

工學碩士 學位論文

하천의 토사유출과 둔치 및 하안 서식
식생의 상호연관성에 관한 연구

A study on the mutual relation between the soil effluence
and local plants on the riverside

指導教授 金 明 珍

2005年 2月

韓國海洋大學校 大學院

土木環境工學科 環境工學專攻

李 國 鎮

본 論文을 李國鎭의 工學碩士學位論文으로 認准함

委員長 : 工學博士 金仁洙 (印)

委員 : 工學博士 金明珍 (印)

委員 : 名譽教授 朴相潤 (印)

2005年 2月

韓國海洋大學校 大學院

土木環境工學科 環境工學專攻

李國鎭

목 차

목 차	i
List of Tables	iv
List of Figures	v
Abstract	vii
I. 서론	1
II. 이론적 고찰	3
2.1 하천의 토사유출	3
2.1.1 토사유출량 산출법	5
(1) 토사유출량 원단위	5
(2) 수정범용 토양손실	6
2.1.2 토양의 식생분포와 토사유출과의 관계	10
2.1.3 식생분포와 토사유출율과의 관계	11
2.2 둔치식생의 수리학적 구조	12
2.2.1 둔치 식생의 구조	13
2.2.2 NEO-SPAM	14
(1) 식생개체의 생장 방정식	15
(2) 토양계 방정식	16
(3) 식생계 방정식	18
(4) 대기계 방정식	19
2.3 유출토사와 하안부 식생과의 관계	20

2.3.1 하안의 수리적 구조	21
(1) 하안부 횡단면 형태	21
(2) 식생이 있는 하천의 횡단방향 유속분포	22
III. 현지관측 및 배양실험	25
3.1 관측항목 및 방법	25
3.1.1 관측지 개요	25
3.1.2 관측방법	27
(1) 지형	28
(2) 수질조사	29
(3) 식생조사	29
(4) 토양조사	31
3.1.3 관측결과 및 고찰	31
(1) 관측지 수위 및 수질변화	31
(2) 식생분포와 지형별 성장	36
(3) 식생 성장량	39
(4) 토양입도 및 영양염 함유량	40
3.2 배양실험	42
3.2.1 영양염류 흡수실험	42
3.2.2 뿌리 호흡실험	44
3.2.3 실험결과 및 고찰	46
(1) 증산과정	46
(2) 호흡량 변화과정	47
(3) 영양염 흡수과정	47
(4) 뿌리 호흡과정	49

3.3. 하안 수리학적 생태	51
3.3.1 실험방법	51
3.3.2 결과 및 고찰	53
IV. 종합결론	58
V. 참고문헌	60

List of Tables

Table 2.1 Basic units of soil effluents	5
Table 2.2 Corrosion coefficient	8
Table 2.3 Factor of soil conservation	9
Table 2.4 Corrosion of construction soil factor	10
Table 3.1 Observation items	27
Table 3.2 Weight percent of main components in each organ	36
Table 3.3 Concentrations distribution of the nutrient in soil	41
Table 3.4 Concentrations of NO ₃ -N in the culture solution	42
Table 3.5 Roots experiment conditions	45
Table 3.6 Experimental conditions	52

List of Figures

Fig. 1.1 Restoration the present of damage by a flood	2
Fig. 2.1 Model of soil effluents	4
Fig. 2.2 Distributions of the effluent in the river soil (SS)	11
Fig. 2.3 Green bult of riverside	12
Fig. 2.4 Vegetation growing on river bank and riverside	13
Fig. 2.5 Metabolism on the river bank plants	14
Fig. 2.6 Diagram of NEO-SPAM	15
Fig. 2.7 Sedimentation and movement of he effluent in the river soil ..	20
Fig. 2.8 Diagram of riverside	21
Fig. 3.1 The location of field observation	26
Fig. 3.2 Field observation and P.Japonica	27
Fig. 3.3 Diagram of field observation site	28
Fig. 3.4 River flow and ground-water level	33
Fig. 3.5 Range of ground water level	33
Fig. 3.6 Nutrient concentrations of river water and ground-water	34
Fig. 3.7 Dry weight ratios of each organ	36
Fig. 3.8 Average growth rate per shoot of P.Japonica in the vegetation zoon(Compared with the distance between the soil suface and ground-water table)	37
Fig. 3.9 Relations of leaf area and leaf length	38
Fig. 3.10 Relations of leaf dry-matter and leaf area	38
Fig. 3.11 Relations of angle of inclination and leaf height	38
Fig. 3.12 Plant community and relative radiation intensity	39
Fig. 3.13 Grain size of the outer layer (0~10cm, 10~20cm)	40
Fig. 3.14 Change of nutrient absorption(C,N,P)	41
Fig. 3.15 Meteorological phenomena in a experiment period	43

Fig. 3.16 Diagram of the hydroponics in this experiment	44
Fig. 3.17 Diagram of the roots in this experiment	46
Fig. 3.18 Transpiration rate	46
Fig. 3.19 Respiration rate	47
Fig. 3.20 Nitrogen uptake rate	48
Fig. 3.21 Relation between nutrient uptake and transpiration per day in this experiment	48
Fig. 3.22 Relation between nutrient uptake and respiration per day in this experiment	49
Fig. 3.23 Root respiration rate in the different oxygen concentration in culture solution and compare with the model	50
Fig. 3.24 View of the flume	51
Fig. 3.25 Grain size distribution	52
Fig. 3.26 Variation of the bed topography (Run A, B, C)	54
Fig. 3.27 Variation of the bed topography (Run D, E)	55
Fig. 3.28 The transverse distribution of down stream velocity (Run A, B, C)	56
Fig. 3.29 The transverse distribution of down stream velocity (Run D, E)	56
Fig. 3.30 Relation between soil effluents and per unit of wide	57
Fig. 3.31 Distribution of vorticity (the scale of contour [-s])	57

The Research on the Mutual Relationship between the Effluence of the River Soil and Local Plants on the Riverside

Guk Jin Lee

Department of Civil and Environmental Engineering,
Graduate School, Korea Maritime University

Abstract

The development projects throughout the nation and change of the nearby soil quality are creating an environmental problem in the river and coastal areas of which precipitation remains steady with the severe corrosion of earth. Such effluence of soil, in the short term, changes the land formation and ecology of the river and badly influence the surroundings of the coastal areas in the long run. The nutritional seawater which includes nitrogen and phosphorus is one of major factors for the possible pollution in the water.

The water system of the river, as the water source, is intimately related to our everyday lives. Therefore it is important for us to protect and conserve it. Especially, the significant roles of local plants on the riverside are brought to a spotlight as their abilities to purify the water, protect ecosystem, and reduce the effluence of the soil are proven. The experiments were done using a model waterway, culture experiment, and the field observation for the purpose of understanding the environmental movement of local plants on waterside and riverside. After performing the tests we obtained the results as below.

- Field Observation -

1. The changes in amount of water in the river influences the water level but not deeply related to the concentration level of seawater nutrition.
2. The growth rate of the plants on the waterside was affected by the height of the impermeable layer.
3. The water side soil has close relationship with the concentration level of seawater nutrition and distribution of the fine particles which are generated by the local plants.

- Culture Experiment -

1. Transpiration is related only to the change in solar radiation, not to the life of the plant roots.
2. In the growing period of the plants high rate of respiratory amount was yielded with high ratio of nitrogen in the soil.
3. The respiratory amount of the root is closely related to the oxygen level of the soil.

- Experiment with a model waterway -

1. The plants on the riverside influence the stability of the river.
2. The plants on the riverside in the waterway create irregular swirl which reduces the movement of the soil.

I 서론

전 국토에 걸친 개발사업과 주변 토지형질 변화는 과거와 동일한 경우의 자연현상에도 불구하고 심화된 토사침식을 통한 하천과 연안역 수계에 환경 문제를 유발시키고 있다[1][13]. 이와 같은 토사유출은 단기적으로 하천의 생태 및 지형을 변화시키고, 장기적으로 연안해역의 환경에 직·간접적인 영향을 미치며, 토사와 함께 유출된 질소와 인 등의 영양염류는 잠재적 수계환경오염의 요인으로 작용하고 있다[3].

현재 우리나라의 대규모 개발 사업장에서는 환경영향평가의 협의 내용에 따라 토사유출 방지를 위한 침사지를 설치·운영하고 있으나, 부지확보 · 유지관리 미흡 · 설계치 미 준수 등에 의한 문제가 제기되고 있으며[1], 그 이외의 소규모 개발사업과 나지, 농지 등에서는 토사유출과 관련한 방지시설이 전무한 실정으로 강우시 하천수계를 통해 토사가 대량으로 유출되고 있다. 또한 2002~3년의 태풍 ‘루사’와 ‘매미’에 의한 비정기적 집중강우강도 발생으로 하천의 둔치와 하안이 붕괴된 이후 하천 복구사업에서 하구까지의 유달시간만을 고려한 Fig. 1.1과 같은 하천 정비 사업으로 유속의 급격한 증가와 하천 식생 사멸에 의한 생태서식지 감소로 하천수계가 파괴되고 있다.

하천 수계는 우리생활과 밀접한 관계를 가지고 있는 상수원이며 나아가 연안해역에 이르기까지 그 보존과 보호의 중요성을 지니고 있다. 그 중에서도 둔치와 하안부 수변식생은 수질정화, 생태계 보

호, 토사유출 저감 등 다양하고 중요한 역할이 부각되면서 그 관심이 집중되어 왔다. 하천 식생은 상류에서 하류까지 지형, 하상구배와 구성 재료, 유속, 유량, 수심 등이 종단면과 횡단면의 변화에 영향을 받으며, 각각의 지형에서 침수빈도와 지하수면의 높이, 홍수와 갈수시의 기상조건이 공간적 시간적으로 변화하고 있다.

본 연구에서는 하천의 둔치와 하안 수변에 서식하는 식생의 환경 수리적 측면의 대기-식생-토양계 3계권역의 상호 연관성과 동태를 파악하기 위하여 둔치식생에 대한 현지관측을 실시하여 하천 유량 변동에 따른 지하수위 변동과 식생의 주변 생태변화, 지하수와 토양에 포함된 영양염류 변화량 확인하였으며, 둔치 식생을 채취 후 배양실험을 통하여 뿌리 호흡량과 관련한 토양산소와 질소 농도의 중요성을 확인하였다. 또한 하안 모형직선 수로를 구축한 모델링 실험을 통하여 하안부에 서식하는 식생이 하천 유선에 미치는 범위와 하천 유출토사의 저감정도를 확인하였다.

본 연구는 우리나라 하천 수변구역과 관련하여 둔치의 생태구성과 하안부의 수변 식생을 통한 연안역의 토사유출 저감과 하천 생태보호에 수리학적 기초 자료로의 사용이 기대된다.



Fig 1.1 Restoration the present position of damage by a flood

II 이론적 고찰

2.1 하천의 토사유출

하천과 연안역의 토사 유출은 구성토양, 강우강도, 지형 등 자연적 요소와 인위적 요소인 농지구성, 개발사업, 군사시설 등에 의해 영향을 받으며, 하천의 미지형 형성(구배단면적 감소)을 통한 홍수 발생과 연안역의 저서생태계 파괴, 부영양화의 잠재요인을 지니고 있다. Fig. 2.1은 강우시 Rayleigh jet가 형성되면서 나타나는 토사 유출 과정을 모식화한 것으로[12], 초기강우에 의해 지표면에 수막이 형성되면 그 이후의 강우강도와 충분한 흐름이 발생할 수 있는 강우량에 의해 토사 유출량이 결정되어진다. 토사유출량은 지역과 위치별로 약간의 차이는 있지만 동일지표상에서의 토사 유출량은 비정기적 강우강도인 시간당 40mm, 10분당 15mm 이상의 강우강도에서 급격히 증가하며 최대 1년 1회 발생 가능한 비정기적 집중강우강도에 의해서 연간 토사 유출량의 40% 이상의 수치가 유출되는 것으로 보고되고 있다[3][14].

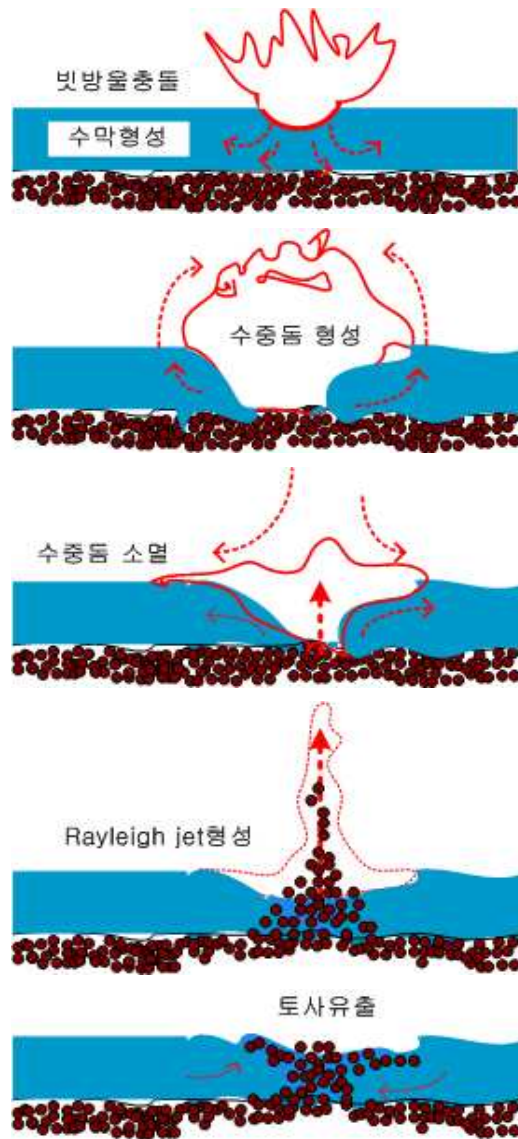


Fig. 2.1 Model of soil effluent

2.1.1 토사유출량 산출법

하천과 연안역의 토사유출과 관련하여 우리나라에서는 대규모 개발지역에서 환경영향평가 원단위를 이용한 토사 유출량을 산출하며, 이를 근거로 침사조를 설계하여 토사가 하천이나 연안해역으로 유출되는 것을 막고 있다[2].

(1) 토사유출량 원단위

현재 우리나라에서 사용되고 있는 1일 토사유출량은 1식을 이용하여 계산하고 있다.

$$Q = \frac{1}{365} A \times C \times D \quad \text{-----(1)}$$

$$1\text{일 토사유출량(톤/ha/day)} = \frac{300\text{m}^3/\text{ha}/\text{year}}{\text{강우일수}/\text{year}} \times \text{토사밀도(톤/m}^3\text{)}$$

Q : 토사유출량(ton/일), A : 배수면적(ha), C : 1ha당 연간 유출 토사량(m³/ha/year)

D : 토사의 밀도(ton/m³)

Table 2.1 Basic units of soil effluents

토지상태	토사유출량(m ³ /ha/year)	두께(mm)
나지, 황무지 등	200~400	20~40
벌초, 초지	15	1.5
채벌지	2	0.2
보통 임야지대	1	0.1

토사유출 원단위 값은 주로 나지, 황무지 등의 토사유출범위인 200~400m³/ha/year의 평균값인 300m³/ha/year을 적용하고 있으며, 토사유출량의 원단위는 Table 2.1과 같다. 그러나 토사유출량 원단위를 이용한 토사유출량 계산은 유출지역과 강우강도가 고려되지 않아 오차범위가 클 뿐만 아니라, 강우유출률이 증가되면서 여러 문제를 야기하고 있다.

(2) 수정범용 토양손실(Universal Soil Loss Equation)

수정범용토양손실 식은 건설현장에서 단순강우에 의한 토양침식량 산출을 가능하도록 하기 위한 것으로 2식과 같다

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P = R \cdot K \cdot LS \cdot VM \quad \text{-----}(2)$$

A : 단위면적당 토사침식량 (ton/acre), R : 강우침식인자 (100ft · ton/acre · in/hr) K : 토양침식인자 (ton/acre · R), LS : 지형(경사면 길이 : 경사도)인자
C : 작물관리인자, P : 토양보존관리인자, VM : 건설현장적용계수

(a) 강우침식인자(R)

강우는 토사 침식에 직접적인 영향을 미치는 토사유출 인자로서 강우침식은 빗방울의 지표 충돌에 의한 이탈과 강우유출에 의한 토사입자 운반에 따라 달라진다. 강우 침식인자는 강우에서 침식지수(특정강우의 침식력) 단위의 수를 표현하는 수치로 30분 최대 강우강도와 강우의 총 동력학적 에너지(Kinematic Energy)의 곱으로 표현되는 년평균 침식도 EI₃₀을 100으로 나눈 값을 말하며 3

식과 같다.

$$R = \frac{\sum EI_{30max}}{100} \text{-----}(3)$$

E = 916+ 331log₁₀X (주어진 강우강도에서 1인치 강우의 운동에너지)

I_{30max}: 30분 지속 최대 강우강도 (inch/hr)

(b)토양침식인자(K)

강우에 의한 토양침식에 대해 저항하는 능력을 나타내는 계수로 토양의 입경분포, 유기물함량(%), 토양구조 및 투수성을 이용하여 산정하며, 토양침식인자는 0.1~0.7의 범위를 가지고, 유역의 토양 구성비를 근거로 Wischmeier의 C값 추정도표를 이용하여 산정한다.

(c) 지형인자(LS)

강우에 의한 토양침식은 경사지역의 길이와 경사도에 따라 달라지므로 토양침식에 대한 지형의 효과를 반영하기 위해 식 4와 같은 LS를 제시하였다. S는 사면 경사도 계수이고 L은 사면길이 계수이다.

$$LS = \left(\frac{l}{72.6} \right)^m \left(\frac{65.41S^2}{S^2 + 10000} + \frac{4.6S}{\sqrt{S^2 + 10000}} + 0.065 \right) \text{-----}(4)$$

l : 경사길이(ft), S : 경사도(%)

m : 경사에 따라 변하는 지수(0.2:S <1%, 0.3:1% <S <3%, 0.4: 3% <S <5%, 0.5: S>5%)

(d) 작물관련인자 (C: Cropping Management Factor)

지피(Cover)인자라고도 불리기도하며, 작물관리인자는 지피상태에서 따른 침식도를 나타내는 무차원계수로서 지피상태가 상시휴경지(Fallow)의 침식계수 1.0을 기준으로 하여 도출한 다른 지피상태의 상대적 침식계수이며 Table 2.2와 같다

Table 2.2 Corrosion coefficient

지피상태	작물관리인자	비고
휴경지, 나대지	1.000	상대적 침식계수 평가의 기준
경작지	0.080	
목초지	0.010	
산림지	0.005	
도시지역	0.010	

(e) 토양보존관리인자(P)

토양보존관리인자는 여러 가지 구조적 토양 보존관리(자연등고선보존, 계단식보존, Strip Cropping) 등에 따른 침식계수의 변화를 나타내는 무차원계수로서 Table 2.3과 같다.

Table 2.3 Factor of soil conservation

유역경사도 (%)	등고선 유지	등경사유지	
		초지	경지
1.0~2.0	0.60	0.30	0.45
2.1~7.0	0.50	0.25	0.40
7.1~12.0	0.60	0.30	0.45
12.1~18.0	0.80	0.40	0.60
18.1~24.0	0.90	0.45	0.70

(f) 건설현장 토양침식인자(VM)

1971년 Wischmeier와 Johnson, Cross등에 의해 건설현장에 확대 적용하기 위하여 산정된 값으로 원공식의 경작인자(C)와 토양보전대책인자(P)의 결합지수로 건설현장 침식표면의 특성을 나타내며 Table 2.4와 같다

Table 2.4 Corrosion of construction soil factor

현장 조건	건설현장 토양침식인자
1. 나대지	
현장부지 6-8인치 교란	1.00
현장부지 6-8인치 교란 (강우 후)	0.89
불도우져 작업중	1.30
불도우져 작업중 (별개제근 후)	1.20
불도우져 사면공사 중	1.30
불도우져 사면공사 중(별개제근 후)	1.20
무작위 공사중	0.90
2. 아스팔트 포장공사	
1250 gallons/acre	0.02
605 gallons/acre	0.14~0.57
151 gallons/acre	0.65~0.70
3. 초지조성공사	
조성후 60일 이내	0.40
조성후 60일 이후	0.05

2.1.2 토사입경분포와 영양염류와의 관계

강우강도의 크기에 따른 토사유출량 결정은 영양염류의 종류와 깊은 관계가 있다. Fig 2.2는 좌측 기준토양을 중심으로 우측의 강우강도 변화에 따른 SS값을 바탕으로 유출 토사의 입도변화를 나타낸 것으로 SS 농도 증가시 토사의 입도도 큰 값을 가지는 것으로 나타났으나[3], 하천 유량 증가에 따른 하상의 소용돌이에 의해 하상입자의 불규칙 운동 발생으로 입도변화는 불규칙적으로 변화하기도 한다.

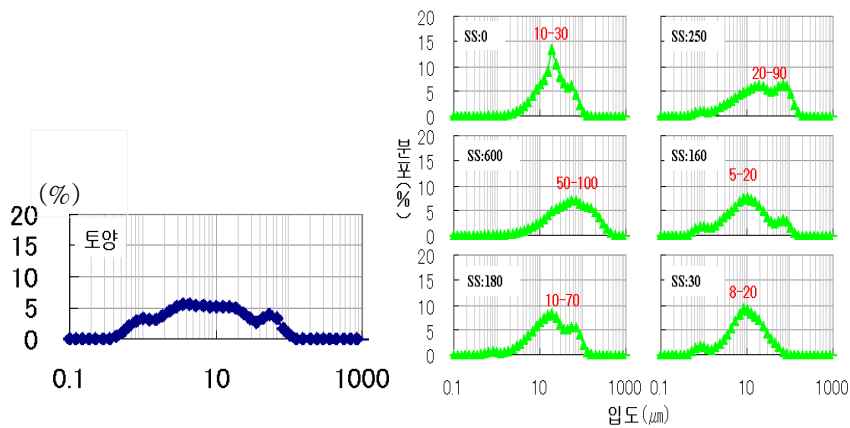


Fig. 2.2 distributions of the effluent in the river soil (SS)

하천수계의 질소농도는 남조류(Blue green algae)에 의해 대기 중의 질소를 고정할 수 있으므로 수체 내에서 질소보다 인의 존재 형태가 더 중요시되며, 평균적으로 하천에서 총인(T-P)의 경우 0.08mg/l 이상일 경우 조류의 과다번식을 유발하는 부영양화의 원인으로 작용하게 된다.[4]

대부분의 수중 생태계에서 인은 용존 무기인, 용존 유기인, 입자성 무기인, 입자성 유기인등의 4가지가 있으나, 용존 무기인과 정인산염의 형태로 다량 존재하며, 시간이 지남에 따라 퇴적층 입자에 흡착과 탈착을 반복하며 연안으로 이동하게 된다.

2.1.3 식생분포와 토사유출율과의 관계

경사구배가 1/150인 피식지(피식율 98%)와 나지를 상대로 토사 유출량을 확인한 실험에서 토양의 피식율에 따라 토사 유출량은

최대 1/10까지 유출 탁도를 감소할 수 있는 것으로 보고되었다 [11][14]. 피식된 토양은 Rayleigh jet 충격이 감소되면서 지표면 토사의 탈착작용을 감소시켜 토사유출을 억제하는 것으로 나타났다으며, 미국의 경우 Fig. 2.3과 같이 토사유출가능지역에 그린벨트를 설치하여 하천으로의 토사유출을 감소시키기도 한다.



Fig. 2.3 Green belt of riverside

2.2 둔치의 식생의 수리적 구조

집중 강우강도에 의해 하천으로 유출된 토사와 영양염류는 둔치의 식생에 의해 저항을 받으며, 그 곳에 생육하는 식생은 이를 수분과 영양분으로 이용하여 그 일차생산 활동으로 이용하고 있다. 홍수시 하천의 흐름은 단 시간에 대량의 물질을 수송하고 둔치 토양환경에 영향을 미치며, 결국 강우에 의한 홍수시 물질 수송의 특성과 수송된 물질이 둔치 토양환경 형성기능의 구조를 해명하는

것은 유출된 토사와 영양염류의 이동 파악에 중요하다. Fig. 2.4는 하천의 수리적 식생을 구분한 것으로 하안에 서식하는 식생과 둔치 식생으로 구분한다[10].

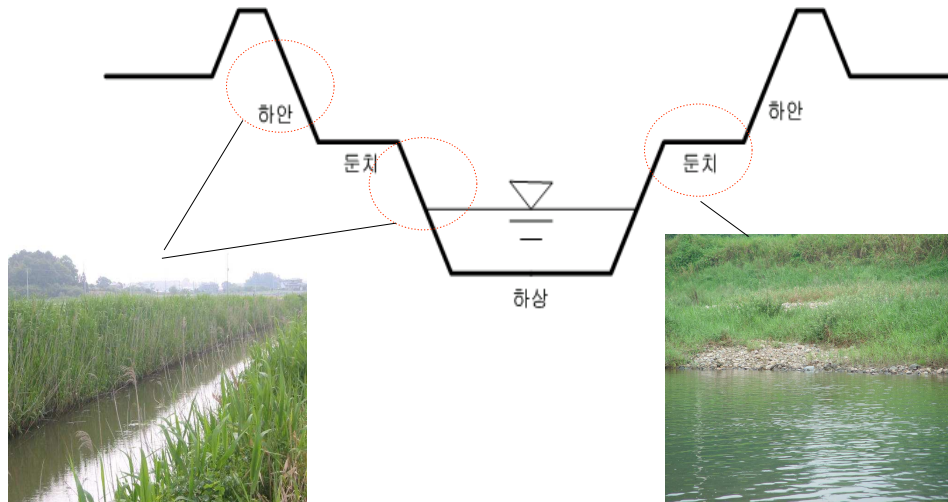


Fig. 2.4 Vegetation growing on river bank and riverside

2.2.1 둔치 식생의 구조

둔치에 서식하는 식생은 하천의 교란을 받으며 천이를 반복하고 있다. 식생의 생육장소에서는 Fig. 2.5와 같은 환경적 영향을 받아 생활의 기초대사 물질인 CO₂를 고정하고, 영양염의 흡수와 그 동화 산물을 이용한 물질생산의 기능을 하고 있다[8].

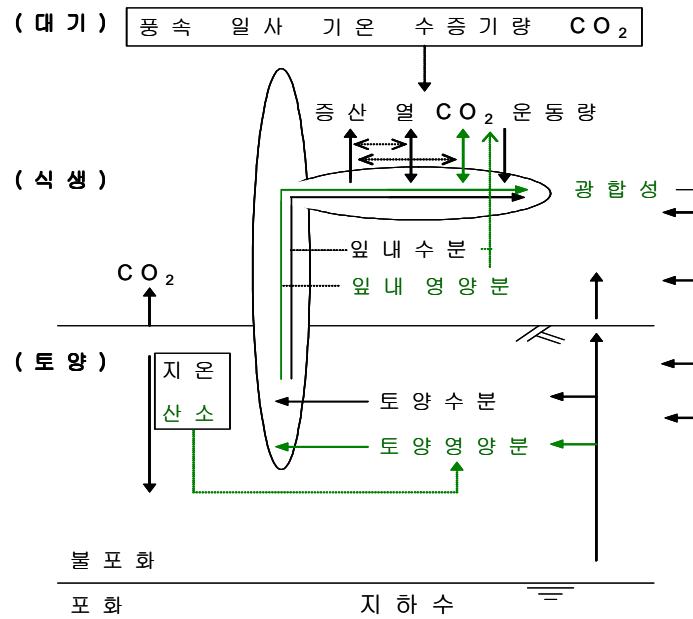


Fig. 2.5 Metabolism on the river bank plants

2.2.2 NEO-SPAM

NEO-SPAM(Neo-Soil-Plant-Atmosphere-Model)은 수리식생의 연구에 있어서 대기권, 토양권, 식물권을 독립적으로 구분했던 것을 3계권에 관하여 유체역학적 관점에서 상호상관 관계와 특성을 파악하는 연계 모델로서, 간략히 모식화하면 Fig 2.6과 같다 [5][6].

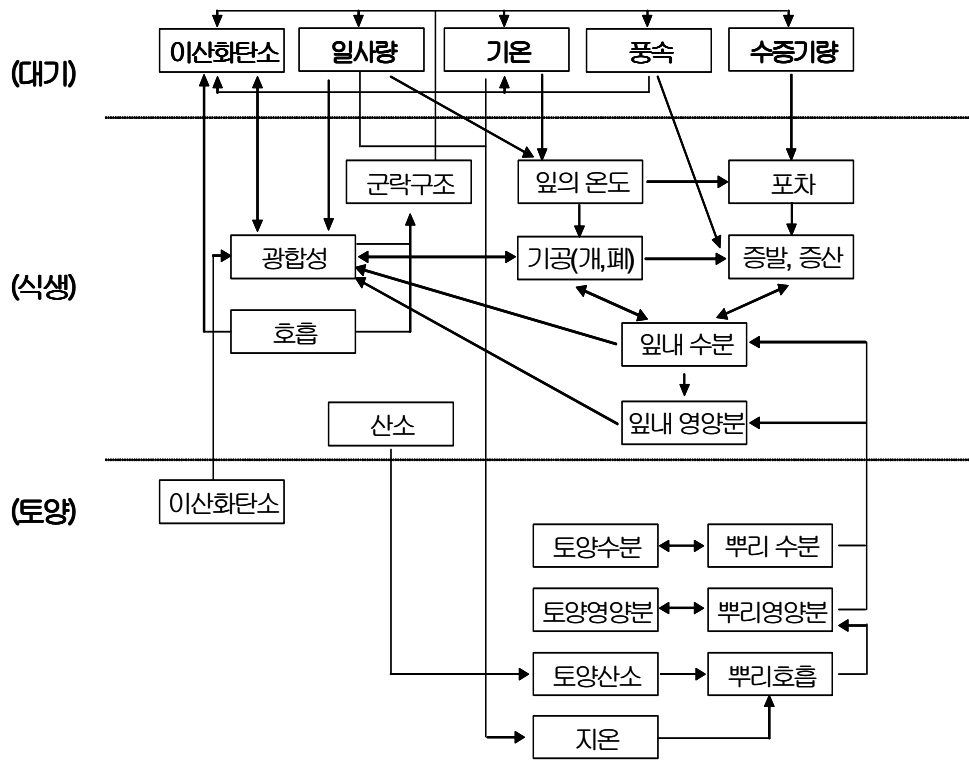


Fig. 2.6 Diagram of NEO-SPAM

(1) 식생개체의 성장방정식

누적 잎 면적지수와와의 관계는 용액중의 빛이 일반적으로 군락내부의 일사강도와 군락상단에서의 감쇠를 표시하는 Lambert-Beer의 7식으로 표시한다.

$$I = I_0 \exp(-KF) \quad \text{-----(7)}$$

여기에서 I : 군락내의 일사강도, I_0 군락위의 일사강도, K : 흡광계수(extinction coefficient), F : 누적 잎 면적지수이다. 군락 단위 개체에서 잎 길이와 잎 면적 관계를 나타낸 식8과 잎 면적과 건조

중량과의 관계를 나타낸 9식이 있으며 줄기와 단면적과 단위길이 당의 건조 중량은 식 10으로 표시할 수 있다.

$$(leaf\ area) = 4.3004e^{0.0616 \cdot (leaf\ length)} \quad \text{-----}(8)$$

$$(R^2 = 0.8661)$$

$$(leaf\ drymatter) = 0.0028 \cdot (leaf\ area)^{1.1815} \quad \text{-----}(9)$$

$$(R^2 = 0.9456)$$

$$(stem\ drymatter/cm) = 2.9924 \cdot (cross - sectional\ area\ of\ stem) \quad \text{---}(10)$$

$$(R^2 = 0.8232)$$

토양권에서 뿌리(지하줄기, 뿌리)의 수분흡수량은 식 11로 표시할 수 있다

$$S = \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^b \xi \cdot I(\psi_s - \psi_r) \quad \text{-----}(11)$$

θ : 토양수분량, θ_s : 포화토양수분량, ξ : 뿌리막 침투율, I : 뿌리 밀도, ψ_s : 뿌리 표면의 수분 potential, ψ_r : 토양의 수분 potential, b : 정수(토양구조의 표면적 / 체적의 비)

$(\psi_s - \psi_r)$: 수분 potential 차

$$PR = AL_{leaf} + AL_{stem} + AL_{rhizome} + AL_{root} \quad \text{-----}(12)$$

$$AL_{leaf} = 0.345 PR, AL_{stem} = 0.325 PR, AL_{rhizome} = 0.252 PR, AL_{root} = 0.078 PR \quad (13)$$

(2) 토양계 방정식

지하부 토양에서 수분의 시간적 이동변화는 식 14와 같으며, 15식은 그 속에서의 영양염류 이동을 수식화적으로 표현한 것이다.

17식인 기체(산소)의 확산은 식 16를 이용하여 18,19, 결과적으로 20식으로 표현하였다.

$$C_c \frac{\partial \psi_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_c \frac{\partial(\psi_s + z)}{\partial z} \right) - \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{2/3} \xi \cdot l(\psi_s - \psi_r), \quad \partial \theta / \partial \psi_s = C_c \quad (14)$$

ψ_s : water potential in soil(cmH₂O), ψ_r : water potential in plant(cmH₂O),

θ : water content(cm³/cm³), ξ : water absorbing rate per unit root length(cm/s), l : root density

$$C_c \frac{\partial(\theta \cdot N_s)}{\partial t} + u_{sw} \frac{\partial(\theta \cdot N_s)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial(\theta \cdot N_s)}{\partial z} \right) - \left\{ N_s \theta \cdot \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{2/3} \xi \cdot l(\psi_s - \psi_r) + \beta \left(\frac{O_s}{O_M + O_s} \right) A_{rr}^{(r_s-20)} G - \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{2/3} \xi_N \cdot l(\theta_r \cdot N_r - \theta \cdot N_s) \right\} \quad (15)$$

N_s : nutrient concentration in soil(g/cm³·H₂O) N_r : nutrient concentration in root(g/cm³·H₂O)

$$O_s = O_{sl} \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{2/3} + O_{sa} \left\{ 1 - \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{2/3} \right\} \quad (16)$$

$$a_l \frac{\partial(\theta \cdot O_{sl})}{\partial t} + u_{sl} \frac{\partial(\theta \cdot O_{sl})}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_l \frac{\partial(\theta \cdot O_{sl})}{\partial z} \right) + K_{ae}(\theta \cdot O_{sl\max}(O_{sa}) - \theta \cdot O_{sl}) - use[f(O_s, T_s)] \quad (17)$$

$$a_a \frac{\partial((\theta_s - \theta) \cdot O_{sa})}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_a \frac{\partial((\theta_s - \theta) \cdot O_{sa})}{\partial z} \right) - K_{ae}(\theta \cdot O_{sl\max}(O_{sa}) - \theta \cdot O_{sl}) - USE[f(O_s, T_s)] \quad (18)$$

$$D_a = a_a \tau D_{Ga} = D_0 \frac{P_0}{P} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1.71} \quad (19)$$

$$\text{USE}[f(O_s, T_s)] = \alpha_{\text{root}} \left(\frac{O_s}{O_M + O_s} \right) \cdot \text{Arr}^{(T-20)} \cdot G_{\text{root}} + \alpha_{\text{bacteria}} \cdot \left(\frac{O_s}{O_M + O_s} \right) \cdot \text{Arr}^{(T-20)} \cdot G_{\text{bacteria}}$$

-----(20)

(3) 식생계 방정식

잎간 수분이동에서 흡수는 식 21로, 증산은 식 22식과 같으며, 줄기간 영양염류 또한 23, 24식과 같이 표현 가능하다. 식생의 잎면 대사활동에서는 25식의 열 수지와 식 26의 일사강도가 큰 영향을 미친다.

$$C_{PW} \frac{\partial \psi_r}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{PW} \frac{\partial(\psi_r + z)}{\partial z} \right) - k_H S(H_s(T_L) - H) / \rho_w \quad [y > 0] \quad \text{-----}(21)$$

$$C_{PW} \frac{\partial \psi_r}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{PW} \frac{\partial(\psi_r + z)}{\partial z} \right) - \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{2/3} \xi \cdot l(\psi_s - \psi_r) \quad [y < 0] \quad \text{-----}(22)$$

ψ_s : water potential in soil(cmH₂O) , ψ_r : water potential in plant(cm H₂O), θ : soil water content(cm³/cm³)

$$C_{PN} \frac{\partial(\theta_r \cdot N_r)}{\partial t} + u_r \frac{\partial(\theta_r \cdot N_r)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta_r D \frac{\partial(N_r + z)}{\partial z} \right) - \text{use} \quad [y > 0] \quad \text{--}(23)$$

$$C_{PN} \frac{\partial(\theta_r \cdot N_r)}{\partial t} + u_r \frac{\partial(\theta_r \cdot N_r)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta_r D \frac{\partial(N_r + z)}{\partial z} \right) + \text{uptake} \quad [y < 0] \quad \text{--}(24)$$

N_r : nutrient concentration in root (g/cm³·H₂O)

$$\rho_s C_s \frac{\partial T_L}{\partial t} = R_s(z) - 2\sigma T_L^3(T_L - T_a) - \rho C_p k_T u(T_L - T_a) - L \rho k_H u(H_s(T_L) - H) \quad \text{--}(25)$$

$$R_s(z) = R_{s0} \cdot \exp \left(-k \cdot \int_z^h S(z) dz \right) \quad \text{-----}(26)$$

(4) 대기계 방정식

대기의 흐름이 있는 지역에서 균락저항이 포함된 Navier-Stokes 방정식을 변형한 것으로 식물과 대기층과의 물질 · 에너지의 교환을 출입하는 항을 포함한 방정식계는 아래와 같다.

$$\text{열} : \frac{\partial T_a}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_T \frac{\partial T_a}{\partial z} \right) + k_T u S (T_L - T_a) \quad \text{-----}(27)$$

$$\text{수증기} : \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial H}{\partial z} \right) + k_H u S (H_s(T_L) - H) \quad \text{-----}(28)$$

$$\text{이산화탄소} : \frac{\partial C_a}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_C \frac{\partial C_a}{\partial z} \right) + k_C u S (C_L(R_s) - C_a) + R_c \quad \text{----}(29)$$

K_T, K_H, K_C 운동 확산 계수

$$K = \lambda^2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad \lambda = \frac{2\kappa^3}{CmS} \quad \text{-----}(30)$$

Bulk coefficient for heat transfer at the leaf surface $k_T = Re^{-1/2}$

Stomatal conductance for water vapor, CO₂ transfer (cm/s)

$$k_H = k_C = k_{H \max} O_p^{2/3} (u/u_{\max})^{1/2} \quad \text{-----}(31)$$

K : diffusion coefficient (cm²/s) S : leaf area density (cm²/cm³) T_a : air temperature(°C) H : absolute humidity(g/cm³) C_a : CO₂ concentration in the air (ppm) λ : mixing length(cm) κ :Karman constant(=0.4)

기공개폐정도 · 잎 내 이산화탄소 농도 식은 다음 32, 33, 34 식과 같다.

stomatal aperture

$$O_p = O_{p \max} \cdot f(R_s) f(T_L) f(\theta_L)$$

$$f(R_s) = R_s \times 10^4 / (144 + 0.77 \times R_s \times 10^4) + 0.2, \quad f(T_L) = 0.0175 \times T_L + 0.125,$$

$$f(\theta_L) = 0.5 \times (1 + \tanh(0.5 \times (\theta_L - 0.94))) \quad \text{-----(32)}$$

$$\text{CO}_2 \text{ concentration in stomatal} : C_L = f(R_s) = 500 \exp(-R_s \times 10^4 / 180) \quad (33)$$

$$\text{Stomatal aperture} : O_p = O_{p \max} \cdot f(T_L) f(\theta_L) \quad \text{-----(34)}$$

2.3 유출토사와 하안부 식생과의 관계

하안부에 서식하는 식생은 유선에 저항을 주어 토사를 침강시키거나 발생한 불규칙 소용돌이에 의해 토사를 하류까지 이동시키는 두 가지 기능을 가지고 있다. Fig. 2.7은 두 작용을 설명한 것으로 토사의 하류이동 작용은 수면에 국한된 것이며, 하안식생의 저항에 의한 유선 반대방향의 흐름과 소용돌이에 의해 유출된 토사가 침강하게 된다. 이때 발생한 소용돌이는 식생번성지역에만 국한된 것이 아니라 하안식생에서 벗어난 부분까지 영향을 미치게 된다.

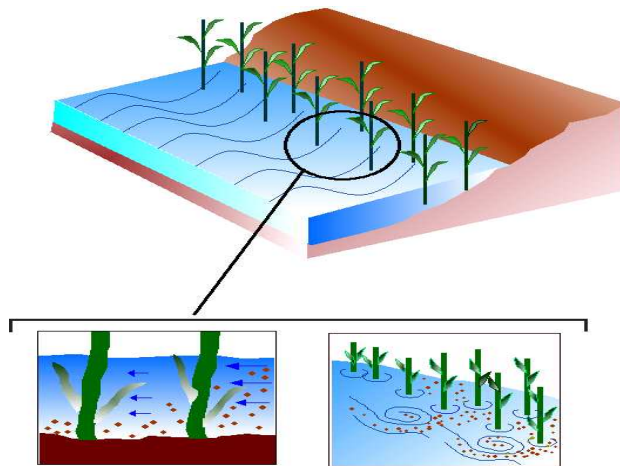


Fig. 2.7 Sedimentation and movement of he effluent in the river soil

2.3.1 하안의 수리적 구조

Fig. 2.8은 하천의 하안을 수로 중앙으로부터 둘로 나누어 한쪽의 수리적 구조를 도식화 한 것이며, J점을 중심으로 하안부를 정의한다[15],[16].

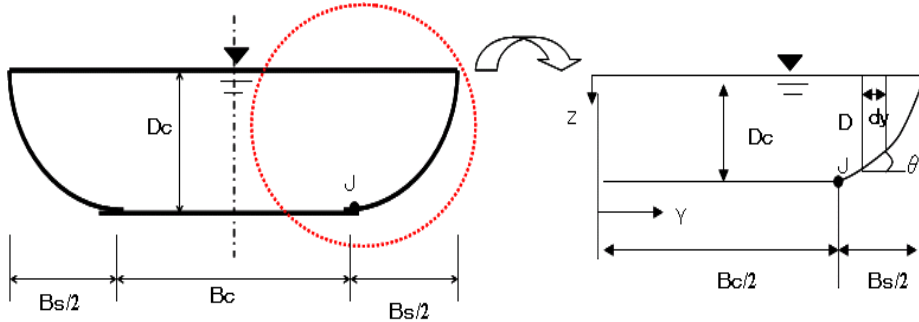


Fig. 2.8 Diagram of riverside

(1) 하안부의 횡단면형태

하천에 식생이 존재하는 경우 하천수로의 중앙부와 하안부로 분리하는 것이 가능하다, 하안부는 정적 안정한 상태이이고 이때 하안부의 저면 전단응력은 아래 35식과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\tau}{\cos \theta} = \frac{\rho C_f \bar{u}^2}{\cos \theta} = \rho g D S - D_r + \rho \epsilon_y \frac{d}{dy} \left(D \frac{d\bar{u}}{dy} \right) \quad \text{-----(35)}$$

$$D_r = \rho C_D (a / \cos \theta) D \bar{u}^2 / 2$$

여기서 D는 수심, Dc는 하천중앙의 수심이며, B는 전체 하천수로의 평형 폭, Bc는 중앙부분 수폭, τ는 저면전단응력, ρ는 물의 밀

도, g 는 중력가속도, S 는 종단면방향하상구배, θ 는 하상의 횡단방향경사각, ε_y 는 횡단방향으로의 운동량확산계수, D_r 은 식생 저항력, a 는 식생의 밀도를 표시한 매개변수, d 는 식생의 직경, x, y 는 식생간격이다. 35식을 하도중앙의 값을 이용하여 다음과 같이 무차원화 할 수 있다.

$$\frac{\sigma}{\cos \theta} = s - \frac{\chi s \phi^2}{\cos \theta} + \nu \frac{d}{d\eta} \left(s \frac{d\phi}{dy} \right) \quad \text{-----}(36)$$

여기서 $\sigma = \tau / \tau_c$, $s = D / D_c$, $\nu = \varepsilon_y D_c / [C_f \bar{u}_c (B_s / 2)^2]$, $\phi = \bar{u} / \bar{u}_c$, $\eta = (2y - B_c) / B_s$ 에서의 \bar{u} 는 수심평균의 하천유속이며, C 는 하도중앙부에서의 값의 표시이다. 또한 $\chi = C_D a D_c / (2C_f)$ 이며 $\sigma = \phi^2$ 관계를 이용하여 37식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\sigma}{\cos \theta} = \frac{s}{1 + \chi s} \quad \text{-----}(37)$$

한편 Lane에서 도입한 정적 평형상태에서 하안부 형태의 식 38을 무차원한 결과 39 식을 얻을 수 있다.

$$\left(\frac{\delta}{\delta_c \cos \theta} \right)^2 + \left(\frac{1 + \mu\beta}{\mu} \right)^2 \left(\frac{dD}{dy} \right)^2 = \left(\frac{1 + \mu\beta}{\mu} - \beta \frac{\delta}{\delta_c \cos \theta} \right)^2 \quad \text{-----}(38)$$

$(B_c / 2 \leq y \leq B / 2)$

$$\text{-----}(39)$$

여기서 $\delta = \tau / \rho g S$, $\delta_c = \tau_c / \rho g S$, β 는 토사입자의 운동 양력계수와 저항계수의 비이며, $\lambda = (2D_c / B_s)^2$, $r = \mu\beta$ 이다. 여기서 식 37과 38을 대입하여 s 를 구하고 $\chi \geq 1$ 일 경우 식생이 존재하는 횡단형태는 다음

40식과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & (\Theta^2 - 1 - \chi\Omega\Theta) \cosh^{-1}\left(\frac{\Theta^2 - 1}{\Omega} s + \Theta\right) \\
 & + \chi\Omega \sinh\left\{\cosh^{-1}\left(\frac{\Theta^2 - 1}{\Omega} + \Theta\right)\right\} \\
 & = -\lambda^{-1/2} \frac{\mu}{\Omega} (\Theta^2 - 1)^{3/2} \eta \\
 & + (\Theta^2 - 1 - \chi\Theta\Omega) \cosh^{-1}\{\chi(1 + \Theta) - 1\} \quad \text{-----(40)} \\
 & + \chi\Omega \sinh[\cosh^{-1}\{\chi(1 + \Theta) - 1\}]
 \end{aligned}$$

여기서 λ 와 A_2 는 식 41과 같이 표현할 수 있다.

$$\lambda^{1/2} = -\mu(\Theta^2 - 1)^{3/2} / A_2 \quad \text{-----(41)}$$

결국 하안부의 안정 횡단 형태는 식 42와 같이 직선적으로 변화한다[9][17][19].

$$\begin{aligned}
 A_s = & \Omega(\Theta^2 - 1 - \chi\Omega\Theta) [\cosh^{-1} \Theta - \cosh^{-1}\{\chi(1 + \Theta) - 1\}] \\
 & + \chi\Omega^2 [\sinh(\cosh^{-1} \Theta) - \sinh\{\cosh^{-1}(\chi(1 + \Theta) - 1)\}] \quad \text{-----(42)}
 \end{aligned}$$

(2) 식생이 있는 하천의 횡단방향 유속분포

식생이 없는 중앙부분과 식생이 있는 하안부분에 관한 운동량 균형식은 식 43과 같다.

$$\rho C_f \bar{u}^2 = \rho g D_c S + \rho \epsilon_y d^2 \bar{u} / dy^2 \quad \text{-----(43)}$$

$$\rho C_f \bar{u}^2 / \cos \theta = \rho g D_c S - \rho C_D a D \bar{u}^2 / (2 \cos \theta) + \rho \epsilon_y d (D d \bar{u} / dy) / dy \quad (44)$$

위와 같이 무차원 조작성을 하면 식 45,46과 같다.

$$1 + v d^2 \phi / d \eta^2 - \phi^2 = 0 \quad \text{-----(45)}$$

$$s + \nu d(sd\phi/d\eta)/d\eta - (1 + \chi s)\phi^2 = 0 \quad \text{-----(46)}$$

45, 46식은 무차원 수심 s 가 섭동매개변수 \sqrt{x} 에 대해 식 48과 같이 전개할 수 있다[15].

$$\phi = \phi_0 + \nu^{1/2}\phi_1 + \dots \quad \text{-----(47)}$$

$$\phi_0 = 1, \phi_1 = \tilde{C}_0 \exp(\sqrt{2}p) \quad \text{----- (48)}$$

Ⅲ 현지관측 및 배양실험

홍수시 물질수송과 둔치 토양환경의 관계를 파악하기 위하여 상류에서 토사 수송과 퇴적기능 구조, 그리고 토사와 둔치 식생의 번성과의 관련성을 파악하기 위하여 현지관측을 하였으며, 둔치 토양의 물리·화학적 특성과 식생 번성과의 관련성을 해명하기 위하여, 현지관측에서 나타난 제한 인자를 바탕으로 실험실 배양 실시하였다

3.1 관측항목 및 방법

3.1.1 관측지 개요

현지관측은 일본 타마가와 하구로부터 58~59km 떨어진 지점에서 실시하였다(Fig. 3.1, Fig 3.2). 본 하천은 4년을 주기로 대규모 홍수가 발생, 지형 및 식생의 천이가 활발히 일어나고 있는 곳으로 식생 성장과 영양염 흡수에 관한 변화 파악을 위하여 식생의 성장 기간은 2003년 4월부터 10월까지 관측을 실시하였다. 평수시 상류 발전 유량과 하천 유지수에 의해 유량 15~20m³/s(평균 유속 30~50cm/s), SS 농도 10mg/l 정도 이었다. 하천의 좌안(100m)과 우안(150m)에 둔치가 국지적으로 형성되어 있으며, 전장 138km, 유역면적 1,240km², 유역평균연간 강수량 1,400mm, 관측지 하상구배 1/140으로 본 현지관측에서는 하천 수변에 생육하는 대표적 식생

인 *Phragmites japonica* Steud(이하 : P.japonica로 표기)의 동태를 파악 하였다. 이론적 고찰에서의 NEO-SPAM을 기초로 하여 성장 관련 대기-식생-토양계 각각의 상호관련을 파악하고, 영양분 흡수 과정과 저장 및 이용실태에 따른 위치별 성장변화 파악을 실시하였다. P.japonica의 생활사는 춘계에 발아하여 초기성장기간을 거치며, 겨울철 지하줄기에 저장되어있던 물질을 이용하여 잎과 줄기의 생장이 일어나고, 하계 광합성에 의하여 활발한 생산 활동을 하며 새로운 지하줄기를 생성시킨다. 8월 이후 동시에 줄기와 잎의 생장이 중지되며 추계부터 고사가 일어나기 시작하며, 12월까지 잎·줄기의 고사가 끝나며 일부의 물질이 다시 지하줄기에 저장 된다. 동계는 월동기로 광합성 생산은 일어나지 않으며 식생 자체의 호흡만이 일어나는 시기로 생체감소가 이어지고, 지상부의 생체는 고사 후 분해에 의한 질소와 인이 토양으로부터의 순환이 일어나게 된다[7].

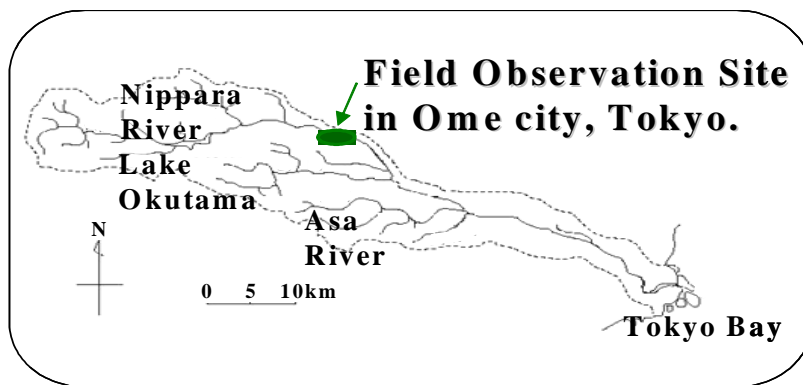


Fig. 3.1 The location of field observation

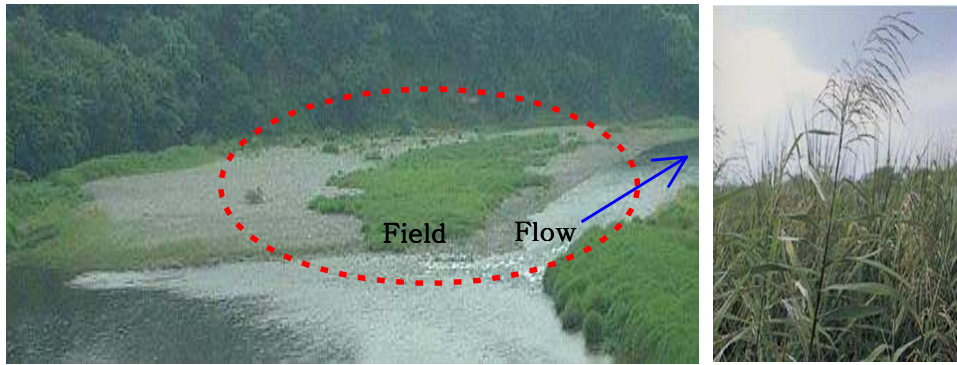


Fig. 3.2 Field observation and P.Japonica

3.1.2 관측방법

현지관측에서 실시한 관측항목은 지형, 수질, 식생, 둔치토양 등의 4가지로 구분하였으며, 측정항목 및 모식도는 Table 3.1과 Fig. 3.3에 나타내었다.

Table 3.1 Observation items

관측항목	측정항목
지형측량	위치측량, 수준(水準)변화 측정
하천·지하수 수질조사	영양염(N,P), 하천유량변화, 수위변화
식생조사	전체영역조사 : 바이오메스 번성 경계영역조사 : 성장량, 일사량과 성장과의 관계
토양조사	입자분포, 영양염 보유량

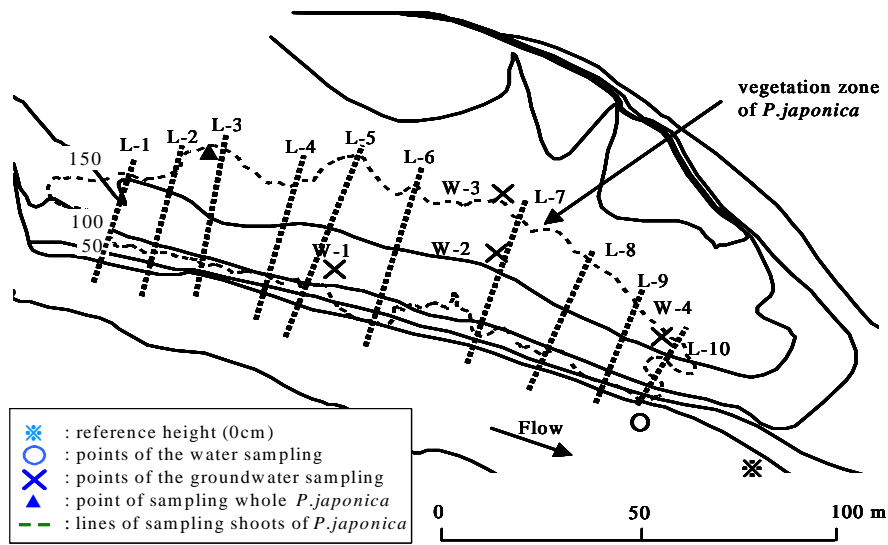


Fig. 3.3 Diagram of field observation site

(1) 지형

지형측량은 현지관측 결과의 정리·분석에 중요한 자료이며, 식생의 영양염 흡수와 성장관련 수치해석에 기초적 자료가 된다. 본 관측지는 2003년 5월 DGPS((주) SOKIA)를 이용하여 관측대상 영역의 지형을 측량하고 측량지점의 단위는 횡단방향의 21측선을 설치, 각 측선에 대하여 10개의 선을 선정하였다. 특히 수준(水準)의 급격히 변화하는 점 등의 간격을 최소화 하였다. 하천수위를 기준으로 하여 50cm간격으로 지형을 구분하여 표시하였다.

(2) 수질조사

하천과 지하수 수질은 관측기간 동안 1주일 간격으로 채수하였고, 채수지점은 Fig. 3.3에 표시하였다. 지하수 채수를 위하여 약 2m 깊이의 관정을 설치하였고, 수동펌프를 이용하여 채수 하였다. 시료수를 직경 1.2 μ m의 필터로 여과하고 용존 상태의 암모니아성 질소(NH₄-N), 아질산성 질소(NO₂-N), 질산성 질소(NO₃-N) 및 인산염인(PO₄-P)의 농도를 분광광도계((주)BRAN+LUEBBE)를 이용하여 분석하였다.

지하수 수위변화를 측정하기 위하여 W-3점에 메모리식 수위계를 설치하여 수위변화가 심할 것으로 예측된 6월2일부터 3개월간 10분 간격으로 측정하였다. 하천의 유량변화는 측정지점에서 13km 상류에 위치한 발전소의 자료를 이용하였다.

(3) 식생조사

1) 영역조사

식생의 성장은 주변지형(미지형)과 주변 환경의 차이에 의하여 차이가 있기 때문에 관측기간 중 총 4회(2003년 4월28일, 6월2일, 7월15일, 9월2일)에 걸쳐 식생군락 영역을 조사하였다. 또한 시기 별 각 지점을 대표하는 평균크기의 식생을 채취하여 항온장치(120 $^{\circ}$ C, 48h)를 이용, 건조 후 뿌리, 지하줄기, 지상줄기, 잎 등 기관별 건조중량을 측정하였다. 측정 후 각 지점의 평균값을 취하여 그

지점별 바이오메스의 자료로 활용하였다.

2) 경계지점 조사

관측지역 중 지하수 채수영역 주변 식생 천이와 군락변화가 일어나지 않는 범위내에서 50cm×50cm 경계영역을 지정하여 식생의 성장변화를 관측하였다. 조사기간은 6월16일에서 8월13일까지 이며 조사항목은 경계지점내의 잎 면적변화, 줄기, 경사각과의 관계를 조사하였다.

3) 식생 성장량 조사

잎과 줄기의 조사에서는 경계지점 지점 조사의 각각의 길이와 폭의 변화를 확인하기 위하여 지하수 옆의 샘플을 채취하여 영상 해석을 통하여 면적을 계산하고 길이변화와 면적의 관계를 확인하였으며 항온장치에서 건조 후 건조 중량을 산출하였다. 또 잎과 지평면과 이루는 경사각의 영향을 확인하기 위하여 경사도와 높이를 측정하였다.

뿌리계(뿌리+지하줄기) 조사에 있어서는 지하부의 뿌리와 지하줄기의 토양층별 구성관계를 알아보기 위하여 경계지점의 토양을 10cm 깊이로 60cm까지 채취하여 각 층별 구성기관을 분리·건조하여 확인하였다.

P.japonica의 기관별 구성물질의 조성을 파악하기 위해 기관별 질소(T-N), 인(T-P), 탄소(T-C)의 보유량을 분광광도계(

(주)BRAN+LUEBBE) · TOC-SSU((주)SHIMADU)를 이용하였으며, 생산 또는 이동중인 물질, 저장물질을 정확히 구분하는 것이 불가능하기에 전체 물질조성을 이용한 간접적인 값을 확인하였다.

(4) 토양조사

둔치표층토양의 입도와 영양염의 구성분포를 확인하기 위하여 10월24일 경계지점 토양의 표층에서 10cm와 10cm~20cm까지의 두 층으로 구분하여 채취하였다. 채취시킨 뒤 토양 시료를 항온장치에서 2일간 건조 후 방냉하여 mesh간격 75mm 이상, 75mm, 37.5mm, 19mm, 9.50mm, 4.76mm, 2.38mm, 1.18mm, 600 μ m, 300 μ m, 150 μ m 이하의 미립자 등 11단계로 구분하여 중량을 측정하였다. 영양염 분석은 모래층으로 구분되는 2.38mm 이하의 입자들을 분석하였다.

입자의 영양염 보유량은 토양입자의 표면적과 밀접한 관계를 가지기 때문에 동일한 중량에도 입경이 작을수록 표면적이 증가하는 경향으로 나타났다. 각 입경별 영양염 보유량을 측정한 뒤에 그 입도의 질량백분율과 영양염의 보유량을 계산하였고, 각 지점별 단위면적당 · 단위질량면적당 보유량도 계산하였다.

3.1.3 관측결과 및 고찰

(1) 하천수 · 지하수의 수위 및 수질 변화

관측기간 중의 하천 유량과 지하수(W-3)의 변화는 Fig. 3.4와

같으며, 지하수 지점별 수위변화는 Fig. 3.5에 나타내었다. 유량변화는 평수시 춘계 7~11m³/s, 하계 9~14m³/s 변화범위를 가졌으며 8월8일~9일까지 태풍(2003년 10호)에 의한 최대 93m³/s, 장마시기였던 8월15일~17일에는 198m³/s가 기록되었으며, 이때 본 관측지의 일부가 침수되었다.

지하수위 변화와 관련하여 둔치중앙부(W-3)의 지하수위와 하천 유량변화에 대한 밀접한 관련성이 있음을 알 수 있었다. 관측지점별 지하수위의 변화는 약간의 차이를 보였으며, 저수로에서 떨어질수록 차이가 커지는 것을 알 수 있었다.

저수시 : 유량 Q=10-20m³/s, 하도폭 W=30m, 수심 = 0.5m

고수시 : 유량 Q=300m³/s, 하도폭 W=100m, 수심 = 1.5m

Fig. 3.6은 하천수와 지하수의 영양염 농도의 변화를 표시하였다. 하천의 질소와 인의 농도는 지하수의 농도와 밀접한 관련이 없는 것으로 파악되었으며, 아질산성 질소는 P.japonica의 생장이 활발한 시기에 높은 값을 나타내었다(W-1,W-2). 나지에 근접한 W-3에서는 약간의 다른 경향을 보였고, 동계에서 춘계, 하계를 거치면서 암모니아성 질소가 증가하는 것이 관측되었다. 이것은 기온상승 등의 요인으로 생각되어지지만, 식물과 미생물에 의한 토양 중의 pH가 상승하고, 산성토양에 의한 가능성도 있다.

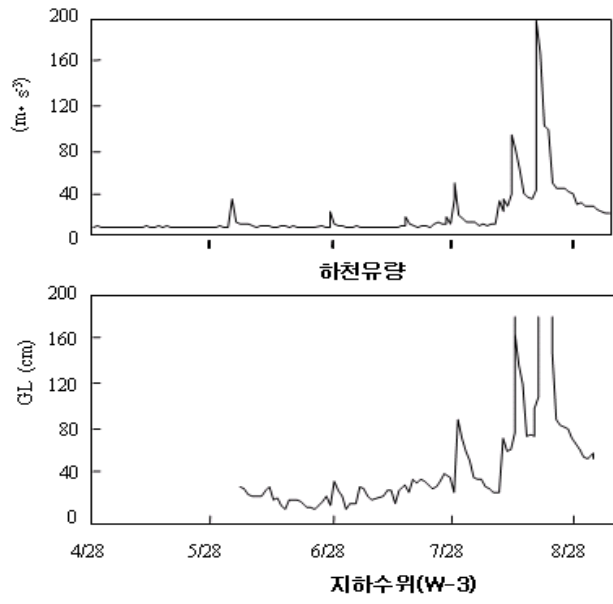


Fig. 3.4 River flow and ground-water level

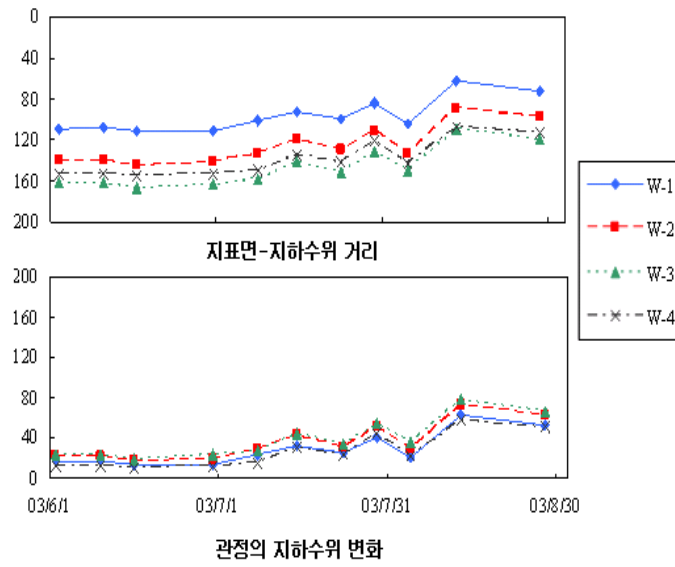


Fig. 3.5 Range of ground water level

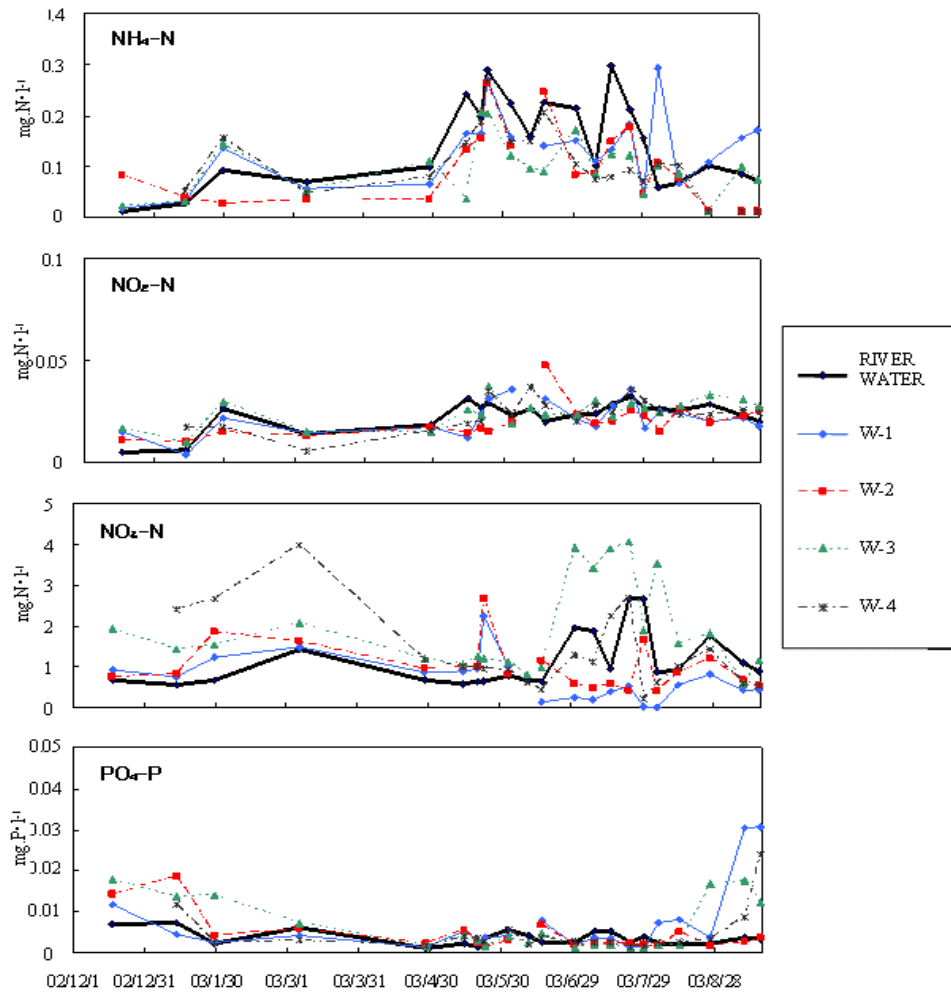


Fig. 3.6 Nutrient concentrations of river water and ground-water

(2) 식생분포와 지형별 성장

1) 영역조사

P.japonica 군락의 지상부 높이, 기관별 건조중량 변화를 Fig. 3.8 에 나타내었으며, 성장과 관련하여 저수로 부근에 서식하는 식생이 지하수 흐름(지표에서 깊이 75cm 이상에 존재하는 흐름)의 영향을 받은 산소부족현상으로 성장저하가 나타나는 것으로 생각된다. 이것은 결국 수변의 P.japonica는 지하부로 생산물의 분배가 작고 지상부의 저장기관에 광합성 생산물질을 분배하는 것으로 생각된다. 성장한 뿌리의 일부가 토양수분이 비정상적으로 높은 영역에 진출하고 그 뿌리주변에 산소부족현상이 발생하여 나타난 것이며, 이 상태에서 장기간 노출될 경우 대사활동의 저하가 일어난다. 결국 뿌리의 호흡농도가 식생의 성장과 관련하여 깊은 관계가 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 3.7은 지상부와 지하부의 바이오메스의 건조량 변화와 Table 3.2는 기관별 구성 비율을 나타낸 것으로, 각각의 기간에 채취한 P.japonica 샘플 개체를 지상부 잎-줄기/지하부 줄기의 건조중량비를 비교한 결과 6월17일에 2.06과 8월27일에 2.03으로 나타났다으므로 대략 일치하는 값을 얻었다.

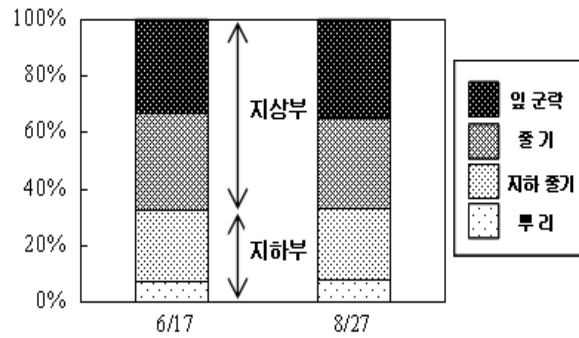


Fig. 3.7 Dry weight ratios of each organ

Table 3.2 Weight percent of main components in each organ

	잎	줄기	지하줄기	뿌리
T-C (%)	40	38	44	41
T-N (%)	1.16	0.40	0.31	0.82
T-P (%)	0.18	0.17	0.04	0.11

2) 경계지점 조사

잎 면적당의 연직분포변화를 단위연직방향높이 당 잎 면적분포와 잎 면적백분율 분포를 Fig. 3.9, 3.10, 3.11에 표시하였다. 잎의 길이와 면적 건조중량과의 관계는 비례하는 것으로 조사되었으며, 잎 경사각과 상대높이와의 관계에서 높은 위치에 있는 잎이 높은 경사각을 유지하고 있었다.

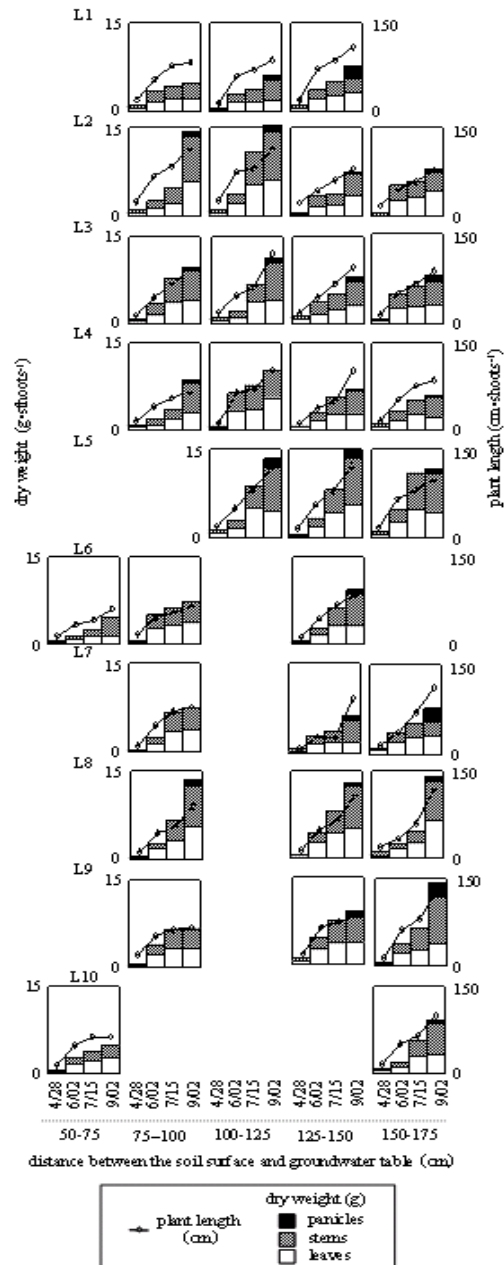


Fig. 3.8 Average growth rate per shoot of *P. Japonica* in the vegetation zoon (Compared with the distance between the soil surface and ground-water table)

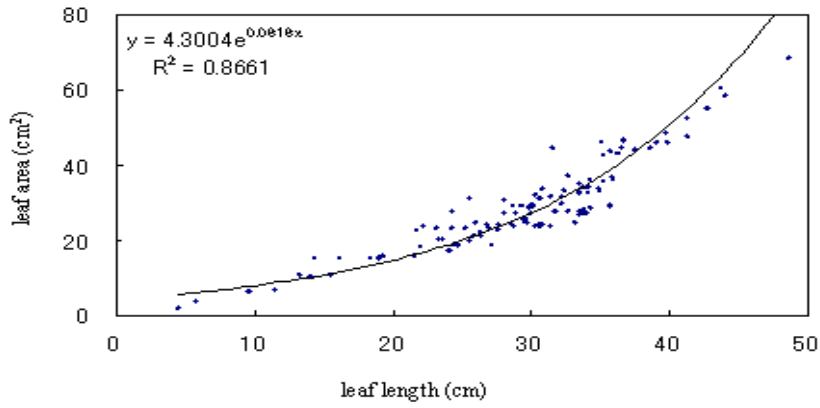


Fig. 3.9 Relations of leaf area and leaf length

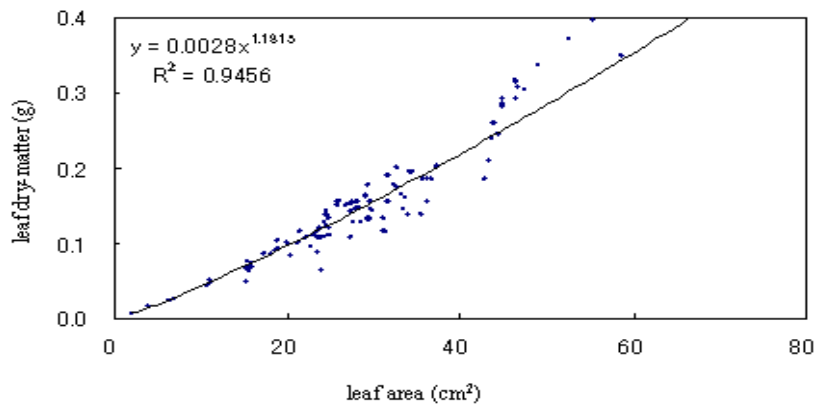


Fig. 3.10 Relations of leaf dry-matter and leaf area

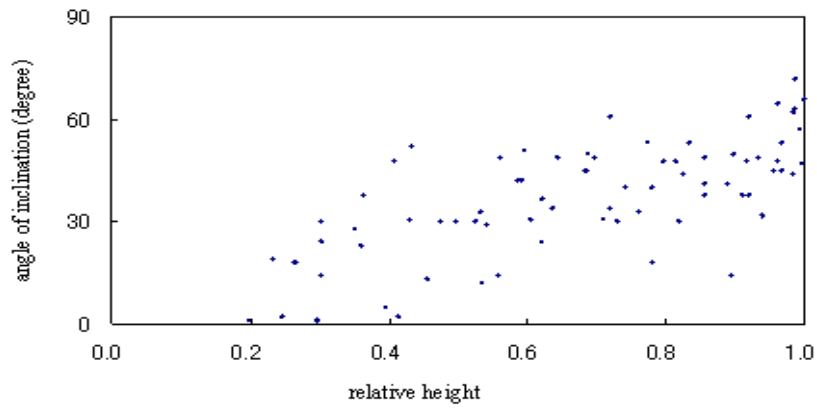


Fig. 3.11 Relations of angle of inclination and leaf height

(3) 식생생장량

일사광도 계산에서는 Lambert-Beer의 식을 이용하였고, Fig. 3.12에 군락구조와 일사강도를 표시하였다. 높이를 기준으로 일사량과 잎 면적과의 관계는 반비례하는 것으로 나타났다.

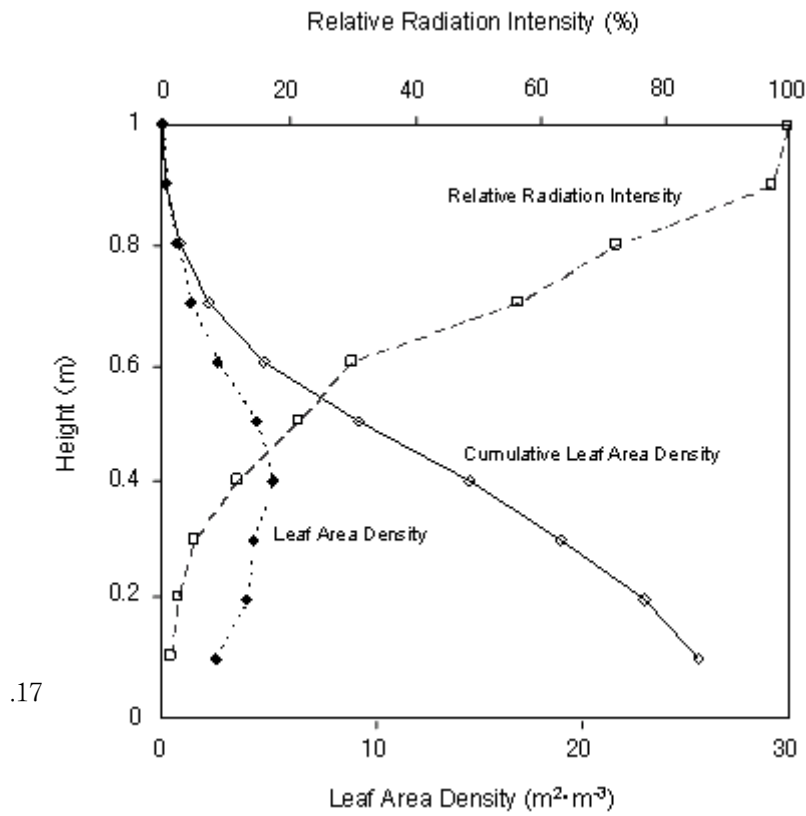


Fig. 3.12 Plant community and relative radiation intensity

(4) 토양입도 및 영양염 함유량

Fig. 3.13은 각 지점토양별 0~10cm, 10~20cm의 입도분포를 나타내었다. 각 지점의 평균적 입도는 확연이 나타나지 않았으나, 0~10cm 구간에서 미세 입자분포가 더 크게 나타났다. Table 3.3은 각 위치별 T-N과 T-P의 농도를 표시하였다. 식생 서식지역에서 확연히 높은 농도로 나타났으며, 식생이 서식하지 않는 W-3의 경우 낮은 농도로 나타났다. Fig 3.14는 관측기간 전체에 걸쳐 P.japonica의 C, N, P 흡수량을 나타낸 것이다. 장마기간과 홍수기간인 6~7월에는 낮은 수치의 흡수량으로 나타났으며, 수로측의 저산소 토양지역의 식생의 흡수율은 낮음을 알 수가 있었다.

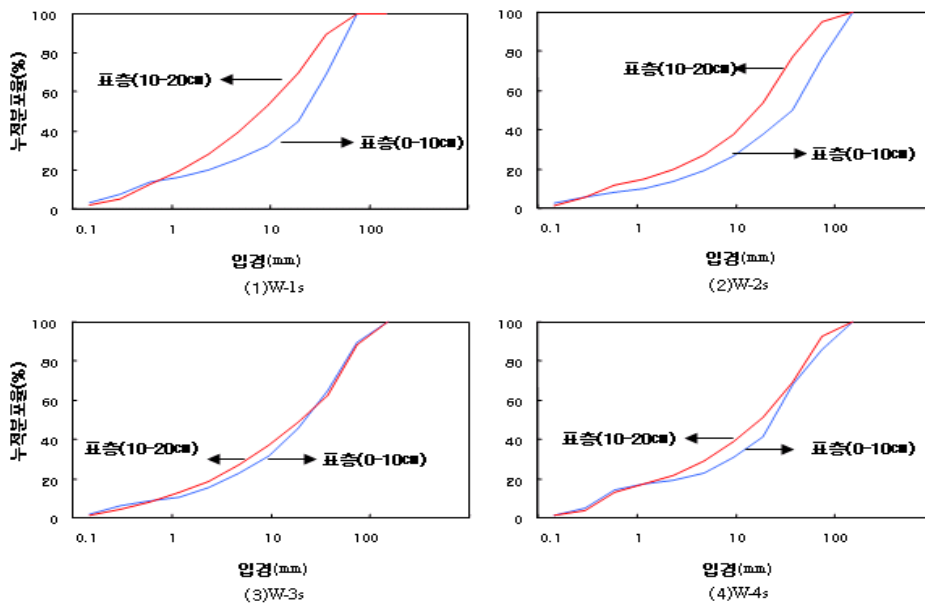


Fig. 3.13 Grain size of the outer layer (0~10cm, 10~20cm)

Table 3.3 Concentrations distribution of the nutrient in soil

위 치		T-N (mg/l)	T-P(mg/l)
W-1	0-10cm	4.99	0.305
	10-20cm	5.50	0.534
W-2	0-10cm	6.58	0.489
	10-20cm	5.26	0.330
W-3	0-10cm	2.62	0.233
	10-20cm	2.89	0.230
W-4	0-10cm	4.00	0.389
	10-20cm	4.34	0.372

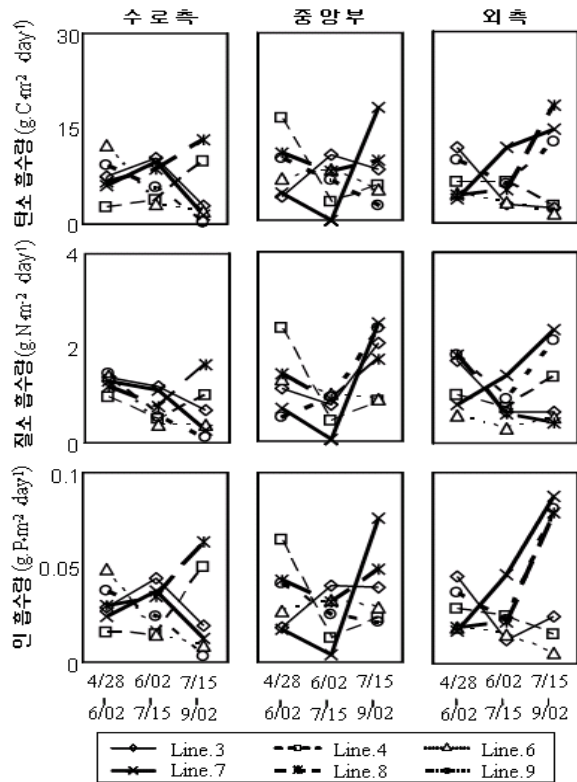


Fig. 3.14 Change of nutrient absorption(C,N,P)

3.2 배양실험

P.japonica의 성장에 있어서 뿌리의 영양염 흡수구조와 호흡의 영향을 파악하기 위하여 관측지에서 채취한 P.japonica를 이용 배양실험을 실시하였다. 평균적으로 둔치지역의 토양에서는 저산소 영역의 지점에서 성장이 감소하는 것으로 관측지 조사결과 확인되었기 때문에 저 산소 농도 하에서 뿌리의 호흡량 동태를 조사하였다. 또 관측지에서의 토사분석결과 타 영양염에 비하여 질소가 상대적으로 낮은 수치를 지니고 있는 것으로 관측되어 질소 농도를 변화시키면서 배양실험을 하였다..

3.2.1 영양염류 흡수실험

실험은 성장단계가 다른 기간을 선택하였으며, 실험은 우천과 풍속의 변화가 심하지 않은 6월29~29일과 8월29일~30일 2회 실시하였고, 각 실험실시일의 기상조건(기온, 습도)변화는 Fig. 3.15에 나타내었다.

Table 3.4 Concentrations of NO₃-N in the culture solution

Treatment	NO ₃ -N(mg/ℓ)	NO ₃ -N(μ mol/ℓ)
1	1.201	100
2	3.603	300
3	12.01	1000

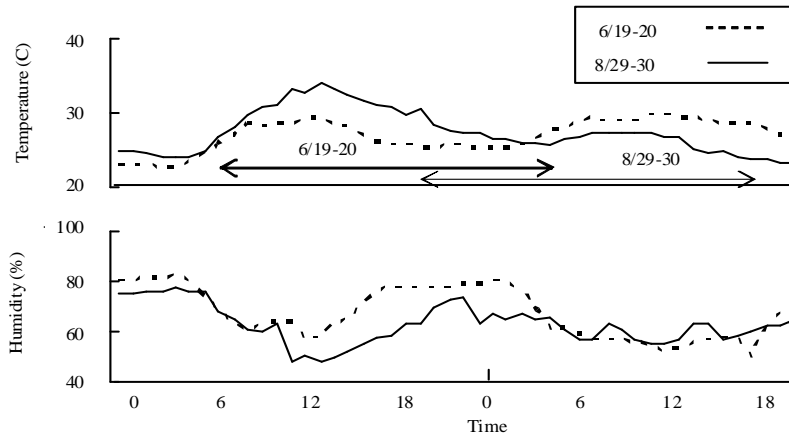


Fig. 3.15 Meteorological phenomena in a experiment period

Fig. 3.16은 실험장치의 모식도를 나타내었다. 가로65cm 세로45cm의 공간에 수온 25℃로 유지조건에서 각 배양액량은 2ℓ로 하였으며, 실험 중 증산을 통한 증발을 막기 위하여 배양액 상층을 밀폐하였다.

식물성장에 필요로 하는 무기영양분 중에서도 질소는 클로로필, 핵산의 중요한 조성성분의 하나이며, 그 중 바이오메스의 증가는 질소의 공급량에 따라 제한되기 때문에 용존성 질소의 농도를 Table 3.4와 같이 3가지로 구분하여 배양실험을 실시하였다. 4시간 간격으로 질소의 흡수량과, 증산량, 뿌리호흡량을 분석하였고 측정 후 배양액을 교환하여 24시간 연속 실시하였다. 질소호흡량에 관해서는 교환 전후 배양액중의 용존 질소 농도를 분광광도계로 측정하였고, 그 차이를 질소의 흡수량으로 계산하였다. 증산량은 배양액 교환 전후의 중량변화에서 산출하였고, 실험중의 생장에 의

한 *P.japonica*의 바이오메스 변화량은 현존량과 비교하여 극히 작은 값으로 나타났으므로 무시하였다. 다만 *P.japonica*내의 수분량은 실험기간 중에 충분한 수분이 공급되었기 때문에 수분에 의한 스트레스가 없는 것으로 판단하였다.

뿌리호흡에서 CO_2 배출과 용존성무기탄소(DIC)는 깊은 상관관계가 있기 때문에 배양액중의 DIC의 변화를 TOC로 측정하였고, 그 변화량에서 호흡량을 간접 계산하였다.

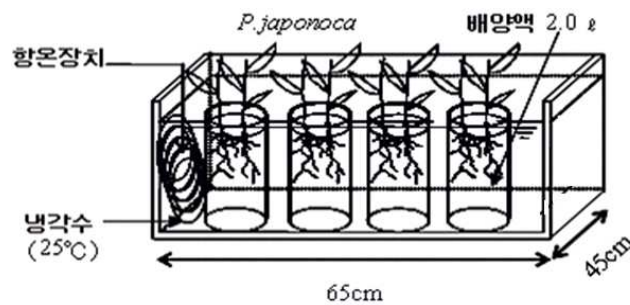


Fig. 3.16 Diagram of the hydroponics in this experiment

3.2.2 뿌리 호흡량 실험방법

Fig. 3.17에 뿌리 호흡 실험장치를 모형도를 표시하였다. 배양용액 중 용존산소량은 에어레이션장치를 이용하여 충분히 통기하였고, 포화상태까지 유지하였다. 초음파세척기를 이용하여 배양액속의 산소를 최소화 하였다. 실험은 배양액 중에서의 다른 용존산소 농도와 공기중에서 산소농도와의 관계를 알아보기 위한 것으로 향

온장치를 이용하여 온도를 20℃로 일정하게 유지하였다(Table 3.5). 배양액 중에서의 실험은 500ml용액의 배양액과 현지관측지에서 채취한 *P.japonica*의 뿌리를 넣고 실험 전후의 용액산소량과 용존 무기탄소량을 분석하였다 그 차이를 산소소비량과 뿌리호흡량이 같다고 판정하였으며, 또 용존산소 농도의 분석에서는 아지화나트륨 변법을 채용하였다. 대기중에서의 실험도 동등하게 500ml 용기에 표준 공기와 뿌리를 넣고 분석했다. 대기중의 산소수치는 높기 때문에 대기중 이산화탄소 농도의 변화를 blank와 대조 샘플의 상층을 밀폐한 후 측정하여 그 차이를 호흡량으로 하였다. 수산화나트륨 용액 0.025N를 용기 내에 첨가 대기 중의 CO₂를 녹게 하는 수법을 사용하여 가스량을 조사하였다.

Table 3.5 Roots experiment conditions

Liquid			
Treatment	Root (dry-gram.)	관측시간 간격 (hour)	초기 DO conc (mg/l)
1	1.67	3	9.99
2	2.31	3	9.41
3	2.03	3	8.83
4	2.33	3	7.92

Air			
Treatment	Root (dry-gram.)	관측시간 간격 (12h)	초기 DO conc (mg/l)
1	1.67	12	276
2	2.31	12	276

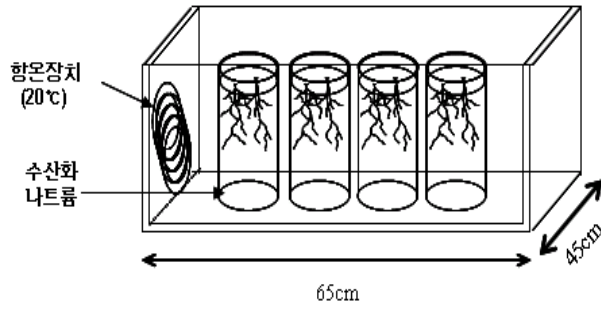


Fig. 3.17 Diagram of the roots in this experiment

3.2.3 결과 및 고찰

(1) 증산과정

Fig. 3.18과 같이 12시~16시 사이에 증산량이 최고치를 기록하였고, 배양액의 영양염의 농도와 6월과 8월의 비교에서도 큰 차이를 나타나지 않았다. 즉 증산량은 뿌리 주변 토양의 영양염류와 관계없이 일사량과 관계가 큰 것으로 확인되었다.

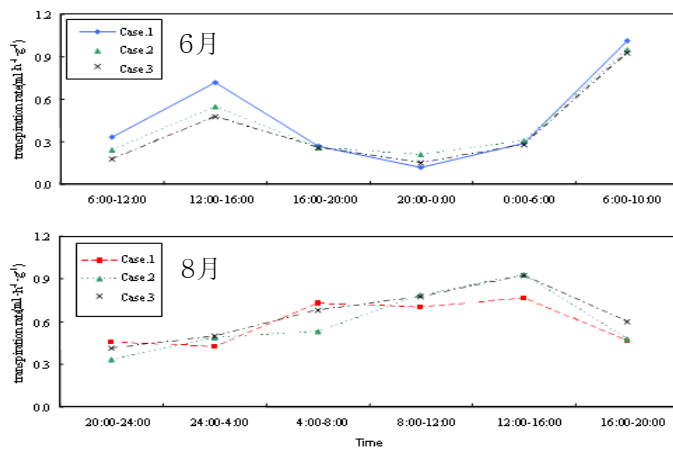


Fig. 3.18 Transpiration rate

(2) 호흡량 변화과정

샘플로 채취한 식생뿌리의 수명이 10일정도 이므로 시간변화에 고사되는 오차를 무시하고 뿌리 호흡량을 Fig. 3.19와 같이 6월의 경우 오전에 높고 오후로 가면서 낮아지는 것을 확인할 수 있었으며, 배양액의 질소농도가 높을수록 뿌리 호흡량은 큰 값을 가졌다. 8월의 경우 6월과 큰 차이를 보이고 있는 것은 생장이 종료되는 8월 중순부터 뿌리호흡이 정지했기 때문으로 생각되어진다.

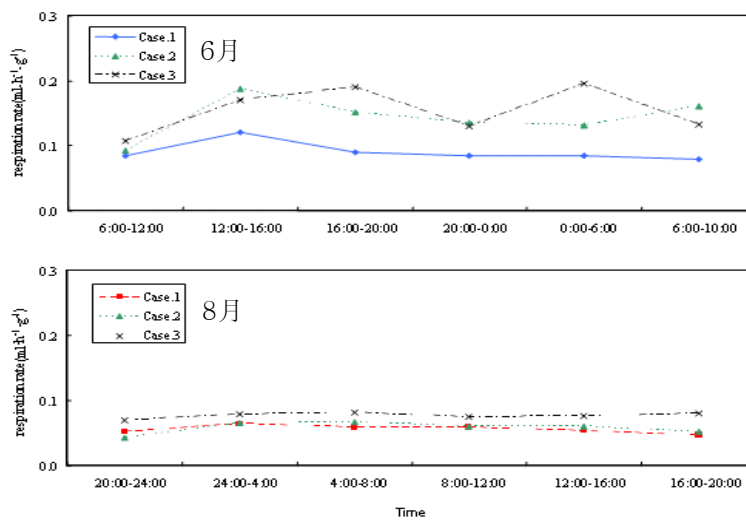


Fig. 3.19 Respiration rate

(3) 영양염 흡수과정

Fig. 3.20은 영양염(질소)의 흡수량을 나타낸 결과로 6월에는 호흡량과 같이 높은 농도에서 흡수량이 높음을 알 수 있었으나, 8월

의 경우 영양염 흡수의 차이를 크게 보이지 않았다. 이는 뿌리 기 능이 저하되는 시점으로 생각된다.

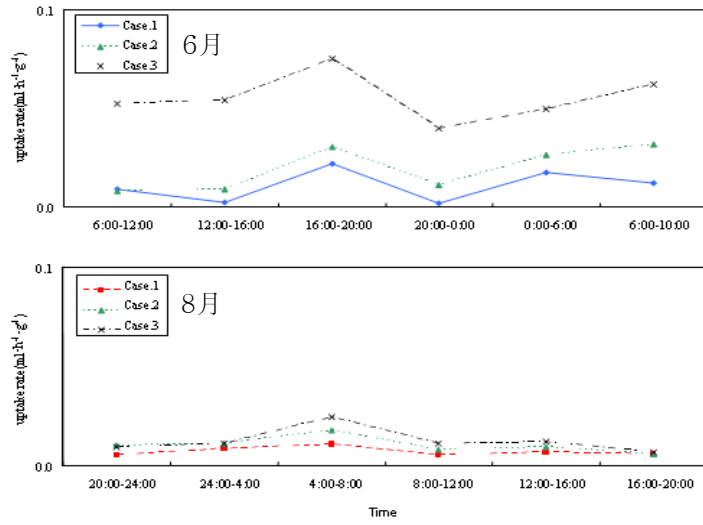


Fig. 3.20 Nitrogen uptake rate

6월과 8월 관측결과를 종합하여 Fig. 3.21과 Fig 3.22에 나타내 었다. 증산량은 흡수량보다는 호흡량과 직접적인 관계가 있는 것 을 알 수 있었다.

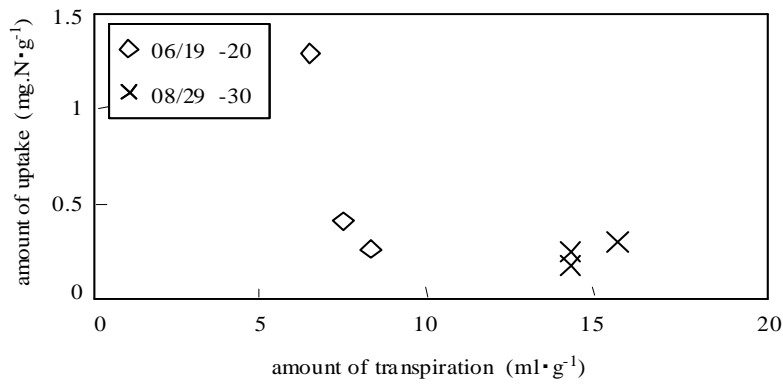


Fig. 3.21 Relation between nutrient uptake and transpiration per day in this experiment

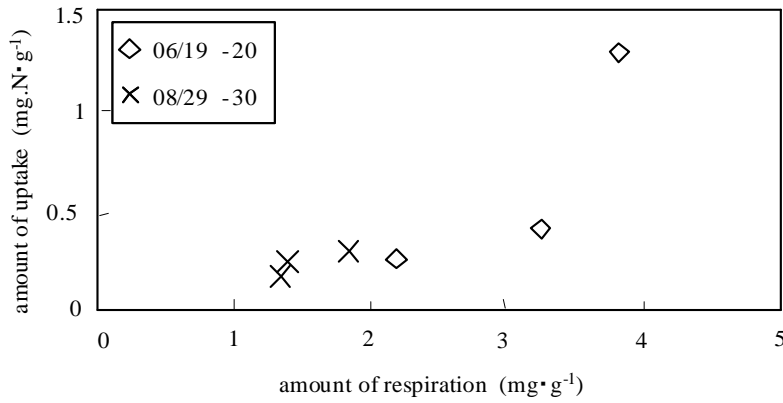


Fig. 3.22 Relation between nutrient uptake and respiration per day in this experiment

(4) 뿌리호흡과정

Fig. 3.23은 액체와 기체상태의 변화된 산소농도 하에서 뿌리의 호흡속도 결과를 나타낸 것이다. 호흡속도는 산소농도의 작은 변화에도 큰 영향을 받고 있었으며, 포화용존 산소 조건하에서 뿌리 호흡량은 최대 호흡속도(2.0ml/ℓ)를 나타내었다[18]. 즉 어떤 일정 농도 이하의 산소농도에서는 뿌리 호흡이 일어나지 않는 산소농도 보상점이 존재하고 있었다.

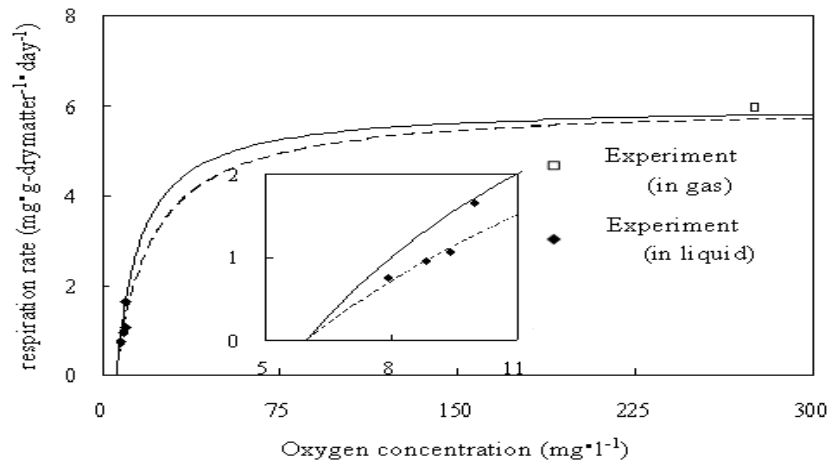


Fig. 3.23 Root respiration rate in the different oxygen concentration in culture solution and compare with the model

3.3. 하천의 수리학적 생태 실험

3.3.1 실험방법

본 실험은 하천의 토사 이동과 하안식생과의 관계를 알아보기 위하여 Fig. 3.24와 같이 모의 수로와 식생을 이용, 식생의 유무에 의한 유체 흐름 지역에서 유출 기준토사를 선정, 하상형태의 변화를 검토하였다. 본 실험에서는 평수시를 상정 직선 하상하천을 대상으로 하였고, 실험에 사용된 식물은 유체에 충분한 탄성을 가지며 15일내 발아하며 실험이 가능한 'Alfalfa'를 선정하였다. 이 식생을 하안부에 성장시키고 식생의 유무에 의해 하천의 토사 이동 과정을 검토하였다.

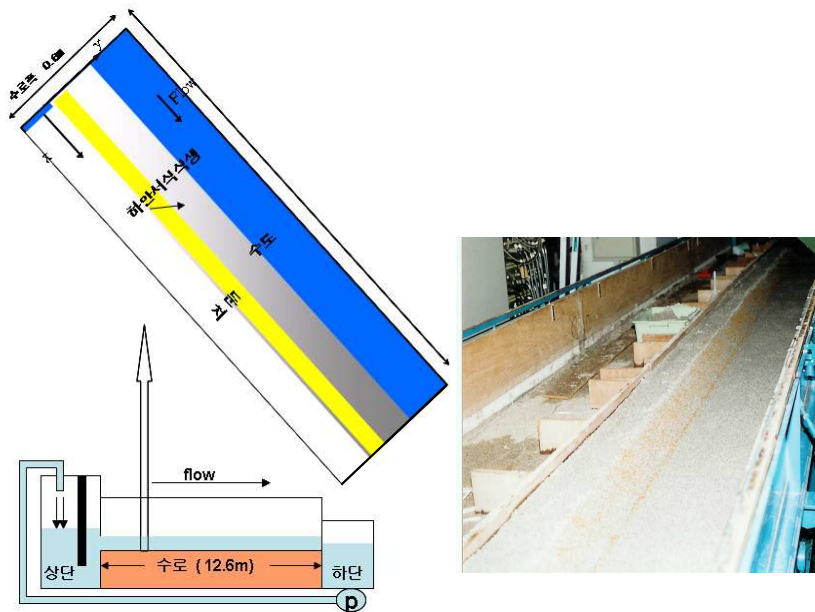


Fig. 3.24 View of the flume

실험에서는 하천에 유출된 토사를 하상하중으로 설정하였으며, 유관 관찰이 가능한 Fig. 3.25와 같은 크기의 토사입자를 재료로 사용하였다.

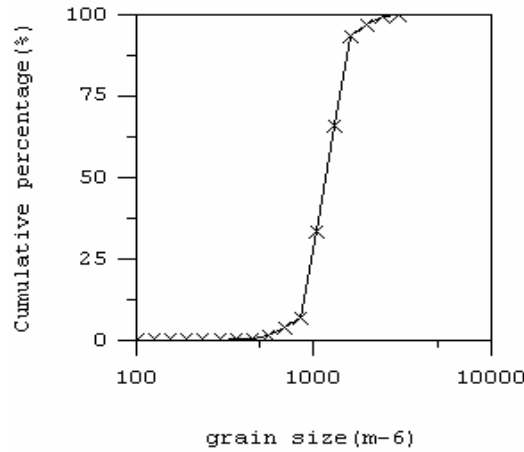


Fig. 3.25 Grain size distribution

실험은 Table. 3.6과 같이 식생의 유무를 나누고, 각 식생의 유속과 밀도를 변화시켜 3회, 대조군으로 평수로에서 2회를 실시하였다. 식생의 성장기간은 15일을 기준으로 하였으며,

Table 3.6. Experimental conditions

Run name	with vegetation			without vegetation	
	Run A	Run B	Run C	Run D	run E
Q/2 (l/s)	3.5	2.3	2.7	3.6	2.0
S(경사구배)	1/379	1/322	1/313	1/390	1/390
Uc (cm/s)	32.2	26.7	32.0	26.8	28.7

Dc (cm)	3.4	2.6	2.4	3.4	2.4
B/2 (cm)	39.1	41.5	41.8	39.0	42.0
Bc/2 (cm)	34.0	37.4	37.4	34.0	37.4
χ	10.5	5.5	3.0	-	-
a(1/m)	2	1.4	0.8	-	-
d(mm)	0.8	0.8	0.8	-	-
vegetation den. (stems/m ²)	2500	1750	1500	-	-

유속은 프로펠러 유속계를 설치 측정하였으며, 소용돌이 측정을 위하여 레이저 유속계(TSI 레이저 유속계)를 이용 측정하였다.

3.3.2 실험결과 및 고찰

Fig. 3.26, 3.27는 식생 유무에 따른 하상과 하안의 변화를 나타낸 것으로 하안식생 유무에 따라 그 모습이 크게 변하고 있음을 알 수 있었다. Run A와 같이 식생의 밀도가 가장 높은 곳에서 토사의 이동이 가장 작았다.

Fig. 3.28, 3.29은 하상별 유속분포를 나타낸 것으로 하안 식생서식 지역의 경우 식생대에서 급격히 유속이 감소하였으나, 식생이 없는 지역에서는 하상 마찰에 의해서만 완만한 감소를 나타내고 있었다.

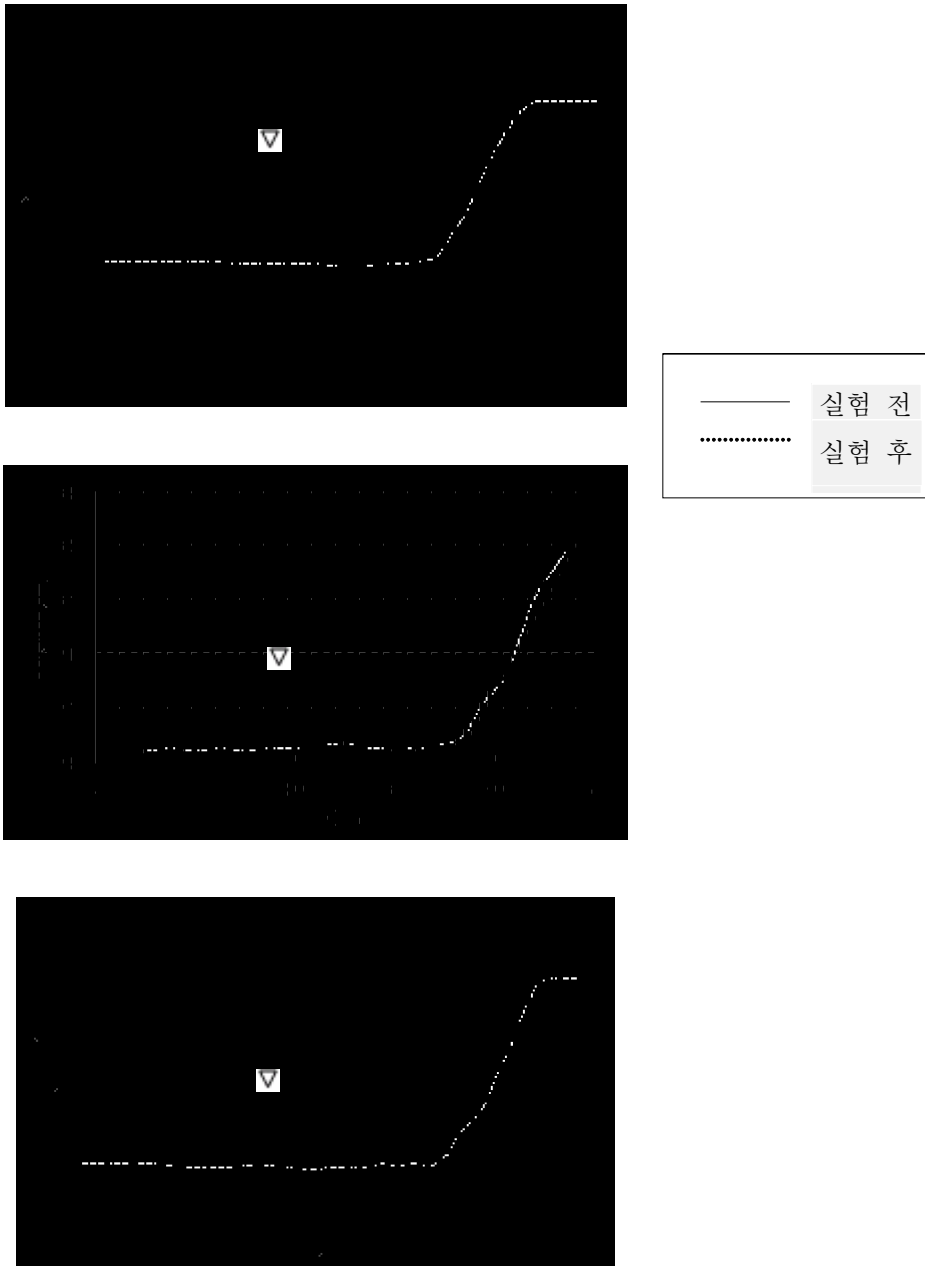


Fig. 3.26 Variation of the bed topography (Run A, B, C)

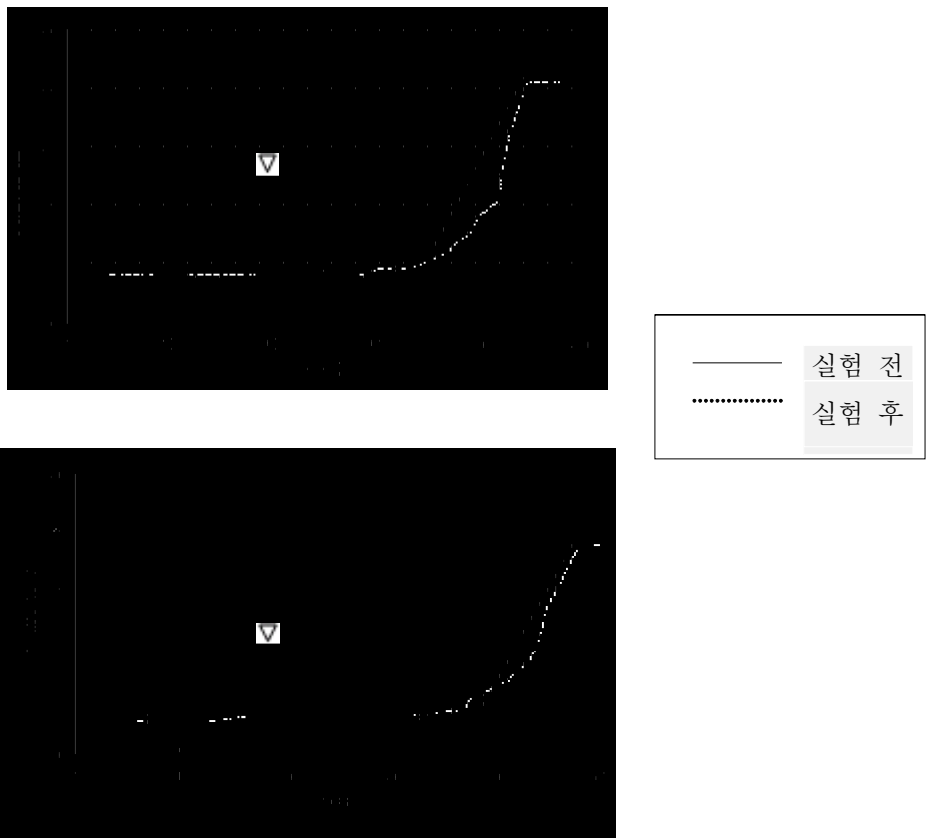


Fig. 3.27 Variation of the bed topography (Run D, E)

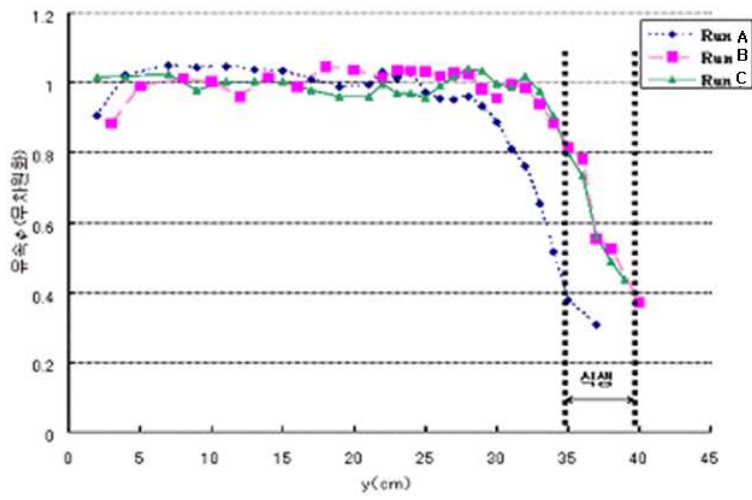


Fig. 3.28 The transverse distribution of down stream velocity
(Run A, B, C)

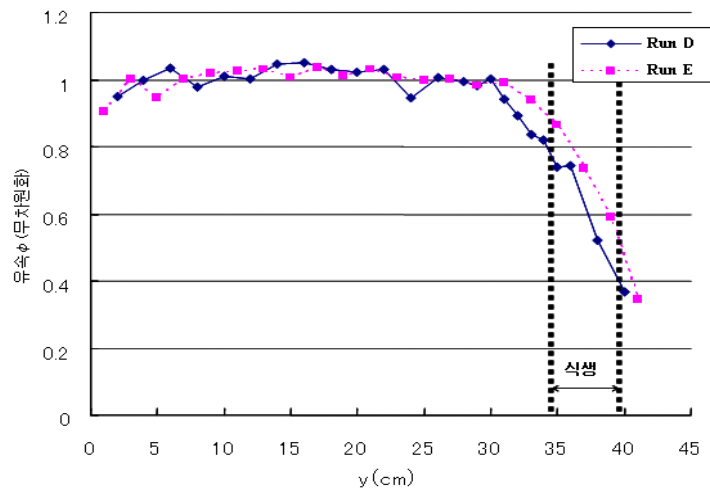


Fig. 3.29 The transverse distribution of down stream velocity
(Run D, E)

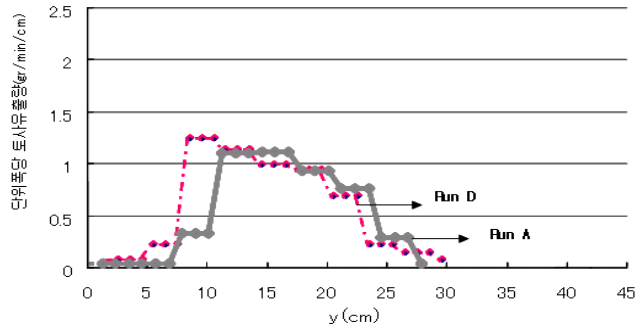


Fig. 3.30 Relation between soil effluents and per unit of wide

Fig. 3.30은 단위 폭 당 토사유출량을 Run A와 Run D를 비교하여 나타낸 것으로 총 토사유출량은 식생 유무에 따라 30% 이상 차이를 나타내었다.

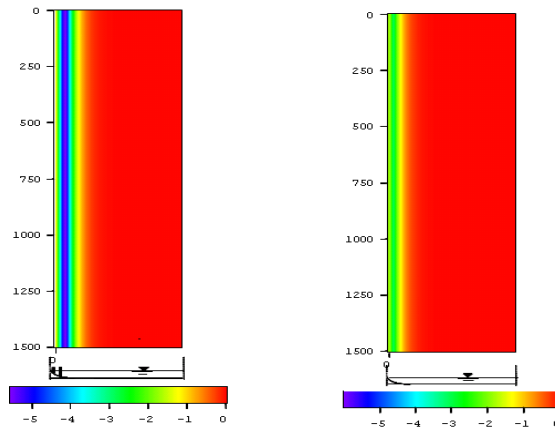


Fig. 3.31 Distribution of vorticity (the scale of contour [-s])

Fig. 3.31은 횡단면 수평 소용돌이를 표시한 것으로 식생대에서 반대 방향으로 발생한 소용돌이가 식생대가 없는 영역과 비교하여 넓은 영역에까지 영향을 주어 유속을 감소시키고 있었다.

IV 종합결론

하천의 토사유출과 관련하여 둔치식생과 하안식생을 구분하여 현지관측과 배양실험, 수로 모형실험을 통하여 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 현지관측 -

1. 하천의 유량변화는 둔치의 지하수 수위에 영향을 미치나 영양염 농도 변화와는 관련성이 적었다.
2. 둔치 식생의 성장율은 지하수위의 불투수층 높이에 영향을 받고 있었다.
3. 둔치 토양은 식생의 유무에 따른 미세입자 분포와 영양염의 농도에 큰 차이를 보이고 있었다.

- 배양실험 -

1. 증산량은 식생뿌리의 대사와 관계없이 일사량 변화에만 관련이 있었다.
2. 식생의 성장기에는 토양중의 질소의 농도가 높을수록 뿌리 호흡량 (영양염 흡수량)이 증대되었다.
3. 뿌리호흡량은 토양속의 산소 농도와 밀접한 관계를 보이고 있었다.

- 모형수로실험 -

1. 하안부 식생은 하천의 안정성에 영향을 미치고 있었다.
2. 직선수로에서 하안부 식생은 불규칙 소용돌이를 발생시켜 토사이동을 저감하고 있다.

V 참고문헌

1. 권영한, 환경정책 연구원. '생태계 환경영향평가 검토', 2002. 54~66p
2. 손광익, 행정자치부 국립방재 연구소 연구보고서. '개발에 따른 토사유출량 산정에 관한 연구(I)', 1998
3. 이국진, 김인수, 池田俊介, 향해항만학회 춘계학술 논문 B3-3. '연안역의 토사 및 영양염류 유출에 관한 현지관측과 대안', 2004. 241~246p
4. 최상기, 송영일, 서성철 한국환경정책평가원. '수질분야 환경영향예측내용과 사후환경 조사결과의 비교·분석', 2003. 73~79p, 131~136p
5. Harazono, Y., Yoshimoto, M. and Kawamura, T. *J. Agric. Meteorol* **52**, 4. 'Photosynthesis rate distribution and light use efficiency within a soybean canopy determined by numerical simulation with the NEO Soil Plant - Atmosphere Model', 1996. 281~291p
6. Kanda, M. and Hino, M, *J. Hydro & Water resources* **3**, 3. 'Numerical simulation of Soil Plant - Air system (2) Numerical experiment on the effect of plant on meteorological environment', 1990 47~55p

7. Kang, S., Kang, H., Ko, D. and Lee, D. *Eng.* **18**. 'Nitrogen removal from a riverine wetland: a field survey and simulation study of *Phragmites japonica*. *Ecol*', 2002. 467~475p
8. Lee, S., Fujita, K. and Yamamoto, K., *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, JSCE, **43**. 'A scenario of area expansion of stable vegetation in a gravel-bed river based on the upper Tama river case', 1999. 977~982p
9. G.K Batchelor, Cambridge Mathematical Library 'An introduction to fluid dynamics', 2002 71~102p
10. 池田俊介, 平成元,2,3年度文部省科学研究費補助金(一般研究(C)) 研究成果報告書, '植生が河川の流れや河道形状に及ぼす効果に関する基礎的研究', 1991. 1~39p
11. 高もく 恵, 東京工業大学 学位論文 '沖縄県石垣島における降雨土砂流出に関する研究', 2004
12. 赤松良久, 東京工業大学学位論文, 'マングローブ水域の水理と物質循環', 2003
13. 中島洋平、池田俊介、赤松良久、宮本泰章、山口悟司, 東京工業大学 学位論文, '石垣島名藏川における土砂・栄養塩の流出に関する現地観

測', 2002

14. 山口悟司, 東京工業大學 學位論文, '沖縄石垣島名藏川における河川水中の濁質・栄養塩特性に関する現地観測', 2003
15. 横山博昭, 水工学論文、第48巻, '側岸部に植生を有する直線礫河川の平行横断形状に関する実験的研究', 2003
16. 泉典洋, 池田俊介, 土木学論文、No. 411/II-12, '側岸樹木を有する直線礫河川の安定横断形状', 1989. 151～159p
17. 泉典洋, 池田俊介, Gary PARKER, 土木学論文, No 565/II-39 '透過水制を有する直線砂床河川の平行横断形状', 1997. 31～41p
18. 共立出版株式会社, '植物の生産 過程', 1～99p
19. 池田俊介, 技報堂出版, '詳述水理学', 1999 150～169p, 328～334p