

국내 농업용수로 시스템에 적합한 유량측정법

Water Quantity Measurement Appropriate to Agricultural Canal System of South Korea

강민구* 김진택**
Kang, Min-Goo · Kim, Jin-Taek

1. 머리말

농업용수로시스템에서는 주로 시설물의 노후화, 시공상 결함, 관리 소홀, 자연적인 붕괴 및 파손 등에 의해서 누수가 발생한다. 이를 저감하기 위해서는 문제 지점의 조기 탐색과 수리가 필요하다. 예를 들어, 수로의 시점과 종점의 유량을 측정하여 중간에서 발생하는 문제점을 파악하거나, 수로의 수위를 측정하고 계산된 수위와 비교하여 수로의 이상 유무를 파악할 필요가 있다. 따라서 적절한 방법을 사용하여 용수로의 수위 및 유량을 측정하게 되며, 이를 수로관리에 효과적으로 적용할 수 있는 방법을 개발할 필요가 있다.

국내의 농업용수관리 효율이 낮은 원인 중의 하나는 수로관리 요원과 예산의 부족이다. 현재 용·배수로는 주로 인력으로 시설물을 조작하여 운영되고 있다. 연도별 관리인원 1인당 관리면적을 살펴보면, 1990년에는 125ha, 1997년에는 147ha, 2003년에는 186ha으로

계속적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다(농림부와 한국농촌공사, 2006). 또한, 우리나라의 농업 및 농촌의 특성상 우수한 유지관리 요원을 확보하기 어려운 실정이다. 이와 같은 인력부족으로 인해 효율적인 물관리가 어렵기 때문에 자동 유량측정과 유량조절로 물관리 방식의 전환이 요구되고 있다.

농업용수로시스템의 운영 목적을 지속적으로 달성하기 위해서는 시스템을 주기적으로 평가하고 물리적 상태를 점검해야 한다. 이를 위해서는 수위 및 유량 측정을 통하여 수로 상태를 점검하고 물관리 상태를 평가해야 한다(강민구 등, 1999; 한국관개배수위원회, 2007). 효과적인 농업용수로시스템의 관리를 위해서는 정확도가 높은 수위 및 유량 측정 방법을 국내 여건을 고려하여 선정해야 하며, 측정할 때 발생하는 불확실도를 저감시켜야 한다(김진택 등, 2005). 본 논문에서는 유량자료의 품질보증을 확보하기 위하여 국내 농업용수로의 유량을 정확하게 계측하는 방안을 제시하였다.

* 미래자원연구원 선임연구원 (kmg901@hanmail.net)

** 한국농어촌공사 농어촌연구원 책임연구원 (jtkim@ekr.or.kr)

2. 농업용수로시스템의 수위 및 유량 계측

가. 수위 측정 및 기록

유량을 직접 계측하기 위해서는 고가의 계측 기기가 필요하기 때문에 일반적으로 수위, 유속 및 통수단면적을 측정하여 수위-유량 관계 곡선을 수립하고 이를 사용하여 측정된 수위를 유량으로 환산하는 방법을 사용한다. 수위계는 수위를 측정하는 방법에 따라 부자식, 음파식, 리드식, 압력식, 기포식, 초음파식으로 구분될 수 있으며, 측정 지점의 여건을 고려하여 적절한 장치를 선정해야 한다(건설교통부 수자원국, 2004). 최근에 보급되고 있는 수위계는 자동기록장치를 사용하여 측정된 수위를 기록하므로 연속적인 수위자료를 얻을 수 있으며 이를 해석하여 수로의 이상 유무와 문제점을 파악할 수 있다.

나. 수로의 유량 측정

1) 유량 계측 장비의 선정

용수로 유량 측정 기기로는 위어, 플룸, 수중 오리피스 등이 있으며, 이들 중 적절한 기기를 선정할 때는 ① 수로의 형상 및 기울기와 최대 유량의 범위, ② 제품의 가격과 설치비 및 유지관리비, ③ 기기의 교정 및 조작의 용이성, ④ 기기의 내구성, ⑤ 온도, 습도, 강우, 태양열에 대한 적응성, ⑥ 이동설치의 용이성, ⑦ 외관의 양호 및 품질보증여부 등을 고려해야 한다. 이들을 고려할 경우 위어나 장목 플룸이 다른 계측기기 보다 수로의 유량 측정에 우수한 것으로 판단된다. 표 1은 유량측정 방법에 대해 경제성, 수리특성, 유지관리 등의 항목에 대하여 평가한 결과이다. 광정 위어나 장목 플룸은 유량의 측정 범위, 수두 손실, 정확도, 유사 및 부유물의 통과, 수명, 유지 관리 등의 측면에서 농업용수로의 유량 측정에 적합한 것으로 판단된다.

2) 유량측정 기기의 위치

수로의 유량측정은 상·하류의 영향을 받기 때문에 주변 여건을 고려하여 설치위치를 선정

표 1. 유량측정 장비의 비교(USBR, 2001) (+: 긍정, -: 부정, 0: 중간)

평가항목	예연위어	광정위어	장목플룸	단목플룸	잠수오리피스	음향유속계	유속계	방사수문
정확도	0	0	0	0	0	-	-	-
비용	0	+	0	-	0	0	-	+
> 150 cfs 측정	-	+	+	-	-	0	+	0
< 10 cfs 측정	+	+	+	0	+	-	-	0
흐름 폭	0	+	+	0	-	0	-	-
수두 손실	-	0	0	-	-	+	+	-
라이닝 수로	-	+	+	-	0	0	0	+
비라이닝 수로	0	0	0	0	0	-	-	+
유량 측정	+	+	+	+	+	+	+	+
부피 측정	-	-	-	-	-	0	-	-
유사 통과	-	0	0	0	-	+	+	0
부유물 통과	-	+	+	+	-	+	+	-
유지관리	0	+	+	+	+	-	0	+
시공	-	+	0	-	0	+	+	+
표준화	+	0	0	+	0	-	+	-
현장검증	0	+	+	-	+	-	0	-

해야 한다. 유량측정 기기는 한계류가 발생할 수 있도록 동일한 단면 형상을 갖는 수로가 일정한 길이로 연장된 곳에 설치되어야 한다. 또한, 유량 계측구조물에서 완전 월류가 발생하도록 적당한 낙차가 필요하며, 수로 경사가 작은 곳에 설치하는 것이 적절하다. 플룸이나 위어로 인해 상류 수위가 증가하므로 이들을 설치한 후에 상류에서 제방 월류가 발생하지 않도록 해야 한다. 유량 계측구조물에서 완전 월류가 발생하는 것을 보장하기 위해 하류 수위 상승에 따라 위어의 잠수가 발생하지 않도록 해야 한다. 또한, 계측 구조물을 설치한 지점에서 누수가 발생하지 않아야 하며, 설치하기 전에 제방의 안전을 고려해야 하고, 부유물이 자료 수집 및 통수에 영향을 미치지 않도록 해야 한다.

다. 수위-유량 관계 수립 및 활용

정확한 수위-유량 관계 곡선을 수립하기 위해서는 수로에서 넓은 범위의 유량을 측정해야 한다. 관개기간동안 필요한 용수는 관개가 시작된 이후 점차적으로 증가하는 경향을 나타내므로 이 기간 동안 필요한 모든 범위의 유량을 측정할 수 있다. 유속 측정 지점의 수로바닥은 일반적으로 영구적으로 안정되어야 하며, 관개기간 동안 퇴적이나 수초의 성장이 없다면 비교적 정확한 수위-유량 관계를 수립할 수 있다. 퇴적이거나 수초의 성장은 수로의 유량을 감소시키며, 이의 영향은 관개기간 후반부에 주로 나타나며, 유량측정에서 가장 큰 오류를 발생시킨다. 따라서 관개기간의 초기에는 깨끗한 상태의 수위-유량 관계 테이블을 이용하고, 관개기간의 후기

에는 변화된 상태를 반영한 수위-유량 관계 테이블을 이용한다. 또한, 관개기간 동안 퇴사나 수초를 제거하면 새로운 수위-유량 관계 테이블을 수립해야 한다.

3. 국내 농업용수로시스템의 유량측정

가. 계측구조물 선정

농업용수로시스템의 정확한 유량계측을 위한 계측구조물을 선정하기 위해 국내·외 문헌과 자료를 검토하여 국내여건에 적합한 예연 위어, 2차원 3단면 위어, 장목 플룸을 검토하였다. 예연 위어는 최근 까지 많이 적용이 되고 있으며, 미국 USBR의 water measurement manual과 같은 문헌에 정확한 유량 측정과 유량식의 오차를 줄이기 위한 다양한 위어의 제원들이 제시되어 있다. 예연 위어는 표 1에 나타난 것과 같이 고유량 보다는 저유량 측정에 용이하다. 2차원 3단면 위어는 설치가 간단하며, 수로 상태를 고려하여 계측구조물의 설계와 현장 시공이 가능하다. 장목 플룸은 광정 위어와 함께 개수로 유량 측정에 용이한 장비로 알려져 있으며, 다른 계측구조물 보다 경제적이며 시공이 용이하다. 또한, 장목 플룸의 설계와 관련된 매뉴얼과 프로그램이 보급되고 있어 실무에 적용이 용이하다. 본 연구에서는 위어공식에 의해 산정된 유량과 2차원 3단면 위어를 통해 측정된 유량을 비교하였으며, 동일한 실측자료를 이용하여 장목 플룸을 설계하고 유량산정식과 실측자료를 비교하였다.

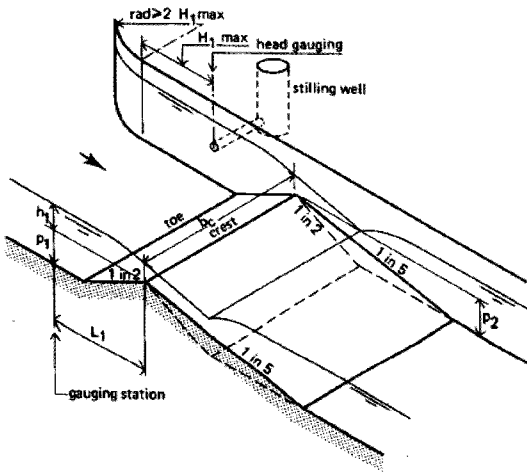


그림 1. 2차원 3단면 위어의 구조(Bos, 1989)

나. 2차원 3단면 위어

1) 특징

2차원 3단면 위어는 Crump 위어라고도 불리며 1952년에 E. S. Crump에 의해서 처음 개발되었다. 그림 1과 같이 이 위어는 흐름 방향에 대하여 상류에서 1:2, 하류에서 1:2나 1:5의 경사를 갖는다. 두 개의 다른 경사를 갖는 단면이 합쳐지는 부분은 흐름 방향에 수평인 월류정이 된다. 월류정은 프리캐스트 콘크리트로 만들어 지거나 부식이 되지 않는 금속판으로 만들어진 다(Bos, 1989).

2차원 3단면 위어의 유량 산정 공식은 식 (1) 과 같다.

$$Q = C_d C_v \frac{2}{3} (2g)^{0.5} b_c h_e^{1.5} \quad (1)$$

여기서, h_e 는 월류정 위의 유효 수두로 $h_e = h_1 + K_h$ 이다. K_h 는 실험값이며, 1:2/1:5 위어는 0.0003이며, 1:2/1:2 위어는 0.00025이다. C_d 는

유량 계수이며, H_1/p_2 의 함수이다. C_v 는 접근 속도 계수이다. 이들 계수들은 위어의 제원과 수로 상태에 따라 제시되어 있으며, 수로 특성을 고려한 설계가 가능하다. 2차원 3단면 위어는 월류정에 비부식성 금속을 삽입하며, 잘 관리된 위어의 h_1 의 최소한계는 0.03m 이다. 프리캐스트 콘크리트나 이와 유사한 재료로 만들어진 월류정을 갖는 위어의 h_1 은 0.06m 보다 커야 한다. 위어 측면 경계층의 영향을 적게 하기 위하여 위어 폭 b_c 는 0.30m 보다 커야하며, b_c/H_1 비는 2.0 이상이어야 한다. 예민하고 일정한 유량 계수를 얻기 위해서 1:2 위어는 H_1/p_2 가 1.25를 초과하지 않아야 하고 1:5 위어는 그 비가 3.0보다 작아야 한다.

2) 설치 및 수리 실험

농업용수로의 유량 계측에 대한 2차원 3단면 위어의 적용성을 검토하기 위하여 계측구조물 및 유량계를 실제 농업용수로에 설치하여 유량을 측정하였다. 대상 용수로는 용덕저수지의 간선수로인 용덕간선이다. 용덕간선은 2000년부터 지속적인 유량을 측정하고 있는 수로이며,

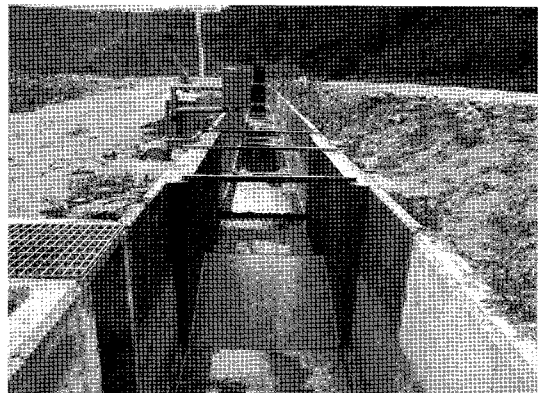


그림 2. 용덕간선에 설치된 2차원 3단면 위어

수위-유량 관계가 안정적으로 확보된 것으로 판단된다. 그림 2는 용덕간선에 설치된 2차원 3단면 위어를 나타낸 것이다. 계측구조물의 성능 시험을 위하여 월류정을 기준으로 하여 수위를 관측하고 수로의 유량을 측정하였다. 측정된 유량의 정확성을 평가하기 위하여 위어 공식에 의해 산정된 유량과 측정된 값으로 유도된 수위-유량 관계에 의해 산정된 유량을 비교하였다. 위어 공식에 의한 유량은 고수위에서 관측유량보다 다소 작은 값을 나타내고 저수위에서는 관측유량보다 다소 큰 값을 나타냈으나 수립된 수위-유량 관계식과 위어 공식에 의한 유량은 비교적 유사한 경향을 나타냈다.

다. 장목 플룸

1) 장목 플룸의 구조 및 장점

장목 플룸은 상류 흐름을 사류 흐름으로 바꾸도록 설계되며, 목 부위에서 단면을 좁게 하거나 수로 바닥을 높여서 한계류가 형성되도록 한다. 한계 수심에서는 에너지가 최소화되며 수심과 유량 사이에 직접적인 관계가 형성된다. 그러나 유량에 따라 한계 수심을 측정하기 어렵기 때문에 플룸의 상류 수심을 측정하여 유량을 산정한다.

장목 플룸은 흐름 조절 영역에서 평행한 유선을 만들 정도로 충분히 긴 목 부분으로 유량을 조절한다. 장목 플룸은 다양한 단면 형상에 사용할 수 있으며, 수로의 기하학적 형상에 대부분 맞출 수 있다. 수정 광폭 월류정이나 램프 플룸은 장목 플룸의 일종이다(USDA ARS, 2001).

장목 플룸은 접근수로, 수렴 천이영역, 목, 발산 천이영역, 방수로와 같이 5가지 주요소로 구성된다. 장목 플룸은 안정적인 수표면을 만들기 위해서 접근 수로가 필요하다. 접근 수로는 라이닝이 되거나 토공수로도 가능하다. 상류 흐름이 불연속 흐름이나 흐름 분리 없이 목을 향해 부드럽게 가속되는 수렴 천이영역은 평평한 표면으로 구성되거나 둥근 형태가 될 수 있다. 흐름이 한계수심으로 통과하는 목이나 지배단면은 흐름 방향으로 수평이 되어야 하며, 흐름에 대하여 수직 방향으로 어떠한 형상도 사용이 가능하다. 장목 플룸은 목 단면에 존재하는 사류의 속도가 감소하고 에너지가 분산되거나 부분적으로 복원되는 발산 천이영역이 필요하다. 에너지 복원이 필요하지 않다면 단절된 천이영역이 사용될 수 있다. 방수로의 수면고는 수로 운영, 유량, 하류 수로나 구조물의 수리학적 특성의 함수이다. 수면고는 플룸을 통과하는 한계 흐름 조건을 유지하기 위해 필요한 지배단면의

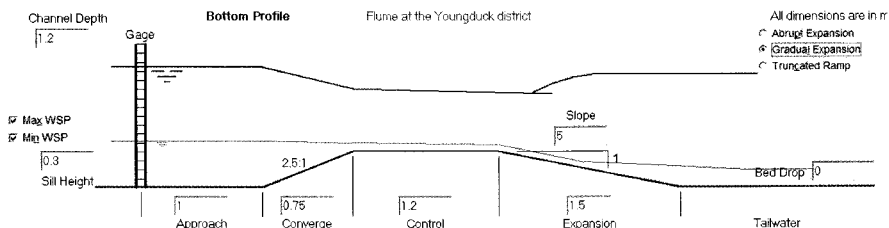


그림 3. 장목 플룸을 설치한 용수로의 종단면과 수면고

표고와 규모를 결정하기 때문에 수로의 수면고 범위는 구조물설계에 중요하다.

장목 플룸은 개수로에 유량측정을 하기 위한 한계 흐름 플룸이나 광정 위어와 유사하다. 장목 플룸은 자연 및 인공 수로의 유량 측정에 다양하게 적용될 수 있다. 이에 비해 파살 플룸은 구조가 복잡하여 시공이 어렵고, 다른 플룸에 비해 유사포착이 쉽다. 장목 플룸의 장점으로 ① 2% 이내의 오차를 내포한 수위-유량 테이블 제공, ② 플룸의 목에는 흐름에 직각 방향으로 다양한 형상을 적용할 수 있으며, 유량의 전 범위를 높은 정확도로 측정할 수 있음, ③ 플룸을 통과할 때 손실 수두가 적음, ④ 부분 잠수 상태에서 유량 측정이 가능함, ⑤ 천이영역으로 부유물 통과 가능, ⑥ 다른 구조물 보다 경제적인, ⑦ 기존 수로에 장착이 쉬움, ⑧ 공장에서 제작한 부품을 현장에서 조립 가능 등이 있다 (USDA ARS, 2001).

2) 장목 플룸 설계 및 적용성 평가

국내 농업용수로 유량측정에 대한 장목 플룸의 적용성을 평가하기 위하여 2차원 3단면 위어가 설치된 용덕저수지의 용수로인 용덕간선 시점부에 적합한 장목 플룸을 설계하여 실측자료와 장목 플룸에 의해 계산된 유량을 비교하였다. 대상 수로에 적합한 장목 플룸을 설계하기 위하여 Wahle에 의해 개발된 설계 프로그램인 WinFlume을 사용하였다. WinFlume은 기존 유량 측정 구조물의 수위-유량 관계 보정과 새로운 측정 구조물의 설계에 사용되고 있다 (USDA ARS, 2001).

그림 3은 설계된 장목 플룸 바닥의 종단면, 최대

유량 및 최소 유량의 수면고 변화를 나타낸 것이다. 장목 플룸의 상류 및 하류 단면은 실제 용수간선에 시공된 단면 형상을 사용하였다. 이와 달리 플룸의 목이 설치된 지점의 단면은 시공의 편리성을 고려하여 사각형 단면을 사용하였다. 통제단면의 폭은 장목 플룸의 흐름 특성을 고려하면서 사용자가 임의로 조정할 수 있으며, 플룸의 목에서 한계류가 형성되도록 해야 한다. 그림 3에 나타낸 수면고의 변화를 살펴보면, 흐름이 통제단면을 통과하면서 한계류를 형성하고 있으며, 상류 수심이 최대로 높은 경우에는 흐름이 통수단면을 단면을 통과한 후에 방수로에서 도수가 뚜렷하게 발생함을 알 수 있다. 그림 4는 장목 플룸의 이론식에 의해서 산정된 계산유량과 관측유량을 비교한 것이다. 그림 4와 같이 관측유량이 계산유량과 유사한 경향을 나타내고 있다. 특히, 저수위 보다 고수위에서 계산된 유량이 관측유량에 근접한 경향을 나타내고 있다.

4. 맺음말

본 연구에서는 농업용수로시스템을 효율적으로

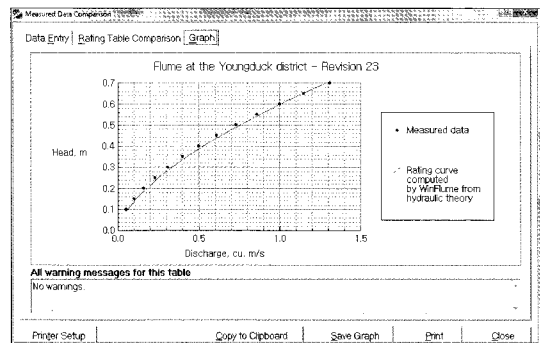


그림 4. 관측유량과 장목 플룸에 의한 계산유량의 비교

관리하기 위해 수로의 수위 및 유량을 측정하고 자료의 질을 확보하는 방안을 고찰하였다. 또한, 국내 여건을 고려한 수로 유량 측정법을 선정하기 위하여 계측 구조물들을 비교하고 실제 적용성을 평가하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 수위 및 유량 관측에 관련된 기존 문헌들을 검토한 결과, 대상 수로에 적합한 계측기기를 선정하기 위해서는 정확도, 비용, 계측할 유량 범위, 수두손실, 현장 조건에 대한 적합성, 유사 및 부유물 통과 능력, 주어진 환경에서 장비의 수명, 시공과 설치 조건, 장비 표준화와 보정, 현장 검증과 보수, 새로운 방법에 대한 사용자 숙달도, 파손 가능성, 주변 환경에 대한 영향 등을 고려해야 하는 것으로 나타났다.

(2) 국내·외의 문헌자료를 고찰하여 국내여건에 적합한 유량 계측구조물로 예연 위어, 2차원 3단면 위어, 장목 플룸 등을 선정하였으며, 관측유량과 계산유량을 비교한 결과 장목 플룸에 의해 계산된 유량이 다른 방법들 보다 관측유량에 가까운 결과를 나타냈다.

농업용수로의 유량관측은 용수로 파손 및 붕괴를 고려한 효율적인 유지관리, 용수관리의 자동화 및 성력화, 용수공급의 효율성 향상 등을 위해서 필요하다. 유량의 측정 범위, 수두 손실, 정확도, 유사 및 부유물의 통과, 유지관리 등의 측면을 고려할 때 국내 농업용수로의 유량측정에는 2차원 3단면 위어과 장목 플룸이 적합한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 강민구, 박승우, 임상준, 1999. 관개용 저수지의 일별 사용량 조사 분석, 1999년 한국농공학회 학술발표회 논문집.
2. 건설교통부 수자원국, 2004. 수문관측매뉴얼.
3. 김진택, 박지환, 구본충, 2005. 농업개수로 유량측정 현황 및 적정 방안 고찰, 2005년도 한국농공학회 학술발표회 논문집.
4. 농림부, 한국농촌공사, 2006. 물부족 시대에 대비한 농업수로 적정 관리기법 연구.
5. 한국관개배수위원회, 2007. 관개배수 수행평가 실무지침.
6. Bos, M. G., 1989. Discharge measurement structure.
7. USBR, 2001. Water measurement manual.
8. USDA ARS, 2001. WinFlume user's manual.

본 연구는 농림수산식품부 농림기술개발사업의 지원에 의해 이루어진 것임.