

범용토양손실공식의 강우침식도 인자 추정
Estimation of Rainfall Erosivity Factor in USLE

책임연구원 : 김 창 완
(한국건설기술연구원 선임연구원)
연 구 원 : 우 효 섭
(한국건설기술연구원 연구위원)
윤 석 영
(한국건설기술연구원 수석연구원)
이 상 태
(국립건설시험소 수공과장)

1. 서 론

1.1 연구의 필요성

재해영향평가제는 1995년에 전문개정된 자연재해대책법에 근거한 제도로써, 지난 1996년부터 내무부 방재국의 주도로 시행되었다. 이 제도의 취지는 자연재해대책법 제28조(재해영향평가의 실시)에 제시된 바와 같이 국가 및 지방자치단체가 각종 개발 계획을 수립하거나 개발사업에 대하여 승인을 하고자 하는 경우 당해 사업이 홍수 등 재해의 가능성과 재해의 정도 및 규모 등에 미치는 영향을 예측·분석하고 재해영향을 줄이는 방안을 강구하는 것이다. 대규모 개발사업으로 인한 재해영향의 평가와 적절한 대책은 저감대책으로는 1) 유출량 증가 저감대책, 2) 토사유출량 저감대책, 3) 절·성토 사면 대책 등 크게 3가지 유형이 있다. 이 중 토사유출 저감 대책에는 유역의 토양침식 저감대책과 침사지를 이용한 하류 토사유출 저감대책 등이 있다.

한 지역을 개발할 목적으로 지형을 인위적으로 바꾸거나 식생 등을 제거하는 경우 토양침식은 가속화되어 침식량은 개발 전보다 10~10,000배 정도 증가하게 된다. 이러한 토양침식 및 토사유출에 적절히 대응하기 위해서는 유출되는 토사의 종류와 유출량 등을 추정하는 것이 중요하다. 유역의 토양손실량을 정확하게 추정하는 방법은 아직 없으며 현재로서는 가장 바람직한 방법은 유사한 지역의 토양손실량 실측자료를 이용하는 것이다. 이러한 실측자료가 없는 경우에는 미국에서 개발된 범용토양손실공식(USLE, Universal Soil Loss Equation)과 같이 토양손실을 추정하는 방법 등을 이용할 수 있다.

범용토양손실공식의 인자 중 지역의 수문 특성에 지배되는 되는 인자로 강우침식도(rainfall erosivity) R 인자가 있다. 우리나라에는 정필균 등(1983)에 의한 연평균 등 R 선도가 제시되어 있으나, 침사지 등의 설계 목적에 사용할 수 있는 지속기간 24-hr인 임의 재현기간의 R 값은 연구된 바가 없다. 따라서 실무에

쉽게 이용할 수 있는 지속기간 24-hr에 해당하는 빈도별 등 R 선도를 작성할 필요성이 있다.

1.2 연구의 내용 및 범위

지속기간 30-min의 강우자료가 가용한 우량관측소를 대상으로 지속기간 0.5, 1, 2, 3, 6, 12, 24-hr에 대한 재현기간 2, 5, 10, 20, 30, 50, 80, 100, 150, 200, 500-yr의 확률강우량을 구한다. 구해진 확률강우량을 적용하여 미국 Transportation Research Board(1980)의 국립합동도로연구프로그램(NCHRP)에 제시되어 있는 방법대로 지점별 지속기간 24-hr에 해당하는 확률 R 값을 구한다. 지점별 빈도별 확률 R 값을 전국지도에 표시하여 빈도별 등 R 선도를 작성한다.

2. 토양손실

2.1 개발사업과 토양침식

지구의 표면을 구성하고 있는 지각은 강수, 바람, 빙하, 중력 등 자연작용에 의해 끊임없이 변화한다. 이러한 지형변화는 통상 지질시간 대에 걸쳐 일어난다. 강수에 의한 지형변화를 미시적으로 보면, 강우 시 빗방울은 지표층을 구성하는 토립자(soil particle)에 부딪혀 이를 튀겨 나오게 한다. 빗방울(rain drops)의 운동에너지에 의해 토립자가 토양(soil)에서 튀기거나 쓸려 나가는 현상을 침식(erosion)이라 하며, 튀겨 나온 토사가 지표면을 흐르는 주위 흐름(sheet flows)에 실리는 현상을 연행(entrainment)이라 한다. 주위의 작은 흐름에 연행된 토사는 흐름 조건이 달라지는 경우 다시 그 자리에 멈추기도 하지만 결국은 도랑, 개울, 하천 등 보다 큰 흐름을 따라 하류로 이송(transport)된다. 빗물에 침식되어 하류로 이송되는 토사를 흐르는 물에 의해 이송된다고 해서 특히 유사(sediment)라 한다. 하류로 이송되는 토사, 혹은 유사입자(sediment particle)는

흐름조건이 달라져서 흐름에너지가 입자를 충분히 이송시킬 수 없게 되는 경우 바닥에 가라앉는다. 이를 퇴적(deposition)이라 한다. 퇴적된 유사는 다시 그 위로 퇴적되는 유사의 무게의 의해 천천히 압축된다. 이를 압밀(compaction)이라 한다. 압밀된 유사는 지질시간에 걸쳐 점차 굳어져 단단한 돌로 변한다. 이를 퇴적암(sedimentary rock)이라 한다. 지각을 구성하는 토사가 침식, 연행, 이송, 퇴적 등의 과정을 거치는 현상을 총체적으로 유사현상(sedimentation)이라 하며, 이에 대한 공학적 연구를 유사현상론(sedimentation engineering)이라 한다.

지질시간대에 걸친 자연적인 침식현상(geological erosion)과 달리, 농경지나 도시, 도로 개발 등 인간의 활동은 자연적인 침식보다 훨씬 큰 침식을 유발한다. 이를 가속화된 침식현상(accelerated erosion)이라 한다. 구체적으로 대규모 도시개발이나 산업단지개발, 관광단지나 체육시설, 산지개발, 또는 도로건설 등은 필연적으로 자연상태의 지형 및 식생, 토양 조건 등을 크게 변화시킨다. 이러한 대규모 개발 사업은 자연상태가 아니라도 논이나 밭 등 오랫동안 경작하여 안정된 지표면의 토양 및 식생상태를 급속히 변화시킨다. Goldman 등(1986)에 의하면 같은 조건의 비가 오더라도 개발사업으로 인한 토양손실은 그 전보다 2~40,000배까지 급속히 증가하는 것으로 알려져 있다.

이렇게 침식된 토사는 결국 개발지역 하류로 이송되어 하류 하천이나 저수지, 호수를 탁하게 만들고, 바닥에 퇴적된다. 특히 부유사의 형태로 이송된 점토나 실트 등 미세사(fine sediment)는 장시간에 걸쳐 하류 수역의 탁도를 증가시켜 음용수 취수의 수질 문제는 물론 수환경을 악화시켜 생태 서식처에 직접적인 피해를 준다. 사실상 개발사업으로 인한 토사유출 문제를 다룬 외국의 자료는 대부분 이러한 환경영향 피해에 초점을 맞추고 있다. 우리 나라에서 시행되고 있는 환경영향평가제에서도 개발사업으로 인한 공사 중 또는 공사 후의 하류 수역의 탁도 증가 방지에 초점을 맞추고 있다.

개발지역에서 침식된 토사량이 매우 큰 경우 위에서 언급한 수질악화에 의한 환경영향 피해를 넘은 토사매물이나 하상변동 등에 의한 물리적인 피해를 줄 수 있다. 구체적으로 상류에서 이송된 다량의 토사는 하류 하천의 바닥이나 하천 구조물 주위에 대규모로 퇴적되어 홍수시 하천 수위를 증가시키거나 하천구조

물의 기능에 장애를 줄 수 있다. 1990년초 용인지역에 내린 국지성 호우로 인해 골프장의 토사가 유실되어 하류지역에 큰 피해를 준 사례가 대표적이라 할 수 있다. 토사 재해가 아주 심한 경우 토석류(debris flows)를 유발시켜 하류 농경지와 주거지역을 휩쓸어 매몰시킬 수도 있다. 이러한 피해는 위에서 언급한 수질악화 등으로 인한 환경영향 피해와는 구분되는 것으로, 현재 시행중인 재해영향평가는 바로 이러한 대규모 물리적 피해를 방지하는 것이라 할 수 있다. 재해영향평가와 환경영향평가의 취지 상의 이러한 차이점은 개발사업으로 인한 토사유출 저감대책의 접근 방법에서 분명한 차이를 야기시킨다.

앞에서 살펴본 바와 같이 한 지역을 개발할 목적으로 지형을 인위적으로 바꾸거나 식생 등을 제거하는 경우 토양침식은 가속화되어 침식량은 개발 전보다 10~10,000배 정도 증가하게 된다. 이렇게 가속화된 토양침식은 유역 하류에 대규모 토사 유출을 유발시켜 상류에서 유실된 토사로 탁류가 형성되어 하류 하천, 호소 등에 환경문제를 야기시킬 수 있다. 이러한 토사 유출이 심한 경우 환경 문제는 물론 나아가서 농경지 등을 매몰시키거나 하천구조물의 기능에 직접 장애를 주거나 하상에 퇴적되어 홍수위를 상승시킬 수 있다.

이러한 토양침식 및 토사유출에 적절히 대응하기 위해 필요한 방안을 검토하기 위해서는 무엇보다도 상류 유역에서 침식되어 유출되는 토사에 대한 정보일 것이다. 이러한 정보는 토사유출 저감을 위한 대책을 수립하는데 기본적인 자료가 된다. 구체적으로 토사유출을 저감시킬 목적으로 하류에 침사지를 설계하는 경우 상류에서 유출되는 토사의 종류(크기, 조직 등)와 유출량 등은 적절한 크기와 기능을 가지는 침사지 설계에 기본적인 자료가 된다.

유역의 토양 손실량을 정확하게 추정하는 방법은 아직 없으며 현재로서 가장 바람직한 방법은 유사한 지역의 토양 손실량 실측 자료를 이용하는 것이다. 이러한 실측 자료가 없는 경우에는 미국에서 개발된 범용토양손실공식(USLE)과 같이 토양손실을 추정하는 방법 등을 이용할 수 있다.

2.2 범용토양손실공식

범용토양손실공식(USLE, Universal Soil Loss Equation)은 1960년 미국의

Wischmeier와 Smith(1960)에 의해 원래는 농경지에서의 토양손실 예측을 위해 개발되었다. 이 공식은 경험적 방법에 의해 개발되었지만 공식의 이름에서 알 수 있듯이 다른 지역에 대해 범용적으로 적용할 수 있다. 그 후 이 공식은 Wischmeier, Johnson과 Cross(1971)에 의해 건설현장에 확대 적용되었다. 이 공식은 유역의 기후(강우), 토양, 토지형태, 토지 이용 등의 변수를 이용하여 그 유역에서의 토양침식량(손실량)을 추정한다. USLE 공식을 이용하여 추정된 토양손실량은 해당 지역에서 강우에 의해 침식되어 하류로 유실되는 토사량으로서 '초기침식량'이라 한다. 나중에 침사지 설계에서 필요로 하는 침사지 저류공간의 크기는 이 양에다 유사전달률(sediment delivery ratio)과 침사지 포착률(trap efficiency) 및 퇴적토 단위중량(specific weight of sediment deposits)를 고려하여 추정할 수 있다.

USLE는 미국에서 개발되었기 때문에 원래는 영미단위를 사용하여 식 (1)과 같이 표시된다.

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1)$$

여기서 A 는 강우침식도 R 의 해당 기간 중 단위면적에서 침식되어 손실되는 토사량[tons/acre; tonnes/ha], R 은 강우침식도[100ft·tons/acre·in/hr; 10⁷ J/ha·mm/hr], K 는 토양침식성 인자(soil erodivity)[tons/acre/ R ; tonnes/ha/ R], LS 는 지형인자[무차원](L 은 침식경사면의 길이인자, S 는 침식 경사면의 경사인자), C 는 작물형태, 피복상태 등 경작 종류와 형태에 따른 경작인자[무차원], P 는 등고선 경작 등 토양보전대책인자[무차원]이다. 참고로 tons는 영미단위계, tonnes는 표준단위계(SI)로 1 [tons] = 0.91 [tonnes]이다. 또한 1 [acre] = 0.405 [ha]이다.

이 공식을 개발하기 위하여 Wischmeier와 Smith(1965)는 이른바 표준밭(unit plot)이라고 하는 길이 72.6 ft(22.1 m)와 9 % 경사를 가진 밭작물을 위한 나지(裸地)에서 대규모로 자료를 수집하였다. 따라서 USLE 상의 K 는 표준밭에서

단위 R 당 해당토양의 침식량을 의미한다. L 은 같은 조건 하에서 실제 경사면 길이에서의 토양손실량과 표준밭에서의 손실량의 비이며, S 도 마찬가지로 실제 경사에서의 토양손실량과 표준밭에서의 손실량의 비이다. C 와 P 또한 각각 해당 조건에서의 단위 면적당 손실량과 표준밭의 단위면적 당 손실량과의 비를 나타낸다. 이 공식의 토양침식량 A 값은 R 값이 1년 평균인 경우 1년 평균 손실량을 의미하며, 특정 호우의 R 값인 경우 그 특정 호우에 의한 손실량을 의미한다. 또한 이 공식은 이른바 박층침식(sheet erosion)과 골침식(rill erosion)에 대해서만 적용이 가능하며, 대형골침식(gully erosion)과 하안침식(channel erosion) 등의 경우 추가적인 침식량 보정이 필요하다. 여기서 골(rill)은 보통 인력으로 메울 수 있는 침식된 도랑을 의미하며, 대형골(gully)은 인력으로 복원할 수 없는 대규모로 침식된 골을 의미한다.

이 공식은 영미단위로 개발되었기 때문에 R , K , A 값을 표준단위계로 환산하려면 각각 1.70, 1.32, 2.24를 곱하면 된다. 즉 다음 식과 같은 관계가 있다.

$$R[10^7 \text{ J/ha} \cdot \text{mm/hr}] = 1.70 R[100 \text{ ft} \cdot \text{tons/acre} \cdot \text{in/hr}]$$

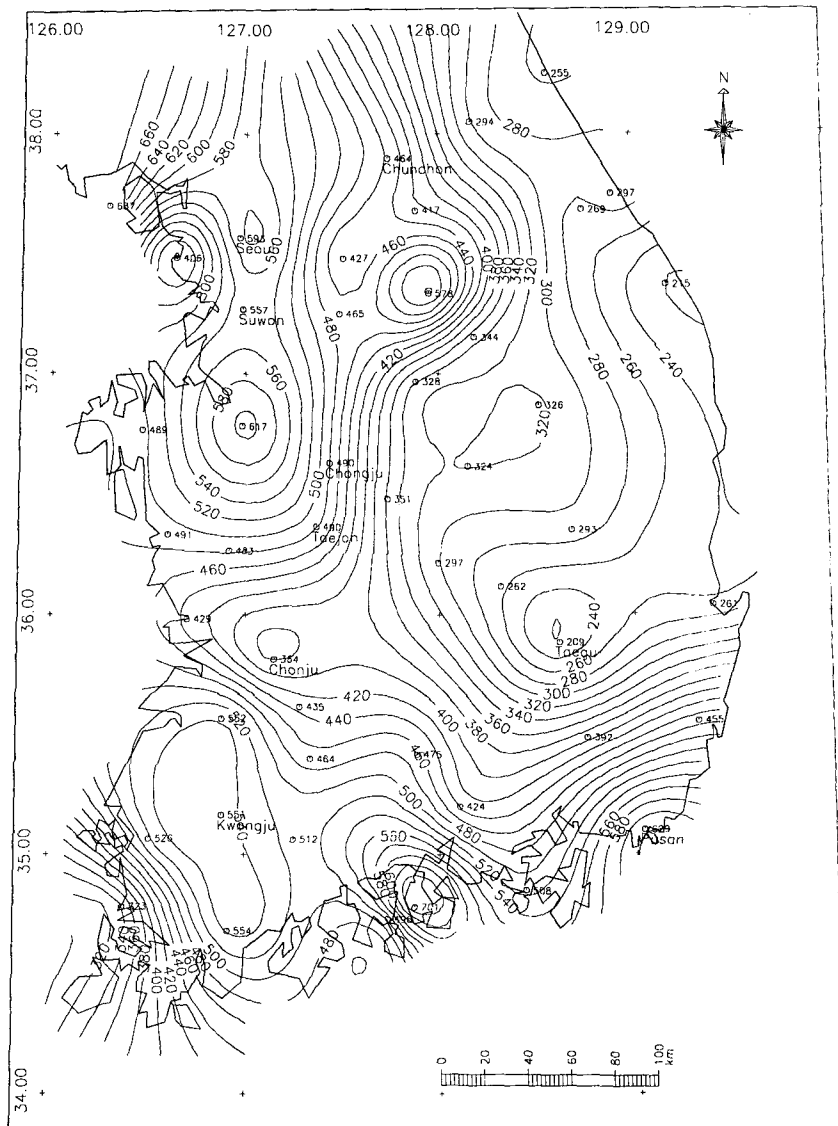
$$K[\text{tonnes/ha/R}] = 1.32 K[\text{tons/acre/R}]$$

$$A[\text{tonnes/ha}] = 2.24 A[\text{tons/acre}]$$

이 공식의 인자에 자세한 내용은 Wischmeier와 Smith(1960, 1965), Goldman(1998), 건설부(1992), 한국수자원학회(1998) 등의 문헌에 수록되어 있다. 본 연구에서는 관심의 대상인 R 인자에 대해서만 다루어 진다.

2.3 토양침식도(R)

범용토양손실공식(USLE)의 토양침식도인자(R)는 정상년 강우의 침식능력을 말한다. USLE는 원래 정상년의 R 을 기준으로 토양손실량 A 를 추정하도록 개발되었다. 연평균 R 값의 추정은 과거의 강우기록 자료를 이용하여 각각의 강우사상에 대해 R 값을 산정하고, 이를 이용하여 그 해의 평균 R 값을 구한



Annual R in Korea

그림 1. 연평균 등 R 선도(정필균 등, 1983)

다음에 이를 다시 연도에 대해 평균하여 구해진다. 우리나라의 경우 정필균 등 (1983)이 기상청 산하 51개 관측소의 1960~1980년대 걸쳐 6~21년의 자료를 이용하여 지점별 연평균 R 값을 산정하였고, 이를 이용하여 등 R 선도(isoerodent



그림 2. 연평균 등 R선도(현병근, 1998)

map)를 그림 1(본 연구에서 지점별 자료를 이용하여 재작성, 단위 : 10^7 J/ha·mm/hr)과 같이 제시한 바 있다. 이 자료는 비록 비교적 단기간 자료를 이용하여 작성되었지만 우리 나라 유일의 연평균 R값 자료로서 실무에 이용된 바 있

다. 이 자료는 연평균 R 값으로서 계절별, 월별 R 값은 아직 가용하지 않았다.

최근 현병근(1998)은 농업과학기술원과 미국 미주리(Missouri)대학과의 공동 연구로 1980~1990년대 강우자료를 보완하여 새로운 연평균 R 값을 산정하고 있으며 그림 2는 이 연구의 결과를 나타낸 것이다. 그림 1과 그림 2의 분포양상은 서로 비슷하나, 그림 2의 값이 그림 1보다 약간 작은 분포를 나타내고 있다.

연평균 R 값은 건설현장에서 단일호우에 의한 토양손실량 추정에 직접 사용하기는 곤란하다. 더욱이, 침사지 건설 목적에 따라 다르겠지만 주기적으로 침사지가 준설·정비되는 경우 단일호우에 의한 토양손실량을 수용하면서 주기적으로 준설·유지하는 것이 경제적이기 때문에 이 경우 1년 전체 손실량 값은 의미가 적다. 따라서 단일 호우에 대한 R 값을 추정하여 그에 따른 토양손실량을 예측하고 적절한 침사지를 설계하는 것이 바람직하다. 더욱이 재해 예방 목적으로 침사지를 설계하는 경우 침사지나 저류지 설계 기준이 되는 특정 생기빈도의 설계강우에 의한 R 값의 추정이 필요하다.

한 호우사상에 대한 R 값의 산정은 표준단위를 사용하면 다음과 같다(정필균 등, 1983).

● 침식지수 :

$$\overline{E} = 210 + 89 \log_{10} X \quad (2)$$

여기서 \overline{E} 는 침식지수[m · tonnes/ha/cm]로서 주어진 강우강도 하에서 1 cm 강우의 운동에너지이며, X 는 강우강도[cm/hr]이다.

● 강우에너지 :

$$E = P \times \overline{E} \quad (3)$$

여기서 E 는 강우에너지[m · tonnes/ha], P 는 강우량[cm]이다.

● 강우침식도 :

$$R = \frac{(\sum E) I_{30, \max}}{100} \quad (4)$$

여기서 R 은 강우침식도[10^7 J/ha · mm/hr]이며, $\sum E$ 은 총 강우에너지로 분리·이탈된 토사를 이송시키는 능력이며, $I_{30, \max}$ 는 30-min 지속 최대강우강도(cm/hr)로 모토양에서 토사를 분리·이탈시키는 능력(강우의 침식력)이다. 강우침식도의 단위에 1 [m · tonnes/ha · cm/hr] = 0.98 [10^7 J/ha · mm/hr]인 관계가 있으나 여러 가지 불확실성을 고려할 때 두 단위를 같게 볼 수 있다.

미국 Transportation Research Board(1980)의 국립합동도로연구프로그램(NCHRP)에 제시되어 있는 방법대로 임의 재현기간의 임의 지속기간 설계호우 사상의 R 값 산정을 위해서는 이른바 그 지역의 IDF(강우강도-지속시간-빈도)자료가 필요하다. 이 자료를 이용하여 R 값을 산정하기 위한 기본 가정은 임의 지속시간에 해당하는 최대호우에는 그 보다 적은 지속시간의 최대호우를 포함하며, 다시 그 호우에는 더 적은 지속시간의 최대호우를 포함한다는 것이다. 또한 토양손실량과 R 값과의 관계는 최대호우의 발생시기 같은 호우 특성에는 큰 영향을 받지 않는 것으로 알려져 있다(Wischmeier, 1959). 미국 Transportation Research Board(1980)의 국립합동도로연구프로그램(NCHRP)에 제시되어 있는 방법으로 임의 재현기간의 24 hr 지속 설계호우 사상 R 값을 계산하는 과정은 표 1에 보인 바와 같다.

국립방재연구소 박무종과 강대환 연구팀(한국수자원학회, 1998)은 24-hr 강우량을 구하고 이에 Huff 분포를 적용시키는 방법을 소개한 바 있다. 확률해석을 통하여 각 지속기간별 강우량을 구하는 데는 많은 비용과 시간이 소요되기 때문에 이 방법에서는 대상빈도의 24-hr 강우량만을 구하고 Huff의 시간특성인자

를 이용하여 30-min 간격으로 분배시킨 후 표 1에 보인 것과 유사한 방법으로 R 값을 추정하고 있다. 그러나 이 방법은 Huff의 시간분포를 이용하여 구한 30-min 지속기간의 강우량이 확률해석을 통해 구한 지속기간 30-min의 확률강우량보다 과소 추정될 수 있기 때문에 이에 따라 R 값도 과소 추정될 가능성이 있다.

표 1. 임의 재현기간의 24 hr 지속 설계호우 사상 R 값 산정 예

(1) 지속기간 [hr]	(2) 강우량 [cm]	(3) 간격당 강우량 [cm]	(4) 시간간격 [hr]	(5) 강우강도 [cm/hr]	(6) 강우 에너지 [m · tonnes/ha]
0.0	0.0	4.7	0.5	9.40	1,394
0.5	4.7	1.2	0.5	2.40	293
1.0	5.9	1.1	1.0	1.10	235
2.0	7.0	0.9	1.0	0.90	183
3.0	7.9	1.4	3.0	0.46	252
6.0	9.3	1.5	6.0	0.25	235
12.0	10.8	1.9	12.0	0.15	260
24.0	12.7				
(7) 강우침식도[10^7 J/ha · mm/hr] $I_{30, \max} = 9.4$ [cm/hr] $R = (\sum E) I_{30, \max} / 100 = 2,852 \times 9.4 / 100 = 268$					$\sum E = 2,852$

표 1에서 (1)란은 지속기간이며, (2)란은 특정 빈도의 지속기간별 강우량, (3)란은 (2)란에 나타나 있는 강우량의 간격, (4)란은 (1)란에 나타나 있는 지속기간의 간격, (5)란은 (3)÷(4)에 의한 강우강도이다. 표 1의 (6)란은 식 (2)에 (5)란의 강우강도를 적용하여 구한 \overline{E} 와 (2)란의 강우량을 식 (3)에 적용하여 구한 강우에너지이며 합계란은 강우에너지의 합이다. (7)란의 $I_{30, \max}$ 는 지속기간이 0.5 hr인 (5)란의 처음 두 강우강도 중의 최대값이며, R 은 식 (4)에 의해 계산된 값이다.

3. 임의 재현기간 24-hr 설계호우의 강우침식도

본 연구에서는 미국 Transportation Research Board(1980)의 국립합동도로연구프로그램(NCHRP)에 제시되어 있는 방법을 적용하여 R 값을 구하였다. 지속기간 30-min, 1, 2, 3, 6, 12, 24-hr의 확률강우량을 구하였으며, 식 (2)~식 (4)를 적용하였다.

3.1 확률 강우량

강우침식도(R)을 결정하기 위해서는 지속기간 30-min, 1, 2, 3, 6, 12, 24-hr의 확률강우량이 필요하다. 건설부(1988)는 전국의 확률강우량도를 작성하기 위하여 기상청 측후소의 지속기간 30-min, 1, 2, 3, 6, 12, 24-hr의 연최대치 강우량 계열을 정리한 바 있다. 대상 관측소는 14개소이며 자료기간은 관측개시년~1987년의 자료이다. 본 연구에서는 이 자료를 이용하여 극치-I형(extreme type-I) 분포로 확률강우량 재산정하였다. 재현기간별 지속기간별 확률강우량은 부록 A의 표 A-1~A-14에 수록되어 있다.

3.2 임의 재현기간의 24-hr 지속 설계호우의 강우침식도

임의 재현기간의 임의 지속기간 설계호우 사상의 R 값 산정을 위해서 부록 A-1~A-14의 재현기간별 지속기간별 확률강우량을 이용하였다. 표 1에 나타나 있는 절차를 이용하여 지점별로 재현기간별 24-hr 지속 설계호우의 강우침식도(R)을 구하였으며 그 결과는 표 2와 같다. 표 2를 이용하여 재현기간별로 등 R 선도를 작성하면 그림 3~그림 13과 같다.

표 2. 지속시간 24-hr의 지점별 강우침식도 $R [10^7 \text{ J/ha} \cdot \text{mm/hr}]$

지점 \ 빈도(yr)	2	5	10	20	30	50	80	100	150	200	500
속 초(090)	111	238	350	482	566	684	802	861	975	1058	1355
강 룡(105)	109	223	321	435	508	608	710	759	856	928	1176
서 울(108)	186	407	604	835	985	1192	1399	1503	1704	1853	2375
인 천(112)	155	327	477	651	763	917	1071	1149	1296	1406	1790
수 원(119)	190	358	499	658	760	898	1035	1102	1233	1329	1665
추풍령(135)	94	164	223	287	328	385	440	467	520	558	692
포 향(138)	85	159	222	293	338	400	461	492	551	595	745
대 구(143)	94	194	281	380	445	534	622	667	753	816	1037
전 주(146)	146	304	444	603	708	850	993	1064	1202	1303	1659
울 산(152)	142	296	431	586	685	823	961	1030	1162	1261	1606
광 주(156)	125	227	311	407	467	549	632	672	750	808	1007
부 산(159)	148	326	484	668	788	953	1118	1203	1363	1482	1898
목 포(165)	113	217	306	406	471	559	648	690	774	837	1052
여 수(168)	178	340	480	638	739	878	1015	1084	1215	1312	1650
평 균	134	270	388	524	611	731	851	910	1025	1110	1408

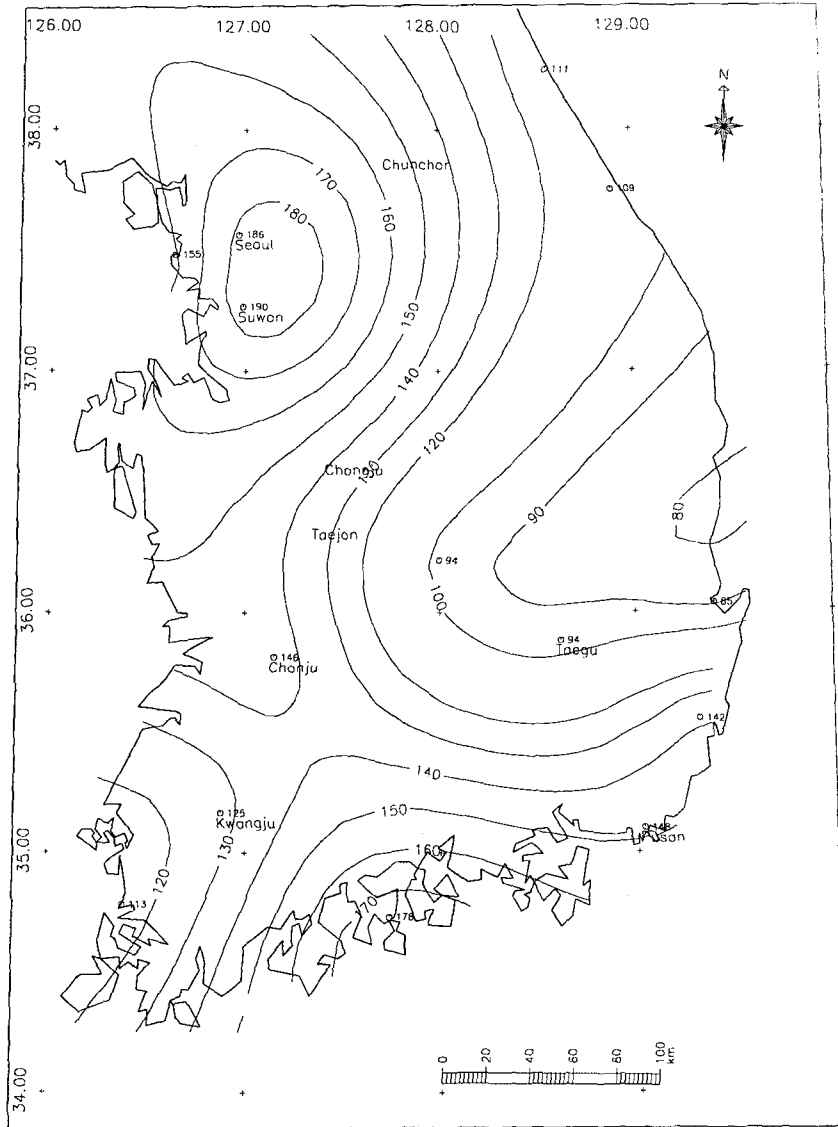


그림 3. 재현기간 2-yr, 지속기간 24-hr 설계호우의 등 R 선도

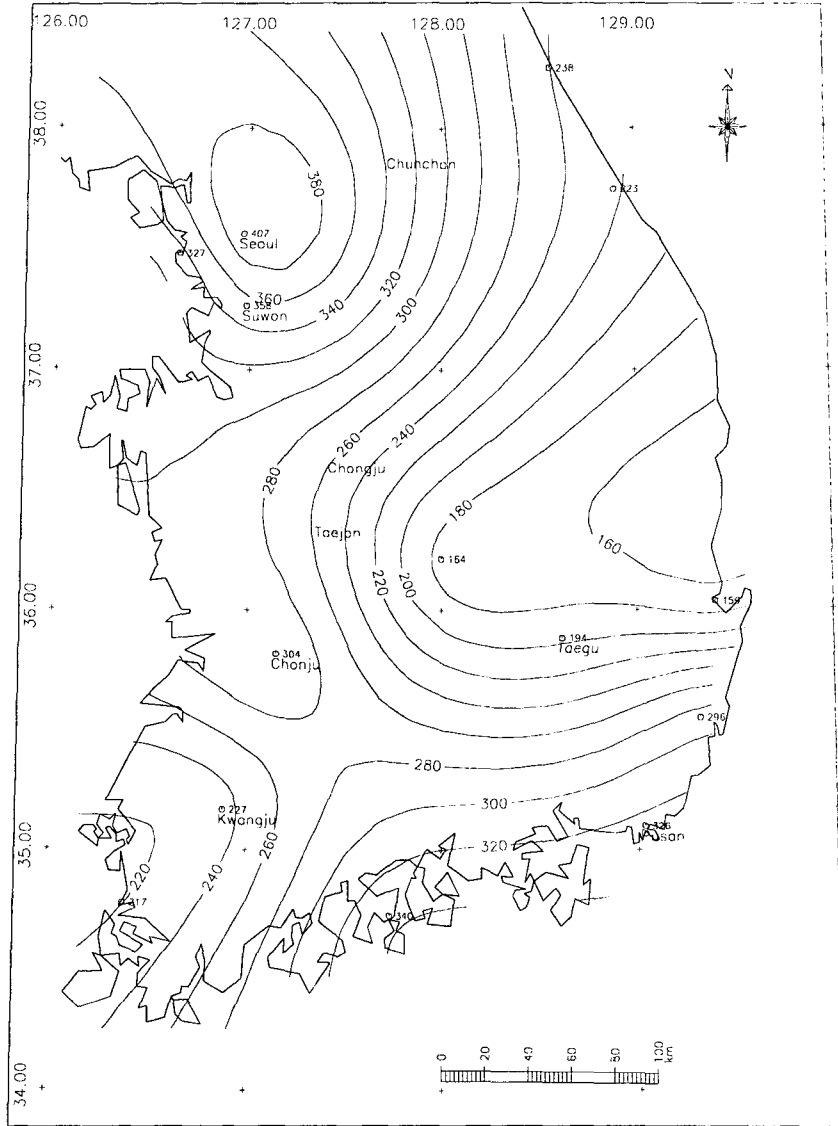


그림 4. 재현기간 5-yr, 지속기간 24-hr 설계호우의 등 R 선도

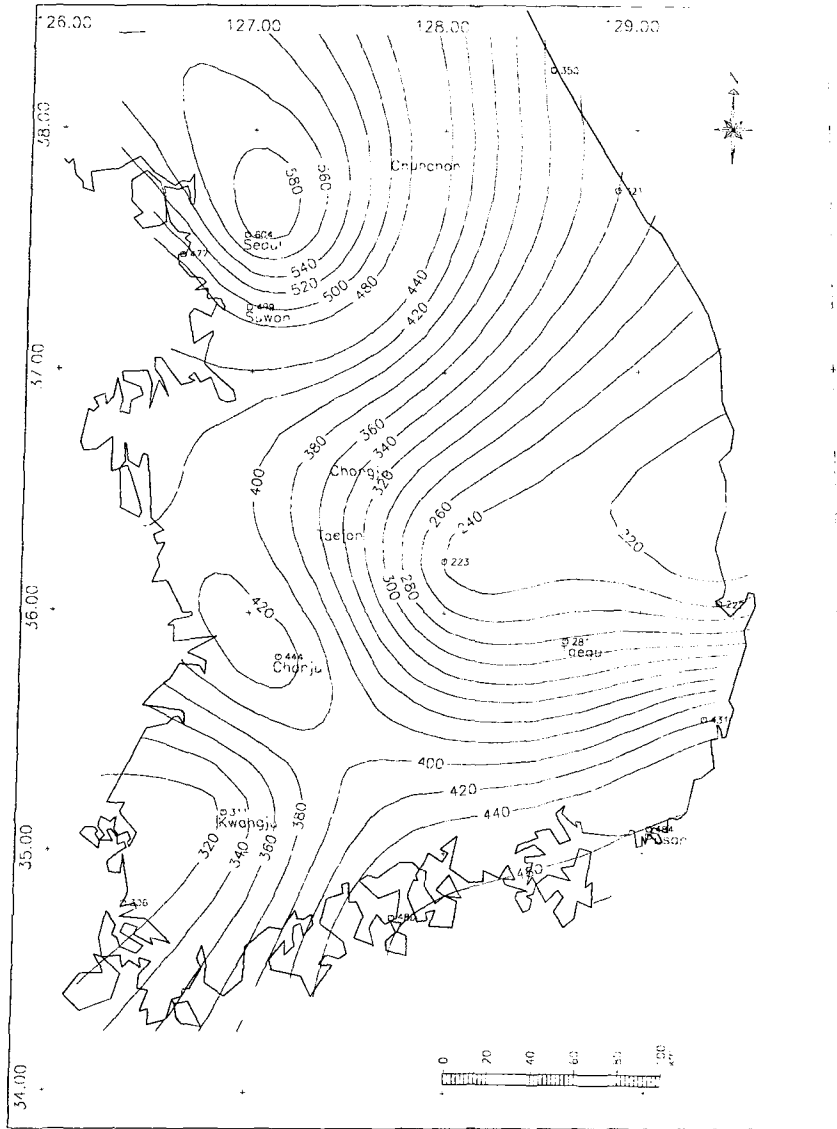


그림 5. 재현기간 10-yr, 지속기간 24-hr 설계호우의 등 R선도

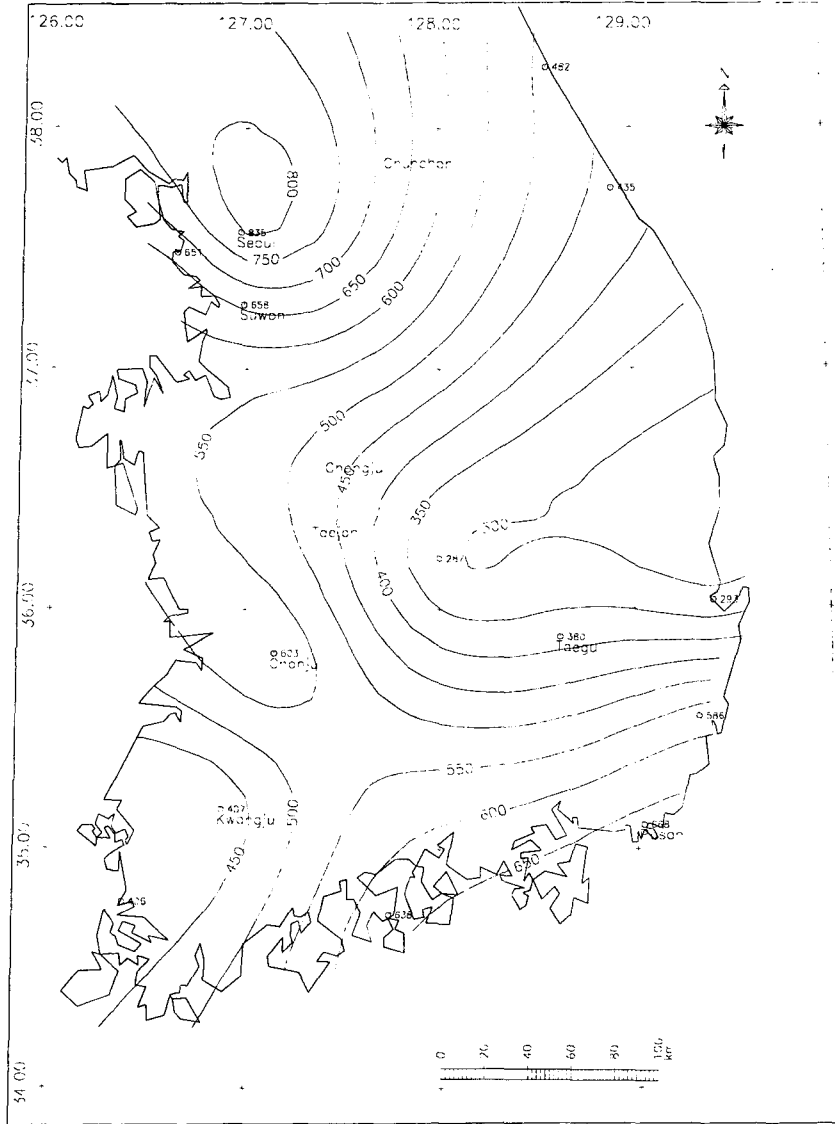


그림 6. 재현기간 20-yr, 지속기간 24-hr 설계호우의 등 R선도

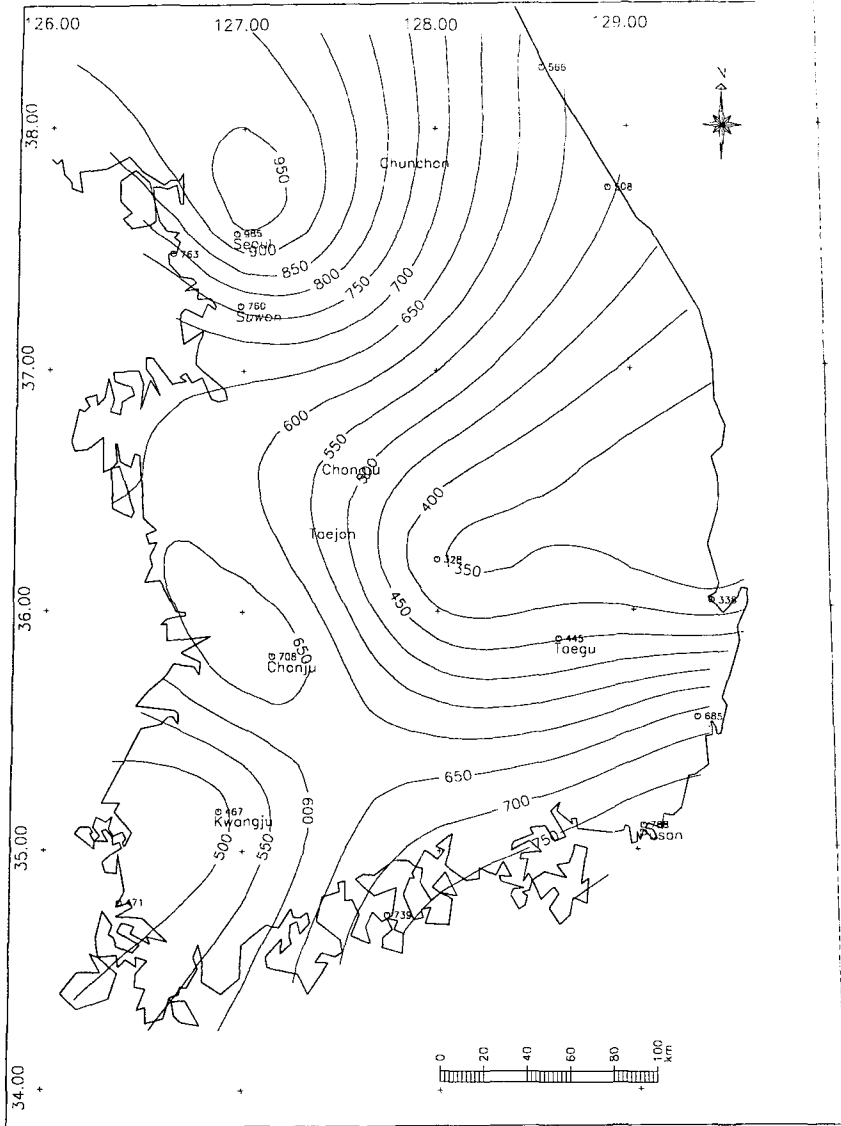


그림 7. 재현기간 30-yr, 지속기간 24-hr 설계호우의 등 R 선도

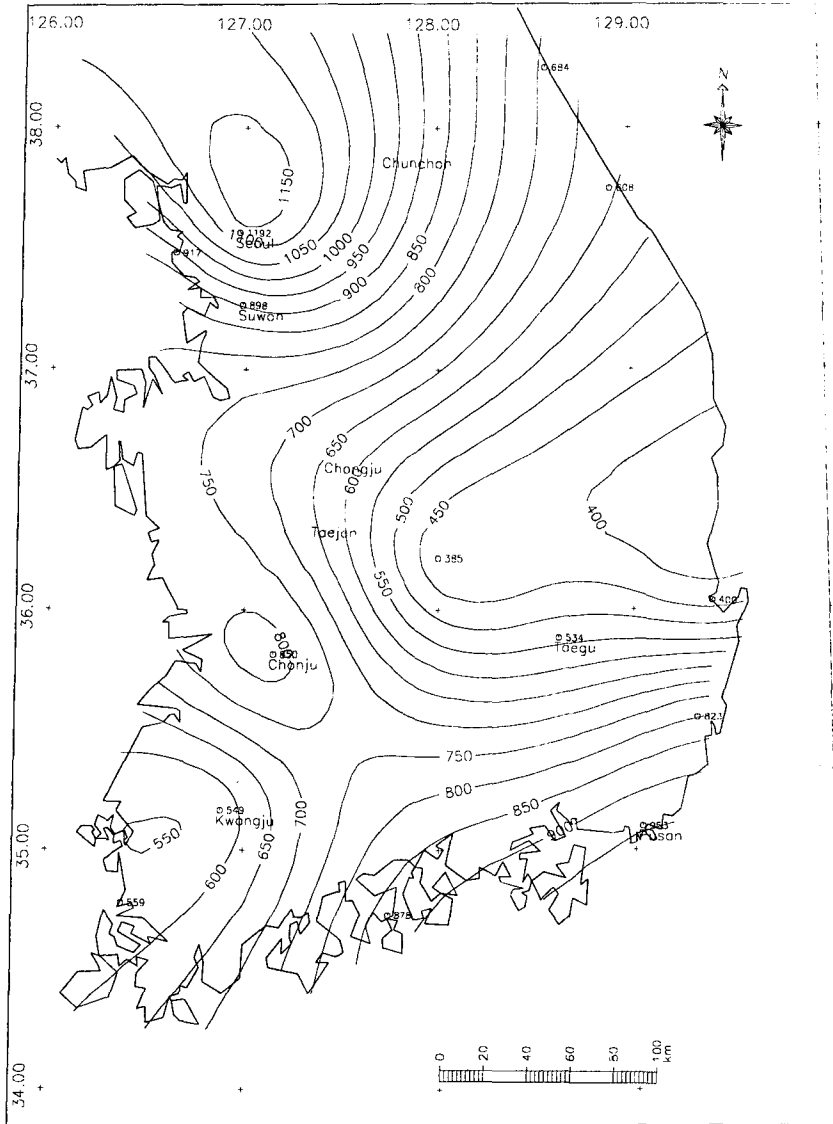


그림 8. 재현기간 50-yr, 지속기간 24-hr 설계호우의 등 R 선도

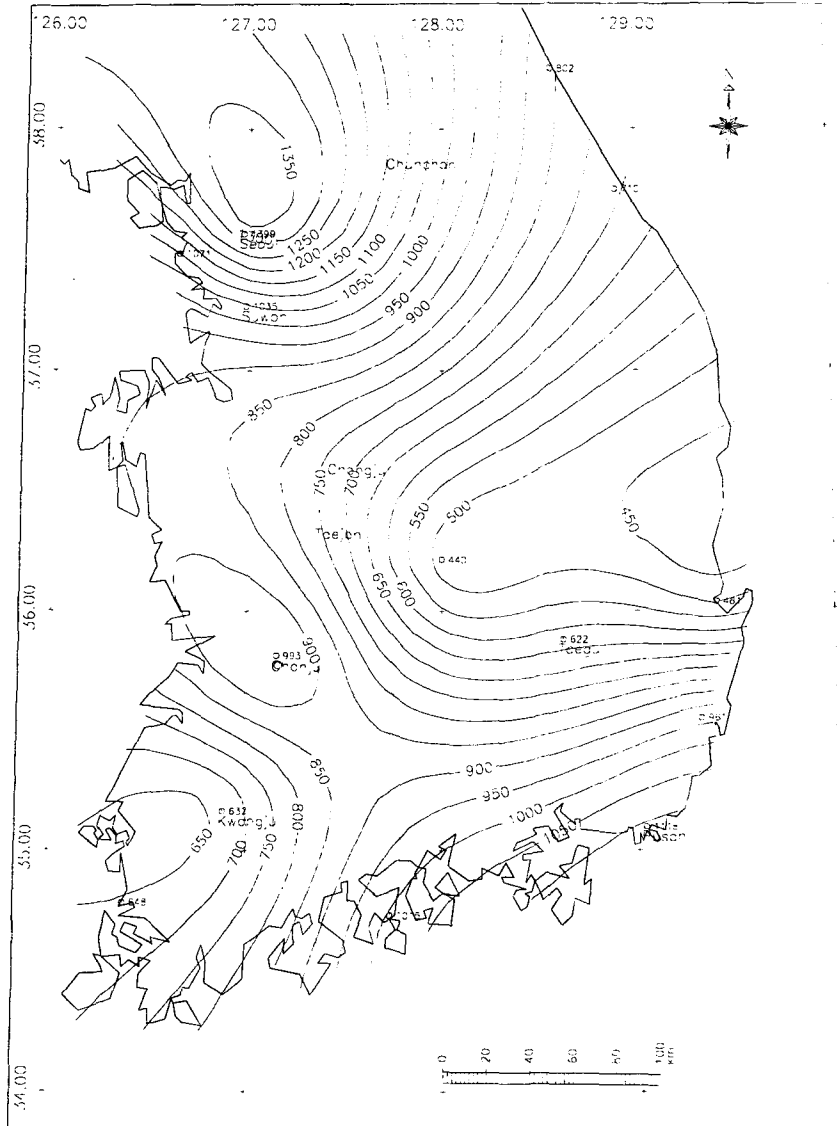


그림 9. 재현기간 80-yr, 지속기간 24-hr 설계호우의 등 R선도

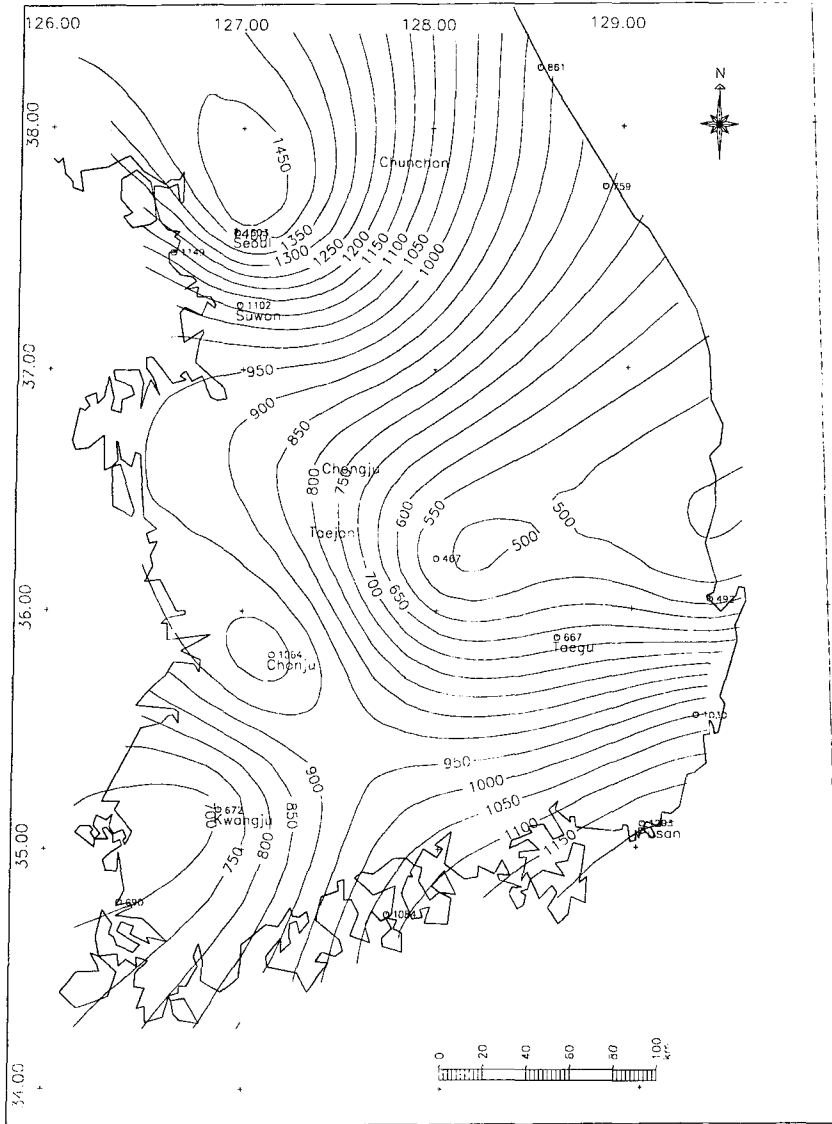


그림 10. 재현기간 100-yr, 지속기간 24-hr 설계호우의 등 R 선도

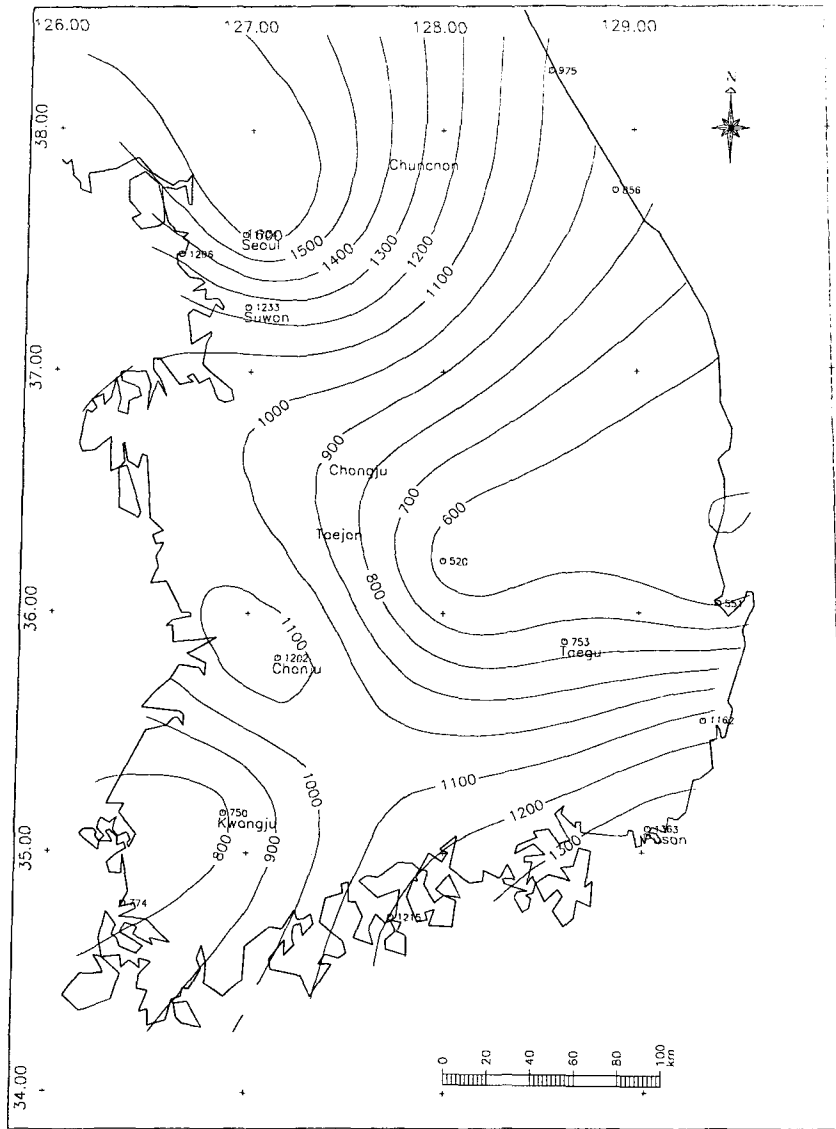


그림 11. 재현기간 150-yr, 지속기간 24-hr 설계호우의 등 R선도

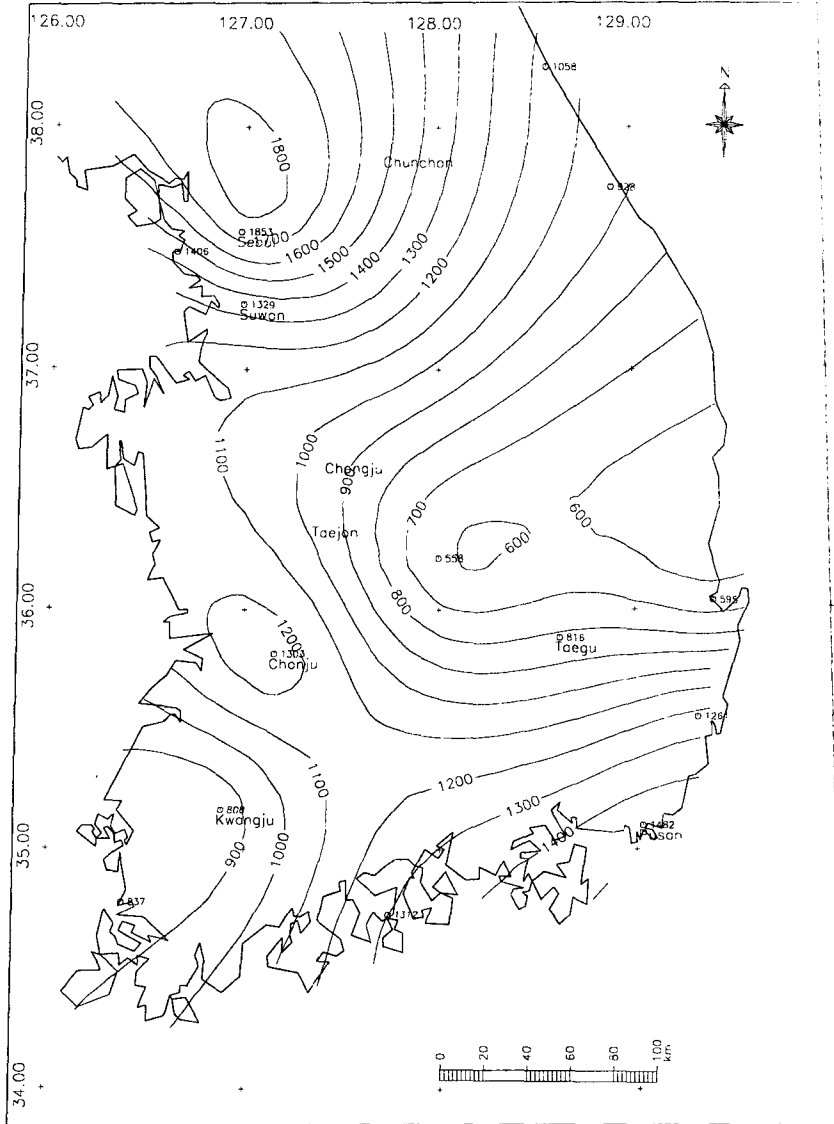


그림 12. 재현기간 200-yr, 지속기간 24-hr 설계호우의 등 R선도

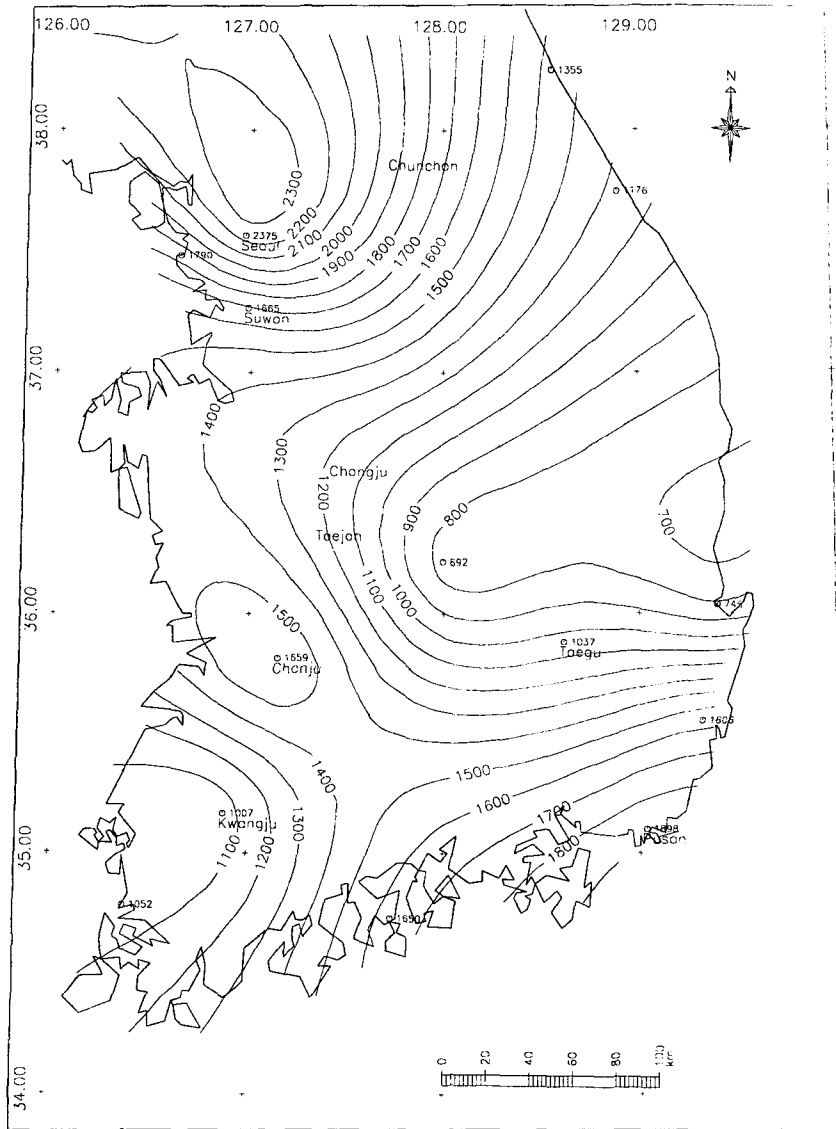


그림 13. 재현기간 500-yr, 지속기간 24-hr 설계호우의 등 R선도

그림 1에 나타나 있는 정필균 등(1983)의 연평균 R 값 분포는 그림 5에 나타나 있는 재현기간 10-yr의 R 값 분포보다 약간 큰 값을 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 그림 2에 나타나 있는 현병근(1998)의 R 값 분포는 그림 4에 나타나 있는 재현기간 5-yr의 분포와 매우 비슷한 값을 보이고 있음을 알 수 있다. 최근까지의 강우자료가 이용되어 계산된 현병근의 연평균 등 R 선도를 선택한다면, 연평균 R 값을 재현기간 5-yr, 지속기간 24-hr 설계호우의 R 값으로 간주할 수 있을 것으로 판단된다. 그림 3~그림 13은 재현기간에 따라 값은 증가하지만 분포 형태가 모두 유사하기 때문에 재현기간 5-yr의 R 값 또는 연평균 R 값만 알면 표 3 및 그림 14에 나타나 있는 배율을 곱하여 다른 재현기간의 R 값을 대략 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

표 3. 재현기간 5-yr(또는 연평균)의 R 값 대비 재현기간별 배율

빈도(yr) \ 지점	2	5	10	20	30	50	80	100	150	200	500
전국 평균	134	270	388	524	611	731	851	910	1025	1110	1408
5-yr 빈도 대비 배율	0.50	1.00	1.44	1.94	2.26	2.71	3.15	3.37	3.80	4.11	5.21

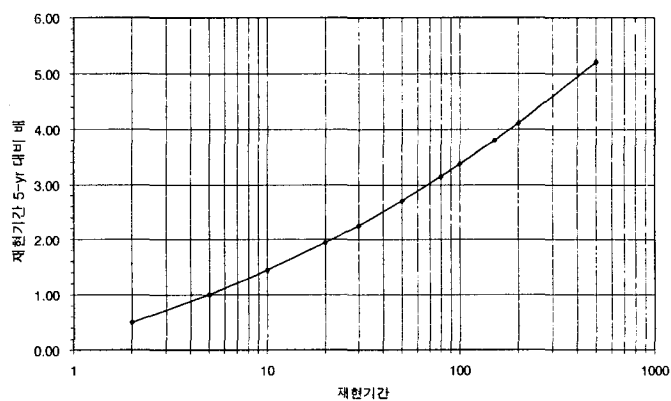


그림 14. 재현기간 5-yr의 R 값 대비 재현기간별 배율

4. 결론

본 연구에서는 미국 Transportation Research Board(1980)의 국립합동도로연구프로그램(NCHRP)에 제시되어 있는 방법을 적용하여 재현기간 2, 5, 10, 20, 30, 50, 80, 100, 150, 200, 500-yr의 24-hr 설계호우에 대한 R 값을 추정하였으며 이를 이용하여 재현기간별 등 R 선도를 작성하였다. 이를 이용하여 필요한 재현기간의 24-hr 설계호우에 대한 R 값을 추정할 수 있다. 본 연구에서 구한 재현기간별 등 R 선도를 현병근(1998)의 연평균 등 R 선도와 비교한 바, 본 연구의 재현기간 5-yr, 24-hr 설계호우의 R 값이 현병근(1998)의 연평균 R 값과 매우 유사한 분포를 나타냄을 알 수 있었다. 따라서 연평균 등 R 선도를 재현기간 5-yr, 24-hr 설계호우의 R 값으로 간주할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서 추정된 재현기간별 R 값은 재현기간에 따라 값은 증가하지만 분포 형태가 모두 유사하기 때문에 재현기간 5-yr에 대한 값만 알면 적절한 배율을 곱하여 임의 재현기간의 R 값을 대략 추정할 수도 있을 것으로 판단된다.

그러나 한 호우사상에 의한 R 값과 그에 따른 토양손실량 추정은 USLE 특성상 연평균 값들에 비해 그 신뢰도가 떨어진다. 더욱이 본 연구에서와 같이 설계호우에 의한 R 값 산정은 불확실성이 더 크다. 이 점에서 실무에서 USLE를 이용하는 경우 연평균 R 값(이 경우 연평균 R 값은 하나의 설계 지표가 될 수 있음)과 설계호우에 의한 R 값을 비교·검토하여 적절히 판단하여야 할 것이다. 이 점에 대해서는 아직 적절한 기준이 제시되고 있지 않기 때문에 '엔지니어링 센스'가 요구된다.

참고문헌

- 건설부 (1992). 댐 설계를 위한 유역단위 비유수량 조사·연구. 한국건설기술연구원
- 정필균, 고문환, 임정남, 윤기대, 최대웅 (1983). “토양유실량 예측을 위한 강우 인자의 분석.” 토양비료학회지, 제16권, 제2호, pp. 112-118.
- 한국수자원학회 (1998). 제6회 수공학특집 교재.
- 현병근 (1998). 소수계내 지속농업을 위한 농업환경 및 관리기술 개발 - 소수계내 토양유실 및 유출예측 모델 개발. 귀국보고서, 농업과학기술원 토양관리과.
- Goldman, S.J., Jackson, K. and Bursztynsky, T.A. (1986). *Erosion and sediment control handbook*. McGraw-Hill Book Company.
- Transportation Research Board (1980). *Design of sedimentation basin*. National Cooperative Highway Research Program - Synthesis of Highway Practice 70, National Research Council, Washington D.C.
- Wischmeier, W.H. (1959). “A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation.” *Proc.*, Soil Science Society of America, Vol. 23, No. 3, pp. 246-249.
- Wischmeier, W.H. and Smith, D.D, “A universal soil-loss equation to guide conservation farm planning.” *7th International Congress of Soil Science*, Madison, Wisc.
- Wischmeier, W.H., Johnson, C.B. and Cross, B.V. (1971). “A soil erodivity nomograph for farm land and conservation sites.” *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 26, No. 5.

부록. 지점별 확률강우량

표 A-1. 속초(090) 지점 확률강우량(mm)

빈도 지속기간	2	5	10	20	30	50	80	100	150	200	500
0.5	17.53	24.86	29.72	34.37	37.05	40.40	43.47	44.92	47.56	49.42	55.36
1.0	28.53	37.82	43.98	49.88	53.28	57.53	61.41	63.25	66.59	68.96	76.49
2.0	43.63	58.68	68.65	78.21	83.72	90.59	96.89	99.87	105.28	109.11	121.30
3.0	54.95	73.93	86.49	98.54	105.48	114.15	122.08	125.84	132.65	137.49	152.85
6.0	81.72	109.88	128.54	146.43	156.72	169.58	181.36	186.93	197.05	204.22	227.03
12.0	115.57	150.32	173.33	195.40	208.10	223.97	238.50	245.38	257.86	266.71	294.85
24.0	155.90	222.45	266.50	308.76	333.07	363.46	391.28	404.46	428.36	445.30	499.18

표 A-2. 강릉(105) 지점 확률강우량(mm)

빈도(yr) 지속기간(hr)	2	5	10	20	30	50	80	100	150	200	500
0.5	18.05	24.36	28.54	32.54	34.85	37.73	40.37	41.61	43.88	45.49	50.59
1.0	27.24	38.13	45.35	52.27	56.25	61.22	65.78	67.94	71.85	74.62	83.45
2.0	41.76	59.19	70.72	81.79	88.16	96.12	103.40	106.85	113.11	117.54	131.65
3.0	53.41	76.10	91.13	105.54	113.83	124.20	133.69	138.18	146.33	152.11	170.48
6.0	78.77	113.05	135.75	157.52	170.05	185.71	200.04	206.83	219.14	227.87	255.63
12.0	113.14	161.74	193.91	224.78	242.53	264.73	285.04	294.66	312.12	324.49	363.84
24.0	149.89	212.13	253.34	292.87	315.61	344.03	370.05	382.37	404.73	420.57	470.97

표 A-3. 서울(108) 지점 확률강우량(mm)

빈도(yr) 지속기간(hr)	2	5	10	20	30	50	80	100	150	200	500
0.5	29.54	42.23	50.63	58.69	63.32	69.11	74.42	76.93	81.49	84.72	94.99
1.0	45.54	65.45	78.63	91.27	98.55	107.64	115.96	119.90	127.06	132.12	148.25
2.0	60.07	85.12	101.71	117.62	126.78	138.22	148.69	153.66	162.66	169.03	189.32
3.0	75.63	103.82	122.48	140.39	150.68	163.56	175.34	180.92	191.05	198.22	221.05
6.0	101.58	138.32	162.65	185.99	199.41	216.20	231.56	238.83	252.03	261.39	291.14
12.0	123.91	170.52	201.37	230.97	248.00	269.29	288.77	298.00	314.74	326.61	364.35
24.0	146.20	212.59	256.55	298.72	322.98	353.30	381.06	394.20	418.05	434.95	488.72

표 A-4. 인천(112) 지점 확률강우량(mm)

빈도(yr) 지속기간(hr)	2	5	10	20	30	50	80	100	150	200	500
0.5	27.91	37.30	43.52	49.48	52.91	57.20	61.12	62.98	66.35	68.74	76.35
1.0	41.21	56.31	66.31	75.91	81.42	88.32	94.64	97.63	103.05	106.90	119.13
2.0	59.07	82.18	97.49	112.17	120.62	131.17	140.84	145.41	153.72	159.60	178.32
3.0	69.12	96.68	114.93	132.43	142.49	155.08	166.60	172.05	181.95	188.97	211.28
6.0	91.10	131.65	158.51	184.26	199.08	217.60	234.55	242.58	257.15	267.48	300.32
12.0	112.34	164.51	199.05	232.18	251.24	275.06	296.87	307.20	325.94	339.22	381.46
24.0	130.98	194.86	237.16	277.73	301.07	330.24	356.95	369.60	392.54	408.81	460.53

표 A-5. 수원(119) 지점 확률강우량(mm)

비도(yr) 지속기간(hr)	2	5	10	20	30	50	80	100	150	200	500
0.5	29.48	36.67	41.42	45.99	48.61	51.89	54.90	56.32	58.90	60.73	66.55
1.0	42.18	53.61	61.18	68.44	72.61	77.83	82.61	84.87	88.98	91.89	101.15
2.0	59.74	79.88	93.22	106.01	113.36	122.56	130.98	134.97	142.20	147.33	163.64
3.0	71.46	93.87	108.71	122.95	131.14	141.38	150.75	155.18	163.23	168.94	187.09
6.0	93.07	123.23	143.19	162.35	173.36	187.14	199.74	205.71	216.54	224.22	248.64
12.0	121.83	166.21	195.60	223.79	240.00	260.27	278.83	287.62	303.56	314.86	350.80
24.0	152.47	220.19	265.03	308.04	332.78	363.70	392.01	405.42	429.75	446.98	501.82

표 A-6. 추풍령(135) 지점 확률강우량(mm)

비도(yr) 지속기간(hr)	2	5	10	20	30	50	80	100	150	200	500
0.5	20.90	27.14	31.27	35.23	37.51	40.36	42.97	44.21	46.45	48.04	53.09
1.0	30.03	38.67	44.38	49.87	53.02	56.97	60.57	62.28	65.39	67.58	74.57
2.0	40.24	51.34	58.69	65.74	69.80	74.87	79.51	81.71	85.70	88.52	97.51
3.0	49.46	61.35	74.20	83.65	89.09	95.89	102.11	105.05	110.40	114.19	126.24
6.0	66.33	84.39	96.34	107.81	114.40	122.65	130.20	133.77	140.25	144.85	159.47
12.0	88.83	113.41	129.69	145.30	154.28	165.51	175.79	180.65	189.48	195.74	215.65
24.0	113.66	145.82	167.12	187.55	199.30	213.99	227.44	233.81	245.37	253.55	279.60

표 A-7. 포항(138) 지점 확률강우량(mm)

비도(yr) 지속기간(hr)	2	5	10	20	30	50	80	100	150	200	500
0.5	19.23	25.82	30.18	34.37	36.77	39.78	42.53	43.84	46.20	47.88	53.21
1.0	27.62	36.78	42.84	48.65	52.00	56.18	60.01	61.82	65.11	67.44	74.86
2.0	38.19	49.23	56.54	63.55	67.58	72.62	77.24	79.43	83.39	86.20	95.14
3.0	46.26	61.18	71.06	80.54	85.99	92.80	99.04	102.00	107.36	111.15	123.24
6.0	65.16	85.49	98.94	111.86	119.28	128.57	137.06	141.09	148.39	153.57	170.03
12.0	87.27	117.70	137.84	157.16	168.28	182.17	194.89	200.92	211.85	219.59	244.23
24.0	112.45	148.35	172.12	194.92	208.03	224.43	239.43	246.54	259.44	268.58	297.65

표 A-8. 대구(143) 지점 확률강우량(mm)

비도(yr) 지속기간(hr)	2	5	10	20	30	50	80	100	150	200	500
0.5	23.29	32.32	38.30	44.04	47.34	51.46	55.24	57.03	60.27	62.57	69.88
1.0	32.37	45.36	53.96	62.22	66.96	72.90	78.33	80.90	85.57	88.87	99.39
2.0	44.42	60.99	71.96	82.48	88.53	96.10	103.03	106.31	112.26	116.48	129.89
3.0	51.62	70.85	83.57	95.78	102.80	111.58	119.62	123.43	130.33	135.22	150.79
6.0	65.65	89.42	105.16	120.26	128.95	139.81	149.74	154.45	162.99	169.04	188.30
12.0	80.33	111.63	132.35	152.23	163.67	177.97	191.05	197.25	208.49	216.46	241.81
24.0	101.45	141.35	167.77	193.11	207.69	225.91	242.59	250.49	264.82	274.98	307.29

표 A-9. 전주(146) 지점 확률강우량(mm)

빈도(yr) 지속기간(hr)	2	5	10	20	30	50	80	100	150	200	500
0.5	28.47	38.46	45.07	51.42	55.06	59.62	63.80	65.78	69.36	71.91	79.99
1.0	40.85	56.44	66.76	76.66	82.35	89.47	95.99	99.07	104.67	108.64	121.26
2.0	56.63	78.18	92.45	106.14	114.01	123.86	132.87	137.13	144.88	150.36	167.82
3.0	64.48	90.07	107.01	123.26	132.61	144.29	154.99	160.06	169.25	175.76	196.48
6.0	84.15	118.18	140.70	162.31	174.74	190.28	204.50	211.24	223.46	232.12	259.67
12.0	103.23	145.28	173.12	199.82	215.18	234.39	251.96	260.29	275.39	286.10	320.14
24.0	121.43	178.08	215.58	251.56	272.26	298.13	321.81	333.03	353.38	367.80	413.67

표 A-10. 울산(152) 지점 확률강우량(mm)

빈도(yr) 지속기간(hr)	2	5	10	20	30	50	80	100	150	200	500
0.5	23.41	32.36	38.28	43.96	47.23	51.31	55.05	56.82	60.04	62.31	69.56
1.0	34.35	48.56	57.96	66.99	72.18	78.67	84.61	87.42	92.53	96.14	107.65
2.0	52.00	74.67	89.68	104.08	112.36	122.72	132.19	136.68	144.83	150.60	168.95
3.0	64.18	91.97	110.37	128.02	138.18	150.87	162.49	167.99	177.98	185.05	207.56
6.0	91.93	131.45	157.61	182.71	197.15	215.20	231.71	239.54	253.73	263.79	295.79
12.0	120.56	169.73	202.29	233.52	251.48	273.94	294.50	304.23	321.89	334.41	374.23
24.0	145.51	205.64	245.45	283.63	305.60	333.06	358.19	370.10	391.69	407.00	455.68

표 A-11. 광주(156) 지점 확률강우량(mm)

빈도(yr) 지속기간(hr)	2	5	10	20	30	50	80	100	150	200	500
0.5	25.43	32.71	37.53	42.16	44.82	48.14	51.19	52.63	55.24	57.10	62.99
1.0	35.14	45.96	53.12	60.00	63.95	68.89	73.42	75.56	79.44	82.20	90.96
2.0	47.68	62.05	71.57	80.69	85.95	92.51	98.52	101.36	106.53	110.19	121.82
3.0	56.44	73.63	85.01	95.92	102.20	110.05	117.24	120.64	126.82	131.19	145.11
6.0	76.82	100.28	115.82	130.72	139.29	150.00	159.81	164.46	172.88	178.86	197.85
12.0	98.12	129.42	150.14	170.01	181.44	195.74	208.82	215.01	226.26	234.22	259.56
24.0	120.62	161.83	189.11	215.28	230.33	249.15	266.37	274.53	289.33	299.82	333.19

표 A-12. 부산(159) 지점 확률강우량(mm)

빈도(yr) 지속기간(hr)	2	5	10	20	30	50	80	100	150	200	500
0.5	25.54	37.78	45.88	53.65	58.12	63.71	68.83	71.25	75.65	78.76	88.67
1.0	38.81	57.22	69.42	81.12	87.84	96.26	103.96	107.60	114.22	118.91	133.82
2.0	55.60	79.83	95.87	111.26	120.11	131.17	141.30	146.10	154.80	160.97	180.58
3.0	68.86	98.31	117.81	136.51	147.27	160.72	173.03	178.86	189.44	196.93	220.78
6.0	94.33	130.07	153.74	176.44	189.49	205.82	220.76	227.84	240.68	249.78	278.72
12.0	117.81	163.09	193.06	221.81	238.35	259.03	277.95	286.92	303.18	314.70	351.36
24.0	137.13	191.61	227.67	262.27	282.17	307.05	329.82	340.61	360.18	374.04	418.16

표 A-13. 목포(165) 지점 확률강우량(mm)

빈도(yr) 지속기간(hr)	2	5	10	20	30	50	80	100	150	200	500
0.5	23.83	30.79	35.40	39.82	42.36	45.54	48.45	49.82	52.32	54.10	59.73
1.0	33.53	42.42	48.31	53.96	57.21	61.27	64.99	66.75	69.95	72.21	79.42
2.0	46.21	58.07	65.92	73.45	77.78	83.20	88.15	90.50	94.76	97.78	107.38
3.0	55.96	71.99	82.61	92.79	98.65	105.97	112.67	115.84	121.60	125.68	138.66
6.0	74.59	99.32	115.69	131.39	140.42	151.72	162.05	166.95	175.83	182.12	202.14
12.0	95.07	134.03	159.83	184.57	198.81	216.60	232.89	240.61	254.60	264.52	296.07
24.0	116.96	165.21	197.16	227.80	245.43	267.47	287.64	297.20	314.53	326.81	365.89

표 A-14. 여수(168)지점 확률강우량(mm)

빈도(yr) 지속기간(hr)	2	5	10	20	30	50	80	100	150	200	500
0.5	27.16	36.54	42.74	48.70	52.12	56.40	60.32	62.18	65.54	67.93	75.52
1.0	40.99	55.20	64.62	73.64	78.84	85.33	91.27	94.09	99.19	102.81	114.32
2.0	55.91	75.77	88.92	101.54	108.79	117.87	126.17	130.10	137.24	142.29	158.38
3.0	68.44	93.06	109.36	125.00	133.99	145.24	155.53	160.40	169.25	175.51	195.45
6.0	92.36	124.50	145.77	166.18	177.91	192.59	206.02	212.38	223.92	232.10	258.12
12.0	125.35	169.09	198.05	225.83	241.81	261.79	280.07	288.73	304.44	315.58	351.00
24.0	155.52	210.00	246.07	280.66	300.57	325.45	348.22	359.00	378.57	392.44	436.55