Average assets store-using total production per year, assuming a growth rate of dX/dt , and a turnover time of 50 years, the total economic structure A may be calculated using
 $G = \text{Total production} - \text{Petroleum} = 1.03 \text{ E}+07 \text{ ton}$
 $A = 50(G + \text{Input} - \text{Output} - \text{Dep.} \cdot A)$
= $50(1.03\text{E}+07 + 5.09\text{E}+07 - 5.17\text{E}+07 - 0.02 \cdot A)$
= $2.53 \text{ E}+08 \text{ ton}$
17. Depreciation rate
= Average asset / Turnover time
= $1 / 50 \text{ yr}$
= $0.02/\text{yr}$
- 16~29. Data from the each regional statistical yearbook, 1996.

3.3. 모델의 보정

Table 1에 주어진 모델의 보정자료를 이용하여 관련 상수(K)를 구하기 위한 정규화(Normalization) 및 계산 과정은 Table 2와 같다.

사용되지 않은 이용가능한 에너지량은 10%로 가정하였으며,⁹⁾ 경제적 자산의 크기는 경제순환기간을 50년으로 하여 연간 생산량을 이용하여 계산하였으며(Footnote for Table 1), 다른 각종 자료는 통계연감¹⁰⁻¹⁵⁾을 이용하였다. 1996년의 자연환경자원의 보유량인 표토층, 수자원, 그리고 경제적 자산 및 화폐보유량을 1로 정규화하여 외부 에너지원과 각각 에너지 경로의 관련상수(K) 값을 구한 결과는 Table 2와 같다.

Table 2. Calibration of the pathway coefficients for the computer simulation of the Nakdong River Basin, 1996

Item	Description	Symbol or Eqn	Normalization	Calculation	Calibration values(K)
Environmental inflows:					
1.	Energy inflow	J	1		1
2.	Energy usable	R	0.1		0.1
3.	Resource used in natural system	$KD \times R$	0.63	$KD=0.63/(8.18 \times 0.1)$	0.77
4.	Resource used in agriculture	$K1 \times W + A \times R + S$	0.27	$K1=0.27/(0.1 \times 1 + 1)$	2.7
5.	Rain inflow	I	818		818
Environmental storages and flows:					
6.	Top soil	S	1		1
7.	Production of top soil	$K2 \times T \times I$	0.002	$K2=0.02/(8.18 \times 0.1)$	0.002
8.	Natural top soil losses	$K3 \times S$	0.002	$K3=0.002/1$	0.002
9.	Agricultural top soil losses	$K4 \times S \times A + B \times W$	0.008	$K4=0.008/(0.1 \times 1 + 1)$	0.008
10.	Average water resources	W	1		1
11.	Water used in agri.	$K12 \times W + R \times A + S$	0.97	$K12=0.97/(0.1 \times 1 + 1)$	0.97
12.	Water used in urban	$K13 \times W \times A + P1$	0.55	$K13=0.55/(1 \times 1 \times 0.5)$	1.1
13.	Outflow of water resources	$K14 \times W$	7.48	$K14=7.48/1$	7.48
14.	Return water from agri.	$K15 \times W \times R + A + S$	0.39	$K15=0.39/(0.1 \times 1 + 1)$	0.39
15.	Return water from urban	$K16 \times W \times A + P1$	0.43	$K16=0.43/(1 \times 1 + 1)$	0.43
Assets storage and flows:					
16.	Average assets store	A	1		1
17.	Production of assets	$K7 \times A \times W + P1$	0.01	$K7=0.01/(1 \times 1 \times 0.5)$	0.02
18.	Output of assets	$K8 \times A + R \times S + W$	0.002	$K8=0.002/(0.1 \times 1 + 1)$	0.02
19.	Depreciation	$K9 \times A$	0.02	$K9=0.02/1$	0.02
20.	Export	$K10 \times A$	0.2	$K10=0.2/1$	0.2
21.	Input from the import	$K11 \times MTG$	0.2	$K11=1.45/0.2$	7.3
Money storage and flows:					
22.	Average money store	M	1		1
23.	Income from export	$K10 \times A + PE$	1.45	$PE=1.45/0.2$	7.3
24.	Spent on import	$K11 \times M$	1.45	$K11=1.45/1$	1.45
25.	Income from agriculture	$P2 \times A$	0.005	$P2=0.005/0.5$	0.012
26.	Price of inflow	IG	7.3		7.3
27.	Price of urban outflow	IE	7.3		7.3
28.	Price of agri. outflow	IA	0.012		0.012
Agriculture Products and flows:					
29.	Outflow of agri. product	$P2 \times K5 \times R \times S + W \times A$	0.5	$P2=0.5/1$	0.5
30.	Agri. product used in basin	$P1 \times K6 \times R \times S + W \times A$	0.5	$P1=0.5/1$	0.5

에너지 시스템 모델링을 위한 프로그램은 유도된 방정식과 모델 검증에서 얻어진 관련상수(K)값을 이용하여 Quick BASIC 언어로 작성하여 시뮬레이션을 수행하였다. 프로그램이 수행된 결과와 실측 및 조사자료를 비교하여 모델의 정확도를 검토하였다.

과거 15년(1982년~1996년) 통계자료를 이용하여 지역 내총생산(GRDP)과 농산물 생산량(Agricultural output)에 대하여 통계자료와 시뮬레이션 결과는 Fig. 2와 같다. 지역내총생산(GRDP)의 상대오차 범위는 0.00%~0.61%로 1982년부터 초기에는 다소 차이가 있으나 점차적으로 그 오차는 감소하였다. 농산물 생산량의 상대오차 범위는 0.00%~0.03%으로 시뮬레이션 결과가 통계자료를 적절히 재현하는 것으로 나타났다.

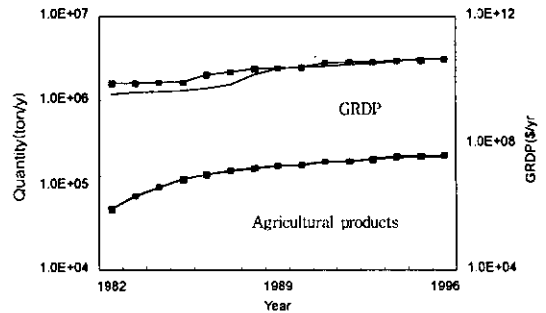


Fig. 2. Comparison of calculated results with statistical data of GRDP and agricultural products(- computed, -- statistical date).

3.4. 낙동강 유역의 미래예측

1996년부터 향후 300년간 낙동강 유역의 자연환경과 경제활동의 변화를 시뮬레이션 한 결과는 Fig. 3과 같다. 유역내의 자연환경자원인 표토층은 Fig. 3과 같이 현재량의 66.0%가 감소되었다.

수자원은 Fig. 3과 같이 초기 3.3 E+09 ton에서 향후 90년 후인 2086년에는 3.2 E+09 ton까지 감소되어 유역은 수자원 부족현상이 나타나게 된다. 그러나 이러한 환경자원의 고갈에 따른 경제활동의 제한으로 인하여 수자원량은 향후 2206년까지는 서서히 회복되다가 2221년부터는 초기 보유량을 회복하여 2296년에는 3.4 E+09 ton까지 증가하여, 현재 보유량의 103.0%까지 증가하게 된다.

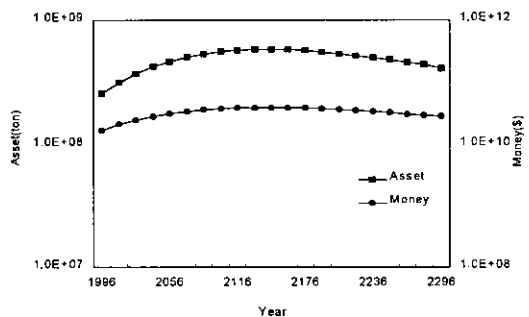
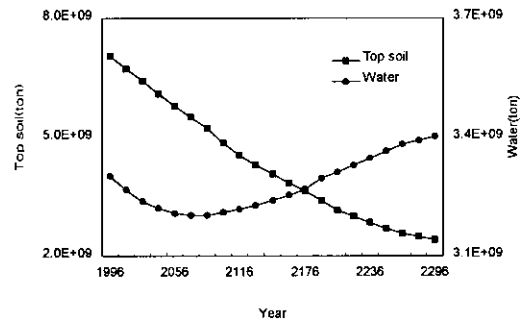


Fig. 3. Simulation results of the Nakdong River Basin model in with present condition.

경제적 자산과 화폐보유량은 Fig. 3과 같이 향후 90년 후인 2086년까지 계속 증가추세를 보였으나 환경자원의 고갈에 따른 경제활동의 제한으로 서서히 감소되었다.

이상의 결과는 수질을 고려하지 않고 수량에 한정된 용수수급 예측결과이기 때문에 최근의 수질 오염에 따라 양호한 수질을 선호하는 시민을 만족시킬 수 있는 수량의 확보 측면에서는 더욱 심각한 용수 부족사태가 우려되며 이로 인한 경제성장의 크기와 속도는 더욱 제한을 받을 것으로 예상된다.

3.5. 선진국 수준의 개발강도에 의한 미래예측

EMERGY 투자비가 7대1을 상회할 경우, 지나친 자연 환경에 대한 압박과 이로 인한 경쟁력의 쇠퇴로 인하여 투자를 다른 지역으로 이전하는 경향이 나타난다.⁴⁾

낙동강 유역의 지속가능한 이용을 위한 EMERGY 분석⁵⁾을 통하여 구하여진 낙동강 유역의 EMERGY 투자비 14.9를 선진국 수준 7로 유지하기 위해 Table 1의 시스템 외부로부터 유입되는 화석연료와 재화와 용역의 양을 5.09E+07 ton/yr에서 2.39 E+07 ton/yr로 감소하여 유역의 변화를 예측한 결과는 Fig. 4와 같다.

유역내의 자연환경자원인 표토층은 Fig. 4와 같이 감소량이 54.0%로 감소속도가 둔화되는 것으로 나타났다.

수자원은 유역내 생산활동이 둔화됨으로 수요량이 감소하게 되어 수자원의 보유량은 향후 30년까지 3.51 E+09 ton으로 계속 증가추세를 보였으며 30년 이후부터는 일정하게 유지되었다.

경제적 자산과 화폐보유량은 향후 30년인 2026년까지 계속 감소하여 각각 6.86 E+07 ton과 4.62 E+09 ton으로 현재의 27.1%와 28.5% 수준이 유지되었다.

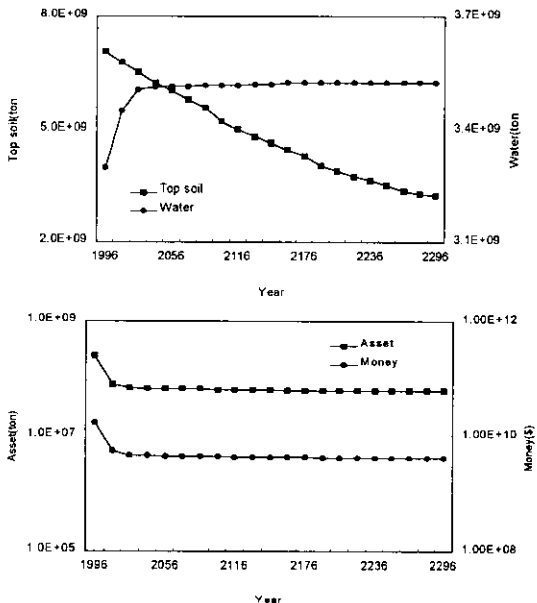


Fig. 4. Simulation results of Nakdong River Basin with investment ratio of developed country.

3.5. 지속적인 이용을 위한 시뮬레이션

지속성 지수와 관련하여 기존의 연구¹⁶⁾에 의하면 지속성 지수가 10이상인 경우에는 지속적인 발전 가능성이 있는 시스템으로 평가되며, 1이하인 경우에는 지속적인 발전 가능성이 적은 시스템으로 평가된다.

낙동강 유역의 지속가능한 이용을 위한 EMERGY 분석⁵⁾을 통하여 구하여진 낙동강 유역의 지속성 지수 0.04를 10.0으로 증가시키기 위해 Table 1의 시스템 외부로부터 유입되는 화석연료와 재화와 용역의 값을 5.09E+07 ton/yr에서 3.59 E+05 ton/yr로 감소하여 유역의 변화를 예측한 결과는 Fig. 5와 같다.

유역내의 자연환경자원인 표토층은 감소량이 53.4%로 감소속도가 둔화되는 것으로 나타났다.

수자원의 보유량은 향후 30년까지 3.59 E+09 ton으로 현재 보유량의 108.8%까지 계속 증가추세를 보였으며 30년 이후부터는 일정하게 유지되었다.

경제적 자산과 화폐보유량은 향후 30년인 2026년에 각각 8.28 E+06 ton과 5.69 E+08 ton으로 현재의 3.3%와 3.4% 수준이 유지되었다.

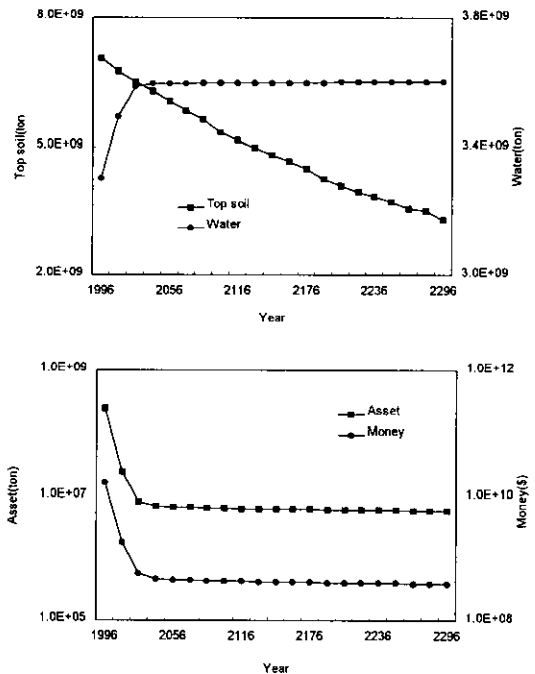


Fig. 5. Simulation result of the Nakdong River Basin for sustainable use.

4. 결론

낙동강 유역의 지속적인 이용을 위하여 에너지 시스템 모델을 이용하여 시뮬레이션 한 결과는 다음과 같다. 향후 300년간 낙동강 유역의 변화를 시뮬레이션 한 결과, 초기에는 공업화와 도시화로 인하여 경제적 자산과 화폐보유량이 증가하며 이로 인하여 자연환경자원인

표토층은 계속 감소추세를 보였으며, 수자원은 2086년까지 계속 감소되었다. 그러나 환경자원의 고갈에 따른 경제활동의 제한으로 경제적 자산과 화폐보유량은 그 증가속도가 서서히 감소되는 추세를 보였으며 수자원은 다시 회복되어 향후 300년 후에는 현재 보유량보다 103.0%가 증가되었다.

현재 수준의 낙동강 유역을 선진국 수준의 개발강도와 투자수준 그리고 지속적인 이용을 위한 투자수준으로 감소시켜 유역의 자연환경과 경제활동의 변화를 시뮬레이션 한 결과 자연환경자원인 표토층의 감소율이 66.0%에서 각각 54.0%와 53.4%로 둔화되었으며, 수자원 보유량은 유역내 생산활동이 둔화됨으로써 양적인 증가가 나타나고, 경제적 자산은 시뮬레이션 초기에 각각 27.1%와 3.3% 감소되고 화폐보유량은 각각 28.5%와 3.4%로 감소되는 결과를 얻을 수 있었다. 이는 현재 계획 중이거나 시행되고 있는 경제활동이 자산의 증가요인이 될 뿐만 아니라 자연환경자원의 고갈을 가중시키는 결과를 초래하여 결국은 경제활동마저도 제한하는 것으로 파악되었다.

따라서 유역의 자연환경과 경제활동간의 조화를 고려하고 지속적인 이용을 위해서는 자연환경자원을 보존하는 방안과 동시에 경제활동에 있어 시스템 외부로부터의 화석연료 및 재화와 용역의 유입을 줄여 환경자원에 대한 고갈을 삭감하는 방안이 필요한 것으로 판단된다.

이상의 결과를 요약하면, 낙동강 유역의 자연환경자원을 지속적으로 이용하기 위해서는 외부로부터의 구매자원에 의존하는 에너지 집약적 산업에서 내부의 환경자원을 최대한 효율적으로 이용할 수 있는 산업으로 전환해야 한다.

참 고 문 헌

1) 김영진·김진이·손지호·이석모, 2001, 환경회계에 의한 낙동강 유역의 환경정책결정에 관한 연구, 한국환경과학회지, 10(2), 85~90.
 2) Ugiati, S. and M. T. Brown, 1998. Monitoring

patterns of sustainability in natural and man-made ecosystem. Ecol. Model. 108, 23-26.
 3) Odum, H. T. 1983. System ecology. John Wiley and Sons, New York. Reprinted in 1994 as Ecological and General System. Univerty Press of Colorado, Niwot, 644pp.
 4) Odum, H. T. 1996. Environmental Accounting. Emery and Environmental Decision Making. John Wiley and Sons, New York, 370pp.
 5) 김진이·손지호·김영진·이석모, 2000, 낙동강 유역의 지속가능한 이용을 위한 EMERGY 분석, 한국환경과학회지, 9(1), 49~55.
 6) Odum, H. T. 1989. Simulation models of ecological economic developed with energy language methods. Simulation (Technical Article) : 69-75.
 7) Odum, H. T. and E. C. Odum, 1998. Revision of Part III. Fundamental Minimodels. A art of Modeling for All Scales. An Introduction to System Simulation. Copyright for Academic Press, 213pp.
 8) Odum, H. T. and E. C. Odum, 2000. Modeling for all scales. 458pp.
 9) Lee, S. M. and H. T. Odum, 1994 Emery analysis overview of Korea. J. of the Korean Env. Sci. Soc. 3(2), 165~175.
 10) 통계청, 1997, 경북통계연보, 680pp.
 11) 통계청, 1997, 경남 통계연보, 710pp.
 12) 통계청, 1997, 대구통계연보, 720pp.
 13) 통계청, 1997, 부산통계연보, 658pp.
 14) 통계청, 1998, 태백통계연보, 435pp
 15) 통계청, 1996, 지역내 총생산, 360pp.
 16) Ugiati S. and M.T. Brown, 1997: Emery-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation. Ecological Engineering, 9, 51-69.