

태화강 감조부의 저수위 수위-유량곡선 개선 Improvement of Low Water Level Rating Curve in Tidal River Taehwa

조 홍 재* / 황 재 호** / 문 성 준***
Cho, Hong Je / Hwang, Jae Ho / Mun, Sung Jun

Abstract

In tidal rivers, the river level, discharge and tide are interrelated. Therefore, the stage-discharge relation that takes no account of tidal effects is inaccurate. For the calculation of river discharge in low water level, this paper attempts to formulate a multiple regression equation of stage-discharge curve to calculate the river discharge in low water level with variables as river level and differences between sea level and river level. Numerical application were performed on Ulsan gaging station in Taehwa river, and the comparison with existing rating curve equation showed good applicability of this multiple regression equation.
keywords : tidal river, low water level, rating curve, multiple regression analysis

요 지

감조하천에서는 수위, 유량과 조석의 상호 관련이 있다. 특히 저수위에서 조석의 영향을 감안하지 않은 수위-유량관계는 부정확하다. 본 논문에서는 수위 및 수위와 조위의 수면차를 변수로 하여 감조하천에서의 유량을 계산할 수 있도록 하였다. 이를 위해 태화강 감조부에 위치한 울산수위관측소 지점의 저수위 유량을 수위 및 수위와 조위의 수면차로 나타내는 다중회귀식을 개발하였으며, 기존의 수위-유량곡선식과 비교한 결과 우수한 적용성을 확인하였다.

핵심용어 : 감조하천, 저수위, 수위-유량곡선, 다중회귀분석

* 울산대학교 공과대학 토목환경공학부 교수
Prof., Dept. of Civil & Environmental Eng., Ulsan Univ., Ulsan 680-749, Korea
(E-mail : hjcho@uou.ulsan.ac.kr)
** 울산대학교 공과대학 토목공학과 대학원
Graduate student, Dept. of Civil & Environmental Eng., Ulsan Univ., Ulsan 680-749, Korea
*** 울산대학교 공과대학 토목공학과 대학원
Graduate student, Dept. of Civil & Environmental Eng., Ulsan Univ., Ulsan 680-749, Korea

1. 서 론

수자원의 효율적 관리를 위해서는 신뢰성 높은 유량자료가 필수적이다. 따라서 우리나라는 수문조사사업의 일환으로 매년 우리나라 전역을 대상으로 유량측정을 실시하고 있으며, 각 지방 홍수통제소는 용역사업의 형태로 주요 수위관측소 지점에서 유량측정을 실시하고 있다. 그러나 많은 수자원기술자들은 유량측정성과의 신뢰성에 대한 많은 의문을 갖고 있다. 이러한 신뢰성의 저하에는 유량측정방법의 문제, 제도의 미비나 결함 또는 측정당사자의 책임의식 결여 등의 여러 가지 복합적인 요인이 있다. 그러나 이에 관한 언급은 본 논문의 주제를 벗어나므로 차후에 제기하도록 하고, 본 논문에서는 유량측정과 수위-유량곡선의 개발 경험을 토대로 감조하천에서 저수위 수위-유량곡선 개선방안을 제시하고자 한다.

과거에는 홍수관리의 측면에서 홍수시 유량자료의 확보에 주력하였으나, 최근에는 용수공급 문제가 심각하게 대두되면서 저수위 유량자료의 확보에도 관심을 기울이고 있다. 특히, 저수위 유량자료는 하천수질관리의 측면에서 중요성이 높다. 그런데 직접 유량을 측정하고, 수위-유량곡선을 개발하면서 조석의 영향을 받는 지점에서 저수위 유량자료의 수집 및 분석에 많은 어려움을 겪었다. 조석의 영향을 받는 지점에서의 유량측정과 수위-유량곡선의 개발방법에 관해서는 하천관련 업무의 중요한 지침인 하천시설기준(1993)이나 하천설계기준(1997)에도 자세히 언급되지 않고 있으며, 통상 유량측정시간을 만조시간과 간조시간으로 구분하고, 수위-유량곡선을 만조식과 간조식 그리고 이의 합산에 의한 중간식으로 개발하는 것이 알려져 있다. 그러나 이 방법은 실제 적용된 예를 찾기 어렵고 조석류와 하천류의 혼합에 의한 역류가 발생할 경우에는 만조식을 개발할 수 없으며, 간조식은 수위와 유량간의 뚜렷한 상관관계가 나타나지 않는 경향이 있다.

한국수문조사연보(1997)에 수록된 건설교통부 관할의 수위관측소는 212개소이며 한강홍수통제소 관할 62개소, 낙동강홍수통제소 관할 64개소, 금강홍수통제소 관할 43개소, 섬진강홍수통제소 관할 18개소, 영산강홍수통제소 관할 25개소이다. 이 중에서 조석의 영향을 받는 수위관측소는 한강홍수통제소 관할 4개소, 낙동강홍수통제소 관할 5개소, 금강홍수통제소 관할 1개소, 섬진강홍수통제소 관할 2개소, 영산강홍수통제소 관할 3개소로 총 15개소이며 표 1과 같다. 그러나 기존에

표 1. 조석의 영향을 받는 수위관측소 현황
(한국수문조사연보, 1997년)

관측소명	수계명	하천명	관할관서명
전 류	한 강	한 강	한 강홍수통제소
행주대교	한 강	한 강	한 강홍수통제소
잠 수 교	한 강	한 강	한 강홍수통제소
한강대교	한 강	한 강	한 강홍수통제소
구 포	낙동강	낙동강	낙동강홍수통제소
삼 랑 진	낙동강	낙동강	낙동강홍수통제소
월 촌	낙동강	낙동강	낙동강홍수통제소
대 송	형산강	형산강	낙동강홍수통제소
울 산	태화강	태화강	낙동강홍수통제소
하구연(외)	금 강	금 강	금 강홍수통제소
하 동2	섬진강	섬진강	섬진강홍수통제소
하 동	섬진강	섬진강	섬진강홍수통제소
하구연(외)	영산강	영산강	영산강홍수통제소
동 지 산	만경강	만경강	영산강홍수통제소
동진대교	동진강	동진강	영산강홍수통제소

개발된 수위-유량곡선이 조석의 영향을 고려한 경우는 없다. 다만 유량연보(1996)에 오십천 삼척수위관측소의 수위-유량곡선을 만조식과 간조식으로 구분하여 기록하고 있으나 실측에 의해 개발된 것이 아니며, 한국수문조사연보(1993)에는 한강 인도교수위관측소의 수위-유량곡선에 관련하여 저수시 수위-유량관계가 일정치 않으므로 주의를 요한다고 기록하고 있다. 즉, 조석의 영향을 받는 지점에서 저수위 유량자료의 신뢰성이 현저히 낮음은 인식하고 있으나 이에 대한 개선책이 제시되지 못하고 있는 실정이다.

Dickinson(1967)은 수위-유량관계의 부정확성의 요인으로 수위관측소 지점에서 조절단면의 불안정성, 수위-유량관계에 영향을 줄 수 있는 식생 등으로 인한 계절적인 변화의 영향, 홍수파의 급상승과 급하강에 따른 지연효과, 조석작용으로 인한 흐름의 변화를 설명하고 있다. Chow(1986)는 지배단면이 수위관측소의 위치로서 가장 적합하고, 지배단면에서 수위-유량곡선을 개발하는 것이 가장 효과적이라고 하였다. 그러나 수위관측소는 유역을 대표하는 지점에 설치되어야 하는 등의 제약으로 유량측정 단면을 Chow가 제시한 지배단

면으로 제한하는 것은 어렵다. 또한 대부분의 수위관측소가 교량에 설치되고 있어 불가피하게 조석의 영향을 받는 지점에서 유량을 측정하게 되는 경우도 있다. 이와 같은 경우 조석의 영향을 받는 수위 및 유량측정 성과를 효율적으로 사용하기 위한 방안이 요구되는데, 이재형과 황만하(1994)는 하구의 수위를 예측하기 위해서는 하천유량과 조석과의 상호영향을 고려한 다변수 함수가 필요하다고 하고 섬진강 하동수위관측소 지점에 대해 수위를 조위와 유량의 함수로 하는 다중회귀식을 개발하였으며, 추태호 등(2000)은 감조하천의 유량은 조석의 영향을 직접 받는다고 하고 낙동강 구포 및 하구독수위관측소 지점에 대해 유량을 수위와 조석에 의해 발생하는 상·하류 간의 수위차의 함수로 하는 다중회귀식을 개발한 바 있다.

본 논문의 연구 대상 지점인 울산수위관측소는 불가피하게 조석의 영향을 받는 곳에 수위관측소를 설치하게 된 경우이다. 따라서 유량측정 및 수위-유량곡선의 개발에 상당한 주의가 필요하며, 실제 측정 및 개발과정에서 많은 애로를 겪어야만 하였다. 울산수위관측소 지점의 유량측정자료는 1999년의 저수시와 홍수시에 측정된 자료와 1997년~1998년에 저수시에 측정된 자료뿐이므로 수위-유량곡선을 저수시와 홍수시로 분리하여 개발할 것을 계획하고, 저수시의 측정자료를 분석하였으나 수위와 유량의 뚜렷한 상관관계를 찾을 수 없었다. 물론 측정오차를 감안할 수도 있겠으나 본 지점이 조석의 영향을 받고 있다는 데 주목하였다. 따라서 본 논문에서는 조석의 영향을 받는 태화강 갑조부에 위치하는 울산수위관측소 지점의 저수위에서 조위와 수위 및 유량의 상관관계를 분석한 후 수위-유량곡선의 활용도를 향상시키기 위한 방안으로 유량을 수위 및 조위와 수위에 의한 수면차를 사용하여 나타내는 다중회귀식을 개발하는데 주안점을 두었다.

2. 자료 분석

2.1 분석 지점 및 자료

태화강수계에는 낙동강홍수통제소 관할인 총 4개소의 수위관측소가 있으며, 본류에 3개소가 있고 최대 지류인 동천에 1개소의 수위관측소가 있다. 수위관측소의 유역면적과 위치, 조석의 영향 여부는 표 2 및 그림 1과 같다. 2000년 5월에 조동과 울산수위관측소에서 관측된 동일한 기간의 시간별 수위기록을 그림 2와 같이 비교하면 울산수위관측소가 조석의 영향을 받고 있음

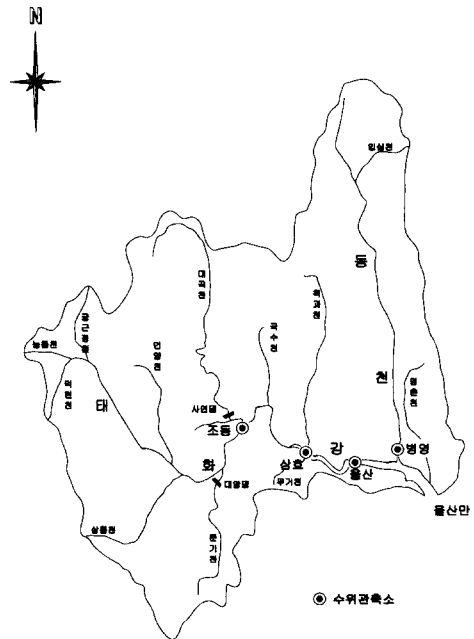


그림 1. 수위관측소 위치도

표 2. 태화강수계의 수위관측소 현황

관측소명	위치		유역면적 (km ²)	하구로부터의 거리 (km)	조석 영향
	동경	북위			
조동	129-12-27	35-34-15	204.0	20.6	무
삼호*	129-16-35	35-33-00	421.4	10.7	무
울산	129-18-45	35-33-00	429.9	7.6	유
병영	129-21-10	35-34-23	156.8	지류	무

*삼호수위관측소는 1999년 하류로 위치를 이동하여 간접적인 조석의 영향을 받음.

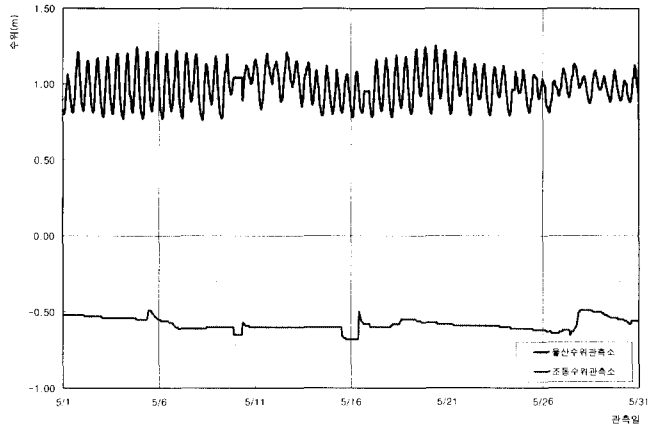


그림 2. 조동 및 울산수위관측소의 시간별 수위 비교 (2000년 5월)

을 확연히 알 수 있다. 또한 울산수위관측소의 하류 약 5.3km 지점에는 울산항 내에 토사 퇴적을 막고 태화강의 염수 침입을 방지하기 위해 방사보가 설치되었으나, 저수시 수질개선을 목적으로 방사보의 폭 600m 중에서 89m를 개방하여 물의 흐름을 원활하게 하고 있다.

분석에 사용된 측정자료는 1998년도 형산강수계 유량측정보고서와 1999년도 태화강수계 유량측정조사보고서의 저수시 유량측정자료 중에서 울산수위관측소

지점의 자료를 사용하였으며, 표 3과 그림 3에 나타내었다. 또한 태화강 하구에 위치한 울산항점조소의 관측 조위 중 해당시간의 조위를 나타내었으며, 수면차는 수위와 조위를 수위의 기준인 수위표의 영점표고(EL. = -0.959m)와 조위의 기준인 기본수준면의 육상표고(EL. = -0.458m)를 사용하여 육상표고로 환산한 후 차를 구하여 나타내었다. 측정자료는 1997년에 만조시 3개와 간조시 5개이고, 1998년에는 만조시 6개와 간조시 1개이며, 1999년에는 간조시 11개로 총 26개이다.

표 3. 울산수위관측소 지점의 유량측정성과와 조위

1997년				1998년				1999년			
수위 (m)	유량 (m ³ /s)	조위* (cm)	수면차 (m)	수위 (m)	유량 (m ³ /s)	조위* (cm)	수면차 (m)	수위 (m)	유량 (m ³ /s)	조위* (cm)	수면차 (m)
1.13	1.77	39.0 [*]	0.24	1.58	24.36	6.0 [*]	1.02	0.92	8.336	15.5	0.259
1.15	2.23	50.0 [*]	0.15	1.35	1.11	36.0 [*]	0.49	1.17	50.776	25.5	0.409
1.34	20.17	27.0	0.57	1.45	10.17	47.0 [*]	0.48	0.88	9.114	16.0	0.219
1.08	5.50	18.0	0.40	1.42	1.70	19.0 [*]	0.73	1.10	27.968	31.0	0.289
1.14	4.56	49.0 [*]	0.15	0.99	1.10	23.0 [*]	0.26	1.23	23.598	47.0	0.259
1.08	8.30	7.0	0.51	1.10	1.74	49.0	0.11	1.13	17.942	38.5	0.239
0.94	1.66	7.0	0.37	1.15	2.59	57.0 [*]	0.08	1.13	29.156	32.0	0.309
0.98	2.08	15.0	0.33	-	-	-	-	1.15	17.904	46.5	0.179
-	-	-	-	-	-	-	-	1.20	49.509	35.5	0.339
-	-	-	-	-	-	-	-	1.11	28.520	35.5	0.249
-	-	-	-	-	-	-	-	1.17	20.640	46.0	0.209

*유량측정 지점의 조위

• 만조시 측정된 자료, 이외는 간조시 측정된 자료

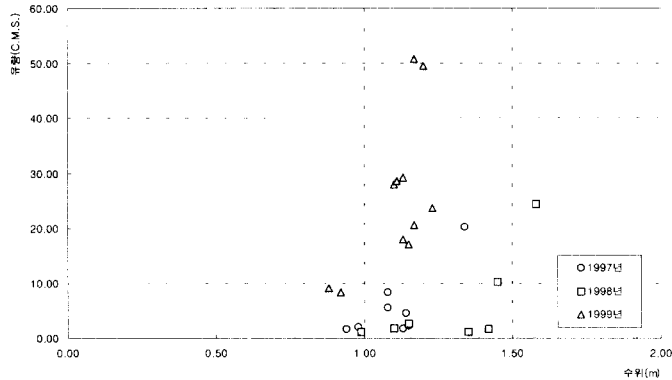


그림 3. 울산수위관측소 지점의 유량측정성과

그동안 태화강수계의 유량측정은 지속적으로 이루어지지 않았다. 1997년~1998년에는 형산강수계 유량측정 사업에 포함되어 주요 유량관측지점인 울산수위관측소 지점에서만 유량측정을 실시하였다. 그러나 1999년에는 태화강 홍수예경보시스템 구축의 일환으로 본격적인 유량측정을 시작하였다. 1999년 울산수위관측소 지점의 유량측정을 간조시로 제한하였던 것은 만조시에는 역류현상이 발생하여 유량을 측정할 수 없었기 때문이다.

2.2 상관분석

저수위 유량자료에 대한 상관분석을 실시한 결과, 수위와 유량의 상관계수가 1999년의 자료에서는 0.632

이고 1997년~1998년의 자료에서는 0.640으로는 낮게 나타났다. 이러한 결과는 수위 및 유량이 조석의 영향을 받고 있음을 의미한다고 판단하였는데, 조석의 영향 여부를 판단하기 위한 방법으로 저수위의 수위 및 유량이 선행강우량과 선행상관관계를 나타낸다는 가정을 하고 어떤 기간 동안의 선행강우가 수위 또는 유량의 증감에 영향이 있는지를 파악하였다. 조동, 삼호, 울산, 병영수위관측소 지점의 1999년 실측된 수위 및 유량 측정성과와 울산강우관측소의 강우량 측정성과로부터 계산된 각 유량측정일 1일전부터 30일전까지의 선행강우량으로 상관분석을 하였으며, 그 결과는 표 4와 같다. 표 4에서 제시된 바와 같이 조석의 영향을 받지 않는 조동과 병영수위관측소 지점은 3일에서 10일까지

표 4. 태화강수계 각 수위관측소 지점의 선행강우에 대한 수위와 유량의 상관계수

지점	변수	선행강우																	
		P ₃₀	P ₂₅	P ₂₀	P ₁₅	P ₁₄	P ₁₃	P ₁₂	P ₁₁	P ₁₀	P ₉	P ₈	P ₇	P ₆	P ₅	P ₄	P ₃	P ₂	P ₁
조동	수위	0.368	0.428	0.541	0.719	0.720	0.731	0.777	0.786	0.831	0.846	0.859	0.872	0.839	0.834	0.834	0.837	0.389	0.351
	유량	0.361	0.360	0.500	0.701	0.713	0.758	0.824	0.860	0.900	0.927	0.944	0.948	0.931	0.947	0.947	0.923	0.220	0.229
삼호	수위	0.531	0.552	0.526	0.709	0.717	0.744	0.699	0.611	0.642	0.632	0.629	0.611	0.644	0.628	0.628	0.614	0.522	0.261
	유량	-0.131	-0.197	-0.216	0.086	0.038	0.114	0.243	0.317	0.418	0.495	0.525	0.573	0.570	0.660	0.660	0.712	0.733	0.721
울산	수위	0.614	0.615	0.640	0.783	0.802	0.707	0.602	0.524	0.549	0.443	0.442	0.355	0.357	0.350	0.350	0.355	0.327	0.185
	유량	0.277	0.177	0.176	0.427	0.387	0.453	0.537	0.591	0.667	0.678	0.677	0.698	0.661	0.629	0.628	0.650	0.619	0.600
병영	수위	0.513	0.520	0.515	0.696	0.706	0.698	0.721	0.707	0.779	0.741	0.741	0.732	0.725	0.693	0.694	0.757	0.475	0.405
	유량	0.228	0.172	0.183	0.405	0.410	0.438	0.485	0.577	0.693	0.764	0.778	0.781	0.748	0.776	0.777	0.895	0.610	0.614

표 5. 울산수위관측소 지점의 유량과 수위, 조위 및 수면차의 상관계수(1997년~1998년, 1999년)

변수	1997년~1998년				1999년			
	유량	수위	조위	수면차	유량	수위	조위	수면차
유량	1.000	0.640	-0.313	0.697	1.000	0.632	0.130	0.843
수위	0.640	1.000	0.044	0.717	0.632	1.000	0.825	0.275
조위	-0.313	0.044	1.000	-0.665	0.130	0.825	1.000	-0.315
수면차	0.697	0.717	-0.665	1.000	0.843	0.275	-0.315	1.000

표 6. 울산수위관측소 지점의 유량과 수위, 조위 및 수면차의 상관계수(1997년~1998년)

변수	만조시				간조시			
	유량	수위	조위	수면차	유량	수위	조위	수면차
유량	1.000	0.710	-0.507	0.715	1.000	0.915	0.037	0.759
수위	0.710	1.000	-0.477	0.879	0.915	1.000	0.425	0.449
조위	-0.507	-0.477	1.000	-0.838	0.037	0.425	1.000	-0.618
수면차	0.715	0.879	-0.838	1.000	0.759	0.449	-0.618	1.000

의 선행강우가 수위와 유량의 증감에 많은 영향을 주고 있는 것을 알 수 있으며, 조동 및 병영수위관측소 지점의 수위 및 유량에 대한 상관계수는 선행강우일 변화에 따라 유사한 양상의 변화를 나타내고 있다. 또한 조동수위관측소 지점은 7일 선행강우에 대한 수위 및 유량의 상관계수가 각각 0.872, 0.948로 가장 높고, 병영수위관측소 지점은 3일 선행강우에 대한 수위 및 유량의 상관계수가 각각 0.757, 0.895 가장 높게 나타났다. 그러나 조석의 영향을 직접 받는 울산수위관측소와 감조구간의 끝에 위치하여 간접적인 조석의 영향을 받는 삼호수위관측소 지점의 수위 및 유량의 상관계수는 선행강우일 변화에 따라 모두 다르게 나타났다. 이는 두 지점의 수위 및 유량이 강우량 이외의 요인에 강한 영향을 받고 있음을 의미하는데, 두 지점의 수위와 유량은 강우에 의한 유출이외에 조석의 영향을 받고 있는 것으로 판단된다.

따라서 조석의 영향을 받는 울산수위관측소 지점에서 유량, 수위, 조위, 수면차의 상관정도를 파악하기 위하여 상관분석을 실시하였으며 그 결과는 표 5와 같다. 표 5에서 제시된 바와 같이 1999년 자료에서는 유량에 대한 수위, 조위, 수면차의 상관계수가 각각 0.632, 0.130, 0.843으로 유량과 수위 및 수면차의 상관성이 비교적 높게 나타났으나 유량에 대한 조위의 상관계수는 매우 낮게 나타났다. 또한 수위에 대한 수면차의 상관계수가 0.275로서 두 변수간의 상관이 낮아 유량을 수위와 수면차의 함수로 나타내는 다중회귀

식을 개발할 필요가 있는 것으로 판단하였다. 반면에 1997년~1998년 자료를 사용한 분석에서는 유량에 대한 수위, 조위, 수면차의 상관계수가 각각 0.640, -0.313, 0.697로 나타났으나, 수위와 수면차의 상관계수가 0.717로 비교적 높게 나타났다.

그런데 1999년 자료는 간조시에 측정된 자료만으로 구성되어 있으므로, 동일한 성격의 자료로서 비교분석하기 위해 1997년~1998년 자료를 만조시와 간조시로 분리하여 상관분석을 실시하고 표 6에 나타내었다. 표 6에서 제시된 바와 같이 유량에 대한 수위와 수면차의 상관계수는 만조시에는 각각 0.710, 0.715이고, 간조시에는 각각 0.915, 0.759로서 만조시와 간조시로 자료를 분리하기 전보다 유량에 대한 수위 및 수면차의 상관성이 높게 나타났다. 그리고 수위와 수면차의 상관계수는 만조시에 0.879이고, 간조시의 경우에는 0.449로서 만조시와 간조시로 자료를 분리하기 전보다 만조시는 두 변수간의 상관성이 높아졌으나, 간조시는 오히려 감소하였다. 따라서 간조시에만 측정된 1999년의 유량 자료와 1997년~1998년의 간조시에 측정된 유량자료를 이용하여 유량을 수위와 수면차의 함수로 나타내는 다중회귀식을 개발하였다.

3. 다중회귀식의 개발

3.1 이론적 배경

일반적으로 유량(Q)과 수위(H)의 관계는 식 (1)과

같이 측정오차가 작은 수위를 독립변수로 하고 유량을 종속변수로 하여 지수형의 회귀식으로 나타낸다.

$$Q = a(H+c)^b \quad (1)$$

a, b, c 는 회귀계수이고 단면에 따른 특성값이다. 회귀분석에서 독립변수의 수를 증가시키면 독립변수가 종속변수에 기여하는 바가 없더라도 회귀식의 결정계수가 증가하는 경향이 있으므로 독립변수의 선택에 주의가 필요한데, 조석의 영향을 받는 지점의 유량을 수위와 수면차(D)를 포함하는 다중회귀식으로 나타내면 식 (2)와 같은 형태를 가정할 수 있다.

$$Q = a + b_0H + b_1D \quad (2)$$

a, b_0, b_1, c_0, c_1 는 회귀계수이다. 또한 유량과 수위의 관계에 있어서는 지수형의 회귀식이 적용성이 높다는 데 착안하면 식 (3)과 같은 지수형의 다중회귀식을 가정할 수 있다.

$$Q = a(H+c_0)b_0(D+c_1)b_1 \quad (3)$$

식 (3)의 양변에 \log 를 취하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\log Q = \log a + b_0 \log(H+c_0) + b_1 \log(D+c_1) \quad (4)$$

식 (4)를 식 (5a)~(5d)를 사용하여 식 (6)과 같이 나타내면, 식 (3)은 다중선형회귀식의 형태가 된다.

$$Q' = \log Q \quad (5a)$$

$$a' = \log a \quad (5b)$$

$$H' = \log(H+c_0) \quad (5c)$$

$$D' = \log(D+c_1) \quad (5d)$$

$$Q' = a' + b_0H' + b_1D' \quad (6)$$

a, b_0, b_1 는 최소제곱법으로 구하며, c_0, c_1 는 임의로 다수 선택하여 회귀분석을 한 후 최적값을 찾는 시행착오법으로 구한다. 식 (2)를 해석하기 위해서는 식 (7)과 같은 다중선형회귀모형을 만족해야 한다.

$$Q = a + b_0H + b_1D + \varepsilon \quad (7)$$

ε 는 잔차이다. 식 (7)로부터 식 (8) 및 식 (9)와 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$E(Q) = a + b_0H + b_1D + E(\varepsilon) \quad (8)$$

$$\text{Var}(Q) = \text{Var}(\varepsilon) \quad (9)$$

여기서 $E(Q), E(\varepsilon)$ 는 각각 Q, ε 의 기대치이고 $\text{Var}(Q), \text{Var}(\varepsilon)$ 는 분산이다. 잔차의 평균 $E(\varepsilon)$ 과 분산 $\text{Var}(\varepsilon)$ 은 식 (10) 및 식 (11)과 같이 주어진다.

$$E(\varepsilon) = \sum \varepsilon_i / n \quad (10)$$

$$\text{Var}(\varepsilon) = \sum \varepsilon_i^2 / (n-3) = \sigma^2 \quad (11)$$

여기서 Gauss-Markov의 조건을 따라 잔차는 서로 비상관이고, 평균이 0이며, 분산이 독립변수에 의존하지 않는 상수로서 σ^2 으로 가정하는 것이 필요하다.

3.2 다중회귀식의 적용

전술한 표 5 및 표 6의 성과에 따르면, 기존 보고서에서 인용한 1997년~1998년 자료를 만조시 및 간조시 측정된 자료로 분리하는 경우와 간조시에만 실측한 1999년의 자료를 이용하는 경우, 유량에 대한 수위와 조위 및 수면차 등의 상관정도가 모두 다르게 나타났다. 따라서 본 연구에서는 동일한 성격의 자료에 대한 다중회귀식을 개발하기 위해 1997년~1998년의 자료는 간조시와 만조시로 구분하였고, 간조시에 실측한 1999년 자료 등으로 나누어 적용하였다. 울산수위관측소 지점에 적합한 다중회귀식을 개발하기 위해 표 7~9에 제시된 식 a)~c)와 같은 다중회귀식을 사용하였다. 표 7~9의 성과는 울산수위관측소 지점의 측정유량을 종속변수로 하고 수위와 수면차를 독립변수로 하는 다중회귀분석의 결과이며, 신뢰수준은 95%이다. 식 a)~c)에서 Q 는 유량, H 는 수위, D 는 수면차이고, 기타 모두 회귀계수이다.

표 7에 제시된 1997년~1998년의 만조시 측정자료에 대한 분석 결과에 따르면, 식 a)~c)의 회귀계수 a, b_0, b_1 는 각각의 유의확률(P)이 유의수준 0.10에서도 벗어나고 있으며, 결정계수도 현저히 낮게 나타나고 있다. 표 8에 제시된 1997년~1998년의 간조시 측정자료에 대한 분석 결과에 따르면, 식 a)~c)의 회귀계수 a, b_0, b_1 는 각각의 유의확률이 유의수준 0.05를 만족하고, 식 a)~c)의 결정계수는 각각 0.982, 0.939, 0.965로 매우 높게 나타났으며, F 비는 유의수준 0.05의 임계값인 9.55를 모두 만족한다. 그리고 표 9에 제시된 1999년 자료에 대한 분석 결과에 따르면, 식 a)~c)의 회귀계수 a, b_0, b_1 는 각각의 유의확률이 유

표 7. 울산수위관측소 지점의 저수위 유량자료에 대한 다중회귀분석 결과(1997년~1998년, 만조시)

계수	$Q = a + b_0H + b_1D^a$				$Q = aH^{b_0}D^{b_1}$				$Q=a(H+c_0)b_0(D+c_1)b_1, c_0, C_1=0.00$			
	값	표준 오차	t 통계량	P 유의확률	값	표준 오차	t 통계량	P 유의확률	값	표준 오차	t 통계량	P 유의확률
a	-16.094	24.094	-0.668	0.5290	0.450	4.188	-0.558	0.5970	0.450	4.188	-0.558	0.5970
b ₀	14.019	22.843	0.614	0.5619	6.236	2213.650	1.864	0.1116	6.236	2213.650	1.864	0.1116
b ₁	9.796	14.176	0.691	0.5154	-0.440	4.086	0.611	0.4982	-0.440	4.086	0.611	0.4982
R ²	0.387				0.266				0.266			
표준 오차	5.967				0.389				0.389			
F비	3.524				2.447				2.447			

표 8. 울산수위관측소 지점의 저수위 유량자료에 대한 다중회귀분석 결과(1997년~1998년, 간조시)

계수	$Q = a + b_0H + b_1D^a$				$Q = aH^{b_0}D^{b_1}$				$Q=a(H+c_0)b_0(D+c_1)b_1, c_0, C_1=0.13$			
	값	표준 오차	t 통계량	P 유의확률	값	표준 오차	t 통계량	P 유의확률	값	표준 오차	t 통계량	P 유의확률
a	-40.986	3.399	-12.058	0.0012	7.138	1.295	7.613	0.0047	3.648	1.419	3.699	0.0343
b ₀	36.959	3.433	10.765	0.0017	5.888	8.659	6.281	0.0081	6.225	10.965	5.985	0.0093
b ₁	19.435	2.984	6.514	0.0073	0.907	1.565	4.664	0.0186	1.444	2.003	4.787	0.0173
R ₂	0.982				0.939				0.965			
표준 오차	0.957				0.109				0.106			
F비	138.681				39.186				41.162			

표 9. 울산수위관측소 지점의 저수위 유량자료에 대한 다중회귀분석 결과(1999년)

계수	$Q = a + b_0H + b_1D^a$				$Q = aH^{b_0}D^{b_1}$				$Q=a(H+c_0)b_0(D+c_1)b_1, c_0, C_1=0.85$			
	값	표준 오차	t 통계량	P 유의확률	값	표준 오차	t 통계량	P 유의확률	값	표준 오차	t 통계량	P 유의확률
a	-77.514	17.410	-4.452	0.0021	87.378	1.559	10.061	0.0000	0.156	2.222	-2.326	0.0484
b ₀	55.724	16.109	3.459	0.0086	3.645	4.828	5.331	0.0007	6.502	16.845	5.301	0.0007
b ₁	152.838	27.082	5.643	0.0005	1.295	2.063	4.118	0.0034	5.336	17.705	4.275	0.0027
R ₂	0.851				0.853				0.860			
표준 오차	5.390				0.097				0.094			
F비	29.526				30.094				31.638			

의수준 0.05를 만족하고, 식 a)~c)의 결정계수는 각각 0.851, 0.853, 0.860으로 나타났으며, F비는 유의수준 0.05의 임계값인 4.46을 모두 만족한다. 표 7~9에서 제시된 분석 결과에 따르면, 1997년~1998년 만조시

측정된 자료는 신뢰하기가 어려운 것으로 판단된다. 또한 식 a)~c)에 대한 결정계수를 비교하면 표 8의 분석 결과에서는 1차식 형태인 식 a)의 결정계수가 상대적으로 높고, 표 9의 분석 결과에서는 지수식 형태인

표 10. 울산수위관측소 지점의 수위-유량곡선식 비교

기간	구분	수위-유량곡선식	비고
1997년 ∫ 1998년 (간조시)	기존식	$Q = 2.752H^{8.188}$	$H = h^*$ $0.91 \leq H \leq 1.48(m)$
	다중회귀중식	$Q = -40.986 + 36.959H + 19.435D^{a)}$ $Q = 7.138H^{5.888}D^{0.907 b)}$ $Q = 3.648(H+0.13)^{6.225}(D+0.13)^{1.444 c)}$	$H = h^*$ $0.94 \leq H \leq 1.34(m)$ $0.11 \leq D \leq 0.57(m)$
1999년	기존식	$Q = 0.106(H - 0.170)^{8.188}$	$H = h^* + 1$ $1.88 \leq H \leq 2.23(m)$
	다중회귀중식	$Q = -77.514 + 55.724H + 152.838D^{a)}$ $Q = 87.378H^{2.645}D^{1.295 b)}$ $Q = 0.156(H+0.85)^{6.502}(D+0.85)^{5.336 c)}$	$H = h^*$ $0.88 \leq H \leq 1.23(m)$ $0.18 \leq D \leq 0.41(m)$

*수위표의 실측 수위

표 11. 울산수위관측소 지점의 실측유량과 계산유량의 비교(1997년~1998년, 간조시)

수위 (m)	수면차 (m)	실측유량 (m ³ /s)	기존식 계산유량 (m ³ /s)	식 a) 계산유량 (m ³ /s)	식 b) 계산유량 (m ³ /s)	식 c) 계산유량 (m ³ /s)	기존식 오차 (m ³ /s)	식 a) 오차 (m ³ /s)	식 b) 오차 (m ³ /s)	식 c) 오차 (m ³ /s)
1.34	0.569	20.17	30.226	19.598	23.977	23.936	-10.056	0.572	-3.807	-3.766
1.08	0.399	5.50	5.168	6.685	4.879	4.765	0.332	-1.185	0.621	0.735
1.08	0.509	8.30	5.168	8.823	6.085	6.260	3.132	-0.523	2.215	2.040
0.94	0.369	1.66	1.658	0.928	2.007	2.037	0.002	0.732	-0.347	-0.377
0.98	0.329	2.08	2.332	1.628	2.311	2.269	-0.252	0.452	-0.231	-0.189
1.10	0.109	1.74	6.006	1.788	1.675	1.676	-4.266	-0.048	0.065	0.064
						표준편차	4.663	0.741	1.980	1.934

식 c)의 결정계수가 상대적으로 높게 나타났다.

3.3 적용성 검토

본 연구에서는 조석의 영향을 고려하여 새로이 개발, 제시한 다중회귀식에 대한 적합성을 검토하기 위해 울산수위관측소 지점의 기존 수위-유량곡선식과 비교하였으며, 표 10에 나타내었다. 또한 다중회귀식 적용에 따른 오차의 정도를 파악하기 위해서, 실측유량과 각 수위-유량곡선식에 의한 계산유량과 실측유량과 계산유량의 간의 오차로부터 표준편차를 계산하여 표 11, 12에 나타내었다.

표 11에 제시된 바와 같이 1997년~1998년 울산수위관측소 지점의 간조시 실측유량과 기존식에 의한 계산유량 간의 오차에 대한 표준편차가 4.663이지만 수

면차를 고려한 다중회귀식에서는 표준편차가 식 a)~c)에 대하여 각각 0.741, 1.980, 1.934로 오차가 크게 감소하였다. 또한 기존식의 오차는 실측유량의 0.0~2.45배의 크기로 나타났으나 식 c)의 오차는 실측유량의 0.04~0.25배의 크기에 불과하여 측정값을 잘 반영하고 있는 것으로 판단된다. 그리고 표 12에서 제시된 바와 같이 1999년 간조시의 실측유량과 기존식에 의한 계산유량 간의 오차에 대한 표준편차가 11.016이지만 식 a)~c)에 대해서는 각각 4.869, 4.724, 4.674로서 오차가 크게 감소하는 것으로 나타났다. 또한 오차가 기존식은 실측유량의 0.07~0.64배의 크기로 나타났으나 식 c)는 0.0~0.36배의 크기로 감소하였다. 따라서 울산수위관측소 지점과 같은 조석의 영향을 받는 지점의 저수위시 수위-유량관계는 조석의 영향을 감안하는

표 12. 울산수위관측소 지점의 실측유량과 계산유량의 비교(1999년)

수위 (m)	수면차 (m)	실측유량 (m ³ /s)	기본식 계산유량 (m ³ /s)	식 ^{a)} 계산유량 (m ³ /s)	식 ^{b)} 계산유량 (m ³ /s)	식 ^{c)} 계산유량 (m ³ /s)	기본식 오차 (m ³ /s)	식 ^{a)} 오차 (m ³ /s)	식 ^{b)} 오차 (m ³ /s)	식 ^{c)} 오차 (m ³ /s)
0.92	0.259	8.336	10.226	13.337	11.204	11.099	-1.890	-5.001	-2.868	-2.763
1.17	0.409	50.776	30.424	50.194	48.637	51.559	20.342	0.572	2.129	-0.793
0.88	0.219	9.114	8.467	4.995	7.667	7.863	0.647	4.119	1.447	1.251
1.10	0.289	27.968	22.745	27.953	24.770	24.022	5.223	0.015	3.198	3.946
1.23	0.259	23.598	38.729	30.612	32.292	31.694	-15.131	-7.014	-8.694	-8.096
1.13	0.239	17.942	25.797	21.982	21.362	20.878	-7.855	-4.040	-3.420	-2.936
1.13	0.309	29.156	25.797	32.681	29.797	29.110	3.359	-3.525	-0.641	0.046
1.15	0.179	17.904	28.027	13.927	15.660	16.472	-10.933	3.167	1.434	0.622
1.20	0.339	49.509	34.357	41.167	41.826	41.819	15.152	8.342	7.683	7.690
1.11	0.249	28.520	23.725	22.396	21.108	20.521	4.795	6.124	7.412	7.999
1.17	0.209	20.640	30.424	19.626	20.383	20.485	-9.784	1.014	0.257	0.155
표준편차							11.016	4.869	4.724	4.674

것이 필요하다. 또한 전술한 표 9 및 표 12에서 제시된 1999년 분석결과에 따르면 다중회귀식으로는 1차식 형태보다는 지수식 형태가 적합하고, 표 8 및 표 11에서 제시된 1997년~1998년 분석결과에서는 1차식 형태가 적합한 것으로 나타났으나 분석에 사용된 자료수가 6개로서 1999년 분석에 사용된 자료수 11개에 비하여 다소 적은 것을 감안하면, 울산수위관측소 지점의 저수위 유량을 수위와 수면차로 나타내는 다중회귀식은 지수식의 형태가 적합한 것으로 판단된다. 따라서 울산수위관측소 지점에 대한 1999년 저수위 수위-유량곡선을 표 13과 같이 제안하였다.

4. 결 론

조석의 영향을 받는 울산수위관측소 지점에서 실제 유량을 측정하고 저수위 수위-유량곡선을 개발하였다. 조석에 의해 유량이 불규칙한 지점에서는 기존의 방법으로는 저수위 수위-유량관계를 명확하게 나타낼 수 없었으며, 유량을 수위 및 수위와 조위의 수면차로 나

타내는 다중회귀식을 적용하여 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 유량측정방법 등의 개선이 필요함과 동시에 저수위 수위-유량곡선으로는 기본식의 형태를 벗어난 다양한 형태의 식을 적용해 볼 필요가 있으며, 본 논문에서 제시하는 지수형의 다중회귀식은 좋은 대안이 될 수 있다. 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 조석의 영향을 받지 않는 수위관측소의 수위 및 유량은 3일~10일의 선행강우량과 높은 상관관계가 있는 것으로 나타났으나, 감조구간에 위치한 울산수위관측소 지점은 조석의 영향에 더욱 민감한 것으로 나타났다.

(2) 울산수위관측소 지점에서는 조석이 저수위 수위-유량관계에 영향을 미치는 것으로 나타났고, 특히 간조시에 뚜렷한 영향이 있었다.

(3) 울산수위관측소 지점의 저수위 수위-유량곡선식으로서 조석에 의한 수면차를 고려한 지수형의 다중회귀식을 개발 제시하였으며, 기존의 단순회귀형의 수위-유량곡선식보다 적용성이 우수하였다.

표 13. 울산수위관측소 지점에 대한 제안식(1999년)

수위-유량곡선식	적용 범위
$Q = 0.156(H+0.85)^{0.382}(D+0.85)^{3.330}$	$0.88 \leq H \leq 1.23(m)$ $0.18 \leq D \leq 0.41(m)$

참 고 문 헌

- 건설교통부 (1996). 유량연보.
- 건설교통부 (1987). 태화강하천정비기본계획, pp. 19~65.
- 건설교통부 (1993). 하천시설기준, pp. 73~114.
- 건설교통부 (1997). 하천설계기준, pp. 65~101.
- 건설교통부 (1993-1997). 한국수문조사연보.
- 낙동강홍수통제소 (1999). 태화강수계 유량측정조사 보고서, pp. 52~55.
- 낙동강홍수통제소 (1998). 형산강수계 유량측정조사 보고서, pp. 44~54.
- 수로국 (1995). 수로기술연보.
- 울산기상대 (1999). 울산강우관측소 강우관측자료, 미발간자료.
- 해양조사원 (1999). 울산항검조소 조위관측자료, 미발간자료.
- 낙동강홍수통제소 (2000). 울산수위관측소 수위관측자료, 미발간자료.
- 이재형, 황만하 (1994). "섬진강 하류부에서의 수위-유량관계에 관한 연구." 한국수문학회지, 한국수문학회, 제27권, 제4호, pp. 115~121.
- 추태호, 김현식, 김만식, 김철구 (2000). "감조하천에서의 수위-유량관계곡선식에 관한 연구." 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 한국수자원학회, pp. 535~540.
- Chow (1986). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill, Singapore, pp. 70~74.
- Dickinson, W.T. (1967). "Accuracy of discharge determination." *Hydrology paper* No. 20, Colorado State Univ., Fort Collins, Colo.

(논문번호:00-038/접수:2000.06.19/심사완료:2000.09.18)