

수정 IAS 지수를 이용한 강우침식인자 추정

Estimation of Rainfall-runoff Erosivity Using Modified Institute of Agricultural Sciences Index

이 준 학* / 오 경 두** / 허 준 행***

Lee, Joon-Hak / Oh, Kyoung-Doo / Heo, Jun-Haeng

Abstract

The purpose of this study is to evaluate the existing method of calculating rainfall-runoff erosivity using monthly precipitation, such as Fournier's index, modified Fournier's index, IAS (Institute of Agricultural Sciences) index, etc., and to present more reasonable regression model based on monthly rainfall data in Korea. This study introduced a new simplified method of calculating rainfall-runoff erosivity based on monthly precipitation, called by modified IAS index. It was expanded form IAS index which is the simple calculation method by summing up the rainfall amount of two months with maximum amount. Monthly precipitation and annual rainfall-runoff erosivity at 21 weather stations for over 25 years were used to analyze correlation relationship and regression model. The result shows that modified IAS index is the more reasonable parameter for estimating rainfall-runoff erosivity of the middle-western and south-western regions in Korea.

Keywords : MIAS index, Monthly precipitation, Rainfall-runoff erosivity, RUSLE, Soil erosion

요 지

본 연구의 목적은 월강우량을 이용하여 강우침식인자를 추정하는 기존의 방법인, Fournier 지수, modified Fournier 지수, IAS (Institute of Agricultural Sciences) 지수 등의 적용성을 확인하고 더 합리적인 월강우량 기반의 강우침식인자 추정모형을 제시하기 위한 것이다. 본 연구에서는 월강우량 기반의 수정 IAS 지수를 새롭게 제안하였다. 이것은 연중 가장 비가 많이 내린 두 달의 강우량의 합으로써 강우침식인자를 추정하는 기존의 IAS 지수의 개념을 확장한 것이다. 본 연구에서는 25년 이상의 21개 지점에 대한 월강우량 및 연 강우침식인자를 토대로 각 추정방법에 대한 상관분석 및 회귀분석을 실시하였다. 그 결과 수정 IAS 지수가 기존의 연강수량 및 월강우량을 이용한 추정방법보다 우리나라 중서부 및 남서부 지역의 강우침식인자의 변동을 잘 나타내는 합리적인 지표임을 알 수 있었다.

핵심용어 : 수정 IAS 지수, 월강우량, 강우침식인자, RUSLE, 토양침식

1. 서 론

강우침식인자 (rainfall-runoff erosivity)는 세계적으로

널리 사용되고 있는 USLE (Universal Soil Loss Equation)

또는 RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)의

6가지 인자 중에 하나로서, 강우로 인해 발생하는 토양침

* 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사과정 (e-mail: cetera@yonsei.ac.kr)

Ph.D. Candidate, School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

** 육군사관학교 건설환경학과 교수 (e-mail: okd0629@kma.ac.kr)

Professor, Dept. of Civil Engineering and Environmental Sciences, Korea Military Academy, Seoul 139-799, Korea

*** 교신저자, 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수 (e-mail: jhheo@yonsei.ac.kr)

Corresponding Author, Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

식의 정도를 정량적으로 나타낼 수 있는 기후인자 (climatic factor)를 의미한다 (Wischmeier and Smith, 1978; Renard et al., 1997). 일반적으로 강우침식인자를 계산하기 위해서는 자기우량기록지 (pluviograph) 또는 연속된 분단위 강우자료를 이용하여 먼저 유효 호우사상에 대한 구분을 해야 한다. 유효 호우사상은 토양침식을 유발하는 호우사상을 의미하며, 비가 내리기 시작한 후부터 종료될 때까지 총 누적강우량이 12.7 mm 이상이 되거나, 그 미만이라도 15분간 최소 6.35 mm 이상 내린 호우사상으로서, 6시간 이내의 무강우는 동일 호우사상으로 간주하며 6시간 이상 일 경우는 다른 호우사상으로 간주한다 (Wischmeier and Smith, 1978). 강우침식인자는 해당 호우기간의 총 강우에너지 (total rainfall kinetic energy)와 30분 최대 강우강도 (maximum 30 minute rainfall intensity)의 곱으로 정의된다. USLE의 개발자인 Wischmeier and Smith (1978)는 USLE가 장기적인 연평균 토양유실량을 계산하기 위한 목적으로 제안되었기 때문에, 특정 연도 및 특정 호우사상에 대한 적용에는 무리가 있으며, 강우침식인자의 경우도 마찬가지로 20~25년 이상의 장기간 강우자료를 이용하여 계산된 연평균 값을 적용할 것을 권고하고 있다.

USLE에 대한 국내 연구는 1970년 무렵부터 농업진흥청 (현 농촌진흥청) 및 대학기관의 농업 관련학과 등을 중심으로 시작되었다. 특히 이러한 연구는 USLE 각 인자별로 구분되어 검토되었는데, 본 연구에서 다루고 있는 강우침식인자에 관한 연구현황을 소개하면 다음과 같다. 박성우 (1976)는 기상청 산하 14개 자기우량관측소의 1960~1975년 (지점별 7~15년) 기간의 자기우량기록지를 관독하여 각 지점별 연 총 강우에너지를 분석한 바 있다. 정필균 등 (1983)은 기상청 산하 51개 관측지점의 1960~1980년 (지점별 6~21년) 기간의 자기우량기록지를 분석하여 Wischmeier and Smith (1978)의 방법으로 계산된 우리나라 전국의 등강우침식도 (iso-erodent map)를 최초로 제시하였다. 그러나 정필균 등 (1983)의 강우침식인자는 51개 지점 중 50개소가 20년 미만의 자료를 사용하여 계산된 값이며, 또한 자료기간이 지점별로 상이하다는 한계가 있었다. 이에 박정환 등 (2000)은 기상청 산하 53개 지점에 대한 1973~1996년 (24년) 기간의 시간단위 강우자료를 이용하여, 20년 이상의 동일한 관측기간에 대한 강우침식인자를 제시하였다. 비슷한 시기에 Hu et al. (2000)도 1974~1995년 (22년) 기간의 1시간 단위 강우자료를 이용하여 기상청 산하 59개 지점의 강우침식인자를 계산한 바 있다. 그러나 1시간 단위 강우자료를 이용하여 강우침식인자를 계산할 경우는, 호우사상의 구분이 명확하지 않고, 30분 최대 강우강도를 산정하는데 제한이 있기 때문에 정확한 강우침식인자 값 추정에는 한계가 있다

(박정환 등, 2000). 이준학 등 (2008)은 현재 실무에서 적용하고 있는 강우침식인자 (정필균 등, 1983; 박정환 등, 2000)가 USLE의 강우침식인자 계산 기준을 충족하는 정확한 값이 아님을 지적한 바 있다. 최근 신유 (2010)는 기상청 우량관측소 33개 지점에 대한 1971~1999년 (29개년) 기간의 1분 단위 강우자료를 이용하여 우리나라의 강우침식인자를 재산정한 바 있다.

일반적으로 강우침식인자 계산을 위해서는 자기우량기록지나 분단위의 연속된 강우자료가 필요한데, 이러한 강우자료의 획득이 쉽지 않은 실정이다. 예를 들어, 보통 우리나라 기상청에서 기본적으로 제공하고 있는 기상자료의 단위는 시간 단위이다. 현재 관측자료 수집주기가 1분인 기상청의 자동기상관측장비 544개소가 전국에 운영되고 있지만, 1988년부터 도입되기 시작한 무인 자동기상 관측소 (Automatic Weather Station, AWS)는 기기의 오작동 및 자료의 신뢰성 문제가 있으며, 2000년부터 도입된 종관용 자동기상 관측장비 (Automatic Surface Observation System, ASOS)의 경우는 자료기간이 20년이 채 안되기 때문에 20년 이상의 강우자료를 필요로 하는 강우침식인자 계산에 제한이 따른다. 이러한 사정은 국외도 마찬가지이며, 이에 연속된 분단위 강우자료 대신에, 보다 획득하기 쉬운 강우자료를 바탕으로 강우침식인자를 추정하는 다양한 방법에 대한 연구가 수행되어 왔다. 대표적인 것으로는 연강수량을 이용한 연구 (Lo et al., 1985), 월강수량을 이용한 연구 (Fournier, 1960; Arnoldus, 1980; Renard and Freimund, 1994), 일강수량을 이용한 연구 (Petkovsek and Mikos, 2004), 상기 변수를 조합한 연구 (Loureiro and Coutinho, 2001), 시간 최대 강우량 및 일 최대 강우량 등 기타 다른 강우매개변수를 이용한 연구 (Diodato, 2004) 등이 있다.

특히 연강수량을 이용하여 강우침식인자를 추정하는 방법은 국내의 다수 연구자들이 지난 10여년 동안 사용해온 방법이다 (신계중, 1999; 이근상과 황의호, 2006). 국내에서 많이 활용되어온 연강수량을 이용한 추정식은 국내에 Toxopeus 식으로 잘못 알려져 있는 Lo et al. (1985)의 식이다. 이 식은 이 식이 수록된 "Soil Erosion and Conservation"의 주저자인 EI-Swaify의 이름을 따서 EI-Swaify et al. (1985) 식으로 알려져 있기도 하다. 일반적으로 연강수량이 강우침식인자를 간편하게 추정할 수 있는 지표로서 국내외적으로 알려져 있지만 (정필균 등, 1983; Lo et al., 1985; Renard and Freimund, 1994), 연강수량만으로는 동일한 강우량을 가진 해에 강우침식인자 값의 차이가 발생하는 이유를 설명할 수 없다. 이에 이준학 등 (2010)은 인천지점을 대상으로 월강수량을 이용한 국외 강우침식인자 추정방법인 Fournier 지수 (Fournier, 1960), Modified Fournier 지수

(Arnoldus, 1980), Renard and Freimund (1994)의 회귀식 등의 국내 적용성을 검토하면서, 인천지점의 경우, 연강수량보다 월강우량을 이용한 Modified Fournier 지수 (*MFI*)가 강우침식인자와 보다 상관성이 높음을 밝힌 바 있다. 또한 이준학 (2010)은 속초지점에 대한 강우침식인자를 *MFI*를 이용하여 추정하는 바 있다.

본 연구의 목적은 인천 및 속초지점에 대해서 연구했던 이준학 등 (2010)의 연구결과를 확장하여 월강우량을 이용한 국내외 강우침식인자 추정방법의 적용성을 평가하고, 기존의 방법보다 더 합리적인 강우침식인자 추정 방법을 도출하는데 있다.

2. 월강우량을 이용한 추정 모델

국외에서 개발된 월강우량을 이용한 강우침식인자 추정방법으로는 Fournier 지수 (Fournier, 1960), modified Fournier 지수 (Arnoldus, 1980)가 있으며, 국내 모델로는 정필균 등 (1983)의 회귀식과 신제성 등 (1983)이 제안한 IAS (Institute of Agricultural Sciences) 지수가 있다.

2.1 정필균 등의 회귀식

우리나라 최초의 등강우침식도 (iso-erodent map)을 제시한 정필균 등 (1983)은 실제 강우침식인자 값을 계산해본 결과, 월별 강우침식인자와 월강우량이 높은 상관관계가 있다고 하였으며, 수원 지점을 그 예로 들었다. 수원 지점의 1964~1980년 (17년) 기간의 강우자료를 바탕으로 유도된 회귀식은 아래와 같다.

$$R_m = 0.0378P_m^{1.4190} \quad (1)$$

$$R = 0.0115P_a^{1.4947} \quad (2)$$

여기서, R_m 은 월 강우침식인자 (100 MTf · m · cm/ha/h/yr), R 은 연 강우침식인자 (100 MTf · m · cm/ha/h/yr), P_m 은 월 강우량 (mm), P_a 는 연강수량 (mm)을 의미한다. 여기서 Eqs. (1) and (2)의 결정계수는 각각 0.78, 0.75 였다. 이 식에서 강우침식인자의 단위를 SI 단위인 MJ · mm/ha/h/yr로 변환해주기 위해서는 계산된 값에 9.808을 곱해줘야 한다 (최진규 등, 1998). 정영상 등 (1999)은 월강우량을 이용한 정필균 등 (1983)의 회귀식을 적용하여 강원도 9개 지점에 대한 강우침식인자를 추정하는 바 있다.

2.2 Fournier's 지수

Fournier (1960)는 아프리카의 대유역을 대상으로, 강우와 유사량간의 상관분석을 통해 아래와 같은 Fournier 지수 (*FI*)를 제안하였다.

$$FI = \frac{p_{\max}^2}{P_a} \quad (3)$$

여기서, *FI*는 Fournier 지수 (mm), p_{\max} 는 비가 가장 많이 내린 달 (the wettest month)의 평균 강우량 (mm), P_a 는 연평균 강우량 (mm)을 의미한다. 이 식은 제한된 강우 자료를 가지고 있는 일부 지역에서 강우침식인자 추정방법으로 적용되어 오고 있다 (Munka et al., 2007).

2.3 Modified Fournier's 지수

Arnoldus (1980)는 미국의 162개 관측지점과 서아프리카의 14개 지점에 대한 연구를 수행하면서 *FI*보다 강우침식인자와 상관관계가 높은 Modified Fournier 지수 (*MFI*)를 제안하였다 (결정계수, $R^2 = 0.80 \sim 0.91$).

$$MFI = \sum_{i=1}^{12} \frac{(\bar{p}_i)^2}{P_a} \quad (4)$$

여기서, *MFI*는 수정 Fournier 지수 (mm), \bar{p}_i 는 월 i 의 강우량 (mm), P_a 는 연강수량 (mm)을 의미한다. *MFI*는 제한된 강우자료를 가지고 있는 지역에서 월강우량을 이용한 강우침식인자 추정방법으로 적용되어 왔다. 지역에 따라 *MFI* 값 자체를 강우침식인자로 사용하는 경우도 있으나, 대부분은 *MFI*를 매개변수로 한 회귀식을 이용하여 계산한 강우침식인자값을 사용하고 있다 (Renard and Freimund, 1994; Lastoria et al., 2008; Andrade et al., 2010).

2.4 IAS 지수

IAS (Institute of Agricultural Sciences) 지수는 신제성 등 (1983)이 제안한 월강우량 기반의 강우침식인자 추정 방법으로서, 연중 강우량이 가장 많은 두 달간의 강우량의 합을 강우침식인자로 간주하는 간편한 방법이다. IAS 지수를 식으로 정리하면 아래와 같다.

$$IASI = P_{1st\max} + P_{2nd\max} \quad (5)$$

여기서, *IASI*는 IAS 지수, 곧 강우침식인자 (100MTf · m · cm/ha/h/yr)를 의미하며, $P_{1st\max}$ 는 연중 가장 많이 내린 월의 강우량 (mm), $P_{2nd\max}$ 는 연중 2번째로 많이 내린 월의 강우량 (mm)을 의미한다. 마찬가지로 이 식에서 강우침식인자의 단위를 SI 단위인 MJ · mm/ha/h/yr로 변환해주기 위해서는 계산된 값에 9.808을 곱해줘야 한다 (최진규 등, 1998).

신제성 등 (1983)의 결과에 따르면 기상청 산하 12개 관측소의 1969~1979년의 강우자료를 바탕으로 IAS 지수를 적용해본 결과, 서울, 전주, 광주, 목포, 제주, 여수 지점에는 약 10% 이내로 강우침식인자를 잘 추정하는 것으로

나타났으나, 대구, 추풍령, 포항, 강릉 지점은 약 20~30% 과다 평가되고, 울산과 부산 지점은 약 30~50% 과소평가 되는 것으로 나타났다 고 하였다. 이를 바탕으로 신제성 등(1983)은 IAS 지수의 적용 가능지역과 적용 제한지역을 구분하여 제시하였다. 신제성 등(1983)은 특히 7~8월에 호우가 집중되는 지역에서는 7월과 8월의 강우량의 합만으로 연강우침식인자를 간편하게 추정할 수 있다고 하였으며, 다만 강우분포가 7~8월에 집중되지 않고 고르게 분포되고 있는 동해안 및 남해안 지역에서는 이를 변형해서 적용할 것을 권고하였다.

3. 월강우량을 이용한 추정 모델의 개발

강우량과 강우침식인자는 상관관계가 높은 것으로 알려져 있지만, USLE 호우사상의 분류기준에 포함되지 않는 호우에 대한 강우량은 강우침식인자 계산에 영향을 미치지 않는다. 강우침식인자는 모든 호우사상을 대상으로 하는 것이 아니라, 토양침식이 시작되는 것으로 알려진, 매 12.7 mm 이상 내리거나 15분간 6.35 mm 이상 내린 호우사상(Wischmeier and Smith, 1978)을 대상으로 하고 있기 때문에, 대체적으로 유효강우량이 연간 총강우량의 약 71%에 해당된다는 선행연구 결과(고문환과 신제성, 1979)를 토대로 본다면 연중 약 29%의 강우량은 강우침식인자 계산에 영향을 미치지 않는다고 볼 수 있다. 따라서 강우침식인자 계산에 영향을 미치지 않는 강우량을 포함한 연강수량보다는, 토양침식을 직접 야기시키는 유효 호우사상이 포함된 월강우량을 직접적으로 강우침식인자와 대비시키는 것이 강우침식인자 추정에 보다 합리적인 것이라는 가설을 세울 수 있다. 정필균 등(1983)은 우리나라 월 강우량과 월 강우침식인자의 분포에 대해서 언급하면서, 강우침식인자의 월별 분포가 지역에 따라 차이가 있으나 전반적으로 연중 7~8월(2개월)에 약 70% 이상 집중되는 지역과, 6~8월(3개월) 기간 중에 약 70~80%가 분포되는 지역, 그리고 4월에서 9월에 걸쳐 분산되어 분포되는 지역(주로 남해안 지역)으로 구분할 수 있다고 하였다. 본 연구에서는 이러한 신제성 등(1983)과 정필균 등(1983)의 연구결과를 토대로 월강우량을 이용한 강우침식인자 추정모델의 개발을 시도하였다.

본 연구에서는 지역에 따른 월 강우침식인자의 상이한 분포에 착안하여 IAS 지수(신제성 등, 1983)를 확장한 수정 IAS 지수의 개념을 정립하였다. 수정 IAS 지수는 연중 강우량이 가장 많은 두 달간의 강우량의 합을 의미하는 IAS 지수의 개념을 확장하여 지역별로 연중 강우량이 가장 많은 2~5달간의 강우량의 합을 나타내는 것으로서 식의 형태는 아래와 같다.

$$MIASI = \sum_{i=1}^j P_{i\max} \quad (6)$$

여기서, $MIASI$ 는 수정 IAS 지수, $P_{i\max}$ 는 연중 i 번째로 가장 많이 내린 월의 강우량(mm), j 는 지역별 상수값으로 연중 최대 강우 개월수를 의미하며, 2~5의 값을 갖는다. 만약 j 가 2일 경우, 연중 비가 많이 내린 두 달 간의 강우량의 합을 의미하므로 IAS 지수와 동일한 값을 갖게 된다. 강우량이 연중 두 달간(주로 7~8월)에 집중되는 것을 고려하여 개발된 IAS 지수와는 달리, 수정 IAS 지수는 지점별로 연중 4~11월 기간에 고르게 분포되는 월강우량의 분포 특성을 고려하여 연산범위를 확장한 것이다. 월강우량이 비교적 고르게 분포되는 지점의 경우도 대부분 연중 5개월 내에 약 80% 이상의 강우량이 집중되는 것을 고려하여 값의 상한선을 5로 정하였다. 예를 들어 $j=4$ 일 경우, 수정 IAS 지수는 연중 비가 가장 많이 내린 4개월 간의 강우량의 합을 의미한다. 동일한 지점 또는 j 값이 같은 지점이라 하더라도 매년 월별 강우분포가 달라질 수 있기 때문에 매년 강우량을 합산하는 월이 상이할 수 있다. IAS 지수와 수정 IAS 지수의 차이점 중에 하나는, IAS 지수는 그 값 자체가 강우침식인자를 추정하는 값이 되지만 수정 IAS 지수는 강우침식인자를 추정하는 매개변수로 활용된다는 점이다.

4. 데이터 및 연구방법

본 연구를 위하여 기상청으로부터 21개 지점에 대한 1971~1999년 기간의 분단위 강우자료(Minutely data using the Magnetic Recording, MMR) 및 월강우량을 획득하여 활용하였다. MMR 자료는 기상청에서 스캔한 자기우량기록지(pluviograph)를 디지털로 판독하여 데이터베이스(database)로 구축해놓은 강우자료로서 관측개시년도부터 1999년까지 구축되어 있다. 본 연구에서는 선행연구와의 비교를 위하여 USLE에서 추천하고 있는 Wischmier and Smith(1978)의 강우 운동에너지식을 적용하여 실제 강우침식인자 값을 계산하였다. 본 연구에서는 MMR 자료를 5분 단위로 합산하여, 27~29년 기간 동안의 21개 지점에 대한 강우침식인자를 먼저 계산한 뒤, 월강우량 자료를 이용하여 FI , MFI , IAS 지수, 수정 IAS 지수를 각각 계산하고, 이들 값에 대한 상관분석(correlation analysis)을 실시한 뒤 그 유의성을 검증하였다. 또한 분석 대상에 연강수량을 포함시켜 각 지점별로 강우침식인자의 변동성을 가장 잘 나타낼 수 있는 지표가 어떤 것인지 살펴 보았다. 그리고 상관계수의 유의성을 검증한 결과를 바탕으로 수정 IAS 지수의 적용 가능지점에 대한 지점별 회귀

Table 1. Data and Gauging Stations in this Study

Gauging station	Period	Observation year	Validation	Gauging station	Period	Observation year	Validation
Seoul	1971~2009	39	O	Yeosu	1971~1999	29	-
Gunsan	1971~2009	39	O	Seosan	1971~1999	29	-
Incheon	1971~2009	39	O	Mokpo	1971~1999	29	-
Daejeon	1971~2009	39	O	Chupungnyeong	1971~1999	29	-
Gwangju	1971~2009	39	O	Chuncheon	1971~1999	29	-
Busan	1971~2009	39	O	Jinju	1971~1999	29	-
Sokcho	1971~2009	39	O	Pohang	1971~1999	29	-
Cheongju	1971~2009	39	O	Icheon	1973~1999	27	-
Ganghwa	1973~2009	37	O	Hongcheon	1973~1999	27	-
Daegu	1971~2009	29	-	Wando	1973~1999	27	-
Gangneong	1971~1999	29	-	Total	691 data in 21 sites	9 sites	

식을 유도하였다. 마지막으로 회귀식에 대한 검정을 위하여 9개 지점의 2000~2009년(10개년) 기간 동안의 실제 강우침식인자 값과 연강수량을 이용한 추정식(Lo et al., 1985), 정필균 등(1983)의 회귀식, IAS 지수를 이용한 추정값, 수정 IAS 지수로 추정된 강우침식인자와의 평균 오차비율(%)과 RMSE(Root Mean Square Errors) 평균을 비교하여 그 유용성을 확인하였다. Table 1은 연구에 사용한 대상지점 및 자료기간을 나타낸 것이다. 본 연구에 사용한 자료는 총 21개 지점 691개년 자료이다.

5. 연구결과 및 토의

5.1 지역별 j 값의 산정

수정 IAS 지수를 산출하기 위한 j 값의 의미는 토양침식을 발생시키는 유효 월강수량이 연중 몇 개월에 집중되는지를 간접적으로 나타내는 지표라고 볼 수 있다. 본 연구에서 지역별 수문학적 동질성과 j 값의 유의미한 연관성을 찾기 위한 시도를 해보았으나, j 값은 강우침식인자를 추정하기 위하여 월강수량을 분류한 것 이상의 의미를 찾기는 어려운 것으로 나타났다. 예를 들어, Figs. 1 and 2는 수원과 서울 지점의 1971~1999년 기간 동안의 월평균 강우량과 신유(2010)가 계산한 동일기간의 월평균 강우침식인자의 연평균 값 대비 월별 분포 비율을 비교하여 나타낸 것인데, Figs. 1 and 2를 보면, 수원 및 서울지점의 강우량은 7~8월에 집중되나, 강우침식인자는 7~9월에 걸쳐 집중되는 양상을 보이고 있음을 알 수 있다. 이것은 지점별로 월평균 강우량이 집중되는 분포 양상이 비슷하다고 하더라도 월평균 강우침식인자의 분포가 비슷한 양상을 보이는 것이 아님을 나타내는 것이다.

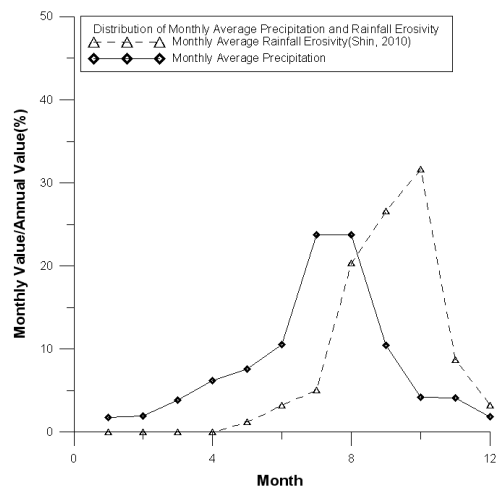


Fig. 1. Comparison between Monthly Average Precipitation and Rainfall Erosivity (Suwon, 1971~1999)

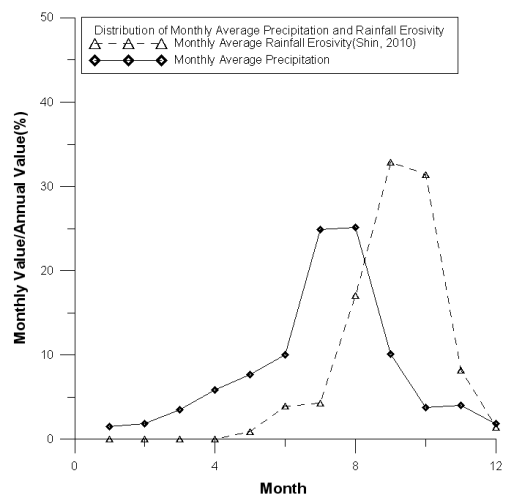


Fig. 2. Comparison between Monthly Average Precipitation and Rainfall Erosivity (Seoul, 1971~1999)

예를 들어, 수원지점의 경우, 6월과 9월의 월평균 강수량 (29개년 평균값)은 비슷하지만, 6월과 9월의 강우침식인자는 약 30% 이상 차이가 나는 것을 알 수 있으며, 서울 지점의 경우도 7월과 8월의 경우, 약 20% 차이가 나는 것을 알 수 있었다.

따라서 본 연구에서는 수정 IAS 지수의 지역별 상수 j 값을 시행착오법에 의해서 산정하였다. j 를 2에서 5까지 적용하여 각각 해당되는 수정 IAS 지수를 계산한 후, 본 연구에서 계산한 실제 강우침식인자와 가장 상관관계수가 높게 나타나는 j 값을 해당 지점의 값으로 정한 것이다. Table 2는 서울 지점을 대상으로 지점별 상수값 (j)을 찾는 과정을 예로 든 것이다. Table 2에서 알 수 있듯이, $j=3$ 일 경우 강우침식인자와 수정 IAS 지수와의 상관관계수가 0.929로 가장 높은 것으로 나타났기 때문에 서울 지점의

j 값을 3으로 정할 수 있다.

5.2 상관분석 결과

Table 3은 1971~1999년 기간 동안의 21개 지점에 대한 지점별 연강우침식인자와 연강수량, FI , MFI , IAS 지수, 수정 IAS 지수의 상관분석 결과를 각각 정리한 것이다. 수정 IAS 지수 계산을 위한 j 값은 Table 3의 비교란에 명시하였다.

Table 3에서 알 수 있듯이 연강수량과 연강우침식인자의 상관관계수 (r)는 0.324~0.878로 나타났다. 이 중 서울, 여수, 부산, 광주 등 10개 지점은 비교적 높은 양의 상관관계 ($r=0.7$ 이상)를 나타낸 반면, 강릉 지점은 상대적으로 낮은 상관관계 ($r=0.4$ 이하)를 보이는 것으로 나타났다. FI 의 경우, 상관관계수가 0.235~0.825로 나타났으며, 특히 목포, 광

Table 2. The Result of Correlation Analysis (Seoul, 1971~1999)

Classification	Rainfall-runoff Erosivity vs. R	Annual Precipitation vs. R	FI vs. R	MFI vs. R	Modified IAS Index vs. R			
					$j=2$	$j=3$	$j=4$	$j=5$
Coefficient of Correlation	1	0.872	0.728	0.871	0.917	0.929	0.915	0.904

Table 3. Coefficients of Correlation and j Values for Stations (27~29 years)

Gauging station	Annual precipitation vs. R	FI vs. R	MFI vs. R	IAS Index vs. R	MIAS Index vs. R	Remark (j)
Cheongju	0.609	0.706	0.828	0.824	0.824	2
Ganghwa	0.725	0.696	0.813	0.788	0.788	2
Gangneong	0.324	0.633	0.679	0.606	0.606	2
Icheon	0.555	0.405	0.554	0.640	0.640	2
Hongcheon	0.416	0.471	0.564	0.555	0.555	2
Seoul	0.878	0.734	0.877	0.923	0.935	3
Gunsan	0.790	0.591	0.844	0.897	0.898	3
Yeosu	0.877	0.363	0.754	0.828	0.886	3
Seosan	0.652	0.729	0.848	0.818	0.826	3
Mokpo	0.607	0.825	0.834	0.763	0.767	3
Incheon	0.667	0.518	0.703	0.742	0.770	3
Chupungnyeong	0.540	0.298	0.499	0.498	0.535	3
Daejeon	0.758	0.580	0.810	0.827	0.860	4
Gwangju	0.800	0.807	0.884	0.854	0.872	4
Chuncheon	0.768	0.492	0.721	0.800	0.855	4
Jinju	0.765	0.539	0.782	0.788	0.806	4
Busan	0.811	0.298	0.736	0.756	0.839	4
Wando	0.655	0.575	0.675	0.646	0.707	4
Pohang	0.748	0.560	0.730	0.729	0.786	4
Sokcho	0.657	0.467	0.654	0.670	0.753	5
Daegu	0.597	0.235	0.551	0.550	0.627	5

주 등 5개 지점은 비교적 높은 상관관계 ($r=0.7$ 이상)를 갖는 것으로 나타났으나, 대구, 추풍령 등 4개 지점은 비교적 낮은 상관관계 ($r=0.4$ 이하)를 가지는 것으로 나타났다. *MFI*의 경우는, 지점별 상관계수가 0.499~0.884로 나타났으며, 특히 광주, 서울, 서산, 군산 등 14개 지점에서 비교적 높은 양의 상관관계 ($r=0.7$ 이상)를 가지고 있는 것으로 나타났다. 특히 강릉과 목포 등 일부 지점에서는 수정 IAS 지수보다 *MFI*의 상관관계가 더 높게 나타난 경우도 있었다. 신제성 등 (1983)의 IAS 지수는 상관계수가 0.498~0.923으로 나타났으며, 특히 서울, 군산, 광주, 여수 등 14개 지점의 경우, 비교적 높은 양의 상관관계 ($r=0.7$ 이상)를 가지는 것으로 나타났다. 수정 IAS 지수는 지점별 상관계수가 0.535~0.935로서 비교한 대상 중에 가장 높게 나타났으며, 서울, 군산, 광주, 여수 등 16개 지점에서 비교적 높은 양의 상관관계 ($r=0.7$ 이상)를 가지는 것으로 나타났다. 특히 21개 지점 중 연강우침식인자와 연강수량 간의 상관관계보다 연강우침식인자와 *FI*의 상관관계가 더 높은 지점은 5개소로 나타났으며, *MFI*가 연강수량보다 높은 상관계수를 갖는 지점은 13개소, IAS 지수가 더 높은 상관계수를 갖는 지점은 15개소로 나타났다. 본 연구에서 제안한 수정 IAS 지수는 21개 지점에서 연강수량보다 동등하거나 더 높은 상관계수를 갖는 것으로 나타났다. 연강우침식인자와 수정 IAS 지수간의 상관계수의 유의성을 검정해본 결과, 21개 지점 중 16개 지점 (서울, 군산, 여수, 대전, 광주, 춘천, 서산, 청주, 진주, 포항, 부산, 강화, 목포, 속초, 인천, 완도)은 유의수준 $\alpha = 0.01$ 에서 유의한 것

으로 나타났고, 기타 5개 지점은 유의수준 $\alpha = 0.1$ 에서 유의한 것으로 나타났다.

이를 토대로 보았을 때, 본 연구에서 제안한 수정 IAS 지수가 강릉 및 목포 지점을 제외한 대부분의 지점에서 연강수량, *FI*, *MFI*, IAS 지수보다 강우침식인자의 변동성을 전반적으로 잘 반영하고 있음을 알 수 있었다.

5.3 지점별 회귀식 유도

이러한 결과를 바탕으로 유의수준 $\alpha = 0.01$ 를 만족하는 상관계수를 가진 16개 지점에 대해서 수정 IAS 지수를 이용한 회귀식을 유도하였으며, 그 결과를 Table 4에 나타내었다.

Table 4에서 알 수 있듯이, 회귀식의 결정계수 (R^2) 범위는 0.500~0.873으로 나타났다. 16개 지점 중 서울, 군산, 여수 등 12개 지점의 경우, 수정 IAS 지수가 연강우침식인자를 약 62.1~87.3% 설명할 수 있는 것으로 나타났으며, 목포, 인천, 속초, 완도 4개 지점의 경우는 50.0~58.8%의 설명력을 보였다.

5.4 회귀식의 검정

본 연구에서 유도한 회귀식을 검정하기 위하여 서울, 광주, 대전, 부산 등 9개 지점에 대한 2000~2009년 기간 동안의 강우침식인자값을 산정하였으며, 본 연구에서 제시한 회귀식을 이용한 추정값과 연강수량을 이용한 추정식 (Lo et al., 1985), 정필균 등 (1983)의 회귀식, IAS 지수를 이용한 추정값과의 오차 비율 (Percentage Error,

Table 4. Regression Models for 16 Stations

Gauging station	Regression Model	r	r^2	Remark
Seoul	$R = 11.099 \times MIASI - 2031.843$	0.935	0.873	$j=3$
Gunsan	$R = 10.575 \times MIASI - 1702.988$	0.898	0.799	$j=3$
Yeosu	$R = 15.977 \times MIASI - 4921.821$	0.886	0.784	$j=3$
Gwangju	$R = 11.424 \times MIASI - 3518.014$	0.872	0.760	$j=4$
Daejeon	$R = 11.853 \times MIASI - 3590.477$	0.860	0.740	$j=4$
Chuncheon	$R = 10.702 \times MIASI - 3629.911$	0.855	0.731	$j=4$
Seosan	$R = 12.702 \times MIASI - 2673.372$	0.826	0.683	$j=3$
Cheongju	$R = 11.157 \times MIASI - 837.386$	0.824	0.679	$j=2$
Jinju	$R = 12.323 \times MIASI - 4240.753$	0.806	0.650	$j=4$
Pohang	$R = 10.775 \times MIASI - 3598.432$	0.786	0.618	$j=4$
Busan	$R = 12.070 \times MIASI - 4579.729$	0.839	0.704	$j=4$
Ganghwa	$R = 23.915 \times MIASI - 7899.518$	0.788	0.621	$j=2$
Mokpo	$R = 9.413 \times MIASI - 1320.949$	0.767	0.588	$j=3$
Incheon	$R = 12.403 \times MIASI - 2386.520$	0.770	0.594	$j=3$
Sokcho	$R = 8.658 \times MIASI - 4302.231$	0.753	0.567	$j=5$
Wando	$R = 11.491 \times MIASI - 2153.593$	0.707	0.500	$j=4$

* R : Rainfall Erosivity (MJ · mm/ha/h/yr), *MIASF*: Modified IAS Index (mm)

Table 5. Validation of Regression Models for Each Station (unit: MJ · mm/ha/h/yr)

Gauging station	<i>R</i>	Lo et al. (1985) Model		Jung et al. (1983) Model		IAS Index		MIAS Index (This Study)		<i>j</i>
		<i>R</i> 1	PE (RMSE)	<i>R</i> 2	PE (RMSE)	<i>R</i> 3	PE (RMSE)	<i>R</i> 4	PE (RMSE)	
Ganghwa	7656.9	4775.3	-37.6% (1627.6)	4672.9	-39.0% (2983.9)	7015.1	-8.4% (1908.2)	8989.7	+17.4% (2852.4)	2
Cheongju	8482.2	4659.5	-45.1% (3822.8)	4400.5	-48.1% (4081.8)	6330.5	-25.4% (3031.4)	6363.8	-25.0% (3337.9)	2
Incheon	7647.5	4725.4	-38.2% (2927.9)	4617.8	-40% (3029.8)	7069.2	-7.6% (1604.6)	8541.8	+12% (1755.6)	3
Seoul	11962.4	5398.7	-54.9% (6563.7)	5884.8	-50.8% (6077.6)	8342.5	-30.3% (4099.2)	9449.7	-21% (3759.1)	3
Gusan	6603.7	4793.5	-37.8% (1809.6)	4578.6	-30.7% (2024.5)	6547.4	-0.8% (655.1)	7190.9	+8.9% (1009.0)	3
Gwangju	9016.0	5445.2	-39.6% (3570.7)	5415.7	-39.9% (3600.3)	7432.8	-17.6% (1730.3)	9030.5	+0.2% (1418.5)	4
Busan	8327.4	5647.2	-32.2% (2680.2)	5724.8	-31.3% (2602.6)	7225.5	-13.2% (1912.8)	8570.8	+2.9% (2538.3)	4
Daejeon	7939.2	5145.9	-35.2% (2896.1)	5120.9	-35.5% (2887.2)	7211.5	-9.2% (1706.5)	8955.3	+12.8% (2211.3)	4
Sokcho	5228.7	5390.9	+3.1% (816.3)	5248.6	+0.4% (900.6)	7125.0	+36.3% (2110.6)	5823.4	+11.4% (1314.3)	5
Mean	MAPE	35.1%		36.0%		16.5%		12.4%		
	RMSE	3132.0		2968.3		2084.3		2244.0		

Lo et al. (1985) model : $R = 38.5 + 0.35xP$

PE) 및 MAPE (Mean Absolute Percentage Error), RMSE (Root Mean Square Error) 평균값을 각각 비교해 보았다. 9개 지점의 실제 연강우침식인자 계산은 기상청으로부터 획득한 5분 단위 강우자료를 사용하였으며, 분석에 사용한 자료는 90개 (9개 지점 × 10개년) 자료이다. 결과의 비교를 위해 계산된 값을 SI단위 (MJ · mm/ha/h/yr)로 통일하였으며, 그 결과를 Table 5에 나타내었다.

회귀식 검증결과, 지점별로 약간의 차이가 있지만 본 연구에서 제안한 수정 IAS 지수를 이용한 회귀식이 전반적으로 강우침식인자를 좀 더 안정되게 추정할 수 있는 것으로 나타났다. 강우침식인자를 가장 간편하게 추정하는 방법인 IAS 지수 (신제성 등, 1983)는 강화, 인천, 군산, 대전 지점에서, 잘 맞는 것으로 나타났으며, 속초 지점의 경우는 정필균 등 (1983)의 회귀식이 보다 유용한 것으로 나타났다. 기존의 연강수량을 이용한 추정방법 (Lo et al., 1985) 과 정필균 등 (1983)의 회귀식을 이용한 추정방법은 속초 지점을 제외하고는 평균 약 30% 이상으로 오차가 많이 발생하는 것으로 나타났다. 수정 IAS 지수는 다른 방법에 비하여 특히 서울, 광주, 부산, 청주 지점의 강우침식인자 추정에 효과적인 것으로 나타났으며 오차범위는 지점별로 상이하지만 평균 약 12.4%로 나타났다.

6. 결론

강우침식인자를 계산하기 위해서는 자기우량기록지나 분단위의 연속된 강우자료가 필요하며, 호우사상의 분류 및 강우에너지 계산, 30분 최대 강우강도 추출 등 복잡한 계산절차 때문에 시간과 노력이 많이 소요된다. 본 연구는 이러한 절차를 거치지 않고 월강우량을 이용하여 강우 침식인자를 추정할 수 있는 국내외 모델에 대해서 검토하였으며 기존의 IAS 지수 (신제성 등, 1983)를 확장한 수정 IAS 지수를 이용한 추정방법을 새롭게 제안하였다. 수정 IAS 지수는 연중 강우량이 가장 많이 내린 2~5달의 강우량의 합을 의미하는 값이다. 본 연구에서 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

첫째, 21개 지점의 27~29개년 자료를 토대로 실제 연 강우침식인자와 연강수량, *FI*, *MFI*, IAS 지수 및 수정 IAS 지수 간의 상관분석을 실시한 결과, 수정 IAS 지수가 강릉 및 목포지점을 제외한 19개 지점에서 다른 매개변수 보다 비교적 높은 양의 상관관계를 보이는 것으로 나타났다. 특히 본 연구에서 제안한 수정 IAS 지수는 21개 지점에서 연강수량보다 동등하거나 더 높은 상관계수를 갖는 것으로 나타났으며, 이를 토대로 보았을 때, 수정 IAS 지

수가 전반적으로 중서부 및 남서부 지역에 대한 연강우침식인자의 변동성을 보다 잘 나타낼 수 있는 지표임을 알 수 있었다.

둘째, 본 연구에서는 21개 지점 중 유의수준 $\alpha = 0.01$ 를 만족하는 16개 지점에 대해서 수정 IAS 지수를 이용한 회귀식을 유도하였으며, 2000~2009년 기간(10개년) 동안의 9개 지점에 대한 실제 연강우침식인자를 계산하여 회귀식을 검증해 본 결과, 기존의 연강수량을 이용한 추정식(Lo et al., 1985), 정필균 등(1983)의 회귀식, IAS 지수를 이용한 추정값보다 전반적으로 강우침식인자를 비교적 안정적으로 추정할 수 있는 것으로 나타났다.

셋째, 신제성 등(1983)이 제안한 IAS 지수는 연중 강우량이 가장 많이 내린 두 달간의 강우량의 합으로 연 강우침식인자를 추정하는 방법인데, 가장 간편하면서도, 강화, 인천, 대전, 군산 지점에 유용하게 사용할 수 있음을 알 수 있었다. 신제성 등(1983)은 IAS 지수의 적용성을 검토하면서, IAS 지수가 중서부 지역에서는 잘 맞지만 동해안 및 남해안 지역에는 잘 맞지 않는다고 하였는데, 본 연구에서도 이와 비슷한 결과를 얻었다. 이것은 중서부 지역과 동해안 및 남해안 지역의 강우분포가 다르기 때문인 것으로 추정된다. 본 연구에서 목포, 강릉 지점의 경우 MFI가 수정 IAS 지수보다 연강우침식인자의 변동성을 보다 잘 나타내는 것으로 나타났는데, 동해안 및 남해안 일부 지역의 경우는 MFI의 적용성을 검토해볼 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서 제안한 수정 IAS 지수는 IAS 지수를 확장한 것으로서 좀 더 많은 지점에 대해서 보다 안정적으로 강우침식인자를 간편하게 추정할 수 있는 방법으로서 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 본 연구에서는 21개 지점에 대해서 분석을 하였으나 향후 좀 더 많은 지점에 대한 강우침식인자를 분석하여 전국의 j 값 분포 특성에 대한 연구를 수행하도록 하겠다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 한국건설교통기술평가원의 2009 건설기술혁신사업인 ‘기후변화에 의한 수문 영향분석과 전망’ 과제에 의해 지원되었으며, 분단위 기상자료를 제공해주신 기상청 관계자 여러분께 감사의 말씀을 전합니다.

참고문헌

고문환, 신제성 (1979). **강우특성 분석**. 시험연구보고서 (토비편), pp. 265-270.
박성우 (1976). “토양손실에 미치는 각 지방별 강우에너지 분석.” **한국토양비료학회지**, 제9권, 제1호, pp. 47-

54

박정환, 우효섭, 편종근, 김광일 (2000). “토양유실공식의 강우침식도 분포에 관한 연구.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제5호, pp. 603-610.
신계중 (1999). 지형공간정보체계를 이용한 유역의 토양유실분석. 박사학위논문, 강원대학교, p. 22.
신유 (2010). 분단위 강우자료를 이용한 범용토양유실공식 (USLE)의 강우침식인자 R 산정, 석사학위논문, 전주대학교, pp. 50-78.
신제성, 고문환, 임정남 (1983). “토양유실예측을 위한 강우인자의 추정.” **한국토양비료학회지**, 제16권, 제2호, pp. 106-111.
이근상, 황의호 (2006). “GIS기반 수변구역의 토사유실 영향 분석.” **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제26권, 제2D호, pp. 335-340.
이준학, 정영훈, 오경두, 허준행 (2010). “월강수량 기반의 강우침식인자 산정방법 평가.” **대한토목학회 2010년도 정기학술대회**, 대한토목학회, pp. 241-244.
이준학, 정영훈, 허준행 (2008). “RUSLE의 강우침식도 추정에 관한 연구.” **2008년 한국수자원학회 학술발표회**, 한국수자원학회, pp. 1324-1328.
이준학 (2010). “Modified Fournier 지수를 이용한 동해안 지역의 강우침식인자 추정.” **2010년 대한환경공학회 추계학술대회**, 대한환경공학회, p. 557.
정영상, 권영기, 임형식, 하상건, 양재의 (1999). “강원도 경사지 토양유실 예측용 신USLE의 적용을 위한 강수인자와 토양 침식성인자의 검토.” **한국토양비료학회지**, 제32권, 제1호, pp. 31-38.
정필균 고문환, 임정남, 윤기대, 최대용 (1983). “토양유실량 예측을 위한 강우인자의 분석.” **한국토양비료학회지**, 제16권, 제2호, pp. 112-118.
최진규, 구자웅, 손재권 (1998). “토양유실량예측공식 USLE 적용과 단위변환.” **한국토양비료학회지**, 제31권, 제3호, pp. 301-308.
Andrade, O., Kappas, M., and Erasmi, S. (2010). “Assessment of erosion hazard in Torres Municipality of Lara State (Venezuela) based on GIS.” **Interciencia**, Vol. 35, No. 5, pp. 348-356.
Arnoldus, H.M.J. (1980). “An approximation of the rainfall factor in the universal soil loss equation.” **Assessment of Erosion**, Edited by De Boodt, M., and Gabriels, D., John Wiley and Sons, Chichester, pp. 127-132.
Diodato, N. (2004). “Estimating RUSLE’s rainfall factor in the part of Italy with a Mediterranean rainfall

- regime.” *Hydrology & Earth System Science*, Vol. 8, No. 1, pp. 103-107.
- Fournier, F. (1960). *Climat et Erosion*. Presses Universitaires de France, Paris
- Hu, Q., Gantzer, C.J., Jung, P., and Lee, B. (2000). “Rainfall erosivity in the Republic of Korea.” *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 55, No. 2, pp. 115-120.
- Lastoria, B., Miserocchi, F., Lanciani, A., and Monacelli, G. (2008). “An Estimated Erosion Map for the Aterno-Pescara River Basin.” *European Water*, 21/22, pp. 29-39.
- Lo, A., EI-Swaify, S.A., Dangler, E.W., and Shinshiro, L. (1985). “Effectiveness of EI30 as an erosivity index in Hawaii.” *Soil Erosion and Conservation*, Edited by EI-Swaify, S.A., Moldenhauer, W.C., and Lo, A., Soil Conservation Society of America, Ankeny, Iowa, pp. 384-392.
- Loureiro, N.S., and Coutinho, M.A. (2001). “A new procedure to estimate the RUSLE EI30 index based on monthly rainfall data and applied the Algarve region, Portugal.” *Journal of Hydrology*, Vol. 250, pp. 12-18.
- Munka, C., Cruz, G., and Caffera, R.M. (2007). “Long term variation in rainfall erosivity in Uruguay: A preliminary Fournier approach.” *GeoJournal*, Vol. 70, pp. 257-262.
- Petkovsek, G., and Mikos, M. (2004). “Estimating the R factor from daily rainfall data in the sub-Mediterranean climate of southwest Slovenia.” *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 49, No. 5, pp. 869-877.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., and Yoder, D.C. (1997). *Predicting Soil Erosion by Water: A guide to conservation planning with RUSLE*. USDA Agriculture Handbook, No. 703, Washington, D.C.
- Renard, K.G., and Freimund, J.R. (1994). “Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE.” *Journal of Hydrology*, Vol. 157, pp. 287-306.
- Wischmeier, W.H., and Smith, D.D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning*. USDA Agriculture Handbook, No. 537, Washington, D.C.

논문번호: 11-008	접수: 2011.01.18
수정일자: 2011.05.02/06.28	심사완료: 2011.06.28