

5.1.1 기저유출 분리법을 이용한 지하수 함양량 분석

국내에서는 “지하수관리 기본계획”에서 지하수 함양량 산정방법의 하나로 기저유출 분리방법을 소개하고 충적층 대상 지하수 배출량 산정에 기저유출 분석방법을 이용하여 왔다(건설교통부, 2006). 그러나 USGS에서는 기저유출분석방법이 지표수와 지하수의 동역학적 연계 해석의 가치있는 방법으로 인식하여 기존의 고전적인 기저유출 분리법을 보완하여 활용하고 있다(SCR 2017-5034). 기저유출은 일반적으로 직접적으로 측정이 불가능하지만 하천유량과 하천동위원소분석을 통해 산정이 가능하며 도식적 형태의 지하수 감소곡선법, 수평직선 분리법, N-day 법, 가변경사법에서 수문곡선에서 고주파와 저주파 시그널을 분리하는 필터링 방법을 적용하여 저감부의 기저유출을 분리하는 디지털 필터링법(RDF; Recursive Digital Filter)으로 발전하였다(Nacthan and McNahon, 1990; Arnold and Allen, 1999; Eckhardt, 2005; Vaxconcelos and others, 2013).

금번 조사에서는 “제 4차 지하수관리 기본계획”의 유역기반 지하수 수량·수질 통합관리체계 구축 전략의 지표수와 연계한 유역기반 지하수 관리방안 마련의 일환으로 기저유출 분리법을 적용하여 지하수함양량을 산정하였으며, 다음 절에서 기저유출 분리법에서 산정된 지하수 함양량과 비교·검토하여 지속가능한 지하수 개발가능량 산정의 자료로 활용하였다.

가. 기본이론

강우에서 하천 및 대수층을 통해 바다로 유출되기까지 그 경로에 따라 지표유출, 중간유출, 기저유출로 분류할 수 있으며 지표유출과 중간유출을 직접유출이라 한다.

국지적인 지하수 유동시스템에서 기저유출의 근원은 강우가 지표에 침투한 물로서, 기저유출을 강우에 의한 지하수 함양량과 같다고 가정할 수 있지만 엄밀하게 구분하면 지하수 함양량은 국지적인 기저유출량(base flow)과 광역적인 강수의 지하침투량, 지하수 이용량(pumpingrate)의 합에 해당한다. 따라서 지하수 함양량은 강수의 지하침투량과 해당지역의 지하수 이용량에 따라 변하는 수문요소이다(국토교통부, 2006).

Park(1996a)은 갈수기뿐만 아니라 함양기간의 수문곡선으로부터 지하수 유출을 분리하여 지하수 함양량을 산정하였고, 국내 5대 강유역의 지하수 함양량을 추정하였다(Park, 1996b). 최근 수문분석을 위해 직접유출로부터 기저유출을 분리할 때 발생하는 임의성과 장기 수문자료가 요구되는 문제를 해결하기 위해 “디지털필터링(RDF)”을 이용한 방법이 사용자 친화적으로 개발되어 이용되고 있으며 지화학적 물수지균형(chemical mass balance)에 의해 최적화하는 방법도 제시되고 있다(USGS, 2017; Son and Jeong, 2020).

본 과업에서는 기저유출 분석방법은 2005년 Ekhardt가 제안한 디지털 필터링법을 적용하였다. Ekhardt는 기존의 one parameter digital filtering 기술이 매개변수선정에 민감하고 유역내 대수층의 특성이 고려되지 않은 점을 개선하여 디지털 필터링 매개변수(α)와 장기간 총유출량에 대한 기저유출량의 비율의 최대값(BFI_{max})을 반영하였다.

Ekhardt(2005)는 미국의 펜실베이니아주, 메릴랜드주, 일리노이주, 그리고 독일의 유역에 이 필터링법을 적용하여 유역특성에 따른 BFI_{max} 값을 제안하였다. 다공질대수층에서 상시하천일 경우 $BFI_{max} = 0.80$, 다공질 대수층에서 일시적인 흐름이 있는 간헐하천일 경우 $BFI_{max} = 0.50$, 암반대수층에서 상시하천일 경우 $BFI_{max} = 0.25$ 이다. 각각 시간간격(최소 일단위)에서 기저유출량(B_{k+1})은 다음 식과 같으며 이 알고리즘을 적용하여 R통계프로그램에서 계산한 결과는 다음과 같다(Lim et al., 2005; Lim, 2006; USGS, 2017).

$$B_{k+1} = \frac{(1 - BFI_{max}) \cdot \alpha \cdot B_k + (1 - \alpha) \cdot BFI_{max} \cdot Q_{k+1}}{1 - \alpha \cdot BFI_{max}} \dots\dots\dots (식 5-12)$$

α : 디지털 필터링 매개변수[무차원] k : 시간간격[day]
 B_k : 기저유출량 [L^3/t] Q_{k+1} : 하천유출량 [L^3/t]
 BFI_{max} : 장기간 총유출량에 대한 기저유출 비율의 최대값[무차원]

USGS의 기술보고서에 의하면, $BFI_{max} = 0$ 이고 $B_k \leq Q_k$ 일 때,

$$B_k = \alpha B_{k-1} \dots\dots\dots (식 5-13)$$

여기서, α 를 지하수함양이 없는 가뭄기간동안 기저유출이 지수함수적으로 감소하거나 지하수유동체계가 선형적 저수지 역할을 수행할 때 감쇠상수(recession constant)로 표현할 수 있으며 지수함수적인 기저유출 감쇠를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B = B_0 e^{-ct} \dots\dots\dots (식 5-14)$$

B : 감쇠가 t 시간동안 진행된 후 기저유출 [L^3/t]
 B_0 : 감쇠가 시작될 때 기저유출 [L^3/t]
 t : 감쇠시작부터 측정된 시간[day] c : 지수적감쇠상수 [$1/t$]

식 5-13과 5-14를 연계하여 감수적 감쇠상수 c 를 α 와 관련하여 표현하면 다음과 같다.

$$\alpha = e^{-c\Delta t} \dots\dots\dots (\text{식 5-15})$$

or

$$c = -\ln(\alpha/\Delta t) \dots\dots\dots (\text{식 5-16})$$

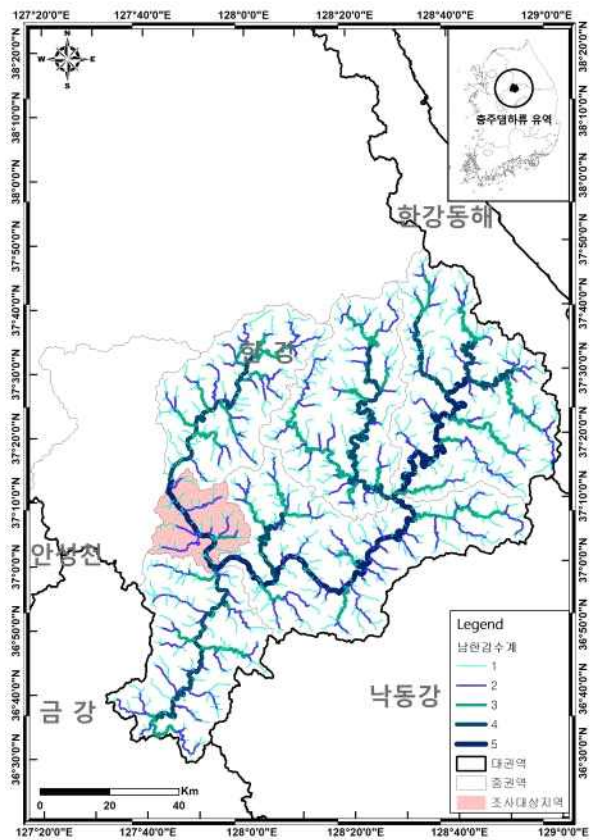
여기서, Δt 는 시간간격이며 이론적으로 대수층이 다시 함양되지 않은 상태에서 기저유출이 나타나는 동안 측정된 하천유량 자료에 의해 Eckhardt(2005)의 감쇠상수 α 는 추정될 수 있다.

나. 하천유량 측정지점

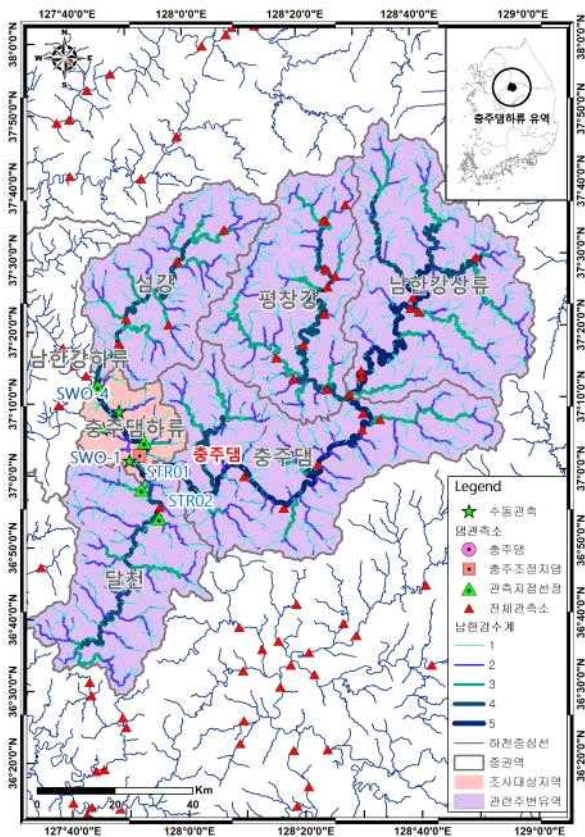
하천유량 관측지점은 기후에너지환경부 그리고 한국수자원공사에서 충주댐하류중권역 주변과 충주댐 및 달천 중권역 일부에서 수행한 측정지점 중 유역말단부에 위치해 있거나 10년이상 장기간 관측기간이 확보된 지점을 중심으로 제시하였다. 특히 충주댐하류중권역 유역의 기저유출 해석에 있어 물수지 해석상 중요한 상류지점(충주댐, 탄금교)에서 하천수위와 유량측정에 의해 수위-유량관계 곡선식(H-Q rating curve)이 제시되지 않은 탄금교의 경우 이를 대신하기 위해 상류의 팔봉교와 국원대교를 추가하여 표준유역내 하천유출량을 산정하였다<그림 5-XX>. 유역선정의 근거가 되는 <그림 5-XX>은 기저유출 해석에 있어서 유역규모의 중요성을 나타내는 개념도(USGS, 2017)이다.



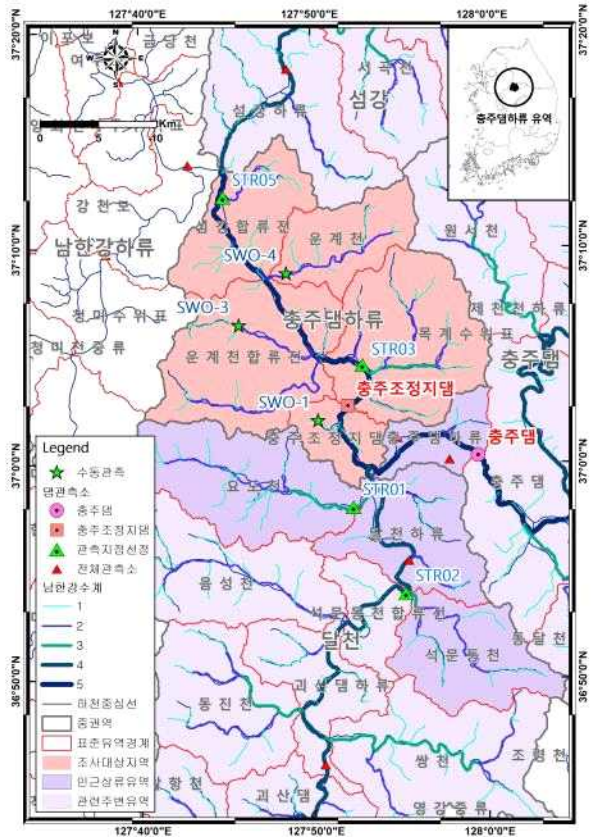
a) 유역경계



b) 수계분포

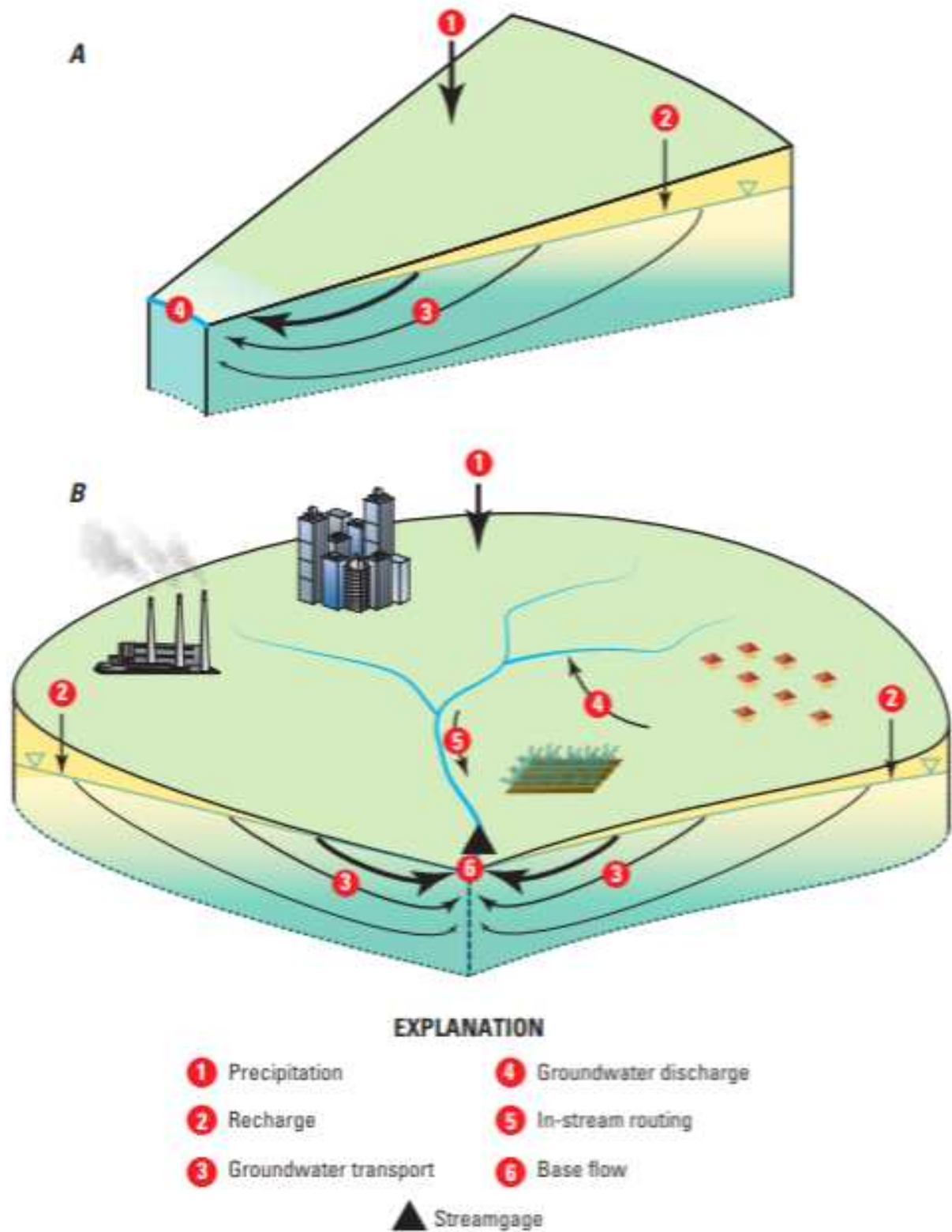


c) 하천수위 관측소



d) 선정된 관측위치

<그림 5-1> 창녕지역 하천유량 측정지점 위치도



〈그림 5-2〉 지하수 함양과 기저유출에 대한 국지적(A), 유역규모(B)의 개념모식도(USGS, 2017)

〈표 5-1〉 충주댐하류 유역 주변 하천 및 댐 관측지점

구 분	관측소명	경도	위도	영점표고	관측개시일
str01	충주시(국원대교)	127-52-18.0	36-57-58.0	63.819	2013-12-31
str02	팔봉교	127-55-16.0	36-53-57.0	71.602	2011-12-01
str03	충주시(목계교)	127-52-52.0	37-04-34.0	52.337	1917-01-01
str05	남한강대교	127-44-52.0	37-12-22.0	39.676	2010-11-11
충주댐	충주본댐우안	127-52-00.1	37-02-40.9	-	1985-08-30
충주조정지댐	-	127-59-31.8	37-00-21.1	-	1985-05-15
SWO-1	하구암천	127-50-17.4	37-02-00.5	72.00	2024-11-07
SWO-3	양성천	127-45-44.4	37-06-26.2	95.89	2024-11-07
SWO-4	운계천	127-48-30.5	37-08-50.5	55.32	2024-11-07

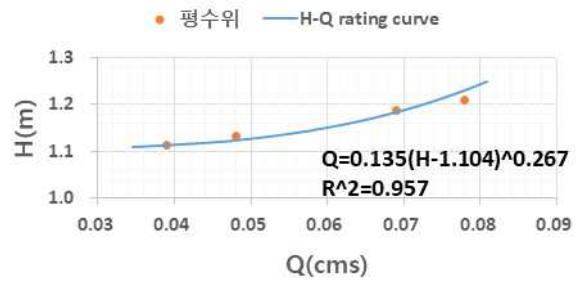
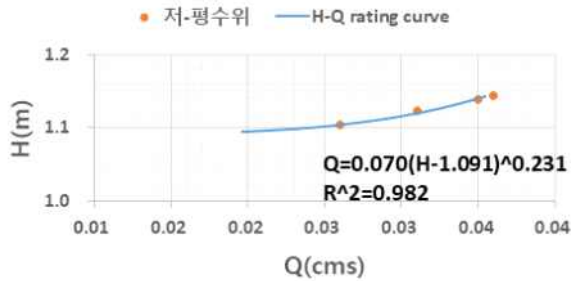
다. 수위-유량 관계곡선 작성 및 댐 유출량 분포현황

수위-유량관계곡선(H-Q)이란 관측 수위(H) 및 유량(Q)과의 관계를 나타낸 곡선이며 이것을 사용하여 연속적으로 측정되는 수위에서 유량을 산출한다. 일반적으로 사용되는 수위-유량관계 곡선의 형태는 지수형과 포물선형이 있으며 되도록 지수형태로 작성한다. 지수형태는 다음과 같다.

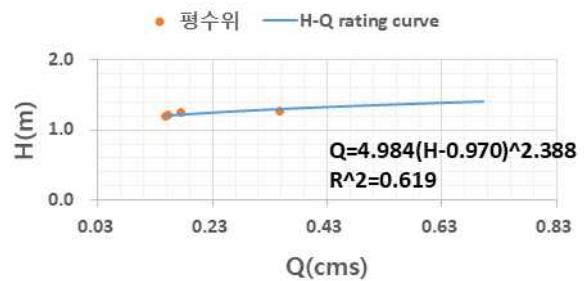
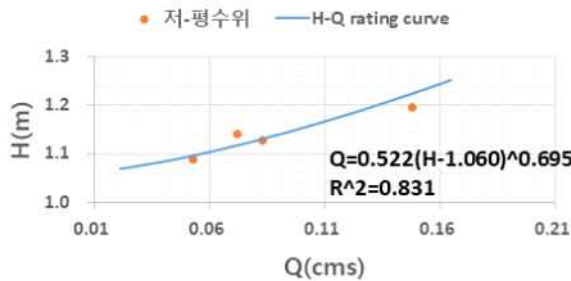
$$Q=a(H+b)^c$$

여기서, Q는 유량(cms; cubic meter per second, m³/sec), H는 상대수위(실수위+조정수위), a, b, c는 매개변수이다. 지수형은 하천수위와 유량의 물리적인 개념을 표현하는 식으로 매개변수 b는 물리적으로 유량이 “0”이 되는 수위이며 매개변수 c는 하천형상에 따라 어느 정도 일정한 값을 가진다. 이러한 수위-유량관계곡선을 작성할 때는 관측자료의 이상치나 관측방법에 대한 점검을 실시한 후 곡선식 적용 기간을 결정한다. 하상의 수리특성이 변하지 않고 하상재료가 심하게 이동하지 않는다면 수위-유량관계는 안정적이나, 하상이나 수리조도계수가 변한다면 하상변동이 일어난 시점을 경계로 하여 새로운 수위-유량관계곡선식을 적용한다. 이를 위해 수위-단면적(H-A) 관계나 수위-유속(H-V) 관계 등의 상관성을 비교하여 단면적 변동을 확인한 후 당해 연도(1월~12월) 혹은 수문년(10월초~다음해 9월)의 수위-유량관계곡선을 선정한다. 이때 영유량 수위를 결정해야 한다. 보통 하도통제가 일어나는 구간의 횡단면을 조사하여 하천수가 마를 때의 최대깊이가 대략적인 영유량 수위가 되며 수위-유량관계곡선식에서 위로 블록하거나 아래로 블록한 형태가 직선이 될 때 b값을 시행착오법이나 직접법으로 산정한다. 여기서는 하류 보의 영향을 받지 않는 경우 영유량 수위(b)를 Log(Q)와 Log(H-b)의 상관성이 가장

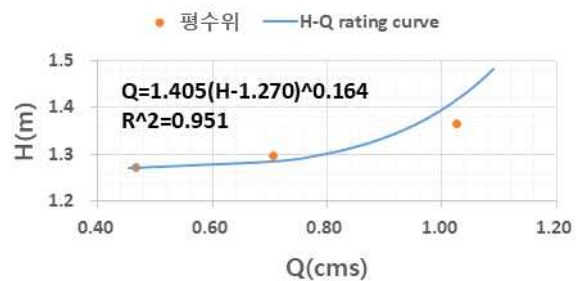
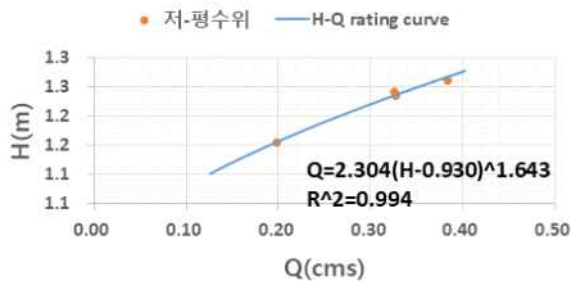
좋은 경우로 시행착오를 거쳐 구하였으며 하루 보의 영향을 받는 경우에는 하루보의 상단고를 영유량 수위로 정하였다. 상기과정을 거쳐 갈수기와 평수기를기준으로 도시한 수위-유량관계는 다음과 같다.



a) SWO-1



b) SWO-3



c) SWO-4

〈그림 5-3〉 관측시기 및 지점별 수위-유량관계 그래프

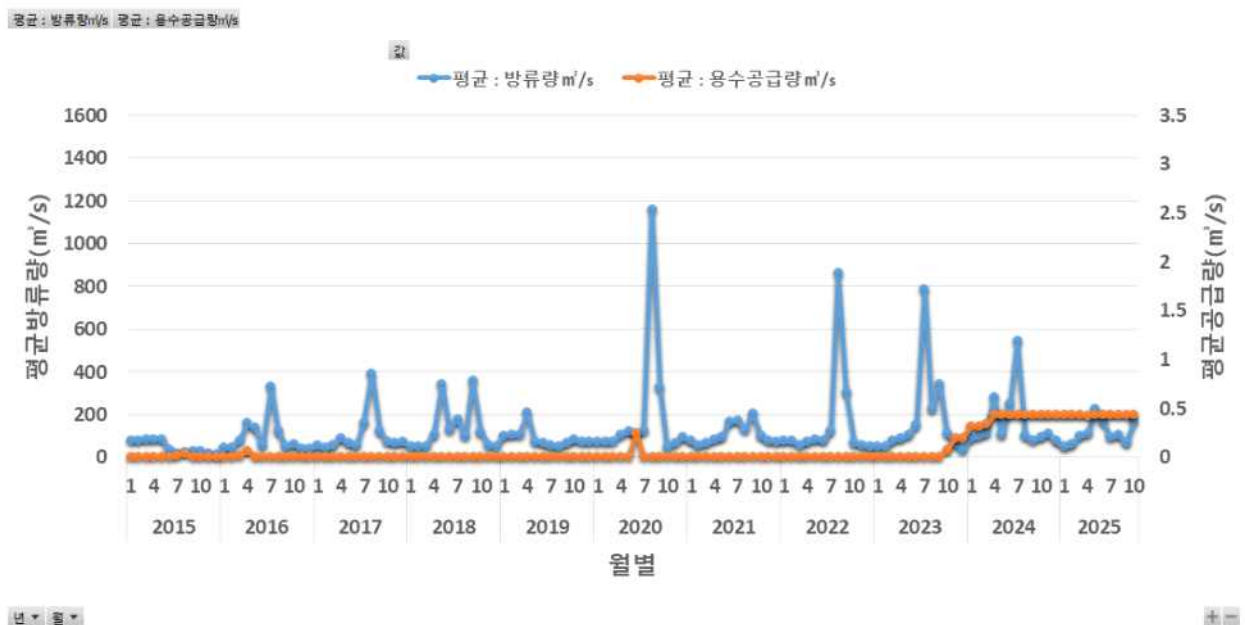
〈표 5-2〉 수동관측 지점별 수위-유량관계 곡선식 적용현황

지 점	적용수위(m)	수위-유량관계	결정계수	비 고
SWO-1	$1.10 \leq H \leq 1.14$	$Q = 0.070 \times (H - 1.091)^{0.231}$	0.98	저-평수기
	$1.11 \leq H \leq 1.21$	$Q = 0.135 \times (H - 1.104)^{0.267}$	0.96	평수기
SWO-3	$1.09 \leq H \leq 1.19$	$Q = 0.522 \times (H - 1.060)^{0.695}$	0.83	저-평수기
	$1.20 \leq H \leq 1.26$	$Q = 4.984 \times (H - 0.970)^{2.388}$	0.62	평수기
SWO-4	$1.16 \leq H \leq 1.26$	$Q = 2.304 \times (H - 0.930)^{1.643}$	0.99	저-평수기
	$1.27 \leq H \leq 1.37$	$Q = 1.405 \times (H - 1.270)^{0.164}$	0.95	평수기

한편, 충주댐에서 하류의 충주조정지댐으로 직접 보내지고 있는 방류량과 취수관을 통해 전답이나 공장 등으로 보내지고 있는 공급량자료를 일별로 구축하고, 여기서 방류량자료를 인접한 과업대상 표준유역내 기저유출 산정에 반영하였으며 년도별, 월별 평균 방류량과 공급량의 변화를 확인하기 위해 그래프로 비교하였다.



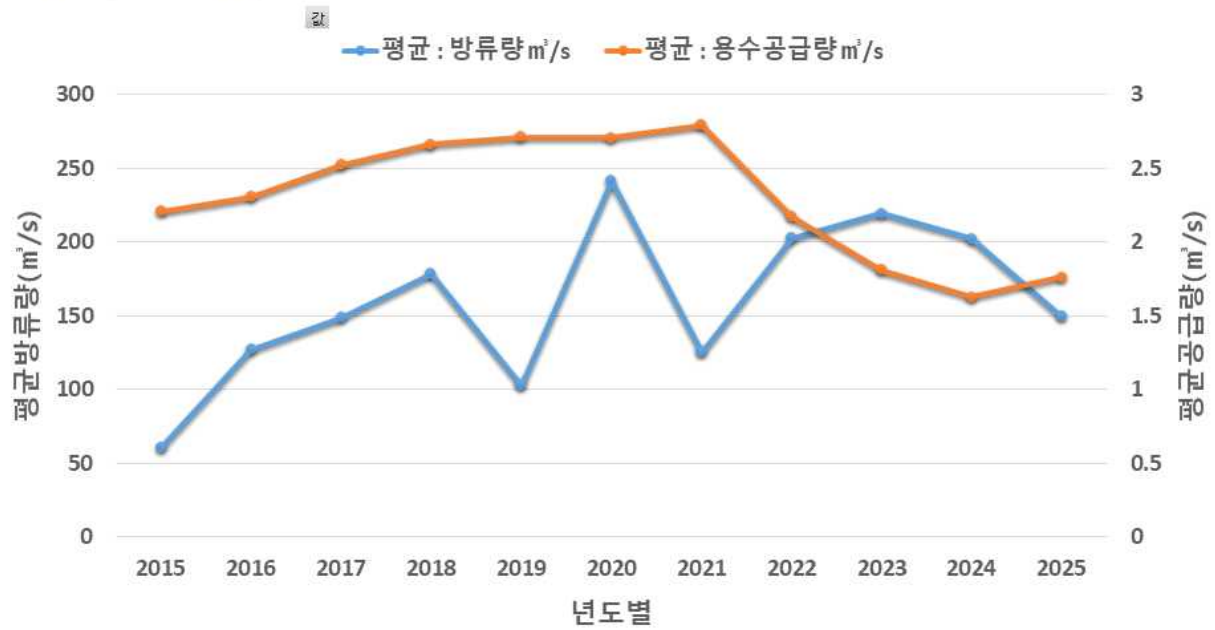
a) 년도별



b) 월별

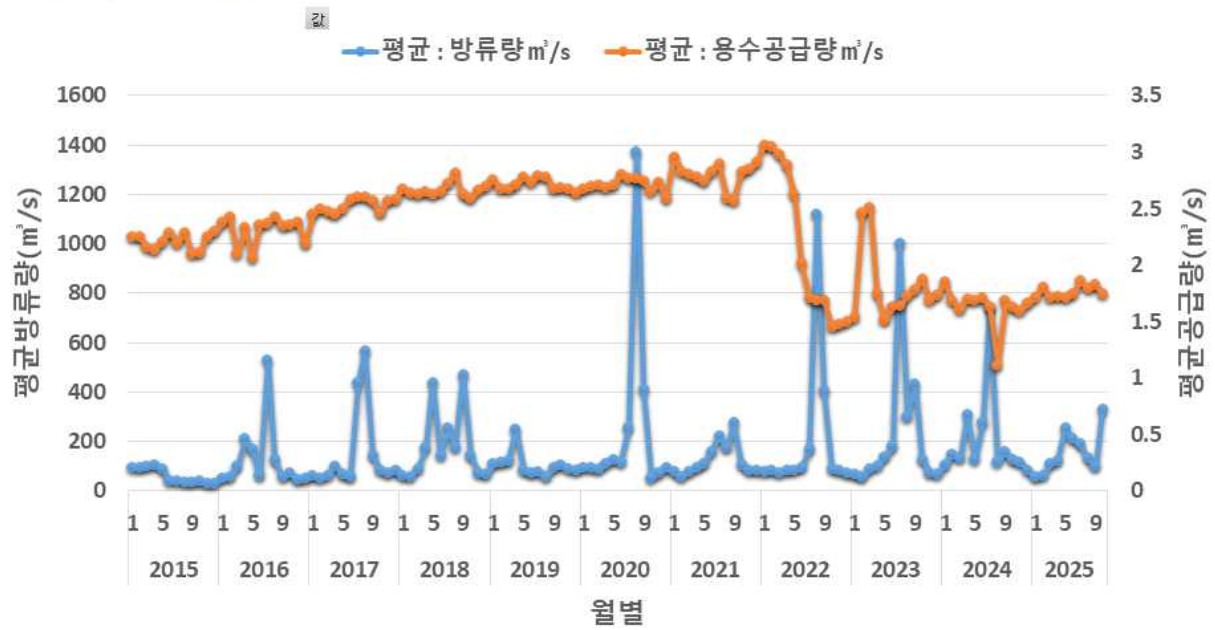
<그림 5-4> 충주댐 시기별 평균 유출량

평균 : 방류량 m³/s 평균 : 용수공급량 m³/s



a) 연도별

평균 : 방류량 m³/s 평균 : 용수공급량 m³/s



b) 월별

<그림 5-6> 충주조정지댐 시기별 평균 유출량

충주댐과 충주조정지댐의 평균 유출량 분포를 확인해 보면, 방류량은 연도 별로는 2020년

평균 199.460, 241.440m³/sec로 가장 높고, 2015년 평균 48.030, 59.971m³/sec로 가장 낮다. 월별로는 8월 평균 296.656, 378.378m³/sec로 가장 높고, 12월 평균 58.83, 70.031m³/sec로 가장 낮게 나타난다. 공급량은 년도 별로는 충주댐의 경우 2025년 평균 0.43m³/sec로 가장 높지만 충주조정지댐의 경우 2021년 평균 2.796m³/sec으로 나타난다. 월별로는 충주댐의 경우 3월 평균 0.101 m³/sec로 가장 높게 나타나고 충주조정지댐의 경우는 3월 평균 2.394m³/sec로 나타났다.

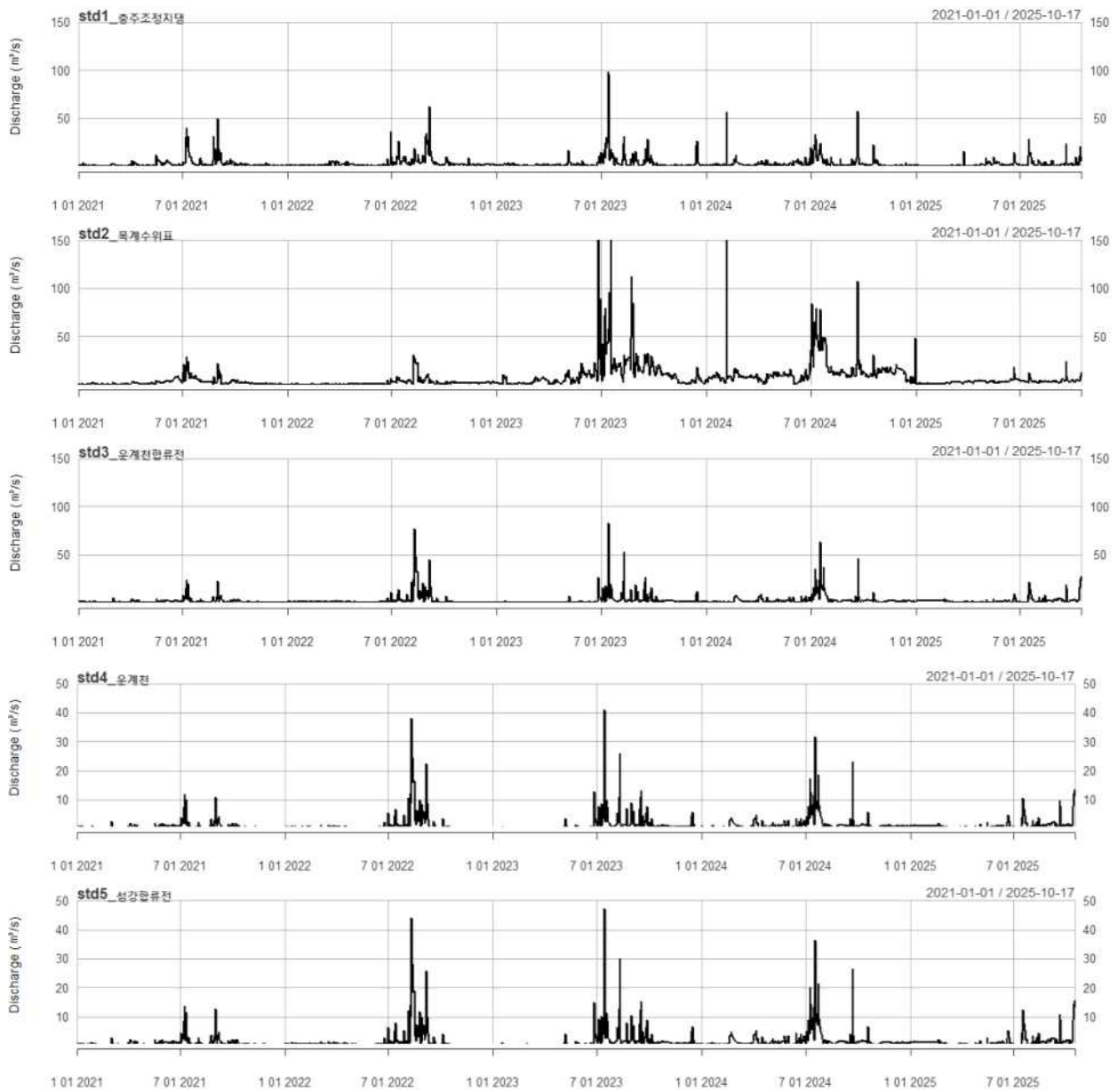
한편, 1~5월 갈수기-평수기시 평균 유출량이 다른 시기보다 높게 나타는 경우가 국지적으로 나타나는데 그것은 댐에서 방류하지 않고 수위를 높이는데서 기인한 것으로 사료된다.

다. 하천수위와 유량 시계열 자료

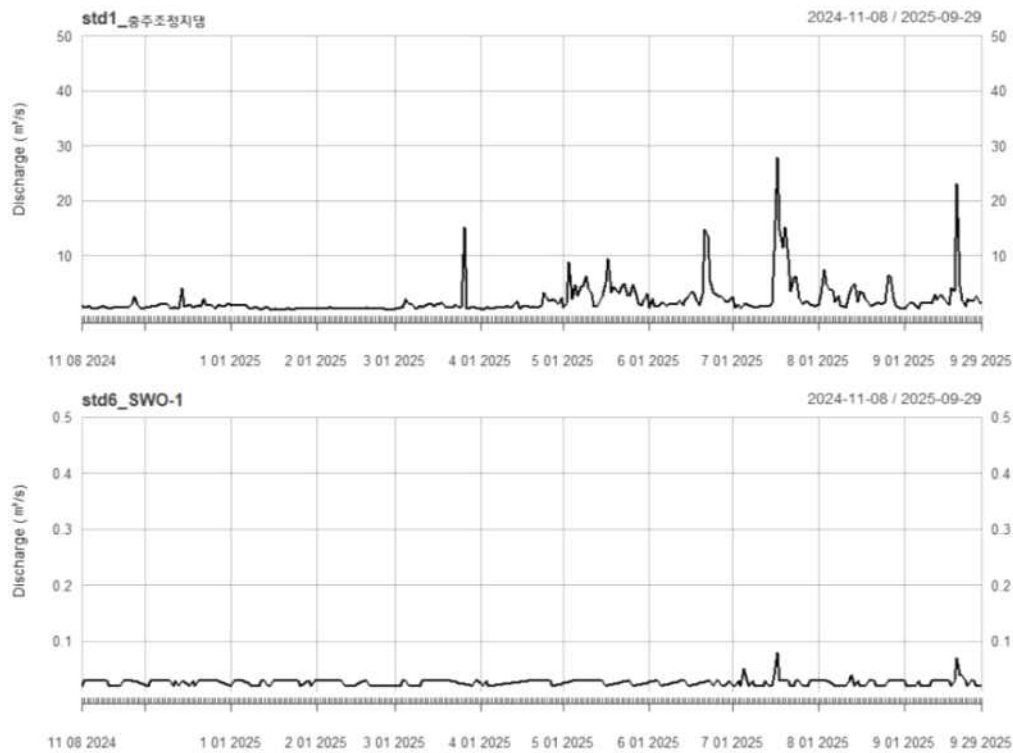
조사지역 유역말단의 하천유량 그래프는 국가수자원관리종합정보 시스템에서 수집하였으며 해당지점에 대해 수문조사보고서나 수문조사연보에 수위-유량 관계곡선이 제시되지 않은 지점은 제외하였고 상류의 댐이나 보의 영향으로 수자원총량 대비 100% 넘어가는 지점은 유역유출고를 고려하여 재산정하였다<표 5-43, 그림 5-49~51>.

<표 5-3> 월평균 하천유량(m³/s)

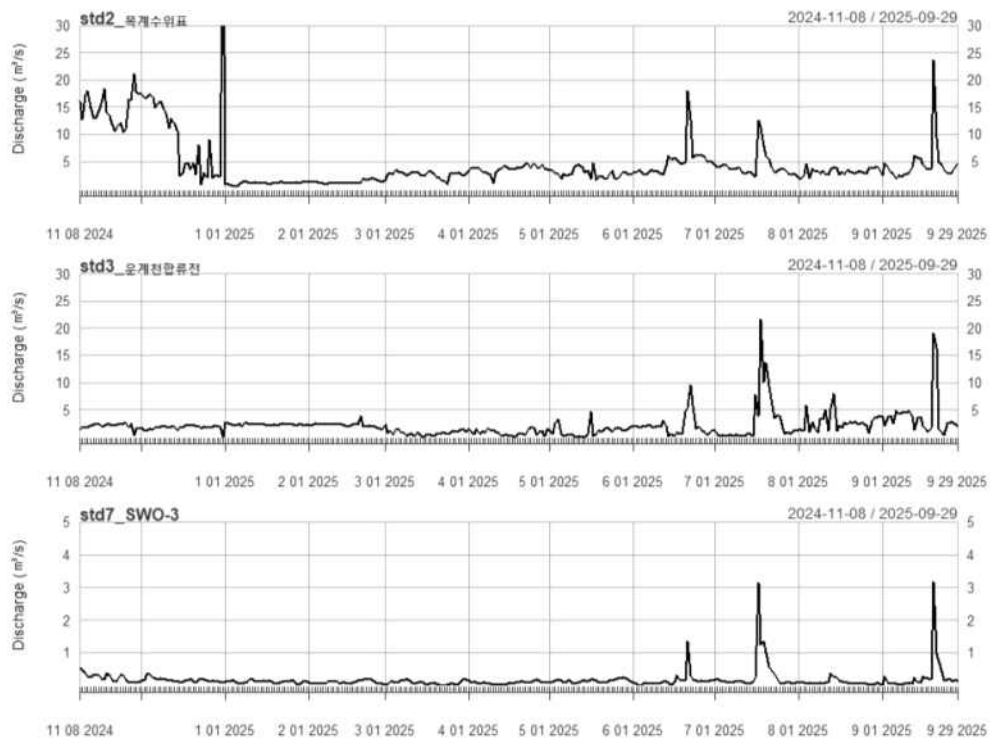
구 분	충주 조정지댐	목계교 수위표	운계천 합류전	운계천	성강 합류전	수동관측			충주댐	충주 조정지댐	국원 대교	팔봉교	목계교	남한강 대교
	std1	std2	std3	std4	std5	SWO-1	SWO-3	SWO-4	Dam01	Dam02	str01	str02	str03	str05
1	1.03	2.67	1.39	0.69	0.80	0.02	0.11	0.34	68.40	76.77	1.16	12.83	80.16	81.27
2	1.47	2.54	1.33	0.66	0.76	0.02	0.10	0.29	67.52	80.59	1.04	14.97	80.88	82.39
3	1.55	2.17	1.78	0.88	1.02	0.01	0.09	0.52	79.76	95.96	1.44	98.06	97.65	101.24
4	1.66	2.82	3.75	1.86	2.15	0.01	0.08	0.25	126.83	151.45	1.78	69.45	150.63	146.64
5	2.21	3.05	2.07	1.03	1.18	0.01	0.14	0.20	130.93	153.99	8.60	59.91	156.98	161.27
6	2.45	4.25	1.76	0.87	1.00	0.01	0.16	0.20	114.58	129.10	6.90	19.13	138.78	141.58
7	9.51	11.57	5.75	2.85	3.28	0.03	0.35	0.38	235.18	356.01	5.59	8.06	381.21	395.66
8	4.41	7.94	5.10	2.53	2.92	0.02	0.09	0.27	296.74	380.61	2.25	8.88	378.81	411.15
9	5.50	6.11	3.91	1.94	2.23	0.03	0.29	0.65	177.06	235.92	1.46	8.04	252.65	252.77
10	2.32	3.64	1.96	0.97	1.12	0.02	0.27	0.67	82.96	105.49	1.32	8.97	113.62	115.01
11	1.13	2.58	1.29	0.64	0.74	0.01	0.25	0.68	63.33	74.82	1.07	10.48	77.16	77.97
12	1.46	2.10	1.26	0.63	0.72	0.02	0.16	0.70	58.89	72.31	1.06	9.76	71.75	73.48
최소	1.03	2.10	1.26	0.63	0.72	0.01	0.08	0.20	58.89	72.31	1.04	8.04	71.75	73.48
최대	9.51	11.57	5.75	2.85	3.28	0.03	0.35	0.70	296.74	380.61	8.60	98.06	381.21	411.15
평균	2.89	4.29	2.61	1.30	1.49	0.02	0.17	0.43	125.18	159.42	2.81	27.38	165.02	170.04



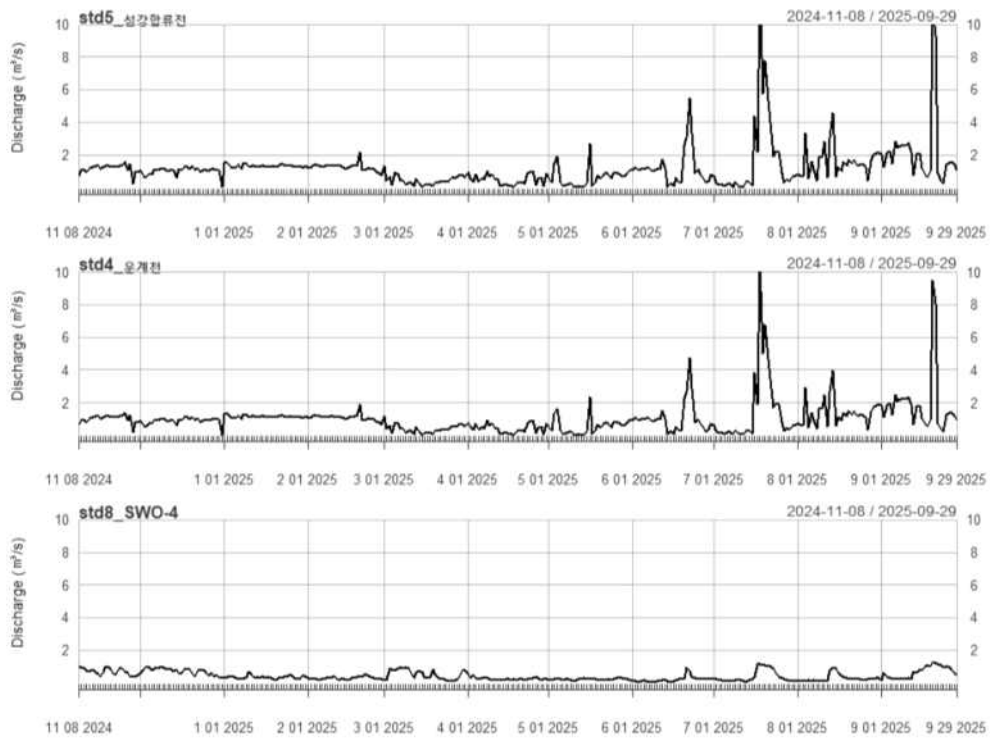
〈그림 5-9〉 충주댐하류 유역 표준유역별 하천유량(2015~2025년)



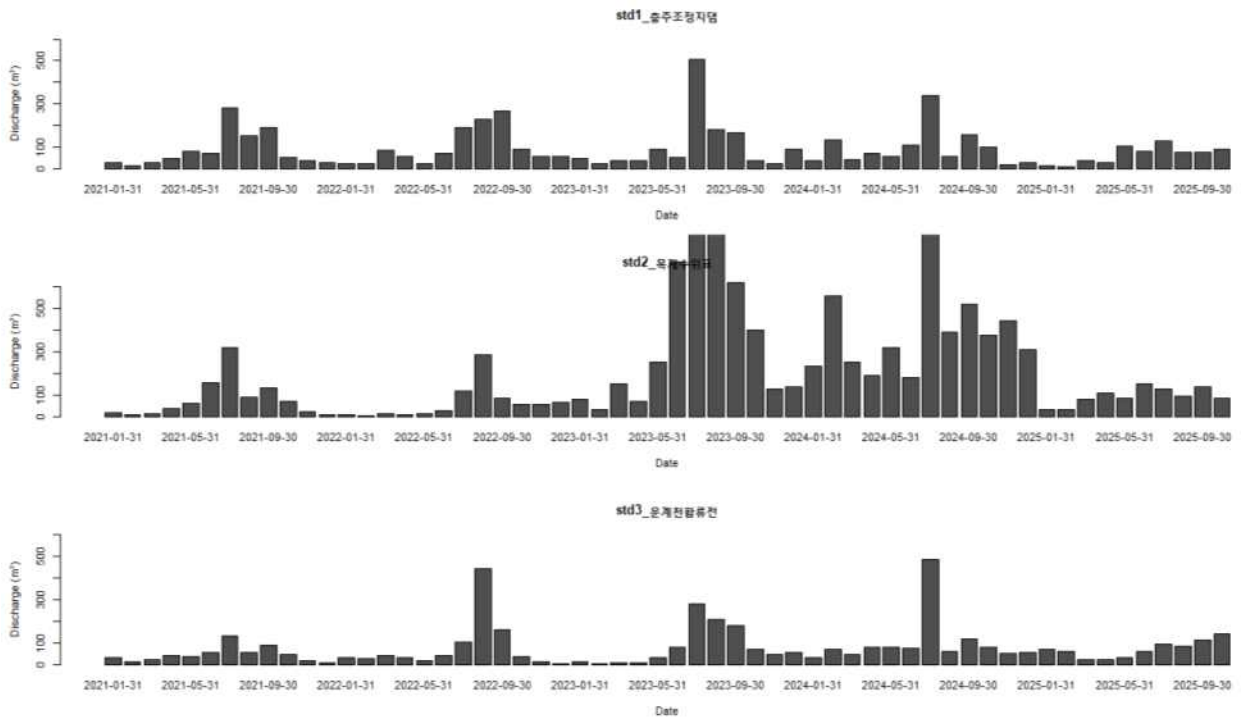
<그림 5-10> 충주댐하류 유역 수동관측지점 하천유량 비교(SWO-1)



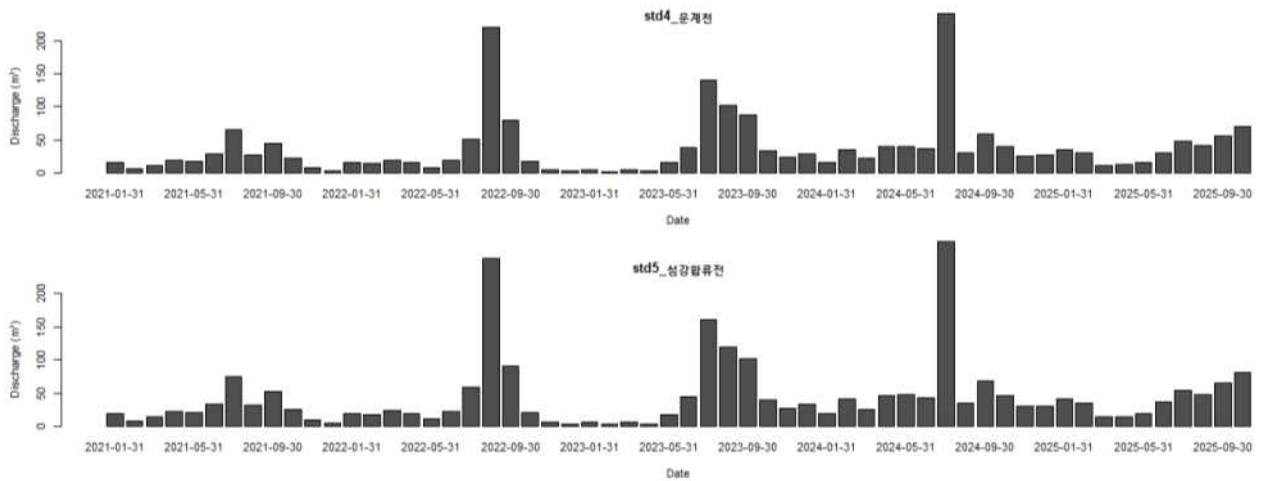
<그림 5-11> 충주댐하류 유역 수동관측지점 하천유량 비교(SWO-3)



<그림 5-12> 충주댐하류 유역 수동관측지점 하천유량 비교(SWO-4)



<그림 5-13> 충주댐하류 유역 월별 하천유량변화



〈그림 5-7〉 충주댐하류 유역 월별 하천유량변화(계속)

라. 수문곡선 기저유출 분리

상기 유량 그래프에서 결측기간을 제외한 나머지 관측기간에 대해 기저유출을 분석하였고 Eckhardt(2005)의 식을 통계프로그램 R에 구현하여 기저유출 감쇠상수 α 와 대수증특성과 관련 상수 β 에 대해 민감도분석을 통해 충주댐하류 유역내 하천에 적합하게 산정하였다<표 5-XX~XX, 그림 5-XX~XX>.

〈표 5-4〉 월평균 기저유출량($\beta=0.725$, 단위 : m^3/s)

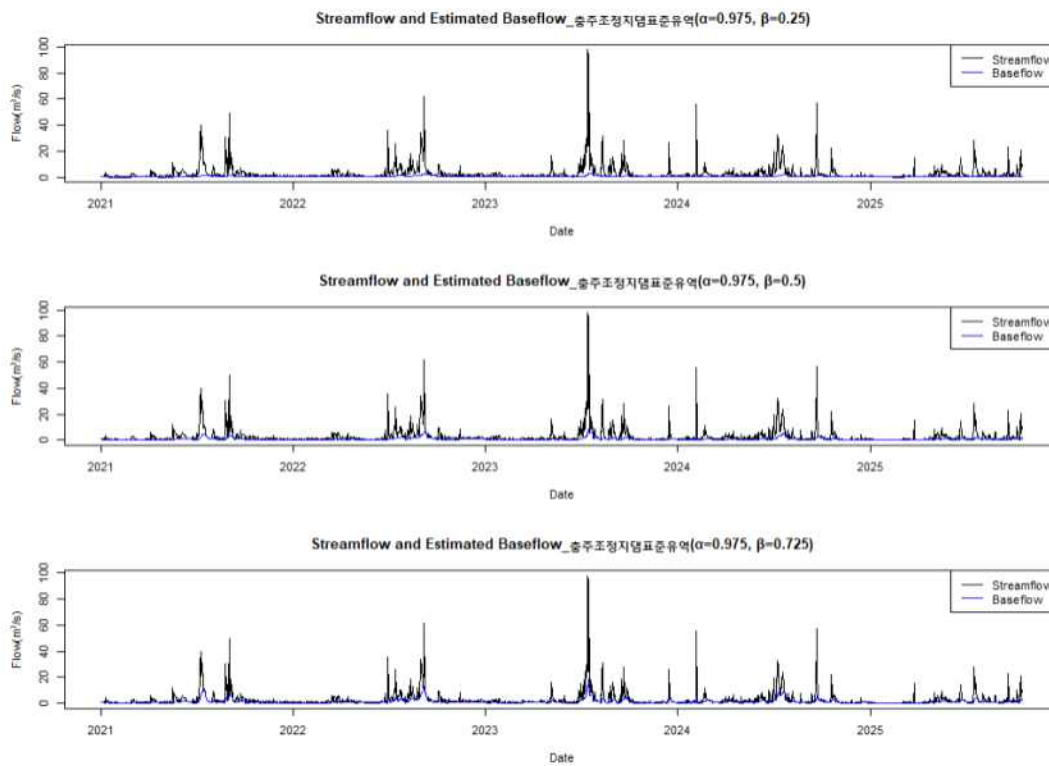
구 분	std1	std2	std3	std4	std5	SWO-1	SWO-3	SWO-4
1월	28.65	19.32	9.99	10.92	9.91	8.96	7.91	8.78
2월	29.43	23.52	10.82	11.84	10.71	7.95	5.87	6.62
3월	41.75	35.26	8.71	9.51	8.63	8.31	3.80	9.59
4월	47.19	20.71	8.77	9.59	8.72	8.31	4.49	6.09
5월	59.73	42.21	7.73	8.42	7.65	8.98	9.32	4.71
6월	63.77	57.64	11.79	12.88	11.66	8.28	7.55	3.48
7월	236.26	171.92	44.37	48.49	43.94	8.96	18.09	6.57
8월	103.99	99.13	27.02	29.51	26.72	8.68	6.66	5.91
9월	153.59	89.57	22.65	24.74	22.41	8.34	10.75	11.62
10월	61.90	88.45	12.59	13.77	12.47	7.57	14.58	13.19
11월	37.45	60.63	8.64	9.42	8.55	6.79	18.41	14.75
12월	49.84	39.39	7.75	8.44	7.66	9.05	12.38	16.23
최소	28.65	19.32	7.73	8.42	7.65	6.79	3.80	3.48
최대	236.26	171.92	44.37	48.49	43.94	9.05	18.41	16.23
평균	61.20	50.27	12.68	13.84	12.55	8.32	8.88	8.10

〈표 5-5〉 월평균 기저유출량($\beta=0.5$, 단위 : m^3/s)

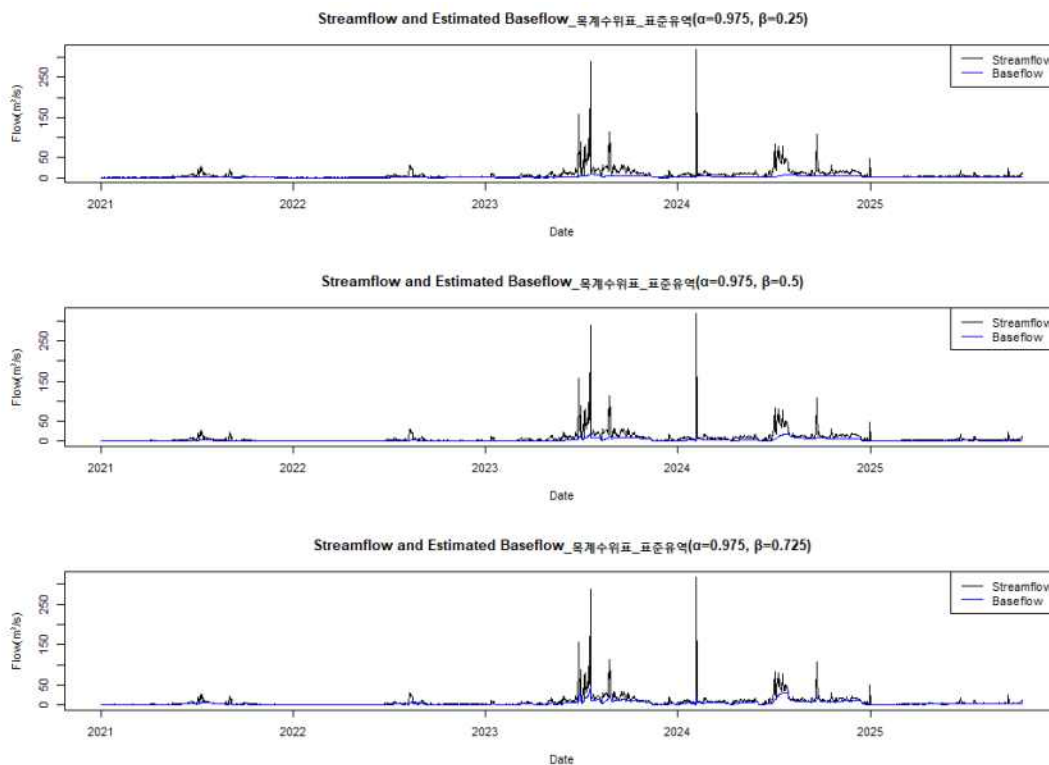
구 분	std1	std2	std3	std4	std5	SWO-1	SWO-3	SWO-4
1월	22.22	12.33	6.50	7.08	6.43	6.30	6.77	8.04
2월	19.78	18.16	6.84	7.46	6.76	5.59	4.42	5.47
3월	28.20	23.23	6.31	6.87	6.23	5.78	2.68	7.33
4월	33.43	13.65	5.70	6.23	5.67	5.71	2.43	4.63
5월	40.88	25.45	5.26	5.72	5.19	6.17	6.10	3.48
6월	44.71	32.97	6.82	7.45	6.75	5.77	4.09	2.29
7월	148.94	104.68	28.97	31.66	28.68	6.18	11.52	4.51
8월	70.96	77.36	17.19	18.76	16.98	6.11	5.71	4.18
9월	101.26	67.11	13.94	15.22	13.78	5.78	7.05	7.06
10월	44.83	75.34	8.01	8.77	7.93	5.91	12.58	10.49
11월	28.17	46.35	5.37	5.84	5.30	6.04	18.10	13.92
12월	37.22	26.79	4.83	5.23	4.74	6.74	9.98	12.84
최소	19.78	12.33	4.83	5.23	4.74	5.59	2.43	2.29
최대	148.94	104.68	28.97	31.66	28.68	6.74	18.10	13.92
평균	42.83	34.68	8.12	8.86	8.03	6.00	6.44	6.16

〈표 5-6〉 월평균 기저유출량($\beta=0.25$, 단위 : m^3/s)

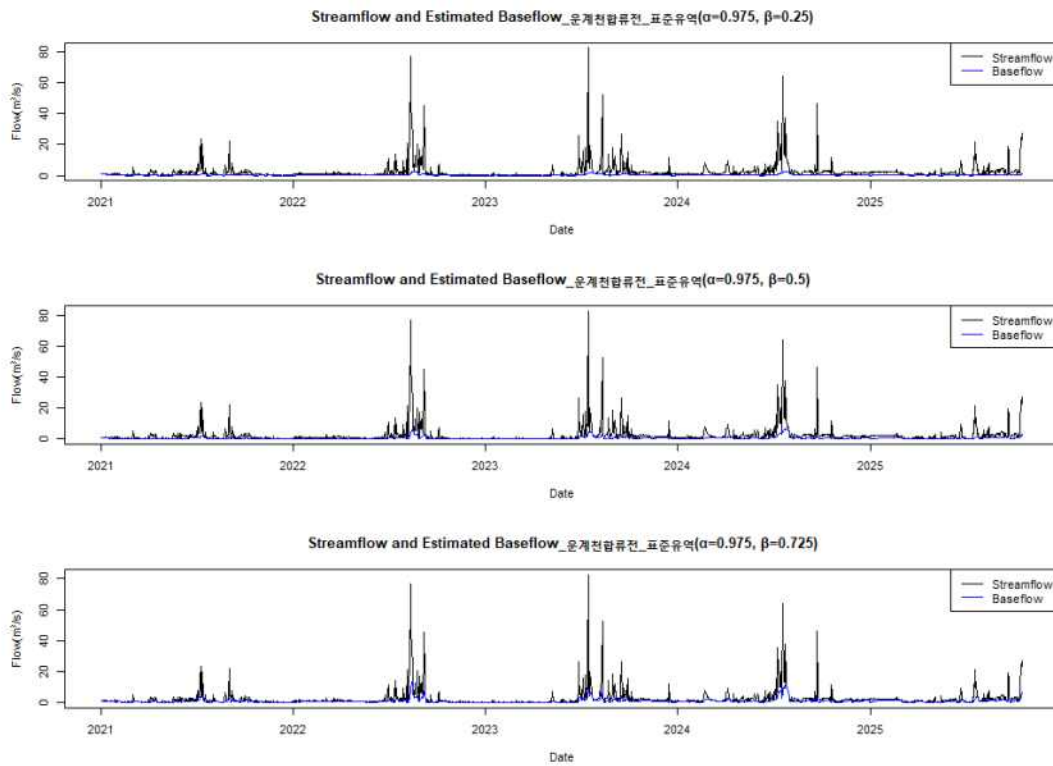
구 분	std1	std2	std3	std4	std5	SWO-1	SWO-3	SWO-4
1월	16.78	6.99	3.88	4.21	3.81	3.73	5.05	6.00
2월	12.49	11.76	3.34	3.63	3.28	3.00	3.02	3.61
3월	17.19	13.08	3.35	3.63	3.29	3.00	1.88	4.15
4월	20.34	7.99	3.24	3.52	3.21	2.88	1.28	3.08
5월	24.38	11.81	2.78	3.05	2.78	3.07	2.76	2.40
6월	25.71	15.27	3.25	3.51	3.23	2.90	1.58	1.54
7월	76.92	52.94	14.24	15.53	14.09	3.07	5.89	2.44
8월	46.56	48.40	10.49	11.43	10.34	3.07	5.04	2.87
9월	58.20	39.03	8.56	9.34	8.46	2.87	3.13	3.42
10월	33.48	40.30	5.09	5.55	5.02	4.22	10.55	8.40
11월	18.86	26.22	3.08	3.33	3.02	5.56	17.96	13.37
12월	21.64	15.04	2.78	3.01	2.72	4.91	7.61	9.36
최소	12.49	6.99	2.78	3.01	2.72	2.87	1.28	1.54
최대	76.92	52.94	14.24	15.53	14.09	5.56	17.96	13.37
평균	26.69	19.17	4.51	4.90	4.45	3.43	4.08	4.15



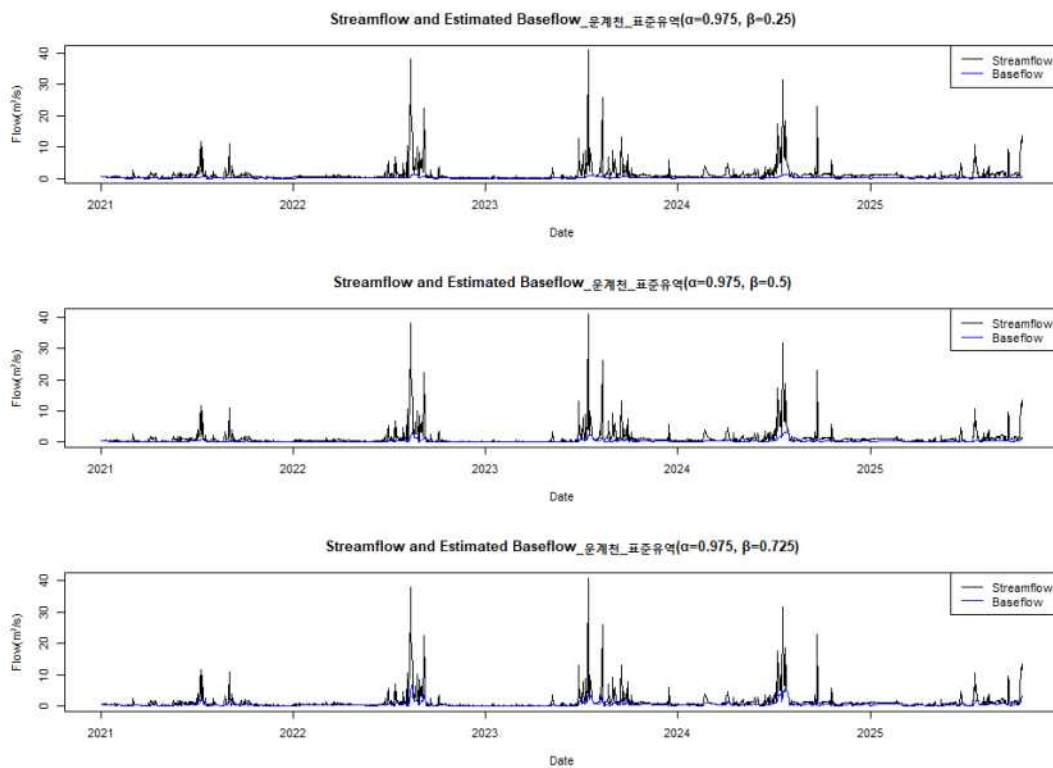
<그림 5-14> 충주조정지댐 표준유역 내 하천유량(Q) 및 기저유출량(bf)



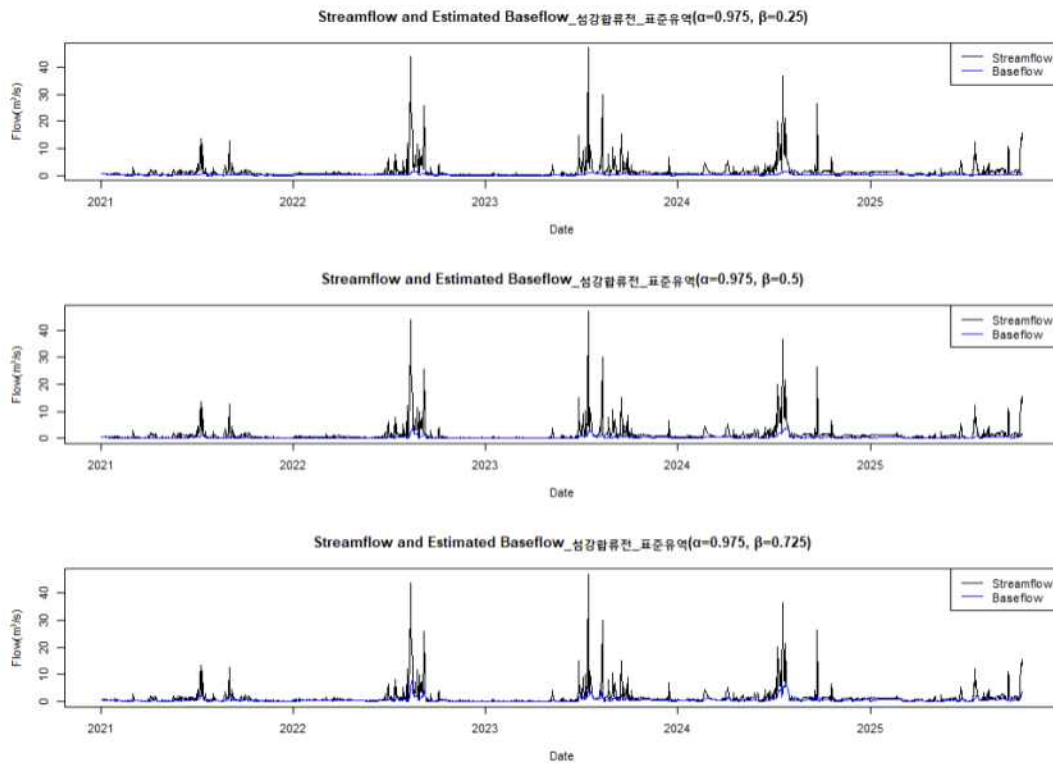
<그림 5-15> 목계수위표 표준유역 내 하천유량(Q) 및 기저유출량(bf)



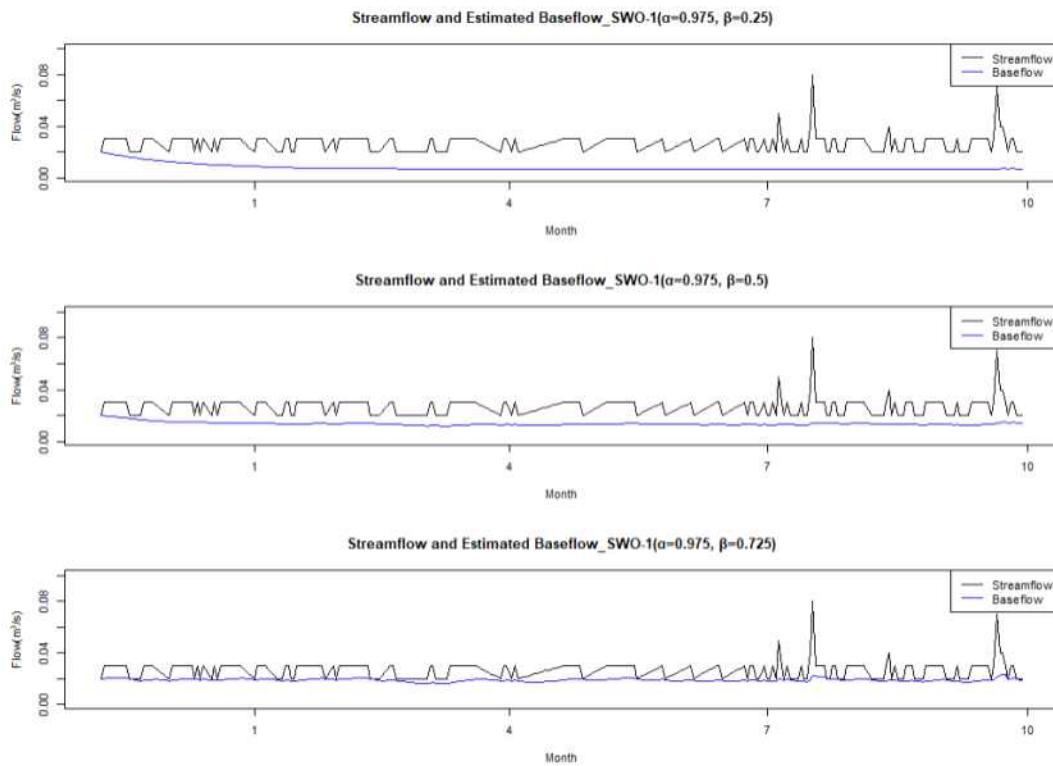
<그림 5-16> 운계천합류전 표준유역 내 하천유량(Q) 및 기저유출량(bf)



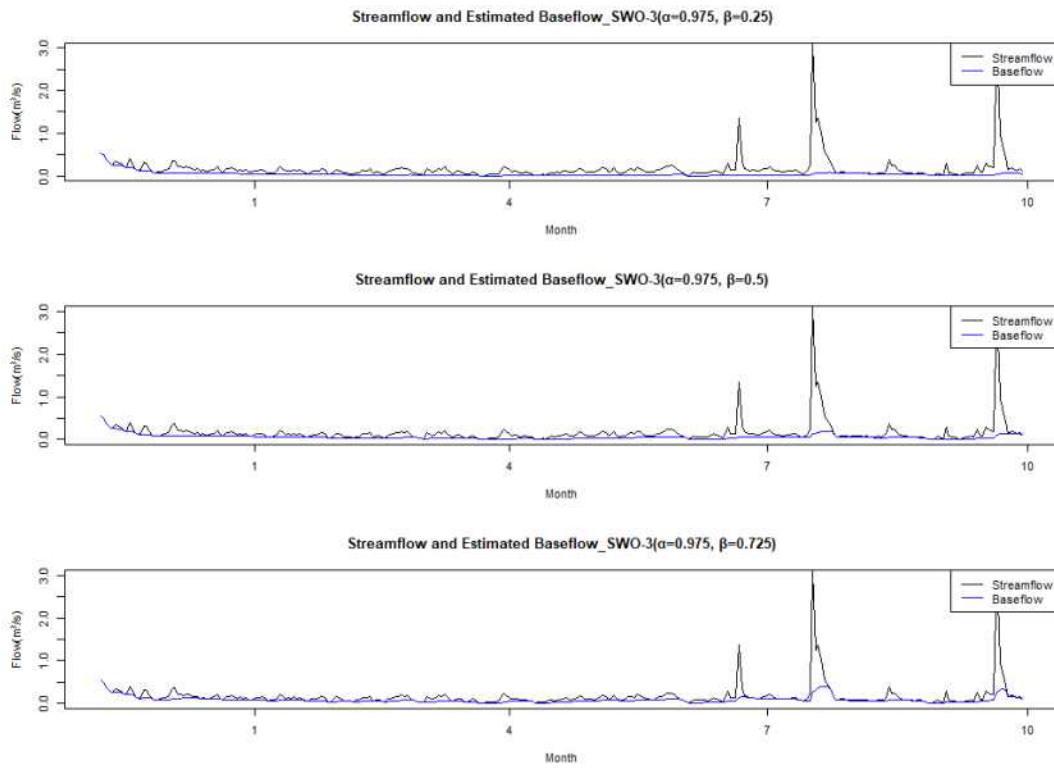
<그림 5-17> 운계천 표준유역 내 하천유량(Q) 및 기저유출량(bf)



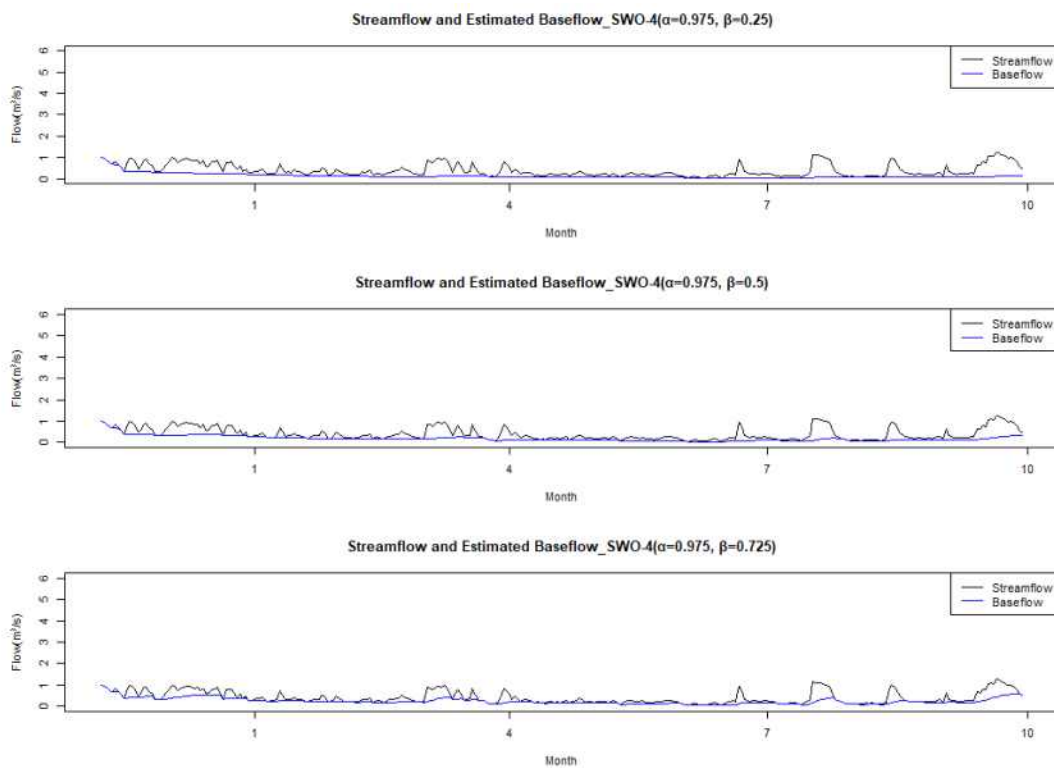
<그림 5-18> 섬강합류전 표준유역 내 하천유량(Q) 및 기저유출량(bf)



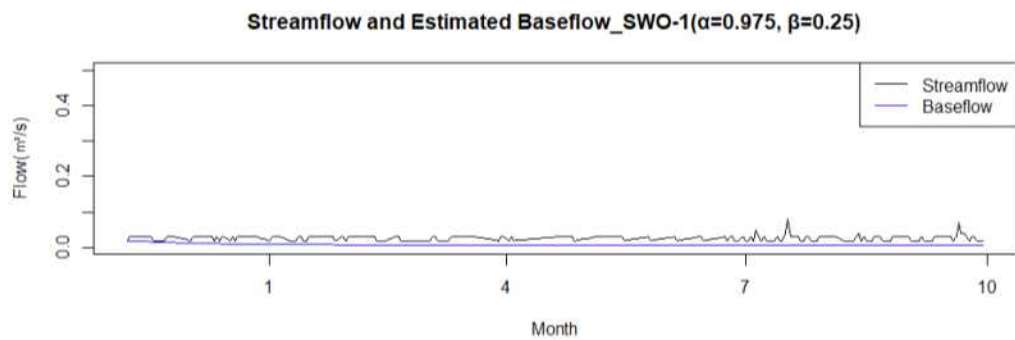
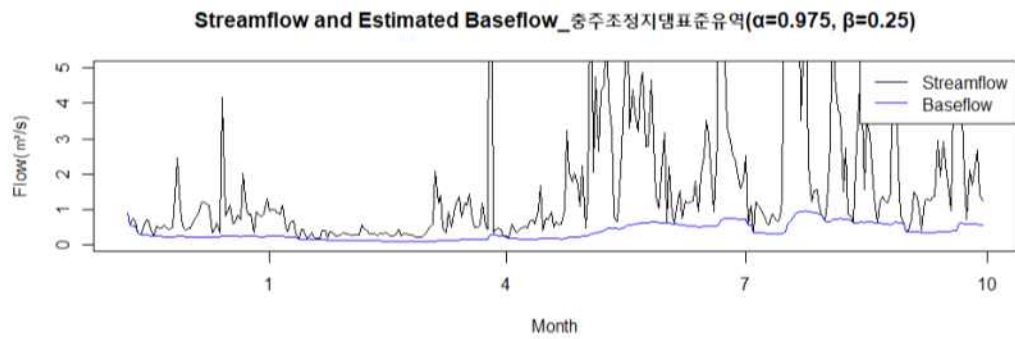
<그림 5-19> SWO-1 수동관측 지점의 하천유량(Q) 및 기저유출량(bf)



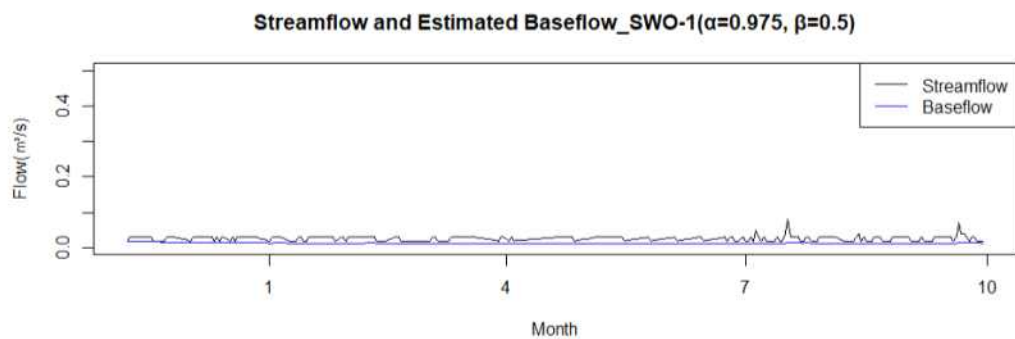
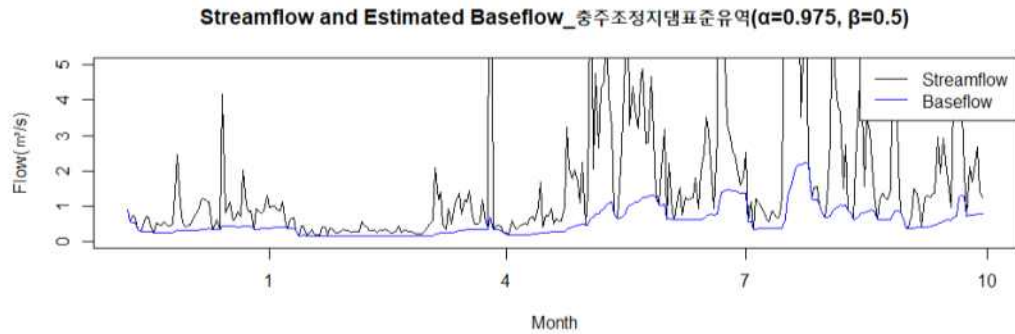
<그림 5-20> SWO-3 수동관측 지점의 하천유량(Q) 및 기저유출량(bf)



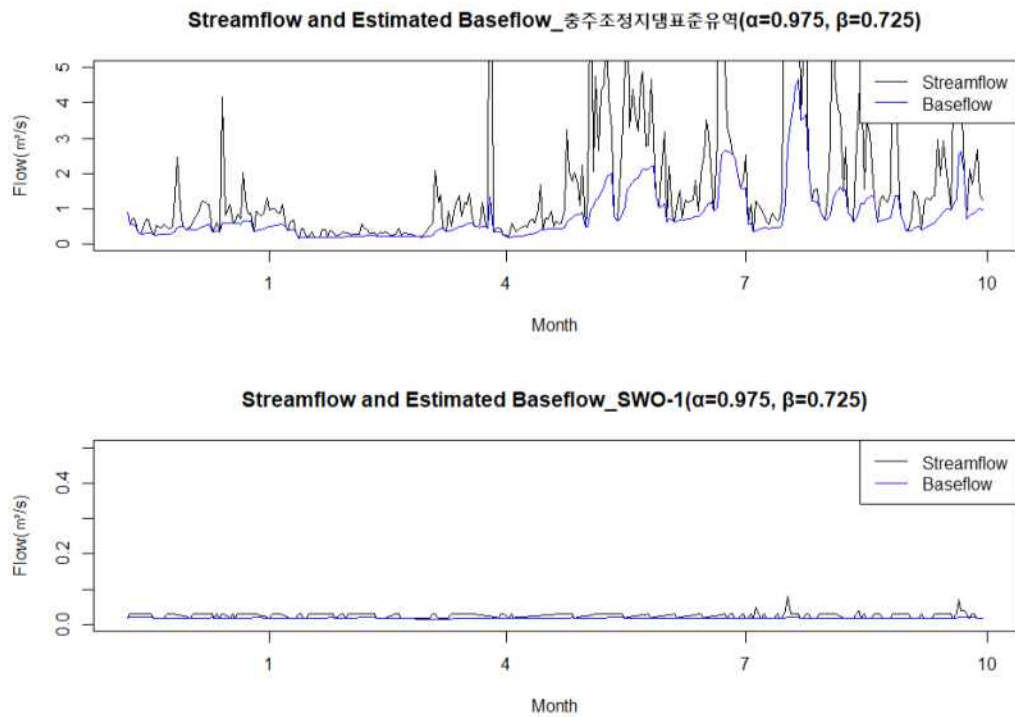
<그림 5-21> SWO-4 수동관측 지점의 하천유량(Q) 및 기저유출량(bf)



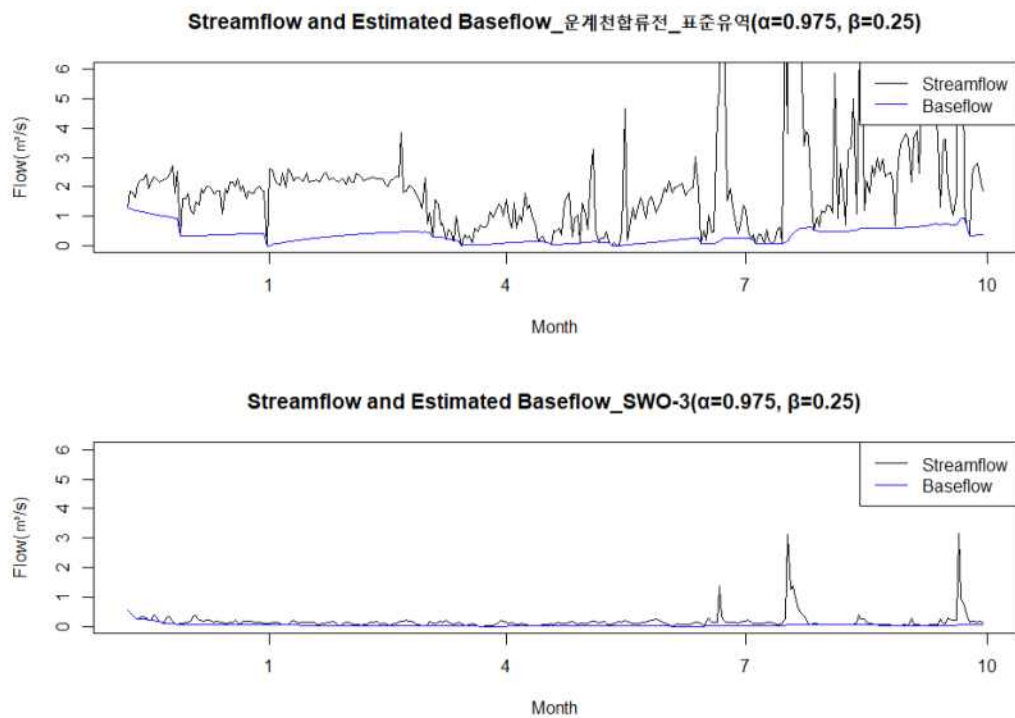
〈그림 5-22〉 SWO-1 수동관측 지점과 인근 표준유역에서 $\beta = 0.25$ 일 때 기저유출량(bf) 비교



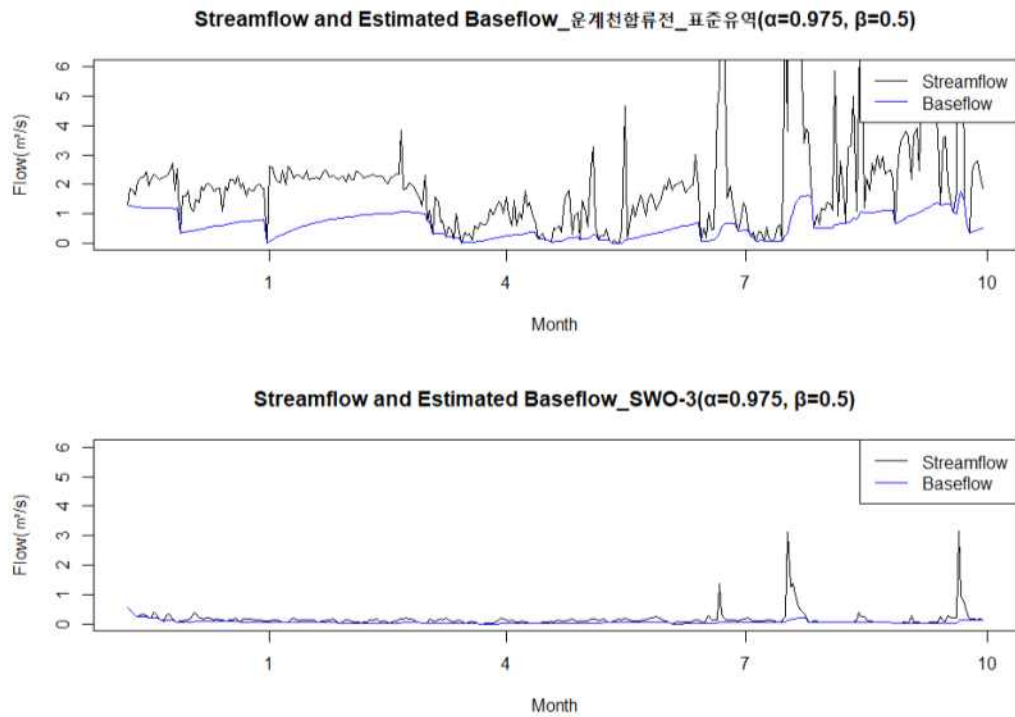
〈그림 5-24〉 SWO-1 수동관측 지점과 인근 표준유역에서 $\beta = 0.5$ 일 때 기저유출량(bf) 비교



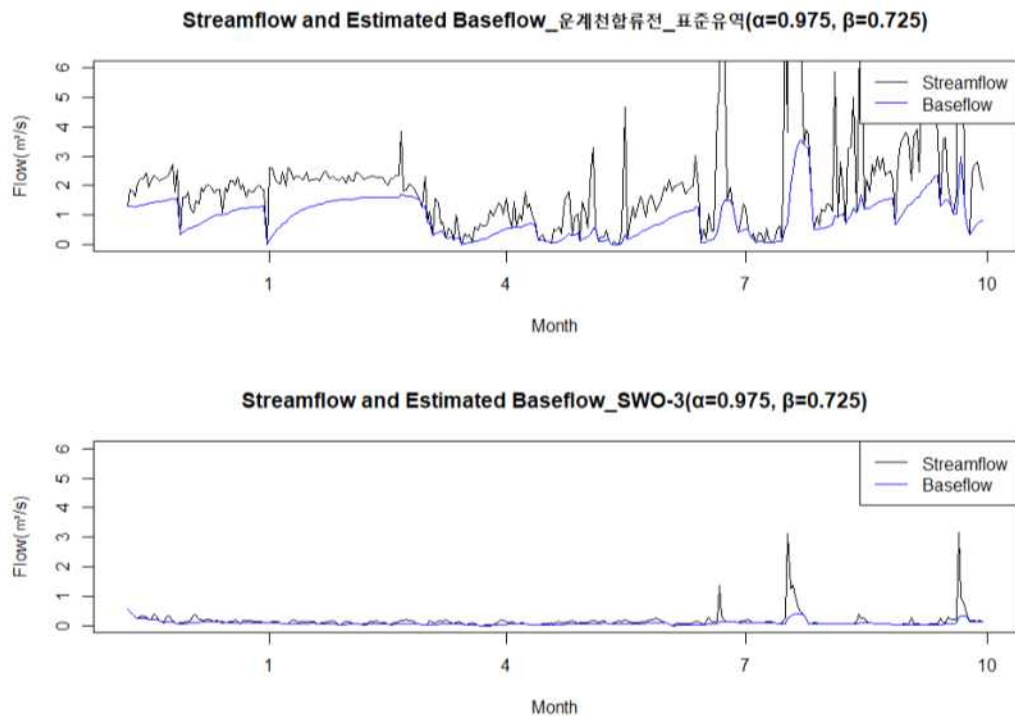
〈그림 5-25〉 SWO-1 수동관측 지점과 인근 표준유역에서 $\beta = 0.725$ 일 때 기저유출량(bf) 비교



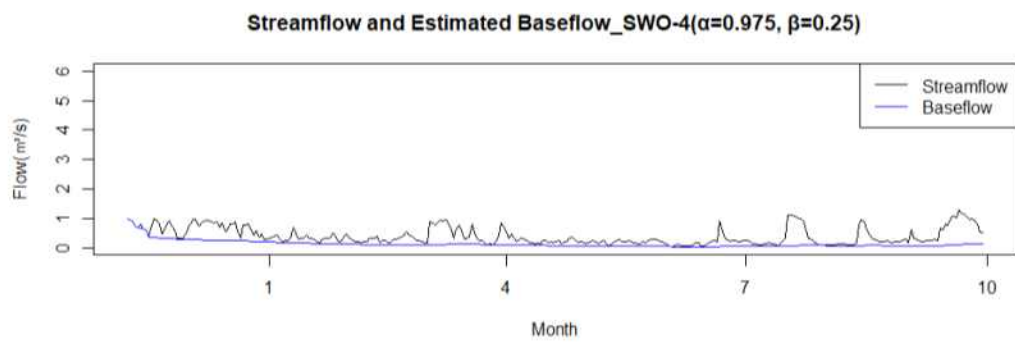
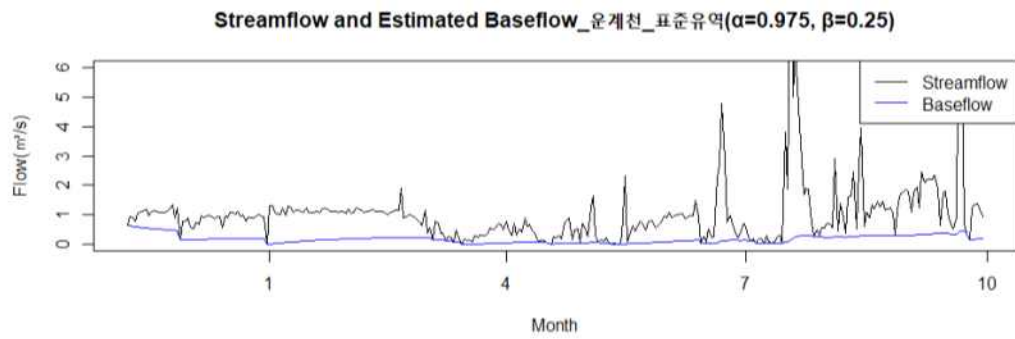
〈그림 5-26〉 SWO-3 수동관측 지점과 인근 표준유역에서 $\beta = 0.25$ 일 때 기저유출량(bf) 비교



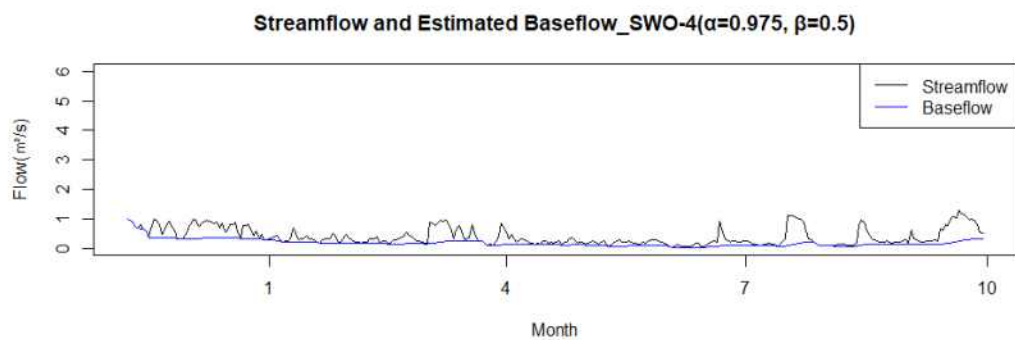
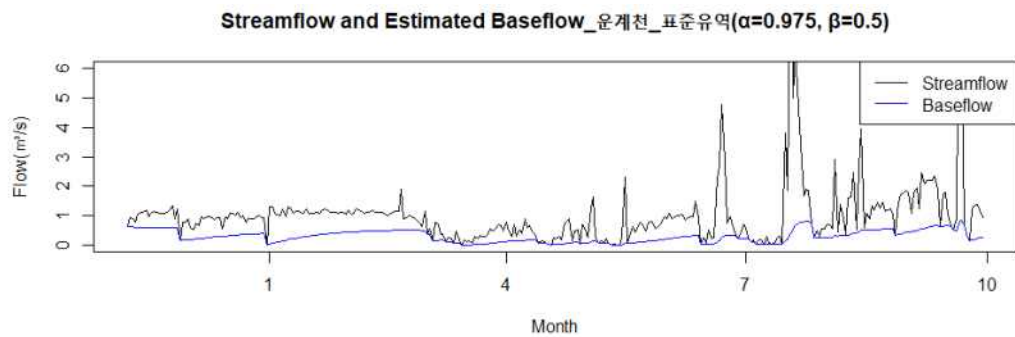
<그림 5-27> SWO-3 수동관측 지점과 인근 표준유역에서 $\beta = 0.5$ 일 때 기저유출량(bf) 비교



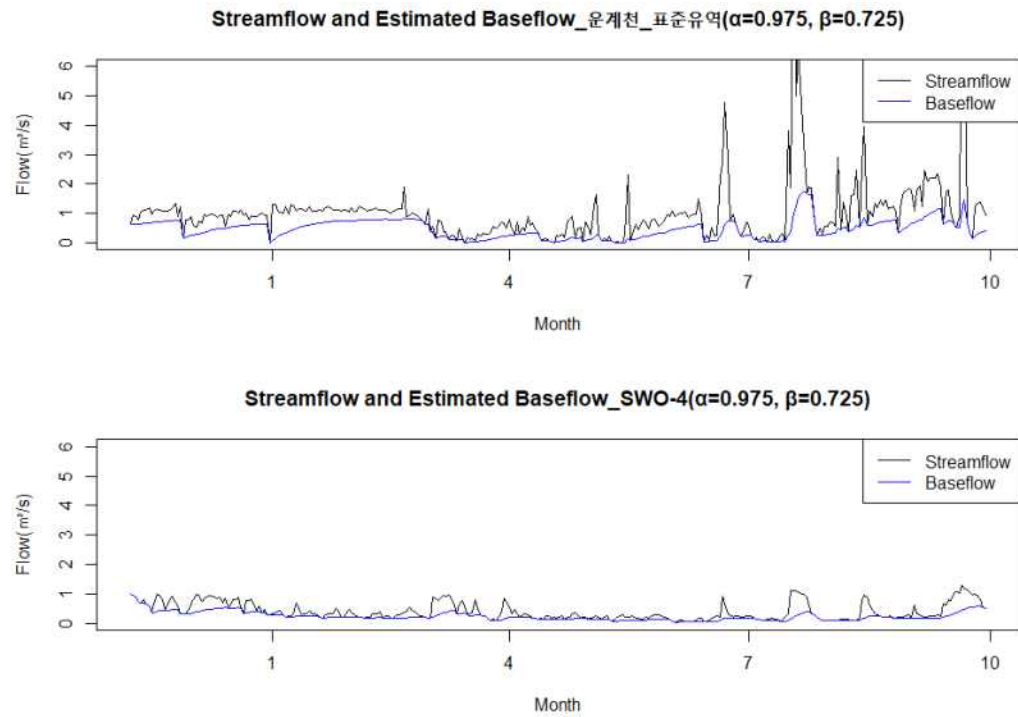
<그림 5-28> SWO-3 수동관측 지점과 인근 표준유역에서 $\beta = 0.725$ 일 때 기저유출량(bf) 비교



〈그림 5-29〉 SWO-4 수동관측 지점과 인근 표준유역에서 $\beta = 0.25$ 일 때 기저유출량(bf) 비교



〈그림 5-30〉 SWO-4 수동관측 지점과 인근 표준유역에서 $\beta = 0.5$ 일 때 기저유출량(bf) 비교



〈그림 5-31〉 SWO-4 수동관측 지점과 인근 표준유역에서 $\beta = 0.725$ 일 때 기저유출량(bf) 비교

마. 함양률 산정

표준유역별 함양률을 추정하기 위해 유역 내 유출고를 산정하고 강우와 비교하였다.<표 5-XX>.

<표 5-7> 충주댐 하류 중권역 내 유역별 유출고(2021~2025년)

구분		월평균	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	계
유역	면적														
std1	40.99	강우(mm)	97.00	85.42	128.24	124.28	170.88	228.42	385.32	268.60	242.76	139.05	119.65	107.85	2097.47
		Q(mm)	67.27	87.39	101.09	104.68	153.15	165.66	612.39	298.24	364.45	150.36	76.30	109.95	2290.93
		B.F ($\beta=0.725$)	28.65	29.43	41.75	47.19	59.73	63.77	236.26	103.99	154.07	61.90	37.45	49.84	914.03
		B.F ($\beta=0.5$)	22.22	19.78	28.20	33.43	40.88	44.71	148.94	70.96	101.62	44.83	28.17	37.22	620.96
		B.F ($\beta=0.25$)	16.78	12.49	17.19	20.34	24.38	25.71	76.92	46.56	58.45	33.48	18.86	21.64	372.80
std2	155.62	강우(mm)	14.08	17.20	53.82	56.00	106.46	190.06	363.34	225.36	197.98	64.63	47.93	27.88	1364.74
		Q(mm)	41.10	70.81	56.85	46.96	81.82	136.74	367.07	190.05	166.42	126.07	90.86	73.39	1448.14
		B.F ($\beta=0.725$)	19.32	23.52	35.26	20.71	42.21	57.64	171.92	99.13	89.89	88.45	60.63	39.39	748.07
		B.F ($\beta=0.5$)	12.33	18.16	23.23	13.65	25.45	32.97	104.68	77.36	67.36	75.34	46.35	26.79	523.67
		B.F ($\beta=0.25$)	6.99	11.76	13.08	7.99	11.81	15.27	52.94	48.40	39.15	40.30	26.22	15.04	288.95
std3	161.43	강우(mm)	15.46	19.54	54.04	55.14	94.62	155.80	334.62	200.02	208.38	63.98	43.46	21.24	1266.30
		Q(mm)	19.48	19.37	15.57	19.77	21.56	33.73	117.62	91.15	71.03	30.86	17.05	16.90	474.09
		B.F ($\beta=0.725$)	9.99	10.82	8.71	8.77	7.73	11.79	44.37	27.02	22.75	12.59	8.64	7.75	180.93
		B.F ($\beta=0.5$)	6.50	6.84	6.31	5.70	5.26	6.82	28.97	17.19	13.99	8.01	5.37	4.83	115.79
		B.F ($\beta=0.25$)	3.88	3.34	3.35	3.24	2.78	3.25	14.24	10.49	8.60	5.09	3.08	2.78	64.12
std4	73.27	강우(mm)	13.14	17.72	52.04	52.34	108.74	177.06	352.92	216.36	192.88	66.45	51.33	27.40	1328.38
		Q(mm)	21.31	21.18	17.02	21.62	23.55	36.84	128.59	99.63	77.63	33.71	18.61	18.47	518.16
		B.F ($\beta=0.725$)	10.92	11.84	9.51	9.59	8.42	12.88	48.49	29.51	24.84	13.77	9.42	8.44	197.63
		B.F ($\beta=0.5$)	7.08	7.46	6.87	6.23	5.72	7.45	31.66	18.76	15.28	8.77	5.84	5.23	126.35
		B.F ($\beta=0.25$)	4.21	3.63	3.63	3.52	3.05	3.51	15.53	11.43	9.38	5.55	3.33	3.01	69.78
std5	93.1	강우(mm)	16.18	20.90	55.36	56.32	91.50	143.26	316.74	189.40	215.30	62.33	58.35	26.38	1252.02
		Q(mm)	19.31	19.21	15.42	19.60	21.37	33.39	116.49	90.26	70.37	30.57	16.89	16.77	469.65
		B.F ($\beta=0.725$)	9.91	10.71	8.63	8.72	7.65	11.66	43.94	26.72	22.51	12.47	8.55	7.66	179.13
		B.F ($\beta=0.5$)	6.43	6.76	6.23	5.67	5.19	6.75	28.68	16.98	13.84	7.93	5.30	4.74	114.50
		B.F ($\beta=0.25$)	3.81	3.28	3.29	3.21	2.78	3.23	14.09	10.34	8.50	5.02	3.02	2.72	63.29
SWO-1	5.7816	강우(mm)	3.60	11.00	37.70	72.60	91.80	176.70	267.80	84.90	204.30	0.00	6.20	35.60	992.20
		Q(mm)	8.98	6.30	6.29	2.61	2.32	4.46	13.19	11.14	11.65	0.00	4.65	9.01	80.60
		B.F ($\beta=0.725$)	8.96	7.95	8.31	8.31	8.98	8.28	8.96	8.68	8.34	0.00	6.79	9.05	92.61
		B.F ($\beta=0.5$)	6.30	5.59	5.78	5.71	6.17	5.77	6.18	6.11	5.78	0.00	6.04	6.74	66.17
		B.F ($\beta=0.25$)	3.73	3.00	3.00	2.88	3.07	2.90	3.07	3.07	2.87	0.00	5.56	4.91	38.06
SWO-3	22.2924	강우(mm)	3.30	9.70	44.60	70.90	104.10	191.30	252.00	100.00	240.50	0.00	6.10	42.70	1065.20
		Q(mm)	13.80	11.10	10.64	9.88	17.11	18.36	42.53	10.86	32.67	0.00	22.22	19.78	208.95
		B.F ($\beta=0.725$)	7.91	5.87	3.80	4.49	9.32	7.55	18.09	6.66	10.75	0.00	18.41	12.38	105.23
		B.F ($\beta=0.5$)	6.77	4.42	2.68	2.43	6.10	4.09	11.52	5.71	7.05	0.00	18.10	9.98	78.85
		B.F ($\beta=0.25$)	5.05	3.02	1.88	1.28	2.76	1.58	5.89	5.04	3.13	0.00	17.96	7.61	55.20
SWO-4	71.0344	강우(mm)	3.50	14.40	49.80	74.60	81.70	159.50	239.90	90.00	242.40	0.00	6.10	47.90	1009.80
		Q(mm)	12.84	9.73	19.47	9.02	7.66	7.24	14.31	10.30	22.91	0.00	19.02	26.48	158.98
		B.F ($\beta=0.725$)	8.78	6.62	9.59	6.09	4.71	3.48	6.57	5.91	11.62	0.00	14.75	16.23	94.35
		B.F ($\beta=0.5$)	8.04	5.47	7.33	4.63	3.48	2.29	4.51	4.18	7.06	0.00	13.92	12.84	73.75
		B.F ($\beta=0.25$)	6.00	3.61	4.15	3.08	2.40	1.54	2.44	2.87	3.42	0.00	13.37	9.36	52.24

Ekhardt(2005)의 식에 따라 β 에 따른 하천관측지점의 지표수-지하수 연동 유형별 함양량은 다음과 같다.

〈표 5-8〉 하천관측지점의 지표수-지하수 연동 유형별 지하수 함양량

관측 지점	구분	지층유형	하천유형	면적(km ²)	면적 강수량 (mm)	수자원 총량 (10 ³ m ³ /년)	지하수 함양량 (10 ³ m ³ /년)	함양률 (%)
충주 조정 지댐	$\beta=0.725$	다공질	상시하천	40.99	2,097.47	85,975.30	37,466.09	43.58
	$\beta=0.5$	다공질	간헐하천				25,453.15	29.61
	$\beta=0.25$	비다공질	상시하천				15,281.07	17.77
목계 수위 표	$\beta=0.725$	다공질	상시하천	155.62	1,364.74	212,380.84	116,414.65	54.81
	$\beta=0.5$	다공질	간헐하천				81,493.53	38.37
	$\beta=0.25$	비다공질	상시하천				44,966.40	21.17
운계 천합 류전	$\beta=0.725$	다공질	상시하천	161.43	1,266.30	204,418.81	29,207.53	14.29
	$\beta=0.5$	다공질	간헐하천				18,691.98	9.14
	$\beta=0.25$	비다공질	상시하천				10,350.89	5.06
운계 천	$\beta=0.725$	다공질	상시하천	73.27	1,328.38	97,330.40	14,480.35	14.88
	$\beta=0.5$	다공질	간헐하천				9,257.66	9.51
	$\beta=0.25$	비다공질	상시하천				5,112.78	5.25
섬강 합류 전	$\beta=0.725$	다공질	상시하천	93.10	1,252.02	116,563.06	16,677.00	14.31
	$\beta=0.5$	다공질	간헐하천				10,659.95	9.15
	$\beta=0.25$	비다공질	상시하천				5,892.30	5.06
SWO -1	$\beta=0.725$	다공질	상시하천	5.78	992.20	5,736.50	535.43	9.33
	$\beta=0.5$	다공질	간헐하천				382.57	6.67
	$\beta=0.25$	비다공질	상시하천				220.05	3.84
SWO -3	$\beta=0.725$	다공질	상시하천	22.29	1,065.20	23,745.86	2,345.83	9.88
	$\beta=0.5$	다공질	간헐하천				1,757.76	7.4
	$\beta=0.25$	비다공질	상시하천				1,230.54	5.18
SWO -4	$\beta=0.725$	다공질	상시하천	71.03	1,009.80	71,730.54	6,702.10	9.34
	$\beta=0.5$	다공질	간헐하천				5,238.79	7.3
	$\beta=0.25$	비다공질	상시하천				3,710.84	5.17

하천관측지점별 해당유역면적과 상기자료를 바탕으로 해당 면적강수량을 산정하여 해당유역별 수자원총량 대비 함양량의 비율을 Ekhardt(2005)가 제안한 유역특성에 따른 $BFI_{max} = \beta$ 값을 적용하여 다공질대수층에서 상시하천일 경우 $\beta = 0.80$, 다공질 대수층에서 일시적인 흐름이 있는 간헐하천일 경우 $\beta = 0.50$, 암반대수층에서 상시하천일 경우 $\beta = 0.25$ 로 표현하면, 창녕지역 하천과 대수층 특성에 따라 함양률은 다음과 같이 산정되었다〈표 5-8〉.

<표 5-9> Eckhardt(2005)에 의한 입력변수별 함양률 비교(%)

유역		std1	std2	std3	std4	std5	SWO-1	SWO-3	SWO-4	계
면적(km ²)		40.99	155.62	161.43	73.27	93.1	5.78	22.29	71.03	
충적 대수층	상시하천	43.58	54.81	14.29	14.88	14.31	9.33	9.88	9.34	23.9
	간헐하천	29.61	38.37	9.14	9.51	9.15	6.67	7.4	7.3	16.33
암반 대수층	상시하천	17.77	21.17	5.06	5.25	5.06	3.84	5.18	5.17	9.33
기하평균		17.77	21.17	8.71	9.06	8.72	6.21	7.24	7.06	11.66

충주댐하류 유역 내 관측지점의 상류에 위치한 std1, std2의 함양률이 상대적으로 하류에 위치한 유역보다 크며 남한강 각 지류별로 말단부의 함양률은 상류에 댐(std1, std2) 이 있는 경우 상대적으로 작은 것을 추정할 수 있다.

따라서 유역 규모의 함양량 산정에 있어 해당 상류 유역 내 지하수의 이용량이 지하수의 함양량에 영향을 미치는 정도를 반영하여 지하수 함양량을 산정해야 함을 확인할 수 있다. 다음절에서는 지하수 이용량을 반영하기 위해 지하수모델링에 의해 표준유역별 지하수 함양량을 추정해 보았다.