

Fault Tree Analysis에 의한 첨단설비 Arm 안전사고의 분석

(A Analysis of a Pointed-end Equipment Arm Safety-Accident
for Fault Tree Analysis)

윤 용 구*
박 범**

Abstract

The purpose of this study is to attempt a Analysis of a pointed-end Equipment Arm Safety-Accident for Fault Tree Analysis. Three major techniques were used first problem is Z-Model by which accident Analysis & prevention of a pointed-end Industry can be made, Fault Tree Analysis(FTA) by which quantification of a pointed-end Equipment accident Analysis can be made it 5 years in past and the third, manual-written by which minimal cut set to accident can be Identified. A example has been made of issue point a pointed-end Equipment that at the Arm in loader happen to Injuries. According to the Analysis lack of safety knowledge, unsafety-behavior seem to be the primal cause of accident. Comparision of the accident cause to actual report demonstrates that the FTA a efficient tool for Industrial Accident prevention.

I. 서론

1.1 연구의 필요성과 목적

최근 국내산업의 과감한 투자와 급속한 팽창으로 기계설비, 화학공장등의 작업공정으로는 노동력이 대규모화 되면서 이에 따른 전문기능 부족현상이 나타나는 동시에 미숙련 작업자의 조업도 증가 현상이 수반되었다. 특히 첨단장비를 운영하는 장치산업의 공장도 자동화율이 높아지고 여기에 따른 미숙련 작업자의 작업도가 증가함으로 인한 운전으로 인해 산업안전사고가 증가하고, 산업안전대책이 시급하고, 그 중에 불안정한 행동으로 인적 오류가 증가되고 있는 실정이다.

* 아주대학교 산업공학과

** 아주대학교 산업정보시스템 공학부

- 1) 2003년도의 경우 산업재해로 인한 직접손실액(산재보상금 지급액)이 2조4800억원으로 전년도 대비 22.8% 증가하고, 직·간접손실을 포함한 손실 추정액은 12조4000억원에 달하고 있다.
- 2) 또한 재해발생 주요 작업 내용은 건축·토목공사의 설치보수가 23.7%, 기계·차량의 운전조작이 18.5%, 기계설비등 해체작업 및 보전작업이 17.1%로 상당히 많은 비중을 차지하고 있다.
또한 2003년도 중대재해 분석결과 전체 산업별 제조업이 22% 증가하였고, 불안정한행동의 현황은[작업수행소홀, 절차 미준수]가 37.2%, 설비, 기계, 물질의 부적절한 사용관리가 20.3% 순으로 나왔다.
- 3) 이러한 원인 분석과 분석결과에 따른 방지 대책이 필요하다. 대부분의 기업이 안전관리제도의 미비로 원인 규명과 해결책에 의한 자체능력이 어려운 실정이다. 이러한 재해 발생 후 안전사고 방지 대책 미비로 재해 발생률이 증가하고 있음을 나타낸다.
본 연구의 목적은 산업재해의 체계적인 분석 방법을 개발하는데 있다.

1.2 연구의 범위 및 방법 분석

첨단장치산업의 주가되는 기계장치 중심의 제조업에서 안전사고의 불안정한행동으로의 원인 분석을 하고 불안정한행동을 근간으로 사업장에서의 연계된 Human-Error를 분석하여 이를 토대로 Fault Tree Analysis를 행하여 Cut Set과 Minimal Cut Set를 구하는 방법을 취하고 그 방법으로 설비 압착에 대한 안전사고를 사례로 선정하여 평가 해 본다.

II. 재해사고의 분석

2.1 불안정한행동의 재해요인

안전사고의 불안정한행동, 상태는 연쇄적으로 일어나게 하는 도미노이론(Domino Theory) 3) 이나 미카엘 자베타키스(Michael Zabetakis)의 이론도 불안정한 행동을 안전사고의 발생 과정으로 보았으며, 샌더스(Sanders)와 쇼(Shaw)는 사고 원인(인과관계)의 기여인자 Contributing Factor in Accident Causation(CFAC)라는 모델로 6개인자(경영관리, 물리적 환경, 도구설계, 작업, 사회적-심리적, 작업자-보조작업자)로 사고인자를 이론화 했고, 그로스(Grose)의 다중요인이론(Man, Machine, Media, Management)으로 발생과정을 이론화 시킨 것처럼 불안정한행동과 작업자(사람)와의 연관됨을 알수 있다.

1) 산업재해 예방 Z Model

이와같이 불안정한 행동의 사고원인 분석과정을 각기 다른 매개체와 순서 흐름에 의해 연관 관계를 산업재해 예방 Model(Z-Model)이 논문에 반영되었다.

여기에 보면 재해예방 Model을 횡적으로 재해요소(Factor)와 종적으로 재해대책 관리 항목의 Level로 구성하고 여기에 Man 측면에 경영층, 중간관리층, 작업자층으로 사용 분석하였다. 다만 요소 범위를 Range로 한정하고 분석한다. <그림-1>를 참조하여

다만 이 Model을 이용해 FTA를 분석하고, 쉽게 풀어 낼 수 있는 재해발생 단계를 표시하여 작업자 측면의 기계적, 환경적, 인위적, 위험적, 작업적 측면을 종축으로 하고 Human 내적요인을 횡적으로 연관성을 구분해서 사고요인의 기인함으로써 간편하고 체계적으로 유추하려고 했고, 또 다른 방법으로는 IAD의 사고원인 분석을 거침으로서 FT작성의 간편, 신속, 정확하게 원인 분석을 할 수 있게 된다.

구분	내적요인				
	개인	교육/훈련	직장성격	자체특성/환경	설계상의 결함
기계적 (기술적)	√	√	√		√
인위적(Human)	√	√	√	√	
환경적	√				
위험적, 작업적 (관리/교육)	√				

< 그림-1 Z-Model >

2.2 사고 연쇄반응의 분석(Fault Tree Analysis)

앞에서 본 Z-Model에 의한 사고의 발생단계의 원인분석의 구성요소는 간편하게 분석 할 수 있으나 하나의 사고가 발생할 수 있는 모든 요인들의 복잡한 요인조합과 단계적이 사고 유발 과정은 나타낼 수가 없다. 이를 나타내기 위하여 Fault Tree(이하 FT라 표기)의 작성에 의한 분석이 필요하다.

Fault Tree Analysis(이하 FTA라 표기)는 시스템 고장을 발생시키는 원인들과의 관계를 논리적으로 사용하여 FT를 만들고 의거하여 시스템의 고장 확률을 구함으로써 취약부분을 찾아내어 시스템의 신뢰도를 개선하는 정량적 평가이고, 재해발생의 분석은 사고요인(Basic event)이 어떤 단계를 거쳐 조합되고, 사고발생(Top event)의 연쇄반응이 일어나는가를 분석하는데 효과적이다. 사고를 유발하는 기본적인

연쇄반응을 파악키 위해 Cut Set과 Minimal Cut Set가 산출되어야 한다.

FTA는 그림-2에 나타난 흐름을 거쳐 진행된다.

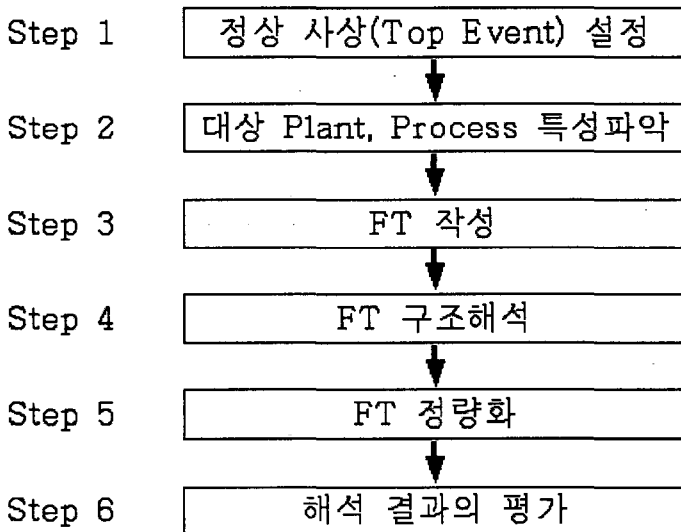
본 FT는 사건요인에 대한 기본사건(Basic-Event)은 숫자가 많아지고 사고발생의 단계가 복잡해짐으로 Cut-Set과 Minimal-Cut Set을 구하기가 곤란해 Computer나 TDX-1으로 처리해야 하나 본 연구는 그림으로 본 과정을 거쳐 작성되었다.

Ⅲ. 효율성 평가 : 사례연구

3.1 FTA 제반사항

효율성 평가를 위해서는 전문가가 현장을 보고 분석한 결과와 Computer 계산과 비교해서 일관성이 있다면 어느 정도 사업장에 분석을 해 적용할 수 있다. 그래서 안전사고의 첨단장비의 Loading시 Arm에 의한 압착에 대한 내용을 수집, 분석하였다.

본 사고는 첨단 설비의 사고발생 빈도가 생산 기계 중에서 가장 높으며 Human-Error성의 복잡성을 보이고 있다. 이와 유사한 분석은 기계설비의 Press에서의 사고와 유사한 사례이고 여기에 대한 적용기법은 FTA로 인용한다.



< 그림-2 FTA 절차 >

수행절차는

Step 1에서 재해 위험도를 고려하여 재해를 결정하고, 재해발생의 활동의 목표값을 구하고,

Step 2에서 공정과 작업내용을 파악하고, 재해에 관련있는 설비, 재료, 배치도, 지침서를 준비, 숙지하고 작업자 실수(Human Error) 원인과 영향을 조사하고, 재해사례나 통계를 넓게 조사하고,

Step3에서 정상사상의 1차 원인을 분석하고, 정상사상과 1차 원인의 논리 Gate 연결 및 1,2차 원인(결합사상)을 분석하고, 1,2차 논리 Gate 연결하고 기본사상(Basic-Event)까지 반복 분석한다.

Step 4에서 작성된 FT를 수학적 처리(Boolean Algebra)에 의해 간소화하고, 최소 컷세트(Minimal Cut Sets) 최소 패스 세트(Minimal Path Sets)를 구하고, 정상외 중요한 중간 및 기본사상을 파악한다.

Step 5에서는 기본사상의 발생빈도나 고장, Error Data등을 정리하여 중간사상 및 정상사상의 확률을 계산하고 재해발생 확률 결과가 유사한 재해의 발생과 비교하여 현격한 차이가 날 경우는 작성된 FT에 대하여 재검토를 한다.

Step 6에서는 재해발생 확률이 허용할 수 있는 위험 수준을 초과할 경우 이것을 감소시키기 위한 대책을 수립한다.

사실 FTA의 활용 및 기대효과 측면에서 사고원인 규명의 간편화, 사고원인 분석의 일반화, 정량화 및 노력시간의 절감과 시스템의 결함 진단과 안전진단 Check-List 작성을 운영하는 장점이 있지만 다음에는 현장관리자의 사고보고문을 인용하였다.

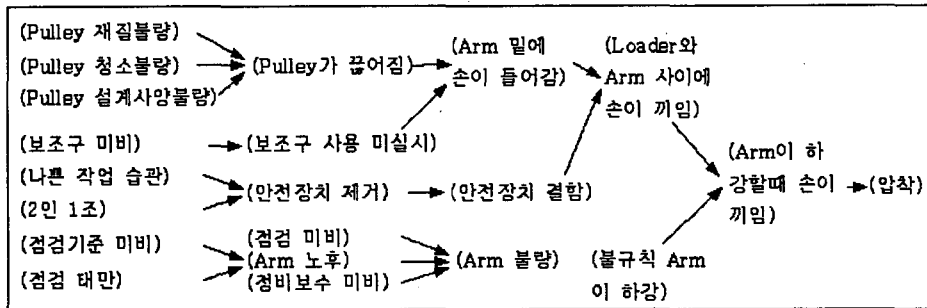
예) A회사 : 경인지역, 종업원수 3200여명, 주요제품 : Computer 소자, 연간매출액 : 약 500억원, 기계 점검에 대한 동작원리 미숙지와 작업자의 점검 부주의 태만으로 설비 Arm에 Motor 축 풀리(Pulley)가 절단됨으로 Loader가 하강하고, 2인 1조의 교육 불충분과 작업의 불안정한 행동과 상태로 안전장치를 제거하고 Motor 축의 Loader를 이용 Arm에 \emptyset Adjust 하려고 손으로 보수하다 Arm이 내려와 손가락 이 압착되는 사고발생

3-2 Z-Model-List 작성

위의 사고 원인들을 일반적인 요인별로 분류하면 다음과 같다.

기계적(기술적)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Pulley 청소 불량 ○ Motor의 Pulley 관리 불량 ○ Pulley 절단 ○ 점검미비, Arm의 하강, Arm 조인 불량 ○ 정비 보수에 대한 설비 특성 미 파악
인위적(Human)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 점검 태만, 점검기준 미비, 동작원리 미숙지 ○ 불안정한 행동, 안전장치제거, 손이 들어감 ○ 교육 불충분, 나쁜 작업 습관, 보조구 미비
환경적	<ul style="list-style-type: none"> ○ 정리정돈 불량
위험적,작업적 (관리,교육)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 점검기준 미비, 설계 사양 불량, 2인 1조 미실시

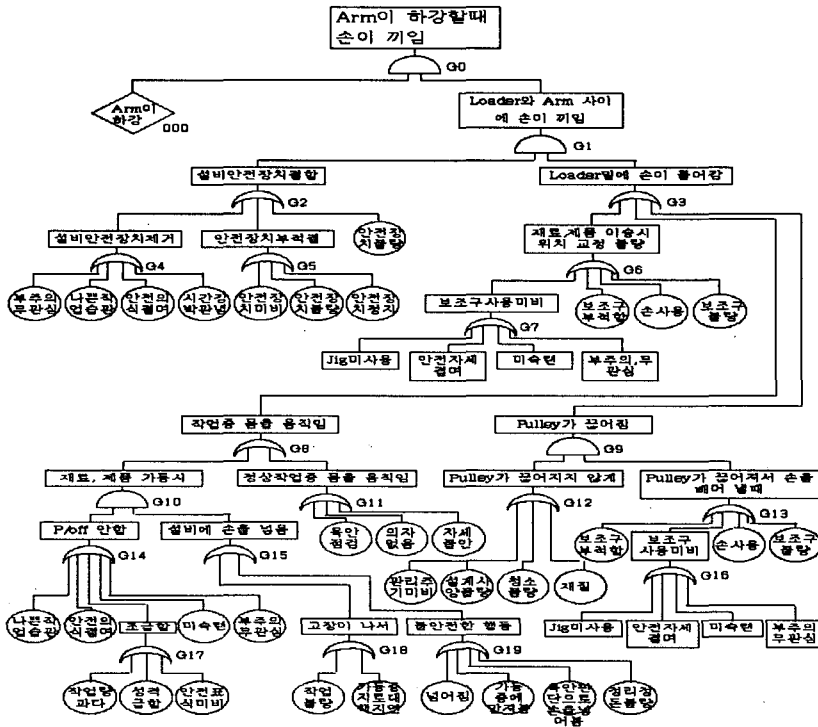
위의 분류를 토대로 Z-Model-List를 이용해 연관 관계를 연역적으로 표현하면 <그림-3>와 같다.



< 그림-3 설비 Arm에 의한 안전사고의 요인 연관 관계 >

3.3 FTA의 적용 및 분석

<그림-4>에서 FT에서 보는 바와 같이 설비 Loader에 의한 사고를 "Arm이 하강" 것을 전제로 하고



< 그림-4 Fault Tree (Loader에 의한 사고) >

"작업중 Pulley 가 끊어짐으로 인한 손이 있음"에 대한 요인을 세분화 하였다. 사례에 사용된 Gate는 19개 (And gate 4개, or gate 15개), basic event는 20종 36개였다. <그림-4>의 FT를 Computer로 처리하지 않고 수작업으로 실시하고 Cut Set에 출현된 basic-event가 사고 발생의 비중을 차지한다고 가정하고 빈도를 구였다. <표-1참조>

분류(일반)	분류 항목	출현횟수 (회)	Arm하강을 제외한부분%
	Arm의 하강	215	
기계적, 기술적	o 안전장치 불량	32	3
	o 안전장치 미비	32	3
	o 안전장치의 부적절	32	3
	o 보조구 사용 미비	25	2
	o 보조구 부적합	25	2
	o Pulley가 끊어짐	43	4
	o Pulley의 재질	43	4
	o Pulley 청소불량	43	4
계		275	25
인위적, Human	o 안전장치 제거	61	6
	o 나쁜 작업습관	79	7
	o 안전의식 결여	56	5
	o 조급함	42	4
	o 부주의, 무관심	85	8
	o 불안정한 행동(인지, 행동, 판단)	124	12
	o 손 사용	30	3
	o 육안판단으로 손으로 만짐	37	3
계		514	48
환경적	o 정리정돈 불량	52	5
	o 의자 없음	60	6
계		112	11
작업적 (관리, 육,정보)	o 안전표식 미비	82	8
	o Pulley의 관리 주기 미비	35	3
	o 작업량 과다	23	2
	o 가동중지로 대책 지연	37	3
계		177	16

< 표-1 Cut Set 중 basic-event 출현횟수 및 빈도 >

표-1에서 보는 바와 같이 "Arm이 하강" 할때 Loader에 의한 안전 사고의 결함요인별 출현빈도 기여의 순위는 나쁜작업습관(7%), 부주의, 무관심(8%), 불안정한행동(12%), 안전표식 미비(8%) 등으로 전체사고의 출현빈도는(35%)를 점하고 있고, Arm의 안전장치 결함(불량,미비, 부적절)은 전체의 9%와 Pulley의 결함(끊어짐,재질,청소불량)으로 12%의 출현빈도를 점하고 있다. 또한 Basic-event가 출현된 횟수는 4가지 일반으로 분류하면 인위적 48%, 기계적 25%, 작업적 16%, 환경적 11% 순으로 나타났다.

이상과 같은 결과의 적용에 대하여 첨단설비에 유사한 사례는 전무여서 불안정한

행동별 현황으로 비교가 필요하다.

3.4 사고원인에 대한 분석과 타 기계분야와의 원인 분석

<표 1-1>의 결과와 한국산업안전공단의 사고원인과 비교하였다.

본 논문은 <그림-4> Loader에 의한 안전사고를 대상으로 Cut Set에 의한 분석을 하고 한국산업안전공단의 2002년 산업재해 원인조사중에 재해발생 형태별 불안정한상태 및 행동으로 분석해서 평가하는 좋은 기준이 된다고 판단된다.

(* 본 논문 불안정한상태+불안정한행동+100%,

		분류	본논문	KOSHA	$\frac{KOSHA}{2}$ =논문
불안정한상태	주요인자	안전장치 결함(불량,미비,부적절), 제거	9	13.6	6.8
		보호구,보조구의 결함(사용미비,부적합, 손상용) 취급	10	33	16.5
		매개체의 결함(부품의 설계불량,파손, 재질) 청소불량 부적절	12	14.3	7.15
		주위환경(정리정돈, 부대시설 미비)	11	18.7	9.35
		안전표식 미비	8	15	7.5
		기타	0	5.4	2.7
불안정한행동	주요인자	불안정한행동(자세,나쁜습관, 행위) 미준수	19	32	16.25
		안전지식 결여(미준수,부주의,조급함,육안 판단, 임의제거)	26	47.2	23.6
		미숙련(가동중지, 작업량 과다)	5	19.5	9.75
		기타	0	0.8	0.4
계			100	200%	100%

KOSHA=불안정한상태+불안정한행동=200%)

< 표-2 사고원인 분석 결과 비교 >

<표-2>의 비교결과를 정리해 보면 불안정한상태의 주요인자의 편차는 매개체의 결함(12%), 주위환경(11%), 보호구(보조구)의 결함(10%), 안전장치의 결함(9%), 안전표식 미비(8%)의 순으로 최대 12%~ 최소 8%의 비중을 차지하고 있고, 한국산업안전공단의 자료가 Press의 자료가 아니고 전체 한해의 불안정한상태/재해자수를 놓고 비교해서 다소 유의차는 있을거라 판단되지만 KOSHA는 보호구(보조구)의 결함(33%), 주위환경(18.7%), 안전표식 미비(15%),매개체의 결함(14.3%), 안전장치의 결함(13.6%), 기타(5.4%)로 최대 33% ~ 최소 5.4%에서 본 논문과 비교 할려면 1/2배 해서 보면 다소 차이는 있고 본다. 실제 press에 불안정한상태일 경우 안전장치의 결함, 보호구(보조구)의 결함, 매개체의 결함 순으로 나타나 보이거나 한해의 전체 재해로 판단될때 다소 유의차는 있으나 중대재해 point는 내재 있다고 본다.

그러나 불안정한행동의 주요인자의 편차는 본 논문에서 안전의식 결여(26%), 불안정한행동(19%), 미숙련(5%)이고, KOSHA는 안전의식 결여(26.3%), 불안정한행동(16.25%), 미숙련(9.75%), 기타(0.4%)로 유사한 차이점을 보이고 있다. 이상과 같이 불안정한상태는 기계(설비), 재료, 수단, 방법등 작업장의 운영 상태에

따라 다소 차이가 난다고 보지만, 불안정한행동의 사람 측면에서는 유사한 차이를 보이고 있어 본 논문의 분석이 일괄성이 있다고 본다.

Ⅳ. 결론

산업재해의 예방 Model인 Z-Model로 사업장에서의 안전사고의 재해 요소를 접근해 Human-Factor의 내적요인으로 유추해 보고 그것을 근간으로 재해원인 분석기법인 FTA(Fault-Tree Analysis)를 이용 적용 해 본 결과 실효성이 있어 효율적으로 응용될 수 있었다.

FTA를 이용 일반적인 개념론적이거나 통설이 아닌 것으로 분명화 되었고 항상 복잡한 것은 아니라는 판단이 되었다. 다만 분석 연구를 통해 보면 Z-Model-List를 작성해 설비의 안전사고의 연관관계가 좀 더 세분화 구분은 보완 부분이 필요했지만 유추해서 재해원인을 도출화 내었고, FTA 분석에서 대책 수립시 Cut Set의 Basic-Event의 현 횟수가 많은 것에 중점을 두고 Minimal Cut Set의 사고방지시 Basic-Event가 적은 Minimal Cut Set 나타난 event부터 중점을 두고, 다만 Cut Set에 출현되었지만 minimal cut set에 출현되지 않은 것들이 있는 것에도 중점을 두고 요인 분석을 하고 생략되어서는 안된다고 본다. 또한 시스템에 대한 예방정비나 고장을 수리할때 본 연구에서 나온 결과를 이용하면 효과적인 점검 및 수리를 할 수 있을 것이다.

차후 연구과제로는 FTA를 이용해 Basic-event에 발생 확률을 구해서 신뢰성을 구하고 Computer를 이용한 Program으로 분석해 연쇄과정 또한 분석해 보고 불안정한행동에 대한 부분에 대해서도 재해요인 분석 Tool과 복합된 program이 개발되면 더욱 일반화 모델이 될 것이다.

참 고 문 헌

- 1) 윤용구, 박범 "Human Error에 의한 첨단방비의 사고 분석 연구"
안전경영과학회지 Vol.6, No.4, 99 40, 2004
- 2) 한국산업안전공단, 2003년 산업재해분석, 2003
- 3) Heinrich, H.W., Industrial Accident Prevention, 3rd ed,
McGraw-Hill Book Co., New York, Toronto, and London, 1950
- 4) 윤용구, "반도체 산업재해 분석 및 예방 Model 개발"로
아주대학교 산업대학원, 석사학위논문, pp 41, 2002
- 5) 정기섭, "FTA를 이용한 산업재해분석" 숭실대학교 산업대학원, 석사논문,
pp 50, 1994
- 6) 이일우, 윤조덕, "Fault Tree Analysis에 의한 Press 안전사고의 체계적분석

- Journal of Korean Institute of Industrial Engineers. Vol.6, No.2,12 1980
- 7) 윤덕조, Fault Tree Analysis를 이용한 프레스 안전사고의 체계적 분석,
서울대학교 석사논문, pp 52, 1980
 - 8) 이성찬, "프레스 재해예방을 위한 효율적 안전점검에 관한 연구"
인하대학교 산업기술대학원, 석사학위논문, pp 45, 1997
 - 9) 이준석, "Fault Tree 분석기법을 이용한 신뢰도 분석"
고려대학교 대학원, 석사학위논문, pp54, 1985

저 자 소 개

- 윤 용 구 : 아주대학교에서 공학 석사 학위를 취득하고(2002), 현재 아주대학교
산업공학과 박사과정에 재학 중이다. 삼성전자(반도체) System LSI 환경
안전부에 재직 중이며 주요 관심분야는 산업안전, HCI, 감성공학 등이다.
- 박 범 : 아주대학교 산업공학과를 졸업하고 미국 Ohio Univ. 산업공학 석사, Iowa
State Univ.에서 산업공학 박사학위를 취득하였고, 한국 전자통신 연구소
에서 Human-machine Interface 업무에 선임 연구원('93-'95)을 역임하였
으며, 현재 아주대학교 산업공학과 부교수로 재직 중이다. 주요관심 분야는
인간공학, 감성공학, HCI, 설비안전이다.