

水稻 圃場의 實蒸發散量 推定에 關한 研究

李浚雨* · 金柄瓊**

Estimation of Actual Evapotranspiration over Paddy Rice Field

Byun Woo Lee* and Byung Chan Kim **

ABSTRACT: Actual evapotranspiration was measured over rice paddy field by Bowen ratio heat balance method and based on this, investigated was the reliability of actual evapotranspiration estimation from Class-A Pan and small pan evaporation and reference evapotranspiration calculated by modified Penman-Monteith model.

Crop coefficients based on Class-A Pan and small pan evaporation and reference evapotranspiration by modified Penman-Monteith model were averaged to be 1.57, 1.10 and 1.49 over the whole rice growing season, respectively. Their respective coefficients of variation were 28.7, 22.7 and 12.8 percent, respectively.

Crop coefficient based on modified Penman-Monteith model varied in good agreement with the trend of leaf area development, being greatest around heading stage.

蒸發散量의 正確한 測定 및 測定資料는 ① 廣地域의 水資源 評價 및 水利利用計劃, ② 農耕地의 水管理計劃, ③ 氣候 혹은 環境構成因子로서의 水의 動態 解析, ④ 作物의 水消費特性 또는 水分生理의 解析, ⑤ 作物의 生理 活力 monitoring 등에 基礎資料로서 매우 중요하다.⁸⁾ 특히 벼의 경우는 湛水狀態에서 栽培되어 灌溉用水의 安定的 供給 確保는 벼 농사의 成敗를 左右하는 가장 중요한 要因인데, 벼의 用水量을 決定하는 要素中 蒸發散量은 그 相對的인 比重 뿐만이 아니라 圃場의 微氣象的 要因 및 作物의 生育狀態와 密接한 關聯이 있어 正確하게 算定하는데 어려움이 있다. 水稻圃場의 用水確保 및 管理計劃에 있어서 正確한 實際 蒸發散量 豫測技法의 確立은 매우 중요하다. 그런데 우리나라에서의 이에 關한 研究는 아직 미흡한 실정이다.^{9,6)}

蒸發散量을 직접 測定하는 데는 lysimeter가 標準的으로 利用되고 있다. 이 方法은 實際蒸發散量을 實測하는 가장 좋은 方法이며 또한 다른 蒸發散量 測定方法의 calibration에 標準으로 利用되기는 하나 設置 및 管理에 많은 費用과 노력이 所要되어 灌溉計劃의 수립 등에 實用的으로 利用되지 못하고 주

로 研究目的으로 利用되고 있다. 圃場의 實際蒸發散量을 lysimeter에 의한 方法과 같이 直接 測定하지는 않지만 圃場의 微氣象觀測에 의하여 實際 蒸發散量을 推定하는 Bowen Ratio-Energy Balance (BREB) 方法이 簡便성과 推定의 信賴性으로 인하여 최근 實際 蒸發散量의 推定에 널리 利用되며 또한 다른 蒸發散 模型을 Calibration 하는데도 자주 利用되고 있다.^{7, 2, 13, 14)} Tanner,¹⁵⁾ Pruitt & Lawrence¹⁰⁾ 등은 移流가 없는 條件下에서 BREB 方法에 의한 實際 蒸發散量 推定値와 lysimeter에 의한 測定値와 잘 一致한다고 하였으며, 또한 Fritschen⁴⁾은 lysimeter에 대하여 BREB 模型을 calibration하여 圃場에서 適用하여 본 結果 強한 現熱 移流가 있는 狀態에서도 效果的이라고 報告하였으나, Blad and Rosenberg¹¹⁾는 局地的인 現熱移流가 있는 狀態에서는 lysimeter에 의한 實測値 보다 낮게 推定이 된다고 하였는데, 그 이유는 BREB 方法에서 假定한 熱傳達係數와 水蒸氣傳達係數의 相似關係가 맞지 않기 때문이라고 하였다. 위에서 言及한 BREB 方法 또한 全國 單位와 같이 넓은 地域을 對象으로 하거나 實際 灌溉計劃 등에 直接 利用하기

* 서울大 農大 農學科(Dept. of Agronomy, Seoul Nat'l Univ, Suwon 441-744, Korea.)

** 中央氣象臺 水源測候所(Suwon Weather Forecasting Office, Korea Meteorological Service, Suwon 441-100, Korea.) <90, 9, 4 接受>

에는 費用이 많이 들므로 實用的이지 못하다. 따라서 基準蒸發散量에 作物係數를 곱하여 實際蒸發散량을 推定하는 方法⁶⁾이 널리 利用되고 있는데, 基準蒸發散量으로 Class A Pan 에 의한 蒸發散量, Braney-Criddle 모델, Penman-Monteith 모델 등에 의하여 氣象要素로부터 計算한 蒸發散量 등을 많이 이용하고 있다.^{2,3,5,6)} Penman-Monteith 모델은 Penman 모델에 空氣力學的 抵抗項을 導入한 것으로 基準蒸發散량의 推定에 가장 많이 利用되고 있다.^{3,5)}

本 研究은 水稻圃場에서의 實際蒸發散량을 BREB 方法에 의하여 測定하고 이를 基礎로 하여 Class A Pan 蒸發量, 小型蒸發計 蒸發散量 및 Penman-Monteith 모델에 의해서 計算된 基準蒸發量으로부터 水稻圃場的 實際蒸發散량의 推定方法을 確立함과 同時에 그 信賴性을 檢討하기 위하여 遂行되었다.

材料 및 方法

本 研究은 水原測候所 水稻圃場에서 統一系 品種인 서광벼를 供試하여 1987年 5月 25日부터 同年 9月 20日에 걸쳐 遂行되었다. 水稻圃場은 東西 40m 南北 60m의 넓이로서 모든 測器는 主風向과 吹走距離(fetch)를 考慮하여 圃場中央部에서 北西쪽으로 치우치게 設置하였다. 實際蒸發散量(Actual Evapotranspiration: AET)은 BEARN System(Bilan D'Énergie Automatique Regionale Numerique, I.N.R.A.)을 利用하여 보웬비-열수지법에 의하여 測定하였으며 다음 式으로부터 計算하였다.

$$AET = (R_n - G) / L(1 - \beta)$$

여기서 R_n 은 純輻射量(W/m^2), G 는 地中熱流量(W/m^2), β 는 Bowen比($\beta = r\partial T/\partial e$, ∂T 와 ∂e 는 각각 溫度 및 水蒸氣壓 勾配, r 는 乾濕計常數), L 은 蒸發潛熱(약 $2440 KJ/kg$)이다.

이 시스템은 4組의 通風乾濕計, 純輻射計, 地中熱流計 및 micro-processing unit로 構成되어 있는데, 通風乾濕計는 群落上 10cm와 55cm에 設置되었으며 센서의 誤差를 없애기 위하여 每 2分마다 上下 通風乾濕計의 位置가 交換되도록 되어 있다. 純輻射量은 센서를 群落上 2m에 設置하여 測定하였으며, 地中熱流量은 熱流板을 地中 0.5cm에 埋

設하여 測定하였다.

大型(Class A pan) 및 小型蒸發計(직경 20cm) 蒸發散量은 水原測候所 露場의 잔디위에서 測定되었고, 基準蒸發散量(Reference Evapotranspiration: RET)은 水原測候所의 綜觀氣象觀測資料를 利用하여 修正된 Penman-Monteith 모델로 다음과 같이 計算하였다.

$$RET = \{ \Delta \langle (1 - \alpha) R_s - L_n \rangle + r \langle (e_s - e_a) / r_a \rangle \} / (\Delta + r)$$

여기서 Δ 는 飽和水蒸氣壓의 溫度에 따른 勾配로서 Titten의 式¹⁴⁾을 溫度에 대하여 微分한 式으로부터 計算하였으며, r 는 乾濕計常數($mb/^\circ C$), e_s , e_a 는 各各 現在 大氣溫度에서의 飽和蒸氣壓과 實際蒸氣壓, α 는 albedo로서 0.25, R_s , L_n 및 r_a 는 各各 日射量, 純長波輻射量 및 空氣力學的 抵抗으로서 Doorenbos와 Pruitt²⁾가 提案한 式을 利用하여 다음과 같이 計算하였다.

$$R_s = R_o(0.18 + 0.05s)$$

$$L_n = (0.1 + 0.9s)(0.56 - 0.079\sqrt{e_a})\sigma(t + 273)^4$$

$$1/r_a = 0.27 + 0.233u$$

여기서 R_o 는 大氣圈 밖에서의 日射量(W/m^2), s 는 日照率, e_a 는 大蒸氣壓, σ 는 Stephan-Boltzman 常數($4.8995 \times 10^{-3} J/m^2/day/K^4$), u 는 2 m 風速(m/sec)이다.

結果 및 考察

1. 에너지 收支項의 生育時期에 따른 變化

水稻의 群落上에 入射되는 太陽에너지의 各種 熱傳達系로의 配分은 水稻群落의 微氣候를 決定하는 重要한 要因이다.

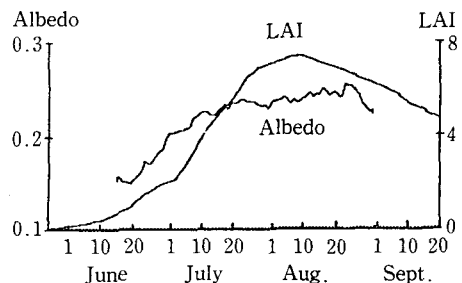


Fig. 1. Seasonal changes in albedo and leaf area index(LAI) evaluated over Seogwang rice.

作物群落上的輻射에너지收支에 중요한 要因인 albedo는 葉面積의 增加와 密接한 關聯이 있는데, 그림 1에서 보는 바와 같이 水面이 완전히 덮으로 덮이지 않은 生育初期(6월 10일경)부터 잎이 水面을 완전히 덮어 閉鎖群落在 形成되는 生育中期(7월 10일경; LAI = 4)까지는 葉面積의 增加와 더불어 albedo가 約 0.15에서 0.22까지 直線的으로 增加

되며, 그 以後는 緩慢하게 增加하여 出穗期경에 0.25로 최대치에 달하였다. 한편 出穗 이후 albedo는 점차 減少하였는데 이는 出穗期 이후 잎의 老化和 枯死에 따른 葉面積의 減少와 關聯이 있는 것으로 判斷된다.

그림 2는 生育期間中 主要時期에 있어서 비교적 맑은 날을 택하여 水稻群落에서의 太陽에너지와 熱

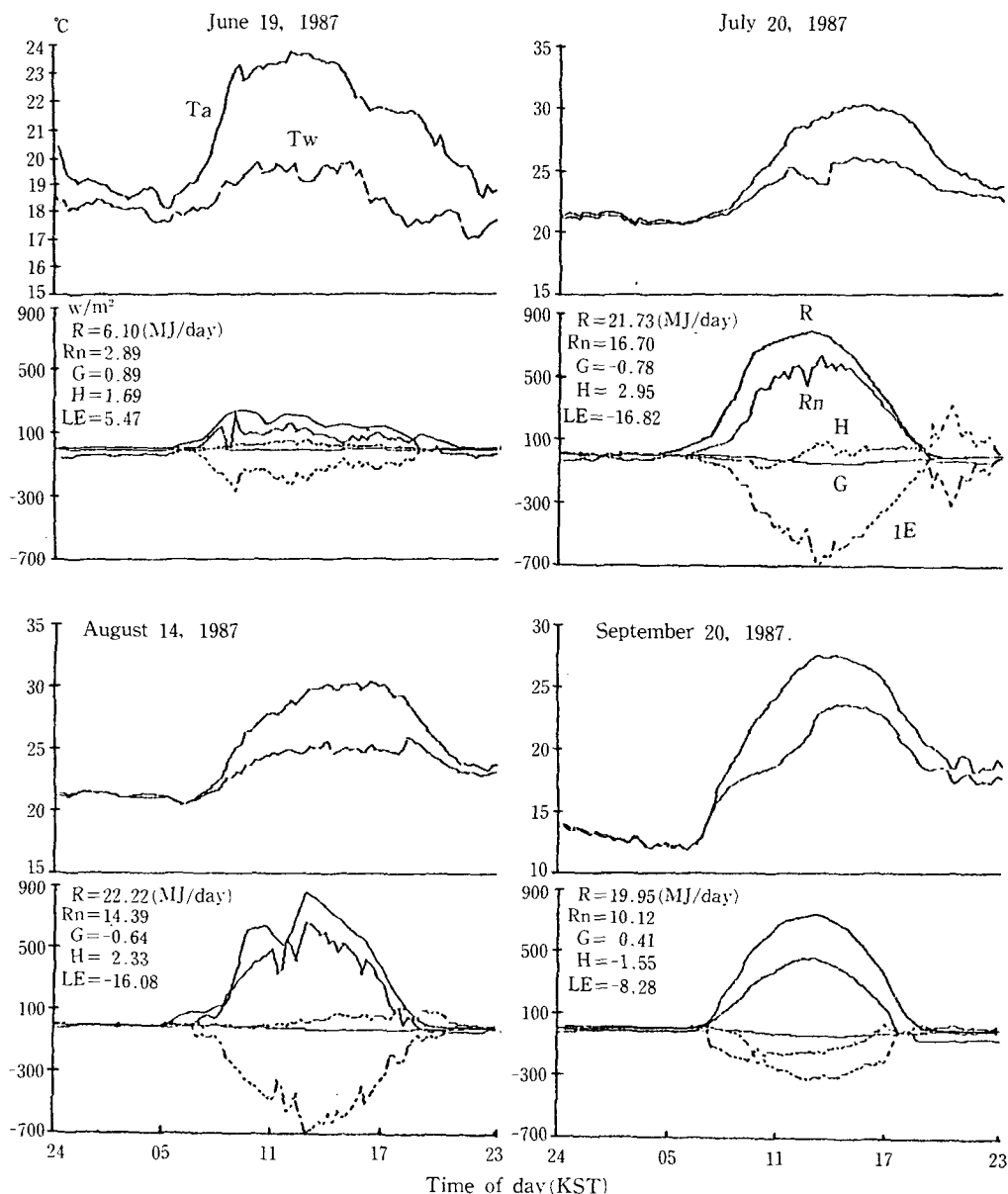


Fig. 2. Diurnal march of the energy balance components evaluated over Seogwang rice. (R=net radiation; G=ground heat flux; H=sensible heat flux; LE=latent heat flux; ;). (Ta=air temperature; Tw=wet air temperature).

의 配分 및 乾-濕球溫度의 日中變化를 나타낸 것이
다.

水稻 群落上에 入射된 太陽에너지가 純輻射量으로 配分되는 量은 日射量과 密接한 關係가 있으나, 그 配分率(R_n/R)은 生育時期에 따라서 다른데 날씨가 흐려 직접 비교가 곤란한 6월 19일의 47%를 제외하면 7월 20일은 77%, 8월 14일은 65%, 9월 20일은 51%로 生育이 進展됨에 따라서 配分率이 減少하였다. 이와 같이 生育이 進展됨에 따라 配分率이 減少하는 것은 群落의 繁茂 및 太陽高度의 低下에 따른 albedo의 增加가 중요한 要因인 것으로 判斷된다. 한편 純輻射量의 各 熱收支項으로의 配分을 보면, 生育時期에 따라서 潛熱 傳達로 82~189%, 現熱 傳達로 -58~15%, 地中低熱로 -4~5% 配分되어 純輻射量中 潛熱 傳達에 利用되는 比率이 가장 컸다. 그런데 9월 20일을 除外하고는 潛熱 傳達量이 純輻射量보다 많았는데 이는 飽差를 감안하여 불 때 移流에 의한 影響으로 날씨가 흐렸던 6월 19일이 가장 컸으며 또한 日射가 가장 강한 正午경에 가장 컸다.

2. 蒸發散量의 生育時期에 따른 變化

測定期間中の 날씨는 6월에는 비교적 맑은 날이 많았으나 7월以後는 흐리고 비오는 날이 많았다.

그림 3에서 보면 全測定期間에 걸쳐서 大型蒸發計 蒸發量은 0.1~6.5mm/day, 小型蒸發計 蒸發量은 0.1~8.5mm/day에서 日射量과 密接한 關係를 가지고 큰 變異를 나타내었다. 한편 AET는 0.1~8mm의 範圍에서 變異를 나타내었는데 AET의 變異는 日射量과 純輻射量의 變異와 매우 密接한 關係를 보였다. 生育時期別로 맑은 날의 최대 AET만을 비교해 보면 分蘖初期의 6mm/day 内外에서 最高分蘖期부터 幼穗形成期の 8mm/day 内外로 增加하며 그以後 다시 減少하여 生育後期에는 7mm/day 内外의 AET를 보였다.

3. 實際蒸發散量과 蒸發計 및 基準蒸發量과의 關係

蒸發計 蒸發散量 및 氣象要素로부터 Penman-Monteith 式을 適用하여 計算한 基準蒸發散量(RET)으로부터 AET의 推定 可能性을 檢討하기 위하여 AET와 小型, 大型蒸發計 蒸發散量 및 RET와의 回歸式을 구한 것이 그림 4이다.

AET와 大型蒸發計, 小型蒸發計 蒸發散量 및 R-

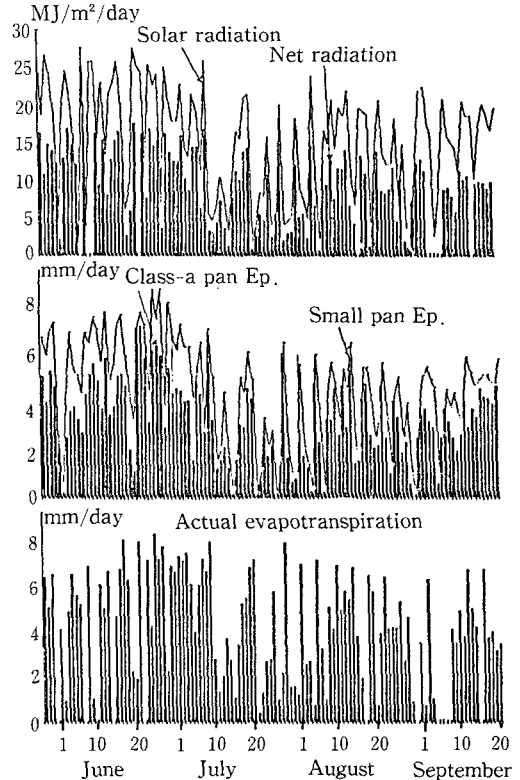


Fig. 3. Seasonal variations in actual evapotranspiration measured by Bowen ratio-heat balance method, pan evaporations, solar and net radiation during the period from 28 May to 20 September, 1987.

ET와는 相關係數가 各各 0.76, 0.79 및 0.914로서 高度의 有意性을 나타내었으나, 小型 및 大型蒸發計 蒸發散量의 變異가 AET變異를 說明해 주는 部分은 各各 62% 및 58%로 낮아 이로부터 AET를 推定하는데는 誤差가 클 것으로 判斷되었다. 그러나 RET의 경우는 대략 10%程度의 誤差 範圍內에서 AET를 推定할 수 있는 것으로 나타나 實用 可能性을 示唆하였다.

蒸發散比(R)를 露場의 小型蒸發計 蒸發量(ET_s) 및 大型蒸發計 蒸發量(ET_L)과 AET를 이용하여 다음과 같이 구하였다.

$$R = ET_s / AET \text{ or } ET_L / AET$$

또한 作物係數(K_c)를 Penman-Monteith 모델에 의한 蒸發量을 基準蒸發量(RET)으로 하여 다음과 같이 구하였다.

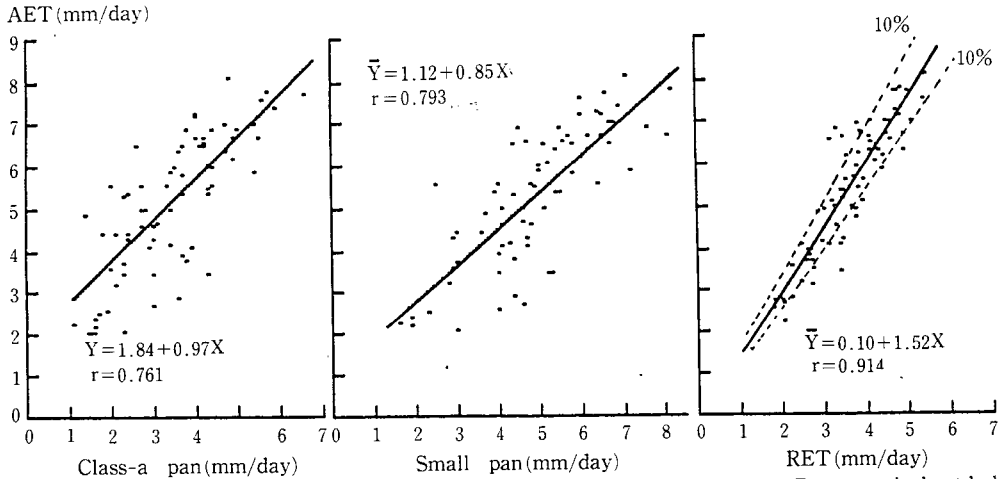


Fig. 4. Comparison of actual evapotranspiration (AET) from rice field measured by Bowen ratio-heat balance method with pan evaporation and reference evapotranspiration (RET) calculated by the Penman-Monteith model.

$$Kc = RET / AET$$

作物係數는 實際 蒸發散量을 間接的으로 구하는데 世界的으로 널리 이용되고 있는데, Kc를 計算할 때 利用되는 RET는 水分不足이 없고 群落이 完全히 形成이 되어 生育이 旺盛한 草長 8~15cm의 禾本과 牧草로부터의 蒸發散量을 말하는데^{2,3)} Deorenbos and Pruitt²⁾는 基準蒸發量으로서 改良 Penman法, 日射法, Blaney-Criddle法, Class A Pan에 의한 蒸發量을 利用할 것을 提案하였다.

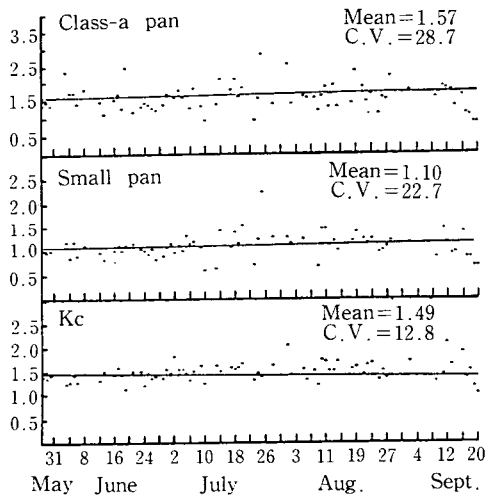


Fig. 5. Seasonal variation in evapotranspiration ratios based on class-a and small pan, and crop coefficient (Kc) calculated by the Penman-Monteith model.

그림 5는 蒸發散比와 作物係數를 全生育期間에 걸쳐서 日別 값을 나타낸 것이다. 大型蒸發計와 小型蒸發計에 의한 蒸發散比는 全生育期間 平均이 各各 1.57, 1.10이며 變異係數는 各各 28.7%, 22.7%로서 變異係數가 매우 크며 平均値로부터 散布程度는 生育時期에 따라 큰 差異가 없었다. 따라서 蒸發散比에 의해서 實際 蒸發散量을 推定하는데는 誤差가 커서 實用性이 적은 것으로 判斷되었다.

한편 Penman-Monteith 모델에 의한 蒸發散量을 RET로 하여 계산한 Kc의 全生育期間 平均値는 1.49이며 그 變異係數는 12.8%로 蒸發散比의 變異係數보다 월등히 낮을 뿐만 아니라 Kc는 生育의

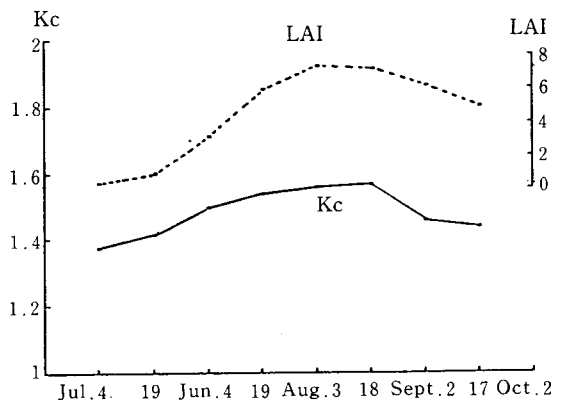


Fig. 6. Seasonal change in leaf area index (LAI) and crop coefficient (Kc) based on Panman-Monteith model. Crop coefficients are the values averaged over 15 days centering on the date in the figure.

進展과 密接한 關係를 가지고 變하는 것으로 보여 生育時期에 따라 作物係數를 計算하여 이를 AET의 推定에 利用하면 비교적 正確하게 AET를 推定할 수 있는 것으로 判斷되었다.

그림 6은 Kc를 15日間の 平均을 구하여 葉面積指數와 함께 나타낸 것이다. Kc는 葉面積指數와 密接한 關係를 가지고 變하여, 葉面積指數가 0.5 미만인 6월 4일경에는 약 1.35정도였으며 葉面積增加와 함께 增加하여 葉面積指數 7.5精度에 달한 出穗期경에 1.55精度를 頂點으로 하여 그 以後 급격히 減少하였다.

結 論

이상의 結果들을 綜合하여 볼 때 水稻 圃場의 AET는 日射量에 가장 크게 影響을 받았으며 AET를 間接 推定할 경우 綜觀氣象觀測資料를 利用하여 Penman-Monteith 모델로 計算한 蒸發散量을 RET로 이용하는 것이 蒸發計 蒸發散量을 RET로 이용하는 것보다 推定の 精度가 더욱 높은 것으로 判斷되었다.

本 實驗에서 얻어진 AET와 RET간의 回歸式 $AET = 0.1 + 1.52 RET (R^2 = 0.84)$ 를 利用할 경우 水稻栽培 全期間을 통해서 약 10% 誤差範圍內에서 推定할 수 있는 것으로 判斷되는데, 더욱 推定の 精度를 높이기 위해서는 生育時期別로 作物係數를 算定하여 이를 利用하는 것이 바람직할 것으로 사료된다. 그러나 本 實驗의 結果들을 1年의 實驗結果로서 보다 長期間의 實驗을 거쳐 多樣한 氣象條件에서 上記와 같은 結論을 誘導해 내어야 實驗에 廣地域적으로 適用될 수 있을 것으로 思料되며 또한 熱收支-보웬비법이 氣候條件과 周邊環境에 따라서 lysimeter에 의해서 測定한 AET와 相異한 값을 나타내는 경우가 多數 報告되어¹⁾ 있는 점을 감안할 때 lysimeter와 並行하여 實驗이 遂行되어져야 할 것으로 思料된다.

摘 要

水稻圃場에서의 實際 蒸發散量을 보웬비-열수지법에 의하여 測定하고 이를 基礎로 하여 大型 및 小型蒸發計 蒸發散量 및 Penman-Monteith 모델에 의해서 計算된 基準蒸發散量으로부터의 水稻圃場 實際蒸發散量 推定の 信賴性을 檢討하기 위하여 本 研

究를 遂行하였다.

本 研究는 水原測候所 水稻圃場에서 統一系인 射광계를 供試하여 遂行되었다. 實際蒸發散量은 BE-ARN system(Bilan D'Énergie Automatique Regionale Numerique; I.N.R.A)을 利用하여 보웬비-열수지법에 의하여 測定하였으며, 大型 및 小型蒸發計 蒸發散量은 水原測候所 露場의 잔디 위에서 測定되고, 基準蒸發散量은 當所의 綜觀氣象觀測資料를 利用하여 修正된 Penman-Monteith 모델로 計算하였다.

1. 日平均 알베도는 0.15~0.25 範圍에서 變하였으며, 葉面積指數 4까지는 葉面積의 增加에 따라서 直線的으로 增加하는 傾向이었으며 그 以後는 완만한 增加를 보였다.

2. 水稻圃場에 入射되는 日射量中 맑은 날 純輻射量으로 配分되는 比率은 50~80% 範圍였으며 生育時期가 進展됨에 따라서 낮아졌다.

3. 純輻射量中 蒸發散에 配分되는 比率이 熱收支項中 가장 커서 벼의 生育時期에 따라서 80~120%의 範圍였으며 生育後期에는 가장 낮았으며, 蒸發散潛熱이 純輻射量보다 높은 경우가 많았는데 이는 移流에 의한 影響이 크기 때문인 것으로 判斷되었다.

4. 生育期間中 日當 實際蒸發散量은 氣象條件에 따라 0.1mm~8mm 範圍에서 變하였다.

5. 보웬비-열수지법에 의한 實際蒸發散量과 大型蒸發計 蒸發量, 小型蒸發計 蒸發量 및 基準蒸發量과는 유의한 直線回歸 關係가 있었는데 이들과의 相關係數는 各各 0.761, 0.793 및 0.914였다.

6. 大型蒸發計 및 小型蒸發計 蒸發散量 Penman-Monteith 모델에 의해 計算한 蒸發散量을 基準蒸發量으로 한 벼의 生育期間中의 平均 蒸發散比 또는 作物係數는 各各 1.57, 1.10 및 1.49였으며 各各의 變異係數는 28.7, 22.7 및 12.8%였다.

7. 基準蒸發量에 根據한 作物係數는 葉面積의 發達과 密接한 關係를 가지고 變하였으며 出穗期경에 최대치를 보였으며, 그 以後 급격히 減少하였다.

8. 以上の 結果들을 綜合하여 볼 때 實際蒸發散量의 推定에는 綜觀氣象資料를 利用하여 Penman-Monteith 모델로 計算한 蒸發散量을 基準蒸發量으로 利用하는 것이 蒸發計 蒸發散量을 基準蒸發量으로 利用하는 것보다 推定の 精度가 높은 것으로 判斷되었으며, 實際蒸發散量(AET)과 Penman-Monteith 모델에 의한 基準蒸發量(RET)간의 回歸式 $AET =$

0.1 + 1.52 RET를 利用할 경우 實際蒸發散量을 全生育期間을 통해서 約 10% 誤差範圍內에서 推定할 수 있을 것으로 判斷되었으며, 生育時期別로 作物係數를 計算하여 이를 利用할 境遇, 보다 正確한 實際蒸發散量을 推定할 수 있을 것으로 思料되었다.

引用文獻

1. Blad, B.L and N.J. Rosenberg. 1974. Lysimetric calibration of the Bowen Ratio-Energy Balance Method for evapotranspiration estimation in the Central Great Plains. *Appl. Meteorol.* 13 : 227-236.
2. Doorenbos, J. and W.O. Pruitt. 1977. Guideline for prediction of crop water requirements. F.A.O. Irr. and Drain. Paper No. 24. FAO. Rome.
3. Ferreira, M.I.F.R. and L.S. Pereira. 1982. L'estimation de L'evapotraspiration de reference (ET_o). *Etude Comparative de Plusieurs Formules Climatique. Ieres Journees Luso-Marocaines des Irrigation et du Drainage* : 1-25.
4. Fritschen, L.J. 1966. Evapotranspiration rates of field crops determined by the Bowen ratio method. *Agron. J.* 61 : 879-886.
5. Gardner, C.M.K. and M. Field. 1983. An evaluation of the success of MORECS, meteorological model, in estimating soil moisture deficits. *Agr. Meteor.* 29 : 269-284.
6. Hargreaves, G.H. and Z.A. Samans. 1982. Estimating of potential evapotranspiration. *J. Irr. and Drain, Proc. ASCE.* No IR 3 : 225-230.
7. Hatfield, J.I., R.J. Reginato and S.B. Idso. 1984. Evaluation of canopy temperature evapotranspiration models over various crops. *Agric. For. Meteorol.* 32 : 41-53.
8. 堀江武·櫻谷哲夫. 1982. 蒸發散測定法(1). *農業氣象* 38(2) : 193-195.
9. 權純國·鄭斗浩. 1976. 新品種統一벼의 蒸發散에 관한 研究. *農振廳 농사시험 연구보고(농공편)*, Vol.18.
10. Pruitt, W.O. and F.J. Lourence. 1968. Correlation of Climatological data with water requirement of crops. *Dept. of Water Sci. and Engr. Paper No. 9001. Univ. of California-Davis.* 59pp.
11. 蒸發散研究グループ. 1967. 水田の放射狀態について. *農業氣象*22(2) : 1-6.
12. Rosenberg et al. 1968. *Evapotranspiration-Review of Research.* Nebr. Agr. Exp. Station Misc. Bull. No. 20 : 80pp.
13. Rosenberg, N.J. 1969. Seasonal patterns in evapotranspiration by irrigated alfalfa in the Central Great plains. *Agron. J.* 61 : 879-886.
14. Rosenberg, N.J. et al. 1983. *Evaporation and Evapotranspiration, in Microclimate, The Biological Environment.* 2nd Ed. : 209-287.
15. Tanner, C.B. 1960. Energy balance approach to evapotranspiration from crops. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 24 : 1-9.
16. 芮鍾斗·權純國. 1985. 氣象要素에 의한 벼 蒸發散量 豫測. *서울大農學研究* 10(1) : 17-27.