

연구논문

비점오염저감을 위한 수변완충지대의 적정 설계

김성원* · 최이송** · 오종민***

경희대학교 대학원 환경공학과 석사과정*, 경희대학교 환경연구센터 선임연구원**,
경희대학교 환경·응용화학부 교수***

(2007년 4월 12일 접수, 2007년 12월 13일 승인)

Best Buffer Width of Riparian Buffer Zone using a Pilot with Different Plant Species for Reduction of Non-point Pollutant Loading

Sung-Won Kim* · I-Song Choi** · Jong-Min Oh**

Master's course, Dept. of Environmental Engineering, Kyung Hee University, SuWon, Korea*
Kyung Hee University, SuWon, Korea**
Kyung Hee University, SuWon, Korea***

(Manuscript received 12 April 2007; accepted 13 December 2007)

Abstract

Non-point pollution is caused by many diffusive sources, unlike a point pollution derived from industrial wastewater treatment plants or sewage treatment plants. Runoff of non-point pollutants is originated from rainfall or thawing in short period of time moving over and through the a ground surface. They cause ill effect on the quality of neighboring aquatic environment. To prevent effectively the wash off from non-point pollutant, it should be immediately reduced at the source or be treated after gathering of runoff water. This study has been carried out for the best width of riparian buffer zone. So we implemented the experiment in terms of its depth, width and kind of vegetations and calculated the reduction of pollutants loading. The experimental zone encompasses the watershed of Namhan River (Kyunggido Yangpyunggun Byungsanri). The region was divided into 5 land cover sectors : grass, reed, pussy willow, mixed(grass+pussy willow) and natural zone to compare effectiveness of vegetation. Water samples from four points have been collected in different depths. And the pollutant removal efficiency by sectors with different plant species was yielded through influent with one of each sample. And we obtained the correlation between the width of riparian buffer zone and the removal efficiency of pollutants. Using correlation result, the width of riparian buffer zones which needs to improve the water quality of river could be derived.

Key words : Non-Point Pollutants, Riparian Buffer Zone, Buffer width

I. 서 론

1970년대 “맑은 물 법(Clean Water Act)”을 처음 제정하여 강력하게 공공수역의 수질 개선에 앞장선 미국이 1990년대 들어와서도 목표수질을 달성하지 못하자 그 동안의 수질개선정책에 기본적인 의문이 생기기 시작하였다(US EPA, 2001). 즉 그 동안 엄청난 노력을 들여 하수처리시설을 확충하여 점오염물질은 성공적으로 저감 하였지만, 비점오염물질의 저감에는 사실상 관심을 기울이지 않았던 것이 목표수질 달성 실패 원인인 것으로 판명되었다. 이 결과 이른바 ‘하천복원(Stream Restoration)’이라는 다양한 최적관리기법(BMP)을 통해 비점오염물질의 저감에 노력을 기울이기 시작하였고, 그 중 대표적인 방법이 수변완충구역(Riparian Buffer Zone), 또는 수변완충지대(Riparian Buffer Strip)의 설정과 관리의 도입이었다. 이러한 방법을 통해 현재 미 농무부, 내무부, 산림청, 환경청 등 각 연방 정부 부처와 주 정부는 비점오염물질의 저감과 차단에 적극적인 노력을 기울이고 있다.

한국에 있어서도 환경부(2003)에 의하면 국내에서는 2000년 들어서 팔당호 등 주요 상수원의 수질이 목표 수질에 달하지 못하고 전국적으로 공공수역의 수질이 충분히 개선되지 못하는 이유로 유입 오염물질의 22~37%를 점하는 비점오염원 문제임을 인식하게 되었다. 이에 따라 정부는 이른바 ‘한강법’을 제정하여 팔당호 상류 북한강, 남한강, 경안천 등 주요 하천 연안 500~1,000 m를 수변구역으로 지정하여 행위 규제와 보전을 통해 팔당호에 오염물질의 유입을 저감하도록 하고 있다. 현재 법령은 낙동강, 금강, 영상강 등 전국의 4대강으로 확대 되었고, 나아가 2004년 국무총리실 수질개선기획단을 중심으로 환경부에서 제시한 비점오염물질 저감 대책이 수립됨으로써, 국내에서도 본격적으로 비점오염원에 대한 대책에 관심을 가지게 되었다(권순국, 1998).

수변완충지대는 다양한 생물의 서식공간(Habitat)이며, 동시에 본류로 유입되는 과정에서 수질을 정화시키는 수질개선 공간이기도 하다(Fennessy, M.S. and J.K. Cronk, 1997). 따라서

특별법에서 정한 수변구역의 자정능력을 높이는 것은 물론 그 밖의 하천 연안에서 비점오염물질의 차단, 처리 능력을 증진시키고 수변 생태계의 서식처 보전, 복원을 위해서 수변완충지대에서 수질정화 기술개발과 생물다양성을 창출할 수 있는 풀, 관목, 교목 등 수목완충지의 개발 등의 노력이 필요하다.

본 연구에서는 이러한 수변완충지대의 효율적 조성을 위해, 수변구역 현장에서의 실험을 통하여 폭의 길이별, 식생종별 오염물질의 제거 효율을 파악하고, 이에 따라 수변완충구역의 효율적 조성에 중요한 인자중의 하나인 폭을 도출하고자 하였다.

II. 실험방법

1. 대상지 선정 및 반응조 설치

현장 실험 현장은 한강수계 지역으로 남한강 수변인 경기도 양평군 병산리에서 실시하였다(Fig.1). 실험지 선정 시 고려되었던 사항은 다음과 같다.

- ① 한강수변구역에 해당되는 지역
- ② 폭 15 m 이상, 경사 5% 미만인 지역
- ③ 바닥표면이 고른 지역
- ④ 기존식생이 잘 형성된 지역 (비교실험)
- ⑤ 외부요인에 의한 교란행위 가능성이 적은 지역
- ⑥ 배후지역에서의 유입이 없는 지역
- ⑦ 시험완충지 공사와 실험을 위한 접근이 용이한 지역

현장 실험지는 식생종별로 잔디지역, 갈대지역, 갯버들지역, 혼합지역, 대조지역으로 나누어 조성하였다. 각 지역별로 하천으로의 폭 약 20 m, 하천변의 길이 약 15 m로 조성되었으며, 실험 시 유입수를 조절할 수 있는 반응조를 약 50 ton 규모로 설치하였다(Fig. 2 참고).

2. 시료 채취 및 실험조건

처리 유출수 시료 채취는 유입부의 유량 균등조와 수변완충지 내부에 설치된 깊이별 시료 채취봉과 유출부에서의 표면유출부에서 채취하였다. 시료 채취 지점은 토양표층으로부터 15 cm, 30 cm, 50

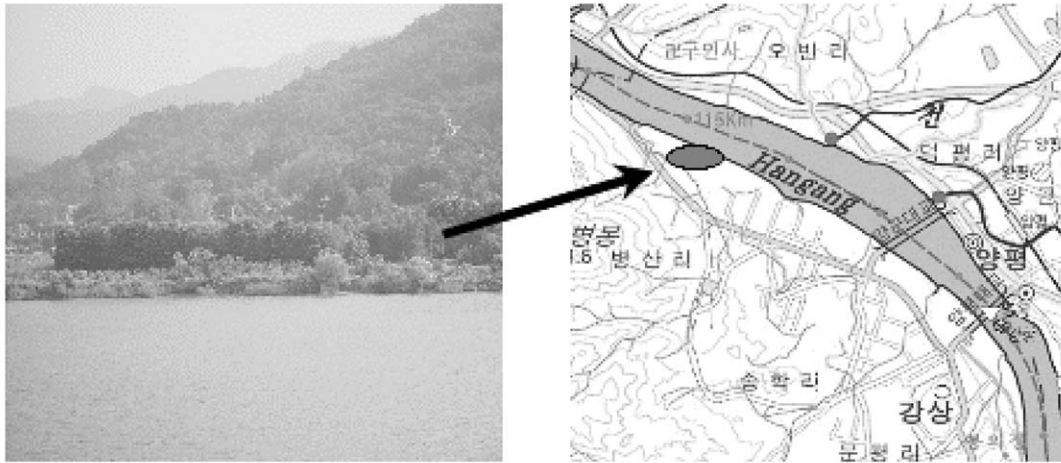


Fig. 1. Sampling Site

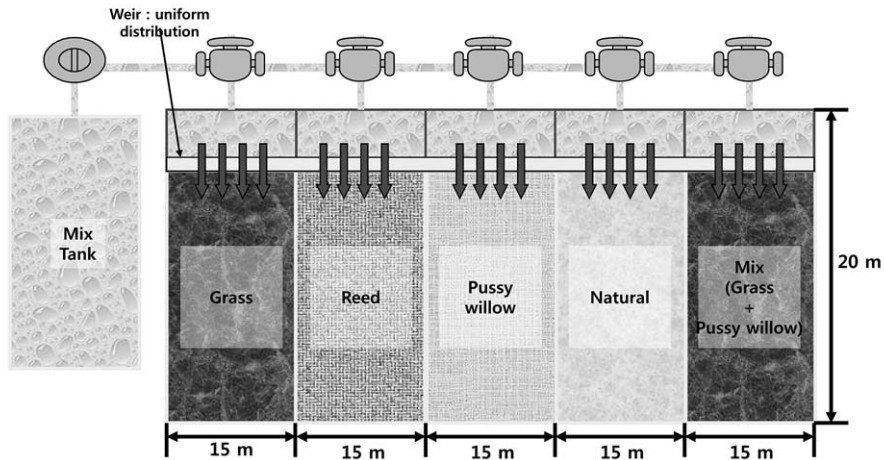


Fig. 2. The Field Formation

cm, 80 cm에서 채취하였으며, 하천변으로부터 2 m, 5 m, 8 m, 11 m 떨어진 지점에서 채취하였다. 세부적인 시료채취 지점은 Fig. 3에 나타내었다.

본 실험에서는 식생종과 폭 길이에 따른 오염부하 저감효과 분석을 위하여 폭의 길이별, 식생별로 나누어 평균값을 비교·분석 하였다. 유입수의 농도 변화를 저농도(저부하)와 고농도(고부하)로 나누어 실험 하였으며, 유입농도 조절을 위하여 질소성분의 경우에는 KNO_3 시약을, 인 성분은 KH_2PO_4 시약을 사용하여 농도를 임의로 조절하여 실시하였다. 유입수의 농도는 SS 80.9~129 mg/L, T-N 11.7~36.1 mg/L, T-P 8.8~13.5 mg/L, TOC 9.1~9.9 mg/L

이었으며, 유입유량은 10~13 ton/hr로 하였다. 유입수는 Fig. 2에서와 같이 mix tank에서 제조하였으며, 그 규모가 50 ton으로 매우 크고, 모래바람 등과 같은 외부요인에 의해 매회 실험 시 같은 농도의 유입수를 제조하기는 힘들었다. 시료 채취는 자체 제작한 장치(시료채취봉) 및 Lysimeter를 이용하여 1일 1회로 1 L 폴리에틸렌 병에 시료를 채취하였고 신속히 실험실로 운반하여 냉장·보관한 후 가능한 빠른 시일 내에 분석하였다.

3. 실험 방법

현장에서 시료를 채취한 후에 실험실로 운반하여

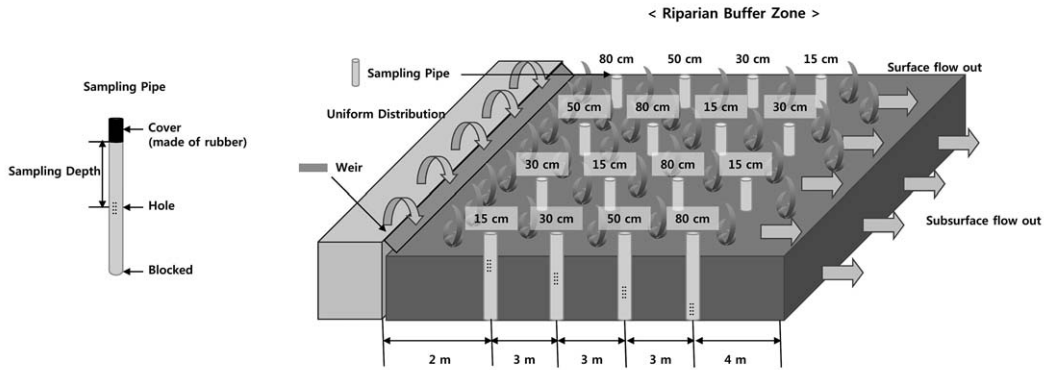


Fig. 3. Arrangement of Sampling Location and Soil Depth in a Pilot Plant of Riparian Buffer Zone

Table 1. Analysis Methods of Water Quality

Item	Analysis Method
SS	Vacuum Filtration(Glass Fiber Filters, GF/C)
T-N	Ultraviolet Spectrophotometric Screening Method(SHIMADZU, UV-1601PC)
NH ₃ -N	I.C.(Metrohm, 792 Basic IC)
NO ₂ -N	I.C.(Metrohm, 792 Basic IC)
NO ₃ -N	I.C.(Metrohm, 792 Basic IC)
T-P	Ascorbic Acid Method(SHIMADZU, UV-1601PC)
PO ₄ -P	I.C.(Metrohm, 792 Basic IC)
TOC	TOC meter (Shimadzu, TOC 5000A)
Size Distribution	Particle Size Analyzer (UK, Malvern Co., Mastersizer S, Ver. 2.19)

분석하였다. 본 실험에서는 채수량이 미량인 경우가 많아 일부 항목의 경우 Ion Chromatograph를 이용하여 분석하였다. 분석항목 및 분석방법은 Table 1과 같고, 토양의 입경분포를 분석하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

1. 현장 실험지의 토양분석

입자들의 중위경은 10.45 μm 로 나타났으며, 각 입자들의 분포는 점토 12.31%, 실트질 56.27%, 가는모래 31.39%, 굵은모래 0.03%로 나타났다.

Fig. 4에 조사된 결과에 의하면, 0.2~2 μm 에 해당하는 점토와 2~20 μm 에 해당하는 실트질(미사), 20~200 μm 에 해당하는 가는 모래, 200~2,000

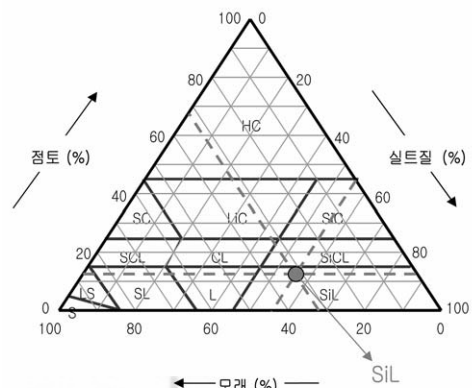
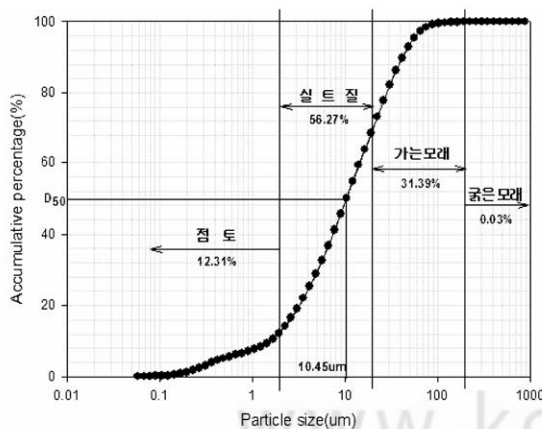


Fig. 4. Size Distribution

μm에 해당하는 굵은 모래로 구성되고 있다. 특히 대부분을 차지하는 실트질(미사)은 주로 석영과 장석이나 철, 마그네시아 광물 및 운모, 점토광물이 섞여 있는 형태이며, 부드럽고, 분상이나 끈기가 없어 어느 정도의 보수력을 가졌다. 국제법의 기준에 의해 분석한 결과 SiL(Silt loam) 형태의 실트질 양토로 나타났다(오종민, 배재근, 1997).

2. 하천변 이격거리에 따른 오염물질 부하량

하천변 이격거리에 따른 저부하와 고부하 실험에서의 평균오염물질 부하량을 Table 2에 나타냈다. SS의 경우 잔디 지역에서 유입 오염부하량이 3,970 g, 2 m에서 2,669 g, 5 m에서 2,227 g, 8 m에서 1,348 g, 11 m에서 653 g으로 나타나 유입수 대비 11 m에서의 오염부하량의 차가 3,217 g으로 오염부하량의 저감이 일어났으며, TOC의 경우에는 대조지역에서 유입 오염부하량이 360 g, 2 m에서 180 g, 5 m에서 176 g, 8 m에서 155 g, 11 m에서 123 g으로 나타났다.

3. 식생대의 하천변 이격거리에 따른 오염물질 제거효율

수변완충지대의 하천변 이격거리에 따른 오염물

질 제거효율과 상관관계식을 식생종 별로 나누어 Fig. 5와 Table 3에 나타내었다. 실험 data는 현장 실험의 결과를 통합하여 사용하였으며, 오염물질 제거효율은 유입수와 폭의 길이별 부하량을 계산하여 유입수에 따른 거리별 오염물질 제거효율로 나타내었다.

11 m 거리에서 잔디지역의 경우 오염부하량 제거효율은 SS 83.6%, T-N 57.7%, T-P 60.6%, TOC 59%로 나타났으며, 갈대지역의 경우는 SS 64.2%, T-N 55.1%, T-P 53.4%, TOC 59%이었으며, 갯버들지역은 SS 65%, T-N 56.8%, T-P 53.3%, TOC 56.9%로 나타났으며, 혼합지역은 SS 49.8%, T-N 56.3%, T-P 53.2%, TOC 60.9%이었으며, 대조지역의 경우는 SS, T-N, T-P, TOC 각각 48.5%, 57.2%, 57.3%, 65.8%로 나타났다. 5개의 구간 모두에서 하천변 이격거리가 멀어질수록 오염부하량 제거효율이 높아지는 것으로 나타났다. SS, T-N, T-P의 제거효율은 각각 83.6%, 57.7%, 60.6%로 잔디지역에서 가장 높게 나타났으며, 이는 초본류인 잔디의 피복율이 가장 높기 때문에 사료된다. TOC의 경우에는 대조지역에서 제거효율이 65.8%로 가장 높게 나타났다.

각각의 상관관계식에서 모두 양의 상관관계로 나

Table 2. Change of Pollution Load along a Flow Distance Covered Different plant species

		SS(g)	T-N(g)	T-P(g)	TOC(g)					
잔디 지역	유입	3,970	723	486	391	갈대 지역	4,849	1,001	490	336
	2m	2,669	345	231	189		3,664	501	245	169
	5m	2,227	339	229	183		3,057	487	240	164
	8m	1,348	324	213	172		2,360	468	237	154
	11m	653	306	191	161		1,735	450	228	138
갯버들 지역	유입	2,872	1116	311	396	혼합 지역	5,746	1,122	473	399
	2m	2,682	556	155	192		4,670	544	231	190
	5m	2,477	545	152	196		4,109	514	228	184
	8m	1,481	523	150	181		3,153	504	227	177
	11m	1,005	482	145	171		2,888	490	221	156
대조 지역	유입	2,994	990	320	360					
	2m	2,717	486	154	180					
	5m	2,376	462	149	176					
	8m	2,088	450	140	155					
	11m	1,542	423	137	123					

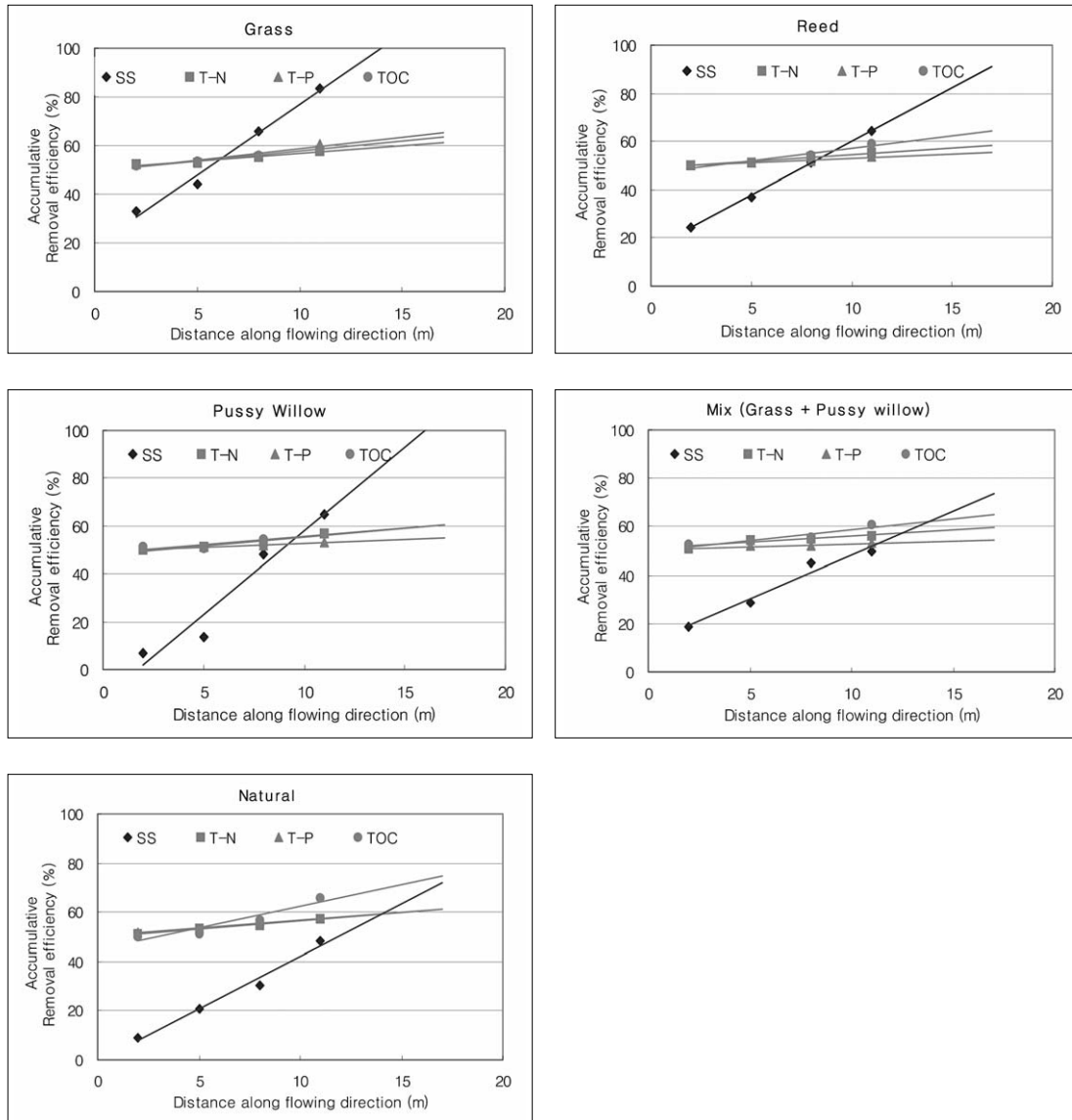


Fig. 5. Pollutant Removal Efficiency along Flow Distance as a Riparian Buffer Zone

타났으며, 상관계수(R^2)의 평균은 0.9492로 나타났다. SS의 상관관계식에서 잔디, 갈대, 갯버들, 혼합, 대조 지역에서의 기울기는 잔디부터 5.8, 4.5, 7, 3.7, 4.2로 나타났으며 갯버들 지역에서의 기울기가 가장 높았지만 제거효율이 잔디 구간에서 가장 높게 나타났다.

5개의 구간에서 모두 SS의 제거효율은 폭의 길이가 길어질수록 SS의 제거효율이 급격하게 높아지는 것으로 나타났으나, 그 외 T-N, T-P, TOC의 경우

에는 SS의 경우보다는 제거효율이 폭의 길이에 따라 점증적으로 증가하였다.

4. 비점오염원 유출오염 부하량 설계 용량 범위

현장 실험에서 저부하와 고부하의 실험이 이루어졌으므로, 본 연구 결과인 Table 3을 이용하여 필요한 수변완충지대의 하천변 이격거리를 산정할 때에는 실험 시 유입된 저부하 및 고부하 시 오염 부

Table 3. Correlation between the Width of Riparian Buffer Zone and Removal Efficiency

	SS	T-N	T-P	TOC
Grass	$y=5.8x+19$ ($R^2=0.9855$)	$y=0.6x+51$ ($R^2=0.9569$)	$y=0.9x+50$ ($R^2=0.9012$)	$y=0.8x+50$ ($R^2=0.9826$)
Reed	$y=4.5x+15$ ($R^2=0.9993$)	$y=0.6x+48$ ($R^2=0.9948$)	$y=0.4x+49$ ($R^2=0.9506$)	$y=1.0x+47$ ($R^2=0.9427$)
Pussy Willow	$y=7.0x-12$ ($R^2=0.9455$)	$y=0.7x+48$ ($R^2=0.9252$)	$y=0.3x+50$ ($R^2=0.9432$)	$y=0.7x+49$ ($R^2=0.8108$)
Mix	$y=3.7x+12$ ($R^2=0.961$)	$y=0.5x+51$ ($R^2=0.9398$)	$y=0.2x+51$ ($R^2=0.9374$)	$y=0.9x+50$ ($R^2=0.9058$)
Natural	$y=4.2x-0.42$ ($R^2=0.9794$)	$y=0.7x+50$ ($R^2=0.9832$)	$y=0.6x+51$ ($R^2=0.977$)	$y=1.8x+45$ ($R^2=0.9015$)

* (x : Width (m), y : Removal Efficiency (%), Total Measurement : 4, n : 4개)

Table 4. Range of Design Capacity

Item	Range of In-put Pollution Load (g)
SS	3,303 ~ 4,870
T-N	492 ~ 1,490
T-P	312 ~ 520
TOC	359 ~ 394

하량의 범위 내이거나 그 이하일 경우, 보다 정확한 수변완충지대의 설계가 이루어질 수 있을 것이다. 본 실험에서 적용된 유입 오염부하량의 범위를 아래의 Table 4에 나타냈다. 단, 아래의 Table 4에 나타난 오염부하량은 현장 실험 시 실질적으로 유입수가 Pilot의 표면과 접촉하는 길이인 10 m에 적용된 유입부하량에 관한 것이다.

5. 설계용량을 이용한 수변완충지대의 규모 산정방법

현장 적용 시 위에서 제시한 자료(Table 3)를 이용하여 수변완충지의 구성에 필요한 폭을 산정할 수 있다(Fig. 6 참고).

- 적용 지역의 목표수질을 결정
 - 적용 지역의 하천수 이용 목적에 따른 목표수질을 결정
- 적용 지역에 대한 기초 조사 실시
 - 적용 지역의 강우사상, 토지이용도 등의 실제 강우 시의 현장 실측 조사
 - 적용 지역의 현장조사로 유입 비점오염 부하량을 계산
- 적용 지역의 목표수질에 대한 오염도 산정

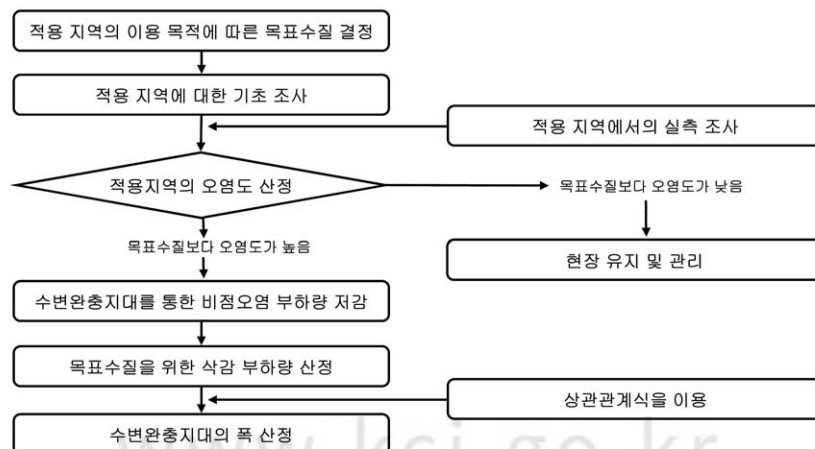


Fig 6. Method of Diduction of Riparian Buffer Zone's Buffer Width

- 적용 지역의 현장조사 결과와 목표수질을 비교하여 오염도를 산정
- 오염도 산정 결과, 적용 지역의 오염도가 목표수질을 넘을 경우 수변완충지대를 통해 비점오염 부하를 저감
- 오염 부하량 저감 효율계산
 - 실제 현장조사를 통해 계산된 부하량에서 목표수질에 해당하는 부하량으로 줄이기 위한 삭감 부하량 산정
- 상관관계식을 이용한 수변완충지대의 폭 계산
 - 위에서 계산한 오염 부하량 저감 효율을 본 논문에서 제시한 상관관계식에 대입함으로써 수변완충지대의 폭을 산정할 수 있음

IV. 결 론

본 논문은 비점오염 부하 저감을 위한 수변완충지대의 최적 폭의 길이 산정을 위해 남한강 수변에서의 현장실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 잔디, 갈대, 갯버들, 혼합, 대조 지역 중 오염물질 제거효율은 잔디지역에서 SS 83.6%로 가장 높게 나타났다. 이는 입자성물질인 SS는 표면에서의 스크린 효과에 의해 제거되는 것으로 실험을 위해 갈대, 갯버들, 혼합, 대조 지역은 환삼덩굴과 같은 잡초를 모두 제거하였기 때문에 상대적으로 잔디의 피복율이 다른 4개의 지역에서 보다 높게 나타났기 때문으로 판단된다.

2. 5개의 지역 중 TOC의 제거효율은 대조지역에서 65.8%로 가장 높게 나타났다. 이는 대조지역은 자연상태 그대로인 지역으로 여러 가지의 초본류와 관목류인 뽕나무가 혼재하고, 다른 4개 지역에서는 실험지를 조성함에 이어 본래 서식하고 있던 생물들의 교란이 일어나 이로 인해 생물들이 다른 4개 지역에서 보다 대조 지역에 많이 서식하고 있어 유기물인 TOC의 분해가 잘 일어나기 때문으로 사료된다.

3. 수변완충지대의 조성 시 필요한 폭의 길이는

본 논문에서 제시한 식생종별 폭의 길이에 따른 오염물질 제거효율의 상관관계식을 이용하여 산정할 수 있다. 수변완충지대의 조성 시 SS, T-N, T-P만을 고려한다면 잔디가 가장 효율적이지만 TOC의 경우 대조지에서 높게 나타나 초본과 관목류가 적절하게 혼합되고 식물의 정착기간을 충분히 둔다면 효율적으로 조성할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 본 논문에서 제시한 상관관계식을 이용하여 수변완충지대의 현장 적용 시 필요한 수변완충지대의 폭을 산정할 수 있을 것이다.

본 논문에서 제시한 결과는 남한강변 현장실험에서의 결과로 타 지역과의 토양성분, 강우사상, 비점오염유입농도와 같은 여러 인자들이 다를 수 있다. 따라서 수변완충지대의 조성 시에는 철저한 사전 모니터링이 중요하며, 그에 따라 수변완충지 조성에 필요한 폭의 길이는 본 논문에서 제시한 것과 다를 수 있다. 본 논문에서 제시한 토양구성, 유입부하, 유입유량 등이 유사한 지역에서의 수변완충지대 조성 시에는 위에서 제시한 방법으로 필요한 폭의 길이 산정에 유용할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 경희대학교와 국립 환경 과학원 한강물환경연구소의 지원으로 이루어 졌으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- 국무조정실, 행정자치부, 농림부, 산업자원부, 환경부, 건설교통부, 산림청, 『물관리 종합대책』의 추진강화를 위한 4대강 비점오염원관리 종합대책.
- 권순국, 1998, 우리나라 비점원 수질오염 관리의 문제점과 개선방안, 대한환경공학회지, 대한환경공학회, 20(11), 1497-1590.
- 김영철, 이재수, 2002, 강우시 유역특성에 따른 유출 오염물질 농도곡선의 형상, 대한환경공

- 학회지, 대한환경공학회, 24(4), 633-645.
- 나승렬, 1999, 미국의 농지 보전정책, 직무파견활동 결과보고서, 농림부, 300-351.
- 오종민, 배재근, 1997, 토양오염학, 신광문화사, 57-60.
- 진재섭, 1995, 도시지역에서 비점오염원, 서울시정 개발연구원 서울시정연구포럼, 24, 22-24.
- 한국건설기술연구원, 2000, 팔당상수원 비점오염 원 유출특성과 최적관리방안.
- 환경부, 2003, 한강수변구역 변경, 환경부 고시 제 2003-125호.
- Daniels, R. B. and J. W. Gilliam, 1996, Sediment and chemical load reduction by grass and riparian filters, *Soil Science Society of America Journal*, 60, 246-251.
- Dillaha, T. A. *et al.*, 1998, Evaluation of vegetative filter strips as a best management practice for feed lots, *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 60(7), 1231-1238.
- Fennessy, M. S. and J. K. Cronk, 1997, The effectiveness and restoration potential of riparian ecotones for the management of nonpoint source pollution, particularly nitrate, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 27(4), 285-317.
- Hedin, L. O. *et al.*, 1998, Thermodynamic constraints on nitrogen transformations and other biogeochemical processes at soil-stream interfaces, *Ecology*, 79(2), 684-703.
- National Research Council, 2000, watershed Management for Potable Water Supply.
- Novotny and Chesters, 1995, Nonpoint pollution and urban storm water management, water quality management library, Technomic Publishing Co. Inc., 9.
- Park, J. Y., Jo, Y. M., and Oh, J. M., 2000, Characterization of nonpoint source from Urban Runoff, *Korea water resources association*, 1(10), 39-48.
- US EPA, 2001, National Management Measure to Control Nonpoint Source Pollution from Forestry.

최종원고채택 08. 01. 02