

식물공장내 작물의 간격조절방법에 대한 식재면적지표 시뮬레이션

김준용¹ · 양승환² · 이춘구¹ · Alireza A. Ashtiani¹ · 이중용^{1,2*}

¹서울대학교 바이오시스템공학전공, ²서울대학교 농업생명과학연구원

Simulation of Planted Area Index (PAI) for Crop Spacing Methods in Plant Factory

Joon Yong Kim¹, Seung Hwan Yang¹, Chun Gu Lee¹, A. A. Ashtiani¹, Joong Yong Rhee^{1*}

¹Dept. of Biosystems Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-921, Korea

²Research Institute for Agriculture and Life Science, Seoul National University, Seoul, 151-921, Korea

(Received: July 26th, 2011; Revised: September 21th, 2011; Accepted: September 29th, 2011)

Abstract

Various crop spacing methods have been implemented so far for the greenhouse and plant factory applications. However, there is no generally accepted parameter for evaluation of plant spacing efficiency in plant production system. In this study, 'Planted Area Index' (PAI) of a spacing method is defined as the ratio of the planted area in the field to required planted area using the spacing method when no transplanting operation is assumed. Three common types of spacing methods for plane placement of the plants were modeled mathematically. For calculating the planted area, an optimal growth radius function ($R(t)$) is needed. Function of the days after transplanting stage gives a radius of an optimal circle area for the living plants. A computer simulation was developed to calculate the PAI, based on three crop spacing methods and four optimal growth radius functions. In general, the 1-D zigzag spacing showed the best PAI. Moreover, it gives an example on how to apply the PAI for the design.

Keywords : Planted area index, Space efficiency, Plant factory, Simulation

1. 서론

식물공장은 다양한 첨단 기술을 복합적으로 이용하는 식물 생산 시스템이라 할 수 있다. Park(1994)는 식물공장에 필요한 장치를 재배장치, 환경조절장치 그리고 각각을 제어하는 제어장치로 구분하였다. 이 중 재배장치는 작물이송기술과 작물간격조절기술을 근간으로 한다. 작물이송기술이란 작물을 필요에 따라 이동시키면서 재배하는 기술로서 운반 작업의 경감과 작업환경개선의 효과를 줄 수 있다. 작물간격조절 기술은 작물의 생장에 맞추어 작물간의 간격을 조절해주는

것으로서 재식초기에 낭비되는 공간을 절약할 수 있는 특징이 있다. Seginer and Ioslovich(1998)는 최적의 재식 밀도를 유지하면 자본의 지출이나 에너지 및 기타 자원의 낭비를 줄일 수 있다고 하였다.

국내외적으로 다양한 작물간격조절장치가 개발되었다. 국내에서는 슬라이딩식(Chang et al., 2006), 체인컨베이어식(Chang et al., 2005b) 등이 개발되어 있으며, 모두 주간만을 조절하는 방식이다. 이외에도 작물의 생장정도에 맞게 일정 거리에 캠 역할을 하는 러그를 이용하는 캠방식, 쟈트리 시스템이 왕복하면서 작물의 성장단계에 따라 작물의 공간을 넓혀주는 쟈트리식, 작물이 성장함에 따라 웹기어의 나사산 피치를 크게하여 작물의 간격을 조절하는 스크류식, 작물이 심어진 정식판 사이에 스페이서를 삽입하는 스페이서식 등이

*Corresponding author: Joong Yong Rhee
Tel: +82-2-880-4605; Fax: +82-2-873-2049
E-mail: jyr@snu.ac.kr

있다(Chang et al., 2010). 또한, Horibe et al.(1994)는 주간과 조간을 동시에 조절할 수 있는 2차원 식물재배이동장치를 이용한 재배실험을 수행하였고, Prince and Bartok(1978)은 슬립 조인트 방식의 간격조절방법을 소개하면서, 생체중과 작물의 부피를 선형적인 관계로 가정하고 이를 이용하여 작물 생육함수를 구하여 간격조절에 사용하였다.

이렇듯 다양한 작물간격조절장치들이 개발되었으나, 이들에 대한 성능이나 효율에 대한 분석은 부족하다. Chang(2000)은 평행배열방식(우물살배열형)과 지그재그배열방식(빗살배열형)을 비교 분석하였지만, 그 외의 방식에 대한 분석은 수행하지 않았다. Mori(1991)은 작물이 차지하는 면적에 대한 재배상의 면적을 G값으로 하여 4가지 작물배열방식을 분석하고, 2차원 작물 간격 조절 방법을 제안하였지만 이때 분석에 사용된 G값은 작물배열방식의 집적능력만을 표현하였다. Seginer and Ioslovich(1999)는 전체적인 작물생산시스템을 위한 최적의 작물간격 및 재식밀도에 대한 연구를 수행하였고, Ioslovich and Gutman(2000)은 식물공장에서 최적의 작물간격조절에 대한 수학적 모델을 만들었지만 이론적인 분석에만 치중되었다. Chang et al.(2010)은 식물공장의 조건조절설계에 대해 설명하였으나, 장치간의 성능 혹은 조절방식간의 성능을 비교할만한 지표를 제시하지는 않았다.

본 연구에서는 이런 문제점을 보완하기 위해 작물간격조절 장치의 평가지표로 대상 식물의 최적성장반경을 고려한 식재면적지표(PAI)을 정의하였다. 그리고 정의를 바탕으로 3가지 작물간격조절방법을 분석하여 각각의 식재면적지표 모델을 유도하였다. 또한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 식재면적지표에 영향을 주는 인자들을 확인하고, 4가지의 최적 성장반경에 따른 식재면적지표의 변화를 확인하였다. 마지막으로 식재면적지표의 예를 제시하여 작물간격조절장치의 설계 요소로서 식재면적지표의 가능성을 제시하였다.

2. 재료 및 방법

가. 변수정의

작물 간격 조절장치를 가진 재배상을 설계하려고 할 때, 재배상이 설치될 공간의 면적(A)(재배상의 폭(W)과 길이(L))과 생산하고자 하는 작물의 종류나 수량이 제약사항이 된다. 또한 재배함통을 사용할 경우 그것의 폭(W_p)과 길이(L_p)도 제약사항에 해당된다.

설계변수는 제약사항이 주어질 때 최상의 결과를 얻기 위해 변경할 수 있는 값을 의미한다. 생육단계의 수(N_s), 생육단계별 재배함통 수(N_p), 재배함통당 작물 수(N_p)가 설계변수에 속한다. 작물간격조절방법도 설계변수가 되며, 정의되지 않은 제약사항도 설계변수로 본다.

나. 작물간격조절방법

작물의 간격조절방법은 배열 형식에 따른 분류와 이동방식에 따른 분류가 있으며, 이들의 조합에 따라 작물의 간격조절방법이 결정된다. 배열형식에 따른 분류는 우물살배열형(Square grid type)과 빗살배열형(Zigzag type)이 있으며, 이동방식에 따른 분류는 고정 간격형(Fixed type), 1차원 간격조절형(1-D spacing type), 2차원 간격조절형(2-D Spacing type)의 3가지가 있다. 예를 들어 노지에서 작물 생산 방식은 우물살배열형과 고정 간격형의 조합이며, Chang(2000)이 지그재그형으로 언급한 1차원 빗살조절형(1-D zigzag spacing)의 경우 빗살배열형과 1차원 간격조절형의 조합이다. 본 연구에서는 표 1과 같은 표기명을 사용하도록 한다.

Table 1 Naming of crop spacing methods

Classification by moving method	Classification by array method	
	Square grid type	Zigzag type
Fixed type	Square Grid Spacing	Zigzag Spacing
1-D Spacing type	1-D Square Spacing	1-D Zigzag Spacing
2-D Spacing type	2-D Square Spacing	2-D Zigzag Spacing

다. 최적성장반경함수

본 연구에서는 작물이 원형으로 자란다고 가정하고 작물의 최적 성장을 보장하는 면적의 반경을 최적성장반경함수($R(t)$)로 정의한다. 일반적으로 작물의 성장함수는 성장환경(온도, 습도, 광, 양분 등), 성장시간, 배지조건 등 다양한 인자에 의해서 결정된다. 하지만 본 연구에서는 식물생장을 위한 환경조절을 수행하는 식물공장내에서 환경조건과 배지조건등은 결정된다고 가정하고, 남은 변수인 성장시간만을 인자로 갖는 함수를 정의할 수 있다고 보았다. 이에 작물의 최적성장반경함수는 작물의 정식후일수(t)의 함수로 가정한다. 여기서 정의한 최적성장반경함수는 작물의 성장함수($G(t)$)와는 다르다. 이는 작물이 차지하는 면적이 작물의 성장에 필요한 최적의 면적과는 다를 수 있기 때문이다. 어떤 작물은 최적 생육을 위해 작물 사이 간격이 넓어야 할 수도 있고, 반대로 일정부분 서로 겹쳐서 자라더라도 작물의 생육에 큰 지장이 없을 수 있다. 예를 들면 Chang(2000)은 작물이 25%정도 겹치게 자라도록 주간조절장치를 구성한 바 있다.

라. 식재면적지표

작물의 최적성장반경함수를 알면 노지에서 작물을 재배할 때 한 작물이 점유하는 최적의 면적을 결정할 수 있다. 그림 1은 노지에서 작물을 우물살배열형으로 배열했을 때의 모습을 보여준다. 9개의 작물이 점유하는 면적은 총 $36R(T)^2$ 으

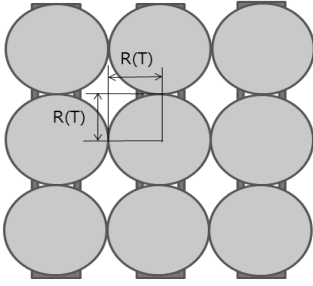


Fig. 1 Square grid spacing.

로 작물당 점유 면적은 $4R(T)^2$ 이 된다. 이때 작물당 평균점유면적(A_p)과 수확시 점유면적(A_H)이 같다. 식물공장을 위한 간격 조절 장치가 제대로 설계되었다면 작물당 평균 점유 면적은 수확시 작물 점유 면적에 비해 작다. 여기서 작물당 평균 점유면적(A_p)에 대한 수확시 점유면적(A_H)의 비를 식재면적지표(Planted Area Index, PAI)라고 정의한다.

$$PAI = \frac{A_H}{A_p} \quad (1)$$

우물살배열형 배열에서 작물당 평균 점유 면적은 수확시 작물 점유 면적과 같으므로 우물살배열형의 식재면적지표는 항상 1이다. 따라서 식재면적지표는 우물살배열형을 기준으로 하는 지표라고 할 수 있다. 또한, 식재면적지표는 생산효율과 연결되는 특성이 있다. 예를 들어 식재면적지표가 2라면 우물살배열형 배열 방식에 비해 2배의 생산이 가능하다.

마. 작물 배열의 수학적 모형

1) 빗살형 작물 배열

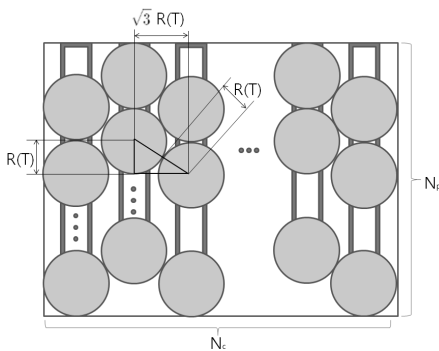


Fig. 2 Zigzag spacing.

평면에 원을 배열할 때 가장 효과적인 배열은 그림 2와 같은 빗살형 작물 배열이다. 빗살형 배열의 경우 작물이 차지하는 면적의 가로 폭(W)과 세로 길이(L)는 다음과 같이 결정된다.

$$W = 2R(T) + (N_c - 1) \times \sqrt{3} R(T) \quad (2)$$

$$L = 2R(T) \times N_p + R(T) \quad (3)$$

여기서 작물당 평균점유면적과 식재면적지표는 다음과 같다.

$$A_p = \frac{W \times L}{N_c \times N_p} = \frac{R(T)^2 (\sqrt{3} (N_c - 1) + 2) (2N_p + 1)}{N_c \times N_p} \quad (4)$$

$$PAI = \frac{A_H}{A_p} = \frac{4R(T)^2 \times N_c \times N_p}{R(T)^2 (\sqrt{3} (N_c - 1) + 2) (2N_p + 1)} = \frac{4 \times N_c \times N_p}{(\sqrt{3} (N_c - 1) + 2) (2N_p + 1)} \quad (5)$$

작물당 평균점유면적은 작물이 많아지면 $2\sqrt{3}R(T)^2$ 으로 수렴하고, 그에 따라 식재면적지표는 $\frac{2}{\sqrt{3}}$ 에 수렴한다.

2) 1차원 간격조절형 작물 배열

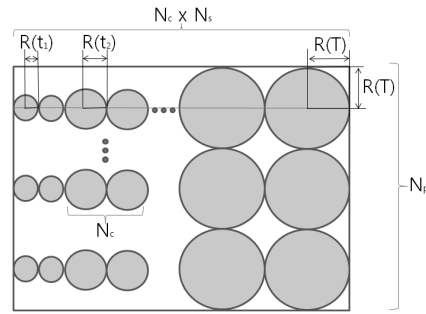


Fig. 3 1-D square spacing.

1차원 간격조절형이란 작물의 생장에 따라 재식초기에는 작물간의 간격을 좁게 설정하고 후기에는 간격을 넓혀 공간을 절약하는 작물 배치이다. N_s 단계로 작물의 주간을 변경하는 간격 조절 장치의 재배상의 면적(A)과 작물당 평균점유면적은 다음과 같이 계산된다.

$$A = 2N_c \sum_{i=1}^{N_s} R(t_i) \times 2N_p R(T) = 4N_c N_p R(T) \sum_{i=1}^{N_s} R(t_i) \quad (6)$$

$$A_p = \frac{A}{N_c \times N_s \times N_p} = \frac{4R(T) \sum_{i=1}^{N_s} R(t_i)}{N_s} \quad (7)$$

정의에 따라 식재면적지표는 다음과 같으며, 재배함통당 작물수(N_p)에는 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

$$PAI = \frac{A_H}{A_p} = \frac{4R(T)^2 N_s}{4R(T) \sum_{i=1}^{N_s} R(t_i)} = \frac{R(T) N_s}{\sum_{i=1}^{N_s} R(t_i)} \quad (8)$$

3) 1차원 빗살 간격조절형 작물 배열

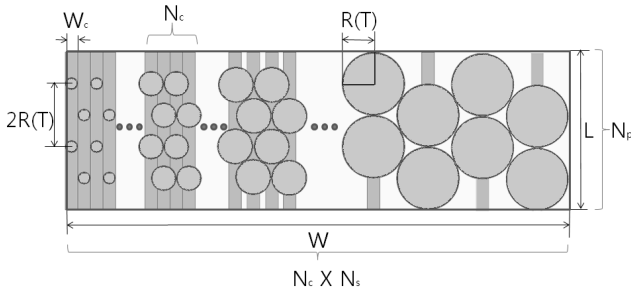


Fig. 4 1-D zigzag spacing.

국내에서 주로 제안된 작물간격조절방식은 1차원 빗살 간격조절형으로 일반적으로 식재면적지표 값이 위의 방식보다 높다. 이 방식에서는 재배홈통내에서 작물의 간격을 변경하지 않기 때문에 재식포트 삽입구멍의 간격은 수확 시점의 최대 생육 반경의 2배(2R(T))가 되어야 한다.

재식초기에는 작물의 폭이 좁아서 재배홈통 사이에 별도의 간격이 필요 없다. 하지만 작물이 점차 자라게 되면서 옆 작물과 접하게 되는데 처음에는 옆옆 재배홈통의 작물과 수평으로 닿게 된다. 이때의 생육단계(S_F)에서부터 재배홈통 사이에 별도의 간격이 필요하며, 이후로 재배홈통 사이의 간격은 R(t_i) (≥ W_c, 재배홈통의 폭)이다. 계속해서 식물이 자라게 되면 바로 옆 재배홈통의 작물과 대각선으로 접하게 되는데, 이 생육단계가 S_S이며 이 단계 이후로 재배홈통 사이의 간격은 $\sqrt{4R(t_i)^2 - R(T)^2}$ (≥ $\frac{R(T)}{\sqrt{3}}$)이다. 이 경우를 고려하면 재배상의 폭(W)과 재배상의 길이(L)는 다음과 같다.

$$W = N_c [(S_F - 1)W_c + \sum_{k=S_F}^{S_S-1} R(t_k) + \sum_{k=S_S}^{N_s} (\sqrt{4R(t_k)^2 - R(T)^2})] \quad (9)$$

$$L = N_p \times 2R(T) + R(T) = (2N_p + 1)R(T) \quad (10)$$

재배되는 전체 작물의 수는 N_s × N_c × N_p이므로, 작물당 평균점유면적은 다음과 같다.

$$A_p = \frac{A}{N_T} = \frac{W \times L}{N_s \times N_c \times N_p} = \frac{(N_c [(S_F - 1)W_c + \sum_{k=S_F}^{S_S-1} R(t_k) + \sum_{k=S_S}^{N_s} (\sqrt{4R(t_k)^2 - R(T)^2})]) \times ((2N_p + 1)R(T))}{N_s \times N_c \times N_p} \quad (11)$$

정의에 따라 식재면적지표를 구하면 다음과 같다.

$$PAI = \frac{A_H}{A_p} = \frac{4R(T)N_sN_p}{(2N_p + 1)[(S_F - 1)W_c + \sum_{k=S_F}^{S_S-1} R(t_k) + \sum_{k=S_S}^{N_s} (\sqrt{4R(t_k)^2 - R(T)^2})]} \quad (12)$$

위와 같은 방식으로 평면상의 어떤 간격조절방식에 대한 식재면적지표의 모델개발 및 분석도 가능하다.

바. 시뮬레이션 프로그램 개발

식재면적지표는 다양한 변수(N_s, N_c, N_p, T, t_k, W_c, S_F, S_S), 간격조절방식, 최적성장반경함수에 의해 결정되기 때문에 모델을 알고 있다고 하더라도 간단하게 구해질 수 없다. 따라서 컴퓨터 프로그램을 활용한 시뮬레이션이 효과적인 해결책이 된다. 본 연구를 위해 python 2.7(Python Software Foundation)을 사용하여 프로그램을 작성하였으며, 작성된 프로그램은 명령행 방식으로 작동한다. 프로그램은 2가지 방식으로 동작하는데, 재배상의 크기(W, L)를 제약조건으로 하여 식재면적지표를 계산하는 방식과 수확하고자 하는 작물 수(N)를 제약조건으로 하여 식재면적지표를 계산하는 방식이다.

우선 크기를 제약조건으로 하여 식재면적지표를 계산하는 방식은 재배상의 폭과 넓이를 각각 90~110% 수준에서 변경하면서, 주어진 간격조절방식 모델과 최적성장반경함수를 이용하여 가능한 조합의 식재면적지표를 계산하여 출력한다. 여기서 간격조절방식 모델은 본 논문에서 제시하고 있는 3가지 이외에도 입력할 수 있도록 하였으며, 최적성장반경함수는 함수의 형태로 입력하도록 하였다.

두 번째 방식은 작물수를 제약조건으로 하여 식재면적지표를 계산하는 방식이다. 이는 개발하고자하는 간격조절장치를 통해서 주기당 생산하고자 하는 작물수를 달성할 수 있는 간격조절방식과 재배상의 크기의 조합을 알려주고, 이들의 식재면적지표를 계산하여 출력한다.

간격조절장치 설계자는 위의 결과들을 통해 식재면적지표를 비교하고, 그 값을 적절한 간격조절방식과 크기를 설계하는데 참조할 수 있다.

사. 가상의 최적성장반경함수

시뮬레이션을 위해 가상 작물의 최적성장반경함수로 R(t)를 상정하고, 생육단계수(N_s), 재배홈통당 작물수(N_p), 생육단계별 재배홈통수(N_c)에 따른 식재면적지표를 계산하였다.

Chang et al.(2005a)과 Chang et al.(2006)이 사용한 청치마상추는 초기 작물폭이 6 cm에서부터 시작하여 24일 동안 33.5 cm까지 자라며, Chang et al.(2005b)이 조사한 엽상추는 35일에 걸쳐 5 cm에서 25 cm까지 자란다. 이를 기초로

하여 본 시뮬레이션에서 사용할 가상 작물은 재식초기에 반경이 약 3 cm이며, 30일 동안 성장하여 반경이 약 15 cm까지 자라는 것으로 가정하였다. 또한, 최적성장반경함수는 직선형(Linear), 시그모이드형(Sigmoid), 지수형(Exp.), 로그형(Log)의 4가지 형태를 가정하였다.

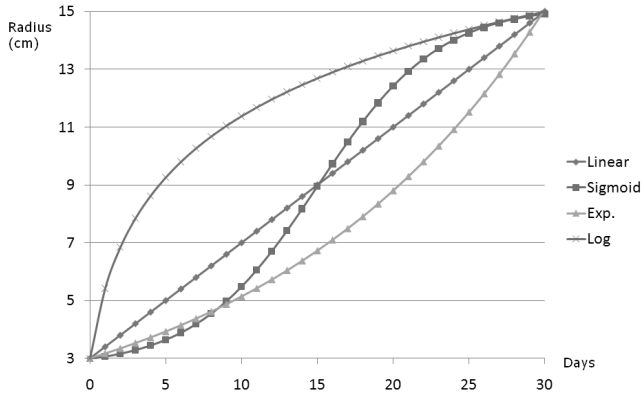


Fig. 5 Shape of virtual optimal growth radius ($R(t)$).

Table 2 Equations of virtual optimal growth radius ($R(t)$)

Growth curve	Virtual optimal growth radius ($R(t)$)
Linear	$R(t) = 0.4t + 3$
Sigmoid	$R(t) = \frac{12.5}{1 + e^{\frac{15-t}{4}}} + 2.7$
Exp.	$R(t) = 3e^{0.0538t}$
Log	$R(t) = 3.495\ln(t + 1) + 3$

Table 3 PAI model of crop spacing methods

Spacing method	Illustration	PAI model
Square grid spacing		1
Zigzag spacing		$\frac{4N_c N_p}{(\sqrt{3}(N_c - 1) + 2)(2N_p + 1)}$
1-D square spacing		$\frac{R(T)N_s}{\sum_{i=1}^{N_s} R(t_i)}$
1-D zigzag spacing		$\frac{4R(T)N_s N_p}{(2N_p + 1)[(S_F - 1)W_c + \sum_{k=S_F}^{S_S-1} R(t_k) + \sum_{k=S_S}^{N_s} (\sqrt{4R(t_k)^2 - R(T)^2}]}$

3. 결과 및 고찰

가. 식재면적지표 모델

표 3은 간격조절방식에 따른 식재면적지표를 나타낸 것이다. 여기서 최적성장반경함수, 재배함통의 폭(W_c), 수확일(T) 등은 재배상의 설계 변수라기보다는 상수에 가깝다. 또한 재배상의 크기, 필요 생산량은 작물 간격 조절장치의 제약 조건이 된다. 따라서 재배상의 크기 혹은 생산량이 주어질 때 가능한 식재면적지표를 구하고, 최대의 식재면적지표일 때의 생육단계의 수(N_s), 생육단계별 재배함통 수(N_c), 재배함통당 작물 수(N_p)를 구하면 작물간격조절장치의 설계가 가능하다.

나. 간격 조절 방식에 따른 식재면적지표의 변화

그림 6은 직선형 최적성장반경함수를 이용할 때 간격 조절 방식에 따라 식재면적지표의 변화를 보여준다.

x축은 총 작물의 수인데, 작물이 늘어날수록 즉 재배상이 커질수록 식재면적지표가 증가하면서 특정 범위를 차지하는 모습을 보여준다. 이때 나타나는 식재면적지표는 한 값으로 수렴하는 형태가 아니라 어떤 영역에서 진동하게 되는데, 이는 생육단계의 수(N_s), 생육단계별 재배함통 수(N_c), 재배함통당 작물 수(N_p)의 조합에 따라 차이를 보이게 된다.

다. 최적성장반경함수에 따른 식재면적지표의 변화

표 4는 한 재배상에서 2,000주에서 2,200주 사이의 작물을 기른다고 가정할 때 최대 식재면적지표를 나타낸다. 1차원

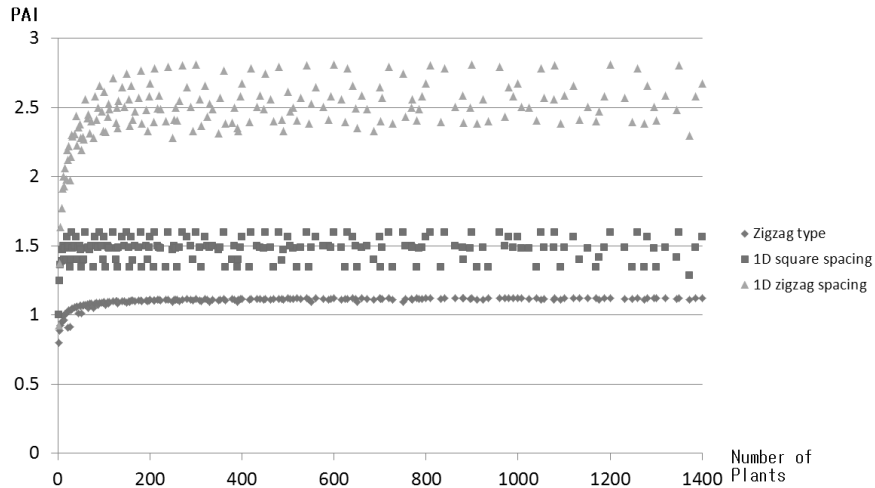


Fig. 6 Comparison of PAI as affected by spacing methods and number of plants on the bed.

Table 4 Maximum planted area index when 2000~2200 plants were grown on the bed

	Maximum planted area index (PAI)			
	Square grid type	Zigzag type	1-D square spacing	1-D zigzag spacing
Linear	1	1.125	1.596	2.811
Sigmoid	1	1.125	1.575	2.707
Exp.	1	1.125	1.911	3.181
Log	1	1.125	1.222	2.251

빗살 간격조절형이 다른 방식에 비해서 높은 식재면적지표를 보이고, 최적 성장 반경 함수가 지수형일 때 높은 식재면적지표가 나타난다.

라. 모델의 검증

모델의 검증은 기존에 발표된 논문과 비교하여 그 결과를 확인하였다. Chang et al.(2006)은 11단계의 조절이 가능한 슬라이딩식 주간조절장치에 $R(t) = 6.7472e^{0.0843t}$ 의 성장곡선을 갖는 양상추를 이용하여 그 효과를 분석하였다. 그 분석결과에서 주수에 대한 분석은 포함되어 있지 않지만, 토경재배의 생산량이 11,709 kg/10a였고, 주간조절장치의 생산량이 36,584 kg/10a로 나타나서 약 3.124배의 생산량 증대를 보였다. 프로그램 이용하여 이론적으로 계산된 PAI값은 3.399로 3.124보다는 약간 크게 계산되었으나, 그것이 이론적인 값이고, 생산량이 아니라 주수를 기준으로 한 것임을 감안하면 용인할 만한 수준으로 판단된다.

마. 제약조건 내에서 설계 적용 예

작물간격조절장치의 설계시 정해진 면적을 적절히 활용해야 한다. 이때 식재면적지표를 이용하면 적절한 변수의 조합을 찾아낼 수 있다. 예를 들어 재배하려는 작물이 위에서 제

시한 지수형 최적 성장 반경 함수를 가지고 있으며, 재배상이 설치될 면적이 약 10 m × 1.5 m이고, 작물 간격 조절 방법으로 1차원 빗살 간격조절형을 고려하고 있다면 모델 계산을 통해 표 5와 같은 데이터를 얻을 수 있다. 단, 재배상의 폭과 길이의 범위는 비교를 위해 주어진 값의 90~110%의 범위를 사용했다. 1차원 빗살 간격조절형을 사용할 경우 최대 2.898 수준의 식재면적지표를 얻을 수 있으며 전체 작물수는 420주이다. 생육단계의 수(N_s)는 15단계, 생육단계별 재배함통 수(N_r)는 7개, 재배함통당 작물 수(N_p)는 4개이고, 재배상의 폭(W)은 9.71 m, 길이(L)는 1.36 m로 정해진 면적에 충분히 들어갈 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 작물당 평균점유면적에 대한 수확시 작물의 점유면적의 비를 식재면적지표로 정의하고, 3가지 작물간격 조절방식에 대하여 식재면적지표를 모델링하고 그 결과를 분석하였다.

- (1) 평면상에서 구현되는 작물간격조절장치의 면적 활용도를 본 논문에서 정의한 식재면적지표를 통해 수치화될 수 있다.

Table 5 Comparison of design variables

Spacing method	Width (W)	Length (L)	# of growth stage (N_s)	# of plant channel (N_c)	# of plants (N_p)	Total # of plants (N)	Planted Area Index (PAI)
1-D zigzag spacing	908	136	13	6	4	312	2.301
	1,055	136	14	6	4	336	2.134
	914	136	12	7	4	336	2.463
	1,059	136	13	7	4	364	2.301
	971	136	15	7	4	420	2.898
	902	136	11	8	4	352	2.612
	1,044	136	12	8	4	384	2.463
	911	136	9	9	4	324	2.382
	1,015	136	11	9	4	396	2.612
	1,012	136	9	10	4	360	2.382
977	136	10	10	4	400	2.740	

- (2) 식재면적지표는 작물간격조절 방식, 최적생장반경함수와 생육단계의 수, 생육단계별 재배홈통 수, 재배홈통 당 작물 수에 주로 영향을 받는다.
- (3) 작물간격조절장치를 사용할 경우 지수형의 최적 생장반경 함수를 갖는 작물이 식재면적지표를 크게 만들기 때문에 동일한 면적을 보다 잘 활용할 수 있다.
- (4) 식재면적지표는 작물간격조절장치의 면적대비 생산가능 주수를 직접적으로 보여주기 때문에 작물간격조절장치의 설계시 한 가지 설계 지표가 될 수 있다.

본 연구에서 식재면적지표가 식물공장용 작물간격조절장치를 설계하고 평가하는 한 가지 기준이 될 수 있음을 보였다. 향후 공간에 대한 지표로 식재면적지표의 확장가능성을 검토해볼 예정이며, 작성된 시뮬레이션 프로그램을 보완하여 작물간격조절 장치 설계프로그램으로 발전시킬 계획이다.

감사의 글

This study was conducted by the research fund supported by Korea Institute of Planning and Evaluation for Technology of Food, Agriculture, Forestry and Fisheries (IPET). A preliminary version of this paper was presented at Proceedings of the KSAM 2011 Winter Conference.

참고 문헌

1. Chang, D. J., M. H. Kim, Y. H. Kim, D. B. Song, I. H. Oh, Y. S. Ryou, Y. S. Chang, S. O. Chung, B. K. Cho and C. S. Han. 2010. Agricultural Machine Design II. pp. 215-221. CIR Co. Seoul. (In Korean)

2. Chang, Y. S. 2000. Development of row spacing system for plant factory, PhD thesis, Chungbuk National University. p. 107 (In Korean)

3. Chang, Y. S., D. E. Kim, H. H. Kim, J. G. Kim, D. H. Lee and S. K. Kim 2005a. Development of vegetable row spacing system by slider and lugs. Proceedings of Korean Society for Agricultural Machinery 10(2):307-311. (In Korean)

4. Chang, Y. S., D. E. Kim, H. H. Kim, J. G. Kim and I. H. Yu. 2006. Utilization effect of sliding type crop row spacing system. Proceedings of Korean Society for Bio-Environment Control 15(1):63-69. (In Korean)

5. Chang, Y. S., H. G. Song and D. E. Kim 2005b. Development of a chain conveyor type row-spacing system for plant factory. J. of Bio-Environment Control 14(1):7-14. (In Korean)

6. Horibe, K., K. Mori, K. Matsuo and K. Kondoh. 1994. Cultivation experiments by two-dimensional plant transfer equipment. J. of the Japanese Society of Agricultural Machinery 56(3):109-115. (In Japanese)

7. Ioslovich, I. and Gutman, P.O. 2000. Optimal control of crop spacing in a plant factory. Automatica 36(11):1665-1668.

8. Mori, K. 1991. Automation technology. SHITA Report. 2:16-24. (In Japanese)

9. Park, K. W. 1994. Mass production of horticultural resources. Natural Resources Research 2:60-71. (In Korean)

10. Prince, R. P. and Bartok, J. J. W. 1978. Plant spacing for controlled environment plant growth. Transactions of the ASABE 21(2):0332-0336.

11. Seginer, I. and I. Ioslovich. 1998. Optimal spacing of a vegetative greenhouse crop. Acta Horticulturae 476:77-84.

12. Seginer, I. and I. Ioslovich. 1999. Optimal spacing and cultivation intensity for an industrialized crop production system. Agricultural Systems 62:143-157.