

草地의 地表面 흐름을 추적하기 위한 Kinematic Wave Model의 개발 (II)

— 포장실험과 모형의 응용 —

Development of a Kinematic Wave Model to Route Overland Flow in Vegetated Area (II)

— Runoff Plot Experiments and Model Application —

崔 重 鎭* · W. L. Magette** · 崔 禮 煥 · 柳 能 桓
Choi, Joong Dae · Choi, Ye Hwan · Ryu, Neung Hwan

Summary

Runoff simulation tests to investigate the flow mechanics of nonsubmerged overland flow in a natural grass intervening land system were conducted and a modified kinematic wave overland runoff model developed by Choi et al. (1993) was verified. Nonhomogeneity and heterogeneity of the soil, slope, local topography, infiltration, grass density, and the density and activity of the soil microbes and wild animals were the major factors affecting the flow. Streamlines were disturbed by grass stems and small concentrated flows due to the disturbed streamlines and local topography were observed a lot. Relatively larger concentrated flows were observed where bundles of grass were dominant than where individual grasses were growing. Predicted hydrographs were agreed very well with measured hydrographs. Since the modified model considers grass density in computing flow depth and hydraulic radius, it can be better than existing kinematic wave model if it were used to route nonpoint source pollutant attenuation processes in many grass intervening land systems.

* 江原大學校 農科大學

키워드 : Kinematic Wave Model, 지표면흐름, 동수

** Associate Professor, Univeristy of Maryland at College Park, MD U.S.A

반경, 흐름의 집중, 유량수문곡선.

I. 緒 論

많은 연구자들은 농지자체에서 발생하는 유출량과 유출수의 수질을 농지의 경작방법, 작물의 종류, 농지의 피복상태 등과 관련하여 연구하여 왔다(Angle et al., 1984; Holt et al., 1979; Meyer et al., 1975; Monke et al., 1977). 농업의 최적관리법(Best Management Practices, BMPs)이 대표적인 예로 농업생산성을 유지하면서도 유출수의 수질을 개선하여 수질을 보전하고 개선하는데 목적을 두고 있다. 그러나 경지주변에서의 수질(Edge-of-the-field Water Quality)이 농지와 하천사이에 있는 Vegetated Filter Strips(VFS)나 川邊樹林 등의 中間地(Intervening Land)를 통과하여 막상 하천에 도달했을 때는 경지주변에서의 수질과 많은 차이를 보인다. 이는 유출수가 中間地를 통과하는 동안 물리적, 화학적, 생물학적 또는 생화학적인 自靜作用에 의하여 수질의 변화가 많이 일어났기 때문이다(Lowrance et al., 1983; Duda and Finnan, 1983; Omernik et al., 1981; Magette et al., 1987; Doyle et al., 1977; Dickey and Vanderholm, 1981; Young et al., 1978). 이와같은 수질의 변화를 정확하게 예측할 수 있을 때에 비로써 농지 혹은 토지이용이 주변수질에 미치는 영향을 분명하게 규명할 수 있을 것이다. 이러한 수질의 변화 예측을 하기 위해서는 中間地에서의 유출수의 수리학적 특성을 정확하게 예측할 수 있는 유출모형 개발이 반드시 선행돼야 한다. 이는 유출수의 수리학적 특성에 따라 토양유실, 퇴적, 토사운반, 중간지에서 유출수의 체류시간 등으로 인해 유출수와 토양과의 상호작용이 크게 변하기 때문이다.

최 등(1993)은 자연의 풀이 자생하는 中間地에서 비잡류를 추적하고 이의 수리학적 특성을 계산할 수 있는 이론적 모형을 개발하였다. 새로 개발된 모델은 풀 密度가 흐름의 수리학적

특성에 미치는 영향을 반영하기 위하여 Spacing Hydraulic Radius를 동수반경(Hydraulic Radius) 대신 사용하였으며 또한 흐름의 연속 방정식에도 풀 密度의 영향을 고려하는 係數를 도입하여 Model의 예측능력을 향상시켰다. 본 연구의 목적은 1) Vegetated Filter Strip에서 지표면 흐름의 거동을 실험을 통하여 연구하고 2) 최 등(1993)에 의해 정의된 기존의 Kinematic Wave Model과 최 등(1993)에 의해 개발된 새로운 Kinematic Wave Model에서 구한 예측치들을 시험포에서 구해진 수문곡선과 비교하며 3) 새로운 Kinematic Wave Model의 독창성을 입증하는데 있다. 시험포 실험을 통해 입증되는 새로운 모델은 초지, 공원 등의 잔디밭, 경작지, 골프장 등에 응용되어 유출해석과 수질의 변화과정을 추적하는데 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

II. 實驗方法

두 모형의 현장실험은 자연의 풀이 자생하며 지표면 경사가 약 6°인 실험농장에서 실시되었다. 실험장소는 10년이상 경작을 하지않아 지표가 교란되지 않은 상태에서 자연적으로 여러 종류의 풀들이 자라고 있었으며 Vegetated Buffer Strip의 모든 특성을 잘 갖추고 있었다. 실험설비는 크게 시험포, 인공강우 발생장치 그리고 模擬流出水 공급장치로 구분될 수 있으며 실험시설의 평면도는 Fig. 1에 나타내었다. 시험포는 60cm 간격으로 두개를 나란히 설치하여 토양변화로 인한 실험오차를 최소화하였으며 또한 등고선에 직각방향으로 배치하여 흐름의 집중을 최대한 예방하고 일차원지표면 흐름을 유도하였다. 각각 시험포의 크기는 5.5m×30.5m였다. 각 시험포의 측면벽은 크기가 30.5cm×183cm×0.8mm인 함석을 약 15cm 깊이로 打入하여 구분하였으며 상단벽은 25cm 그리고 하단벽은 30.5cm까지 打入하여 외부의 流入水

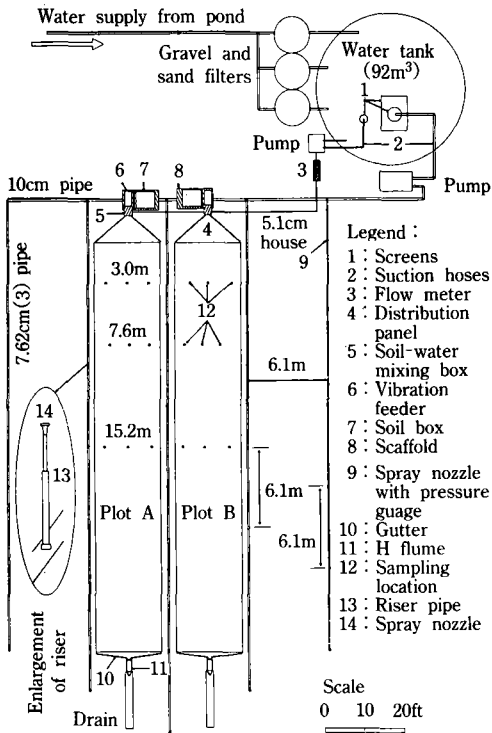


Fig. 1. Top view of the experimental layout. Filters and pumps are not scaled

를 차단하고 시험포 내부 流出水의 손실을 막아 정확한 流量水文曲線을 측정할 수 있도록 하였다. 각 시험포의 하단에는 홈통, H-Flume과 수위측정용 Strip Chart Recorder를 설치하여 연속적인 水位水文曲線을 측정하였다. H-Flume은 실험이 시작되기전에 보정을 하여 환산곡선을 작성하였다. 인공강우발생장치는 Shanholtz et al.(1981)이 고안한 시설을 사용하였다. 이 강우발생장치는 최대 약 620m²(188평)의 면적에 2.04kg/m²(29psi)의 압력으로 49 mm/hr의 일정한 강우강도로 인공강우를 발생할 수 있는 대형설비이다. 모의유출수 공급장치는 경작지 주변에서의 유출량과 수질을 모형실험하여 Buffer Strip에 공급할 수 있도록 만든 장치이다. 이 장치는 물과 흙의 공급시설, 공급된 물과 흙을 혼합하여 주는 장치와 혼합된 물(모의유출수)을 시험포로 균등하게 공급해주

는 장치로 구성되었다.

인공강우강도는 평균 42mm/hr이었으며 모의 유출수는 시험포 상단에서 처리구에 따라 360 l/min와 160 l/min의 율로 공급이 되었다. 모의 유출수는 다시 유입수심으로 환산되어 시험포 상단의 경계조건으로 사용이 되었다. 수정된 Kinematic Wave Model에서 새로 도입된 평균 폴간격(S₀)과 평균 폴줄기 직경(da)은 시험포에서 실측한 값으로 각각 0.0283m와 0.00261 m가 사용되었으며 Manning의 조도계수는 0.042가 사용되었다.

시험포의 침투능 측정은 시험포에 가해지는 유입 및 유출량과의 관계에서 역추적하여 Horton식의 변수들을 구하였으며 이 변수들을 다시 Horton식에 대입하여 최종적인 침투능계산을 하여 모형의 입력값으로 사용하였다.

모의유출실험은 60분간의 건조상태실험 30분간의 관측 및 시료채취를 위한 休止時間과 30분간의 습윤상태실험으로 구분되어 실시되었다. 건조상태실험에서는 자연의 토양수분 상태(건조상태)에서 60분간의 인공강우와 50분간의 모의유출수를 공급하여 유출의 발생과정을 관측하였다. 건조상태실험에서는 처음 10분동안 인공강우만 공급하여 토양이 수분을 흡수할 수 있는 시간을 준 후 모의유출수를 공급하였으나 습윤상태실험에서는 건조상태실험으로 토양이 이미 습윤상태에 있으므로 30분동안 인공강우와 모의유출수를 동시에 공급하며 유출의 발생과정을 관측하며 수위수문곡선을 측정하였다. 측정된 수위수문곡선은 이미 작성된 환산곡선을 사용하여 유량수문곡선으로 변환되어 모형들이 예측한 유량수문 곡선과 비교되었다.

III. 結果 및 考察

장기간 교란되지 않은 중간지에서 지표면 흐름의 거동은 많은 인자의 영향을 받고 있었다. 토성과 토양의 극심한 異質 異方性, 지표면의

경사도, 침투능의 차이, 풀의 종류와 밀도, 토양생물 및 야생동물의 밀도와 활동 등이 지표면 흐름에 영향을 주는 대표적인 인자들이었다. 지표면 경사도를 제외한 이들 인자들이 흐름에 끼치는 영향은 각각 독립적이라기 보다는 서로 간섭하며 복합적인 영향을 주고 있었다. 예를들면 토양의 종류에 따라 식생하는 풀과 풀밀도가 다르며 또한 토양생물 및 야생동물의 밀도와 활동도 다르게 관찰되었다. 따라서 흐름의 중요한 영향을 주는 침투능은 시간과 공간에 따라 많은 변화를 보여주었다. 또한 중간지의 토양은 장기간 교란이 되지 않았으며 지표면이 죽은 풀등으로 두껍게 피복되어 있고 풀뿌리 등의 발달과 토양생물들의 왕성한 활동 때문에 굉장히 부드럽고 느슨한 구조를 하고 있어 침투능이 높으며 따라서 유출수와 토양과의 접촉이 많아 유출수에 포함된 각종 오염물질의 제거에도 탁월한 능력을 보여주었다. 반면에 이와같이 연약한 토양은 작은 압력에도 다짐이 잘되어 실험시 연구요원이 걸어나면 조금이나마 다짐이 된 지역과 그렇지 않은 지역 사이에서도 유출의 차이는 잘 목격되었다.

지표면 흐름의 상태는 실험시 흐름과 실험후 토립자가 침전된 상태를 보고 관찰하였다. 흐름은 층류라기 보다는 난류에 가까웠다. 이는 지표가 아주 편평하지도 않고 또 많은 풀줄기들이 흐름을 가로막고 있어 流線의 방향을 계속 바꾸어 주며 또한 교란시키어서 작은 흐름의 집중이 생기고 다시 지표면 흐름으로 변하는 離合集散이 계속되었다. 이는 흐름의 소류력에도 직접적인 영향을 주어 토립자의 운반상태나 퇴적상태는 전혀 균일하지 못했으며 흐름의 변화와 같이 복잡하였다. 풀들이 포기를 지어 있는 곳에서 비교적 크고 적은 흐름의 집중이 목격되었으며 풀들이 날개로 흩어져 자라고 있는 곳에서는 비교적 작고 많은 흐름의 집중이 나타났다. 특출하게 크거나 돋보이는 흐름의 집중은 없었지만 상당히 많은 量의 흐름과 특히

土粒子 등은 흐름의 집중을 통하여 운반되고 있었다. 따라서 오염물질 등의 발생과 운반 등의 예측에 사용되는 유출모형이 흐름의 수리학적 특성과 함께 지표면의 조도와 식생에 따른 흐름의 집중의 영향도 고려되어 개발된다면 더 정확하게 수질의 변화과정을 모형실험할 수 있을 것이다.

Fig. 2는 기존의 모형과 수정된 모형이 예측한 유량수문곡선과 시험포에서의 측정된 유량수문곡선을 비교하여 보여주고 있다. 기존의 모형과 수정된 모형이 예측한 유량수문곡선은 실측된 유량수문곡선과 잘 일치하고 있으며 따라서 수정된 모형은 기존의 모형과 동일하게 지표면 흐름의 유출량을 추적하는데 이용될 수 있다. 하지만 Fig. 2에서 보는 바와 같이 두 모형 모두가 유출의 발생과 최대유출물은 잘 추적하였으나 인공강우와 모의유출수가 중단된 이후의 예측된 유량수문곡선은 실측된 유량수문곡선과 약간의 차이를 보였다. 이는 강우가 중단된 이후의 유량수문곡선은 토양의 침투능력과 얇은 지표하 흐름에 주로 영향을 받으나 이들의 거동을 예측할 수 있는 알고리즘이 모델에 반영

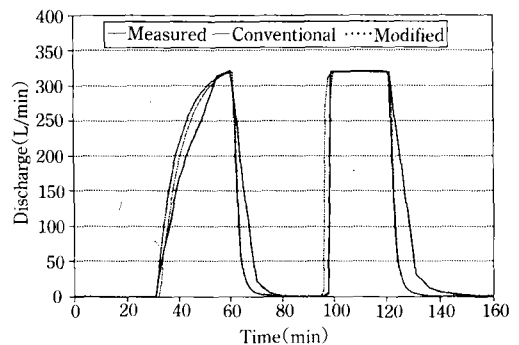


Fig. 2. Measured and predicted hydrographs. Model parameters for synthetic runoff, average grass stem spacing, manning's roughness coefficient and average grass stem diameter were 360l/min, 0.0283m, 0.042, and 0.00261m, respectively

되지 않았기 때문이다. 홍수추적을 위한 유출량만이 주 관심의 대상일 때는 강우후 유출에 중요한 의미를 줄 필요가 없었고 따라서 지표하 흐름을 추적하기 위한 모형의 개발노력도 활발하지 못했다. 하지만 오염물질의 변화과정을 추적하는 데는 지표하 흐름이 중요한 역할을 할 수 있으므로 이의 개발이 요구되고 있다.

Fig. 3과 4는 각각 시험포의 중간지점(15.2 m)와 하단(30.5m)에서 평균수심(기존 모형과 수정된 모형)과 동수반경(수정된 모형)을 비교한 것이다. 두 모형의 유량수문곡선(Fig. 2)은 잘 일치하였으나 수심에서는 많은 차이점을 보여주고 있다. 수정된 모형을 사용하여 예측한 수심은 기존의 모형을 사용하여 예측한 수심보다 26%가 크게 나타났다. 이는 수정된 모형은 지표면의 조도뿐만 아니라 풀밀도가 흐름에 미치는 영향도 고려하여 단순히 지표만의 조도만을 고려한 기존의 모형보다 지표면 저항이 크므로 흐름은 지체되고 수심은 크게 되기 때문이다. 또한 수정된 모형이 예측한 동수반경은 기존의 모형이 예측한 평균 수심보다 21% 작게 나타났다. 이는 수정된 모형이 예측한 수심은 비록 기존의 모형이 예측한 수심보다 깊지만 흐름의 소류력 등 흐름의 세기는 풀 등에

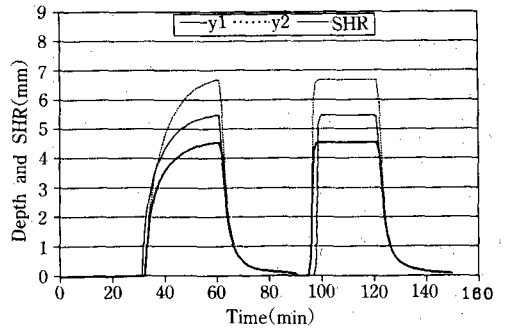


Fig. 4. Predicted flow depth(y1) from conventional model and predicted flow depth(y2) and spacing hydraulic (SHR) from modified model at the bottom of a plot

의해 약화되어 오히려 작아졌다. 이와같은 이론은 기존하는 모형의 이론보다 합리적이며 Kao and Barfield(1978)의 연구와도 잘 일치하고 있다. 따라서 수정된 모형을 사용하면 초지에서 지표면 흐름의 유출량은 물론 흐름의 평균깊이와 동수반경을 동시에 예측할 수 있어서 흐름의 소류력 등 흐름의 수리학적 특성을 보다 합리적으로 예측하여 유출수와 함께 유출되는 많은 오염물질의 추적을 보다 효과적으로 예측할 수 있다.

IV. 結 論

본 연구에서는 현장 시험포 실험을 통하여 자연의 초지에서 흐름의 특성을 관찰하고 수정된 Kinematic Wave Model이 예측한 유량수문곡선과 실측된 유량수문곡선을 비교하고 수정된 모형의 수리학적 특성을 기존의 모형과 비교하여 自然狀態의 草地의 밀도를 고려한 지표면 흐름의 양상을 추적코자 시도하였다.

草地에서 비잠류는 토성과 토양의 異質 異方性, 지표면의 경사도와 국지적인 凹凸, 침투능의 차이, 풀의 종류와 밀도, 토양생물과 야생동물들의 밀도와 활동 등에 영향을 받고 있었

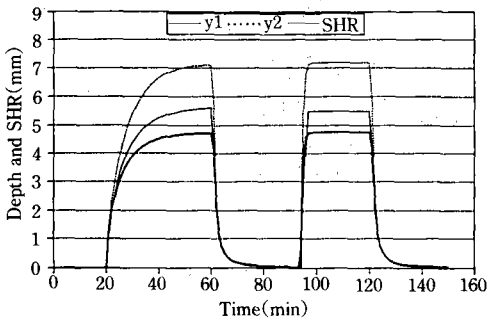


Fig. 3. Predicted flow depth(y1) from conventional model and predicted flow depth(y2) and spacing hydraulic (SHR) from modified model at the 15.2m sampling location of a plot

으며 지표면 경사도를 제외한 이들 인자들이 흐름에 끼치는 영향은 각각 독립적이라기 보다는 서로 간섭하며 복합적인 영향을 주고 있었다. 흐름의 流線은 풀줄기 등의 장애물과 지형의 국지적인 凹凸로 인해 끊임없이 교란되며 수없이 많고 작은 흐름의 집중이 형성되고 소멸되는 과정을 반복하였다. 풀이 포기져 자라는 곳에서는 비교적 큰 흐름의 집중이 그리고 각개의 풀이 자라는 곳에서는 작은 흐름의 집중이 관찰되었다. 실험중과 실험후 토립자의 퇴적상태를 관찰한 결과 流線의 교란과 흐름의 집중은 흐름의 제반 수리학적 특성에 많은 영향을 주는 것으로 나타났다. 수정된 Kinematic Wave Runoff Model이 예측한 유량수문곡선은 실측된 유량수문곡선과 잘 일치하였으며 또한 수정된 모형은 풀밀도를 고려하여 수심과 동수반경을 예측하므로 기존의 모델보다 掃流力 등 흐름의 수리학적 특성을 보다 합리적으로 예측할 수 있다. 수정된 Kinematic Wave Runoff Model은 각종의 초지와 골프장 등의 유출해석은 물론 대표적인 비점원 오염원인 토양, 비료 그리고 농약 등의 유실을 예측하는데 응용되어 수자원 보존과 개선에 기여할 수 있다.

參 考 文 獻

1. 최중대, W. L. Magette, 최예환, 유능환. 1993. 草地의 地表面 흐름을 추적하기 위한 Kinematic Wave Model의 개발(I) : 理論 Model의 開發. 한국농공학회지 Vol. 35(2).
2. Angle, J. S., G. McClung, M. S. McIntosh, P. M. Thomas and D. C. Wolf. 1984. Nutrient Losses in Runoff from Conventional and Notill Corn Watersheds. J. Environ. Qual., 13 : 431-435.
3. Dickey, E. C. and D. H. Vanderholm. 1981. Performance and Design of Vegetative Filters for Feedlot Runoff Treatment. Proce-

- dings of the 4th International Livestock Waste Symposium. ASAE Publication 2-81, American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan 49085.
4. Doyle, R. C., G. D. Stanton and D. C. Wolf. 1977. Effectiveness of Forest and Grass Buffer Strips in Improving the Water Quality of Manure Polluted Runoff. Paper No. 77-2501. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan 49085.
5. Dudda, A. M. and D. S. Finnan. 1983. Influence of Livestock on Nonpoint Source Nutrient Levels of Streams. Transactions of the ASAE, 26 : 1710-1716.
6. Holt, R. F., D. R. Timmons and R. E. Burwell. 1979. Water Quality Obtainable under Conservation Practices. Soil Sci. Soc. Am. Special Publication No. 8.
7. Kao, T. Y. and B. J. Barfield. 1978. Prediction of Flow Hydraulics for Vegetated Channels. Transactions of the ASAE, 22 : 489-494.
8. Lowrance, R. R., R. L. Todd and L. E. Asmussen. 1983. Waterborne Nutrient Budgets for the Riparian Zone of an Agricultural Watershed. Agriculture, Ecosystems and Environment, 10(1983) : 173-184.
9. Magette, W. L., R. B. Brinsfield, R. E. Palmer, J. D. Wood, T. A. Dillaha and R. B. Reneau. 1987. Project Summary for Vegetated Filter Strips for Agricultural Runoff Treatment. Assistance No. X-003314-01. Region III, Chesapeake Liaison Office, Annapolis, Maryland 21403.
10. Meyer, L. D., G. R. Foster and S. Nikolov. 1975. Effect of Flow Rate and Conopy on Rill Erosion. Transactions of the ASAE, 18 (5) : 905-911.

11. Monke, E. J., H. J. Marelli, L. D. Meyer and J. F. DeJung. 1977. Runoff Erosion and Nutrient Movement from Interrill Areas. Transactions of the ASAE, 20(1) : 58-61.
12. Omernik, J. M., A. R. Abernathy and L. M. Male. 1981. Stream Nutrient Levels and Proximity of Agricultural and Forest Land to Streams : Some Relationships. J. Soil. and Water Conserv., 36 : 227-231.
13. Shanholtz, V. O. et al. 1981. Predicting Soil Loss from Surface Mined Areas. Completion SMMRRI Report, Department of Agricultural Engineering, VPI, Blacksburg, Virginia. 19pp.
14. Young, R. A., T. Huntrods and W. Anderson. 1978. Effectiveness of Nonstructural feedlot Discharge Control Practices. Paper No. 78-2578. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan 49085.