

최 중
연구보고서

지상 원격탐사를 이용한 작물의 질소 시비량 추천방법 개발

Recommendation of Application rate of N Fertilizer for
Crop by Ground-Based Remote Sensing

주관연구기관 : 충북대학교

협동연구기관 : 충북농업기술원

농 림 부

제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “지상 원격탐사를 이용한 작물의 질소시비량 추천방법 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2007 년 5 월 25 일

주관연구기관명 : 충북대학교

총괄연구책임자 : 홍순달

책 임 연 구 원 : 석영선

책 임 연 구 원 : 강보구

선 임 연 구 원 : 김응모

연 구 원 : 김태일

연 구 원 : 권의석

연 구 원 : 김영상

연 구 원 : 김준교

보 조 원 : 강성수

보 조 원 : 장세영

보 조 원 : 공효영

보 조 원 : 한재규

보 조 원 : 심재식

보 조 원 : 박성일

보 조 원 : 김용현

보 조 원 : 신숙진

요 약 문

I. 제 목

지상 원격탐사를 이용한 작물의 질소시비량 추천방법 개발

II. 연구개발의 목적 및 중요성

질소는 세포 구성물질인 단백질의 핵심성분으로 작물의 수량과 품질을 결정하는 가장 중요한 영양소이면서 또한 질소과량에 의한 다즙성 식물은 병충해 이병율과도 밀접한 관계를 갖기 때문에 작물의 생산성에 가장 크게 영향을 미치는 핵심 성분이다. 그러나 토양 중 질소는 이동성이 매우 활성적이기 때문에 시간적 공간적 변이에 의한 토양의 질소공급능력 평가는 용이하지 않다. 특히 작물의 생육시기에 강우분포가 일정하지 않고 반건조 지역의 특성을 나타내는 국내의 기상조건에서 토양의 비옥도를 검정하여 작물의 질소시비량을 정확하게 결정하는 것은 친환경 농업을 정착시키는 핵심적 기술이다.

따라서 작물의 요구도를 기준으로 추천되는 관행의 시비량은 대부분의 경작지에서 과량시비의 결과를 초래하였다. 국내농업 양분지표 중 질소 균형지표 설정에 관한 연구에서 질소균형지표는 85년 기준 $70\sim 162 \text{ kg ha}^{-1}$ 에서 97년에 1.7~2.3배 증가되었으며 증가원인을 가축분뇨 및 화학비료 소비량 증가와 경지면적 감소로 분석하였다. 이러한 결과는 질소비료의 시용량이 매우 과다함을 시사하는 것이며 특히 가축분뇨를 질소 시비량에 고려하지 않는 시비관행이 질소투입량을 증가시키는 원인이 되고 있다.

시간적 공간적 변이특성을 나타내는 토양의 질소공급능력을 평가하기 위한 토양검정은 토양특성이외에 수많은 환경요인들이 종합적으로 작용하기 때문에 실시간으로 적시에 단일지표에 의하여 평가한다는 것은 거의 불가능하다. 그러나 토양특성을 포함한 여러 가지 환경요인들이 종합적으로 작용하여 반영된 식물체의 영양상태를 평가하는 식물체 검정법은 보다 효율적일 수 있으며 그 구체적인 접근방법이 식물의 광학적 특성을 활용하는 원격탐사 기술이며 최근에 위성탐사 방법에서 지상부 탐사 방법으로 전환 발전되고 있다.

이러한 원격탐사 기술은 인공위성이나 항공기를 통한 반사 신호와 이미지를 측정하

는 선진국의 독점적인 기술로 발전되어 왔기 때문에 우리 농업분야에 대한 활용은 더 많은 시간이 요구되는 선진기술로 인식되어 왔다. 그러나 최근에는 센서를 장착하는 platform 이 인공위성이나 항공기가 아닌 트랙터와 같은 농기계나 혹은 개인 휴대용으로까지 발전 전환되면서 원격탐사는 정밀농업을 수행하기 위한 새로운 측정기술로 발전되고 있다. 이러한 휴대용 혹은 농기계 장착용 원격탐사에 의한 측정기술은 관행의 시료채취, 건조, 분쇄, 분석절차 등의 복잡한 조사과정에 비하여 신속하고, 비 접촉 및 비 파괴적이며 원하는 시기에 언제나 반복적으로 측정할 수 있는 편의성과 함께 경제적인 이점을 가지고 있는 새로운 식물체 검정방법이다.

이제 우리 농업의 시비체계도 밑거름은 최소화 하고 덧거름은 적정화 하는 효율적 관리체계로의 전환을 적극적으로 검토할 때이다. 어린 유아기보다는 실제로 영양이 필요한 청소년기에 적시 적량의 양분을 공급할 때 건강한 성인으로 성장하듯이 작물의 양분 요구량이 많지 않은 유묘기 나 생육 초반기보다는 영양생장이 왕성해지는 결정적 생육시기(critical season) 적량의 양분을 공급해야 할 것이다. 대부분의 작물에서 결정적 시기에 관한 특성은 밝혀져 있으므로 적정시비량을 어떻게 결정하느냐가 중요한 관점이다. 작물의 생장에 관여하는 요인은 토양조건 이외에 무수히 많은 환경요인들이 관여하고 있기 때문에 토양검정에 의한 평가는 극히 제한적일 수밖에 없고 토양요인을 포함한 여러 가지 환경요인들이 종합적으로 작용하여 반영된 식물체에 대한 광학적 검정은 보다 효율적일 수 있다. 이 기술은 질소비료 과다사용에서 유발되는 작물의 생산성 저하와 토양 및 수자원 환경오염을 방지할 수 있는 정밀농업의 핵심기술로 활용할 수 있으며 특히 영농규모가 작은 우리의 농업환경에서도 친환경농업을 달성하기 위한 중요한 선도 기술로 생각된다.

Ⅲ. 연구개발 내용 및 범위

본 연구는 선진국에서 정밀농업 실천을 위한 핵심기술로 활용하기 시작한 지상원격탐사센서를 이용하여 밭작물의 질소 시비추천을 위한 방법을 개발하려는 것이다. 공시작물로 국내 재배면적이 많은 고추와 연초를 공시하여 사경재배 양액시험과 포장평가시험으로 구분하여 수행하였다. 사경재배 온실시험은 질소 스트레스에 따른 작물의 광학적 특성을 조사하고 또한 작물의 생장량 평가를 위한 식물생장지표를 비교 검토

하였다. 질소 스트레스 조건의 처리를 위하여 사경재배 양액재배방법으로 연초와 고추재배를 위한 완전 영양액의 질소농도를 기준으로 40%, 60%, 80%, 100%, 120%, 140%의 6개 수준으로 하였다. 재배방법은 온실조건에서 20L 포트에 모래를 충전시키고 양액을 수용할 수 있는 사각형 플라스틱 상자에 위치시키고 사경재배 하였다. 연초묘와 고추묘는 이식후 10일간 물을 5일마다 교환 공급해 주고 이식후 10일부터 20일까지는 양액 처리농도의 50% 조건의 용액을 이식 20일 이후부터는 양액 처리농도 100% 용액을 매 4일마다 포트 윗면에 교환 공급하였다. 시험에 적용한 원격탐사 센서 측정기는 현재 개발되어 지상 원격탐사 측정기로 활용되는 센서들인 Chlorophyll meter (Minolta, SPAD502), FIELDSCOUT™ Chlorophyll meter (Spectrum™, CM1000), Spectroradiometer (LI-1800 and SD-2000), Crop Circle™ (Holland Scientific, Lincoln, Nebraska)-passive sensor, Crop Circle™ ACS-210(Holland Scientific, Lincoln, Nebraska) - rNDVI 및 aNDVI 측정 active sensor, GreenSeeker™ (Ntech Industries, Ukiah, California)-rNDVI 및 gNDVI 측정 active sensor 등이었다. 조사항목은 연초는 이식후 25일부터 5일 간격으로, 고추는 이식후 30일부터 1주일 간격으로 생육조사와 함께 원격탐사 측정기에 의한 광학적 성질을 canopy 조건에서 조사하였다. spectroradiometer의 경우 측정회수는 최소 3회 이상, 엽록소 측정기는 10회 이상 실시하였다. 식물체 시료는 생육단계별로 생체중, 건물중, 질소 흡수량 등을 조사하였다. 그리고 생육 중반기의 작물 생체량 및 최종 수량과 원격탐사 측정치와의 상호관계를 분석하여 효율적 식물생장지표, critical season, 충족지수 등을 평가하였다. 또한 포장조건에서 지상 원격탐사 지표에 의한 질소 시비수준 구분 및 생체량 평가를 수행하였다. 처리내용은 토양의 질소 공급능력을 기준으로 연초재배 포장과 고추재배 포장에서 각각 상, 중, 하의 비옥도를 갖는 3개 포장을 선정하여 질소 시비수준을 4개 수준으로 구분하여 작물 군락에 대한 센서들의 측정효율을 비교하였다. 재배방법은 연초와 고추의 표준 멀칭 재배법에 준하여 농가 포장에서 수행하였으며 원격탐사 센서 측정기는 사경재배 조건에서 활용하였던 센서들을 이용하여 동일한 방법으로 조사하였다.

지상 원격탐사에 의한 질소 적정시비량 추천모델은 질소비수준별 작물의 생체량과 가장 밀접한 센서 및 식물생장지표와 검정을 적정시기를 결정하여 평가하였다.

최적의 센서와 식물생장지표의 선별은 작물의 수량요인들과 가장 밀접한 상관성을 갖는 효율적인 센서 및 식물생장지표를 평가하여 선별하고 또한 생육단계별 결정시기 (critical season)를 선별하여 원격탐사 검정을 위한 작물별 최적시기를 구명하였다. 지상 원격탐사에 의한 질소 적정시비량 추천모델은 검정을 위한 최적시기의 가장 효율적인 센서에 의한 지표를 이용하여 작물의 최종수량 및 질소시비수준과의 회귀관계식으로부터 개발하였다. 개발된 질소 시비추천 모델은 포장시험에서 평가하기 위하여 연초재배 포장과 고추재배 포장을 토양의 질소 공급능력에 따라 다양한 10개 이상을 선정하여 질소 시비수준을 농가시비구, 추천 표준시비구, 원격탐사 검정시비구로 처리하여 평가하였다. 또한 최종적인 포장에서의 질소 시비추천 모델의 실증시험을 위하여 동일한 방법으로 각 작물별로 10개 이상의 다양한 비옥도 특성을 갖는 포장을 선정하여 효율성을 평가하였다.

IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

여러 가지 지상원격탐사센서들의 효율성을 비교하기 위하여 사경재배 조건에서 질소수준을 40%에서 140% 까지 6개 수준으로 처리된 작물의 개체조건과 포장에서 다양한 비옥도 및 질소 시비수준의 처리에 대한 작물의 군락조건으로 구분하여 생체량 변이와 센서들의 반사율지표들의 상호관계를 비교 평가하였다. 지상원격탐사 passive형 센서들이나 active형 센서들의 반사율지표들은 작물의 군락조건에 관계없이, 즉 사경재배 포트의 개체식물과 포장시험 처리구의 군락식물 조건 모두 동일시기의 작물 생체량 및 질소흡수량과 고도로 유의성 있는 상관성을 보였다. 센서형태 별로 구분할 때 passive형 센서 중에는 Crop Circle 반사율지표들이 고추와 연초의 생체량 및 질소흡수량 평가에 가장 양호하였다. 그러나 passive sensor들은 측정시의 광조건, 즉 구름 낀 흐린 날씨나 혹은 측정시간에 따른 광량의 차이 등에 의하여 영향을 받기 때문에 active형 센서보다 평가의 효율성이 낮았다. 따라서 인공적인 LED 광원을 이용하여 측정시의 광 환경조건에 관계가 없는 active형 센서인 Crop Circle ACS-210의 반사율 지표는 고추와 연초 작물의 생체량 및 질소흡수량을 가장 양호하게 평가하였다.

원격탐사센서에 의한 작물의 질소시비량 추천모델을 개발하기 위하여 질소시비추천을 위한 센서 효율성은 작물의 최종 수량특성 및 질소흡수량과 생육단계별 효율적

센서 반사율지표들의 상호관계를 평가하여 비교하였다. 원격탐사 검정을 위한 최적 시기는 고추와 연초의 최종 수량특성 및 질소흡수량과 생육단계별 원격탐사센서 반사율지표의 상관관계로부터 구명하였다. 고추와 연초 작물 모두 생육 초중반기 active형 센서들의 반사율지표는 최종 수량특성들과 고도로 유의성 있는 상관을 보였으며 이러한 결과는 사경제배 포트식물의 개체식물 조건과 포장조건의 작물군락 조건 모두에서 공통적이었다. 고추의 경우 이식후 120일 전후 수확기 건물중 및 생고추 수량은 이식후 55일부터 90일 사이의 반사율지표와 유의성 있는 상관을 보였으며 질소비료 덧거름 시비추천을 위한 원격탐사 최적 검정시기는 이식후 70일 전후로 판단되었다. 또한 연초 수확기의 수량 및 질소흡수량은 이식후 30일부터 50일의 반사율지표들과 밀접한 상관을 보였으나 원격탐사 검정에 의한 질소비료 시용시기를 가능한 앞당기기 위하여 최적 검정 시기는 이식후 30일 전후가 바람직 할 것으로 판단되었다. 고추와 연초 모두의 원격탐사 검정을 위한 효율적인 센서는 생체량 평가에서 가장 효율적인 센서로 평가되었던 active형 센서 Crop Circle ACS-210의 aNDVI로 선발되었다.

상기와 같이 원격탐사 검정을 위한 최적 시기와 효율적 센서를 선정한 결과는 포장조건의 작물군락에 대한 평가에서도 동일한 경향으로 평가되었다. 따라서 원격탐사 검정법으로 고추는 이식후 70일 전후에, 연초는 이식후 30일 전후에 active형 Crop Circle ACS-210 센서로 결정하였고 시비량 추천모델은 효율적 반사율지표의 충족지수와 질소 시비수준의 회귀관계식으로 확립하였다. 반사율지표의 충족지수는 최적상태 작물의 측정지표에 대한 비율 값을 의미하며 이는 반사율지표 측정치가 년차 간 및 작물 품종특성에 따라 동일하지 않기 때문에 상대적인 개념으로 선진국에서 활용하는 방법이다. 따라서 고추에 대한 질소 시비량 추천 회귀식은 $Y(\text{aNDVI의 충족지수}) = -0.2577x^2 + 0.6517x + 0.5466$ (x =질소 시비비율, %), 연초에 대한 추천 회귀식은 $Y(\text{aNDVI의 충족지수}) = -0.2917x^2 + 0.6687x + 0.5595$ (x =질소 시비비율, %)로 적용하였고 각각의 회귀관계의 결정계수(R^2)는 0.82 및 0.67이었다.

고추와 연초 두 작물에 대하여 원격탐사 active형 Crop Circle ACS-210 센서의 aNDVI에 의하여 확립된 질소 시비비율의 추천모델을 포장조건에서 신뢰도를 평가하기 위하여 무비구, 토양검정시비구 및 원격탐사 검정시비구로 구분하여 비교하였다.

고추에 대한 원격탐사 검정시비구는 2005년의 경우 11개 포장에서 이식후 60일째

aNDVI에 의한 충족지수가 0.71~0.98의 분포를 보였고 추천모델식에 의한 질소 시비비율은 비료이용율을 70%로 적용하였을 때 고추 시비량의 0%~100%까지 추천되었다. 2006년의 경우 10개 포장에서 이식후 58일째 aNDVI에 의한 충족지수는 0.85~1.01의 분포를 보였고 추천모델에 의한 질소 시비비율은 비료이용율을 60%로 적용하였을 때 0%~64.4%의 분포를 보였다. 최종 수확된 고추수량은 2005년과 2006년 공히 반사율지표 검정시비구와 토양검정시비구 사이에 큰 차이를 보이지 않고 유사하였다.

연초에 대한 원격탐사 검정시비구는 2005년의 경우 10개 포장에서 이식후 35일째 aNDVI에 의한 충족지수가 0.42~0.91의 분포를 보였고 추천모델식에 의한 질소 시비비율은 비료이용율을 70%로 적용하였을 때 연초 표준시비량의 13%~83%까지 추천되었다. 2006년의 경우 10개 포장에서 이식후 28일째 aNDVI에 의한 충족지수는 0.62~0.93의 분포를 보였고 추천모델에 의한 질소 시비비율은 비료이용율을 70%로 적용하였을 때 4%~129%의 분포를 보였다. 연초의 질소비료 이용율을 70%로 간주하여 추천한 반사율지표 검정시비구의 연초수량은 표준시비구에 비하여 2005년 72%~102%, 2006년 72%~104%로 비슷하게 분포되었다. 선정된 10개 포장에서 원격탐사 시비구의 연초 수량은 표준시비량의 87% 이상이 7개 포장이었고 나머지 3개 포장에서 72%, 74% 및 79%의 분포를 보였다. 이러한 결과는 고추의 경우와 달리 연초의 생육기간이 65일 정도로 짧기 때문에 이식후 30일 전후에 사용된 비료의 흡수 이용율이 이식전 기비로 사용된 표준시비구의 수량보다 낮았던 것으로 생각되었다.

고추와 연초에 대한 원격탐사 검정법의 효율성을 종합적으로 비교해 볼 때 active형 Crop Circle ACS-210 센서의 aNDVI 지표는 재배기간이 길고 덧거름을 사용하는 작물인 경우 재배기간의 질소 시비관리를 위한 실시간검정법으로 그 활용성은 많은 작물에 적용 가능할 것으로 생각되었다. 따라서 원격탐사센서 검정법은 작물의 생산성을 확보하면서 질소비료 과다시비에서 기인되는 환경오염 문제를 경감시킬 수 있는 친환경 농업의 핵심기술로 발전시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

SUMMARY

To compare the efficiency of ground-based remote sensors for evaluation of crop biomass pot experiments using sand culture were conducted in 2004 and 2005 under greenhouse conditions to evaluate the effect of nitrogen (N) deficiency on red pepper and tobacco growth, respectively. Also field experiments were conducted in 2005 and 2006 to investigate difference of sensitivity of measurement between crop canopy in field condition and single plant of pot condition. Nitrogen stress was imposed by implementing 6 levels (40% to 140%) of N in Hoagland's nutrient solution for the both crops, red pepper and tobacco. Canopy reflectance measurements were made with hand held spectral sensors including GreenSeeker™ red and green version(Ntech Industries) Crop Circle™ passive sensor(Holland Scientific), Crop Circle™ ACS-210 red and amber version and Field Scout™ Chlorophyll meter (CM1000, Spectrum), and spectroradiometers (LI-1800 of LICOR Inc. and Ocean Optics models SD2000) as well as Minolta SPAD-502 chlorophyll meter. Reflectance indexes of both active and passive remote sensors were significantly correlated with biomass of both crops at each growth stage showing no difference between crop canopy in field and single plant in pot condition. However the reflectance indexes of rNDVI and aNDVI by the active sensor such as Crop Circle™ ACS-210 were the best tool for assessing differences in biomass of crops at every growth stages estimated because reflectance index by passive sensor was affected by light condition such as cloud and so on. Consequently active sensor using light source of LED such as Crop Circle™ ACS-210 was selected for best reflectance index for recommendation model of application rate of nitrogen fertilizer by remote sensor test in growing season of the both crops. This result means that this reflectance index could be used for in-season N management as a real-time crop sensor. And the aNDVI at about 70th day after planting as critical seasons were closely correlated with dry weight, yield, and

nitrogen uptake of red pepper at the 120th day after planting. Also the critical season was about 30th day after planting resulting from significant correlation between the aNDVI and tobacco yield. The reflectance index by Crop CircleTM ACS-210 selected for recommendation model of application rate of nitrogen fertilizer and critical season estimated from correlation between crop yield and effective reflectance index showed the same tendency in field experiment of the both crops. Consequently recommendation model for application rate of nitrogen fertilizer were made by regression equations such as Y (sufficiency index by the aNDVI) = $-0.2577x^2 + 0.6517x + 0.5466$ (x =application percent to that of soil test, %) for red pepper and Y (sufficiency index by the aNDVI) = $-0.2917x^2 + 0.6687x + 0.5595$ (x = application percent to that of soil test, %) for tobacco. Field experiments including more than ten fields of red pepper and tobacco respectively were conducted in 2005 and 2006 to prove the recommendation model by above regression equation by the best reflectance index of remote sensor. The application percent of nitrogen fertilizer for red pepper at the condition of fertilizer use efficiency 70% and 60% in 2005 and 2006, respectively by the reflectance test at the 60th and 58th day after planting to that by soil test were estimated by 0% ~ 100% in 2005 and by 0% ~ 64.4% in 2006 based on sufficiency index by the aNDVI of 0.71 ~ 0.98 in 2005 and 0.85 ~ 1.01 in 2006. From the above results yield of red pepper recommended by reflectance test was similar to that of soil test plot. Also the application percent of nitrogen fertilizer for tobacco at the condition of fertilizer use efficiency 70% by the reflectance test at the 35th and 28th day after planting to that by recommended application rate were estimated by 13% ~ 83% in 2005 and by 4% ~ 129% in 2006 based on sufficiency index by the aNDVI of 0.42 ~ 0.91 in 2005 and 0.62 ~ 0.93 in 2006. And yield of red pepper recommended by reflectance test was a little less than that of the plot of recommended application rate resulting in yields of seven filed showed more than 87% yield to that recommended plot. Consequently ground remote sensing as a

non-destructive real-time assessment of plant nitrogen status was thought to be a useful tool for in season crop nitrogen management providing both spatial and temporal information.

CONTENTS

Presentation	1
Summary(Korean)	2
I. Title	2
II. Objective	2
III. Approach	3
IV. Results and recommendation	5
Summary(English)	8
Contents(English)	11
Contents(Korean)	14
Chapter 1 Outline	17
Section 1 Objective and approach	17
1. objective	17
A. Technical view	17
B. Economical and industrial view	18
C. Social and cultural view	19
2. Approach	20
A. Optical characteristics by nitrogen stress	20
B. Selection of reflectance index by remote sensor	21
C. Evaluation for biomass and N uptake	22
D. Recommendation model for N fertilizer	23
Chapter 2 Background and history	25
Section 1 Oversea	25
Section 2 Domestic	27
Chapter 3 Results	29
Section 1 Reflectance index by remote sensor	29
1. Introduction	29
2. Material and methods	31
A. Cultivation	31
B. Experimental soil	32
C. Measurement of remote sensor	35
D. Reflectance index	40
3. Results and discussion	41

A. Optical characteristics	41
1) Red pepper	41
2) Tobacco	43
B. Reflectance index for prediction of crop biomass	44
1). For single plant	44
a) Red pepper	44
b) Tobacco	50
2) For crop canopy	54
a) Red pepper	54
b) Tobacco	58
4. Summary	62
Section 2 Recommendation model of N fertilizer	64
1. Introduction	64
2. Material and methods	65
3. Results and discussion	65
A. Selection of critical season	65
1) For single plant	65
a) Red pepper	65
b) Tobacco	72
2) For crop canopy	74
a) Red pepper	74
b) Tobacco	79
B. Recommendation model	82
1) For single plant	82
a) Red pepper	82
b) Tobacco	90
4. Summary	96
Section 3 Field test of recommendation model for N fertilizer	97
1. Introduction	97
2. Material and methods	97
A. Red pepper experiment	97
1). 2005	97
2) 2006	98
B. Tobacco experiment	99
1) 2005	99

2) 2006	100
3. Results and discussion	101
A. Application of recommendation model for field test	101
1) Red pepper	101
2) Tobacco	104
B. Establishment of recommendation model	107
1) Red pepper	107
2) Tobacco	112
4. Summary	117
Chapter 4 Achievement and contribution	119
Section 1 2004	119
Section 2 2005	120
Section 3 2006	121
Chapter 5 Application of research results	123
Chapter 6 Information about relative technique from oversea	124
Chapter 7 Reference	125

목 차

제 출 문	1
요 약 문	2
I. 제 목	2
II. 연구개발의 목적 및 중요성	2
III. 연구개발 내용 및 범위	3
IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의	5
SUMMARY	8
CONTENTS	11
목 차	14
제 1 장 연구개발과제의 개요	17
제 1절 연구개발의 목적과 범위	17
1. 연구목적	17
가. 기술적 측면	17
나. 경제·산업적 측면	18
다. 사회·문화적 측면	19
2. 연구범위	20
가. 질소 스트레스에 따른 공시작물의 광학적 특성 구명	20
나. 작물 생체량 변이를 평가하기 위한 식물생장지표 선발	21
다. 지상 원격탐사 식물생장지표에 의한 작물의 생장량 및 질소흡수량 평가	22
라. 지상 원격탐사에 의한 질소 적정시비량 추천모델 확립	23
제 2 장 국내외 기술개발 현황	25
제 1 절 국외	25
제 2 절 국내	27
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	29
제 1 절 원격탐사 센서를 활용한 식물생장지표 개발	29
1. 서 설	29
2. 재료 및 방법	31
가. 경종방법	31
나. 공시토양	32
다. 원격탐사 센서 및 측정	35
라. 식물생장지표	40

3. 결과 및 고찰	41
가. 질소스트레스에 따른 광학 반사율 특성	41
1) 고추	41
2) 연초	43
나. 작물 생체량 예측을 위한 식물생장지표 개발	44
1). 작물개체에 대한 반사율지표	44
가) 고추	44
나) 연초	50
2) 작물군락에 대한 반사율지표	54
가) 고추	54
나) 연초	58
4. 적요	62
제 2 절 원격탐사 센서에 의한 작물의 질소시비량 추천모델 개발	64
1. 서 설	64
2. 재료 및 방법	65
3. 결과 및 고찰	65
가. 질소시비추천을 위한 센서 효율성 및 검정시기 선별	65
1) 작물개체에 대한 효율성 및 검정시기	65
가) 고추	65
나) 연초	72
2) 작물군락에 대한 효율성 및 검정시기	74
가) 고추	74
나) 연초	79
나. 반사율지표에 의한 추천모델	82
1) 작물개체에 대한 추천모델	82
가) 고추	82
나) 연초	90
4. 적요	96
제 3 절 원격탐사 지표에 의한 질소시비량 추천모델	97
1. 서 설	97
2. 재료 및 방법	97
가. 고추 재배시험	97
1). 2005년	97
2) 2006년	98
나. 연초 재배시험	99

1) 2005년	99
2) 2006년	100
3. 결과 및 고찰	101
가. 추천모델의 현장 활용성	101
1) 고추	101
2) 연초	104
나. 추천모델의 신뢰성 평가	107
1) 고추	107
2) 연초	112
4. 적요	117
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	119
제 1 절 1차년도(2004)	119
제 2 절 2차년도(2005)	120
제 3 절 3차년도(2006)	121
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	123
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	124
제 7 장 참고문헌	125

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1절 연구개발의 목적과 범위

1. 연구목적

가. 기술적 측면

3대 영양소 중 질소는 세포 구성물질인 단백질의 핵심성분으로 작물의 수량과 품질을 결정하는 가장 중요한 영양소이면서 또한 질소과량에 의한 다즙성 식물은 병충해 이병율과도 밀접한 관계를 갖기 때문에 작물의 생산성에 가장 크게 영향을 미치는 핵심 성분이다. 그러나 토양 중 질소는 인산과 칼륨에 비하여 이동성이 매우 활성적이기 때문에 시간적 공간적 변이에 의한 토양의 질소공급능력 평가는 매우 어려운 실정이다. 특히 작물의 생육시기에 강우분포가 일정하지 않고 반건조 지역의 특성을 나타내는 국내의 기상조건에서 토양의 비옥도를 검정하여 작물의 질소시비량을 정확하게 결정한다는 것은 신뢰도가 낮을 수밖에 없다. 따라서 작물의 요구도를 기준으로 추천되는 관행의 시비량은 대부분의 경작지에서 과량시비의 결과를 초래하였다.

국내농업 양분지표 중 질소 균형지표 설정에 관한 연구에서 질소균형지표는 85년 기준 $70\sim 162 \text{ kg ha}^{-1}$ 에서 97년에 1.7~2.3배 증가되었으며 증가원인을 가축분뇨 및 화학비료 소비량 증가와 경지면적 감소로 분석하였다. 그리고 97년 기준 질소의 Input은 화학비료 59%, 가축분뇨 42%, 기타 5%의 분포를 보였고 탈질과 부산물 회수를 제외한 질소균형지표는 253 kg ha^{-1} 으로 네덜란드 다음으로 높다고 하였다. 이러한 결과는 질소비료의 사용량이 매우 과다함을 시사하는 것이며 특히 가축분뇨를 질소 시비량에 고려하지 않는 시비관행이 질소투입량을 증가시키는 원인이 되고 있다.

시간적 공간적 변이특성을 나타내는 토양의 질소공급능력을 평가하기 위한 토양검정은 토양특성이외에 수많은 환경요인들이 종합적으로 작용하기 때문에 실시간으로 적시에 단일지표에 의하여 평가한다는 것은 거의 불가능하다. 그러나 토양특성을 포함한 여러 가지 환경요인들이 종합적으로 작용하여 반영된 식물체의 영양상태를 평가하는 식물체 검정법은 보다 효율적일 수 있으며 그 구체적인 접근방법이 식물의 광학적 특성을 활용하는 원격탐사 기술이며 최근에 위성탐사 방법에서 지상부 탐사 방법

으로 전환 발전되고 있다.

이러한 원격탐사 기술은 인공위성이나 항공기를 통한 반사 신호와 이미지를 측정하는 선진국의 독점적인 기술로 발전되어 왔기 때문에 우리 농업분야에 대한 활용은 더 많은 시간이 요구되는 선진기술로 인식되어 왔다. 그러나 최근에는 센서를 장착하는 platform 이 인공위성이나 항공기가 아닌 트랙터와 같은 농기계나 혹은 개인 휴대용으로까지 발전 전환되면서 원격탐사는 정밀농업을 수행하기 위한 새로운 측정기술로 발전되고 있다. 이러한 휴대용 혹은 농기계 장착용 원격탐사에 의한 측정기술은 관행의 시료채취, 건조, 분쇄, 분석절차 등의 복잡한 조사과정에 비하여 신속하고, 비접촉 및 비 파괴적이며 원하는 시기에 언제나 반복적으로 측정할 수 있는 편의성과 함께 경제적인 이점을 가지고 있는 새로운 식물체 검정방법이다.

이제 우리 농업의 시비체계도 밑거름은 최소화 하고 덧거름은 적정화 하는 효율적 관리체계로의 전환을 적극적으로 검토할 때이다. 어린 유아기보다는 실제로 영양이 필요한 청소년기에 적시 적량의 양분을 공급할 때 건강한 성인으로 성장하듯이 작물의 양분 요구량이 많지 않은 유묘기 나 생육 초반기보다는 영양생장이 왕성해지는 결정적 생육시기(critical season) 적량의 양분을 공급해야 할 것이다. 대부분의 작물에서 결정적 시기에 관한 특성은 밝혀져 있으므로 적정시비량을 어떻게 결정하느냐가 중요한 관점이다. 작물의 생장에 관여하는 요인은 토양조건 이외에 무수히 많은 환경요인들이 관여하고 있기 때문에 토양검정에 의한 평가는 극히 제한적일 수밖에 없고 토양요인을 포함한 여러 가지 환경요인들이 종합적으로 작용하여 반영된 식물체에 대한 광학적 검정은 보다 효율적일 수 있다. 이 기술은 질소비료 과다사용에서 유발되는 작물의 생산성 저하와 토양 및 수자원 환경오염을 방지할 수 있는 정밀농업의 핵심기술로 활용할 수 있으며 특히 영농규모가 작은 우리의 농업환경에서도 친환경농업을 달성하기 위한 긴요한 선도 기술로 생각된다.

나. 경제·산업적 측면

질소비료의 과다 시비량에 기인되는 경작지 토양의 염류집적은 작물의 생산기반으로서의 토양환경을 황폐화 시키므로 서 먹거리 생산능력 상실에 의한 경제적 손실이 막대하며 또한 생산성 저하에 따른 농업 소득의 감소요인으로 작용하기도 한다. 또

한 토양에 집적된 염류는 강수량의 조건에 따라 지표수 혹은 지하수에 용해되어 이동되므로 식수로 활용되는 지하수와 상수원의 오염을 초래하기 때문에 수질정화를 위한 환경처리 비용의 부담도 무시할 수 없다(Sharpley et al 1993; 정이근 등 1994; Schepers et al 1991; Owens et al 1994; Lichtenberg et al 1997). 그리고 주로 수입에 의존하고 있는 비료자원의 비효율적 이용은 외화낭비의 요인이 될 수 있다. 농업 생산과정에서 특히 질소비료는 작물의 수량과 품질에 가장 크게 영향을 미치고 또한 병충해 이 병율과 밀접하게 관련되는 핵심 영양소로서 작물 생산성을 결정하고 농가소득에 직접적으로 영향을 미치는 필수적인 영양소이다. 반면에 토양 중 질소비료의 과다축적은 채소작물의 질산염 과다축적 등에 의하여 생산된 농산물의 안전성을 위협하고 또한 지하수에 용탈된 질산염은 음용수를 오염시키므로 국민건강에 위해를 가하므로서 또 다른 경제적 손실을 유발시킬 수 있다. 따라서 질소시비의 효율적 관리를 위하여 원격탐사 기술을 이용한 실시간 검정법의 개발은 합리적인 적정 시비량 추천방법을 확립할 수 있으므로 농업적, 경제적, 산업적 측면에서 긴요한 기술로 활용될 수 있다.

다. 사회·문화적 측면

질소비료가 과다하게 집적된 토양에서 재배된 채소류에는 체내 양분의 흡수가 과다해 지며, 특히 질산염의 과다 축적은 식품으로서의 안전성을 위협하는 중요한 성분이 되고 있다. 따라서 선진국에서는 질산염의 1일 섭취량에 대한 허용치를 법으로 규정하여 국민건강을 증진시키려 노력하고 있다. 국내에서도 채소류의 가식부위 내 질산염의 축적량을 조사한 결과, 시설 재배지의 채소류에는 질산염이 과다하게 축적된 것으로 밝혀져 식품으로서의 안전성을 위협받고 있다. 토양 중의 질산태 질소는 다른 영양소들과 달리 토양입자와 동일한 음전기적 성질을 가지기 때문에 토양입자에 흡착되지 않고 보다 자유스럽게 이동될 수 있는 특성을 가지고 있다. 때문에 토양에 과량으로 존재하면 물의 흐름에 따라 같이 이동하여 지표수나 지하수에 유입되어 음용수의 오염원으로 작용한다. 토양에 집적된 염류의 유거수에 의한 이동량을 조사한 Lysimeter 조사(강보구 등, 2001)에서 음이온들은 양이온들보다 용탈 유실되는 양이 많았다. 이러한 결과로부터 토양에 과량으로 집적된 질산태 질소는 지하수 오염에 민감하게 영향을 미칠 것으로 예상할 수 있다. 1998년도에 전국 195개소에서 조사된

각 도별 지하수의 질산염 평균 함량은 시설재배 지역뿐 아니라 과수재배 지역에서도 음용수 허용수준인 10 ppm을 초과하고 있는 실정이다. 또한 시설재배 지역의 지하수에 대한 화학성 조사에서 식수로 활용되는 지하수에는 질산염이 법적 허용치인 10mg/l 이상 함유된 지역이 30%에 육박하는 것으로 밝혀졌으며(정이근 등 1994) 농업에서 기인된 지하수 오염 조사에 대한 외국의 경우도 유사한 것으로 보고 되고 있다 (Owens et al 1994; Evans et al 1994; Spalding et al 1993). 그리고 질산염으로 오염된 지하수로 분유를 먹인 유아에게서 혈색소가 methemoglobin로 변화되며 혈색이 파랗게 변하는 일명 청색증 환자의 발병이 보고된 경우도 있는 실정이다. 따라서 채소류의 질산염 축적이나 지하수의 질산염 오염문제는 합리적인 시비체계의 개선으로만 해결할 수 있는 현안이므로 적정 시비량의 결정을 위한 식물체 검정법으로서 원격탐사에 대한 기술개발은 지속적으로 요구되고 있는 실정이다.

2. 연구범위

연구개발의 최종목표는 비교적 재배면적 분포가 넓은 연초와 고추작물에 대하여 지상부 원격탐사 기술을 활용한 식물체 검정으로 토양의 질소공급능력에 대한 시간적 공간적 변이를 실시간으로 평가하여 질소시비의 정밀관리방안을 확립하는 것이다. 이러한 최종목표를 달성하기 위하여 다음과 같은 단계적 접근방법을 적용한다.

가. 질소 스트레스에 따른 공시작물의 광학적 특성 구명

1) 질소 스트레스에 따른 연초식물의 반사율 특성

사경재배 조건에서 질소의 처리수준을 완전 영양액 질소의 40%에서 140%까지 6개 수준으로 연초를 생육시키면서 이식후 25일부터 5일 간격의 생육단계별로 가시광선에서 근적외선 영역까지, 즉 400nm부터 1200nm까지 연초식물의 canopy 반사율을 spectroradiometer를 이용하여 측정한다. 또한 식물의 광학적 특성을 측정하는 엽록소 측정기, Chlorophyll meter (Minolta, SPAD502), 와 FIELDSCOUT™ Chlorophyll meter (Spectrum™, CM1000) 등 2개 종류와 원격탐사로 활용되는 센서측정기, Crop Circle™ (Holland Scientific, Lincoln, Nebraska)-passive 및 active 형태, GreenSeeker™ (Ntech Industries, Ukiah, California)-적색 및 녹색버전 등 여러 종류를 동시에 측정하여 반사율 특성과의 상호관계를 비교 평가한다.

2) 질소 스트레스에 따른 고추식물의 반사율 특성

연초의 사경재배 조건과 동일한 처리에서 고추를 생육시키면서 이식후 30일부터 10일 간격의 생육단계별로 연초식물에서 조사된 측정기들과 동일한 조건에서 고추 canopy의 광학적 특성을 조사하고 측정기별로 상호관계를 조사한다.

나. 질소 스트레스에 의한 작물 생체량 변이를 평가하기 위한 식물생장지표 선발

1) 연초 생체량 변이에 대한 식물생장지표 선발

(1) 측정센서 및 식물생장지표 비교평가

질소처리 6개 수준의 사경재배시험에서 포트 반복수를 5개씩 연초를 생육시켜 생육중반기인 이식후 40일 경에 2개 반복, 수확시기에 3개 반복의 식물체 시료를 채취하여 건물중 및 질소 흡수량을 조사하고 원격탐사 측정기 센서의 종류별 반사율 특성을 이용한 여러 가지 식물생장지표들과의 상호관계를 분석하여 최종 수량과 질소흡수량 및 중반기 성장량과 질소흡수량을 예측할 수 있는 가장 효율적인 식물생장 지표를 탐색한다.

(2) 식물생장지표에 의한 충족지수와 질소시비 수준의 상호관계

상기 항에서 선발된 효율적인 식물생장지표를 이용하여 최대 연초 성장량을 갖는 처리구의 지표값을 기준으로 한 각 질소수준들의 지표 값들의 비율값을 충족지수로 하여 시비수준과의 상호관계를 구명한다. 즉 충족지수는 각 질소수준의 지표 값을 최대 성장량을 보인 처리구의 지표값으로 나눈 비율이다.

(3) 질소시비 추천을 위한 critical season 탐색

연초의 최종 수량과 각 생육단계의 반사율 특성으로 선발된 식물생장 지표와의 상호관계 분석으로부터 연초의 질소시비량을 결정할 수 있는 critical season을 탐색한다.

2) 고추 생체량 변이에 대한 식물생장지표 선발

(1) 효율적인 측정센서 및 식물생장지표 선발

질소처리 6개 수준의 사경재배시험으로 6개 반복으로 고추를 재배하여 생육 중반기에 1개 반복, 과실형성기 직전에 2반복씩 2회에 걸쳐 시료를 채취하여 건물중과 엽중 질소 흡수량을 조사한다. 그리고 최종 수확기에 3반복의 과실 수량과 최종 건물중 및 질소 흡수량을 조사하여 중반기에 2회 조사된 생체량 및 질소 흡수량과 함께 원격탐사 측정기 센서의 종류별 반사율 특성을 이용한 여러 가지 식물생장지표들과의 상

호관계를 분석하여 최종 수량과 질소흡수량 및 중반기 성장량과 질소흡수량을 예측할 수 있는 가장 효율적인 식물성장 지표를 탐색한다.

(2) 식물성장지표에 의한 충족지수와 질소시비 수준의 상호관계

상기 항에서 선발된 효율적인 식물성장지표를 이용하여 고추의 최대 성장량을 갖는 처리구의 지표값을 기준으로 한 각 질소수준들의 지표 값들의 비율값을 충족지수로 하여 시비수준과의 상호관계를 구명한다. 즉 충족지수는 각 질소수준의 지표 값을 최대 성장량을 보인 처리구의 지표값으로 나눈 비율이다.

(3) 질소시비 추천을 위한 critical season 탐색

연초의 경우와 마찬가지로 고추의 최종 수량 및 건물중과 각 생육단계의 반사율 특성으로 선발된 식물성장 지표와의 상호관계 분석으로부터 고추의 질소시비량을 결정할 수 있는 critical season을 탐색한다.

다. 지상 원격탐사 식물성장지표에 의한 작물의 성장량 및 질소흡수량 평가

1) 연초 생체량 및 질소 흡수량과 식물성장 지표들의 상호관계

사경제배의 온실조건과 달리 자연 포장조건에서 토양의 질소공급능력을 기준으로 상, 중, 하급지의 3개 농가포장을 선발하여 질소 시비수준을 무비구, 추천시비구, 토양 검정 시비구, 추천시비구의 50% 증비구 등 4개 수준으로 3반복 처리하여 생육단계별로 식물체 시료를 채취하고 건물중과 질소 흡수량을 조사한다. 또한 동일한 생육단계와 최종 수확기에 원격탐사 측정기 센서 종류별 반사율을 측정하고 가능성 있는 여러 가지 식물성장지표들과 상호관계를 분석하여 질소 시비수준을 구별할 수 있는 효율성 있는 지표를 선발한다.

2) 고추 생체량 및 질소 흡수량과 식물성장 지표들의 상호관계

연초 포장시험과 동일한 조건의 농가포장 3개소를 선발하여 질소 시비수준을 연초 시험의 경우와 동일하게 4개 수준 3반복으로 처리하여 고추 생육 단계별로 건물중과 질소 흡수량을 조사하고 최종 고추 수량과 함께 원격탐사 측정기 센서 종류별 반사율을 측정하고 가능성 있는 여러 가지 식물성장지표들과 상호관계를 분석하여 질소 시비수준을 구별할 수 있는 효율성 있는 지표를 선발한다.

다) 식물성장지표에 의한 충족지수와 질소시비 수준의 상호관계

연초와 고추작물의 수량 및 질소흡수량을 가장 효율적으로 예측하는 것으로 선발

된 식물생장지표를 활용하여 최대 수량을 나타낸 질소 시비수준의 식물생장지표를 기준으로 하여 각 질소 시비수준 처리들의 식물생장지표들에 대한 비율값을 충족지수로 계산한다. 이 충족지수는 질소 시비수준과의 상호관계 분석으로부터 시비량 차이를 예측하는 지수로 활용한다.

라. 지상 원격탐사에 의한 질소 적정시비량 추천모델 확립

1) 지상 원격탐사에 의한 연초의 질소 적정 시비법 개발

토양의 질소공급능력이 다양한 연초재배 농가포장 10개소 이상을 선발하여 질소 시비수준을 농가 시비구, 추천 표준시비구 및 무비구로 구분하고 무비구는 3개 처리가 설치될 수 있는 면적으로 구획을 정한다. 무비구 처리는 1차년도 시험에서 구명된 critical season의 시기에 효율적인 원격탐사 측정기로 선발된 센서의 식물생장지표를 이용하여 추천 표준시비구의 지표에 대한 충족지수를 계산하여 질소 시비량을 결정한다. 예로 추천시비구의 지표 값이 1.0인데 비하여 무비구의 지표 값이 0.8이라면 충족지수는 $0.8/1.0 = 0.8$ 이 되며 이 지수 값의 의미는 질소비료 충족량의 20%가 부족된다는 개념으로 시비량을 추천할 수 있다. 다만 충족지수가 0.8일 때 질소 시비량을 얼마로 할 것인가는 1년차 사경재배 조건과 포장조건의 시험에서 검토된 충족지수와 질소 시비수준과의 상호관계로부터 추정된 시비량을 기준으로 20% 증비구와 20% 감비구 등 3개 수준을 적용하여 무비구의 처리를 3개 수준으로 구분하여 농가시비구, 추천 표준시비구, 원격탐사 검정시비구 등의 연초 수량 변이를 비교 검토한다. 이러한 원격탐사 센서의 실시간 검정에 의한 질소 시비량 추천방법의 신뢰도를 검증하기 위하여 3년차에는 다른 비옥도 조건의 포장 10개소 이상을 선발하여 추천시비량에 대한 연차 간 변이도를 평가한다.

2) 지상 원격탐사에 의한 고추의 질소 시비체계 확립

연초 재배시험의 경우와 동일하게 토양의 질소공급능력을 고려하여 고추재배 농가포장 10개소 이상을 선발하여 질소 시비수준을 동일하게 농가 시비구, 추천시비구, 무비구로 설정하고 연초의 시비량 결정에 활용된 동일한 접근방법으로 1년차 시험에서 구명된 critical season의 시기에 평가된 원격탐사의 식물 생장지표를 이용한 충족지수에 의하여 고추의 질소 적정시비량을 추정하여 연초의 경우와 동일하게 추정된 시비량을 기준으로 20% 증비구와 20% 감비구 등 3개 수준으로 처리한다. 또한 고추의 재

배기간이 상대적으로 길기 때문에 2차 질소 덧거름의 검정시기와 시비량 결정방법이 요구되면 추천 표준시비구나 혹은 농가시비구의 식물생장지표에 대한 비율 값으로서 충족지수를 평가하고 동일한 접근방법으로 충족지수의 차이에 의한 적정시비량을 결정하여 고추의 수량특성을 비교 평가한다. 연초시험과 마찬가지로 원격탐사 센서의 실시간 검정에 의한 질소 시비량 추천방법의 신뢰도를 검증하기 위하여 3년차에는 다른 비옥도 조건의 포장 10개소 이상을 선발하여 추천시비량에 대한 년차 간 변이도를 평가한다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국외

원격탐사의 농업적 이용은 미농무성(USDA-ARS)의 과학자들에 의해 처음 시작되었고 1960년대 이후 기기발달과 더불어 작물의 형태학적 성질에 따른 광학적 특성에 관련된 많은 기초이론 및 연구결과(Allen et al., 1969, 1973; Gausman et al., 1969; Woolley, 1971; Gausman, 1973, 1974; Gausman et al., 1974; Gausman, 1977)를 기반으로 발전되어 왔다.

원격탐사의 농업에 대한 활용분야는 토양특성 및 토지 이용 지도 작성, 작물의 수분상태 및 생육상태 평가, 수량예측, 강과 호수의 수질평가, 그리고 잡초 및 병해충관리, 수리기상학에의 이용, 방목지 관리 등 광범위하게 응용되고 있다. 원격탐사는 토양이나 작물개체 또는 작물 군락에 입사되는 전자기 에너지(incident radiation energy)에 대한 반사되는 빛(reflected energy)의 비율인 반사율 또는 작물의 열방사(emitted thermal radiation)량을 측정하여 작물의 상태를 판단하게 된다. 작물에 대한 가시광선, 근적외선(NIR; near-infrared), 열적외선(TIR; thermal-infrared), 마이크로파의 분광학적 측정은 생체량(plant biomass), 수분 스트레스, 질소결핍, 재식밀도, 토양수분, 잡초 및 병충해의 발생 등에 대한 정보를 얻을 수 있다(Hatfield and Pinter, 1993).

두 개 이상 파장 반사율의 직선적인 조합 또는 변형으로 구하는 식생지표(vegetation index; VI)는 대기나 토양 등의 외부효과를 줄이고 건물중이나 잎의 질소 농도과 같은 생물리적 변수들을 더 정확히 예측할 수 있다. 수많은 식생지표들이 개발되어 왔다(Richardson and Wiegand, 1977; Tucker, 1979; Jackson, 1983). 식물생장의 활성도를 검증하기 위해 개발된 최초의 디지털 원격탐사 지표 중의 하나는 근적외선 영역의 반사율을 적색 영역의 반사율로 나누어 구하는 RVI(ratio vegetation index)이며 단순지표(simple ratio, SR)라고도 불린다(Jordan 1969; Tucker 1979). 이 지표는 적색영역의 복사선이 엽록소에 의해 강하게 흡수되어 낮은 반사율을 나타내는 반면, 근적외선 영역의 복사선은 식물체에 의해 반사되어 높은 반사율을 나타낸다는 관계를 활용

한 것이다(Avery and Berlin, 1992). 녹색 생체량의 평가수단으로서 가장 일반적인 지표는 잡음(noise)에 대한 감수성을 최소화하기 위해 개발된 Normalized Difference Vegetation Index $\{NDVI=(NIR-Red)/(NIR+Red)\}$ 이다(Rouse et al., 1974). 이 지표는 포장에서 비정상적인 생육 상황의 검출 또는 생육중의 녹색 생체량이나 엽면적 지수(LAI)의 정량적인 평가에 적합하다(Jackson and Huete, 1991; Wiegand et al., 1991).

생장지표 값에 영향을 미치는 요인으로는 토양배경, 측정각도, 태양과의 각도, 대기 구성, 수관구조를 들 수 있다. 배경이 되는 토양의 반사율이 식생지표에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 Soil-adjusted Vegetation Index (SAVI, Huete, 1988a), Transformed Soil-Adjusted Vegetation Index(TSAVI, Baret 등, 1991), Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index(OSAVI, Rondeaux et al., 1996)와 같은 식생지표들이 개발되었다(Qi et al., 1994). SAVI는 지상원격측정 자료를 이용하여 개발한 지표이지만 Huete and Warrick (1990)은 위성자료에 적용하였을 때도 토양의 배경효과를 성공적으로 최소화시켰다고 보고하였다. 그리고 Gitelson et al.(1996a)은 Green Normalized Difference Vegetation Index(GNDVI)의 이용을 제안하였으며, 이것은 녹색작물 생체량의 캐노피 변이를 평가하는데 NDVI보다 유용하다고 보고되고 있다(Gitelson et al., 2001; Schepers, 2001; Shanahan et al., 2001). Gitelson(2004)은 지상부 생체량이 많아짐에 따라 NDVI가 포화에 가까워져 NDVI의 증가가 둔화된다고 하며 Wide Dynamic Range Vegetation Index($WDRVI=(a*\rho_{NIR}-\rho_{red})/(a*\rho_{NIR}+\rho_{red})$)를 개발하였다. 그는 엽면적지수(LAI) 2를 초과하면 적색파장의 반사율이 거의 변화가 없는 반응을 보이는 반면 근적외선 파장의 반사율은 엽면적지수가 2에서 6으로 높아짐에 따라 유의하게 변화한다고 하였고 이러한 근적외선 파장의 민감성에도 불구하고 NIR의 반사율이 30%를 초과하면 NDVI값에 미치는 영향이 거의 없기 때문에 NDVI 계산식에서 NIR의 반사율(ρ_{NIR})에 가중치(weighting coefficient) a (0.1~0.2)를 곱해주는 것이 밀, 옥수수, 콩의 성장량과 상관관계가 증가한다고 보고하였다. 그 이외 작물의 생체량 혹은 곡물 수량을 평가하는데 유용하였다는 수많은 지표들이 제안되어 왔다. 이러한 지표들은 엽면적지수(LAI), 생물 총량(biomass), 녹색 피복도, 작물 생산성, 광합성 활성도 등과 같은 다양한 식생변이들과 밀접한 상관을 보였다고 보고되었다(Wiegand et al., 1991; Huete, 1988b; Gilabert et al., 2002; Osborne et al., 2002a).

작물의 수분 스트레스를 평가하기 위하여 열적외선(thermal-infrared) 스펙트럼의 반사 에너지를 측정함으로써 식물체의 표면온도를 알 수 있다. 식물은 뿌리를 통하여 수분을 토양으로부터 흡수하고 증산작용에 의해 수분을 잎에서 공기중으로 방출하여 체온을 낮추어 일정온도를 유지하게 된다. 그러나 토양수분 부족이나 다른 요인에 의해 식물체내에 수분이 부족하게 되면 체온이 올라가게 되며 센서를 이용하여 온도의 증감을 측정함으로써 작물의 수분 스트레스를 평가할 수 있게 된다(Jackson et al., 1986).

Active 방식의 지상원격측정 센서를 이용한 연구는 센서의 개발국인 미국에서도 연구기간이 4~5년 정도로 짧기 때문에 보고된 결과가 그리 많지 않다. Bell et al., (2002a)은 active 센서를 차량에 탑재하여 잔디캐노피의 반사율 지표로 잔디의 질을 평가하여 신속하면서도 객관적으로 신뢰할 수 있는 수준의 평가가 가능하다고 보고하였다. 그들은 또한 차량탑재 센서 반사율 측정은 잔디관리에 있어서의 잠재적 문제점을 초기에 검출 가능하여 잔디포장의 변이지도 작성을 통한 변량처리로 비료와 농약의 비용을 절약할 수 있다고 하였다(2002b). Mullen et al.,(2003)과 Hodgen et al.,(2005)은 센서의 NDVI를 이용한 반응지수(response index: RI)는 덧거름 시비량에 따른 수량반응을 구별할 수 있기 때문에 덧거름 시비량을 결정에 활용할 수 있다고 하였다. Raun et al.,(2005a)은 옥수수 V6 생육시기에 측정된 NDVI의 변이계수(CV)가 약 30% 정도로 가장 높아 이 시기는 공간변이성이 가장 크고 수량예측이 가능하며 질소 덧거름을 시비할 최적의 시기라고 하였다. 또한 Raun et al.,(2005b)은 광학센서를 기초로 한 알고리즘을 이용하면 0.4m²의 해상도로 밀포장의 질소반응과 수량예측이 가능하여 수량을 증가시키고 과량의 질소시비로 인한 환경오염을 줄일 수 있다고 하였다.

제 2 절 국내

국내의 원격탐사 연구는 1985년 대한원격탐사학회가 설립되어 활성화되기 시작하였다. Yang and Miller(1985)는 벼의 생육단계에 따른 캐노피 생체량의 반사율 측정치와 벼 수량의 상관관계를 보고하였다. 또한 정부 연구기관이 주도한 원격탐사 기술의 농업적 활용을 위한 연구는 약 10여년의 역사를 갖고 있으며 토지 및 토양에 관한 연구, 물/수자원에 관한 연구, 작물 및 식생에 관한 연구를 수행하였다(RDA-NIAST,

2005). 작물 및 식생에 관한 연구 성과를 살펴보면 벼의 엽면적, 생체량(biomass) 및 수량 추정, 엽록소 및 질소함량 추정에 관한 연구와 분광반사 특성을 이용한 밭작물 구분 또는 생육단계 추정에 관한 연구, 그리고 NOAA AVHRR 위성영상을 이용한 한반도 지표면 식생분석에 관한 것이었다. 대부분 위성영상 이미지 자료를 이용하거나 passive 방식의 지상원격측정 센서를 이용한 연구였다.

국내의 active센서를 이용한 연구는 Kim(2006)이 온실조건에서 지상 원격탐사 센서의 반사율 지표를 이용한 고추 생체량 추정과 Jeong(2006)의 passive와 active 방식의 지상원격측정 센서의 특성을 조사하기 위한 연초의 엽위 분포형태에 따른 지상 원격탐사 센서의 유효탐사거리에 관한 연구결과가 있었으며 점차 active 센서를 이용한 연구가 확산되고 있는 추세이다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 원격탐사 센서를 활용한 식물생장지표 개발

1. 서 설

녹색식물 잎의 색소인 엽록소, 크산토펜(xanthophyll), 카로테노이드(carotenoids), 안토시아닌(anthocyanins)은 가시광선(400~700nm) 영역의 빛을 강하게 흡수하기 때문에 전형적으로 15% 이하의 낮은 반사율을 나타내며 또한 매우 낮은 투과율을 나타낸다(Chappelle et al., 1992). 잎에 입사된 빛의 가시광선 영역 중에서 청색과 적색영역은 고등식물 잎의 약 65%를 차지하는 엽록소 a와 b에 의해 강하게 흡수되어 매우 낮은 반사율을 보이며 550nm 부근의 녹색영역에서 가장 높은 반사율을 나타낸다. 그리고 근적외선 영역(700~1300nm)에서는 세포질 속의 입자나 색소들에 의한 흡수가 매우 낮기 때문에 흡수율은 10% 이하로 매우 낮고 엽육조직의 세포벽 접촉면에서 상당한 분산이 일어나기 때문에 반사되거나 투과된다. 반사율은 약 50% 정도 되며 반사율의 정도는 세포층의 수나 세포들의 크기, 세포벽의 배열방향과 세포 농도의 불균일성 등에 의해 증가된다(Gausman et al., 1970; Gausman, 1974, 1977; Grant, 1987; Slaton et al., 2001). 이러한 가시광선 영역과 근적외선 영역 사이에 현저한 차이를 보이는 반사율 특성은 작물 및 자연식생을 관리하고 모니터링하기 위한 원격탐사 방법의 주요 이론적 기초이다(Knipling, 1970; Bauer, 1975).

식물 스트레스와 생육후반의 노쇠화(senescence)는 잎의 엽록소 함량을 낮추고 카로틴(carotenes)과 크산토펜(xanthophylls) 같은 잎의 보조색소를 발현시킨다. 이것은 550nm근처의 녹색파장의 반사율 피크를 장파장 쪽으로 넓어지게 하며 전체적으로 가시광선 영역의 반사율을 증가시킨다(Adams et al., 1999). 동시에 비록 가시광선 반사율의 증가보다는 덜 비례적이기는 하나 근적외선의 반사율은 감소한다. 식물스트레스가 증가함에 따라 녹색 식생(green vegetation)의 파장에 따른 반사율 변화곡선에서 가시광선 영역의 적색파장과 근적외선 파장 사이에 나타나는 반사율의 기울기가 최대가 되는 파장(abrupt transition 또는 red edge)은 단파장 쪽으로 이동이 시작되며 노쇠화한 식생(senescent vegetation)의 경우 이것은 완전히 사라지게 된다.

태양스펙트럼의 중간적외선 (middle-infrared)과 단파적외선 (shortwave-infrared: SWIR, 1300~2500nm)의 잎에 대한 광학적 특성은 식물체 조직의 수분에 의해 나타나게 된다. 이 파장영역의 반사율은 건강하게 자라고 있는 식생에서는 상대적으로 높지만 탈수상태의 조직에서는 반사율이 감소된다. 그러나 가뭄에 의해 야기된 단파적외선의 반사율 변화는 포장조건 식물의 수분함량 변화 범위에서 수분 스트레스를 진단할 수 있을 정도로 충분히 크지 않다고 보고되었다(Bowman, 1989; Carter, 1991).

개체 잎의 광학적 특성이 작물의 전 생육기간에 걸쳐 일정하게 유지되었다 하더라도 캐노피의 분광학적 특성은 토양과 식생의 비율 변화와 식물의 전체적인 구조를 이루는 구성요소의 변화에 따라 달라질 수 있다(Penuelas and Filella, 1998). 일반적으로 식물은 성장하면서 가시광선 영역을 많이 흡수하므로 결국 나지 토양에 비하여 가시광선 영역의 반사율은 점차로 감소하지만, 근적외선 영역의 반사율은 식물이 성장하면서 토양에 의한 흡수를 차단하고 식물체에 의한 반사량이 증가하기 때문에 점진적으로 높아지는 특성을 나타낸다.

서로 다른 시간과 공간에서 측정된 생장지표를 비교하는 것은 매우 유용하지만 주의가 필요하다. 왜냐하면 각각의 측정센서에 대하여 파장의 반응함수가 다르고, 관측 범위가 또한 다르며 가공되지 않은 데이터나 변형된 데이터로 생장지표가 계산되어질 수 있기 때문이다(Jackson and Huete, 1991). 따라서 어떻게 생장지표가 계산되었는지, 어떤 센서가 사용되었는지, 그리고 측정시의 환경과 대기조건을 이해하는 것이 필요하다.

식생지표들은 식물건강도 혹은 활성도(vigor)와 동의어로 자주 이용되었다. 이는 오해되기 쉬울 수 있다 왜냐하면 광범위한 파장영역의 식생지표들은 특정한 형태의 스트레스를 확인하기 위한 혹은 왜 생체량이 어떤 수준에 있는 것인지를 진단하기 위한 능력이 부족하기 때문이다. Photochemical Reflectance Index (PRI), Water Band Index (WBI), 그리고 Normalized Pigment Chlorophyll Ratio Index (NPCl)와 같이 더 좁은 영역의 지표들은 어떠한 생리적 식물 감응도와 상관성이 있는 반사율 지표의 본보기들이며 수분과 양분스트레스를 진단할 수 있는 것으로 평가되었다(Penuelas et al., 1994; Gamon et al., 1997).

2. 재료 및 방법

가. 경종방법

1) 온실시험

2004년과 2005년에 수행된 온실시험의 사경재배는 직경 30cm 높이 30cm의 PVC 포트에 세척된 중모래를 충전하였으며 40x60x30cm의 PVC 상자 내부에 포트를 설치하여 영양액이 밑으로부터 스며 올라가도록 하였다. 영양액 조성은 표 2-1과 같이 Hoagland's 영양액의 질소 농도를 기준으로 40%에서 140%까지 20% 간격으로 6개 수준으로 하였다. 영양액의 공급은 정식후 1주는 물로 약 3.5L/포트를 포트 상면에 첨가하였으며 2주후에는 50% 영양액, 3주후에는 100% 영양액으로 처리하였다.

고추재배는 2004년의 경우 묘(으뜸)를 4월 21일에 정식하였고, 2005년에는 묘(청풍명월)를 4월 15일에 정식하여 각각 7반복으로 임의 배치하였다. 연초재배는 2004년과 2005년에 동일한 공시품종(KF118)으로 하여 2004년에는 5월 3일에, 그리고 2005년에는 4월 15일에 각각 정식하여 각각 7반복으로 임의 배치하였다.

Table 2-1. Application amount of nutrients in the plot of 100% N treatment

Nutrient	Concentration	Salts
	mg L ⁻¹	
N	199.9	KNO ₃ & Ca(NO ₃) ₂ *4H ₂ O
P	29.2	KH ₂ PO ₄
K	254.4	KNO ₃ & KH ₂ PO ₄
Ca	174.5	Ca(NO ₃) ₂ *4H ₂ O
Mg	25.0	MgSO ₄ * 7H ₂ O
Fe	6.5	FeNa EDTA
Mn	0.25	MnSO ₄ * H ₂ O
B	0.26	H ₃ BO ₄
Cl	7.1	NaCl
Zn	0.05	ZnSO ₄ *7H ₂ O
Cu	0.01	CuSO ₄ *5H ₂ O
Mo	0.01	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ *4H ₂ O
S	33.1	M-SO ₄
Na	7.7	NaCl

2) 포장시험

고추의 포장시험은 2004년의 경우 음성군 삼성면 양덕리, 괴산군 청천면 송면리, 보은군 산외면 장갑 1구 등 3개 농가포장을 선정하여 고추 묘(음성; 왕대박, 괴산; 한반도, 보은; 왕대박)를 5월 1일부터 5월 6일 사이에 정식하였다. 농가포장에 대한 질소 시비수준은 무비구(퇴비 시용), 토양 검정시비량의 50%구, 100%구, 150%구의 4개 수준으로 처리구의 면적은 각각 15m² 씩 3반복으로 임의 배치하였다. 생육중반기 생체량 및 질소흡수량은 각 처리구에서 5주씩 채취하여 조사하였고 수량은 6m²의 면적에서 측정하였다. 2005년의 시험포장은 음성군 6개, 청원군 5개 등 11개 농가포장을 선정하여 고추 묘(왕대박)를 5월 1일에서 4일 사이에 각각 정식하였다. 질소시비 수준에 대한 처리는 무비구, 토양검정시비구, 원격탐사 시비-1구(시비효율 100% 적용) 및 -2구(시비효율 70% 적용), 및 농가시비구의 5개 수준으로 처리구의 면적은 각각 18m² 씩 단일구로 하였다. 생육중반기 생체량 및 질소흡수량은 2004년도와 같이 각 처리구에서 5주씩 채취하고 수량은 9m²의 면적에서 측정하였다.

연초의 포장시험은 2004년의 경우 청주시 개신동과 복대동의 2개 포장을 선정하여 연초 묘(KF118)를 4월 14일에 정식하였다. 질소시비수준은 무비구, 표준시비량의 80%구, 100%구, 120%구, 140%구의 5개 수준으로 처리구의 면적은 12m² 씩 3반복으로 임의 배치하였다. 생육중반기 생체량 및 질소흡수량은 각 처리구에서 3주씩 채취하여 조사하였고 수량은 처리구당 15주를 채취하여 조사하였다. 2005년에는 청원군 지역에서 10개 농가포장을 선정하여 연초 묘(KF118)를 4월 15일 전후에 정식하였다. 질소시비 수준에 대한 처리는 무비구, 표준시비구, 원격탐사 시비구(시비효율 70% 적용)의 3개 수준으로 처리구의 면적은 각각 18m² 씩 단일구로 하였다. 생육중반기 생체량 및 질소흡수량은 2004년도와 같이 각 처리구에서 3주씩 채취하고 수량은 처리구당 15주를 채취하여 조사하였다.

나. 공시토양

2004년도에 수행된 연초 재배 포장의 시험전 토양 화학성은 표 2-2와 같으며 화동통보다 예산통의 무기태질소, 유기물, 및 유효인산 함량이 높았다. 2004년의 고추 재배포장의 토양 화학성은 표 2-3과 같이 pH가 5.3에서 7.4로 분포되었고 유효인산 함량

은 피산의 수암통이, 양이온교환용량은 보은지역의 대산통이 가장 높았다.

Table 2-2. Physico-chemical properties of experimental soils for tobacco(2004)

Soil Series	Texture	pH	E.C.	O.M.	T-N	NO ₃ -N
		(1:5)	(dS m ⁻¹)	(%)	(%)	(mg/kg)
Hwadong	silt loam	4.87	0.42	1.89	1.06	19.4
Yesan	sandy loam	6.65	0.32	1.31	0.63	11.8

Soil Series	NH ₄ -N (mg/kg)	Ava.-P ₂ O ₅ (mg/kg)	Exch.-Cation (cmol ⁺ /kg)			CEC (cmol+/kg)
			K	Ca	Mg	
Hwadong	30.1	78.0	0.47	2.40	0.60	6.38
Yesan	1.7	359.5	0.86	4.51	0.77	8.66

Table 2-3. Physico-chemical properties of experimental soils for red pepper(2004)

Site	Soil Series	pH	E.C.	O.M.	T-N
		(1:5)	(dS m ⁻¹)	(%)	(%)
Eumseong	Galgok	7.4	1.07	1.87	0.12
Goesan	Suam	6.3	0.18	1.43	0.09
Boeun	Dasan	5.3	0.54	2.31	0.15

Site	Ava.-P ₂ O ₅ (mg/kg)	Exch.-Cation (cmol ⁺ /kg)			CEC (cmol+/kg)
		K	Ca	Mg	
Eumseong	872.7	0.67	3.84	1.23	7.87
Goesan	1028.0	0.57	2.87	1.00	5.98
Boeun	716.9	1.62	3.99	2.52	8.52

2005년도에 수행된 토양의 질소공급능력이 다양한 조건에서 고추의 생산력검정에 공시된 청원군과 음성군 지역의 11개 농가포장의 토양 화학성은 표 2-4와 같다. 토양의 pH는 4.8에서 7.2까지 다양하게 분포되었고, 유기물 함량은 3~25 g kg⁻¹로서 대체로 낮은 경향이였다. 토양의 질소공급능력과 밀접한 질산태질소 함량은 최소 4.5mg kg⁻¹에서 최대 58.0 mg kg⁻¹의 차이를 보였고, 유효인산 78~756 mg kg⁻¹, 치환성칼륨 0.06~0.60cmol⁺ kg⁻¹의 분포로서 다양한 비옥도 특성을 보였다.

Table 2-4. Physico-chemical properties of experimental soils for red pepper cultivation in 2005

Field site	pH	OM	NH ₄ -N	NO ₃ -N	Avail.-P ₂ O ₅	Exch.-K	Exch.-Ca	Exch.-Mg	CEC
	(1:5H ₂ O)	(g kg ⁻¹)	———— (mg kg ⁻¹) ————			———— (cmol ⁺ kg ⁻¹) ————			
Cheongwon-1	7.2	9	2.6	23.7	160	0.06	6.5	0.9	9.9
Cheongwon-2	4.8	13	2.3	5.2	435	0.19	2.5	0.3	7.7
Cheongwon-3	6.7	25	1.7	12.6	522	0.31	6.8	1.3	12.4
Cheongwon-4	6.9	3	1.8	2.2	78	0.08	5.8	1.2	7.1
Cheongwon-5	5.6	13	3.5	4.5	348	0.45	3.1	1.5	9.6
Eumseong-1	6.3	16	4.5	30.5	440	0.18	2.8	1.4	8.4
Eumseong-2	7.1	15	2.4	33.2	238	0.15	2.9	1.7	8
Eumseong-3	6.5	23	2.4	42.3	756	0.38	2.8	1.6	9.2
Eumseong-4	5.5	9	2.4	22.4	435	0.21	2.3	0.6	8.3
Eumseong-5	5.2	15	4.7	31.5	618	0.60	2.8	1.6	8.5
Eumseong-6	6.7	13	3.2	58.0	356	0.16	3.8	2.2	8.1

표 2-5는 청원지역에서 선정된 연초재배포장 10개소의 토양화학성을 나타낸 것이다. 토양의 pH는 5.27 ~ 7.70으로 다양하게 분포되었고, 유기물 함량은 0.88% ~ 1.78%로서 대체로 낮은 경향이였다. 토양의 질소공급능력과 밀접한 질산태질소 함량은 최소 9 mg kg⁻¹에서 최대 23 mg kg⁻¹으로 고추재배포장의 경우보다 낮은 함량을 보였고, 유효인산은 268~1166 mg kg⁻¹, 치환성칼륨 0.16~3.46 cmol⁺ kg⁻¹으로 고추재배포장의 경우보다 훨씬 높은 함량을 보였다.

Table 2-5. Chemical properties of experimental soils for tobacco cultivation in 2005

Field site	pH	E.C.	T-N	NO ₃ -N	NH ₄ -N	P ₂ O ₅	Exch. Cation (cmolc/kg)			OM	CEC
	(1:5)	(dS/m)	%	ppm	mg/kg	mg/kg	K	Ca	Mg	% (cmolc/kg)	
Field-1	7.70	0.94	0.07	11	0.1	339	0.16	5.68	2.19	0.88	6.7
Field-2	6.58	0.46	0.10	23	10.7	443	0.44	5.84	3.40	1.17	12.3
Field-3	6.36	0.51	0.09	22	14.8	427	0.73	3.03	1.50	1.78	8.9
Field-4	5.84	0.25	0.12	11	10.4	268	0.31	3.16	1.47	0.99	7.2
Field-5	5.27	0.34	0.09	9	8.0	810	0.54	2.38	0.93	0.97	7.2
Field-6	5.46	0.32	0.12	10	5.3	458	0.31	3.81	0.90	0.90	7.7
Field-7	6.88	0.31	0.07	10	3.8	1038	0.65	2.94	0.95	1.11	5.5
Field-8	7.23	0.47	0.07	22	4.2	448	0.73	3.13	1.35	1.06	7.5
Field-9	7.28	0.37	0.07	19	4.5	1042	0.60	3.16	1.26	1.19	6.0
Field-10	7.25	2.30	0.05	16	3.2	1166	3.46	7.55	3.97	1.01	4.5

다. 원격탐사 센서 및 측정

1) 엽록소 측정기

가) Chlorophyll meter (Minolta, SPAD502)

엽록소가 녹색파장(400~500nm)과 적색파장(600~700nm)에서는 흡광도가 매우 높고 근적외선파장에서는 투과율이 매우 낮은 원리를 이용한 측정기이다. 발광다이오드(light emitting diode: LED)광원을 가지고 있으며 측정면적은 2×3mm이다. 잎의 측정 부위를 선택하여 상, 하 양면을 접촉하여 측정공간이 외부와 차단된 상태로 측정한다. SPAD(Soil Plant Analysis Development)502의 측정단위는 측정부위인 잎의 근적외선 영역(940 nm) 투과율을 적색 영역(650 nm) 투과율과 비교하여 엽록소의 상대적인 양을 수치로 나타낸 것이다(Schepers and Francis, 1998). 흡수된 적색 광량이 더 많다는 것은 엽록소가 더 많이 함유되어 있다는 것을 의미하며 녹색도가 더 진하고 더 건강한 식물이라는 것을 나타낸다. 연초와 고추 모두 완전엽으로 전개된 상위엽 부위에 대하여 20회 이상의 반복 측정치를 이용하였다.

나) FIELDSCOUT™ Chlorophyll meter (Spectrum™, CM1000)

최근에 미국의 NASA 연구팀은 식물체의 엽록소 함량을 평가하기 위하여 700nm와 840nm의 반사율을 이용하는 휴대용 복사계(radiometer)를 개발하여 특허권을 얻었으며 스펙트럼 사는 이 특허권을 이양 받아 CM1000 엽록소 측정기를 개발하여 2001년에 출시하였다. 이 측정기는 복사선의 반사율 특성을 이용한 일종의 소극적 원격탐사 체계의 기능을 가지고 있다. 측정될 때 측정기의 레이저 빔은 원뿔형태의 직경 1.10cm~18.8cm의 관측영역(field of view, FOV)을 나타내며 잎에 접촉되지 않는 29cm에서 183cm의 유효거리를 갖는다. SPAD의 측정 부위와 동일한 엽위에서 20회 이상의 반복 측정 자료를 이용하였다.

2) 지상원격측정센서(Ground-based remote sensors)

지표상의 물체들은 전자기 에너지를 방출하거나 반사하게 되고 센서는 이러한 전자기 에너지를 감지하게 된다. 전자기 에너지의 공급원으로 대표적인 것이 태양이며 태양광과 같이 자연적으로 이용 가능한 전자기 에너지 공급 시스템을 “passive” 시스템이라 한다. 이와 대조적으로 LED나 레이더 시스템과 같이 대상물체에 조사하기 위

하여 자체광원을 갖고 있는 전자기 에너지 공급 시스템을 “active” 시스템이라 부른다 (Lillesand et al., 2004). Passive 센서는 자연광을 이용하는 소극적 탐사체계의 형태이므로 측정시 표준반사판을 이용하여 표준화(normalization)과정을 해야 하고 태양광의 세기변화, 구름 및 미세입자(aerosol)등에 의해 측정의 영향을 받는 단점이 있다. 이러한 문제점 때문에 최근에는 인위적 광원을 이용하는 적극적 탐사체계(active)의 센서가 개발되었다. Active 센서는 광원 방출시 초당 수회 light source를 on/off 됨으로써 연속적인 자연광과는 다른 불연속적으로 변조(modulation)된 광을 방출하는 방법 등으로 주변의 자연광과 구별된다. 따라서 태양광, 구름, 어둠에 상관없이 측정이 가능하다.

가) Passive sensors

(1) Spectroradiometer: (LI-COR Inc. LI-1800)

모든 복사전 영역에 대한 반사광량을 1 nm 또는 그 이하 및 이상 단위로 설정하여 측정할 수 있으며(hyperspectral) 주로 대상 물체의 반사율 특성을 탐색하기 위한 연구용으로 사용되고 있다. 관측영역은 15°이며 측정을 위해서 처음에 99%의 반사율을 갖는 흰색의 표준 반사율판을 이용하여 입사광을 반사시켜 입사광량을 인식시키는 과정(normalization)을 수행한 후 대상 물체에 대한 반사광량을 측정한다. 측정된 자료는 컴퓨터를 이용하여 입사광량에 대한 반사광량의 비율을 구함으로써 반사율을 계산하고 이렇게 계산된 각 파장의 반사율로 각종 식물생장지표들을 계산할 수 있다. 입사광량을 측정하는 시점과 반사광량을 측정하는 시점이 다르므로 구름이나 대기상태에 의해 오차가 발생할 수 있다는 단점이 있다. 이 측정기는 2004년도 시험에서 340nm에서 1100nm 범위의 반사율 특성을 측정하여 여러 가지 식물생장지표로 평가하였으며 측정방법은 연초 및 고추 모두 Canopy 반사율을 3회 이상 측정하였다

(2) Spectroradiometer: SD-2000 (Ocean optics)

이 측정기 또한 모든 복사전 영역에 대한 반사율을 1 nm 또는 그 이하 및 이상 단위로 설정하여 측정할 수 있다(hyperspectral). LI-1800과 다른 점은 입사광량을 직접 측정하는 센서가 있고 또한 동시에 물체로부터의 반사광량을 측정하는 센서가 있다는 것이다. 처음에 표준 반사율판(반사율 99%)을 이용하여 입사광을 반사시켜 태양으로부터의 입사광량과 표준 반사율판으로부터의 반사광량을 같게 인식시켜 주는 과정

(normalization)을 수행한 후 대상 물체에 대한 반사광량을 측정한다. 이 때 대상 물체로부터 반사광량을 측정함과 동시에 태양으로부터의 입사광량을 측정하여 normalization시의 입사광량과 비교하여 증감된 비율만큼을 반사광량에 적용하여 입사광량의 변화에 따른 반사광량의 변화를 보정하게 됨으로써 구름이나 대기상태에 따른 오차를 최소화 할 수 있다. 측정된 자료는 컴퓨터를 이용하여 입사광량에 대한 반사광량의 비율을 구함으로써 반사율을 계산하고 이렇게 계산된 각 파장의 반사율로 각종 식물생장지표들을 계산할 수 있다. 반사율은 340nm부터 1100nm까지 0.5nm 단위로 측정되었고 이를 이용한 여러 가지 식물생장지표로 평가하였다.

(3) Crop CircleTM (Holland Scientific, Lincoln, Nebraska)

Spectroradiometer를 이용한 작물의 반사율 연구에서 녹색 (550nm), 노란색 (600nm), 적색 (680nm), 근적외선 (820nm) 영역의 반사율을 이용한 생장지표들이 식물체의 엽록소 함량이나 생장량과 밀접한 관계를 갖는다는 원리를 이용한 센서이다(그림 2-1). 농업현장에서의 활용성 증대를 위해 작물의 스트레스와 밀접하게 관련된 4개 파장의 작물 캐노피 반사율을 스캐닝하면서 측정할 수 있도록 고안되었다. 측정된 녹색 (550nm), 노란색 (600nm), 적색 (680nm), 근적외선 (820nm) 파장의 입사광량 (irradiance)을 각각의 반사광량 (radiance)으로 나누어 반사율을 구하고, 이 반사율 이용하여 RVI, RNDVI, GNDVI 등 여러 가지 식생지표를 계산하여 이용할 수 있다. 센서의 구성은 광의 입사량을 측정하여 광조건의 변화를 감지하여 기준 역할을 하는 하나의 상향 센서 (reference sensor), 그리고 1개에서 31개 센서까지 네트워크로 연결할 수 있고 반사광량을 감지하는 목표물 센서 (target sensor), data hub로 이루어져 있고 GPS의 연결도 가능하다. 그리고 목표물 센서의 관측영역은 후드의 길이와 목표물까지의 거리를 다르게 하여 조절할 수 있으며 관측영역인 원의 직경은 그림 2-1의 식에 의하여 구할 수 있다. 실제로 후드 길이가 5cm이고 후드에서 측정목표물까지 90cm라고 가정하면 측정되는 영역의 직경은 52cm가 된다. 연초 및 고추 모두 canopy 반사율 측정으로 측정반복은 30회 이상으로 하였다.

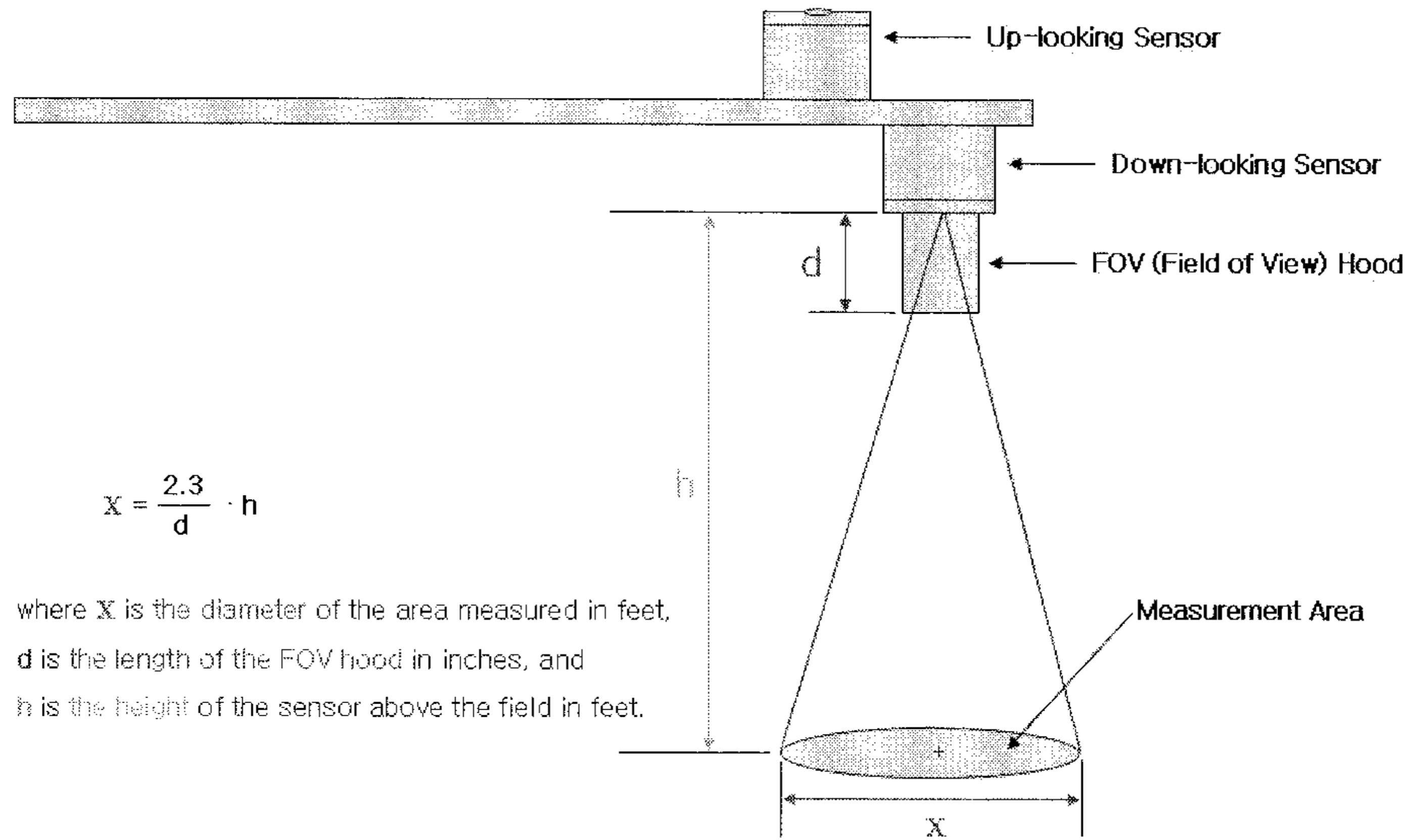


Fig. 2-1. Schematic diagram and measuring area of Crop Circle-passive sensor.

나) Active sensors

(1) GreenSeeker-Red version and Green version (Ntech industries, Inc.,)

이 측정기는 그림 2-2와 같이 센서의 진행방향에 비스듬한 수직으로 모듈레이션(modulation)된 LED광을 방출하는 센서이다. Red 버전 센서는 근적외선 파장으로 770±15nm와 적색 파장으로 660±15nm, 그리고 Green 버전 센서는 근적외선 파장으로 770±15nm와 녹색 파장으로 530±15nm의 모듈레이션된 반사광(radiance)만을 검출하여 각각 RNDVI와 Red/NIR, GNDVI와 Green/NIR 지표를 산출한다. 그리고 센서의 측정높이를 60cm에서 120cm까지 변화해도 관측영역은 1×60cm로 일정하게 유지되는 특징을 갖는다. 기본 장비는 센서헤드, PDA, Control box 등으로 구성되어 있으며 여러 개의 센서를 장착할 수 있는 네트워크로서 액체비료 살포기를 장착하여 작물의 질소 영양상태의 탐사와 동시에 적정량의 질소비료를 살포할 수 있다. 작물의 캐노피를 유효거리를 유지하며 스캐닝 하는 방식으로 측정한다. 두 공시작물 모두 canopy 반사율 측정

으로 유효거리(80~120cm)를 지속하며 scanning 하는 방식으로 측정된 40개 이상의 자료를 평균하여 이용하였다.

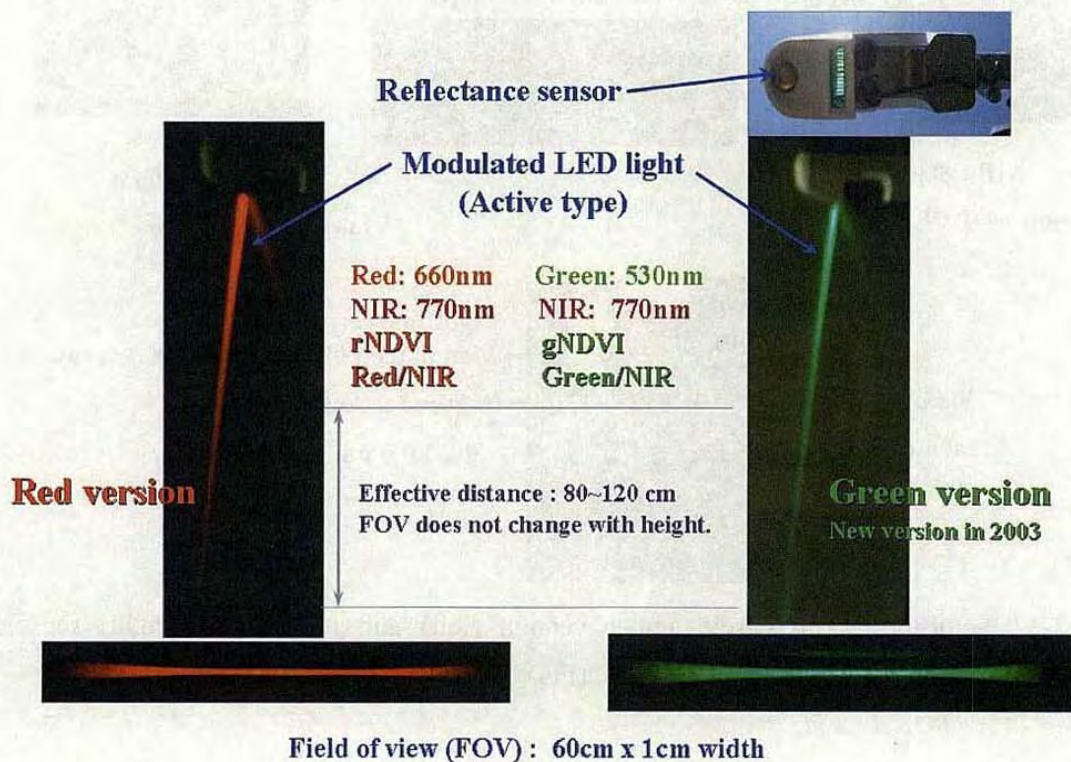


Fig 2-2. Picture of GreenSeeker red version (left) and green version (right) sensors and their illumination and field of view (FOV).

(2) Crop Circle-Red and Amber version (Holland Scientific, ACS-210)

이 측정기는 Fig. 2-3과 같이 센서의 진행방향에 수직으로 모듈레이션 (modulation) 된 LED (light-emitting diode)광을 방출하고 검출부에서 자연광과 구별하여 모듈레이션 (modulation)된 반사광을 검출하여 지표값을 나타낸다. Red 버전 센서는 근적외선 파장으로 880±10nm와 적색 파장으로 650±5nm, 그리고 Amber 버전 센서는 근적외선 파장으로 880±10nm와 amber 파장으로 590±5.5nm의 LED광을 이용하며 각각 RNDVI와 NIR/Red, ANDVI와 NIR/Amber 지표를 산출한다. 센서와 목표물까지의 거리가 증가할 수록 관측영역은 32°×6°로 증가하게 된다. 따라서 센서와 목표물까지의 거리가 90cm 일 때 관측영역은 50×10cm가 된다. Crop Circle 센서는 LED광원으로부터 근적외선 파장과 가시광선 파장의 빛이 동시에 방출된다.



Fig 2-3. Picture of Crop Circle amber version (left) and red version (right) sensors and their illumination and field of view (FOV).

따라서 두 파장의 빛이 비춰지는 목표물의 관측영역이 동일하다. 반면에 GreenSeeker 센서는 매우 짧은 시간에 교대로 근적외선파장이 한번 방출되고 가시광선파장이 방출되는 방식이다. 따라서 센서가 스캐닝방식으로 진행함에 따라 두 파장의 빛이 비춰지는 목표물의 관측부위가 센서의 진행속도에 따라 서로 달라질 수 있다. 그러므로 서로 다른 부위에서 반사되어진 근적외선과 가시광선의 반사율로 지표값이 계산될 수 있다. 두 공시작물 모두 canopy 반사율 측정으로 유효거리(90cm)를 지속하며 scanning 하는 방식으로 측정된 40개 이상의 자료를 평균하여 이용하였다.

라. 식물생장지표

지상원격측정 센서들에 의해 측정된 반사율은 아래와 같은 식물생장지표들로 계산하여 작물의 성장량 평가를 위하여 평가하였다. 평가에 적용된 지표들은 Normalized Difference Vegetation Index (rNDVI)를 기본으로 하여 red 밴드 대신 다른 밴드의 반사율을 대체시켜 개발된 것들이다.

Normalized Difference Vegetation Index (rNDVI) :

$$\text{rNDVI} = \frac{(\text{NIR} - \text{Red})}{(\text{NIR} + \text{Red})}$$

Green Normalized Difference Vegetation Index (gNDVI) :

$$\text{gNDVI} = \frac{(\text{NIR} - \text{Green})}{(\text{NIR} + \text{Green})}$$

Amber Normalized Difference Vegetation Index (aNDVI) :

$$\text{aNDVI} = \frac{(\text{NIR} - \text{Amber})}{(\text{NIR} + \text{Amber})}$$

3. 결과 및 고찰

가. 질소스트레스에 따른 광학 반사율 특성

1) 고추

Spectroradiometer에 의해 340nm에서 1100nm까지의 파장영역에서 측정된 질소시비 수준별 고추 canopy 반사율 특성은 그림 2-1과 같다. 영역별 반사율의 변화양상은 녹색영역에서 약간 증가된 다음 적색영역에서 감소되고 근적외선 영역에서 크게 증가되는 대부분의 식물에서와 동일한 전형적인 반사율 특성을 보였다. 질소시비 수준에 따른 반사율은 녹색영역의 540nm 근처와 적색영역의 680nm 근처에서 질소수준이 낮을수록 더 높은 반사율을 그리고 근적외선 영역에서는 더 낮은 반사율을 보여 옥수수 및 다른 작물에서 조사된 결과들과 동일한 경향을 보였다.

그림 2-2는 광범위한 파장영역의 반사율들과 고추의 건물중 및 질소흡수량과의 상관계수의 변화특성을 나타낸 것이다. 이들 상호관계로부터 녹색밴드에서 550nm, 적색밴드에서 680nm, 근적외선 밴드에서 820nm를 각각 선정하여 반사율 생장지표로 환산하여 평가에 이용하였다.

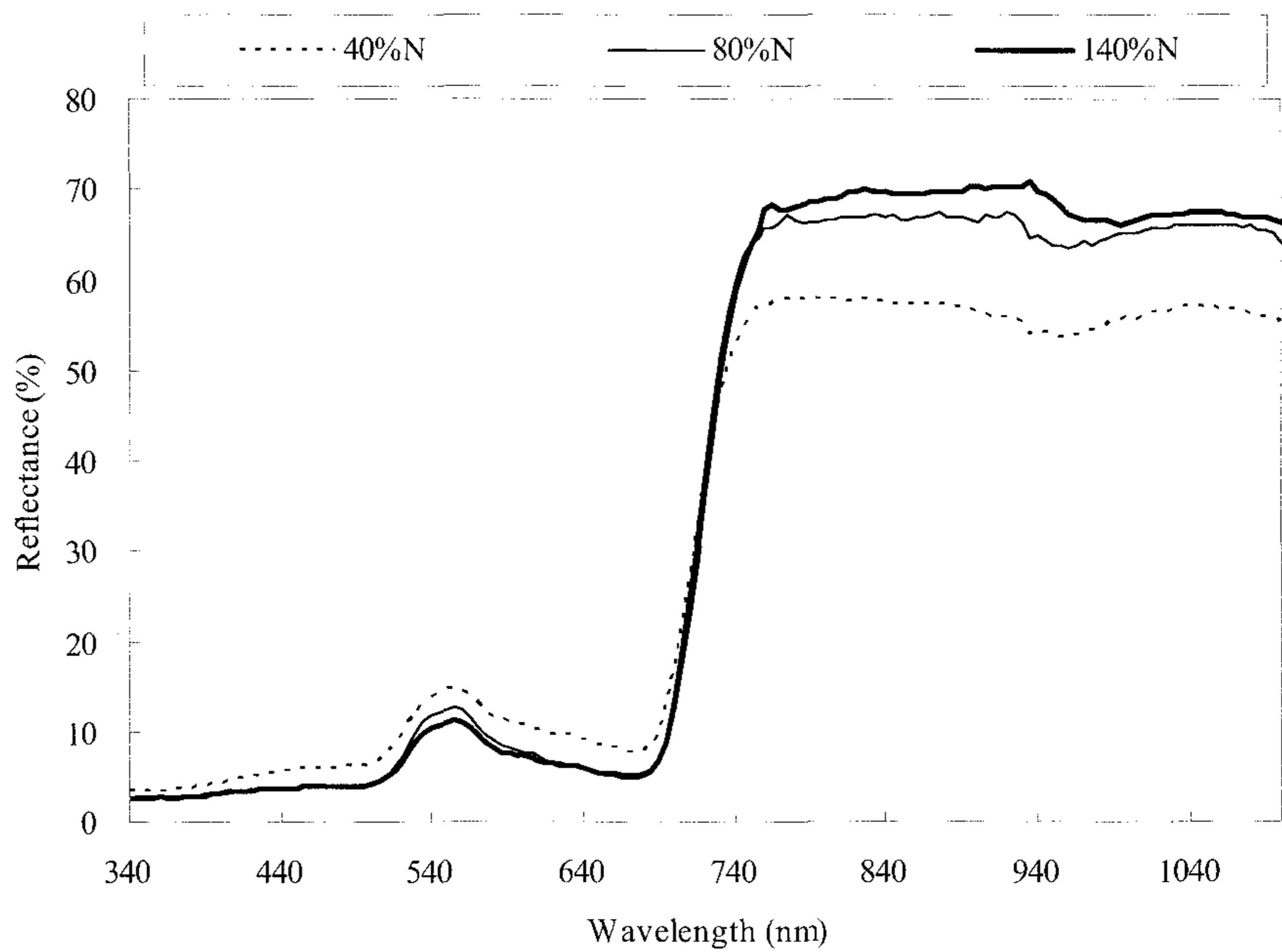


Fig. 2-1. Reflectance of red pepper at the 50th day after planting.

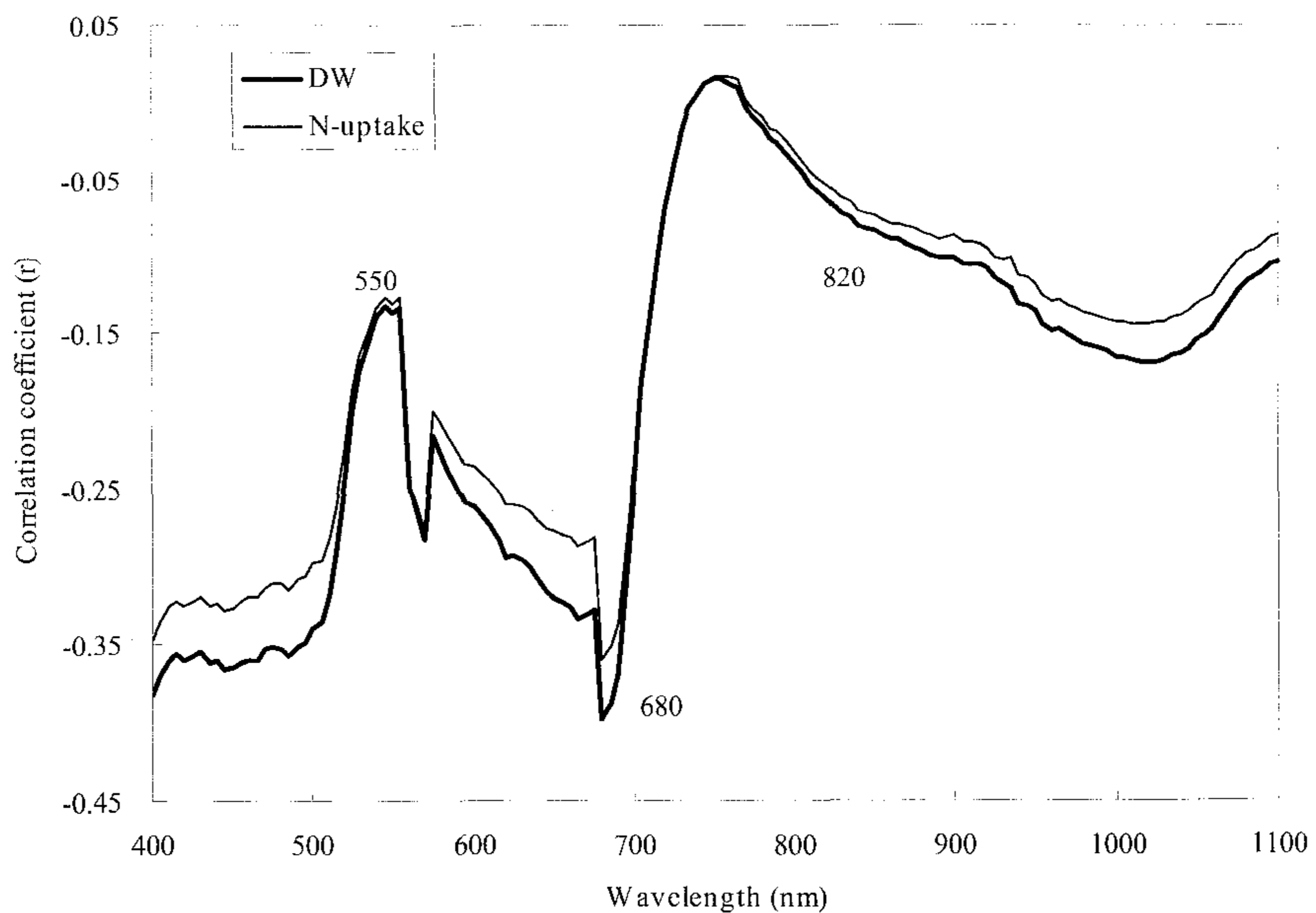


Fig. 2-2. Correlation coefficient between DW, N-uptake and reflectance of the whole wavelength at the 37th day after planting. Wavelength were selected at 550nm for green, 680nm for red edge, and 820nm for NIR.

2) 연초

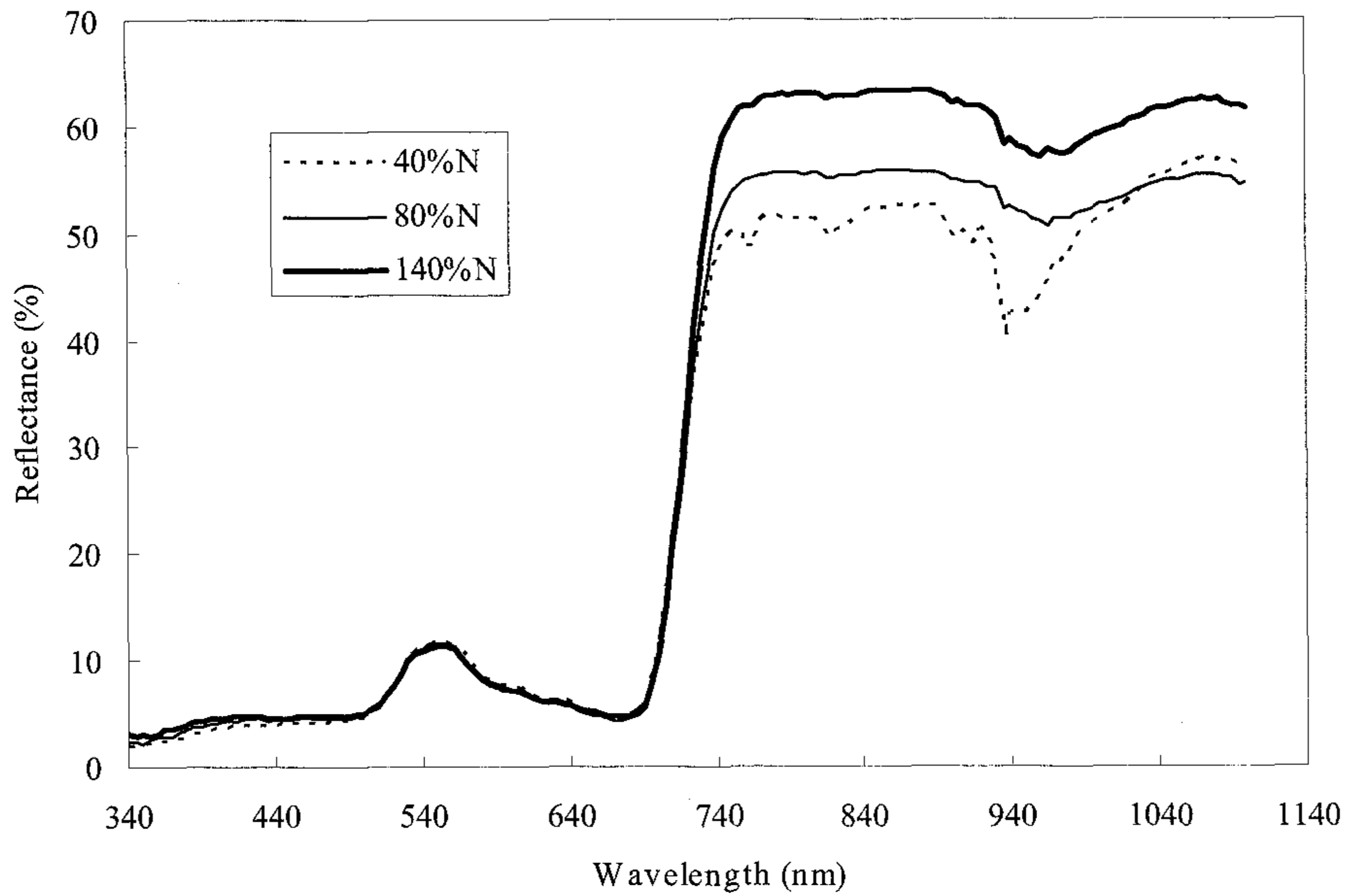


Fig. 2-3. Canopy reflectance of tobacco at the 50th day after planting.

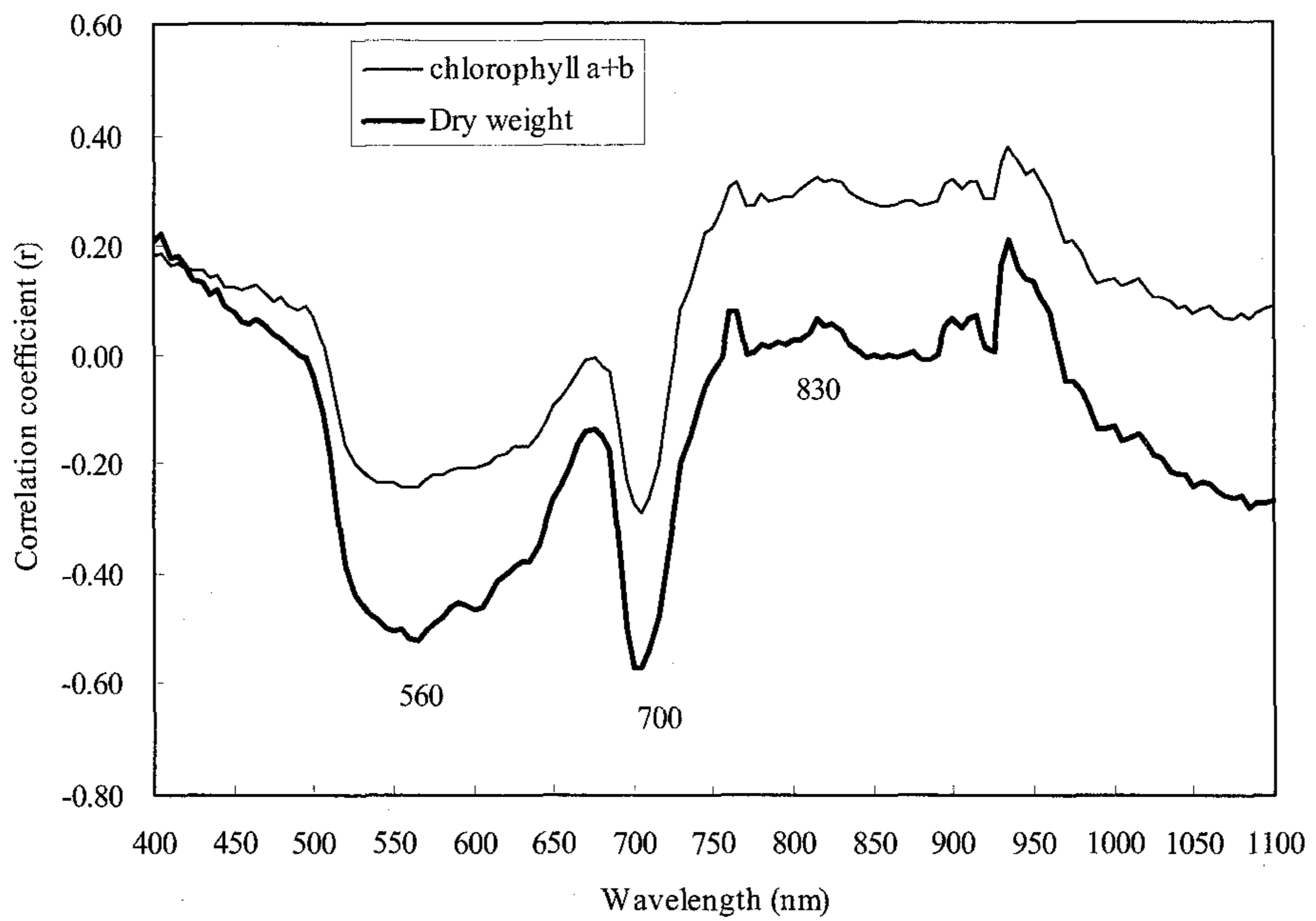


Fig. 2-4. Correlation coefficient (r) between canopy reflectance and dry weight of tobacco at the 50th day after planting. Wavelength were selected at 560nm

그림 2-3은 340nm에서 1100nm까지의 파장영역에서 spectroradiometer에 의해 측정된 연초 canopy의 반사율 특성을 나타낸 것이다. 파장 영역별 반사율의 변화양상은 고추의 경우와 거의 동일한 경향으로 녹색영역에서 약간 증가된 다음 적색영역에서 감소되고 근적외선 영역에서 크게 증가되는 전형적인 반사율 특성을 보였다. 질소시비 수준에 따른 반사율은 고추의 경우와 같이 녹색영역 및 적색영역에서 뚜렷한 차이를 보이지 않았으며 근적외선 영역에서는 질소수준이 높을수록 더 높은 반사율을 보였다.

그림 2-4는 고추의 경우와 같이 파장영역별 반사율들과 고추의 건물중 및 질소흡수량과의 상관계수 변화특성을 나타낸 것이다. 이들 상호관계로부터 녹색밴드에서 560nm, 적색밴드에서 700nm, 근적외선 밴드에서 830nm를 각각 선정하여 반사율 생장지표로 환산하여 평가에 이용하였다.

나. 작물 생체량 예측을 위한 식물생장지표 개발

1). 작물개체에 대한 반사율지표

가) 고추

사경재배 조건에서 질소수준을 40%에서 140% 까지 6개 수준으로 처리하여 생육된 고추의 성장량은 표 2-5에서 보는바와 같이 정식후 120일째 건물중은 최소 48.2g/주에서 최대 196.6g/주, 질소 흡수량은 최소 824 mg/주에서 최대 3399 mg/주까지 큰 변이를 보였다. 정식후 120일째 건물중과 질소 흡수량의 변동계수는 27.82% 및 34.0%를 보였으며 이들 변이들은 반사율 지표와의 상관분석에 이용하였다.

Table 2-5. Variation of dry weight and amount of N-uptake by red pepper affected by nitrogen stress in 2004

Statistic	Dry weight of red pepper				Amount of N-uptake by leaves			
	29th DAP	37th DAP	78th DAP	120th DAP	29th DAP	37th DAP	78th DAP	120th DAP
	----- (g plant ⁻¹) -----				----- (mg N plant ⁻¹) -----			
Min.	1.0	3.5	20.3	48.2	40.7	148.2	266.3	824.0
Max	2.6	10.0	51.9	196.6	123.1	490.2	954.8	3399.0
Median	1.7	6.6	35.4	133.5	80.6	302.6	607.8	2374.6
Average	1.7	6.7	35.5	140.5	80.4	304.8	592.3	2566.1
STDEV	0.4	1.9	11.1	37.1	20.9	99.3	238.0	807.3
CV(%)	23.5	28.7	31.3	27.8	26.0	32.8	39.2	34.0

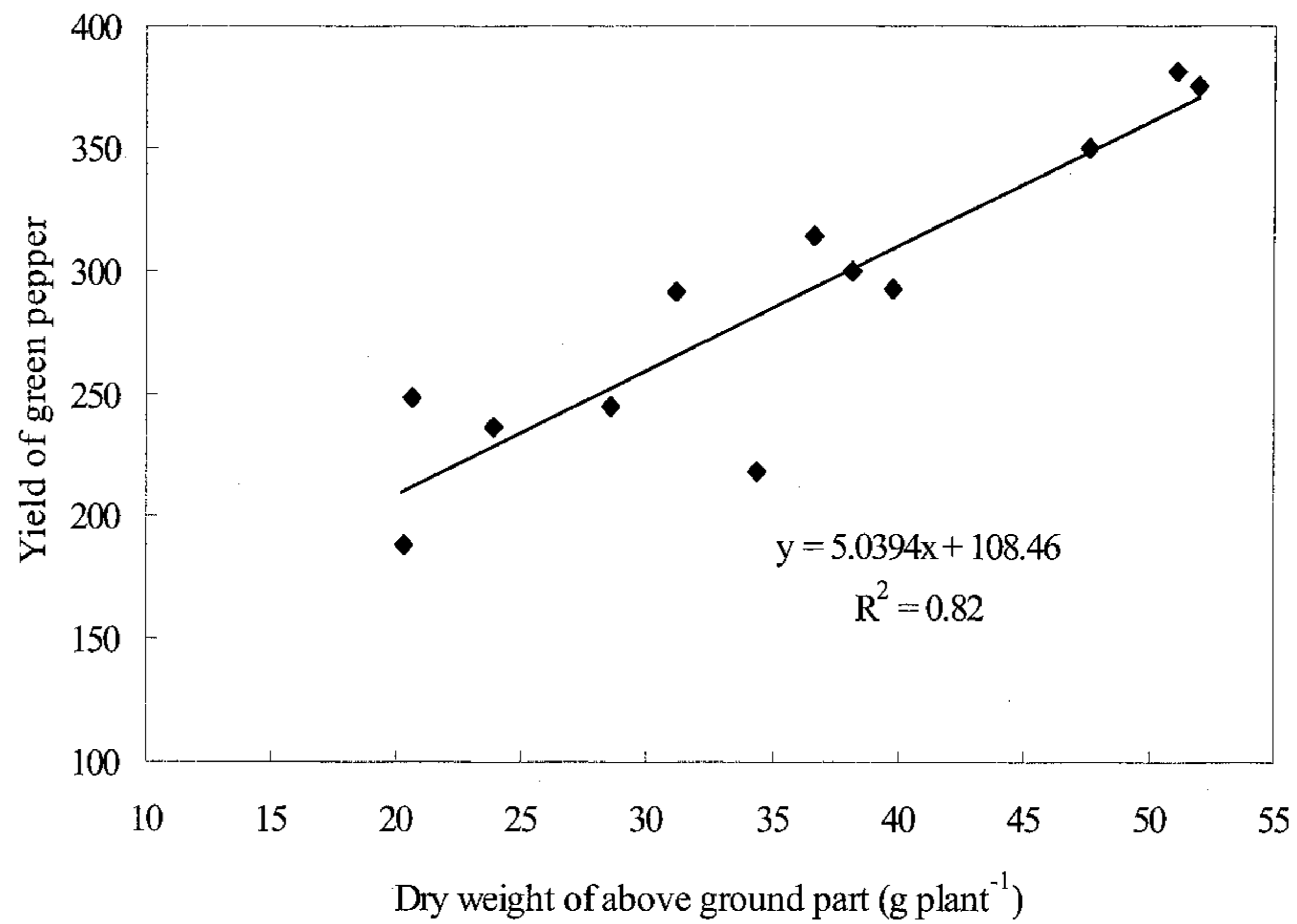


Fig. 2-5. Relationship between dry weight of above ground part of plant and green pepper yield harvested until the 78th day after planting in 2004.

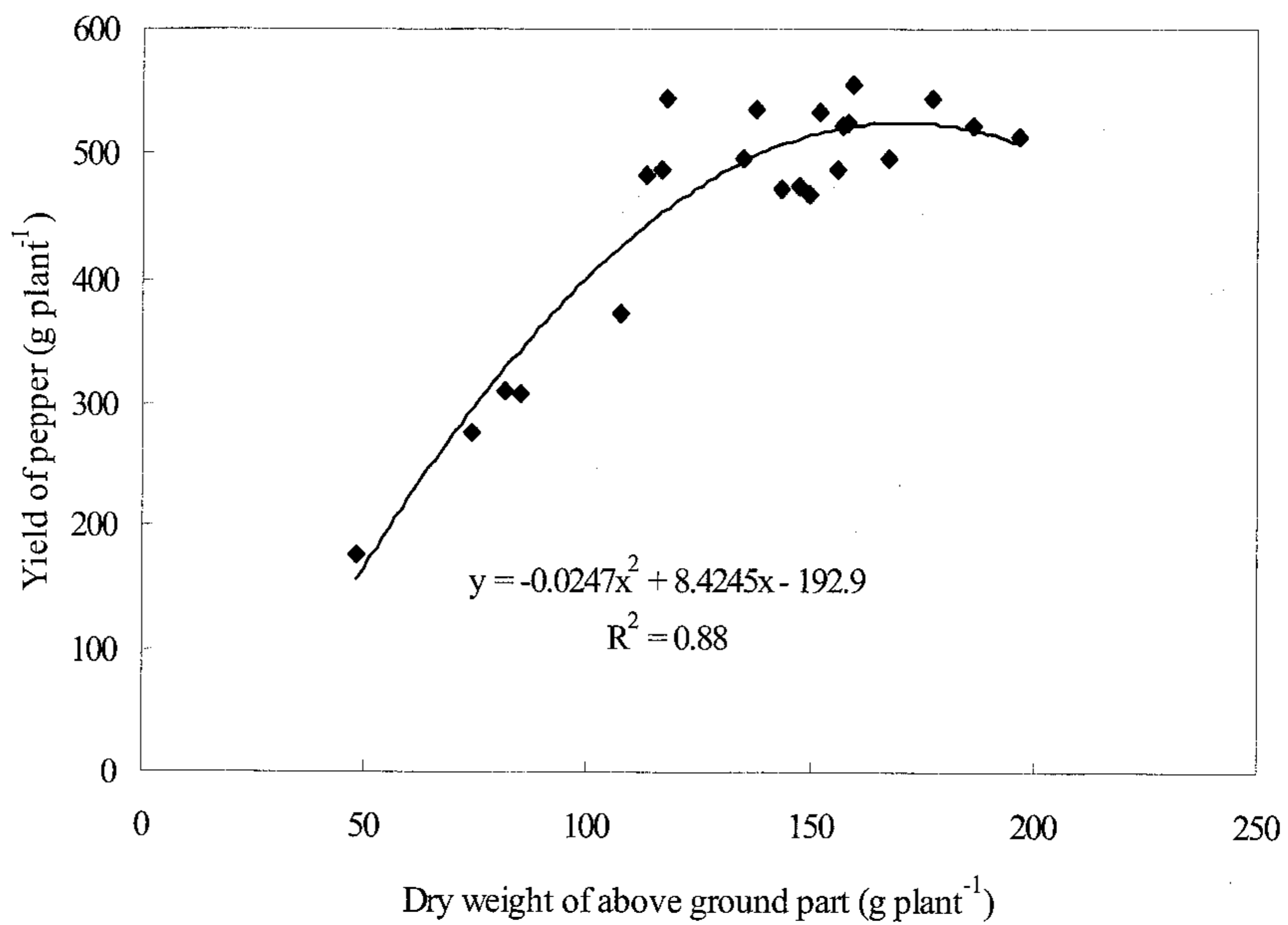


Fig. 2-6. Relationship between dry weight of above ground part of pepper plant and green pepper yield harvested until the 120th day after planting in 2004.

고추의 생산성 평가에서 특히 수량조사는 장기간의 수확기간에서 유발될 수 있는 오차가 크게 관여될 수 있다. 따라서 생체량 요인들 간의 관계를 조사하기 위하여 생고추 수량과 지상부 건물중의 상호관계를 정식후 78일째 및 120일째에 그림 2-5와 2-6에 각각 나타냈다. 그 결과 생고추 수량은 고추의 지상부 건물중과 조사된 두 시기에 모두 각각 고도로 유의성 있는 밀접한 관계(결정계수 $R^2=0.82$ 및 0.88)를 보였다. 이러한 결과는 고추의 생산성 평가에서 지상부 건물중은 수량을 대체하여 평가될 수 있음을 시사하고 있다.

고추 정식후 37일째 및 78일째에 지상원격탐사 센서의 반사율지표를 포함한 여러 가지 지표들과 고추 성장량 및 질소흡수량 사이의 상관계수를 표 2-6과 2-7에 각각 나타냈다. 조사된 두 시기에서 고추의 성장량 및 질소 흡수량은 지상원격탐사 반사율지표들과 고도로 유의성 있는 정의 상관을 보였다. 특히 passive sensor인 Crop Circle에 의한 반사율 지표, rNDVI는 정식후 37일째 생체량 및 질소흡수량과 0.80~0.83의 상관계수를 보였고, 정식후 78일째에는 rNDVI와 gNDVI 모두 생체량 및 질소흡수량과 0.83~0.88의 상관계수를 보이며 가장 양호한 관계를 보였다.

Table 2-6. Correlation coefficient between dry weight of red pepper and reflectance indexes at the 37th day after planting in 2004(n=36)

Sensor	Index	Fresh weight	Dry weight	N-uptake by leaves
Amon method	Chlorophyll a+b	0.20	0.20	0.27
Chlorophyll meter	SPAD reading	0.30	0.26	0.36*
Field Scout TM	CM1000 reading	0.64**	0.62**	0.64**
GreenSeeker TM	rNDVI	0.67**	0.71**	0.65**
Crop Circle TM	rNDVI	0.83**	0.81**	0.80**
Crop Circle TM	gNDVI	0.38*	0.33*	0.35*
Crop Circle TM	aNDVI	0.73**	0.69**	0.70**
Spectroradiometer (LI1800)	rNDVI	0.55**	0.57**	0.53**
Spectroradiometer (LI1800)	gNDVI	0.42*	0.37*	0.41*
Spectroradiometer (LI1801)	aNDVI	0.58**	0.56**	0.57**

*Significant at the 0.05 level

**Significant at the 0.01 level

Table 2-7. Correlation coefficient between dry weight of red pepper and reflectance indexes at the 78th day after planting in 2004(n=12)

Sensor	Index	Fresh weight	Dry weight	Yield of pepper	N-uptake by leaves
Chlorophyll meter	SPAD reading	0.49	0.52	0.36	0.67*
GreenSeeker™	rNDVI	0.61*	0.64*	0.32	0.70*
Crop Circle™	rNDVI	0.86**	0.84**	0.66*	0.83**
Crop Circle™	gNDVI	0.86**	0.84**	0.66*	0.88**
Crop Circle™	aNDVI	0.85**	0.78**	0.58*	0.79**
Spectroradiometer	rNDVI	0.61*	0.70*	0.48	0.82**
Spectroradiometer	aNDVI	0.38	0.52	0.34	0.66*

*Significant at the 0.05 level

**Significant at the 0.01 level

Table 2-8. Correlation coefficient between reflectance index and biomass attributes of red pepper at the 74th day after planting in 2005

Sensor	Index	Dry weight	N content	N uptake	P content	P uptake	K content	K uptake
Crop Circle(ACS210)	aNDVI	0.847	0.828	0.810	-0.828	-0.184	0.551	0.793
Crop Circle(ACS210)	NIR/Amber	0.846	0.881	0.857	-0.784	-0.141	0.611	0.834
Crop Circle(ACS210)	rNDVI	0.837	0.826	0.809	-0.739	-0.122	0.627	0.801
Crop Circle(ACS210)	NIR/Red	0.798	0.822	0.794	-0.698	-0.144	0.585	0.770
GreenSeeker	gNDVI	0.512	0.656	0.559	-0.532	-0.276	0.535	0.548
GreenSeeker	Green/NIR	-0.518	-0.655	-0.559	0.530	0.259	-0.536	-0.548
GreenSeeker	rNDVI	0.672	0.693	0.668	-0.712	-0.252	0.399	0.635
GreenSeeker	Red/NIR	0.703	0.718	0.698	-0.734	-0.249	0.400	0.661
Crop Circle(passive)	gNDVI	0.468	0.394	0.459	-0.375	-0.105	0.201	0.431
Crop Circle(passive)	aNDVI	0.614	0.536	0.611	-0.456	-0.030	0.401	0.610
Crop Circle(passive)	rNDVI	0.700	0.636	0.694	-0.572	-0.098	0.449	0.684
Crop Circle(passive)	Green index	0.466	0.391	0.462	-0.372	-0.116	0.230	0.445
Spectroradiometer	gNDVI	0.841	0.828	0.862	-0.728	0.025	0.627	0.860
Spectroradiometer	aNDVI	0.796	0.776	0.819	-0.682	0.047	0.597	0.819
Spectroradiometer	rNDVI	0.704	0.668	0.723	-0.593	0.060	0.531	0.729

n=42

표 2-8은 2004년도와 동일한 사경제배 방법으로 질소수준을 40%에서 140%까지 처리된 2005년도 시험의 고추 이식후 74일째 건물중 및 양분흡수량과 지상원격탐사 반사율지표의 상관관계를 나타낸 것이다. 1년차 시험결과(2004)과 동일하게 지상원격탐사의 여러 가지 반사율지표들은 고추 생체량 및 양분흡수량과 유의성 있는 밀접한 상관관계를 보였다. 2004년도 1차 시험에서 검토되지 못하였던 active sensor인 Crop Circle ACS210

의 반사율지표들은 passive sensor의 반사율지표들보다 더 양호한 상관을 보였다. 이러한 원인은 passive sensor의 단점인 측정시의 광조건, 즉 구름에 의한 흐린 날씨나 혹은 측정시간의 광량이 상대적으로 적은 늦은 오후 등에 영향을 받은 것으로 생각된다. 외부의 광조건에 영향을 받지 않는 Crop Circle active sensor의 반사율지표들, rNDVI와 aNDVI는 고추의 건물중, 엽중 질소함량, 질소흡수량, 칼륨흡수량 등과 고도로 유의성 있는 정의 상관 (상관계수 $r=0.79\sim 0.85$)을 보였다. 그러나 엽중 인 함량은 이들 반사율지표들과 고도로 유의성 있는 부의 상관을 나타냈다.

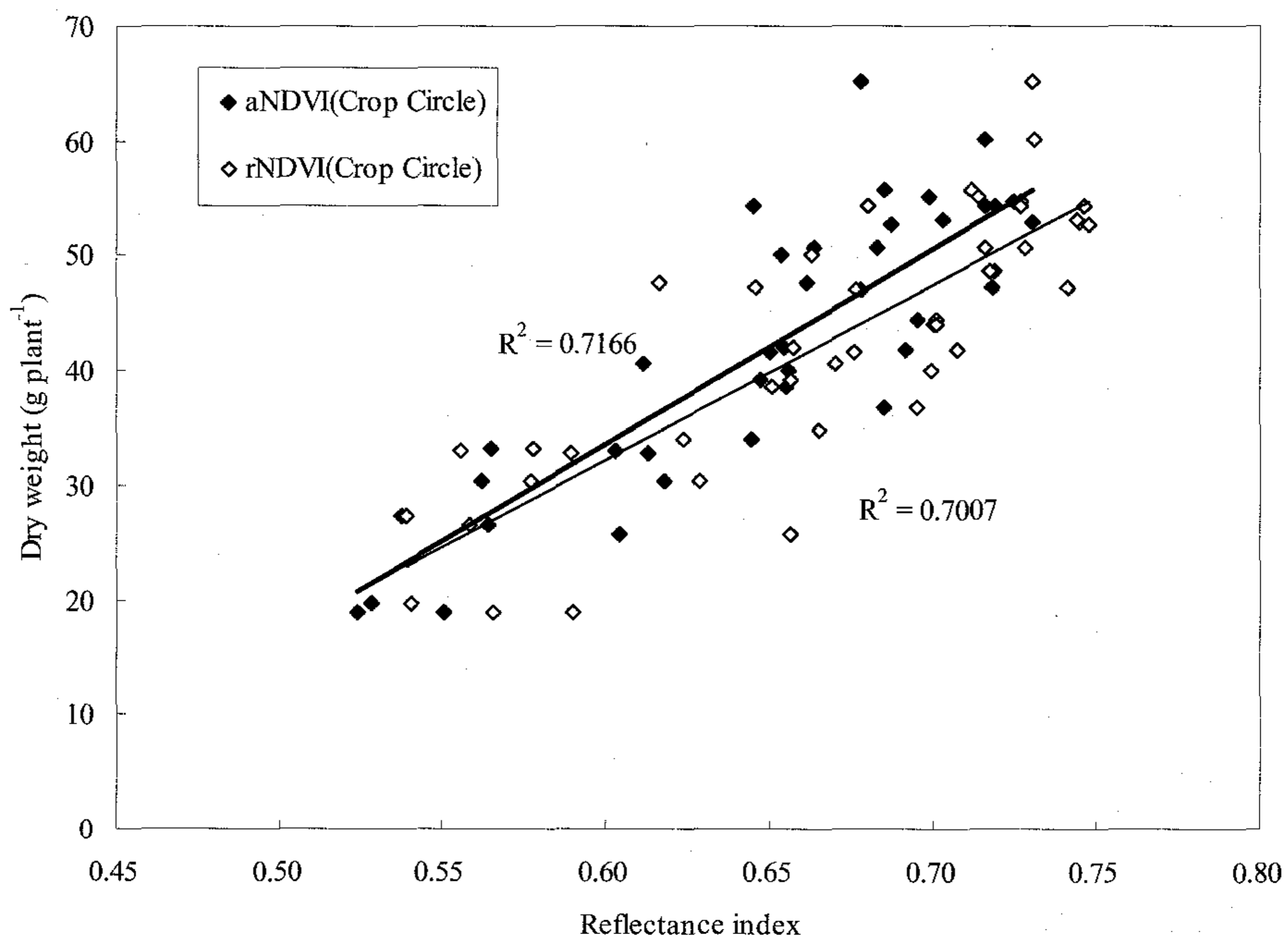


Fig. 2-7. Relationship between reflectance index and dry weight of red pepper at the 74th day after planting in 2005.

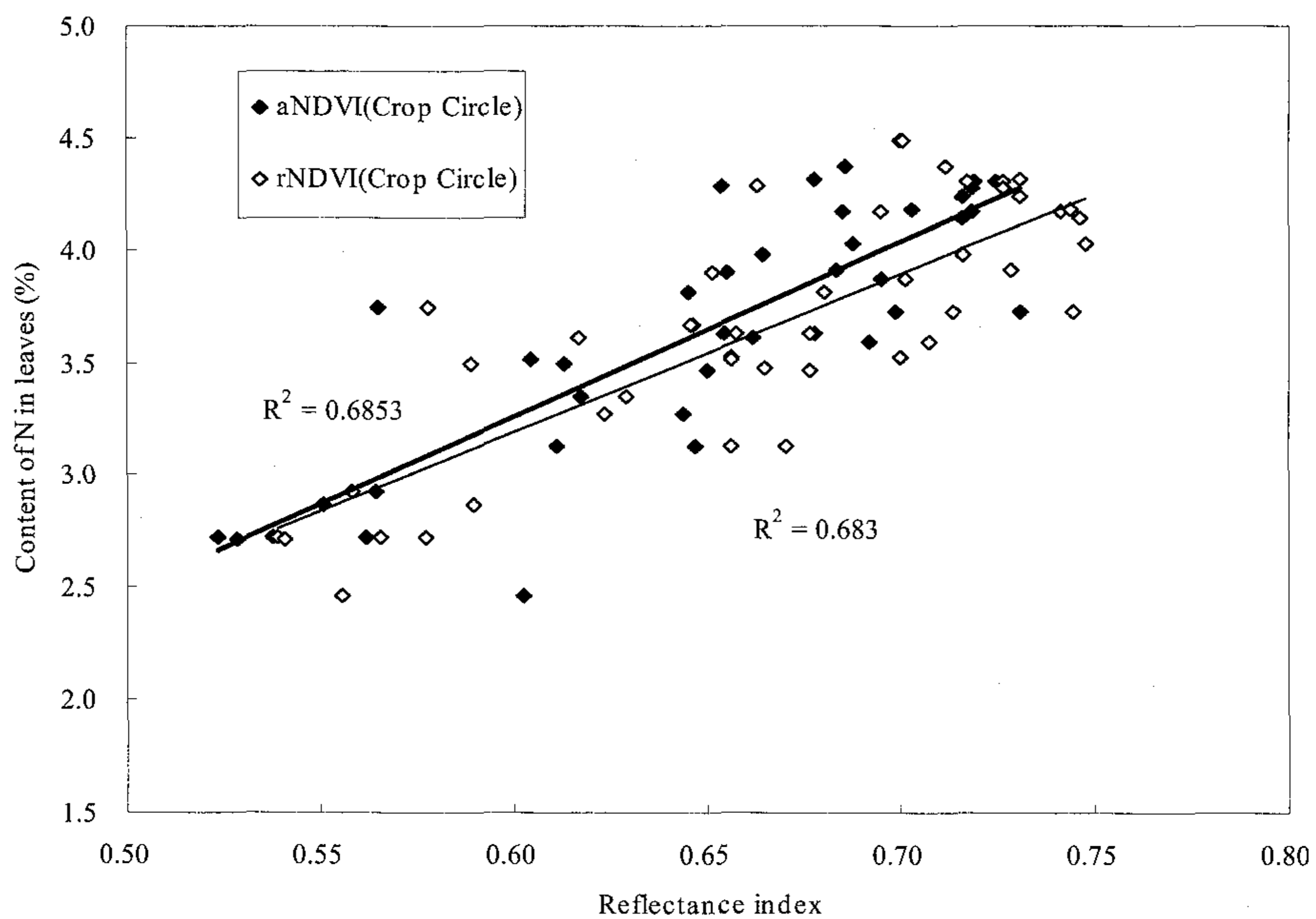


Fig. 2-8. Relationship between reflectance index and content of nitrogen in red pepper leaves at the 74th day after planting in 2005.

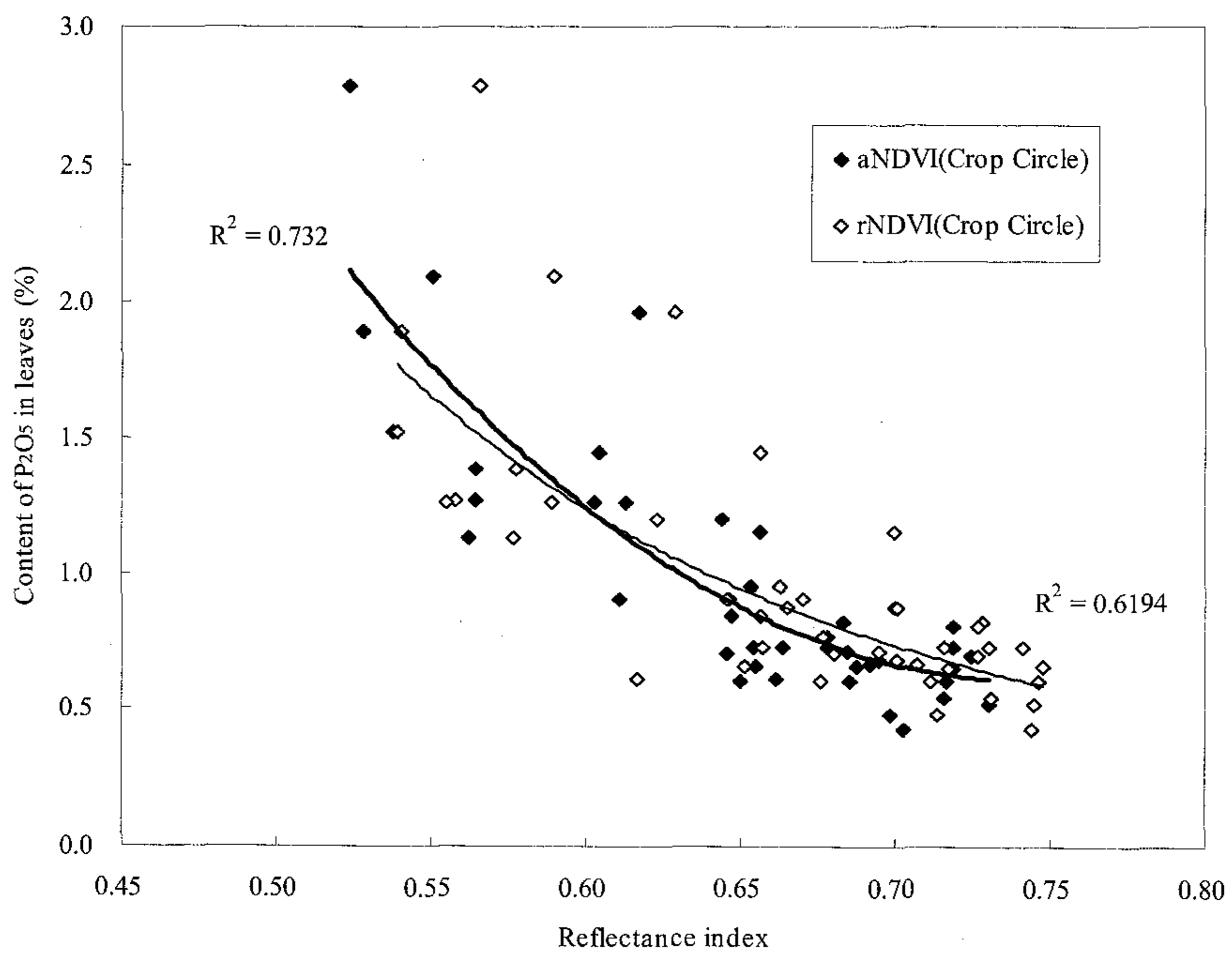


Fig. 2-9. Relationship between reflectance index and content of phosphorus in red pepper leaves at the 74th day after planting

정식후 74일째 고추의 건물중, 엽중 질소함량 및 인산함량과 고도로 유의성 있는 상관을 보인 active sensor Crop Circle의 반사율 지표들의 상호관계는 각각 그림 2-7, 2-8, 2-9에 나타냈다. 정의 상관을 보인 건물중과 질소함량은 이들 반사율지표들에 의하여 각각 70% 및 68%를 설명할 수 있는 곡선적인 정의 회귀관계를 보였으며 인산함량은 rNDVI에 의하여 73%가 설명되는 곡선적인 부의 회귀관계를 보였다. 따라서 고추의 생체량을 평가하기 위하여 효율적인 지상원격탐사 센서는 passive sensor보다는 active sensor가 측정할 때의 광 조건에 영향을 받지 않기 때문에 현장 활용성에서 유리하고 특히 Crop Circle ACS-210 센서가 가장 양호한 것으로 평가되었다.

나) 연초

사경재배 조건에서 질소수준을 40%에서 140% 까지 6개 수준으로 생육된 연초의 성장량은 표 2-9에서 보는바와 같이 수확시 건물중은 최소 99.6g/주에서 최대 230.5g/주 까지 큰 차이를 보였으며 수확시 건물중의 변동계수는 20.2% 질소흡수량의 변동계수는 34%를 보였다. 이들 성장량 변이들은 여러 가지 원격탐사센서들의 반사율 지표와 상호관계를 분석하였다.

Table 2-9. Variation of dry weight and amount of N-uptake by tobacco affected by nitrogen stress in 2004

Statistic	Dry weight of tobacco			Amount of N-uptake by leaves		
	30th DAP	40th DAP	Harvesting	30th DAP	40th DAP	Harvesting
	----- (g plant ⁻¹) -----			----- (mg N plant ⁻¹) -----		
Min.	1.6	16.8	99.6	62.2	385.1	728.9
Max.	5.8	38.6	230.5	240.3	1393.1	2919.6
Median	4.3	28.4	190.2	199.9	927.7	1885.3
Average	4.1	27.8	182.2	182.0	915.2	1836.5
STDEV	1.2	6.2	36.7	55.8	322.0	624.8
CV	30.3	22.3	20.2	30.7	35.2	34.0

연초 정식후 30일째, 40일째 및 수확기의 3시기에 연초 성장량 및 질소흡수량과 지상원격탐사 센서들의 반사율지표 사이의 상관계수를 각각 표 2-10, 2-11 및 2-12에

나타냈다. 정식후 30일째는 반사율지표 rNDVI와 gNDVI가 엽록소 측정기보다 생체량 및 질소흡수량과 양호한 상관을 보였다(표 2-10).

Table 2-10. Correlation coefficient between reflectance index and biomass and N-uptake by tobacco at the 30th DAP in 2004(n=19)

Factor	Fresh weight	Dry weight	N-uptake
SPAD reading	0.47*	0.46*	0.54*
CM1000 reading	0.48*	0.51*	0.43
rNDVI	0.70**	0.70**	0.76**
gNDVI	0.66**	0.73**	0.71**

*Significant at the 0.05 level

**Significant at the 0.01 level

정식후 40일째는 Green Seeker의 반사율지표가 가장 낮은 상관을 보였지만 대부분의 반사율지표들은 30일째와 같은 경향으로 고도로 유의성 있는 정의 상관을 보였다(표 2-11). 센서별로는 passive sensor인 Crop Circle과 spectroradiometer의 반사율지표들이 높은 상관계수를 보였으며 비 접촉 엽록소 측정기인 CM-1000도 양호하게 평가되었다. 그러나 수확기때는 지상원격측정 반사율지표보다 엽록소 측정기 SPAD가 가장 양호한 상관을 나타냈다. 아마 수확기에 잎이 완전히 전개되고 성숙된 엽에서 passive 형태의 광 반사율 효율이 떨어지는 것으로 생각되었다.

Table 2-11. Relationship between fresh and dry weight and N-uptake by tobacco and reflectance indexes at the 40th day after planting in 2004 (n=18)

Sensor	Index	Fresh weight	Dry weight	N-uptake by leaves
Arnon method	Chlorophyll a+b	0.73**	0.75**	0.71**
Chlorophyll meter	SPAD reading	0.87**	0.84**	0.86**
Field Scout	CM1000 reading	0.92**	0.93**	0.91**
GreenSeeker TM	rNDVI	0.54*	0.56*	0.61**
Crop Circle TM	rNDVI	0.82**	0.78**	0.83**
Crop Circle TM	gNDVI	0.83**	0.81**	0.84**
Crop Circle TM	aNDVI	0.94**	0.91**	0.96**
Spectroradiometer (LI1800)	rNDVI	0.91**	0.89**	0.91**
Spectroradiometer (LI1800)	gNDVI	0.93**	0.92**	0.92**

*Significant at the 0.05 level

**Significant at the 0.01 level

Table 2-12. Relationship between dry weight and N-uptake by tobacco and reflectance indexes at the harvesting in 2004(n=24)

Sensor	Index	Fresh weight	Dry weight	Yield	N-uptake by leaves
Chlorophyll meter	SPAD reading	0.85**	0.86**	0.83**	0.83*
GreenSeeker™	rNDVI	0.44*	0.46*	0.43*	0.50*
Crop Circle™	rNDVI	0.16	0.14	0.15	0.19
Crop Circle™	gNDVI	0.38	0.36	0.34	0.35
Crop Circle™	aNDVI	0.31	0.27	0.23	0.25

*Significant at the 0.05 level

**Significant at the 0.01 level

그림 2-10은 연초 정식후 40일째 건물중과 양호한 상관을 보였던 비 접촉형 엽록소 측정기 CM-1000의 측정치와 건물중의 상호관계를 나타낸 것이다. 엽록소 측정치는 연초 건물중을 87% 설명하며 직선적인 회귀관계를 보였다.

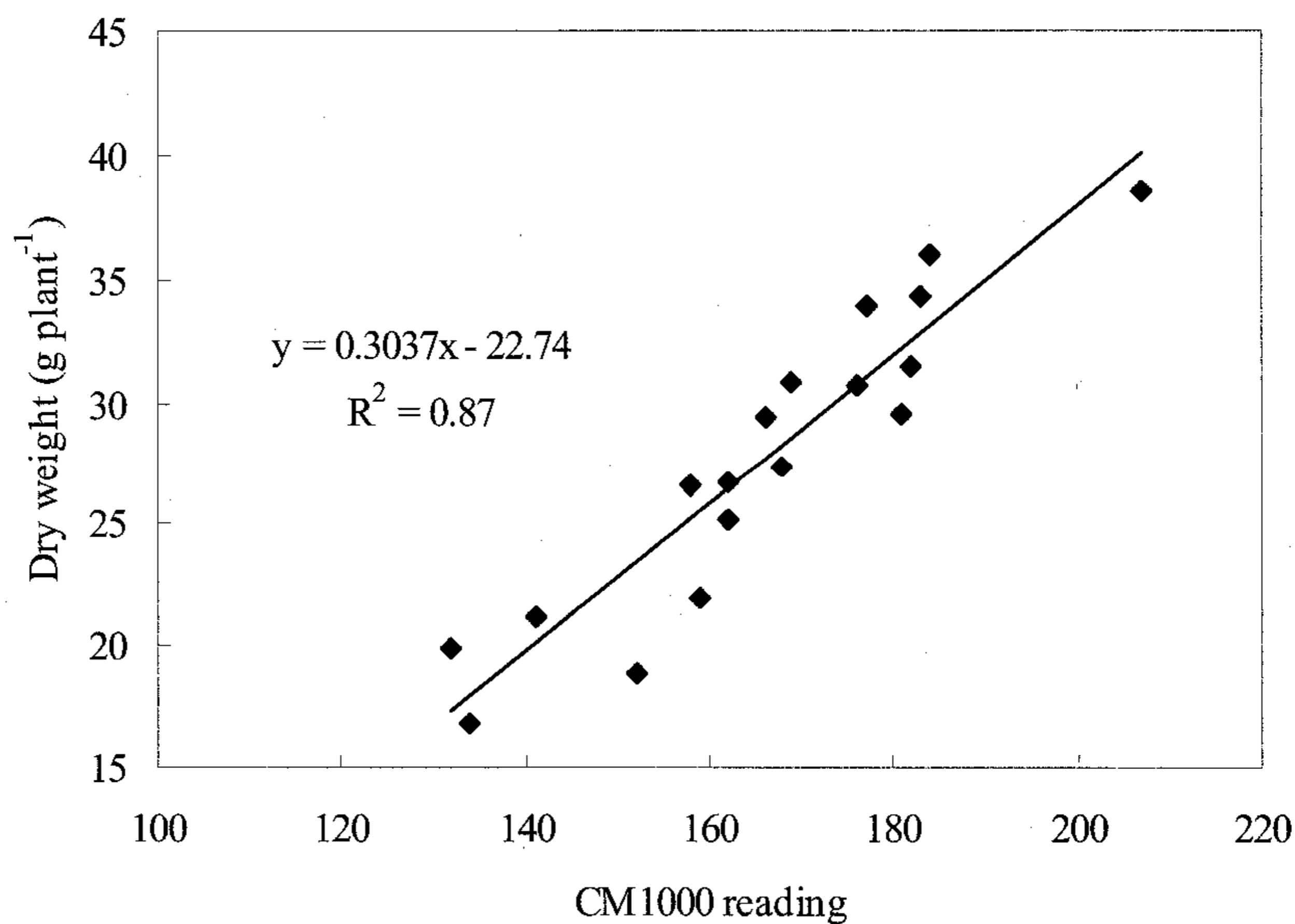


Fig. 2-10. Relationship between dry weight and CM1000 reading at the 40th day after planting in 2004.

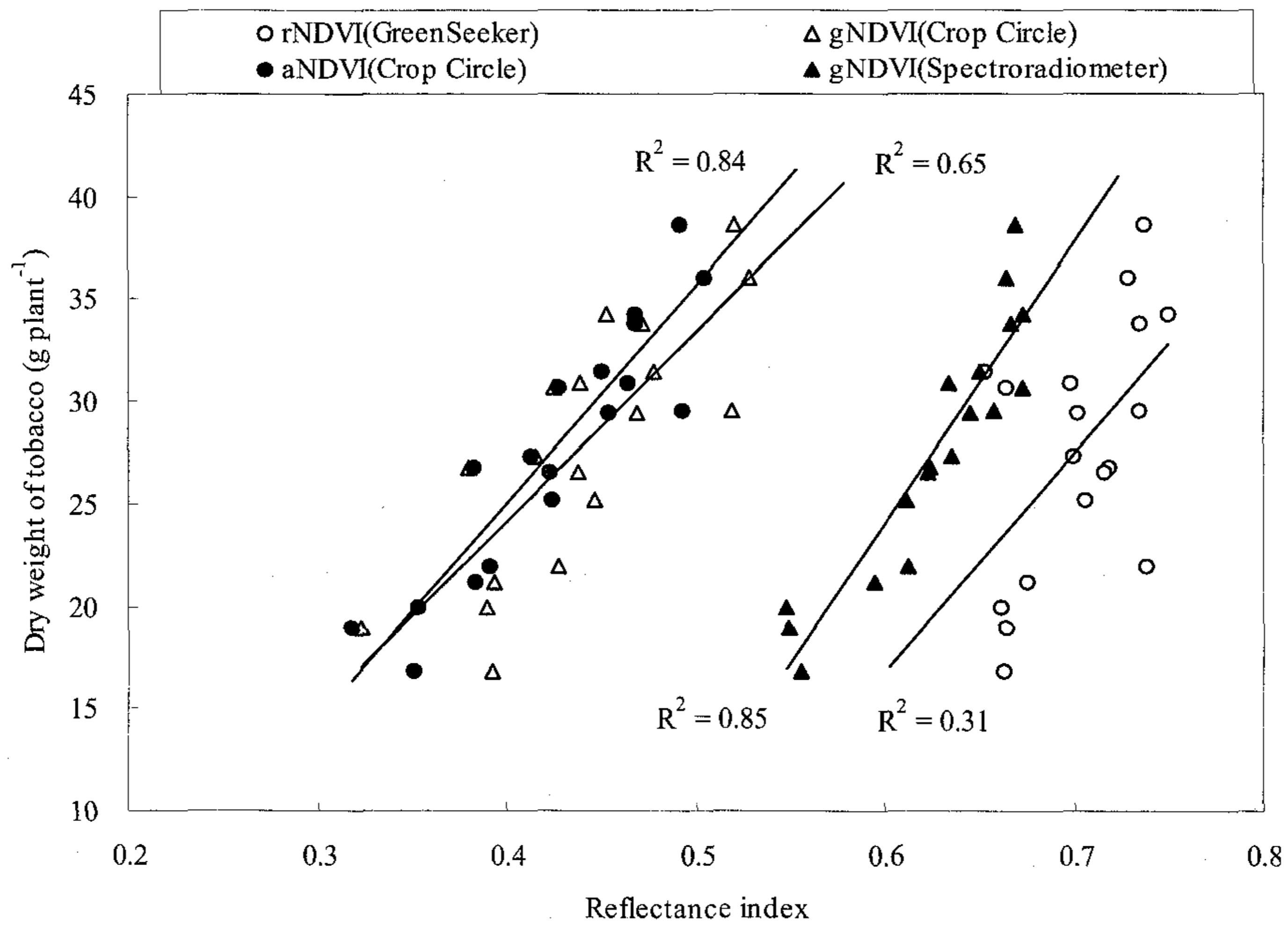


Fig. 2-11. Relationship between dry weight of tobacco and reflectance indexes at the 40th day after planting in 2004.

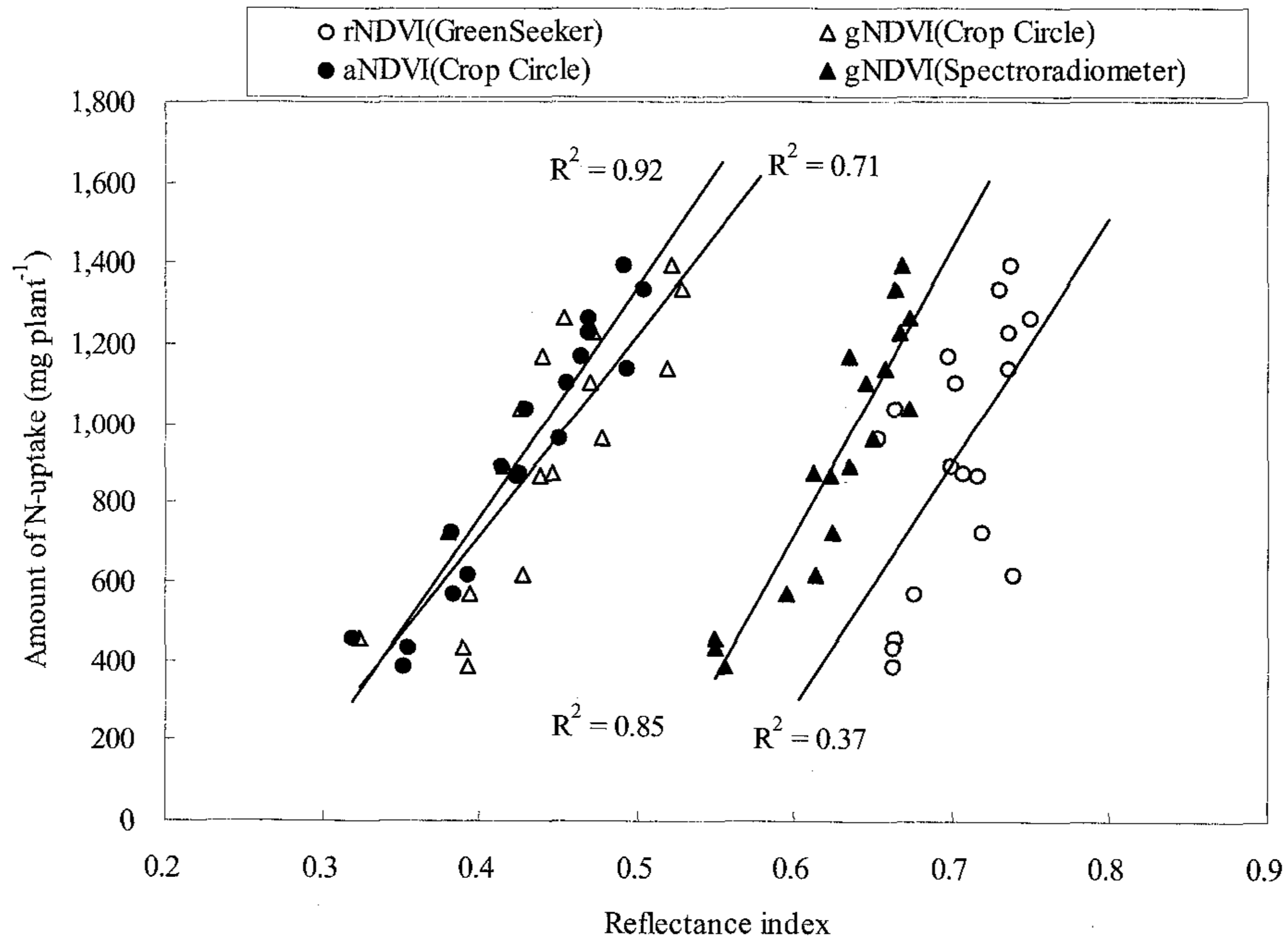


Fig. 2-12. Relationship between amount of N-uptake by tobacco and reflectance index at the 40th day after planting in 2004.

또한 연초 정식후 40일째 고도로 유의성 있는 상관을 보였던 지상원격탐사 센서들의 반사율지표와 연초 건물중의 관계를 그림 2-11에 그리고 질소흡수량과의 관계는 그림 2-12에 나타냈다. 반사율 지표들 중에서 특히 40일째 Crop Circle에 의해 측정된 aNDVI는 건물중을 84%, 질소흡수량을 92% 각각 설명하면서 직선적인 회귀관계를 보였다.

Table 2-13. Correlation coefficient between yield attributes of tobacco and reflectance index at the 35th day after planting in 2005

Sensor	Index	FW-leaves	DW-leaves	Ncontent	Nuptake	P content	Puptake	K content	Kuptake
Crop Circle(passive)	gNDVI	0.567	0.451	0.530	0.494	-0.441	0.051	0.392	0.422
Crop Circle(passive)	aNDVI	0.618	0.427	0.635	0.570	-0.405	0.060	0.519	0.496
Crop Circle(passive)	rNDVI	0.489	0.317	0.537	0.472	-0.323	-0.033	0.459	0.421
Crop Circle(passive)	g index	0.557	0.435	0.520	0.482	-0.442	0.030	0.387	0.411
Crop Circle(ACS210)	rNDVI	0.582	0.516	0.592	0.575	-0.395	0.150	0.400	0.470
Crop Circle(ACS210)	NIR/Red	0.676	0.613	0.663	0.671	-0.537	0.054	0.504	0.585
GreenSeeker	rNDVI	0.317	0.292	0.381	0.373	-0.074	0.300	0.418	0.398
GreenSeeker	gNDVI	0.771	0.571	0.828	0.818	-0.448	0.114	0.776	0.765

n=24

표 2-13은 2004년도와 동일한 사경제배 방법으로 질소수준을 40%에서 140%까지 처리된 2005년도 시험의 연초 이식후 35일째 건물중 및 양분흡수량과 지상원격탐사 반사율지표의 상관을 나타낸 것이다. 1년차 시험결과(2004)과 동일하게 지상원격탐사의 여러 가지 반사율지표들은 연초 생체량 및 양분흡수량과 유의성 있는 밀접한 상관을 보였다. 2004년도 1차 시험에서 검토되지 못하였던 active sensor인 Crop Circle ACS-210의 반사율지표들은 고추의 경우와 동일한 경향으로 passive sensor의 반사율지표들보다 더 양호한 상관을 보였다. 이러한 결과로부터 측정 시에 광 조건에 영향을 받지 않는 active sensor는 고추에 대한 평가결과와 동일한 경향으로 연초의 생체량을 평가하기에 바람직 할 것으로 생각되었다.

2) 작물군락에 대한 반사율지표

가) 고추

포장조건의 고추군락에 대한 지상원격탐사 센서들의 효율성을 평가하기 위하여 음

성지역의 갈곡통, 괴산지역의 수암통, 그리고 보은지역의 대산통 포장에서 조사되었다.

음성지역의 포장 조건에서 정식후 40일째 고추군락에 대한 지상원격탐사센서의 반사율지표들과 고추 생체량의 상관계수는 표 2-14에 나타냈다. 고추군락 canopy에 대한 지상원격탐사 센서들의 반사율지표들은 고추 건물중 및 질소흡수량과의 상관에서 사경재배 조건의 고추 단일개체에 대한 경우보다 대부분의 지표들이 약간 낮은 상관계수를 보였으나 passive sensor인 Crop Circle의 rNDVI는 active sensor인 Green Seeker보다 양호하며 가장 높은 상관계수를 보였다.

표 2-15는 괴산지역 포장 조건에서 정식후 84일째 고추군락에 대한 지상원격탐사 센서의 반사율지표들과 고추 생체량의 상관계수를 나타냈다. 음성지역의 정식후 40일째와 유사한 경향으로 passive sensor인 Crop Circle의 반사율지표들은 active sensor인 Green Seeker보다 양호하며 가장 높은 상관계수를 보였다. 이러한 결과는 보은지역의 포장조건에서도 동일한 경향으로 정식후 60일째(표 2-16) 및 84일째(표 2-17) 조사된 상관계수가 Crop Circle의 반사율지표들이 가장 높은 상관계수를 보였다.

Table 2-14. Relationship between biomass of red pepper and reflectance indexes at the 40th day after planting for Eumseong field in 2004(n=12).

Sensor	Index	Fresh weight	Dry weight	N-uptake
Chlorophyll meter	SPAD reading	0.450	0.494	0.479
Field Scout TM	CM1000 reading	0.450	0.504	0.464
GreenSeeker TM	rNDVI	0.623	0.587	0.581
Crop Circle TM	rNDVI	0.813	0.813	0.821
	gNDVI	0.685	0.672	0.710
	aNDVI	0.424	0.446	0.514
Spectroradiometer	gNDVI	0.324	0.476	0.454
	gNDVI2	0.342	0.536	0.533
	rNDVI	0.363	0.535	0.528

Table 2-15. Relationship between biomass of red pepper and reflectance indexes at the 84th day after planting for Goesan field in 2004 (n=14).

Sensor	Index	Fresh weight	Dry weight	N-uptake
Chlorophyll meter	SPAD reading	0.601	0.598	0.653
GreenSeeker™	rNDVI	0.380	0.435	0.461
Crop Circle™	rNDVI	0.679	0.734	0.707
	gNDVI	0.781	0.859	0.890
	aNDVI	0.784	0.837	0.866

Table 2-16. Relationship between biomass of red pepper and reflectance indexes at the 60th day after planting for Boeun field in 2004(n=14).

Sensor	Index	Fresh weight	Dry weight	N-uptake
Chlorophyll meter	SPAD reading	0.665	0.624	0.627
GreenSeeker™	rNDVI	0.470	0.556	0.576
Crop Circle™	rNDVI	0.806	0.782	0.773
	gNDVI	0.875	0.899	0.899
	aNDVI	0.790	0.828	0.803

Table 2-17. Relationship between biomass of red pepper and reflectance indexes at the 84th DAP for Boeun field in 2004(n=14).

Sensor	Index	Fresh weight	Dry weight	N-uptake
GreenSeeker™	rNDVI	0.419	0.559	0.569
Crop Circle™	rNDVI	0.624	0.729	0.724
	gNDVI	0.528	0.702	0.705
	aNDVI	0.501	0.644	0.638

따라서 지상원격측정센서의 반사율지표, 특히 passive sensor인 Crop Circle의 반사율 지표는 고추의 개체(포트시험) 및 군락조건(포장시험)에 관계없이 고추의 생체량 및 질소흡수량과 가장 양호한 상관을 보여 검토된 센서 중에서 가장 바람직한 것으로 평가되었다.

Table 2-18. Correlation coefficient between reflectance index and dry weight of red pepper and nutrients uptake by leaves at the 60th day after planting in 2005

Sensor	Index	Fresh weight	Dry weight	Nuptake by leaves	Ncontent of leaves	P ₂ O ₅ uptake by leaves	P ₂ O ₅ content of leaves	K ₂ O uptake by leaves	K ₂ O content of leaves
Crop Circle(ACS210)	aNDVI	0.502	0.524	0.539	0.079	0.686	0.009	0.556	0.352
Crop Circle(ACS210)	NIR/anber	0.472	0.499	0.508	0.042	0.660	0.003	0.534	0.334
Crop Circle(ACS210)	rNDVI	0.531	0.533	0.535	-0.026	0.668	-0.059	0.594	0.459
Crop Circle(ACS210)	NIR/red	0.492	0.504	0.499	-0.073	0.661	-0.032	0.554	0.366
Crop Circle(passive)	gNDVI	0.315	0.326	0.307	-0.165	0.278	-0.128	0.311	0.028
Crop Circle(passive)	aNDVI	0.387	0.413	0.402	-0.066	0.376	-0.166	0.408	0.068
Crop Circle(passive)	rNDVI	0.382	0.398	0.387	-0.056	0.327	-0.233	0.384	0.022
Crop Circle(passive)	green Index	0.327	0.341	0.330	-0.094	0.262	-0.203	0.327	0.013
GreenSeeker	rNDVI	0.667	0.675	0.642	-0.255	0.671	-0.301	0.721	0.516
GreenSeeker	Red/NIR	0.668	0.676	0.643	-0.258	0.670	-0.303	0.722	0.517

n=33

표 2-18은 2005년도에 수행된 토양의 질소공급능력이 다양한 조건에서 고추의 생산력검정에 공시된 청원군 5개 포장과 음성군 6개 포장 등 11개 포장 33개 처리에서 이식후 60일째 고추 생체량과 센서 종류별 반사율지표의 상관계수를 나타낸 것이다. 사경제배의 고추 개체에 대한 평가와 동일한 경향으로 active sensor인 Green Seeker와 2005년도에 포함된 active sensor인 Crop Circle ACS-210의 반사율지표들은 passive sensor의 지표들보다 고추의 건물중과 질소흡수량을 더 양호하게 평가하였다. 그림 2-12는 Green Seeker의 rNDVI와 고추 건물중의 상호관계를 나타낸 것인데 반사율지표는 고추 건물중을 67% 설명하며 곡선적인 정의 회귀관계를 보였다.

따라서 사경제배 포트의 개체조건과 포장의 균락 조건에서 지상원격탐사센서에 의한 고추의 생체량을 평가한 결과 개체 및 균락조건에 관계없이 효율적인 반사율지표는 passive 형태의 센서 지표들보다 active 형태의 지표들이 양호하였으며 특히 Crop Circle ACS-210 센서의 반사율지표들이 가장 효율적인 것으로 확인되었다.

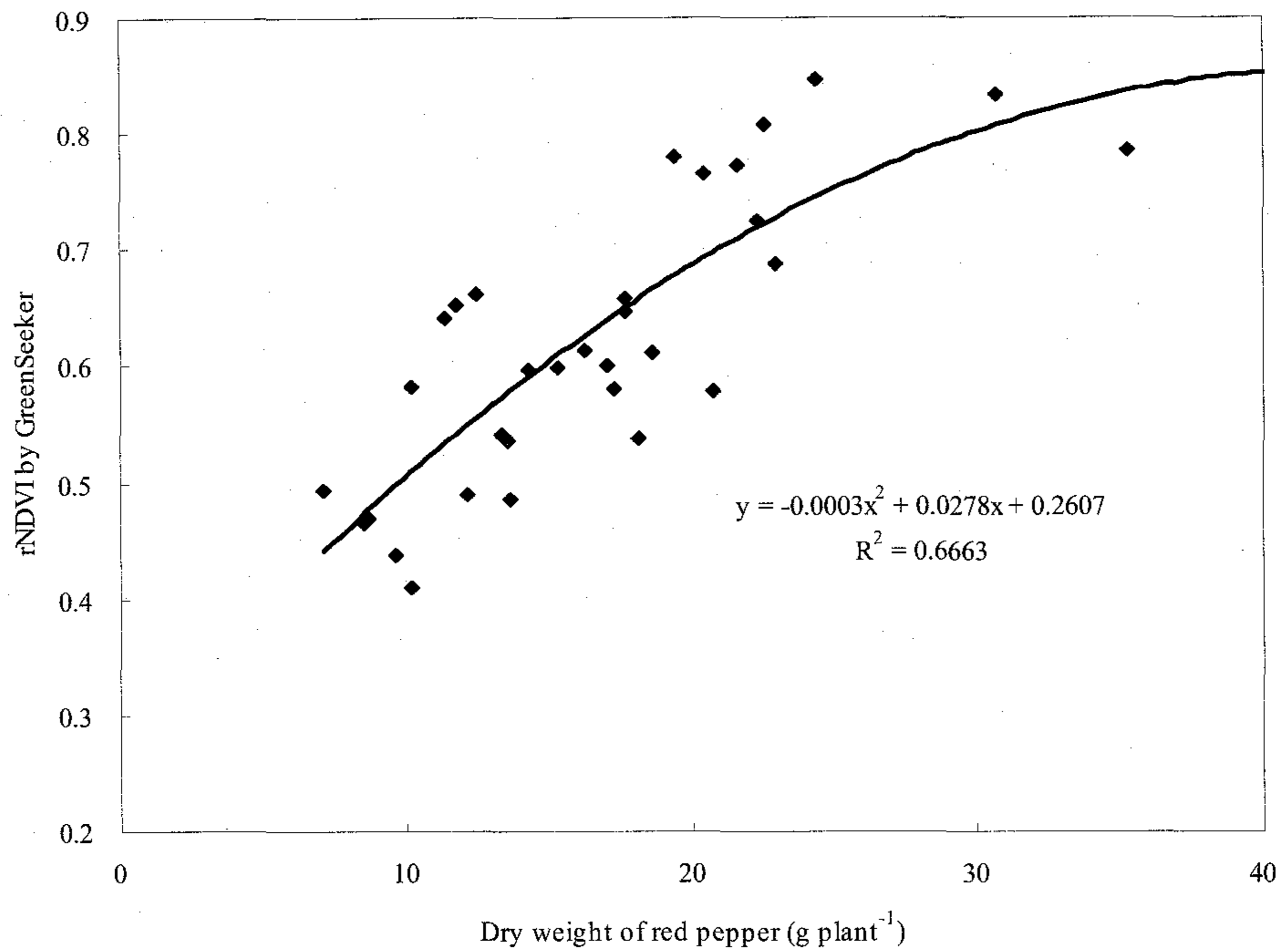


Fig. 2-12. Relationship between dry weight of red pepper and rNDVI at the 60th day after planting in 2005.

나) 연초

포장조건의 연초군락에 대한 지상원격탐사 센서들의 효율성을 평가하기 위하여 청주시 개신동의 예산통 포장과 복대동의 화동통 포장에서 조사되었다.

질소 시비수준을 무비구, 표준시비량의 80%, 100%, 120% 및 140%로 처리된 예산통에 대한 포장시험에서 정식후 40일째 및 50일째의 연초 생체량과 반사율 지표들의 상관계수를 각각 표 2-19와 2-20에 나타냈다. 사경재배의 연초 개체에 대한 평가결과와 유사하게 검토된 원격탐사센서들의 모든 반사율지표들은 고도로 유의성 있는 상관관을 보였다. 연초 개체조건보다 군락조건에서 센서 반사율지표들이 더 양호한 상관계수를 보인 것은 광엽 식물인 연초의 canopy 탐사영역이 광범위하게 분포되었기 때문으로 생각된다. 이러한 경향은 화동통에 대한 포장시험의 정식후 45일과 52일에 각각 측정된 표 2-21과 2-22에서도 모든 반사율 지표들이 양호한 상관관을 보인 결과에서도 동일하였다.

Table 2-19. Correlation coefficient between dry weight of tobacco and reflectance indexes at the 40th DAP for field experiment in 2004(Yesan series, n=21)

Sensor	Index	Fresh weight	Dry weight
Field Scout TM	CM1000 reading	0.721	0.744
	Chlorophyll content	0.719	0.680
GreenSeeker TM	rNDVI	0.729	0.719
Crop Circle TM	rNDVI	0.688	0.699
	gNDVI	0.761	0.759
	aNDVI	0.710	0.718
Spectroradiometer	rNDVI	0.783	0.768
	gNDVI	0.791	0.785
	aNDVI	0.790	0.778

Table 2-20. Correlation coefficient between dry weight of tobacco and reflectance indexes at the 50th DAP for field experiment in 2004(Yesan series, n=21)

Sensor	Index	FWL	DWL	FW	DW
Field Scout TM	CM1000 reading	0.898	0.907	0.912	0.908
GreenSeeker TM	rNDVI	0.905	0.894	0.911	0.890
Crop Circle TM	rNDVI	0.863	0.839	0.874	0.838
	gNDVI	0.923	0.904	0.931	0.902
	aNDVI	0.910	0.884	0.911	0.877

FW : fresh weight of above ground part of tobacco

DW : Dry weight of above ground part of tobacco

FWL : Fresh weight of tobacco leaves

Table 2-21. Relationship between dry weight of tobacco and reflectance indexes at the 45th DAP for field experiment in 2004(Hwadong series, n=21)

Sensor	Index	FW	DW
Chlorophyll meter	SPAD reading	0.748	0.652
Field Scout TM	CM1000 reading	0.853	0.785
	Chlorophyll content	0.452	0.412
GreenSeeker TM	rNDVI	0.712	0.670
Crop Circle TM	rNDVI	0.729	0.629
	gNDVI	0.717	0.600
	aNDVI	0.723	0.616
Spectroradiometer	rNDVI	0.799	0.724
	gNDVI	0.699	0.618
	aNDVI	0.763	0.685

Table 2-22. Relationship between dry weight of tobacco and reflectance indexes at the 52nd for field experiment in 2004(Hwadong series, n=21)

Sensor	Index	FWL	DWL	FW	DW
Chlorophyll meter	SPAD reading	0.811	0.812	0.799	0.803
Field ScoutTM	CM1000 reading	0.832	0.816	0.824	0.810
GreenSeekerTM	rNDVI	0.785	0.805	0.776	0.795
Crop CircleTM	rNDVI	0.682	0.710	0.668	0.695
	gNDVI	0.743	0.742	0.730	0.731
	aNDVI	0.737	0.737	0.724	0.726

FW : fresh weight of above ground part of tobacco

DW : Dry weight of above ground part of tobacco

FWL : Fresh weight of tobacco leaves

DWL : Dry weight of tobacco leaves

표 2-23은 2005년도에 수행된 토양의 질소공급능력이 다양한 조건에서 연초의 생산력검정에 공시된 청원군지역의 10개 포장 32개 처리에서 이식후 60일째 active 형태의 센서 종류별 반사율지표와 수확기의 연초 수량 및 양분흡수량의 상관계수를 나타낸 것이다. 연초의 생육 초 중반기에 검토하였던 2004년 1차년도와 동일한 경향으로 반사율지표들은 수확기에도 연초의 건물중과 질소흡수량의 평가에 효율적이었다. 특히 Green Seeker의 rNDVI는 수확엽의 건물중을 72% 설명하는 곡선적인 정의 회귀관계(그림 2-13)를 보였다. 그리고 Crop Circle ACS-210의 rNDVI는 수확엽의 건물중을 67%(그림 2-14), 질소흡수량을 72%(그림 2-15) 씩 각각 설명하는 곡선적인 정의 회귀관계를 보였다.

Table 2-23. Correlation coefficient between yield and nutrition uptake by tobacco at the harvesting and reflectance indexes at the 60th day after planting in 2005

Sensor	Index	Yield(FW)	Yield(DW)	Ncontent	Nuptake	P ₂ O ₅ uptake	K ₂ Ouptake
GreenSeeker	rNDVI	0.726	0.743	0.192	0.598	0.669	0.651
GreenSeeker	Red/NIR	0.684	0.715	0.200	0.571	0.630	0.604
Crop Circle(ACS210)	aNDVI	0.679	0.696	0.182	0.576	0.565	0.664
Crop Circle(ACS210)	NIR/Amber	0.679	0.677	0.204	0.604	0.574	0.694
Crop Circle(ACS210)	rNDVI	0.546	0.548	0.301	0.522	0.492	0.536
Crop Circle(ACS210)	NIR/Red	0.262	0.318	0.195	0.329	0.125	0.239

N=36

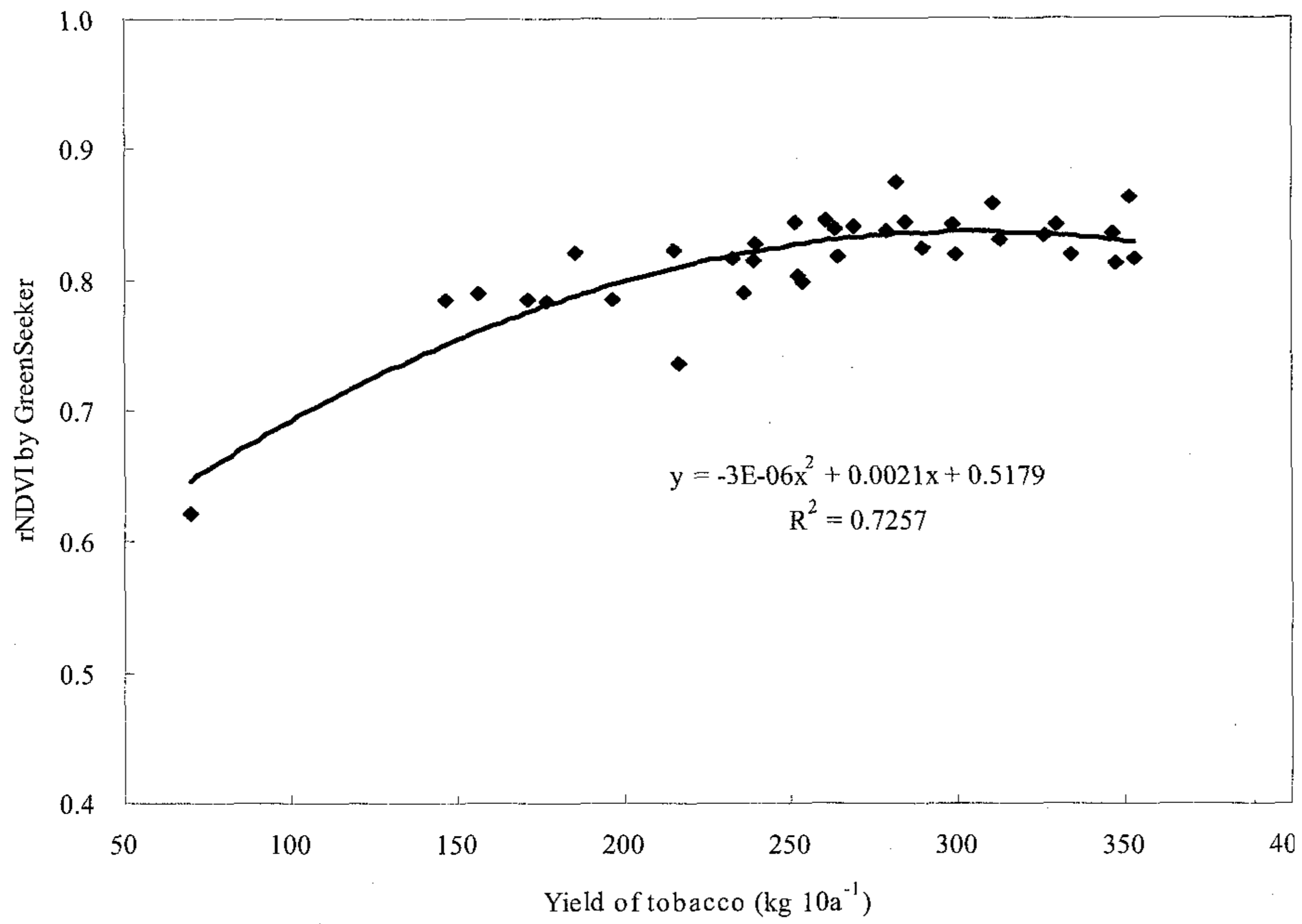


Fig. 2-13. Relationship between yield of tobacco and rNDVI by GreenSeeker at the 60th day after planting in 2005.

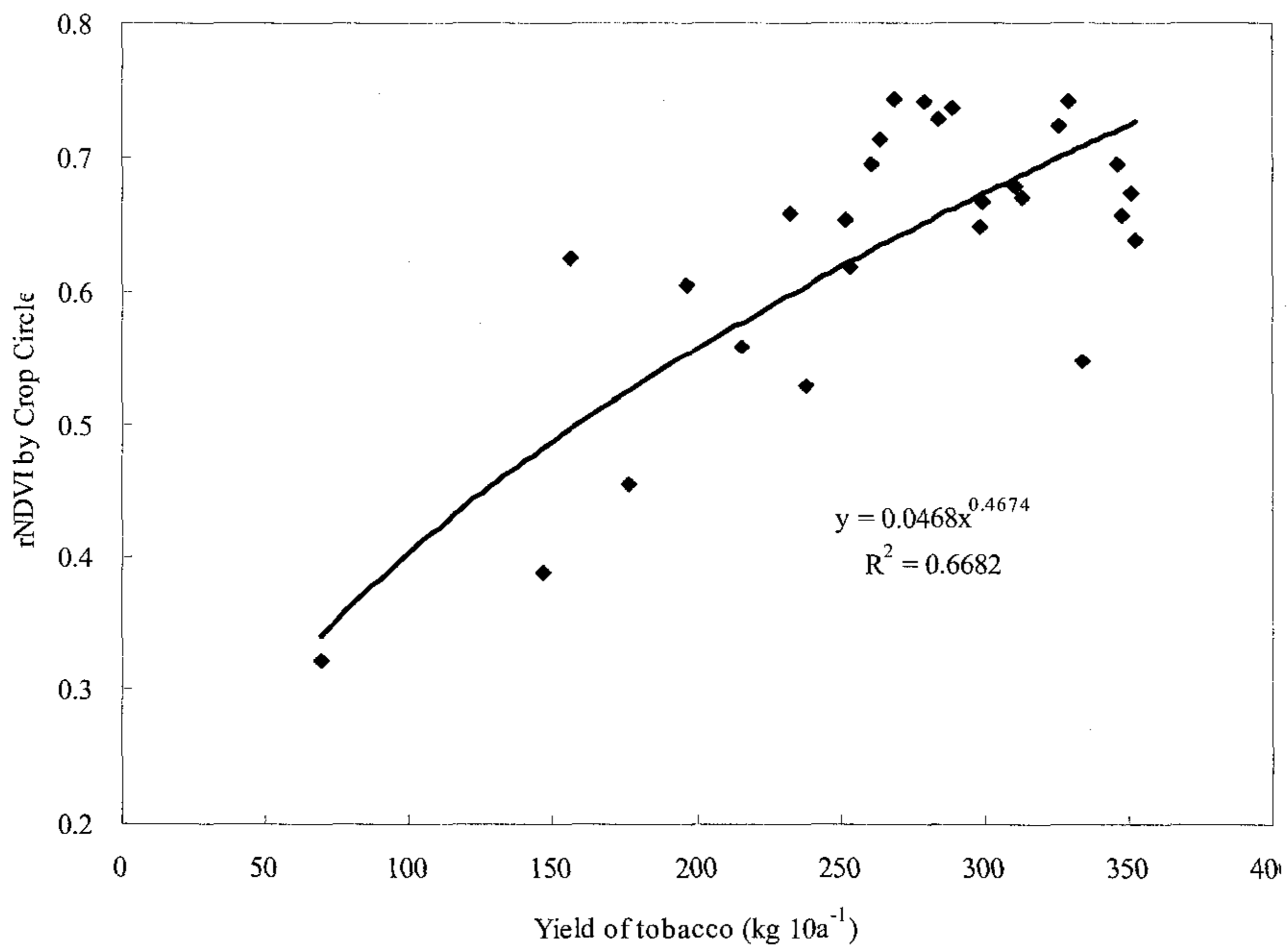


Fig. 2-14. Relationship between yield of tobacco and rNDVI by Crop Circle at the 37th day after planting in 2005.

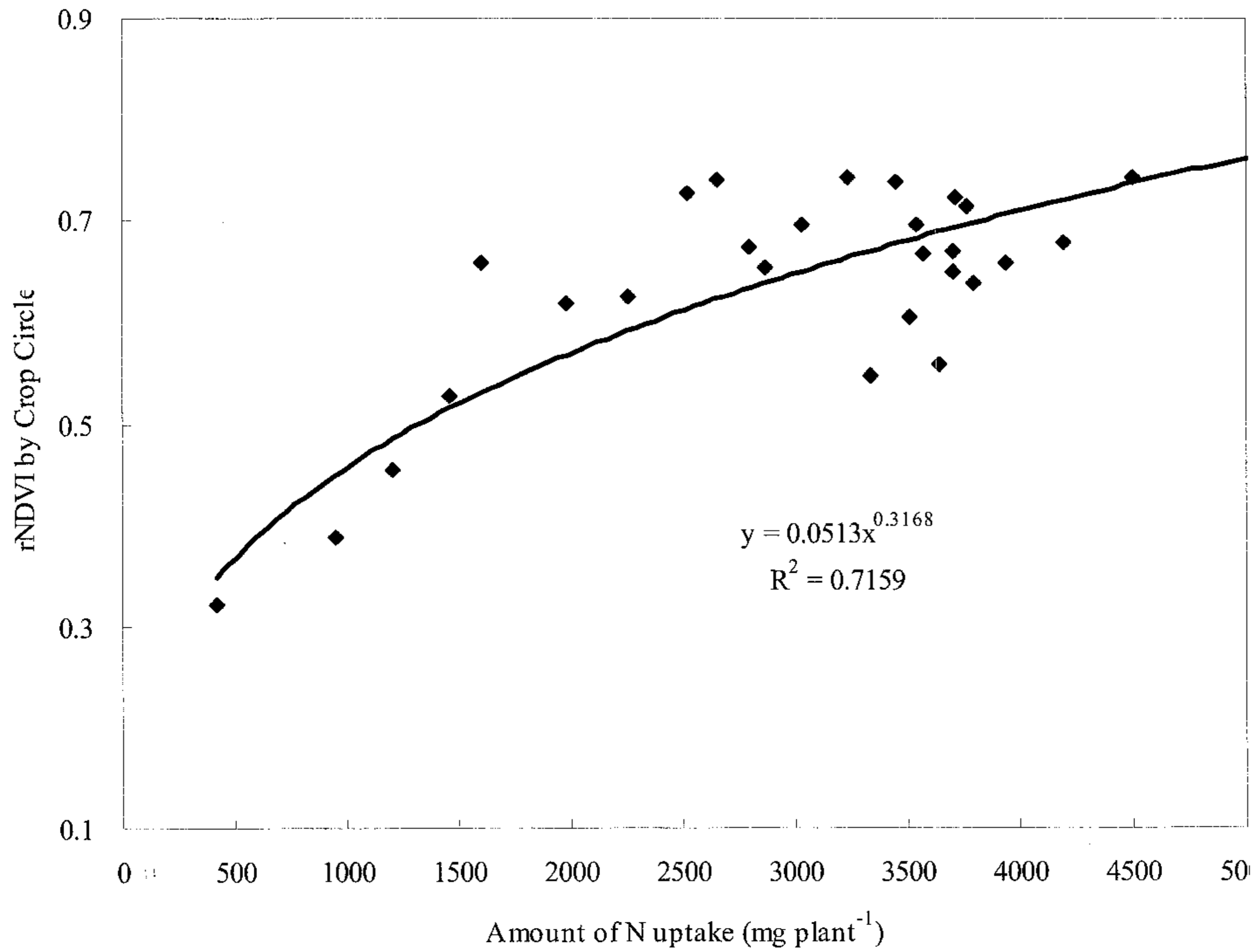


Fig. 2-15. Relationship between N uptake by tobacco leaves at the harvesting and rNDVI by Crop Circle at the 37th DAP in 2005.

이상의 결과로부터 지상원격탐사 센서들의 반사율지표들은 고추와 연초 두 작물의 개체조건 및 군락조건에 관계없이 생체량 및 질소흡수량을 양호하게 평가하였다. 특히 외부의 광 환경조건에 영향을 받지 않는 active 형태의 센서인 Crop Circle ACS-210에 의한 반사율지표는 고추와 연초의 생체량 평가에 가장 효율적인 것으로 확인되었다.

4. 적요

여러 가지 지상원격탐사센서들의 효율성을 비교하기 위하여 사경제배 조건에서 질소수준을 40%에서 140% 까지 6개 수준으로 처리된 작물의 개체조건과 포장에서 다양한 비옥도 및 질소 시비수준의 처리에 대한 작물의 군락조건으로 구분하여 생체량 변화와 센서들의 반사율지표들의 상호관계를 비교 평가하였다. 지상원격탐사 passive형

센서들이나 active형 센서들의 반사율지표들은 작물의 균락조건에 관계없이, 즉 사경재배 포트의 개체식물과 포장시험 처리구의 균락식물 조건 모두 동일시기의 작물 생체량 및 질소흡수량과 고도로 유의성 있는 상관을 보였다. 센서형태 별로 구분할 때 passive형 센서 중에는 Crop Circle 반사율지표들이 고추와 연초의 생체량 및 질소흡수량 평가에 가장 양호하였다. 그러나 passive sensor들은 측정시의 광조건, 즉 구름 낀 흐린 날씨나 혹은 측정시간에 따른 광량의 차이 등에 의하여 영향을 받기 때문에 active형 센서보다 평가의 효율성이 낮았다. 따라서 인공적인 LED 광원을 이용하여 측정시의 광 환경조건에 관계가 없는 active형 센서인 Crop Circle ACS-210의 반사율 지표는 고추와 연초 작물의 생체량 및 질소흡수량을 가장 양호하게 평가하였다.

제 2 절 원격탐사 센서에 의한 작물의 질소시비량 추천 모델 개발

1. 서 설

원격측정은 수량과 품질의 손실 없이 생육 초기에 양분결핍을 진단할 수 있으며 다양한 비율의 비료 살포장치와 접속될 경우 실시간 canopy 센서는 양분 이용율을 개선시키고 지표수와 지하수 자원의 오염을 경감시키는 필지별 시비방법으로 활용 할 수 있다(Schepers and Francis, 1988). Al-Abbas et al.(1974)은 온실 조건의 양분스트레스 연구에서 무기양분 결핍으로 가시광선 영역의 반사율은 증가된 반면 근적외선(NIR)과 중적외선(middle-infrared) 영역의 반사율은 특정무기양분에 따라 변화하였다고 하였고, Walburg et al.(1982)은 질소시비량을 4수준으로 처리한 옥수수 포장시험에서 질소시비량이 적어질수록 적색 파장의 반사율은 증가하고 근적외선 파장의 반사율은 감소되었다고 하였다. 그리고 적색파장의 반사율에 대한 근적외선 파장 반사율의 비율(RVI)은 질소시비량과 직접적으로 관련되어 있다고 하였으며 Jackson et al.(1981)도 사탕수수의 질소결핍 조건에서 유사한 결과를 보고하였다. Bausch and Duke (1996)는 관수장치인 center pivot 아래에 센서를 장착하여 10m 높이에서 옥수수 캐노피의 반사율을 측정하였고 반사율 지표 NIR/Green은 잎의 질소농도와 관련되어 있다고 하였다. 미국 오클라호마의 연구자들은 NIR과 Red 파장의 입사량과 반사량을 동시에 측정하는 spectroradiometer를 개발하여 밭의 열 수직 위에서 측정하였고 측정된 반사율 지표 NDVI는 질소흡수량, 생체량, 수량과 관련이 있었다고 하였다(Stoner et al., 1996; Raun et al., 2001). Ma et al., (2001)은 지상으로부터 2m 높이에서 생육중 콩(Glycine max, L)의 반사율을 측정하여 NDVI 지표로 콩의 수량을 예측하였다. Lihong et al., (2001)은 지상으로부터 3m 높이에서 반사율을 측정하였고 잎의 질소농도는 청색파장의 반사율과 음의 상관관계를 나타냈으며 NDVI와 RVI 지표는 목화의 생체량, 질소흡수량, 면화수량과 정의 상관관계를 보였다고 하였다.

식물의 생화학, 생리학, 그리고 대사작용에서의 변화를 검출하기 위한 새로운 원격

탐사 기술을 개발하고 기존의 원격탐사 기술을 개선하기 위한 연구가 진행되어 왔다. 예를 들면 밀감 수분 스트레스를 검출하기 위한 형광의 활용에 관한 연구(McFarlane et al., 1980)이다. Laser induced fluorescence (LIF)를 이용한 새로운 접근방법은 양분과 수분 스트레스의 사전 확인을 위한, 그리고 포장상태의 다양한 시비조건에서 식물 생장과 수량의 적정 수준을 검출하기 위한 가능성을 가지고 있는 것으로 연구되고 있다(Chappelle et al., 1984a; 1984b; McMurtrey et al., 1994; 1996; Corp et al., 1997; Daughtry et al., 1997, 2000).

2. 재료 및 방법

고추와 연초의 사경재배시험과 포장시험은 제 2장의 재료 및 방법과 동일한 조건에서 수행되었던 자료들을 이용하여 고추와 연초의 질소 시비량 추천모델 평가에 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 질소시비추천을 위한 센서 효율성 및 검정시기 선별

1) 작물개체에 대한 효율성 및 검정시기

가) 고추

원격탐사 센서에 의하여 생육 중반기에 수확기 고추의 생산성을 예측할 수 있는 기준시기(critical season)를 결정하기 위하여 2004년 사경재배 조건에서 생육된 고추 수확기(정식후 120일)의 건물중 및 질소흡수량과 이식후 37일, 50일, 78일째 측정된 반사율지표들의 상관계수를 표 3-1에 나타냈다. 고추 생체량 평가에 가장 양호하였던 passive 센서형태의 Crop Circle 반사율지표들은 이식후 37일, 50일, 78일째 모두 수확기의 고추 수량, 건물중, 질소흡수량과 고도로 유의성 있는 상관관계를 보였으며 특히 78일째 반사율지표가 가장 높은 상관계수를 보였다.

Table 3-1. Correlation coefficient between yield and amount of N-uptake by leaves of red pepper and reflectance indexes at the different growth stage in 2004.

Day after planting (DAP)	Index	at the 120th day after planting		
		Yield	Dry weight	N-uptake by leaves
37th DAP	SPAD	0.49*	0.63**	0.64**
	CM(40)	0.40	0.58**	0.62**
	rNDVI by GreenSeeker	0.50*	0.59**	0.64**
	rNDVI by Crop Circle	0.67**	0.73**	0.73**
	aNDVI by Crop Circle	0.73**	0.71**	0.75**
	rNDVI by Spectroradiometer	0.77**	0.82*	0.86*
50th DAP	SPAD	0.32	0.49*	0.62**
	CM1000	0.60**	0.69**	0.80**
	rNDVI by GreenSeeker	0.22	0.36	0.39
	rNDVI by Crop Circle	0.61**	0.70**	0.73**
	aNDVI by Crop Circle	0.66**	0.74**	0.78**
	rNDVI by Spectroradiometer	0.55	0.68*	0.70*
78th DAP	aNDVI by Spectroradiometer	0.61*	0.78**	0.81**
	SPAD	0.50*	0.68**	0.81**
	rNDVI by GreenSeeker	0.57**	0.70**	0.68**
	rNDVI by Crop Circle	0.77**	0.85**	0.87**
	aNDVI by Crop Circle	0.80**	0.89**	0.91**
	rNDVI by Spectroradiometer	0.55**	0.59**	0.72**
120th DAP	aNDVI by Spectroradiometer	0.57**	0.63**	0.74**
	rNDVI by GreenSeeker	0.27	0.48*	0.47*
	rNDVI by Crop Circle	0.44*	0.61**	0.55**
	gNDVI by Crop Circle	0.45*	0.72**	0.71**
	aNDVI by Crop Circle	0.48*	0.70**	0.69**

*Significant at the 0.05 level

**Significant at the 0.01 level

수확기의 고추 생체량 특성과 밀접한 상관을 보인 정식후 37일째 Crop Circle 반사율지표들과 수확기 고추 건물중 및 질소흡수량의 회귀관계는 그림 3-1과 3-2와 같이 곡선적인 정의 회귀관계를 보였다. 또한 동일한 방법으로 이식후 78일째 지표들도 그림 3-3과 3-4와 같이 수확기 고추의 건물중 및 질소흡수량과 유의성 있는 정의 회귀관계를 보였으며 특히 Crop Circle의 gNDVI는 수확기 고추 건물중을 78%, 질소흡수량을 83%씩 각각 설명할 수 있는 가장 양호한 효율성을 나타냈다.

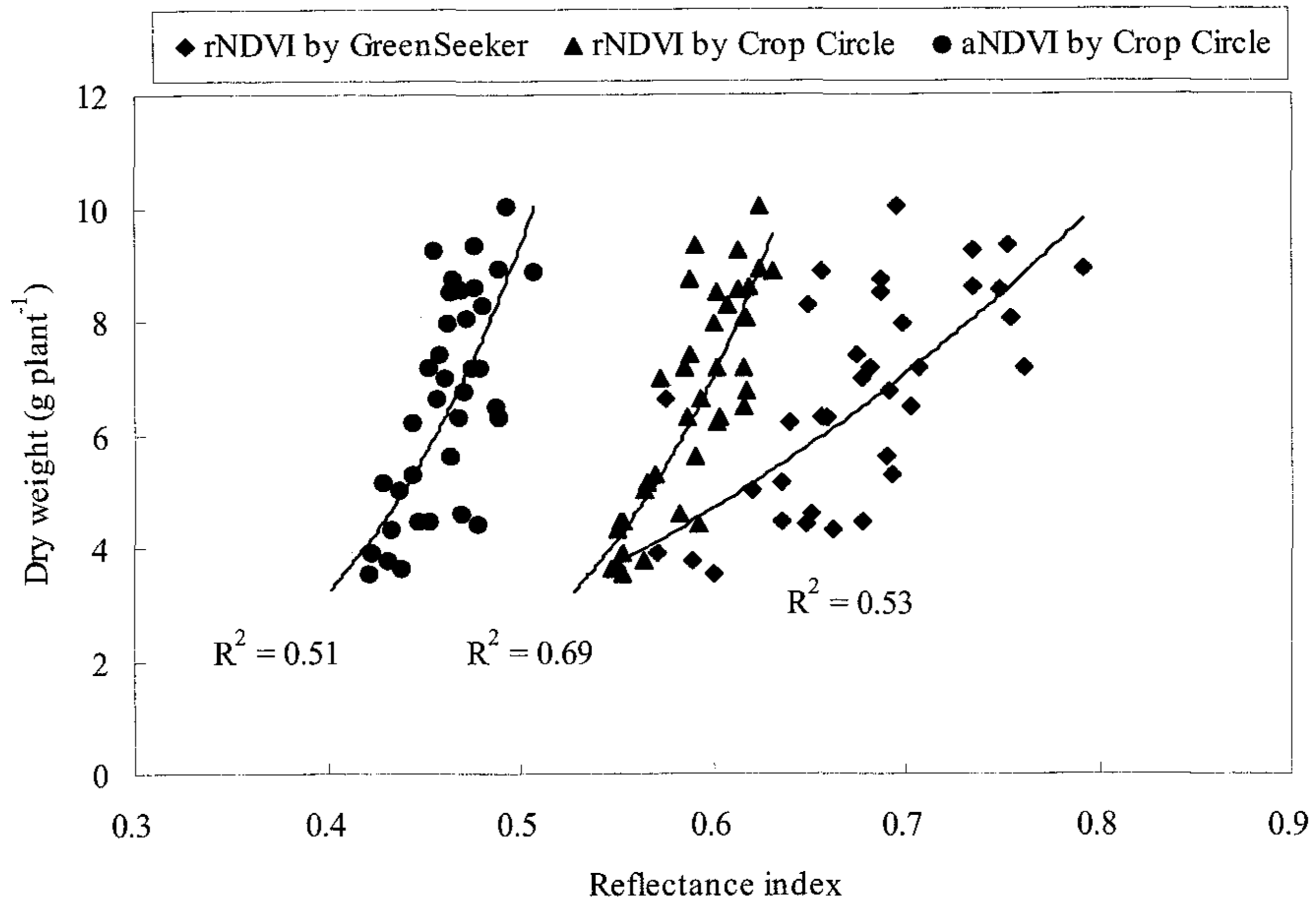


Fig. 3-1. Relationship between dry weight of above ground part of pepper and reflectance indexes at the 37th DAP in 2004.

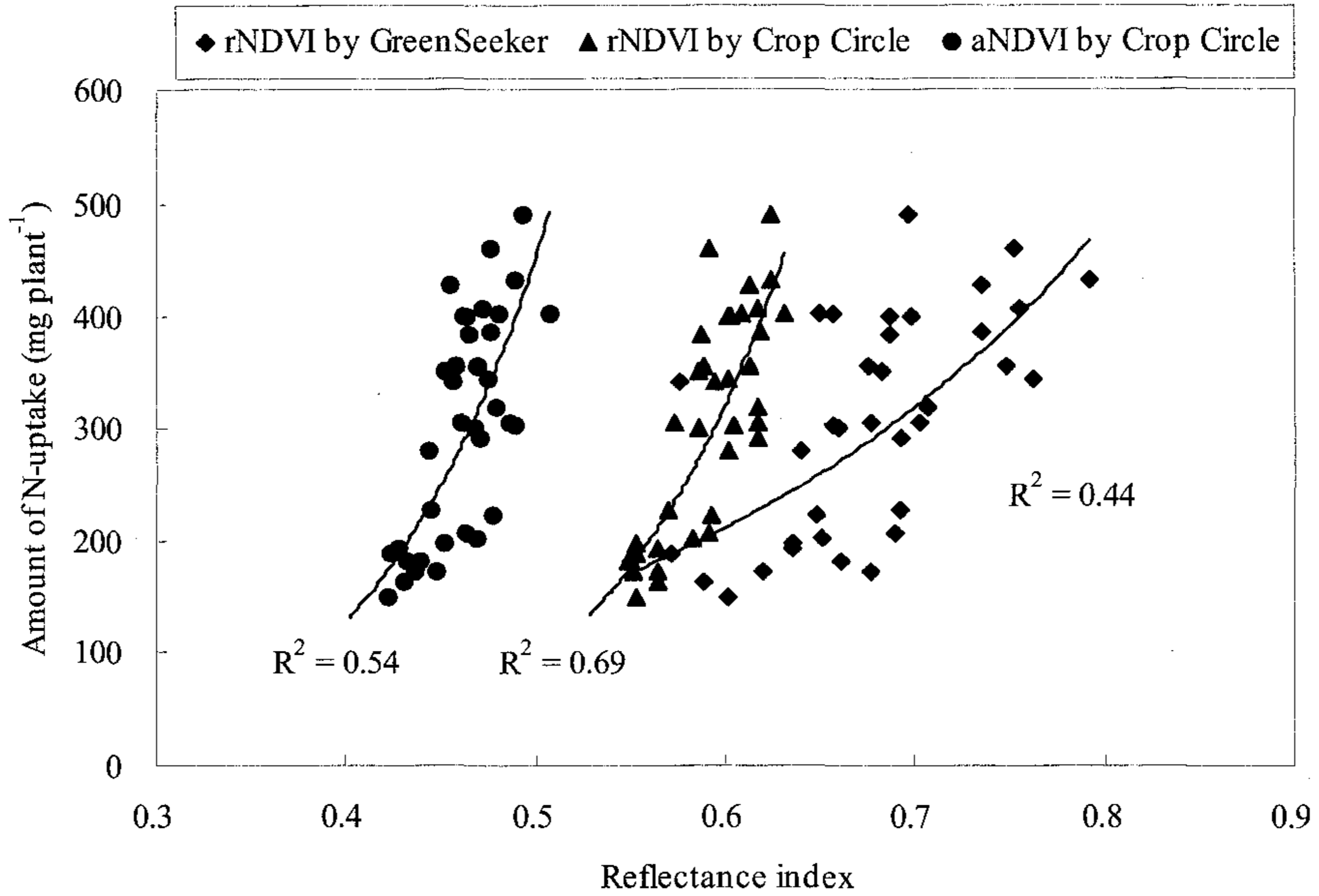


Fig. 3-2. Relationship between amount of N-uptake by leaves of pepper and reflectance indexes at the 37th DAP in 2004.

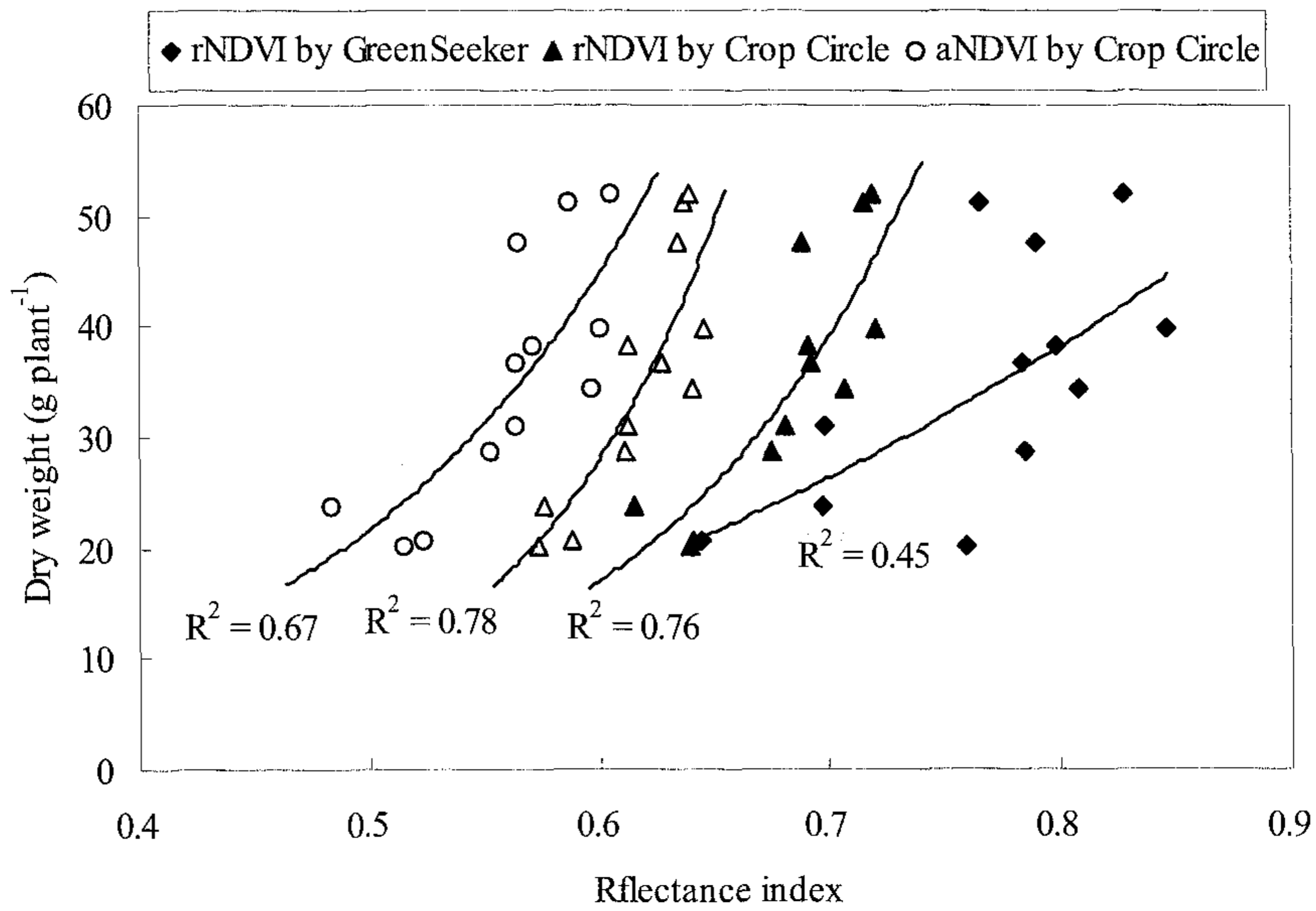


Fig. 3-3. Relationship between dry weight of above ground part of pepper and reflectance indexes at the 78th day after planting in 2004.

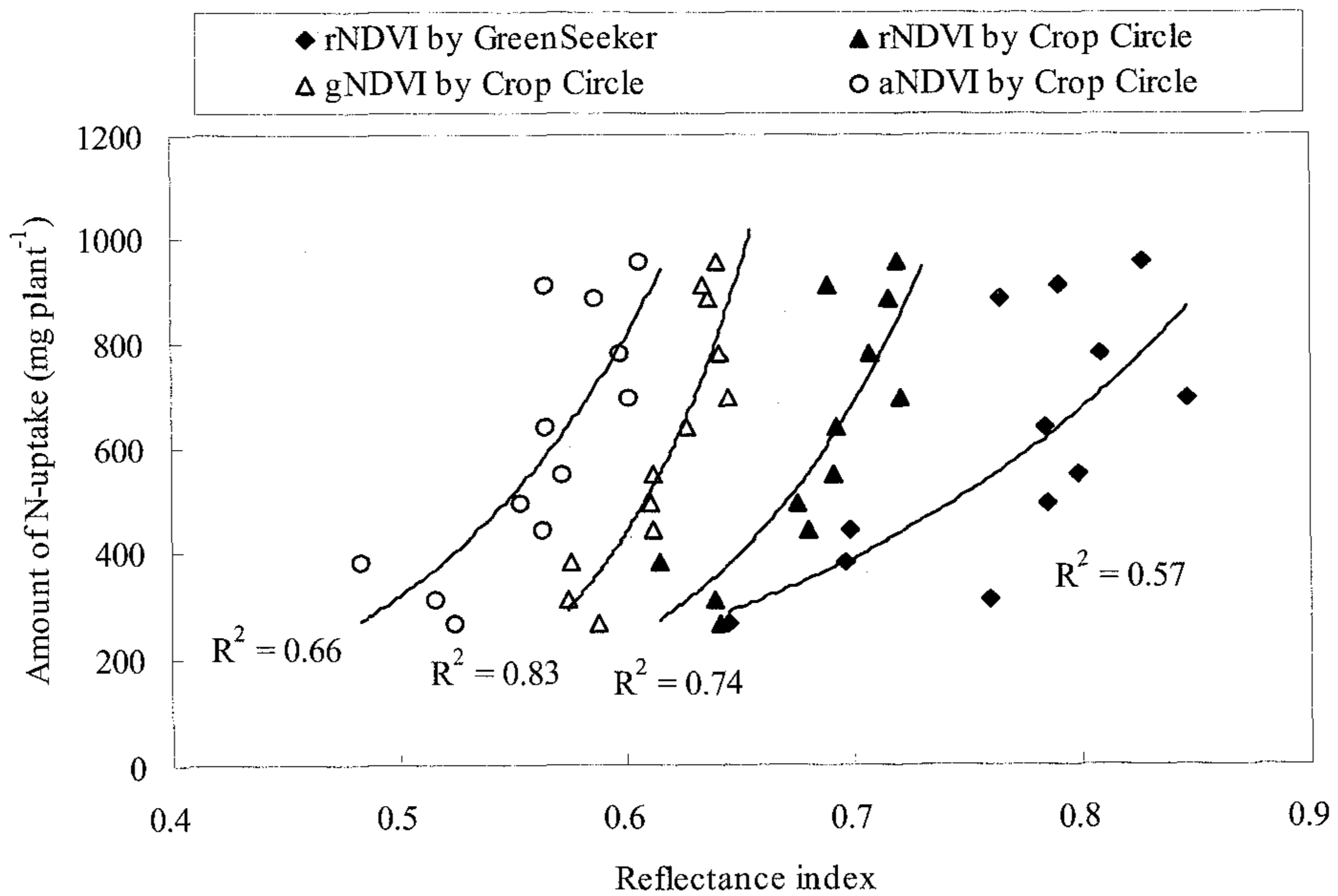


Fig. 3-4. Relationship between amount of N-uptake by leaves of pepper and reflectance indexes at the 78th DAP in 2004.

Table 3-2. Correlation coefficient between reflectance index at the 54th day after planting(DAP) and biomass attributes of red pepper at the 123rd day after planting in 2005

Sensor	Index	Dry weight	Yield	N uptake	P uptake	K uptake
Crop Circle(ACS210)	aNDVI	0.413	0.530	0.410	-0.204	0.405
Crop Circle(ACS210)	NIR/Amber	0.488	0.634	0.531	-0.227	0.529
Crop Circle(ACS210)	rNDVI	0.655	0.818	0.748	-0.064	0.742
Crop Circle(ACS210)	NIR/Red	0.578	0.801	0.759	-0.075	0.751
GreenSeeker	rNDVI	0.384	0.326	0.326	-0.070	0.312
GreenSeeker	Red/NIR	0.385	0.297	0.296	-0.064	0.284
Crop Circle(passive)	gNDVI	0.561	0.596	0.556	-0.012	0.530
Crop Circle(passive)	aNDVI	0.497	0.539	0.516	0.059	0.487
Crop Circle(passive)	rNDVI	0.507	0.563	0.513	-0.001	0.496
Crop Circle(passive)	Green index	0.557	0.597	0.558	-0.035	0.528
Spectroradiometer	gNDVI	0.552	0.697	0.662	0.050	0.663
Spectroradiometer	aNDVI	0.548	0.658	0.634	0.112	0.638
Spectroradiometer	rNDVI	0.550	0.612	0.597	0.151	0.604

n=42

Table 3-3. Correlation coefficient between reflectance index at the 74th day after planting(DAP) and biomass attribute of red pepper at the 123rd DAP in 2005

Sensor	Index	Dry weight	Yield	N uptake	P content	P uptake	K uptake
Crop Circle(ACS210)	aNDVI	0.716	0.876	0.388	-0.712	-0.128	0.365
Crop Circle(ACS210)	NIR/Amber	0.703	0.875	0.352	-0.723	-0.201	0.324
Crop Circle(ACS210)	rNDVI	0.708	0.846	0.376	-0.704	-0.195	0.337
Crop Circle(ACS210)	NIR/Red	0.665	0.777	0.336	-0.650	-0.179	0.294
GreenSeeker	gNDVI	0.566	0.649	0.271	-0.549	-0.111	0.238
GreenSeeker	Green/NIR	-0.594	-0.659	-0.299	0.553	0.090	-0.261
GreenSeeker	rNDVI	0.556	0.722	0.250	-0.510	-0.102	0.253
GreenSeeker	Red/NIR	0.562	0.739	0.241	-0.525	-0.120	0.248
Crop Circle(passive)	gNDVI	0.400	0.266	0.235	-0.259	-0.007	0.222
Crop Circle(passive)	aNDVI	0.431	0.480	0.218	-0.347	-0.170	0.165
Crop Circle(passive)	rNDVI	0.538	0.595	0.281	-0.435	-0.163	0.233
Crop Circle(passive)	Green index	0.373	0.262	0.186	-0.228	-0.018	0.171
Spectroradiometer	gNDVI	0.748	0.776	0.465	-0.797	-0.203	0.441
Spectroradiometer	aNDVI	0.709	0.744	0.440	-0.782	-0.231	0.410
Spectroradiometer	rNDVI	0.644	0.663	0.411	-0.722	-0.231	0.376

표 3-2는 2005년도에 수행된 사경제배 조건에서 고추 수확기(이식후 123일)의 건물중, 수량 및 양분흡수량과 이식후 54일째 원격탐사 센서 반사율지표들의 상관계수를 나타낸 것이다. 고추 수확기의 인산흡수량을 제외한 수량, 건물중, 질소 및 칼륨흡수량은 이식후 54일째 반사율지표들에 의하여 유의성 있는 상관을 보였으며 특히 active

형태의 센서인 Crop Circle ACS-210에 의한 반사율지표 rNDVI는 가장 높은 상관계수를 보였다. 또한 동일한 방법으로 이식후 74일째 측정된 반사율 지표들도 표 3-3과 같이 수확기 고추 수량 및 건물중과 밀접한 상관을 보였으며 이식후 54일째와 동일한 경향으로 Crop Circle ACS-210의 rNDVI와 aNDVI가 가장 양호한 상관을 보였다. 이러한 결과는 2004년 시험결과와 거의 같은 경향으로 고추 덧거름을 시용하기 전에 고추 생산성을 예측할 수 있기 때문에 질소 덧거름 시용량을 추천하는데 원격탐사 센서를 활용할 수 있음을 시사하고 있다. 따라서 고추 수확기의 수량 및 건물중을 예측할 수 있는 적정시기가 언제인지를 비교하기 위하여 수확기의 건물중 및 수량과 생육기간 중의 반사율지표들의 상관계수 변화를 그림 3-4와 3-5에 각각 나타냈다. 수확기 고추 수량 및 건물중에 대한 반사율 지표의 상관계수는 이식후 54일부터 101일 사이에 유의성 있는 높은 상관계수를 보였다. 그러나 수량과 건물중 두 요인을 고려할 때 원격탐사센서의 검정을 위한 적정 시기는 이식후 70일에서 90일 사이인 것으로 판단되었다.

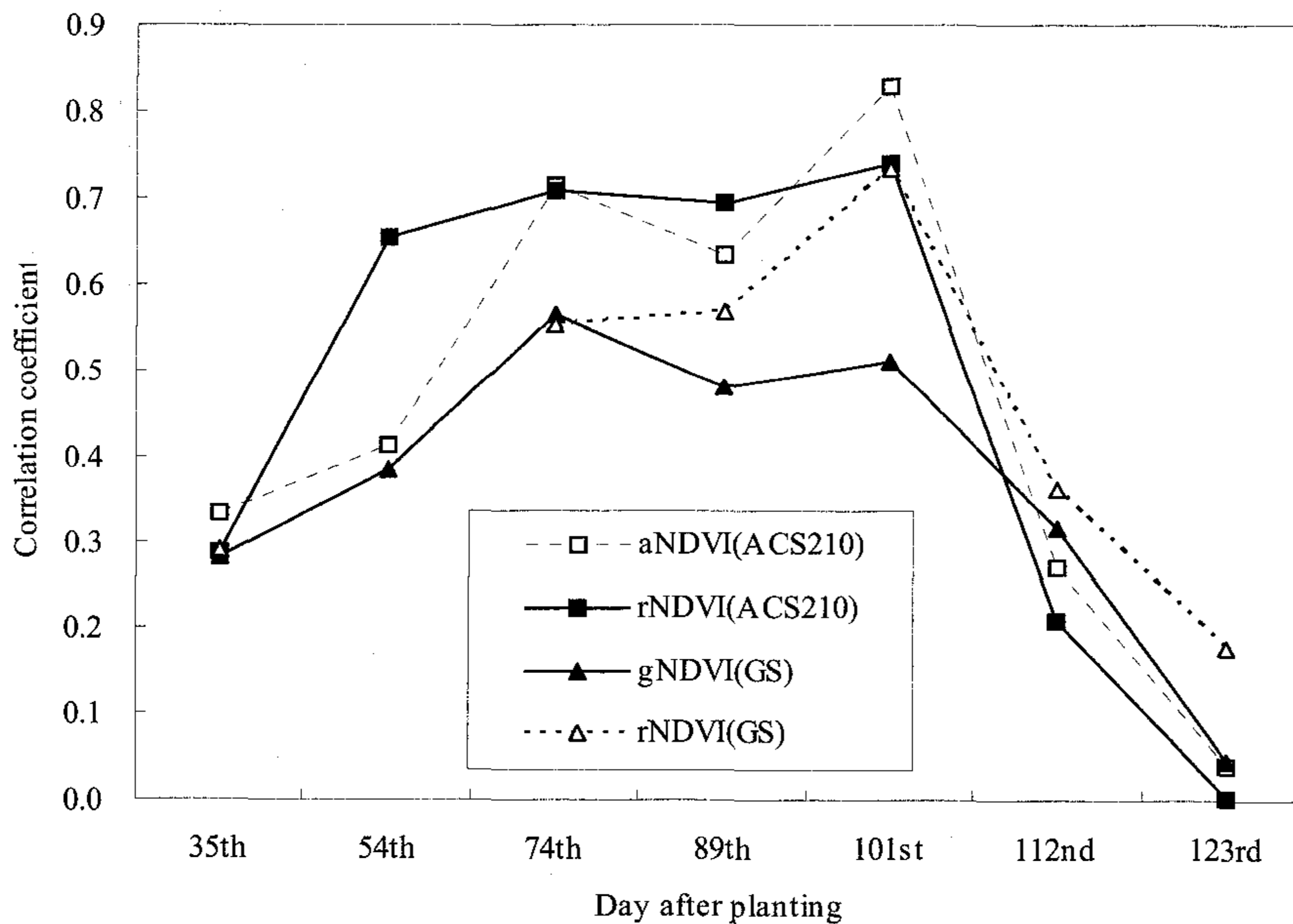


Fig. 3-4. Changes of correlation coefficient between dry weight of red pepper at the 123rd day after planting and reflectance indexes from the 35th to 123rd DAP in 2005.

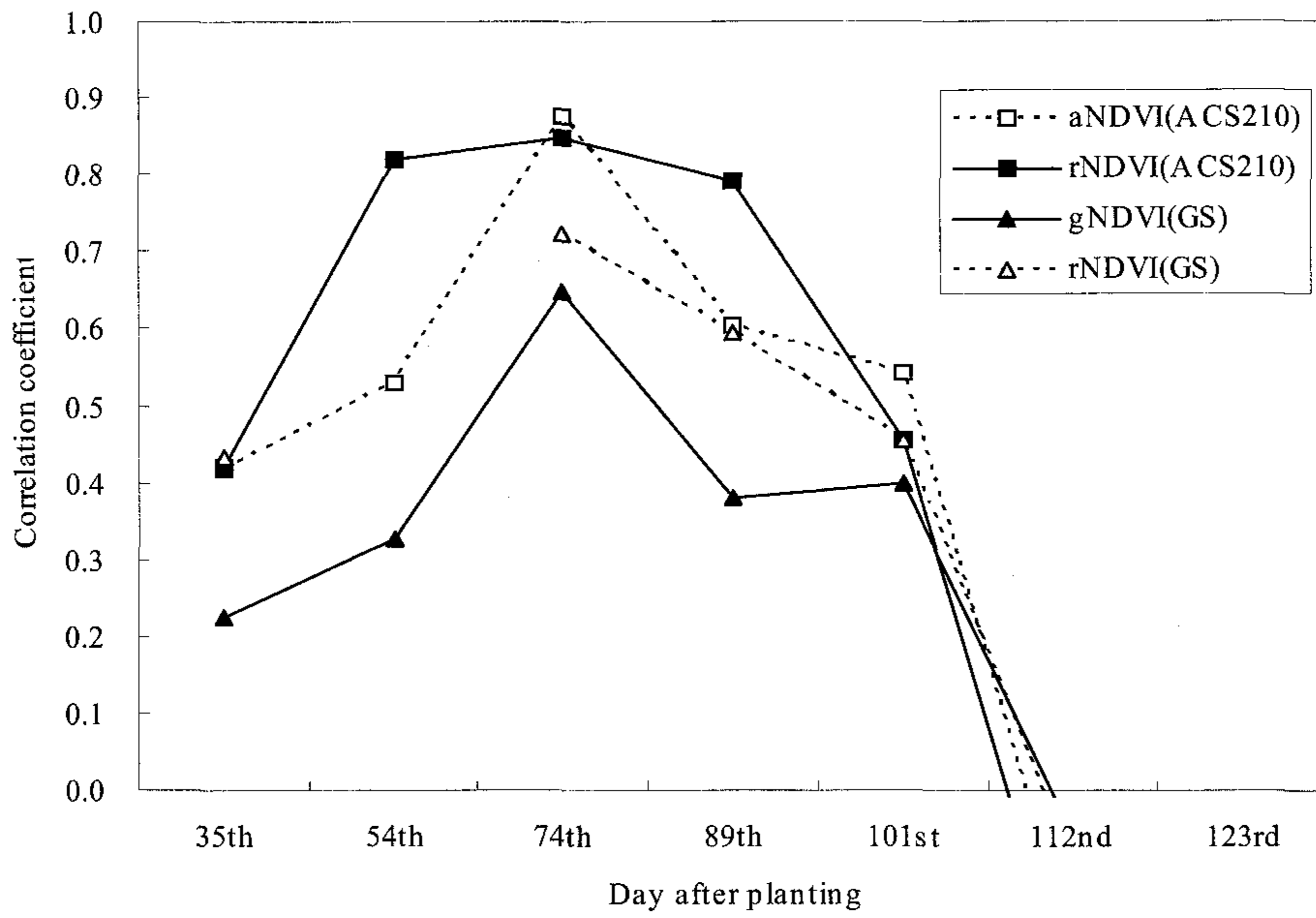


Fig. 3-5. Changes of correlation coefficient between cummulative yield of green pepper until the 123rd dat after planting(DAP) and reflectance indexes from the 35th to 123rd DAP in 2005.

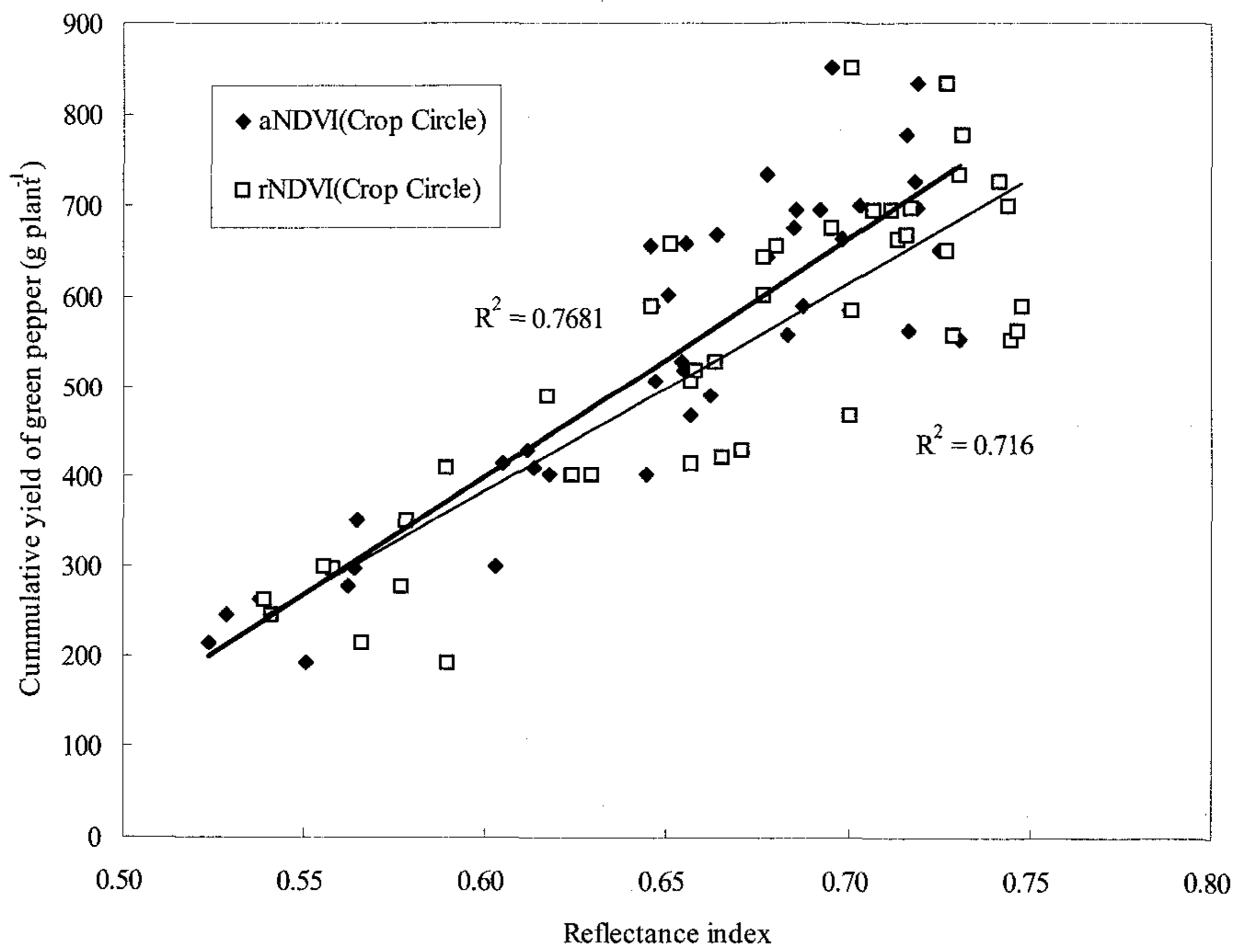


Fig. 3-6. Relationship between cummulative yield of green pepper until the 123rd day after planting(DAP) and reflectance index at the 74th DAP in 2005.

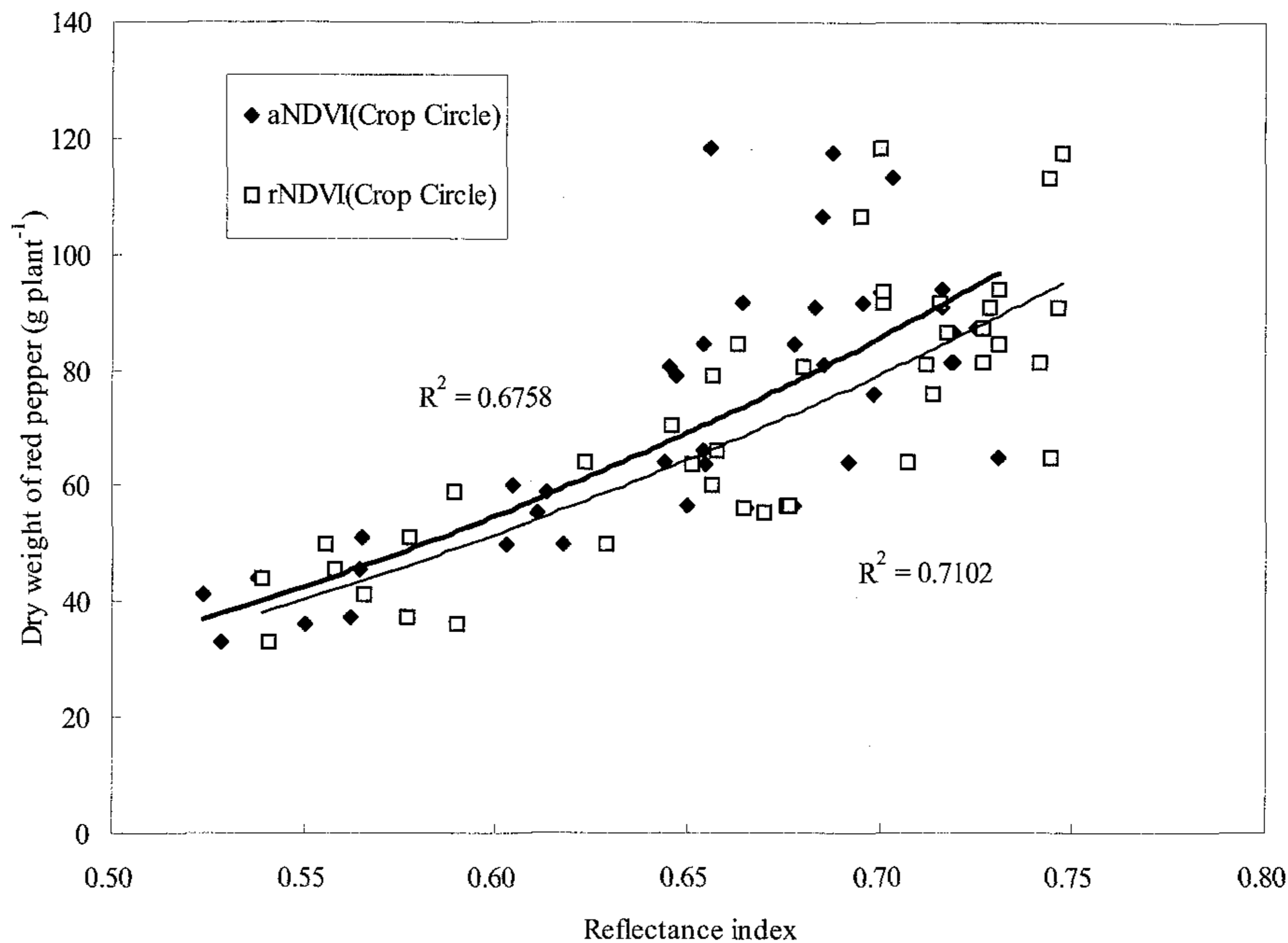


Fig. 3-7. Relationship between dry weight of red pepper at the 123rd day after planting(DAP) and reflectance index at the 74th DAP in 2005.

이식후 74일째 강장 효율적인 센서로 확인된 Crop Circle ACS-210의 반사율 지표와 수확기(이식후 123일)까지의 고추수량 및 건물중과의 회귀관계를 그림 3-6 및 3-7에 각각 나타냈다. 이식후 74일째 이들 반사율 지표는 고추 수량을 72%에서 77%를, 그리고 건물중을 68%에서 71%를 설명하는 고도로 유의성 있는 직선적인 회귀관계를 보였다. 따라서 이러한 회귀관계는 고추의 질소 덧거름을 사용하기 전에 원격탐사센서의 반사율지표에 의한 검정법으로 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

나) 연초

원격탐사 센서에 의하여 생육 중반기에 수확기 연초의 생산성을 예측할 수 있는 기준시기(critical season)를 결정하기 위하여 2004년 사경제배 조건에서 생육된 연초 수확후의 수량 및 질소흡수량과 이식후 35일, 40일, 50일째 측정된 반사율지표들의 상관계수를 표 3-4에 나타냈다. 원격탐사센서의 반사율지표들은 조사된 매 시기마다 수확후 연초 수량 및 질소흡수량과 유의성 있는 상관을 보였으나 spectroradiometer와 Crop

Circle의 반사율지표들이 가장 높은 상관계수를 보였다.

Table 3-4. Correlation coefficient between yield and amount of N-uptake by tobacco leaves and reflectance indexes at the different growth stage in 2004.

Day after planting (DAP)	Index	at the harvesting of tobacco	
		Yield	N-uptake by leaves
35th DAP	SPAD	0.40	0.35
	rNDVI by GreenSeeker	0.61**	0.63**
	rNDVI by Crop Circle	0.56*	0.44*
	gNDVI by Crop Circle	0.54*	0.48*
	rNDVI by Spectroradiometer	0.66**	0.64**
	gNDVI by Spectroradiometer	0.70**	0.65**
40th DAP	SPAD	0.47*	0.49*
	CM1000	0.76**	0.71**
	rNDVI by GreenSeeker	0.65**	0.62**
	rNDVI by Crop Circle	0.59**	0.53**
	gNDVI by Crop Circle	0.72**	0.66**
	rNDVI by Spectroradiometer	0.83**	0.80**
50th DAP	gNDVI by Spectroradiometer	0.85**	0.81**
	SPAD	0.65**	0.65**
	CM1000	0.76**	0.79**
	rNDVI by GreenSeeker	0.41	0.33
	rNDVI by Crop Circle	0.66**	0.68**
	gNDVI by Crop Circle	0.75**	0.76**
Harvesting	rNDVI by Spectroradiometer	0.86**	0.89**
	gNDVI by Spectroradiometer	0.84**	0.86**
	SPAD	0.83**	0.83*
	rNDVI by GreenSeeker	0.43*	0.50*
	rNDVI by Crop Circle	0.15	0.19
	gNDVI by Crop Circle	0.34	0.35

*Significant at the 0.05 level

**Significant at the 0.01 level

그리고 2005년도 사경제배의 고추에 대하여 active 형 센서를 포함시켜 동일한 방법으로 연초 수량과 생육단계별 반사율지표의 상관계수를 표 3-5에 나타냈다. 연초 수량 및 수확엽의 양분흡수량은 이식후 37일, 47일 및 60일째 측정된 원격탐사 센서 반사율지표와 유의성 있는 상관을 보였으나 특히 active 형 센서인 Crop Circle ACS-210에 의한 반사율지표들은 연초 수량과 가장 밀접한 상관을 보였다. 이러한 결과는 연초 수량을 생육중반기에 특히 이식후 40일 이전에 예측할 수 있으며 이러한 결정시기에 연초의 질소 시비량을 추정하는데 활용될 수 있음을 시사하고 있다

Table 3-5. Correlation coefficient between yield attributes of tobacco and reflectance indexes at the different growth stages in 2005

Day after Planting	Sensor	Index	Yield(FW)	Yield(DW)	Ncontent	Nuptake	P ₂ O ₅ uptake	K ₂ O uptake
37th day	GreenSeeker	gNDVI	0.340	0.197	0.316	0.320	0.455	0.255
	GreenSeeker	Green/NIR	-0.249	-0.173	-0.350	-0.319	-0.261	-0.161
	Crop Circle(ACS210)	aNDVI	0.716	0.652	0.457	0.679	0.706	0.648
	Crop Circle(ACS210)	NIR/Amber	0.437	0.464	0.275	0.452	0.339	0.343
	Crop Circle(ACS210)	rNDVI	0.721	0.725	0.435	0.718	0.647	0.667
	Crop Circle(ACS210)	NIR/Red	0.427	0.508	0.248	0.472	0.284	0.357
47th day	GreenSeeker	gNDVI	0.258	0.210	-0.241	-0.020	0.385	0.237
	GreenSeeker	Green/NIR	-0.131	-0.158	0.193	0.042	-0.143	-0.066
	GreenSeeker	rNDVI	0.710	0.724	0.095	0.535	0.725	0.626
	GreenSeeker	Red/NIR	0.703	0.724	0.149	0.561	0.708	0.616
	Crop Circle(ACS210)	aNDVI	0.687	0.800	0.031	0.569	0.546	0.644
	Crop Circle(ACS210)	NIR/Amber	0.390	0.548	-0.007	0.359	0.178	0.317
	Crop Circle(ACS210)	rNDVI	0.607	0.685	0.045	0.503	0.572	0.556
	Crop Circle(ACS210)	NIR/Red	0.345	0.490	-0.045	0.302	0.234	0.259
60th day	GreenSeeker	rNDVI	0.679	0.696	0.182	0.576	0.565	0.664
	GreenSeeker	Red/NIR	0.679	0.677	0.204	0.604	0.574	0.694
	Crop Circle(ACS210)	aNDVI	0.546	0.548	0.301	0.522	0.492	0.536
	Crop Circle(ACS210)	NIR/Amber	0.262	0.318	0.195	0.329	0.125	0.239
	Crop Circle(ACS210)	rNDVI	0.726	0.743	0.192	0.598	0.669	0.651
	Crop Circle(ACS210)	NIR/Red	0.684	0.715	0.200	0.571	0.630	0.604

n=27 for the 37th day

n=36 for the 47th and 60th day

2) 작물군락에 대한 효율성 및 검정시기

가) 고추

사경재배 포트조건의 고추 개체에 대한 반사율지표의 평가와 비교하기 위하여 포장조건의 고추 군락에 대하여 효율적 검정시기를 비교 평가하였다.

표 3-6은 괴산지역 수암동의 포장시험에서 조사된 고추 수량 및 건물중과 이식후 40일, 60일, 84일째 반사율지표들의 상관계수를 나타낸 것이다. 고추 수량과 생육중반기 반사율지표들은 고도로 유의성 있는 상관을 보였으며, 특히 정식 60일째와 84일째 Crop Circle에 의한 gNDVI는 생고추 수량과 각각 상관계수 0.902 및 0.838을 보이며 가장 높은 상관계수를 보였다.

Table 3-6. Correlation coefficient between yield of red pepper and reflectance indexes at the different growth stage for Goesan field in 2004(n=14).

Day after planting	Sensor	Index	Yield	
			Fresh weight	Dry weight
40th day	Chlorophyl meter	SPAD reading	0.661	0.498
	Field Scout TM	CM1000 reading	0.584	0.540
	GreenSeeker TM	rNDVI	0.576	0.627
	Spectroradiometer	gNDVI	0.738	0.641
60th day		rNDVI	0.677	0.567
	Chlorophyl meter	SPAD reading	0.782	0.668
	GreenSeeker TM	rNDVI	0.809	0.838
	Crop Circle TM	rNDVI	0.836	0.829
		gNDVI	0.902	0.858
	aNDVI	0.747	0.778	
84th day	Chlorophyl meter	SPAD reading	0.602	0.539
	GreenSeeker TM	rNDVI	0.285	0.241
	Crop Circle TM	rNDVI	0.652	0.637
		gNDVI	0.838	0.774
		aNDVI	0.832	0.769

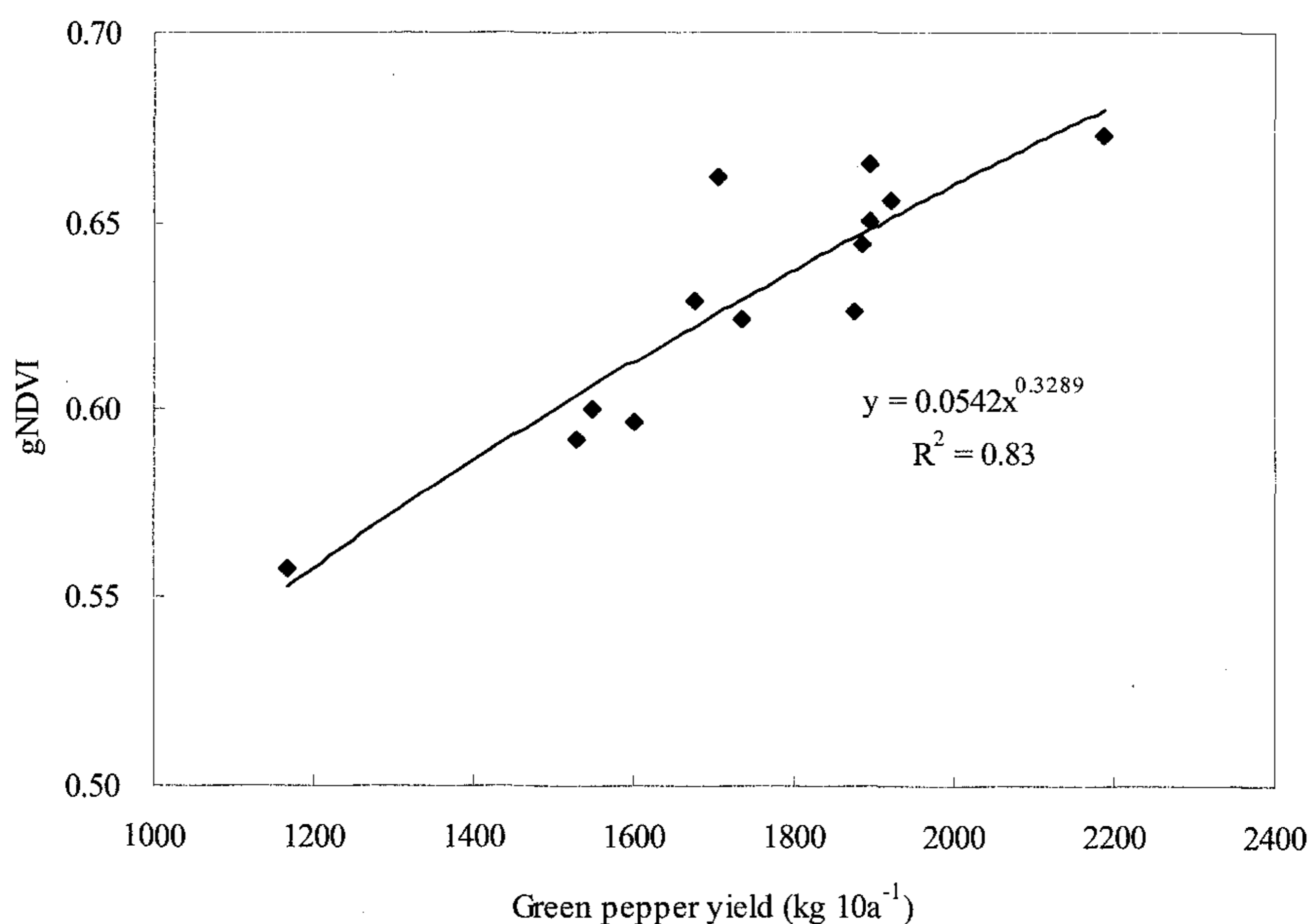


Fig. 3-8. Relationship between green pepper yield and gNDVI by Crop Circle at the 60th DAP for Goesan field in 2004.

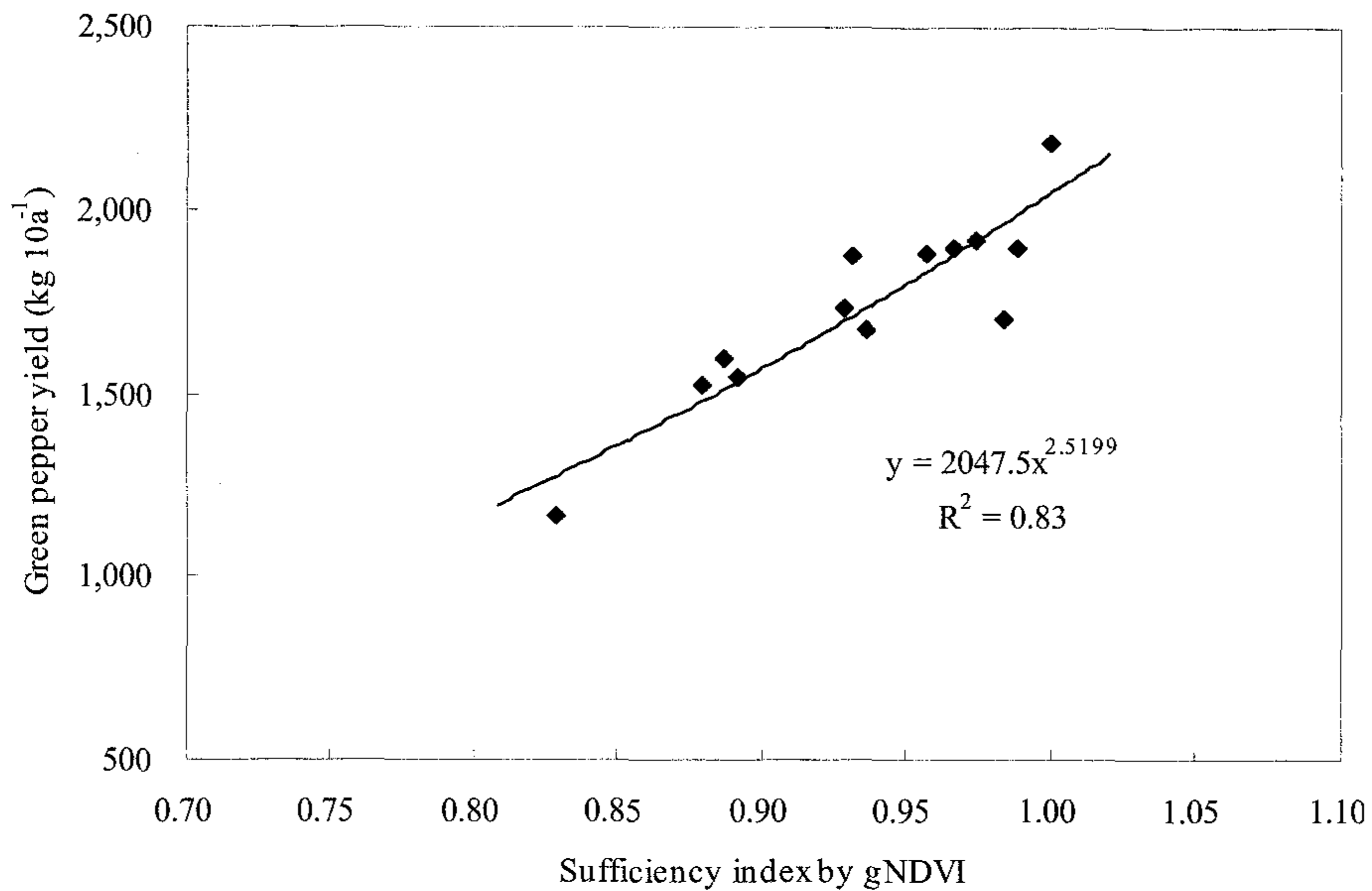


Fig. 3-9. Relationship between green pepper yield and sufficiency index by gNDVI at the 60th day after planting for Goesan field in 2004.

따라서 정식후 60일째 효율적인 반사율 지표로 확인된 passive형 Crop Circle의 반사율지표 gNDVI와 고추 수량과의 상호관계를 그림 3-8에, 그리고 gNDVI로 계산한 충족지수(최대 측정치에 대한 비율)와 연초 수량과의 관계를 그림 3-9에 각각 나타냈다. 그 결과 이식후 60일째 측정된 gNDVI는 연초수량을 83% 설명하는 고도로 유의성 있는 회귀관계를 나타냈고 gNDVI의 충족지수는 0.83에서 1.0의 분포로서 고추 수량을 83% 설명할 수 있는 관계를 보였다.

그리고 보은 지역 대산통에 대한 포장시험의 경우 고추 이식후 84일째 지상부 건물중에 대한 이식후 40일 및 60일째 반사율지표들의 상관계수는 표 3-7과 같다. 이식후 40일째 spectroradiometer에 의한 rNDVI와 60일째 GreeSeeker 및 Crop Circle에 의한 반사율 지표들은 유의성 있는 상관을 보여 유사한 경향을 보였다.

표 3-8은 2005년도에 수행된 토양의 질소공급능력이 다양한 조건에서 고추의 생산력검정에 공시된 청원군 5개 포장과 음성군 6개 포장 등 11개 포장시험에서 고추 수량과 이식후 80일째 반사율지표들의 상관계수를 나타낸 것이다. 이식후 80일째 평가에 적용된 원격탐사 반사율지표들은 고추 최종수량과 고도로 유의성 있는 상관을 보

였으며 passive형 센서보다 active형 센서들의 반사율지표가 더 양호한 평가를 보였다. 특히 Crop Circle ACS-210 센서와 Green Seeker rNDVI 지표는 가장 높은 상관계수를 보였으며 그림 3-10 및 3-11과 같이 곡선적인 정의 회귀관계를 보였다.

Table 3-7. . Correlation coefficient between dry weight and N-uptake by red pepper at the 84th DAP and reflectance indexes at the different growth stage for Boeun field in 2004 (n=14).

Day after planting	Sensor	Index	Fresh weight	Dry weight	N-uptake
40th day	Chlorophyl meter	SPAD reading	0.414	0.498	0.542
	Field Scout TM	CM1000 reading	0.197	0.341	0.365
	GreenSeeker TM	rNDVI	0.342	0.472	0.405
	Crop Circle TM	rNDVI	0.210	0.261	0.153
		gNDVI	0.298	0.343	0.258
		aNDVI	0.227	0.237	0.174
	Spectroradiometer	rNDVI	0.732	0.756	0.706
60th day	Chlorophyl meter	gNDVI	0.476	0.451	0.376
		aNDVI	0.258	0.440	0.468
	GreenSeeker TM	rNDVI	0.481	0.642	0.631
	Crop Circle TM	rNDVI	0.351	0.509	0.498
		gNDVI	0.498	0.663	0.643
		aNDVI	0.494	0.629	0.635

Table 3-8. Correlation coefficient between yield of red pepper and reflectance index at the 80th day after planting in 2005

Sensor	Reflectance index	Yield of red pepper	
		FW	DW
Crop Circle(ACS210)	aNDVI	0.614	0.603
Crop Circle(ACS210)	NIR/amber	0.607	0.606
Crop Circle(ACS210)	rNDVI	0.721	0.716
Crop Circle(ACS210)	NIR/red	0.698	0.703
GreenSeeker	gNDVI	0.354	0.322
GreenSeeker	rNDVI	0.741	0.720
Crop Circle (passive)	gNDVI	0.512	0.496
Crop Circle (passive)	aNDVI	0.548	0.537
Crop Circle (passive)	rNDVI	0.557	0.536
Crop Circle (passive)	green Index	0.501	0.489

n=55

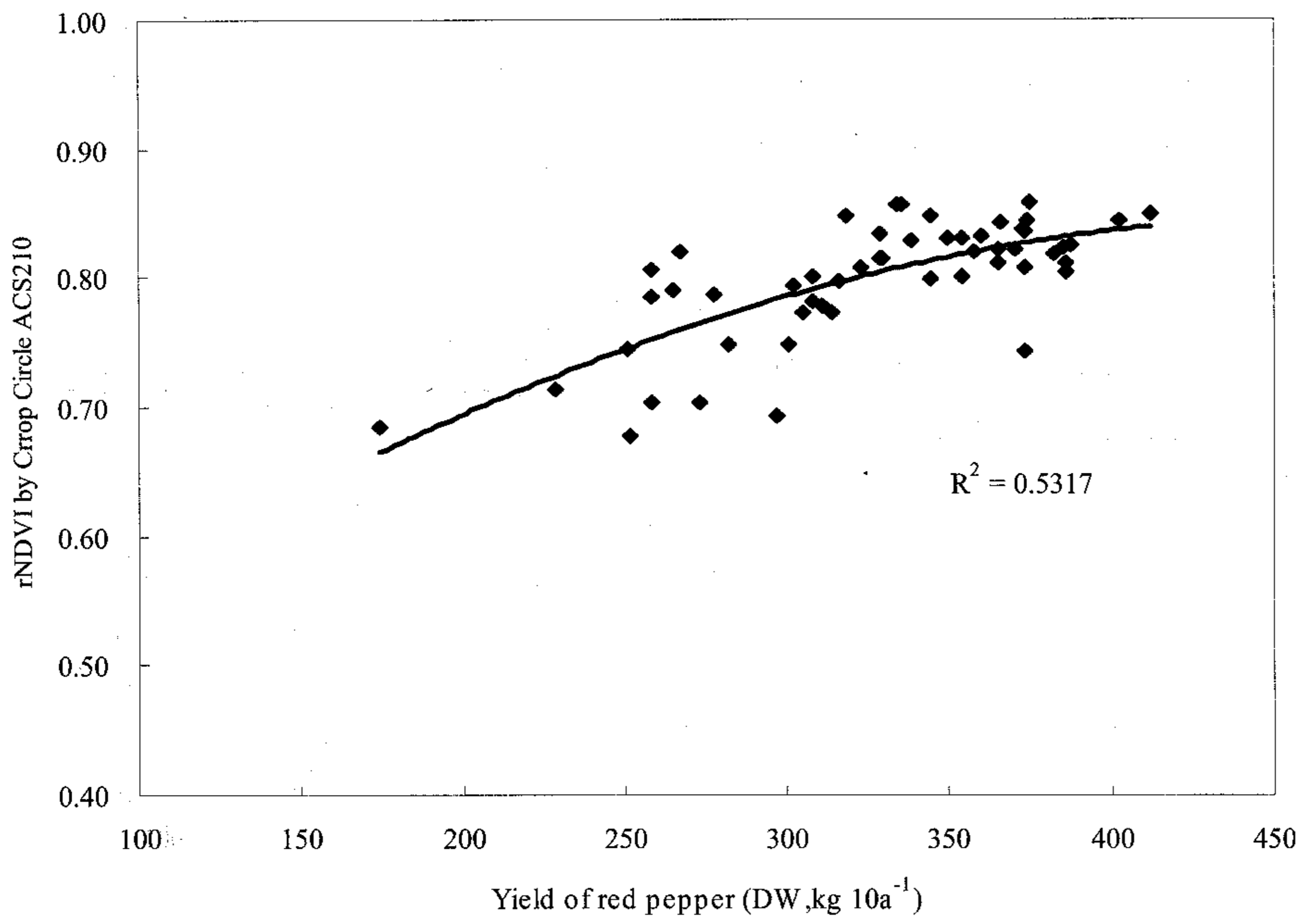


Fig. 3-10. Relationship between red pepper yield and reflectance index at the 80th day after planting in 2005.

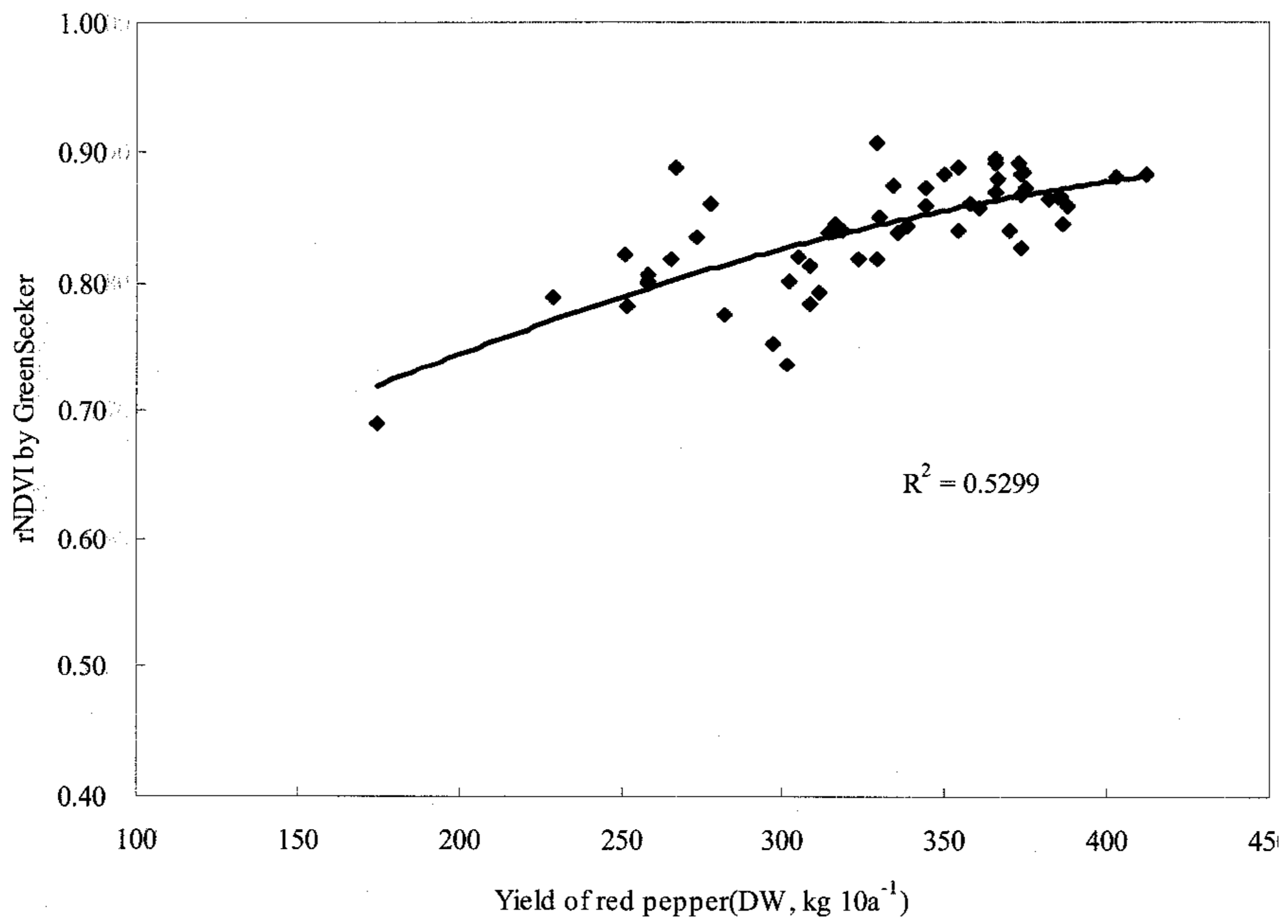


Fig. 3-11. Relationship between yield of red pepper(DW) and reflectance index at the 80th day after planting in 2005.

나) 연초

질소 시비수준을 무비구, 표준시비량의 80%, 100%, 120% 및 140%로 처리된 2004년 청주시 화동동의 포장시험 15개 처리에 대한 연초 수량과 이식후 45일, 52일, 70일째 반사율지표의 상관계수는 표 3-9와 같다. 이식후 45일, 및 52일째 측정된 반사율 지표들은 연초 수량과 밀접한 관계를 보였다. 또한 청주시 예산동에 대한 포장시험의 경우에도 표 3-10과 같이 연초 수량과 정식후 35일, 40일, 50일, 및 70일째 측정된 반사율 지표들은 고도로 유의성 있는 상관계수를 보였다. 이러한 결과는 연초 사경제배 조건과 동일하게 지상원격탐사 반사율 지표들은 연초의 생산성을 생육중반기 결정시기에, 즉 정식후 35일째부터 예측할 수 있음을 시사하는 것이며 이러한 시기의 원격탐사 검정법은 연초의 질소 시비량을 결정하는데 유용하게 이용될 수 있음을 시사하고 있다

Table 3-9. Correlation coefficient between tobacco yield and reflectance index at the different growth stage for field experiment in 2004(Hwadong)

Day after planting	Sensor	Index	Yield	
45th day	GreenSeeker TM	rNDVI	0.379	
		Crop Circle TM	0.753	
	Spectroradiometer	gNDVI	0.775	
		aNDVI	0.773	
		rNDVI	0.704	
		gNDVI	0.703	
		aNDVI	0.723	
	52nd day	Chlorophyll meter	SPAD reading	0.673
		Field Scout TM	CM1000 reading	0.757
GreenSeeker TM		rNDVI	0.723	
Crop Circle TM		rNDVI	0.751	
		gNDVI	0.792	
		aNDVI	0.758	
70th day	GreenSeeker TM	rNDVI	0.675	
	Crop Circle TM	rNDVI	0.451	
		gNDVI	0.202	
		aNDVI	0.477	

Table 3-10. Correlation coefficient between tobacco yield and reflectance indexes at the different growth stage for field experiment in 2004 (Yesan)

Day after planting	Sensor	Index	Yield	
35th day	GreenSeeker TM	rNDVI	0.733	
		Crop Circle TM	0.747	
	Chlorophyll meter	gNDVI	0.756	
		aNDVI	0.734	
40th day	Chlorophyll meter	SPAD reading	0.830	
		GreenSeeker TM	rNDVI	0.902
			Crop Circle TM	0.818
	Spectroradiometer	gNDVI	0.870	
		aNDVI	0.854	
		rNDVI	0.916	
		gNDVI	0.923	
		aNDVI	0.918	
		rNDVI	0.916	
50th day	Field Scout TM	CM1000 reading	0.945	
	GreenSeeker TM	rNDVI	0.912	
		Crop Circle TM	0.821	
	Spectroradiometer	gNDVI	0.917	
		aNDVI	0.895	
70th day	Field Scout TM	CM1000 reading	0.867	
	GreenSeeker TM	rNDVI	0.771	
		Crop Circle TM	0.831	
	Spectroradiometer	gNDVI	0.916	
		aNDVI	0.897	

Table 3-11. Correlation coefficient between dry weight of tobacco and reflectance indexes at the 37th day after planting in 2005

Sensor	Index	Fresh weight	Dry weight	Ncontent	Nuptake	P ₂ O ₅ uptake	K ₂ O uptake
GreenSeeker	gNDVI	0.348	0.330	0.292	0.350	0.357	0.325
	Green/NIR	-0.386	-0.381	-0.194	-0.359	-0.340	-0.347
Crop Circle(ACS210)	aNDVI	0.603	0.619	0.550	0.619	0.583	0.617
	NIR/Amber	0.623	0.653	0.366	0.598	0.556	0.603
	rNDVI	0.705	0.715	0.656	0.732	0.652	0.721
	NIR/Red	0.718	0.740	0.455	0.700	0.625	0.699

n=27

표 3-11은 2005년도에 수행된 토양의 질소공급능력이 다양한 조건에서 연초의 생산력검정에 공시된 청원군지역의 10개 포장에서 이식후 37일째 active 형 반사율지표

와 수확기 연초 건물중의 상관계수를 나타낸 것이다. Crop Circle ACS-210 센서는 GreenSeeker 센서보다 연초의 건물중 및 양분흡수량과 더 높은 상관계수를 보였다. 따라서 수확기 연초 건물중과 Crop Circle ACS-210의 NIR/Red 비율값의 상호관계를 나타낸 그림 3-12에서 이 지표는 68%를 설명하는 유의성 있는 회귀관계를 보였다.

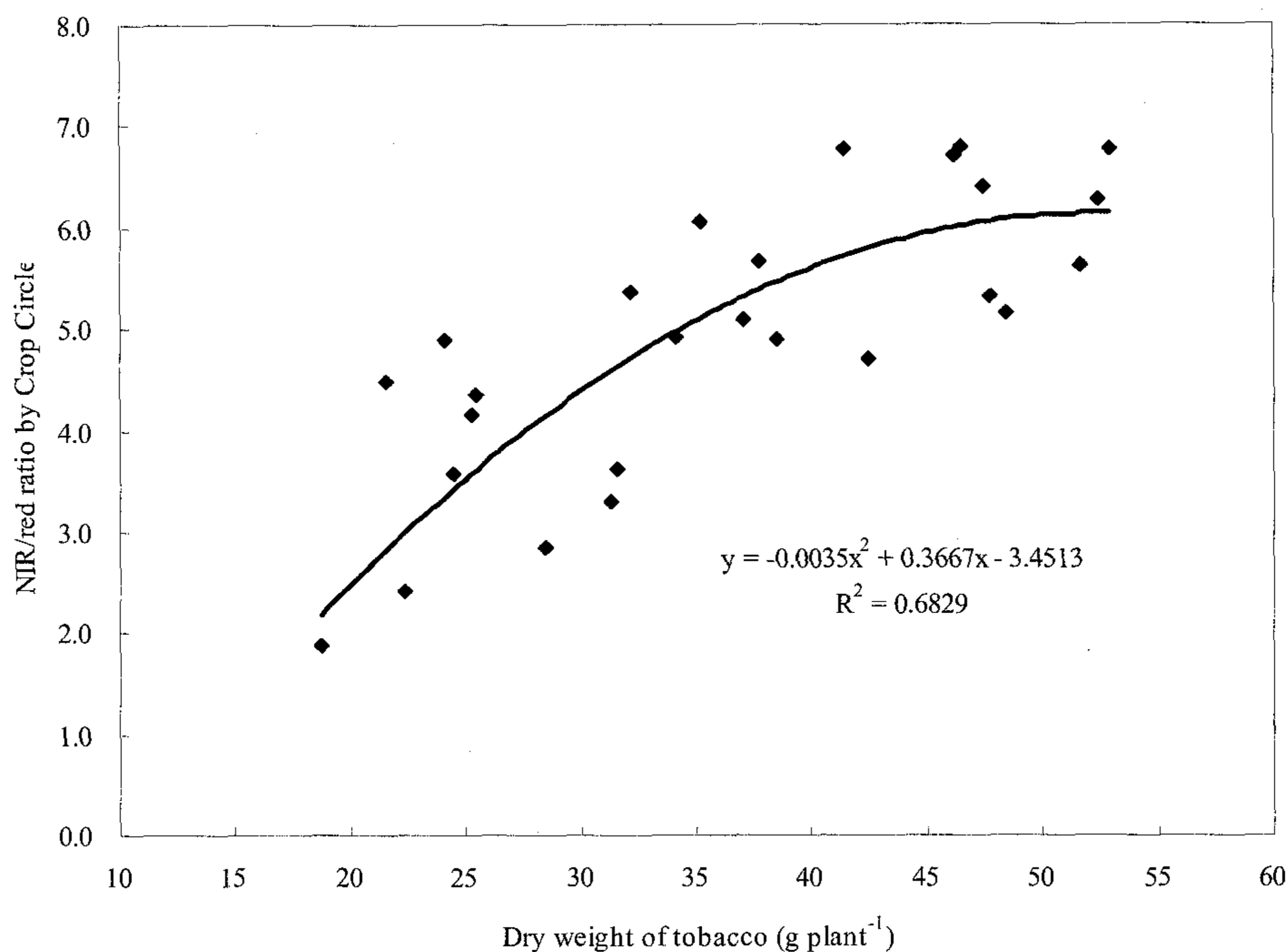


Fig. 3-12. Relationship between dry weight of tobacco and NIR/red ratio by Crop Circle (ACS210) at the 37th day after planting in 2005.

Table 3-12. Correlation coefficient between dry weight of tobacco and reflectance indexes at the 47th day after planting in 2005

Sensor	Index	Fresh weight	Dry weight	N content	N uptake	P ₂ O ₅ uptake	K ₂ O uptake
GreenSeeker	gNDVI	0.169	0.178	0.436	0.275	0.350	0.199
GreenSeeker	Green/NIR	-0.198	-0.182	-0.400	-0.280	-0.327	-0.239
GreenSeeker	rNDVI	0.638	0.624	0.490	0.610	0.665	0.610
GreenSeeker	Red/NIR	0.601	0.586	0.442	0.556	0.610	0.574
Crop Circle(ACS210)	aNDVI	0.805	0.826	0.558	0.807	0.768	0.805
Crop Circle(ACS210)	NIR/Amber	0.643	0.639	0.475	0.662	0.595	0.666
Crop Circle(ACS210)	rNDVI	0.719	0.712	0.519	0.687	0.706	0.702
Crop Circle(ACS210)	NIR/Red	0.606	0.582	0.491	0.600	0.588	0.612

N=36

표 3-12는 연초 이식후 47일째 건물중 및 양분흡수량과 반사율지표의 상관계수를 나타낸 것이다. 반사율지표에 의한 연초 성장량 및 양분흡수량의 평가는 이식후 37일째 보다 양호하였다. 이식후 37일째 평가된 경우와 동일하게 active 형 센서 Crop Circle ACS-210은 가장 효율적인 센서로 확인되었다. 이러한 상호관계를 나타낸 그림 3-13에서 Crop Circle ACS-210에 의한 aNDVI는 연초 수확기 건물중을 86%까지 설명하며 밀접한 관계를 보였다.

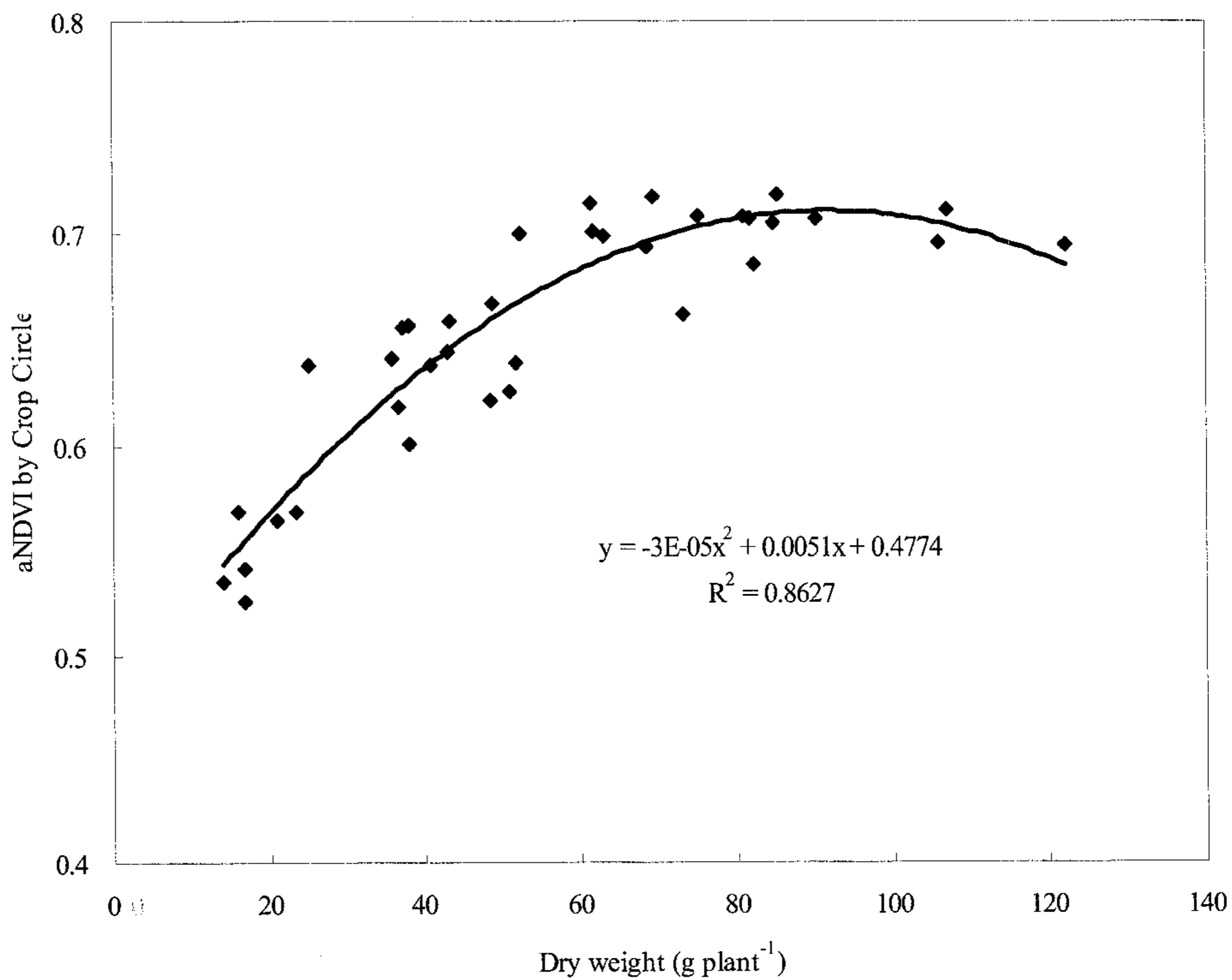


Fig. 3-13. Relationship between dry weight of tobacco and aNDVI by Crop Circle at the 47th day after planting in 2005.

나. 반사율지표에 의한 추천모델

1) 작물개체에 대한 추천모델

가) 고추

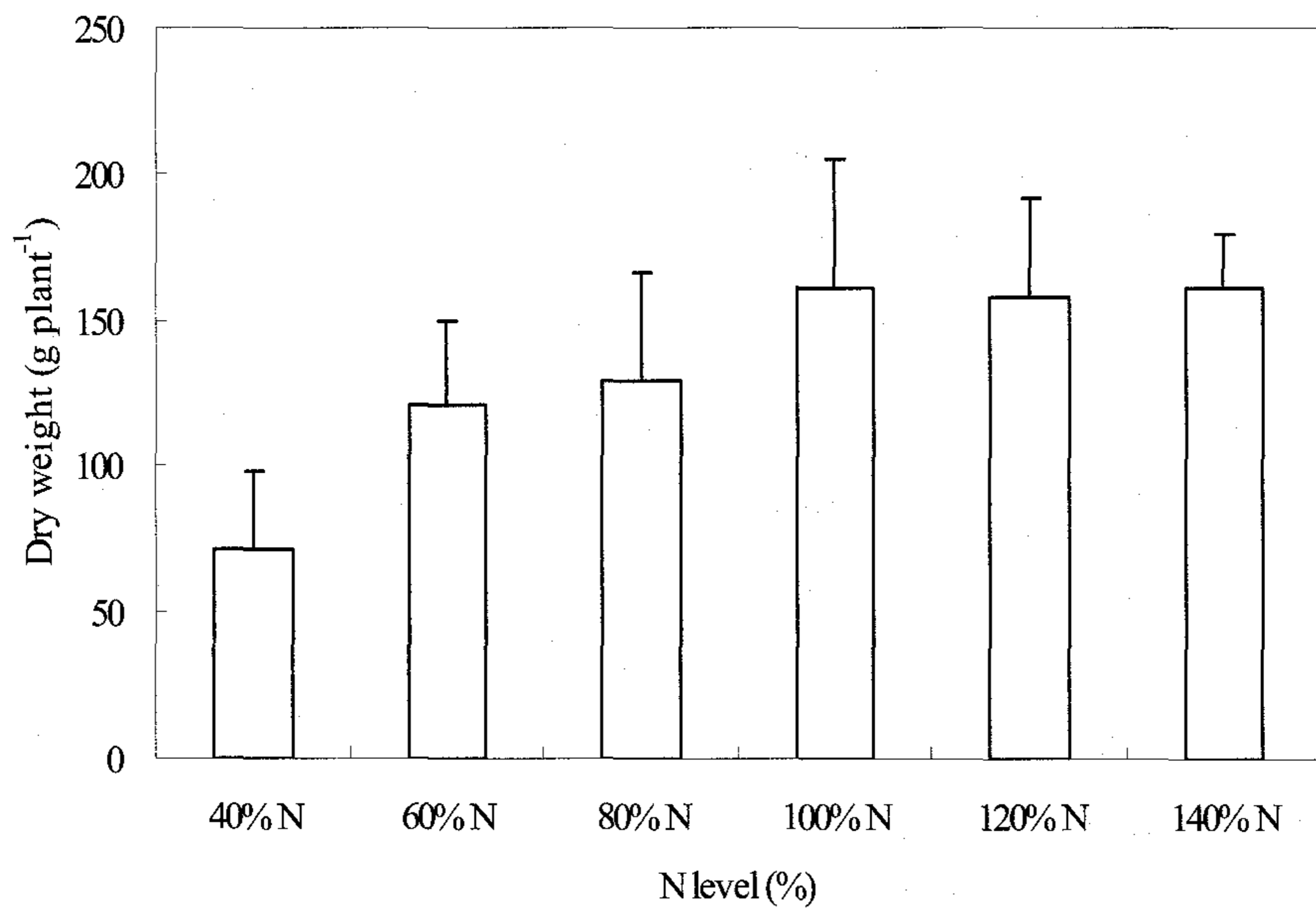


Fig. 3-14. Dry weight of above ground part of red pepper affected by nitrogen stress at the 120th day after planting in 2004.

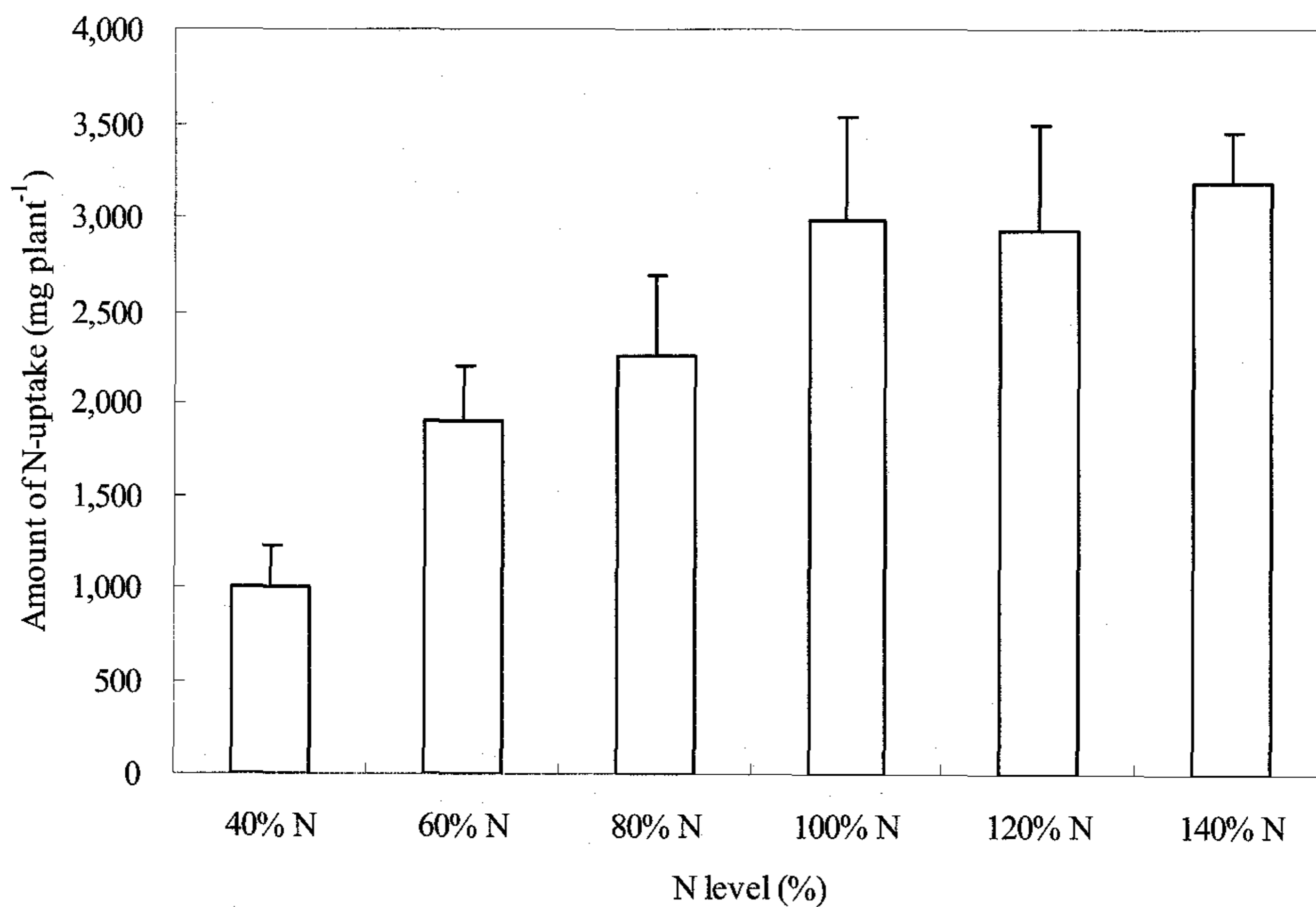


Fig. 3-15. Amount of N-uptake by leaves of red pepper affected by nitrogen stress in 2004.

2004년에 수행된 사경재배의 질소수준을 40%에서 140% 까지 6개 수준에서 정식후 120일째 고추의 건물중 및 엽 중 질소흡수량은 그림 3-14 및 3-15와 같다. 고추의 수량과 밀접한 지상부 건물중은 질소 100% 수준을 정점으로 하는 곡선적 증가를 보였으며 질소 흡수량은 질소수준이 40%에서 140%로 증가될수록 직선적으로 증가되는 경향을 보였다. 이와 같은 수량 및 질소 흡수량 변이들은 지상원격탐사 반사율지표들에 의한 질소시비량 추천모델의 평가에 이용되었다.

그림 3-16과 3-17은 고추 수확기(이식후 120일)의 건물중 및 질소흡수량과 밀접한 상관을 보였던 이식후 37일째 반사율지표들과의 상호관계를 각각 나타낸 것이다. 가장 밀접한 관계를 보인 Crop Circle에 의한 aNDVI는 고추의 건물중을 54% 설명할 수 있었으며 질소흡수량은 61% 설명되는 관계를 보였으나 시비추천모델로 이용하기에는 만족스럽지 못한 관계를 보였다.

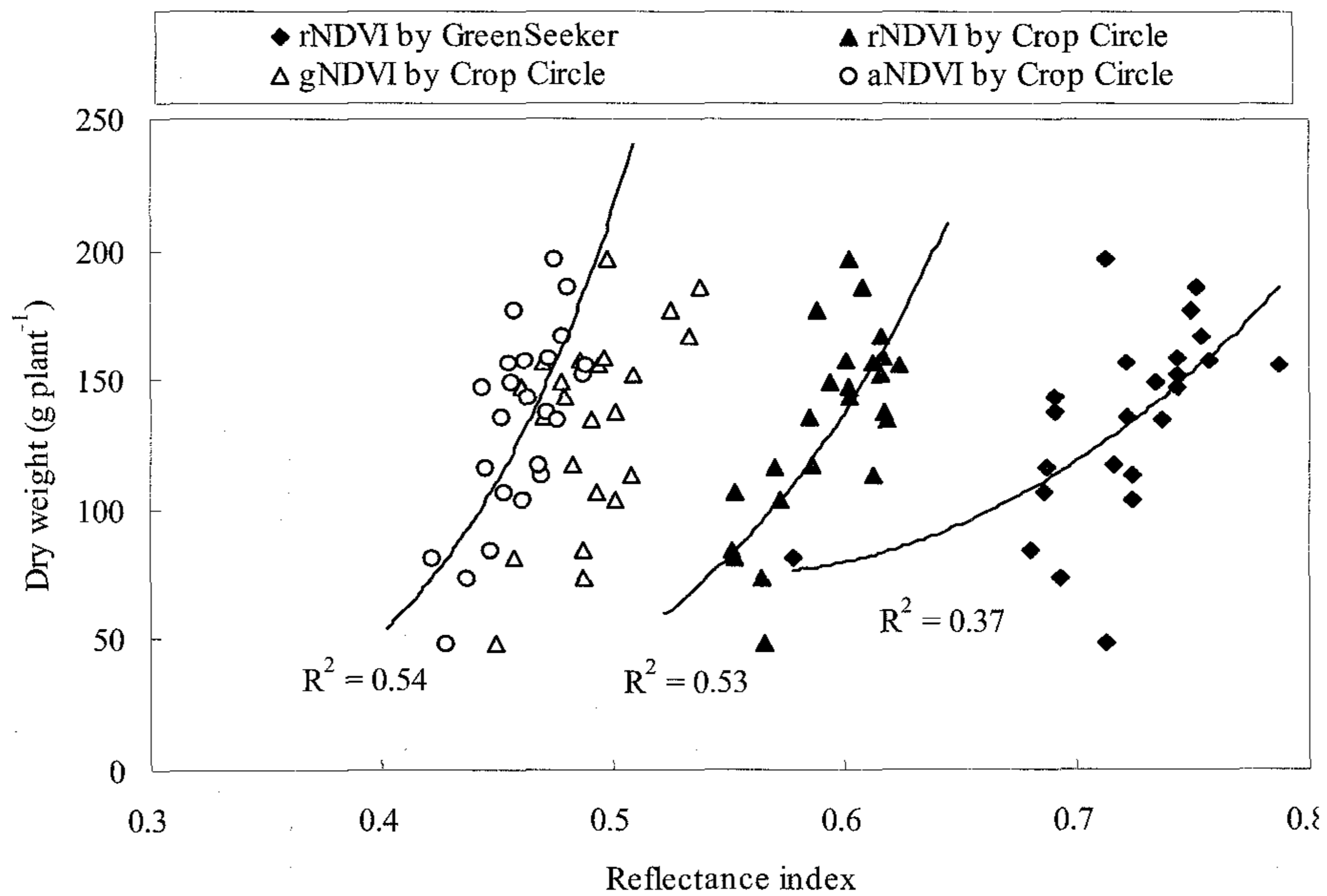


Fig. 3-16. Relationship between dry weight of above ground part of pepper at the 120th day after planting (DAP) and reflectance indexes at the 37th DAP in 2004.

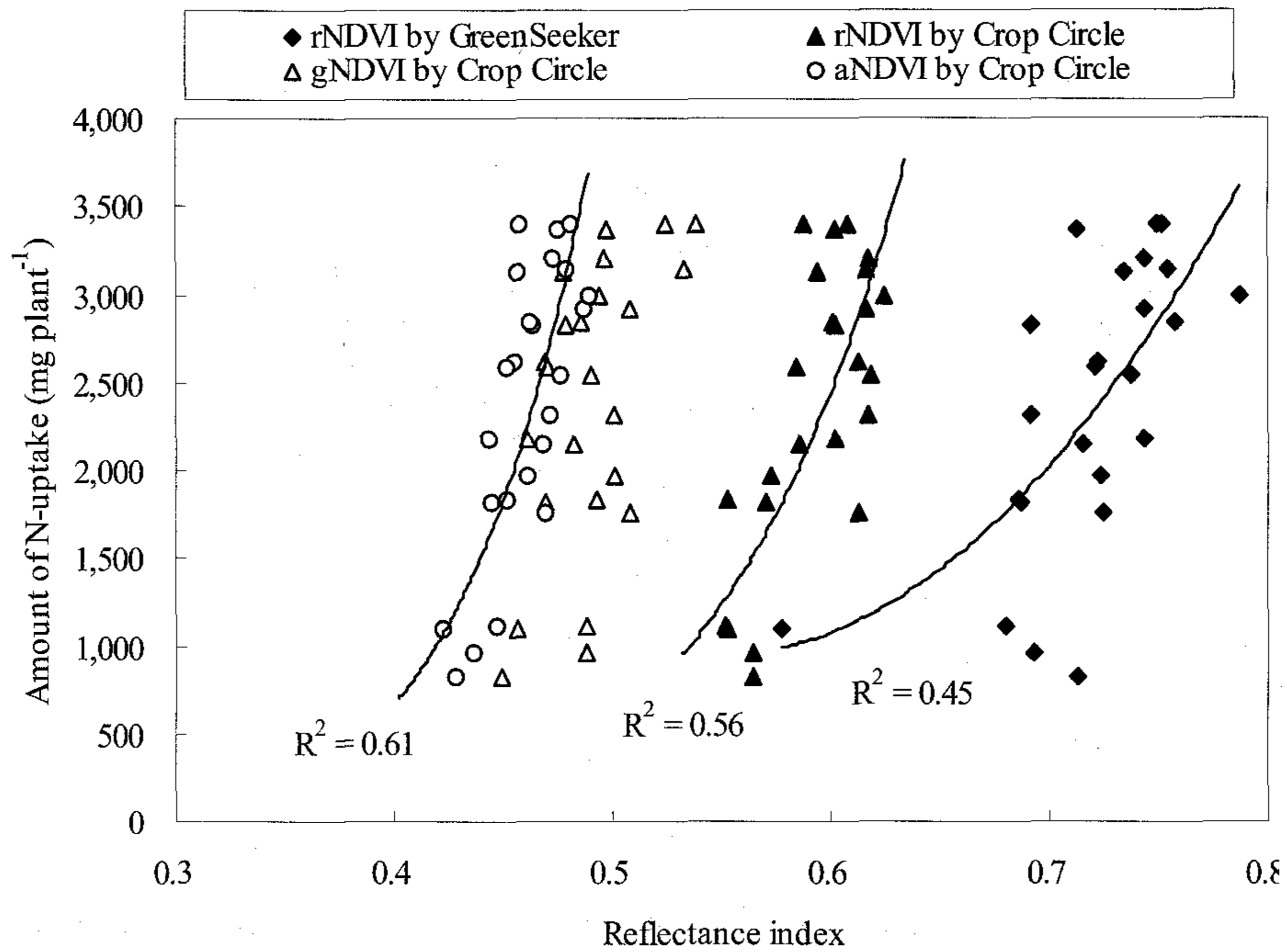


Fig. 3-17. Relationship between amount of N-uptake by leaves of pepper at the 120th day after planting (DAP) and reflectance indexes at the 37th DAP in 2004.

그림 3-18은 수확기 고추의 건물중을 보다 더 양호하게 평가하였던 이식후 78일째 passive형 센서 Crop Circle에 의한 aNDVI와의 상호관계를 나타냈다. 이식후 78일째 이 반사율지표에 의한 수확기 고추 건물중은 79%까지 설명할 수 있는 밀접한 회귀관계를 보였다. 따라서 이 반사율 지표를 이용하여 충족지수로 환산하여 수확후 고추 건물중과의 상호관계를 그림 3-19에 나타냈다. 충족지수의 적용하는 이유는 동일한 지상 원격탐사 센서의 지표 출력값이 작물의 품종 및 기상조건에 따라 일정하지 않기 때문에 지표의 상대 값 개념으로 작물이 스트레스가 없는, 즉 적절한 영양 및 환경조건에 대한 반사율지표 측정치를 1.0의 기준치로 하여 비율 값으로 표현한 개념이다. 선진국에서 시비량 추천에 활용되는 이 개념은 예로 충족지수가 0.95 이상일 때 즉 최적조건의 95% 조건일 경우는 사용되는 비료량이 없는 것으로 간주한다. 이식후 78일째 동일한 aNDVI로부터 환산된 충족지수는 0.83에서 1.0의 분포로서 정식후 120일째 고추 건물중을 79% 설명할 수 있는 관계를 보였다.

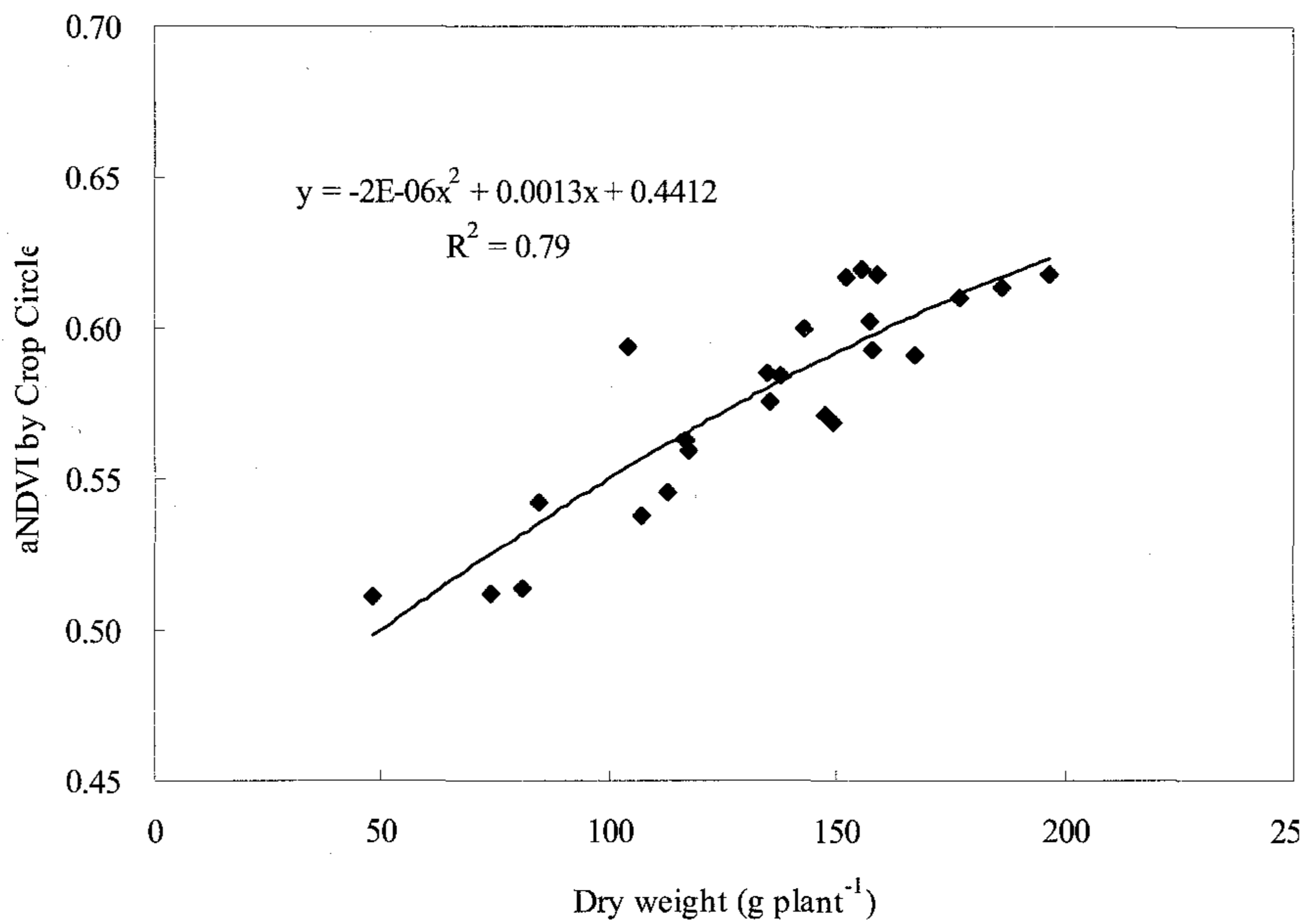


Fig. 3-18. Relationship between dry weight of red pepper at the 120th day after planting and aNDVI by Crop Circle at the 78th day after planting in 2004.

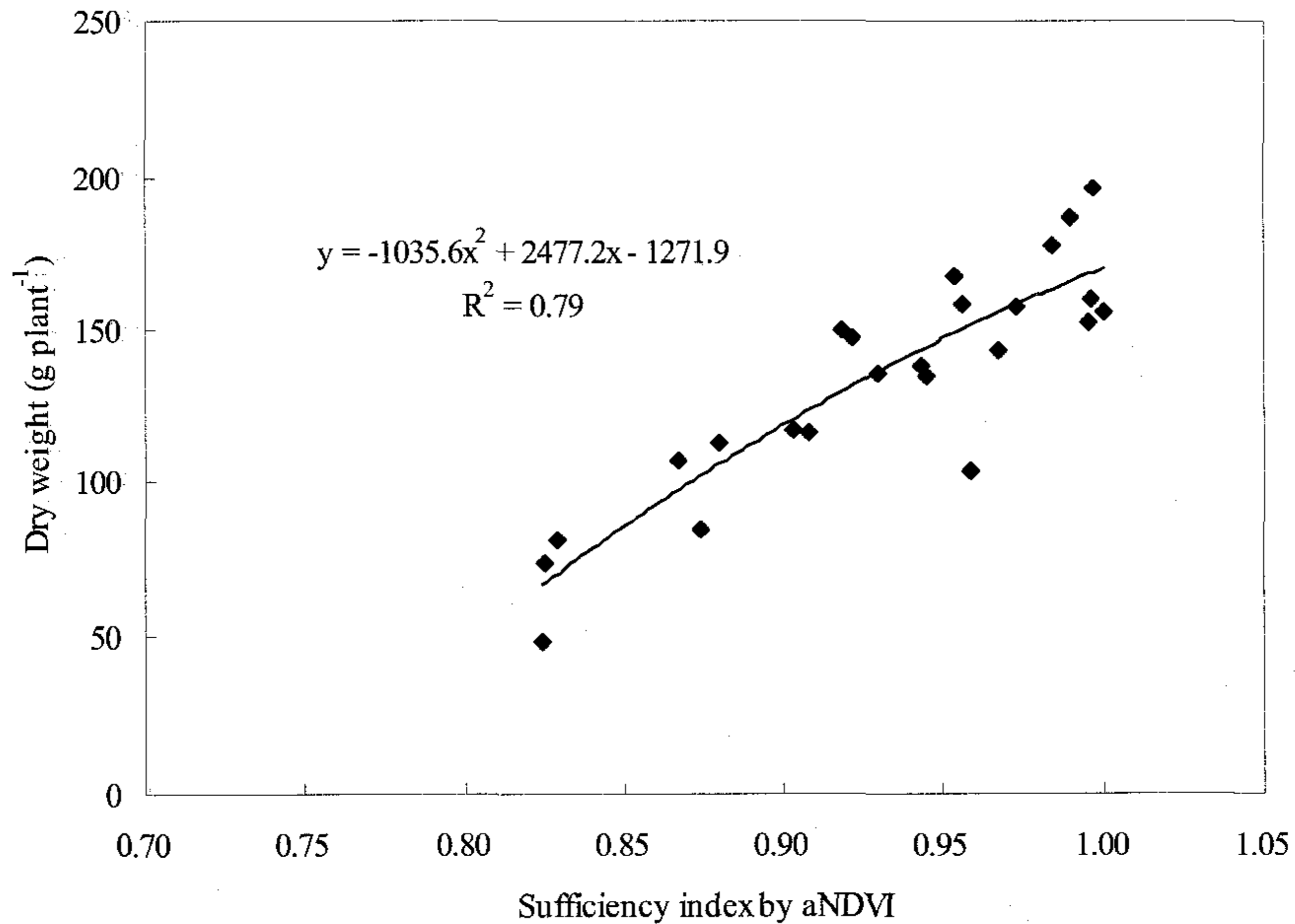


Fig. 3-19. Relationship between dry weight of red pepper at the 120th day after planting and sufficiency index by aNDVI at the 78th day after planting in 2004.

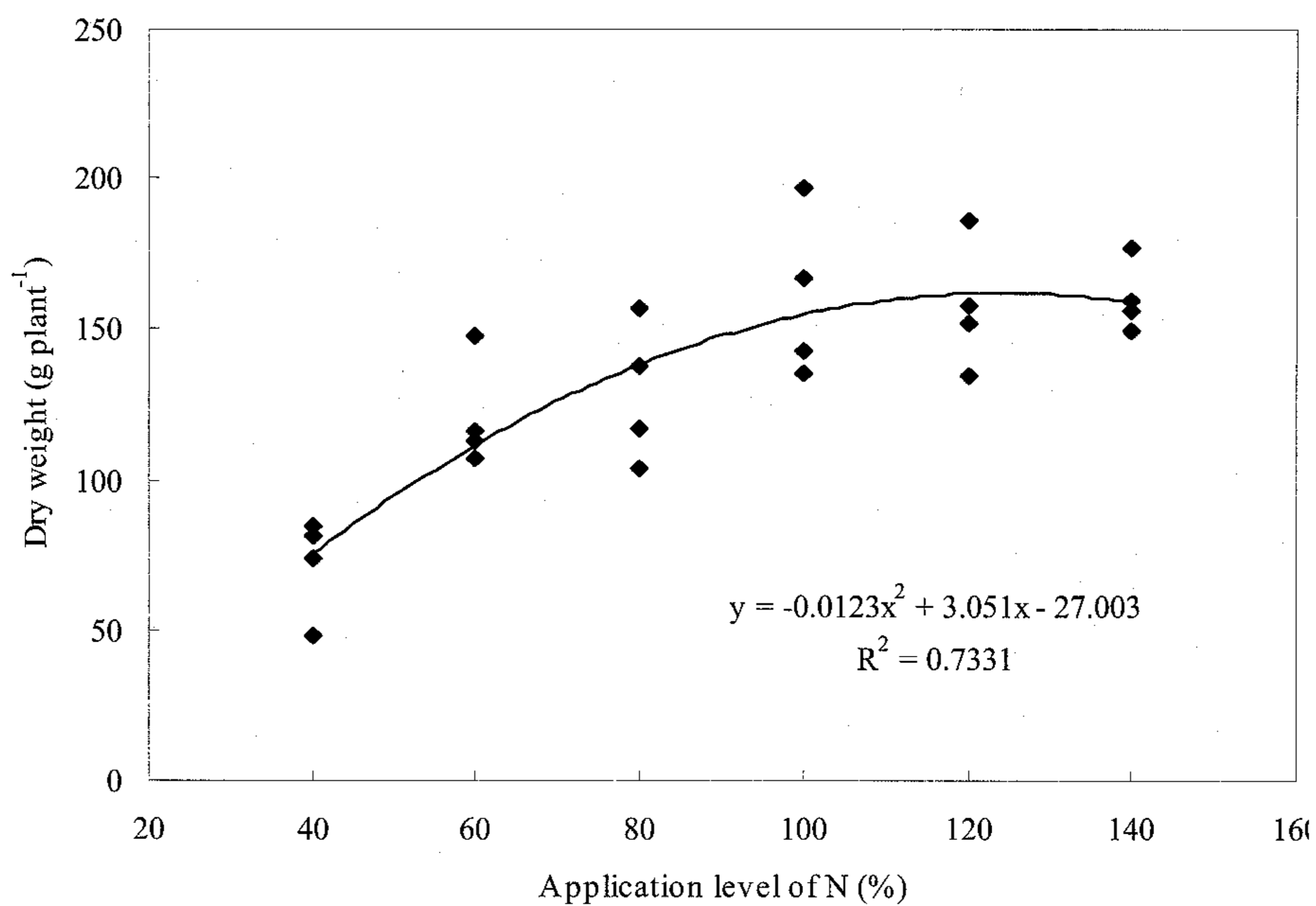


Fig. 3-20. Relationship between dry weight of pepper at the 120th DAP and application level (%) of N in 2004 experiment.

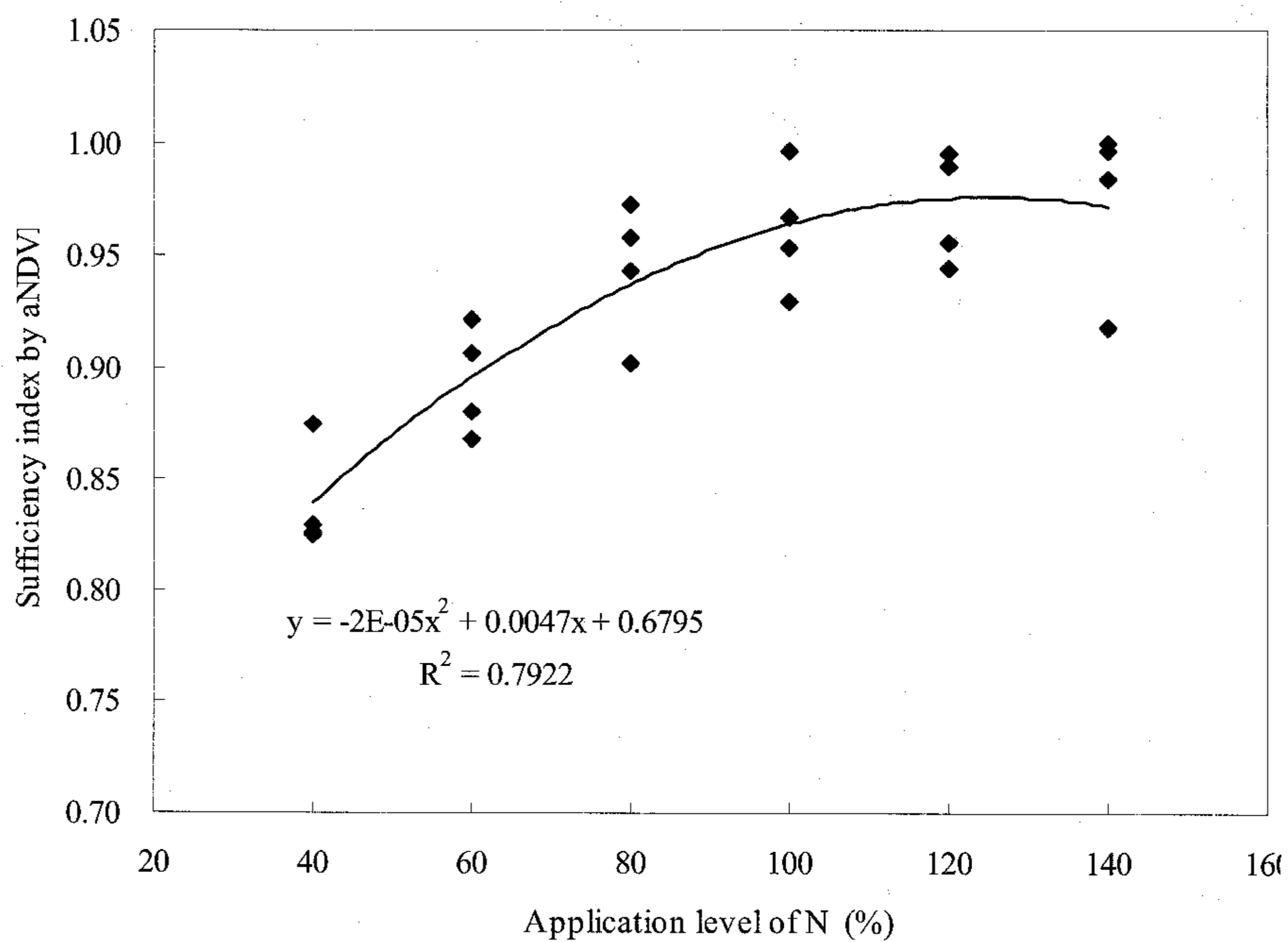


Fig. 3-21. Relationship between application level of N (%) and sufficiency index by aNDVI at the 78th DAP in 2004.

그림 3-20은 질소 시비수준에 따른 수확기 고추 건물중의 변화를 나타낸 것이다. 고추 건물중은 질소 시비수준에 따라 2차함수의 회귀관계로 곡선적으로 증가되는 밀접한 관계를 보였다. 그림 3-21은 이식후 78일째 Crop Circle aNDVI를 이용한 충족지수와 질소 시비수준의 상호관계를 나타낸 것이다. 질소 시비수준에 따른 aNDVI의 충족지수는 40% 수준일 때 0.82, 60%일 때 0.90, 80%일 때 0.93, 100%이상의 질소 시비수준일 때 0.95의 충족지수를 보였다. 이는 연초에 대한 충족지수의 평가결과와도 거의 동일한 경향으로 효율적인 반사율 지표에 의한 충족지수는 질소 시비수준을 유의성 있게 구분하여 예측할 수 있는 것으로 생각되었다. 또한 고추의 생체량 평가에서 passive형 센서보다 양호한 것으로 평가된 active형 센서에 의한 추천모델을 개발하기 위하여 2005년도의 사경재배시험 결과를 이용하여 동일한 방법으로 적용하였다.

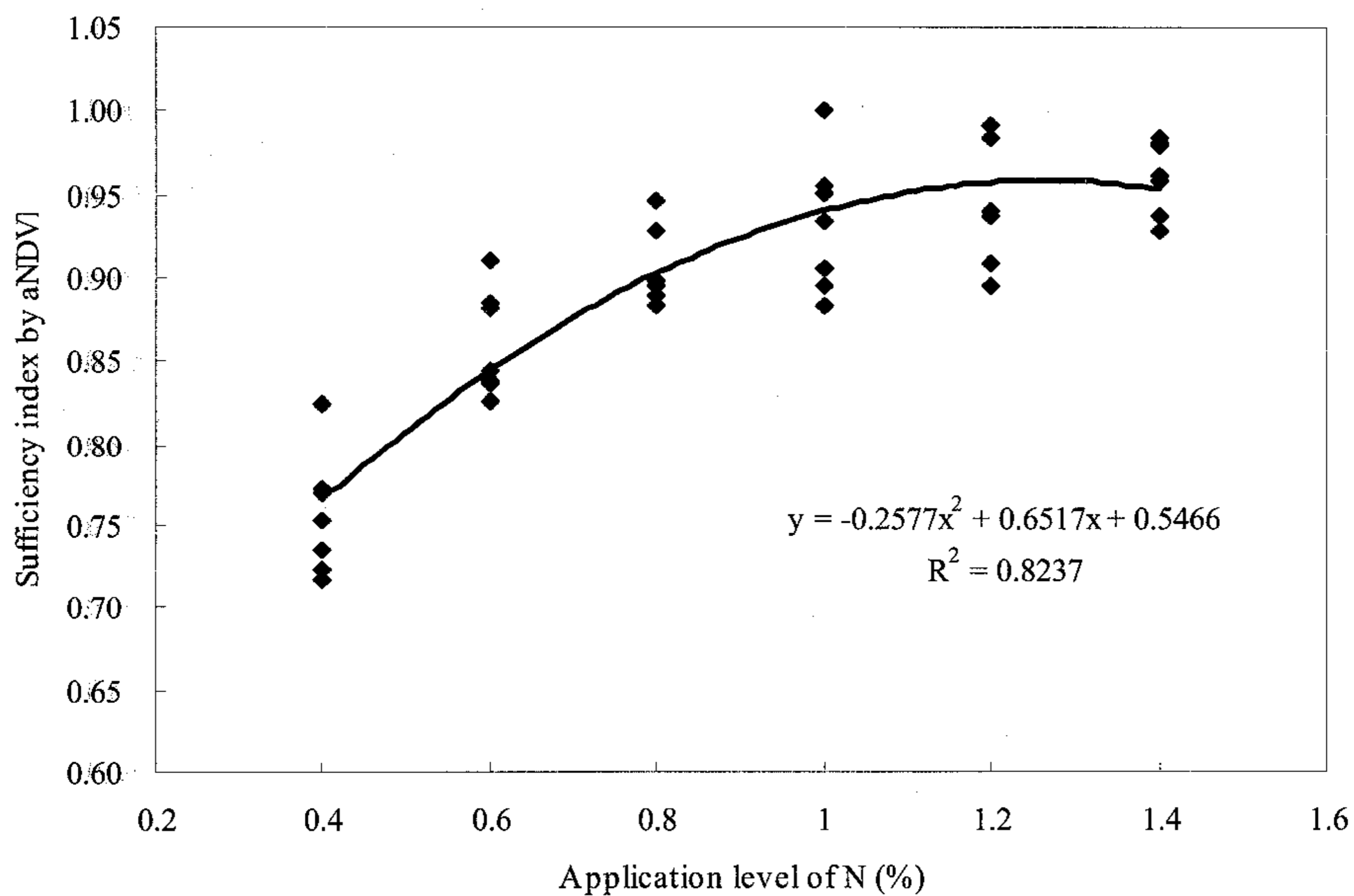


Fig. 3-22. Relationship between application level of N(%) and sufficiency index by aNDVI at the 74th DAP in 2005

2005년 사경재배시험에서 수확기 고추 건물중은 이식후 74일째 Crop Circle ACS-210 센서로서 수확기의 고추 수량을 77%까지 설명하는 밀접한 관계를 보였다(그림 3-6 참조) 따라서 그림 3-22는 이식후 74일째 Crop Circle ACS-210 센서의 aNDVI에

의해 환산된 충족지수와 질소 시비수준의 상호관계를 나타낸 것이다. 이식후 74일째 aNDVI로 측정된 질소시비수준의 최대 값에 대한 비율로 표현한 충족지수는 고추의 질소 시비수준을 82%까지 설명하는 고도로 유의성 있는 회귀관계를 보였다. 이러한 결과는 1년차 시험의 반사율지표에 의한 충족지수와 질소 시비수준 사이의 관계와 거의 유사한 경향이였다. 그림 3-23는 가장 효율적인 반사율지표에 의한 충족지수와 시비수준간의 회귀관계를 2004년도와 2005년도를 비교한 것이다. 회귀관계의 결정계수는 거의 비슷하게 0.8 내외를 보였으나 충족지수의 범위는 passive형 센서를 이용한 2004년도는 0.83에서 0.95이었으나 active형 센서의 반사율지표에 의한 충족지수인 2005년도는 0.75에서 0.95까지 더 광범위하여 질소 시비추천을 위한 모델식으로 더 적합할 것으로 판단되었다. 따라서 active형 센서는 인공광원을 이용하여 측정하는 이점이 있기 때문에 2005년과 2006년의 현장 실증시험에서 질소 시비추천을 위한 모델은 2005년의 반사율지표의 충족지수를 이용하는 회귀식을 적용하였다.

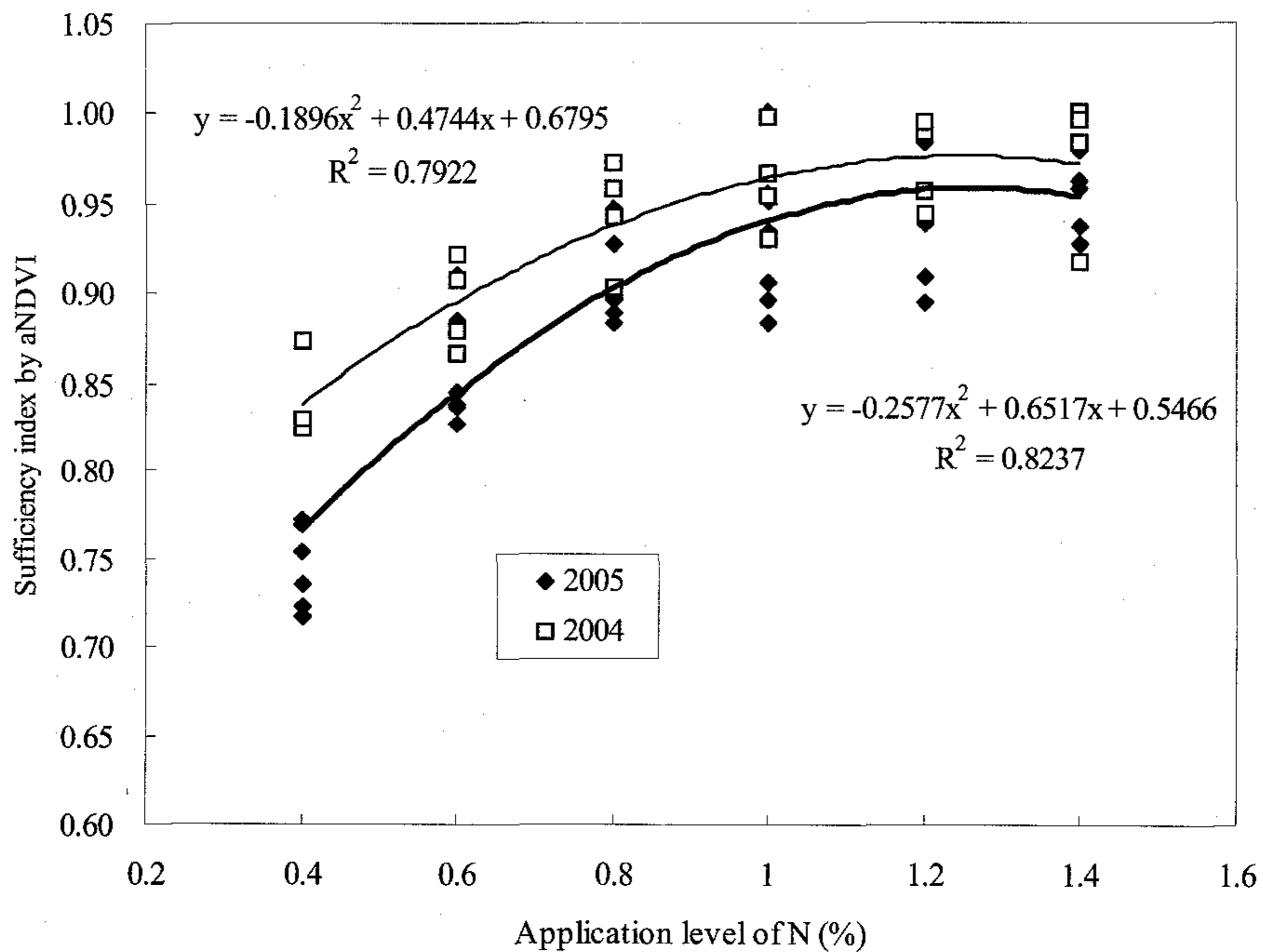


Fig. 3-23. Relationship between application level of N (%) and sufficiency index by aNDVI at the 74th and 78th DAP in 2004 and 2005, respectively

나) 연초

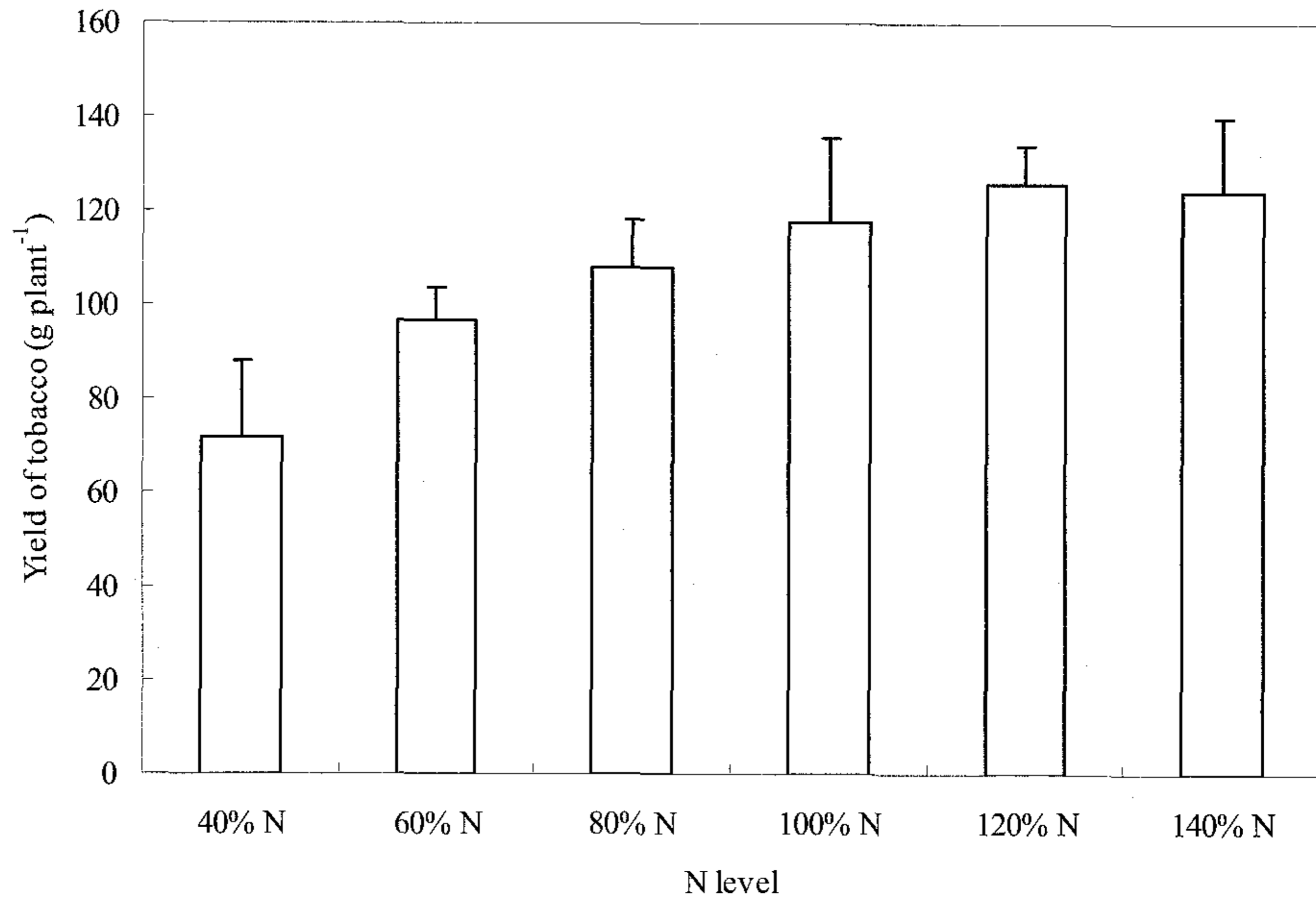


Fig. 3-24. Yield of tobacco affected by N stress in 2004 experiment.

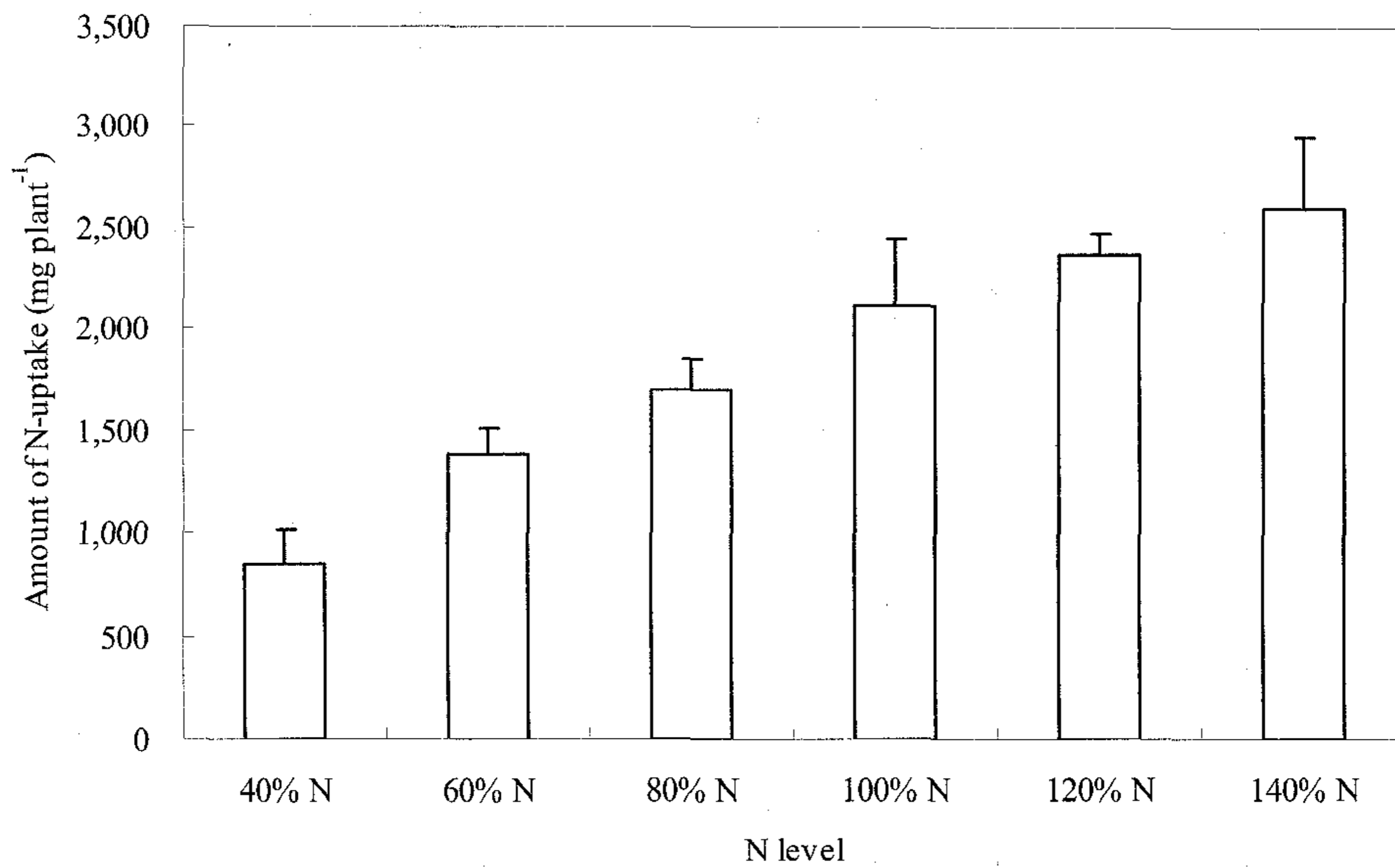


Fig. 3-25. Amount of N-uptake by tobacco leaves affected by N stress at the harvesting in 2004 experiment.

2004년에 수행된 사경제배의 질소수준을 40%에서 140% 까지 6개 수준으로 처리된 연초의 수량 및 엽 중 질소 흡수량은 그림 3-24 및 3-25와 같다. 연초 수량은 질소 120% 수준을 정점으로 하는 곡선회귀를 보였으며 질소 흡수량은 질소수준이 40%에서 140%로 증가될수록 직선적으로 증가되는 경향으로 고추의 경우와 동일한 경향을 보였다. 이와 같은 수량 및 질소 흡수량 변이들은 지상원격탐사 반사율지표들에 의한 질소 시비추천모델의 개발에 활용하였다.

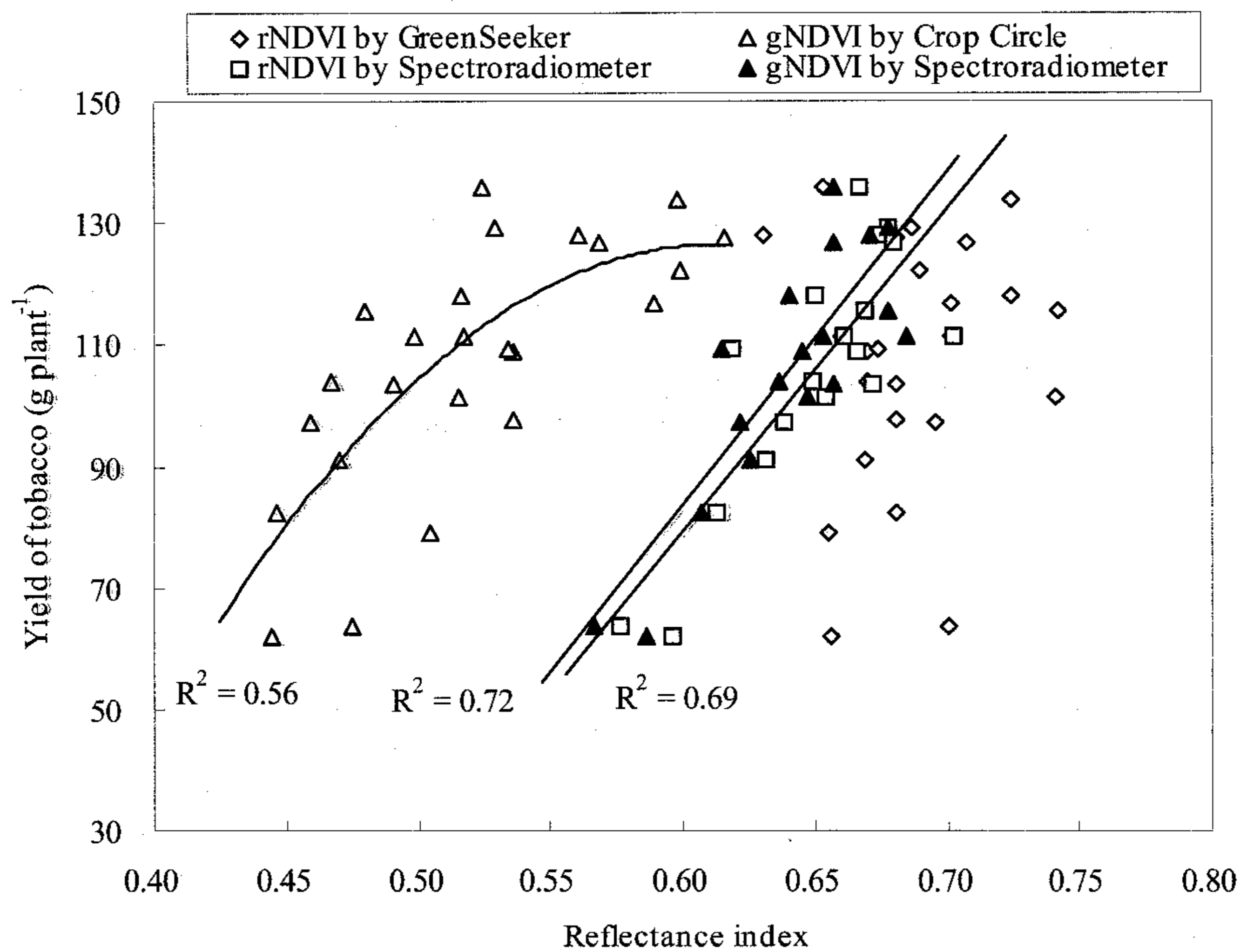


Fig. 3-26. Relationship between yield of tobacco and reflectance indexes at the 40th day after planting in 2004

그림 3-26은 연초 이식후 40일째 측정된 반사율 지표들과 연초의 수량의 상호관계를 나타냈다. 이식후 40일째 spectroradiometer에 의한 rNDVI와 gNDVI는 연초 수량을 각각 72% 및 69%씩 설명하는 직선적인 회귀관계를 보였다. 따라서 가장 양호한 관계를 보인 gNDVI에 의한 총족지수와 연초 수량과의 상호관계를 그림 3-27에 나타냈다. gNDVI에 의한 총족지수는 연초 수량을 74% 설명하며 유의성 있는 회귀관계를 보였다.

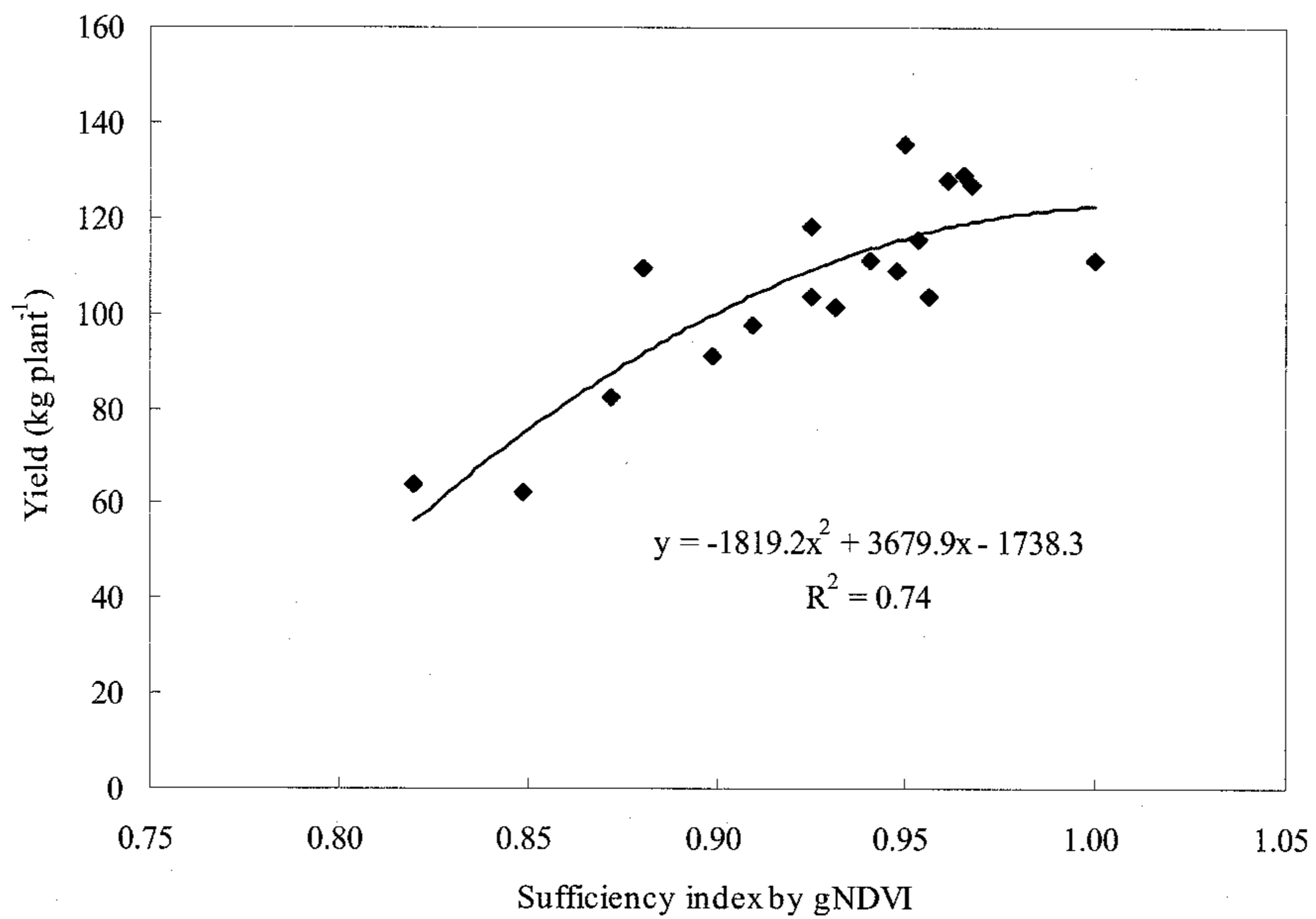


Fig. 3-27. Relationship between tobacco yield and sufficiency index by gNDVI at the 40th day after planting in 2004.

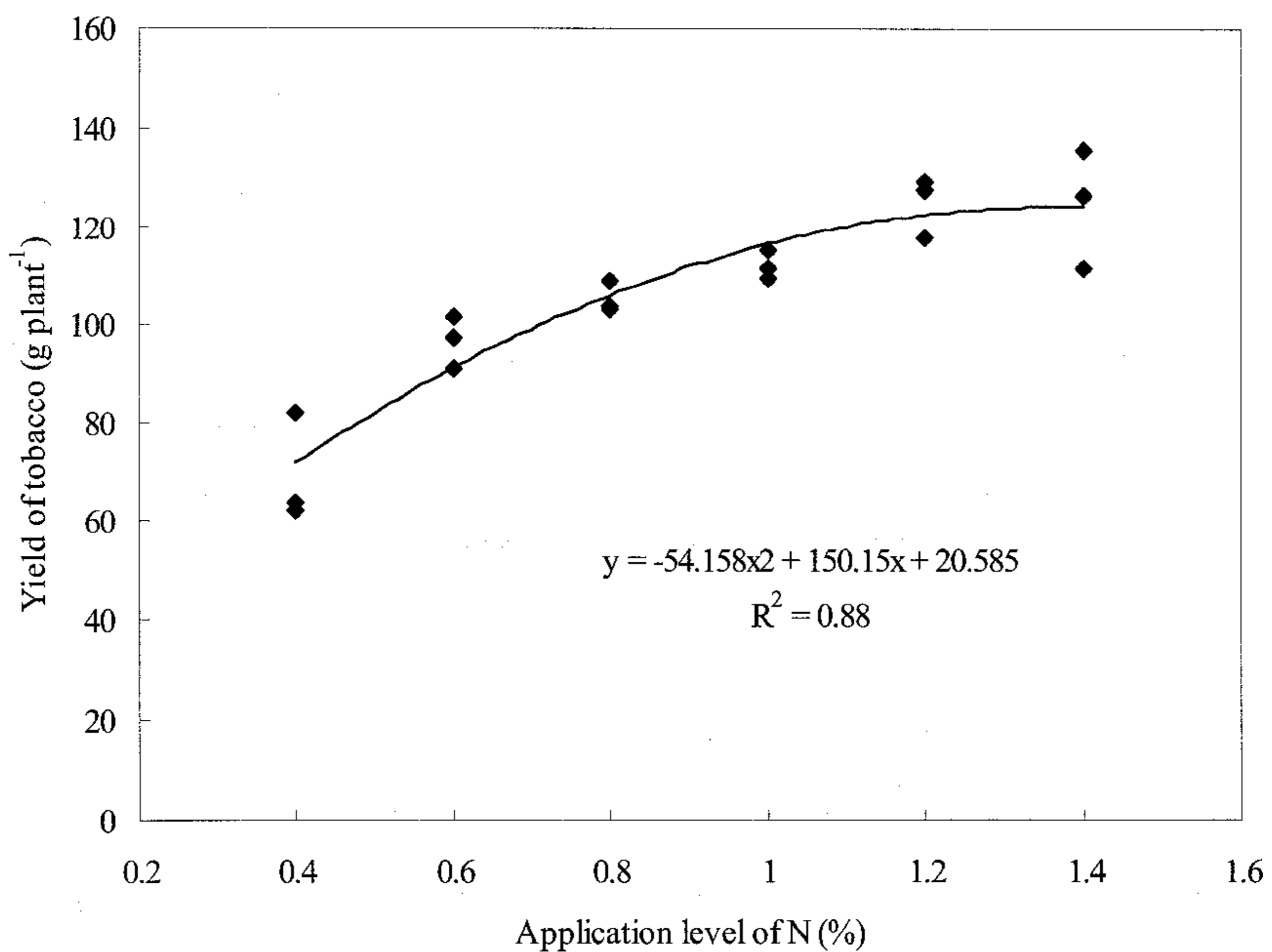


Fig. 3-28. Relationship between yield of tobacco and application level (%) of N in 2004 experiment.

그림 3-28은 질소 시비수준에 따른 연초의 수량변화를 나타냈다. 연초 수량은 질소 시비수준이 증가함에 따라 곡선적으로 증가되는 밀접한 관계를 보였다. 또한 이식 후 40일째 반사율지표 gNDVI에 의한 충족지수와 질소 시비수준의 상호관계는 그림 3-29와 같이 충족지수는 0.8에서 1.0의 분포로서 질소 시비수준을 69% 설명하는 밀접한 관계를 보였다. 질소 시비수준에 따른 gNDVI의 충족지수는 40% 수준일 때 0.85, 60%일 때 0.89, 80%일 때 0.93, 100%이상의 질소 시비수준일 때 0.95의 충족지수를 보였다. 따라서 이식 후 40일째 효율적인 반사율 지표에 의한 충족지수는 질소 시비수준을 유의성 있게 구분하여 예측할 수 있는 것으로 생각되었다.

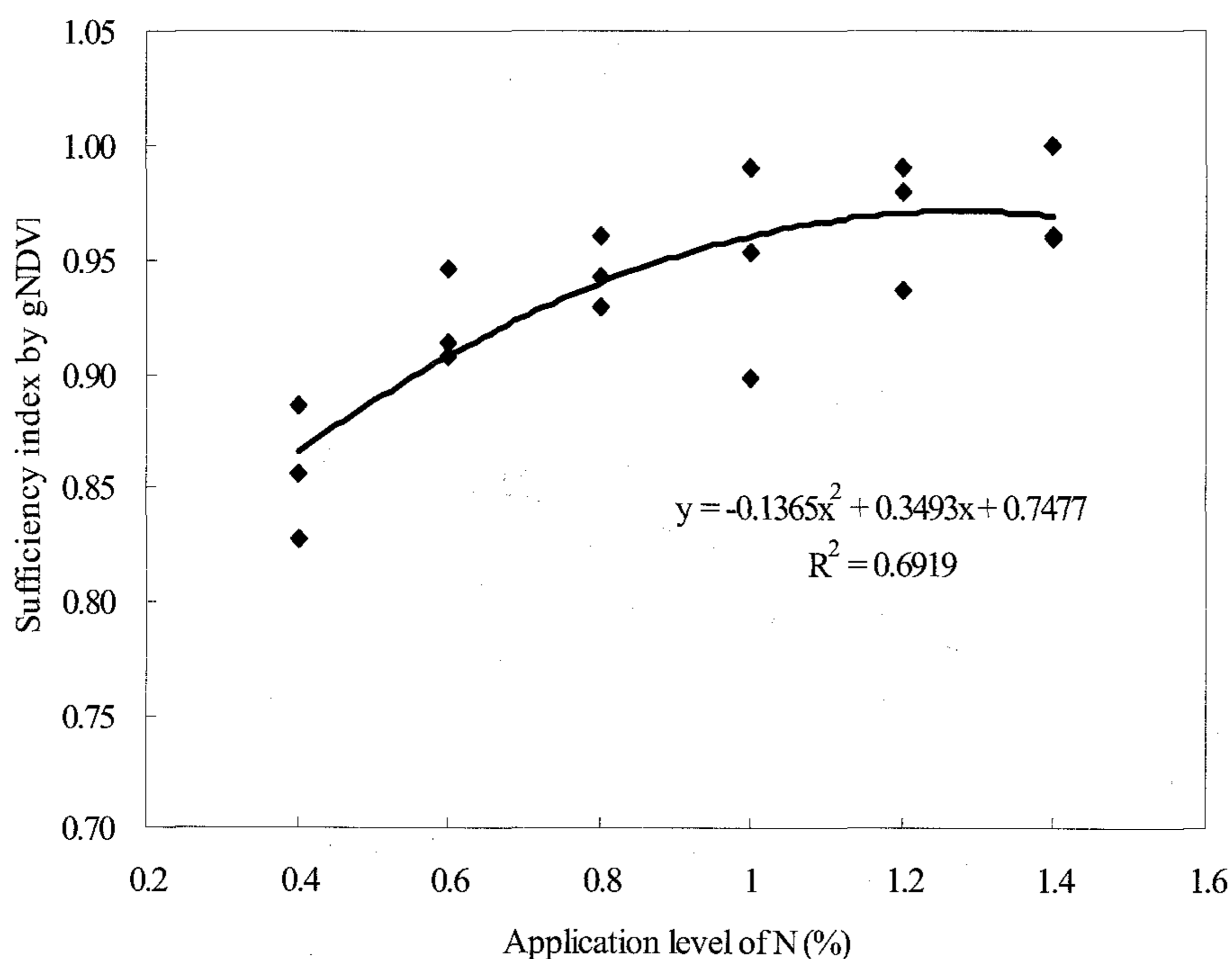


Fig. 3-29. Relationship between application level of N(%) and sufficiency index by gNDVI at the 40th DAP in 2004 experiment.

그림 3-30은 active형 센서를 포함하여 평가한 2005년도 사경재배시험에서 연초수량과 가장 밀접한 상관관을 보인 이식 후 35일째 Crop Circle ACS-210에 의한 rNDVI와의

상호관계를 나타낸 것이다. 반사율지표 rNDVI는 연초수량을 75%까지 설명하는 밀접한 관계를 보였다. 따라서 이 반사율지표에 의한 충족지수와 질소 시비수준과의 관계를 그림 3-31에 나타냈다. 이러한 반사율지표의 충족지수는 질소 시비수준을 67% 설명하며 밀접한 관계를 보였다.

이러한 결과는 1년차 시험에서 가장 밀접한 관계를 보였던 이식후 40일째 spectroradiometer의 gNDVI에 의한 충족지수에 의한 평가와 유사하였으나 충족지수의 범위가 2004년의 경우는 0.85에서 0.95이었으나 2005년은 0.75부터 0.95까지 더 광범위하게 분포하여(그림 3-32) 질소 시비추천을 위한 모델식으로 더 적합할 것으로 판단되었다. 따라서 active형 센서는 인공광원을 이용하여 측정하는 이점이 있기 때문에 2005년과 2006년의 질소 시비추천을 위한 현장 실증시험에서 질소 시비추천 모델은 2005년의 반사율지표의 충족지수를 이용하는 회귀식을 적용하였다.

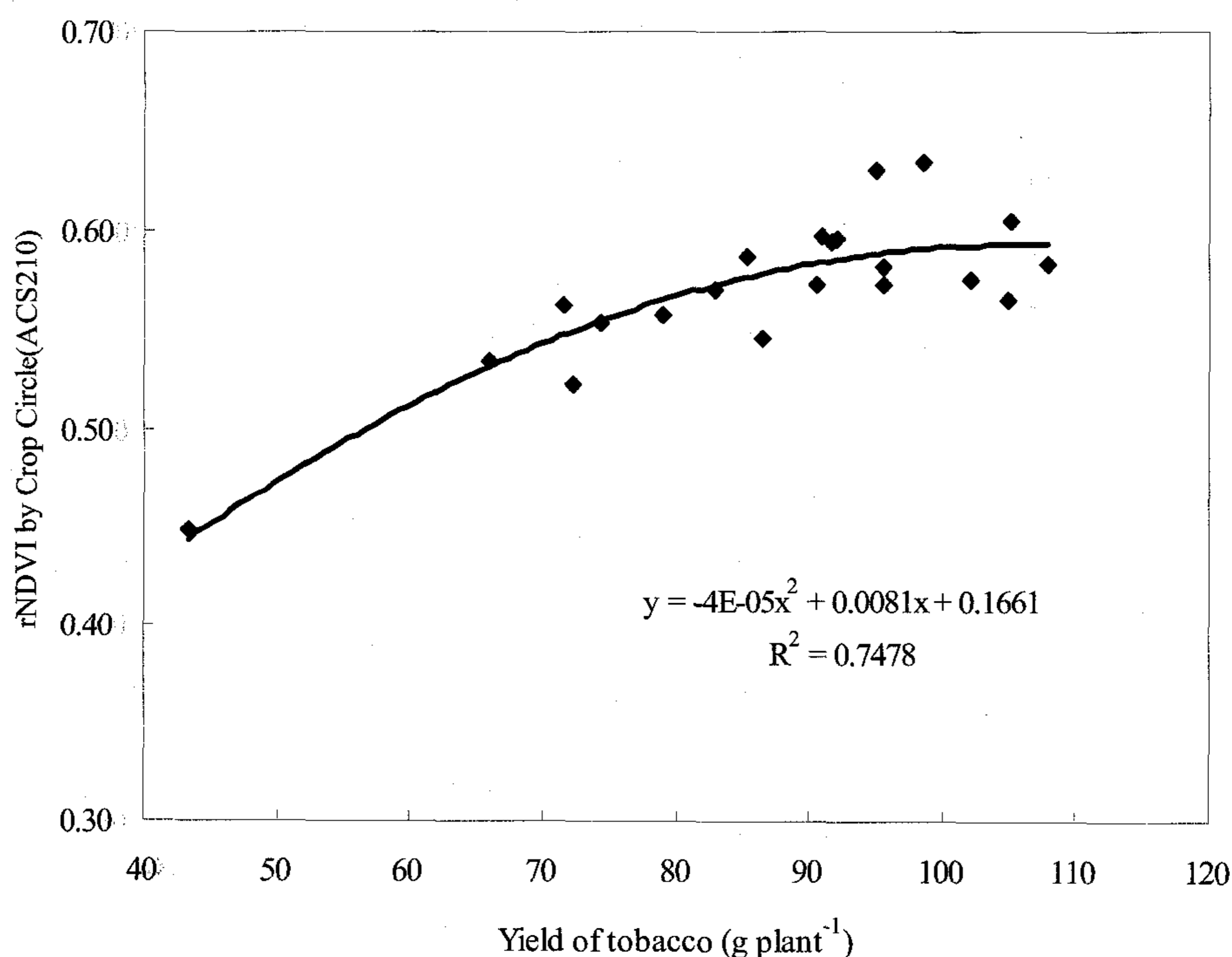


Fig. 3-30. Relationship between tobacco yield and rNDVI by Crop Circle (ACS210) at the 35th day after planting in 2005.

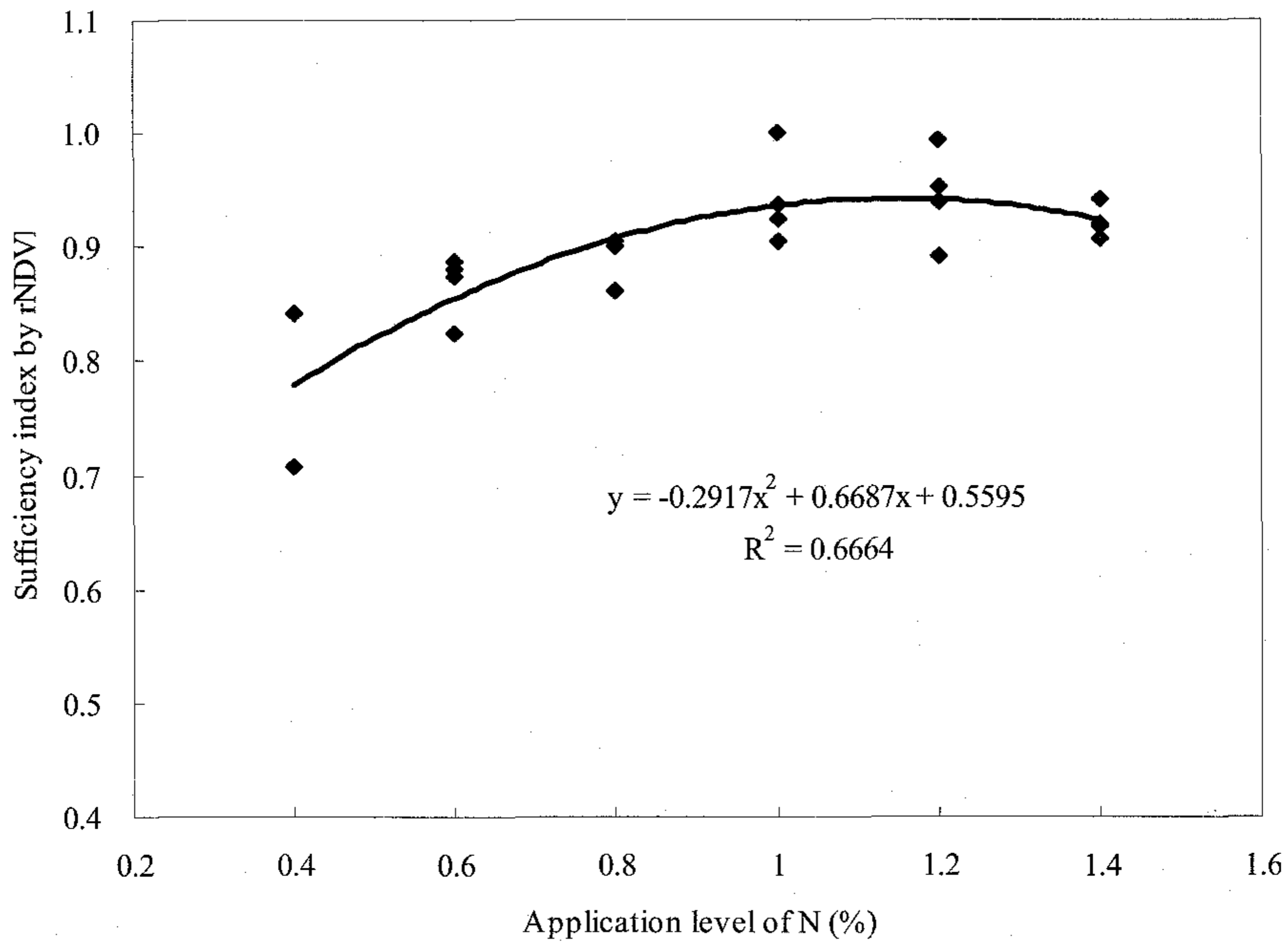


Fig. 3-31. Relationship between application level of N (%) and sufficiency index by rNDVI of Crop Circle at the 35th day after planting in 2005

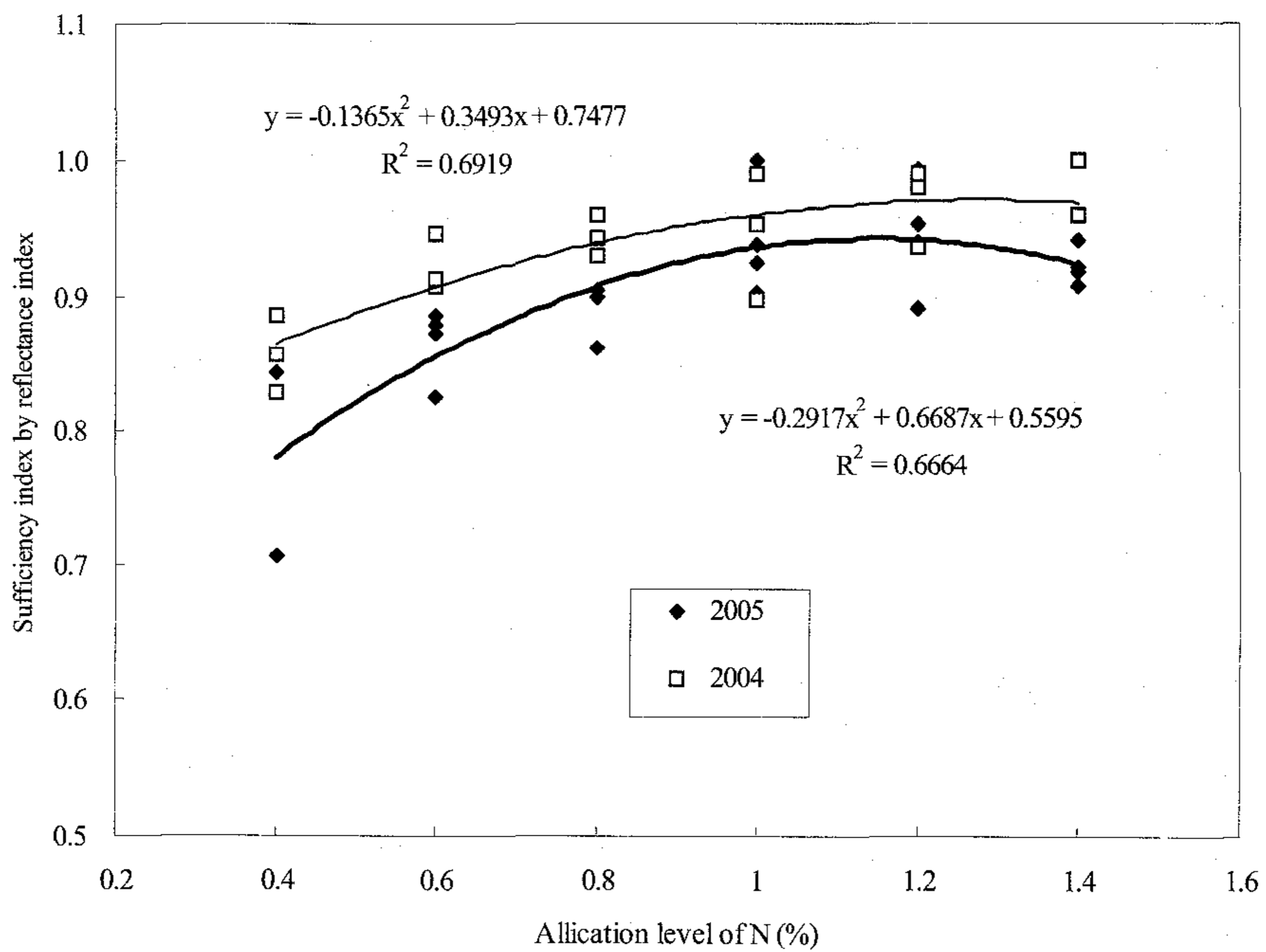


Fig. 3-32. Relationship between application level of N fertilizer and sufficiency index by reflectance index at the 35th and 40th day after planting in 2005 and

4. 적요

원격탐사센서에 의한 작물의 질소시비량 추천모델을 개발하기 위하여 질소시비추천을 위한 센서 효율성은 작물의 최종 수량특성 및 질소흡수량과 생육단계별 효율적 센서 반사율지표들의 상호관계를 평가하여 비교하였다. 원격탐사 검정을 위한 최적 시기는 고추와 연초의 최종 수량특성 및 질소흡수량과 생육단계별 원격탐사센서 반사율지표의 상관관계로부터 구명하였다. 고추와 연초 작물 모두 생육 초중반기 active형 센서들의 반사율지표는 최종 수량특성들과 고도로 유의성 있는 상관을 보였으며 이러한 결과는 사경재배 포트식물의 개체식물 조건과 포장조건의 작물군락 조건 모두에서 공통적이었다. 고추의 경우 이식후 120일 전후 수확기 건물중 및 생고추 수량은 이식후 55일부터 90일 사이의 반사율지표와 유의성 있는 상관을 보였으며 질소비료 덧거름 시비추천을 위한 원격탐사 최적 검정시기는 이식후 70일 전후로 판단되었다. 또한 연초 수확기의 수량 및 질소흡수량은 이식후 30일부터 50일의 반사율지표들과 밀접한 상관을 보였으나 원격탐사 검정에 의한 질소비료 시용시기를 가능한 앞당기기 위하여 최적 검정 시기는 이식후 30일 전후가 바람직 할 것으로 판단되었다. 고추와 연초 모두의 원격탐사 검정을 위한 효율적인 센서는 생체량 평가에서 가장 효율적인 센서로 평가되었던 active형 센서 Crop Circle ACS-210의 aNDVI로 선발되었다.

상기와 같이 원격탐사 검정을 위한 최적 시기와 효율적 센서를 선정한 결과는 포장조건의 작물군락에 대한 평가에서도 동일한 경향으로 평가되었다. 따라서 원격탐사 검정법으로 고추는 이식후 70일 전후에, 연초는 이식후 30일 전후에 active형 Crop Circle ACS-210 센서로 결정하였고 시비량 추천모델은 효율적 반사율지표의 충족지수와 질소 시비수준의 회귀관계식으로 확립하였다. 반사율지표의 충족지수는 최적상태 작물의 측정지표에 대한 비율 값을 의미하며 이는 반사율지표 측정치가 년차 간 및 작물 품종특성에 따라 동일하지 않기 때문에 상대적인 개념으로 선진국에서 활용하는 방법이다. 따라서 고추에 대한 질소 시비량 추천 회귀식은 $Y(\text{aNDVI의 충족지수}) = -0.2577x^2 + 0.6517x + 0.5466$ (x =질소 시비비율, %), 연초에 대한 추천 회귀식은 $Y(\text{aNDVI의 충족지수}) = -0.2917x^2 + 0.6687x + 0.5595$ (x =질소 시비비율, %)로 적용하였고 각각의 회귀관계의 결정계수(R^2)는 0.82 및 0.67이었다.

제 3 절 원격탐사 지표에 의한 질소시비량 추천모델의 신뢰성 평가

1. 서 설

원격측정 센서를 이용한 반사율측정, 지표계산, 알고리즘에 의한 시비량 산출, 변량 시비기술 등이 종합되어야 원격측정 센서를 활용한 양분관리가 가능하다. 미국 오클라호마 주립대학의 연구팀들은 60×1 cm의 관측영역을 갖는 GreenSeeker 센서를 트랙터에 장착하여 옥수수 열의 60cm 캐노피 반사율을 스캐닝으로 측정 평균하여 0.6m² 단위로 실시간으로 시비량을 정하여 변량시비를 하기 위한 연구를 하고 있다 (Raun et al., 2002). 이러한 원격측정 방법은 통계학적으로 가장 이상적인 전수조사가 가능한 방법이며 위와 같은 시스템은 질소가 필요한 지점에만 시비함으로써 질소비료의 사용량을 줄여 생산성을 최적화할 수 있고 환경에 대한 부하도 최소화 할 수 있는 방법이다. 따라서 정밀농업의 핵심인 시간적 공간적 변이에 따른 위치별 변량적 농작업 관리가 가능한 방법이며 영농규모가 작은 우리의 농업환경에서도 적용 가능한 기술로 생각된다.

2. 재료 및 방법

가. 고추 재배시험

1). 2005년

사경재배 조건에서 원격탐사 반사율지표의 충족지수에 의해 추천되는 질소의 시비 비율에 대한 고추재배 포장의 현장 활용성을 평가하기 위하여 2005년의 시험포장은 음성군 6개, 청원군 5개 등 11개 농가포장을 선정하여 고추 묘(왕대박)를 5월 1일에서 4일 사이에 각각 정식하였다. 질소시비 수준에 대한 처리는 무비구, 토양검정시비구, 원격탐사 시비-1구(시비효율 100% 적용) 및 -2구(시비효율 70% 적용), 및 농가시비구의 5개 수준으로 처리구의 면적은 각각 18m² 씩 단일구로 하였다. 생육중반기 생체량

및 질소흡수량은 각 처리구에서 5주씩 채취하고 수량은 9m²의 면적에서 측정하였다.

11개 농가포장의 토양 화학성은 표 4-1a와 같다. 토양의 pH는 4.8에서 7.2까지 다양하게 분포되었고, 유기물 함량은 3~25 g kg⁻¹로서 대체로 낮은 경향이였다. 토양의 질소공급능력과 밀접한 질산태질소 함량은 최소 4.5mg kg⁻¹에서 최대 58.0 mg kg⁻¹의 차이를 보였고, 유효인산 78~756 mg kg⁻¹, 치환성칼륨 0.06~0.60cmol⁺ kg⁻¹의 분포로서 다양한 비옥도 특성을 보였다.

Table 4-1a. Physico-chemical properties of experimental soils for red pepper cultivation in 2005

Field site	pH	OM	NH ₄ -N	NO ₃ -N	Avail.-P ₂ O ₅	Exch.-K	Exch.-Ca	Exch.-Mg	CEC
	(1:5H ₂ O)	(g kg ⁻¹)	————(mg kg ⁻¹)————			————(cmol ⁺ kg ⁻¹)————			
Cheongwon-1	7.2	9	2.6	23.7	160	0.06	6.5	0.9	9.9
Cheongwon-2	4.8	13	2.3	5.2	435	0.19	2.5	0.3	7.7
Cheongwon-3	6.7	25	1.7	12.6	522	0.31	6.8	1.3	12.4
Cheongwon-4	6.9	3	1.8	2.2	78	0.08	5.8	1.2	7.1
Cheongwon-5	5.6	13	3.5	4.5	348	0.45	3.1	1.5	9.6
Eumseong-1	6.3	16	4.5	30.5	440	0.18	2.8	1.4	8.4
Eumseong-2	7.1	15	2.4	33.2	238	0.15	2.9	1.7	8
Eumseong-3	6.5	23	2.4	42.3	756	0.38	2.8	1.6	9.2
Eumseong-4	5.5	9	2.4	22.4	435	0.21	2.3	0.6	8.3
Eumseong-5	5.2	15	4.7	31.5	618	0.60	2.8	1.6	8.5
Eumseong-6	6.7	13	3.2	58.0	356	0.16	3.8	2.2	8.1

2) 2006년

2005년과 동일한 방법으로 원격탐사 반사율지표에 의해 추천된 질소 시비비율의 현장 실증 평가를 위하여 시험포장은 보은군에서 4개포장, 음성군에서 6개 포장 등 10개 농가포장을 선정하여 고추 묘(왕대박)를 5월 1일 전후로 각각 정식하였다. 질소 시비 수준에 대한 처리는 무비구, 토양검정시비구, 원격탐사시비-1구(시비효율 100% 적용) 및 -2구(시비효율 60% 적용), 및 농가시비구의 5개 수준으로 처리구의 면적은 각각 18m² 씩 단일구로 하였다. 생육중반기 생체량 및 질소흡수량은 각 처리구에서 5주씩 채취하고 수량은 9m²의 면적에서 측정하였다.

10개 농가포장의 토양 화학성은 표 4-1b와 같다. 토양의 pH는 4.8에서 7.2까지 다양하게 분포되었고, 유기물 함량은 3~25 g kg⁻¹로서 대체로 낮은 경향이였다. 토양의 질소공급능력과 밀접한 질산태질소 함량은 최소 4.5mg kg⁻¹에서 최대 58.0 mg kg⁻¹의

차이를 보였고, 유효인산 78~756 mg kg⁻¹, 치환성칼륨 0.06~0.60cmol⁺ kg⁻¹의 분포로서 다양한 비옥도 특성을 보였다.

Table 4-1b. Physico-chemical properties of experimental soils for red pepper cultivation in 2006

Field site	pH	OM (1:5 H ₂ O) (g kg ⁻¹)	NH ₄ -N (mg kg ⁻¹)	NO ₃ -N (mg kg ⁻¹)	Avail.-P ₂ O	Exch.-K	Exch.-Ca	Exch.-Mg	CEC
			----- (mg kg ⁻¹) -----			----- (cmol ⁺ kg ⁻¹) -----			
Boeun-1	5.3	32	2.1	6.6	287	0.3	1.5	0.8	10.6
Boeun-2	6.9	23	18.9	28.7	261	1.02	3.7	1.8	8.9
Boeun-3	6.2	18	8.7	6.9	41	0.22	1.7	0.8	8.3
Boeun-4	5.7	29	4.2	14.4	359	0.59	4	1.9	12.8
Eumseong-1	5.2	18.4	4.8	23.8	779	0.4	3.1	1.4	11.5
Eumseong-2	7.6	17.9	9.8	56.0	495	0.4	5	2.5	11.8
Eumseong-3	6.9	11.6	2.8	2.1	275	0.18	4.1	1.8	13.2
Eumseong-4	6.9	20.4	8.3	22.9	614	0.61	3.4	1.9	11.8
Eumseong-5	6.8	18.6	1.5	5.2	366	0.39	2.7	0.8	10.9
Eumseong-6	6.7	13	4.9	8.5	356	0.16	3.8	2.2	10.1

나. 연초 재배시험

1) 2005년

사경재배 시험결과로부터 평가된 반사율지표의 충족지수에 의해 추천된 질소의 시비비율에 대한 연초재배 포장의 현장 활용성을 평가하기 위하여 2005년에는 청원군 지역에서 10개 농가포장을 선정하여 연초 묘(KF118)를 4월 15일 전후에 정식하였다. 질소시비 수준에 대한 처리는 무비구, 표준시비구, 원격탐사 시비구(시비효율 70% 적용)의 3개 수준으로 처리구의 면적은 각각 18m² 씩 단일구로 하였다. 생육중반기 생체량 및 질소흡수량은 2004년도와 같이 각 처리구에서 3주씩 채취하고 수량은 처리구당 15주를 채취하여 조사하였다.

공시토양은 표 4-2a는 청원지역에서 선정된 연초재배포장 10개소의 토양화학성을 나타낸 것이다. 토양의 pH는 5.27 ~ 7.70으로 다양하게 분포되었고, 유기물 함량은 0.88% ~ 1.78%로서 대체로 낮은 경향이였다. 토양의 질소공급능력과 밀접한 질산태질소 함량은 최소 9 mg kg⁻¹에서 최대 23 mg kg⁻¹으로 고추재배포장의 경우보다 낮은 함량을 보였고, 유효인산은 268~1166 mg kg⁻¹, 치환성칼륨 0.16~3.46 cmol⁺ kg⁻¹으로 고추

재배포장의 경우보다 훨씬 높은 함량을 보였다.

Table 4-2a. Chemical properties of experimental soils for tobacco cultivation in 2005

Field site	pH (1:5)	EC (dS/m)	T-N %	NO ₃ -N ppm	NH ₄ -N mg/kg	P ₂ O ₅ mg/kg	Exch. Cation (cmol/kg)			OM %	CEC (cmol/kg)
							K	Ca	Mg		
Field-1	7.70	0.94	0.07	11	0.1	339	0.16	5.68	2.19	0.88	6.7
Field-2	6.58	0.46	0.10	23	10.7	443	0.44	5.84	3.40	1.17	12.3
Field-3	6.36	0.51	0.09	22	14.8	427	0.73	3.03	1.50	1.78	8.9
Field-4	5.84	0.25	0.12	11	10.4	268	0.31	3.16	1.47	0.99	7.2
Field-5	5.27	0.34	0.09	9	8.0	810	0.54	2.38	0.93	0.97	7.2
Field-6	5.46	0.32	0.12	10	5.3	458	0.31	3.81	0.90	0.90	7.7
Field-7	6.88	0.31	0.07	10	3.8	1038	0.65	2.94	0.95	1.11	5.5
Field-8	7.23	0.47	0.07	22	4.2	448	0.73	3.13	1.35	1.06	7.5
Field-9	7.28	0.37	0.07	19	4.5	1042	0.60	3.16	1.26	1.19	6.0
Field-10	7.25	2.30	0.05	16	3.2	1166	3.46	7.55	3.97	1.01	4.5

2) 2006년

원격탐사 반사율지표의 충족지수와 질소 시비수준의 회귀식으로부터 추천된 시비 추천량의 포장 실증시험을 위하여 2006년에는 2005년도의 포장위치와 다른 곳으로 청원군 지역에서 10개 농가포장을 선정하여 연초 묘(KF118)를 4월 19일 전후에 정식하였다. 질소시비수준에 대한 처리는 무비구, 표준시비구, 원격탐사시비-1구(시비효율 50% 적용), 원격탐사시비-2구(시비효율 70% 적용)의 4개 수준으로 처리구의 면적은 각각 18m² 씩 단일구로 하였다. 생육중반기 생체량 및 질소흡수량은 2005년도와 같이 각 처리구에서 3주씩 채취하고 수량은 처리구당 15주를 채취하여 조사하였다.

표 4-2b는 청원지역에서 선정된 연초재배포장 10개소의 토양화학성을 나타낸 것이다. 토양의 pH는 5.27 ~ 7.70으로 다양하게 분포되었고, 유기물 함량은 0.88% ~ 1.78%로서 대체로 낮은 경향이였다. 토양의 질소공급능력과 밀접한 질산태질소 함량은 최소 9 mg kg⁻¹에서 최대 23 mg kg⁻¹으로 고추재배포장의 경우보다 낮은 함량을 보였고, 유효인산은 268~1166 mg kg⁻¹, 치환성칼륨 0.16~3.46 cmol⁺ kg⁻¹으로 고추재배포장의 경우보다 훨씬 높은 함량을 보였다.

Table 4-2b. Chemical properties of experimental soils for tobacco cultivation in 2006

Field site	pH (1:5)	EC (dS/m)	OM g kg ⁻¹	NO ₃ -N ppm	NH ₄ -N mg/kg	P ₂ O ₅ mg/kg	Exch. Cation (cmol/kg)			CEC (cmol/kg)
							K	Ca	Mg	
Field-1	6.2	0.58	15.23	39.7	0.1	600	0.69	5.46	1.33	6.9
Field-2	6.9	0.34	21.24	9.8	10.7	386	0.66	9.13	2.09	11.1
Field-3	6.5	0.52	11.31	8.5	14.8	212	0.52	7.53	1.22	7.8
Field-4	6.0	0.89	15.69	21.3	10.4	546	1.48	6.82	2.45	10.7
Field-5	5.1	0.30	11.95	11.9	8.0	469	0.62	2.23	0.74	7.1
Field-6	6.2	0.22	4.37	18.6	5.3	105	0.19	13.29	2.66	7.9
Field-7	7.9	0.61	9.63	15.4	3.8	276	0.83	9.34	1.33	7.1
Field-8	7.3	0.58	10.96	4.2	4.2	304	0.81	7.87	1.85	7.8
Field-9	6.4	0.22	7.08	12.9	4.5	138	0.33	5.32	1.23	6.2
Field-10	6.4	0.19	7.09	6.6	3.2	308	0.73	4.55	0.51	5.4

3. 결과 및 고찰

가. 추천모델의 현장 활용성

1) 고추

표 4-3은 2005년 사경재배시험에서 이식후 74일째 Crop Circle ACS-210 센서의 aNDVI의 충족지수와 질소 시비수준의 회귀관계식(그림 3-23 참조)을 활용하여 이식후 60일째 Crop Circle ACS-210에 의하여 측정된 aNDVI의 충족지수로부터 질소시비수준을 추정하여 나타낸 것이다. 11개 포장의 반사율지표 aNDVI에 의한 충족지수는 0.71부터 0.98까지 분포되었으며 회귀식으로부터 추정된 시비비율은 기비 시용량의 0%에서 70%까지 분포되었으며 이 시비수준은 시비된 질소가 100% 이용된다는 가정에서의 기준이다. 따라서 시용된 질소의 시비효율을 70%로 가정하여 추정한 경우 질소 시비수준을 별도로 추가하였으며 이 경우 추천된 시비비율은 기비량의 0%에서 100%까지 추천되었다.

Table 4-3. Recommendation of N fertilizer based on sufficiency index by reflectance index of red pepper at the 60th DAP in 2005

Factor	Cheongwon area					Eumseong area					
	Field-1	Field-2	Field-3	Field-4	Field-5	Field-1	Field-2	Field-3	Field-4	Field-5	Field-6
Sufficiency index by aNDVI of Crop Circle	0.98	0.85	0.90	0.86	0.71	0.85	0.77	0.92	0.87	0.90	0.88
Reflectance-1 ⁽¹⁾	0	58	40	55	70	40	50	33	65	58	45
Reflectance-1 ⁽²⁾	0	83	57	78	100	57	71	47	93	83	64

Reflectance-1⁽¹⁾; application level of fertilizer recommended by reflectance test based on 100% of N fertilizer efficiency

Reflectance-1⁽²⁾; application level of fertilizer recommended by reflectance test based on 70% of N fertilizer efficiency

Table 4-4. Application level of fertilizer recommended by reflectance test for field experiment in 2005

Field site	Recomm Method	N(kg 10a ⁻¹)				Total	P ₂ O ₅ (kg 10a ⁻¹)		K ₂ O(kg 10a ⁻¹)		Compost (kg 10a ⁻¹)
		Basal 55%	Additional(45%)				Basal 100%	Basal 60%	Additional(40%)		
			1st(40%)	2nd(30%)	3rd(30%)				1st(50%)	2nd(50%)	
Cheongwon-1	Soil test ⁽¹⁾	13	4.1	3.1	3.1	23.0	20.3	19.9	6.6	6.6	33.1
	Reflectance-1 ⁽²⁾	0	0	0	0	0	20.3	19.9	6.6	6.6	33.1
	Reflectance-2 ⁽³⁾	0	0	0	0	0	20.3	19.9	6.6	6.6	33.1
	Farmer ⁽⁴⁾	13		10		22.6	10.2	10.2		13	23.2
Cheongwon-2	Soil test	11	3.4	2.6	2.6	19.1	9.8	16.7	5.6	5.6	27.9
	Reflectance-1	0	0	3.05	3.04	6.09	9.8	16.7	5.6	5.6	27.9
	Reflectance-2	0	0	4.36	4.36	8.72	9.8	16.7	5.6	5.6	27.9
	Farmer	17		12		28.8	13.6	13.6		12	25.6
Cheongwon-3	Soil test	9	2.8	2.1	2.1	15.5	6.4	16.7	5.6	5.6	27.9
	Reflectance-1	0	0	1.7	1.7	3.4	6.4	16.7	5.6	5.6	27.9
	Reflectance-2	0	0	2.43	2.42	4.85	6.4	16.7	5.6	5.6	27.9
	Farmer	13		10		22.6	10.2	10.2		13	23.2
Cheongwon-4	Soil test	11	3.4	2.6	2.6	19.1	23.5	19.6	6.5	6.5	32.6
	Reflectance-1	0	0	2.89	2.89	5.78	23.5	19.6	6.5	6.5	32.6
	Reflectance-2	0	0	4.1	4.09	8.19	23.5	19.6	6.5	6.5	32.6
	Farmer	13		10		22.6	10.2	10.2		10	20.2
Cheongwon-5	Soil test	11	3.4	2.6	2.6	19.1	13.1	12.1	3.4	3.4	18.9
	Reflectance-1	0	0	3.68	3.67	7.35	13.1	12.1	3.4	3.4	18.9
	Reflectance-2	0	0	5.3	5.2	10.5	13.1	12.1	3.4	3.4	18.9
	Farmer	15		10		24.7	11.9	11.9		9	19.9
Eunseong-1	Soil test	11	3.4	2.6	2.6	19.1	9.5	17.3	5.8	5.8	28.9
	Reflectance-1	0	0	3.05	3.04	6.09	9.5	17.3	5.8	5.8	28.9
	Reflectance-2	0	0	4.36	4.36	8.72	9.5	17.3	5.8	5.8	28.9
	Farmer	16		9.6		25.6	8	7		4.2	11.2
Eunseong-2	Soil test	11	3.4	2.6	2.6	19.1	17.2	18	6.0	6.0	30.0
	Reflectance-1	0	0	3.42	3.41	6.83	17.2	18	6.0	6.0	30.0
	Reflectance-2	0	0	4.89	4.88	9.77	17.2	18	6.0	6.0	30.0
	Farmer	16		9.6		25.6	11.2	7		4.2	11.2
Eunseong-3	Soil test	8	2.7	2.0	2.0	15.1	3	14.0	4.7	4.7	23.4
	Reflectance-1	0	0	1.34	1.33	2.77	3	14.0	4.7	4.7	23.4
	Reflectance-2	0	0	1.72	1.72	3.44	3	14.0	4.7	4.7	23.4
	Farmer	10		12.8		22.4	4.8	4.2		5.6	9.8
Eunseong-4	Soil test	13	4.1	3.1	3.1	22.8	9.7	16.1	5.4	5.4	26.9
	Reflectance-1	0	0	3.13	3.12	6.25	9.7	16.1	5.4	5.4	26.9
	Reflectance-2	0	0	4.44	4.44	8.88	9.7	16.1	5.4	5.4	26.9
	Farmer	6		6.4		12.8	3.2	2.8		2.8	5.4
Eunseong-5	Soil test	11	3.4	2.6	2.6	19.1	3.0	10.2	3.4	3.4	17.0
	Reflectance-1	0	0	2.1	2.1	4.2	3.0	10.2	3.4	3.4	17.0
	Reflectance-2	0	0	3	2.99	5.99	3.0	10.2	3.4	3.4	17.0
	Farmer	10		6.4		17.0	4.8	4.2		2.8	7.0
Eunseong-6	Soil test	11	3.4	2.6	2.6	19.1	12.7	16.7	5.6	5.6	27.9
	Reflectance-1	0	0	2.37	2.36	4.73	12.7	16.7	5.6	5.6	27.9
	Reflectance-2	0	0	3.36	3.36	6.72	12.7	16.7	5.6	5.6	27.9
	Farmer	21		8.6		29.6	25.4	33.4		11.6	45

Soil test⁽¹⁾; application level of fertilizer by soil testReflectance-1⁽²⁾; application level of fertilizer recommended by reflectance test based on 100% of N fertilizer efficiencyReflectance-2⁽³⁾; application level of fertilizer recommended by reflectance test based on 70% of N fertilizer efficiencyFarmer⁽⁴⁾; application level of fertilizer by farmer

Table 4-5. Yield of red pepper affected by application rate of N fertilizer recommended by reflectance test in 2005 experiment

Field site	Application method	Yield of red pepper (kg 10a ⁻¹)		Percent of yield to the plot of soil test	N rate (N kg 10a ⁻¹)	Percent of N rate to the plot of soil test
		FW	DW			
Cheongwon-1	No-fertilizer ⁽¹⁾	1914	373	99.7	0.0	0.0
	Soil test ⁽²⁾	1921	375	100.0	23.0	100.0
	Reflectance-1 ⁽³⁾	1914	373	99.7	0.0	0.0
	Reflectance-2 ⁽⁴⁾	1914	373	99.7	0.0	0.0
	Farmer ⁽⁵⁾	2027	385	102.8	22.6	98.3
Cheongwon-2	No-fertilizer	1454	273	73.9	0.0	0.0
	Soil test	1969	370	100.0	19.1	100.0
	Reflectance-1	1860	350	94.5	6.1	31.9
	Reflectance-2	1944	365	98.8	8.7	45.7
	Farmer	2063	388	104.8	28.8	150.8
Cheongwon-3	No-fertilizer	1461	278	69.0	0.0	0.0
	Soil test	2119	403	100.0	15.5	100.0
	Reflectance-1	1863	354	87.9	3.4	21.9
	Reflectance-2	1965	373	92.7	4.9	31.3
	Farmer	2168	412	102.3	22.6	145.8
Cheongwon-4	No-fertilizer	873	175	56.2	0.0	0.0
	Soil test	1554	311	100.0	19.1	100.0
	Reflectance-1	1143	229	73.5	5.8	30.3
	Reflectance-2	1290	258	83.0	8.2	42.9
	Farmer	1541	308	99.2	22.6	118.3
Cheongwon-5	No-fertilizer	1306	259	81.2	0.0	0.0
	Soil test	1607	318	100.0	19.1	100.0
	Reflectance-1	1526	302	95.0	7.4	38.5
	Reflectance-2	1632	323	101.5	10.5	55.0
	Farmer	1696	336	105.5	24.7	129.3
Eumseong-1	No-fertilizer	1293	259	78.5	0.0	0.0
	Soil test	1733	329	100.0	19.1	100.0
	Reflectance-1	1605	305	92.6	6.1	31.9
	Reflectance-2	1664	316	96.0	8.7	45.7
	Farmer	1864	354	107.6	25.6	134.0
Eumseong-2	No-fertilizer	1259	252	80.2	0.0	0.0
	Soil test	1569	314	100.0	19.1	100.0
	Reflectance-1	1484	297	94.6	6.8	35.8
	Reflectance-2	1505	301	95.9	9.8	51.2
	Farmer	1541	308	98.2	25.6	134.0
Eumseong-3	No-fertilizer	1409	282	75.3	0.0	0.0
	Soil test	1968	374	100.0	15.1	100.0
	Reflectance-1	1735	330	88.2	2.8	18.3
	Reflectance-2	1812	344	92.1	3.4	22.8
	Farmer	2032	386	103.2	22.4	148.3
Eumseong-4	No-fertilizer	1334	267	69.2	0.0	0.0
	Soil test	1978	386	100.0	22.8	100.0
	Reflectance-1	1688	329	85.3	6.3	27.4
	Reflectance-2	1913	373	96.7	8.9	38.9
	Farmer	1874	365	94.7	12.8	56.1
Eumseong-5	No-fertilizer	1288	251	68.8	0.0	0.0
	Soil test	1923	365	100.0	19.1	100.0
	Reflectance-1	1855	358	98.0	4.2	22.0
	Reflectance-2	1927	366	100.2	6.0	31.4
	Farmer	2032	382	104.6	17.0	89.0
Eumseong-6	No-fertilizer	1396	265	73.6	0.0	0.0
	Soil test	1801	360	100.0	19.1	100.0
	Reflectance-1	1829	338	93.9	4.7	24.8
	Reflectance-2	1806	334	92.8	6.7	35.2
	Farmer	1832	344	95.6	29.6	155.0

No-fertilizer⁽¹⁾; application with no fertilizer

Soil test⁽²⁾; application level of fertilizer by soil test

Reflectance-1⁽³⁾; application level of fertilizer recommended by reflectance test based on 100% of N fertilizer efficiency

Reflectance-2⁽⁴⁾; application level of fertilizer recommended by reflectance test based on 70% of N fertilizer efficiency

Farmer⁽⁵⁾; application level of fertilizer by farmer

표 4-4는 표 4-3에서 추정된 질소시비수준에 의하여, 즉 원격탐사센서 반사율지표의 충족지수로부터 추정된 질소 시비량을 포함한 농가시비구, 토양검정시비구의 실제로 사용된 질소시비량을 나타낸 것이다. 모든 포장의 인산과 칼리시비량은 토양검정에 의해 추정된 시비량을 처리 간에 동일하게 사용하였다. 질소의 시비효율을 70%로 가정하여 반사율지표에 의하여 추천한 전체 질소시비량은 토양검정 시비구의 전체시비량에 비하여 훨씬 적었다. 실제로 반사율지표에 의한 추천시비량이 가장 많았던 청원지역 포장5의 경우 원격탐사검정에 의한 전체 질소시비량, $10.5 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ 은 토양검정시비량, $19.1 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ 에 비하여 약 55%에 불과하였다.

표 4-5는 11개 포장조건에서 질소비료 시비추천 방법에 따른 고추수량을 비교하여 나타낸 것이다. 원격탐사센서 반사율지표에 의해 추정된 질소비료시비량이 토양검정에 의해 추정된 질소시비량에 비하여 55% 이하(표 4-5 참조)였던 것을 고려할 때 최종 수확된 고추수량은 반사율지표 검정시비구와 토양검정시비구 사이에 큰 차이를 보이지 않고 유사하였다. 고추의 질소비료 이용율을 70%로 간주하여 추천한 반사율지표 검정시비구의 고추수량을 토양검정 시비구에 대한 비율 값으로 비교해 볼 때 11개 포장 중 청원지역 포장4번의 경우만 83%의 수량을 보였고 청원지역 포장 3번과 음성지역 포장 3번 및 6번은 92-93%, 그리고 나머지 7개 포장의 경우는 95% 이상의 고추수량을 보였다. 질소시비량을 절반이하로 감소시키면서 토양검정 시비구와 유사한 고추수량을 확보한 이와 같은 결과로 미루어 원격탐사센서에 의한 질소시비 추천방법은 고추의 적정수량을 확보하면서 질소비료 과다시비에서 기인되는 환경오염 문제를 경감시킬 수 있는 친환경 농업의 기술로 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

2) 연초

표 4-6은 2005년 사경재배시험에서 이식후 35일째 반사율지표의 충족지수와 질소시비수준의 회귀관계식(그림 3-32 참조)을 활용하여 이식후 35일째 Crop Circle ACS-210에 의하여 측정된 aNDVI의 충족지수로부터 질소시비수준을 추정하여 나타낸 것이다. 10개 포장의 반사율지표 aNDVI에 의한 충족지수는 0.42부터 0.91까지 분포되었으며 사용된 질소의 시비효율을 70%로 가정하여 추정된 시비수준은 표준시비구 질소시비량의 13%에서 83%까지 분포되었다.

Table 4-6 Recommendation of N fertilizer based on sufficiency index by reflectance index of tobacco at the 35th day after planting in 2005

Factor	Field-1	Field-2	Field-3	Field-4	Field-5	Field-6	Field-7	Field-8	Field-9	Field-10
Sufficiency index by aNDM of Crop Circle	0.82	0.88	0.74	0.91	0.51	0.87	0.64	0.81	0.42	0.80
Reflectance-1 ⁽¹⁾	26	18	37	13	69	18	51	27	83	28

Reflectance-1⁽¹⁾; application level of fertilizer recommended by reflectance test based on 70% of N fertilizer efficiency

Table 4-7. Application level of fertilizer recommended by reflectance test for field experiment in 2005

Field	Method	N (kg 10a ⁻¹)			P ₂ O ₅ (kg 10a ⁻¹)			K ₂ O (kg 10a ⁻¹)		
		Basal	Additional	Total	Basal	Additional	Total	Basal	Additional	Total
Field-1	Recommended	10.0		10.0	5.0		5.0	30.0		30.0
	Reflectance-1 ⁽¹⁾	0.0	3.7	3.7	0.0	1.9	1.9	0.0	11.1	11.1
Field-2	Recommended	10.0		10.0	5.0		5.0	30.0		30.0
	Reflectance-1	0.0	2.6	2.6	0.0	1.3	1.3	0.0	7.7	7.7
Field-3	Recommended	10.0		10.0	5.0		5.0	30.0		30.0
	Reflectance-1	0.0	5.3	5.3	0.0	2.6	2.6	0.0	15.9	15.9
Field-4	Recommended	10.0		10.0	5.0		5.0	30.0		30.0
	Reflectance-1	0.0	1.9	1.9	0.0	0.9	0.9	0.0	5.6	5.6
Field-5	Recommended	10.0		10.0	5.0		5.0	30.0		30.0
	Reflectance-1	0.0	9.9	9.9	0.0	4.9	4.9	0.0	29.6	29.6
Field-6	Recommended	10.0		10.0	5.0		5.0	30.0		30.0
	Reflectance-1	0.0	2.6	2.6	0.0	1.3	1.3	0.0	7.7	7.7
Field-7	Recommended	10.0		10.0	5.0		5.0	30.0		30.0
	Reflectance-1	0.0	7.3	7.3	0.0	3.6	3.6	0.0	21.9	21.9
Field-8	Recommended	10.0		10.0	5.0		5.0	30.0		30.0
	Reflectance-1	0.0	3.9	3.9	0.0	1.9	1.9	0.0	11.6	11.6
Field-9	Recommended	10.0		10.0	5.0		5.0	30.0		30.0
	Reflectance-1	0.0	11.9	11.9	0.0	5.9	5.9	0.0	35.6	35.6
Field-10	Recommended	10.0		10.0	5.0		5.0	30.0		30.0
	Reflectance-1	0.0	4.0	4.0	0.0	2.0	2.0	0.0	12.0	12.0

Reflectance-1⁽¹⁾; application level of fertilizer recommended by reflectance test based on 70% of N fertilizer efficiency

표 4-7은 표 4-6에서 추정된 질소시비수준에 의하여, 즉 원격탐사센서 반사율지표의 충족지수로부터 추정된 질소 시비량을 포함한 표준시비구의 실제로 사용된 질소시비량을 나타낸 것이다. 질소를 제외한 인산 및 칼륨 시비량은 연초용 복합비료를 이용하였기 때문에 추천된 질소 시비량에 따라 다르게 사용되었다. 질소의 시비효율을 70%로 가정하여 반사율지표에 의하여 추천한 전체 질소시비량은 토양검정 시비구의 전체시비량에 비하여 대부분 적었으나 9번 포장은 오히려 표준시비량보다 약 19% 많게 추천되었다.

Table 4-8. Yield of tobacco affected by application rate of N fertilizer recommended by reflectance test in 2005 experiment

Field site	Application method	Yield (kg 10a ⁻¹)	Percent of yield to the plot of recomm.	N rate (N kg 10a ⁻¹)	Percent of N rate to the plot of soil test
Field-1	No-fertilizer ⁽¹⁾	285.7	93	0	0.0
	Reflectance ⁽²⁾	242.8	79	3.7	37.0
	Recommended ⁽³⁾	308.0	100	10.0	100.0
Field-2	No-fertilizer	260.8	91	0	0.0
	Reflectance	206.4	72	2.6	26.0
	Recommended	286.5	100	10.0	100.0
Field-3	No-fertilizer	115.2	52	0	0.0
	Reflectance	212.6	95	5.3	53.0
	Recommended	223.2	100	10.0	100.0
Field-4	No-fertilizer	151.8	64	0	0.0
	Reflectance	243.3	103	1.9	19.0
	Recommended	236.1	100	10.0	100.0
Field-5	No-fertilizer	196.2	94	0	0.0
	Reflectance	183.0	87	9.9	99.0
	Recommended	209.6	100	10.0	100.0
Field-6	No-fertilizer	189.5	91	0	0.0
	Reflectance	186.7	90	2.6	26.0
	Recommended	208.6	100	10.0	100.0
Field-7	No-fertilizer	217.0	66	0	0.0
	Reflectance	339.6	104	7.3	73.0
	Recommended	326.5	100	10.0	100.0
Field-8	No-fertilizer	243.2	91	0	0.0
	Reflectance	238.6	89	3.9	39.0
	Recommended	267.8	100	10.0	100.0
Field-9	No-fertilizer	90.7	33	0	0.0
	Reflectance	205.5	74	11.9	119.0
	Recommended	276.9	100	10.0	100.0
Field-10	No-fertilizer	122.4	55	0	0.0
	Reflectance	201.8	90	4.0	40.0
	Recommended	224.0	100	10.0	100.0

No-fertilizer⁽¹⁾; application with no fertilizer

Reflectance⁽²⁾; application level of fertilizer recommended by reflectance test based on 70% of N fertilizer efficiency

Recommended⁽³⁾; application level of fertilizer by recommendation

표 4-8은 10개 포장조건에서 질소비료 시비추천 방법에 따른 연초수량을 비교한 것이다. 원격탐사센서 반사율지표에 의해 추정된 질소비료시비량은 연초 표준 질소시비량의 13%~83%(표 4-7 참조)를 비료 이용율 70%를 적용하여 추천된 것을 고려할 때 최종 수확된 연초수량은 포장별로 시비추천방법 사이에 다양한 차이를 보였다. 연초

의 질소비료 이용율을 70%로 간주하여 추천한 반사율지표 검정시비구의 연초수량을 표준시비구에 대한 비율 값으로 비교해 볼 때 72%에서 102%까지 분포되었다. 보다 세분화하면 표준시비량의 87% 이상의 수량을 보인 포장은 7개소이었으며 나머지 3개 포장에서 72%, 74% 및 79%의 분포를 보였다. 원격탐사 검정에 의한 처리구에서 고추의 경우와는 달리 연초수량이 보다 낮게 분포된 이유로는 고추에 비하여 연초의 생육기간이 65일 정도로 짧기 때문에 이식후 35일경에 사용된 비료의 흡수 이용율이 낮기 때문으로 생각되었다.

나. 추천모델의 신뢰성 평가

1) 고추

Table 4-9. Recommendation of N fertilizer based on sufficiency index by reflectance index of red pepper at the 58th DAP in 2006

Factor	Boeun				Cheongwon					
	Field-1	Field-2	Field-3	Field-4	Field-1	Field-2	Field-3	Field-4	Field-5	Field-6
Sufficiency index by aNDVI of Crop Circle	0.92	1.01	1.00	0.89	0.99	0.98	0.97	0.96	0.96	0.85
Reflectance-1 ⁽¹⁾	11.3	0.0	0.0	22.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	38.7
Reflectance-1 ⁽²⁾	18.9	0.0	0.0	37.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	64.4

Recommendation level of N fertilizer-1 ; Percent of basal application rate of N fertilizer reflected by 100% of N fertilizer efficiency

Recommendation level of N fertilizer-2 ; Percent of basal application rate of N fertilizer reflected by 60% of N fertilizer efficiency

표 4-9는 2005년 사경제배시험에서 이식후 74일째 Crop Circle ACS-210 센서의 aNDVI의 충족지수와 질소 시비수준의 회귀관계식(그림 3-23 참조)을 활용하여 이식후 58일째 Crop Circle ACS-210에 의하여 측정된 aNDVI의 충족지수로부터 질소시비수준을 추정하여 나타낸 것이다. 10개 포장의 반사율지표 aNDVI에 의한 충족지수는 0.85부터 1.01까지 분포되었으며 회귀식으로부터 추정된 시비비율은 기비 사용량의 0%에서 38.7%까지 분포되었으며 이 시비수준은 시비된 질소가 100% 이용된다는 가정에서의 기준이다. 따라서 사용된 질소의 시비효율을 60%로 가정하여 추정한 경우 질소 시비수준을 별도로 추가하였으며 이 경우 추천된 시비비율은 기비량의 0%에서 64.4%까지 추천되었다. 그리고 1차 추비를 사용한 이후 2차 추비량을 결정하기 위하여 이식후 86일째 Crop Circle ACS-210에 의하여 측정된 aNDVI의 충족지수로부터 질소시비수준을 추정하여 표 4-10에 나타냈다. 그러나 2차 추비를 위한 원격탐사 검정에 의한 질

소 시비비율은 모든 처리구에서 0%를 보였다. 이는 2006년도에 선정된 시험포장의 비옥도가 좋았기 때문으로 생각되며 토양화학성의 비교(4-1a 및 4-1b)에서 2006년의 경우 무기태 질소함량 및 양이온치환용량 등의 화학성이 더 양호했던 결과와 또한 2006년의 경우 모든 처리구에서 2005년보다 훨씬 많은 퇴비가 시용된 결과(표 4-4와 4-11 참조)로부터 기인되었기 때문으로 생각된다.

Table 4-10. Recommendation of N fertilizer based on sufficiency index by reflectance index of red pepper at the 86th DAP in 2006

Factor	Boeun				Cheongwon					
	Field-1	Field-2	Field-3	Field-4	Field-1	Field-2	Field-3	Field-4	Field-5	Field-6
Sufficiency index by aNDVI of Crop Circle	1.00	0.98	0.96	0.95	0.97	0.98	0.97	0.96	1.03	0.97
Reflectance-1 ⁽¹⁾	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Reflectance-1 ⁽²⁾	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Reflectance-1⁽¹⁾; application level of fertilizer recommended by reflectance test based on 100% of N fertilizer efficiency

Reflectance-1⁽²⁾; application level of fertilizer recommended by reflectance test based on 60% of N fertilizer efficiency

표 4-11은 표 4-9에서 추정된 질소시비수준에 의하여, 즉 원격탐사센서 반사율지표의 충족지수로부터 추정된 질소 시비량을 포함한 농가시비구, 토양검정시비구의 실제로 시용된 질소시비량을 나타낸 것이다. 모든 포장의 인산과 칼리시비량은 토양검정에 의해 추정된 시비량을 처리 간에 동일하게 시용하였다. 질소의 시비효율을 60%로 가정하여 반사율지표에 의하여 추천한 전체 질소시비량은 토양검정 시비구의 전체시비량에 비하여 훨씬 적었다. 실제로 반사율지표에 의한 추천시비량이 가장 많았던 음성지역 포장6의 경우 원격탐사검정에 의한 전체 질소시비량, 15.0 kg 10a⁻¹은 토양검정시비량, 19.2 kg 10a⁻¹에 비하여 약 78%에 불과하였다. 2006년의 시비량이 2005년과 비교하여 다른 점은 음성지역 포장 5번과 6번을 제외하고 모든 처리구에 퇴비가 2000kg ~ 4000kg 10a⁻¹씩 시용된 점이다. 이는 200년의 경우 1차 추비량 결정을 위한 원격탐사검정에 의한 추천 시비비율이 2005년보다 낮게 평가되는 결과와 86일째 2차 검정에서 추천 시비비율이 0%로 평가된 점과 밀접하게 관련되었다.

Table 4-11. Application level of fertilizer recommended by reflectance test for red pepper field experiment in 2006

Field site	Recomm Method	N (kg 10a ⁻¹)			P ₂ O ₅ (kg 10a ⁻¹)		K ₂ O (kg 10a ⁻¹)			Compost (kg 10a ⁻¹)	
		Basal 55%	Additional(45%)		Total	Basal 100%	Basal 60%	Additional(40%)			Total
			1st(40%)	2nd(30%)				1st(50%)	2nd(50%)		
Boeun-1	Soil test ⁽¹⁾	7.3	3.1	2.6	13.1	14.1	9.5	3.5	3.5	16.5	2000
	Reflectance-1 ⁽²⁾		1.2		1.2	14.1	9.5	3.5	3.5	16.5	2000
	Reflectance-2 ⁽³⁾		1.9		1.9	14.1	9.5	3.5	3.5	16.5	2000
	Farmer ⁽⁴⁾	14.4		7.2	21.6	5.6	7.2		7.2	14.4	2000
Boeun-2	Soil test	7.6	3.3	2.7	13.6	15	2.4	0.9	0.9	4.2	3000
	Reflectance-1				0.0	15	2.4	0.9	0.9	4.2	3000
	Reflectance-2				0.0	15	2.4	0.9	0.9	4.2	3000
	Farmer	10		7.2	17.2	11	9		7.2	16.2	3000
Boeun-3	Soil test	10.5	4.5	3.8	18.8	24.7	11.7	4.3	4.3	20.3	2000
	Reflectance-1				0.0	24.7	11.7	4.3	4.3	20.3	2000
	Reflectance-2				0.0	24.7	11.7	4.3	4.3	20.3	2000
	Farmer	18		7.2	25.2	7	9		7.2	16.2	2000
Boeun-4	Soil test	7.6	3.3	2.7	13.6	11.4	7.9	2.9	2.9	13.7	2000
	Reflectance-1		2.5		2.5	11.4	7.9	2.9	2.9	13.7	2000
	Reflectance-2		5.1		5.1	11.4	7.9	2.9	2.9	13.7	2000
	Farmer	14.4		8.1	22.5	5.6	7.2	8.1		15.3	2000
Eumseong-1	Soil test	10.5	3.5	2.6	19.2	0	13.7	4.6	4.6	22.9	4000
	Reflectance-1				0.0	0	13.7	4.6	4.6	22.9	4000
	Reflectance-2				0.0	0	13.7	4.6	4.6	22.9	4000
	Farmer	12		9.6	21.6	4.8	4.2	5.6		9.8	4000
Eumseong-2	Soil test	10.5	3.5	2.6	19.2	7.4	15.2	5.1	5.1	25.4	3000
	Reflectance-1				0.0	7.4	15.2	5.1	5.1	25.4	3000
	Reflectance-2				0.0	7.4	15.2	5.1	5.1	25.4	3000
	Farmer	16		9.6	25.6	11.2	7	4.2		11.2	3000
Eumseong-3	Soil test	10.5	3.5	2.6	19.2	15.8	17.8	6	6	29.8	4000
	Reflectance-1				0.0	15.8	17.8	6	6	29.8	4000
	Reflectance-2				0.0	15.8	17.8	6	6	29.8	4000
	Farmer	15.4		12.8	28.2	10.8	4.2	5.6		9.8	4000
Eumseong-4	Soil test	10.5	3.5	2.6	19.2	3	10.9	3.7	3.7	18.3	4000
	Reflectance-1				0.0	3	10.9	3.7	3.7	18.3	4000
	Reflectance-2				0.0	3	10.9	3.7	3.7	18.3	4000
	Farmer	9.6		6.4	16.0	3.2	2.8	2.8		5.4	4000
Eumseong-5	Soil test	10.5	3.5	2.6	19.2	12.3	13	4.4	4.4	21.8	0
	Reflectance-1				0.0	12.3	13	4.4	4.4	21.8	0
	Reflectance-2				0.0	12.3	13	4.4	4.4	21.8	0
	Farmer	6.4		6.4	12.8	4.8	4.2	2.8		7.0	4000
Eumseong-6	Soil test	10.5	3.5	2.6	19.2	10.2	15.2	5.1	5.1	25.4	0
	Reflectance-1		12.0		12.0	10.2	15.2	5.1	5.1	25.4	0
	Reflectance-2		15.0		15.0	10.2	15.2	5.1	5.1	25.4	0
	Farmer	21		8.6	29.6	25.4	33.4	11.6		45	3000

Soil test⁽¹⁾; application level of fertilizer by soil test

Reflectance-1⁽²⁾; application level of fertilizer recommended by reflectance test based on 100% of N fertilizer efficiency

Reflectance-2⁽³⁾; application level of fertilizer recommended by reflectance test based on 60% of N fertilizer efficiency

Farmer⁽⁴⁾; application level of fertilizer by farmer

Table 4-12. Yield of red pepper affected by application rate of N fertilizer recommended by reflectance test in 2006 experiment

Field site	Application method	Yield(kg 10a ⁻¹)		Percent of yield to the plot of soil test	N rate (N kg 10a ⁻¹)	Percent of N rate to the plot of soil test
		FW	DW			
Boeun-1	No-fertilizer ⁽¹⁾	905	181	59.4	0.0	0.0
	Reflectance-1 ⁽²⁾	1393	279	91.4	1.2	9.2
	Reflectance-2 ⁽³⁾	1429	286	93.8	1.9	14.5
	Soil test ⁽⁴⁾	1524	305	100.0	13.1	100.0
Boeun-2	No-fertilizer	1364	273	60.8	0.0	0.0
	Reflectance-1	2273	455	101.4	0.0	0.0
	Reflectance-2	2167	433	96.7	0.0	0.0
	Soil test	2242	448	100.0	13.6	100.0
Boeun-3	No-fertilizer	1000	200	61.1	0.0	0.0
	Reflectance-1	1515	303	92.6	0.0	0.0
	Reflectance-2	1515	303	92.6	0.0	0.0
	Soil test	1636	327	100.0	18.8	100.0
Boeun-4	No-fertilizer	750	150	51.0	0.0	0.0
	Reflectance-1	1194	239	81.1	2.5	18.4
	Reflectance-2	1306	261	88.7	5.1	37.5
	Soil test	1472	294	100.0	13.6	100.0
Eumseong-1	No-fertilizer	1653	331	78.2	0.0	0.0
	Reflectance-1	1905	381	90.1	0.0	0.0
	Reflectance-2	2049	410	96.9	0.0	0.0
	Soil test	2115	423	100.0	19.2	100.0
Eumseong-2	No-fertilizer	---	---	---	---	---
	Reflectance-1	---	---	---	---	---
	Reflectance-2	---	---	---	---	---
	Soil test	---	---	---	---	---
Eumseong-3	No-fertilizer	2108	422	90.1	0.0	0.0
	Reflectance-1	2363	473	101.0	0.0	0.0
	Reflectance-2	2352	470	100.6	0.0	0.0
	Soil test	2339	468	100.0	19.2	100.0
Eumseong-4	No-fertilizer	1946	389	83.3	0.0	0.0
	Reflectance-1	2412	482	103.3	0.0	0.0
	Reflectance-2	2445	489	104.7	0.0	0.0
	Soil test	2335	467	100.0	19.2	100.0
Eumseong-5	No-fertilizer	1127	225	89.3	0.0	0.0
	Reflectance-1	1313	263	104.1	0.0	0.0
	Reflectance-2	1343	269	106.4	0.0	0.0
	Soil test	1262	252	100.0	19.2	100.0
Eumseong-6	No-fertilizer	1122	224	77.7	0.0	0.0
	Reflectance-1	1271	254	87.9	12.0	62.5
	Reflectance-2	1418	284	98.1	15.0	78.1
	Soil test	1445	289	100.0	19.2	100.0

No-fertilizer⁽¹⁾; application with no fertilizer

Reflectance-1⁽²⁾; application level of fertilizer recommended by reflectance test based on 100% of N fertilizer efficiency

Reflectance-2⁽³⁾; application level of fertilizer recommended by reflectance test based on 60% of N fertilizer efficiency

Soil test⁽⁴⁾; application level of fertilizer by soil test

표 4-12는 10개 포장조건에서 질소비료 시비추천 방법에 따른 고추수량을 비교하여 나타낸 것이다. 선정된 포장 중에서 보은지역 포장 2번은 불행히도 고추의 병해발생으로 수량을 조사할 수 없었다. 원격탐사센서 반사율지표에 의해 추정된 질소비료 시비량이 토양검정에 의해 추정된 질소시비량에 비하여 78% 이하(표 4-12 참조)였던 것을 고려할 때 최종 수확된 고추수량은 반사율지표 검정시비구와 토양검정 시비구 사이에 큰 차이를 보이지 않고 유사하였다. 고추의 질소비료 이용율을 60%로 간주하여 추천한 반사율지표 검정시비구의 고추수량을 토양검정 시비구에 대한 비율 값으로 비교해 볼 때 10개 포장 중 보은지역 포장4번의 경우만 88.7%의 수량을 보였고 보은지역 포장 1번과 3번이 각각 93.8% 및 92.6%의 수량을 보였고 나머지 포장에서는 96.9% ~ 106.4%의 고추수량을 보였다. 2005년의 결과와 마찬가지로 질소시비량을 감소시키면서 토양검정 시비구와 유사한 고추수량을 확보한 이와 같은 결과로 미루어 원격탐사검정법에 의한 질소시비 추천방법은 고추의 적정수량을 확보하면서 질소비료 과다시비에서 기인되는 환경오염 문제를 경감시킬 수 있는 친환경 농업의 기술로 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

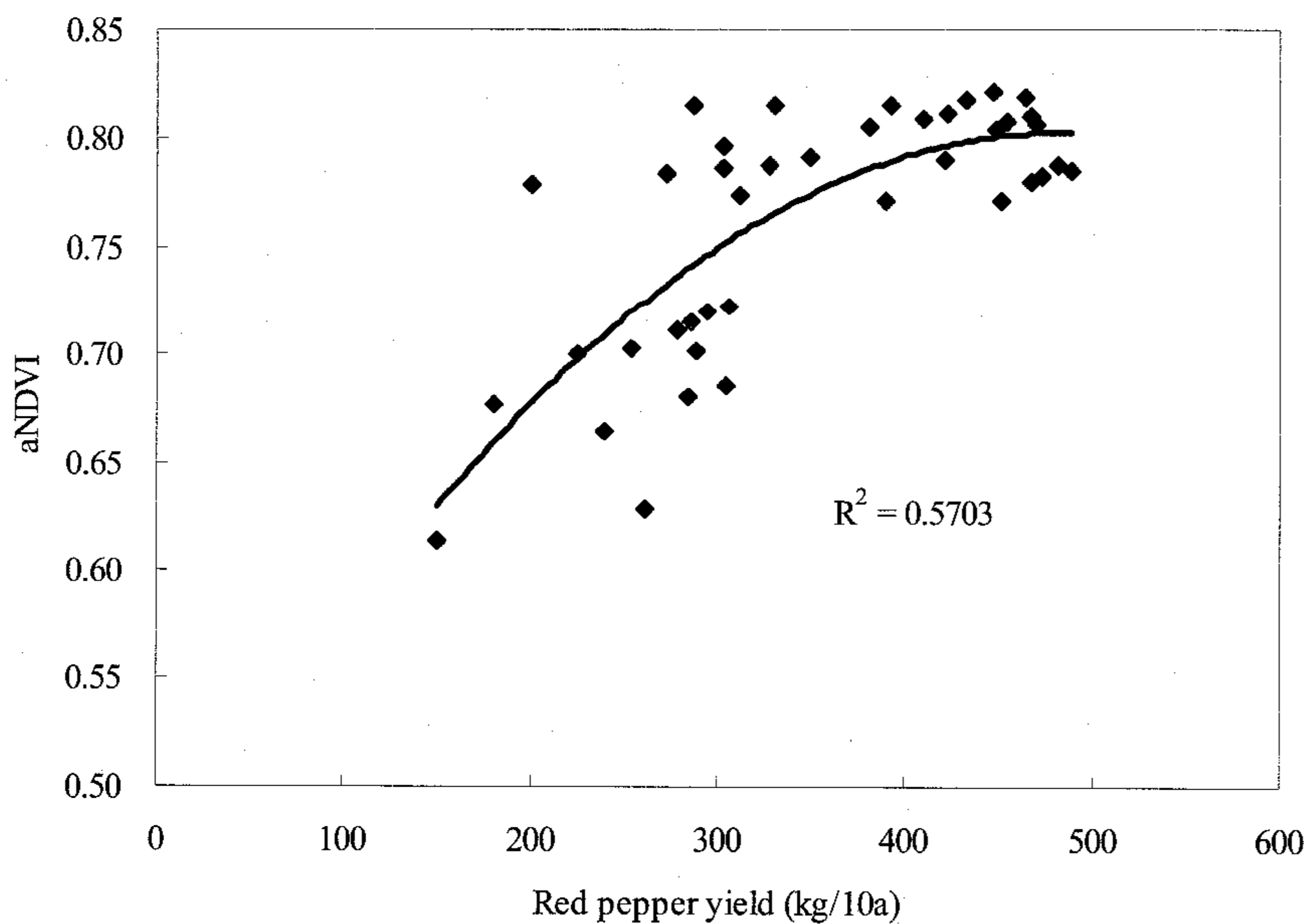


Fig. 4-1 Relationship between red pepper yield and aNDVI by Crop Circle ACS-210 at the 58th day after planting in 2006.

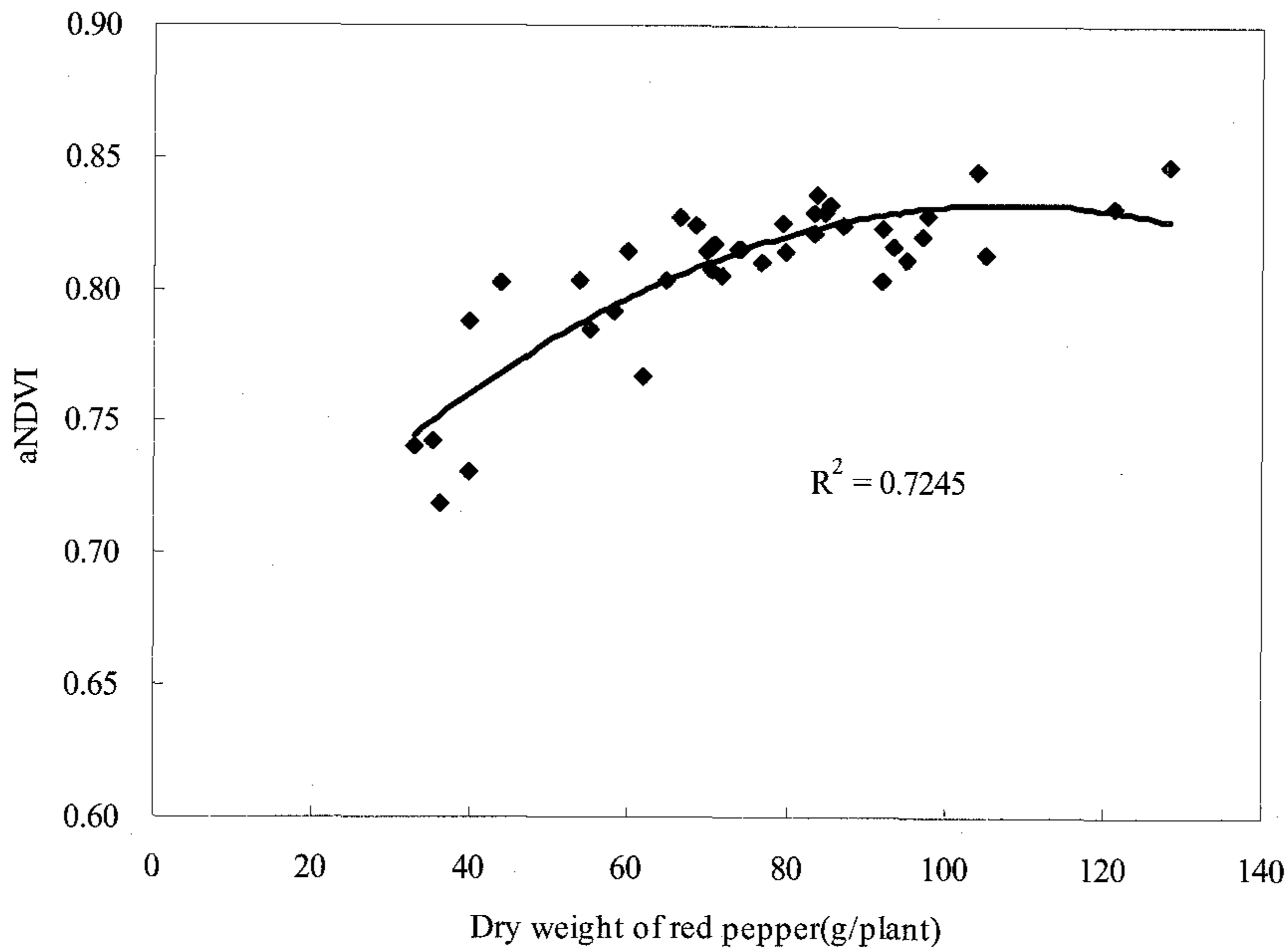


Fig. 4-2. Relationship between dry weight of red pepper and aNDVI by Crop Circle ACS-210 at the 86th day after planting in 2006

그림 4-1과 4-2는 포장조건에 대한 효율적인 센서로 평가된 Crop Circle ACS-210 센서의 이식후 58일째와 86일째 aNDVI와 최종 고추수량과의 상호관계를 각각 나타낸 것이다. 이 반사율지표에 의해 고추의 최종 수량은 이식후 54일째에 57%, 86일째에 72%를 설명하며 매우 밀접한 회귀관계를 보였다. 이러한 결과는 이 지표의 충족지수를 이용하여 질소 시비량을 추천한 결과에서 고추의 생산성이 토양검정시비구와 비슷하였던 결과와 밀접하게 관련된다고 생각된다.

2) 연초

표 4-13은 2005년 사경제배시험에서 이식후 35일째 반사율지표의 충족지수와 질소 시비수준의 회귀관계식(그림 3-32 참조)을 활용하여 이식후 28일째 Crop Circle ACS-210에 의하여 측정된 aNDVI의 충족지수로부터 질소시비수준을 추정하여 나타낸 것이다. 2005년의 경우와 유사하게 10개 포장의 반사율지표 aNDVI에 의한 충족지수는 0.62부터 0.93까지 분포되었다. 2005년의 활용성 검토에서 적용하였던 시비효율

70% 조건은 짧은 재배기간을 고려할 때 다소 부족한 것으로 판단되어 시비효율의 조건을 70% 이외에 50% 조건을 추가하여 추정하였다. 70% 시비효율을 적용하여 추정된 시비수준은 표준 질소시비량의 4%에서 129%까지, 50% 시비효율을 적용하여 추정된 시비수준은 5%에서 181%까지 분포되었다.

Table 4-13. Recommendation of N fertilizer based on sufficiency index by reflectance index of tobacco at the 28th day after planting in 2006

Factor	Field-1	Field-2	Field-3	Field-4	Field-5	Field-6	Field-7	Field-8	Field-9	Field-10
Sufficiency index by aNDM of Crop Circle	0.87	0.93	0.90	0.85	0.75	0.88	0.90	0.62	0.76	0.71
Reflectance-1 ⁽¹⁾	50	4	36	58	95	43	35	129	91	106
Reflectance-2 ⁽²⁾	71	5	50	82	133	60	50	181	128	149

Reflectance-1⁽¹⁾; application level of fertilizer recommended by reflectance test based on 70% of N fertilizer efficiency

Reflectance-2⁽²⁾; application level of fertilizer recommended by reflectance test based on 50% of N fertilizer efficiency

표 4-14는 표 4-13에서 추정된 질소시비수준에 의하여, 즉 원격탐사센서 반사율지표의 충족지수로부터 추정된 질소 시비량을 포함한 표준시비구의 실제로 사용된 질소 시비량을 나타낸 것이다. 질소를 제외한 인산 및 칼륨 시비량은 연초용 복합비료를 이용하였기 때문에 추천된 질소 시비량에 따라 다르게 사용되었다. 질소의 시비효율을 70%로 적용하여 반사율지표에 의하여 추천한 전체 질소시비량은 토양검정 시비구의 전체시비량에 비하여 대부분 적었으나 8번 포장과 10번 포장은 오히려 표준시비량보다 약 29% 및 6% 많게 추천되었다. 그리고 50% 시비효율을 적용하여 추천된 시비량은 5번, 8번, 9번 및 10번 포장에서 표준시비량보다 28%에서 81%까지 많게 추천되었다.

표 4-15는 질소 시비량 추천에 적용한 원격탐사 반사율지표의 적정성을 확인하기 위하여 연초 이식후 28일째 측정된 active형 센서들에 의한 여러 가지 반사율지표들과 성숙기인 이식후 54일째 및 수확기 연초 수량과의 상관계수를 나타낸 것이다. 성숙기의 생체량 및 수확후 연초 수량을 가장 효율적으로 평가한 반사율지표는 역시 Crop Circle ACS-210 센서의 aNDVI로 가장 밀접한 관계를 보였다(그림 4-3 및 4-4). 이러한 결과는 질소시비량 추천모델의 반사율지표로 고추에서도 동일하게 Crop Circle ACS-210 센서의 aNDVI가 적용된 결과와 일치하고 있다.

Table 4-14. Application level of fertilizer recommended by reflectance test for tobacco field experiment in 2006

Field	Method	N (kg 10a ⁻¹)			P ₂ O ₅ (kg 10a ⁻¹)			K ₂ O (kg 10a ⁻¹)		
		Basal	Additional	Total	Basal	Additional	Total	Basal	Additional	Total
Field-1	Recommended	10.0		10.0	5.0		5.0	30.0		30.0
	Reflectance-1 ⁽¹⁾	0.0	5.0	5.0	0.0	2.5	2.5	0.0	15.1	15.1
	Reflectance-2 ⁽²⁾	0.0	7.1	7.1	0.0	3.5	3.5	0.0	21.2	21.2
Field-2	Recommended	10.0		10.0	5.0		5.0	30.0		30.0
	Reflectance-1	0.0	0.4	0.4	0.0	0.2	0.2	0.0	1.2	1.2
	Reflectance-2	0.0	0.5	0.5	0.0	0.3	0.3	0.0	1.6	1.6
Field-3	Recommended	10.0		10.0	5.0		5.0	30.0		30.0
	Reflectance-1	0.0	3.6	3.6	0.0	1.8	1.8	0.0	10.7	10.7
	Reflectance-2	0.0	5.0	5.0	0.0	2.5	2.5	0.0	15.0	15.0
Field-4	Recommended	10.0		10.0	5.0		5.0	30.0		30.0
	Reflectance-1	0.0	5.8	5.8	0.0	2.9	2.9	0.0	17.5	17.5
	Reflectance-2	0.0	8.2	8.2	0.0	4.1	4.1	0.0	24.5	24.5
Field-5	Recommended	10.0		10.0	5.0		5.0	30.0		30.0
	Reflectance-1	0.0	9.5	9.5	0.0	4.8	4.8	0.0	28.5	28.5
	Reflectance-2	0.0	13.3	13.3	0.0	6.7	6.7	0.0	39.9	39.9
Field-6	Recommended	10.0		10.0	5.0		5.0	30.0		30.0
	Reflectance-1	0.0	4.3	4.3	0.0	2.1	2.1	0.0	12.8	12.8
	Reflectance-2	0.0	6.0	6.0	0.0	3.0	3.0	0.0	18.0	18.0
Field-7	Recommended	10.0		10.0	5.0		5.0	30.0		30.0
	Reflectance-1	0.0	3.5	3.5	0.0	1.8	1.8	0.0	10.6	10.6
	Reflectance-2	0.0	5.0	5.0	0.0	2.5	2.5	0.0	14.9	14.9
Field-8	Recommended	10.0		10.0	5.0		5.0	30.0		30.0
	Reflectance-1	0.0	12.9	12.9	0.0	6.5	6.5	0.0	38.8	38.8
	Reflectance-2	0.0	18.1	18.1	0.0	9.1	9.1	0.0	54.3	54.3
Field-9	Recommended	10.0		10.0	5.0		5.0	30.0		30.0
	Reflectance-1	0.0	9.1	9.1	0.0	4.6	4.6	0.0	27.4	27.4
	Reflectance-2	0.0	12.8	12.8	0.0	6.4	6.4	0.0	38.4	38.4
Field-10	Recommended	10.0		10.0	5.0		5.0	30.0		30.0
	Reflectance-1	0.0	10.6	10.6	0.0	5.3	5.3	0.0	31.8	31.8
	Reflectance-2	0.0	14.9	14.9	0.0	7.5	7.5	0.0	44.7	44.7

Reflectance-1⁽¹⁾; Percent of basal application rate of N fertilizer reflected by 50% of N fertilizer efficiency

Reflectance-2⁽²⁾; Percent of basal application rate of N fertilizer reflected by 70% of N fertilizer efficiency

Table 4-15. Correlation coefficient between reflectance index at the 28th day after planting(DAP) and biomass at the 56th DAP and yield(n=27)

Sensor	Index	56th day after planting				Yield
		DW of leaves	N-uptake	P-uptake	K-uptake	
GreenSeeker	rNDVI	0.737	0.609	0.616	0.660	0.595
GreenSeeker	gNDVI	0.707	0.635	0.597	0.691	0.423
Crop Circle (ACS210)	rNDVI	0.754	0.606	0.654	0.696	0.599
Crop Circle (ACS210)	aNDVI	0.800	0.643	0.682	0.751	0.705
Crop Circle (ACS210)	NIR/red	0.785	0.642	0.702	0.708	0.632
Crop Circle (ACS210)	NIR/amber	0.778	0.644	0.649	0.699	0.648

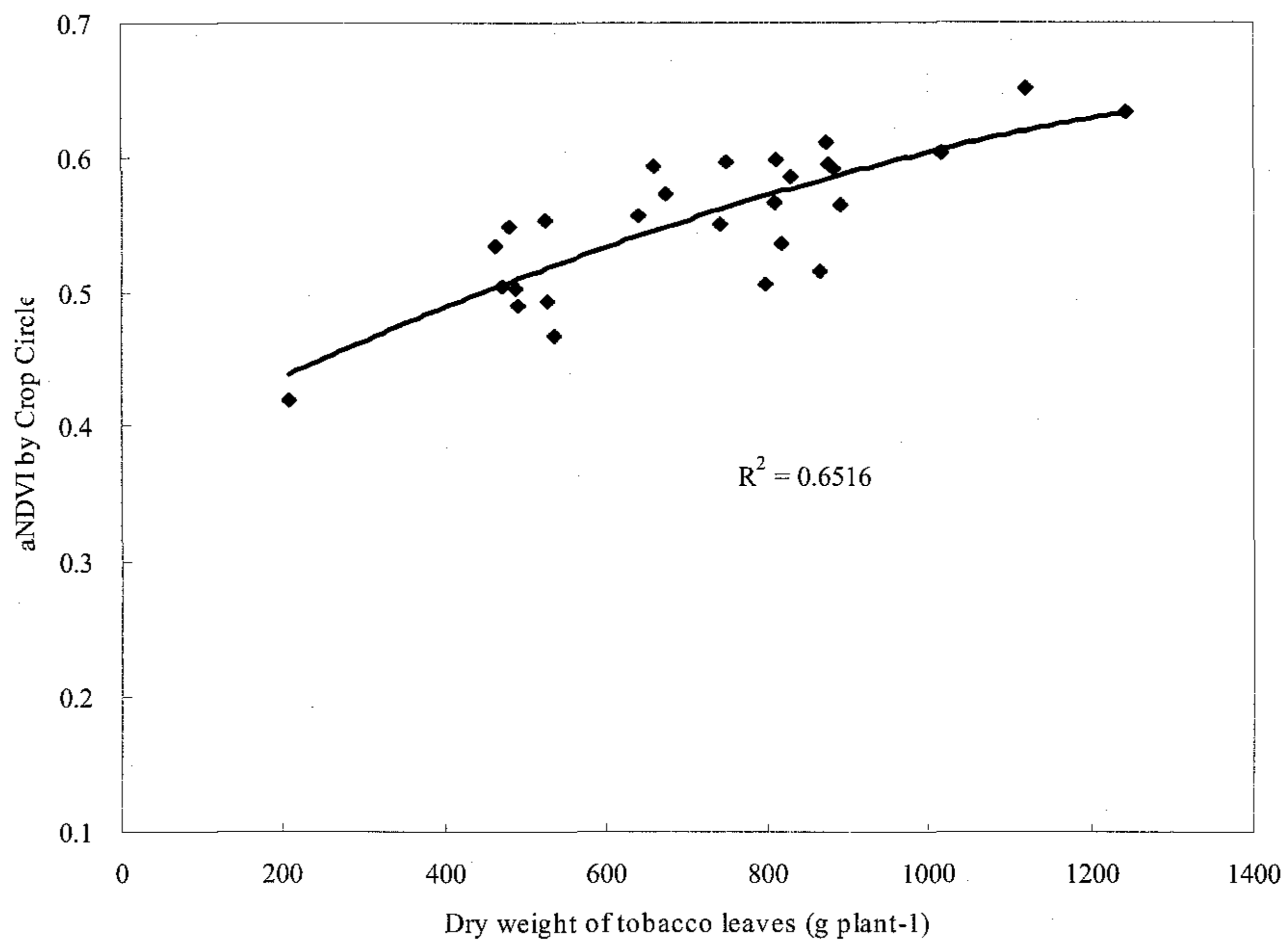


Fig. 4-3. Relationship between dry weight of tobacco leaves at the 56th day after planting and reflectance index at the 28th day after planting in 2006.

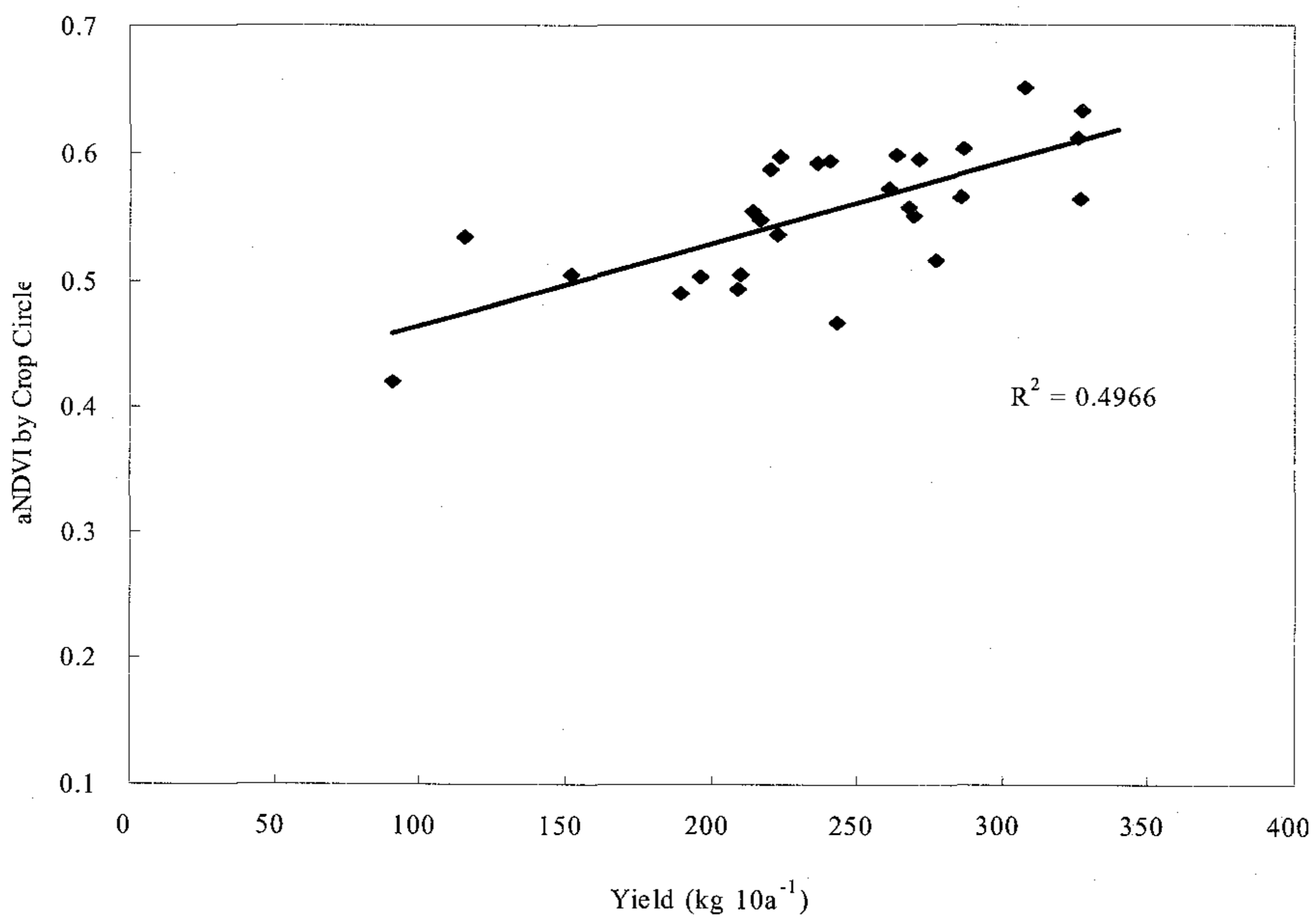


Fig. 4-4. Relationship between tobacco yield and reflectance index by Crop Circle ACS210 at the 28th day after planting in 2006.

Table 4-16. Yield of tobacco affected by application rate of N fertilizer recommended by reflectance test in 2006 experiment

Field site	Application method	Yield(kg 10a ⁻¹)	Percent of yield to the plot of recomm	N rate (N kg 10a ⁻¹)	Percent of N rate to the plot of soil test
Field-1	No-fertilizer ⁽¹⁾	285.7	93	0	0.0
	Reflectance-1 ⁽²⁾	242.8	79	5.0	50.4
	Reflectance-2 ⁽³⁾	295.4	96	7.1	70.5
	Recommended ⁽⁴⁾	308.0	100	10.0	100.0
Field-2	No-fertilizer	260.8	91	0	0.0
	Reflectance-1	206.4	72	0.4	3.8
	Reflectance-2	215.6	75	0.5	5.4
	Recommended	286.5	100	10.0	100.0
Field-3	No-fertilizer	115.2	52	0	0.0
	Reflectance-1	212.6	95	3.6	35.7
	Reflectance-2	198.8	89	5.0	50.0
	Recommended	223.2	100	10.0	100.0
Field-4	No-fertilizer	151.8	64	0	0.0
	Reflectance-1	243.3	103	5.8	58.4
	Reflectance-2	207.9	88	8.2	81.8
	Recommended	236.1	100	10.0	100.0
Field-5	No-fertilizer	196.2	94	0	0.0
	Reflectance-1	183.0	87	9.5	95.0
	Reflectance-2	204.1	97	13.3	133.0
	Recommended	209.6	100	10.0	100.0
Field-6	No-fertilizer	189.5	91	0	0.0
	Reflectance-1	186.7	90	4.3	42.8
	Reflectance-2	185.6	89	6.0	59.9
	Recommended	208.6	100	10.0	100.0
Field-7	No-fertilizer	217.0	66	0	0.0
	Reflectance-1	339.6	104	3.5	35.5
	Reflectance-2	317.6	97	5.0	49.6
	Recommended	326.5	100	10.0	100.0
Field-8	No-fertilizer	243.2	91	0	0.0
	Reflectance-1	238.6	89	12.9	129.3
	Reflectance-2	304.7	114	18.1	181.0
	Recommended	267.8	100	10.0	100.0
Field-9	No-fertilizer	90.7	33	0	0.0
	Reflectance-1	205.5	74	9.1	91.4
	Reflectance-2	172.4	62	12.8	128.0
	Recommended	276.9	100	10.0	100.0
Field-10	No-fertilizer	122.4	55	0	0.0
	Reflectance-1	201.8	90	10.6	106.0
	Reflectance-2	202.9	91	14.9	149.0
	Recommended	224.0	100	10.0	100.0

No-fertilizer⁽¹⁾; application with no fertilizer

Reflectance-1⁽²⁾; Percent of basal application rate of N fertilizer reflected by 70% of N fertilizer efficiency

Reflectance-2⁽³⁾; Percent of basal application rate of N fertilizer reflected by 50% of N fertilizer efficiency

Recommended⁽⁴⁾; application level of fertilizer by recommendation

표 4-16은 10개 포장조건에서 질소비료 시비추천 방법에 따른 연초수량을 비교한 것이다. 원격탐사센서 반사율지표에 의해 추정된 질소비료 시비량은 시비효율을 70%로 적용한 경우 연초 표준 질소시비량의 4%~129%, 50%의 시비효율을 적용한 경우 5%~181%까지 다양하게 처리하였으나 최종 수확된 연초수량은 포장별로 시비추천방법 사이에 다양한 차이를 보였다. 즉 연초의 질소비료 이용율을 50%로 적용한 경우는 70%로 적용한 경우보다 시비량 증가를 고려할 경우 연초 수량이 증가되지 않아 시비효율을 70%로 적용하는 것이 바람직 할 것으로 생각되었다. 연초의 질소비료 이용율을 70%로 간주하여 추천한 반사율지표 검정시비구의 연초수량을 표준시비구에 대한 비율 값으로 비교해 볼 때 72%에서 104%까지 분포되었다. 보다 세분화하면 표준시비량의 87% 이상의 수량을 보인 포장은 7개소이었으며 나머지 3개 포장에서 72%, 74% 및 79%의 분포를 보여 2005년의 경우와 거의 비슷한 결과를 보였다. 이는 고추의 경우와 달리 연초의 생육기간이 65일 정도로 짧기 때문에 이식후 28일경에 사용된 비료의 흡수 이용율은 이식전 기비로 처리한 표준시비구의 생산정보다 낮았던 것으로 생각되었다.

4. 적요

고추와 연초 두 작물에 대하여 원격탐사 active형 Crop Circle ACS-210 센서의 aNDVI에 의하여 확립된 질소 시비비율의 추천모델을 포장조건에서 신뢰도를 평가하기 위하여 무비구, 토양검정시비구 및 원격탐사 검정시비구로 구분하여 비교하였다.

고추에 대한 원격탐사 검정시비구는 2005년의 경우 11개 포장에서 이식후 60일째 aNDVI에 의한 충족지수가 0.71~0.98의 분포를 보였고 추천모델식에 의한 질소 시비비율은 비료이용율을 70%로 적용하였을 때 고추 시비량의 0%~100%까지 추천되었다. 2006년의 경우 10개 포장에서 이식후 58일째 aNDVI에 의한 충족지수는 0.85~1.01의 분포를 보였고 추천모델에 의한 질소 시비비율은 비료이용율을 60%로 적용하였을 때 0%~64.4%의 분포를 보였다. 최종 수확된 고추수량은 2005년과 2006년 공히 반사율지표 검정시비구와 토양검정시비구 사이에 큰 차이를 보이지 않고 유사하였다. 따라서 원격탐사센서에 의한 질소시비 추천방법은 고추의 적정수량을 확보하면서 질소비료

과다시비에서 기인되는 환경오염 문제를 경감시킬 수 있는 친환경 농업의 기술로 적용 가능함을 확인할 수 있었다.

연초에 대한 원격탐사 검정시비구는 2005년의 경우 10개 포장에서 이식후 35일째 aNDVI에 의한 충족지수가 0.42~0.91의 분포를 보였고 추천모델식에 의한 질소 시비비율은 비료이용율을 70%로 적용하였을 때 연초 표준시비량의 13%~83%까지 추천되었다. 2006년의 경우 10개 포장에서 이식후 28일째 aNDVI에 의한 충족지수는 0.62~0.93의 분포를 보였고 추천모델에 의한 질소 시비비율은 비료이용율을 70%로 적용하였을 때 4%~129%의 분포를 보였다. 연초의 질소비료 이용율을 70%로 간주하여 추천한 반사율지표 검정시비구의 연초수량은 표준시비구에 비하여 2005년 72%~102%, 2006년 72%~104%로 비슷하게 분포되었다. 선정된 10개 포장에서 원격탐사 시비구의 연초 수량은 표준시비량의 87% 이상이 7개 포장이었고 나머지 3개 포장에서 72%, 74% 및 79%의 분포를 보였다. 이러한 결과는 고추의 경우와 달리 연초의 생육기간이 65일 정도로 짧기 때문에 이식후 30일 전후에 사용된 비료의 흡수 이용율이 이식전 기비로 사용된 표준시비구의 수량보다 낮았던 것으로 생각되었다. 그러나 재배기간이 길고 덩거름을 사용하는 작물인 경우 지상원격탐사 검정법은 질소비료의 이용효율을 증대시키고 환경오염을 줄일 수 있는 친환경농업의 실천적 시비관리기술로 발전시킬 수 있을 것으로 생각되었다.

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1 절 1차년도(2004)

1. 연구목표

- 질소 스트레스에 따른 고추 및 연초식물의 반사율 특성
- 고추 및 연초 생체량 변이에 대한 식물생장지표 선발
- 고추와 연초의 생체량 및 질소 흡수량과 식물생장 지표들의 상호관계

2. 평가 착안점

- 연초 및 고추의 질소 스트레스에 의한 복사선 영역의 반사율 특성
- 작물의 질소 스트레스 평가를 위한 광학 센서 및 식물생장지표 선발
- 지상 원격탐사 검정을 위한 critical season 결정
- 식물생장지표의 질소 충족지수에 의한 시비수준 예측

3. 연구개발목표의 달성도

Spectroradiometer에 의해 340nm에서 1100nm까지의 파장영역에서 측정된 질소시비 수준별 고추 canopy 반사율 특성은 질소시비 수준에 따른 반사율은 녹색영역의 540nm 근처와 적색영역의 680nm 근처에서 질소수준이 낮을수록 더 높은 반사율을 그리고 근적외선 영역에서는 더 낮은 반사율을 보여 옥수수 및 다른 작물에서 조사된 결과들과 동일한 경향을 보였다. 여러 가지 지상원격탐사센서들의 효율성을 비교하기 위하여 사경재배 조건에서 질소수준을 40%에서 140% 까지 6개 수준으로 처리된 작물의 개체조건과 포장에서 다양한 비옥도 및 질소 시비수준의 처리에 대한 작물의 군락조건으로 구분하여 생체량 변이와 센서들의 반사율지표들의 상호관계를 비교 평가하였다. 지상원격탐사 passive형 센서들이나 active형 센서들의 반사율지표들은 작물의 군락조건에 관계없이, 즉 사경재배 포트의 개체식물과 포장시험 처리구의 군락식물 조건 모두 동일시기의 작물 생체량 및 질소흡수량과 고도로 유의성 있는 상관관계를 보였다. 센서형태 별로 구분할 때 passive형 센서 중에는 Crop Circle 반사율지표들이 고추와 연초의 생체량 및 질소흡수량 평가에 가장 양호하였다. 그러나 passive sensor들은

측정시의 광조건, 즉 구름 낀 흐린 날씨나 혹은 측정시간에 따른 광량의 차이 등에 의하여 영향을 받기 때문에 active형 센서보다 평가의 효율성이 낮았다. 따라서 인공적인 LED 광원을 이용하여 측정시의 광 환경조건에 관계가 없는 active형 센서인 Crop Circle ACS-210의 반사율 지표는 고추와 연초 작물의 생체량 및 질소흡수량을 가장 양호하게 평가하였다. 따라서 연구개발목표는 계획대로 모두 달성하였다.

제 2 절 2차년도(2005)

1. 연구목표

- 지상 원격탐사에 의한 고추 및 연초의 질소 적정시비량 결정

2. 평가 착안점

- 토양 질소공급능력을 예측할 수 있는 식물생장지표의 효율성 평가 및 비교
- 지상 원격탐사 충족지수에 의한 연초 및 고추 적정시비량 결정모델 개발
- 연초 및 고추의 질소 시비량 추천방법에 따른 생산량 비교평가

3. 연구개발목표의 달성도

원격탐사센서에 의한 작물의 질소시비량 추천모델을 개발하기 위하여 질소시비추천을 위한 센서 효율성은 작물의 최종 수량특성 및 질소흡수량과 생육단계별 효율적 센서 반사율지표들의 상호관계를 평가하여 비교하였다. 원격탐사 검정을 위한 최적 시기는 고추와 연초의 최종 수량특성 및 질소흡수량과 생육단계별 원격탐사센서 반사율지표의 상관관계로부터 구명하였다. 고추와 연초 작물 모두 생육 초중반기 active형 센서들의 반사율지표는 최종 수량특성들과 고도로 유의성 있는 상관을 보였으며 이러한 결과는 사경제배 포트식물의 개체식물 조건과 포장조건의 작물군락 조건 모두에서 공통적이었다. 고추의 경우 이식후 120일 전후 수확기 건물중 및 생고추 수량은 이식후 55일부터 90일 사이의 반사율지표와 유의성 있는 상관을 보였으며 질소비료 덧거름 시비추천을 위한 원격탐사 최적 검정시기는 이식후 70일 전후로 판단되었다. 또한 연초 수확기의 수량 및 질소흡수량은 이식후 30일부터 50일의 반사율지표들과 밀접한 상관을 보였으나 원격탐사 검정에 의한 질소비료 시용시기를 가능한 앞당기기 위하여 최적 검정 시기는 이식후 30일 전후가 바람직 할 것으로 판단되었다. 고추와 연초 모두의 원격탐사 검정을 위한 효율적인 센서는 생체량 평가에서 가장 효율적인 센서로

평가되었던 active형 센서 Crop Circle ACS-210의 aNDVI로 선발되었다.

상기와 같이 원격탐사 검정을 위한 최적 시기와 효율적 센서를 선정 한 결과는 포장조건의 작물군락에 대한 평가에서도 동일한 경향으로 평가되었다. 따라서 원격탐사 검정법으로 고추는 이식후 70일 전후에, 연초는 이식후 30일 전후에 active형 Crop Circle ACS-210 센서로 결정하였고 시비량 추천모델은 효율적 반사율지표의 충족지수와 질소 시비수준의 회귀관계식으로 확립하였다. 반사율지표의 충족지수는 최적상태 작물의 측정지표에 대한 비율 값을 의미하며 이는 반사율지표 측정치가 년차 간 및 작물 품종특성에 따라 동일하지 않기 때문에 상대적인 개념으로 선진국에서 활용하는 방법이다. 따라서 고추에 대한 질소 시비량 추천 회귀식은 $Y(\text{aNDVI의 충족지수}) = -0.2577x^2 + 0.6517x + 0.5466$ (x =질소 시비비율, %), 연초에 대한 추천 회귀식은 $Y(\text{aNDVI의 충족지수}) = -0.2917x^2 + 0.6687x + 0.5595$ (x =질소 시비비율, %)로 적용하였고 각각의 회귀관계의 결정계수(R^2)는 0.82 및 0.67이었다. 이상의 결과로부터 연구개발목표는 계획대로 모두 달성하였다.

제 3 절 3차년도(2006)

1. 연구목표

- 지상 원격탐사에 의한 고추 및 연초의 적정시비량 추천모델의 신뢰도 검증

2. 평가 착안점

- 연초 및 고추재배 토양의 질소공급능력 예측을 위한 식물생장지표 선발
- 지상 원격탐사에 의한 연초 및 고추의 적정 시비량 결정 모델 확립
- 토양 비옥도에 따른 원격탐사 검정 시비구의 연초 및 고추 생산력 비교

3. 연구개발목표의 달성도

고추와 연초 두 작물에 대하여 원격탐사 active형 Crop Circle ACS-210 센서의 aNDVI에 의하여 확립된 질소 시비비율의 추천모델을 포장조건에서 신뢰도를 평가하기 위하여 무비구, 토양검정시비구 및 원격탐사 검정시비구로 구분하여 비교하였다.

고추에 대한 원격탐사 검정시비구는 2005년의 경우 11개 포장에서 이식후 60일째 aNDVI에 의한 충족지수가 0.71~0.98의 분포를 보였고 추천모델식에 의한 질소 시비비율은 비료이용율을 70%로 적용하였을 때 고추 시비량의 0%~100%까지 추천되었다.

2006년의 경우 10개 포장에서 이식후 58일째 aNDVI에 의한 충족지수는 0.85~1.01의 분포를 보였고 추천모델에 의한 질소 시비비율은 비료이용율을 60%로 적용하였을 때 0%~64.4%의 분포를 보였다. 최종 수확된 고추수량은 2005년과 2006년 공히 반사율지표 검정시비구와 토양검정시비구 사이에 큰 차이를 보이지 않고 유사하였다.

연초에 대한 원격탐사 검정시비구는 2005년의 경우 10개 포장에서 이식후 35일째 aNDVI에 의한 충족지수가 0.42~0.91의 분포를 보였고 추천모델식에 의한 질소 시비비율은 비료이용율을 70%로 적용하였을 때 연초 표준시비량의 13%~83%까지 추천되었다. 2006년의 경우 10개 포장에서 이식후 28일째 aNDVI에 의한 충족지수는 0.62~0.93의 분포를 보였고 추천모델에 의한 질소 시비비율은 비료이용율을 70%로 적용하였을 때 4%~129%의 분포를 보였다. 연초의 질소비료 이용율을 70%로 간주하여 추천한 반사율지표 검정시비구의 연초수량은 표준시비구에 비하여 2005년 72%~102%, 2006년 72%~104%로 비슷하게 분포되었다. 선정된 10개 포장에서 원격탐사 시비구의 연초 수량은 표준시비량의 87% 이상이 7개 포장이었고 나머지 3개 포장에서 72%, 74% 및 79%의 분포를 보였다. 이러한 결과는 고추의 경우와 달리 연초의 생육기간이 65일 정도로 짧기 때문에 이식후 30일 전후에 시용된 비료의 흡수 이용율이 이식전 기비로 시용된 표준시비구의 수량보다 낮았던 것으로 생각되었다. 그러나 재배기간이 길고 덧거름을 사용하는 작물인 경우 지상원격탐사 검정법은 질소비료의 이용효율을 증대시키고 환경오염을 줄일 수 있는 친환경농업의 실천적 시비관리기술로 발전시킬 수 있을 것으로 생각되었다. 따라서 연구개발목표는 계획대로 달성되었다.

제 4 절 관련분야의 기술발전예의 기여도

밭작물의 재배면적에서 많은 부분을 차지하는 고추와 연초에 적용된 지상원격탐사 센서를 활용한 질소 시비추천방법은 모든 작물에 확대 적용할 수 있으며 특히 재배기간이 길고 덧거름을 사용하는 수도 작물에 이삭거름의 추천방법으로 활용할 수 있음을 확인하였고 더욱 발전시켜 쌀의 단백질함량을 조절할 수 있는 방법으로 적용이 가능함을 확인하였다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

지상원격탐사센서에 의한 작물의 생체량 및 질소흡수량과의 밀접한 관계는 비교적 장기간 재배되는 작물의 덧거름을 시용량 추천에 적합한 비파괴 실시간 검정법으로 활용도를 고추 및 연초이외에 모든 작물에 확대 적용할 수 있음이 확인되었다. 특히 고품질을 추구하는 수도의 이삭거름 추천방법으로 그리고 다량의 비료가 투입되는 녹차재배지역의 효율적 질소시비관리 방안으로 현장 활용성 연구가 추가된다면 질소비료 과량시용에 기인되는 농경지의 비점오염원을 줄일 수 있는 친환경농업의 핵심기술로 발전이 가능할 것으로 판단되었다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학 기술정보

지상원격탐사기술의 선도적 역할을 하고 있는 미국의 네브라스카 및 오클라호마 주립대학의 연구진과 연구결과에 대한 협의과정에서 지상원격탐사에 의한 질소비료 추천기술은 선진국의 정밀농업을 정착시키는 핵심기술로 발전되고 있었다. 그 실례로 농기계에 다수의 센서를 액체암모니아 시비살포기와 연결하여 옥수수 재배포장에서 8 마일 속도로 진행하며 비과과 실시간 검정과 변량시비가 동시에 수행될 수 있는 정밀농업의 실질적인 기술이 현장에 적용되고 있었다.

제 7 장 참 고 문 헌

- Adams, M.L., W.D. Philpot, and W.A. Norvell, 1999. Yellowness index: An application of spectral second derivatives to estimate chlorosis of leaves in stressed vegetation, *International Journal of Remote Sensing*, 20(18):3663-3675.
- Al-Abbas, A.H., R. Barr, J.D. Hall, F.L. Crane, and M.F. Baumgardner. 1974. Spectra of normal and nutrient deficient maize leaves. *Agron. J.*, 66:16-20.
- Allen, W.A., H.W. Gausman, A.J. Richardson, and J.R. Thomas, 1969. Interaction of isotropic light with a compact plant leaf, *J. of the Optical Society of America*, 59(10):1376.
- Allen, W.A., H.W. Gausman, and A.J. Richardson. 1973. Willstater-Stoll theory of leaf reflectance evaluated by ray tracing, *Applied Optics*, 12(10):2448-2453.
- Avery, T.E. and G.L. Berlin. 1992. *Fundamentals of remote sensing and airphoto interpretation*. 5th ed. Macmillan, New York.
- Baret, F., and G. Guyot. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and PAR assessment. *Remote Sens. Environ.* 35:161-173.
- Bauer, M.E., 1975. The role of remote sensing in determining the distribution and yield of crops, *Advance in Agronomy*, 27:271-304.
- Bausch, W.C., and H.R. Duke, 1996. Remote sensing of plant nitrogen status in corn, *Transaction of the ASAE*, 39(5):1869-1875.
- Bell, G.E., D.L. Martin, S.G. Wiese, D.D. Dobson, M.W. Smith, M.L. Stone and J.B. Solie. 2002a. Vehicle-mounted optical sensing: An objective means for evaluating turf quality. *Crop Sci.* 42:197-201.
- Bell, G.E., D.L. Martin, M.L. Stone, J.B. Solie, and G.V. Johnson. 2002b. Turf area mapping using vehicle-mounted optical sensors. *Crop Sci.* 42:648-650.
- Bowman, W.D., 1989. The relationship between leaf water status, gas exchange, and spectral reflectance in cotton leaves, *Remote Sensing of Environment*, 30:249-255.

- Carter, G.A., 1991. Primary and secondary effects of water content on the spectral reflectance of leaves, *American Journal of Botany*, 78(7):916-924.
- Chappelle, E.W., F.M. Wood, J.E. McMurtrey, and W.W. Newcomb, 1984a. Laser-induced fluorescence of green plants: 1. A technique for the remote detection of plant stress and species differentiation, *Applied Optics*, 23(1):134-138.
- Chappelle, E.W., J.E. McMurtrey, F.M. Wood, and W.W. Newcomb, 1984b. Laser-induced fluorescence of green plants: 2. LIF caused by nutrient deficiencies in corn, *Applied Optics*, 23(1):139-142.
- Corp, L.A., J.E. McMurtrey, E.W. Chappelle, C.S.T. Daughtry, and M.S. Kim, 1997. UV band fluorescence and its implications for the remote assessment of nitrogen supply in vegetation, *Remote Sensing of Environment*, 61(1):110-117.
- Daughtry, C.S.T., J.E. McMurtrey, M.S. Kim, and E.W. Chappelle, 1997. Estimating crop residue cover by blue fluorescence imaging, *Remote Sensing of Environment*, 61(1):14-21.
- Daughtry, C.S.T., C.L. Walthall, M.S. Kim, and E.B. De Colstoun, and J.E. McMurtrey, 2000. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance, *Remote Sensing of Environment*, 74(2):229-239.
- Gamon, J.A., L. Serrano, and J.S. Surfus. 1997. The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. *Oecologia* 112:492-501.
- Gausman, H.W., W.A. Allen, V.I. Myers, and R. Cardenas, 1969. Reflectance and internal structure of cotton leaves (*Gossypium hirsutum* L.), *Agronomy J.*, 61(3):374.
- Gausman, H.W., W.A. Allen, R. Cardenas, and A.J. Richardson, 1970. Relation of light reflectance to histological and physical evaluation of cotton leaf maturity. *Applied Optics*, 9:545-552.
- Gausman, H.W., 1973. Reflectance, transmittance, and absorptance of light by subcellular particles of spinach (*Spinacia oleracea* L.) leaves, *Agronomy J.*, 65(4):551-553.
- Gausman, H.W. 1974. Leaf reflectance of near-infrared, *Photogrammetric Engineering &*

- Remote Sensing, 40:57-62.
- Gausman, H.W., W.A. Allen, and D.E. Escobar, 1974. Refractive index of plant-cell walls, *Applied Optics*, 13(1):109-111.
- Gausman, H.W. 1977. Reflectance of leaf components, *Remote Sensing of environment*, 6(1):1-9.
- Gilabert, M.A., J. Gonzalez-Piqueras, F.J. Garcia-Haro, J. Melia. 2002. A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment* 82 :303-310.
- Gitelson, A.A., M.N. Merzlyak, and H.K. Lichtenthaler. 1996. Detection of red edge position and chlorophyll content by reflectance measurements near 700 nm. *J. Plant Physiology* 148:501-508.
- Gitelson, A.A., M.N. Merzlyak, and O.B. Chivkunova. 2001. Optical properties and nondestructive estimation of anthocyanin content in plant leaves. *Photochemistry and Photobiology* 74(1):38-45.
- Gitelson, A.A. 2004. Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. *J. of Plant Physiology*, 161(2):165-173.
- Grant, L. 1987. Diffuse and specular characteristics of leaf reflectance. *Remote Sensing of Environ.* 22:309-322.
- Hatfield, J.L. and P.J. Pinter, Jr. 1993. Remote sensing for crop protection. *Crop protection*, 12(6):403-414.
- Hodgen, P.J., W.R. Raun, G.V. Johnson, R.K. Teal, K.W. Freeman, K.B. Brixey, K.L. Martin, J.B. Solie, and M.L. Stone. 2005. Relationship between response indices measured in-season and at harvest in winter wheat. *J. of Plant Nutrition*. 28:221-235.
- Huete, A.R. 1988a. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environ.* 25:295-309.
- Huete, A.R. 1988b. Soil and atmosphere influences on the spectra of partial canopies. *Remote Sensing of Environ.* 25:89-106.
- Huete, A.R. and Warrick, A.W., 1990. Assessment of vegetation and soil water regimes in partial canopies with optical remotely sensed data. *Remote Sensing Environ.*, 32:155-167.

- Jackson, R.D., C.A. Jones, G. Uehara, and L.T. Santo. 1981. Remote detection of nutrient and water deficiencies in sugarcane under variable cloudiness. *Remote Sensing Environ.*, 11:327-331.
- Jackson, R.D., 1983. Spectral indexes in N-space, *Remote Sensing of Environment* 13(5):409-421.
- Jackson, R.D., P.J. Pinter Jr., R.J. Reginato, and S.B. IDSO. 1986. Detection and evaluation of plant stresses for crop management decisions. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. GE-24, 1:199-106.
- Jackson, R.D., and A.R. Huete. 1991. Interpreting vegetation indices, *Preventive Veterinary Medicine*, 11:185-200.
- Jordan, C.F., 1969. Derivation of leaf index from quality of light on the forest floor. *Ecology*. 50:663-666.
- Jeong, H.C. 2006. Effective sensing distance for ground-based remote sensor with different leaf distribution in tobacco plant. Master's degree thesis, Chungbuk National University. Cheongju, Korea.
- Kim, H.G., 2006. Estimation for red pepper (*Capsicum annum* L.) biomass by reflectance indices with ground-based remote sensor. Master's degree thesis, Chungbuk National University. Cheongju, Korea.
- Knipling, E.B. 1970. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing of Environment* 1:155-159.
- Lihong, X., W. Cao, W. Luo, D. Tingbo, and Zhu. 2004. Monitoring Leaf Nitrogen Status in Rice with Canopy Spectral Reflectance. *Agron. J.* 96:135-142.
- Ma, B.L., L.M. Dwyer, C. Costa, E.R. cober, and M.J. Morrison. 2001. Early prediction of soybean yield from canopy reflectance measurements. *Agron. J.* 93:1227-1234.
- McFarlane, J.C., R.D. Watson, A.F. Theisen, R.D. Jackson, W.L. Ehler, P.J. Pinter, Jr., S.B. Idso, and R.J. Reginato, 1980. Plant stress detection by remote measurement of fluorescence, *Applied Optics*, 19:3287-3289.
- Mullen, R.W., K.W. Freeman, W.R. Raun, G.V. Johnson, M.L. Stone, and J.B. Solie.

2003. Identifying an in-season response index and the potential to increase wheat yield with nitrogen. *Agron. J.* 95:347-351.
- Osborne, S.L., J.S. Schepers, D.D. Francis, and M.R. Schlemmer, 2002a. Use of spectral radiance to estimate in-season biomass and grain yield in nitrogen- and water-stressed corn. *Crop Sci.* 42:165-171.
- Penuelas, J., J.A. Gamon, A.L. Fredeen, J. Merino, and C.B. Field, 1994. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen-and water limited sunflower leaves, *Remote Sensing of Environment*, 48:135-146.
- Qi, J., A. Cheboouni, A.R. Huete, Y.H. Kerr, and S. Sorooshian, 1994. A modified soil adjusted vegetation index, *Remote Sensing of Environment*, 48:119-126.
- Raun, W.R., J.B. Solie, G.V. Johnson, M.L. Stone, R.W. Mullen, K.W. Freeman, W.E. Thomason, and E.V. Lukina. 2002. Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing variable rate application. *Agron. J.* 94:815-820.
- Raun, W.R., J.B. Solie, K.L. Martin, K.W. Freeman, M.L. Stone, G.V. Johnson, and R.W. Mullen. 2005a. Growth stage, development, and spatial variability in corn evaluated using optical sensor readings. *J. of Plant Nutrition.* 28:173-182.
- Raun, W.R., J.B. Solie, M.L. Stone, K.L. Martin, K.W. Freeman, R.W. Mullen, H. Zhang, J.S. Schepers, and G.V. Johnson. 2005b. Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization. *Commun. Soil Sci. Plan.* 36(19/20): 2759-2781.
- RDA-NIAST. 2005. Remote sensing research of the past 10 years for agricultural environment assessment-Imagery and Applications. Suwon, RDA.
- Richardson, A.J., and C.L. Wiegand. 1977. Distinguishing vegetation from soil background information, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 43:1541-1552.
- Rondeaux, G., M. Steven, and F. Baret. 1996. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sens. Environ.* 55:95-107.
- Rouse, J.W., R.H. Hass, J.A. Schell, D.W. Deering, and J.C. Harlan. 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation (Type III Final Report), NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland.

- Schepers, James. S. 2001. Practical applications of remote sensing. Conference proceedings of InfoAg, August 7-9, Indianapolis.
- Shanahan, J.F., J.S. Schepers, D.D. Francis, G.E. Varvel, W.W. Wilhelm, J.M. Tringe, M.K. Schlemmer, and D.J. Major. 2001. Use of remote-sensing imagery to estimate corn grain yield. *Agronomy J.* 93:583-589.
- Slaton, M.R., E.R. Hunt, and W.K. Smith, 2001. Estimating near-infrared leaf reflectance from leaf structural characteristics, *American Journal of Botany*, 88(2):278-284.
- Stoner, E.R., and M.F. Baumgardner, 1981. Characteristic variations in reflectance of surface soils, *Soil Sci. Society of American J.* 45:1161-1165.
- Tucker, C.J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment.* 8:127-150.
- Walburg, G., M.E. Bauer, C.S.T. Daughtry, and T.L. Housley, Effects of nitrogen nutrition on the growth, yield, and reflectance characteristics of corn canopies. *Agron. J.*, 74:677-683.
- Wiegand, C.L., A.J. Richardson, D.E. Escobar, and A.H. Gerbermann. 1991. Vegetation indices in crop assessments. *Remote Sensing of Environment* 35:105-119.
- Woolley, J.T., 1971. Reflectance and transmittance of light by leaves. *Plant Physiology.* 47(5):656-662.
- Yang, Y.K. and L.D. Miller. 1985. Correlations of rice grain yields to radiometric estimates of canopy biomass as a function of growth stage. *J. of Korean Soc. of Remote Sensing.* 1(1):63-87.