

물수지 분석을 위한 대규모 저수지 시스템 해석

Large-Scale Multi-Reservoirs System Analysis for Water Budget Evaluation

아 광 만* / 이 재 응**

Lee, Gwang-Man / Yi, Jae Eung

Abstract

Many reservoirs have been constructed and operated for utilizing and controlling water in main rivers of Korea since 1960's. New reservoirs are planned to satisfy increasing water demands according to the National Long-Term Water Resources Development Plan, that will make the entire water resources system more complex. That means reasonable approach is necessary to review many alternatives for future policy decision making of water resources management. As an attempting to simplify the water problem of the large-scale reservoirs system with more than 10 reservoirs, two stages approach such as simulation approach (HEC-5) is first applied to medium and small reservoirs and the results are used as inputs to final optimization approach (IDP) including large reservoirs is used in the water budget analysis of Han river water resources. In addition, existing multi-purpose reservoirs and planned reservoirs in Han river are formulated into one system and DPSA is applied to solve the basin-wide water resources assessment problem.

keywords: water demand, water resources system, water budget, water resource assessment

요 지

1960년대 이래로 우리나라 주요수계에는 이·치수를 목적으로 많은 댐들이 건설되어 운영되어 오고 있다. 계속 증가하는 용수수요를 충족시키기 위한 신규댐 개발이 국가 장기 수자원 개발계획에 포함되어 있어 수자원 시스템은 더욱 복잡해 질 것으로 예상된다. 이와같은 특징은 장래 수자원 관리 정책 결정문제에서 보다 많은 대안 검토를 요구하게 되므로 이를 해결할 수 있는 합리적인 접근방법의 개발이 요구된다. 본 연구는 10여개 이상의 대규모 저수지 시스템 문제를 해결하기 위한 방법중 문제를 간략화하기 위한 시도로 중·소규모 댐에 대해서는 모의모형(HEC-5)을 적용하고 이의 결과를 대용량의 댐으로 구성된 최적화 모형(IDP)의 입력자료로 이용하여 최종적인 결과를 얻는 2단계 해석 방법을 한강유역 물수지 분석에 적용하였다. 아울러 한강수계의 기존 다목적댐과 장래 개발 계획댐을 하나의 시스템으로 구성하고 DPSA를 이용하여 유역 개념의 수자원 평가에 적용하였다.

핵심용어: 용수수요, 수자원 시스템, 물수지, 수자원 평가

* 한국수자원공사 조사계획처

** 국토개발연구원 건설교통연구실

1. 서 론

유역개념의 수자원 평가 방법중의 하나인 물수지 분석은 향후 안정된 용수수급을 계획하기 위하여 유역에서 장래 예측되는 용수수요와 공급가능량을 비교하여 장래 유역내 물의 과부족을 검토하기 위한 방법을 말하며, 현재 주로 쓰이고 있는 물수지 방법으로는 크게 나누어 총량비교 방법과 저수지운영 방법으로 나눌 수 있다 (한국수자원공사, 1993). 전자는 NEDECO방법이라 불리며, 이론 및 적용의 간편성 때문에 대부분의 수자원 개발 계획에 많이 이용되어 왔으나 후자는 저수지 운영을 모의하기 위한 모형개발 및 복잡한 시스템에 대한 적용의 어려움 때문에 국한적으로 이용되어 왔다 (윤용남과 김태균, 1993).

우리나라 수자원 시스템은 날로 복잡해 지고 있을 뿐만 아니라, 용수공급체계도 급변하고 있다. 또한 한정된 수계내에서 가용 수자원을 최대로 이용하는 수자원 개발정책에 바탕을 두고있어 적든 크든시간에 새로운 수자원 계획수립에서는 유역 전체를 대상으로 수자원 부존량을 평가하고 배분하는 문제가 대부분이다. 이와같은 문제는 대규모 다목적 저수지 시스템을 통한 광역체계의 수자원 시스템 운영 및 배분 계획을 더욱 어렵게 만들고 있다. 따라서 시스템의 동적특성을 고려한 수자원 평가방법이 보다 합리적일 것으로 생각되며, 유역개념의 시스템 해석이 하나의 대안으로 검토될 수 있을 것이다. 유역개념의 복잡한 수자원 시스템 평가를 위하여 저수지 운영 방법에 의한 물수지 해석을 수행할 경우 시스템의 복잡성을 고려하여 시스템 해석 기법을 이용할 수 있다. 이들 방법으로 모의기법과 최적화기법을 적용할 수 있는데 많은 수의 저수지 운영정책결정이 쉽지 않으므로 모의기법보다 최적화기법이 보다 합리적인 것이다. 이중 저수지 시스템 해석에 많이 이용되고 있는 동적계획기법은 오랫동안 수자원 시스템 해석분야에서 아주 강력한 방법중의 하나로 널리 인식되어 왔다. 그러나 이 방법은 소위 "curse of dimensionality"라 불리는 엄청난 계산시간 및 메모리 요구량 때문에 다차원 시스템 해석에는 적절히 이용할 수 없다는 문제점을 갖고 있다.

이와같은 어려움을 완화시키기 위한 기법이 많은 수자원 전문가에 의하여 시도되었다. Bellman과 Dreyfus(1962)는 축차해석 방법의 이용을 제안하였으며, Larson(1968)도 IDP (incremental dynamic programming)라는 매우 강력한 기법을 소개하였다. 상태변수를 대상으로 증분개념을 도입하고 있어 증분

동적계획기법이라 할 수 있는 비슷한 기법이 Hall(1969) 등에 의하여 개발되었다. Jacobson과 Mayne(1970)는 최적 조절문제(optimal control theory)를 해결하기 위하여 DDP (differential dynamic programming)를 개발하였고 Heidari 등(1971)은 Hall 등(1969)이 개발한 방법의 일반적인 형태라 할 수 있는 DDDP (discrete differential dynamic programming)을 개발하였다.

그러나 IDP나 DDDP가 동적계획기법의 "curse of dimensionality" 문제를 극복할 수 있는 하나의 방법을 제공하지만 다차원 문제에서는 아직 계산시간과 기억용량 과다소비에 대한 문제가 남아있어 효율적이라 할 수 없다. 이와같은 문제점을 완화시키기 위한 대안으로 높은 차원의 문제를 낮은 차원의 문제로 변형시킬 수 없는가란 명제가 제기되었는데 Bellman과 Dreyfus(1962)는 높은 차원의 문제를 1차원 DP를 연속해서 풀어가는 DPSEA (dynamic programming with successive approximations)을 제시하였다. 이 방법은 원래의 다차원 상태변수 동적계획기법을 하나의 상태변수만을 다루는 1차원 문제로 변형하고 하위문제에 대한 최적화 계산을 원래문제의 해에 수렴시키는 방법이다. Larson (1968) 그리고 Trott과 Yeh (1971)는 다차원 저수지 시스템 문제 해결에 이 방법을 적용하였다. 보다 진보적인 방법으로 Nopmongcol과 Askew(1976)는 Successive Approximation의 기본 개념을 2차원 혹은 3차원 등 보다 다차원 수준으로 확대시켰다. 즉, 고차원 문제를 저차원의 IDP 문제로 분할하고 이를 연속적으로 풀어 해결할 수 있다면 이와같은 연속계산기법은 동시에 여러단계를 수행하는 MIDP (multilevel incremental dynamic programming)로 간주할 수 있다. MIDP는 IDP나 DDDP와는 다르게 시스템을 여러단계로 분해하여 해석한다는 점에서 장점을 발견할 수 있다. 그러나 이 방법 역시 잘 알려져 있듯이 고질적인 단점은 국부 최적치(local optimum)에 빠질 수 있다는 것이다.

일반적으로 IDP의 경우 6차원 이상의 저수지 시스템 해석은 불가능한 것으로 알려져 있으며, 우리나라에서 지금까지 동적계획기법을 이용한 문제에서는 이순탁 (1990)이 낙동강 수계의 4차원 저수지 문제에 DDDP를 적용한 경우가 있으나 대부분 3차원 이내의 저수지 문제에 많이 이용되어 왔다. 이광만과 고석구 (1993)는 IDP를 이용하여 한강수계 저수지 시스템을 3차원 문제로 해석하였다. 그러나 우리나라 각 수계에는 이미

다수의 댐이 건설되어 운영되고 있을 뿐만 아니라 앞으로 많은 댐이 건설될 예정으로 있어 IDP를 이용한 저수지 시스템 해석이 불가능하여 새로운 방법의 검토가 요구된다.

본 연구는 이와같은 목적을 달성하기 위하여 10여개 이상의 대규모 저수지 시스템으로 구성된 유역의 장래 수자원 평가를 위한 물수지 분석과 관련된 방법론적 대안을 제시하고 있다. 적용수계는 한강을 대상으로 하였으며, 기존의 다목적댐과 장래 개발 계획댐을 모두 고려하여 2011 및 2021년을 기준으로 과거 30년간의 유량자료를 이용, 시스템 분석을 통한 유역 물수지분석을 수행하였다. 해석방법으로는 IDP와 DPSA (Labadie, 1990)를 적용하였는데, 전자의 경우 시스템을 대규모 저수지 위주의 주시스템과 중·소규모 댐을 보조시스템으로 정의하고 보조시스템에 대해서는 저수지 모의 기법으로 널리 이용되고 있는 HEC-5를 적용하여 개별적으로 해를 구한 뒤 이를 IDP를 적용한 주시스템의 입력자료로 이용하여 IDP모형을 통하여 최종적인 평가를 수행하는 2단계 분석 방법을 택하였다. 후자는 계산시간이나 기억용량 문제에서 IDP보다 월등히 우수하나, 10개 이상의 대규모 시스템을 장기간 운영문제로 해석할 경우 역시 기억용량 및 초기조건 설정 문제 때문에 운영기간을 단축하여 분석하였다.

2. 적용 모형의 이론적 검토

2.1 IDP 계산 방법

Hall 등(1969) 그리고 Trott과 Yeh(1971)에 의하여 설명된 IDP와 Heidari 등 (1971)에 의하여 체계화된 DDDP는 DP순환방정식을 푸는데 이용된 반복계산과정이다. 기본적으로 이 계산과정은 시행정책 $R_i (R_i \in \{R\};$ 그리고 $I = 1, \dots, I)$ 을 대응결과로 생성하는 허용상태벡터의 연속과정으로 나타내는 시행상태레직 $X_i (X_i \in \{X\}; I = 1, \dots, I)$ 을 가정함으로써 시작할 수 있다. 그리고 시행조건에 대응하는 목적함수의 초기치 F 를 가정할 수 있다. DP순환방정식은 'Corridor'라는 초기 시행레직선에 이웃하여 설정된 상태변수의 고정된 증분치의 제약조건 집합내에서 계산된다. 이 계산과정에서 목적함수치를 개선시키는 새로운 어떤 이웃 레직선이 발견되면 이 새로운 레직선은 다음 계산단계의 시행레직선으로 이용된다. 이와같은 반복적 계산과정은 더 이상 목적함수가 개선되지 않거나 어떤 조건의 수렴기준을 만족시킬때까지 계속된다.

앞에서 언급했듯이 DP문제를 해석하는데 컴퓨터 사

용시간과 기억용량이 큰 제약조건이 되는데 이러한 컴퓨터 사용에 관한 제약조건은 상태변수의 개수와, 그 분할구간이 증가함에 따라 증가하게 된다. 즉, n 개의 상태변수를 각각 m 개로 분할했다면, 각 단계마다 m^n 만큼의 계산이 이루어져야 하며, 그 만큼의 기억장소가 필요하다. 하지만 IDP에서는 각 단계에서 3^n 만큼만 계산을 하면되므로 계산에 필요한 시간과 기억장소를 크게 감소시킬 수 있다. 매단계 계속 동일한 증분치가 사용되면 IDP는 최적값을 발견하지 못할 수 있으므로 최적값을 얻기 위해서는 매단계 증분치를 변형시켜주어야 한다.

2.2 DPSA 계산방법

다차원 문제를 풀기위한 하나의 방법으로 DPSA를 사용할 수 있다. 이 방법은 다차원 문제에 의해 발생되는 문제점을 해결하기 위한 한 방법으로 여러 상태변수로 구성된 문제를 하나의 상태변수만이 작용하는 1차원 부시스템으로 분해하는 방법이다. 차원문제를 해결하기 위한 DPSA의 두가지 단점은 우선 전체 최적해가 아닌 국부 최적해로 수렴할 가능성이 있으며, 두 번째는 상태변수나 결정변수에 부등호 제약조건이 적용될 경우 상당한 어려움을 발생시킬 수 있다는 것이다. 또한 DPSA의 해는 초기 상태레직치와 밀접한 관련이 있는데 부적절한 초기 레직치를 사용하면 국부 최적해 혹은 불가능해를 얻을 수 있으므로 시행 착오법을 사용하여 초기 레직치를 얻어야 한다. 일반적으로 DPSA는 다음과 같은 계산절차를 갖는다. 각 상태벡터는 계산시작 초기치로 가정된 레직선을 이용하여 다음과 같이 한 번에 하나씩 최적치를 구하게 된다.

$$F_i (X_{i1}^{\circ}, X_{i2}^{\circ}, \dots, X_{im}^{\circ}) \quad (1)$$

여기서, F_i 는 계산단계 i 에서의 동적계획기법 최적 함수, X_{im} 은 계산단계 i 에서의 m 번째 상태변수이다. 여기서 위첨자 $^{\circ}$ 는 초기레직치를 나타낸다. 다음단계로 첫 번째 상태변수를 제외하고 다른 상태변수값을 초기치로 고정하면 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F_i (X_{i1}, X_{i2}^{\circ}, \dots, X_{im}^{\circ}) \quad (2)$$

여기서, 첫 번째 상태변수만을 대상으로 1차원 문제를 해석할 수 있다. 즉, $X_{i2}^{\circ}, \dots, X_{im}^{\circ}$ 는 목적함수 및 제약조건에서 상수값으로 유지되며, X_{i1} 만이 동적 계획기법에 의한 상태변수의 변화가 허용된다. 첫 번째 부시스템의 모든 계산단계 i 에 대하여 최적해가 얻어진다면, 이 부시스템의 추정된 상태변수는 주시스템의 역할

회수를 정의하기 위해 위첨자 1로 표시할 수 있다.

$$F_i(X_{i1}^1, X_{i2}^0, \dots, X_{im}^0) \quad (3)$$

다음으로 두 번째 상태변수를 대상으로, 첫 번째 상태변수를 대상으로 행해졌던 것과 동일한 1차원 동적계획법 계산을 수행하게 되며, 이때 다른 모든 상태변수들의 값들은 현재상태로 유지되는 조건에서 새로운 해가 구해진다.

$$F_i(X_{i1}^1, X_{i2}^1, X_{i3}^0, \dots, X_{im}^0) \quad (4)$$

이와같은 계산과정을 마지막 상태변수에 이를때까지 계속하며, 발견된 값들이 새로운 최적값으로 사용된다. (1)에서 (4)까지의 단계를 새로운 최적값을 사용, 다시 반복하여 상태변수의 값이 그 전단계와 별 차이가 없을 때까지 계속한다.

$$X_i^k \equiv X_i^{k-1} \quad (5)$$

2.3 HEC-5 및 IDP 이용 방법

다차원 저수지 문제를 해결하는 방법론은 여러 가지를 생각할 수 있다. 비교적 저수지 시스템 문제에서 비선형, 연속함수, 미분불가능한 문제까지 광범위하게 이용될 수 있는 동적계획법법을 채택하는 경우 컴퓨터의 계산처리능력을 고려할 때 IDP의 경우는 5차원 문제 이내에서 가능한 것으로 알려져 있다. 그러나 보다 차원이 높은 문제 해결에서는 한 번에 직접 답을 구하는 방법보다는 간략화된 방법이나 계산시간을 줄일 수 있는 다단계 계산방법을 이용하는 방법도 좋은 대안이라 할 수 있다. 이와같은 예로는 선형계획법이나 동적계획법등 최적화기법을 이용할때 가능한 문제를 간략화시키고 이의 결과를 토대로 보다 정교한 모의 모형을 개발하여 분석하는 방법이 많이 이용되고 있다.

그러나 이와같은 방법에서도 상태변수의 차원은 불변이며, 다만 시스템의 기본방향을 설정하기 위하여 최적화 기법이 이용된다. 때로는 전체시스템을 개별시스템으로 분할하여 각각에 대하여 모의한후 전체 시스템의 결과로 평가할 수 있으나 최적 대안을 구한다는 측면에서는 채택하기 어려운 점이 있다. 위에서 제시한 DPSA가 유일의 최적해를 찾는 데 어려움이 있다면 가능한 주요 시스템을 IDP의 상태변수로 고려하고 나머지 시스템, 즉 시스템 구성요소이기 하나 시스템에 미치는 영향이 비교적 적은 요소는 별도의 방법으로 모의 후 주시스템을 보조할 수 있는 형태로 고려하는 방법도

좋은 해를 얻을 수 있는 방법중의 하나라고 할 수 있다.

이와같은 접근방법에 기초하여 이미 저수지 운영문제에 널리 이용되고 있는 HEC-5 (U.S. Army Corps of Engineers, 1989)를 보조 시스템으로 포함시킬 수 있다. HEC-5는 잘 알려져 있는 모의기법으로 그림 1에서 제시하고 있듯이 보조적으로 작용할 수 있는 시스템을 모의하여 그 결과를 주 시스템으로 구성된 IDP의 입력자료로 이용할 수 있다. HEC-5는 사용자의 선택사항에 따라 운영 결과를 제시하므로 경우에 따라서는 아주 좋은 결과를 얻을 수 있다. 이와같이 대규모 시스템 문제를 주시스템과 보조시스템으로 구분하여 모의하는 방법은 우선 전체 시스템 구성요소중 IDP 수행이 가능한 범위내에서 주시스템을 구성하고 그외의 시스템 요소는 보조시스템으로 분리하여 개별 혹은 그룹별로 HEC-5를 이용하여 모의한후 그 결과를 주 시스템의 입력자료로 활용하는 것이다. HEC-5 적용에 있어서는 저수지 운영방법에 대한 여러 가지 옵션을 이용하여 모의한후 댐개발 목적을 최대한 달성할 수 있는 대안을 선택하게 된다. 즉, 중·소규모 댐들에 대해서 일정 수준의 보장방류량을 달성하는 운영방안을 시행착오법으로 찾을 수 있다. 이때 얻어진 방류량을 IDP의 입력자료로 이용하게 되는데 댐계획이 있는 유역의 유량자료를 HEC-5를 통하여 얻어진 방류량으로 대체할 경우 댐을 통하여 조절된 유량이 적용되므로 IDP에서 고려될 저수지들의 운영은 조절된 유량조건을 이용하게 되므로 공급능력을 향상시킬 수 있다. 이와같은 해석방법을 적용할 경우 전체 시스템의 기능을 손상시키지 않으면서 대규모 시스템을 해석할 수 있는 장점이 있다.

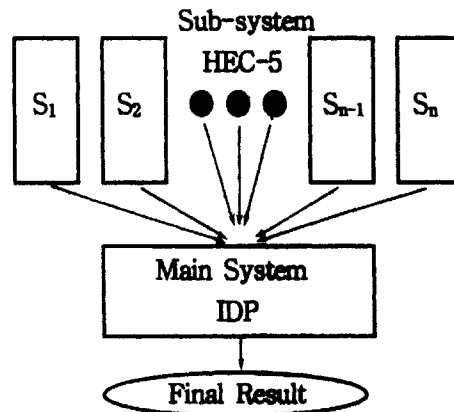


그림 1. 대규모 저수지 시스템 해석을 위한 HEC-5 및 IDP 이용 방법

3. 문제의 정식화

한강유역의 수자원 평가는 용수공급체계 및 수문학적 특성을 고려하여 그림 2와 같이 15개의 소유역으로 구분할 수 있다. 이들 유역에서 장래 수자원 평가를 위한 저수지 시스템은 다음과 같은 특징을 가지고 있다. 우선, 한강수계에는 현재 총 저수용량이 10억 m³ 이상인 다목적 저수지가 2개 있으며, 건설중에 있는 영월댐의 경우 768백만m³의 총저수용량 규모를 가지고 있다. 이밖에도 한전에서 수력발전용으로 운영하고 있는 대규모 댐으로는 화천댐이 있으며, 유로댐(flow-through-reservoir)이 북한강 본류에 4개 있다. 또한, 작은 규모의 다목적댐으로는 황성댐

이 원주일원에 용수공급을 위하여 건설되고 있다. 따라서 기존 시스템만으로도 한강수계 저수지군은 매우 복잡하다.

그러나 2001년 이후의 용수수요에 대비한 한강유역에서의 수자원 시스템은 지금보다 더욱 복잡해질 것으로 예상되며, 다수의 중·소규모 댐이 건설될 예정임을 감안할 때 다차원 해법에 많이 이용되는 IDP나 선형계획기법 등으로는 컴퓨터 계산시간이나 모형을 정형화하는데 따르는 어려움 때문에 용이하지 않다. 이를 해결할 수 있는 방법으로 앞에서 이론적 근거를 제시한 DPSA의 선택이나 IDP와 모의기법을 동시에 적용하는 것도 하나의 대안이 될 수 있다.

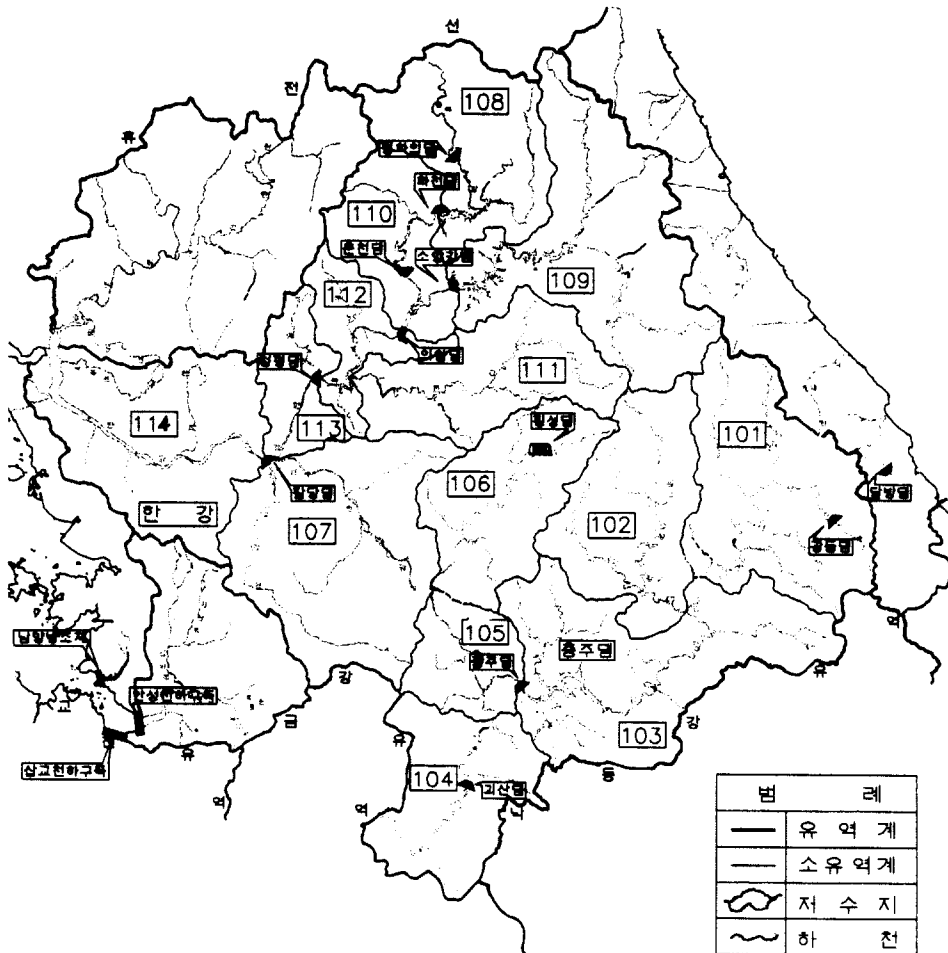


그림 2. 한강유역 수자원 평가를 위한 유역 구분

3.1 적용대상 시스템

한강유역의 용수공급 시스템은 수도권을 중심으로 경기중·북부 일원과 인천광역시 그리고 서해안 일원을 포함하고 있다. 또한 장래에는 금강유역이나 동해안 지역으로의 도수계획도 포함될 수 있어 한강유역을 중심으로하는 한강권역 용수공급 체계는 지금보다 더욱 복잡해 질 것으로 예상된다. 이와같은 장래 상황을 고려하여 한강유역의 저수지 시스템을 구성하면 그림 3과 같이 묘사할 수 있다. 시스템은 전체 10개의 저수지로 구성되어 있으며, 현재에서 발전 전용으로 운영하고 있는 북한강 수계의 춘천, 의암, 청평 및 팔당댐은 용수공급 능력이 미미하여 시스템에서 제외하였다. 팔당댐은 한강하류부 용수공급 기준지점인 점을 감안 상태변수로 고려하지는 않았으나 시스템도에 도시하였다.

용수공급 기준단위는 그림 2와 같이 주요 수자원 시설물, 배수구역 그리고 용수공급체계를 고려하여 수자원장기종합계획(1997)에서 분할한 14개 소유역을 그대로 적용하였고, 한강상류에서 동해안으로의 도수계획은 계획대에서 직접 취수하는 것으로 고려하였다. 경기도 서해안일원으로서의 도수계획은 114번 소유역에 포함하였다. 모형구성으로는 DPSA에서는 그림 3에서 제시된 10개 저수지를 모두 하나의 시스템으로 구성하였다. HEC-5와 IDP를 이용하는 분석방법에서는 현재 한국수자원공사에서 관리운영하고 있는 충주, 소양강 다목적 댐과 한국전력공사에서 수력발전 생산 전용으로 운영

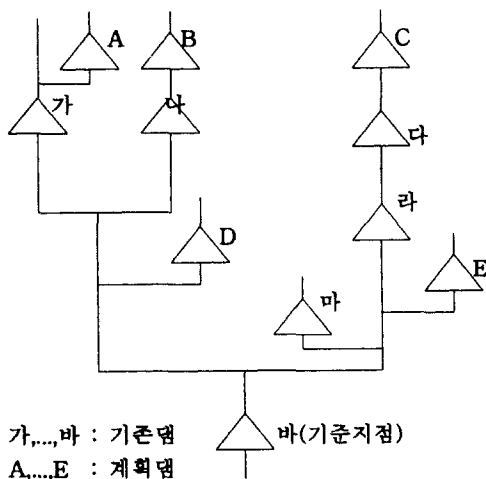


그림 3. 한강유역 저수지 시스템도

하고 있는 화천댐, 그리고 2001년 목표로 건설중에 있는 영월댐을 주시스템으로 구성하고 나머지 댐은 부시스템으로 하여 HEC-5를 적용하였다. 표 1에서는 그림 3에서 제시된 11개 저수지의 특성을 보여주고 있으며, 표 2에서는 14개 소유역의 장래 용수수요를 목표년도별로 제시하였다(건설교통부/한국수자원공사, 1996).

표 1. 한강유역 수자원 시설물 현황

댐	유역면적 (km ²)	년간유입량 (MCM)	유효저수용량 (MCM)	년간계획 공급량 (MCM)	비고
충주	6,648	4,997	1,789	3,380	기존
소양	2,703	2,156	1,900	1,200	기존
화천	3,901	3,070	658	-	기존
영월	2,267	1,322	643	429	건설
형성	209	176	73	112	건설
팔당	23,800	16,917	18	-	기존
A					계획
B					계획
C	4,923	3,663	1,791	1,978	계획
D					계획
E					계획

표 2. 한강유역권 장래 용수수요

목표년도	소유역	용수수요(MCM/년)			
		생활용수	공업용수	농업용수	하천유지용수
2011년	1번	6.9	0.5	11.7	
	2번	3.2	109.0	45.0	
	3번	27.0	191.1	88.1	
	4번	36.4	47.5	147.3	
	5번	3.5	1.1	55.0	
	6번	42.6	15.2	115.5	
	7번	47.3	37.5	429.0	
	8번	3.1	0.0	29.8	
	9번	3.0	0.0	26.2	
	10번	43.1	9.2	38.8	
	11번	6.4	2.3	71.7	
	12번	2.7	0.1	23.4	
	13번	6.4	8.1	29.2	
	14번	3,002.0	667.8	236.2	110cms
2021년	1번	7.2	0.5	11.2	
	2번	3.4	109.0	43.3	
	3번	29.7	191.1	85.9	
	4번	42.8	47.5	242.2	
	5번	3.6	1.1	53.3	
	6번	49.9	15.2	111.5	
	7번	41.8	37.5	413.1	
	8번	3.1	0.0	28.6	
	9번	3.0	0.0	24.8	
	10번	51.3	9.2	37.5	
	11번	6.9	2.3	69.1	
	12번	3.0	0.1	22.3	
	13번	6.0	8.1	27.8	
	14번	3,130.7	667.8	225.2	110cms

3.2 시스템 운영목적

한강유역의 장래 물수지 분석을 위한 저수지 시스템 운영은 두가지로 구분하여 적용할 수 있는데 HEC-5를 보조적 수단으로 이용하는 경우 규모가 작은 댐들에 대해서는 방류량 신뢰도를 적용하여 보장량을 증대시키고 대규모 다목적 댐에 대해서는 시스템을 최종적으로 평가할 수 있는 목적함수를 정할 수 있다. 즉, HEC-5를 이용하여 규모가 작은 보조 저수지를 개별 시스템으로 분석할때는 HEC-5가 모의모형인 점과 각각의 개별시스템에 대하여 전체 시스템의 이행도를 평가하기 어려운 점을 감안하여 각각의 보조 시스템을 대상으로 95%의 보장방류량을 유지하는 운영을 실시하였다.

대부분 장래 계획된 중규모댐들은 주로 작은 규모의 지류나 본류 상류유역에 위치하게 되며, 다른유역으로 도수나 하류부 용수공급 증대를 목적으로 하고 있다. 따라서 용수공급의 신뢰도를 95%로 결정할 경우 도수 계획은 물론 상류 소유역에서 필요로 하는 수요를 안정적 수준으로 고려할 수 있게 된다. 물론 수요의 계절적 편차는 있으나 대상댐들이 주로 생공용수를 공급한다고 하면 보장방류량 개념의 운영방안을 적용할 수 있을 것이다. 한편 DPSA이나 IDP 모형을 적용할 경우 평가함수는 용수공급 위주로 설정할 수 있는데 그림 2에서 제시된 전 소유역을 대상으로 평가할 수 있으나 댐 건설이 고려되지 않은 소유역의 경우 자연유량을 이용하여 용수공급을 평가할 수 밖에 없어 최적화 모형의 시스템 운영평가에 미치는 영향이 없다고 할 수 있다. 따라서 주요 수유지점이 한강 본류 및 하류부인 점을 감안하여 남·북한강의 본류구간 소유역을 대상으로 용수 부족을 최소화하는 평가함수를 적용할 수 있다.

이 평가함수는 용수공급 부족량을 제곱으로 평가하므로 큰 용수부족량을 가능한 적은 용수부족 단위로 분산시키는 효과를 기대할 수 있으며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J (DEF_{t,j})^2 \quad (6)$$

if $TG_{t,j} > TL_{t,j}$ then $DEF_{t,j} = TG_{t,j} - TL_{t,j}$

for $t = 1, \dots, T$; $j = 1, \dots, J$

if $TG_{t,j} \leq TL_{t,j}$ then $DEF_{t,j} = 0.0$

for $t = 1, \dots, T$; $j = 1, \dots, J$

subject to:

$$R_{t,i} = X_{t,i} - X_{t+1,i} + I_{t,i} - D_{t,i} \quad (7)$$

$$TL_{t,j} = C_1 \cdot R_{t,i} + C_2 \cdot L_{t,k} \text{ for } k = 1, \dots, K \quad (8)$$

$$X_{t,i,\min} \leq X_{t,i} \leq X_{t,i,\max} \quad (9)$$

$$R_{t,i,\min} \leq R_{t,i} \leq R_{t,i,\max} \quad (10)$$

여기서, F 는 용수부족량을 평가하기 위한 시스템 목적함수이며, $TG_{t,j}$ 는 운영단계 t 에서 j 번째 용수공급 평가지점의 용수수요량, $TL_{t,j}$ 는 운영단계 t 에서 j 번째 용수공급 평가지점의 하천유량, $DEF_{t,j}$ 는 운영단계 t 에서 j 번째 용수공급 평가지점의 용수공급 부족량이다. $R_{t,i}$ 는 운영단계 t 에서 i 번째 저수지로부터 방류량, $X_{t,i}$ 는 운영단계 t 에서 i 번째 저수지의 초기 저류량, $X_{t+1,i}$ 는 운영단계 t 에서 i 번째 저수지의 말기 저류량, $I_{t,i}$ 는 운영단계 t 에서 i 번째 저수지로의 유입량, $D_{t,i}$ 는 운영단계 t 에서 i 번째 저수지로부터 직접 도수량이다. $L_{t,k}$ 는 운영단계 t 에서 k 번째 소유역의 국부유입량, C_1 및 C_2 는 용수공급 평가지점의 총 유입량을 계산하기 위한 시스템 구성메트릭스이다.

4. 적용사례

4.1 적용조건

대규모 저수지 시스템 운영을 통한 공급신뢰도 개념의 물수지 분석을 수행하기 위해 제2장에서 제시하고 있는 방법을 적용하기 위한 조건들은 다음과 같다. 우선 유입량 자료계열은 수자원장기종합계획(1997)의 물수지 분석에 이용했던 30년간(64~93)의 월별자료를 한강 유역의 14개 소유역에 대하여 개별적으로 적용하였다. 용수공급 평가지점은 그림 2에서 알 수 있듯이 남·북한강 본류구간 6개 소유역 (103, 105, 107, 110, 112, 113)과 팔당댐 하류 서울, 인천 및 경기일원의 수요를 총괄하는 114번 소유역 등 7개 지점을 대상으로 하였다. 그외 소유역에 대해서는 자연유량이나 댐을 통하여 방류된 하천수를 취수하여 용수공급하는 형태로 고려하였다. 용수수요량은 생공용수와 농업용수로 구분하고 월단위로 배분하여 적용하였다. 수자원평가 기준년은 장래 댐 개발계획을 고려하여 표 2에서 제시된 2011년 및 2021년을 목표년도로 하였다. 하천유지 용수는 한강 하류부 인도교를 기준지점으로 수자원장기종합계획(1990)에서 제시한 장래 목표유량을 적용하여 평가하였다. 저수지 운영조건으로는 IDP 및 DPSA의 경우 시작시점의 저류량과 말기 저류량을 유효

저수용량의 75%로 정의하여 1월초를 운영시작 기준시점으로 하였다. HEC-5에서는 상시만수위 저류량에서 시작하는 것으로 하였다. 저수지 운영은 월간운영이며, 저수지 수표면 증발량은 저수지상의 강수량과의 상쇄효과로 결과에 미치는 효과가 크지 않을 것으로 간주되어 고려하지 않았다. 용수공급 평가에서는 각 목표년도별 수자원 평가를 위해 용수예비율 개념을 도입하였는데 수요량만을 고려하는 경우와 1~11%까지 2%씩 할증하여 6개의 수요조건에 대하여 평가하였다. 각부문 용수공급량에 대한 하천으로의 회귀율은 NEDECO (MOC/ NEDECO, 1976)에서 제시한 생공용수 65%, 농업용수 35%를 적용하였다.

4.2 적용결과 분석

본 연구에서 추구하고 있는 대규모 저수지 시스템 (6개 이상)으로 구성된 유역개념의 이용가능 수자원 평가를 위해서는 컴퓨터의 계산능력 및 수학적 알고리즘이 갖추어져야 하는데 중요한 문제는 컴퓨터의 계산능력이다. PC에서 메모리의 한계로 DPSA를 모의할 경우 본 연구에서 적용한 10개 저수지 시스템의 경우 15년 정도의 월간운영이 가능했다. 따라서 과거 30년간의 유량자료를 이용한 수자원 시스템 평가는 IDP+HEC-5로 분석하였고 DPSA를 이용하여 최대 공급 가능량을 기왕 최대 과우년이 포함된 기간을 모의하여 분석하였다. 용수공급 평가방법은 수자원장기종합계획이 물수지를 기본으로 장래 예견되는 용수수요를 충족시키기 위한 수자원시설물 건설계획인 점을 감안하여 양적인 개념에서의 신뢰도 및 위험도를 평가하였다.

우선 2001년 완공예정인 영월댐을 포함하여 충주 및 소양강댐에 의한 2011년과 2021년의 예상 용수부족량을 추정하였다. 수자원 평가기준은 NEDECO방법에서 적용하고 있는 자연유량과 수요량간의 물수지 분석으로 얻어진 부족량에 대해 댐조작 및 하천손실을 고려하여 부족량의 120%를 댐에서 공급하는 조건으로 평가하고 있는 점을 고려하여 본 연구에서는 전체 수요량에 10%를 할증한 수요조건에 대한 부족량으로 산출하였다. 이의 결과는 그림 4에서 보여주고 있는데, 2011년 수요조건에 최대 40MCM/월의 용수부족이 있었으며, 위험도는 5% 내외였다. 그러나 2021년 기준에 대해서는 최대 용수부족량이 100MCM/월에 이르고 있으며, 공급 위험도는 13% 수준이었다.

이와같이 예상되는 장래 용수공급 부족량을 완화시키고 최소한의 용수공급 보장을 확보하고자 표 1과 같은 수자원 시설물 개발계획이 검토되었다. 이들 시설물

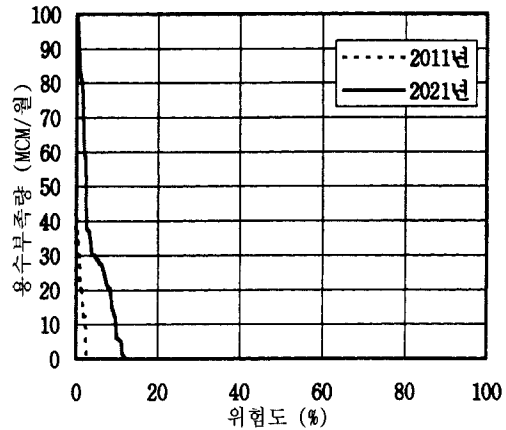


그림 4. 2011년 및 2021년 수요 기준 예상 용수부족

에 의한 장래 용수공급 능력에 대해 분석해 보면 다음과 같다. 우선 IDP+HEC-5에 의한 분석결과를 살펴 보면, 그림 5 및 6에서 보여주듯이 2011년에 용수예비율 7%의 확보가 가능할 것으로 나타났으며, 2021년 기준에서는 5% 미만으로 낮아지는 것으로 분석되었다. 그림 7에서는 각각의 경우에 대한 용수예비율별 공급신뢰도를 평가한 것으로 용수예비율 12%에서 91%의 신뢰도를 보여주고 있다. 이상의 결과는 현재 발전전용댐인 화천댐을 용수공급댐으로 고려한 경우로써 장래 한강유역의 물사정은 점차 어려워질 것으로 예상된다.

한편 1976년 낙동강 유역 물수지 분석시 적용되어 지금까지 일반적으로 이용되고 있으며, NEDECO방법이라 불리는 물수지 방법 적용에 필요한 기왕최대 과우년을 분석하였다. 한강유역 수자원 시스템 운영을 고려한 용수공급 측면에서 한강유역 최대 가뭄기간을 찾기 위하여 2021년의 수요량을 11%로 증가시켜 분석한 결과, 그림 8에서 알 수 있듯이 용수부족이 80년 말부터 83년 6월까지 계속되고 있어 한강유역의 물수지 분석을 위한 과우년은 이 기간중에서 정해져야 할 것으로 나타났다. 이 결과는 그림 9에서 보여주고 있는 과거 30년간의 한강유역 팔당댐 지점 연간 유량의 갈수 크기 순서 분석(갈수가 큰쪽에서 작은쪽으로 순위를 매김)과 일치되는 경향을 보여주고 있다.

2021년을 기준한 한강유역의 최대 용수공급가능량 평가는 DPSA를 이용하였다. IDP+HEC-5를 이용한 분석 방법은 부분적으로 최적화 기법에 의존하고 있으나 일부 소규모 댐들은 이 모의기법을 이용하기 때문에 전체 시스템의 최대 공급가능량을 평가하고 있다고는 할 수 없다.

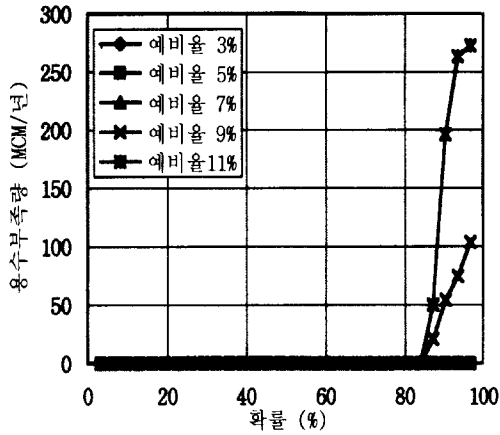


그림 5. 2011년 기준 용수예비율별 용수부족

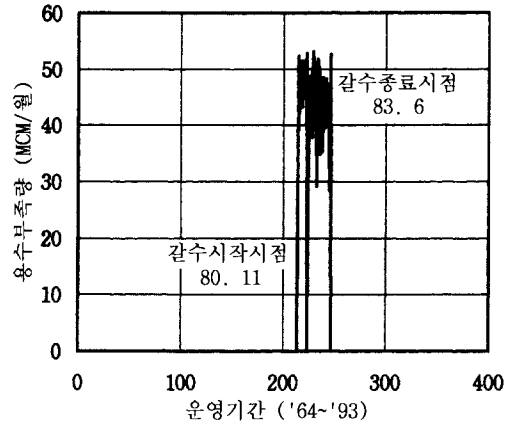


그림 8. 한강유역 월별 용수부족

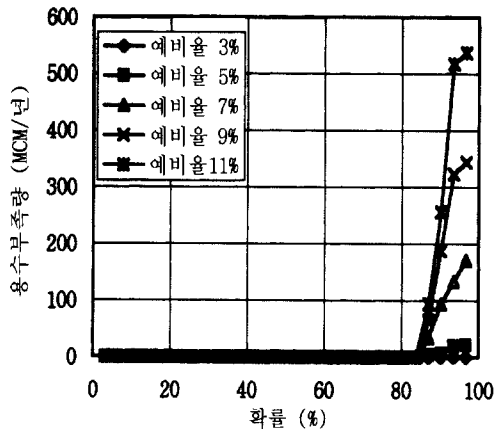


그림 6. 2021년 기준 용수예비율별 용수부족

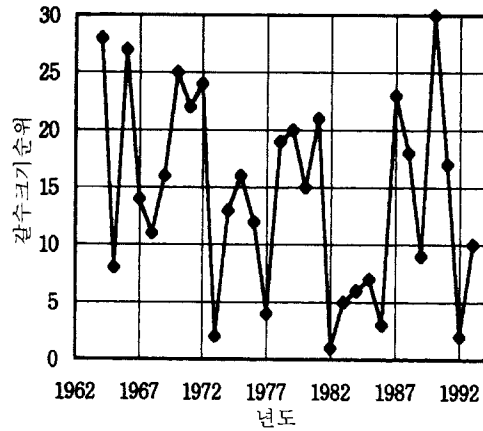


그림 9. 한강유역 과거 연유입량의 기쁨순위

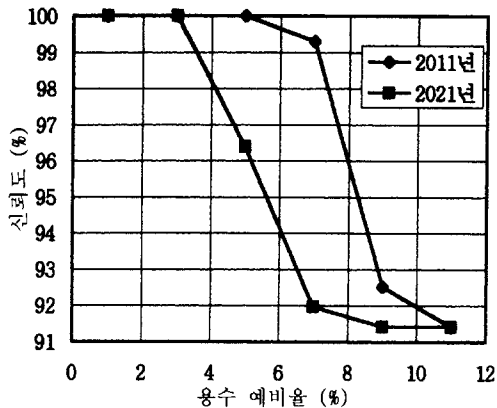


그림 7. 용수예비율별 공급신뢰도

따라서 DPSA를 한강권역의 대규모 저수지 시스템 분석에 이용할 수 있는가를 평가하기 위하여 적용하였다. 이때 적용방법은 IDP+HEC-5의 결과(그림 8)에서 알 수 있듯이 과거 최대 과우년으로 기록된 81~83년을 포함시키기 위하여 74~86(13년간)의 기간에 대하여 모의하였다. 이의 결과는 그림 10에서 보여주고 있는데 최대 공급 가능량을 추정하기 위하여 2021년 기준 용수수요량을 1%에서 10%까지 1%씩 증가시키는데 따른 용수부족량을 확인한 결과, 이 방법 역시 5% 수준의 용수예비를 확보가 가능한 것으로 나타났다. 따라서 DPSA의 경우가 IDP+HEC-5의 경우와 비슷한 결과를 보이는 이유는 용수공급능력이 보장 신뢰도 및 이수 안전도 개념으로 평가되고 있어 어느 방법이던 최대 갈수 상황이 시스템을 지배한 결과로 해석할 수 있다.

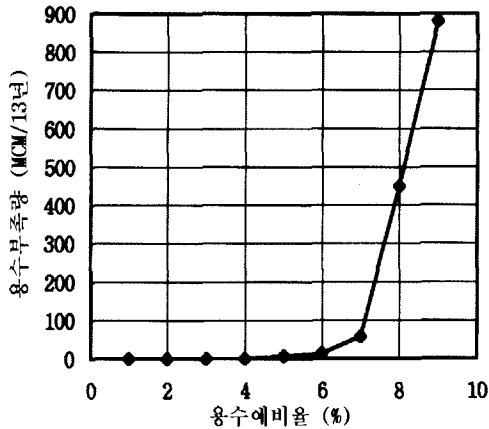


그림 10. 2021년 기준 예비율 증가에 대한 용수 부족량 민감도 분석

5. 결론 및 건의사항

본 연구는 지금까지 우리나라의 수자원 시스템분석이 단일 혹은 한정된 유역의 시스템을 대상으로 이루어진 방법을 유역 혹은 광역개념으로 확대시킨 것으로 대규모 저수지 시스템을 구성하는 문제에서 최적화 기법을 이용할 수 있는 방법론을 마련하는 것이었다. 모형적용 방법은 DPSA와 IDP+HEC-5로 두 방법 모두 적절히 이용할 수 있음을 입증하였다. 전자의 경우 경우에 따라서 국부 최적해에 빠질 우려는 있으나 초기조건들을 합리적으로 설정하면 10개 이상의 저수지 시스템에서도 이용이 가능하며, 후자의 경우는 단단계 분석방법의 일종으로 비교적 기능이 풍부하게 내장되어 있는 HEC-5를 이용하여 상대적으로 영향이 적은 시스템을 대상으로 일차 모의한후 이를 최적화 기법의 입력자료로 활용하여 시스템 전체를 평가하는 방법으로 저수지 시스템 운영을 고려한 유역 개념의 물수지 분석 문제를 간략화 시키는데 적절히 이용될 수 있을 것이다.

분석결과로 한강권역을 대상으로 한 용수공급에서 목표년도 2011년까지는 수자원 장기종합계획에서 제시된 댐들이 모두 건설될 경우 비교적 안정적인 용수공급이 가능할 것으로 나타났으나, 2021년도에는 용수예비율 확보가 5%정도에 불과해 보다 치밀한 개발 계획이 이루어져야 할 것으로 나타났다. 한편 한강권역에서의 물수지 분석을 위한 갈수기준년은 81~83년이 보다 합리적일 것으로 생각되며, 몇 개의 갈수년을 선택하여 분석한후 이수안전도를 고려하여 유역별로 물수지분석 기준년을 설정해야할 것으로 분석되었다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 (1990,1997). 수자원장기종합계획.
 건설교통부, 한국수자원공사 (1996). 수자원개발 가능 지점 및 광역배분계획 기본조사.
 윤용남, 김태균 (1993). "외부공급을 공간적으로 고려한 물수지 분석." 대한토목학회논문집, 제13권 제1호, pp. 89-96.
 이광만, 고석구 (1993). "저수지군으로부터 기대편의 산정을 위한 Monte Carlo 기법의 간략화." 한국수문학회논문집, 제25권 제1호, pp. 89-97.
 이순탁 (1990). 낙동강수계 다목적댐 연계 운영 방안. 한국수자원공사.
 한국수자원공사 (1993). 21세기를 바라보는 수자원 전망.
 Bellman, R.E. and Dreyfus, S.E. (1962). *Applied dynamic programming*. Princeton University Press, Princeton, N.J.
 Hall, W.A., Harbor, R.C. Yeh, W.W.-G. and Askew, A.J. (1969). *Optimum firm power output from a two reservoir system by incremental dynamic programming*. Contrib. 130, Water Resources Center, University of California, Los Angeles.
 Heidari, H., Chow, V.T., Kokotovic, P.V. and Meredith, D.D. (1971). "Discrete differential dynamic programming approach to water resources systems optimization." *Water Resources Research*, Vol. 7, No. 2, pp. 273-282.
 Jacobson, D.H. and Mayne, D.Q. (1970). *Differential dynamic programming*. Elsevier, New York.
 Labadie, J.W. (1990). *Dynamic programming with microcomputer: program CSUDP*. Civil engineering Department, Colorado State University, Fort Collins, Co, pp. 286-287.
 Larson, R.E. (1968). *Incremental dynamic programming*. American Elsevier Publishing Co., Inc., New York.
 Ministry of Construction, NEDECO. (1976). *Nakdong river basin delta study*. Water Management/Water Balance Computation.
 Nopmongcol, P. and Askew, A.J. (1976).

- "Multi-level incremental dynamic programming." *Water Resources Research*, Vol. 12, No. 6, pp. 1291-1297.
- U.S. Army Corps of Engineers, (1989). *HEC-5 simulation of flood control and conservation systems*.
- Trott, W.M. and Yeh, W.W.-G. (1971). "Multi-level optimization of a reservoir system." *Annual and National Environmental Engineering Meeting*, ASCE., St. Louis, Mo.

〈최종본 접수일 : 1997년 9월 29일〉