

산업용 로봇작업시 안전을 위한 MORT기법적용에 관한 연구

- A Study on MORT Application for Safety in
the Industrial Robot Operation -

이 윤 원 *

Lee Yoon Won

이 동 경**

Lee Dong Kyung

신 용 백***

Shin Yong Back

Abstract

The use of industrial robots has been one of the most important innovations in production technology in recent years. It is true that robotic techniques, as applied to hazardous operation in industry, have reduced the risk of injury and occupational disease among workers. However, new types of occupational safety and health risks, associated with unpredictable motion patterns and erratic idle times and serious injuries and deaths have occurred due to operator misperception of these robot design and performance characteristics.

This paper provides an overview of ergonomic and safety issues which are important in the design of robotic workspaces. Particularly, this study uses MORT(Management oversight and risk tree analysis)as the system's safety technique applied to robotics.

1. 서 론

산업용 로봇의 사용은 생산기술 측면에서 가장 중요한 혁신중에 하나로 꼽혀진다. 특히 산업현장의 위험한 장소나 설비의 운용시 로봇 기술이 근로자의 부상위험과 직업병을 감소시킨 것은 사실이다. 그러나 산업안전과 보건의 새로운 유해요소로써 로봇의

* 공간안전평가연구원

** 한국산업안전공단 산업안전연구원

*** 아주대학교 기계 및 시스템 공학부

특별한 요소들이 생겨나고 있다. 실제로 산업용 로봇은 빠른 속도로 작동되고 예측할 수 없는 운동패턴과 예상치 못한 지연시간, 나아가 작업장의 로봇 디자인과 수행특징에 대한 오류로 인하여 증상 및 사망사고까지도 발생시킨다. [1] , [2]

로봇과 관련한 일반적 사고원인들은 다음과 같이 네 가지 범주로 구분되어 진다. 첫째 인간과오(Human Error), 둘째 작업장 디자인(Workplace Design), 셋째 로봇 자체 디자인(Robot Design), 넷째 주변 환경요소의 복합적 요인(Hybrid fault in its environment)으로 구분된다.

타 일반적인 사고와는 달리 로봇의 재해는 인적인 원인이 크게 작용하고 있으므로 재해원인을 분석하고 예방하는 것이 간단하지 않다

지금까지 로봇 작업자의 안전응답에 대한 몇 가지 로봇 동작요소의 결과를 조사하기 위해 실험적인 접근이 한편으로 시도되었다.(Naramachi,1986 ;Beachump 1988 ; Rahimi, 1991). 그러나. 로봇재해는 작업자에게 항상 다른 기계 및 물질들 그리고 프로세서들이 작용하고 있다. 소프트웨어 뿐만아니라 하드웨어적 외향배치도 작업자의 안전과 상호 영향을끼치고 있다. 따라서 로봇 시스템의 전반적인 외적 모양새를 평가하기 위해서는 분석적 접근방법이 더 적당하다고 보여진다. 일반적인 시스템 안전기술이 로봇안전 분석에도 적당한 것으로 나타난다(Rahimi, 1986). 안전장치와 절차가 실제의 위험과 예상되는 위험에 적당한 것인가는 몇가지 우수한 시스템 안전분석기법으로 가능하다고 생각한다. 안전분석방법에는 복잡한 기술 시스템의 분석에 그 가치있는 것으로 인식되고 있는데 몇가지 정성분석(qualitative techniques)을 포함하여 여러 가지 기법들이 개발되어 있다. 그 예로써 몇가지 공통적인 분석기법이 있는데 FTA(Fault Tree Analysis),FMEA(Failure Mode and Effect Analysis), EBA(Energy Barrier Analysis), System simulation 편향분석(Deviation analysis), 테스크 분석(Task analysis), 근접사고분석, 절차분석(Procedure analysis)그리고 MORT(Management Oversight and Risk Tree Analysis) 등이 있다. 이러한 방법들 각각이 특별한 작업장의 안전을 분석하기 위해 사용될 수 있다. 그중에 좀더 정량적 분석적인 방법중 하나가 FTA(Fault tree analysis)이다. 특히 MORT는 FTA를 정성적인 요소로 확장시킨 것으로 평가되고 있다.이 논문은 로봇 작업장의 디자인에 있어서 중요한 인간공학적 문제 및 안전공학적 문제들에 대한 전반적인 검토를 하였는데, 특히 최초로 MORT를 사용하여 로봇 사고에 대한 종합적인 원인분석을 실시하였다. [3] , [4]

2. 로봇안전과 관련한 MORT의 방법론적 분석

MORT는 안전 프로그램요소들을 순서대로 정렬하고 논리적인 방식으로 정렬하는 다이어그램이다. 이것은 FTA 기법을 이용하여 동적이고 이상적인 안전시스템 모델을 도식적인 표현으로 나타내고 있다. MORT는 조직화되지 않은 문헌과 최근 훌륭한 안전 실제들을 세가지 레벨로 상호 연관지어 구성하고 있다. 약 98개정도의 일반적인 문제점을 사전 제시하고 사고의 기본원인으로 약 1500가지 정도의 기본사상을 제시하며

나아가 적당한 평가기준을 수천가지 이론적 기준을 제시한다.

따라서, 로봇과 같이 인적인 요소에 의해 상당히 혼란한 대책이 제시 될 수 있는 예방책을 다이어그램만 분명히 제시하여 주면 가시적으로 분명하고 명확한 사고의 흐름을 보여 줄 수 있고 예방 또한 용이하게 할 수 있다. 이를 위해 프로세서를 완전하게 해주는 필요기능들이 상위에 자리 잡고 기능의 수행을 위한 방법들이 중간 사상으로 위치한 후 단계가 잘 수행되지 않은 것에 대해서는 LTA(Less Than Adequate:부적합)이란 용어를 독특하게 사용하면서 포괄적인 관리 대책과 인적인 요인을 적절한 로직에 의해 연결시키고 있다. [5]

2-1. MORT 특징 및 의미에 대한 고찰

본 논문에서는 지금까지 개발된 정량 및 정성 분석인 MORT기법을 산업용로봇 사고분석에 적용시켜 보았다. [6]

FTA와 비슷한 MORT는 더 포괄적이고 몇가지 혁신적인 다음과 같은 특징들을 갖고 있다.

첫째, MORT는 대체로 한가지 사건에 적용하는 FTA와는 구별된다.

둘째, 완전히 수행되었을 때 MORT는 재해 분석 프로세서에 대해 고도의 가시력을 제공한다.

셋째, 일반화된 MORT tree는 훨씬 더 복잡한데 그것은 찾아져야 하는 모든 가지들이 나타나기 때문이다. 따라서 MORT는 특정위험분야나 조직관리의 안전성 확보에 많은 기여를 했으며, 넓은 범위의 안전개념을 집합시켜 대칭적으로 비교시켜 형식화되도록 질서 잡힌 로직(Logic)결정수로서의 역할을 갖고 있다.

MORT는 실제로 다음 두가지 의미가 있다.

- 1) 총체적 안전 프로그램 개념(전문화된 관리 서브시스템으로 가시화됨)으로 산업안전의 위해요소에 프로그램화적인 조정장치기능을 가진다.
- 2) 실제 로직 다이어그램은 상호 관련있는 안전프로그램 요소들과 개념들 구조화된 세트를 보여주고 MORT라고 불리는 이상적인 안전프로그램 모델을 포함한다. 이 보편적 로직 다이어그램은 잠재적인 사고나 사건에 대한 안전프로그램의 평가에 사용되거나 특별한 사고에 사용되는 최고의 작업시트 (Work Sheet)가 되었다.

2-2. 인간과 로봇사이의 분석을 위한 MORT의 적용 원칙

인간과 로봇 사이의 인터페이스(interface)를 안전관리프로그램으로서 분석하는데 있어서 MORT는 다음과 같은 사항들을 위해 디자인 되었다. [7]

첫째, 안전과 관련된 간과사항(Oversights), 에러(Errors), 태만(Omission) 등으로부터 보호하기 위해 디자인되었다.

둘째, 알맞은 조치를 취해 적절한 관리수준에 대한 잔여위험의 확인, 평가, 전환을 위해 디자인되었다.

셋째, 안전프로그램과 개인의 위험컨트롤 노력에 이용될 수 있는 자원의 할당을 최적화 시키기 위해 디자인되었다.

MORT 구성 방법학상으로 규칙을 나누어 보면 다음의 9가지가 있다.

- 1) 규칙1 : 특별한 시간에 결합조건의 묘사와 타이밍을 포함하여 아래 질문에 합당하면 결합으로써 서술한다
- 2) 규칙2 : 결합 서술의 기본적인 두가지 형태 (Safety of System과 State of Component)
 - ① 결합서술이 State-of-System 서술이면 규칙 3으로 가라.
 - ② 결합서술이 State-of-Component 서술이면 규칙 4로 가라.
- 3) 규칙3 : State-of-System 결합은 AND-, OR-, CONDITIONAL-gate를 사용하거나 게이트가 없다. 사용될 게이트를 결정하기 위해 입력결합은 반드시 아래와 같아야 한다.
- 4) 규칙4 : State-of-Component 결합은 항상 OR-gate를 사용한다. 계속하기 위해서는 1차적, 2차적 그리고 명령 불충분 결합 이벤트를 찾아보고 결합 이벤트를 아래에 기술한다.
- 5) 규칙5 : State-of-gate 관계가 없음
- 6) 규칙6 : 기적이 없음을 예기한다. 보통 정상적으로 발생될 수 있는 모든 것들이 결합의 결과로 나타날 수 있고 정상적인 시스템 작용이 결합이 발생할 때도 나타날 수 있다.
- 7) 규칙7 : OR-gate에서 Input은 Output을 반드시 야기시키지 않는다. 어떤Input이 있다면 Output이 있다. Gate 아래에 있는 결합이벤트는 Output이벤트의 재서술이 될 수 있다.
- 8) 규칙8 : AND-gate는 원인적 관계로 정의된다. Input이벤트가 공존한다면 Output이 생산된다.
- 9) 규칙9 : 조건부 게이트는 한 결합과 또다른 결합사이의 원인적인 관계를 묘사한다. 그 결합은 직접적이고 유일한 Output의 원인이 된다. 그러나 지적된 조건은 반드시 있어야 한다.

3. 다이어그램에 관한 결과 분석

로봇 시스템안전 및 인간공학에 관련된 MORT 기법을 적용한 결과 아래와 같이 아주 유용한 것으로 판명되었다.

첫째, 인적요인을 포함하여 사고와 관리측면에 관하여 분명하고도 높은 가시적 효과를 창출한다.

둘째, 이벤트는 미래의 원치 않은 사건들 즉 EMI, Omissions 및 Oversight 그리고

가정되는 Risk와 같이 발생할 수 있다.

세제, 추정된 Risk에서는 문제에 대한 해답이 나올 수 없고 비 실제적 일 때는 언제 든 Omission Oversight로부터 만들어 졌다.(그림1 정상사상 참조)

넷째, 일반적인 관리 방법으로 "Less Than Adequate"(LTA)를 사용했다. 왜냐하면 3가지 주요 문제점 분야가 아래와 같이 나타났다가 때문이다.(그림2 통제요인 부적합, 그림3 관리시스템요인부적합 참조)

1) "회사정책부재" 가 다이어그램에 기재되었다.

MORT: The management Oversight and Risk Tree

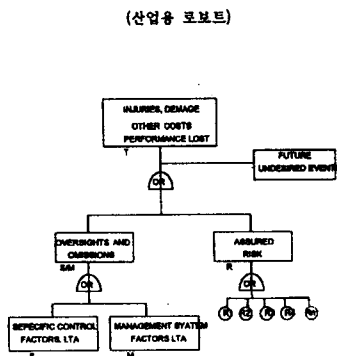


그림 1 정상사상

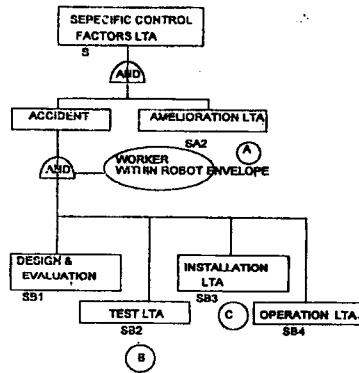


그림 2. 통제 요인 부적합

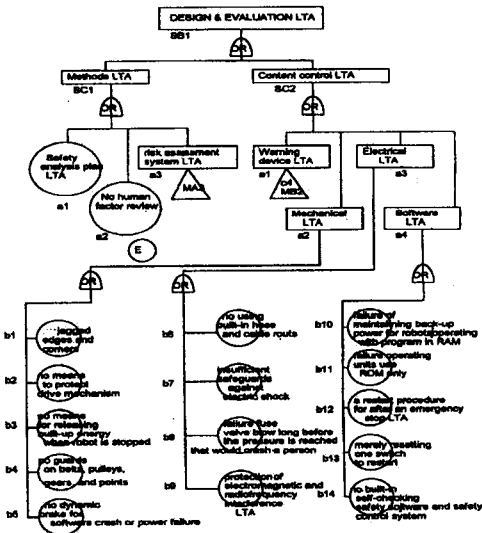


그림 3 설계 및 평가 부적합

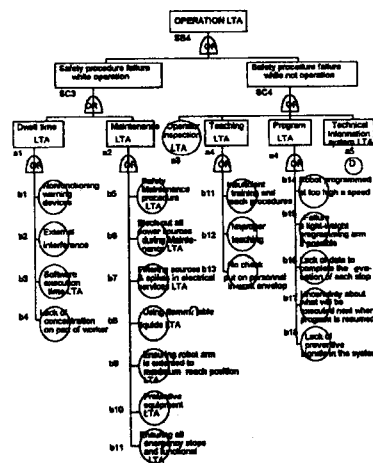


그림 4. 운전 부적합

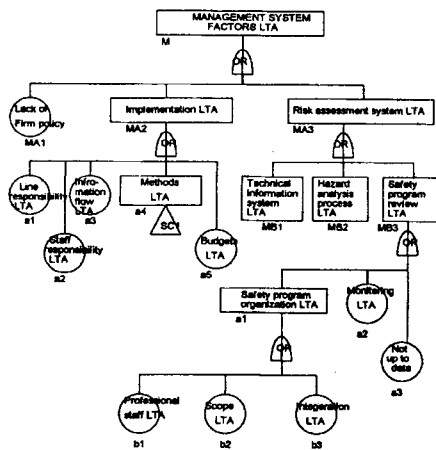


그림 5 관리 시스템요인 부적합

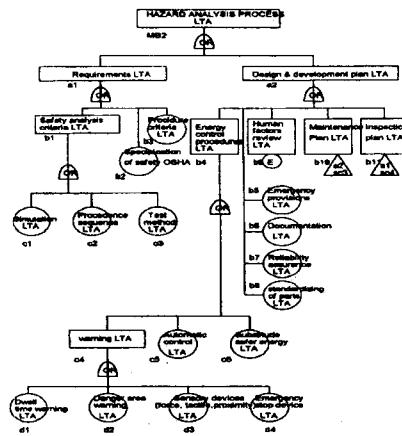


그림 6 위험분석절차 부적합

2) 라인책임 LTA, 스텝책임 LTA, 관리 서비스 LTA, 회계 예산 LTA를 포함하는 수행 LTA가 있었다.

3) 위험 평가 시스템 LTA

다섯째, 사고는 설계(Design) 및 계획(Plan) LTA, 설치 LTA, 작동 LTA (Barriers LTA와 휴먼에러 상태에서)로부터 다음과 같이 분명히 나타난다.(그림4~그림11 참조)

1) 설계(Design) 및 계획(Plan) LTA에 포함사항

① 방법 LTA : 안전분석계획 LTA, 휴먼요소 검토부재, 위험분석 시스템 LTA

② 부속물 콘트롤 LTA :

㉠ 센서장치 LTA는 비상정지장치의 안전디자인 결함으로 유발

㉡ 기계적 LTA는 가장 자리와 코너 결함으로 유발, 구동 기계보호수단 부재, 로봇이 멈출때 상승에너지 해제 수단 부재,벨트, 풀리, 기어와 포인트에 대한 방호 부재, 소프트웨어 망가짐과 전력사고 대책 브레이크 부재 등으로 부터 발생

③ 전기적 LTA : 내부호스와 케이블 사용 부재, 전격에 대한 적절한 방호조치 미사용 압력이 사람을 압사 시키기 전에 작동해야할 고장 휴즈 밸브결함 EMI로 부터의 보호장치 부재등으로 부터 야기됨.

④ 소프트 웨어 LTA : RAM(Random Access Memory)에 있는 프로그램으로 작동하는 로봇에 대한 보수용 백업과워 고장, 작동유닛 ROM (Read Only Memory)고장, 비상 정지후 재시동절차 LTA 등으로 야기됨.

2) 테스트 LTA

- ① 초기 구동 테스트 LTA
- ② 정지, 재구동 버튼 테스트 LTA
- ③ 재구동 절차 테스트 LTA
- ④ 센서장치 LTA (안전장치 LTA 및 예기치 않은 정지테스트 LTA포함)
- ⑤ 소프트웨어 신뢰도 테스트 LTA
- ⑥ 임무수행 테스트 LTA : 동력수행 테스트 LTA (부하, 속도, 시작, 포인트, 경로에 대한 고려 부족, 동력가동 조건 아래 센서체크 부재, 로봇이 움직이지 않는 동안 제조회사의 사양에 대한 콘트롤 파라미터 세팅 체크 부재) 그리고, 정지 상태에서 수행 테스트 LTA

3) 설치 LTA

- ① 콘트롤 환경 LTA : 로봇과 같이 작업하는 작업자에 대한 조명부적당, 어떤 로봇에서 나타나는 열, 노이즈, 화재 잠재력을 가진 화공물질처럼 콘트롤 환경 요소제한 범위 이상의 것
- ② 안전작업장 디자인 LTA : 물질적 Layout LTA : 로봇 움직임을 방해하는 필요한 물리적 인터록 시스템 설치부재, 작업자나 통행인의 의도치 않은 접근을 막도록 로봇트 위치선정 실패, 콘트롤 패널이 위험지역밖에 설치되도록 고쳐하지 못함, 작업자 팔이 닿지 않는 곳에 비상스위치 설치 등
- ③ 전기적인 시스템 고려 LTA
- ④ 경고 사인과 신호 LTA

4) 조작 LTA

- ① 동작중의 안전절차 무시:
 - ㉠ Dwell time LTA(경고장치의 기능결함, 외부간섭, 소프트웨어 실행시간 LTA, 작업자의 집중력 부족)
 - ㉡ 유지보수(안전 유지보수 절차 LTA, 수리작업중 모든 전력소스의 차단화 LTA, 전기서비스 장치에 필터링 소스와 차단 LTA, 가연성 물질사용 LTA, 로봇트 아암 최대 가동지점 판단 LTA)
- ② 정지중의 안전절차 무시:
 - ㉠ 조작자 검사 LTA
 - ㉡ Teaching LTA (불충분한 파이크 훈련과 teaching 절차)
 - ㉢ 부적당한 Teaching 작업구간에 사람 존재유지 미확인
 - ㉣ 프로그래밍 LTA(너무 높은 속도로 프로그램된 로봇, 가능한 가벼운 무게의 아암 프로그램 결함, 프로그램이 재개되었을때 다음 실행되어야 할 단계의 불확실성 시스템에서 보호 신호계통 결함)
- ③ 기술적인 정보시스템 LTA :
 - ㉠ 위험평가 시스템 LTA(엔지니어, 프로그래머, 운전조작자, 안전스텝 사이의 의사전달 과정 LTA)
 - ㉡ 안전 모니터링 시스템 LTA(환경적, 전기조건 상태의 결함, 로봇트 수행 확인절차 LTA, 안전 관찰계획 LTA)

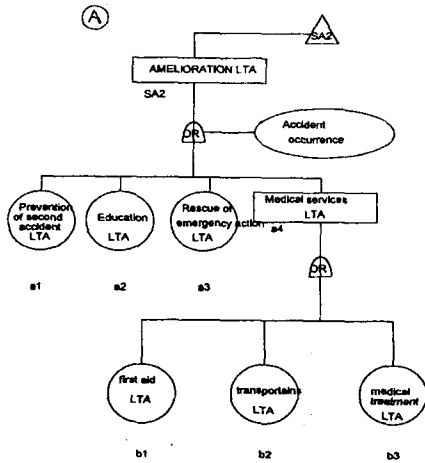


그림 7 개선 부적합

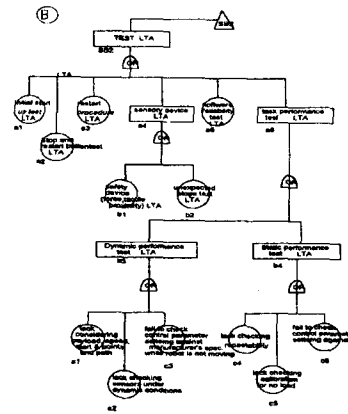


그림 8 테스트 부적합

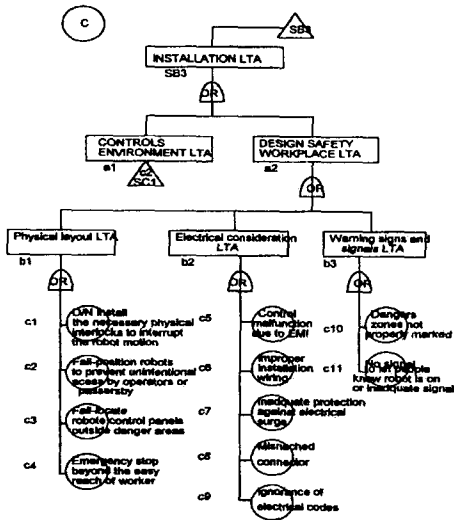


그림 9 설치 부적합

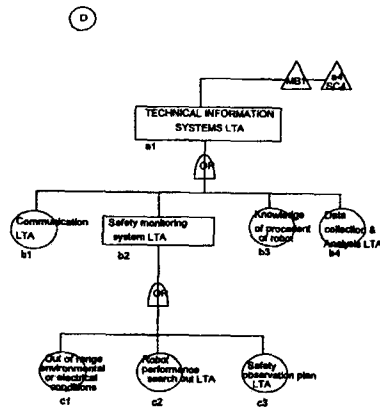


그림 10 기술정보 시스템 부적합

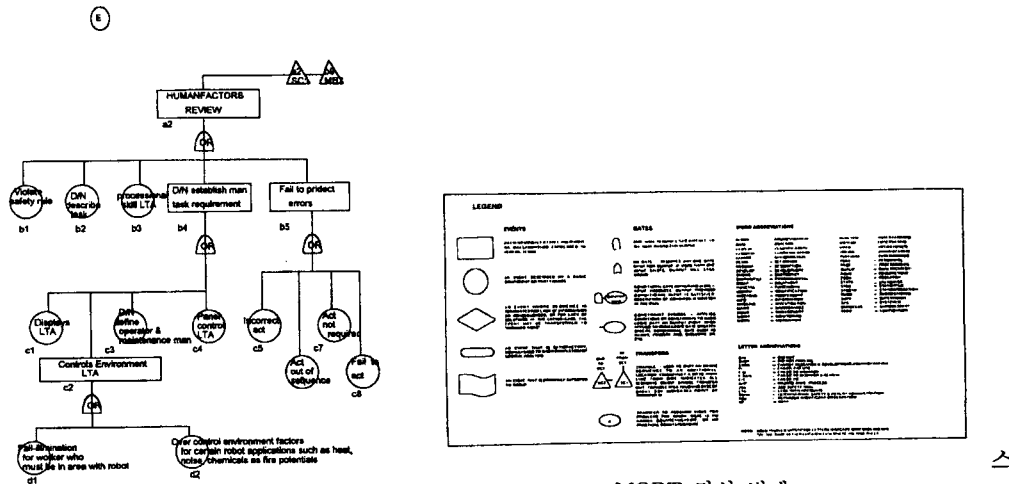


그림 11 인간공학 검토

MORT 작성 범례

4. 결론 및 제안

로봇은 우리 미래 산업의 필연적인 한 부분이다. 본질적으로 안전한 기계류를 만드는 것이 안전관리의 기본정책이 되고 있는데 이것은 산업용 로봇에서도 적용되어야 한다. 본 연구 논문에서 로봇 시스템안전 및 인간공학에 관련된 MORT 기법을 적용한 결과 우리가 무시할 수 있는 많은 문제점들이 산업용로봇에서 발생하고 있다는 것을 알 수 있었으며, 특히 다음과 같은 유용한 사실을 알아냈다.

- 첫째, 인적요인을 포함하여 사고와 관리측면에 관하여 분명하고도 높은 가시적 효과를 창출한다는 사실
- 둘째, 이벤트는 미래의 원치 않은 사건들 즉 EMI, Omissions 및 Oversight 그리고 가정되는 Risk와 같이 발생할 수 있다는 사실
- 셋째, 추정된 Risk에서는 문제에 대한 해답이 나올 수 없고 비 실제적 일 때는 언젠가 Omission Oversight로부터 만들어 졌다는 사실
- 넷째, 일반적인 관리 방법으로 "Less Than Adequate"(LTA)를 사용하여 주요 문제점 분야가 나타났다는 사실.

본 논문에서 MORT 기법의 응용 확대를 통하여 위험성 분석과 Risk 평가를 대칭적으로 함으로써 어느 정도 원가를 절감하고 위험을 제거 감소 시킬 수 있는 분명한 해결책이 나올 수 있다는 사실을 알아 냈다. 따라서 현재 안전에 대한 신뢰성 있는 수단 및 방법 등을 갖고 있지 않고 로봇 사용이 규정·통제되지 않으면 근로자들은 그들의 로봇으로부터 보호될 수 없다. 작업자로부터 산업용로봇을 격리시킬 수 있는 가능성은 자동생산라인에 의한 수 많은 작업을 가지기 때문에 제한되어 있다. 자동화에서 출현하는 로봇사고들의 복잡하고 정교한 상황을 블루칼라 근로자들이 따라 가기에는 매

우 어려운 실정에 처해 있다.

앞으로 시급히 연구조사되어야 할 것은 로봇사고 조사통계 확보와 현장 평가연구이다. 이 두가지 영역은 아주 기본적으로 중요하다. 왜냐하면 로봇안전과 인간공학적 시스템 디자인은 이러한 정보로부터 추출될 수 있기 때문이다.

이번 연구를 통해 알아낸 향후 연구아이템을 우선 순위별로 아래와 같이 제안하고자 한다.

- 1) 안전분석을 위한 데이터 뱅크의 실험
- 2) 로봇 작업장의 디자인 요구충족을 위한 현장 연구
- 3) 로봇 아암(Robot Arm) 움직임에 대한 인지
- 4) 인간과 로봇사이의 기능 할당
- 5) 자동무선안전 센서의 개발
- 6) MORT기법 응용 확대
- 7) EMI와 같은 고도의 기술분야 연구 실시

5. 참고문헌

- [1] 이윤원, "산업용 로봇의 근원적 안전확보를 위한 Code분류에 관한 연구" 한양대학교 환경과학대학원 공학석사학위 논문, 1992
- [2] 신용백, "경영자를 위한 경영관리포인트", 범한, 1999
- [3] "한국의 로봇공업"한국공작기계협회,2000
- [4] 이윤원, 신용백 "인간공학적 작업장 평가 프로그램의 개발", 안전경영과학회지 제3권 제3호, pp45-54, 2001
- [5] W.G. Johnson, Grandjean, "The Management Oversight and Risk Tree", Energy Research and Development Administration, pp.112-131, 1973
- [6] R.W. Eicher, "MORT User's Manual for use with the management oversight and risk tree analytical logic diagram", Energy Research and Development Administration, pp.66-129, 1976
- [7] William G. Johnson, "MORT Safety Assurance Systems", National Safety Council. N.W. Knox, pp.88-135, 1980
- [8] Kageyu Noro, "Occupational Health and Safety in Automation and Robotics", pp135-145, 1987.
- [9] Ted S. Ferry, "Modern Accident Investigation and Analysis" A wiley-interscience publication, pp.121-146, 1988

- [10] Occupational safety and health series No. 60., "Safety in the use of industrial robots", Geneva, International Labour Office, pp.60-85, 1989
- [11] Etherton, John R. March, "Working with robots", Professional Safety, pp.56-80, 1990.
- [12] Bernard C. Jiang and Otto S.H Cheng, " A procedure analysis for robot system safety", International Journal Ergonomics, pp.35-47, 1990
- [13] G. Schmidt, "Information Processing in Autonomous Mobile Robots Springer-Verlag", pp.55-85. 1991
- [14] Taylor & Francis. James H. Graham, "Safety, Reliability, and Human Factors in Robotic Systems", Van Nostrand Reinhold, pp.103-145,1991
- [15] Karwowski, Waldmar, "The relationship between humans and industrial robots", pp.135-155, 1992

저 자 소 개

- 이윤원 : 아주대학교 대학원 산업공학과 박사과정 수료
 (사)한국안전인증원 연구위원
 관심분야 : 안전보건경영시스템 및 인간공학분야
- 이동경 : 한국산업안전공단 산업안전교육원 교수
 관심분야 : 인간공학분야
- 신용백 : 공장관리기술사,공학박사
 현 아주대학교 기계 및 시스템 공학부 정교수,
 현 노동부 기술자격제도심의회 전문위원,
 현 산업자원부 KS심의위원 겸 중소기업청 싱글PPM품질인증 심사위원
 (사)한국품질관리학회 및 (사)한국산업시스템경영학회 부회장 역임,
 아주대학교 산업대학원 원장 보직 역임,
 (사)한국생산성학회 제16대 회장 역임
 관심분야 : 제조공정설계 및 생산관리시스템 운영과 생산성관리 불량 LOSS
 관리와 품질경영시스템 개발 제조원가분석과 원가절감의 추진