

수공구조물에 대한 Risk Analysis 기법의 적용(III)



한 건 연 |

경북대 토목공학과 교수, 우리학회지 편집위원장
kshanj@knu.ac.kr



이 중 석 |

한국건설교통기술평가원 선임연구원
kicltep@kistep.re.kr

Contents...

1. 서 언
2. Risk Analysis 방안
3. 수공구조물 안전에 대한 Risk Analysis
 - 3.1 1단계 분석
 - 3.2 2단계 분석
 - 3.3 3단계 분석
4. 댐 하류부 Risk Analysis
 - 4.1 하류부 Risk Analysis의 중요성
 - 4.2 모델링 결과 평가
 - 4.3 공공 안전성 평가
 - 4.4 경제적인 측면 평가
 - 4.5 환경적인 측면 평가
5. 적용 예
 - 5.1 댐 위험도 발견
 - 5.2 댐 위험도 예측
 - 5.3 댐 위험도 평가
 - 5.4 댐 위험도 관리
6. 결 언

5. 적용 예

금번 미국 아리조나주 중서부에 위치해 있는 Alamo 댐에 대한 risk analysis 기법의 적용사례를 통해 학술강좌 I과 II에서 설명되어진 동 기법에 대한 독자들의 이해를 돕고자 한다.

Alamo 댐은 홍수조절, 수자원 보호와 공급, 수상 레저활동 지원 등의 목적으로 미공병단에 의해 283ft(약 86m)의 제방고와 975ft(약 291m)의 제방 폭을 가진 흙댐으로 1964년에 건설되었다. 현재 Alamo댐은 댐 운영에 있어 특별한 문제점을 드러내고 있지는 않지만, 최근 미공병단에 의해 계산된 Standard Project Flood(SPF)나 Probable Maximum Flood(PMF)는 댐 설계 당시 예측치보다 상당히 증가된 것으로 밝혀졌다. 특히, PMF의 상황 하에서 20ft(약 6m) 이상의 월류가 발생할 수 있는 것으로 예측되었다. 따라서, risk analysis 기법을 적용하여 기상환경 변화와 댐 노후화 등에 따른 Alamo댐의 위험도를 파악하고 안전성을 확보할 수 있는 방안들에 대한 검토가 이루어졌다.

학술강좌(I)에서 설명된 바와 같이 댐, 저수지 등 수공구조물의 안전도 평가를 위한 risk analysis 기법의 적용은 1) 위험도 분석(risk analysis), 2) 위험도 평가(risk assessment), 3) 위험도 관리(risk management) 단계를 걸쳐 이루어진다. 특히 위험도 분석(risk analysis)은 수공구조물의 붕괴모드들과 이와 관련된 확률들을 추정하는 위험도 발견(risk identification) 과정과 이들을 바탕으로 구성된 event tree 형태의 risk analysis 모델을 구성하여 대상 댐의 위험도를 예측해내는 위험도 예측(risk estimation) 과정으로 세분되어진다. Alamo 댐의 위험도 분석도인 그림 1의 위험도 분석절차에 따라 risk analysis 모델을 개발하고 적용함으로써

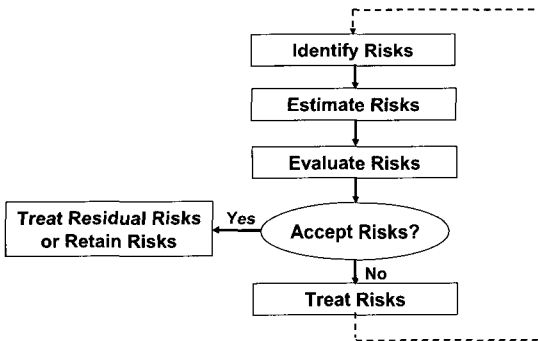


그림 1. 수공구조물에 대한 risk analysis 기법 적용 과정
 동 댐에 대한 위험도의 예측, 평가 및 관리까지 이루어졌다.

5.1 댐 위험도 발견(Risk Identification)

댐의 위험도 분석과정에서 위험도 발견(risk identification)은 댐 위험도 예측을 위해 댐 붕괴시나리오 설정과 함께 붕괴모드, 하류부 피해등 붕괴상황들을 구체화하는 과정이다. 그림 2에서 보는 바와 같이 위험도 발견 과정에서 홍수, 지진 등 댐의 붕괴를 야기할 수 있는 사건들(initiating events), 이들로 인해 댐에서 발생하는 월류나 파이핑 등의 붕괴모드들(system responses), 댐 붕괴상태(outcome), 댐에 의한 피해가 발생하는 시점(exposure), 댐의 의한 인명피해 및 경제적 손실 등 피해(consequences)

등 댐 붕괴시나리오의 세부 상황들이 결정된다.

Alamo댐의 위험도 분석과정에서 위험도의 발견은 Alamo댐의 붕괴발생 상황 및 붕괴모드들에 대한 예측을 위해 Alamo댐 관계자와 댐 전문가들이 모여 동 댐의 현장답사, 동 댐 관련자료 분석, 댐 붕괴 사건의 기록들에 대한 검토 등으로부터 시작되었다. 이러한 현장답사 및 관련 서류검토, 전문가의 의견수렴 과정을 걸쳐 최종적으로 결정된 Alamo댐의 붕괴발생 상황은 정상적인 댐 운영의 경우를 포함하여 홍수 및 지진 발생의 세가지 경우로 한정되었다. 전쟁이나 테러 등 인위적인 붕괴발생 상황은 고려대상에서 제외되었다.

Alamo댐의 위험도 발견단계에서 결정된 홍수 발생으로 인한 예상 붕괴모드들은 월류(overtopping), 댐 제방 하단부 침식(toe erosion), 풍랑에 의한 제방 침식(wave action)들이다. 지진 발생 시에 추측된 붕괴모드들은 댐 기초부분의 액화현상(foundation liquefaction), 제방에서 액화현상(embankment liquefaction)들이다. 정상적인 댐 운영 하에서 예상된 댐 붕괴모드들은 파이핑(piping)과 사면 불안정(embankment slope instability)들이다.

그림 3~그림 5에서는 risk identification 과정을 통해 이끌어 낸 Alamo댐 붕괴발생별 붕괴모드들로 구성된 event tree형 risk analysis 모델을 보여 준다.

Initiating Events	System Responses	Outcomes	Exposure	Consequences
Flood Earthquake Landslide Static Loading U/S Dam Fail	Piping Cracking Overtopping Slope Failure Foundation Fail	Breach No Breach Partial Breach	Time of Day Day of Week Season of year Warning Time	Loss of Life Economic Damage Social Impace

그림 2. 댐 위험도 분석과정에서 risk identification

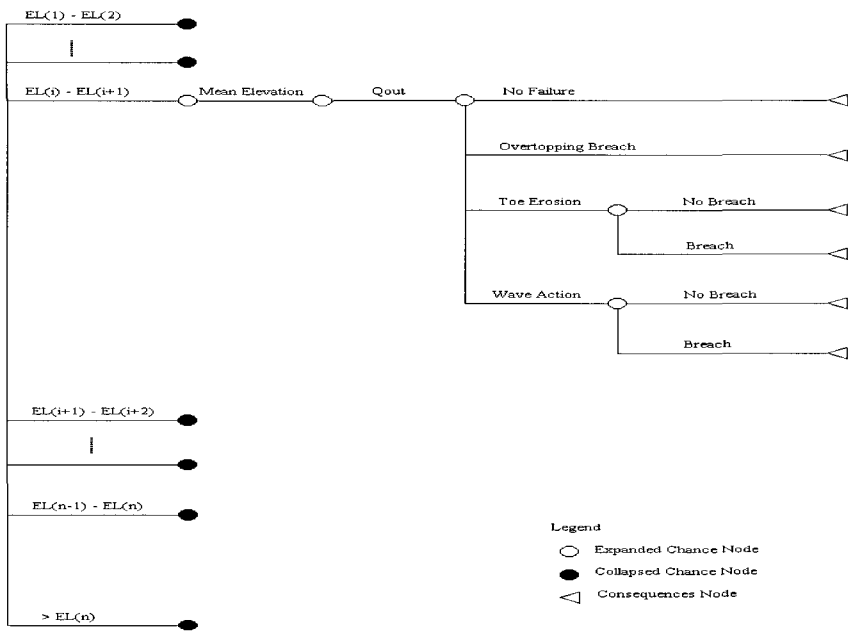


그림 3. Alamo댐 위험도 분석을 위한 홍수 발생 시에 대한 event tree

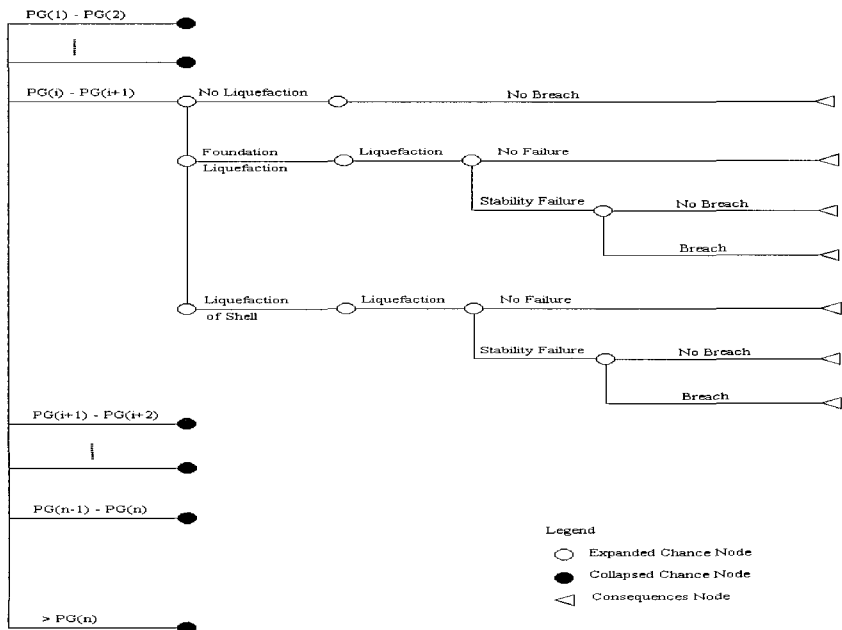


그림 4. Alamo댐 위험도 분석을 위한 지진 발생 시에 대한 event tree

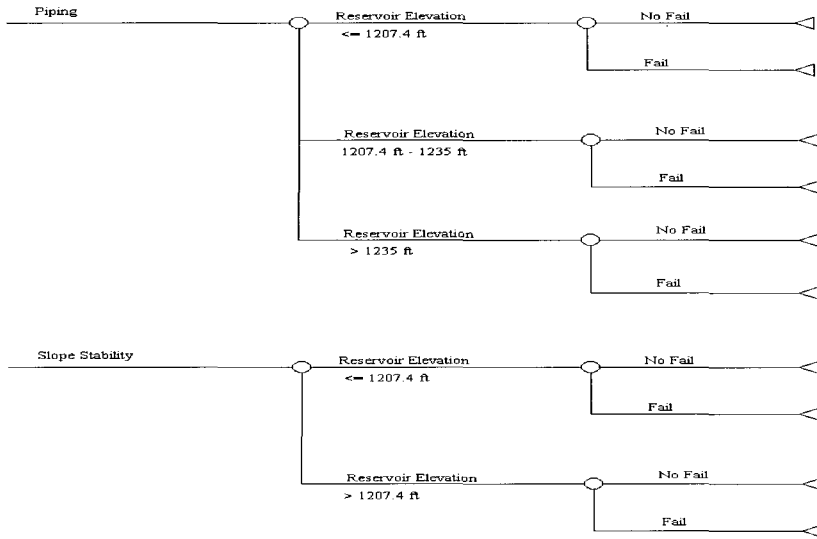


그림 5. Alamo댐 위험도 분석을 위한 정상 댐 운영 시에 대한 event tree

5.2 댐 위험도 예측(Risk Estimation)

댐 위험도 예측(risk estimatio) 과정에서는 위험도 발견 단계를 통해 결정된 홍수, 지진 등의 각 상황(Initiating event)별 「loading condition」과 붕괴

모드별 「system response」의 발생확률들을 결정하고, 댐 붕괴 및 비붕괴 시나리오별 「consequence analysis」가 이루어진다. Alamo댐의 위험도 분석을 위한 「consequence analysis」는 13가지의 Alamo댐 붕괴 및 비붕괴 시나리오에 대하여 이루어

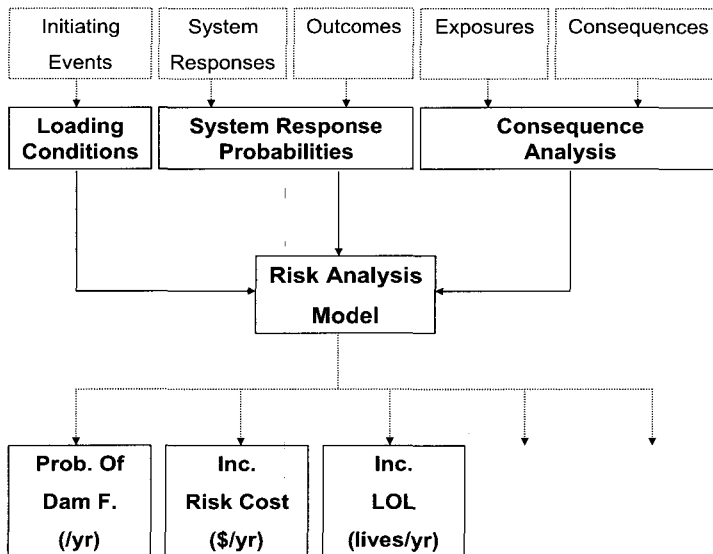


그림 6. Alamo댐 위험도 분석 모델의 구성

졌다. 위험도 예측 과정을 통해 도출된 이들 값들은 다시 그림 3~그림 5에 소개된 risk analysis 모델의 입력 자료로써 이용되어 Alamo 댐의 위험도가 계산되었다.

그림 6에서와 같이 Alamo댐의 위험도 분석을 통해 예측된 동 댐의 붕괴 위험도는 $4.67 \times 10^{-6}/\text{year}$ 이었다. 이 중 홍수로 인한 Alamo 댐의 붕괴 위험도는 $1.89 \times 10^{-6}/\text{year}$, 지진으로 인한 붕괴 위험도는 $6.11 \times 10^{-7}/\text{year}$, 정상적인 댐 운영상태에서는 붕괴 위험도는 $2.17 \times 10^{-6}/\text{year}$ 로 예측되었다. 또한, Alamo댐 붕괴로 인한 경제적 피해 위험도는 \$2,964/year로 추정되었다. 인명피해는 발생하지 않는 것으로 예측되었다.

표 1에서는 Alamo댐의 위험도 저감을 위해 제시된 19가지의 대안들에 대한 간략한 설명과 함께 예상 소요 비용이 정리되어 있다. Alamo댐의 위험도 저감

을 위하여 이들 대안들을 시행 시 예상되는 동 댐의 위험도 분석결과는 표 2와 같다.

5.3 댐 위험도 평가(Risk Assessment)

Alamo댐의 위험도 분석을 통해 예측된 댐 붕괴 위험도 ($4.67 \times 10^{-6}/\text{year}$)는 U.S. Bureau of Reclamation의 댐 위험도 평가기준($10^{-4}/\text{year}$)보다 낮으며, Alamo댐의 붕괴로 인한 경제적 피해 위험도 (\$2,964/yr) 역시 New South Wales Treasury Total Asset Management(NSW TAM) 기준에 보다는 낮은 것으로 판명되었다. 따라서, Alamo댐의 붕괴위험도 및 경제적 피해위험도는 그리 높지 않은 것으로 판단된다. 다만, Alamo댐의 위험도 판정은 적용기준에 따라 달라질 수 있으며, 동 분석결과를 절대적인 것으로 오해해서는 안 된다.

표 1. Alamo 댐 위험도 저감 방안

코 드	대안 설명	예상 소요 비용 (\$M)
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 게이트 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
FR10	분쇄석, soil cement, RCC로 하류부 보호	1.59
FR15	풍랑에 대한 제방 보호 시설 설치	1.47
FR16	5 ft 높이의 parapet wall과 crest and toe protection (FR10과 FR14의 결합)	3.80
ER1	상하류부 (up-/downstream) berm 설치	47.86
ER2	하류부 (downstream) berm 설치	14.81
ER3	Soil mixing of foundation material/chemical grouting	40.09
FER1	ER1과 FR9의 결합	48.52
FER2	ER2와 FR3c의 결합	25.12

표 2. Alamo 댐 위험도 저감 방안에 대한 위험도 분석 결과

코 드	예상 소요 비용 (\$M)	댐 붕괴 위험도 (10-6/yr)	경제적 피해 위험도 (\$/yr)	연간 예상 소요비용(C) (\$/yr)	총 예상 비용 (\$/yr)	경제적 피해 저감위험도(B) (\$/yr)	B/C
Existing(E)	-	4.67	2,946	-	2,946	-	-
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
FR11	3.92	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
FR9	21.38	2.78	2,166	1,377,100	1,379,271	780	5.66E-04
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
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

5.4 댐 위험도 관리(Risk Management)

위험도 관리(risk management)는 표 3에서 보듯이 손실빈도와 손실강도의 두가지 측면에 따라 이루어진다. 즉, 손실빈도와 손실강도가 모두 낮은 경우는 해당 위험(risk)을 “보유”, 손실빈도는 높으나 손실강도가 낮은 경우는 위험의 “보유 또는 예방”, 손실빈도는 낮으나 손실강도가 높은 경우는 위험을 “전가”, 손실빈도와 손실강도 모두가 높은 경우에 위험을 “회피”하는 일반적인 위험도 관리 방법이다.

따라서, 위험도 분석을 통해 예측된 Alamo댐의

표 3. 위험도 관리(Risk Management) 방법

손실빈도 \ 손실강도	낮 음	높 음
낮 음	보유	회피
높 음	보유/예방	회피

위험도가 높지 않은 상황에서 동 댐의 위험도 저감을 위해 제시된 표 1의 대안들에 대한 시행 필요성은 그리 크지 않은 것으로 판단된다. 즉, Alamo댐의 위험도를 “보유”하는 것도 위험도의 관리측면에서는 하나의 대안이 될 수 있다. 다만, 앞서 언급한 바와 같이 Alamo댐 위험도 평가결과는 사회적으로 요구되는 적용기준에 따라 달라질 수 있으므로 동 댐의 위험도 관리 측면에서 제시된 저감방안들에 대한 검토를 실시하였다.

표 2에 정리된 Alamo댐 위험도 저감방안들에 대한 위험도 분석결과에 의하면, 제시된 19가지 대안들 중 “FER1”은 댐 붕괴위험도 ($6.04 \times 10^{-8}/\text{year}$)와 경제적 피해 위험도(\$46/yr) 측면에서 최적의 대안인 것으로 분석되었다. 다만, “FER1”의 시행에 필요한 예상 소요비용(\$48,52 $\times 10^6$) 19가지 대안 중 가장 높다.

Alamo댐 위험도 저감방안들의 시행에 소요되는

비용과 경제적 피해위험도를 고려한 총 예상비용 측면에서는 “FR15”(\$97,616/yr)가 가장 적합한 것으로 예측되었다(그림 7 참조). 또한, 각 대안들의 시행비용(C)과 이들의 인해 발생된 경제적 피해 저감 위험도(B)을 고려한 비용 대비 편익(B/C)측면에서는 “FR14”가 가장 최적의 방안으로 분석되었다. 따라서, 표 3에 제시된 Alamo댐 위험도 저감방안들에

대한 최종 선택은 Alamo댐의 안전성에 대한 사회적 요구 및 예산상의 여건 등 위험도 관리의 목적에 따라 이루어져야만 한다. 즉, 붕괴위험도를 낮추고자 할 경우에는 “FER1”을, 경제적 피해 위험도를 포함한 최소비용의 측면에서는 “FR15”를, B/C측면에서는 “FR14”를 선정하는 것이 바람직한 것으로 판단 된다.

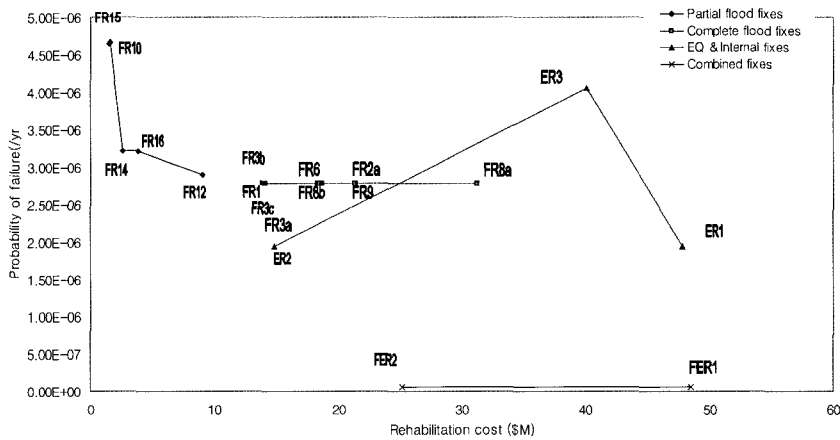


그림 7. Alamo댐 위험도 저감방안들의 댐 붕괴위험도와 예상 소요비용

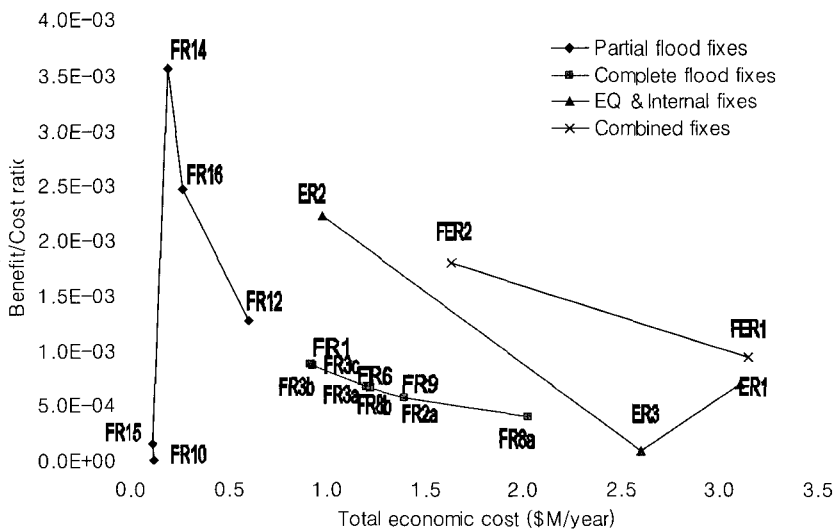


그림 8. Alamo댐 위험도 저감방안들의 총비용과 B/C

6. 결론

본 강좌에서는 수공구조물에 대한 Risk Analysis 기법에 대한 학술강좌 (I)과 (II)를 통해 소개되어진 위험도 해석기법 적용에 대한 이해를 돕기 위해 미국 아리조나주에 위치한 Alamo댐에 대한 위험도 예측과 평가 그리고 관리까지의 단계별 적용사례를 소개하였다. 특히, 동 적용사례를 통해 risk analysis 기법을 수공구조물에 대한 적용은 대상 구조물의 붕괴위험도 등의 공학적인 위험도뿐 아니라 물적, 인적 피해 등을 포함한 사회적 위험도까지 분석이 가능해지고 분석결과에 따라서 최적의 위험도 관리가 이루어질 수 있음

을 확인할 수 있었다. 다만, risk analysis 기법의 적용을 통한 보다 합리적이고 정확한 위험도 분석과 관리를 위해서는 수공구조물들에 대한 체계적인 자료축적은 필수적이다. 또한, 수공구조물들의 위험도 해석 결과에 대한 평가와의 기준이 되는 법적, 사회적 위험도 기준(risk criteria) 마련도 필요하다. 따라서, 기후변화와 집중호우로 인해 해마다 많은 홍수피해가 발생하고 홍수로부터 국민의 안전을 댐이나 제방 등의 수공구조물들에 의지하고 있는 우리나라의 현실에서는 수공구조물들의 안전성 확보와 적절한 위험도 관리를 위하여 risk analysis 기법의 적용을 위한 보다 활발한 연구가 이루어질 기대해 본다. 