

水稻成長 및 收量豫測을 위한 動的模型 SIMRIW의 適用

Application of Dynamic Model SIMRIW for Predicting the Growth and Yield of Rice

李 南 鎬*
Lee, Nam Ho

Summary

A simplified physiologically-based dynamic model, SIMRIW was selected for predicting the growth and yield of rice. The applicability of the model to the rice cultivars and weather conditions in the Republic of Korea was evaluated. Parameters of the model were calibrated using actual rice yields in Suweon region and an optimization scheme, Constrained Rosenbrock Algorithm. The simulated results from the calibrated model were in good agreement with the field data. The model with parameters calibrated for Suweon was applied to other five regions for the evaluation of transferability, but the simulated results fell short of satisfaction. However, the model is found to be applied to real-time prediction of the growth and yield of rice crop, which is believed to be useful for timely rice crop management, agricultural policy making, and optimal irrigation water management.

I. 緒 論

水稻와 環境과의 複雜한 相互關係에 대한 理解는 여러가지 側面에서 重要하다. 즉, 環境 與件의 變化가 水稻의 生育과 收穫에 미치는 影響을 把握하는 것은 農學分野 뿐만아니라 水稻의 適正 生育條件을 마련하기 위한 물管理組織을 效率的으로 運用해야 하는 農工學分野와

農業政策을 樹立하고 施行하는 分野에서도 重要한 일이라 思料된다. 이와 같은, 水稻와 環境과의 相互關係를 利用하여 水稻의 生育과 收穫量을 豫測할 수 있는 模型을 開發하고, 이의 시뮬레이션을 통해 氣象變化에 따른 水稻生育의 豫測을 통한 適切한 栽培管理를 가능하게 하고 水稻收穫量 豫測을 통한 計劃生産을 可能하게 하며, 또한 長短期 氣象豫報와 並行하면 經濟性

*安城産業大學校 農村開發學科

키워드 : 水稻, 收穫量, 模型, 葉面積指數, 收穫指數, 成長段階

있는 물管理를 위한 基礎資料를 提供할 것으로 期待된다.

水稻의 生育과 收穫量의 豫測에는 植物生理學에 根據를 둔 成長過程 指向的인 動的模型, 土壤 물收支模型,²⁾ 또는 經驗式 내지는 統計的 模型¹⁴⁾ 등이 利用되어 왔다.⁹⁾ 이 중에서도 計劃生産이나 最適 물管理 등에 重要한 役割을 할 수 있는 日別 또는 生育時期別로 生育過程을 시뮬레이션 할 수 있는 水稻生育過程에 대한 動的模型은 量的인 發展을 이루지 못하고 있다. McMennamy⁸⁾는 1980년에 필리핀 國際米作研究所의 實驗資料에 根據를 두고 日降雨量, 日蒸發計蒸發量, 日輻射量, 日最大氣溫, 日照時間 등을 入力資料로 使用하는 RICEMOD라는 水稻成長豫測模型을 開發하였고 1983년에는 이를 修正한 RICEMOD300⁹⁾을 開發하여 그 應用性을 檢討하였는데 熱帶地域에 適合한 것으로 報告되고 있다. Whisler^{12,13)}는 環境變數들과 作物變數들에 대한 RICEMOD의 銳敏度分析을 實施한 바 있다. Angus¹⁾는 水稻의 成長을 微分方程式으로 表現하고 溫度, 土壤, 물收支, 栽培管理 등의 影響因子들을 導入하였다. Horie⁵⁾는 水稻의 植物生理學的 및 物理的 成長過程을 單純化한 SIMRIW를 開發하여 Hokkaido 氣候條件에서 水稻成長 및 收穫量豫測을 試圖하였다. 또한 이 模型을 泰國, 필리핀, 美國, 이태리 등의 氣候條件에 대해 適用한 結果도 報告된 바 있다.⁴⁾ 다른 動的模型들이 많은 媒介變數와 模型의 檢定을 위해 複雜한 圃場實驗을 必要로 하는 反面에 SIMRIW는 水稻成長過程의 單純化에 의한 小數의 媒介變數와 入力資料를 利用할 수 있도록 그 使用을 普遍化하였다.

따라서 本 研究에서는 水稻의 生育 및 收穫量의 豫測이 容易한 生理學的 模型인 SIMRIW의 構成에 대해 살펴보고, 이를 우리나라의 氣候條件과 水稻品種의 實測收穫量資料를 利用하여 最適化 技法을 使用하여 模型의 媒介變數

를 補正하고, 模型의 適用性을 檢討하기 위해 年度別 및 地域的 適用可能性을 檢討하는데 그 目的이 있다.

II. 模型의 基本理論

水稻의 生育과 環境과의 反應關係를 單純化하여 이의 生育과 收穫量 豫測을 目的으로 한 SIMRIW(Simulation Model for Rice-Weather Relationship) 模型은 水稻의 收穫量(grain yield : Y)은 總乾物生産量(W_t)의 一部分이라는 基本原理에 그 基礎를 두고 있다.

$$Y = h \cdot W_t \dots\dots\dots(1)$$

여기서, h는 收穫指數(harvest index)이다. 水稻의 乾物生産量은 光合成에 利用되는 輻射量이나 水稻에 대해 吸收된 短波輻射量에 比例한다. 輻射量에서 乾物로의 變換率은 成熟期 중반까지는 一定하고 그 이후에는 曲線的으로 變化한다. 더구나 이 變換率은 여러 氣候環境 條件에 影響을 받지 않는 것으로 判明되었다.⁴⁾ 乾物生産量의 時間的 變化는 式(2)와 같이 表示된다.

$$\frac{dW_t}{dt} = C_s \cdot A_s \dots\dots\dots(2)$$

여기서, C_s : 短波輻射量에서 水稻乾物生産量으로의 變換率
 A_s : 單位時間當 吸收된 輻射量이다.

式(2)는 式(3)과 같이 表示할 수 있다.

$$\Delta W_t = C_s \cdot S_s \dots\dots\dots(3)$$

여기서, ΔW_t : 水稻乾物生産量의 日增加量
 S_s : 日吸收輻射量

媒介變數 h, C_s 와 S_s 는 環境, 生育期 및 成長狀態의 函數이다.

1. 作物成長(crop development)

水稻의 成長過程은 環境과 水稻의 遺傳子 形態에 의해 支配된다. 本 模型에서는 벼의 成長過程을 나타내기 위해 成長段階(Development Stage : DVS)라는 連續函數를 導入하였다. DVS는 發芽初期에는 그 값이 0.0, 出穗期에는 1.0이고 成熟期에는 2.0이다. 즉, DVS는 0에서 2사이의 값을 나타낸다. 任意的 水稻成長段階에서의 DVS는 成長率(Development Rate : DVR)을 式(4)와 같이 時間에 대해 積分함으로서 구할 수 있다.

$$DVS(t) = \sum_{i=1}^t DVR_i \dots\dots\dots(4)$$

여기서 DVS(t) : t일의 成長段階
 DVR_i : 出穗後 i일째의 成長段階

書間길이나 溫度는 DVR을 決定하는 重要한 因子들이다. 式(5)는 0 ≤ DVS ≤ 1인 境遇이다.

$$DVR = \frac{1}{G_v} \cdot \frac{1 - \exp\{B(L_0 - L_c)\}}{1 + \exp\{-A(T - T_h)\}} \dots(5)$$

여기서, T : 日平均氣溫
 L₀ : 書間길이
 G_v : 任意的 水稻品種의 出穗에 必要한 最少 日數
 L_c : 任意的 水稻品種의 成長에 必要한 限界 日數
 A, B, T_h : 媒介變數

2. 乾物生産量(dry matter production)

式(3)에 의해 乾物生産量을 計算하기 위해서는 水稻에 의해 吸水되는 輻射量(S_s)의 計算이 필요한데 式(6)을 使用한다.

$$S_s = S[1 - r - (1 - r_0)\exp\{-(1 - m)k_*F\}] \dots(6)$$

여기서, S : 太陽輻射量
 r : 作物의 反射率

r₀ : 裸地의 反射率
 m : 分散係數,
 k_{*} : 作物의 日短波輻射量의 吸收係數
 F : 葉面積指數(leaf area index : LAI)이다.

作物의 反射率 r은 다음 式으로 推定될 수 있다.

$$r = r_f - (r_f - r_0) \cdot \exp(-0.5F) \dots\dots\dots(7)$$

여기서, r_f : 作物의 草冠密度가 100%일 때의 反射率이다.

이의 計算을 위한 媒介變數의 값은
 k_{*} : 0.6, m : 0.25, r_f : 0.22, r₀ : 0.1이다.

葉面積指數의 成長은 주로 溫度(T)에 의해 支配를 받는 것으로 假定하였다. 出穗 直前까지 葉面積指數의 成長은 日平均氣溫의 函數로 定義되었는데 式(8)과 같다.

$$\frac{1}{F} \cdot \frac{dF}{dt} = R[1 - \exp\{-K_f(T - T_{cf})\}] \cdot \left\{1 - \left(\frac{F}{F_{as}}\right)^\eta\right\} \dots\dots\dots(8)$$

여기서, R : 葉面積指數의 最大相對成長率
 T_{cf} : 葉面積指數의 成長에 必要한 最少溫度
 F_{as} : 葉面積指數의 asymptotic值
 K_{f,η} : 媒介變數이다.

一般的으로 벼의 境遇, 葉面積指數는 出穗期에 最大이고 그 以後 成熟期에는 漸次的으로 減少하게 된다. 그러나 成熟過程에서의 葉面積指數의 變化는 水稻成長段階(DVS)만의 函數로 表示된다.

變換率 C_s는 成熟中期까지는 一定하고 그 以後에는 漸次的으로 減少하는데 아래 式으로 表現된다.

$$C_s = 1.95, \quad \text{for } 0 \leq DVS \leq 1$$

$$= 1.95 \cdot \frac{1+G}{1+G \cdot \exp\{(DVS-1)/\tau\}},$$

$$\text{for } 1 \leq DVS \leq 2 \quad \dots\dots\dots(9)$$

여기서, G, τ는 媒介變數인데 最適推定値는 G=0.001, τ=0.1이다.

3. 收穫指數

收穫指數 h는 벼의 小穗의 中性率(γ)와 DVS의 函數로 나타내는데 式(10)과 같다.

$$h = h_m(1-\gamma)[1-\exp\{-K_h(DVS-1.22)\}] \quad \dots(10)$$

여기서, h_m: 任意的 水稻品種의 潛在收穫指數

K_h: 媒介變數

III. 模型의 適用

1. 對象地域 및 使用資料

模型의 適用을 위한 研究對象地域은 模型의 運用에 필요한 氣象因子들이 測定되고 있는 測候所가 있는 地域 중에서 秋晴벼에 대한 試驗記錄이 存在하는 6個 地點을 選定하였다. 對象地區의 位置, 收穫量資料의 期間 및 測候所名 등은 Table-1과 같고 使用된 氣象因子는 日照時間, 日平均氣溫 및 日輻射量 등이었다. 選定된 地域은 京畿道의 水原, 江原道의 春川, 忠清北道의 淸州, 忠清南道의 瑞山, 全羅南道의 和順 및 慶尙北道의 安東이다. 水原地域에 대해서는 模型의 媒介變數 補正 및 年度別 適用性 檢討를 위해 1983~1991年 까지의 9個年의 收穫量資料¹⁷⁾를 利用하였다. 기타 5個 地域은 水原地域의 資料에 의해 補正된 媒介變數를 利用하여 模型의 地域의 適用性 檢討를 위해 1989年 收穫量 資料¹⁸⁾만을 利用하였다. 收穫量資

Table-1. Summary of data used for model calibration and validation

Regions	Yield Data	Station	Remarks
Suweon	1983~1991	Suweon	Cultivar
Chuncheon	1989	Chuncheon	-Chuchung
Chungju	1989	Chungju	
Seosan	1989	Seosan	
Hwasoon	1989	Kwangju	
Andong	1989	Andong	

料는 普通肥培 條件에서의 玄米重을 使用하였다.

2. 模型의 補正

가. 最適化 技法

SIMRIW 模型의 媒介變數 補正에는 最適化 技法을 使用하였다. 使用된 最適化 技法은 直接 探查法의 一種인 制約條件을 갖는 Constrained Rosenbrock 알고리즘⁷⁾이다. 이 技法은 非線形 이고 不等式인 制限條件을 갖는 多變量이고 非線形인 目的函數를 갖는 最適化問題의 最大값 또는 最少값을 發見하는 것인데, 變數가 制限된 條件하에서 最適化 問題의 解決에 效果인 것으로 證明된 循次的 探索技法이다. 本 研究에서는 補正이 필요한 6개의 媒介變數들(A, B, T_h, K_r, η, K_h)을 決定變數로 하고 이들의 變化範圍를 制約條件으로 使用하여 實測値와 計算値와의 RMS(Root Mean Square) 誤差가 最少化 되도록 目的函數를 定義하였다.

나. 媒介變數의 補正

水原地域의 1983~1988年間的 6個年의 水原 測候所 氣象資料와 作物試驗場의 收穫量 資料를 利用하여 最適化 技法을 使用하여 模型의 最適 媒介變數의 組合을 구하였다. 이들 媒介變數를 利用하여 收穫量을 豫測한 結果를 實測收穫量과 比較하면 Table-2와 같다. 實測收穫量에 대한 豫測結果의 絶對誤差는 0.03~0.51ton/ha이고, 相對誤差는 0.6~10.3%의 값을 보이고 RMS 誤差는 0.359ton/ha이다.

Table-2. Comparison of the simulated and actual rice yields in Suweon for 1983~1988 Unit : ton/ha

Year	Actual Yields	Simulated Yields	Absolute Error	Relative Error	RMS Error
1983	5.26	5.72	0.46	8.7%	0.359
1984	5.44	5.90	0.46	8.5	
1985	4.92	5.43	0.51	10.3	
1986	4.89	4.92	0.03	0.6	
1987	5.11	4.89	0.22	4.3	
1988	5.64	5.44	0.20	3.5	

3. 模型의 適用

가. 年度別 適用性 檢討

模型의 檢定을 위해 1983~1988年間の 水原地域의 氣象資料와 水稻收穫量資料로 부터 補正된 模型을 使用하여 1989년부터 1991년까지의 3年間の 氣象資料를 利用하여 每年의 水稻收穫量을 豫測하였다. 그 豫測收穫量을 實測收穫量과 比較하기 위해 絶對誤差, 相對誤差 및 RMS 誤差를 구하였는데 그 結果는 Table-3과 같다. 絶對誤差는 0.27~0.34ton/ha이고, 相對誤差는 4.8~10.0%, 그리고 RMS 誤差는 0.391ton/ha의 값을 보인다. 模型의 補正과 檢定過程에서 얻어진 1983년부터 1991년까지의 9年間の 收穫量 豫測結果를 實測收穫量과 比較하여 圖示한 結果는 Fig. 1, Fig. 2와 같다. Fig. 1은 實測收穫量과 豫測收穫量의 年度別 變化를 나타내고 있는데 두 曲線의 變化 形態가 거의 類似함을 보이고 있다. Fig. 2는 實測收穫量과 豫測收穫量을 XY 그래프에 圖示한 것인데 1:1 直選에서 크게 分散되지 않는 것으로 나타나고 있다.

다음은 본 模型에서 入力資料로 使用된 氣象因子인 平均氣溫, 日照時間의 年度別 變化가 收穫量에 미치는 影響을 定性的으로 分析하였다. 各 氣象因子들이 벼의 生育에 큰 影響을 미치는 期間을 平均氣溫은 7~8月, 日照時間은 7~9月로 假定하였다. 平均氣溫은 1983년부터 1991년까지 7~8月の 日平均氣溫을 구하고 이

Table-3. Comparison of the simulated and actual rice yields in Suweon for 1989~1991 Unit : ton/ha

Year	Actual Yields	Simulated Yields	Absolute Error	Relative Error	RMS Error
1989	5.66	5.39	0.27	4.8%	0.391
1990	4.85	4.51	0.34	7.0	
1991	5.22	4.70	0.52	10.0	

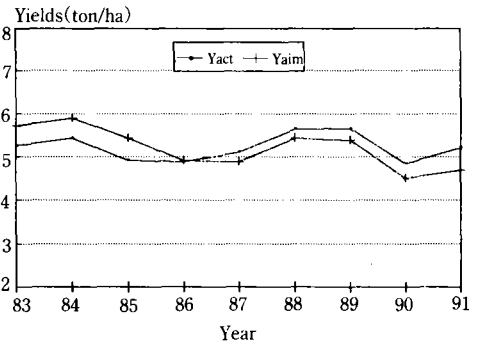


Fig. 1. Yearly fluctuation of the simulated and actual yields in Suweon for 1983~1988

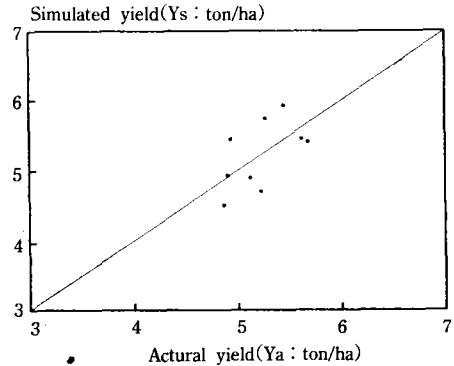


Fig. 2. X-Y relationship between simulated and actual yields in Suweon for 1983~1988

들을 9年間の 平均値와의 差異을 計算하였는데 그 結果는 Fig. 3과 같다. 日照時間은 3個月間の 合計로 年度別로 구하고 이들을 9年間の 平均値와의 差異를 계산하여 그 結果를 Fig. 4와

같이 圖示하였다. Fig. 3과 Fig. 4를 Fig. 1과 比較하면 類似한 變化形態를 보인다. 그러나 Fig. 1에서 보면 1985年은 1984年과 比較해서 減少되고 있는 반면 Fig. 4에서는 日照時間은 減少現象을, Fig. 3에서는 平均氣溫이 增加現象을 나타내고 있는 것으로 보아 溫度보다는 日照時間의 變化가 水稻生育에 더 影響을 미치는 것으로 推定된다.

나. 地域別 適用性 檢討

水源地域의 資料에 의해 補正된 模型을 使用하여 春川, 淸州, 和順, 安東, 瑞山의 1989年度 氣象資料를 利用하여 收穫量을 豫測하고 各 地域의 實測收穫量과를 比較함으로써 地域別로

媒介變數 補正의 必要性 與否를 檢討하였다. 豫測收穫量과 實測收穫量과를 比較한 結果는 Table-4와 같은데 絶對誤差는 水源地域을 제외하면 0.58~1.62ton/ha 相對誤差는 10.3~37.3% 이고, RMS 誤差는 0.88ton/ha로서 水源地域과 比較하면 큰 誤差값을 보이고 있다. 實測收穫量과 豫測收穫量을 XY 圖에 圖示하면 Fig. 5와 같은데 1:1 直線에서 分散된 現象을 보이고 있다. 이 結果에서 보면, 本 模型을 他 地域에 使用하기 위해서는 媒介變數의 補正이 반드시 善行되어야 할 것이다.

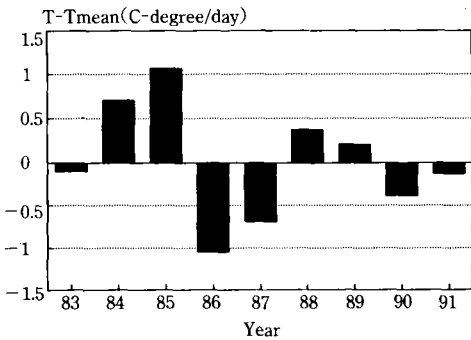


Fig. 3. Yearly fluctuation of the deviation of mean temperature in Suweon for 1983~1991

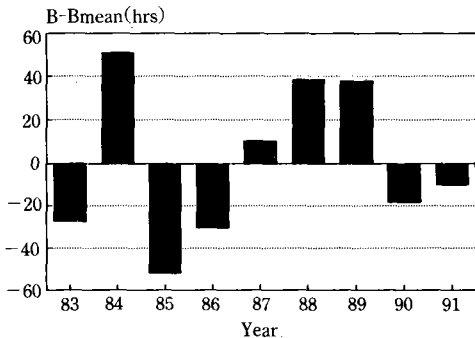


Fig. 4. Yearly fluctuation of the deviation of sunshine hours in Suweon for 1983~1991

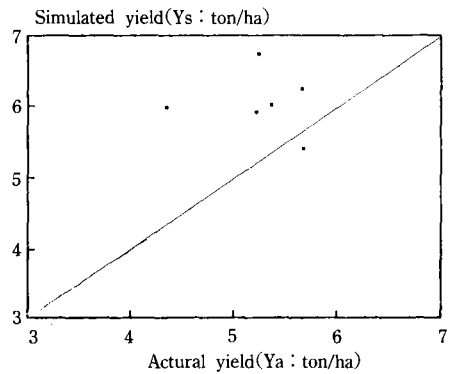


Fig. 5. X-Y relationship between simulated and actual yields in 6 regions for 1989

Table-4. Comparison of the simulated and actual rice yields in 6 regions for 1989

Year	Actual Yields	Simulated Yields	Absolute Error	Relative Error	Unit : ton/ha	
					RMS Error	
Suweon	5.66	5.39	0.27	4.8%	0.880	
Chuncheon	4.34	5.96	1.62	37.3		
Chungju	5.65	6.23	0.58	10.3		
Hwasoon	5.21	5.90	0.69	13.2		
Andong	5.35	6.00	0.65	12.1		
Seosan	5.23	6.73	1.50	28.7		

IV. 要約 및 結論

水稻의 生育 및 收穫量을 豫測할 수 있는 生理學的 模型인 SIMRIW를 우리나라의 氣候條件과 水稻品種에 適用하여 模型의 年度別 및 地域適用可能性을 檢討한 結果는 다음과 같다.

1. 模型의 媒介變數는 最適化 技法인 Constrained Rosenbrock 알고리즘을 利用하여 補正을 實施하였다.

2. 水源地方을 對象으로 實施된 年度別 檢定을 위해, 實測收穫量과 豫測收穫量을 比較한 結果 絶對誤差는 0.27~0.34ton/ha, 相對誤差는 4.8~10.0%, RMS 誤差는 0.391ton/ha로서 比較的 좋은 結果를 보였다.

3. 5個 地域을 對象으로 實施된 地域適用性 檢定을 위해, 實測收穫量과 豫測收穫量을 比較한 結果, 絶對誤差는 0.58~1.62ton/ha, 相對誤差는 10.3~37.3%, RMS 誤차가 0.88ton/ha로서 差異를 보였다.

4. 本 模型의 適用性을 檢討한 結果, 水稻의 生育 및 收穫量에 使用 可能한 것으로 判斷되고, 他 地域에의 適用을 위해서는 長期間의 實測資料를 利用한 媒介變數의 補正이 必要한 것으로 判斷된다.

參 考 文 獻

1. Angus, J. F. and H. G. Zandstra, 1980, Climatic Factors and the Modeling of Rice Growth and Yield, Proc. of a Symposium on the Agrometeorology of the Rice Crop, WMO and IRRI, PP. 189-199.
2. Bolton, F. R. and H. G. Zandstra, 1981, A Soil Moisture Based Yield Model of Wetland Rainfed Rice, IRRI Research Paper Series No. 62, PP. 10.
3. Doorenbos, J., et al., 1979, Yield Response to Water, FAO Irr. & Dra. Paper No. 33,

PP. 125-130.

4. Horie, T., 1987, A Model for Evaluating Climatic Productivity and Water Balance of Irrigated Rice and Its Application to Southeast Asia, Southeast Asian Studies, Vol. 25, No. 1, PP. 62-74.
5. Horie, T., 1987, Dynamic Models of Evaluating and Predicting the Growth and Yield of Rice and Sunflower Crops from Weather, Technical Bulletin, No. 99, ASPAC, PP. 13.
6. Huke, R. E., 1985, FARIDPUR : A Computer-Assisted Instruction Model for Rainfed Lowland Rice, IRRI Research Paper Series No. 104, IRRI, PP. 14.
7. Kuester, J. L., and J. H. Mize, 1973, Optimization Techniques with FORTRAN, McGRAW-HILL BOOK CO., PP. 386-398.
8. McMennamy, J. A., 1980, Dynamic Simulation of Irrigated Rice Crop Growth and Yield, Proc. of a Symposium on the Agrometeorology of the Rice Crop, PP. 213-221.
9. McMennamy, J. A. and J. C. O'Toole, 1983, RICEMOD : A Physiologically Based Rice Growth and Yield Model, IRRI Research Paper Series, No. 87, IRRI, PP. 33.
10. Penning de Vries, 1987, Simulation of Ecophysiological Processes of Growth of Several Annual Crops, PP. 350.
11. Sinclair, T. R. and T. Horie, 1989, Leaf Nitrogen, Photosynthesis and Crop Radiation Use Efficiency : A Review, Crop Science, Vol. 29, No. 1, PP. 90-98.
12. Whisler, F. D., 1983, Sensitivity Tests of the Environmental Variables in RICEMOD, IRRI Research Paper Series, No. 88, IRRI, PP. 11.
13. Whisler, F. D., 1983, Sensitivity Tests of the Crop Variables in RICEMOD, IRRI Re-

- search Paper Series, No. 89, IRRI. PP. 9.
14. Yao, A. Y. and S. K. Leduc, 1980, An Analogue for Estimating Rice Yield in China, Proc. of a Symposium on the Agrometeorology of the Rice Crop, WMO and IRRI, PP. 239-247.
 15. 李殷雄, 1988, 水稻作, 鄉文社, PP. 354.
 16. 朴鍾聲 外, 1983, 作物生理學, 鄉文社, PP. 437.
 17. 作物試驗場, 1983-1991, 試驗報告書, 農村振興廳.
 18. 作物試驗場, 1989, 地方適應連絡試驗報告書, 農村振興廳.