

개수로에서의 부정류 수문곡선 재현을 위한 유량공급장치의 개발 및 정확도 분석

Development and Accuracy Analysis of the Discharge-Supply System to Generate Hydrographs for Unsteady Flow in the Open Channel

김 서 준* / 김 상 혁** / 윤 병 만*** / 지 운****

Kim, Seojun / Kim, Sanghyuk / Yoon, Byungman / Ji, Un

Abstract

The analysis for unsteady flow is necessary to design the hydraulic structures affected by water level and discharge changes through time. The numerical model has been generally used for unsteady flow analysis, however it is difficult to acquire field data to calibrate and validate the numerical model. Even though it is possible to collect field data for some case, high cost and labor are required and sometimes it is considered that the confidence of measured data is very low. In this case, the experimental data for unsteady flow can be used to calibrate and validate the numerical model as an alternative. Therefore, the discharge-supply system which could generate various type of unsteady flow hydrograph was developed in this study. Also, the accuracy of the unsteady flow hydrograph generated by developed discharge-supply system in the experiment was evaluated by comparing with target hydrograph. Accuracy errors and Root Mean Square Error (RMSE) were analyzed for the rectangular-type hydrograph with sudden changes of flow, triangular-type hydrograph with short peak time, and bell-type flood hydrograph. As a result, the generating error of the discharge-supply system for the rectangular-type hydrograph was about 59% which was maximum error among various types. Also, it was represented that RMSE for the triangular-type hydrographs with single and double peaks were approximately corresponding to 10%. However, RMSE for the bell-type flood hydrograph was lower than 2%.

Keywords : unsteady flow, discharge-supply system, hydrograph, accuracy analysis, error analysis

요 지

시간에 따른 하도의 수위 및 유량 변화에 영향을 많이 받는 수리구조물의 설계에 있어서 부정류 흐름 해석은 반드시 필요하다. 일반적으로 부정류 흐름 해석에는 수치모형이 많이 활용되고 있으나 수치모형의 검·보정을 위한 현장 자료의 획득이 어려운 경우가 많다. 또한 자료구축이 가능하더라도 인력과 비용이 많이 소모되며, 측정 정확도를 신뢰하기 어려운 경우가 많다. 이러한 경우 수치모형의 검·보정을 위해 부정류 수리실험을 통해 획득되는 자료를 활용하는 것이 대안이 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 다양한 형태의 부정류 수문곡선을 실험에서 재현할 수 있는 유량공급장치를 개발하고자

* 명지대학교 토목환경공학과 박사과정 (e-mail: seojuny@paran.com)

Ph.D Candidate, Dept. of Civil & Environmental Eng, Myongji University, San 38-2 Namdong, Yongin, Gyeonggi-do 449-728, Korea

** 명지대학교 토목환경공학과 석사과정 (e-mail: peterkim43@gmail.com)

Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Eng, Myongji University, San 38-2 Namdong, Yongin, Gyeonggi-do 449-728, Korea

*** 명지대학교 토목환경공학과 교수 (e-mail: bmyoon@mju.ac.kr)

Prof., Dept. of Civil & Environmental Eng, Myongji University, San 38-2 Namdong, Yongin, Gyeonggi-do 449-728, Korea

**** 교신저자, 명지대학교 토목환경공학과 연구교수 (e-mail: jiuncivil@gmail.com)

Corresponding Author, Research Prof., Dept. of Civil & Environmental Eng, Myongji University, San 38-2 Namdong, Yongin, Gyeonggi-do 449-728, Korea

하며, 개발된 부정류 유량공급장치를 이용하여 수리실험 수로에서 재현되는 수문곡선과 목표 수문곡선을 비교 분석함으로써 재현 정확도를 정량적으로 평가하고자 한다. 본 연구에서는 유량이 급격하게 증가 또는 감소하는 사각형 형태, 침두 유량 발생 시간이 짧은 삼각형 형태 및 일반적인 홍수 수문곡선 형태의 종(bell) 형태 수문곡선을 대상으로 재현 오차 및 Root Mean Square Error (RMSE)를 분석하였다. 재현 정확도 분석 결과, 사각형 형태의 수문곡선 재현 오차는 약 59% 정도로 가장 크게 나타났으며, 삼각형 형태의 수문곡선은 단일침두와 이중침두 형태 모두 약 10% 정도의 재현 오차가 나타났지만 홍수 수문곡선 형태인 종 모양의 수문곡선의 재현 오차는 최대 2% 이내인 것으로 나타났다.

핵심용어 : 부정류, 유량공급장치, 수문곡선, 정확도 분석, 오차 분석

1. 서 론

최근 들어 기상이변으로 인한 태풍 및 집중호우로 하천 범람과 내수침수 등의 홍수재해에 의한 인명 및 재산 피해가 매년 발생하고 있으며 홍수피해의 빈도와 강도는 계속 증가하고 있는 실정이다. 그렇기 때문에 이상홍수에 대한 대책 마련은 치수, 이수 및 환경적인 관점에서 볼 때 매우 중요한 관심사항으로 부각되고 있다. 실질적인 홍수 피해를 줄이기 위해서는 계획홍수량 이상의 홍수량을 저류하거나 홍수 도달시간을 조절하기 위한 하도정비, 홍수 조절지, 강변저류지 및 방수로 또는 지하저류지 계획 등의 구조적 대책수립이 필요하다. 이를 위해서는 홍수시 발생 가능한 수문곡선들에 대해 각각의 대처 방법들의 저류효과를 평가할 필요가 있으며 이때 부정류 흐름 해석이 반드시 필요하다. 기존의 정류 해석으로는 시간에 따른 저류량의 변화를 정량적으로 산정하는데 한계가 있을 뿐만 아니라 강변저류지와 같이 시간에 따른 수위 변화로 저류량이 결정되는 구조물의 경우 정상류 해석만으로는 홍수조절효과에 대한 분석이 어렵다.

부정류 흐름 해석에 대한 연구는 컴퓨터의 급속한 발전과 더불어 수리학적 수치해석 방법을 활용한 연구가 활발하게 진행되었다. Moussa (1996)는 측방향 유입을 고려한 Saint-Venant 방정식의 해석적 해를 구하였고, Moramarco et al. (1999)는 선형화된 Saint-Venant 방정식의 해석적 해를 측방향 유입량을 고려하여 산정하였다. Perumal and Ranga Raju (1998)는 하도 특성을 나타내는 매개변수를 유도하여 임의 단면형 수로에 대해서 Saint-Venant 방정식을 사용하여 수위-수문곡선 추적방법을 제안하였다. 특히 1차원 부정류 흐름 해석의 경우는 유한차분법이 계산의 정확도면에서 유리하여 일반적으로 많이 사용되고 있다. 유한차분법에는 양해법과 음해법이 있으며 음해법으로는 Preissmann 기법이 우수한 것으로 알려져 있다(이종태, 1982). 이를 적용한 국내 연구로는 최성욱 등(1991),

윤용남과 박무중(1992), 이종태 등(1993), 김원 등(1993), 진민우와 조용수(2002), 이정규와 전세호(2004)가 국내 하천을 대상으로 부정류 해석 및 홍수추적을 모의한 바 있다. 이와 같은 부정류 수치모형을 실제 문제에 적용하기 위해서는 사용되는 모형의 검정(calibration) 또는 검증(verification) 단계를 거쳐야 한다(우효섭, 2001). 부정류 수치모형의 검정과 검증을 위해서는 현장에서 발생한 부정류 수문곡선 자료의 획득이 필수적이지만 현장 자료를 구축하기 위해서는 많은 인력과 비용이 필요하고, 측정 정확도를 신뢰하기 어려운 경우가 많기 때문에 수치모형의 검증을 위한 경계조건의 부족, 유량별 조도계수의 변화에 대한 자료 부족 등 연속적인 수문자료의 부족 및 불확실성 등의 문제가 발생할 수 있다. 특히, 저류지 혹은 강변저류지 등과 같은 구조적 대책 수립을 위해 부정류 수문곡선 자료를 현장에서 직접 수집하여 수치모형의 검·보정 자료로 활용한다는 것은 저류지가 현장에 설치되기 전에는 거의 불가능한 일이다. 이러한 경우 수치모형의 검·보정을 위해 부정류 수리실험 또는 수리모형실험을 통해 획득되는 자료를 활용하는 대안이 있다. 따라서 이러한 부정류 수리실험을 가능하게 하는 유량공급장치의 개발이 필수적이며 개발된 장치의 정확도 분석을 통한 장치의 검증이 반드시 필요하다.

부정류 흐름 해석을 위한 실험적 연구는 부정류 발생 및 측정 장치의 한계 때문에 현재까지는 많이 미흡한 실정이다. 그 중에서도 대부분이 구조물 주변의 부정류 흐름에 대한 분석들이었고, 실제 홍수사상과 동일하게 유입 유량의 변화를 고려한 연구는 주로 홍수시 유사이송을 분석하기 위한 연구들이었다. Yen and Lee (1995)는 부정류 흐름시 수로 만곡부에서의 하상변동을 연구하기 위해 수로 하류단에 sluice gate를 설치하고 시간 변화에 따라 수동으로 1 mm씩 조절하여 부정류 흐름이 발생하도록 하였고, Lee et al. (2004)은 유량을 공급하는 펌프에 제어장치를 설치하고 펌프의 회전수를 변화시켜 부정류 흐름을 발생시켜 소류사

이송에 대한 연구를 수행하였다. De Sutter (2001)는 유량 공급관에 설치된 밸브를 제어하는 방식으로 부정류 흐름을 발생시켜 홍수시 하상 재료에 따른 유사이송을 분석한 수리실험을 수행하였고 Bombar et al. (2011)은 부정류 흐름 상태에서 유사이송 실험을 수행하여 수치모형 검증을 실시하였다. 과거의 부정류 흐름 해석을 위한 실험적 연구들은 유량의 시간 변화가 단순하게 선형적으로 증가하거나 또는 감소하는 정도에 그쳐 실제 홍수시의 수문곡선을 재현하여 부정류 흐름을 분석한 연구는 수행되지 못한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 여러 가지 형태의 부정류 흐름을 발생시키고 다양한 수문곡선 형태를 재현할 수 있는 유량 공급장치를 개발하고자 하며, 개발된 부정류 유량공급장치에 입력되는 목표 수문곡선과 수리실험 수로에서 재현되는 수문곡선을 비교 분석함으로써 재현 정확도를 정량적으로 평가하고자 한다. 수문곡선 재현은 첫째, 시간에 따른 유량 변화가 급격히 발생한 경우에 대하여 실시하였고, 둘째, 단일 침두가 발생하는 수문곡선과 이중 침두를 갖는 수문곡선을 재현하였으며, 셋째, 일반적인 종(bell) 모양의 홍수 수문곡선 형태를 재현하였다.

2. 부정류 유량공급장치의 개발

2.1 부정류 유량공급장치 설계

본 연구에서는 부정류 흐름을 발생시키기 위해 개발된 부정류 유량공급장치를 Fig. 1과 같이 유량공급수조(Water supply tank), 전자유량계(Electromagnetic flow meter), 유량조절밸브(Discharge control valve), 초음파수위계

(Ultrasonic water level meter) 및 유량조절모듈(Discharge control module)로 구성하였다. 부정류 유량공급장치는 밸브를 이용하여 유량을 조절하는 방식이기 때문에(Water supply tank)에서 공급되는 유량은 항상 일정하게 유지될 수 있도록 하여야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 유량공급수조의 한쪽 벽에 월류턱을 설치하여 실험에 사용되는 유량이 변화하더라도 공급수조의 수위는 항상 일정하게 유지할 수 있도록 하였다.

전자유량계와 유량조절밸브는 실험수로 상류단의 정류장(stilling basin)으로 유량을 공급하기 위한 관 중간에 설치되어 있으며, 초음파수위계는 유입수문곡선을 획득하고자 하는 임의의 단면에 설치되어 있다. 전자유량계, 유량조절장치 및 초음파수위계는 모두 유량조절모듈과 연결되어 있어서 입력 및 출력 자료를 관리하도록 하였다. 유량조절밸브는 Fig. 2와 같이 공기압을 이용해 관내에 설치된 disk를 조절하여 통수단면적을 조절하는 방식으로 유량조절모듈에 입력된 시간 변화에 따른 유량공급밸브의 개폐율 곡선에 따라 자동으로 작동하도록 제작하였다. 또한 유량조절모듈에 입력되는 개폐율 단위는 소수점 한자리까지 가능하도록 하였다. 본 연구에서는 100% 개폐시 110 l/s의 유량을 수로로 공급할 수 있으며 유량공급장치로 조절 가능한 최소 유량 단위를 0.11 l/s로 하여 수로로 공급하는 유량을 정확하게 제어할 수 있도록 하였다. 유량조절장치는 KOPECS사에서 제조된 Pneumatic Butterfly Control Valve로 크게 4가지 부분으로 구성되어 있는데 A부분은 유량조절모듈과 결선되어 4mA에서 20mA까지의 전류신호를 받아 유량조절에 필요한 disk의 각

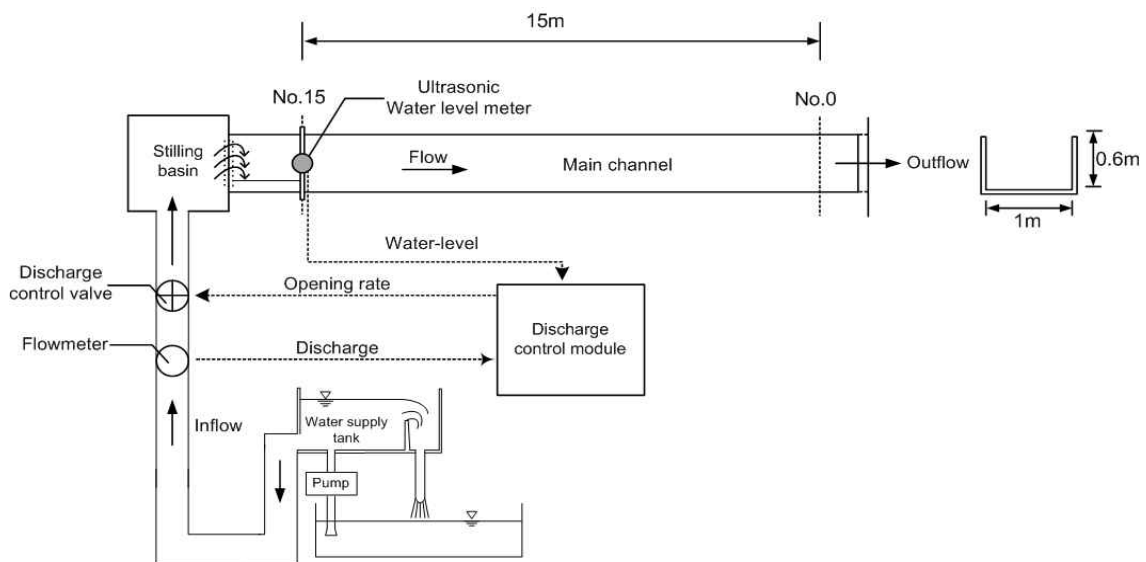


Fig. 1. Schematic Diagram of Unsteady Discharge-Supply System for Unsteady Flow

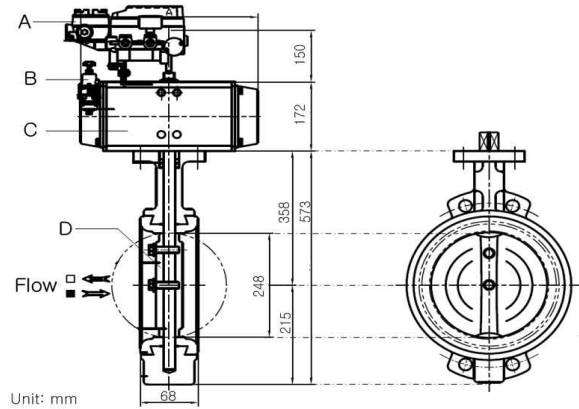


Fig. 2. Discharge Control Device

도(angle)를 결정하는 장치이다. B부분은 Air-Set로 밸브를 열고 닫는데 필요한 5kg/cm^2 이상의 공기압을 Air compressor로 부터 공급받고 불필요한 공기압을 배출하는 장치이며, C부분은 Air-Set에서 공급받은 압축공기를 이용하여 밸브를 움직여주는 실린더 역할의 공압작동 장치이다. D부분은 가운데 축을 중심으로 양 날개모양을 가진 disk이며, A에서 결정된 각에 따라 disk를 움직여 유량을 조절하는 장치이다. 본 연구에서는 유량조절밸브를 통해 0 l/s 에서 110 l/s 까지의 유량을 실험수로로 자유롭게 공급 할 수 있도록 하였다.

2.2 수문곡선 재현 방법

부정류 유량공급장치를 이용하여 수문곡선을 재현하는 방법은 우선 재현하고자하는 목표 수문곡선을 결정한 다음, 유량조절밸브의 개폐율(valve opening rate)과 공급 유량의 관계를 파악하고, 이 자료를 근거로 목표 수문곡선 재현에 필요한 시간에 따른 개폐율 곡선을 작성하여 유량조절모듈에 입력하였다. 개폐율 곡선은 1초 단위로 작성되었으며 유량조절밸브의 최소 조절단위 또한 1초로 설정하였다. 부정류 흐름을 발생시킨 후, 목표 수문곡선을 재현하고자 하는 단면에서 초음파수위계를 이용하여 1초마다 수위를 측정하였다. 실험이 끝나게 되면 측정된 수위자료는 수위-유량관계(rating curve)를 이용하여 측정된 수위를 유량으로 환산하고 수문곡선을 작성한 다음 목표 수문곡선과 비교하였다. 유량조절밸브로 조절한 유량이 목표 단면까지 도달하는데 걸리는 시간은 밸브와 목표 단면 사이의 거리와 변화시키고자 하는 유량 범위에 따라 달라질 수 있다. 그러나 이는 부정류 수문곡선의 재현이 시작되는 시점에만 영향을 미칠 뿐 전체적인 수문곡선 재

현에는 영향을 미치지 않는다. 다만 합류부 실험과 같이 둘 이상의 수문곡선을 동시에 재현해야 하는 경우에는 각각의 수문곡선에 대한 도달시간을 고려하여 유량조절모듈 시간차를 조절해야 할 것으로 판단된다. 참고로 본 연구에서 제작한 수로에서는 유량조절밸브에서 유량을 변화시켰을 때 재현 단면의 초음파수위계에서 변동량을 감지하는데 까지 걸리는 도달시간은 약 7초인 것으로 확인하였다.

3. 수리실험 조건 및 재현 정확도 평가 방법

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 길이 15m, 폭 1m, 하상 경사 0.002의 직사각형 단면의 직선수로에서 부정류 유량 공급장치를 이용한 수문곡선 재현 및 정확도 분석을 수행하였다. No. 15 단면에 목표 수문곡선의 재현여부를 확인하기 위해 초음파수위계를 설치하여 수위 변화를 측정하였다. 또한 측정된 수위를 유량으로 변환시키기 위해 No. 15 단면의 수위-유량 관계를 Fig. 3과 같이 작성하였다.

본 연구에서 재현한 수문곡선은 총 4가지 형태이다. Fig. 4(a)는 사각형 형태의 수문곡선으로 짧은 시간동안 유량이 급격히 증가하고 감소하는 형태의 수문곡선이고, Fig. 4(b)는 삼각형 형태의 수문곡선으로 침두 유량까지는 증가하다가 침두 유량 발생 후 감소하는 형태의 수문곡선이다. Fig. 4(c)는 Fig. 4(b)의 수문곡선이 연속해서 발생하는 수문곡선으로 유량의 증가와 감소를 반복하는 형태의 수문곡선이다. 마지막으로 Fig. 4(d)는 일반적인 종(bell) 모양의 홍수 수문곡선이다. 홍수시 수문곡선은 시간에 따른 유량 변화가 불규칙하기 때문에 본 연구에서는 현실적으로 발생 가능성은 적지만 유량 변화가 급한 사각형 또는 삼각형 형태의 수문곡선 또한 재현 검증 대

상으로 선정하였다.

수문곡선의 재현 정확도를 평가하기 위해 Fig. 5와 같

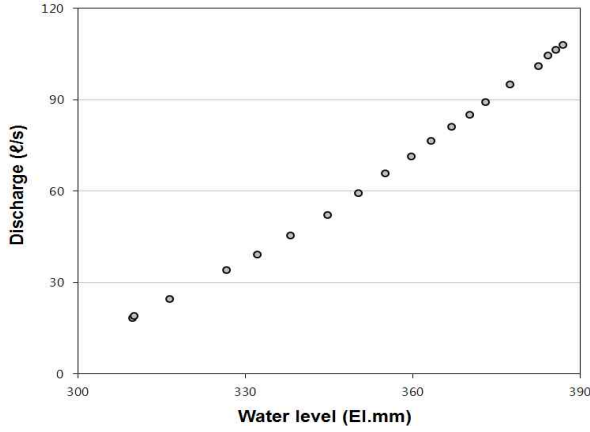


Fig. 3. Rating Curve at No. 15 Section

이 변수들을 정의하고 목표 수문곡선과 재현 수문곡선의 오차를 Eq. (1)과 Eq. (2)와 같이 계산한 후 정확도를 평가 하였다.

$$\text{Error for Water Surface Level (EWL, \%)} = \frac{h_M - h_T}{h_{\max} - h_{\min}} \times 100 (\%) \quad (1)$$

$$\text{Error for Discharge (EQ, \%)} = \frac{Q_M - Q_T}{Q_{\max} - Q_{\min}} \times 100 (\%) \quad (2)$$

여기서, h_M 은 측정 수위, h_T 는 목표 수위이고, Q_M 은 측정 유량, Q_T 는 목표 유량이다. 그리고 h_{\max} 와 Q_{\max} 는 목표 수문곡선상의 최대수위와 최대유량, h_{\min} 와 Q_{\min} 은 목표

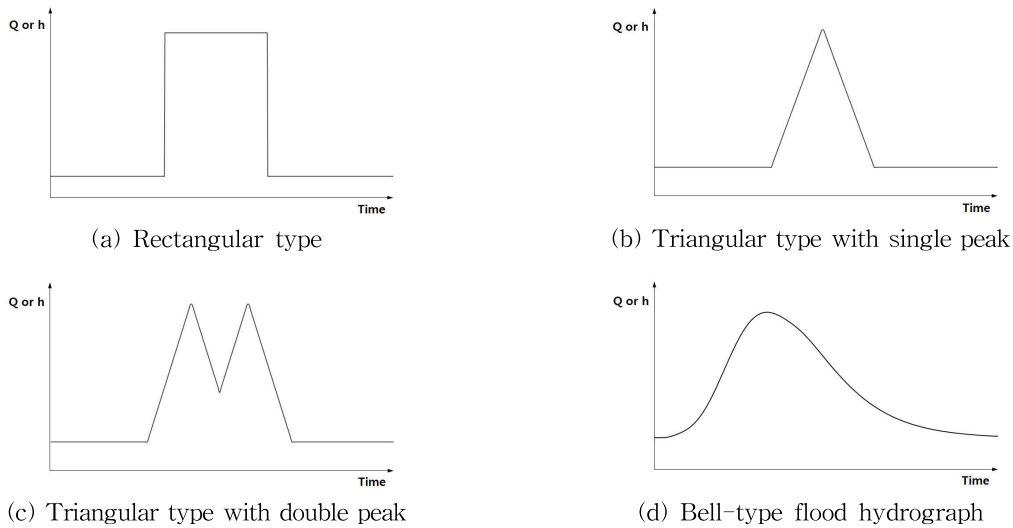


Fig. 4. Shape of Target Hydrographs

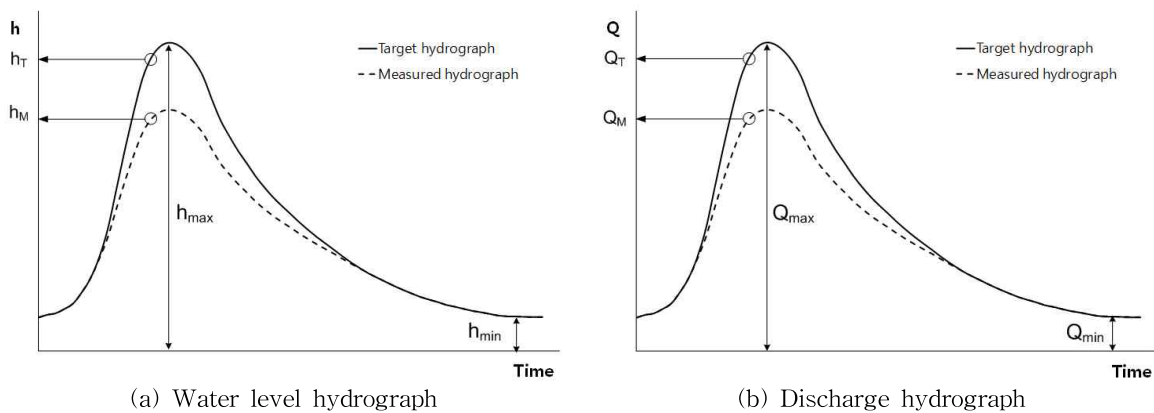


Fig. 5. Sketch of the Relative Error Calculation for Water Level and Discharge Hydrographs

수문곡선상의 최소 수위와 최소유량이다.

목표 수문곡선과 재현 수문곡선간의 RMSE (Root Mean Square Error)를 Eq. (3)과 같이 산정하여 수문곡선 전체의 재현 형태에 대한 정확도를 평가하였다.

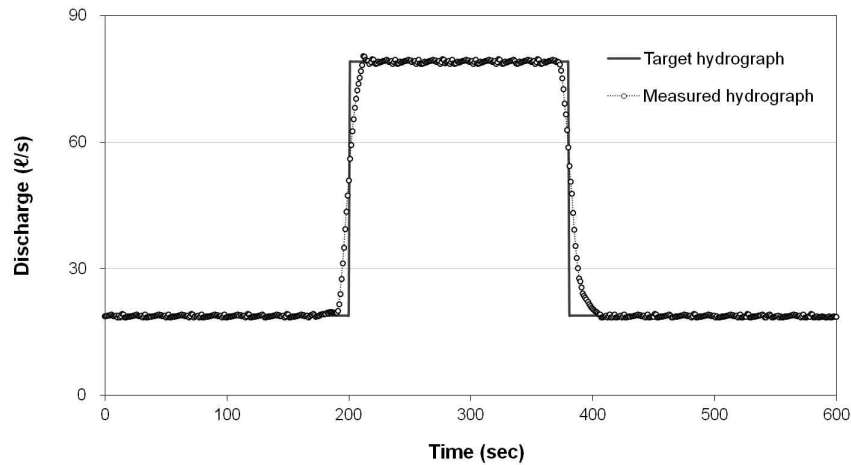
$$RMSE(mm \text{ or } \ell/s) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [h_M - h_T]^2} \text{ or } \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Q_M - Q_T]^2} \quad (3)$$

4. 부정류 유량공급장치의 수문곡선 재현 정확도 분석

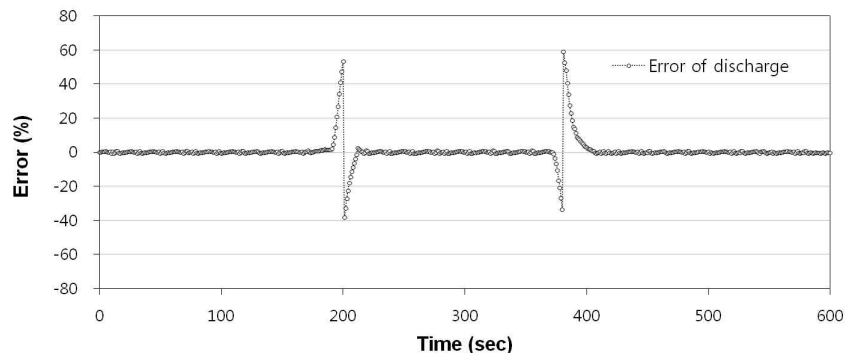
4.1 사각형 형태의 수문곡선 재현

유량이 짧은 시간동안 급격히 증가하고 감소하는 수문곡선에 대한 재현능력을 평가하기 위하여 Fig. 6과 같은 사각형 형태의 유량 수문곡선을 재현하였다. 사각형 형태의 수문곡선은 실험시작 후 200초에서 19 ℓ/s에서 79 ℓ/s로 유량이 급격하게 증가하고, 다시 380초에서 79 ℓ/s에서 19 ℓ/s로 유량이 급격하게 감소하도록 설정하였다. 이와

같은 목표 수문곡선은 현실적으로 발생하기 어려운 형태이지만 부정류 유량공급장치의 재현능력을 평가하기 위해 설정된 수문형태이다. 수문곡선은 수위 수문곡선이 재현된 후 수위-유량관계를 이용하여 유량으로 환산되기 때문에 수위와 유량에 대한 목표 수문곡선과 재현 수문곡선을 비교한 결과 동일한 결과를 나타낸다. 따라서 본 논문에서는 유량 수문곡선에 대한 재현 정확도를 중점적으로 서술하겠다. 유량 수문곡선의 재현 결과를 살펴보면 유량이 급격하게 증가 또는 감소하는 구간에서는 오차가 최대 35 ℓ/s 정도 나타났으며, 침투 홍수 발생 구간에서는 최대 1 ℓ/s 이내의 차이를 보였다. 즉, 유량이 급격히 증가 또는 감소하는 구간에서는 -38%에서 +60% 정도로 비교적 큰 오차를 보였으며, 침투홍수 발생 구간에서는 ±1% 정도의 오차를 나타냈다. 이와 같이 유량이 급격히 증가 또는 감소하는 구간에서 오차가 발생한 원인은 유량공급장치에서 변화시킬 수 있는 최대 유량이 초당 약 ±5.5 ℓ/s인 반면 본 연구에서 가정한 사각형 형태 수문곡선의 최대 유량변화율은 초당 ±60 ℓ/s이기 때문인 것으로 판단된다. 또한 유량이 증가하는 구간과 감소하는 구간을 비교해 보면 최대 오차는 유량



(a) Discharge hydrograph



(b) Error analysis

Fig. 6. Analysis Result of Rectangular Discharge Hydrograph

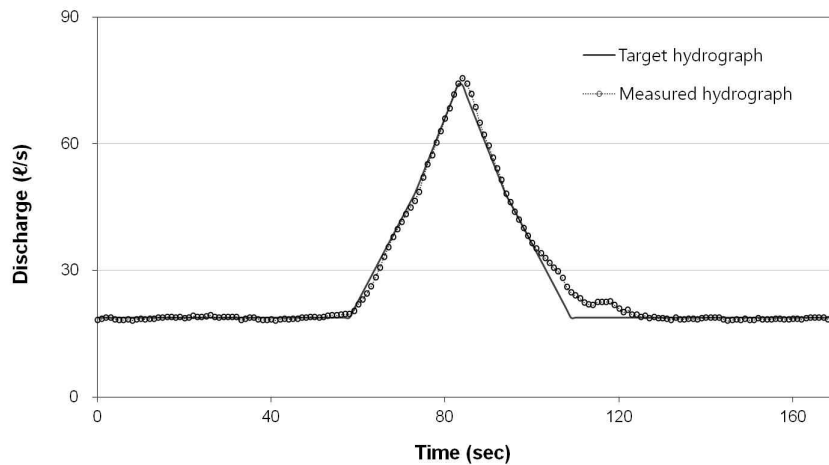
이 감소하다가 초기유량으로 수렴하는 구간에서 발생하였다. 이는 하도내 유량이 하류로 빠져나가지 못하여 지체되는 현상으로 이러한 배수효과로 인해 유량 감소 곡선의 경사가 좀 더 완만하게 형성되었기 때문인 것으로 판단된다. 수문곡선 전체에 대한 RMSE를 산정한 결과 사각형 형태의 유량 수문곡선 형태는 $4.3 \ell/s$ 정도의 오차를 나타냈다.

4.2 삼각형 형태의 수문곡선 재현

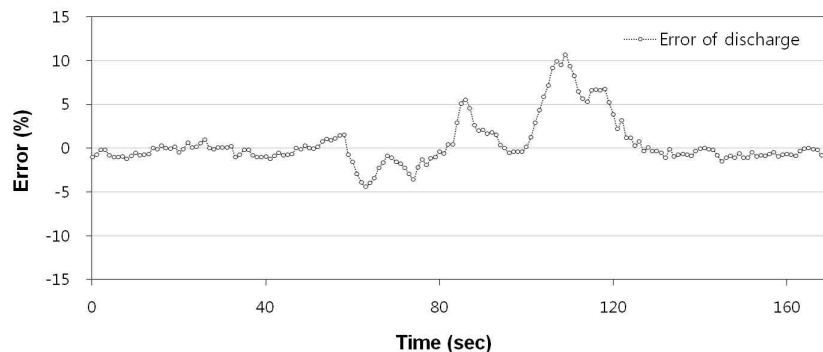
침두유량 발생 시간이 매우 짧은 삼각형 형태의 수문곡선에 대한 부정류 유량공급장치의 재현능력을 평가하기 위하여 Fig. 7과 같은 단일 침두의 삼각형 형태 유량 수문곡선을 재현하였다. 삼각형 형태의 수문곡선은 60초에서 $19 \ell/s$ 를 기준으로 유량이 증가하기 시작하여, 84초에서 $74 \ell/s$ 의 침두 유량을 보이고, 다시 $19 \ell/s$ 로 유량이 감소하도록 설정하였다. 유량 수문곡선의 재현 결과를 살펴보면 대부분의 구간에서 5% 이내의 오차를 보였으며, 유량이 상승하는 구간에서는 최대 $2.4 \ell/s$ 정도의 차이를 보였다. 유량이 감소하는 구간에서는 최대 $6 \ell/s$ 정도의 차이를 보였고, 침두 유량은 $1.6 \ell/s$ 정도의 차이를 보였다. 즉, 유량이

증가하는 구간에서는 최대 -4.4% 의 오차를 보였으며, 유량이 감소하는 구간에서는 최대 $+10.7\%$ 정도의 오차를 나타냈고, 침두 유량은 $+3\%$ 정도의 오차를 나타냈다. 사각형 형태의 수문곡선 재현 결과와 마찬가지로 유량 감소가 끝나는 구간의 경사가 완만하게 재현되어 오차가 크게 나타났다. 또한 수문곡선 전체에 대한 RMSE는 $1.51 \ell/s$ 정도로 사각형 형태의 수문곡선 보다는 높은 재현 정확도를 나타냈다.

유량이 감소하다가 다시 증가하는 구간을 포함하는 수문곡선에 대한 재현능력을 평가하기 위해 Fig. 8과 같은 이중 침두를 갖는 삼각형 형태의 수위 및 유량 수문곡선을 재현하였다. 이중 침두를 갖는 삼각형 형태의 수문곡선은 56초에서 $18.9 \ell/s$ 의 유량을 기준으로 증가하다가 81초에서 $74 \ell/s$ 에서 유량이 감소하기 시작하고, 98초에서 $36 \ell/s$ 에서, 다시 침두 유량 $74 \ell/s$ 까지 증가하다가 다시 $18.9 \ell/s$ 의 초기 유량으로 감소하도록 설정하였다. 목표 수문곡선과 재현 수문곡선을 비교한 결과 처음 유량이 증가하여 침두 유량까지 상승하는 구간에서는 최대 $2.8 \ell/s$ 정도 차이를 보였으며 이는 -5.2% 의 오차에 해당되는 것으로 나타났고, 침두 유량에서 $36 \ell/s$ 의 유량까지 감소하는 구간에서는 최

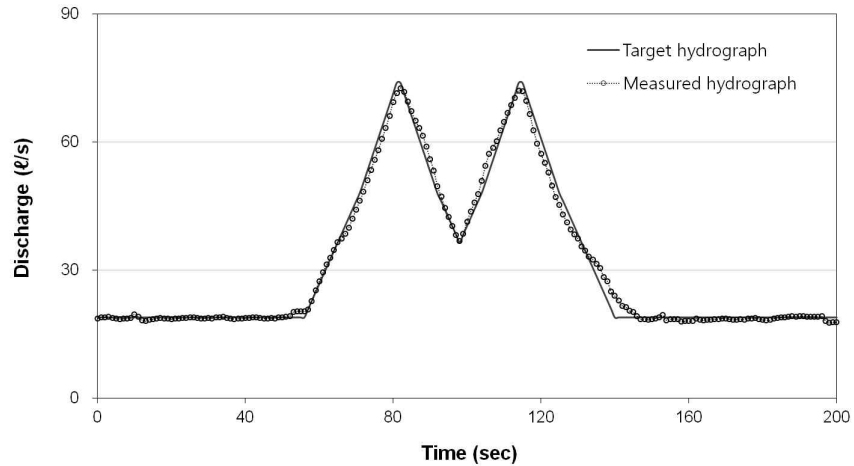


(a) Discharge hydrograph

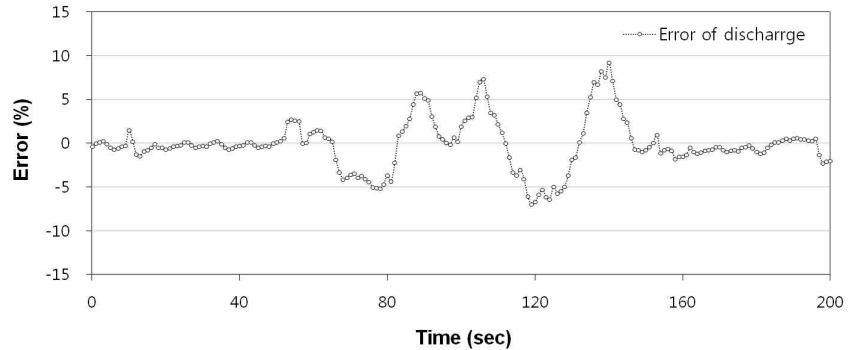


(b) Error analysis

Fig. 7. Analysis Result of Triangular Discharge Hydrograph with Single Peak



(a) Discharge hydrograph



(b) Error analysis

Fig. 8. Analysis Result of Triangular Discharge Hydrograph with Double Peak

대 3.1 l/s 정도 차이를 보였으며 이는 +5.7%의 오차에 해당하는 것으로 나타났다. 다시 첨두 유량까지 증가하는 구간에서는 최대 4 l/s 정도 차이를 보였으며 이는 +7.3%의 오차에 해당하는 것으로 나타났고, 다시 초기유량인 18.9 l/s로 감소하는 구간에서는 최대 5 l/s 정도 차이를 보였으며 이는 +9.2%의 오차에 해당하는 것으로 나타났다. 그리고 첫 번째 첨두 유량의 재현 결과를 살펴보면 유량이 2.4 l/s 정도 차이를 보였으며 이는 -4.4% 오차에 해당하고, 두 번째 첨두 유량 재현 결과를 살펴보면 유량이 2 l/s 정도 차이를 보였으며 이는 -3.7% 오차에 해당하는 것으로 나타났다. 유량이 감소하다가 다시 증가하는 변곡점에서의 유량 재현 결과를 살펴보면 0.36 l/s 정도 차이를 보였으며 이는 0.7% 정도에 해당하는 것으로 나타났다. 또한 수문곡선 전체에 대한 RMSE는 1.58 l/s 정도로 첨두 홍수가 한번 발생한 경우와 비슷한 재현 정확도를 나타냈다.

4.3 홍수 수문곡선 재현

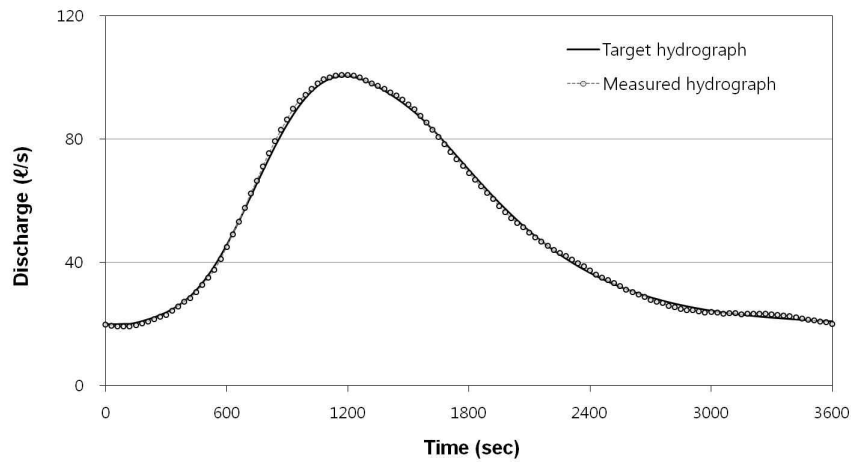
일반적인 종(bell) 형태의 홍수 수문곡선에 대한 재현

능력을 평가하기 위하여 Fig. 9와 같은 유량 수문곡선을 재현하였다. 홍수 수문곡선은 120초에서 100.3 l/s의 첨두 유량을 갖도록 설정하였으며, 수문곡선의 경사는 유량이 증가할 때보다 감소할 때의 기울기를 좀 더 완만하게 결정하였다. 유량 수문곡선의 재현 결과를 살펴보면 유량이 증가하는 구간에서는 최대 1.5 l/s 정도의 차이를 보였으며, 유량이 감소하는 구간에서는 최대 1.2 l/s 정도의 차이를 보였다. 즉, 유량이 증가하는 구간에서는 최대 1.9%의 오차를 보였으며, 유량이 감소하는 구간에서는 초기 유량과 만나는 구간에서 최대 -1.3% 정도의 오차를 나타냈다. 그리고 첨두 유량 발생 시점에서는 최대 0.5 l/s의 차이를 보였으며 이는 0.6%의 오차에 해당하는 것으로 나타났다. 부정류 유량공급장치를 이용하여 홍수수문곡선을 재현하는 경우에는 유량 변화에 따라 수로의 수면에 미소한 파문이 발생하였다. 이와 같은 수면파문의 변화는 약 ± 1 mm 정도였으며 이를 유량으로 환산하였을 경우 저유량에서는 ± 0.9 l/s 정도, 고유량에서는 ± 2.0 l/s 정도의 차이였다. 종(bell) 형태의 홍수 수문곡선에 대한 재현 결

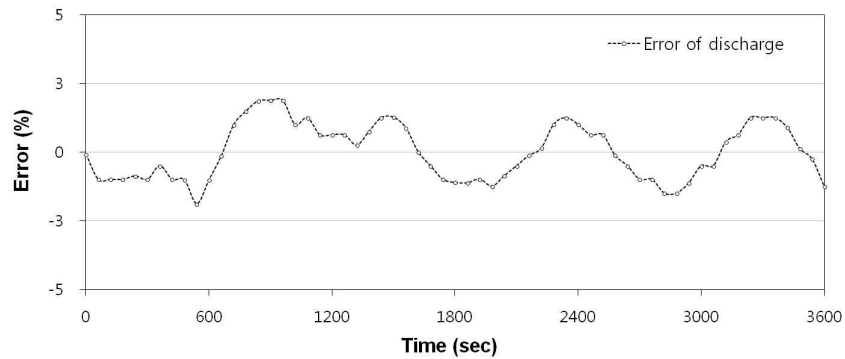
과, 최대 1.5 l/s의 유량 차이가 발생한 것은 이러한 부정류 수면 곡선에서의 수면과문으로 인한 불확실성에 포함될 수 있는 매우 작은 오차인 것으로 나타났다. 수문곡선 전체에 대한 RMSE는 0.81 l/s로 본 연구에서 분석한 수문형태 중 가장 높은 재현 정확도를 나타냈다.

4.4 수문곡선 형태별 재현 정확도 분석

부정류 유량공급장치를 이용한 수문곡선 형태별 재현 정확도를 분석하기 위해 Table 1과 같이 총 4가지 형태의 수문곡선에 대한 최대 오차와 RMSE를 정리하였다. 유량



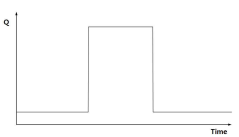
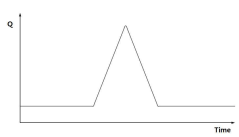
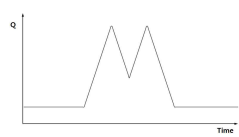
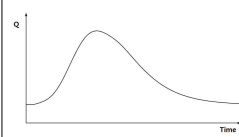
(a) Discharge hydrograph



(b) Error analysis

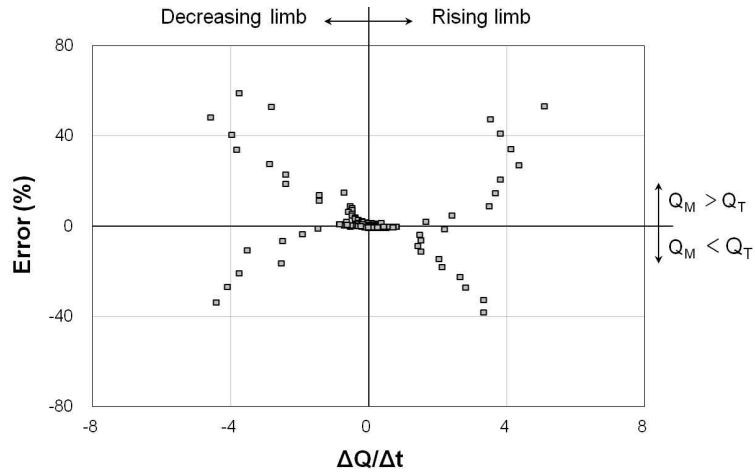
Fig. 9. Analysis Result of Flood Discharge Hydrograph

Table 1. Comparison of Analysis Results for Various Hydrograph Type

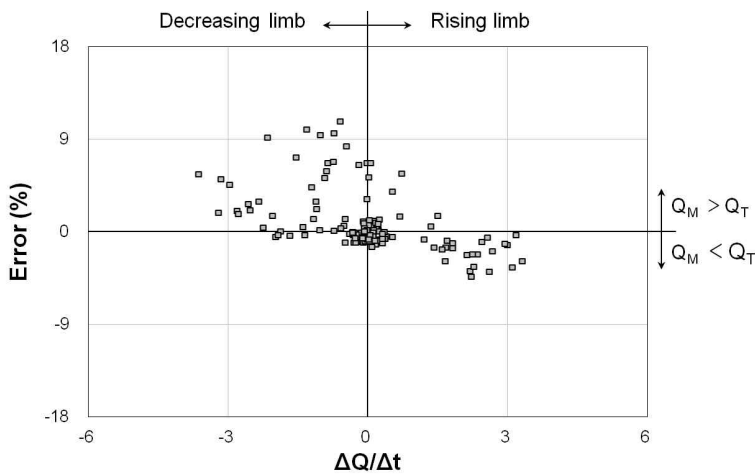
Contents	Rectangular hydrograph	Triangular hydrograph I	Triangular hydrograph II	Bell-type flood hydrograph
Hydrograph				
Base time	180 sec	50 sec	80 sec	3600 sec
Peak flow	79 l/s	74 l/s	74 l/s	100 l/s
Maximum error	+59%	+10.7%	+9.2%	±1.9%
RMSE (l/s)	4.3 l/s	1.51 l/s	1.58 l/s	0.81 l/s

이 급격하게 증가 또는 감소하는 형태의 사각형 수문곡선 재현 오차는 최대 59% 정도로 가장 크게 나타났으며, 삼각형 형태의 수문곡선은 단일첨두와 이중첨두 형태 모두

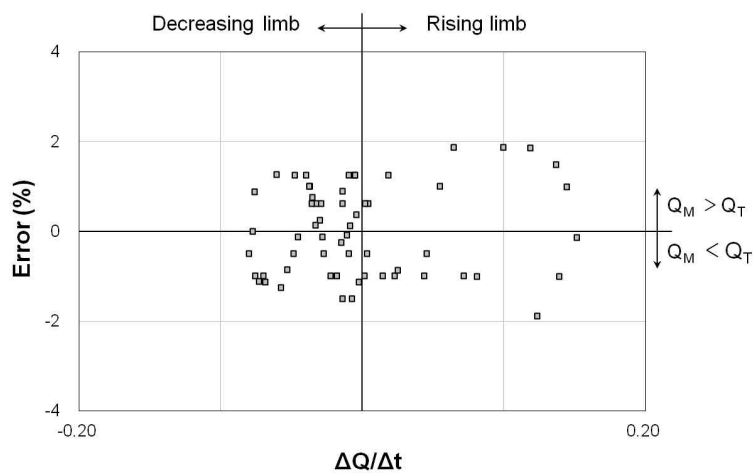
약 10% 정도의 재현 오차를 나타냈다. 또한 중 형태의 홍수 수문곡선 재현 오차는 약 2% 정도로 나타났다. 사각형과 삼각형 형태의 수문곡선과 같이 유량이 급격하게 증가



(a) Rectangular hydrograph



(b) Triangular hydrograph



(c) Bell-type flood hydrograph

Fig. 10. Error Analysis of Various-type Hydrographs

또는 감소하는 경우의 수문곡선 재현 정확도는 상대적으로 낮은 것으로 나타났으며, 종 형태의 홍수 수문곡선과 같이 완만하게 유량이 증가 또는 감소하는 경우의 수문곡선 재현 정확도는 높은 것으로 나타났다. 특히 종 형태의 홍수 수문곡선을 제외한 나머지 수문곡선의 경우 침투 유량을 지나 유량이 감소하여 기저유량과 만나는 구간에서 최대 오차가 발생하는 것으로 나타났다. 또한 RMSE 계산 결과 사각형 형태의 수문곡선의 경우는 4.3 l/s로 침투 유량 대비 5.4% 정도로 나타났고 삼각형 형태의 수문곡선은 약 1.6 l/s로 침투 유량 대비 2.2% 정도로 나타났으며, 종 형태의 홍수 수문곡선은 0.81 l/s로 침투 유량 대비 0.81% 정도로 나타나 부정류 유량공급장치의 수문곡선 재현 정확도가 비교적 높은 것으로 나타났다.

부정류 유량공급장치를 이용한 수문곡선 형태별 재현 결과를 좀 더 면밀히 분석하기 위해 Fig. 10과 같은 형태의 그래프를 도시하였다. Fig. 10은 본 연구에서 재현한 사각형, 삼각형, 종(bell) 형태의 수문곡선 오차를 도시한 것이며, x 축은 단위시간에 따른 유량 변화의 비($\Delta Q/\Delta t$)를 나타내는 것으로 0보다 큰 경우는 부정류 수문곡선 상에서 유량이 증가할 때인 유량 상승구간(rising limb)을 의미하며 0보다 작은 경우는 유량이 침투 값을 지나 하강할 때를 나타내는 유량 감소구간(decreasing limb)을 의미한다. 또한 오차가 0보다 큰 경우는 유량공급장치에 의해 재현된 유량이 설정된 목표유량 값보다 큰 경우를 나타내며 오차가 0보다 작은 경우는 반대의 경우를 나타낸다. 따라서 Fig. 10에 의하면 사각형 형태 수문곡선의 경우는 단위시간에 따른 유량변화 폭이 클수록 오차가 커지는 것을 확인할 수 있었다. 삼각형 형태 수문곡선의 경우는 유량이 상승하는 경우 보다 하강하는 경우의 오차가 큰 것으로 나타났으며 전반적으로 유량공급장치에 의해 재현된 유량이 목표 수문곡선상의 유량보다 크게 나타났다. 또한 종(bell) 형태 홍수 수문곡선의 경우 유량 상승구간에서의 오차가 유량 하강구간에서 보다 크게 나타났으나 이는 하강구간의 유량변화율이 상승구간 때보다 완만하기 때문인 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 개수로에서의 부정류 흐름 상태에 대한 수리실험을 위해 수문곡선의 재현이 가능한 부정류 유량공급장치를 개발하였으며, 이를 이용하여 여러 가지 형태별 수문곡선의 재현 정확도를 분석하였다. 본 연구에서 도출된 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서는 개수로에서 유량조절밸브의 개폐율 자료를 이용하여 자동으로 수문곡선을 재현할 수 있도록 함으로써 입력되는 다양한 형태의 부정류 흐름을 발생시킬 수 있는 유량공급장치를 개발하였다.
- 2) 부정류 유량공급장치를 이용한 수문곡선 형태별 재현 정확도를 분석하기 위해 총 4가지 형태의 수문곡선에 대한 재현 오차와 RMSE를 검토하였다. 유량이 급격하게 증가 또는 감소하는 형태의 사각형 수문곡선 재현 오차는 최대 59% 정도로 가장 크게 나타났으며, 삼각형 형태의 수문곡선은 단일침투와 이중침투 형태 모두 최대 10% 정도의 재현 오차를 나타냈다. 또한 종 형태의 홍수 수문곡선 재현 오차는 최대 1.9% 정도로 나타났다. RMSE 계산 결과 사각형 형태의 수문곡선의 경우는 4.3 l/s로 침투 유량 대비 5.4% 정도로 나타났고 삼각형 형태의 수문곡선은 약 1.6 l/s로 침투 유량 대비 2.2% 정도로 나타났으며, 종 형태의 홍수 수문곡선은 0.81 l/s로 침투 유량 대비 0.81% 정도로 나타났다.
- 3) 부정류 수문곡선의 형태를 단위시간에 따른 유량 변화의 비로 나타내어 오차를 분석한 결과 단위시간에 따른 유량변화 폭이 클수록 오차가 커지는 것을 확인할 수 있었고, 수문곡선 재현에 있어서 유량이 상승하는 경우보다 하강하는 경우의 오차가 상대적으로 크게 나타남을 확인하였다.

마지막으로 본 연구를 통해 개발된 부정류 유량공급장치는 단순형태의 삼각 혹은 사각형 형태의 수문곡선 재현보다는 일반적인 종(bell) 모양의 홍수 수문곡선을 재현하는데 높은 정확도를 나타냈으며 최대 오차는 1.9%인 것으로 나타났다. 따라서 여러 형태의 부정류 수문곡선 재현이 필요한 수리실험에 활용도가 높을 것으로 판단되며 특히 강변저류지와 지하저류지 등과 같이 시간에 따른 홍수 조절효과 혹은 수위저감효과 등을 분석하기 위한 기초자료 획득 및 검·보정에 적극적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 김원, 우효섭, 김양수 (1996). “1차원 St. Venant방정식을 이용한 한강 하류부 하도의 홍수류 특성 분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제29권, 제1호, pp. 163-179.
- 윤용남, 박무중 (1992). “수리학적 홍수추적에 의한 댐 방류시 하류수위 및 주요 하도구간별 홍수도달 시간의 예측.” **한국수문학회지**, 한국수문학회, 제25권, 제3호, pp. 115-124.
- 우효섭 (2001). 하천수리학. 청문각
- 이정규, 전세호 (2004). “부정류 모형을 이용한 한강의 수리학적 홍수추적에 관한 연구.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제24권, 제4B호, pp. 301-310.
- 이종태 (1982). “Preissmann 기법에 의한 1차원 부정류의 해석.” **한국수문학회지**, 한국수문학회, 제15권, 제1호, pp. 57-62.
- 이종태, 한건연, 서병하 (1993). “한강의 홍수규모에 따른 인도교 수위의 조석영향분석.” **한국수문학회지**, 한국수문학회, 제26권, 제2호, pp. 67-77.
- 전민우, 조용수 (2002). “선형저수지모형을 적용한 수리학적 홍수추적.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제35권, 제6호, pp. 787-796.
- 최성욱, 여운광, 주철, 김창완, 오규창 (1991). “양해법과 음해법을 이용한 영산강에서의 부정류해석.” **한국수문학회지**, 한국수문학회, 제24권, 제4호, pp. 49-57.
- Bombar, G., Elci, S., Tayfur, G., Guney, M.S., and Bor, A. (2011). “Experimental and numerical investigation of bed-load transport under unsteady flows.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 137, No. 10, pp. 1276-1282.
- De Sutter, R. (2001). “Simulation of sediment transport during flood events: laboratory work and field experiment.” *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 46, No. 4, pp. 599-610.
- Lee, K.T., Liu, Y.L., and Cheng, K.H. (2004). “Experimental investigation of bed-load transport processes under unsteady flow conditions.” *Hydrological Processes*, Vol. 18, No. 13, pp. 2439-2454.
- Moramarco, T., Fan, Y., and Bars, R.L. (1999). “Analytical solution for channel routing with uniform lateral inflow.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 7, pp. 707-713.
- Moussa, R. (1996). “Analytical Hayami solution for the diffusive wave flood routing problem with lateral inflow.” *Hydrological Process*, Vol. 10, No. 9, pp. 1209-1227.
- Perumal, M., and Ranga Raju, K.G. (1998). “Variable-parameter stage-hydrograph routing method I: Theory.” *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 3, No. 2, pp. 109-114.
- Yen, C.L., and Lee, K.T. (1995). “Bed topography and sediment sorting in channel bend with unsteady flow.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 8, pp. 591-599.

논문번호: 12-020	접수: 2012.02.22
수정일자: 2012.03.21/05.14	심사완료: 2012.05.14