

전기전도도를 이용한 CSO의 유량 추정

The Flow rate estimation of CSOs using EC Data

최원석 · 송창수*

Weonsuk Choi · Changsoo Song*

호남대학교 토목환경공학과

(2011년 7월 1일 접수 ; 2011년 10월 10일 수정 , 2011년 10월 13일 채택)

Abstract

The monitoring technique based on electrical conductivity (EC) can provide researchers with some advantages in maintenance management and is cost-effective as compared with existing CSOs monitoring. In this study, the flow rate estimation using EC data was executed in two sites where storm overflow chamber had installed. In the result of A-site, R^2 of second order multinomial between dilution ratio of EC and observed flow rate was showed the range of 0.68 ~ 0.77. And R^2 of B-site was 0.62 ~ 0.81. On the other hand, cumulative frequency of A-site was 43.4 ~ 52.2% in the relative error level of under 20%. And B-site was 10.1 ~ 46.5%. The flow rate estimation formula was improved through consideration of some parameters including antecedent dry days and rainfall duration. And difference between estimated flow rate and observed flow rate in total rainfall event was very small.

Key words : CSOs monitoring, EC(electrical conductivity), Flow rate estimation, antecedent dry days, rainfall duration

주제어 : CSOs 모니터링, 전기전도도, 유량추정, 선행건기일수, 강우지속시간

1. 서론

국내 CSOs 오염부하는 비점오염원 발생부하의 2배 가량으로 수계환경에 매우 큰 영향을 미치며, 합류식 하수도 월류수(Combined Sewer Overflows; CSOs)는 그 발생원이 비점오염원의 특성을 지니고 있으면서도 점오염원의 형태로 배출되기 때문에 관거말단부인 우수토실 또는 우수지등지에서 관리를 하면 강우시 공공수역으로 배출되는 오염부하를 저감할 수 있다.

또한 CSOs중 초기강우유출수의 경우에는 하수관거의 퇴

적물의 영향으로 고농도의 병원성 미생물이나 유해물질 등을 포함하고 있으며, 미처리된 상태로 방류될 경우 피부에 접촉하거나 상수원으로 이용되는 하천의 경우에는 공중위생이나 생태계에 영향을 줄 수 있으며 쓰레기 등의 협잡물과 취기에 의한 경관상의 문제를 가지고 있다(일본하수도협회, 2002).

건기 및 우기시 CSOs 특성을 살펴보면 건기시 수질의 변동은 2~3배 범위지만, 강우시 수질의 변동범위는 10배를 넘는 경우도 나타났으며, 미국 EPA 보고에 의하면, CSOs는 유기물, 박테리아, 영양물질, 암모니아, 탁도, TSS, 독성

* Corresponding author Tel:+82-62-940-5467, Fax:+82-62-940-5080, E-mail: cssong@honam.ac.kr(Song, C.S.)

물질 등 산성폐수를 제외한 모든 오염물질을 포함하고 있는 것으로 조사되었다. 따라서 이러한 오염물질은 월류토구를 통해 짧은 시간에 많은 양이 유출되어 수체 오염을 가중시키며, 하천이나 호수로 유입되면서 환경오염을 유발하게 된다 (배, 2008).

따라서 정부도 2004년부터 4대강 비점오염관리 종합대책등을 통해 CSOs 제어 및 관리를 위한 관련기준 및 지침을 정비하고 시범사업을 추진하였으며, 향후 2015년까지 CSOs 및 SSOs 관리를 위해 2,811억원을 투자할 계획을 가지고 있다(환경부, 2007).

효과적인 CSOs 제어 및 관리를 위해서는 우선적으로 해당 지점의 우천시 발생하는 CSOs의 실질적인 유출특성에 대한 조사가 반드시 선행되어야 하며, 이를 위해서는 장기간 모니터링 조사사업을 통해 지역기후 등에 따라 다양한 발생현상을 보이는 CSOs의 정확한 발생현상을 규명해야 한다.

또한, 최근 유역관리를 위한 수질오염총량관리제의 합리적인 시행을 위해서도 유량·수질 모니터링은 유역환경을 대표할 수 있는 지류하천을 선정하여 지속적으로 수행하여야 하며, 평·갈수기가 포함되도록 10월부터 ~ 익년 6월까지 일정간격으로 30회 이상 의무적으로 측정하고, 그 결과를 기준으로 목표수질 및 수질개선유역의 선정 및 평가에 활용되어야 한다고 보고되었다(김, 2011).

이처럼 장기적인 모니터링 사업은 그 중요성에 비해 비용 및 유지관리 측면에 제약이 많으며, CSOs의 경우에도 국내에 산재되어 있는 우수토실에 대해서 고비용의 유량계를 도입하여 모니터링하는 것은 현실적으로 어려움이 많기 때문에 기존의 CSOs 모니터링 연구결과는 우천시 일회성 분석에 의한 연구가 대부분이며, 장기간 모니터링 조사사업을 통한 연간 CSOs 발생부하에 대한 실질적인 조사사업은 현재까지 수행된 사례가 미미하다.

CSOs 오염부하 산정을 위한 신뢰성 있는 데이터 구축을 위해서는, 데이터의 정확도 뿐만 아니라, 조사개소수 및 조사기간 또한 중요하다고 할 수 있으나, 고비용의 유량계 설치 및 인력에 의한 수질채수는 모니터링에 제약이 많으며, 특히 우천시 수질채수의 경우 일본 사례에 비취볼 때, 조사 실패의 확률이 80%이상으로 알려져 있다(일불수도협회, 2002).

일본의 경우 하수도법 시행령에서 합류식 지역의 배출기준을 BOD 40mg/L로 규정하고 있는데 이 배출기준은 합류식 유역에서 발생하는 방류수에 포함된 오염부하 총량을 발생된 방류수 총량으로 나누어 산정하도록 규정하고 있으며, 이때 오염부하 총량은 법령에서 정하는 방법에 의한 계측 또는 추계한 경우의 총량으로 하고 있는데, 이는 CSOs 규제를 위한 수질의 직접계측의 한계점을 직·간접적으로 시사하고 있는 것으로 이해된다.

따라서 본 연구에서는 고비용이 요구되는 모니터링 사업의 특성상 비용효과적이며 유지관리가 용이한 모니터링 방법으로 전기전도도를 선정하고, 전기전도도 데이터를 이용한 유량 및 수질추계방안에 대해서 연구하였으며, 본 논문에서는 먼저 첫 번째로 전기전도도를 이용한 CSOs의 유량 추정방안에 대해 그 적용성을 검토하였다.

2. 실험 대상지점 및 운영현황

2.1 대상지점현황

전기전도도를 이용한 CSOs 모니터링 적용성 검토를 위한 대상지점은 서울특별시에 소재하고 있는 주요 우수토실 관련 배수구역 기초자료 및 현장조사를 통해 토지이용별로 상업지역이 밀집된 A site와 주거 및 녹지지역이 포함된 B site를 각각 선정하였다. 각 site별 배수유역 및 관거현황은

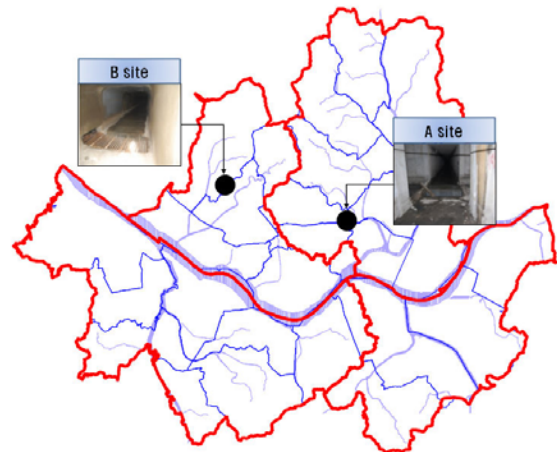


Fig. 1. The monitoring site.

Table 1. The outline of monitoring site.

조사지점	유역면적 (ha)	토지이용현황 (%)					관거현황	
		주택	녹지	상업	도로	기타	합류관거(m)	차집부
A site	33.73	-	-	48	17	35	2.0 x 2.0	D300mm
B site	71.05	20	20	1	6	53	2.0 x 1.5	D600mm

Table 1와 같으며, 대상지점 위치는 Fig. 1과 같다.

2.2 계측기 운영 현황 및 강우 데이터 활용

대상지점의 유량 및 전기전도도 측정을 위한 계측기는 유량계는 이동식 초음파 유량계, 전기전도도계는 유도전류방식에 의해 전도도를 측정하는 Jumo CTI-500 모델로 계측기를 설치하여 운영하였으며, 각 지점별로 유량은 2010년 6월 ~ 2011년 2월, 전기전도도는 2010년 9월 ~ 2011년 2월동안 모니터링을 실시하였다. 지점별 청천시 유량패턴 분석은 5분 간격으로 연속 측정된 유량데이터 및 해당지점의 시간대별 강우자료를 토대로 3일이상의 선행건기의 영향을 고려하여 A site는 46일, B site는 48일에 대해서 수행하였다.

측정된 데이터의 분석을 위하여 필요한 강우데이터는 기상청 관측소중 측정지역에서 가장 근접한 지역별 상세 관측 강우자료(AWS)를 활용하였다.

3. 청천시 유량 및 전기전도도 모니터링 결과

3.1 지점별 청천시 유량의 변화

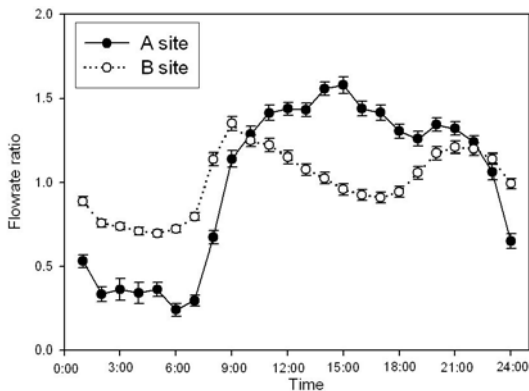


Fig. 2. Flow rate pattern of dry weather

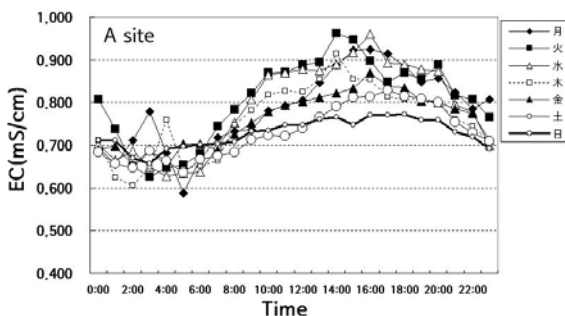


Fig. 3. The EC pattern of dry weather

지점별 청천시 유량패턴분석은 5분 간격으로 연속 측정된 유량데이터 및 해당지점의 시간대별 강우자료를 토대로 선행건기의 영향을 고려하여 실시하였으며, 각 지점별 유량패턴 분석결과는 Fig. 2와 같다.

각 site별로 일평균 건기유량 (A site : 176.8m³/hr, B site : 293.8m³/hr) 대비 시간대별 유량변화를 살펴보면, A site의 경우 유량 변동비는 0.24~1.58로 새벽시간대에 급격히 감소하고 오전8시부터 오후 10시까지 유량이 지속적으로 증가하는데 반하여, B site의 경우 유량 변동비는 0.69~1.35로 A site에 비하여 시간대별 유량 변동 폭이 적게 나타난 것을 알 수 있다.

이는 A site의 경우 토지이용별로 상업지역이 많이 분포되어 있어 새벽시간대를 제외하고는 물 사용량이 상대적으로 많기 때문인 것으로 판단되며, B site의 경우 주거지역의 영향으로 오전7시~9시 및 오후 7시~10시에 물사용량이 많아 유량비가 높게 나타났으며, 불명수의 영향으로 새벽시간대에도 유량비가 급격히 감소하지 않은 것으로 판단된다.

3.2 지점별 청천시 전기전도도 변화 분석

전기전도도를 이용한 유량추정방법은 해당지점의 청천시 전기전도도에 대한 변동패턴을 얼마나 정확하게 설정하는가가 중요한 조건이 된다. 전기전도도 계측기는 해당수질 성상이 유지류를 비롯한 이물질이 많이 포함하고 있는 조건에서도 안정적인 계측이 가능하기 때문에, 장기간에 걸친 관측 데이터에 근거하여 통계적으로 청천시의 전기전도도 변동패턴을 설정할 수 있다.

각 지점별 청천시 전기전도도 패턴분석은 유량패턴분석과 마찬가지로 선행건기일수(ADWP)를 고려하여 각 지점별로 2010년 9월부터 약 4개월간 5분 간격으로 연속 측정된 전기전도도 데이터를 가지고 실시하였으며, 그 결과는 Fig. 3과 같다.

전기전도도 패턴은 향후 유량추정시 강우 발생시간에 대한 전기전도도 데이터 적용을 위해 요일 및 시간대별로 분

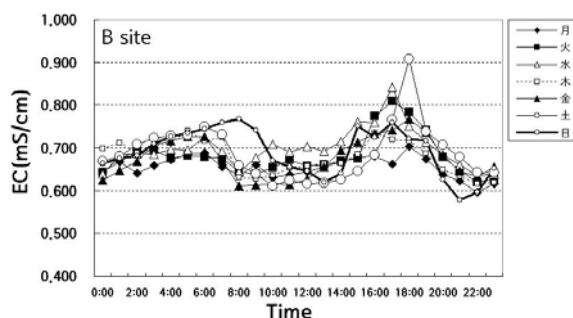


Table 2. The flow estimation equation result for each event

지점	강우 이벤트			유량추정식 (Q : 유량(m ³ /hr), X : EC _{dry} /EC _{wet})	결정계수 (R ²)	상대오차 누적빈도(%) 오차 20%이내
	일자	시간(hr)	강우량(mm)			
A site	9/19	13	16.5	$Q = 78.822X^2 + 26.655X + 99.414$	0.7654	52.2
	9/20	10	28.5	$Q = 39.164X^2 - 59.762X + 291.54$	0.7561	44.6
	10/2	12	21.5	$Q = 160.8X^2 - 716.84X + 1099.7$	0.6763	43.4
B site	9/19	13	19	$Q = 138.1X^2 - 98.163X + 168.19$	0.8134	46.5
	9/20	10	26.5	$Q = 260.33X^2 - 922.47X + 1033.9$	0.8133	38.0
	10/2	14	21	$Q = 218.53X^2 - 640.84X + 786.26$	0.6257	10.1

류하여 수행하였다.

지점별 청천시 전기전도도 패턴분석결과 A site의 경우 청천시 일평균 전기전도도 값은 0.73 ~ 0.81mS/cm의 범위로 요일별로는 화요일과 수요일의 경우가 다른 요일에 비해 변동폭이 크며, 시간대별로는 대부분 새벽시간대에 전기전도도값이 낮게 나타나는 경향을 보였으며, B site의 경우 청천시 일평균 전기전도도 값은 0.65 ~ 0.70mS/cm의 범위로, 요일 및 시간대별 변동폭은 A site에 비해서 작게 나타났으며, 오전 6시~7시와 오후 5시~7시가 타시간대에 비해 높게 나타나는 경향을 보였다.

이처럼 Fig.3과 같이 동일지점의 경우에도 요일 및 시간대에 따라 청천시 전기전도도 값이 미세하게 다르게 나타나는 것이 확인되었는데, 이는 해당지점의 생활 및 경제활동 패턴과 관련된 오수발생 특성을 나타내는 것으로 볼 수 있으며, 유량 추정의 정확도 향상을 위해서는 건기 전기전도도의 시간대별, 요일별 안정적인 데이터 구축이 필요하다.

4. 전기전도도를 이용한 CSOs의 유량 추정

4.1 전기전도도 희석률(EC_{dry}/EC_{wet})을 이용한 유량 추정

국내 강우에 포함된 전기전도도는 지역마다 차이가 있겠지만 주로 20~30μS/cm 근처로(이, 1999) 일반 하수에 비하여 매우 낮기 때문에 강우에 의한 희석효과를 이용하여 유량을 추정하는 방안을 검토하였다.

전기전도도를 이용한 유량추정은 일본 요코하마시 중부 수재생센터의 사례를 참고하여, 청천시의 EC값과 강우시의 시간적 변화에 따른 전기전도도 희석률(EC_{dry}/EC_{wet})을 실측유량과의 관계식을 통해 추정하는 것으로 유량을 추정하였다.

각 지점별로 요일별, 시간별 청천시 전기전도도 데이터를 구축한 후 모니터링 기간 중 10mm이상의 강우가 발생한 3

번의 이벤트에 대해서 전기전도도 희석률에 의한 유량추정식을 산정한 후 강우이벤트별로 유량을 추정하였으며, 그 결과는 Table 2 및 Fig. 4~5과 같다.

각 지점별로 총 6번의 강우이벤트에 대해서 전기전도도 희석률에 의한 유량추정결과 상습지역이 많이 포함된 A site의 경우 전기전도도 희석률과 실측유량과의 2차 다항식 결정계수(R²) 값은 0.68~0.77의 범위로 유사하게 나타났으며, 유량추정값과 실측값의 상대오차를 분석한 결과, 오차범위 20%이내에 포함된 상대오차 누적빈도는 강우이벤트별로 43.4~52.2%의 범위를 나타내었다.

주거 및 녹지지역을 포함한 다양한 형태의 토지이용을 보이고 있는 B site의 경우에는 유량추정식의 2차 다항식 결정계수(R²) 값은 0.62~0.81의 범위를 나타냈으며, 오차범위 20%이내의 상대오차 누적빈도는 10.1~46.5%의 범위를 나타내었다.

전기전도도 희석률에 의한 유량추정결과 전기전도도 희석률과 유량과의 상관계수가 0.8이하로 떨어지는 경우도 발생하였고, 10월 2일 발생한 강우에 의한 유량추정결과는 다른 강우이벤트에 비해서 실측값과의 상관성도 낮고 상대오차도 가장 크게 발생하였는데, 이는 동일 지점일 경우라도 선행건기일수 및 강우강도에 따른 다양한 강우특성에 따라서 전기전도도 희석률에 영향을 주어 유량추정의 오차가 상대적으로 크게 발생된 것으로 판단된다.

즉, 전반적으로 각 강우사상에 대한 유량추정식이 실측 유량의 변동추이와 유사하게 나타났고, 전기전도도에 의한 유량추정의 가능성을 볼 수 있었으나, 각각의 강우일자에 대하여 추정된 경험식을 그 지점의 범용 유량식으로 적용하면 다른 강우에 대하여는 상관관계가 떨어질 수 밖에 없는 문제가 있으므로, 해당 지점에 대해 적용할 수 있는 범용 유량식의 산정이 필요하다. 따라서, 다음 절에는 선행건기일수와 강우지속기간 등의 변수를 추가적으로 고려한 유량추정식을 산정하였다.

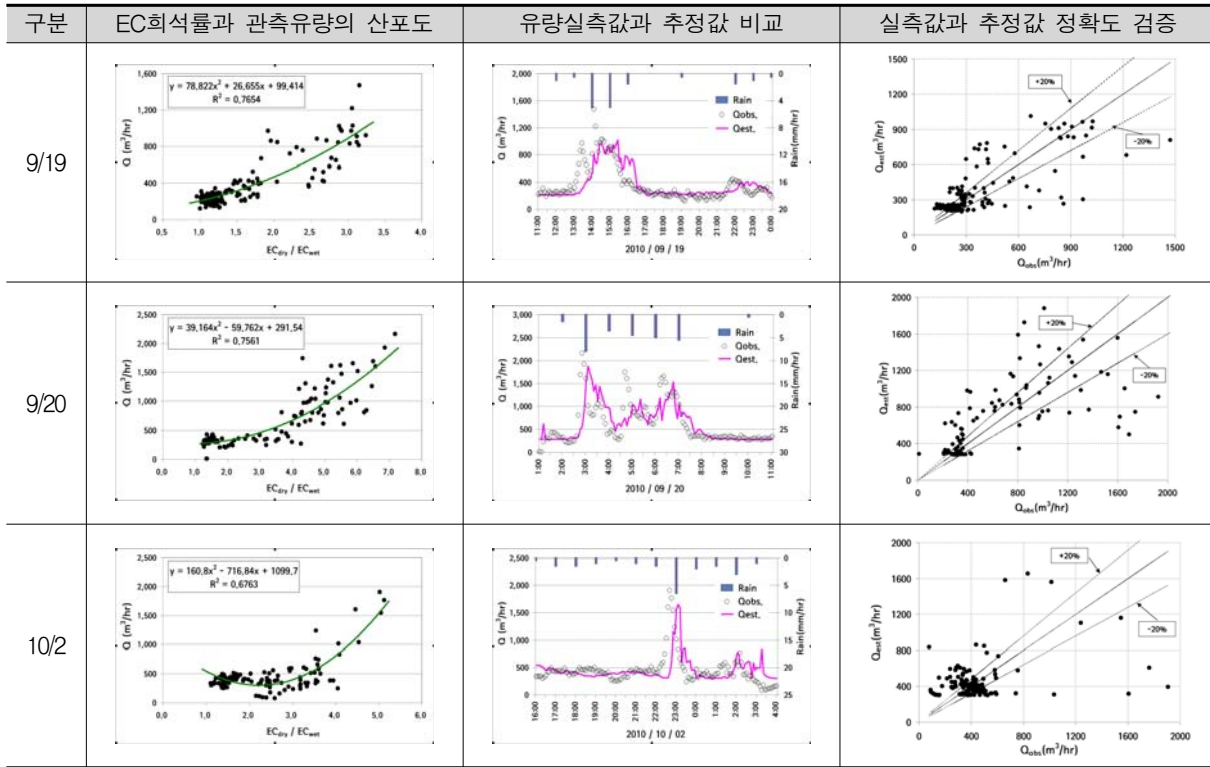


Fig. 4. The flow estimation result by each flow estimation equation _ A site

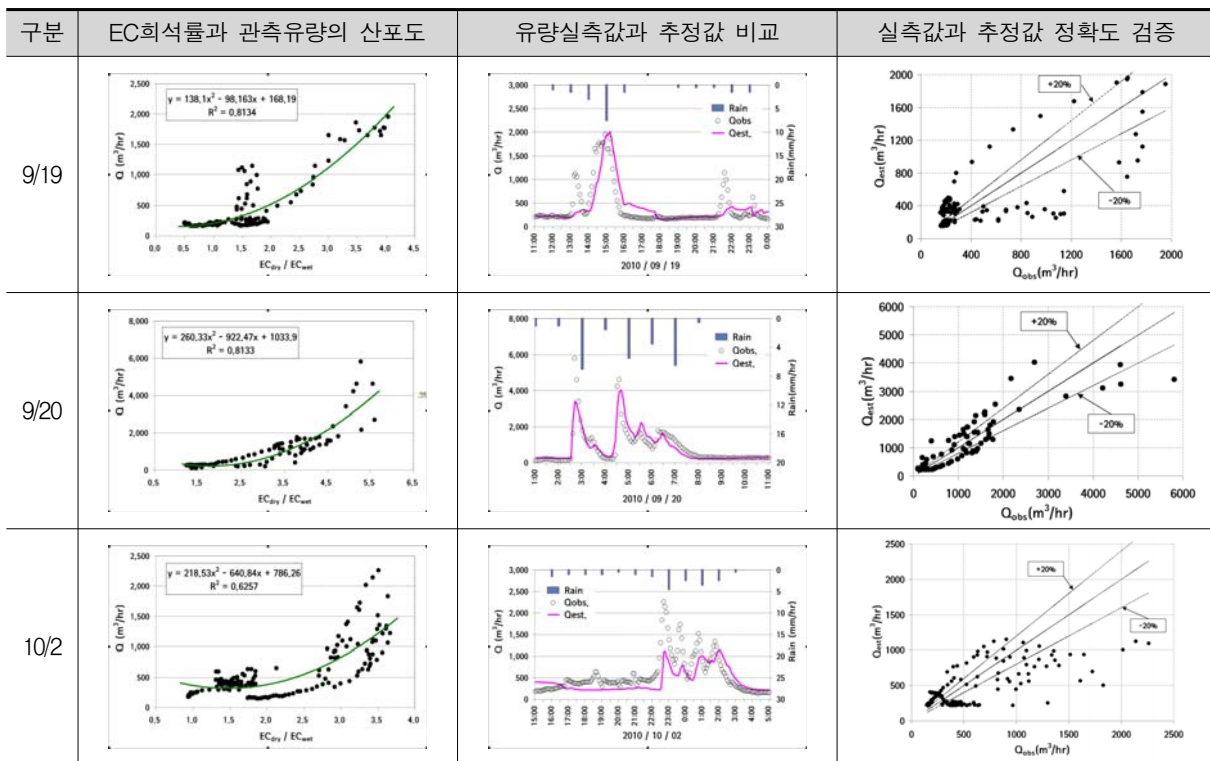


Fig. 5. The flow estimation result by each flow estimation equation _ B site

4.2 강우 특성 (선행건기일수, 강우지속기간)과 전기전도도를 이용한 유량추정

강우기간동안 하수관거에서 배출되는 오염물질의 유출은 매 강우시마다 다양하게 나타나게 되는데, 강우강도의 다양함을 강우우량도 및 선행건기일수의 영향을 받게 된다(최, 2004). 이두진(2005)은 하수관거의 차집용량을 결정하는 방안으로서 초기세척효과를 분석하였는데, 이에 고려된 변수로 강우강도, 지속시간, 선행강우일수를 고려하고 있으므로 유량추정의 정확도를 높이기 위하여 지속시간과 선행건

기일수를 고려하였다. 동일한 강우라도 선행건기일수가 길거나, 강우초기에 초기세척효과에 의해 우천시 전기전도도가 높아지는 시간이 길어질 경우 이론적인 전기전도도 희석률보다 희석률이 낮게 산정되어 유량추정에 영향을 크게 미칠 수 있는 것으로 판단된다.

앞 절에서 살펴본 바와 같이, 다양한 강우사상에 적용하기 위한 범용 유량추정식을 도출하기 위하여 기존의 2차 다항식에서 선행건기일수와 강우지속시간 2가지를 추가매개 변수로 재산정하여, 회귀분석을 통한 유량추정식을 보완하였으며, 그 결과는 Table 3, Fig. 6과 같다.

Table 3. Derived flow equation in view of ADWP and rainfall duration

지점	$Q = aX^2 + bX + c + dY + eZ$					결정계수 (R^2)	상대오차 누적빈도(%) 오차20%이내
	Q : 유량추정값(m^3/hr), X : 전기전도도 희석률 Y : 선행건기일수(일), Z : 경과시간(분) a, b, c, d, e : 계수						
	a	b	c	d	e		
A site	19.97	92.55	148.75	22.56	-0.30	0.6874	42.1
B site	168.58	-344.60	376.65	29.90	-0.23	0.7806	22.6

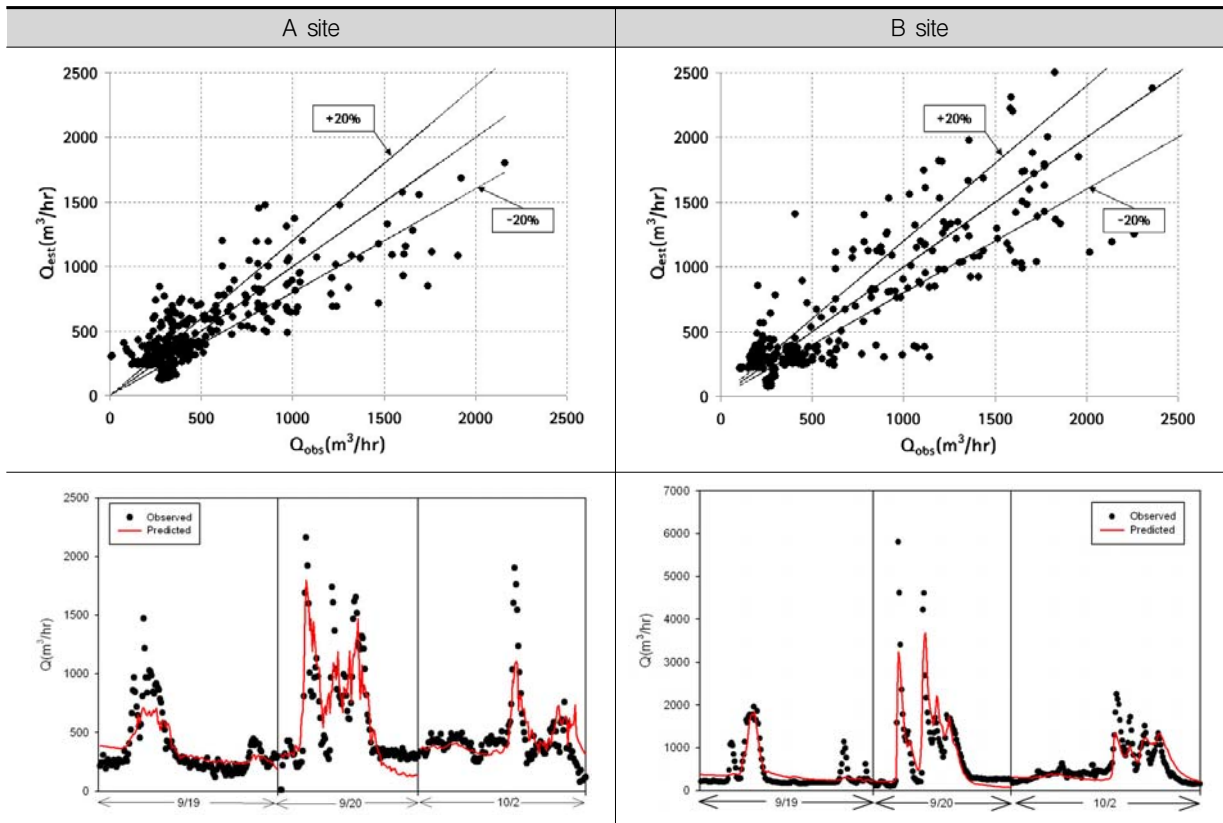


Fig. 6. Flow estimation result by revised integrated equation

Fig. 6과 같이 지점별로 선행건기일수 및 강우시간을 추가매개변수로 고려하여 산정된 유량추정식에 의한 전체강우이벤트의 유량추정결과 오차범위 20%이내에 포함된 상대오차 누적빈도는 지점별로 A site 42.1%, B site 22.6%로 나타났으며, 결정계수(R^2)는 A site 0.69, B site 0.78로 나타났으며, 세 번의 강우이벤트에 대해서 실측값과 추정값이 시계열적으로 양호한 유사성을 나타내었다.

5. 결 론

본 연구에서는 기존의 CSOs 모니터링에 비해 비용효과적이며 유지관리가 용이한 전기전도도를 이용한 모니터링에 대해서 유량추정방안에 대한 적용성을 검토하였으며 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 강우시의 전기전도도를 이용한 CSOs의 유량은 2개의 지점에 대하여 총 6번의 강우이벤트에 대해서 유량추정을 실시한 결과, 전기전도도 회석률과 실측유량과의 2차 다항식 결정계수(R^2)값은 A site의 경우 0.68~0.77, B site의 경우 0.62~0.81의 범위를 나타냈으며, 유량실측값과의 오차범위 20%이내의 상대오차 누적빈도는 A site의 경우 43.4~52.2%, B site의 경우 10.1~46.5%의 범위를 나타내었으며, 추정값과 실측값이 유사한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

2. 전기전도도 회석률만 고려하여 단일 강우에 대하여 도출된 추정식을 다양한 강우이벤트에 대하여 범용적으로 사용하기에는 한계가 있는 것으로 판단된다.

3. 전기전도도 회석률 뿐만 아니라 선행건기일수 및 강우시간 등의 강우특성인자를 추가매개변수로 고려하여 회귀분석을 통하여 새로운 유량추정식을 유도하였으며, 전체강우이벤트에 대해서 유량을 추정한 결과, 오차범위 20%이내의 상대오차 누적빈도는 A site의 경우 42.1%, B site의 경우 22.6%로 나타났으며, 2차 다항식 결정계수(R^2)값은 A site의 경우 0.68, B site의 경우 0.78로 나타나 모든 강우이벤트에 대해서 실측값과 추정값이 양호한 상관성과 유사성을 보이는 것으로 나타났다.

4. 전기전도도를 이용한 유량추정은 기존의 모니터링 방식에 비해 유지관리성 및 경제성이 우수한 반면, 유량계에 의한 모니터링에 비해서는 정확성이 떨어지는 추정이므로, CSOs 모니터링의 효과 및 성능을 극대화 할 수 있도록 건기시 양호한 데이터 구축을 통한 패턴데이터는 지속적으로 보완되어야 하며, 본 연구에서 적용한 매개변수인 선행건기일수와 강우지속시간 외 유량추정치에 신뢰도를 향상시킬 수 있는 다른 인자에 대한 추가 연구가 필요하다고 판단된다.

5. 전기전도도를 이용한 유량추계뿐만 아니라 동시에 진행된 수질추계방안에 대하여 신뢰도를 높이기 위한 지속적인 연구를 수행함으로써 본 기법으로 범용성 있는 CSOs 모니터링 시스템을 구축할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- 日本下水道協會(2002) 合流式下水道改善對策指針と解説
日本國土交通省(2004) 合流式下水道の雨天時放流水質基準についての水質検査マニュアル.
中村榮一(1991) 自動水質監視裝置の現状と課題 -, 日本下水道協會誌, 28(329)
株式會社 日水コン(2010) 電気伝導度を利用したCSOs モニタリング, 내부기술자료, pp. II-7~II-18.
日本下水道協會(2002) 合流式下水道の改善對策に関する調査報告書
이종식, 김복영, 김진호, 홍승길(1999) 수원과 안성지역 빗물의 화학성분 조성, *한국환경농학회지*, 18(2), pp.169~173
배유진(2008) 강우시 토구의 CSOs발생 특성분석을 위한 기초연구, 서울산업대 산업대학원 석사학위논문
환경부(2007) 합류식 하수도 월류수 오염부하 저감시설설치 타당성 조사용역 요약보고서, 환경부
김영일, 이상진, 김홍수, 정우혁(2011) 유역관리를 위한 수질오염 총량관리제의 합리적인 시행방안, *한국물환경학회·대한상하수도학회 공동 춘계 학술발표회 논문집*, pp.173-174.
이두진, 신용배(2004) 강우유출 모델을 이용한 합류식 하수관거 월류수 저류시설의 용량결정에 관한 연구(1) - 월류수 발생 특성 분석 -, *대한환경공학회지*, 26(3), pp.362~369.
이두진, 김주환, 우현민, 안효원(2005) 오염부하 물질분석을 통한 합류식 하수관거 적정 차집용량 결정(1)-오염부하 물질수지 분석-, *상하수도학회지*, 19(5), pp.547-556.
최성현, 최승철, 김병욱, 임재명(2004) 강우시 합류식 하수관거의 월류수 차집용량 산정을 위한 유출특성 분석, *상하수도학회지*, 18(3), pp.320~330.