

담수직파논 올챙이고랭이 발생밀도에 따른 경합 및 쌀 수량예측

원종건^{1*}, 안덕종¹, 김세종¹, 권오도², 문병철³, 박재읍³

Competitiveness and Yield Loss Prediction of Water-seeded Rice by Densities of *Scirpus juncooides* Roxb

Jong-Gun Won^{1*}, Duok-Jong Ahn¹, Se-Jong Kim¹, Oh-Do Kwon²
Byeong-Chul Moon³ and Jae-Eup Park³

ABSTRACT This study was conducted to predict the rice yield loss and determine the economic threshold levels for water direct seeded rice from competition of the most serious weeds, *Scirpus juncooides* Roxb. (bulrush) and *Echinochloa crusgalli* L. (barnyardgrass) in Daegu of Korea. To predict crop yield as a function of weed density used a rectangular hyperbola, and determine their economic threshold levels used the equation developed by Cousens. The rice yield loss model of *S. juncooides* was predicted as $y = 466 / (1+0.00188x)$, $R^2 = 0.933$ and that of *E. crusgalli* was $y = 458 / (1+0.02402x)$, $R^2 = 0.973$. In comparison of the competitiveness represented by parameter β , it was 0.001884 in *S. juncooides* and 0.02402 in *E. crusgalli*. Economic threshold calculated using Cousens' equation was negatively related to the competitiveness of weed. So that the economic threshold of *S. juncooides* was 13.4 and that of *E. crusgalli* was 1.07 plants per m².

Key words: competitiveness; *Scirpus juncooides*; water-seeded rice; weed density; yield loss.

서 언

작물과 잡초 사이의 경합은 농업 생태계에서는 항상 존재하고 있으며, 작물의 수량 형성과 품질 등에 많은 영향을 미치고 있다. 또한 그 영향은 잡초의 밀

도나 본수 또는 잡초 종류 및 잡초와 작물간 경합 정도의 강도에 따라 다양하게 나타나고 있다(Lindquist 등 1996; Cowan 등 1998; Kim 등 2002; 조 등 2006; 권 등 2007; 송 등 2008; 권 등 2009). 일반적인 농업에 있어서 작물의 생산력 및 품질에 미치는

¹ 경상북도 농업기술원, 702-708 대구광역시 북구 동호동 189(Gyeongbuk Agricultural Research & Extension Services, Daegu 702-708, Korea).

² 전남농업기술원 쌀연구소, 520-715 전남 나주시 산포면 산제리 206-7(Jeonnam Agricultural Research & Extension Services, Naju 520-715, Korea).

³ 국립농업과학원, 441-707 경기도 수원시 권선구 서둔동 249(National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon 441-707, Korea).

* 연락저자(Corresponding author) : Phone) +82-54-683-1691, Fax) +82-54-683-1690, E-mail) ricewon@korea.kr

(Received February 23, 2010; Examined March 11, 2010; Accepted March 16, 2010)

영향은 주로 제초제를 처리함으로 최소화 시키고 있으나, 이러한 재배법은 많은 부작용을 초래하는 결과를 가져오게 되었다. 즉, 특정제초제를 계속하여 많은 양을 처리함으로 인한 저항성 잡초의 발생이나, 농업 생태계와 다른 생태계에 있어서 오염을 발생시켜 생태계를 교란시킬 뿐만 아니라, 식품의 안전성에도 상당한 위협이 되고 있다(마 등 2002; 박 등 2005; 박 등 2006). 따라서 모델식을 이용한 잡초 발생에 따른 정확한 수량예측(Cousens 1985; Kropff와 Spitters 1991; Kropff 등 1995; Berti와 Sattin 1996)과 제초제 비용, 쌀 가격, 잡초 완전 방제시 쌀 수량 등을 종합적으로 고려한 경제적 한계 허용 밀도(Economic threshold)라는 개념(Cousens 1987)은 잡초 발생 밀도에 따라 방제할 것인가 말 것인가를 경제적인 관점에서 접근하여 의사결정을 가능하게 하는 것으로 제초비용 절감은 물론 환경적으로도 매우 유용하다고 할 수 있다.

올챙이고랭이는 논에서 우점율이 높은 문제 잡초이며(허 등 1995; 김과 변 1998), 휴경답에서는 큰 군락을 형성하는데 특히 논에서 발생량이 많으며 벼의 초기생육이 완만한 조기재배, 치묘이앙 그리고 담수직파재배 등에서는 출아후의 생육이 왕성해서 피해가 큰 강해잡초이다(양 등 2004). 특히 최근 담수직파답을 중심으로 제초제 저항성 올챙이고랭이가 많이 발생되어 문제시되고 있다(마 등 2002; 박 등 2005; 박 등 2006). 그러나 담수직파벼와 올챙이고랭이간의 밀도에 의한 벼 수량 감소를 예측한 결과는 상대적으로 연구가 많이 진행되어 있지 않아 방제에 대한 의사 결정을 가능하게 하는 자료가 없는 실정이다.

따라서 본 시험은 2008년에 경상북도 농업기술원 담수직파재배 벼 포장에서 잡초발생 예측시스템구축의 일환으로 담수직파 논에서 가장 문제시 되고 있는 잡초 중 하나인 올챙이고랭이를 대상으로 잡초 밀도별 벼와의 경합력을 구명하고 Rectangular hyperbola 모델을 기초로 잡초의 밀도에 따른 쌀 수량 감소를 예측하고 경제적인 방제 필요수준을 구명하고자 실시하였다.

재료 및 방법

포장시험

시험재료로는 중만생종인 일미벼를 프로클로라즈 유제(상표명 : 스포탁)과 페니트리티온유제(상표명 : 스미치온)으로 소독하여 침종한 후 최아를 시켜 5월 10일에 평방미터당 100~120본이 되도록 담수직파로 산파하였다. 잡초의 밀도는 초종별로 처리를 달리 하였으며, 피는 평방미터당 0, 1, 4, 8, 16, 24, 48, 96 본을 조성하였고, 올챙이고랭이는 0, 12, 24, 48, 192, 384, 576본을 조성하여 3반복으로 시험을 실시하였다.

10a당 시비량은 N 11kg, P₂O₅ 4.5kg, K₂O 5.7kg을 파종 전 기비로 N 40%, P₂O₅ 100%, K₂O 70%와 분얼비로 3엽기때 N 30%, 수비는 유수분화기를 전후로 N 30%, K₂O 30%로 나누어서 시비하였다. 벼 생육은 출수 후 30일경에 반복당 20주를 임의 선정하여 간장, 수장, 수수를 조사하였다. 영화수와 등숙비율은 수확 전 반복당 3주를 채취하여 조사하였으며, 수량조사는 반복당 2m²를 수확한 후 10a당 수량으로 환산하였다.

통계분석 및 예측모델 작성

모든 통계 분석은 Genstat(Genstat Committee, 1993) 프로그램을 이용하여 분석하였으며, 잡초 밀도에 따른 벼 수량감소를 예측하기 위한 추천은 1985년에 Cousens에 의해 제시되었던 Rectangular hyperbola 식을 이용하였다.

$$Y = \frac{Y_0}{1 + \beta X} \quad (1)$$

여기서 Y₀는 잡초가 완전 방제시의 쌀 수량, β는 잡초의 벼에 대한 경합력, X는 잡초의 밀도를 나타낸다.

경제적 잡초 피해 한계 밀도(tE)는 잡초 방제에 필요한 비용, 제초제 비용, 쌀값 등을 고려하여 1987년 Cousens에 의해 개발된 식에 의해 추정되었다.

$$tE = \frac{C_h + C_a}{Y_0 PLH} \quad (1)$$

Table 1. Yield and yield components as affected by different densities of *Scirpus juncooides* in water direct seeded rice.

Weed density (plant m ⁻²)	Culm length (cm)	Panicle length (cm)	panicles (No. m ⁻²)	Spikelet (No. panicle ⁻¹)	1000-G weight (g)	Ripened grain ratio (%)	Rice yield (kg 10a ⁻¹)
0	75a ¹⁾	20.5a	300a	86.2a	21.8a	88.9a	473.1a
12	74ab	19.2b	301a	83.3ab	21.6a	86.8a	462.8a
48	74ab	18.8bc	264ab	78.6abc	21.8a	84.9ab	413.5a
192	72bc	18.2c	231bc	76.8abc	21.6a	76.7bc	333.0b
384	71c	16.8d	208cd	69.5bc	21.8a	76.9bc	279.9bc
576	71c	16.5d	171d	63.9c	21.4a	74.0c	225.6c

¹⁾DMRT : In a column, means with the same letter are not significantly different according to the Duncan's multiple test (P=0.05).

여기서 C_n는 제초제 가격, C_a는 제초 작업 비용, Y₀는 잡초 완전방제시 쌀 수량, P는 쌀 가격, L은 잡초 1본에 의해 감소되는 쌀 수량 감소율, H는 제초제 처리시 방제가를 나타낸다.

결과 및 고찰

잡초 밀도에 따른 수량 및 수량구성요소

올챙이고랭이 밀도에 따른 쌀 수량 및 수량구성요소의 변화는 표 1에서 보는 바와 같다. 벼의 간장은 평방미터당 192본에서 감소하기 시작하였고, 수장은 12본부터 짧아지기 시작하였다. 수수의 변화는 48본이 발생될 때 까지는 큰 차이가 없었지만 그 이후에는 유의적으로 감소하기 시작하였다. 수량에 가장 많

은 영향을 미치는 수수가 48본에서는 12%, 192본에서는 23%, 384본에서는 31% 정도 감소하였다. 특히 영화수는 384본에서 유의적으로 감소하기 시작하였으며 192본에서 약 11%, 576본에서는 26% 정도의 감소율을 보였다. 등숙비율은 192본부터 떨어지기 시작하였다. 등숙율 감소 정도는 48본에서 5%, 192본에서 14%, 576본에서 17%였다. 이러한 결과로 인해 수량은 올챙이고랭이가 192본 발생부터 감소하기 시작하였으며, 192본에서 30%, 384본에서 41%, 576본에서 52%씩 감소하였다.

한편, 대조구의 피 발생 밀도에 따른 쌀 수량 및 구성요소의 변화는 표 2에서 보는 바와 같이 벼의 수수는 8본에서 감소하기 시작하였으며, 48본부터 급격히 감소하였다. 48본에서 39.4%, 96본에서는 53% 정도 감소하여 올챙이고랭이와 비교하였을 때 감소율이

Table 2. Yield and yield components as affected by different densities of *Echinochloa crusgalli* in water direct seeded rice.

Weed density (plant m ⁻²)	Culm length (cm)	Panicle length (cm)	panicles (No. m ⁻²)	Spikelet (No. panicle ⁻¹)	1000-G weight (g)	Ripened grain ratio (%)	Rice yield (kg 10a ⁻¹)
0	75a ¹⁾	20.5a	300a	86.2a	21.8a	88.9a	473.1a
1	73ab	19.8b	280a	83.3ab	21.6a	84.1ab	426.6a
8	72bc	18.4c	271a	75.7abc	21.6a	80.7abc	381.2ab
24	71bc	17.7d	260a	72.5bc	22.0a	76.5bc	320.2ab
48	70cd	17.4de	182b	67.3cd	21.4a	73.9bc	184.6bc
96	68d	16.9e	141b	58.8d	22.0a	69.1c	142.8c

¹⁾DMRT : In a column, means with the same letter are not significantly different according to the Duncan's multiple test (P=0.05).

현저히 높았다. 영화수는 피 24본부터 감소하였고, 8본에서 12%, 24본에서 16%, 48본에서 22%, 96본에서 32% 정도 줄어들었다. 피 발생밀도에 따른 등숙율은 24본부터 떨어졌고 8본에서 9%, 24본에서 14%, 48본에서 17%, 96본에서 22% 정도 떨어졌다. 이에 따른 수량은 피가 48본에서 유의적으로 감소하기 시작하였으며, 8본에서 19%, 24본에서 32%, 48본에서 61%, 96본에서 70%씩 감소하였다.

벼와 잡초의 경합

대구에서 올챙이고랭이 밀도에 따른 벼 수량감소를 예측하기 위한 추정식을 작성하기 위해 재료 및 방법의 계산식(1)을 이용하여 추정된 잡초완전 방제시의 벼 수량(Y_0)과 잡초의 벼에 대한 경합력(β) 등을 표 3에 제시하였으며, 표 3에서 구해진 올챙이고랭이와 피의 완전 방제시 수량과 올챙이고랭이와 피에서 벼와의 경합력을 바탕으로 하여 올챙이고랭이 밀도에 따른 벼 수량 감소 예측식을 그림 1에 나타내었다. 올챙이고랭이 및 피를 완전 방제했을 경우를 가정한 벼 수량은 올챙이고랭이에서 10a당 466kg로 피의 458kg에 비해 다소 높았으며, 벼와 잡초의 경합력은 올챙이고랭이에서 0.00188로 피의 0.02402 보다 낮아 그림 1에서 보는 바와 같이 올챙이고랭이의 밀도 증가에 따른 실측 및 예측 수량($y = 466/(1 + 0.00188x)$, $R^2 = 0.933$)과 피의 실측 및 예측 수량($y = 458/(1 + 0.02402x)$, $R^2 = 0.973$)을 비교해 볼 때 그 격차가 잡초의 밀도가 증가할수록 계속 벌어지는 경향을 보였다. 이는 벼와 잡초간의 경합에 있어서 잡초 종류에 따라 경합의 차이는 현저히 달라질 수 있고, 그 경합력이 클수록 수량 감소는 더욱 증가한다는 것을 알 수 있었다. 본 시험의 피 경합력은 원 등(2009)에 의해 보고된 벼 이앙재배시의 경합력인 0.02433과 비슷하였으나, 전남지방의 피 경합력은 담수직파 재배에서 0.03782(권 등 2009)로 이앙재배의 0.010568(권 등 2007)에 비해 약 3배 정도 높게 보고되고 있어 잡초의 경합력이 지역간, 재배 양식간 변이가 심한 것을 보여 주고 있다. 한편, 조 등(2006)에 의해 보고된 벼 건답직파 재배에서 피의 경합력인 0.0868과는 2.3~3.6배 정도 차이를 보여 재배양식에 따라 잡초 초

Table 3. Weed free rice yield (Y_0) and the competitiveness represented by parameter β , whose reciprocal $1/\beta$ is a weed density reducing rice yield by 50% in water direct seeded rice.

Weed	Parameter estimate		R^2
	Y_0 (kg 10a ⁻¹)	β	
<i>Scirpus juncoide s</i>	466	0.00188	0.933
<i>Echinochlo r crusgalli</i>	458	0.02402	0.973

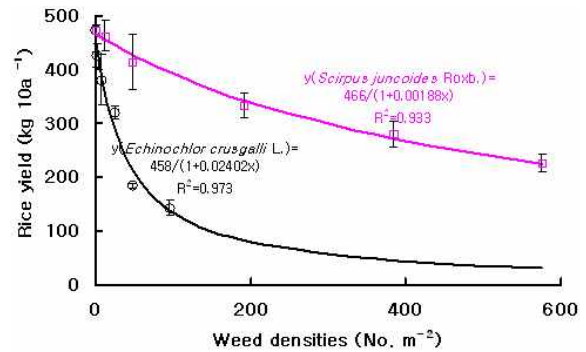


Fig. 1. Observed and predicted yield as a function of *Scirpus juncoide s* and *Echinochlo r crusgalli* density in direct seeded rice. The predicted rice grain yield (continuous line) was calculated using eqn 1 and parameter estimates in table 4. The vertical bars represent the standard deviation.

종별 경합력이 상당히 달라짐을 알 수 있었다. 재배양식간 올챙이고랭이의 경합력은 본 시험인 담수직파에서 0.00188로 조 등(2007)이 이앙재배에서 보고한 0.0007162에 비해 약 2.6배 정도 큰 것을 알 수 있었다. 그리고 담수직파에서 알방동사니의 0.001134(권 등 2009)와 비슷한 경합정도를 나타내었다.

벼와 잡초의 경합에 의한 수량 감소 예측 및 감수율

그림 1에서 구해진 벼와 잡초와의 경합에 의해 얻어진 모델식에 의해 잡초밀도에 따른 벼의 예측 수량과 수량감소율을 계산한 결과를 표 4에 나타내었다. 잡초 본수가 4본에서 올챙이고랭이는 10a당 462kg로 수량이 0.7%, 피는 418kg로 8.8% 감소하였으며, 48본에서 올챙이고랭이는 428kg로 8.3%, 피는 213kg로 53.6%의 수량이 감소하였으며, 192본 발생시 올챙이고랭이는 342kg 26.6%, 피는 82kg로 82.2%나

Table 4. Prediction of rice grain yields and reduction rate by the equation estimated in Fig. 1. as a function of *Scirpus juncooides* and *Echinochlor crusgalli* in water direct seeded rice.

Weed density (plants m ²)	0	1	2	3	4	8	16	24	48	96	192
<i>Scirpus juncooides</i>											
Predicted Rice yield (kg 10a ⁻¹)	466	465	464	463	462	459	453	446	428	395	342
Reduction Rate (%)	0	0.2	0.4	0.6	0.7	1.5	2.9	4.3	8.3	15.3	26.6
<i>Echinochlor crusgalli</i>											
Predicted Rice yield (kg 10a ⁻¹)	458	447	437	427	418	384	331	290	213	138	82
Reduction Rate (%)	0	2.3	4.6	6.7	8.8	16.1	27.8	36.6	53.6	69.8	82.2

수량이 감소하였다. 특히 벼 수량이 10% 이상 감소 되기 시작한 잡초 밀도는 올챙이고랭이가 96본 이었으나 피는 8본으로 잡초와 벼와의 경합력 차이에 의한 수량 감소 정도는 상당한 차이가 있었다.

경제적 방제수준

표 5는 Cousens(1987)에 의해 개발된 계산식(2)를 이용하여 벼와 잡초와의 경합에 있어서 경제적 피해 한계 밀도를 산출하여 나타낸 것이다. 그 결과, 제초제 구입 비용은 10a당 12,492원이었고, 제초제를 살포하는데 소요되는 인건비 등은 10a당 9,936원, 쌀의 kg당 가격은 2,000원, 제초제의 방제가 95%로 적용하였을 때 경제적 피해 한계 밀도는 잡초 완전 방

제시 수량이 10a당 466kg이고, 잡초 1본당 수량 감소 정도가 0.001884인 올챙이고랭이는 평방미터당 13.4본, 잡초 완전 방제시 수량이 458kg이고 잡초 1본당 수량 감소 정도가 0.02402인 피는 평방미터당 1.07본이었다. 이와 같은 결과로 볼 때 경합력이 낮았고 잡초의 완전 방제시 쌀 수량이 높았던 올챙이고랭이에 대한 경제적 피해 한계 밀도는 피에 비해 10배 이상 많은 것을 알 수 있었다. 경북지역 이양재배에서 산출된 피의 경제적 방제수준은 평방미터당 0.98본(원 등 2009)과 비슷하였으나, 전남지역 담수직파의 0.6본(권 등 2009)에 비해서는 약간의 차이를 보였다. 한편, 조 등(2006)에 의해 보고되었던 건답직파의 피 경제적 방제수준은 0.47본으로 이양재배나 담수직파의

Table 5. Parameter estimates and economic threshold (tE) of *Scirpus juncooides* and *Echinochlor crusgalli* in water direct seeded rice.

Weed species	Parameter estimates and economic thresholds (tE)						
	C _h (₩ 10a ⁻¹)	C _a (₩ 10a ⁻¹)	Y ₀ (kg 10a ⁻¹)	P (₩ kg ⁻¹)	L	H	tE (No m ²)
<i>Scirpus juncooides</i>	12,492	9,936	466.3	2,000	0.001884	0.95	13.4
<i>Echinochlor crusgalli</i>	12,492	9,936	457.8	2,000	0.02402	0.95	1.07

*Abbreviation : Y₀, weed free rice yield; P, value per unit of crop; L, proportion of yield loss per unit weed density; H, herbicide efficacy calculated as (efficacy/100); C_h, herbicide cost; C_a, application cost.

경우 보다 낮아 잡초 방제에 더 많은 노력과 관심이 필요할 것으로 사료되었다. 올챙이고랭이의 이앙재배 경제적 방제수준은 28본(조 등 2007)으로 본 시험 담수직파의 13.4본에 비해 약 2배 정도 높았다.

경제적 방제수준은 엄밀히 말하여 고정된 값은 아니며, 나라별 또는 지역별 경제적 여건이나 시대적 여건에 따라 달리 적용될 수 있다. 최근 들어 농산물의 안전성에 관심이 고조되면서 제초제에 대한 소비자들의 우려가 커지고 있는 시대적 상황을 고려할 때 잡초 종류별 또는 재배양식별 잡초 밀도에 따른 벼와의 경합력을 구명하고 정확한 수량 감수 모델에 의한 경제적 방제수준을 제시하는 것은 잡초를 방제할 것인가에 대한 판단 근거를 제공할 뿐 아니라 제초제의 무분별한 남용을 방지하는데도 일조할 것으로 생각된다.

요 약

본 시험은 2008년에 경상북도 농업기술원 벼 재배 포장에서 최근 담수직파답에서 제초제 저항성 잡초로 가장 문제시 되고 있는 잡초 중 올챙이고랭이를 대상으로 잡초 밀도별 벼와의 경합력을 구명하고 Rectangular hyperbola 모델을 기초로 잡초의 밀도에 따른 쌀 수량 감소를 예측하여 경제적인 방제 필요수준을 구명하고자 실시하였다. 잡초를 완전 방제 했을 경우를 가정한 벼 수량은 올챙이고랭이에서 10a당 466kg으로 피의 457kg보다 다소 높았으며, 벼와 잡초의 경합력은 올챙이고랭이에서 0.00188로 피의 0.02402 보다 낮았고, 수량 예측식은 올챙이고랭이가 $y = 466/(1+0.00188x)$, $R^2 = 0.933$, 피가 $y = 458/(1+0.02402x)$, $R^2 = 0.973$ 로 나타났다. 제초제 구입 비용을 10a당 12,492원, 제초제 살포 인건비를 9,936원, 쌀의 가격을 kg당 2,000원, 제초제 방제가 95%로 적용하여 구한 경제적 피해 한계 밀도는 잡초 완전 방제시 수량이 10a당 466kg이고 잡초 1본당 수량 감수 정도가 0.001884인 올챙이고랭이는 평방미터당 13.4본, 잡초 완전 방제시 수량이 458kg이고 잡초 1본당 수량 감수 정도가 0.02402인 피는 평방미터당 1.07본이었다.

인 용 문 헌

- 권오도, 국용인, 조승현, 문병철. 2007. 벼 이앙재배에서 피와 알방동사니 발생밀도에 따른 쌀 수량, 미질 및 경제적 허용 한계밀도 설정. 한국잡초학회지 27:102-111.
- 권오도, 문병철, 안규남, 박홍규, 신해룡, 국용인. 2009. 벼 담수직파에서 알방동사니의 발생밀도에 따른 쌀 수량예측 및 경제적 방제밀도 수준 설정. 한국잡초학회지 29:167-177.
- 김현호, 변종영. 1998. 벼 직파재배 유형에 따른 잡초 발생 및 벼의 수량에 미치는 영향. 한국잡초학회지 18:12-19.
- 마상용, 고성림, 한성수. 2002. 올챙이고랭이(*Scirpus juncooides* Roxb.) 수집종의 Sulfonylurea계 제초제에 대한 저항성. 한국잡초학회지 22:334-342.
- 박태선, 강동균, 문병철, 조정래, 김길웅. 2005. Sulfonylurea계 제초제 저항성 올챙이고랭이(*Scirpus juncooides* Roxb.)의 발생 밀도에 따른 벼의 생리 생태적 특성 변화. 한국잡초학회지 25: 179-184.
- 박태선, 문병철, 조정래, 강충길, 박재읍. 2006. 논에서 Sulfonylurea계 저항성 올챙이고랭이(*Scirpus juncooides* Roxb.)의 관리와 경합특성. 한국잡초학회지 26:98-107.
- 송석보, 황재복, 홍연규, 강항원. 2008. 기계이앙 재배 논에서의 여뀌바늘 발생밀도가 벼 생육 및 수량에 미치는 영향. 한국잡초학회지 28:214-219.
- 양환승, 김동성, 박수현. 2004. 잡초 형태·생리·생태 합관화류 II. 이전농업자원도서 pp. 462-465.
- 원종건, 안덕중, 김세중, 권오도, 문병철, 박재읍. 2009. 기계이앙답 가막사리와 한련초 발생밀도에 따른 벼 수량 감수정도 예측 및 경제적 한계밀도. 한국잡초학회지 29:328-335.
- 조승현, 권영립, 최동철, 최정식, 문병철, 전재철. 2006. 벼 건답직파 재배에서 잡초경합에 의한 수량감소. 한국잡초학회지 26:295-302.
- 조승현, 권오도, 권영립, 최동철, 문병철, 전재철. 2007. 이앙재배에서 올챙이고랭이 경합에 의한 수량감소. 한국잡초학회지(별책) 27:84-85.

- 허상만, 조이기, 권삼열. 1995. 벼 직파재배 양식에 따른 잡초발생양상 및 경합특성. 제 1보. 잡초의 발생분포와 생장. 한국잡초학회지 15:278-288.
- Berti, A., and M. Sattin. 1996. Effect of weed position on yield loss in soybean and a comparison between relation weed cover and other regression models. *Weed Res.* 36:249-258.
- Cousens, R. D. 1985. A simple model relating yield loss to weed density. *Annals Applied Biology.* 107:239-252.
- Cousens, R. D. 1987. Theory and reality of weed control thresholds. *Plant Protection Quarterly.* 2:13-20.
- Cowan, P. S. E. Weaver and C. J. Swanton. 1998. Interference between pigweed (*Amaranthus* spp.), barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*), and soybean (*Glycine max.*). *Weed Science.* 46:533-539.
- Genstat Committee. 1993. Reference Manual (Genstat 5.0, Released 3). Oxford University Press, Oxford, UK.
- Kim, D. S., P. Brain, E. J. P. Marshall and J. C. Caseley. 2002. Modelling herbicide dose and weed density effects on crop-weed competition. *Weed Research.* 42:1-13.
- Kropff M. J., and C. J. T. Spitters. 1991. A simple model of crop loss by weed competition from early observations on relative leaf area of weeds. *Weed Research.* 31:97-105.
- Kropff, N. J., L. A. P. Lotz, S. E. Weaver, H. J. Bos, J. Wallinga and T. Migo. 1995. A two-parameter model for prediction of crop loss by weed competition from early observations of relative area of weeds. *Annals of Applied Biology.* 126:329-346.
- Lindquist, J. L., D. A. Mortensen, S. A. Clay, R. Schmenk, J. I. Kells, K. Howatt and P. Westra. 1996. Stability of corn (*Zea mays*)-velvetleaf (*Abutilon theophrasti*) interference relationships. *Weed Science.* 44:309-313.