

제주도 토지이용변화에 따른 직접유출량 변화 추정

하규철^{1*} · 박원배² · 문덕철³

¹한국지질자원연구원, ²제주발전연구원, ³제주특별자치도 환경자원연구원

Estimation of Direct Runoff Variation According to Land Use Changes in Jeju Island

Kyoochul Ha^{1*}, Won-bae Park² and Deokcheol Moon³

¹Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²Jeju Development Institute

³Institute of Environmental Resources Research, Jeju Special Self-Governing Province

SCS method was applied to make the assessments of direct runoff according to land use changes in Jeju island. Land uses were obtained from 5 year-period remote sensing time series data from 1975 to 2000 which are provided by Water Management Information System (WAMIS). Hydrologic soil groups were categorized based on soil series of National Academy of Agricultural Sciences (NAAS), and permeable geologic structures such as Sumgol, Gotzawal and so on. The land uses of Jeju island are obviously characterized by urban-agricultural areas increases, and forest areas decrease. According to land use changes, curve number (CN) for Jeju island was consistently increased from 65.3 in 1975 to 69.6 in 2000. From 1975 to 2000, the amount of direct runoff and ratios increased due to CN changes. When the rainfall data in 1995 was applied to each year, the direct runoff amounts were 299.0~351.6 mm, and runoff ratios were 15.1~17.7%. In the case of the application of the rainfall data in 2000, the direct runoff amounts were 136.9~161.5 mm, and runoff ratios were 9.7~11.5%. Since direct runoff can be closely related to groundwater recharge and sustainable groundwater yield, the groundwater influence caused by land use changes or district exploitations should be considered for the reasonable water management and development in Jeju island.

Key words : land use, direct runoff, SCS method, Jeju island

제주도의 토지이용 변화에 대한 직접유출량의 변화를 알아보기 위하여 SCS 방법에 의한 직접유출량을 산정하였다. 토지이용자료는 국토해양부에서 운영하는 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 1975년부터 2000년까지 5년 주기의 위성 영상으로부터 추출 분류된 자료들을 이용하였으며, 토양도, 투수성 지질구조 분포를 토대로 수문학적 토양군을 분류하였다. 제주도의 1975년부터 2000년까지 토지이용은 도시화 및 지역 개발 등에 의한 산림지역의 감소와 시가지 지역과 농지 증가가 뚜렷하게 나타나고 있다. 그에 따라 제주도의 평균 유출곡선지수는 1975년에 65.3이었던 것이 2000년에는 69.6으로 지속적으로 증가되었다. 유출곡선지수의 증가로 인하여, 연간 직접유출량은 1995년도의 강우량을 적용 했을 때 299.0 mm에서 351.6 mm로, 직접유출률은 15.1%에서 17.7%로 증가된 것으로 산정되며, 2000년도의 강우량을 적용 했을 때에는 직접유출량이 연간 136.9 mm에서 161.5 mm로, 직접유출률은 9.7%에서 11.5%로 증가된 것으로 평가되었다. 이러한 직접유출량의 변화는 지하수 함양량과 지하수 개발 가능량의 변화로 이어지기 때문에, 합리적인 물관리에 있어서 토지이용변화, 지역개발에 의한 물수지 변화 등을 면밀하게 검토할 필요가 있다.

주요어 : 토지이용, 직접유출량, SCS 방법, 제주도

*Corresponding author: hasife@kigam.re.kr

1. 서 론

강우가 발생하게 되면, 초기강우의 대부분은 초목이나 건물 등에 의하여 차단(interception) 되고, 지면에 도달한 강우부분은 지하로 침투한다. 강우가 지속되어 침투로 인하여 표토층이 포화상태에 달하고, 침투능을 초과하는 부분은 지표면을 따라 직접 유출된다. 직접유출량은 침투율과 토양의 초기 함수량에 따라 크게 달라지며, 동일한 강수량이 발생하더라도, 선행강수 등에 의한 토양의 함수량이 커지게 되면 건조한 상태의 토양보다 침투량은 적어지고 반대로 직접유출은 많이 발생하게 된다(Sunu, 1996; Yoon, 1998). 직접유출량에 영향을 미치는 요인으로는 강우의 형태, 강우강도, 강우의 지속시간 등 기상학적 요인과 유역의 크기, 지형, 형상, 지질, 토양, 토지이용 등 유역 요인이 있다. 이들 요인들 중 토양과 토지이용은 직접유출량에 영향을 미치는 가장 중요한 요소이다(Ward and Elliot, 2004).

직접유출량 산정은 지역별 수자원 개발과 관리에 사용되며, 물수지를 계산하는 데 있어서 필수적인 요소이다. 지역개발 및 도시화에 의하여 산림지가 거주지 또는 농경지로 변하면서 지표면의 수문학적 특성이 변화하게 되고, 이에 따라 직접유출량은 달라진다. 즉, 식생이 거의 없는 노출된 지표면에서는 수목이 무성한 산림지역보다 유출이 더 많이 발생한다. 이는 식생이 발달한 곳은 토양구조가 발달하여 침투가 용이하게 되므로 토양수분이 소실되며, 따라서 직접유출량이 줄어든다(Ward and Elliot, 2004).

직접유출량을 산정하는 방법에는 ϕ 지표법(Goel *et al.*, 2000), W 지표법(Linsley *et al.*, 1949), SCS(Soil Conservation Service) 방법 등이 있다. 이번 연구에서는 SCS 방법을 이용하여 제주도 전역을 대상으로 직접유출량을 산정하였다. SCS 방법은 하천유출량이 측정되지 않은 유역의 유출량 산정에 이용되며, 토양의 종류, 토지이용 및 식생피복상태 등의 자료를 이용하여 간접적으로 직접유출량을 산정할 수 있다(Morel-Seytoux and Verdin, 1981).

Choi and Ahn(1998)는 지역단위 지하수함양량을 산정하기 위해, SCS-CN방법에 의한 강우의 침투량을 구하는 방법을 사용한 바 있으며, Park *et al.*(1999)은 지하수 함양량 추정을 위해 물수지분석법, SCS-CN 방법, 지하수위강하곡선법 및 유출수문곡선법을 사용하여 서로 비교하였다. 이밖에도 SCS 방법을 활용한 국내 연구들은 이전부터 많이 수행되어 왔다(Kim *et al.*, 2007; An *et al.*, 2006; An *et al.*, 2008; Chang and Jung,

2004). 국외의 경우에 있어서, Oki(2002)는 제주도와 여건이 비슷한 하와이에서 직접유출량을 구하기 위해 SCS-CN방법을 적용하였다.

이와 같이 직접유출량의 산정에 있어서 과거에서 현재에 이르기까지 가장 많이 사용되고 있는 방법이 SCS 방법 (또는, SCS-CN방법, 유출곡선지수방법)이지만, 물리적인 과정들이 생략되어 있으므로 다소 비현실적이라는 비판을 받고 있지만, SCS 방법은 토지이용이 직접유출량 산정에 있어서 중요한 변수가 되기 때문에 지표환경변화와 직접유출량간의 관계성을 상호 비교분석하는데 있어서 유용한 방법이라고 판단되어 이를 차용하였다.

2. 연구방법

2.1. 이론

SCS 방법에 의한 직접유출량을 산정하는 방법은 수문학 관련 서적과 그밖에 많은 논문들을 통하여 소개되고 있고(Sunu, 1996; Yoon, 1998; An *et al.*, 2008; Choi and Ahn, 1998; Lee and Bae, 2004; Bae and Kim, 2006), 이를 다시 정리하면 다음과 같다.

SCS 방법에 의한 직접유출량을 산정하는 것은 토양내 침투량과 토양의 최대가능함수량과의 비는 직접유출량과 누적강수량의 비와 같다는 가정에 근거하고 있다.

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P} \quad (1)$$

여기서, F는 시간(t)에 따른 토양내 침투량(mm), S는 토양의 최대 가능 함수량(mm), Q는 직접유출량(mm), P는 누적강수량(mm)이다. 직접유출량 Q는 S와 F의 합수로 표현될 수 있다. 그리고 F는 직접유출량과 강수량의 차이로서 $F=P-Q$ 와 같다. 따라서 $F=P-Q$ 를(1)식에 대입하고, Q에 대하여 재정리하면 아래 식과 같다.

$$Q = \frac{P^2}{P+S} \quad (2)$$

(2) 식은 강우 발생 즉시 직접유출이 일어남을 의미하기 때문에, 초기의 지하 침투량을 고려하여야 하며, 이러한 초기 손실(I_a)은 경험식(Ponce and Hawkins, 1996)에 의하면 $I_a=0.2S$ 이며, 이 관계식을 (2)식에 대입하게 되면,

$$Q = \frac{(P-I_a)^2}{(P-I_a)+S} \quad (3)$$

과 같이 된다. 여기서 Q는 0보다 크고, P는 I_a보다 커야 한다. P가 I_a보다 작을 경우에는 직접유출량 Q는 0이 된다. 초기손실량 I_a는 최대가능함수량 S의 함수이며, 따라서 주어진 강우량에 대하여 직접유출량인 Q를 구하기 위해서는 S값이 제시되어야만 한다. 이를 위해 미국 토양보전국(Soil Conservation Service)은 토양종류, 식생피복 및 토지 이용도, 선행 토양함수조건(antecedent soil moisture condition, AMC)에 의해서 결정되는 무차원 수인 유출곡선지수(runoff curve number, CN)를 개발하여, 다음과 같이 최대가능함수량과의 관계식을 도출하였다.

$$S = \frac{25,400}{CN} - 254 \quad (4)$$

CN은 1에서 100의 범위를 갖고 있으며, 강우의 손실부분은 유역이 수용할 수 있는 최대잠재보유수량 S는 유출곡선지수에 반비례한다. CN=100인 경우, 손실은 불가능하고 유출은 총강우량과 같게 된다. 따라서,

CN과 총강우량이 주어지게 되면, (3)식과 (4)식을 이용하여 직접유출량, Q를 구할 수 있게 된다.

SCS에서 제시하고 있는 CN 표는 A, B, C, D의 4개 수문학적 토양군(hydrologic soil group)과 토지이용에 따라서 분류되어 있다(McCuen, 1982). 수문학적 토양군에서 A는 실트가 거의 없고 모래와 자갈로 구성되어 지하 침투율이 높고 직접유출률이 상대적으로 낮은 토양이고, D는 실트가 많이 포함된 불투수성 토양으로 직접유출률이 높은 토양이다. 토지이용은 도시지역, 농경지, 도로, 산림, 초목 등 다양한 항목으로 분류되어져 있다. 따라서, 수문학적 토양군과 지면피복상태를 나타내는 토지이용을 알면 이에 대한 유출곡선지수인 CN값을 SCS에서 제시하는 표로부터 찾아서 적용할 수 있다.

또한, SCS에서 제시하고 있는 CN표는 토양의 수분상태가 건조하거나 습하지 않은 중간인 상태에서의 CN값을 제시하고 있으므로, 이전 강우사상을 고려할 수 있도록 CN값을 조정하여야 한다. SCS에서는 5일

Table 1. AMC based on accumulated five-day antecedent rainfall(P₅) during dormant and growing seasons (Aller *et al.*, 1987)

*AMC	P ₅ (mm)		Water content condition of AMC
	Dormant season	Growing season	
I	P ₅ <12.7	P ₅ <35.56	Highly dried
II	12.7<P ₅ <28.0	35.56<P ₅ <53.34	Moderate
III	P ₅ >28.0	P ₅ >53.34	Highly saturated

*AMC: Antecedent Soil Moisture Condition

Table 2. Hydrologic soil group in Jeju island

Type	Soil Characteristics	Soil series	Permeable geological features
A	High infiltration capacities, even when thoroughly wetted. Chiefly sands and gravels, deep and well drained	AaD, DIC, KnC, GvB, KbF, KjD, RB, RB, RB, JuB, MfF, MbE, OgC, SMF, SLC, WiD, HtB	Sumgol, lava tube
B	Soils with moderate infiltration rates when thoroughly wetted. Moderately deep to deep, moderately well to well drained, with moderately fine to moderately coarse textures	Bv, GM, KjDPL, Ho, JED, JkD, NmE, NmE, NjD, NmE, PL, Sd, SuD, SQE, WiD, YqB, rock area, lavas	Gotzawal, scoria, Oreum
C	Soils with slow infiltration rates when thoroughly wetted. Usually have a layer that impedes vertical drainage, or have a moderately fine to fine texture.	AhC, DsE4, DsE4, Gef3, Gef3, IaC, InB, JrD, JiD, JkD, My, NrF2, OdF2, PiC, SRF3, TpC, TnE, OaF2, PoD, BRC,	
D	Soils with very slow infiltration rates when thoroughly wetted. Chiefly clays with a high swelling potential; soils with a high permanent water table; soils with a clay layer at or near the surface; shallow soils over nearly impervious materials.	DmB, GRC, HtB, HvC, IaC, My, YjD, WiD, YEF2, YjD, YqB	

선형 강수량(P_5)의 규모에 따라 초기수분상태를 AMC-I, AMC-II, AMC-III로 분류하고 있다. AMC-I에서는 5일 선형 강수량이 적으므로 지하로의 침투량이 많아져 유출량은 적어지며, 반대로 AMC-III에서는 침투량이 적어지고 유출량은 커지게 된다(Aller *et al.*, 1987). AMC-I과 AMC-III일 경우에는 AMC-II에 해당하는 CN(II) 값을 이용하여 다음 식(5)와 (6)에 의하여 각각 CN(I)과 CN(III)로 환산하게 된다. 또한, AMC를 적용함에 있어 성수기(growing season)와 비성수기(dormant season)로 구분하여 초기 수분상태를 나타내고 있다(Table 1).

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)} \quad (5)$$

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0.13CN(II)} \quad (6)$$

따라서, 토지이용자료와 토양종류에 따라서 CN값이 정하여 지게 되면 식(3)과 (4)를 이용하여 일별 직접유출량을 계산할 수 있게 된다.

2.2. 토양 및 토지이용 자료

이번 연구에서는 제주도의 수문학적 토양군을 Table 2에서와 같이 국립농업과학원에서 제공하는 토양도(1:25,000)의 66종의 토양통과 투수성 지질구조인 습골, 용암동굴, 꽃자왈 지역과 오름 및 스코리아 분포지를 고려하여 분류하였다(Jeju Special Self-Governing Province and Korea Water Resources Corporation, 2003). 투수성 지질구조를 1차적으로 고려하고, 그 후에 남은 나머지 영역은 Jung *et al.*(2006)에 의하여 분류된 토양통에 의하여 A, B, C, D로 분류하였다(Fig. 1).

토지이용은 국토해양부에서 운영하는 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 1975년부터 2000년까지 5년 주기의 위성 영상으로부터 추출 분류된 자료들을 이용하였다. WAMIS에서 제공되는 자료는 Landsat 위성 영상을 이용하여 피복 분류된 자료들이다. 1975년과 1980년에는 MSS센서로부터 공간해상도는 60m×60m이며, 1985년, 1990년, 1995년에는 TM센서, 2000년에는 ETM 센서로 부터 30m×30m의 해상도를 가지고 있다. 토지피복 분류를 보면, 1975년과 1980년도에는 수역, 나지, 산림, 농경지, 시가화, 습지, 초지 등 7개의 토지피복으로 분류되고 있으며, 1985년 이후로는 농경지대신 논과, 밭으로 구분되어 총 8종으로 분류되고 있다(<http://www.wamis.go.kr>). 따라서, 통일성을 가하기 위해 수역(water), 나지(bare soil), 산

림(forest), 논과 밭을 포함한 농경지(agricultural area), 시가화(urban area), 습지(wetland), 초지(grass and pasture area)의 7개의 토지피복을 토지이용으로 정하여 분석을 수행하였다.

지역별, 표고에 따른 토지이용변화, 유출곡선지수를 비교하기 위해 제주도 전역을 북부, 남부, 동부, 서부로 나누었고, 또한 표고에 따라 저지대는 해발고도 0m에서 200m까지의 구간을, 중간간 지대는 해발고도 200m에서 600m, 고산지대는 600m이상 지역으로 3개 지역으로 구분하였다(Fig. 2).

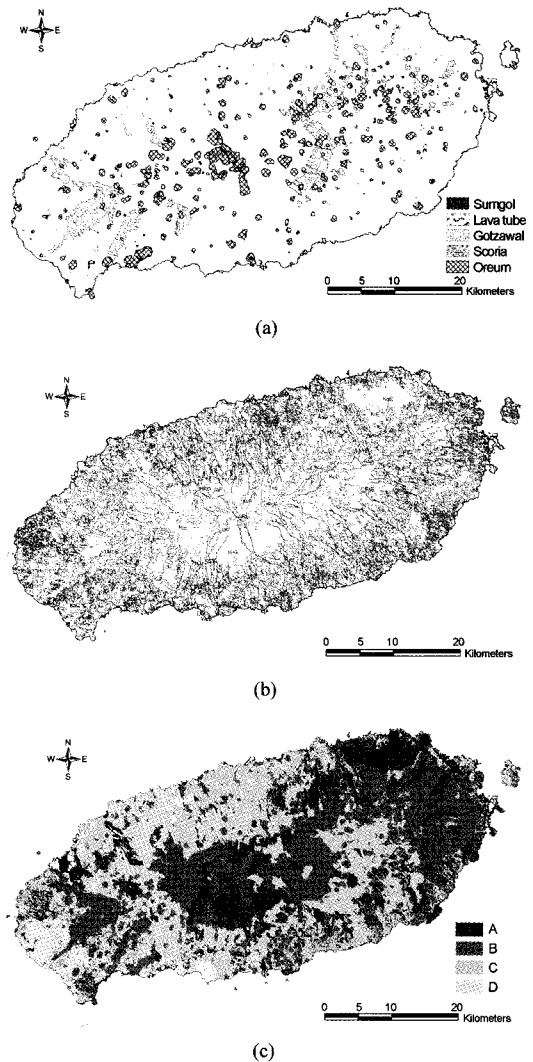


Fig. 1. Soil classification for the application of SCS method, (a) permeable geologic structures, (b) soil series, and (c) hydrologic soil group.

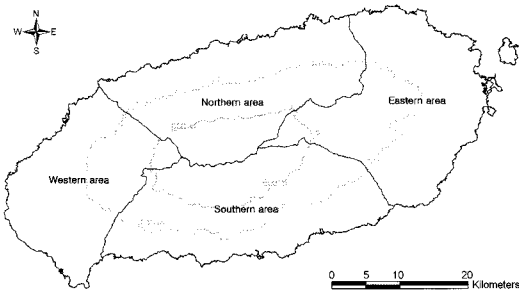


Fig. 2. Regional classification of Jeju island.

3. 결 과

3.1. 토지이용 변화

Fig. 3은 1975년부터 2000년까지 5년 주기의 토지

이용분포를 나타낸 그림이다. 제주도의 1975년부터 2000년까지 토지이용은 도시화 및 지역 개발 등에 의한 산림지역의 감소와 시가화 지역과 농지 증가가 뚜렷하게 나타나고 있다. Table 3은 토지이용으로 분류된 지역의 면적을 산정한 표이고, 이들에 대한 변화는 Fig. 4의 원형도표에 잘 나타나 있다. 전반적으로 산림지역이 크게 감소하고 있고, 그에 반해 시가화 지역과 농경지는 증가하고 있는 모습이 잘 나타난다.

지역별로 이들 토지이용 변화를 살펴보면, 시가화 지역의 증가하는 추세는 제주도 북부지역에서 가장 크게 나타났다. 그러나, 1995년과 2000년도를 비교해보면 동부지역의 시가화 지역의 증가폭이 가장 큰 것을 알 수 있다. 농경지 면적은 모든 지역에서 1975년도에서 1980년을 지나면서 다소 줄어들었지만, 그 이후부터는 지속적으로 증가하였다. 농경지 면적 증가폭은 시가화

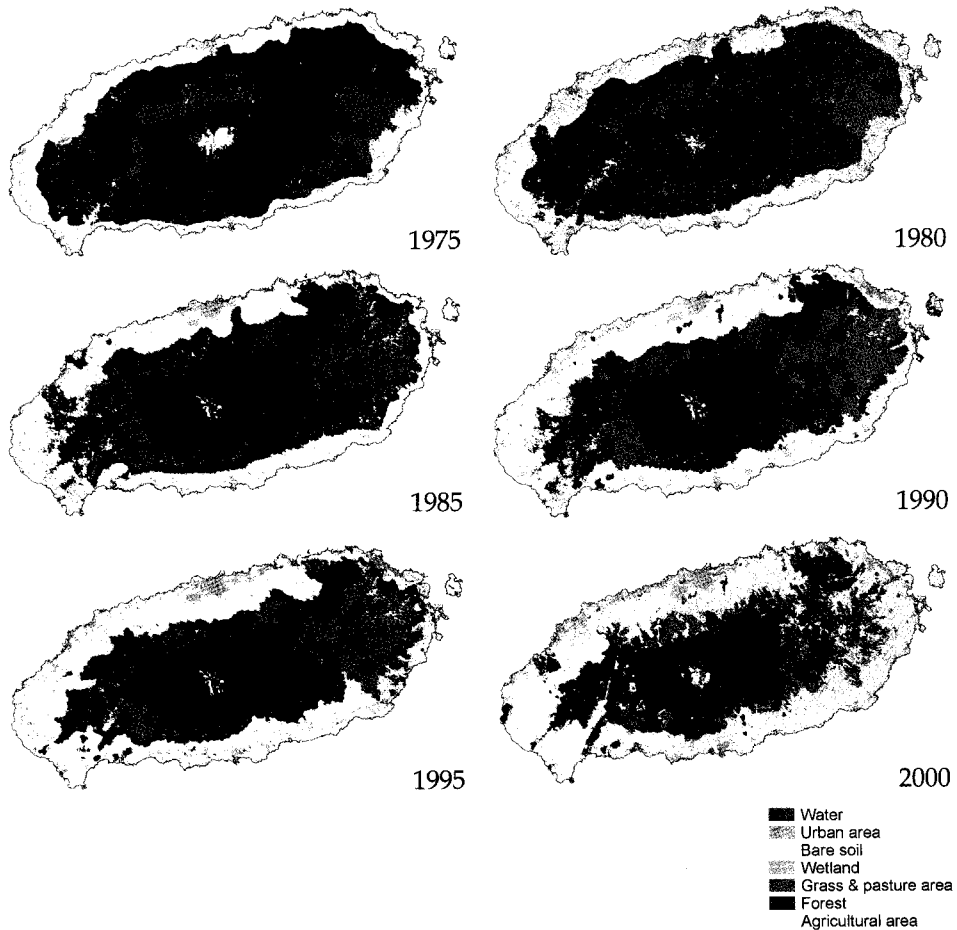


Fig. 3. Land use changes with time in Jeju island.

Table 3. Land use changes with time in Jeju island(unit: km²)

(a) Land use changes in each region of Jeju island

Land use	Year	Eastern	Western	Southern	Northern	Sum
Water	1975	3.14	0.87	0.68	1.52	6.21
	1980	3.15	1.84	0.59	2.69	8.27
	1985	1.78	1.93	1.99	1.74	7.44
	1990	1.56	1.07	1.80	0.52	4.95
	1995	2.67	0.31	0.16	0.74	3.88
	2000	2.74	0.38	0.22	0.71	4.05
Urban area	1975	3.93	8.21	1.39	3.95	17.49
	1980	9.45	10.89	6.73	16.08	43.15
	1985	7.80	17.38	6.83	23.99	56.01
	1990	17.48	19.65	21.32	28.44	86.89
	1995	20.96	21.09	19.70	35.59	97.34
	2000	43.28	30.14	32.06	52.52	158.00
Bare soil	1975	1.40	1.91	5.98	8.32	17.61
	1980	3.07	4.45	0.31	0.51	8.33
	1985	4.76	3.49	4.60	2.26	15.11
	1990	5.36	3.82	4.29	2.05	15.52
	1995	4.25	2.60	4.44	2.02	13.31
	2000	7.04	1.54	1.82	1.42	11.82
Wetland	1975	0.09	0.09	0.01	0.07	0.27
	1980	0.63	0.07	0.30	0.19	1.19
	1985	0.76	0.71	0.52	0.46	2.46
	1990	0.00	0.04	0.01	0.04	0.09
	1995	0.19	0.23	0.06	0.16	0.63
	2000	0.30	0.19	0.01	0.33	0.84
Grass & pasture area	1975	91.87	7.60	35.26	58.34	193.07
	1980	100.45	38.18	22.53	53.85	215.01
	1985	110.27	26.65	20.83	39.59	197.34
	1990	123.78	26.62	33.51	41.82	225.73
	1995	125.46	19.18	30.02	43.90	218.56
	2000	64.27	21.28	56.82	65.45	207.83
Forest	1975	297.88	219.26	396.36	305.28	1218.78
	1980	291.47	198.58	376.70	298.62	1165.37
	1985	262.10	159.14	327.61	251.68	1000.53
	1990	245.52	145.49	303.76	224.19	918.96
	1995	230.66	135.90	293.11	214.57	874.24
	2000	200.89	122.05	262.66	179.10	764.71
Agricultural area	1975	105.89	141.70	58.23	92.97	398.79
	1980	92.24	127.36	91.92	99.38	410.90
	1985	115.58	172.45	131.81	153.49	573.33
	1990	112.43	181.54	132.45	173.66	600.08
	1995	123.48	198.34	148.20	174.27	644.29
	2000	187.88	200.58	143.72	172.79	704.97

지역과 마찬가지로 1995년에서 2000년 기간 동안 동부지역에서 가장 크게 나타났다. 산림지역의 면적은 모든 지역에서 꾸준히 감소하는 추세가 계속 되고 있다.

그밖에 수역, 나지, 습지, 초지의 면적은 그리 큰 변화를 보이지 않는다.

표고별 토지이용 추세를 살펴보면, 시가지 지역의 증

Table 3. Continued

(b) Land uses to various elevated regions

Land use	Year	0~200 m	200~600 m	600 m~	Sum
Water	1975	4.24	0.04	0.07	6.21
	1980	5.58	0.01	0.01	8.27
	1985	4.74	0.01	0.01	7.44
	1990	2.61	0.01	0.01	4.95
	1995	2.13	0.01	0.01	3.88
	2000	1.69	0.02	0.00	4.05
Urban area	1975	18.88	0.01	0.00	17.49
	1980	42.79	0.28	0.00	43.15
	1985	43.01	0.18	0.03	56.01
	1990	82.86	0.21	0.02	86.89
	1995	90.43	0.18	0.03	97.34
	2000	137.21	13.29	0.44	158.00
Bare soil	1975	3.63	1.42	14.96	17.61
	1980	6.50	0.75	0.36	8.33
	1985	5.07	5.80	3.17	15.11
	1990	6.06	5.96	3.25	15.52
	1995	3.00	5.95	3.30	13.31
	2000	9.54	1.33	0.25	11.82
Wetland	1975	0.13	0.02	0.00	0.27
	1980	0.80	0.19	0.01	1.19
	1985	2.02	0.04	0.00	2.46
	1990	0.02	0.01	0.00	0.09
	1995	0.39	0.00	0.00	0.63
	2000	0.67	0.00	0.00	0.84
Grass & pasture area	1975	93.55	85.27	20.10	193.07
	1980	159.46	68.97	5.35	215.01
	1985	93.11	99.38	3.72	197.34
	1990	103.90	112.16	5.06	225.73
	1995	98.49	110.56	2.68	218.56
	2000	93.86	97.55	5.35	207.83
Forest	1975	503.95	501.63	207.59	1218.78
	1980	425.80	509.11	232.17	1165.37
	1985	345.75	442.61	236.02	1000.53
	1990	271.37	420.21	233.51	918.96
	1995	231.41	417.47	235.83	874.24
	2000	167.42	374.61	228.98	764.71
Agricultural area	1975	385.52	9.70	1.49	398.79
	1980	368.13	19.38	6.56	410.90
	1985	515.59	50.51	1.44	573.33
	1990	542.64	59.87	2.49	600.08
	1995	583.48	64.33	2.54	644.29
	2000	598.94	111.71	9.36	704.97

가추세는 해발고도 200m 이내의 저지대에서 대부분 이루어지고 있고, 1975년에 비하여 2000년에 시가화 지역이 6배 이상 늘어난 것을 알 수 있다. 200~600 m

의 중산간에서 시가화 지역의 증가는 1995년과 2000년 사이에 급한 기울기를 보인다. 농경지 면적은 대부분 해발고도 200 m이내의 지역에 분포하고 있으며 꾸

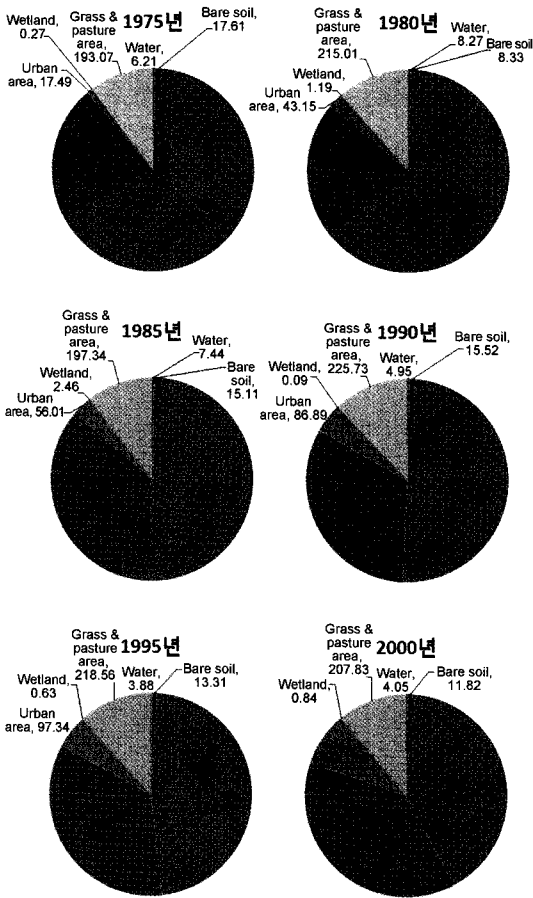


Fig. 4. Pi diagram showing land use changes in Jeju island.

준한 증가세를 나타내고 있다. 200~600 m의 중산간지역의 농경지 면적의 증가도 저지대와 마찬가지로 지속적으로, 1995년과 2000년 사이의 증가율은 저지대의 증가율을 능가하고 있다. 산림지역의 감소는 저지대와 중산간의 두 지역에서 모두 나타나고, 특히 저지대의 산림지역의 감소는 약 3배정도로 매우 컸다.

제주도 전역에 대하여 가장 변화가 심한 시가지 지역, 농경지, 산림지역의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 산림지역의 연간 감소속도는 18.43 km²/yr이고, 시가지 지역의 연간 증가속도는 5.12 km², 농경지의 연간 증가속도는 12.90 km²/yr으로 추세를 그을 수 있는데, 줄어드는 산림지를 시가지 지역과 농경지가 대부분 차지하면서 상쇄하는 것을 알 수 있다.

3.2. 유출곡선 지수

Table 4는 WAMIS에서 분류한 토지이용과 수문학적

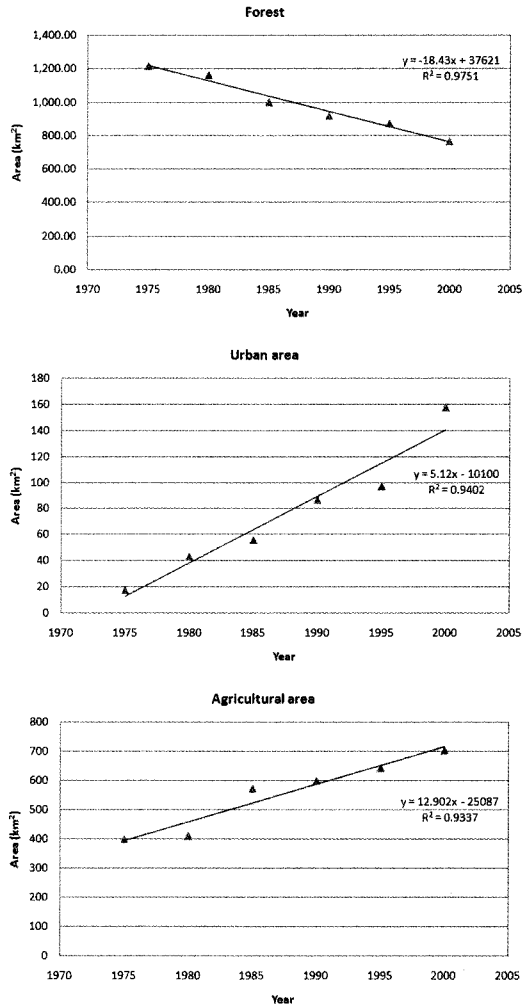


Fig. 5. The trend for the forest, agricultural and urban area.

토양군에 따른 유출곡선지수를 나타낸 것이다(Sunu, 1996; Jeju Special Self-Governing Province and Korea Water Resources Corporation, 2003). 토양종이나 지질 등은 토지이용과 같은 항목과 상대적으로 시간에 따라 변하지 않기 때문에, 수문학적 토양군은 시간에 따라 변하지 않는다는 가정을 하였다. 또한, 토지이용분류에서 1985년 이후의 논과 밭으로 구분된 토지피복은 모두 농경지로 통일하였다. 이렇게 하여 도출된 1975년부터 2000년까지의 유출곡선지수의 분포를 Fig. 6에 나타내었다. 도시화 및 지역 개발 등에 의한 산림지역의 감소와 시가지 지역과 농지 증가에 따라 제주도의 평균 유출곡선지수는 1975년에 65.3이었던 것이 2000년에는 69.6으로 증가된 것으로 산정된다.

Table 4. Curve numbers (CN) for land uses

Land use	Hydrologic soil group				Comment
	A	B	C	D	
Water	98	98	98	98	Streams
Urban area	89	92	94	95	Urban, commercial areas, and roads
Bare soil	49	69	79	84	Bare and open spaces
Wetland	98	98	98	98	Reservoirs
Grass & pasture area	49	69	79	84	Grass and pasture areas
Forest	36	60	73	79	Woodlands, mountainous areas
Agricultural area	65	76	84	88	Dense cultivated land (upland area included)

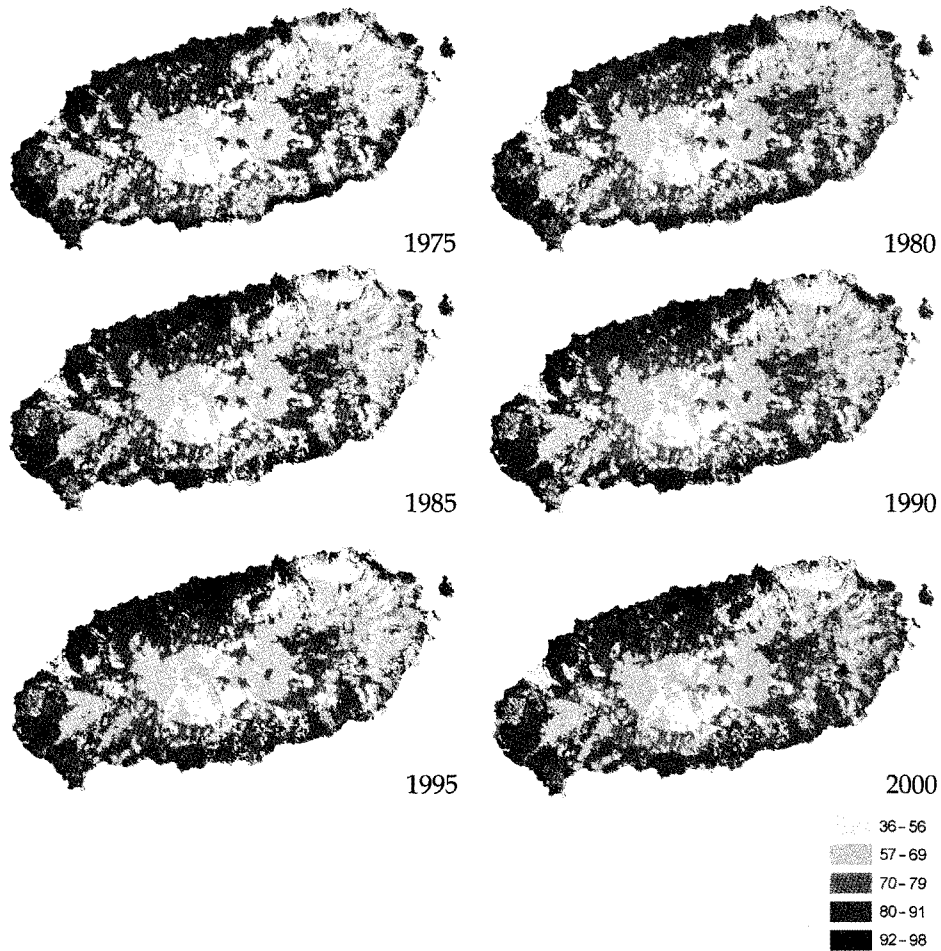
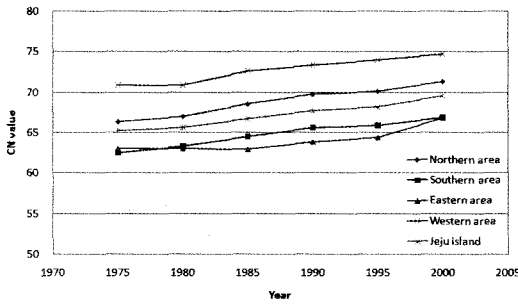


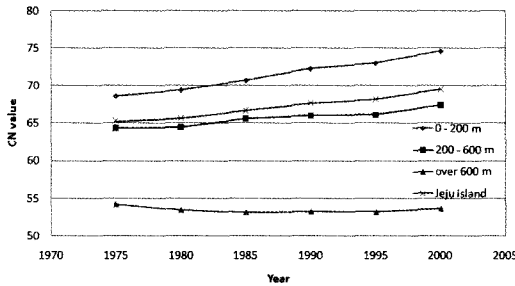
Fig. 6. Spatial CN distribution in Jeju island.

Fig. 7은 지역별로 시기에 따라 CN값의 변동을 나타낸 그림이다. CN값은 1975년부터 2000년까지 서부

지역이 70.8~74.8, 북부지역이 66.4~71.3, 남부지역이 62.5~66.9, 동부지역이 62.5~66.9로 전반적으로 꾸준



(b)



(c)

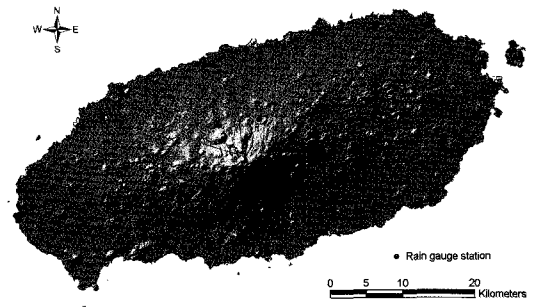
Fig. 7. Average CN variation with time (b) on each area, and (c) low to high area.

히 증가하는 것으로 산정이 되었다. 제주도 전체와 비교했을 때 서부와 북부지역의 유출곡선지수가 높게 분포하고 있다. 증가율은 북부와 남부지역이 제주도 전체지역보다 상회하고 있으며, 동부와 서부지역은 상대적으로 낮게 나타났다.

표고별 유출곡선지수를 보면, 0에서 200 m 고도 이내의 저지대에서 68.6~74.6의 분포로 시간이 지남에 따라 지속적으로 증가하면서 가장 큰 값을 나타내었다. 200에서 600 m의 중산간 지대는 64.4~67.5로 저지대 보다는 낮은 유출곡선지수를 나타내었으며 증가율 또한 저지대보다 낮게 나타났다. 반면 해발고도 600 m 이상의 고산지대는 1975년부터 2000년까지의 유출곡선지수가 54.2~53.2로 거의 변화가 없었다. 고지대는 한라산 국립공원으로 지정이 되어 있으므로 지역개발과 같은 인위적인 토지이용의 변화가 적기 때문에 이와 같은 결과가 나타난 것으로 판단된다.

3.3. 직접유출량 변화

1975년부터 2000년까지의 제주도의 전반적인 유출곡선지수는 증가하는 것으로 분석이 되었으며, 유출곡선의 증가는 직접 직접유출량증가로 이어질 것으로 예상이 된다. 구하여진 유출곡선지수를 이용하여 식 (3)~(6)



(a)



(b)



(c)

Fig. 8. Spatial rainfall distribution in Jeju island, (a) rain gauge stations and Thiessen rainfall distribution for the areal precipitation estimation, (b) annual rainfall distribution in 1995, and (c) in 2000.

를 이용하여 직접유출량을 산정할 수 있다.

토지이용에 따른 직접유출량 변화를 비교하기 위해 기준이 되는 강수량 자료는 기상청관할 기상관측소와 제주도 재난방재본부 관할 강우관측소에서 1995년과 2000년의 자료이다. 1992년 이전 강수량 자료는 중산간 지역에서 자료의 누락이나 기기 오작동에 의한 자료의 신뢰성을 확신할 수 없어서, 1995년과 2000년의 강수량자료를 분석의 기준 강수량으로 설정하였다. 그리고, 제주도 전역에 대한 면적강우량을 산정하기 위해, 이들 강우관측소들을 중심으로 티센망(Thiessen

network)을 구성하였다(Fig. 8(a)). Fig. 8(b)와 Fig. 8(c)는 각각 1995년과 2000년의 총강우량의 공간적인 분포를 나타낸 것이다. 계절적, 지형적인 요인에 의하여 제주도 남동 사면에서 가장 많은 강우량을 나타내고 있으며, 최대강우량을 보이는 지점과 최소강우량을 보이는 지점 간에는 2배 이상의 강수량 차이를 나타낸다.

Fig. 9는 티센망을 이용하여 1995년과 2000년도의 제주도 전체지역의 일별 강우량을 산정하여 나타낸 그림이다. 1995년에 비하여 2000년의 강수량이 적었고, 분포패턴도 1995년도에는 7월에, 2000년도에는 9월에 강수량이

가장 많이 분포하고 있는 것을 알 수 있다. Table 5는 1995년도와 2000년도의 강우특성을 비교한 표이다. 1995년과 2000년에 각각 총강우량은 1985.9 mm, 1408.6 mm 이고, 강우가 발생한 일수는 229일, 213일, 무강우일수는 136일, 153일로 전반적으로 2000년의 강우가 1995년보다 적게 내린 것을 알 수 있다. 또한 1 mm이상의 강우가 내린 일수도 1995년에 122일, 2000년에 111일로 전체강우량과 강우빈도가 1995년도가 큰 것을 알 수 있다. 일별 최대강우량은 1995년도에 224.6 mm이고, 2000년도에는 147.8 mm 였다. 또한 SCS 방법에 의하여 직접유출이 발생했던 일수는 1995년에 16일, 2000년에 14일로 산정이 되었다. 5일 선행강수량에 의한 성수기, 비성수기의 토양의 수분상태를 살펴보면 역시 1995년이 2000년보다 습한 상태에 있었던 기간이 길었던 것을 알 수 있다. 이와 같은 강우 분포 양상에 의해서도, 1995년의 강우사상에서 직접유출량이 2000년의 강우사상보다 많을 것으로 짐작할 수 있다.

Fig. 10은 1995년과 2000년의 강우량이 제주도 기상관측 이래 어느 정도 수준인지를 알아보기 위해 4개의 기상관측소의 년 간 강수량 분포와 고산을 제외한 제주, 서귀포, 성산포 기상관측소의 평균 강우량을 가지고 재현기간을 나타낸 그래프이다. 높은 강수량을 가지는 해를 기준으로 재현기간을 계산하여 보면 1995년의 강수량은 4.9년의 빈도를 가지고 분포하는 풍수년이었지만, 그에 비하여 2000년의 강수량은 평년보다는 다소 적은 강수량을 나타내었던 해로 판단된다.

Fig. 11과 Table 6은 1995년과 2000년의 강수량을 각각의 해당 년에 적용했을 때, 1975년부터 2000년까지

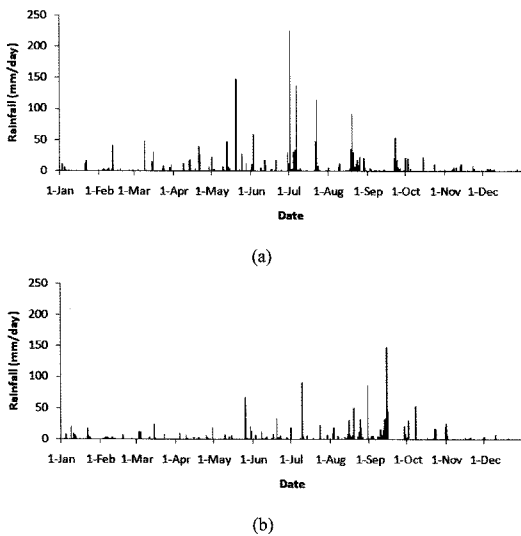


Fig. 9. Daily rainfall distribution in (a) 1995, and (b) 2000.

Table 5. Rainfall characteristics in 1995 and 2000

Rainfall characteristics		1995	2000
Total rainfall		1985.9 mm	1408.6 mm
Rainy days		229 days	213 days
Not rainy days		136 days	153 days
Rainy days more than 1mm		122 days	111 days
Maximum daily rainfall		224.6 mm	147.8 mm
Runoff occurrence (>0.2S)		16 days	14 days
AMC	Dormant	Condition I	128 days
		Condition II	25 days
		Condition III	28 days
	Growing	Condition I	130 days
		Condition II	11 days
		Condition III	43 days

지의 토지이용변화에 따른 CN값 변동에 따라 직접유출량의 변화를 나타낸 것이다. 토지이용변화에 따라 1975년부터 2000년까지 지속적으로 CN값이 증가하고, 그와 함께 직접유출량과 그 비율도 증가하는 것을 알 수 있다.

1995년의 강수량을 각 년도에 적용했을 때, 1975년도에는 직접유출량이 299.0 mm로 전체 강수량 대비 직접유출률이 15.1%로 산정되었지만, 2000년도에는 직접유출량이 351.6 mm, 직접유출률이 17.7%로 증가하였다. 1995년도의 실제 강수량을 가지고 산정된 직접유출량과 직접유출률은 333.6 mm, 16.8%였다.

2000년도의 강수량은 전체 강수량, 강우빈도 등에서

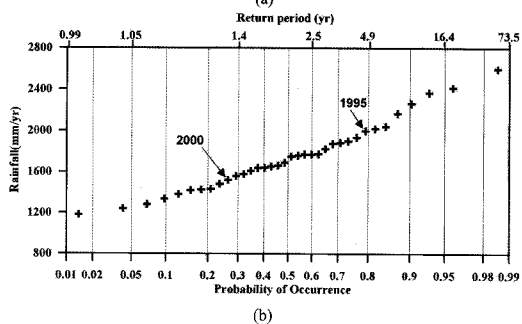
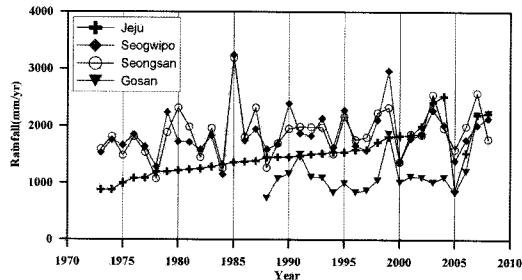


Fig. 10. Rainfall and return period in Jeju island, (a) annual rainfall trend of 4 meteorological stations, (b) return period based on high annual rainfall amount.

1995년보다는 적은 강수량과 직접유출이 발생할 가능성이 적을 것으로 예상되는 바, 이를 적용하게 되었을 때는, 1975년도에는 직접유출량이 136.9 mm, 직접유출률이 9.7%로 산정되었고, 2000년도에는 직접유출량이 161.5 mm, 직접유출률이 11.5%로 산정이 되었다. 2000년도의 실제 강수량을 가지고 산정된 직접유출량과 직접유출률은 161.5 mm, 11.5%였다.

1995년과 2000년의 강수량을 적용하여 비교한 결과, 각 년도의 토지이용에 따른 직접유출률과 직접유출량은 강우패턴에 따라 큰 차이를 나타내는 것을 알 수

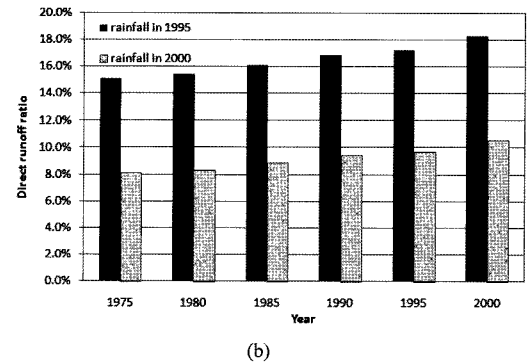
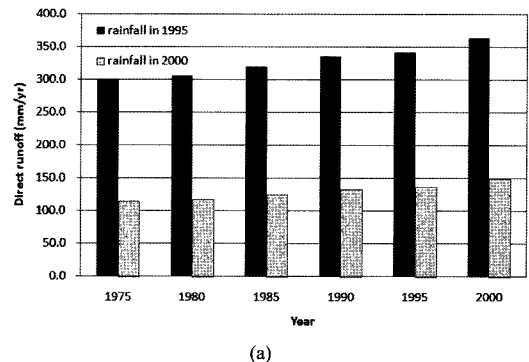


Fig. 11. Direct runoff change, (a) direct runoff amount, (b) direct runoff ratio to total annual rainfall.

Table 6. Estimations of direct runoff in each year

Year	CN	Rainfall (mm)	*DR (mm)	*DR ratio (%)	Rainfall (mm)	*DR (mm)	*DR ratio (%)
1975	65.3		299.0	15.1%		136.9	9.7%
1980	65.7		303.5	15.3%		138.9	9.9%
1985	66.7		315.9	15.9%		144.5	10.3%
1990	67.7		327.9	16.5%		150.1	10.7%
1995	68.1	1985.9	333.6	16.8%		152.1	10.8%
2000	69.6		351.6	17.7%	1408.6	161.5	11.5%

*DR: Direct runoff

있다. 즉, 직접유출량은 2000년도에 비하여 1995년도에 2배 이상 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 강우패턴에 대한 직접유출량의 변동성이 매우 크기 때문에, 강우패턴과 관련한 수자원 관리대책을 세우는 것도 중요하다고 하겠다.

4. 요약 및 결론

이번 연구에서는 제주도의 토지이용에 따른 직접유출량의 변화를 평가하기 위하여 SCS 방법을 적용하였다. 국립농업과학원의 토양도(1:25,000)에서 제시된 토양통과 투수성 지질구조인 송골, 용암동굴, 꽃자왈 지역과 오름 및 스킨리아 분포지를 고려하여 수문학적 토양군을 분류하였고, 토지이용은 국토해양부에서 운영하는 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 1975년부터 2000년까지 5년 주기의 위성 영상으로부터 추출된 피복 분류된 자료들을 이용하였다. 수역(water), 나지(bare soil), 산림(forest), 논과 밭을 포함한 농경지(agricultural area), 시가화(urban area), 습지(wetland), 초지(grass and pasture area)의 7개의 토지피복을 토지이용으로 정하여 분석을 수행하였다.

제주도의 토지이용은 도시화 및 지역 개발 등에 의한 산림지역의 감소와 시가화 지역과 농지 증가가 뚜렷하게 나타나고 있다. 지역별로 시가화 지역이 증가하는 추세는 제주도 북부지역에서 가장 크고, 산림지역의 면적은 모든 지역에서 꾸준히 감소하는 추세가 계속 되고 있다. 표고별 토지이용의 추세를 살펴보면, 시가화 지역의 증가추세는 해발고도 200 m 이내의 저지대에서 대부분 이루어지고 있고, 1975년에 비하여 2000년에 시가화 지역이 6배 이상 늘어난 것을 알 수 있다. 200~600 m의 중산간지역의 농경지 면적의 증가도 저지대와 마찬가지로 지속적이며, 1995년과 2000년 사이의 증가율은 저지대의 증가율을 능가하고 있다. 산림지역의 감소는 저지대와 중산간의 두 지역에서 모두 나타나고, 특히 저지대의 산림지역의 감소는 약 3배정도로 매우 크다.

SCS 방법을 적용할 때 핵심적인 요소인 CN값은 토지이용변화에 따라 1975년에 65.3이었던 것이 2000년에는 69.6으로 증가되었다. 제주도의 전반적인 유출곡선지수는 증가하는 바로 직접유출량증가로 이어져 1995년과 2000년의 강수량을 기준자료로 활용하여 직접유출량을 산정하였을 때, 1995년도의 강수량 적용 시에는 직접유출량과 직접유출률이 299.0 mm에서 351.6 mm, 15.1에서 17.7%로 증가된 것으로 계산되며, 2000년도

의 강수량 적용 시에는 136.9 mm에서 161.5 mm, 9.7에서 11.5%로 증가한 것으로 나타난다. 1995년도에 비하여 2000년에는 직접유출 발생일수와 강우규모, 강우빈도가 줄어들었기 때문에 직접유출량과 직접유출률이 줄어들었다.

토지이용상태가 산림지에서 시가화지역이나, 농경지로의 변화 경향은 강수가 지하로 침투할 수 있는 여지를 줄임으로써 직접유출량의 증가로 이어진다고 것이 정량적으로 평가 되었다. 여기에서는 토지이용상태 뿐만 아니라, 강우강도, 강우빈도와 같은 강우특성이 중요한 역할을 하게 된다. 년도 별로 직접유출량의 차이가 2배이상 발생할 수 있다고 하는 사실은 지하수를 거의 100% 의존하고 있는 제주도 입장에서는 지하로 침투하여 지하수로 함양되는 물의 변동성도 같이 커질 수 있다는 것과 관련지을 수 있다. 따라서, 지역별로 시기에 따라서는 지하수 장해가 발생할 여지가 있다고 할 수 있다. 양적인 측면뿐만 아니라 수질에 있어서도 토지이용이 달라졌을 때 오염원의 발생이 있을 수 있으므로 제주도 수자원 개발과 관리에 이에 대한 대안이 마련되어야 할 것이다.

직접유출량의 산정을 위해 SCS 방법의 적용에 있어서, 한계점도 묵과해서는 안 된다. SCS 방법은 토양의 피복상태와 이용상태 및 선행강수량에 따라 유출율을 결정짓는 CN 지수를 도입하여 비교적 정확한 함양량을 추정할 수 있다고는 하나 CN 지수의 결정에 있어서 미국 동부지역을 대상으로 작성된 것이기 때문에 우리나라 지형에 맞는 CN 지수를 산정해 놓을 필요가 있다(Park *et al.*, 1999). 또한 국립농업과학원에서 작성된 토양도로부터 분류된 수문학적 토양군에 대한 면밀한 검토도 있어야 할 것으로 보인다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원의 기본사업인 “지구환경변화 대응 지하수자원 확보 통합솔루션기술 개발” 사업의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J.H., Petty, R.J. and Hackett, G. (1987) DRASTIC: A standard system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings, U.S. Environmental Protection Agency, 600/2-87/035, Washington, D.C., 455p.
- An, J.-G., Lee, Y.-D. and Hwang, J.-H. (2006) Estimation

- of the spatial distribution of groundwater recharge by grid-based soil water balance method, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, v. 11, no. 1, pp. 65-76.
- An, J.-H., Hamm, S.-Y., Lee, J.-H., Kim, N.-H., Yang, D.B. and Hwang, J.G. (2008) Estimation of groundwater recharge in Junggwae-Boeun area Ulsan city using the water balance and hydrogeological analyses, *Economic and Environmental Geology*, v. 41, no. 4, p. 427-442.
- Bae, S.-K. and Kim, Y.-H. (2006) Estimation of groundwater recharge rate using the NRSC-CN and the baseflow separation methods, *Journal of Environmental Sciences*, v. 15, p. 253-260.
- Chang, E.-M. and Jung, I.-K. (2004) A study on Change of average SCS-CN value by the spatial resolution, *Korean Journal of Remote Sensing*, v. 20, no. 6, pp. 361-368.
- Choi, B.-S. and Ahn, J.-G. (1998) A study on the estimation of regional groundwater recharge ratio, *Journal of the Korean Society of Groundwater Environment*, v. 5, no. 2, p. 57-65.
- Goel, N.K., Kurothe, R.S., Mathur, B.S. and Vogel, R.M. (2000) A derived flood frequency distribution for correlated rainfall intensity and duration, *Journal of Hydrology*, v. 228, p. 56-67.
- Jeju Special Self-Governing Province and Korea Water Resources Corporation (2003) Report on hydrogeology and coordinated investigation of groundwater resources in Jeju Island, 425p.
- Jung, K.-H., Jung, S.-J., Sonn, Y.-K. and Hong, S.-Y. (2006) Classification of hydrologic soil group of Korea, *National Academy of Agricultural Science*, 29p.
- Kim, S., Lee, M., Park, G. and Kim, S. (2007) Application of QuickBird Satellite Image to Storm Runoff Modeling, *Korean Journal of Remote Sensing*, v. 23, no. 1, pp. 15-20.
- Lee, S.H. and Bae, S.K. (2004) Estimation of precipitation recharge in the Pyungchang River basin using SCS-CN method, *Journal of Environmental Sciences*, v. 13, p. 1033-1039.
- Linsley, R.K., Kohler, M.A. and Paulhus, J.L.H. (1949) *Applied hydrology*, McGraw-Hill, Inc., 639p.
- McCuen, R.H. (1982) *A guide to hydrologic analysis using SCS methods*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 110p.
- Morel-Seytoux, H.J. and Verdin, J.P. (1981) Extension of the soil conservation service rainfall-runoff methodology for ungaged watersheds, Report FHWA/RD-81/060 Offices of Research & Development Environmental Division, U.S. Federal Highway Administration, 75p.
- Oki, D.S. (2002) Reassessment of Ground-Water Recharge and Simulated Ground-Water Availability for the Hawaii Area of North Kohala, Hawaii, U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 02-4006, Honolulu, Hawaii, p. 62.
- Park, J.-S., Kim, K.-H., Jeon, M.-W. and Kim, J.-S. (1999) Estimation methods of groundwater recharge rate in small basin, *Journal of the Korean Society of Groundwater Environment*, v. 6, no. 2, p.76-86.
- Ponce, V.M. and Hawkins, R.H. (1996) Runoff curve number: has it reached maturity?, *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 1, p. 11-19.
- Sunu, J.-H. (1996) *Hydrology*, Dongmyungsa, 4th ed., 396p.
- Ward, A.D. and Elliot, W.J. (2004), *Environmental Hydrology*, Lewis Publishers, 2nd ed., 475p.
- Yoon, T.-H. (1998) *Applied Hydrology*, Cheong Moon Gak Publishers, 924p.