Journal of Korean Society on Water Quality, Vol. 20, No. 4, pp.352-356 (2004)

한강수질의 월변동성에 관한 연구

유 호 식†

경기대학교 토목환경공학부

Monthly Fluctuation of the Han River Water Quality

Ho-Sik Yoo†

Division of Civil and Environmental Engineering, Kyonggi University

(Received 10 April 2004, Accepted 17 May 2004)

Abstract : Variations of water quality parameters were investigated for last 13 years in Han river. Deviation from 3 month moving average was suggested for the variation analysis. Many parameters of mainstream and tributaries showed similar monthly fluctuations. Suspended solid of mainstream showed higher fluctuation than that of tributaries due to summer flood. Contrarily, the organic parameters such as BOD, COD, and TN showed lower fluctuations in the mainstreams. The magnitude of deviation was in the order of pH < DO, COD, temp. < BOD, TN < TP, SS. Strong correlation was found in BOD data of adjacent sites. Main sites showed low deviation in comparison to adjacent common sites of mainstream (1:2.4). Mainstream showed low deviation in comparison to tributaries (1:1.7). Seasonal tendency of monthly BOD was confirmed using autocorrelation function. The deviation was in inverse proportion to the magnitude of BOD.

keywords : Han river, Water quality, Seasonal tendency, Deviation analysis, Moving average

1. 서 론

하천수질의 시계열자료를 살펴보면 불규칙한 변화를 발견하게 된다. 때로는 추세가 있기도 하고 그렇지 않을 때도 있다. 이러한 변화의 원인을 규명하기 위해 많은 연구들이 수행된다. 대부분 연구는 수질의 영향요소들을 조합하여 수학적 모델을 작성한 뒤 simulation을 통한 예측치를 실측치에 근접시키려는 것이다. 그러나 항상 결과는 명확하지 않으며 어떠한 선형결합으로도 수질항목을 정밀한 유의수준에서 나타내기는 어렵다. 이러한 불규칙의 원인은 보다 근본적인 곳에 존재한다. 이론적 해석의 범위를 벗어나는 무작위의 변동(random shock)과 거기에 더하여 측정 변동성도 해당수질의 한 측면을 대표한다고 보아야 할 것이며, 그 둘을 분리할 수도 없는 것이다. 변동성은 실제 수질의 시계열 변화와 측정시의 편차를 포함한다. 이 연구에서는 변동성의 크기를 계량하는 방법을 모색해 보고자 한다. 그동안 연구된 사례들도 국내(백, 1997; 이, 1995; 이, 1997), 또는 외국의 경우(Belle et al., 1984; Berryman et al., 1988; Hirsch et al., 1982; Hirsch et al., 1984; Hirsch et al., 1991; Lettenmaier et al., 1976; Lettenmaier et al., 1988; Lettenmaier et al., 1991), 수질 시계열 자료의 추세분석에 관련된 것이며 변동성에 대한 연구는 찾아보기 어렵다. 일반적으로 수질로 인식되는 것은 수질항목의 측정치이다. 수학적 모델들도 결국은 수질항목의 측정치에 의존하게 되는데 측정치의 신뢰성이 떨어질 때에는 심각한 오류를 내포하게 된다. 일반적으로 수질측정 결과치는 시료채취시점 및 지점선정, 채취실행자와 분석자에 따라 달라지며 동일인이 채취 및 분석을 다시 해도 편차는 존재하기 마련이다. 무작위의 변동과 측정오차(두 가지를 합하여 이하 변동성이라 칭함)로 인해 수질이 일정치 않은 편차를 가진다면 그 변동성은 규명되어야 할 것이다. 본 연구는 실측치만으로 장기간에 걸친 기술적 분석을 함으로써 수학적 모델이 찾지 못하는 편차의 특성과 경향을 알아보고자 하였다.

2. 연구방법

연구대상하천으로 한강을 선택하였다. 북한강과 남한강을 포함하여 한강에는 총 380개의 수질측정지점이 있으며 환경관리청과, 지방자치단체, 수자원공사 등에서 측정을 하여 환경부에서 집계한다. 측정항목은 연 1회, 분기별, 월별 측정항목으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 한강 본류 및 지류 중 지난 13년 간 (1990년-2002년) 월별 결측치가 없는 지점을 대상으로 하였다.

수질지표로는 8개 항목을 선정하였는데 모두 월 1회 측정대상이며 한강 주요지점 5곳은 월 4회 측정 후 평균치를 사용한다. 시료채취 및 측정방법은 환경부의 수질측정망 운영계획에 명기되어 있다(환경부, 2002). 환경부의 공식자료가 본 연구에 사용되었고 통계분석을 위해서는 SAS 8.1을 사용하였다(SAS Institute, 2001).

† To whom correspondence should be addressed.
hsyoo@kyonggi.ac.kr

상관분석을 위해서 피어슨의 상관계수를 사용하였는데 최소자승법으로 구해진 선형회귀선의 주위에 관측값들이 밀집되어 있는 정도를 의미하는 것으로 식 (1)로 표현된다.

$$r_{xy}=\frac{\sum(X_i-\overline{X})(Y_i-\overline{Y})}{\sqrt{\sum(X_i-\overline{X})^2}\sqrt{\sum(Y_i-\overline{Y})^2}}=\frac{S_{XY}}{S_XS_Y} \quad (1)$$

즉, 상관계수는 X, Y의 공분산을 X와 Y 각각의 표준편차로 나눈 것으로서 이것은 단순회귀식에서의 기울기, 즉 회귀계수를 표준화시킨 값과 같다. 상관계수는 -1에서 1 사이의 범위를 취하며 값이 -1이면 X와 Y간에는 완전한 선형관계가 있으나 기울기는 음의 부호를 갖고 이와 반대로 +1이면 역시 완전한 선형관계이나 기울기가 반대이다. 값이 0일 때는 X와 Y 사이에 아무런 선형적 상관관계가 없는 것으로 본다.

계절성 파악을 위해서는 자기상관함수를 사용하였다(오, 2000). Z_t를 t의 시점에서의 값이라고 하고 t는 일정한 평균 $E(Z_t)=\mu$와 분산 $Var(Z_t)=\sigma^2$을 가지며 공분산 $Cov(Z_t, Z_{t+k})$는 시차 k의 함수가 된다. 즉 Z_t 와 Z_{t+k} 의 자기공분산은 식 (2)와 같다.

$$r_k=Cov(Z_t, Z_{t+k})=E(Z_t-\mu)(Z_{t+k}-\mu) \quad (2)$$

한편 Z_t 와 Z_{t+k}의 상관함수는 식 (3)과 같다.

$$\rho_k=\frac{Cov(Z_t, Z_{t+k})}{\sqrt{Var(Z_t)}\sqrt{Var(Z_{t+k})}}=\frac{r_k}{r_0} \quad (3)$$

여기서 $Var(Z_t)=Var(Z_{t+k})=r_0$이고, r_k는 k의 함수이므로 자기공분산함수(autocovariance function)라 하고, ρ_k는 자기상관함수(autocorrelation function)라고 한다. 왜냐하면 단지 k시차로 분리된, 같은 과정에서의 Z_t 와 Z_{t+k} 사이의 공분산과 상관을 나타내기 때문이다. 즉, 1개월 단위의 시계열자료를 분석했을 때 시차 12가 큰 자기상관함수 값이 나왔다는 것은 12개월 주기로 강한 상관을 나타낸다는 뜻이다. 매년 같은 월들끼리 상관관계가 높다는 즉, 계절성이 있다는 것이다.

마지막으로 수질항목들의 편차분석을 위해 3개월 이동평균(moving average)을 사용하였다. 해당 월과 앞뒤 1개월씩의 3개월 평균을 편차가 발생하지 않았을 때의 해당 월의 수질 예상치(평균치)로 가정하고 그것과 실측치와의 차이를 편차로 계산했다. 본 논문에서 사용하는 편차(deviation)라는 용어는 부호가 없이 크기만을 가지는 절대값으로 정의하며 편의상 그것을 예상치로 나누어 백분율(%)로 표시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 수질 항목별 변동성

북한강, 남한강을 비롯한 한강의 총 380개의 수질측정지점 중 13년간 월별 수질 결측치가 없는 지점의 수는 Table 1과 같다. 본 논문에서는 Table 1의 지점들을 대상으로 모든 조사가 이루어졌다.

Table 1. Number of sampling sites without missing data for 13 years (1990-2002)

Temp.	pH	DO	BOD	COD	SS	TN	TP
26	27	25	28	28	28	27	28

수질항목들의 표현단위와 변동폭이 가지는 의미가 다르지만 단순한 수치들의 백분율을 비교해 보는 것도 측정치들의 신뢰도를 가늠하는데 도움이 될 것이다. 본류지점 및 지류지점의 13년 간 총평균과 월별평균치를 구하여 Fig. 1에 비교하여 보았다. 최대 평균월과 최소 평균월의 차이를 총평균치에 대비하여 백분율로 표시하였으므로 항목간의 상대적 비교도 어느 정도는 가능하다. 본류와 지류의 월별 움직임은 일부 항목을 제외하고는 전체적으로 유사하였다. Fig. 1을 보면 부유물 농도를 나타내는 SS의 본류 농도가 지류보다 압도적으로 큰 변화를 보이는데 여름철 홍수의 영향을 지류보다 크게 받는 것을 시사하고 있다. BOD, COD, TN 등 주로 유기오염을 나타내는 지표들은 SS와 반대로 지류보다 본류에서의 변동폭이 작은데 물이 섞이는 본류의 완충효과로 추측된다.

이동평균을 이용한 항목별 편차 규모를 도식화하면 Fig. 2와 같으며 그림에 나타난 대략적인 편차 순서는 다음과 같다.

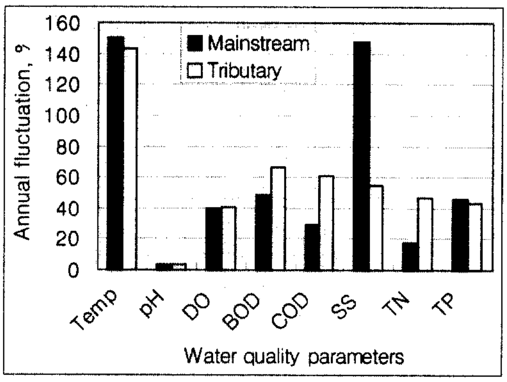

Fig. 1. Annual fluctuation of water quality parameters.

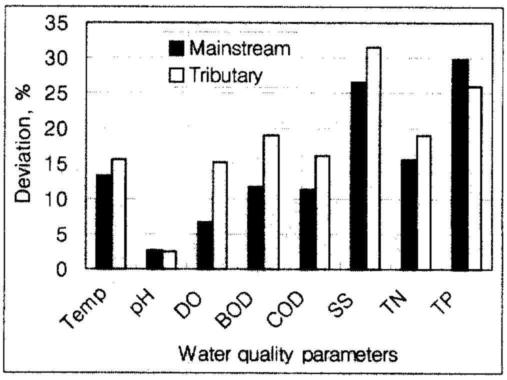

Fig. 2. Deviations of water quality parameters.

pH < DO, COD, 수온 < BOD, TN < TP, SS

이러한 순서는 측정치의 우연한 변동성이 고려된 순서이므로, 분석의 재현성과 분석오차를 포함한 모든 변동성을 감안하는 측정치의 신뢰도 순서로 파악해도 무리가 없을 것이다.

3.2. 인접지역 수질의 연관성과 측정횟수가 월편차에 끼치는 효과

거리가 멀지 않은 본류 지점끼리는 수질연관성을 갖는 것이 당연한 것으로 판단된다. 이동경로와 배출원이 서로 다른 지천들과는 달리 본류에서는 동질의 하천수가 약간의 시간차이를 두고 경유하므로 인접된 측정지점의 수질은 높은 연관성을 예상할 수 있는 것이다. 남한강본류의 원주에서 양평에 이르는 연속된 5개 지점의 3년간(2000.1-2002.12) BOD자료로 상관관계를 살펴보았다. Table 2에 해당지점의 BOD와 월편차의 3년 평균치를 나타내었다. Table 3은 BOD 원자료로 그리고 Table 4는 월편차로 상관관계를 나타낸 것이다. 두 경우 모두 상당히 높은 상관관계를 볼 수 있었다. 즉 월별로 진행되는 수질변화도 인접지역에서는 상관성이 높다는 것을 알 수 있다.

다음은 한강 본류의 연속된 5개 지점의 월편차를 Fig. 3에 나타내었다. 편차의 크기가 W자로 뚜렷이 대비되며 그 차이는 1:2.4로 나타났다. 한강 본류의 연속된 측정지점사이에서 이러한 차이를 만들어 내는 원인은 측정횟수 때문인 것으로 판단된다. 자료수집지점 중에는 주요지점이라는 곳들이 있다. 주요지점은 한 달에 4회 수질검사를 하여 평균치를 월평균으로 하고 기타지역은 월 1회 측정한 값을 해당지점 해당 월의 수질로 간주한다. 당연히 주요지점 수질의 신뢰도가 높게 될 것으로 예상된다. 한강전체의 주요지점 5개중 팔당댐 하류에는 노량진과 가양 두 곳이 있다. Fig. 3에서 W자의 밑 부분 두 곳이다. 측정빈도에 따라서는 이러한 정도(1:2.4)의 신뢰도 차이를 나타낸다는 것은 월평균 BOD자료를 취급할 때 유의해야할 점으로 보인다. 또한 수질측정 결과치가 수질자체의 변화 이외에도 시료채취 및 검사시의 오차에도 크게 영향을 받는다는 증거가 될 수 있어서 반복측정의 중요성을 보여주고 있다.

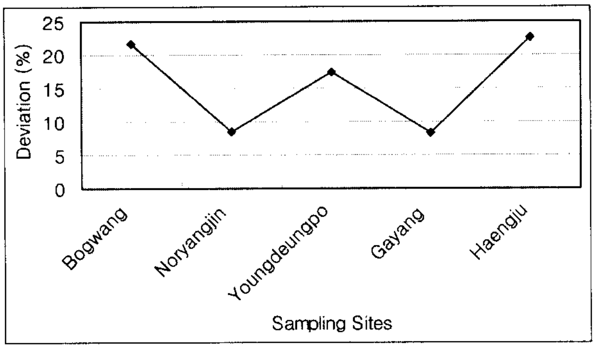

Fig. 3. Deviations of monthly BOD of consecutive sites.

Table 2. BOD and average monthly deviations for 3 years (2000-2002)

	BOD (mg/L)	Average deviation (%)
Wonjoo	1.32	14.75
Gangchun	1.69	17.14
Yeojoo1	1.62	17.83
Yeojoo2	1.86	18.65
Yangpyung	2.31	17.24

Table 3. Pearson correlation coefficient among BOD data

	Wonjoo	Gangchun	Yeojoo1	Yeojoo2	Yangpyung
Wonjoo	-	0.79661	0.87298	0.85806	0.85826
Gangchun		-	0.92893	0.87138	0.79696
Yeojoo1			-	0.96605	0.89754
Yeojoo2				-	0.93548
Yangpyung					-

Absolute values greater than 0.5 at significance level of P ≤ 0.0001 are presented.

Table 4. Pearson correlation coefficient among monthly deviations of BOD data

	Wonjoo	Gangchun	Yeojoo1	Yeojoo2	Yangpyung
Wonjoo	-	0.43602	0.49120	0.43841	0.49828
Gangchun		-	0.70438	0.50828	0.43117
Yeojoo1			-	0.79134	0.59927
Yeojoo2				-	0.69509
Yangpyung					-

Absolute values greater than 0.5 at significance level of P ≤ 0.05 are presented.

3.3. 지역별 수질 변동성

하천별 3년 간(2000.1-2002.12) BOD의 편차경향을 Table 5에 표시하였다. 앞에서 나타난 것처럼 주요지점 다섯 곳의 편차평균은 가장 낮은 수준을 보였고 본류와 지류의 편차는 1:1.3-2.4 사이로 평균적으로는 1:1.7의 차이를 보였다. Table 5에 나타난 각 편차는 중요한 의미를 갖는다. 3개월 이동평균으로부터의 편차이므로 임의 시점에서 측정한 BOD는 다음시기에 측정시 ±해당 백분율만큼의 변동가능성을 나타낸다. 그것은 해당하천에서의 수질 본래의 변화 및 측정오차를 모두 포함하며 수질자료의 신뢰도를 나타내기도 한다.

Table 5. BOD and monthly deviations in Han river

Site	BOD avg.(mg/L)	Mean Dev. Rate (%)
Main sites	1.92	6.29
North Han river(1)	1.03	9.24
North Han river(2)	1.50	13.51
South Han river(1)	1.24	13.96
South Han river(2)	2.60	18.64
Han river(1)	1.56	9.55
Han river(2)	9.07	23.17

(1): mainstream, (2): tributaries

3.4. 계절성의 확인

연평균 수질대신 이동평균을 사용하는 중요한 이유 중 하나는 수질의 계절성 때문이다. 실제로 한강수질의 계절성

Lag	Covariance	Correlation	-1 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1	Std Error
0	0.061537	1.00000	|********************	0
1	-0.015875	-.25798	*****|	0.083624
2	-0.018600	-.30227	******|	0.089016
3	0.0037762	0.06136	|*	0.095925
4	0.0067093	0.10903	|**	0.096199
5	-0.0083946	-.13642	***|	0.097060
6	0.0037781	0.06140	|*	0.098391
7	0.0016812	0.02732	|*	0.098659
8	-0.0085996	-.13975	***|	0.098712
9	-0.0051740	-.08408	**|	0.100086
10	0.017410	0.28293	|******	0.100578
11	0.0065004	0.10564	|**	0.105998
12	-0.028742	-.46708	*********|	0.106732
13	0.013286	0.21590	|****	0.120179
14	0.0042626	0.06927	|*	0.122861
15	-0.0011210	-.01822	|	0.123134
16	-0.0047496	-.07718	**|	0.123153
17	0.0035701	0.05802	|*	0.123490
18	0.0012565	0.02042	|	0.123681
19	0.0036390	0.05914	|*	0.123704
20	-0.0058006	-.09426	**|	0.123902
21	0.0036380	0.05912	|*	0.124402
22	-0.0025148	-.04087	*|	0.124599
23	0.00014248	0.00232	|	0.124692
24	-0.0019554	-.03178	*|	0.124693

BOD Autocorrelations

Fig. 4. Seasonal tendency of monthly BOD.

을 확인하기 위해 통계적 검증이 필요하였다. 장기간에 걸친 자료에서 실제로 주기적 성향을 보였는지 확인을 해보았다. 팔당댐의 13년 (1990 - 2002년) 월별BOD자료를 자기상관함수로 분석한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 수치 0을 중심으로 좌우에 찍어 놓은 점선을 벗어나면 유의한 값이다. 12번째 시차에서 유의한 값이 나온 것으로 보아 계절성이 있음을 알 수 있다. 즉 시차 12의 자기상관이 크다는 것이다. 그리고 나머지의 시차에서의 값들은 시차 1을 제외하고는 대부분 유의하지 못하고 낮은 자기상관값들을 나타내고 있다(시차 0에서는 값을 1로 한다).

Fig. 5는 12년간(1990-2001) BOD 결측치가 없는 28개소의 월별 BOD 및 편차를 평균치로 표시한 것이다. 여름을 중심으로 뚜렷한 계절성을 보여주고 있는데 우리나라의 강수량은 여름 한철에 집중되어 있어 그 시기의 BOD 희석효과가 큰 것으로 보인다. 이와 반비례하여 월변동성은 오히려 여름에 증가하고 있다. Fig. 6에 BOD의 절대수치와 변동성의 백분율을 비교하여 보았다. 회귀직선의 기울기가 -0.9 정도로 계절적 측면에서는 BOD의 절대수치와 월변동성은 반비례하는 것으로 나타났다.

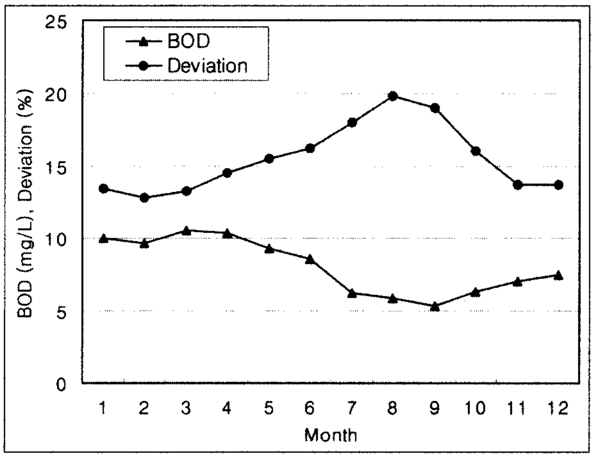

Fig. 5. Monthly variation of BOD and deviation.

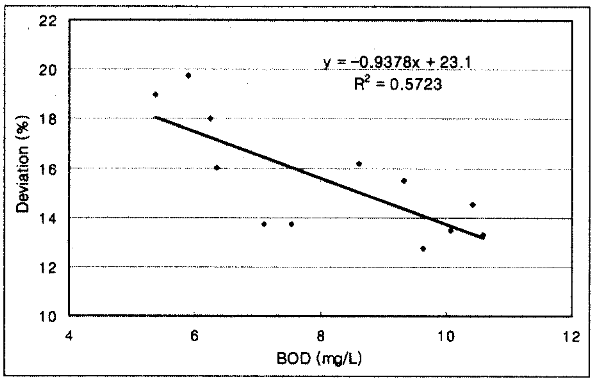

Fig. 6. Correlation of BOD and deviation.

4. 결 론

수질의 평가에서 변동성의 중요함을 강조하고 그 크기를 계량하는 방법으로 편차분석을 제시하였다. 북한강, 남한강을 비롯한 한강의 지난 13년 간의 월별 수질자료를 대상으로 3개월 이동평균에 대한 편차를 분석해 보았다.

본류와 지류의 월별 움직임은 전체적으로 유사하였으나 부유물 농도를 나타내는 SS의 본류 농도가 지류보다 압도적으로 큰 변화를 보여 여름철 홍수의 영향을 지류보다 크게 받는 것으로 판단하였다. BOD, COD, TN 등 주로 유기오염을 나타내는 지표들은 SS와 반대로 지류보다 본류에서의 변동폭이 작아서 물이 섞이는 본류의 완충효과로 추측되었다.

항목별 편차크기는 pH < DO, COD, 수온 < BOD, TN < TP, SS로 나타나서 측정치의 신뢰도 순서로 이해할 수 있었다.

거리가 멀지 않은 본류 지점끼리의 BOD자료와 월편차로 상관분석을 한 결과 두 경우 모두 상당히 높은 상관관계를 볼 수 있었다. 그러나 자료측정횟수가 월4회인 주요지점을 포함하는 경우의 인접지역끼리는 뚜렷한 편차의 차이(1:2.4)를 나타내어 측정빈도의 중요성을 보여주었다. 또한

본류와 지류의 편차는 1:1.3-2.4 사이로 평균적으로는 1:1.7의 차이를 보여서 본류 수질자료의 신뢰도가 높은 것으로 판단된다.

월별BOD자료를 자기상관함수로 분석한 결과 뚜렷한 계절성이 나타나 이동평균 방법을 사용한 편차분석의 당위성을 보여 주었다. 여름 홍수기의 BOD 희석와 편차증가 등을 감안한 계절적 효과를 분석한 결과 회귀직선의 기울기가 -0.9 정도로 BOD의 절대수치와 월변동성은 반비례하는 것으로 나타났다.

사 사

이 논문은 2003학년도 경기대학교 연구년제 수혜로 연구되었으므로 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 백중철, 허준행, 조원철, 월 수질 시계열자료의 추이 및 통계학적 특성 분석, *대한토목학회지*, **17**(II-2), pp. 147-155 (1997).
2. 이상훈, 수질자료의 추세분석을 위한 비모수적 통계검정에 관한 연구, *환경영향평가*, **4**(2), pp. 93-103 (1995).
3. 이상훈, 수질변화의 계량화를 위한 비모수적 통계준거에 관한 연구, *환경영향평가*, **6**(1), pp. 111-119 (1997).
4. van Belle, G., and Hughes, J.P., Nonparametric tests for trend in water quality, *Water resources Research*, **20**(1), pp. 127-136 (1984).
5. Berryman, D., Bobee, B., Cluis, D., and Haemmerli, J., Nonparametric tests for trend detection in water quality time series, *Water resources Research, Bulletin WARBAQ*, **24**(3), pp. 545-556 (1988).
6. Hirsch, R.M., Slack, J.R., and Smith, R.A., Techniques of trend analysis for monthly water quality data, *Water resources Research*, **18**(1), pp. 107-121 (1982).
7. Hirsch, R.M., and Slack, J.R., Nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence, *Water resources Research*, **20**(6), pp. 727-732 (1984).
8. Hirsch, R.M., Alexander, R.B., and Smith, R.A., Selection of methods for the detection and estimation of trends in water quality, *Water resources Research, WRERAQ*, **27**(5), pp. 803-813 (1991).
9. Lettenmaier, Detection of trends in water quality data from records with dependent observations, *Water resources Research*, **12**(5), pp. 1037-1046 (1976).
10. Lettenmaier, Multivariate nonparametric tests for trend in water quality, *Water resources Research, Bulletin WARBAQ*, **24**(3), pp. 505-512 (1988).
11. Lettenmaier, D.P., Hooper, E.R., Wagoner, C., and Faris, K.B., Trends in stream quality in the continental United States, 1978-1987, *Water resources Research*, **27**(3), pp. 327-339 (1991).
12. 환경부, *수질측정망 운영계획* (2002).
13. SAS Institute, *SAS User's Guide* (2001).
14. 오광우, 이성덕, 이우리, *시계열 분석*, 탐진출판사, pp. 96-119 (2000).