

산악지역 돌발홍수 기준우량 결정에 관한 연구

전계원 · 오채연[†]

강원대학교 방재기술전문대학원
(2008. 10. 10. 접수 / 2009. 2. 5. 채택)

A Study on Flash Flood Warning Trigger Rainfall in Mountainous Area

Kye-Won Jun · Chae-Yeon Oh[†]

Graduate School of Disaster Prevention Technology, Kangwon University
(Received October 10, 2008 / Accepted February 5, 2009)

Abstract : The purpose of this study is to estimate the critical flood discharge and flash flood trigger rainfall for alarm system providing for a flash flood in mountainous area. The flash flood need non-linear approaching method, because rainfall-runoff is nonlinear and it is difficult to explain the existing linear rainfall-runoff. Hydrological characteristics would be utilized to apply such as hydrologic modelling or basin management. This study was effectively estimated a topographic characteristic factor of basin using the GIS. Especially, decided stream order using GIS at stream order decision that is important for input variable of GCIUH. A flash floods defined as a flood which follows shortly after a heavy or excessive rainfall event, with a few hours. In this study, we gave a definition that a critical flood for alarm is the flood when valley depth judging dangerous depth is over 0.5m depth from the bottom of channel. Result that calculate threshold discharge to use GCIUH, at the Mureung valley basin, flash flood trigger rainfall was 16.34mm in the first 20minutes when the threshold discharge was 14.54m³/sec.

Key Words : flash flood, warning, geomorphoclimatic instantaneous unit hydrograph, trigger rainfall

1. 서론

지구온난화에 의한 현상으로 여름철 집중호우의 발생빈도가 증가하고 있으며 최근에는 게릴라성 호우라고 일컫는 공간적·시간적으로 예측하기가 곤란하고 전례가 없을 정도의 대규모의 국지성 집중호우가 빈발하여 해마다 막대한 인적, 물적 피해를 야기하고 있다. 수문학적인 의미에서 홍수는 호우의 지속시간과 지역적 특성에 따라 하천홍수(river flood), 돌발홍수(flash flood)와 해안범람(coastal flood)으로 구분할 수 있다. 각종의 홍수는 지형의 특성에 따라 성격이 크게 다르고 피해 형태와 규모 역시 달라지기 때문에 이러한 분류에 있어서 지형조건을 고려하는 불가피하다. 돌발홍수(flash flood)는 단시간 내에 급격한 수위상승 및 상류댐 파괴를 유발하는 홍수로서, 유속의 급격한 증가에 의한 교량과 도로가 유실될 수 있으며, 사면붕괴를 초래하며, 호우의 지속시간이 상당히 짧고 또한, 강우-유출 관

계가 비선형적이고 지형적인 변동에 민감한 특성을 가지고 있다고 정의할 수 있다. 이는 기존의 선형 강우-유출 관계로는 해석이 곤란하며 비선형적인 접근이 필요하며 또한 개략 모형보다는 GIS를 이용한 공간적인 호우 및 홍수 해석이 필수적이다. 산지 하천 지역에서의 돌발홍수는 짧은 시간에 특히 많은 인명피해를 발생시킨다는 점에서 대 하천 홍수 예경보와 연계하거나 별도의 적절한 산지하천 돌발홍수에 대한 예측모형 및 예경보 시스템의 구축이 필요하다.

본 연구에서는 산악지역의 홍수특성을 도출하기 위하여 강우의 시공간적 특성 분석, 강우 유출관계를 토대로 우량관측시스템의 경보발령에 관한 합리적인 기준 제시, GIS기법을 적용하여 유역지형 및 수문학적 지형자료 구축을 위한 소유역 분할 및 특성 자료의 추출, Horton 하천차수 및 GCIUH의 매개 변수 산정과 산악지역의 경보발령시 기준이 되는 기준우량을 산정하고자 한다.

2. 모형의 기본이론

[†] To whom correspondence should be addressed.
cyoh@kangwon.ac.kr

2.1. Horton의 법칙

하천망 분석의 정량적 해석은 Horton(1945)에 의 해 차수에 따른 하천망구축기법이 소개되었다. Strahler (1950)는 Horton분류와 다른 하천의 길이, 형상 발 원을 고려하는 방식을 개선하였는데 그 방법은 Horton의 방법과는 달리 하천의 길이, 형상 발원등과 서로의 연관을 고려한 것이었다.

하천의 차수에 대한 Horton 법칙의 정량적인 표현은 다음과 같다.

$$\text{하천수에 대한 법칙 } \frac{N_w - 1}{N_w} = R_B \quad (1)$$

$$\text{하천길이에 대한 법칙 } \frac{\bar{L}_w}{L_w - 1} = R_L \quad (2)$$

$$\text{하천면적에 대한 법칙 } \frac{\bar{A}_w}{A_w - 1} = R_A \quad (3)$$

하천 분기율 R_B 는 식 (1)과 같고 하천길이와 면 적의 법칙에 대한 개념은 하천수의 법칙과 같고 R_L 과 R_A 는 식 (2), (3)과 같이 계산된다.

2.2. 지형기후학적 순간단위유량도

Rodriguez-Iturbe(1982)는 지리정보시스템의 적용 이 가능한 지형학적순간단위유량도(GIUH)와 지형 기후학적 순간단위유량도(GCIUH)를 소개하였다. Rodriguez-Iturbe 등(1982)은 V가 유효강우강도와 지 속시간의 함수임을 입증하였고 결과로부터 V를 제 거하려고 노력하였다. 그 결과, 간단하고 이해가 용 이한 다음과 같은 침투량 q_p 와 침투량 도달시간 t_p 로 표현되었다.

$$q_p = \frac{0.871}{\Pi_i^{0.4}} \quad (4)$$

$$t_p = 0.585 \Pi_i^{0.4} \quad (5)$$

$$\Pi_i = \frac{L_{\Omega}^{2.5}}{(i_r A_{\Omega} R_L a_{\Omega}^{1.5})} \quad (6)$$

$$a_{\Omega} = \frac{S_{\Omega}^{0.5}}{(n b_{\Omega}^{2/3})} \quad (7)$$

여기서, i_r 은 평균유효강우강도(cm/hr), A_{Ω} 는 최고

차 유역의 유역면적(km²), L_{Ω} 는 최고차 하천의 하 천길이(km), S_{Ω} 는 최고차 하천의 유역경사, a_{Ω} 는 최고차 하천의 kinematic wave 대개변수이며 n은 Manning의 조도계수와 일치한다.

2.3. 경보발령우량 산정절차

해당 유역에서의 threshold runoff 혹은 유효 강우 량의 산정은 돌발 홍수 예경보에 있어 기초가 되 는 절차이다. 우선 지속시간에 따른 유효 강우량과 총강우량을 구하고 지속 시간에 따른 총강우량 관 계를 산출함으로써 돌발홍수 예경보에 필요한 자 료를 확보하게 된다. GCIUH 공식을 이용하여 한계 유량(Q_d)을 산정하는 식은 (8)과 같다.

$$Q_d = \frac{0.288}{n} S_c^{0.5} B_b \left[\frac{Y_b}{m+1} \right]^{0.38} \quad (8)$$

여기서, S_c 는 유역 하도경사, B_b 는 최대하폭(m), Y_b 는 최대수심(m), n은 Manning 조도계수, m은 형 상계수, Q_d 은 한계유량(m³/sec)이다.

3. 대상유역의 적용 및 분석

본 연구대상 유역은 강원도 동해시에 위치한 전 천 유역중 상류지역인 무릉계곡 유역으로 유역면적 은 19.34km²이며, 동해시의 대표적인 관광지로 Fig. 1과 같다.

3.1. GIS 지형자료 구축 및 적용

GIS기법을 이용하여 GIS의 기본개념 및 DEM 구 축절차, 수문학적 지형자료 구축을 위한 소유역 분 할 및 특성자료 추출, Horton 하천차수 및 Horton's ration등의 지형기후학적순간단위도의 유도를 위하

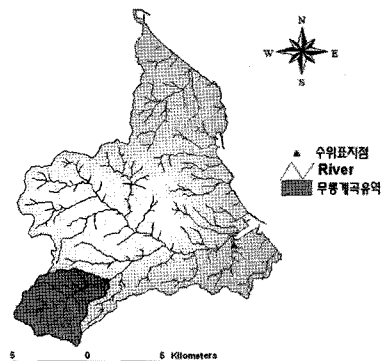


Fig. 1. Location map in the study basin.

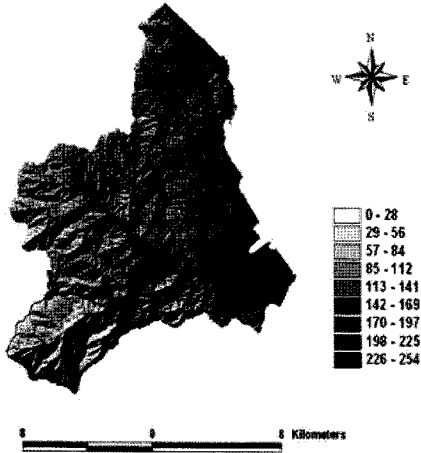


Fig. 2. Triangular Irregular Network(TIN).

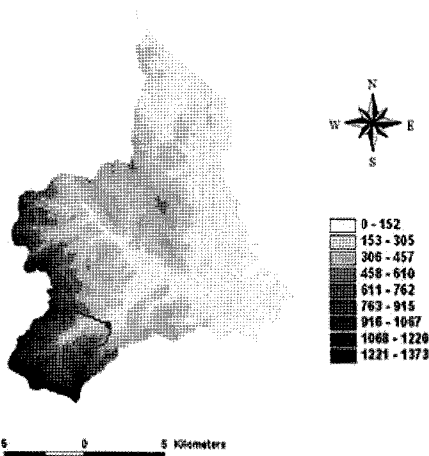


Fig. 3. Digital Elevation Model.

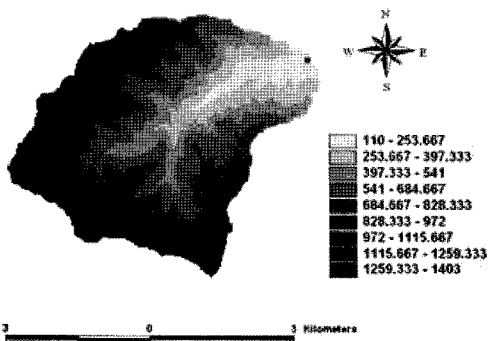


Fig. 4. Fill Sink.

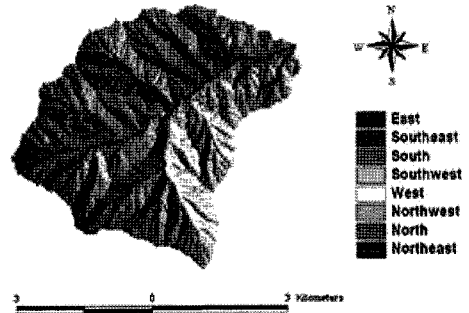


Fig. 5. Flow Direction.

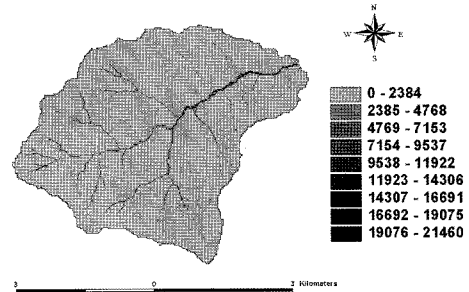


Fig. 6. Flow Accumulation.

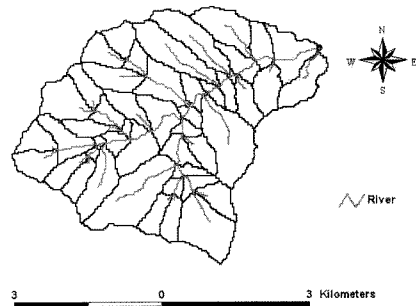


Fig. 7. River Network of basin.

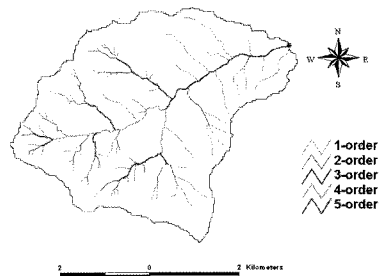


Fig. 8. Estimate stream order & basin boundary.

여 필요한 각종 매개변수의 객관적 추정과 이에 필요한 각종 지형인자들을 ArcView를 이용하여 자동 추출할 수 있도록 하였으며, 등고선 사이에 불규칙 삼각망(triangular irregular network, TIN)을 형성하여

지표면을 모형화하는 방법을 적용하였으며, ArcView를 이용하여 불규칙삼각망을 형성하여 등고선 사이에 표고를 내삽하고 그 위에 특정한 크기의 격자망을 중첩시켜 수치고도모형(DEM)을 생성하였다.

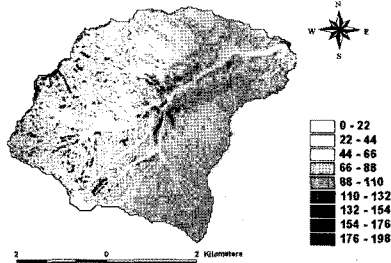


Fig. 9. Basin slope analysis.

Table 1. Basin characteristic of Mureung Valley

유역면적 (km ²)	유로연장 (km)	경사 (m/m)	단면폭 (m)	평균고도 (EL.(m))
19.34	7.34	0.227	23	680.13

Table 2. GCIUH parameter of Mureung Valley

분기율 RB	연장비 RL	면적비 RA	평균연장 Lo(km)
3.20	1.74	3.38	3.41
평균경사 So	조도계수 n	평균폭 Bo(m)	CN
0.0367	0.040	29.08	76

전처리 과정을 거쳐 추출한 하천망과 분할된 유역도로부터 본 연구에 필요한 하천차수의 산정 및 유역특성인자를 추출하였다. 하천차수의 산정을 위해서 “Create strahler stream order” ArcView Extension을 이용하였으며 Fig. 8, 9는 산정된 하천차수 및 차수별 유역계계를 나타내고 있으며 GIS의 적용 결과를 통하여 산정된 무릉계곡 유역의 특성은 Table 1과 같고, GCIUH 유출모형에 입력치인 무릉계곡 유역의 매개변수는 Table 2와 같다.

3.2. 홍수량 산정 및 기법검토

지속시간별-강우발령 홍수량 관계를 GCIUH를 적용하여 계산하고, 위험 홍수량을 유발하는 위험 강우량(trigger rainfall)을 결정하였다. GCIUH를 적용하기 위해서는 유역특성과 하천차수에 따른 특성 등이 필요하다. 유역특성자료는 토지 이용별, 토양형별 CN값과 유역면적, 유로연장 등이 필요하며, 하천차수에 따른 특성은 GIS를 이용하여 산정하였으며, 유효우량 산정을 위한 CN값은 SCS방법의 토양형 분류에 따라 산지하천의 특성을 반영하여 CN값을 76으로 산정하였고 조도계수는 대부분의 지역이 산지지역임을 고려하여 전천 하천정비기본계획과 현장조사를 통해 0.040을 적용 하였다. Fig. 10은 전천하천정비기본계획에 수록된 보고서 상의

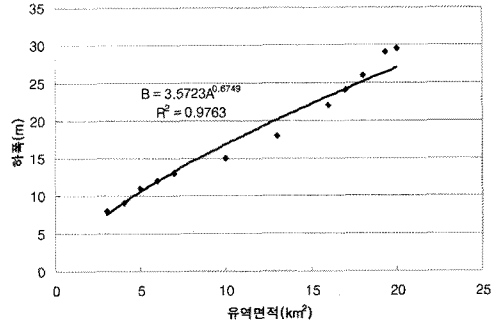


Fig. 10. River width relation of basin area.

단면과 현장조사를 통해 조사된 계획 하폭을 고려하여 유역면적에 따른 평균적 의미의 하폭관계를 산정하였다.

한계유량(Q_i)를 산정하기 위하여 Manning 공식을 적용하였으며, 계곡에서 인명의 안전 확보를 위해 하천의 수심이 50cm 이상으로 증가하게 될 때의 유량을 경보발령기준을 위한 한계유량(Q_i)으로 정의하였다.

3.3. 경보발령 강우량 산정 및 기준 설정

경보발령 기준을 설정하기 위하여 수심 0.5m, 0.7m, 1.0m가 발생할 수 있는 강우량을 산정하였으며, 무릉계곡 유역 내 자동우량경보시설 설치 시 경보발령우량을 산정하기 위하여 GCIUH를 적용하였으며, GIS기법을 통해 산출된 GCIUH의 매개변수들을 이용하여 지속시간을 10~120분으로 증가시키면서 강우량의 변동성향을 분석하였다. 또한 강우에 의한 계곡의 수위가 안전성을 위협하는 0.5m 이상으로 증가하게 될 경우 경보발령을 내리고 0.7m, 1.0m로 계속 증가 시에는 각각 대피발령1, 대피발령2의 경보를 발령하도록 지속시간별 경보발령 우량을 산정하였다. 강우지속시간을 고려하여 각 지속시간에서 한계유량(Q_i)을 초과하게 되는 강우량을 결정할 수 있으며 이때의 강우량이 경보발령우량(trigger rainfall)으로 정의될 수 있다. 경보발령우량 결정 시 한 가지 고려해야 될 사항은 일정시간 동안 경보가 발령될 조건이 만족되지 않는 경우에는 초기 상태로 돌아가는데 돌발홍수의 가능성을 위해서는 무강우에 대한 고려가 필요하다. 즉, 강우사상이 10분 이상 무강우가 지속되는 경우에는 기준강우량이 지속시간별로 증가하게 되나 실제 누가강우량은 작아짐에 따라 돌발홍수의 가능성은 작아지게 된다. 지속시간 10분간의 강우량은 14.66mm이며 이 강우량이 1시간 동안 지속되면 87.96mm, 2시간 동안 지

Table 3. Determinated alarm discharge according to duration (unit : m³/s)

시간(분)	R _T (mm), I _a = 0.0S		
	d = 0.5m	d = 0.7m	d = 1.0m
10	14.66	15.47	17.49
20	16.34	17.45	19.75
30	17.76	18.77	21.26
40	18.71	19.78	22.42
50	19.50	20.62	23.39
60	20.18	21.36	24.23
70	20.79	22.01	24.97
80	21.34	22.59	25.64
90	21.83	23.13	26.26
100	22.29	23.63	26.83
110	22.74	24.10	27.37
120	23.13	24.53	27.88
Q _a	14.54	16.52	18.92
발령	경보발령	대피발령1	대피발령2

속되면 175.92mm가 되어 일반적인 돌발홍수 분류 시의 2시간 동안 100mm 이상의 강우량에 비해 강우강도가 커지게 된다. 따라서 지속시간 10분을 기준으로 할 경우 경보발령의 가능성은 아주 작아지게 된다. 반면 강우의 지속시간이 증가함에 따라 경보발령의 가능성이 점차 증가하게 되는 것을 알 수 있다. 따라서 무릉계곡 유역의 경우 강우의 지속시간과 경계 홍수량의 발생시간 및 경보발령 횟수 등을 고려하여 강우량의 기준 단위시간을 20분 단위로 결정하였다. 그 결과 20분 단위의 경우 경보발령을 유발하는 강우량은 16.34mm가 되며 이 강우량이 1시간 동안 지속되면 49.02mm가 되어 적절한 경보가 이루어 질것으로 판단된다. 같은 방법으로 수심 0.7m에 이르기까지의 20분간의 강우량 17.45mm인 경우는 대피경보1, 수심 1.0m에 이르기까지의 20분간 강우량이 19.75mm의 경우에는 대피2를 설정하였다.

3.4. 경보발령기준 적용

무릉계곡 유역에 자동우량경보발령기준안을 적용하기 위해 기왕자료중 경보발령기준 적용에 적합한 강우사상의 규모를 파악하였으며, 다음 Fig. 11은 2002년 8월 31일~9월 1일에 걸쳐 내린 태풍 루사에 의한 호우사상을 나타내고 있다.

동해기상대에서 측정된 강우량 및 기후 극값 자료를 고려하여 임의의 강우량 변화에 따른 경보발령 기준에 의한 경보발령 시점을 비교하였다. 이를

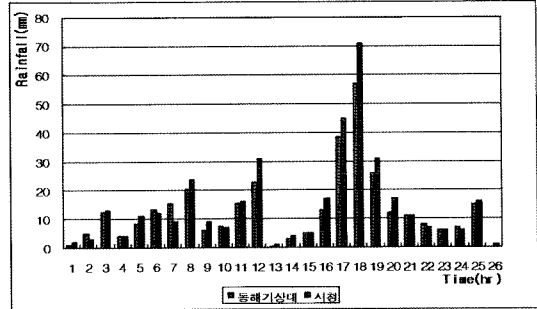


Fig. 11. Precipitation of Donghae Weather Station(2002.08.31).

Table 4. Comparison of alarm standard by Mononobe method

강우량 (mm/hr)	10분단위 경보발령 기준		
	강우량 (mm/10min)	발생시간 (min)	발령
30	14	30	경계
	15	31	대피 1
	17	35	대피 2
50	23	30	대피 2
70	17	30	대피 2
100	14	27	경계
	19	29	대피 2

강우량 (mm/hr)	20분단위 경보발령 기준		
	강우량 (mm/20min)	발생시간 (min)	발령
30	16	30	경계
	18	31	대피 1
	20	34	대피 2
50	27	30	대피 2
70	16	27	경계
	17	28	대피 1
	23	30	대피 2
100	16	21	경계
	17	23	대피 1
	20	26	대피 2

위해 강우의 지속시간을 1시간으로 하고 강우량의 변화는 시간당 30mm, 50mm, 70mm, 100mm로 증가될 경우의 경보발령 상황을 비교 분석하였다.

임의 강우량에 대한 경보발령 기준의 비교 결과 Mononobe 분포시 강우량의 증가함에 따라 10분 단위와 20분 단위 경보발령 기준 모두 경보발령 시간이 점차 빨라지고 있는 것을 알 수 있다. 또한 동해지역 및 인근 주변지역의 강우관측소에서 관측한 1시간 지속시간별 최대우량이 62.4mm로 조사되었으며 20분간 지속시간별 최대우량으로 환산하면 약 20.8mm 정도인 점을 감안하면 10분 단위 경보발령 기준 보다 20분 단위 경보발령 기준이 위험시 빠른 대처를 할 수 있도록 도움을 줄 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 전천유역의 상류인 무릉계곡지역의 돌발홍수 예경보 시스템에 있어서의 한계유량 산정, 지역여건에 적합한 경보발령 기준을 설정하기 위해 유역의 기초자료 조사, 수문특성 분석 및 GIS를 이용한 지형학적, 지형기후학적 특성 분석을 수행하였으며 GCIUH 유출모형의 적용을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 무릉계곡내의 기초자료 조사 및 현장조사를 통해 돌발홍수시 피해 위험지역을 파악하였으며, GIS 기법을 이용한 공간지형자료를 정량적으로 산출함으로써 유역특성자료에 대한 불확실성을 감소시킬 수 있었다.

2) 경보발령기준 강우량의 적용성을 파악하기 위해 임의강우 분포시 경보발령 기준을 10분 단위와 20분단위로 나누어 비교한 결과 본 연구에서 제시된 경보발령기준은 강우량이 증가함에 따라 경보 단계를 상향 조절하여 최대 강우시에는 짧은 간격을 두고 경보가 발령하여 위험상황을 전달하는 것으로 분석되었다.

3) 돌발 홍수 예경보 시스템의 경보 발령 우량 산정기법을 제시함으로써 기존의 경보 발령 체계에 대한 보안 및 수정을 위한 기초 자료를 제시할 수 있을 것이다.

감사의 글 : 본 연구는 국토해양부 한국건설교통기술평가원의 지역기술혁신사업인 수충부 및 토석류방재기술개발 연구단의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 강원도, 전천 하천정비기본 계획, 2003.
- 2) 전계원 등, GIS를 활용한 돌발홍수 기준우량 결정, 한국지리정보학회지, Vol. 9, No. 1, 2006.
- 3) 최현, 남광우, “산악에서 돌발홍수 예측을 위한 지리정보시스템의 적용”, 대한원격탐사학회지, 제21권, 제4호, pp. 317~327, 2005.
- 4) Bras, R. L., HYDROLOGY An introduction to Hydrologic science. Massachusetts Institute of Technology. Massachusetts, 1990.
- 5) Carpenter, T.M. and K.P. Georgakakos, “GIS-Based Procedure In Support of Flash Flood Guidance”, NOAA/NWS/IIHR, Report No. 366.
- 6) Horton, R.E., “Erosional development of stream and their drainage basins ; hydrophysical approach to quantitative morphology”, Geological Society of America Bulletin, Vol. 56, pp. 275~370, 1945.
- 7) Strahler, A.N., “Equilibrium theory of erosional slopes approached by frequency distribution analysis”, part 1: American Journal of Science, Vol. 248, pp. 673~696, 1950.
- 8) Rodriguez-Iturbe etc., “A Geomorphoc-limatic theory of the Instantaneous Unit Hydrograph”, WRR, Vol. 18, No. 4, pp. 877~886, 1982.