Journal of the Ergonomics Society of Korea
Vol.20, No.3, pp.61-76, December 2001

Fault Tree Analysis 기법을 이용한 발파사고 분석

An analysis of Blasting Accidents by Fault Tree Analysis

서 승 록*, 이 정 훈**

ABSTRACT

This study is for analyzing the explosion accidents in the tunnels, roads, subways, streets and various kinds of building construction area with the use of Fault Tree Analysis(FTA). Based on the Police Department and Guns & Explosives Safety Technology Association's researching materials, the explosion accidents have been investigated and analyzed between 1988 and 1997. As the result, we can find out that the majority of the explosion accidents in Korea is the accidents by flown stones(45.7%), like in Japan.

So we make the research chart which is needed for analyzing the explosion accidents, and then analyze these accidents systematically, using the investigation codes of the industrial accidents. After that, the FTA was performed on the accidents by flown stones. They result from non-observance of the safety rules, and less knowledge of the safety and so on. Moreover several causes are combined and then the accidents are apt to happen. So according to the results of this study, for the protection of the explosion accidents, the specialized safety education is badly needed and the enough investigation of the places before the work along with the management for safety in working must be planned.

Keywords: Fault Tree Analysis, Investigation codes, Blasting accidents

* 대구대학교 자동차·산업·기계공학부 산업공학전공 교수
주 소 : 경상북도 경산시 진량면 내리리 15번지
전 화 : 053-850-6543
E-mail: seosl@biho.taegu.ac.kr
** 대구대학교 대학원 산업공학과 박사과정

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

1. 서 론

우리나라는 1970년대 이후 경제발전의 성장과정에서 야기된 후유증의 하나로 부실 시공과 안전에 대한 경시풍조가 사회 전반에 만연되었고, 1980년대 후반기부터는 대단위 터널 굴착과 도시 지하철 및 대형 빌딩의 건설이 급증함에 따라 안전사고에 따른 재해도 다양해지고 대형화되고 있는 추세이며, 이로 인한 대형 재해가 끊임없이 발생되고 있음에도 불구하고 안전에 대한 불감증은 근절되고 있지 않는 실정이다.

특히 건설, 토목현장에서의 안전활동은 전근대적인 방법으로 관리되고 있으며, 안전시설은 형식적이며 안전 수칙은 무시되어 동일한 종류의 재해가 반복해서 발생되고 있다.

이 중 화약류에 의한 사고 역시 예외가 아니며, 화약제조량의 증가와 함께 발파사고도 꾸준히 대형화, 다양화되고 있는 추세이다.

화약이 최초의 산업용도로 쓰여진 것은 1890년경 경상남도 마산에서 일본인이 채광에 흑색화약을 사용하면서부터 이며, 그 후 1968년에 ANFO제작, 1977년 도심지 발파용인 미진동파쇄기(CCR)생산 공급, 1981년 정밀폭약과 슬러리폭약, 1993년에는 에멀젼 폭약이 각각 생산 공급되었다.

우리나라 뇌관의 연간 사용량은 70년대 2천여발 수준에서 80년대 3천5백만 발로 증가하였으며, 90년대에는 약 4천여만 발로 그 생산량이 증가하였다(원연호 등, 2000). 이러한 화약제조량 및 사용량 증가에 따른 발파사고의 재해는 매우 우발적이기 때문에 예측이 까다로우며, 현장실험도 어렵다.

통상 안전사고의 재해조사는 산업안전보건법에서 제시되고 있는 산업재해조사표를 이용하거나 자체적으로 만든 사고조사표를 이용하고 있으나, 발파사고와 같은 특수 분야의 사고는 그의 특성에 맞는 재해조사표가 필요하다.

우리나라의 경우 경찰청에서 발파재해조사를 실시하고 있으나 이것은 다른 형 · 민사 사건과 같이 취급되어 오고 있으므로, 재해에 대한 공학적 분석이 불가능하였으며, 이에 따라 유사 및 동종 재해에 대한 체계적 조사가 불가능하였고, 대책선정 및 수립도 불가능한 실정이었다.

따라서 본 연구에서는 우리나라 화약류산업에 많은 영향을 미친 일본 발파사고와의 유사점 및 차이점을 통해, 전 발파사고재해에 이용할 재해조사표를 개발하고, 이를 기준으로 우리나라 발파사고에 대한 체계적인 FTA분석을 실시 하고자 한다. 또한 발파사고에 대한 기존의 조사방법과 FTA기법을 이용한 조사방법의 결과를 비교분석 하고자 한다.

2. 기존 연구

이 장에서는 기존 발파사고의 분석에 관한 선행연구의 취약점을 제시하였으며, 본 논문에서 적용하고자 하는 발파사고분석을 위한 FTA기법 적용 연구가 전무하여, 유사 산업분야에서 적용되고 있는 FTA분석 사례들을 중심으로 국내 · 외 연구동향을 기술하였다.

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

2.1 발파사고분석에 관한 선행연구의 취약점

한국의 발파사고에 관련된 연구는 대부분 발파에 수반되는 소음, 지반진동에 관한 것(김영환등, 2000)과 제품개선 및 경제성에 관한(이천식, 2000) 것이다.

이것은 발파현장에서의 소음과 진동이 민원발생으로 치닫고 있고 그로 인해 보다 나은 제품생산개발을 위해 필요한 요소이기 때문으로 판단된다. 그러나 이러한 연구는 주변민원의 대비방안으로 개발되어온 것이며, 발파현장에서 누구보다 위험에 직접 노출되어 있는 화약류 취급자나 관리자의 재해발생원인 및 분석에 관련된 연구가 선행되지 않은 것과 재해분석시 산업재해조사표와 같은 구체적이고 객관적인 기준을 사용하지 않았다는 문제점이 있다하겠다. 이외에 발파사고를 J. H. Harvey의 3E를 기준으로 분석한 화약산업의 재해분석 및 안전대책에 관한 연구가 있다.(안명석, 1987)

그러나 이것 또한 일본 발파사고자료를 한국의 실정에 대입시킨 것으로써 한국 발파사고의 경우와는 결과가 다를 것이라는 문제점을 갖고 있다.

이와 같이 현행발파사고에 대한 연구는 화약을 직접 취급하는 산업현장 일선에서의 작업자와 기 발생된 재해자 및 재해유형과 관련된 연구가 부족하며, 우리나라의 발파사고사례를 중심으로 객관적인 도구를 사용한 체계적인 분석이 취약하다 하겠다.

2.2 국내 연구동향

한국에서도 산업재해 및 화학 Plant와 같은 아주 복잡한 시설에 대한 재해 조사를 위해서 FTA기법을 사용한 연구가 널리 활용되어 지고 있다. 마영식(1984)은 FTA기법을 이용하여 자동차 브레이크 고장의 분석 및 평가를 실시하였고, 이근희 등(1989)은 Bag Filter 고장을 분석하였으며, 김병석(1989)은 LPG저장탱크 폭발원인을 분석하기도 하였다.

그 후로도 FTA분석기법은 산업전반에 걸쳐 활용되었는데 Compress고장 진단과 이송용 로울러 베어링 고장진단에도 활용되었다.(배용환등, 1993, 1994) 일반적으로 기계계통에서 재해율이 가장 높은 프레스에 대한 재해분석을 정기섭(1994)이 실시하였다.

최근에는 한국에서도 FTA분석기법을 활용하여 항공분야와 원자력발전소 같은 최첨단 분야의 안정성 및 재해분석을 실시하고 있다. 항공기 운영시에 발생하는 안전사고를 기계적 요인을 중심으로 분석, 각 기종별 안전도를 평가하고 일정시간대에 안전도 분석에 대한 결과를 도출하였으며(김준식, 1997), 항공기 RAM분석으로 항공기 추진기관의 고장에 영향을 주는 주요 부품 및 취약부분에 대한 연구(이병렬, 1998)도 진행되었다.

김재학(1998)은 원자력발전소 보조급수계통의 신뢰도 분석을 FTA기법을 이용하여 중기발생기의 체크밸브의 열림실패, 터빈구동펌프의 기동실패 및 모터구동펌프의 고장에 대해 실시하였다.

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

2.3 국외 연구동향

시스템의 신뢰성과 안정성을 분석, 평가하는데 매우 유효한 Fault Tree Analysis는 1962년 벨전화연구소의 H. A. Watson이 Minuteman Missile의 발사제어시스템 연구에 관한 공군계약에 관련해서 처음으로 고안되어 미사일의 우발사고를 예측하는 문제의 해결에 공헌하였다. 그 후 보잉사의 Haasl, Schroder, Jackson등은, FTA를 컴퓨터를 사용하는 시뮬레이션이 가능하도록 수정하는 등, 중요한 개량을 했다. 이 당시의 FTA의 진보는 보잉사를 중심으로 하는 항공우주산업에 의한 것이었다.(Fussel, 1974)

그 후 NASA에서 극히 제한된 범위 내에서 우주선을 개발하는데 시스템의 안정성을 평가하기 위하여 이 기법을 사용하였으며 (Haward E. Lambert, 1977) 1965년 미국에서 열린 Safety Symposium에서 시스템의 신뢰성과 안정성을 분석하는 방법을 제시하여 더욱 광범위하게 FTA를 적용시키는데 대한 관심을 크게 불러 일으켰다. 1972년에는 NASA에서 더욱 정교한 우주선을 설계하는데 광범위하게 연구하였으며 1974년 원자력 발전소의 자동 반응기의 신뢰성과 안정성을 분석, 평가하는데 사용하였다.(Steven A. Lapp, 1977)

1979년 TMI 사고와 1986년 체르노빌 사고를 계기로 원자력 발전소 신뢰도 제고에 대한 관심이 더욱 고조되었으며 이에 산업재해 전반에 FTA기법을 이용한 분석연구가 진행되어 오고 있다.

3. 발파사고 분석

이 장에서는 본 연구에서 개발 및 적용하고자 하는 발파사고의 재해조사표와 FTA 분석을 위한 기초자료들을 일본과 우리나라의 과거 발파사고 사례들을 기준으로 분석하고자 한다.

3.1 일본의 경우

일본의 발파사고는 1957년의 263건을 피크로 일본 전국에서 감소되고 있으며 1975년에는 56건으로 감소되었고 이후 약간의 증감을 반복하면서 1987년에는 14건까지 감소되었다.(김정진, 1993) 이는 일본 화약류 안전협회의 중 장기적인 발파사고 안전대책 활동의 결과로 나타난 것이다.

1975년에서 1987년간의 합계를 보면 발파에 따른 전체 재해자 351명중 사망자가 59명으로 전체 발파사고의 16.8%로 대단히 높은 비율로 나타났다.(그림 1) 이는 특수분야인 발파산업에서 사용되고 있는 화약류의 에너지가 폭속이 2000m/s에서 8000m/s의 폭굉을 수반하고 있으며, 비 에너지가 높은 화약류를 사용하고 있기 때문으로 판단된다. 그러므로 장약공 내의 화약류가 폭발하면서 커다란 에너지로 암석등 피 파괴체를 밀어내고 이에 장약부근에 있던 작업자 등이 재해를 입게되는 것이다.

표 1은 일본의 1975년에서 1987까지 총 13년간의 발파사고 사례를 건수, 사망수, 부상수 별 및 항목 별로 나타낸 것이다.

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

표 1. 일본의 발파사고 사례(1975~1987년)

건수, 사망수, 부상수별	건수													사망수													부상수												
항목별 / 연도별(1월~12월)	87	86	85	84	83	82	81	80	79	78	77	76	75	87	86	85	84	83	82	81	80	79	78	77	76	75	87	86	85	84	83	82	81	80	79	78	77	76	75
1 대피지연						1		1	1																							2		2	2				
2 불발(잔류약)(회수등을 포함)	5		1			3	1	5	6	2	3	6	4													3	6		2			6	2	9	14	4	5	11	7
3 조기접근(지연폭발)							1																										1		1				
4 비석·낙석등	6	6	8	8	16	19	19	30	27	33	33	34	42	1	1	1	1	1	1	1	1	3	7	2	4	2		2	2	3	6	7	6	7	1	6	4	7	10
5 신호·경계·연락 불충분	1		4		2		1	1	2	1		3	2			2						1			3		1		3		2		2	1	1	2		3	2
6 장전작업중				3	2	4	1	2	6	6	2	3	4				2	2			1	2	2			1					7	6	3	5	8	9	3	6	5
7 대피장소 부적당				2			3		2	2	1	1	1										1		1	1				3			3		2	1	2	1	
8 폭발확인 불충분									1																					4					1				
9 점화부주의		1				1		1		1	1																	2				1		1		1	1		
10 프라이머카트리지등 제작중									1													3																	
11 일시보관중				1																										2									
12 수면화기(소석포함)에 의해																																							
13 휴대중(운반중)부주의	1								1	1												1	1				1									2			
14 결선등 부주의											1		2											2													2		5
15 과조발(점화중을 포함)																																							
16 도선이 전원에 접촉																																							
17 시판의 변형등	1	1									1																												
18 준비중의 발파								1																										15					
19 전발파에 의해 점화																																							
20 누전등에 의해					1						1																				4						3		
21 사용중 부주의(과실을포함)						1				1		1																				2				2			
22 취급중 부주의(과실을포함)							1	3		2		1																					1	3		3		1	
23 결착작업중(공업뇌관도화선)																																							
24 대피시의 부주의			1				1	1					1													1			1				1		1				1
25 도통시험중																																							
26 대피중 점화																																							
27 결착작업중(전기뇌관)																																							
28 건설용리베트총등공포사용중			2									1				1		1											3		3							1	
29 신호뇌관에 의해																																							
30 낙뢰																																							
31 기타(후가스를 포함)			3		1	1	1	1	2	4	2												1						1			1	2	1	3	3	1		
계	14	8	19	14	22	30	29	46	50	53	45	50	56	1	1	4	3	4	1	1	2	10	12	4	8	8	8	4	12	12	19	25	21	45	33	33	21	30	30

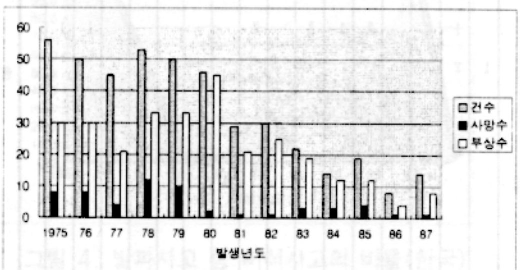

그림 1. 일본의 발파사고건수, 사상자수 비교

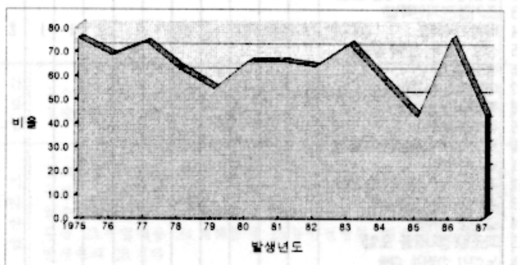

그림 2. 발파사고 중 비석사고의 비율(일본)

발파사고항목 중 비석 및 낙석에 의한 사고가 전체의 64.4%를 차지하는 것으로 나타났다.(그림 2) 이는 장약 부근에 사람이 위치하고 있을 때 비석 및 낙석이 발생되면 재해가 많이 일어남을 나타내고 있다. 왜냐하면 비석 및 낙석에 의한 사고는 발생원으로 부터 멀어질수록 급격히 안전해 지기 때문이다.

이외에 불발잔류약에 의한 경우가 8.25%, 장전작업 중 7.57%, 신호, 경계, 연락 불충분이 3.9% 순으로 나타났다. 그리고 연 평균

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

재해건수는 33.5건에 사망자는 4.54명, 부상자는 22.54명으로 나타났다.

3.2 한국의 경우

경찰청과, 총포·화약 안전기술 협회자료에 의하면 1988년에서 1997년까지 10년 간 발파사고는 매년 10건 이내로 발생되는 것으로 조사되었다.(표 2) 일본의 경우와 같이 사망(29.6%) 등 중대재해비율이 한국에서도 높게 나타났으며 (그림 3), 비석 및 낙석에 의한 사고의 비율도 높게 나타났다.(그림 4)

일본의 경우와 같이 발파사고원인으로는 비석·낙석에 의한 사고가 45.7%로써 가장 많은 비율을 차지하였으며, 그 다음이 장전작업중·소각처리중·누전·낙뢰(8.6%)등이었다.

그러나 일본에 비해 우리나라는 대체적으로 발파사고에 따르는 사망자수가 증가하고 있음을 알 수 있다. 이것은 발파사고에 대한 중요성인식 및 사망자수의 증가에 따른 문제점해결이 일본에 비해 낮고 관련단체 및 행정기관의 중 장기적인 대책이 마련되지 않았기 때문인 것으로 사료된다. 누전이나 낙뢰 등에 의한 사고 역시 일본의 경우는 거의 없는데 비해 한국의 경우는 장전작업 중과 같은 두 번째로 많은 8.6%로 나타났다. 이는 뇌관과 같은 화약류 제품의 안정성이 떨어진다고 볼

표 2. 한국의 발파사고 사례(1988~1997년)

건수,사망수 부상수별 / 연도별(1월~12월) 항목별	건수										사망수										부상수									
	97	96	95	94	93	92	91	90	89	88	97	96	95	94	93	92	91	90	89	88	97	96	95	94	93	92	91	90	89	88
1 채석시연																														
2 불발(잔류약)(회수등을 포함)																														
3 조기접근(지연폭발)																														
4 비석·낙석등	6	4			2			2	1	1	2	3			1			2	1	2		2						1	1	
5 신호·경계·연락 불충분																														
6 장전작업중				1	2									1	2										1					
7 대피장소 부적당																														
8 폭발확인 불충분																														
9 점화부주의																														
10 프라이머(카트리지)를 제작중																														
11 발사보관중																														
12 주변화기[소각포함]에 의해		1	1			1							1										3			3				
13 휴대중(운반중)부주의																														
14 결선중 부주의																														
15 과조발(점화등을 포함)																														
16 도선이 선로에 접촉																														
17 지반의 변형등																														
18 준비중의 발파																														
19 전열파에 의해 점화																														
20 누전등에 의해		1			2										1							5			9					
21 사용중 부주의(과실을포함)																														
22 취급중 부주의(과실을포함)																														
23 굴착작업중(공업뇌관도화선)																														
24 대피시의 부주의				1										1										2						
25 도통시험중																														
26 대피중 섬락																														
27 굴착작업중(전기뇌관)																														
28 건설용리베트총등공포사용중																														
29 신호뇌관에 의해																														
30 낙뢰			1		1			1					1					3					1		7					
31 기타(가스를 포함)		1		1		2	1	1						1			1	1				1		12		2	1	6		
계	6	7	2	3	7	3	1	4	1	1	2	3	2	3	4	0	1	6	1	2	0	8	4	14	17	5	1	7	1	0

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

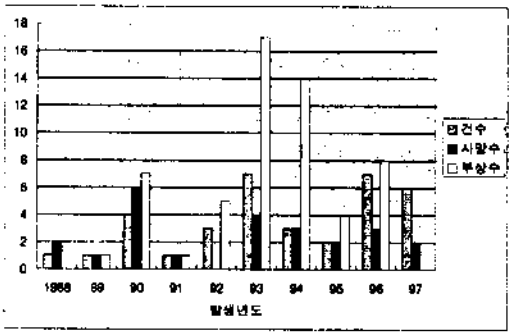

그림 3. 한국의 발파사고건수, 사상자수 비교

수 있으며, 또한 주변환경에 대한 안전조치 및 시설이 불량하거나 미비했다고 볼 수 있다. 여기서 1993년도에는 발파사고 총 7건 발생에 사망자수 4명, 부상자수가 17명으로 나타났다. 이것은 1993년도에 건설경기가 일시적으로 활성화됨에 따른 화약류 사용의 증가가 원인으로 보여진다.

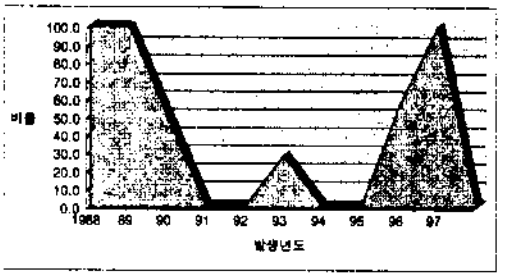

그림 4. 발파사고 중 비석사고의 비율(한국)

4. 발파사고에 대한 분류코드 작성 및 FTA에 의한 분석

본 장에서는 제3장에서 분석한 발파사고의 기본자료들을 이용해서 FTA분석을 위한 발파사고재해 분류코드를 작성하며 이를 이용해서 FTA분석 결과를 제시하고, 기존의 발파사고 조사, 분석과의 비교를 통해서 본 연구의 타당성을 검증하고자 한다.

4.1 발파사고에 대한 재해분류코드 작성 및 Input

한국의 경우 산업안전보건법에서 제시하고 있는 산업재해조사표에 의하거나 자체 작성한 사고조사표를 사용하고 있으나, 그 항목은 제조업이나 건설업에 치중되어 있어 특수한 업종, 즉 발파산업과 같은 업종에서는 적용하기가 어려운 실정이다. 현재 산업안전보건법 제10조와 시행규칙 제 4 조에서는 사망 또는 4일 이상의 요양을 요하는 부상을 입거나 질병에 걸린 자가 발생한 때에는 28 항목의 산업재해조사표를 작성하여 제출하게 하고 있는데 그 내용은 표 3과 같다.

표 3. 재해조사 항목

건설업	1.소속사업장 2.공사종류 3.단위공정 4.공정율 5.직종 6.근속기간 7.작업종류
기타산업	8.고용형태 9.근무형태 10.작업형태 11.목격자유무 12.근무작업공정 13.동시작업 14.인적피해 15.상해종류 16.상해부위 17.휴업일수 18.기인물 19.개인보호구 20.방호설비 21.발생장소 22.작업환경 23.작업내용 24.재해동작 25.불안전행동 26.불안전상태 27.발생형태 28.기타

그러나 발파사고 재해분석은 현장의 특수성과 재료 및 제품의 비 일반성 때문에 그의 특성에 맞는 재해조사표의 필요로 발파작업의 안전사고와 관련하여 발파 사고의 기본 요인을 과거 발파사고 사례와, 사고를 일으킬 가

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

표 4(a). 작업대상물의 결함요인 분류표

분류	분류번호	분류항목	분류	분류번호	분류항목
A1. 재료 및 제품의 결함	A11	재료불량		A125	탈락(빠짐)
	A12	재료노후		A126	꼬임
	A13	재료부족		A127	동결
	A14	재료미비		A128	식별곤란
	A15	자연발화재료		A129	기타
	A16	흡습성재료	A2. 보조구의 결함	A21	부적합
	A17	대전성재료		A22	불량
	A18	파손재료		A23	미비
	A19	Cut-off 재료		A24	기타
	A110	용융재료	A3. 경보장치의 결함	A31	부적합
	A111	혼합불량		A32	불량
	A112	포장불량		A33	미비
	A113	용기불량		A34	기타
	A114	감도불량	A4. 복장, 보호구 결함	A41	부적합
	A115	시차불량(뇌관)		A42	불량
	A116	취기과다		A43	미비
	A117	폭풍압과다		A44	기타
	A118	용량부족	A5. 안전방호 시설장치의 결함	A51	안전방호시설부적합
	A119	과전류발생		A52	안전방호시설불량
	A120	소음발생		A53	안전방호장치부적합
	A121	가스발생		A54	안전방호장치불량
	A122	화염발생		A55	안전방호시설 부재
	A123	정전기발생		A56	기타
	A124	진동발생			

능성이 있는 요인을 포함하여 종합적으로 코드화 하였다. 분류코드는 IAD(Industrial Accident Dynamics)를 기준으로 개발된 체계를 이용하였으며(정기섭, 1994), 작업대상물에 따른 결함, 인적 결함, 환경적 결함 및 기타 관리, 감독, 교육에 따른 결함 요인으로 분류하였다. 표 4를 기준으로 FTA분석을 위해 Fault Tree+ v9.0(Isograph Limited, 1999)라는 프로그램을 사용하여 FT도를 작성하면 그림 5와 같다. 그림 5(a)는 가장 많은 사고 비율을 차지하는 비석에 의한 사고를 중심으로 구축되었으며, FTA의 분석 특성상 상위사상에 영향을 많이 미칠 수 있는 하위사상들을 논리적 기호를 사용하여 구축하였다. 여기에서 TOP사상이 발생할 조건은 비석발생과 동시에 작업 중 비석발생위치에 작업자가 위치해 있어야 한다. 비석발생은 장전작업이 미비할 경우와 폭약에 삽입된 뇌관이 폭발할 경우에 각각 독립적으로 발생할 수 있다. 작업 중 비석발생위치에 작업자가 위치하는 경우는 안전방호시설의 결함 또는 비석발생위치에 작업자가 위치해 있는 경우로 볼 수 있다.

표 4(b). 작업자(인적)의 결함요인 분류표

분류	분류번호	분류항목	분류	분류번호	분류항목
B1. 태도의 결함	B11	명령무시	재료, 보조구 결함	B54	불량,부적합보조구사용
	B12	명령불복종		B55	제품혼용(뇌관,폭약)
	B13	비협조		B56	용도이외의것 사용
	B14	공포,긴장,흥분		B57	무리한 사용
	B15	성격조급		B58	손사용
	B16	잡념,망상		B59	기타
	B17	열중,몰두	B6. 위험장소 물체에 접근	B61	위험,유해장소 출입
	B18	이기심		B62	운전중 기계장치에 접근접촉
	B19	사용중부주의(과실포함)		B63	물체의 접촉
	B110	취급중부주의(과실포함)		B64	붕괴,파괴되기쉬운 물체에 접근접촉
	B111	무절제한생활		B65	불안전한장소에 접근접촉
	B112	기타		B66	기타
B2. 지식 또는 기능 결함	B21	지능결여(이해부족)	B7. 안전방호 장치, 시설	B71	안전방호장치의 제거
	B22	무경험		B72	안전방호장치의 파괴
	B23	미숙련		B73	안전방호장치의 조정잘못
	B24	안전지식결여		B74	안전방호시설의 제거
	B25	나쁜작업습관		B75	안전방호시설의 파괴
	B26	전폭약포제작미비		B76	안전방호시설의 미설치
	B27	결착작업미비(전기,공업뇌관)		B77	기타
	B28	장전작업미비	B8. 직접확인 및 태만	B81	안전방호장치점검확인소홀
	B29	결선작업미비		B82	안전방호시설물점검확인소홀
	B210	점화미비		B83	경보장치 점검확인 소홀
	B211	과조발		B84	자동차단장치점검확인 소홀
	B212	도통시험미비		B85	제동장치 점검확인 소홀
	B213	잔류화약류처리미비		B86	가제장치 점검확인소홀
	B214	기타		B87	기타
B3. 신체적 결함	B31	시력결함	B9. 운반, 수리, 보관	B91	운반잘못
	B32	청력결함		B92	수리잘못
	B33	질병		B93	보관잘못
	B34	반응둔감		B94	기타
	B35	신체부적격	B10. 기타 규율 무시 행위	B101	작업표준 미준수
	B36	음주,흡연		B102	안전수칙 미준수
	B37	과로,피로		B103	무자격 조작
	B38	기타		B104	연락 불충분
B4. 복장, 보호구 결함	B41	불량,부적합보호구착용		B105	불안전속도 조작
	B42	잘못사용		B106	불안전위치, 자세동작
	B43	미사용		B107	점검태만
	B44	선택잘못		B108	조기접근
	B45	기타		B109	승득장난
B5. 재료, 공구,	B51	불량,부적합재료사용		B110	타용도 이용
	B52	불량,부적합공구사용		B111	기타
	B53	불량,부적합제품사용			

폭약에 삽입된 뇌관의 폭발은 전기뇌관의 폭발 또는 비 전기뇌관의 폭발로 볼 수 있다. 안전방호 시설의 결함은 각각 안전방호 시설

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

의 부재, 안전방호시설의 미사용, 안전방호시설의 부적합, 안전방호시설의 불량 등으로 볼 수 있으며, 안전방호시설의 미사용은 안전방호시설제거, 안전방호시설파괴, 안전방호시설의 미설치 등에 의해 발생될 수 있다.(그림 5(b))

표 4(c). 환경의 결함요인 분류표

분류	분류번호	분류항목	분류	분류번호	분류항목
C1. 작업주변의 결함	C11	물체의 위치불안정,부적절	C2. 작업환경의 결함	C210	화기
	C12	물체의 결함 결함		C211	누전
	C13	작업공간 협소		C212	정전기
	C14	통로 미확보, 협소		C213	녹,흙,찌꺼기
	C15	정리 정돈 불량		C214	풍향
	C16	기계장치,공구,집기배치결함		C215	천공내 거칠음
	C17	적재결함		C216	무선전파
	C18	작업바닥 거침		C217	탄진
	C19	기타		C218	부석
C2. 작업환경의 결함	C21	조명, 채광		C219	지반변형
	C22	환기, 통풍		C220	낙뢰
	C23	온도		C221	기타
	C24	습도	C3. 경계설비의 결함	C31	경계구역 불명확
	C25	소음		C32	경계표시 없음
	C26	분진		C33	경계표시 희미함
	C27	유해가스		C34	경고표시 미비
	C28	가연성 가스		C35	경고표시 희미함
	C29	수증기		C36	기타

비석발생위치에 작업자가 위치하는 경우에 대해 FT도를 작성하면 그림 5(c)와 같은데, 작업현장에서 비석이 발생하는 경우, 나쁜 대피위치를 선정한 경우, 대피도중에 비석이 발

표 4(d). 관리.감독.교육의 결함요인 분류표

분류	분류번호	분류항목	분류	분류번호	분류항목
D1. 기술적 결함	D11	설계결함	D3. 관리감독 결함	D35	작업량 책정 과다
	D12	작업 방법 결함		D36	조업시간 과다
	D13	작업 공정 결함		D37	휴식시간 책정의 잘못
	D14	안전방호시설 미비		D38	인사관리 결함
	D15	기타		D39	감독지시 착오
D2. 교육지도 결함	D21	표준작업 교육미비 불충분		D310	작업지시 착오
	D22	화약류 교육미비 불충분		D311	노동의욕 상실
	D23	안전교육 미비 불충분		D312	대책실시 지연
	D24	교육자의 자질 결여		D313	화약류작업공정조치 불비
	D25	훈련 불충분		D314	화약류에대한안전조치결여
	D26	전업자가 그렇게 해와서		D315	사고 재난시 대책결여
	D27	기타		D316	작업표준 미비
D3. 관리감독 결함	D31	안전관리 조직미비 불충분		D317	작업표준 이행규제결여
	D32	안전관리 활동미비 불충분		D318	기타
	D33	안전교육제도미비 불충분	D4. 가정적 요인	D41	부업
	D34	점검보존기준제도미비불충분		D42	가정문제
				D43	기타

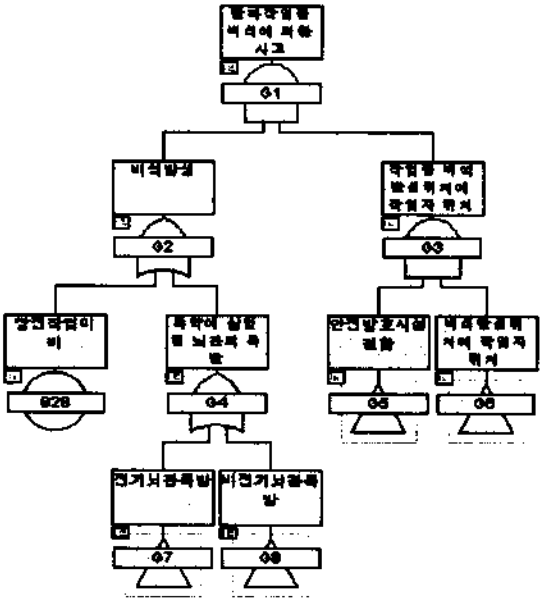

그림 5(a). 발파작업 중 비석에 의한 사고 Fault Tree

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

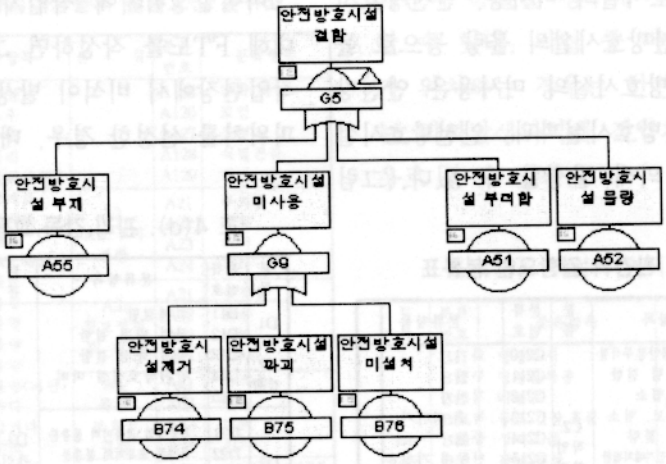

그림 5(b). 안전방호 시설결함의 Fault Tree

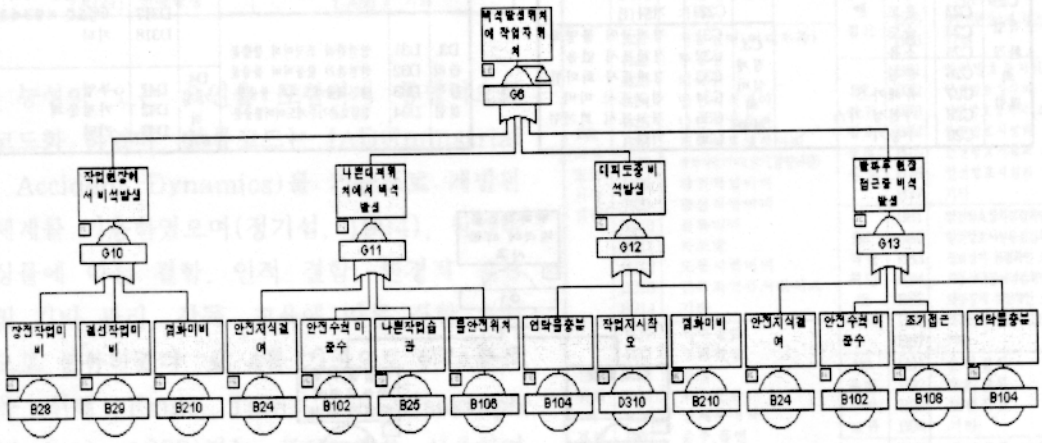

그림 5(c). 비석발생 위치에 작업자가 위치하는 경우 Fault Tree

생되는 경우, 발파 후 현장점검 중 비석이 발생되는 경우로써 각각 독립적으로 상위 사상을 발생시킬 수 있으며, 각각의 사상은 하위 사상을 가지고 있다

전기뇌관의 폭발은 정전기, 무선전파, 무리한 작업방법, 누설전류, 낙뢰, 과조발, 점화미비등에 의해서 발생될 수 있으며 이들 중 어떤 한 사상이라도 발생되면 상위사상이 발생될 수 있다. 중간사상 중 낙뢰는 일본의 경우는 13년간 단 한 건의 사고도 없었는데 비해 한국의 경우는 8.57%라는 발생확률을 가짐으로 중요한 요인으로 지적되고 있다.

비 전기뇌관의 폭발은 대체적으로 전기뇌관의 경우에 비해 제품의 비 안정성에 의한 사

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

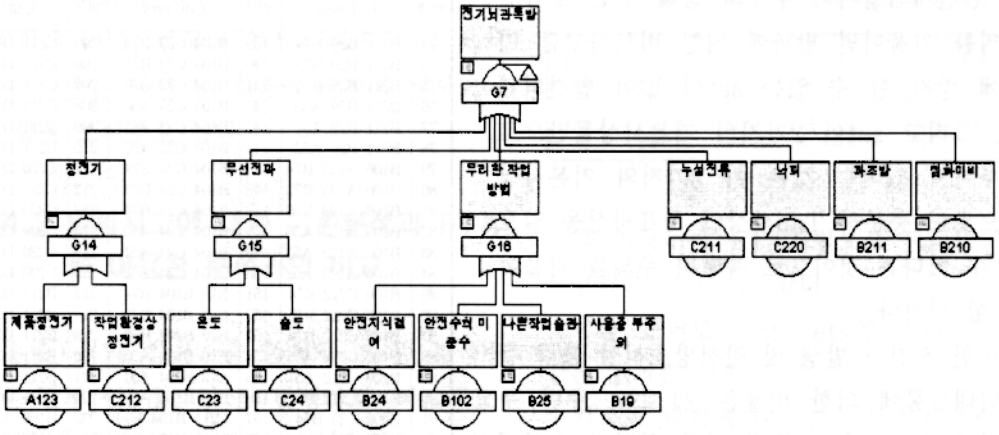

그림 5(d). 전기뇌관폭발의 Fault Tree

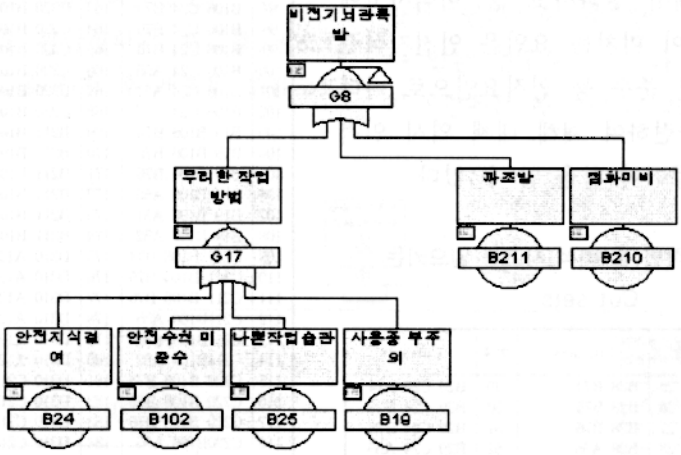

그림 5(e). 비 전기뇌관폭발의 Fault Tree

고보다는 인간의 무리한 작업방법등 인적요인에 의한 사고가 대부분으로 나타나고 있다.

4.2 FTA Output의 분석

작성된 FT도를 기준으로 TOP사상인 발파작업 중 비석에 의한 사고의 Cut sets는 표 5와 같다.

총 270개의 Cut sets가 발견되었으며 이 중 인적결함요인만으로 이루어진 set이 45개로써 전체의 16.7%를 차지하고 있음을 알 수 있다. 30개의 set이 2가지의 기본사상만으로 이루어진 반면 나머지 240개의 set이 3개의 기본사상으로 이루어져 있음을 알 수 있다. 이들 중 인적결함요인이 차지하고 있는 총 비율은 54.2%로써 절반이상의 Cut sets

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

에 안전지식결여나 부주의 등과 같은 조금만 주의를 기울이면 발파에 의한 비석사고를 미연에 방지 할 수 있는 set이 많이 발견되었다. 그리고 set이 2가지의 기본사상들만으로 이루어져 있다는 것은 이 2가지의 기본사상만으로도 충분히 Top사상인 목표사상을 일으킬 수 있다는 것이므로 특별히 주의를 기울여야 할 것이다.

또한 정전기 발생 및 안전방호시설 불량 등 작업대상물에 의한 비율은 21.2%, 주변 누전이나 온도, 습도 등에 의한 환경적 요인에 의한 비율이18.4%로 나타났다.

이상의 분석에서 발파사고 중 비석사고에 가장 영향을 많이 미치는 요인은 안전지식결여, 안전수칙 미 준수 등 인적요인으로 나타났으며, 이에 관련하여 재해 대책 역시 인적 대책에 중점을 두어야 함을 알 수 있다.

표 5. 발파작업 중 비석 사고를 일으키는 Cut sets

번호	Cut sets	번호	Cut sets	번호	Cut sets
1	B24 B74	25	B28 B74	49	B29 C24 B74
2	B24 B75	26	B28 B75	50	B29 C24 B75
3	B24 B76	27	B28 B76	51	B29 C24 B76
4	B24 A55	28	B28 A55	52	B29 C24 A55
5	B24 A51	29	B28 A51	53	B29 C24 A51
6	B24 A52	30	B28 A52	54	B29 C24 A52
7	B102 B74	31	B29 A123 B74	55	B19 B29 B74
8	B102 B75	32	B29 A123 B75	56	B19 B29 B75
9	B102 B76	33	B29 A123 B76	57	B19 B29 B76
10	B102 A55	34	B29A123 A55	58	B19 B29 A55
11	B102 A51	35	B29 A123 A51	59	B19 B29 A51
12	B102 A52	36	B29 A123 A52	60	B19 B29 A52
13	B25 B74	37	B29 C212 B74	61	C211 B29 B74
14	B25 B75	38	B29 C212 B75	62	C211 B29 B75
15	B25 B76	39	B29 C212 B76	63	C211 B29 B76
16	B25 A55	40	B29 C212 A55	64	C211 B29 A55
17	B25 A51	41	B29 C212 A51	65	C211 B29 A51
18	B25 A52	42	B29 C212 A52	66	C211 B29 A52
19	B210 B74	43	B29 C23 B74	67	C220 B29 B74
20	B210 B75	44	B29 C23 B75	68	C220 B29 B75
21	B210 B76	45	B29 C23 B76	69	C220 B29 B76
22	B210 A55	46	B29 C23 A55	70	C220 B29 A55
23	B210 A51	47	B29 C23 A51	71	C220 B29 A51
24	B210 A52	48	B29 C23 A52	72	C220 B29 A52
73	B211 B29 B74	139	B104 C23 B74	205	C211 D310 B74
74	B211 B29 B75	140	B104 C23 B75	206	C211 D310 B75
75	B211 B29 B76	141	B104 C23 B76	207	C211 D310 B76
76	B211 B29 A55	142	B104 C23 A55	208	C211 D310 A55
77	B211 B29 A51	143	B104 C23 A51	209	C211 D310 A51
78	B211 B29 A52	144	B104 C23 A52	210	C211 D310 A52
79	B106 A123 B74	145	B104 C24 B74	211	C220 D310 B74
80	B106 A123 B75	146	B104 C24 B75	212	C220 D310 B75
81	B106 A123 B76	147	B104 C24 B76	213	C220 D310 B76
82	B106 A123 A55	148	B104 C24 A55	214	C220 D310 A55
83	B106 A123 A51	149	B104 C24 A51	215	C220 D310 A51
84	B106 A123 A52	150	B104 C24 A52	216	C220 D310 A52
85	B106 C212 B74	151	B19 B104 B74	217	B211 D310 B74
86	B106 C212 B75	152	B19 B104 B75	218	B211 D310 B75
87	B106 C212 B76	153	B19 B104 B76	219	B211 D310 B76
88	B106 C212 A55	154	B19 B104 A55	220	B211 D310 A55
89	B106 C212 A51	155	B19 B104 A51	221	B211 D310 A51
90	B106 C212 A52	156	B19 B104 A52	222	B211 D310 A52
91	B106 C23 B74	157	C211 B104 B74	223	B108 A123 B74
92	B106 C23 B75	158	C211 B104 B75	224	B108 A123 B75
93	B106 C23 B76	159	C211 B104 B76	225	B108 A123 B76
94	B106 C23 A55	160	C211 B104 A55	226	B108 A123 A55
95	B106 C23 A51	161	C211 B104 A51	227	B108 A123 A51
96	B106 C23 A52	162	C211 B104 A52	228	B108 A123 A52
97	B106 C24 B74	163	C220 B104 B74	229	B108 C212 B74
98	B106 C24 B75	164	C220 B104 B75	230	B108 C212 B75
99	B106 C24 B76	165	C220 B104 B76	231	B108 C212 B76
100	B106 C24 A55	166	C220 B104 A55	232	B108 C212 A55
101	B106 C24 A51	167	C220 B104 A51	233	B108 C212 A51
102	B106 C24 A52	168	C220 B104 A52	234	B108 C212 A52
103	B19 B106 B74	169	B211 B104 B74	235	B108 C23 B74
104	B19 B106 B75	170	B211 B104 B75	236	B108 C23 B75
105	B19 B108 B76	171	B211 B104 B76	237	B108 C23 B76
106	B19 B106 A55	172	B211 B104 A55	238	B108 C23 A55
107	B19 B106 A51	173	B211 B104 A51	239	B108 C23 A51
108	B19 B106 A52	174	B211 B104 A52	240	B108 C23 A52
109	C211 B106 B74	175	D310 A123 B74	241	B108 C24 B74
110	C211 B106 B75	176	D310 A123 B75	242	B108 C24 B75
111	C211 B106 B76	177	D310 A123 B76	243	B108 C24 B76
112	C211B106 A55	178	D310 A123 A55	244	B108 C24 A55
113	C211B106 A51	179	D310 A123 A51	245	B108 C24 A51
114	C211B106 A52	180	D310 A123 A52	246	B108 C24 A52
115	C220 B106 B74	181	D310 C212 B74	247	B19 B108 B74
116	C220 B106 B75	182	D310 C212 B75	248	B19 B108 B75
117	C220 B106 B76	183	D310 C212 B76	249	B19 B108 B76
118	C220B106 A55	184	D310 C212 A55	250	B19 B108 A55
119	C220 B106 A51	185	D310 C212 A51	251	B19 B108 A51
120	C220 B106 A52	186	D310 C212 A52	252	B19 B108 A52
121	B211 B106 B74	187	D310 C23 B74	253	C211 B108 B74
122	B211 B106 B75	188	D310 C23 B75	254	C211 B108 B75
123	B211 B106 B76	189	D310 C23 B76	255	C211 B108 B76
124	B211 B106 A55	190	D310 C23 A55	256	C211 B108 A55
125	B211 B106 A51	191	D310 C23 A51	257	C211 B108 A51
126	B211 B106 A52	192	D310 C23 A52	258	C211 B108 A52
127	B104 A123 B74	193	D310 C24 B74	259	B220 B108 B74
128	B104 A123 B75	194	D310 C24 B75	260	B220 B108 B75
129	B104 A123 B76	195	D310 C24 B76	261	B220 B108 B76
130	B104 A123 A55	196	D310 C24 A55	262	B220 B108 A55
131	B104 A123 A51	197	D310 C24 A51	263	B220 B108 A51
132	B104 A123 A52	198	D310 C24 A52	264	B220 B108 A52
133	B104 C212 B74	199	B19 D310 B74	265	B211 B108 B74
134	B104 C212 B75	200	B19 D310 B75	266	B211 B108 B75
135	B104 C212 B76	201	B19 D310 B76	267	B211 B108 B76
136	B104 C212 A55	202	B19 D310 A55	268	B211 B108 A55
137	B104 C212 A51	203	B19 D310 A51	269	B211 B108 A51
138	B104 C212 A52	204	B19 D310 A52	270	B211 B108 A52

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

또한 낙뢰에 의한 원인이 일본의 경우는 0%인데 비해, 한국의 경우는 8.57%나 차지하고 있음은 뇌관 및 제품의 품질이 개선되어야 함을 보여주고 있다.

4.3 발파사고에 대한 기존분석과 FTA를 이용한 분석과의 비교

총포·화약 안전기술 협회의 조사, 분석방법은 발생 년, 월, 일 및 발생장소, 사고개요, 피해상황 및 사고의 원인을 서술식으로 나열하고 있으며, 이는 경찰청에서 조사, 분석하고 있는 방법과도 동일하다.(표 6)

표 6의 사고를 현장상황과 재해를 일으킬 가능성이 큰 항목을 선정 후 개발된 분류코드

표 6. 기존 발파사고분석방법사례

년도	발생일	발생장소	사고개요	피해	사고원인
97	3. 12	충북 청원군 강외면 공복리	골프장 공사현장의 암반발파중 안전주의 소홀로 돌이 비산하여 공사관리자의 머리에 맞아 사망.	사망1	안전수칙 미이행

를 적용하여 FTA기법으로 Fault Tree를 작성하면 그림 6과 같다.

이를 근거로 Cut sets을 구하면 표 7과 같은 결과를 얻을 수 있다.

기존의 방법에서는 단순히 안전수칙 미 이행이라고만 조사, 결론 내린 것에 비해 본 연구의 방법을 이용할 경우 총11가지의 원인이 발견되었다. 이 중 단독으로 재해를 일으킬 수 있는 경우도 3경우나 존재하였으며, 나머지 8경우는 두 가지의 기본사상이 동시에 발

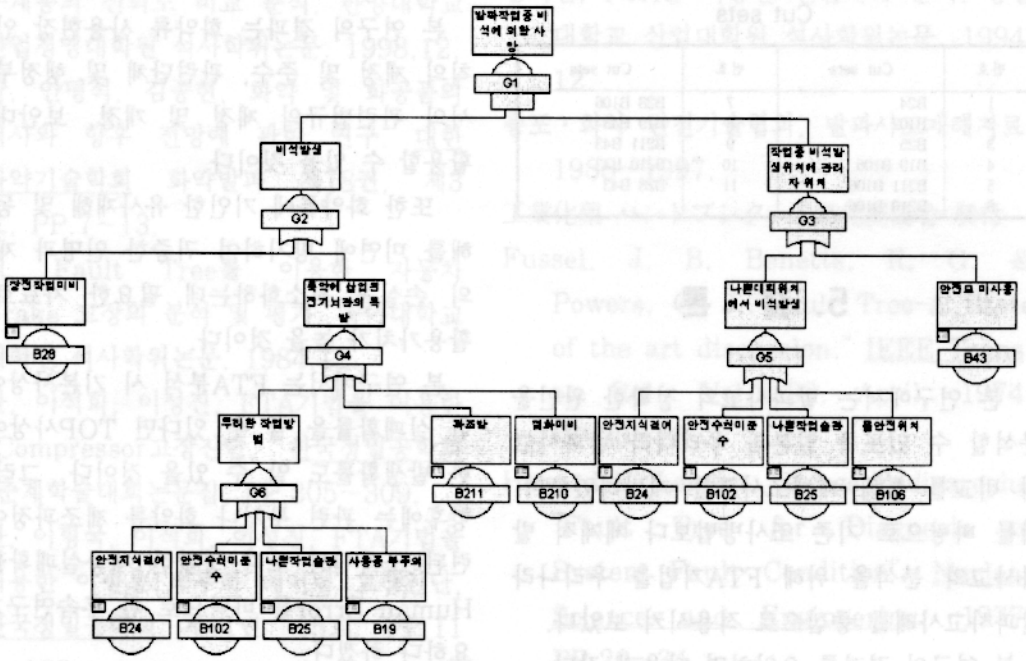

그림 6. FTA를 이용한 발파사고분석사례

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

생될 경우 일어날 수 있는 것으로 나타났다.

즉, 안전지식 결여, 안전수칙 미 준수, 나쁜 작업습관은 단독으로도 재해를 일으킬 수 있는 것으로 나타났으며, 그 외 사용중 부주의, 과조발, 점화미비, 장전작업미비, 불안전 위치, 보호구 미 착용등은 두가지이상이 조합되면 TOP사상을 일으키는 것으로 나타났다.

이는 기존방법에서 소홀히 다루거나 지나쳐 버릴 수 있는 많은 원인을 시각화 할 수 있다는 장점이 있으며, 특히 발파사고에 대한 원인을 단순히 한 가지로만 결론 내리던 기존 조사, 분석법에 비해 두 가지 이상의 복합요인에 의한 원인까지도 추출할 수 있으므로, 이에 따른 대비책 강구가 보다 체계적이다 하겠다.

표 7. 현장발파작업 중 비석사고에 대한 Cut sets

번호	Cut sets	번호	Cut sets
1	B24	7	B28 B106
2	B102	8	B19 B43
3	B25	9	B211 B43
4	B19 B106	10	B210 B43
5	B211 B106	11	B28 B43
6	B210 B106		

5. 결 론

본 연구에서는 발파사고의 정확한 원인을 분석할 수 있도록 일본과 우리나라 발파사고의 비교를 통해 재해조사표를 개발하였으며, 이를 바탕으로 기존 조사방법보다 체계적 발파사고의 분석을 위해 FTA기법을 우리나라 발파사고사례를 중심으로 적용시켜 보았다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 발파사고는 특수분야이므로 이에 맞는 재해조사표를 개발하여 정확한 사고분석을 위해 사용되어야 한다.

둘째, 기존의 발파사고 조사방법에 비해 FTA기법을 이용한 분석방법이 보다 체계적이고 구체적인 근본원인 조사가 가능하였다.

셋째, 1988년에서 1997년간 한국의 발파사고는 비석 및 낙석에 의한 사고가 전체 발파사고의 45.7%로 나타났으며, 비석사고에 대한 FTA분석결과 그 원인은 안전수칙 미준수 및 나쁜 작업습관 등 인적요인이 54.2%로 절반이상으로 나타났으며, 작업대상물에 따른 요인이 21.2%, 환경에 따른 요인이 18.4%로 각각 나타났다. 이에 화약류를 취급, 관리하는 자에게는 사전에 안전교육을 철저히 하고, 안전지식을 갖춘 전문가가 작업을 하도록 하는 등의 안전조치가 필요하다.

본 연구의 결과는 화약류 사용현장 안전수칙의 제정 및 준수, 관련단체 및 행정부처에서의 관련법규의 제정 및 개정, 보안대책에 활용할 수 있을 것이다.

또한 화약류에 기인한 유사재해 및 동종재해를 미연에 방지하여 귀중한 인명과 재산상의 손실을 최소화하는데 필요한 자료로써의 활용가치가 높을 것이다.

본 연구에서는 FTA분석 시 기본사상에 대한 실패확률을 알 수 있다면 TOP사상에 대한 발생확률도 알 수 있을 것이다. 그러므로 향후에는 관련 부처나 화약류 제조과정에 관련된 조직에서 보다 정확한 제품실패확률 및 Human Error를 바탕으로 한 후속연구가 필요하다 하겠다.

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

참고 문헌

김병석, FTA기법을 이용한 LPG저장탱크 폭발원인분석, 동아대학교 행정대학원 석사학위논문, 1989.12.

김영환, 안명석, 박종남, 강대우, 이창우,도심지 미진동 제어발파에서 진동분석을 통한 안전발파설계에 관한 연구, 대한화약기술학회 화약발파 제 18군, 제2호, PP.7~13.

김정진, 신.발파핸드북, 원기술, 1993, PP 635~641

김준식, FTA기법을 이용한 항공기 안전도분석에관한 연구, 군사과학대학원 석사학위논문, 1997.2.

김재학, FTA를 이용한 원자력발전소 보조급수계통의 신뢰도 비교 분석, 한양대학교 산업경영대학원 석사학위논문, 1998.12.

김희창, 안명석, 김종현, 화약 및 화공품의 역사와 향후 전망에 관한 연구, 대한화약기술학회 화약발파 제18권, 제3호, PP.7~13.

마영식, Fault Tree를 이용한 자동차 Brake 고장의 분석 및 평가, 동아대학교 대학원 석사학위논문, 1984.12.

배용환, 이석희, 이성진, FTA기법을 이용한 Compressor고장진단, 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, PP.305~309.

배용환, 이형국, 이석희, 이성진, FTA기법을 이용한 이송용 대부하 베어링 고장진단, 한국정밀공학회 제11권 제5호, PP.110~123.

안명석, 화약산업의 재해분석 및 안전대책에 관한 연구, 동아대학교 경영대학원 석사학위논문, 1987.

이근희, 이동형, "Fault Tree Analysis을 활용한 집진기(Bag Filter) 고장의 체계적 분석," 공업경영과학회 제12권, 제20집, 1989.

이병렬, FTA기법을 이용한 항공기 추진기관 RAM분석에 관한 연구, 국방대학원 석사학위논문, 1998.12.

이천식, 김형섭, 터널발파에 있어서의 폭약위력개선 및 경제성, 대한화약기술학회 화약발파 제18권, 제2호, PP.35~45.

원연호, 이익주, 이상헌, 뇌관의 정밀성 및 안정성에 관한 연구, 대한화약기술학회 화약발파 제18권, 제2호, PP.23~35

정기섭, FTA를 이용한 산업재해 분석, 숭실대학교 산업대학원 석사학위논문, 1994, 12.

총포·화약 안전기술협회, 발파사고재해자료, 1988~1997.

工業化藥 ハンドブシク, 工業化藥協會 發行

Fussel, J. B, Benetts, R, G. & Powers, G, J.,"Fault Tree-A State of the art discussion," IEEE Trans. on Rel., Vol.R-23, April, 1974, PP.20~23.

Howard E. Lambet, George Yadigaroglu, "Fault Tree for Diagnosis of System Fault Condition", Nuclear Science and Engineering, 1977, PP.20~34.

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

Isograph Limited. Fault Tree+v9.0. 1999.

Steven A. Lapp. Garry J. Powers. "Computer Aided Synthesis of Fault Tree", IEEE Transaction on Reliability, April, 1977, PP.2~15.

저자 소개

◈ **서승록**

현재 대구대학교 산업공학과 교수재직 중이며 주요관심분야는 인간공학, 재활공학, 생체역학 등이다.

◈ **이정훈**

현재 대구대학교 산업공학과 박사과정이며, 파워발파학원 원장으로 재직중이다. 주요관심분야는 인간공학, 안전공학 등이다.

논문접수일 (Date Received): 2000/11/14
논문게재승인일(Date Accepted): 2002/1/3

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.