

大規模 社会 工学 시스템 —概觀 및 方向—

朴 成 柱
(韓國科學技術院 教授)

■ 차 례 ■

- | | |
|-----------|--------------|
| 1. 서 론 | 5. 인간-기계 시스템 |
| 2. 경제 시스템 | 6. 결 론 |
| 3. 공공 시스템 | 참 고 문 헌 |
| 4. 교통 시스템 | |

1 서 론

항공공학, 컴퓨터, 전력, 반도체 및 통신 등의 분야에서 주로 발전되어 온 대규모 시스템 이론이 사회 경제 시스템에 적용되기 시작한 것은 한마디로 사회 및 경제의 복잡한 현상도 흡사 수많은 부품들의 복잡한 연관관계에 의한 상호 작용으로 날아가는 항공기의 비행을 설명하는 것과 같이 다룰 수 있을 것이라는 가정에 그 근거를 두고 있다. 이것은 상당한 비약을 내포하고 있고 근본적으로 서로 다른 특성을 지닌 두 시스템을 동일시 하는 데에서 파생하는 많은 문제점을 지니고 있음에도 불구하고 끊임없는 주목을 받아왔으며 많은 발전을 하여 왔다.

그 가장 큰 이유로는 우선 점차 복잡 다단하여 가는 사회 제도나 경제 체계에 반하여 기존의 사회, 경제 분야의 학문에서는 이에 대처할 뚜렷한 도구를 제공하는데 성공적이지 못했다는 데에서 기인하며, 둘째로는 대규모 시스템 이론이 발전해 가며 다학문간의 혼합 분야 예로 관심이 변천되었고 특히 공학 시스템의 분석에서도 사회 경제적인 측면 혹은 사회경제 시스템과의 연결이 중요하다는 것을 인식한 때문

으로 보인다. 전력 시스템을 예로 든다면 종래의 공학적인 측면만이 연구 대상이었던 것이 수력, 화력, 원자력등 종합적인 에너지 시스템으로 파악하는 것이 중요해졌으며 이 에너지 시스템은 다시 경제 시스템 및 원자력 발전에서 보는 바와 같이 환경 시스템 나아가서는 사회의 가치 시스템과의 연결과 이러한 측면을 다 고려한 종합적인 분석이 무엇보다도 중요해지고 있는 것이다.

한 사회가 안고 있는 문제점들 즉 국민 보건, 범죄, 도시 교통, 환경 오염 및 공해, 에너지, 식량, 인플레이션, 불경기등은 각양 각색의 피이드백 관계를 가지고 서로 긴밀하고 복잡하게 연결되어 있는 "대규모의 문제"들이다. 흔히 이러한 문제점들의 해결을 시도하면 그것은 바로 다른 문제점을 더욱 악화시키고 다시 새로운 문제를 파생시키는 등의 순환 관계가 존재하게 된다. 그러므로 이러한 복잡하고, 불확실하며, 대규모인 사회 경제 문제들을 분석해 보고 해결책을 찾기 위해서는 다음과 같은 요건을 갖춘 도구가 필요해 진다.

첫째, 많은 고려사항과 연관 관계를 동시에 다룰 수 있고, 둘째 영향을 미치는 영역이 넓고 의견의 차이가 많을 경우 가치 판단의 기준을 고려할 수 있어야 하며, 셋째 여러 학문

분야의 지식이 통합적으로 적용될 수 있으며, 넷째 어렵고 복잡한 미래의 예측이 가능하고, 마지막으로 구조적인 혹은 제도적인 요소를 충분히 고려할 수 있는 방법이어야 한다.

시스템 공학적 접근 방법은 공학 시스템에서와 마찬가지로 대규모의 사회 경제 시스템에서도 성공적으로 적용되어 왔다.

본 논문에서는 사회가 복잡해 감에 따라 점차 중요성을 더해 가고 있는 사회 경제 시스템에서의 시스템 공학 응용을 살펴 보고 앞으로의 방향을 모색해 보고자 한다.

2 경제 시스템

1) 투입-산출(Input-Output) 모형

시스템 접근방법의 적용이 가장 빨리 이루어진 분야는 경제 시스템을 들 수 있다. 노벨 경제학상 수상자인 Leontief 에 의해 1930년대에 개발된 투입-산출 모형은 주어진 경제 구조하에서 각 산업 혹은 부문간의 연관관계를 계량적으로 분석해 보고자한 시도였다. 투입 산출 모형에서의 기본적인 가정은 한 산업의 생산을 위한 투입은 다른 산업들의 산출들로 구성된다고 보는 것이다. 예를 들어 전 경제를 농업, 광업, 제조업, 서비스업등 네개의 산업으로 구분하였다 하고 각 산업의 단위 시간당 생산량을 x_1, x_2, x_3, x_4 로 표시한다고 하자. 또한 j 산업의 제품 한 단위를 생산하는데 필요한 i 산업의 제품량은 a_{ij} 로 표시하자. 그러면 i 산업의 제품 총 생산량은 각 산업의 중간 원료를 쓰인 투입량과 소비자에 의한 최종 소비 y_i 의 합으로 표시될 수 있다. 즉

$$x_i = \sum_{j=1}^4 a_{ij} x_j + y_i, \quad i = 1, 2, 3, 4$$

로 표시되며 일반적으로 n 개의 산업에 대하여는

$$X_1 = A_{11} X_1 + Y_1$$

으로 표시할 수 있다. 여기에서 X_1 은 각 산업별 생산량 벡터, $A_{11} = \{ a_{ij} \}$ 는 투입 산출 계수 행렬 혹은 기술적 연관 행렬, Y_1 은 각 산업별 최종 소비 벡터를 나타낸다. 이식은 다시

$$X_1 = (I - A_{11})^{-1} Y_1$$

즉 $(I - A_{11})$ 이 특이 행렬이 아닐때(nonsingular), 최종 소비가 주어지면 소비와 중간 투입량을 충족시키는 각 산업별 생산량을 구할 수 있게 된다. 이를 도표로 보이면 그림 1과 같다.

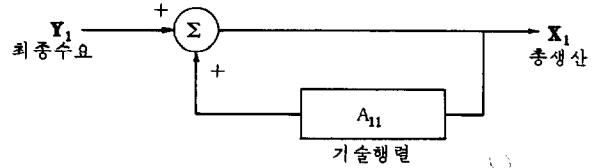


그림 1. 간단한 형태의 투입-산출 모형

그림 1은 투입 산출 모형의 가장 기본적인 아이디어를 나타내 주고 있다.

이 시스템은 최종 수요에 의해서 움직여 저고 수출 수입등의 무역은 고려하지 않은 폐쇄적 경제 시스템을 표현하고 있다.

한 경제에서의 총 생산은 중간 투입물과 최종 수요를 충족하기 위한 것이다. 그러나 생산 활동은 부산물로서 다른 산업 혹은 사회 전체적으로 도움이 나해가 되는 즉 외부 경제 혹은 비경제의 외부 영향(externalities)을 초래하게 된다. 이것은 특히어느 한 산업 또는 경제 활동만이 아닌 사회적인 가치 측면에서의 고려가 중요시 되기 시작하면서 투입 산출 모형의 필수사항이 되었다.

외부 영향에는 공해, 교육, 세금등이 포함될 수 있으며 이러한 것을 고려하기 위하여 앞의 식을 수정하면,

$$Y_2 = A_{21} X_1 = A_{21} (I - A_{11})^{-1} Y_1 = F Y_1$$

으로 표시할 수 있다. 여기에서 F 는 최종 수요 한 단위를 위한 Y_1 의 직접 필요량을 나타내는 요소 내 용 행렬이다.

흔히 외부 영향은 총 생산만이 아니라 최종 수요에 의해서도 영향을 받는다. 세금의 예를 든다면 총 생산에 대한 세금외에 판매세와 같은 최종 수요에 대한 세금도 존재한다. 또한 외부 영향은 다른 산업의 수요에 영향을 줄 수 있으며 투입이 영향을 증감시킬 수도 있다.

이러한 요인들을 고려한 예를 수식으로 표현하면

$$X_1 = A_{11} X_1 + A_{12} X_2 + Y_1 + B_{12} Y_2$$

$$X_2 = A_{21} X_1 + A_{22} X_2 + B_{12} Y_1 + Y_2$$

를 들 수 있으며 이를 그림으로 보이면 그림 2와 같다.

같은 방식으로 n 개의 내생(벡터) 변수와 m 개의 외생 변수가 존재하는 일반적인 투입 산출 모형은

$$X = AX + BY$$

로 주어진다. 여기에서 $X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix}$

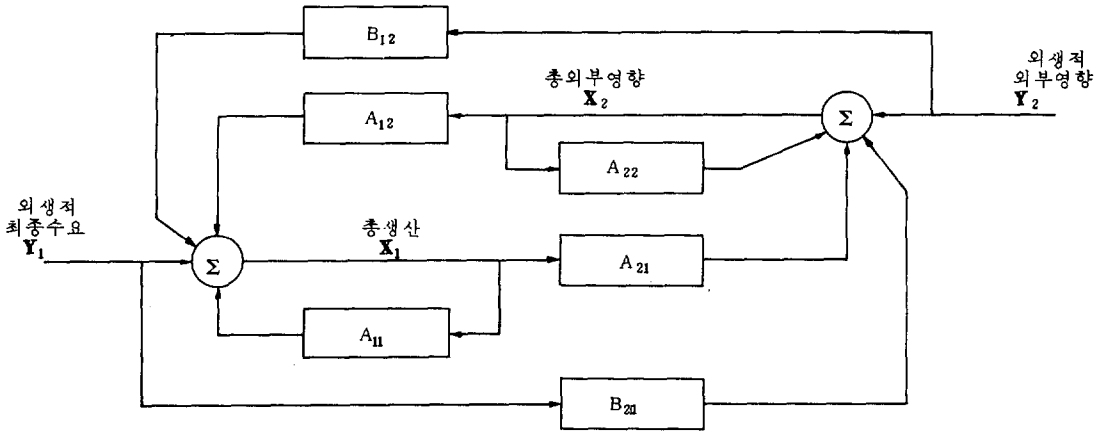


그림 2. 외부의 영향을 고려한 투입 산출 모형의 예

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & \dots & A_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ A_{n1} & \dots & A_{nn} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} I & B_{12} & \dots & B_{1m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ B_{m1} & \dots & \dots & I \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_m \end{bmatrix}$$

이다. 앞에서와 마찬가지로 최종 수요가 주어졌을 경우의 총 생산량은

$$X = (I - A)^{-1} B Y$$

로 구해진다.

여기에서 행렬 A, B 는 생산수준, 시간 혹은 다른 변수의 함수로 볼 수도 있으며 이 경우에는 각각 $A(X, t), B(X, t)$ 로도 표시할 수 있다.

이제까지 생각한 투입 산출 모형은 생산과 수요가 매 시점마다 일치하는 균형 모형이며 이 모형에서 수요와 공급이 일치하지 않으며 그 차이가 시간에 따라 계속 생산에 영향을 주는 동적모형으로 발전시킬 수 있다. 실제로 최종 수요의 일부는 재고로 남아 있으며 최종 수요의 증가는 시스템이 안정적일 경우 생산을 증가시켜 새로운 균형점을 향해 움직일 것이다. 이 새로운 가정을 고려한 동적 투입 산출 모형은

$$\dot{X}(t) = A X(t) + B \dot{X}(t) + Y(t)$$

와 같이 표시할 수 있다. 여기에서 $B \dot{X}(t)$ 는 재고율을 Y 는 외부 영향을 고려한 수요를 위한 공급량을 표시한다.

만약 총 생산을 수요와 공급의 차이에 비례하게 변화시킨다는 가정을 추가하면

$$\dot{X} = F e$$

$$e = D - Y$$

가 된다. 여기에서 D 는 수요를 나타내고 F 는 생산공급의 동적 특성을 나타내는 전환 행렬이라 할 수 있다.

위식은 그림 3과 같이 표시된다.

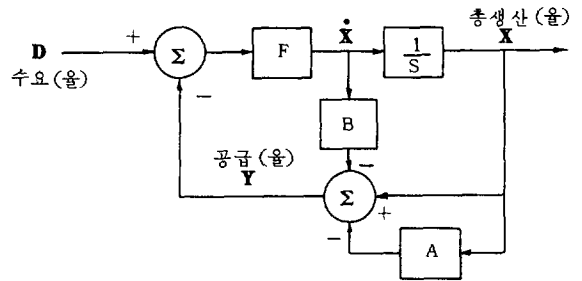


그림 3. 동적 투입 산출 모형

투입 산출 모형은 간단한 형태의 연관 관계를 가정하고 있으나 경제-환경-사회의 복잡한 대규모 문제들에 대한 종합적인 인과 관계를 볼 수 있다는 점과 손쉽게 적용시키고 분석해 볼 수 있다는 점에서 실제로 많은 응용이 이루어 졌고 주목을 받아왔다.

2) 경제 성장 모형

이론적으로 어느 한 시점에서의 생산 기술은 투입 요소에 대한 1차의 동차 변환식(homogeneous transformation)으로 표시할 수 있다. 즉

$$G(X_1, \dots, X_n; V_1, \dots, V_n) = 0$$

여기에서 X_i 는 상품 i 의 총생산량이며 V_j 는 j 번째 생산 투입 요소(factor input)의 축적된 양을 말한다.

만약 시간에 따른 기술 진보가 없고 가장 원초적인 생산 투입요소는 노동뿐이며 최종 소비 상품은 통합된 한가지로 가정하자. 그러면 이러한 가정에 근거한 생산 변환 함수는

$$Y_0 = H(Y_1, \dots, Y_n; K_0, K_1, \dots, K_n)$$

로 표시된다. 여기에서 Y_0 는 소비재의 총생산, Y_i

는 i 번째 자본재의 총생산, K_i 는 i 번째 자본재의 축적된 총량, $K_0 = L$ 는 노동력을 나타낸다. H 는 1 차의 동차 함수이므로 단위 노동력당 생산 변환 함수는

$$\begin{aligned} y_0 &= Y_0 / L = H(Y_1 / K_0, \dots, Y_n / K_0; 1, \\ &K_1 / K_0, \dots, K_n / K_0) \\ &= H(y_1, \dots, y_n; 1, k_1, \dots, k_n) \\ &= T(y_1, \dots, y_n; k_1, \dots, k_n) \\ &= T(y, k) \end{aligned}$$

로 표시할 수 있다. 여기에서 y 와 k 는 각각 단위 노동력당의 총생산 및 자본재의 배타를 말한다.

자본재 i 는 시간이 흐름에 따라 일정을 δ_i 에 의해 가치가 감소한다고 볼 수 있으므로 i 번째 자본의 변화는 i 번째 상품의 생산액중 재투자액에서 감가액만큼 뺀 것 즉

$$\dot{K}_i = s_j Y_j - \delta_i K_i$$

로 표시된다. 여기에서 s_j 는 j 번째 상품의 저축율을 나타낸다.

또한 노동력이 일정을 g 로 성장한다고 가정하면

$$\dot{k}_i = s_i y_i - (g + \delta_i) k_i$$

가 된다.

한편 상품의 가치와 자본재의 가치 즉 가격 p_i 와 임대율 ω_i 는 y, k , 및 y_0 로 부터 구해질 수 있으며 완전 경쟁과 완전 정보 즉 가격 변동의 기대치와 실제 가격 변동이 일치하는 것으로 가정하면 투자가가 p_i 원을 투자해서 얻는 순 수익은

$$p_i r_o = p_i + \omega_i - \delta_i$$

로 표시된다. 여기에서 r_o 는 공통의 수익율 즉 이자율 되며, 가격의 변화율과 임대율의 합에서 감가상각율을 뺀 것과 P_i 만큼 투자했을 때 얻는 수익율이 일치하는 것을 말해 준다.

앞의 두식을 다시 표시하면

$$\dot{k} = s^T y - (g + \delta) k, \quad k(0) = \bar{k}$$

$$\dot{p} = -w + p [r_o + \delta]$$

여기에서 $(g + \delta)$ 는 $g + \delta_i$ 가 요소인 $(n \times n)$ 대각선 행렬, $(r_o + \delta)$ 는 $r_o + \delta_i$ 가 요소인 대각선 행렬을 나타낸다.

만약 이 경제 시스템에서 사회의 가치 척도인 복지 함수 (social welfare function) 가 총 소비를 극대화 하는 것이라면

$$\max J = \int_0^{\infty} y_o e^{-rt} dt$$

로 주어지면 최적 경제 성장 또는 경제 계획 모형으로 표시될 수 있다. 다시 말해서 사회 복지를 최대화 하기 위해서 생산을 어떻게 하고 저축과 소비는

어떻게 하는 것이 좋은가를 찾고자 하는 최적 제어 문제가 된다. 즉

$$\begin{aligned} \max J &= \int_0^{\infty} T(y; k) e^{-rt} dt \\ &s. t. \\ &\dot{k} = s^T y - (g + \delta) k \end{aligned}$$

로 주어진다. 여기에서 r 는 시간에 따른 가치 선호도의 변화율을 표시한다.

이 모형은 일반적으로 최적 제어 이론에 의해 풀 수 있다.

여기에서는 설명을 위해 간단한 예를 들었으나 이러한 모형은 많은 제약 조건을 가지고 있으며, 우선 들 수 있는 것은 생산 변환 함수가 1 차의 동차 함수 즉 규모에 대한 일정한 산출 (Constant returns to scale) 을 가정하여 재생 불가능한 자원이나 환경적 균형 요인을 무시했다는 점이다. 또한 조세 정책 등 간섭 문제와 사회적 목표로 점차 중요시 되고 있는 소득 분배의 문제도 고려되어야 한다. 완전경쟁의 가정을 수정하는 것과 돈의 흐름을 파악하는 시스템 등도 추가되어야 할 부분이다. 그러나 앞의 간단한 모형으로도 경제 시스템의 안정성 등 근본적인 의문에 일차적인 해답을 줄 수 있으며 현실적인 가정들이 추가될 경우 공학 모형에서는 보기 힘들고 이론적으로도 간단하지 않은 형태의 모형이 된다.

③ 공공 시스템

시스템 공학은 공공 서비스에 관련된 모든 분야에 광범위하게 적용되어 왔다. 예를 들면 대도시에서의 공공 자원, 배분, 공해 문제에 대한 모의실험, 수자원 계획, 도서 정보망 구축등을 들 수 있다.

공공 문제에는 응용은 흔히 그 복잡성 때문에 특정 문제에 대한 해답보다는 문제 자체의 이해를 돕거나 대안에 대한 구상을 돕는 형태의 분석이 많게 된다. 이를 위하여 기본적으로 모형이 쓰여지며 이 모형에서는 대안에 대한 시나리오, 변수간의 연결을 위한 기본구조, 정책에 대한 영향 평가, 정책대안 및 사회 정치적 차원에서의 선택 등 부분을 갖추고 있고 추가로 가치의 민감도 분석을 위한 부분도 포함된다. 공공 시스템 모형으로 부터 도출되는 정보는 주로의 생적 입력에 대한 사회적, 심리적, 정치적, 경제적, 환경적 제 변수에 대한 영향을 종합적으로 분석해 보기 위한 것이며 이에 바탕을 두어 정책의 바람직한 방향 혹은 대안을 구하고자 하는 것이다.

그러나 공공 시스템에 대한 시스템 공학의 응용에 있어서는 특히 모형이 적합한가, 얻고자 하는 목

표가 무엇인가, 모형의 해가 실제 행정의 의사 결정에 있어서 어떠한 의미를 내포하고 있는가, 제안에 따라 수행했을 때 실제로 원하는 변화가 일어날 수 있는가 등에 대하여 신중히 검토하여야 한다. 왜냐하면 어떠한 제안이 실시되어 사회 변화를 일으킨 후에는 제안을 수정하거나 다시 다른 대안에 대한 실험을 행할 때 발생하는 사회적 비용이 엄청나기 때문이다.

4 교통 시스템

교통 시스템이 사회에 미치는 영향은 다른 대규모 시스템 보다 더 넓고 크다고 하겠다. 이 부문에서의 연구는 주로 교통 수단의 영향과 선택이 대상이었으며 이를 위한 교통 모형은 일반적으로 다음의 요소를 갖추고 있다.

- (1) 도시개발의 패턴을 예측하기 위한 토지 이용 모형.
- (2) 각 지역으로 부터 목적별 교통량을 예측하기 위한 교통량 산출모형.
- (3) 한 지역에서 발생된 교통량에 대한 각 지역으로의 배분을 예측하기 위한 교통량 분산 모형.
- (4) 배분된 교통량이 어떠한 교통 수단을 선택하는가를 추정해 주는 교통 수단 선택 모형.
- (5) 선택된 교통수단에 의해 어떠한 경로를 거쳐 목적지로 가는가를 추정해 주는 경로 배정 모형.

이러한 모형들은 교차로, 고속도로 및 도시에 미치는 전반적인 영향에 대한 분석을 통해서 교통의 흐름을 이해하고 제어 방법 및 전략을 제공한다.

구체적인 교통 모형은 입-출력 모형과 같은 형태에서 부터 적응 제어 모형에 이르기 까지 다양하며 교통 분기점과 관련된 인구 집합체를 표현하기 위해서는 대수학, 미분 방정식 및 열역학 수식등의 복잡한 수식이 쓰이고 있다.

5 인간-기계 시스템

인간은 공장 또는 전력 시스템을 통제하거나 비행기를 조종하는 경우와 같이 다양한 상황을 감지하다가 그중의 하나에 주의를 기울여야 하는 경우가 자주 있으며, 상황이 복잡하고 주의를 기울여야 할 사항이 많아지면 인간의 수행 한계를 벗어나게 된다.

이러한 경우 인간의 업무량을 적정선으로 유지하기 위한 한 방법은 인간의 업무를 얼마간 대신해 줄 수 있는 자동화를 시도하는 것이며 이로 부터 얻을

수 있는 이익을 추정하기 위해서는 인간의 작업 수행 모형이 유용하게 쓰일 수 있다. 더 나아가 인간과 자동화된 의사 결정도구와의 책임을 나눌 수 있는 시스템에 있어서는 두 의사 결정자간의 조정 역할도 모형이 담당할 수 있다.

신속한 작동이 필요한 다중의 동적 과정을 인간이 동시에 감지하는 다중 작업이 존재하는 경우에 각 과정의 우선 순위도 달라 질 수 있으며 이에 따라 인간이 동시에 감지한다는 것이 불가능한 경우가 많이 있다. 이러한 경우에도 인간의 의사 결정 과정 모형은 컴퓨터에 의한 감지 시스템의 설계와 개발에 큰 도움이 된다. 이 모형들의 특성은 첫째 즉시 수행할 수 있는 여건하에서 적용될 수 있을 만큼 간단해야 하고, 둘째 과정의 동적 특성이나 의사 결정 기준이 변화하는 것에 대해서 적응적으로 다루질 수 있어야 하며, 마지막으로 인간의 업무 수행의 관찰로 부터 의사 결정에 대한 학습 기능을 보유하고 있는 것이 바람직하다.

현상 파악이나 의사 결정을 위한 기법으로는 정보이론, 제어이론, 칼만 필터, 최적화등이 사용되며 이들에 의한 모형은 인간-기계 시스템에 대한 이해와 설계에 많은 도움을 주고 있다.

6 결 론

사회 경제 시스템의 이해를 위해 시스템 공학을 적용시키는 데는 다음과 같은 한계점이 있다.

- (1) 모형 타당성 입증의 어려움.
- (2) 기초 상황에 대한 검증 불능.
- (3) 한 모형을 다른 문제에 적용시킬 수 없는 점, 즉 일반적인 모형의 존재 불가능성.
- (4) 고도의 비선형 및 확률적 정보를 분석할 수 있는 능력의 결여.
- (5) 사회 경제 시스템에 대한 실제 실험의 비가역성 및 불가능성.
- (6) 수학적 형식 주의에 치중함으로써 발생하는 모형과 사회 실제 문제와의 괴리.
- (7) 인간 행동 및 사고에 대한 체계적 연구의 미비.
- (8) 가치와 사회적 효용 측정 수단에 있어서의 한계점.

사회 경제 시스템 모형화 과정에서의 가장 근본적인 한계점은 불확실성과 위험이다. 즉 공학적 시스템과는 달리 불확실성을 떠나거나 전혀 정확해 질 수 없는 요소를 무수히 내포하고 있기 때문이다. 특히 인간의 형태, 사고 및 의사 결정 과정 까지도 모형화

하고자 하는 경우의 어려움은 “장님이 코끼리 만지는 격”의 회의를 낳기도 한다. 그러나 우리 앞에는 해결을 기다리는 산적한 사회 경제 문제들이 놓여 있으며 이러한 문제들을 체계적이고 종합적으로 분석해 볼 수 있는 거의 유일한 도구는 시스템 공학적 접근 방법이다.

그러나 대규모 사회경제 시스템에 대한 시스템공학 적용의 기본적인 한계점을 극복하기 위해서는 우선 이론적인 측면에서 불확실성을 다루기 위한 고도의 비선형 확률 시스템이론의 진보가 필요하며 급변하는 사회 경제 시스템의 실제 문제를 파악하고 분석할 수 있는 여러 관련 학문과의 더욱 긴밀한 연결이 요구된다.

응용 측면중 앞으로의 방향에서 두드러 지게 나타나는 것은 컴퓨터의 급속한 발전과 함께 인공 지능 (Artificial Intelligence) 의 응용 분야이다. 이러한 응용은 인간의 행동 및 사고를 이해하는데 도움을 주고 있으며 궁극적으로는 대규모 사회 경제 시스템에서 발생하는 복잡한 의사 결정 문제에 해답을 줄 수 있으리라 생각된다.

參 考 文 獻

- 1) Adams, F. G., Burmeister, E. ; "Economic models," IEEE Trans SMC, Vol. SMC-3, No. 1, pp. 19—27, 1973
- 2) Chen, K., Ghausi, M. S., and Sage, A. P. ; "Social systems engineering," Proceedings of the IEEE, Vol. 63, No. 3, pp. 340—344, 1975
- 3) Palmer, J. D. ; "Large scale systems; systems, man, and cybernetics overview," IEEE Trans. SMC, Vol. SMC-13, No. 4, pp. 453—459, 1983
- 4) Palmer, J. D., and Saeks, R., ed. ; The World of Large Scale Systems. IEEE Press, 1982
- 5) Sage, A. P. ; Methodology for Large Scale Systems. New York : McGraw-Hill, 1977
- 6) Sage, A. P. ; "Systems engineering : fundamental limits and future prospects," Proceedings of IEEE, Vol. 69, No. 2, pp. 158—166, 1981