

Penman式에서 補正係數 (C)가 潛在蒸發散量에 미치는 效果

- 水原地方의 水稻에 대하여 -

The Effect of Adjustment factor(c) in Penman Equation

- For Paddy in Suwon -

鄭 夏 禹* · 金 成 俊** · 任 正 男**
Chung, Ha Woo · Kim, Seong Joon · Im, Jung Nam

Summary

The purpose of this paper is to know the effect of Adjustment factor (C) in Penman equation. In the modified Penman equation by Doorenbos and Pruitt (1977), Potential Evapotranspiration(PET) was calculated in cases of (1) neglecting Adjustment factor (C=1, 0, A), (2) fixing Day/Night wind ratio (URATIO) to 2.0(B-1) and computing daily URATIO (B-2), and was compared with Actual Evapotranspiration (AET) for paddy fields in Suwon (1985-1986).

The followings are a summary of this study results :

1. Using 1985-1986 meteorological data, daily average PET in cases of A, B-1, B-2 were 4.61 mm/day, 4.81 mm/day and 5.36 mm/day respectively and daily average AET was 4.26 mm/day. The increment ratios of PET based on case A were 100%, 104.34% and 116.27%
2. The range of Adjustment factor (C) in cases of B-1, B-2 were 0.916-1.140 and 0.922-1.392 respectively.
3. The regression coefficient(r) between AET and PET in cases of A, B-1, B-2 were 0.928, 0.924 and 0.915 respectively.

I. 緒 論

必要水量을 안다는 것은 農業用水의 開發과 물의 效率의인 管理計劃樹立에 있어 重要한 事項이다. 必要水量은 蒸發散量과 滲透量으로 이루어지며, 滲透量은 土壤의 種類, 地下水位 등에 의해

영향을 받는 반면 蒸發散量은 作物의 種類 및 每日의 氣象條件에 의해 變化하므로 滲透量에 비해 그 變化率이 매우 크다.

世界的으로 볼 때 蒸發散量에 대한 研究는 지금까지 약 200년에 걸쳐 活潑하게 進行되어 왔으며, 現在 사용되고 있는 여러 潛在蒸發散量 算定

* 서울대학교 農科大學

** 서울대학교 大學院

** 農村振興廳 農業技術研究所

公式중의 하나인 Penman公式은 灌溉組織을 設計하는데 자주 適用되고 있고, 1948년에 처음으로 Penman이 發表한 이래로 그동안 여러 學者들에 의해 계속 修正補完되어 왔다. Penman公式은 에너지收支項(energy balance term)과 空氣動力項(aerodynamic term)으로 構成된, 理論的으로 유도된 公式으로 여러 複合的인 氣象資料가 觀測되어 있는 경우에 適用되고 있다.

蒸發散量은 밤과 낮의 氣象條件에 의해서도 영향을 받기 때문에 Doorenbos와 Pruitt (1977)는 이를 고려하여 基存의 Penman 公式에 補正係數(C)를 곱한 식을 제안하였고, Frevert (1983) 등은 이 補正係數(C)를 재차 補正하였으며, 補正係數(C)에 영향을 주는 인자는 最大相對濕度, 日射量, 晝間風速 및 晝間風速/夜間風速의 比(URATIO)로 이루어진다.

本 研究에서는 Doorenbos와 Pruitt의 修正 Penman公式에서 補正係數를 고려하지 않은 경우(C=1.0)와 고려할 경우에 晝間風速/夜間風速의 比(晝夜風速比)가 一定한 경우(URATIO=2.0), 晝夜風速比를 日別로 算定한 경우(URATIO=varied)에 대한 各各의 潛在蒸發散量값들을 서로 比較分析하므로써 補正係數(C)가 潛在蒸發散量에 미치는 效果를 알아 보고, 補正係數를 고려한 潛在蒸發散量과 實測蒸發散量과의 關係를 糾明해 보 고자 하였다.

II. 模型의 構成

1. 基本 理論

地表面에 도달한 短波輻射量(R_s)중 일부(αR_s)는 反射되고, 일부(R_b)는 大氣중으로 환원된다. 따라서 순수하게 물을 蒸發시키는데 이용되는 純輻射量(R_n)은 다음과 같다.

$$R_n = R_s - \alpha R_s - R_b \dots \dots \dots (1)$$

여기서, α : 表面의 反射係數

反輻射量(R_b)는 氣溫, 濕度 및 雲度에 의해 결정된다.

$$R_b = \sigma T_a^4 (0.47 - 0.075e_a^{1/2}) (0.17 - 0.83 n/N) \dots \dots \dots (2)$$

여기서,

$$\sigma : \text{Stefan-Boltzmann常數 } (11.71 \times 10^{-8} \text{ cal/cm}^2 \text{ } ^\circ\text{K}^4 \text{ /day})$$

T_a : 平均氣溫 ($^\circ\text{K}$)

e_a : T_a 에서의 水蒸氣壓 (mmHg)

n/N : 日照時間에 대한 日照時間의 比

한편, 純輻射量(R_n)중 일부(Q)는 表面바로 위의 大氣로 전달되고 일부(E)는 實際로 물을 蒸發시키는데 이용된다.

$$R_n = Q + E \dots \dots \dots (3)$$

여기서, Q (Heat Transfer)는 바람, 수직기온차에 의해 영향을 받는다.

$$Q = \gamma f(u) (T_s - T_a) \dots \dots \dots (4)$$

여기서,

γ : 單位換算係數

$f(u)$: 風速函數

T_s : 蒸發對象表面에서의 溫度

實際蒸發量(E)은 風速, 수직기압차에 의해 영향을 받는다.

$$E = f(u) (e_s - e_a) \dots \dots \dots (5)$$

여기서, e_s : T_s 에서의 飽和水蒸氣壓 (mmHg)

潛在蒸發量(E_a)은 風速 및 大氣水分不足量에 의해 영향을 받는다.

$$E_a = f(u) (e_a - e_a) \dots \dots \dots (6)$$

여기서, e_a : 平均氣溫에서의 飽和水蒸氣壓 (mmHg)

Penman은 위의 식들 중에서 氣象測定器具로부터 觀測하기 어려운 變數들을 소거시키기 위하여 Δ (蒸氣壓/氣溫)을 이용하였다.

$$\Delta = \frac{e_s - e_a}{T_s - T_a} \dots \dots \dots (7)$$

(7)式을 (4)式에 代入하면

$$Q = R_n - E = \frac{\gamma f(u) (e_s - e_a)}{\Delta}$$

또한,

$$\frac{\Delta}{\gamma} (R_n - E) = f(u) (e_s - e_a) = f(u) (e_s - e_a) - f(u) (e_a - e_a) \dots (8)$$

와 같이 나타낼 수 있고, (5), (6)式으로부터 (9), 式과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta}{\gamma} (R_n - E) = E - E_a$$

따라서,

$$E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_n + \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} E_a \dots \dots \dots (9)$$

Penman式에서 補正係數(C)가 潛在蒸發散量에 미치는 效果

원래 Penman은 1948년에 자유수면에서의 蒸發量을 구하기 위하여 (9)式을 理論的으로 유도하였고, 여기서 E_a 는 (10)式과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_a = 0.35(1 - 0.0098u_2)(e_a - e_a) \dots\dots\dots (10)$$

여기서, u_2 : 地上 2m 높이에서의 平均風速 (miles/day).

Penman은 1952년과 1956년에 蒸發量으로부터 作物의 蒸發散量을 구할 수 있게 그의 式을 수정하였다.

$$ET = E \cdot \frac{ET}{E}$$

여기서, ET/E 는 계절별로 고려하여 산정하여야 하고, 風速函數는 다음과 같다.

$$f(u) = 0.35(0.5 - 0.01u_2) \dots\dots\dots (11)$$

Penman은 1963년에 土壤이 飽和된 상태 및 잔디가 地表面을 完全히 피복한 상태에서의 潛在蒸發散量(PET)을 구하기 위하여 風速函數를 (12)式과 같이 유도하였다.

$$f(u) = 0.35(1 + \frac{u_2}{100}) \dots\dots\dots (12)$$

따라서, 潛在蒸發散量(PET)은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} PET &= \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_n + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a \\ &= \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_n + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \left\{ 0.35(e_a - e_a) \right. \\ &\quad \left. \left(1 + \frac{u_2}{100} \right) \right\} \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

한편, Doorenbos와 Pruitt(1977)는 밤과 낮의 氣象條件에 의해서도 蒸發散量이 영향을 받으므로 Table-1과 같이 補正係數(c)를 圖表化하여 제안하였고, Frevent(1983)는 補正係數를 다음과 같이 數式化하여 나타내었다.

$$\begin{aligned} C &= 0.6817006 + 0.0027864RH_{max} + 0.0181768R_s \\ &\quad - 0.0682501 U_{day} + 0.0126514URATIO \\ &\quad + 0.0097297 U_{day} \cdot URATIO + 0.043025 \times 10^{-4} \\ &\quad RH_{max} R_s U_{day} - 0.92118 \times 10^{-7} RH_{max} \\ &\quad URATIO \cdot R_s \end{aligned}$$

여기서, RH_{max} : 最大相對濕度 (%)

R_s : 日射量 (mm/day)

U_{day} : 晝間風速 (km/day)

URATIO: 晝間風速/夜間風速의 比

Table-1. Adjustment Factor(c) in Presented Penman Equation.

Rs mm/day Uday m/sec	RHmax=30%				RHmax=60%				RHmax=90%			
	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12
	Uday/Unight=4.0											
0	.86	.90	1.00	1.00	.96	.98	1.05	1.05	1.02	1.06	1.10	1.10
3	.79	.84	.92	.97	.92	1.00	1.11	1.19	.99	1.10	1.27	1.32
6	.68	.77	.87	.93	.85	.96	1.11	1.19	.94	1.10	1.26*	1.33
9	.55	.65	.78	.90	.76	.88	1.02	1.14	.88	1.01	1.16	1.27
	Uday/Unight=3.0											
0	.86	.90	1.00	1.00	.96	.98	1.05	1.05	1.02	1.06	1.10	1.10
3	.76	.81	.88	.94	.87	.96	1.06	1.12	.94	1.04	1.18	1.28
6	.61	.68	.81	.88	.77	.88	1.02	1.10	.86	1.01	1.15	1.22
9	.46	.56	.72	.82	.67	.79	.88	1.05	.78	.92	1.06	1.18
	Uday/Unight=2.0											
0	.86	.90	1.00	1.00	.96	.98	1.05	1.05	1.02	1.06	1.10	1.10
3	.69	.76	.85	.92	.83	.91	.99*	1.05*	.89	.98	1.10*	1.14
6	.53	.61	.74	.84	.70	.80	.94	1.02	.79	.92	1.05	1.12*
9	.37	.48	.66	.76	.59	.70	.84	.95	.71	.81	.96	1.06
	Uday/Unight=1.0											
0	.86	.90	1.00	1.00	.96	.98	1.05	1.05	1.02	1.06	1.10	1.10
3	.64	.71	.82	.89	.78	.86	.94	.99*	.85	.92	1.01	1.05*
6	.43	.53	.68	.79	.62	.70	.84	.93	.72	.82	.95	1.00
9	.27	.41	.59	.70	.50	.60	.75	.87	.62	.72	.87	.96

Data from FAO-24. Crop water requirements

2. 模型의 構成

本 研究에서의 潛在蒸發散量算定 電算模型은 FAO에서 1977년에 提示한 修正 Penman式을 基礎로 하여 作成하였다.

Penman式으로부터 潛在蒸發散量을 求하기 위해서는 日平均氣溫, 日平均相對濕度, (日平均露點溫度), 日平均風速, 日照時間 및 高度資料가 반드시 있어야 하며, 日射量資料가 없을 경우에 本模型에서는 日照時間으로부터 日射量 및 純輻射

量을 구할 수 있게 하였다. 또한 晝間 및 夜間平均風速資料의 有無에 따라 補正係數(C)를 고려하여 潛在蒸發散量 (PET)을 구하도록 하였다. 本模型의 흐름도는 Fig. 1과 같다.

模型에서의 入力資料에 대한 變數名, 內容 및 單位는 Table-2에서 보는 바와 같으며, 出力은 日別, 半旬別, 旬別 및 月別單位로 平均潛在蒸發散量을 計算하도록 하였고, 補正係數가 日別로 計算되는 경우에는 이를 出力하도록 하였다.

Table-2. Basic Input Paramctor.

Classification	Variable name	Parameter Description	unit
Option Parameter	KRM	when there is radiation data, KRM= 1 when there is net radiation data, KRM= 2 when there is no radition data, KRM= 3	
	KUM	when there is day time wind speed data, KUM= 1 when there is no day time wind speed data, KUM= 2 or 3	
	UNIT	when unit is "1", the unit of wind speed is m/s. Otherwise km/day	
Generally necessary parameter	LOCA	Location	
	LAT	Latitude	
	ALT	Altitude	
	UHT	Wind speed measurement height	m
	UHTD	Daytime wind speed measuement height	m
Meteorological parameter	TMEAN	Daily average temperature	℃
	RH	Daily average relative humidity	%
	TOW	Daily average dew point temperature	℃
	UM	Daily average wind speed	m/s (km/day)
	SH	Daily sunsbine hour	hr
	RS	Solar radiation	MJ/m ²
	RN	Net radiation	MJ/m ²
	UDAY	Daily average day time wind speed	m/s (km/day)

Ⅲ. 模型의 適用

本 模型을 利用하여 다음과 같은 세가지 경우에 의한 潛在蒸發散量과 畚에서의 實測蒸發散量을 比較分析하였다.

- 1) 補正係數를 考慮하지 않은 경우 (C=1.0, A),
 - 2) 補正係數를 考慮한 경우 (B),
- 가) 晝夜風速比가 一定한 경우, (URATIO =2.0, B-1),
- 나) 晝夜風速比를 日別로 算定한 경우 (URATIO=varied, B-2),

晝間 및 夜間風速資料는 '85~'86年 동안에 農村振興廳 農業技術研究所에서 觀測한 값을 使用

하였다. 實測蒸發散量資料는 서울大學校 農科大學 附屬農場에서 觀測한 값을 利用하였으며, 水稻의 品種은 常豐(中生種), 土壤은 砂壤土이었고, 위의 두 地域間의 距離는 약 800m이다.

1.補正係數(C)에 따른 潛在蒸發散量間의 比較 세가지 경우의 補正係數에 따른 各各의 潛在蒸發散量은 Fig 2, 3에서 보는 바와 같고, 結果를 要約하면 Table-2와 같다.

Table-3에서 보는 바와 같이, 日平均 潛在蒸發散量(PET)은 A의 경우에 4.61mm/day, B-1의 경우에 4.81mm/day, B-2의 경우에 5.36mm/day로서, A경우를 基準으로 하여 比較하여 보면

Penman式에서 補正係數(C)가 潛在蒸發散量에 미치는 效果

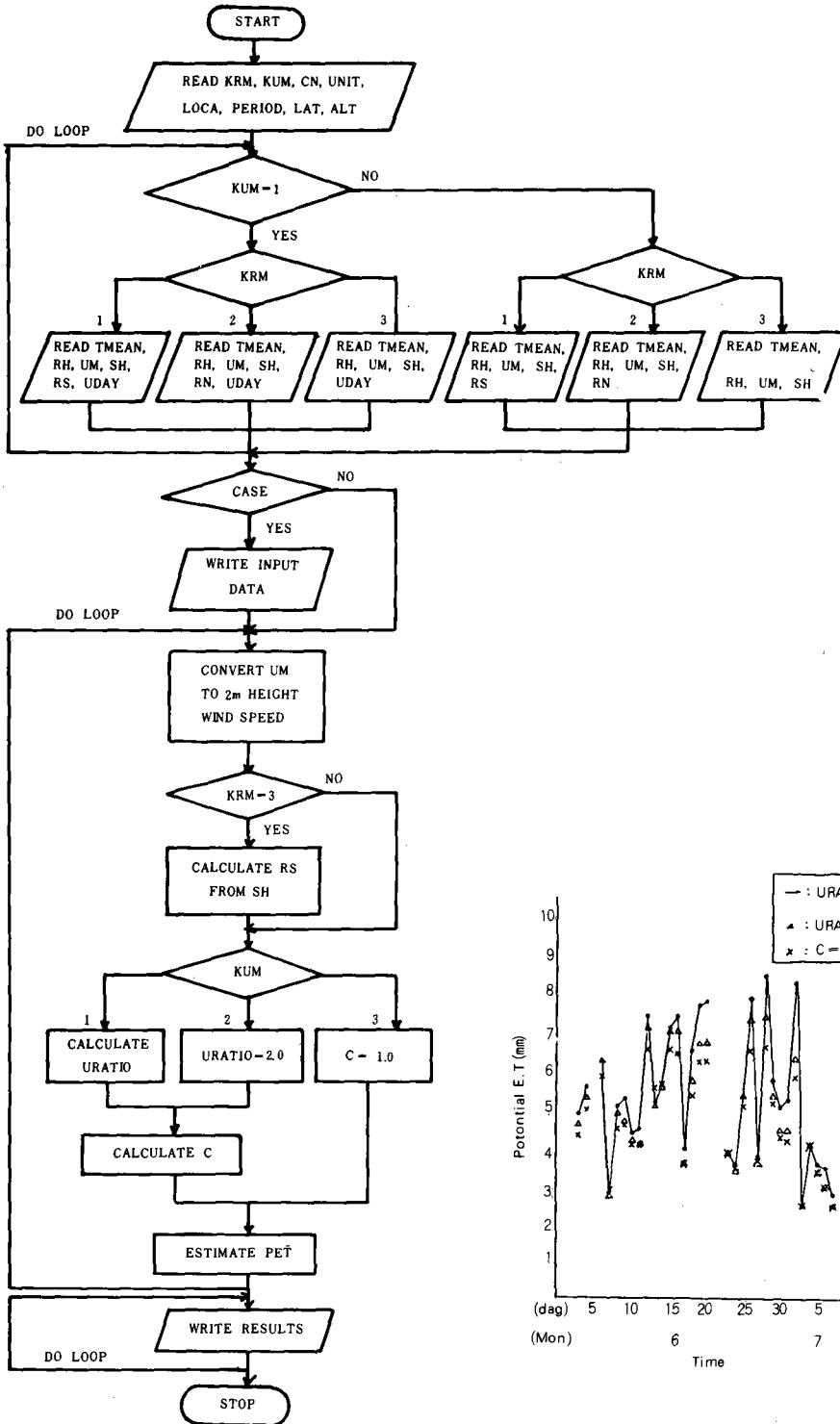


Fig. 1. FLOW CHART.

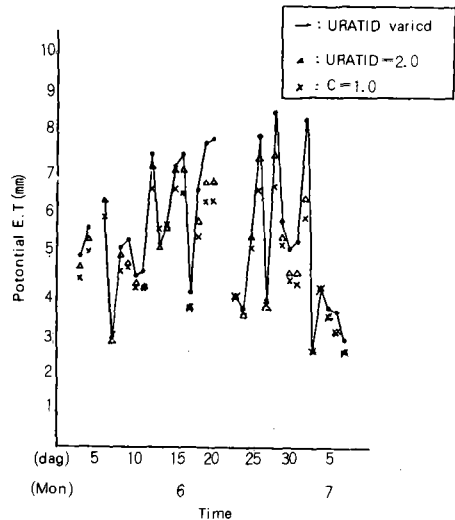


Fig. 2. Comparison of Average daily P.E.T. with three cases of adjustment factor(c) ('85).

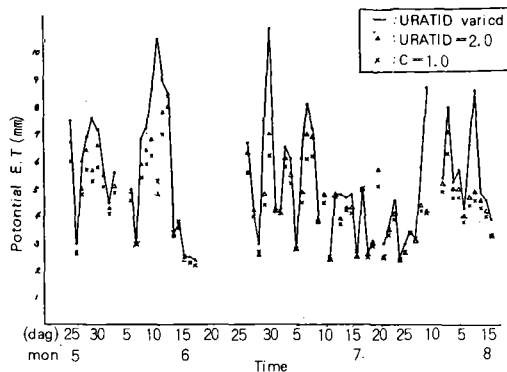


Fig. 3. Comparison of Average daily P.E.T. with three cases of adjustment factor(c) ('86).

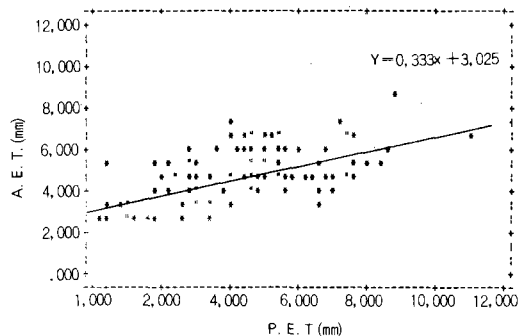


Fig. 4. Relation between Actual Evapotranspiration and Potential Evapotranspiration in case of C=1.0.

潛在蒸發散量の増加率は各各 100%, 104.34%, 116.27%이었다.

이는晝夜風速比(URATIO)를考慮하여日別로補正係數를算定하였을 때,補正係數가1보다 큰경우가 많다는 것을 말하며, 따라서水原地方에

Table-3. Comparison of Average Daily P.E.T. with three cases of adjustment factor (c).

unit : mm

Year	Average daily P.E.T.			Period
	C=1.0	URATIO=2.0	URATIO varied	
1985	4.70	4.90	5.34	May. 2.-July.7
1986	4.51	4.71	5.37	May.20-Aug.10.
Average	4.61	4.81	5.36	
C range		0.916-1.140	0.922-1.392	

서의水稻生育期間中(5月~9月)에는日射量 및相對濕度가蒸發散量에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

2.實測蒸發散量과 各各의 潛在蒸發散量과의 比較

1985年, 1986年 동안의 서울大學校 附屬農場에서 觀測한 旬別 日平均 實測蒸發散量과 同一期間에서의 세가지 경우에 의한 潛在蒸發散量은 Table-4에서 보는 바와 같다.

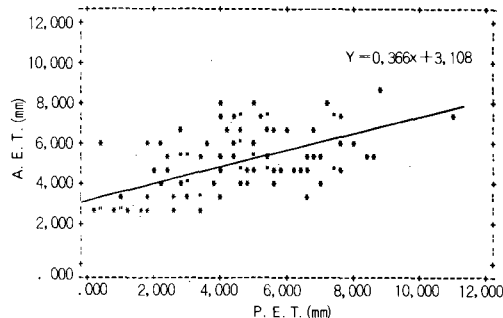


Fig. 5. Relation between Actual Evapotranspiration and Potential Evapotranspiration in case of URATIO=2.0.

Table-4. Average daily Actual Evapotranspiration(AET) and Potential Evapotranspiration with three cases of Adjustment factor(c) in Suwon(1985~1986).

Year	1985						1986						Average	
	Mon. 6			7			6			7				8
	E	M	L	E	L	E	E	M	L	E	M	L		
AET	4.2	5.9	4.9	3.9	2.4	3.8	3.0	4.2	5.0	4.0	4.2	5.6	4.26	
PET 1	4.5	5.7	4.9	3.6	5.3	5.0	4.3	4.6	4.7	3.7	3.3	4.5	4.61	
PET 2	4.7	6.0	5.1	3.8	5.5	5.2	4.2	5.0	5.0	3.9	3.3	4.8	4.81	
PET 3	4.9	6.4	5.5	4.3	6.3	6.4	4.6	6.5	5.5	3.9	4.2	5.7	5.36	

Note ; PET 1 : PET in case of C=1.0
 PET 2 : PET in case of URATIO=2.0
 PET 3 : PET in case of calculating daily URATIO

實測蒸發散량과 세가지 경우에 의한 潛在蒸發散量들로 부터 各各의 경우에 대한 1차회귀분석을 한 結果는 Fig. 4, 5, 6에서 보는 바와 같으며, 相關係數는 A경우에 0.928, B-1의 경우에 0.924, B-2의 경우에는 0.915로서, 세가지 경우가 모두 높은 有意性을 보여 주었고, 이 중에서도 補正係數가 1.0인 경우(A)가 제일 높게 나타났다.

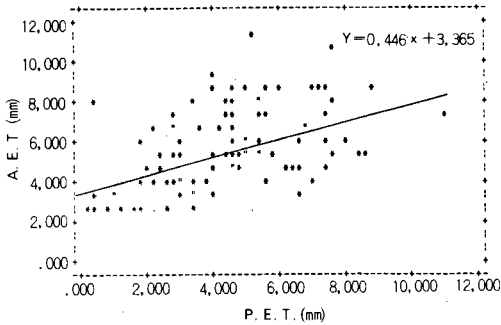


Fig. 6. Relation between Actual Evapotranspiration and Potential Evapotranspiration in case of calculating daily URATIO.

IV. 結 論

Doorenbos와 Pruitt(1977)의 修正 Penman 式에서 다음과 같이 세가지 경우의 補正係數(C)에 대한 潛在蒸發散量을 水原地方의 1985~1986年 氣象資料를 利用하여 求하였다.

- 1) 補正係數를 考慮하지 않은 경우(C=1.0, A),
- 2) 補正係數를 考慮한 경우(B),
 - 가) 晝間風速 對 夜間風速의 比(晝夜風速)가 一定한 경우(URATIO=2.0, B-1),
 - 나) 晝夜風速比를 日別로 算定한 경우 (URATIO=varied, B-2).

또한 이들을 畝에서의 實測蒸發散량과 各各 比較分析하였던 바 다음과 같은 結果를 얻었다.

1. 水原地方('85~'86)의 水稻生育期間中 日平均 潛在蒸發散量은 A의 경우에 4.61mm/day, B-1의 경우에 4.81mm/day, B-2의 경우에는 5.36mm/day였으며, 實測蒸發散量은 4.26mm/day였다. A경우를 基準으로 한 潛在蒸發散량의 增加率은 各各 100%, 104.34%, 116.27%였다.

2. 補正係數를 考慮한 경우, B-1 및 B-2의 補正係數의 範圍는 各各 0.916-1.140, 0.922-

1.392였다.

3. 畝에서의 實測蒸發散량과 潛在蒸發散量에 대해 一次回歸分析을 한 結果, A경우, B-1의 경우 및 B-2의 경우에 대한 相關係數(r)는 各各 0.928, 0.924, 0.915로 나타났다.

參 考 文 獻

1. E. J. Winter, 1974, Water, Soil and Plant, ELBS and Macmillan : 129-131
2. Doorenbos J and W. O. Pruitt. 1977, Crop Water Requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper 24, Revised, Rome, Italy
3. Richard H. C. and M. T. Nicholson, 1982, Application of Penman Equation Wind Function, Journal of Irrigation and Drainage Div., ASCE, Vol. 108, No. IR1 : 13-23
4. 서울大學校 農科大學 附屬 農業開發研究所, 1986, 作物 消費水量 算定方法의 定立, 農林水産部 農業振興公社
5. 서울大學校 農科大學 附屬 農業開發研究所, 1987, 밭作物 消費水量 算定方法 定立 研究, 農林水産部 農業振興公社
6. Penman, H. L., 1948, Natural Evaporation for Open Water, Bare Soil, and Grass, Proceedings Royal Society of London, A193, 120-146.
7. Penman, H. L., 1952, The Physical Bases of Irrigation Control, Proceedings 13th International Horticulture Congress, London, England, 913-924
8. Penman, H. L., 1956, Evaporation : An Introductory Survey, Netherlands Journal of Agricultural Science, Vol. 1, Nos. 9-29
9. Penman, H. L., 1963, Vegetation and Hydrology, Technical Communication No. 53, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, England
10. Jensen, M. E., ed, 1983, Design and Operation of Farm Irrigation Systems, Monograph No. 3, ASAE, St. Joseph, Mich
11. Jensen, M. E., ed, 1974, Consumptive Use of Water and Irrigation Water Requirements, ASCE, New York, N. Y.