

熱收支法에 의한 벼논의 水溫推定

李定澤* 尹成浩* 任正男* 高見普**

Estimation of Water Temperature by Heat Balance Method in Paddy Field.

Jeong-Taek* Lee, Seong-Ho Yun,* Jung Nam Im* Shinich Takami**

Summary

To determine irrigated water temperature under the rice plant canopy, micrometeorological elements air temperature, relative humidity, water temperature, solar radiation, and the rice leaf area index the rice plant canopy were measured. Water temperature under the canopy was also estimated from these data. The results are as follows :

1. Maximum and minimum temperatures of water in the paddy field were higher about 1-2°C than those of air temperature.
2. Mean water temperature under the canopy became lower than mean air temperature when the leaf area indices were greater than 4, because of decreased light penetration rates
3. Penetration amounts of net radiation under the canopy can be estimated by an exponential equation
4. Estimated water temperatures under the canopy by a combination method model was adaptable in Suweon, a plain area, but its accuracy was lower in Jinbu, an alpine area.

緒 論

太陽에너지는 天空과 地面에서 輻射와 反射를 통하여 作物體에 到達하며, 作物體表面에서 다시 反射作用이 일어나 大氣中으로 나아가게 된다. 作物群落内部로 들어오는 太陽에너지 輻射量은 群落의 形態에 따라서 달라진다. 따라서 作物群落内에서 에너지 配分은 熱收支式으로 表現되지만 實際 應用에 있어서는 여러가지 目的에 따라서 使用되어 질 수 있는 것이다. 熱收支項은 純輻射量, 潛熱傳達量, 顯熱傳達量, 蓄熱量 등으로 構成되어 있다. 日中 純輻射量은

群落内에서 蒸發散을 일으키는 潛熱傳達量과 作物體나 群落内의 溫度를 높이는 顯熱傳達量이 되고, 일부는 水面以下로 傳達되어진다⁽¹⁾ Penman(1948)⁽²⁾은 潛熱傳達量으로써 潛在蒸發量을 推定하였고, 内嶋等은^(3,4,5,6,7,8) 熱收支式을 利用하여 水溫 및 地溫의 變化를 報告한 바 있으며, 岩切(1964)은⁽⁹⁾ 水稻群落의 繁茂度에 따른 水面의 熱收支特性에 對하여 報告하였다.

湛水狀態에서 栽培되는 水稻는 水面으로 들어오는 熱량이 作物群落의 生育에 密接하게 影響을 준다. 寒冷地方에서 生育初期에 氣溫이 낮을 때는 물의 保溫

* 農業技術研究所 Agricultural Science Institute R.D.A. (Suweon), Korea

** 北陸農業試驗場 Hokuriku Agricultural Experimental Station (Japan)

效果를 利用하여 冷害를 輕減 시킬 수 있으며 積極的으로 水溫을 上昇시켜 安全生育을 도모하여 生産量의 增加를 얻는 경우도 있다.^(10,11,12) 그러나 우리나라 南部地方에서는 晩期移秧時 水溫이 너무 높아 苗의 呼吸量이 증가하여 活着과 生育에 障害를 일으키는 경우도 가끔 있다.⁽¹³⁾

이와같은 水稻生育에 밀접한 影響을 미치는 水溫을 圃場狀態에서 별도로 測定하기는 어려운 點이 있다. 그러므로 大氣의 氣象狀態와 群落의 繁茂度로써 논의 水溫을 推定하는 方法의 하나로 熱收支分析法中 組合法을 利用하여 水稻群落內에서 水溫環境變化와 水溫推定模型을 作成하고 그 模型에 의한 推定值와 實測值를 比較 檢討한 結果를 報告하는 바이다.

材料 및 方法.

本 試驗은 1984年 水原測候所圃場과 珍富 農家畓에서 遂行하였으며, 水原(N 37°16', E126°59', Alt. 37 m)에서는 秋晴벼를 珍富(N37°40', E127°13', Alt. 565m)에서는 小白벼를 供試하였다. 水溫測定은 pt 100Ω 檢出器와 記錄計(橫河 ER-100)를 使用하여 實施하였는데, 檢出器 設置位置는 各 區의 中央部, 水深 3cm를 基準地點으로하여 測定하였다. 群落上部의 日射量은 네오일사계(MS-42英弘精密)를 使用하였고 反射量은 管型日射計(MS-3 英弘精密)를 地上150cm 높이에서 檢出部位를 地面으로 向하게하여 測定하였다. 反射率은 反射量(A)를 全日日射量(B)으로 나누어 그 比(A/B)를 百分率로 나타내었다. 그 밖에 熱收支項을 調查하기 위하여 群落上部 150cm에 純輻射計를 設置하여 測定하였다. 大氣의 氣溫, 溫度, 等은 水原測候所와 作物試驗場 珍富出張所에서 觀測된 資料를 利用하였다.

結果 및 考察

水稻圃場의 周圍環境을 單純化 시켜 보면 作物, 물, 土壤이 存在하며 作物體 위에 太陽에너지의 直達 短波輻射와 구름, 大氣水蒸氣 等에서 反射되어나오는 長波輻射가 있다. 한편 群落內에서는 熱放出과 顯熱量·蒸發量 flux가 있으며, 大氣의 溫度 濕度와, 群落內의 溫度·濕度와 바람이 있고, 에너지 輸送에 對한 群落의 抵抗과 水面, 及 土壤으로의 熱의 흐름을 考慮하게 된다. 群落上部에 到達되는 日射量은 作物의 光合成,

蒸散作用 및 群落內의 氣溫을 左右하는 推進力이다. 이러한 太陽輻射量의 日中變化를 보면 그림1과 같다. 群落에 到達하는 日射量은 日出後 서서히 增加하여 太陽의 南中時에 가장 높은 값을 나타냈고, 日沒時까지 점차적으로 減少된다. 一般的으로 太陽의 高度가 높을수록 單位面積에 到達되는 日射量은 많아지고 그 日射量은 群落內에서 葉面積의 指數函數로서 透過된다. 反面에 낮동안의 純輻射量은 日射量과 비슷한 傾向으로 變하지만 絕對值는 日射量보다 낮다. 夜間에는 長波輻射量이 地面으로 내려오는 量보다 大氣中으로 나가는 量이 많으므로 負의 값을 가지게 된다. 反射率은 群落內로 흡수, 透過되는 日射量을 決定하는 것으로 熱收支研究 뿐만 아니라 光合成의 研究에도 重要하다.

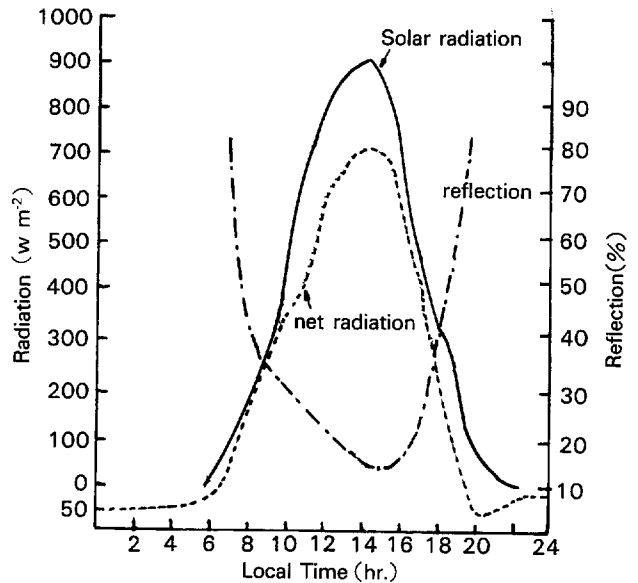


Fig. 1. Diurnal changes in solar radiation, net radiation and reflection above rice plant canopy on 1 July, 1984.

反射率의 時刻別 變化를 보면 太陽高度가 낮은 아침과 저녁에는 높고 正午에 가까울 수록 反射率이 낮아 群落內로의 透光量은 많아짐을 알 수 있다.

日中の 純輻射量은 群落이 純粹하게 받아들인 輻射에너지를 말하는 것으로 群落內에서의 顯熱傳達量과 潛熱傳達量으로 쓰여지며 그중 一部는 光合成에

利用되고 나머지는 水中이나 地中으로 들어가게 된다. 이와같은 純輻射量은 熱收支全體를 左右하게 되며 作物의 生産에도 密接한 關係를 가지고 있다. 그러나 實際로 研究觀測을 爲해서 별도로 純輻射量을 測定하는 경우는 있으나 現在 綜觀觀測에서는 이루어지지 않고 있는 實情이다. 그러므로 水平面 日射量으로서 水稻群落에서의 純輻射量을 推定하기 爲하여 그들 關係를 分析한 結果는 그림2에서 보는 바와 같다. 純輻射量은 日射量の 約 70% 程度이며 그 關係式은 有意한 1次函數로 表現될 수 있었다. 純輻射量은 太陽의 高度나 雲量의 狀態, 作物의 種類에 따라서 多少 差異를 보이고 있으나 벼農事期間中에는 日射量の 平均 70% 程度로 나타났다.

輻射에너지는 大氣와 더불어 群落內 氣溫과 水溫에 密接한 影響을 주므로 大氣氣溫과 이들 相互關係를 究明 하면 群落內 水溫과 氣溫을 推定할 수 있는 것이다.

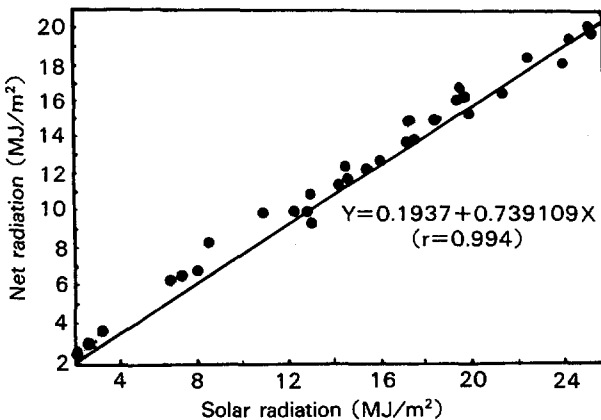


Fig. 2. Relationship between total solar radiation and net radiation above rice plant canopy

初期 벼生育期間中(6月 12-7月 20日)의 大氣氣溫에 따른 群落內 氣溫 및 水溫과의 關係를 보면 그림3과 같다. 水原地方에서 群落內 最高氣溫은 大氣보다 約 0.5~1.5°C程度 높으며 大氣溫度가 높아 질수록 그 差異가 컸으며 反對로 群落內 最低氣溫은 大氣에 비하여 約 1°C 程度 낮았다. 群落內 最高水溫은 大氣 最高氣溫보다 約 0.5~1°C程度 높았으나 生育後기로 갈수록 差異는 작았다. 그러나 最低水溫은 大氣最低

氣溫에 比하여 1~1.5°C程度 높았으며 生育後기로 갈수록 그 差異가 작아지는 傾向이었다. 高冷地인 珍富의 境遇에는 全體의인 樣相은 平野地와 비슷하였으나 群落內氣溫과 大氣氣溫과의 差異는 작았으며, 水溫과의 差異는 훨씬 크게 나타났다. 그러므로 山間 高冷地에서는 平野地보다 生育初期에는 水溫에 依한 保溫效果가 큰 것으로 생각된다.

生育時期別 群落內의 透光率과 水溫 및 氣溫變化와의 關係를 보면 그림4와 같다. 生育이 進展될수록 葉面積指數가 늘어남에 따라서 透光率은 減少되어 7月 21日頃에는 大氣氣溫이 水溫보다 높아지는 逆轉現象이 일어났으며 그때의 透光率은 40% 以下로 되었고 이러한 傾向은 水原과 珍富모두 비슷하였다. 水原地方에서 8月의 水溫은 大氣氣溫보다 約 1~2°C 程度 높았으나 珍富地方에서는 이보다 작은 差異를 보였지만 登熟期에는 서로 비슷한 傾向 이었다. 生育初期에 水溫이 大氣溫度보다 높아진것은 이 時期에는 畚水面 輻射量이 많고 그것이 比熱이 높은 물에 傳達되어 낮의 水溫이 大氣보다 높아진것으로 볼 수 있다. 그러나 葉面積이 一定值 以上으로 增加되면 日射가 그 만큼 遮斷되어 水溫이 떨어져 大氣溫度보다 낮아진다. 따라서 標高가 높은 高冷地에서 後期 低溫 對策으로 水溫을 上昇시킨 灌溉水를 使用하게 되면 벼의 正常的인 生育을 도모하며, 出穗遲延을 막을 수 있을것으로 본다.

群落內의 水溫에 直接的인 影響을 이 미치는 要因은 水面에 到達한 純輻射量이다. 全天日射量의 輻射內에서의 光減衰는 PAR과 IR波長 사이에서 일어나며, 純輻射量의 輻射內에서의 透過樣相도 全天日射量과 비슷하다고 알려져있다.⁽¹⁴⁾ 따라서 水面의 純輻射量도 群落의 葉面積에 대하여 指數函數的으로 減衰한다는 事實을 適用하여 每日의 水稻群落이 받는 全天日射量과 純輻射量의 變化를 보면 그림6과 같다. 하루의 全天日射量이 20MJ/m² 前後이면 純輻射量은 15MJ/m² 前後의 分布를 보이고 生育後기로 갈수록 絕對量은 줄어드는 傾向이었다. 群落內 地上30cm에서 測定한 純輻射量은 生育初期에는 群落上部的 純輻射量과 거의 같으나 出穗期 以後에는 3MJ m² 以下로 떨어졌다. 그리고 水面의 純輻射量은 日射量이 水面 아래로 傳達되거나 水面에서 反射되고 남은 量으로 생각할 수 있겠지만 실제로 畚水面에 到達하는 純輻射量을 測定하기는 어렵다. 따라서 地上 30cm 位置에서 純輻射量(R_{n0})은 純輻射量의 地上 30cm

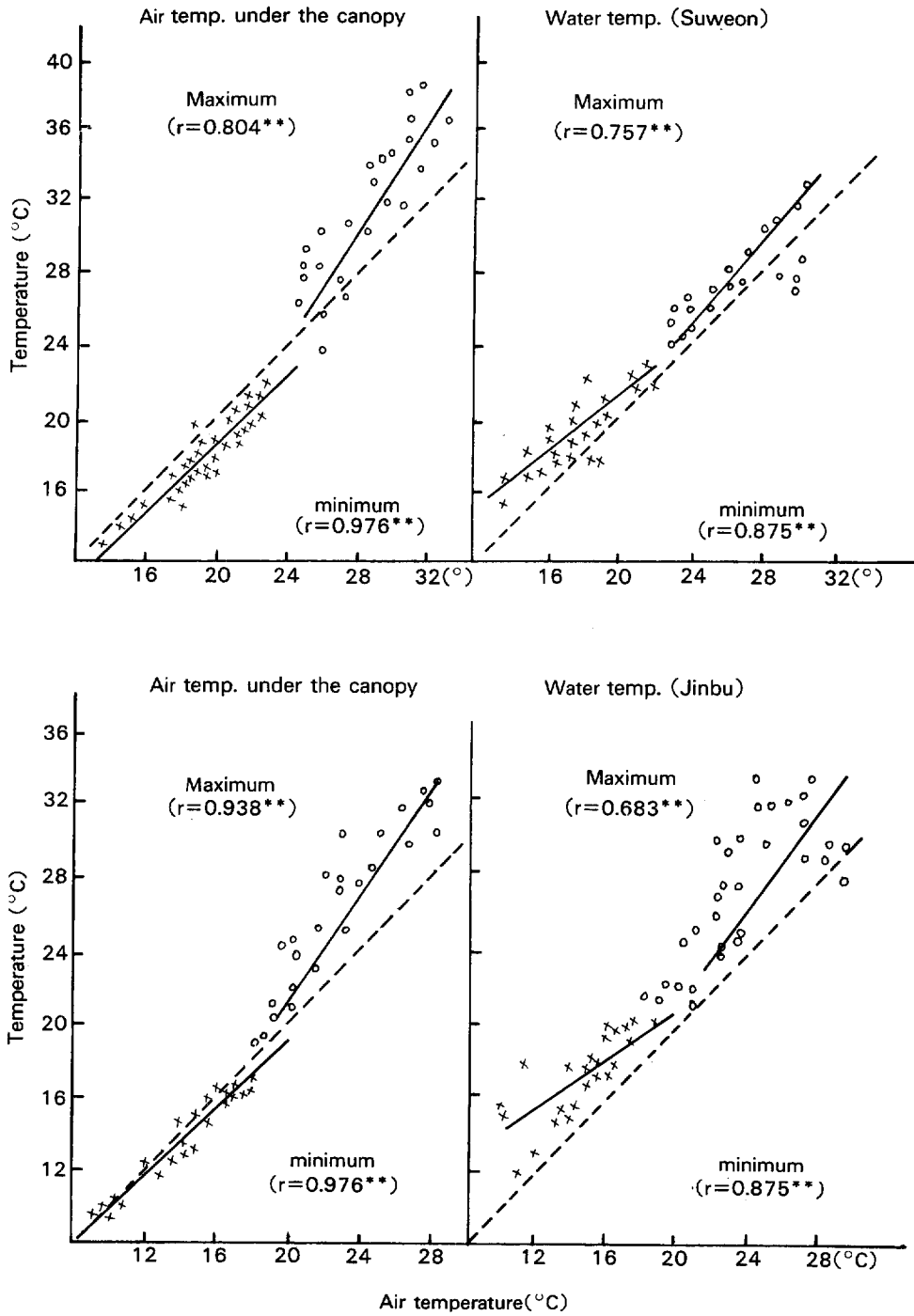


Fig. 3. Relationships between atmospheric air temperature and ambient air and water temperatures of the crop canopy of rice plants under irrigation conditions in Suweon and Jinbu.

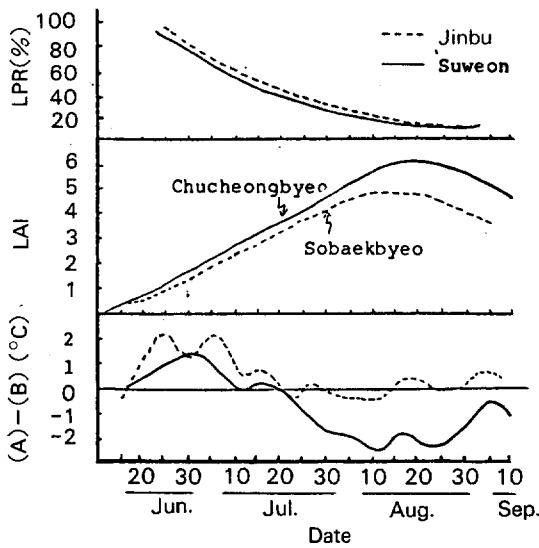


Fig. 4. Changes in air(A) and water (B) temperature difference, light penetration rate (LPR), and leaf area index(LAI) under the rice plant canopy at Suweon and Jinbu.

以上の葉面積指數の函數로 보고推定한結果 $R_{me} = R_n \cdot \text{Exp}(-0.4033 \text{ LAI} + 0.3001) \dots (1)$ 의函數式을 얻었다. 여기서 R_{me} 는 畚水面의 純輻射量, R_n 는 群落上部의 純輻射量, LAI는 葉面積指數이다. 이式을利用한推定値는 實測値(R_{me})와 接近하였다. 따라서 群落의 葉面積指數를 測定하여 畚水面의 純輻射量을 (1)式에 依하여 推定한 結果 生育初期에는 推定値가 實測値보다 若干 많았으나 生育이 進展 될 수록 그 差異는 점점 작아졌으며 出穗期 前後하여 水面純輻射量은 하루 2 MJ/m^2 以下로 크게 떨어졌다.

群落内の 水温은 熱收支의 組合法을 利用하여 大氣의 日射量, 氣温, 溫度 및 群落의 葉面積指數를 求하여 다음 式으로 推定할 수 있다.

$$T_w = T_a + (r_a R_n - 0.025 \cdot 4d) / (0.0168(\epsilon + 1)) \dots (2)$$

여기서 T_w 는 水温 10.9 , T_a 는 大氣氣溫($^{\circ}\text{C}$), d 는 館差(mb), R_n 는 純輻射量(MJ m^{-2}) r_a 는 aerodynamic resistance ϵ 는 psychrometric constant이다. 式(2)를 利用하여 水原과 珍富의 日別水温을 推定하고 測定한 結果는 그림6에서 보는 바와 같다. 水原地方에서

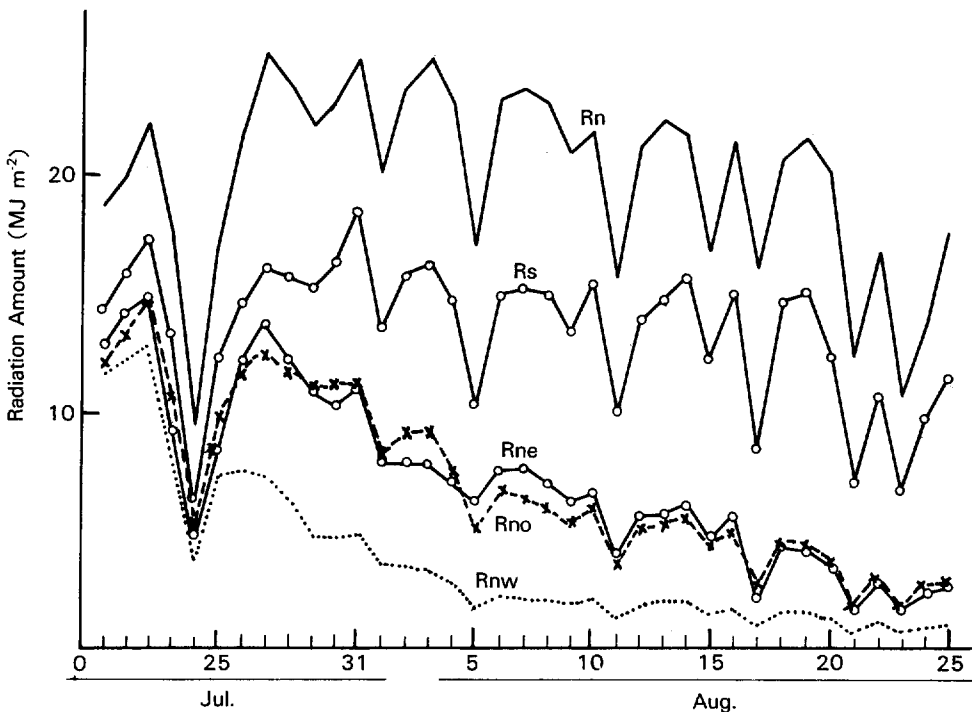


Fig. 5. Changes in solar radiation(RS), net radiation (Rn) above rice canopy, estimated net radiation (Rne : 30cm above water surface, Rnw : water surface), and net radiation(Rno) at 30cm.

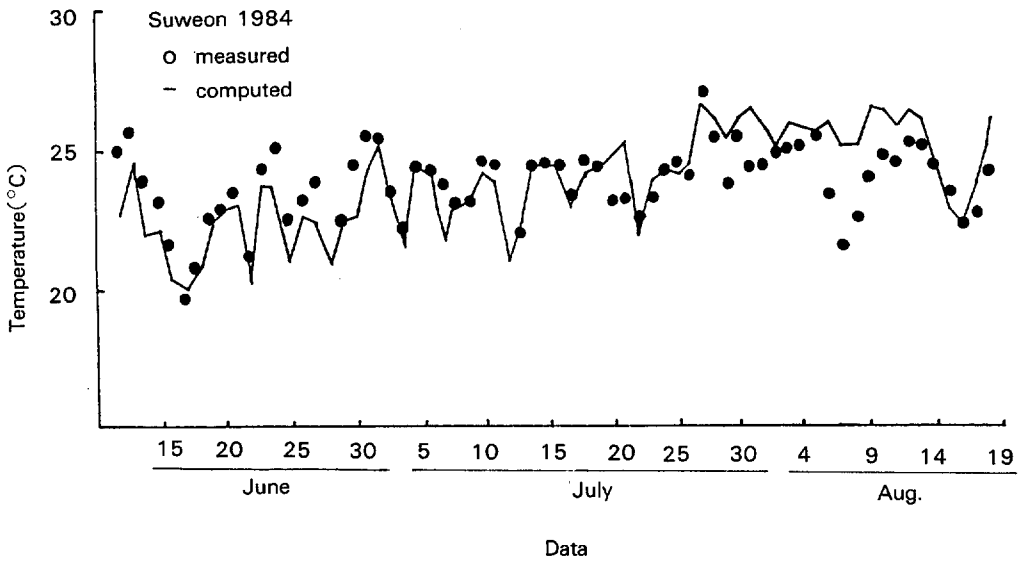


Fig. 6-1. Changes in water temperature under the rice plant canopy. (Suweon, 1984)

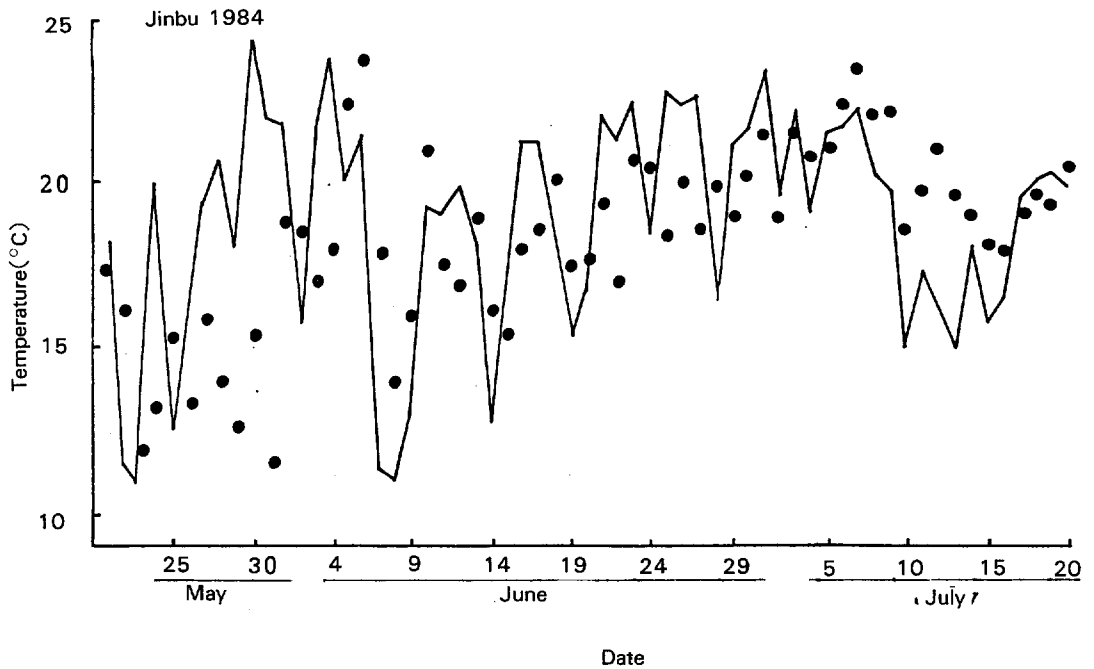


Fig. 6-2. Changes in water temperature under the rice plant canopy. (Jinbu, 1984)

는 推定値와 實測値를 比較해 보면 生育初期는 推定値가 實測値보다 낮으나 生育後期는 若干 높게 나타

났으며, 珍富地方에서는 推定値와 實測値의 差異가 水原地方 보다 훨씬 크게 나타났다.

이러한 現象은 珍富가 山間高冷地이면서 試驗圃場이 砂質畚으로 漏水量(減水深)이 많은 데에 起因한 것으로 생각된다. 따라서 水原과 같은 平野地에서는 이식을 利用하여 水温推定이 可能하다고 생각되나, 珍富地方과 같은 山間高冷地에서는 適用이 不可能한 것으로 判斷된다. 그러나 減水深을 考慮한 (2)式의 補完을 通하여 特殊地域에 對한 水温推定도 可能한 것으로 보인다.

要 約

벼 生育에 氣温과 더불어 密接한 影響을 주는 논의 水温 環境의 生育時期別 變化를 大氣의 温度, 濕度 日射量과 群落의 葉面積指數로써 推定하고자 1984年에 水原과 珍富에서 測定調査하여 分析한후 그 推定 水温을 實測値와 比較檢討한 結果를 要約하면 다음과 같다.

1. 벼 生育初期의 水温은 大氣氣温보다 最高·最低 温度가 모두 1~2° 程度높았다.
2. 水面에 到達되는 純輻射量은 葉面積指數의 指數 函數로 表現된다.
3. 벼의 葉面積指數가 3~4以上이 되면 水面에 到達되는 光量의 減衰로 논의 水温은 大氣氣温보다 낮아졌다.
4. 平野地인 水原地方의 보통논에서는 組合法을 利用한 推定水温은 實測値와 비슷한 傾向을 나타내어 大氣氣象에 依한 논의 水温推定이 可能한 것으로 判斷 되었다. 그러나 山間高冷地인 珍富의 砂質畚에서는 이 組合法을 利用한 水温豫測模型은 適用이 不可能하였다.

引 用 文 獻

1. 日本農業氣象學會 關東支部編(1988): 農業氣象의 測器と測定法. 農業技術協會 pp. 332

2. Penman H.L. (1948): Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Pro. Soc (London)* 193, 120-145
3. 内嶋善兵衛 (1959): 水温의 熱収支氣候學的研究. 農業技術研究所報告.A 7, 131-181
4. 三原義秋·内嶋善兵衛 · 中村千里·大沼一己 (1959): 温水池의 熱収支および水温上昇의 研究. 農業技術研究所報告 A7, 1-43
5. 三原義秘·内嶋善兵衛·中村千里 (1959): 温水路의 熱収支 水温 上昇 關する研究. 農業技術研究所報告. A7, 45-67
6. 内嶋善兵衛·大沼一己 (1961): 回温水路의 熱収支特性について. 農業氣象 17(1), 1-8
7. 内嶋善兵衛 (1961): On Characteristics of Heat Balance of Water Layer under Paddy Plant Cover *Bull. Natl. Inst. Agric. Sci*, 8, 243-265
8. 内嶋善兵衛 (1961): 技術者のための 農業氣象學 講座. 農業技術 19, 89-93
9. 岩切敏 (1964): 水稻植被의 繁茂にともなる水面 熱収支 特性의 變化について. 農業氣象 19(3), 89-95
10. 荒井哲男 (1957): 温床式水温上昇について. 農業氣象. 12(2), 79-80
11. 越水幸男 (1973): 湛水直播水稻의 初期生育 安定技術確立に 關する研究(I) 有孔 直播田의 水温上昇. 東北農業技術研究 14, 88-90.
12. 水山忠男·岩田茂·七田茂 (1958): 限界生産地帶における水稻,의 生理氣象學的研究1. ビニールフィルム使用による水田遊水路의 水温上昇 について. 第9回 帶廣畜産大學集談會記事 28-29.
13. 佐藤正一 (1960): 本邦暖地의 稻作氣候と水田微氣 ならびに 微氣候調節に關する研究. 九州農業試驗場 報 第6卷 第4號 259-364
14. Hamlin G. Jones (1983): *Plant and microclimate*. Cambrige University Press. pp 323