

보장 공급량 분석에 의한 댐의 물 공급 안전도 평가기법 연구

An Evaluation Method of Water Supply Reliability for a Dam by Firm Yield Analysis

이 상 호* / 강 태 욱**

Lee, Sang Ho / Kang, Tae Uk

Abstract

Water supply reliability for a dam is defined with a concept of probabilistic reliability. An evaluation procedure of the water supply reliability is shown with an analysis of long term firm yield reliability. The water supply reliabilities of Soyanggang Dam and Chungju Dam were evaluated. To evaluate the water supply reliability, forty one sets of monthly runoff series were generated by SAMS-2000. HEC-5 model was applied to the reservoir simulation to compute the firm yield from a monthly data of time series. The water supply reliability of the firm yield from the design runoff data of Soyanggang Dam is evaluated by 80.5 % for a planning period of 50 years. The water supply reliability of the firm yield from the historic runoff after the dam construction is evaluated by 53.7 %. The firm yield from the design runoff is 1.491 billion m³/yr and the firm yield from the historic runoff is 1.585 billion m³/yr. If the target draft is 1.585 billion m³/yr, additional water of 0.094 billion m³ could be supplied every year with its risk. From the similar procedures, the firm yield from the design runoff of Chungju Dam is evaluated 3.377 billion m³/yr and the firm yield from the historic runoff is 2.960 billion m³/yr. If the target draft is 3.377 billion m³/yr, water supply insufficiency occurs for all the sets of time series generated. It may result from overestimation of the spring runoff used for design. The procedure shown can be a more objective method to evaluate water supply reliability of a dam.

keywords : water supply reliability, firm yield, HEC-5 model, SAMS-2000

요 지

확률론적 신뢰도를 이용하여 댐의 물 공급 안전도를 정의하였다. 그리고 장기 보장 공급량의 안전도 분석에 의한 댐의 물 공급 안전도 평가 절차를 제시하였고, 소양강댐과 충주댐의 물 공급 안전도를 평가하였다. 물 공급 안전도의 평가에 필요한 41 개의 월 유출 시계열은 SAMS-2000으로 모의 발생시켰다. 보장 공급량 결정을 위한 저수지 모의 운영에는 HEC-5 모형이 사용되었다. 50년 계획 기간에 대하여 설계 유출자료에 의한 소양강댐 보장 공급량의 물 공급 안전도는 80.5 %로 평가되었고, 준공 후 기록 유입량에 의한 보장 공급량의 물 공급 안전도는 53.7 %였다. 그리고 설계 유입량 자료의 보장 공급량은 14.91억 m³/yr이었고, 기록 유입량 자료의 보장 공급량은 15.85억 m³/yr으로 분석되었다. 기록 유입량 자료의 보장 공급량을 목표 공급량으로 하면 연간 0.94억 m³의 용수를 추가 공급할 수 있다.

* 부경대학교 건설공학부 부교수
Associate Prof., Construction Division, Pukyong National Univ., Busan 608-739, Korea
(e-mail: peterlee@pknu.ac.kr)

** 부경대학교 대학원 토목공학과 석사과정
Master's Course, Dept. of Civil Engrg., Pukyong National Univ., Busan 608-739, Korea
(e-mail: ktw62@hanmail.net)

동일한 절차로부터, 충주댐의 설계 유출자료에 의한 보장 공급량은 33.77억 m³/yr이었고, 기록 유입량에 의한 보장 공급량은 29.60억 m³/yr으로 평가되었다. 충주댐의 설계 유출자료에 의한 보장 공급량을 목표 공급량으로 하였을 때, 모든 모의 발생 시계열에 대하여 물 공급 부족이 발생하였다. 충주댐의 설계 당시 봄철 유입량의 과대평가가 그 원인일 수 있다. 제안된 절차를 적용하면 보다 객관적으로 댐의 물 공급 안전도를 평가할 수 있다.

핵심용어 : 물 공급 안전도, 보장 공급량, HEC-5 모형, SAMS-2000

1. 서 론

1.1 연구의 목적 및 배경

수자원 시설을 계획하고 개발하거나 운영하는 주체는 시설의 수명기간 내에서 얼마나 안전하게 물을 공급할 수 있는가에 대한 의문을 가지게 된다. 주어진 목표 공급량에 대한 물 공급 안전도가 평가되면 신규 수자원 시설의 필요 여부를 알 수 있게 되고, 안전도가 매우 높은 경우에는 새로운 국토 이용의 가능성을 뒷받침하게 된다.

현재 댐과 관련하여 물 공급 안전도를 부여하는 절차를 예로 들면, 20년 유출자료로 댐을 모의운영하여 1회의 물 부족이 발생할 때의 안전도는 $(1-1/20)=0.95$ 라고 표시한다. 이러한 개념과 평가방법은 몇 가지 측면에서 모호성을 가지고 있어서 개선의 필요성이 있다. 먼저 위와 같은 평가방법을 사용하면, 자료 사용 기간이 충분히 길지 않은 경우에 자료 기간에 따라 안전도가 달라진다. 즉, 30년의 유출자료를 사용하여 1회의 물 부족을 허용하는 저수지 운영결과가 나오면 $(1-1/30)=0.967$ 의 안전도가 결정된다. 그리고 동일한 물 부족 1회라고 하여도 기간이 다를 수 있는 모호성이 있다. 예로서 한 해의 물 부족 기간이 한 달일 수도 있고 몇 달일 수도 있다. 마지막으로, 안전도 평가에 사용된 과거 유출기록은 미래에 유사하게 기록되겠지만 동일하게 반복되지는 않으므로 미래 유출기록에 의한 안전도는 달라질 가능성이 있다. 즉, 미래의 불규칙한 유출 사상에 대한 안전도를 과거의 확정적인 유출기록을 가지고 평가함으로써 상대적으로 덜 엄밀한 안전도를 사용하게 되는 문제점을 가지고 있다.

국내의 연구로서, 박성삼 등(2001)은 다목적 댐의 용수공급 능력을 평가하였고, 노재경(1998)은 다목적 댐의 용수공급 능력 평가지표 설정에 관한 연구를 수행하였다. 이들이 사용한 기록 유입량이나 모의 유입량은 과거 자료이고 이 방법들은 확률론적 방법이다. 그리고 박성삼 등(2002)의 물 공급 안전도 지표 비교 연구는 '1회/32년 물 부족이 발생했으며 ... 96.88 %=(31/32)의

물 공급 신뢰도로 약 1회/30년 발생 가뭄에 대처'와 같이 기술하고 있다. 이것은 통계적으로 보면 모호한 기술이다.

댐의 물 공급 안전도를 평가하는 현재의 방법은 과거의 유출 자료를 사용함으로써 경험적 측면에서 의의가 있지만, 언급한 바와 같은 모호성이 있다. 본 연구는 댐의 물 공급 안전도 개념을 보다 분명히 하고자 시도하였으며, 확률론적인 평가절차 대신에 확률론적인 평가절차를 제시하였다. 또한 제시한 절차를 다목적댐에 적용하여 물 공급 안전도를 평가하였다.

1.2 연구내용 및 범위

물 공급 안전도와 관련 있는 미국, 영국, 일본의 유사 용어를 고찰한 다음, 신뢰도 개념의 물 공급 안전도를 제안하였다. 그리고 확률론적인 물 공급 안전도의 평가 절차를 최근의 외국 문헌으로부터 제시하였다. 제시한 물 공급 안전도는 단일 댐의 물 공급 안전도이다. 제시된 절차에 따라 소양강 다목적댐과 충주 다목적댐의 물 공급 안전도를 평가하였다. 물 공급 안전도를 평가하는데 사용된 주요 컴퓨터 프로그램은, 월 유출 자료의 모의 발생을 위한 SAMS 프로그램과 HEC-5 저수지 모의운영 모형이다.

2. 물 공급 안전도 평가기법

2.1 물 공급 안전도와 관련된 외국의 용어

미국의 경우, 저수지에 의해 물을 공급할 때 안전 유출량(safe yield) 또는 보장 공급량(firm yield)이라는 용어를 많이 사용하여 왔다. 보장 공급량은 유입량 등의 장기간 입력자료에 대하여 여러 가지 제약조건 아래서 저수지 모의운영이나 저수지 최적운영을 통하여 결정된다. Grigg(1996)는 보장 공급량을 다음과 같이 정의하였다. "보장 공급량이란 50년에서 100년의 계획기간에 대하여 물 공급 체계로부터 공급할 수 있는 최소의 유량이다. 이는 통계적으로 기대되는 값이며 공급의 시간 단위는 일, 월 또는 연 등이다."

최근에 캘리포니아에서는, 1987~1992년 사이의 가뭄

을 겪으면서 물 공급 계획을 수립할 때, 두 가지 기준을 사용하고 있다. 하나는 1922~1994년의 73년 유출량 자료이고, 다른 하나는 1990~1991년 기간의 갈수이다. 1990~1991년 기간의 갈수는 재현기간이 약 20년에 해당한다. 이렇게 작은 재현기간에 대해 물 공급 계획을 수립하는 이유는, 위의 가뭄이 주 전역에서 발생하여 많은 하부 지자체들이 이 기간을 물 공급 계획의 기준으로 삼고 있기 때문이다. 그리고 최근 기간에 대한 물 수요와 공급 자료가 잘 관리되고 있기 때문이기도 하다 (California Department of Water Resources, 1998).

영국의 과거 물 관리 조직 중에서 Wessex 물관리청은 1986, 1991, 2001, 2011년에 대하여 계획 물 수요량을 추정하였고, 이에 대하여 다음과 같은 목표로 물 공급 시설을 정비해왔다.

- (1) 계획 물 수요량에 대해 재현기간 50년의 갈수에 대응 가능한 수자원을 개발.
- (2) 1990년까지 살수와 세차를 제한하는 가뭄의 재현기간을 10~15년으로 함.
- (3) 물 사용자의 건물에서 충분한 수압이 확보되도록 함.
- (4) 15시간 분의 용량을 가지도록 배수지를 정비함.

위의 항목 중에서 (1), (2)가 물 공급 안전도에 관련된 것이다. 항목 (1)에서 재현기간 50년의 갈수란 매해의 발생확률이 0.02인 갈수라는 것이고, 이에 대해서 물 공급이 원활하도록 하는 것이다. 항목 (2)는 용도에 따른 별도의 안전도이다.

일본에서 사용하는 개념은 이수계획의 안전도이고, 이는 1970년경에 사용되어지기 시작했으며 藤吉三郎(1971)에 의하면 다음과 같다. 댐 등의 수자원 개발시설은 하류 기준점의 유황을 평활화 하여 갈수시에도 확보 유량(유지유량, 기득용수, 신규용수)을 취수 가능하도록 건설된다. 이수계획의 안전도란 설정된 유량이 확보 가능한 확실성을 말한다.

일본은 이수안전도의 지표로서 기준 갈수년을 사용하였다. 통상적인 이수안전도 개념은 과거 10년 정도의

유황을 대상으로 제1위 또는 제2위 갈수유황을 기준 갈수년도로 선정하고, 그 유황에 대하여 안전하게 공급하면 좋다고 하는 것이다.

일본에서 통상 사용하는 이수안전도는 10년 중 제1위 상당의 갈수에 대한 것이다. 이러한 기술은 여러 문헌에 비슷하게 표현되어 있지만 대부분 통계적으로 명확하게 규정하고 있지 않다. 즉, 위의 기술이 매해의 갈수 발생확률 0.1 또는 재현기간 10년 갈수에 대한 이수안전도를 의미하는지, 아니면 글자대로 10년 자료 중에서 제1위의 갈수를 의미하는지가 명확하지 않다. 이런 모호함을 명백히 하지 않은 채, 국내에서는 1/10 이수안전도라고 사용하기도 한다.

10년 기간 중 제1위 상당 갈수의 개념을 사용하면 10년 자료를 어느 것으로 사용하느냐에 따라 갈수량이 달라진다. 이 점은 당연한 것으로, 藤吉三郎(1971)도 간단한 분석 자료까지 제시하면서 지적하고 있다. 통계적으로 보면 10년 중 제1순위 갈수 값이 1/10의 발생확률을 가지는 것이 아니다. 결국 이수계획의 안전도는 엄밀한 확률론적 개념이라고 볼 수 없고, 경험적인 계획 실태에 의미를 부여하고 개념화한 것으로 볼 수 있다.

2.2 우리나라 댐의 물 공급 안전도

우리나라의 댐 시설기준(건설부, 1993)은 물 공급 안전도에 대하여 명확히 규정하고 있지 않다. 다만 2.2.3 절의 5항에서 댐의 용수공급능력 판단을 위한 저수지 조작에 소요되는 자료 기간을 20년 이상으로 하고 있다. 자료 기간이 짧은 경우는 모의 발생시킬 것을 권장하고 있다. 농수산부(1982)의 '농지개발사업계획 설계기준: 댐편'에서는 "농업용수 보급을 위한 필요 저수량은 10년 1회 정도의 갈수를 기준으로 ...구한다."고 제시하고 있다. 이 문구는 일본의 통상적인 이수안전도 정의를 따른 것으로 보인다. Table 1은 일부 댐에 대한 물 공급 안전도의 현황을 나타내는데, 이와 같이 서로 상이한 기준 하에서 여러 댐들이 건설되거나 계획되어 왔다(건설교통부, 1999).

Table 1. Water Supply Reliability of Multipurpose Dams

Dam	Completion	Water supply (10 ⁶ m ³)	Data for analysis	Water supply reliability	Reference
Soyanggang	'73.12	1,213	'15~'39	Firm yield of 36 m ³ /sec	소양강댐 공사지
Andong	'77.5	926	'58~'69	Drought streamflow of '67~'68 + a reserve storage of 25 %	안동댐 공사지
Daechong	'81.6	1,649	'58~'70	Water supply against the severest drought year	대청댐 광역상수도 2단계 사업 타당성조사 및 기본계획
Chungju	'85.10	3,380	'66~'83	Reliability of 95 %	충주다목적댐 공사지

전반적으로 우리나라의 댐에 대한 물 공급 안전도의 지표는 보장 공급량, 기준 갈수년 등이었다. 그렇지만 댐의 건설 시점마다 서로 다르게 적용되어 일관성이 없다. 가장 많은 비율을 차지하는 지표는 기준 갈수년이라고 볼 수 있는데, 이마저도 자료 사용기간이 서로 다르다. 이것은 가용자료의 보유기간이 짧은 이유도 있고, 일관된 지침이 없기 때문이기도 하다.

물 공급에 관하여 서구에서 사용하는 재현기간의 개념은 그 자체로서 의의를 가진다. 그러나 우리나라에서 사용하고 있는 물 공급 안전도의 지표는 다양하기도 하고 모호한 면도 있다. 본 연구는 다음과 같이 물 공급 안전도를 제시하고자 한다.

2.3 신뢰도 개념을 이용한 확률론적 물 공급 안전도

물 공급 시스템이 목적인 기능을 달성하는 신뢰도를 파악하기 위해서는 물에 대한 수요와 자원을 비교해야 한다. 여기서, 수요는 여러 요인에 의해 변동하며 물 자원은 자연 현상에 따라 변화하므로, 수요에 대한 공급을 확률적으로 기술하는 방식이 시스템의 설계와 운영에 적합한 해석 방법이다. 시스템이 수요를 충족시키지 못하는 위험도(risk)란, 시스템의 수명기간에 대해 목적 달성 실패 확률 p_f 로 정의된다. 반대로 시스템의 신뢰도(reliability)는 목적을 달성할 확률이고, r 로 표시하여 $r = 1 - p_f$ 가 된다(Kottegoda and Rosso, 1997).

시스템 또는 저수지에 대한 위험도를 평가하는 지표로서 흔히 재현기간(recurrence interval)을 사용한다. 어느 한 해에 대하여 시스템이 목적인 기능을 발휘하지 못하는 실패 확률 R 은 매해의 위험도 또는 실패확률(annual risk of failure)이라고 말하며, 이것은 실패사상의 재현기간인 T 의 역수이다(Eq.(1)).

$$R = 1/T \quad (1)$$

반면에 어느 한 해에 목적을 달성할 확률은 매해의 신뢰도라고 하며, 1에서 매해의 위험도를 뺀 것과 같다. 따라서 매해의 위험도는 Eq.(2)와 같다.

$$r = 1 - 1/T \quad (2)$$

구조물의 수명기간과 같은 여러 해에 대한 장기 위험도는 매해의 위험도와 관련되어 있으며 베르누이 확률 관계에 의하여 Eq.(3)과 같이 표시된다.

$$R_n = 1 - (1 - R)^n = 1 - (1 - 1/T)^n \quad (3)$$

여기서, R_n 은 장기 위험도이고 n 은 계획 연수이다.

위와 같은 고찰은 댐에 의한 물 공급 안전도의 성격을 규정하는데 보다 객관화된 방안을 제공할 수 있다. 지금까지 사용되어온 재현기간이나 이수안전도의 용어는 나름대로의 의미와 특징이 있으나, 본 연구에서는 별도의 확률론적인 물 공급 안전도의 개념을 제시하고자 한다. 이것은 Basson et al.(1999)의 저서 내용의 일부를 재정리한 것이다. 여기에 사용된 용어는 ‘계획안전도’ 등 일본의 용어와 ‘신뢰도’ 등 확률론의 기초 용어 등이다.

먼저, 이 개념에는 물 공급이 부족해지는 상황에서 취하는 절수 등의 관리기법을 감안한 안전도를 생각하지 않는다. 즉, 관리안전도의 개념이 아니라 계획안전도에 국한된 개념으로 생각한다. 다음으로, 이수계획의 안전도는 수자원 개발시설에 대한 하류 기준점을 중심으로 정의되었으나, 댐의 물 공급 안전도는 수자원 개발시설 자체를 중심으로 안전도를 고려한다. 이수라는 단어보다 공급이라는 단어를 사용함으로써 댐 시설 자체를 중심으로 고려하는 개념을 나타낼 수 있다. 그리고 안전도의 평가는 일본에서 사용하는 개념을 지양하고, 확률론적인 신뢰도의 개념으로 수행한다. 이제 댐의 물 공급 안전도에 대한 정의를 다음과 같이 내리고자 한다.

(1) 댐의 물 공급 안전도란, 설정된 물 수요량을 공급할 수 있는 확률론적 신뢰도이다. (2) 이는 계획안전도이며, 댐 등 수자원 개발시설을 기준으로 한 공급 신뢰도이다. (3) 신뢰도는 일정 기간에 대한 목표 달성 정도를 확률론에 입각하여 평가한 것이다.

다음 절에서는 댐의 물 공급 안전도를 평가하는 방법을 기술하고 있다.

2.4 보장 공급량을 이용한 물 공급 안전도 평가기법

2.4.1 공급량의 개념

목표 공급량(target draft; TD)이란 정해진 기간에 대하여 저수지로부터 취득(draft)하고자 하는 물의 목표량이다. 공급량(yield)이란 저수지로부터 특정 기간에 대하여 취득되는 물의 양이다. 공급량은 궁극적으로 목표 공급량과 같아지는 것이 바람직하다.

Fig. 1은 용어의 정의를 이해하기 위한 모식도이다(Basson et al., 1999). 기본 공급량(base yield)이란 어느 한 유입량 계열에 대하여, 특정한 운영정책 아래서 특정 수요에 대응하여 목표 공급량을 가급적 만족하도록 저수지를 운영하였을 때 기록되는 최소 공급량이다. 여러 가지의 목표 공급량에 대하여 기본 공급량을 계산하면 Fig. 1과 같은 기본 공급량선이 작성된다. 목표 공급량이 크면, 저수지 수위가 저하하여 목표 공급량을

공급하지 못하게 되어 기본 공급량은 목표 공급량보다 작아지게 된다.

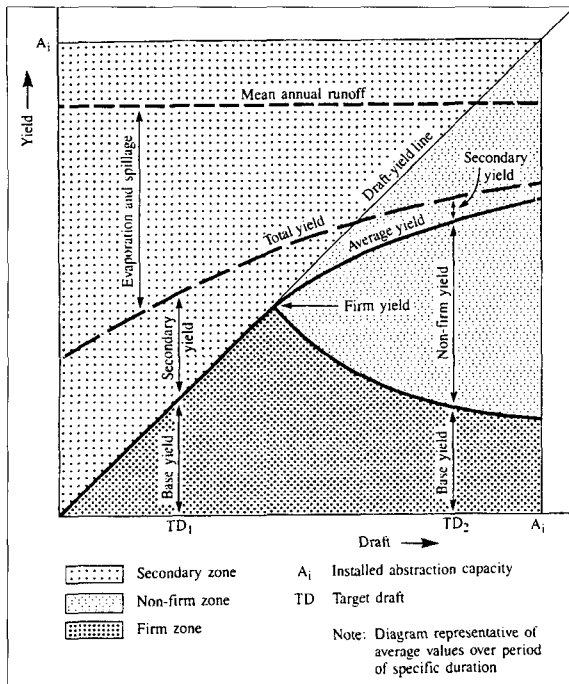


Fig. 1. Average Draft-Yield Response Diagram

목표 공급량을 작은 값부터 증가시켜 가면, 기본 공급량은 임계(critical) 목표 공급량에 도달할 때까지 목표 공급량과 같게 된다. 임계 목표 공급량이란 저수지의 저수량이 최소의 운영 수준에 접하고 공급량은 목표 공급량보다 작아지지 않는 상태의 값을 말한다. 이는 각 유입량 계열마다 하나씩 존재하고, 이때의 최대 기본 공급량을 보장 공급량이라고 한다. 그리고 Fig. 1의

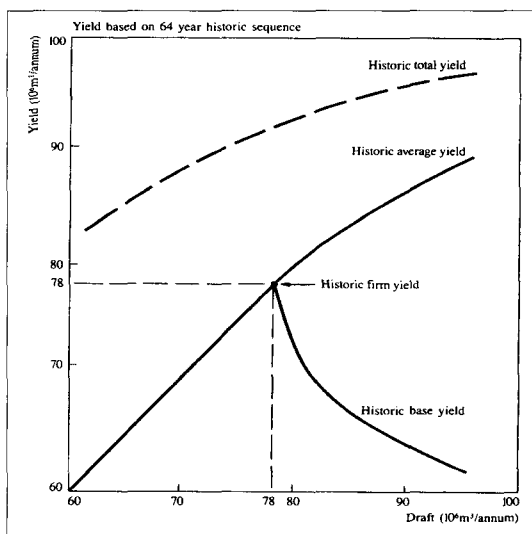


Fig. 2. Historic Long-Term Yield

기본 공급량 선이 꺾인 점은 보장 공급량을 나타낸다.

2.4.2 장기 보장 공급량의 안전도와 물 공급 안전도

Fig. 2는 64년의 기록 자료를 이용하여 작성한 (목표 공급량)/공급량(draft/yield) 분석도이다(Basson et al., 1999). Fig. 1과 유사하지만 주요 공급량 변수들을 부각시켜 작성되었다. 장기 공급량(long term yield)의 안전도 개념을 수립하기 위하여 여러 묶음의 추계학적 시계열로부터 각각 (목표 공급량)/공급량 관계를 분석한다. 이를 중첩시켜 그리면 Fig. 3과 같다. 이 때 발생시켜야 할 시계열의 개수는 수립되는 결과를 도출하기 위한 최소의 개수로서, Basson et al.(1999)은 약 40 개를 제안하였다. Basson et al.(1999)은 시계열의 묶음 수를 여러 가지로 변경시키면서 장기 공급량의 안전도를 분석하였으며, 그 결과 최소 40 묶음의 시계열을 사용하면 안전도 값이 시계열 묶음 수에 상관없이 수렴됨을 보였다. 또한 이들의 저서에서는 하나의 중앙값(median)을 얻기 위하여 홀수인 41개를 사용하여 분석 결과를 기술하고 있다.

Fig. 3에서 특정한 목표 공급량 TD에 대하여 일부 계열은 TD보다 큰 보장 공급량을 제공한다. 이들은 항상 목표 공급량 TD를 충족시킬 수 있다. 만일 41개의 시계열이 각각 64년간의 자료로 구성되어 있고, 이 가운데 14개가 TD보다 큰 보장 공급량을 만족 한다면, $14/41 \times 100 = 34.1\%$ 가 64년 동안 실패 없이 만족된다. 즉, 안전도는 0.341이 된다. 이로부터 매해의 위험도를 Eq.(3)을 변형하여 구하면, $1 - (0.341)^{1/64} = 0.01665$ 가 된다. 이를 재현기간으로 나타내면, $0.01665^{-1} = 60$ 년이 된다.

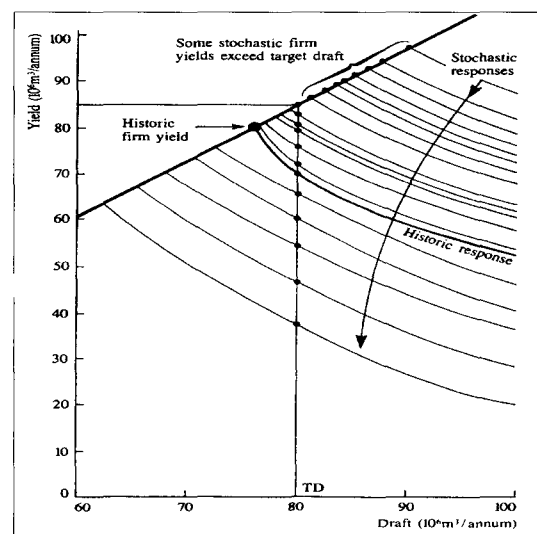


Fig. 3. Stochastic Draft/Yield Response Lines with an Example of Target Draft

본 연구에서는 이와 유사하게, 목표 공급량을 설계 당시의 유입량으로써 평가한 보장 공급량과 기록 유입량으로써 평가한 보장 공급량으로 지정하고, 기록 유입량 자료로부터 모의 발생시킨 41개의 시계열 자료로써 물 공급 안전도를 평가하였다.

3. 다목적댐의 물 공급 안전도 평가기법 적용

3.1 소양강 다목적댐의 물 공급 안전도 분석

3.1.1 소양강 다목적댐의 건설 후 관측자료를 이용한 월 유출 모의 발생

소양강 다목적댐을 설계할 당시에 사용한 월 유출 자료는 1915~1939년의 25년 자료로서 가자야마 월 유출식에 의하여 계산된 것이다. 건설 후에는 1974년부터 현재까지 관측된 월 유출자료가 관리되고 있다. 목표 공급량-공급량 분석에 의한 물 공급 안전도를 평가하기 위하여 여러 묶음의 시계열 자료가 필요하다. 이를 위하여 SAMS-2000 상용 프로그램(Salas et al., 2000)을 사용하여, 건설 후의 월 유출 관측자료를 가지고 유출 자료를 모의 발생시켰고, 모형식별 절차는 다음과 같다. 준공 후 29년간의 관측 월 유출자료는 정규분포를

따르지 않고, 계절형 자료로서 월별로 비교적 큰 왜곡도를 가지고 있으므로 원자료를 월별로 대수변환 하였다. 변환한 자료에 대해 정규성 검사를 위한 왜곡도 검정을 실시한 결과, 신뢰구간 95 %에서 정규분포를 만족하였다. 그리고 계절성을 제거하기 위해 월별 표준화를 수행하였다. 월별 표준화를 위해서 Table 2에 보인 자료의 기본 통계량에서 표본 평균과 표본 표준편차를 이용하였고, 대수변환에는 quantile lower bound를 이용하였다.

PARMA(Periodic Auto Regressive Moving Average) 모형차수의 식별을 위해 정상 시계열(stationary time series)로 변환된 자료의 ACF와 PACF를 검토한 결과 (Figs. 4 and 5), PACF의 lag-1에서 유의한 자기상관을 확인할 수 있다. Fig. 6에는 월별 lag-1, 2, 3에 대한 자기상관함수를 보였으며, 여기서도 1월, 2월과 같은 갈수기의 경우에 대하여 신뢰구간 95 %에서 통계적으로 유의한 자기상관이 약 lag-3까지도 존재하는 것을 확인하였다. PARMA의 모형식별 과정도 ARMA 방법론처럼 PACF를 통해 AR 차수를 결정하므로 주기성(periodic) AR 모형의 차수를 1로 결정하였고, PAR(1) 모형을 적용하였다.

Table 2. Monthly Statistical Data of Soyanggang Dam for the Past 29 Years after the Dam Construction

Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Average(m/s)	6.74	9.32	29.30	64.94	59.82	57.32	184.45	209.21	126.16	30.09	21.46	11.57
Standard deviation	3.61	10.22	22.56	34.64	46.15	68.04	107.49	163.40	148.40	31.10	18.75	9.05
Minimum	1.03	1.08	5.10	17.66	4.78	9.29	29.96	24.41	14.13	7.03	4.12	2.85
Maximum	14.91	41.19	88.29	150.42	204.30	269.29	414.40	703.07	607.30	151.17	98.14	43.09
Median	6.34	5.65	21.46	61.69	45.39	27.28	186.38	133.12	74.79	17.78	15.87	10.02
Skewness	0.78	2.31	1.31	0.76	1.54	2.05	0.46	1.31	2.36	2.56	2.69	2.05
Quantile lower bound	-7.60	0.40	-0.20	-25.71	-9.17	7.84	-311.76	-1.21	6.33	6.08	2.16	0.86

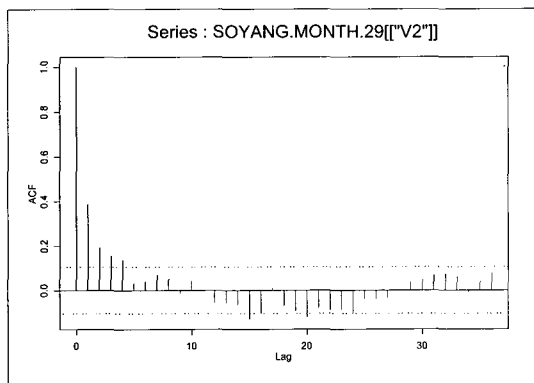


Fig. 4. ACF for Monthly Data of Soyanggang Dam Converted into Stationary Time Series

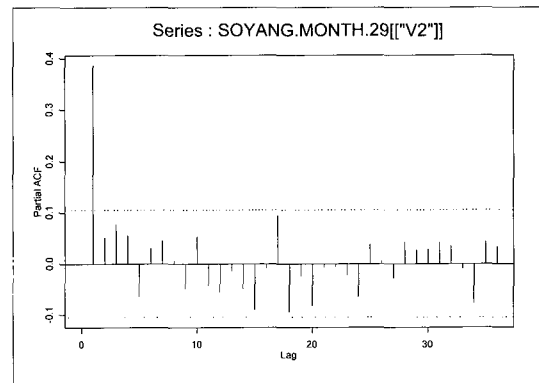


Fig. 5. PACF for Monthly Data of Soyanggang Dam Converted into Stationary Time Series

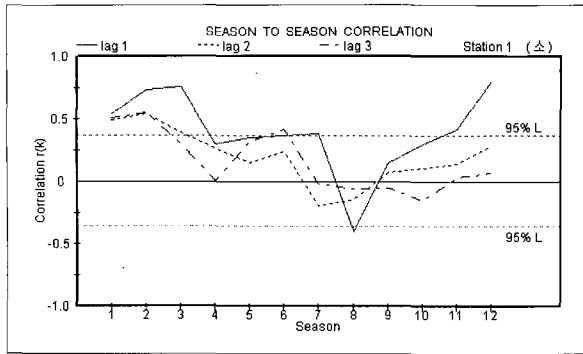


Fig. 6. Autocorrelation of Lag-1, 2, 3 for the Historic Inflow

3.1.2 저수지 운영 규칙

저수지 운영에는 HEC-5 모형(US Army COE, 1997)이 사용되었다. HEC-5는 저수지 공간을 다섯 개의 저수위로 구분하는데, 이에 따라 소양강 다목적댐의 저수위를 Fig. 7과 같이 구분하였다. 그런데 HEC-5와 우리나라의 저수위 구분은 다소 다르다. 먼저 저수위 1 이하에 대하여 사수역(inactive zone)의 구분은 같으나, HEC-5는 사수역과 이수공간(conservation zone) 사이에 비상공간(buffer zone)이 있고 비상공간의 최고 수위를 저수위 2로 하고 있다. 그러나 우리나라에는 이런 공간을 개념화하지 않은 관계로 본 연구에서 저수위 1과 2를 같게 하였다. 저수위 3은 이수공간의 최고 수위를 표시하는데, 홍수기와 비홍수기를 구분하여 운영된다. 즉, 6월 21일~9월 20일 사이로 정의되는 홍수기에는 저수위 3을 홍수기 제한수위로 낮춘다. 그리고 저수위 4는 계획 홍수위를 나타내고, 저수위 4와 5 사이는 홍수의 추가 저류공간(surcharge storage)으로 명명되는데, 이도 역시 우리나라의 댐에 명확히 표시되지 않는 공간이다.

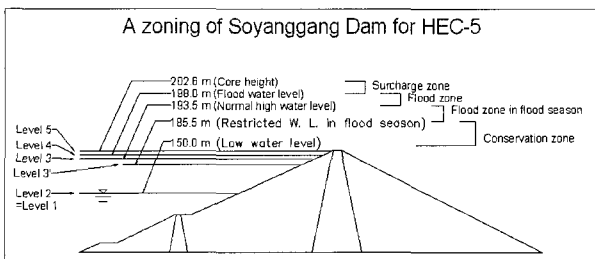


Fig. 7. Stages and Zones of Soyanggang Dam

Fig. 8은 저수위의 제한과 연중 운영규칙을 시기에 따라 도시한 그림이다. 소양강 다목적댐의 하류 용수공급(발전 포함)을 위한 이수 운영은 일정한 방류량으로 하였다. 그리고 우두보 지역의 기득 수리권에 대한 유

량 분기(diversion)는 3월 20일~10월 10일 사이에 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 이지만, 입력자료 형성의 편의상 10월의 분기량을 모두 3월로 옮겼다. 실제 운영 자료를 살펴보아도 10월에는 전혀 농업용수를 공급한 적이 없었다. 22일간의 유량을 31일간으로 분배하여 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 대신에, 하류 평균 $0.7097 (=22\text{일}/31\text{일}) \text{ m}^3/\text{s}$ 의 분기량을 3월에 공급하도록 설정하였다.

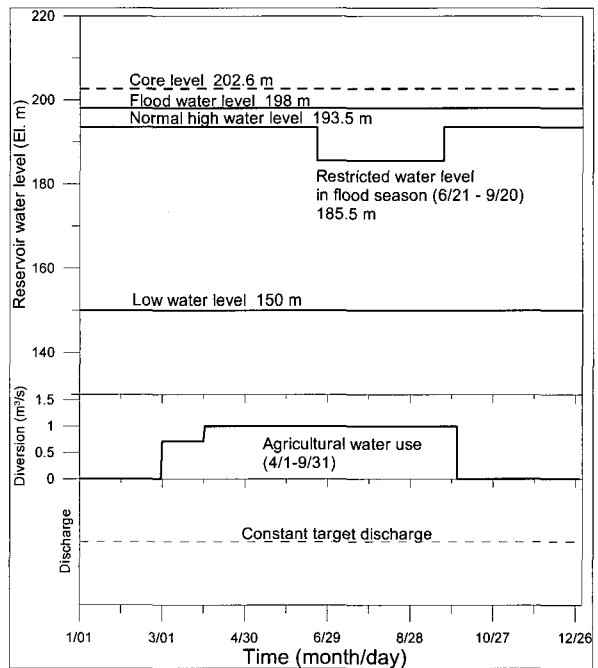


Fig. 8. Annual Operation Rule of Soyanggang Dam

3.1.3 물 공급 안전도 분석

설계 당시 자료와 기록 자료를 가지고 모의운영하여 목표 공급량-공급량 분석을 수행한 결과를 Fig. 9(× 표시 곡선)와 Fig. 10(○ 표시 곡선)에 제시하였다. 곡선을 산정한 절차는 다음과 같다. 먼저, 작은 목표 공급량을 HEC-5에 입력하여 저수지 모의운영을 수행하고, 이로부터 최소 공급량인 기본 공급량을 결정한다. 그 후 차츰 목표 공급량을 크게 하여 저수지 모의운영을 수행하고, 각각의 기본 공급량을 결정한다. 목표 공급량이 작으면, 저수지 운영결과에서 이 보다 작은 공급량이 발생하지 않으므로 목표 공급량과 동일한 기본 공급량이 결정된다. 이 경우의 (목표 공급량, 기본공급량) 자료 쌍을 도시하면, Figs. 9 and 10의 원점에서 증가하는 직선이 된다. 다음으로, 목표 공급량을 증가시키다 보면 최소 공급량이 목표 공급량 보다 작아지기 직전의 한계 상태가 발생하는데, 이 좌표점이 Figs. 9 and 10의 증가 직선이 꺾이는 곳이다. 이 꺾인 점은 한 시계열에 대한 보장 공급량을 나타낸다. 이와 같이 하나의 시계열

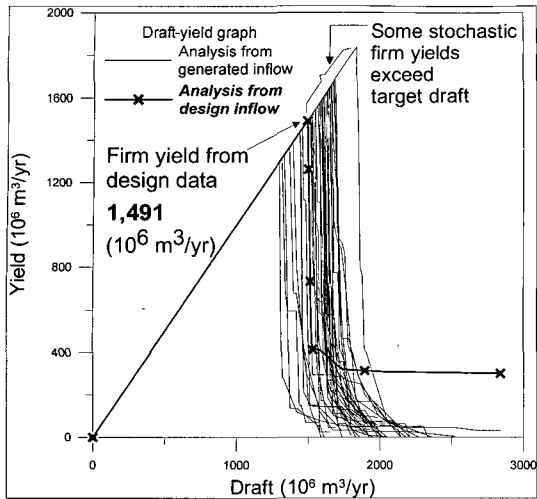


Fig. 9. Stochastic Draft/Yield Response Lines and the Line from Design Data of Soyanggang Dam

로부터 하나의 목표 공급량-공급량 분석 곡선을 얻으려면 약 20 회의 HEC-5 저수지 모의운영이 필요하다. 특히 보장 공급량 주변에서는 목표 공급량을 매우 작은 단위로 증가시키면서 저수지 모의운영을 수행하여야 한다. 비록 많은 횟수의 HEC-5 수행이 필요하지만, 1 회의 저수지 운영에 걸리는 수행 시간은 매우 작으므로 분석 작업에 지장을 초래하지 않는다. 만일 목표 공급량을 더욱 크게 하면, 저수지 운영 결과에서 이 보다 작은 최소 공급량이 발생하므로 목표 공급량 보다 작은 기본 공급량이 결정된다. 이 경우는 (목표 공급량, 기본 공급량) 좌표 점이 격인 점보다 아래에 위치하게 되어 곡선은 하강한다.

기록 자료의 보장 공급량은 연간 15.85억 m³이고, 설

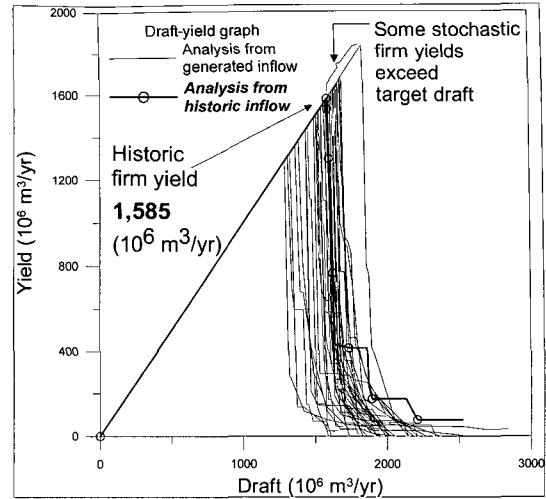


Fig. 10. Stochastic Draft/Yield Response Lines and the Line from Historic Data of Soyanggang Dam

계 자료의 보장 공급량은 연간 14.91억 m³으로 평가되었다. 여기에 모의 발생된 41개 시계열 묶음에 대해 목표 공급량-공급량 분석을 수행하여 중첩 도시하였다 (Figs. 9 and 10). 모의 발생된 각 시계열의 목표 공급량-공급량 분석도도 언급한 절차대로 약 20 회의 저수지 모의운영으로부터 얻어졌다.

Fig. 11은 기록 유입량 자료의 보장 공급량(15.85억 m³/yr)을 목표 공급량으로 하여 각 시계열의 저수지 모의운영 결과를 구한 후, 안전도를 도시한 것이다. 41개의 시계열 자료 중에서 22개의 시계열이 15.85억 m³/yr의 보장 공급량을 초과하여 물 공급 안전도는 53.7 %가 된다. 그림 작성은 다음과 같이 하였다(Table 3). 먼저 Fig. 10의 보장 공급량 중에서 15.85억 m³/yr 보다 큰 값

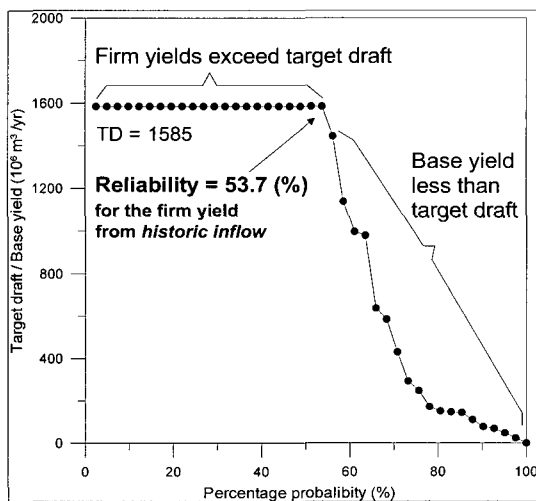


Fig. 11. Reliability of Long-Term Yield for the Historic Firm Yield of Soyanggang Dam

Table 3. Drawing Procedure of Fig.11

(a) Base yield (10 ⁸ m ³ /yr)	(b) Descending order of (a)	(c) Rank	(d) % Excess probability
6.37	15.85	1	2.4
15.85	15.85	2	4.9
15.85	15.85	3	7.3
0.68	15.85	4	9.8
⋮	⋮	⋮	⋮
4.29	15.85	22	53.7
15.85	14.44	23	56.1
9.96	11.37	24	58.5
9.79	9.96	25	61.0
15.85	9.79	26	63.4
⋮	⋮	⋮	⋮

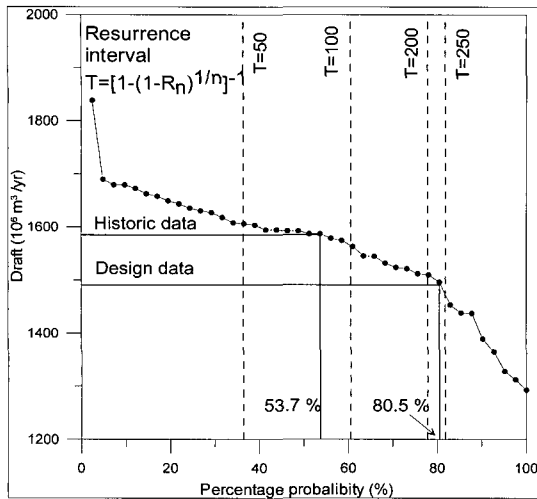


Fig. 12. Reliability of Long-Term Yield for Soyanggang Dam

의 시계열은 목표 공급량을 15.85억 m³/yr로 할 때, 최소 공급량이 모두 15.85억 m³/yr가 되므로 기본 공급량을 15.85억 m³/yr로 기록한다. 15.85억 m³/yr 보다 작은 보장 공급량의 시계열은 목표 공급량을 15.85억 m³/yr로 하여 다시 저수지 모의운영하고, 이로부터 얻어진 기본 공급량을 기록한다(Table 3(a)). 이 값들은, Fig. 3에서 목표 공급량 8천만 m³/yr를 나타내는 세로 직선과 여러 기본 공급량 곡선이 교차하는 점들과 같은 성격을 갖는다. 이와 같이 두 가지 방식으로 기록된 값을 내림차순으로 나열한다(Table 3(b)). 그 다음에 각 값에 순위를 부여하고 각 순위를 전체 개수로 나누어 % 초과 확률을 구한다(Tables 3(c) and 3(d)). 이 때, 여러 개의 15.85억 m³/yr 자료가 있지만 나열된 자료 개수만큼 1, 2, 3 등으로 순위를 부여한다. 초과 확률을 횡축의 값으로 하고 그에 상응하는 기본 공급량(Table 3(b))을 종축의 값으로 나타내면, Fig. 11과 같이 된다.

Fig. 12는 41개 시계열의 보장 공급량을 내림차순으로 정리하고 각 자료의 % 초과확률을 부여한 후, 초과 확률과 보장 공급량을 각각 횡, 종의 자료 쌍으로 도시한 것이다. 여기에 기록 유입량 자료와 설계 자료의 보장 공급량에 대한 물 공급 안전도를 표시하였다. 설계 유입량 시계열의 보장 공급량은 14.92억 m³/yr이다. 41개 시계열 중에서 33개의 보장 공급량이 14.92억 m³/yr를 초과하므로 물 공급 안전도는 80.5%가 된다. 분석된 물 공급 안전도를 정리하면 Table 4와 같다.

Table 4. Reliability of Firm Yield for the Historic and Design Inflow of Soyanggang Dam

Item	The firm yield from the historic data 15.85×10 ⁸ m ³ /yr	The firm yield from the design data 14.91×10 ⁸ m ³ /yr
Water supply reliability for a planning period of 50 yrs	0.537	0.805
Water supply risk for a planning period of 50 yrs	0.463	0.195
Return period (yr)	81	231

3.2 충주 다목적댐의 물 공급 안전도 분석

3.2.1 충주 다목적댐의 월 유출 모의 발생

소양강 다목적댐과 동일한 절차로 건설 후 관측 자료(1986~2002)를 이용하여 충주 다목적댐의 월 유출을 모의 발생시켰다. 그런데 충주 다목적댐의 경우, 각 월의 유입량 자료를 대수변환한 후, 표준화를 거쳐 PAR(1) 모형으로 모사한 자료의 잔차가 4월과 12월에 대하여 독립성이 기각되었다. 그래서 Box-Cox 변환(Maidment, 1993)을 원자료에 다시 적용한 다음, 표준화를 거쳐 PAR(1) 모형으로 월 유입량을 모의하였다. 그 결과 잔차의 독립성이 모든 월에 대하여 만족되었다. 이에 따라 Box-Cox 변환을 거친 PAR(1) 모형을 월 유입량 모의 발생에 사용하였다.

Box-Cox 변환에 사용되는 식은 Eq. (4)와 같다. 여기서, x_t 는 원자료의 시계열, y_t 는 변형된 시계열, λ 는 Box-Cox 변환 계수이다. 이때 λ 의 값은 y_t 의 왜곡도(skewness)가 0을 가하도록 하는 값이다(Maidment, 1993). λ 값을 월별로 추정하기 위해, SAMS-2000에서 y_t 의 왜곡도가 0이 되도록 반복 수행하였으며 결과는 Table 5와 같다.

$$y_t = \frac{x_t^\lambda - 1}{\lambda} \quad \lambda \neq 0 \quad (4)$$

$$= \ln(x_t) \quad \lambda = 0$$

Table 5. Monthly λ values for the Box-Cox Transformation

Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
λ	0.1045	-1.2256	0.1196	0.0063	0.1516	-0.3795	0.5194	-0.2480	-0.1638	-0.4597	-0.6807	-0.4569

3.2.2 충주 다목적댐의 저수지 모의운영과 물 공급 안전도 분석

충주 다목적댐의 저수위 제한과 연중 운영규칙 (Nippon Koei, 1985)을 참조하여 Fig. 7과 유사하게 HEC-5의 다섯 개 수위를 지정하였다. Fig. 13은 충주 다목적댐의 연중 운영규칙을 도시한 그림이다. 앞서 나타난 소양강 다목적댐의 연중 운영 규칙과 다른 사항은 충주 다목적댐의 경우, 농업용수 공급을 위한 유량 분기가 없는 점이다.

Fig. 14는 설계 유입량(순 유입량)과 과거 관측 유입량의 월 평균값을 도시한 그림이다. 충주 다목적댐의 설계에 사용된 유입량은 14개 강수 관측소의 18개년 (1966~1983) 자료에 의한 계산 유입량이다. 유입량 계산에는 4단 탱크모형이 사용되었다. 유의할 사항은 준공 후의 기록 유입량이 1~6월의 기간에 대하여 설계 유입량 보다 작거나 유사하다는 것이다. 반면에 7~9월의 3개월은 준공 후 기록 유입량이 설계 유입량 보다 크다. 물 이용 측면에서 보면, 7~9월에 집중된 유입량 중 상당한 양은 여수로로 방류될 가능성이 크다. 그러므로 7~9월의 관측 유입량이 크다는 것이 물 이용률의 증가로 귀결될 가능성은 희박하다. 오히려 나머지 9 개 월간의 건기에 기록 유입량이 작아서 물 공급 양이 줄어들 수 있다.

설계 자료와 기록 자료를 가지고 모의운영한 결과를 Fig. 15(× 표시 곡선)과 Fig. 16(○ 표시 곡선)에 도시하

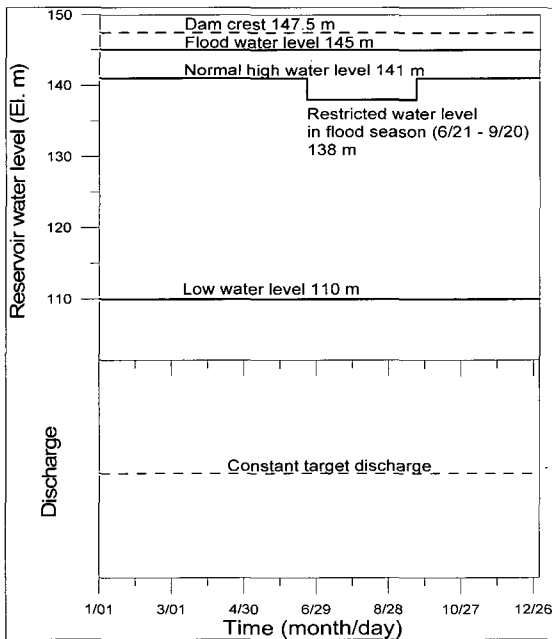


Fig. 13. Annual Operation Rule of Chungju Dam

였다. 기록 자료의 보장 공급량은 연간 29.60억 m^3 이고, 설계 자료의 보장 공급량은 연간 33.77억 m^3 으로 평가되었다. 여기에 모의 발생된 41개 시계열 묶음에 대해 목표 공급량-공급량 분석을 수행하여 중첩 도시하였다.

Fig. 17은 기록 유입량 자료의 보장 공급량(29.60억 m^3/yr)으로 저수지 모의운영한 결과의 안전도를 도시한 것이다. 41개의 시계열 자료 중에서 18개의 시계열이 29.60억 m^3/yr 의 보장 공급량을 초과하여 물 공급 안전도는 43.9 %가 된다. Fig. 18은 41개 시계열의 보장 공급량을 내림차순으로 정리하고 각 자료의 초과확률을 부여한 후 도시한 것으로, 기록 유입량 자료와 설계 자료의 보장 공급량에 대한 물 공급 안전도를 표시하였다. 이를 정리하면 Table 6과 같다. 설계 자료의 보장 공급량 33.77억 m^3/yr 는 50년 연한 동안 안전도가 0이다. 즉, 모든 모의 발생 시계열에서 물 공급 부족이 발생하였다. 박성삼 등(2001)의 연구에서도 충주 다목적댐의 가뭄대처 능력을 '1회/15년 가뭄'으로 평가하여 50년의 시계열에서 물 공급이 부족될 수 있는 가능성을 뒷받침하고 있다. 실제 충주댐 방류 기록을 보아도(한국수자원공사, 2004), 1994, 1996, 2001년의 방류량이 33.77억 m^3/yr 보다 작았다. 이들 해에는 여수로 방류가 없었으며, 방류량은 각각 31.21, 32.41, 27.09억 m^3/yr 였다. 여기서 공급 부족이 발생한다는 것은 실제 수요량보다 공급이 부족하다는 의미는 아니다. 충주 다목적댐의 용수 사용 계약량은 17.71억 m^3/yr 로서 33.77억 m^3/yr 의 52.4%에 지나지 않는다(한국수자원공사 2004).

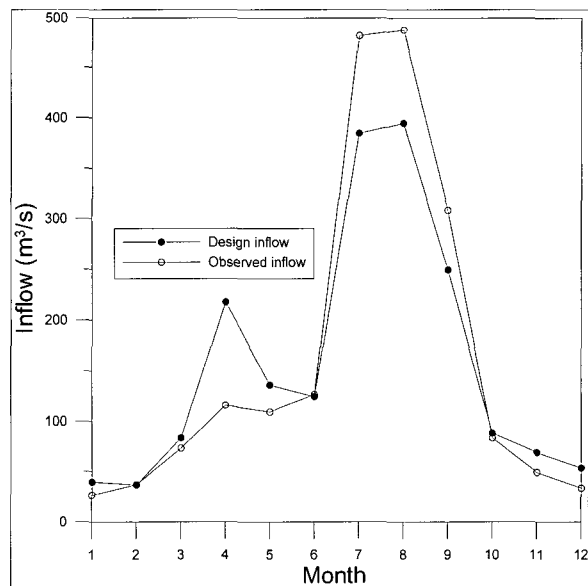


Fig. 14. Comparison of the Design and Historic Inflow of Chungju Dam

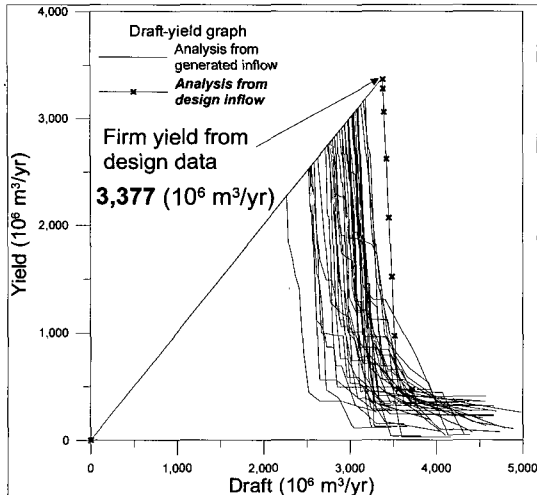


Fig. 15. Stochastic Draft/Yield Response Lines and the Line from Design Data of Chungju Dam

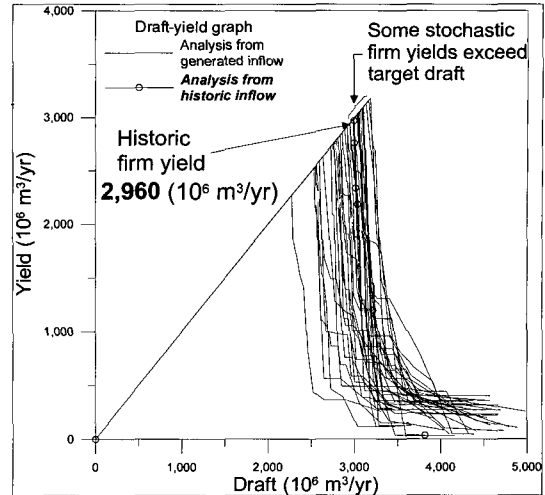


Fig. 16. Stochastic Draft/Yield Response Lines and the Line from Historic Data of Chungju Dam

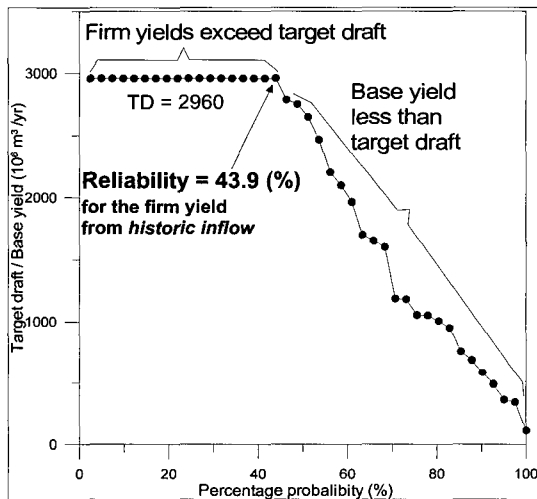


Fig. 17. Reliability of Long-Term Yield for the Historic Firm Yield of Chungju Dam

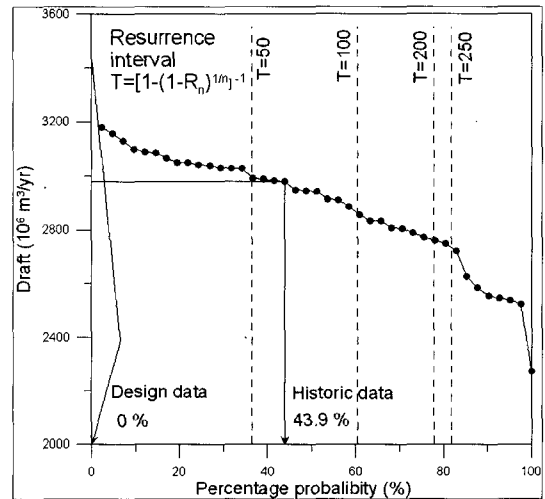


Fig. 18. Reliability of Long-Term Yield for Chungju Dam

Table 6. Reliability of Firm Yield for the Historic and Design Inflow of Chungju Dam

Item	The firm yield from the historic data 15.85×10^8 m ³ /yr	The firm yield from the design data 14.91×10^8 m ³ /yr
Water supply reliability for a planning period of 50 yrs	0.439	0
Water supply risk for a planning period of 50 yrs	0.561	1
Return period (yr)	61	-

4. 결론

우리나라에서 사용하고 있는 물 공급 안전도의 개념과 평가절차는 사용 자료기간에 따라 안전도가 달라지는 점과 1회 물 부족의 기간이 정해지지 않은 점, 과거의 유출에 대하여 평가하는 확률론적 방법인 점의 한계가 있다. 이를 극복할 수 있는 대안을 마련하고자 확률론적 연구를 시도하였으며, 주요 결과 및 결론은 다음과 같다.

- (1) Basson et al.(1999)의 연구 중 일부를 재정리하고 확률론적 신뢰도 개념을 사용하여 댐의 물 공급 안전도를 제시하였다. 그리고 장기 보장 공급량의 안전도 분석에 의한 다목적댐의 물 공급 안전도 평가 절차를 제시하였다. 이 절차는 크게 1)

기록 유입량 자료로부터 주기성 AR 모형 등으로 41 묶음 이상의 시계열을 모의 발생시키는 과정과, 2) 각 시계열로부터 저수지 모의운영에 의해 보장 공급량을 구하는 과정, 보장 공급량들을 내림차순으로 정리하고 각 값에 대한 초과확률을 부여한 다음, 3) 장기 보장 공급량의 안전도 분석도를 작성하는 과정, 4) 적절한 보장 공급량을 결정하고, 그에 상응한 안전도와 재현기간을 부여하는 과정으로 구성된다. 여기서, 결정된 보장 공급량 및 안전도, 재현기간을 물 공급 안전도를 구성하는 세 요소로 한다.

- (2) 소양강 다목적댐에 대하여 본 연구에서 제시한 안전도 평가기법을 적용한 결과, 50년 계획연한에 대하여 설계 유출 자료의 보장 공급량은 80.5%의 안전도를 가졌고, 준공 후 기록 유입량 자료의 보장 공급량은 53.7%의 안전도를 가졌다. 이를 재현기간으로 환산하면, 각각 231년과 81년이다. 만일, 기록 유입량 자료의 보장 공급량(15.85억 m³/yr)을 공급가능 보장량으로 선택한다면, 연간 0.94억 m³의 용수를 추가 확보하게 된다. 설계 유출 자료의 보장 공급량이 기록 유입량 자료보다 안전도가 매우 높은 것은 설계 유출 자료가 과소하게 추정되었기 때문이다.
- (3) 충주 다목적댐에 대하여 물 공급 안전도를 평가한 결과, 기록 유입량 자료의 보장 공급량은 43.9%의 안전도를 가졌다. 이것은 재현기간으로 61년에 해당된다. 설계 유출자료에 의한 보장 공급량 33.77억 m³/yr을 목표 공급량으로 한다면 50년 연한에 대하여 물 공급 안전도가 0이다. 즉, 50년 공급계획 기간에 물 공급 부족이 발생함을 의미한다. 이와 같이 물 공급 안전도가 작은 것은 설계 당시 봄철 유입량의 과대 추정이 원인일 수 있다.

감사의 글

본 논문의 내용은 21세기 프론티어 연구개발 사업 중 수자원의 지속적 확보기술 개발사업(과제번호 2-4-1) 결과의 일부로서, 연구비 지원에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

참고 문헌

건설교통부 (1999). 수자원 계획의 최적화 연구(III).

건설부 (1993). 댐시설기준.

농수산부 (1982). 농지개량사업계획 설계기준 : 댐편.

노재경 (1998). “다목적댐의 용수공급능력 평가지표 설정 연구.” 1998년 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 한국수자원학회, pp. 245-250.

박성삼, 이동률, 김현준, 신영호 (2001). “우리나라 다목적 댐 용수공급능력 평가.” 2001년 학술발표회 논문집(I), 한국수자원학회, pp. 533-538.

박성삼, 이동률, 강경석, 윤석영 (2002). “물 공급 안전도 지표의 비교 평가.” 2002년 학술발표회 논문집(II), 한국수자원학회, pp. 691-696.

한국수자원공사 (2004). 다목적댐 운영 실무편람.

藤吉三郎 (1971). “利水計劃の安全度に關する二,三の考察.” 日本土木學會 論文集, 11月號, pp. 23-29.

Basson, M.S., Allen, R.B., Pegram, G.G.S., and van Rooyen, J.A. (1999). *Probabilistic management of water resource and hydropower systems*. Water Resources Publications.

California Department of Water Resources (1998). *The California water plan update, bulletin 160-98*. California.

Grigg, N.S. (1996). *Water resources management: principle, regulation, and cases*. McGraw-Hill.

Kottegoda, N.T., and Rosso R. (1997). *Statistics, probability, and reliability for civil and environmental engineers*. McGraw-Hill, p. 555.

Maidment, D. R. (1993). *Handbook of hydrology*. McGraw-Hill. p. 19.20.

Nippon Koei. (1985). *Chungju multipurpose dam project, operation and maintenance manual, Vol. 1, civil structures*, Ministry of Construction.

Salas, J. D., Saada, N., Chung, C. H., Lane, W. L., and Frevert, D. K. (2000). *Stochastic Analysis, Modeling, and Simulation(SAMS) version 2000 user's manual*, Computing Hydrology Laboratory, Water Resources, Hydrologic and Environmental Research Center, Technical Report No. 10, Colorado.

US Army COE (1997). *Hydrologic engineering requirements for reservoirs*. EM 1110-2-1420, pp. 12-12~12-13.

(논문번호:05-51/접수:2005.03.23/심사완료:2006.04.20)