

지표조건에 따른 침투능의 비교연구

배 상 근 | 계명대학교 공과대학 토목공학과 교수

1. 서론

유역에 내린 강수는 직접유출로 유하 하든가 지중으로 침투하거나 증발한다. 지중에 침투한 강수의 일부는 중간유출로서 측방향으로 이동하여 짧은 시간 내에 다시 지표로 유출하여 직접유출의 일부가 되나 그 나머지는 토양층, 대수층을 경유하여 언젠가는 하도나 해안으로 유출한다. 우수의 침투현상은 이와 같이 물순환기구를 이루는 중요한 역할을 담당하고 있다. 강우 침투에 관한 연구는 여러분야에서 이루어지고 있다. 수문학에 있어서의 침투에 관한 연구는 주로 강우의 침투, 손실, 지하수 함양기구, 또는 증발산기구에 대하여 밝힘으로써 유역에 있어서의 물순환 기구의 제 과정을 규명하고자 하는 목적으로 발전하여 왔다.

이와 관련해서 종래의 유출해석에 있어서는 강우 침투부분을 블랙박스로 취급한 예가 많았다. 근년 유출에 기여하는 부분으로써 뿐만아니라 지하수함양량의 파악 등 강우 침투의 중요성에 대한 인식이 높아져서 많은 연구가 이루어지게 되었다. 지하수개발과 보존의 필요성이 증대됨에 따라 지하수의 적정개발량을 평가하기 위한 기법의 개발이 요구되고 있다. 배상근(2002)과 같이 지하수함양량의 파악이 지하수개발량의 평가뿐만 아니라 수자원시스템을 규명하기 위하여 반드시 필요하다.

이와같이 연구필요성의 증가로 인하여 우수침투현

상의 해석은 근년에 이르러 현저히 발전하였다. 어떤 특정 유역에서의 침투과정의 상대적 중요도는 지형, 지질, 토양특성, 강우 특성, 증발량뿐만 아니라 식물에 의한 증산량에 의해서도 영향을 받는 등의 복합적인 영향을 받기 때문에 실제 발생하는 침투현상에는 시간적으로도 공간적으로도 대단히 큰 차이가 생기고 있다.

따라서 실제 유역에서의 침투량의 규명에는 여러가지 지배요인의 상호관계를 정리하여 각각 요인의 영향을 명확히 해야한다. 다양한 침투과정의 지배요인들 중에 지표조건이 가장 중요하다. 동일한 지표조건에서는 거의 일정한 침투능력이 있다고 알려져 있으며 지표조건에 따른 침투능의 크기가 강수 유출과 지하수함양량에 영향을 미치기 때문에 지표조건에 따른 침투능에 대한 규명이 필요하다. 지표조건에 따른 침투능의 규명은 지하수함양량의 산정과 수자원시스템의 해석에 대단히 큰 역할을 할 수 있다. 그러나 실제 유역에 있어서의 강우 침투량에 대한 평가는 쉽지 않기 때문에 실제 침투능을 파악하기 위해서는 각각의 수문현상에 대한 보다 정밀한 해석과 더불어 다양한 조건을 가진 유역이나 지역에서의 강우 침투현상의 관측 사례를 축적하고 비교 검토해야할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 기존의 수행된 연구결과를 토대로 지표조건에 따른 침투능을 비교 검토하고자 한다.

2. 실제 유역에서의 강우 침투능

安原(1997)는 도시지역의 우수침투에 대한 기술을 하면서 安藤(1982)가 제시한 표 2.1을 예로 들었다.

본 표에 의하면 중기침투능으로부터 도시지역의 침투가 어려움을 나타내고 있다. 또한 임지, 밭과 과수원에서 200mm/hr이상의 극고침투능을 가지며, 수목원에서 100~200mm/hr의 고침투능을 가져 이들지역의 침투능이 대단히 큼을 알 수 있다. 반면에 나대지와 운동장에서 10mm/hr미만의 극저침투능을 가지며 정원의 나지 또한 10~50mm/hr의 저 침투능을 가져 이들지역의 침투능이 대단히 적음을 나타내고 있다.

岡 등(1980)은 도시화에 따른 수해위험도의 확대방지를 위하여 도시화지역의 지목과 지피요소별 우수침투·유출특성을 명확히 하기위하여 도시화지역에 침투

능실험을 하였다. 표 2.2에 각 시험지역의 토질특성과 침투능을 나타내었다. Nanryo와 Ujinogami의 양 시험지역에는 수목의 뿌리와 지갈이 많아 간극물이 결측되었다. Iseda지역의 잡초가 우거진 채마밭에서의 평균 침투능은 약 43.2mm/hr 이었으며, Nanryo 지역의 운동장 잔디밭에서의 평균 침투능은 약12.6mm/hr, Ujinogami 지역의 나대지의 침투능은 약 7.2mm/hr 이었다.

谷口 등(1989)은 오스트레일리아의 Perth 지역의 지하수 함양량을 추정하였다. 그들은 식생의 종류 및 식립 밀도, 수령 등을 달리하는 시험지역을 선정하여 각각의 식생하에서의 지하수 함양량을 비교하였다. 서부 오스트레일리아 지역에는 목초지 조성을 위하여 자연림을 벌채하고 있으며, 한편으로는 목재자원의 조달을 위하여 식림을 하고 있다. 연구지역은 해안 사

표 2.1. 중기침투능에 따른 침투역구분과 대응하는 토지이용(安藤 등, 1982)

침투역구분	중기침투능fc (mm/hr)													
극고침투능력	200≤fc	임지	밭	과수원	수목원	식제지	도로	법면	초지	잔디	공원나지	정원의나지	운동장	나대지
고침투능력	100≤fc≤200													
중침투능력	50≤fc≤100													
저침투능력	10≤fc≤50													
극저침투능력	0≤fc≤10													

표 2.2. 침투시험지역의 지표조건

Plot	Land classification	Land cover	slope	Soil			Infiltration rates(mm/hr)
				Density	Porosity	Type	
Iseda	Kitchen garden	Weed	0.156	2.48	0.486	Clay loam	43.2
Nanryo	Playing field	Lawn	0.297	2.53	—	Sandy clay loam	12.6
Ujinogami	House lot	Bare	0.033	2.65	—	Clay with gravel	7.2

구이며 토층의 포화투수계수는 30mm/day 정도의 크기를 나타낸다. 연강수량은 700~800mm 정도이며 Class A Pan으로 측정한 가능증발량은 1800mm이다. 시험지역은 지하수면의 깊이를 기준으로 2개의 지역군으로 나누었다. 하나는 지하수면까지의 깊이가 20m 정도인 deep site이고 다른 하나는 지하수면까지의 깊이가 4~6m인 shallow site이다. 각각의 site에 자연림, 목초지, 송림의 식생지역을 선정하였다. 송림지는 deep site에서는 수령을 기준으로 mature pines(식림후 30년, 평균수고(樹高) 16m)와 young pines(식림후 9년, 평균수고 6m)로, shallow site에서는 식림밀도를 기준으로 dense pines(수간(樹幹)의 면적이 30m²/ha, 평균수고 15m)와 sparse pines(수간의 면적이 9.5m²/ha, 평균수고 15m)로 구분하여 합계 8개의 시험지역에 대하여 관측하였다.

그 결과가 표 2.3과 표 2.4에 나타나 있다. 표 2.3

에서 banksia site에서는 지하수 함양량이 연강수량의 15%로 적다. 한편 young pines site에서는 연강수량에 대한 연지하수 함양량이 32%로 banksia site의 2배이상에 달한다.

표 2.4는 각각의 조사지역의 지하수면의 심도, 뿌리역의 하한 심도, 강수량에 대한 지하수 함양량의 비율을 나타내고 있다. 각 식생별로 지하수 함양량을 비교하면 banksia woodland, pasture land에서 지하수면이 낮은 deep site일수록 지하수 함양량이 적다. 이것은 지하수위가 낮을수록 토양수가 증발산으로 소실될 기회가 많기 때문으로 사료된다. deep site에서의 강수량에 대한 연간 지하수 함양량의 비율은 pasture, young pines, banksia, mature pines 순으로 적어지며 mature pines에서는 거의 0으로 추정되었다. 또한 shallow site에서는 강수량에 대하여 연간지하수 함양량의 비율은 pasture, sparse pines, banksia, dense

표 2.3. deep site의 banksia site, young pines site에 있어서, matrix flow에 의한 지하수 함양량과 preferential flow에 의한 지하수 함양량(after Sharma et al., 1988)

		Annual Recharge(m)	Recharge as % of Precipitation	Rp as % of Rt
Banksia Woodland	Rm	49	6	
	Rp	70	9	60
	Rt	119	15	
Young Pines	Rm	211	27	
	Rp	35	5	16
	Rt	246	32	

Rm : soil matrix recharge(mm/year)
Rp : preferential recharge(mm/year)
Rt : total recharge(mm/year)

표 2.4. 각종식생지역의 연간 지하수 함양량의 비교(after Sharma et al., 1988)

		Annual Recharge(m)	Recharge as % of Precipitation	Rp as % of Rt
Banksia Woodland	Deep site	20	10	15
	Shallow site	7	7	30
Pine Plantation	Mature pines	20	10	0
	Young Pines	20	10	32
	Dense Pines	6	6	8
	Sparse Pines	5	5	16
Pasture Land	Deep site	8	1.5	50
	Shallow site	4	1.5	60

표 2.5. 유효강우 파라메타

	불투수구역	나대지	논	밭·초지	임지
유출율	1.00	0.20	0.00	0.15	0.10
포화우량(mm)	0.0	50.0	50.0	100.0	250.0

pines순으로 적어지고 있음을 나타내고 있다.

岸正 등(1984)은 토지이용상태가 혼재하는 지역에 서의 홍수유출을 예측하기 위하여 유출특성이 크게 차이나는 토지이용을 불침투지역, 나대지, 논, 밭과 초지, 임지의 다섯 종류로 분류하여 이들의 면적을 조사하였다. 다음에 유역전체에 대하여 유출율, 유출계수, 도달시간 유출율을 산출하여 도로와 건물 등의 불침투면적율과 유출율, 유출계수간의 대응관계에 대하여 연구하였다.

그들은 홍수유출을 계산하기 위한 파라메타로 魚生川·北川(1982)와 橋本·長谷川(1977) 및 水理公式集(1963)의 값을 이용하였다. 유출모델에 이용한 파라메타값은 논, 임지, 밭과 초지에 대하여 각각 0.0, 0.2~0.5, 0.15~0.3 이다. 불침투구역에 대해서는 0.7~0.95를, 나대지에서는 0.1~0.3을 이용하였다. 본 연구에서 얻은 값은 표 2.5와 같다. 본표에 의하면 토지이용상태별 유출율이 과거 연구로부터 얻은 값과 유사하며 나대지에서의 유출율은 20%, 밭과 초지에서의 유출율은 15%, 임지에서는 10%임을 나타내고 있다. 또한 밭과 초지 및 임지의 포화우량이 100mm 이상으로 큼을 나타내고 있다.

3. 초지에서의 강우 침투능

岸井(1981)은 강우특성에 의한 홍수유출특성의 변

화량을 규명하여 총유출량, 최대홍수유량 등의 홍수 예측을 행할 목적으로 일본 국립 방재 과학기술센터의 대형강우 실험시설내에 2년간 양생한 사면에서 강우-유출 실험을 하였다. 2년간의 양생기간에 의하여 사면의 표층은 1년생 풀이 무성하고 표층토양은 자연 상태에 가깝게 조성되어 있다. 사면의 규모는 길이 13.8m, 폭 4m의 직사각형이며 경사는 10도이다. 표층에서 50cm까지는 50cm두께의 Kanto로움층이고 그 하부층은 점토층으로 구성되어 있다. 본 실험에서는 강우강도에 따라 표면 유출량이 변화하는 양상을 파악하기 위하여 강우강도를 달리하는 세 종류의 경우에 대하여 표면유출의 발생상태를 관측하였다. 그 결과에 대한 각 경우별 유출율과 유출계수에 대하여 표 3.1에 나타내었다. 본표에 의하면 강우강도가 커짐에 따라 유출계수가 증가하여 지하수 함양율이 감소함을 나타내고 있다.

木下와 中根(1977)는 표면유출의 발생기구를 규명하기 위하여 일본 국립 방재과학 기술센터의 대형강우실험장치내의 실험사면에 20~100mm/hr의 강우를 발생시켰다. 이 사면의 면적은 102m², 최대사면장 12m, 경사가 10~15도이다. 유기질의 밭 토양을 채취하여 쌓아 2년간 야외에 방치하였다. 그 사이 사면에는 1년생 잡초가 무성하고 식물의 뿌리등으로 다공질의 표토층이 형성되었다. 표토층의 토양을 10지점 채취하여 조사한 공극율은 80%였다. 결과중 강우강도별 침투능 곡선이 그림 3.1에 나타나 있다. 본 그림에

표 3.1. 지표면 유출의 유출율과 유출계수

실험명	강우강도 (mm/hr)	총우량 (mm)	총유출고 (mm)	침투유량 (mm/hr)	유출량	유출계수	최종면적유량 발생면적적출
CASE 1	19.8	99.2	29.98	6.72	0.302	0.339	0.06
CASE 2	50.0	99.9	43.93	25.77	0.440	0.515	0.64
CASE 3	104.7	112.0	52.49	64.34	0.469	0.615	0.75

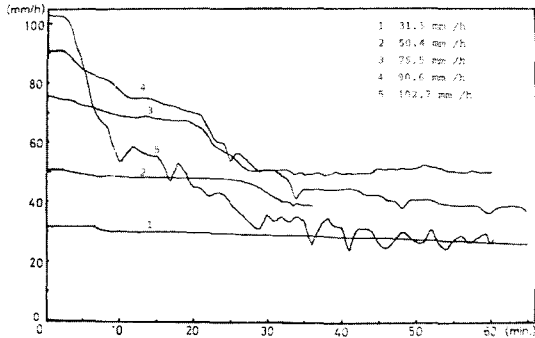


그림 3.1. 일정강우강도의 강우침투에 의한 침투능

의하면 강우강도가 75.5mm/hr일 경우에 종기침투능이 약 50mm/hr로 가장 크며 31.5mm/hr와 102.7mm/hr의 강우강도 조건에서 종기침투능이 가장 작아 약 30mm/hr임을 나타내고 있다.

4. 임지에서의 강우 침투능

村井(1996)는 平田식 사면 침투계, Rocky Mountain type Infiltrometer와 Mugrave형 원통 침투계 등을 사용하여 일본 각지의 산지유역 임지에서 침투 실험을 하였다. 그림 4.1에 토지조건에 따른 침투곡선을 나타내었다. 임지에서의 침투측정의 결과 명백한 감쇠형 침투곡선이 나타나는 경우가 많지 않다는 것을 이 그림을 통하여 그는 밝혔다. 그 이유는 원래 임지의 침투능이 크고 지표면은 낙엽층으로 덮여있어 표토의 상태가 습윤하며 토양구조가 내수성 단립구조여서 강우가 계속되어도 농지와 같은 나지와는 달리 침투능이 상기의 원인으로 급감하는 경우는 거의 없다. 즉 침투곡선에서의 초기침투능과 종기침투능간에 현저한 차가 없고 일반적으로 완만한 하강곡선을 그린다. 또한 어떤 특정 조건하에서는 상기의 감쇠곡선과 전혀 역으로 점점 상승하여 거의 일정한 값에 접근하는 침투과정을 나타내는 경우도 있다는 것을 알았다. 그 하나가 산 화재가 발생한 지역이다. 이런 지역에는 강우초기에 강우가 거의 침투하지 않고 유출한다. 어느 정도 강우가 계속되면 점점 지표면의 투수성이 커

지게되어 침투곡선이 상승하게 된다. 그러나 화재가 발생하지 않은 자연임지에 비해서는 종기침투능이 상당히 적다. 이와 유사한 현상으로 낙엽층내와 그 직하에 외생균근(Ectotrophic mycorrhiza)이 발달한 장소에서는 독특한 백색균사망층이 소수성(疎水性)을 가져 상기의 화재지역에서와 유사한 침투곡선의 경향을 나타낸다. 본그림에 의하면 일반임지의 종기침투능이 275mm/hr정도로 대단히 큼을 알수 있다.

삼림지의 우수침투 현상은 토지조건이 변하지 않는 한 거의 일정한 침투능을 갖는다. 삼림이 가진 수원 함양기능 즉 물 보전 기능은 하천유출의 홍수와 같수위를 완화하는데 기여한다. 藤枝(1996)은 브라질 상파울로주 해안산맥의 삼림유역의 물순환 과정과 년 강우량의 물수지 각 성분내 대하여 연구하였다. 그의 연구에 의하면 연강우량에 대한 년 수관 통과우량은 77%, 년 수관유하량은 1%이며 년 강우량의 17%가 수관층에 의해 차단되기 때문에 임지 도달우량은 78%가 된다. 임지의 표층부는 침투능이 높기 때문에 지표면에 도달한 강우의 거의 전부가 침투하여 토양수분이 된다. 토양수분의 대부분은 지하수를 함양(59%)하여 대수층에 지하수로 저류된 후 기저유량이 된다. 직

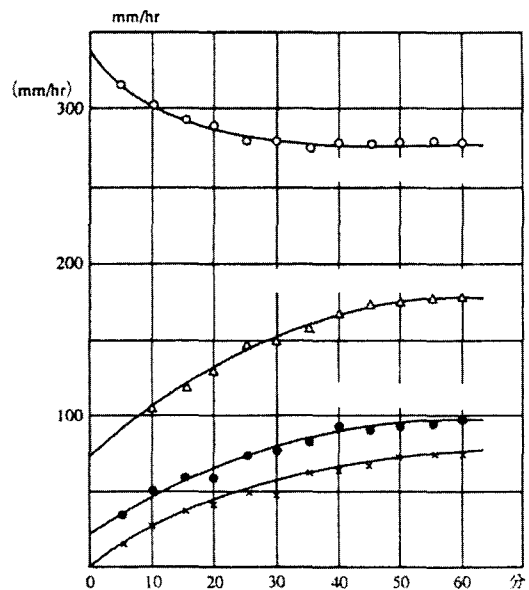


그림 4.1. 토지조건에 따라 변화하는 침투곡선

접유출량은 표면유출 성분(5%)과 중간유출 성분(6%)으로 년 강우량의 11%에 상당한다. 그의 연구로부터 삼림이 갖는 토양수분 저류기능에 의한 지하수함양에 미치는 역할의 중요성을 알 수 있다.

일본 산지유역내의 75개소의 지역에서 지표경사를 $30\text{도}\pm 10\text{도}$ 로 하고 최고 강우강도 400mm/hr 전후로 약 1시간 급수하여 종기 침투능을 구하고 별도로 행한 경사각과 침투속도에 관한 기초 실험 값을 사용하여 측정치를 보정한 지피별 측정 결과의 평균치가 그림 4.2에 나타나있다(村井, 1996). 본 그림에 의하면 임지는 다른 지피보다 침투능이 높고 임지평균 258mm/hr , 벌채적지 평균 158mm/hr , 초지평균 128mm/hr , 나지 평균 79mm/hr 로 임지를 100% 했을시 나지는 30%에 지나지 않는다. 임지에서의 침투능은 활엽수가 침엽수 보다 5% 정도 높고 그 중에서도 너도밤나무천연림이 최대로 400mm/hr 에 가까운 값을 나타냈다. 그러나 나지에서는 지표가 단단한 보도에서 극단적으로 낮아 10mm/hr 정도이다.

본 그림으로부터 임지가 갖는 지하수 함양기능의

규모와 임지에 대한 관리의 중요성을 알 수 있다. 삼림지에 존재하는 낙엽층은 삼림 조성후의 경과 년수, 입지조건에 의한 분해정도, 수종임상 등에 의하여 퇴적상황이나 퇴적 두께의 차이가 있다. 이 낙엽층이 지하수함양, 침식방지와 침투촉진 등에 영향을 미친다. 일본 이와데산 산록의 화산재 토양에 식재한 약 30년 생의 11수종을 대상으로 실험한 결과에 의하면 낙엽층을 제거 했을시에는 전체적으로 20~30% 침투능이 저하함을 나타내었다(村井, 1996).

太田 등(1983)은 산지 사면에서의 강우유출특성을 검토하기 위하여 산지사면의 토양층의 두께를 달리하는 두 개지역을 선정하여 인공강우실험을 하였다. 실험유역은 표고 200m에서 265m에 위치하며 풍화화강암으로 구성되어 있다. 지역1은 경사각 32도 평균 토층두께 30cm이며 지역2는 경사각 32도, 기반암의 경사각은 25도, 평균 토층두께 50cm이다. 지역별 식생은 지역1에서는 활엽수이고 지역2에서는 키 작은 활엽수이다. 강우강도를 달리하여 수차례의 실험을 한 결과 지역1에 77.4mm/hr 이상의 강우시에만 표면

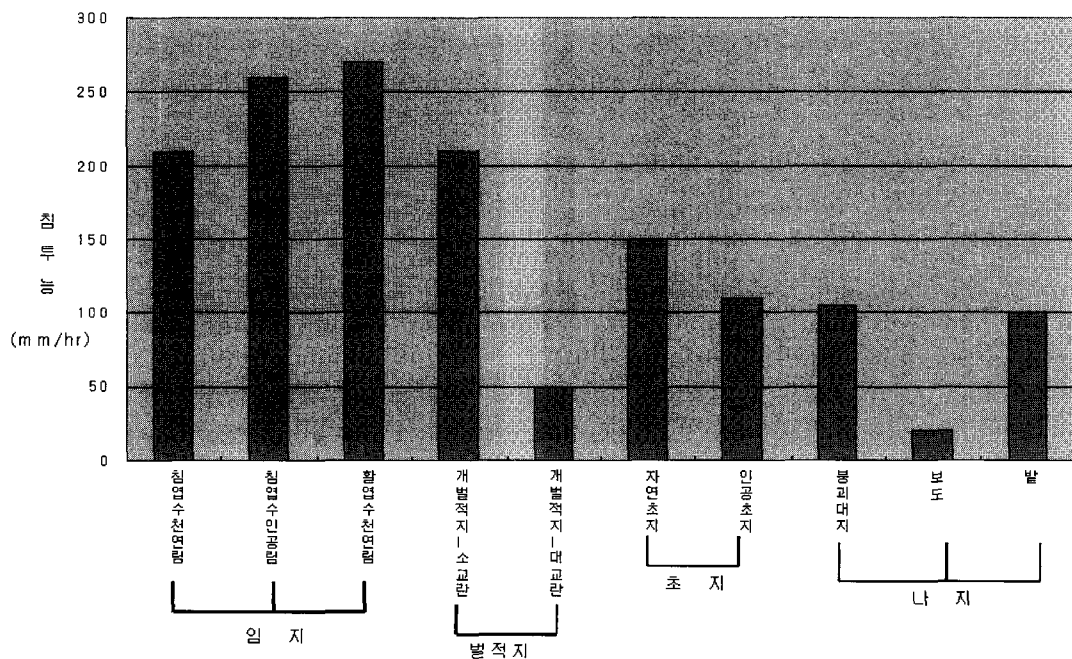


그림 4.2. 지피별로 평균한 침투능의 비교

표 4.1. 원통형침투계에 의한 침투능 측정치

측정지점	사면위치	표고(m)	방위	측정지점경사(°)	소실전의 입상	탄화층두께(cm)	지표상태(%)	침투능(mm/hr)
No. 1	사면하부	210	WNW	18	고 목 층	2	나지	457
2	중부	300	SSE	12	"	1	녹화식생 90	696
3	상부	330	NNE	15	"	2	" 100	613
4	하부	110	NNW	8	"	2	시다류 30	611
5	중부	140	WNW	10	"	1	고사근경 많음	514
6	중부	170	NW	14	"	2	녹화식생 30	551
7	상부	180	ENE	11	저목·초본층	2	" 100	887
8	중부	140	E	16	고 목 층	2	" 60	398
9	상부	190	E	10	"	2	" 40	470
10	상부	210	ENE	14	저목·초본층	없음	" 80	273
11	중부	120	SE	12	고 목 층	1	" 80	256

류가 관측되었다. 이 때 표면류가 발생한 지점은 토층이 극히 얇은 지점과 일치하였다. 77.4mm/hr 이하의 강우강도에서는 어느지점에서든 표면류가 관측되지 않았음을 보고하였다.

太田 등(1985)은 자연사면에서의 우수이동기구와 이에 영향을 미치는 기반지질의 영향을 규명하기 위하여 구릉지역에 시험사면을 설치하였다. 시험지역은 신 제3기 구릉성 산지 자연사면이다. 표층은 수심미

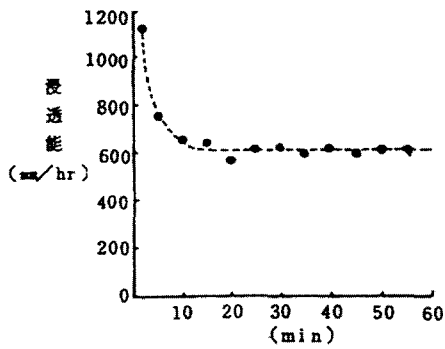


그림 4.3. 침투능곡선(No 4)

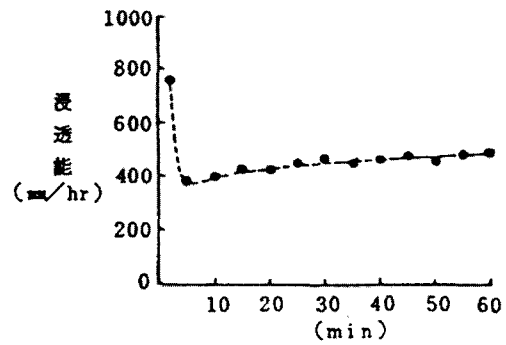


그림 4.4. 침투능곡선(No 9)

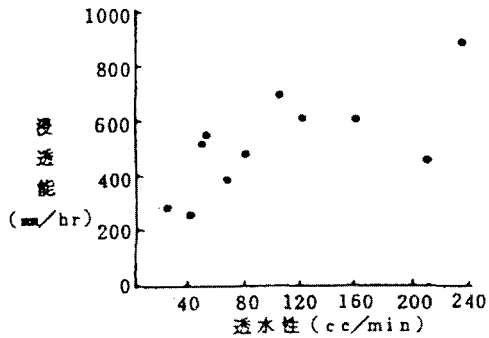


그림 4.5. 투수성과 침투능의 관계

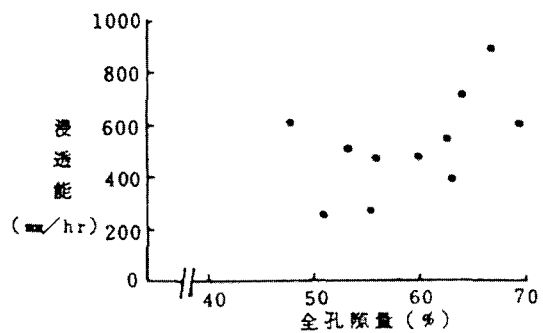


그림 4.6. 전공극률과 침투능의 관계

터두께를 갖는 갈색 점토질 loam층으로 이루어져 있다. 식생은 높이 15~20m의 활엽수의 2차림이고 하층식생은 수고 약 2m의 가는 대나무가 밀생하고 있다. 시험사면에서 토양층의 수분변화를 관측하였다. 그 결과 40mm/hr 정도의 강우강도에서는 지표면이 포화하는 경우가 발생하지 않는다는 사실을 밝혔다.

竹内와 井上(1981)은 직경 22.6cm 길이 30cm의 스텐레스 원통형침투계를 사용하여 임지사면에서 침투실험을 하였다. 연구지역의 토양은 화강암질암의 풍화력층이 주체를 이루고 있다. 사면의 평균경사는 30°~35°이나 실험은 완경사지를 선정하여 실시하였다. 표 4.1에 측정결과가 제시되어있다. 침투능은 256~887mm/hr의 범위를 가지며 평균 520mm/hr로 표준편차는 172mm/hr로 상당한 편차가 있었다. 표 4.1과 그림 4.3 및 4.4로부터 임지에서의 침투능이 대단히 큼을 알 수 있다.

투수성과 침투능과의 관계를 그림 4.5에 나타내었으며 상관계수는 0.69였다. 공극율은 50~70%였으며 침투능과 공극률과의 관계를 그림 4.6에 나타내었으며 상관계수는 0.52였다. 이들 그림으로부터 투수성과 침투능과의 상관성이 침투능과 공극률과의 상관보다 큼을 알 수 있다.

5. 밭에서의 강우 침투능

梶根 등(1980)은 환경트리티움을 추적자로하여 불포화대 토양수의 거동을 규명하고 Kanto 로움층으로

이루어진 홍적대지에서의 지하수함양기구를 밝히기 위한 연구를 하였다. 연구지역은 동경도 교외에 위치한 밭으로 지표층 약 6m를 Kanto 로움층이 덮고 있다. Kanto 로움층 중의 각 심도에서 채취한 토양수의 트리티움 농도로부터 토양수의 유동상태를 조사하였다. 그 결과 표 5.1과 같은 결과를 얻었다.

본 표에서 연구지역 밭에서의 지하수함양량은 연평균 885mm임을 나타내고 있어 밭에서의 지하수 함양량이 많음을 알 수 있다.

森脇(1983)은 밭의 유출에 영향을 미치는 요인중, 표면유출과 밀접한 관계가 있는 강우강도와 지표조건을 대상으로 이들 요인이 표면유출에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

본 연구에서는 일본 국립 방재 과학기술센터 대형 강우실험 시설내에 Kanto loam을 이용하여 밭 모양의 사면을 제작하였다. 지표면의 상태가 다른 3종류의 경우에 대하여 강우침투 실험을 하였다. 실험 사면

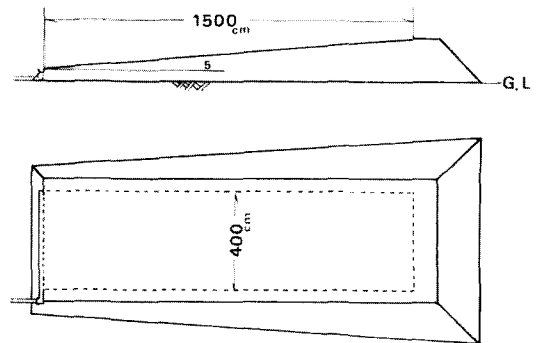


그림 5.1. 실험사면

표 5.1. 清瀬市교외 밭의 물수지(mm/yr)

연도	강수량	가능증발산량	증발산량	강하침투량
1971	1452	945	662	790
1972	1760	1010	707	1053
1973	1295	991	694	601
1974	1794	937	656	1138
1975	1496	953	667	829
1976	1542	874	612	930
1977	1508	934	654	854
평균	1550	959	665	885

표 5.2. 지표조건

지표조건	건조밀도 (g/cm ³)	간극율 (%)	포화투수계수 (cm/sec)	제 작 방 법
(a) 나지 (무경작)	0.734	71.22	2.7×10 ⁻³	지표면을프레이트전압기로동일지점에 2회식 다졌다.
(b) 나지 (경작)	0.555	78.43	2.0×10 ⁻²	지표면으로부터 깊이20cm정도의 토층을 실제 농사시와 같이 쟁기로같이 조성하였다.
(c) 초지	0.618	75.76	1.4×10 ⁻²	(b)의 실험종료후, 1년간 야외에방치하여, 식생이 자연적으로 조성되게 하였다. 주된 식생은 사초류, 썩 등이다.

의 규모와 형상은 그림 5.1과 같다. 사면의 수평길이는 15m, 폭 4m, 사면경사는 5도이다. 토양은 밭에 사용 되고있는 유기질이 풍부한 Kanto loam이다. 밭의 경우 작물을 재배함에 따라 지표면의 상태가 변화한다. 경작하면 토양의 공극은 증가하여 토양의 보수성이 좋아지며 식생의 성장에 따라서도 지표상태는 달라진다. 본 실험에서는 이러한 상황을 고려하여 나지(무경작), 나지(경작), 초지의 3종류의 지표면 상태에 대하여 유출특성을 비교하였다. 지표 조건은 표 5.2와 같다.

본 연구 결과에 의하면 무경작 나지의 최종침투능은 15mm/hr, 경작 나지의 최종침투능은 33mm/hr, 초지에서 28mm/hr였다.

Michaelson et al.(1979)은 미국 북중부지역의 대표 토양에 대하여 강우 침투실험을 하였다. 실험을 위

하여 스프링클러형 강우침투 장치를 고안하였다. 각 주별 대표지역을 선정하였으며 선정된 실험지역의 토양조직은 silt loam이 주이다. 각 주별로 토지이용상태에 따른 중기침투능이 표 5.3에 나타나 있다. 본표에 의하면 휴경지의 중기 침투능이 10.67mm/hr이며 bromegrass에서는 평균 중기침투능이 34.55mm/hr이며 작물묘종상에서는 평균 중기 침투능이 30.46mm/hr이며 작물 성장시에는 평균 중기침투능이 22.91mm/hr임을 나타내고 있다.

정하우와 유기희(1983)은 밭에서의 침투현상을 파악하기 위하여 침투실험을 하고 해석하였다. 실험지역은 예산지역으로 토양은 우리나라 밭토양에 일반적인 coarse loamy soil이며 풀로 덮여있다. 실험결과 중 토양 상태와 침투능이 표 5.4에 나타나있다. 본 실험결과에 의하면 밭 지역에서의 평균 중기 침투능이

표 5.3. 토지상태별 중기침투능

지역	Infiltration Rate(mm/hr)			
	Fallow	Bromegrass	Corn seedbed	Corn cultivated
ALASKA	10.67	10.16		
ILLINOIS		50.80	33.02	30.23
INDIANA		18.80	19.47	23.79
IOWA		32.85	18.80	
MICHIGAN		76.20	32.17	38.10
MINNESOTA		32.17	25.4	24.13
NEBRASKA		33.70	26.92	
NORTH DAKOTA		24.51	7.11	11.43
OHIO		25.40	76.20	7.28
SOUTH DAKOTA		24.38		25.40
WISCONSIN		51.05	35.05	
평균	10.67	34.55	30.46	22.91

표 5.4. 토양조건과 침투능

No	fO	fC	MC	MD	V
1	102	7.97	219.3	309.0	200
2	162	30.12	202.1	326.2	700
3	168	15.20	202.4	325.9	400
4	270	51.00	200.1	328.2	1000
5	186	34.86	202.6	325.7	800
6	144	17.70	224.3	314.0	300
7	60	6.20	225.6	302.7	0
8	60	5.70	225.6	302.7	100
평균	144	21.09	212.75	316.8	437.5

21.09mm/hr임을 나타내고있다.

- 여기서 fO : initial infiltration rate (mm/hr),
- fC : final infiltration rate (mm/hr)
- IMC : initial moisture content (%)
- V : vegetative condition of grass to total area (%)

그는 또한 가장 적절한 침투방정식은 Kostiakov의 식으로 $f=3.927t-0.407$ 의 관계식을 제안하였다.

6. 논에서의 침투능

菅原(1992)는 논에 의한 지하수함양을 파악하기 위하여 일본 木縣의 那須扇狀地에 대하여 조사하였다. 이 지역은 일본 유수의 선상지로 선정부의 표고는 500~560m, 선단부의 표고는 180m로 비고는 380m에 달한다. 이 지역에 분포하는 투수성이 대단히 큰

선상지 사력층 때문에 논의 일 감수심이 크다. 조사결과 는 수로로부터의 손실을 무시할 경우 28.2mm/day임을 알았다.

정하우 등(1986)은 논에서의 유효수량산정을 위한 연구를 하였다. 대상지역은 서울대학교 농과대학 부속농장내 논이다. 토양은 사양토이며 포장면적은 281.2m²이다. 실험을 위하여 몇 개의 실험소구역으로 나누었으며 소구역별 면적은 표 6.1과 같다.

소구역별로 논농사시의 일평균침투량을 측정한 결과는 표 6.2와 같다. 본 표에 의하면 논에서의 평균 침투량이 7.52mm/day임을 나타내고 있다.

일본에서는 벼농사 기간 중의 논의 1일당 감수심은 평균 20mm정도이다. 이중 평균적인 증발산량은 5mm정도로 15mm/day 정도의 지하수를 함양하고 있다. 관개기간을 120일로 생각하면 관개기간 중의 지하수 함양량은 1800mm에 달한다(三菱綜合研究所, 1992).

표 6.1. 각 소구역의 면적

Plot	A1	A2	A3	B1	B2	B3
Area(m ²)	37.5	37.4	35.5	37.4	37.0	32.9

표 6.2. Plot 시험기간중의 일평균 침투량

구분 Plot	A1	A2	A3	B1	B2	B3	전체평균
일평균침투량 (mm/day)	7.8	7.5	7.4	7.6	7.4	7.4	7.52

7. 결론

지하수함양량 산정과 강수 유출해석에 필요한 지표 조건에 따른 침투능을 비교 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 초지에서는 종기침투능이 30~50mm/hr이다.
- 2) 나대지에서는 종기침투능이 7.2mm/hr 정도이다.
- 3) 임지에서는 40mm/hr 정도의 강우강도의 강우에는 지표면이 포화하지 않으며 산지사면에서는 77.4mm/hr이상의 종기침투능을 갖는다. 지표조건별 평균 종기침투능은 일반임지에서 258mm/hr, 벌채적지에서 158mm/hr이며 산불채해임지에서는 80~100mm/hr의 침투능을

나타낸다.

- 4) 밭에서는 종기침투능이 휴경지의 경우 10.7~28mm/hr, 경작지의 경우 22.9~33mm/hr, 나지의 경우 6.2~15mm/hr이다.
- 5) 선상지의 논에서는 감수심이 28.2mm/day이고 일반적인 논에서의 감수심은 7.5 ~ 15mm/day이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 : 3-3-1)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 배상근(2002): 지하수함양량 산정방법에 대한 고찰, 한국수자원학회지, 제35권 제3호, pp.50~59.
- 鄭夏禹, 柳基熙(1983): 밭 灌溉를 위한 浸透方程式의 實驗的 考察, Seoul Nat'l Univ., Coll. of Agric. Bull. Vol. 8, NO. 1, pp.103~112.
- 정하우, 권순국, 박성우, 장평욱, 김성준(1986): 숲에서의 有效雨量에 關한 研究, 서울大 農學研究, 第11卷 1號, pp.19~27.
- Michaelson, N.E. et al. (1979): Water Infiltration into representative soil of the North Central Region, p.26.
- Sharma, M.L., Taniguchi, M., Barron, R.J.W., Craig, A.B., Raper, G.P., Fernie, M. and Byrne, J.(1988): Investigations of natural groundwater recharge in the unconfined aquifers of the Coastal Plain. Project Report, CSIRO Division of Water Resource, Wembley, W.A., p.104.
- 木下武雄·中根和郎(1977): 表面流出に關する研究(その1), 實驗斜面において降雨強度が表面流出の發生に及ぼす影響, 國立防災科學技術センター研究報告, 第18號, pp.35~49.
- 橋本 健, 長谷川正(1977): 土地利用變化を評する洪水流出モデル, 土木技術資料, 19~5, pp.11~16
- 石崎勝義, 北川明(1979): "地下水の人工涵養". 地下水ハンドブック, 建設産業調査會, pp.1279~1310.
- 梶根 勇, 田中正, 嶋田 純(1980): 環境トリチウムで追跡した關東ローム層中の土壤水の移動, 地理學評論, 第53卷第4 , pp.225~237.
- 岡 太郎, 角屋 睦, 野口 美具(1980): 宅地域の雨水浸透と流出特性, 京大防災研究所年報, 第23號 B-2, pp.227~238.
- 岸井德雄(1981): 表面流出の發生に關する實驗, 國立防災科學技術センター研究報告 第25號, pp.19~27.
- 竹内信治, 井上清美(1981): 林野火災跡地の土壤浸透能と透水性および空隙量, 日本林論, pp.445~446.

- 魚生川 登, 北川善廣(1982): 都市化流域の洪水流出モデル, 土木學會論文報告集, 第325號, pp.51~59.
- 安藤義久, 管 明芳, 岡本哲夫, 淺羽晴夫(1982): 關東ローム丘陵・台地における土地利用別の浸透能, 水利科學, Vol.26, No.5, pp.1-23.
- 太田岳史, 福嶋義宏, 鈴木雅一(1983): 一次元鉛直不飽和浸透を用いた雨水流出特性の検討, 日林誌, 65(4), pp.125~134.
- 森 脇(1983): 降雨實驗による畑地模型の表面流出について, 國立防災科學技術センター研究報告, 第30號, pp.65~83.
- 岸正徳雄, 中根和郎, 大倉 博, 佐藤照子, 小西達男(1984): 筑波研究學園流出試驗地の流出特性(第2報), 國立防災科學技術センター研究報告 第33號, pp23~68.
- 太田猛彦, 塚本良則・比留間雅紀(1985): 丘陵性自然斜面における雨水移動の實 的研究(I) 鉛直浸透特性と基盤地質, 日林誌 67(8), pp.311~321.
- 谷口真人(1989): オーストラリア・パースにおける異なる植生下での地下水涵養量の比較研究, 筑波大學水理實驗センター報告, 第13號, pp.71~76.
- 菅原利夫(1992): 水田の地下水涵養 果とその活用方策, 地下水技術, pp1~11.
- 三菱綜合研究所(1992): “水田のもたらす外部經濟果に関する調査・研究報告書”. p.56.
- 村井 宏(1996): “林地における雨水の浸透”. 雨水技術資料, Vol. 20, pp.35~44.
- 藤根基久(1996): “森林と水流出”. 雨水技術資料, Vol. 20, pp.27~34.
- 湯本敏夫(1996): “安全でおいしい水をはぐくむ水道水源林”. 雨水技術資料, Vol. 20, pp.61~69.
- 安原正也(1997): 都市の地下水に今なにが起きているのか, 量的な観点から, 地質ニュース, 513 , pp.11-19.