

농작물의 잠재수확량 및 이상기후에 따른 재해발생 확률의 추정

Simulating Potential Crop Yields and Probable Damages
from Abnormal Weather Conditions

책임연구원 : 박 승 우

(서울대학교 농공학과, 교수)

1. 서론

최근의 이상저온과 일조시간의 부족 등으로 인하여, 채소, 과수 등의 원예 작물의 작황은 물론, 논벼의 생육부진과 출수의 지연으로 인하여 상당 규모의 추곡 수확량의 감소가 예상되고 있는 실정이다. 이와 같은 농작물의 수확량 감소로 인하여 농가의 경제에 상당한 타격이 예상되며, 농촌과 국가경제 전반에 부담이 될 것으로 추정되고 있다.

이상기상으로 인한 농업재해는 불가항력적인 것으로, 과거에도 한발, 홍수 등에 의한 수확량의 감소가 있었다. 그동안 농업개발사업과 다수확 품종 개량, 영농기술의 발달 등에 힘입어 상대적으로 한발 등에 의한 수확량의 감소 위험은 낮아진 것이 사실이다. 그러나, 19세기 말의 한반도에 계속된 수년간의 한발(김등, 1993)이 재현될 경우는 현재의 수리시설 만으로 효율적인 대처가 가능할 수 있을지는 속단하기 어려운 것이 사실이다.

특히, 1980년과 1993년에 경험한 이상저온 등의 기상 재해로부터 농작물의 피해를 줄일 수 있는 효과적인 방법이 없다. 다만, 재해에 대한 국가적 차원의 보상 방법의 검토 등 농업재해 경감이 유일한 대안이며, 올해에도 추곡 생산량의 감소에 대한 대책에 있어서도 보상 방법이 검토되고 있는 실정이다.

농작물의 기상재해에 대한 대책을 위하여는 무엇보다도 우리나라의 기상조건에 대한 수확량의 변화를 계량화하는 것이 전제되어야 할 것이다. 농작물의 피해의 규모와 발생 빈도 등을 고려하여 재해의 보전을 위한 대비책을 마련하고, 소위 농업재해보험 등 구제 방안이 마련되어야 할 것이다. 그러나, 지난 20여년간 괄목할 만한 농업기술의 발달과 함께 지속적인 수확량의 증가를 보였다. 예를 들어, 1970년의 전국 평균 밭당 수확량은 327kg에서, 1990년의 수확량은 450kg으로 123kg의 증가를 보였다(농림수산부, 1991). 따라서, 과거의 기상과 수확량과의 통계적 관계의 구명이 어려울 뿐만 아니라 실제로 이들의 관계를 기초로한 농업재해 규모의 예측이 어려울 수 있다. 또한, 품종 개량 이외에도 경운,

이양, 제초, 병충해의 방제, 관개, 배수, 수확방법 등의 영농방법이 변화되어 왔기 때문에 과거의 농업 생산량 자료는 기상조건 만을 반영하지 않는 것이다.

이상기상에 따른 농작물의 재해발생을 추정하는 방법으로는 농작물의 생육과 수확량 추정 모형을 이용하여 영농조건을 동일하게 처리함으로써 기상과 작물생산과의 관계를 구명함으로써 가능할 것이다. 작물 생육과 수확량의 추정모형에는 여러가지가 있는데, USDA의 EPIC (Sharpley와 Williams, 1990), WEPP (Lane와 Nearing, 1989) 등과 IRRI의 RICEMOD (McMennamt와 O'Toole, 1983), FARIDPUR (Huke, 1985), 일본의 SIMRIW (Horie, 1987) 등이 그 예이다. 이들 모형은 작물 생육기간중 일별 기상조건과 수분, 비효분, 경운방법, 식물의 환경조절 등에 따라 작물의 생육과 수확량을 추정할 수 있도록 하고 있다

따라서, 작물 생육 및 수확량 추정 모형을 이용하여 장기간의 기상조건에 따른 수확량의 변화를 추정함으로써, 우리나라의 잠재수확량을 구하고, 또한, 수확량의 변이성을 확률분포함수에 적용함으로써 기상재해의 재현기간을 구할 수 있을 것이다.

본 연구의 목적은 농작물의 생육과 수확량 추정 모형을 이용하여, 주요 축후소의 장기간의 기상 자료로 부터 작목별 수확량의 연도별 변이를 추정하고, 그 결과로 부터 수확량의 확률분포함수를 선정하여, 재현기간별 기상재해에 따른 작목별 수확량을 추정함으로써 농업재해에 대비하고자 한다.

2. 논벼의 성장 및 수확량 모형

논벼의 성장과 수확량의 예측에는 식물생리학에 근거를 둔 성장과정 지향적인 동적모형, 토양 물수지모형, 또는 경험식 내지는 통계적 모형 등이 이용되어 왔다. McMennamy는 1980년에 필리핀 국제미작연구소의 실험자료에 근거를 두고 일강우량, 일증발계증발량, 일복사량, 일최대기온, 일조시간 등을 입력자료로 사용하는 RICEMOD라는 수도성장 예측모형을 개발하였고, 1983년에는 이를

수정한 RICEMOD300을 개발하여 그 응용성을 검토하였는데, 열대지역에 적합한 것으로 보고되고 있다. Horie(1987)는 논벼의 식물생리학적 및 물리적 성장 과정을 단순화한 SIMRIW를 개발하여 Hokkaido 기후조건에서 논벼의 성장 및 수확량 예측을 시도하였다. 또한 이 모형을 태국, 필리핀, 미국, 이태리 등의 기후조건에 대해서도 적용하였으며, 이(1993)는 SIMRIW를 이용하여 6개 지점의 논벼의 생육 및 수확량을 추정하였다.

본 연구에서는 SIMRIW 모형을 이용하여 논벼의 성장 및 수확량을 예측하였다.

2.1 모형의 기본이론

SIMRIW는 논벼의 성장과 환경과의 반응관계를 단순화하여 이의 성장과 수확량을 예측한다. 논벼의 수확량 (grain yield: Y_G)은 총건물생산량 (W_t)의 일부분이라는 기본원리에 그 기초를 두고 있다.

$$Y_G = h \times W_t \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

여기서, h 는 수확지수 (Harvest Index)로서 환경, 작물생육단계 및 성장상태의 함수이다.

일반적으로 작물의 건물생산량은 광합성에 이용되는 복사량이나 작물에 흡수된 단파복사량에 비례하며 (Gallagher & Biscoe 1978; Monteith 1977; Shibles & Weber 1966), Horie와 Sakuratani (1985)는 논벼에 대해서도 이 가정이 적용될수 있다고 하였다. 복사량에서 건물로의 변환율은 성숙기 중반까지는 일정하고 그 이후에는 곡선적으로 변화하는데, 이 변화율은 주위환경과 기후적 조건에 영향을 받지 않는다.

건물생산량의 일 증가량은 식 (2.2)와 같이 표시된다.

$$\Delta W_t = c_s \times S_s \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

여기서, c_s 는 단파복사량에서 논벼의 건물생산량 (g/MJ)으로의 변환율이며, S_s 는 일 흡수복사량이다.

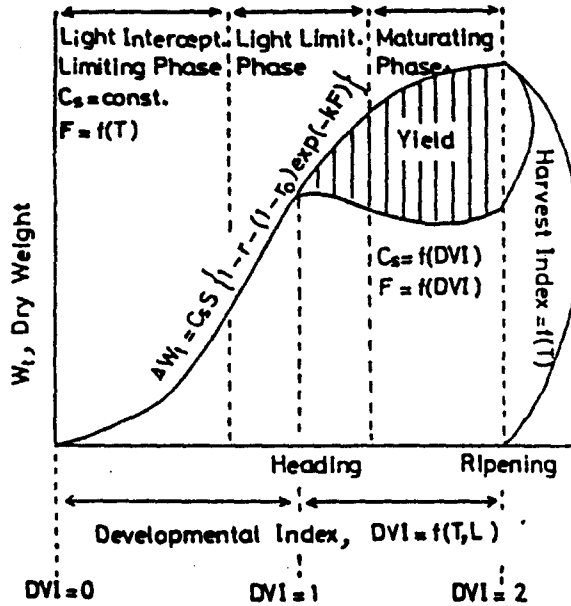


Fig. 1 Relationship between total crop dry weight (W_t) at different times of growth and absorbed shortwave radiation (S_s) or PAR (S_p)

식 (2.2)에서 논벼에 의해 흡수되는 복사량 (S_s)은 식 (2.3)과 같다.

$$S_s = S[1 - r - (1 - r_0) \exp[-(1 - m)k_*F]] \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

여기서, S 는 태양복사량, r , r_0 는 작물 및 나지의 반사율이고, m 은 분산계수이며, k_* 는 작물의 일단파복사량의 흡수계수이고 F 는 엽면적지수 (*leaf area index* : LAI)이다.

작물의 반사율 r 은 다음 식 (2.4)로 추정될 수 있다.

$$r = r_f - (r_f - r_0) \times \exp(-0.5F) \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

여기서, r_f 는 작물에 의해 지표면이 완전히 피복되었을 때의 반사율이다.

IR36의 경우, $k_* = 0.6$, $m = 0.25$, $r_f = 0.22$, $r_0 = 0.1$ 이며, 본 연구에서도

이 값을 그대로 이용하였다.

2.1.1 작물성장 (crop development)

논벼의 성장과정은 주위환경과 논벼의 유전자 형태에 의해 지배된다. 본 모형에서는 벼의 성장과정을 나타내기 위해 성장단계 (*Development Stage* : *DVS*) 라는 연속함수를 도입하였다. *DVS*는 발아초기에는 그 값이 0, 출수기에는 1.0 이고 성숙기에는 2.0이다. 즉, *DVS*는 0에서 2사이의 값을 나타낸다. 임의의 논벼의 성장단계에서의 *DVS*는 성장률 (*Development Rate* : *DVR*)을 식 (2.5)와 같이 시간에 대해 적분함으로서 구할 수 있다.

$$DVS(t) = \sum DVR_i \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

여기서, *DVS(t)*는 *t*일의 성장단계이며, *DVR_i*는 출수후 *i*일째의 성장단계이다.

주간길이와 온도는 *DVR*을 결정하는 중요한 인자들이다. 출수기 ($0 \leq DVS \leq 1$)까지의 *DVR*은 아래의 식 (2.6)으로 부터 얻을 수 있다.

$$DVR = \frac{1}{G_v} \times \frac{1 - \exp[B(L_0 - L_c)]}{1 + \exp[-A(T - T_h)]}, \quad \text{for } L_0 \leq L_c$$
$$= 0, \quad \text{for } L_0 > L_c \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

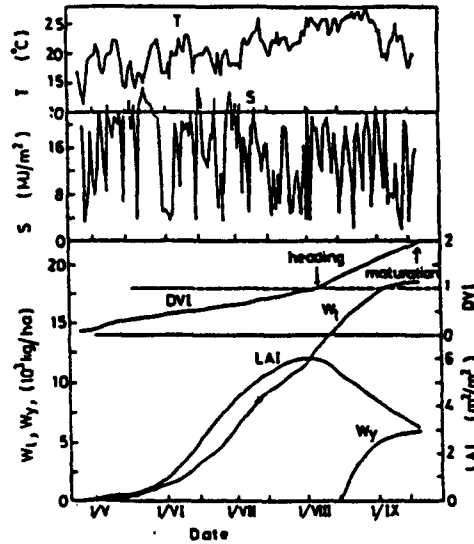


Fig. 2 Simulated dynamics in crop development stage (*DVS*), *LAI* and dry weights (W_y) and whole crop (W_i), together with the daily mean temperature (T), day length (L_o) and radiation (S)

여기서, T 는 일평균기온, L_o 는 주간길이이고, G_o 와 L_c 는 각각 임의의 논벼에 대한 출현에 필요한 최소일수와 성장에 필요한 한계일수이다. 또한, A , B , T_h 는 매개변수이다.

2.1.2 건조생산량(dry matter production)

엽면적지수의 성장은 주로 온도 (T)에 의해 지배를 받는 것으로 가정하였다. 출수 직전까지 엽면적지수의 성장은 일평균기온의 함수로 정의되었는데 식

(2.7)과 같다.

$$\frac{1}{F} \times \frac{dF}{dt} = R[1 - \exp[-K_f(T - T_c)]] \times [1 - (\frac{F}{F_{as}})^n] ,$$

$$\text{for } T \geq T_c$$

$$= 0, \quad \text{for } T < T_c \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

여기서, R 은 엽면적지수의 최대 상대 성장률을 나타내며, T_c 는 엽면적지수의 성장에 필요한 최소온도이고, F_{as} 는 엽면적지수의 *asymptotic*치를 표시하며 K_f , n 는 각각 매개변수이다.

일반적으로 벼의 경우, 엽면적지수는 출수기에 최대이고 그 이후 성숙기에는 연차적으로 감소하게 된다. 그러나 성숙과정에서의 잎의 생리와 환경과의 반응은 매우 명확하지는 않다. 따라서 출수 직전부터 논벼의 성숙기까지의 엽면적지수의 변화는 논벼의 성장지수 (*DVS*)만의 함수로 표시된다.

변환율 c_s 는 성숙중기까지는 일정하고 그 이후에는 연차적으로 감소하는데 아래 식으로 표현된다.

$$c_s = 2.0 \text{ g/MJ}, \quad \text{for } 0 \leq DVS \leq 1 \quad (2.8)$$

$$= 2.0 \frac{1+G}{1+G \exp[(DVS-1)/\tau]}, \quad \text{for } 1 < DVS \leq 2$$

여기서, G , τ 는 매개변수인데 최적추정치는 $G=0.001$, $\tau=0.1$ 이다.

2.1.3 수확지수

수확지수 h 는 벼의 증성을 (γ)과 *DVS*의 함수로 나타내는데 식 (2.9)와 같다.

$$h = h_m(1 - \gamma)[1 - \exp[-K_h(DVS - 1.22)]] , \quad \text{for } DVS \geq 1.22$$

$$\dots\dots\dots (2.9)$$

여기서, h_m 은 잎의 논벼의 잠재수확지수이고, K_h 는 매개변수이다.

2.2 모형의 적용성 검토

2.2.1 모형의 검정

모형의 적용성 검토를 위하여 수원지방의 기상조건과 실측 수확량 자료를 이용하였다. 모형의 검정을 위해 사용된 기상자료는 수원축후소의 일조시간, 일평균기온 및 일복사량 등이며, 수확량 자료는 작물시험장의 1983-1991년의 9개년에 대한 추청벼의 실측자료를 이용하였다.

수원지방의 추청벼에 대한 수확량 추정 결과는 Table 1에 나타나 있다. Table 1에서와 같이 실측 수확량은 4.85~5.66 t/ha로 평균 5.22 t/ha였으며, 추정 수확량은 4.92~5.85 t/ha로 평균 5.36t/ha의 결과를 보였다. 또한, 실측 수확량과 추정 수확량의 절대오차와 상대오차는 각각 0.20 t/ha, 3.7%를 나타내었다. 또한, 9개년의 실측 수확량과 추정 수확량의 상관계수 (R^2)는 0.659로서 매우 양호한 결과를 보였으며, 이로 부터 논벼의 수확량 추정을 위한 모형의 적용 가능성이 높다고 할 수 있다.

수원지방의 추청벼에 대한 포장의 실측 수확량과 추정 수확량을 도시하면 Fig. 3과 같다.

2.2.2 기상조건에 따른 수확량 변화

기상조건에 따른 년도별 수확량 변화를 분석하기 위하여 수원지방의 추청벼에 대하여 1969~1987년의 19년간의 수확량을 추정하였으며 그 결과는 Table 2 와 같다. Table 2에서 기온은 6월부터 8월까지의 평균기온이며, 일조시간은 생육기간인 6월부터 9월까지의 누가 일조시간이다. Fig. 4는 수확량, 평균기온 및 일조시간을 함께 도시한 것으로, 평균기온과 일조시간의 년도별 변화에 따라 논벼의 수확량도 변화하고 있음을 보여 주고 있다.

Table. 1 Comparison of the simulated and actual rice yields in Suwon

Year	Actual Yields	Simulated Yields	Absolute Error	Relative Error
1983	5.26 t/ha	5.62 t/ha	0.35 t/ha	6.7 %
1984	5.44	5.85	0.41	7.5
1985	4.92	5.17	0.25	5.0
1986	4.89	4.92	0.03	0.6
1987	5.11	5.31	0.20	3.9
1988	5.64	5.81	0.17	3.0
1989	5.66	5.39	0.27	4.8
1990	4.85	4.92	0.07	1.5
1991	5.22	5.25	0.03	0.6
Mean	5.22	5.36	0.20	3.7
R ²	0.659			

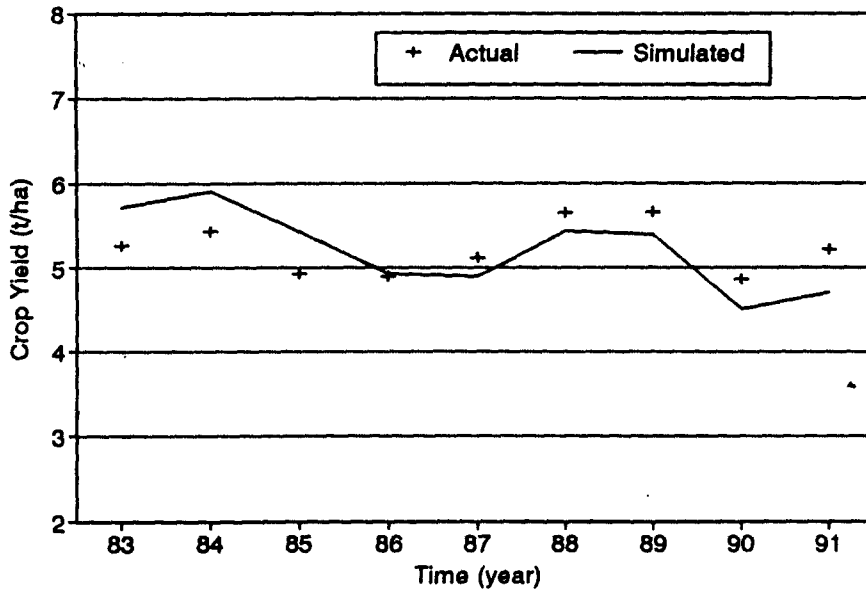


Fig. 3 Yearly fluctuation of the simulated and actual yields in Suwon

Table 2 Result of crop yields, mean temperature and sunshine hours
in Suwon

Year	Yield (t/ha)	Temp.(°C)	ΔT (°C)*	S_h (hr)	ΔS_h **
1969	5.39	24.11	-0.48	946.1	191.1
1970	5.13	24.43	-0.16	880.1	125.1
1971	5.93	24.62	0.02	933.9	178.9
1972	5.62	24.15	-0.45	1042.6	287.6
1973	6.11	26.06	1.47	743.0	-12.0
1974	6.09	24.18	-0.41	709.8	-45.2
1975	3.28	25.40	0.81	673.4	-81.6
1976	4.46	23.25	-1.34	630.0	-125.0
1977	5.28	24.72	0.13	903.4	148.4
1978	4.87	26.10	1.51	634.2	-120.8
1979	5.68	24.81	0.22	690.9	-64.1
1980	5.18	22.67	-1.93	567.4	-187.6
1981	5.45	24.71	0.11	707.1	-47.9
1982	6.52	24.65	0.05	849.6	94.6
1983	5.68	24.65	0.05	714.1	-40.9
1984	5.87	25.53	0.93	728.0	-27.0
1985	5.38	25.75	1.15	640.9	-114.1
1986	4.89	23.62	-0.97	623.4	-131.6
1987	4.85	23.92	-0.68	726.3	-28.7
Mean	5.35	24.60	-	754.9	-

* Deviation of July-August mean temperature

** Deviation from the total sunshine hours June to September.

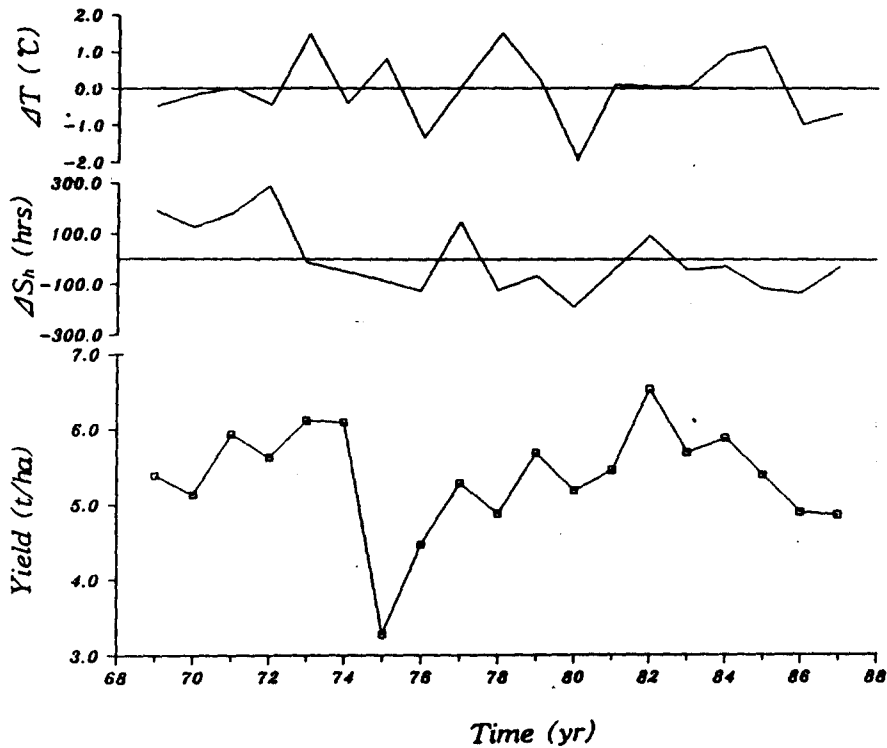


Fig. 4 Yearly variations in simulated rice yields in Suwon

3. 발작물의 성장 및 수확량 모형

작물의 성장-수확량 추정 모형으로는 USDA-ARS에서 개발한 EPIC, WEPP 등이 있다. EPIC는 토양침식이 생산성에 미치는 장기적 영향을 추정하는 모형으로 토양 유실로 인한 표토의 감소에 따른 작목별 수확량의 변화를 추정하며, 농지보전방법에 따른 경제성을 판단할 수 있도록 개발되었다(Sharpley와 Williams, 1990). WEPP은 포장에서의 토양 유실 및 유사운송과 비효분 유실 등의 추정을 목적으로 개발되었는데, 작물의 생육단계의 영향을 고려하기 위한

피복상태, 근역의 발달 등의 성분을 고려하고 있다(Alberts 등, 1989)

Kiniry 등 (1990)은 EPIC의 작물 수확량 모형을 이용하여 옥수수, 밀, 벼, 해바라기, 보리, 콩 등의 생육과 수확량의 추정을 시도하였으며, 포장 자료와 비교적 유사한 분포를 갖는 수확량 추정 결과를 얻었다.

본 연구에서는 EPIC의 수확량 부모형을 이용하여 발작물의 성장 및 수확량을 추정할 수 있는 모형을 구성하였다.

3.1 모형의 기본이론

3.1.1 작물의 성장

작물의 성장은 광합성에 이용되는 복사량이나 작물에 흡수된 단파복사량에 비례한다. 즉, 작물생체량 (*Biomass*)의 일 증가량은 Monteith방법에 의하여 아래식으로 부터 구할 수 있다.

$$\Delta B_{p,i} = (BE) \cdot (PAR)_i \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

여기서, ΔB_P 는 작물생체량의 일별 증가량 (*t/ha*), *BE*는 단파복사량에서 작물생체량으로의 변환계수 (*kg/MJ*)이다. 또한, *PAR*은 광합성 이용 복사량 (*MJ/m²*)으로 아래 식으로 부터 계산할 수 있다.

$$PAR_i = 0.5(RA)_i [1.0 - \exp(-0.65LAI)] \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

여기서, *RA*는 복사량 (*MJ/m²*), *LAI*는 엽면적지수 (*Leaf area index*)이다.

엽면적지수는 열단위(*Heat unit*)와 작물 스트레스, 성장단계 (*Crop development stage*) 등의 함수이다. 작물의 출아시기부터 엽면적지수가 감소하는 시기까지의 엽면적지수는 다음 식으로 부터 구한다.

$$LAI_i = LAI_{i-1} + \Delta LAI$$

$$\Delta LAI = (\Delta HUF) \cdot (LAI_{mx}) \{ 1.0 - \exp[-5.0(LAI_{i-1} - LAI_{mx})] \} \sqrt{REG_i}$$
..... (3.3)

여기서, HUF 는 열단위인자 (*heat unit factor*)이며 REG 는 작물 스트레스이다. 열단위인자 HUF 는 열단위지수 (*Heat unit index*)로 부터 구할 수 있다.

$$HUF_i = \frac{HUI_i}{HUI_i + \exp[ah_{i,1} - (ah_{i,2})(HUI_i)]}$$
..... (3.4)

여기서, $ah_{i,1}$ 와 $ah_{i,2}$ 는 작물에 따른 변수이며 HUI 는 열단위지수이다.

또한, 엽면적지수의 감소부는 아래 식 (3.5)로 부터 계산한다.

$$LAI_i = LAI_o \left[\frac{1 - HUI_i}{1 - HUI_o} \right]^{ad}$$
..... (3.5)

여기서, ad 는 엽면적지수의 감소율을 결정하는 변수이며 첨자 o 는 엽면적지수가 감소하기 시작하는 시기를 뜻한다.

작물의 초장 (*Crop height*)은 다음 식으로 부터 계산한다.

$$CHT_i = HMX \sqrt{HUF_i}$$
..... (3.6)

여기서, CHT 는 작물의 초장 (m)이고 HMX 는 작물의 최대초장 (m)이다.

전체 작물생체량 중 뿌리가 차지하는 비율은 파종시기의 0.3 이나 0.5 에서 완전히 성숙했을때 0.05 나 0.2 로 점차적으로 감소한다. 따라서 본 연구에서는 뿌리의 중량비를 0.4 에서 0.2 로 선형적으로 감소한다고 가정하여 계산한다.

$$\Delta RWT_i = \Delta B_{p,i} (0.4 - 0.2 HUI_i)$$
..... (3.7)

여기서, ΔRWT 는 뿌리의 일별 중량변화량 (t/ha)이다.

뿌리의 성장깊이 (*Root depth*)는 파종깊이에서 작물의 최대 성장깊이까지 급속히 증가한다. 대부분의 경우, 작물의 최대 성장깊이는 생리학적으로 완전히

성숙하였을때 관찰할 수 있다. 뿌리의 성장깊이는 열단위와 근근역 (*Root zone*)의 깊이에 따라 아래의 식으로 부터 구할 수 있다.

$$\Delta RD_i = 2.5(RDMX) \cdot (\Delta HUF_i), \quad RD_i \leq RZ \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

여기서, *RD*는 뿌리의 성장깊이 (*m*), *RDMX*는 최대 성장깊이 (*m*)이며 *RZ*는 토층의 깊이 (*m*)이다.

3.1.2 수확량

작물의 수확량은 수확지수 (*Harvest index*)를 이용하여 건물생산량으로 부터 구할 수 있다.

$$YLD = (HI) \cdot (B_{AG}) \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

여기서, *YLD*는 작물의 수확량 (*t/ha*), *HI*는 수확지수이며 *B_{AG}*는 건물생산량 (*t/ha*)이다.

수확지수는 파종시기의 0 에서 부터 성숙기의 1.0 까지 비선형적으로 증가 하며 아래 식 (3.10)으로 부터 계산할 수 있다.

$$HIA_i = (HI) \cdot \left(\sum_{k=1}^i \Delta HUFH_k \right) \quad \dots\dots\dots (3.10)$$

여기서 *HIA*는 *i*일의 수확지수이며 *HUFT*는 수확지수 열단위 (*Harvest index heat unit*)이다.

수확지수 열단위 *HUFT*는 다음 식 (3.11)로 부터 구할 수 있다.

$$HUFT_i = \frac{HUI_i}{HUI_i + \exp(6.50 - 10.0HUI_i)} \quad \dots\dots\dots (3.11)$$

3.1.3 생육제한인자

실제의 작물생육은 생육환경에 의해 여러가지 제약을 받는다. 이들 제약조

건은 비배관리, 물관리, 제초 등 인위적 관리에 의해서도 영향을 받지만 온도, 일장, 토양수분 등 환경요인의 영향에 비하면 정상적인 관리하에서는 무시할 수 있는 정도이다. 따라서 오래전부터 온도와 일장에 의해서 생육상태를 예측하는 모형들을 구성하여 왔다. 본 연구에서는 온도에 따른 생육제한인자를 구성하였으며, 잠재 작물생육조건으로부터 생육조절인자를 이용하여 실제 생육상태를 예측하였다. 이때 생육조절인자는 1.0 보다 작은 값을 가지는 제약조건이 된다.

$$\Delta B = (\Delta B_p) \cdot (REG) \quad \dots\dots\dots (3.12)$$

온도는 작물이 성장하는데 있어서 기본적인 요소이며 주요 에너지원이다. 또한, 작물의 생리학적 성장을 제약하는 중요한 요소가 되기도 한다. 온도에 의한 작물의 스트레스는 다음의 식 (3.13)으로 부터 결정된다.

$$TS_i = \sin \left\{ \frac{\pi}{2} \left(\frac{TG - T_b}{T_o - T_b} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (3.13)$$

여기서 TS 는 온도에 의한 일별 작물 스트레스, TG 는 토양 표면의 온도 ($^{\circ}C$), T_b 는 최저생육가능온도 (*base temperature*), T_o 는 최적생육온도 (*optimal temperature*)이다.

3.2 모형의 적용성 검토

모형의 적용성 검토를 위하여 수원지방의 각 작목별 수확량 자료와 수원측 후소의 기상자료를 이용하였다. 옥수수의 경우에는 1982-1989년, 콩은 1980-1992년의 농업통계년보에 의한 경기도의 평균 수확량 자료를 이용하였으며, 기상자료는 수원측우소의 일별 최대 및 최소온도, 태양복사량, 그리고 상대습도를 이용하였다.

옥수수의 년도별 수확량 추정 결과는 Table 3과 같다. Table 3에서 옥수수의 추정 수확량은 2.19~3.10 t/ha의 범위를 보이고 있으며 평균 2.60 t/ha이었

으며, 실측 수확량은 2.28~2.85 t/ha로 평균 2.55 t/ha였다. 수확량 추정 결과의 절대오차는 0.16~0.49 t/ha의 범위를 보였으며 평균 0.31 t/ha이고, 상대오차는 5.7~21.3%의 범위로 평균 12.3 %였다.

Table 3. Comparison of the simulated and actual corn yields in Suweon

Year	Actual Yield (t/ha)	Simulated Yield (t/ha)	Absolute Error (t/ha)	Relative Error (%)
1982	2.85	3.10	0.25	8.8
1983	2.28	2.77	0.49	21.3
1984	2.48	2.85	0.37	15.1
1986	2.49	2.19	0.30	12.1
1987	2.69	2.30	0.37	13.8
1988	2.72	2.56	0.16	5.7
1989	2.70	2.44	0.26	9.8
Mean	2.55	2.60	0.31	12.3

또한, 콩의 수확량 추정 결과는 Table 4와 같다. 콩의 추정 수확량은 1.31~1.86 t/ha였으며, 실측 수확량은 1.17~1.48 t/ha의 범위를 보이고 있으며, 평균 수확량은 각각 1.51 t/ha, 1.28 t/ha였다. 그리고, 수확량 추정에 대한 상대오차 및 절대오차는 각각 0.26 t/ha, 20.9%로 평균 오차가 약간 큰 값을 보였다.

Table 4. Comparison of the simulated and actual soybean yields in Suweon

Year	Actual Yield (t/ha)	Simulated Yield (t/ha)	Absolute Error (t/ha)	Relative Error (%)
1980	1.19	1.31	0.12	10.5
1981	1.17	1.43	0.26	22.6
1982	1.23	1.86	0.63	51.4
1983	1.25	1.62	0.37	29.8
1984	1.29	1.65	0.36	28.1
1986	1.48	1.37	0.11	7.7
1987	1.29	1.40	0.11	8.6
1988	1.36	1.48	0.12	8.7
Mean	1.28	1.51	0.26	20.9

Fig. 5는 옥수수과 콩의 년도별 수확량 추정 결과를 도시한 것으로, 실측 수확량과 추정수확량이 년도별로 유사한 변화형태를 나타내고 있다.

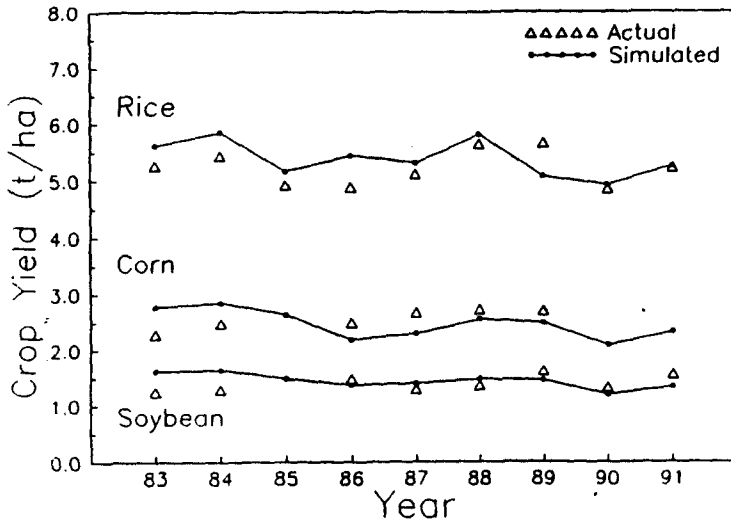


Fig. 5 Yearly variations in simulated and actual crop yields in Suwon.

4. 기상 발생 모형

작물의 성장 및 수확량 모형을 이용하여 기상조건에 따른 수확량의 변이를 추정하기 위하여는 장기간의 기상자료로 부터 영농조건을 동일하게 처리하여 기상조건과 작물의 생육 및 수확량과의 관계를 분석하여야 한다. 이를 위하여 장기간의 기상자료가 필요하지만 우리나라의 경우에는 장기간의 기상관측자료가 미비한 실정이다. 따라서, 이상기후를 재현할 수 있는 기상 발생 모형을 이용하여 장기간의 기상자료를 생성하여 이들 자료로 부터 수확량을 추정하여야 한다.

기상자료의 모의발생은 기상요소들의 추계학적 특성으로 부터 장기간의 기상자료를 생성하는 방법으로, 어떤 지점의 시계열 자료 성분을 분석하여 단기간의 기상인자 시계열을 추계학적으로 모형화하여 장기간의 시계열을 모의발생시키는 추계학적 모의발생기법이 널리 이용되고 있다.

본 연구에서는 추계학적인 기상자료의 모의발생기법을 이용하여 수확량 모형의 입력자료인 최고 및 최저온도, 태양복사량, 상대습도를 모의발생하였다.

4.1 최고온도와 최저온도

최고온도와 최저온도의 잔차계열 (*residual series*)을 발생시키기 위한 모형은 Richardson (1981)이 제안하였는데, 그 방법은 Matalas (1967)가 제시한 약정상 상태 (*weakly stationary*)의 발생과정에 근거를 두고 있다. 이를 수식으로 표시하면 식 (4.1)과 같다.

$$x_i = Ax_{i-1} + B\epsilon_i \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

여기서, x_i 는 최고온도와 최저온도의 잔차 요소로서 t 일에 대한 3×1 매트릭스이다. ϵ_i 는 정규분포를 나타내는 독립난수요소인 3×1 매트릭스이다. A 와 B 는 계열상관계수 (*serial correlation*)와 상호상관 (*cross correlation*)계수로서 정의되는 3×3 매트릭스 요소이다. 식 (4.1)은 최고온도와 최저온도의 잔차가 정규분포를 나타내고, 각 변수의 계열상관은 1차선형자기회귀모형 (*first-order linear autoregressive model*)을 나타내고 있다.

A 와 B 의 매트릭스는 식 (4.2)와 식 (4.3)의 매트릭스 방정식에 의해 결정되어진다.

$$A = M_1 M_0^{-1} \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

$$BB^T = M_0 - M_1 M_0^{-1} M_1^T \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

여기서, 위첨자 -1 과 T 는 각각 역행렬 (*inverse matrix*)과 전치행렬 (*transposition matrix*)을 나타낸다. 그리고, M_0 와 M_1 은 각각 0차 상호상관계수 (*lag-zero cross correlation coefficients*)와 1차 계열상관계수 (*lag-one serial correlation coefficients*)이다.

Richardson (1982)은 상관계수 (*correlation coefficients*)의 시간적, 공간적 형태의 변화는 작다고 보고하였다. 따라서, 그 작은 변화량을 무시하고 Richardson (1982)이 제시한 상관계수 (*correlation coefficients*)의 평균값을 사용하면 식 (4.4), 식 (4.5)와 같다. 식 (4.4)와 식 (4.5)는 식 (4.2)와 식 (4.3)에서 구한 값으로 최고 및 최저온도 자료계열의 상관성을 나타내는 값으로 식 (4.1)의 잔차를 연속적으로 발생시키는데 이용된다.

$$A = \begin{bmatrix} 0.567 & 0.086 & -0.002 \\ 0.253 & 0.504 & -0.050 \\ -0.006 & -0.039 & 0.244 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.781 & 0.000 & 0.000 \\ 0.328 & 0.637 & 0.050 \\ 0.238 & -0.341 & 0.873 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

최고온도와 최저온도의 모의발생은 식 (4.1)에서 발생된 잔차요소와 월평균, 표준편차의 함수로서 식 (4.6)으로 나타내어진다.

$$t_i = x_i \cdot s_i + m_i \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

여기서, t_i 는 최고온도와 최저온도의 일별 모의발생값, x_i 는 식 (4.1)에서 구한 잔차요소, s_i 는 각각의 표준편차, m_i 는 각각의 월평균 값을 나타낸다. s_i 와 m_i 는 각

각 우천일과 청명일에 따르는 조건적 함수이다.

4.2 태양복사량

태양복사량의 모의발생은 최고온도와 최저온도의 발생과정을 따르고 있다. 즉, 태양복사량의 모의발생은 식 (4.2)와 식 (4.3)에서 식 (4.1)의 잔차계열을 발생시키기 위한 상수 A 와 B 를 계산하여 태양복사량을 나타내는 잔차요소인 3×1 매트릭스를 식 (4.1)과 같이 계산하고 우천일과 청명일에 따라 식 (4.6)과 같이 모의발생시킨다.

4.3 상대습도

상대습도의 모의발생은 삼각분포 (*triangular distribution*)를 이용하여 과거의 월평균 값으로 부터 구하였다. 온도와 태양복사량과 마찬가지로 상대습도는 우천일과 청명일의 사상에 영향을 받는다. 상대습도의 우천일과 청명일과의 관계는 식 (4.7)과 같다.

$$RHW_j = RHD_j + \phi(1.0 - RHD_j) \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

여기서, RHW_j 는 j 월에 해당하는 우천일의 상대습도이고, RHD_j 는 j 월에 해당하는 청명일의 상대습도이다. 그리고, ϕ 는 형상계수로서 0.0~1.0의 값을 가지며, 선정된 모든 대상지점에서 0.9가 적절함을 나타내었다.

청명일에 대한 상대습도는 식 (4.8)로 나타내어진다.

$$RHD_j = \frac{RH_j - \phi(NWD/ND)}{1.0 - \phi(NWD/ND)} \quad \dots\dots\dots (4.8)$$

여기서, RH_j 는 j 월에 해당하는 과거의 장기 자료의 평균값이다.

RHW_j 와 RHD_j 의 적절한 값을 모의발생하기 위해서는 삼각분포

(triangular distribution)의 적절한 상한치 (upper limit)와 하한치 (lower limit)를 결정하여야 한다. 삼각분포의 확률밀도함수는 식 (4.9)로 나타내어진다.

$$f(x) = \frac{2}{RHU_i - RHL_i} \left(\frac{x - RHL_i}{u - RHL_i} \right) \quad \text{if, } RHL_i \leq x \leq u$$

$$f(x) = \frac{2}{RHU_i - RHL_i} \left(\frac{RHU_i - x}{RHU_i - u} \right) \quad \text{if, } u \leq x \leq RHU_i$$

..... (4.9)

여기서, RHU_i 는 상한값, RHL_i 는 하한값, u 는 평균값, 그리고 x 는 표본변량이다.

이상의 관계에서 삼각분포의 상한치는 다음 식 (4.10)으로 나타낸다.

$$RHU_i = RHP_i + (1.0 - RHP_i) \exp(RHP_i - 1.0) \quad (4.10)$$

여기서, RHU_i 는 i 일에 모의발생될 수 있는 최고 상대습도, RHP_i 는 RHW_i 와 RHD_i 에 따르는 삼각분포에서의 첨두값이다.

하한치는 식 (4.11)로 나타내어진다.

$$RHL_i = RHP_i + [(1.0 - \exp(-RHP_i))] \quad \dots\dots (4.11)$$

여기서, RHL_i 는 i 일에 모의발생될 수 있는 상대습도의 하한치이다.

일별 상대습도의 모의발생 값은 식 (4.12)로 나타내어진다.

$$RHG_i^* = RHG_i \left(\frac{RHP_i}{RH_i} \right) \quad \dots\dots\dots (4.12)$$

여기서, RHG_i^* 는 i 일의 상대습도, RHG_i 는 삼각분포로부터 발생된 상대습도, RH_i 는 삼각분포의 평균값이다.

4.4 모형의 적용성 검토

기상자료 모의발생의 적용성을 검토하기 위하여 수원축후소의 기상자료를

사용하였다. 매개변수의 추정 및 적용에 사용된 기상자료와 자료기간은 Table 4에 나타나 있다. 온도와 상대습도는 1951~1989년의 일별 관측자료를 사용하여 매개변수를 추정하였고 1990~1992년의 관측자료와 비교하여 그 적용성을 검증하였다. 또한, 태양복사량은 1973~1989년의 자료로부터 매개변수를 추정하고, 1990~1992년의 관측자료와 비교하였다.

Table 5. Summary of data used for weather generation models

Item	Year	Period of data used	
		Calibration	Verification
Temperature		1967~1989	1990~1992
Humidity		1967~1989	1990~1992
Solar radiation		1973~1989	1990~1992

수원측후소의 기상자료로부터 계산된 통계치와 가중합수를 이용하여 최고 및 최저온도를 모의발생하였다. 관측치와 모의발생치의 χ^2 는 최고온도의 경우 0.07이었으며 최저온도는 0.91로서 5%의 유의수준에서 귀무가설이 인정되었다. Fig. 6은 최고 및 최저온도의 관측치와 모의발생치의 월별 변화를 보여주고 있는데, 최고온도의 상대오차는 0~9%의 범위를 나타내었으며 최저온도는 1~14%의 범위를 보였다.

Fig. 7은 1990~1992년의 3개년에 대한 최고온도와 최저온도의 관측치와 모의발생치의 변화를 보여주고 있다. Fig. 7에서와 같이 최고 및 최저온도는 뚜렷한 주기성을 나타내고 있으며, 절대오차의 최대치는 최고온도의 경우에 7.15℃이고 최소온도는 6.91℃의 값을 보였다.

태양복사량의 관측치와 모의발생치의 χ^2 값은 0.34로 귀무가설이 인정되었으며, 태양복사량의 월별 변화는 Fig. 8과 같다. Fig. 8에서와 같이 태양복사량의 상대오차는 1~14%의 범위를 나타내었다.

태양복사량 모의발생의 적용성을 평가하기 위하여 1990~1992년의 관측자료와 비교하였으며 그 결과는 Fig. 9에 나타나 있다. 태양복사량의 관측치와 모

의발생치의 상대오차는 1~70%의 범위를 보였다. 특히, 1990년 1월에서 8월까지의 실측치가 모의발생치보다 현저하게 낮은 값을 보이는 것은 당해년도에 우천일의 빈도가 높기 때문인 것으로 보인다.

상대습도의 월평균 관측치와 모의발생치의 χ^2 는 0.35로서 귀무가설이 인정되었다. Fig. 10은 상대습도의 월별 변화를 나타내고 있으며, 모의발생기간에 대한 상대오차는 1~3%의 범위를 보였다.

Fig. 11은 1990~1992년에 대한 상대습도의 적용 결과를 나타내고 있다. 관측치와 모의발생치의 상대오차는 0~10%의 범위를 보였으며, 1990년 여름철의 모의발생치가 관측치보다 낮게 나타난 것은 우천일의 빈도가 높고 강수량이 많기 때문인 것으로 보인다.

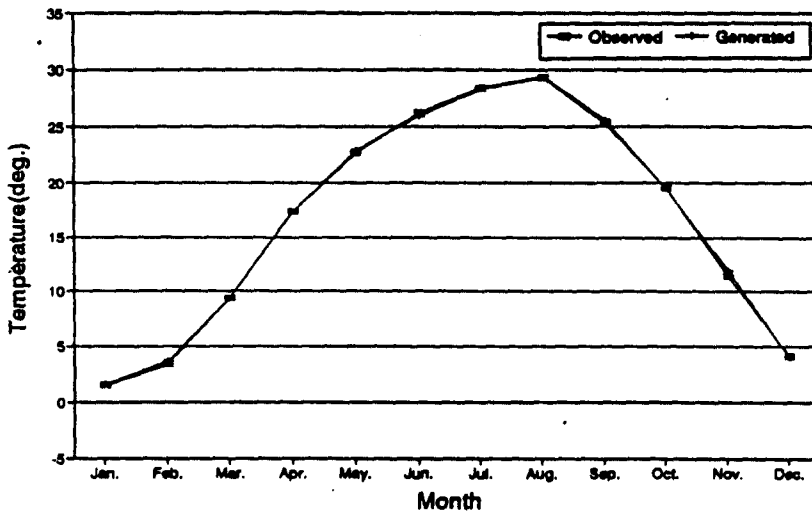


Fig. 6(a) Observed and generated monthly maximum temperature in Suwon

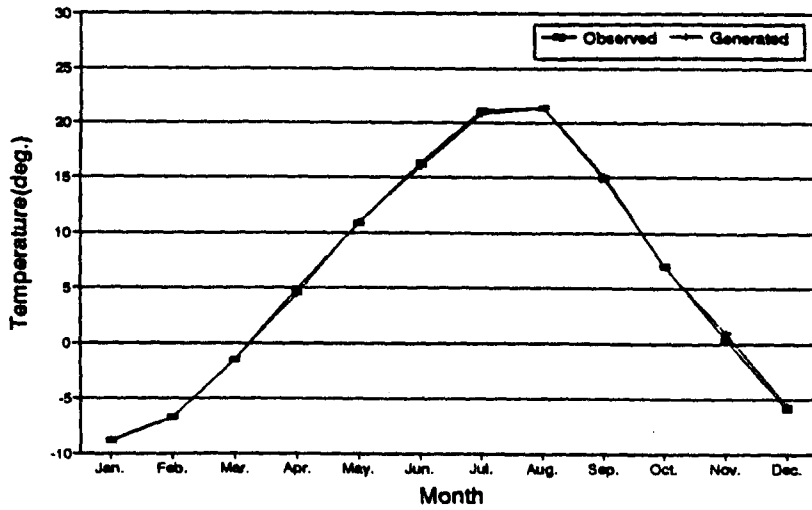


Fig. 6(b) Observed and generated monthly minimum temperature

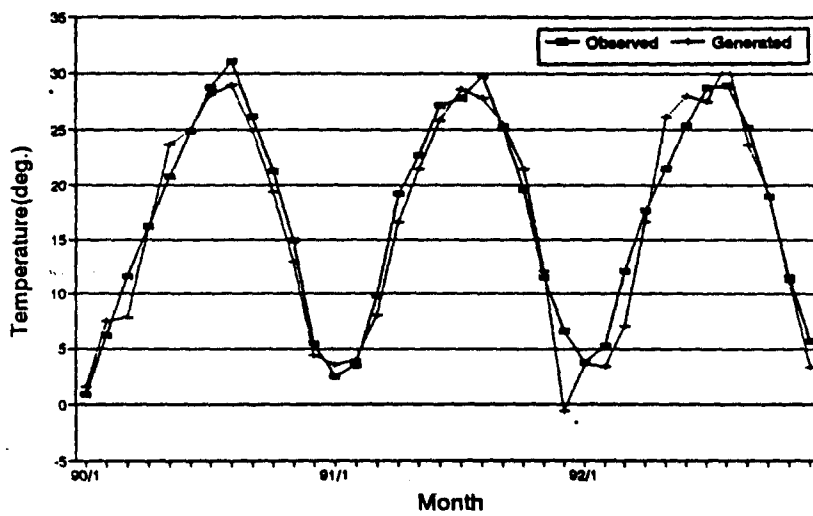


Fig. 7(a) Monthly variations of observed and generated maximum temperature (Suwon, 1/1/1990~12/31/1992)

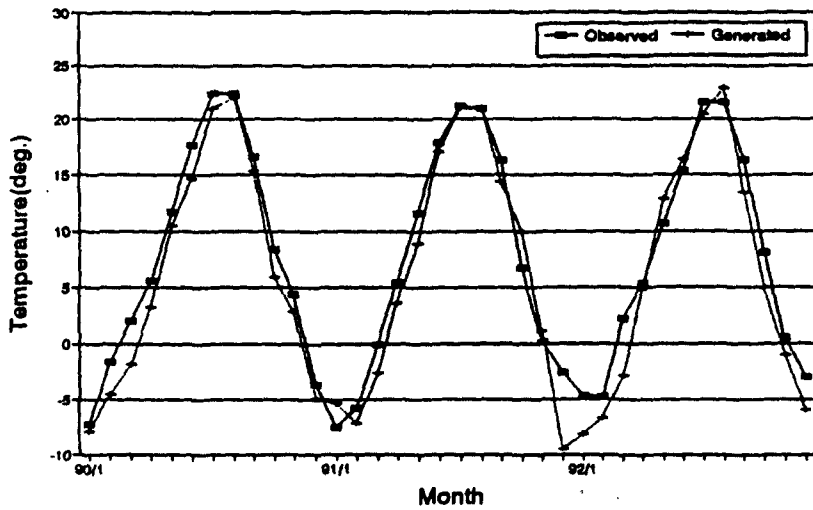


Fig. 7(b) Monthly variations of observed and generated minimum temperature (Suwon, 1/1/1990~12/31/1992)

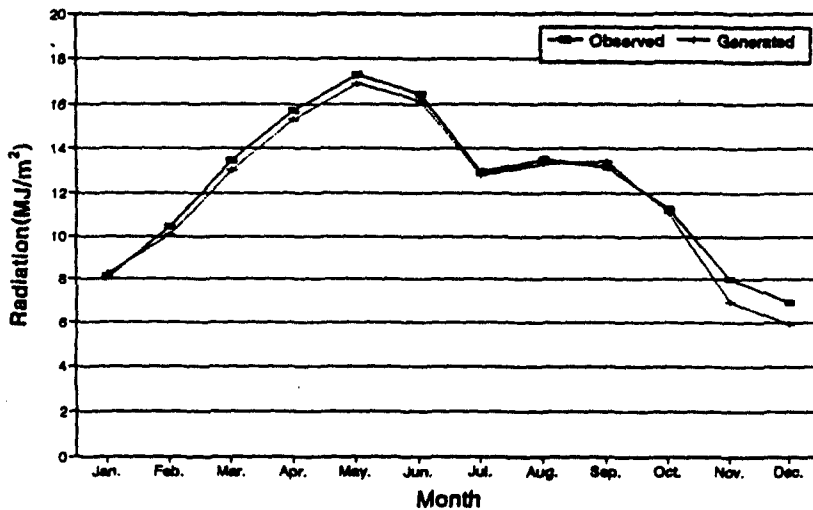


Fig. 8 Observed and generated monthly solar radiation in Suwon

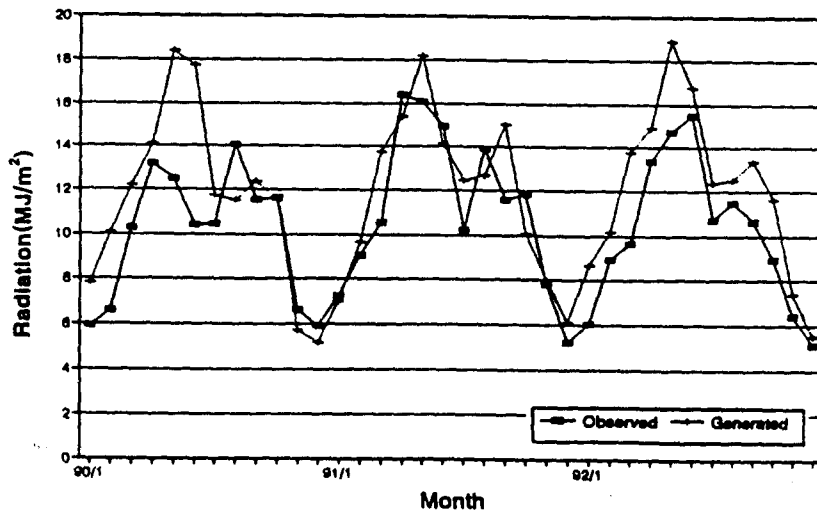


Fig. 9 Monthly variations of observed and generated solar radiation (Suwon, 1/1/1990~12/31/1992)

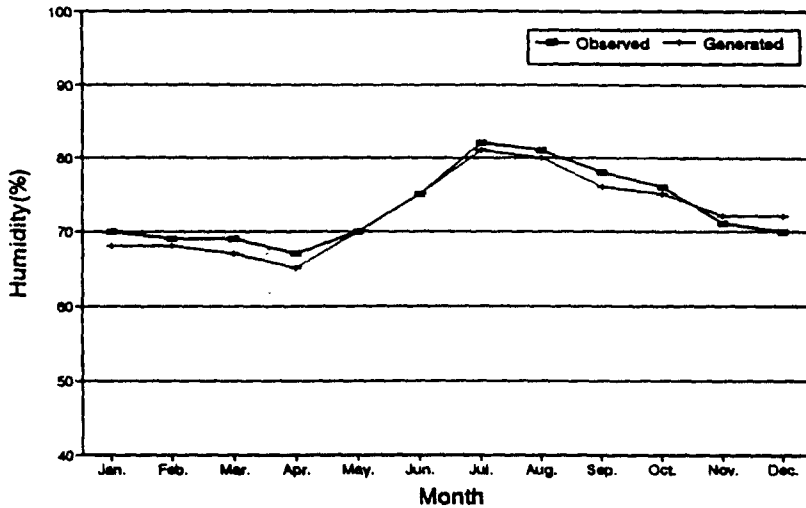


Fig. 10 Observed and generated monthly relative humidity in Suwon

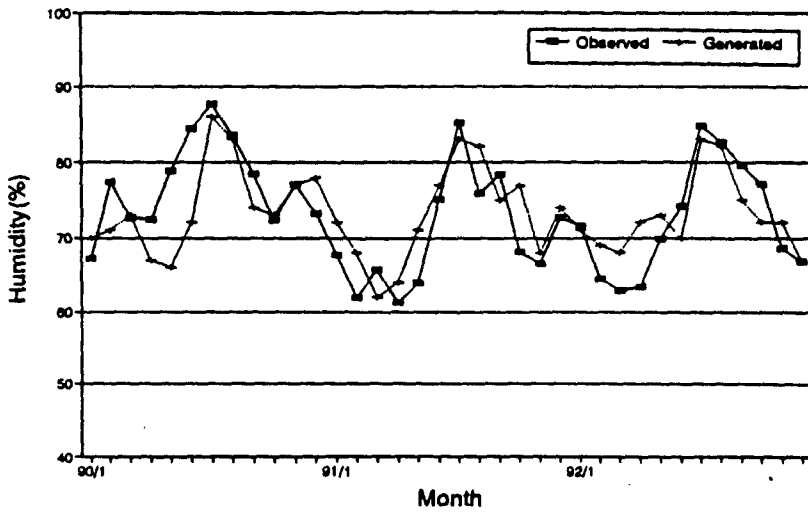


Fig. 11 Monthly variations of observed and generated relative humidity
(Suwon, 1/1/1990~12/31/1992)

5. 기상재해확률의 추정

5.1 수확량 예측

개발된 기상 발생 모형을 이용하여 수원지방의 최대 및 최소온도, 태양복사량과 상대습도를 모의발생하였다. 모의발생된 수원지방의 50년간의 기상자료로부터 논벼와 옥수수, 콩의 수확량을 추정하였으며, 작목별 수확량 추정결과는 Table 6과 같다. Table 6에서와 같이 논벼의 수확량은 최대값이 5.94 t/ha이고 최소값은 4.49t/ha였으며, 평균 5.22 t/ha로서 표준편차는 0.36이었다. 옥수수의 경우에는 2.07 ~ 2.65 t/ha의 범위로 평균 수확량은 2.32 t/ha 였다. 콩의 수확량은 1.22~1.54 t/ha의 범위를 보였으며, 평균 수확량은 1.22 t/ha 이고 표준편차는 0.08이었다.

Table 6. Simulated crop yields for 50 years

Yield (t/ha)	Rice	Corn	Soybean
Maximum	5.94	2.65	1.54
Minimum	4.49	2.07	1.22
Mean	5.22	2.32	1.37
Std. Deviation	0.36	0.14	0.08

5.2 재해확률함수의 선정

작목별 수확량의 확률분포함수를 선정하기 위하여 각 확률분포함수의 매개변수를 최우법 (*method of maximum likelyhood*)으로 추정였으며, *chi-square*검정으로 적합성을 판단하였다. 수확량의 분포함수는 정규분포 (*normal distribution, ND*), 2변수 대수정규분포 (*two-parameter lognormal distribution, LN2*), *Pearson Type-III*분포 (*P3*), *Gumbel*분포 (*GD*), 그리고, *Weibull*분포 (*WD*)에 대하여 *chi-square*검정을 실시하였으며, 그 결과는 Table 7에 나타나 있다. Table 7에 의하면 χ^2 는 정규분포함수에 대해서 가장 작은 값을 보였으며 그 값은 벼의 경우에 9.6이며 옥수수, 콩은 각각 2.0, 4.8로 자유도가 9일때 신뢰도 95%의 $\chi^2 = 16.9$ 보다 작으므로 적합성이 인정된다.

Table 7. Results of the chi-square (χ^2) test

Crop	Probability Distribution				
	ND	LN2	P3	GD	WD
Rice	9.6	10.0	19.6	18.8	17.3
Corn	2.0	6.4	20.0	12.4	9.6
Soybean	4.8	3.6	13.6	7.2	4.4

Fig. 12는 논벼에 대한 수확량의 분포함수와 정규분포함수를 도시한 것으로 선정된 정규분포함수가 수확량의 분포를 잘 나타내고 있음을 알 수 있다.

5.3 재해발생확률별 수확량

Table 7의 결과로부터 정규분포함수를 이용하여 재해확률에 따른 수확량을 추정할 수 있으며, Table 8은 선정된 정규확률분포로부터 계산된 확률별 수확량을 보여주고 있다. 벼의 경우 10%, 90% 확률 수확량은 각각 4.76, 5.68 t/ha이며, 50% 확률 수확량은 평균 수확량으로 5.22 t/ha 이다. 옥수수의 10% 확률 수확량은 2.13 t/ha이고, 50% 및 90%에 대해서는 그 값이 각각 2.32 t/ha, 2.50 t/ha 이다. 콩의 10%, 50%, 및 90% 확률수확량은 2.17 t/ha, 1.37 t/ha, 그리고 1.48 t/ha 이다.

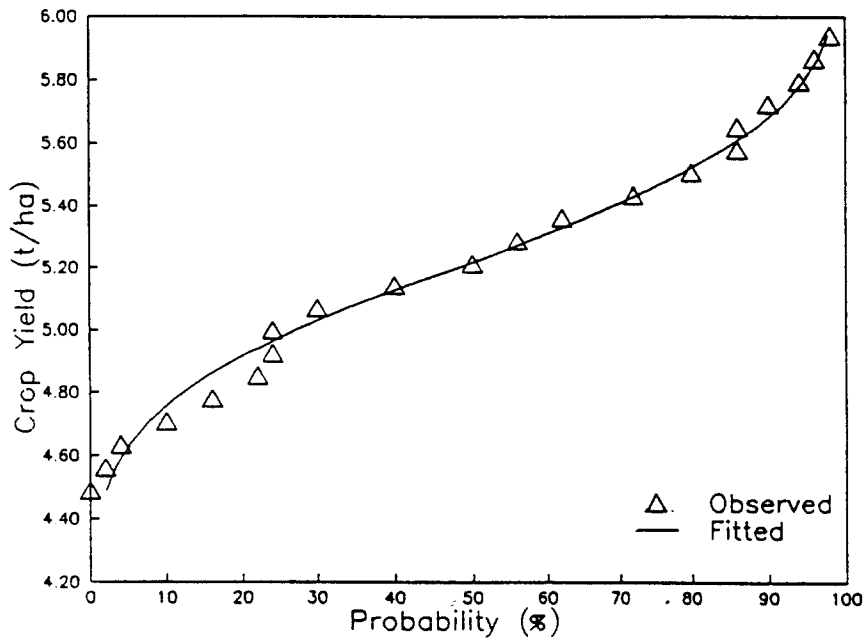


Fig. 12 Probability distribution of crop yield for rice
by the normal probability function.

Table 8 Crop yields derived from the fitted normal distribution

Probability (%)	Crop Yield (t/ha)		
	Rice	Corn	Soybean
10	4.76	2.13	1.27
20	4.92	2.20	1.31
30	5.03	2.24	1.33
40	5.13	2.28	1.35
50	5.22	2.32	1.37
60	5.31	2.36	1.39
70	5.41	2.40	1.42
80	5.52	2.44	1.44
90	5.68	2.50	1.48

5.4 이상기후에 따른 농작물 수확량

이상기후로 인한 수확량의 감소를 계량화하기 위하여 작목별 수확량의 재현기간을 추정하였다. 각 작목별 재해확률함수를 이용하여 평균 수확량보다 작은 수확량에 대해 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100년 빈도의 재해확률에 대한 수확량을 각각 추정하였다. 이때의 확률은 각각 50, 20, 10, 5, 4, 2, 1%에 해당한다.

Table 9는 논벼, 옥수수과 콩에 대한 재해확률 및 재현기간별 수확량을 표시하고 있다. 논벼의 경우에 4.92 t/ha는 5년빈도의 재해발생시 예상되는 수확량이며 이는 20%의 재해확률에 해당한다. 옥수수의 경우 2.13 t/ha는 10년빈도의 이상기온으로 인하여 예상되는 수확량이며, 2.02 t/ha는 50년빈도, 2%의 재해확률 수확량이다.

Table 9. Probable damage from abnormal weather conditions

Return Period (yrs)	Probability (%)	Crop Yield (t/ha)		
		Rice	Corn	Soybean
2	50	5.22	2.31	1.37
5	20	4.92	2.19	1.31
10	10	4.76	2.13	1.27
20	5	4.63	2.08	1.24
25	4	4.59	2.06	1.23
50	2	4.48	2.02	1.21
100	1	4.38	1.98	1.18

Table 9로 부터 작물의 수확량에 대한 기상재해 정도를 계량화할 수 있으며, 이로 부터 재해보상기준을 수립할 수 있을 것이다. 예를 들어, Table 9에서 논벼의 수확량 5.22 t/ha는 2년 빈도, 4.63 t/ha는 20년 빈도이고 옥수수의 수확량 2.02 t/ha는 50년 빈도에 해당되며 콩의 경우 수확량 1.23 t/ha는 25년 빈도의 이상재해에 해당된다.

6. 요약 및 결론

이상기상으로 인한 농작물의 수확량 감소를 계량화하고 재해발생확률을 구하기 위하여 논벼와 밭작물의 생장 및 수확량 모형을 구성하였으며, 기상 발생 모형을 이용하여 장기간의 기상자료를 생성하고 이들 자료를 이용하여 논벼, 옥수수 및 콩의 기상재해확률을 추정하였다.

논벼의 생장 및 수확량 모형인 SIMRIW를 이용하여 수원지방의 추청벼에 대하여 수확량을 추정하였으며, 추정된 결과를 작물시험장의 1983~1991년의 실측 수확량 자료와 비교한 결과는 다음과 같다.

(1) 수원지방의 추청벼의 추정 수확량은 4.92~5.85 t/ha로 평균 5.36 t/ha였으며, 작물시험장의 실측 수확량은 4.85~5.66 t/ha의 범위를 보였고 평균 5.22 t/ha였다.

(2) 실측 수확량과 추정 수확량의 절대오차와 상대오차는 각각 0.20 t/ha, 3.7%였다.

(3) 실측 수확량과 추정 수확량의 상관계수(R^2)는 0.659로서 비교적 양호한 결과를 보였다.

(4) 6~8월의 평균온도와 6~9월의 누가 일조시간의 변이와 수확량과의 관계를 분석한 결과, 수확량은 평균온도 및 일조시간과 매우 밀접한 관계를 가지고 있었다.

밭작물의 수확량을 예측하기 위하여 밭작물의 생장 및 수확량 모형을 구성하였으며, 수원지방의 옥수수와 콩에 대하여 적용한 결과는 다음과 같다.

(1) 수원지방의 옥수수의 추정 수확량은 2.19~3.10 t/ha의 범위를 보이고 있으며 평균 2.60 t/ha이였으며, 실측 수확량은 2.28~2.85 t/ha로 평균 2.55 t/ha였다.

(2) 옥수수의 수확량 추정 결과의 절대오차는 0.16~0.49 t/ha의 범위를 보였으며 평균 0.31 t/ha이고, 상대오차는 5.7~21.3%의 범위로 평균 12.3 %였다.

(3) 수원지방의 콩의 추정 수확량은 1.31~1.86 t/ha였으며, 실측 수확량은 1.17~1.48 t/ha의 범위를 보였고, 평균 수확량은 각각 1.51 t/ha, 1.28 t/ha였다.

(4) 콩의 수확량 추정에 대한 상대오차 및 절대오차는 각각 0.26 t/ha, 20.9%로 평균 오차가 약간 큰 값을 보였다.

장기간의 기상변화에 대한 수확량을 추정하기 위하여 기상 발생 모형을 이용하여 최고 및 최저온도, 태양복사량, 상대습도 등의 기상자료를 생성하였으며 수원측후소의 관측 자료와 비교한 결과는 다음과 같다.

(1) 최고 및 최저온도와 태양복사량은 잔차계열과 상관계수를 이용하여 계산하였다.

(2) 상대습도는 삼각분포를 이용하여 우천일과 청명일에 따라 계산하였다.

(3) 수원측후소의 관측치와 모의발생치의 χ^2 는 최고온도의 경우에 0.07이었으며 최저온도는 0.91로서 5%의 유의수준에서 귀무가설이 인정되었다. 또한, 최고온도의 상대오차는 0~9%의 범위를 보였으며 최저온도는 1~14%의 범위를 나타내었다.

(4) 태양복사량의 관측치와 모의발생치의 χ^2 값은 0.34로 귀무가설이 인정되었으며, 태양복사량의 상대오차는 1~14%의 범위를 나타내었다.

(5) 상대습도의 월평균 관측치와 모의발생치의 χ^2 는 0.35로서 귀무가설이 인정되었으며, 모의발생기간에 대한 상대오차는 1~3%의 범위를 보였다.

모의발생된 기상자료를 이용하여 수원지방의 논벼, 옥수수, 콩 등에 대하여 50년간의 수확량을 추정하였으며 추정된 수확량으로 부터 작목별 재해확률함수를 선정하고 재해발생확률별 수확량을 결정하였다. 이상의 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 50년간의 기상자료로 부터 추정한 논벼의 수확량은 최대값이 5.94 t/ha이고 최소값은 4.49t/ha였으며, 평균 5.22 t/ha로서 표준편차는 0.36이었다. 옥수수 경우에는 2.07 ~ 2.65 t/ha의 범위로 평균 수확량은 2.32 t/ha 였다. 콩의 수확량은 1.22~1.54 t/ha의 범위를 보였으며, 평균 수확량은 1.22 t/ha 이고 표준편차는 0.08이었다

(2) 작목별 수확량의 확률분포함수를 선정하기 위하여 각 확률분포함수의 매개변수를 최우법으로 추정였으며, *chi-square*검정으로 적합성을 판단한 결과, χ^2 는 정규분포함수에 대해서 가장 작은 값을 보였으며 그 값은 벼의 경우에 9.6이며 옥수수, 콩은 각각 2.0, 4.8로 자유도가 9일때 신뢰도 95%의 $\chi^2 = 16.9$ 보다 작으므로 적합성이 인정되었다.

(3) 정규분포함수를 이용하여 재해발생확률에 따른 수확량을 추정하였으며, 벼의 경우 10%, 50%, 90% 확률 수확량은 각각 4.76, 5.22, 5.68 t/ha 이고, 옥수수의 10% 확률수확량은 2.13 t/ha이고, 50% 및 90%에 대해서는 그 값이 각각 2.32 t/ha, 2.50 t/ha 이다. 콩의 10%, 50%, 및 90% 확률수확량은 1.17, 1.37, 1.48 t/ha 이었다.

(4) 각 작목별 재해확률함수를 이용하여 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100년 빈도의 재해발생확률에 대한 수확량을 추정하였다.

우리나라 농업한발 지수의 결정

Determination of Agricultural Drought Index in Korea

책임연구원 : 김 현 영

(농어촌진흥공사, 기술지원부장)

1. 머리말

우리는 가뭄이 들었다고 할때 단순히 장기간 강수의 부족으로 쓸 물이 없을 때를 말한다. 미국 기상국(U.S.Weather Bureau)의 정의를 빌어 좀더 학술적인 용어로 표현하면 '가뭄이란 어느지역의 동식물 생육에 피해를 가져올수 있을 정도로 강수의 부족이 매우 심각하게 장기간 지속되는 상태이거나 생활용수와 수력발전에 필요한 용수를 정상적으로 확보하지 못한 상태'로 정의하고 있다. 그러나 이러한 정의도 타지역에서 또는 지하수로 부터 공급이 가능한 경우 포괄적인 정의로 볼수 없다. 이와 같이 강수현상과 물의 용도에 따라 여러가지 가뭄이 있음을 알수 있다.

박성우 등(1984)은 다음과 같이 가뭄을 구분하고 있다.

- (1) 기상학적인 가뭄 : 주어진 기간의 강수량이나 無降水 계속일수 등으로 정의하는 가뭄
- (2) 기후학적인 가뭄 : 월별 또는 년별 강수량을 동일 기간의 누년 평균치의 백 분율로 표시하는 가뭄
- (3) 大氣가뭄 : 기온, 바람 및 습도 등으로 정의하는 가뭄
- (4) 농업가뭄 : 농작물 생육에 직접관계되는 토양수분으로 표시하는 가뭄
- (5) 水文學적인 가뭄 : 하천, 저수지, 지하수 등의 가용 수자원의 량으로 정의하는 가뭄

이러한 가뭄현상은 개별적으로 또한 독립적으로 발생하는 것이 아니며 서로 상관성이 있다. 기상학적인 가뭄이 오래 지속되면 토양수분을 고갈시켜 농업 가뭄을 유발시키며 하천이나 저수지의 수량을 감소시키므로써 수문학적인 가뭄으로 이어지게 된다. 따라서 각 가뭄마다 그 정도를 표시할수 있는 지표가 필요하며 이에따라 발생빈도도 상이할 것이다.

작년(1994년) 우리가 겪은 가뭄은 어느정도의 것일까? 흔히들 가뭄의 정도를 표시하는 데는 “몇년 만의 가뭄이다” 라는 표현을 사용하고 있다. 찾아오는

햇수가 길면 길수록 가뭄의 정도가 큼을 나타내고 있다. 기술자들은 이런 표현에 만족할수가 없고 좀더 정확한 가뭄표현 도구가 필요하다. 여기에는 가뭄을 어떤 인자에 의해 표현할 것인가?, 이들 인자들을 수치화(지수화)할수는 없을까?, 수치화된 인자들의 발생빈도는 어느 정도인가? 등에 따라 가뭄의 평가는 달라질 것이다.

가뭄의 정도를 표시하는 데는 여러가지 인자가 사용된다. Sikka(1972)는 강우량의 지역적 시기적 특성을 정해 놓고 실제 강우발생 비율에 따라 가뭄을 표현하였다. Hershfield 등 (1972)은 dry-day를 사용하여 가뭄의 정도를 나타내기도 하였다. Bidwell (1972)은 토양수분과 기상인자를 조합한 새로운 수문변수를 사용하여 가뭄을 평가하기도 하였다. Millan(1972)과 Chow(1964)는 강수, 토양수분, 지하수위, 하천유량, 저수량 등의 부족정도를 가뭄발생의 확률분포 대상으로 간주하였다. Smart(1983)는 강우량과 증발량으로 토양수분의 부족상태를 추정하므로써 가뭄의 빈도, 지속시간 및 심도를 나타내었다. 朴成宇 등(1982)은 한발 기준년 재조정의 연구에서 과우량과 과우일수를 사용하여 가뭄의 빈도표와 과우량별 빈도별 等寡雨日數圖를 제시하였다. 이때 최초로 '寡雨'라는 용어를 사용한 바 있다. 이와 같이 가뭄의 정도를 표시하는 데 사용되는 인자에는 강수량과 무강수 일수, 하천유량, 토양수분, 지하수위, 저수지, 호소등의 저수량, 과우량과 과우일수 등이 있음을 알수 있다.

가뭄을 평가하는 데는 가뭄에 관여하는 인자들을 지수화하여 나타내기도 한다. 가장 널리 알려진 가뭄지수는 Palmer(1965)의 PDSI(Palmer Drought Severity Index)이다. 이 가뭄지수는 어느 지역의 증발량, 지하수 보충량, 유역의 유출량 등을 물수지식으로 표현하였다. Bahlme 등 (1980)은 PDSI를 간략화하여 강수량만을 사용하여 BMDI(Bahlme Mooley Drought Index)를 사용하였다.

우리나라의 경우 박성우 등 (1982)이 기상조건에 따라 한발 예측 농업생산성을 분석하기위하여 저수지의 유역면적, 관개면적, 저수량 등의 인자를 사용하여 내한능력 지수를 개발하였다. 안병기 등(1988)은 월별 강수량자료를 이용하

여 한발강도, 한발지속시간 및 크기를 지수화하였다. 김현영 등(1993)은 저수지의 저수량과 고갈저수지의 고갈일수를 이용하여 개별 및 군저수지의 가뭄심도를 계산하는 방법을 제시하였다.

이와 같이 가뭄을 평가하기 위하여 사용되는 지수화 방법은 이제까지 활용되지 못하였다. 그 이유는 가뭄지수를 나타내는 데는 여러가지 인자가 있으며 이들 인자들이 일반 대중들이 쉽게 이해하기 어렵기 때문이기도 하지만 이런 인자들이 과거부터 자료로서 일관되게 정리되어 있지 못하기 때문이다. 따라서 좀더 쉽고 간단하면서 과거부터 일관되게 평가할수 있는 기준의 확립이 시급하다. 이런 의미에서 다음에 기술하고자 하는 과우일수와 그 발생빈도는 가뭄평가에 있어 가뭄의 정도를 잘 표현하면서 매우 편리하게 사용할수 있을 것으로 판단된다.

다음으로 가뭄을 평가하는 방법으로서는 가뭄의 발생빈도에 따라 평가하는 방법이다. 이를 위해서는 가뭄을 구성하는 요소를 정확히 정의해야 한다. 가뭄의 구성요소를 가장 잘 표현한 이론은 Yevjevich (1967)의 Runs이론이다. 그후 하천의 연유량을 대상으로 Runs이론을 가뭄 발생빈도 분석에 사용한 사람은 Millan (1972), Zekai Sen (1980), Dracup 등 (1980), 강관원 등(1986)이 있으며 Llamas 등 (1969)은 강수자료틀, Smart (1983)는 토양수분을 각각 Runs의 대상으로 하여 가뭄발생빈도를 계산하였다.

Runs이론은 다음 그림 1에서 보는 바와 같이 가뭄의 지속시간(Duration), 가뭄의 심도(Severity) 및 이의 크기(Magnitude)로 구성된다. 가뭄지속시간은 일정 유량 또는 강수량(Truncation Level)을 기준하여 이 보다 많으면 잉여(Surplus), 적으면 부족수량(deficit)으로 할때 부족수량이 지속되는 기간으로 정의하고 부족되는 수량의 깊이를 가뭄심도라고 정의한다. 따라서 이때 가뭄의 크기 $M = \text{가뭄심도}(S)/\text{가뭄기간}(D)$ 로 표현된다. 이로 부터 가뭄크기, 가뭄심도, 가뭄기간 등의 시계열이 모두 확률적으로 임의변량(Random)이므로 이를 빈도 계산하므로서 가뭄빈도(Drought Frequency)를 얻을수 있다.

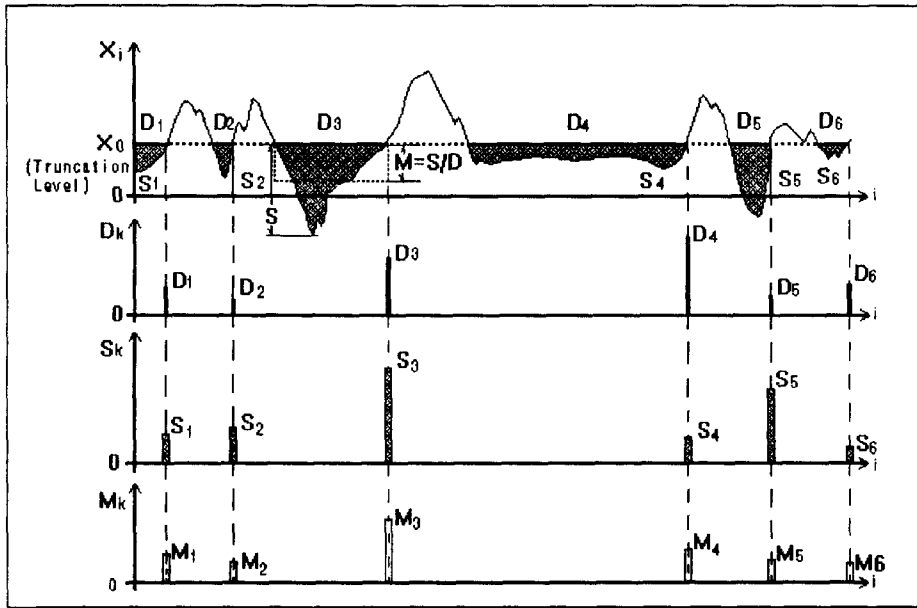


그림 1. Runs이론에 의한 가뭄의 구성요소

2. 가뭄의 기상학적 지표

2.1 寡雨量과 寡雨日數

寡雨의 '寡'는 '적다'라는 뜻이다. 다시말해 평균 강우량에 비해 적게 왔을 때 과우 상태라고 말할수 있다. 이 과우상태는 기상학적인 가뭄을 평가하는 데 유용한 용어임을 알수있다. Hershfield (1972)가 사용한 dry-day는 無降雨의 의미가 강하다. Hershfield가 dry-day를 계산할때 기준한 우량은 강우가 있긴 있되 강우로서 水文 및 농업에 아무런 영향을 미치지 않는 강우 즉 무강우로 취급할수 있는 0.25" (6.4mm)였다. 따라서 이때의 dry-day는 無降雨日數로 볼수 있다. 박성우 등(1982)의 寡雨日數는 日우량을 누가하여 합계가 각각 0,5,10, 15,20,30mm가 될 때까지의 일수로 정의하였다. 즉 예를들면 일우량이 30mm가 될 때까지는 과우상태로 간주하는 것이며 이때 30mm는 과우량이 되는 것이다. 여기에서 문제되는 것은 30mm가 되면 과우상태가 끝나고 해갈된 것으로 간주할수 있느냐 하는 것이다. 우리가 가뭄을 겪을때 느끼는 體感가뭄과 일치해야 하는데 30mm로서는 어느 누구도 가뭄이 끝났다고 단정하기 어렵다. 따라서 Hershfield의 과우량을 무강우로 취급할수 있는 下限 과우량이라고 한다면 해갈 여부를 결정할수 있는 上限 과우량의 개념이 도입되어야 한다.

여기에서 가뭄의 지속여부와 관계되는 새로운 상한 과우량의 기준의 마련에는 두가지 접근방법이 가능할 것이다. 하나는 물리적인 의미에서 가뭄의 지속 여부를 판단할수 있는 과우량의 기준이고 다른 하나는 이제까지 우리가 겪은 체감가뭄을 기준으로 과거의 가뭄지속일수를 계산하고 이 기간동안의 강우량을 과우량으로 정의하는 것이다.

물리적인 의미의 과우량은 토양수분의 포화도에서 그 기준을 마련할수 있다. 즉 표토층의 경운 깊이에 토양수분이 작물생육에 도움이 될 정도가 된다면 가뭄이 종료되었다고 볼수 있다. 물론 토양의 종류, 강우강도, 작물의 재배방식

등에 따라 토양수분의 함유정도는 상이할 것이다. 일반적인 평균치로 부터 표토층의 경운깊이를 15.0cm로 보고 이의 공극율은 60%이며 이 공극의 약 50%가 물로 포화된다면 작물생육 조건을 만족한다고 볼수 있다. 여기에서 강우의 손실이 작물에 의한 차단과 삼투능에 의해 약 25%가 발생하는 것으로 하면 다음 식과 같이 약 60mm가 된다.

$$150 \times 0.6 \times 0.50 / (1 - 0.25) = 60\text{mm}$$

다음으로 체감가뭄을 기준하여 과거 가뭄지속일수(과우일수)를 분석하는 방법을 상술하면 다음과 같다.

우선 과우량은 5,6,7,8월 동안 일강우량 자료를 누가하여 과우일수를 계산하고 그 일수가 해당 가뭄년의 가뭄지속일수와 비교하는 것이다. 이때 과우량인 누가 강우량을 계산하는 방법은 다음과 같다. 또한 無降雨로 간주하는 하한 과우량의 기준은 Hershfield의 기준(0.25" = 6.4mm)에서 약 5mm로 준용할수 있다.

(1) 5,6,7,8월의 일강우량 자료로 부터 단독 1일 강우량이 5mm 이하이거나 연속 2일 이상 강우량이 5mm이하일 경우 무강우로 취급하고 일 강우량을 누가한다.

(2) 누가강우량이 50mm, 60mm, 70mm등 여러가지 기준에 달할때 까지의 과우지속 일수 를 계산한다.

(3) 계산결과를 과거 가뭄기록으로 부터 비교하여 과우일수를 결정하고 이때의 누가 강우량을 과우량으로 정의한다.

(4) Runs이론에서 과우량은 Truncation Level이 되고 과우일수는 Run-Length 즉 가뭄기간(Duration)이 되므로서 가뭄발생빈도의 시계열자료로서 사용한다.

과우량 50, 60, 70mm별, 측후소별 과우일수를 계산하면 다음 표 1과 같다.

표 1. 寡雨日數 산출 결과

(단위: 일)

년 도	과우량	서 울	춘 천	청 주	대 전	전 주	광 주	대 구	진 주	부 산
1960	50 mm	24	29	27	38	28	33	44	44	39
	60 "	25	30	27	38	28	37	44	44	39
	70 "	28	39	29	38	28	38	44	44	39
1961	50 mm	28	26	24	24	28	24	34	18	23
	60 "	28	26	24	24	28	27	35	23	28
	70 "	33	27	28	27	31	28	36	24	35
1962	50 mm	40	35	32	38	33	33	54	32	33
	60 "	44	37	38	39	36	33	55	32	33
	70 "	46	40	39	39	47	33	59	32	33
1963	50 mm	24	24	32	24	18	25	22	24	16
	60 "	26	25	26	26	19	25	26	26	16
	70 "	26	26	26	26	21	25	27	32	19
1964	50 mm	30	28	33	28	31	31	53	23	40
	60 "	31	31	35	31	34	37	54	30	49
	70 "	31	37	35	36	39	39	62	32	59
1965	50 mm	68	68	46	44	46	35	43	37	36
	60 "	70	69	47	46	53	35	44	37	39
	70 "	71	70	48	46	61	37	61	37	46
1966	50 mm	35	29	52	30	29	35	29	29	41
	60 "	36	40	53	35	35	35	44	35	41
	70 "	38	44	55	42	35	36	36	35	43
1967	50 mm	32	34	51	53	56	55	37	50	48
	60 "	33	40	51	54	56	56	47	50	55
	70 "	33	49	51	55	56	56	48	55	56
1968	50 mm	44	37	37	41	41	52	45	34	56
	60 "	45	37	44	41	41	60	59	43	57
	70 "	45	41	48	41	46	72	71	48	58
1969	50 mm	42	39	47	35	28	31	37	22	24
	60 "	43	39	50	41	31	32	37	25	24
	70 "	43	42	60	43	33	37	40	27	27
1970	50 mm	28	28	37	28	29	37	20	20	35
	60 "	36	39	37	28	29	37	29	30	35
	70 "	37	39	37	28	37	37	29	30	35
1971	50 mm	32	30	37	30	24	24	36	24	24
	60 "	32	32	47	30	29	30	38	29	24
	70 "	33	34	48	30	30	33	42	30	29

표 1 계속

년 도	과우량	서 울	춘 천	청 주	대 전	전 주	광 주	대 구	진 주	부 산
1972	50 mm	34	43	37	47	40	33	33	30	28
	60 "	37	45	43	48	47	47	33	30	30
	70 "	44	47	51	52	48	48	43	43	30
1973	50 mm	49	40	40	40	43	49	43	40	40
	60 "	50	43	42	42	52	52	51	40	41
	70 "	50	43	43	49	52	52	55	41	42
1974	50 mm	34	30	30	30	30	28	27	27	27
	60 "	34	34	43	32	30	28	35	27	28
	70 "	35	34	43	42	40	28	36	28	29
1975	50 mm	53	44	39	29	21	32	32	21	21
	60 "	53	50	47	34	26	34	32	21	21
	70 "	63	52	48	35	29	40	32	21	25
1976	50 mm	46	33	40	37	37	28	54	30	30
	60 "	51	44	50	37	37	28	55	30	34
	70 "	51	46	51	39	37	32	55	34	34
1977	50 mm	32	34	45	39	34	34	34	27	40
	60 "	32	49	45	46	34	54	36	27	40
	70 "	40	50	45	50	38	54	46	32	40
1978	50 mm	56	40	40	40	40	41	41	41	41
	60 "	56	43	40	41	40	41	41	41	41
	70 "	56	56	41	41	41	41	41	41	41
1979	50 mm	18	25	22	22	25	28	25	20	23
	60 "	26	25	26	26	29	30	25	20	27
	70 "	29	33	29	29	34	33	28	26	29
1980	50 mm	26	32	26	21	22	28	30	22	16
	60 "	26	35	26	26	26	30	30	22	22
	70 "	26	41	26	26	26	30	35	22	30
1981	50 mm	42	23	50	43	39	42	42	38	42
	60 "	44	23	52	50	41	48	42	41	43
	70 "	44	30	53	50	47	50	43	42	43
1982	50 mm	57	45	57	54	51	38	68	42	43
	60 "	59	50	58	54	51	41	77	43	43
	70 "	60	51	63	54	54	54	77	57	57
1983	50 mm	56	56	44	44	43	51	51	43	36
	60 "	56	56	44	44	50	55	51	43	36
	70 "	56	63	44	51	50	62	51	44	36

표 1 계속

년 도	과우량	서 울	춘 천	청 주	대 전	전 주	광 주	대 구	진 주	부 산
1984	50 mm	48	38	32	35	38	38	38	37	29
	60 "	48	38	37	37	39	39	39	38	29
	70 "	48	39	38	37	41	39	39	38	29
1985	50 mm	44	52	50	44	40	30	40	34	35
	60 "	44	57	54	44	40	31	40	35	35
	70 "	44	57	54	50	40	35	40	40	38
1986	50 mm	33	36	27	28	27	25	27	27	42
	60 "	36	39	28	30	28	27	27	28	43
	70 "	44	44	33	34	28	27	30	28	44
1987	50 mm	33	32	28	28	33	33	34	33	21
	60 "	37	37	33	33	33	33	34	33	24
	70 "	37	37	33	33	34	33	34	33	29
1988	50 mm	37	34	37	39	52	44	39	27	30
	60 "	37	34	38	39	52	52	40	27	31
	70 "	40	34	40	40	63	52	41	27	31
1989	50 mm	36	29	25	25	36	35	39	35	31
	60 "	36	36	36	36	39	35	39	36	36
	70 "	36	36	36	36	39	36	39	36	39
1990	50 mm	23	25	42	32	32	31	28	34	36
	60 "	27	27	45	39	38	32	31	35	37
	70 "	31	31	46	42	42	32	31	36	37
1991	50 mm	33	28	27	26	26	33	34	26	24
	60 "	33	28	27	33	27	33	34	26	24
	70 "	33	33	27	34	32	33	40	32	25
1992	50 mm	35	30	55	57	64	59	62	52	44
	60 "	45	32	57	57	65	64	64	57	44
	70 "	57	34	62	63	65	65	72	62	45
1993	50 mm	25	24	36	25	22	26	26	18	25
	60 "	25	24	37	25	22	36	35	19	26
	70 "	26	26	37	26	26	41	41	25	28
1994	50 mm	35	38	41	42	42	46	35	60	36
	60 "	38	39	45	43	43	62	35	61	37
	70 "	35	41	46	46	43	68	38	62	37

상기 표 1에서 보는 바와 같이 광주측후소의 과우일수만을 보더라도 과우량 70mm 때가 1967, 1968, 1992 및 1994년의 가뭄을 잘 표현하고 있음을 알 수 있으며, 특히 '94년 慶南의 경우 西部와 東部지역이 地形的인 특성의 영향을 받아 부산과 진주에서 같은해 인데도 불구하고 약 25일간의 차이를 보이고 있어 체감가뭄과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 체감가뭄을 기준할 때는 과우량 70mm가 상한 과우량의 기준으로 적합함을 알 수 있다. 또한 상기 과우량 70mm를 기준으로 하여 寡雨日數를 Gumbel-Chow 방법으로 頻度處理한 결과 표 2와 같이 나타났다.

2.2 과우일수에 의한 가뭄빈도

표 1을 가지고 Gumbel-Chow의 확률분포함수를 이용 빈도값을 구하면 다음 표 2와 같다.

표 2에서 보는 바와 같이 가뭄頻度は 강우량이 지역별로 편중되는 원인으로 측후소마다 相異하며, 전국적으로 볼 때 10년빈도 가뭄에 해당되는 寡雨日數는 약 50일에서 61일 사이인 것으로 나타났다. 한편 平年 寡雨日數는 경남 진주의 35일에서 경북대구의 42일 사이를 나타내고 있어 표 1의 과우일수로 부터 크고 작은 가뭄현상이 전국에서 자주 발생됨을 알 수 있다.

표 2. 寡雨日數에 의한 가뭄頻度

(단위 : 일)

빈도별	서울	춘천	청주	대전	대구	전주	광주	부산	진주
평년	39	40	41	39	42	39	40	36	35
3년	44	44	45	43	47	43	45	40	39
5년	49	49	50	47	53	48	51	44	44
10년	56	55	56	53	61	55	58	50	50
20년	62	60	62	58	68	61	65	55	56
50년	70	68	69	65	77	69	74	63	64
100년	77	73	75	70	84	75	80	68	70

결론적으로 표 2는 향후 과우일수를 기준하여 그 해의 가뭄정도를 판단할 수 있는 충분한 기준이 될 것으로 사료된다. 그러나 과우일수와 가뭄상태와는 항상 일치할수는 없으며 수리시설의 내한능력에 따라 달라질수 있다. 즉 기상학적인 가뭄과 수문학적인 가뭄의 정도가 상이하기 때문이다. 표 2의 가뭄빈도를 기준하여 '94년 광주지역의 가뭄빈도를 추정하면 과우일수가 약 68일이므로 30년 빈도에 해당한다고 할수 있다.

3. 가뭄의 수문학적인 지표

과우일수가 아무리 길더라도 저수지의 유효수량이 많이 확보되어 있으면 가뭄이 들었다고 볼수 없다. 그래서 가뭄을 평가하는 데 있어서 기상학적인 가뭄만을 가지고 평가한다면 올바른 방법이 될수 없다. 하천의 유량이나 저수지의 저수량을 가지고 가뭄을 평가할수 있는 수문학적인 지표가 보완되어야 완전한 가뭄평가가 가능할 것이다.

3.1 貯水率

저수지의 저수량을 알수 있는 자료로서는 만수량에 대한 현재 저수량의 비인 저수율이 있으며 이를 정기적으로 관측정리하고 있다(농림수산부,가뭄대책 추진현황,1995). 저수율에 의한 가뭄頻度 계산을 위해 최대 寡雨日數 발생 기간 동안의 道別 최저저수율 자료 표 3을 이용하였다. 여기서 貯水率은 道別 각 農組에서 報告한 저수율로서 각 저수지에서 2-3日 간격으로 관측한 값을 평균한 것이다.

표 3에서 보는 바와 같이 가뭄년의 도별 최저저수율은 약 30%미만인 것으로 나타났으며, 특히 '92년과 같은 가뭄년의 경우에는 경기도가 58%인 반면 전북의 경우는 12%를 나타내어 지역별로 상당한 차이를 보이고 있음을 알수 있다

표 3. 道別 最低 저수율

(단위: %)

년 도	경 기	강 원	충 북	충 남	진 북	전 남	경 북	경 남	평 균
1967	42	35	39	25	33	5	43	15	27.78
1968	21	18	17	15	9	4	23	16	15.00
1969	20	39	26	35	62	59	56	72	43.78
1970	26	22	45	40	65	41	81	60	42.56
1971	56	46	61	60	81	84	76	63	59.22
1972	31	38	39	34	59	67	55	50	43.78
1973	34	33	30	33	44	28	17	5	29.00
1974	58	60	50	65	71	58	60	64	57.00
1975	15	38	39	48	79	53	64	50	45.33
1976	8	16	12	25	51	37	26	29	26.11
1977	27	25	16	30	26	29	13	25	27.00
1978	9	14	18	12	21	13	36	23	18.78
1979	79	75	73	74	62	85	87	92	74.56
1980	75	33	79	78	91	78	66	64	72.22
1981	54	32	27	37	37	46	33	45	39.44
1982	42	9	13	24	19	27	7	9	20.33
1983	63	27	57	61	51	41	66	56	51.33
1984	47	47	64	55	56	60	73	80	59.89
1985	64	40	53	49	63	73	71	64	59.22
1986	63	47	56	61	77	81	62	74	66.11
1987	74	58	70	64	51	68	69	64	68.67
1988	44	33	20	18	13	48	32	49	33.78
1989	47	34	22	32	23	50	50	74	41.00
1990	84	76	57	67	63	68	65	48	68.56
1991	62	47	49	57	62	77	48	80	63.11
1992	58	32	32	34	12	23	30	21	31.44
1993	69	76	63	63	60	60	71	80	63.56
1994	54	33	36	40	9	17	14	17	60.00

3.2 저수율에 의한 가뭄빈도

표 3의 저수율 자료를 이용하여 Weibul-Method로 頻度처리한 결과는 다음 표 4와 같이 나타났다. 표 4에서 보는 바와 같이 貯水率頻度 역시 地域別로 상이하며, 전국적으로 본 10년 頻度 貯水率は 忠北의 15.5 % 에서 慶北의 21.3 % 사이인 것으로 나타났다. 道別 分布를 살펴보면 頻度年이 增加할 수록 京南과 全南지역의 貯水率이 급격히 떨어지는 것으로 보아 이제까지 겪은 體感가뭄과 잘 一致하고 있음을 알 수 있다. 또한 최근 가뭄으로서 '94년의 全南지역의 가뭄은 저수율이 약 17%를 기록하여 약 10년 빈도 가뭄에 해당하였다. 이는 대체적으로 10년 빈도 가뭄에 대해 설계한 저수지가 유역의 조건에 따라 고갈되거나 아니거나 한 상황이었음을 상기할때 수문학적인 가뭄의 평가 방법으로서 표 4의 저수율빈도 자료가 유용함을 알 수 있다.

표 4. 道別 저수율 빈도

(단위 : %)

빈도별	경 기	강 원	출 북	충 남	전 북	전 남	경 북	경 남
평 년	48.2	36.7	41.5	44.3	51.1	52.3	52.9	52.7
3 년	38.3	29.1	32.5	35.7	40.7	41.7	43.0	41.6
5 년	28.5	22.8	24.1	27.7	30.2	30.9	32.8	30.4
10 년	17.9	17.2	15.5	19.3	18.7	18.7	21.3	17.7
20 년	9.1	13.5	9.0	12.8	9.1	8.2	11.5	6.9
30 년	4.6	11.9	5.8	9.7	4.1	2.7	6.3	1.3

4. 요약 및 결론

가뭄을 평가할수 있는 여러가지 지표나 지수들이 국내외에 많이 발표되었으나 일반대중의 몰이해와 장기간의 자료축적이 되지 않아 우리 나라에서는 적용되지 못하였다. 본 연구는 이러한 문제를 해결하기 위해 기상학적인 가뭄으로서 비교적 장기간의 자료가 유효한 과우일수의 개념을 도입하였고 수문학적인 가뭄으로서 농지개량 조합 저수지의 저수율 자료를 가뭄평가의 기초자료로 사용하였다. 일별 강우량 자료를 기초로 측후소별 과우일수에 대한 초과확율을 계산하고 실제 가뭄년의 과우량에 대한 과우일수를 검증한 결과 다음과 같은 결론을 얻었으며, 또한 농지개량조합 저수지의 저수율 자료를 기초로 가뭄빈도를 계산한 결과도 얻었다.

(1) 과우량별 과우일수는 과우량이 70mm일때 실제 가뭄년의 가뭄지속 일수와 가장 잘 부합하였다.

(2) 최근의 가뭄으로서 '94년의 가뭄을 평가한 결과 과우량 70mm일때의 과우일수는 광주지역이 68일로서 약 30년 가뭄빈도에 해당하는 것으로 나타났다.

(3) 수문학적인 가뭄의 지표로서 저수지 연 최저 저수율 확률빈도는 전남과 경남지역이 낮은 것으로 나타났고 '94저수율과 실제빈도를 비교할때 실제 남부지역의 가뭄발생과 잘 일치하였다.

(4) 과우일수에 의한 기상학적 가뭄지수와 저수율에 의한 수문학적 가뭄지수는 상호 보완하여 사용해야하며 우리나라의 가뭄평가 방법으로서 일관되게 적용할 수 있을 것으로 판단된다.