

한탄강의 '96년 7월 홍수와 연천댐 일부붕괴

이종태*, 윤용남**, ○이창수***

1. 서론

한탄강 대부분의 하안은 지천의 합류부를 제외하고는 암석단애의 협곡을 이루어 자연제방의 역할을 하고 있다. 강원도 철원으로부터 발원하여 유하하는 한탄강은 연천군에 이르러 좌안에서 유입하는 영평천과 합류하게 되며 합류점의 직하류부에는 연천댐이 위치하고 있다. 연천댐으로부터 전곡읍에 이르는 과정에서 좌안으로 강화천이 유입하며 전곡읍을 끼고 서쪽으로 유하하다가 임진강 본류에 합류하게 된다. 전곡읍의 한탄강 둔지와 제방도로와의 사이 구간에는 한탄강유원지가 사랑대교 지점까지 연천군에 의해 개발되어 사용되어 오고 있다. 강화천과 차탄천이 유입하는 합류부지점의 인근은 비교적 넓은 하폭을 보이고 있으며, 이번 홍수범람으로 큰 피해를 겪었다(그림 1).

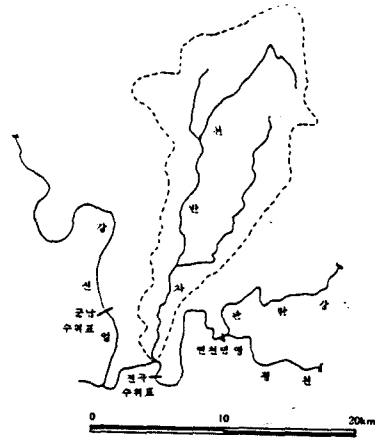


그림 1 한탄강 유역도

'96년 7월 26~28일 3일간의 강우로 인한 한탄강유역의 홍수는 연천댐의 일부붕괴와 한탄강 하류지역이 크게 범람하였다. 금번의 총강우량은 약 200~700mm로 지역적인 특성이 매우 강하였으며, 특히 한탄강 상류지역인 철원, 동송, 김화, 근남 등에서는 700mm가 넘는 강우로 한탄강의 범람에 크게 영향을 주었다.

본 연구에서는 수치모형을 적용하여 이번 홍수기간의 한탄강 전곡구간의 홍수파를 해석하여, 연천댐 일부붕괴로 인해 발생한 홍수파가 하류에 미친 영향을 분석하였다.

2. 연천댐의 제원과 유입 홍수량

(1) 연천댐의 주요 제원

연천댐은 연천군 전곡읍 신담리와 포천군 청산면 궁평리를 연결하는 한탄강 협곡부를 막아 발전용수와 생활 및 농업용수를 확보하기 위해 1986년 건설되었다. 댐의 주요제원은 아래의 표와 같다.

표 1. 연천댐과 저수지의 주요 제원

연천댐의 제원	수위 및 저수지 용량
<ul style="list-style-type: none"> · 댐형식 : 콘크리트 문비형, 토사댐 혼성방식 · 댐의 길이 : 243.5 m · 발전방식 : 댐 수로식 · 발전시설용량 : 3,000 kw×2기 · 도수로 : 길이 2.6 km, 직경 4.2 m · 계획최대홍수량 : 5,230cms 	<ul style="list-style-type: none"> · 총저수량 : 1300만 m³ · 유효저수량 : 850만 m³ · 총유역면적 : 1,838 km² · 만수면적 : 3.9 km² · 댐 마루표고 : EL. 53.50 m · 만수위 : EL. 50.5 m · 저수위 : EL. 45.0 m · 하상고 : EL. 30.0 m

(2) 유입 홍수량

실제홍수를 재현하는 모형의 구성을 위하여 먼저 관측강우자료와 유역자료로부터 HEC-1 모형으로 산정한 유출수문곡선을 먼저 첨두홍수량과 도달시간면에서 실측 수위자료와의 비교를 통하여 1차 검정한 후, 날개둑의 붕괴시각 및 규모와 전곡수위표 지점 및 임진강 본류

* 경기대학교 토목공학과 교수

** 고려대학교 토목환경공학과 교수

*** 경기대학교 토목공학과 석사과정

의 군남 및 적성에서의 수위 기록자료를 만족하는 유입수문곡선 및 하도매개변수들을 역추적하는 2차 보정작업을 실시하였다.

즉, 7월 26일~28일간의 홍수량을 산정하기 위하여서는 먼저 당시의 강우량 및 시간분포 및 지표면 자료로 부터 HEC-1에 의한 수문화적인 홍수량을 추정하고 이를 본 모의구간에 적용하여 본 수문학적 산정 결과의 타당성을 홍수파의 도달시간과 첨두홍수량을 중심으로 비교 검토하였으며 비교적 만족할만한 결과를 얻었다. 그러나 수문학적 홍수추적에 적용되는 몇 개의 경험계수 및 유역의 분할, 다소의 오차가 예상되는 읍,면에서의 강우측정기록 만으로는 72시간동안에 급격한 홍수위 변동을 나타내는 하류의 홍수를 정확하게 재현하기에는 상류 유역에서의 입력정보량과 그 정확도에 한계가 있었다. 한편 댐지점에서의 붕괴양상과, 하류부의 수위 변동측정결과를 전 모의 시간과정을 통하여 정확히 재현하는 유입수문곡선을 얻기 위하여서는 앞에서 산정한 수문곡선을 재 보정하는 후속작업이 필요하였다. 이를 위해 홍수량의 보정과 병행하여 주요변수의 최적화를 통하여 오차를 최소화하는 반복과정을 거쳐 '96년 7월 26~28일간의 연천댐으로의 유입수문곡선을 확정하였다. 표 2는 HEC-1에 의한 첨두유량과 첨두발생시간을 보정치와 비교한 것으로서 첨두시간의 계산오차는 1시간정도로서 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

표 2. HEC-1과 보정치에 의한 유입수문곡선의 비교

	첨두유량 (cms)	첨두발생시간 (월,일,시)
HEC-1	8,346	7월 27일 17:00
보정치	8,346	7월 27일 16:00

이와 같이 도출된 연천댐 지점에서의 유입수문곡선(그림 2)을 적용하여 수치 모의한 전곡지점에서의 계산치는 그림 3에서와 같이 전곡수위표의 기록치에 매우 근사한 합당한 결과를 보여주었다. 이러한 과정은 실제상황에 대한 타 경우와의 엄격한 비교를 위하여 필수적이었다.

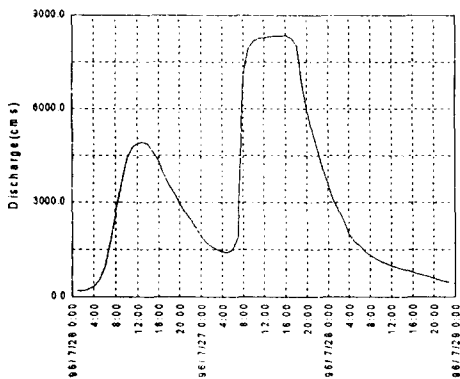


그림 2 연천댐 유입수문곡선

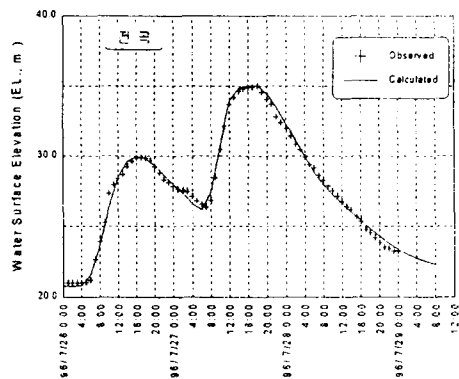


그림 3 전곡수위표지점에서의 모의치와 실측치 비교

3. 댐의 일부 붕괴와 유출 홍수량

3.1 댐의 붕괴 원인 및 형상

앞절에서 산정된 첨두 홍수량 8,346cms는 표 1의 계획최대홍수량 5,230cms를 무려 60%나 상회하는 것으로서 이번 연천댐 일부 붕괴의 원인은 홍수량의 과대로 인한 월류가 직접적인 원인이었다.

연천댐에서의 붕괴 시간 및 형태를 파악하기 위하여 '96년 7월 27일 붕괴 현장의 목격자와의 면담과 현지답사 및 관련자료를 통한 붕괴규모와 붕괴시점에 관한 조사를 실시하였다.

당시의 상황이 급박하고 증언자들이 비전문가이기 때문에 현상을 체감하는 정도에 차이가 컸다. 그러나 이상의 내용을 종합하여 판단하면 7월 27일 09:00시경에 월류가 시작되어 이

시간 이후부터 붕괴가 시작되었을 것으로 판단되며, 제체의 균열과 활발한 침식의 시작시간은 본 날개둑의 마루가 콘크리트로 포장되어 월류 홍수류에 의한 침식력에 상당한 저항을 하였을 것으로 판단되어 실제적인 붕괴 시작 시간은 7월 27일 09:20시 경으로 추정된다. 침식으로 인한 침식 과정은 날개둑의 중심부에 상당한 높이로 설치된 콘크리트 심벽의 영향으로 이 부분이 유실되기까지는 단순 필댐의 경우와는 달리 상당한 저항이 있었을 것으로 판단되어 붕괴시간은 단순 토사제방의 경우에 비하여는 그 붕괴 시간이 길어졌을 것으로 보아 약 80분으로 판단하였다. 따라서 본 조사연구에서의 날개둑의 붕괴시간은 27일 09:00시부터 10:20시까지의 1시간 20분으로 하였다.

연천댐의 붕괴부는 콘크리트 댐부와 우안으로 연결되는 날개부 토사댐 구간으로서 축조재료로 사용된 거석 및 토사와 연결 콘크리트 차수 심벽의 일부가 유실되었다. 최종 붕괴부의 개략적 형상은 상부폭 60.3m, 바닥폭 20m, 깊이 14m의 사다리꼴 단면의 형태를 보이고 있다(그림 4).

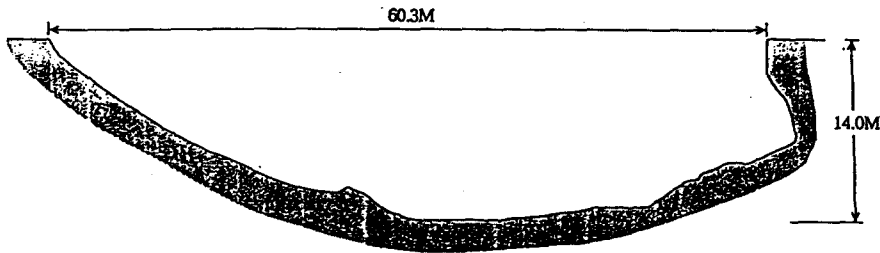


그림 4 연천댐 날개둑 유실부의 형상과 규모

3.2 DAMBRK와 기본방정식

(1) DAMBRK

본 모형은 댐으로부터의 유출 수문곡선의 유도과 하류에서의 홍수추적을 수리학적으로 해석하기 위하여 개발되었다. 본 모형에서 사용하는 지배방정식은 부정류에 관한 1차원 Saint-Venant 방정식으로서 하류구간에서의 급변류, 단면의 변화, 교량 등의 영향을 내부 경계조건으로 수용할 수 있도록 설계되었다. 또한 검토대상 하도구간의 상류 및 하류단에서의 경계조건들이 도입되도록 하였다. 구성된 방정식들은 비선형 4점 가중 음형법(nonlinear weighted 4-point implicit finite-difference method)에 의하여 그 해가 구해진다.

(2) 기본방정식

댐 붕괴로 인한 유출수문곡선을 유도하기 위하여서는 저수지내로의 유입량과 유출량에 따른 저수용량의 변화가 고려된 저류 방정식이 사용되어야 한다.

월류에 의한 붕괴의 경우에는 넓은 마루웨어의 공식, 파이핑의 경우에는 오리피스스의 유량 공식이 사용되었는데, 이들은 저수지내의 수위, 붕괴부의 형상 및 하류부의 수위 등의 함수로서 다음식에 의하여 결정된다.

$$Q_b = C_1 \beta (h - h_b)^{1.5} + C_2 \beta (h - h_b)^{2.5} \quad (1)$$

$$Q_s = C_3 (h - h_s)^{1.5} + C_4 a (h - h_g)^{0.5} + C_5 (h - h_{dm})^{1.5} + Q_t \quad (2)$$

- 여기서, a : 수문의 유출단면적 (m^2), C_1 : 넓은 마루 직사각형 웨어의 유량계수
 C_2 : 넓은 마루 삼각형 웨어의 유량계수, C_3 : 여수토에 대한 유량계수
 C_4 : 수문에 대한 유량계수, C_5 : 댐 마루부에서의 유량계수
 h : 시간 t 에서의 저수지의 수위 (m), h_b : 시간 t 에서의 붕괴부의 표고 (m)
 h_g : 수문의 표고 (m), h_s : 여수토의 표고 (m)
 β : 잠수계수 (submergence factor)
 Q_t : 저수지의 수위와 무관한 기타 유출량 (cms)

저류방정식은 질량보존 법칙에 의하여 다음의 식 (3)으로 표시할 수 있다.

$$ds/dt = Q_i(t) - Q_b(h, t) - Q_s(h, t) \quad (3)$$

여기서, ds/dt : 시간에 따른 저류용량의 변화율, $Q_i(t)$: 저수지내로의 유입량
 $Q_b(h, t)$: 붕괴부를 통한 유출량, $Q_s(h, t)$: 비붕괴부를 통한 유출량

3.3 저수지 수위곡선과 유출수문곡선

홍수기간의 연천댐 저수지의 수위를 산정한 결과는 그림 5와 같다. 저수지 수위는 27일 06:00시부터 급상승하여 오전 09:00시경에는 댐의 마루높이 53.5m를 상회되면서 월류가 시작됨을 보여주고 있으며, 월류와 더불어 댐의 유실이 진행되면서 다시 저수지 수위는 11:00시경을 정점으로 하강하여 13:00시경에는 댐 마루이하의 수위로 낮아졌음을 보여주고 있다. 그림 6은 저수지로 부터의 유출수문곡선으로서 09:00~12:00시간에는 첨예한 형태를 보여주고 있다.

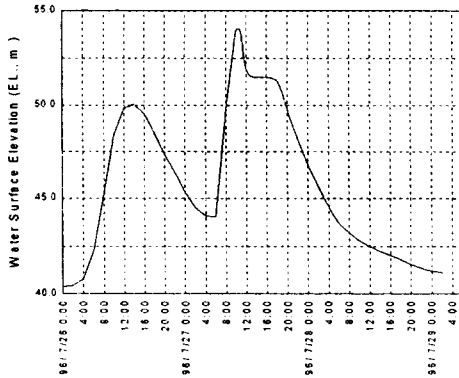


그림 5 저수지 수위곡선

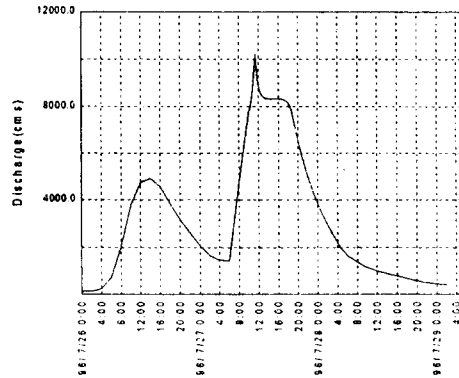


그림 6 저수지 유출수문곡선

4. 홍수파의 전달 특성

4.1 기본방정식

하도의 홍수파해석을 위한 동역학적 파동 방정식은 식 (4)와 (5)의 연속방정식과 운동량 방정식으로 구성되며,

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial(A + A_0)}{\partial t} - q = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} - gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f + S_e \right) - q_1 v_1 = 0 \quad (5)$$

여기서, x 는 하천의 흐름방향거리, t 는 시간, Q 는 유량, h 는 수위, A 와 A_0 는 각각 유동(active) 및 저류(inactive) 하도단면적, q_1, v_1 은 측방유출입량과 그 유속, S_f, S_e 는 각각 마찰경사와 단면변화에 따른 손실경사의 항이다. 차분 방정식은 Preissmann 기법을 도입하였다(Preissmann, 1961; Liggett, 1975).

4.2 주요지점별 수위 수문곡선과 홍수파의 전달 특성

연천댐의 방류 및 월류홍수량에 의한 하류구간에서의 홍수파 전달 특성을 파악하기 위하여 강화천 합류부, 한탄강유원지 및 차탄천 합류부에서의 홍수위 수문곡선을 계산하였다(그림 7). 그림 7에서 볼 수 있는 바와 같이 27일 12시경 댐 직하류부에서 발생한 최고 홍수위는 하류로 가면서 댐 유출로 인한 첨두한 양상이 완만해져서 댐 붕괴로 인한 영향이 감쇄되어 나감을 알 수 있다.

한편, 최고 홍수위 발생시간은 강화천에서 17:50시경, 한탄강 유원지에서 16:35시, 차탄천 합류부에서 16:35시 등으로 하류로 홍수파의 전달양상을 보여주고 있으며 평균 파속은 약 3.66m/sec였다.

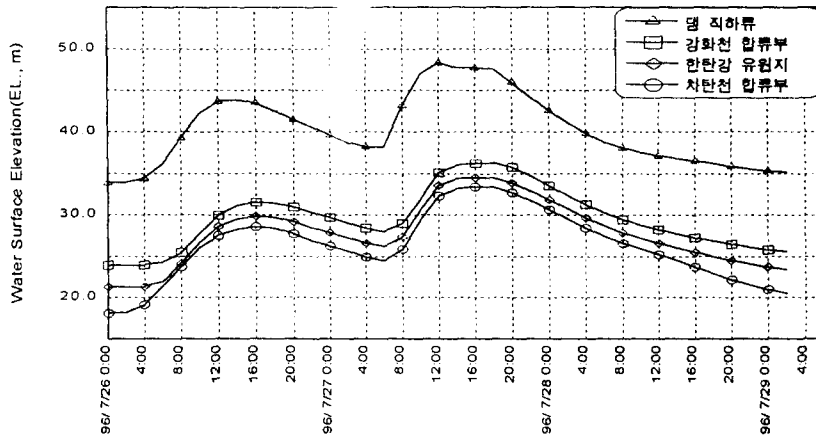


그림 7 홍수파의 전달특성

표 3 한탄강유원지(관리사무소지점)에서의 시간별 수위상승속도

시 간	수 위(EL., m)	상승속도(m/hr)	시 간	수 위(EL., m)	상승속도(m/hr)
27일 01:00	27.565	-0.304	27일 13:00	33.976	0.402
02:00	27.261	-0.304	14:00	34.378	0.402
03:00	26.942	-0.319	15:00	34.442	0.064
04:00	26.623	-0.319	16:00	34.505	0.063
05:00	26.417	-0.207	17:00	34.483	-0.023
06:00	26.210	-0.206	18:00	34.460	-0.023
07:00	26.783	0.573	19:00	34.170	-0.290
08:00	27.356	0.573	20:00	33.880	-0.290
09:00	28.971	1.615	21:00	33.388	-0.492
10:00	30.586	1.615	22:00	32.896	-0.492
11:00	32.080	1.494	23:00	32.384	-0.512
12:00	33.574	1.494	24:00	31.872	-0.512

위의 표 3은 한탄강 유원지에서의 27일 홍수위 변동양상을 분석한 것으로서 27일 06:00 시까지 하강하던 홍수위는 다시 급격히 증가하기 시작하였으며, 특히 09:00~10:00시경에는 그 상승속도가 급격히 빨라졌음을 보여주고 있다.

그림 8과 9는 댐 직하류부와 한탄강유원지에서 댐 붕괴로 인한 영향을 분석하기 위하여 댐이 붕괴되지 않았을 경우의 홍수위와 실제 홍수위를 비교한 것으로서 댐 붕괴의 영향이 한탄강유원지 지점에 이르러서는 상당히 감소되고 있음을 알 수 있으며, 수위차는 27일 10시~14시 사이에서는 약 1.5 cm내외, 최고홍수위면에서는 약 3 cm의 차이를 보여주었다.

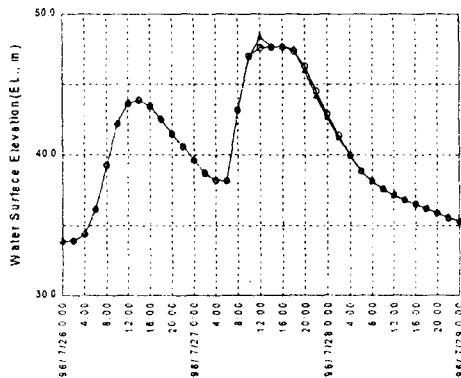


그림 8 댐 직하류지점에서의 비교

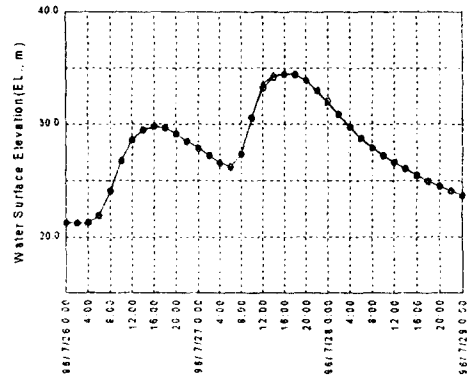


그림 9 한탄강유원지 지점에서의 비교

5. 결 론

- (1) '96년 7월 홍수로 인한 연천댐 저수지의 수위변화와 댐 붕괴와 여수로 개방으로 인한 홍수량을 산정하였다.
- (2) 이번 연천댐의 직접적인 붕괴원인은 계획홍수량을 훨씬 능가하는 홍수규모에 의한 것으로 판단되며, 기존의 계획홍수량은 현재의 홍수량상으로 보아 상향조정하여 댐을 재보강하는 것이 바람직하다.
- (3) 댐 하류부 한탄강구간에서의 홍수위 상승은 계획홍수량을 초과하는 홍수에 기인한 것이며 제한된 시간과 범위내에서 댐의 일부유실영향은 있었다고 판단되나 하류로 갈수록 그 영향은 감소하였다. 이는 댐 붕괴 인한 홍수량의 크기가 전체 홍수량에 비해 차지하는 비중이 상대적으로 작은것도 한 원인이었다.
- (4) 한탄강 유원지에 설치된 수십개의 상점, 관리사무소 심지어는 공중화장실 등의 설치는 홍수피해를 가중시켰는바 하천공간의 관리는 하천의 통수능과 자연성을 고려하여 슬기롭게 이루어져야 할 것이다.

6. 참고 문헌

1. 건교부, 임진강 유역조사보고서(1차), 1995
2. 건설부, 임진강 하천정비기본계획, 1980. 12
3. 이종태 (1990), "이상홍수에 대응을 위한 하천 시스템에서의 홍수파 해석 모형연구", 국제수문개발계획 (IHP) 연구보고서
4. 이종태 (1982) "Preissmann 기법에 의한 1차원 부정류의 해석", 한국수문학회지, 15(1), 57-62
5. 이종태, 한건연 (1986), "하천제방의 붕괴로 인한 제내지의 침수예측모형", 한국수문학회지, 22(2), 223-231.
6. 이종태, 한건연, 이정식 (1986), "Fill Dam의 가상파괴로 인한 홍수파의 예측모형", 대한토목학회 논문집, 6(4), 69-78.
7. 한건연 (1986) "Fill dam의 파괴에 따른 홍수파 예측모형의 개발", 연세대학교대학원, 박사논문.
8. 한국수자원학회, '96년 7월 경기·강원 북부지역 홍수피해, 1996.10
20. Fread, D.L. (1985), "Channel Routing" in Anderson, M.G., and Purt, T.P.(eds), Hydrological Forecasting, John Wiley and Sons, 437-503.
21. Fread, D.L. (1989), "THE NWS DAMBRK MODEL : THEORETICAL, BACKGROU-ND/USER DOCUMENTION", NWS, NOAA