

배추의 最適給水計劃 研究

A Study on the Optimal Irrigation Scheduling of Chinese cabbage

鄭 夏 禹* · 朴 商 鉉**
Chung, Ha Woo · Park, Sang Hyun

Summary

An approach to irrigation scheduling for chinese caggage is presented, and a crop yield response function to soil moisure is derived from irrigation experiments, based on a root-zone water balance method.

The paper concludes that crop yield can be estimated by allowable depletion and actual evapotranspiration in 3 cropping stages, and presents the optimal allowalbe depletion, irrigation frequency and the amount of irrigation water to get the maximum crop yield and optimal irrigation policy.

I. 緒 論

우리나라의 밭작물 중에서 김장배추는 食生活의 基本을 이루는 菜蔬로서, 일반 農家의 重要한 收益源이다. 그러나, 아직까지 作物 生育에 필요한 用水量의 대부분은 降雨에 의존하고 있고, 강우의 年중 분포가 고르지 못하기 때문에 安정적인 生産 公급을 기대하기 어려운 실정이다. 이러한 배추의 生産 기반을 개선하기 위하여는 적절한 灌溉施設의 설치와 이를 통한 합리적인 給水 計劃의 樹立이 要望된다.

포장의 給水計劃(irrigation scheduling)은 作物이 必要로하는 用水量과 給水時期를 決定하는 것으로서, 이는 作物의 品種과 土壤의 肥沃度 등이 일정한 상태에서 作物의 收穫量 증대

에 가장 중요한 수단이다. 給水 計劃의 궁극적인 目的은 收穫量을 最大化하는 것이며, 收穫量은 증발산量 또는 土壤水分의 函數로 표시될 수 있다.

포장의 給水에 관한 從來의 많은 研究들은 全 生育期間에 대한 總 증발산량과 土壤水分 및 收穫量의 相互 關係를 糾明하는데 重點을 두어 왔다.

이러한 研究 結果는 作物의 生育時期別 用水量의 分配 計劃과 적정 灌水點을 찾아내기에 어려운 점들이 있었다.

이에 따라, 본 研究는 김장배추의 收穫量을 最大化하는데 必要한 生育단계別 用水量과 灌水點의 土壤水分을 生育期別로 導出코자 한다. 본 研究는 1988年 農林水産部와 農業振興公社

* 서울대학교 農科大學

** 農業振興公社

의 支援에 의한 밭作物 消費水量 研究와 並行하여 實施되었다.

II. 基本 理論

포장의 給水計劃 方法은 根群域의 土壤水分 收支法(Rootzone water balance), 蒸發量法(Evaporation devices), 土壤水分 測定法(Soil based measurements) 및 作物生育 測定法(Plant based measurements) 등으로 분류된다. 이 중 根群域의 土壤水分收支法은 作物과 土壤 및 氣象 因子를 함께 고려하여 근군역의 토양 含水량이 지표면과 作物의 葉면으로 기화되는 물흐름이동에 관한 收支 관계식에 의하여 給수량을 결정하는 방법이다. 본 연구에서는 토양수분수지법을 이용하였으며 이의 기본식은 다음과 같다.

$$(IRR + ER)i = (AET + DN + RF + SMs - SMe); \quad (1)$$

여기서, IRR과 ER는 i 기간에 給수되는 용수량과 유효수량이며, AET, DR, RF는 이때 각각의 증발산량, 지하배수량, 지표유출량이며, SMs, SMe는 給수 初期 및 다음 給수 직전의 토양수분이다

作物의 根群域에서 土壤水分의 변화는 생육 단계별 뿌리의 분포영역과 토양수분 소비형태를 분석하여 결정할 수 있다. Borg(1986)는 작물 뿌리 성장에 관한 조사에서, 토양수분이 부족한 경우는 토양수분이 충분한 경우보다 작물 근군역이 15% 정도 더 깊게 분포했다고 하였다.

Stewart(1977)는 給수로 인한 增收량을 給수에 의한 증발산량의 관계를 식(2)와 같이 나타내었다.

$$1 - Y_a/Y_m = B(1 - ET_a/ET_m) \quad (2)$$

여기서 Y_a , Y_m 은 실제 생산량과 관개에 의한 최대생산량이며, ET_a , ET_m 은 실제 및 최대 생산량을 얻을 때의 증발산량이며, B는 作物별

생산량의 감소계수이다.

또한, Bos(1980)와 Jensen(1983)은 식(2)에 의하여 관개효율을 도출하였다.

$$RYE = (Y_a - Y_o)/(ET_a - ET_o) \quad (3)$$

여기서, RYE는 관개효율이며, Y_a 와 ET_a 는 관개구의 생산량과 증발산량이며, Y_o 와 ET_o 는 각각 非灌溉포장의 생산량과 증발산량이다.

이들의 收穫量 예측 方法은 生育時期別로 作物이 要求하는 給水 水準을 제시하고 있지 않기 때문에 灌溉 給수에 활용하기 어렵다. 또한 Hiller와 Clark(1981)는 한발일지수(a Stress Day Index)를 이용하여 土壤水分의 吸引力을 生育 段階別로 分析하였으나, 연속되는 生育 段階에서 볼 때, 先行段階의 토양수분이 부족한 경우 이의 影響을 나타내지는 못하였다.

이에 비하여, Enrique p. Veles(1984)는 생육 단계를 幼芽期, 成長期, 成熟期로 분류하여 토양수분과 수확량의 관계를 2차 曲面回歸式(Simplification of Quadratic Function)을 이용하여 식(4)와 같이 나타내었다.

$$Y = BO + B1*V + B2*F + B3*M + B11*V*V + B22*F*F + B33*M*M + B12*V*F + B23*F*M \quad (4)$$

여기서, Y는 收穫量이며, V, F, M은 幼芽期, 開花期, 成熟期の 生育段階別 土壤水分의 最低維持水準(Terminal Soil Moisture)을 나타낸다.

식(4)의 마지막 두 항인 $V*F$ 와 $F*M$ 은 각 생육기간의 상호관계를 나타내므로서, 기존의 수확량 예측기법들보다 비교적 발전된 방법인 것으로 판단된다.

III. 재료 및 方法

1. 시험 재료

본 試驗은 1988년 8월 23일부터 11월 15일까지 농촌진흥청 농업기술연구소의 試驗포에서 실시되었다. 시험 作物은 김장배추를 선택하였으며, 시험포장은 토양수분의 유지 계획에 따라

서, 14개의 處理區로 계획하여 Fig.1과 같이 배치하였다. 試驗用水는 지하수를 給水탱크에 저류하여 給水量을 계측한 후 물방울灌溉(Drip irrigation)施設로서 給水되었다. 시험포의 土壤은 Table-1과 같이 土粒의 平均直徑이 0.15mm인 中東續의 사양토(Loamy sand)이었다. 포장의 肥料는 標準施肥法에 의하여 生育초기와 중기에 복합비료(N:P:K:11:7:13)를 각각 35kg 씩 施肥하였다.

잠재증발산량과 降雨量의 자료는 水原測候所에서 측정된 기상자료를 이용하였다.

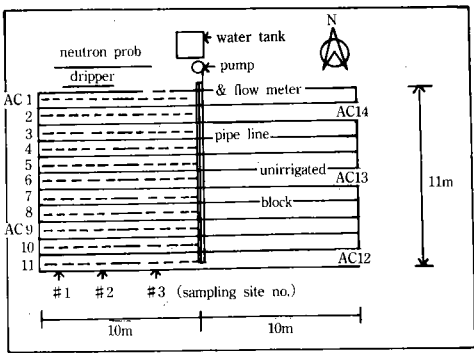


Fig. 1. Layout of experimental field.

Table-1. Soil characteristics in experimental block.

PH	Organic matter	sand	silt	clay	D50
4.8	0.86%	84%	10%	6%	0.15mm

2. 試驗 方法

試驗區別 토양수분의 維持水準은 有效水分의 20%, 40%, 60%, 80%로 분류하였으며, 관개용수는 토양수분이 위의 유지수준에 도달하였을 때 급수토록하였다.

生育段階別 배추의 뿌리 成長 과정은 10일 간격으로 根群域을 굴착하여 뿌리의 분포를 測定하였다. 또한 根群域의 土壤水分은 2일 간격으로 Neutron probe에 의하여 測定되었으며, 측정 범위는 表層으로부터 15cm, 30cm, 45cm, 60cm의 4개층으로 나누어 조사하였다.

2일 간격으로 調査된 土壤水分의 測定結果는 1일별로 증발산량을 보정하기 위하여 J.A Dyer (1983)가 개발한 식(5)과 식(6)을 활용하였다.

$$AET = \sum_{j=1}^n Rij(sj/cj) zj * PET \dots\dots\dots (5)$$

$$zj = 8(sj/cj) (1-sj/cj) \dots\dots\dots (6)$$

여기서, AET는 日別 증발산량이며, i는 生育段階數, j는 根群域의 층수, n는 근군역의 층수, R는 土壤吸收能力係數(Fig. 4 참조)이며, S는 有效水分, c는 포장用水量, z는 土壤水分의 水準에 따른 보정係數이다. PET는 日別 잠재증발산량으로서 본 연구에서는 수원측후소에서 측정된 A-Pan의 증발량의 실측값을 적용하였다.

배추의 수확량은 14개의 시험구를 각각 2개의 집구로 나누어 임의로 배추를 채취하여 포기당 중량을 측정하였으며 6회 반복으로 측정되었다. 또한 시험 결과의 분석 과정은 Fig. 3에 나타나 있다. 생산량과 생육 단계별 토양수분의 최저 유지 수준의 관계는 2次回歸式으로 나타내었으며, 최대생산량과 생육단계별 최적의 토양수분의 유지계획은 식(4)를 생육단계별 토양수분의 독립 변수로 미분한 3개의 연립방정식에 의하여 구하였다.

이에 따라, 생육 단계별 최적의 관개수심과 관개시기 및 관개효율을 구하였다.

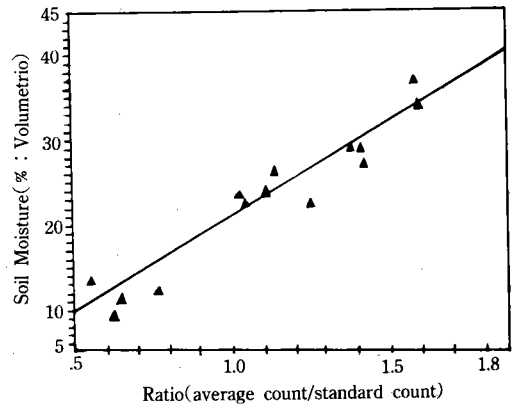


Fig. 2. Neutron probe(Hydroprobe) calibration.

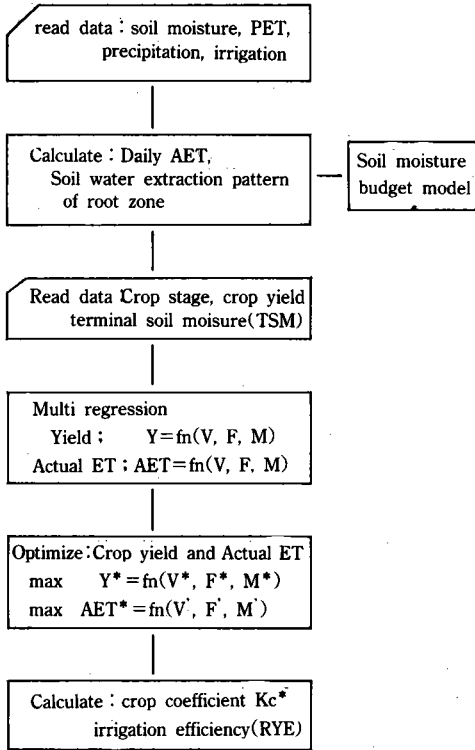


Fig. 3. Schematic of the Data flow of crop yields responses to terminal soil moisture and actual evapotranspiration .

IV. 結果 및 考察

1. 根群域의 土壤水分 消費形態

김장배추의 生育段階別 뿌리의 성장과 土壤水分 消費形態의 조사 결과는 Fig. 4와 같다. 여기서 충분히 給水된 試驗區(plot no. AC9)의 토양수분 흡수계수는 上層部에서 深層部으로 내려갈수록 선형적인 감소경향을 나타내고 있다. 그러나, 給水가 부족한 試驗區(plot no. AC 1, AC2, AC13)는 파종 이후 40일이 경과한 10月 初旬 이후부터 最深層인 4층의 토양수분의 흡수계수는 이의 上層인 3층에 비하여 상대적으로 큰 값을 나타내고 있으며, 이의 根群域 吸水形態는 *弓* 字形의 모양을 보이고 있다.

이러한 형태는 토양수분이 부족한 경우, 뿌리의 모관력이 최심부에 집중되기 때문인 것으로 판단된다.

2. 蒸發散量과 收穫量

관개수준에 따른 소비수량과 수확량의 관계는 다음과 같다.

즉 배추의 증발산량은 Fig. 5와 Fig. 9와 같이 생육기별 토양수분을 60%~73%로 유지한 AC-9의 試驗區는 큰 증발산량을 나타낸 반면, 降雨에만 의존한 Fig. 6의 試驗區(AC-13)는 成長後期에 작은 값을 나타내었다. 각 試驗區의 증발산량과 收穫量의 關係는 Fig. 7에 나타나듯이, 收穫量은 증발산량에 指數函數的으로 증가하였으며 最大 收穫量은 총증발산량이 200mm 정도일 때였다. 最大 증발산량과 生育段階別 최저 土壤水分 關係는 식(4)를 이용하여 다음과

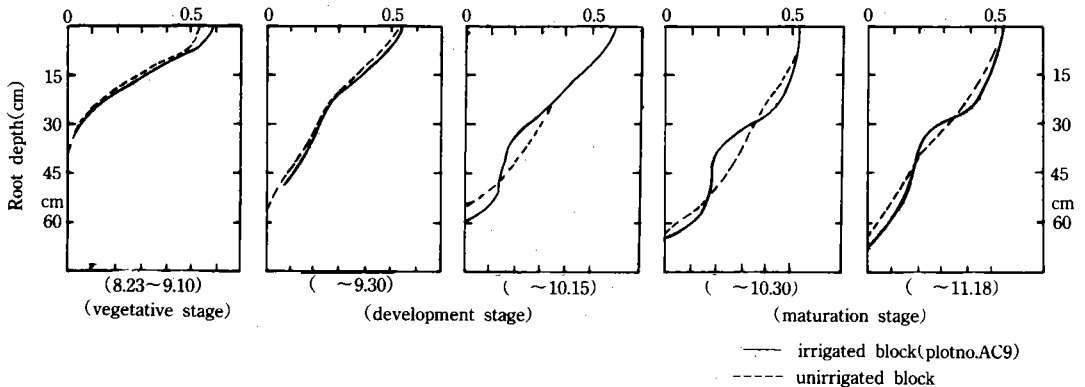


Fig. 4. Comparison of soil water extension patterns between irrigated and unirrigated plot.

같이 구하였다.

$$ET = -81.86 + 4.97V + 2.924F + 2.779M - 0.046V * V - 0.026F * F - 0.024M * M - 0.008V * F + 0.007 F * M \dots\dots\dots (7)$$

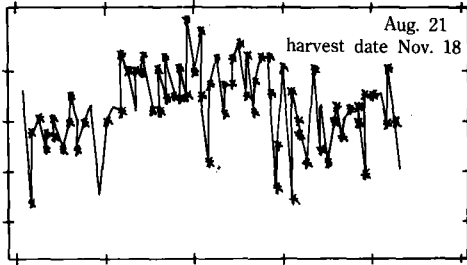


Fig. 5. AET at irrigated block(plot no. AC9).

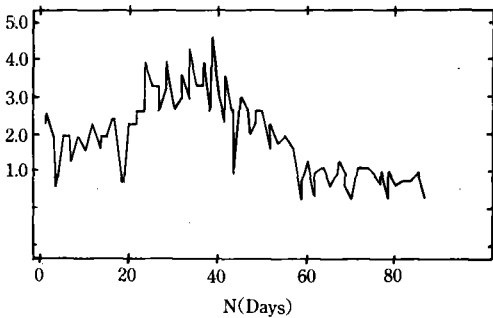


Fig. 6. AET at unirrigated block(plot no. AC 13).

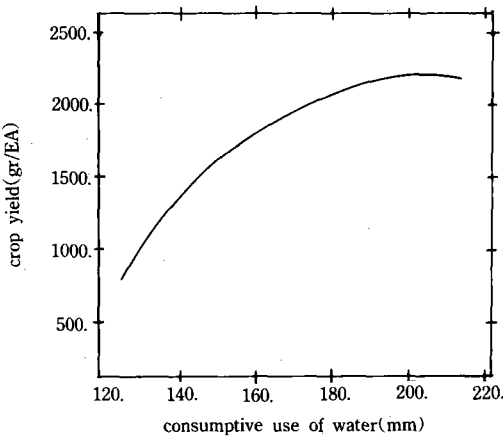


Fig. 7. Crop yields as function of consumptive use of water.

여기서, ET는 증발산량이며, 最大 증발산량을 나타내는 生育段階別 최저 土壤水分은 幼芽期에 49%, 成長期에 57%, 成熟期에 66%로 나타났으며, 이때 最大 총 증발산량은 216mm 이었다.

3. 土壤水分과 收穫量

각 試驗區別 收穫量과 生育段階別 給水點의 土壤水分 關係는 식(4)에 의하여 식(8)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Y = -3015 + 92.056V + 53.686F + 53.090M - 0.738V * V - 0.375 F * F - 0.503 M * M - 0.278 V * F + 0.060F * M \dots\dots\dots (8)$$

여기서, Y는 收穫량을 나타내며, 最大收穫량을 나타내는 최저土壤水分은 幼苗期에 52%, 成長期에 57%, 成熟期에 51%이었다.

식(7)과 식(8)의 수확량 관계식에 대하여, F-test에 의한 有意性 檢正 結果 1% 以下の 有意水準을 나타내었으며, 相關係數도 0.80 이상을 나타내었다. Fig. 8은 식(8)의 계산값과 測定값을 比較한 것이다.

식(8)의 수확량함수는 토양의 비옥도등에 따라 변화될 수 있으며, 이러한 변화를 보완하기 위하여 다음의 상대생산량함수(Relative yield function)를 산정하였다.

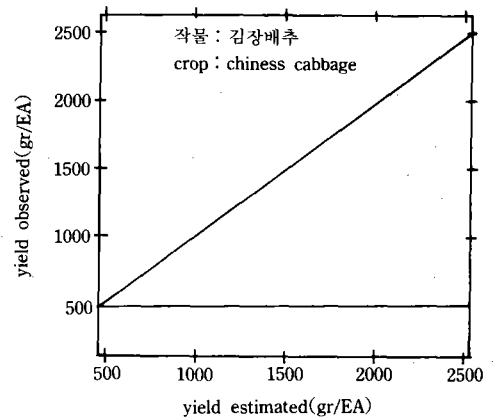


Fig. 8. Comparison of observed and estimated crop yields.

$$RY = Y/Y_{max} \dots \dots \dots (9)$$

여기서, RY는 상대생산량, Y는 생산량, Y_{max}는 최대생산량이다.

4. 灌溉給水の 最適化分析

식(7)과 식(8)에 의한 收穫量을 最大化하는 최저 土壤水分을 比較한 結果는 Table-2와 같다.

Fig. 9는 시험구 중 수확량이 가장 많았던 AC-9의 생육 시기별 토양수분의 유지결과를 나타낸 것이며, Fig. 10은 Table-2의 最適土壤水分과 이에 가장 잘 접근한 試驗區인 AC-9 (Fig. 4, Fig. 5 참조)의 根群域 土壤水分吸水形態를 적용하여 찾아낸 最適化 灌溉給水計劃의 分析 結果이다. 이때 灌溉 水深은 100mm이며, 給水回數는 3회이었으며 1회 給水深度는 20-40mm가 소요되었다. Fig. 11은 이러한 最適化 給水조건에서 잠재 증발산량을 실제증발산량의 比率로 나누어 算定된 作物係數를 구하였으며 이의 生育期別 作物係數는 生育초기의 0.6정도로부터 成熟期の 1.75 정도까지의 범위에 있었다.

Table-2. 最適 土壤水分의 比較.

區 分	土壤水分			最大 收穫量 gr/EA	증발 산량 mm
	最低維持水準(%)				
	幼苗期	成長期	成熟期		
최대수확량식(eq.8)	52	57	51	2367	210.3
증발산량식(eq.7)	49	57	66	2327	216.3

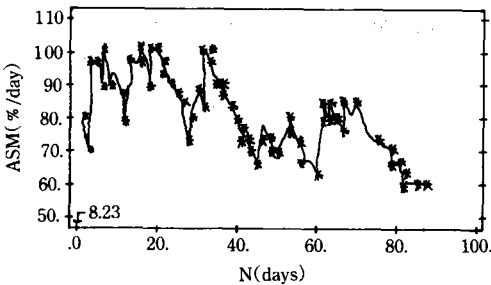


Fig. 9. Available soil moisture(%) at irrigated plot(plot no. Ac9).

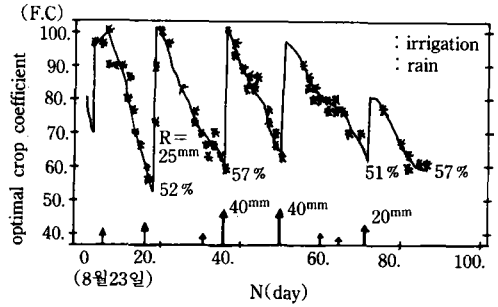


Fig. 10. Irrigation scheduling for maximum yield.

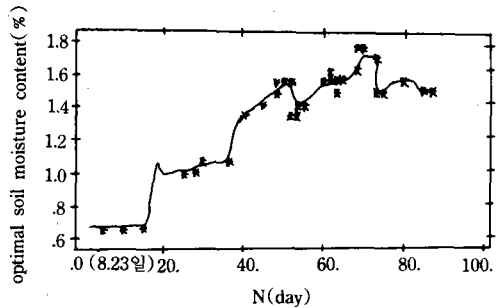


Fig. 11. Crop coefficient at optimal condition.

5. 灌溉效率

본 시험포장에서 관개효율은 Jensen(1983)과 Bos(1980)이 제안한 灌溉效率 결정방법을 이용하였다. 본 試驗포장에서 非灌溉區의 收穫量은 1400 gr/EA이며 消費水量은 140mm이므로 식(3)은 식(10)으로 바꿀 수 있다.

$$RYE = (v_i - 1400) / (ET_i - 140) \dots \dots \dots (10)$$

Fig. 12는 각 試驗區別 灌溉給水量(IRR)과 生産量(Y) 및 灌溉 生産效率(RYE)을 나타낸 것이다. 각 試驗區의 RYE는 灌溉水量이 100 mm 이상에서 20정도의 安定된 값을 나타내고 있으며, 이는 본 試驗포의 灌溉生産效率로 정할 수 있다. 또한 관개생산효율 20을 나타내는 최소의 관개수량 90mm는 Fig. 10의 최적화 분석에 의한 최적 관개수량 100mm와 잘 접근하고 있기 때문에 灌溉生産效率는 개괄적인 最適 용수량 산정에 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

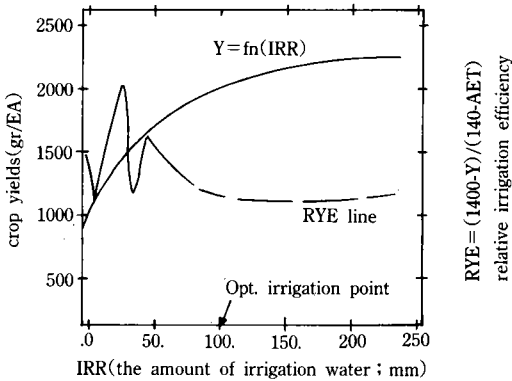


Fig. 12. Irrigation efficiency and crop yield.

V. 結論

수원지방의 사질양토에서 김장 배추를 대상으로 최대 수확량을 얻기 위한 최적토양수분조건을 규명하고 이에 따른 관개효율을 도출코저 시험한 연구 결과 다음의 결론을 얻게 되었다.

1. 배추의 근근역에서의 土壤水分消費形態는 灌溉區의 경우 深層部로 내려갈수록 吸水能力이 감소되었으나, 非灌溉區에서는 最深部에서 吸收力이 상당히 크게 존재하였다. (Fig. 4 참조)

2. 배추의 最低 土壤水分과 생육단계별 소비수량의 관계를 조사 분석한 결과는 식(7)과 같았으며, 소비수량을 최대화하는 토양수분의 최저유지수준은 유아기에 49%, 성장기에 57%, 성숙기에 66%로 각각 나타났다.

3. 배추의 생산량을 최대화하는 생육단계별 토양수분의 최저수준은 유아기에 52%, 성장기에 57%, 성숙기에 51%로 각각 나타났다.

4. 收穫량을 最大化시키는 灌溉給水計劃에 대하여 分析한 結果, 총 灌溉量은 Fig. 10과 같이 100mm이며, 1회 灌溉深度는 20-40mm 정도로서 灌溉回數는 3회로 나타났다.

5. 수확량을 최대화시키는 최적조건에서 생육단계별 作物係數는 Fig. 11에 나타나 있으며, 作物 成長에 따라 유아기의 0.65로부터 성숙기의 1.7까지 증가하였다.

6. 포장의 灌溉效率는 生産量을 고려한 灌溉

生産效率(RYE)로서 나타낼 수 있었으며, 灌溉量이 100mm이상에서 RYE는 20정도의 安定된 값을 나타내었다.

參 考 文 獻

1. 金始原, 金善柱.(1988), 발관개의 계획용수량 및 시설용량의 정립에 관한 연구. 한국농공학회지 제30권 4호. pp23
2. 徐孝德.(1986), 채소재배의 관수효과. 발작물에 대한 물의 효율적 이용에 관한 세미나 (7.8-11. 1986) FFTC/ASPAC. pp14-1.
3. 任正男.(1987), 기상자료에 의한 배추의 생육 시기별 토양수분 증발산량 및 收量 추정 모형에 관한 연구. 서울대학교 논문집.
4. 鄭夏禹외.(1988), 발 作物消費水量定立에 관한 연구. 서울대농대 농업기술연구소, 농업진흥공사.
5. 鄭夏禹, 金成俊 任正男.(1988), Penman식에서 보정계수(C)가 잠재증발산량에 미치는 효과. 한국농공학회지 제30권 3호. pp. 51.
6. Borg.(1986), Depth Development of roots with time ; An Experical Description. Transaction ASCE. pp. 195.
7. Cochran. Cox.(1985), Experimental Design 2nd edition. John Willey & Son Inc. pp. 363.
8. Daniel Hillel.(1983), Advances in Irrigation Vol. 2. Academic Press.
9. D.J.Bernardo, N.K. Whittlesy. K.E.Saxon et. al.(1988), Irrigation optimization under Water Supply. ASAE. Paper no. 85-2598
10. Enrique Palacios Velez.(1984), Construction and use of Responce function of Beans to Soil moisture. Sobretiro de Agrociencia Chapingo, Maxico.
11. FAO.(1974), Effective rainfall. FAO Irrigation and Drainage paper No. 25.
12. FAO.(1979), Yield responce to water. FAO

- Irrigation and Drainage paper No. 33.
13. Hamdy. A. Taha.(1982), Operations research. 4th edition Macmillan. pp.811.
 14. J.A Dyer etal.(1984), The Versatile Soil Moisture Budget Budget Version III. Research Branch Agriculture Canada.
 15. M.E.Jensen(1983), Design and operation of Farm Irrigation Systems, ASCE.
 16. E.A.Hiller and clark(1971), Stress Day Index to characterize effect of water stress on crop yields.
Transaction of ASCE 14-2, pp. 757-761.