

댐 안전성 평가를 위한 위험도 기법의 적용

Risk based Dam Safety Assessment

이종석* · 한건연**

1. 서론

지구 온난화로 인한 기상변화는 댐유역에서 강수량과 강수량의 변동을 가져왔다. 경제의 발전과 인구의 증가로 인한 도시의 팽창과 거주지역의 확대로 인해 댐 상·하류부가 개발되었고, 이로 인해 강수 유출량과 단위시간당 댐으로의 강수 유입량이 증가되었다. 이와 같이 현재 운용되고 있는 많은 기존의 댐들이 댐 건설 당시와는 상당히 변화된 환경하에서 운영되고 있으며, 댐파괴와 같은 극한상황에서 예상되는 경제적 피해와 인명손상은 댐 건설 당시에 비해 증가되었다. 따라서, 현재 운용되고 있는 댐들에 대해 요구되는 안전성은 이들 댐들의 건설 당시 설정된 안전성 기준과는 달리 보다 높은 댐 안전성이 요구되어지고 있다. 하지만, 한정된 재정범위 안에서 댐으로 인한 위험성을 줄이고 강화된 댐 안전성 기준에 맞추기 위해서는, 이 두가지 요소를 동시에 비교 분석할 수 있는 새로운 방법이 필요하다. 위험도 기법은 댐의 위험성을 확률적인 방법을 이용하여 정량화하고, 댐의 위험성을 줄이기 위해 제시된 대안들에 대해서는 공학적인 측면과 경제적인 측면에서의 평가를 가능하게 한다. 위험도 기법을 적용함으로써 댐 안전성 평가자들은 각 대안들에 대한 수행능력을 공학적인 면에서 평가를 할 수 있고, 댐 정책 결정자들은 그들의 투자에 대한 대안들의 수행능력의 이해 뿐 아니라 경제적인 효율성까지 검토가 가능하다. 그러므로 댐 정책 결정자들은 이들 대안들에 대해 보다 나은 결정을 할 수 있고, 한정된 재정범위 안에서 투자의 우선순위를 결정할 수 있게 된다.

2. 댐 안전성 평가를 위한 위험도 기법

댐 안전성 평가분야에 있어 위험도 기법은 기존의 댐 안전성 평가 방법을 보완하고 경제적 분석을 통하여 댐이 지니고 있는 위험성을 효율적으로 줄이기 위해 도입되었다. 위험도 기법에서 '위험성(risk)'이란 적용분야에서 조금씩 다른 의미를 지니고 있지만, 일반적으로 경제적 손실, 인명손상이나 구조물의 파괴 등의 바람직하지 않은 사건들이 발생할 확률이나 가능성을 의미한다.

* 미국 Utah 주립대학교 Post-Doc.

** 경북대학교 토목공학과 교수

댐 안전성 평가분야에서 위험성은 댐 구조물의 파괴확률이나 댐의 파괴로 인한 하류부에서의 환경적, 경제적 피해나 인명손상 등이 발생할 가능성을 의미한다. 따라서 댐의 위험성은 이러한 바람직하지 않은 사건들의 발생확률과 이로 인한 예상되는 피해의 정도로서 예측되어질 수 있다. 댐의 위험성 예측은 다음과 같은 네가지의 단계를 통해 이루어진다. 1) 위험성의 발견(risk identification), 2) 위험성의 예측(risk estimation), 3) 위험성의 평가(risk evaluation), 4) 위험성의 대처(risk treatment). 이와 같은 네 가지 단계를 체계적으로 고려하여 댐의 위험성을 밝히기 위해 본 연구는 event tree 모델을 이용하였다. Event tree 모델은 댐 파괴를 가져올 수 있는 모든 발생 가능한 사건들과 이들로 인한 결과들을 도식적으로 나타낼 수 있어 이해가 용이하고 댐과 같이 다양한 사건들과 결과들을 고려하여 위험성을 계산해야하는 경우에 있어 매우 유용한 방법이다.

3. 적용예

본 연구는 위험도 기법을 이용하여 Arizona주 중서부에 위치해 있는 Alamo 댐에 대해 안전성 평가를 실시하였다. Alamo 댐은 홍수조절, 수자원 보호와 공급, 그리고 수상여가 활동의 지원을 위해 미공병단에 의해 1964년 흙댐으로 건설되었으며, 283ft의 제방고와 975ft의 제방폭을 가지고 있다. 댐 제방의 높이는 1265ft이며, 여수로의 높이는 1235ft이다. 비록 Alamo 댐이 구조적인 문제점을 가지고 있지는 않지만, 최근에 새로 예측한 standard project flood(SPF)와 probable maximum flood(PMF)가 설계 기준값보다 증가된 것으로 밝혀졌다. 특히, PMF의 발생시 20ft의 월류가 발생할 것으로 예측되었다. 따라서, 이러한 극한 홍수의 발생시 월류로 인한 댐 붕괴 위험성과 밝혀지지 않은 새로운 위험성에 대처하기 위해 댐 안전성 평가를 실시하게 되었다.

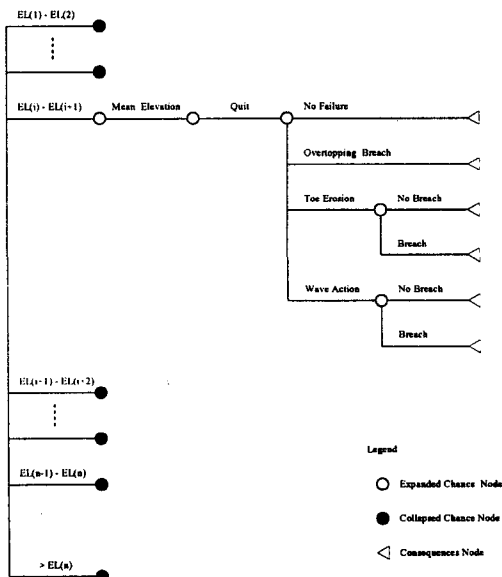


그림 1. Event tree model for flood

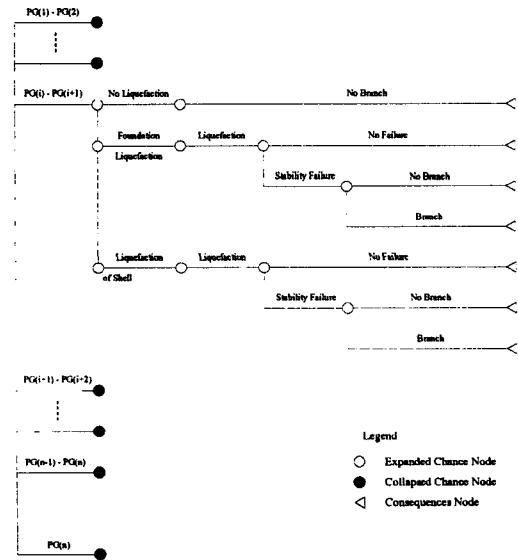


그림 2. Event tree model for earthquake

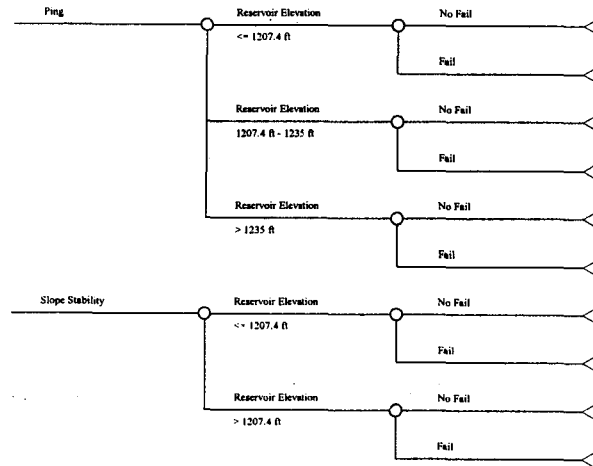


그림 3. Event tree model for normal reservoir operation

Alamo 댐의 안전성 평가에서는 세 가지 초기조건(홍수, 지진, 정상적인 댐 운영 상태)이 고려되었으며, 이들 조건들 하에서 발생 가능한 사건들을 현장답사와 Alamo 댐 건설 기록, 수문학적 자료를 바탕으로 결정하였다. 이들 예측된 사건들을 바탕으로 각 초기조건에 대한 event tree 모델을 그림 1~3과 같이 구성하였고, 발생 가능성에 따라 서로 다른 확률값들이 주어졌다. 이들 예측된 사건들에 대한 확률값은 다양한 상황 하에서 댐의 수행능력에 대한 모의 실험, 컴퓨터 시뮬레이션 결과, 기존의 자료와 연구(McCann et al., 1985, Hatem, 1985, Foster et al., 1998)를 이용하였으며, 필요시 전문가적 지식과 경험을 바탕으로 그들에 대한 값을 결정하였다.

홍수에 대한 초기조건은 침투 저수위고와 연간 초과확률의 관계를 이용하여 나타냈다. 지진에 대한 초기조건은 침투 지반 입자가속도와 재현기간의 관계를 이용하였으며, 정상적인 댐 운영 상태에 대해서는 저수위고와 지속기간의 관계를 이용하여 나타냈었다.

댐 파괴시 예상되는 경제적 피해와 인명손상의 예측을 위해, 댐 파괴 모의, 홍수파 추적, 그리고 하류부 홍수 범람 구역의 결정은 NWS DAMBRK 모델을 이용하여 결정하였다. 댐 파괴 홍수파로 인한 하류부의 피해를 예측하기 위해, 댐 하류부 구역에 대한 경제분석 연구자료와 센서스 자료(1998)를 이용하였다. 미국 비상기획청(FEMA)의 홍수파의 범람수심과 경제적 피해관계를 이용하여 하류부의 피해를 예측하였으며, DeKay McClelland(1993)의 연구 모델을 통해 댐 파괴 홍수파로 인한 인명손상을 산정하였다.

4. 위험도 기법 적용의 결과

본 연구에서 고려된 Alamo 댐에서 발생 가능한 사건들은 월류, 댐 상단부 침식, 댐 하단부 침식, 액화현상, 파이프핑 등이다. 이들 사건들로 인한 Alamo 댐의 위험성을 줄이기 위해 19가지의 대안들이 개발되었으며, 이들 개발된 대안들은 다음과 같이 네 가지로 분류된다. 1) partial flood fixes, 2) complete flood fixes, 3) earthquake and internal fixes, 4) combined flood, earthquake, and internal fixes.

그림 1~3의 event tree 모델들과 예측된 사건들의 발생 확률과 하류부의 피해를 바탕으로 Alamo 댐의 위험도가 계산되었다. Event tree 모델을 이용한 위험도의 예측은 현 Alamo 댐의 상태에 대해서 뿐만 아니라 19가지의 대안들의 적용시에 대해서도 이루어졌다.

고려된 세 가지의 초기조건들 하에서 발생 가능한 사건들로 인한 현 Alamo 댐의 댐 파괴확률은 $4.67 \times 10^{-6}/\text{year}$ 이다. 특히 홍수로 인한 Alamo 댐의 파괴확률은 $1.89 \times 10^{-6}/\text{year}$ 이고, 지진으로 인한 파괴확률은 $6.11 \times 10^{-7}/\text{year}$, 정상적인 댐 운영상태에서 파괴 확률은 $2.17 \times 10^{-6}/\text{year}$ 인 것으로 예측되었다. 또, 예측된 Alamo 댐의 파괴확률은 USBR 댐 안전성 기준(Tier2: $\times 10^{-4}/\text{year}$) 보다 낮으므로, 현 Alamo 댐은 구조적 측면에서는 안전한 것으로 판단된다. 하지만, Alamo 댐의 안전성을 지속적으로 유지하고, 댐 파괴시 예상되는 재산상의 피해나 인명손상 등 하류부의 위험성을 줄이기 위해서 제시된 다양한 대안들에 대해서도 평가가 이루어졌다. Alamo 댐의 위험성을 줄이기 위해 제시된 대안들은 댐 파괴 위험성 측면과 경제적인 관점에서 평가되었으며, 이러한 평가도 개발된 event tree 모델을 이용하여 이루어졌다. 하지만, 각 대안들의 적용으로 인해 예측된 사건들의 발생 가능성이 감소됨에 따라 줄어든 확률값을 바탕으로 댐 위험성이 계산되었다. Partial flood fixes에서 가장 작은 파괴확률을 가지는 대안은 FR12($2.90 \times 10^{-6}/\text{year}$)이고, 가장 큰 파괴확률은 가지는 대안은 FR10($4.67 \times 10^{-6}/\text{year}$)이다. Complete flood fixes에서는 대안들에 대한 비용은 서로가 다른 반면 모든 대안들이 같은 파괴확률을 가지는 것으로 확인되었다. Earthquake and internal fixes에서는 ER1과 ER2가 같은 정도의 파괴확률값을 ($1.94 \times 10^{-6}/\text{year}$) 가지며, ER3의 파괴확률은 ($4.06 \times 10^{-6}/\text{year}$)이다. Combined flood and earthquake and internal fixes에서는 FER1과 FER2는 상대적으로 매우 작은 파괴확률값($0.0604 \times 10^{-6}/\text{year}$ 와 $0.0624 \times 10^{-6}/\text{year}$)을 보여준다. 댐 파괴 확률값의 측면에서는 FER1이 가장 작은 값을 가지지만 가장 큰 비용이 동반된다. 따라서, 다양한 대안들에 대한 평가는 파괴확률의 측면에서만 아니라 경제적인 효율성 측면이나 인명손상의 측면에서도 평가되어야만 할 것이다.

Alamo 댐 하류부 지역은 미개발 상태이며, 댐의 파괴로부터 영향을 받을 수 있는 첫 지역이 댐으로부터 35 mile(56 km) 밖에 위치해 있다. 또 잘 준비되어 있는 경보체제와 긴 홍수파 전달시간으로 인해 댐 파괴시 상당히 긴 경보 발생 시간이 주어지므로 인명손상은 없는 것으로 예측되었다. 따라서, Alamo 댐의 위험성을 줄이기 위해 제시된 대안들의 평가는 경제적인 측면에서 이루어졌다. 경제적 평가를 위해 각 대안들에 대한 위험도 비용의 증분(\$/year), 총비용(\$/year), 대안의 적용으로 발생하는 이익(\$/year), 그리고 이익대 비용의 비율(B/C)이 계산되었다. 위험도 비용의 증분치는 댐 파괴시와 비파괴시 예상되는 하류부의 연간 피해액의 차이로 결정하였으며, 총비용은 위험도 비용의 증분치와 연간 대안 건설비용의 합으로 계산했다. 연간 대안 건설비용은 예측된 건설비용에 연 6.876%의 이자율과 100년 사업기간을 바탕으로 계산하였다. 또, 대안들의 실행시 발생하는 이익은 현재 댐에 대한 위험도 비용의 증분치와 대안들에 대한 위험도 비용의 증분치의 차로 결정하였다.

각 대안들에 경제적인 평가에 대한 결과는 표 1에 주어져 있다. Partial flood fixes에서는 FR15가 가장 적은 총비용(\$97,616/year)이 드는 반면, FR12는 가장 큰 총비용(\$581,631/year)이 든다. 또 가장 좋은 이익대 비용의 비율을 보여주는 대안은 FR14($3.56E-03$)이고, FR10은 가장 낮은 비율

값(2.85E-06)이 든다. 특히 FR14와 FR16(2.47E-03)은 다른 분류의 대안들에 대해서도 상대적으로 높은 이익대 비용비율을 가진다. 따라서, FR14와 FR16은 Alamo 댐이 지니고 있는 위험성에 가장 경제적으로 대처할 수 있는 효율적인 대안들이다. Complete flood fixes에서는 FR3b가 가장 낮은 총비용(\$896,190/year)을 차지하며, FR8a가 가장 큰 총비용(\$2,013,074/year)이 든다. 이익대 비용의 비율에서는 FR3b(8.70E-04)가 가장 크며, FR8a(3.88E-04)가 가장 작다. Earthquake and internal fixes에서는 ER2가 가장 작은 총비용(\$954,751/year)을 가지며, ER1이 가장 큰 총비용(\$2,584,948/year)을 가진다. 이익대 비용의 비율에서는 ER2(2.22E-03)가 가장 크며 ER3(8.98E-05)가 가장 작다. Combined flood and earthquake and internal fixes에서는 FER2가 가장 작은 총비용(\$1,618,236/year)과 가장 큰 이익대 비용의 비율(1.79E-03)을 차지한다.

표 1. Alamo 댐 위험평가 결과

종류	코드	비용 (\$M)	파괴확률 (10 ⁻⁶ /yr)	증분 위험 비용 (\$/yr)	재개발 비용 (\$/yr)	총비용 (\$/yr)	수익 (\$/yr)	수익 대 비용 비율
현재 댐	E		4.67	2,946		2,946		
부분 홍수 피해 방지	FR10	1.59	4.67	2,945.7	102,413	105,359	0.3	2.85E-06
	FR15	1.47	4.65	2,932	94,684	97,616	14	1.43E-04
	FR14	2.61	3.22	2,339	168,113	170,421	607	3.56E-03
	FR16	3.80	3.22	2,336	244,761	247,097	610	2.47E-03
	FR12	9.03	2.90	2,212	581,631	583,843	734	1.26E-03
홍수 피해 방지	FR1	13.92	2.78	2,166	896,600	898,766	780	8.68E-04
	FR8a	31.22	2.78	2,165	2,010,909	2,013,074	781	3.88E-04
	FR8b	18.64	2.78	2,165	1,200,620	1,202,785	781	6.49E-04
	FR2a	21.35	2.78	2,166	1,375,173	1,377,339	780	5.66E-04
	FR3a	14.07	2.78	2,166	906,262	908,428	780	8.59E-04
	FR3b	13.88	2.78	2,166	894,024	896,190	780	8.70E-04
	FR3c	13.96	2.78	2,164	899,176	901,340	782	8.68E-04
	FR6	18.32	2.78	2,166	1,180,008	1,182,174	780	6.60E-04
지진과 내부 붕괴 피해 방지	ER1	47.86	1.94	824	3,082,707	3,083,531	2,122	6.88E-04
	ER2	14.81	1.94	825	953,926	954,751	2,121	2.22E-03
	ER3	40.09	4.06	2,714	2,582,234	2,584,948	232	8.98E-05
홍수, 지진, 내부 붕괴 피해 방지	FER1	48.52	0.0604	44	3,126,216	3,126,260	2,902	9.28E-04
	FER2	25.12	0.0624	46	1,618,190	1,618,236	2,900	1.79E-03

19가지의 모든 대안들에 대해서는 FER1은 가장 큰 연간 대안 건설비용(\$3,126,216/year)과 총비용(\$3,126,260/year)을 가지지만, 가장 작은 위험도 비용의 증분치(\$44/year)를 가진다. FR10은 가장 큰 위험도 비용의 증분치(\$2,925.7/year)를 가진다. 따라서 FR10은 댐 파괴와 비파괴가 가장 큰 차이를 보여주는 대안임을 알 수 있다. 가장 작은 총비용 (\$97,616/year)을 가지는 대안은 FR15이며, 가장 큰 이익대 비용의 비율 (3.56E-03)을 보이는 대안은 FR14이다.

5. 결론

오늘날 댐 안전성 평가는 단순한 구조적 문제점뿐만 아니라 지진이나 홍수와 같은 극심한 자연적인 재해 하에서 댐의 수행능력과 하류부에 미치는 영향 등 다양한 평가가 요구됨에 따라서 댐 안전성 평가 방법은 더욱 복잡하게 변화되었다. 위험도 기법을 적용함으로써 모든 발생 가능한 상황들에 대해 체계적으로 댐 파괴 위험성을 구할 수 있었고, 댐의 위험성을 줄이기 위해 제시된 각 대안들에 대해서는 감소된 위험성의 비교뿐만 아니라 경제적 효율성 면에서의 평가도 가능하였다. 위험도 기법의 장점은 기존의 댐 안전성 평가 방법들을 보완하고, 댐 정책 결정자들이 보다 쉽게 댐의 위험성을 파악할 수 있게 도와준다. 따라서, 댐 정책 결정자들은 위험도 기법의 적용 결과를 바탕으로 투자시 예상되는 이익을 보다 분명하게 이해하고, 제한적인 재정적인 범위 안에서 투자의 우선 순위를 결정할 수 있을 것이다. 또, 댐 위험성을 효율적으로 줄일 수 있는 대안들에 대해 자금과 자원을 집중함으로써 댐이 지니고 있는 위험성들을 합리적으로 줄여 나갈 수 있을 것이다.

6. 참고문헌

- Bowles, D.S., Anderson, L.R., and Glover, T.F. (1998). "The practice of dam safety risk assessment and management: Its roots, its branches, and its fruit." *Eighteen Annual USCOLD Lecture Series*, August 10-14, Buffalo, New York. pp. 15.
- DeKay, M.L., and McClelland, G.H. (1993). "Predicting loss of life in cases of dam failure and flash flood." *Risk Analysis*, Vol. 13, No. 2, pp. 193-205.
- Foster, M., Fell, R., and Spannagle, M. (1998). "Risk assessment - Estimating the probability of failure of embankment dams by piping." *Proceedings of the 1998 ANCOLD/NZSOLD Conference on Dams*, Sydney, New South Wales, Australia. pp. 11.
- Hatem, G.A. (1985). *Development of a database on dam failures in the United States: Preliminary results*. Unpublished MS thesis. Stanford University, California.
- McCann, M.W., J.B. Franzini, E. Kavazanjian, and H.C. Shah. 1985. "Preliminary safety evaluation of existing dams." Report Prepared for Federal Emergency Management Agency by Department of Civil Engineering, Stanford University, November.
- Lafitte, R. 1993. "Probabilistic risk analysis of large dams : its value and limits." *Water Power & Dam Construction*. March. pp. 13-16.
- Lee, J.S. 2002. *Uncertainty analysis in dam safety risk assessment*. Unpublished PhD dissertation. Utah State University, Utah.
- U.S. Bureau of Census. 1998. *State Population Estimates*. CD ROM Database for Population Projections by State.
- U.S. Army Corps of Engineers. 1992. "Guidelines for risk and uncertainty analysis in water resources planning." *IWR Report 92-R-1*. pp. 71.