

지역특성을 고려한 pan 증발량 산정식 평가

Evaluation of Equations for Estimating Pan Evaporation Considering Regional Characteristics

임창수* · 윤세의** · 송주일***

Rim, Chang-Soo · Yoon, Sei Eui · Song, Ju Il

Abstract

The climate change caused by global warming may affect on the hydro-meteorologic factor such as evaporation (IPCC, 2001). Furthermore, it is also necessary that the effect of climate change according to geographical condition on evaporation should be studied. In this study, considering geographical and topographical conditions, the 6 evaporation equations that have been applied to simulate annual and monthly pan evaporation were compared. 56 climatologic stations were selected and classified, basing on the geographical and topographical characteristics (urbanization, topographical slope, proximity to coast, and area of water body). The evaporation equations currently being used are applied. These evaporation equations are Penman, Kohler-Nordenson-Fox (KNF), DeBruin-Keijman, Priestley-Taylor, Hargreaves, and Rohwer. Furthermore, Penman equation was modified by calibrating the parameters of wind function and was verified using relative error. The study results indicate that the KNF equation compared best with the pan: relative error was 8.72%. Penman equation provided the next-best values for evaporation relative to the pan: relative error was 8.75%. The mass-transfer method (Rohwer) provided the worst comparison showing relative error of 33.47%. In case that there is a close correlation between wind function and wind speed, modified Penman equation provided a better estimate of pan evaporation.

Keywords : *evaporation, pan, climate change, regional characteristics*

요 지

지구가 온난화됨에 따라서 발생하는 기후변화는 증발과 같은 수문순환과정에 직접적인 영향을 주는 것으로 보고된 바 있다(IPCC, 2001). 또한 지역특성에 따른 기후변화가 증발에 미치는 영향을 파악하는 것은 필요하다. 본 연구에서는 지리지형적 특성을 고려하면서, 연별 pan 증발량을 모의하기 위한 6개 증발식들의 적용성을 비교 검토하였다. 이를 위하여, 전국 56개 연구지역을 지리지형적 특성(도시화율, 해안근접성, 지역 평균경사, 수역면적)에 따라서 분류하고, 기존에 제안된 증발식(Penman, Kohler-Nordenson-Fox(KNF), DeBruin-Keijman, Priestley-Taylor, Hargreaves, Rohwer)을 적용하여 pan 증발량과 비교 검토하였다. 또한 Penman 증발식의 풍속함수를 보정하고 보정된 식의 적용성을 검증하였다. 연구결과에서 KNF식은 가장 pan 증발량과 유사한 결과를 보여서 8.72%의 상대오차를 보였고, 그 다음으로 Penman 식은 8.75%의 상대오차를 보였으며, 반면에 질량이동에 근거한 Rohwer 식이 가장 큰 상대오차(33.47%)를 보였다. 그리고 풍속함수와 풍속과의 상관관계가 높게 나타나는 경우 Penman 식의 풍속함수 보정을 통하여 증발량 산정의 정확도를 높일 수 있었다.

핵심용어 : 증발, 증발접시, 기후변화, 지역특성

1. 서 론

지구가 온난화됨에 따라서 발생하는 기후변화는 증발과 같은 수문기후요소에 직접적인 영향을 주는 것으로 보고된 바 있다(IPCC, 2001). 이러한 기후변화가 증발에 미치는 영향을 파악하기 위하여 수표면으로부터의 실측 증발량인 pan 증발량 변화특성을 연구하는 것은 기후변화와 저수지 증발간의 상관관계를 규명하는데 유용하게 활용될 수 있다.

저수지 증발에 영향을 미치는 요인은 최근 문제가 되고 있는 지구온난화 현상뿐만 아니라 지리 및 지형적 요인에 의한 기후변화와 밀접한 연관이 있다. 본 연구에서는 이러한 지리지형적 특성에 따른 pan 증발량 변화를 모의하기 위하여 전국 56개 연구지역을 지리지형적 특성(도시화율, 해안 근접성, 지역 평균경사, 수역면적)을 고려하여 분류하였다. 이러한 지리지형적 특성에 따른 군집별 pan 증발량 산정식을 평가하고 선정함으로서 지리지형적 특성에 따른 기후변

*정회원 · 교신저자 · 청운대학교 철도행정토목학과 부교수 (E-mail : csrim@chungwoon.ac.kr)

**정회원 · 경기대학교 토목환경공학부 교수 (E-mail : syoon@kyonggi.ac.kr)

***정회원 · 경기대학교 토목환경공학부 박사과정 (E-mail : toyoo012@hanmail.net)

화가 저수지 증발에 미치는 영향을 파악하고, 기후변화에 대응하여 적절한 수자원관리 방안을 강구하는데 활용될 수 있다.

pan 증발계는 전 세계적으로 호수, 저수지, 강 그리고 습지 등과 같은 수표면으로부터의 증발량을 산정하기 위한 방법으로 사용되고 있으며 많은 연구자들에 의해서 그 적용성이 입증된 바 있다(Rohwer, 1931; Kohler, 1954; Penman, 1956; Sellers, 1965; Abtew, 2001). Jauregui 등(1978)은 멕시코시티의 외곽지역에서 Penman(1948)식을 적용하여 pan 증발량과 비교한 결과 매우 유사한 결과를 보였고, 특히 습한기간에 더 높은 상관관을 보였다. Irmak과 Haman(2003)은 조합법(combination approach)에 근거한 Penman 식(1948)의 에너지항과 공기동력항을 pan 측정자료를 이용하여 보정한 방법인 KNF 식이 가장 pan 증발량을 잘 묘사하는 것으로 발표하였으며, 그 다음으로 Penman의 공기동력학적 방법에 기초한 경험식, Priestley-Taylor 식이 우수한 것으로 나타났다. KNF 식의 적용성은 미국 와이오밍주에서 실시된 연구에서도 pan 증발량을 잘 묘사하는 것으로 발표되었다(Pochop 등, 1984).

WMO(1976)는 다양한 크기의 증발계로부터 측정된 증발량과 Penman 식(1948)으로부터 산정된 증발량을 비교한 바 있으며, 적용된 증발계는 구소련의 20 m² tank(5 m 지름, 2 m 깊이)와, GGI 3000 tank(61.8 cm 지름, 68.5 cm 깊이), 그리고 Class A pan(121 cm 지름, 25.5 cm 깊이) 등이다. 비교결과 Penman 식의 경우 구소련의 tank와 0.91의 상관계수를, Class A pan과 0.89의 상관계수를 그리고 GGI와 0.85의 상관계수를 보이고 있다. 또한 증발량에도 차이를 보이는 것으로 나타났으며 구소련 tank가 가장 Penman 증발식과 유사한 증발량을 보이고 있어서 증발계의 특성에 따라서 증발량이 다르게 나타나는 결과를 보였다.

국내의 경우 조희구(1973)는 전국 주요 기상관측지점에서 Kohler(1955)에 의해서 제안된 얇은 저수지의 증발량 산정식과 소형 pan 증발량 자료와의 회귀식을 유도하여 월별 및 연 증발량을 산정한 바 있다. 이광호와 김문일(1985)은 대형 증발량과 소형증발량 그리고 Kohler와 Richards(1962)에 의해서 제안된 수표면 증발량자료를 이용하여 증발량의 시공간적 특성분석을 실시한 바 있으며, 대형증발계와 소형증발계 사이에 매우 높은 상관성이 있음을 보였다. 한진수와 이부용(2006)은 해남 농경지에서 대형증발량 관측자료와 기상 관측자료를 이용하여 증발량과 기상요소와의 상관성분석을 통하여 질량이동(mass transfer)방법에 기초한 증발식의 매개변수를 추정한 바 있다.

2. 연구지역

2.1 연구지역 및 자료

연구 지역을 선정하기 위하여 수문기후자료의 가용성을 검증하고, 검증된 결과를 바탕으로 선정된 56개의 기후관측지점을 중심으로 반경 10 km 범위의 314 km²에 대해서 분석을 실시하였다. 연구 지역을 선정하기 위하여 연구지역의 도시화 정도, 해안근접성, 수역면적비, 지역 평균경사를 고려

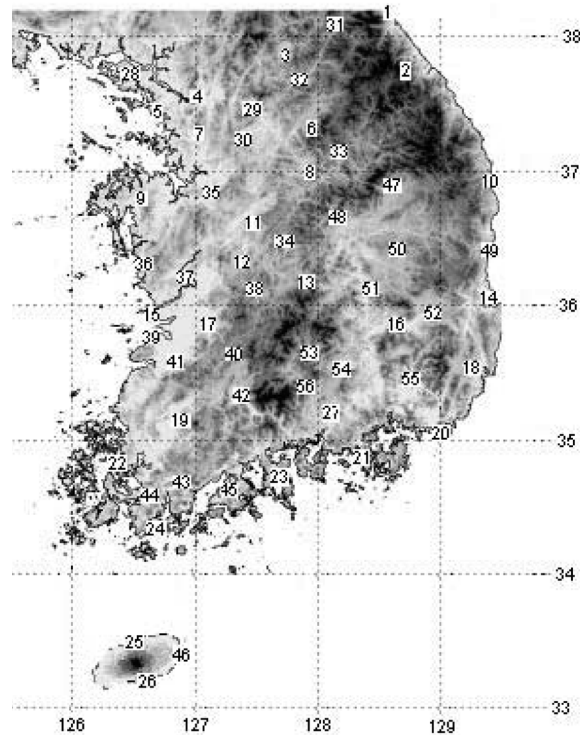


그림 1. 56개 연구지역

하였다. 선정된 56개의 연구지역은 우리나라 한반도 전역에 걸쳐서 해안지역 및 내륙지역에 고르게 위치하고 있으며, 또한 연구지역의 지형특성이 평야, 산악, 호소 등에 고르게 분포하고 있다(그림 1). 연구에 적용된 기후자료는 56개 관측소에서 관측된 월평균 일별 기후자료(기온, 풍속, 상대습도, 일조시간, 소형 및 대형 pan 증발량)이며, 적용된 기후자료 기간은 관측 시작 기간부터 2006년까지의 기간 중 가용한 기후 관측자료를 이용하여 분석을 실시하였다(표 1).

2.2 연구지역 분류 및 군집화

56개 연구지역의 분류를 위하여 기후관측지점을 중심으로 반경 10 km에 대해서 국가수자원관리 종합정보시스템(WAMIS)에서 제공되고 있는 자료를 활용하여 2004년 수치표고자료에 대한 분석을 실시하였고, 1975년도부터 2000년도까지 6개 년도에 대한 토지피복도를 분석하였다. 1975년도 및 1980년도의 경우 Landsat MSS를 이용한 자료이며, 1985년도, 1990년도 및 1995년도의 경우 Landsat TM, 그리고 2000년도의 경우에는 Landsat ETM을 이용하여 분석된 자료이다. 연구 지역의 도시화 정도를 판단하기 위하여 토지이용현황을 분석하였고, 56개 지역에 대해서 GIS분석을 이용하여 토지이용조건과 지역 평균고도자료 등을 분석한 결과를 바탕으로 연구지역을 분류하였다(표 1).

pan 증발량을 모의하기 위한 증발식들의 적용성을 비교 검토하기 위하여, 전국 56개 연구지점에서 지리지형적 특성(도시화율, 해안근접성, 지역 평균경사, 수역면적)을 고려하여 도시화율의 경우 6개 군집으로 분류하였고, 해안근접성의 경우 3개의 군집, 지역 평균경사의 경우 4개의 군집 그리고 수역면적의 경우 3개의 군집으로 분류하였다(표 2).

표 1. 56개 연구지역의 지리 지형학적 특성

연구지역 (No.)	자료 적용기간	위도 (N)	경도 (E)	고도 (m)	지리 및 지형학적 분류												
					연구지역 위치 및 육지면적		2000년 도시화 율(%)	수역면적 비율 (%) (6년 평균)			5% 이하 경사면적 비(%)						
					해안 내륙	육지면적 (km ²)		10~	5~ 10	~5	0~ 20	20~ 40	40~ 60	60~ 80	80~ 100		
속초 (1)	1968-1990	38°15'	128°34'	17.8	○	164.99	6.67			○				○			
대관령 (2)	1972-1997	37°41'	128°46'	842.5	●	314	0.34			○	○						
춘천 (3)	1967-2006	37°54'	127°44'	76.8	●	314	8.43		○			○					
서울 (4)	1933-2006	37°34'	126°58'	86.0	●	314	59.40		○							○	
인천 (5)	1952-2006	37°28'	126°38'	68.9	○	193.09	52.70	○								○	
원주 (6)	1973-1990	37°20'	127°57'	149.8	●	314	6.23			○		○					
수원 (7)	1965-2006	37°16'	126°59'	33.6	●	314	23.70			○				○			
충주 (8)	1973-1996	36°58'	127°57'	114.1	●	314	5.37		○			○					
서산 (9)	1968-2006	36°46'	126°30'	25.9	●	314	7.51			○				○			
울진 (10)	1972-1990	36°59'	129°25'	49.4	○	161.54	3.1			○	○						
청주 (11)	1967-2006	36°38'	127°27'	57.4	●	314	13.30			○				○			
대전 (12)	1969-2006	36°22'	127°22'	68.3	●	314	20.0			○				○			
추풍령 (13)	1954-1990	36°13'	128°00'	242.5	●	314	0.52			○	○						
포항 (14)	1949-2006	36°02'	129°23'	1.9	○	233.80	14.20			○				○			
군산 (15)	1968-1990	36°00'	126°45'	26.9	○	249.83	16.40		○							○	
대구 (16)	1937-1990	35°53'	128°37'	57.6	●	314	25.60			○				○			
전주 (17)	1919-2006	35°49'	127°09'	53.5	●	314	10.50			○				○			
울산 (18)	1946-1990	35°33'	129°19'	34.7	●	314	12.20			○		○					
광주 (19)	1940-1990	35°10'	126°54'	70.5	●	314	22.20			○				○			
부산 (20)	1934-2006	35°06'	129°02'	69.2	○	196.94	41.0		○					○			
통영 (21)	1968-1990	34°51'	128°26'	31.7	○	177.15	3.36			○	○						
목포 (22)	1906-2006	34°49'	126°23'	37.9	○	174.44	17.10	○						○			
여수 (23)	1943-2006	34°44'	127°45'	66.1	○	130.16	16.50			○	○						
완도 (24)	1973-1990	34°24'	126°43'	34.9	○	185.85	5.14		○			○					
제주 (25)	1924-2006	33°31'	126°32'	20.0	○	166.38	21.0			○						○	
서귀포 (26)	1962-2006	33°15'	126°34'	50.5	○	162.79	11.80			○				○			
진주 (27)	1970-2006	35°12'	128°07'	21.3	●	314	5.25			○		○					
강화 (28)	1973-1990	37°42'	126°27'	45.7	○	270.23	5.06			○				○			
양평 (29)	1973-1990	37°29'	127°30'	47.0	●	314	1.29			○		○					
이천 (30)	1973-1990	37°16'	127°29'	77.8	●	314	5			○						○	
인제 (31)	1973-1989	38°03'	128°10'	198.6	●	314	1.69			○	○						
홍천 (32)	1974-1990	37°41'	127°53'	140.6	●	314	3.14			○	○						
제천 (33)	1973-1990	37°09'	128°12'	263.2	●	314	3.91			○	○						
보은 (34)	1973-1990	36°29'	127°44'	174.1	●	314	2.88			○		○					
천안 (35)	1973-1999	36°47'	127°07'	24.9	●	314	6.94			○				○			
보령 (36)	1973-1990	36°19'	126°34'	15.3	○	216.29	7.5			○				○			
부여 (37)	1973-1990	36°16'	126°55'	11.3	●	314	8			○				○			
금산 (38)	1973-1990	36°06'	127°29'	171.3	●	314	4.11			○		○					
부안 (39)	1975-1990	35°44'	126°43'	10.7	○	284.16	7.4		○								○
임실 (40)	1973-1990	35°37'	127°17'	246.9	●	314	5.18			○		○					
정읍 (41)	1973-1990	35°34'	126°52'	44.1	●	314	4.22			○				○			
남원 (42)	1973-1990	35°24'	127°20'	89.7	●	314	8.2			○		○					
장흥 (43)	1973-1990	34°41'	126°55'	45.2	●	314	4.2			○		○					
해남 (44)	1973-1990	34°33'	126°34'	13.7	●	314	2.93		○					○			

표 1. 계속

연구지역 (No.)	자료 적용기간	위도 (N)	경도 (E)	고도 (m)	지리 및 지형학적 분류												
					연구지역 위치 및 육지면적		2000년 도시화 율(%)	수역면적 비율 (%) (6년 평균)			5% 이하 경사면적 비(%)						
					해안 내륙	육지면적 (km ²)		10~	5~ 10	~5	0~ 20	20~ 40	40~ 60	60~ 80	80~ 100		
고흥 (45)	1973-1990	34°37'	127°17'	53.3	○	239.92	5.93			○		○					
성산포 (46)	1977-1990	33°23'	126°53'	18.6	○	169.38	11.8			○							○
영주 (47)	1973-1990	36°52'	128°31'	210.2	●	314	0.82			○	○						
문경 (48)	1973-1990	36°37'	128°09'	170.4	●	314	1.31			○		○					
영덕 (49)	1973-1990	36°32'	129°25'	41.2	○	196.95	0.42			○	○						
의성 (50)	1973-1996	36°21'	128°41'	81.1	●	314	0.79			○	○						
구미 (51)	1973-1990	36°08'	128°19'	47.9	●	314	5.32			○				○			
영천 (52)	1973-1990	35°58'	128°57'	94.1	●	314	1.28			○		○					
거창 (53)	1973-1990	35°40'	127°55'	220.9	●	314	0.36			○	○						
합천 (54)	1973-1990	35°34'	128°10'	32.7	●	314	0.44			○	○						
밀양 (55)	1973-1996	35°29'	128°45'	12.6	●	314	1.81			○		○					
산청 (56)	1973-1990	35°25'	127°53'	138.6	●	314	0.22			○	○						

○ : 해안지역, ● : 내륙지역, 육지면적은 각 연구지역의 총 면적 314 km²에서 육지에 해당하는 면적을 나타냄.

표 2. 도시특성에 따른 연구지역의 군집

군집	도시화율(2000년 기준)	군집	해안근접성	군집	지역 평균 지세	군집	저수지 및 습지면적
I	속초, 대관령, 춘천, 원주, 충주, 서산, 울진, 추풍령, 통영, 완도, 진주, 강화, 양평, 이천, 인제, 홍천, 제천, 보은, 천안, 보령, 부여, 금산, 부안, 임실, 정읍, 남원, 장흥, 해남, 고흥, 영주, 문경, 영덕, 의성, 구미, 영천, 거창, 합천, 밀양, 산청	I	속초, 인천, 울진, 부산, 통영, 목포, 여수, 완도, 제주, 서귀포, 보령, 성산포, 영덕	I	속초, 서울, 수원, 서산, 청주, 대전, 포항, 대구, 전주, 울산, 광주, 부산, 목포, 서귀포, 강화, 천안, 보령, 부여, 정읍, 해남, 구미, 영천	I	속초, 대관령, 원주, 수원, 서산, 울진, 청주, 대전, 추풍령, 포항, 대구, 전주, 울산, 광주, 통영, 여수, 제주, 서귀포, 진주, 강화, 양평, 이천, 인제, 홍천, 제천, 보은, 천안, 보령, 부여, 금산, 임실, 정읍, 남원, 장흥, 고흥, 성산포, 영주, 문경, 영덕, 의성, 구미, 영천, 거창, 합천, 밀양, 산청
II	서울			II	대관령, 춘천, 원주, 충주, 울진, 추풍령, 통영, 여수, 완도, 진주, 양평, 인제, 홍천, 제천, 보은, 금산, 임실, 남원, 장흥, 고흥, 영주, 문경, 영덕, 의성, 거창, 합천, 밀양, 산청	II	춘천, 서울, 충주, 군산, 부산, 완도, 부안, 해남, 춘천, 서울, 충주, 군산, 부산, 완도, 부안, 해남
III	인천			III	인천, 군산, 제주, 이천	III	인천, 목포
IV	수원, 대전, 대구, 광주, 제주	II	대관령, 춘천, 서울, 원주, 수원, 충주, 서산, 청주, 대전, 추풍령, 대구, 전주, 울산, 광주, 진주, 양평, 이천, 인제, 홍천, 제천, 보은, 천안, 부여, 금산, 임실, 정읍, 남원, 장흥, 해남, 영주, 문경, 의성, 구미, 영천, 거창, 합천, 밀양, 산청	IV	부안, 성산포		
V	청주, 포항, 군산, 전주, 울산, 목포, 여수, 서귀포, 성산포						
VI	부산	III	포항, 군산, 강화, 부안, 고흥				

3. 증발량 산정식 비교 분석

본 연구에서는 지리지형적 특성을 고려하면서, 연별 및 월별 pan 증발량을 모의하기 위한 6개의 증발식들의 적용성을 비교 검토하였다. 적용된 증발식은 Penman, Kohler-Nordenson-Fox(KNF), DeBruin-Keijman, Priestley-Taylor, Hargreaves, Rohwer 등이다.

3.1 소형 및 대형증발계 증발량 상관분석

소형 및 대형 증발계 증발량을 비교 검토하기 위하여 전국 15개 관측지점에서 관측된 증발량 자료를 이용하였다. 이는 대형증발계시 증발량의 경우 가용한 관측자료 지점과 기간이 제한되어 있기 때문이다.

분석결과 4월부터 10월까지 관측된 증발자료의 경우 15개 대부분의 지점에서 상관계수가 0.907(여수)-0.966(전주, 진주)

의 범위를 보여 소형증발계 증발량과 대형증발계 증발량 사이에는 상당히 높은 상관관계가 있음을 보여주었다. 각 월별 자료를 분석한 결과, 4월의 경우 0.717(대전)~0.941(청주)의 범위를 보이고, 5월의 경우 0.681(대전)~0.938(서산), 6월의 경우 0.838(포항)~0.955(진주), 7월의 경우 0.888(서울)~0.984(진주), 8월의 경우 0.857(서울)~0.970(목포), 9월의 경우 0.797(대전)~0.970(목포) 그리고 10월의 경우 0.692(수원)~0.931(목포)의 범위를 보이고 있다. 따라서 각 월별 증발량 자료분석에서도 높은 상관관계를 보이고 있어서, 본 연구에서는 대형증발계 증발량 대신에 자료연수나 지점이 충분한 소형증발계 증발량 자료를 이용하여 분석을 실시하였다.

3.2 증발식 검토

3.2.1 Penman 식

Penman 식은 수문기상분야에서 광범위하게 적용된 식으로써, Penman(1948)은 수표면으로부터 증발량 산정을 위하여 물리적 근거에 기초한 증발식을 개발하였다. Penman은 수표면에서 발생하는 순복사에너지와 증발표면 위의 공기움직임에 의한 증발효과를 고려하여 물리적 이론에 근거한 증발식을 제안하였다. Penman 증발식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. Penman 식의 경우 지역 특성에 따라서 풍속함수(wind function)를 보정해야 하는 단점이 있다.

$$E_p = \frac{\Delta(R_n - S) + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \quad (1)$$

$$E_a = f(u_2)(e_s - e_a) = c(a + bu_2)(e_s - e_a) \quad (2)$$

$$f(u_2) = c(a + bu_2) \quad (3)$$

여기서, E_p 는 Penman식을 이용하여 산정된 pan 증발량(mm/day), R_n 은 순방사(mm/day)이고 Allen 등(1998)에 의해서 제안된 방법을 적용하였으며, u_2 는 지상 2 m 높이에서 풍속(m/s), e_s 는 포화증기압(mb), e_a 는 실제증기압(mb), $(e_s - e_a)$ 는 대기의 포화증기압 부족량(mb), a , b 그리고 c 는 Penman(1956)에 의해서 저수지로부터의 증발을 고려한 경험적으로 얻어진 계수로서($a=0.5$, $b=0.54$, $c=0.26$), Δ 은 포화증기압과 온도곡선의 기울기($\text{mb}/^\circ\text{C}$), γ 는 건습계 상수($\text{mb}/^\circ\text{C}$), E_a 는 건조력(drying power)항(mm/day)이다. 여기서 S 는 pan 내부에서의 열저류향으로써 일평균이나 월평균 일 자료를 사용하는 경우 무시할 수 있다(Linacre, 1993; Valiantzas, 2006).

식 (1)과 (2)로부터

$$f(u_2) = \left(E_{pan} - \frac{\Delta R_n}{\Delta + \gamma} \right) \frac{\Delta + \gamma}{\gamma(e_s - e_a)} \quad (4)$$

여기서 E_{pan} 은 pan 증발량(mm/day)이다. 따라서 식 (3)과 (4)의 관계로부터 선형회귀분석을 이용하여 매개변수 a , b 를 추정할 수 있다.

3.2.2 Kohler-Nordenson-Fox(KNF)식

KNF식(Kohler 등, 1955)은 저수지 증발량 산정을 위하여 가장 많이 사용하는 방법으로 알려져 있다(Burman과 Pochop, 1994). Kohler 등(1955)은 저수지 증발량 산정을 위하여 Penman 1948)식에 근거한 증발식 (5)를 식 (1)로부터 제안하였다.

$$E_{KNF} = \frac{\Delta R_n + \gamma_p E_a}{\Delta + \gamma_p} \quad (5)$$

여기서 E_{KNF} 는 KNF식을 적용하여 산정된 pan 증발량(mm/day), R_n 은 순방사(mm/day), Δ 은 포화증기압과 온도곡선의 기울기($\text{kPa}/^\circ\text{C}$), γ_p 는 건습계 상수($0.001568P \text{ kPa}/^\circ\text{C}$), P 는 대기압(kPa), 공기동력항 E_a (mm/day)는 다음 식 (6)으로 산정된다.

$$E_a = 25.4[0.296(e_s - e_a)^{0.88}(0.37 + 0.00255u_p)] \quad (6)$$

여기서 u_p 는 Class A pan으로부터 15.2 cm 상부지점에서 풍속(km/day), e_s 는 대기온도에서의 포화증기압(kPa), e_a 는 이슬점온도에서의 증기압(kPa) 그리고 $(e_s - e_a)$ 는 증기압부족분(kPa)이다. 또한 식 (1)의 유효 순방사($R_n \Delta$)의 경우 Class A pan에서 발생하는 열전도영향을 고려하여 다음 식 (7)이 제안되었다(Kohler et al., 1955; Lamoreux, 1962; Jensen, 1974).

$$R_n \Delta = 154.4 \exp[(1.8T - 180)(0.1024 - 0.01066 \ln(0.239R_s)) - 0.01544] \quad (7)$$

여기서 T 는 평균대기온도($^\circ\text{C}$) 그리고 R_s 는 일사량($\text{J}/\text{cm}^2/\text{day}$)이다.

KNF 식의 경우 Penman의 조합법에서 에너지항과 공기동력항의 매개변수를 관측된 Class A pan 자료를 이용하여 보정한 식이다. 이러한 매개변수의 보정과정은 pan 증발량이 계절적 및 공간적인 특성에 따라서 상이한 양상을 보인다는 점을 감안 할 때, 계절적 및 공간적 특성을 고려한 pan 증발량 산정식을 개발하기 위해서는 적절한 매개변수의 보정은 필요하다고 할 수 있다.

Kohler 등 (1955)은 식 (7)로부터 증발접시계수 0.7을 곱함으로써 저수지증발량을 산정하는 방법을 제안하였다. 하지만 이 경우에는 실제 pan의 수온이 대기온도와 동일하여 pan과 대기사이에 현열유동(sensible heat flux)의 영향이 이루어지지 않는 상태로서 순방사가 단지 증발로만 사용되는 경우라고 한정하였다(Lamoreux, 1962). 따라서 저수지의 규모(저수지 깊이)나 계절적 영향을 고려하지 않고 동일한 증발접시계수를 적용하는 것은 주의를 요한다.

3.2.3 DeBruin-Keijman 식

DeBruin-Keijman 식(DeBruin과 Keijman, 1979)은 수표면상의 수증기상태와 저수지에 저류되어 있는 열에너지 그리고 대기압과 잠재증기화열의 함수인 건습계 상수로부터 얻어진다.

$$E_{DK} = \frac{\Delta}{0.85\Delta + 0.63\gamma} R_n \quad (8)$$

여기서 E_{DK} 는 DeBruin-Keijman식으로 산정된 pan 증발량(mm/day), Δ 은 포화증기압과 온도곡선의 기울기($\text{mb}/^\circ\text{C}$), γ 는 건습계 상수($\text{mb}/^\circ\text{C}$) 그리고 R_n 은 순방사(mm/day).

3.2.4 Priestley-Taylor 식

복사를 이용한 방법 중의 하나는 Priestley와 Taylor (1972)에 의해서 제안된 Penman(1948) 식을 단순화한 형태의 식으로 이 식은 적용 지역의 기후조건이 습하여 증발량

산정 과정에서 Penman에 의해서 제안된 조합법의 공기동력항 영향이 미미하다는 가정 하에 Penman 식의 공기동력항을 특정 계수 값으로 가정하여 단순화 한 식이다. 따라서 보다 적은 관측자료를 필요로 하고, 단순한 지역에서 적용하도록 제안되었고, 식의 형태는 다음 식 (9)와 같다.

$$E_{PT} = \alpha \frac{\Delta R_n}{\Delta + \gamma} \quad (9)$$

여기서 E_{PT} 는 Priestley-Taylor 식을 이용하여 산정된 pan 증발량(mm/day), R_n 는순방사(mm/day), $(\Delta R_n)/(\Delta + \gamma)$ 은 Penman 증발식의 에너지항과 동일하고, α 는 경험적 계수로서 수표면이나 균일하게 포화된 지표면과 같이 이류(advection)영향을 무시할 수 있는 경우 공기동력항이 에너지항과 비례관계를 보이고, 공기동력항이 에너지항의 26% 정도라고 가정하는 경우 $\alpha=1.26$ 으로 발표하였다. Irmak과 Haman(2003)에 의하면 $\alpha=1.26$ 을 적용하는 경우 Priestley-Taylor 식은 Class A pan 증발량보다 과소한 증발량을 산정하는 것으로 발표한 바 있다.

많은 연구자들에 의해서 Priestley-Taylor식의 α 값이 연구된 바 있으며(Flint와 Childs, 1991), 이류항의 영향이 없는 수표면이나 포화된 지표면에서 $\alpha=1.26$ 이 확인된 바 있다(Ferguson과 Den Hartog, 1975; Stewart와 Rouse, 1976, 1977; Mukammal과 Neumann, 1977). 하지만 증발계와 같이 수표면적이 작은 경우 α 값을 결정하기 위하여 이류(advection)의 영향을 충분히 고려하여야 한다(Mukammal과 Neumann, 1977).

3.2.5 Mass Transfer Approach(Rohwer 식)

일반적으로 질량이동(mass transfer)을 근거로 한 증발량 산정방식은 가장 오래된 방식이다. 그리고 아직까지 간편한 적용성으로 인하여 자유수표면으로부터 증발량을 산정하는 방식으로 적용되고 있다. 물질이동 방식은 자유수면으로부터의 증발량 산정을 위하여 다음 식 (10)에 기초하고 있다.

$$E = f'(u)(e_s - e_a) \quad (10)$$

Rohwer(1931)는 식 (10)에서 식 (11)과 같은 풍속항(wind function)을 제안한 바 있다.

$$f'(u) = c(a + bu_2) = 0.44(1 + 0.27u_2) \quad (11)$$

여기서 E 는 자유수면으로부터의 증발량(mm/day)이고, $f'(u)$ 는 적용지점에서 유도된 경험식으로 풍속항(wind function)이고, u_2 는 풍속(m/sec), e_s 와 e_a 는 대기온도에서의 포화증기압과 실제증기압 (mmHg)이다.

3.2.6 Hargreaves 식

Hargreaves와 Samani(1985)는 잔디에서 증발량을 계산하는 다음과 같은 식을 제안한 바 있으며, 본 연구에서는 수표면에서의 증발량 모의 정도를 알아보기 위하여 식의 적용성을 검토하였다. 식 (12)는 FAO(Food and Agriculture Organization)에 의해서 대기온도 자료만이 가용한 경우에 적용하도록 채택된 바 있으며(Allen 등, 1998), 상대습도와 풍속과 같은 지역적 특성에 영향을 받는 기후요소를 고려하지 못하는 단점이 있으나, 계산이 간단하고 최소한의 기후자

료를 필요로 하는 장점이 있다.

$$E_H = \alpha R_a T D^{1/2} (T_a + 17.8) \quad (12)$$

여기서 E_H 는 증발량(mm/day)이고, α 는 적용지역의 수역 면적이거나 해안근접성을 고려한 매개변수로서 0.0023, $T D$ 는 일 최고기온과 최저기온의 차(°C), R_a 는 일별 태양복사량(mm/day), T_a 는 2 m 높이에서의 일 평균기온(°C)이다.

3.2.7 증발식 평가

증발량 산정식들을 비교하기 위하여 pan 증발량과 증발식으로부터 산정된 증발량과의 상대오차를 식 (13)으로 산정하고, % 오차를 식 (14)로부터 산정하여 비교하였다.

$$Error = \frac{E_x - E_{pan}}{E_{pan}} \quad (13)$$

$$\%Error = Error \times 100 \quad (14)$$

여기서, $ERROR$ 와 $\%ERROR$ 는 상대오차(relative error)와 Percentage 오차를 나타내고, E_x 는 증발식으로부터 산정된 증발량, E_{pan} 은 pan 증발량이다.

3.3 증발식 적용성 검토

56개 연구지역에 대해서 지역특성별로 증발식들의 적용성을 비교 검토하기 위하여 지역특성에 따라서 분류된 각 군집별로 연 및 월별 % 오차를 산정하여 비교 분석하였다.

3.3.1 연별 분석결과

표 3은 연별 증발량 산정식들의 적용성을 비교분석한 결과를 보여주고 있으며, 표 4는 각 군집에 따른 연별 증발량 산정식들의 적용성을 비교 분석한 결과를 보여주고 있다. 도시화율을 고려하는 경우 KNF식은 비도시화지역(군집 I)과 수원, 대전, 대구, 광주, 제주지역(군집 IV)에서 양호한 결과를 보이고, Penman 식은 청주, 포항, 군산, 전주, 울산, 목포, 여수, 서귀포, 성산포지역(군집 V)에서 양호한 결과를 보이고 있으며, DeBruin-Keijman 식의 경우 서울지역(군집 II), 인천지역(군집 III) 그리고 부산지역(군집 VI)에서 양호한 결과를 보이고 있다. 따라서 도시화율에 따라서 증발식들의 적용성이 다른 것으로 나타났다.

해안근접성을 고려한 경우 KNF 식이 군집 II와 III에서 가장 양호한 결과를 보였고, Penman 식이 군집 I에서 가장 양호한 결과를 보였다. 따라서 해안근접성을 고려하는 경우 KNF식은 내륙지역이나 해안에 근접한 내륙지역에서 양호한 결과를 보이고, Penman 식은 해안지역에서 양호한 결과를 보이는 것으로 나타났다. 지역 평균경사를 고려하는 경우 KNF 식이 군집 II와 III에서 가장 양호한 결과를 보였으며, Penman 식이 군집 I과 IV에서 가장 양호한 결과를 보였다. 따라서 지역 평균경사를 고려하는 경우 KNF 식은 지역 평균경사가 급한 지역에서, Penman 식은 지역 평균경사가 완만한 지역에서 적절한 것으로 판단된다. 수역면적을 고려하는 경우 KNF 식이 군집 I에서, Penman 식이 군집 II에서, 그리고 DeBruin-Keijman 식이 군집 III에서 가장 양호한 결과를 보였다. 따라서 수역면적을 고려하는 경우 KNF 식이 수역면적이 작은 지역에 적합한 것으로 나타났고, Penman 식과 DeBruin-Keijman 식이 수역면적이 상대적

표 3. 56개 연구지점별 연 증발량 산정식 비교

Station No.	E_{pan}	E_P	% Error	E_{KNF}	% Error	E_{dK}	% Error	E_{PT}	% Error	E_H	% Error	E_R	% Error
1	3.533	2.987	14.07	3.063	12.12	2.984	14.36	2.322	33.14	2.223	35.91	2.471	29.10
2	2.911	2.601	10.46	2.529	13.03	3.181	11.32	2.279	21.40	2.24	22.75	1.533	47.42
3	2.872	2.662	7.62	2.643	8.32	3.114	9.16	2.435	14.88	2.883	5.52	1.949	31.97
4	3.092	2.947	6.29	3.039	5.53	3.107	5.32	2.458	20.18	2.682	13.13	2.502	18.96
5	3.184	3.041	7.75	3.131	6.87	3.19	5.63	2.511	20.64	2.429	23.33	2.4	24.03
6	3.069	2.821	8.98	2.853	9.09	3.455	14.60	2.701	12.42	2.91	6.11	1.847	39.75
7	3.022	2.739	9.61	2.722	10.80	3.177	7.70	2.49	17.29	2.761	9.17	2.009	33.27
8	2.79	2.746	5.72	2.722	6.38	3.374	23.57	2.656	7.51	2.97	10.07	1.806	35.42
9	2.919	2.76	7.56	2.733	8.66	3.234	11.52	2.528	13.68	2.749	7.90	1.854	36.28
10	3.413	3.222	5.92	3.396	3.01	3.298	9.10	2.587	23.56	2.536	25.02	2.517	26.69
11	2.958	2.864	4.60	2.908	4.57	3.207	10.09	2.543	13.70	2.911	5.25	2.263	23.85
12	2.92	2.88	8.07	2.906	9.08	3.229	11.41	2.577	11.61	2.904	6.71	2.237	24.77
13	3.593	3.043	15.06	3.138	12.52	3.248	9.55	2.554	28.61	2.808	21.50	2.368	34.12
14	3.874	3.291	14.12	3.491	12.09	3.144	17.31	2.533	32.84	2.705	28.17	3.011	20.87
15	3.165	3.067	4.12	3.137	4.59	3.285	6.35	2.6	17.61	2.532	19.66	2.308	26.89
16	3.8	3.381	10.82	3.669	6.69	3.322	12.25	2.678	28.82	3.011	19.85	3.108	17.74
17	3.12	2.808	11.07	2.766	12.81	3.329	8.60	2.663	14.06	2.948	9.54	1.961	36.94
18	3.561	3.074	13.72	3.158	12.04	3.277	8.38	2.634	25.67	2.879	18.63	2.372	32.91
19	3.425	2.966	13.02	2.982	12.82	3.397	7.15	2.729	19.76	2.922	14.31	2.119	37.54
20	3.455	3.594	8.97	3.875	13.92	3.302	7.71	2.691	21.37	2.564	25.11	3.315	9.80
21	3.021	3.048	5.97	3.056	7.34	3.262	8.90	2.639	12.35	2.59	14.10	2.366	21.45
22	3.274	3.401	9.27	3.604	14.26	3.403	8.70	2.751	15.46	2.693	16.88	2.777	18.14
23	3.831	3.529	8.09	3.749	6.03	3.34	12.47	2.703	29.06	2.42	36.45	3.134	18.78
24	3.547	2.988	15.14	2.912	17.36	3.419	10.56	2.742	21.72	2.478	28.95	1.97	44.46
25	3.729	3.48	8.39	3.619	6.57	3.409	9.36	2.799	24.28	2.566	30.54	2.954	21.57
26	3.462	3.363	6.35	3.469	6.91	3.309	6.66	2.75	20.09	2.584	24.89	2.997	14.62
27	3.037	2.885	6.04	2.908	6.34	3.255	8.44	2.601	14.02	3.073	5.36	2.164	28.66
28	2.726	2.763	4.75	2.742	4.48	3.381	24.59	2.623	5.49	2.711	5.41	1.712	36.82
29	2.707	2.764	8.32	2.786	7.85	3.345	24.93	2.611	8.19	2.994	14.64	1.869	30.22
30	2.983	2.806	9.09	2.806	9.21	3.507	18.80	2.756	9.45	2.883	9.71	1.726	41.30
31	3.073	2.8	9.10	2.858	8.02	3.273	8.80	2.521	17.56	2.852	8.13	1.966	35.67
32	2.851	2.627	7.65	2.584	9.03	3.331	17.56	2.595	8.93	3.068	10.07	1.601	43.70
33	2.752	2.674	4.95	2.639	4.89	3.223	17.85	2.495	9.48	2.904	8.90	1.845	32.92
34	3.059	2.741	10.13	2.714	11.13	3.433	13.16	2.659	12.74	2.978	4.98	1.662	45.69
35	2.85	2.85	5.07	2.866	5.48	3.458	23.79	2.721	8.39	2.937	7.00	1.844	35.66
36	3.07	2.87	7.25	2.85	8.14	3.532	15.43	2.773	10.00	2.767	10.23	1.676	45.36
37	2.924	2.948	3.30	2.97	3.58	3.772	29.31	2.994	4.27	3	5.21	1.553	46.93
38	2.88	2.77	5.99	2.722	7.34	3.458	20.64	2.722	6.22	3.006	6.98	1.661	42.10
39	3.336	2.912	12.39	2.882	13.34	3.667	10.30	2.906	12.65	2.86	14.41	1.597	51.86
40	2.684	2.756	3.82	2.686	3.66	3.55	32.51	2.769	4.44	3.007	12.29	1.525	43.13
41	2.667	2.857	8.33	2.814	7.31	3.539	34.06	2.832	8.76	3.051	15.43	1.76	33.74
42	2.898	2.739	5.25	2.668	7.90	3.366	16.62	2.679	7.25	3.164	10.37	1.738	39.96
43	3.099	2.788	9.84	2.718	12.12	3.312	8.38	2.638	14.56	3.053	6.03	1.83	40.82
44	2.92	2.974	7.73	2.942	7.76	3.578	23.69	2.865	8.26	2.898	7.16	1.829	37.14
45	3.304	3.018	8.42	3.022	8.52	3.68	12.05	2.968	9.85	3.077	7.07	1.815	45.13
46	3.185	3.114	6.34	3.068	6.77	3.507	11.44	2.862	10.18	2.716	14.28	2.043	35.74

E_{pan} : pan 증발(mm/day), E_P : Penman 증발(mm/day), E_{KNF} : KNF 증발(mm/day), E_{dK} : DeBruin-Keijman 증발(mm/day), E_{PT} : Priestley-Taylor 증발(mm/day), E_H : Hargreaves 증발(mm/day), E_R : Rohwer 증발(mm/day)

표 3. 계속

Station No.	E_{pan}	E_p	% Error	E_{KNF}	% Error	E_{dK}	% Error	E_{PT}	% Error	E_H	% Error	E_R	% Error
47	3.373	2.986	12.07	3.088	9.88	3.517	8.36	2.758	17.50	2.993	11.73	1.985	40.77
48	3.384	3.063	9.56	3.19	6.14	3.441	8.38	2.751	18.08	2.976	11.63	2.359	30.30
49	3.568	3.187	10.46	3.36	6.43	3.486	4.60	2.773	22.01	2.848	19.81	2.391	32.91
50	3.281	2.758	15.34	2.784	14.71	3.345	7.60	2.609	19.80	3.191	8.46	1.903	41.92
51	3.34	2.96	11.07	3.028	9.11	3.346	4.96	2.648	20.44	3.024	9.13	2.169	34.86
52	2.966	2.967	6.00	3.045	6.31	3.311	13.28	2.631	10.76	3.081	8.39	2.312	21.62
53	3.319	2.849	13.76	2.848	13.92	3.477	7.36	2.73	17.28	3.057	8.96	1.826	44.90
54	3.403	2.914	13.91	2.935	13.45	3.505	7.05	2.8	17.18	3.073	9.98	1.931	43.13
55	3.172	2.949	7.09	3.016	6.69	3.391	8.42	2.709	14.22	3.166	6.54	2.158	31.90
56	3.098	2.942	6.44	2.96	5.55	3.406	11.61	2.738	11.68	3.131	9.27	2.099	32.20

표 4. 지역 특성에 따른 연별 증발량 산정식 비교

군집		E_p % Error	E_{KNF} % Error	E_{DK} % Error	E_{PT} % Error	E_H % Error	E_R % Error
도시화율	I	8.71	(8.62)	14.49	13.81	11.57	37.38
	II	6.29	5.53	(5.32)	20.18	13.13	18.96
	III	7.75	6.87	(5.63)	20.64	23.33	24.03
	IV	9.98	(9.19)	9.57	20.35	16.12	26.98
	V	(8.63)	8.90	10.00	19.85	19.30	25.41
	VI	8.97	13.92	(7.71)	21.37	25.11	9.80
해안근접성	I	(8.77)	8.90	9.61	20.30	23.50	26.36
	II	8.75	(8.68)	13.85	14.18	10.18	35.53
	III	8.76	(8.60)	14.12	15.69	14.94	36.31
지역 평균 지세	I	(8.68)	8.84	13.92	16.55	13.79	29.40
	II	8.97	(8.81)	12.63	15.09	12.56	36.64
	III	7.34	(6.81)	10.03	17.99	20.81	28.45
	IV	(9.37)	10.05	10.87	11.41	14.34	43.80
수역면적	I	8.81	(8.48)	13.28	15.67	13.10	34.25
	II	(8.50)	9.65	12.08	15.52	15.50	32.06
	III	8.51	10.56	(7.17)	18.05	20.10	21.08
전체		8.75	(8.72)	12.89	15.74	13.70	33.47

E_p : Penman 증발(mm/day), E_{KNF} : KNF 증발(mm/day), E_{dK} : DeBruin-Keijman 증발(mm/day), E_{PT} : Priestley-Taylor 증발(mm/day), E_H : Hargreaves 증발(mm/day), E_R : Rohwer 증발(mm/day), ()는 최소 % error를 나타냄.

로 큰 지역에 적합한 것으로 나타났다. 연구결과 전체 56개 연구지역을 대상으로 연별 pan 증발량을 모의한 결과에서 KNF식(8.72% error), Penman 식(8.75% error) 그리고 DeBruin-Keijman 식(12.89% error)의 순으로 양호한 결과를 보였다.

3.3.2 월별 분석결과

표 5-8은 각 군집에 따른 월별 증발량 산정식들의 적용성을 비교 분석한 결과를 보여주고 있다. 도시화율을 고려하는 경우 1월과 10월에 Penman 식이 군집 VI에서 가장 양호한 결과를 보인 것을 제외하고, 다른 모든 군집에서 KNF식이 가장 양호한 결과를 보였다. 4월에는 군집 II에서 KNF식이 그리고 군집 VI에서 Rohwer식이 가장 양호한 결과를 보인 것을 제외하고 Penman 식이 가장 양호한 결과를 보이고 있

다. 7월의 경우 모든 군집에서 KNF식이 가장 양호한 결과를 보이고 있다.

해안근접성을 고려한 경우 1월과 7월에 KNF식이 가장 양호한 결과를 보이고, 4월의 경우 I, IV군집에서 Penman 식이, 10월에 II군집에서 Hargreaves 식이 가장 양호한 결과를 보였다. 지역 평균경사를 고려하는 경우 1월에 IV군집에서 DeBruin-Keijman식이 가장 양호한 결과를 보이고 있고, 4월에는 Penman 식이 I, II, IV 군집에서 양호한 결과를 보이고, 7월에는 모든 군집에서 KNF 식이 가장 양호한 결과를 보이고, 10월에는 I, II 군집에서 KNF식이 II, IV 군집에서 DeBruin-Keijman식이 가장 양호한 결과를 보이고 있다. 수역면적을 고려하는 경우 1월에 I, II 군집에서 KNF 식, 그리고 II 군집에서 Penman 식이 가장 양호한 결과를 보이고 있다. 4월의 경우 모든 군집에서 Penman 식이 가장

표 5. 지역 특성에 따른 월별 증발량 산정식 비교 (1월)

군집		E_p % Error	E_{KNF} % Error	E_{DK} % Error	E_{PT} % Error	E_H % Error	E_{MK} % Error	E_R % Error
도시화율	I	28.31	(22.03)	25.30	56.50	39.02	44.47	39.70
	II	22.21	(15.69)	16.94	62.54	49.92	50.57	29.66
	III	19.59	(12.66)	26.24	66.26	56.00	53.43	25.20
	IV	23.63	(21.29)	23.09	56.12	41.31	48.07	31.12
	V	20.97	(17.54)	28.50	58.36	44.59	49.78	24.82
	VI	(15.53)	16.84	46.04	69.74	56.26	55.97	16.38
해안근접성	I	21.29	(16.62)	33.67	63.41	50.98	53.87	21.70
	II	27.73	(22.22)	23.68	54.97	37.14	43.30	39.97
	III	27.55	(21.63)	22.03	58.89	43.58	47.38	36.94
지역 평균 지세	I	24.23	(19.89)	25.85	56.77	40.38	45.38	32.64
	II	28.76	(21.94)	26.62	57.93	47.71	46.20	38.94
	III	19.06	(17.52)	24.30	56.75	45.35	48.41	28.31
	IV	26.82	23.33	(18.23)	54.80	41.22	48.59	38.42
수역면적	I	26.90	(20.88)	26.86	57.40	40.51	46.12	36.29
	II	24.17	(20.66)	21.28	56.19	41.87	45.28	35.68
	III	(18.68)	21.34	21.00	58.88	46.78	49.42	21.77
전체		26.22	(20.87)	25.86	57.29	40.93	46.12	35.69

E_p : Penman 증발(mm/day), E_{KNF} : KNF 증발(mm/day), E_{DK} : DeBruin-Keijman 증발(mm/day), E_{PT} : Priestley-Taylor 증발(mm/day), E_H : Hargreaves 증발(mm/day), E_R : Rohwer 증발(mm/day), ()는 최소 % error를 나타냄.

표 6. 지역 특성에 따른 월별 증발량 산정식 비교 (4월)

군집		E_p % Error	E_{KNF} % Error	E_{DK} % Error	E_{PT} % Error	E_H % Error	E_{MK} % Error	E_R % Error
도시화율	I	(11.49)	11.62	17.16	19.56	14.72	32.28	40.09
	II	6.88	(6.01)	8.92	23.88	19.72	36.88	23.71
	III	(9.36)	9.56	11.63	22.54	28.42	35.76	30.74
	IV	(10.07)	10.17	10.88	21.73	16.63	35.56	31.64
	V	(9.21)	9.92	15.21	18.39	18.73	33.08	31.65
	VI	13.68	15.91	15.77	15.06	21.30	29.69	(12.56)
해안근접성	I	(10.34)	10.96	15.46	18.98	23.50	33.08	33.16
	II	11.16	(11.13)	15.97	20.07	13.28	32.80	37.82
	III	(10.56)	11.92	17.79	17.85	17.07	32.03	41.10
지역 평균 지세	I	(10.35)	10.68	17.03	19.39	16.18	32.37	33.77
	II	(11.40)	11.47	15.12	20.32	15.12	33.44	38.79
	III	7.34	(6.81)	10.03	17.99	20.81	32.43	28.45
	IV	(12.35)	13.90	20.93	13.87	14.96	28.02	50.78
수역면적	I	(11.09)	11.09	15.93	20.06	15.66	33.10	37.54
	II	(10.33)	11.75	16.79	17.39	16.42	31.09	36.11
	III	(9.35)	10.49	15.11	18.55	22.01	32.81	29.12
전체		(10.92)	11.16	16.02	19.62	15.99	32.80	37.03

E_p : Penman 증발(mm/day), E_{KNF} : KNF 증발(mm/day), E_{DK} : DeBruin-Keijman 증발(mm/day), E_{PT} : Priestley-Taylor 증발(mm/day), E_H : Hargreaves 증발(mm/day), E_R : Rohwer 증발(mm/day), ()는 최소 % error를 나타냄.

양호한 결과를 보이고, 7월과 10월의 경우 KNF식이 모든 군집에서 가장 양호한 결과를 보이고 있다.

각 계절별로 전체 연구지역을 대상으로 분석한 결과 1, 7, 10월의 경우 KNF 식이 가장 양호한 결과를 보였고, 특히 7월의 경우 KNF 식이 대부분의 지역에서 가장 양호한 결과를 보였다. 4월의 경우 Penman 식이 가장 양호한 결과를

보이고 있다. 월별 pan 증발량을 모의한 결과에서 1월의 경우 KNF식(20.87% error), DeBruin-Keijman 식(25.86% error)의 순으로 양호한 결과를 보였다. 4월의 경우 Penman 식(10.92% error) 그리고 KNF 식(11.16% error)의 순으로 양호한 결과를 보였다. 7월의 경우 KNF 식(11.13% error) 그리고 Penman 식(14.93% error)의 순으로 양호한 결과를

표 7. 지역 특성에 따른 월별 증발량 산정식 비교 (7월)

군집		E_p % Error	E_{KNF} % Error	E_{dK} % Error	E_{PT} % Error	E_H % Error	E_{MK} % Error	E_R % Error
도시화율	I	16.14	(11.61)	32.36	23.19	22.14	15.90	37.40
	II	14.30	(9.84)	22.03	15.95	21.21	22.72	20.43
	III	13.23	(10.76)	21.50	14.77	14.62	22.91	32.25
	IV	10.61	(9.35)	14.45	11.75	16.77	29.11	28.66
	V	12.27	(10.15)	19.26	14.30	15.69	25.58	34.90
	VI	16.07	(11.77)	25.79	17.00	14.37	19.71	28.56
해안근접성	I	13.45	(10.36)	24.34	16.89	15.84	21.47	39.20
	II	15.50	(11.48)	29.46	21.41	22.47	18.01	33.82
	III	14.48	(10.47)	28.23	21.30	15.81	19.50	40.47
지역 평균 지세	I	16.21	(12.75)	27.45	20.65	19.48	20.77	32.30
	II	14.48	(10.20)	29.64	20.69	21.89	16.99	37.35
	III	13.68	(11.05)	22.15	17.16	18.48	23.98	34.86
	IV	9.84	(6.47)	27.21	18.69	11.65	16.30	50.70
수역면적	I	15.09	(11.04)	28.85	20.90	20.99	18.46	35.69
	II	14.55	(11.64)	26.06	18.77	18.05	20.70	36.62
	III	13.00	(11.09)	20.61	14.13	14.29	23.17	31.36
전체		14.93	(11.13)	28.16	20.35	20.33	18.95	35.67

E_p : Penman 증발(mm/day), E_{KNF} : KNF 증발(mm/day), E_{dK} : DeBruin-Keijman 증발(mm/day), E_{PT} : Priestley-Taylor 증발(mm/day), E_H : Hargreaves 증발(mm/day), E_R : Rohwer 증발(mm/day), ()는 최소 % error를 나타냄.

표 8. 지역 특성에 따른 월별 증발량 산정식 비교 (10월)

군집		E_p % Error	E_{KNF} % Error	E_{dK} % Error	E_{PT} % Error	E_H % Error	E_{MK} % Error	E_R % Error
도시화율	I	15.99	(12.91)	13.25	25.98	13.87	29.39	33.10
	II	12.81	(6.85)	16.35	34.78	19.99	35.13	12.44
	III	25.61	(14.23)	33.70	33.04	173.30	31.21	32.09
	IV	15.42	(11.93)	15.50	30.53	18.94	34.54	22.73
	V	14.16	(12.01)	19.20	33.71	25.70	38.11	20.11
	VI	(8.55)	17.19	21.95	35.42	30.36	38.35	24.45
해안근접성	I	15.31	(12.21)	21.96	34.93	40.53	38.22	20.29
	II	15.70	12.79	12.64	25.52	(12.39)	29.09	32.95
	III	15.88	(13.00)	14.67	29.74	18.55	32.87	27.73
지역 평균 지세	I	13.56	(11.44)	15.21	27.93	16.76	31.32	25.32
	II	16.89	13.70	(13.35)	27.47	15.06	31.30	33.09
	III	16.48	(11.00)	26.58	32.98	64.48	33.42	26.11
	IV	18.87	15.09	(12.36)	28.48	20.97	33.70	33.22
수역면적	I	15.55	(12.39)	13.86	27.21	15.04	30.87	30.54
	II	15.40	(13.21)	18.61	31.82	24.93	34.70	25.11
	III	18.28	(17.04)	26.30	33.14	99.62	34.61	24.30
전체		15.63	(12.67)	14.99	28.08	19.47	31.55	29.54

E_p : Penman 증발(mm/day), E_{KNF} : KNF 증발(mm/day), E_{dK} : DeBruin-Keijman 증발(mm/day), E_{PT} : Priestley-Taylor 증발(mm/day), E_H : Hargreaves 증발(mm/day), E_R : Rohwer 증발(mm/day), ()는 최소 % error를 나타냄.

보였다. 10월의 경우 KNF 식(12.67% error) 그리고 DeBruin-Keijman 식(14.99% error)의 순으로 양호한 결과를 보였다. KNF 식의 경우 Penman의 조합법에서 에너지항과 공기동력 항의 매개변수를 관측된 Class A pan 자료를 이용하여 보정한 식이다. 이러한 매개변수의 보정과정은 pan 증발량이 계절적 및 공간적인 특성에 따라서 상이한 양상을 보인다는

점을 감안 할 때, 계절적 및 공간적 특성을 고려한 pan 증발량 산정식을 위하여 Penman식의 적절한 매개변수의 보정은 필요하다고 할 수 있다.

3.3.3 적용성 평가

56개 연구지역을 지리 및 지형적 특성별로 군집화하여 증

발량 산정식들을 pan 증발량과 비교한 결과에 의하면 대부분의 군집에서 에너지와 공기동력학적 현상을 조합하여 유도된 Penman 식과 Penman 식으로부터 pan 증발량 산정식을 유도한 KNF 식이 가장 양호한 결과를 보였다. 지리 및 지형적 특성에 따른 증발식들의 적용성에 대해서 물리적 의미를 부여하는 것은 증발현상이 단지 하나의 기후 요소에 의해서 지배되지 않으므로 매우 어려운 문제이다. 하지만 지리 및 지형적 특성이 일사량, 습도, 기온 그리고 풍속과 같은 기후요소변화에 밀접한 연관이 있다는 것은 많은 학자들에 의해서 발표된 바 있다(Qiu 등, 2002; Droogers와 Allen, 2002; Lage 등, 2003; Chen 등, 2005; Trajkovic, 2005). 과거 도시화에 따른 수문기후학적 변화에 대한 연구결과에 의하면 도시화가 진행됨에 따라서 도시기온은 상승하는 반면에 풍속과 상대습도 그리고 안개일수와 일조시간은 감소하는 것으로 많은 연구자들에 의해서 보고된 바 있다(Bornstein과 Johnson, 1977; Yague 등, 1991; Chow, 1992). 일반적으로 도시화로 인하여 도시지역에 내린 강수의 빠른 유출과 식생의 감소로 인한 실제증발산량의 감소로 인하여 상대습도는 감소한다고 보고된 바 있다(Henry와 Dicks, 1985).

본 연구에서 적용 검토된 KNF 식과 Penman 식의 경우 증발에 미치는 물리적 특성인 에너지와 공기동력학적 영향을 동시에 반영하고 있으며, 이들 증발에 미치는 물리적 요소는 지역의 지리 및 지형적 특성과 밀접한 연관이 있는 기후요소들에 의해서 직접적인 영향을 받는다. 즉 일사량이나 기온의 경우 증발에 영향을 미치는 에너지와 연관이 있고 풍속이나 습도의 경우 공기동력학적 요인과 연관이 있다. 반면에 다른 증발식들(DeBruin-Keijman 식, Priestley-Taylor 식, Hargreaves 식, Rohwer 식)은 증발량 산정을 위하여 에너지 혹은 공기동력학적 요인이 제한적으로 반영되고 있어서, 증발에 영향을 미치는 에너지나 공기동력학적 요인과 밀접한 연관성이 있는 도시화나, 해안근접성, 지역 평균경사도 그리고 수역면적 등과 같은 지리 및 지형적 특성에 따른 기후 물리학적 변화의 차이를 증발량 산정에 반영하고자 하는 경우에는 한계가 있다. 한편으로는 이러한 제한적인 요인은 기후자료 수집의 어려움을 해소하는데 유용하게 활용될 수 있다.

본 연구에서 적용된 Priestley-Taylor 식의 경우 적용 지역의 기후조건이 습하여 증발량 산정 과정에서 Penman에 의해서 제안된 조합법의 공기동력학적 영향이 미미하다는 가정하에 Penman 식의 공기동력학을 특정 계수 값으로 가정하여 단순화 한 식으로서 Penman 식에서 공기동력학이 에너지항의 26% 정도($\alpha=1.26$)라고 가정하고 있다. 따라서 이류 영향이 증발에 크게 영향을 미치는 경우에 그 영향을 충분히 반영할 수 없으며, Priestley-Taylor 식을 이용한 pan 증발량을 모의하기 위해서는 이류 영향이 충분히 반영되어야 한다. 또한 지리 및 지형적 특성에 따른 기후요소 변화를 증발량 산정에 반영하기 위해서는 적절한 공기동력학적 요소가 고려되어야 하며, 이를 위해서는 에너지항에 대한 공기동력학의 비인 α 값의 추정이 선행되어야 한다. 연구결과 본 연구에서 적용된 $\alpha=1.26$ 은 pan 증발량을 모의하기에는 적절하지 않으며, 보다 큰 값을 적용하는 것이 타당한

것으로 판단된다. Debruin-Keijman 식의 경우 에너지수지 방정식과 Priestley-Taylor 식을 조합하여 유도된 식으로 경험적으로 α 값을 수표면 증발자료를 이용하여 보정하였다. 따라서 Priestley-Taylor 식보다는 수표면에서의 증발량산정을 위해서 향상된 식이라 할 수 있으나, 이 식 역시 풍속이나 상대습도와 같은 기후요소의 공기동력학적 영향을 증발량 산정에 반영하는 것이 제한되어 있어서, 지리 및 지형적 특성이 충분히 반영된 증발량을 산정하기에는 한계가 있다. Hargreaves 식의 경우 FAO에 의해서 대기온도 자료만이 적용된 경우에 적용하도록 채택된 바 있으며(Allen *et al.*, 1998), 지리 및 지형적 특성에 따른 풍속과 상대습도의 변화를 반영하기 위해서는 적용지역의 수역 면적이나 해안근접성 등을 고려한 매개변수의 추정이 선행되어야 하는 단점이 있다. Rohwer 식의 경우 질량이동을 근거로 유도된 식으로 일사량 등의 자료가 부족한 경우 유용하게 적용할 수 있으나, 지리 및 지형적 특성에 따른 에너지수지의 변화를 반영하지 못하는 단점이 있다.

반면에 Penman 식과 KNF 식의 경우 대부분의 군집에서 연별 및 월별 pan 증발량 모의결과가 가장 양호한 것으로 나타났다. 도시화로 분류하는 경우 군집 II, III, VI에서 Debruin-Keijman 식이 낮은 % error를 보이는 것은 군집 II에 해당하는 서울과 군집 III에 해당하는 인천 그리고 군집 VI에 해당하는 부산지역이 모두 도시화율이 매우 높은 지역이라는 것과 매우 밀접한 연관이 있는 것으로 판단된다. 앞서 언급된 바와 같이 도시화율이 높은 지역이 도시화율이 낮은 지역과 비교하여 일사량이 상대적으로 작고, Debruin-Keijman 식을 이용한 증발량 산정을 하는 경우 증발량에 직접적인 영향을 주는 기후요소가 일사량이라는 점을 감안할 때, 도시화율이 상대적으로 높은 이들 지역에서는 Debruin-Keijman 식이 다른 식들과 비교하여 pan 증발량을 보다 잘 모의하고 있으며, 이들 지역에서 일사량이 pan 증발량 모의를 위하여 보다 중요한 기후요소로서 작용하고 있음을 판단할 수 있다.

4. Penman 증발식 보정

4.1 기후요소와 pan 및 Penman 증발량 상관분석

본 연구에서는 지역특성에 따른 pan 및 Penman 증발량과 연별 및 월별 일 평균 기후요소(기온, 상대습도, 일사량, 풍속, 강수량)와의 상관성 분석을 실시하였다. 그리고 각 연구지역의 지리 지형적 특성을 고려한 군집별로 기후요소와 pan 및 Penman 증발량의 상관성 분석을 실시하였다.

56개 연구지역에 대해서 지리 지형적 특성에 따라서 연별 자료를 분석한 결과 지리 및 지형적 특성과 상관없이 대부분의 지역에서 pan 증발량과 Penman 증발량은 일사량과 가장 높은 상관성을 보이고 있다. pan 및 Penman 증발량과 상대습도는 음(-)의 상관을 보이고 있으며, Penman 증발량이 보다 큰 음(-)의 상관을 보이고 있다. pan 증발량과 Penman 증발량 모두 기온과 가장 낮은 상관을 보이는 것으로 나타났다. 기후요소 중 강수량을 제외하고 모든 다른 기후요소에서 pan 증발량보다는 Penman 증발량과 더 큰 상관관계를 보이고 있다.

월별자료 분석결과, 1월의 경우 전반적으로 pan 증발량은 강수량(-상관) 그리고 Penman 증발량은 풍속(+상관)과 가장 높은 상관성을 보이고 있고, 4월의 경우 pan 증발량은 지역특성에 상관없이 일사량(+상관)과 가장 높은 상관성을 보이고, Penman 증발량은 상대습도(-상관)와 높은 상관성을 보이고 있다. 7월의 경우 지리 및 지형적 특성과 상관없이 대부분의 지역에서 pan 증발량과 Penman 증발량 모두 일사량(+상관)과 가장 높은 상관성을 보이는 것으로 나타났다. 10월의 경우 pan 증발량은 일사량(+상관)과 그리고 Penman 증발량은 상대습도(-상관)와 가장 높은 상관성을 보이고 있다. 따라서 Penman 식을 이용하여 월별 pan 증발량을 산정하는 경우에는 여름에 해당하는 7월을 제외하고 다른 계절에서는 기후요소의 계절적 변화가 고려되어야 한다.

4.2 Penman 식 풍속함수 보정

본 연구에서는 Penman 증발식으로부터 증발계 증발량을

산정하기 위하여 Penman 식의 풍속함수 매개변수를 보정하였다. 다음 그림 2는 Penman 식의 풍속함수 매개변수를 보정하기 위하여 연별 일평균자료를 이용하여 분석 실시한 풍속함수와 풍속과의 연별 상관관계를 보여준다. 분석결과 Penman식의 풍속함수와 풍속은 지역 특성에 따라서 상이한 상관관계를 보이는 것으로 나타났다. Penman에 의해서 제안된 풍속함수의 경우 본 연구에서 제안된 풍속함수와 비교하여 풍속의 변화에 덜 민감한 것으로 나타났다. 또한 풍속함수와 풍속과의 상관관계가 높게 나타나는 경우 Penman 식의 매개변수 보정을 통하여 증발량 산정의 정확도를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 Penman 풍속함수 보정식 적용성 검토

본 연구에서는 풍속함수와 풍속과의 상관관계가 비교적 높은 값을 보이는 지역에 대하여 Penman 풍속함수 보정 증발식의 적용성을 검토하였다. 이를 위하여 Penman 보정식, 기

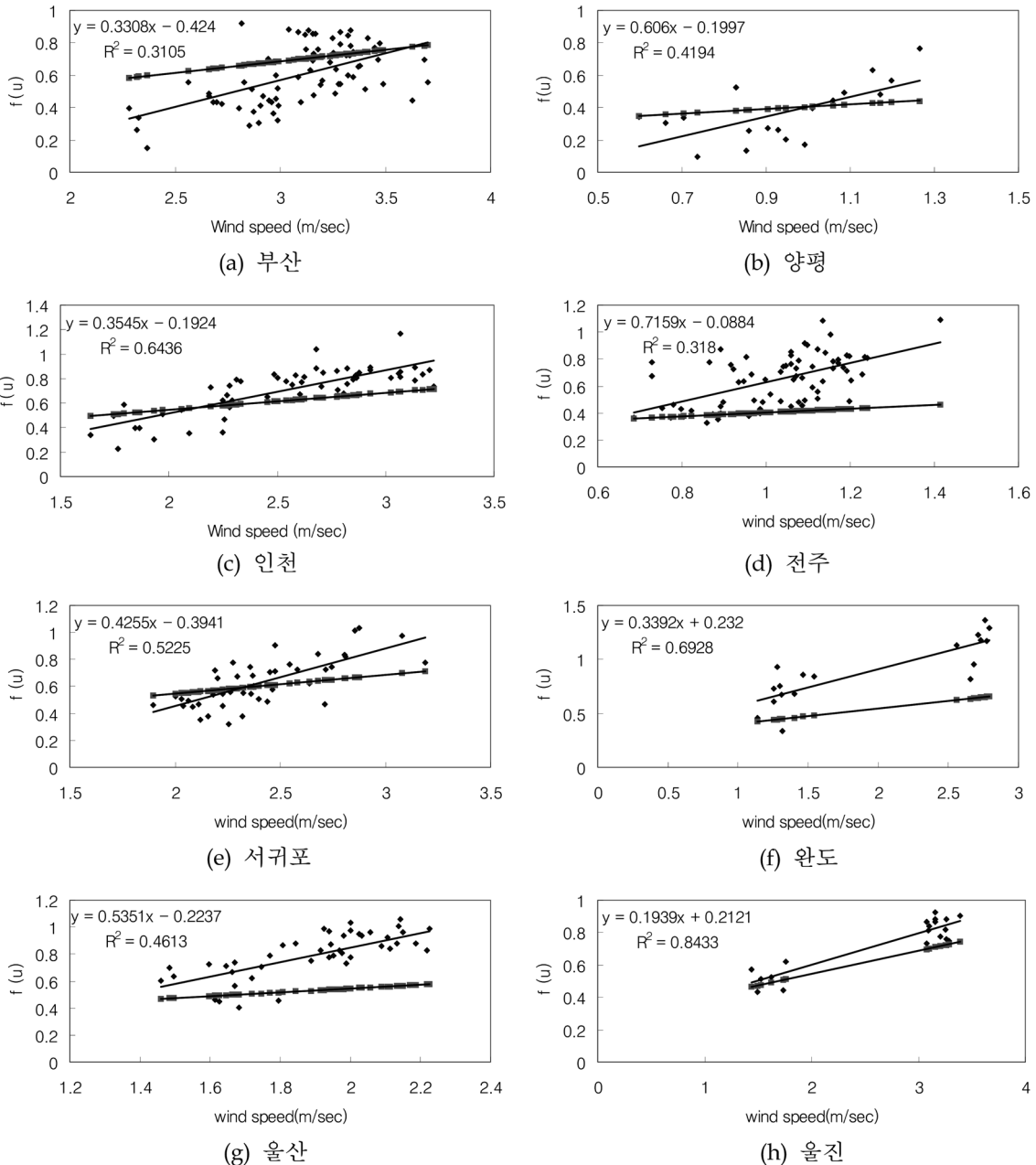


그림 2. 연별 풍속함수와 풍속과의 상관관계

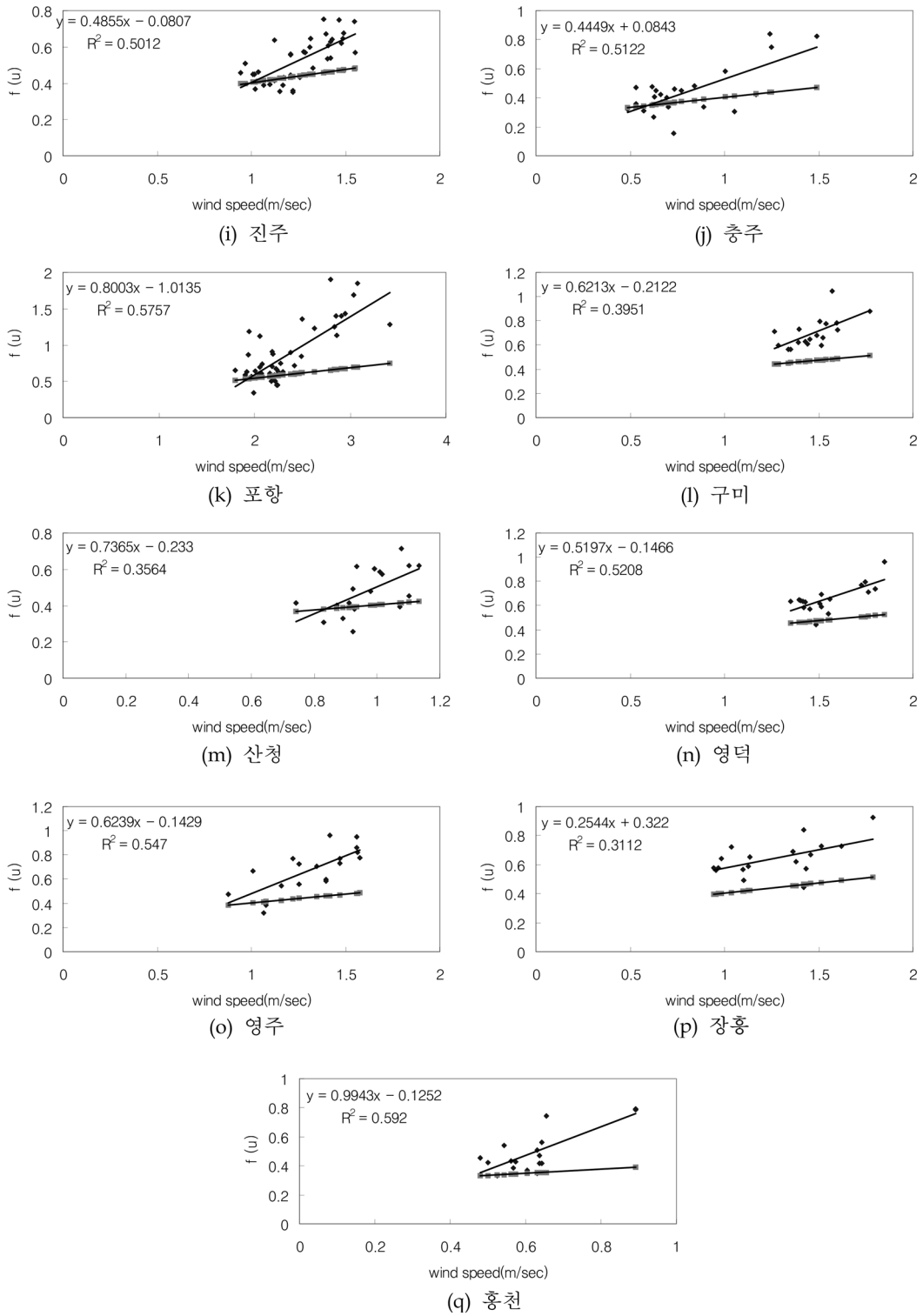


그림 2. 계속

존의 Penman 식 그리고 KNF 식으로부터 산정된 증발량을 pan 증발량과 비교하여 증발량 모의 정도를 알아보았다. 검토 결과 대부분 지역의 연별 및 월별 증발량 산정에서 기존 Penman식 보다 pan 증발량 모의 정도가 향상되는 것으로 나타났고, 또한 KNF 식보다도 나은 결과를 보여주었다(표 9~10, 그림 3).

5. 결 론

전국에 위치한 56개 기후 관측지점에 대하여 소형증발계

증발량과 대형증발계 증발량의 상관분석을 실시한 결과 4월부터 10월까지 관측된 증발자료의 경우 15개 대부분의 지점에서 상관계수가 0.907(여수)~0.966(전주, 진주)의 범위를 보였다. 따라서 소형증발계 증발량과 대형증발계 증발량 사이에는 상당히 높은 상관관계가 있음을 알 수 있었다.

지리지형적 특성(도시화율, 해안근접성, 지역 평균경사, 수역면적)을 고려하여 pan 증발량을 모의하기 위한 증발식들의 적용성을 비교한 결과 증발식들은 지리 및 지형적 특성에 따라서 각기 다른 적용성을 보이는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 각 증발식들이 유도된 지역의 지리 및 지형적 특성

표 9. 연구지역에서 수정 Penman 식 비교

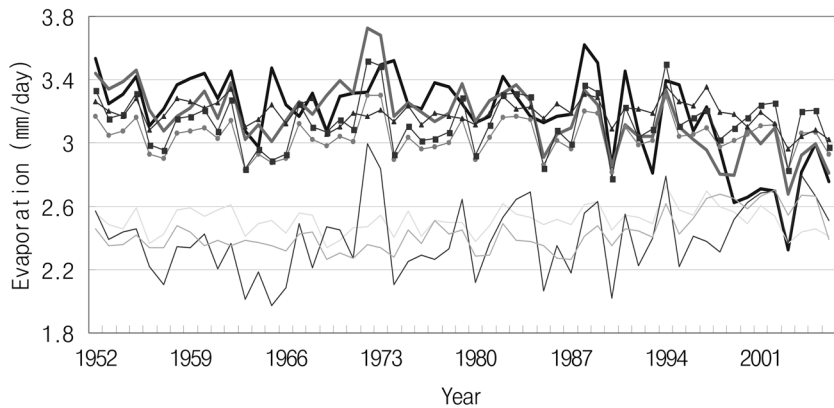
연구지역	E _{pan}	E _P	% Error	E _{KNF}	% Error	수정 Penman 식			
						E	% Error	f(u) = a + bu ₂	r
인천(5)	3.184	3.041	7.75	3.131	6.86	3.169	5.02	Y= -0.1924+0.3545X	0.802
충주(8)	2.790	2.746	5.71	2.722	6.38	2.870	5.51	Y= 0.0843+0.4449X	0.715
울진(10)	3.413	3.222	5.92	3.396	3.00	3.389	2.76	Y= 0.2121+0.1939X	0.918
울산(18)	3.561	3.074	13.71	3.158	12.04	3.556	4.88	Y= -0.2237+0.5351X	0.679
부산(20)	3.455	3.594	8.97	3.875	13.92	3.377	6.64	Y= -0.424+0.3308X	0.557
완도(24)	3.547	2.988	15.14	2.912	17.36	3.513	5.13	Y= 0.232+0.3392X	0.832
서귀포(26)	3.462	3.363	6.35	3.469	6.91	3.412	4.91	Y= -0.3941+0.4255X	0.722
진주(27)	3.037	2.885	6.04	2.908	6.34	3.056	4.08	Y= -0.0807+0.4855X	0.707
양평(29)	2.707	2.764	8.32	2.786	7.85	2.715	7.41	Y= -0.1997+0.606X	0.647
홍천(32)	2.851	2.627	7.65	2.584	9.03	2.880	4.23	Y= -0.1252+0.9943X	0.769
장흥(43)	3.099	2.788	9.84	2.718	12.12	3.098	3.77	Y= 0.322+0.2544X	0.558
영주(47)	3.373	2.986	12.07	3.088	9.88	3.369	5.32	Y= -0.1429+0.6239X	0.739
영덕(49)	3.568	3.187	10.46	3.36	6.43	3.552	3.13	Y= -0.1466+0.5197X	0.721
구미(51)	3.34	2.960	11.07	3.028	9.11	3.357	3.87	Y= -0.2122+0.6213X	0.628
산청(56)	3.098	2.942	6.44	2.96	5.55	3.090	4.77	Y= -0.233+0.7365X	0.596

E_P: Penman 증발(mm/day), E_{KNF}: KNF 증발(mm/day), E_{MP}: 수정 Penman 증발(mm/day), f(u): 풍속함수, r: 상관계수

표 10. 월별 수정 Penman 식 비교 (인천, Station 5)

Month	E _{pan}	E _P	% Error	E _{KNF}	% Error	수정 Penman 식			
						E	% Error	f(u) = a + bu ₂	r
Jan.	1.503	1.204	19.593	1.420	12.667	1.512	12.372	Y= 0.2141+0.2469X	0.566
Feb.	1.848	1.700	13.822	1.778	12.862	1.859	11.604	Y= -0.0409+0.2822X	0.576
Mar.	2.653	2.584	8.813	2.553	9.539	2.667	7.797	Y= -0.1738+0.2989X	0.652
Apr.	3.941	3.746	9.364	3.726	9.560	3.932	8.689	Y= 0.0181+0.256X	0.495
May	4.692	4.558	8.791	4.574	8.454	4.682	7.015	Y= -0.3224+0.3953X	0.678
Jun.	4.635	4.584	10.420	4.447	10.208	4.631	9.631	Y= -0.345+0.4453X	0.460
July	3.966	4.219	13.229	3.956	10.761	3.945	10.617	Y= -0.2179+0.2637X	0.313
Aug.	4.383	4.419	8.509	4.423	7.857	4.302	8.497	Y= -0.0192+0.2438X	0.393
Sep.	3.875	3.708	8.057	3.867	7.099	3.874	7.018	Y= 0.1775+0.228X	0.595
Oct.	3.090	2.738	13.014	3.082	9.825	3.106	9.601	Y= 0.3009+0.2069X	0.574
Nov.	2.062	1.797	16.113	2.184	12.609	2.075	11.507	Y= 0.3+0.1863X	0.610
Dec.	1.559	1.240	21.226	1.567	13.128	1.570	12.910	Y= 0.2672+0.2267X	0.570
Year	3.184	3.041	7.75	3.131	6.86	3.169	5.02	Y= -0.1924+0.3545X	0.802

E_P: Penman 증발(mm/day), E_{KNF}: KNF 증발(mm/day), E_{MP}: 수정 Penman 증발(mm/day), f(u): 풍속함수, r : 상관계수



— pan — Penman — 수정 Penman — P-T — KNF — D-K — Rohwer — Hargreaves

그림 3. 연별 증발량 비교 (인천지역)

과 증발식을 처음 유도하는 과정에서 증발현상에 영향을 미치는 에너지 및 공기동력학적 현상을 간략화하고 단순화한 데서 기인하다. 또한 증발식 모의를 위한 증발량자료 획득과정에서 실험장비 및 주변환경 조건들이 다르기 때문인 것으로 판단된다.

전체 56개 연구지역을 대상으로 연별 pan 증발량을 모의한 결과에서 KNF식(8.72% error)과 Penman 식(8.75% error) 그리고 DeBruin-Keijman 식(12.89% error)의 순으로 양호한 결과를 보였으며, 월별 pan 증발량 모의결과 4월에 Penman 증발량이 가장 양호한 pan 증발량 모의결과를 보인 것을 제외하고, 7, 10월에서 KNF 식이 가장 양호한 pan 증발량 모의결과를 보였다.

본 연구에서는 Penman 증발식으로부터 연별 및 월별 증발량을 산정하기 위하여 Penman 식의 풍속함수 매개변수를 보정하였다. 분석결과 Penman에 의해서 제안된 풍속함수의 경우 본 연구에서 제안된 풍속함수와 비교하여 풍속의 변화에 덜 민감한 것으로 나타났다. 또한 풍속함수와 풍속과의 상관관계가 높게 나타나는 경우 Penman 식의 매개변수 보정을 통하여 증발량 산정의 정확도를 높일 수 있고, 대부분 지역의 연별 증발량 산정에서 기존 Penman 식이나 KNF 식보다 pan 증발량 모의 정도가 향상되는 것으로 나타났다. 하지만 효율적인 저수지관리를 위해서는 궁극적으로 저수지 증발량을 산정하는 것이 필요하며, pan 증발량 자료를 이용하여 저수지 증발량을 추정하는 경우 pan 증발량은 저수지 실제 증발량보다 과다 산정되는 경향이 있다. 따라서 추후 연구에서는 pan 증발량 산정식을 적용하여 실제 저수지 증발량을 산정하기 위해서 pan 증발량과 실측된 저수지 증발 자료를 이용하여 연별 및 월별 pan 계수의 추정이 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

- 이광호, 김문일(1985) 증발량의 시공간적 변화. **한국수문학회지**, 한국수문학회, 제18권, 제3호, pp. 243-251.
- 조희구(1973) 기후요소에 의한 증발량 연구. **한국수문학회지**, 한국수문학회, 제6권, 제1호, pp. 5-12.
- 한진수, 이부용(2005) 해남 농경지에서 자유수면 증발 관측과 해석. **한국농림기상학회지**, 한국농림기상학회, 제7권, 제1호, pp. 91-97.
- Abtew, W. (2001) Evaporation estimation for lake okeechobee in south florida. *J. Irr. Drainage Eng. Amer. Soc. Civil Eng.* Vol. 127, No. 3, pp. 140-147.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. (1998) *Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO.
- Bornstein, R. and Johnson, D.S. (1977) Urban-rural wind velocity differences. *Atmospheric Environment*, Vol. 11, pp. 597-604.
- Burman, R.D. and Pochop, L.O. (1994) Evaporation, evapotranspiration and climate data. *Developments in atmospheric science*, Vol. 22, Elsevier Science, Amsterdam.
- Chen, D., Gao, G., Xu, C.-Y., Guo, J., and Ren, G. (2005) Comparison of the thornthwaite method and pan data with the standard Penman-Monteith estimates of reference evapotranspiration in China. *Climate Research*, Vol. 28, pp. 123-132.
- Chow, S.D. (1992) The urban climate of shanghai. *Atmospheric Environment*, Vol. 26B, No. 1, pp. 9-15.
- DeBruin, H.A.R. and Keijman, J.Q. (1979) The priestley-taylor evaporation model applied to a large, shallow lake in the Netherlands. *J. of Applied Meteorology*, Vol. 18, pp. 898-903.
- Droogers, P. and Allen, R.G. (2002) Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation and Drainage Systems*, Vol. 16, pp. 33-45.
- Ferguson, H.L. and Den Hartog, G. (1975) *Meteorological studies of evaporation at Perch lake, Ontario. Hydrological Studies on a Small Basin on the Canadian Shield-Evaporation Studies*, P.J. Barry, Ed. AECL Chalk River Nuclear Laboratories, pp. 417-448.
- Flint, A.L. and Childs, S.W. (1991) Use of the priestley-taylor evaporation equation for soil water limited conditions in a small forest clearcut. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 56, pp. 247-260.
- Hargreaves, G.H. and Samani, Z.A. (1985) Reference crop evapotranspiration from temperature. *Appl. Engr. Agric.* Vol. 1, pp. 96-99.
- Henry, J.A. and Dicks, S.E. (1985) Urban and rural humidity distribution: Relationships to surface materials and land use. *J. of Climatology*, Vol. 5, pp. 53-62.
- IPCC (2001) *Climate Change: Working Group 1, The Scientific Basis*.
- Irmak, S. and Haman, D.Z. (2003) Evaluation of five methods for estimating class A pan evaporation in a humid climate. *Hort. Technology*, Vol. 13, No. 3, pp. 500-508.
- Jauregui, E., Klaus, D., and Lauer, W. (1978) On the estimation of potential evaporation in Central Mexico. *Colloquium Geographicum*, Band 13, pp. 163-190. Dummlers Verlag, Bonn.
- Jensen, M.E. (ed). (1974) *Consumptive use of water and irrigation water requirements*. Tech. Rpt. Com. Irr. Water Requirement, Irr. Drainage Div., Amer. Soc. Civil Eng., Davis, Calif.
- Kohler, M.A. (1954) *Lake and pan evaporation. Water loss investigation Vol. 1, Lake Hefner studies*. U.S. Geol. Surv. Paper 269.
- Kohler, M.A., Nordenson, T.J., and Fox, W.E. (1955) *Evaporation from pans and lakes*. U.S. Dept. Commerce Research. Paper. No. 38.
- Kohler, M.A. and Richards, M.M. (1962) Multicapacity basin accounting for predicting runoff from storm precipitation. *J. Geophys. Res.* Vol. 67, pp. 5187-5197.
- Lage, M., Bamouh, A., Karrou, M., and Mourid, M.E. (2003) Estimation of rice evapotranspiration using a microlysimeter technique and comparison with FAO Penman-Monteith and Pan evaporation methods under Moroccan conditions. *Agronomie*, Vol. 23, pp. 625-631.
- Lamoureux, W.W. (1962) Modern evaporation formula adapted to computer use. *Monthly Weather Rev.*, Vol. 90, pp. 26-28.
- Linacre, E.T. (1993) Data sparse estimation of potential evapotranspiration using a simplified Penman equation. *Agric. Forest Meteorol.* Vol. 64, pp. 225-237.
- Mukammal, E.I. and Neumann, H.H. (1977) Application of the Priestley-Taylor evaporation model to assess the influence of soil moisture on the evaporation from a large weighing lysimeter and class A pan. *Boundary-Lay. Met.*, Vol. 14, pp. 243-256.
- Penman, H.L. (1948) Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. *Proc. Roy. Soc. London*, Vol. A193, pp. 120-146.
- Penman, H.L. (1956) Evaporation: an introductory survey. *Netherlands J. of Agricultural Science*, Vol. 4, pp. 9-29.
- Pochop, L., Borrelli, J., and Hasfurther, V. (1984) *Design characteristics for evaporation ponds in Wyoming*. Wyoming Water Research Center Final Report, Wyoming.
- Priestley, C.H.B. and Taylor, R.J. (1972) On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, Vol. 100, pp. 81-92.

- Qiu, G.Y., Miyamoto, K., Sase, S., Gao, Y., Shi, P., and Yano, T. (2002) Comparison of the three temperature model and conventional models for estimating transpiration. *Japanese Agricultural Research Quarterly*, Vol. 36, No. 2, pp. 73-82.
- Rohwer, C. (1931) *Evaporation from free water surfaces*. USDA Tech. Bul. No. 271.
- Sellers, W.D. (1965) *Physical Climatology*. University of Chicago Press, Chicago, IL.
- Stewart, R.B. and Rouse, W.R. (1976) A simple method for determining the evaporation from shallow lakes and ponds. *Water Resour. Res.*, Vol. 12, pp. 623-628.
- Stewart, R.B. and Rouse, W.R. (1977) Substantiation of the Priestley-Taylor parameters $\alpha=1.26$ for potential evaporation in high latitudes. *J. Appl. Meteor.*, Vol. 16, pp. 649-650.
- Trajkovic, S. (2005) Temperature-based approaches for estimating reference evapotranspiration. *J. of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 131, No. 4, pp. 316-323.
- Valiantzas, J.D. (2006) Simplified versions for the penman evaporation equation using routine weather data. *J. of Hydrology*, Vol. 331, pp. 690-702.
- WMO. (1976) *The CIMO International Evaporimeter Comparisons*. Final Report No. 449, 38pp.
- Yague, C., Zurita, E., and Martinez, A. (1991) Statistical analysis of the Madrid urban heat island. *Atmospheric Environment*, Vol. 25B, No. 3, pp. 327-332.
- (접수일: 2008.9.25/심사일: 2008.11.17/심사완료일: 2008.12.17)