

# 流域 및河道洪水追跡 방법을結合시킨都市流出解析模型

元錫淵\*, 尹龍男\*\*

## 1. 서론

일반적으로 도시구역의 홍수피해는 외수위의 상승으로 인한 제방의 붕괴 및 내수침수등을 들 수 있는 바, 도시하천의 외수위 결정을 위해서는 하천으로 유입하는 도시구역의 홍수유출해석과 도시하천의 하도를 통한 홍수류의 해석을 필요로 한다. 현재까지 도시유출모형과 하도 홍수추적모형에 관한 많은 연구가 있었으나, 도시유출모형은 대부분 도시소구역의 유출량은 결정하는 방향으로 진행되었으며 도시하천에서의 홍수파의 흐름해석에 관한 연구는 별도로 진행된 것이 사실이다.

본 연구에서는 도시소구역으로 부터의 홍수유출량 산정을 위해 널리 사용되는 ILLUDAS모형을 4점 음형 유한차분기법을 사용하여 완전한 Saint Venant방정식의 해를 구하는 하도 홍수추적모형과 결합한 이른바 도시유출해석모형을 개발함으로써, 도시 소구역으로부터의 홍수유출량 산정은 물론, 하천을 포함하고 있는 도시구역의 홍수 관리를 용이하게 할 수 있도록 하고자 하였다. 또한 본 연구에서 개발한 모형을 대상 표본구역인 성북천의 성북 3교 유역에 적용하여 모형의 적정성을 검토한 후, 본 모형에 의해 성북천의 설계홍수위를 산정하여 그 결과를 실무에서 사용하고 있는 방법에 의한 결과와 비교함으로써 실무적용 방법의 적정성을 상대적으로 평가하고자 하였다.

## 2. 기본이론

### 2.1 ILLUDAS 모형

1974년 Terstriep과 Stall에 의해 처음 개발되어 1984년, 1986년 개정된 모형으로 도시구역의 홍수유출량 산정을 위해 널리 사용되고 있는 모형이다. 이 모형을 전체유역을 직접연결 포장지역, 간접연결 포장지역, 투수지역 및 유출에 기여하지 않는 지역의 4가지로 구분·해석하는 모형이며, 계산 흐름도는 그림 2.1과 같다.

---

\* 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 대학원 박사과정

\*\* 참여회원, 고려대학교 토목환경공학과 교수

## 2.2 하도 홍수추적 모형

1차원 부정류 흐름의 지배방정식인 Saint Venant방정식의 완전한 형태를 4점 음형 유한차분기법을 사용하여 해석하였다. 연속방정식과 운동량방정식을 유한차분식으로 표시하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C = \theta(Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^{j+1} - \bar{q}_i^{j+1} \Delta x_i) + (1-\theta)(Q_{i+1}^j - Q_i^j - \bar{q}_i^j \Delta x_i) + \frac{\Delta x_i}{2\Delta t} (A_{i+1}^{j+1} + A_i^{j+1} - A_{i+1}^j - A_i^j) \quad (2.1)$$

$$M = \frac{\Delta x_i}{2\Delta t_j} (Q_{i+1}^{j+1} + Q_i^{j+1} - Q_{i+1}^j - Q_i^j) + \theta \left[ \left( \frac{\beta Q^2}{A} \right)_{i+1}^{j+1} - \left( \frac{\beta Q^2}{A} \right)_i^{j+1} + g(\theta \bar{A}_{i+1}^{j+1} + (1-\theta) \bar{A}_i^j) (h_{i+1}^{j+1} - h_i^{j+1} + \bar{S}_{f_i}^{j+1} \Delta x_i + \bar{S}_{e_i}^{j+1} \Delta x_i) + (\bar{B}L)_i^{j+1} \Delta x_i \right] + (1-\theta) \left[ \left( \frac{\beta Q^2}{A} \right)_{i+1}^j - \left( \frac{\beta Q^2}{A} \right)_i^j + g(\theta \bar{A}_{i+1}^j + (1-\theta) \bar{A}_i^j) (h_{i+1}^j - h_i^j + \bar{S}_{f_i}^j \Delta x_i + \bar{S}_{e_i}^j \Delta x_i) + (\bar{B}L)_i^j \Delta x_i \right] \quad (2.2)$$

홍수추적을 행하고자 하는 하도구간을 N개의 구간으로 나누면 (N-1)개의 격자망에 대해 각각 연속방정식과 운동량방정식을 세울 수 있으며, 여기에 상류단과 하류단의 경계조건을 포함하면 총 2N개의 비선형 연립방정식을 수립할 수 있다. 이 비선형 연립방정식을 풀면 2N개의 미지수 즉, 각지점별 수위와 유량 값을 동시에 구할 수 있으며, 그 해법으로는 Newton-Raphson방법을 사용한다. 하도 홍수추적의 계산 절차는 그림 2.2에 제시된 바와 같다.

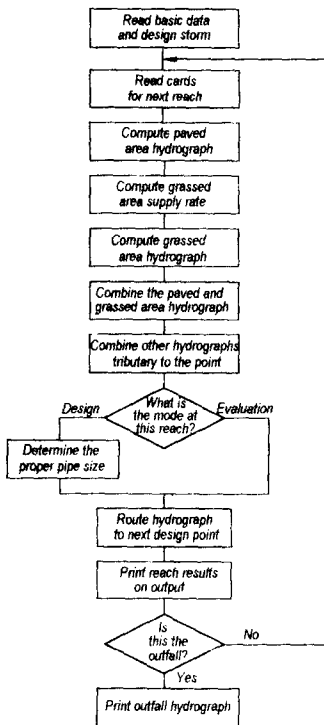


그림 2.1 ILLUDAS모형의 계산 흐름도

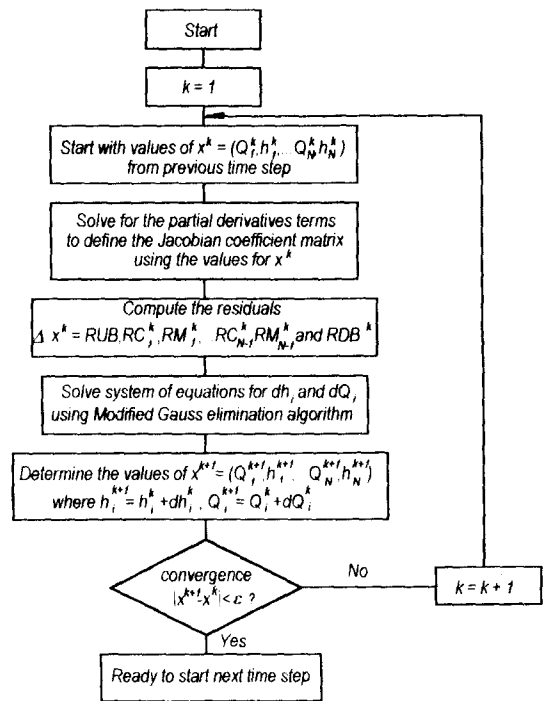


그림 2.2 Newton Raphson방법에 의한 비선형 연립방정식의 계산흐름도

### 3. 모형의 적용 및 분석

#### 3.1 모형의 적용

도시유출해석모형의 구성은 그림 3.1과 같으며 모형의 적용을 위해 필요한 각종 조건을 다음과 같이 설정하였다.

먼저 상류단의 경계조건으로는 하천의 시점으로 유입하는 도시유역의 유출수문곡선을, 하류단의 경계조건으로는 성북 제 3교 지점의 수위-유량관계곡선식( $Q = 31.9 H^{3.28}$ )을 사용하였다. 또한 성북천의 초기유량을  $4m^3/sec$ 로 설정한 후, 하천에서의 흐름을 정상류로 보고 수위를 계산하여 이를 초기조건으로 설정 하였다.  $\Delta x$ 의 거리간격을 가지는 하천상의 두 격점사이에, 하천으로 유입되는 우배수관거가 한개 이상 있을 경우 그 유입량을 모두 합한 값(Q)을 두 격점사이의 측방 유입량으로 하였다. 대상유역인 성북 제 3교 유역의 지점별 측방유입량은 ILLUDAS 모형에 의한 도시 소유역별 유출량이며 그 모식도는 그림 3.2와 같다. 계산 시간구간  $\Delta t$ 의 값은 5분으로 설정하였으며, 계산 거리구간  $\Delta x$ 와  $\Delta t$ 사이에  $\Delta x = 3/2 \cdot (Q/A) \cdot \Delta t$ 의 조건을 만족하도록  $\Delta x$ 의 크기를 결정하였다. 마지막으로 가중계수  $\theta$ 를 0.5, 0.55, 0.60, 및 0.70으로 각각 설정하여 계산을 실시한 결과  $\theta$ 값에 따른 유출량의 계산치는 0.50~0.70 사이에서 큰 차이를 보여주지 못하는 것을 알 수 있었으며, 본 연구에서는  $\theta$ 값을 0.60으로 설정하여 모형을 적용하였다.

#### 3.2 적용결과 분석

본 연구에서 설정한 도시유출해석모형을 대상유역인 성북천 유역에 적용하여 수위관측소가 위치해 있는 성북 제 3교 지점에서의 유출량을 계산하였으며, 이를 실측 유출수문곡선과 비교하여 모형의 적정성을 판단코자 하였다. 또한 수문학적 홍수추적방법을 사용하여 하도 홍수추적을 실시한 후, 이를 본 모형과 비교함으로써 본 모형의 하도 홍수추적방법의 정확성을 상대적으로 평가하고자 하였으며 수문학적 하도추적을 위해서는 ILLUDAS모형을 사용하였다. 본 모형에 의해 계산된 유출량과 ILLUDAS모형에 의해 계산된 유출량을 실측 유출량과 함께 그림 3.3에 나타내었다. 본 모형이 실제하천에서의 홍수파의 거동을 얼마나 잘 나타내고 있는지를 판단하기 위하여, 홍수사상별로 계산된 첨두홍수량의 크기 및 발생시간 그리고 평방자승오차를 구하였으며, 그 값은 표 3.1과 같다.

먼저 첨두홍수량의 크기만을 기준으로 모형의 적용 결과를 판단해 보면, ILLUDAS모형에 의한 결과와 본 모형에 의한 결과는 다소간의 차이는 있으나 비교적 실측치에 부합하는 것을 알 수 있다. 그러나 첨두홍수량의 발생시간은 ILLUDAS모형의 경우, 전반적으로 실측치보다 빨리 발생하는 것을 볼 수 있으며, 수문곡선의 오차 역시 전반적으로 큰 것을 알 수 있다. 이에 반해

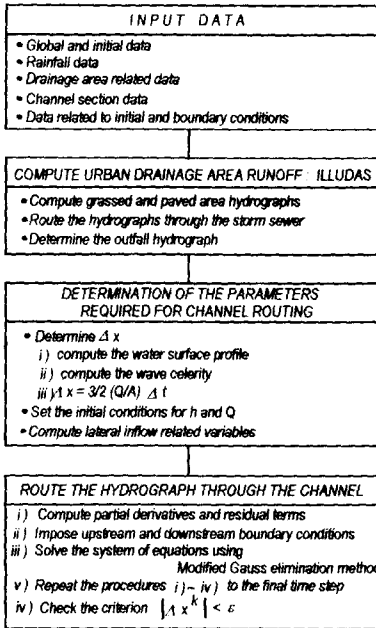


그림 3.1 도시유출해석모형의 구성도

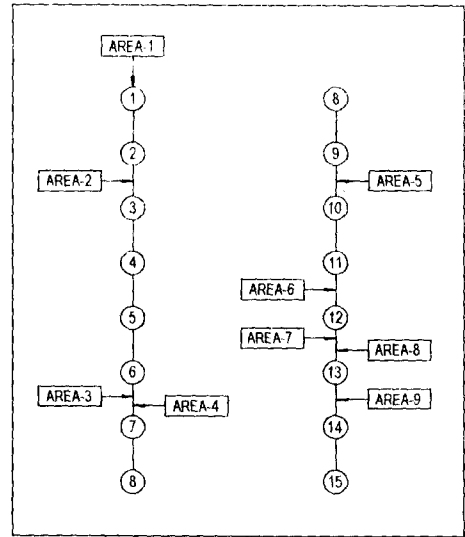


그림 3.2 성북 제 3교 유역의 모식도

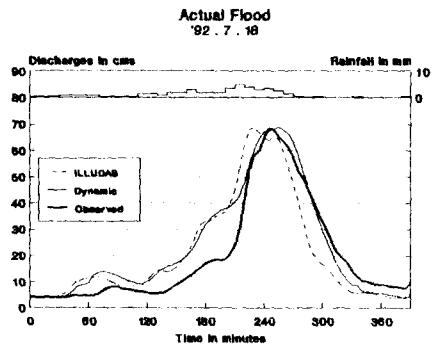
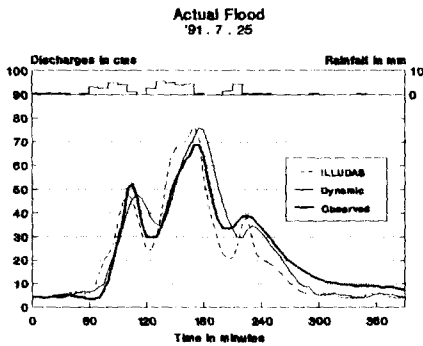
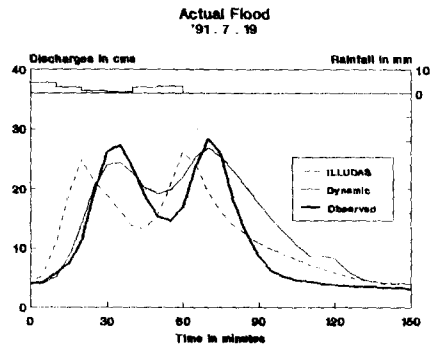
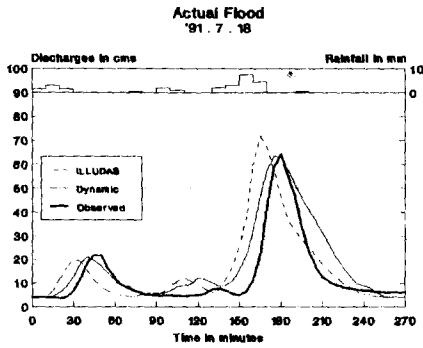


그림 3.3 도시유출해석모형의 적용 결과

표 3.1 하도 홍수추적 방법에 따른 유출 특성치의 비교

구 분	방 법 별	91. 7. 18	91. 7. 19	91. 7. 25	92. 7. 17
Peak Discharge	실 측 치	64.49	28.32	68.54	68.54
	도시유출해석모형	63.40	26.82	75.94	68.70
	ILLUDAS모형	72.01	26.10	77.22	68.80
Peak Time	실 측 치	180	70	225	245
	도시유출해석모형	175	70	230	255
	ILLUDAS모형	165	60	225	230
$\epsilon_{RMS}$	도시유출해석모형	0.627	0.345	0.238	0.366
	ILLUDAS모형	0.995	0.500	0.315	0.505

본 모형에 의한 결과는 침투홍수량의 발생시간 뿐 아니라, 전체적인 수문곡선의 형태 역시 실 측치에 상당히 부합하는 것을 볼 수 있으므로 부정류인 하천에서의 홍수파의 흐름 특성을 적절히 해석하였음을 알 수 있다. 또한 본 모형에서 사용한 음형 유한차분기법은 항상 안정된 해를 구할 수 있다는 장점을 가지고 있으므로, 본 연구에서 제시한 도시유출해석모형은 도시하천을 포함하고 있는 도시유역으로 부터의 홍수량 및 도시하천의 홍수량 산정에 유용하게 사용될 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 도시유출해석모형에 의한 설계홍수위의 계산

일반적으로 하천에서의 설계홍수위의 결정을 위해서는 먼저 하천의 각 지점에서의 설계홍수량을 결정한 후 하천에서의 흐름을 정상류로 가정하여 하천수위를 계산하여 이를 설계홍수위로 설정하고 있다. 그러나 홍수시 하천에서의 홍수류는 부정류의 형태를 가지는데 반해 이를 정상류로 가정하여 해석할 경우 시간에 따른 흐름 특성의 변화를 고려할 수 없으며, 또한 시간에 따라 변화하는 하천의 유량과 수위는 상호간에 밀접한 관계를 가지고 있으므로 이를 독립적으로 결정할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 실무에서 사용하고 있는 설계홍수위의 산정방법을 적용한 후, 이를 도시유출해석모형에 의한 결과와 비교함으로써 실무적용방법을 검토하고자 하였다.

먼저, 설계강우로는 지속시간 2시간, 설계빈도 100년인 강우를 택하였으며, 실무에서 사용하고 있는 방법을 그대로 적용하여 설계 유량주상도를 결정하였다. 먼저 본 연구에서 수립한 도시유출해석모형에 설계강우를 적용하여 하천의 각 지점별 설계홍수위를 계산하였다. 다음으로는 실무에서 사용하고 있는 방법에 의해 지점별 홍수위를 결정하고자 하였으며, 이때 지점별 홍수량의 계산을 위해서는 ILLUDAS모형을 적용하였고 홍수위의 계산을 위해서는 HEC-2모형을 사용하였다. 또한 부정류 계산에 의해 하천수위를 계산할 경우와 하천에서의 흐름을 정상류로 가정하여 수위를 계산할 경우의 차이를 비교하기 위하여, 도시유출해석모형에 의해 계산된 지점별 설계홍수량을 하천의 유량으로 설정하여 HEC-2모형에 의해 홍수위를 계산하였다. 즉, 하천의 홍수위 계산 절차를 다음과 같이 3가지 경우로 설정하였다.

Case-A : 도시유출해석모형에 의한 설계홍수위 계산

Case-B : HEC-2모형에 의한 설계홍수위 계산(ILLUDAS모형에 의해 지점별 홍수량 결정)

Case-C : HEC-2모형에 의한 설홍수위 계산(도시유출해석모형에 의해 지점별 홍수량 결정)

먼저 100년빈도 설계강우에 대한 성북 제 3교에서의 유출수문곡선은 그림 4.1과 같다. ILLUDAS모형은 도시유출해석모형에 비해 하천에서의 저류로 인한 홍수의 감쇠효과와 지체효과를 제대로 고려하고 있지 않음을 볼 수 있어 설계홍수량으로 사용되는 첨두홍수량의 크기가 상대적으로 큼을 볼 수 있다. 도시유출해석모형과 ILLUDAS모형에 의한 대상하도의 지점별 설계홍수량은 그림 4.2에 제시된 바와 같으며, 그림에서 ILLUDAS모형에 의한 지점별 설계홍수량은 도시유출해석모형에 의한 결과보다 전체적으로 큰 값을 보여주고 있음을 볼 수 있으며 그 이유는 전술한 바 있다. 지점별 홍수량에 대한 홍수위와 수심은 그림 5.3과 그림 5.4와 같다.

먼저 Case-A와 Case-C에 의한 계산 결과를 살펴 보면, 그림 5.4에서 Case-C에 의한 설계홍수위 계산치는 전 구간에 걸쳐 Case-A보다 작은 것을 볼 수 있다. 이는 그림 5.5에서 볼 수 있듯이 홍수시 수위와 유량간의 관계는 고리(loop)형태로 표시되는데 반하여 홍수파의 흐름을 정상류로 가정할 경우 수위-유량 관계곡선은 단일곡선으로 표시되기 때문에 설계홍수위의 값이 항상 작게 계산되는 것을 알 수 있다. 즉, 하천에서의 홍수파의 흐름을 정상류로 가정할 경우에는 설계홍수위의 값이 과소 추정됨을 알 수 있다.

다음으로 Case-B와 Case-C의 결과를 비교해 보면, Case-B에 의한 설계홍수위 계산치는 하류 지점으로 갈수록 Case-C보다 큰 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 이는 그림 5.2에서 볼 수 있듯이 ILLUDAS모형에 의한 설계홍수량의 값이 도시유출해석모형에 의한 값보다 크기 때문이다.

마지막으로 실무에서 사용하고 있는 방법(Case-B)과 도시유출해석모형(Case-A)에 의한 결과를 비교해 보기로 한다. 먼저 Case-B의 지점별 설계홍수량의 값은 Case-A의 경우보다 크게 계산되었음은 전술한 바와 같다. 그러나 지점별로 계산된 설계홍수위의 값은 Case-B에 의한 결과가 전반적으로 작게 계산되었음을 볼 수 있으며 이는 Case-B에서 하천내 홍수파의 흐름을 정상류로 가정하였기 때문에 동일한 유량이라 할지라도 그에 해당하는 수위의 값이 작게 계산되기 때문이다. 또한 상류에서 하류 방향으로 진행함에 따라 두 방법에 의한 수심의 차가 작아지며 하류단에 인접한 지점에서는 오히려 Case-B에 의한 수심이 더 크게 나타나고 있는 데, 이는 Case-A에서의 하류단 경계조건으로 단일 수위-유량 관계곡선을 사용하였기 때문임은 전술한 바와 같으며 또한 하류로 갈수록 Case-B의 설계홍수량이 Case-A에 비해 점점 커지기 때문이다.

이상의 결과로부터, 실무에서 사용하고 있는 하천의 설계홍수위 산정방법은 상호간에 밀접한 관계를 가지고 있는 수위와 유량을 개별적으로 계산함으로써 인해 하천의 설계홍수위를 전반적으로 과소 추정함을 알 수 있다. 즉 하천내의 홍수파를 정상류로 가정할 경우, 시간에 따라 하천유량이 급격히 변화하는 중·소규모 하천에서의 설계홍수위의 산정시 많은 오차를 수반하며, 본 연구에서 제안한 도시유출해석모형은 하천에서의 홍수파의 해석을 위하여 부정류 해석기법을 사용하고 있으므로 도시하천에서의 설계홍수위 산정을 위해 유용하게 사용될 수 있는 모형임을 알 수 있었다.

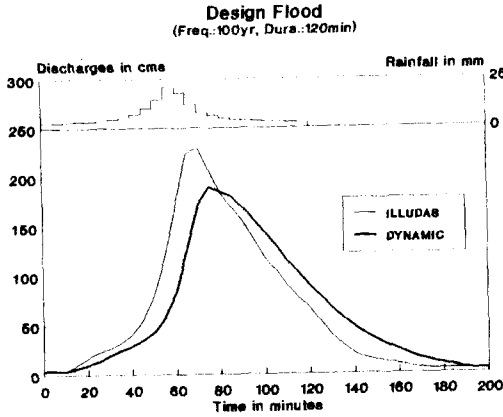


그림 4.1 성북 제 3교 지점의 설계 홍수수문곡선(100년 빈도)

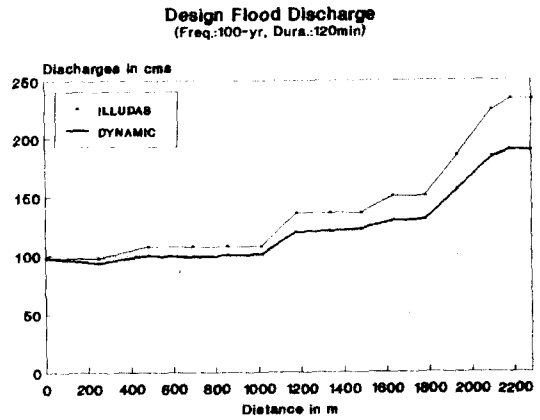


그림 4.2 성북천의 각 지점에서의 설계홍수량(100년 빈도)

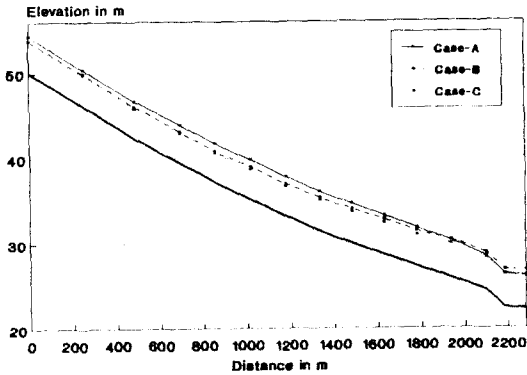


그림 4.3 성북천의 각 지점에서의 설계홍수위(100년 빈도)

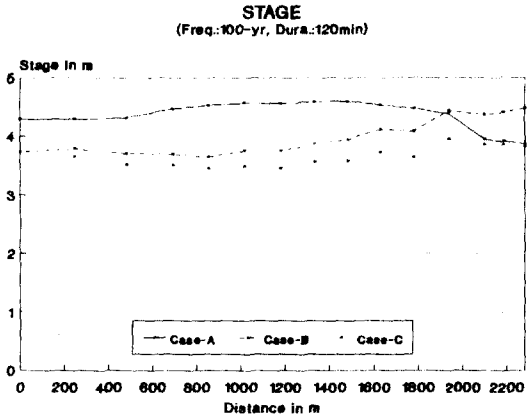


그림 4.4 성북천의 각 지점에서의 수심(100년 빈도)

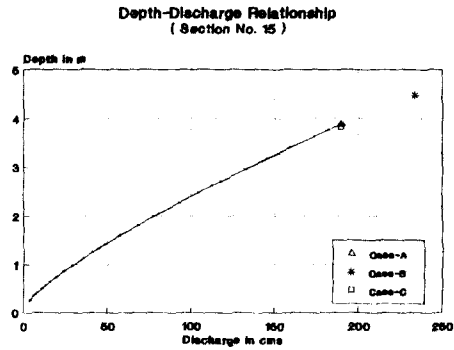
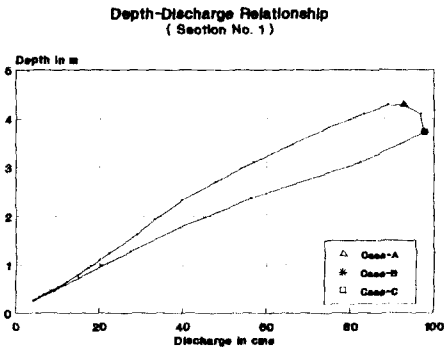


그림 4.5 지점별 수위-유량 관계곡선

## 5. 결 론

본 연구에서는 소규모의 도시 배수구역으로부터의 홍수유출량 산정을 목적으로 개발된 ILLUDAS모형을 도시하천에서의 홍수파의 흐름해석을 위해 유한차분기법을 사용하여 완전한 Saint Venant방정식의 해를 구하는 하도 홍수추적모형을 결합한 도시유출해석모형을 개발하였다. 모형의 검정을 위해서 도시 하천구역인 성북천의 성북 제 3교 유역을 대상구역으로 선정하여 표본구역의 강우-유출 자료를 직접측정 혹은 수집하여 분석에 이용하였다.

본 연구에서 개발한 도시유출해석모형을 도시 하천구역에 적용하여 실측 유출량과 비교한 결과 매우 우수한 결과를 보여주었으므로, 본 모형은 도시 소유역의 홍수유출량 계산은 물론 하천을 포함하고 있는 도시하천의 홍수 관리를 위해서도 유용하게 사용될 수 있는 모형이라 할 수 있다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 도시구역의 홍수유출량의 산정을 위한 ILLUDAS모형을 4점 가중 음형 유한차분기법과 결합시킨 도시유출해석모형을 수립하였다. 일반적으로 도시 하천구역으로 부터의 유출량을 계산하기 위해서는 먼저 도시구역의 유출량을 계산한 후 이를 하도를 통해 홍수추적하는 두단계의 과정을 거쳐야 하는 데 반하여 본 모형은 이 과정을 일괄적으로 처리할 수 있다는 강점을 가지고 있다.

2) 도시유출해석모형에서 하도 홍수추적을 위해 사용한 4점 가중 음형 유한차분기법의 적용성을 검증하기 위해 그 적용 결과를 수문학적 방법을 사용한 결과와 실측치를 기준으로 하여 비교·검토 하였다. 본 모형은 첨두홍수량의 크기 및 발생시간 그리고 수문곡선의 형태등 모든 면에서 수문학적 방법보다 좋은 결과를 보여주었다. 또한 음형 기법은 수치적으로도 안정성이 높은 방법이므로 도시하천에서의 하도 홍수추적을 위해 유용하게 사용될 수 있는 방법임을 알 수 있었다.

3) 도시하천의 설계홍수위의 산정을 위하여 도시유출해석모형을 표본구역에 적용하여 설계홍수량 및 설계홍수위를 산정하였다. 실무 적용방법과의 비교를 위해 수문학적 홍수추적 방법에 의해 하천의 각 지점별 설계홍수량을 계산하였으며 그를 도시유출해석모형에 의한 설계홍수량 값과 비교한 결과 하류로 갈수록 더 큰 값을 가지는 것을 볼 수 있었다.

4) 도시유출해석모형으로 계산된 지점별 홍수량을 사용하여 HEC-2모형에 의해 설계홍수위를 계산하였으며 이를 본 모형에 의해 계산된 설계홍수위와 비교하였다. HEC-2모형은 도시유출해석모형에 비해 동일한 유량에 대한 수위의 값이 항상 작게 계산된 것을 볼 수 있었으며 이는 HEC-2모형에서 홍수시 하천의 흐름을 정상류로 가정하기 때문인 것으로 생각된다. 또한 실무에서 사용하고 있는 ILLUDAS모형으로 계산된 설계홍수량을 그대로 사용하여 HEC-2모형에 의해 설계홍수위를 계산했을 경우에도 하천의 각 지점에서의 설계홍수위의 값이 전반적으로 과소 추정됨을 알 수 있었다.