# 인공강우 시 나지교란사면 토사유출에 미치는 다짐처리의 영향

Effects of Surface Compaction Treatment on Soil Loss from Disturbed Bare Slopes under Simulated Rainfalls

박 상 덕\* / 신 승 숙\*\* / 김 선 정\*\*\* / 최 병 구\*\*\*\*

Park, Sang Deog / Shin, Seung Sook / Kim, Seon Jeong / Choi, Byoungkoo

#### Abstract

Surface compaction significantly impacts runoff and soil erosion under rainfall since it leads to changes of soil physical characteristics such as increase of bulk density and shear stress, change of microporosity, and decrease of hydraulic conductivity. This study addressed surface compaction effects on runoff and soil loss from bare and disturbed soils that are commonly distributed on construction sites. Thirty-six rainfall simulations from three replicates of each involving rainfall intensities (68.5 mm/hr, 95.6 mm/hr) and plot gradients (5°, 12.5°, 20°) were conducted to measure runoff and soil loss for two different soil surface treatments (compacted surface, non-compacted surface). Compacted surface increased significantly soil bulk density and soil strength. However, the effect of surface treatments on runoff changed with rainfall intensity and plot gradient. Rainfall intensity and plot gradient had a positive effect on mean soil loss. In addition, the effect of surface treatments on soil loss at gentle slope (5°) while they decreased soil loss at steep slope (20°). These results indicate that there exists transitional slope range (10~15°) between gentle and steep slope by surface compaction effects on soil loss under disturbed bare soils and simulated rainfalls.

Keywords : rainfall simulation, soil erosion, runoff, surface roughness, surface compaction

#### 요 지

\_\_\_\_\_

토양의 다짐은 강우 시 지표유출 및 토사유출에 큰 영향을 끼친다. 다짐은 체적밀도 증가, 전단강도 증가, 공극률 변형, 투수계수 등과 같은 토양특성 변화를 야기하기 때문이다. 본 연구는 인공강우 실험을 활용하여 개발지의 사면조건과 유사한 나지교란사면에서 표면의 다짐처리가 지표유출 및 토사유출에 미치는 영향을 파악하였다. 표면처리(다짐, 비다짐), 강우강 도(68.5 mm/hr, 95.6 mm/hr), 사면경사(5°, 12.5°, 20°)의 각 조건별 3회 반복하여 총 36회의 강우모의에 따른 지표유출 및 토사유출을 측정하였다. 연구결과, 다짐처리 후 토양의 체적밀도 및 전단강도는 유의적으로 증가하였다. 그러나 이러한 물리적 특성의 변화가 지표유출에 미치는 영향은 강우강도와 사면경사에 따라 다르게 반응하였다. 평균 토사유출량은 강우강도와 사면경사가 증가함에 따라 유의적으로 증가하였다. 또한, 토사유출량은 강우강도와 사면경사 별 다짐처리 유·무에 따라 다른 반응을 보였다. 완경사(5°)에서는 다짐처리에서 더 많은 토사가 유출되었으나, 급경사(20°)에서의 다짐처

Professor, Dept. of Civil Engineering, Gangneung-Wonju National University, Gangneung 210-702, Korea.

<sup>\*</sup> 강릉원주대학교 토목공학과 교수 (e-mail: sdpark@gwnu.ac.kr)

<sup>\*\*</sup> 강릉원주대학교 방재연구소 전임연구원 (e-mail: cewsook@hanmail.net)

Associate Researcher, Institute for Disaster Prevention, Gangneung-Wonju National University, Gangneung 210-702, Korea. \*\*\* 기상청 국립기상연구소 재해기상연구센터 연구원 (e-mail: mk0637@korea.kr)

Researcher, High Impact Weather Research Center, National Institute of Meteorological Research, KMA, Gangneung 210-702, Korea. \*\*\*\* 교신저자, 강릉원주대학교 수충부 및 토석류 방재기술연구단 연구교수 (e-mail: bkchoi@gwnu.ac.kr, Tel: 033-640-3037)

Carresponding Author, Research Professor, Research Center for River Flow Impingement and Debris Flow, Gangneung-Wonju National University, Gangneung 210-702, Korea.

리는 토사유출을 감소시키는 역할을 한 것으로 나타났다. 나지교란사면에서는 토사유출에 대한 다짐효과의 천이구간이 존재하는 것으로 파악되며, 본 연구의 토양조건 및 강우조건에서 천이구간은 완경사와 급경사 사이로서 사면경사 10~15° 범위에 존재하는 것으로 판단된다.

핵심용어 : 인공강우, 토양침식, 유출, 표면조도, 표면다짐

# 1. 서 론

지속적인 경제성장과 더불어 도로개설, 신도시건설 및 산지개발 등 인간에 의한 토지이용의 고도화로 인해 매년 자연을 훼손한 개발지의 사면이 꾸준히 증가하고 있는 실 정이다. 이러한 개발행위는 특성상 기존 토지의 용도가 변경되고, 건설공사가 수반됨에 따라 광범위한 지표의 노 출과 교란이 필연적으로 발생되어 토양침식 및 토사유출 의 주요 원인으로 작용한다. 강우 시 유실토양은 인근 수 계로 유입되어 다른 유기물들과 함께 수생태계의 형성 및 유지에 필요한 생육공간(Gomi et al., 2002)을 제공하기도 하지만, 집중호우와 같은 과도한 강우 시 탁수와 통수단면 적 감소 등을 비롯한 토사 스트레스(sediment stress)를 야 기하여 수생태계의 오염을 가중시킨다(U.S. EPA, 2003). 또한, 과거 개발지의 토사유출 등의 비점오염원은 그 유 출이 강우 시에만 집중되고, 넓고 다양한 발생원으로 인 한 상대적인 처리의 어려움으로 중요성이 인식되지 못하 였다. 최근까지 개발지의 비점오염원에 대한 규제는 공사 후 개발지 내 비점오염원 처리에 국한되었으며, 공사 중 발생하는 비점오염원에 대한 규제가 엄격하지 않아 적절 한 관리가 이루어지지 않고 있는 실정이다(Choi et al., 2009). 더욱이, 국내에서는 다양한 개발지의 지표조건이 적절히 반영된 토사유출 관련 연구가 미진한 실정이다. 이는 개발지의 토사유출에 대한 기초적인 자료의 해석과 정확한 토사유출 원단위 산정의 미흡으로 연결되며, 결국 이로 인해 토사유출 저감시설이 과대 또는 과소 설계되는 문제점을 야기한다(Kim et al., 2008).

개발지에서 발생하는 토사유출을 저감하는 방법으로는 크게 실트펜스(silt fence), 토목섬유 등의 가설형 시설과 이동식 여과 처리시설 등과 같은 장치형 시설을 이용하는 방법으로 구분한다. 가설형 유출저감 시설은 간단하고 저 렴한 시공비로 인해 가장 범용화 되어있는 일반적인 방법 이고(Harbor, 1999), 장치형 시설은 보다 높은 저감 효과 를 기대 할 수 있으나 비용 측면에서는 효율적이지 않다. 최근 국내에서는 토목섬유(Choi et al., 2009), 볏짚(Shin et al., 2009), 임목폐기물(Kang and Lee, 2012) 등 다양한 방법을 활용하여 개발지 교란사면에서 원천적으로 토사 유출을 저감시킬 수 있는 기술들을 평가하였으며 높은 수 준의 효율성을 기대할 수 있는 것으로 보고하였다. 그러 나 이러한 방법들은 대단위 개발지에 적용하기에는 높은 공사비가 소요되며, 연간 유출되는 토사량의 대부분을 차 지하는 장마기와 집중호우 대비를 위한 일시적인 대책으 로는 시공 상 많은 시·공간적인 제약이 따른다. 그러한 이유로 개발공사 중에 일시적으로 포장을 덮기도 하지만, 대부분 나지상태로 방치하며 토사유출 저감을 위해 나지 사면을 다짐처리 하는 것이 일반적이다. 지표의 다짐은 토 양의 체적밀도를 증가, 토양 내 공극률 변형, 침투율 감소 를 야기하고, 이러한 변화는 지표유출의 증가로 이어지며 토양침식의 주요한 원인이 되기도 한다(Aust et al., 1998; Lacey and Ryan, 2000; Black et al., 2002).

따라서 본 연구에서는 개발지역 공사현장의 대표적인 지표유형인 나지교란사면에서 표토의 다짐(compaction) 처리가 지표유출 및 토사유출 저감에 미치는 영향을 파악 하기 위해 강우모의 실험을 수행하고, 토양침식의 주요 지배요인인 강우강도와 사면경사에 따라 이들이 어떠한 변화 특성을 나타내는지 조사하였다.

## 2. 연구방법

## 2.1 실험시설 및 재료

실험시설은 강릉원주대학교 수리실험동에 위치하고 있 으며, 인공강우기와 수조, 토양상자로 구성되어 있다(Fig. 1). 인공강우기는 최대 낙하고 4.1 m에서 약 50~150 mm/ hr 범위의 강우강도를 모의할 수 있으며, 강우를 발생시 키는 20개의 노즐과 노즐 회전속도 제어장치로 구성되어 있다. 토양상자는 5.5 × 1.2 × 0.4 m (L×W×H) 크기로 총 3 개를 철판으로 제작하여 이용하였으며, 유압장치를 이용 하여 최대 22°까지 경사를 조절할 수 있도록 제작되었다 (Fig. 1). 토양상자의 출구부에는 지표유출수 및 유출토사 를 수집할 수 있는 유도판 및 집수시설이 설치되어 있으 며, 바닥면에는 기저유출수의 배수가 용이하도록 배수구 를 설치하였다. 토양은 산지개발 나지교란사면과 유사한 조건을 조성하기 위해 인근 도로공사중인 산지에서 수집 하였다.

## 2.2 인공강우 발생 및 보정

인공강우기는 용수공급용 펌프가 수조의 물을 압송하 여 속도제어 장치에 의해 조절되는 노즐의 좌우 회전을 통해 인공강우를 발생시킨다. 20개의 노즐로 유입되는 물 의 압력을 일정하게 조절하기 위해 유량조절 밸브와 및 압력계를 설치하였다. 강우량은 30분 동안 강우를 발생시 킨 후 토양상자 내에 배치된 20개의 강우량 측정 용기에 서 측정된 값들의 평균값으로 산정하였다. 실험설계 시 강우강도를 60 mm/hr와 100 mm/hr로 설정하기 위해 수 차례 반복하여 강우량을 측정하였다. 실제 인공강우 실험 에서 측정한 강우강도의 평균치는 68.5 mm/hr와 95.6 mm/ hr로 각 노즐에서 분사되는 분사량의 오차로 인해 설계 강우강도와 다소 차이를 보였다. 이는 Korea Ministry of Construction and Transportation (2000)에서 제시한 확률 강우강도식에 따른 서울지역 30분 강우에 대한 발생빈도 3년과 9년에 해당하는 강우강도의 규모이다. 사면에 작용 한 강우의 실제 강우분포는 경사에 따른 강우낙하고의 차 이와 노즐의 강우분사 상호작용에 따른 사면 위치에 따라 다소 차이를 보였다. 노즐의 강우분사속도는 자연강우의 낙하속도 37~78% 범위였다. 빗방울의 지름을 정확히 알 수 없었기 때문에 강우운동에너지의 차이를 확인하지 못 했다. Fig. 2는 15분 동안의 강우발생에 따른 우측 토양상 자의 사면경사에 따른 강우분포를 나타낸 것이다(Kim, 2012; National Disaster Management Institute, 2011).

#### 2.3 실험방법

인공강우 실험은 강우강도(68.5 mm/hr, 95.6 mm/hr),



Fig. 1. Rainfall Simulator and Soil-box Placement



Fig. 2 Rainfall Distribution for Slope Steepness 5°, 12.5°, and 20° on Right Soil Box

사면경사(5°, 12.5°, 20°), 사면처리(다짐, 비다짐)의 세 조 건으로 각 조건 별 3회를 반복 실시하여 총 36회 수행하였 다. 68.5 mm/hr와 95.6 mm/hr의 조건에서 30분 동안의 강 우 발생 후, 사면경사와 사면처리 별 지표유출량 및 토사유 출량를 측정하였다. 사면경사 조절은 유압장치에 따른 토 양상자의 고도 조절과 경사계 사용에 의해 이루어졌다.

토양상자마다 40 cm 깊이로 실험토양을 채웠다. 사면 조건은 실험사면의 표토 10 cm를 다짐과 비다짐으로 다 르게 처리하였다. 표토의 다짐을 위해 다짐롤러(직경 35 cm, 폭 60 cm, 무게 50 kg)를 이용하여 선행 측정된 토양 의 체적밀도와 유사한 값이 되도록 재현하였다. 선행 측 정된 토양의 체적밀도는 건설현장에서 백호의 버킷을 이 용하여 다짐처리 할 경우로 가정하였다. 예비실험을 통하 여 숙련자에 의해 성토된 동일한 토양에 대해 현장다짐을 실시한 후 총 4곳에서 측정된 평균 체적밀도를 측정하였 고, 이 값을 토양상자 내의 토양의 다짐 횟수별 체적밀도 와 비교하였다. 본 실험에서는 백호의 버킷을 이용하여 다짐처리한 경우와 제작된 다짐롤러를 이용하여 3회 다짐 한 토양의 체적밀도가 유사하게 나타나, 표토의 다짐처리 조건(3회 다짐)으로 이를 사용하였다.

각 실험 별 토양상자 내의 토양의 성분과 함수비의 편 차를 줄이기 위해 실험간격, 실험순서 및 토양상자를 교 차하여 처리하였다. 예비실험에서 강우 발생 후 경과시간 에 따른 토양의 함수비 변화를 측정하였고, 이를 통해 토 양의 함수비의 편차가 줄어들기 시작하는 실험 후 6시간 을 실험간격으로 설정하였다(Fig. 3). 또한, 매 실험 후 표 토는 새로운 토양으로 대체하기 위해 뒤섞어 교란시킨 후 다짐 및 비다짐으로 정리하여 실험하였다. 강우 시 지표



Fig. 3 Changes of Moisture Content in Soil Box Positions after Rainfall Simulation

유출수의 총량을 집수시설을 통해 수집하였고 함께 이송 된 유사는 출구부에 설치된 유도판을 이용하여 수집하였 다. 유출수에 포함된 유사를 가라앉히기 위해 실험종료 12시간 경과 후에 유출량을 메스실린더로 계측하였고, 침 전된 토사는 105℃ 건조시킨 후 총량을 측정하였다.

#### 2.4 분석방법

토질의 특성은 입도시험과 비중시험을 실시하여 측정하였다. 또한 입도시험 후 입경 2mm 이하의 토양을 105℃에서 1차 건조 후 도가니에 담아 600℃에서 4시간 이상 태운 후 유기물의 양을 측정하였다. 유출된 토사의 양은 완전건조 후 무게를 측정하여 산정하였다.

실험 준비가 완료된 각 토양상자를 9곳으로 구분하여 체적밀도 및 토양전단강도를 측정하였으며, 이때의 초기 체적함수비를 계산하였다. 체적밀도 측정을 위한 토양시 료는 체적 100 cm<sup>3</sup>인 시료체취기를 이용하여 토양깊이 10 cm 내에서 채취하였으며, 가능한 주변 토양의 교란을 최 소화하였다(Rab, 2004). 토양전단강도 측정은 체적밀도 측정을 위해 토양시료를 채취한 인접위치에서 수행되었 다. 휴대용 베인시험기(Torvane)의 큰 저항날개(vane)를 이용하여 베인전단실험을 수행한 후 보정계수(0.2 kg/cm<sup>2</sup>) 를 이용하여 토양전단강도를 산정하였다. 각 토양상자의 체적밀도, 토양전단강도, 초기 체적함수비는 9곳에서 산 정된 평균값을 이용하였다.

각 실험조건 별 체적밀도 및 토양강도, 지표유출량, 토 사유출량의 차이를 비교·분석하였으며, 분석에 SAS통계 패키지(SAS Institute Inc., 2008)를 이용하였다. 각 실험 조건 별 5% 유의수준(a=0.05)에서 Tukey's HSD 검정을 이용하여 비교하였다.

#### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 토질

12

토질의 특성을 파악하기 위해 입도분석 시험을 실시하 였으며 Fig. 4와 같은 입경가적곡선을 작성하였다. 실험 에 이용한 토양은 점토(clay) 1.5%, 실트(silt) 7.2%, 모래 (sand) 91.3%의 구성비를 보였다. 균등계수(C<sub>u</sub>)와 곡률계 수(C<sub>g</sub>)는 각각 5.9와 0.9로 산출되었으며, 통일분류법에 의해 SP로 분류되었다. 또한 토양에 포함된 유기물 함량 은 3.2~3.7%로서 비교적 균등한 것으로 조사되었다.

#### 3.2 토양의 물리적 특성 변화

다짐처리 전·후 토양의 체적밀도 및 전단강도의 변화

를 산정하였다(Table 1). 토양의 체적밀도는 다짐처리 전 ·후 각각 1.33 g/cm<sup>3</sup>, 1.48 g/cm<sup>3</sup>으로 나타났으며, 전단강 도는 다짐처리 전 0.16 kg/cm<sup>2</sup>, 다짐처리 후 0.38 kg/cm<sup>2</sup> 로 나타났다. 다짐처리 후 토양의 체적밀도는 11.3% 증가 하였고, 전단강도는 2.4배 증가한 것으로 나타나 다짐처리 전·후 토양의 물리적 특성의 차이가 통계적으로 유의함을 보였다(Table 1). 이러한 물리적 특성 변화는 산림 및 농업 과 관련된 수확작업 등으로 교란된 토양에서 빈번한 장비 이용과 통행으로 토양의 체적밀도(Lacey and Ryan, 2000; Block et al., 2002; Choi, 2012)와 토양전단강도(Hamza and Anderson, 2005; Ekwue and Harrilal, 2010)가 증가 한다는 보고와 일치한다. 그러나 토양의 초기 체적함수비 는 다짐처리 전·후 유의적인 차이를 나타내지 않았다 (Table 1). 이러한 다짐처리 전·후 초기 체적함수비의 미 세한 변화는 매 실험 전 표토를 주변의 자연 건조된 새로 운 토양으로 대체하였기 때문인 것으로 판단된다.

교란된 나지사면을 인위적으로 다지면, 다짐전과 비교 할 때 표면조도(surface roughness)의 조건이 달라진다. 이러한 표면조도의 변화는 강우 시 유출의 분포와 양상, 집중류(concentrated flow)의 발달 및 그에 따른 토사유출 량에 영향을 미칠 수 있다. 일반적으로는 매끄러운 표면보 다는 거친 표면에서 더 많은 지표유출 및 토양침식이 발생 하는 경향을 보인다(Zobeck and Onstad, 1987; Hairsine and Rose, 1992; Gomez and Nearing, 2005). 본 연구에서



Fig. 4. Accumulated Grain Size Distribution Curve of the Soil

는 다짐처리를 위해 표면요철이 없는 롤러를 사용하였으 며, 다짐처리 전·후 표면조도의 변화가 확연하였다. 따라서 나지교란사면을 대상으로 한 다짐처리(compacted surface) 와 비다짐처리(non-compacted surface)에 따른 표면조도 의 차이는 명확한 것으로 판단된다.

#### 3.3 지표유출

지표유출량은 경사도와 강우강도에 따라 다짐과 비다 짐처리 사면으로 구분하여 산출하였다(Fig. 5). 전체적으 로 지표유출률은 강우발생장치를 이용한 국내의 기존 선 행연구와 비교하여 다소 높게 산출되었다(Im et al., 2007; Shin et al., 2009). 이는 나지교란사면의 특성과 실험에 이 용된 토질, 사면경사, 강우강도의 차이에 기인한 것으로 판단된다.

강우강도 68.5 mm/hr 조건에서, 지표유출률은 비다짐 처리 사면의 경우, 경사도 5°, 12.5°와 20°에서 0.88, 0.87, 0.89로 산출되었으며, 다짐처리 사면에서는 0.90, 0.88, 0.87로 나타나 경사도 및 다짐처리에 따른 유의적인 차이 는 없는 것으로 나타났다. 그러나 강우강도가 68.5 mm/hr 에서 95.6 mm/hr로 증가함에 따라 지표유출량은 유의적 으로 증가하였고, 사면경사가 급할수록 지표유출량은 증



Fig. 5. Surface Runoff by Varying Rainfall Intensity, Surface Treatment and Plot Gradient

Table 1. Changes in Mean Bulk Density, Shear Strength, and Initial Moisture Content by Surface Treatment

Soil physical characteristics	Non-compacted surface (N=18)	Compacted surface (N=18)
Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	1.33 <sup>a*</sup>	$1.48^{\rm b}$
Shear strength (kg/cm <sup>2</sup> )	0.16 <sup>a</sup>	0.38 <sup>b</sup>
Initial moisture content (%)	18.40 <sup>a</sup>	17.49 <sup>a</sup>

\*Means with different letters within a low are significantly different at a=0.05 by Tukey's HSD test.

가하는 것으로 나타났다(Fig. 5). 이러한 경향은 강우강도 가 증가함에 따라 급경사 사면의 침투율이 감소했기 때문 이며, 지표유출에 대한 사면경사의 영향이 강우강도에 따 라 다른 반응을 보인다는 것을 의미한다. Dong et al. (2012)은 본 실험에 이용된 나지교란사면의 조건과 유사 한 도로개설지의 교란토양에서 지표유출에 미치는 사면 경사의 영향은 강우강도에 따라 다르게 나타나며, 나지교 란사면에서는 사면경사보다 강우강도가 지표유출에 더 크게 기여한다고 보고하였다.

또한, 강우강도 95.6 mm/hr의 동일한 경사조건에서 지 표유출률은 다짐처리(비다짐: 0.85~0.89, 다짐: 0.87~0.92) 사면에서 증가하는 경향을 보였다(Fig. 5). 이는 토양의 체적밀도와 전단강도가 유의적으로 증가한 다짐처리 사 면에서 침투율이 감소하고(Aust et al., 1998; Lacey and Ryan, 2000), 다짐처리로 인해 표면조도가 균일해 짐에 따 른 지면저류의 효과가 감소하였기 때문인 것으로 판단된 다. 더욱이 다짐처리는 표토실링(sealing)이 용이한 지표조 건을 조성하여 침투율을 감소시킬 수 있다(Agassi et al., 1994; Fox and Bryan, 1999).

## 3.4 토사유출량

나지교란사면의 경사도(5°, 12.5°, 20°), 사면처리(다짐, 비다짐)와 강우강도(68.5 mm/hr, 95.6 mm/hr)의 조건에 따른 토사유출량을 산출하였다(Fig. 6). 평균 토사유출량 은 강우강도와 사면경사가 증가함에 따라 유의적으로 증 가하는 것으로 나타났다. 강우강도 68.5 mm/hr의 조건에 서 비다짐처리는 평균 1.62 kg/m<sup>2</sup>, 다짐처리는 1.59 kg/ m<sup>2</sup>의 유사한 양의 토사유출이 발생하였고, 강우강도 95.6 mm/hr의 조건에서 비다짐처리는 평균 2.55 kg/m, 다짐 처리는 2.25 kg/m<sup>2</sup>의 토사유출이 발생하여 다짐사면에서 약 13% 감소한 것으로 나타났다(Fig. 6 and Table 2).

Fig. 7에서와 같이 동일한 강우조건에서 5° 경사도 사



Fig. 6. Effects of Surface Treatments on Soil Loss by Rainfall Intensity and Plot Gradient

Rainfall intensity	Plot gradient (°)	Soil loss (kg/m <sup>2</sup> )	
(mm/hr)		Non-compacted surface	Compacted surface
68.5	5	0.08 <sup>a*</sup>	0.31 <sup>b</sup>
	12.5	1.71 <sup>a</sup>	1.81 <sup>a</sup>
	20	3.06 <sup>a</sup>	2.64 <sup>a</sup>
95.6	5	0.28 <sup>a</sup>	0.57 <sup>b</sup>
	12.5	2.53 <sup>a</sup>	2.44 <sup>a</sup>
	20	4.83 <sup>b</sup>	3.74 <sup>a</sup>

<sup>\*</sup>Means with the same letters within a low are not significantly different at  $\alpha$ =0.05 by Tukey's HSD test.



(a) Non-compacted (left) and compacted (right) surfaces at gentle slope(5°)



(b) Non-compacted (left) and compacted (right) surfaces at steep slope(20°)Fig. 7. Examples of Two Different Surface Treatment Conditions after 95.6 mm/hr of Rainfall

면은 얕은 수심의 면상흐름(sheet flow)이 지배적이었고, 20° 경사도 사면은 다량의 토사유출을 일으키는 세류(rill) 발달이 현저히 증가했다. 또한 각 경사 별 사면처리 유·무 에 따라 토사유출량은 다른 양상을 보였다(Fig. 7). 전체 적으로 사면경사 5°의 조건에서는 다짐처리 사면에서 더 많은 토사유출이 발생한 것으로 나타났다. 강우강도 68.5 mm/hr와 사면경사 5°의 조건에서 다짐처리(0.31 kg/m<sup>2</sup>) 사면은 비다짐처리(0.08 kg/m<sup>2</sup>) 사면에 비해 약 4배의 토 사유출량이 증가하였으며, 강우강도 95.6 mm/hr와 경사 도 5°의 조건에서 다짐처리(0.57 kg/m<sup>2</sup>)는 비다짐처리(0.28 kg/m<sup>2</sup>)에 비해 약 2배 증가한 것으로 나타났다(Table 2). 교란된 나지사면을 다지면, 토양의 체적밀도가 증가함 에 따라 토양 내 미세공극 및 토양입단(soil aggregate)의 변형에 의해 침투율 감소(Lacey and Ryan, 2000) 표면요 철 및 저류효과의 감소로 인해 지표유출이 증가되고, 결 국 이러한 토양의 물리적·수문학적 특성 변화를 통해 토 양침식 및 토사유출이 가중된다는 결과는 많은 선행연구

에서 보고되어 왔다(Gomez and Nearing, 2005). 본 연구 에서도 강우강도 95.6 mm/hr와 사면경사 5°의 조건에서 다짐처리로 인해 지표유출과 토사유출량이 증가하여 위 의 개념에 부합되는 경향을 나타냈다. 그러나 68.5 mm/hr 의 조건에서는 사면경사 및 다짐처리가 지표유출에 유의 적인 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다(Fig. 5). 강우 강도 68.5 mm/hr와 사면경사 5°의 조건에서 다짐처리 사 면의 토사유출량 증가는 지표유출 이외의 다른 토양침식 지배요인에 의해 다짐처리로 인한 표면조건의 변화와 이 들의 복합적인 작용에 의해 더 큰 영향을 받은 것으로 사 료된다(Gomez and Nearing, 2005; Dong et al., 2012). Helming et al. (1998)은 지표유출과 토사유출의 진행과정 관련된 표면조도에 대한 연구에서 표면조도가 지표유출 량에 미치는 영향은 작지만, 강우 시 지표유출의 공간적 인 분포와 이송능력은 토사유출량에 영향을 줄 수 있다고 판단하였다. 결과적으로 완경사의 경우는 비다짐사면이 다짐사면보다 토양 침식 및 이송에 있어 유리한 조건을 갖는다는 사실이다.

사면경사 20°의 조건에서는 비다짐처리 사면의 토사유 출량이 증가하는 경향을 보여, 사면경사 5°와는 상반되는 양상을 보였다(Fig. 7). 모든 강우강도(68.5 mm/hr, 95.6 mm/hr)의 사면경사 20°의 조건에서 다짐처리에 의해 상 대적으로 토사유출량이 감소하는 것으로 나타났다(Table 2). 급경사 사면의 다짐처리는 표토실링 형성을 조성하여 유출량이 상대적으로 증가하는 경향을 보이지만, 다짐처 리로 인해 토양의 전단강도 또한 크게 증가한다. 다짐사 면은 비다짐사면과 비교하여 상대적으로 지표유출을 공 간적으로 균일하게 분포시키는 경향이 있으며, 이는 다량 의 토양입자의 박리 및 이송을 일으키는 집중흐름에 의한 세류침식(rill erosion) 발생을 저해하고, 면상흐름에 의한 유송 비율을 증대시킴으로서 비다짐보다 적은 양의 토사 유출을 일으켰다(Helming et al., 1998; Dong et al., 2012). Adekalu et al. (2006)과 Ekwue and Harrilal (2010)은 표 면의 다짐처리에 의해 지표유출은 유의적으로 증가하였 지만, 오히려 토사유출량은 감소함을 보고하였다.

중경사(12.5°)의 교란나지사면에서는 다짐처리에 따른 토사유출량의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다(Table 2). 이는 지표유출 및 토사유출에 미치는 사면경사의 영향 은 강우강도에 따라 다르게 반응한다는 Dong et al. (2012)의 연구에서 언급한 바와 같이, 완경사와 급경사 사 이의 토양침식 지배요인의 차이가 존재하며, 중경사의 사 면은 이러한 토양침식 지배요인의 천이구간에 해당하기 때문인 것으로 판단된다.

Gomez and Nearing (2005)은 지표유출, 토양침식 및 토사유출에 대한 표면다짐의 효과가 긍정적일 것이라는 일반적인 개념들에 대해 항상 모든 조건에서 타당한 것이 아님을 시사했다. 완경사에서는 다짐처리가 오히려 토사 유출을 증가시키는 요인으로 작용하였기 때문이다. 이러 한 토사유출에 대한 표면다짐 효과는 역학적 의미로 해석 이 가능하다. Fig. 7과 같이 완경사 사면은 급경사 사면에 비해 세류 발달이 현저히 적으며 토사유출이 면상흐름에 의해 지배적인 영향을 받는다. 강우튀김(rainsplash)과 면 상흐름이 지배적인 경우의 토사유출은 지표면 상태에 따 른 저류효과와 조도에 의한 유속변화에 크게 영향을 받는 다. 지표유출에 의한 이송능력이 제한되기 때문에 강우낙 하 운동에너지에 의한 토양 입자의 박리 및 튀김이 상대 적으로 토사유출에 크게 기여한다(Kinnell, 1991; 2005). 완경사의 다짐사면은 비다짐사면보다 세류 발달이 더 두 드러지는 것을 알 수 있다(Fig. 7(a)). 이는 면상흐름의 저 류 및 유속저감 효과가 거친 조도의 비다짐사면에서 크게

작용했기 때문이다. 그러나 세류흐름이 지배적인 경우는 유속이 빠르기 때문에 사면조도 및 지표상태보다는 토양 자체의 전단저항에 의해 토사유출이 크게 영향을 받는다. 또한 지표유출의 수심이 증가하면 유출수의 실링효과에 의해 강우운동에너지 영향이 상대적으로 감소한다. 실제 급경사면의 비다짐 사면의 세류 깊이와 발생빈도가 다짐 사면보다 크게 증가함을 보였으며(Fig. 7(b)), 이는 토양 입자의 전단저항이 약한 급경사 비다짐 사면에서 토사유출 이 많이 발생함을 입증하였다. 토양침식 예측모형에서는 면상흐름이 지배적인 세류간침식(interrill erosion)과 세류 침식을 분류하고 있다. WEPP (Flanagan and Nearing, 1995)과 EUROSEM (Morgan et al., 1998)에서는 세류간 및 세류 침식에 대한 주요매개변수가 상이한 지배방정식 을 사용하고 있으며, SEMMA (Park et al., 2012)는 흐름 특성에 따른 토양침식량 산정을 위해 식생 및 강우량 범 위에 따른 세분화된 모형식들을 제시하고 있다. Park and Shin (2011)은 이러한 모형 매개변수들 중에 투수계수, 세 류간침식성, 세류침식성, 한계전단응력 등의 입력변수들 은 토양침식의 반응메커니즘에 중요하게 작용함을 확인 하였다.

면상흐름이 지배적인 경우의 토사유출은 세류에 의한 것과는 상이하며 이러한 지배 흐름 사이에는 분명 천이구 간이 존재한다. 강우강도 95.6 mm/hr에 대한 토사유출 반 응이 저강도 68.5 mm/hr보다 더 민감하고 분명하게 반응 하는 것은 고강도 강우에 의해 세류 발달이 훨씬 용이하 기 때문이다. 또한 완경사보다 급경사에서 세류발달이 용 이했던 것도 지표유출수의 수류력이 경사가 증가함에 따 라 강해졌기 때문이다. 이와 같이 천이구간은 강우의 규 모, 사면 경사, 토양특성 및 지표상태 등에 의해 결정된다. 개발공사지의 나지교란사면을 대상으로 한 본 연구 결과 에 따르면, 완경사와 급경사 사이에 이러한 천이구간이 존재했던 것으로 파악되며, 본 연구의 토양조건 및 강우 조건에서는 10~15° 범위임을 확인했다.

## 4. 결 론

본 연구는 개발지의 사면조건과 유사한 나지교란사면 을 조성하여 인공강우의 조건하에서 표면의 다짐처리에 따른 지표유출량 및 토사유출량을 측정·분석하였다. 또한 이들이 토양침식 지배요인인 강우강도와 사면경사에 따 른 변화 특성을 파악하였다.

다짐처리 후 토양의 체적밀도 및 전단강도는 유의적으 로 증가하였으나, 이러한 물리적 특성의 변화가 지표유출 에 미치는 영향은 강우강도와 사면경사에 따라 다르게 반 응하였다. 강우강도 68.5 mm/hr의 조건에서는 다짐처리 및 사면경사가 지표유출량에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으나, 강우강도 95.6 mm/hr의 조건에서는 다짐처 리 및 사면경사에 따라 지표유출량이 증가하는 경향을 보 였다. 평균 토사유출량은 강우강도와 사면경사가 증가함 에 따라 유의적으로 증가하였다. 또한, 토사유출량은 강우 강도와 사면경사 별 다짐처리 유·무에 따라 다른 반응을 보였다. 완경사(5°)에서는 다짐처리에서 더 많은 토사가 유출되었으나, 급경사(20°)에서의 다짐처리는 토사유출을 감소시키는 것으로 나타났다.

본 연구의 결과는 옥외 실험실 수준의 인공강우 실험에 의한 것이므로, 실제 개발지역 공사현장의 나지교란사면 조건과는 약간의 차이가 있을 수 있다. 향후 현장 수준에 서의 반복실험, 사면의 표면조도와 관련된 세부 과정인 표토실링 등에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 보인 다. 그럼에도 불구하고, 본 실험 결과는 개발지의 급경사 나지교란사면에 대한 다짐처리는 토사유출을 저감하기 위해 사용할 수 있는 간편한 방법임을 확인시켰다.

# 감사의 글

본 연구는 국립방재연구원의 2011년도 연구비 지원에 의한 것으로 이에 감사합니다.

## REFERENCES

- Adekalu, K.O., Okunade, J.A., and Osunbitan, J.A. (2006). "Compaction and mulching effects on soil loss and runoff from two southwestern Nigeria agricultural soils." *Geoderma*, Vol. 137, pp. 226–230.
- Agassi, M., Bloem, D., and Ben-Hur, M. (1994). "Effect of drop energy and soil and water chemistry on infiltration and erosion." *Water Resources Research*, Vol. 30, pp. 1187–1193.
- Aust, W.M., Burger, J.A., Carter, E.C., Preston, D.P., and Patterson, S.C. (1998). "Visually determined soil disturbance classes used as indices of forest harvest disturbance." *Southern Journal of Applied Forestry*, Vol. 22, pp. 245–250.
- Block, R., Van Rees, K.C.J., and Pennock, D.J. (2002). "Quantifying harvesting impacts using soil compaction and disturbance regimes at a landscape scale."

*Soil Science Society of American Journal*, Vol. 66, pp. 1669–1676.

- Choi, B.K. (2012). "Soil physical and hydrological properties affected by forest harvesting within riparian areas of forested headwaters." *Journal of Korean Forestr Society*, Vol. 101, No. 3, pp. 538–545.
- Choi, Y.H., Jeong, S.H., Kim, C.Y., Kim, H.S., and Oh, J.H. (2009). "Characteristics evaluation of non point source treatment facilities in construction site." *Journal* of Korean Geo-Environmental Society, Vol. 10, No. 3, pp. 53–62.
- Dong, J., Zhang, K., and Guo, Z. (2012). "Runoff and soil erosion from highway construction spoil deposits: A rainfall simulation study." *Transportation Research Part D*, Vol. 17, pp. 8–24.
- Ekwue, E.I., and Harrilal, A. (2010). "Effects of soil type, peat, slope, compaction effort and their interactions on infiltration, runoff and raindrop erosion of some Trinidadian soils." *Biosystems Engineering*, Vol. 105, pp. 112–118.
- Flanagan, D.C., and Nearing, M.A.(eds)(1995). USDA-Water Erosion Prediction Project (WEPP) version 95.7, hillslope profile and watershed model documentation. National Soil Erosion Research Laboratory Report 10. USDA-ARS, West Lafayette.
- Fox, D.M., and Bryan, R.B. (1999). "The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient." *Catena*, Vol. 38, pp. 211–222.
- Gomez, J.A., and Nearing, M.A. (2005). "Runoff and sediment losses from rough and smooth soil surfaces in a laboratory experiment." *Catena*, Vol. 59, pp. 253–266.
- Gomi, T., Sidle, R.C., and Richardson, J.S. (2002). "Understanding processes and downstream lingkages of headwater systems." *Bioscience*, Vol. 52, pp. 905–916.
- Hairsine, P.B., and Rose, C.W. (1992). "Modeling water erosion due to overland flow using physical principles: I. Sheet Flow." *Water Resources Research*, Vol. 28, pp. 237–243.
- Hamza, M.A., and Anderson, W.K. (2005). "Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions." *Soil & Tillage Research*, Vol. 82, pp. 121–145.
- Harbor, J. (1999). "Engineering geomorphology at the

cutting edge of land disturbance: erosion and sediment control on construction sites." *Geomorphology*, Vol. 31, pp. 247–263.

- Helming, K., Römkens, M.J.M., and Prasad, S.N. (1998). "Surface roughness related processes of runoff and soil loss: a flum study." *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 62, pp. 243–250.
- Im, J.H., Song, J.W., Park, S.S., and Park, H.S. (2007). "An experimental study on infiltration characteristics of facilities for reducing runoff considering surface materials according to housing lot development." *Journal of Korean Geo–Environmental Society*, Vol. 8, No. 5, pp. 47–55.
- Kang, S.W., and Lee, T.Y. (2012). "Recycling of wood waste generated from construction sites for removal of soil efflux." *Journal of Korea Society of Waste Management*, Vol. 29, No. 3, pp. 245–250.
- Kim, C.M., Lee, E.J., Lee, S.Y., Kim, Y.C., and Kim, L.H. (2008). "Sediment unit loads from developing areas during storms." *Journal of Korean Wetlands Society*, Vol. 10, No. 1, pp. 59–68.
- Kim, S.J. (2012). A study of soil erosion in bared slope. Master's thesis, Gangneung–Wonju National University.
- Kinnell, P. (1991). "The effect of flow depth on sediment transport induced by raindrops impacting shallow flows." *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, Vol. 34, pp. 161–168.
- Kinnell, P. (2005). "Raindrop-impact-induced erosion processes and prediction: a review." *Hydrological Processes*, Vol. 19, pp. 2815–2844.
- Lacey, S.T., and Ryan, P.J. (2000). "Cumulative management impacts on soil properties and early growth of Pinus radiata." *Forest Ecology and Management*, Vol. 138, pp. 321–333.
- Morgan, R.P.C., Quinton, J. N., Smith, R.E., Govers, G., Poesen, J.W.A., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D., and Styczen, M.E. (1998). "The european soil erosion model (EUROSEM): a dynamic approach for predic-

ting sediment transport from fields and small catchments." *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 23, pp. 527–544.

- National Disaster Management Institute (2011). Experimental analysis for variation of sediment yields according to development and monitoring of experimental watersheds. No.11-1311526-000014-14.
- Park, S.D., Lee, K.S., and Shin, S.S. (2012). "Statistical Soil Erosion Model for Burnt Mountain Areas in Korea–RUSLE Approach." *Journal of Hydrologic Engineering* (ASCE), Vol. 17, pp. 292–304.
- Park, S.D., and Shin, S.S. (2011). "Applying evaluation of soil erosion models for burnt hillslope: RUSLE, WEPP and SEMMA." *Journal of the Korean Society* of Civil Engineers, Vol. 31, No. 3B, pp. 221–232.
- Rab, M.A. (2004). "Recovery of soil physical properties from compaction and soil profile disturbance caused by logging of native forest in Victorian Central Highlands, Australia." *Forest Ecology and Manage – ment*, Vol. 191, pp. 329–340.
- SAS Institute Inc. (2008). SAS/STAT 9.2 User's Guide, SAS Institute Inc., Cary, N.C., USA.
- Shin, M.H., Won, C.H., Choi, Y.H., Seo, J.Y., Lee, J.W., Lim, K.J., and Choi, J.D. (2009). "Simulation of field soil loss by artificial rainfall simulator: By varying rainfall intensity, surface condition and slope." *Journal* of Korean Society on Water Quality, Vol. 25, No. 5, pp. 785–791.
- U.S. Environmental Protection Agency (2003). Developing water quality criteria for suspended and beded sediments.
- Zobeck, T.M., and Onstad, C.A. (1987). "Tillage and rainfall effects on random roughness: a review." *Soil & Tillage Research*, Vol. 9, pp. 1–20.

논문번호: 13-006	접수: 2013.01.17
수정일자: 2013.03.04/03.19	심사완료: 2013.03.19