

〈論 文〉

유출과 부정류 관수로 흐름 계산에 관한 연구  
Runoff and Unsteady Pipe Flow Computation

전 병 호\* · 이 재 철\*\* · 권 영 하\*\*\*  
Jun, Byong Ho · Lee, Jae Chul · Kwon, Young Ha

Abstract

For surcharge flow in a sewer, the slot technique simulates surcharge flow as open-channel flow using a hypothetical narrow open piezometric slot at the sewer crown. The flow in a sewer is described mathematically using the unsteady open-channel Saint-Venant equations.

In this study, the computer simulation model(USS-slot) using slot techniques is developed to simulate the inlet hydrographs to manholes and the flow under pressure as well as free-surface flow in tree-type sewer networks of circular conduits. The inlet hydrographs are simulated by using the rational method or the ILSD program. The Saint-Venant equations for unsteady open-channel flow in sewers are solved by using a four-point implicit difference scheme. The flow equations of the sewers and the junction flow equations are solved simultaneously using a sparse matrix solution technique.

要 旨

본 연구의 목적은 도시 유역에서의 표면유출에 의한 맨홀 유입량을 추정하고 관망에서의 흐름을 해석하기 위한 모형을 개발하기 위한 것이다.

각 맨홀로의 유입량은 합리식을 이용한 단순방법으로 유입 수문곡선을 모의하는 방법과 해당유

\* 육군사관학교 토목공학과 부교수  
\*\* 서울시립대학교 토목공학과 박사과정  
\*\*\* 동국대학교 토목공학과 박사과정

역 특성을 고려한 표면유출 모의에 의한 유입 수문곡선 결정방법이 이용된다.

관망에서의 흐름은 Saint-Venant공식의 dynamic equation에 유한음차분법(four-point implicit method)을 적용하여 동시해법으로 해석하였다. 특히 압력류(surcharge flow)흐름은 관의 상단에 좁고 긴 가상관을 연결시켜 모든 흐름을 개수로 흐름으로 해석가능 하도록 전환함으로써 해석의 단순화를 기하였고, 개발된 USS-slot모형이 부정류 우수관망 흐름을 적절히 모의할 수 있는가를 판별하기 위하여 기존에 연구된 관망에 적용하여 그 결과들을 비교 분석하였다.

## 1. 서 론

도시 유역에서의 우수유출은 관망을 부설하여 효과적으로 배제시키게 된다. 그러므로 관망을 어떻게 설치할 것인가 하는 설계가 필요하게 된다. 그러나 대개의 설계 프로그램은 관경이나 관경사를 결정할 때에 간략법을 이용하게 되므로 기 부설된 또는 설계된 관망에 대하여 보다 정확한 방법으로 관망내의 흐름을 해석하는 것이 필요하다. 이렇게 함으로써 해당유역의 유출을 보다 적절히 처리할 수 있는가의 여부를 판단할 수 있게 된다.

관망이 설치되기 위한 유역이 결정되면 맨홀들의 위치가 결정되며 각각의 맨홀로 얼마만한 유량이 유입되는가 하는 유입 수문곡선의 모의가 필요하게 된다. 그러므로 관망해석을 위해서는 표면유출을 모의하는 과정과 각 맨홀로 유입된 우수의 관로내 흐름해석의 두가지 부분으로 구분되어 진다.<sup>4,9,30)</sup>

우수관망은 맨홀(또는 junction)과 이에 연결된 하수관거들로 특징지을 수 있다. 관망은 보통 나무가지 형태이며 loop형태도 흔히 볼 수 있다. 우수관로에서의 흐름은 일반적으로 강우가 지역적 시간적으로 변화하기 때문에 비정상부동류(unsteady nonuniform flow)가 된다. 본 논문에서는 강우에 의한 유출이 언급되었지만 기본적인 수리학적 원리는 오수에 의한 하수관망에도 적용될 수 있다.

관거는 전통적으로 개수로 상태하에서 흐르도

록 설계되는데 만일 유량이 크지 않다면 거의 대부분의 관거내 흐름이 개수로 상태일 것을 예상할 수 있다. 그러나, 유량이 클 경우, 몇개 혹은 대부분의 관거가 침두유량 발생시간 동안에 개수로흐름으로 부터 압력류의 형태로 전환된다. 수리 동력학적으로 관내 흐름은 세가지 영역으로 나눌 수 있다. 즉 개수로흐름(open channel flow), 압력류(surcharge flow)와 전이영역(transition)등으로 구분할수 있다. 관망에서 전이문제는 매우 복잡하여 아직 해결되지 않고 있는 수리학적 문제중의 하나이다.<sup>23)</sup>

완전한 dynamic wave방정식 혹은 압력류 방정식을 이용하여 관망에서의 부정류를 해석하는데는 analytical solution은 일반적으로 가능하지 않고 컴퓨터를 이용해 반복과정을 통한 수치해석 방법을 적용하여야 한다. 관망에서의 해는 관거내 흐름뿐 아니라 내부맨홀에서의 해도 구하게 된다. 어느 순간에 맨홀은 이와 연결된 관거에 역류효과(backwater effect)를 나타낼 수 있다. 따라서, 이러한 내부맨홀의 상태를 잘 알 수 없으므로 동시해법(simultaneous solution)이 요구되어지며 결과적으로 대규모 행렬식을 풀어야 한다. 규모가 큰 관망의 해를 구할 때 전산비용을 줄이고 메모리에 제한을 받지않기 위해서는 중첩분할법(overlapping segment scheme)이라 불리는 연속 분할기법을 적용시킬 수 있다.<sup>17,31)</sup>

관거내 압력류에 대해 두가지 수학적인 해법이 존재한다. 한가지는 압력류 상태가 된 관거를 추

적하며 여기에 압력류 방정식을 적용하여 개수로 상태의 관거와 구별지어 해를 구하는 것이다.<sup>17, 31)</sup> 또 다른 하나는 가상의 얇은 open slot을 이용하여 압력류를 개수로 흐름으로 취급하여 해를 구하는 것이다.<sup>10, 13)</sup> 이들 두 방법은 관망흐름을 해석하는데 쓰여져 왔다. 하지만 이들에 관련된 많은 연구에도 불구하고 수치해를 얻는데 포함된 난점에 대해서는 보고된 것이 거의 없다. 더군다나, 이들 방법에 있어 장점이나 단점들에 대한 비교가 되어 있지 않으며, 어떤 방법도 실험적으로 검증되어진 것이 없다.

이 연구의 목적은 입력자료로 유입 수문곡선을 모의하고 관거흐름 해석을 위해 관거의 상단에 가상의 좁고 긴 관을 이용하여 흐름의 상태를 개수로 흐름과 압력류의 구별없이 일괄적으로 개수로 흐름으로 처리함으로써 개수로 흐름에 관한 방정식에 차분방법을 적용하여 개선된 수학적 모의 모형을 개발하는 것이다. 개발된 모형은 부정류 우수관망 흐름을 적절히 모의할 수 있는가를 판별하기 위하여 서로 다른 유입 수문곡선을 갖는 가정된 우수관망들에 적용될 것이다.

2. 표면 유출과 유입수문곡선

관거로 인입되는 유량을 나타내는 표면유출은 강우강도, 지배면적의 크기 및 지배면적의 상태와 모양에 따라 달라진다. 관망해석 모형을 위한 관거로의 입력자료로는 최대유량만이 아닌 유입

수문곡선을 필요로 한다. 유입 수문곡선을 도출하는 방법에는 여러가지가 있으나, 여기서는 합리식(rational method)과 ILSD(Yen, et al. 1984) 프로그램에서 사용했던 모의방법을 사용하고자 한다.<sup>29, 32)</sup>

합리식은 다음과 같이 표시되어 진다.

$$Q_p = CiA \text{ 또는 } Q_p = i \sum_{j=1}^n C_j a_j \quad (1)$$

여기서  $Q_p$ 는 최대유량(peak discharge),  $A$ 는 유역면적,  $i$ 는 강우강도(rainfall intensity),  $a$ 는 분할소유역 면적이고,  $C$ 는 유출계수(무차원)이다.

합리식에서 강우지속 시간은 도달시간(time of concentration)과 같다고 가정하고 도시유역에서의 도달시간 산정을 위한 많은 공식들이 발표되고 있다. 강우강도는 예상 사용 년한과 수용가능한 수문학적 위험도를 고려한 재현기간과 강우지속 시간이 결정되면 해당지역의 I-D-F곡선을 이용하여 결정할 수 있다.<sup>21)</sup>

합리식을 이용하여 최대유량이 결정되면 유입 수문곡선은 맨홀로 유입되는 유역의 면적이 통상 작기 때문에 그림1과 같이 최대유량  $Q_p$ 와 시간  $t_p = t_o + t_d$ 를 기준으로 하는 2등변삼각형을 형성한다고 가정하여 결정한다.<sup>21)</sup> 여기서  $t_d$ 는 도달시간  $t_c$ 와 같은것으로 간주된다.

ILSD에서 채택된 표면유출량 산정방법은 우선 전체유역을 지표면 상태에 따라 직접유출 불투수면, 직접유출 투수면, 보조 불투수면, 보조 투수면과 유출에 기여하지 않는 면의 5가지 영역으로 구분한다. 이들 영역은 그림2와 같이 두가지 경로를 통하여 유출되는 것으로 가정한다.

유출량의 산정은 시간-면적법에 의하여 이루어

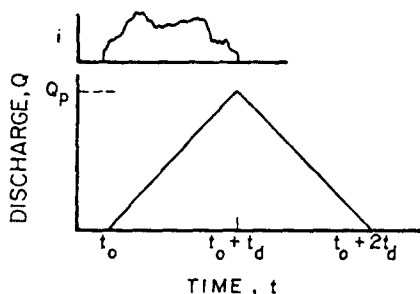


Fig.1 Inlet Hydrograph

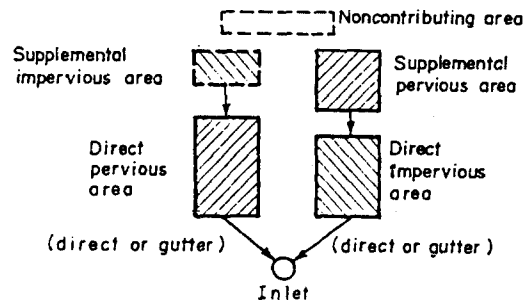


Fig.2 Catchment Surface Composition

어지며, 표면유출의 도달시간은 다음식을 이용하여 된다.

$$t_o = K \left( \frac{nL}{S^{1/2}} \right)^{0.6} \quad (2)$$

여기서 L은 최장 유로연장, S는 최장 유로연장의 평균경사, n은 표면 조도계수이고 K는 상수이다. 유입시간은 위의 두가지 경로중 긴시간을 택하여 강우 지속시간 결정에 사용한다. 강우에 대한 초기 차단 및 저류 손실은 불투수면에서 2.5mm, 투수면에서는 5mm로 가정하였고, 투수면에 대한 침투 손실계산은 Horton공식을 이용하였다.

### 3. 우수거내 수리이론

#### 3.1. 개수로 방정식

개수로에서 점변 부정류는 수학적으로 Saint-Venant방정식으로 알려진 한쌍의 쌍곡선 형태의 편미분 방정식으로 표현된다. <sup>19, 20, 22, 28)</sup>

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial X} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X} \left( \frac{\beta Q^2}{A} \right) + gAC \cos \theta \frac{\partial h}{\partial X} = gA(S_o - S_f) \quad (4)$$

여기서 A는 흐름단면적, Q는 유량, t는 시간,

x는 관거방향의 거리,  $\beta$ 는 운동량 보정계수, g는 중력가속도,  $\theta$ 는 관거연장축과 수평면사이의 각, h는 수위,  $S_o$ 는 하상경사이고  $S_f$ 는 에너지선 경사이다.

#### 3.2. 맨홀(또는 Junction)방정식

##### 가. 연속 방정식

저류능력을 갖는 일반적인 경우에

$$\sum Q_{in} - Q_o = A_m \frac{\partial H}{\partial t} \quad (5)$$

여기서  $A_m$ 은 맨홀의 단면적,  $Q_{in}$ 은 맨홀로 유입되는 양,  $Q_o$ 는 맨홀로 부터 나가는 양이고, H는 맨홀에서의 수위를 나타낸다. <sup>10, 27)</sup>

##### 나. 에너지 방정식

맨홀로 유입되는 관거의 출구부분 수심이 맨홀 수심보다 높을때는 출구에서 한계수심으로 보고, 그 반대의 경우는 역류효과가 발생하는 것으로 보아 다음과 같이 표현한다. <sup>10, 27)</sup>

$h_{ic} + Z_i < H$ 인 경우

$$h_i + Z_i + (1 - K_d) \frac{Q_i^2}{2gA_i^2} = H \quad (6)$$

위 이외의 경우  $h_i = h_{ic}$  (7)

여기서  $h_{ic}$ 는 i번째 유입관거에서의 한계수심,  $Z_i$ 는 i번째 유입관거의 관저고이며  $K_d$ 는 유출손실계수이다.

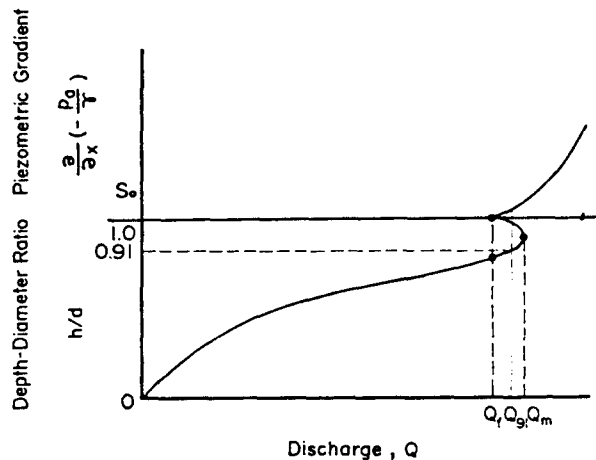


Fig.3 Discharge Rating Curve for Steady Flow in a Circular Pipe

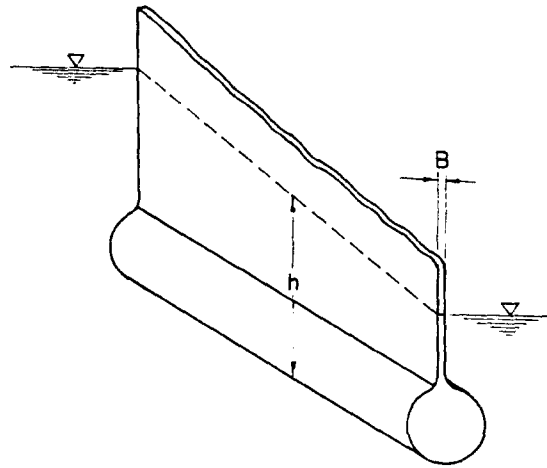


Fig.4 Schematic of Preissmann Slot

Table 1. Geometry of Imaginary Slot<sup>10)</sup>

Geometry	Depth $h \leq 0.91d$	$0.91d \leq h \leq 0.9999d$	$0.9999d \leq h$
Cross-Sectional Area, A	$\frac{d^2}{8}(\phi - \sin \phi)$	$\frac{d^2}{8}(\phi - \sin \phi)$	$A_{0.9999d} + Bh$ (slot area)
Water Surface width, B	$d \sin \frac{\phi}{2}$	$d \sin \frac{\phi}{2}$	$[10^{-6} + \frac{1}{18.44} e^{-th \cdot d^{24}}]d$
Hydraulic Radius, R	$\frac{d}{4}(1 - \frac{\sin \phi}{\phi})$	$(\frac{A_{0.91d}}{A})^{1.5} R_{0.91d}$	$(\frac{A_{0.91d}}{A})^{1.5} R_{0.91d}$
Remark	real case	R is Calculated	imaginary part R and B are calculated

맨홀로 부터 유출되는 관거의 수심은 맨홀의 수심에 비하여 입구 손실만큼 낮아진다고 보아 다음과 같이 표현한다.<sup>10,27)</sup>

$$h_o + Z_o + (1 + K_u) \frac{Q_o^2}{2gA_o^3} = H \quad (8)$$

여기서 첨자 o는 유출관거를 의미하고,  $K_u$ 는 관 입구 손실 계수이다.

### 3.3. 가상 slot기법을 이용한 해법

관거 흐름에서 유량과 수위의 관계는 그림 3과

같이 유량에 대하여 세가지의 수위가 형성될 수 있는 일정치 않은 양상을 나타낸다. 이와같은 전이구역과 압력류 흐름 해석을 위해 관거 상단부에 그림4와 같이 가느다란 slot을 이용하는 기법이 이용된다. 이 기법은 일명 Preissmann slot기법이라고도 하며 압력류 흐름을 등가의 개수로 흐름으로 전환시킬 수 있다.

전이구역에 대한 slot의 기하학적 제원으로는 Sjoberg(1981)의 연구결과를 기초로 slot이 너무 좁을 경우 불안정 문제가 발생할 수 있고<sup>18,25)</sup> 너무 넓은 경우는 실제와 거리가 멀다는 점을 고려하여 표1과 같은 새로운 값을 이용하였다.

(표1에서 d는 관의 직경이고  $\phi$ 는 수면폭의 끝단과 원의 중심이 이루는 각이다.)

#### 4. 수치해석 방법

##### 4.1. 개수로 흐름 방정식의 차분화 방법

개수로 흐름의 Saint-Venant식은 독립변수인  $x$ 와  $t$ , 그리고 종속변수인  $h$ 와  $Q$ 를 가지고 있다. 이를 수치적으로 풀기위해 그림 5와 같이 4개의 격자점을 이용한 유한 음차분법(four point implicit finite difference scheme)을 관의 각 격자점에 적용하였다.<sup>2,3,5,11,14</sup>

$$f(x, t) \approx \frac{W}{2}(f_{i,j+1} + f_{i+1,j+1}) + \frac{1-W}{2}(f_{i,j} + f_{i+1,j}) \quad (9)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} \approx \frac{W}{\Delta x}(f_{i+1,j+1} - f_{i,j+1}) + \frac{1-W}{\Delta x}(f_{i+1,j} - f_{i,j}) \quad (10)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} \approx \frac{1}{2\Delta t}(f_{i+1,j+1} - f_{i+1,j} + f_{i,j+1} - f_{i,j}) \quad (11)$$

여기서  $f_{i,j}$ 는 격자점  $(i,j)$ 에서  $f$ 의 함수치이며,  $\Delta x$ 와  $\Delta t$ 는 거리와 시간축의 격자 간격이고,  $W$ 는 시간도함수에서 도입되는 가중치로 0.5-1.0의 값을 가지며, Quinn과 Wylie(1972)는  $W$ 가 0.6에서 1.0사이의 값을 가질때 가장 안전됨을 확인하였으며 Fred(1974, 1984)는 0.55에서 0.65사이의 값을 가장 안전한 값으로 제안하였다.<sup>6,7</sup> 본연구의 예제실행에는 0.6이 사용되었다.

##### 가. 연속 방정식

연속방정식(식3)을 차분화시켜 단순화하면 다음과 같다.

$$B_i \Delta h_i - \frac{2W\Delta t}{\Delta x} \Delta Q_i + B_{i+1} \Delta h_{i+1} + \frac{2W\Delta t}{\Delta x} \Delta Q_{i+1} = -\frac{2\Delta t}{\Delta x}(Q_{i+1} - Q_i) \quad (12)$$

여기서  $B$ 는 수면폭을 표시한다.

##### 나. 운동량 방정식

운동량 방정식(식4)을 차분화시켜 단순화하면 다음과 같다.

$$l_i \Delta h_i + m_i \Delta Q_i + p_i \Delta h_{i+1} + q_i \Delta Q_{i+1} = r_i \quad (13)$$

여기서

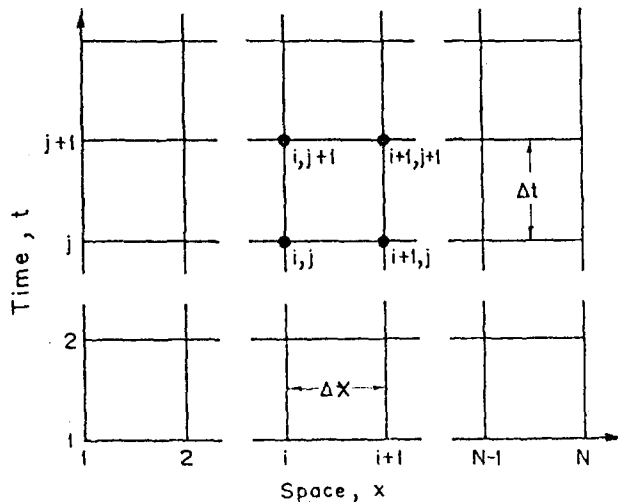


Fig.5 Computational Grid for Four-Point Implicit Finite Difference Scheme



써 계산될 수 있으며 식 5,6,7로 부터 차분화식을 유도할 수 있다. 관거 출구의 경계조건으로는 자유낙하할 때와 역류제어흐름이 형성될 때의 두 가지로 구분하여 적용하였다.<sup>10, 16, 27)</sup>

4.3. 관망의 해석기법

관망에 있어 맨홀과 관거흐름의 음차분화식들은 내부맨홀의 수위가 미지수이기 때문에 동시적으로 해를 구하여야 한다. 이들 지배방정식에 대한 동시해법을 위한 행렬 형태는 단일 관거에서 diagonal matrix가 되지만 관망전체를 해석하는 경우는 내부맨홀의 고려로 그림 6과 같은 sparse matrix가 된다. 이를 풀기위한 해법으로는 컴퓨터의 기억용량을 줄이기 위한 sparse mode를 사용한 부프로그램(Gupta and Tanji, 1977)을 적용하였다.<sup>4)</sup>

5. 모형 적용 결과 분석

관망내의 부정류를 모의하기 위한 모형의 정확도는 실제 현장의 측정자료나 민을만한 실험실 자료 혹은 analytical solution을 이용하여 검증되어야 한다. 불행하게도 현재로서는 이러한 자료

나 해를 구할 수 없는 상태이다. 따라서 모형의 능력을 평가하는것은 수리학적 원리에 의한 흐름 특성을 확인하는 방법이 행하여질 수 있을 뿐이다.

본 연구에서는 원형의 우수관거 상단에 slot을 가정하고, 흐름해석을 위해 연속방정식과 dynamic wave방정식을 음차분화하는 기법을 사용하여 앞의 2~4절에서 언급한 절차와 방법으로 USS-slot모형(urban storm sewer system simulation-slot model)을 만들었다. 이 USS-slot모형을 몇개의 구역에 적용하고, 그 결과는 Yen and Pansic이 만든 SURKNET모형의 결과와 비교될 것이다. SURKNET은 slot기법이 아닌 개수로 흐름과 압력류 흐름을 분리하여 계산하는 표준기법을 이용하였으며, 개수로 흐름의 해석은 연속방정식, kinematic방정식과 저류방정식을 이용하였고, 압력류 흐름해석은 연속방정식과 운동량방정식을 사용하였다.<sup>12, 26)</sup>

5.1. 적용 관망

관망에서 전이구역의 흐름을 모의하는데 있어 모형의 효율성을 보여주기 위해 선택한 관망은 Yen and Pansic(1980)에 의해서 이용되었던 것인데 이는 본 연구에서 비교의 목적으로 도입한

Table 2. Sewer Properties

Sewer	Length (ft)	Slope	Diameter (ft)	Drop at Exit (ft)
1-3	200	0.0010	4	1.0
2-3	200	0.0010	4	1.0
3-5	200	0.0015	5	0.5
4-5	200	0.0010	4	0.1
5-6	200	0.0020	6	free-fall

Table 3. Manhole Properties

Manhole	Ground Elevation (ft)	Manhole Depth (ft)	Manhle Diameter (ft)
1	118.4	16.0	4
2	118.4	16.0	4
3	115.2	14.0	5
4	116.6	15.0	4
5	112.4	12.0	6
6 --Outlet (Root node) invert elevation=100.0ft			



Table 4. Surface Inflow Hydrograph

Time (min)	Discharge (cfs)	Time (min)	Discharge (cfs)
0.00	5.0	5.00	135.0
0.50	5.0	5.50	115.0
1.00	15.0	6.00	95.0
1.50	35.0	6.50	75.0
2.00	55.0	7.00	55.0
2.50	75.0	7.50	35.0
3.00	95.0	8.00	15.0
3.50	115.0	8.50	5.0
4.00	135.0	9.00	5.0
4.50	155.0	9.50	5.0

것이다.<sup>12,26)</sup> 이 관망은 5개의 관거와 두개의 맨홀로 이루어져 있으며 그림7에 도식화되어 있고 관거와 맨홀에 대한 자료는 표2와 3에 나타나 있다. Manning조도 계수는 모든 관거에 대하여 0.015로 가정하였다. 유입 수문곡선은 Yen and Pansic이 사용한 자료(표4)를 그대로 사용하였다. (비교를 위해  $f_1$  단위를 그대로 사용)

5.2. 결과 분석

계산상 모든 관거는 3개의 Reach와 4개의 격자점을 사용하였다. USS-slot모형을 가상유역에 적용한 결과 얻어진 각 관거 출구에서의 유량과 수위는 그림 8과 그림9에 나타나 있다. 압력류 발생시 수위는 압력 수두로 표시하였다.

본 연구에서 사용한 유입 수문곡선의 유량치가 매우 큰 값이므로 어떤 시기에는 모든 맨홀에 물이 차있는 상태가 되어 모든 관거에 압력류가 발생하게 되며, 부분적으로 맨홀 상부에 범람현상이 나타난다. 이런 이유로 맨홀 위로 물이 넘치는 경우에는 수위변화 곡선은 일직선으로 표현된다.

관거 1-3과 2-3의 제원은 모든 점에서 동일하다. 예상대로 이들 두 관거에 대한 수위 및 유량곡선은 동일하였다. 그림8과 그림9에 나타난 것처럼 관거 1-3, 2-3 및 4-5는 유입이 시작된지 2분후에 압력류 상태가 되는것을 보여주고 있으며, 하류관거 3-5와 5-6은 약간 뒤인 약3분후에 압력류 상태가 되는것으로 나타났다.

본연구에서 얻어진 각 관로에 대한 첨두유량의

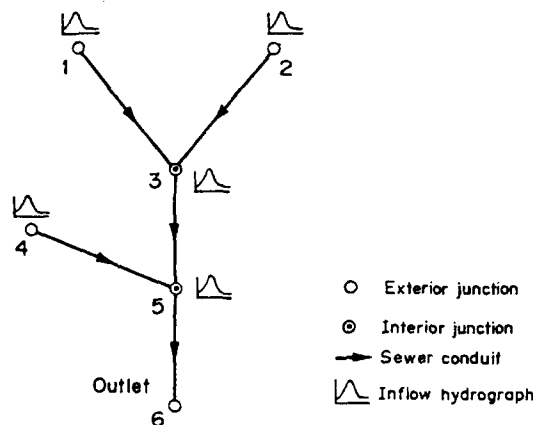
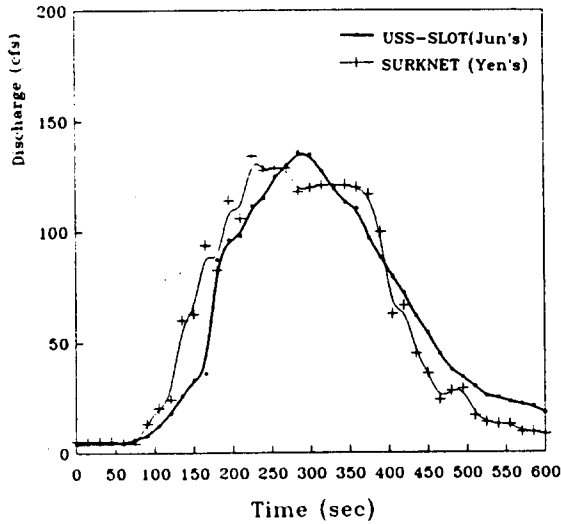
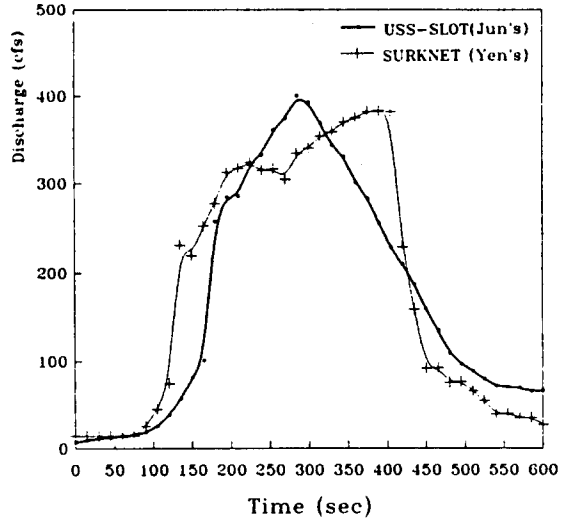


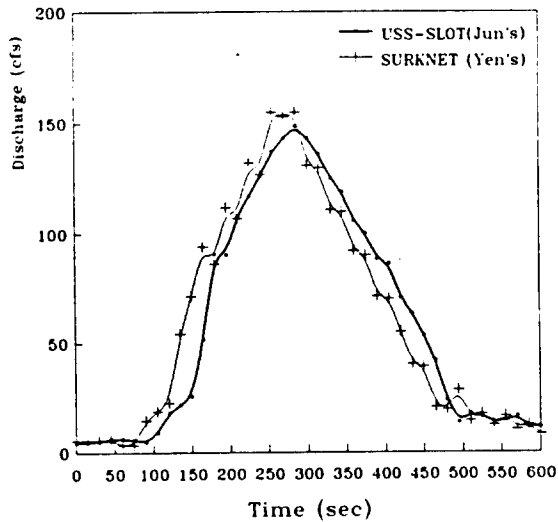
Fig.7 Hypothetical Storm Sewer Network



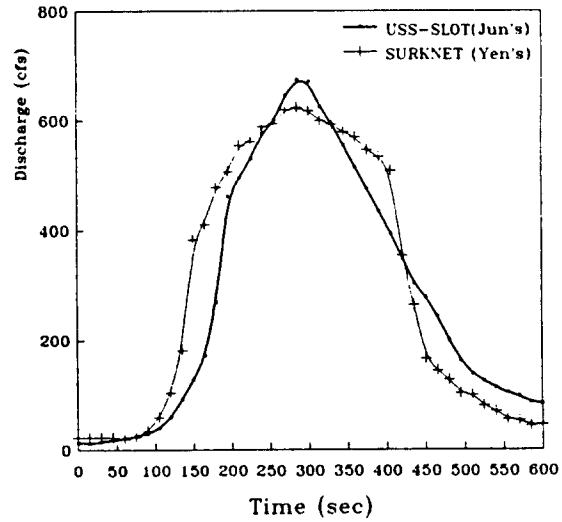
(a) Sewer 1-3 or 2-3



(b) Sewer 3-5



(c) Sewer 4-5



(d) Sewer 5-6

Fig.8 Discharge Hydrographs

크기와 발생시간이 표5에 주어져 있으며 비교를 위해 SURKNET모형의 결과도 함께 수록하였다. 두 방법은 전이구역에 대한 가정과 식 형성 과정의 차이에도 불구하고, 계산된 결과는 지표면 범람만 일어나지 않는다면 상당히 잘 일치하는 것으로 볼 수 있다. (여기 소개된 관망외에도 3개의 관망에 대하여 적용 되었으며 그 결과 얻어진 결론이다.) SURKNET모형에서 계산된 침투유량은 USS-slot모형의 그것보다 5% 정도 작

은 편이다. 침투유량에 도달하는 시간은 한단계 시간간격인 15초 정도 차이로 거의 같았다. 실제로 SURKNET모형은 압력류 계산에서 가속도 항을 무시한 간략식을 사용하였으므로 결과에서 어느정도의 정확도 감소가 있었으리라 판단된다.

### 6. 결론

수치해법에 의한 실행을 통하여, full dynamic

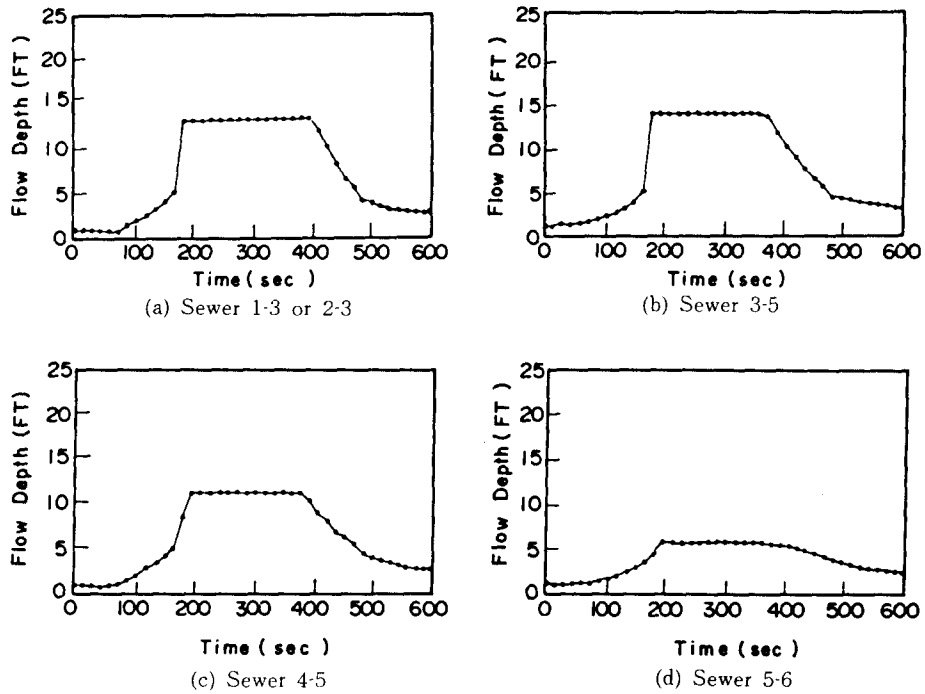


Fig.9 Depth Hydrographs

Table 5. Comparison with SURKNET

(a) Peak discharge at pipe exit and its time of occurrence

Sewer	Peak Discharge(cfs)		Time to Peak(min)	
	USS-slot	SURKNET	USS-slot	SURKNET
1-3	137.2	130	4.75	4.75
3-5	403.3	380	4.75	6.25
4-5	147.7	157	4.75	4.75
5-6	679.0	625	4.75	4.75

\* The results of sewer 2-3 are identical with those of sewer 1-3.

(b) surcharge flow period

Sewer	Initiation Time(min)-Cessation Time(min) (Duration(min))		
	USS-slot		SURKNET
	Entrance	Exit	
1-3	2.00-7.75(5.75)	3.00-7.75(4.75)	2.25-7.25(5.00)
3-5	2.25-8.00(5.75)	2.75-8.25(5.50)	2.25-7.25(5.00)
4-5	2.00-7.50(4.50)	2.75-7.50(4.75)	2.25-7.00(4.75)
5-6	2.75-7.75(5.00)	3.00-8.00(5.00)	2.25-7.50(5.25)

wave equation을 이용하여 관망의 부정류를 해석하는데 가상 slot을 이용한 기법이 개선 발전될 수 있음이 재확인 되었다. 현재의 지식으로는 여러가지 수리학적 현상에 대한 가정들이 이같은 모형에서 불가피하게 요구된다. 무엇보다도 중요한 것은 개수로흐름과 압력류사이의 전이구역과 사류와 상류사이의 전이구역에 대한 가정들이다. 이러한 흐름을 모의하는 모형은 신뢰할만한 현장 자료나 실험실자료등을 이용하여 검증함이 필요하다. 그러나 이러한 자료가 현재 없는 상태이므로 컴퓨터 실행에 의한 결과만이 검토가 가능하다.

이 모형은 단지 개수로 방정식 하나만으로 모든 흐름을 다룰 수 있기 때문에 프로그램 과정이 그리 복잡하지 않다. 그러나 개수로 흐름 및 압력류 사이의 전이구역을 다루는데 있어서의 어려움이 완전 해소된 것은 아니다. Slot모형의 경우 표준모형과는 달리 slot의 제원이 전이구역을 설정하게 된다. 이러한 제원이 좀더 적절히 설정된다면, 여기서 발생하는 불안정문제는 많이 감소될 것이다.

본 연구에서 사용된 예제의 계산에 있어, 불안정 문제가 비록 크게 대두되지는 않았지만, 시간증분이 짧을수록 수치적인 불안정 문제가 감소된다. 반면에 시간증분이 길게 되면 계산비용이 감소되는 경향이 있다. 그러므로, 만일 실행시간이 문제가 될 경우 적절한 시간증분의 선택이 중요한 의미를 갖는다. Fully implicit method는 안정한 것으로 알려져 있지만 이것도 비선형 미분 방정식을 차분화하는 동안의 몇개의 단순화 과정과 전이구역에서의 유량 또는 수치변화량의 급격한 변화는 불안정 문제를 야기시킬 수 있고, 특히 slot의 제원은 하나의 가상적인 것으로 실제가 아니기 때문에 이들 문제의 완전한 해결은 쉬운 문제가 아니다. 그러므로 전산비용을 줄이기 위하여 계산상에서 시간증분을 변화시키는 것이 고려될 수 있다. 예를 들어 불안정 문제가 심각한 전이구역에서는 짧은 시간증분을 적용하고, 기타 구역에서는 긴 시간 증분을 사용하는 것도 한 방법일 수 있다.

또한 관망을 해석하는데는 본 논문과 같이 전체관망을 하나로 생각하여 동시해를 구하는 방법과 몇개의 구획으로 나누어 해를 구해가는 overlapping segment 방법(전병호 외, 1988)이 가능해진다. <sup>1, 27, 31</sup>

overlapping segment 방법은 적은 기억장치로 계산이 가능해진다. Overlapping 방법은 해의 정도가 낮아질 우려가 있으나, 이 문제는 해당구간에 대하여 double overlapping 방법을 적용하므로써 해결이 가능 하리라 본다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 지원해주신 한국과학재단에 심심한 사의를 표합니다.

### 參 考 文 獻

1. Akan, A.O., and Yen, B.C., (1981) *Diffusion Wave Flood Routing in Channel Networks*, Jour. Hydraulics Div., ASCE, vol.107, no.6, pp.719-732.
2. Amein, M., (1968) *An Implicit Method for Numerical Flood Routing*, Water Resources Research, Vol.4, No.4, pp.719-726.
3. Amein, M., and Chu, H.L., (1975) *Implicit Numerical Modeling of Unsteady Flows*, Jour. Hydraulics Div., ASCE, Vol.101, No.6, pp.717-731.
4. Cunge, J.A., Mazaudou, B., (1984) *Mathematical Modeling of Complex Surge Systems: Difficulties in Computation and Simulation of Physical Simulation*, Proceedings, Vol.1, 3rd International Conference on Urban Storm Drainage, Sweden, pp.363-373.
5. Fread, D.L., (1973) *Effects of Time Step Size in Implicit Dynamic Routing*, Water Resources Bulletin, Vol.9, No.2, pp.338-351.
6. Fread, D.L., (1974) *Numerical Properties of Implicit Four Point Finite Difference Equations of Unsteady Flow*. NOAA Technical Memorandum, NWS, HYDRO-18.
7. Fread, D.L., (1984) *An Implicit Dynamic Wave Model for Mixed Flows in Storm Sewer Networks*, Proceedings, 1984 International Symposium on Urban Hydrology, Hydraulics and Sediment Control, University of Kentucky.
8. Gupta, S.K., and Tanji, K.K., (1977) *Computer Program for Solution of Large, Sparse, Unsymmetric Systems of Linear Equations*, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol., pp.1151-1259.

9. Joliffe, J.B., (1984) *Free Surface and Pressurised Pipe Flow Computations*, Proceedings, Vol.1, 3rd International Conference on Urban Storm Drainage, Sweden, pp.397-405.
10. Jun, B.H., (1985) *Dynamic Wave Simulation of Unsteady Open Channel and Surchage Flows in Sewer Networks*, Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Engineering, University of Illinois.
11. Liggett, J.A., and Cunge, J.A., (1975) *Numerical Methods of Solution of the Unsteady Flow Equations, Unsteady Flow in Open Channel*, Ed. Mahmood, K., and Yevjevich, V., Vol.1, chapter 4, Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado.
12. Pansic, N., (1980) *Dynamic Wave Modeling of Storm Sewers with Surchage*, M.S. Thesis, Dept. of Civil Engineering, University of Illinois.
13. Preissmann, M.A., (1961) *Propagation des Intumescences Dans les Canaux et Rivières*, 1st Congres de L'Assoc. Francaise de Calcul, Grenoble, pp.433-442.
14. Preissmann, M.A., and Cunge, J.A., (1961) *Calculation of Wave Propagation on Electronic Machines*, Proceedings, 9th congress, IAHR, Dubrovnik, pp.656-664.
15. Quinn, F.Y., and Wylie, E.B., (1972) *Transient Analysis of the Detroit River, by Implicit Method*, Water Resources Research, Vol.8, No.6, pp.1461-1469.
16. Richtmyer, R.D., and Morton, K.W., (1967) *Solution of the Implicit Equations, -Difference Methods for Initial Value Problems*, 2nd Ed., Interscience Publishers, New York.
17. Sevuk, A.S., (1973) *Unsteady Flow in Sewer Networks*, Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Engineering, University of Illinois.
18. Sjoberg, A., (1981) *Sewer Network Models DAGVL-A and DAGVLT-DIFF*, Proceedings, ASCE, Vol.1, 2nd International Conference on Urban, Storm Drainage, Ed. by Yen, B.C., University of Illinois, pp.127-136.
19. Strelkoff, T., (1970) *Numerical Solution of Saint-Venant Equations*, Proceedings, ASCE, Vol.96, No. HY1, pp.223-252.
20. Wylie, E.B., (1970) *Unsteady Free-Surface Flow Computations*, Proceedings, ASCE, Vol.96, No. HY11.
21. Yen, B.C., (1970) *Risks in Hydrologic Design of Engineering Projects*, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol.96, No. HY4, pp.959-966.
22. Yen, B.C., (1973) *Open-channel Flow Equations Revisited*, Jour. Eng. Mech. Div., ASCE, Vol.99, No. EM5, pp.979-1009.
23. Yen, B.C., (1978) *Hydraulic Instabilities of Storm Sewer Flows, Urban Storm Drainage*, Proceedings of 1st International Conference, Ed. by Helliwell, P.R., John Wiley and Sons, New York, pp.282-293.
24. Yen, B.C., (1978) *Inlet Hydrographs, Storm Sewer System Design*, Ed. by Yen, B.C., University of Illinois, pp.44-50.
25. Yen, B.C., (1985) *Hydraulics of Sewers, Advances in Hydrosiences*, Vol.14, Academic Press.
26. Yen, B.C., and Pansic, N., (1980) *Surchage of Sewer Systems*, Research Report 149, Water Resources Center, University of Illinois.
27. Yen, B.C., and Sevuk, A.S., (1975) *Design of Storm Sewer Networks*, Jour. Env. Eng. Div., ASCE, Vol.101, No. EE4, pp.535-553.
28. Yen, B.C., Wenzel, H.G., Jr., Mays, L.W., and Tang, W.H., (1976) *Advanced Methodologies for Design of Storms Sewer Systems*, Research Report No.112, Water Resources Center, University of Illinois.
29. Yen, B.C., Cheng, S.T., Jun, B.H., Voorhees, M.L., Wenzel, H.G., and Mays, L.W., (1984) *Illinois Least-Cost Sewer System Design Resources Center*, University of Illinois.
30. Yevjevich, V., and Barnes, A.H., (1970) *Flood Routing through Storm Drains*, Final Report, Colorado State University.
31. 전병호, 이형기, 구자공, 신항식, (1988) 개인 전산기를 이용한 도시합류 관거의 흐름 해석, 대한토목학회 논문집, 제8권1호.
32. 전병호, (1988) 도시개발에 따른 수해 가중 영향 분석 및 대책 연구, 한국건설기술연구원.