

Fault Tree Analysis 기법을 이용한 발파사고 분석

An analysis of Blasting Accidents by Fault Tree Analysis

서 승 룩*, 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

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 끊임 없이 발생되고 있음에도 불구하고 안전에 대한 불감증은 근절되고 있지 않는 실정이다.

특히 건설, 토목현장에서의 안전활동은 전 근대적인 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 산업용으로 쓰여진 것은 1890년경 경상남도 마산에서 일본인이 채광에 흑색화약을 사용하면서부터이며, 그 후 1968년에 ANFO제작, 1977년 도심지 발파용인 미진동파쇄기(CCR)생산 공급, 1981년 정밀폭약과 슬러리폭약, 1993년에는 에멀전 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 발파

사고의 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 산업 분야에서 적용되고 있는 FTA분석 사례들을 중심으로 국내·외 연구동향을 기술하였다.

2.1 발파사고분석에 관한 선행연구의 취 약점

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 민원 발생으로 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 증기발생기의 체크밸브의 열림실패, 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 Haasl, 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 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 폭평을 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.

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 발생하는 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)

| 항목별 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 대파시연 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 폭발(전폭약(회수중을 포함) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 조기업단(지역폭발) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 비석·낙석 | 6 | 4 | | | 2 | | | 2 | 1 | 1 | 2 | 3 | | | 1 | | | 2 | 1 | 2 | 2 | | | | | | | | | |
| 5 신호·경계·연락 불충분 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 상선삭입중 | | | | 1 | 2 | | | | | | | | | 1 | 2 | | | | | | | | | | | 1 | | | | |
| 7 대파장소 부작동 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 폭발약인 불충분 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 점화부주의 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 프라임(마)트리저를 재작중 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 일시보안중 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 주변화기(소각포함)에 의해 | 1 | 1 | | | | 1 | | | | | | | 1 | | | | | | | | | | | 3 | | | 3 | | | |
| 13 휴대중(문반중)부주의 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 결선중 부주의 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 과조발(경화중을 포함) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 노선기 선봉에 접촉 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17 지면의 변형률 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 준비중의 불파 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19 전발파에 의해 경과 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 누전등에 의해 | | 1 | | | | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21 사용중 부주의 과실(불포함) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22 취급중 부주의 과실(불포함) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23 결착작업중(공업비관도화선) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24 대파시의 부주의 | | | | | 1 | | | | | | | | | 1 | | | | | | | | | | | | | | 2 | | |
| 25 도통시행중 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 26 대파중 경과 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 27 결착작업중(전기뇌관) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 28 건설용(비트)중공포사용중 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 29 신호뇌관에 의해 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30 낙뢰 | | | 1 | | 1 | | | 1 | | | | | | | | | | | 3 | | | | | | | | | 1 | | |
| 31 기타(부)스물 포함 | 1 | | | 1 | | 2 | 1 | 1 | | | 1 | | 1 | | | | | 1 | 1 | 1 | | 1 | 12 | 7 | 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 |

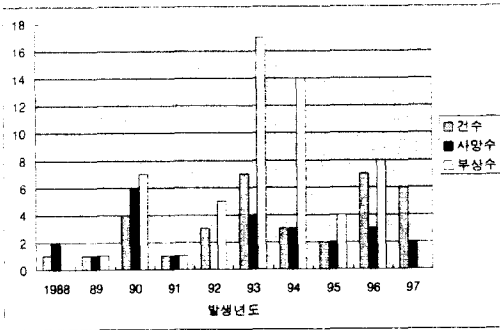


그림 3. 한국의 발파사고건수, 사상자수 비교

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.

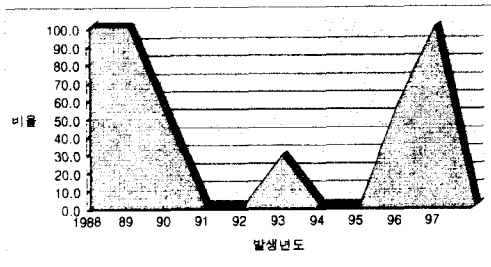


그림 4. 발파사고 중 비석사고의 비율(한국)

4. 발파사고에 대한 분류코드 작성 및 FTA에 의한 분석

본 장에서는 제3장에서 분석한 발파사고의 기본자료들을 이용해서 FTA분석을 위한 발파사고재해 분류코드를 작성하며 이를 이용해

서 FTA분석 결과를 제시하고, 기존의 발파 사고 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 제 10조와 시행규칙 제 4 조에서는 사망 또는 4 일 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.공정을 5.적종 6.근속기간 7.작업종류 |
| 기타산업 | 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 가

표 4(a). 작업대상물의 결함요인 분류표

| 분류 | 분류번호 | 분류항목 | 분류 | 분류번호 | 분류항목 |
|-----------------|----------|------------|-------------------|------|--------|
| A1. 재료 및 제품의 결함 | A11 | 재료불량 | A2. 보조구의 결함 | A125 | 타락(빠짐) |
| | A12 | 재료노후 | | A126 | 고임 |
| | A13 | 재료부족 | | A127 | 동결 |
| | A14 | 재료미비 | | A128 | 식별곤란 |
| | A15 | 자연발화재료 | | A129 | 기타 |
| | A16 | 흡습성재료 | A3. 경보장치의 결함 | A21 | 부적합 |
| | A17 | 대전성재료 | | A22 | 불량 |
| | A18 | 파손재료 | | A23 | 미비 |
| | A19 | Cut-off 재료 | | A24 | 기타 |
| | A110 | 용융재료 | A4. 보호구의 결함 | A31 | 부적합 |
| | A111 | 혼합불량 | | A32 | 불량 |
| | A112 | 포장불량 | | A33 | 미비 |
| | A113 | 용기불량 | A5. 안전방호 시설장치의 결함 | A34 | 기타 |
| | A114 | 감도불량 | | A41 | 부적합 |
| A115 | 시차불량(노란) | A42 | 불량 | | |
| A116 | 취기과다 | A43 | 미비 | | |
| A117 | 폭풍압과다 | A44 | 기타 | | |
| A118 | 용량부족 | 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(노란,폭약) | |
| | B13 | 비협조 | | B56 | 용도이외의것 사용 | |
| | B14 | 공포,긴장,흥분 | | B57 | 무리한 사용 | |
| | B15 | 성격조급 | | B58 | 손사용 | |
| | B16 | 감념,망상 | B6. 위험 장소물체에 접근 | B59 | 기타 | |
| | B17 | 열중,물두 | | B61 | 위험,유해장소 출입 | |
| | B18 | 이기심 | | B62 | 운전중 기계장치에 접근,접촉 | |
| | B19 | 사용중부주의(과실포함) | | B63 | 물체의 접촉 | |
| | B110 | 취급중부주의(과실포함) | | B64 | 폭발,과역적이러운 물체에 접근,접촉 | |
| | B111 | 무절제한생활 | | B65 | 불안전한장소에 접근,접촉 | |
| | 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 | 결격적업(매진기,공업노란) | | B77 | 기타 | |
| | B28 | 장전작업미비 | B8. 직접 확인 및 태만 | B81 | 안전방호장치점검확인소홀 | |
| | B29 | 결선작업미비 | | B82 | 안전방호시설물점검확인소홀 | |
| | B210 | 정확미비 | | B83 | 경보장치 점검확인 소홀 | |
| | B211 | 과조발 | | B84 | 자중차단장치점검확인 소홀 | |
| | B212 | 도통시험미비 | | B85 | 배출장치 점검확인 소홀 | |
| B213 | 간류화약류처리미비 | B86 | 기계장치 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 | 부자격 조작 | | | |
| B38 | 기타 | B104 | 연락 불출분 | | | |
| B4 | 부장, 보호구 결함 | B41 | 불량,부적합보호구착용 | | B105 | 불안전속도 조작 |
| B42 | | 잘못사용 | B106 | 불안전위치, 자세동작 | | |
| B43 | | 미사용 | B107 | 점검태만 | | |
| B44 | | 선택잘못 | B108 | 조기접근 | | |
| B45 | | 기타 | B109 | 습득장난 | | |
| B5. 계통, 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

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

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(c). 환경의 결함요인 분류표

| 분류 | 분류번호 | 분류항목 | 분류 | 분류번호 | 분류항목 |
|---------------|------|------------------|---------------|----------|-----------|
| C1. 작업 주변의 결함 | C11 | 물체의 위치불안정, 부적절 | C2. 작업 환경의 결함 | C210 | 화기 |
| | C12 | 물체의 결함 결함 | | C211 | 누전 |
| | C13 | 작업공간 협소 | | C212 | 정전기 |
| | C14 | 동로 미확보, 협소 | | C213 | 독, 흙, 찌꺼기 |
| | C15 | 정리 정돈 불량 | | C214 | 풍향 |
| | C16 | 기계장치, 공기, 전기배치결함 | | C215 | 천공내 거칠음 |
| | C17 | 적재결함 | | C216 | 무선전파 |
| | C18 | 작업바닥 거침 | | C217 | 탄진 |
| | C19 | 기타 | | C218 | 부식 |
| C2. 작업 환경의 결함 | C21 | 조명, 채광 | C3. 경계설비의 결함 | C219 | 지반변형 |
| | C22 | 환기, 통풍 | | C220 | 낙뢰 |
| | C23 | 온도 | | C221 | 기타 |
| | C24 | 습도 | | 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 | |

표 4(d). 관리, 감독, 교육의 결함요인 분류표

| 분류 | 분류번호 | 분류항목 | 분류 | 분류번호 | 분류항목 |
|--------------|------|---------------|--------------|-------------|--------------|
| D1. 기술적 결함 | D11 | 설계결함 | D3. 관리 감독 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. 교육 지도 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 봐와서 | D315 | 사고 재난시 대책결여 | |
| | D27 | 기타 | D316 | 작업표준 미비 | |
| D3. 관리 감독 결함 | D31 | 안전관리 조직미비 불충분 | D317 | 작업표준 이행규해결여 | |
| | D32 | 안전관리 활동미비 불충분 | D318 | 기타 | |
| | D33 | 안전교육제도미비 불충분 | D41 | 부업 | |
| | D34 | 점검보존기준제도미비불충분 | D42 | 가정문제 | |
| | | | D43 | 기타 | |

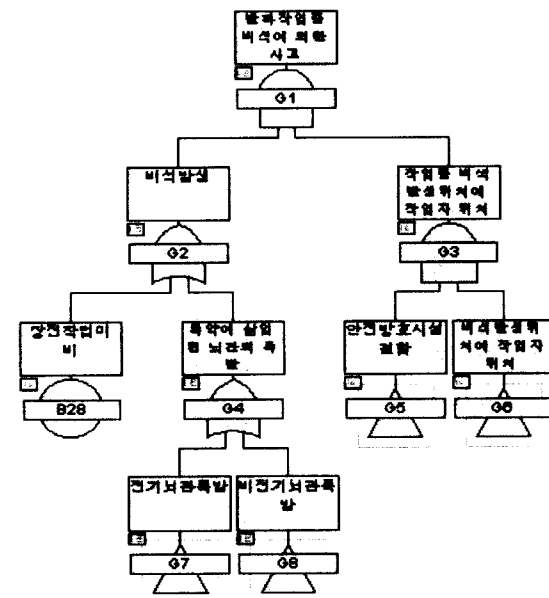


그림 5(a). 발파작업 중 비석에 의한 사고 Fault Tree

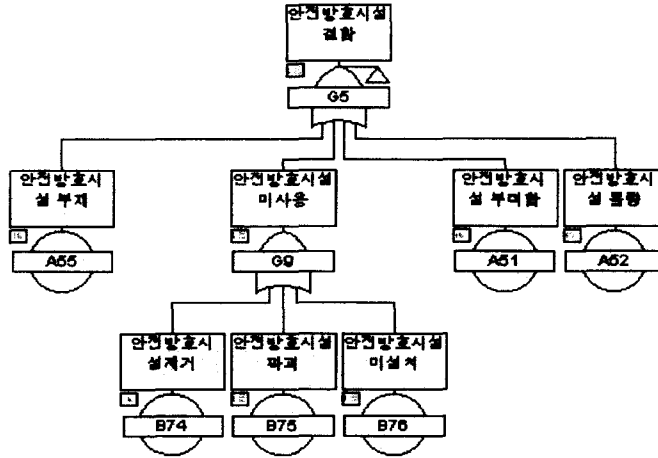


그림 5(b). 안전방호 시설결함의 Fault Tree

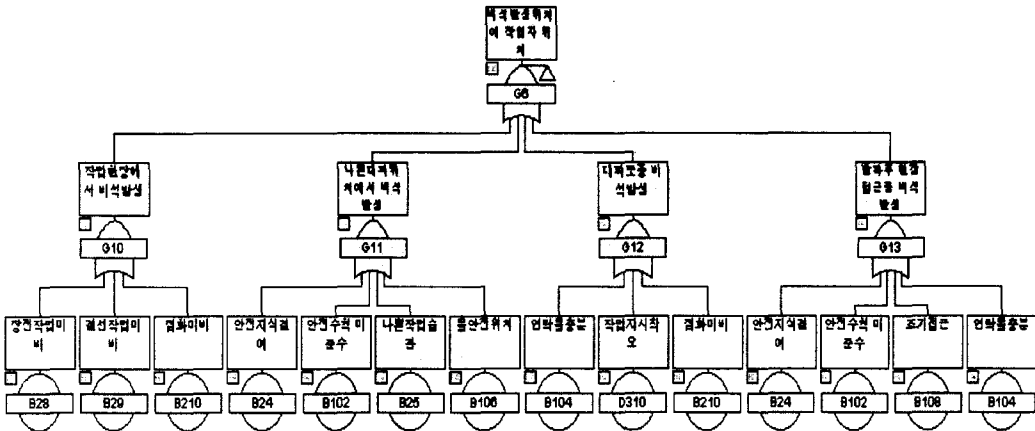


그림 5(c). 비석발생 위치에 작업자가 위치하는 경우 Fault Tree

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 발생할 수 있으며 이들 중 어

떤 한 사상이라도 발생되면 상위사상이 발생할 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

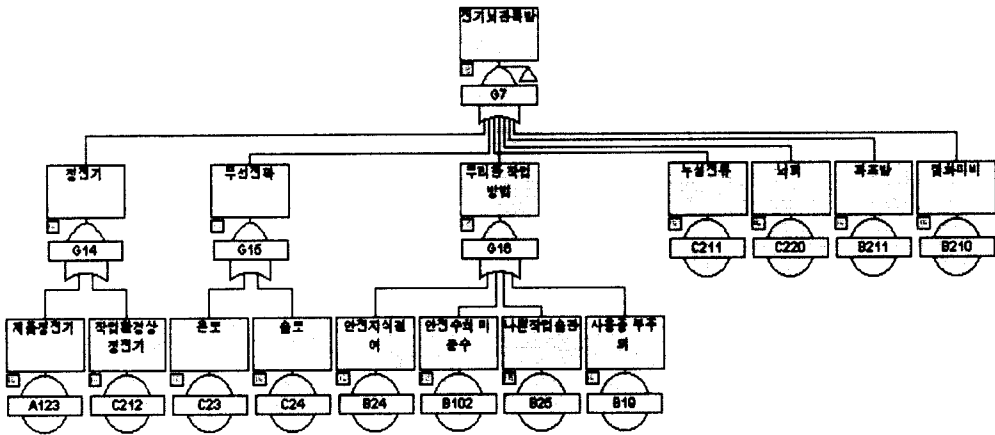


그림 5(d). 전기뇌관폭발의 Fault Tree

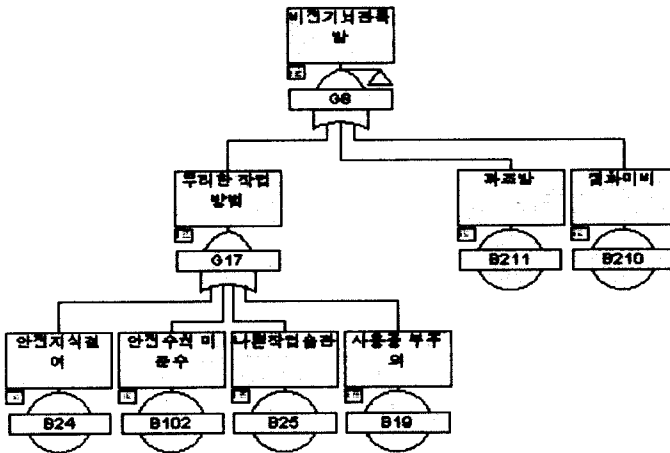


그림 5(e). 비 전기뇌관폭발의 Fault Tree

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

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 비율이 18.4%로 나타났다.

이상의 분석에서 발파사고 중 비석사고에 가장 영향을 많이 미치는 요인은 안전지식결여, 안전수칙 미 준수 등 인적요인으로 나타났다. 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 |

| 번호 | Cut sets | 번호 | Cut sets | 번호 | Cut sets |
|-----|---------------|-----|---------------|-----|---------------|
| 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 B106 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 |

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 6. 기존 발파사고분석방법사례

| 년도 | 발생일 | 발생장소 | 사고개요 | 피해 | 사고원인 |
|----|-------|----------------|--|-----|----------|
| 97 | 3. 12 | 충북 청원군 강의면 광복리 | 골프장 공사현장의 안전발파중 안전주의 소홀로 돌이 비산하여 공사관리자의 머리에 맞아 사망. | 사망1 | 안전수칙 미이행 |

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

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 미이행이라고만 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

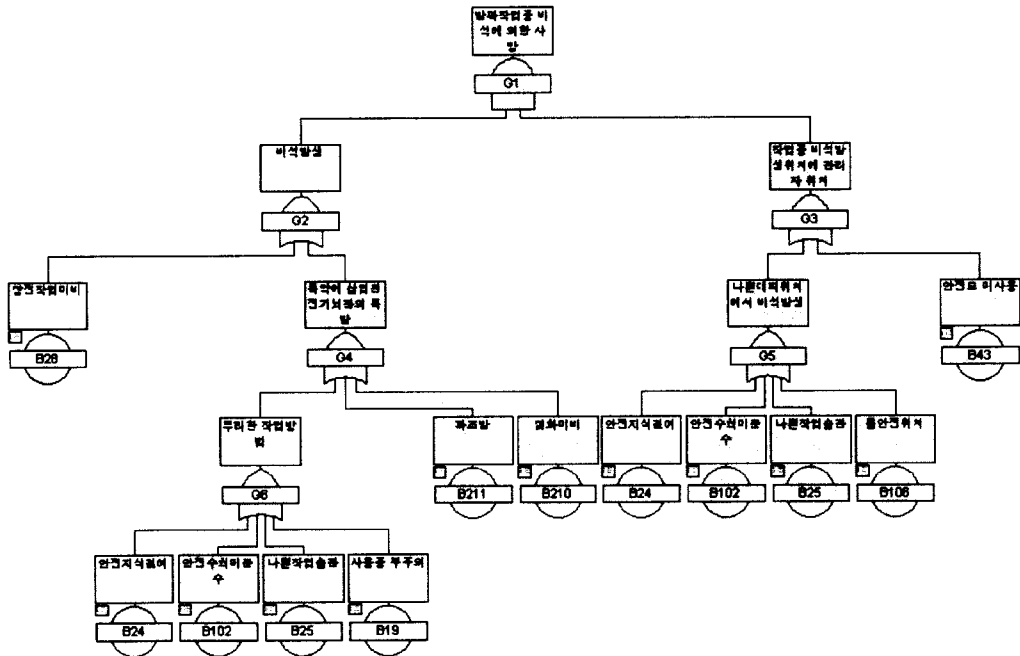


그림 6. FTA를 이용한 발파사고분석사례

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 미 준수 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 자료로서의 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.

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 18권, 제2호, PP.7~13.
- 김정진, 신. 발파핸드북, 원기술, 1993, PP 635~641
- 김준식, FTA기법을 이용한 항공기 안전도분석에 관한 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, 이상현, 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.

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 중
이며 주요관심분야는 인간공학, 재활공학,
생체역학 등이다.

◆ 이정훈

현재 대구대학교 산업공학과 박사과정
이며, 파워발파학원 원장으로 재직중이다.
주요관심분야는 인간공학, 안전공학 등
이다.

논문접수일 (Date Received): 2000/11/14

논문게재승인일(Date Accepted): 2002/1/3