

산간지역의 전작지 농업용수 공급에 관한 연구

배상수* 전무갑** 지홍기*** 이순탁***

1. 서론

우리나라는 여름에 비가 많고 고온 다습하며, 용수의 편리함 등으로 옛날부터 논농사가 주로 시행되어 왔으나, 경지의 확장 및 이용에 있어서 가장 먼저 논을 생각하여 왔고, 지력이 척박하고 수리시설이 불량한 토지나 경사지 등에서는 전작지로 이용해 왔다. 그래서 관개시설이 전혀 없어서 전작지 농업이 매우 불안정하였음은 물론 저위 생산지로 머물게 한 결과를 초래하였다. 그러므로 매년 한발이 심한 전작지의 농업용수를 안정적으로 공급할 수 있도록 산간지역에 저수조를 설치하여 농업용수를 합리적으로 배분하기 위한 기법의 개발이 절실히 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 산간지역의 전작지 농업용수 공급을 위한 저류량의 확보방안으로서 집수면적과 소요의 저류량을 결정하고 이로부터 효율적인 용수배분기법을 개발하여 산간지역에 적용할 수 있는 전작지 관개시스템을 개발하였다.

2. 최적의 용수배분 시스템 및 Run 이론

2.1 최적의 용수배분 시스템의 기본이론

최적화 문제를 해석하는 과정에서 목적함수(Objective Functions)와 제약조건(Constraints)에 따라 그 분석기법이 다르며, 주어진 조건을 어떤 형태로 수식화하고 목적함수를 어떻게 설정하는가에 따라 시스템의 최적화 결과는 상당한 차이가 발생된다.

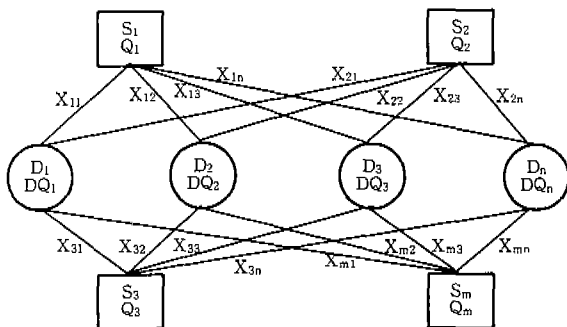


그림 1. 용수공급 시스템 개념도

유역의 한정된 수자원을 i ($i=1, 2, \dots, m$)개의 수원지에서 j ($1, 2, \dots, n$)개의 수요지로 배분하는 문제에서 각 수원지의 가능공급량을 Q_i , 각 용수수요지의 수요량을 DQ_j , i 수원지에서 j 수요지까지의 용수배분량을 X_{ij} 라 할 경우 그림 1과 같이 도식화할 수 있다.

* 영남대학교 대학원 석사과정 수료
 ** 농업기반공사 농어촌연구원 공학박사
 *** 영남대학교 토목공학과 교수

목적함수 :
 $Z = \text{Optimization}(C_1X_1 + C_2X_2 + \dots + C_nX_n)$

제약조건 :
 $a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1n}X_n \leq b_1$
 $a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2n}X_n \leq b_2$

 $a_{m1}X_1 + a_{m2}X_2 + \dots + a_{mn}X_n \leq b_m$

m개의 제약조건식과 n개의 결정변수(Decision Variables)로 구성되는 선형문제에서 a_{ij} , b_i , c_j 는 상수 ($i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$), X_j 는 결정변수, m은 제약조건식의 수, n은 결정변수의 수를 나타내며, 목표는 결정변수 X_j 의 선형식으로 성립되는 목적함수 Z를 최적화하는 것으로서 선형 계획법의 일반적인 형태는 다음 식(1)~(2)와 같이 표현할 수 있다.

2.2 Run 이론

Run 이론은 표본의 독립성 여부를 검정하기 위해서 사용되지만 본 연구에서는 갈수기 강우에 의한 용수가 부족한 기간동안 농업용수 공급시스템에서 유역면적-저수조 용량의 관계를 합리적으로 설계하기 위해서 본 이론을 도입하였다. 그림 2와 같이 강우는 임의의 기간동안 연속 또는 중단되거나 시간적으로 변화하여 일정한 농업용수 필요수량(절단수준; Truncation Level) 이하의 강우 지속기간을 Negative Run-Length(L_j^-), 부족이 발생한 유출량을 Negative Run-Sum(S_j^-)

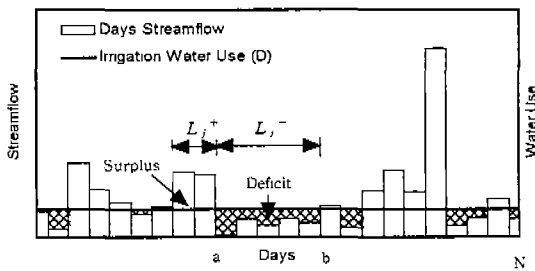


그림 2. Run 이론의 개념

이라 하고 초과하는 강우의 지속기간을 Positive Run-Length(L_j^+), 초과 발생한 유출량을 Positive Run-Sum(S_j^+)이라고 한다. 또한 Negative Run-Intensity는 $I_j^- = S_j^- / L_j^-$ 로 계산할 수 있으며, S_j^- 는 a와 b사이 L_j^- 기간동안의 부족량(Deficit)이 된다.

3. 용수공급 시스템과 농업용수 수요패턴

3.1 용수공급 시스템

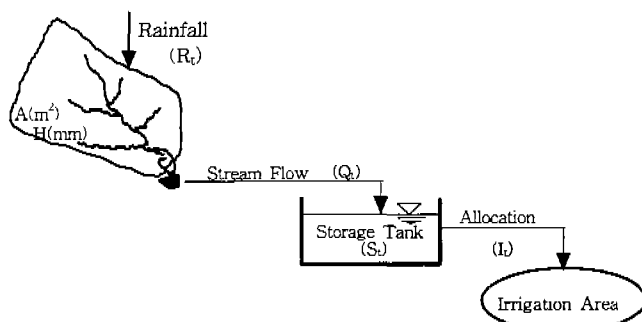


그림 3. 집수-저류-용수공급 관개시스템

산간지역에 원활한 농업용수를 공급하기 위하여 저류시설을 축조하고 관개지역에 배분할 수 있는 최적의 농업용수 공급시스템, 즉 유역으로부터 집수-저류-용수공급할 수 있는 관개시스템을 그림 3과 같이 유역면적 $A(m^2)$ 에 t시간 동안 내린 강우량 $R_t(mm)$ 을 Tank모형을 이용하여 유출고 $H(mm)$ 및 유출량 $Q_t(m^3/sec)$ 를 구하고 관개지역에 필요수량 $I_t(m^3/day)$ 을 안정적으로 공급할 수 있는 저수조 용량 $S_t(m^3)$ 을 결정하기 위한 시스템을 도식화할 수 있다.

3.2 농업용수 수요패턴

전작지의 용수수요량 산정은 논에 비해 작물의 종류가 많고 토양내 물 소비기구가 복잡하여 토양, 작물의 종류, 생육조건 등에 따라 크게 영향을 받으므로 정확한 수요량을 추정하기는 어렵다. 그러므로 용수수요량은 계산이 비교적 간단한 Blaney-Criddle방법을 이용하여 직접 측정된 소비수량과 월평균기온 및 일조시간을 관련시켜 온도에 따라 변화하는 보정계수(0.0311 t+0.24), 생육기별 작물계수 K 그리고 주간시간 백분율 b값을 다음 식(3)에 대입하여 일 평균 증발산량 U를 산정하였다.

$$U = K \frac{b(45.7t + 813)}{100} \quad (mm/day) \quad (3)$$

계획기준년의 최대용수시기에 단위면적에 대한 단위시간당 소요되는 계획용수량을 단위용수량 (g)이라고 하며, 관개시설 규모결정의 기준이 되고 조용수량 (G)과 일 관개시간 (T)을 고려하여 다음 식(4)를 이용하였다.

$$g = \frac{G}{24} \times \frac{24}{T} \quad (m^3/hr/ha) \quad (4)$$

위의 식(3)~(4)를 이용하여 구한 주요작물의 관개시기별 단위용수량은 그림 4와 같이 분석되었다.

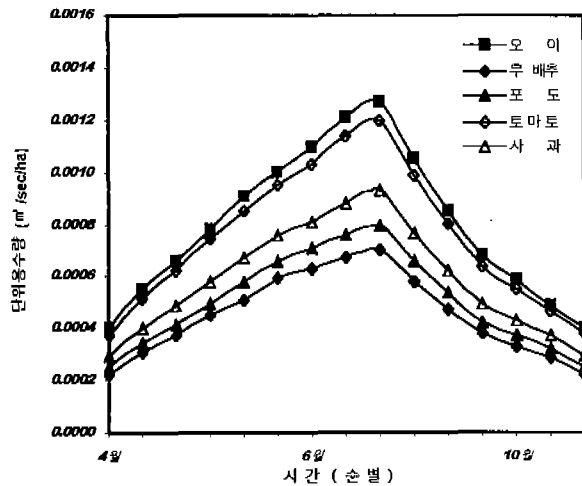


그림 4. 작물별 단위용수량

4. 실제유역의 유출량 및 농업용수 수요분석

4.1 대상유역의 선정

본 연구의 목적과 유사한 발기반정비사업이 기 시행된 지구가 인근지역에 많이 분포되어 있어서 관개시스템의 적용여부를 판단하기 용이한 지구를 선정토록 하였다. 본 연구대상지역은 유역면적 60ha인 계곡상류지점에 저수조를 설치하여 시설농업 시범지역으로 선정된 경상북도 영주시 봉현면 두산리 수용골(계곡)지구를 대상으로 하였으며, 작물별 재배면적은 사과 21ha, 오이 12ha, 무·배추 10ha, 토마토 8ha 등 전체 시설농지면적 51ha에서 작물별 생육시기에 최적의 용수공급이 될 수 있도록 하였다.

4.2 유출량 추정

강우-유출해석에 있어서 영주관측소의 31개년(1966년~1996년) 강우자료를 이용하여 Tank모형을 실제 하천유역에 적용하여 유출량을 산정 한 결과는 표 1 및 그림 5와 같다.

표 1. Tank모형에 의한 유출량 산정결과

(단위 : m³/day)

1월			2월			3월			4월		
상	중	하	상	중	하	상	중	하	상	중	하
167	186	200	229	269	285	331	347	367	394	444	474
5월			6월			7월			8월		
상	중	하	상	중	하	상	중	하	상	중	하
524	557	614	710	850	1,336	1,865	2,730	2,205	1,938	1,976	2,276
9월			10월			11월			12월		
상	중	하	상	중	하	상	중	하	상	중	하
1,865	1,337	961	734	592	511	436	330	293	224	181	161

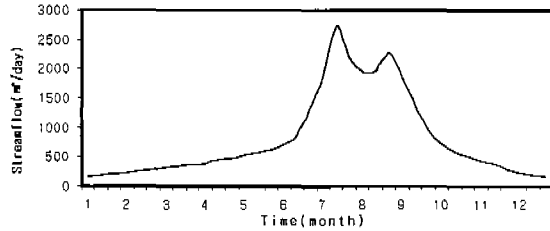


그림 5. Tank모형에 의한 유출량 산정결과

4.3 농업용수 수요량 추정

각 관개지역에서 재배되는 작물의 증발산량을 Blaney-Criddle방법으로 구하고 생육시기별로 합한 값을 작물별 필요수량으로 하였다. 발기반정비사업 조사설계요령(농어촌진흥공사, 1994)에서 우기(7~8월)는 이수시설로부터 농업용수 공급을 하지 않은 것으로 설계되고 있으며, 산정결과는 표 2 및 그림 6과 같다.

표 2. 작물의 생육시기별 필요수량

(단위 : m³/day)

면적	4월			5월			6월			7~8월	9월			10월
	상	중	하	상	중	하	상	중	하		상	중	하	
사과 (21ha)	-	-	-	525	764	768	903	-	-	우기로 미급수	-	-	-	-
우미 (12ha)	258	356	423	410	597	600	705	784	824		-	-	-	-
부채수 (10ha)	-	-	-	-	-	-	-	-	-		316	256	204	177
토마토 (9ha)	-	-	-	-	-	-	-	-	-		428	347	-	-
계	258	356	423	935	1,361	1,368	1,608	784	824	744	603	204	177	

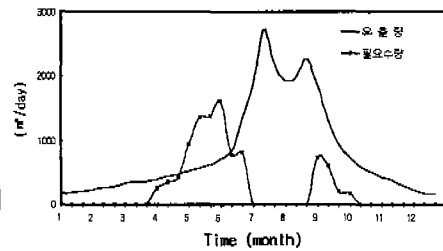


그림 6. 유출량-필요수량 관계

5. 저수조-농업용수 공급시스템의 적용분석

5.1 저수조의 용량결정

본 분석에서는 유출량과 작물별 필요수량 자료를 이용하여 다음 식(5)에서 유역면적에 대한 V_t 기간 말의 저류용량 (T)의 시간에 따른 변화를 분석하였으며, 분석치 중에서 최저 저류량 ($V_t=0$)의 빈도수에 보장률(99, 90, 80%)에 대하여 유역면적과 저수조 용량의 관계에서 최적의 저수조 용량을 결정하였다. 31개년 실제자료를 분석한 결과를 요약하면 최저 저류량의 빈도수에 대하여 보장률(99, 90, 80%)에 대하여 규모별 유역면적과 관계면적의 관계에서 저류용량을 나타냈으며, 그림 7~9에서 보장률에 관계없이 유역면적과 저류량 사이에 반비례관계가 성립하는 것으로 나타났다.

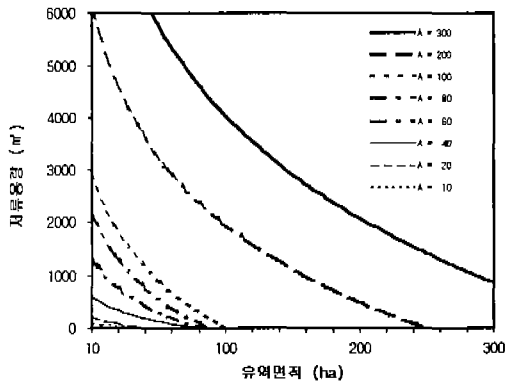


그림 7. 저수조 규모결정(보장률 80%)

$$V_t = \text{Min}[\text{Max}\{(V_{t-1} + Q_t - D_t, 0)\}, T] \quad (5)$$

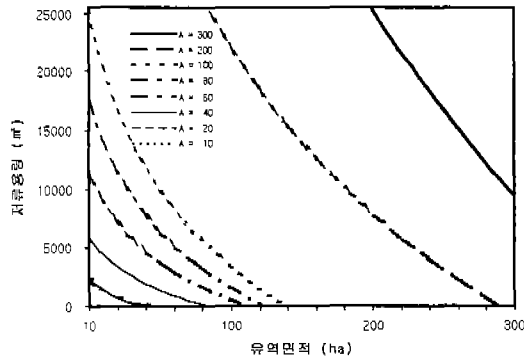


그림 8. 저수조 규모결정(보장률 90%)

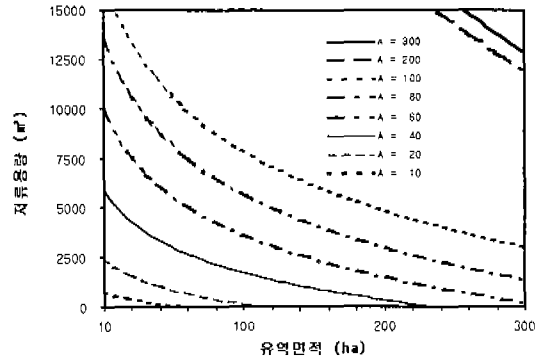


그림 9. 저수조 규모결정(보장률 99%)

5.2 관개면적에 따른 유역면적-저수지용량의 상관관계 검토

본 연구대상지구인 수용골(계곡)의 유역면적(60ha)에 강우가 발생하여 저수조에 유입 가능한 유출량을 시뮬레이션하여 각 관개면적의 필요수량을 절단수준(Truncation Level)으로 취하고 Run 분석을 실시하였으며, 결정된 유역면적-저수조 용량 관계를 얼마나 만족하는지를 정량적으로 분석하였다. 그림 10~11은 유역면적이 60ha인 경우 각 관개지역의 필요수량을 각각 보장률에 따라 저수조 용량과 I_j , $\max S_j$ 을 비교하였으며, 그 결과 저수조 용량과 유역면적은 보장률 80%인 경우를 제외하고는 관개면적이 80ha 이상으로 클수록 안정한 것으로 나타났다.

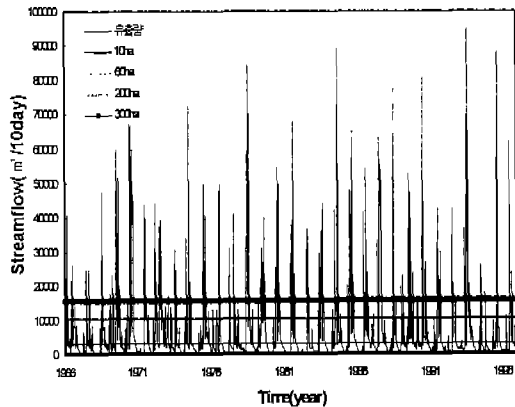


그림 10. 유역면적 60ha의 유출량-필요수량의 Run분석

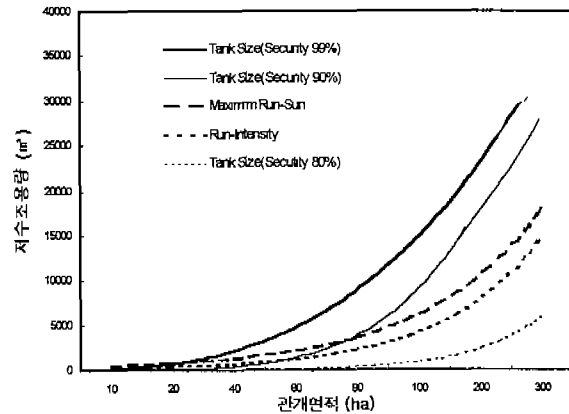
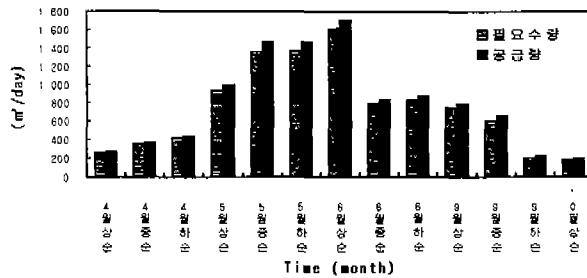


그림 11. 보장률별 관개면적-저수조규모

5.3 농업용수 공급시스템의 적용성 평가

관개시스템에서 재배작물의 생육시기별 필요수량을 저수조에서 각 관개지역으로 배분하기 위해서 선형계획법의 하나인 LINDO(Linear Interactive Discrete Optimizer; Linus Schrage, University of Chicago, 1986) 프로그램 패키지를 이용하였으며, 이때 목적함수를 최대 용수공급량 (W)으

로 하고 제약조건은 i 월 j 순 일 평균 유출량 (X_{ij}), 잉여수량 (A), 각 관개시기별 작물의 필요수량 가중치 (B), 최소 저류용량 (C), 설계 저류용량 (D), 초기조건 및 말기조건을 설계 저류용량의 1/2로 가정하여 다음 식(6)~(7)에 의해서 분석하였다. 그 결과 그림 12와 같이 재배작물의 생육시기에 안정적으로 공급되는 것으로 분석되었다.



$$X_{ij+1} = X_{ij} + A - BW \quad (6)$$

$$C \leq X_{ij} \leq D \quad (7)$$

그림 12. 선형계획법에 의한 최적 물배분 결과

6. 결론

본 연구에서는 영주관측소의 31개년 강우량 자료와 작물의 생육시기별 필요수량 자료를 이용하여 수용골(계곡)에 최적의 용수공급시스템 운영을 위한 집수면적과 저수조 용량을 결정하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 보장률 99%인 경우 유역면적-저류용량의 관계에서 관계면적이 10~100ha는 이상적인 계획이 될 것으로 판단되나 200ha 이상은 저류용량 규모가 급격히 증가하여 비합리적으로 판단된다.
- (2) 본 연구의 관개시스템에서 90~99%의 보장률에서는 작물의 생육시기에 따라 안정적으로 공급되는 것으로 나타났다.
- (3) 본 연구에서 제시된 관개시스템은 산간지역에서 강우에 의해 유출되는 유량을 임의적으로 저류시켜 이를 전작지 관개용수로 이용하는 시스템으로 홍수기에는 유출량을 조절하고 갈수기에는 저수조에 저장된 용수를 농업용수로 활용할 수 있으므로 매우 합리적이고 경제적인 관개 시스템이라고 판단된다.

참고문헌

1. 지홍기, 이순탁, 일수문량의 Run-length 및 Run-sum의 Simulation, 한국수자원학회 논문집, 제 10권 제1호, 1976.
2. 이순탁, 배상근, 동적계획법에 의한 용수공급 시설의 최적화, 한국수문학회지, 제14권 제2호, 1981.
3. 농림수산부, 농어촌진흥공사, A Technical Study of Groundwater Dam Development in a Small Basin Area, 1995.
4. 농림수산부, 농어촌진흥공사. 영농방식 변화에 따른 필요수량 변화연구(II), 1996.
5. Doorenbos, J. and W. O. Pruitt, Guidelines for Predicting Crop water Requirements, Food and Agriculture Organization United Nation, FAO Irrigation and Drainage Paper 24, 2nd Ed., Rome, 1977.