

ORIGINAL ARTICLE

토지이용변화에 따른 한천유역의 홍수유출 변동 분석

양세창 · 양성기^{1)*} · 이준호¹⁾ · 정우열 · 고광호¹⁾

제주특별자치도의회, ¹⁾제주대학교 토목공학과

Flood Discharge Analysis on Land Use Changes in Han Stream, Jeju Island

Se-Chang Yang, Sung-Kee Yang^{1)*}, Jun-Ho Lee¹⁾, Woo-Yul Jung, Kwang-Hyo Ko¹⁾

Jeju Special self-governing provincial council, Jeju 690-747, Korea

¹⁾Department of Civil Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

Abstract

A number of projects for development have been done continuously due to the increase of tourist in Jeju Island. However flood disaster countermeasure due to urbanization is not considered during this development projects. This study is to make basic process for the flood estimation in Han stream of Jeju Island. The variation of stream discharge due the every 5 years' land use change from 1980 to 2005. Data for flood events (rainfall and discharge) were collected for HEC-HMS model. Clark method was used for unit hydrograph analysis. For the estimation of Clark unit hydrograph parameters, Kraven II and Sabol's empirical equations were applied. The peak discharge increased 9.9~33.67% and total discharge amount increased 12.53~30.21%. Also, time of concentration for peak discharge was reduced by 10 minutes for each event.

Key words : HEC-HMS, Land use, Han stream, Clark

1. 서론

최근 도시 집중화와 개발사업의 증가로 인해 유역의 유출환경이 크게 변화하고 있다. 특히, 도시화에 따른 불투수층 토지가 크게 증가함에 따라 지표면의 이용과 형질이 변형됨으로써 지표수 흐름과 지하수 함양 및 오염 등의 문제가 심각하게 대두되고 있는 실정이다(Han과 Yang, 2009). 이러한 도시화는 생활용수량을 비롯한 각종 소비수량을 증대시키고 불투수면적의 증대, 표면 조도계수의 감소 등과 같은 수문현상의 변화를 초래하고 이에 따라 동일 강우에도 침투유량과 유출용적 증가되어

유출수문곡선의 변화로 저지대 및 하류지역에서는 도시형의 재해를 초래하기도 한다(Choi 등, 2009).

토지 피복변화에 따른 수문환경의 변화에 관한 연구는 주로 유역의 토지피복상태로 유출량을 산정하는 NRCS-CN기법을 사용하는 연구가 대부분을 이루고 있다(Kim 2008; Park, 2012). Jin(2001)은 SCS 모형으로 탄천유역의 토지이용변화를 파악하고 수문환경의 변화를 분석하여 불투수층 도심지의 증가율이 클수록 침투유량 증가 및 침투유출 도달시간은 단축되는 결과를 도출하였다. Jeong과 Lee(2003)은 대전광역시 노은 유역을 대상으로 도시화에 따른 유출현상의 변화를 분석하고 도

Received 24 February, 2015; Revised 3 April, 2015;

Accepted 6 April, 2015

*Corresponding author : Sung-Kee Yang, Department of Civil Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea
Phone: +82-64-754-3451
E-mail: skyang@jeju.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

시개발 전·후를 비교하였으며, Lee와 Bac(2004)은 기초 수문자료 및 정밀토양도, 토지피복도 등을 이용하여 SCS-CN 방법을 이용하여 소유역의 지하수함양량을 산정하였으며, 제주도의 토지이용변화에 따른 유출 연구는 Han과 Yang(2009)가 SWAT 모형을 이용하여 제주도 외도천유역에서 1975년과 2000년의 토지이용변화에 따른 유출량 변동을 분석하여 직접유출을 분석하였다. 그러나 SWAT 모형은 일단위 유출결과를 도출하기 때문에 재해적인 측면에서 도시화가 홍수유출에 미치는 영향을 분석할 수는 없으므로 단위도법을 적용할 수 있는 모형이 필요하다.

최근 들어 제주도는 관광객 증가로 인한 각종 개발사업이 지속적으로 추진되고 있으나, 사전재해영향성검토에서는 개발사업 소유역을 중심으로만 평가하고 있어 하천유역의 도시화에 따른 홍수재해 영향은 검토하지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 제주도 도심하천인 한천유역을 대상으로 국가 수자원관리 종합정보시스템(<http://www.wamis.go.kr>)과 환경부(<http://www.me.go.kr>)에서 제공하는 1980년부터 2005년까지 5년 주기의 토지피복도를 이용하여 유역 내 토지이용 변화를 분석하고 호우사상에 따른 홍수유출 변동을 분석하여 토지이용 변화가 홍수유출량 미치는 영향을 도출하고자 한다. 이러한 연구결과는 향후 제주 도심지역의 도시계획 수립, 유역종합치수계획 수립, 사전재해영향성검토 등에서 광범위하게 활용되어 홍수재해로부터 안전한 제주도를

를 구축하는데 기초적인 연구가 될 것으로 판단된다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구방법

제주도 도심하천인 한천유역의 토지이용변화에 따른 홍수유출 변동을 분석하기 위하여 국가 수자원관리 종합정보시스템과 환경부에서 제공하는 1980년부터 2005년까지 5년 주기의 토지피복자료를 구축하였다. 구축된 자료를 이용하여 제주도와 연구대상유역의 토지이용변화에 대하여 분석하였으며, 농업과학기술원에서 제공하는 토양도를 이용하여 5년 단위의 유출곡선지수(CN)을 산정하였다.

주요 호우사상에 따른 홍수유출량을 산정하기 위해 HEC-HMS 모델을 적용하고 단위도법은 Clark 방법을 이용하였으며, 단위도법 매개변수는 Jung 등(2014)의 연구에서 제시한 매개변수는 Kraven II, Sabol을 적용하였다. 5년 주기 홍수유출량 산정 결과를 이용하여 토지이용변화에 따른 침투유량 및 침투유량 도달시간 변동 등에 대하여 분석하고 토지이용 변화가 홍수유출량 미치는 영향을 도출하였다.

2.2. 연구대상 유역

연구대상유역인 제주도 북측에 위치한 한천은 한라산 EL. 1,950 m 고지에서 발원하여 용담동 해안으로 유출되며(Fig. 1), 유로연장은 11.5 km, 유역면적은 37.39 km²,

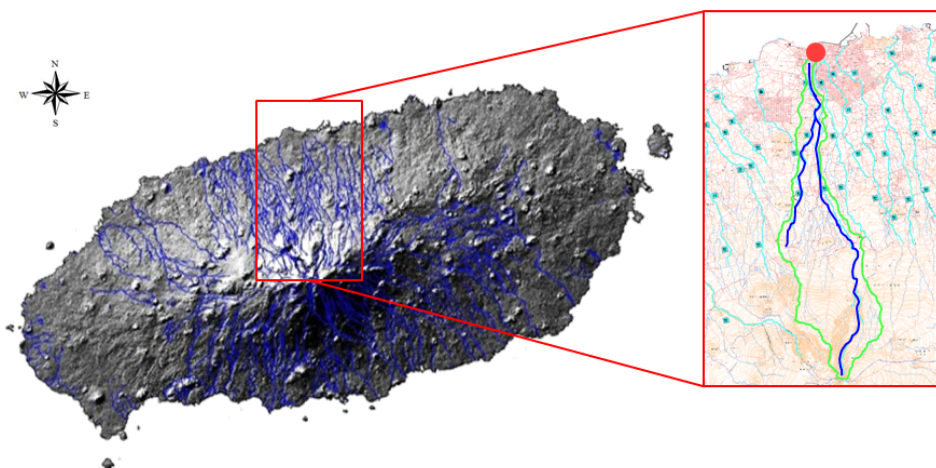


Fig. 1. Watershed for the study.

Table 1. Watershed characteristic factor

Watershed	Watershed Area (km^2)	Stream Length (km)	Average width (A/L)	Form factor (A/L^2)
Han stream	34.57	19.82	1.83	0.09

유역의 형상은 좌안으로 토천이 유입되는 것을 제외하고는, 지류가 거의 없는 수지상에 가까운 하천형태를 보이고 있다(Table 1). 하천 인근으로는 하류부에 도심지가 위치하고 있으며 일부 복개가 약 341 m 정도로 되어 도로 및 주차장으로 이용되고 있다. 또한, 하천의 유출은 수백mm이상의 호우 시에만 짧게 발생하며, 나머지 기간은 건천의 상태를 유지하고 있다.

한천유역의 토양자료를 분석하기 위하여 토양도는 농업과학기술원의 토양통 분류자료를 이용하여 분석하였다(Fig. 2). 한천유역의 토양자료를 분석한 결과 흑악토이 28.99%로 가장 많이 분포하고 있으며, 군산통, 평대통, 오라통 순으로 분포하는 것으로 나타났다. 수문학적 토양군을 분석한 결과 한천유역은 침투율이 대체로 작고, 세사질 토양층이며 배수가 대체로 불량한 C 그룹의 토양이 51.25%로 가장 많이 분포하는 것으로 나타났으며, A 그룹의 토양이 32.47%, B 그룹의 토양이 14.74%, D 그룹의 토양이 1.54%로 분석되었다.

2.3. 적응 호우사상 및 유역평균강우량

일반적으로 유역평균강우량은 유역 내 강우량 관측지점의 점 강우량 자료를 이용하여 Thiessen 다각형을 도출하고 유역평균 강우량을 산정한다. 그러나 Thiessen 다각형법은 각 관측소마다 지배면적에 가중치를 부여하여 평균 강우량을 산정하는 방법으로 제주지역과 같은 고도에 따른 강우의 영향을 많은 받는 지역에서는 정확

도가 떨어지는 단점이 있다. 따라서 제주지역과 같이 고도에 따라 강우량이 증가하는 지역에서는 등우선법을 이용하여 유역평균 강우량을 산정하여야 한다.

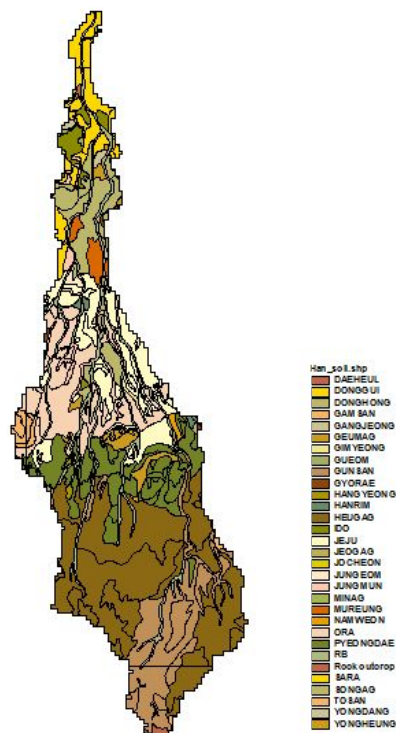


Fig. 2. Soil-map of Han stream watershed.

Table 2. Rainfall Observatory Station

The name of a observatory	AWS spot	Altitude(m)	Longitude	Latitude
Jeju	184	20	33.514	126.530
Ara	329	375	33.456	126.562
Urimok	753	965	33.393	126.495
Jindallae field	870	1,489	33.370	126.556
Witseohreum	871	1,673	33.362	126.518

Table 3. Rainfall according in observed point

(unit: mm)

Rainfall events	Jeju	Ara	Urimok	Jindalae field	Witseoruem	Note
2011.08.01 - 08.10	323.5	465.0	714.5	682.0	929.0	Typhoon “Muifa”
2011.11.17 - 11.19	125.5	128.0	181.0	419.5	346.5	Heavy rain period
2012.04.15 - 04.24	98.5	312.5	267.5	456.0	642.5	Heavy rain period

본 연구에서는 Jung(2013)이 제시한 티센다각형법의 유역평균 강우량을 등우선법으로 환산하는 식을 이용하여 한천유역의 유역평균 강우량을 산정하였으며, 사용된 강우량 관측소는 Table 2와 같다.

제주도 도심하천인 한천유역의 토지이용 변화에 따른 홍수유출 변동을 분석하기 위하여 2011년 8월 7일 태풍 “무이파”, 2011년 11월 17일 집중호우, 2012년 4월 21일 집중호우 사상을 적용하였으며, 각 호우사상별 지점 강우량을 산정하였다(Table 3).

제주도와 같이 고도에 따른 강우량의 증가경향이 나타나는 지역에서는 다양한 변화가 발생하는 현상을 반영할 수 있도록 등우선법을 이용하여 유역평균 강우량을 산정하여야 한다. Jung(2013)은 강우 사상에 따른 총 강우량의 Thiessen 방법과 등우선법의 오차는 한천의 경우 4.4 ~ 7.2%로 제시하였으며, 변환식을 도출하기 위하여 각 지점별 시간강우량을 Thiessen 방법으로 한천을 기준

으로 1.0 mm ~ 66.68 mm 값을 계산하였다. Thiessen 다각형법으로 산정된 유역평균 강우량을 Jung(2013)이 제시한 Fig. 3의 티센-등우선 변환식을 이용하여 등우선법으로 산정하였다(Table 4).

$$R_i = 0.8996R_t^{1.0174} \quad (1)$$

2011년 9호 태풍 “무이파”의 영향으로 한천유역에 599.29 mm의 유역평균 강우량이 산정되었으며, 시간최대 강우강도는 56.43 mm/hr(8월 7일 14시)로 나타났다. 2011년 11월 17일 집중호우로 인하여 205.62 mm의 유역평균 강우량이 산정되었으며, 시간최대 강우강도는 28.56 mm/hr(11월 18일 오전 8시)로 나타났다. 2012년 4월 21일 집중호우로 인하여 307.03 mm의 유역평균 강우량이 산정되었으며, 시간최대 강우강도는 33.28 mm/hr(4월 21일 오전 9시)로 나타났다.

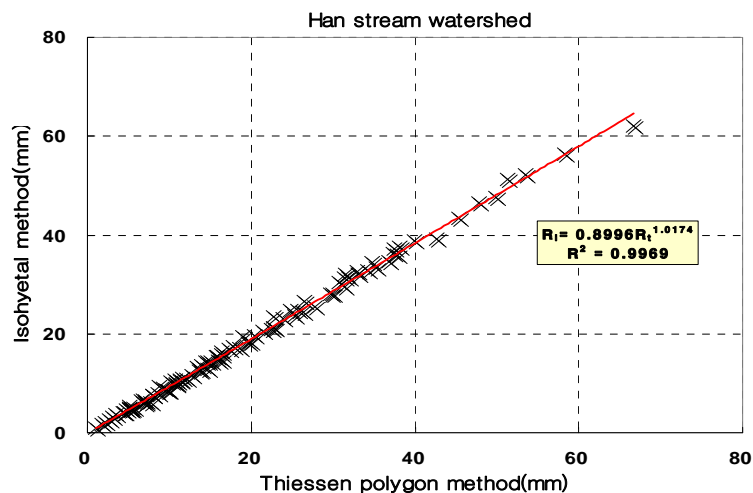
**Fig. 3.** Thiessen-isohyetal method transformation of Han Stream(Jung, 2013).

Table 4. Mean areal rainfall using isohyetal method

Rainfall events	Han stream basin(mm)	Note
2011.08.01 - 08.10	599.29	Typhoon “Muifa”
2011.11.17 - 11.19	205.62	Heavy rain period
2012.04.15 - 04.24	307.03	Heavy rain period

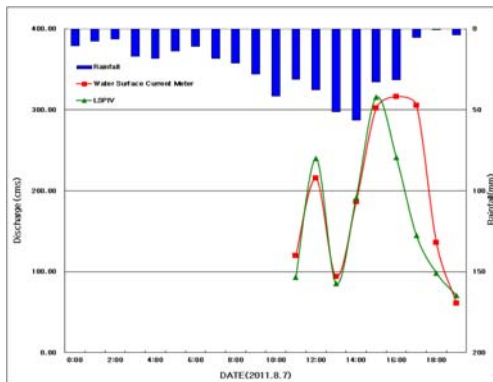
2.4. 홍수유출량 매개변수 최적화

Clark 단위도법의 매개변수인 도달시간과 저류상수는 경험공식을 이용하여 산정한다. 홍수유출량 산정은 Jung 등(2014)이 제시한 한천유역의 최적 매개변수 조합으로 유속을 도입한 도달시간 산정방법인 Kraven II, 유역형상 및 도달시간을 고려한 저류상수 산정방법은 Sabol 방법을 매개변수 경험식으로 채택하였으며, 하도 추적은 Muskingum 방법(K:1.5, X:0.2)을 이용하였다.

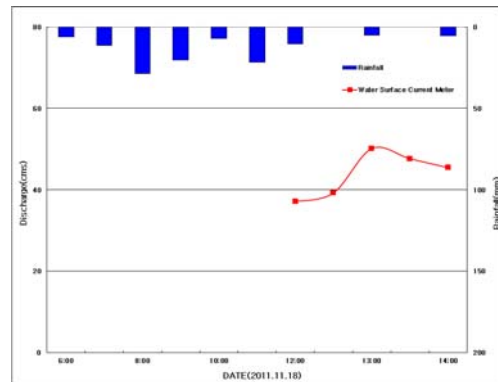
한천유역의 토지이용 변화에 따른 홍수유출 변동을

분석하기 위하여 2011년 8월 7일 태풍 “무이파”, 2011년 11월 17일 집중호우, 2012년 4월 21일 집중호우사상을 적용하였으며, 각 호우사상별 유량관측 자료를 이용하여 현재 상태에서의 최적 결과를 도출하였다.

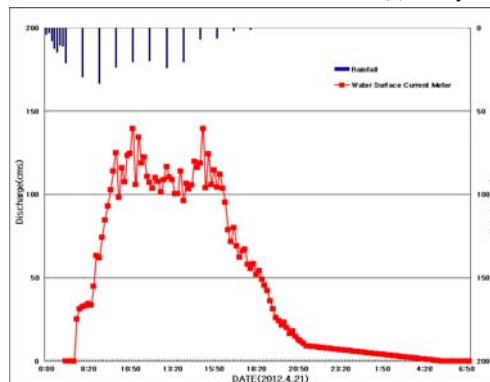
각 호우사상별 유량관측 자료는 제주수자원연구단의 유량관측자료(2011년 태풍 “무이파”, 4월 21일 집중호우)를 이용하였다. 유량관측 자료는 Fig. 4와 같으며, 각 호우사상별 유속자료를 이용하여 Kraven II, Sabol 방법의 매개변수를 산정하였다(Table 5).



(a) Typhoon “Muifa”



(b) Heavy rainfall in November 2011



(c) Heavy rainfall in April 2012

Fig. 4. Flood discharge hydrograph of Han stream watershed.

Table 5. Calculation of Clark unit hydrograph method parameters

Rainfall events	Han stream			
	Basin area (km^2)	Reaching time (hr)	Storage constant (hr)	Note
2011.08.01 - 08.10	37.19	1.51	2.44	Typhoon “Muifa”
2011.11.17 - 11.19	37.19	2.10	3.60	Heavy rain period
2012.04.15 - 04.24	37.19	1.53	2.48	Heavy rain period

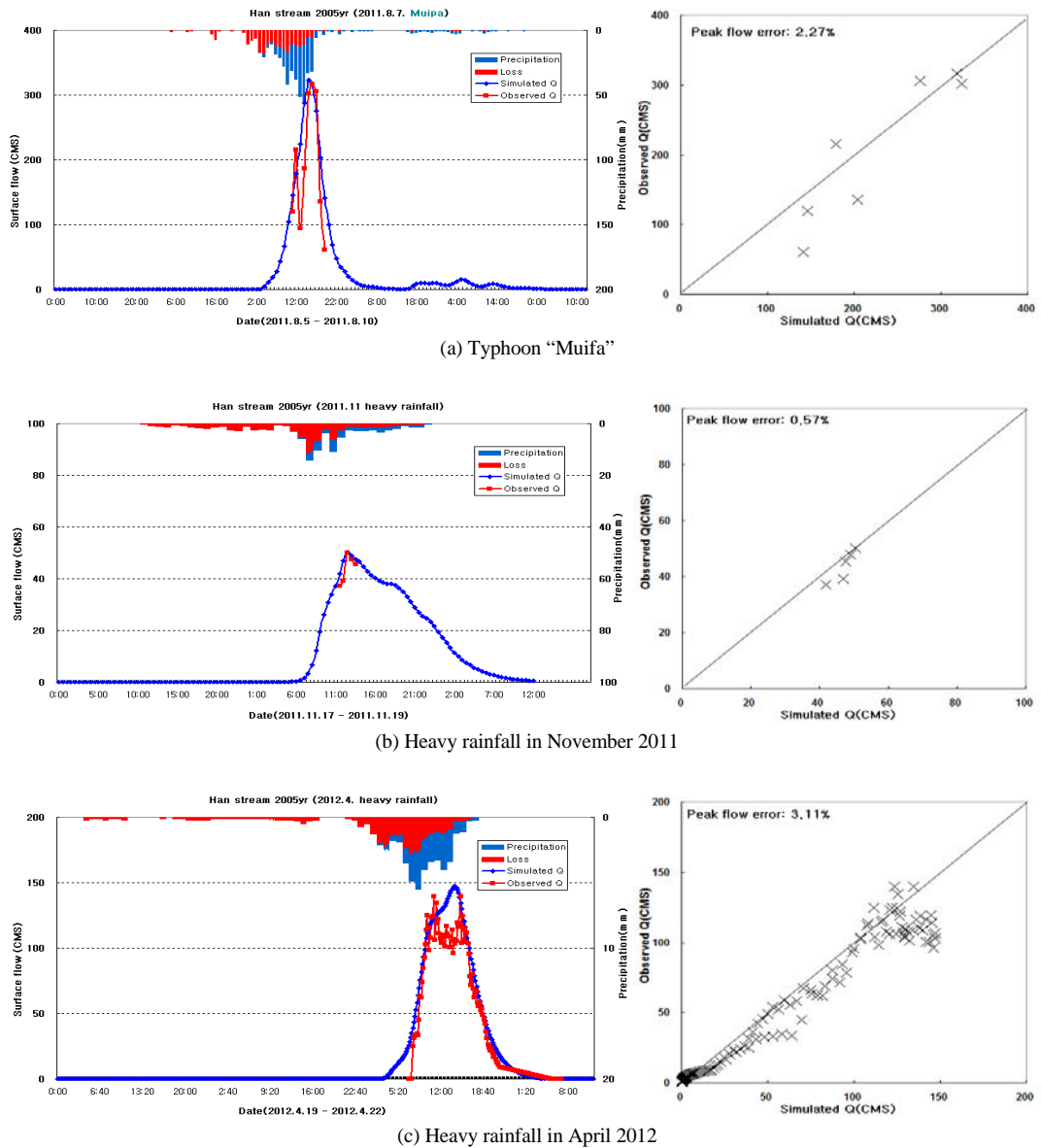


Fig. 5. Calculation of discharge to Clark unit hydrograph method.

Table 6. Land use change of Han stream watershed

Division	(unit: m ²)					
	1980	1985	1990	1995	2000	2005
Water	2,430	2,430	2,430	2,430	2,430	2,430
Urban	359,192	589,213	789,151	827,827	1,578,864	1,907,288
Bare soil	3,600	343,772	323,146	338,980	43,328	49,878
Wetland	19,731	367	-	-	-	-
Grass & pasture area	5,861,361	2,280,619	2,233,380	2,243,245	6,961,010	7,060,422
Forest	28,791,886	30,669,364	28,918,126	27,809,474	21,625,194	21,000,863
Agricultural area	2,158,035	3,310,470	4,930,002	5,974,280	6,985,409	7,175,355
Total	37,196,236	37,196,236	37,196,236	37,196,236	37,196,236	37,196,236

Table 7. CN of Han steam watershed

Division	Han stream					
	1980	1985	1990	1995	2000	2005
AMC- I	39.27	40.85	41.89	42.73	44.87	46.77
AMC- II	60.62	62.18	63.19	63.98	65.96	67.66
AMC- III	77.98	79.09	79.79	80.34	81.67	82.79

현재 상태에서의 Clark 단위도법을 이용하여 홍수유출량을 산정한 결과와 유량관측 결과를 비교 검토하였으며, 그 결과를 이용하여 과거 토지이용상태에 대한 홍수유출량을 산정하였다. 홍수유출량 산정결과와 각 호우사상에 대한 유량관측결과를 분석한 결과 2011년 태풍 “무이파” 사상에 대한 첨두유량 오차는 2.27%, 2011년 11월 집중호우 사상에 대한 첨두유량 오차는 0.57%, 2012년 4월 집중호우 사상에 대한 첨두유량 오차는 3.11%로 각각 도출되었다(Fig. 5).

3. 결과

3.1. 토지이용변화 분석

한천유역의 토지이용 변화에 따른 홍수유출 변동을 분석하기 위하여 국가 수자원관리 종합정보시스템과 환경부에서 제공하는 1980년 2005년까지 5년 주기의 토지피복자료를 구축하였다(Fig. 6).

한천유역의 1980년부터 2005년까지 토지이용변화는

도시화 및 지역개발 등에 의하여 산림지역의 감소, 시가지 지역 및 농경지역 증가가 뚜렷하게 나타나고 있다. 분석기간 동안 한천유역의 시가지 면적은 359,192 m²에서 1,907,288 m²으로 약 5.3배 증가하였으며, 농경지 면적은 2,158,035 m²에서 7,175,355 m²으로 약 3.3배 증가하였다. 산림지역의 경우 28,791,886 m²에서 21,001,243 m²으로 약 28% 감소하는 것으로 분석되었다(Table 6).

3.2. 토지이용에 따른 유출계수 산정

한천유역의 토지피복자료(1980~2005)와 토양통자료를 이용하여 연도별 유출계수를 산정한 결과는 Table 7과 같다. 1980년부터 2005년까지 5년단위로 CN을 산정한 결과 5년간 평균적으로 2.2%씩 증가하는 것으로 나타났으며, 1980년대비 2005년에는 CN이 7.04 증가(11.06%)하는 것으로 분석되었다. 산정된 선행토양함수조건(AMC- II)의 CN값을 이용하여 AMC- I, AMC- III 조건의 변환식에 적용하여 각 선행토양함수조건에 따른 유출곡선지수를 계산하였다(Fig. 7).

3.3. 토지이용에 따른 유출계수 산정

Clark 단위도법을 이용하여 각 호우사상에 따른 홍수 유출량을 산정하는데 적용된 도달시간 및 저류상수를 이용하여 1980년부터 2005년까지의 홍수유출량을 산정하였다. 2011년 태풍 “무이파” 사상에 대하여 토지이용변화에 따른 홍수유출 변동을 분석한 결과, 침투유량은 5년 평균 5.93 m³/s(1.91%)씩 증가하는 것으로 나타났으며, 유출총량은 5년 평균 236,992 m³(2.39%)씩 증가하였다. 1980년 대비 2005년에는 침투유량이 29.67 m³/s(9.90%) 증가하였으며, 유출총량은 1,184,958 m³(12.53%), 침투유량 도달시간은 10분 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 8).

2011년 11월 집중호우 사상에 대하여 토지이용변화에 따른 홍수유출 변동을 분석한 결과, 침투유량은 5년 평균 2.56 m³/s(5.99%)씩 증가하는 것으로 나타났으며, 유출총량은 5년 평균 2.56 m³/s(5.43%)씩 증가하였다. 1980년 대비 2005년에는 침투유량이 12.78 m³/s(33.67%)

증가하였으며, 유출총량은 522,490 m³(30.21%), 침투유량 도달시간은 10분 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 9).

2012년 4월 집중호우 사상에 대하여 토지이용변화에 따른 홍수유출 변동을 분석한 결과, 침투유량은 5년 평균 3.65 m³/s(2.69%)씩 증가하는 것으로 나타났으며, 유출총량은 5년 평균 161,802 m³(3.68%)씩 증가하였다. 1980년 대비 2005년에는 침투유량이 18.26 m³/s(14.18%) 증가하였으며, 유출총량은 809,010 m³(19.78%), 침투유량 도달시간은 10분 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 10).

4. 결론

본 연구에서는 제주도 도심하천인 한천유역을 대상으로 1980년부터 2005년 5년 주기 토지피복도를 이용하여 유역 내 토지이용변화를 분석하고 호우사상에 따른 홍수유출 변동을 분석하였다. 주요 호우사상에 따른 홍수유출량을 산정하기 위해 HEC-HMS 모델을 적용하고

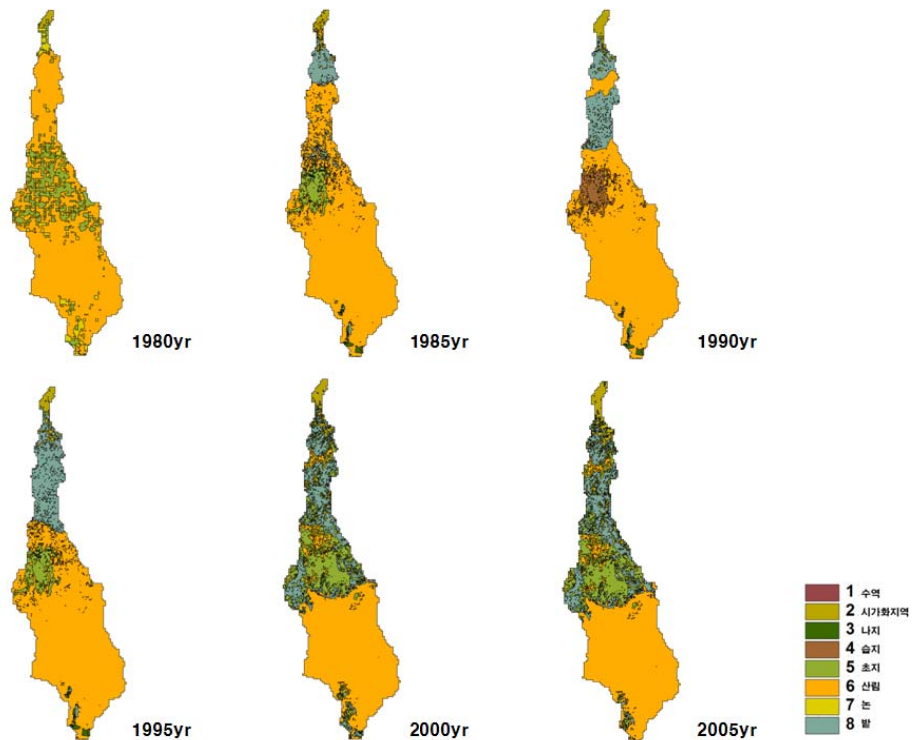


Fig. 6. Land use change of Han stream watershed.

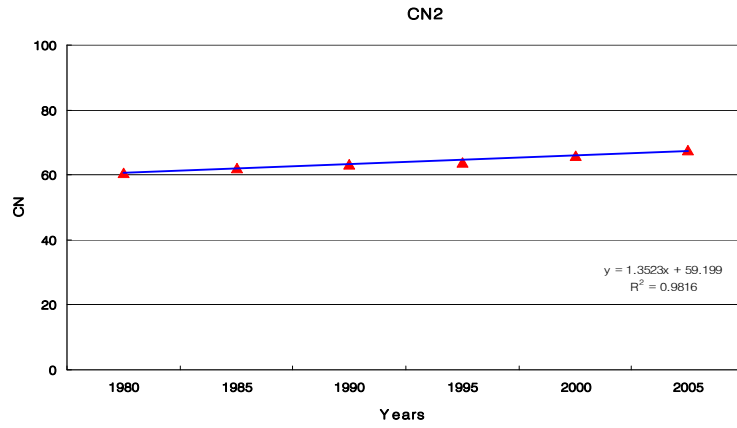


Fig. 7. AMC- II CN of Han stream watershed.

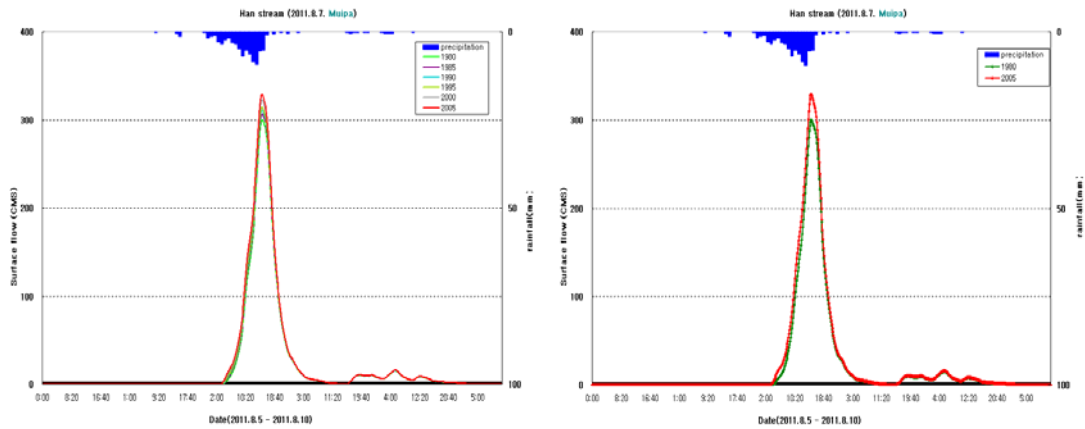


Fig. 8. Analysis discharge of Landuse change(Muifa).

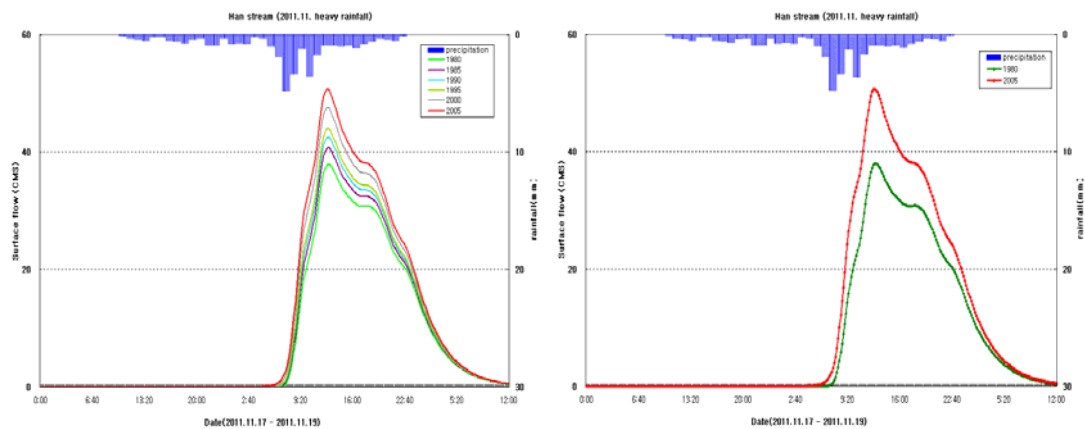


Fig. 9. Analysis discharge of Landuse change(Heavy rainfall in November 2011).

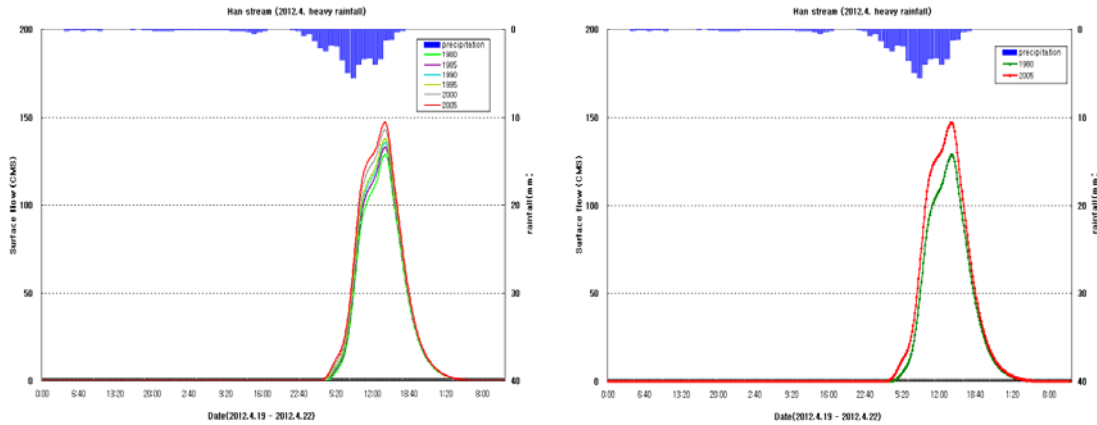


Fig. 10. Analysis discharge of Landuse change(Heavy rainfall in April 2012).

단위도법은 Clark 방법을 이용하였으며, 단위도법 매개 변수는 Jung 등(2014)의 연구에서 제시한 매개변수는 Kraven II, Sabol을 적용하였다. 5년 주기 홍수유출량 산정 결과를 이용하여 토지 이용변화에 따른 침투유량 및 침투 도달시간 변동 및 토지이용 변화가 홍수유출량 미치는 영향을 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 한천유역의 1980년부터 2005년까지 토지이용변화는 도시화 및 지역개발 등에 의하여 산림지역의 감소, 시가지 및 농경지역의 증가 뚜렷하게 나타나고 있다. 분석기간 동안 시가지면적은 5.3배, 농경지역의 면적은 약 3.3배 증가하였으며, 산림지역은 약 28% 감소하는 것으로 나타났다.

2. 한천유역의 토지피복자료와 토양통자료를 이용하여 유출계수를 산정하였다. 1980년부터 2005년까지 5년 주기 유출계수를 산정한 결과 평균 2.2% 씩 증가하는 것으로 나타났으며, 1980년 대비 2005년에는 11.6% 증가하는 것으로 분석되었다.

3. 각 호우사상에 따른 한천유역의 토지이용변화에 따른 홍수유출 변동을 분석한 결과 5년 주기 침투유량 증가율은 1.91~5.99%, 유출총량 증가율은 2.39~5.43%로 나타났으며, 1980년 대비 2005년의 침투유량 증가율은 9.9~33.67%, 유출총량은 증가율은 12.53~30.21%로 나타났다. 또한 침투유량 도달시간은 각 호우사상마다 10분 감소하는 것으로 분석되었다.

한천유역의 토지이용변화에 따른 홍수유출 변동을 분석한 결과는 토지이용상태가 산림지에서 시가지 및 농경

지로 변화하는 것은 홍수유출량의 증가로 이어진다는 것을 정량적으로 도출하였으며, 이와 같은 연구결과는 도시계획 수립 및 개발사업 시행 등에 활용이 가능할 것이다. 향후 기후변화 및 도시개발에 따른 홍수재해 예방을 위해서는 장기간 기초자료의 확보 및 구축, 제주지역에 적합한 홍수유출량 산정방법의 개발 및 적용 등의 연구가 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설교통기술지역특성화사업 “제주형 물순환 해석 및 수자원 관리 기반 구축 연구(10 지역기술혁신B02)”의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCE

- Choi, J. H., Lee, J. J., Kwon, H. H., 2009, An Analysis of the Runoff variation due to Urbanization in Cho-Kyung Stream Watershed, Korean Wetlands Society, 11(3) 161-169.
- Han, W. K., Yang, S. K., 2009, A Runoff Simulation Using SWAT model Depending on Changes to Land Use in Jeju Island, Journal of Environmental Science, 18(9) 1057-1063.
- Jeong, D. G., Lee, B. H., 2003, Urban Watershed Runoff Analysis Using Urban Runoff Models, Journal of Korea Water Resources Association, 36(1) 75-85.
- Jin, E. J., 2001, A Study on the Hydrologic Change Analysis

- by Urbanization - Focused on Detention Storage Estimation Using SCS method -, Seoul National University
- Jung, W. Y., Yang, S. K., Kim, D. S., 2014, Flood Discharge to Decision of Parameters in Han Stream, Journal of Environmental Science, 23(4) 533-541.
- Jung, W. Y., 2013, The Estimation of Parametric Runoff Characteristics and Flood Discharge based on Riverine In-situ Measurements in Jeju Island, doctoral thesis, Jeju national university
- Kim, S. H., 2008, An Analysis of Runoff Variation by Land Cover Change in the Nabal Stream Watershed, Gyeongsang National University
- Lee, S. H., Bae, S. K., 2004, Estimation of Precipitation Recharge in the Pyung chang River Basin Using SCS -CN Method, Journal of Korea water Resources Association, 13(12), 39-44
- Ministry of Environment, <http://www.me.go.kr>
- Park, G. B., 2012, Runoff Characteristics of New Urban Expansion Area according to The Type of Land Use, Journal of Environmental Sciences Society Conference, Vol(21), 306-309.
- Water Resources Management Information System, <http://www.wamis.go.kr>