

非破壞 連續 生體重 測定裝置의 開發 및 이에 의한 상추의 生長反應 分析

1. 養液의 이온 濃度 및 明·暗 處理가 生長에 미치는 影響

南潤一*·蔡濟天**

*園藝研究所, **檀國大學校 農科大學

Analysis of Growth Response by Non-destructive, Continuous Measurement of Fresh Weight in Leaf Lettuce

1. Effect of Nutrient Solution and Light Condition on the Growth of Leaf Lettuce

Nam, Yooun Il*, Chae, Je Cheon**

*National Horticultural Research Institute RDA, Suwon, 440-310

**College of Agriculture, Dankook University, Cheonan 330-714

Summary

These studies were carried out to develop a system for non-destructive and continuous measurement of fresh weight and to analyse the growth response of leaf lettuce under the different nutrient solution and light condition with this system.

The developed measurement system was consisted of four load cells and a micro-computer.

The output from the system was highly positive correlation with the plant fresh weight above the surface of the hydroponic solution. The top fresh weight of plant could be measured within the error $\pm 1.0g$ in the range of 0 - 2000g.

The top fresh weight of leaf lettuce increased 44 times at 18th day after transferring to the nutrient solution, and the maximum growth rate was observed at 13th day after transferring. The growth rate was 10.7- 29.6% per day during 18 days.

Optimum concentration of the nutrient solution for the growth of lettuce was 1.4 - 2.2 mS/cm of EC level.

When the light condition was changed from dark to light, the fresh weight was temporarily decreased, but the fresh weight increased under the opposite condition. Top fresh weight of leaf lettuce in the darkness normally increased within 12 hours after darkness treatment, and then slowly increased until 78 hours under continuous dark condition. After that times, the fresh weight began to decrease.

키 워 드 : 상추, 생체중, 비파괴 연속측정, 이온농도

Key words: leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.), Non-destructive & continuous measurement, fresh weight, ionic concentration.

緒 論

施設園藝나 植物工場과 같이 人爲的으로 環境을 制御하여 作物을 栽培하는 주요 목적중의 하나는 生育速度를 가능한 高速化하여 生育期間을 단축시키고 시설을 효율적으로 이용하는데 있다. 따라서 作物이 生育하는데 필요한 여러가지의 環境을 最適條件으로 維持시키는 기술이 필요한데, 지금까지는 이들 기술을 개발하기 위하여 作物體를 植栽한 후 얻고자 하는 환경조건을 조성하고 이에따른 결과를 作物의 生長反應을 갖고 解釋하는 것이 일반적인 技法이었다. 그런데 作物의 生體重과 같은 生體情報는 주로 解體 調査에 의해서 수집하여야 하기 때문에 生育段階 마다 많은 個體를 필요로 하고, 測定誤차를 줄이기 위하여는 더욱 많은 개체수를 確保해야 하므로 栽培나 조사를 위한 場所와 勞力面에서 制約을 받아, 實際의 調査 間隔은 數日로부터 數週間에 1회씩 하기도 곤란한 實情이었다. 또한 作物의 生體重과 같은 生體情報는 위에서 설명한 바와 같이 非破壞 連續의 수집이 어렵기 때문에 電氣 計測技術이 발달한 環境 情報와 比較하면 그 수집 속도가 매우 늦고, 따라서 環境변화에 따른 生體의 短期的 反應 解析이나 또는 精밀한 계측이 곤란하였다.

近年에 들어서면서 센서 및 컴퓨터 기술을 活用해서 生體정보를 연속적으로 수집하고자 하는 연구가 活發하여지고 있다.^{3,7,9)} 生理的인 情報로서 橋本 等²⁾은 植物體內的 水分狀態를 靜電容量으로, Klepper 等⁴⁾, 長野 等⁶⁾, 關山 等⁹⁾은 莖徑의 變化로서 同定하였고, 校谷¹²⁾은 蒸散의 流量은 莖表面의 2點間에 傳達되는 熱의 傳達速度로서 測定 가능하다고 하였으며, 生態的으로는 莖¹³⁾, 葉¹⁾ 및 果實의 伸長을 連續 測定할 수 있는 시스템이 개발되었고, Matsui 等⁵⁾은 生育상태의 畫像解析을 試圖하였다. 또한 小田⁷⁾等은 生體重의 非破壞 連續 測定裝置를 開發 하였다.

本 研究에서는 壓縮型 load cell과 마이크로 컴퓨터를 利用하여 水耕 條件에서 個體群의 生體重을 비파괴적으로 연속측정이 가능한 裝置를 考案 製作하였고, 이들 장치에 대한 精密성과 本 裝置를 利用하여 養液의 이온 濃度에 따른 상추의 生체중 變化를 측정하였으며, 또한 明暗 條件에

다른 生체중의 短期的 變化等을 조사하였다.

材料 및 方法

1. 生體重 連續測定 裝置

生體重 連續測定裝置의 構造를 Fig 1에 나타내었다. 그림에서와 같이 양액의 水位를 一定하게 維持하면서 養液供給에 따른 水槽內的 물 振動을 最少化하고 容存酸素를 원활히 供給하기 위하여 스텐레스 鋼板으로 2중의 水槽를 만든 후 양액을 펌프로 供給하여 水位에 따라 自然 排水 및 循環 供給되는 시스템으로 製作하였다. 1중과 2중의 수조내에서 水位差에 의하여 作物재배 수조내의 양액이 供給水槽로 逆流하는것을 防止하기 위하여 역류방지 밸브를 설치하였다. 水槽 上부분에 支持板을 設置한 후 四角의 支持板 위에 壓縮型 load cell(CAS 社製, 정격하중 0-2000g 이 4-20mA 에 對應)을 각각 1개씩 설치하고 그위에 제작이 간편하고 load cell에 걸리는 하중을 최소로 줄이기 위해 55×75cm의 알루미늄판에 8×8cm 간격으로 구멍을 뚫어 35개체의 作物이 정식 될수 있는 재식판을 만들어 올려 놓았다. 재식판에 荷量이 加해짐에 따라 로드셀에서 重量을 檢知하여 여기에서 발생하는 전류(4-20mA)는 신호처리용 증폭기(AMP)를 통하여 변환된 전압신호인 아날로그 신호는 A/D변환기로서 디지털신호로 변환된 후 마이크로 컴퓨터로 입력시켜 모니터와 프린터가 가능하도록 시스템을 構成하였다. 또한 4개의 load cell에서 出力되는 電流를 한 곳으로 모아 컴퓨터로 보내기 위하여 신호변환기(signal converter)를 사용하였으며, 양액 內外부의 온도 環境을 測定하기 위하여 온도센서를 水槽內部와 外部에 설치하였다.

本 測定 장치에서 養液 循環 및 데이터를 얻기 위한 計測과 制御시스템의 흐름도는 Fig 2와 같다. 양액이 循環하는 동안에는 양액 흐름으로 인하여 水槽내의 양액중에 있는 뿌리가 흔들려 로드셀에 영향을 주기 때문에 측정에 誤差가 발생하므로, 양액이 순환하지 않는 동안에만 데이터를 받아들일도록 하였다. 따라서 그림에서 보는 바와

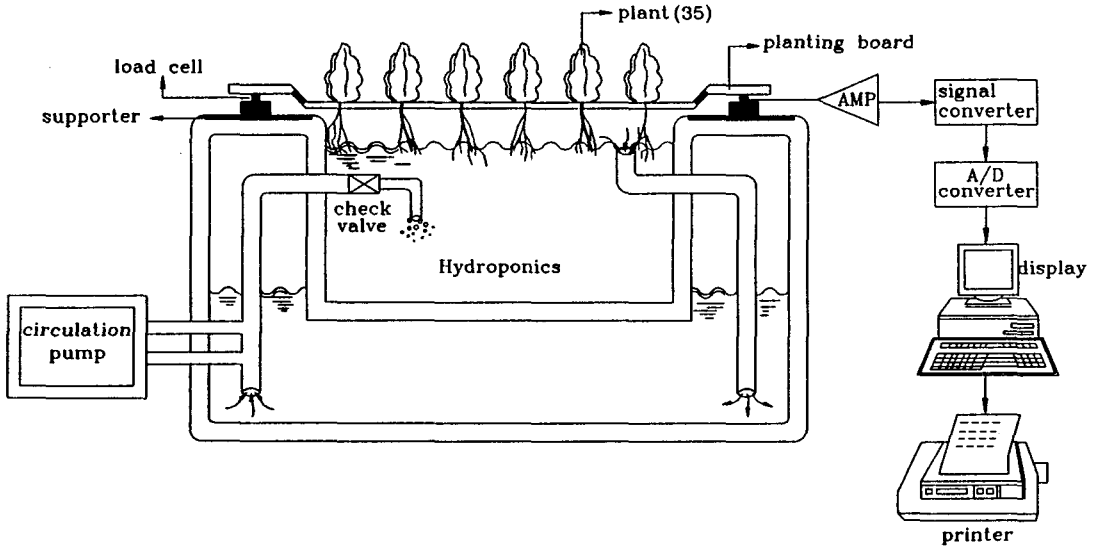


Fig. 1. Sketch map of device for monitoring top fresh weight of solution cultured crops.

같이 1시간에 10분씩 펌프를 작동시켜 양액이 순환되도록 하되 펌프가 작동하지 않는 기간 동안에만 30분간격으로 1회씩 1일에 48회 측정되도록 하였다. 1회 측정에는 1초 동안에 3000번의 데이터를 읽어 들여 이를 평균값으로 변환한 후 평균치로 부터 지나치게 크거나 작은 값은 삭제한 후 결과를 나타내도록 하였다.

2. 栽培 方法

本 研究은 1992년부터 1993년까지 2개년에 걸쳐 수원 원예연구소 시험용 生育調節室에서 청국면 상추를 供試하여 수행되었다. 育苗은 3×3×3cm의 물을 충분히 함유시킨 우레탄 스폰지 블럭에 상추 種子를 1-2립씩 점파한 후 20/15℃의 온실내에서 재배하면서 종자가 마르지 않도록 분무기로 물을 1일에 1회 정도 살포하고 백색 한냉사로 遮光하여 발아시킨 후 水耕液(원더그로1호와 2호를 각각 600-1000倍液)으로 20일간 재배한 후 本葉이 3매 정도일때 생육이 均一한 苗 35株를 알루미늄 栽植板에 우레탄 스폰지로 줄기를 保持하여

定植한 후 20일간의 生長量을 測定하였다.

3. 養液의 이온 濃度 및 明·暗 處理

7m²의 完全密閉된 室內 空間에서 光量을 조절하기 위하여 메탈램프 1개(250W), 고압나트륨등 1개(250W), 할로겐램프 2개(각 250W), 백열등 5개(각 60W), 生育用 형광램프 2개(각 60W), 백색형광등 2개(각 40W)를 천정에 설치하되 높낮이 조절이 가능하도록 제작하여 작물체가 받는 光量이 조절될 수 있도록 하였으며, 壁面 四方에는 反射필름을 붙여서 光이 均일하게 분포 되도록 하였다. 한편 내부에는 에어컨과 히터를 설치하여 온도를 조절할 수 있도록 한 인공생육실을 만들어 시험하였다.

養液은 韓國 園試 標準液 濃度의 0.25, 0.50, 1.00, 1.50배로 처리하였는데, 이때의 무기 이온 농도(EC)는 각각 0.73, 1.37, 2.24, 2.82 로 나타났다. 양액의 pH는 6.5로 유지시켰다. 明期와 暗期 處理에서 暗期와 明期の 光量子束密度는 0과

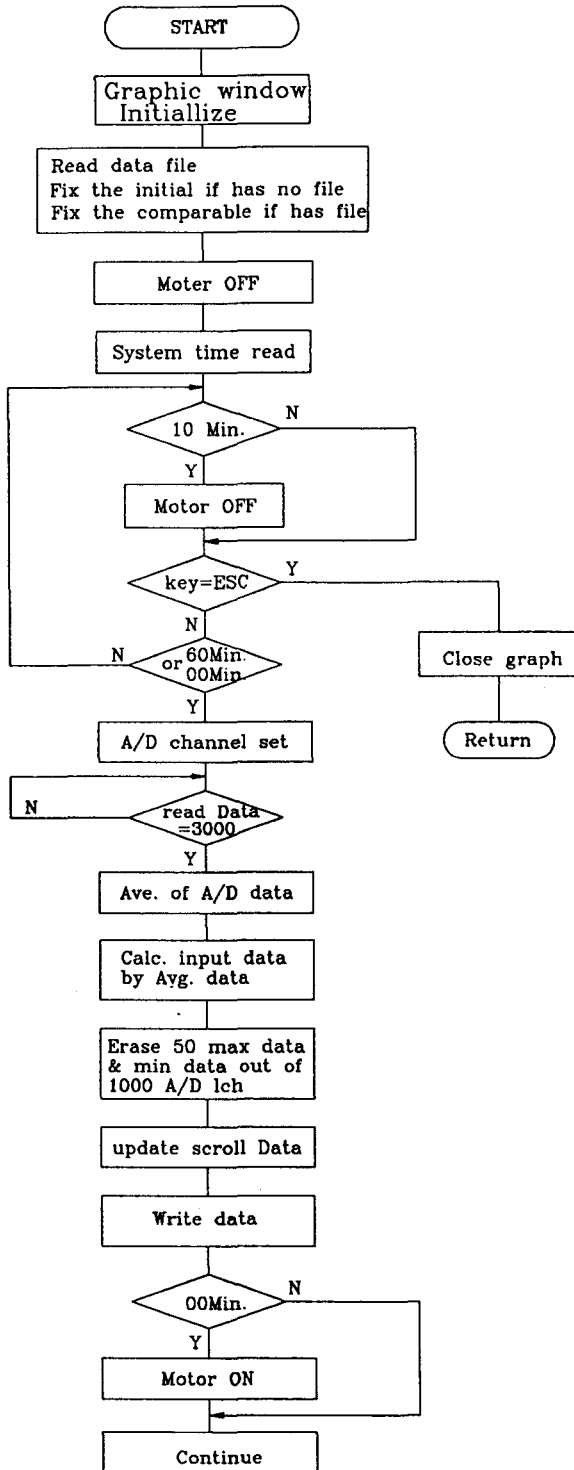


Fig. 2. Flow chart for monitoring systems of top fresh weight of solution cultured crops.

300 μ E.m⁻²s⁻¹로 유지시켰으며, 暗期 처리는 정식 후 8일 부터 4일간 消燈하여 暗黑狀態로 維持하였으며, 이와는 別途로 1일을 6-12시간 間隔으로 暗期와 明期 處理를 하였다. 모든 처리에서 온도는 全 生育기간 20/15°C로 유지시켰다. 光處理와 養液 이온 농도 처리 이외의 環境조건은 원시 표준조건을 부여하였다.

結果 및 考察

1. 제작된 生體重 測定裝置의 精度 分析

生體重 測定裝置의 性能 및 精度를 檢證하기 위하여 무게를 정확히 알고 있는 분동을 栽植板 위에 차례로 올리는 것을 10회 反復하여 재식판의

部位에 따른 出力값에 差異가 있는지를 觀察하였던바 測定誤差는 全體 測定 範圍 0-2000g의 0.05%인 ± 1.0 g으로 나타났다. 生체중 측정장치에 작물을 정식하였을 경우 뿌리는 水耕 養液中에 浮游하기 때문에 本 裝置로 生체중을 측정할때 뿌리에 의한 영향을 보기 위하여 뿌리의 발달 정도가 다른 生育 단계의 상추에 대하여, 재식판 위의 식물체 무게와 재식후 뿌리가 수경액에 담겨져있을 경우의 load cell에 의한 출력치와 實測值 重量과의 關係를 조사한 결과는 Table 1에서와 같다. load cell에 의한 指示值(Y)와 莖葉部(X₁), 水面上部(X₂), 全體植物體(X₃)의 實測重量과는 各各 $Y = 1.096X_1 - 0.796$, $Y = 1.008X_2 + 0.243$, $Y = 1.000X_3 - 0.251$ 이 되고 相關係數는 모두 1.00*** 이었다.

Table 1. Relations between actual fresh weights of leaf lettuce and the readings with load cells of device.

Number of leaves	Reading with load cells(g) of device (Y)	Actual fresh weight(g)		
		Top(X ₁)	Above water(X ₂)	Whole(X ₃)
3.5	39.5	35.5	39.0	39.5
6.0	162.5	150.5	161.0	163.5
10.0	705.0	643.5	699.5	705.0

即 load cell에 의한 指示值와 實測重量과는 直線 關係가 있었으나, 莖葉部の 實測重量은 指示重量보다 가벼운反面, 水面上部와 指示重量과는 거의 一致함 알 수 있었다. 그러나 生育이 進전되어 뿌리의 양이 많아지는 경우에는 水面위와 水中에 있는 뿌리가 많아져 출력치와 실측치간에 다소 차이가 발생하는 傾向이었다. 수면상부의 실측중량과 로드셀에 의한 출력치가 잘 일치되는 것은 뿌리가 양액중에 있어도 작물체의 뿌리 및 수경양액의 比重이 거의 1이 되어 양액중의 뿌리 무게가 양액에 의한 浮力에 의해 相殺되기 때문인 것으로 생각되었다.

2. 生體重 및 相對生長率의 長期變化 樣相

시간의 경과에 따른 상추의 生체중 및 生長율 변화양상은 Fig3과 같다. 生체중은 정식당시에 비해 정식후 18일에 44배로 증가 되었고 相對生長率은 10.7-29.6% day⁻¹範圍에 있었다. 상대生長율은 정식후 初期에는 낮았으나 정식후 7일경부터 急激히 높아져 정식후 13일경에 最大에 달하였고, 이때의 個體當 平均 生체중은 22g 정도로서 生長율은 29.6% day⁻¹ 이었다. 以後에는 生長速度가 급격히 낮아지는 樣相을 나타내었다.

陣 等³⁾은 상추에서 정식후 5일까지는 生長율이 微弱했으나, 개채당 生체중이 25g정도 되는 정식후 11일경에 生長율이 최고치를 나타냈고 이후에는 둔화되었으며, 이에따라 탄산가스의 소비율도 같은 傾向이라고 보고하였다. 小田 等⁷⁾도 상추

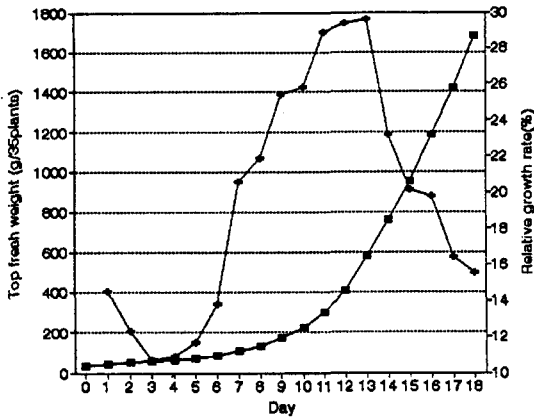


Fig. 3. Changes in top fresh weight and relative growth rate of solution cultured leaf lettuce determined by device

* : Relative growth rate, ■ : Top fresh weight

의 성장율은 정식후 17일간에 10-28.8% day⁻¹이었으며 성장율은 정식후 5일에 가장 낮았으며 이후에는 증가하여 개체당 생체중이 30g인 정식후 11일에 가장 높았고 이후에는 감소하였다고 보고한 바 있다. 본 시험 결과도 위의 두 결과와 유사하였는데, 정식후 5일경에 성장율이 낮아지는 원

인에 대하여 小田 等⁷⁾은 이때에 증산량 및 증산속도가 일시적으로 低下하고, 葉이 橫方向으로 넓어지는 것이 이 생육단계의 特有的인 현상인데 이것이 吸水의 低下와 어떤 關聯性이 있는것이 아닌가 생각하고 있으나 분명치는 없다고 보고하였다. 또한 정식후 13일 이후 성장율이 낮아지는 원인은 最適葉面積指數와 關連되어 있는 것으로 보이는데, 星野 等¹⁰⁾은 결구상추의 最適葉면적지수를 4 정도라고 하였는데 小田 等⁷⁾은 정식후 13일의 葉面積指數가 4.6이라고 보고한 점으로 미루어 보아 정식후 13일 정도가 되면 莖葉의 遮蔽에 의하여 성장속도가 낮아지는 것이 아닌가 推察된다.

3. 養液의 이온 濃度 및 明·暗 處理에 따른 生長反應

養液의 無機 이온 濃度를 園試 標準液을 基準으로 하여 0.25, 0.5, 1.0, 1.5배로 調節하고 정식후 20일에 地上部 및 地下部の 生長量을 조사한 결과를 Table 2에 나타내었다. 地上部 및 地下部の 생체중은 원시 표준액의 1.0배로 조절된 EC 2.24 ms/cm 에서 가장 높았고 EC 0.73 과 2.82 ms/cm 에서 낮았는데 특히 EC 2.8의 高濃度에서는 뿌리의 發育이 不振하였으며 乾物重도 낮게 나타났다. 이와같은 결과는 李¹¹⁾가 상추에 대하여 시험한 결과 지상부 및 지하부의 성장량은 EC

Table 2. Effect of concentration of nutrient solution on the growth of leaf lettuce in solution culture.

Solution concentration HES (times)	EC level	No. of leaves	Top		Root	
			Fresh wt.(g)	Dry wt.rate(%)	Fresh wt.(g)	Dry wt.
0.25	0.73	10.0 ^b	26.3 ^c	5.4 ^a	5.1 ^{ab}	0.27 ^{ab}
0.50	1.37	11.5 ^{ab}	32.1 ^{ab}	5.3 ^a	5.5 ^{ab}	0.29 ^a
1.00	2.24	12.0 ^a	35.2 ^a	5.2 ^a	5.7 ^a	0.30 ^a
1.50	2.82	10.5 ^{ab}	29.8 ^{bc}	5.2 ^a	4.6 ^b	0.20 ^b

HES: Horticultural Experiment Station Standard solution

Means within a column followed by the same letter are not significantly different at 5% level by Duncan's Multiple Range Test

2.0ms/cm에서 가장 높았고 다음은 2.5, 1.5ms/cm 순이며 그 이상이나 이하에서는 생육이 부진하며 특히 3.0ms/cm에서는 뿌리의 발육이 부진하고 갈변현상을 관찰할 수 있었다고 보고한 내용과 잘 일치되는 결과이었다.

Fig 4는 양액의 이온농도에 따른 생체중의 증가様相을 나타낸 것인데, 정식 당시의 생체중을 기준으로 할 때의 성장량은 정식후 10일경 부터 급격히 증가하여 정식후 20일에는 양액의 농도에 따라 26-35배가 증가하였다. 양액농도에 따른 생체중의 증가속도는 정식후 7일경까지는 大差 없었으나 以後 부터 差異가 나기 시작하여 정식후 20일에는 처리간에 따라 큰 차이를 나타내었다. 處理間에는 EC 2.24ms/cm에서 가장 높았고 다음은 1.37, 2.82, 0.73ms/cm順으로 나타났다.

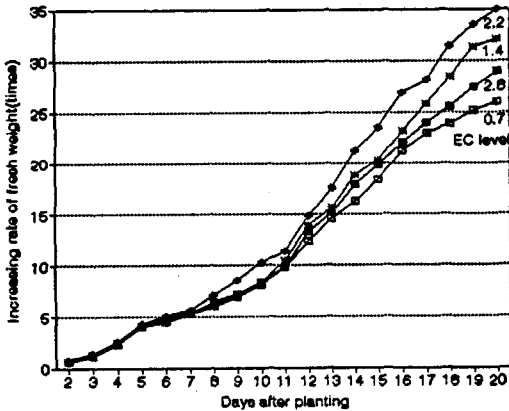


Fig. 4. Effect of concentration of nutrient solution on the growth rate of leaf lettuce in water culture condition.

4일 동안 계속해서 暗條件 狀態下에서 상추를 생육시켰을때의 생체중량의 변화는 Fig 5와 같다. 정식후 8일부터 暗期處理를 하였는데, 생체중은 消燈後 12시간까지는 正常的으로 增加하여 12시간 동안에 21g정도 늘었으나 그 후의 증가는 緩慢하였다. 30시간 정도가 경과하면서 一時的으로

생체중은 감소하다가 48시간째 부터는 다시 증가하기 시작하여 78시간까지 생체중은 증가하였다. 그러나 이 시간 이후에는 감소하는 경향을 나타내었다. 따라서 消燈後 4일 동안에 생체중량은 48g 정도가 증가하였다. 暗黑 處理後 12시간 동안의 생체중 증가는 明期에 蓄積되었던 同化產物과 蒸散速度의 低下에 起因되었다고 생각 되어지나, 그以後에는 同化產物이 不足해서 吸水를 主體로 한 徒長에 의해서 생체중이 증가한 것으로 推察되었다.

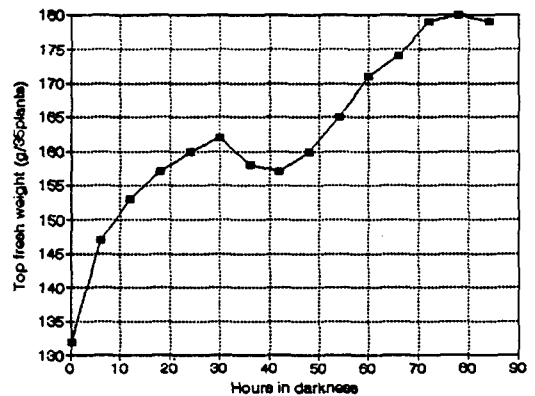


Fig. 5. Changes in top fresh weight of leaf lettuce in dark period under solution culture condition

以上的 결과로 볼때 생체중의 변화는 物質生産에 따른 生長에 의한 長期的인 변화와 暗期와 같은 환경조건에 의한 短期的인 변화가 混在할것으로 추측되어 1일동안에 明期와 暗期 동안의 생체중량 변화 양상을 조사한 바를 Fig 6에 나타내었다. 午前 7時에 光을 照射하고 午後 18時에 消燈하여 暗條件을 維持하고 다음날 午前 7時에 다시 光을 照射하는 處理를 하였을때 생체중은 暗期로부터 明期로 變하면 一時的으로 減少하고 반대의 경우에는 一時的으로 增加하면서 全體적으로는 시간이 경과함에 따라 漸進的으로 增加하는 様相을 나타내었다.

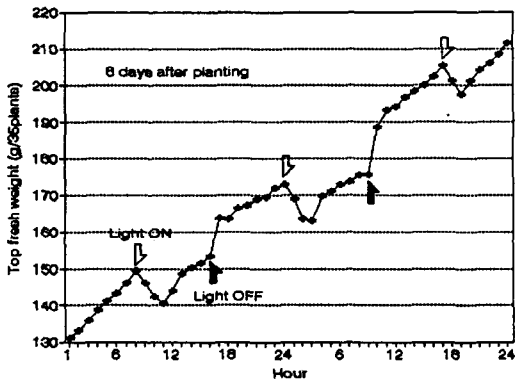
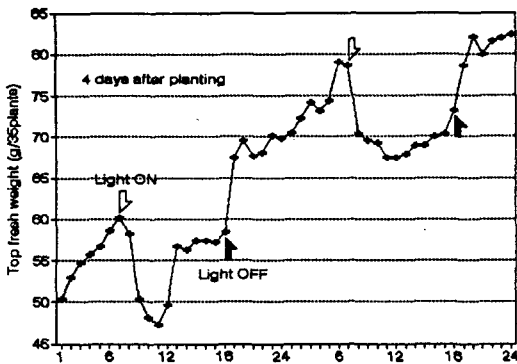


Fig. 6. Diurnal fluctuations of top fresh weight of leaf lettuce as influenced by light and dark treatment.

또한 정식후 8일에서 9일에 걸쳐 1일을 3等分하여 8시간씩 暗期와 明期로하여 처리하였을때에도 Fig 6에서와 같이 1일을 2等分하여 암기와 명기로 하였을 경우와 거의 類似한 생장반응을 나타내었다. 이와같은 현상은 暗期가 되면 蒸散速度가 低下함에 따라서 식물체내의 수분포텐셜이 上昇하여 생체중이 增加하는데 反하여, 明期가 되면 蒸散速度가 왕성해져서 뿌리로부터의 水分 吸水과의 均衡 狀態가 變化해서 作物體에 수분포텐셜이 低下하여 생체중이 減少하는 것으로 생각되었다. 小田 等⁸⁾은 光이 照射되는 동안에 상추의 증산속도는 $0.71g\ dm^{-2}h$ 이었으나 消燈後 20分에는 0.

$25g\ dm^{-2}h$ 까지 낮아졌으며, 点燈 1時間後에는 다시 $0.82g\ dm^{-2}h$ 까지 回復되었다고 報告한바 있다. 以上の 결과를 종합해 볼때 생체중의 증가는 物質生産에 의한 生長 뿐만 아니라 단순한 吸水에 의해서도 나타나는 것으로 생각된다. 따라서 금후에는 생체중의 증가와 물질생산과의 관계 및 이에 영향을 미치는 환경조건에 대하여도 생육단계마다 밝힐 필요가 있다고 본다.

摘 要

環境變化에 따른 作物生體의 反應을 迅速하고 正確히 解析하기 위하여, 로드셀과 마이크로컴퓨터를 이용하여 水耕條件에서 生體重을 非破壞의으로 連續測定할 수 있는 시스템을 개발 하였다. 또한 이 시스템을 이용하여 양액의 이온농도 및 明暗 條件에 따른 상추의 生長反應을 調査 하였던바, 그 結果를 要約하면 다음과 같다.

가. 作物의 生體重을 非破壞 連續的으로 測定할 수 있는 이 裝置의 測定誤차는 측정범위 0-2000g에서 0.05%인 $\pm 1.0g$ 以下로 나타났다.

나. 로드셀에서 出力된 指示重量은 水面위의 生體重과 잘 一致하였다.

다. 상추의 생체중은 정식후 18일에 定植 當時에 比해서 44倍 정도 增加하였고, 相對生長率은 정식후 5일까지는 微弱하였으나 以後에 急激히 높아져 定植後 13일에 최대에 달하여 $29.6\% day^{-1}$ 이었다. 정식후 18일간의 상대성장율은 $10.7-29.6\% day^{-1}$ 범위에 있었다.

라. 養液의 無機 이온 濃度에 따른 상추의 生長量은 EC 1.4-2.2mS/cm 에서 가장 높았으며, EC 0.7 以下나 2.8以上에서는 떨어졌는데, 특히 地下部의 生長량은 2.8以上の 高濃度에서 顯著히 낮았다.

마. 양액의 이온 농도에 따른 生體重의 增加速度는 定植後 7일까지는 큰차이가 없었으나 以後 差異가 나기 시작하여 정식후 20일에는 양액의 이온농도에 따라 큰 차이가 있었다.

사. 暗黑 處理後 12時間까지는 正常的으로 生體重이 增加 하였으며, 以後 78時間까지도 緩慢한 增加 樣相을 나타내었으나 그 以後에는 減少하는

경향이였다.

아. 明條件에서 暗條件으로 環境이 變化함에 따라 生體重은 급격히 增加하였고 反對의 條件에서는 一時的인 生체중 減少가 있었는데, 이와같은 樣相은 生育段階, 光照射 時刻 및 時間을 달리하여도 같은 경향이였다.

引用文獻

- Gallagher, J.N., P.V. Biscoe, and R.A. Saffell. 1976. A sensitive auxanometer for field use. *J. Exp. Bot.* 27: 704-716.
- 橋本 康, 一條文二郎, 野中金造, 大政謙次, 船田周. 1974. 植物體內水分의 電子的計測. *生物環境調節* 12 : 69-72.
- 陳濟鏞, 柳寬熙, 洪淳昊. 1993. 작물의 生長정보 계측 및 生育제어에 관한 연구 1. 탄산가스 제어 알고리즘 개발. *생물생산시설환경*. 2(1): 27-36
- 星野和生, 吉川稚夫, 野口正樹, 池田登男. 1977. 野菜의 收量成立要因의 解析에 關する研究. 1. 生長解析法による lettuce 多收條件檢索. *野菜試報 A*. 3: 1-29
- Klepper, L. M., J. F. Bartholic, and J. R. Runkles. 1969. Monitoring cotton plant stem radius as an indication of water stress. *Agron. J.* 61: 891-893.
- 李承禧. 1994. 춘과 적축면 상추의 生育 및 무기양분 흡수에 미치는 양액의 이온 농도, pH 및 온도의 영향. 경상대학교 대학원 석사학위논문.
- Matsui, T., and H. Eguchi. 1976. Computer control of plant growth by image processing 1. Mathematical representation of relation between growth and pattern area taken in photographs of plant. *Environ. Control in Biol.* 14 : 1-7
- 長野敏英, 島地英夫. 1976. 植物의 水分狀態とその制御에 關する研究 (1) 水分狀態의 測定について. *農業氣象* 32 : 67-71
- 小田雅行, 野中正義, 星野和生. 1986. 作物의 生體重의 連續測定. *生物環境調節* 24(2) : 43-49.
- 小田雅行, 野中正義, 星野和生. 1986. 環境變化による 地上部 生體重의 短期的變化. *生物環境調節*. 24(3-4) : 123-126
- 關山哲雄, 岡部勝美, 岩尾憲三. 1978. 植物生體情報의 工學的計測と處理에 關する研究. (1) 莖의 膨縮, 伸長および葉身의 電氣的特性等と 連續測定法と測定事例. *電力中央研報*. 478005 : 2-9
- 梭谷哲雄. 1982. 作物體內의 蒸散流量測定法開發と應用. *農技研報 A*. 29 : 47-121
- Shunji I., and I. Kenzo, and F. tamino. 1990. Measurements of plant physiological information of vine tree and indexation of soil moisture control. 1. Analysis of stem diameter variation affected by environmental factors. *Environ. Control in Biol.* 28(3) : 103-108