

점적 급액 방식에서의 양액 공급량 예측 프로그램의 개발

Development of A Computer Simulation Program of Emitter Discharges for Trickle Application

오길근*	류관희*	홍순호**
	정희원	정희원
K. K. Oh	K. H. Ryu	S. H. Hong

ABSTRACT

This study was conducted to develop a computer simulation program for trickle application of nutrient solution. A computer simulation program using finite element method was developed to evaluate discharges of emitters on trickle application. The uniformity of application for two different lateral line lengths and three application methods was evaluated by the computer simulation program. The results of this study are as follows.

1. A computer simulation program was developed to determine emitter discharges from a trickle application system and pressures at emitter positions by finite element method and to design a uniform trickle application system.
2. The simulation program developed was verified by experiment. The root mean square error between experimental data and simulated data was 1.1% on the average discharge and it was found that the computer simulation program was an effective tool for the design of a trickle application system of nutrient solution.
3. The uniformity of trickle application system was evaluated for three different methods of supplying nutrient solution with different lateral line lengths. The best uniformity was obtained from the method, which supplies nutrient solution from both ends alternatively for the same period of time.

주요 용어(Key Words) : 양액(nutrient solution), 점적급액방식(trickle application), 유한요소법(finite element method), 균일도(uniformity), 공급방법(supply method)

* 서울대학교 농공학과
** 마포산업전자(주)

1. 서론

최근 국내에서는 식물생산시설의 단지화, 대형화와 함께 재배시스템에 있어서도 생물환경의 제어가 용이하고 토경재배에서 나타나기 쉬운 연작장애 등을 줄임으로써 주년 안정 생산에 적합한 수경재배 시스템의 도입이 증가하고 있다. 토경재배에서 수경재배로의 가장 큰 변화는 培地의 변화라고 할 수 있는 만큼 배지의 변화에 따른 양액의 정확한 공급이 이루어져야 할 것이다.

수경재배를 위해 다양한 급액방식이 개발되어 사용되고 있으며, 이중 점적식 급액방법은 다른 급액 방식에 비해 급액량을 효율적으로 조절할 수 있으며, 매우 낮은 공급 압력을 필요로 하여 구조가 단순하고 보수 관리가 용이한 장점을 가지고 있다. 공급량의 균일성을 확보한다면 전염병의 확산이 훨씬 적다는 것 외에 다른 관수 방법에 비하여 많은 장점을 가진다.

어떠한 급액방식이라도 모든 작물에 균일한 양의 양액을 공급할 수 없듯이, 점적급액방식은 각 점적관에서 공급하는 양이 공급위치로부터의 거리에 따라서 일정하게 나타나지 않는다는 문제점을 안고 있다. 이러한 불균형의 원인 가운데 가장 큰 것은 파이프 내의 마찰이나 경사의 변화에 따른 압력분포의 불균일이다. 이러한 원인들을 고려하여 공급용 배관내의 압력 분포를 예측함으로써 각 배출기에서의 배출량을 예측할 수 있어, 각 설계조건에 성능평가가 가능해진다.

점적 관수에서의 배출량의 불균일의 주요한 원인으로 각 배출기의 제작편차, 경사에 의한 수직 높이의 변화와 파이프 내에서의 마찰손실, 각 배출기의 압력에 대한 감도와 온도변화, 그리고 각 배출기의 오염정도를 들 수 있다(Numan, 1989).

점적관수에서 배출량의 균일도를 향상시키기 위한 연구가 많은 연구자들에 의해 수행되었으며, 파이프 네트워크 내의 유체역학적인 분석을 통해서 이루어져 왔다. 여러개의 배출구를 가진 파이프 내에서의 압력 손실은 Wu-Gitlin 근사법

(Wu 와 gitlin, 1975)과 같은 근사 추정 방법에 의해 계산되어 왔다. Haghghi 등(1989)은 파이프 네트워크에 사용되는 각 구성요소들을 유한요소화하는 방안을 제시하였다. 또한 Saldivia 등(1990)은 유한요소해석 방법을 이용한 스프링클러 관수 시뮬레이션에서 유한요소해석 방법을 적용하여 배출량의 예측 프로그램을 개발하였다.

Wu 등(1993)은 점적관 내의 길이에 따른 유체 에너지의 변화를 이용하여 각 배출기에서의 배출량을 예측하기 위한 방안을 제시하였다.

본 연구는 점적급액식 양액 배출기에서의 배출량을 예측하기 위한 시뮬레이션 프로그램을 개발하고, 검증하기 위해 수행되었다.

2. 材料 및 方法

가. 공급량의 균일도

본 연구에서는 점적식 공급라인의 각 배출기에서의 배출량을 예측하기 위하여 압력 수두와, 배출기 특성의 함수로 표현된 점적식 배출기에서의 배출량 모델을 이용하였으며, 식 (1)에 모델을 나타내었다.

$$Q = K_m H^x \dots\dots\dots (1)$$

여기에서, Q : 배출 유량(l/hr)

K_m : 배출기들 간의 편차에 의한 교정 상수(l/m^x)

H : 배출기에서의 압력(m)

x : 배출기의 형상에 따른 압력에 대한 반응 상수

윗 식에서 배출기에서의 배출량은 배출기들 간의 제작편차에 의한 비례상수 K와 배출기에서의 압력 수두와 배출기의 형상에 따른 지수성분 x 로 표현된다. 지수 성분 x 는 배출기의 압력에 대한 감도를 의미한다. x 값이 작을수록 압

력 변동에 대한 배출기의 유량의 변화는 작다는 것을 의미한다.

본 연구에서는 각 배출기에서의 배출량의 균일도를 나타내기 위하여, Wu와 Gitlin(1981)이 제안한 압력에 의한 배출량 변동계수 V_Q 를 이용하였으며, V_Q 는 식 (2)에 의해서 계산된다.

$$V_Q = \frac{S_Q}{Q_m}$$

여기에서 V_Q : 배출량 변동계수
 S_Q : 배출량의 표준편차(ℓ/hr)
 Q_m : 평균 배출량(ℓ/hr)

나. 有限要素化

본 연구에서는 점적관수용 공급라인의 각 배출기에서의 배출량을 예측하기 위한 분석방법으로서 有限要素解析法을 이용하였다. 공급용 배관내의 각 구성요소들을 요소화하여 요소 행렬을 구하여 이들을 결합함으로써 예측할 수 있도록 하였다. 요소행렬의 유도과정은 Haghghi 등 (1989)의 방법을 이용하였다.

점적 배관의 직경은 일정하며, 배출기를 제외한 각 요소들에서의 유량은 일정하므로 要素내에서의 유속의 변화를 무시하면, 각 요소내의 에너지 평형식은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$Z_i + \frac{P_i}{\gamma} + H_{fp} = Z_j + \frac{P_j}{\gamma} + H_f + H_c \dots \dots \dots (3)$$

여기에서

H_f : 파이프 내의 마찰손실에 의한 손실수두 (m),
 H_c : 엘보, 티 등 기타 배관 구성 요소에 의한 손실수두(m).

식 (3)을 각 요소에 대하여 다시 정리하면 식 (4)를 얻을 수 있다.

$$\Delta H = (Z_i + H_i) - (Z_j + H_j) \dots \dots \dots (4)$$

$$= KQ^m + \frac{K_c Q^2}{2gA^2} - H_{fp}$$

여기에서,

Q : 요소 내의 유량(ℓ/hr)
 H : 압력수두(P/γ)(m)
 K, m : Darcy-Weisbach에 의해 정의된 마찰계수($m/\ell-m$)
 K_c : 손실계수(s^2/m^2)
 g : 중력가속도(m/s^2)
 A : 요소의 단면적 (m^2)

식 (4)의 우변을 파이프와 펌프, 엘보(elbow)나 티(tee)등의 기타 구성품을 요소별로 분리하여 정리하면 식 (5)와 같다.

$$\Delta H_{pipe} = KQ^m \dots \dots \dots (5)$$

$$\Delta H_{component} = \frac{K_c Q^2}{2gA^2}$$

식 (5)는 각 요소에서의 유량 Q 를 요소내에서의 압력강하의 함수로 선형화하면 식 (6)과 같이 표현된다.

점적관 $Q = C_p(H_i - H_j) + C_p(Z_i - Z_j)$
 여기서 $C_p = \frac{|(Z_i + H_i) - (Z_j + H_j)|}{K^{\frac{1}{m}}}$

기타 구성품 $Q = C_{pc}(H_i - H_j) + C_{pc}(Z_i - Z_j)$
 여기서 $C_{pc} = \frac{1}{R_c^{\frac{1}{2}} \Delta H_{component}^{\frac{1}{2}}}$,
 $R_c = \sum_{k=1}^n \left(\frac{K_c}{2gA^2} \right)_k$

배출기 $Q = C_e(H_i - H_j)$
 여기서 $C_e = \frac{1}{(H_i - H_j)^{\frac{1}{2}} K_e^{\frac{1}{2}}}$

다. 要素行列과 全體行列

각 노드에 유입되는 유량을 음의 부호, 배출되

는 유량을 양의 부호로 하면, 그림 1과 같은 임의의 연속한 노드 s, t 에서의 연속방정식은 식 (7)과 같이 표현된다.

$$-Q_s^{(e-1)} + Q_s^{(e)} = 0, -Q_t^{(e)} + Q_t^{(e+1)} = 0 \dots\dots (7)$$

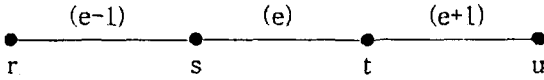


Fig. 1. Element and node.

요소 e에서의 각 노드의 잔차(殘差) 방정식은 식 (8)과 같다.

노드 s 에서의 잔차 방정식

$$Q_s^{(e)} = C_p(H_s - H_t) + C_p(Z_s - Z_t)$$

노드 t 에서의 잔차 방정식 (8)

$$Q_t^{(e)} = -C_p(H_s - H_t) - C_p(Z_s - Z_t)$$

잔차 방정식으로부터 요소 e 에서의 요소 행렬을 유도하면 식 (9)와 같다.

$$\begin{Bmatrix} Q_s^{(e)} \\ Q_t^{(e)} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_p & -C_p \\ -C_p & C_p \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} H_s \\ H_t \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} C_p \Delta Z \\ -C_p \Delta Z \end{Bmatrix} \dots (9)$$

$$\Delta Z = Z_s - Z_t$$

이와 같은 방법에 의해 펌프, 배출기, 기타 구성요소들에 대한 요소행렬(element stiffness matrix)을 구하면 식 (10)과 같다.

구해진 요소행렬들을 시스템에 따라 직접 결합 과정(direct stiffness procedure)을 이용하여 결합하여 전체 행렬(global stiffness matrix)을 생성하였다.

$$\text{점적관 } [K_p^{(e)}] = \begin{bmatrix} C_p & -C_p \\ -C_p & C_p \end{bmatrix}$$

$$\text{배출기 } [K_e^{(e)}] = \begin{bmatrix} C_e & -C_e \\ -C_e & C_e \end{bmatrix} \dots\dots\dots (10)$$

$$\text{기타구성요소 } [K_{pc}^{(e)}] = \begin{bmatrix} C_{pc} & -C_{pc} \\ -C_{pc} & C_{pc} \end{bmatrix}$$

라. 양액 공급 시스템

개발된 양액 공급 시뮬레이션 프로그램의 성능을 검증하기 위하여 양액 공급 시스템을 제작하였다. 그림 2는 제작된 공급 시스템의 개략도의 모습을 나타낸 것이다.

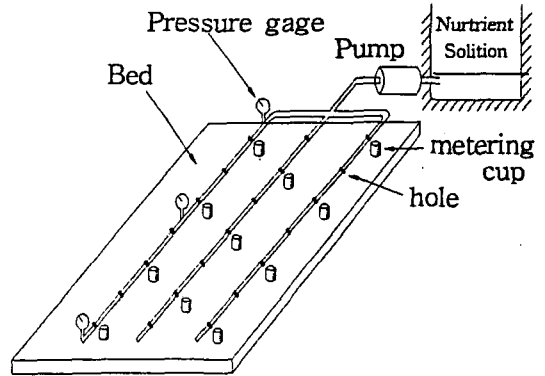


Fig. 2. Schematic diagram of the test system on nutrient solution supply.

그림 2에서 각 점적관의 길이는 100m이며, 1m 간격으로 배출기를 설치하였다. 공급량을 측정하기 위하여 계량 용기를 각 배출기마다 설치하였다. 또한 실험에 사용된 양액 공급장치는 양액을 공급하기 위한 공급펌프와 공급시간을 정확하게 제어하기 위하여 컴퓨터에 의해 솔레노이드 밸브를 개폐시켰다. 급액시 배관내의 압력을 측정하기 위하여 지관의 양 끝과 중간 지점에 각 1개씩 3개의 압력계를 설치하였다.

마. 양액 공급량 예측 시뮬레이션

시뮬레이션을 위하여 단일 점적관을 요소화한 결과를 식 (11)에 나타내었다.

$$[K] = \begin{bmatrix} C_p & -C_p & 0 & \dots & 0 \\ -C_p & C_p + C_e & -C_e & \dots & 0 \\ 0 & -C_e & C_e + C_p & \dots & -C_p \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & -C_p & \dots & C_p \end{bmatrix} \dots (11)$$

시뮬레이션에 사용된 총 요소의 수와 노드의 수는 각각 200개와 201개이다.

바. 급액방법과 균일도

공급량의 균일도를 향상시키기 위한 방법을 구명하기 위하여 공급관의 길이와 공급방법을 변화시키면서 시뮬레이션을 하였으며, 각 경우에 대하여 균일도를 조사하였다. 50 m, 100 m의 각 길이에 대해 각각 세가지 공급방법에 대하여 시뮬레이션을 하였으며 시뮬레이션의 구체적인 내용은 표 1과 같다.

Table 1. Supply methods used for simulation

Symbol	Supply method	No. of elements	No. of elements
Method I	One-way supply	200	201
Method II	Alternating supply from both ends	200	201
Method III	Two-way simultaneous supply	207	207

그림 3은 각 시뮬레이션 내용을 그림으로 나타낸 것이다.

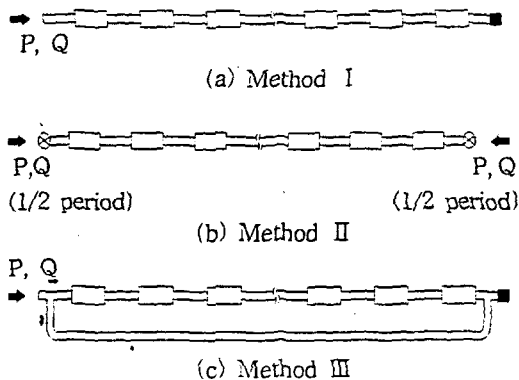


Fig. 3. Schematic diagram of the three methods of supply .

3. 結果 및 考察

가. 양액 공급량 예측 프로그램의 검증

그림 4는 양액공급 시험 결과 측정된 유량 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 실험오차를 줄이기 위하여 5회의 검증 실험을 수행하였으며, 각 실험 결과를 평균하여 시뮬레이션에 의한 결과와 비교하였다.

실험결과와 시뮬레이션 결과 간의 오차는 RMS 오차 결정법에 의하여 계산하였으며, RMS 오차는 약 1.1%로서 두 결과는 서로 잘 일치하였다.

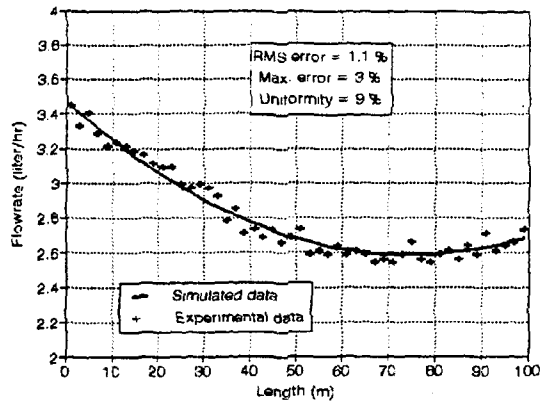


Fig. 4. Experimental and simulated emitter discharges .

그림 5는 시뮬레이션에 의한 결과로부터 얻어진 각 노드점에서의 압력을 나타낸 것이다. 공급 위치로부터 멀어질수록 압력은 급격하게 감소되는 것을 알 수 있다.

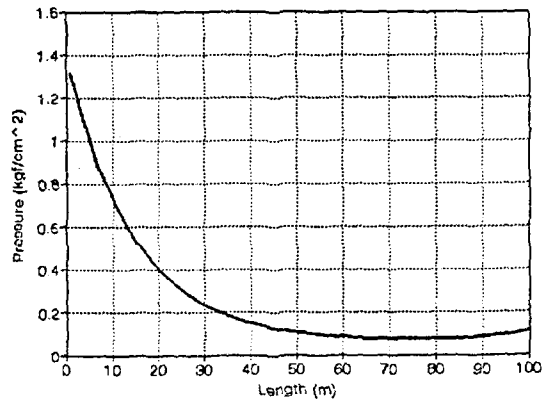


Fig. 5. Pressure changes in the line(simulated).

나. 공급방법에 따른 균일도의 평가

배관의 길이가 50, 100m 일 때, 세가지 공급방법에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 각각의 경우에 대하여 식 (2)에 의한 균일도를 구하였다. 균일도를 나타내기 위한 다른 수단으로서, 최소 예측치를 기준으로 하여 작물에게 양액이 공급되는 점을 고려하여 최대 예측치와 최소 예측치 간의 차이를 최소 예측치로 나누어 계산한 최대편차율을 사용하여 비교하였다. 또한, 공급된 양액중 과잉 공급으로 인한 손실량을 고려하기 위하여, 손실량을 최소 공급액으로 나누어 계산한 손실율을 비교하였다.

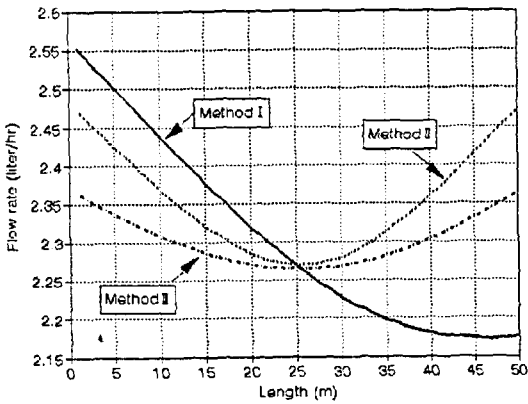


Fig. 6. Simulated emitter discharges for a 50m lateral line .

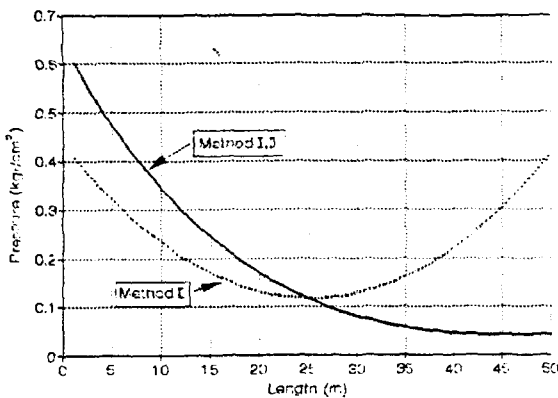


Fig. 7. Simulated nodal pressures for a 50m lateral line .

그림 6과 7은 각각 배관 길이 50m일 때의 시뮬레이션 결과로서 얻어진 각 배출기에서의 공급유량과 각 노드점에서의 압력을 나타낸 것이다. 관 길이 50m일때의 방법 I, 방법 II, 방법 III에 대한 균일도는 각각 5.3, 1.4, 2.8%로 나타났다.

그림 8, 9는 각각 배관 길이 100m 일 때의 시뮬레이션 결과로서 얻어진 각 배출기에서의 공급유량과 각 노드점에서의 압력을 나타낸 것이다. 100m 일때의 방법 I, 방법 II, 방법 III에 대한 균일도는 각각 9.0, 3.3, 5.1% 로 나타났다.

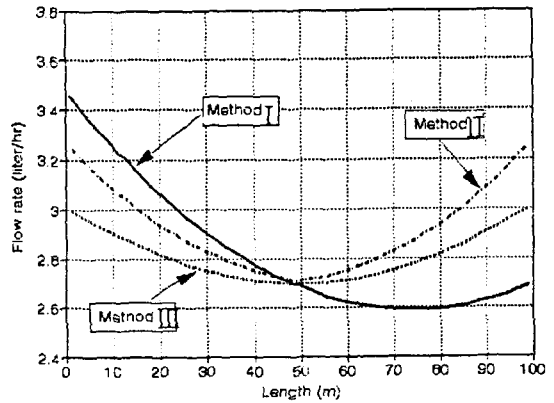


Fig. 8. Simulated emitter discharges for a 100m lateral line .

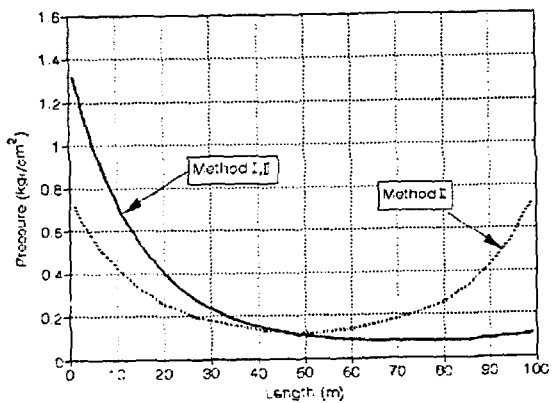


Fig. 9. Simulated nodal pressures for a 100m lateral line .

표 2는 공급방법별 시뮬레이션 결과를 비교하

여 나타낸 것이다. 여기에서 관 길이가 짧아질수록 균일도, 배출량의 최대 편차율, 손실율이 작아지는 것을 알 수 있으며, 3가지 공급방식 중에서 양방향에서 교대로 공급하는 방법이 가장 좋은 균일도를 나타내었다.

Table 2. Comparison of performance by the supply methods(by simulation)

Supply	METHOD I		METHOD II		METHOD III	
	100m	50m	100m	50m	100m	50m
Length of line	100m	50m	100m	50m	100m	50m
Coefficient of variance(%)	9.0	5.3	3.3	1.4	5.1	2.8
Max. difference in discharge(%)	33.4	17.5	10.0	5.1	16.6	8.9
Amount of loss(%)	8.9	5.9	4.0	1.6	7.6	3.5

4. 결론

본 연구는 인공배지용 점적 급액 시스템에서의 공급량 예측을 위한 시뮬레이션 프로그램의 개발을 목적으로 수행되었으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 점적식 양액 공급 시스템의 공급량 예측을 위한 시뮬레이션 프로그램을 유한요소해석법을 이용하여 개발하였으며, 양액 공급시스템을 구성하여 검증 시험을 수행한 결과, 실험과 시뮬레이션에 의한 공급량은 1.1%의 RMS 오차로서 거의 일치하였다.

2. 3가지의 양액공급 방법에 대하여 각각 시뮬레이션을 수행하여, 각 방법에서의 공급량을 예측하고 이에 따른 균일도를 변동계수에 의해 분석한 결과, 양방향을 번갈아 공급하는 방법이 가장 우수한 것으로 나타났다.

5. 參考文獻

1. 송현갑 외. 1993. 시설원예 자동화, 문운당.
 2. 오길근. 1995. 양액 자동 제어 장치 및 공급량

예측 프로그램의 개발, 서울대학교 석사 학위 논문

3. Shim, Kyu Don. 1992. Development of a fully-controlled plant growth system. M.S. thesis. Seoul National University.
 4. Bournival, P., S. Prasher, B. Von Hoyningen Huene, R.S. Broughton. 1987. Measurement of head losses in a subirrigation system. Transactions of the ASAE 30(1) : 183-186
 5. Clemmens, A.J. 1987. A statistical analysis of trickle irrigation uniformity. Transactions of the ASAE 30(1) : 169-175
 6. David J.H., C.M. Ricardo, W. Wes. 1986. Oscillating pressure for improving application uniformity of spray emitters. Transactions of the ASAE
 7. Davis, H.H., A.S. Donigian. 1979. Simulating nutrient movement and transformations with ARM model. Transactions of the ASAE pp. 1081-1086
 8. Haghghi, K., etc. 1989. Modeling expansion /contraction, valve and booster pump in hydraulic pipe network analysis : a finite element approach. Transaction of the ASAE 32 (6) : 1945-1953
 9. Wu I.P., H.M. Gitlin. 1975. Drip irrigation design based on uniformity. Transactions of the ASAE. 17(3) : 429-432.
 10. Wu I.P., H.M. Gitlin. 1981. Preliminary concept of a drip irrigation network design. Transactions of the ASAE. PR 80-014 : 1080-1085.
 11. Saldivia, L.A. etc. 1990. Hydraulic analysis of sprinkler irrigation system components using the finite element method. Transactions of the ASAE 33(4) : 1195-1202.