

FTA기법을 이용한 발파사고 분석에 관한 연구

이정훈¹⁾, 안명석²⁾, 류창하³⁾

A Study on the FTA Analysis of Blasting Accidents

Jung-Hoon Lee, Myung-Seog Ahn and Chang-Ha Ryu

ABSTRACT. The industrial explosives in Korea have been made and used since 1952. The blasting accidents have increased gradually with the use of explosives. Based on the Police Department and Guns & Explosives Safety Technology Association's researching materials, the blasting accidents between 1988 and 1997 have been investigated and analyzed in this paper. FTA method was applied for the analysis of the blasting accidents which occurred in the tunnels, roads, subways, and various kinds of building construction area. The results show that the majority of the accidents, about 45.7% of the total, are due to the fly rocks. It is similar trend in Japan. The FTA analysis performed on the accidents by fly rocks shows that the major source of the accident is human factors such as non-observance of the safety rules, less knowledge of the safety and so on. The results of the study are expected to provide basic data for making and observing the safety rules, making and amending the laws concerned, and planning the security project. It will be helpful in preventing the blasting accidents and in reducing the loss of valuable lives and the financial damage.

Key words : blasting accident, FTA method, fly rocks

초 록. 우리나라에서 산업용화약이 사용된 것은 1952년부터이며 이때부터 화약류 사용의 증가와 함께 발파사고가 증가한 것으로 나타나고 있다. 본 연구에서는 본 연구에서는 터널, 도로, 지하철, 고속도로와 같은 다양한 건설현장에서 발파사고에 대하여 발파사고의 분석에 필요한 사고조사표를 개발하고, 이를 이용하여 발파사고에 대한 체계적인 분석을 실시하였다. 분석방법으로는 FTA 기법이 이용되었고, 발파사고 중 가장 높은 비율을 차지하는 것이 비석에 의한 사고로 나타났다. 이는 일본의 사례와 유사하며, 분석 결과 안전규칙 미준수, 안전지식결여 등 대부분이 인적요소의 원인에 의한 것으로 나타났다. 또한 발파사고는 몇 가지의 원인이 복합적으로 나타나는 경향을 가지고 있음을 보여주었다. 본 연구의 결과는 화약류 사용현장 안전수칙의 제정 및 준수, 관련단체 및 행정부처에서의 관련법규의 제정 및 개정, 보안대책에 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 화약류에 기인한 유사재해 및 동종재해를 미연에 방지하여 귀중한 인명과 재산상의 손실을 최소화하는데 필요한 자료로서의 활용가치가 높을 것이다.

핵심어 : 발파사고, FTA 분석, 비석

1. 서 론

1970년대 이후 산업의 고속성장과정에서 야기된 부실시공과 안전 경시풍조가 사회 전반에 만연되었고, 1980년대부터는 대단위 터널 굴착과 지하철 및 대형 빌딩의 건설이 급증함에 따라 안전사고에 따른 재해도 다양해지고 대형화되고 있는 추세임에도 불구하고 안전에 대한 불감증은 크게 줄어들지 않는 실정이다.

특히, 건설토목현장에서의 IMF이후 낮은 수익률

로 인해 직원들의 사기저하 및 동일한 종류의 재해가 반복해서 발생되고 있으며, 화약제조공장 역시 화약제조량의 증가와 함께 대형화, 다양화되고 있는 추세이다.

우리나라에서 화약이 최초의 산업용으로 사용된 것은 1890년경 경상남도 마산에서 일본인이 채광에 흑색화약을 사용하면서부터이며, 그 후 1940년 인천에 조선유지주식회사 인천화약공장을 건설하여 다이너마이트와 뇌관과 도화선을 생산하였으며, 해방 후 1952년에 (주)한화에 불하됨으로써 민간 화약제조공장으로 산업현장에 본격 진출하였다. 1968년에 ANFO가 생산되었고, 1977년에 도심지 발파용인 미진동파쇄기(CCR)가 생산 공급되었고,

1) 파원발파전문학원

2) 동서대학교

3) 한국지질자원연구원

접수일 : 2004년 2월 10일

1981년에 정밀폭약과 슬러리폭약이 공급되었으며, 1993년에는 (주)고려노벨화약에서 에밀전 폭약을 공급하기 시작하였다.(안명석등, 2000)

현재 뇌관의 연간 사용량은 70년대 2천여발 수준에서 80년대 3천5백만 발로 증가하였으며, 90년대에는 약 4천여만 발로 그 생산량이 증가하였다(원연호등, 2000). 이러한 화약제조량 및 사용량 증가에 따른 발파사고의 재해는 매우 불규칙하기 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 필수적이다.

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 우리나라와 일본의 발파사고 비교를 통해, 발파현장에 이용할 재해조사표를 개발하고, 이를 기준으로 하여 우리나라 발파사고에 대한 체계적인 FTA분석을 실시하고, 기존의 조사방법과 FTA기법을 이용한 조사방법의 결과를 비교분석 하고자 한다.

2. 기존연구

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

2.1 발파사고분석에 관한 선행연구의 취약점

한국의 발파사고에 관련된 연구는 대부분 1997년 이후 표면화 되었으나 발파에 수반되는 소음,

지반진동에 관한 것과 제품개선 및 경제성에 관한 것이 주요 연구과제였다.

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

이와 같이 현행발파사고에 대한 연구는 화약을 직접 취급하는 산업현장 일선에서의 작업자와 기발생된 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 롤러 베어링 고장진단에도 활용되었다. (배용환 등, 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 운영

시에 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 증기발생기의 체크밸브의 열림 실패, 터빈구동펌프의 기동실패 및 모터구동펌프의 고장에 대해 실시하였다.

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 Haas, Schroder, Jackson 등은, 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 기초 자료들을 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 증장기적인 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 특수 분야인 발파산업에서 사용되고 있는 화약류의 에너지가 폭발이 2000m/s에서 8000m/s의 폭발을 수반하고 있으며, 비에너지가 높은 화약류를 사용하고 때문으로 판단된다. 그러므로 장약공 내의 화약류가 폭발하면서 커다란 에너지로 암석 등 피 파괴체를 밀어내고 이에 장약부근에 있던 작업자 등이 재해를 입게 되는 것이다.

그림 1과 표 1은 일본의 1975년에서 1987까지 총 13년간의 발파사고 사례를 건, 사, 부, 별 및 항목별로 나타낸 것이다.

그림 2는 발파사고 중 비석사고의 비율을 나타낸 그림이다. 그림에 나타낸바와 같이 발파사고항목 중 비석 및 낙석에 의한 사고가 전체의 64.4%를 차지하는 것으로 나타났다. 이는 장약 부근에 사람이 위치하고 있을 때 비석 및 낙석이 발생되면 재해가 많이 일어남을 나타내고 있다.

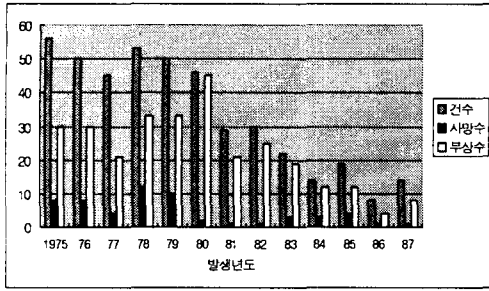


그림 1. 일본의 발파사고건수, 사상자수 비교

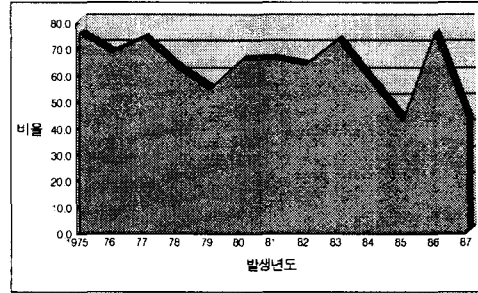


그림 2. 발파사고 중 비석사고의 비율(일본)

표 1. 일본의 발파사고 사례 (1975~1987년)

연도별(1월~12월)	건 수												사 망 수												부 상 수													
	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
1 대피지연																																						
2 폭발장류약(화수층을 포함)	5		1			3	1	1	5	5	2	3	6	4														2			2	2	2	2	4	5	11	7
3 조끼장류(지역폭발)						1																																
4 비석 낙석등	6	6	8	8	16	18	18	30	27	33	33	34	42	1	1	1	1	1		3	7	7	2	4	2	2	2	3	5	6	7	8	11	9	10	2	5	
5 신호·경계·연락 불충분	1		4		2	4	1	2	5	5	2	3	2	2	1	2	2	1	1		3	3	2	3	1	1	1	3	3	4	4	3	3	3	3	2	5	
6 장전작업중					3	2	4	1	2	5	5	2	4	4								1	2	2	1	1	1											
7 대피장소 부적당																																						
8 폭발장인 불충분																																						
9 장류부주의																																						
10 프라이마트리저등 저장중	1																																					
11 임시보관중																																						
12 주변화기 소파로행여 의해																																						
13 휴대중(운반중)부주의	1																																					
14 끝산중 부주의																																						
15 과조발(장화중을 포함)																																						
16 도선이 전원에 접촉																																						
17 지반의 변형등	1	1																																				
18 준비중의 발파																																						
19 전발파여 의해 결화																																						
20 누전등에 의해																																						
21 사용중 부주의(과실물포함)																																						
22 취급중 부주의(과실물포함)																																						
23 장전작업중(음압보관도차선)																																						
24 대피시의 부주의																																						
25 도동시행중																																						
26 대피중 결화																																						
27 장전작업중(전기보관)																																						
28 건설용리튬트롬용공포사용중																																						
29 신호나관여 의해																																						
30 낙뢰																																						
31 기타(포가스등 포함)																																						
계	10	8	13	14	22	30	28	46	50	53	45	50	56	1	1	4	3	4	1	1	2	10	12	4	8	8	4	12	12	19	25	21	45	33	33	21	30	30

왜냐하면 비석 및 낙석에 의한 사고는 발생원으로부터 멀어질수록 급격히 안전해지기 때문이다. 이외에 불발 잔류약에 의한 경우가 8.25%, 장전작업 중 7.57%, 신호, 경계, 연락 불충분이 3.9% 순으로 나타났다. 그리고 연 평균 재해건수는 33.5건에 사망자는 4.54명, 부상자는 22.54명으로 나타났다.

3.2 한국의 경우

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

표 2. 한국의 발파사고 사례 (1988~1997년)

건사부별 연도별(1월~12월)	건 수										사 망 수										부 상 수									
	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 대외지연																														
2 폭발·건류(화수증기 포함)																														
3 조가질근(지열폭발)																														
4 비석·낙석류	6	4			2		2	1	1	2	3			1			2	1	2	2								1	1	
5 산호·점결·연락 불충분																														
6 장전작업중				1	2									1	2									1						
7 대외장소 부적당																														
8 폭발물이 불충분																														
9 접착부주의																														
10 크라이머카트리지를 저각중																														
11 임시보관중																														
12 주변화기(소각포함)에 의해	1	1			1						1								3				3							
13 휴대용(분방중)부주의																														
14 결상중 부주의																														
15 과포화(결화중을 포함)																														
16 도선이 전원에 접촉																														
17 자원의 변형등																														
18 준비중의 발파																														
19 전발파에 의해 결화																														
20 누전등에 의해	1				2									1					5				9							
21 사물중 부주의(과실물포함)																														
22 취급중 부주의(과실물포함)																														
23 결착작업중(응양화전도화선)				1										1									2							
24 대외시의 부주의																														
25 도통시험중																														
26 대외중 결화																														
27 결착작업중(전기노관)																														
28 건설용기계·특종용포사용중																														
29 산호·점결에 의해																														
30 낙뢰			1	1				1			1							3	1	1	7									
31 기타(후가스등 포함)	1		1	1		2	1	1					1				1	1	1	12	2	1	6							
계	6	7	2	3	7	3	4	1	1	2	3	2	3	4	0	1	6	1	2	0	8	4	14	17	5	1	7	1	0	

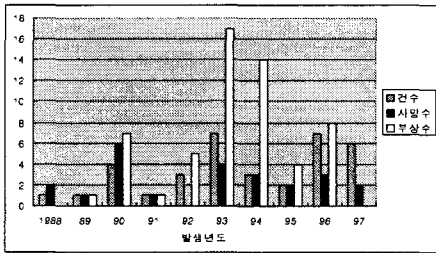


그림 3. 한국의 발파사고건수, 사상자수 비교

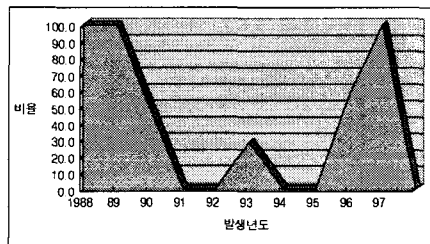


그림 4. 발파사고 중 비석사고의 비율(한국)

일본과 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 문제접해결이 일본에 비해 낮고 관련단체 및 행정기관의 중장기적인 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 수 있으며, 또한 주변 환경에 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 보인다.

4. 발파사고에 대한 분류코드 작성 및 FTA에 의한 분석

본 장에서는 제3장에서 분석한 발파사고의 기본 자료들을 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

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 제 10조와 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.공정용	5.직종	6.근속기간
	7.작업종류					
기타 산업	8.고용형태	9.근무형태	10.작업형태	11.목적자유무		
	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 가능성이 있는 요인을 포함하여 종합적으로 코드화 하였다. 분류코드는 IAD(Industrial Accident Dynamics)를 기준으로 개발된 체계를 이용하였으며(정기섭, 1994), 작업 대상물에 따른 결함, 인적 결함, 환경적 결함 및 기타 관리, 감독, 교육에 따른 결함 요인으로 분류 하였다.

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 비석 발생위치에 작업자가 위치해 있는 경우로 볼 수 있다.

표 4(a). 작업 대상물의 결함요인 분류표

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

표 4(b). 작업자(인적)의 결함요인 분류표

분류	분류번호	분류항목	분류	분류번호	분류항목
B1. 대도의 결함	B11	명령무시	B5. 재료, 보조구, 결합	B54	불량, 부적합보조구사용
	B12	명령불복종		B55	제폭혼용(뇌관, 폭약)
	B13	비협조		B56	용도이외의것 사용
	B14	공도, 긴장, 흥분		B57	무리한 사용
	B15	성경조급		B58	손사용
	B16	잡념, 망상	B59	기타	
	B17	열중, 졸무	B6. 위험장소	B61	위험, 유탄장소 출입
	B18	이기심		B62	운전중 기계장치에 접근, 접촉
	B19	사용중부주의(과실표함)		B63	물체의 접촉
	B110	취급중부주의(과실표함)		B64	방파, 파괴력기구는 물체에 접근, 접촉
	B111	부적절한생활		B65	불안전한장소에 접근, 접촉
	B112	기타		B66	기타
B21	지능결여(이해부족)	B7. 안전		B71	안전방호장치의 제거
B22	무경험		B72	안전방호장치의 파괴	
B23	미숙련		B73	안전방호장치의 조정잘못	
B24	안전지식결여		B74	안전방호시설의 제거	
B25	나쁜작업습관		B75	안전방호시설의 파괴	
B26	진폭약포제막미비		B76	안전방호시설의 미설치	
B27	견착작업미비(전기, 공업 뇌관)		B77	기타	
B2. 지식 또는 기능 결함	B28	장전작업미비	B8. 직접 확인 및 대만	B81	안전방호장치점검확인소홀
	B29	견선작업미비		B82	안전방호시설물점검확인소홀
	B210	검화미비		B83	경보장치 점검확인 소홀
	B211	과조발		B84	자동차단장치점검확인 소홀
	B212	도통시험미비		B85	제동장치 점검확인 소홀
	B213	진류회약류처리미비		B86	기계장치 점검확인소홀
	B214	기타		B87	기타
B3. 신체적 결함	B31	시력결함	B9. 운반, 수리, 보관	B91	운반잘못
	B32	청력결함		B92	수리잘못
	B33	진병		B93	보관잘못
	B34	반응둔감		B94	기타
	B35	신체부적격	B10. 규율 무시 행위	B101	작업표준 미준수
	B36	음주, 흡연		B102	안전수칙 미준수
	B37	과로, 피로		B103	무자격 조작
	B38	기타		B104	연락 불충분
B4. 불량, 보 호 구 결함	B41	불량, 부적합보호구착용	B10. 기타 규율 무시 행위	B105	불안전속도 조작
	B42	잘못사용		B106	불안전위치, 자세등과
	B43	미사용		B107	점검태만
	B44	선택잘못		B108	조기접근
	B45	기타		B109	숙독장난
	B5. 재 품, 공 구, 결 함	B51		불량, 부적합재료사용	B110
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 시설의 부재, 안전방호 시설의 미사용, 안전방호 시설의 부적합, 안전방호 시설의 불량 등으로 볼 수 있으며, 안전방호 시설의 미사용은 안전방호 시설 제거, 안전방호 시설 파괴, 안전방호 시설의 미설치 등에 의해 발생될 수 있다. (그림 5(b))

비석발생위취에 작업자가 위치하는 경우에 대해 FT도를 작성하면 그림 5(c)와 같은데, 작업현장에서 비석이 발생하는 경우, 나쁜 대피위취를 선정한

표 4(c). 환경의 결함요인 분류표

분류	분류번호	분류항목	분류	분류번호	분류항목
C1. 작업의 결함	C11	물체의 위치불안정, 무직결	C2. 작업 환경의 결함	C210	화기
	C12	물체의 걸림 결함		C211	누전
	C13	작업공간 협소		C212	정전기
	C14	통로 미확보, 협소		C213	녹, 흙, 찌꺼기
	C15	장리 정돈 불량		C214	풍향
	C16	기계장치, 공구, 짐기 배치결함		C215	침공내 거칠음
	C17	적재결함		C216	무선전파
	C18	작업바닥 거칠		C217	탄진
	C19	기타		C218	부식
C2. 작업 환경의 결함	C21	조명, 채광	C3. 경제성의 결함	C219	지반변형
	C22	환기, 통풍		C220	낙뢰
	C23	온도		C221	기타
	C24	습도		C31	경제구역 불명확
	C25	소음		C32	경제표시 없음
C3. 작업의 결함	C26	분진	C33	경제표시 희미함	
	C27	유해가스	C34	경고표시 미비	
	C28	가연성 가스	C35	경고표시 희미함	
	C29	수증기	C36	기타	

표 4(d). 관리, 감독, 교육의 결함요인 분류표

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

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

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

비 전기뇌관의 폭발은 대체적으로 전기뇌관의 경우에 비해 제품의 비 안정성에 의한 사고보다는 인간의 무리한 작업방법 등 인적요인에 의한 사고가 대부분으로 나타나고 있다.

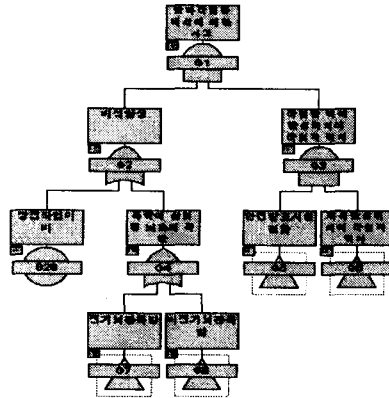


그림 5(a). 비석에 의한 사고 Fault Tree

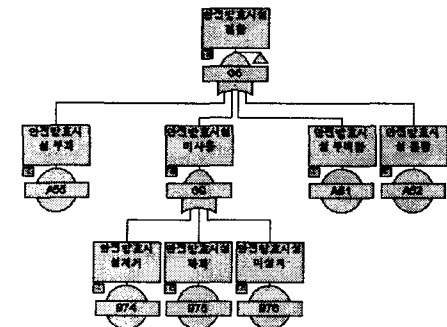


그림 5(b). 안전방호 시설결함의 Fault Tree

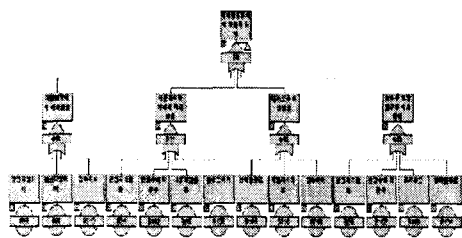


그림 5(c). 비석발생 위치에 작업자가 위치하는 경우 Fault Tree

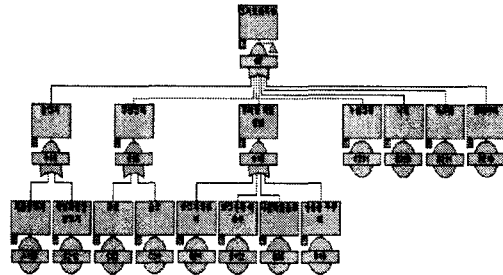


그림 5(d). 전기뇌관폭발의 Fault Tree

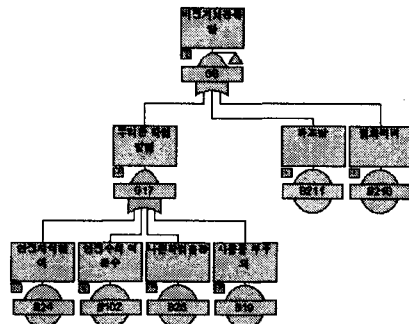


그림 5(e). 비전기뇌관 폭발의 Fault Tree

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 45개으로써 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 sets에 안전지식결여나 부주의 등과 같은 조금만 주의를 기울이면 발파에 의한 비석사고를 미연에 방지할 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 작

업 대상물에 의한 비율은 21.2%, 주변 누전이나 온도, 습도 등에 의한 환경적 요인에 의한 비율이 18.4%로 나타났다.

이상의 분석에서 발파사고 중 비석사고에 가장 영향을 많이 미치는 요인은 안전지식결여, 안전수칙 미 준수 등 인적요인으로 나타났으며, 이에 관련하여 재해 대책 역시 인적대책에 중점을 두어야 함을 알 수 있다. 또한 낙뢰에 의한 원인이 일본의 경우는 0%인데 비해, 한국의 경우는 8.57%나 차지하고 있음은 뇌관 및 제품의 품질이 개선되어야 함을 보여주고 있다.

표 5. 발파작업 중 비석 사고를 일으키는 Cut sets

번호	Cut sets	번호	Cut sets	번호	Cut sets
1	B24 B74	31	B29 A123 B74	61	C211 B29 B74
2	B24 B75	32	B29 A123 B75	62	C211 B29 B75
3	B24 B76	33	B29 A123 B76	63	C211 B29 B76
4	B24 A55	34	B29A123 A55	64	C211 B29 A55
5	B24 A51	35	B29 A123 A51	65	C211 B29 A51
6	B24 A52	36	B29 A123 A52	66	C211 B29 A52
7	B102 B74	37	B29 C212 B74	67	C220 B29 B74
8	B102 B75	38	B29 C212 B75	68	C220 B29 B75
9	B102 B76	39	B29 C212 B76	69	C220 B29 B76
10	B102 A55	40	B29 C212 A55	70	C220 B29 A55
11	B102 A51	41	B29 C212 A51	71	C220 B29 A51
12	B102 A52	42	B29 C212 A52	72	C220 B29 A52
13	B25 B74	43	B29 C23 B74	73	B211 B29 B74
14	B25 B75	44	B29 C23 B75	74	B211 B29 B75
15	B25 B76	45	B29 C23 B76	75	B211 B29 B76
16	B25 A55	46	B29 C23 A55	76	B211 B29 A55
17	B25 A51	47	B29 C23 A51	77	B211 B29 A51
18	B25 A52	48	B29 C23 A52	78	B211 B29 A52
19	B210 B74	49	B29 C24 B74	79	B106 A123 B74
20	B210 B75	50	B29 C24 B75	80	B106 A123 B75
21	B210 B76	51	B29 C24 B76	81	B106 A123 B76
22	B210 A55	52	B29 C24 A55	82	B106 A123 A55
23	B210 A51	53	B29 C24 A51	83	B106 A123 A51
24	B210 A52	54	B29 C24 A52	84	B106 A123 A52
25	B28 B74	55	B19 B29 B74	85	B106 C212 B74
26	B28 B75	56	B19 B29 B75	86	B106 C212 B75
27	B28 B76	57	B19 B29 B76	87	B106 C212 B76
28	B28 A55	58	B19 B29 A55	88	B106 C212 A55
29	B28 A51	59	B19 B29 A51	89	B106 C212 A51
30	B28 A52	60	B19 B29 A52	90	B106 C212 A52

표 5. (계속)

번호	Cut sets	번호	Cut sets	번호	Cut sets
91	B106 C23 B74	136	B104 C212 A55	181	D310 C212 B74
92	B106 C23 B75	137	B104 C212 A51	182	D310 C212 B75
93	B106 C23 B76	138	B104 C212 A52	183	D310 C212 B76
94	B106 C23 A55	139	B104 C23 B74	184	D310 C212 A55
95	B106 C23 A51	140	B104 C23 B75	185	D310 C212 A51
96	B106 C23 A52	141	B104 C23 B76	186	D310 C212 A52
97	B106 C24 B74	142	B104 C23 A55	187	D310 C23 B74
98	B106 C24 B75	143	B104 C23 A51	188	D310 C23 B75
99	B106 C24 B76	144	B104 C23 A52	189	D310 C23 B76
100	B106 C24 A55	145	B104 C24 B74	190	D310 C23 A55
101	B106 C24 A51	146	B104 C24 B75	191	D310 C23 A51
102	B106 C24 A52	147	B104 C24 B76	192	D310 C23 A52
103	B19 B106 B74	148	B104 C24 A55	193	D310 C24 B74
104	B19 B106 B75	149	B104 C24 A51	194	D310 C24 B75
105	B19 B106 B76	150	B104 C24 A52	195	D310 C24 B76
106	B19 B106 A55	151	B19 B104 B74	196	D310 C24 A55
107	B19 B106 A51	152	B19 B104 B75	197	D310 C24 A51
108	B19 B106 A52	153	B19 B104 B76	198	D310 C24 A52
109	C211 B106 B74	154	B19 B104 A55	199	B19 D310 B74
110	C211 B106 B75	155	B19 B104 A51	200	B19 D310 B75
111	C211 B106 B76	156	B19 B104 A52	201	B19 D310 B76
112	C211B106 A55	157	C211 B104 B74	202	B19 D310 A55
113	C211B106 A51	158	C211 B104 B75	203	B19 D310 A51
114	C211B106 A52	159	C211 B104 B76	204	B19 D310 A52
115	C220 B106 B74	160	C211 B104 A55	205	C211 D310 B74
116	C220 B106 B75	161	C211 B104 A51	206	C211 D310 B75
117	C220 B106 B76	162	C211 B104 A52	207	C211 D310 B76
118	C220B106 A55	163	C220 B104 B74	208	C211 D310 A55
119	C220 B106 A51	164	C220 B104 B75	209	C211 D310 A51
120	C220 B106 A52	165	C220 B104 B76	210	C211 D310 A52
121	B211 B106 B74	166	C220 B104 A55	211	C220 D310 B74
122	B211 B106 B75	167	C220 B104 A51	212	C220 D310 B75
123	B211 B106 B76	168	C220 B104 A52	213	C220 D310 B76
124	B211 B106 A55	169	B211 B104 B74	214	C220 D310 A55
125	B211 B106 A51	170	B211 B104 B75	215	C220 D310 A51
126	B211 B106 A52	171	B211 B104 B76	216	C220 D310 A52
127	B104 A123 B74	172	B211 B104 A55	217	B211 D310 B74
128	B104 A123 B75	173	B211 B104 A51	218	B211 D310 B75
129	B104 A123 B76	174	B211 B104 A52	219	B211 D310 B76
130	B104 A123 A55	175	D310 A123 B74	220	B211 D310 A55
131	B104 A123 A51	176	D310 A123 B75	221	B211 D310 A51
132	B104 A123 A52	177	D310 A123 B76	222	B211 D310 A52
133	B104 C212 B74	178	D310 A123 A55	223	B108 A123 B74
134	B104 C212 B75	179	D310 A123 A51	224	B108 A123 B75
135	B104 C212 B76	180	D310 A123 A52	225	B108 A123 B76

표 5. (계속)

번호	Cut sets	번호	Cut sets	번호	Cut sets
226	B108 A123 A55	241	B108 C24 B74	256	C211 B108 A55
227	B108 A123 A51	242	B108 C24 B75	257	C211 B108 A51
228	B108 A123 A52	243	B108 C24 B76	258	C211 B108 A52
229	B108 C212 B74	244	B108 C24 A55	259	B220 B108 B74
230	B108 C212 B75	245	B108 C24 A51	260	B220 B108 B75
231	B108 C212 B76	246	B108 C24 A52	261	B220 B108 B76
232	B108 C212 A55	247	B19 B108 B74	262	B220 B108 A55
233	B108 C212 A51	248	B19 B108 B75	263	B220 B108 A51
234	B108 C212 A52	249	B19 B108 B76	264	B220 B108 A52
235	B108 C23 B74	250	B19 B108 A55	265	B211 B108 B74
236	B108 C23 B75	251	B19 B108 A51	266	B211 B108 B75
237	B108 C23 B76	252	B19 B108 A52	267	B211 B108 B76
238	B108 C23 A55	253	C211 B108 B74	268	B211 B108 A55
239	B108 C23 A51	254	C211 B108 B75	269	B211 B108 A51
240	B108 C23 A52	255	C211 B108 B76	270	B211 B108 A52

4.3 발파사고에 대한 기존방법과 FTA를 이용한 분석과의 비교

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

표 6. 기존 발파사고분석방법사례

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

표 6의 사고를 현장상황과 재해를 일으킬 가능성이 큰 항목을 선정 후 개발된 분류코드를 적용하여 FTA기법으로 Fault Tree를 작성하면 그림 6과 같다. 이를 근거로 Cut sets을 구하면 표 7과 같은 결과를 얻을 수 있다.

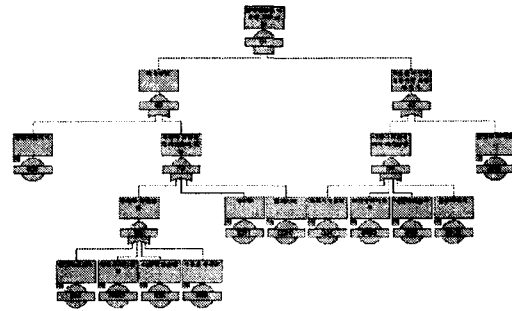


그림 6. FTA를 이용한 발파사고분석사례

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		

기존의 방법에서는 단순히 안전수칙 미이행이라는 1가지 원인에 대해서만 조사, 결론 내린 것에 비해 본 연구의 방법을 이용할 경우 총11가지의 원인이 발견되었다. 이 중 단독으로 재해를 일으킬 수 있는 경우도 3가지의 경우나 존재하였으며, 나머지 8가지의 경우는 두 가지의 기본사상이 동시에 발생할 경우 일어날 수 있는 것으로 나타났다.

즉, 안전지식 결여, 안전수칙 미준수, 나쁜 작업 습관은 단독으로도 재해를 일으킬 수 있는 것으로 나타났으며, 그 외에도 사용중 부주의, 과조발, 점화미비, 장전작업미비, 불안전위치, 보호구 미착용 등은 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 보

다 체계적이라 하겠다.

5. 결론

본 연구에서는 발파사고의 정확한 원인을 분석할 수 있도록 일본과 우리나라 발파사고의 비교를 통해 재해 조사표를 개발하였으며, 이를 바탕으로 기존 조사방법보다 체계적 발파사고의 분석을 위해 FTA기법을 우리나라의 발파사고사례를 중심으로 적용시켜 보았으며 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 발파사고는 특수한 기술 분야이므로 이에 맞는 재해조사표를 별도로 개발하여 정확한 사고분석을 위해 사용되어야 한다.

2) 기존의 발파사고조사 방법에 비해 FTA기법을 이용한 분석 방법이 보다 체계적이고 구체적인 근본원인의 조사가 가능하다.

3) 1988년에서 1997년간 한국의 발파사고는 비석 및 낙석에 의한 사고가 전체 발파사고의 45.7%로 나타났다. 비석사고에 대한 FTA 분석결과 그 원인은 안전의식 결여, 안전수칙 미 준수 및 나쁜 작업습관 등 인적요인이 54.2%로 절반이상으로 나타났으며, 작업 대상물에 따른 요인이 21.2%, 환경에 따른 요인이 18.4%로 각각 나타났다. 이러한 결과는 화약류를 취급, 관리하는 자에게는 사전에 안전교육을 철저히 하고, 안전지식을 갖춘 전문기술자가 작업지도를 하도록 하는 등의 안전조치가 필요함을 보여준다.

4) 본 연구의 결과는 화약류 사용현장에서 안전수칙의 제정 및 준수, 관련단체 및 행정부처에서의 관련법규 제정 및 개정, 보안대책에 활용할 수 있을 것이며, 화약류에 기인한 유사재해 및 동종재해를 미연에 방지하여 귀중한 인명과 재산상의 손실을 최소화하는데 필요한 자료로서의 활용가치가 높을 것으로 기대된다.

또한 FTA분석으로 기본사상에 대한 실패확률을 알 수 있다면 TOP사상에 대한 발생확률도 알 수

있을 것이므로 향후에는 관련 부처나 연구기관, 대학연구소 등에서 보다 정확한 제품실패확률 및 Human Error를 바탕으로 한 후속연구가 계속 필요할 것이다.

참 고 문 헌

1. 김정진, 1993, 신발파핸드북, 원기술, p.635~641
2. 김준식, 1997, FTA기법을 이용한 항공기 안전도 분석에 관한 연구. 군사과학대학원 석사학위 논문.
3. 김재학, 1998, FTA를 이용한 원자력발전소 보조급수계통의 신뢰도 비교 분석. 한양대학교산업경영대학원 석사학위논문.
4. 김희창, 안명석, 김종현 2000, 화약 및 화공품의 역사와 향후 전망에 관한 연구. 화약발파, 대한화약발파공학회지, 제18권, 제3호. p.11~13.
5. 허진, 안명석, 1987, 안전한 불꽃놀이를 위한 고찰, 기술사회지, 한국기술사회 Vol.20, Mar, p.21~26
6. 김재국, 1997, 산업화약과 발파공학, 서울대학교출판부, p.50
7. 안명석, 1987, 화약산업의 재해분석 및 안전대책에 관한 연구, 동아대학교 경영대학원 석사 학위 논문.
8. 이병렬, 1998, FTA기법을 이용한 항공기 추진기관 RAM분석에 관한 연구. 국방대학원 석사 학위논문.
9. 이천식, 김형섭, 터널발파에 있어서의 폭약위력 개선 및 경제성. 화약발파, 대한화약발파공학회지, 제18권, 제2호, p.35~45.
10. 원연호, 이익주, 이상현, 뇌관의 정밀성 및 안정성에 관한 연구. 화약발파, 대한화약발파공학회지, 제 18권, 제2호. p.23~35
11. 정기섭, 1994, FTA를 이용한 산업재해 분석. 숭실대학교 산업대학원 석사학위논문.
12. 총포·화약 안전기술 협회, 1988~1997 발파사고 재해자료.

13. 工業化藥 핸드ブック, 工業化藥協會 發行
14. Fussel, J. B, Benetts, R, G. & Powers, G, J., "Fault Tree-A State of the art discussion," IEEE Trans. on Rel., Vol.R- 3, April, 1974, p.20~23.
15. Howard E. Lambet, George Yadigaroglu, "Fault Tree for Diagnosis of System Fault Condition", Nuclear Science and Engineering, 1977, p.20~34.
16. Isograph Limited, Fault Tree+ v9.0. 1999.
17. Steven A. Lapp. Garry J, Powers, "Computer Aided Synthesis of Fault Tree", IEEE Transaction on Reliability, April, 1977, p. 2~15.