

養液栽培를 위한 培養液管理 支援시스템의 開發

I. 培養液의 配合 및 電氣傳導度(EC)의 豫測

孫楨翼 · 金文基

서울대학교 農業生命科學大學 農工學科

Development of a Supporting System for Nutrient Solution Management in Hydroponics

I. Fertilizer Combination and Electrical Conductivity(EC) Prediction

Son, Jung-Eek and Kim, Moon-Ki

Dept. of Agr. Eng., Coll. of Agr. & Life Sciences, Seoul Nat'l Univ., Suwon 441-744

Summary

The optimum management of nutrient solution needs the effective combination of fertilizers as well as the accurate control of nutrient solution. This study was attempt to make a supporting system for effective fertilizer combination by using computer and also to develop a EC predicting equation for keeping the EC of solution within the allowable range after application of combined fertilizers.

The supporting system consists of three parts : (1) data bases, (2) rules for deciding the kinds and amounts of fertilizers and (3) main control. With input data, the main control automatically constructs the network connecting the related data bases and subsequently executes the operation of searching proper fertilizers through it. For more effective searching, fertilizers are classified into two levels(level 1 and level 2) in consideration of solubility, price, and frequency in use, and searched in that order.

The EC prediction equation, a extended form of the Robinson and Stroke's theoretical equation only available for a binary electrolyte, is suggested for predicting the EC of the nutrient solution containing many kinds of inorganic compounds. The comparison of predicted and measured ECs showed good agreements with the high correlation between the predicted EC decrement by ion interaction and the actual one(limiting EC minus measured EC).

키 워 드 : 배양액관리, 배양액배합, 양액재배, 전기전도도예측

Key words : EC prediction, fertilizer combination, hydroponics, nutrient solution management

序 論

養液栽培는 결코 새로운 기술은 아니지만 岩綿의 도입, 工場의 재배등을 통해서 다시 주목을 받고 있다. 과거에는 재배관리의 어려움 때문에 전문가 이외에

는 재배가 곤란했지만, 최근 재배관리의 自動化경향 때문에 비전문가에 의한 관리도 가능하게 되었다.

양액재배에 따른 관리는 크게 작물관리와 배양액 관리로 구분할 수 있다. 작물관리의 자동화를 위해서는, 각 작물에 대한 경험적 재배지식 및 자료가

필요하기 때문에 실현까지는 많은 시간이 걸릴 것이다.

배양액관리의 경우, 먼저 화학성분을 배합해서 적절한 배양액을 만드는 일과, 배양액을 재배기간중에 적절하게 유지(제어)하는 일로 구분될수있다. 배양액제어의 경우, 최초로 적당한 組成의 배양액을 만들어도 작물의 종류와 생육단계에 따라 각 이온별 흡수속도가 틀리기 때문에 생육이 진행됨에 따라서 배양액의 유효성이 감소되고⁽⁶⁾, 또한 배양액조건이 다를 때는 작물의 생육에 영향을 미칠 수 있다^(7, 8). 이러한 문제를 해결하기 위해서는 쏠 이온을 연속적으로 분석해 부족량을 자동적으로 추가하는 시스템이 필요하다. 최근, 자동분석 기술은 현저히 발전하고 있지만, 이러한 시스템의 실용화에는 이르지 못하고 있다.

따라서, 현실적인 방법중의 하나로써, 작물생육에 적합한 배양액을 적당한 간격의 이온분석 결과를 고려하여, 생육시나 상황에 따라 배양액의 조성을 변화시키는 방법이 적절하다. 실제로 필요한 각 이온의 흡수량이 예측되어도 실제적으로 정확하고 효율적인 배양액의 배합이 없으면 무의미 하고, 더우기 재배자 고유의 생각이나 경험에 기초를 둔 배양액의 배합을 고려할 필요가 있기 때문에 효율적인 배양액 배합방법이 필요하다.

또한, 임의의 생육단계에 따른 배양액의 배합후, 전체적인 배양액의 농도(EC)의 예측이 가능하다면 사전에 EC의 허용한계를 만족하는 추가량을 결정할 수 있기 때문에 배양액관리에 유효하다. 1종류의 무기화합물 수용액에 대한 이론적 예측은 어느정도 가능하지만⁽¹¹⁾, 무기화합물의 종류가 증가하면 근사적인 예측방법이외에는 불가능하다^(5, 9, 12). 따라서 배양액과 같은 복합 무기화합물 수용액의 경우, 실험에 의한 정확하고 합리적인 근사 예측방법이 필요하다.

최근 농업생산분야에도 컴퓨터의 도입이 적극적으로 시도되고 있고^(4, 10), 양액관리도 그 예외는 아니다. 본 연구는 종합적인 배양액 관리의 기초가 되는 효율적인 배양액 배합시스템의 개발 및 배양액의 전기전도도의 예측방법을 검토하였다.

材料 및 方法

1. 배양액 배합시스템

1.1 시스템의 구성

본 시스템의 전체적개념은 Fig.1과 같다.

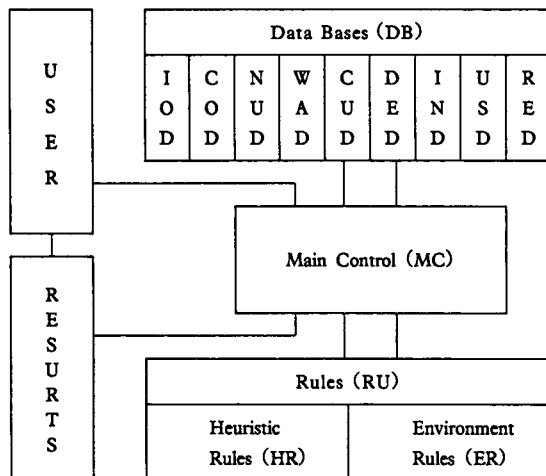


Fig.1. Schematic diagram of the system.

본 시스템은, 중심부(Main Control : MC), 肥料鹽, 이온및 재배기록 정보를 가지고 있는 데이터베이스(Data Bases : DB), 배양액배합에 관한 推論을 하는 규칙(Rules : RU) 으로 구성 된다. MC는 사용자의 정보 입력력, 규칙의 기능제어, 시스템내부의 데이터 흐름을 제어한다. DB는, 배양액의 배합을 위한 데이터베이스로서, 이온 데이터(Ion Data : IOD), 결합 데이터(Combination Data : COD), 비료염 데이터(Nutrient Data : NUD), 배양액 組成 決定에 참고가 되는 작물별 표준 양분조성 데이터 또는 과거의 경험적 양분조성 데이터(Reference Data : RED) 및 재배기록 데이터(Growth Data : GRD)로 구성되어 있다. 그리고 GRD는, 재배에 사용했던 참조 양분 조성 데이터(RED), 수질 데이터(Water Data:WAD), 현재의 배양액분석 데이터(Current Data : CUD), 각 이온의 不足分 데이터(Deficit Data:DED), 각 이온의 投入分 데이터(Input Data : IND) 및 투입한 각 비료염 데이터(Used Data : USD)의 데이터 번호를 기억하고있다. RU는 探索에 의하여 양분을 배합하는 탐색규칙(Search Rules : SR)과 환경조건을 고려하는 환경규칙(Environment Rules : ER)으로 구성된다.

본 시스템은 데이터, 규칙 및 비료염의 투입량 결정을 위한 계산식과 반 경험적 지식을 이용하여 결론을 유도한다. 수질문제가 없는 양액배를 가정할 경우, 먼저 最適組成(혹은 設定組成)에 관해서 배양액분석 데이터에 의해서 각 성분의 추가량을 결정한다. 그다음에 SR과 ER에 의해서 부족성분에 대한 투입 비료염을 분배한다. 마지막으로 나중의 배양액 배합에 참고로 하기 위하여 모든 처리결과를 재배 기록 데이터(GRD)에 기록한다.

1.2 지식 베이스

여기서는 DB를 구성하고 있는 IOD, COD 및 NUD의 데이터 베이스의 내용과, GRD에 연결되어 있는 RED, WAD, CUD, IND, DED 및 USD의 데이터 베이스의 내용을 설명한다.

IOD에는, 데이터번호, 이온종류, 이온극성(+, -), 1 meq당의 ppm치, 이온의 사용범위 및 그 이온과 결합가능한 이온의 이름과 순위등이 기술되어 있다. COD에는, 데이터번호, 결합가능한 양이온과 음이온의 이름, 후술의 결합화합물의 水準(1, 2), 화합물 이름과 순위등이 기술되어 있다. NUD에는, 데이터 번호, 비료염의 종류, 비료염 1 meq에 대한 양이온과 음이온의 meq수, 분자량, 당량당 중량, 가격, 용해도 및 사용빈도(1, 0) 등이 기술되어 있다.

여기서 배양액분석 데이터로부터 K⁺ 이온의 보충에 필요한 각 데이터의 관련성은 Fig.2와 같다.

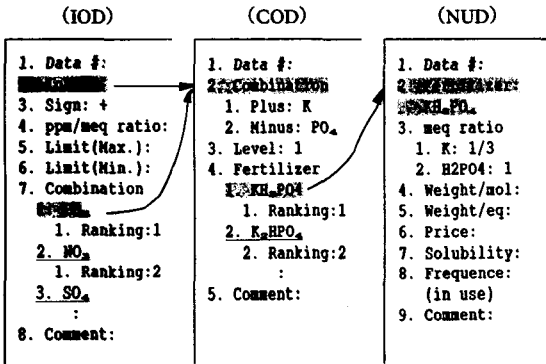


Fig.2. A generated relationship among IOD, COD and NUD in deficiency of K⁺ ion.

먼저, IOD로 부터 결합가능한 이온의 이름과 순위를 탐색한다. 그리고, IOD의 양이온 혹은 음이온의 이름과 같은 이름을 갖는 데이터를 탐색하기 위하여 COD로 부터 화합물의 水準과 순위를 탐색한다. 그 다음, COD에서 탐색된 화합물을 만족하는 비료염을 NUD로부터 탐색한다. 여기서 사용자의 사용빈도를 고려한다. 실제로 사용자가 필요로 하는 배양액 배합하기 위하여 이온간의 네트워크를 만들어 탐색규칙에 의하여 배합한다. 상세한 내용은 1.3 에서 설명한다.

GRD에는, 데이터의 번호, 날짜, 배양액의 pH, EC 및 수량의 설정치, 참조양분조성 데이터의 번호 (RED), 현재의 배양액의 pH, EC, 수량 및 배양액분석 데이터(CUD), 수질분석 데이터(WAD), 부족한 pH, EC, 수량 및 이온데이터, 투입한 수량 및 이온 데이터

(IND) 및 투입한 비료염 데이터(USD)등이 기술되어 있다. 여기서는 GRD로부터 일반적으로 다른 데이터를 탐색한다. 실제로 GRD에 연결되어 있는 RED, WAD, CUD, DED, IND 및 USD와의 관계는 Fig.3과 같다.

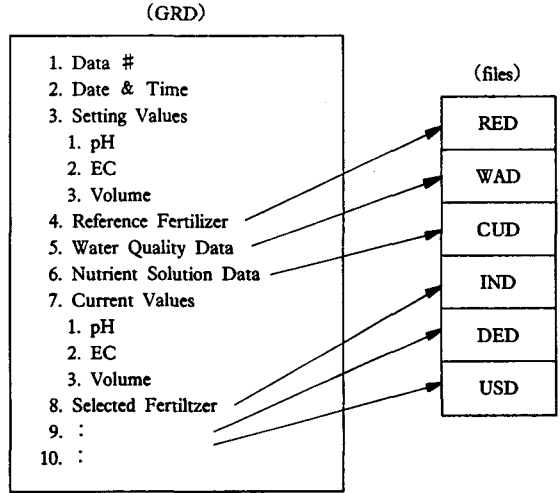


Fig.3. Relationship among GRD and other data.

만약 양호한 재배결과를 얻었을 경우, 그 데이터를 RED에 등록하여 나중에 참조할 수 있다. 그리고 DED의 경우 지금까지의 데이터처럼 입력에 의한 것이 아니고 입력 데이터에 의한 일련의 계산에 의해 만들어 진다. 여기서는 각 이온의 부족량(필요량)이 기술된다.

1.3 배양액 배합을 위한 탐색규칙

(1) 탐색의 필요성

재배 도중에 배양액을 분석하여 그 결과에 따라 필요한 양분조성을 보충하는 경우, 어떤 양분조성을 보충하는데 필요한 비료염의 종류는 다양하기 때문에 선택하는 비료염에 따라서 배합방법도 달라진다. 필요한 양이온과 음이온의 me/l 적산치는 반드시 일치하지는 않기 때문에, 필수 영양요소 중에서 양분조성을 배합할 때 선택가능한 비료염과 그 배합방법은 중요한 문제가 된다. 그 방법에 따라 배양액의 유효성이 변하게 된다.

먼저, 양이온과 음이온의 me/l 적산치를 강제적으로 맞추기 위해서 작물에 필요여부를 고려치 않고 성분을 투입하는 것도 하나의 방법이지만 그것에 의해서 배양액의 유효성은 저하된다. 또한 부족한 이온농도를 만족시키는 양분을 투입할 경우, 모든 비료염에 대해서 시행착오적으로 양분을 배합하는

것은 맹목적인 방법이고 또한 그 탐색회수도 상당히 많기 때문에 합리적인 탐색방법이 필요하다.

이 문제의 하나의 해결책으로서, 배양액을 구성하는 비료염은 다량요소와 미량요소로 나누고, 다량요소도 용해도, 비료의 값 및 사용빈도를 고려해 일반적으로 반드시 사용되는 1차적 요소와 그외의 2차적 요소로 나눌수있다. 따라서 어떤 가정에 기초를 두고 어느정도의 제한등을 포함한 탐색방법이 필요하다.

어떤 문제를 컴퓨터로 해결할 경우, 그 탐색에는 기본적으로 맹목적 탐색과 발견적 탐색이 있고, 또한 목적과 해결의 효율에 따라서 다양하게 개량된 탐색방법이 사용되고 있다. 특히 발견적인 탐색은 폭발적 조합의 발생을 방지하면서 빨리 결론에 접근하는 유력한 방법으로 알려져있다(12). 문제에 관한 지식을 이용하여 탐색할수록 탐색의 효율은 빨라진다.

(2) 탐색에 의한 배양액의 배합규칙 필요양분의 수량이 결정되고 배양액의 배합을 위하여 필요한 비료염을 탐색할 경우, (1)사용 비료염의 숫자를 최소로 하기 위하여 필요량이 최소인 이온부터 이온 결합의 전개를 할 경우, (2)사용자의 지정에 따라서 전개를 할 경우 및 (3)시스템의 설정에 의한 전개를 할 경우의 3개의 선택기가 가능하다. 비료염중에서 다량요소에 대한 탐색의 응용 예는 Fig.4와 같다.

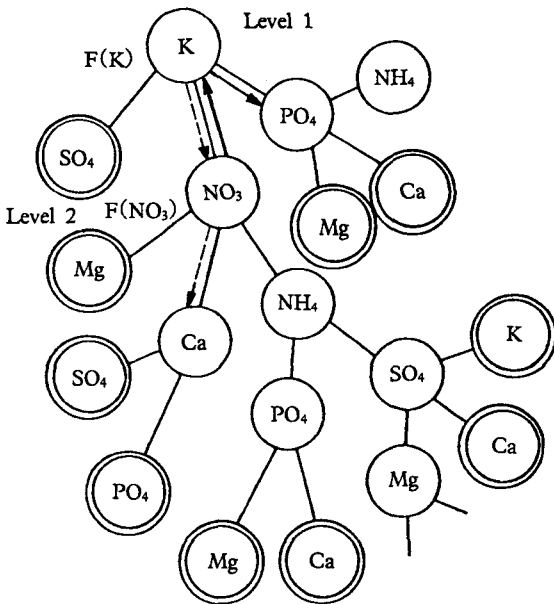


Fig.4. All possible alternatives with starting from K⁺ ion. F(K) is the heuristic function at K⁺ ion ; Single and double circles are corresponding to level 1 and level 2, respectively.

이것은 K⁺ 이온으로 부터 탐색을 전개했을 경우의 조합의 경로를 나타내고 있다. 여기서 F는 SO₄, NO₃ 및 PO₄ 이온에 대한 탐색방향을 결정하는 반 경험적 평가함수이고, 각 지점에서 구할 수 있다. 평가함수에 대한 설명은 후술한다. 다량요소의 1차적 요소와 2차적 요소를 각각 水準1(1重圓), 水準2(2重圓)로 표기했다. 그리고 미량요소는 水準3으로 했지만, 이번에는 포함되지 않았다. 이 원들은 탐색범위를 축소시키기 위하여 최초로 설정된 것이고 이 水準을 표시하는 숫자는 DB중의 COD에 등록되어 있다.

양분을 배합할 때 사용되는 평가의 정보에는, 이온 결합순위, 水準, 비료염의 결합순위 및 사용빈도가 있다. 여기서 사용되는 반 경험적 평가함수의 예는 다음과 같다.

$$G(K, NO_3) = I(K, NO_3) * C(K, NO_3) * N(K, NO_3) * U(KNO_3) \quad (1)$$

$$\text{단, } I(K, NO_3), C(K, NO_3), N(K, NO_3), U(KNO_3) \geq 0$$

$$H(K, NO_3) = E(K) - E(NO_3) \quad (2)$$

$$F(K, NO_3) = [G(K, NO_3), H(K, NO_3)] \quad (3)$$

여기서 I(K, NO₃)는 K⁺ 이온과 결합가능한 여러 이온 중에서 NO₃⁻ 이온의 순위, C(K, NO₃)는 K⁺ 이온과 NO₃⁻ 이온화합물의 水準, N(K, NO₃)는 K⁺ 이온과 NO₃⁻ 이온의 화합물 중에서 KNO₃ 비료염의 결합순위(K⁺ 이온과 NO₃⁻ 이온의 경우는 1개지만, K⁺ 이온과 PO₄³⁻ 이온의 경우는 다수임), U(KNO₃)는 KNO₃에 대한 사용빈도, E(K)는 필요한 K 이온의 me/l 량을 나타낸다. 그리고 [G(K, NO₃), H(K, NO₃)]는 G(K, NO₃)의 값, H(K, NO₃)의 부호의 조합이다. I(K, NO₃), C(K, NO₃) 및 N(K, NO₃)는 조합이 이루어 질 때마다 바뀐다. 즉, 순위1로 결합된 각 이온 및 비료는 순위0이 되고 순위2의 것이 순위1이 된다. U(KNO₃)는 1 혹은 0 으로 사용빈도를 나타낸다.

예를들면, 필요량이 최소인 이온으로서 Fig.4처럼 K⁺ 이온으로 부터 전개하는 경우를 생각해 보자. 먼저, G의 값에 따라서 NO₃⁻, PO₄³⁻ 및 SO₄²⁻의 방향을 결정한다. 즉, 각각 이온에 대해서 G=1의 방향으로 전개한다. 만약, I, C 및 U의 값을 조사해 G=1 이면 KNO₃를 만든다. 그 다음에 H(K, NO₃) >= 0의 경우, 즉 F(K, NO₃) = [1, +]의 경우는 NO₃⁻ 이온은 Mg²⁺ 이온, Ca²⁺ 이온, NH₄⁺ 이온의 방향으로, F(K, NO₃) = [1, -]의 경우에는 K⁺ 이온으로 돌아와 NO₃⁻ 이온을 제외한 다른 이온에 대해서 전술의 방법과 같은 방법으로 탐색을 반복한다.

이러한 방법으로 최후까지 간 후에, 전부 결합되지 않았을 경우, 최초와 사용했던 방법으로 배양액배합을 계속한다. 水準1에 대한 배양액배합이 끝난 시점에서 전부 결합되지 않았을 경우, 水準2에 대해서 배양액배합 작업을 계속한다. 水準2의 경우도 水準1과 같은 방법으로 배양액배합을 한다. 시스템에 의한 배양액조합의 탐색방법은 Fig.5와 같다.

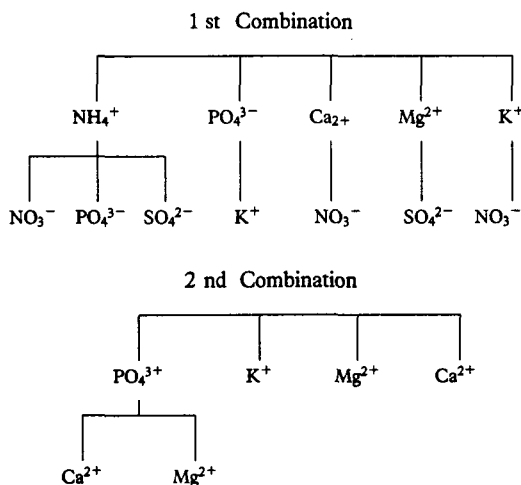


Fig.5. Fertilizer selecting order by the system.

여기서는 並木⁽¹⁴⁾의 비료염 처방의 순서를 고려한 배양액의 배합방법을 사용하였다. 비료염의 다량요소를 2 종류로 나누어 1차 조합과 2차 조합으로 했다. 1차 조합의 좌측에서 2차 조합의 우측으로 진행하면서 양분을 배합한다. 그리고 사용자가 지정할 경우에는 시스템지정의 경우처럼 각각의 이온의 순위를 입력함으로써 설정할 수 있다.

水準2의 배양액배합이 끝났을 때도 완전히 결합되지 않았을 경우는, 배양액배합에 사용된 비료에 대해서 日長時間 및 光強度 등에 의해서 양분배합을 실행한다. 기본적으로는, 양분배합에 사용된 비료염을 구성하는 모든 이온에 대하여 동 분배(5식의 P가 1일 경우)를 하는 것이 가장 쉽지만, 좀더 배양액의 유효성을 높이기 위해서, 간단한 식이지만 다른 이온에 비해서 강광도나 일장시간에 민감한 K⁺ 이온(橋⁽¹⁵⁾)에 대해서 가중계수를 부여하였다.

이를 위해, (1)강광도의 현재치와 예측치의 비율(L), (2)일장시간의 현재치와 예측치의 비율(D), (3)작물의 K⁺ 이온의 선호도에 관해서 질문을 한다. K 이온을 선호하는 작물에 대해서 K⁺ 이온에 곱하는 가중계수 P는 다음과 같다.

$$P = a * L * D \tag{4}$$

여기서, a는 경험적계수이며 본 연구에서는 1로 했다. 예를들면, NO₃⁻ 이온이 남았을 경우, 1차와 2차 배양액배합에 사용된 양이온으로서 K⁺ 이온, Mg²⁺ 이온, Ca²⁺ 이온 및 NH₄⁺ 이온이 있을 경우는 다음과 같이 추가분배를 한다.

$$K = \frac{P * E(K) * \Delta NO_3}{[P * E(K) + E(Ca) + E(NH_4) + E(Mg)]} \tag{5}$$

여기서, ΔNO₃는 1차와 2차 배양액배합이 끝났을 때 남은 NO₃⁻ 이온의 농도, ΔK는 ΔNO₃를 만족하기 위하여 사용된 여분의 K⁺ 이온의 양이다. 여기서 배양액배합을 위한 경험적 지식은 현재 충분치 않고 적당히 배분하는 형태라고 할 수 있지만, 이 분배는 나머지 부분에 대한 것이기 때문에 전체의 결과에 결정적으로 영향을 미치지 않는다.

마지막으로, 배합된 양분의 조성은 어느 정도의 한계범위를 만족할 필요가 있다. 따라서 Jones⁽³⁾의 NH₄⁺ 이온을 사용할 경우에 대한 각 이온의 한계조건을 검사한다.

2. 배양액 EC의 예측

2.1 실험방법

배양액은 8종류의 肥料鹽(特級試藥)과 純水로 만들었다. 배양액의 종류는 180종류로 EC는 0.5~6 mS/cm였다. 배양액의 EC는 EC計(東亞電波(株), Model CM-5S)에 의하여 25°C를 기준으로 측정했다. 또한 EC의 예측치와 실측치의 비교를 위하여 채취된 배양액을 Ion Chromatography(橫河電機, Model IC-200)로 분석하였다. 분석대상 이온은 K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, NH₄⁺, Na⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻, PO₄³⁻, Cl⁻이었다.

2.2 예측방법

배양액내의 無機이온의 종류가 많을수록 농도가 높을수록, 이온간의 상호작용에 의하여 농도의 증가분만큼 EC가 증가하지 않는다^(2, 5, 9). 上記의 180종류의 배양액의 경우 투입비료염의 당량농도의 합과 배양액의 EC는 비선형적인 관계를 나타냈다⁽⁹⁾. EC 예측에는 여러가지 방법이 시도되었지만^(5, 9, 11, 13), 보다 정확한 예측을 위해서는 비선형적 요소의 제거를 통한 선형적인 요소에 의한 예측이 유효하다고 생각된다. 본 연구에서는 Son and Okuya의 예측식(8식)⁽⁹⁾을 일부 수정함으로써 보다 합리적인 EC의 예측을 시도하였다.

(6-1)식은 1종류의 화합물 수용액에 한해서, 이론적으로 당량전기전도도의 예측이 가능한 Robinson and Stokes의 식이다⁽¹¹⁾. 결국, 전기전도도(EC)는 (당량전기전도도) × (당량)이 된다(7식). (6-1)식의 이온간의 상호작용에 의한 EC의 감소치는緩和 효과 및 電氣泳動 효과의 2부분으로 되어있고, 여러종류의 화합물 수용액의 경우 이 부분을 구하는 것은 불가능하기 때문에 배양액과 같은 여러종류의 화합물 수용액에 확장, 적용하는 것은 불가능하다. 따라서 Son and Okuya는 공통부분 g 를 제외한 부분은 常數로 하고, 우변의 2번째항을 $R \sum (g_i \cdot z_i \cdot A_i)$ 로 처리한 바 있다(8식)⁽⁹⁾.

본 연구에서는 보다 일반적 예측방법의 개발을 위하여 이론적인 근거를 둔 Robinson and Stokes 식의 배양액에 대한 확장 가능성을 검토하였다(9식). 그 내용은 다음과 같다.

(1) 1종류의 화합물 수용액의 경우의 평균이온 반경(r_{ij})개념을 이용한 이온강도 관련항목을(6-3식), 여러종류의 화합물의 수용액에 적용 가능하도록 각각의 이온반경(r_i)을 이용한 항목을 사용하였다(9-5식).

(2) 이온상호작용에 의한 EC감소항목중 i 이온과 반대극성인 j 이온이 관련된항목은(6-2식), 임의의 i 이온과 상호작용을 하는 반대극성의 여러개의 이온간의 비율이 미지수이기 때문에, 각 이온의 효과를 동일하게 보고, i 와 j 는 i 로 통일하였다(식9-3). 그 결과 이온의 전하(z)가 1 또는 2의 경우, (9-3)식에서의 q_{ij} 는 0.5가 되고, (9-4)식에서의 V_{ij} 는 0.2929가 된다.

(3) 1종류 화합물 수용액 단위의 EC 예측식(7식)으로부터 각각의 독립된 이온에 의한 EC를 나타내고, 그 합으로써 여러종류의 화합물의 수용액의 EC를 예측식으로 나타낸다.(9-1식). 또한 상기의 (1) 및 (2)에서의 가정에 의한 수치를 대입하여 (9-2)식을 유도한다.

$$\lambda_{ij} = (\lambda_i + \lambda_j) - [0.7816 |z_i \cdot z_j| (\lambda_i + \lambda_j) \cdot V_{ij} + 0.03016 (|z_i| + |z_j|)] g_{ij} \quad (6-1)$$

$$\text{단, } q_{ij} = |z_i \cdot z_j| (\lambda_i + \lambda_j) / [(|z_i| + |z_j|) \cdot (|z_i| \lambda_j + |z_j| \lambda_i)], \quad (6-2)$$

$$g_{ij} = I^{1/2} / (1 + b \cdot r_{ij} \cdot I^{1/2}), \quad (6-3)$$

$$V_{ij} = q_{ij} / (1 + q_{ij}^{1/2}) \quad (6-4)$$

$$f = \lambda_{ij} \cdot Z_{ij} \cdot A_{ij} \quad (7)$$

$$f = \sum (\lambda_i \cdot z_i \cdot A_i) - R_1 \sum (g_i \cdot z_i \cdot A_i) \quad (8)$$

$$f = \sum (\lambda_i \cdot z_i \cdot A_i) - R_2 \sum [(0.7816 V_i \cdot$$

$$\lambda_i \cdot Z_i + 0.03016) g_i \cdot Z_i^2 \cdot A_i] \quad (9-1)$$

$$= \sum (\lambda_i \cdot z_i \cdot A_i) - R_2 \sum [(0.2289 \lambda_i \cdot z_i + 0.03016) g_i \cdot Z_i^2 \cdot A_i] \quad (9-2)$$

$$\text{단, } q_i = |z_i \cdot z_i| (\lambda_i + \lambda_i) / [(|z_i| + |z_i|) \cdot (|z_i| \lambda_i + |z_i| \lambda_i)] = 0.5, \quad (9-3)$$

$$V_i = q_i / (1 + q_i^{1/2}) = 0.2929, \quad (9-4)$$

$$g_i = I^{1/2} / (1 + b \cdot r_i \cdot I^{1/2}) \quad (9-5)$$

R 은 미지의 정수, z 는 이온의 전하, λ 는 극한당량이온전도율($\text{mS}\cdot\text{cm}^2/\text{meq}$), I 는 이온강도, b 는 0.329 (1기압, 25°C), r 은 이온반경(\AA), f 는 배양액의 EC (mS/cm), A 는 이온의 몰농도(화학평형상태의 몰농도)이다. 여기서, i 는 임의의 이온, j 는 i 와 반대극성을 가진 이온, ij 는 i 및 j 이온의 화합물을 의미한다.

상기의 (6)~(9)식에 사용된 I , A_i 및 T_i 는 시물레이션에 의하여 이온페어를 고려한 화학평형상태에서의 수치를 사용하였다. 예측식의 평가를 위하여 6개의 샘플의 측정치와 본 식에 의한 예측치를 비교하였다.

2.3 화학평형상태

배양액중의 화학평형상태를 구하기 위하여 Adams⁽¹¹⁾의 방법을 사용하였다. 이온 i 의 몰농도의 측정치(C_i)를 이용하여 이온 i 와 반대극성을 가진 이온 j 와의 이온페어(Ion Pair)의 몰농도(P_{ij}), 이온의 실질적인 몰농도(A_i) 및 이온의 활량(T_i)을 구한다.

화학평형상태를 구하는 순서는, (1) A_i 의 초기치에 임시로 C_i 를 대입해서 배양액의 이온강도(I)를 구한다(10식). (2) Debye-Hückel의 식으로부터 활량계수(α_i)를 구한다(11식). (3) 이온의 몰농도와 활량계수로 부터 활량(T_i)을 구한다(12식). (4) i 및 j 이온의 활량과 평형정수(K_{ij})를 이용해서 이온페어(P_{ij})를 구한다(13식). (5) 최초의 몰농도(C_i)에서 이온페어를 뺀 양을 A_i 로 설정한다. (6) 여기서 구한 A_i 를 다시 최초의 식(10식)에 대입하여 동일한 작업을 반복한다. 이 반복은 모든 값이 변하지 않을 때까지, 즉 반응속도가 일정할 때까지 계속한다.

이 작업을 하기위해서, 다음과 같은 가정을 하였다.

- (1) Cl^- 및 NO_3^- 는 양이온과 이온페어를 이루지 않고,
- (2) PO_4^{3-} 는 H_2PO_4^- 의 형태로 존재하고,
- (3) 이온페어의 활량계수는 1이다.

$$I = 0.5 \sum (A_i \cdot z_i^2) \quad (10)$$

$$-\log a_i = a \cdot z_i \cdot I^{1/2} / (1 + b \cdot r_i \cdot I^{1/2}) \quad (11)$$

$$T_i = \alpha_i \cdot A_i \quad (12)$$

$$P_{ij} = T_i \cdot T_j / K_{ij} \quad (13)$$

$$A_i = C_i - \sum P_{ij} \quad (14)$$

z는 이온의 전하, I는 이온강도, a 및 b는 0.509 및 0.329(1기압, 25°C), r는 이온반경(A), A는 이온의 실질적 몰농도(화학평형상태의 몰농도의 최중치), α는 활량계수, T는 이온의 활량(meq), C는 몰농도의 측정치, P는 이온페어의 몰농도, K는 평형정수이다. 여기서, i는 임의의 이온, j는 i와 반대극성을 가진 이온, ij는 i 및 j 이온의 결합물을 의미한다.

結果 및 考察

1. 배양액 배합시스템

먼저, 필요한 데이터를 입력한다. 비료염의 사용 빈도로서 NUD에 0 혹은 1을 입력한다. 또한, IOD, COD 및 NUD 등의 데이터 베이스의 내용을 변경할 수 있다. 재배에 사용되는 참조양분의 조성으로서 경험적으로 좋다고 판정되면 RED에 등록한다. 이상의 준비가 끝나면 실행에 필요한 데이터를 입력한다. 여기서 설정 배양액량으로부터 현재 배양액량을 뺀 것을 증발산에 의해서 없어진 수량으로 가정한다. 다음에, 실제의 재배에 사용하고 싶은 참조양분의 조성을 RED로부터 참조한다. 수질은 빈번히 변하지 않기 때문에 다시 분석할 필요가 없으면 WAD를 참조한다.

이상의 데이터로부터 현지점에서 각각 부족 이온농도를 계산해서 DED에 기술한다. 데이터베이스로부터 부족한 이온에 대해서 네트워크에 따라서 탐색을 개시한다. 여러종류의 부족한 이온으로부터 최초로 결합하는 이온을 결정하기 위하여 3 종류의 選擇岐를 결정한다.

배양액배합의 상세한 수순은 전술과 같고, 1차와 2차의 배양액배합을 실행한다. 비료염의 결합방향을 결정하는 반 경험적 평가함수를 사용한다(3). 여기서, 부족한 이온이 존재하는 경우에는 간단한 질문을 하여 최종분배를 실행한다. 이상의 작업을 끝내면 각 이온의 투입량과 투입된 비료염의 내용을 IND와 USD에 기술한다. 최후에는 나중에 참고용으로 모든 작업내용과 사용했던 데이터의 이름을 GRD에 기록한다. Fig.6은 최종분배가 끝났을 때의 결과를 나타낸다.

★★ 採用方式 = 最小值 ★★

肥料目錄	肥料의 投入量	最初の 不足量	最終分配(2)까지
KNO ₃	= 2.26- (me/l)	K = 2.00- (me/l)	0.00 (me/l)
Ca(NO ₃) ₂	= 3.03- (me/l)	Ca = 2.50- (me/l)	0.00 (me/l)
KH ₂ PO ₄	= 0.50- (me/l)	Mg = 1.00- (me/l)	0.00 (me/l)
Hg(SO ₄)	= 1.00- (me/l)	NH ₄ = 0.50- (me/l)	0.00 (me/l)
Hg(NO ₃) ₂	= 0.21- (me/l)	NO ₃ = 5.50- (me/l)	0.00 (me/l)
		PO ₄ = 0.50- (me/l)	0.00 (me/l)
		SO ₄ = 1.00- (me/l)	0.00 (me/l)
		Cl = 1.00- (mg/l)	0.00 (mg/l)
		Fe = 1.00- (mg/l)	0.00 (mg/l)
		Mn = 1.00- (mg/l)	0.00 (mg/l)
		Cu = 1.00- (mg/l)	0.00 (mg/l)
		Zn = 1.00- (mg/l)	0.00 (mg/l)
		B = 1.00- (mg/l)	0.00 (mg/l)
		Mo = 1.00- (mg/l)	0.00 (mg/l)

Fig.6. A final result showing the kinds and amounts of fertilizers to be selected.

2. 배양액 EC의 예측

Fig.7에 (9-2)식의 이온상호작용에 의한 EC감소의 예측치 ($X = \sum [(0.2289\lambda_i \cdot Z_i + 0.03016)g_i \cdot Z_i^2 \cdot A_i]$) 와 극한치에서 실측치를 감한 실제의 EC감소치 ($Y = \sum (\lambda_i \cdot Z_i \cdot A_i) - f$) 과의 관계를 나타낸다. 이 결과에서 X와 Y간에는 높은 선형관계 및 고정도의 결과를 나타냈다. 상관식은 $Y = 1.023 X - 0.044$ 로, $R^2 = 1$ 이었고 상관계수 $r = 0.973$, 표준오차 $e = 0.083$ 이었다.

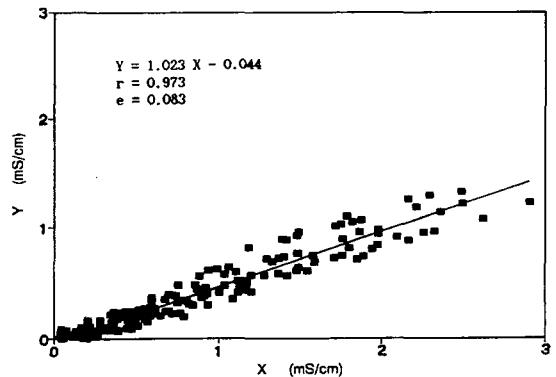


Fig.7. Relation between the predicted EC decrement by ion interaction ($X = \sum [(0.2289\lambda_i \cdot Z_i + 0.03016)g_i \cdot Z_i^2 \cdot A_i]$) and the actual one (limiting EC minus measured EC) ($Y = \sum (\lambda_i \cdot Z_i \cdot A_i) - f$) in equation (9-2).

Table 1에 측정치와 예측치를 비교한 결과이다. 여기서, 샘플 1~4는 채취한 배양액이고, 5~6은 시약으로 만든 것이다. 측정치와 예측치사이에는 높은 일치율을 나타냈다.

이 결과로부터, 배양액과 같은 여러종류의 화합물 수용액에 관해서 제시한 EC 예측식은, 1종류의 화합물수용액에 대하여 이론적인 근거를 둔 Robinson and Strokes의 식을, 여러종류의 화합물의 수용액에

Table 1. Comparison of the measured EC(f_m) and the predicted EC(f_p) at 25°C. Samples 1~4 are collected from the real culture beds and samples 5~6 made with reagents.

Samples	Ion concentration (me/l)										EC(ms/cm)	
	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	Na ⁺	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻	Cl ⁻	f_m	f_p	
1	3.40	5.18	2.92	0.12	0.70	8.00	2.34	1.39	0.09	1.40	1.47	
2	3.66	6.18	3.62	0.08	0.96	10.76	4.02	2.25	0.10	1.86	1.88	
3	5.01	6.80	3.84	0.93	1.29	12.59	5.06	3.34	0.12	2.15	2.28	
4	5.65	7.18	4.10	1.18	1.74	14.22	5.31	3.32	0.12	2.43	2.58	
5	5.82	5.90	5.75	1.42	11.78	7.22	8.56	1.40	5.00	2.63	2.85	
6	17.68	5.88	17.27	3.80	5.66	23.54	17.27	11.39	5.66	5.08	5.86	

대하여 적용할 수 있는 일반적 확장의 가능성을 제시하였다.

다른 종류의 수용액에 대한 적합성 여부를 포함한 보다 상세한 EC의 예측을 위해서는, 이온간의 상호작용에 의한 EC의 감소부분에 관한 정밀한 연구가 필요하다.

結論 및 要約

최근, 농업에 대한 컴퓨터의 응용은 다양한 분야에서 적극적으로 시도되고 있고, 특히 배양액의 관리도 그 예외는 아니다. 적절한 배양액배합을 함으로서 효율적인 배양액관리가 가능하게 되고, 컴퓨터에 의한 배양액관리가 한층 효율적이 된다. 또한, 배양액의 배합후, 농도(EC)의 예측이 가능하다면 사전에 EC의 허용한계를 만족하는 추가량을 결정할 수 있기 때문에 배양액관리에 유효하다. 따라서 이러한 목적을 위하여 배양액관리를 위한 배양액의 배합시스템 및 EC 예측방법을 개발했다.

본 시스템은, 데이터베이스, 배양액배합을 위한 간단한 탐색규칙 및 입출력부분을 포함하는 제어부분으로 되어 있다. 실제로 사용자가 필요로 하는 양분배합을 결정하기 위하여, 입력데이터로부터 데이터베이스에 의해서 이온간 네트워크를 만들어, 탐색규칙에 따라서 배양액배합을 개시한다. 여기서는 비료의 용해도, 값 및 사용빈도를 고려하여, 사용가능비료염의 결정후, 이 비료염을 다시 2종류의 비료염(水準1과 水準2)으로 구분해서 결정하는 방법으로 했다.

탐색수순은, 먼저 水準1에 대해서 배양액배합을 실행하고, 필요이온으로서 남는 경우는 水準2에 대해서 배양액배합을 실행한다. 최종적으로 남은 이온에 대해서 최종분배를 실행한다. 이러한 방법에 의해서 효율적인 배양액배합이 가능하게 되었다. 앞으로 작물의 특성이나 생육단계에 따른 적절한 배양액조건의 참조데이터의 추가, 참조데이터의 선택을 위한 규칙의 고도화등이 필요하다.

또한 배양액과 같은 여러종류의 화합물 수용액에 관해서 제시한 EC 예측식은, 1종류의 화합물수용액에 대하여 이론적인 근거를 둔 Robinson and Strokes의 식을, 여러종류의 화합물의 수용액에 대하여 사용 가능하도록 확장한 식이다. 이온상호작용에 의한 EC감소의 예측치와 실제의 감소치(극한전기전도도-측정된 전기전도도)와는 선형관계를 수반하는 높은 일치성을 보여, 일반적인 확장의 가능성을 제시하였다. 급후, 다른 종류의 수용액에 대한 적합성 여부를 포함한 보다 상세한 EC의 예측을 위해서는, 이온간의 상호작용에 의한 EC의 감소부분에 관한 정밀한 연구가 필요하다.

參考文獻

1. Adams, F.. 1977. Ionic concentration and activities in soil solutions. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 35: 420-426.
2. Bard, A.J.. 1985. Chemical equilibrium(松田・小倉譯). 化學同人: 101-112.
3. Jones, J. B., Jr.. 1983. A guide for the hydroponic

- and soilless culture grower. Timber press.
4. Jones, P. and J. Haldeman. 1986. Management of a crop research facility with a microcomputer-based expert system. Trans. ASAE. 29 : 235-245.
 5. McNeal, B. L., J. D. Oster and J. T. Hatcher. 1970. Calculation of electrical conductivity from solution composition data as an aid to in-situ estimation of soil salinity. Soil Science 110 : 405~414
 6. Son, J. E. and T. Takakura. 1987. A study on automatic control of nutrient solutions in hydroponics. J. Agr. Met. 43 : 147-151. (in Japanese with English summary)
 7. Son, J. E., 1988 : A study on environmental control in factory-style production of lettuce. PhD thesis , University of Tokyo, Tokyo. (in Japanese)
 8. Son, J. E. and T. Takakura. 1989. Effect of EC of nutrient solution and light condition on transpiration and tipburn injury of lettuce in a plant factory. J. Agr. Met. 44 : 253-258. (in Japanese with English summary)
 9. Son, J. E. and T. Okuya. 1991. Prediction of electrical conductivity of nutrient solution in hydroponics. J. Agr. Met. 47 : 159-163. (in Japanese with English summary)
 10. Takakura, T., G. Shono and T. Honjo. 1983. Applicationn of knowledge engineering to crop cultivation(1) Consultation system for the management of tomato crops in greenhouse. J. Agr. Met. 39 : 113-116. (in Japanese)
 11. Tanji, K. K.. 1960. Predicting specific conductance from electrolytic properties and ion association in some aqueous solution. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 33 : 887-889.
 12. Winston P. H.. 1977. Artificial Intellegence. Addison-Wesley Publishing Company.
 13. 水野直治. 1984. 水溶液の電氣傳導度に關する各種イオン濃度の影響, 土肥紙 55 : 103-108.
 14. 並木隆和. 1986. 培養液組成の理論と實際. 養液栽培の新技术, 養賢堂.
 15. 橋 昌 司. 1986. 養液栽培における環境要因と根の機能, 養液栽培の新技术, 養賢堂.