

HEC-HMS와 HEC-RAS를 이용한 댐 붕괴 해석

Dam Break Analysis with HEC-HMS and HEC-RAS

홍승진* · 김수전** · 김형수*** · 경민수****

Hong, Seung-Jin · Kim, Soo-Jun · Kim, Hung-Soo · Kyung, Min-Soo

Abstract

This study simulates the dam break situation by a probable maximum precipitation of Soyang-River Dam using HEC-HMS model and HEC-RAS model and compares the simulated results. The probable maximum precipitation was calculated using the flood event of the typhoon Rusa occurred in 2002 and using the mean areal precipitation of the Gangreung region and the moisture maximization method. The estimated probable maximum precipitations were compared for the duration of 6, 12, 18, and 24 hrs and were used as input data for the HEC-HMS model. Moreover, the inflow data calculated by HEC-HMS were utilized as ones for HEC-RAS, and then unsteady flow analysis was conducted. The two models were used for the dam break analysis with the same conditions and the peak flow estimated by HEC-HMS was larger than that of the HEC-RAS model. The applicability of two models was performed from the dam break analysis then we found that we could simulate more realistic peak flow by HEC-RAS than HEC-HMS. However, when we need more fast simulation results we could use HEC-HMS. Therefore, we may need the guidelines for the different utilizations with different purposes of two models. Furthermore, since the two models still include uncertainties, it is important to establish more detailed topographical factors and data reflecting actual rivers.

Keywords : probable maximum precipitation, dam break, HEC-HMS, HEC-RAS

요 지

본 연구에서는 HEC-HMS와 HEC-RAS 모형을 이용하여 소양강댐에 가능최대강수량이 발생하여 소양강댐이 붕괴할 경우 두 모형간의 소양강댐 직하류의 유출량을 산정해 그 결과를 비교하였다. 가능최대강수량은 태풍 루사의 호우사상을 사용하여 강릉지역의 면적별평균강우량과 수분최대화방법을 이용하여 산정하였다. 산정된 가능최대강수량은 지속시간(6 hr, 12 hr, 18 hr, 24 hr)별로 각각을 비교하였으며, HEC-HMS 모형의 입력자료로 이용하였고, HEC-HMS로 산정되어진 유입량자료를 HEC-RAS에서의 유입량 자료로 이용하여 부정류 해석을 실시하였다. 두 모형의 댐 붕괴 조건은 동일하게 입력하였으며, HEC-HMS 모형으로 산정되어진 첨두유출량은 HEC-RAS 모형보다 크게 산정되었다. HEC-RAS와 HEC-HMS의 댐 붕괴 해석을 이용해 두 모형의 적용성을 판단하였는데, HEC-HMS 모형보다는 HEC-RAS 모형이 댐 붕괴 해석에 대한 적용성에서 보다 실제에 가까운 모의를 할 수 있었다. 하지만 HEC-HMS 모형은 자료 구축이 용이하다는 측면에서 신속한 댐 붕괴 모의를 필요로 할 때 적용성이 있을 것으로 판단된다. 두 모형의 경우 댐 붕괴 해석에 대한 정확한 자료와 함께 각기 다른 붕괴해석 개념에 대한 가이드라인의 생성이 중요하다고 판단된다. 또한 두 모형이 모두 불확실성을 포함하고 있기 때문에 보다 자세한 지형인자와 실제 하천과 비슷한 자료의 구축의 필요성이 있다고 판단된다.

핵심용어 : 가능최대강수량, 댐 붕괴, HEC-HMS, HEC-RAS

1. 서 론

최근 세계적인 기상이변으로 인해 이상홍수가 빈번하게 발생하고 있으며, 우리나라도 이상홍수로 인해 수해 규모가 날로 증가하고 있다. 특히 2002년 태풍루사(RUSA) 시 강릉지역 동막댐, 장현댐 등 관개용수댐의 붕괴로 피해가 가중되는 사례도 있었다(한국개발연구원, 2007). 이에 따라 주요 호우

사상을 고려한 가능최대홍수량(Probable Maximum Flood, PMF)의 유입 시 기존 수공구조물과 치수시설의 안정성에 문제가 생길 수 있다는 점을 인식하고 치수능력의 증대를 위한 사업과 연구를 수행하여 왔다. 이의 결과 기존 및 신규 댐의 설계홍수량의 기준이 가능최대강수량(Probable Maximum Precipitation, PMP)과 가능최대홍수량(Probable Maximum Flood, PMF)으로 강화되었으며 수공구조물의 시

*정회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 수자원연구실 연구원 · 공학석사 (E-mail : hongsst@kict.re.kr)

**인하대학교 사회기반시스템공학부 박사과정 (E-mail : soojuny@empal.com)

***정회원 · 인하대학교 사회기반시스템공학부 부교수 · 공학박사 (E-mail : sookim@inha.ac.kr)

****정회원 · 인하대학교 사회기반시스템공학부 박사과정 (E-mail : gigatg@inha.ac.kr)

설규모가 전반적으로 증가하게 되었다.

이와 같이 가능최대강수량은 댐과 같은 주요 수공구조물의 기준이 되고 있으며, 국외에서도 이를 정량적으로 산정하기 위한 노력이 진행 중이다. 미국의 수문기상연구소(HMR)에서는 가능최대강수량의 개념을 정립하여 매년 HMR Report를 편찬해 미국의 지역별로 가능최대강수량 산정의 가이드라인을 제시하고 있다. HMR51은 가능최대강수량의 추정의 일반론을 제시하고, HMR52에서는 “HMR51 Report”에서 제안한 내용에 현실적으로 공간분포라는 개념을 접목하였다. 또한 HMR53, 54에서는 10 mi²~400 mi²의 면적에 대해서 각각 가능최대강수량을 산정하였다. 그리고 영국의 경우 1970년대 초부터 가능최대강수량과 가능최대홍수량의 관점에서 FSR(Flood Studies Report)를 출판하여 영국 전 지역의 가능최대강수량과 가능최대홍수량의 유도하는 방법론을 설명하였다.

국내에서 가능최대강수량을 구하기 위한 보고서들에서는 WMO(세계기상기구)에서 제시하는 방법을 사용하고 있으며, 2000년대 들어서면서부터 가능최대강수량을 산정하기 위한 다양한 기법제시도 되고 있는 추세이다. 1980년대부터 가능최대강수량을 개념화하고 정립하기 위한 노력이 있었는데 가능최대강수량산정(건설교통부, 1988), 한국의 가능최대강수량 추정(건설교통부, 1999), 전국 PMP도 제작성 보고서(건설교통부, 2004)등에서 가능최대강수량도 작성을 위한 노력을 찾아 볼 수 있다. 또한 김남원, 원유승 등(2004)은 설계호우(확률강우량, 가능최대강수량 등)에 대한 분석 중 에서 공간분포를 적용하여 실제호우로부터 가상호우의 형태를 가정하는 것과 최근 들어서 국내에 이상기후로 인하여 집중호우로 인한 피해가 증가함에 따라서 가능최대강수량이 변화하고 있다고 설명하였다. 권지혜 등(2006)은 가능최대강수량의 호우 중심에 따라서 댐별로 가능최대강수량을 산정하였는데, 한강 유역의 주요 댐별로 호우중심 위치에 따른 공간분포를 각각 수행하여 소유역별로 강우량 값을 산출하였다. 전시영 등(2006)은 태풍루사의 호우를 포함한 기왕의 131개의 주요호우를 호우전이를 고려한 수문학적 방법과 기존의 가능최대강수량도에 의한 방법을 통해 가능최대강수량을 산정하였다. 또한 댐 설계기준의 적정성 검토(한국개발연구원, 2007)에서는 현재 댐 설계기준에서 제시되고 있는 가능최대강수량 및 가능최대홍수량의 산정방법의 적정성을 검토하였다.

그리고 가능최대홍수량과 관련한 댐 붕괴 해석을 위해 많은 연구가 진행되어 왔었다. 우선, 국외의 댐 붕괴 해석에 관한 연구로 Garcia-Navarro 등(1999)은 일차원 모형을 통하여 댐 붕괴 흐름을 분석하였고, Sharghi 등(2000)은 2차원 Navier-Stokes 방법을 통하여 댐 붕괴시 댐 직하류의 흐름을 분석하였다. 또한 미육군공병단(USACE)산하의 HEC(Hydrologic Engineering Center, 2007)에서는 하와이의 Kaphai 유역의 상류부분의 댐붕괴 해석을 위해서 HEC-HMS와 HEC-RAS 모형을 연동하여 댐붕괴 해석을 실시하였다. 국내의 댐 붕괴 해석의 경우 이홍래 등(1988)이 댐 붕괴에 따른 홍수류의 해석시의 불확실도를 규명하기 위하여 DAMBRK 모형을 Monte-Carlo기법을 이용해 수정보완함으로써 DAMBRK-U모형을 개발하고 연천댐에 모의하여 실제적용성을 입증하였다. 이상호 등(1992)은 소양강댐을 가상 파괴하여 댐 파괴파의

전과양상을 DAMBRK로 수치모의를 하였다. 한건연 등(1992)은 댐 붕괴 유형을 순간적인 것과 점진적인 것에 대하여 침투유량산정식을 유도하였다. 이준학(2001)은 HEC-HMS, DAMBRK, HEC-RAS을 연계하여 댐 붕괴가 하류 지역에 미치는 영향을 공학적으로 규명하였으며, 최규현과 한건연(2005)은 제내지에서의 홍수범람 양상을 해석하기위해 2차원 홍수 범람모형을 개발하였다. 최근에 최병규 등(2008)은 DAMBRK 와 HEC-RAS모형의 하류 홍수류해석을 비교하여 두 모형간의 차이를 설명하였는데, 보다 정확한 HEC-RAS의 댐 붕괴 해석을 위하여 HEC-HMS 모형과의 비교 및 검토를 제안하였다.

이에 본 연구에서는 소양강댐 유역을 대상으로 가능최대강수량의 발생에 의한 댐 붕괴 상황을 가정하고 HEC-HMS와 HEC-RAS 모형을 이용하여 댐 붕괴 해석에 대한 모형의 적용성을 검토하고자 한다.

2. 가능최대강수량

2.1 가능최대강수량의 산정방법

가능최대강수량을 산정하는 방법에는 수문기상학적 방법(hydrometeorological method)과 최대우량 포락곡선방법(maximum rainfall envelope curve method) 및 통계학적 방법(statistical method)의 세 가지가 있으나 수문기상학적 방법이 물리적으로 가장 타당한 방법이므로 실무에서 주로 사용되고 있다(윤용남, 2007).

본 연구에서는 가능최대강수량의 세 가지 산정 방법중에서 수문기상학적 방법을 사용하였다. 수문기상학적 방법은 실제 호우를 전이하는 방법과 가능최대강수량도를 이용하는 방법이 있는데, 실제 호우전이법의 경우 대상호우를 선정한 후에 그 호우를 대상으로 전이비를 산정하여 호우사상에 가중치

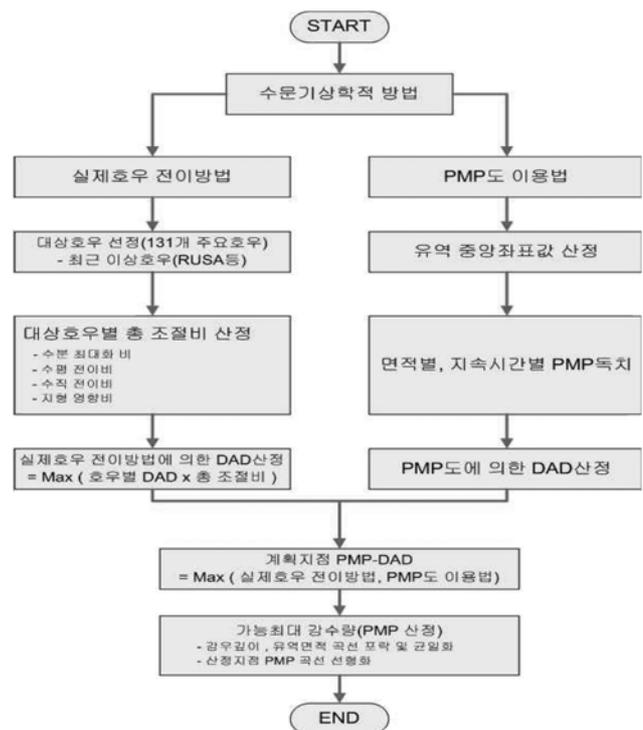


그림 1. 가능최대강수량 산정 모식도

를 적용함으로써 PMP-DAD를 산정하게 된다. 가능최대강수량도를 이용하는 경우에는 가능최대강수량도에 나타내어져 있는 내용들을 유역별로 면적중양값을 선정한 후에 각 면적별 지속시간별 가능최대강수량을 독치하게 되는데, 독치되어져 나온 값들을 이용하여 DAD를 산정한 후에 계획지점의 PMP-DAD를 산정하여 가능최대강수량을 구하게 된다. 본 연구에서는 실제호우의 전이방법을 사용함으로써 특정 호우사상을 사용하여 가능최대강수량을 산정하였다.

2.1.1 수문기상학적방법

1) 기본방정식

수분최대화와 호우전이에 따라 조절된 강우량을 산정하는 방법은 다음과 같다.

$$R_T = R_{IP} \times R_{HT} \times R_{VT} \times R_{GF} \times OP \quad (1)$$

여기서, R_{IP} 는 수분최대화비, R_{HT} 는 수평전이비, R_{VT} 는 수직전이비, R_{GF} 는 지형영향비를 나타내고 OP 는 관측강우량이다. 관측강우량은 어느 특정지점의 점강우량이 아닌 면적강우량으로 강우깊이·면적·지속시간(DAD) 관계에서 도출되며, 대상유역에 영향을 미칠 수 있는 관측강우량을 수분최대화와 전이를 통하여 획득한 조절된 강우량을 지속시간별, 면적별로 포락하여 가능최대강수량을 결정한다.

2) 수분최대화비

수분최대화비는 호우지대의 고도를 고려한 최대 12시간 지속 1000 mb 이슬점에 의한 가강수량과 대표 12시간 지속 1000 mb 이슬점에 의한 가강수량의 비로 산정되며, 이때 최대 12시간 지속 1000 mb 이슬점은 호우 발생일 약 15일 전후에서의 최대 이슬점이다.

$$R_{IP} = \frac{W_{pm,si,se}}{W_{ps,si,se}} \quad (2)$$

여기서 $W_{pm,si,se}$ 는 최대 12시간 지속 1,000 hpa 이슬점에 의한 가강수량(mm), $W_{ps,si,se}$ 는 대표 12시간 지속 1,000 hpa 이슬점에 의한 가강수량(mm)을 나타낸다.

3) 수평전이비

강수량의 수평변화는 최대 12시간 지속 1000 mb 이슬점에 기인된 수분의 차라고 가정하여 호우를 전이시킬 때 호우발생지대의 수평비는 두지대의 최대 12시간 지속 이슬점에 의한 가강수량의 비로 산정한다.

$$R_{HT} = \frac{W_{pm,ti,te}}{W_{pm,si,te}} \quad (3)$$

여기서 $W_{pm,ti,te}$ 는 호우지대의 고도를 고려한 전이지대의 최대 12시간 지속 1000 mb 이슬점에 의한 가강수량, $W_{pm,si,te}$ 는 호우지대의 고도를 고려한 최대 12시간 지속 1000 mb 이슬점에 의한 가강수량을 나타낸다.

4) 수직전이비

관측강우량과 고도와의 관계, 즉 고도에 따라 강우량의 증가나 감소의 관계는 일정하지 않으며, 따라서 호우지대와 전이지대의 수직적 조절은 수분을 근거로 하며 이 비를 수직전이비라 한다.

$$R_{VT} = 0.5 + 0.5 \left(\frac{W_{pm,ti,te}}{W_{pm,ti,(se \pm 300)}} \right) \quad (4)$$

여기서 $W_{pm,ti,(se \pm 300)}$ 은 호우지대와 전이지대의 고도차가 300 m 이상일 때 호우지대의 고도에 대한 가강수량의 1/2을 고려하고 최대 12시간 지속 1000 mb 이슬점에 의한 가강수량을 나타낸다.

5) 지형영향비

호우전이는 호우지대와 전이지대의 지형학적, 기상학적으로 동질성을 기준 가정으로 삼고 있으나 지형학적, 기상학적 동질성을 만족하는 객관적인 판단을 정확히 할 수 없을 뿐만 아니라 각 지역의 강우특성을 묘사할 수 없다. 따라서, 이를 해결하기 위해서 지속시간 24시간 100년빈도 확률강우량의 비를 지형영향비로 사용한다.

$$R_{CF} = \frac{(100yr-24hr)_{ti}}{(100yr-24hr)_{si}} \quad (5)$$

여기서, $(100yr-24hr)_{ti}$ 는 전이지대에서 호우지대면적과 동등한 면적에 해당하는 평균 100년빈도 24시간 확률강우량, $(100yr-24hr)_{si}$ 는 호우지대 평균 100년빈도 24시간 확률강우량을 나타낸다.

6) 포락

포락(envelopment)은 어떤 자료군에서 가능한 최대값을 찾기 위한 과정이다. 세계기상기구(WMO)에서 소개하고 있는 절차는 최대화되고 전이된 강우량 값들을 그래프지에 도시한 후 최대값으로 매끄러운 곡선을 그리는 과정이다. 이 과정은 적용하는 사람의 판단으로 시행착오를 거치면서 적절하다고 판단될 때까지 계속적으로 반복하는 것이다.

2.2 가능최대강수량의 시간 및 공간 분포

2.2.1 가능최대강수량의 시간분포

강우의 시간분포는 국내에서는 주로 Mononobe 방법, Huff 방법, Yen-Cow 방법, 교호블록 방법 등을 사용하고 있다. 본 연구에서는 실무에서 가장 많이 사용하고 있는 Huff 방법을 사용하여 태풍 루사의 호우사상을 시간분포 하였다.

Huff 방법은 수공구조물의 설계홍수량 산정에 필요한 설계우량주상도를 결정하기 위한 시간분포 모형이다. Huff는 실제로 발생한 호우기간 중의 누가우량곡선을 관찰하여 총 강우지속시간을 4개의 동일한 시간구간으로 나누었을 때 가장 큰 강우량이 어느 구간에서 발생하는냐에 따라 강우의 시간분포 특성을 4가지로 구분하였다. 즉, 총 강우지속시간 중 처음 1/4 구간에서 가장 큰 강우량이 발생하면 1분위호우, 2/4구간에서 발생하면 2분위호우와 같이 3분위, 4분위로 분류하였다.

이와 같이 강우의 시간분포형을 4개 분위로 분류한 후 각 분위에 속하는 개개 호우의 시간별 누가우량기록을 호우별 총 지속시간과 총 우량을 사용하여 다음과 같이 무차원화 하였다.

$$PT(i) = \frac{T(i)}{TO} \quad (6)$$

$$PR(i) = \frac{R(i)}{RO} \times 100\% \quad (7)$$

여기서, $PT(i)$ 는 총 강우지속시간 TO (분)에 대한 임의시간 $T(i)$ 에서의 강우지속시간 백분율(%)이며 i 는 단위시간 구간 수로서 통상 $i=10$ 을 택하며, $PR(i)$ 는 총 지속시간 TO 동안의 총 우량(mm)에 대한 임의시간 $T(i)$ 까지의 누가우량 백분율(%)이다. 따라서 $PT(i)$ 와 $PR(i)$ 로 그려지는 곡선은 무차원 강우시간분포곡선이 된다.

2.2.2 가능최대강수량의 공간분포

공간분포 방법의 경우는 주로 면적감소계수(areal reduction factor; ARF)를 산정하기 위해 이용되며, 주로 사용되고 있는 방법은 호우중심형(storm-centered)과 면적고정형(fixed-area)방법이 있는데 본 연구에서는 호우중심형 방법을 사용하였다.

호우중심형 방법은 개개 호우사상을 중심으로 하여 공간분포를 수행하는 방법으로 점 가능최대강수량을 면적 가능최대강수량으로 전환하는데 사용된다.

$$ARF = \frac{R_1}{R_2} \quad (8)$$

여기서, R_1 은 특정 호우사상에서 주어진 유역면적 및 지속기간에 대한 호우지대의 최대 면적우량이고, R_2 는 호우지대의 최대 점우량을 나타낸다. 일반적으로 R_1 의 계산을 위해 주어진 면적의 위치는 등우선도의 형태에 의해 결정되므로 강우에 따라 변하게 되며 강우지역은 최대강수량 R_2 의 주위에 중심이 위치하도록 선정한다(한국건설기술연구원, 1991). 호우중심형 방법은 주로 DAD(depth-area-duration) 관계를 이용하는 것이 일반적이고, 우리나라에서는 가능최대강수량의 분석에 주로 사용되고 있다.

3. HEC-HMS와 HEC-RAS 모형의 댐 붕괴 해석 방법론 및 입력자료

댐 붕괴시에 HEC-HMS와 HEC-RAS 모형은 MacDonald and Langridge-Monopolis(1984), Froehlich(1995), Von Thun & Gillette(1990)의 방법을 공통으로 사용하고 있으며 세 가지 방법들은 HEC-HMS와 HEC-RAS 모형의 댐 붕괴 해석시에 사용되는 방법론적인 내용으로서 사면경사 즉 Overtop Breach와 Piping Failure에 관해서 입력자료의 차이에 따라서 사용되어진다. 방법들이 대부분 댐의 붕괴시간산정을 댐의 구조와 댐이 붕괴시의 수위에 따라서 결정되어지게 되어 있다. 각 방법에 대한 댐의 붕괴 시간과 사면경사에 따른 방법론을 간략하게 소개하면 다음과 같다.

3.1 MacDonald and Langridge-Monopolis

1984년에 MacDonald and Langridge-Monopolis에 의해 제안된 본 방법에서는 댐 붕괴시의 최대 유출용적을 다음과 같이 사력댐과 비사력댐을 구분하여 산정한다. 또한 댐 붕괴시의 최대 유출용적을 이용하여 댐 붕괴 시간 및 댐 붕괴 크기를 산정한다. 댐 붕괴시의 사면 경사는 댐 상류부와 하류부를 각각 표현하여 입력하고 있고 댐 붕괴 사면경사에 대해서는 0.5의 값을 제안하고 있다.

$$V_{eroded} = 0.0261(V_{out} \times h_w)^{0.769} - Earthfill \quad (22)$$

$$V_{eroded} = 0.00348(V_{out} \times h_w)^{0.852} - Non-Earthfill \quad (23)$$

$$t_f = 0.0179(V_{eroded})^{0.364} \quad (24)$$

$$BREACH_{size} = f(V_{eroded}) \quad (25)$$

여기서 V_{out} 은 유출 용적(m^3), V_{eroded} 은 댐 붕괴 시 최대 유출용적(m^3), h_w 는 댐 붕괴 시 수위(m), t_f 는 붕괴 시간(hour)을 의미하며, $BREACH_{size}$ 는 댐의 붕괴 크기를 나타낸다. 위식들로 인해서 댐의 하부 붕괴 폭을 산정하게 되는데, 산정식은 아래와 같다.

$$W_b = \frac{V_{eroded} - h_b^2(CZ_b + h_w z_b z_3/3)}{h_b(C + h_b Z_3/2)} \quad (26)$$

여기서 W_b 는 댐의 하부 붕괴 폭, h_b 는 붕괴 높이, C 는 댐의 정점 부분의 폭, Z_b 는 붕괴 사면 경사 ($h:v$); MacDonald는 0.5로 제안하고있다, Z_1 는 댐의 상류부 표면 경사($h:v$), z_2 는 댐의 하류부 표면경사($h:v$), z_3 는 이다.

3.2 Froehlich

본 방법은 Froehlich(1995)에 의해 제안된 식으로 댐을 통과하는 체적과 댐 붕괴수위 및 댐이 붕괴하는 방법에 따라서 댐의 붕괴 폭을 산정한다. 또한 댐을 통과하는 체적과 붕괴수위를 이용하여 댐 붕괴 시간을 산정하는데 본 방법에서는 사면경사계수, 즉 댐이 붕괴하는 방법에 따라서 Overtop Breach의 경우에는 1.4($h:v$), 다른 경우(Piping Breach등)에는 0.9를 제시하고 있다.

$$B_{ave} = 0.1803K_0 V_w^{0.32} h_b^{0.19} \quad (27)$$

$$t_f = 0.00254 V_w^{0.53} h_b^{-0.90} \quad (28)$$

B_{ave} 는 측면으로 보았을 때 사다리꼴 모형인 댐의 평균 폭(m), K_0 는 계수로서 Overtop Breach : 1.4 Otherwise(Piping Failure) : 1.0의 값을 나타내고, h_b 는 댐의 붕괴 높이로서 댐의 하부붕괴지점과 상부붕괴 지점간의 높이(m)를 나타내고, V_w 는 댐을 지나간 체적(m^3)을 나타내고, t_f 는 붕괴 시간을 의미한다.

3.3 Von Thun and Gillette

Von Thun and Gillette(1990)에 의해 제시된 본 방법은 댐의 붕괴 시간을 결정하기위한 방법으로 댐이 붕괴에 저항하는 경우와 저항하지 못하고 한순간에 무너지는 경우에 대하여 붕괴시간을 따로 산정하였는데, 이는 댐 붕괴 당시 평균 폭과 붕괴수위를 이용하여 댐 붕괴 시간을 결정짓는다.

$$B_{avg} = 2.5h_w + C_b \quad (29)$$

$$t_f = 0.02h_w - 0.25 - erosionresistant \quad (30)$$

$$t_f = 0.015h_w - easilyerodible \quad (31)$$

B_{avg} 댐의 붕괴되었을 때의 평균 폭(m), h_w 는 댐 붕괴시 하부로부터의 수위(m), C_b 는 저수지 크기의 함수, t_f 는 붕괴 시간을 의미한다.

Von Thun & Gillette는 t_f 산정을 위해 다른 식을 아래 식과 같이 제안하였다.

$$t_f = \frac{B_{avg}}{(4h_w + 61)} - \text{erosion resistant} \quad (32)$$

$$t_f = \frac{B_{avg}}{4h_w} - \text{easily erodible} \quad (33)$$

위 식들은 붕괴시 사면경사가 비점착성을 갖는 물질에 의해서는 1:1(h:v)로 나타내고, 점착성을 갖는 물질에 대해서는 0.33~0.5(h:v)의 사면경사비가 주어진다.

3.4 입력자료 설정

본 연구에서는 HEC-HMS 모형과 HEC-RAS 모형을 이용하여 댐 붕괴 해석을 실시하게 된다. 두 모형을 이용하여 댐 붕괴 해석을 실시하는 방법은 우선 산정되어진 가능최대강수량을 이용하여 HEC-HMS의 입력자료를 구성하게 된다. 또한 각 소유역별 속성값과 매개변수, 하도추적을 입력하여 각 지속시간별 댐 붕괴 해석을 실시하게 된다. HEC-HMS 모형으로 산정되어진 유입량 자료를 HEC-RAS 모형의 부정류 해석에 이용하여 부정류 해석시 필요한 Flow Hydrograph의 기본 입력자료로 활용하였다. 이는 미육군공병단(2005)에서 제시한 HEC-HMS 모형과 HEC-RAS 모형의 댐붕괴 해석시에 HEC-HMS 모형의 유입량자료를 이용하는 것에서 착안을 하였다. 입력되어진 유입량 자료를 이용하여 부정류 해석을 실시하고 지속시간별로 Flow Hydrograph를 작성하여 유출량을 산정한 후에 모형들간의 유출량을 비교하였다. 그림 2는 본 연구에서 사용한 방법을 간략하게 모식도로 작성한 모습이다.

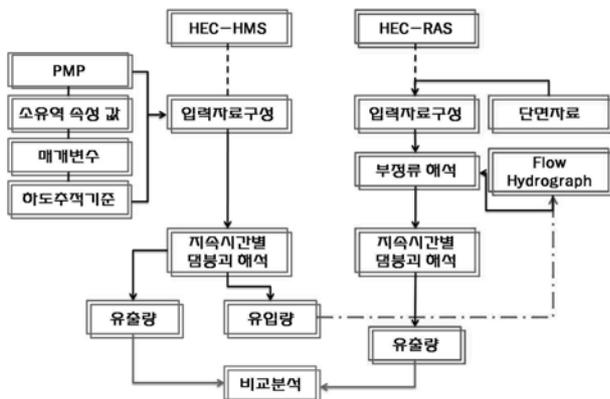


그림 2. HEC-HMS 모형과 HEC-RAS 모형의 유출량 산정 모식도

표 1. 모형 간 댐 붕괴 입력 자료 구성

	HEC-HMS	HEC-RAS
Dam Failure Method	Overtop breach	Overtopping
Trigger Method	Elevation	WS Elevation
	198m(EL)	198m(EL)
Progression Method	Linear	Linear
Break Time	1hr	1hr
Left Slope	2:1	2:1(0.2)
Right Slope	2:1	2:1(0.2)
댐 붕괴 모양 결정 가능	X	O
여수로 제한 입력 가능	△	O
단면자료 입력 가능	X	O

표 1은 HEC-HMS 모형과 HEC-RAS 모형간의 입력자료 구성과 함께 붕괴 해석시에 사용되는 주요 결정 사항 등에 대해서 기술한 내용이다. 이는 두 모형간의 입력자료가 같으며 Dam Failure Method, Trigger Method, Progression Method 등 입력 방법도 같은 조건에서 해석을 실시 하였다. 하지만 두 모형간의 차이점은 댐 붕괴 모양을 결정 짓는 것과 하도의 단면자료를 입력하는 차이를 보이고 있는데 이는 HEC-HMS 모형은 시물레이션에 적합한 모형이라고 판단되며, HEC-RAS 모형의 경우는 실제 발생하거나 발생가능한 지역에 대해서 자세한 입력자료를 제공함으로써 HEC-HMS 모형 보다는 자세한 해석을 할 수 있다고 생각된다.

4. 댐 붕괴 해석

4.1. 대상유역

본 연구의 대상유역인 소양강유역은 강원도 홍천군과 인제군을 포함하고 있다. 소양강의 하천총길이는 156.80 km이고, 유역평균경사는 28%이다. 또한 강우의 공간적 분포 특성을 고려하여 소양강유역을 세 유역으로 분할하였는데, 그림 3에서 보여 지는 바와 같이 ①인북천(923.3 km²)이고, ②내린천(1069.3 km²), ③소양호(709.9 km²)를 나타내고 있다.

소양강댐은 좌안으로는 강원도 춘천시 동면 월곡리를 위치하고 우안으로는 춘천시 신북읍 천전리를 포함한다. 소양강댐은 다목적댐으로 중심코어형 사력댐이다. 댐의 높이는 123 m이고 길이는 530 m, 댐체적은 9,591(천m³)이다.

4.2. 가능최대강수량 산정

가능최대강수량을 구하기 위해서는 가능최대강수량도를 이용하여 가능최대강수량값을 독치하는 방법과 DAD관계를 이용하여 PMP-DAD를 이용하여 산정하는 방법이 있는데 본 연구에서는 전국 PMP도 재작성 보고서(건설교통부, 2004)에서 사용한 후자의 방법을 택하였다.

가능최대강수량을 산정하기 위하여 호우로 인한 지속시간-면적별 평균강우량이 필요한데, 이 자료는 건교부(2004)에서 산정한 투사로 인한 지속시간-면적별 평균 강우량을 사용하

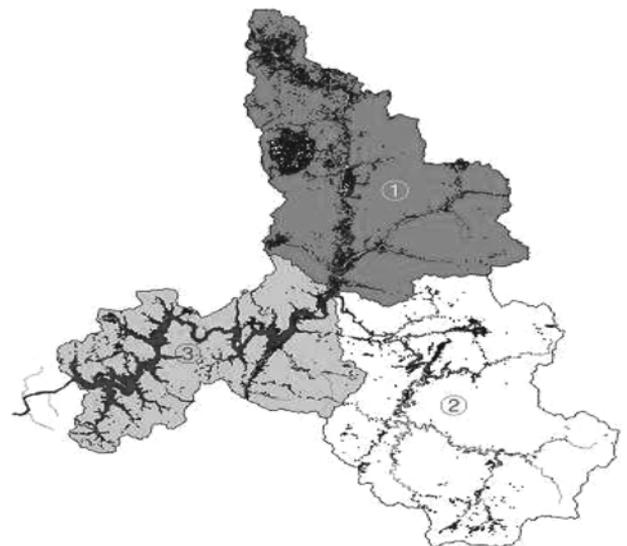


그림 3. 소양강 유역

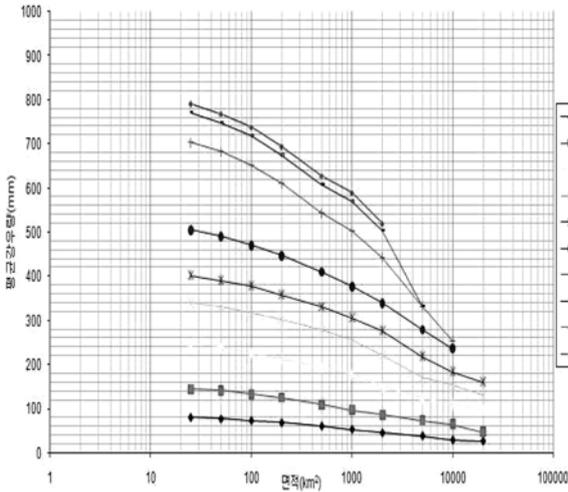


그림 4. 태풍루사의 DAD분석 결과(건교부, 2004)

였다. 그리고 그림 4에서 보여지는 것은 루사로 인한 지속 시간-면적별 평균 강우량을 사용하여 도시한 태풍루사의 DAD 분석결과 이다.

수분최대화방법을 사용하여 산정된 호우조절비를 태풍 루사의 DAD분석 결과에 적용시켜서 태풍 루사의 PMP-DAD (그림 5)을 산정하였다. 각 소유역의 PMP를 산정하는데 각 소유역별로 나온 PMP값을 시간 및 공간분포 시킨 후에 모형에 적용하였다.

시간분포방법은 Huff 방법을 사용하였고, 1분위~4분위중

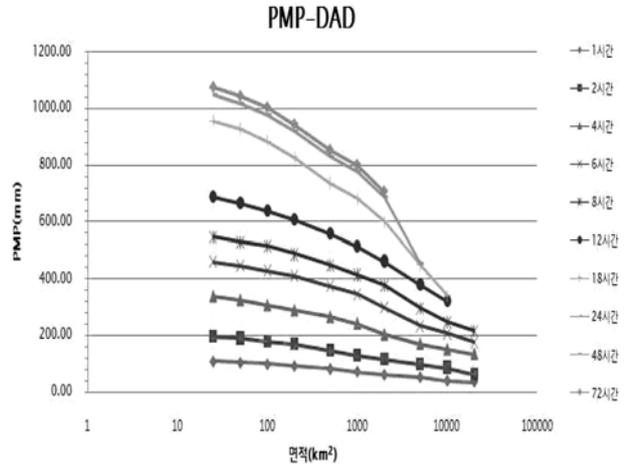


그림 5. 태풍 루사의 PMP-DAD

최빈분위인 2분위를 사용하였다. 공간분포 방법으로는 전국 PMP도 제작성 보고서(건교부, 2004)에서 제시한 내용을 바탕으로 산정하였다. 소양강유역을 인북천, 내린천, 소양호 세 유역으로 나누어서 각 유역별로 산정하였다. 또한 호우형상비는 건교부(2004)에서 제시한 형상비(장축:단축, 2:1)을 적용하였다. 그림 6는 공간분포를 고려하지 않은 각 소유역별 가능최대강수량을 나타내고 있고, 그림 7은 시간 및 공간분포가 모두 고려된 가능최대강수량을 나타내고 있다. 각 소유역별로 공간분포를 고려했을 때 유역의 크기에 따라서 값이

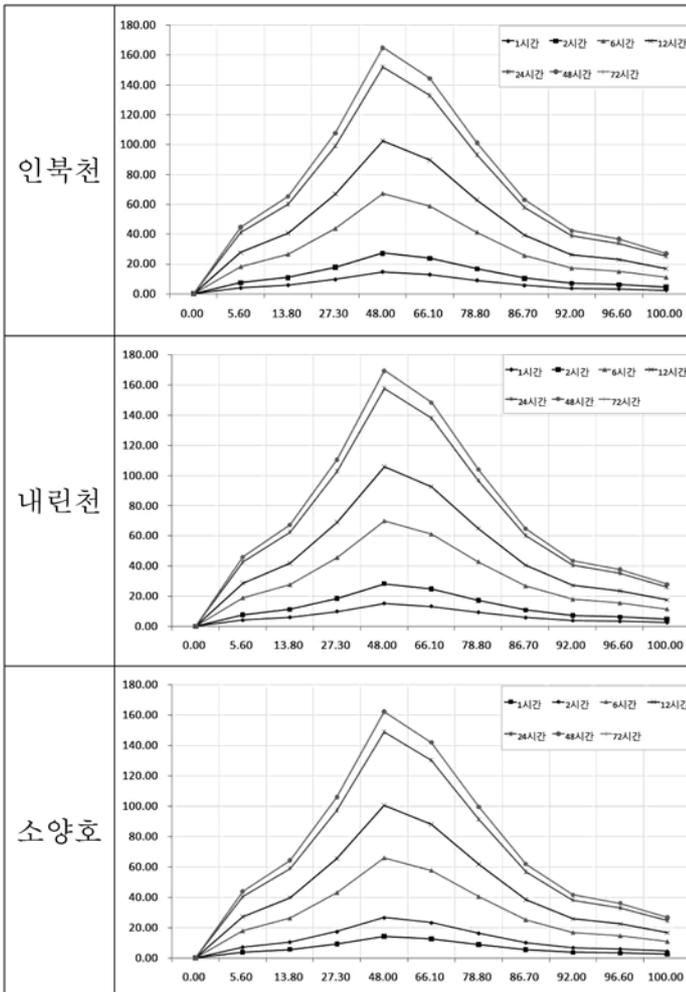


그림 6. 시간분포만 고려된 가능최대강수량

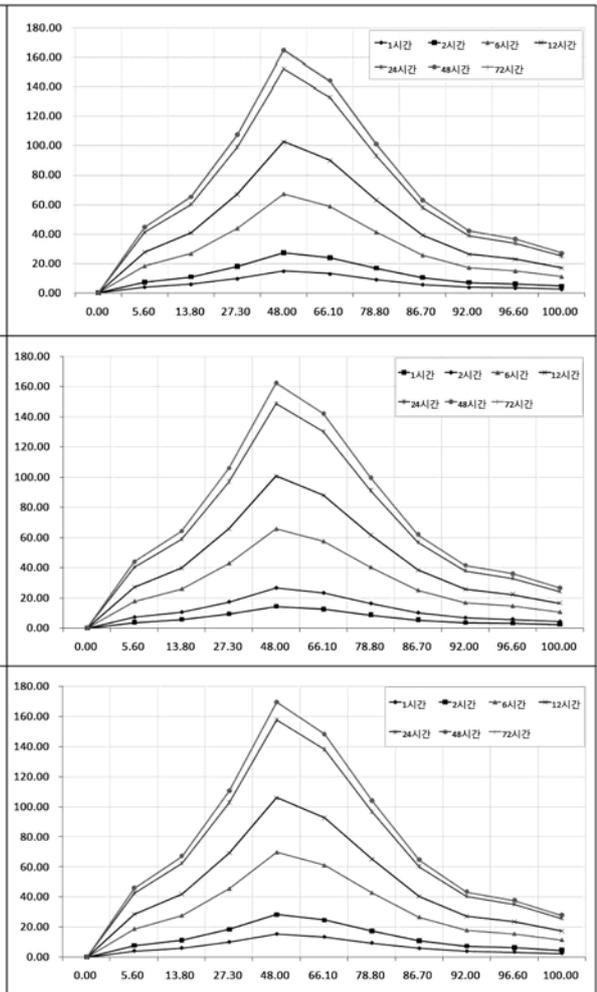


그림 7. 시간 및 공간분포가 고려된 가능최대강수량

커지거나 작아지는 것을 볼 수 있다. 이는 공간분포를 실시하였을 때에 면적이 크면 공간분포의 영향을 조금 받게 되고, 면적이 작아질수록 공간분포의 영향을 크게 받는 모습을 알 수 있다.

4.3. HEC-HMS 모형을 이용한 댐 붕괴 해석의 적용 결과

태풍 루시의 호우사상으로 산정된 가능최대강수량을 HEC-HMS에 적용하여 유출량을 산정하였으며, 유출량 산정 시 필요한 강우의 손실량 계산은 SCS방법, 하도추적은 Muskingum방법을 이용하였다. HEC-HMS를 이용하여 댐 붕괴 해석 시 HEC-HMS 내의 Dam-Break Tool을 이용하여 산정하게 된다.

태풍 루시를 이용하여 산정 되어진 가능최대강수량을 지속 시간 6 hr, 12 hr, 18 hr, 24 hr인 댐 붕괴 시나리오를 적용하여 유출량을 산정하였다. 댐 붕괴되면 유출량이 상당히 증가한 모습을 볼 수가 있는데, 그림 8~그림 11 을 보면 유출량이 유입량그래프에 비하여 상대적으로 크게 증가하는 부분이 있는데 이 부분에서 댐 붕괴가 일어났음을 알 수 있다. 또한 표 2은 각 지속시간별 첨두유출량을 나타내고 있는데 각 해당하는 유출수문곡선은 그림 8~그림 11에 나타나있다. 또한 HEC-HMS로 인해 산정되어진 소양강댐으로 유입되는

표 2. 댐 붕괴시 첨두유출량 (HEC-HMS)

강우지속시간별 첨두유출량					단위
지속시간	6	12	18	24	hr
첨두유출량	1,374	310,588.3	318,132.3	860,718.4	CMS

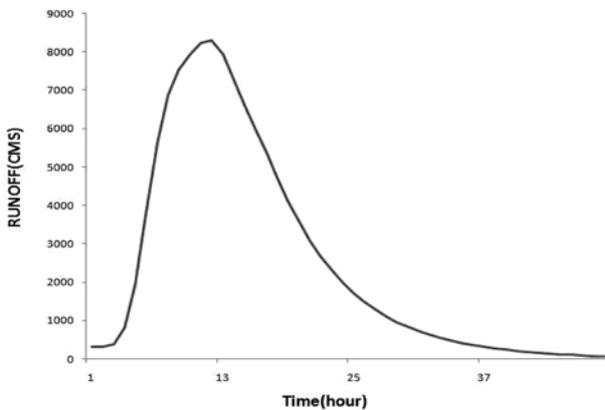


그림 8. 지속시간 6 hr 유출곡선 (HEC-HMS)

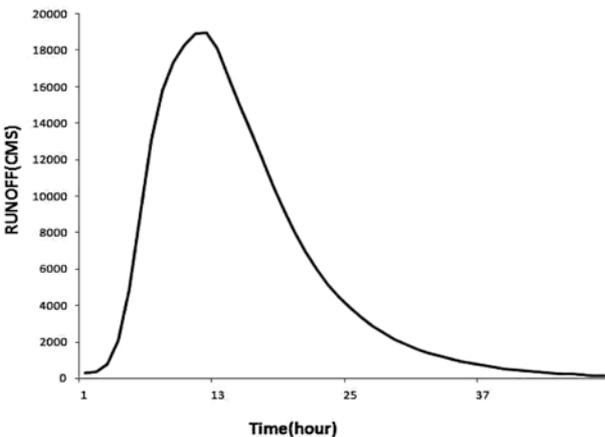


그림 9. 지속시간 12 hr 유출곡선 (HEC-HMS)

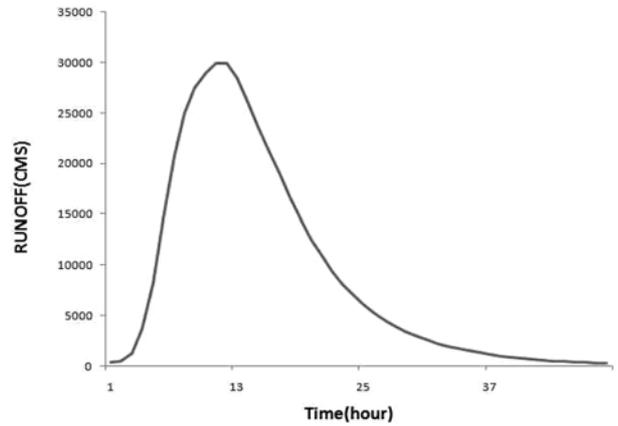


그림 10. 지속시간 18 hr 유출곡선 (HEC-HMS)

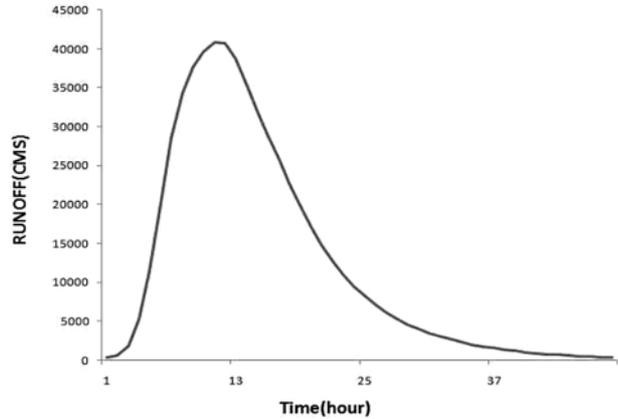


그림 11. 지속시간 24 hr 유출곡선 (HEC-HMS)

유입량 자료를 1시간 간격으로 94개의 자료를 산정한 유입량 자료를 사용하여 HEC-RAS모형에 적용하게 된다.

강우 지속시간별 유출곡선을 보면 그림 7의 경우 댐 붕괴가 일어나지 않은 모습을 볼 수 있는데 이는 6시간 지속 가능최대강수량의 경우 시간이 지남에 따라도 댐 붕괴 수위 (EL 198 m)까지 도달하지 않았기 때문에 붕괴되지 않은 모습을 보인다. 이를 통해서 댐 붕괴 모의 시 댐 붕괴 높이 (EL)가 중요한 결정사항임을 확인할 수 있다. 또한 지속시간 12 hr 가능최대강수량의 경우 유출량이 18 hr보다 크게 나왔는데, 이는 12 hr의 가능최대강수량이 발생했을 때 HEC-HMS내에 설정한 붕괴 수위까지 상승하는 시간이 오래 걸려서 그때까지 저류되어있는 유량이 순간적으로 유출되었기 때문이라고 할 수 있다.

4.4. HEC-RAS 모형을 이용한 댐 붕괴 해석의 적용 결과

HEC-HMS로 댐 붕괴 시 각 지속시간별로 댐으로 유입되는 양을 산정하여 각 지속시간별 유입량을 HEC-RAS 모형으로 부정류 해석을 실행하였다. 부정류 해석을 위해서 초기 유입량과 시작지점을 소양강댐으로 부터의 상류지역으로 정하였으며, HEC-HMS로 나눈 소유역의 모든 유출량은 소양강댐 상류로 모두 유입된다는 가정하에 산정하였다.

HEC-RAS도 HEC-HMS와 마찬가지로 댐 제원을 입력하게 되어있는데 이 제원은 HEC-HMS에서 입력한 제원과 동일한 조건으로 입력하였다. 단 HEC-HMS와 HEC-RAS의 댐 제원 입력의 가장 큰 차이점은 댐 붕괴 모습을 정할 수 있다는 것이다. HEC-HMS의 경우 댐의 붕괴 높이와 방법

표 3. 댐 붕괴시 침투유출량 (HEC-RAS)

강우지속시간별 침투유출량				단위	
지속시간	6	12	18	24	hr
침투유출량	207,714.8	275,427.5	331,090.7	413,097.8	CMS

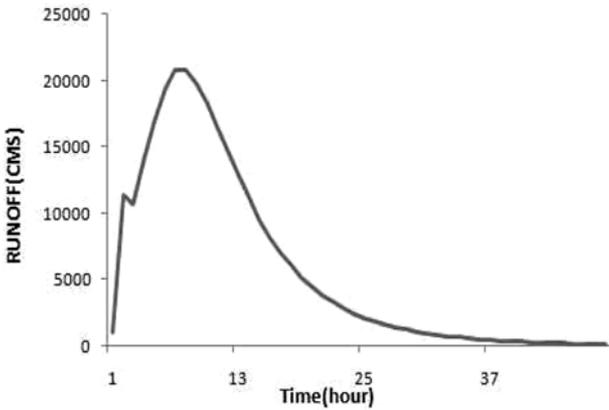


그림 12. 지속시간 6 hr 유출곡선 (HEC-RAS)

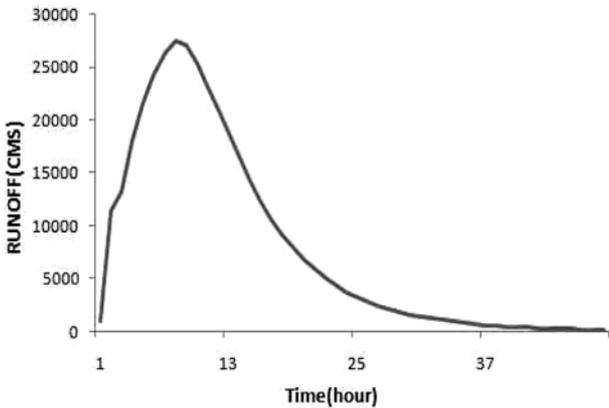


그림 13. 지속시간 12 hr 유출곡선 (HEC-RAS)

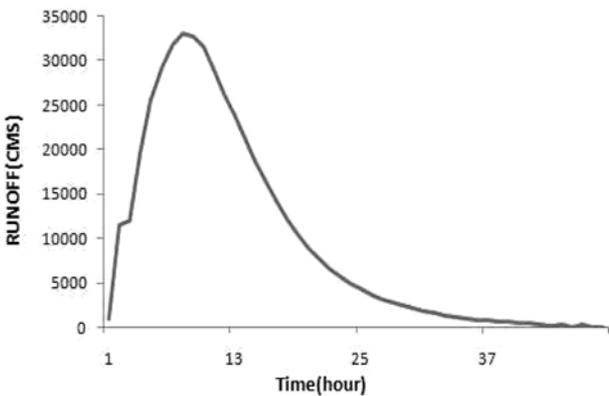


그림 14. 지속시간 18 hr 유출곡선 (HEC-RAS)

을 정하면 HEC-HMS내에서 붕괴를 시켜주는 것에 반해서, HEC-RAS의 붕괴 조건은 HEC-HMS와 비슷한 형태로 입력이 되지만 HEC-RAS는 댐붕괴 지점을 설정하여서 보다 객관적인 댐 붕괴 모습을 보여준다.

HEC-HMS로 구한 지속시간별 침투유출량을 HEC-RAS로 얻어진 댐 붕괴 후 침투유출량과 비교를 하였다. 또한 HEC-RAS에서 부정류 해석을 위하여 HEC-HMS로 산정되어진 소양강댐까지의 유입량을 지속시간별로 HEC-RAS모형에 적용하였다. 붕괴 조건의 입력은 HEC-RAS와 HEC-

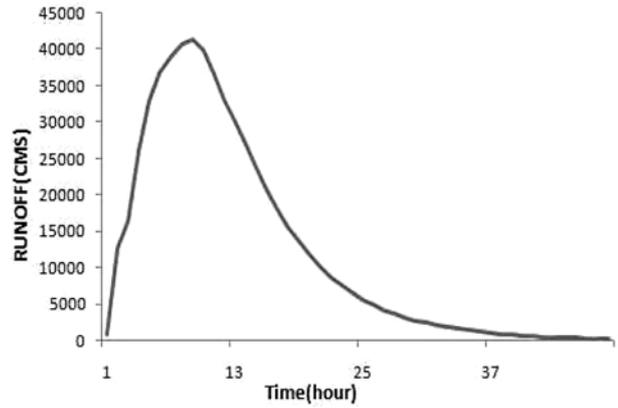


그림 15. 지속시간 24 hr 유출곡선 (HEC-RAS)

HMS모두 동일하게 입력하였고, 댐 붕괴 지점에 대해서는 두 개의 모형 모두 198 m(EL)이다.

그림 12~그림 15는 HEC-RAS를 이용하여 댐 붕괴 모의 결과로 처음 침투지점은 댐 붕괴 직후 순간적으로 유출된 유출량이다. 또한 HEC-RAS의 경우 댐 직하류의 단면마다 각각의 유출곡선을 산정할 수 있는데 본 연구에서는 HEC-HMS와 비교를 하기 위하여 댐 직하류의 유출수문곡선을 산정하였다.

4.5. 결과 및 토의

4.5.1 가능최대강수량 산정 결과

본 연구에서 실제호우를 이용하여 가능최대강수량을 산정한 것은 가능최대강수량도를 독치할 때 연구자의 주관적인 판단에 의해 독치값이 왜곡될 수 있게 되고, 2000년 이후 가장 극심한 피해를 발생한 태풍 루사의 호우사상으로 산정한 가능최대강수량을 댐 붕괴 해석에 적용하기 위함이다.

태풍 루사의 호우사상으로 산정된 가능최대강수량은 댐의 수문학적 안정성 검토 및 치수능력증대 기본계획수립 보고서(건설교통부, 2004)에서 제시한 소양강댐의 지속시간 48 hr의 가능최대강수량(810 mm)보다 인북천과 내린천의 경우(표 4) 약 13~25 mm 정도 작게 산정되었으며, 소양호의 경우에는 9 mm가 과대하게 산정되었다. 또한 소양강유역 전체를 소유역 분할을 하지 않은 상태에서 산정한 가능최대강수량의 경우 댐설계기본계획(2004)에 제시된 가능최대강수량 810 mm보다 작은 710 mm로 산정되었으며, 이러한 차이가 나는 이유는 기본계획(2004)에서 산정한 가능최대강수량의 경우 루사의 호우를 포함한 기왕의 8개호우를 소양강댐 유역에 전이시켜서 산정한 호우이지만, 본 연구는 소양강유역 3개의 소유역으로 구분하여 단일호우사상을 소유역 별로 각각 전이시켰기 때문에 산정 값에 차이가 나타난 것으로 판단된다.

표 4. 가능최대강수량의 비교

	가능최대강수량 (mm)	지속시간 (hr)	비교
기본계획(2004)	810	48	0
인북천	797	48	-13
내린천	785	48	-25
소양호	819	48	+9

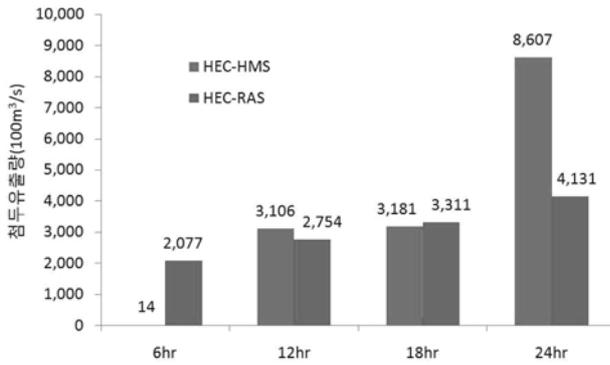


그림 16. HEC-HMS와 HEC-RAS의 첨두유출량

4.5.2 HEC-HMS와 HEC-RAS의 댐 붕괴 해석 결과의 비교분석

HEC-HMS와 HEC-RAS 두 모형으로 댐 붕괴 해석을 실시한 결과 유출량은 지속시간(6 hr~24 hr)에 따라 큰 차이를 나타낸다(그림 16 참고). HEC-HMS의 모의 결과 지속시간 6 hr에서는 저수위가 댐 붕괴수위에 도달하지 않아 여수로에 의한 방류만 이루어진 것으로 판단된다. 지속시간 12 hr~24 hr에서는 저수위가 댐 붕괴수위에 도달하여 유출량이 급격히 증가한 것을 확인할 수 있다. 하지만 HEC-RAS의 모형의 경우에는 6 hr~24 hr의 모든 지속시간에 대해서 댐이 붕괴를 일으켰다. 지속시간 6 hr에서 HEC-HMS는 댐 붕괴가 발생하지 않았는데 HEC-RAS에서는 댐 붕괴가 발생한 이유는 여수로에 대한 수치해석 상의 차이로 인한 것으로 판단된다. HEC-RAS의 경우 흐름저항과 같은 에너지 손실의 발생으로 인해 방류가 효과적으로 이루어지지 못하고 저류지 수위가 증가하게 되어 댐 붕괴 수위에 도달하게 됨을 확인할 수 있었다.

그림 16에서 확인할 수 있듯이 HEC-RAS의 경우는 지속시간이 증가함에 따라 댐 붕괴에 의한 유출량이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 하지만 HEC-HMS의 결과에서는 지속시간 12 hr, 18 hr의 결과가 HEC-RAS의 결과와 유사한 것에 비해서 지속시간 24 hr에서 급격한 유출량의 증가가 발생하고 있는 것을 확인할 수 있다. 여기에서, 댐 붕괴에 대한 HEC-HMS와 HEC-RAS의 해석상의 차이를 확인할 수 있었다. HEC-HMS의 경우 설정한 댐 붕괴수위에 도달하면 임의로 댐체 전체가 붕괴되는 것으로 모의하는 반면, HEC-RAS의 경우에는 댐체의 붕괴 형상을 입력하여 모의할 수 있으므로 실제와 가까운 댐 붕괴 상황을 재현할 수 있는 것으로 판단되었다. 또한 Christopher(2005)는 HEC-HMS는 HEC-RAS보다 간단하고 보다 빠른 시간내에 댐 붕괴해석을 할 수 있지만, 과대추정 될 수 있는 단점이 있다고 설명하였다.

따라서, HEC-HMS 보다는 HEC-RAS가 댐 붕괴 상황에 더욱 적용성이 있음을 확인할 수 있었다. 하지만 HEC-HMS는 신속한 모의를 필요로 하는 상황에서 자료 구축이 용이함으로 댐 붕괴로 인해 발생하는 대략적인 유출량을 모의하는데 적용성이 있을 것으로 판단된다.

4.5.3 댐 붕괴해석 사례 비교

본 연구에서 산정한 유출량의 값들을 실제 댐이 무너졌을

경우와 비교해보았는데 2004년 5월 22일에 무너진 러시아의 서쪽 Vladivostok에 위치한 Partizansk 댐이 내부의 전력시설이 폭발을 일으켜 무너졌을 때 실제 댐이 붕괴하여 유출용적을 측정하였는데 이 값이 160,000 m³으로(Robinson, 2004) 본 연구에서 산정한 최대 유출용적인 2,300,000 m³에 비해 적은 값을 보였다. 실제 무너진 댐의 규모자체가 연간 1,000,000 m³ 정도의 양을 광산개발에 투입할 수 있는 공업용댐으로 소양강댐의 규모보다 약 10배정도 작은 규모의 댐이다. 실측자료로서 정확한 유출량 자료를 얻지 못하였지만 두 댐의 유출용적을 규모별로 선형보간을 했을 때에는 실측 자료와 거의 비슷한 자료로 판단된다. 또한 임의의 댐 붕괴 자료로서 1986년도에 열린 금강산댐의 좌담내용에서는 최영박(환경미디어 자료 인용, 2002)은 금강산댐을 주제로한 좌담에서 금강산댐이 붕괴했을 경우(완파시) 초당 2,300,000CMS가 흘러나온다는 좌담내용을 밝힌 바가 있다. 본 연구에서 산정한 유출량 값보다는 큰 값을 나타냈지만, 본 연구에서는 완파가 아닌 부분 파괴로 인해서 댐이 붕괴하는 모습을 모의하였기 때문에, 완파시의 값과는 차이를 나타낸다고 할 수 있다.

그리고 같은 HEC-RAS 모형을 이용하여 댐 붕괴 해석을 이용한 미육군공병단에서는 하와이의 Kapahi 댐을 HEC-HMS와 HEC-RAS 모형을 연동하여 붕괴해석(HEC, 2007)을 실시하였는데 Kapahi의 유역면적이 소양강유역의 전체 면적보다 굉장히 작은 소유역(약 100배이상 차이)에 대해서 붕괴모의를 실시하였다. Kapahi 댐이 붕괴했을 때의 유출량이 약 8,500CMS로 나타났는데 이는 유역의 규모(약 6.97 km²)로 보았을 때 엄청나게 큰 유출량으로서 가능최대강수량을 사용한 것이 아닌 기왕의 최대호우로 붕괴 해석을 실시하였다.

여러 붕괴 자료를 보았을 때에 본 연구에서 구한 값들이 과대추정한 모습을 보여질 수도 있지만, 실측자료와 비교해 보았을 때에 적절한 값이 추정된 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 태풍 루사(2002년)의 강우사상을 이용하여 가능최대강수량을 산정하였으며, 소양강댐 유역을 3개의 소유역으로 구분하여 가능최대강수량을 시·공간적으로 분포시켰다. 그리고 소양강 댐이 붕괴되는 상황을 가정하고 HEC-HMS와 HEC-RAS 모형을 이용하여 댐 붕괴 해석에 대한 모형의 적용성을 검토하였다.

댐 붕괴 수위를 소양강댐의 계획홍수위로 설정하고 HEC-HMS와 HEC-RAS의 댐 붕괴 틀에 적용하여 첨두유출량을 비교하였다. 댐 붕괴 상황에 대한 적용 결과 HEC-HMS와 HEC-RAS의 해석상의 차이를 확인할 수 있었고 HEC-HMS 모형보다는 HEC-RAS 모형이 댐 붕괴 해석에 대한 적용성이 우수함을 확인할 수 있었다. 하지만 HEC-HMS 모형도 자료 구축이 용이하다는 측면에서 신속한 모의를 필요로 하는 댐 붕괴 상황에서 발생하는 대략적인 유출량을 모의하는데 적용성이 있을 것으로 판단된다.

따라서, 두 모형을 연동해서 이용할 경우 대상유역에 대해서 보다 정확하고 용이한 해석을 가능하게 할 수 있다고 판단된다. 그리고 댐 붕괴 해석시 중요한 인자인 댐 유입량의

정량적인 산정방법(가능최대강수량에 의한 가능최대홍수량의 산정)을 보완하고 댐의 붕괴에 따른 하류홍수과의 거동에 관한 연구가 더욱 진행된다면 댐 붕괴에 대한 좋은 연구 성과를 기대할 수 있을 것이다.

참고문헌

건설교통부(1988) 제3권 한국가능최대강수량산정, 수자원관리기법 개발 연구조사보고서

건설교통부(1999) 한국 확률강우량도 작성, 1999년도 수자원관리 기법개발연구조사 보고서, 제1권.

건설교통부(1999) 한국의 가능최대강수량추정, 1999년도 수자원관리 기법개발연구조사 보고서, 제2권.

건설교통부(1999) 지역적 설계 강우의 시간적 분포, 1999년도 수 자원관리기법개발연구조사 보고서, 별책 제2권.

건설교통부(2004) 전국 PMP도 재작성 보고서.

건설교통부·한국수자원공사(2004) 댐의 수문학적 안정성 검토 및 치수능력증대 기본계획수립 보고서.

권지혜, 김남원, 허준행, 신은우(2004) 가능최대홍수량 산정 절차 변경에 따른 결과 분석, 한국수자원학회 04 학술발표대회 논문집, 한국수자원학회, pp. 599-603.

권지혜, 허준행, 박세훈, 규근준(2004) 기존댐의 홍수방어능력 평가 - 수문학적 접근을 중심으로, 2004 대한토목학회 정기학술대회, 대한토목학회, pp. 833-838.

김남원, 이정은(2004) 강우분포와 강우-유출 매개변수에 따른 가능최대홍수량의 변화, 한국수자원학회 04 학술발표대회 논문집, 한국수자원학회, pp. 287-291.

김남원, 원유승(2004) 호우이동을 고려한 DAD 분석방법, 한국수 자원학회논문집, 한국수자원학회, 제37권, 제5호, pp. 437-448.

김남원, 원유승(2004) 설계호우의 공간분포 분석 방법, 한국수자 원학회 04 학술발표대회 논문집, 한국수자원학회, pp. 604-609.

김남원, 이정은, 신홍섭(2005) PMF 산정방법에 따른 비교, 한국 수자원학회 05 학술발표대회 논문집, 한국수자원학회, pp. 710-714.

김남원, 원유승(2004) 최근의 기상변동과 PMP의 변화, 한국수자 원학회 04 학술발표대회 논문집, 한국수자원학회, pp. 1203-1207.

이상호, 이길성(1992) 소양강댐 가장 파괴파의 수치모의, 대한토 목학회논문집, 대한토목학회, 제12권 제2호, pp. 109-122.

최규현, 한건연(2005) 댐 붕괴 해석을 위한 2차원 홍수범람모형 의 개발 : I. 이론 및 모형의 검증, 대한토목학회논문집, 대 한토목학회, 제25권 제2B호, pp. 135-142.

최규현, 한건연(2005) 댐 붕괴 해석을 위한 2차원 홍수범람모형 의 개발 : II. 적용 예, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제25권 제2B호, pp. 143-149.

최병규, 강태호, 정요한, 고재영, 김강모(2008) 댐 붕괴 홍수류해 석을 위한 1차원 모형의 비교 연구, 한국수자원학회 08 학 술발표대회 논문집, 한국수자원학회, pp. 1765-1769.

금강산댐 붕괴우려, 이미 예고됐다, 환경미디어, 2002년 5월(제 161호).

허천(2005) 소양강댐, 정말안전한가?, 2005. 정기국회 국정감사 자료집.

Brufau, P. and Garcia-Navarro, P. (2000) *Two-dimensional dam break flow simulation*, International Journal of Numerical Methods in Fluids, Vol. 33, Issue 1, pp. 35-57.

Christopher R.G. (2005) *Dam Break Modeling for Tandem Reservoirs-a Case Study using HEC-RAS and HEC-HMS*, America Society of Civil Engineering.

Clark, C.O. (1945) *Storage and The Unit Hydrograph*, American Society of Civil Engineers, Vol. 2261.

Francis, K.S. and John, F.M. (1983) *Probable Maximum Precipitation and Snowmelt Criteria for Southeast Alaska*, National Weather Service, Silver Spring.

Francis, P.H. and John, T.R. (1980) *Seasonal Variation of 10-Square-Mile Probable Maximum Precipitation Estimates, United States East of the 10th Meridian*, National Weather Service, Washington D.C.

Hansen, E.M. and Scheriner, L.C.(1978) *Application of Probable Maximum Precipitation Estimates - United States East of the 105th Meridian*, Hydrometeorological Report No. 52, National Weather Service, Washington D.C.

Hydrologic Engineering Center (HEC, 2007) *Dam Break Analysis for Upper Kapahi Reservoir(HI00013)*, Kaua'i Country, Hawai'i, US Army Corps of Engineers.

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

Louis, C.S. and John, T.R. (1978) *Probable Maximum Precipitation Estimates, United States East of the 105th Meridian*, Hydrometeorological Report No. 51, National Weather Service, Washington D.C.

Natural Resources Conservation Service (NRCS, 1986) *Urban Hydrology for Small Watersheds*, Technical Release 55, USDA.

National Research Council of Canada (NRCC, 1989) *Hydrology of Floods in Canada : A Guide of Planning and Design*, Edited by Watt, W. E.

Paul Robinson (2004) *Partizansk Coal Ash Dam Break and Spill - Observation*, Southwest Research and Information Center.

Garcia-Navarro, Fras, A. and Villanueva, I. (1999) *Dam-break flow simulation : some results for one-dimensional models of real cases*, Journal of Hydrology 216, pp. 227-247.

U.S. Soil Conservation Service (US/SCS, 1972) *Hydrology, Section 4 : National Engineering Handbook*, U.S. Department of Agriculture.

U.S. National Weather Service (1980) *Comparison of Generalized Estimates of Probable Maximum Precipitation With Greatest Observed Rainfall*, NOAA, Technical Report NWS 25, Washington, D.C.

(접수일: 2009.1.22/심사일: 2009.2.26/심사완료일: 2009.6.16)