

# 비점오염저감 및 탄소축적을 고려한 적정 수변지역 설계방법 Design of Riparian Areas for the Carbon Sequestration and Diffused Pollutants Control

김보라 · 성기준<sup>†</sup>  
Bora Kim · Kijune Sung<sup>†</sup>

부경대학교 생태공학과  
Department of Ecological Engineering, Pukyong National University

(2010년 10월 4일 접수, 2010년 11월 17일 채택)

**Abstract :** This study suggests the riparian area management measures that can control nonpoint source pollution and optimal carbon sequestration. 30~600 m ranges of riparian buffer width are estimated for controlling diffused pollutants in Nakbon K watershed in the Nakdong River. The area that can be easily restored to the riparian buffer zone considering current land use type is the 1,776.51 ha and it is the 50% of estimated buffer area. About 14,526 tC/yr, 11,826 tC/yr, 8,382 tC/yr and 3,349 tC/yr of carbon can be sequestered in the restoration of riparian buffer zone with broad leaved forest, mixed forest, coniferous forest and perennial grass, respectively. It is equivalent amount of carbon dioxide that emitted from 5,000 cars or 20,000 homes as a family of four.  
**Key Words :** Riparian Buffer Width, Carbon Sequestration, Nakdong River Watershed, Nonpoint Pollution, Restoration

**요약 :** 본 연구에서는 비점오염물질 관리를 위한 적정 수변완충폭의 산정 방안과 산정된 수변완충지역에 식재되는 식생 유형에 따른 탄소 축적 효과를 비교하여 수변지역을 친환경적으로 관리하기 위한 방안을 제시하였다. 낙동강 중·하류지역인 낙본 K 유역을 대상으로 수행한 연구 결과 대상 하천에 30~600 m 범위의 수변 폭이 필요한 것으로 분석되었으며, 산출된 수변완충지대 조성 지역에서 논, 밭, 초지, 나대지 등 수변 조성이 용이한 지역은 총 1,776.51 ha로 산출된 지역의 약 50%로 나타났다. 조성이 용이한 1776.51 ha에 활엽수림으로 수변완충지역을 조성할 경우 약 14,526 ton, 혼효림으로 조성할 경우 11,826 ton, 침엽수림으로 조성할 경우 8,382 ton, 다년생 초지로 조성할 경우에는 3,349 ton의 탄소가 각각 매년 축적되는 것으로 나타났다. 본 연구의 결과 산정된 수변완충지역에 매년 흡수하는 이산화탄소량은 자동차 약 5천대에서 배출되는 이산화탄소량과 비슷하며, 4인 기준 가정 약 2만 가구에서 나오는 이산화탄소량과 유사한 양으로 파악되었다.

**주제어 :** 수변완충폭, 탄소축적, 낙동강유역, 비점오염물질, 복원

## 1. 서론

산업화와 도시화 과정 중에 우리나라의 하천과 수변지역은 치수와 이수 등 홍수의 예방과 하천의 이용을 위하여 지속적으로 개발되어왔다.<sup>1,2)</sup> 인간에 의한 하천의 인위적 간섭은 오염물질의 유입을 저감할 수 있는 수변지역에 오히려 오염원을 위치하게 함으로 하천 수질의 악화를 초래할 수 있다.<sup>3)</sup> 뿐만 아니라 수변지역의 토지이용변화로 인하여 기존 식물과 토양이 보유하고 있는 탄소저장량의 변화 또한 초래할 수 있다.<sup>4,5)</sup>

육역과 수역의 전이시대인 수변지역은 강터를 안정화시키고, 유역으로부터 들어오는 영양염류와 토사를 여과함으로써 수질을 향상시키는 지역이다. 또한 육역과는 다른 식물과 토양 특성을 가짐으로 인하여 높은 종 다양성과 종밀도 및 생물학적 생산력을 보유하고 있으며 탄소보유능력 또한 뛰어난 것으로 보고되고 있다.<sup>6-8)</sup> 수변의 중요성을 파악한 미국과 일본 및 유럽의 일부 국가에서는 수변 관리에 많은 노력을 기울이고 있으며, 특히 미국의 경우 각 주 별로 다양한 형태의 수변완충지대를 조성하고 있으며 수변구역 관

리를 위한 제도 또한 구축하고 있다.<sup>9,10)</sup>

우리나라는 1990년대 후반부터 수변지역에 관한 관심이 증가되었는데, 1998년 수립된 팔당 등 한강상수원 수질개선대책을 지원하기 위한 “한강수계 상수원수질 개선 및 주민지원 등에 관한 법률”에서 처음으로 수변지역에 관련된 법적 규정이 마련되었고, 2003년 이후 4대강을 중심으로 기존 수변지역에 입지한 오염원을 제거하고 오염을 유발할 수 있는 토지이용을 미리 방지하여 상수원의 수질 개선을 도모하기 위한 수변구역 제도를 실시하였다. 현재 수변구역 관련 제도에서는 하천에서 가장 인접한 지역을 보전지역으로 조성하고 이들 지역에 대하여 오염원의 철저한 배제와 수변관리를 위한 토지매수 및 생태벨트 조성을 도모하고 있다. 특히 하천 양안 50~100m 구역을 절대보전지역으로 지정하고 식생을 연결하여 녹지조성을 하는 녹지조성권고지역으로 계획하고 있다.<sup>11,12)</sup> 또한, 서식 생물종에게 공간, 먹이, 물, 은신처 등을 제공하는 생물의 이동통로 및 종과 오염물질의 여과 기능 그리고 유입물질의 보유기능을 담당하는 수변생태벨트를 조성하기 위한 매수토지관리계획 또한 수립하고 있다.<sup>11,12)</sup>

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: ksung@pknu.ac.kr Tel: 051-629-6544 Fax: 051-629-6538

국내에서의 수변완충지역에 대한 연구는 여과대의 길이와 식생피도, 기울기 등의 변화에 따른 수변완충지대에서의 비점오염물질의 제어와 수질개선에 관한 연구,<sup>13)</sup> 현장 파일럿 실험을 통하여 수변완충지대의 조성에 있어 폭과 오염물질 저감효율과의 관계를 통해 수변완충지대의 설계인자를 도출 방법에 관한 연구<sup>14)</sup> 등 주로 비점오염제어 및 수질개선 효과에 대한 연구가 주로 수행되어 왔다. 반면에 국외의 경우 이러한 오염제어 뿐만이 아니라 수변완충지역에서의 탄소 축적에 관한 연구가 활발히 수행되고 있는데, 수변완충지대를 조성할 경우 변화 될 수 있는 탄소량에 대한 추정 등 다양한 분야에서 활발히 연구가 진행되고 있다.<sup>7,8,15,16)</sup>

본 연구에서는 비점오염물질의 유입관리를 위한 적정 수변완충폭의 산정 방안과 산정된 수변완충지역에 식재되는 식생 유형에 따른 탄소 축적 효과를 비교함으로써 비점오염물질의 제어뿐만 아니라 탄소의 축적도 가능한 수변완충 지역을 친환경적으로 이용하고 관리하기 위한 효율적인 방안을 제시하고자 하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 연구지역 선정

본 연구에서 활용한 대상지역은 낙동강 수계의 경상남도 김해시와 양산시에 위치하고 있는 낙본 K 유역으로 낙동강 수계 구간 중 밀양강 합류점 후부터 양산천 합류점 전까지 전 구간으로, 대상하천의 유로연장은 26 km, 유역면적은 약 253.5 km<sup>2</sup>이다(Fig. 1). 낙본 K 유역은 부산시민의 식수원인 매리와 물금 취수장이 위치한 지역으로 이들 취수장을 통하여 본류에서 1일 약 250만 톤의 물을 취수하고 있다. 부산광역시 상수원의 94% 정도가 낙동강 원수에 의존하고 있지만 하천 인근 지역은 대다수 농경지나 도로 등으로 이용되고 있어 하천에 비점오염물질의 유입이 용이한 지역이다.<sup>17-19)</sup> 2008년 낙동강 수질조사 결과에 의하면 낙본 K 유역의 경우 부유 물질과 총인의 농도가 풍수기에 증가하는 경향을 보이고 있는데,<sup>20)</sup> 이는 강우량이 많은 풍수기에 입

자성 오염물질의 유입으로 인한 것으로 수변관리를 통한 비점원 오염물질의 제어가 필요하다고 판단된다.

### 2.2. 비점원 오염물질 관리를 위한 수변 폭 산정

수변완충지대를 조성할 때 적절한 수변 폭을 산정하는 것은 중요한 일이다. 수변폭이 너무 좁으면 완충지대로서의 역할을 하지 못하며, 오염물질의 제어나 생물서식처로서의 기능 또한 제대로 수행할 수 없다. 그렇다고 수변완충지대의 폭이 너무 크게 되면 대상 하천 주변 지역에 있어서 효율적인 토지이용이나 재산권에 제약을 초래할 수 있다. 수변완충 녹지를 조성할 경우 하천변을 따라 일정한 폭으로 식생대를 조성하는 것이 일반적이지만 수변완충녹지의 폭은 대상 지역의 경사, 유역의 특징 및 오염 부하량에 따라 적합한 폭이 산정되어야 한다.<sup>21,22)</sup> 비점원 오염물질을 효과적으로 제어하기 위하여 수변폭을 산정하는데 사용되는 모형으로는 VFSSMOD-W, RBDE, CREAMS 등이 있다.<sup>23-25)</sup> VFSSMOD모형은 수문과 토사, 오염물질이 식생여과대를 통과하는 것을 시뮬레이션 한 모형으로, 다양한 조건에서 수변 완충폭을 산정할 수 있다는 장점은 있지만, 많은 매개변수와 입력 자료를 필요로 하며 고도의 기술력을 요하므로 사용하기 어려운 단점 또한 가지고 있다.<sup>22)</sup> RBDE모형과 CREAMS 모형 등은 VFSSMOD모형에 비하여 비교적 간단한 모형이다. Phillips에 의해 연구된 RBDE모형은 토양 특성과 경사도, 그리고 표면의 거칠기 등을 이용하여 기준 완충지대와 연구대상지를 비교하여 수변폭을 산정하는 모형이다.<sup>24)</sup> 하지만 기준완충지대의 선정 시 필요한 변수 값을 특정지역의 평균값으로 사용하고 기준완충지대 산정에 따른 주관적인 판단으로 인하여 모형의 불확실성이 커질 수 있다.<sup>26)</sup> CREAMS 모형은 수변폭에 따른 유출수와 토사량 등을 고려하는 모형으로 유역에서의 비점오염원을 평가하기 위한 목적으로 개발되었다.<sup>25)</sup> 본 연구에서는 VFSSMOD에 비하여 비교적 간단한 모형인 RBDE를 수정 보완한 Xiang의 수변완충 폭 산정모형을 사용하였다. Xiang의 완충폭 모형은 1995년 미국 North Carolina 주 Mountain Island Lake 유역의 법규상 규정된 식생완충지대의 적정성을 평가하기 위한 연구에 사용되었으며, 다음 식 (1)을 이용하여 목표 완충효율( $p$ )에 도달하기 위한 완충지대의 적정 폭인  $L_p$ 를 계산하게 된다.<sup>27)</sup>

$$L_p = L_r \sqrt{p \left( \frac{n_r}{n_b} \right)^{0.6} \left( \frac{K_r}{K_b} \right)^{0.4} \left( \frac{s_r}{s_b} \right)^{-0.7} \left( \frac{W_r}{W_b} \right)} \quad (1)$$

- 여기서  $b$  : 목표 완충지대(Proposed buffer)
- $r$  : 기준 완충지대(Reference buffer)
- $n$  : Manning 조도계수(Manning roughness coefficient)
- $L$  : 완충지대의 폭(m)
- $K$  : 포화수리전도도(Saturated Hydraulic conductivity) (cm/hr)
- $s$  : 경사율(%)
- $W$  : 토양 수분 보유함량(cm)

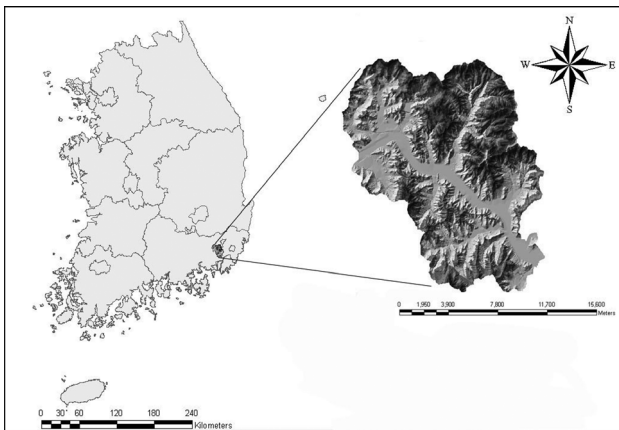


Fig. 1. Map showing the location of Nakbon K watershed.

식 (1)은 미리 정의된 기준완충지대의 여과능력과 대상지 역의 여과능력을 비교하여 완충효율이 목표 완충효율 이상 일 때의 수변완충지대의 폭을 의미하며,<sup>24)</sup> 이때 기준완충지 는 평균유출 조건하에서 여과효과를 충분히 발휘하는 곳이거나 연구대상지에서 토양, 지피, 지형상태를 대표할 수 있는 곳을 선정하여 이용하게 된다.<sup>24,28)</sup> 본 연구에서는 수변 완충지대 폭 산정 모형에서 실제 대상지의 완충효과율( $p$ )이 기준완충지대의 완충효과율에 상응하는 값을 가지도록 완충효과율을 1로 두고 기준완충지대의 각 인자 값을 대입하여 모형과 결합시켜 계산한 후 대상지역의 지도 중첩을 실시하였다.

**2.3. 수변완충지대에서의 탄소축적**

육상생태계에서의 탄소축적과 배출은 식물과 토양, 그리고 고사목 등에 의하여 발생된다.<sup>6)</sup> 따라서 수변지역에서 탄소흡수 및 배출량을 산출하기 위해서는 식물과 토양에서의 탄소 흡수와 배출량을 먼저 평가해야한다. 수변완충지대의 구성에 따른 탄소량 변화는 Fig. 2에서 보는바와 같이 주로 수변완충지대 구성에 따른 식물 생체량 변화, 토지이용 변화에 따른 토지의 탄소 보유량 변화 및 무기토양의 탄소보유량 변화에 영향을 받게된다.<sup>29)</sup>

비점원 오염물질 관리를 위하여 산정한 수변폭에 대하여 수변완충지대를 조성하였을 경우 최적 탄소축적량을 산출하기 위하여 본 연구에서는 대상 수변지역을 활엽수림, 침엽수림, 혼효림, 초지로 조성하였을 때를 가정하여 탄소축적량을 추정하였다.

수변완충지대에 식생대를 조성한 후 식물 생장으로 인한 연간 생체량 축적의 증가는 다음의 식 (2)를 이용하여 줄기재적의 순증가량 축적으로 계산되며, 측정된 줄기재적의 순증가량과 전건비중, 지상바이오매스 대 줄기바이오매스 비율, 전체 바이오매스 대 지상바이오매스 비율과 탄소전환인자를 곱하여 탄소흡수량을 계산한다. 임상에 따른 식물 성장량은 임상별 연간 성장량 자료를 활용하여 침엽수림과 활엽수림, 혼효림 별로 계산하였다.<sup>30)</sup> 단 수변완충지대의 구성에 따른 탄소축적량을 산출하기 위하여, 20년 동안 일정한 면적을 수변으로 조성하며, 1년생 목본을 식재하여 20년간 성장하는 것을 가정하여 계산하였다.

$$\Delta G_t = \Delta S_t \times \delta_s \times r_s \times r_t \times CF \tag{2}$$

- 여기서  $C_t$  : 탄소흡수량( $tC$ )
- $S_t$  : 줄기재적의 순증가( $m^3$ )
- $\delta_s$  : 줄기의 전건비중( $tdm/m^3$ )
- $r_s$  : 줄기바이오매스에 대한 지상바이오매스의 비율 (%)
- $r_t$  : 지상바이오매스에 대한 전체 바이오매스의 비율 (%)
- $CF$  : 탄소전환계수( $tC/tdm$ )

토지이용변화로 인한 탄소축적량의 추정은 토지전용 시에 발생하는 바이오매스 소각으로 인한 배출량과 전용 후 남은 잔재 바이오매스의 부후, 그리고 전용에 따른 토양탄소의 변화 등으로 나타내며 이 중, 전용 후 남은 잔재 바이오매스의 부후에 따른 탄소배출량은 다음 식 (3)에 의하여 산출하였다.

$$\Delta C_l = Area_{av} \times (B_{before} - B_{after}) \times F \times CF \tag{3}$$

- 여기서  $C_l$  : 부후에 의한 탄소 배출량( $tC$ )
- $Area_{av}$  : 평균 전용면적( $ha$ )
- $B_{before}$  : 전용 전 바이오매스량( $tdm/ha$ )
- $B_{after}$  : 전용 후 바이오매스량( $tdm/ha$ )
- $F$  : 부후되는 잔존비율(%)
- $CF$  : 탄소전환인자( $tC/tdm$ )

토양 유기 탄소 축적량은 토지이용과 관리 활동에 따라 다르게 나타나며, 일반적으로 미생물 분해와 물리적인 분해에 작용하는 관리 결정 요인의 영향을 받으며, 과거 토지이용, 기후, 토양 특성 간의 상호작용에 따라 토양 탄소 축적량의 증가와 감소에 영향을 미친다. 일반적으로 탄소 축적량의 변화는 토양 탄소 축적량이 새로운 평형 상태에 근접할 때까지 수년에서 수십 년에 걸쳐 나타나므로, 일반적으로 20년 단위의 자료가 필요하며, 토양단면 상부 30cm 만을 근거로 산출하고 있다.<sup>29)</sup> 본 연구에서는 대상 토지를 논과 밭, 산림과 기타 4가지의 토지이용으로 구분한 후 1978년도와 1998년도의 토양내 탄소량을 비교하여 토지이용에 따른 토양탄소량을 산출한 이경학 등<sup>31)</sup>의 자료를 사용하여 수변완충지대의 토지이용변화에 따른 토양 유기탄소축적량을 추정하였다.

**2.4. 자료수집 및 처리**

대상 지역의 특성을 파악하기 위하여 국립지리원에서 제공하는 1:25000 수치지형도를 이용하여 대상지역의 등고선과 표고점을 추출하여 30 m×30 m 크기의 DEM을 생성한 후 경사도를 분석하였다(Fig. 3). 또한 Manning 조도계수분포도와 토양 포화수리전도도 및 토양수분보유함량도는 환경부와 농업과학기술원에서 제공하는 토지피복도와 정밀토양

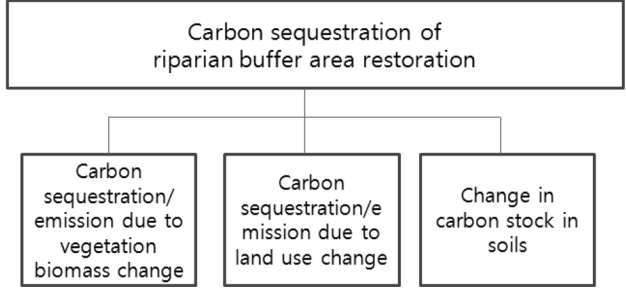


Fig. 2. Main factors affecting carbon sequestration in the restored riparian buffer area.

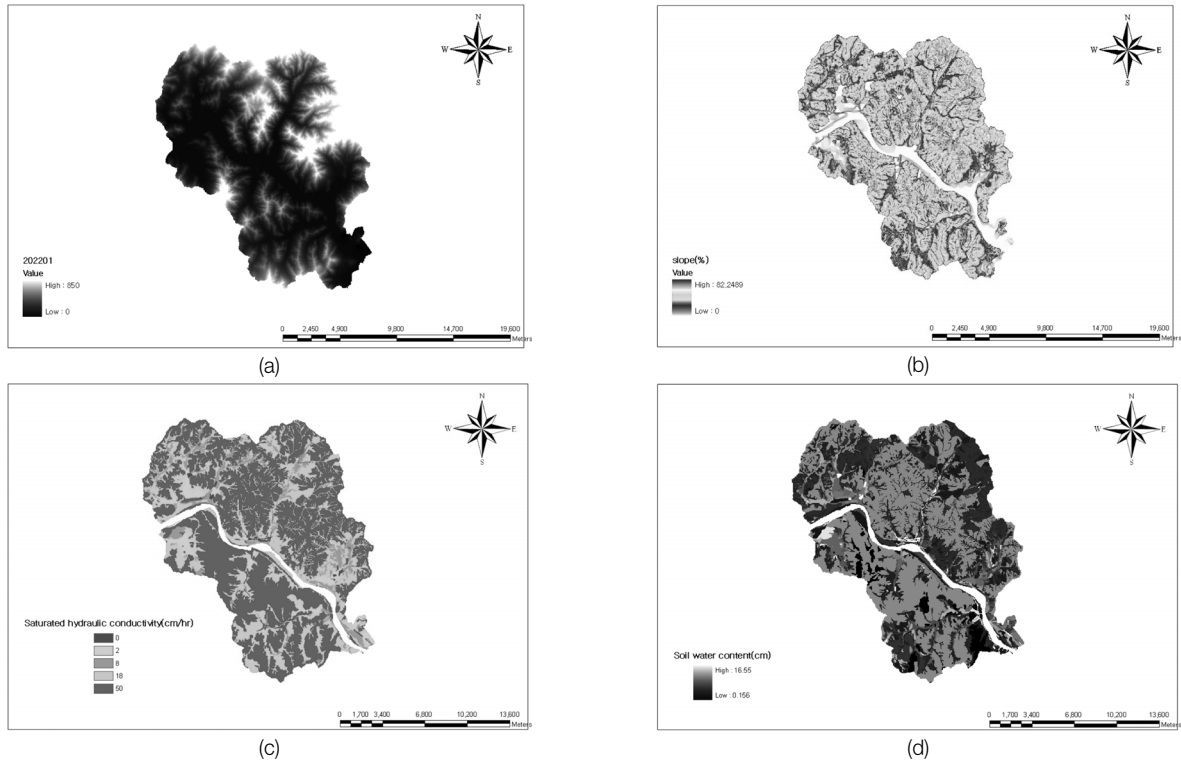


Fig. 3. Map of characteristics of Nakbon K watershed (a) DEM, (b) Slope, (c) Saturated hydraulic conductivity, and (d) Soil moisture content.

도를 이용하여 작성하여 수변 폭 산정에 활용하였다(Fig. 3).

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 수변 폭 산정

본 연구대상지인 낙본K 유역 중 본류에서 1 km, 제 1지류로부터 500 m, 제 2지류로부터 300 m를 경계로 비점원오염물질 관리에 필요한 기준완충지대를 선정하였다. 대상지역에서 배수가 양호하고 하천변을 따라 가장 넓게 분포하는 토양의 종류는 무등통으로 나타났는데, 무등통의 포화수리전도도(K)는 50 cm/hr로, 토양수분보유함량은 4.44 cm이다.<sup>32)</sup> 또한 대상 하천주위의 경사도는 0~15%, 지류는 1~3%로 분석되었으며, 2% 경사가 가장 많이 나타나는 것으로 분석되었다(Table 1).

낙동강 주변에 빈번히 분포되는 식물은 버드나무류 같은 일부 목본류를 제외하고는 달뿌리풀(*Phragmites japonica*), 갈대(*Phragmites communis*), 부들(*Typha orientalis*) 등 초본식물이 많은 것으로 알려져 있다.<sup>33)</sup> 따라서 본 연구에서는 비점원 오염물질 관리를 위한 수변폭 산정을 위하여 초본식물을 기본완충지대에 주로 분포하는 식물로 가정하여 적용하였다. 한편 국내 관련 식물의 Manning 조도계수 값을 적용할 수 없어 외국의 유사연구에서 사용한 초본류 중 버뮤다 그라스의 조도계수 값인 0.41을 적용하여 계산하였다.<sup>34)</sup>

Table 1. Basic properties of the standard riparian buffer area

Parameter	Value
Width (Lr)	30 m
Soil water moist (W)	4.44
Slope (s)	1~3%
Saturated hydraulic conductivity (K)	50 cm/hr
Manning's roughness coefficient (n)	0.41
Area	21,057,508 m <sup>2</sup>

경사도, 포화수리전도도, 토양수분함량도 등을 식 (1)에 적용하여 완충효과(p)가 1인 수변완충지대의 폭을 구하기 위하여 지도 중첩을 실시하였다. 이때 구해진 각 셀의 값은 완충효과를 만족하기 위하여 필요한 완충폭(W<sub>c</sub>)이며 다음의 식 (4)를 이용하여 계산하였다.

$$B_{uc} = \frac{1}{W_c} \quad (4)$$

산정된 W<sub>c</sub>의 역수인 단위 완충효과기여도(B<sub>uc</sub>)에 해당도(r)을 곱한 완충효과기여도(B<sub>c</sub>)는 다음 식 (5)으로 산출하였다.

$$B_c = rB_{uc} \quad (5)$$

본 연구에서 산정한 수변완충지대의 적정폭은 하천경계로부터 완충 여과효과기여도를 합하여 총 완충효과기여도가 1이 되는 지역까지의 폭으로서 산정된 비점오염원 관리

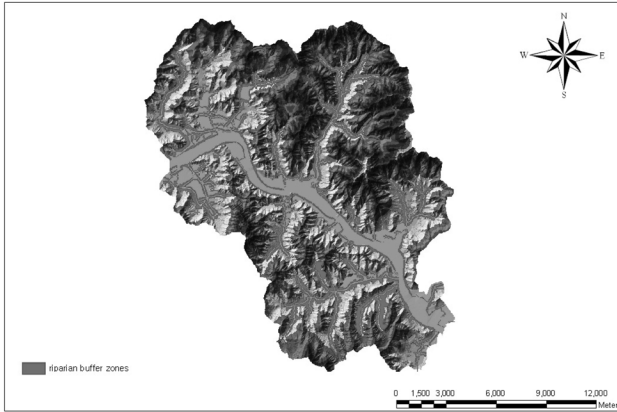
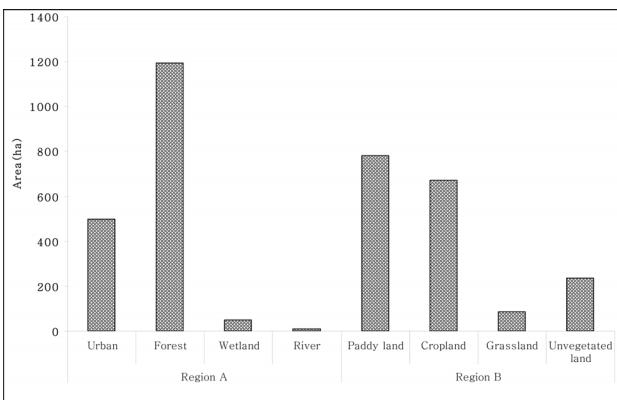


Fig. 4. Optimal riparian buffer width for diffused pollutants control in Nakbon K watershed.



Region A: Region is unnecessary (forest, wetland, river) and difficult (urban) for riparian area creation  
Region B: Region is easily convertible for riparian area (paddy land, cropland etc.)

Fig. 5. Classification of land use type within the estimated riparian buffer area

를 위한 수변 폭은 30~600 m 범위이며 일부구간을 제외하고는 평균 34 m의 범위가 가장 적합한 것으로 분석되었다 (Fig. 4).

비점원 오염물질 관리를 위하여 필요한 수변폭을 고려하여 이들 지역 내에 수변조성이 비교적 용이한 논, 밭, 초지, 나지를 추출하여 중첩한 결과, 총 대상 면적 3,529.26 ha 중 수변완충지대로 조성이 가능한 지역은 1,776.51 ha로 수변 완충지대로 추출된 지역의 약 50%로 나타났으며, 조성이 불가능한 시가화·건조지역은 약 14%, 그 외 지역은 산림이나 습지 등 수변완충지대로의 조성이 필요 없는 지역으로 나타났다(Fig. 5).

### 3.2. 탄소 축적 분석

#### 3.2.1. 조성된 수변완충지역에서의 바이오매스 저장량 변화

대상 유역 주변인 낙동강 중·하류지역에 자생하는 초본류 식물로는 갈대와 부들 등이, 목본류는 버드나무류가 주로 서식하고 있는 것으로 보고되었다.<sup>17,33)</sup> 하천의 수변완충지대 조성에 따른 식물 생체량의 변화는 식 (2)에 의하여 낙동강 중·하류권에 분포하고 있는 갈대, 애기부들, 줄, 물

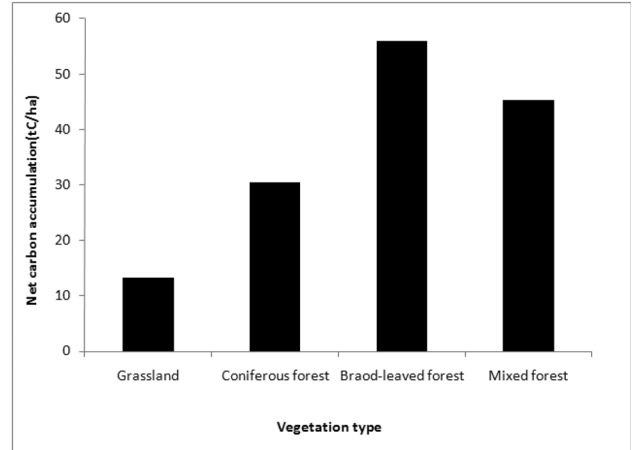


Fig. 6. Carbon accumulation by the various vegetation type in the riparian area creation.

억새 4가지의 초본류와 침엽수림, 활엽수림, 혼효림으로 분류하여 임업통계연보<sup>35)</sup>를 참고하여 3년 동안의 목본류 성장량의 평균값을 이용하여 연간 바이오매스 순증가량을 계산하였다. 분석 결과 수변완충지대의 조성에 따른 이산화탄소 순 흡수량은 활엽수림, 침엽수림, 혼효림, 초본 식재 지역에서 각각 연간 56 tC/ha, 30 tC/ha, 45.34 tC/ha, 13 tC/ha 인 것으로 나타났다(Fig. 6).

#### 3.2.2. 조성된 수변완충지역에서의 토지전용에 따른 탄소 배출 및 흡수량

토지이용변화에 따른 탄소흡수 및 배출량은 토지이용변화시 발생하는 바이오매스 소각으로 인한 배출과 남은 잔재 바이오매스의 부후, 그리고 토양탄소의 변화 등 세 가지로 추정할 수 있다.<sup>36)</sup> 잔재 바이오매스의 부후는 대부분의 경우 10년에 걸쳐 일어나며 전용면적을 토대로 추정하게 되는데,<sup>29)</sup> 본 연구에서는 IPCC 가이드라인을 기초로 전용전과 전용 후의 바이오매스량을 이경화 등의 자료<sup>31)</sup>를 이용하여 분석하였으며, 전용에 따른 탄소배출 및 흡수량은 전용 후 잔존 바이오매스가 방치되어 서서히 부식하면서 방출되는 이산화탄소만을 대상으로 하였다.<sup>36)</sup> 분석결과 타용도로의 토지 전용에 따른 바이오매스의 부후는 식생별로 보면 활엽수림에서 가장 큰 변화가 일어나는 것으로 나타났으며, 경작지에서 초지(다년생 초본지역)로 전용되었을 경우 탄소의 배출이 일어나는 것으로 나타났다(Fig. 7). 토지전용에 따른 토양 탄소(C)의 변화량은 활엽수림에서 2,785 ton, 혼효림에서 1,984 ton이, 침엽수림에서 1,184 ton 순으로 축적되는 것으로 나타났다. 다년생 초본지역의 경우는 약 148 ton의 탄소가 배출되는 것으로 나타났다. 다년생 초본지역에서 탄소가 배출되는 것은 경작지에서 초지로 전용되었을 때 배출되는 양이 나지에서 초지로 전용되었을 경우 흡수하는 양보다 크기 때문에 일어나는 현상으로, 이러한 결과는 수변완충지대 조성시 초본류의 도입이 필요할 경우에는 가급적 기존 경작지역 보다는 나지에 조성하는 것이 탄소흡수 면에서 유리함을 보여준다.

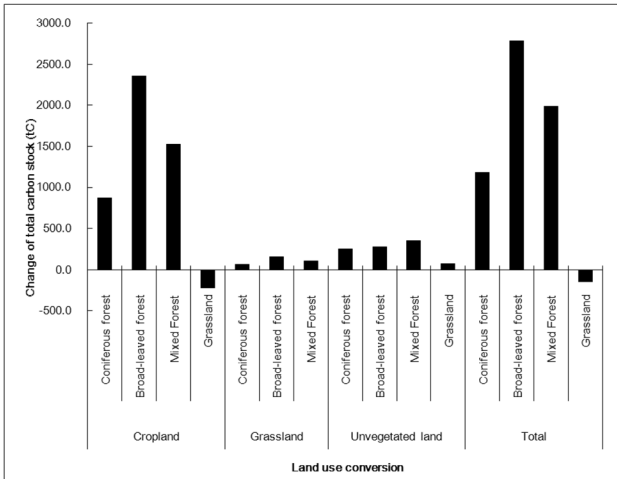


Fig. 7. Change of total carbon stock in soil by land use conversion with various vegetation type at created riparian buffer area.

초지가 산림에 비해 총 생태계 탄소 축적량의 훨씬 적은 부분을 차지하고 있으며 초지가 황폐화 되는 경우에는 생체량은 시간에 따라 감소하게 되며, 주기적으로 수확할 경우에는 수확여부에 따라 생체량의 증감이 나타날 것이다. 하지만 일반적으로 자연적인 조건에서 생장하는 초본류에 의하여 생산되는 바이오매스는 해마다 혹은 몇 년 마다 반복해서 나타나므로 일반적으로 순수 바이오매스 탄소 축적량은 일정하게 유지하게 된다고 가정할 수 있다.<sup>37)</sup>

3.2.3. 조성된 수변완충지역에서의 토양탄소량 변화

토지이용변화에 따른 토양 내 탄소 변화량은 무기토양내의 탄소저장량 변화에 따른 이산화탄소 배출량을 대상으로 하였으며, 20년 동안 수변 조성 가능 면적인 약 1,776.51 ha를 수변식생대로 조성하는 것을 가정하여 계산하였다. 낙본 K 유역에서 수변식생대를 조성할 경우 유역내 논, 밭, 초지 및 나지의 면적은 각각 2,539 ha에서 1,756 ha, 2,199 ha에서 1,440.81 ha, 357.57 ha에서 269.82 ha, 1,573 ha에서 1,388 ha로 감소하게 되며 토양에 저장되어 있던 탄소 또한 매년 각 토지이용별로 2,367.49 tC, 1,742.04 tC, 166.73 tC, 135.02 tC로 감소하게 된다. 하지만 전용되는 면적만큼 목본류를 우점으로 하는 수변식생대를 조성할 경우 총

Table 2. Change of soil carbon in Nakbon K watershed after riparian buffer zone restoration

Land-use system	Soil carbon (tC)		Annual net accumulation (tC/yr)
	Before	After	
Paddy land	153,608.90	106,259.18	-2,367.49
Cropland	100,974.03	66,133.18	-1,742.04
Grassland	13587.66	10253.16	-166.73
Unvegetated area	18,087.66	15,387.35	-135.02
Scenario 1	0.00	120,625.03	6,031.25
Scenario 2	0.00	107,478.86	5,373.94
Total	1,514,535.79	308,404.73	1,786.71
		295,258.55	1,129.40

Note: Scenario 1 : riparian area restoration using woody plant, Scenario 2 : riparian area restoration using perennial grass

1,786.71 tC가, 초본류를 우점으로 하는 수변식생대를 조성할 경우 1,129.40 tC이 더 축적되는 것으로 나타났다(Table 2). 초본류보다 목본류에서 탄소축적이 더 많이 일어나는 것으로 분석되어 다른 국내연구와 유사한 경향을 나타내었다.<sup>31,38)</sup>

3.2.4. 수변완충지역 조성에 따른 탄소 축적

낙본 K 유역에 수변완충지역 조성 가능지역인 1,776.51 ha를 각각 침엽수림, 활엽수림, 다년생 초본지로 조성한다면, 침엽수림으로 조성 할 경우에는 연간 8,382.48 ton, 활엽수림의 경우 14,525.97 ton, 혼효림의 경우 11,825.92 ton, 다년생 초지로 조성하면 3,348.73 ton의 탄소를 각각 저장되는 것으로 나타났다(Table 3). 이러한 탄소 저장량은 2003년 기준으로 우리나라 1인당 배출하는 이산화탄소량은 평균 0.62톤, 자동차 1대가 배출하는 이산화탄소량은 7.9톤이라 보고된 국립산림과학원의 자료<sup>20)</sup>와 비교할 때 본 연구의 결과 산정된 수변완충지역에 매년 흡수하는 이산화탄소량은 자동차 약 5천대에서 배출되는 이산화탄소량과 비슷하며, 4인 기준 가정 약 2만 가구에서 나오는 이산화탄소량과 유사한 양으로 파악되었다.

4. 결론

Table 3. Potential CO<sub>2</sub> accumulation after riparian area restoration in Nakbon K watershed

Potential reduction of CO <sub>2</sub>	Land-use Conversion	Increment of biomass (tC/yr)	Emissions and uptake by soil (tC/yr)		Total (tC/yr)
			Land-use Conversion (tC/yr)	Emissions and uptake by soil (tC/yr)	
Potential reduction of CO <sub>2</sub>	Coniferous forest	5,411.04	1,184.73	1786.71	8,382.48 (30,735.78)*
	Broad-leaved forest	9,953.82	2,785.44	1786.71	14,525.97 (53,261.89)
	Mixed forest	8,055.05	1,984.16	1786.71	11,825.92 (43,361.71)
	Grassland	2,366.98	-147.65	1129.40	3,348.73 (12,278.66)

\* unit of ( ) is ton CO<sub>2</sub>/yr

본 연구에서는 비점오염물질의 유입관리를 위한 적정 수변완충폭의 산정 방안과 산정된 수변완충지역에 식재되는 식생 유형에 따른 탄소 축적 효과를 비교하여 비점오염물질의 제어뿐만 아니라 탄소의 축적도 가능한 수변완충 지역을 친환경적으로 이용하고 관리하기 위한 효율적인 방안을 제시하였다.

낙동강 중·하류지역인 낙본 K 유역을 대상으로 연구를 수행한 결과 대상 하천에 30~600 m 범위의 수변 폭이 필요한 것으로 분석되었으며, 산출된 수변완충지대 조성 필요 지역에서 논, 밭, 초지, 나대지 등 수변 조성이 용이한 지역은 1,776.51 ha로 산출된 지역의 약 50%로 나타났다. 1776.51 ha 면적에 해당하는 수변완충지역을 활엽수림으로 조성할 경우 14,526 ton, 혼효림으로 조성할 경우 11,826 ton, 침엽수림으로 조성할 경우 8,382 ton, 다년생 초지로 조성할 경우에는 3,349 ton의 탄소가 매년 축적되는 것으로 나타났다.

탄소축적을 고려하여 수변완충지역을 조성할 경우, 다년생 초본류 보다는 목본 식물 위주의 설계가 탄소축적 및 이산화탄소 저감량에 있어서 효율적이라고 판단된다. 하지만, 수변지역은 수리·수문학적 상태에 따라서 탄소 흡수 및 축적 기능이 달라지며,<sup>39)</sup> 이러한 대상지역의 수문이나 토양 특성 및 하천 구조에 따라 또는 주변 경관에 따라 적용할 수 있는 식물종이 달라질 수 있다.<sup>33)</sup> 따라서 수변완충지역을 조성할 경우 해당 유역의 오염원, 서식환경, 경관구조 및 탄소축적량 등을 종합적으로 고려하여 조성하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

## 사사

본 연구는 부산지역환경기술개발센터의 2007년도 연구사업비(07-1-70-76)의 지원과 2008년도 교육과학기술부와 한국산업기술재단 지역혁신인력양성사업의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

KSEE

## 참고문헌

1. 김승, 이진원, 류대영, 하천내 수목의 현황 및 관리방안에 관한 조사·연구, 건설교통부(1997).
2. 우효섭, “수변복원의 이해(1): 미국의 수변 복원 가이드라인을 중심으로,” 대한토목학회지, **48**(7), 66~71(2000).
3. 최지용, 정유진, 수질개선을 위한 수변녹지의 조성 및 관리방안 연구, 한국환경정책·평가연구원(2000).
4. Foley, J. A., DeFires, R., Asner, G. P., Barford, G., Bonan, G., Carpenter, S. R., Chapin, F. S., Coe, M. T., Daily, G. C., Gibbs, H. K., Helkowski, J. H., Holloway, T., Howard, E. A., Kucharik, C. J., Monfreda, C., Patz, J. A., Prentice, I. C., Ramankutty, N. and Snyder, P. K., “Global Consequences of Land Use,” *Science*, **309**(5734), 570~574(2005).
5. Pimm, S. L. and Raven, P. H., “Biodiversity: Extinction by Numbers,” *Nature*, **403**, 843~844(2000).
6. U.S. Department of Energy, Carbon Sequestration, State of the Science. Draft Report. Ch.4: Carbon Sequestration in Terrestrial Ecosystems(1997).
7. Tufekcioglu, A., Raich, J. W., Isenhardt, T. M. and Schultz, R. C., “Biomass, carbon and nitrogen dynamics of multi-species riparian buffers within an agricultural watershed in Iowa, USA,” *Agroforestry Systems*, **57**(3), 187~198(2003).
8. Giese, L. A. B., Aust, W. M., Kolka, R. K. and Trettin, C. C., “Biomass and carbon pools of disturbed riparian forest,” *Forest Ecology and Management*, **180**, 493~508(2003).
9. Delgado, A. N., Periago, E. L. and Viqueira, F. D., “Vegetated filter strips for wastewater purification: a review,” *Bio-resource Technology*, **51**(1), 13~22(1995).
10. Palone, R. S. and Todd, A. H., Chesapeake Bay Riparian Handbook: A Guide for Establishing and Maintaining Riparian Forest Buffer, USDA, Forest Service Northeastern Area State & Private Forestry, Natural Resources Conservation Service, Cooperative State Research, Education and Extension Service(1998).
11. 금강유역환경청, 금강수계 수변구역 관리 기본계획(‘09~‘13)(2008).
12. 낙동강유역환경청, 낙동강수계 수변구역 관리 기본계획(2009).
13. 이병수, 길경익, “식생피도가 식생여과대의 질소 및 인 처리효율에 미치는 영향,” 한국물환경학회지, **24**(4), 499~503(2008).
14. 김성원, 최이송, 오종민, “비점오염저감을 위한 수변완충지대의 적정설계,” 환경영향평가, **17**(1), 1~9(2008).
15. Knoepp, J. D. and Clinton, B. D., “Riparian zones in southern Appalachian headwater catchments: Carbon and nitrogen responses to forest cutting,” *Forest Ecology and Management*, **258**(10), 2282~2293(2009).
16. Blazejewski, G. A., Stolt, M. H., Gold, A. J. and Groffman, P. M., “Macro-and micromorphology of subsurface carbon in riparian zone soils,” *Soil Science Society of American Journal*, **69**(4), 1320~1329(2005).
17. 여운상, 이용민, 김기섭, 성기준, 강대석, 이석모, “낙동강 중·하류지역의 수변식생분포 특성,” 한국환경과학회지, **7**(2), 149~162(2008).
18. 환경부, 낙동강수계 비점오염원 관리방안 마련을 위한 조사사업 보고서(2003).
19. 박성배, 이상균, 장광현, 정광석, 주기재, “장마기의 강우가 낙동강 하류(물금) 수질에 미치는 영향,” 한국하천호수학회지, **35**(3), 160~171(2002).
20. 국립환경과학원, 수질오염총량관리를 위한 ‘08 낙동강수계 목표수질측정망 운영결과 보고서(2009).
21. Dosskey, M. G., “How much can riparian buffers reduce agricultural nonpoint source pollution?” *Riparian Ecology and Management in Multi-Land Use Watersheds*, Wigington, P. J. and Beschta, R. L. (Eds.). Amer. Water Resour. Assoc., Middleburg, VA, pp. 427~432(2000).
22. Dosskey M. G., Helmers, M. J. and Eisenhauer, D. E., “A design aid for determining width of filter strips,” *J. Soil*

- and Water Conservation*, **63**(4), 232~241(2008).
23. Rafael, M. C., Parsons, J. E., Vegetative Filter Strips Hydrology and Sediment Transport Modelling System, University of Florida(2005).
  24. Phillips, J. D., "An evaluation of the factors determining the effectiveness of water quality buffer zones," *J. Hydrology*, **107**(1-4), 133~145(1989).
  25. Knisel W. G. J. R, CREAMS: A field scale model for chemicals, Runoff, and erosion from agricultural management systems, conservation research report No.26, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.(1980).
  26. Aslan, A., Development and application of vegetative buffer width modeling using Geographic Information Systems, Master of Science, University of Missouri(2009).
  27. Xiang, W., "GIS-based riparian buffer analysis: injecting geographic information into landscape planning," *Landscape and Urban Planning*, **34**(1), 1~10(1996).
  28. Xiang, W., "A GIS method for riparian water quality buffer generation," *Int. J. Geographical Information Science*, **7**(1), 57~70(1993).
  29. IPCC, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T. and Tanabe, K. (Eds). Published: IGES, Japan (2006).
  30. 국립산림과학원, 지구온난화와 산림 그리고 탄소나무 계산기(2006).
  31. 이경학, 손영모, 김영수, "임업 및 토지이용부문의 온실가스 흡수 및 배출 현황," *임산에너지*, **20**(1), 53~61(2001).
  32. 농업토양정보, <http://asis.rda.go.kr>(2009).
  33. 이윤경, 김종원, 한국의 하천식생, 계명대학교출판부(2005).
  34. Landphair, H. C. and Klatt, F., Landscape architecture construction, Prentice Hall, NJ(1998).
  35. 산림청, 임업통계연보(2006).
  36. 안소은, 한기주, 탄소고정을 위한 토지이용모델 활용방안에 관한 연구, 한국환경정책·평가연구원(2004).
  37. 환경부, 환경관리공단: 국가 온실가스 인벤토리 작성을 위한 2006 IPCC 가이드라인(2008).
  38. 이동근, 박찬, "토지이용변화에 따른 식생 및 토양의 이산화탄소 저장잠재량 분석," *한국환경복원녹화기술학회지*, **12**(2), 95~105(2009).
  39. Gulledge, J. and Schimel, J. P., "Controls on soil carbon dioxide and methane fluxes in a variety of taiga forest stands in interior Alaska," *Ecosystems*, **3**(3), 269~282(2000).