Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers
Vol. 53, No. 3, pp. 53~58, May, 2011
DOI: 10.5389/KSAE.2011.53.3.053

강우 및 지반조건에 따른 토양침식 특성

Characteristics of the Soil Erosion with the Rainfall and Geotechnical Conditions

이명구* · 송창섭**,†
Lee, Myung Gu · Song, Chang Seob

ABSTRACT

This study is analyzed the characteristics of the soil erosion with the geotechnical conditions and rainfall conditions, such as the ground slope, the compaction ratio, rainfall intensity and duration of rainfall etc. To this ends, a series of model test are conducted on clayey sands. From the results, the variation of soil loss is analyzed with the geotechnical and the rainfall conditions. The amount of soil loss is decreased as the increase of compaction ratio and is increased as the ground slope, rainfall intensity and the duration of rainfall.

Keywords: Compaction ratio; geotechnical conditions; rainfall; soil erosion; soil loss

I. 서 론

토양은 빗방울의 타격에 의해 입단이 파괴된다. 비가 많이 오는 경우 빗방울의 속도가 8 m/s에 달하며 강한 파괴력을 토양입자를 분해되고 분산된 토립자는 물에 의하여 흘러내려가며, 이를 입단파괴침식이라고 한다. 분산된 토립자는 토양 중의 간극을 메우기도 하고 삼투수와 함께 삼투되면서 토양속의 간극을 메우게 되면서 빗물의 삼투를 방해하여 흘러가는 물의 양을 증가시켜 더욱 더 침식을 촉진하게 된다. 특히, 이러한 현상은 유용한 토양성분 뿐만 아니라 토양 속에 포함된 유기성분까지 유실되고 나아가 대규모 산사태 등과 같은 지반의 붕괴를 유발하게 되어, 지반조건과 결합된 침식의 특성 연구가 필요한 실정이다 (Park et al. 2009).

최근 우리나라 주변의 기후변화에 따라 연강우량이 증가하였으며, 또한 강우량은 약 90 % 정도가 6월에서 9월 사이에 집중적으로 내리는 게릴라성 강우특성을 보이고 있다. 이러한 집중호우에 의하여 경사지의 토양침식 또는 토양유실이 심각한 실정이며, 이에 대한 대책수립이 필요한 실정이다. 토양침식은 경작지의 유효성분과 수자원의 저수용량을 감소시키는 중요한 지질학적 작용으로, 인간의 활동영역이 확대되면서 토지 이용의 집중화에 따라 토양침식이 급격하게 증가되었다. 특히, 대규모 단지 및 택지개발과 기상이변이 연계되면서 우리에게 위협적인 환경문제로 대두되고 있다 (Kim et al. 2007).

산지의 토사유출은 일반적으로 강우에 의한 지표면 흐름에 의하여 발생되며 토사유출에 따른 문제점을 예방하기 위해서는 유역에서의 개발행위나 개발 후 유역관리 계획에 대한 자료를 바탕으로 토사생성과 유출에 대한 조사와 분석이 필요하다. 토사유출의 저감을 위해서는 토사의 발생장소, 시간, 규모, 이동형태를 정확하게 파악하고, 그것이 어떤 경로로 유출되는가를 예측할 필요가 있으며, 사면에서의 침식과정은 지표특성 및 강우특성에 의해 변화 한다. 다양한 지표특성에 의한 침식과정을 이해하기에는 자연강우 실험만으로는 시간적이고 공간적으로 어려운 요소가 많이 있다 (Park et al. 2009).

이러한 토양침식이나 토양유실 방지대책을 수립하기 위해서는 토양침식이 발생되는 메커니즘을 규명하여야 적절한 공법을 적용할 수 있다. 지금까지는 토양유실이 수리수문학적인 측면에서만 고려되어 강우강도나 강우지속시간 등 강우조건을 고려하여 연구되었다 (Eiliot, 1983; Foster, 1991;George, 1981; Kim, 1997). 그러나 강우는 인위적으로 조절이 불가능한 인자이므로 인위적인 조절이 가능한 지반조건을 고려한 토양침식 과정의 규명이 필요하다.

본 연구에서는 최근의 강우형태를 고려한 토양침식 특성을 분석하기 위하여 강우조건과 지반조건을 달리하여 토양침식 실내 모의실험을 통하여 특성을 분석하고자 한다.

* 충북대학교 대학원
** 충북대학교 지역건설공학과
† Corresponding author Tel.: +82-43-261-2578
Fax: +82-43-272-5922
E-mail: cssong@cbnu.ac.kr
2011년 4월 27일 투고
2011년 5월 4일 심사완료
2011년 5월 19일 게재확정

II. 재료 및 실험방법

1. 재료

우리나라에 가장 많이 분포되어 있는 화강토를 대상으로 하였으며, 사용된 흙의 비중은 2.64, 균등계수는 10.7 그리고 곡률계수가 0.8인 점토질 모래인 재료로 통일분류상 SC에 속하는 시료로 물리적 특성은 Table 1과 같다.

2. 시험장치

가. 모형토조장치

모형토조장치의 규격은 40 cm×60 cm×5 cm로 1 cm 두께의 합판으로 제작하였으며, 접착부를 실리콘을 바르고 전체적으로 도색하여 물의 흡수를 방지하였다. 또한, 다짐에 의한 변형을 방지하기 위하여 앵글로 틀을 보강하였으며, 지반의 경사도를 재현할 수 있도록 제작하였다 (Danial, 1983; Craig et al., 1999).

나. 강우재현 장치

강우에 의한 토양침식량을 측정하기 위하여 빗방울을 재현할 수 있는 인공강우장치를 제작하였다. 인공강우장치는 40 cm×60 cm×5 cm의 아크릴 상자에 2.5 cm의 간격으로 직경 1 mm의 구멍을 뚫고 0.9 mm 철사를 고리형으로 삽입하여 빗방울의 직경 4.5 mm∽5 mm정도 되도록 제작하였으며 구멍의 갯수는 345개이다. 구멍의 간격은 인공강우가 낙하하여 평지 또는 토조에 빗방울이 퍼지는 직경이 약 2.5 cm 정도 되는 것을 고려하여 구멍의 간격을 2.5 cm로 결정하였다. 강우강도는 우리나라에 나타나는 일반적인 강우강도의 범위를 고려하여 10 mm/hr, 20 mm/hr 및 30 mm/hr로 하였으며, 이는 사전 시험에 의하여 재현장치의 수위를 변화시켜 조절하였다. 사전 시험결과, 수위가 0.3 cm, 0.6 cm 및 0.9 cm일 때 강우강도는 각각 10 mm/hr, 20 mm/hr 및 30 mm/hr에 해당하였다. 일정한 수위를 유지하기 위하여 아크릴상자 옆면에 각각의 수위에 해당하는 높이에 구멍을 뚫고 수위조절장치를 달아 수위를 일정하게 유지시켜 사용하였다.

Table 1 Physical properties.

LL (%)	PI (%)	G_s	Grain size distribution(%)						γd_{max} (tf/m^3)	OMC (%)	USCS
			4.76 m/m	2.0 m/m	0.42 m/m	0.074 m/m	0.05 m/m	0.01 m/m			
29.0	21.5	2.64	98.5	90.2	46.7	24.9	24.0	22.0	1.96	12.6	SC

3. 시험방법

가. 시료의 조제

사전에 시행된 다짐시험을 결과를 바탕으로, 공기건조시킨 화강토를 제작한 모형토조 내부에 정해진 다짐도에 해당하는 중량을 계량하여 고르게 다져서 공시체를 만들어 시험을 실시하였다. 본 연구에 사용된 시료의 다짐도는 자연지반, 인공지반 및 경작지의 다짐상태를 고려하여 60 %, 80 %, 100 %로 선정하였으며, 공시체는 3회 이상 반복, 조제하여 공시체 제작에 따른 오차를 최소화하였다.

나. 사면의 경사

사면의 경사는 20° 및 30°로 결정하였다. 그 이유는 지금까지 발생한 자연사면의 산사태가 각을 기준으로 볼 때 산사태가 가장 많이 발생하는 지역의 경사는 26°∽30°이며, 이 범위에서 전체 산사태의 32 %가 발생한 것으로 나타났다 (Lee, 2011). 산사태 발생지점에서의 경우 경사가 20°를 기준으로 20°미만일 경우에는 산사태가 거의 발생하지 않으며, 사면 경사가 20° 이상일 경우 산사태 발생이 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 반면 경사각이 30°보다 커지면 서서히 감소하는 경향을 보이고 있다. 산사태의 전체 길이에 대한 평균 경사도와 산사태 발생 빈도를 비교하여도 유사한 경향을 보이고 있어 결국 30° 전후의 경사면에서 산사태가 가장 빈번히 일어남을 알 수 있다. 따라서 본 실험에서는 현장에서 흔히 볼 수 있는 20°, 30°의 사면경사조건을 주어서 실험을 수행하였다.

다. 강우강도 및 지속시간

산사태의 규모에 따른 발생빈도를 살펴본 결과, 소규모 산사태는 강우강도가 10 mm/hr를 초과하면 발생되는 것으로 나타났고, 중규모 산사태는 강우강도가 15 mm/hr를 초과하면 발생되는 것으로 나타났다. 또한 대규모 산사태는 강우강도가 35 mm/hr를 초과하면 발생하는 것으로 나타났다 (Lee. 2011). 강우강도의 결정은 산사태 규모에 따른 발생빈도의 분석결과를 참고로 하여 소규모, 중규모, 대규모, 산사태가 발생하는 10 mm/hr, 20 mm/hr, 30 mm/hr의 세 가지 조건을 적용하였으며, 지속시간은 1 시간 2 시간 단위로 실험하였다.

라. 시험방법

제작한 모형토조에 각각의 다짐도에 따른 시료를 다져 넣은 뒤 모형토조를 경사조건에 따라 설치한다. 물을 채운 저수조에서 인공강우 장치로 물을 공급하며 수위는 수위 조절장치로 정수위를 맞추어 각 단계별 강우강도를 재현할 수 있도록 조절하

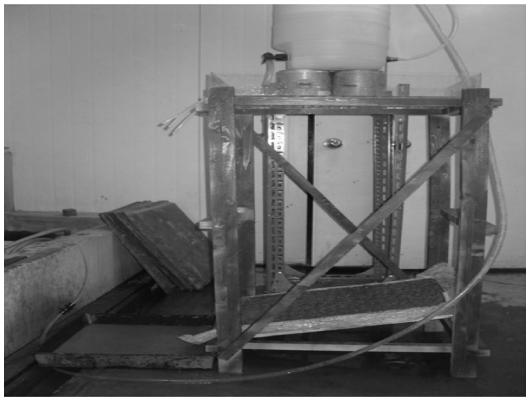


Fig. 1 Experimental device

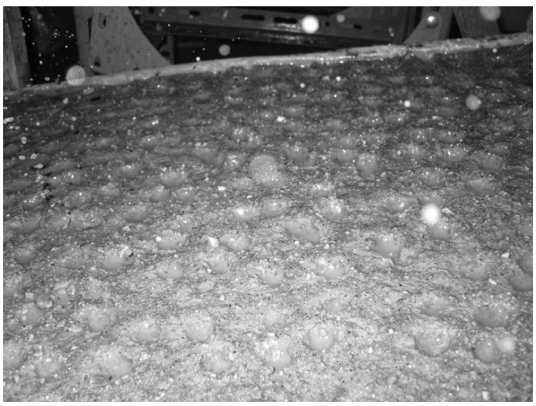


Fig. 2 Distributed form of soil particles

고, 지속시간에 따라 실험을 수행하였다. 실험이 종료되면, 사면 내로 침투한 유량이 토조 하단부로 유출되도록 시간이 경과한 후, 토조에 남은 토사를 오븐에서 24 시간 건조하여 시료의 중량을 측정하여 시험초기의 중량과 비교하여 유실량을 계산하였다. Fig. 1은 조합된 시험장치를 보여주고 있으며, Fig. 2는 모형토조 위에 빗방울 낙하하면서 발생되는 토립자의 분산형태를 보여주고 있다.

III. 결과 및 고찰

1. 시험조건에 따른 침식량의 변화

인공강우장치에서 낙하하는 빗방울의 크기와 강하속도가 일정하고, 각 실험의 토성이 동일하다는 조건하에서 강우강도와 경사도, 다짐도, 지속시간을 달리하여 모형토조의 토양유실량을 측정하였다.

다짐도가 60 %, 80 % 및 100 %인 경우, 지반의 경사도, 강우강도 및 강우지속시간에 따른 유실량을 측정한 결과를 요약하면 Table 2, Table 3 및 Table 4와 같다.

Table 2 Amount of the soil loss with the compaction ratio 60 %

Ground slope	20°						30°					
Rainfall intensity	10 mm/hr		20 mm/hr		30 mm/hr		10 mm/hr		20 mm/hr		30 mm/hr	
Rainfall duration	1hr	2hr	1hr	2hr	1hr	2hr	1hr	2hr	1hr	2hr	1hr	2hr
Amount of soil loss (kg)	0.43	0.9	0.48	1.01	0.53	1.13	0.51	0.98	0.55	1.05	0.58	1.19

Table 3 Amount of the soil loss with compaction ratio 80 %

Ground slope	20°						30°					
Rainfall intensity	10 mm/hr		20 mm/hr		30 mm/hr		10 mm/hr		20 mm/hr		30 mm/hr	
Rainfall duration	1hr	2hr	1hr	2hr	1hr	2hr	1hr	2hr	1hr	2hr	1hr	2hr
Amount of soil loss (kg)	0.21	0.5	0.29	0.66	0.41	0.87	0.27	0.73	0.38	0.81	0.46	0.98

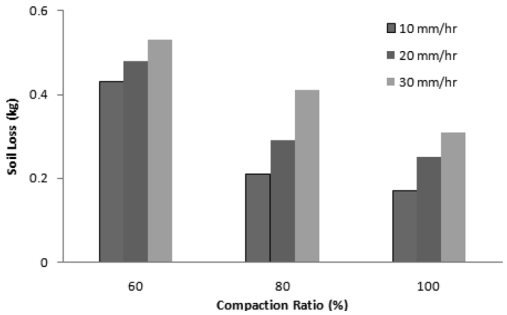
Table 4 Amount of the soil loss with compaction ratio 100 %

Ground slope	20°						30°					
Rainfall intensity	10 mm/hr		20 mm/hr		30 mm/hr		10 mm/hr		20 mm/hr		30 mm/hr	
Rainfall duration	1hr	2hr	1hr	2hr	1hr	2hr	1hr	2hr	1hr	2hr	1hr	2hr
Amount of soil loss (kg)	0.17	0.33	0.25	0.59	0.31	0.77	0.21	0.56	0.29	0.68	0.41	0.91

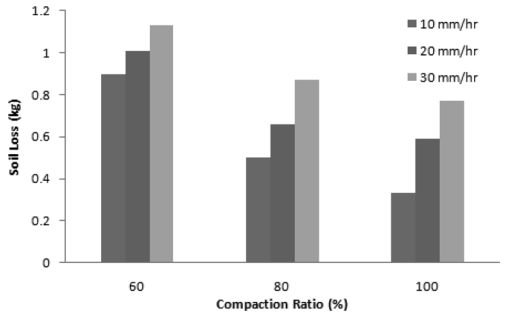
2. 지반조건에 따른 침식특성

가. 다짐도에 따른 유실량 변화

지반의 경사도가 20° 및 30°일 때, 다짐도에 따른 유실량 변화를 강우강도별로 도시하면 Fig. 3 및 Fig. 4와 같다. (a)는 지속시간이 1시간인 경우, (b)는 지속시간이 2시간인 경우의 유실량을 도시한 것이다. 다짐도가 증가할수록 유실량은 감소하는데 다짐율이 80 %일 경우는 60 %보다 1/2정도, 100 %인 경우에는 1/4 정도로 감소하는 것으로 나타났다. 또한 강우강도가 클수록 유실량은 증가하게 되는데 다짐도가 클수록 강우강도에 따른 기울기가 증가하므로 유실되는 비율이 크게 나타나고 있다. 이러한 경향은 지속시간이 커져도 같은 경향을 보이고 있으며, 지속시간에 따른 전체 전체 유실량 및 유실되는 비율도 증가하는 것으로 나타났다.

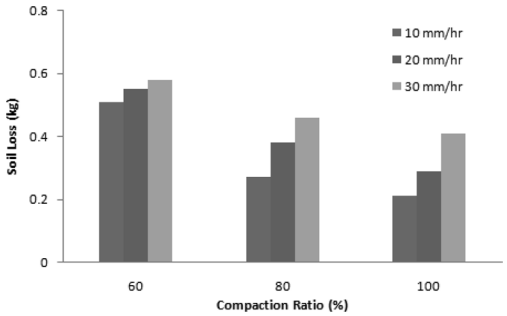


(a) Duration 1 hr

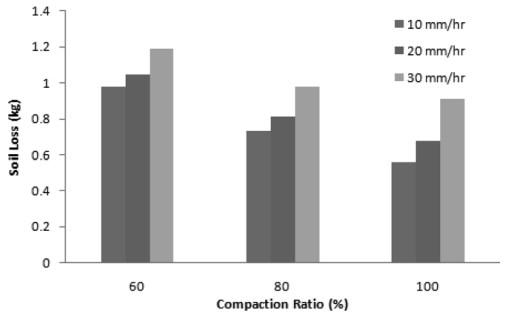


(b) Duration 2 hr

Fig. 3 The variation of the soil loss with compaction ratio (ground slope 20°)

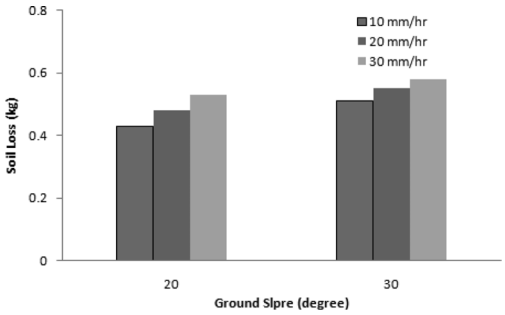


(a) Duration 1 hr

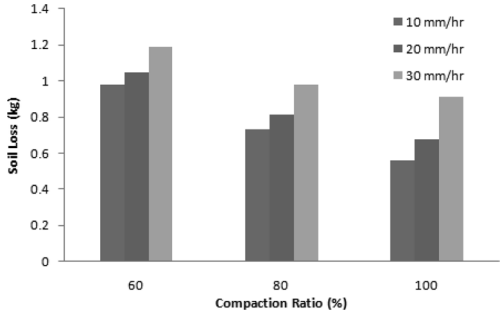


(b) Duration 2 hr

Fig. 4 The variation of the soil loss with compaction ratio (ground slope 30°)

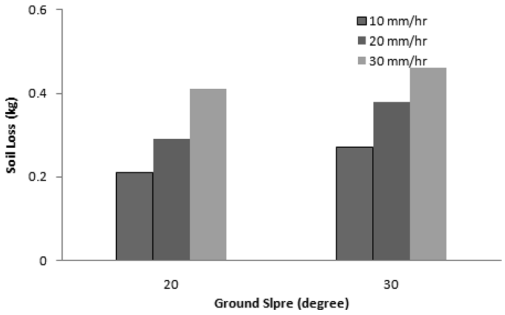


(a) Duration 1 hr

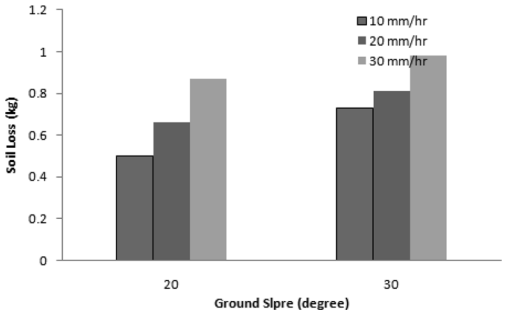


(b) Duration 2 hr

Fig. 5 The variation of the soil loss with the ground slope (compaction ratio 60 %)

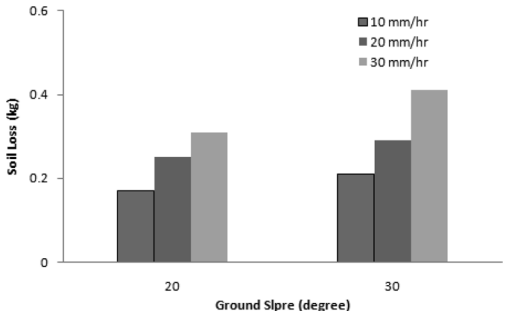


(a) Duration 1 hr

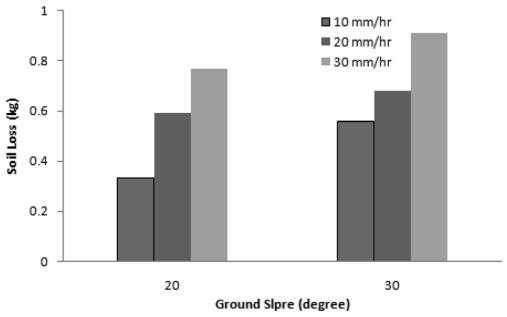


(b) Duration 2 hr

Fig. 6 The variation of the soil loss with the ground slope (compaction ratio 80 %)

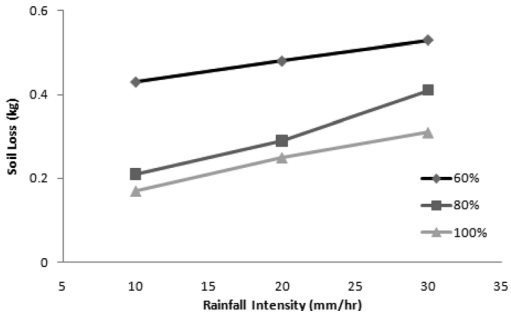


(a) Duration 1 hr

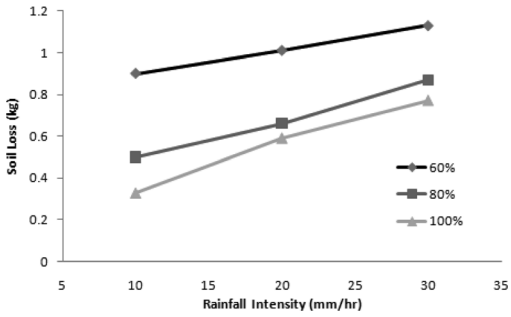


(b) Duration 2 hr

Fig. 7 The variation of the soil loss with the ground slope (compaction ratio 100 %)



(a) Duration 1 hr



(b) Duration 2 hr

Fig. 8 The variation of the soil loss with the rainfall intensity (ground slope 20°)

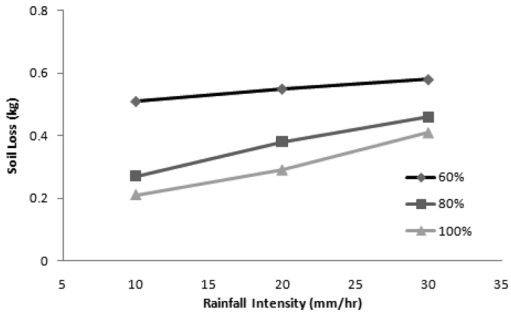
나. 경사도에 따른 유실량 변화

지반의 다짐도가 60 %, 80 % 및 100 %일 때, 지반의 경사도에 따라 유실량을 강우강도별로 재도시하면 Fig. 5, Fig.6 및 Fig. 7과 같다. (a)는 지속시간이 1시간인 경우, (b)는 지속시간이 2시간인 경우의 유실량을 도시한 것이다.

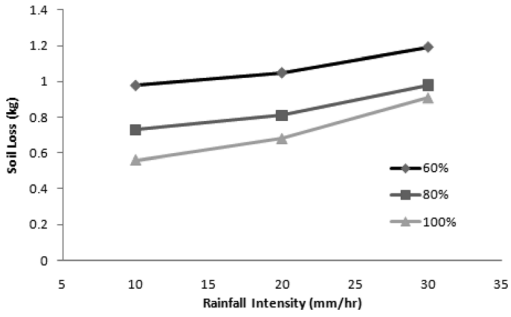
전체적인 유실량은 경사도 및 지속시산이 일정한 경우, 강우강도에 따라 증가하는데 이러한 경향은 다짐도가 높을수록 더 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한 지반의 경사도에 따라 유실량은 약 25 % 정도 증가하는 것으로 나타났다. 이는 강우강도가 커질수록 비율이 감소하는 것으로 나타나고 있다. 또한 다짐율이 60 %일 때 약 1.3배, 80 %릴 때 약 1.2배, 100 %일 때 약 1.1배로 다짐율이 증가할수록 경사도에 덜 영향을 받는 것으로 나타났다.

3. 강우조건에 따른 침식특성

강우강도에 따라 유실량을 지반의 다짐도별로 도시하면 Fig. 8 및 Fig. 9과 같다. Fig. 8은 지반의 경사가 20°일 때, Fig. 9는 지반의 경사가 30°인 경우를 나타내며, 그림에서 (a)는 지속시간이 1시간, (b)는 지속시간이 2시간인 경우의 유실량을 도시하였다. 강우강도에 따른 유실량은 선형관계를 나타내며, 증



(a) Duration 1 hr



(b) Duration 2hr

Fig. 9 The variation of the soil loss with the rainfall intensity (ground slope 30°)

가되는 비율은 다짐도 및 지속시간에 영향을 받는 것으로 나타나고 있다. 특히 지속시간이 길수록 지반의 다짐도가 낮을수록 더 유실되는 양이 급격하게 증가되는 것으로 나타나고 있다.

따라서 지반의 유실량을 줄이기 위해서는 지반의 다짐도, 경사도, 강우강도 및 지속시간 등을 고려하여 대책을 수립하는 것이 바람직하다. 특히 지반의 조건에 따른 유실량은 인위적으로 줄일 수 있는 다양한 방법이 가능하므로 이에 대한 구체적인 연구나 검토가 필요한 것으로 판단된다.

IV. 요약 및 결론

우리나라에 널리 분포한 화강토를 대상으로 다짐도 및 경사도를 달리하여 지반조건에 따른 유실량을 측정하여 침식특성을 분석하였다. 이를 위하여 지반상태를 재현할 수 있는 모의사면을 제작하고 인공강우장치를 통하여 강우강도 및 지속시간을 달리하여 화강토의 유실량을 측정하였으며, 각 조건에 따른 유실특성을 분석하고 요약하면 다음과 같다.

1. 토양의 유실량은 지반의 다짐도에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 특히 지반의 다짐도가 100 %인 경우에는 다짐도가 60 %인 경우에 비하여 1/4 정도로 감소하는 것으로 나타났다. 또한 강우강도 증가에 따른 유실량의 증가도 지반의 다짐도에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

2. 지반의 경사도에 따른 유실량 변화는 경사도가 클수록 증가하며, 경사도가 30°인 경우는 경사도가 20°일 때 보다 다짐도이 60 %일 때는 약 1.3배, 다짐도가 80 %일 때는 약 1.2배, 다짐도가 100 %일 때에는 약 1.1배 크게 나타나고 있으며 다짐도가 높아짐에 따라 경사의 변화로 인한 유실량의 변화는 줄어드는 것으로 나타났다.

3. 강우강도에 따른 유실량 변화는 강우강도와 선형적인 관계를 보이면서 증가하였다. 강우강도가 10 mm/hr에서 20 mm/hr의 증가일 때는 약 0.07 kg, 20 mm/hr에서 30 mm/hr 증가할 때는 약 0.1 kg의 유실량 증가를 보여 강우강도의 커짐에 따라 유실되는 비율은 더욱 커지는 것으로 나타났다. 또한, 강우지속시간이 증가함에 따라 거의 선형적으로 유실량이 증가하는 것으로 나타났다.

4. 토양침식이나 토양유실은 강우강도 및 지속시간에 많은 영향을 받지만 인위적으로 조절하거나 가감할 수 있는 인자가 아니므로 토양침식 방지대책을 수립하는 경우에는 인위적인 조절이 가능한 지반의 조건을 고려하여 수립하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

이 논문은 2009년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음 (This work was supported by the research grant of the Chungbuk National University in 2009).

REFERENCES

1. Box J. E., 1981. The Effect of surface slaty fragment on soil erosion by water. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43(1): 111-116.
2. Bromhed E. N., 1992. *The Stability of Slopes.* Blackie Academic & Professional.
3. Castro C. D., 1986. Evaluation of the topographic factor in the universal soil loss equation on irrigation slopes. *J. Soil Water Cons* 41(2): 113-125.
4. Craig H. B. and M. Gribb, 1999. Measuring Unsaturated Hydraulic Conductivity in the Laboratory and Field, ASCE Geotech. *Special Pub* 68: 113-168.
5. Daniel D. E., 1983, Permeability test for unsaturated soil, Geotech. *Testing J. of ASCE* 6(2): 81-86.
6. Eiliot W. J and J. M. Laflen. 1993. A process-based rill erosion model. *Transaction of the ASCE* 36(1): 65-72
7. Foster G. H. 1991. Advanced in wind and water erosion prediction. *Journal of Soil and Water Conservation* 46(1): 65-77.
8. George E. D. 1981. Estimating the cover management factor (C) in the universal soil loss equation for forest conditions. *J. Soil Water Cons* 36(4): 5-17.
9. Kim N. C., H. K. Song, G. S. Park, G. S. Jeong, S. H. Lee and B. J. Lee. 2007. An Analytical study on the revegetation methods for highway slopes. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology* 10(2): 1-15 (in Korean).
10. Kim S. J. 1997. Physically based soil-water erosion model. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 39(4): 82-89 (in Korean).
11. Lee M. G., 2011. Characteristics of soil erosion for geotechnical conditions. Thesis for the degree of master. Chungbuk National University (in Korean).
12. Park J. H., Y. H. Jeong and H. T. Choi. 2009. Using gabion systems with vegetation base materials on stability analysis for th forest road cut-slope rehabilitation techniques. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology* 12(2): 116-113 (in Korean).
13. Park S. W and J. Y. park. 2009. Effects of overburden stress on stability in unsaturated weathered soil slopes. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 25(10): 55-66 (in Korean).