

고 고형분함량 감자의 수확시기 예측모형을 위한 식물체내 에너지 소모량 추정

정재윤*[†] · 서상곤**

*^(주)이오공감, **영남대학교

A Calculation Method of *in vivo* Energy Consumption in Estimation of Harvesting Date for High Potato Solids

Jae-Youn Jung*[†] and Sang-Gon Suh**

*E O Gong Gam Co., Ltd., GBTP, Gyeongsan 712-210, Korea

**Dept. of Horticultural Science, Yeungnam Univ., Gyeongsan 712-749, Korea

ABSTRACT A simulation modeling for predicting the harvesting date with high potato solids consists of development of mathematical models. The mathematical model on potato growth and its development should be obtained by using agricultural elements which analyze relations of solar radiation quantity, temperature, photon quantity, carbon dioxide exchange rate, water stress and loss, relative humidity, light intensity, and wind etc. But more reliable way to predict harvesting date against climatic change employs *in vivo* energy consumption for growth and induction shape in a slight environmental adaptation. Therefore, to calculate *in vivo* energy loss, we take a concept of estimate of the amount of basal metabolism in each tuber on the basis of $Wm = \int_t^m f(x)dt$ and $Tp = \frac{Tm \cdot Wm^{Tp}}{Wm^{Tm}}$. In the validation experiments, results of measuring solid accumulation of potato harvested at simulated date agreed fairly well with the actual measured values in each regional field during the growth period of 2005-2009. The calculation method could be used to predict an appropriate harvesting date for a production of high potato solids according to weather conditions.

Keywords : high potato solids, simulation, modeling, energy consumption, harvesting date, climatic change

우리나라에서 감자(*S. tuberosum*)의 재배 형태는 봄재배, 여름재배, 가을재배, 겨울재배 등으로 분화되어 4월 중순부터 이듬해 1월 중순까지 수확시기가 이루어지고, 특히 제주

도의 가을재배는 이듬해 2월말까지 수확이 가능하여 3월부터 4월 상순까지만 저장감자를 이용할 만큼 신선한 감자가 연중 공급되고 있다(고령지농업연구소, 2006; 농림수산통계연보, 2008). 이 때문에 과거에 봄재배와 여름재배가 대부분을 차지하던 재배형태는 최근 가을재배와 겨울 시설재배가 급격히 증가하면서 봄과 여름재배가 상대적으로 감소추세를 보여 점차 감자의 연간 생산이 균형을 이루어 간다.

하지만 여전히 봄재배의 의존도가 높은 우리나라는 성숙도가 높을수록 고형분함량이 높은 감자를 수확할 수 있음에도 불구하고, 장마라는 특이한 기후조건 때문에 고품질 감자생산을 위한 충분한 성숙도를 보장하지 못한다(고령지농업연구소, 2006). 게다가 일부 식용이외의 감자는 그 소비량을 따라가지 못하고 저장성, 원가문제 등으로 가공용 원료감자의 수급에 애를 먹고 있어 수입의존도가 크다. 우리나라의 가공용 감자시장은 재배면적이 세계 생산량 대비 0.02%수준으로 저조하고 최근 10년간 연 평균 5.3만톤을 수입하고 있으며, FAO통계(faostat.fao.org)자료와 한국농수산물유통공사통계정보(www.kati.net)를 보면 수입물량은 계속 증가추세에 있다. 수입감자의 저장성 문제와 우수한 먹거리에 대한 관심이 고조되면서 국내농산물에 대한 수요가 증가하였지만, 원가절감문제 등 가공업체의 어려움이 증대하고 있어 안정적 농산물량확보를 위한 정보제공 및 예측시스템의 요구가 급증하므로 이에 대한 연구와 기술개발이 시급하다.

우리나라의 예측시스템과 관련된 연구는 농업기상자료를 이용한 프로그램개발(안정렬 외, 1985)을 기점으로 1989년부터 농촌진흥청과 시스템공학연구소가 공동으로 주요작물 생산량 예측을 위하여 미국의 LANDSAT, 프랑스의 SPOT 위성 데이터를 분석하여 보리, 마늘, 양파 등의 재배면적과

[†]Corresponding author: (Phone) +82-53-801-9002 (E-mail) e-mail@ynu.ac.kr <Received February 9, 2010 >

경지이용도 분류 등을 분석하였다. 최근에는 지리정보시스템(GIS)을 이용하여 병해충의 발생이 우려되는 지역을 미리 예측하는 모델에 관한 연구(농업생산환경정보통합서비스시스템)가 시도되고 있다. 기후 여건이 특이한 우리나라의 경우 감자 식물체의 생육단계만으로 수확시기를 결정하는 데는 다소 무리가 있다. 특히 봄 재배에서는 대부분 수확기가 여름철 고온다습한 장마기와 조우되며, 이때에는 수확작업 자체가 곤란할 뿐만 아니라 습한 토양에서 수확된 괴경은 수확 후 관리과정에서 부패로 인한 손실이 많아진다. 이 경우 높은 온도로 인한 호흡량이 동화물질의 전류량을 증가하여 괴경의 건물율은 감소하게 되는데, 동화물질의 전류가 다소 미흡하더라도 장마기 이전에 수확작업을 마무리해야 하는 까닭에 그나마 적절한 수확시기를 예측할 필요가 있다.

또한, 국내산 감자를 수급하여 스낵가공용 원료감자로 이용하고자 계약재배를 하더라도 확보물량의 약 20%는 고형분함량 미달 등의 이유로 가공 부적합 판정을 받아 반품처리 되고 있는 실정(농업통계, naqs.go.kr)에서 소비요구에 대한 맞춤형 생산이 필요한 시기가 되었음을 알 수 있다. 제과업계에서는 100톤의 감자를 가공할 때 고형분함량 1%가 낮아지면 약 1천만원의 손실이 발생한다고 하니 우리나라 지형에서 흔히 발생하는 기후변화 요소인 온도변이와 강우의 영향을 고려하여 고 고형분함량(16%이상)의 원료감자 확보전략이 요구된다.

따라서 감자재배에 있어 점차 심각해지는 기후변화에 대응해 체계적인 관리와 출하시기 결정에 도움을 주어 고 고형분 함량의 감자 생산물량 확보에 필요한 예측시스템이 필요하다. 이를 위해 생육환경에서의 호흡량과 동화물질의 전류량을 계상할 때 소모되는 에너지를 추정하여 제한된 생육기간 중에서도 스낵가공용 원료로 적합한 고 고형분 함량의

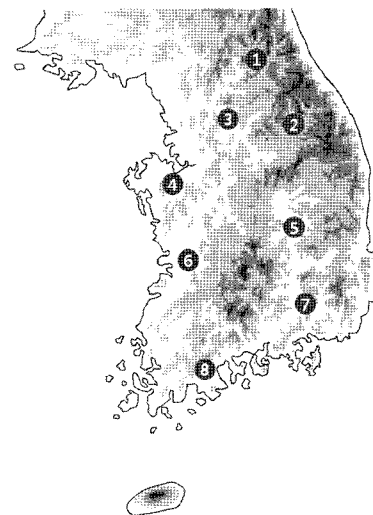
감자를 확보하려는 연구를 수행하고자 한다.

재료 및 방법

공시재료 및 자료수집

본 연구에서 이용된 공시재료는 대서와 두백 2개 품종이다. 전국에서 이들 품종을 재배하는 인제, 정선, 여주, 당진, 구미, 김제, 남지, 보성 등 8개 지역(그림 1)의 지역별 10,000 m² 포장에 6주/ m²로 재식하여 재배작황을 2005년부터 2009년까지 최근 5년간 감자의 파종시기부터 수확시기에 걸쳐 조사하고, 재배시기별 농업환경 기후정보를 수집하였다.

수집할 농업환경 기후정보의 대상은 감자의 생육에 주요한 환경인자(표 1 참조)인 평균기온, 강수량, 일조시간, 풍



1: Inje 2: Jeongseon 3: Yeosu 4: Dangjin
5: Gumi 6: Gimje 7: Namji 8: Boseong

Fig. 1. Regional fields information.

Table 1. Regarding factors of potato growth and development process on agricultural environment.

	Growth		Development	
	Mass	Expansion	Induction	Shape
Principal environmental factor	Solar radiation Water	Temperature Water	Temperature Photoperiod	Temperature
Variation on genotype	High	Low	High	Low
Sensitivity to plant water deficit	Stomate and wilting point	Low: tuber enlargement	Delay in vegetative stage	Damage to vascular system
Sensitivity to temperature degree days	Tuber formation	vegetative stage	High	High
Sensitivity to nitrogen content	Moderate: high solid High: low solid	High	Low	Luxuriant growth

속, 지중온도 등 5가지로 한다(Biemand and Vos, 1992; Katny *et al.*, 2005; 고령지농업연구소, 2006). 이는 감자의 생육에 주요한 영향을 미치는 요인으로 생태적 반응에 가장 민감한 생육적온(지중온도 포함)과 강수정도를 포함하고, 동화산물의 생산량을 추정하기 위한 광합성 환경을 예상할 효율적인 정보수집에 목적이 있다. 평균기온과 지중온도는 지역별 포장의 지상 1 m와 지하 20 cm에 온도계(TX-500, SK-1250)를 설치하여 측정하고, 일조시간은 포장의 정중앙에 일조시간계(Jordan Sunshine Recorder)를 설치하여 측정에 이용하였다. 또한, 강수량과 풍속은 포장의 정중앙에 간이기상관측계(WXT510)를 사용하여 측정 자료를 수집하였다.

수확시점에는 칼 피셔변법(Karl Fischer method)을 응용해 고형분 함량을 측정한 결과를 평균기온, 강수량과 비교하여 추이를 분석하였다. 재배농가에는 파종이후 5일 간격으로 방문하여 재배포장의 상황을 육안관찰하고 생육진전 정도와 성장지연에 대한 조사를 실시해서 이론적으로 정의한 기본 성장모형에 근거해 고 고형분함량의 수확적기 예측에 필요한 관측을 하였다.

수확시기 예측용 기본 성장모형

생육에 영향을 미치는 재배환경은 크게 재배관리기술, 토양환경, 수분환경, 대기환경, 온도환경, 광환경, 생물환경 등으로 나눌 수 있다. 이 중 각 지역 농업기술센터의 노력으로 제어될 수 있는 요소를 제외하고, 감자의 생육에 필요한 주요 환경 요인을 추출하였다. 선행 연구에서는 생육을 예측하기 위한 주요 인자들로 광, 온도, 일장, 수분, 질소에 따른 변이에 중점을 두고 있다(Biemand and Vos, 1992; Hajirezaei *et al.*, 2000; Katny *et al.*, 2005; 이변우 외, 2001). 이에 고품종의 동화물질 전류량을 계상하는 데 필요한 요인을 표 1과 같이 정리하였다.

농업생산체계에서 생물체에 존재하는 에너지는 유기물에 화학에너지 형태로 존재하는데, 화학에너지는 생육 환경에서의 다양한 대사반응으로 형성되지만 광합성에 의한 형성이 절대적이다. 감자가 동화조직으로부터 광합성을 통해 에너지를 발생시키고 유관속조직을 통해 토양의 양분을 흡수해 성장에 필요한 에너지를 응집시키는 것을 기본식으로 나타내면 다음 수식 (1)과 같다.

$$\Delta W = f(x), f(x) \geq 0 \quad \text{수식 (1)}$$

여기서 x 는 대표적 동화조직인 잎의 광합성에 필요한 광, 이산화탄소, 물의 흡수량과 뿌리를 통한 양분흡수량이다. 고령지농업연구소(1993)에서는 감자성장시물레이션 모델

을 정의하는 데 있어 위 기본식에 시간개념을 부여한 $\Delta W/\Delta t$ 모형을 도입하였다. 이는 시간의 지속에 대한 성장율을 보인 것으로 흡수일사량에 비례하는데 흡수일사량은 일사량과 엽면적에 정의 상관관계로 의존하게 된다. 고령지농업연구소(1993)의 $\Delta W/\Delta t$ 개념을 정리하여 나타내면 다음 수식 (2)와 같다.

$$\Delta W/\Delta t = (D/(N \cdot \Delta LA)) \cdot \Delta A \quad \text{수식 (2)}$$

여기서 D 는 재식밀도, N 은 개체, ΔLA 는 엽면적신장율, ΔA 는 광합성율이 된다. 본 연구에서는 가공에 적합한 고형분 함량의 감자를 언제 수확해야 하는가에 대한 수확적기를 예측하기 위한 성장모형개발이 목표이므로 시간변이에 중점을 두어 출현기와 수확기를 각각 t_0 , t_m 이라하는 Δt 의 개념을 적용해 성장량 ΔW 를 수확적기의 성장량 W_m 으로 나타내면 다음 수식 (3)과 같다.

$$W_m = \int_{t_0}^{t_m} f(x) dt \quad \text{수식 (3)}$$

이렇게 하면 광합성율과 양분흡수에 따른 작물의 성장과 관련된 과정과 기상요인과의 관계를 모두 포함할 수 있는 성장모형이 된다. 한편 수확적기의 성장량 W_m 은 각 지역별 수확시기까지의 성장기간을 설정하는 파라미터가 된다.

결과 및 고찰

재배형태로 보았을 때 여름재배지인 인제와 정선은 4월 초순에 파종하여 9월 중순까지 수확한다. 여주, 당진, 구미, 김제, 남지가 속하는 봄재배지에서는 남지를 제외한 여주, 당진, 구미, 김제가 3월 중순에 파종하여 7월 상순까지 수확하고, 남지는 2월 하순에 파종하여 6월 중순까지 수확한다. 보성은 1월 중순에 파종하여 6월 중순까지 수확하는 이른 봄재배지로 겨울철에 파종하는 만큼 만작재배를 하는 곳이다. 여름재배지인 인제와 정선도 파종시기가 타지역에 비해 1개월 가량 늦어진 만큼 장마기간을 포함하여 보성지역처럼 만작재배형태를 띤다. 각 지역별로 포장의 파종시기부터 수확시기까지 최근 5년간(2005년~2009년) 평균기온, 상대습도, 강수량, 풍속, 일조시간, 지중온도 등 농업환경요소를 조사한 결과는 표 2에 요약하여 나타내었다.

표 2에서 보면 여름재배지인 인제와 정선은 9월에 접어들면 강수량이 200 mm이하로 감소추세가 되어 고형분함량이 높아지고, 장마로 인해 충분한 일조시간을 확보하지 못

Table 2. Agricultural environment factors in each regional field on farming days for the last 5 years(2005~2009).

Local	Environmental Factor	Month									Cropping Type
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Inje	Mean Temp. (°C)				10.6	15.9	20.3	23.1	23.9	19.0	Spring
	RH (%)				56.8	63.8	70.0	79.8	78.0	77.0	
	Precipitation (mm)				57.8	104.8	147.4	431.1	242.1	151.8	
	Wind (m/s)				2.5	2.2	2.1	1.9	2.0	1.9	
	Sunshine (hr)				175.5	198.7	186.9	118.5	160.4	144.3	
	Soil Temp. (°C)				10.7	17.8	23.6	25.5	26.6	21.2	
Jeongseon	Mean Temp. (°C)				11.4	16.7	21.1	23.7	24.5	19.6	Spring
	RH (%)				53.8	61.3	68.5	79.3	76.5	75.0	
	Precipitation (mm)				48.6	84.0	126.7	274.3	267.5	167.0	
	Wind (m/s)				2.2	1.8	1.6	1.3	1.4	1.5	
	Sunshine (hr)				188.8	215.6	181.6	104.8	149.0	138.8	
	Soil Temp. (°C)				13.7	21.0	25.6	26.8	28.4	23.2	
Yeoju	Mean Temp. (°C)			5.1	12.0	17.6	21.9	24.3			Spring
	RH (%)			64.8	59.5	65.0	72.5	82.3			
	Precipitation (mm)			56.8	56.6	95.0	138.0	459.2			
	Wind (m/s)			1.8	1.8	1.5	1.3	1.1			
	Sunshine (hr)			197.7	196.6	220.3	180.3	113.7			
	Soil Temp. (°C)			5.6	13.2	19.4	25.5	26.1			
Dangjin	Mean Temp. (°C)			4.6	10.8	16.2	21.0	26.1			Spring
	RH (%)			67.5	67.3	71.5	77.5	23.9			
	Precipitation (mm)			48.6	57.2	97.2	153.9	86.3			
	Wind (m/s)			3.2	3.4	3.0	2.8	368.3			
	Sunshine (hr)			204.0	201.0	228.7	159.5	2.7			
	Soil Temp. (°C)			6.7	12.9	19.2	23.8	94.5			
Gumi	Mean Temp. (°C)			6.2	12.8	18.2	22.0	25.7			Spring
	RH (%)			55.3	54.5	60.8	72.0	24.2			
	Precipitation (mm)			37.9	40.1	59.4	110.8	82.8			
	Wind (m/s)			2.7	2.3	1.8	1.3	205.5			
	Sunshine (hr)			204.8	199.5	224.9	176.4	1.1			
	Soil Temp. (°C)			7.9	14.4	21.6	25.8	112.1			
Gimje	Mean Temp. (°C)			6.7	13.1	18.5	23.0	26.8			Spring
	RH (%)			60.3	58.0	62.3	69.5	25.8			
	Precipitation (mm)			54.9	45.4	90.9	155.1	78.3			
	Wind (m/s)			2.3	2.4	2.2	2.0	351.4			
	Sunshine (hr)			193.6	195.6	215.6	159.0	2.1			
	Soil Temp. (°C)			8.6	15.3	21.7	25.6	99.0			
Namji	Mean Temp. (°C)		2.2	7.1	12.9	17.8	21.9				Early Spring
	RH (%)		51.3	54.5	56.8	60.8	67.0				
	Precipitation (mm)		23.5	56.3	65.1	125.4	143.8				
	Wind (m/s)		1.5	1.6	1.8	1.6	1.5				
	Sunshine (hr)		185.2	205.3	198.8	208.0	144.8				
	Soil Temp. (°C)		2.8	7.7	14.7	20.9	24.8				
Boseong	Mean Temp. (°C)	1.3	2.2	6.4	11.9	17.0	21.2				Early Spring
	RH (%)	67.0	63.3	64.5	67.0	71.5	78.3				
	Precipitation (mm)	22.2	38.3	76.5	89.9	188.3	199.2				
	Wind (m/s)	2.7	3.1	2.8	2.5	2.3	2.1				
	Sunshine (hr)	151.5	181.6	206.2	204.3	227.8	145.4				
	Soil Temp. (°C)	1.5	3.0	8.2	14.6	20.9	24.6				

한 만큼 괴경의 비대기를 늘릴 수 있어 수확적기가 된다. 봄재배지인 여주, 당진, 구미, 김제는 수확기인 7월이 장마와 겹쳐 많게는 450 mm이상의 강수를 보이므로 3~4일 정도의 소강상태가 되면 서둘러 수확을 해야 하는 단점이 있다. 봄재배지인 남지와 이른 봄재배지인 보성은 재배형태가 약간 상이하긴 하나 두 지역의 수확기가 6월에 집중되어 장마가 시작되기 전에 재배를 완료할 수 있어 파종기의 저온피해를 회피할 수 있게 멀칭재배만 잘하면 가공용 원료감자의 재배지로 적절하다고 생각된다.

가공용 원료감자는 만작을 선호하지 않고 필요시 물량을 수급하기 때문에 출현 이후 수확기까지 품종간 차이는 없으며, 파종시기에는 지중온도에 영향을 많이 받아 지역별 편차가 심해 출현시기를 기준으로 감자의 수확적기를 예측하는 것이 바람직하다고 판단된다(표 3).

기본 성장모형에 표 2에서 나타낸 농업환경요소를 적용하면 지역별 평균 수확적기를 산출할 수 있는데 이론적으로는 출현 후 85일 정도가 지나면 수확적기가 될 수 있으나 실상은 그렇지 못하다. 이는 광합성 산물이 저장기관에 축적되는 정도가 균일하지 못하다는 것으로, 축적되지 않고 손실되는 양을 추정하여 보다 정밀한 예측이 필요함을 나타낸다.

괴경형성과 비대에 기여하는 광합성은 광조건, 온도효과, 수분스트레스, 수분손실, 이산화탄소 농도 등에 영향을 받으며(Biamond and Vos, 1992; Hajirezaei *et al.*, 2000; Katny *et al.*, 2005; 이변우 외, 2001), 이는 광합성율로서 시스템에서는 변환효율(g/MJ)과 일사량에 따른 수량증가로 본다. 광합성율은 기본 성장모형을 설명하는 수식 (2)에서 ΔA 에 해당하는 요소이다. 광합성율 ΔA 를 요약해 보면 수식 (4)와 같다.

$$\Delta A = PHO_{max} \cdot BM \cdot f_1(QP) \cdot f_2(TP) \cdot f_3(H_2O/g) \cdot f_4(WS) \cdot f_5(CO_2) \quad \text{수식 (4)}$$

PHO_{max}: max. photoperiod, BM: biomass, QP: quality of photo.(irradiance & wavelength), TP: temperature potential, WS: water stress(involving water loss)

동화조직에서 수분스트레스나 손실이 없을 때 일조시간과 이산화탄소가 풍부해지면 활발한 광합성산물 생산으로 이어져 광합성율 ΔA 를 높이며 성장량 ΔW 가 증대된다(Fernie and Willmitzer, 2001; Tsegaw and Zelleke, 2002). 성장량 ΔW 의 증대는 수확적기의 성장량 W_m 으로의 도달시간을 단축시키게 되며, 그 반대의 경우 지연시키게 된다. 이는 다음과 같이 수식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$T_p = \frac{T_m \cdot W_m^{T_p}}{W_m^{T_m}} \quad \text{수식 (5)}$$

여기서 수확시기를 T_p , 과거 평균 수확시기를 T_m 라 하자. T_p 는 지역의 과거 평균 수확시기 T_m 일 때의 수확적기 성장량 $W_m^{T_m}$ 으로 성장량 $W_m^{T_p}$ 과 수확시기 T_m 과의 연산량을 나누어 주면 산출된다. 이렇게 하여 산출한 수확시기 T_p 를 실제 수확기와 비교하면 표 4(S₁)와 같다.

그러나 표 4에서 기본 성장모형에 의해 산출된 수확시기 S₁에 수확한 감자의 고형분 함량을 측정해 보면 2006년 남지, 2007년 남지와 보성, 2008년 정선, 당진, 구미, 보성, 2009년 보성을 제외하고 실제 수확시기에 비해 유사하거나 낮은 것으로 나타났다(표 5). 이는 기존의 기본 성장모형에서 갑작스런 저온현상이나 고온현상, 강수 등의 외부환경에 식물체가 대응해 사용하는 에너지 소모를 계상(Ahuja *et al.*, 2002; Papajorgji and Pardalos, 2005)하여 수확적기의 성장량 $W_m^{T_m}$ 에 도달하는 시기를 더 정밀하게 산출하는 메카니즘이 필요함을 나타낸다.

Table 3. Days to emergence in each regional field.

Field	Seeding date	Year					Mean
		2005	2006	2007	2008	2009	
Inje	15 April	35 ^c	33 ^b	34 ^b	33 ^b	33 ^b	34 ^b
Jeongseon	5 April	32 ^b	32 ^b	31 ^{ab}	32 ^b	32 ^{ab}	32 ^{ab}
Yeoju	20 March	31 ^{ab}	30 ^{ab}	30 ^a	31 ^{ab}	31 ^{ab}	31 ^{ab}
Dangjin	5 March	30 ^a	29 ^a	30 ^a	30 ^a	29 ^a	30 ^a
Gumi	5 March	31 ^{ab}	30 ^{ab}	30 ^a	29 ^a	30 ^a	31 ^{ab}
Gimje	15 March	29 ^a	28 ^a	31 ^{ab}	30 ^a	30 ^a	29 ^a
Namji	1 March	30 ^a	28 ^a	29 ^a	29 ^a	29 ^a	30 ^a
Boseong	15 January	45 ^d	43 ^c	44 ^c	45 ^c	45 ^c	45 ^c

^{a, b, c}: Mean separation within columns by Duncan's multiple range test at P=0.05.

Table 4. Actual harvesting date and suggested date by simulation in each regional field.

Field	Year															Mean (15yrs)
	2005			2006			2007			2008			2009			
	H	S ₁	S ₂	H	S ₁	S ₂	H	S ₁	S ₂	H	S ₁	S ₂	H	S ₁	S ₂	
Inje	86	82	85	80	81	78	86	83	80	95	84	89	80	84	81	85
Jeongseon	90	87	84	85	84	87	89	85	84	89	85	86	75	78	81	86
Yeoju	71	73	70	73	72	74	70	74	76	75	74	77	76	75	77	73
Dangjin	69	70	72	71	70	73	68	71	70	73	73	71	73	72	75	71
Gumi	64	65	68	69	68	71	67	70	71	73	70	72	74	73	72	69
Gimje	67	65	69	71	70	73	70	71	69	67	70	69	69	70	72	69
Namji	63	66	67	65	68	70	68	69	72	61	65	66	75	70	68	66
Boseong	87	89	91	94	90	88	82	85	87	81	86	88	84	82	85	86

H: Days to harvest, S₁: Simulated days on a basic model, S₂: Simulated days on a modified model

Table 5. Results of measuring solid accumulation for harvesting potato of actual date and suggested date in each regional field.

Field	Year														
	2005			2006			2007			2008			2009		
	H	S ₁	S ₂	H	S ₁	S ₂	H	S ₁	S ₂	H	S ₁	S ₂	H	S ₁	S ₂
Inje	14.34	14.01	14.87	15.48	15.48	15.67	15.17	14.98	15.29	16.01	15.74	16.00	15.90	15.78	16.21
Jeongseon	15.01	15.00	15.11	15.33	15.01	15.34	15.34	15.02	15.41	15.99	16.04	16.03	15.85	15.80	16.02
Yeoju	16.11	15.87	16.45	15.90	16.00	16.21	16.01	15.98	15.99	16.21	16.01	16.74	16.37	15.98	16.91
Dangjin	16.02	15.48	16.00	16.38	16.12	16.98	17.75	15.99	17.77	16.58	16.61	16.78	17.49	16.98	17.41
Gumi	17.02	17.01	17.36	17.27	17.22	17.01	17.20	16.87	17.33	16.90	17.01	17.25	17.10	16.64	17.31
Gimje	17.25	16.91	17.20	16.70	16.66	17.21	18.71	17.96	18.88	16.70	16.55	16.98	16.60	15.97	16.71
Namji	17.11	16.99	17.52	16.33	16.54	16.72	17.89	18.00	18.21	16.75	17.09	17.25	17.37	16.84	17.50
Boseong	16.74	16.55	17.00	16.76	16.70	16.99	17.17	17.33	17.31	16.43	16.53	16.50	15.74	16.02	16.44

H: Days to harvest, S₁: Simulated days on a basic model, S₂: Simulated days on a modified model

따라서 기본 성장모형에서 수확적기의 성장량 $W_m^{T_m}$ 에 도달하는 시기 계상에 필요한 식물체내 에너지 소모를 ΔE 라 하면, ΔE 를 정의하기 위해 한 식물체내 감자가 총 N 개의 괴경 $i=1,2,\dots,N$ 가 있다고 하자. 이 괴경들은 여러 개의 지경에 분산되어 있을 수도 있고 한 지경에 위치할 수도 있다. 괴경 i 의 비대 속도를 s_i 라고 하자. 또한 괴경 i 가 비대 속도 s_i 로 비대해질 때 필요한 에너지 소모량을 $p_i(s_i)$ 라고 하자. 그리고 식물체가 속해있는 외부환경에 대처하면서 괴경이 비대하기 위해 사용해야 할 소모에너지 요구들 $j=1,2,\dots,J$ 가 있다고 하자. 소모에너지 요구 j 에 의해 총 사용되어야 할 괴경비대 소모에너지량을 r_j 라고 하자. 이 괴경비대 소모에너지 총사용량 r_j 는 단일식물체 내 괴경들

$I_j \subset \{1,2,\dots,N\}$ 에 분산되어 사용된다고 하자. 여기서 괴경 $i \in I_j$ 는 소모에너지 요구 j 에 대해 x_{ij} 만큼의 에너지를 사용하며, $\sum_{i \in I_j} x_{ij} = r_j$ 이다. 괴경비대에 소모되는 소모에너지 요구 j 의 발생은 복지신장기 이후 괴경형성기에 접어들면 지하부에서 동시다발적으로 괴경이 형성되면서 괴경수만큼의 요구 j 가 시작되며, 요구 j 에 의한 괴경비대 소모에너지의 유관속조직을 통한 제공에 대한 전체 요구량은 요구 j 가 원형질연락사를 통해 시작된 세포에서 계산이 이루어진다고 간주한다.

감자식물체가 속한 환경에서 한정된 저장물질을 괴경에 저장하여 비대해지기 위해 에너지를 소모할 경우, 여러 개

의 과정에서 유관속조직을 통해 저장물질을 제공할 과정에서 소모에너지 분배의 최적화는 다음과 같이 수식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{minimize } \sum_i \left(p_i(s_i) \frac{\sum_j x_{ij}}{s_i} \right) + \sum_j \sum_{i \in I_j} x_{ij} (\alpha p_{ji} d_{ji} + \beta p_{ij} d_{ij}) \\ & \text{subject to} \\ & \max_{i \in I_j} \left(\frac{x_{ij}}{s_{ij}} + d_{ji} + d_{ij} \right) \leq D_j, \quad \forall j = 1, 2, \dots, J \\ & \sum_i x_{ij} = r_j, \quad \forall j = 1, 2, \dots, J \\ & \sum_j s_{ij} = s_i, \quad \forall i = 1, 2, \dots, N \\ & \text{over } x_{ij} \geq 0, \quad s_i \geq 0, \quad s_{ij} \geq 0 \end{aligned} \quad \text{수식 (6)}$$

목적 함수의 첫 번째 항은 각 과정 내에 물, 당, 전분, 지방, 단백질 등의 저장물질을 저장하면서 과정비대를 위해 소모되는 에너지량을 나타낸다. 과정 i 로부터 저장물질의 수송을 요구받은 과정비대 과정 $\sum_j x_{ij}$ 을 수행하는 데 $(\sum_j x_{ij})/s_i$ 의 시간이 걸린다. 그러므로 과정 i 에서의 과정비대를 위한 총 에너지 소모량은 $p_i(s_i) \left(\sum_j x_{ij} \right) / s_i$ 가 된다. 목적 함수의 두 번째 항은 유관속조직을 통해 과정으로 저장물질을 수송하는 과정에서 소모되는 에너지량이다. 요구 j 가 시작된 세포에서 저장물질 분배와 수송에 대한 소모에너지량을 원형질연락사를 통해 각 과정 $i \in I_j$ 들에게 전달해야 한다. 여기서 과정 i 가 받아야 할 에너지에 대한 사용량은 x_{ij} 에 비례한다고 가정하여 αx_{ij} 라 하고 저장물질 수송에 소모되는 시간을 d_{ji} 라고 하자. 또한 단일식물체 전역의 에너지 분배 계획은 이미 결정되어 있으며, 모든 기관으로 연결된 유관속조직 내 물질수송과 에너지 전달이 동일한 속도로 이루어진다고 가정한다. 여기에 모든 과정에 연결된 유관속조직을 통해 과정비대 소모에너지를 전달하는 과정에서 소모되는 전달 에너지 소비량을 p_{ji} 라고 하자. 요구 j 는 과정 i 가 비대하는 데 αx_{ij} 만큼의 과정비대 소모에너지 사용량을 요구하므로 여기에 총 $\alpha p_{ji} x_{ij}$ 의 에너지가 사용된다. 그러므로 요구 j 에 따른 과정비대 소모에너지에 관한 사용량 즉 에너지 총 소비량은 $\alpha \sum_{i \in I_j} p_{ji} x_{ij} d_{ji}$ 가 된다. 한편 I_j 에 속하는 각 과정들이 과정비대에 소모할 에너지를 요구 j 가 시작된 세포로 전달하는 데 소모되는 에너지를 고려해 보자. 과정 i 가 보내야 할 에너지 요구에 대한 과정도 x_{ij} 에 비례하여 βx_{ij} 의 값을 갖는다고 하고, 수송 시간을 d_{ij} 라고 하면 요구 j 에

대해 세포로의 전달에 사용되는 에너지량은 $\beta \sum_{i \in I_j} p_{ij} x_{ij} d_{ij}$ 가 된다. 그러므로 요구 j 의 에너지 배분에 따른 전달 에너지 소모량은 다음과 같이 목적함수의 두 번째 항이 된다.

$$\sum_{i \in I_j} (\alpha p_{ji} x_{ij} d_{ji} + \beta p_{ij} x_{ij} d_{ij}) = \sum_{i \in I_j} x_{ij} (\alpha p_{ji} d_{ji} + \beta p_{ij} d_{ij})$$

일반적으로 과정이 과정형성기에 도달하여 비대해지기 시작하면 심각한 환경변이가 일어나지 않는 이상 일정 시간 내에 과정비대가 지속된다. 이를 반영하여 요구 j 에 대한 시간 D_j 안에 비대가 시작된 과정에 저장물질과 비대에 필요한 에너지가 전해져야 한다고 하자. 하나의 과정이 단순히 과정비대에 대한 에너지만 소비하는 것이 아니라 토양 환경이나 기후환경의 변이에 대응하기 위한 여러 소모에너지를 요구하게 되며 동시에 소비되는 에너지에 대한 전달 에너지도 분배가 필요하다. 과정 i 에서 에너지 사용량 x_{ij} 들에게 분배되는 일정한 소비 속도를 s_{ij} 라고 할 때 요구 j 에 대한 지연은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\max_{i \in I_j} \left(\frac{x_{ij}}{s_{ij}} + d_{ji} + d_{ij} \right) \leq D_j$$

괄호 안의 첫 번째 항은 과정 i 에서 비대과정에 따른 에너지 사용량 x_{ij} 가 소모되는 데 걸리는 시간이고, 두 번째 항과 세 번째 항은 비대과정에 따른 에너지 사용량 x_{ij} 에 대한 정보와 소비에너지 요구에 걸리는 시간이다. 여기에는 비대과정에 사용되는 지연시간 D_j 에 대한 시간 개념에 있어 최대 지연시간으로 결정된다는 가정을 전제하여 기후변화에 따른 최대 지연개념을 둔다. 이렇게 해서 정의한 ΔE 를 성장량 Wm 의 계상에 적용해 수식 5를 통한 수확시기를 산출한 결과는 표 4(S₂)와 같고, 해당 시기에 수확한 감자의 고형분함량 측정치와 비교(표 5)하면 이전 성장모형보다 향상된 결과를 얻을 수 있었다.

이 연구에서 제안하는 에너지 소모량 추정 원리를 여타 작물의 생육모형에 적용할 경우 광합성 생성물이 저장기관으로 전류되는 수준을 보다 정밀하게 추정할 수 있어 기존의 예측 결과값의 오차수준을 많이 낮출 것으로 기대된다.

적 요

고 고형분함량 감자 생산을 위한 수확시기를 예측하는 데 있어 에너지 소모량의 추정에 대한 연구결과는 다음과 같다.

1. 각 지역별로 포장의 파종시기부터 수확시기까지 최근 5년간(2005년~2009년) 평균기온, 강수량, 상대습도, 일조시간, 바람, 지중온도 등의 농업환경을 조사한 결과 파종기 저온피해와 괴경비대기 장마기간을 회피한다면 가공용 원료감자는 가공품 생산에 필요시마다 물량을 공급하기 때문에 만숙재배를 하지 않아 품종의존도가 낮아 수확시기의 환경에 대한 비중이 큰 것으로 판단되었다.
2. 파종시기부터 출현까지에는 지중온도에 영향을 많이 받아 지역별 편차가 심해 시뮬레이션에서는 출현시기를 기준으로 감자의 수확적기를 예측하는 것이 바람직하였다.
3. 수확시기를 예측하기 위한 성장모형은 $Tp = \frac{Tm \cdot Wm^{Tp}}{Wm^{Tm}}$ 를 사용하고, 성장량 Wm 을 계산하는 기본 성장모형은 $Wm = \int_i^m f(x)dt$ 를 사용하였다.
4. 기본 성장모형을 통해 Wm 을 계산할 때는 광합성율(ΔA)과 식물체내 에너지 소모(ΔE) 개념을 적용해야 보다 정밀한 수확시기를 예측할 수 있었으며, 식물체내 에너지 소모에 대한 정의는 기후변화에 대응하여 농업환경에 대처하는 식물체내 에너지 소모를 계산하는 것으로 최근 5년간(2005년~2009년) 수확시기에 따라 고형분함량을 측정한 결과 광합성율만 계산할 때보다 에너지 소모개념을 적용한 것이 효과적이었다.

사 사

본 연구는 농림수산물부 연구개발사업의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드린다.

인용문헌

- Ahuja, L.R., Ma, L., and Howell, T.A. 2002. Agricultural System Models in Field Research and Technology Transfer, CRC Press.
- Bimond, H. and Vos, J. 1992. Effects of nitrogen on the development and growth of potato plant. 2. The partitioning of dry matter, nitrogen and nitrate. *Ann. Bot.* 70, 37-45.
- Fernie, A.R. and Willmitzer, L. 2001. Molecular and biochemical triggers of potato tuber development. *Plant Physiol.* 127, 1459-1465.
- Hajirezaei, M.R., Takahata, Y., Trethewey, R.N., Willmitzer, L., and Sonnewald, U. 2000. Impact of elevated cytosolic and apoplastic invertase activity on carbon metabolism during potato tuber development. *J. Exp. Bot.* 51, 439-445.
- Katny, M.A.C., Hoffmann-Thoma, G., Schrier, A.A., Fangmeier, A., Ja'ger, H., Bel, A.J.E. 2005. Increase of photosynthesis and starch in potato under elevated CO₂ is dependent on leaf age, *Plant Physiol.* 162, 429-438.
- Papajorgji P.J. and Pardalos., P.M. 2005. Software Engineering Techniques Applied to Agricultural Systems: An Object-Oriented and UML Approach, Springer.
- Tsegaw, T. and Zelleke, A. 2002. Removal of reproductive growth increased yield and quality of potato (*Solanum tuberosum* L.) *Trop. Agric.* 79(2), 125-128.
- 과학기술처. 1993. 기상정보에 의한 지역농업생산력 및 병해충 예측 기술개발(I), 고령지농업연구소 주관 1차년도 보고서.
- 고령지농업연구소. 2006. 감자총서. 농촌진흥청.
- 농림수산물부. 2008. 농림수산물통계연보 2008, 농림수산물부.
- 안정렬, 한원식, 정영상. 1985. 농업기상자료 이용을 위한 전산 프로그램개발, 농사시험연구논문집 27(1): 60-63.
- 이변우 외 25인. 2001. 농업기상학, 향문사.
- 농업생산환경정보통합서비스시스템, http://http://acis.rda.go.kr:8080/Analyzer6_Server/jsp/main/Main.jsp