# Estimation Model of the Change in Dairy Leaf Surface Temperature Using Scaling Technique

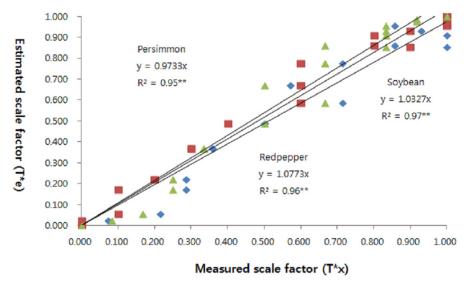
Ki-Cheol Eom\* and Ho-Yong Eom

SEjong Institute of Data Analysis (SEIDA), Suwon 443-766, Korea

(Received: September 27 2013, Accepted: October 2 2013)

This study was conducted to develop a model to estimate crop leaf surface temperature. The results were as following; A definition for the daily time based on elapsed time from the midnight (00:00) as  $^{\top}$ E&E time\_J with the unit of Kmin. was suggested. The model to estimate the scaled temperature (T\*e) of crop leaf surface temperature by scale factor (T\*) according to the  $^{\top}$ E&E time : Kmin. J (X) was developed as eq. ① T\*e = 0.5  $\cdot$  sin (X + 780) + 0.5 ② T\* = (Tx - Tn) / (Tm - Tn), Tx : Daily leaf temperature, Tm : Daily maximum leaf temperature, Tn : Daily minimum leaf temperature. Relative sensitivity of the measured temperature compared to the estimated temperature of red pepper, soybean and persimmon was 1.078, 1.033 and 0.973, respectively.

**Key words:** Leaf surface temperature, Scaling technique, Relative sensitivity



Relationship between the measured and estimated scale factors for the leaf surface temperature.

<sup>\*</sup>Corresponding author: Phone: +821088568765, E-mail: kceom6578@hanmail.net

<sup>§</sup>Acknowledgement: This study was carried out with the support of "Cooperative Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No. PJ009123)", Rural Development Administration, Republic of Korea.

#### Introduction

작물의 생육 상태를 알기 위하여서는 수분이나 양분의 흡수상태 등 여러 요인을 조사하여야 하지만, 작물체의 온 도는 생육상태와 관련된 하나의 지표 (indicator)가 되기도 한다.

그러나 작물 체내의 온도를 측정하기 위해서는 thermocouple (Scott, 2000 : Lal and Shukla, 2004) 등 고가의 측정기와 고도의 측정 기술이 있어야 하며, 체내 온도와 표면 온도와 는 당연히 상관이 있기 때문에. 작물생리 연구 등에 있어서 비교적 측정이 용이한 작물체의 표면 온도 또한 중요 연구 대상 중의 하나일 것이다. 또한 작물체의 어느 부위에 대하 여 표면온도의 변화 양상을 구명하기 위하여서는 작물의 생 육기간 동안 경시적으로 매일 일정한 시각에 조사를 하여야 할 것이다. 그러나 측정 대상 온도의 일중 변화 양상을 구명 하면 하루 중 시각 별 상대 측정치가 산정 가능하므로 경시 적으로 측정할 경우에도 매일 같은 시각에 측정하지 않아도 될 것이다. 하지만 이에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 특히 작물 잎 표면온도의 일중 변화양상을 예측 또는 추정 할 수 있는 모형이 개발되면 작물 관련 연구에 매우 도움이 되리라 생각된다. 물론 현재까지의 modeling과 관련된 많은 연구결과를 활용하면 그 변화양상을 추정할 수도 있겠으나. 이들 모형은 대부분이 외국에서 개발되었으며 워낙 복잡한 이론 도입과 실제 작물 재배 조건과 잘 맞지 않는 가정 하에 서 유도된 수학적인 함수에만 의존하고 있는 것들이 대부분 이어서 그 활용정도는 매우 낮은 실정이다 (Eom et al., 1995).

따라서 활용성 있는 간편한 모형 개발이 요구되는 실정이다. 이를 위해서는 몇 가지 공시작물에 대하여 연중 그 변화폭이 가장 큰 시기의 변화양상 구명을 통하여 타 작물 또는 타 생육기에도 적용 가능한 모형이 개발 되어야 할 필요성이 있다고 생각된다.

이와같은 모형 개발에 유용하게 활용되는 연구 방법 중하나가 Scaling technique (Miller and Miller, 1955a, 1955b: Hillel and Erick, 1990: Eom & Eom, 2008)일 것이다. 즉, 어떤 조건에서 실측한 온도 data를 이용하여, 다른 경우의 온도 특성과 가장 관련 있는 변환계수인 scale factor를 구하여 추정 대상 온도 변화에 대한 일반적인 경향을 파악할 수 있게 해 주는 방법으로서, scale factor를 구하는 방법에 따라 dimensional 분석법, inspectional 분석법 및 similitude 분석법으로 대별 될 수 있다 (Patricia and Nielsen, 1984: Eom et al., 1995). 이 중에서 온도 변화와 관련하여서는 어떤 물체 내에서의 열 이동은 Fourier's law를 따를 것이라는 가정 하에 similitude 분석법에 기초하여 회귀계수 유도에의한 기법이 가장 활용도가 높다고 할 수 있다 (Patricia and Nielsen, 1984).

뿐만 아니라, 어떤 모형이 개발되어 그 모형에 의한 예측 또는 추정치의 정밀도를 분석하여 실측 시 같은 정밀도를 얻기 위해 요구되는 상대적 반복치의 수를 산정할 수 있는 방법으로는 상대정밀도 (Relative sensitivity: RS) 분석 방법 (Mandel, 1964: Eom et al., 1988)이 활용되고 있다.

따라서 본 연구에서는 작물 잎 표면온도에 대하여 similitude 분석법에 기초한 scale factor를 구하여, 일반적으로 활용 가능한 작물 잎 표면 온도의 일중 변화 양상을 추정 할 수 있는 모형을 개발하고, 이 모형을 이용하여 공시 작물 별 같은 정밀도를 얻기 위해 필요한 상대적 측정 반복수를 산정비교 분석하고자 하였다.

본 연구는, 금후 물질의 표면온도 관련 연구, 특히 작물 잎 또는 다른 물체의 표면온도 측정 시 경시적 측정이 요구 되는 경우나, 측정 반복치 결정 등에 기여 할 수 있으리라 생각되다.

## Materials and Methods

본 연구는 고추 (품종명:금강석)와 콩 (품종명:황금콩) 및 감나무 품종명:부유)를 공시작물로 하여, 수원 (매산로 2가) 농가 포장에서, 2013년 폭염기인 6월 16일과 8월 19일 2회에 걸쳐 약 30~90분 간격으로 24시간동안 열적외선 표면온도측정기 (SK-8700II: 오차범위 0.5℃)를 이용하여 직사광선을 받지 않는 작물잎 표면온도를 측정하여 2회 측정치의 평균값을 근거로 하여 작물잎 표면온도의 일중변화양상을 분석하였다.

본 연구에서, 하루의 시각을 자정을 기준으로 하여 기준일 자정으로부터 다음일 자정까지의 24시간에 대하여 기준일 자정을 0으로 하여 그로부터 경과된 시간을 분 단위로나타내어 「E&E time」이라 명명하고, 하루 24시간인 1,440분을 「Kmin. 또는 K분」이라고 명명한 단위로 표시한 시각에 따라 시각 (Kmin.)별 작물체 잎 표면온도의 변화양상을 분석하였다.

작물체 잎 표면온도의 일중변화 양상을 추정하기 위한 모형은 식 ①과 같은 sin함수의 형태로 개발하였다.

$$T = a \cdot \sin [b \cdot (x + c)] + d$$

단, T는 잎 표면온도(°C), x는 E&E time (Kmin.), a, b, c, d는 계수임.

상기 모형의 계수는 다음과 같이 설정하였다. a값은 일중 변화 진폭의 1/2에 해당하는 값을 뜻하는 계수이므로 실측한 최고온도와 최저온도 차이의 1/2값으로 설정하였으며, b 값은 주기를 뜻하는 계수이므로 하루를 1주기로 하였기에 1.0을 적용하였다. c값은 sin함수 graph의 기준시각과 관련된 계수이므로 실측치의 graph형태 (Fig. 1)에 근거하여자정시각이 0이 되도록 graph를 x축 방향으로 평행이동 시키는 값을 적용하였다. d값은 최고온도와 최저온도의 평균치가 graph의 중심에 오면서 실측치가 y축에 표현될 수 있도록 graph를 y축 방향으로 평행이동 시키는 값을 적용하였다.

본 연구는, 작물체 잎 표면온도의 일중변화양상을 폭염기에 조사한 결과이므로 측정시기가 다른 일시의 온도를 추정할 경우 그 온도 (T)의 절대값이 다르기 때문에 이 차이를 극복하기 위하여 상대적인 온도값으로 변환시킨 변수  $(T^*)$ , 즉 scale fector를 식  $(T^*)$ 와 같이 설정하여 작물별 잎 표면온도의 일중변화 양상을 분석하였다.

$$T^* = (Tx - Tn) / (Tm - Tn)$$
 2

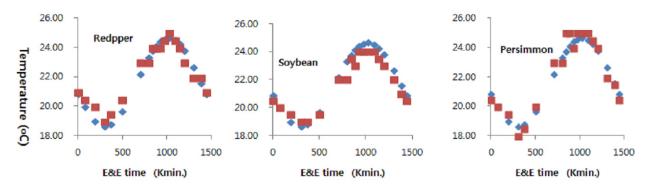


Fig. 1. Changes in the measured and estimated leaf surface temperature according to the E&E time.

단, Tx (Daily leaf temperature :  $^{\circ}$ C)는 일중시각별 잎 표면온도, Th (Daily minimum leaf temperature :  $^{\circ}$ C)은 일중최저 잎 표면온도, Th (Daily maximum leaf temperature :  $^{\circ}$ C)은 일중최고 잎 표면온도 임.

또한, 작물 또는 처리 등이 다른 경우의 변화양상에 대한 상호 비교분석을 위한 지표로서 식 ③과 같은 상대정밀도 (Relative sensitivity: RS)를 산출하여 작물별 같은 정밀도를 얻기 위해 요구되는 측정 반복수를 산정하였다. 실측치(X)에 대한 추정치(E)의 상대정밀도 즉, RS(E/X)는 다음과 같이 산정된다.

$$RS (E/X) = [S (T_X) / S (T_E)] = h$$

단, S (Tx)는 실측치의 표준편차, S (Tx)는 추정치의 표준 편차 임.

여기서 추정치와 실측치의 함수관계를 적용시키면 식 ③ 은 식 ④와 같이 된다.

$$RS (E/X) = [ | dE / dX | ] / (S_E / S_X)$$

또한, 상기 식 4에서 추정치와 실측치의 표준편차 ( $S_E$  및  $S_X$ )가 동일하다고 가정하면 식 4는 식 5와 같이 된다. 즉,

$$RS (E/X) = [S (T_X) / S (T_E)] = |dE / dX| = h$$

그리고, 실측치 (X)와 추정치 (E)의 분산 (Variance : V) 의 비율은 식 ⑥과 같이 된다.

$$[V(T_X) / V(T_E)] = [S^2 (T_X) / S^2 (T_E)] = h^2$$

따라서,

$$V (T_X) = h^2 \cdot V (T_E)$$
 (7)

여기서 h<sup>2</sup>이 뜻하는 것은, 실측치가 추정치의 정밀도와 같은 정밀도를 갖기 위하여 필요한 상대적 반복치를 의미하 게 된다 (Mandel, 1964 : Eom et al.,1988).

#### **Results and Discussion**

작물 잎 표면온도의 시간적 변화는 태양 일사, 풍속, 증발산 및 잎의 각도 등에 따라 달라지게 되며, 이들 요소들은 일중 시간에 따라 상승과 하강의 변화를 보이며 태양 일사가 많을수록 또한 잎의 각도가 태양광과 수직 방향일수록 작물 잎 표면 온도는 상승하게 될 것이며, 반면 증발산과 풍속이 클수록 잎 표면 온도는 하강하게 될 것이나, 이들 요소들은 동시에 복합적으로 작용하므로, 어느 한 요소가 잎 표면 온도 변화에 어느만큼 영향을 미쳤는지를 구명하기란 매우 어려운 문제이다. 따라서 본 연구에서는 이들 요소들의 복합적인 영향의 결과로 나타나는 일중 시각별 작물 잎 표면 온도를 예측하고자 하였다.

작물 잎 표면온도의 일중 변화양상 (Fig. 1)을 보면, 일중 최고온도 및 최저온도를 나타내는 시각은 각각 1,020 K분 (17:00시)경 및 300K분 (05:00시)경 이었다. 이와 같은 결과 는 5cm 깊이 토양온도의 경우 일중 최고온도 및 최저온도를 나타내는 시각 (Eom et al., 1990)과 비교 해 볼 때 약 30분 정도 이른 시각이었다.

실측한 작물체 잎 표면온도의 일중변화는 3작물 모두 하루 24시간(1,440 Kmin.)을 1주기로 하는 sin함수 형태를 보였다. 따라서 식 ①의 모형에서 b값은 1.0을 적용하였다. 또한 자정(Kmin.=0)의 시각을 x축의 0값으로 맞추기 위하여 sin함수 graph를 x축 방향으로 평행이동 시키기 위한 계수 c값은 780을 적용하였다. 또한 graph진폭의 1/2값인 a값은 고추와 콩 및 감나무 잎의 경우 각각 3.0과 2.5 및 3.5 이었으며 그 평균인 3.0을 적용하였다. 그리고 graph의 y축 방향 평행이동 관련 계수인 d는 고추와 콩 및 감나무 잎의 경우 각각 22.0과 21.5 및 21.5 이었으며 그 평균인 21.67을 적용하여, 결론적으로 본 연구에서 폭염기 작물체 잎 표면온도의 일중변화 추정모형을 식 ⑧과 같이 설정 하였다.

$$T_E = 3.0 \cdot \sin (X + 780) + 21.67$$
 8

단,  $T_E$ 는 시각별 추정 잎 표면온도, X는 E&E time (Kmin.) 임.

식 ⑧의 모형에 의한 시각별 추정온도 (TE)와 실측온도

E&E time (Kmin.)	Measured Temperature ( $^{\circ}$ C) <a></a>			Estimated	Deviation ( A-B ) (℃)			
	Red	Soy bean	Persi- mmon	Temperature ( $^{\circ}$ C) $^{\circ}$	Red	Soy bean	Persi- mmon	Mean
0	pepper				pepper			0.200
0	21.0	20.5	20.5	20.89	0.106	0.394	0.394	0.298
75	20.5	20.0	20.0	20.00	0.497	0.003	0.003	0.168
190	20.0	19.5	19.5	19.01	0.991	0.491	0.491	0.658
300	19.0	19.0	18.0	18.67	0.330	0.330	0.670	0.443
370	19.5	19.0	18.5	18.81	0.691	0.191	0.309	0.397
495	20.5	19.5	20.0	19.69	0.808	0.192	0.308	0.436
700	23.0	22.0	23.0	22.19	0.809	0.191	0.809	0.603
795	23.0	22.0	23.0	23.34	0.337	1.337	0.337	0.670
840	24.0	23.5	25.0	23.79	0.209	0.291	1.209	0.570
880	24.0	23.0	25.0	24.13	0.127	1.127	0.873	0.709
925	24.0	24.0	24.0	24.42	0.416	0.416	0.416	0.416
970	24.5	24.0	25.0	24.60	0.099	0.599	0.401	0.366
1020	25.0	24.0	25.0	24.67	0.330	0.670	0.330	0.443
1090	24.5	24.0	25.0	24.53	0.031	0.531	0.469	0.344
1140	24.0	23.5	24.5	24.27	0.268	0.768	0.232	0.423
1195	23.0	23.0	24.0	23.84	0.837	0.837	0.163	0.612
1300	22.0	22.0	22.0	22.70	0.696	0.696	0.696	0.696
1385	22.0	21.0	21.5	21.60	0.396	0.604	0.104	0.368
1440	21.0	20.5	20.5	20.89	0.107	0.393	0.393	0.298
Average	22.34	21.79	22.32	22.21	0.425	0.530	0.453	0.469

Table 1. Deviation between the measured temperature and estimated temperature.

(T<sub>x</sub>)와의 편차 (Table 1)의 일평균편차는 고추와 콩 및 감나 무의 경우 각각 0.425와 0.530 및 0.453도 이었으며, 전체 에 대한 평균편차는 0.469도 이었다.

또한 식 ⑧의 모형에 의한 추정치와 실측치와의 상관을 보면 (Fig. 2), 고추와 콩 및 감나무 잎의 경우 결정계수 (R²)가 각각 0.96과 0.97 및 0.96을 나타내어 3작물의 경우모두 1%유의수준에서 유의성 있는 고도의 상관관계를 보였다.

본 연구에서 작물체 잎 표면온도는 연중 폭염기에 측정된 값이었으며, 다른 시기의 작물체 잎 표면온도는 이와 차이가 클 것이나, 온도의 일중변화를 나타내는 graph의 형태는 같을 것이라고 사료된다. (Eom et al., 1990). 따라서 이와 같은 조사시기별 차이에 의한 온도 절대값의 차이를 극복하며 동일한 변화형태를 추정할 수 있는 모형개발을 위하여, 온도를 절대치 (T)가 아닌 식 G에 의한 상대치로 변환 (Graphics) 등 측정대상 변수로 삼아 모형을 설정하고자 하였다.

$$T^*x = (Tx - Tn) / (Tm - Tn)$$

단, Tx는 일중시각별 잎 표면온도, Tn은 일중최저 잎 표면온도, Tm은 일중최고 잎 표면온도 임.

식 @와 같은 scale factor를 이용하여 설정되는 모형에서 변환된 변수  $T^*x$ 의 값은  $0\sim 1.0$ 의 값을 가지게 되므로

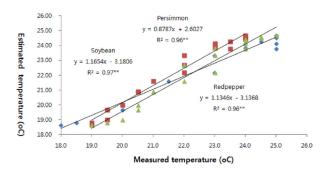


Fig. 2. Relationship between the measured and estimated leaf surface temperature.

a값은 0.5로 설정 하였으며, 하루가 1주기로 변화하므로 b값은 1.0으로 설정되었다. 또한 c값은 식 (8)의 모형과 같이 780으로 설정하였으며, d값은 graph진폭의 1/2인 0.5로 설정하였다. 따라서 본 연구에서 scale factor를 이용한 작물체 (1) 표면온도의 일중변화 추정치 (1) 모형은 식 (1) 과 같이 설정하였다.

$$T^*e = 0.5 \cdot \sin(X + 780) + 0.5$$

단, X는 E&E time (Kmin.) 임.

상기 식 ⑩의 모형에 의한 일중시각별 작물 잎 표면온도

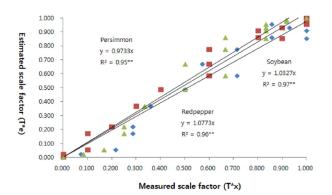


Fig. 3. Relationship between the measured and estimated scale factor for the leaf surface temperature.

의 추정치  $(T^*e)$ 와 식 @에 의한 변환된 실측치  $(T^*x)$ 와의 상 관관계는 (Fig. 3) 3작물 모두 결정계수  $(R^2)$ 가 0.95이상으로 1%유의수준에서 유의성 있는 고도의 상관관계를 보였다.

상기 식 ⑩의 모형은 낮 시간 동안 작물 잎의 일중 수광 상태가 일정한 조건 즉, 직사광선을 받지 않는 환경 조건 등 에서 대부분 작물(곡류, 과채류, 과수)의 잎 표면 온도 예측 에 적용 될 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 설정된 모형 (식 ⑩)에 의한 추정치  $(T^*e)$ 의 실측치  $(T^*x)$ 에 대한 상대정밀도인  $RS(T^*e/T^*x)$ 의 값은 (Fig. 3), 고추와 콩 및 감나무 잎의 경우 각각 1.078과 1.033 및 0.973 이었으며, 이를 근거로 하여 산정된 100반 복치의 추정치와 동일한 상대정밀도를 얻기 위하여 요구되는 실측치 반복수는 고추와 콩 및 감나무 잎의 경우 각각 116과 107 및 95 이었다.

### **Conclusions**

고추와 콩 및 감나무 잎을 대상으로 하여 연중 최고온도를 나타내는 폭염기에 2회에 걸쳐 약 30분~90분 간격으로 24시간동안 작물체 잎 표면온도를 측정한 결과를 이용하여, 작물 잎 표면온도의 일중변화 추정 모형을 개발한 결과는 다음과 같다.

1. 하루의 시각을 자정을 기준으로 하여 기준일 자정으로부터 다음일 자정까지의 24시간에 대하여 기준일 자정을 0으로 하여 그로부터 경과된 시간을 분단위로 나타내어 「E&E time」이라 명명하고, 하루 25시간인 1,440분을 「Kmin. 또는 K분」이라고 명명한 단위로 표시한 시각을 독립변수 (X: rad단위)로 하여 시각 (Kmin.)별 작물체 잎 표면온도를 추정할 수 있는 모형을 식 ①의 삼각함수 형태로 개발 하였다.

$$T = a \cdot \sin [b \cdot (X + c)] + d$$

단, T는 잎 표면온도 (도), X는 E&E time (Kmin.), a,b,c,d는 계수임.

 작물체 잎 표면의 일중최고온도 및 최저온도를 나타 내는 시각은 각각 1,020K분 (17:00시) 경 및 300K분 (05:00시) 경 이었다.

3. 고추와 콩 및 감나무 잎 표면온도의 평균치를 이용하여 설정된 작물체 잎 표면온도의 폭염기 일중시각별 온도 추정모형은 식 ②와 같다.

$$T = 3.0 \cdot \sin (X + 780) + 21.67$$

단, T와 X는 식 ①과 동일함.

- 5. 계절별 일중온도의 절대값 차이를 극복하기 위하여 실제온도 (T)를 식 ③과 같이 변환시킨 변수  $(T^*)$ 에 대한 일중변화 양상의 실측치  $(T^*x)$ 와 식 ④에 의한 추정치  $(T^*e)$ 간에는 3작물 경우 모두 고도의 유의성이 있었으며  $(R^2 > 0.95)$ , 본 연구에서 식 ④를 작물체 잎 표면온도의 일중변화 양상 추정 모형으로 설정 하였다.

$$T^* = (Tx - Tn) / (Tm - Tn)$$

단, Tx는 일중시각별 잎 표면온도, Tn은 일중최저 잎 표면온도, Tm은 일중최고 잎 표면온도 임.

$$T^*e = 0.5 \cdot \sin[(X + 780)] + 0.5$$

단, X는 E&E time (Kmin.) 임.

6. 일중시각에 따른 고추, 콩 및 감나무 잎 표면온도의 실측치에 대한 추정치의 상대정밀도 (Relative sensitivity)는 각각 1.078, 1.033 및 0.973 으로써, 100 반 복치에 의한 추정치와 동일한 상대정밀도를 얻기 위 하여 요구되는 실측치 반복수는 각각 116, 107 및 95 이었다.

#### References

Eom, K.C., K.S. Ryu, and K.T. Um. 1988. Comparison of the measurement methods of soil water content. Korean J. Soil Sci. & Fert. 21:367-372.

Eom, K.C., E.R. Son, and K.S. Ryu. 1990. Changes in evapotranspiration and soil water status to vinyl mulching. Korean J. Soil Sci. & Fert. 21:367-372.

Eom, K.C., K.C. Song, K.S. Ryu, Y.K. Sonn, and S.E. Lee. 1995. Model equations to estimate the soil water characteristics curve using scaling factor. Korean J. Soil Sci. & Fert. 28:227-232.

Eom, K.C. and K.R. Eom. 2008. Mathematics for agricultural sciences. Daewon Publishers, Korea, Seoul. 438-491 (In Korean).

- Hillel, D. and D.E. Erick. 1990. Scaling in soil physics: Principles and applications. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA. 300-318.
- Mandel, J. 1964. The statistical analysis of experimental data. John Wiley & Sons, New York, 58-77, 363-389.
- Miller, E.E. and R.D. Miller. 1955a. Theory of capillary flow: I. Practical implications. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 19:267-271. Miller, E.E. and R.D. Miller. 1955b. Theory of capillary flow: II.
- Experimental information. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 19:271
- Lal, R. and Shukla M. 2004. principles of soil physics. Marcel Dekker, Inc. USA. 515-555.
- Patricia, M.T. and D.R. Nielsen. 1984. Scale factors in soil science. Soil Sci. Soc. Am. J. 48:953-959
- Scott, H.D. 2000. Soil physics agricultural and environmental applications. Iowa State University Press. Ames. IA.