

삼교호유역의 수질자료를 이용한 군집분석 및 요인분석

Cluster and Factor Analyses Using Water Quality Data in the Sapkyo Reservoir Watershed

임창수*, 신재기**
Chang-Soo Rim, Jae-Ki Shin

요 지

삼교호유역에 위치한 19개 수질관측지점에서 측정된 월별수질자료를 이용하여 수질관측지점을 2개에서 7개의 수질특성으로 분류하였으며, 그에 따른 수질요인분석을 실시하였다. 군집분석결과 삼교호유역의 각 하천은 개개의 수질특성을 보이고 있으며, 삼교호, 삼교천, 무한천 및 곡교천의 4개 그룹으로 나눌 수가 있었다. 수질분석결과에 의하면 삼교호에서는 부유물질의 농도가 다른 하천보다 높았는데 이는 하천으로부터 유입되는 풍부한 영양염에 의한 식물플랑크톤의 생물량 증가에 따른 것으로 사료된다. 또한 곡교천의 수질은 다른 하천에 비해 생화학적산소요구량은 3.5~4.8배, 화학적산소요구량은 1.7~2.5배 높았으며, 전반적으로 삼교호유역의 수질은 부영양상태를 훨씬 초과하였다. 요인분석결과 삼교천과 무한천은 농경지와 주거지에 의한 수질요인이 지배적이었고, 곡교천은 천안도시지역으로부터 유입되는 과다한 유기물유입과 상류에 위치한 하수처리장의 영향을 복합적으로 받고 있는 것으로 사료된다. 삼교호의 수질은 삼교천과 무한천 및 곡교천에서 높은 부하를 보인 인자가 주된 오염요인으로 나타났다.

핵심용어: 저수지, 하천, 수질, 군집분석, 요인분석

1. 서론

인구의 증가, 산업의 발달 및 도시화로 인해 유역하천으로부터 생활하수와 산업폐수가 다량 유입되고, 또한 농경지나 산지 등 비점오염원으로부터 오염물질이 하천으로 유입되어 하천의 자정능력 범위를 초과하게 되면, 수질의 오염도가 증가하게 된다. 이와 같이 각 지류로부터 하천분류로 유입되는 오염물질은 지류유역의 특성, 즉 토지이용 조건, 인구밀도 및 산업조건 등에 따라 상이하게 다르다. 따라서 여러 지류 및 분류지점에 위치한 수질관측 지점으로부터 측정되어진 수질자료들을 이용하여 다변량 수질분석을 실시함으로써 전반적인 각 수질관측 지점간의 수질특성을 파악할 수 있을 것이다. 다변량분석은 연구대상으로부터 측정된 2개 이상의 변수들의 관계를 동시에 분석할 수 있는 통계적인 기법으로, 요인분석, 회귀분석, 다변량분산분석, 판별분석, 군집분석 등이 있으며, 본 연구에서는 군집분석과 요인분석을 통하여 수질자료의 분석을 실시하였다.

군집분석은 특성자료가 얼마나 비슷한 값을 갖는지를 거리로 환산하여 거리가 가까운 대상들을 동일한 집단으로 편입시킴으로서, 수질자료를 이용한 군집분석은 대상들이 지니고 있는 다양한 수질특성의 유사성을 바탕으로 동질적인 수질관측점으로 묶어주게 되며, 다수의 수질관측점을 몇 개의 동질적인 관측점으로 군집화 함으로서 동일군집내에 속해있는 관측점의 수질특성을 조사하기 위한 목적으로 이용된다. 요인분석은 변

* 정회원 · 청운대학교 토목환경공학과 조교수 · E-mail : csrim@chungwoon.ac.kr

** 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원

수들 간의 상관관계를 이용하여 서로 유사한 변수들끼리 묶어주는 방법으로, 여러 항목이 복잡하게 연관되어 있어 직접적인 해석이 어려운 항목간의 관계를 보다 간결하게 묶음으로서 그 특징을 쉽게 해석하고 평가하는데 목적이 있다.

본 연구에서는 첫번째로 삼교호유역의 주요 분류 및 지류에 위치한 19곳의 수질관측지점의 수질변수를 이용한 군집분석을 실시하여 서로 비슷한 수질특성을 가지고 있는 관측지점을 몇 개의 군집으로 군집화하였다. 또한 서로 다른 군집으로 분류된 수질관측지점들에 대한 요인분석을 실시하여 각기 서로 다른 수질특성을 보이는 요인을 알아보았다. 따라서 본 연구의 결과는 삼교호유역에 위치한 기존의 수질관측 지점간의 수질특성 연구에 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 조사방법

본 연구에서는 환경부(2000a)에서 관리하는 삼교호유역 수질관측점의 월별 수질자료를 이용하여 수질의 일반적 특성을 분석하였고, 삼교호유역의 주요 분류 및 지류에 위치한 수질관측지점의 수질자료를 이용하여 군집분석을 실시하여 서로 비슷한 수질특성을 가지고 있는 관측지점을 몇 개의 군집으로 군집화하였다. 또한 서로 다른 군집으로 분류된 수질관측지점들에 대한 요인분석을 실시하여 각기 서로 다른 수질특성을 보이는 요인을 알아보았다.

2.1 조사지점

삼교호 유역은 충남 홍성군 장곡리 기러기재(표고 344.9m)에서 발원하여 남쪽으로 유하하다가 무한천, 곡교천과 합류하여 삼교호를 이루고 최종적으로 아산만을 통해 서해로 배수된다. 유역면적은 1670km², 유로연장 65km이며, 유역내에는 예당저수지를 비롯하여 수 개의 농업용 저수지가 축조되어 있다.

최근 들어 삼교호유역에 위치한 하천들의 수질이 점차 오염되어 수질개선을 위한 대책수립이 절실히 요구되고 있다. 이들 수질오염 발생부하량을 인구, 산업 및 축산별로 구분해 보면 인구에 의한 오염발생량은 전체 발생원의 86%, 산업에 의한 오염발생량은 10%, 그리고 축산폐수에 의한 오염발생량은 4% 정도에 해당한다. 또한 생화학적산소요구량을 고려하여 삼교호 유역의 오염발생원을 분석하면 인구가 37.5%, 산업이 2.2%, 축산이 37.5%, 양식장이 2.8%, 온천이 10.3% 그리고 토지이용에 따른 오염발생량이 약 9.7% 정도에 해당한다 (금강환경관리청, 1997). 금강환경관리청(1997)에 따르면 삼교천의 수질은 현재 2급수인 것으로 분류되고 있으나 향후 하수종말처리장의 증설과 고도하수처리 등과 같은 적절한 수질오염원 관리가 병행되지 않으면 수질은 더욱 악화될 수 있는 시점에 있다.

2.2 수질자료

본 연구를 위해서 사용되어진 수질자료는 환경부(2000a)에서 관리하는 수질관측점의 월별 수질자료로서 삼교호유역의 분류 및 지류에 위치한 수질관측 지점의 월별자료를 이용하였으며 자료의 기간은 1995년 1월부터 1999년 12월까지이다. 삼교호유역에서 선택된 19곳의 관측 지점명은 충의대교(S1), 구만교(S2), 구양교(S3), 신대교(M1), 동산교(M2), 송지리(M3), 예당저수지댐 (M4), 신레원교(M5), 남부교(M23), 원성교(K22), 남산교(K21), 천안공단(K24), 휴대교(K25), 남관교(K11), 옥정교(K31), 강청교(K12), 군덕리(R1), 대음리(R2) 및 삼교호방조제(R3) 등이다. 또한, 분석에 이용된 수질자료는 8개의 기초 수질자료로서 즉, 용존산소(DO), 생화학적산소요구량(BOD), 화학적산소요구량(COD), 부유물질(TSS), 총대장균군수(TC), 총질소(TN), 총인(TP) 및 전기전도도(SC)이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수질변수들의 평균값 비교

삼교호와 유입하천의 주요 지점에서 1995년부터 1999년까지 조사된 수질의 평균값과 표준편차를 비교한 결과 DO의 평균 농도는 8.4 mg O₂/l이었다. K24, K25 및 K31지점의 평균값이 5.9 mg O₂/l로서 그 수준 이 하이었고, 다른 지점에 비해 DO의 결핍이 현저하였다. SC는 무한천이 211 μS/cm로서 낮았고, 곡교천이 686 μS/cm로서 높았다. SS는 평균값이 17.4 mg dw/l이었고, K24지점에서 32.6 mg dw/l로서 높았다. 또한 TSS는 유입하천보다도 삼교호가 평균값이 20.2 mg dw/l로서 가장 높았다.

BOD와 COD는 유기물 오염의 척도로서 곡교천이 다른 하천에 비해 BOD는 3.5~4.8배, COD는 1.7~2.5 배 높았다. TN과 TP의 평균 농도는 삼교천에서 각각 5.6 mg N/l, 0.16 mg P/l, 무한천에서 3.1 mg N/l, 0.09 mg P/l, 곡교천에서 8.6 mg N/l, 0.66 mg P/l 및 삼교호에서 4.7 mg N/l, 0.18 mg P/l이었다. 전체 유역의 평균값은 TN이 6.1 mg N/l이었고 TP가 0.36 mg P/l로서 이것을 상회하는 것은 곡교천만 해당하였다. 또한, 연평균 TN과 TP값을 기준으로 하여 각각 1.9 mg N/l, 0.08 mg P/l를 부영양상태로 보는 OECD (1982)의 기준과 > 1.5 mg N/l, > 0.1 mg P/l를 과영양상태로 보는 Forsberg과 Ryding (1980)의 기준을 적용하면 삼교호 유역은 부영양 또는 과영양 상태를 훨씬 초과하였다.

3.2 수질관측지점의 군집화

19곳의 수질관측지점 중에서 M4와 K24의 수질특성이 가장 다르며, R1과 R2사이의 수질특성이 가장 유사하다는 것을 보여준다. 또한 삼교호유역 중 오염부하량이 클 것으로 사료되는 천안시에 위치한 수질관측지점(K21, K22, K23, K24, K25)의 수질은 해당저수지 상류에 위치한 수질관측점(M1, M2, M3, M4)과 가장 다른 수질특성을 보여주었다.

2개의 군집으로 분류하였을 경우에 천안공단만이 다른 수질특성을 보였으며 3개의 군집으로 분류하였을 경우에는 K24와 K31지점이 그 외 17곳의 수질관측지점의 수질과 상이한 특성을 보였다. 4개 수질특성 군집으로 분류하였을 경우에 K24, K31지점 그리고 K25지점이 그 이외의 16개 지점과 비교하여 각기 다른 수질 특성을 보였다. 5개의 군집으로 분류하는 경우 이들 3개 지점을 포함한 K21지점의 수질이 다른 지점의 수질과 상이한 독립적인 수질특성을 보였다. 이는 천안공단에서 배출되는 오염물질이 직하류에 위치한 K25지점의 수질에 직접적으로 영향을 미치고 있으며 K31 상류지점에서의 오염원 배출로 인하여 유사한 수질특성을 보이는 것으로 사료된다. 6개 및 7개 군집으로 분류하는 경우 해당저수지와 그 상류에 위치한 수질관측지점인 M1, M2, M3 그리고 M4에서의 수질이 같은 수질특성을 보였으며, 삼교호내의 수질관측지점인 R1, R2, R3의 수질이 같은 수질특성을 보였다. 7개 수질특성 군집으로 분리하는 경우 곡교천에 위치한 수질관측지점들은 그 이외의 지점들과 달리 유사한 수질특성을 보이지 않았고, 삼교호와 만나는 삼교천의 최하류지점(S3)과 무한천의 최하류지점(M5) 그리고 곡교천의 최하류지점(K12)의 수질은 삼교호의 수질관측지점(M1, M2, M3)과 동일한 군집으로 분류되었다. 또한, 삼교천과 무한천이 합류된 지점 직하류에 위치한 R1지점은 무한천 수질특성보다는 삼교천수질특성과 더 유사한 관계를 보이고 있으며, 이는 무한천의 수질이 해당저수지의 저류로 인한 유량의 감소에 따른 것으로 판단된다.

군집분석결과에 의하면 삼교호유역의 수질은 지류별로 상이한 수질특성을 보이는 것으로 나타났다. 따라서, 삼교호유역의 수질은 삼교호(R1~R3), 삼교천(S1~S3), 무한천(M1~M4) 및 곡교천(K21, K24, K25, K31)의 4개 그룹으로 나눌 수가 있었으며, 이것은 삼교호를 중심으로 유입하천의 상·하류에 분포하는 오염원의 영향을 현저하게 반영하고 있는 것으로 판단된다. 삼교천과 무한천은 전형적인 농촌 하천이고, 곡교천은 중·상류에 온천과 공단 도시를 두고 있다. 곡교천 수질은 유입하천인 천안천(K24~K25)과 온천천(K31)의 영향이 가장 큰 것으로 나타났고, 다른 유입 하천과 비교할 때 가장 이질적이었다. 천안천의 지류 중에서 K21, K22 및 K23지점은 도시를 관류하는 전형적인 소하천으로써 각각 독립적인 수질을 보였고, 미처리된 생활하수의 영향이 극심하였다. 무한천은 해당저수지의 M2~M4구간이 거의 유사하였고, 무한천과 곡교천의 최

상류 지점인 M1, K11과 군집되었다. 삼교천의 S1~S3지점은 무한천의 최하류 M5지점과 군집을 이루었다. 삼교천의 R1~R3구간은 예당저수지와 마찬가지로 저수지의 수질 특성이 잘 반영되어 단일 그룹화를 이루었고, 이것은 삼교천 구간과 무한천, 곡교천의 하류 수질과 관련성이 있는 것으로 나타났다.

삼교천 유역에서 수질 자료를 분석한 결과 오염도에 따른 특성이 있음을 알 수 있었다. 수질조사 지점간 Euclidean distance 행렬에서 가장 차이가 큰 지점은 M4와 K24로서 특히 DO, BOD, COD, SS, TN, TP 및 SC 요인 영향이 대별되었다. M4는 농촌 저수지의 최하류 지점으로 비교적 청정한 수역인데 반해, K24는 천안하·폐수종말처리장 (시설용량 70천톤/일, 표준활성슬러지법)직후에 위치하고 있어 생활 및 공단 오·폐수를 차집 처리하여 배출하는 처리수의 영향이 매우 큰 곳이다 (환경부, 2000b). 따라서 M4와 K24지점은 오염도의 양극화 현상이 뚜렷하였고 하류의 삼교천에 미칠 수 있는 영향 잠재력도 비교될 수 있었다. K31은 아산하수종말처리장 (시설용량 36천톤/일, 표준활성슬러지법)을 수계에 두고 있어 천안천 다음으로 오염이 심한 전형적인 도시하천에 해당한다 (환경부, 2000). 또한 Euclidean distance가 가장 작았던 곳은 삼교천 상류 (R1)와 중류 (R2)로서 수질 차이가 크지 않았다.

결과적으로, 삼교천 유역에서 수질의 오염도를 평가한 결과 곡교천의 수질이 가장 악화되어 있고 그 다음으로 삼교천, 삼교천 그리고 무한천의 순으로 나타났다. 또한, 무한천 (M1~M4)과 곡교천 (K11)의 상류는 매우 청정한 수질을 유지하여 도시와 공단에 인접한 천안천과 온천천의 수질과는 크게 대비되었다.

3.3 요인분석

군집분석결과에 의하면 삼교천유역의 수질은 지류별로 상이한 수질특성을 보이는 것으로 나타났다. 따라서, 삼교천유역의 수질은 삼교천(R1~R3), 삼교천(S1~S3), 무한천(M1~M4) 및 곡교천(K21, K24, K25, K31)의 4개 그룹으로 나눌 수가 있었으며, 각 수질관측지점의 수질요인을 알아보기 위하여 요인분석을 실시하였다. 수질자료를 이용한 요인분석을 수행하기 위하여 필요한 가정한 자료의 정규분포성을 만족시키기 위하여 원래의 자료에 상용대수를 취하여 자료를 변환하였다.

요인적재량은 각 변수와 요인간의 상관관계의 정도를 나타내 주는 것이다. 따라서 각 변수들은 요인적재량이 가장 높은 요인에 속하게 된다. 그러나 어느 정도 적재량이 커야 유의한 것인지를 판단하는 정확한 기준은 없다. 보통 ± 0.3 이상이면 적재량의 유의성이 있다고 할 수 있으며, 보수적인 기준으로는 ± 0.4 이상으로 잡는 경우도 있다. ± 0.5 이상이면 매우 높은 적재량이라고 할 수 있다. 그러나 적재량의 유의도는 표본의 수, 요인의 수에 따라 변동하게 되므로 이에 대해서는 Hair 등 (1979)에 의해서 언급되어 있다.

삼교천 (S1~S3)의 경우, 상류 수질은 BOD (0.74), COD (0.85) 등의 유기물 요인이, 하류에서는 부유물질 (0.80)과 분변성 대장균 (0.68)요인이 높은 비중을 차지하였다. 무한천 (M1~M5)의 경우, COD가 0.65~0.77범위, M1을 제외한 다른 지점에서 SS가 0.74~0.83범위로서 공통적인 제 1요인으로 추출되었다. 이것은 하류로 유하하면서 농경지와 주거지로부터 비롯되는 탁수와 농촌 생활하수의 영향이 컸던 것으로 추정되었다. 곡교천의 중상류부로 유입되는 천안천은 TN, TP 및 SC가 K21에서 각각 0.64, 0.79, 0.57, K22에서 0.86, 0.70, 0.73 및 K23에서 0.82, 0.70, 0.74로서 수질의 지배 요인으로 볼 수 있었고, BOD와 COD가 K22에서 0.82, 0.79, K23에서 0.76, 0.87로서 주요 인자에 해당하였다. 하·폐수종말처리장에서 처리수가 배출된 직후인 K24에서는 BOD (0.87), COD (0.85) 및 SC (0.68)가 제 1요인으로, DO (0.81)가 제 2요인으로, TN (0.79), TP (0.79)가 제 3요인으로 추출되어 용존 전해질이 풍부할 뿐만 아니라 과다한 유기물 유입에 따른 DO의 요구도가 높은 것으로 설명될 수 있었고, 질소와 인의 부하도 매우 큼을 알 수 있었다. 천안천 하류 (K25)는 천안천 중류 (K21~K23)와 하수처리장 (K24)의 영향을 복합적으로 받아 전술한 제 1요인이 모두 해당하였다.

한편, 곡교천의 또 다른 지류인 온천천 (K31)은 천안천 다음으로 최대 오염하천 (황병기와 이상호, 2000)으로서 SS (0.84), BOD (0.81)가 제 1요인, SC (0.78), COD (0.74)가 제 2요인 및 TN (0.91), TP (0.66)가 제 3요인으로 추출되어 유기물과 영양염의 부하가 높았고 이것은 천안천과 유사한 양상이었다. 끝으로, 삼교천은 상류의 R1에서 COD (0.81), BOD (0.70), TP (0.63) 및 SS (0.60)가 제 1요인으로 나타난 반면, R2와 R3는 각각 SC 0.82, 0.80, DO 0.70, 0.81 및 TN 0.69, 0.64가 제 1요인으로서, 삼교천과 무한천 그리고 곡교천에

서 높은 부하를 보인 인자가 주된 요인으로 추출되어 유입지천의 영향이 잘 반영되었다. 본 연구는 조사지점에 대한 유입하천의 특성을 고려한 요인분석으로서 계절적인 영향을 포함시킨다면 더욱 복잡한 양상을 보일 것으로 생각되지만 평균 수질로 볼 때, 천안천과 온천천의 오염 수준은 다른 하천과는 매우 상이한 수질을 보임으로서 이에 대한 대책 마련이 시급한 것으로 판단된다.

4. 결론

삼교호유역 19곳의 수질관측 지점의 수질특성에 따른 군집화 경향을 알아보기 위하여 군집분석을 실시하였고, 서로 다른 군집으로 분류된 수질관측지점들에 대한 요인분석을 실시하여 각기 서로 다른 수질특성을 보이는 요인을 알아보았다. 군집분석 결과에 의하면 삼교호 유역에서 수질 자료를 분석한 결과 오염도에 따른 특성이 있음을 알 수 있었다. 군집분석한 결과 삼교호유역의 수질은 삼교호, 삼교천, 무한천 및 곡교천의 4개 그룹으로 나눌 수가 있었다. 삼교호 유역에서 수질의 오염도를 평가한 결과 곡교천의 수질이 가장 악화되어 있고 그 다음으로 삼교천, 삼교호 그리고 무한천의 순으로 나타났다. 또한, 무한천 (M1~M4)과 곡교천 (K11)의 상류는 매우 청정한 수질을 유지하여 도시와 공단에 인접한 천안천과 온천천의 수질과는 크게 대비되었다.

요인분석결과 삼교천의 경우, 상류 수질은 생화학적산소요구량, 화학적산소요구량 등의 유기물 요인이, 하류에서는 부유물질과 분변성 대장균요인이 높은 비중을 차지하였다. 무한천의 경우, 화학적산소요구량과 신대교지점을 제외한 다른 지점에서 부유물질이 공통적인 제 1요인으로 추출되었다. 이것은 하류로 유하하면서 농경지와 주거지로부터 비롯되는 탁수와 농촌 생활하수의 영향이 컸던 것으로 추정되었다. 곡교천의 경우 천안천이 유입되는 중상류부와 하·폐수종말처리장에서 처리수가 배출되는 직후 지점과 상이한 수질양상을 보여주었다. 또한, 삼교호는 삼교천과 무한천 그리고 곡교천에서 높은 부하를 보인 인자가 주된 요인으로 추출되어 유입지천의 영향이 잘 반영되었다. 본 연구는 조사지점에 대한 유입하천의 특성을 고려한 요인분석으로서 계절적인 영향을 포함시킨다면 더욱 복잡한 양상을 보일 것으로 생각되지만 평균 수질로 볼 때, 천안천과 온천천의 오염 수준은 다른 하천과는 매우 상이한 수질을 보임으로서 이에 대한 대책 마련이 시급한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 금강환경관리청 (1997). 금강중권역 수질오염원 현황.
- 환경부 (2000a). 수질측정망 운영계획.
- 환경부 (2000b). 2000년 하수종말처리장 운영현황. 16pp.
- 황병기, 이상호 (2000). "천안/아산군역내 곡교천의 수질분석 및 지리정보체계를 이용한 유역 오염원 관리 방안"에 관한 연구." 한국환경과학회지, 제9권, pp. 443~447.
- Forsberg, C. and Ryding, S.O. (1980). "Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish waste-receiving lakes." Archiv Fur Hydrobiologie, Vol. 89, pp. 189~207.
- OECD (1982). Eutrophication of waters: Monitoring, assessment and control. Organization for Economic Co-operation and Development, Paris, France. 154pp.