

QUAL2 모형에 기초한 하천수질관리 목적을 포함하는 최적 저수지 운영

Optimal Reservoir Operation Including River Water Quality Management Objective According to QUAL2

이광만*, 고석구**, 김우구***, 윤용남****

1. 서론

수문시스템은 수자원의 량과 질을 결정하는데 필연적으로 분석되어야 하며 유역개념의 수자원 개발 및 관리 문제에서는 필수 불가결한 요소이다. 특히 수문의 자연적 현상과 이를 자원화하여 이용하는 과정에는 물의 존재형태 및 질적 수준에 따라 사용가치에 큰 차이가 있으며 분석하고자하는 수문시스템은 자연적 순환외에 주어진 자원을 환경기준 및 사용목적에 알맞게 관리하고 이용하는 과정을 포함하게 된다.

우리나라의 수자원은 지하수의 부존량이 적고 개발적지의 한계성으로 지표수가 주요개발의 대상이 되어왔으며, 오늘날에는 유역상류에 대규모 댐들이 개발되어 용수공급 및 수력발전등 여러 목적으로 이용되고 있다. 그러나 유역전반에 걸친 급격한 사회적 변화는 각종 오염물질을 유발하여 하천으로 유입되고 있으며 하류에서는 이를 생활용수를 비롯하여 각종 목적으로 이용하고 있는 실정이다.

유역개념의 수질 관리 계획은 여러가지 경제적 조건이나 수질 목적을 만족하기 위한 대안들을 평가하고 검증하는 과정을 포함한다. 경제적 목적은 효율적 비용관리로 비용 최소화를 취하거나 비용의 균등분배를 추구하게 된다. 수질목적은 방류되는 폐수의 한계농도나 량을 표준화하는 형태로 나타나거나 또는 방류되는 폐수를 자정능력으로 소화하는 수체의 오염물질 한계 농도를 표준으로 하는 경우가 있다. 따라서 수질 관리계획의 효과는 이와같은 목적을 얼마나 잘 실현하는가를 평가하는 것이 될 것이다.

수질관리 모형은 가능한 관리계획의 평가나 입증에서 그리고 이와같은 경제적 혹은 수질목적 을 최적으로 달성할 수 있는 계획을 결정하는데 이용되며, 수질관리 모델을 수질 예측 모형에 기초하여 설계나 운영 정책 변수를 대안으로 평가하게 된다. 즉 다시말하면 수질예측과 운영정책 변수를 기반으로하는 대안의 평가사이에는 설계나 운영정책 변수의 함수와 같은 각각의 관리방안 에 따른 비용과 방류시점의 오염물질의 농도나 방류에 의한 하천이나 수체에서의 시간 및 경과거 리에 따른 수질 변화를 예측하는 관계가 성립된다. 또한 이들 관계를 제약하는 조건이 추가될 수 있는데 희망하는 폐수의 방류농도나 량, 하천이나 수체가 유지하여야 할 표준 수질 기준등이 이에 해당된다.

많은 수의 수질관리 모형은 최적화 모형으로서 앞에서 정의한 경제적 목적 혹은 수질관리 목 적간의 관계에서 시스템의 각종 물리적 제약조건 및 사회, 정치적 제약 조건등을 고려하여 가능 한 대안중에서 몇가지의 최적화 알고리즘을 이용하여 최적의 대안을 선택 이를 관리의 기본으로 삼을 수 있다.

* 한국수자원공사, 수자원연구소, 연구원, 중앙대 박사과정 수료
** 한국수자원공사, 조사계획처장, 공학박사
*** 한국수자원공사, 수자원연구소, 책임연구원, 기술사
**** 고려대학교, 토목공학과, 교수

이와같이 수질관리 모형은 생태계의 수질예측과 더불어 결정변수와 상태변수를 결정할 수 있는 최적화기법 알고리즘을 구성해야 하는 관계로 모형의 개발 및 적용에 한계성이 있으며, 이를 위해 대부분의 수질 관리모형은 폐수방류시 DO-BOD등을 평가할 수 있는 유기 영양염류의 방출농도에 기준을 두었으며, 생태계의 기준이 되는 Algae에 대한 모의는 쉽게 이루어지지 못했다.

따라서 본 연구의 목적은 기 건설되어 운영중인 대규모 저수지 운영에 있어 하류 기준 지점에서 수량 및 수질 기준을 만족시키면서 시스템 편익을 극대화할 수 있는 방법론의 개발과 하천의 자정능력 유지를 위한 하천유지 유량 산정에 있으며, Streeter와 Phelps(1925) 모형으로 대표되는 DO-BOD 모형에서 탈피하여 보다 진보된 종합적인 수질 예측 모형을 저수지 운영에 도입하고자 한다. 이의 방법론은 각 저수지로부터 방류되어 용수공급지점까지 도달하는 동안 시간 및 공간적 수질 변동상황에 대한 정보의 획득과 주요기준지점에서의 하천유지유량 산정과 아울러 시스템에서 이들 정보를 목적 혹은 주요 제약조건으로 고려하면서 충족시키면서 각종 편익을 최대화할 수 있는 저수지 운영방안의 모색에 있다.

2. 수질관리를 위한 저수지 운영 모형

저수지 운영을 위한 모형은 크게 모의 모형과 최적화 모형으로 구분되며 복잡하고 다양한 수자원 시스템을 양적으로 관리하기 위한 궁극적인 목표는 댐을 건설 목적에 따라 저류된 물을 어느 시간 구간의 유입량과 어느시점에서의 저류량등을 감안하여 적절한 방류를 행하는 것이다. 적절한 방류를 행한다는 의미는 수자원 시스템의 관점에서 선정된 평가기준에 가장 적합한 방류량을 방류시키는 것인데 평가기준이나 내용에 따라 저수지 운영 방법이 달라진다. 댐의 건설은 대체로 한가지 이상의 목적을 달성하기 위하여 건설되는데 대개 관개용수, 생활용수, 공업용수등을 포함하고 수력발전, 주운, 수질보전, 생태계 보전, 오락 및 휴식공간의 확보 그리고 홍수조절등이다.

일반적으로 저수지 운영 모형에서 저수지의 운영 목적은 목적함수에 반영되는데 다목적댐의 경우는 우선 순위에 따라 특정 목적을 중심으로 정의된다. 대개 수력발전과 용수공급을 최대화하는 목적함수를 취하는것이 보통이며, 기간별 기준 저류량과 유지하여야 할 방류량은 제약조건으로 처리한다.

동일 수계내에 직렬 및 병렬의 조합으로 연결된 복합 다목적 저수지 시스템의 운영에 있어서는 여러개의 목적을 동시에 고려할 필요가 있다. 예로써 연구대상인 한강수계내의 이수목적을 위한 저수지 운영에 있어서는 제어지점에서 용수공급 보장율을 증대시키면서 기간중 시스템으로부터의 발전량을 최대화 시키는 것을 기본구상으로 주요제어 지점에서의 수질 기준을 제약조건으로 처리하고 발전량 만을 극대화하는 단일 목적함수로 처리하면 다음과 같은 모형을 구성할 수 있다. (Marglin, 1967; Haimes et al., 1971)

$$F = \max \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N f_i(X_{it}, X_{it+1}, U_{it}) \dots \dots \dots (1)$$

subject to :

$$\underline{X}_{t+1} = \underline{X}_t + \underline{I}_t - \underline{E}_t(\underline{X}_t, \underline{X}_{t+1}) - \underline{D}_t + \underline{CU}_t \dots \dots \dots (2)$$

$$\underline{X}_{tmin} \leq \underline{X}_t \leq \underline{X}_{tmax} \dots \dots \dots (3)$$

$$\underline{U}_{tmin} \leq \underline{U}_t \leq \underline{U}_{tmax} \dots \dots \dots (4)$$

$$\underline{Q}_{tmin,k} \leq \underline{Q}_{t,k} \dots \dots \dots (5)$$

$$\underline{Q}_{t,1} \leq \underline{Q}_{tmax,1} \dots \dots \dots (6)$$

여기서, N는 저수지의 수, T는 저수지 운영기간, f(·)는 발전량을 나타내는 함수(N * 1 Vector), X_t는 저수지의 기간t 초기의 저류량(N * 1 Vector), I_t는 기간 t에 있어서의 국부유입량(N * 1 Vector), U_t는 기간t 동안 저수지로부터의 방류량(n * 1 Vector), E_t는 저수지 수면 중

발량(N * 1 Vector), D_t 는 댐상류에서 순도수량(N * 1 Vector), C는 시스템구성 행렬(N * N matrix), $Q_{tmin,k}$ 는 수질인자의 최소 기준치, $Q_{tmax,1}$ 는 수질인자의 최대기준치이며, k는 DO와같이 최솟치 기준인 수질인자를 나타내고, 1은 인(P)과 같이 최대치 기준 수질인자를 나타낸다.

본 모형에서 이용하고 있는 수질예측 모형은 QUAL2(1987)에서 이용하고 있는 각각의 수질인자에대한 공간 및 시간적으로 농도변화를 알 수 있는 1차원 대류-확산 물질이송 방정식(advection-dispersion mass transport equation)을 이용하였다.

이 방정식은 대류(advection) 및 확산(diffusion), 희석(dilution), 물질반응(constituent reaction), 상호작용(interaction), 그리고 외부부하(source)와 소멸(sink)로 구성되어 있으며, 임의의 성분 C는 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \frac{\partial(Ax\overline{DL}\frac{\partial c}{\partial x})}{\partial x} dx - \frac{\partial(Ax\overline{UC})}{\partial x} dx + (Ax\overline{dx}) \frac{dc}{dt} + s \dots\dots\dots(7)$$

여기서, M은 질량(M), X는 거리(L), t는 시간(T), C는 농도(ML^{-3}), Ax는 하천단면적(L^2), D는 확산계수(L^2T^{-1}), U는 평균유속(LT^{-1}), S는 외부부하 혹은 소멸(MT^{-1})을 나타낸다.

모의하고자 하는 수질항목은 수질상태를 파악하는 가장 중요한 지표 중 Chlorophyll-a의 농도를 중심으로 구성하였는데, 이 Chdorophull-a의 농도는 다음과 같다.

$$Chl-a = \alpha_0 A \dots\dots\dots(8)$$

여기서, Chl-a는 Chloophyll-a의 농도($\mu g\ chl-a/L$), α_0 는 전환율($\mu g\ chl-a/mg\ A$), A는 조류 농도(mgA/L)이다.

Organic Nitrogen은 호기성 자연하천에서 Ammonia로 변환되며 Nitrite로 되었다가 최종적으로 Nitrate가 된다. QUAL2E에서는 위의 4개의 과정에 대하여 모의하고 있으며, Organic Nitrogen은 다음과 같이 변화한다.

$$\frac{dN_4}{dt} = \alpha_1 \rho A - \beta_3 N_4 - \sigma_4 N_4 \dots\dots\dots(9)$$

여기서, N_4 는 Organic Nitrogen의 농도($mg-N/L$), β_3 는 Organic Nitrogen이 Ammonia Nitrogen으로 가수분해되는 반응상수(day^{-1}), α 는 Algal Biomass 중 Nitrogen의 비율($mg-N/mg-A$), ρ 는 Algal 호흡율(day^{-1}), α_4 는 침전되는 Organic Nitrogen의 비율이다.

Ammonia Nitrogen은

$$\frac{dN_1}{dt} = \beta_3 N_4 - \beta_1 N_1 + \sigma_3/d - F_1 \alpha_1 \mu A \dots\dots\dots(10)$$

$$F_1 = P_N N_1 / (P_N N_1 + (1-P_N) N_3) \dots\dots\dots(11)$$

여기서, N_1 는 Ammonia Nitrogen의 농도(mg^2N/L), N_3 는 Nitrate Nitrogen의 농도($mg-N/L$), β_1 는 Ammonia Nitrogen의 생물학적 산화계수(day^{-1}), β_3 는 Organic Nitrogen의 가수분해율(day^{-1}), σ_3 는 Ammonia Nitrogen에 대한 Benthos Source 율($mg-N/ft^2-day$), d는 평균수심(M), F_1 은 Ammonia Pool로부터 취해지는 Algal Nitrogen의 비율, μ 는 Algae의 증식율(day^{-1}), P_N 는 Ammonia Nitrogen의 선호율(preference factor)이다.²²

Nitrite Nitrogen은

$$\frac{dN_2}{dt} = \beta_1 N_1 - \beta_2 N_2 \dots\dots\dots(11)$$

여기서, N_2 는 Nitrite Nitrogen의 농도(mg-N/L)이며, β_2 는 Nitrite Nitrogen의 산화에 대한 비율(day^{-1})이다.

Nitrate Nitrogen은

$$\frac{dN_3}{dt} = \beta_2 N_2 - (1-F)\alpha_1 \mu A \dots\dots\dots (12)$$

여기서, N_3 는 Nitrate Nitrogen의 농도이다.

Phosphorus는 여러가지 관점에서 Nitrogen순환과 거의 유사하며 Phosphorus의 Organic 형태는 Algae가 사멸함으로써 생성되며, Algae가 이용할수 있는 Dissolved Inorganic 상태로 된다.

이중 Organic Phosphorus는 다음과 같고

$$\frac{dP_1}{dt} = \alpha_2 \rho A - \beta_4 \rho_1 - \sigma_5 \alpha_1 \dots\dots\dots (13)$$

여기서, P_1 은 Organic Phosphorus의 농도(mg-P/L)이며, α_2 는 Algae의 Phosphorus함유율 (mg-P/mg-A), β_4 는 Organic Phosphorus 부식율(day^{-1}), σ_5 는 Organic Phosphorus 침전율(day^{-1})이다.

Dissolved Phosphorus는 다음과 같고

$$\frac{dP_2}{dt} = \beta_4 \rho_1 + \sigma_2/d - \sigma_2 \mu A \dots\dots\dots (14)$$

여기서, P_2 는 Phosphorus 농도(mg-P/L)이다. 또한 QUAL2EU에서는 하천에서의 Ultimate Carbonaceous BOD의 탈산소계수(deoxygenation)에 대해 1차 반응으로 가정하여 BOD항은 Sedimentation과 채굴(scour) 및 응집(flocculation)을 추가하여 설명하고 있다.

$$\frac{dL}{dt} = -K_1 L - K_3 L \dots\dots\dots (15)$$

여기서, L 은 Ultimate Carbonaceous BOD (mg/L), K_1 은 탈산소계수(day^{-1}), K_3 는 Carbonaceous BOD의 Settling에 의한 손실율을 나타낸다.

하천에서의 DO균형은 자체의 재폭기 능력에 의존하며 이 과정은 대류와 확산이 지배적이고, 광합성 및 DO농도가 높은 유입수등에 의해 영향을 받는다. DO의 손실로는 유기물질의 분해 및 Benthic Oxygen Demand 와 Algae 호흡에 의한 산소의 이용이 있다.

$$\frac{dO}{dt} = K_2(O^* - O) + (\alpha_3 \mu - \alpha_4 \rho) A - K_1 L - K_4/d - \alpha_5 \beta_1 N_1 - \alpha_6 \beta_2 N_2 \dots\dots\dots (16)$$

여기서, O 는 용존 산소 농도(mg/L), O^* 는 포화용존 산소농도, α_3 는 Algal 광합성단위당 산소 생성율(mg-O/mg-A0), α_4 는 Algae 호흡단위당 산소 소모율(mg-O/ng-A), α_5 는 Ammonia Nitrogen 산화단위당 산소 소모율(mg-O/mg-A), α_6 는 Nitrite Nitrogen 단위당 산소 소모율, L 는 Ultimate Carbonaceous BOD농도(mg/L), K_1 는 Carbonaceous BOD 탈산소율(day^{-1}), K_2 는 Fickian Diffusion에 따른 재폭기 계수, K_4 는 Sediment Oxygen Demand 을($\text{g}/\text{ft}_2\text{-day}$)이다.

3. 모형의 개발 및 적용

본 연구의 대상지역인 충주 조정지 댐에서 팔당댐 유입지점까지 남한강 본류 하류부는 섬강 및 청미천 등 5개의 지류가 있으며, 남한강 중류에 위치한 여주지점은 비교적 풍부한 수위, 유량 자료가 있다. 가장 큰 지류인 섬강에는 문막지점의 수문자료가 있어 각지천에 대한 수문량은 이를 근거로 작성할 수 있으며, Headwater 및 상.하류측 경계조건은 충주댐 및 팔당댐의 저수지 운영자료를 이용할 수 있다.

본 연구에서는 QUAL2EU 모형의 입력자료 구성을 위해 하천 수질을 조사하였는데 남한강 유역에서 발생하는 오염물질의 량적, 질적 변화의 규명과 이들 방류량이 기준지점까지의 도달시간을 고려하여 수질현황을 정확히 파악하고 저수지 운영을 통하여 하천의 수질 오염도를 저감시킬수 있는 방법론의 개발이 가능토록 조사기준을 정하였으며, 이를 위한 수질조사 지점은 충주댐을 비롯하여 각 지천의 유입점 및 합류후 주요지점등 10개지점으로 하였으며, '92년도 갈수기 6회 및 홍수기 2회등 8회(한국수자원공사, 1992)에 이어 '93년 홍수기 2회를 포함하여 10회의 수질 조사를 계획하고 수행중에 있다.

수질 조사 항목으로는 DO, BOD, Total Phosphorus, Dissolved Organic Phosphorus, Dissolved Inorganic Phosphorus, Total Nitrogen, Nitrate, Conductivity, Suspended Solids, Chlorophyll-a 및 저수지에서의 Dominant Phytoplankton Cell Density등 11개 항목을 조사하였다. 분석 방법은 환경오염 공정시험법(환경처, 1986)과 Standard Method(AWWA-QPCP-APHA, 미국 1986) 및 기타 공인된 분석방법과 분류체계에 의해 시행하였다.

3-1 수리 모델링

본 연구에서 수질예측에 필요한 수리량 계산을 위한 수리모델링은 상류측으로 충주 조정지댐에서 하류로 북한강과 만나는 직상류 지점까지 76.5km 구간을 대상으로 모의하였다. 실제 하천에서의 수질변화는 수리량 자료와 밀접한 관계가 있으며, 대부분의 수질모형이 계산상의 어려움으로 인하여 정류흐름으로 가정하고 모의하고 있다. 따라서 수리모델링을 위해 이용된 수학적 방법으로는 QUAL2E에서 채택하고 있는 1-D Steady-state Flow로 모의하였다.

QUAL2E에서는 하천수리량 계산을 위한 지배방정식을 Steady-state Flow로 가정하고 $\partial Q / \partial t = 0$ 의 형태를 취하고 있으며, 따라서 하도추적을 위한 계산상에서의 절점의 질량보존의 법칙은 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial X} \right)_i = (Q_x)_i \dots\dots\dots (17)$$

여기서, $(Q_x)_i$ 는 Element i에서의 외부로부터의 유입(inflow)이나 취수(diversion)를 합한량이다. 위식을 유량 Q에 대하여 풀면 각각의 하천 구획에서의 평균유속 및 단면적 수심은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\bar{u} = aQ^b \dots\dots\dots (18)$$

$$Ax = Q/\bar{u} \dots\dots\dots (19)$$

$$H = cQ^d \dots\dots\dots (20)$$

여기서 a, b, c 및 d는 경험적으로 구한 상수이다.

3-2 수질관리 모형

지금까지 충주저수지 시스템을 대상으로 많은 수의 저수지 관리방안이 개발되었다. 그러나 전부 한정된 자원의 최대 이용을 통한 편익의 극대화에 초점이 맞추어져 있으며, 저수지 운영 목적의 하나인 수질관리 방안에 대한 연구는 전무한 실정이다. 수량관리 개념에서의 저수지 운영 방안의 연구로는 고석구(1986)가 52년간의 월별유입량 자료를 이용, 최적운영 결과에 따라 저수지 월초 저류량과 최적 방류량 및 최적 발전 가동율과의 관계를 회귀분석하여 2차식으로 제시하였으며, 한국수자원공사 수자원연구소(1991)에서는 신뢰도를 고려한 저수지군의 월별운영을 개발하였다. 그러나 이들 모형에서는 발전량을 극대화하면서 용수공급 및 Firm Power가 제약값보다 적은경우 목적함수에 음의 값을 부여하는 Weighting Method(1963)를 이용하여 수질제약은 전혀 고려치 않았으며, 고석구 등(1992)은 한강수계 저수지 시스템에 대하여 인(P)을 팔당댐 저수지에서의 수질제약조건으로한 발전편익을 산정하였다.

본 연구소에서는 방류량에 따른 하류측 주요기준지점의 수질상태를 분석하여 수질기준에 입각한 생태계 자정능력 유지를 위한 유하량을 산정하고 저수지운영을 통한 하천 수질관리 방안을 위한 모형을 구성하였으며, 이의 구성도는 아래 그림과 같다.

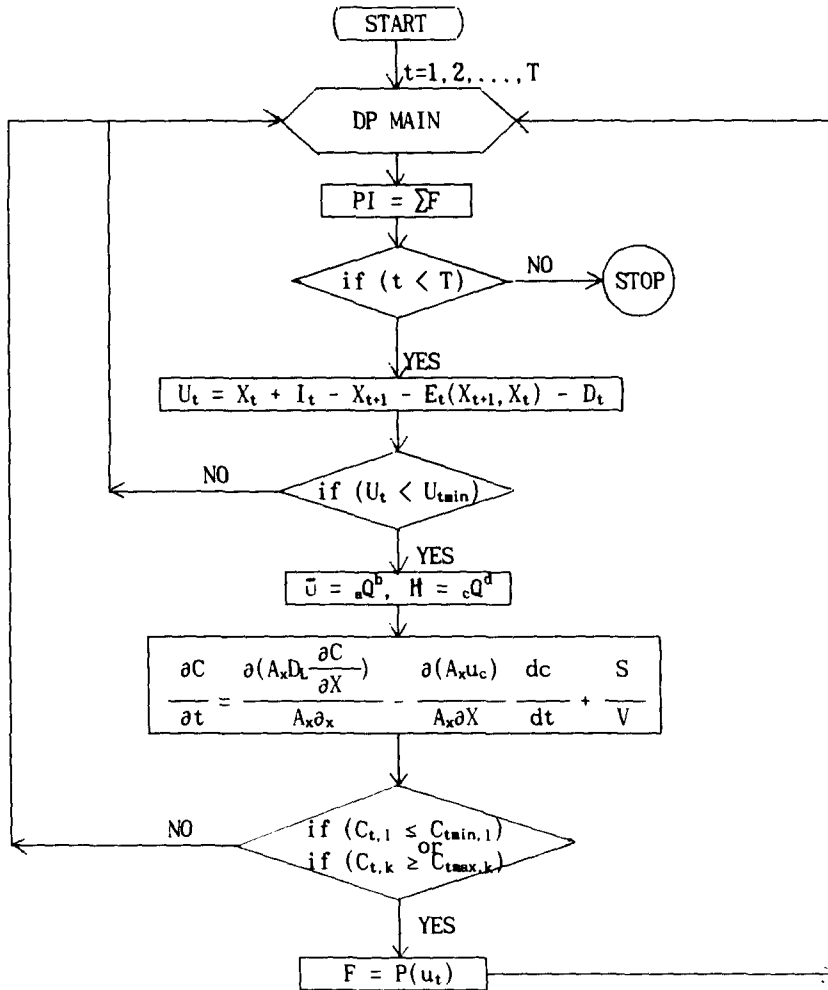


그림. QUAL2E에 기초한 하천 수질관리를 위한 저수지 최적 운영 모형의 구성

참 고 문 헌

1. Haimes, Y.Y., D.A. Wismer, and L. S. Larsdon, "On Bicriterion Formulation of Integrated System Identification and System Optimization", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.SMC-1, pp.296-297, 1971.
2. Marglin, S.A., Public Investment Criteria, the M.I.T. Press, Cambridge, MA, 1967.
3. Linfield C.B. and T.O. Barnwell, Jr., "The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and User Manual", U.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA, 1987.
4. 高錫九, "貯水池 시스템 운영 효율화를위한 운영기준 도출에 관한 연구", 제7회 댐건설 및 관리 기술 세미나 논문집, 한국대담학회, 1986.
5. 高錫九, 金修三, 李光晚, 李基宗, "수량 및 수질을 고려한 저수지군의 종합관리". 한국토목학회 논문집, 제12권, 제1호, 1992.
6. 한국수자원공사, "수량 및 수질을 고려한 저수지군의 종합관리 방안개발(1차)", 1992.
7. Zadeh, L.A., "Optimality and Non-Scalar-Valued Performance Criteria", IEEE Transactions on Automatic Control, AC-8, No.1, pp.59-60, 1963.