

# 연천댐 사례를 통한 댐 파괴 부정류해석 및 하류 영향 검토(I) -댐 파괴 시나리오와 부정류 해석을 통한 지속시간 및 파괴시간 해석-

장 석 환

대진대학교 건설시스템공학과

(2008년 9월 30일 접수; 2008년 10월 28일 수정; 2008년 11월 18일 채택)

## Dam Failure and Unsteady Flow Analysis through Yeoncheon Dam Case(I) -Analysis of Dam Failure Time and Duration by Failure Scenarios and Unsteady Flow -

Sukhwan Jang

Department of Civil Engineering, Daejin University, Pocheon, Kyunggi Do 487-711, Korea

(Manuscript received 30 September, 2008; revised 28 October, 2008; accepted 18 September, 2008)

### Abstract

This study aims at the estimation of dam failure time and dam failure scenario analysis of and applied to Yeoncheon Dam which was collapsed August 1st 1999, using HEC-HMS, DAMBRK-FLDWAV simulation model. As the result of the rainfall-runoff simulation, the lancet flood amount of the Yeoncheon Dam site was 10,324 m<sup>3</sup>/sec and the total outflow was 1,263.90 million m<sup>3</sup>. For the dam failure time estimation, 13 scenarios were assumed including dam failure duration time and starting time, which reviewed to the runoff results. The simulation time was established with 30 minutes intervals between one o'clock to 4 o'clock in the morning on August 1, 1999 for the setup standard for each case of the dam failure time estimation, considering the arrival time of the flood, when the actually measured water level was sharply raising at Jeongok station area of the Yeoncheon Dam downstream. As results, dam failure arrival time could be estimated at 02:45 a.m., August 1st 1999 and duration time could be also 30 minutes. Those results and procedure could suggest how and when dam failure occurs and analyzes.

**Key Words :** Dam failure time, DAMBRK, FLDWAV, Scenario, Yeoncheon Dam

### 1. 서 론

홍수피해를 경감하기 위한 방법에는 댐, 제방, 유수지 등의 구조적인 방법과 홍수에 · 경보, 홍수보

험 등의 비구조적인 방법이 있다. 이 중에서 댐과 제방은 홍수피해를 줄이기 위한 가장 일반적인 방법으로서 우리나라의 경우 대부분 이 방법들에 의해 홍수피해를 예방하고 있다<sup>1,2)</sup> 댐이나 제방은 설계홍수량 이하의 경우에는 비교적 안전하게 홍수를 예방할 수 있으나 이보다 큰 규모의 홍수가 발생하여 댐 붕괴로 이어지면 일반적으로 해빙이나 큰 강우로 인한 홍수보다 훨씬 그 규모가 크므로 그 피

Corresponding Author : Sukhwan Jang, Department of Civil Engineering, Daejin University, Pocheon, Kyunggi Do 487-711, Korea  
Phone: +82-31-539-2025  
E-mail: drjang@daejin.ac.kr

해 또한 엄청나다고 할 수 있다. 홍수로 인한 피해를 최소화하기 위해서는 댐이나 제방의 붕괴를 사전에 예방하는 것이 가장 바람직하지만 이를 위해서 붕괴시간 예측과 하류 홍수와 해석을 통한 홍수피해를 최소화하는 것도 매우 중요하다.

댐 붕괴의 모의를 위한 대표적인 모형으로서 DAMBRK모형은 1977년 Fread<sup>3)</sup>에 의해서 처음 소개되었고, 1979, 1980, 1981, 1982, 1984년에 기능이 향상되어 발표되었다. 댐 붕괴에 관한 연구로서는 Ritter, Dressler, Whitham 등<sup>4)</sup>에 의하여 급격한 붕괴로부터 발생하는 Positive Wave와 Negative Wave에 관한 연구가 있었다. 댐 붕괴로부터의 홍수와 해석을 위한 방법은 그 해석 알고리즘이 비교적 정교한 해석모형으로 Fread D.L.<sup>5)</sup>에 의해 소개된 동역학과 홍수추적 방법을 사용하는 미국 기상청의 FLDWAV 모형(1998), 수문학적 홍수추적방법을 사용하는 미 육군공병단 수문연구소(U.S Army corps of Engineers, Hydraulic Engineering Center, HEC)의 HEC-1(1987) 모형<sup>6)</sup>이 있으며 개수로에서 일차원 부정류 흐름 해석을 모의할 수 있는 수치모형은 미국 기상청에서 개발한 DWOPER모형과 FLDWAV모형, 그리고 미 육군공공병단의 수문 연구소(HEC)에서 개발한 UNET모형을 대표적으로 들 수 있다.

국내에서는 주로 댐 붕괴에 의한 하류부 홍수와 해석이 많이 다루어져 왔다. 이 분야에 대한 연구로서 구 등<sup>1)</sup>에 의해 댐 붕괴에 의한 하류부 부정류 흐름의 수리학적 영향검토와 장<sup>2)</sup>에 의한 1999년 연천소수력발전소(연천댐) 붕괴로 인한 수해원인조사 감정평가서가 있었다. 댐 붕괴에 대한 연구로서 이<sup>7)</sup>에 의한 댐붕괴 홍수와 해석을 위한 무차원 홍수추적곡선 유도가 있었으며, 또한 흙댐의 가상파괴로 인한 홍수과의 예측 모형에 대한 연구가 있었다. 그리고 한<sup>8)</sup>에 의한 흙댐의 파괴에 따른 홍수와 예측

모형의 개발과 댐 파괴에 따른 무차원 홍수추적곡선의 유도가 있었다. 하지만 상기 연구들은 대부분 파괴 시각과 지속시간 관측 기록을 바탕으로 하류의 홍수와 해석이나 홍수추적 수문 곡선 등을 유도하는 기법을 제시하였고 댐 파괴 지속시간에 대한 추정 연구는 없는 실정이다. 이에 본 연구는 댐 파괴 시작시간과 지속시간의 기록을 갖지 않는 지점에서의 하류 홍수추적을 위한 기본적인 경계조건을 위한 댐 파괴시각 및 지속시간을 추정하기 위한 방법으로 시간증분과 댐 파괴 시작시각을 달리하여 각각의 사나리오 설정과 부정류 해석을 통한 댐 파괴 시작시간 추정방법과 실측수위를 이용한 홍수와의 하류 부정류 해석을 제시하고자 한다.

## 2. 적용 구역 및 댐 붕괴 상황

### 2.1. 강우관측소 선정 및 강우특성

1999년 7월 31일부터 8월 3일까지 연천댐 지점 등 한탄강 수계 내 주요지점에서의 홍수량을 산정하기 위하여 한탄강 수계 유출에 기여하는 유역 내 및 인근 강우관측소의 시간강우자료 분석으로부터 자료의 결측이 없고 인접한 관측소간 동질성이 확보되는 총 5개의 관측소를 선정하였다.

1999년 7월 31일부터 8월 2일까지 내린 강우에 대하여 지속시간별 최대 강우량을 산정한 결과 차탄천, 영평천, 신천 등 한탄강 수계의 주요 지천에 큰 영향을 줄 수 있는 짧은 지속시간의 강우는 전국, 신서, 동두천, 포천 순으로 크게 나타나 차탄천 유역의 유출이 다른 지천에 비하여 상대적으로 클 것으로 조사 되었다. Table 1는 관측소의 지속시간별 최대강우량을 나타낸 것이다.

### 2.2. 댐 제원 및 붕괴

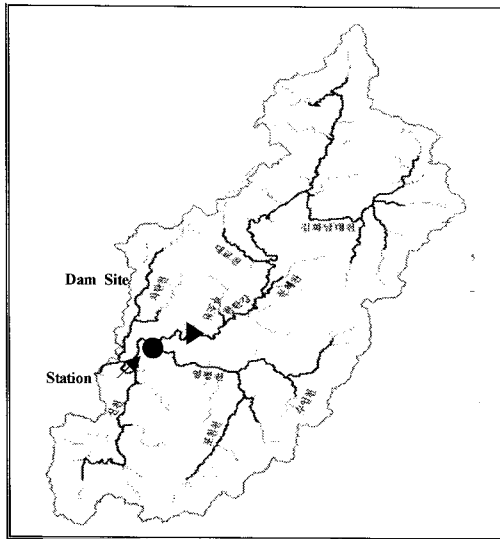
연천댐이 위치한 한탄강은 임진강의 제 1지류이

Table 1. Maximum rainfall along duration

Station	3 hrs	6 hrs	12 hrs	24 hrs	48 hrs	3 days
Pocheon	106.5	150.5	298.5	390.0	659.0	736.6
Dongduchon	127.4	177.4	343.7	418.3	680.7	724.9
Jeongok	184.0	273.0	347.0	469.0	679.0	727.0
Sinseo	151.0	247.0	368.0	466.0	652.0	742.0
Cheolwon	117.8	199.6	307.8	460.2	697.9	752.9

**Table 2.** Dimension of Yeoncheon Dam<sup>9)</sup>

Dam type	CFRD	Dam Crest EL.	EL.53.50 m(Height 22 m)
H.W.L.	EL. 50.0 m (Depth 18.5 m)	Gates	7 (10.5 m × 11.3 m × 7)
Length	165.6 m	Crest Width	8.0 m
L.W.L.	EL. 45.0 m (Depth 13.5 m)	Bed EL.	EL. 30.0 m
Capacity	1,300mil. m <sup>3</sup>	Design Flood	5,230 m <sup>3</sup> /s



**Fig. 1.** Hantan River Basin.



**Fig. 2.** Yeoncheon Dam(before failure).

며 유역면적이 2,436 km<sup>2</sup>, 유로연장이 141 km로서 영평천과 신천 그리고 차탄천의 주요 지류로 구성되어 있으며<sup>9)</sup> 연천 댐은 유로 변경하여 낙차를 이용하는 댐 수로식으로 발전 시설용량이 6,000 kw (3,000 kw×2기)로 우리나라 최대의 소수력 발전 가능 댐이었다.

1996년 7월 홍수로 인하여 일부 유실된 연천댐은 1999년 7월 31일부터 8월 2일까지 700 mm 이상의 집중호우로 인하여 8월 1일 새벽에 연천댐이 또 다시 파괴되어 하류에 큰 피해가 발생하였으며 1999년 7월 31일 18:00시 이후에는 시간당 70 mm가 넘는 집중호우로 인해 수문 완전개방을 실시하였으나 댐 제체와 보수를 위한 가물막이공도 함께 파괴가 일어났으나 그에 대한 시간적 기록이 없는 상태로 8월 1일 00시 부터 04시 사이에 댐 파괴가 발생하였을 것으로 추측 하고 있었다. 이로 인한 하류의 홍수 해석의 어려움과 논란이 있어 왔으며 정확한 파괴

시간 추정이 필요하였다.

### 3. 유역 홍수량 산정

본 연구에서 홍수량을 모의 모형은 HEC-HMS (Hydrologic Modeling System)이며 유역은 임진강 수계 내 중유역인 한탄강유역으로 15개의 소유역으로 분할하여 HEC-HMS 모형의 유역모형을 구축하였다. 소유역별 지형인자에서 수치고도모형의 격자크기는 50 m×50 m 크기이고 소유역별 수선길이는 평균 약 11 km 이다. 유역경사는 평균 12.74%로 나타났다. 하도평균과 하도단순 평균은 각각 0.56%, 0.30%로 분석되었다.

HEC-HMS 모형에서는 합성단위도법 중 Clark 단위도법을 채택하였으며 매개변수로는 도달시간 (Tc), 저류상수(R) 및 시간-면적곡선이다. 본 연구에서는 기존 시간-면적곡선을 제외한 도달시간과 저

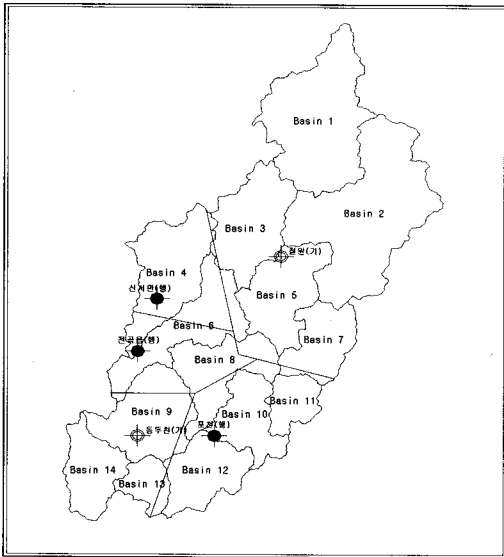


Fig. 3. Rainfall stations and thissen polygon.

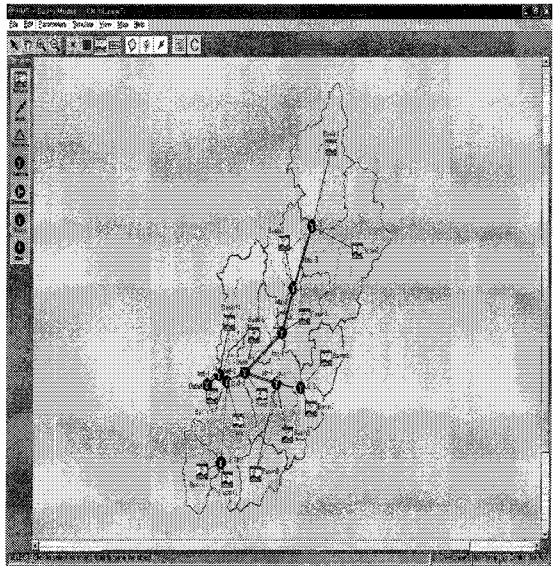


Fig. 4. HEC-HMS scheme.

류상수를 지형인자로부터 산정하여 적용하였다. Table 3는 모형의 매개변수 산정 결과이다<sup>2)</sup>.

구축된 HEC-HMS 강우-유출모형과 강우관측소의 강우자료를 사용하여 1999년 7월 31일부터 8월 3일간 한탄강 유역에 대한 홍수량을 산정하였다.

분석결과 연천댐 지점의 침투 홍수량은 10,324

cms이며 유출총량은 1,263.90백만 $m^3$ 로 모의되었다. 이때의 침투 홍수량 발생시간은 1999년 8월 1일 05:00 경이고 주요지점의 홍수량 발생모의 결과 신천 합류점 지점의 침투 홍수량은 12,502 cms이며, 발생시간은 8월1일 04:30 경으로 조사되었고 차탄천 합류점 지점의 침투 홍수량은 13,961.0 cms, 침투

Table 3. Results of model parameter

Basin no	Concentration time(hr)					Storage coefficient(hr)			
	Kirpich	Kraven	Kraven-II	Rzaha	Kerby	Clark	Linsley	Russel	Sabol
Basin1	6.02	2.79	3.58	8.09	8.39	17.47~52.41	6.22~18.65	8.90~97.08	6.42
Basin2	8.73	4.57	2.77	14.14	10.51	28.30~84.89	11.45~34.36	5.03~54.84	3.60
Basin3	5.01	2.19	2.21	6.23	7.51	13.76~41.28	3.65~10.94	6.85~74.46	5.28
Basin4	2.64	0.94	1.10	2.55	5.08	5.98~17.93	1.52~4.57	2.81~30.60	1.88
Basin5	4.02	1.64	1.75	4.49	6.57	10.33~30.99	2.22~4.65	4.94~53.88	4.11
Basin6	3.62	1.45	1.58	4.31	6.17	9.03~27.09	1.94~5.82	1.60~17.40	1.07
Basin7	1.86	0.61	0.39	1.88	4.11	3.80~11.39	0.61~1.84	2.07~22.56	1.31
Basin8	3.52	1.41	1.08	4.46	6.06	8.70~26.11	1.95~5.86	1.55~16.92	1.00
Basin9	5.68	2.63	1.96	8.33	8.10	16.19~48.58	3.47~10.40	2.89~31.56	2.03
Basin10	6.33	2.99	3.16	8.96	8.65	18.63~55.89	4.53~13.59	3.29~35.88	2.66
Basin11	4.53	1.96	1.57	6.13	7.06	12.08~36.25	2.53~7.60	2.16~23.52	1.45
Basin12	1.27	0.37	0.43	0.99	3.27	2.33~6.98	0.34~1.03	1.09~11.88	0.70
Basin13	6.27	2.98	1.77	9.24	8.60	18.43~55.28	4.93~14.79	3.28~35.76	2.32
Basin14	5.89	2.72	3.24	7.98	8.28	16.99~50.98	4.72~14.16	8.78~95.76	6.70
Basin15	6.24	2.95	2.03	8.92	8.57	18.30~54.89	2.71~8.14	3.25~35.40	4.21

**Table 4.** Peak discharges in Hantan River Basin

Location	Peak Discharge(CMS)	HMS Index
Yeoncheon Dam	10,324	Dam
Shincheon River	12,502	J2
Chatan River	13,732	J1
Outlet	14,142	Outlet

발생시간은 8월 1일 4:30 경, 한탄강 하구지점의 침두 홍수량은 14,142.0 cms, 침두시간은 8월 1일 04:30 경으로 분석되었다.

#### 4. 댐파괴 시간 추정모의

연천댐에 의한 유출 수문곡선의 유도와 댐 하류에서의 홍수와 전달특성을 해석하기 위하여 이 연구에서는 그 동안 국내·외에서 많은 연구와 적용성 평가를 거친 미국 기상청의 DAMBRK(1988)모형을 적용하였다. 본 모형은 댐으로부터의 유출 수문곡선의 유도와 하류에서의 홍수추적을 수리학적으

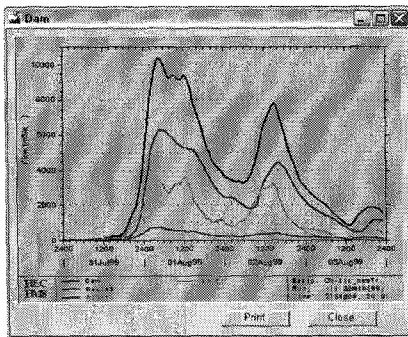
로 해석하기 위하여 개발되었는데 지배방정식은 부정류에 관한 1차원 Saint-Venant 방정식으로서 하류 구간에서의 급변류, 단면의 변화, 교량 등의 영향을 내부 경계조건으로 수용할 수 있도록 설계되었다.

#### 4.1. 댐 유출량 분석

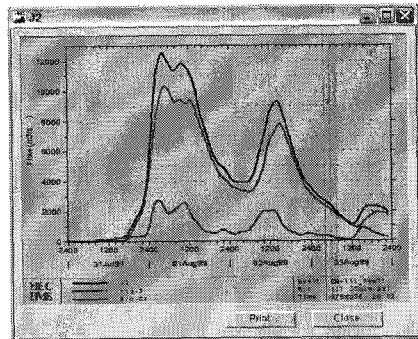
댐파괴 유출량은 광정웨어 유량공식을 적용하여 계산하며 그 공식은 다음과 같다.

$$Q_b = c_v k_s [3.1 b (h - h_b)^{1.5} + 2.45 z (h - h_b)^{2.5}] \quad (1)$$

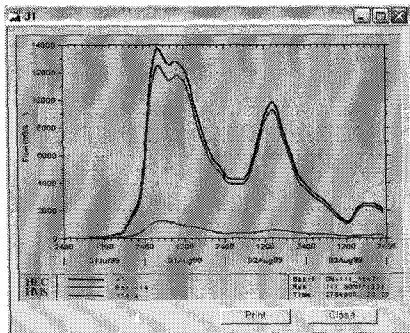
여기서  $c_v$ 는 접근유속 보정계수,  $b$ 는 붕괴 단면의 저면 폭,  $h$ 는 댐 직상류 수위,  $h_b$ 는 붕괴부의 바닥면 표고,  $z$ 는 붕괴면의 사면경사(연직1:수평 $z$ ),  $k_s$ 는 댐 수위와 댐하류 수위 차에 의하여 결정되는 계수이다. 이때 붕괴의 진행속도가 붕괴 지속시간  $T$  내에서 일정하다고 가정하면 임의시간  $t$ 에서의 붕괴부의 저면폭  $b$ 와 붕괴부의 바닥표고  $h_b$ 는 시



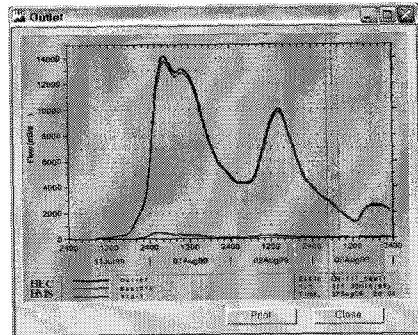
**Fig. 5.** Hydrograph at Yeoncheon Dam.



**Fig. 6.** Hydrograph at Shincheon.



**Fig. 7.** Hydrograph at Chatan River.



**Fig. 8.** Hydrograph at outlet.

간에 따라 증가 또는 감소하게 되므로 이를 식으로 표시하면 다음과 같다.

$$0 < t_b \leq T$$

$$h_b = b \left( \frac{t}{T} \right)^{n_0} \quad (2)$$

$$h_b = h_{lm} + (h_{dm} - h_{lm}) \left( \frac{T - t}{T} \right) \quad (3)$$

$$0 < t_b \leq T$$

$$h_b = b, \quad h_b = h_{lm} \quad (4)$$

기타 댐 방류량은 여수로를 통한 방류량과 수문을 통한 방류량, 댐 정부를 월류하여 흐르는 월류량 그리고 발전방류량으로 구분할 수 있다.

여수로를 통한 방류량은 웨어유량공식으로 산정하며 기존 수위-유량곡선식이 있는 경우 이를 사용할 수 있으며, 기존의 공식이 없는 경우 유량공식에 의하여 산정되고 수문 방류량은 고정식 수문과 가동식 수문으로 구분하여 모의되며, 고정식 수문에 대한 방류량은 오리피스공식으로 모의된다. 가동식 수문에 대한 수문방류량은 댐과 댐하류 수위에 따라 오리피스공식과 웨어공식이 각각 사용되어 모의된다. 또한 댐 월류량은 댐 수위가 댐 정부의 표고 이상 형성되면 월류를 하게 되고 이때 월류량은 웨어공식으로 계산한다.

### 4.2. 모형의 구성

다음은 댐 유출량 산정을 위하여 구성된 DAMBRK-FLDWAV 모형의 모식도이다. 여기서 댐 유출량 산정을 위한 한탄강의 하도단면은 하도길이 L=20.70 km(12.863mi)에 대하여 총 20개 단면으로 구성하였으며, 댐으로의 유입량에 대한 저류효과와 댐 수위를 계산하기 위하여 No.0 에 설정한 저수지의 저수위-내용적 계산을 위한 지점을 선정하고 댐 직하류 No.2 지점에 부정류 해석을 위한 단면과 하류 주요 지점을 구성하여 저수지 추적도의 및 댐 직하류 수위특성이 모형에 반영될 수 있도록 하였다. 이때의 단면자료는 한탄강수계 하천정비기본계획<sup>9)</sup>의 하도 단면자료를 사용하였다.

### 4.3. 댐 운영 및 파괴에 대한 시나리오 설정

1999년 9월 집중호우 및 연천댐 좌안부 붕괴에 따른 영향을 적절히 분석하기 위하여 댐 운영 및 파괴에 대한 시나리오를 설정하였다. 여기서 설정된 시나리오는 다음의 요소를 기준으로 각각 하부 시나리오를 가지고 있다.

- ① 댐이 없는 자연상태 하천조건
- ② 댐 파괴와 관련하여 댐 파괴가 발생한 것과 발생하지 않았을 조건
- ③ 댐 파괴와 관련하여 댐파괴 시작시간 및 댐파

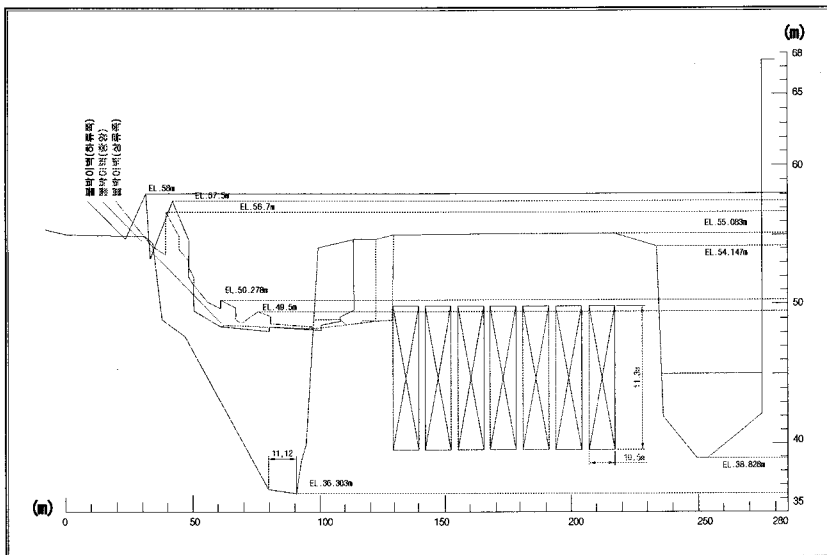


Fig. 9. Cross section of Yeoncheon Dam.

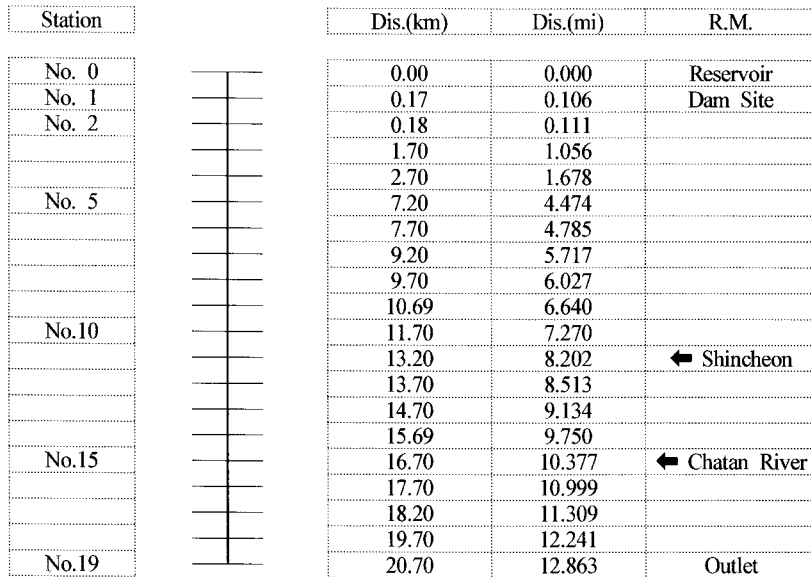


Fig. 10. FLDWAV model scheme.

Table 5. Scenarios of dam operation and failure

Condition Case no.	Dam failure			Coffer facility	Gate operation	Remarks
	Y·N	Starting time	Duration			
Case 1	-	-	-	-	-	Condition of no Dam
Case 2	N	-	-	N	18:00	
Case 3	Y	08. 01. am 02:45	30 min	N	18:00	
Case 4	Y	08. 01. am 02:45	30 min	N	19:00	
Case 5	Y	08. 01. am 02:45	30 min	Y	19:00	

피 지속시간

의 존치 또는 원상태 복구 조건

- ④ 댐 운영과 관련하여 수문조작 시간 및 조작 조건 5가지 조건에 대하여 댐 파괴 및 운영에 따른 댐
- ⑤ 댐 운영과 관련하여 우안 측 가시철(sheet pile) 유출량 산정을 위한 시나리오를 설정하면 다음

Table 6. Scenarios for dam failure starting time

Condition Case no.	Dam failure starting time	Duration(min.)	Coffer facility(Y/N)	Remark
Case 1-1	08. 01. am 02:00	30	Y	
Case 1-2	08. 01. am 02:30	30	Y	
Case 1-3	08. 01. am 02:45	30	Y	
Case 1-3-1	08. 01. am 02:45	25	Y	
Case 1-3-2	08. 01. am 02:45	30	Y	
Case 1-3-3	08. 01. am 02:45	35	Y	
Case 1-3-4	08. 01. am 02:45	40	Y	
Case 1-3-5	08. 01. am 02:45	45	Y	
Case 1-4	08. 01. am 03:00	30	Y	
Case 1-5	08. 01. am 03:30	30	Y	

Table 7. Scenarios for gate operation analysis

Condition Case no.	Gate full open time	Dam failure starting time	Duration(min.)	Coffer facility(Y/N)	Remark
Case 1-3-6	07. 31. pm 19:00	08. 01. am 02:45	25	Y	
Case 1-3-7	07. 31. pm 19:30	08. 01. am 02:45	30	Y	
Case 1-3-8	07. 31. pm 20:00	08. 01. am 02:45	35	Y	

Table 8. Results of each scenario for dam failure duration simulation

Simulation time(hr)	Case 1-3-1(25min)		Case 1-3-2(30min)		Case 1-3-3(35min)		Case 1-3-4(40min)		Case 1-3-5(45min)	
	W.L. (EL.m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	W.L. (EL.m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	W.L. (EL.m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	W.L. (EL.m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	W.L. (EL.m)	Q (m <sup>3</sup> /s)
7/31/18.0	44.74	391.3	44.74	391.3	44.74	391.3	44.74	391.3	44.74	391.3
18.5	44.76	508.9	44.76	508.9	44.76	508.9	44.76	508.9	44.76	508.9
19.0	44.80	670.5	44.80	670.5	44.80	670.5	44.80	670.5	44.80	670.5
19.5	44.86	869.0	44.86	869.0	44.86	869.0	44.86	869.0	44.86	869.0
20.0	44.95	1083.4	44.95	1083.4	44.95	1083.4	44.95	1083.4	44.95	1083.4
20.5	45.05	1297.8	45.05	1297.8	45.05	1297.8	45.05	1297.8	45.05	1297.8
21.0	45.17	1505.6	45.17	1505.6	45.17	1505.6	45.17	1505.6	45.17	1505.6
21.5	45.31	1725.3	45.31	1725.3	45.31	1725.3	45.31	1725.3	45.31	1725.3
22.0	45.52	1992.7	45.52	1992.7	45.52	1992.7	45.52	1992.7	45.52	1992.7
22.5	45.82	2332.2	45.82	2332.2	45.82	2332.2	45.82	2332.2	45.82	2332.2
23.0	46.25	2746.5	46.25	2746.5	46.25	2746.5	46.25	2746.5	46.25	2746.5
23.5	46.87	3249.6	46.87	3249.6	46.87	3249.6	46.87	3249.6	46.87	3249.6
8/01/0.0	47.70	3821.9	47.70	3821.9	47.70	3821.9	47.70	3821.9	47.70	3821.9
0.5	48.71	4418.0	48.71	4418.0	48.71	4418.0	48.71	4418.0	48.71	4418.0
1.0	49.85	5007.3	49.85	5007.3	49.85	5007.3	49.85	5007.3	49.85	5007.3
1.5	51.10	5583.8	51.10	5583.8	51.10	5583.8	51.10	5583.8	51.10	5583.8
2.0	52.43	6134.8	52.43	6134.8	52.43	6134.8	52.43	6134.8	52.43	6134.8
2.5	53.77	6648.2	53.77	6648.2	53.77	6648.2	53.77	6648.2	53.77	6648.2
3.0	54.97	8574.6	54.95	8551.7	55.03	7863.9	55.04	7708.7	55.05	7607.6
3.5	54.02	11297.0	54.06	11333.3	54.51	11678.7	54.77	11929.9	55.05	12234.6
4.0	53.34	10770.6	53.37	10793.5	53.65	11015.8	53.82	11147.2	54.00	11284.3
4.5	53.05	10546.9	53.07	10561.1	53.24	10696.4	53.35	10777.7	53.46	10863.5
5.0	52.93	10450.3	52.94	10458.5	53.04	10539.0	53.11	10587.7	53.17	10639.2
5.5	52.83	10371.3	52.83	10376.1	52.89	10423.4	52.93	10452.0	52.97	10482.6
6.0	52.69	10262.6	52.69	10265.4	52.73	10293.2	52.75	10309.9	52.77	10328.0
6.5	52.50	10111.1	52.50	10112.8	52.52	10128.9	52.53	10138.6	52.54	10149.0
7.0	52.24	9908.6	52.24	9909.5	52.25	9918.8	52.26	9924.5	52.27	9930.7
7.5	51.94	9671.9	51.94	9672.5	51.95	9677.6	51.95	9681.0	51.96	9684.4
8.0	51.69	9474.3	51.69	9474.5	51.70	9477.6	51.70	9479.3	51.70	9481.3
8.5	51.58	9385.1	51.58	9385.3	51.58	9386.8	51.58	9387.9	51.58	9388.7
9.0	51.58	9383.1	51.58	9383.1	51.58	9383.9	51.58	9384.5	51.58	9385.1
9.5	51.59	9393.0	51.59	9393.0	51.59	9393.5	51.59	9393.5	51.59	9394.1
10.0	51.55	9363.5	51.55	9363.8	51.55	9363.8	51.55	9364.1	51.55	9364.4
10.5	51.47	9293.0	51.47	9293.0	51.47	9293.0	51.47	9293.3	51.47	9293.3
11.0	51.37	9219.1	51.37	9219.1	51.37	9219.1	51.37	9219.4	51.37	9219.4
11.5	51.34	9189.7	51.34	9189.7	51.34	9189.7	51.34	9189.7	51.34	9189.7
8/01/0.0	51.38	9223.9	51.38	9223.9	51.38	9223.9	51.38	9223.9	51.38	9223.9
0.5	51.47	9292.2	51.47	9292.2	51.47	9292.2	51.47	9292.2	51.47	9292.2
1.0	51.50	9317.1	51.50	9317.1	51.50	9317.1	51.50	9317.1	51.50	9317.1
1.5	51.38	9225.1	51.38	9225.1	51.38	9225.3	51.38	9225.3	51.38	9225.3
2.0	51.09	8995.1	51.09	8995.1	51.09	8995.1	51.09	8995.1	51.09	8995.1
2.5	50.68	8657.0	50.68	8657.0	50.68	8657.0	50.68	8657.0	50.68	8657.0
3.0	50.22	8273.3	50.22	8273.3	50.22	8273.3	50.22	8273.3	50.22	8273.3
3.5	49.78	7905.2	49.78	7905.2	49.78	7905.2	49.78	7905.2	49.78	7905.2
4.0	49.39	7573.3	49.39	7573.3	49.39	7573.3	49.39	7573.3	49.39	7573.3
4.5	49.03	7263.3	49.03	7263.3	49.03	7263.3	49.03	7263.3	49.03	7263.3



Table 5과 같다. 댐 파괴 시작시간과 지속시간은 두 조건이 서로 종속적으로 댐 유출량 산정에 작용하므로 두 조건 중 댐 유출량 산정에 민감도가 적은 조건을 먼저 검색한 후 검색된 조건을 고정시킨 상태에서 다음 조건을 검색하는 방법을 채택하였다. 이때 두 조건 중 먼저 검색되는 조건은 댐 파괴 지속시간이며, 다음으로 댐 파괴 시작시간이 검색되었다. 이와 같이 하위 시나리오를 포함하여 총 13개

**Table 9.** Results of each scenario for dam failure starting time simulation

Simulation time(hr)	Case 1-1(02:00)		Case 1-2(02:30)		Case 1-3(02:45)		Case 1-4(03:00)		Case 1-5(03:30)	
	W.L. (EL.m)	Q (m³/s)	W.L. (EL.m)	Q (m³/s)	W.L. (EL.m)	Q (m³/s)	W.L. (EL.m)	Q (m³/s)	W.L. (EL.m)	Q (m³/s)
7/31/21.5	45.31	1725.3	45.31	1725.3	45.31	1725.3	45.31	1725.3	45.31	1725.3
22.0	45.52	1992.7	45.52	1992.7	45.52	1992.7	45.52	1992.7	45.52	1992.7
22.5	45.82	2332.2	45.82	2332.2	45.82	2332.2	45.82	2332.2	45.82	2332.2
23.0	46.25	2746.5	46.25	2746.5	46.25	2746.5	46.25	2746.5	46.25	2746.5
23.5	46.87	3249.6	46.87	3249.6	46.87	3249.6	46.87	3249.6	46.87	3249.6
8/01/0.0	47.70	3821.9	47.70	3821.9	47.70	3821.9	47.70	3821.9	47.70	3821.9
0.5	48.71	4418.0	48.71	4418.0	48.71	4418.0	48.71	4418.0	48.71	4418.0
1.0	49.85	5007.3	49.85	5007.3	49.85	5007.3	49.85	5007.3	49.85	5007.3
1.5	51.10	5583.8	51.10	5583.8	51.10	5583.8	51.10	5583.8	51.10	5583.8
2.0	52.43	6134.8	52.43	6134.8	52.43	6134.8	52.43	6134.8	52.43	6134.8
2.5	53.06	10545.2	53.77	6648.2	53.77	6648.2	53.77	6648.2	53.77	6648.2
3.0	52.24	9908.1	54.32	11530.1	54.95	8551.7	55.08	7284.5	55.08	7284.5
3.5	52.06	9764.5	53.32	10761.0	54.06	11333.3	55.35	12595.1	56.10	8265.4
4.0	52.18	9861.9	52.91	10437.9	53.37	10793.5	54.18	11427.8	56.04	13536.0
4.5	52.39	10023.6	52.80	10349.8	53.07	10561.1	53.57	10954.1	54.68	11841.3
5.0	52.55	10150.5	52.78	10335.6	52.94	10458.5	53.24	10694.4	53.94	11237.0
5.5	52.61	10198.9	52.74	10304.5	52.83	10376.1	53.01	10515.5	53.44	10847.6
6.0	52.56	10162.9	52.64	10223.8	52.69	10265.4	52.80	10347.3	53.05	10546.6
6.5	52.42	10053.6	52.47	10088.7	52.50	10112.8	52.56	10160.4	52.71	10278.4
7.0	52.20	9875.5	52.22	9895.6	52.24	9909.5	52.27	9937.2	52.36	10006.0
7.5	51.92	9652.9	51.93	9664.5	51.94	9672.5	51.96	9688.3	52.01	9727.7
8.0	51.68	9463.8	51.68	9470.0	51.69	9474.5	51.70	9483.3	51.73	9505.7
8.5	51.57	9379.4	51.58	9382.8	51.58	9385.3	51.59	9390.1	51.60	9402.0
9.0	51.58	9380.0	51.58	9381.9	51.58	9383.1	51.58	9385.9	51.59	9392.4
9.5	51.59	9391.3	51.59	9392.1	51.59	9393.0	51.59	9394.4	51.60	9397.8
10.0	51.55	9362.7	51.55	9363.2	51.55	9363.8	51.55	9364.4	51.56	9366.4
10.5	51.47	9292.5	51.47	9292.7	51.47	9293.0	51.47	9293.3	51.47	9294.4
11.0	51.37	9218.8	51.37	9219.1	51.37	9219.1	51.37	9219.4	51.37	9220.0
11.5	51.34	9189.4	51.34	9189.4	51.34	9189.7	51.34	9189.7	51.34	9189.9
8/02/0.0	51.38	9223.6	51.38	9223.6	51.38	9223.9	51.38	9223.9	51.38	9223.9
0.5	51.47	9291.9	51.47	9291.9	51.47	9292.2	51.47	9292.2	51.47	9292.2
1.0	51.50	9317.1	51.50	9317.1	51.50	9317.1	51.50	9317.1	51.50	9317.1
1.5	51.38	9225.1	51.38	9225.1	51.38	9225.1	51.38	9225.3	51.38	9225.3
2.0	51.09	8995.1	51.09	8995.1	51.09	8995.1	51.09	8995.1	51.09	8995.1
2.5	50.68	8657.0	50.68	8657.0	50.68	8657.0	50.68	8657.0	50.68	8657.0
3.0	50.22	8273.3	50.22	8273.3	50.22	8273.3	50.22	8273.3	50.22	8273.3
3.5	49.78	7905.2	49.78	7905.2	49.78	7905.2	49.78	7905.2	49.78	7905.2
4.0	49.39	7573.3	49.39	7573.3	49.39	7573.3	49.39	7573.3	49.39	7573.3
4.5	49.03	7263.3	49.03	7263.3	49.03	7263.3	49.03	7263.3	49.03	7263.3
5.0	48.69	6952.6	48.69	6952.6	48.69	6952.6	48.69	6952.6	48.69	6952.6
5.5	48.33	6625.0	48.33	6625.0	48.33	6625.0	48.33	6625.0	48.33	6625.0
6.0	47.95	6272.7	47.95	6272.7	47.95	6272.7	47.95	6272.7	47.95	6272.7
6.5	47.58	5907.5	47.58	5907.5	47.58	5907.5	47.58	5907.5	47.58	5907.5
7.0	47.24	5556.0	47.24	5556.0	47.24	5556.0	47.24	5556.0	47.24	5556.0
7.5	46.95	5235.8	46.95	5235.8	46.95	5235.8	46.95	5235.8	46.95	5235.8
8.0	46.70	4939.6	46.70	4939.6	46.70	4939.6	46.70	4939.6	46.70	4939.6

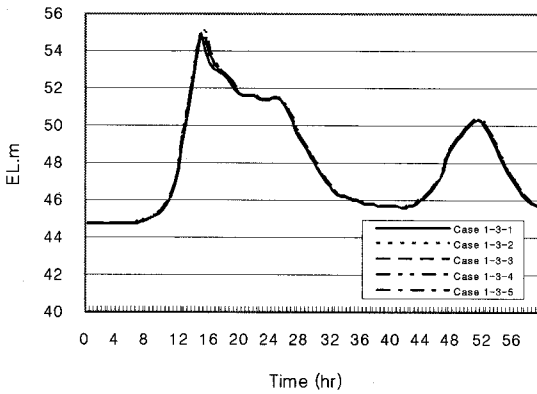
의 조건 시나리오에 대하여 댐 유출량 분석을 실시하여 댐 파괴와 관련하여 조사되고 기록된 자료들을 기반으로 시간적으로 그리고 물리적으로 적합한 시간조건 즉, 파괴 시작시간과 파괴 지속시간을 검색하였다.

**4.4. 시나리오별 댐 파괴 지속시간 및 지속시간 검색**

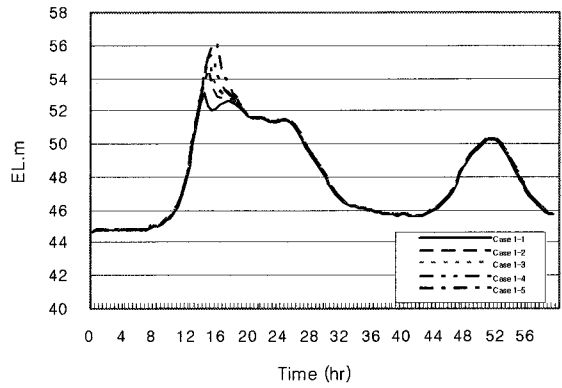
댐 파괴 지속시간 검색을 위한 시나리오에 대한 계산결과를 정리하면 다음과 같다. 여기서 모의 계

산시작은 7월 31일 12:00이며, 이를 30분 간격으로 정리하였으며 따라서 계산시간은 0.00시부터 0.5시간 간격으로 증가한다.

모의결과 댐 파괴 지속시간은 지속시간 45분까지는 댐방류량 및 댐 수위에 있어서 큰 차이를 보이지 않는 것으로 조사되었으며, 댐 파괴 지속시간 30분 이내 조건에서 하루 전곡수위표의 관측수위와 가장 근접한 결과를 제공하는 것으로 조사되어 본 연구에서의 댐 파괴 지속시간은 30분(Case 1-3-2)으



**Fig. 11.** Hydrograph of dam failure duration simulation.



**Fig. 12.** Hydrograph of dam failure starting time simulation.

**Table 10.** Water elevation comparison of each case

Cal.	Time		Case 1	Case 2		Case 3		Case 4		Case 5	
	Mon./Dat.	H M	W.L. (EL.m)	W.L. (EL.m)	Difference (Case 2-1)	W.L. (EL.m)	Difference (Case 3-1)	W.L. (EL.m)	Difference (Case 4-1)	W.L. (EL.m)	Difference (Case 5-1)
12.0	8/1	0 0	38.18	47.70	9.52	47.70	9.52	47.70	9.52	47.70	9.52
12.5		0 30	39.02	48.71	9.69	48.71	9.69	48.71	9.69	48.71	9.69
13.0		1 0	39.83	49.85	10.02	49.85	10.02	49.85	10.02	49.85	10.02
13.5		1 30	40.65	51.10	10.45	51.10	10.45	51.10	10.45	51.10	10.45
14.0		2 0	41.40	52.43	11.03	52.43	11.03	52.43	11.03	52.43	11.03
14.5		2 30	42.06	53.77	11.71	53.77	11.71	53.77	11.71	53.77	11.71
15.0		3 0	42.63	55.08	12.45	54.95	12.32	55.01	12.38	55.01	12.38
15.5		3 30	43.07	56.10	13.03	54.06	10.99	54.26	11.19	54.26	11.19
16.0		4 0	43.38	56.80	13.42	53.37	9.99	53.49	10.11	53.49	10.11
16.5		4 30	43.56	57.24	13.68	53.07	9.51	53.14	9.58	53.14	9.58
17.0		5 0	43.59	57.49	13.90	52.94	9.35	52.98	9.39	52.98	9.39
17.5		5 30	43.52	57.60	14.08	52.83	9.31	52.86	9.34	52.86	9.34
18.0		6 0	43.39	57.60	14.21	52.69	9.30	52.71	9.32	52.71	9.32
18.5		6 30	43.19	57.52	14.33	52.50	9.31	52.50	9.31	52.50	9.31
19.0		7 0	42.98	57.38	14.40	52.24	9.26	52.25	9.27	52.25	9.27
19.5		7 30	42.79	57.22	14.43	51.94	9.15	51.94	9.15	51.94	9.15
20.0		8 0	42.74	57.08	14.34	51.69	8.95	51.69	8.95	51.69	8.95

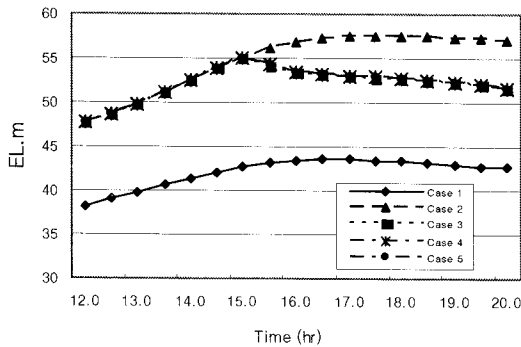


Fig. 13. Stage hydrograph for each case.

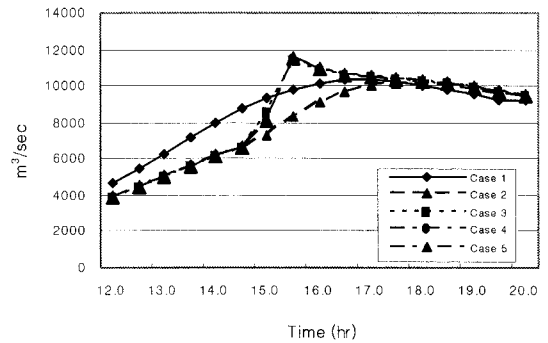


Fig. 14. Discharge hydrograph for each case.

Table 11. Dam discharge comparison of each case

Cal.	Time		Case 1			Case 2			Case 3		Case 4		Case 5	
	Mon/Date	H	M	Discharge (m³/s)	Discharge (m³/s)	Difference (Case 2-1)	Discharge (m³/s)	Difference (Case 3-1)	Discharge (m³/s)	Difference (Case 4-1)	Discharge (m³/s)	Difference (Case 5-1)		
12.0	8/1	0	0	4,611.0	3,821.9	-789.1	3,821.9	-789.1	3,821.9	-789.1	3,821.9	-789.1		
12.5		0	30	5,442.0	4,418.0	-1,024.0	4,418.0	-1,024.0	4,418.0	-1,024.0	4,418.0	-1,024.0		
13.0		1	0	6,310.0	5,007.3	-1,302.7	5,007.3	-1,302.7	5,007.3	-1,302.7	5,007.3	-1,302.7		
13.5		1	30	7,182.0	5,583.8	-1,598.2	5,583.8	-1,598.2	5,583.8	-1,598.2	5,583.8	-1,598.2		
14.0		2	0	7,996.0	6,134.8	-1,861.2	6,134.8	-1,861.2	6,134.8	-1,861.2	6,134.8	-1,861.2		
14.5		2	30	8,715.0	6,648.2	-2,066.8	6,648.2	-2,066.8	6,648.2	-2,066.8	6,648.2	-2,066.8		
15.0		3	0	9,325.0	7,284.5	-2,040.5	7,284.5	-2,040.5	7,284.5	-2,040.5	7,284.5	-2,040.5		
15.5		3	30	9,803.0	8,265.4	-1,537.6	8,265.4	-1,537.6	8,265.4	-1,537.6	8,265.4	-1,537.6		
16.0		4	0	10,136.0	9,073.9	-1,062.1	9,073.9	-1,062.1	9,073.9	-1,062.1	9,073.9	-1,062.1		
16.5		4	30	10,310.0	9,638.2	-671.8	9,638.2	-671.8	9,638.2	-671.8	9,638.2	-671.8		
17.0		5	0	10,324.0	9,974.3	-349.7	9,974.3	-349.7	9,974.3	-349.7	9,974.3	-349.7		
17.5		5	30	10,214.0	10,117.3	-96.7	10,117.3	-96.7	10,117.3	-96.7	10,117.3	-96.7		
18.0		6	0	10,036.0	10,114.8	78.8	10,114.8	78.8	10,114.8	78.8	10,114.8	78.8		
18.5		6	30	9,808.0	10,010.3	202.3	10,010.3	202.3	10,010.3	202.3	10,010.3	202.3		
19.0		7	0	9,518.0	9,827.9	309.9	9,827.9	309.9	9,827.9	309.9	9,827.9	309.9		
19.5		7	30	9,266.0	9,604.2	338.2	9,604.2	338.2	9,604.2	338.2	9,604.2	338.2		
20.0		8	0	9,219.0	9,424.1	205.1	9,424.1	205.1	9,424.1	205.1	9,424.1	205.1		

로 설정하였다.

댐 파괴 시작시간 검색을 위한 시나리오에 대한 계산결과를 정리하면, 모의결과 댐 파괴 시작시간을 8월 1일 02:00부터 15~30분 간격으로 증가시키면서 모의한 댐 방류량 및 댐 수위 결과에 대하여 8월 1일 02:30~03:30(대표 값 02:45)분 파괴가 발생한 것으로 분석되었다.

이러한 판단은 Case 1-3(02:45 파괴 시작)의 최고 수위 및 발생시간인 EL.54.95 m과 03:00이 시간적으로나 물리적으로 타당한 것으로 조사되었으며, 댐 파괴 시작시간이 02:45 경이고 지속시간이 30분인

조건에 대하여 하류 전곡수위표의 관측수위와 가장 근접한 결과를 제공하는 것으로 판단되어 댐 파괴 시작시간은 8월 1일 02:45 경으로 설정하였다.

#### 4.5. 시나리오별 댐 유출량의 분석 및 검증

앞 절에서 제안한 바와 같이 댐 파괴 발생 유무 및 가시설의 원상복구 여부에 따른 댐 유출량 산정에 선행하여 조사 기록된 자료들을 토대로 시간적으로 그리고 물리적으로 적합한 시간조건 및 조차 조건을 검색하였다.

분석결과 댐 파괴가 있는 Case 3, 4, 5의 댐 유출

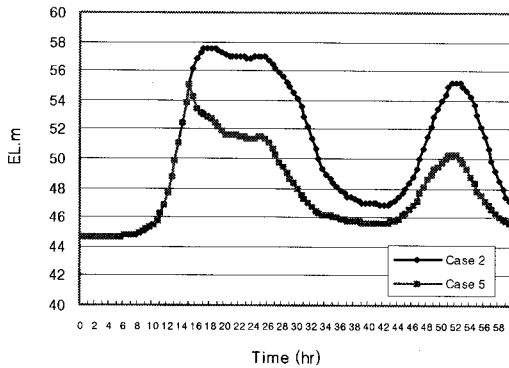


Fig. 15. Stage hydrograph between dam failure and not.

량과 댐 수위는 침투 발생시간 이후 유사한 값을 보이고 있으며, 특히 댐 우안 측 가시설의 영향에 대한 Case 4와 Case 5의 수문량에서 확인할 수 있는 바와 같이 가시설에 의한 영향은 없는 것으로 모의되었다. 또한 댐 유출량에 있어서도 03:30 경 Case 3이 11,333.3 m<sup>3</sup>/sec, Case 5가 11,484.5 m<sup>3</sup>/sec로 최대 151 m<sup>3</sup>/sec의 유출량 저감 효과가 있는 것으로 모의되었다. 댐 파괴 유무조건인 Case 2과 Case 5의 수문량을 비교 도시한 Fig. 15, Fig. 16에서 확인할 수 있는 바와 같이 댐 파괴가 발생한 Case 5의 침투 댐 유출량은 8월 1일 03:30 경에 11,484.5 m<sup>3</sup>/sec이며, 동시간대 댐 파괴가 없는 Case 2의 댐 유출량은 8,265.4 m<sup>3</sup>/sec로 댐 파괴에 의한 댐 유출량은 3,219.1 m<sup>3</sup>/sec 증가되는 것으로 모의되었다. 또한 댐 파괴로 인한 댐 수위의 경우 8월 1일 03:00 경 최고수위인 EL.55.01 m를 보이다가 04:00 경 EL.53.49 m로 1시간 사이 1.54 m의 급격한 수위 하상이 모의되었다.

이러한 분석결과를 종합해 볼 때 댐 파괴 시작시간을 8월 1일 02:30~03:00 경으로 추정하고 파괴 지속시간을 30분으로 설정한 시나리오 분석 모의는 시간적으로 그리고 정량적으로 대부분 일치하는 결과를 제공하는 것으로 분석되었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 1999년 7월 31일부터 8월 3일에 걸친 한탄강 수계 내 연천댐 유역의 강우자료를 이용하여 댐 파괴 추정시간을 모의하였다. 1999년 7월

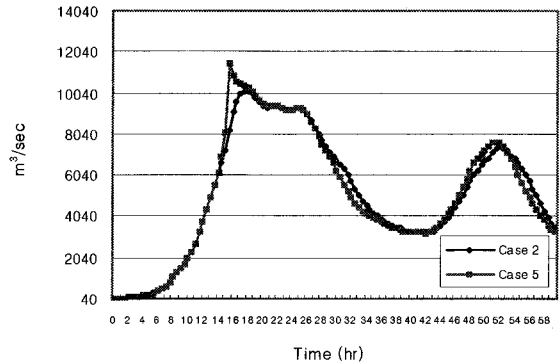


Fig. 16. Dam discharge hydrograph between dam failure and not.

31일 12:00부터 8월 3일 12:00까지의 홍수를 재현한 결과 연천댐 지점의 침투 홍수량은 10,324 cms, 총 유출량은 1,263.90백만m<sup>3</sup>로 모의 되었으며, 이때의 침투 홍수량 발생시간은 1999년 8월 1일 05:00 경으로 모의되었다. 댐 파괴 지속시간 및 댐 파괴 시작시간을 추정하기 위하여 총 13개의 조건을 설정하여 댐 방류량을 모의하여 시나리오별로 파괴지속시간과 파괴시작시점 검색을 실시하였고 댐 파괴유무에 따른 수위 및 방류량을 비교 분석 하였다. 연천댐 파괴 시간 추정 모의를 위하여 8월 1일 01:00부터 04:00까지 30분 간격으로 연천댐 파괴 시간을 설정하여 연천댐 하류단에 있는 전곡지점의 수위와 비교하여 가장 근사한 값을 추정한 결과 댐 파괴 지속시간이 30분일 때 댐 파괴는 8월 1일 02:45에 발생한 것으로 모의되었으며 분석결과를 종합해 볼 때 이와 같은 방법의 시나리오 분석 모의는 시간적으로 그리고 정량적으로 대부분 일치하는 결과를 제공할 수 있을 것으로 분석되었다. 이와 같은 시간 간격 파괴 모형을 이용하여 댐파괴 시간을 추정하는 기법은 하류의 홍수추적과 함께 중요한 요소로서 향후 미계측 유역이거나 실측자료의 부정확으로 인한 댐 파괴 해석을 위한 기법으로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

## 참고 문헌

- 1) 구본웅, 2004, 댐 붕괴에 의한 하류부 부정류 흐름의 수리학적 영향검토, 석사학위논문, 토목공학과,

- 대전대학교, 포천.
- 2) 장석환, 2006, 1999년 연천소수력발전소(연천댐)붕괴로 인한 수해원인조사 감정평가서, 대전대학교 건설연구소, 20-55.
  - 3) Fread D. L., 1985, Channel Routing, in Anderson, M.G., and Purt, T.P.(eds), Hydrological Forecasting, John Wiley and Son, 150-185.
  - 4) Dressler R. F., 1954, Comparison of and Experiments for The Hydraulic Dam-Break Wave, Publ. No.38, International Association of Scientific Hydrology, 75.
  - 5) Fread D. L., Lewis J. M, 1998, The NWS FLDWAV Model Quick Users guide, NOAA, Silver Spring, 88-100.
  - 6) Hydraulic Engineering Center, 1987, HEC-1 Flood Hydrograph Package User's Manual, Ver 1.0, U.S Army corps of Engineers, 20-43.
  - 7) 이종태, 1991, 댐붕괴 홍수와 해석을 위한 무차원 홍수추적곡선 유도, 한국과학재단.
  - 8) 한건연, 1986, 흙댐의 파괴에 따른 홍수와 예측 모형의 개발, 박사학위논문, 토목공학과, 연세대학교, 서울.
  - 9) 건교부, 2002, 임진강 하천정비기본계획, 15-28.
  - 10) 대한토목학회, 2000, 연천소수력발전소 댐으로 인한 홍수피해원인 및 영향조사 연구, 35-158.