

하천에 함유된 부유입자의 특성에 관한 연구

문병현[†] · 서규태 · 장덕준^{*}

창원대학교 환경공학과

^{*}창원대학교 통계학과

A Study on Characteristics of Suspended Particles in the River

Byung-Hyun Moon[†] · Gyu-Tae Seo · Deok-Joon Jang^{*}

Department of Environmental Engineering, Changwon National University

^{*}Department of Statistics, Changwon National University

(Received 25 April 2005, Accepted 16 June 2005)

Abstract

Water samples were collected at 7 sites located along the River Nakdong on 30 occasions. Water qualities, size and fractal dimension (d_f) of suspended particles were measured. Laser light scattering method was used to obtain the size and d_f of suspended particles. The average size of particles in this river ranged from 89 μm and 169 μm , which appears to be relatively coarse compared with other rivers worldwide. The average d_f of suspended particles in this study ranged from 1.8 to 1.9. The correlation analysis showed that DO, TN, NO_3 and chlorophyll-*a* had significant positive relationships with particles size, whereas flow rates and TSS had negative relationships. Interestingly, the factors of which had positive relationships with particles size showed negative relationship with the fractal dimension (d_f) of suspended particles. Generally, as the size of particles increased, the fractal dimension of particles decreased which was indicating the shape of the larger particles became more irregular.

keywords : Suspended particles, Size, Fractal dimension

1. 서론

일반적으로 하천을 상수원수로 사용하는 정수처리 공정은 물리적 화학적인 방법을 사용하여 원수에 함유된 부유성 물질을 효과적으로 처리하도록 단위공정을 구성하여 운전·관리한다. 하천에 함유되어 있는 부유성 물질을 구성하는 입자상 물질이나 입자에 부착되어 있는 물질들은 대부분 건강에 직접적으로 혹은 간접적으로 해로운 물질들이기 때문이다. 따라서 상수원수에 함유된 부유성 물질을 구성하고 있는 입자성 물질의 특성을 조사하고 입자성 물질의 특성에 영향을 미치는 인자를 파악하는 것은 하천의 수질 관리 및 정수처리 공정에 매우 중요하다고 할 수 있다.

하천에 함유된 부유성 물질의 특성은 그 물질의 기원과 오염원에 대한 정보를 제공하기도 한다. 일반적으로 부유성 물질을 구성하는 입자상 물질의 집합체인 floc의 물리적 특성은 크기 및 형태를 측정하여 조사되고 있다. 부유성 물질의 물리적 특성은 침강, 이송 및 퇴적 현상에 영향을 미치는 중요한 인자이다.

최근 하천에 함유된 부유성 입자(De Bore, 1997; Krein

et al., 2003; Lartiges et al., 2001) 및 수처리 공정(Kim et al., 2001; Jin et al., 2003)에서 발생하는 입자상 물질 및 입자상 물질의 집합체인 floc의 형태를 프랙탈 차원(fractal dimension)을 적용하여 특성을 조사한 연구가 발표되고 있다. Floc의 형태, 즉 프랙탈 차원에 영향을 미치는 환경 및 조작 인자의 관계를 파악하여 하천 및 수처리 공정의 관리에 적용하고 있다. 그러나 아직까지 국내에서 상수원수로 이용되는 하천에 함유된 floc의 특성에 대한 연구는 미진한 실정이다. 따라서 본 연구의 목적은 상수원수로 사용되는 하천에 함유된 부유성 물질을 구성하는 입자상 물질의 집합체인 floc의 물리학적 특성인 크기와 프랙탈 차원을 조사하고 또한 하천의 수질과의 관계를 파악하고자 하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1. 채수지점 및 기간

시료의 채취는 낙동강 중·하류 지역에서 서 7개 지점을 선정하였으며, 시료의 채취는 2003년 5월부터 같은해 11월 동안 약 8일 간격으로 30회 수행하였다. 그러나 강우 중 특히 장마기간 중에는 채수 및 유량 측정이 어려워 채수 간격이 연장되어 조정되었다.

[†] To whom correspondence should be addressed.

bhmoon@changwon.ac.kr

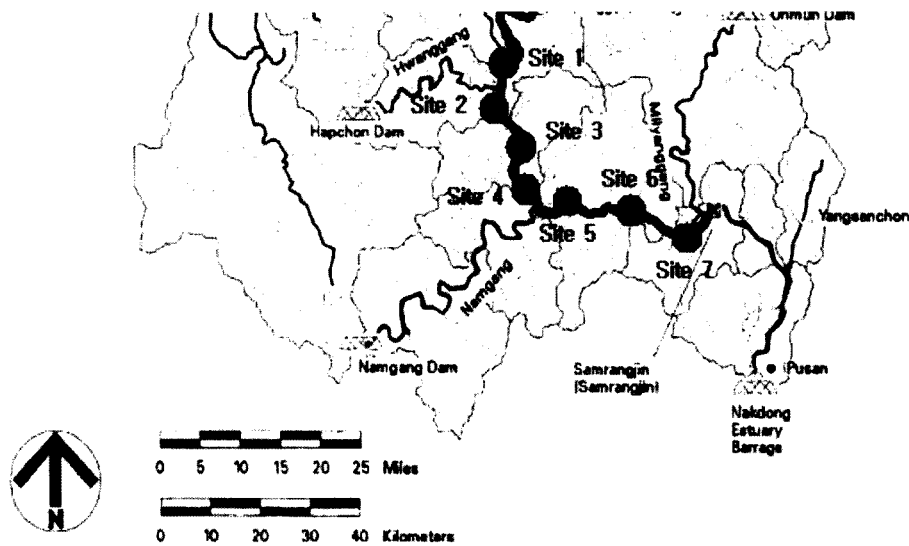


Fig. 1. Map of the investigated area of the Nakdong River.

2.2. 수질 및 입자특성 분석

수질의 분석은 Standard Method (APHA, 1995)에 의하여 분석되었으며 pH, DO, 온도는 현장에서 측정하였다. 하천의 유속은 유속 측정기(Flowmate, Marsh-McBirney)를 이용하여 측정하였으며 하천의 수위와 하천의 단면적을 측정하여 구한 후 유속을 곱하여 하천 유량을 산정하였다.

최근 입자의 집합체인 floc의 불규칙한 형태를 프랙탈 차원을 사용하여 다음의 관계식으로 나타낼 수 있음이 발표되었다(Guan et al., 1998).

$$M \propto R^{d_f}$$

여기서 M은 floc의 질량, R은 floc의 크기이며, d_f 는 floc의 프랙탈 차원을 나타낸다. d_f 의 값은 1에서 3 사이에 존재하며, 3에 가까울수록 표면적인 적은 구형의 형태에 가까우며 침전속도가 빠른 형태를 가지고 있으며, 1에 가까울수록 선형의 형태로 표면적인 넓은 불규칙적인 형태로 침전속도가 느린 형태로 floc이 구성됨을 나타낸다. 프랙탈 차원은 여러가지 방법을 사용하여 측정할 수 있으나 최근 발표(Guan et al., 1998; Wu et al., 2002)된 small angle laser light scattering (SALLS)을 이용한 프랙탈 차원의 측정방법은 기존 방법들의 한계점을 극복할 수 있는 측정방법으로 제시되었다. SALLS 방법에 사용된 기기는 Marlvern Mastersizer/E를 사용하였으며 5 mV He-Ne laser 광원과 300 mm 렌즈를 이용하였다. 동일한 기기를 사용하여 입자의 크기도 측정하였다.

수집된 수질 특성값들에 대한 통계적 분석은 통계처리 소프트웨어인 SAS System을 이용하여 분석하였다. 고려된 수질 특성값들의 일반적 특성, 주요 수질 특성값들의 관련성은 Pearson correlation coefficient를 이용한 상관분석을 실시하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 2에는 본 연구에서 수행한 하천의 각 지점에서의 평균 floc 크기를 나타내었다. 부유 floc의 평균 크기는 89~169 μ m를 나타내었다. 문헌에 보고된(Walling et al., 2000) 외국 하천의 floc 크기 결과와 비교할 때 본 연구가 수행된 낙동강에 함유된 부유 floc의 크기는 비교적 큰 편에 속하였다. 하천에 함유된 부유 floc의 크기는 floc을 구성하는 체외고분자 물질과 밀접한 관계가 있으며 체외고분자 물질은 하천의 유기물질과 박테리아 함유량과 밀접한 관계가 있다고 발표되고 있다(Lartiges et al., 2001; Liss et al., 1996). 따라서 보다 명확한 원인을 규명하기 위해서는 floc을 구성하는 물질의 분석이 필요한 것으로 사료되나 본 연구가 수행된 하천에 함유된 floc의 크기가 크게 나타난 결과를 주시할 필요가 있음을 알 수 있다. Floc의 크기는 3 지점에서 가장 크게 나타났으며 이는 본 연구 기간 중 3 지점의 상류에서 토사의 채취가 진행되었으며 이로 인하여 육안으로도 하천에 다량의 토사가 유입됨을 알 수 있어 이로 인하여 큰 floc이 발생된 것으로 사료된다. 그러나 floc의 크기는 하천의 흐름 방향에 따라 일정한 경향을 나타내지는 않았다. 이는 채수지점이 비교적 짧은 상하류에 함유된 floc 크기에 대한 경향을 파악하기 어려웠다.

Table 1에는 각 지점과 전체 결과자료를 사용하여 floc의 크기와 수집된 여러 수질 분석값들 간의 상관분석 결과를

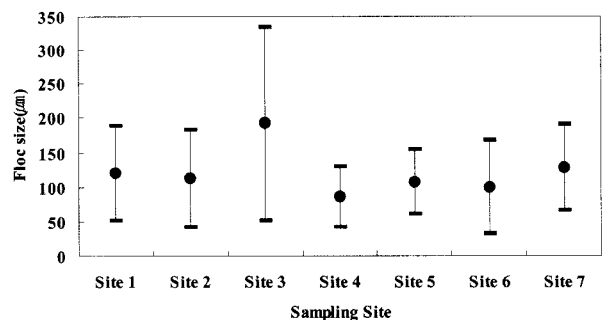


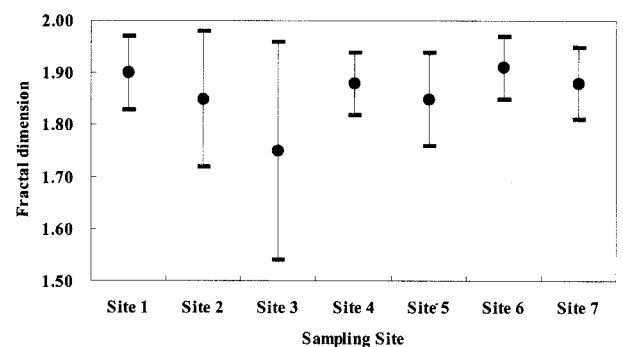
Fig. 2. Longitudinal variation of size of suspended particle in the Nakdong River.

Table 1. Results of the correlation analysis between the size of particles and water qualities

	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7	Total
pH	0.376	0.315	0.180	0.189	0.313	-0.139	-0.081	0.064
DO	0.536	0.515	0.658	0.590	0.107	0.527	0.417	0.482
TSS	-0.369	-0.482	0.157	-0.162	-0.277	-0.315	-0.264	-0.232
BOD	0.445	-0.006	0.105	0.233	0.199	0.293	-0.042	0.170
COD _{Mn}	0.313	-0.175	0.539	-0.241	-0.344	0.022	0.042	0.032
T-N	0.560	0.315	0.625	0.593	0.426	0.451	0.329	0.435
NH ₃ -N	0.265	0.745	0.885	0.287	-0.061	-0.053	0.142	0.186
NO ₃ -N	0.607	0.242	0.570	0.436	0.617	0.508	0.569	0.491
T-P	0.044	-0.070	-0.314	-0.206	-0.197	0.133	0.086	-0.037
Chl-a	0.152	0.463	0.128	0.503	0.447	0.361	0.643	0.398
Flow	-0.304	-0.445	-0.625	-0.248	-0.434	-0.406	-0.412	-0.382

제시하였다. 또한 유량과의 상관분석 결과도 제시하였다. 먼저 전체 자료를 사용하여 상관도 분석 결과를 살펴보면 flocc의 크기와 NO₃-N의 상관계수가 양(+)의 값이고 비교적 크게 나타나 NO₃-N의 값이 커지거나 작아짐에 따라 flocc의 크기도 동시에 커지거나 작아지는 선형관련성이 있음을 알 수 있다. 그 다음으로 DO, T-N, chlorophyll-a 순으로 flocc 크기와 양(+)의 상관관계를 나타내었으며 하류로 갈수록 chlorophyll-a와 flocc 크기의 양의 상관관계가 증가되는 경향을 나타내었다. 유량과 TSS가 flocc 크기와 음(-)의 상관관계를 나타내었다. 하천 수질의 대표적인 오염의 정도를 나타내는 pH, BOD, COD_{Mn}, T-P 등의 수질 분석결과들과 flocc 크기의 상관관계는 낮은 것으로 나타났다. 따라서 하천에 함유된 flocc 크기는 NO₃-N, DO, T-N, chlorophyll-a의 농도와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 생물학적 처리에서 발생하는 입자들의 집합체인 flocc의 크기는 DO 및 NO₃-N의 농도가 증가될수록 입자의 응집이 촉진되어 flocc의 크기가 증가된다고 보고(Wilen et al., 2000)되었다. 하천에 함유된 flocc과 생물학적 flocc의 구성을 분석한 연구 결과에 의하면 구성물질의 비율의 차이는 있지만 미생물에서 기인하는 체외고분자 물질이 하천에 함유된 입자상 물질의 응집에 관여하여 flocc의 형성에 영향을 준다고 보고하고 있다(Droppo et al., 1997; Lartiges et al., 2001; Liss et al., 1996). 또한 하천에 함유된 무기물질과 입자상 물질에 함유된 무기물질에 의한 응집도 flocc의 형성에 영향을 미치거나 미생물에 의한 체외고분자 물질에 의한 응집의 영향이 크다고 보고하였다. 따라서 생물학적 flocc의 응집에 영향을 미치는 DO와 NO₃-N의 농도도 하천의 flocc의 응집에 관여하여 크기에 영향을 주는 것으로 사료된다. 하천에 함유된 chlorophyll-a의 농도가 증가되면 flocc의 크기가 증가한다고 보고(Walling et al., 2000)되고 있어 본 연구 결과와 유사한 결과를 나타내었다.

Flocc의 크기와 음(-)의 상관관계를 나타내는 유량은 유량이 증가될수록 하천 유속이 증가하여 발생하는 전단력이 flocc 형성을 방해함으로써 크기가 감소되는 것을 알 수 있다. 하천 유량이 커지면 TSS의 농도가 증가하여 입자들의 충돌 횟수가 증가하여 입자의 응집에 유리한 측면이 있으나 chlorophyll-a를 발생시키는 조류의 형성에 부정적인 영

**Fig. 3.** Longitudinal variation of fractal dimension of suspended particle in the Nakdong River.

향을 미치며 유량 증가로 인한 전단력이 flocc의 크기를 감소시키는 영향이 더 지배적인 것으로 생각된다.

Fig. 3에 나타난 바와 같이 본 연구에서 분석된 부유입자의 집합체인 하천에 함유된 flocc의 평균 프랙탈 차원 값의 범위는 1.8~1.9를 나타내었다. 기존에 수행되어진 다른 연구에서는 하천에 함유된 flocc의 면적과 원주 관계를 이용하여 구한 프랙탈 차원의 값의 범위는 1.26~1.74로 보고되어진 바 있다(De Boer, 1997). 또한 하천수 중 입자의 부피 농도와 평균크기 관계를 이용하여 하천수 중에 함유된 flocc의 프랙탈 차원값이 2.4로 조사되었다(Lartiges et al., 2001). 그리고 본 연구와 유사한 분석 방법을 사용하여 해양에 함유된 flocc의 프랙탈 차원을 분석한 결과(Risovid et al., 1996) 프랙탈 차원 값은 1.77~2.40의 범위를 나타내어 본 연구에서 조사되어진 프랙탈 차원의 값보다 넓은 범위를 나타내고 있었다. 그와 같은 결과는 기존의 연구(Risovid et al., 1996)가 보다 광범위한 해양에서 채수한 flocc의 프랙탈 차원을 분석한 결과이며 해양에 함유된 flocc의 형태가 하천의 경우보다 다양한 형태로 존재하기 때문이라 할 수 있다. 프랙탈 차원의 값은 측정 방법에 따라 flocc의 다른 형태적 특성을 나타낸다고 보고 되고있다(Wu et al., 2002). 그러나 공통적으로 flocc의 형태특성이 해당 하천 혹은 해양의 환경조건과 밀접한 관계가 있음을 위의 문헌들에서 보고되고 있어 지속적인 연구 결과의 비교 및 축적이 필요할 것으로 사료된다.

Table 2에는 각 지점과 전체 결과자료를 사용하여 flocc의

Table 2. Results of the correlation analysis between the fractal dimension of particles and water qualities

	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7	Total
pH	0.409	0.578	0.273	0.193	-0.077	0.071	0.303	0.234
DO	-0.838	-0.500	-0.385	-0.615	-0.143	0.251	0.046	-0.319
TSS	0.507	0.368	0.111	0.287	0.164	-0.301	-0.122	0.144
BOD	0.029	0.297	0.269	-0.379	-0.103	0.219	-0.072	0.066
COD _{Mn}	-0.335	0.402	0.158	0.316	-0.063	-0.196	-0.094	0.044
T-N	-0.317	-0.189	-0.566	-0.393	0.027	-0.318	-0.248	-0.205
NH ₃ -N	0.069	-0.605	-0.220	-0.072	-0.075	-0.574	-0.032	-0.170
NO ₃ -N	-0.595	-0.165	-0.896	-0.366	-0.114	-0.123	-0.217	-0.268
T-P	-0.173	0.160	0.570	-0.324	-0.084	-0.383	-0.123	0.003
Chl-a	-0.125	-0.356	-0.015	-0.729	-0.317	-0.043	-0.144	-0.242
Flow	0.452	0.419	0.624	0.463	0.187	0.205	0.320	0.315

프랙탈 차원값과 수집된 여러 수질 분석값들 간의 상관분석 결과를 나타내었다. 전체 자료를 사용한 상관계수를 살펴 보면 DO, NO₃-N, chlorophyll-a, T-N 순으로 floc의 프랙탈 차원값과 음(-)의 상관관계를 나타냈으며 유량과는 양(+)의 상관관계를 나타내었다. 상관관계의 순위에 약간의 변동이 있지만 floc의 크기와 높은 상관관계를 나타내는 수질 인자가 floc의 프랙탈 차원값과도 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 또한 floc의 크기와 음(-)의 상관관계를 나타내었던 유량과 TSS는 floc의 프랙탈 차원 값과 양의 상관관계를 나타내었다. 따라서 전반적으로 floc의 크기와 양(+)의 상관관계를 나타내는 수질인자는 floc의 프랙탈 차원값과 음(-)의 상관관계를 나타내었으며 floc의 크기와 음(-)의 상관관계를 나타낸 유량과 TSS는 프랙탈 차원값과 양(+)의 상관관계를 나타냈다. 즉 floc의 크기를 증가시키는 수질인자는 입자들의 결합한 floc의 형태를 불규칙하고 표면적인 큰 모양으로 형성시키며 반대로 floc의 크기를 감소시키는 인자들은 floc의 형태를 비교적 원형에 가까운 규칙적인 모양으로 형성시킴을 알 수 있다. 따라서 입자의 크기가 증가하면 형태는 불규칙한 모양을 나타내며 크기가 감소하면 비교적 규칙적인 형태를 나타내었다.

4. 결론

1. 부유 입자들의 집합체인 floc의 평균 크기의 범위는 89~169 μm를 나타내 비교적 크기가 큰 floc을 함유한 것으로 나타났다. Floc의 평균 프랙탈 차원 값의 범위는 1.8~1.9를 나타내었다.
2. NO₃-N, DO, T-N, chlorophyll-a 순으로 floc 크기와 양(+)의 상관관계를 나타내었으며 유량과 TSS가 floc 크기와 음(-)의 상관관계를 나타내었다.
3. Floc의 크기와 양(+)의 상관관계를 나타내는 수질인자는 floc의 프랙탈 차원의 값과 음(-)의 상관관계를 나타내었으며 floc의 크기와 음(-)의 상관관계를 나타낸 인자는 프랙탈 차원값과 양(+)의 상관관계를 나타내었다.
4. Floc의 크기가 감소하면 형태는 규칙적인, 즉 구형에 가까운 모양을 형태를 나타내었으며 floc의 크기가 증가하면 불규칙한 형태를 나타내었다.

사 사

본 연구는 2004년 창원대학교 해외 방문 연구에 의하여 수행되었음.

참고문헌

APHA, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19th ed., Washington DC (1995).

De Bore, D. H., An Evaluation of Fractal Dimensions to Quantify Changes in the Morphology of Fluvial Suspended Sediment Particles during Baseflow Conditions, *Hydrological Processes*, **11**, pp. 415-426 (1997).

Droppo, I. G. et al., The Freshwater Floc: A Functional Relationship of Water and Organic and Inorganic Floc Constituents Affecting Suspended Sediment Properties, *Water, Air and Soil Pollution*, **99**, pp. 43-54 (1997).

Guan, J., Waite, T. D. and Amal, R., Rapid Structure Characterization of Bacterial Aggregates Using Small Angle Light Scattering, *Environmental Science and Technology*, **32**, pp. 3735-3742 (1998).

Jin, B., Wilen, B. and Lant, P., A Comprehensive Insight into Floc Characteristics and their Impact on Compressibility and Settability of Activated Sludge, *Chemical Engineering Journal*, **95**, pp. 221-234 (2003).

Kim, S. H., Moon, B. H. and Lee, H. I., Effect of pH and Dosage on Pollutant Removal and Floc Structure during Coagulation, *Microchemical Journal*, **68**, pp. 197-203 (2001).

Krein, A., Petticrew, E. and Udelhoven, T., The Use of Fine Sediment Fractal Dimensions and Colour to Determine Sediment Sources in a Small Watershed, *Catena*, **53**, pp. 165-179 (2003).

Lartiges, B. S., Deneux-Mustin, S., Villemin, G., Mustin, C., Barres, O., Chamerois, M., Gererd, B. and Babut, M., Composition, Structure and Size Distribution of Suspended Particulates from the Rhine River, *Water Research*, **35**(3), pp. 808-816 (2001).

Liss, S. N., Droppo, I. G., Flannigan, D. T. and Leppard, G. G., Floc Architecture in Wastewater and Natural Riverine Systems, *Environmental Science and Technology*, **30**, pp. 680-686 (1996).

- Risovid, D. and Matinis, M., Fractal Dimensions of Suspended Particles in Seawater, *J. Colloid Interface Sci.*, **182**, pp. 199-203 (1996).
- Walling, D. E., Owens, P. N., Waterfall, B. D., Leeks, G. J. L. and Wass, P. D., The Particle Size Characteristics of Fluvial Suspended Sediment in the Humber and Tweed Catchments, UK. *The Science of the Total Environment*, **251/252**, pp. 205-222 (2000).
- Wilen, B., Keiding, K. and Nielsen, P. H., Anaerobic Deflocculation and Aerobic Reflocculation of Activated Sludge, *Water Research*, **34**(16), pp. 3933-3942 (2000).
- Wu, R., Lee, D., Waite, T. and Guan, J., Multilevel Structure of Sludge Flocs, *J. Colloid Interface Sci.*, **252**, pp. 383-392 (2002).