

최대경계선을 이용한 벼 수량의 기상반응분석과 수량 예측 I. 최대경계선 분석과 수량예측모형 구축

김창국*[†] · 이변우** · 한원식*

*농촌진흥청, **서울대학교

Upper Boundary Line Analysis of Rice Yield Response to Meteorological Condition for Yield Prediction I. Boundary Line Analysis and Construction of Yield Prediction Model

ChangKug Kim*[†], ByunWoo Lee** and WeonSik Hahn*

*Farm Management Bureau, RDA, Suwon 441-707, Korea

**Coll. of Agric. and Life Sci., Seoul Nat'l Univ., Suwon 441-744, Korea

ABSTRACT : Boundary line method was adopted to analyze the relationships between rice yield and meteorological conditions during rice growing period. Boundary lines of yield responses to mean temperature(T_a) and sunshine hour(S_h) and diurnal temperature range(T_r) were well-fitted to hyperbolic functions of $f(T_a)=\beta_{0t}(1-EXP(-\beta_{1t} \times T_a))$ and $f(S_h)=\beta_{0t}(1-EXP(-\beta_{1t} \times S_h))$, to quadratic function of $f(T_r)=\beta_{0r}(1-(T_r-\beta_{1r})^2)$, respectively. To take into account for the sterility caused by low temperature during reproductive stage, cooling degree days [$T_c=\Sigma(20-T_a)$] for 30 days before heading were calculated. Boundary lines of yield responses to T_c were fitted well to exponential function of $f(T_c)=\beta_{0c} \exp(-\beta_{1c} \times T_c)$. Excluding the constants of β_{0s} from the boundary line functions, formed are the relative function values in the range of 0 to 1. And these were used as yield indices of the meteorological elements which indicate the degree of influence on rice yield. Assuming that the meteorological elements act multiplicatively and independently from each other, meteorological yield index (MIY) was calculated by the geometric mean of indices for each meteorological elements. MIY in each growth period showed good linear relationship with rice yield. The MIY's during 31 to 45 days after transplanting (DAT) in vegetative stage, during 30 to 16 days before heading (DBH) in reproductive stage and during 20 days after heading (DAH) in ripening stage showed greater explainability for yield variation in each growth stage. MIY for the whole growth period was calculated by the following three methods of geometric mean of the indices for vegetative stage (MIVG), reproductive stage (MIRG) and ripening stage (MIRS). MIY_I was calculated by the geometric mean of meteorological indices showing the highest determination coefficient in each growth stage of rice. That is, $MIY_I = \sqrt[3]{MIVG_{31 \sim 45} \cdot MIRG_{30 \sim 16} \cdot MIRS_{0 \sim 20}}$. MIY_{II}

was calculated by the geometric mean of all the MIY's for all the growth periods divided into 15 to 20 days intervals from transplanting to 40 DAH. MIY_{III} was calculated by the geometric mean of MIY's for 45 days of vegetative stage (MIVG₀₋₄₅), 30 days of reproductive stage (MIRG₃₀₋₀) and 40 days of ripening stage (MIRS₀₋₄₀). MIY_I, MIY_{II} and MIY_{III} showed good linear relationships with grain yield, the coefficients of determination being 0.651, 0.670 and 0.613, respectively.

Keywords : boundary line, yield, rice, model, meteorological index

농작물의 生育 및 作況은 내적으로는 品種 자체의 고유 특성과 외적으로는 栽培技術, 土壤環境, 氣象環境 등에 크게 영향을 받는다. 이중 溫度, 日照時數 등의 氣象條件은 生育과 收量 형성에 직접적인 영향을 미치게 되며 作物의 고유특성인 出穗期, 收量構成要素 등도 氣象環境에 따라 變異를 나타낸다. 따라서 氣象은 作物生産에서 地域 및 年次間 變異를 가져오는 가장 중요한 요인이라 할 수 있다. 또한 氣象 環境이 벼의 생산성에 미치는 영향은 복잡 다양하고 生育段階에 따른 차이가 많으므로 주어진 氣象環境으로 부터 벼의 收量を 정량적으로 평가하고 예측하는 모형을 개발하여 地域 및 年次間 變異를 판별할 수 있는 기준을 설정하는 것은 중요하다.

氣象과 벼의 收量構成要素 및 收量과의 관계에 대해서도 많은 연구자들(崔와 鄭, 1984; 박, 1975; 堀江, 1985)이 分析하였으나 調査 地域과 品種이 다를 경우에는 효율적으로 비교할 수 있는 방법이 없어 대부분 한정된 品種과 일부 地域에서만 分析되어 왔다.

특정 자료집합에서 원인과 결과사이에 존재하는 두 변수 관계를 표현하는 함수 즉 Y값이 X변수에 의하여 영향을 받으면

[†]Corresponding author: (Phone)+82-031-299-2352 (E-mail) chang@rda.go.kr

<Received May 2, 2001>

서도 X변수 이외의 다른 변수들이 고정되어 있지 않은 경우 Y의 X에 대한 반응을 명확하게 해석을 할 수 없는데 이 경우 X변수에 의해 나타나는 Y의 최대값은 X이외의 다른 변수가 제한인자로 작용하지 않은 경우에 X에 대한 Y의 반응을 나타내는 것으로서 이 최대값을 연결한 함수식을 最大境界線(Boundary line)이라 한다. 다양한 地域에서 栽培 品種과 연도가 다른 자료를 綜合分析하여 벼 收量의 氣象反應을 파악할 때는 최대경계선 분석방법이 유용하게 이용될 수 있을 것으로 판단되나 이에대한 연구는 전혀 없다.

最大境界線 分析은 Webb(1972)에 의해 최초로 생물학적 자료에 대하여 적용된후 주로 토양 양분 균형의 최적 모형을 구하거나 식물의 성장모형에서 양분의 최적점을 찾는 데 주로 이용되었다(Moller-Nielsen 등, 1976; Walworth 등, 1986). 또한 Evanylo 등(1987)은 土壤養分集積도와 收量과의 관계를 나타내는데에 사용하였으며, Elliott 등(1993)은 각각 다른 포장에서 조사시기가 다른 자료를 이용하여 밭질률의 변화를 예측하는데 이용하였으며, Schmidt 등(2000)은 土壤으로부터 N₂O flux 豫測模型을 설정하는데에 이용하였다.

본 연구에서는 1985년부터 1999년까지 15년간 전국에서 수행한 水稻地域適應試驗 결과를 最大境界線 分析方法을 이용하여 벼의 收量構成要素와 收量의 기상반응을 종합적으로 검토하여 수량기상지수를 계산하였으며 이를 토대로 한 收量豫測模型을 작성하였다.

材料 및 方法

본 연구는 1985년부터 1999년까지 15년간에 걸쳐 農村振興廳 作物試驗場, 湖南農業試驗場, 嶺南農業試驗場, 京畿, 江原, 忠南, 忠北, 慶南, 慶北, 全南, 全北 地域에서 수행한 水稻地域適應試驗중에서 지리적 위치와 지형을 고려한 20개소를 선정하여 分析하였다. 선정된 地域들은 標高 6~576 m, 위도 35° 02'~38° 15', 經度 126° 27'~129° 21' 사이에 위치하고 있다. 조사품종은 일반계 품종인 대청벼, 동진벼, 상풍벼, 소백벼, 오대벼, 중원벼, 추청벼, 화성벼로 보통기의 標準栽培法(水稻地域適應試驗報告書, 1999)으로 재배되었으며 收量은 標準調查方法(水稻地域適應試驗報告書, 1999)에 의하여 조사되었다. 氣象資料는 해당 생육 관찰포가 있는 地域의 기상대에서 관측한 氣象資料와 農村振興廳의 시·군농업기술센터에서 氣象 DB로 구축한 자료를 이용하였으며 1985년부터 1999년까지 15년간의 일 平均氣溫, 日較差, 일조시간을 사용하였다.

분석에 이용한 20개 地域의 15년간 平均收量의 지역간 변이는 537 kg/10a(珍富)~684.3 kg/10a(西山)범위 였다. 20개 지역 平均收量의 年次間 變異는 579.0 kg~662.7 kg으로 地域간 차이에 비하여 변이폭이 크지 않았다. 벼를 生育時期에 따라 營養生長期, 生殖生長期 및 登熟期로 구분하여 각 시기의 平

均氣溫, 日較差, 日照時數에 대한 地域간 변이를 보면 營養生長期의 平均氣溫은 16.7°C~22.0°C, 日照時數는 5.9시간~8.0시간, 日較差는 7.2°C~10.7°C, 生殖生長期의 平均氣溫은 20.5°C~26.7°C, 日照時數는 5.3시간~8.2시간, 日較差는 7.9°C~10.9°C, 登熟期 平均氣溫은 16.9°C~23.6°C, 日照時數는 5.4시간~8.1시간, 日較差는 7.6°C~11.9°C로 나타났다.

氣象反應의 最大境界線(boundary line) 分析과 수량기상지수

벼의 收量에 대한 氣象要素의 영향을 時期別로 分析하기 위하여 벼의 生育期間을 營養生長期, 生殖生長期 및 登熟期로 구별하고 각 시기별로 平均氣溫(T_a), 日照時數(S_h) 및 日較差(T_r)에 대한 수량의 最大境界線 分析을 하였으며 최대경계선 분석은 Schnng 등(1996)의 방법을 이용하였다.

각 기상요소에 대한 수량의 최대경계점(boundary point)을 연결하는 최대경계선은 다음의 함수로 나타내었다.

$$\begin{aligned} f(T_a) &= \beta_{0t}(1 - \text{EXP}(-\beta_{1t} \times T_a)) \\ f(S_h) &= \beta_{0s}(1 - \text{EXP}(-\beta_{1s} \times S_h)) \\ f(T_r) &= \beta_{0r}(1 - (T_r - \beta_{1r})^2) \end{aligned}$$

위 최대경계선 식에서 상수항인 0 를 제외하면 각 기상요소가 수량에 미치는 영향도를 0~1사이의 指數값으로 나타낼 수 있다. 즉

$$\begin{aligned} g(T_a) &= 1 - \text{EXP}(-\beta_{1t} \times T_a) \\ g(S_h) &= 1 - \text{EXP}(-\beta_{1s} \times S_h) \\ g(T_r) &= 1 - (T_r - \beta_{1r})^2 \end{aligned}$$

으로 표현할 수 있다. 營養生長期는 이양후 0~15일, 16~30일, 31~45일, 0~45일의 4단계로 나누어 각각에 대하여 最大境界線 分析을 하였다. 收量에 대한 營養生長期 收量氣象指數(Meteorological yield index in vegetative growth stage, MIVG)는 각 시기의 平均온도, 日照時數, 日較差 기상지수의 기하평균(geometric mean)으로 구하였다.

生殖生長期의 收量氣象指數를 구하기 위하여 生殖生長期를 出수전 30~16일, 出수전 15~0일, 出수전 30~0일의 3단계로 구분하고 각 시기에 대하여 營養生長期와 같은 방법으로 收量에 대한 最大境界線을 分析하였다. 다만 生殖生長期에는 저온에 의한 불임을 고려하기 위하여 出수전 30일간의 냉각도일수[cooling degree day; T_c=Σ(20-T_a)](Uchijima, 1976)에 대한 最大境界線 分析을 추가하였다. 生殖生長期의 收量氣象指數(Meteorological yield index in reproductive growth stage, MIRG)는 平均온도, 日照時數, 日較差 및 Cooling degree day의 기하평균을 이용하여 구하였다.

登熟期の 收量氣象指數(Meteorological yield index in ripening stage, MIRS)는 登熟期를 出수후 0~20일, 出수후 21~40일, 出수후 0~40일의 3단계로 구분하고 각 시기에 대하여 營養生長期와 같은 방법으로 구하였다.

收量氣象指數에 의한 收量豫測模型 設定

最大境界線 分析方法을 통하여 얻어진 각 생육시기별 收量 氣象指數와 收量과의 직선회귀식을 구하여 收量예측모형(Model I, II, III)을 구성하였다.

Model I은 벼의 營養生長期, 生殖生長期, 登熟期の 각 생육단계에서 벼 收量變異에 대한 氣象指數의 설명력이 가장 높은 기간만을 선택하여 이들 氣象指數를 기하평균하여 전 생육기간에 대한 기상지수를 구하였다. 만일 營養生長期중의 d₁~d₂일의 기상지수(MIVG_{d1-d2}), 生殖生長期 d₃~d₄일의 기상지수(MIRG_{d3-d4}), 登熟期 d₅~d₆일의 기상지수(MIRS_{d5-d6})가 수량변이에 대한 설명력이 가장 높다면, 각 생육단계에서 이들 기간의 기상지수만을 선택하여 다음과 같이 기하평균을 구하여 종합수량기상지수(MIY_I)를 구하고 수량과의 관계를 구한 것이다.

$$MIY_I = \sqrt[3]{MIVG_{d1-d2} \cdot MIRG_{d3-d4} \cdot MIRS_{d5-d6}}$$

收量(\hat{Y})예측식 Model I은 종합기상지수의 1차회귀식으로 나타내었다.

$$\hat{Y} = \alpha MIY_I + \beta$$

Model II는 벼의 생육기간을 營養生長期, 生殖生長期, 登熟期の 3시기로 구분하고 그 각각의 시기에 대하여 營養生長期를 이양후 0~15일, 16~30일, 31~45일의 3시기로, 生殖生長期를 출수전 30~16일, 15~0일의 두시기로, 登熟期를 출수후 0~20일, 21~40일의 두시기로 구분하여 이 모든 시기의 氣象指數를 기하평균하여 종합수량기상지수(MIY_{II})를 다음과 같이 계산하여 수량과의 관계를 구한 것이다.

$$MIY_{II} = \sqrt[7]{MIVG_{0-15} \cdot MIVG_{16-30} \cdot MIVG_{31-45} \cdot MIRG_{30-16} \cdot \sqrt[7]{MIRG_{15-0} \cdot MIRS_{0-20} \cdot MIRS_{21-40}}}$$

收量(\hat{Y})예측식 Model II는 다음과 같은 식으로 나타내었다.

$$\hat{Y} = \alpha MIY_{II} + \beta$$

Model III은 營養生長期 45일간, 生殖生長期 30일간, 登熟期 40일간의 종합 氣象指數를 기하평균하여 전생육기간에 대한 종합수량기상지수(MIY_{III})를 구하여 수량과의 관계를 구한 것이다.

$$MIY_{III} = \sqrt[3]{MIVG_{0-45} \cdot MIRG_{30-0} \cdot MIRS_{0-40}}$$

收量(\hat{Y})예측식 Model III는 다음과 같은 식으로 나타내었다.

$$\hat{Y} = \alpha MIY_{III} + \beta$$

결과 및 고찰

收量 氣象反應의 最大境界線 分析

營養生長期인 이양후 45일 동안 각 時期별로 收量에 대한 氣象指數를 구하기 위하여 營養生長期의 時期를 4단계로 구분하고(이양후 0~15일, 이양후 16~30일, 이양후 31~45일, 이양후 0~45일) 각 時期에 대하여 氣象要素別로 추정된 最大境界線 함수식을 나타내면 Table 1과 같다.

본 研究에서 사용한 氣象變異내에서는 어느 경우에도 收量의 最大境界線 함수는 平均氣溫과 日照時數의 지수함수로 잘 표현되었으며 日較差는 2차함수로 표현되었다. 營養生長期 45일간의 平均氣溫에 대한 收量 反應의 산점도와 最大境界線을

Table 1. Boundary line formulas of rice yield responses to average meteorological elements during different growth periods in vegetative growth stage.

Growth period (DAT)	Meteoro-logical elements	Boundary line formula	Meteorological index formula	No. of group	R ²
0~15	MT	$f(T_a)=972.3(1-EXP(-0.082T_a))$	$g(T_a)=1-EXP(-0.082T_a)$	6	0.986
	SH	$f(S_h)=1021.6(1-EXP(-0.245S_h))$	$g(S_h)=1-EXP(-0.245S_h)$	8	0.975
	DTR	$f(T_r)=896.3(1-0.0084(T_r-9.34)^2)$	$g(T_r)=1-0.0084(T_r-9.34)^2$	7	0.953
16~30	MT	$f(T_a)=902.7(1-EXP(-0.085T_a))$	$g(T_a)=1-EXP(-0.085T_a)$	6	0.976
	SH	$f(S_h)=995.3(1-EXP(-0.198S_h))$	$g(S_h)=1-EXP(-0.198S_h)$	8	0.978
	DTR	$f(T_r)=1038.2(1-0.012(T_r-9.578)^2)$	$g(T_r)=1-0.0124(T_r-9.578)^2$	7	0.986
31~45	MT	$f(T_a)=872.2(1-EXP(-0.159T_a))$	$g(T_a)=1-EXP(-0.159T_a)$	6	0.984
	SH	$f(S_h)=892.8(1-EXP(-0.121S_h))$	$g(S_h)=1-EXP(-0.121S_h)$	8	0.990
	DTR	$f(T_r)=1105.3(1-0.010(T_r-12.17)^2)$	$g(T_r)=1-0.0103(T_r-12.17)^2$	7	0.986
0~45	MT	$f(T_a)=914.4(1-EXP(-0.092T_a))$	$g(T_a)=1-EXP(-0.092T_a)$	6	0.994
	SH	$f(S_h)=954.6(1-EXP(-0.212S_h))$	$g(S_h)=1-EXP(-0.212S_h)$	8	0.966
	DTR	$f(T_r)=845.5(1-0.007(T_r-10.08)^2)$	$g(T_r)=1-0.0073(T_r-10.08)^2$	7	0.963

†DAT : Days after transplanting
 MT : Mean air temperature(°C)
 SH : Sunshine hours
 DTR : Diurnal temperature range (°C).

예로서 나타낸 것이 Fig. 1이다. 그러나 溫度에 대한 反應은 最適溫度를 정점으로 하여 온도가 이보다 높거나 낮은 경우에는 생물학적 활성이 떨어지는 것이 일반적인 것이다. 그런데 여기서 平均氣溫에 대한 收量反應 最大境界線 함수가 온도증가에 따라서 收量이 지속적으로 증가하는 지수함수로 표현이 되었는데 이는 본 연구에서 취급되는 온도범위가 좁아서 최적 온도 이하의 온도범위에서만 다루어졌기 때문인 것으로 생각된다.

生殖生長期인 출수전 30일 동안 각 時期별로 收量에 미치는

氣象指數를 구하기 위하여 生殖生長期의 時期를 3단계(출수전 30~16일, 출수전 15~0일, 출수전 30~0일)로 구분하고 각 時期에 대하여 氣象要素別로 추정된 收量反應의 最大境界線 함수식을 나타내면 Table 2와 같다. 生殖生長期의 時期를 3단계로 구분하여 추정된 最大境界線 함수식은 營養生長期와 마찬가지로 生殖生長期에서도 平均氣溫과 日照時數에 대한 收量反應의 最大境界線은 指數函數로 잘 표현되었고 日較差는 2차함수로 잘 표현되었다.

生殖生長期에는 저온에 의한 불임과 이에 따른 收量저하가

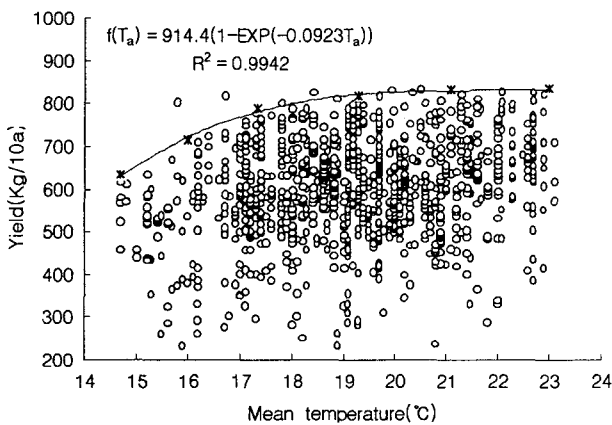


Fig. 1. Scattergram and boundary lines of rice yield responses to mean air temperature during 45 days after transplanting. Symbol "*" indicates the boundary points.

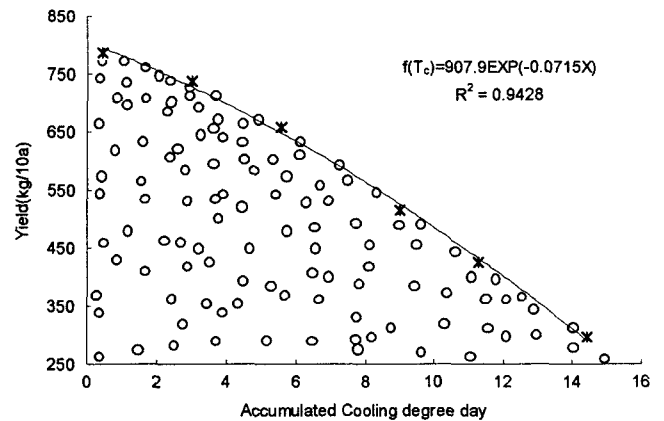


Fig 2. Scattergram and boundary line of rice yield responses to cooling degree day calculated during 30 days before heading by Uchijima method (1976).

Table 2. Boundary line formulas of rice yield responses to average meteorological elements during different periods in reproductive growth stage.

Growth period (DBH)	Meteoro-logical elements	Boundary line formula	Meteorological index formula	No. of group	R ²
30~16	MT	$f(T_a)=798.1(1-EXP(-0.051T_a))$	$g(T_a)=1-EXP(-0.051T_a)$	6	0.985
	SH	$f(S_h)=812.3(1-EXP(-0.202S_h))$	$g(S_h)=1-EXP(-0.202S_h)$	6	0.959
	DTR	$f(T_r)=767.6(1-0.009(T_r-11.749)^2)$	$g(T_r)=1-0.009(T_r-11.749)^2$	6	0.977
	CD	$f(T_c)=852.5EXP(-0.067T_c)$	$g(T_c)=EXP(-0.067T_c)$	7	0.953
15~0	MT	$f(T_a)=811.8(1-EXP(-0.048T_a))$	$g(T_a)=1-EXP(-0.048T_a)$	6	0.989
	SH	$f(S_h)=876.2(1-EXP(-0.227S_h))$	$g(S_h)=1-EXP(-0.227S_h)$	7	0.967
	DTR	$f(T_r)=834.5(1-0.007(T_r-10.639)^2)$	$g(T_r)=1-0.007(T_r-10.639)^2$	6	0.982
	CD	$f(T_c)=919.2EXP(-0.069T_c)$	$g(T_c)=EXP(-0.069T_c)$	7	0.962
30~0	MT	$f(T_a)=842.8(1-EXP(-0.081T_a))$	$g(T_a)=1-EXP(-0.081T_a)$	6	0.978
	SH	$f(S_h)=835.7(1-EXP(-0.438S_h))$	$g(S_h)=1-EXP(-0.438S_h)$	6	0.984
	DTR	$f(T_r)=816.3(1-0.006(T_r-10.168)^2)$	$g(T_r)=1-0.006(T_r-10.168)^2$	6	0.999
	CD	$f(T_c)=907.9EXP(-0.071T_c)$	$g(T_c)=EXP(-0.071T_c)$	7	0.942

†DBH: Days before heading

MT : Mean air temperature(°C),

SH : Sunshine hours

DTR: Diurnal temperature range(°C)

CD : Cooling degree day

$$T_c = \sum_{i=h-30}^h \sum (20 - T_a) , h \text{ refers to heading date.}$$

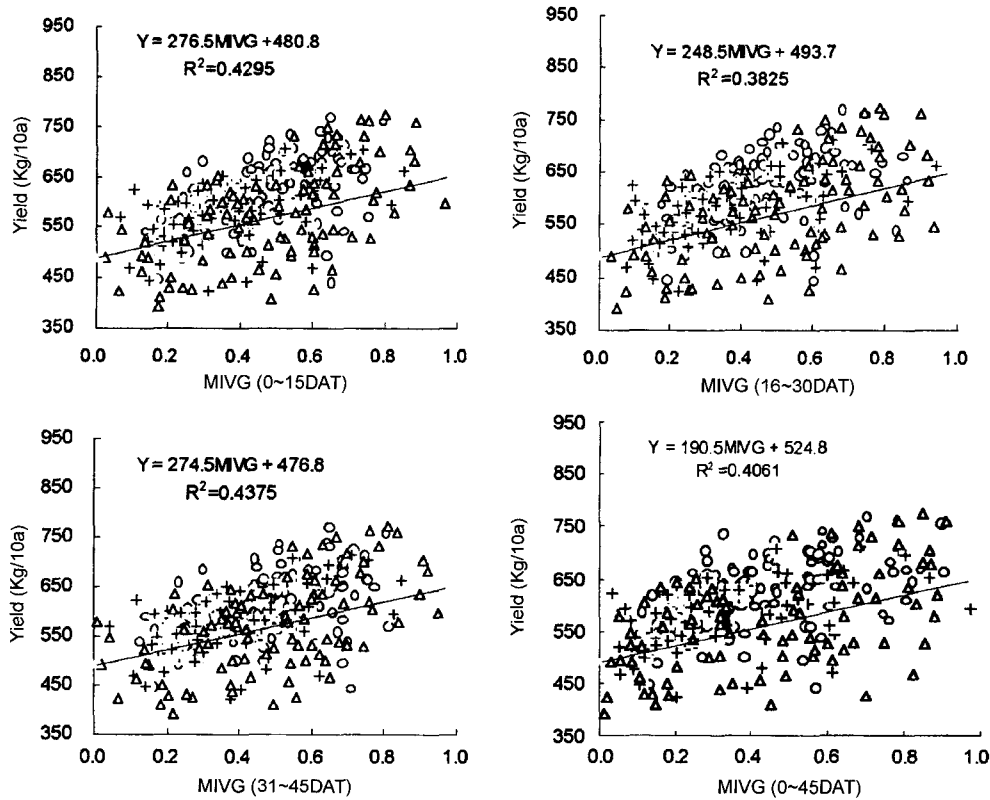


Fig. 3. Relationship between rice yield and mean meteorological yield indices [MIVG's] during different periods in vegetative growth stage. MIVG's were calculated by geometrical mean of indices of mean air temperature, sunshine hours and diurnal range of air temperature during respective period. DAT means days after transplanting.

문제시 된다. 따라서 生殖生長期의 저온에 의한 收量감소를 고려하기 위하여 출수전 30일동안의 냉각도일수(Cooling degree day; Uchijima, 1976)에 대한 收量の 最大境界線을 Fig. 2와 같이 구하였다. 냉각도일수에 대한 最大境界線 함수는 냉각도일이 증가할수록 收량이 떨어지는 지수함수로 잘 표현이 되었다. 登熟期인 출수후 40일 동안 각 時期별로 收量에 대한 氣象指數를 구하기 위하여 登熟期の 時期를 3단계(출수후 0~20일, 출수후 21~40일, 출수후 0~40일)로 구분하여 추정된 最大境界線 함수식은 營養生長期와 生殖生長期의 경우와 마찬가지로 平均氣溫과 日照時數에 대해서는 指數函數로 일교차에 대해서는 2차함수로 잘 표현이 되었다.

氣象指數와 收量과의 관계

벼의 收量에 대한 氣象要素의 영향을 時期別로 收量과 氣象要素의 平均氣溫, 日照時數 및 日較差에 대한 最大境界線 함수식을 상수항(0)을 제외한 식으로 각 氣象要素간의 영향도를 0~1 사이의 값으로 指數化하였다. 한편 平均氣溫, 日照時數 및 日較差를 종합한 收量氣象指數는 이들 각각의 氣象指數를 幾何平均(geometric mean)을 하여 綜合收量氣象指數로 나타내었다.

營養生長期 각 時期의 氣象指數가 收量에 미치는 영향을 파악하기 위하여 營養生長期를 4단계로 구분하여 綜合氣象指數

를 구하여 收量과의 關係를 구한 것이 Fig. 3이다. 여기서 綜合氣象指數는 각 時期 氣象要素의 지수를 幾何平均한 값, 즉 $MIVG = \sqrt[3]{g(T_a) \cdot g(S_h) \cdot g(T_r)}$ 로 계산하였다. 收量과 氣象指數間에는 유의한 직선회귀 관계가 인정되었는데, 이 회귀직선의 결정계수는 이양후 0~15일이 $R^2=0.4295$, 이양후 16~30일이 $R^2=0.3825$, 이양후 31~45일이 $R^2=0.4375$ 이었으며 營養生長期 45일간의 결정계수는 $R^2=0.4061$ 이었다. 즉 綜合氣象指數의 변이가 收量 變異를 가장 높게 설명할 수 있는 時期는 이양후 31~45일이었다

生殖生長期인 출수전 30일 동안 각 時期별로 收量에 미치는 收量氣象指數를 구하기 위하여 生殖生長期의 時期를 3단계로 구분하고(출수전 30~16일, 출수전 15~0일, 출수전 30~0일) 각 時期에 대하여 추정된 收量 산점도는 營養生長期의 경우(Fig. 3)와 유사한 경향이였다. 收量과 氣象指數間에는 유의한 직선회귀 관계가 인정되었는데, 이 회귀직선의 결정계수는 출수전 30~16일이 $R^2=0.5337$, 출수전 15~0일이 $R^2=0.4563$ 生殖生長期 30일간의 결정계수는 $R^2=0.5061$ 이었다. 즉 綜合氣象指數의 변이가 收量 變異를 가장 높게 설명할 수 있는 時期는 출수전 30~16일이었다

登熟期の 收量과 氣象指數간에는 유의한 직선회귀 관계가 인정되었는데, 이 회귀직선의 결정계수는 출수후 0~20일이

Table 3. Linear regressions of meteorological indices in different growth stages to grain yield of rice.

Growth stage	Growth period	Yield formula	R ²
Vegetative stage	0~15DAT	Y=276.5MIVG+480.8	0.429
	16~30DAT	Y=248.5MIVG+493.7	0.382
	31~45DAT	Y=274.5MIVG+476.8	0.437
	0~45DAT	Y=190.5MIVG+524.8	0.406
Reproductive stage	30~16DBH	Y=310.9MIRG+458.9	0.533
	15~0DBH	Y=321.1MIRG+482.7	0.456
	30~0DBH	Y=193.2MIRG+521.4	0.506
Ripening stage	0~20DAH	Y=330.3MIRS+475.5	0.586
	21~40DAH	Y=352.2MIRS+488.8	0.459
	0~40DAH	Y=196.7MIRS+525.8	0.569

MIVG, MIRG and MIRS mean meteorological index for rice yield in vegetative, reproductive and ripening stage, respectively.

R²=0.5869, 출수후 21~40일이 R²=0.4598이었다. 登熟期 40일간의 결정계수는 R²=0.5691이었다. 즉 登熟期에서 綜合氣象指數의 변이가 收量 變異를 가장 높게 설명할 수 있는 時期는 출수후 0~20일이었다. 營養生長期, 生殖生長期, 登熟期の 각 時期별 氣象指數의 收量變異 설명도 즉 회귀모델의 결정계수는 각각 0.383~0.430, 0.460~0.534, 0.4603~0.587로 결정계수는 營養生長期<生殖生長期<登熟期の 순으로 컸다.

收量 氣象指數에 의한 收量豫測模型

最大境界線 분석방법을 통하여 얻어진 각 生育時期別 氣象指數를 다음과 같은 방법으로 전 生育期間에 대한 氣象指數를 구하여 이 氣象指數와 收量과의 직선회귀식을 구하여 收量豫測模型을 작성하였다.

Model I: 벼의 營養生長期, 生殖生長期, 登熟期の 각 生育段階에서 벼 收量變異에 대한 氣象指數의 설명력이 가장 높은 기간만을 선택하여 이들 氣象指數를 幾何平均하여 전 生育기간에 대한 氣象指數를 구하였다. 즉 營養生長期에는 이양후 31~45일의 氣象指數(MIVG₃₁₋₄₅), 生殖生長期에는 출수전 30~16일의 氣象指數(MIRG₃₀₋₁₆), 登熟期에는 출수후 0~20일의 氣象指數(MIRS₀₋₂₀)가 收量변이에 대한 설명력이 가장 높았는데, 각 生育段階에서 이들 기간의 氣象指數만을 선택하여 기하평균을 구하고 收量에 대한 綜合收量氣象指數, 즉

$$MIY_I = \sqrt[3]{MIVG_{31-45} \cdot MIRG_{30-16} \cdot MIRS_{0-20}}$$

로 계산하였다. 이와 같이 계산한 氣象指數와 收量간의 1차회귀로 收量豫測模型을 작성하였는데 收量은 Y=544.5MIY_I+297.8의 관계에 있었으며 이 모델의 결정계수는 0.6512로 收量變異의 약 65%를 이와 같이 계산한 綜合收量氣象指數로 설명하는 것이 가능하였다.

Model II: 벼의 生育기간을 營養生長期, 生殖生長期, 登熟期

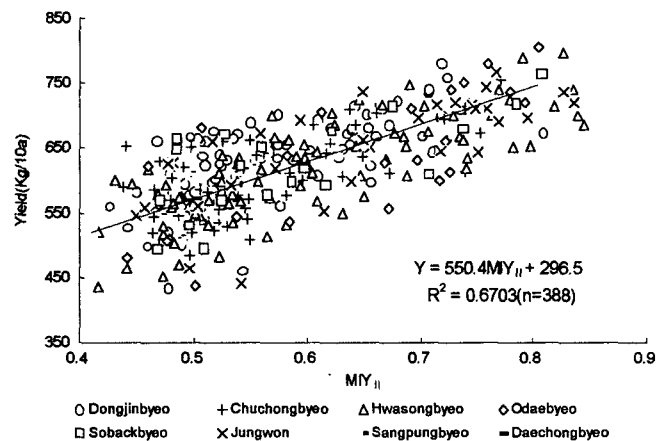


Fig. 4. Relationship between grain yield and meteorological index for grain yield (MIY) which was calculated by the geometric mean of all the meteorological indices considered in each growth stage.

의 3時期로 구분하고 그 각각의 時期에 대하여 營養生長期를 이양후 0~15일, 16~30일, 31~45일의 3時期로, 生殖生長期를 출수 전 30~16일, 15~0일의 두 時期로, 登熟期를 출수 후 0~20일, 21~40일의 두 時期로 구분하여 이 모든 시기의 氣象指數를 기하평균하여 綜合收量氣象指數를 다음과 같이 구하였다. 즉

$$MIY_{II} = \sqrt[7]{MIVG_{0-15} \cdot MIVG_{16-30} \cdot MIVG_{31-45} \cdot MIRG_{30-16} \cdot \sqrt[3]{MIRG_{15-0} \cdot MIRS_{0-20} \cdot MIRS_{21-40}}}$$

로 계산하였다. 收量은 Fig. 4에서 보는바와 같이 계산한 氣象指數와 Y=550.4MIY_{II}+296.5의 1차 회귀관계가 있으며 이 모델의 결정계수는 R²=0.6703으로 收量變異의 67%이상을 이 綜合收量氣象指數로 설명할 수 있는 것으로 나타났다.

Model III: 營養生長期 45일간, 生殖生長期 30일간, 登熟期 40일간의 綜合 氣象指數를 기하평균하여 전 生育기간에 대한 氣象指數(MIY_{III})를 구하였다. 즉

$$MIY_{III} = \sqrt[3]{MIVG_{0-45} \cdot MIRG_{30-0} \cdot MIRS_{0-40}}$$

로 계산하였다. 이와 같이 계산한 氣象指數는 收量(Y)과 Y=275.9MIY_{III}+483.3의 1차 회귀관계가 있었으며 이 모델의 결정계수는 R²=0.6129로 이 모델은 收量변이의 61%이상을 설명하는 것으로 나타났다.

이상에서 살펴본 바와 같이 氣象指數를 계산하는 방법을 달리하여 작성한 收量豫測模型 Model I, II, III은 각각 결정계수가 0.6512, 0.6703, 0.6129로 모든 生育段階에 걸쳐서 기간을 15~20일 단위로 세분하여 모든 기간의 收量에 대한 氣象指數를 고려하여 전 生育기간의 收量氣象指數를 산출한 Model II가 氣象變異에 의한 收量變異의 설명도가 가장 높았다.

적 요

우리나라 벼 수량의 기상반응을 종합적으로 검토하여 벼 수량예측모형을 구축하고자 1985년부터 1999년까지 15년간 수행한 20개 지역의 벼 지역적응시험 자료를 이용하여 기상에 대한 수량반응의 최대경계선(boundary line)분석을 하였으며, 이에 근거하여 수량예측모형을 설정하였다.

1. 벼의 생육기간을 영양생장기, 생식생장기, 등숙기로 구분하고 각 발육단계를 15~20일 간으로 구분하여 각 시기의 기상요소에 대한 수량반응의 최대경계선은 평균기온(T_a)과 일조시수(S_h)에 대해서는 지수함수 $f(T_a)=\beta_0(1-\exp(-\beta_1 \times T_a))$, $f(S_h)=\beta_0(1-\exp(-\beta_1 \times T_h))$ 로 나타났으며 일교차(T_r)는 2차함수 $f(T_r)=\beta_0(1-(T_r-\beta_1)^2)$ 로, 이 식에서 상수항 β_0 를 제거하여 수량에 대한 각 기상요소의 영향도를 0~1로 나타내는 기상지수로 나타내었다.

2. 각 생육시기의 평균기온, 일조시간 및 일교차에 대한 수량반응의 최대경계선 이외에 불임에 의한 등숙률 저하와 그에 따른 수량감소를 고려하기 위하여 Uchijima(1976)가 제안한 냉각도일수(cooling degree day)를 출수전 30일간의 生殖生長期에 계산하여 이에 대한 收量과 등숙률 반응의 最大境界線을 계산하였는데 냉각도일수가 증가하면 수량이 감소하는 지수함수로 잘 표현되어 기존의 연구들과 같은 결과였다

3. 氣象指數는 벼의 생육기간을 營養生長期, 生殖生長期 및 登熟期로 구별하고 각 시기별로 收量 氣象指數를 각 기상요소 기상지수를 기하평균하여 산출하였는데 각 시기별 수량기상지수의 수량변이 설명도는 각각 0.383~0.430, 0.460~0.534, 0.4603~0.587로 결정계수는 영양생장기<생식생장기<등숙기의 순으로 컸다.

4. 최대경계선 분석방법을 통하여 얻어진 각 생육시기별 수량기상지수를 기하평균하여 구한 종합수량기상지수와 수량과

의 직선회귀식을 구하여 수량예측모형(Model I, II, III)을 작성하였다. Model I, II, III은 각각 결정계수가 0.6512, 0.6703, 0.6129로 모든 생육단계에 걸쳐서 기간을 15~20일 단위로 세분하여 모든 기간의 수량에 대한 기상지수를 고려하여 전 생육기간의 종합수량기상지수를 산출한 Model II가 기상변화에 따른 수량변이의 설명도가 가장 높았다.

인용문헌

崔海椿, 정근식. 1984. 수도品種의 收量安定性 評價와 地域특성의 해석. 韓育誌 16(2) : 238-251.

Elliott, J.A. and de Jong, E. 1993. Prediction of field denitrification rates: a boundary Line approach. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57 : 82-87.

堀江 武, 櫻谷哲夫. 1985. 生産の氣象的評價?豫測法に關する 研究. 農業氣象 40(4) : 331-342.

朴錫洪. 1975. 水稻 收量構成要素에 미치는 氣象影響의 해석적 연구. 韓作誌 16 : 1-35.

農村振興廳. 1985-1999. 水稻地域適應試驗報告書.

Moller-Nielsen, J. and B. Friis-Nielsen. 1976. Evaluation and control of the nutritional status of cereals. *Plant and Soil* 45 : 339-351

Schnug, E., J. Heym and F. Achwan. 1996. Establishing critical values for soil and plant analysis by means of the boundary line development system (BOLIDES). *Commun. in Soil Sci Plant Anal* 27 : 2739-2748.

Schmidt, U., H. Thoni and M. Kanpenjohanaw. 2000. Using a boundary line approach to analyze N_2O flux data from agricultural soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 57 : 119-129.

Uchijima, T. 1976. Some aspects of the relation between low air temperature and sterile spikelets numbers in rice plant. *J. Agric. Meteor. Jpn.* 31(4) : 199-202.

Walworth, J. L., W.S. Letzsch and M. E. Sumner. 1986. Use of boundary lines in establishing diagnostic norms. *Soil Sci Soc Am J* 50 : 123-128.

Webb, R.A. 1972. Use of the boundary line in the analysis of biological data. *J Hort Sci* 47 : 309-319.