장치형 비점오염저감시설의 유입수로 분기각과 단면비율에 따른 수두손실계수 분석

Analysis of Head Loss Coefficient for Non-point Pollutants Removal Equipments with Branch Angle and Cross-section Ratio of Inflow Channel

송영석* · 이희섭** · 박민규*** · 박무중****

Song, Youngseok*, Lee, Heesub**, Park, Minkyu***, and Park, Moojong****

Abstract

Various NPS (Non-Point Sources) pollutants flow into a stream after rainfall event that directly causes water quality deterioration. NPPE (Non-point Pollutants Removal Equipments) is necessarily emphasis for water quality improvement. Existing installed NPPE only consider conditions of location or digestion capacity that causes low removal efficiency. In this study, head loss coefficient are analyzed by branch angle and ratio of channel flow area of inflow channel when polluted stream water flows in NPPE. Branch angle of inflow channel (30° , 45° , 60° , 75° , 90°) and entrance channel on ratio of channel flow area of inflow channel (20%, 30%, 40%) are analyzed Using Two-dimensional hydraulic modeling. Result from decreasing branch angle of inlet and increasing entrance channel on ratio of channel flow area of inlet that showed decreasing head loss coefficient.

Key words : Non-point pollutants removal equipments, Head loss coefficient, Different shape of inflow channel, Branch angle of inflow channel, Two-dimensional numerical modeling

요 지

강우발생시 각종 비점오염물질은 우수유출수와 함께 하천으로 유입되는 수질저하의 직접적인 원인으로 비점오염원 저감시설의 필요성이 대두되고 있다. 기존에 설치된 장치형 비점오염저감시설의 경우 단순히 입지조건이나 처리용량만을 고려한 설계로서 처리효율이 낮은 실정이다. 본 연구에서는 오염된 하천수가 장치형 비점오염저감시설로 유입시 유입수로 분기각과 단면비율에 따른 수두손실계수를 분석하고자 한다. 분석모형으로는 2차원 수치모델을 활용하였으며 유입부의 분기각(30° , 45° , 60° , 75° , 90°)과 분류수로에 대한 유입수로 단면비율(20%, 30%, 40%)에 대하여 분석을 진행하였다. 분석결과 유입수로의 분기각이 감소할수록, 분류수로에 대한 유입수로 단면비율이 증가할수록 수두손실계수는 감소하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 장치형 비점오염저감시설, 수두손실계수, 유입수로 형상, 유입수로 분기각, 2차원 수치모델

1. 서 론

최근 4대강 사업 등과 관련해서 비점오염물질의 하천유입 저감을 위한 각종 사업이 관심을 받고 있으며 이 중 장치형

비점오염저감시설의 경우 자연형에 비해 시설용량이 작고 공간적인 활용성이 우수하다. 또한, 강우 발생시 유출수의 체류시간이 짧아 강우패턴에 따른 초기우수 유입농도에 대한 완충능력에도 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 하지만 기존의

*정회원. 한서대학교 토목공학과 박사과정(E-mail: kind711@hanmail.net)
Member. Doctor's course, Department of Civil Engineering, Hanseo University

**한서대학교 토목공학과 석사과정
Master's course, Department of Civil Engineering, Hanseo University

***중원대학교 방재안전과학과 교수
Professor, Department of Civil Engineering, Jungwon University

****교신저자. 정회원. 한서대학교 토목공학과 교수(Tel: +82-41-660-1051, Fax: +82-41-660-1119, E-mail: mjpark@hanseo.ac.kr)
Corresponding Author. Member. Professor, Department of Civil Engineering, Hanseo University

장치형 비점오염저감시설의 경우 유입부의 손실을 고려하지 않은 설계가 대부분이었으며 장치형 비점오염저감시설로 유입되는 유입부의 형상이 전체손실에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. 이러한 맨홀등의 접합부에서 수두손실계수 산정에 대한 국외의 연구는 1950년대부터 꾸준히 진행되어 왔다. Sangster *et al.* (1958)은 맨홀 상·하류부에서 흐름의 연속식과 운동량 보존식으로 수두손실계수를 산정하는 식을 제안하고 실험을 통해 검증하였으며, 사각형 맨홀에서는 유입관의 연결 관경비, 유입관 및 유출관의 접합부 위치 변화와 맨홀내부에 벤칭을 설치한 수두손실계수 산정 실험을 실시하였다. Lindval (1984)은 2개의 유입관과 한개의 유출관으로 이루어진 합류맨홀의 내부형상을 중간벤칭과 전체벤칭 형태의 두 가지로 구분하고, 관거의 접합형태를 직선유입, 90° 유입조건에서 관경변화, 유량변화, 유량비 변화를 주어 합류맨홀에서의 수두손실계수산정에 대해 연구하였다. Johnston and Volker (1990)는 중간맨홀에서의 수두손실계수 산정과 맨홀내부에 벤칭 설치에 따른 손실저감 효과를 확인하였으며 합류맨홀 내 deflector를 설치하여 손실의 저감효과를 증명하였다. Wang *et al.* (1998)은 3개의 유입관과 1개의 유출관이 접합하는 원형 합류 맨홀에서 맨홀과 관경의 크기가 벤칭 설치에 대한 유입관의 유입유량 비에 따른 수두손실계수를 제시하였다. 국내의 수두손실계수 산정에 대한 연구로는 Yoon *et al.* (2008a: 2008b: 2009: 2010)이 맨홀에서의 수두손실계수 산정에 대하여 연구하였을 뿐 기존 연구나 설계사례에서는 장치형 비점오염저감시설의 구조형식이나 유지관리 방법을 분석하여 합리적인 설계나 처리시설의 효율에 대한 개선안을 보여준 연구는 없었다.

본 연구에서는 장치형 비점오염저감시설의 유입수로 형상에 따라 발생하는 수두손실계수에 중점을 두어 연구를 진행하고자 한다. 연구방법으로는 유입수로 형상에 따른 수리적 영향 인자 중 분기각의 변화에 따라 발생하는 수두손실계수와 본류수로에 대한 유입수로 단면비율변화에 따른 수두손실계수를 분석하고자 한다. 수두손실계수는 2차원 수치모델인 RMA-2를 이용하여 주요지점의 수두손실계수를 산정하였다. 두 인자의 분석을 통해 장치형 비점오염저감시설의 유입수로 형상에서 손실이 최소로 발생하는 최적설계의 관계식을 제안하고자 한다. 이 식은 장치형 시설 설계시 처리시설의 처리효율증가에 초석이 될 것이라 예상된다.

2. 이론적배경

2.1 지배방정식

RMA-2는 2차원 수심 평균한 유한요소 수리동역학적 수치모델로서 상류(sub-critical) 및 자유수면 흐름의 수위와 수평방향의 2차원 유속 성분을 계산한다. 마찰력은 Manning 방정식의 조도계수나 Chezy 방정식의 평균유속계수로 계산되며

정상류 뿐만 아니라 부정류에서도 모의가 가능하다. 모형의 지배방정식은 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식을 수심 적분한 식으로 다음과 같다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left(E_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + gh \left(\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{gun^2}{C^2} + (u^2 + v^2)^{1/2} - \zeta V_a^2 \cos \psi + 2h\omega \sin \phi = 0 \quad (2)$$

$$h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left(E_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + gh \left(\frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{gun^2}{C^2} + (u^2 + v^2)^{1/2} - \zeta V_a^2 \sin \psi + 2h\omega \sin \phi = 0 \quad (3)$$

여기서, h 는 수심, u , v 는 x , y 방향의 수심평균 유속이며, t 는 시간, a 는 하상표고, ρ 는 유체의 밀도, E 는 확산계수, g 는 중력가속도, n 은 Manning 조도계수이며, C 는 Chezy 계수, V_a 는 풍속, ζ 는 바람응력계수, ψ 는 풍향, ω 는 지구자전각속도, ϕ 는 위도를 나타낸다. 수치기법으로는 가중잔차 Galerkin법을 도입하여 해를 구하기위해서 완전 음해법을 사용한다. 반복 계산법으로는 각 시간단계에서의 비선형 연립방정식을 Newton - Raphson 반복법을 사용하여 계산한다.

2.2 수두손실계수

수로 내부의 수두손실계수를 산정하기 위하여 Sangster *et al.* (1958)은 유입구 지점 흐름의 연속방정식과 운동량 방정식으로부터 수두손실계수의 산정방법을 식 (4)에 제안하였으며, 이 식은 이후 Marsalek (1984), Bo Pederson and Mark (1990)등에 의하여 수로 내부의 수두손실계수 산정에 사용되었다.

$$\Delta h = K \frac{V^2}{2g} \quad (4)$$

여기서, Δh 는 수로내 두 지점의 수두차, K 는 수로내부의 수두손실계수, V 는 수로 내 평균유속이다

3. 수치모델링

3.1 수치모델링의 인자선정

장치형 비점오염저감시설은 획일화된 시설이 아닌 주변지형이나 처리용량에 따라 매우 다양한 형태로 설계되어 시설 전체에 대한 일반적인 손실을 분석하기에는 경우의 수가 너무 많이 존재한다. 그래서 본 연구는 장치형 비점오염저감시설에서 발생하는 전체손실의 중요한 부분을 차지하고 있는

Fig. 1. Branch Angle of Inlet.

유입수로 형상에 대하여 연구를 진행하고자 한다. 장치형 비점오염저감시설의 유입수로 형상과 구조형식에서 손실을 유발하는 인자로는 1. 본류수로에서 장치형 비점오염저감시설로 유입되는 유입수로 분기각(θ), 2. 본류수로에 대한 유입수로 단면비율(d/D), 3. 월류위어의 설치각(ϕ), 4. 월류위어의 높이(h) 등이 있다. 그러나 월류위어의 설치각과 높이는 유입수로 분기각과 비율에 비해 손실에 미치는 영향이 상대적으로 미비

하다고 판단하여 본 연구의 분석 인자에서는 제외하였다. 최종 선정된 분석 인자는 본류수로에서 장치형 비점오염저감시설로 유입되는 유입수로 분기각은 90° , 75° , 60° , 45° , 30° 의 조건으로 Fig. 1과 같으며, 본류수로에 대한 유입수로 단면비율은 본류수로에 대한 유입수로 단면비율이 20%, 30%, 40%의 조건인 D20, D30, D40으로 3가지 조건은 Fig. 2와 같다.

3.2 수치모델링 조건

장치형 비점오염저감시설의 수치모델링 제원은 환경관리공단에서 제시한 실제 설치사례를 참고하였다(Park, 2012). 실제 설치된 본류수로는 원형관과 박스관으로 폭이 0.8 m부터 2.5 m의 범위로 평균 1 m내외로 설계되었으며 유입수로는 원형관으로 설치되어 폭은 0.2 m부터 0.8 m의 범위로 0.2 m, 0.3 m, 0.4 m의 크기가 절반이상의 설치사례에서 이용되었다. 본 연구에서 활용하는 2차원 수치모델은 원형관에서의 수리학적 해석이 불가능하여 박스형 수로에 대해 분석을 진행하였다. 따라서, 본 연구에서 분석할 본류수로는 Box형 수로이며 수로의 제원은 $B1.0\text{ m} \times H1.0\text{ m} \times L3.0\text{ m}$, 경사가 1/1000로 맨홀이 없는 것으로 가정하였으며 유입수로도 Box 형 수로이며 수로의 제원은 $B0.2\text{ m} \times H0.2\text{ m}$, $B0.3\text{ m} \times H0.3\text{ m}$, $B0.4\text{ m} \times H0.4\text{ m}$ 으로 총 3개의 조건을 가정하였다. 본류수로에서 장치형 저감시설로 유입되는 유입수로 분기각은 90° , 75° , 60° , 45° , 30° 를 적용하였으며 수치모델링의 유량 조건은 유입수로

Table 1. Numerical Model Applied Boundary Condition

Boundary Condition		d/D (%)		
		20	30	40
Case 1	Discharge (m^3/s)	0.0057	0.0097	0.0139
	Downstream Boundary Elevation (m)	0.10		
Case 2	Discharge (m^3/s)	0.0097	0.0169	0.0246
	Downstream Boundary Elevation (m)	0.15

Fig. 2. Areal Ratio of Entrance Channel(d) and Main Channel(D).

Fig. 3. Various Inlet Angle According to Various Elevation.

Fig. 4. Various Inlet Angle According to Various Velocity.

의 폭이 0.2 m, 0.3 m, 0.4 m일 때 월류가 발생하지 않는 하류 단 경계수심이 0.10 m인 Case 1과 0.15 m인 Case 2를 Table 1과 같이 적용하였다.

3.3 수치모델링 결과

Fig. 3과 Fig. 4는 유입수로의 제원이 B0.3 m×H0.3 m일 때 분기각에 대한 수위와 유속의 수치모델링 결과이다. Fig. 3을 살펴보면 유입수로 분기각이 30°부터 90°로 분기각이 변화에 따라 본류수로에서 나타나는 수위변동 양상을 확인할 수 있으며, Fig. 4는 분기각의 변화에 따른 유속벡터의 흐름방향의 변화를 보여주고 있다.

4. 수두손실계수 정량화

4.1 에너지 손실발생 양상

Case 1에서 d/D 가 20%인 조건의 수치모델링에 대한 에너

지 손실발생 양상은 Fig. 5와 같이 분석되었다. Fig. 5(a)의 에너지 수두변화는 본류수로 구간에서 마찰손실 수두로 인한 미미한 손실만이 나타나다가 본류수로 월류위어 앞쪽의 유입수로 분기영역에서 부터는 직선적인 흐름이 굴절되는 속도벡터 양상을 보이며 추가적으로 큰 에너지 손실을 보이기 시작한다. 이러한 영향은 본류수로에 비해 상대적으로 그 제원이 작은 유입수로로 비점오염수가 유입되면서 단면급축소 효과가 약 0.5 m~1.0 m 정도의 일정한 흐름 안정화 구간까지 계속되면서 큰 에너지손실을 보인다.

이러한 양상을 고려할 때 장치형 비점오염저감시설이 설치되는 지점에서 큰 에너지 손실을 초래하는 두 가지 형상특성은 유입수로 분기각 영향과 본류수로에 대한 유입수로의 제원 차이로 인한 단면급축소 효과로 볼 수 있다. Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)의 에너지 수두와 수위 손실은 분기각이 완만할수록 손실이 보다 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그러나 Fig. 5(c)를 살펴보면 유속특성의 경우 분기각이 완만할수록 상대

Fig. 5. Change of Hydraulic Characteristic (Case 1, $d/D = 20\%$, Branch Angle=various).

Table 2. Result for Condition of Head Loss Coefficient in Influent Point of Non-point Pollutants Removal Equipments

Boundary Condition	$\theta (^{\circ})$	30°	45°	60°	75°	90°
	$d/D (%)$					
Case 1	20	19.12	25.78	28.48	32.78	33.33
	30	14.69	17.31	19.17	21.42	22.62
	40	11.62	10.18	14.40	16.46	17.80
Case 2	20	19.32	24.31	27.58	31.71	33.00
	30	13.02	15.70	17.75	20.13	21.53
	40	10.13	11.64	12.99	15.03	16.52
Average	20	19.22	25.05	28.03	32.24	33.17
	30	13.86	16.50	18.46	20.78	22.08
	40	10.87	10.91	13.69	15.74	17.16

Annotation) d/D means ratio of entrance channel and main channel

적으로 큰 유속이 나타나는 양상을 보이고 있다. 이러한 두 가지 상충되는 조건을 식 (4)를 통해 수두손실계수를 산정하면 Table 2과 같은 결과가 제시된다. 모든 조건을 고려했을 때 동일한 유량과 유입수로 폭의 경우 유입수로 분기각이 작을수록 작은 손실이 발생하였다.

4.2 수두손실계수의 발생특성 및 정량화

수치모델링 조건에 대한 수두손실계수의 발생특성은 Fig. 6과 같다. Fig. 6(a)에서 분기각이 완만한 30°에서 90°로 증가할수록 수두손실계수의 값이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 75°, 60°, 45°, 30°의 분기각에서의 수두손실계수는 평균적으로 90°의 수두손실계수 값의 94%, 83%, 71%, 61%에 해당하는 것으로 분석되었다. 한편, Fig. 6(b)에서 본류수로에 대한

유입수로 제원의 비율이 커질수록 수두손실계수의 값은 감소하는 것을 확인할 수 있다. 본류수로와 유입수로 단면비율이 20%인 것과 비교하면 30%, 40%는 각각 67%, 50% 정도 감소한 수두손실계수 값을 가지는 것을 알 수 있다.

장치형 비점오염저감시설의 유입수로 분기각과 본류수로에 대한 유입수로 단면비율에 대한 결과에 대해 수두손실계수 분포도는 Fig. 7과 같다. Fig. 7에서 장치형 비점오염저감시설의 유입부에서 발생하는 수두손실계수를 최소화하기 위해서는 유입수로 분기각이 30°에 가까우면서 본류수로와 유입수로 단면비율이 40%일 때 유입수로에서 발생하는 수두손실계수가 최소로 발생하였다. 유입수로 분기각이 60°이상과 본류수로에 대한 유입수로 단면비율이 30%미만인 시설에서는 수두손실계수가 20을 초과하는 위험이 있으므로 상대적으로 비효

(a) Various Inlet Angle According to Head Loss Coefficient

(b) Various d/D According to Head Loss Coefficient

Fig. 6. Variation Characteristic of Head Loss Coefficient.

Fig. 7. Influent Point of Non-point Pollutants Removal Equipments of Head Loss Coefficient Distribution by Design Condition.

올적인 설계가 될 것으로 판단할 수 있다. 수치모델링을 통해 분석된 유입수로 분기각과 본류수로에 대한 유입수로 단면비율에 대한 수두손실계수 산정식을 식 (5)와 같이 제시하였으며 산출된 수두손실계수의 편차는 평균 약 2.6%로 나타났다.

$$K = \frac{1}{4.96(d/D) + 0.12(d/D)^2} \times (10.8(\sin 1.06\theta) + 25.9(\sin 1.06\theta)^2) \quad (5)$$

여기서, K 는 장치형 비점오염저감시설 유입지점의 수두손실계수, d/D 는 본류수로 제원(D)와 유입수로 제원(d)의 비율 그리고 θ 는 유입수로 분기각이다.

5. 결 론

본 연구에서는 장치형 비점오염저감시설의 유입수로 형상 조건에 따른 손실수두가 최소로 발생하는 최적설계조건을 제시하였다. 장치형 비점오염저감시설 유입수로의 경우 밸브와 유사한 수준의 큰 수두손실계수(일반적으로 밸브손실계수는 10 내외의 값에서 최대 수백정도의 값을 보인다)를 보이고 있다. 이는 유입수로 형상이 다양한 손실유발인자가 서로 복합적으로 영향을 미치기 때문에 나타나는 현상이라고 생각할 수 있다. 에너지 손실에 영향을 미치는 다양한 영향요소를 감안한 유입수로 최적설계를 위한 고려사항은 다음과 같다.

- 1) 장치형 비점오염저감시설 유입수로 형상 최적설계를 위해서는 유입수로 분기각과 본류수로에 대한 유입수로 단면비율을 적절한 수준으로 고려할 필요가 있다. 분기각은 최대한 완만하게 하는 것이 수두손실계수를 저감하는데 유리하며, 본류수로와 유입수로의 제원비율이 클수록 수두손실계수 저감 측면에서 효과가 크다.
- 2) 본류수로에 대한 유입수로의 단면비율은 그 값이 클수록 유입흐름이 원활해져 작은 에너지손실을 유도할 수 있다. 따라서 장치형 시설의 설계용량을 초과하지 않는 수준에서 가장 제원이 큰 유입수로를 선정하는 것이 필요하다. 이 경우 유입수로의 제원은 통상적으로 해당 장치형 비점오염저감시설이 설치된 배수구역의 특성, 본류수로의 제원 및 수리특성을 고려하여 적절한 비점오염원 저감기능을 할 수 있도록 결정되는 것이 우선시 된다.
- 3) 유입수로 분기각에 따른 영향을 살펴보면 60° 이상의 급격한 분기각은 20 이상의 큰 수두손실계수를 초래할 위험이 있으므로 상대적으로 비효율적인 설계가 될 것으로 판단할 수 있다. 다만 90°의 급격한 분기각일지라도 0.3 m의 유입수로에서는 수두손실계수의 값이 22 정도에 불과하여 상대적으로 효율적으로 우수하다고 알려진 유입조건에 비해 그리 불리하지는 않다는 것을 알 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 한서대학교 교내연구지원사업에 의하여 연구되었음.

References

- Bo Pedersen, F. and Mark, O. (1990) Head losses in storm sewer manholes : submerged jet theory, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 116, No. 11, pp. 1317-1328.
- Johnston, A.J. and Volker, R.E. (1990) Head loss at junction boxes, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 116, No. 3, pp. 326-341.

- Kim, J.S., Choi, H.S., and Yoon, S.E. (2010) An Experimental Study for Estimation of Head Loss Coefficients at Surcharged Combining Junction Manholes, *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 43, No. 5, pp. 445-453.
- Kim, J.S., Song, J.I., and Yoon, S.E. (2009) An Experimental Study for Deainage Capacity Increment at Surcharged Manhole with a 90° Bend, *Korean Society of Water and Wastewater*, KSWW, Vol. 23, No. 4, pp. 447-458.
- Kim, J.S., Song, J.I., Jang, S.J., and Yoon, S.E. (2008a) An Experimental Study for Estimation of Head Loss Coefficients at Surcharged Circular Manhole, *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 41, No. 3, pp. 305-314.
- Kim, J.S., Song, J.I., Jang, S.J., and Yoon, S.E. (2008b) An Experimental Study for Deainage Capacity Increment at Surcharged Circular Manhole, *Korean Society of Water and Wastewater*, KSWW, Vol. 22, No. 6, pp. 619-625.
- Lindval, G. (1984) Head loss at surcharged manholes with a main pipe and a 90° lateral. *Proceeding of 3rd International Conference on Urban Storm Drainage*, pp. 137-146.
- Maraslek, J. (1984) Head losses at sewer junction manholes, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 8, pp. 1150-1155.
- Park, M.J. (2012) Optimistic analysis of Non-point Pollutants Removal Equipments with Various Shape of Inlet, *Korean Society on Water Environment*.
- Sangster, W.M., Wood, H.W., Smerden, E.T., and Bossy, H.G. (1958) Pressure changes at open junction in conduits. *Bulletin No. 41, Engineering Experiment Station, Univ. of Missouri, Columbia*.
- Wang, K.H., Cleveland, T.G., Towsley, C., and Umrigar, D. (1998) Head loss at manholes in surcharged sewer systems. *Journal of the American Water Resource Association*, AWRA, Vol. 34, No. 6, pp. 1391-1400.

Received ■ May 13, 2014

Revised ■ May 19, 2014

Accepted ■ July 7, 2014