

라이시미터에서 지하수위에 따른 보리, 밀, 조의 수분이용효율 특성

김범기 · 공효영 · 심재식 · 홍순달*

충북대학교 농화학과

Water Use Efficiency of Barley, Wheat and Millet Affected by Groundwater Table under Lysimeter

Beom-Ki Kim, Hyo-Young Gong, Jae-Sig Shim, and Soon-Dal Hong*

Department of Agricultural Chemistry, Chungbuk National University, Sungbong-ro 410, Gaeshin-dong, Cheongju-si 361-763, Republic of Korea

This experiment was conducted to evaluate water use efficiency of barley, wheat, and millet as a substitution crop for rice of fallow paddy field. Dry weight (DW), evapotranspiration, and transpiration of crop grown on the lysimeters controlled with 5 levels of groundwater table (GWT), 0, 25, 50, 75, and 100 cm were evaluated for optimum GWT and water use efficiency. All the lysimeters randomized with four replication arrangements were filled up sandy loam and were adjusted to the constant bulk density treated with twice water infiltration from bottom side to upper side of lysimeter. DW of barley, wheat, and millet in the plot of 0cm GWT that is saturated soil showed 34.9%, 44.7%, and 37.1% of that in the plot of 100 cm GWT, respectively showing a serious obstacle in crop growth. Evapotranspiration ratios calculated by evapotranspiration volume (mL) per DW were 166~605 mL for barley, 136~481 mL for wheat, and 81~418 mL for millet showing the order of barley > wheat > millet. Evapotranspiration ratio was increased with decrease of groundwater table that is the condition of moisture saturation. Estimation of GWT for maximum DW of wheat was 76 cm, and those of barley and millet were 100 cm below. The volumetric moisture content of lysimeter soil with cropping was markedly decreased as increase of crop growth because moisture supplying capability by capillary rise of water was less than amount of moisture required by crop.

Key words: Evapotranspiration, Groundwater table, Lysimeter, Water use efficiency

서 언

국민 식생활 변화에 따른 쌀 소비량 감소와 농업에서 쌀 생산에 의한 농가소득 비중이 줄어들면서 휴경 논은 증가는 우리나라의 식량 자급율을 악화시키는 요인이 되고 있다. 우리나라는 사료를 포함하여 1,200만톤 이상의 곡물이 매년 수입되고 있는 반면 보리는 1980년대 이후 수요가 급감하여 현재 일부지역에서만 생산되고 있다. 또한 밀은 국민1인당 연간 소비량이 34 kg으로 쌀 다음으로 소비되는 곡물임에도 불구하고 자급률이 0.38%이고 조의 생산량은 통계 조사조차 이루어지지 않는 실정이다 (농림통계연보, 2008; 통계정보시스템, 2009).

휴경 논을 활용한 대체작물의 생산은 식량 자급률을

증대시킬 수 있는 유일한 선택이 되고 있다. 휴경논의 대체작물 재배에서 가장 큰 문제점은 논 토양의 과습조건에 의한 산소공급 부족이며 (Lee and Ku, 1994), 과습 토양의 토성, 지하수위수준 및 배수조건은 작물 생산성을 제한하는 중요한 요인이 되고 있다. 과습 토양에서 산소 결핍은 작물 수량 감소 및 생육 불량을 유발시키는 직접적인 습해의 원인이며 식물체 대사과정의 독성이나 양분결핍 현상은 간접적인 장애의 원인이 되고 있다 (Levitt, 1980). 침수에 의한 발작물의 장애는 잎의 질소함량 감소, 줄기 생장 억제, 노화촉진, 뿌리 썩음, 엽록소 파괴 등을 유발시킨다 (Berlyn and Mikshce, 1976).

수분부족에 의한 작물의 생장장애는 공급되는 수분량보다 소모되는 수분량이 초과할 경우이다. 수분공급량을 조절하는 요인이 수분함량을 결정하는 지하수위 조건이라면 소모량을 조절하는 요인은 증발량과 증산량이라 할 수 있다. 증발산량은 계절에 따라 변화가 있어 증발

접수 : 2010. 1. 21 수리 : 2010. 2. 1

*연락처 : Phone: +82432612564

E-mail: sdhong@cbnu.ac.kr

산량이 높은 시기에는 관수횟수와 관수량을 증가해야 수량을 확보할 수 있다 (Locascio and Smajstrla, 1996; Norrie et al., 1994). 증발산량은 지하수위뿐만 아니라 대기 습도와 날씨에 따라 변화정도가 크며, Hong et al. (1989)은 흐린 날씨에서 증산량이 적고, 맑고 건조한 날씨에서 증가함을 보고하였다. 식물체내 수분함량이 감소되면 세포 성장저하, 증발산과 광합성작용의 저하, 가수분해와 노화의 촉진 등의 피해가 나타나며 생육 불량으로 이어져 수량이 크게 감소한다 (표준영농교본-보리재배, 2001).

따라서 본 연구는 벼를 대체할 수 있는 발작물인 보리, 밀, 조에 대하여 수분이용효율 특성을 파악하여 적정 지하수위를 추정하고자 하였다.

재료 및 방법

시험 작물 및 토양 작물은 보리, 밀, 조 3개 곡류 작물로 하여 지하수위를 다르게 처리한 라이시미터에서 재배하였다. 강우에 의한 영향을 제한하기 위하여 비가림 조건인 비닐하우스에서 재배하였고 하우스 측면을 열어 온도와 습도는 외부와 같게 하였다. 시험토양의 토성은 사양토이었으며 pH는 8.0으로 높은 편이었고 EC는 0.8 dS m⁻¹, 질산태질소 함량과 치환성양이온, 양이온 치환용량 등 대부분의 토양화학성은 다소 낮은 경향이였다 (Table 1).

작물별 시비량은 토양검정시비량 (작물별 시비처방기준, 2006)에 따라 Table 2와 같이 질소는 보리와 밀의 경우 밀거름 78 kg ha⁻¹와 덧거름 45.5 kg ha⁻¹, 조는 전량 밀거름으로 130 kg ha⁻¹씩 사용하였다. 인산과 칼륨은 밀거름으로 전량 시비하였다.

보리와 밀은 10일 동안 육묘한 후 (04/24), 조는 17

일 육묘한 후 (04/30) 정식하였고 정식 후 보리와 밀은 57일 (04/30~06/23), 조는 66일동안 (04/30~07/04) 재배하였으며 수확 후 지상부 생체량과 건물중을 조사하였다.

라이시미터 라이시미터는 직경 30 cm의 PVC파이프를 이용하여 Fig. 1과 같이 밀면의 급수구로부터 수분공급이 원활하도록 제작하였다. 라이시미터에 충전된 토양은 라이시미터 표면까지 수분을 포화시킨 다음 자연배수를 2회 반복하여 충전된 토양의 용적밀도가 균일하게 되도록 하였다. 지하수위는 파이프 밀면 급수구로부터 토양 표면까지의 높이를 달리하여 0, 25, 50, 75, 100 cm 등 5개 지하수위로 처리하고 라이시미터는 작물별로 난괴법 4반복으로 배치하였다.

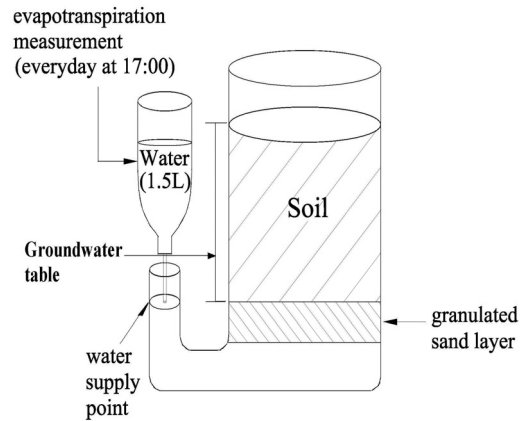


Fig. 1. Picture of lysimeter and water supplying and measurement of evapotranspiration.

증발산량과 증발량 작물 재배기간 동안 증발산량을 측정하기 위한 수분공급장치는 라이시미터 밀면의 급수관에 1.5 L 플라스틱 물병의 마개부위에 유리관을

Table 1. Physico-chemical properties of experimental soil.

pH	EC	OM	T-N	NO ₃ -N	Av. P ₂ O ₅	Exchangeable cation				CEC	Bulk Density
						K	Ca	Mg	Na		
(1:5)	dS m ⁻¹	g kg ⁻¹	---	mg kg ⁻¹	---	cmol _c kg ⁻¹				Mg m ⁻³	
8.0	0.80	8.61	0.85	73.1	370	0.11	1.41	0.23	0.01	6.61	1.34

Table 2. Application rate of fertilizer.

Crop	N		P ₂ O ₅	K ₂ O
	Basal	Additional		
kg ha ⁻¹				
Barley	78	45.5	68	30
Wheat	78	45.5	68	30
Millet	130	-	75	75

끼워 넣고 급수관의 물속에 잠겨 지하수위가 유지되도록 거꾸로 설치하였으며 매일 일정한 시간에 소모된 물의 양을 측정하여 증발산량으로 간주하였다. 또한 동일한 방법으로 작물을 재배하지 않은 라이시미터 조건에서 소모된 물의 양은 증발량으로 간주하였다. 라이시미터 표면에서 증발되는 수분량은 표면의 식물 존재여부에 따라 차이가 있겠지만 상기와 같이 조사된 증발산량에서 증발량을 공제하여 증산량으로 간주하였다.

물 이용효율 지하수위 처리별 각 작물의 건물중 통계분석은 SPSS 프로그램을 이용하여 통계처리하였고 재배기간동안 조사된 증발산량과 지상부 성장량의 상호관계로부터 증산 효율 퍼센트, 증산 비율, 증발산 효율 퍼센트 및 증발산 비율 등을 구하여 물 이용효율을 평가하였다. 증산 효율 퍼센트는 지상부 건물중을 전체 증산량으로 나누어서, 즉 단위 증산량 100 mL가 지상부 건물중 몇 g을 생산할 수 있는지를 평가하는 것이고 (Kang et al., 1996), 증산 비율은 반대로 지상부 건물중 1 g을 생산하는데 소요되는 증산량이 몇 mL인지를 평가하는 지표이다 (Armen et al., 2005; Pilbeam et al., 1995). 동일한 방법으로 증발산 효율 퍼센트와 증발산 비율도 증산량 대신 증발산량을 적용하여 평가하였으며 계산식은 아래와 같다.

- 가) 증산 효율 퍼센트 (percent of transpiration efficiency)

$$= [\text{지상부 건물중 (g)} / \text{총 증산량 (mL)}] \times 100$$
- 나) 증산 비율 (transpiration ratio)

$$= \text{총 증산량 (mL)} / \text{지상부 건물중 (g)}$$
- 다) 증발산 효율 퍼센트 (percent of evapotranspiration efficiency)

$$= [\text{지상부 건물중 (g)} / \text{총 증발산량 (mL)}] \times 100$$
- 라) 증발산 비율 (evapotranspiration ratio)

$$= \text{총 증발산량 (mL)} / \text{지상부 건물중 (g)}$$

토양의 용적수분함량 작물 생육기간중 토양의 용적수분함량은 표면으로부터 10, 25, 50, 75 cm 깊이에

서 TDR (Time Domain Reflectometry)센서 (model Trime-fm, Imko Co., Ettlingen, Germany)를 이용하여 매일 측정하였다. 이 센서의 용적수분함량은 calibration없이 센서 내부에 프로그램 되어있는 유전율 방정식 $\theta_v = (-530+292\varepsilon_a+5.5\varepsilon_a^2+0.043\varepsilon_a^3)/10^4$ 으로부터 계산되었다 (Topp et al., 1988).

결과 및 고찰

지하수위별 작물 성장량 보리와 밀은 57일간, 조는 66일간 재배 후 수확하였고 지상부 건물중을 Table 4에 나타냈다. 보리와 밀의 경우는 지하수위 (GWT, groundwater table) 50 cm 및 75 cm 처리가 100 cm 처리와 비교할 때 각각 75~110% 및 91~102%의 성장량을 보이며 GWT-75 cm 처리에서 가장 높았고 과습 조건일수록 감소되는 경향을 보였다 (Table 4). 이는 지하수위가 낮을수록 보리와 밀의 성장량이 좋았던 Lee and Ku (1995)와 Suh (1971)의 연구결과와 비슷한 경향이였다. 조의 경우도 보리 및 밀의 경우와 유사하게 100 cm 처리구에서 가장 높은 성장량을 보였으며 또한 과습 처리로 갈수록, 즉 지하수위가 높아질수록 감소되는 경향을 보였다.

가장 높은 성장량을 보인 GWT-100 cm를 기준으로 성장량을 비교해 보면, 보리는 GWT-0, 25, 50 cm에서 각각 35, 65, 73%, GWT-75 cm의 성장량은 110% 수준이었으며, 밀은 GWT-0, 25, 50, 75 cm에서 각각 45, 84, 95, 102%의 수준을 보였다. 그리고 조는 37, 73, 75, 89%의 수준을 나타냈다. 상기와 같은 성장량 변화로부터 평가한 과습에 대한 내성은 밀 > 조 > 보리의 순이었다. 특히 보리는 과습조건일수록 성장량이 가장 크게 감소하여 과습에 예민한 작물로 판단되었고, GWT-20 cm인 과습조건에서 보리 (71.1~72.2%)와 밀 (41.0~60.0%)의 성장량 감소를 밝힌 Lee and Ku (1995)의 연구 결과와 매우 유사한 경향이였다. Lee and Ku (1995)와 Kemper et al. (1961)는 과습 처리에서의 성장량 감소는 식물의 광합성 능력 저하와 이로

Table 3. Above-ground dry matter weight of crops affected by different groundwater table.

Crop	Growth period	DW					DW yield index				
		0 cm	25 cm	50 cm	75 cm	100 cm	0 cm	25 cm	50 cm	75 cm	100 cm
		----- g plant ⁻¹ -----					----- % -----				
Barley	57days	24.0e [†]	44.8d	50.0c	75.4b	68.7a	34.9	65.2	72.8	109.8	100
Wheat	57days	34.1d	64.0c	72.3b	77.9a	76.3ab	44.7	83.9	94.7	102.1	100
Millet	66days	49.8c	97.6b	100.2b	119.8a	134.0a	37.1	72.8	74.8	89.4	100

[†] Duncan's multiple range test.

Table 4. Total amount of evapotranspiration and transpiration affected by different GWT during the growing season.

	Crop	GWT-0 cm	GWT-25 cm	GWT-50 cm	GWT-75 cm	GWT-100 cm
		----- (L lysimeter ⁻¹) -----				
Total amount of evapotranspiration	Barley	14.5	15.3	12.1	15.3	11.4
	Wheat	16.4	26.7	17.2	12.5	10.4
	Millet	20.8	21.9	14.1	12.4	10.9
Total amount of transpiration	Barley	3.0	5.5	5.6	8.5	5.3
	Wheat	10.7	16.0	10.7	5.7	4.2
	Millet	5.6	10.6	7.0	4.8	4.3

Table 5. Percent of evapotranspiration efficiency, transpiration efficiency, evapotranspiration ratio, and transpiration ratio affected by different GWT during the growing season.

	Crop	GWT-0 cm	GWT-25 cm	GWT-50 cm	GWT-75 cm	GWT-100 cm
Percent of evapotranspiration efficiency †	Barley	0.17	0.29	0.41	0.49	0.60
	Wheat	0.21	0.24	0.42	0.62	0.74
	Millet	0.24	0.44	0.71	0.97	1.23
Percent of transpiration efficiency ‡	Barley	0.80	0.82	0.89	0.89	1.29
	Wheat	0.32	0.40	0.68	1.37	1.80
	Millet	0.90	0.92	1.43	2.49	3.13
Evapotranspiration ratio §	Barley	605	343	243	203	166
	Wheat	481	417	238	161	136
	Millet	418	225	140	103	81
Transpiration ratio ¶	Barley	124	122	112	112	77
	Wheat	314	251	148	73	56
	Millet	111	109	70	40	32

† Percent of evapotranspiration efficiency was calculated by [above-ground dry matter (g) / total amount of evapotranspiration (mL)] × 100

‡ Percent of transpiration efficiency was calculated by [above-ground dry matter (g) / total amount of transpiration (mL)] × 100

§ Evapotranspiration ratio was calculated by total amount of evapotranspiration (mL) / above-ground dry matter (g)

¶ Transpiration ratio was calculated by total amount of transpiration (mL) / above-ground dry matter (g).

인한 단당류 증가와 지하부의 생육 저하 때문이라고 하였다. 특히 성장초기의 과습으로 인한 산소결핍에 의한 식물체 내 CO₂ 증가는 치명적이며 잎줄기 생장 억제, 뿌리 썩음, 엽록소 파괴 등이 일어나는 것으로 보고되었다 (Crawford, 1977; Salisbury and Ross, 1992).

수분이용효율 작물 재배기간 동안의 지하수위별 증발산량과 증산량의 변화는 유사하였으며 증발산량, 증산량 모두 보리는 GWT-75 cm에서 그리고 밀과 조는 GWT-25 cm에서 가장 많았다 (Table 4). 이들 증발산량과 증산량으로부터 물 이용효율을 평가하기 위하여 증발산효율 퍼센트와 증산효율 퍼센트를 계산하였다.

증발산량으로 소모된 물 100 mL로부터 생산된 지상부 건물중은 보리의 경우 0.17~0.60 g, 밀은 0.21~0.74 g, 조는 0.24~1.23 g의 분포를 보였고, 증산량으로 소모된 물 100 mL로부터 생산된 지상부 건물중은

보리의 경우 0.80~1.29 g, 밀은 0.32~1.80 g, 조는 0.90~3.13 g의 분포로서 증발산량효율 퍼센트보다 높은 값을 보였다 (Table 5). 증발산 및 증산량효율 퍼센트 모두 작물별로는 조 > 밀 > 보리의 순이었으며 지하수위별로는 시험작물 모두 0 cm에서 100 cm 지하수위로 낮아질수록 증가되는 경향을 보였다. 이는 지하수위가 낮아질수록, 즉 과습조건보다는 수분부족 조건에서 단위 수분량으로 더 많은 작물을 생산할 수 있어 GWT-100 cm에서 증발산효율은 보리, 밀, 조가 각각 0.6, 0.74, 1.23 g mL⁻¹, 증산효율은 1.29, 1.80, 3.13 g mL⁻¹으로 가장 높은 수분이용효율을 나타냈다.

지상부 건물중 1 g을 생산하는데 소요된 보리의 증발산비율은 166~605 mL, 밀은 136~481 mL, 조는 81~418 mL의 분포로서 보리 > 밀 > 조의 순이었고, 보리의 증산량비율은 77~124 mL, 밀은 56~314 mL, 조는 32~111 mL로서 밀 > 보리 > 조의 순이었다. 또한

지하수위별 증발산 및 증산량비율은 100 cm 지하수위에서 0 cm 지하수위로, 즉 수분포화 조건으로 갈수록 증가되었고 특히 GWT=0 cm에서의 증발산비율은 보리, 밀, 조가 각각 605, 481, 418 mL g⁻¹ 증산비율은 124, 314, 111 mL g⁻¹로 가장 낮은 수분이용효율을 나타냈다.

지하수위별 생장량 및 증산량비율 지하수위에 따른 작물의 지상부 건물중의 회귀관계 (Fig. 2)는 보리, 밀, 조 모두 지하수위가 낮은 100 cm 조건으로 갈수록 비례하며 증가되는 곡선적인 2차함수의 회귀관계를 보였다. 특히 보리와 밀의 경우 지하수위가 높아질수록, 즉 과습 조건일수록 생장량의 감소가 현저하였으며 습해 정도가 클 경우 급격한 질소흡수량의 감소로 인해

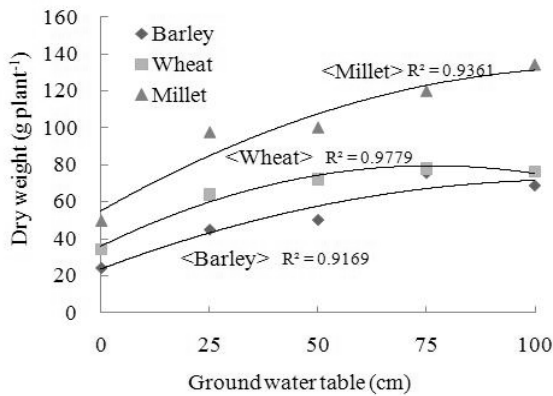


Fig. 2. Relationship between groundwater table and dry weight of shoot of barley, wheat, and millet.

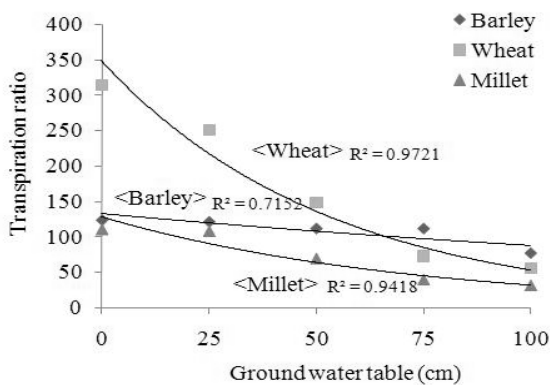


Fig. 3. Relationship between groundwater table and transpiration ratio by barley, wheat, and millet.

생장량이 감소한다는 Drew and Sisworo (1979), Trought and Drew (1980), Lee and Ku (1995)의 연구결과와 일치되는 경향이였다.

Figure 3은 지하수위에 따른 수분이용효율로서 지하수위에 따른 증산량비율의 회귀관계를 나타낸 것이다. 시험작물 모두 지상부 건물중 1 g을 생산하는데 소모되는 증산량비율은 시험작물 모두 지하수위가 낮아질수록 곡선적으로 감소되는 경향을 보였다. 특히 감소되는 기울기는 밀에서 가장 크게 나타났다.

Table 6은 지하수위와 지상부 건물중의 회귀관계로부터 구한 회귀식과 최대 건물중에 대한 지하수위를 나타낸 것이다. 밀은 76 cm로 평가되었으나 보리와 조의 경우는 본 시험의 처리범위 밖에 해당하는 지하수위에서 최대건물중이 얻어지는 것으로 평가되었다.

토양수분 변화 재배기간 중 100 cm 지하수위 처리에서 토양 깊이별로 용적수분함량의 일 변화를 조사하여 Fig. 4, 5에 나타냈다. 작물을 재배하지 않은 조건에서 지하수위를 일정하게 조절하면서 수분을 공급한 경우에도 토양깊이별 용적수분함량은 시간이 경과함에 따라 감소되는 경향이였다 (Fig. 4). 그리고 표면 10 cm 깊이가 25 cm 깊이보다 6월 중순 이후에 더 높게 유지된 것은 강우분포가 잦으면서 상대습도가 높았던 것에 기인된 것으로 생각된다. 그러나 작물을 재배한 경우는

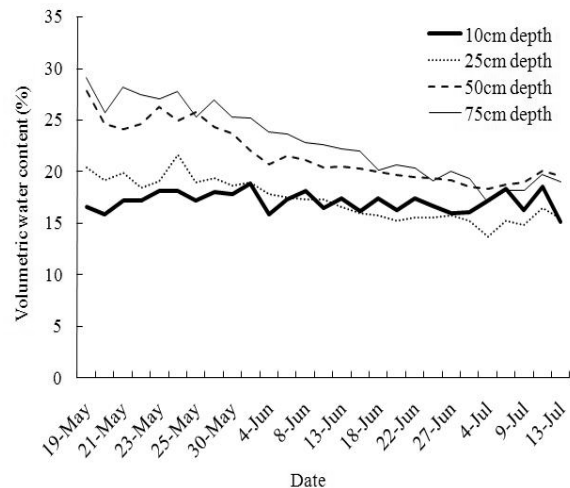


Fig. 4. Seasonal changes of volumetric water content at different depth of lysimeter without crop.

Table 6. Optimum groundwater table for maximum dry weight of shoot of crops.

Crop	Regression equation (0 cm < X < 100 cm)	Groundwater table at maximum dry weight
Barley	$Y = -0.004X^2 + 0.8802X + 23.58$ ($R^2 = 0.9169$)	100 cm below
Wheat	$Y = -0.0075X^2 + 1.1422X + 35.92$ ($R^2 = 0.9779$)	76 cm
Millet	$Y = -0.00057X^2 + 1.3355X + 55$ ($R^2 = 0.9361$)	100 cm below

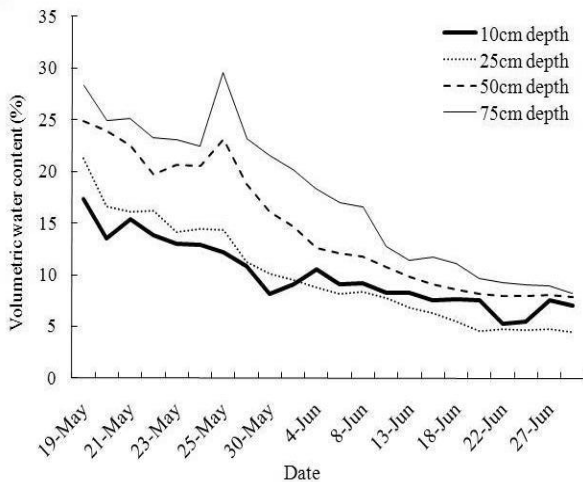


Fig. 5. Daily changes of volumetric water content at different soil depth of lysimeter grown with barley.

시간이 경과함에 따라 용적수분함량은 더 급격하게 감소되는 경향을 보였다 (Fig. 5). 이러한 결과는 작물에 의한 수분흡수량만큼 모세관을 통한 수분공급이 충족되지 못하기 때문으로 생각되었다 (Hwang et al., 2003). 또한 작물을 재배한 경우에도 10 cm 깊이에서의 용적수분함량은 25 cm 깊이보다 6월 하순부터 더 높게 유지되었는데 이는 강우에 의한 상대습도의 영향으로 판단된다.

요 약

본 연구는 휴경논 벼 대체작물로서 보리, 밀, 조의 수분스트레스에 대한 생육특성을 비교하기 위하여 실시하였다. 라이시미터를 이용하여 지하수위를 0, 25, 50, 75, 100 cm의 5개 수위로 처리하여 지하수위에 따른 생체량과 증발산량 및 증산량을 조사하고 수분이용효율 특성과 작물별 적정 지하수위를 추정하였다. 보리, 밀, 조 모든 작물은 과습에 대한 내성이 약하였으며 작물별로는 보리 > 조 > 밀의 순이었다. 지상부 건물중 1 g을 생산하는데 소요된 증발산량으로 나타난 증발산비율로 비교할 경우 보리는 166~605 mL, 밀은 136~481 mL, 조는 81~418 mL의 분포로서 보리 > 밀 > 조의 순이었고 100 cm 지하수위에서 0 cm 지하수위로, 즉 수분포화 조건으로 갈수록 증발산 비율은 증가되었다. 지하수위에 따른 지상부 건물중의 회귀식으로부터 최대 건물중을 나타내는 지하수위는 밀이 76 cm로 평가되었고 보리와 조의 경우는 지하수위가 낮아질수록 거의 직선적으로 증가되는 경향을 보이며 처리구 시험범위 밖인 100 cm 이하로 평가되었다. 작물 재배기간 동안 토양의 용적수분 함량은 작물에 의한 수분흡수량만큼 모세

관을 통한 수분공급량이 부족하여 재배기간이 경과할수록 급격하게 감소되는 경향을 보였다.

인 용 문 헌

- 농림통계연보. 2008. 농림수산식품부.
 보리재배. 표준영농교본 118. 2001. 농촌진흥청. pp 33-38, 191-203.
 작물별 시비처방기준. 2006. 농촌진흥청.
 통계정보시스템. 2009. 한국농촌경제연구원 농업관측정보센터. <http://krei.re.kr/kor/agreport/grain/yoyak.php>.
 Armeen, R.K., O.S. Claudio, and R.H. David. 2005. Transpiration-use efficiency of barley. *Agricultural and forest meteorology* 130:1-11.
 Belryn, G.P. and J.P. Miksche. 1976. *Botanical micro-technique and cytochemistry*. The Iowa State Univ. Press, Ames, Iowa, USA
 Crawford, R.M.M. 1997. Tolerance of anoxia and ethanol metabolism in germinating seeds. *New Phytol.* 79:511-517.
 Drew, M.C. and E.J. Sisworo. 1979. The development of waterlogging damage in young barley plants in relation to plant nutrient status and changes in soil properties. *New Phytol.* 82:301-314.
 Hong, S.D., J.J. Kim, S.J. Cho, and Y.H. Lee. 1989. The interrelationships between yield, transpiration of the tobacco plant, and seasonal meteorological factors during the growing season. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 22:228-233.
 Hwang, J.M., G.S. Tae, and J.S. Uom. 2003. Changes of soil water balance and growth of red paper as affected by growing conditions in the plastic house. *Korean J. Bio-Environment Control.* 12:38-44.
 Kang, Y.K., A.R. Richard, and G.C. Anthony. 1996. Interactions among carbon isotope discrimination, water use efficiency and nitrogen nutrition in wheat and barley. *Korean J. Crop Sci.* 41:318-331.
 Kemper, W.D., C.W. Robinson., and H. J. Bolus. 1961. Growth rates of barley and corn as affected by changes in soil moisture stress. *Soil Sci.* 91:332-338.
 Lee, H.S. and J.H. Ku. 1995. Effect of water table depth in different soil texture on quality of barley and wheat grain. *Korean J. Crop Sci.* 40:195-202.
 Levitt, J. 1980. *Response of plants to environmental stresses*. Academic press. pp 266-288.
 Locascio, S.J. and A.G. Smajstrla. 1996. Water application scheduling pan evaporation for drip-irrigated tomato. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 121:63~68.
 Norrie, J., M.E.D. Graham., and A. Gosselin. 1994. Potential evapotranspiration as a means of predicting irrigation timing in greenhouse tomatoes grown in peat bags. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 119:163-168.

- Pilbeam, C.J., L.P. Simmonds., and A.W. Kavilu. 1995. Transpiration efficiencies of maize and beans in semi-arid Kenya. *Field crops reaserch* 41:179-188.
- Salisbury, F.B. and C.W. Ross. 1992. *Plant physiology* (4th ed.). Wadsworth, Inc., Belmont, California. pp 27-65.
- Suh, H.S. 1971. Studies on the wet-injury resistance of wheat and barley varieties. *Korean J. Breeding* 3:98-106.
- Topp, G.C., M. Yanuka., W.D. Zebchul., and S. Zegelin. 1988. Determination of electrical conductivity using time domain reflectometry: Soil and water experiments in coaxial lines. *Water Resour. Res.* 24:945-952.
- Trought, M.C.T. and M.C. Drew. 1980. The development of waterlogging damage in wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.). II. Accumulation and redistribution of nutrient by shoot. *Plant Soil.* 56:187-199.