

도시화에 따른 수문기후변화 I (연 물수지 변화 분석)

A Study on Variation in Annual Water Balance

임 창 수* / 채 효 석**

Rim, Chang-Soo / Chae, Hyo-Seok

Abstract

The effects of climatic changes owing to urbanization on annual water balance have been studied. In this study, 56 meteorological stations including Seoul metropolis in South Korea have been selected, and the area of study site is 314 km². The meteorological station is centrally located in the study area with a 10 km radius. Land use status of study area was examined to estimate the urbanization extent, so that annual actual evapotranspiration could be estimated. Annual runoff was estimated by annual water balance approach using the estimated annual actual evapotranspiration and measured annual precipitation. Annual actual evapotranspiration was estimated by applying experimental equation suggested by Zhang et al,(2001) which was evaluated from 250 watersheds all over the world. Study results show that reference evapotranspiration is tending upwards due to urbanization; therefore, it seems that climatic change due to urbanization may increase the amount of annual actual evapotranspiration. However, the increase of residential area due to urbanization in study area may decrease the amount of annual actual evapotranspiration. The study results indicate that urbanization effect on annual trend of precipitation was not significant. In urban area, annual runoff is directly affected by annual precipitation, and compared with annual precipitation, annual variation of actual evapotranspiration was not significant even though it was estimated by using annual precipitation. It seems that the effect of urbanization on annual actual evapotranspiration does not influence on annual runoff significantly, and that urbanization effect on annual runoff is not significant.

keywords : urbanization, annual water balance, annual actual evapotranspiration

요 지

도시화에 따른 기후변화가 연 물수지에 미치는 영향을 분석하기 위하여 전국 56개 기후관측지점을 중심으로 반경 10 km에 해당하는 314 km²의 면적을 연구지역으로 설정하였다. 연구지역 내에서 연 실제증발산량을 산정하였고, 도시화에 따른 연 유출량변화를 모의하기 위하여 연 물수지분석을 실시하였다. 연 실제증발산량 산정을 위하여 수문기후자료와 토지이용자료를 이용하여 추정된 식생지수를 이용하여 연구지역별 연 실제증발산량을 산정하였다. 여기서 연 실제증발산량은 Zhang et al.(2001)에 의해서 전 세계 250개 유역에서 장기간의 물수지분석으로부터 유도된 경험 공식을 적용하였다. 연구결과 도시화가 진행됨에 따라서 기준잠재증발산량의 증가추세를 보이고 있다. 따라서 도시화에 따른 기후변화가 연 실제증발산량을 증가시키는 요인과 도시화가 진행됨에 따라 주거지면적이 증가하여 지역

* 청운대학교 철도행정토목학과 부교수

Associate Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Chungwoon University, Chungnam 350-701, Korea (e-mail: csrim@chungwoon.ac.kr)

** 한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원

Principal Researcher, Korea Institute of Water and Environment, Daejeon, 305-730, Korea (e-mail: chaehs@kowaco.or.kr)

내의 연 실제증발산량을 감소시키는 요인이 복합적으로 작용하는 것으로 판단된다. 강수량자료의 분석 결과 연구기간 동안에 도시화에 따른 연 강수량의 뚜렷한 추세를 보이지 않고 있다. 도시화지역에서 연 유출량은 연 강수량의 변화에 직접적인 영향을 받고 있고, 실제증발산량의 변화 정도는 연 강수량의 영향을 받음에도 불구하고 연 강수량에 비하여 그 편차가 크지 않다. 도시화에 따른 연 실제증발산량의 변화는 연 유출량에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보이며, 도시화에 따른 연 유출량 변화는 크지 않은 것으로 판단된다.

핵심용어 : 도시화, 물수지, 실제증발산

1. 서론

도시지역은 농촌 및 산림지역과 비교하여 수문 기후학적 측면에서 상이한 특성을 가지고 있으며 이러한 상이한 특성은 지역 내 에너지수지 및 물수지에 상당한 영향을 미친다. 따라서 그러한 특성을 이해하고 농촌 및 산림지역이 도시화되면서 발생하는 기후학적 변화가 유역물수지에 미치는 변화를 분석 파악하는 것은 필요하다. 도시화에 따른 기후변화가 유역 물수지에 미치는 영향을 파악함으로써 도시화 과정에서 발생할 수 있는 기후변화와 그에 따른 유출변화를 분석하고자 한다.

도시화가 진행됨에 따라서 도시화에 따른 도시지역에서의 수문기후학적 변화에 대한 많은 연구가 수행된 바 있다. 특히 도시화가 도시지역 강수, 기온, 풍속, 습도, 증발산 등에 미치는 영향연구가 수행된 바 있다. 도시화가 강우형태에 미치는 영향 연구에서 연구자들은 도시화에 따른 열섬효과와 공기동력학적 조도가 강우를 증가시키며 (Goldreich, 1995), 강우기간 동안에 도시지역 내에서 발생하는 강우형태는 도시화의 진행과정과 밀접한 관계가 있는 것으로 보고하였다 (Ernesto and Ernesto, 1996; 김광섭과 임태경, 2005b). 특히 여름 강우기간 중에 도시지역에서의 강우량 증가가 비도시지역에 비해서 크다고 보고한 바 있다 (Stulov, 1993; 오태석 등, 2005). 40년간 서울지역 기후자료 분석에서 강우일수는 감소하였으나 강우량은 증가하여 일 강우강도가 증가하는 경향을 보이고, 도시화가 대류성 강우 발생에 중요한 영향을 미치는 것으로 나타났다 (김연희 등, 2005).

도시화가 기후변화에 미치는 영향뿐만 아니라 유역 증발산량 및 유출량에 미치는 영향도 연구된 바 있다. 실제증발산량 자료가 없는 경우 연 물수지분석을 통한 잠재증발산량으로부터 실제증발산량을 산정하는 방법은 일반적으로 유역규모에서 토양수분과 지하수함양량의 변화를 무시하는 조건으로 연구가 수행되어 왔으며 (Zhang et al. 2001; Lu et al., 2005), Allen et al.(1998)은 연 잠재증발산량 산정을 위한 표준식으로 Penman-

Monteith (P-M)방법을 제안한 바 있으며 유역규모에서의 적용 연구가 이루어지고 있다 (Chen et al., 2005; Alkaeed et al., 2006; Gong et al., 2006; Xu et al., 2006). 최근에는 도시유역에서의 증발산분석을 위하여 GIS분석이 적용된 바 있다 (Furaus et al., 2004). 도시화에 따른 강수량과 유출량의 장기추세 분석에서 김광섭과 임태경(2005b)은 한반도 강수량과 유출량의 장기추세분석을 실시한 결과 유출량의 변동이 강수량의 증가에 비례해서 증가하지 않는 것으로 보고하였다.

과거 수행된 연구 결과들은 일부 제한된 지역의 관측자료를 이용하여 도시화에 따른 국지적인 기후변화와 그에 따른 실제증발산량의 변화나 강우량의 변화 등과 같은 수문학적 변화에 대하여 연구를 수행하였으나, 본 연구에서는 연 실제증발산량 산정을 위하여 GIS분석을 실시하였으며 연 물수지 분석으로부터 지역별 유출량을 산정하였다.

2. 연구 지역 및 자료

2.1 연구지역 및 분류

연구 지역을 선정하기 위하여 수문기후자료의 가용성을 검증하고, 검증된 결과를 바탕으로 기후관측지점을 중심으로 반경 10 km 범위에서 56곳의 연구 지역을 선정하였다. 연구 지역을 선정하기 위하여 다음과 같은 사항을 고려하였다. 첫째, 수문기후자료 관측지점의 도시화 정도로써 크게 도시화지역, 준도시화지역, 비도시화지역으로 구분할 수 있다. 둘째, 관측지점이 해안지역에 위치해 있는지 혹은 내륙지역(호소, 평야, 산악)에 위치해 있는지 등을 고려하였다. 선정된 56개의 연구지역은 우리나라 한반도 전역에 걸쳐서 해안지역 및 내륙지역에 고르게 위치하고 있으며, 또한 연구지역의 지형 특성이 평야, 산악, 호소 등에 고르게 분포하여 도시화에 따른 수문기후변화를 분석하는데 적절하리라 판단된다 (Fig. 1).

연구지역의 선정 및 분류를 위하여 국가수자원관리 종합정보시스템 (<http://www.wamis.go.kr>)에서 제공되

고 있는 자료를 활용하여 2004년 수치표고자료와 임상 자료에 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.

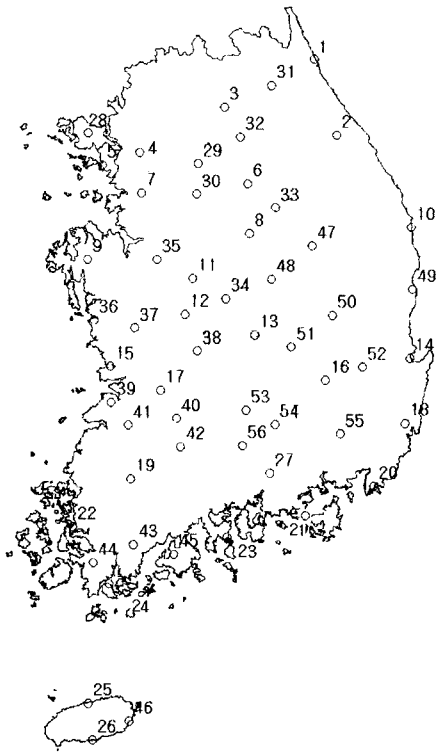


Fig. 1 Study Locations

연구 지역의 도시화정도를 판단하기 위하여 토지이용현황을 분석하였다. 56개 지역에 대해서 GIS분석을 이용하여 토지이용조건과 지역 평균고도자료 등을 분석한 결과를 바탕으로 연구지역을 분류하였다 (Table 1). 연구지역을 도시화에 따라서 분류하기 위하여 도시화율과 도시화 진행정도를 기준으로 판단하였다. 도시화율을 산정하기 위하여 반경 10 km 이내에 위치한 주거지역의 면적을 육지면적으로 나눈 값을 도시화율로 결정하였으며, 도시화정도를 판단하기 위하여 1975년도 도시화율과 2000년도의 도시화율의 차이를 도시화 정도의 기준으로 적용하였다. 연구지역의 분류를 위하여 2000년도의 도시화율과 도시화정도(2000-1975)를 동시에 고려하여 연구지역을 분류한 결과 1975년부터 2000년에 걸쳐서 도시화율이 변하고 있는 것으로 판단된다. 분석결과에 의하면 서울, 인천, 수원, 대구, 광주, 부산 그리고 제주 등 7개 지역이 2000년도에 21 % 이상의 도시

화율과 15 % 이상의 도시화정도를 보이고 있으며, 청주, 대전, 포항, 군산, 울산, 목포, 여수, 서귀포 그리고 성산포 등 9개 지역이 2000년도에 11~21 %의 도시화율과 8.5 ~15 %의 도시화정도를 보이고 있고, 나머지 40개 지역이 2000년도 11 %미만의 도시화율과 8.5 %이하의 도시화정도를 보이고 있다.

분류된 연구지역에서 18개 지역(속초, 인천, 울진, 포항, 군산, 부산, 통영, 목포, 여수, 완도, 제주, 서귀포, 강화, 보령, 부안, 고흥, 성산포, 영덕)이 해안지역으로 분류되었으며, 나머지 33개 지역은 내륙지역으로 분류되었다. 6년간의 평균 수역 및 습지면적비의 경우 인천, 목포지역이 10 % 이상의 비율을 보이고 있고, 춘천을 비롯한 8개 지역이 5~10 %의 수역 및 습지면적비를 보이고 있다. 연구지역 내 5 %이하 경사도 면적비를 분석한 결과 대관령, 울진, 추풍령, 통영, 여수, 인제, 홍천, 제천, 영주, 영덕, 의성, 거창, 함천, 산청지역이 20 % 이하의 면적비를 보이고 있어 이들 지역이 산악지역으로 분류할 수 있을 것으로 판단된다.

선정된 56개 연구 지역에 대해서 기후관측지점을 중심으로 반경 10 km 범위의 314 km²에 대해서 GIS분석을 통하여 1975년, 1980년, 1985년, 1990년, 1995년 2000년의 6년간의 토지피복현황에 대해서 분석을 실시하였다. 기후자료와 동일한 기간을 적용하는 것이 타당하나 1970년 및 2004년 자료의 경우 GIS분석을 위하여 자료사용에 어려움이 있어 분석자료에서 제외하였다. 연구지역들의 토지피복 현황변화를 분석한 결과 대부분의 대도시 지역에서 주거지면적의 비율이 증가하고 있고, 반면에 산림이나 농경지의 면적이 계속적으로 감소하고 있다.

56개 지역의 표고분포를 검토한 결과 서울을 포함한 23개 지역이 100 m 이내의 평균고도에 위치하고 있었다. 대도시로는 서울, 인천, 수원, 청주, 포항, 울산, 광주, 부산 등 대다수의 대도시가 포함되어 있다. 속초를 포함한 17개 지역이 100~200 m 범위의 평균고도를 보였으며 대도시로는 대전, 대구, 제주 등이 포함되어 있었다. 춘천을 비롯한 9개 지역이 200~300 m 범위 내에 위치하고 있으며 대도시로는 포함되어 있지 않다. 대관령을 비롯한 7개 지역의 평균고도가 300 m를 초과하였고, 대도시로는 포함되어 있지 않다.

56개 지역의 전체 면적대비 5 %이하 경사 면적분포를 비교 검토한 결과 대관령을 비롯한 14개 지역(대관령, 울진, 추풍령, 통영, 여수, 인제, 홍천, 제천, 영주, 영덕, 의성, 거창, 함천, 산청)이 20 %이하의 면적비를 보였고 대도시로는 포함되어 있지 않다. 이들 지역은 대부분 태백산맥과 소백산맥에 위치해 있다. 춘천을 비롯한

Table 1. Geographical and Topographical Characteristics of 56 Study Stations

Station(No.)	Lat. (N)	Long. (E)	Elev. (m)	Geographical and topographical classification																	
				Geographical location		Urbanization rate of year 2000 (%)	Area ratio of lake and wet land (%) (6 year average)			Area ratio of topographical gradient below 5% (%)											
				coast	inland		10~	5~10	~5	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100							
Sokcho (1)	38° 15'	128° 34'	17.8	○		6.67			○			○									
Daegwallyeong (2)	37° 41'	128° 46'	842.5		○	0.34			○			○									
Chuncheon (3)	37° 54'	127° 44'	76.8		○	8.43		○				○									
Seoul (4)	37° 34'	126° 58'	86.0		○	59.40		○												○	
Incheon (5)	37° 28'	126° 38'	68.9	○		52.70	○													○	
Wonju (6)	37° 20'	127° 57'	149.8		○	6.23			○			○									
Suwon (7)	37° 16'	126° 59'	33.6		○	23.70			○										○		
Chungju (8)	36° 58'	127° 57'	114.1		○	5.37		○				○									
Seosan (9)	36° 46'	126° 30'	25.9		○	7.51			○										○		
Ulsan (10)	36° 59'	129° 25'	49.4	○		3.1			○	○											
Cheongju (11)	36° 38'	127° 27'	57.4		○	13.30			○										○		
Daejeon (12)	36° 22'	127° 22'	68.3		○	20.0			○										○		
Chupungnyeong(13)	36° 13'	128° 00'	242.5		○	0.52			○	○											
Pohang (14)	36° 02'	129° 23'	1.9	○		14.20			○										○		
Gunsan (15)	36° 00'	126° 45'	26.9	○		16.40		○												○	
Daegu (16)	35° 53'	128° 37'	57.6		○	25.60			○										○		
Jeonju (17)	35° 49'	127° 09'	53.5		○	10.50			○										○		
Ulsan (18)	35° 33'	129° 19'	34.7		○	12.20			○				○								
Gwangju (19)	35° 10'	126° 54'	70.5		○	22.20			○										○		
Busan (20)	35° 06'	129° 02'	69.2	○		41.0		○											○		
Tongyeong (21)	34° 51'	128° 26'	31.7	○		3.36			○	○											
Mokpo (22)	34° 49'	126° 23'	37.9	○		17.10	○												○		
Yeosu (23)	34° 44'	127° 45'	66.1	○		16.50			○	○											
Wando (24)	34° 24'	126° 43'	34.9	○		5.14		○				○									
Jeju (25)	33° 31'	126° 32'	20.0	○		21.0			○											○	
Seogwipo (26)	33° 15'	126° 34'	50.5	○		11.80			○										○		
Jinju (27)	35° 12'	128° 07'	21.3		○	5.25			○										○		
Ganghwa (28)	37° 42'	126° 27'	45.7	○		5.06			○										○		
Yangpyeong (29)	37° 29'	127° 30'	47.0		○	1.29			○				○								
Icheon (30)	37° 16'	127° 29'	77.8		○	5			○											○	
Inje (31)	38° 03'	128° 10'	198.6		○	1.69			○	○											
Hongcheon (32)	37° 41'	127° 53'	140.6		○	3.14			○	○											
Jecheon (33)	37° 09'	128° 12'	263.2		○	3.91			○	○											
Boeun (34)	36° 29'	127° 44'	174.1		○	2.88			○				○								
Cheonan (35)	36° 47'	127° 07'	24.9		○	6.94			○										○		
Boryeong (36)	36° 19'	126° 34'	15.3	○		7.5			○										○		
Buyeo (37)	36° 16'	126° 55'	11.3		○	8			○										○		
Geumsan (38)	36° 06'	127° 29'	171.3		○	4.11			○				○								
Buan (39)	35° 44'	126° 43'	10.7	○		7.4			○												○
Imsil (40)	35° 37'	127° 17'	246.9		○	5.18			○										○		
Jeongeup (41)	35° 34'	126° 52'	44.1		○	4.22			○										○		
Namwon (42)	35° 24'	127° 20'	89.7		○	8.2			○				○								
Jangheung (43)	34° 41'	126° 55'	45.2		○	4.2			○				○								
Haenam (44)	34° 33'	126° 34'	13.7		○	2.93			○										○		
Goheung (45)	34° 37'	127° 17'	53.3	○		5.93			○				○								
Seongsanpo (46)	33° 23'	126° 53'	18.6	○		11.8			○												○
Yeongju (47)	36° 52'	128° 31'	210.2		○	0.82			○	○											
Mungyeong (48)	36° 37'	128° 09'	170.4		○	1.31			○				○								
Yeongdeok (49)	36° 32'	129° 25'	41.2	○		0.42			○	○											
Uiseong (50)	36° 21'	128° 41'	81.1		○	0.79			○	○											
Gumi (51)	36° 08'	128° 19'	47.9		○	5.32			○										○		
Yeongcheon (52)	35° 58'	128° 57'	94.1		○	1.28			○				○								
Geochang (53)	35° 40'	127° 55'	220.9		○	0.36			○	○											
Hapcheon (54)	35° 34'	128° 10'	32.7		○	0.44			○	○											
Miryang (55)	35° 29'	128° 45'	12.6		○	1.81			○				○								
Sancheong (56)	35° 25'	127° 53'	138.6		○	0.22			○	○											

16개 지역(춘천, 원주, 충주, 울산, 완도, 진주, 양평, 보은, 금산, 임실, 남원, 장흥, 고흥, 문경, 영천, 밀양)이 20~40%의 면적비를 보였으며 대도시로는 울산이 포함되어 있다. 속초를 비롯한 19개 지역(속초, 수원, 서산, 청주, 대전, 포항, 대구, 전주, 광주, 부산, 목포, 서귀포, 강화, 천안, 보령, 부여, 정읍, 해남, 구미)이 40~60%의 면적비를 보였으며, 대부분의 대도시(수원, 청주, 대전, 포항, 대구, 광주, 부산)가 포함되어 있다. 서울을 비롯한 5개 지역(서울, 인천, 군산, 제주, 이천)이 60~80%의 면적비를 보였고, 대도시로는 서울, 인천, 제주가 포함되어 있다. 그리고 부안과 성산포지역이 80% 이상의 면적비를 보였다. 이러한 5% 이하의 경사 면적비를 기준으로 판단할 때, 대부분의 대도시는 경사가 급하지 않은 완만한 해안지역이나 분지지역에 위치한 것으로 판단된다.

경사향분포를 비교 검토한 결과 서울의 경우 평지면적은 65.8 km²로 전체면적대비 21%이고 남서방향의 경사는 36.5 km²로써 전체면적 대비 11.6%로써 가장 많았다. 인천의 경우 평지면적은 58.6 km²로 전체면적 대비 30.5%이고 남서방향의 경사는 20.7 km²로써 전체면적 대비 10.7%로써 가장 많았다. 수원의 경우 평지면적은 47.7 km²로 전체면적대비 15.2%이고 남동방향의 경사는 36.2 km²로써 전체면적 대비 11.5%로써 가장 많았다. 청주의 경우 평지면적은 39.9 km²로 전체면적 대비 12.7%이고 남동방향의 경사는 39.9 km²로써 전체면적 대비 12.7%로써 가장 많았다. 대전의 경우 평지면적은 15.1 km²로 전체면적대비 4.8%이고 북동방향의 경사는 41.7 km²로써 전체면적 대비 13.2%로써 가장 많았다. 포항의 경우 평지면적은 4.6 km²로 전체면적대비 1.9%이고 북동방향의 경사는 35.2 km²로써 전체면적 대비 15.0%로써 가장 많았다. 대구의 경우 평지면적은 6.4 km²로 전체면적대비 2.0%이고 북서방향의 경사는 43.8 km²로써 전체면적 대비 13.9%로써 가장 많았다. 울산의 경우 평지면적은 4.4 km²로 전체면적대비 1.4%이고 동방향의 경사는 50.1 km²로써 전체면적 대비 15.9%로써 가장 많았다. 광주의 경우 평지면적은 12.7 km²로 전체면적대비 4%이고 서방향의 경사는 48.0 km²로써 전체면적 대비 15.3%로써 가장 많았다. 부산의 경우 평지면적은 0.02 km²로 전체면적 대비 0.01%이고 서방향의 경사는 29.2 km²로써 전체면적 대비 15.0%로써 가장 많았다. 제주의 경우 평지면적은 3.7 km²로 전체면적대비 2.2%이고 북방향의 경사는 56.6 km²로써 전체면적 대비 33.8%로써 가장 많았다. 56개 지역의 임상분포를 검토한 결과 대부분의 지역에서 침엽수가 활엽수보다 더 넓게 분포하고 있다.

침엽수 중에서 소나무의 면적비가 가장 높은 것으로 나타났다.

2.2 연구자료

본 연구를 위하여 수집 분석될 자료는 강수, 기온, 풍속, 습도, 일조시간, 가조시간, 증발량자료 등이며, 전국 56개 기후관측지점 중 서울을 포함한 11개 대도시의 경우 1970년부터 5년 간격으로 2004년까지 8개년에 걸쳐서 분석을 실시하였고, 속초를 포함한 45개 중소도시의 경우 1975년부터 10년 간격으로 4개년에 걸쳐서 분석을 실시하였다. 전국 56개 지점에서 관측되는 수문기후 관측 자료를 수집하여 도시화에 따른 기후요소 변화를 분석하였고 특히 도시화가 상당히 진행된 대도시지역을 중심으로 분석하였다. 수집된 자료를 바탕으로 본 연구의 궁극적 목표인 도시화에 따른 기후변화가 물수지에 미치는 영향 평가를 위하여 자료의 적절성을 분석하였다.

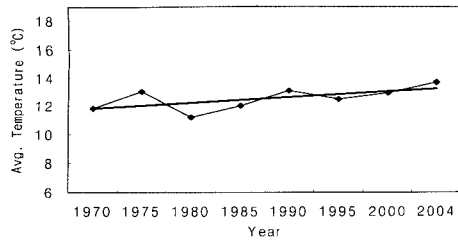
기온자료를 검토한 결과 도시화에 따라서 기온은 증가추세를 보이고 있는 것으로 판단된다 (Fig. 2). 기온은 대구지역이 전반적으로 가장 높고, 인천과 수원지역이 낮은 기온을 보이고 있다. 강수자료를 검토한 결과 대부분의 지역에서 변화추세가 매우 미미하였다 (Fig. 3). 풍속자료를 검토한 결과 도시화에 따라서 풍속의 감소추세를 보이고 있으며 감소추세는 인천지역이 가장 큰 것으로 나타났다 (Fig. 4). 상대습도 자료를 검토한 결과 도시화에 따라서 현격한 상대습도의 감소추세를 보이고 있다 (Fig. 5). 일조시간 자료를 검토한 결과 도시화에 따라서 일조시간의 감소추세를 보이고 있다 (Fig. 6).

3. 연 물수지 변화 분석

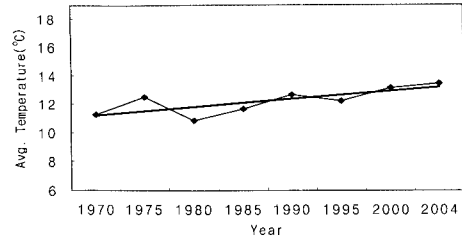
도시화에 따른 기후변화가 물수지에 미치는 영향을 분석하기 위하여 연구지역 내에서 연 실제증발산량을 산정하였고, 도시화에 따른 연 유출량변화를 모의하기 위하여 연 물수지분석을 실시하였다.

3.1 연 실제증발산량 산정

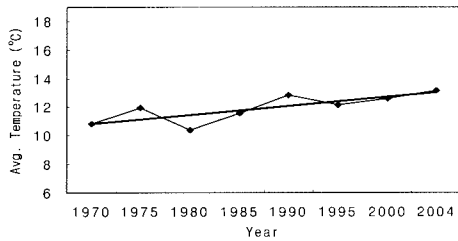
1975년, 1980년, 1985년, 1990년, 1995년, 2000년 수문기후자료와 토지이용자료를 이용하여 추정된 식생지수를 이용하여 지역별 반경 10 km 지역의 연 실제증발산량을 산정하였다. 여기서 연 실제증발산량은 Zhang et al.(2001)에 의해서 전 세계 250개 유역에서 장기간의 물수지분석으로부터 유도된 경험공식 (1)을 적용하였다. 민감도 분석결과 강수량, 기준 잠재증발산량 그리고 식생지수의 증가에 따라서 실제증발산량은 증가하는 것으로 나타났다.



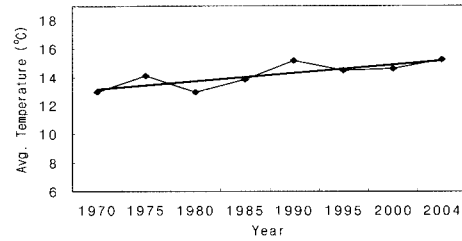
(a) Seoul



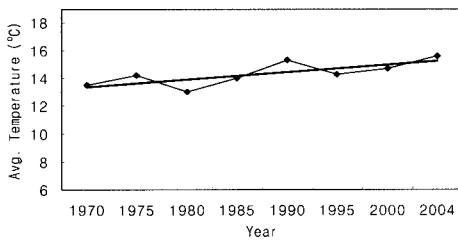
(b) Incheon



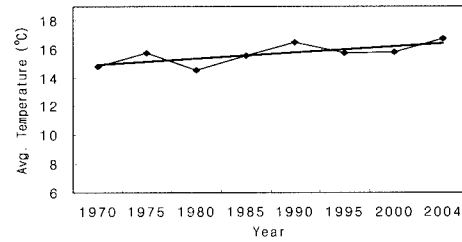
(c) Suwon



(d) Daegu

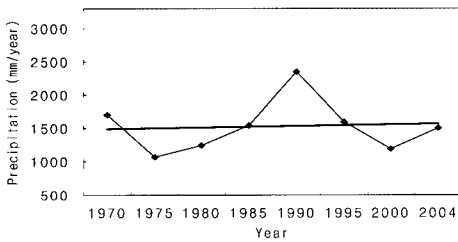


(e) Ulsan

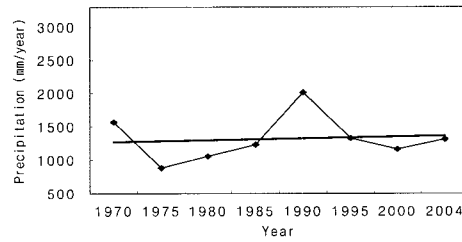


(f) Jeju

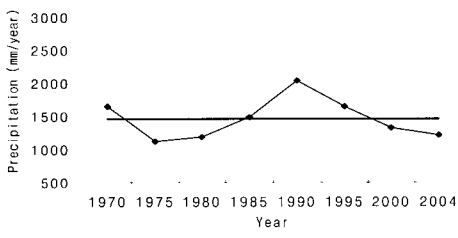
Fig. 2. Variation of Air Temperature



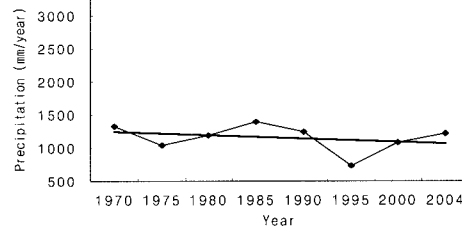
(a) Seoul



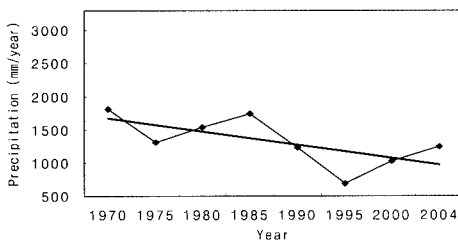
(b) Incheon



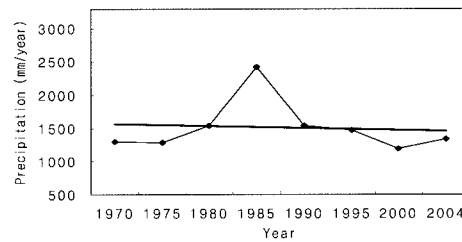
(c) Suwon



(d) Daegu

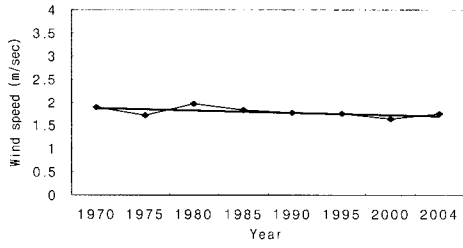


(e) Ulsan

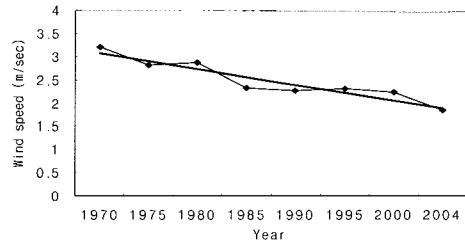


(f) Jeju

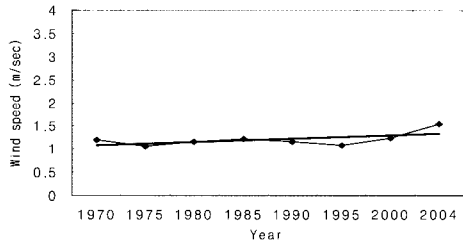
Fig. 3. Variation of Precipitation



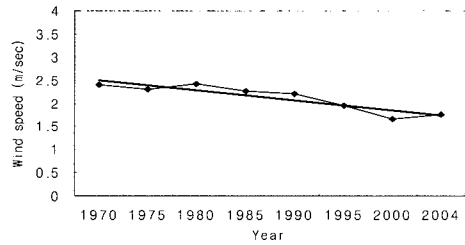
(a) Seoul



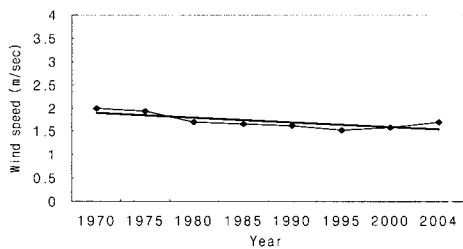
(b) Incheon



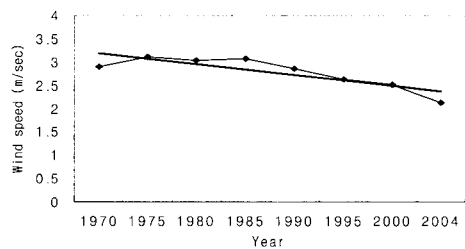
(c) Suwon



(d) Daegu

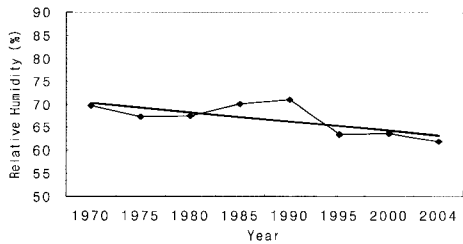


(e) Ulsan

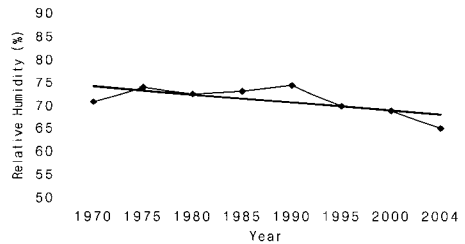


(f) Jeju

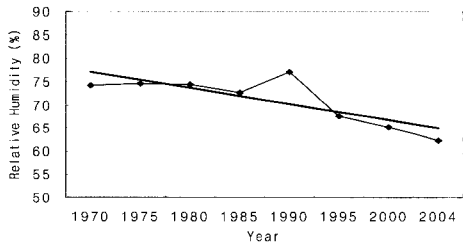
Fig. 4. Variation of Wind Speed



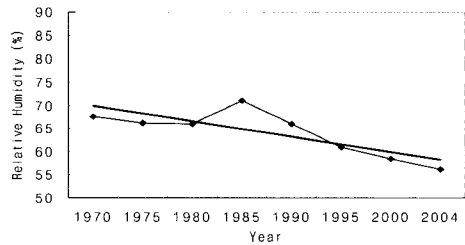
(a) Seoul



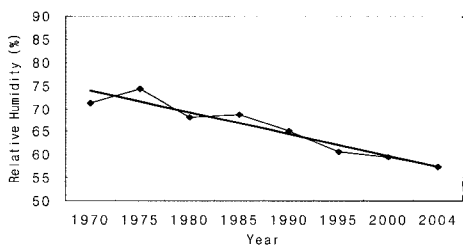
(b) Incheon



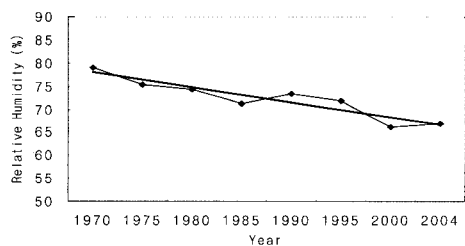
(c) Suwon



(d) Daegu



(e) Ulsan



(f) Jeju

Fig. 5. Variation of Relative Humidity

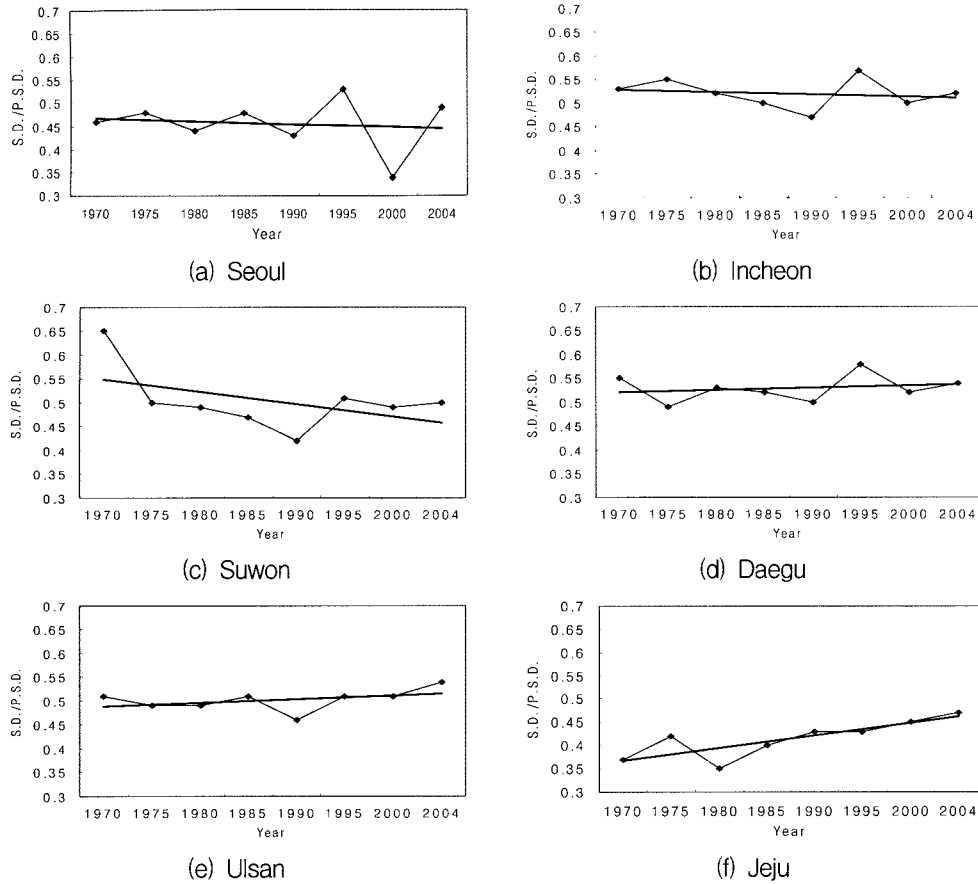


Fig. 6. Variation of Sunshine Duration over Possible Sunshine Duration

$$AET = \left(\frac{1 + w \frac{PET}{P}}{1 + w \frac{PET}{P} + \frac{P}{PET}} \right) \times P \quad (1)$$

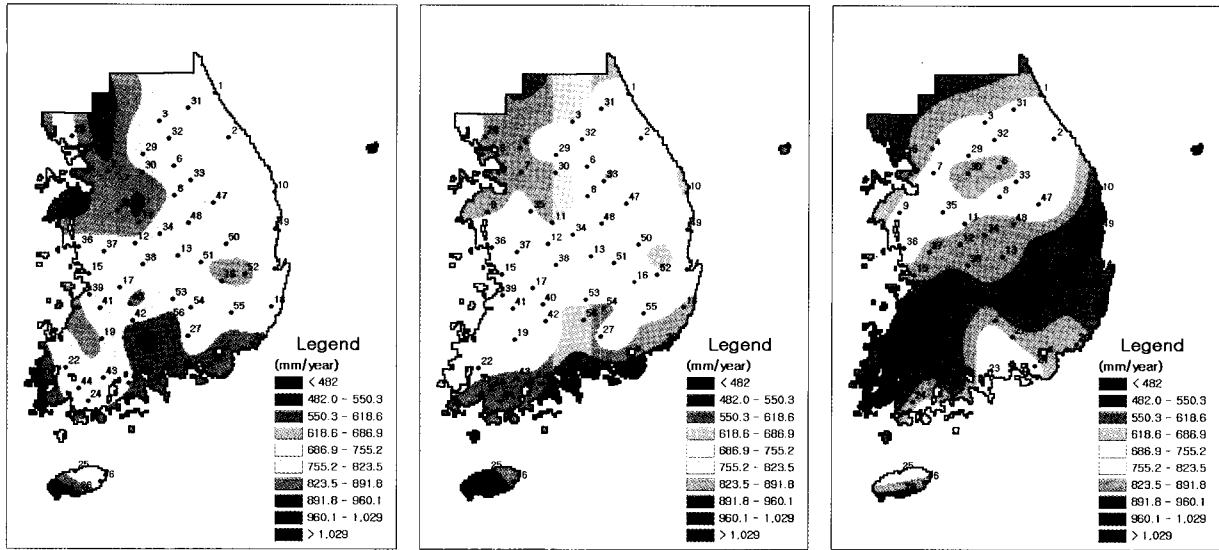
$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (Q_n - Q_g) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (2)$$

여기서 AET는 연 실제증발산량(mm/년), P는 연 강수량(mm/년), w는 식생이 증산작용에 의한 물사용 정도의 차이를 반영하는 계수이다. 여기서, w지수는 연구지역의 토지피복조건을 이용하여 산정하였으며 주거지역의 경우 0, 나대지의 경우 0.2, 논, 밭, 초지의 경우 0.5, 산림의 경우 2.0, 수역의 경우 연 실제증발산은 연 기준 잠재증발산량의 1.076배로 간주하였다. PET는 FAO Penman-Monteith식으로부터 산정된 기준잠재증발산량(mm/년)이다. Eq. (2)로부터 일별 기준잠재증발산량(ET_o, mm/day)을 산정한 후 연 기준잠재증발산량(PET, mm/년)을 산정하였다. 여기서, T_a = 2 m 높이에서 일평균기온(°C), u₂ = 2 m 높이에서 풍속(m/s), Q_n = 순방사(MJ/m²/day), Q_g = 토양열 유동밀도

(MJ/m²/day), e_s = 포화증기압(kPa), e_a = 실제증기압(kPa), (e_s - e_a) = 대기의 포화증기압 부족량(kPa), Δ = 포화증기압과 온도곡선의 기울기(kPa/°C), γ = 건습계상수(kPa/°C)이다.

Gong et al.(2006)에 의하면 Eq. (2)의 경우 상대습도가 가장 민감한 것으로 나타났으며, 태양복사량, 대기온도 그리고 풍속이 뒤를 이었다. 기후자료 검토결과 연구지역에서 기온은 증가추세를 보이고 있으며, 기온의 증가추세는 Eq. (2)의 에너지항을 증가시켜 기준잠재증발산량을 증가시키는 영향을 미친다. 연구지역에서 풍속은 감소추세를 보이고 있으며, 풍속의 감소는 Eq. (2)의 공기동력항을 감소시켜 기준잠재증발산량을 감소시키는 영향을 미친다. 연구지역에서 상대습도는 현격한 감소추세를 보이고 있으며, 이는 공기동력항을 증가시켜 기준잠재증발산량 증가에 큰 영향을 미친다. 연구지역에서의 일조시간의 감소추세는 Eq. (2)에서 에너지항에 영향을 미쳐서 기준잠재증발산량을 감소시키는 영향을 미친다. Fig. 7은 56개 연구지역에서 산정된 실제증발산량의 분포를 보여주고 있다.

Fig. 8은 11개 연구지역의 토지이용에 따른 연 실제증발산량(AET)의 변화를 보여주고 있다. Fig. 8의 범례



(a) 1975 (b) 1985 (c) 1995

Fig. 7. Geographical Distribution of Actual Evapotranspiration

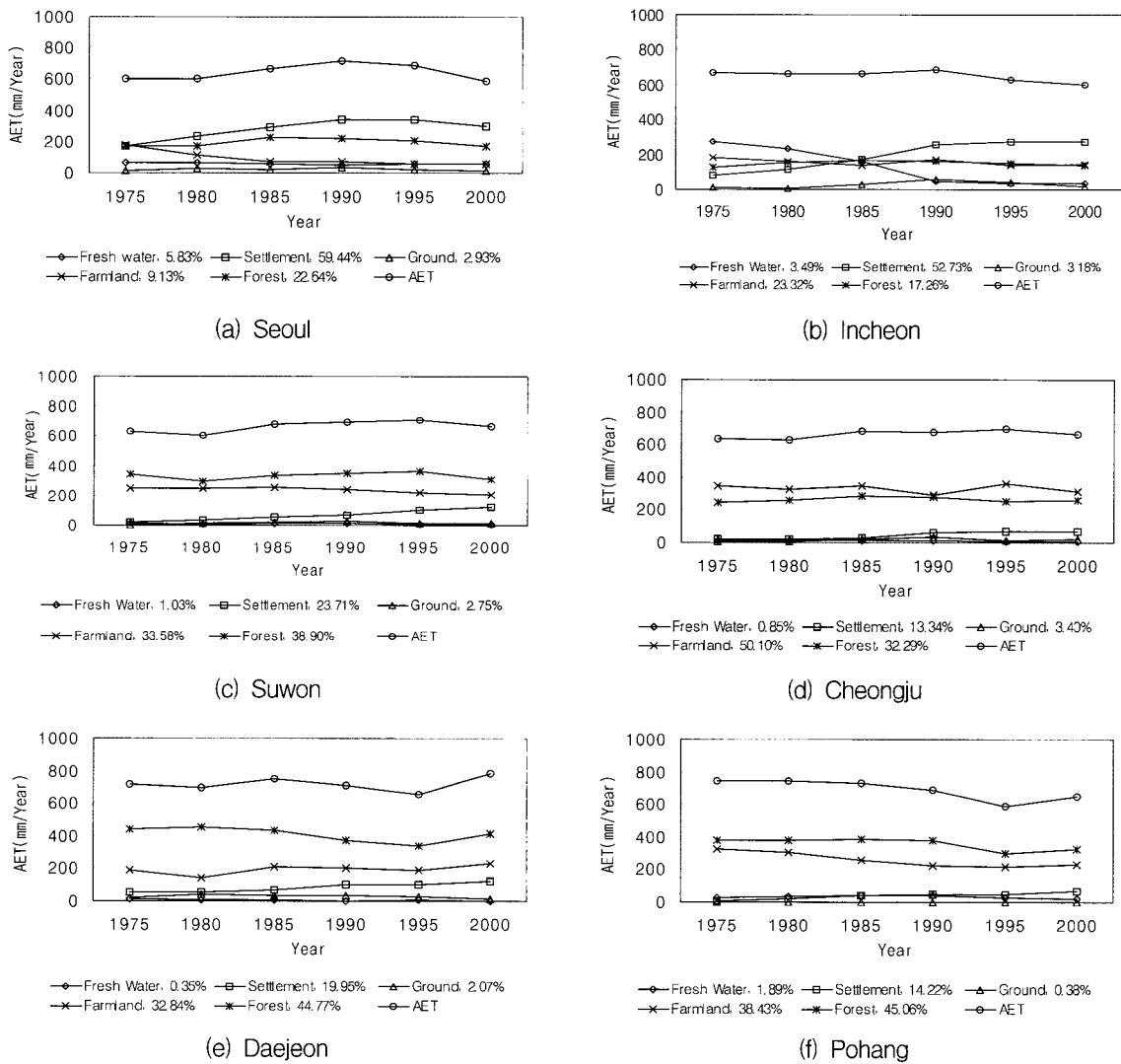
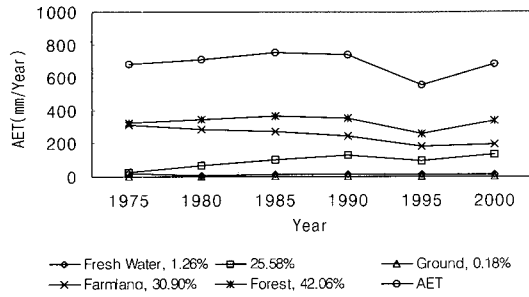
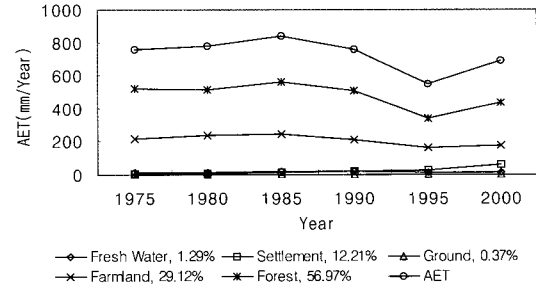


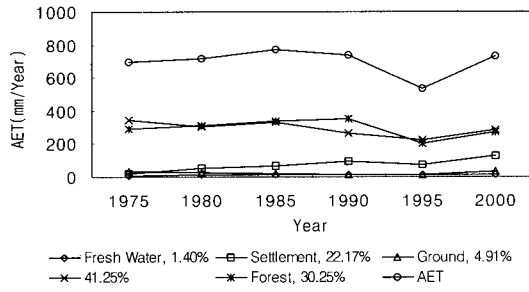
Fig. 8. Variation of Actual Evapotranspiration According to Land Use



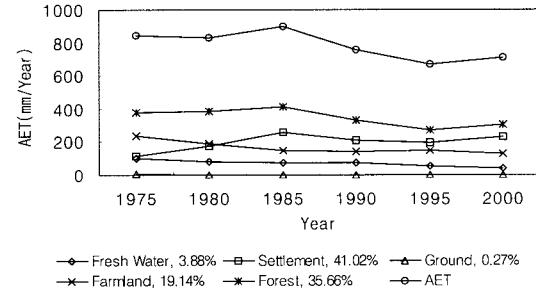
(g) Daegu



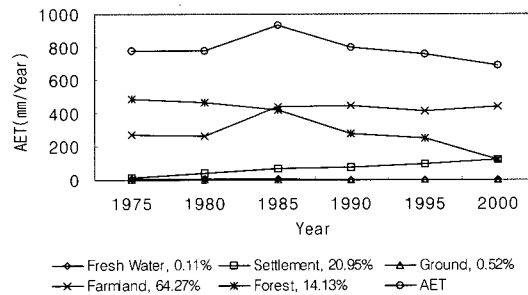
(h) Ulsan



(i) Kwangju



(j) Busan



(k) Cheju

Fig. 8. Variation of Actual Evapotranspiration According to Land Use (continued)

에서 각각의 토지이용조건에 주어진 숫자는 2000년도 각 토지이용 조건에 해당하는 면적비(%)를 나타낸다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 대부분의 도시 주거지역에서의 실제증발산량은 증가하고 있다. 이는 주거지면적 증가에 따른 연구지역에서의 실제증발산량의 증가가 주원인으로 판단되며, 또한 연구지역이 도시화함에 따라서 상대습도 감소와 열섬현상에 의한 대기온도의 증가에 기인한다. 대부분의 연구지역에서 도시화의 진행에 따라서 주거지역에서의 실제증발산량이 크게 증가한 것으로 나타났다 (Table 2). Table 2에서 보는 바와 같이 1975년과 2000년 사이의 주거지역에서의 실제증발산량 증가율은 서울 21.43 %, 인천 45.25 %, 수원 15.64 %, 청주 6.99 %, 대전 7.85 %, 포항 9.76 %, 대구 15.72 %, 울산 8.43 %, 광주 14.77 %, 부산 19.14 %, 제주 15.98 %를 보이고 있어서 인천지역이 가장 큰 주거지역 실제증발산량 증가율을 보이고 있다. 주거지역의 실제증발

산량이 증가하고 있는데 반해서 전반적으로 농경지에서의 실제증발산량은 크게 감소하는 경향을 보이고 있다. 산림지역으로부터의 실제증발산량의 경우 농경지와는 달리 급격한 변화를 보이지 않고 있으며, 다만 제주지역의 경우 1975년 485.8 mm(62.28 %)에서 121.9 mm(17.74 %)로 급격한 감소를 보이고 있다.

3.2 연 물수지 요소 변화

56개 연구지역에 대해서 1970년, 1975년, 1980년, 1985년, 1990년, 1995년, 2000년 그리고 2004년에 대해서 연 강수량자료를 수집하여 도시화 정도에 따른 분석을 실시하였다. 연구지역으로부터의 연 유출량(Q, mm/년)은 연 강수량(P, mm/년)과 실제증발산량(AET, mm/년)과의 차이(Q=P-AET)를 이용하여 산정하였다. 56개 지역의 실제증발산량 분석결과에 의하면 도시화에 따른 특정한 경향을 찾아볼 수 없다. 이는 과거 30년 이

Table 2. Estimated Actual Evapotranspiration According to Land Use

Study Location (No.)	Actual Evapotranspiration (mm/year)											
	Year 1975						Year 2000					
	1	2	3	4	5	Sum	1	2	3	4	5	Sum
Seoul (4)	173.6 (28.72)	169.2 (27.99)	179.0 (29.61)	15.8 (2.61)	66.9 (11.07)	604.5	296.1 (50.15)	171.5 (29.05)	53.6 (9.08)	15.6 (2.64)	53.6 (9.08)	590.4
Incheon (5)	76.5 (11.48)	125.7 (18.86)	181.6 (27.25)	11.2 (1.68)	271.5 (40.73)	666.5	271.2 (45.25)	134.5 (22.44)	142.5 (23.78)	17.3 (2.89)	33.8 (5.64)	599.3
Suwon (7)	19.1 (3.04)	345.3 (54.93)	248.5 (39.53)	2.0 (0.32)	13.7 (2.18)	628.6	123.9 (18.68)	309.3 (46.62)	205.7 (31.01)	15.2 (2.29)	9.3 (1.40)	663.4
Cheongju (11)	22.6 (3.56)	244.1 (38.48)	347.4 (54.76)	4.2 (0.66)	16.1 (2.54)	634.4	69.8 (10.55)	256.8 (38.83)	308.2 (46.60)	19.2 (2.90)	7.4 (1.12)	661.4
Daejeon (12)	55.0 (7.67)	438.7 (61.20)	190.8 (26.62)	20.1 (2.80)	12.2 (1.70)	716.8	121.4 (15.52)	412.2 (52.69)	232.6 (29.73)	13.0 (1.66)	3.1 (0.40)	782.3
Pohang (14)	7.7 (1.04)	379.5 (51.06)	325.8 (43.83)	1.2 (0.16)	29.1 (3.91)	743.3	69.8 (10.80)	326.8 (50.56)	227.5 (35.20)	1.6 (0.25)	20.6 (3.19)	646.3
Daegu (16)	28.3 (4.14)	326.9 (47.77)	311.4 (45.51)	0.2 (0.02)	17.5 (2.56)	684.3	135.2 (19.86)	335.2 (49.25)	196.2 (28.83)	0.6 (0.09)	13.4 (1.97)	680.6
Ulsan (18)	4.3 (0.57)	518.8 (68.62)	216.6 (28.65)	0.6 (0.08)	15.8 (2.09)	756.1	62.0 (9.00)	434.6 (63.10)	177.4 (25.76)	1.7 (0.25)	13.0 (1.89)	688.7
Kwangju (19)	21.1 (3.04)	287.3 (41.44)	345.8 (49.88)	30.7 (4.43)	8.4 (1.21)	693.3	129.7 (17.81)	269.5 (37.01)	283.6 (38.95)	30.9 (4.24)	14.5 (1.99)	728.2
Busan (20)	114.8 (13.54)	381.5 (45.01)	239.6 (28.27)	8.2 (0.97)	103.5 (12.21)	847.6	232.5 (32.68)	306.3 (43.05)	129.0 (18.13)	1.2 (0.17)	42.5 (5.97)	711.5
Cheju (25)	11.4 (1.46)	485.8 (62.28)	271.4 (34.79)	3.1 (0.4)	8.3 (1.06)	780.0	119.8 (17.44)	121.9 (17.74)	440.6 (64.13)	3.3 (0.48)	1.4 (0.20)	687.0

1: settlement area; 2: forest area; 3: farmland area; 4: ground area; 5: lake, wet land and river area; (): the ratio of actual evapotranspiration from land use over total actual evapotranspiration (%)

상 장기 관측된 강수량자료 분석 결과 미약하나마 도시화와 강수량 간에는 상관관계가 존재하였으나, 실제증발산량 산정에 적용된 1975년, 1980년, 1985년, 1990년, 1995년 그리고 2000년의 강수량 자료의 분석결과 도시화에 따른 연 강수량의 뚜렷한 추세를 보이지 않고 있으며, Eq. (1)에서 보는 바와 같이 이들 강수량의 변화에 따라서 실제증발산량 산정 값이 영향을 받고 있기 때문이다. 따라서 강수량변화가 실제증발산 산정에 미치는 영향이 커서 도시화에 따른 기후변화로 인한 실제증발산량의 증가나 주거지면적 증가로 인한 실제증발산량의 감소를 판단하는데 어려움이 있다. Fig. 9와 Fig. 10은 각기 전국 56개 지점에서의 1975년, 1985년 그리고 1995년 강수량 및 유출량 분포를 보여준다.

Table 3은 Spearman 순위상관분석을 이용하여 도시화가 많이 이루어진 11개 지역에 대해서 각 도시별 물수지 요소들의 변화추이를 알아보았다. 실제증발산량의 경우 서울, 수원, 청주, 대전, 광주지역에서 증가추세를 보이고 있고, 나머지 지역은 감소추세를 보이고 있다. 인천, 포항, 부산지역 등 3 지역이 유의수준 0.1 이상에

서 유의한 변화를 보이고 있으며, 나머지 지역은 유의한 변화추세를 보이지 않고 있다. 실제증발산량이 증가추세를 보이고 있는 지역은 대구를 제외하고 모두 내륙 지역에 분포하고 있으며, 해안지역에 분포하고 있는 지역은 모두 감소추세를 보이고 있다. 강수량의 경우 서울, 인천, 수원, 대전지역에서 증가추세를 보이고 있고, 나머지 지역에서 감소추세를 보이고 있다. 포항과 부산 등 2 지역이 유의수준 0.025 이상에서 유의한 경향을 보이고 있고, 나머지 지역은 유의한 변화추세를 보이지 않고 있다. 유출량의 경우 서울, 인천, 수원, 청주, 대전지역에서 증가추세를 보이고 있고, 나머지지역에서 감소추세를 보이고 있다. 포항과 울산 등 2 지역이 유의수준 0.025 이상에서 유의한 경향을 보이고 있고, 나머지지역은 유의한 추세를 보이지 않고 있다. 따라서 대부분의 도시화지역에서 도시화에 따른 실제증발산량이나, 강수량 그리고 유출량 등의 변화에서 유의한 경향을 발견할 수 없었다. 기준 잠재증발산량의 경우 모든 도시에서 증가하는 추세를 보이고 있다.

Fig. 11에서 보는 바와 같이 도시화지역에서 연 유출

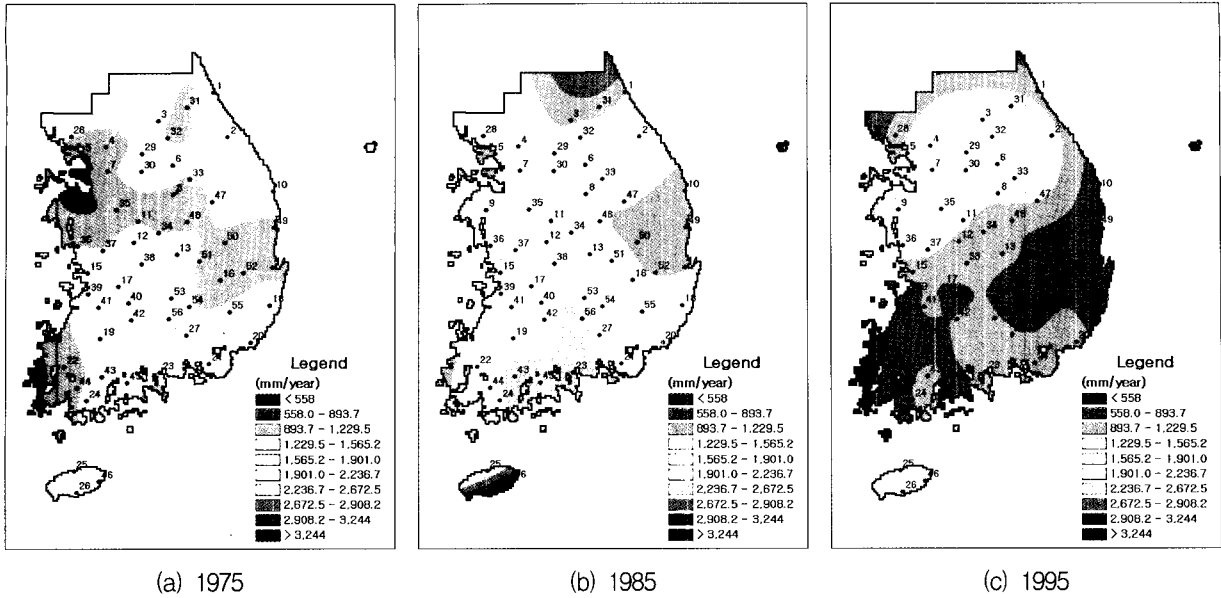


Fig. 9. Geographical Distribution of Precipitation

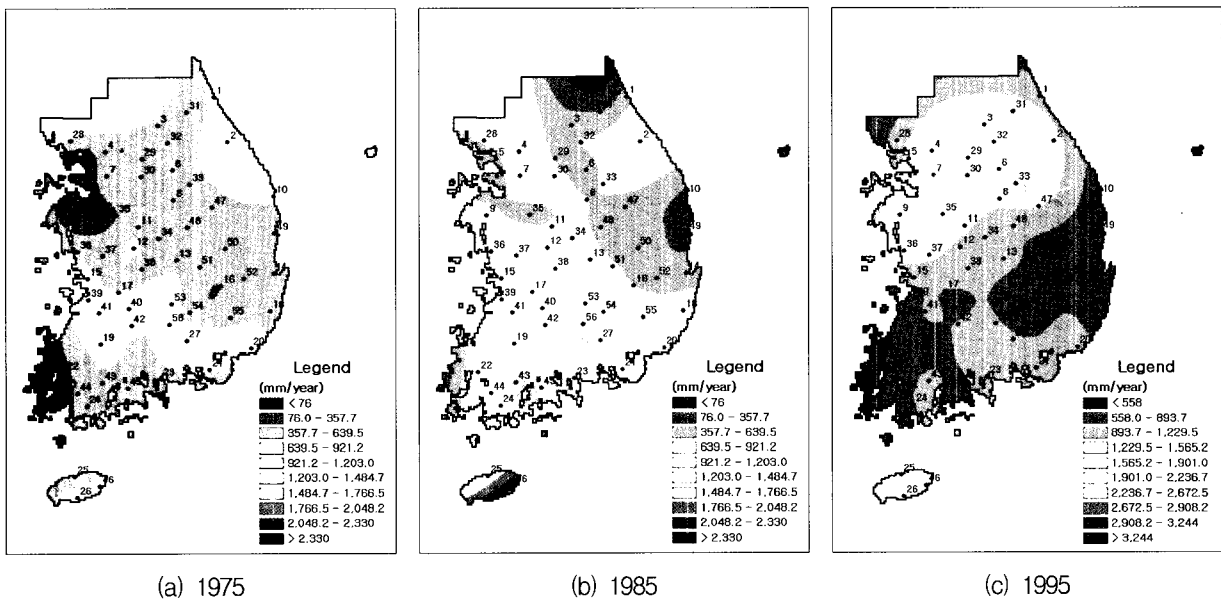


Fig. 10. Geographical Distribution of Runoff

량은 연 강수량의 변화에 직접적인 영향을 받고 있고, 연 실제증발산량의 변화정도는 연 강수량의 영향을 받음에도 불구하고 연 강수량에 비하여 그 편차가 크지 않다. 도시화에 따른 연 실제증발산량의 변화는 연 유출량에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보이며, 따라서 도시화가 연 유출량에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 판단된다. 도시화정도가 큰 연구지역의 경우 도시화가 진행됨에 따라서 기준잠재증발산량의 증가추세를 보이고, 기준잠재증발산량은 도시지역 내 습도의 감소영향을 가장 크게 받는 것으로 판단되며, 도시지역 내의 일사량 감소에 따른 순단과 복사량의 감소나 기온상승에

따른 순장과복사량의 증가에 의해서 영향을 받는 것으로 보인다. 따라서 도시화에 따른 기후변화가 실제증발산량을 증가시키는 요인과 도시화가 진행됨에 따라 주거지면적이 증가하여 실제증발산량을 감소시키는 요인이 복합적으로 작용하는 것으로 판단된다. 인천지역의 경우 도시 주거지면적이 1975년과 2000년을 비교했을 때 35.5 km²가 증가하여 다른 대도시지역과 비교하여 최고의 도시화 증가율을 보였다. 또한 2000년도의 대전, 포항, 대구, 울산 그리고 광주지역의 실제증발산량은 1995년도와 비교하여 강수량의 증가에 따른 증가를 보여주고 있다.

Table 3. Trend of Water Balance Components (N=6)

Study Location (No.)	Reference ET			Actual ET			Precipitation			Streamflow		
	α	ρ	Trend	α	ρ	Trend	α	ρ	Trend	α	ρ	Trend
Seoul (4)	0.1	0.086	↑(NS)	0.1	0.086	↑(NS)	0.1	0.371	↑(NS)	0.1	0.371	↑(NS)
Incheon (5)	0.1	0.257	↑(NS)	0.1	-0.657	↓(S)	0.1	0.600	↑(NS)	0.1	0.600	↑(NS)
Suwon (7)	0.1	0.714	↑(S)	0.1	0.600	↑(NS)	0.1	0.600	↑(NS)	0.1	0.600	↑(NS)
Cheongju (11)	0.1	0.657	↑(S)	0.1	0.543	↑(NS)	0.1	-0.029	↓(NS)	0.1	0.143	↑(NS)
Daejeon (12)	0.05	0.829	↑(S)	0.1	0.143	↑(NS)	0.1	0.257	↑(NS)	0.1	0.086	↑(NS)
Pohang (14)	0.1	0.600	↑(NS)	0.01	-0.943	↓(S)	0.025	-0.886	↓(S)	0.025	-0.886	↓(S)
Daegu (16)	0.1	0.600	↑(NS)	0.1	-0.429	↓(NS)	0.1	-0.143	↓(NS)	0.1	-0.143	↓(NS)
Ulsan (18)	0.01	0.943	↑(S)	0.1	-0.543	↓(NS)	0.05	-0.714	↓(S)	0.05	-0.714	↓(S)
Kwangju (19)	0.01	0.943	↑(S)	0.1	0.086	↑(NS)	0.1	-0.143	↓(NS)	0.1	-0.143	↓(NS)
Busan (20)	0.1	0.200	↑(NS)	0.1	-0.771	↓(S)	0.05	-0.714	↓(S)	0.1	-0.600	↓(NS)
Cheju (25)	0.1	0.771	↑(S)	0.1	-0.543	↓(NS)	0.1	-0.371	↓(NS)	0.1	-0.086	↓(NS)

N: Number of data pairs; α : Level of significance; ρ : Spearman rank correlation coefficient; S: Significant; NS: Not Significant; ↑: Increase; ↓: Decrease

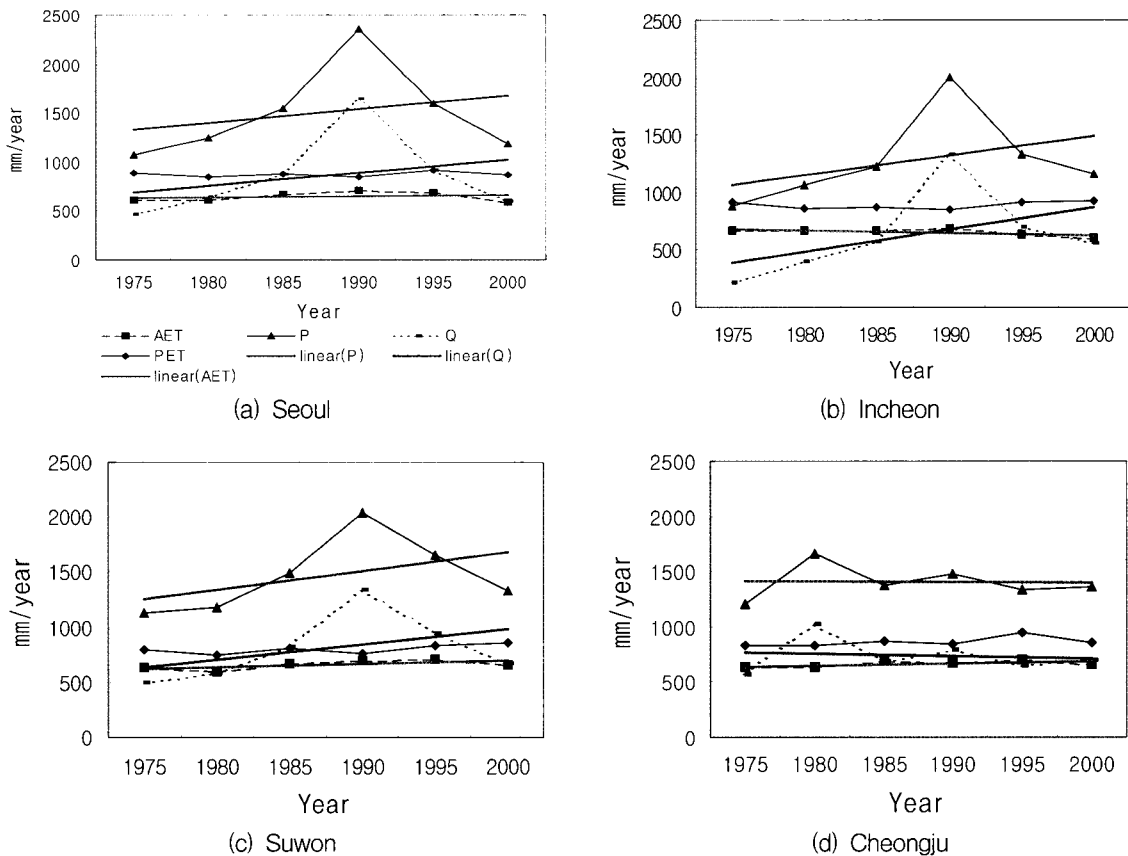
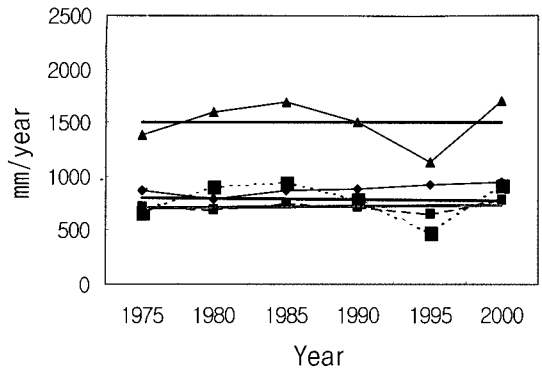
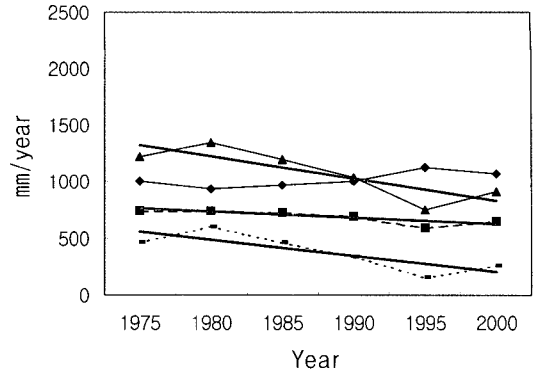


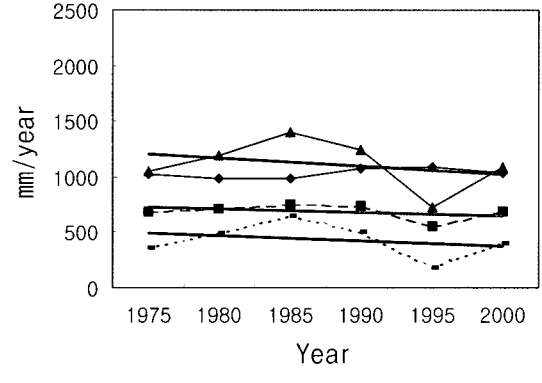
Fig. 11. Variation of Water Balance



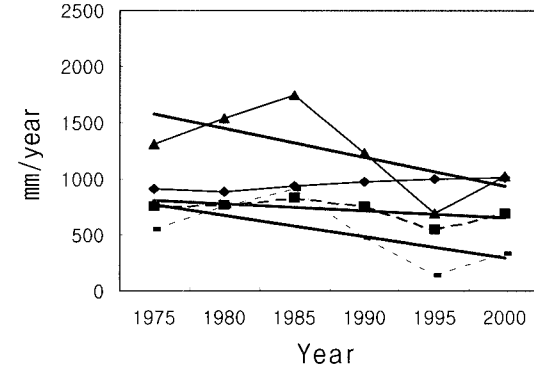
(e) Daejeon



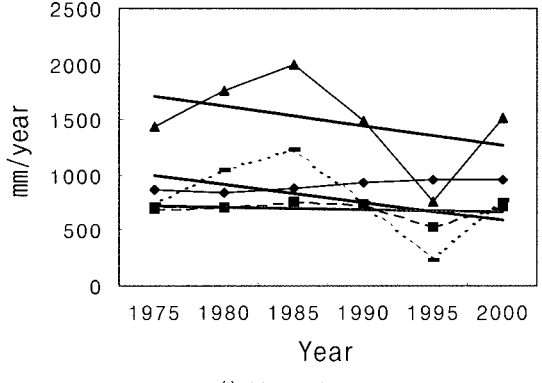
(f) Pohang



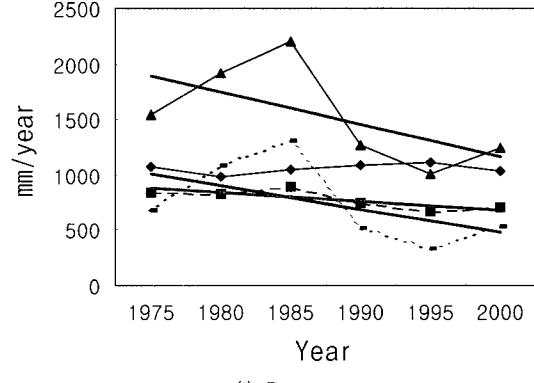
(g) Daegu



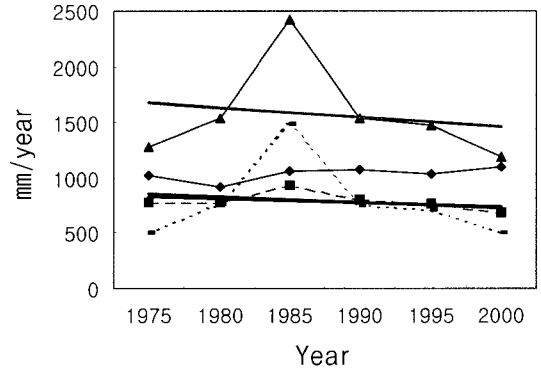
(h) Ulsan



(i) Kwangju



(j) Busan



(k) Cheju

Fig. 11. Variation of Water Balance (continued)

서울, 인천, 수원 등 수도권지역의 경우 1990년에 다른 지역과 비교하여 많은 강수량을 보여 유출량이 증대되었음을 볼 수 있고, 광주, 부산, 제주지역의 경우 1985년에 다른 지역과 비교하여 많은 강수량을 보여 유출량이 증대되었음을 볼 수 있다. 이들 기간 중에 강수량은 기준잠재증발산량을 매우 초과하여 습한 기간이었음을 알 수 있다. 반면에 1995년의 경우 포항, 대구, 울산, 광주 그리고 부산지역의 강수량이 기준잠재증발산량보다 적어서 이 기간 중에 이들 지역이 매우 건조한 기간이었음을 보여준다.

4. 결 론

도시화에 따른 기후변화가 연 물수지에 미치는 영향을 분석하기 위하여 전국 56개 기후관측지점을 중심으로 반경 10 km 범위에서 연구 지역을 선정하였다. 연구 지역 내에서 연 실제증발산량을 산정하였고, 도시화에 따른 연 유출량변화를 모의하기 위하여 연 물수지분석을 실시하였다.

분석결과 도시화가 진행됨에 따라서 기준잠재증발산량은 증가추세를 보이고 있다. 기준잠재증발산량은 도시지역 내 습도의 감소영향을 가장 크게 받는 것으로 판단되며, 도시지역 내의 일사량 감소에 따른 순단파복사량의 감소나 기온상승에 따른 순장파복사량의 증가에 의해서 영향을 받는 것으로 보인다. 따라서 도시화에 따른 기후변화가 연 실제증발산량을 증가시키는 요인과 도시화가 진행됨에 따라 주거지면적이 증가하여 연 실제증발산량을 감소시키는 요인이 복합적으로 작용하는 것으로 기대된다.

실제증발산량이 증가추세를 보이고 있는 지역은 대구를 제외하고 모두 내륙지역에 분포하고 있으며, 해안 지역에 분포하고 있는 지역은 모두 감소추세를 보이고 있다. 실제증발산량 및 강수량자료의 분석 결과 연구기간 동안에 일부 지역을 제외하고 대부분의 지역에서 도시화에 따른 연 실제증발산량 및 강수량의 뚜렷한 추세를 보이지 않고 있다.

도시화지역에서 연 유출량은 연 강수량의 변화에 직접적인 영향을 받고 있고, 연 실제증발산량의 변화 정도는 연 강수량의 영향을 받음에도 불구하고 연 강수량에 비하여 그 편차가 크지 않다. 따라서 도시화에 따른 연 실제증발산량의 변화는 연 유출량에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보인다. 유출량자료의 분석 결과 연구기간 동안에 일부 지역을 제외하고 대부분의 지역에서 도시화에 따른 연 유출량의 뚜렷한 추세를 보이지 않고 있다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업 (03산학연C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과입니다.

참 고 문 헌

- 김광섭, 임태경 (2005a). "도시화 등 환경변화에 따른 지역기후변화 특성 분석." 2005년 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 한국수자원학회.
- 김광섭, 임태경 (2005b). "한반도 강수량과 유량의 장기 추세 분석." 2005년 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 한국수자원학회.
- 김연희, 구혜정, 남재철 (2005). "서울지역 강우 특성 분석을 통한 도시화 영향 평가." 서울도시연구, 제6권, 제2호, pp. 165-183.
- 오태석, 안재현, 문영일, 정민수 (2005). "도시화가 도시 지역 강우변화에 미치는 영향 연구." 2005년 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 한국수자원학회.
- Alkaeed, O., Flores, C., Jinno, K. and Tsutsumi, A. (2006). "Comparison of several reference evapotranspiration methods for Itoshima peninsula area, Fukuoka, Japan." *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu Uni.*, Vol. 66, No. 1, pp. 1-14.
- Allen, R.G., Peretira, L.S., Raes, D. and Smith, M. (1998). "Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements." *FAO irrigation and drainage paper 56*, FAO, ISBN 92-5-104219-5.
- 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.
- Ernesto, J. and Ernesto, R. (1996). "Urban effects on convective precipitation in Mexico City." *Atmospheric Environment*, Vol. 30, No. 20, pp. 3383-3389.
- Furau, M.J., Wagner, D.G. and Podmore, T.H. (2004). "Using remotely sensed imagery and GIS for urban evapotranspiration studies." *Applied Engineering in Agriculture*, Vol. 21, No. 3, pp.

- 347-355.
- Goldreich, Y. (1995). "Urban climate studies in Israel-A review." *Atmospheric Environment*, Vol. 29, No. 4, pp. 467-478.
- Gong, L., Xu, C.Y., Chen, D., Halldin, S. and Chen, Y.D. (2006). "Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin." *J. of Hydrology*, Vol. 320, pp. 620-629.
- Lu, J., Sun, G., McNulty, S.G. and Amatya, D.M. (2005). "A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the Southeastern United States." *J. of the American Water Resources Association*, Vol. 41, No. 3, pp. 621-633.
- Stulov, E.A. (1993). "Urban effects on summer precipitation in Moscow." *Russian Meteorology and Hydrology*, Vol. 11, pp. 34-41.
- Xu, C.Y., Gong, L., Jiang, T., Chen, D. and Singh, V.P. (2006). "Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment." *J. of Hydrology*, Vol. 327, pp. 81-93.
- Zhang, L., Dawes, W.R. and Walker, G.R. (2001). "Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale." *Water Resources Research*, Vol. 37, No. 3, pp. 701-708.

(논문번호:07-32/접수:2007.04.04/심사완료:2007.07.16)