

最大境界線을 利用한 벼 收量의 氣象反應分析과 收量 豫測

I. 최대경계선 분석과 수량예측모형 구축

김창국¹, 이변우², 한원식¹

¹농촌진흥청, ²서울대학교

Boundary Line Analysis of Rice Yield Responses to Meteorological Conditions for Yield Prediction

I. Boundary Line Analysis and Construction of Yield Prediction Model

ChangKug Kim¹, ByunWoo Lee², and WeonSik Hahn¹

¹Farm Management Bureau, RDA, Suwon 441-707, Korea; Collge of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Suwon 441-744, Korea

1. 서론

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. 最大境界線 分析은 Webb (1972)에 의해 최초로 생물학적 자료에 대하여 적용된 후 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 탈질률의 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 수량 기상지수를 계산하였으며 이를 토대로 한 收量豫測模型을 작성하였다.

2. 재료 및 방법

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 표고 6~576m, 위도 35° 02'~38° 15', 경도 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.

2.1 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 분석을 하였으며 최대경계선 분석은 Schnng 등(1996)의 방법을 이용하였다.

2.2 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.

3. 결과 및 고찰

3.1 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 구하였는데 收量の 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. 生殖生長期는 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 營養生長期와 마찬가지로 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(표 1).

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

| Growth period (DBH) | Meteorological elements | Boundary line formula | Meteorological index formula | No. of group | R ² |
|---------------------|-------------------------|--|---------------------------------|--------------|----------------|
| 30~16 | MT | $f(T_a)=798.1(1-EXP(-0.0512T_a))$ | $g(T_a)=1-EXP(-0.0512T_a)$ | 6 | 0.9854 |
| | SH | $f(S_h)=812.3(1-EXP(-0.2024S_h))$ | $g(S_h)=1-EXP(-0.2024S_h)$ | 6 | 0.9599 |
| | DTR | $f(T_r)=767.6(1-0.009(T_r-11.7498)^2)$ | $g(T_r)=1-0.009(T_r-11.7498)^2$ | 6 | 0.9776 |
| | CD | $f(T_c)=852.5EXP(-0.0673T_c)$ | $g(T_c)=EXP(-0.0673T_c)$ | 7 | 0.9532 |
| 15~0 | MT | $f(T_a)=811.8(1-EXP(-0.0484T_a))$ | $g(T_a)=1-EXP(-0.0484T_a)$ | 6 | 0.9892 |
| | SH | $f(S_h)=876.2(1-EXP(-0.2271S_h))$ | $g(S_h)=1-EXP(-0.2271S_h)$ | 7 | 0.9678 |
| | 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 | 0.9823 |
| | CD | $f(T_c)=919.2EXP(-0.0697T_c)$ | $g(T_c)=EXP(-0.0697T_c)$ | 7 | 0.9625 |
| 30~0 | MT | $f(T_a)=842.8(1-EXP(-0.0818T_a))$ | $g(T_a)=1-EXP(-0.0818T_a)$ | 6 | 0.9787 |
| | SH | $f(S_h)=835.7(1-EXP(-0.4387S_h))$ | $g(S_h)=1-EXP(-0.4387S_h)$ | 6 | 0.9846 |
| | 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 | 0.9995 |
| | CD | $f(T_c)=907.9EXP(-0.0715T_c)$ | $g(T_c)=EXP(-0.0715T_c)$ | 7 | 0.9428 |

* DBH : Days before heading

MT : Mean air temperature(°C), SH : Sunshine hours

DTR : Diurnal temperature range(°C), CD : Cooling degree day

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

生殖生長期에는 저온에 의한 불임과 이에 따른 收量저하가 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 함수는 냉각도일이 증가할수록 收量이 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.

3.2 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(β_0)을 제외한 식으로 각 氣象要素간의 영향도를 0~1사이의 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는 유의한 직선회귀 관계가 인정되었는데, 이 회귀직선의 결정계수는 이앙후 0~15일이 $R^2=0.4295$, 이앙후 16~30일이 $R^2=0.3825$, 이앙후 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 이앙후 31~45일이었다

生殖生長期인 출수전 30일 동안 각 時期別로 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 경우와 유사한 경향이었다. 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 $R^2=0.5869$, 출수후 21~40일이 $R^2=0.4598$ 이었다. 登熟期 40일간의 결정계수는 $R^2=0.5691$ 이었다. 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 時期別 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.

지금까지의 最大境界線 방법에 의하여 추정한 收量模型式이 기존의 방법과 차이가 있는가를 비교하기 위하여 각 時期別 氣象要素와 收量간에 중회귀분석을 실시한 결과 중회귀모델에서 營養生長期의 R^2 는 0.4758로 3時期중 가장 높았으며 生殖生長期와 登熟期는 $R^2=0.1379$, $R^2=0.1153$ 으로 매우 낮아 중회귀분석에 의한 결과는 설명력이 가장 높은 營養生長期의 경우에도 最大境界線 방법에 의하여 추정된 收量 모형식보다 효율성이 떨어졌으며 모든 時期에 있어서도 最大境界線 방법이 결정계수 값이 높게 나타났다. 이와 같은 결과는 이 중회귀모델은 각 氣象要素에 대한 收量の 反應이 직선이라는 가정에 근거하고 있으나 最大境界線에 의한 氣象指數 모델은 氣象要素에 대한 收量反應曲線을 고려하고 또한 각 氣象要因들 간의 상호작용효과도 고려되었기 때문인 것으로 판단된다.

3.3 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 생육기간에 대한 氣象指數를 구하였다. 즉 營養生長期에는 이양후 31~45일의 氣象指數(MIVG_{31~45}), 生殖生長期에는 출수전 30~16일의 氣象指數(MIRG_{30~16}), 登熟期에는 출수후 0~20일의 氣象指數(MIVG_{0~20})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 그림 4에서 보는바와 같이 收量 $Y=544.5MIY_I+297.8$ 의 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 생육기간을 營養生長期, 生殖生長期, 登熟期の 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 출수전 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

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

로 계산하였다. 收量은 그림 5에서 보는바와 같이 계산한 氣象指數와 $Y=550.4MIY_{II}+296.5$ 의 1차 회귀관계가 있으며 이 모델의 결정계수는 $R^2=0.6703$ 으로 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 그림 6에서 보는바와 같이 收量(Y)과 $Y=275.9MIY_{III}+483.3$ 의 1차 회귀관계가 있었으며 이 모델의 결정계수는 $R^2=0.6129$ 로 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.

引用文獻

- 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
- 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 N₂O 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