

안전을 위한 기본 원칙

이 글에서는 안전의 확보를 위하여 기본적으로 살펴보아야 할 몇 가지 원칙과 고려하여야 할 점들에 대하여 살펴본다.

글 · 박재학 / 충북대학교 안전공학과, 교수
e-mail · jhpark@chungbuk.ac.kr

1994년 10월 21일 발생된 성수대교 붕괴사고, 그 해 12월 7일 서울 아현동 도시가스 폭발사고, 다음 해 4월 28일 대구 지하철 가스폭발사고, 2개월 뒤인 6월 29일 발생하여 500명의 사망자를 낸 삼풍백화점 붕괴사고, 2003년 2월 18일 대구 지하철 화재사고. 모두들 기억하고 있는 최근의 국내 사고 목록이다.

이들 사고를 대하는 우리들의 인식은 이러한 사고가 사용자나 관리자들의 부주의나 우연적인 실수 또는 불운에 의하여 발생된 것이고 공학과는 비교적 무관한 일이라는 것이다. 따라서 이러한 재해를 방지하기 위해서는 보다 주의하고, 관리 기구를 마련하며 교육을 철저히 할 필요가 있다고 생각한다. 그러나 보다 근본적인 안전의 확보를 위해서는 마치 기계를 설계하기 위하여 응력을 계산하고 온

도분포를 구하는 것과 같이 이러한 사고의 방지를 위해서도 안전에 대하여 해석하고, 계산하며, 또한 축적된 공학적인 지식들이 종합적으로 사용되고 검토되어야 한다.

따라서 이 글에서는 안전을 확보하기 위해서 강조되어야 할 대표적인 몇 가지 중요한 원칙들에 대하여 살펴본다.

손실 우연의 원칙

안전에 관련한 몇 가지 원칙 중 손실 우연의 원칙이라는 것이 있다. 예를 들어 사람들의 왕래가 많은 길에 나무 그루터기가 하나 있고, 지나가는 사람이 이 그루터기에 걸려 넘어지는 일이 가끔 발생된다고 하자. 이때 걸려 넘어진 사람의 대부분은 큰 상처를 입지



그림 1 1995년 6월 29일 발생하여 500명의 사망자를 낸 삼풍백화점 붕괴사고.



그림 2 1994년 12월 7일에 발생된 서울 아현동 도시가스 폭발사고. (9명 사망, 52명 부상)

않고 그대로 툭툭 털고 일어나 불평을 하면서 지나갈 것이다. 그러나 일부 사람은 무릎에 상처가 나는 것과 같은 경상을 입게 될 것이고 아주 운이 없는 소수의 사람은 큰 부상을 입게 될 것이다. 이와 같이 동일한 사고임에도 불구하고 그에 따른 손실은 우연에 의하여 결정된다고 하는 것이 손실 우연의 원칙이다.

이 경우 증상을 방지하기 위해서는 어떻게 해야 할까? 손실 우연의 원칙을 이해한다면 증상을 방지하기 위해서는 큰 부상은 없지만 넘어지는 사고가 일어난 경우를 주목하고 이때 대책을 마련하여야만 한다는 것을 알 수 있다. 그렇지만 일반적으로 이렇게 잘 되지 않는다. 큰 부상자가 나오고 나서야 그에 대한 대비책을 세우게 되지 손실이 없는 사고의 경우는 그대로 지나쳐 버리게 된다. 그러나 손실 우연의 원칙에서는 큰 손실의 사고를 방지하기 위해서는 손실이 별로 크지 않은 사고가 일어났을 때 대비책을 마련해야 한다는 점을 강조하고 있다.

따라서 어떤 산업체에 간단한 화재사고가 일어나서 아무런 피해 없이 진화되었다고 하더라도 대형 화재로 연결되지 않은 것은 우연이다. 따라서 큰 불을 방지하기 위해서는 큰 피해가 없이 일어난 화재사고에 주목하고 이때 대비책을 마련하여야 한다. 2003년도에 SK 울산 공장에서 대형화재가 일어났는데 이미 그전에 매년 2, 3건의 작은 화재들이 일어났었다고 한다. 피해가 별로 없었던 작은 화재 때 대책을 마련하였더라면 대형 화재를 방지할 수 있었을 것이다.

원인계기의 원칙

손실은 우연에 의하여 결정되지만 사고와 그 원인과의 사이에는 필연적인 인과관계가

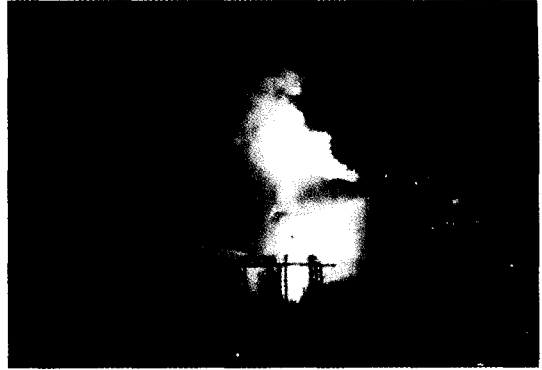


그림 3 2003년 10월에 발생한 SK 울산공장 대형화재 모습

존재한다는 원칙이다. 따라서 사고의 원인은 철저히 그리고 과학적으로 규명되어야 하고 규명된 원인에 대한 대책을 강구하여야 한다.

이때 한 가지 주의할 점은 사고의 원인과 대책은 다를 수 있다는 점이다. 앞에서 나무 그루터기에 걸려 넘어져 어떤 사람이 다쳤다고 했을 때 이 사고에 대한 직접적인 원인은 넘어진 사람의 부주의가 될 것이다. 따라서 이에 대한 대책으로 주의 팻말을 설치한다거나 교육과 홍보를 강화한다고 했을 때 당연히 이는 근본적인 대책이 될 수 없다. 근본적인 대책은 당연히 나무 그루터기를 없애는 것이다. 따라서 인적원인으로 결론이 난 경우도 그에 대한 대책은 인적 대책만이 아닌 기술적인 대책이 동반되어야 한다.

어떤 사고의 원인을 보통 인적원인과 물적원인으로 나누고 있다. 인적원인으로는 사용자의 부주의나 교육의 미비, 작업자의 무경험 등이 될 수 있을 것이고, 물적원인으로는 설비의 결함이나 설계의 잘못, 환경의 불량 등이 될 수 있다.

비록 작업자의 실수로 사고가 난 경우에도 만약 안전장치의 미비나 작업 환경의 불량이 간접적인 원인이 되었다면 당연히 그 사고에

대한 대책으로는 인적대책과 물적대책을 함께 고려하여야 한다.

사고 확률

우리가 매일 이러한 게임을 하고 있는 것은 아닐까?

사고확률을 생각할 때마다 대학생 때 보았던 디어헌터란 영화를 떠올리게 된다. 아마도 40대 후반 이상의 분들은 이 영화를 기억하고 계실 것이다. 미국의 한 시골마을에서 사슴 사냥을 하며 우정을 다지던 한 무리의 친구들이 베트남전에 참전하게 되면서 일어나는 이야기를 다룬 영화로 전쟁의 잔혹함을 고발하는 영화이다. 그 중 한 친구가 베트남에서 러시아 룰렛 게임의 희생물이 된다. 러시아 룰렛 게임이란 6연발 권총에 총알을 한발 장전하고 회전시킨 후 자신의 머리에 대고 쏘는 게임으로 죽지 않으면 대신 걸린 돈을 모두 가지게 된다. 이 글을 읽는 독자의 어느 누구도 스스로 이러한 게임을 하는 것은 원하지 않을 것이다. 그런데 실지 그러한가?

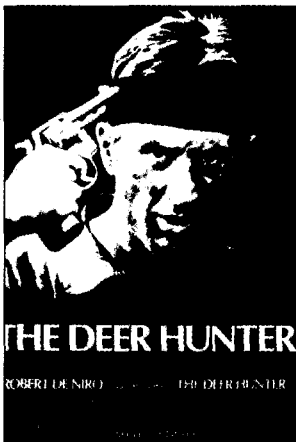


그림 4 디어헌터의 영화포스터에 그려진 러시아 룰렛 게임.

우리나라의 일 년 동안 교통사고 사망자는 7,000명 정도 된다. 이를 4,500만으로 나누면 확률이 1년에 대략 0.016%가 된다. 어떤 사람이 80년을 산다고 하면 평생 교통사고 사망자가 될 가능성

은 1.2%, 이는 80연발 권총에 총알을 한발 넣고 머리에다 대고 방아쇠를 당기는 것과 같은 것이다. 이 정도 확률의 러시아 룰렛 게임을 자동차의 편리함을 위하여 우리 모두가 하고 있는 것이다. 너무 높은 확률이지 않은가? 더구나 이는 교통사고만을 고려한 경우이다.

일 년에 국내 교통사고 부상자는 35만 명, 이를 4,500만으로 나누면 1년에 교통사고로 부상할 가능성이 0.8%가 되고, 어떤 사람이 80년 산다면 일생 동안 부상을 입을 가능성은 64%이다. 이는 6연발 권총에 총알 4발을 장전하고 방아쇠를 당기는 것과 동일한 것이다. 너무 높은 확률 값이 아닌가?

이러한 사고확률들은 단순히 운만 바라고 있기에는 너무 높은 확률 값이다. 따라서 사랑하는 가족들이 사고를 당하는 것을 원하지 않는다면 사고의 확률도 우리가 수용할 수 있는 값 이하로 낮추어야만 하고 여기에는 많은 노력과 투자가 필요하다. 80연발 권총 대신 400연발 권총으로 하는 러시아 룰렛 게임이라면 보다 안심이 될 수 있을 것이다.

안전에 대한 투자

어떤 회사에서 새로운 제품을 출시하였을 때 회사는 제품을 알리기 위해서 얼마의 선전비를 지출하면서 선전을 하게 된다. 선전비와 들이는 노력에 비례하여 소비자의 뇌리에 제품의 이름이 각인될 것이다.

흔히 대형사고가 날 때마다 우리의 부족한 안전의식을 한탄하며 안전의식을 고취시켜야 한다고 소리를 높이지만 안전의식을 갖게 하기 위하여 어떤 노력을 기울여야 하는가에 대해서는 별로 고려를 하지 않는다. 그러나 우리가 어릴 때 귀가 아프도록 들었던 '반공·방첩'이나 '산림녹화'에 기울였던 사회

적인 노력을 생각한다면 안전에 대한 사회적 노력은 아직 부족하다고 볼 수 있고 따라서 안전의식이 생기지 않은 것은 어쩌면 당연한 것이다.

따라서 안전의식 고취를 위해서는 그만한 투자가 있어야 한다. 비록 제품의 선전비와는 다를지라도 각급 학교에서의 교육, 방송에서의 홍보 등의 투자가 있어야 하고 필요한 사회적인 조직도 구성되어야 한다. 필요하다면 회사에서 선전비를 지출하는 것과 같이 정부에서도 예산으로 홍보비를 지출하여야 할 것이다. 이러한 투자에 비례하여 안전의식이 고취되는 것이고, 어느 날 갑자기 안전의식이 고취되는 것은 아닌 것이다.

불행한 일이지만 대형 사고가 날 때마다 국민들의 안전의식은 조금씩 고취될 것이지만 지불되는 사회적 비용이 너무나 엄청난 것이기에 이러한 대형 사고 없이도 국민의 안전의식이 고취되어야 하는 것은 당연하다.

대구에서 발생한 지하철 화재 사고에 대하여 다시 생각해 보면 사고 발생 원인은 결국 안전 수준을 높이는 투자를 하지 않은 것이다. 대구 1호선 전동차의 객차 당 구입가격은 6억여 원이었지만 우리나라에서 인도 수출용으로 만든 차량은 객차당 16억 7,000만 원이었다. 우리보다 일인당 GNP가 훨씬 낮은 인도보다 우리의 차량가격이 낮은 것이다. 그 원인은 우리가 원하는 안전 수준이 인도보다 낮았기 때문이다. 우리가 원하는 안전 수준에 따라 설비의 가격이 결정될 것이고, 사회적인 방재 조직이나, 회사 내에서의 안전 조직이 결정될 것이다. 안전 조직이 없는 회사에서 높은 안전 수준을 바랄 수는 없는 것이고 얼마나 투자 할 것인가는 필요하다고 생각되는 안전수준에 달려 있다고 볼 수 있다.

안전과 설계

기계공학 기술자들이 기계나 설비의 설계에 많이 참여하지만 그 일들이 안전과는 무관하다고 생각하는 경우가 많다. 물론 응력 계산을 하여 구조물의 강도를 고려한다거나 유입되는 열량을 조절하여 폭발로 연결되지 않도록 하는 등의 계산은 수행하지만 일부 부품이 고장나는 경우 또는 사용자가 실수하는 경우의 대책 등에 대해서는 많은 관심을 기울이지 않는다. 그러한 점은 설계와는 무관하고 사용자의 책임이라고 생각해 버리기 쉽다. 그러나 어떤 기계, 설비 또는 구조물의 안전성은 설계도에서 이미 결정되어 버린다. 그 후의 제작이나 사용자 교육 등은 설계도에서 정해진 안전 수준을 최대한 확보하기 위한 활동일 뿐이고 그 이상의 안전 수준은 획득되지 않는다. 따라서 설계자는 설계하는 기계나 설비의 안전에 대하여 가장 큰 책임을 져야 한다.

즉 기계가 설계가 되면 그 기계의 사고율은 설계도에서 정해진다. 때에 따라 사고가 발생하기도 하고 발생하지 않기도 하는 이유는 경우의 수가 충분하지 않기 때문이다. 경우의 수가 충분하다면 즉 많은 수의 사용자가 있다면 정해진 사고율에 접근하게 된다. 설계도에 무심히 적어 넣는 숫자와 무심히 결정하는 부품에 따라 재해를 당하는 사람의 수가 결정된다는 것을 인식한다면 설계를 무심히 하기는 힘들 것이다. 따라서 설계자는 설계하는 기계의 사고율을 낮추기 위하여 가능한 많은 노력을 기울여야 한다. 안전에 대한 많은 공학적이론과 지식들이 응용되어야 하고 보다 많은 인력과 시간의 투자가 안전의 고려에 할당되어야 한다.

사실 모든 사람이 안전에 대한 전문가가 될 수는 없으므로 설계과정에서 안전 전문가에

의한 검토과정이 있어야 하고 또한 정부에서도 설계에서 적용하여야 할 안전 기준을 마련하고 새로운 형태의 기계에 대한 안전 관련 승인 과정을 강화하여야 할 필요성이 있다.

기계설비의 안전

기계설비의 설계에 있어서 두 가지 중요한 원리가 폴프루프(fool proof)와 페일세이프(fail safe)이다. 폴프루프란 사용자가 실수를 하더라도 안전이 확보될 수 있도록 하는 것이고 페일세이프란 설비가 고장 또는 파손이 되더라도 안전할 수 있도록 하는 원리이다.

폴프루프의 적용 예로서 가까이 볼 수 있는 것이 가정용 믹서기이다. 믹서기의 칼날이 위험한 것은 모두 알 수 있는 바이며 뚜껑을 열더라도 믹서기가 계속 작동되게 설계되어 있다면 아마도 일 년에 수천 명의 주부들의 손가락이 칼날에 베어졌을 것이다. 그러나 뚜껑이 열리면 자동으로 믹서기의 작동이 정지되는 폴프루프 구조로 되어 있어 실수에 의한 사고가 방지되고 있다.

승강기에서 승객이 많으면 경고음이 울리고 작동이 되지 않는다거나 프레스에서 작업자의 손이 금형 사이에 들어갔을 때 프레스의 작동이 멈추는 것, 세탁기의 뚜껑을 열면 세탁기가 멈추게 되는 것 등이 폴프루프의 또 다른 예이다.

페일세이프의 원리를 적용한 예로는 승강기에서 정전이 되면 브레이크가 작동되어 운전을 정지시킨다거나 교통 신호등을 두 군데 달아 한 쪽 신호등이 고장나더라도 다른 쪽 신호등을 볼 수 있게 하는 것 등이다. 자동차의 브레이크 등이 좌우 양쪽에 달려 있는 것도 페일세이프의 역할을 한다.

따라서 기계의 설계자는 사용자의 실수에

의한 사고를 사용자의 책임으로 돌릴 것이 아니라 철저하게 실수를 줄일 수 있도록 그리고 실수를 하였더라도 사고로 연결되지 않도록 설계하여야 한다. 또한 기계의 고장에 대해서도 마찬가지로 고려하여야 한다.

공학적인 원리

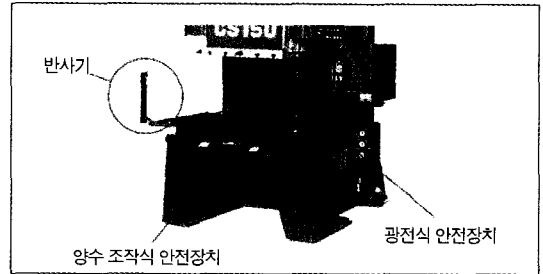


그림 5 프레스 안전장치

설비의 강도 설계를 하면서 설비에 걸리는 응력이 허용응력 이하로 되는 것을 운에 맡기고 응력 계산을 하지 않는 설계자는 없을 것이다. 그러나 아직 어떤 설비의 안전성에 대해서는 공학적인 해석을 하지 않고 운에 맡긴다거나 사용하는 사람의 책임으로 떠넘기는 경우가 상당히 많다. 이렇게 되는 이유로는 관련분야에 대한 정보가 많지 않고 또한 전공한 전문가도 많지 않기 때문이기도 하지만 아직 이의 필요성에 대한 인식이 부족하고 여기에 투자할 필요성을 느끼지 않기 때문이기도 하다.

대구 지하철 화재사고에서 많은 사망자의 사망원인은 화재 시 발생하는 연기에 의한 질식이었다. 따라서 적절한 제연 설비가 필수였음을 알 수 있다. 제연설비의 설계를 위해서는 연기의 발생 및 흐름에 대한 시뮬레이션이 필요하였을 것이고, 아마도 이러한 시뮬레이

선이 행해졌었다면 당연히 난연재로 된 차량의 필요성이 강하게 대두되었을 것이다. 따라서 방재와 관련된 분야에 대한 기술이 향상되어야 하고 관련 연구에 대해서도 투자도 확대되어야 한다.

전통적인 공학 분야가 모두 안전과 관련이 있지만 보다 좁은 의미에서 안전과 밀접한 관련이 있는 분야들을 모아보면 다음과 같다.

- 방화 : 발화조건, 소방 등 화재와 관련된 내용
- 방폭 : 폭발조건, 폭발에 의한 피해, 방폭설비 등 폭발과 관련된 내용
- 고장 진단 및 예측 : 진동 등을 측정하여 설비의 상태를 파악하고 고장을 미리 예측
- 구조안전 : 구조물의 안전을 확보
- 인간공학 : 실수 등 사고에 대한 인간의 영향 및 기계의 인체에 미치는 영향 등을 분석
- 신뢰성 평가 : 고장 및 사고의 확률을 분석
- 안전장치 : 안전장치 설계 및 제작
- 안전성 분석 : 위험성의 파악과 대비책의 마련
- 전기안전 : 감전, 전기에 의한 발화, 폭발 등 전기와 관련된 내용

안전성 확보를 위한 기법

기계설비의 신뢰성과 안전성을 분석하는 몇 가지 기법들을 소개하기로 한다.

PHA

PHA(Preliminary Hazard Analysis)는 다음에 행할 보다 엄밀한 해석의 기초로서 행해지며 위험성을 찾고, 이의 영향을 살펴보고, 안전 문제가 있는 곳을 찾아 보다 엄밀한 해석이나 시험의 필요성을 결정한다.

FMEA

FMEA(Failure Mode and Effect Analysis)는 1960년대에 NASA에서 달 탐험용 차량(space vehicle)의 설계에 처음 적용되었다. 차량의 모든 요소에 대하여 발생될 가능성이 있는 문제점들을 장시간의 집중적인 난상토론(brainstorming session)을 통하여 빠짐없이 예상하려는 방법으로 사용되었다. 그 후 NASA의 기술자가 산업체로 이동함으로써 산업체에서도 널리 사용되게 되었다.

FMEA는 설계, 제작, 생산품의 운용 등의 단계에서 나타날 수 있는 모든 문제점들을 빠짐없이 확실하게 고려하고, 정리하고, 해석하기 위하여 사용된다. 양식(form)을 이용하여 해석하는 경우 양식에는 고장모드, 고장의 영향, 고장의 원인, 대책, 고장의 빈도, 고장의 중대도, 검출의 난이도 등의 항목이 포함된다.

FTA

FTA(Fault Tree Analysis)는 연역적인 방법이다. 중요한 재해를 정상사상(頂上事象; top event)으로 두고 그 최종결과를 가져



그림 6 최근 국내 중소기업에서 개발된 승강기 제동장치인 로프 그리퍼

오게 하는 가능한 사상(event)과 결함들을 찾아 나가는 분석 방법으로 이러한 분석을 통하여 고장의 경로가 밝혀진다. FTA 결과는 각 사상들이 논리적인 연산자(operator)로 연결되어 구성된다.

정상사상이 설정된 후 정상사상의 원인이 되는 바로 직전의 사상들을 찾게 되고, 이들 하위의 사상들에 대하여 다시 그 원인들을 찾기 위하여 검토되며, 이러한 과정을 아주 상세한 레벨까지 반복한다. 이상적으로는 말단 사상들은 모두 원인으로 나타내어지는 기본사상(basic event)이 된다. 말단사상들에 대한 확률 값이 주어지면 정상사상이 발생할 확률도 구할 수 있다.

HAZOP

HAZOP(Hazard and Operability Study)은 안전성이나 설비의 가동성에 문제가 일어날 수 있는 모든 가능한 경우를 고려하여 해석하려는 방법이다. 정상상태로부터의 이탈을 가정하고, 이러한 이탈이 일어날 가능성, 그 위험성, 대책 등을 살펴보는 방법이다. 이탈을 가정할 때에는 안내어(guide word)의 도움을 받는다.

예를 들어 어떤 파이프라인에 설치된 밸브의

제거 가능성 여부에 대하여 검토한다고 했을 때, 밸브의 제거로 인하여 발생하는 파이프 내 흐름에 대하여, 역류, 과도한 흐름, 적은 흐름 등을 가정하고 이들의 안전과 설비의 가동에 미치는 영향을 따져나가는 해석법이다.

통계 및 확률의 이용

기계 부품의 고장률 등을 구하고 이들이 전체 시스템의 고장에 미치는 영향을 통계, 확률적인 기법을 이용하여 해석하는 것이다. 이를 이용하여 전체 시스템의 고장률, 부품들에 요구되는 고장률 수준이나, 시스템의 신뢰도 향상을 위한 가장 효과적인 투자 방법 등을 결정할 수 있다.

이러한 해석 방법의 적용을 위해서는 부품들에 대한 고장률 데이터가 얻어져야 하고 모델링 및 해석 방법들에 대한 연구가 수행되어야 한다.

맺음말

안전성 확보를 위하여 고려해야 할 몇 가지 기본적인 원칙들을 살펴보았다. 대부분의 공학적인 해석은 기계나 설비의 효율을 높이기 위한데 효율이 높은 기계를 만들었다고 하더라도 그 기계를 몇 배 비싼 값으로 판매하지는 못할 것이다. 그러나 앞으로 안전이나 건강에 대한 관심이 높아질수록 단지 보다 안전하다거나 사용자의 몸에 무리가 가지 않는다는 이유만으로 몇 배나 비싼 기계가 선호될 수 있다. 따라서 안전에 대한 관심은 단지 사고를 줄인다는 목적뿐만 아니라 기계의 부가가치를 획기적으로 높일 수 있는 길이기도 하다. 따라서 안전에 대한 보다 많은 관심이 요구된다고 본다.

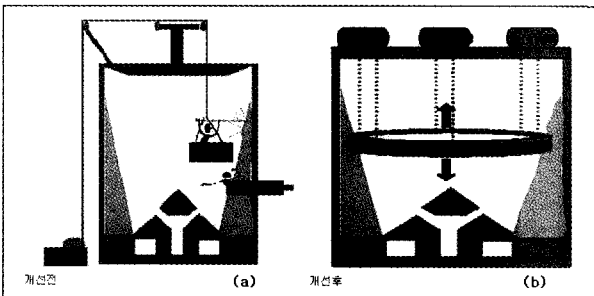


그림 7 (a) 시멘트 저장 사이로에 달라 붙은 적분을 직접 제거하는 과정에서 적분 붕괴, 질식 등으로 사망사고 발생 (b) 적분제거용 스크레이퍼 설치로 자동화 (한국산업안전공단 자료)