

금강에 대한 대장균 부하 지속곡선의 개발 및 적용

김건하[†] · 윤재영^{*}

한남대학교 토목환경공학과
^{*}고려대학교 환경시스템공학과

Development and Application of Coliform Load Duration Curve for the Geum River

Kim, Geonha[†] · Yoon, Jaeyoung^{*}

Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University

^{*}Department of Environmental System Engineering, Korea University

(Received 6 May 2005, Accepted 31 May 2005)

Abstract

An useful protocol called load duration curve methodology to estimate contaminant loading to a river on an exceedance probability scale was developed in this research. The technique was further applied to estimate total coliform loading to the Geum River, using the daily mean flow rate and total coliform concentration data during January, 1996 and July, 2004 for the Gongju where an automated monitoring station is located. Drought flow of the Gongju (=50.3 cms) was equivalent to 40% on an exceedance probability scale. Load duration curve for total coliform loading at the Gongju was constructed. Standard duration curve was constructed with the water quality criteria for the class 2 (total coliform concentration = 1000 MPN/100 mL). By plotting load duration curve with standard duration curve, it could be revealed that water quality do not meet the desired water quality for 47% on an exceedance probability scale. If linearity between flow rate and coliform concentration is assumed, it can be interpreted that water quality exceeds desired criteria when average mean flow rate is over 51 cms.

keywords : Pathogen, Water quality, Diffuse pollution, Coliforms, Load duration curve

1. 서론

환경정책기본법에 의하면 하천수질의 등급을 분류할 때 수소이온농도, 생물화학적 산소요구량 (BOD), 부유물질량 (SS), 용존산소량 (DO), 대장균 (coliform) 군수를 기준으로 수질등급을 그 사용용도에 따라 5단계로 분류하도록 되어 있으나 수소이온농도와 부유물질량, 용존산소량은 등급간의 차이가 없고 대장균 군수는 관련 자료가 부족하므로 생화학적 산소요구량을 등급분류의 기준으로 주로 사용한다. 동법에 의하면 하천 수질등급분류에 있어서 주 관심이 있는 1급수-3급수에 해당하는 BOD농도는 각각 1 mg/L 이하, 3 mg/L 이하, 6 mg/L 이하이고 대장균 군수는 각각 50 MPN/100 mL 이하, 1000 MPN/100 mL 이하, 5000 MPN/100 mL 이하이다.

대장균은 병원균 지표 미생물(Pathogen Indicator Micro-organism)로 수체 내 병원균 군집 수를 간접적으로 나타낸다. 병원균에 오염된 물은 인간 활동에 다양한 부분에서 악영향을 끼치게 된다. 첫째, 미생물에 오염된 물에서 수영과 같은 레크레이션 활동을 하게 될 때 피부 접촉 또는 물을 삼키게 될 경우 질병을 유발할 수 있으며, 둘째, 오염된

수체는 어패류의 생육에 악영향을 끼치게 되고, 셋째, 미생물에 오염된 수체를 상수원수로 사용할 경우 염소 소독으로도 제거되지 않는 *Cryptosporidium*, *Giardia lamblia* 같은 미생물을 제거하기 위해서는 여과와 같은 고도처리를 하여야 하므로 수처리 비용을 증가시킬 수 있고, 네 번째는 미생물의 제거를 위하여 염소소독을 하게 될 경우 THM (Trihalomethanes)과 같은 부산물 생성에 의해 인간에게 악영향을 끼치게 된다.

이와 같이 병원균 지시미생물의 다량 검출은 레크레이션 활동, 음용수로의 이용, 수생환경 등을 통해 인간의 건강에 유해한 영향을 미칠 수 있으므로 다른 여러 나라에서는 이 분야에 대한 연구와 다양한 수질 기준을 정하여 관리하고 있다. United Nations Environmental Program(UNEP)과 World Health Organization(WHO)는 위락용수의 대장균 농도를 규제하고 있다. 수질 측정시 5개 이상의 중복 시료의 분원성 대장균의 평균농도는 시료 수의 50% 누적확률이 100/100 mL 이하이고 90% 누적확률이 1000/100 mL 이하이어야 한다. 미 환경국(U.S. EPA)은 *E. coli*의 농도가 5개 이상의 시료에 대하여 30일 평균농도가 126/100 mL 이하가 되도록 규정하고 있다.

병원균은 다양한 오염원을 통해 수체로 유입하게 된다. 대표적인 점오염원에는 하수처리장 방류수, 합류식 하수관거 월류수(CSOs: Combined Sewer Overflow), 분류식 하수

[†] To whom correspondence should be addressed.
kimgh@@hannam.ac.kr

관거월류수(SSOs: Sanitary Sewer Overflow) 등이 있고, 비점오염원에는 불법적인 방류, 야생동물, 부패조, 가축시설, 매립지, 목초지 등을 들 수 있다. 그리고 농지에서 사용하는 비료와 하수 오니 또한 큰 오염원이 된다. 이와 같은 오염원들은 강우에 의해 수체로 유입되게 된다.

이와 같이 병원균의 수체 유입과 강우유출수간의 관계가 높기 때문에 하천의 유량과 대장균 군집간의 관계가 높다. 하천의 유량을 확률적으로 파악하기 위한 방법으로 유량 지속곡선(Flow Duration Curve)법이 있다(Dingman, 2002; Jacobs et al., 1998; Singh et al., 2001; Vogel et al., 1994). 이는 일정한 기간의 하천유량자료에 대한 초과누적확률을 구하고 확률지에 도시하여 유량과 누적확률간의 관계를 곡선으로 작성하는 방법이다. 유량지속곡선의 작성법을 응용하여 부하지속곡선을 작성할 수 있는데(Vogel et al., 1995) 하천유량과 관심이 있는 항목의 하천농도를 이용하여 부하량을 계산하고 부하량과 누적확률간의 관계를 확률지상에 도시하는 방법이다. 그러나 이러한 부하지속곡선법을 이용한 하천부하량 해석의 예는 많지 않다. Julien (2002)는 하천의 유량과 유사량의 배출량의 자료를 이용하여 퇴적물지속곡선(sediment duration curve)을 작성하는 방법을 제시하였다. Leib 등(1998)은 소하천의 용해성 아연 농도의 지속기간을 산정하기 위하여 유량지속곡선법을 응용하였다. 그는 한정된 숫자의 실제 유량과 농도측정자료를 이용하여 제작한 관계식을 이용하여 관심지점의 6년간 일유량에 대응하는 용해성 아연농도자료와 부하량을 산출하고, 용해성 아연 일 부하지속곡선을 작성하였다. 이 방법은 부하량의 산정에 있어서 실제 측정자료를 사용하지 않았으므로 그 해석과 적용에 제한이 있다. Kim 등(2005)은 비점원 오염물질이 하천 병원균 농도 변화에 미치는 영향을 제시하기 위하여 금강하류유역 두 지점에서의 병원균 부하량을 누적확률 별로 도시하였다. 그러나 이는 2002년 11월부터 2003년 4월까지 주 일회씩 24회에 걸친 실 측정치만을 이용하였으므로 그 의미 해석에 제한이 있다.

따라서 본 연구에서는 장기간(1996년 1월-2004년 8월) 모니터링한 하천의 대장균 농도를 일 유량과 함께 분석하는 방법으로 대장균 부하지속곡선(load duration curve)을 개발하였으며 금강 하류 공주 유역에 대하여 적용하였다.

2. 연구 방법

본 연구는 금강유역의 공주지역을 대상으로 하였다. 금강은 전북 장수군에서 발원하여 대전, 공주, 부여 등을 경유하여 서해로 흐르며 유역면적은 12,548.51 km²이고 670개의 하천을 포함하며 그 총 연장은 7,426 km이다. 토지이용은 산림과 농지면적이 7020.7 km², 3585.7 km²으로 전체면적의 84.5%를 차지하고 연평균 강수량은 1,100-1,300 mm 이나 지형 등의 요인에 의해 국지적인 변화가 크다. 따라서 하류지역은 연평균 강수량이 1,100 mm 내외로 적은 편이고, 상류지역은 1,300 mm 내외의 다우지역에 속한다.

공주유역은 여러 수질예측모델링 연구에 걸쳐서 수질 예측치와 관측치의 차이가 많이 발생하는 지역이다. 공주수위표의 평균강우량은 1,157.7 mm이고 평균 유출고는 750.1 mm로써 평균 유출률은 63.8%이다. 공주유역의 목표수질은 2급수로써, 환경정책기본법의 하천등급에 의하면 BOD 3 mg/L이하, 대장균수 1,000 MPN/100 mL에 해당한다. 이는 또한 수영용수의 등급에 해당하므로 상수용수 2급과 위락용수의 목적에 동시에 부합되어야 함을 뜻한다.

공주지역의 수질자료는 금강유역 환경부 수질측정망 공주 1지점의 1996년 1월부터 2004년 7월까지 월평균 수질 자료를 이용하였다. 수질자료는 유기물질, 중금속, 영양염류 등 25개 항목이 있으나 이중 대장균군 농도(단위: MPN/100 mL)를 본 연구에 사용하였다.

유량자료는 1996년 1월부터 2004년 7월까지의 건설교통부 공주(금강교) 지점의 수위자료를 이용하여 산출한 일 단위 유량 자료를 이용하였다. 공주 지점의 갈수량은 대청댐 건설전 20.44 cms, 대청댐 건설 후 31.49 cms 이다. 강우량 자료는 같은 기간의 기상청 자료를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 1996년 1월부터 2004년 7월까지 공주지점 일 강우량과 일 평균 유량을 도시한 것이다. 유량과 강우가 밀접하게 관련이 있음을 보이고 있으며 매년 7월과 8월 등 호우기에 유량이 1000 cms 이상 증가할 때도 있음을 보이고 있다.

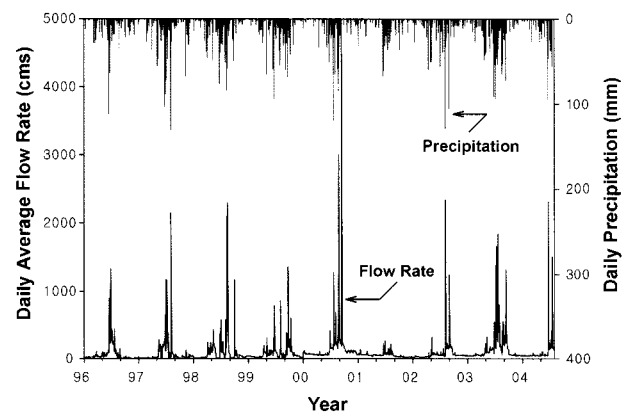


Fig. 1. Daily Average Flow Rate and Daily Precipitation at Gongju, the Geum River during January, 1996-July, 2004.

Fig. 1에 보인 일유량 자료를 이용하여 유량지속곡선(Flow Duration Curve)은 다음과 같은 방법으로 작성할 수 있다:

- 1) 자료기간 동안의 일유량자료를 취합한 후 이를 크기 순서로 작은 것부터 나열해 비초과확률을 아래와 같은 도시공식(plotting position formula)에 의해 계산한다.

$$F_Q(q_n) = i / (365N+1) \quad (1)$$

여기서 $F_Q(q_{(i)})$ 는 크기순서로 작은 것부터 나열했을 때 그 순서가 i 번째인 일유량 $q_{(i)}$ 의 비초과확률(not-exceeding probability)을 의미하며 N 은 자료년수이다.

2) 1)에서 일유량 별로 비초과확률이 계산되면 다음의 식을 이용해 초과확률을 계산할 수 있으며 이를 이용해 x 축(확률스케일)을 초과확률로 y 축(로그 스케일)을 유량으로 하는 유량지속곡선(Flow duration curve)을 작성한다.

$$EP_Q(q) = 1 - F_Q(q) \quad (2)$$

여기서 $EP_Q(q)$ 는 일유량 q 에 해당하는 초과확률이다.

Fig. 2는 Fig. 1과 같은 기간, 지점에서 유량지속곡선을 도시하고 있다. Fig. 2를 이용하면 특정 유량에 대한 초과누적확률을 간편하게 찾을 수 있다. 예를 들어 50 cms의 유량에 대한 초과확률은 40%로 1년 중 50 cms 이상의 유량이 흐르는 일수가 $365 \times 0.4 = 146$ 일 임을 의미한다. 유량의 변화에 대한 이해를 돕기 위하여 동일지점, 동일 기간에 대한 유량의 시 변화를 같은 그래프상에 함께 도시하였다.

Fig. 3은 Fig. 1과 같은 기간, 지점에서 대장균 균집 농도의 시계열 변화이다. 공주지점의 목표수질인 2급수를 만족하기 위한 수질항목 중 대장균 균집수는 1000 MPN/100 mL 인데 상당히 오랜 기간 동안 수질등급을 초과하고 있는 것을 보이고 있다. 대장균 균집농도와 유량과의 관계에 대한 이해를 돕기 위하여 동일지점, 동일 기간에 대한 유량의 시 변화를 같은 그래프상에 함께 도시하였다.

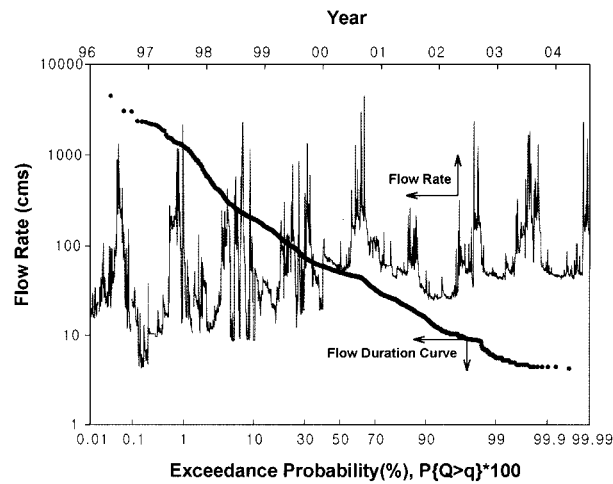


Fig. 2. Flow Duration Curve at Gongju, the Geum River during January, 1996-July, 2004.

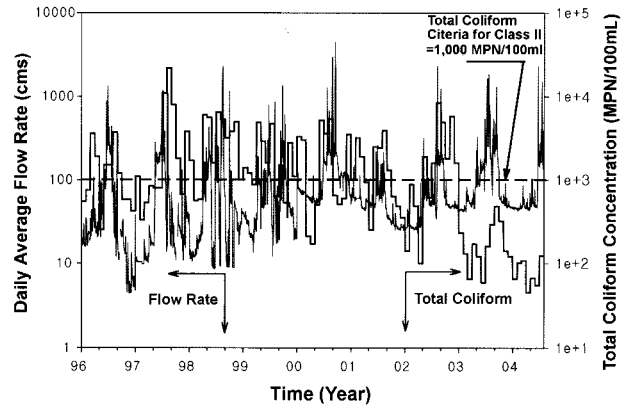


Fig. 3. Time Series of Daily Flow Rate and Total Coliform Concentration at Gongju, the Geum River during January, 1996-July, 2004.

Fig. 3에서 하천의 유량과 대장균 균집간의 관계가 상당히 높은 것을 알 수 있다. Kim 등(2004)은 공주지점에서 수위(Water Surface Level: WSL) 및 BOD, COD, SS, 대장균 균집 농도(TC), 분원성 대장균 균집 농도(FC) 측정 자료에 대한 상호 상관도 분석결과 수위와 대장균 균집농도간의 상관도가 매우 높음을 보고하였다. Table 1은 그 상관도 분석결과를 보이고 있다. Table 1에서 상관도를 나타내는 Pearson 계수는 완전 선형 상관일 경우는 1, 완전 역선형 상관일 경우는 -1을 나타낸다. 수위와 BOD간 Pearson 계수값은 -0.363으로 수위가 증가할 때 BOD농도는 감소함을 뜻하지만 선형적인 관계가 존재하지 않는다. 반면 수위와 대장균 균집수간의 상관계수는 0.712로써, 수위증가와 대장균 균집농도간에 선형관계가 존재함을 뜻하며, 또한 0.01수준에서 유의함을 나타내므로 두 인자간의 관계가 밀접함을 나타내고 있다.

Fig. 1의 유량자료와 Fig. 3의 대장균군 농도를 이용하여 다음과 같은 방법으로 부하지속곡선을 작성할 수 있다:

- 1) 크기 순으로 나열된 일유량 값에 이에 상응하는 측정된 농도를 곱하면 일평균 부하량을 계산할 수 있으며 이를 이용하여 x 축을 초과확률로, y 축을 부하량으로 하는 부하지속곡선(Load Duration Curve)을 구한다. 일평균 부하량을 산정할 때 월평균 수질농도가 유지되는 것으로 가정하였다.
- 2) 마찬가지로 크기 순으로 나열된 일유량에 수질 기준 농도를 곱하면 기준 일평균부하량을 계산할 수 있으며 이를 이용하여 x 축을 초과확률로, y 축을 부하량으로 하

Table 1. Pearson correlation coefficients between water surface level and water quality concentrations (after Kim et al., 2004a)

	Level	BOD	COD	SS	TC	FC
Level	1	-.363	-.252	.375	.712**	.018
BOD	-.363	1	.621**	.130	-.515**	.023
COD	-.252	.621**	1	.288	-.385	-.116
SS	.375	.130	.288	1	.192	.534**
TC	.712**	-.515**	-.385	.192	1	.134
FC	.018	.023	-.116	.534**	.134	1

**Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

는 기준 부하지속곡선(Standard Load Duration Curve)을 작성한다.

이와 같은 절차를 통해 얻게 되는 부하지속곡선과 기준 부하지속곡선을 동일 그래프상에 도시하여 비교하면 수질 기준을 초과하는 부하량 및 이에 해당하는 유량과 초과확률간의 관계를 분석할 수 있게 된다.

Fig. 4는 Fig. 1과 동일지점, 동일기간에 대한 대장균 부하지속곡선을 보이고 있다. 공주지점의 목표수질인 2급수를 만족하기 위한 수질항목 중 대장균 군집수는 1000 MPN/100 mL이므로 수질기준과 일 평균유량 자료를 이용하여 기준부하지속곡선(Standard Duration Curve)을 작성할 수 있다. 대장균부하지속곡선이 기준부하지속곡선보다 큰 부분은 수질이 2급수를 만족하지 못하는 것을 나타낸다. 즉 Fig. 4에 의하면 공주지점에서 1996년 1월부터 2004년 7월까지 47%의 기간 동안 대장균 군집수 항목에 대하여 목표수질을 달성하지 못하고 있음을 나타내고 있다. 대장균부하지속곡선과 기준부하지속곡선이 교차하는 지점의 유량은 Fig. 2 유량지속곡선에서 47% 초과누적확률에 해당하며 이는 51 cms이다. 즉 유량과 대장균 농도간의 선형상관도가 매우 높은 것을 고려하면 51 cms이상의 유량이 흐르는 경우는 대장균 군집의 농도가 수질기준을 초과함을 의미한다.

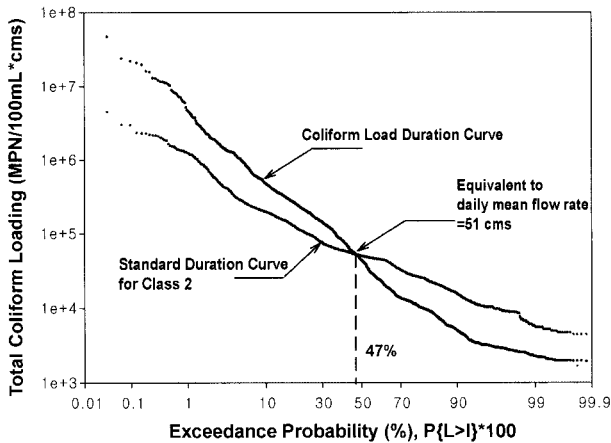


Fig. 4. Coliform Load Duration Curve and Standard Load Duration Curve at Gongju.

유량이 높을 때 대장균 군집의 농도가 높아져서 수질기준을 초과하므로 수질개선을 위하여 비점원 오염물질 배출원에서의 병원균을 저감하기 위한 노력이 필요하다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 하천에서의 오염물질 부하량의 수질기준초과확률을 산정하기 위한 방법으로써 부하지속곡선을 개발하였으며 이를 금강하류 공주지점의 유량과 대장균 군집농도 자료를 이용하여 대장균부하지속곡선을 개발하였다.

1996년부터 2004년까지 8년간의 일 평균유량 자료를 이

용하여 유량지속곡선을 도시한 결과 공주지점에 50 cms 이상 유량이 흐르는 경우의 초과확률은 40%로 나타났다. 같은 기간에 대하여 부하지속곡선과 2급수 수질에 해당하는 대장균 군집 농도 1000 MPN/100 mL과 유량을 이용한 기준지속곡선을 도시한 결과 공주지점에서 47%의 기간 동안 대장균 군집수 항목에 대하여 목표수질을 달성하지 못하고 있음을 알 수 있었다. 하천에서 유량과 대장균 군집농도 간의 선형상관을 가정할 때 유량지속곡선에서 47% 초과누적확률에 해당하는 51 cms 이상의 일평균 유량에서 대장균 군집의 농도가 수질기준을 초과함을 의미한다.

사 사

본 연구는 2005년도 금강수계 환경기초조사사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- Dingman, S. L., Physical Hydrology 2nd ed., Prentice Hall, New Jersey, p. 646 (2002).
- Jacobs, J. M. and Vogel, R. M., Optimal Allocation of Water Withdrawals in a River Basin, *Journal of water resources planning and management*, **124**(6), 357-363 (1998).
- Julien, P. Y., *River Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, UK., p. 434 (2002).
- Kim, G., Choi, E. and Lee, D., Diffuse and Point Pollution Impact on the Pathogen Indicator Organism Level in the Geum River, Korea, *Science of the Total Environment* (In press).
- Kim, G., Kim, S., Lee, D. and Choi, E., Coliform Concentrations as a Diffuse Pollution Indicator in the Geum River, Korea, *Proceeding of 8th Diffuse/Nonpoint source pollution IWA Special Conference, Kyoto, Japan*, CD-Rom (2004).
- Leib, K. J., Mat, L. M. and Wright, W. G., Recurrence Intervals, Probability, and Annual Duration of Dissolved-zinc Concentrations using Flood Analysis Techniques in the Upper Animas River Watershed, Colorado. *Science for watershed decisions on abandoned mine lands: Review of preliminary results*, Denver, Colorado, February 4-5 (1998).
- Singh, R. D., Mishra, S. K. and Chowdhary, H., Regional Flow-duration Models for Large Number of Ungauged Himalayan Catchments for Planning Microhydro Projects, *Journal of hydrologic engineering*, **6**(4), pp. 310-316 (2001).
- UNEP, *GEO Yearbook 2003*, United Nations Environment Programme, New York, NY, 10017, USA, p. 80 (2004).
- Vogel, R. M. and Fenessey, N. M., Flow-duration Curves. I: New Interpretation and Confidence Intervals, *Journal of water resources planning and management*, ASCE, **120**(4), pp. 485-504 (1994).
- Vogel, R. M. and Fenessey, N. M. Flow Duration Curves II: A Review of Application in Water Resources Planning, *Water Resources Bulletin*, **31**(6), pp. 1029-1039 (1995).