총량관리 단위유역의 토지이용 변화 및 오염물질 배출형태 분석

박준대 · 오승영^{*} · 최옥연^{*}

국립환경과학원 물환경연구부 유역총량연구과

^{*}서울시립대학교 환경공학과

Analysis of Changes in Land Use and Pollution Load for the Unit Watersheds of Total Maximum Daily Loads

Jun Dae Park · Seung Young Oh^{*} · Ok Youn Choi^{*}

Water Pollution Load Management Research Division, Water Environmental Research Department,
National Institute of Environmental Research

^{*}Department of Environmental Engineering, University of Seoul

(Received 16 December 2013, Revised 15 January 2014, Accepted 5 February 2014)

Abstract

The land use of the unit watersheds should be maintained appropriately in order to keep the load allotment stable for the management of Total Maximum Daily Loads (TMDLs). This study classified the land area in four types and analyzed the use of each land type and its changing pattern by calculating the occupation and conversion ratios for the unit watersheds in three river basins. The forest land showed the greatest occupation ratio with 63.0%, followed by the farm land with 23%, the other area with 8.0% and the site area with 6.0% in 2003. The occupation ratio of the site and the other area increased by 0.4% and 0.2% respectively, and that of the farm and the forest land decreased by 0.4% and 0.2% respectively in 2007. The conversion ratio for the site area ranged from 1.65% to 1.97%, for the farm land from -0.47% to -0.33%, for the forest land from -0.10% to -0.04% and for the other area from 0.17% to 1.97%. It can be inferred that the decrease in the farm and the forest land contributed to the increase in the site area and that the increase in the other area was mainly made by the decrease in the forest land. It could be more effective to take into account the changes in the site area and in the forest land in the process of developing the TMDL plans.

Key words : Conversion ratio, Land use pattern, Occupation ratio, Total maximum daily loads, Unit watershed

1. Introduction

수질오염총량관리제는 단위유역의 목표수질을 설정하고, 이 목표수질을 달성할 수 있도록 유역으로부터 배출되는 오염부하량을 할당하여 관리하는 제도이다(MOE, 2004; Park et al., 2012). 단위유역의 할당부하량은 기존오염원에 의한 자연증감부하량과 지역개발부하량으로 구성된다. 지역개발부하량은 총량관리 계획기간의 개발계획에 의하여 추가로 증가되는 부하량이다(MOE, 2012). 그러므로 총량관리계획을 원활하게 수립하기 위해서는 각 개발계획에 대한 부하량을 최대한 감소시키는 것이 필요하다. 유역에서 이루어지는 지역개발은 점오염원의 증가뿐만 아니라 단위유역의 토지형태를 변화시켜 비점오염원의 증가를 수반하게 된다. 유역으로부터 발생하는 비점부하량은 토지이용형태에 따라 매우 다르게 나타나며, 수질에 미치는 영향도 다양하게 나타난다(Allan et al., 1997; Bolstad and Swank, 1997). Jung

et al. (2006)은 유역의 토지이용과 오염원이 수질에 미치는 영향을 분석하였으며, Kim et al. (2007) 및 Yoon et al. (2007)은 토지이용과 수질특성과의 관련성을 분석하였다. 토지이용 변화에 따른 수질영향은 도시와 주거지역 등의 토지형태에서 특히 더 크게 나타나고 있다(Song and Pak, 2010).

오염원이 밀집되어 있거나 오염배출이 집중적으로 일어나는 단위유역에서는 자체 단위유역의 할당부하량은 물론, 목표수질을 달성하기가 어려울 뿐만 아니라, 하류 단위유역들에 대한 목표수질에도 영향을 미치게 된다. 점오염원에 대한 배출부하량의 감소는 관거를 통한 차집이나 각종 처리시설 등을 통하여 비교적 용이하게 이루어질 수 있으나, 토지계로부터 발생하는 비점오염원 부하량에 대해서는 배출량을 감소시키기가 여간 어려운 일이 아니다. 그러므로 비점오염원 할당부하량을 안정적으로 유지하기 위해서는 오염부하 증가요인이 되는 토지변환을 가능한 한 최소로 하여야 한다. 즉, 현재의 토지형태를 기준으로 하여 오염부하 증가요인이 큰 토지형태는 가능한 한 줄이고 오염부하 증가요인이 상대적으로 적은 토지형태는 가능한 한 늘려가는 방향으로 계획을 수립하여야 한다.

^{*} To whom correspondence should be addressed.
osyoung@korea.kr

유역의 토지이용이 변화되면 오염물질 배출형태도 변화된다. 총량관리 단위유역의 토지형태는 할당부하량 및 목표수질 수준을 결정짓는 중요한 요소 중의 하나이다. 단위유역의 할당부하량을 준수하고 목표수질을 안정적으로 달성하기 위해서는 단위유역의 토지형태를 적정하게 유지하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 단위유역별 토지이용 변화 특성 및 오염물질 배출형태를 분석하여 총량관리지역의 토지형태를 적정하게 유지하고 효율적으로 관리할 수 있는 방안을 제시하고자 하였다.

2. Materials and Methods

2.1. 조사대상 지역

본 연구는 토지이용 현황자료 등 자료 확보가 가능한 낙동강, 금강 및 영산강·섬진강수계의 3대강수계를 대상으로 하였다(Fig. 1 참조). 낙동강 등 3대강수계는 2004년 수질오염총량관리제가 최초로 도입된 이후부터 의무제로 시행되고 있는 지역이다. 의무제 시행지역에서는 광역시도가 주체가 되어 매 단계별로 기본계획을 수립하며, 단위유역별 오염원 자료를 비롯하여 각종 토지이용 현황자료가 구축된다. 한강수계에서는 2013년 중반 이후부터 수계 일부지역인 경기도 지역에서만 의무제로 시행되므로 전체 지역에 단위유역별 자료가 구축되고 있지 않다. 낙동강수계는 5개 광역시도인 강원도, 경상북도, 경상남도, 대구광역시 및 부산광역시에 기본계획을 수립하고 있으며, 41개의 단위유역으로 구성되어 있다. 금강수계는 4개 광역시도인 충청북

도, 충청남도, 대전광역시 및 전라북도에서 기본계획을 수립하고 있으며, 32개의 단위유역으로 구성되어 있다. 영산강·섬진강수계는 4개 광역시도인 전라남도(영산강), 광주광역시(영산강), 전라북도(섬진강) 및 전라남도(섬진강)에서 기본계획을 수립하고 있으며, 23개의 단위유역으로 구성되어 있다.

2.2. 토지형태 분류

토지계 발생부하량은 실측조사를 통하여 산정하거나 발생부하원단위를 이용하여 산정한다. 실측조사는 유역 내 전체 토지를 구획으로 구분하여 조사하거나 대표유역을 선정하여 조사한다. 발생원단위에 의한 방법은 지목면적과 연평균 발생부하원단위를 이용하여 산정한다. 발생부하원단위를 사용하여 오염부하량을 산정할 경우에는 28개로 세분화되어 있는 지목을 오염물질 발생특성이 유사한 지목들로 그룹화하여 5개의 토지형태로 분류하여 산정한다(NIER, 2012). 본 연구에서도 이와 같은 분류에 따라 토지형태를 분류하였으며, 토지용도가 유사한 전과 답은 하나로 하여 농경지역으로 표기하였다(Table 1 참조). 토지형태 중에서 건물, 공장, 도로 등으로 구성되어 있는 대지는 인위적인 오염요인 존재하는 지역으로서 토지에 의한 수질오염 영향이 매우 큰 지역이다. 농경지역에서도 인위적인 활동에 의하여 오염발생이 일어나므로 수질오염 영향이 비교적 큰 지역이라고 할 수 있다. 한편, 산림지역은 인위적인 오염요인이 없는 자연지역으로서, 수질오염 영향이 거의 없는 지역이다. 기타지역은 수질오염물질이 발생되기는 하나 그 양이 매우 미미하므로 수질오염 영향이 매우 적은 지역이라고 할 수 있다.

Fig. 1. The map for the study area.

Table 1. The classification of land use type

		Particular land use
Site area		Building, Factory, School, Road, Railroad, Parking, Gas station, Warehouse, Sports, Recreation, Religion, Historic site
Farm land	Rice paddy	Rice paddy
	Upland field	Upland field, Orchard
Forest land		Forest land
Other area		Mineral spring site, Salt pond, Bank, Stream, Ditch, Retarding reservoir, Fish farm, Water supply site, Park, Graveyard, Pasture, Miscellaneous land

2.2. 토지이용 변화특성 분석

토지이용 변화특성은 토지형태별 점유율과 전환율을 산정하여 분석하였다. 토지형태별 점유율은 대지, 농경지역, 산림지역 및 기타지역이 단위유역 내에서 각각 차지하고 있는 면적비율을 의미한다. 토지형태별 전환율은 현재의 토지형태가 일정기간 동안에 다른 형태의 토지로 전환되는 면적비율을 의미한다. 토지형태에 대한 점유율 정보는 수질오염에 취약한 단위유역 등을 판단할 수 있는 기준을 제공해 줄 수 있다. 토지형태에 대한 전환율 정보는 단위유역의 토지변화 유형을 판별할 수 있는 속성들을 제시해 줄 수

있으며, 또한, 최종 목표년도에 대한 토지이용 형태를 예측할 수 있게 해준다.

토지형태별 점유율 및 전환율은 3대강수계 96개 단위유역(낙동강수계 41개, 금강수계 32개 및 영산강·섬진강수계 23개 단위유역)을 대상으로 하여 산정하였다. 토지면적 자료는 제2단계 수질오염총량관리 기본계획 보고서의 토지계 오염원 자료를 이용하였다(Busan Metropolitan City, 2009; Chungcheongbuk-do, 2009; Chungcheongnam-do, 2009; Daegu Metropolitan City, 2009; Daejeon Metropolitan City, 2009; Gangwon-do, 2009; Gwangju Metropolitan City, 2009; Gyeong-sangbuk-do, 2009; Gyeongsangnam-do, 2009; Jeollabuk-do, 2009a; Jeollabuk-do, 2009b; Jeollanam-do, 2009a; Jeollanam-do, 2009b). 토지형태별 점유율은 2003년도와 2007년도의 토지면적을 기준으로 하여 산정하였다. 토지형태별 전환율은 2003년부터 2007년까지 각 연도별 전환율을 구한 다음, 연도별 전환율을 평균하여 산정하였다. 2003년도는 제1단계 수질오염총량관리제도가 시작되기 바로 직전연도이며, 2007년도는 제2단계 총량관리 기본계획 수립을 위한 기준년도에 해당된다.

2.3. 오염물질 배출형태 분석

단위유역의 토지형태는 오염원의 밀집정도 또는 오염물질의 배출형태와 깊은 관계가 있다. 토지이용 변화에 따른 오염물질 배출형태를 분석하기 위하여 토지계 오염부하량 증가율과 토지형태별 전환율 사이의 상관관계를 분석하였다. 오염부하량 증가를 분석하기 위한 오염물질 항목은 3대강수계 전 지역에서 총량관리 대상물질로 관리하고 있는 Biochemical Oxygen Demand (BOD)를 기준으로 하였다. BOD 부하량의 증가는 점오염원 등 모든 오염원으로부터 발생할 수 있으나, 본 연구에서는 토지이용 변화에 따른 증가율을 파악하고자 하는 것이므로 토지계 비점오염원으로 한정하여 분석하였다. 토지계 BOD 부하량 증가율은 2003년도와 2007년도의 토지형태별 점유율에 따라 산정하였다.

효과적인 총량관리를 위해서는 각 단위유역에서 나타나는 특성적인 수질분포 및 수질변화 등을 파악하여 이를 계획수립 및 이행평가 과정에 반영할 필요가 있다. 단위유역의 수질분포는 오염원 뿐만 아니라 하천유량 변화 등에 따라서도 서로 다르게 나타나며(Park et al., 2010), 특히, 오

염원이 밀집되어 있고 오염부하가 집중적으로 배출되는 지역에서 크게 나타난다(Park et al., 2012). 토지이용에 따른 수질영향을 파악하기 위하여 단위유역의 토지형태별 점유율과 수질 사이의 관계 그래프를 작성하고 상관계수를 구하였다. 각 단위유역의 토지형태별 점유율과 수질자료는 2007년도 자료를 기준으로 하였다.

3. Results and Discussion

3.1. 단위유역별 토지이용 변화

3.1.1. 토지형태별 점유율

3대강수계 단위유역에 대한 2003년도의 토지형태별 점유율을 보면, 산림지역이 약 63.0%로서 가장 넓은 지역을 차지하고 있으며, 농경지역은 약 23.0%, 기타지역은 약 8.0% 및 대지는 약 6.0%를 차지하고 있는 것으로 나타났다(Fig. 2(a) 참조). 2007년도의 토지형태별 점유율은 산림지역이 약 62.8%를 차지하고 있으며, 농경지역은 약 22.6%, 기타지역은 약 8.2% 및 대지는 약 6.4%로서 2003년도에 비하여 대지 점유율이 0.4% 정도 증가하였으며, 농경지역은 0.4% 정도 감소하였다. 또한, 산림지역의 점유율은 0.2%가 감소하였으며, 기타지역은 0.2%가 증가하였다(Fig. 2(b) 참조). 토지형태별 점유율이 가장 큰 산림지역의 경우, 대지에 비하여 약 10배 정도의 높은 점유율을 나타내고 있으며, 농경지역의 경우에는 대지에 비하여 약 4배 정도 높게 나타나고 있다. 3대강수계 수질오염총량관리 지역에서는 대지와 기타지역의 면적은 증가한 반면, 농경지역과 산림지역은 감소한 것으로 나타나고 있다.

수계별 토지형태 점유율을 보면 다음 Fig. 4와 같다. 대지점유율을 보면 2003년도에는 5.2~7.6%의 범위로 나타났으며, 2007년도에는 5.6~8.0%의 범위로서 모든 수계에서 증가하는 현상을 나타내고 있다. 3대강수계 중에서 대지 점유율이 가장 높게 나타난 수계는 금강수계이며, 낙동강수계와 영산강·섬진강수계는 거의 유사한 점유율을 나타내고 있다. 농경지역의 점유율은 2003년도에는 18.4~29.1%의 범위로 나타났으며, 2007년도에는 18.1~28.6%의 범위로서 모든 수계에서 감소하는 현상을 나타내고 있다. 3대강수계 중에서 농경지역의 점유율이 가장 높게 나타난 수계는 금강수계이며, 낙동강수계에서 가장 낮은 점유율을 나타내고

Fig. 2. The average occupation ratio of land use type in three river basins.

Fig. 3. The occupation ratio of land use type by the river basin.

Fig. 4. The distribution of the occupation ratio of land use type for the unit watershed in three river basins (NR: Nakdong river, GR: Geum river, YSR: Youngsan·Seomjin river).

있다. 산림지역의 점유율은 2003년도에 54.8~68.3%의 범위로 나타났으며, 2007년도에는 54.5~68.3%의 범위로서 모든 수계에서 감소하는 현상을 나타내고 있다. 3대강수계 중에서 산림지역의 점유율이 가장 높게 나타난 수계는 낙동강수계이며, 금강수계에서 가장 낮은 점유율을 나타내고 있다. 기타지역의 점유율은 2003년도에는 7.3~8.5%의 범위로 나타났으며, 2007년도에는 7.6~8.9%의 범위로서 모든 수계에서 증가하는 현상을 나타내고 있다. 3대강수계 중에서 기타지역의 점유율이 가장 높게 나타난 수계는 금강수계이며, 영산강·섬진강수계 가장 낮은 점유율을 나타내고 있다. 금강수계는 타 수계에 비하여 대지와 농경지역의 점유율은 상대적으로 높은 반면, 산림지역의 점유율은 상대적으로 낮게 나타나고 있다. 한편, 낙동강수계는 타 수계에 비하여 대지와 농경지역의 점유율이 상대적으로 낮은 반면, 산림지역의 점유율은 상대적으로 높게 나타나고 있다. 이와 같은

토지형태로 볼 때, 금강수계와 낙동강수계는 서로 상반된 특성을 나타내고 있다. 금강수계는 인위적 오염요인이 큰 토지형태의 점유율이 높다는 것을 알 수 있으며, 낙동강수계는 인위적 오염요인이 작은 토지형태의 점유율이 높다는 것을 알 수 있다. 그러므로 금강수계는 타 수계에 비하여 상대적으로 수질오염에 취약한 토지형태로 구성되어 있다고 할 수 있으며, 낙동강수계는 수질오염에 비교적 안정적인 토지형태로 구성되어 있다고 볼 수 있다.

각 수계에 대한 단위유역별 토지형태 점유율 분포를 보면 다음 Fig. 4와 같다(2007년도 토지형태 기준). 대지의 경우를 보면, 낙동강수계의 단위유역별 대지 점유율은 1.6~25.0%의 범위로 나타났으며, 최대/최소 점유배율(최대점유율을 최소점유율로 나눈 값)은 약 15.6을 보이고 있다. 금강수계에서는 단위유역별 대지 점유율이 2.6~21.1%의 범위로 나타났으며, 최대/최소 점유배율은 약 8.2이다. 영산강·

섬진강수계에서는 단위유역별 대지 점유율이 2.4~20.8%의 범위로 나타났으며, 최대/최소 점유배율은 약 8.6이다. 농경지역의 경우를 보면, 낙동강수계의 단위유역별 농경지역 점유율은 3.7~34.4%의 범위로 나타나고 있으며, 최대/최소 점유배율은 약 9.3을 보이고 있다. 금강수계에서는 단위유역별 농경지역 점유율이 10.1~59.9%의 범위로 나타났으며, 최대/최소 점유배율은 약 5.9이다. 영산강·섬진강수계에서는 단위유역별 농경지역 점유율이 7.4~41.5%의 범위로 나타났으며, 최대/최소 점유배율은 약 5.6이다. 임야지역을 보면, 낙동강수계에서는 단위유역별 임야지역 점유율이 37.1~89.0%의 범위로 나타났으며, 최대/최소 점유배율은 약 2.4를 보이고 있다. 금강수계에서는 단위유역별 임야지역 점유율이 13.3~83.7%의 범위로 나타났으며, 최대/최소 점유배율은 약 6.3이다. 영산강·섬진강수계에서는 단위유역별 임야지역 점유율이 36.4~85.4%의 범위로 나타났으며, 최대/최소 점유배율은 약 2.3이다. 기타지역을 보면, 낙동강수계에서는 단위유역별 기타지역 점유율이 2.5~26.4%의 범위로 나타났으며, 최대/최소 점유배율은 약 10.6을 보이고 있다. 금강수계에서는 단위유역별 기타지역 점유율이 3.7~23.0%의 범위로 나타났으며, 최대/최소 비율은 약 6.2이다. 영산강·섬진강수계에서는 단위유역별 기타지역 점유율이 4.5~14.9%의 범위로 나타났으며, 최대/최소 점유배율은 약 3.3이다.

3대강수계의 토지형태 중에서 최대/최소 점유배율이 가장 큰 토지형태는 대지이며, 농경지역, 기타지역 및 임야지역의 순서로 나타나고 있다. 임야지역의 최대/최소 점유배율이 가장 작은 이유는 단위유역에 대한 임야지역의 점유율이 다른 토지형태에 비하여 월등하게 커서 최대값과 최소값의 배율이 매우 작아졌기 때문이다.

3.1.2. 토지형태별 전환율

3대강수계 단위유역에 대한 토지형태별 전환율은 다음 Table 2와 같다. 토지형태별 전환율 중에서 대지와 기타지역은 증가하고 있는 토지형태이므로 양(+)의 값으로 산정되었으며, 농경지역과 산림지역은 감소하고 있는 토지형태이므로 음(-)의 값으로 산정되었다. 3대강수계의 대지 전환율은 평균 1.76%로 나타났으며, 이것은 매년 3대강수계의 대지면적이 전년도 대지면적에 비해 1.76%씩 증가하고 있다는 것을 의미한다. 수계별 대지 전환율은 1.65~1.97%의 범위를 보이고 있으며, 낙동강수계에서 가장 높게 나타나고 있다. 3대강수계의 농경지역 전환율은 평균 -0.40%로 나타났으며, 수계별 농경지역 전환율은 -0.47~0.33%의 범위를 보이고 있다. 3대강수계에서는 금강수계의 농경지역 전환율이 가장 높게 나타나고 있다. 또한, 임야지역 전환율은 평균 -0.07%로 나타났으며, 수계별로는 -0.10~-0.04%의 범위를 보이고 있다. 임야지역 전환율은 영산강·섬진강수계에서 가장 높게 나타나고 있다. 기타지역의 전환율은 평균 1.04%로 나타났으며, 수계별로는 0.17~1.97%의 범위를 보이고 있다.

3대강수계 중 대지 전환율이 가장 높게 나타난 지역은 낙동강수계인데, 이것은 낙동강수계가 타 수계에 비하여 지

Table 2. The average conversion ratio of land use type in three river basins

	Site area	Farm land	Forest land	Other area
Nakdong river	1.97	-0.40	-0.04	0.17
Geum river	1.65	-0.47	-0.06	1.97
Youngsan·Seomjin river	1.66	-0.33	-0.10	0.99
Average	1.76	-0.40	-0.07	1.04

역개발이 비교적 활발하게 진행되고 있음을 시사해주고 있다. 금강수계에서는 농경지역과 기타지역의 전환율이 높게 나타나고 있는데, 특히 금강수계에서는 농경지역이 전환되어 주로 기타지역으로 변화되고 있는 것으로 보여진다.

토지형태가 전환되면 토지형태별 증감현상이 동시에 발생한다. 그러므로 단위유역 내에서 증가하는 토지형태가 있으면 이에 대응하여 감소하는 토지형태가 존재한다. 증감현상이 발생하는 토지형태 사이의 관련성을 파악하기 위하여 다음 Fig. 5와 같이 토지형태별 증감관계를 분석하였다. 토지형태별 증감관계 분석은, 양(+)의 방향으로 전환되고 있는 토지형태와 음(-)의 방향으로 전환되고 있는 토지형태를 조합으로 하여 분석하였으며, 각 토지전환율은 전환면적에 대한 상대적인 비교가 가능하도록 단위유역의 총면적에 대한 전환율을 사용하였다.

Fig. 5의 (a)와 (b)는 대지와 농경지역간의 관계 및 대지와 산림지역간의 관계를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이, 대지의 전환율이 증가할수록 농경지역의 음(-)의 전환율도 증가하고 있으며, 산림지역의 음(-)의 전환율도 증가하고 있다. 이와 같은 관계로 볼 때, 농경지역과 산림지역이 모두 대지면적의 증가에 기여한다고 판단할 수 있다. 또한, 산림지역에 비하여 농경지역의 증가현상이 더 뚜렷하게 나타나고 있는데, 이것은 대지로 전환된 면적 중 농경지역의 면적이 더 큰 부분을 차지하고 있다는 것을 시사해주고 있다. Fig. 5의 (c)와 (d)는 기타지역과 농경지역간의 관계 및 기타지역과 산림지역간의 관계를 나타낸 것이다. 기타지역의 전환율이 증가할수록 농경지역의 음(-)의 전환율은 감소하고 있는 반면, 산림지역의 음(-)의 전환율은 다소 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이와 같은 관계로 볼 때, 기타지역의 주요 증가요인은 산림지역의 감소라고 할 수 있으며, 농경지역의 감소는 기타지역의 증가에 크게 기여하지 않는다고 볼 수 있다.

3.2. 단위유역별 오염물질 배출형태

3.2.1. 오염부하량 증가율

토지계에서 오염부하량의 변화는 현재의 토지이용이 다른 형태의 토지이용으로 전환되기 때문에 발생하며, 3대강수계에서는 BOD 부하량이 모두 증가하는 것으로 나타났다. 2003년도부터 2007년도까지 3대강수계 단위유역별 토지계 BOD 부하량에 대한 증가율을 산정한 결과, 평균 5.56%로 나타났다. 3대강수계 중, 낙동강수계가 6.23%로 가장 높게 나타났으며, 금강수계가 5.32% 및 영산강·섬진강수계가 5.14%로 나타났다. 낙동강수계의 41개 단위유역별 오염부

Fig. 5. The conversion relationship between the increased and the decreased land use type for the unit watershed in three river basins.

하량 증가율은 -0.01~16.54%의 범위로 나타났으며, 금강수계의 32개 단위유역에서는 -4.90~12.98%의 범위로 나타났다. 영산강·섬진강수계의 23개 단위유역에서는 1.61~12.50%의 범위로 나타났다.

오염부하량 증가의 주요 요인을 파악하기 위하여 토지형태별 전환율과 오염부하량 증가율과의 상관관계를 분석하였다. Table 3은 토지형태별 전환율과 BOD 부하량 증가율 사이의 상관계수를 나타낸 것이다. 대지전환율과 BOD 부하량 증가율 사이의 상관계수는 약 0.98로서 다른 토지형태에 비하여 매우 강한 상관관계를 나타내고 있는데, 이것은 대지전환이 BOD 부하량 증가의 주요요인이 되고 있음을 나타내주고 있다. 이와 같은 BOD 부하량 증가율은 대지 전환율에 거의 비례하여 나타나고 있다. 대지 전환율과 BOD 부하량 증가율 간의 상관관계가 낙동강수계에서 가장 높게 나타난 것은 낙동강수계의 대지 전환율이 다른 수계에 비하여 더 높기 때문에 나타난 현상이다. 금강수계와 영산강·섬진강수계를 비교해 보면, 대지 전환율은 서로 유사하나 상관계수는 금강수계에서 약간 높게 나타나고 있는데, 이것은 금강수계의 기타지역 전환율이 BOD 부하량 증

가의 추가적인 요인으로 작용한 것으로 판단된다.

다음 Table 4는 오염부하량 증가율별 해당되는 단위유역을 나타낸 것이다. 낙동강수계에서 오염부하량 증가율이 15% 이상으로 매우 높은 단위유역은 밀양B 등 3개 단위유역이며, 낙본G 등 6개 단위유역에서도 10% 이상의 비교적 높은 증가율을 나타내고 있다. 한편, 오염부하량 증가율이 5% 미만으로서 비교적 낮게 나타나고 있는 단위유역은 남강A 등 21개 단위유역이며, 낙본B 단위유역은 오히려 오염부하가 감소하는 것으로 나타났다. 오염부하량 증가율이 높게 나타난 단위유역들은 상대적으로 대지 전환율이 높은 지역들이며, 오염부하량 증가율이 낮게 나타난 단위유역들은 대지 전환율이 낮은 지역들이다. 낙동강수계에서 15% 이상의 오염부하량 증가율을 나타내고 있는 단위유역들의 평균 대지 전환율은 4.91%이며, 10% 이상의 오염부하량 증가율을 나타내고 있는 단위유역들의 평균 대지 전환율은 3.75%이다. 또한, 5% 미만의 오염부하량 증가율을 나타내고 있는 단위유역들의 평균 대지 전환율은 0.99%이며, 오염부하가 감소하고 있는 단위유역의 대지 전환율은 0.01%로서 대지전환이 거의 이루어지지 않고 있는 지역이다.

금강수계의 32개 단위유역에 대한 오염부하량 증감율은 -4.90~12.98%의 범위를 보이고 있으며, 오염부하량 증가율이 10% 이상으로서 비교적 높게 나타나고 있는 지역은 병천A 등 5개 단위유역이다. 오염부하량 증가율이 5% 미만으로서 비교적 낮게 나타나고 있는 단위유역은 유등A 등 12개 단위유역이며, 금본B 등 3개의 단위유역은 오염부하가 감소하는 것으로 나타났다. 금강수계에서 10% 이상의 오염부하량 증가율을 나타내고 있는 단위유역들의 평균 대지 전

Table 3. The correlation coefficient between the conversion ratio of land use type and the change of BOD load for the unit watersheds in three river basins

	Site area	Farm land	Forest land	Other area
Nakdong river	0.9868	0.0058	0.0780	0.1268
Geum river	0.9861	-0.0503	-0.0244	-0.4800
Yongsan·Seomjin river	0.9824	-0.6920	-0.5158	-0.0202

Table 4. The unit watersheds by the rate of increase in pollution load in three river basins

Rate of increase	Nakdong river	Geum river	Youngsan·Seomjin river
Above 15%	MiY-B, NB-K, YeG-A	-	-
10~15%	NB-G, NB-A, GuH-A, NB-I, GuH-B, NB-N	ByC-A, MiH-C, MiH-A, GB-H, MaG-A	TaJ-A
5~10%	NB-L, NB-F, NaG-D, NB-E, NaG-E, NB-J, HwG-A, ByS-A, NB-H, MiY-A	MaG-C, GB-E, JeJ-A, GB-A, MaG-B, NoS-A, ChG-A, GB-J, GB-I, MiH-B, GaC-A, TaC-A	YB-B, BoS-A, SB-A, HwR-A, JiS-A, YB-D, BoS-B, YoC-A, SB-F
0~5%	NaG-A, HwG-B, GuH-C, YeC-A, HoC-A, GuC-A, IiA-A, NaG-B, BaB-A, NaG-C, NaS-A, NB-M, GaC-A, NB-C, NaS-B, YeC-B, NB-D, MiC-A, GiA-A, BaB-B, YoJ-A	YuD-A, GB-F, GB-D, GB-L, WoP-A, GB-K, DoJ-B, BoC-A, JeU-A, GoB-A, DoJ-A, GB-C	SB-B, YoC-B, SuE-A, TaJ-B, YB-E, SB-D, YB-A, SB-E, SB-C, DoB-A, YB-C, OoS-A, ChR-A
Below 0%	NB-B	GB-B, MuS-A, GB-G	-

환율은 3.32%이며, 오염부하량 증가율이 5% 미만인 단위유역들의 평균 대지 전환율은 0.99%이다. 또한, 오염부하량 감소하고 있는 단위유역들의 평균 대지 전환율은 -0.43%로서 대지가 다른 토지형태의 토지로 전환된 지역들이다.

영산강·섬진강수계의 23개 단위유역에 대한 오염부하량 증가율은 1.61~12.50%의 범위를 보이고 있다. 오염부하량 증가율이 10% 이상으로서 비교적 높게 나타난 지역은 탐진A 단위유역이며, 섬본B 등 13개 단위유역에서는 오염부하량 증가율이 5% 미만으로서 비교적 낮게 나타나고 있다. 영산강·섬진강수계에서 10% 이상의 오염부하량 증가율을 나타내고 있는 단위유역의 대지 전환율은 4.10%이며, 오염부하량 증가율이 5~10% 사이에 있는 단위유역들의 평균 대지 전환율은 2.33%이다. 또한, 오염부하량 증가율이 5%

미만인 단위유역들의 평균 대지 전환율은 1.00%로서 대지로 전환된 지역이 매우 작은 단위유역들이다.

3.2.2. 토지형태와 수질변화

수역의 수질은 유역으로부터 배출되는 점 및 비점 오염부하량을 비롯하여 여러 가지 요소들의 작용에 의하여 결정된다. 유역의 토지형태는 오염원과 밀접한 관계가 있으므로 수질에 미치는 영향이 크다고 할 수 있다.

단위유역의 토지형태가 수질에 미치는 영향을 파악하기 위하여 토지형태별 점유율과 수질(BOD)과의 관계를 분석하였다. Fig. 6의 (a)에 나타난 바와 같이 대지 점유율과 수질과의 상관관계는 상관계수 0.6768로서 비교적 상관관계가 높게 나타나고 있으며, 대지 점유율이 증가할수록 수질

Fig. 6. The relationship between the occupation ratio of each land use type and water quality for the unit watershed in three river basins.

농도도 증가하고 있다. 또한, (b)에서와 같이 농경지역 점유율과 수질과의 상관관계는 상관계수 0.5187로서 농경지역이 증가할수록 수질농도도 다소 증가하는 경향을 나타내고 있다. (c)는 임야지역의 점유율과 수질과의 상관관계는 상관계수 0.6512로서, 임야지역이 증가할수록 수질농도는 감소하고 있다. (d)는 기타지역의 점유율과 수질과의 상관관계를 나타낸 것으로서, 상관계수는 0.3564로서 그다지 높지 않으나 기타지역이 증가할수록 수질농도도 다소 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이와 같은 분석결과로 볼 때, 특히 대지 점유율이 높을수록 수질농도는 증가하며, 임야지역의 점유율이 높을수록 수질농도는 감소한다는 것을 알 수 있다.

3.3. 총량관리지역의 토지이용 관리방안

3.3.1. 토지형태별 점유율 조정

단위유역의 할당부하량을 준수하기 위하여, 점 및 비점오염원으로부터 오염부하량을 삭감하기 어려운 경우에는 토지형태별 점유율을 조정하는 방법을 고려해 볼 수 있다. 즉, 비점오염원 중에서 수질농도가 증가하는 대지의 면적비율을 감소시키고 수질농도가 감소하는 임야지역의 면적비율을 증가시키는 것이다. 대지 점유율이 큰 비중을 차지하고 있는 단위유역은 현재까지 상대적으로 지역개발이 많이 이루어진 지역이라고 할 수 있으며, 이와 같은 지역에서는 생태지역의 조성 등을 통하여 이미 개발된 지역에 대한 대지 점유율을 줄일 수 있다.

다음 Table 5는 2007년도를 기준으로 하여 2015년도의 토지형태별 점유율을 예측한 결과이다. 오염발생 요인이 큰 대지의 점유율을 보면, 기준년도의 점유율이 가장 큰 금강수계에서 장래에도 가장 큰 폭으로 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 금강수계에서는 농경지역의 감소율도 가장 크게 나타나고 있다. 이와 같은 대지와 농경지역의 증감을 고려해 볼 때 농경지역의 토지형태가 감소하여 대지의 토지형태로 증가된다고 추정할 수 있다. 금강수계의 토지형태별 점유율을 조정하기 위해서는, 특히 기존 대지면적을 생태지역으로 조성하여 대지 점유율을 줄여 나가는 것이 필요할 것으로 본다. 한편, 영산강·섬진강수계에서는 타 수계에 비하여 임야지역의 감소율이 비교적 큰 것으로 나타나고 있는데, 이 지역에서는 산림지역의 감소를 예방할 수 있는 사전대책을 강구하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

3.3.2. 지역개발계획의 적정배분

단위유역의 토지계로부터 발생되는 오염부하량의 변화는 주로 대지 전환율에 따라 변화된다. 대지 전환율이 증가하

면 오염부하량이 증가하게 되고, 오염부하량이 증가하면 단위유역의 할당부하량을 준수하거나 목표수질을 달성하기가 어렵게 된다.

대지 전환율을 가속화 시키는 주요 원인은 단위유역의 지역개발이다. 또한, 대지 전환율이 증가하면 오염원 및 오염배출이 집중되므로 수질오염에 취약한 지역으로 변하게 된다. 그러므로 실질적인 수질개선을 이루고 목표수질을 달성하기 위해서는 지역개발계획이 특정 단위유역에 집중되지 않도록 하거나 단위유역별로 적정하게 배분하여야 한다.

지역개발계획은 대지 점유율과 전환율에 따라 배분할 수 있다. 대지 점유율이 높은 지역은 현재까지 상대적으로 지역개발이 많이 이루어진 지역이므로, 지역개발을 보류하거나 지역개발 속도를 완화시키는 것이 바람직하다. 즉, 대지화 되는 면적이 더 이상 증가되지 않도록 함으로서 오염부하량이 증가되지 않도록 하는 것이 필요하다. 지역개발계획의 적정배분은 대지 전환율을 억제하여 수질이 더 이상 악화되는 것을 방지할 뿐만 아니라 지역 균형개발 측면에서도 합리적인 토지이용 방안이라고 볼 수 있다.

4. Conclusion

수질오염총량관리 단위유역의 할당부하량을 안정적으로 준수하고 목표수질을 달성하기 위해서는 유역의 토지이용이 적정하게 관리되어야 한다. 본 연구에서는 3대강수계 단위유역의 토지형태별 점유율 및 전환율을 산정하여 토지이용 변화특성을 분석하고, 토지이용 변화에 따른 오염부하량 증가율 및 토지형태별 전환율 사이의 상관관계를 통하여 오염물질 배출형태를 분석하였다.

3대강수계 단위유역에 대한 토지형태별 점유율을 보면, 2003년도의 경우, 산림지역의 점유율이 약 63.0%로서 가장 크게 나타나고 있으며, 농경지역은 약 23.0%, 기타지역은 약 8.0% 및 대지의 점유율은 약 6.0%로 나타났다. 2007년도에는 2003년에 비하여, 대지와 기타지역의 점유율이 각각 0.4% 및 0.2%씩 증가하였으며, 농경지역과 산림지역의 점유율은 각각 0.4% 및 0.2%씩 감소하였다.

3대강수계 단위유역의 대지 전환율은 1.65~1.97%의 범위로서, 평균 1.76%로 나타나고 있으며, 농경지역의 전환율은 -0.47~-0.33%의 범위로서, 평균 -0.40%로 나타나고 있다. 또한, 임야지역의 전환율은 -0.10~-0.04%의 범위로서, 평균 -0.07%로 나타나고 있으며, 기타지역의 전환율은 0.17~1.97%의 범위로서, 평균 1.04%로 나타나고 있다. 3대강수계 단위유역에 대한 토지형태 상호간의 증감관계를 보면, 단위유역 내에서 농경지역과 산림지역의 감소는 대지면적의 증가

Table 5. The prediction of the occupation ratio of each land use type for 2015 in three river basins

	Site area		Farm land		Forest land		Other area	
	2007	2015	2007	2015	2007	2015	2007	2015
Nakdong river	5.68	5.76	18.07	17.99	68.28	68.28	7.98	7.97
Geum river	7.99	8.10	28.62	28.42	54.48	54.46	8.91	9.02
Yongsan·Seomjin river	5.62	5.70	21.11	21.03	65.66	65.56	7.61	7.71
Average	6.43	6.52	22.60	22.48	62.81	62.77	8.17	8.23

에 기여하고 있으며, 전환된 면적 중 농경지역의 면적이 더 큰 부분을 차지하는 것으로 나타났다. 또한, 기타지역의 증가는 주로 산림지역의 감소에 의하여 전환된 것이라고 볼 수 있다.

2003년도부터 2007년도까지 3대강수계 단위유역별 토지계 오염부하량 증가율은 평균 5.56%로 나타났으며, 낙동강수계가 6.23%로서 가장 높고 금강수계가 5.32% 및 영산강·섬진강수계가 5.14%로 나타났다. 3대강수계에서 토지계 오염부하량의 변화는 주로 대지 전환율에 따라 변화한다. 단위유역의 토지형태 중에서 특히, 대지 점유율이 수질농도의 주요 증가요인으로 작용하고 있으며, 임야지역은 수질농도의 감소요인으로 작용하고 있다.

단위유역의 할당부하량을 준수하고 목표수질을 안정적으로 달성하기 위해서는 총량관리지역의 토지형태를 효율적으로 관리하는 것이 필요하며, 이를 위해서는 단위유역의 오염발생 부하량을 크게 증가시키는 대지형태의 토지전환을 우선적으로 고려하는 것이 가장 효과적일 수 있다. 대지의 전환은 단위유역의 토지형태별 점유율을 조정하거나 지역개발계획을 적정하게 배분함으로써 이를 수 있다. 즉, 대지 점유율이 크거나 전환율이 큰 단위유역에서는 지역개발계획을 축소·조정하거나, 상대적으로 대지점유율 또는 전환율이 작은 단위유역으로 이전하여 토지계 부하량이 특정 단위유역에 집중되지 않도록 하는 것이 필요하다. 또한, 단위유역 내에서 생태지역의 조성 등을 통하여 대지 점유율을 감소시키거나 대지 전환율을 완화시킴으로서 단위유역의 토지형태가 수질오염에 취약한 지역으로 변화되는 것을 사전에 방지하여야 할 것이다.

References

- Allan, J. D., Erickson, D. L., and Fay, J. (1997). The Influence of Catchment Land Use on Stream Integrity Across Multiple Spatial Scales, *Freshwater Biology*, 37(1), pp. 149-161.
- Bolstad, P. V. and Swank, W. T. (1997). Cumulative Impacts of Landuse on Water Quality in a Southern Appalachian Watershed, *Journal of the American Water Resources Association*, 33(3), pp. 519-533.
- Busan Metropolitan City. (2009). *Bu-san-gwang-yeoksi-jaei-dan-gye-o-yeom-chong-ryang-gwan-ri-gi-bon-gye-hoek*. [Total Maximum Daily Load Basic Plan for the 2nd Stage in Busan Metropolitan City], Busan Metropolitan City, pp. 3.1-3.66. [Korean Literature]
- Chungcheongbuk-do. (2009). *Chung-cheong-buk-do-jae-i-dan-gyeo-yeom-chong-ryang-gwan-ri-gi-bon-gye-hoek*. [Total Maximum Daily Load Basic Plan for the 2nd Stage in Chungcheongbuk-do], Chungcheongbuk-do, pp. 3.1-3.24. [Korean Literature]
- Chungcheongnam-do. (2009). *Chung-cheong-nam-do-jae-i-dan-gyeo-yeom-chong-ryang-gwan-ri-gi-bon-gye-hoek*. [Total Maximum Daily Load Basic Plan for the 2nd Stage in Chungcheongnam-do], Chungcheongnam-do, pp. 3.1-3.75. [Korean Literature]
- Daegu Metropolitan City. (2009). *Dae-gu-gwang-yeoksi-jaei-dan-gye-o-yeom-chong-ryang-gwan-ri-gi-bon-gye-hoek*. [Total Maximum Daily Load Basic Plan for the 2nd Stage in Daegu Metropolitan City], Daegu Metropolitan City, pp. 3.1-3.87. [Korean Literature]
- Daejeon Metropolitan City. (2009). *Dae-jeon-gwang-yeoksi-jaei-dan-gye-o-yeom-chong-ryang-gwan-ri-gi-bon-gye-hoek*. [Total Maximum Daily Load Basic Plan for the 2nd Stage in Daejeon Metropolitan City], Daejeon Metropolitan City, pp. 3.1-3.51. [Korean Literature]
- Gangwon-do. (2009). *Gang-won-do-jae-i-dan-gyeo-yeom-chong-ryang-gwan-ri-gi-bon-gye-hoek*. [Total Maximum Daily Load Basic Plan for the 2nd Stage in Gangwon-do], Gangwon-do, pp. 3.1-3.16. [Korean Literature]
- Gwangju Metropolitan City. (2009). *Gwang-ju-gwang-yeoksi-jaei-dan-gye-o-yeom-chong-ryang-gwan-ri-gi-bon-gye-hoek*. [Total Maximum Daily Load Basic Plan for the 2nd Stage in Gwangju Metropolitan City], Gwangju Metropolitan City, pp. 3.1-3.45. [Korean Literature]
- Gyeongsangbuk-do. (2009). *Gyeong-sang-buk-do-jae-i-dan-gyeo-yeom-chong-ryang-gwan-ri-gi-bon-gye-hoek*. [Total Maximum Daily Load Basic Plan for the 2nd Stage in Gyeongsangbuk-do], Gyeongsangbuk-do, pp. 3.1-3.433. [Korean Literature]
- Gyeongsangnam-do. (2009). *Gyeong-sang-nam-do-jae-i-dan-gyeo-yeom-chong-ryang-gwan-ri-gi-bon-gye-hoek*. [Total Maximum Daily Load Basic Plan for the 2nd Stage in Gyeongsangnam-do], Gyeongsangnam-do, pp. 3.1-3.469. [Korean Literature]
- Jeollabuk-do. (2009a). *Jeol-la-buk-do-jae-i-dan-gyeo-yeom-chong-ryang-gwan-ri-gi-bon-gye-hoek*. [Total Maximum Daily Load Basic Plan for the 2nd Stage in Jeollabuk-do], Jeollabuk-do, pp. 3.1-3.104. [Korean Literature]
- Jeollabuk-do. (2009b). *Jeol-la-buk-do-jae-i-dan-gyeo-yeom-chong-ryang-gwan-ri-gi-bon-gye-hoek*. [Total Maximum Daily Load Basic Plan for the 2nd Stage in Jeollabuk-do], Jeollabuk-do, pp. 3.1-3.56. [Korean Literature]
- Jeollanam-do. (2009a). *Jeol-la-nam-do-jae-i-dan-gyeo-yeom-chong-ryang-gwan-ri-gi-bon-gye-hoek*. [Total Maximum Daily Load Basic Plan for the 2nd Stage in Jeollanam-do], Jeollanam-do, pp. 3.1-3.68. [Korean Literature]
- Jeollanam-do. (2009b). *Jeol-la-nam-do-jae-i-dan-gyeo-yeom-chong-ryang-gwan-ri-gi-bon-gye-hoek*. [Total Maximum Daily Load Basic Plan for the 2nd Stage in Jeollanam-do], Jeollanam-do, pp. 3.1-3.90. [Korean Literature]
- Jung, K. W., Yoon, C. G., Jang, J. H., and Kim, H. C. (2006). Analysis of Land Use and Pollutant Source Effect on Water Quality Characteristics of Watersheds, *Korean Journal of Limnology*, 39(1), pp. 41-51. [Korean literature]
- Kim, J. H., Kim, C. Y., Lee, S. T., Choi, C. M., Jung, G. B., Lee, J. S., and Kim, W. I. (2007). Properties of Water Quality and Land Use at the Rural Area in the Nakdong River Watershed, *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 26(2), pp. 99-106. [Korean literature]
- Ministry of Environment (MOE). (2004). *Su-jil-o-yeom-chong-ryang-gwan-ri-eop-mu-pyeon-lam*. [A Handbook of Total Maximum Daily Loads], Ministry of Environment, pp. 1-69. [Korean literature]
- Ministry of Environment (MOE). (2012). *Su-jil-o-yeom-chong-ryang-gwan-ri-gi-bon-bang-chim*. [Basic Policy for the Total Maximum Daily Loads], Ministry of Environment, pp. 1-29. [Korean literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2012). *Su-jil-o-yeom-chong-ryang-gwan-ri-gi-sul-ji-chim*. [Technical

- Guideline for the Total Maximum Daily Loads], *National Institute of Environmental Research*, pp. 1-102. [Korean literature]
- Park, J. D., Choi, O. Y., and Oh, S. Y. (2012). Characterization on the Pollution Discharge Load at the Unit Watershed for the Management of Total Maximum Daily Loads -in Guem River Basin-, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 28(6), pp. 786-795. [Korean Literature]
- Park, J. D., Kim, J. L., Rhew, D. H., and Jung, D. I. (2010). A Study on the Water Quality Patterns of Unit Watersheds for the Management of TMDLs -in Nakdong river Basin-, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 26(2), pp. 279-288. [Korean Literature]
- Song, C. M. and Pak, B. H. (2010). The Characteristic of Pollutions According to Landuse for a Small Watershed in PALDANG Water system, *Korea Water Resources Association 2010 Academic Conference*, pp. 1031-1034. [Korean literature]
- Yoon, C. G., Lee, S. B., Jung, K. W., and Han, J. Y. (2007). Analysis of Relationship between Water Quality Parameters in Agricultural Irrigation Reservoirs and Land Uses of Associated Watersheds, *Korean Journal of Limnology*, 40(1), pp. 31-39. [Korean literature]