교량의 제원 설계 및 해석을 위한 수리해석 프로그램 활용

Using Stream Analysis Program For Design And Interpretation Hydraulic Structure

김 대 웅[1)] 김 종 혁[2)] 장 찬 익[3)]
Kim, Dae-Woong Kim, Jong-Hyeok Jang, Chan-Ik

Abstract

In this study, bridge design was carried out using HEC-RAS (v5.0), HEC-HMS, and RFAHD (Human Data Regional Frequency Analysis), which are programs related to hand-made design, for reasonable design and analysis of hand-made structures. First, the current status of the river basin, rainfall data, flood tracking parameters of the basin, and characteristic factor conditions were used to calculate the 100-year frequency probability rainfall of the bridge installation section and the design flood of major points. According to the probability rainfall and design flood, the optimal structure format for the section was determined using concrete bridges (extreme strength design method), bridge length and width, bridge passage width, and elevation above and below the upper structure, and the results (figure) were conducted using HEC-RAS. Through such design and interpretation, each equation is applied to improve major knowledge application and practical skills through rational design.

keywords : *standard step method, limit design method, Bernoulli equation, Manning formula*

요 지

본 연구에서는 합리적인 수공구조물 설계 및 해석을 위해 수공설계 관련 프로그램인 HEC-RAS(v5.0), HEC-HMS, RFAHD(수문자료 지역빈도 해석)과 각각의 식을 이용하여 교량 설계를 진행해 나갔다. 먼저 하천유역의 현황과 강우량 자료 및 유역의 홍수추적 매개변수와 특성인자 조건을 이용하여 교량 설치구간 소유역의 100년 빈도 확률강우량과 주요지점의 설계 홍수량을 산정하여 그래프로 작성하였다. 확률강우량과 설계 홍수량에 의해 구간 최적의 구조물형식은 콘크리트교(극한강도설계법) 등을 이용하여 교량 길이와 폭, 교량통로폭, 상부구조 위·아래면 표고 등을 결정하고 HEC-RAS를 이용하여 결과(도표)를 진행하였다. 이와 같은 설계 및 해석을 통해 각각의 식을 적용하여 합리적인 설계를 통하여 전공지식 응용력과 실무능력을 증진 시킨다.

핵심용어 : 표준축차법, 극한강도설계법, Bernoulli 방정식, Manning 공식,

1. 서 론

인류는 일찍이 하천을 중심으로 경제를 부흥시키고 삶의 질은 향상 시켜왔으며, 정부는 물과 함께하는 국토 재창조를 목표로 주기적으로 반복되는 가뭄과 물 부족 현상을 해결하고, 홍수피해를 예방하면서 하천을 지역경제 활성화와 국가발전의 거점으로 활용하고자 노력하였다(한국수자원학회, 2009).

하지만 기후변화로 인하여 국지성 집중호우의 발생빈도 및 강우량이 증가하고 있어 각 지역 지자재의 홍수방어 대책수립에도 불구하고 기록적 강수에 의한 홍수피해가 빈번히 발생하고 있다. 우리나라의 5대강 중 하나인 금강의 최근 20년간 홍수피해 현황을 살펴보면 공공시설 등 각종 시설 피해규모가 증가하는 것으로 조사되었으며, 과거에는 실제적으로 커다란 재앙을 불러일으켰던 댐 파괴가 발생된 바 있고, 향후 발생될 가능성은 상존하고있는 상황이다. 댐 붕괴시 붕괴부를 통해 일시에 유출되는 대규모의 저수유량으로부터 야기되는 폭발적인 파괴력은 댐 하류부에서 거주하는 인명 및 재산피해에 막대한 손실을

1) 건설환경공학과 4학년 01반 학번: 20207154 (E-mail; kimdaewoong88@naver.com)
2) 건설환경공학과 4학년 01반 학번: 20201967 (E-mail; cnaturec@naver.com)
3) 건설환경공학과 4학년 01반 학번: 20161843 (E-mail; cksdlr33@naver.com)

초래할 수 있다. 다행히 전체 기존 댐 가운데 금세기 동안에 파괴되는 비율이 설계나 시공적인 면에서 기술적인 향상으로 인해 줄어들고 있으나, 최근의 기상이변에 따라 댐 붕괴, 제방붕괴 등에 따른 홍수해석의 필요성이 크게 대두되고 있다(Douglas and Richard, 1971).

하천기본계획의 주요 목표는 다음과 같다. 첫째, 수자원을 효율적으로 관리하고 보존하기 위한 목표를 가지고 있다. 이는 수문학적 조절, 물의 질 개선, 물의 양 증가 등을 통해 이루어진다. 둘째, 계절별로 발생하는 폭우, 태풍 등으로 인한 홍수 피해를 최소화하기 위한 목적을 가지고 있고 적절한 홍수 예측 및 대응을 통해 인명과 재산을 보호한다. 셋째, 물의 순환을 유지하고, 서식지를 보호하여 물생태계를 유지하고 보전하는 목표를 가지고 있다. 이는 생태학적 균형을 유지하고 수생생물의 다양성을 유지하는 데 중점을 둔다.

수지상 유역의 강우 유출과정을 모의하여 광범위한 문제를 풀기 위해 지리적 면적의 넓은 범위에 적용시킬 수 있도록 고안되었으며, 지리적 면적에는 작은 도시나 자연유역 유출에 대한 홍수 수문학과 큰 하천유역의 급수가 포함되어 교량설계에 용이한 HEC-RAS를 통하여 HEC-HMS에서 도출한 홍수량으로부터 설계를 진행하였다. 그리고 홍수위 검토를 위해 사용하는 HEC-RAS는 미 육군공병단에서 2005년 3월에 발표한 다중작업환경에서 대화식으로 사용함으로 홍수위를 검토하기 위해 고안된 소프트웨어 통합시스템으로서 해석성분, 자료 저장 및 관리성능, 그래프와 출력기능을 분리하여 사용자가 그래픽을 통해 컴퓨터와 정보를 교환하는 작업환경으로 구성되었고 이를 통하여 정확하게 여수로 등을 설계할 수 있을 것이다. 이처럼 HEC-HMS 모형을 적용하고, HEC-RAS 모형과 연계하여 하천에서의 종, 횡 단면에 대한 수면곡선, 각종 수리학적 특성치, 지형 및 수면곡선의 3차원 표현 등을 나타냄으로써 홍수 발생여부에 대한 전반적인 사항을 알 수 있다.

2. 이론적 배경

합리적인 교량설계를 위해서는 수공 구조물에 맞는 설계방법을 사용하여야 한다. 따라서 수공구조물을 합리적으로 설계하기 위해 사용한 대표적인 설계방법들과 프로그램들을 몇 가지 설명한다.

(1) 설계 홍수량 산정

수공 실무에서 유역 내 수장기 계획 또는 하천기본계획 등의 각종 수자원(개발)계획 수립을 위하여 환경부(2019)의 지침에 따라야 한다. 해당 지침에서는 수장기 계획 등 수자원 관련 개발계획의 수립을 위한 수공 실무에서 유역 내외에 위치한 기상청 또는 국토교통부 등 관할기관의 관측기간 5년 이상의 615개 우량관측소 우량자료를 수집하여 26개 군집지역으로 구분하였다. 이들 군집지역의 자료를 이용하여 지역빈도해석을 통해 우리나라의 최적 확률 분포형을 GEV 분포로 제시하였다.

이러한 최적분포를 이용하여 RFAHD(환경부, 2020)를 통해 확률강우량을 산정하고 Huff 4분위 중 3분위 시간분포 자료를 산출한다. 그 다음, 설계 홍수량을 HEC-HMS(v4.8)로 구한 후, HEC-RAS(v5.0)를 통해 홍수위 안정성 검토를 실시함으로써 각종 수자원 관련 개발 계획수립 등의 수공실무에 이를 활용하는 등 전체 과정을 도식화하면 그림 1과 같다.

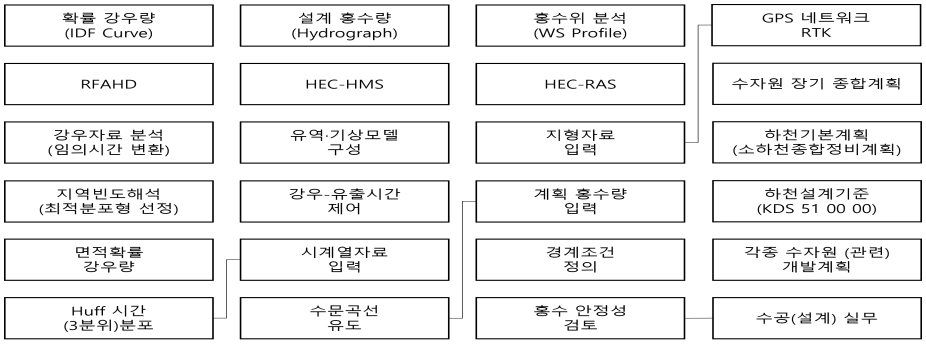


그림 1. 수공실무의 전체 개요도

(2) 교량 해석

교량을 설계함에 있어 흐름 수축(flow contraction)을 고려하여야 하는 데, 이는 교량의 교대와 교각에 의해 발생되며, 교량에 의한 급작스러운 흐름 수축은 발생되는 에너지 손실이 극심할 것이기에 에너지 방법은 이러한 교량을 통한 수면곡선을 계산하는 데 필요할 것이다. 에너지 접근법에서 폐색이 발생되지 않을 조건을 검증하기 위해서는 **식** 1을, 에너지 방법에 의한 저수위의 수면계산을 위해서는 **식** 2를 사용할 수 있다.

$$z_2+h_2+\alpha_2\frac{V_2^2}{2g}>z_{BR}+E_c \qquad \text{식 (1)}$$

$$z_1+h_1+\alpha_1\frac{V_1^2}{2g}-\frac{1}{2}\Delta x S_{f_1} =z_2+h_2+\alpha_2\frac{V_2^2}{2g}+\frac{1}{2}\Delta x S_{f_2}+h_e \qquad \text{식 (2)}$$

마지막으로 HEC-RAS(v5.0)에서 암거 및 교량 설치이후 홍수위 안정성 검토를 위해서 기존 단면 뿐 아니라, 추가단면도 별도로 구성해주어야 한다(이종석, 2022a).

HEC-RAS를 활용하여 교량을 설치하였을 때 교량의 구조물에 의해 발생되는 에너지 손실은 세 개의 부분을 고려를 해야한다. 첫 번째 부분은 흐름의 확대가 발생되는 구조물의 하류구간에서 발생되는 손실이다. 두 번째 부분은 여러 가지 방법으로 계산할 수 있는 구조물 자체에서 발생되는 손실이고, 세 번째는 흐름이 개방 통로를 통해 수축되는 구조물의 상류구간에서 발생되는 손실이다.

이러한 교량에서의 발생되는 에너지 손실은 에너지 방법, 운동량 방법과 Yarnell방법 등에 의해 계산할 수 있다. 또한 교량에서의 흐름은 상류와 사류에 따라 A, B, C급으로 분류된다. A급 흐름은 교량을 통한 완전한 상류상태, C급 흐름은 완전한 사류상태이다. B급 흐름은 교량 수축에 의해 폐색 될 때 발생하는 흐름이며 교량이 적절하게 설계가 되었다면 B급 흐름은 발생되지 않아야 하며 일반적으로 교량에서는 A급 흐름이 일반적이다(이종석, 2019).

3. 수리 안정성 검토

본 절에서는 **그림** 2의 열공강(Study River) 유역 내 두 지점(청색 사각 박스) 상에 교량 설치를 진행하기 위한 설계 절차를 수록하였다.

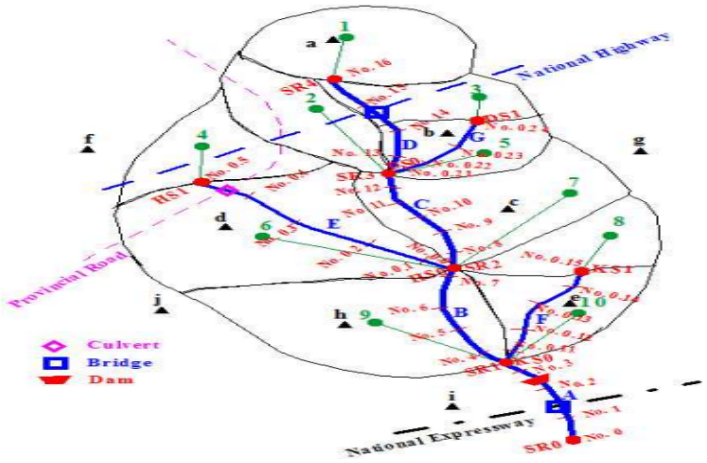


그림 2. 열공강 유역 및 교량 설치 계획도

3.1 지역빈도해석 · 확률 강우량

RFAHD 2020을 통해 열공강(Study River)내 각 소유역의 총 10곳의 우량관측소의 50년 빈도 확률강우량(Huff, 1967) 산정을 위하여 지역빈도해석(환경부, 2020; 2023)을 **그림** 3과 같이 진행하였으며, 그 중 Precipitation 우량관측소의 재현기간-지속기간-확률강우량 곡선(PDF Curve)의 결과는 다음 **그림** 4와 같고, 우량관측소별 50년 빈도-매시간(24시간) 확률강우량은 **표** 1과 같다.

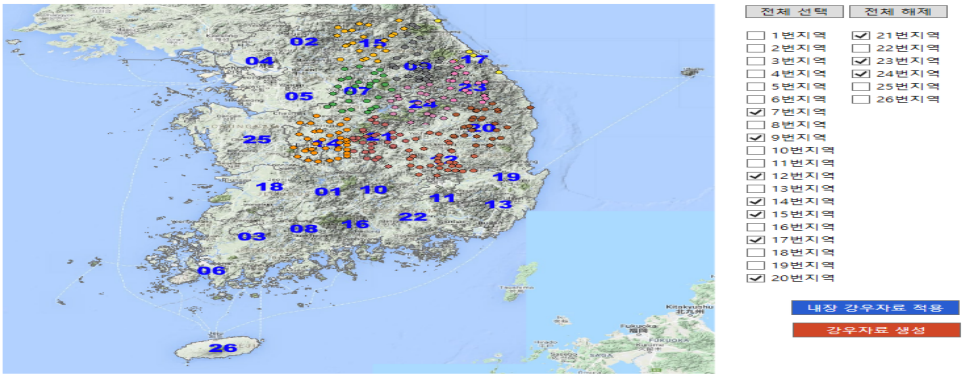


그림 3. RFAHD 2020의 지역빈도해석을 위한 강우자료의 선택과 입력

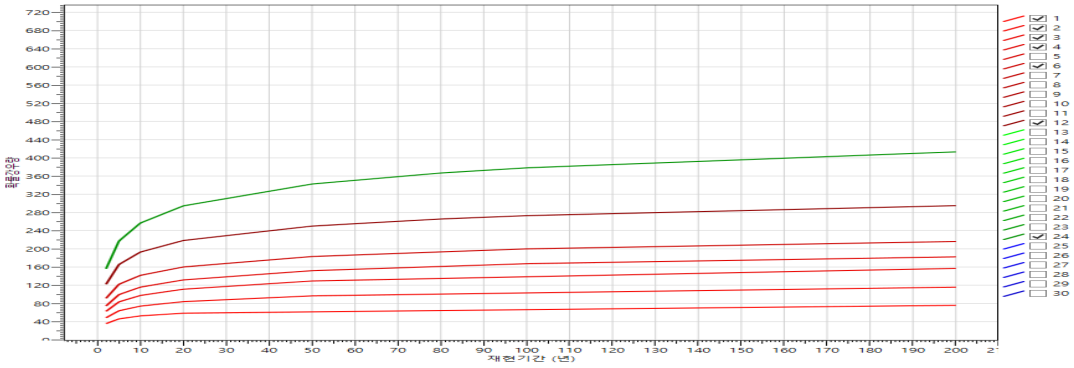


그림 4. Precipitation 우량관측소의 재현기간-지속기간-확률강우량 곡선(PDF Curve)

표 1. 우량관측소별 50년 빈도-매시간(24시간) 확률강우량

시간 / 지점	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
(a)	82.9	112.4	134.6	158	170.9	184.7	199.1	212.4	226	237.3	248.8	257.7	265.4	272.9	280	287.4	295.7	301.8	309.1	317.9	326.2	334.6	345	354.8
(b)	66.5	90.9	110.1	125.5	138.9	154.1	165.6	175.5	186.3	198.4	206	212.5	220.2	228.9	237.1	246.2	256.3	263.6	270	275	280	285.8	294.3	301
(c)	69.8	94.8	115.6	132.7	150.8	166.9	177.8	189.1	201.2	209.9	220.3	230.3	238.8	247.9	254.2	262.2	272.7	282.5	289.1	296.9	305.8	315.3	326.4	336.7
(d)	59.2	83.9	100.8	115.1	127.1	136.7	146.3	154	160.8	167.6	176.1	185.7	193.8	198.9	202.2	205.3	208.7	212.4	218.3	223.5	228.8	235.6	243.2	248.6
(e)	61.8	81.9	105.4	118.8	127.2	134.7	144.4	151.6	160.2	168.3	172.6	176.8	181.1	185.3	190.1	195.9	201.6	207.2	213.1	216.9	221.1	223.1	225.3	230
(f)	80.7	108.6	131.1	143.6	158.6	169.8	179.9	193.1	207.5	221.6	230.3	237.9	246.1	254.6	261.7	267.5	271.5	274	276.2	279.6	281.5	283.9	288.7	292.4
(g)	69.9	112.3	145.9	173.3	192.9	208.8	223.9	235.1	245.7	255.9	267	279	288.9	299.5	311.6	324.7	336.7	346.2	355.3	364.8	372.1	379.2	390	398.2
(h)	60.3	82.6	99.6	112.7	124	133.5	143.9	152.7	161.3	168.7	173.5	179.4	184.9	191.4	196.1	200.6	204	207.5	212	216	221.2	226.9	231.8	236
(i)	55.2	78.3	93.6	106.7	115.8	124.9	132.2	139.1	145.2	151.1	154.9	159.8	163.1	168.1	174.6	180.5	187.6	193.4	198.7	202.4	206.5	209.2	211.7	214
(j)	71.5	100.9	119.4	138.2	155.3	166.1	179.5	188.5	197.8	207.6	216	222.3	228.7	234.3	237.5	239.7	242	244.1	247.4	250	250.6	252.6	255.9	261.7
비고	(a)=Precipitation 우량관측소(지역15, 지점=10124130), (b)=Infiltration 우량관측소(지역9, 지점=10014210), (c)=Percolation 우량관측소(지역23, 지점=20011216), (d)=Groundwater 우량관측소(지역24, 지점=20044070), (e)=Runoff 우량관측소(지역20, 지점=20024160), (f)=Evaporation 우량관측소(지역7, 지점=10034130), (g)=Transpiration 우량관측소(지역17, 지점=13021106), (h)=Interception 우량관측소(지역21, 지점=20074010), (i)=Hydrocycle 우량관측소(지역12, 지점=20084060), (j)=Watercycle 우량관측소(지역14, 지점=30114030)																							

홍수량 산정표준지침(환경부; 2019)에 따라, 관측소가 속한 해당 지역에서의 Huff 3분위 50% 초과확률에 대한 곡선은 **그림 5**와 같았으며, 여기서 적색 곡선은 8차 다항식 회귀(8th-Order Regression)에 대한 결과 곡선으로, 그때의 다항식의 계수와 그로부터 재구성된 다항식은 **표 2**와 같다.

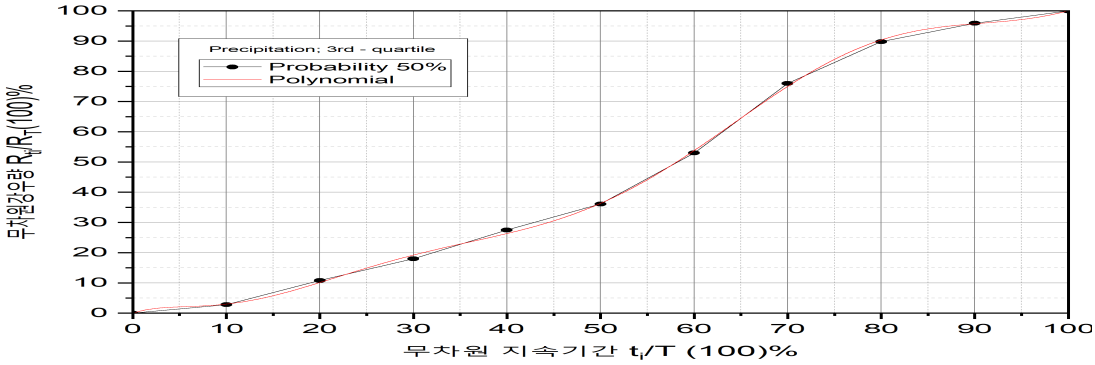


그림 5. Precipitation 우량관측소의 재현기간-지속기간-확률강우량 곡선(PDF Curve)

표 2. Precipitation 우량관측소의 Huff 3분위 분포곡선에 대한 무차원 다항식 유도

내용 / 관측소	다항식의 계수	다항식
Precipitation 우량관측소	C_0=-2.40E-002, C_1=1.02805808 C_2=-2.01E-001, C_3=1.93E-002 C_4=-8.05E-004, C_5=1.73E-005 C_6=-1.99E-007, C_7=1.16E-009 C_8=-2.71E-012	y_{ti}=-2.40E-002+1.02805808x_{ti}-(2.01E-001)x_{ti}^2+(1.93E-002)x_{ti}^3-(8.05E-004)x_{ti}^4+(1.73E-005)x_{ti}^5-(1.99E-007)x_{ti}^6+(1.16E-009)x_{ti}^7-(2.71E-012)x_{ti}^8

이로부터 해당 관측소의 Huff 3분위 분포의 50% 초과확률에 대한 24시간 누가확률강우량은 **표 3**과 같으며, 2, 5, 10, 20, 50, 80, 100, 200년 빈도에 대한 유도된 **식 3**과 같은 전대수 다항식형의 강우강도식은 **표 4**와 같다.

$$\ln I = a + b\ln(t_h)+c[\ln(t_h)]^2+d[\ln(t_h)]^3+e[\ln(t_h)]^4+f[\ln(t_h)]^5+g[\ln(t_h)]^6 \quad \textbf{식 (3)}$$

여기서, t_h=강우지속기간(h)이고, a, b, c, d, e, f, g=회귀상수이다.

표 3. Precipitation 우량관측소의 Huff 3분위 분포의 24시간 누가확률강우량

관측소 / 시간		Precipitation 우량관측소 (지역15, 지점=10124130)		
시간 (h)	(t/T) 100(%)	(R_t/R_T) 100(%)	R_t	I_t
0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	4.17	1.9	6.7	6.7
2	8.33	2.5	8.9	2.2
…				
24	100.00	100.0	354.8	8.9

표 4. Precipitation 우량관측소(지역15, 지점=10124130)의 강우강도식(전대수 다항식형) 유도

재현기간	a	b	c	d	e	f	g	결정계수
2	3.802	-0.936	0.568	-0.402	0.151	-0.029	0.002	0.999853
5	4.062	-0.968	0.712	-0.526	0.196	-0.036	0.003	0.999758
10	4.195	-0.964	0.773	-0.590	0.219	-0.039	0.003	0.999660
20	4.302	-0.950	0.815	-0.641	0.237	-0.041	0.003	0.999514
50	4.419	-0.921	0.853	-0.696	0.256	-0.043	0.003	0.999214
80	4.471	-0.903	0.867	-0.720	0.264	-0.043	0.003	0.999000
100	4.495	-0.893	0.873	-0.731	0.268	-0.043	0.002	0.998880
200	4.561	-0.862	0.885	-0.761	0.277	-0.044	0.002	0.998429

3.2 설계홍수량 산정

설계 홍수량 산정을 위하여 HEC-HMS v4.8(USACE, 2022)에서 구성한 유역모델(Basin Model)은 다음 **그림 6**과 같고, 앞선 RFAHD 지역빈도해석을 실시한 우리나라 유역도의 중동부 지역을 열공강(Study River)의 유역으로 가정하여 이를 작도하였다.

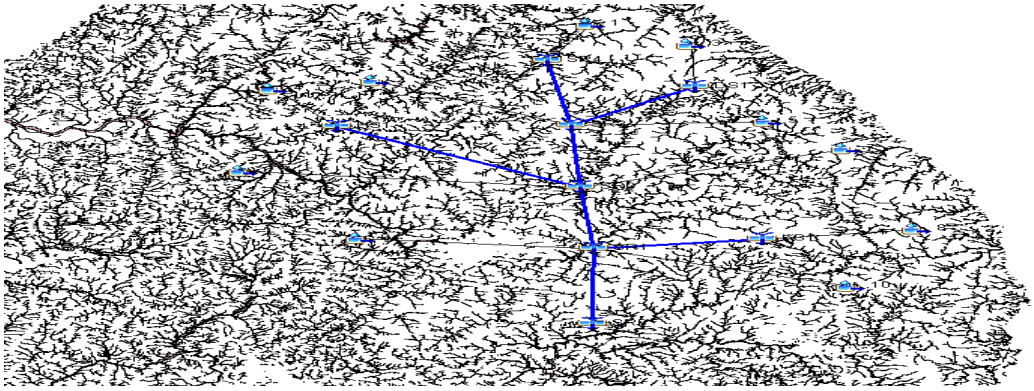


그림 6. 우리나라 유역도 상의 열공강(Study River) 유역

앞선 3.1절에서 도출한 각 관측소별 24시간 누가확률강우량의 시계열 자료로부터 HEC-HMS v4.8(USACE, 2022)에서 설계홍수량을 산정한 결과는 다음 **그림 7**과 같았고, 교량 설계 지점으로 흘러들어가는 설계 시 고려해야하는 SR1과 SR4 지점에서의 첨두유출량은 각각 4019.2m^3/s와 285.7m^3/s으로 도출되었다.

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak
1	72	285.7	03Aug2020, 14:00
SR4	72	285.7	03Aug2020, 14:00
D	72	270.4	03Aug2020, 16:00
2	71	351.1	03Aug2020, 14:00
5	43	257.7	03Aug2020, 14:00
3	40	232.1	03Aug2020, 14:00
DS1	40	232.1	03Aug2020, 14:00
G	40	230.1	03Aug2020, 15:00
SR3	226	1026.5	03Aug2020, 14:00
C	226	990.0	03Aug2020, 16:00
4	70	337.8	03Aug2020, 14:00
HS1	70	337.8	03Aug2020, 14:00
6	149	948.0	03Aug2020, 14:00
7	135	754.5	03Aug2020, 15:00
E	70	318.4	03Aug2020, 16:00
SR2	580	2849.3	03Aug2020, 15:00
B	580	2598.7	03Aug2020, 17:00
9	148	749.0	03Aug2020, 15:00
10	77	408.6	03Aug2020, 14:00
8	70	361.1	03Aug2020, 15:00
KS1	70	361.1	03Aug2020, 15:00
F	70	332.1	03Aug2020, 17:00
SR1	875	4019.2	03Aug2020, 16:00
A	875	3852.0	03Aug2020, 17:00
SR0	875	3852.0	03Aug2020, 17:00

그림 7. 각 지점별 첨두유출량

3.2 교량해석

교량 설계 및 해석을 위하여 HEC-RAS v5.0(USACE, 2022)을 통해 사전에 유역 내 각 측점에서의 단면의 측량 데이터를 이용해 지형자료를 구축한 결과는 다음 **그림 8**과 같다.

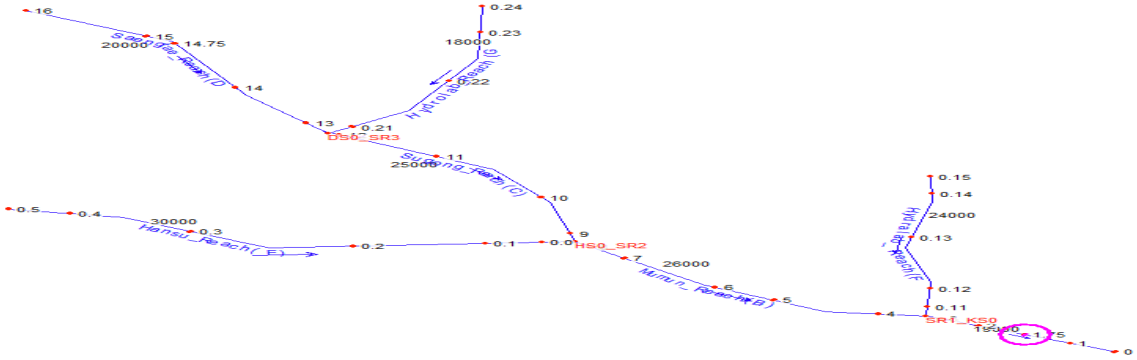


그림 8. 열공강의 수계도

교량이 설치되는 지점은 측점 14와 15 사이와 측점 1과 2 사이이므로, 각 측점간에 추가적인 단면인 측점 14.75, 14.25 그리고 측점 1.75, 1.25를 각각 추가 구성하였으며, 이러한 추가 단면 및 변경된 단면의 상세 제원 및 그 결과는 다음 **표 5**, **그림 9**와 같다.

표 5-(a). 변경된 Saengtae Reach의 측점 15

좌표 / 번호	좌안 (LOB)	중앙 (Channel)	우안 (ROB)
구간길이(m)	1520	1500	1480

표 5-(b). Saengtae Reach의 측점 14.75

좌표 / 번호	x좌표 (station)(m)	y좌표 (elevation)(m)	비고	좌표 / 번호	x좌표 (station)(m)	y좌표 (elevation)(m)	비고
1	23.0	82.5		6	103.0	78.6	
2	39.0	79.4		7	119.0	79.0	
3	55.0	79.4		8	135.0	79.1	
4	71.0	79.0		9	151.0	79.3	
5	87.0	79.0		10	167.0	82.5	
좌표 / 번호	좌안 (LOB)	중앙 (Channel)	우안 (ROB)	비고	중앙수로 좌표 (m)	좌안 끝점 71.0	우안 시점 119.0
구간길이(m)	20	20	20	No.	단면변화	급축소계수	급확대계수
조도계수	0.041	0.04	0.044			0.1	0.3

표 5-(c). Saengtae Reach의 측점 14.25

좌표 / 번호	좌안 (LOB)	중앙 (Channel)	우안 (ROB)
구간길이(m)	5500	5480	5460
비 고	명시되지 않은 사항들은 **표 5-(b)**와 동일		

표 5-(d). 변경된 Daedo Reach의 측점 2

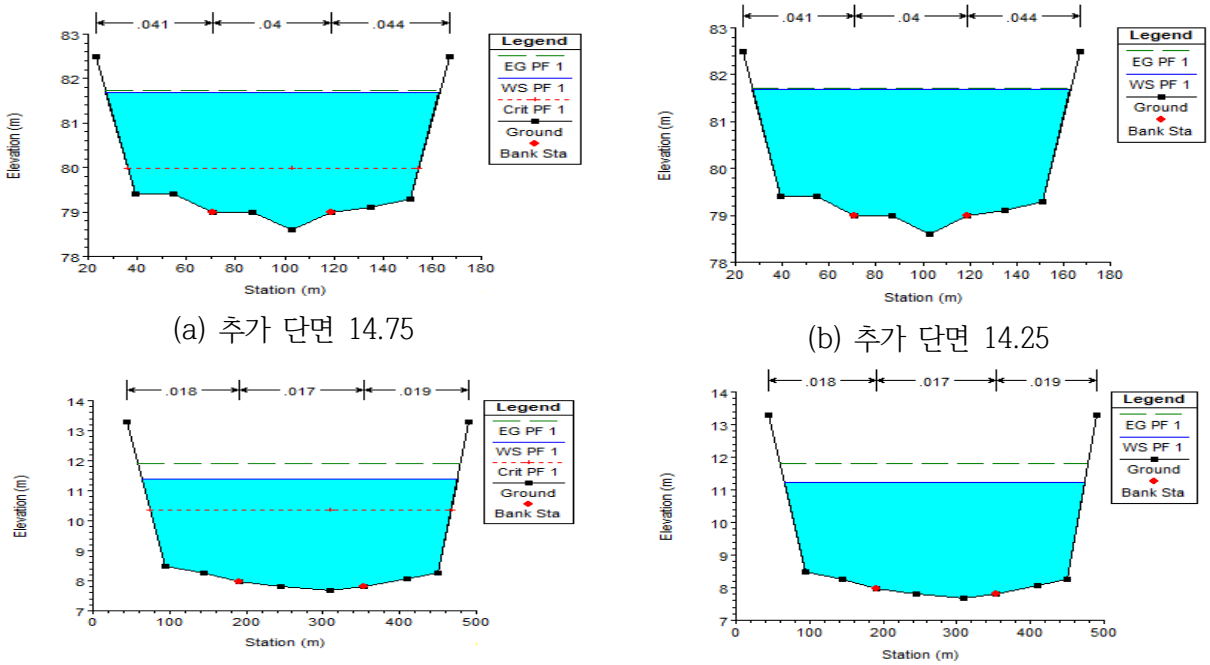
좌표 / 번호	좌안 (LOB)	중앙 (Channel)	우안 (ROB)
구간길이(m)	5100	5000	4900

표 5-(e). Daedo Reach의 측점 1.75

좌표 / 번호	x좌표 (station)(m)	y좌표 (elevation)(m)	비고	좌표 / 번호	x좌표 (station)(m)	y좌표 (elevation)(m)	비고
1	45.0	13.3		6	308.5	7.69	
2	93.7	8.49		7	353.2	7.82	
3	145.4	8.26		8	408.9	8.06	
4	190.1	7.98		9	450.6	8.27	
5	245.8	7.8		10	490.5	13.3	
좌표 / 번호	좌안 (LOB)	중앙 (Channel)	우안 (ROB)	비고	중앙수로 좌표 (m)	좌안 끝점 190.1	우안 시점 353.2
구간길이(m)	28	28	28	No.	단면변화	급축소계수	급확대계수
조도계수	0.018	0.017	0.019			0.1	0.3

표 5-(f). Daedo Reach의 측점 1.25

좌표 / 번호	좌안 (LOB)	중앙 (Channel)	우안 (ROB)
구간길이(m)	4972	4972	4972
비 고	명시되지 않은 사항들은 **표 5-(e)**와 동일		



(a) 추가 단면 14.75

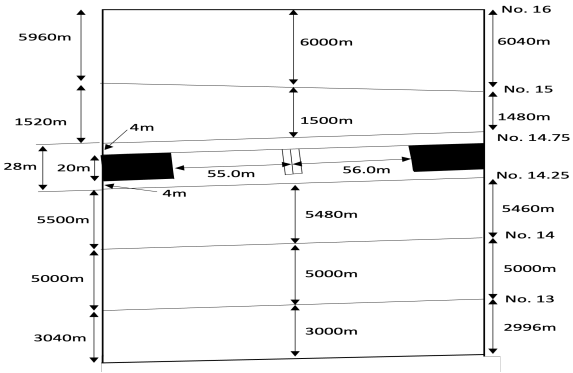
(b) 추가 단면 14.25

(c) 추가 단면 1.75

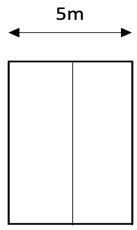
(d) 추가 단면 1.25

그림 9. 추가 횡단면 결과

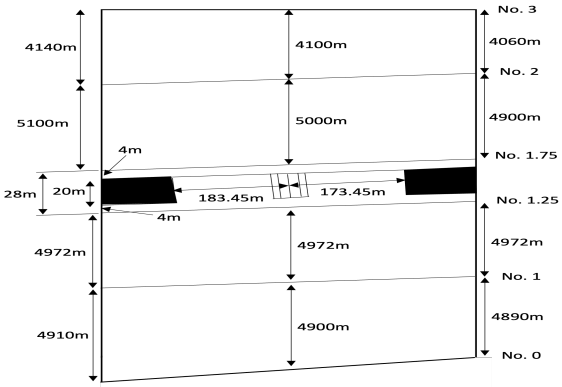
콘크리트교 설계기준(KDS 24 14 20)(국토교통부; 2018)에 따라 교량의 수로구간 내 측점별 종횡단면자료 및 특성 등의 상세한 도면은 **그림 10**과 같고, 각 Reach에서의 설치할 교량단면에 대한 설계 상세도는 **그림 11**과 같다.



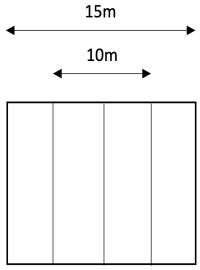
(a)-1. Saengtae Reach의 측점별 상세도



(a)-2. Saengtae Reach의 교각(Pier) 상세도

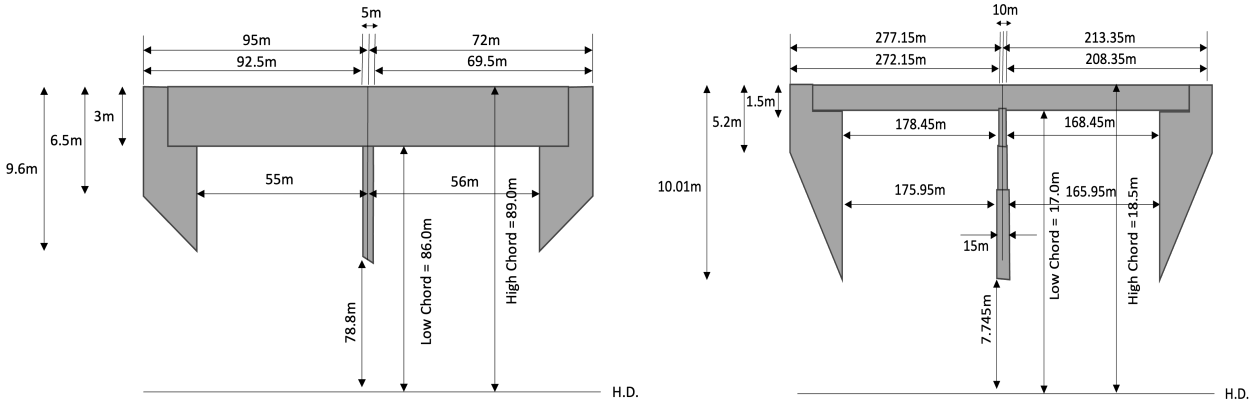


(b)-1. Daedo Reach의 측점별 상세도



(b)-2. Daedo Reach의 교각(Pier) 상세도

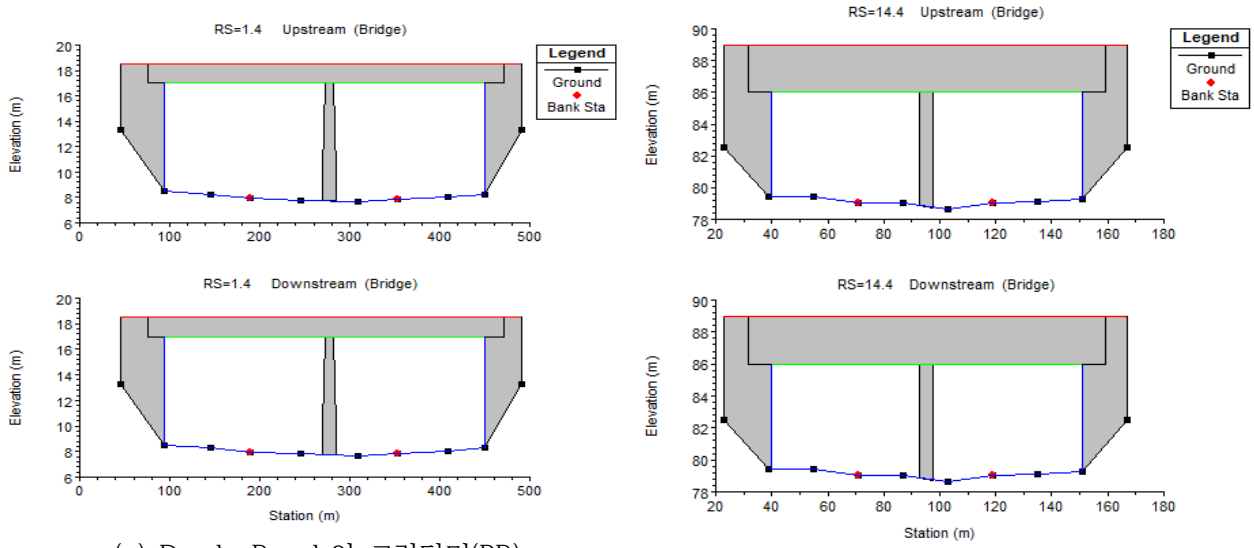
그림 10. 각 Reach에서의 측점별 상세도 및 교각 상세도



(a) Saengtae Reach의 교량단면(BR)과 그 상세도 (b) Daedo Reach의 교량단면(BR)과 그 상세도

그림 11. 각 Reach에서의 측점별 상세도 및 교각 상세도

설계를 진행한 결과를 HEC-RAS v5.0의 교량·암거 자료 편집기에 입력한 결과는 다음 **그림 12**와 같다.



(a) Daedo Reach의 교량단면(BR) (b) Saengtae Reach의 교량단면(BR)

그림 12. HEC-RAS v5.0의 교량·암거 편집기 상의 각 Reach에 설치되는 교량단면(BR)

HEC-RAS v5.0에서 교량 설치 이후의 각 Reach에서의 종방향 수면곡선의 결과는 다음 **그림 13, 14**와 같이 도출되었다.

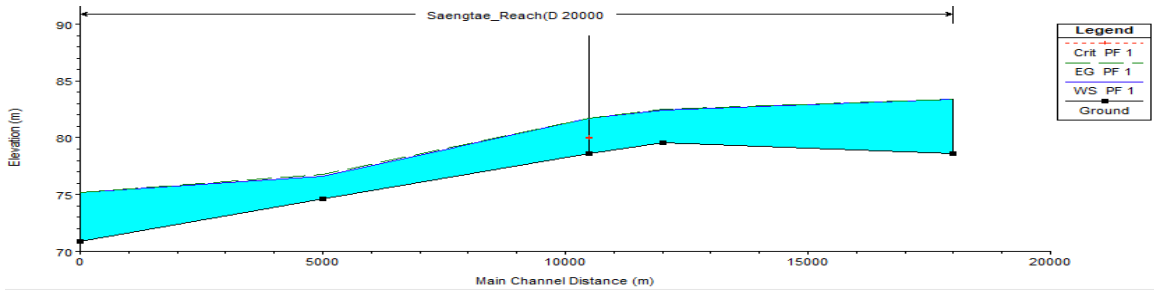


그림 13. 계산 결과 Saengtae Reach의 종방향 수면곡선

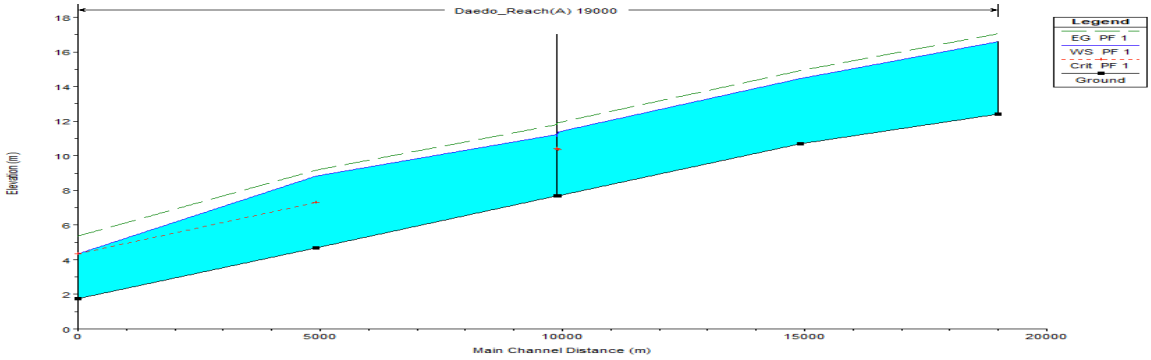
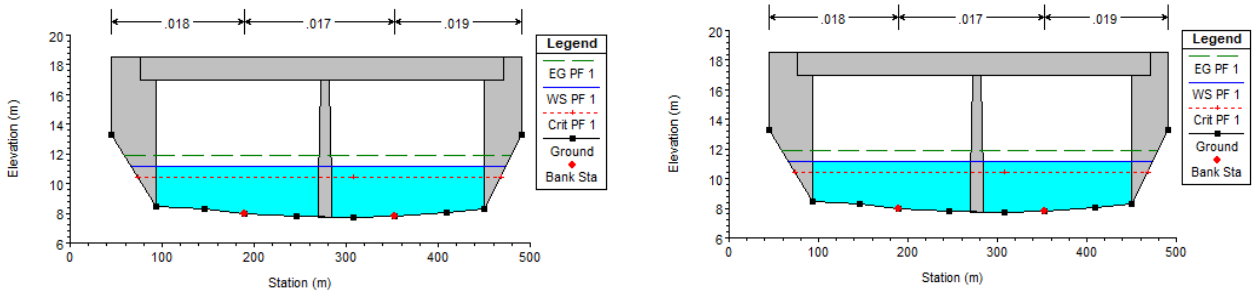


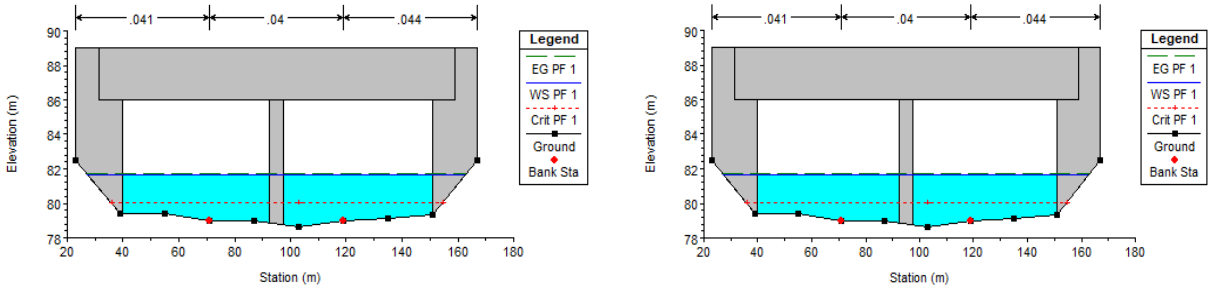
그림 14. 계산 결과 Daedo Reach의 종방향 수면곡선

그림 13, 14와 같이 교량설치에 따른 전 측점간의 종방향 수면곡선은 교량 설치 이후에도 별다른 배수영향 없이 통수가 원활히 이루어지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 교량 설계 시 교량의 표고를 하천의 지형측량에 대한 표고보다 더 높게 설치하였고, 교대와 교각의 너비를 설계기준에 위배되지 않는 선에서 최소화하였기 때문인 것으로 보인다. 단, **그림 14**의 Daedo Reach의 교량 설치 위치에서 확인할 수 있듯이, 상류 지점과 하류 지점간에 개수로에서 보이는 Water drop 현상이 발생함을 확인할 수 있었다.

또한, 설치된 교량의 수위 분석결과에 대한 상세도를 보이면, 다음 **그림 15**와 같다.



(a) Daedo Reach 교량의 상류부 수위 (b) Daedo Reach 교량의 하류부 수위



(c) Saengtae Reach 교량의 상류부 수위 (d) Saengtae Reach 교량의 하류부 수위

그림 15. 교량 설치 이후 교량 수위 분석 결과도

수위 분석결과, 각 Reach에 설치된 모든 교량의 상류부와 하류부에서 교량의 Low Chord보다 수위가 아래에 위치해 있음을 확인할 수 있었고, Daedo Reach와 Saengtae Reach의 50년 빈도의 홍수량이 각각 4019.20m^3/s와 285.70m^3/s로 도출되었다.

하천설계기준(KDS 51 50 00)(국토교통부, 2018) 중 하천제방(KDS 51 50 05)(국토교통부, 2018)에 따라 Daedo Reach의 경우 계획홍수량이 2000m^3/s이상 5000m^3/s미만인 경우이므로 교량이 설치된 지점에서의 상류부와 하류부의 Energy grade elevation이 각각 11.88m와 11.86m으로 Low Chord로부터 떨어진

거리가 각각 5.12m, 5.14m로 다리밑 공간이 1.2m 이상 확보되었으므로 안전축으로 설계가 진행되었다.(또한, Saengtae Reach의 경우에는 계획 홍수량이 200m^3/s이상 500m^3/s미만인 경우로 교량이 설치된 지점에서의 상류부와 하류부의 Energy grade elevation이 둘다 81.73m로 Low Chord로부터 떨어진 거리가 4.27m로 다리밑 공간이 0.8m 이상 확보되었으므로 안전축으로 설계가 진행되었다.

최종적으로, HEC-RAS의 최종 결과에 대한 표준형 자료 출력표(Standard Table)를 보이면 다음 **그림 16**과 같다.

Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
			(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
19000	3	PF 1	4019.20	12.40	16.61		17.05	0.000477	3.27	1389.32	398.53	0.52
19000	2	PF 1	4019.20	10.69	14.48		14.93	0.000566	3.34	1390.42	445.50	0.56
19000	1.75	PF 1	4019.20	7.69	11.39	10.34	11.90	0.000646	3.51	1295.73	411.01	0.59
19000	1.4		Bridge									
19000	1.25	PF 1	4019.20	7.69	11.24		11.80	0.000754	3.68	1233.52	408.26	0.63
19000	1	PF 1	4019.20	4.69	8.81	7.32	9.16	0.000378	2.89	1571.35	461.90	0.46
19000	0	PF 1	4019.20	1.75	4.32	4.32	5.35	0.002272	5.11	929.62	456.49	1.04

(a) Daedo Reach

Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
			(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
20000	16	PF 1	285.70	78.60	83.41		83.42	0.000071	0.58	566.18	144.00	0.09
20000	15	PF 1	285.70	79.60	82.43		82.48	0.000598	1.14	286.58	133.10	0.23
20000	14.75	PF 1	285.70	78.60	81.69	79.97	81.74	0.000415	1.02	322.48	135.81	0.19
20000	14.4		Bridge									
20000	14.25	PF 1	285.70	78.60	81.68		81.72	0.000424	1.03	320.20	135.64	0.20
20000	14	PF 1	285.70	74.60	76.58		76.74	0.003128	2.00	167.01	117.96	0.49
20000	13	PF 1	285.70	70.90	75.14		75.16	0.000108	0.65	511.59	153.00	0.10

(b) Saengtae Reach

그림 16. 교량 설치 이후, 교량 설치된 각 Reach별 표준형 자료 출력결과

4. 결 론

본 연구에서는 RFAHD 2020, HEC-HMS v4.8, HEC-RAS v5.0과 홍수량 산정표준지침(환경부; 2019)과 하천설계기준(KDS 51 00 00)(국토교통부; 2018) 등 각종 지침 및 설계기준에 따라 기존 열공강(Study River) 유역 2곳에 교량 설치를 모의하였다. 모의 결과, RFAHD 2020을 통해 50년 빈도 50% 초과확률에 대한 Huff 3분위 분포의 확률 강우량으로부터 HEC-HMS v4.8의 설계 지점으로 흘러들어가는 설계 시 고려해야하는 SR1, SR4 지점에서의 50년 빈도 첨두유출량은 각각 4019.2m^3/s, 285.7m^3/s으로 도출되었다. 이를 교량설계 지점의 설계 홍수량으로 설정하여 HEC-RAS v5.0을 통해 각 측점간 측량 데이터와 각 지점의 유출량을 기입하고 이들 간에 서로 연결하여 최종적으로 열공강의 수계도를 작성하였으며, 측점 14와 15 사이, 측점 1과 2 사이에 교량 설치를 진행하였다. 그 결과, 종방향 수면곡선 상에서 Daedo Reach의 측점 1, 2 구간 내 교량 설치지점에서 상류 지점과 하류 간에 개수로에서 확인할 수 있는 Water drop 현상이 발생함을 확인할 수 있었으며, Saengtae Reach의 측점 14, 15 구간 내 교량 설치지점과 마찬가지로 별다른 배수 영향이 발생하지 않음을 확인할 수 있었다. 이는 교량의 교대와 교각의 너비를 설계기준을 만족시키는 선에서 최소화시킴에 따라 통수능을 최대로 확보하여 가능한 것으로 해석하였다. 또한, 하천설계기준(KDS 51 50 00)(국토교통부, 2018) 중 하천제방(KDS 51 50 05)(국토교통부, 2018)에 따라 Daedo Reach의 경우 계획홍수량이 2000m^3/s이상 5000m^3/s미만인 경우로 교량이 설치된 지점에서의 상류부와 하류부의 Energy grade elevation이 각각 11.88m와 11.86m으로 Low Chord로부터 떨어진 거리가 각각 5.12m, 5.14m로 다리밑 공간이 1.2m 이상 확보되었으므로 안전축으로 설계가 진행되었다. Saengtae Reach의 경우에는 계획 홍수량이 200m^3/s이상 500m^3/s미만인 경우로 교량이 설치된 지점에서의 상류부와 하류부의 Energy grade elevation이 둘다 81.73m로 Low Chord로부터 떨어진 거리가 4.27m로 다리밑 공간이 0.8m 이상 확보되었으므로 안전축으로 설계가 진행되었다.

참고문헌

1, 국토교통부(2018). 하천설계기준(KDS 51 00 00; 2018), 하천 제방(KDS 51 50 05; 2018), 유량 조사(KDS 51 12 20; 2018), 설계수문량(KDS 51 14 10; 2018), 콘크리트교 설계기준(극한강도설계법) (KDS

24 14 20; 2018) 국가건설기준센터(http://www.kcsc.re.kr).
2. 이종석(2019), 수공설계(제2판), 도서출판 씨아이알
3. 이종석(2022a), 수리학 및 실험(제4판), 도서출판 씨아이알
4. 이종석(2022b), 하천공학(제4판), 도서출판 씨아이알, p.623-638, 673-675, 676-687.
5. 환경부(2019), 홍수량 산정 표준지침(http://www.wamis.go.kr/wsc/wsc_fldstand.do).
6. 환경부(2020), 강우빈도해석 프로그램 개발보고서(http://www.wamis.go.kr/wsc/wsc_fldstand.do).
7. 환경부(2022), 댐설계기준(KDS 54 00 00; 2022), 댐 설계계획(KDS 54 10 15; 2022), 댐 여수로(KDS 54 2015; 2022), 국가건설기준센터(https://www.kcsc.re.kr).
8. 환경부(2023), 국가수자원관리 종합정보시스템(WAMIS)(http://www.wamis.go.kr/wsc/wsc_fldstand.do)
9. 충청남도(2007), 증산천 하천정비기본계획(국가수자원관리종합정보시스템; http://www.wamis.go.kr/).
10. 한국수자원학회(2009), 하천설계기준 해설(http://www.kwra.or.kr)
11. Chow, V. T., Maidment, D. R., and Mays, L. W.(1988), Applied Hydrology, McGraw-Hill International Editions, p.423-426.
12. Huff, F.A.(1967), "Time Distribution of Rainfall in Heavy Storms", Water Resources, Vol. 3, No. 4, pp.1007-1019.
13. USACE(2016)(US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center), HEC-RAS(River Analysis System), Application Guide v5.0.
14. USACE(2022)(US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center), HEC-HMS(Hydrologic Modeling System), Application Guide v4.8.
15. Douglas H. Hamilton and Richard L. Meehan(1971), Ground Rupture in the Baldwin Hills.

Using Stream Analysis Program For Design And Interpretation Hydraulic Structure

김 대 웅[4] 김 종 혁[5] 장 찬 익[6]
Kim, Dae-Woong Kim, Jong-Hyeok Jang, Chan-Ik

Abstract

In this study, bridge design was carried out using HEC-RAS (v5.0), HEC-HMS, and RFAHD (Human Data Regional Frequency Analysis), which are programs related to hand-made design, for reasonable design and analysis of hand-made structures. First, the current status of the river basin, rainfall data, flood tracking parameters of the basin, and characteristic factor conditions were used to calculate the 100-year frequency probability rainfall of the bridge installation section and the design flood of major points. According to the probability rainfall and design flood, the optimal structure format for the section was determined using concrete bridges (extreme strength design method), bridge length and width, bridge passage width, and elevation above and below the upper structure, and the results (figure) were conducted using HEC-RAS. Through such design and interpretation, each equation is applied to improve major knowledge application and practical skills through rational design.

keywords : *standard step method, limit design method, Bernoulli equation, Manning formula*

4) 건설환경공학과 4학년 01반 학번: 20207154 (E-mail; kimdaewoong88@naver.com)
5) 건설환경공학과 4학년 01반 학번: 20201967 (E-mail; cnaturec@naver.com)
6) 건설환경공학과 4학년 01반 학번: 20161843 (E-mail; cksdlr33@naver.com)

요 지

본 연구에서는 합리적인 수공구조물 설계 및 해석을 위해 수공설계 관련 프로그램인 HEC-RAS(v5.0), HEC-HMS, RFAHD(수문자료 지역빈도 해석)과 각각의 식을 이용하여 교량 설계를 진행해 나갔다. 먼저 하천유역의 현황과 강우량 자료 및 유역의 홍수추적 매개변수와 특성인자 조건을 이용하여 교량 설치구간 소유역의 100년 빈도 확률강우량과 주요지점의 설계 홍수량을 산정하여 그래프로 작성하였다. 확률강우량과 설계 홍수량에 의해 구간 최적의 구조물형식은 콘크리트교(극한강도설계법) 등을 이용하여 교량 길이와 폭, 교량통로폭, 상부구조 위·아래면 표고 등을 결정하고 HEC-RAS를 이용하여 결과(도표)를 진행하였다. 이와 같은 설계 및 해석을 통해 각각의 식을 적용하여 합리적인 설계를 통하여 전공지식 응용력과 실무능력을 증진 시킨다.

핵심용어 : 표준축차법, 극한강도설계법, Bernoulli 방정식, Manning 공식,

1. 서 론

인류는 일찍이 하천을 중심으로 경제를 부흥시키고 삶의 질은 향상 시켜왔으며, 정부는 물과 함께하는 국토 재창조를 목표로 주기적으로 반복되는 가뭄과 물 부족 현상을 해결하고, 홍수피해를 예방하면서 하천을 지역경제 활성화와 국가발전의 거점으로 활용하고자 노력하였다(한국수자원학회, 2009).

하지만 기후변화로 인하여 국지성 집중호우의 발생빈도 및 강우량이 증가하고 있어 각 지역 지자재의 홍수방어 대책수립에도 불구하고 기록적 강수에 의한 홍수피해가 빈번히 발생하고 있다. 우리나라의 5대강 중 하나인 금강의 최근 20년간 홍수피해 현황을 살펴보면 공공시설 등 각종 시설 피해규모가 증가하는 것으로 조사되었으며, 과거에는 실제적으로 커다란 재앙을 불러일으켰던 댐 파괴가 발생된 바 있고, 향후 발생될 가능성은 상존하고있는 상황이다. 댐 붕괴시 붕괴부를 통해 일시에 유출되는 대규모의 저수유량으로부터 야기되는 폭발적인 파괴력은 댐 하류부에서 거주하는 인명 및 재산피해에 막대한 손실을 초래할 수 있다. 다행히 전체 기존 댐 가운데 금세기 동안에 파괴되는 비율이 설계나 시공적인 면에서 기술적인 향상으로 인해 줄어들고 있으나, 최근의 기상이변에 따라 댐 붕괴, 제방붕괴 등에 따른 홍수해석의 필요성이 크게 대두되고 있다(Douglas and Richard, 1971).

하천기본계획의 주요 목표는 다음과 같다. 첫째, 수자원을 효율적으로 관리하고 보존하기 위한 목표를 가지고 있다. 이는 수문학적 조절, 물의 질 개선, 물의 양 증가 등을 통해 이루어진다. 둘째, 계절별로 발생하는 폭우, 태풍 등으로 인한 홍수 피해를 최소화하기 위한 목적을 가지고 있고 적절한 홍수 예측 및 대응을 통해 인명과 재산을 보호한다. 셋째, 물의 순환을 유지하고, 서식지를 보호하여 물생태계를 유지하고 보전하는 목표를 가지고 있다. 이는 생태학적 균형을 유지하고 수생생물의 다양성을 유지하는 데 중점을 둔다.

수지상 유역의 강우 유출과정을 모의하여 광범위한 문제를 풀기 위해 지리적 면적의 넓은 범위에 적용시킬 수 있도록 고안되었으며, 지리적 면적에는 작은 도시나 자연유역 유출에 대한 홍수 수문학과 큰 하천유역의 급수가 포함되어 교량설계에 용이한 HEC-RAS를 통하여 HEC-HMS에서 도출한 홍수량으로부터 설계를 진행하였다. 그리고 홍수위 검토를 위해 사용하는 HEC-RAS는 미 육군공병단에서 2005년 3월에 발표한 다중작업환경에서 대화식으로 사용함으로 홍수위를 검토하기 위해 고안된 소프트웨어 통합시스템으로서 해석성분, 자료 저장 및 관리성능, 그래프와 출력기능을 분리하여 사용자가 그래픽을 통해 컴퓨터와 정보를 교환하는 작업환경으로 구성되었고 이를 통하여 정확하게 여수로 등을 설계할 수 있을 것이다. 이처럼 HEC-HMS 모형을 적용하고, HEC-RAS 모형과 연계하여 하천에서의 종, 횡 단면에 대한 수면곡선, 각종 수리학적 특성치, 지형 및 수면곡선의 3차원 표현 등을 나타냄으로써 홍수 발생여부에 대한 전반적인 사항을 알 수 있다.

2. 이론적 배경

합리적인 교량설계를 위해서는 수공 구조물에 맞는 설계방법을 사용하여야 한다. 따라서 수공구조물을 합리적으로 설계하기 위해 사용한 대표적인 설계방법들과 프로그램들을 몇 가지 설명한다.

(1) 설계 홍수량 산정

수공 실무에서 유역 내 수장기 계획 또는 하천기본계획 등의 각종 수자원(개발)계획 수립을 위하여 환경부(2019)의 지침에 따라야 한다. 해당 지침에서는 수장기 계획 등 수자원 관련 개발계획의 수립을 위한 수공 실무에서 유역 내외에 위치한 기상청 또는 국토교통부 등 관할기관의 관측기간 5년 이상의 615개 우량관측소 우량자료를 수집하여 26개 군집지역으로 구분하였다. 이들 군집지역의 자료를 이용하여 지역빈도해석을 통해 우리나라의 최적 확률 분포형을 GEV 분포로 제시하였다.

이러한 최적분포를 이용하여 RFAHD(환경부, 2020)를 통해 확률강우량을 산정하고 Huff 4분위 중 3분위 시간분포 자료를 산출한다. 그 다음, 설계 홍수량을 HEC-HMS(v4.8)로 구한 후, HEC-RAS(v5.0)를 통해 홍수위 안정성 검토를 실시함으로써 각종 수자원 관련 개발 계획수립 등의 수공실무에 이를 활용하는 등 전체 과정을 도식화하면 그림 1과 같다.

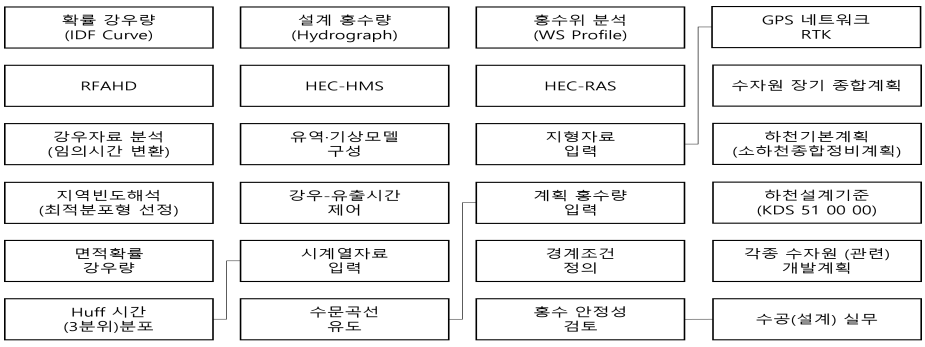


그림 1. 수공실무의 전체 개요도

(2) 교량 해석

교량을 설계함에 있어 흐름 수축(flow contraction)을 고려하여야 하는 데, 이는 교량의 교대와 교각에 의해 발생되며, 교량에 의한 급작스러운 흐름 수축은 발생되는 에너지 손실이 극심할 것이기에 에너지 방법은 이러한 교량을 통한 수면곡선을 계산하는 데 필요할 것이다. 에너지 접근법에서 폐색이 발생되지 않을 조건을 검증하기 위해서는 **식 1**을, 에너지 방법에 의한 저수위의 수면계산을 위해서는 **식 2**를 사용할 수 있다.

$$z_2+h_2+\alpha_2\frac{V_2^2}{2g}>z_{BR}+E_c \qquad \text{식 (1)}$$

$$z_1+h_1+\alpha_1\frac{V_1^2}{2g}-\frac{1}{2}\Delta x S_{f_1} =z_2+h_2+\alpha_2\frac{V_2^2}{2g}+\frac{1}{2}\Delta x S_{f_2}+h_e \qquad \text{식 (2)}$$

마지막으로 HEC-RAS(v5.0)에서 암거 및 교량 설치이후 홍수위 안정성 검토를 위해서 기존 단면 뿐 아니라, 추가단면도 별도로 구성해주어야 한다(이종석, 2022a).

HEC-RAS를 활용하여 교량을 설치하였을 때 교량의 구조물에 의해 발생되는 에너지 손실은 세 개의 부분을 고려를 해야한다. 첫 번째 부분은 흐름의 확대가 발생되는 구조물의 하류구간에서 발생되는 손실이다. 두 번째 부분은 여러 가지 방법으로 계산할 수 있는 구조물 자체에서 발생되는 손실이고, 세 번째는 흐름이 개방 통로를 통해 수축되는 구조물의 상류구간에서 발생되는 손실이다.

이러한 교량에서의 발생되는 에너지 손실은 에너지 방법, 운동량 방법과 Yarnell방법 등에 의해 계산할 수 있다. 또한 교량에서의 흐름은 상류와 사류에 따라 A, B, C급으로 분류된다. A급 흐름은 교량을 통한 완전한 상류상태, C급 흐름은 완전한 사류상태이다. B급 흐름은 교량 수축에 의해 폐색 될 때 발생하는 흐름이며 교량이 적절하게 설계가 되었다면 B급 흐름은 발생되지 않아야 하며 일반적으로 교량에서는 A급 흐름이 일반적이다(이종석, 2019).

3. 수리 안정성 검토

본 절에서는 **그림 2**의 열공강(Study River) 유역 내 두 지점(청색 사각 박스) 상에 교량 설치를 진행하기 위한 설계 절차를 수록하였다.

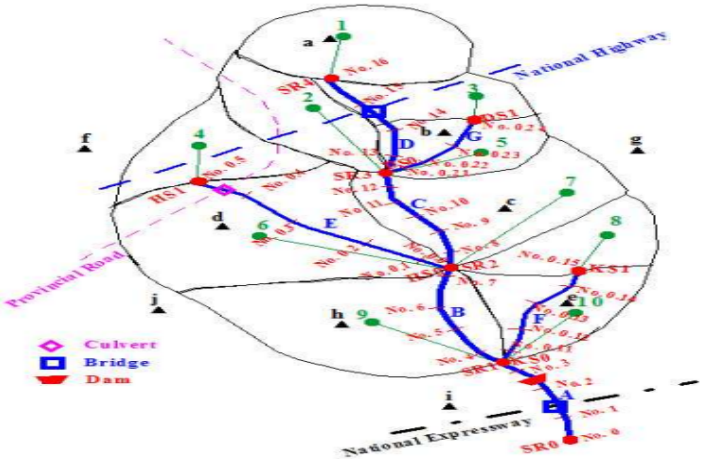


그림 2. 열공강 유역 및 교량 설치 계획도

3.1 지역빈도해석 · 확률 강우량

RFAHD 2020을 통해 열공강(Study River)내 각 소유역의 총 10곳의 우량관측소의 50년 빈도 확률강우량(Huff, 1967) 산정을 위하여 지역빈도해석(환경부, 2020; 2023)을 **그림 3**과 같이 진행하였으며, 그 중 Precipitation 우량관측소의 재현기간-지속기간-확률강우량 곡선(PDF Curve)의 결과는 다음 **그림 4**와 같고, 우량관측소별 50년 빈도-매시간(24시간) 확률강우량은 **표 1**과 같다.

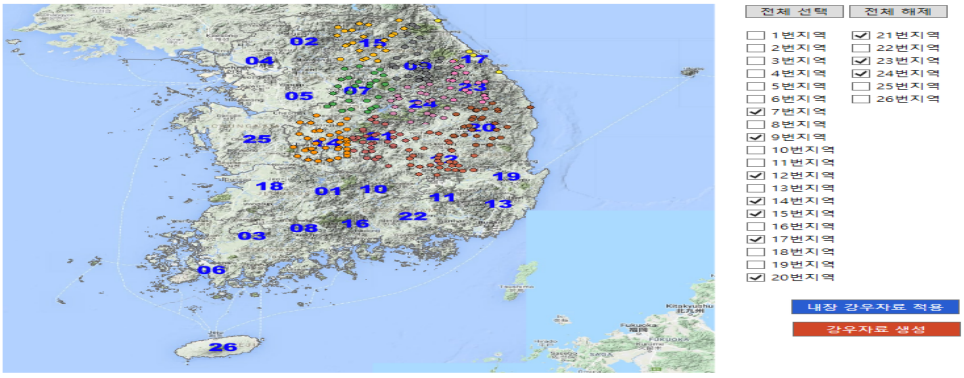


그림 3. RFAHD 2020의 지역빈도해석을 위한 강우자료의 선택과 입력

그림 4. Precipitation 우량관측소의 재현기간-지속기간-확률강우량 곡선(PDF Curve)

표 1. 우량관측소별 50년 빈도-매시간(24시간) 확률강우량

시간 / 지점	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
(a)	82.9	112.4	134.6	158	170.9	184.7	199.1	212.4	226	237.3	248.8	257.7	265.4	272.9	280	287.4	295.7	301.8	309.1	317.9	326.2	334.6	345	354.8
(b)	66.5	90.9	110.1	125.5	138.9	154.1	165.6	175.5	186.3	198.4	206	212.5	220.2	228.9	237.1	246.2	256.3	263.6	270	275	280	285.8	294.3	301
(c)	69.8	94.8	115.6	132.7	150.8	166.9	177.8	189.1	201.2	209.9	220.3	230.3	238.8	247.9	254.2	262.2	272.7	282.5	289.1	296.9	305.8	315.3	326.4	336.7
(d)	59.2	83.9	100.8	115.1	127.1	136.7	146.3	154	160.8	167.6	176.1	185.7	193.8	198.9	202.2	205.3	208.7	212.4	218.3	223.5	228.8	235.6	243.2	248.6
(e)	61.8	81.9	105.4	118.8	127.2	134.7	144.4	151.6	160.2	168.3	172.6	176.8	181.1	185.3	190.1	195.9	201.6	207.2	213.1	216.9	221.1	223.1	225.3	230
(f)	80.7	108.6	131.1	143.6	158.6	169.8	179.9	193.1	207.5	221.6	230.3	237.9	246.1	254.6	261.7	267.5	271.5	274	276.2	279.6	281.5	283.9	288.7	292.4
(g)	69.9	112.3	145.9	173.3	192.9	208.8	223.9	235.1	245.7	255.9	267	279	288.9	299.5	311.6	324.7	336.7	346.2	355.3	364.8	372.1	379.2	390	398.2
(h)	60.3	82.6	99.6	112.7	124	133.5	143.9	152.7	161.3	168.7	173.5	179.4	184.9	191.4	196.1	200.6	204	207.5	212	216	221.2	226.9	231.8	236
(i)	55.2	78.3	93.6	106.7	115.8	124.9	132.2	139.1	145.2	151.1	154.9	159.8	163.1	168.1	174.6	180.5	187.6	193.4	198.7	202.4	206.5	209.2	211.7	214
(j)	71.5	100.9	119.4	138.2	155.3	166.1	179.5	188.5	197.8	207.6	216	222.3	228.7	234.3	237.5	239.7	242	244.1	247.4	250	250.6	252.6	255.9	261.7
비고	(a)=Precipitation 우량관측소(지역15, 지점=10124130), (b)=Infiltration 우량관측소(지역9, 지점=10014210), (c)=Percolation 우량관측소(지역23, 지점=20011216), (d)=Groundwater 우량관측소(지역24, 지점=20044070), (e)=Runoff 우량관측소(지역20, 지점=20024160), (f)=Evaporation 우량관측소(지역7, 지점=10034130), (g)=Transpiration 우량관측소(지역17, 지점=13021106), (h)=Interception 우량관측소(지역21, 지점=20074010), (i)=Hydrocycle 우량관측소(지역12, 지점=20084060), (j)=Watercycle 우량관측소(지역14, 지점=30114030)																							

홍수량 산정표준지침(환경부; 2019)에 따라, 관측소가 속한 해당 지역에서의 Huff 3분위 50% 초과확률에 대한 곡선은 **그림 5**와 같았으며, 여기서 적색 곡선은 8차 다항식 회귀(8th-Order Regression)에 대한 결과 곡선으로, 그때의 다항식의 계수와 그로부터 재구성된 다항식은 **표 2**와 같다.

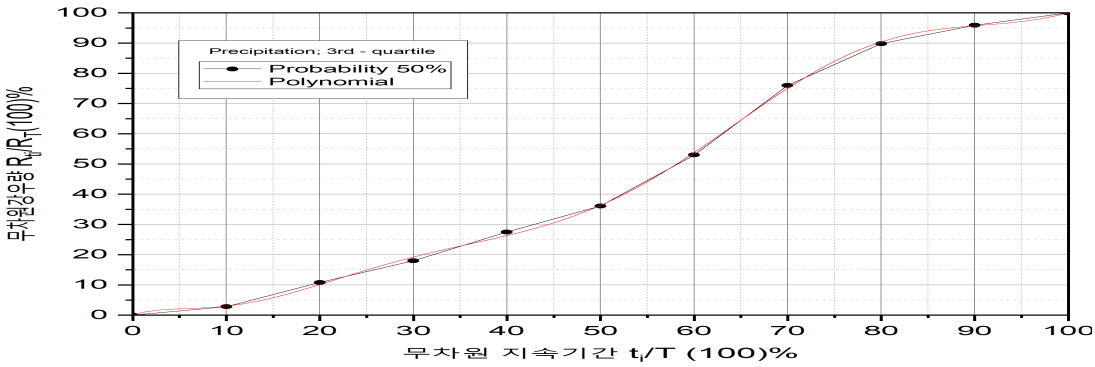


그림 5. Precipitation 우량관측소의 재현기간-지속기간-확률강우량 곡선(PDF Curve)

표 2. Precipitation 우량관측소의 Huff 3분위 분포곡선에 대한 무차원 다항식 유도

내용 / 관측소	다항식의 계수	다항식
Precipitation 우량관측소	C_0=-2.40E-002, C_1=1.02805808 C_2=-2.01E-001, C_3=1.93E-002 C_4=-8.05E-004, C_5=1.73E-005 C_6=-1.99E-007, C_7=1.16E-009 C_8=-2.71E-012	y_{ti}=-2.40E-002+1.02805808x_{ti}-(2.01E-001)x_{ti}^2+(1.93E-002)x_{ti}^3-(8.05E-004)x_{ti}^4+(1.73E-005)x_{ti}^5-(1.99E-007)x_{ti}^6+(1.16E-009)x_{ti}^7-(2.71E-012)x_{ti}^8

이로부터 해당 관측소의 Huff 3분위 분포의 50% 초과확률에 대한 24시간 누가확률강우량은 **표 3**과 같으며, 2, 5, 10, 20, 50, 80, 100, 200년 빈도에 대한 유도된 **식 3**과 같은 전대수 다항식형의 강우강도식은 **표 4**와 같다.

$$\ln I = a + b\ln(t_h)+c[\ln(t_h)]^2+d[\ln(t_h)]^3+e[\ln(t_h)]^4+f[\ln(t_h)]^5+g[\ln(t_h)]^6 \qquad \text{식 (3)}$$

여기서, t_h=강우지속기간(h)이고, a, b, c, d, e, f, g=회귀상수이다.

표 3. Precipitation 우량관측소의 Huff 3분위 분포의 24시간 누가확률강우량

관측소 / 시간		Precipitation 우량관측소 (지역15, 지점=10124130)		
시간 (h)	(t/T) 100(%)	(R_t/R_T) 100(%)	R_t	I_t
0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	4.17	1.9	6.7	6.7
2	8.33	2.5	8.9	2.2
…				
24	100.00	100.0	354.8	8.9

표 4. Precipitation 우량관측소(지역15, 지점=10124130)의 강우강도식(전대수 다항식형) 유도

재현기간	a	b	c	d	e	f	g	결정계수
2	3.802	-0.936	0.568	-0.402	0.151	-0.029	0.002	0.999853
5	4.062	-0.968	0.712	-0.526	0.196	-0.036	0.003	0.999758
10	4.195	-0.964	0.773	-0.590	0.219	-0.039	0.003	0.999660
20	4.302	-0.950	0.815	-0.641	0.237	-0.041	0.003	0.999514
50	4.419	-0.921	0.853	-0.696	0.256	-0.043	0.003	0.999214
80	4.471	-0.903	0.867	-0.720	0.264	-0.043	0.003	0.999000
100	4.495	-0.893	0.873	-0.731	0.268	-0.043	0.002	0.998880
200	4.561	-0.862	0.885	-0.761	0.277	-0.044	0.002	0.998429

3.2 설계홍수량 산정

설계 홍수량 산정을 위하여 HEC-HMS v4.8(USACE, 2022)에서 구성한 유역모델(Basin Model)은 다음 **그림 6**과 같고, 앞선 RFAHD 지역빈도해석을 실시한 우리나라 유역도의 중동부 지역을 열공강(Study River)의 유역으로 가정하여 이를 작도하였다.

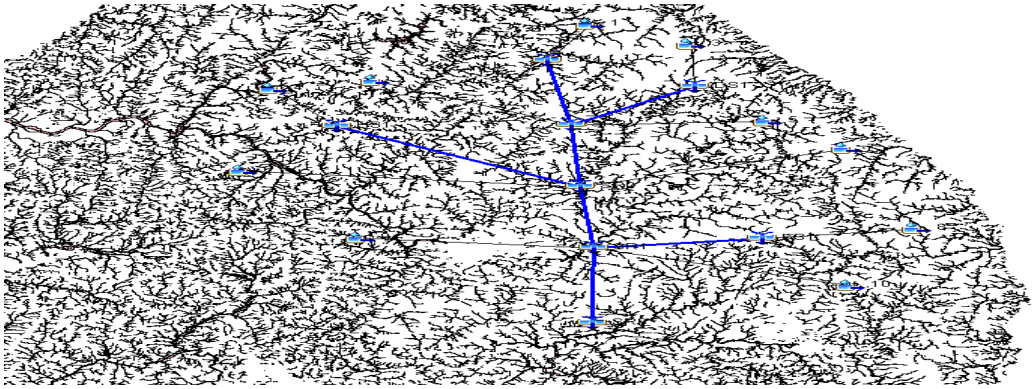


그림 6. 우리나라 유역도 상의 열공강(Study River) 유역

앞선 3.1절에서 도출한 각 관측소별 24시간 누가확률강우량의 시계열 자료로부터 HEC-HMS v4.8(USACE, 2022)에서 설계홍수량을 산정한 결과는 다음 **그림 7**과 같았고, 교량 설계 지점으로 흘러들어가는 설계 시 고려해야하는 SR1과 SR4 지점에서의 첨두유출량은 각각 4019.2m^3/s와 285.7m^3/s으로 도출되었다.

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak
1	72	285.7	03Aug2020, 14:00
SR4	72	285.7	03Aug2020, 14:00
D	72	270.4	03Aug2020, 16:00
2	71	351.1	03Aug2020, 14:00
5	43	257.7	03Aug2020, 14:00
3	40	232.1	03Aug2020, 14:00
DS1	40	232.1	03Aug2020, 14:00
G	40	230.1	03Aug2020, 15:00
SR3	226	1026.5	03Aug2020, 14:00
C	226	990.0	03Aug2020, 16:00
4	70	337.8	03Aug2020, 14:00
HS1	70	337.8	03Aug2020, 14:00
6	149	948.0	03Aug2020, 14:00
7	135	754.5	03Aug2020, 15:00
E	70	318.4	03Aug2020, 16:00
SR2	580	2849.3	03Aug2020, 15:00
B	580	2698.7	03Aug2020, 17:00
9	148	749.0	03Aug2020, 15:00
10	77	408.6	03Aug2020, 14:00
8	70	361.1	03Aug2020, 15:00
KS1	70	361.1	03Aug2020, 15:00
F	70	332.1	03Aug2020, 17:00
SR1	875	4019.2	03Aug2020, 16:00
A	875	3852.0	03Aug2020, 17:00
SR0	875	3852.0	03Aug2020, 17:00

그림 7. 각 지점별 첨두유출량

3.2 교량해석

교량 설계 및 해석을 위하여 HEC-RAS v5.0(USACE, 2022)을 통해 사전에 유역 내 각 측점에서의 단면의 측량 데이터를 이용해 지형자료를 구축한 결과는 다음 **그림 8**과 같다.

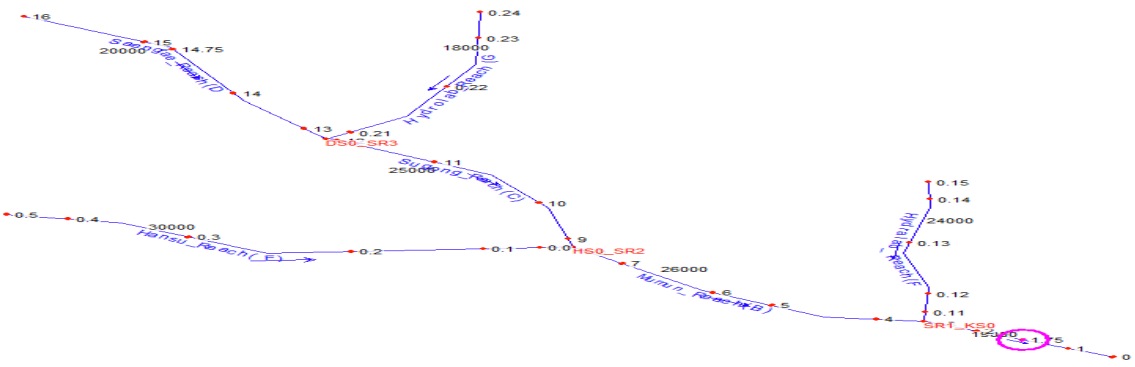


그림 8. 열공강의 수계도

교량이 설치되는 지점은 측점 14와 15 사이와 측점 1과 2 사이이므로, 각 측점간에 추가적인 단면인 측점 14.75, 14.25 그리고 측점 1.75, 1.25를 각각 추가 구성하였으며, 이러한 추가 단면 및 변경된 단면의 상세 제원 및 그 결과는 다음 **표 5**, **그림 9**와 같다.

표 5-(a). 변경된 Saengtae Reach의 측점 15

좌표 / 번호	좌안 (LOB)	중앙 (Channel)	우안 (ROB)
구간길이(m)	1520	1500	1480

표 5-(b). Saengtae Reach의 측점 14.75

좌표 / 번호	x좌표 (station)(m)	y좌표 (elevation)(m)	비고	좌표 / 번호	x좌표 (station)(m)	y좌표 (elevation)(m)	비고
1	23.0	82.5		6	103.0	78.6	
2	39.0	79.4		7	119.0	79.0	
3	55.0	79.4		8	135.0	79.1	
4	71.0	79.0		9	151.0	79.3	
5	87.0	79.0		10	167.0	82.5	
좌표 / 번호	좌안 (LOB)	중앙 (Channel)	우안 (ROB)	비고	중앙수로 좌표 (m)	좌안 끝점 71.0	우안 시점 119.0
구간길이(m)	20	20	20	No.	단면변화	급축소계수	급확대계수
조도계수	0.041	0.04	0.044			0.1	0.3

표 5-(c). Saengtae Reach의 측점 14.25

좌표 / 번호	좌안 (LOB)	중앙 (Channel)	우안 (ROB)
구간길이(m)	5500	5480	5460
비 고	명시되지 않은 사항들은 **표 5-(b)**와 동일		

표 5-(d). 변경된 Daedo Reach의 측점 2

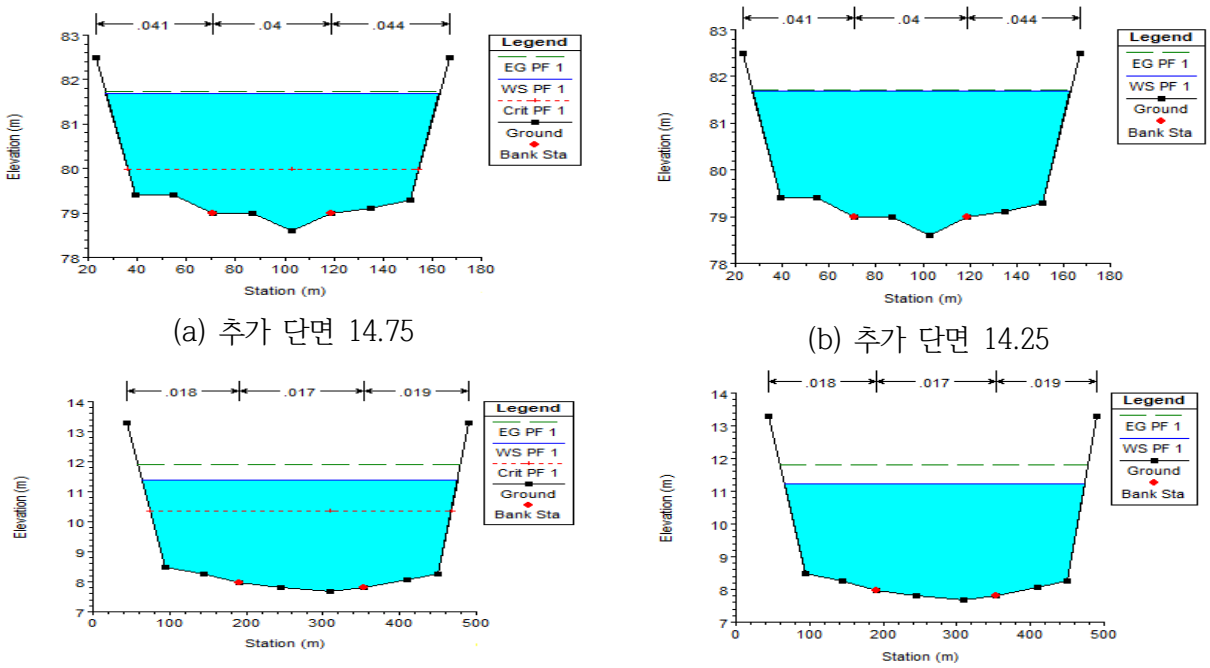
좌표 / 번호	좌안 (LOB)	중앙 (Channel)	우안 (ROB)
구간길이(m)	5100	5000	4900

표 5-(e). Daedo Reach의 측점 1.75

좌표 / 번호	x좌표 (station)(m)	y좌표 (elevation)(m)	비고	좌표 / 번호	x좌표 (station)(m)	y좌표 (elevation)(m)	비고
1	45.0	13.3		6	308.5	7.69	
2	93.7	8.49		7	353.2	7.82	
3	145.4	8.26		8	408.9	8.06	
4	190.1	7.98		9	450.6	8.27	
5	245.8	7.8		10	490.5	13.3	
좌표 / 번호	좌안 (LOB)	중앙 (Channel)	우안 (ROB)	비고	중앙수로 좌표 (m)	좌안 끝점 190.1	우안 시점 353.2
구간길이(m)	28	28	28	No.	단면변화	급축소계수	급확대계수
조도계수	0.018	0.017	0.019			0.1	0.3

표 5-(f). Daedo Reach의 측점 1.25

좌표 / 번호	좌안 (LOB)	중앙 (Channel)	우안 (ROB)
구간길이(m)	4972	4972	4972
비 고	명시되지 않은 사항들은 **표 5-(e)**와 동일		



(a) 추가 단면 14.75

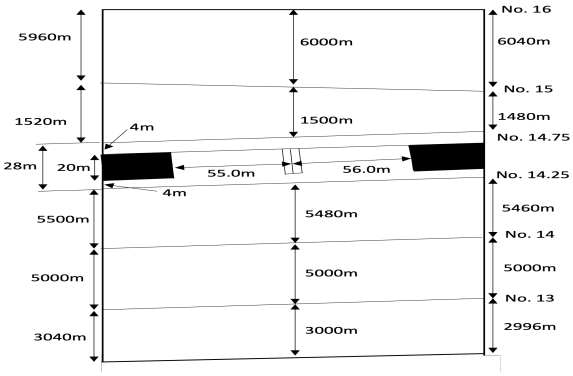
(b) 추가 단면 14.25

(c) 추가 단면 1.75

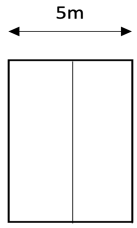
(d) 추가 단면 1.25

그림 9. 추가 횡단면 결과

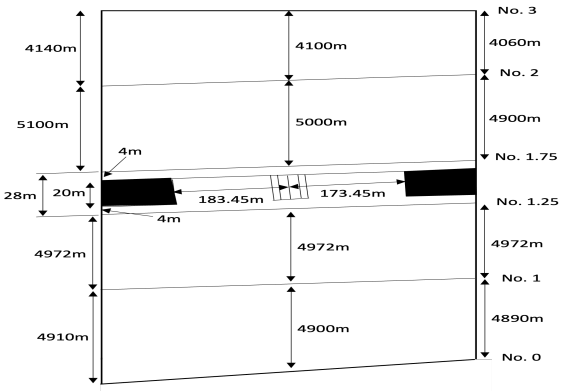
콘크리트교 설계기준(KDS 24 14 20)(국토교통부; 2018)에 따라 교량의 수로구간 내 측점별 종횡단면자료 및 특성 등의 상세한 도면은 **그림 10**과 같고, 각 Reach에서의 설치할 교량단면에 대한 설계 상세도는 **그림 11**과 같다.



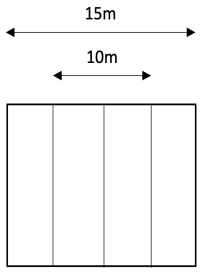
(a)-1. Saengtae Reach의 측점별 상세도



(a)-2. Saengtae Reach의 교각(Pier) 상세도

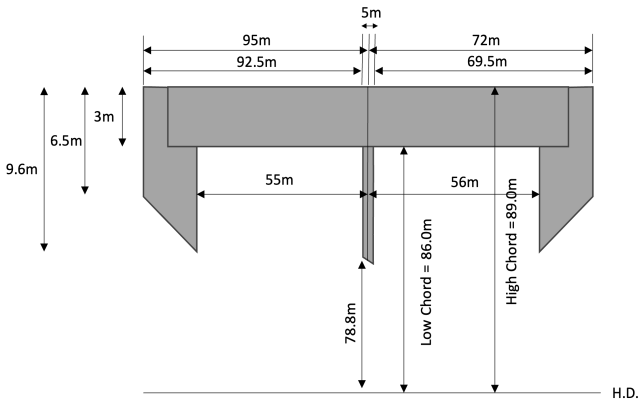


(b)-1. Daedo Reach의 측점별 상세도

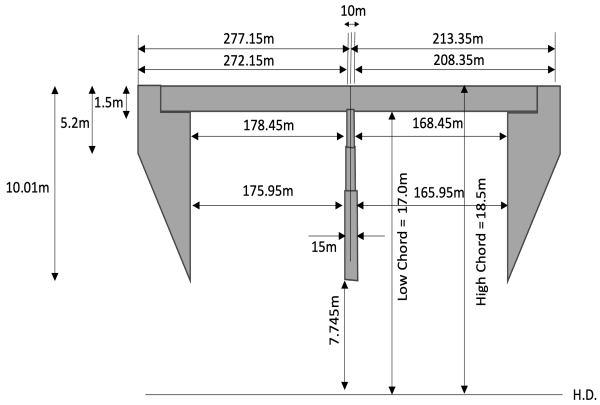


(b)-2. Daedo Reach의 교각(Pier) 상세도

그림 10. 각 Reach에서의 측점별 상세도 및 교각 상세도



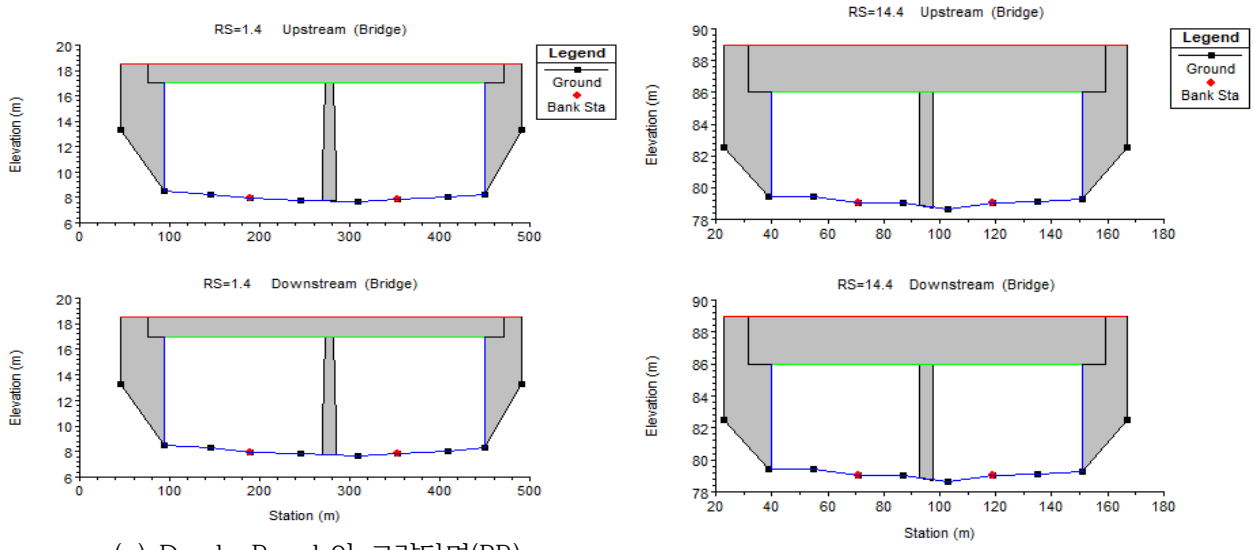
(a) Saengtae Reach의 교량단면(BR)과 그 상세도



(b) Daedo Reach의 교량단면(BR)과 그 상세도

그림 11. 각 Reach에서의 측점별 상세도 및 교각 상세도

설계를 진행한 결과를 HEC-RAS v5.0의 교량·암거 자료 편집기에 입력한 결과는 다음 **그림 12**와 같다.



(a) Daedo Reach의 교량단면(BR)

(b) Saengtae Reach의 교량단면(BR)

그림 12. HEC-RAS v5.0의 교량·암거 편집기 상의 각 Reach에 설치되는 교량단면(BR)

HEC-RAS v5.0에서 교량 설치 이후의 각 Reach에서의 종방향 수면곡선의 결과는 다음 **그림 13, 14**와 같이 도출되었다.

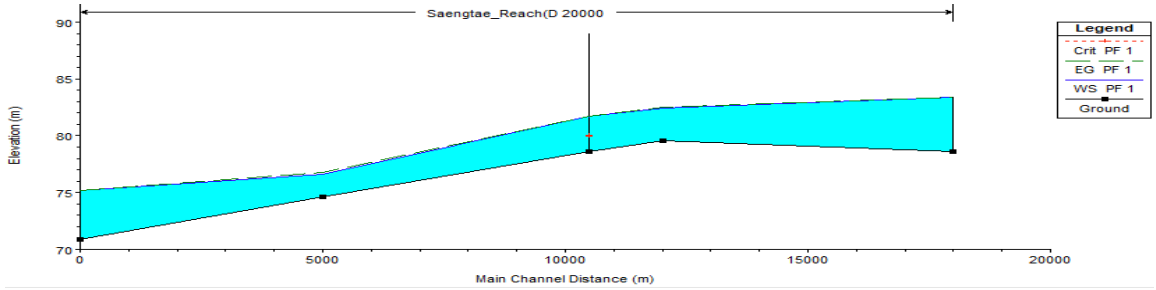


그림 13. 계산 결과 Saengtae Reach의 종방향 수면곡선

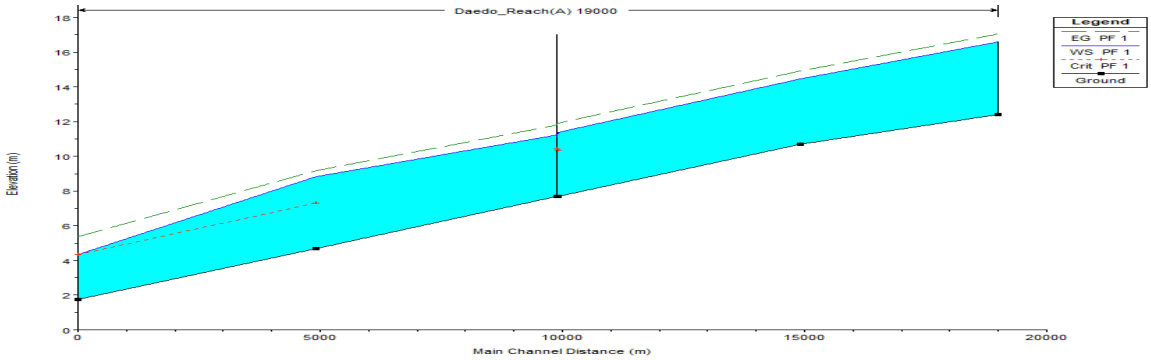
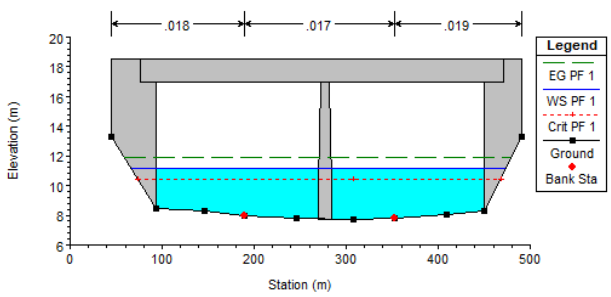


그림 14. 계산 결과 Daedo Reach의 종방향 수면곡선

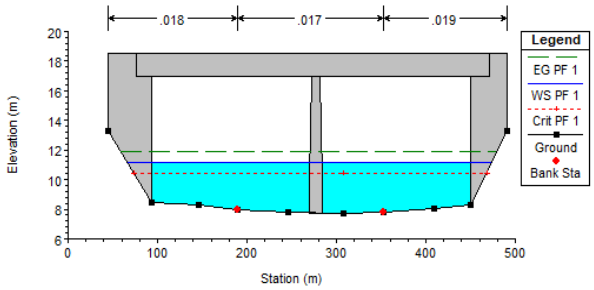
그림 13, 14와 같이 교량설치에 따른 전 측점간의 종방향 수면곡선은 교량 설치 이후에도 별다른 배수영향 없이 통수가 원활히 이루어지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 교량 설계 시 교량의 표고를 하천의 지형측량에 대한 표고보다 더 높게 설치하였고, 교대와 교각의 너비를 설계기준에 위배되지 않는 선에서 최소화하였기 때문인 것으로 보인다. 단, **그림 14**의 Daedo Reach의 교량 설치 위치에서 확인할 수 있듯이, 상류 지점과 하류 지점간에 개수로에서 보이는 Water drop 현상이 발생함을 확인할 수

있었다.

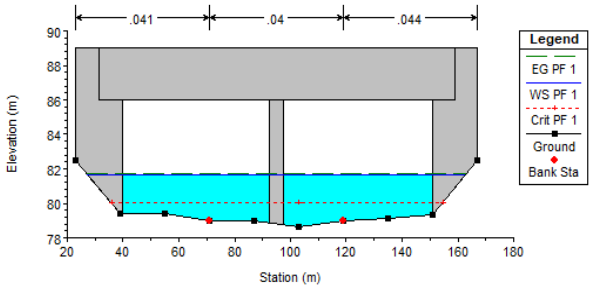
또한, 설치된 교량의 수위 분석결과에 대한 상세도를 보이면, 다음 **그림 15**와 같다.



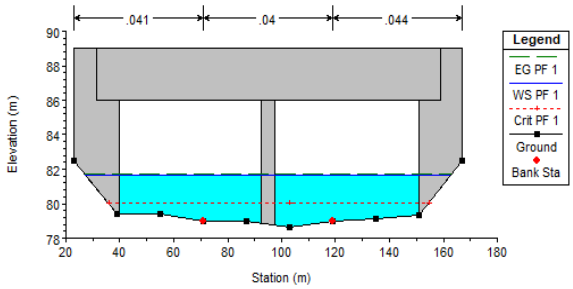
(a) Daedo Reach 교량의 상류부 수위



(b) Daedo Reach 교량의 하류부 수위



(c) Saengtae Reach 교량의 상류부 수위



(d) Saengtae Reach 교량의 하류부 수위

그림 15. 교량 설치 이후 교량 수위 분석 결과도

수위 분석결과, 각 Reach에 설치된 모든 교량의 상류부와 하류부에서 교량의 Low Chord보다 수위가 아래에 위치해 있음을 확인할 수 있었고, Daedo Reach와 Saengtae Reach의 50년 빈도의 홍수량이 각각 4019.20m^3/s와 285.70m^3/s로 도출되었다.

하천설계기준(KDS 51 50 00)(국토교통부, 2018) 중 하천제방(KDS 51 50 05)(국토교통부, 2018)에 따라 Daedo Reach의 경우 계획홍수량이 2000m^3/s이상 5000m^3/s미만인 경우이므로 교량이 설치된 지점에서의 상류부와 하류부의 Energy grade elevation이 각각 11.88m와 11.86m으로 Low Chord로부터 떨어진 거리가 각각 5.12m, 5.14m로 다리밑 공간이 1.2m 이상 확보되었으므로 안전축으로 설계가 진행되었다.(또한, Saengtae Reach의 경우에는 계획 홍수량이 200m^3/s이상 500m^3/s미만인 경우로 교량이 설치된 지점에서의 상류부와 하류부의 Energy grade elevation이 둘다 81.73m로 Low Chord로부터 떨어진 거리가 4.27m로 다리밑 공간이 0.8m 이상 확보되었으므로 안전축으로 설계가 진행되었다.

최종적으로, HEC-RAS의 최종 결과에 대한 표준형 자료 출력표(Standard Table)를 보이면 다음 **그림 16**과 같다.

Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
			(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
19000	3	PF 1	4019.20	12.40	16.61		17.05	0.000477	3.27	1389.32	398.53	0.52
19000	2	PF 1	4019.20	10.69	14.48		14.93	0.000566	3.34	1390.42	445.50	0.56
19000	1.75	PF 1	4019.20	7.69	11.39	10.34	11.90	0.000646	3.51	1295.73	411.01	0.59
19000	1.4		Bridge									
19000	1.25	PF 1	4019.20	7.69	11.24		11.80	0.000754	3.68	1233.52	408.26	0.63
19000	1	PF 1	4019.20	4.69	8.81	7.32	9.16	0.000378	2.89	1571.35	461.90	0.46
19000	0	PF 1	4019.20	1.75	4.32	4.32	5.35	0.002272	5.11	929.62	456.49	1.04

(a) Daedo Reach

Reach	River Sta	Profile	Q Total	Min Ch El	W.S. Elev	Crit W.S.	E.G. Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Froude # Chl
			(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
20000	16	PF 1	285.70	78.60	83.41		83.42	0.000071	0.58	566.18	144.00	0.09
20000	15	PF 1	285.70	79.60	82.43		82.48	0.000598	1.14	286.58	133.10	0.23
20000	14.75	PF 1	285.70	78.60	81.69	79.97	81.74	0.000415	1.02	322.48	135.81	0.19
20000	14.4		Bridge									
20000	14.25	PF 1	285.70	78.60	81.68		81.72	0.000424	1.03	320.20	135.64	0.20
20000	14	PF 1	285.70	74.60	76.58		76.74	0.003128	2.00	167.01	117.96	0.49
20000	13	PF 1	285.70	70.90	75.14		75.16	0.000108	0.65	511.59	153.00	0.10

(b) Saengtae Reach

그림 16. 교량 설치 이후, 교량 설치된 각 Reach별 표준형 자료 출력결과

4. 결 론

본 연구에서는 RFAHD 2020, HEC-HMS v4.8, HEC-RAS v5.0과 홍수량 산정표준지침(환경부; 2019)과 하천설계기준(KDS 51 00 00)(국토교통부; 2018) 등 각종 지침 및 설계기준에 따라 기존 열공강(Study River) 유역 2곳에 교량 설치를 모의하였다. 모의 결과, RFAHD 2020을 통해 50년 빈도 50% 초과확률에 대한 Huff 3분위 분포의 확률 강우량으로부터 HEC-HMS v4.8의 설계 지점으로 흘러들어가는 설계 시 고려해야하는 SR1, SR4 지점에서의 50년 빈도 첨두유출량은 각각 4019.2m^3/s, 285.7m^3/s으로 도출되었다. 이를 교량설계 지점의 설계 홍수량으로 설정하여 HEC-RAS v5.0을 통해 각 측점간 측량 데이터와 각 지점의 유출량을 기입하고 이들 간에 서로 연결하여 최종적으로 열공강의 수계도를 작성하였으며, 측점 14와 15 사이, 측점 1과 2 사이에 교량 설치를 진행하였다. 그 결과, 종방향 수면곡선 상에서 Daedo Reach의 측점 1, 2 구간 내 교량 설치지점에서 상류 지점과 하류 간에 개수로에서 확인할 수 있는 Water drop 현상이 발생함을 확인할 수 있었으며, Saengtae Reach의 측점 14, 15 구간 내 교량 설치지점과 마찬가지로 별다른 배수 영향이 발생하지 않음을 확인할 수 있었다. 이는 교량의 교대와 교각의 너비를 설계기준을 만족시키는 선에서 최소화시킴에 따라 통수능을 최대로 확보하여 가능한 것으로 해석하였다. 또한, 하천설계기준(KDS 51 50 00)(국토교통부, 2018) 중 하천제방(KDS 51 50 05)(국토교통부, 2018)에 따라 Daedo Reach의 경우 계획홍수량이 2000m^3/s이상 5000m^3/s미만인 경우로 교량이 설치된 지점에서의 상류부와 하류부의 Energy grade elevation이 각각 11.88m와 11.86m으로 Low Chord로부터 떨어진 거리가 각각 5.12m, 5.14m로 다리밑 공간이 1.2m 이상 확보되었으므로 안전축으로 설계가 진행되었다. Saengtae Reach의 경우에는 계획 홍수량이 200m^3/s이상 500m^3/s미만인 경우로 교량이 설치된 지점에서의 상류부와 하류부의 Energy grade elevation이 둘다 81.73m로 Low Chord로부터 떨어진 거리가 4.27m로 다리밑 공간이 0.8m 이상 확보되었으므로 안전축으로 설계가 진행되었다.

참고문헌

1, 국토교통부(2018). 하천설계기준(KDS 51 00 00; 2018), 하천 제방(KDS 51 50 05; 2018), 유량 조사(KDS 51 12 20; 2018), 설계수문량(KDS 51 14 10; 2018), 콘크리트교 설계기준(극한강도설계법) (KDS 24 14 20; 2018) 국가건설기준센터(http://www.kcsc.re.kr).

2. 이종석(2019), 수공설계(제2판), 도서출판 씨아이알

3. 이종석(2022a), 수리학 및 실험(제4판), 도서출판 씨아이알

4. 이종석(2022b), 하천공학(제4판), 도서출판 씨아이알, p.623-638, 673-675, 676-687.

5. 환경부(2019), 홍수량 산정 표준지침(http://www.wamis.go.kr/wsc/wsc_fldstand.do).

6. 환경부(2020), 강우빈도해석 프로그램 개발보고서(http://www.wamis.go.kr/wsc/wsc_fldstand.do).

7. 환경부(2022), 댐설계기준(KDS 54 00 00; 2022), 댐 설계계획(KDS 54 10 15; 2022), 댐 여수로(KDS 54 2015; 2022), 국가건설기준센터(https://www.kcsc.re.kr).

8. 환경부(2023), 국가수자원관리 종합정보시스템(WAMIS)(http://www.wamis.go.kr/wsc/wsc_fldstand.do)

9. 충청남도(2007), 증산천 하천정비기본계획(국가수자원관리종합정보시스템; http://www.wamis.go.kr/).

10. 한국수자원학회(2009), 하천설계기준 해설(http://www.kwra.or.kr)

11. Chow, V. T., Maidment, D. R., and Mays, L. W.(1988), Applied Hydrology, McGraw-Hill International Editions, p.423-426.

12. Huff, F.A.(1967), “Time Distribution of Rainfall in Heavy Storms”, Water Resources, Vol. 3, No. 4, pp.1007-1019.

13. USACE(2016)(US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering

Center), HEC-RAS(River Analysis System), Application Guide v5.0.
14. USACE(2022)(US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center), HEC-HMS(Hydrologic Modeling System), Application Guide v4.8.
15. Douglas H. Hamilton and Richard L. Meehan(1971), Ground Rupture in the Baldwin Hills.