

댐의 안전성 평가를 위한 위험도 해석기법의 적용 Application of Risk Analysis for Dam Safety Assessment

이 종석*

Lee, Jong Seok

Abstract

The main purposes of dam safety assessment are to predict risk of an existing dam and to reduce the identified risks reasonably. This study determined the risks of an existing dam for each different dam breach scenario using risk analysis. In addition, the application of risk analysis in the dam safety assessment made possible to compare and evaluate a variety of alternatives that may reduce risk of an existing dam with respect to the possibility of dam failure and economic efficiency. On the ground of the risk analysis results, the dam safety analysts can obtain better understanding and more information regarding the risk of an existing dam and recommended alternatives. Decision-makers will be able to manage risk of an existing dam efficiently by spending their affordable money and resources on the alternatives that are expected to reduce the risk of an existing dam practically.

Keywords : risk analysis, risk management, dam safety assessment, dam failure

요지

댐 안전성 평가의 주된 목적은 댐이 지나고 있는 잠재된 위험성을 미리 예측하고, 합리적인 방법으로 밝혀진 위험성을 줄여나가는 것이다. 본 연구에서는 위험도 해석기법을 이용하여 댐의 붕괴를 가져올 수 있는 각 상황별 댐의 위험성을 결정하였다. 또한, 댐의 위험성을 줄이기 위해 제시된 대안들에 대해서도 댐의 붕괴 위험성뿐 아니라 경제적인 측면에서의 비교, 평가를 실시하였다. 위험도 해석기법의 적용을 통해 댐의 안전을 책임지고 있는 관계자들은 댐의 위험성에 대한 구체적인 정보와 댐의 위험성을 개선할 수 있는 다양한 대안들에 대한 보다 넓은 이해를 가질 수 있다. 또한, 댐 정책 결정자들은 이러한 댐의 위험성에 대한 정보와 이해를 바탕으로 댐의 위험성을 효과적으로 줄여나갈 수 있는 대안들에 대해 자금과 지원을 집중하여 댐의 위험성을 효율적으로 관리할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 위험도 해석기법, 댐 안전성 평가, 댐 붕괴

* 경북대학교 공과대학 토목공학과 박사후 과정
Post Doctoral, Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ., Taegu 702-701, Korea
(E-mail : slktf@hanmail.net)

1. 서 론

오늘날 운용되고 있는 많은 댐들은 홍수나 가뭄과 같은 자연재해를 극복하고, 생공용수의 공급, 수력발전, 수운의 개발 등 인류사회의 발전과 경제개발을 지원하기 위해 건설되었다. 하지만, 현재 운용되고 있는 많은 댐들은 지구 온난화와 기상 변화로 인해 댐 설계 당시 와는 매우 변화된 수문기상 조건 아래에 놓여져 있다. 또한, 인구증가와 사회의 팽창에 따른 댐 상, 하류부의 개발로 인해 댐 붕괴와 같은 극한 상황의 발생시 하류부에서 예상되는 피해는 댐 건설 당시의 예측을 초월하게 되었다. 따라서, 변화된 수문기상 환경과 증가된 댐의 구조적, 사회적 위험성에 효과적으로 대처하고 체계적으로 현재 운용되고 있는 댐들의 안전성을 개선해 나가기 위해, 미국을 중심으로 한 일부 국가에서는 위험도 해석기법을 이용한 댐 안전성 평가를 시도하고 있다. 본 연구는 댐 안전성 평가 분야에서 새롭게 도입이 시도되고 있는 위험도 해석기법을 소개하고, 위험도 해석기법을 이용한 댐 안전성 평가의 적용 예를 통하여 위험도 해석기법의 적용시 기대되는 이점들과 앞으로의 연구방향을 알아보기 위해 이루어졌다.

2. 댐 안전성 평가를 위한 위험도 해석기법의 적용절차

공학분야에서 위험도 해석기법은 원자력 발전소나 학화산업 시설물과 같이 매우 높은 수준의 안전성을 요구하는 구조물들의 안전성 평가에 널리 사용되고 있다. 특히, 댐 분야에 있어서 위험도 해석기법의 적용에 대한 연구는 1976년 미국의 Teton 댐 붕괴이후 댐의 위험성에 효과적인 방안들을 찾아내기 위해 시작되었으며, 오늘날에는 세계 대댐 위원회 (ICOLD, 1999)와 미국의 U.S. Bureau of Reclamation, 캐나다의 B.C. Hydro, 호주의 대댐 위원회 (ANCOLD) 등 일부 국가의 댐 관리국이나 연구소를 중심으로 위험도 해석기법의 활용을 위한 많은 연구가 이루어지고 있다. 그럼에도 불구하고 각 댐마다 가지는 서로 다른 고유한 특성들로 인해 위험도 해석기법의 적용시 요구되는 댐의 안전성과 관련된 공학적인 분석의 범위와 정도에 대한 합의는 아직까지 완전히 이루어지지 않은 상태이다. 다만, 댐 안전성 평가를 위한 위험도 해석기법의 기본적인 적용절차에 대해서는 일부 용이 사용에 대한 이견 이외에는 기본적인 인식의 차이가 없으므로, 본 연구에서는 Bowles 등 (1998)의 연구를 바탕으로 댐 안전성

평가를 위한 위험도 해석기법의 네가지 적용단계를 간단히 설명하였다.

① 위험성의 발견 (risk identification)

위험성의 발견은 댐의 붕괴가 일어날 수 있는 상황들을 설정하고, 이들의 상황하에서 발생 가능한 사건들을 밝혀내는 단계이다. 홍수나 지진과 같은 자연적인 재해, 수문의 조작 실수와 같은 댐 운영상의 실수, 그리고 전쟁이나 테러를 통한 인위적인 댐 파괴 행위 등이 위험성의 발견단계에서 고려될 수 있는 상황들이며, 댐의 특성과 주변여건들, 그리고 요구되는 댐 안전성 평가의 정도에 따라 이들에 대한 포함여부가 결정된다. 또한, 결정된 상황별로 댐에서 발생 가능한 다양한 사건들 (즉, 월류, 파이핑, 제방의 침하 등)의 선택은 댐에 붕괴에 대한 연구와 자료 등을 활용하여 밝혀낸다.

② 위험성의 예측 (risk estimation)

위험성의 예측이란 댐의 위험성 발견 단계에서 결정된 상황들과 사건들의 발생 가능성을 확률적으로 구체화하고, 이를 바탕으로 설정된 댐 붕괴 상황별로 댐 붕괴 위험성과 하류부 피해를 예측하는 단계이다. 이를 위해 댐 붕괴 가능성에 대한 공학적인 분석과 댐유역에 대한 수리, 수문학적 연구보고서, 댐건설 기록, 댐유역에 대한 지질연구 보고서 등 모든 관련자료들이 이용되며, 기존의 댐 붕괴 자료나 연구들과 공학자들의 경험, 그리고 댐 전문가들의 의견들도 사용된다.

③ 위험성의 평가 (risk evaluation)

위험성의 평가는 위험성의 예측단계를 통해 밝혀진 댐의 위험성에 사회적으로나 법적으로 요구되는 댐 안전성에 대한 기준을 적용하여 댐의 위험성의 정도를 평가하는 단계이다. 이 단계에서는 댐의 붕괴 가능성뿐 아니라 댐 붕괴시 예상되는 하류부의 경제적 손실과 인명손상들에 대해서도 댐의 위험성이 평가된다.

④ 위험성의 대처 (risk management)

위험도 해석기법의 적용을 통해 밝혀진 댐의 위험성과 다양한 대안들의 평가 결과를 바탕으로, 댐 정책 결정자들이 재정적인 문제와 같은 여러 제약 조건들하에서 가장 효율적인 대안들을 선택하고 시행하여 댐의 위험성을 효과적으로 줄여나가는 단계이다.

3. 위험도 해석기법을 이용한 댐 안전성 평가의 적용 예

본 연구에서는 위에서 설명한 위험도 해석기법의 적용절차를 따라, 미국 Arizona주 중서부에 위치해 있는 Alamo 댐에 대한 안전성 평가를 실시하였다. Alamo 댐은 홍수의 조절, 수자원의 보호와 공급, 수상여가 활동의 지원을 위해 미 공병단에 의해 1964년에 283ft의 제방고와 975ft의 제방폭을 가진 흙댐으로 건설되었다.

현재 운영되고 있는 Alamo 댐이 구조적인 문제점을 드러내고 있지는 않지만, Alamo 댐 유역에 대해서 최근에 새로이 계산한 Standard Project Flood (SPF) 와 Probable Maximum Flood (PMF)가 Alamo 댐 설계 당시 예측치보다 증가된 것으로 밝혀졌다. 특히, PMF의 경우에 있어서는 Alamo 댐에서 20ft의 월류가 발생할 수 있는 것으로 예측되었다. 극한 홍수의 발생과 같은 자연 재해의 발생시 Alamo 댐의 붕괴 위험성과 하류부의 피해정도를 산정하고, 이러한 Alamo 댐의 위험성에 적절히 대처하기 위한 방안들을 밝혀내기 위해 위험도 해석기법을 적용해 보았다. 위험도 해석기법을 이용한 Alamo 댐의 안전성 평가는 댐의 정상적인 운영 상태에서 뿐 아니라 홍수나 지진의 발생시 댐

의 붕괴 위험성과 하류부의 피해를 예측하였고, Alamo 댐의 위험성을 개선시키기 위해 제시된 대안들에 대한 평가도 함께 이루어졌다.

Alamo 댐의 안전성 평가를 위해 설정된 세 가지 상황들(즉, 홍수의 발생시, 지진 발생시, 정상적인 댐 운영 상태)에서 발생할 것으로 예상되는 사건들은 Alamo 댐에 대한 현장 답사, Alamo 댐 관련 자료, 댐 붕괴 사건들에 대한 기록과 연구, 그리고 댐 전문가들의 의견들을 바탕으로 결정하였다. 홍수로 인해 Alamo 댐에서 발생 가능할 것으로 예측된 사건은 월류(overtopping), 제방 하단부 침식(toe erosion), 풍랑으로 인한 제방의 침식(wave action) 이고, 지진시에는 기초부의 액화(foundation liquefaction), 제방의 액화(embankment liquefaction) 이었다. 정상적이 댐 운영시에 Alamo 댐에서 발생 가능할 것으로 예측된 사건들은 파이핑(piping)과 사면 불안정이었다. 각 상황별로 선택된 사건들을 바탕으로 그림 2, 3, 4와 같이 각 상황별 event tree 모델을 개발하였다.

Alamo 댐의 위험성을 예측하기 위해서, Alamo 댐 유역에서 발생 가능한 홍수와 지진의 규모와 빈도는 Alamo 댐 저수위고와 그에 따른 연(年) 초과 확률과의 관계와 첨두 지반 입자가속도와 재현 기간의 관계를

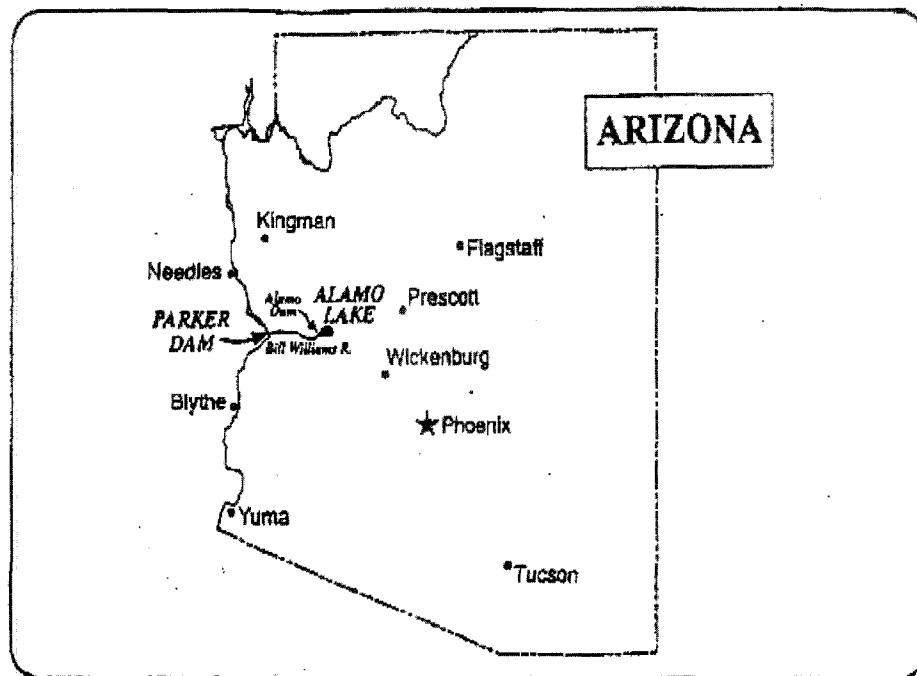


그림 1. Alamo 댐 위치도

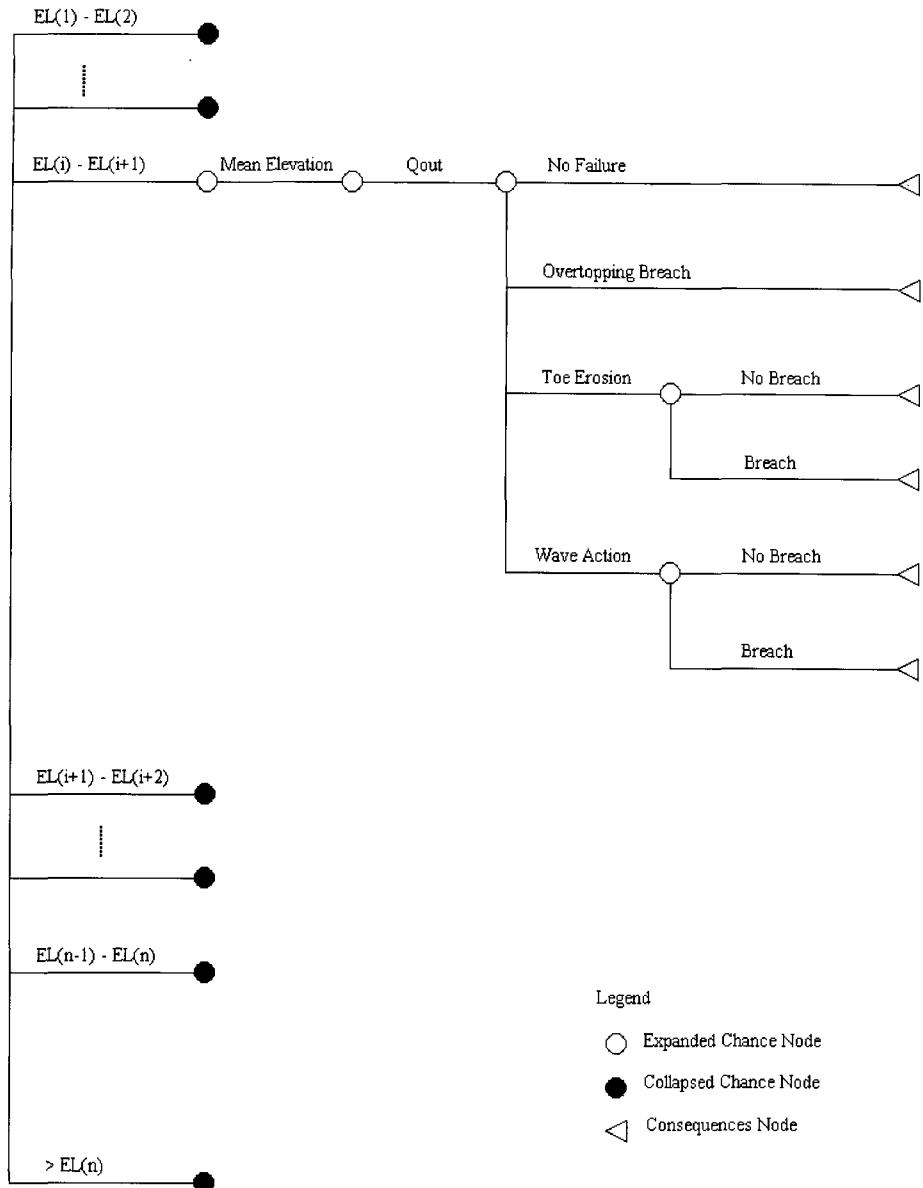


그림 2. Event tree model for flood

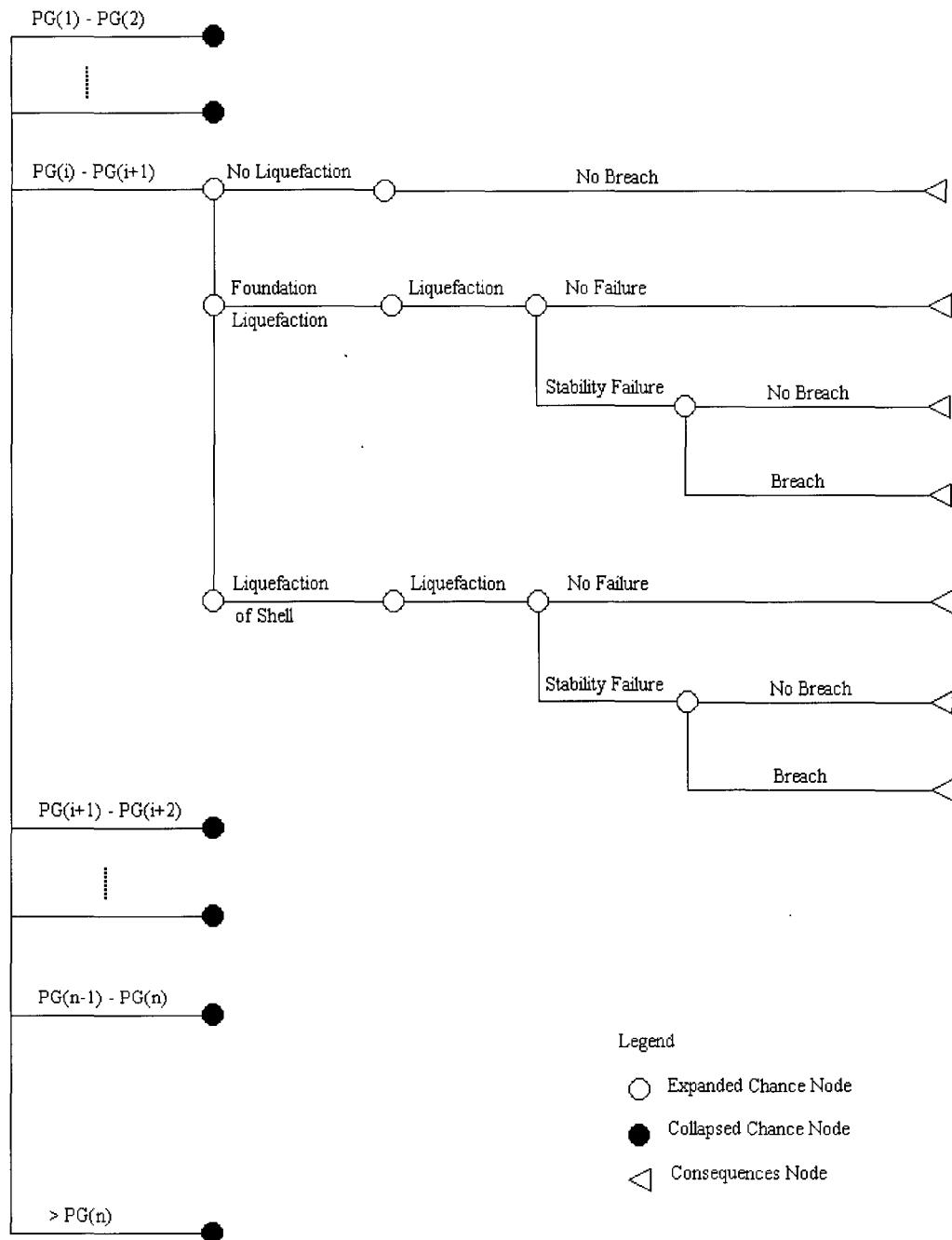


그림 3. Event tree model for earthquake

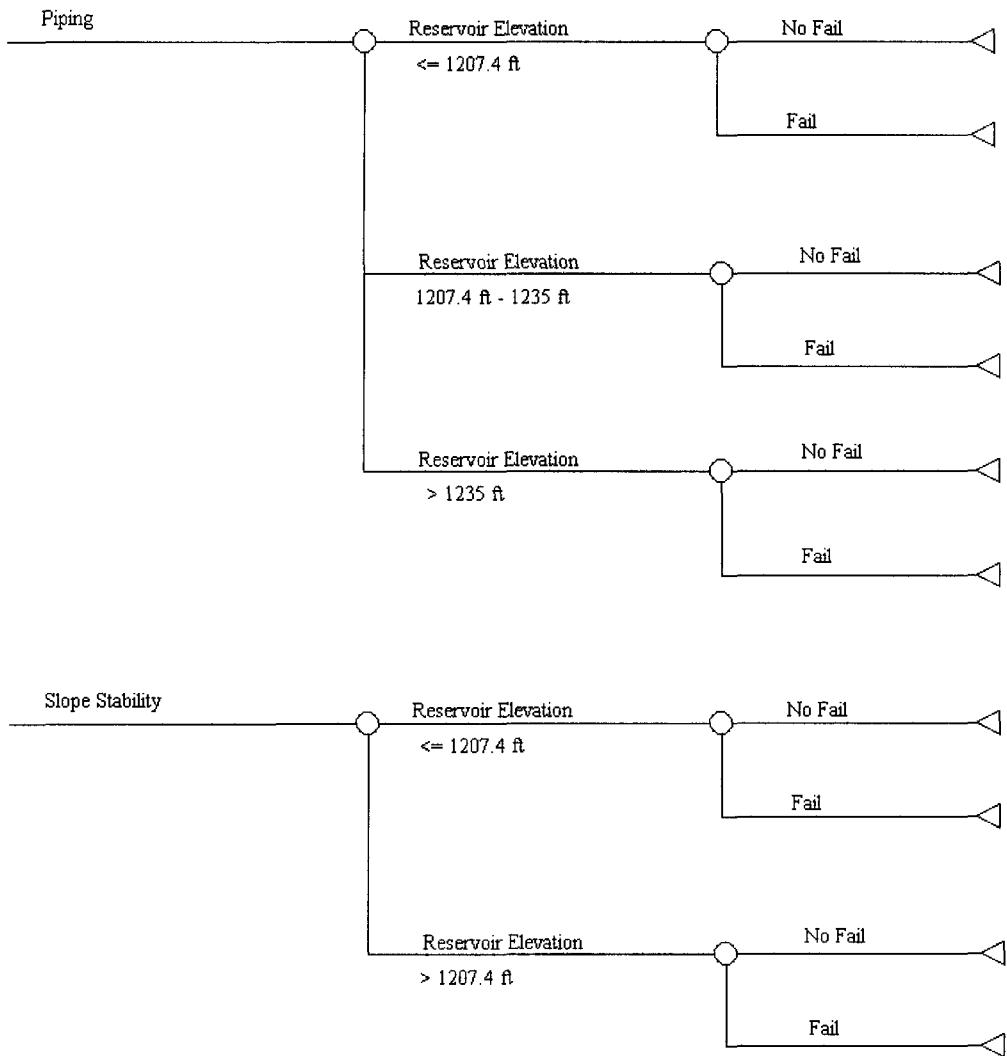


그림 4. Event tree model for normal reservoir operation

표 1. Alamo 댐 위험성 예측을 위한 각 상황별 조건과 사건들의 발생 가능성

Failure mode	Loading condition	System response probability		Probability of failure
Flood	Stage(ft) - AEP	SRP		Probability of breach
	(1116) - 5.00E-01	(Overtopping depth) (ft) - SRP	(0.375) 0.00	1.0
	(1134) - 2.00E-01		(1.00) - 0.25	1.0
	(1145) - 1.00E-01		(2.00) - 1.00	1.0
	(1155) - 5.00E-02			
	(1169) - 2.00E-02	Toe erosion when Qout > 50000 cfs	0.1	0.01
	(1182) - 1.00E-02			
	(1196) - 5.00E-03			
	(1210) - 2.00E-03	Wave action when water surface elevation 1259.6 ~ 1265 ft	1.0	0.01
	(1219) - 1.00E-03			
Earthquake	(1228) - 5.00E-04			
	(1237) - 2.00E-04			
	(1243) - 1.00E-04			
	(1249) - 5.00E-05			
	(1254.5) - 2.00E-05			
	(1259) - 1.00E-05			
	(1262) - 5.00E-06			
	(1266) - 2.00E-06			
	(1268.5) - 1.00E-06			
	(1274) - 1.00E-07			
	(1281.3) - 1.00E-09			
Normal operation	(PGA) - AEP	SRP		Probability of stability failure
	(6.00E-02) - 2.11E-03	(PGA) - Foundation liquefaction	(0.09) - 0.02	0.1
	(7.00E-02) - 1.43E-03		(0.15) - 0.18	
	(8.00E-02) - 1.03E-03		(0.20) - 0.58	
	(9.00E-02) - 7.55E-04		(0.25) - 0.86	
	(1.00E-01) - 5.88E-04		(0.50) - 1.00	
	(1.10E-01) - 4.76E-04			
	(1.20E-01) - 4.04E-04	(PGA) - Embankment liquefaction	(0.09) - 0.0002	0.1
	(2.00E-01) - 1.41E-04		(0.15) - 0.0018	
	(2.50E-01) - 6.63E-05		(0.20) - 0.0058	
			(0.25) - 0.0086	
			(0.50) - 0.0173	
Failure mode	Loading condition	System response probability		Probability of failure
Normal operation	Stage (ft) - Annual Probability	SRP		Probability of breach
	(<1207.4) - 0.998	Piping	4.10E-7	1.0
	(1207.4 ~ 1235) - 0.0018		6.38E-7	1.0
	(>1235) - 0.0002		6.38E-7	1.0
	(<1207.4) - 0.998	Slope stability failure	1.80E-6	1.0
	(>1207.4) - 0.002		4.20E-6	1.0

이용하여 산정하였다. 또, 정상적인 댐 운영 상태에 대해서는 댐의 저수위고와 지속기간의 관계를 사용하였다. 각 상황별로 선택된 사건들에 대한 발생 가능성은 실제 발생된 댐 붕괴 사건들과 그들의 발생 가능성에 대한 McCann 등 (1985), Hatem (1985), 그리고 Foster 등 (1998)의 연구와 댐 전문가들의 조언을 바탕으로 결정하였다.

표 1은 결정된 각 상황별 조건과 사건들의 발생 가능성을 보여주며, 그림 2~4에 소개된 event tree 모델에 이들 값을 적용하여 Alamo Dam의 붕괴 위험성을 계산하였다.

Probability of dam failure = Probability of initiating conditions for flood, earthquake, etc. × Probability of potential events such as overtopping, piping, slinging, etc. × Probability of dam breach

Alamo 댐의 붕괴시 예상되는 하류부의 피해 (즉, 경제적 손실과 인명손상)를 예측하기 위해, 총 13가지

의 다양한 댐 붕괴/비붕괴 시나리오를 설정하였다. 설정된 13가지의 시나리오는 크게 세가지의 분류 (즉, 홍수로 인한 댐 붕괴와 비붕괴, 그리고 자연이나 정상적인 댐 운영상황에서 댐 붕괴(sunny day dam failure))로 나뉘어지며, 각 시나리오에 대한 설명과 특성들은 표 2에 자세히 주어져 있다.

본 연구는 이들 시나리오를 따라서 National Weather Service DAMBRK 모델을 이용하여 컴퓨터 모의를 실시하였고, 모의 결과들 (즉, 최대 홍수 수위와 도달 시간, 최대 홍수량과 도달 시간)을 바탕으로 댐 하류부에서의 경제적인 피해와 인명손상에 대한 예측을 하였다. 특히, Alamo 댐 붕괴 위험성으로 인한 하류부의 경제적 피해를 예측을 하기 위해 댐 하류부에 대한 경제분석 연구 자료와 1998년도 센서스 자료, 그리고 미국 비상 기획청 (Federal Emergency Management Agency)에서 개발한 범람수심과 홍수 피해 관계 (즉, 표3)를 이용하였다.

표 2. Alamo 댐 하류부 피해 예측을 위한 13가지의 댐 붕괴/비붕괴 시나리오

Code	Initiating event	Breach run code	Failure/No failure	Inflow flood	WSE @ breach
Existing(E)	Sunny day Failure (S)	ESFA	Failure (F)	No Flood	1125 ft - earthquake failure (a, Normal operating target elevation)
		ESFB	Failure (F)	No Flood	1207.4 ft - internal failure (b, Historical height)
		ESFC	Failure (F)	No Flood	1235 ft - internal failure (c, Spillway crest)
	Threshold Flood (TF)	ETFN	No Failure (N)	Threshold flood (USACE definition: flood which peaks at dam crest minus freeboard)	N/A
		ETFF	Failure (F)	Threshold flood	1259.6 ft (Max. design surcharge WSE)
	PMP Flood (PF)	EPFN	No Failure (N)	PMF Flood (with starting WSE = 1125 ft)	N/A (Max. WSE during reservoir routing = 1267.67 ft)
		EPFF	Failure (F)	PMF Flood (with starting WSE = 1125 ft)	Dam crest + 1 ft = 1266 ft (Rising limb failure)
	SPF + PMF	EPSN	No Failure (N)	SPF + PMF (with starting WSE = 1180 ft*)	N/A
		EPSF	Failure (F)	SPF + PMF (with starting WSE = 1180 ft*)	Dam crest + 1 ft = 1266 ft (Rising limb failure)
FR2B	SPF + PMF	FR2B-PSN	No Failure (N)	SPF + PMF (with starting WSE = 1180 ft*)	N/A
FR3C		FR3C-PSN	No Failure (N)	SPF + PMF (with starting WSE = 1180 ft*)	N/A
FR9		FR9-PSN	No Failure (N)	SPF + PMF (with starting WSE = 1180 ft*)	N/A
FR12		FR12-PSF	Failure (F)	SPF + PMF (with starting WSE = 1180 ft*)	Dam crest + 1 ft = 1275 ft (Rising limb failure)

표 3. FEMA 범람수심과 홍수 피해관계 곡선

Inundation Depth (ft)	Single Family Residential		Commercial		Manufacturing	
	Structure (%)	Contents (%)	Structure (%)	Contents (%)	Structure (%)	Contents (%)
0.3	11%	17%	11%	8%	26%	15%
0.8	13%	23%	13%	10%	43%	27%
1.3	17%	25%	17%	14%	52%	38%
1.8	20%	32%	20%	18%	62%	49%
2.3	23%	33%	23%	20%	67%	57%
2.8	27%	35%	27%	23%	73%	64%
3.3	28%	36%	28%	32%	75%	67%
3.8	29%	37%	29%	35%	78%	70%
4.3	29%	39%	29%	38%	79%	73%
4.8	30%	41%	30%	40%	79%	76%
5.3	35%	43%	35%	43%	80%	77%
5.8	41%	45%	41%	45%	80%	78%
6.3	42%	47%	42%	48%	81%	78%
6.8	43%	50%	43%	50%	82%	79%
7.3	43%	52%	43%	52%	84%	80%
7.8	44%	55%	44%	55%	85%	81%
8.3	44%	57%	44%	57%	88%	82%
8.8	45%	60%	45%	60%	90%	83%
9.3	46%	60%	46%	60%	92%	83%
9.8	46%	60%	46%	60%	95%	83%
10.3	47%	60%	47%	60%	98%	83%
10.8	47%	60%	47%	60%	100%	83%
11.3	48%	60%	48%	60%	100%	83%
11.8	48%	60%	48%	60%	100%	83%
12.3	48%	60%	48%	60%	100%	83%

인명손상에 대한 예측은 DeKay와 McClelland (1993)의 연구 모델을 이용하여 이루어졌다.

서의 event tree 모델을 통해 계산된 Alamo 댐의 붕괴 위험성을 바탕으로 Alamo 댐으로 인한 경제적 피해와 인명손상에 대한 위험성은 다음과 같이 계산되었다.

$$LOL = \frac{PAR}{1 + 13.277(\text{PAR}^{0.44})\exp(0.759(\text{WT}) - 3.790(\text{Force}) + 2.223(\text{WT})(\text{Force}))}$$

여기서, LOL = Loss of life, PAR = Persons at risk,

WT = Warning time, Force = Flooding forcefulness.

13가지의 시나리오에 대한 댐 하류부에서 예상되는 경제적인 피해와 인명손상에 대한 예측과 그림 2~4에

Risk of an existing dam = Probability of dam failure \times Expected economic damage
(or human life loss)

본 연구에서는 Alamo 댐의 위험성에 대처할 수 있는 19가지의 대안들을 개발하였고, 이들에 대한 설명과 함께 사업 수행시 예상되는 소요 경비가 표 4에 소개되어 있다.

표 4. Alamo 댐 위험도 감소를 위한 대안들

댐붕괴 상황	댐 붕괴 원인	코드	대안 설명	예상 비용 (M \$)
홍수	월류	E	현 댐 상태를 유지	0.0
		FR1	제방을 17.3 ft 높임	13.92
		FR2a	여수로 폭을 220 ft 넓히고 제방을 13.5 ft 높임	21.35
		FR3a	여수로를 10 ft 낮추고 제방을 15.4 ft 높임	14.07
		FR3b	여수로를 20 ft 낮추고 제방을 13.6 ft 높임	13.88
		FR3c	여수로를 30 ft 낮추고 제방을 11.9 ft 높임	13.96
		FR6	임시 케이트 설치 (fuge gate), 여수로를 10 ft 낮추고 제방을 15.5 ft 높임	18.32
		FR8a	콘크리트로 댐 제방 하류부면 (downstream face) 강화	31.22
		FR8b	RCC로 댐 제방 하류부면 (downstream face) 강화	18.64
		FR9	여수로 폭을 220 ft로 넓히고 10 ft 낮추며, 제방을 10.5 ft 높임	21.38
		FR12	제방을 9 ft 높임, FR10과 FR15 포함	9.03
		FR14	제방을 5 ft 높임 (parapet wall), FR15 포함	2.61
	댐하류부 침식	FR10	분쇄석, soil cement, RCC로 하류부 보호	1.59
	풍랑	FR15	풍랑에 대한 제방 보호 시설 설치	1.47
지진과 내부 붕괴	기초나 제방의 액화로 인한 사면 붕괴	FR16	5 ft 높이의 parapet wall 과 crest and toe protection (FR10과 FR14의 결합)	3.80
		ER1	상하류부 (up-/downstream) berm 설치	47.86
		ER2	하류부 (downstream) berm 설치	14.81
홍수, 지진, 내부 붕괴	모든 댐 붕괴 원인들을 포함	ER3	Soil mixing of foundation material/chemical grouting	40.09
		FER1	ER1과 FR9의 결합	48.52
		FER2	ER2와 FR3c의 결합	25.12

그림 2~4의 event tree 모델을 이용한 Alamo 댐의 위험성 예측은 현 Alamo 댐 상태에 대해서 뿐 아니라, 표 4에 소개된 19가지의 대안들에 대해서도 이루어졌다. 특히, 각 대안들에 대한 경제적인 측면에서의 평가와 비교를 위해 먼저 위험도 비용의 증분치 (Incremental risk cost), 대안들의 사업 수행시 예상되는 수익 (Benefit), 총 비용 (Total economic cost), 수익대 비용의 비율 (Benefit/Cost ratio) 등이 다음과 같이 계산되었다.

Incremental risk cost (\$/year) = (Probability of dam failure × Risk cost of dam failure) - (Probability of dam no failure × Risk cost)

of dam no failure)

Benefit (\$/year) = Incremental risk cost for an existing dam - Incremental risk cost for an alternative

Total cost (\$/year) = Annualized cost for an alternative + Incremental risk cost for an alternative
Benefit/Cost ratio = Benefit ÷ Total cost

4. 위험도 해석기법의 적용 결과의 검토

그림 2~4의 event tree 모델과 각 상황별로 결정된 사건들의 발생 가능성을 이용하여 예측된 Alamo

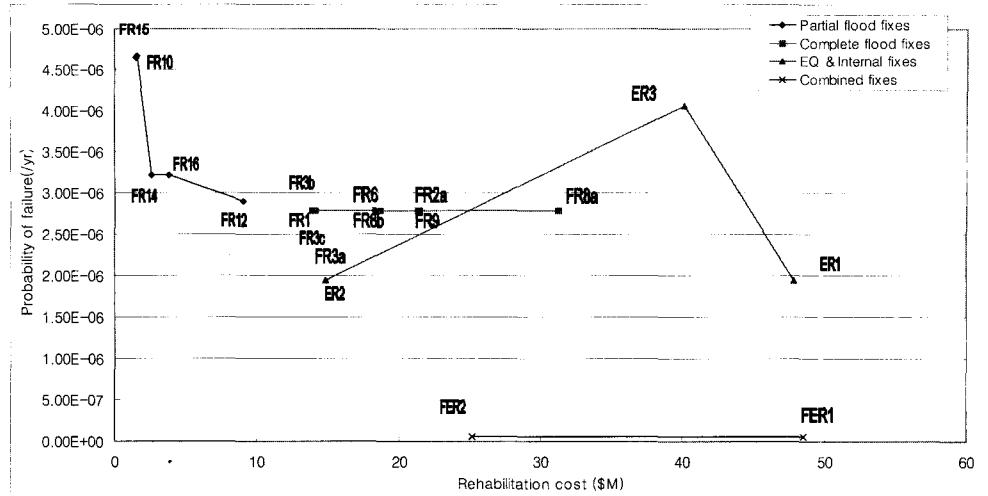


그림 5. 댐 붕괴 위험성과 예상경비의 관계

표 5. Alamo 댐 위험평가 결과

종류	코드	예상 비용 (\$M)	붕괴확률 (10^-6/yr)	위험도 비용 증분 (\$/yr)	연간 예상 비용 (\$/yr)	총비용 (\$/yr)	예상 이익 (\$/yr)	이익 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
	FR1	13.92	2.78	2,166	896,600	898,766	780	8.68E-04
홍수 피해 방지	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
	FR9	21.38	2.78	2,166	1,377,100	1,379,271	780	5.66E-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

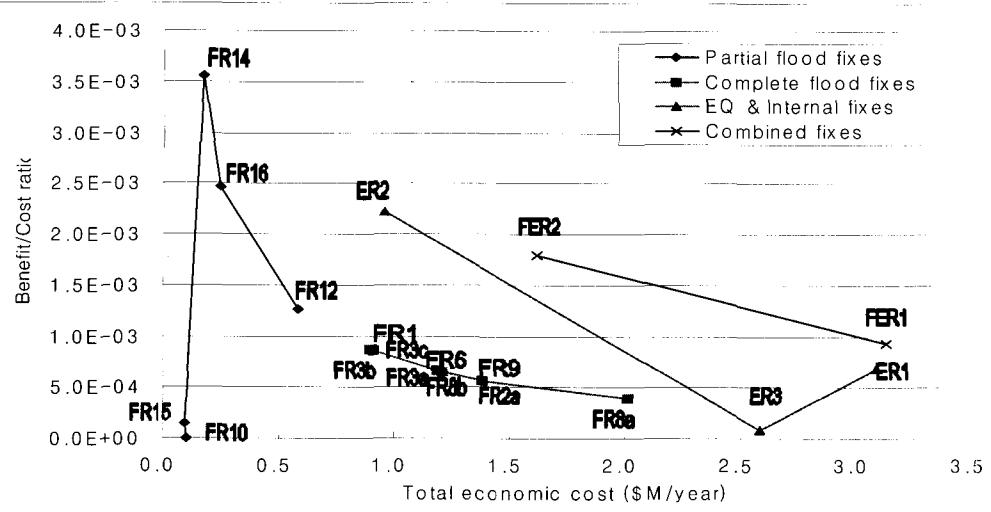


그림 6. 이익대 비율과 연간 총비용의 관계

댐의 붕괴 확률은 $4.67 \times 10^{-6}/\text{year}$ 이었다. 이 중 홍수로 인한 Alamo 댐의 붕괴 확률은 $1.89 \times 10^{-6}/\text{year}$ 이고, 지진발생으로 인한 붕괴 확률은 $6.11 \times 10^{-7}/\text{year}$ 이며, 정상적인 댐 운영상태에서는 $2.17 \times 10^{-6}/\text{year}$ 이었다. 특히, 예측된 Alamo 댐의 붕괴 확률은 U.S. Bureau of Reclamation에서 요구하는 댐 안전성 기준치 ($10-4/\text{year}$)보다 낮은 것으로 판명되었다. Alamo 댐의 붕괴로 인한 하류부에서 예상되는 피해는 연간 \$2,964이었다. Alamo 댐 붕괴로 인한 하류부에서의 인명 손실은 인구 거주 지역이 Alamo 댐으로부터 35 mile 밖에 위치해 있고 잘 준비되어 있는 경보 시스템으로 인해 매우 희박할 것으로 예측되었다.

표 4에서 소개한 19가지의 대안들 중에서는 FER1이 가장 낮은 댐 붕괴 확률 ($0.0604 \times 10^{-6}/\text{year}$)을 가지는 것으로 확인되었으며, 가장 높은 댐 붕괴 확률 ($4.67 \times 10^{-6}/\text{year}$)을 가지는 대안은 FR10이었다. 총 비용이 가장 적은 대안은 FR15 (\$97,616/year)이었고, 가장 큰 대안은 FER1 (\$3,126,260/year)이었다. 그림 5에서는 댐 붕괴 위험성과 예상경비의 관계를 보여주고 있다. 19가지의 대안들 중에서 가장 낮은 댐 붕괴 위험성을 보여주는 대안이 FER1과 FER2임을 확인할 수 있었다. 하지만, 이들 대안들의 시행을 위해서는 다른 대안들에 비해 상대적으로 매우 높은 경비가 요구된다 는 것도 알 수 있었다. 딸서, 대안들의 평가는 댐 붕괴 위험성과 함께 경제적인 면에서도 이루어져야함을 알 수 있다.

19가지의 대안들에 대한 경제적 분석 결과를 바탕으로 수익이 가장 큰 대안은 FER1 (\$2,902/year)이었고, 가장 적은 대안은 FR10 (\$0.3/year)이었다. 총 비용 대비 수익이 가장 큰 대안은 FR14 (3.56E-03)이었고, 가장 작은 대안은 FR10 (2.85E-06)이었다. 각 대안들에 경제적인 평가에 대한 자세한 결과는 표 5에 주어져 있다.

표 5에 정리된 각 대안별 경제분석을 통해 밝혀진 결과를 바탕으로 연간 총비용에 따른 수익대 비용의 비율의 관계를 그림 6에 각각 도시하였다. 그림 6은 FR14가 19가지의 대안들 중에서 총비용은 다른 대안들에 비해 매우 작은 반면, 가장 높은 수익대 비용 비율을 보여 주는 것을 확인 할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 미국을 비롯한 일부 국가에서 댐 안전성 평가를 위해 도입이 시도되고 있는 위험도 해석기법을 소개하였고, 위험도 해석기법을 적용하여 미국 Arizona 주에 위치해 있는 Alamo 댐에 대하여 댐의 안전성 평가를 실시하였다. Alamo 댐에서 발생 가능한 모든 상황들과 사건들을 고려하여 event tree 모델을 구성하였고, 각 상황별 사건들의 발생 가능성을 바탕으로 댐의 붕괴 위험성과 하류부의 피해를 예측하였다. 또한, Alamo 댐의 위험성에 대처하기 위해 제시된 대안들의 평가와 비교도 실시되었다. 본 연구는 위험도 해석기법을 이용한 Alamo 댐의 안전성 평가를 통해

다음과 같은 결론들을 얻을 수 있었다.

1. 위험도 해석기법의 적용을 통해 밝혀진 Alamo 댐의 붕괴 위험성은 $4.67 \times 10^{-6}/\text{year}$ 이었다. 이 중 홍수로 인한 Alamo 댐의 붕괴 위험성은 $1.89 \times 10^{-6}/\text{year}$ 이고, 지진발생으로 인한 붕괴 위험성은 $6.11 \times 10^{-7}/\text{year}$ 이며, 정상적인 댐 운 영상태에서는 $2.17 \times 10^{-6}/\text{year}$ 이었다. 또한, Alamo 댐 붕괴 위험성으로 인해 예상되는 경제적인 피해는 연간 \$2,964이었으며, 인명손실은 없는 것으로 예측되었다.
2. 위험도 해석기법의 적용을 통해 밝혀진 Alamo 댐의 붕괴 위험성을 USBR의 댐 안전성 기준치 ($10^{-4}/\text{year}$)에 적용한 결과, Alamo 댐은 붕괴 위험성의 측면에서는 안전한 것으로 판명되었다.
3. Alamo Dam의 위험성을 개선하기 위해 제시된 19가지 대안들 중에서 사업 수행후 가장 작은 댐 붕괴 위험성을 가질 것으로 예측된 대안은 FER1 (여수로 폭을 220ft로 넓히고 10ft 낮추며, 제방을 10.5ft 높임 + 상하류부에 berm을 설치) 이었고, 비용대비 수익이 가장 큰 대안은 FR14 (parapet wall을 이용하여 제방을 5ft 높임) 이었다.

위험도 해석기법의 적용의 목적은 댐의 위험성에 대한 정보와 대안들에 대한 단순한 공학적 평가 결과만을 제시하는 것 뿐 아니라, 댐의 안전을 책임지고 있는 관계자나 댐 정책 결정자들이 이러한 정보를 바탕으로 댐의 위험성에 대한 정확한 이해와 함께 댐의 위험성을 적절히 관리할 수 있도록 도와주는데 있다. 하지만, 위험도 해석기법의 적용을 위해 필요로 되는 많은 댐 관련 자료가 부족하고 이를 보충할 수 있는 연구는 매우 미흡한 상태이다. 따라서, 보다 나은 댐 위험성 예측을 위해서는 이러한 부분들에 대한 연구와 노력이 지속적으로 이루어져야 할 것이다. 또한, 예측된 댐의 구조적인 위험성과 하류부의 피해들에 대해 평가할 수 있는 댐 안전성 기준의 마련도 절실히 필요한 실정이다.

6. 참고문헌

- 한건연, 이종석, 김상호 (1997a). “댐 및 하천제방에 대한 위험도 해석기법의 개발: I. 모형 및 이론.” *한국수자원학회논문집*, 한국수자원학회, 제30권, 제6호, pp. 679-690.
- 한건연, 이종석, 김상호 (1997b). “댐 및 하천제방에 대한 위험도 해석기법의 개발: II. 적용 예.” *한국수자원학회논문집*, 한국수자원학회, 제30권, 제6호, pp. 691-698.
- Bowles, D.S., L.R. Anderson, and T.F. Glover (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, 1998, Buffalo, New York, pp. 1-15.
- Bras, R.L. (1979). “Hydraulic and hydrologic uncertainties: Two aspects of reliability.” *Preprint 3661*, ASCE, Convention and Exposition, Atlanta, pp. 643-652.
- Cheng, S.T. (1982). *Overtopping Risk Evaluation for an Existing Dam* Ph.D. Dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- 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. 1-11.
- Hatem, G.A. (1985). *Development of a Database on Dam Failures in the United States :Preliminary Results*. Unpublished MS thesis, Standford University, California.
- International Commission of Large Dam (ICOLD) (1999). “Risk Assessment As An Aid To Dam Safety Management.” ICOLD Bulletin on Risk Assessment.
- McCaughan, M.W., Franzini, J.B., Kavazanjian, E. and Shah, H.C. (1985). *Preliminary Safety Evaluation of Existing Dams*. Report Prepared for Federal Emergency Management Agency by Department of Civil Engineering, Standford University, November.
- Rose, D. (1978). “Risk of catastrophic failure of major dams.” *J. of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 104, No. 9, pp. 1349-1351.
- Tung, Y.K., and Mays, L.W. (1980). “Risk analysis

- for hydraulic design." *J. of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 106, No. 5, pp. 893-913.
- U.S. Bureau of Census (1998). *State Population Estimates*. CD ROM Database for Population Projections by State.
- Yen, B.C., and Tung, Y.K. (1993). "Some recent progress in reliability analysis for hydraulic design." *Reliability and Uncertainty Analyses Design*, ed. by Yen, B.C. and Tung, Y.K. ASCE, pp. 35-79.

(논문번호:02-22/접수:2002.04.16/심사완료:2002.10.04)