

로봇 시스템의 FMECA An application of FMECA to an industrial robot system

장주수 김성락* 이용국* 송준엽**

JooSoo Chang Sungrak Kim Yongkuk Lee JunYeob Song

(주)모아소프트 신뢰성기술연구소장

*현대중공업(주) 기계전기연구소 로봇개발실

**한국기계연구원 지능생산시스템그룹장

ABSTRACT

A robot system in most industries has a complicated structure, which includes electric and electronic components, and mechanical parts. For this reason, building a robot system also has a very complicated design and maintenance processes. Especially to predict or assess the system's maintainability and safety is important for both designer and operator before its production or installation of the system. This paper presents an application methodology of FMECA focused on safety in design process of a robot system with point of view of reliability engineering.

I. 서론

고장형태 및 영향분석(Failure Mode and Effect Analysis) 그리고 보다 더 계량화된 방법으로서 치명도 해석(Criticality Analysis)기법 등은 그 목적에 따라 분석과정에 차이가 있을 수 있다. 일반적으로 군수산업분야에서는 미국방성에서 제시한 MIL-STD-1629 계열의 규격서를 근간으로 FMECA 작업을 진행하며, 민수산업의 경우 이른바 빅-3 라 불리는 자동차제조 회사들 그리고 미국자동차협회(Society for Automotive Engineers) 등에서 제시한 방법 등을 따르고 있다. 따라서 FMEA 또는 FMECA 는 하나이지만 분석의 목적에 따라 과정은 여러 가지가 있을 수 있다는 것이다.

본 논문은 이러한 FMECA 분석기법을 현재 제작중인 로봇시스템에 적용하여 설계과정에서 미리 고려하지 못했던 잠재적 고장형태 그리고 시스템운용과정에서 발생할 수 있는 위험 요소들을 발견하고 다시 그 것을 설계과정에 반영하여 로봇이라는 시스템의 완성도를 높일 수 있었다는 것을 보일 것이다. 한편 FMECA 분석과정으로 다음과 같은 절차를 거쳤다.

방법은 MIL-HDBK-217F 와 EPRD97 데이터를 사용하였고, 기계류의 경우 예측방법은 미 해군의 NSWC-98 LE1 규격과 NPRD95 데이터를 활용하였다. 한편 고장형태에 관한 정보는 전기전자의 경우 FMD97, 기계류는 NPRD3 및 OREDA97 자료를 활용하였다. 마지막으로 FMECA 분석절차는 방대한 고장형태의 라이브러리 그리고 고장률에 관한 데이터가 필요하다. 따라서 분석을 위한 도구가 필요하다. 이를 위해서는 미국 Relex Software 사의 Relex 7.6 을 이용하였다는 것을 밝혀둔다.

II. 로봇 시스템

현재 현대중공업에서 제작 및 운영중인 로봇 시스템은 다음과 같다.

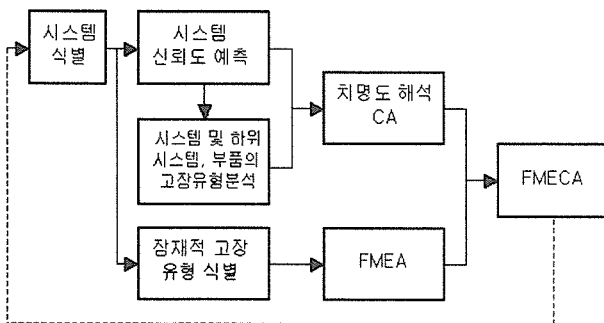


그림 1. FMECA 분석절차

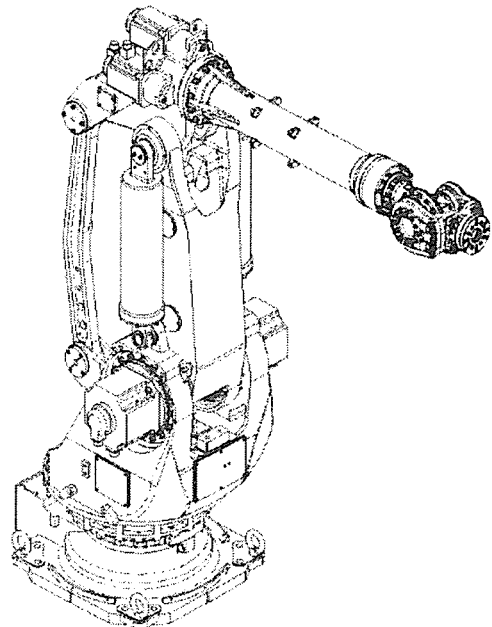


그림 2. 로봇 시스템의 본체

전기전자부품 또는 하위시스템의 경우의 신뢰도예측

Name	Level	Number of Parts	
		Category	Total
H-Robot	System	573	1,890
Control Units	Sub-System	453	1,771
Back Plane Board	Assembly	6	32
Main Board	Assembly	78	92
Digital I/O Board	Assembly	49	321
Servo Board	Assembly	51	135
Sequence Board	Assembly	43	135
Analog I/O Board	Assembly	52	152
EE equips	Assembly	27	43
Motor Drive equips	Assembly	84	676
Teaching Pendant	Assembly	63	185
Mechanical Units	Sub-System	80	119
Wrist-Part	Assembly	20	33
Upper Arm-Part	Assembly	22	27
Lower Arm-Part	Assembly	26	44
Rotary-Part	Assembly	12	15

표 1. 로봇 시스템 구성표

위의 그림 2 는 로봇 시스템의 본체를 나타낸 것이며 표 1 은 전기전자적인 요소 그리고 기계적인 요소로 구분하여 시스템의 계층도를 작성한 것이다. 한편 시스템의 수명 또는 안전 등에 미치는 영향이 미미하거나 거의 없다고 판단할 수 있는 하위시스템 등은 분석의 대상에서 제외하였다.

III. FMEA 및 CA

FMEA 분석절차에서 가장 중요한 부분은 고장형태(Failure Modes)를 체계적으로 정리하고 분류하는 작업이다. 일반적으로 잘 알려진 부품 또는 어셈블리의 경우 고장형태에 관한 정보를 얻을 수 있지만 대개의 경우 시스템을 설계하는 과정에 참여하는 엔지니어들이 경험적 내용을 토대로 추론하거나 또는 예측할 수 있어야 한다. 뿐만 아니라 언어로 기술된 고장형태의 범주를 코드화하여 분석과정의 일관성을 가져야 한다. 따라서 이러한 과정을 혼돈 없이 수행하기 위해서는 설계를 담당하는 엔지니어들 사이의 의사소통이 원활해야 한다.

1. FMEA

FMEA 분석절차는 최하위의 부품부터 시작하여 시스템 레벨까지의 고장형태 그리고 영향 등을 다루는 것이다. 따라서 시스템의 구성요소인 하위시스템, 부품단위의 기능과 역할에 대한 이해가 선행되어야 한다. 이러한 것들을 이해하기 쉽게 도식화한 것을 시스템의 기능도(Functional Block Diagram)라 하는데, 본 논문에서 다루고자 하는 로봇 시스템의 기능도는 다음과 같다.

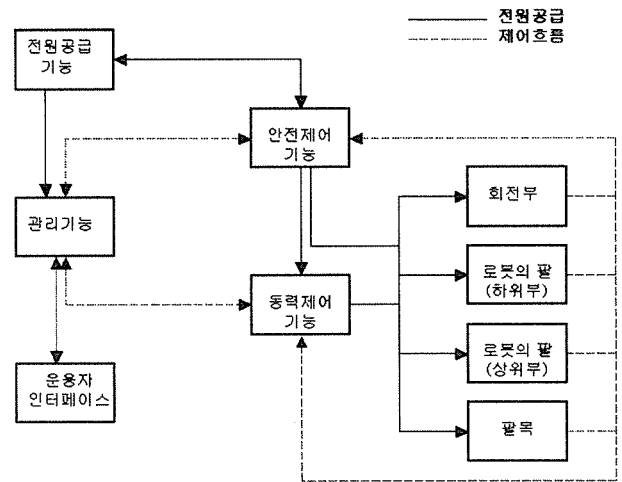


그림 3. 로봇 시스템의 기능도

한편 분석의 목적이 고장에 따른 위험요소를 식별하여 시스템을 재구성하는 것에 있으므로 각각의 고장형태에 대한 계량화된 평가방법이 있어야 한다. 즉 많은 수의 고장형태 중에 어느 것이 더 심각한가를 평가해야 한다. 일반적인 평가방법 중 하나는 위험우선순위수치(Risk Priority Number)라 하여 하나의 고장형태에 대하여 심각도(Severity), 발생빈도(Occurrence), 그리고 고장형태를 식별 또는 탐지할 수 있는 정도(Detection) 등을 수치로 환산하여 계산하는 방식이다. 즉 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$RPN = Severity \times Occurrence \times Detection$$

본 논문에서는 SAE 에서 제시하는 기준을 따랐고, RPN 값의 범위는 $1 \leq RPN \leq 1000$ 의 값을 갖도록 평점 하였다. 다음 그림 4 와 그림 5 는 RPN 값을 기준으로 위험도를 계산할 때 기준보다 높은 값을 갖는 고장형태를 도시한 것이다.

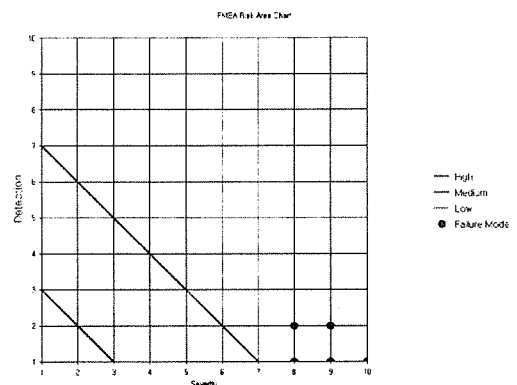


그림 4. 위험도 차트(Severity-Detection)

그림 4 는 Severity-Detection 의 관계에서 높은 값을 가지는 경우이고 그림 5 는 Severity-Occurrence 관계에서 높은 값을 갖는 경우를 각각 점으로 표시한 것이다.

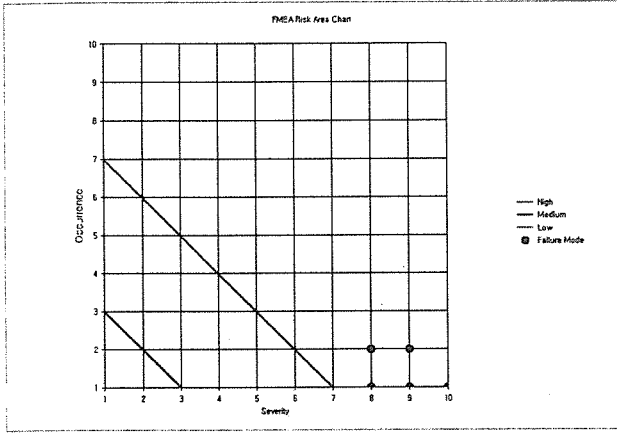


그림 5. 위험도 차트(Severity-Occurrence)

FMEA 분석결과 안전에 심각한 수준의 RPN 값은 대부분 Sequence 보드와 이것을 통해 제어되는 스위치부분에서 산출되었다.

2. CA

앞의 FMEA 를 통해 산출한 RPN 값은 다소 주관적이고 분석자의 경험에 의해 결정된다는 단점이 있다. 이것을 보완하여 보다 객관적인 위험도를 산출하기 위해 치명도(Criticality)분석방법을 적용하였다. 즉 신뢰도에 축을 통해 산출된 개별 부품 및 하위시스템의 고장율을 앞서 계산한 RPN 값과 결합하여 개별 고장형태가 발생할 경우의 시스템의 치명도를 산출한 것이다. 산출 방법은 다음과 같다.

$$C_m = \beta \alpha \lambda_p t$$

C_m : 고장형태의 치명도

β : 고장영향 확률

α : 고장형태의 비율

λ_p : 개별 부품의 고장율

t : 시스템의 운용시간

로봇시스템의 스위치의 경우 다음과 같다.

부품의 고장형태	α	λ_p	λ_m
Open	0.5	\times 0.04672	= 0.02336
Close	0.5	\times 0.04672	= 0.02336
Total	1.0		0.04672

표 2. 스위치의 고장형태별 고장율

표 2 의 λ_m 는 개별 고장형태에 따른 부품의 고장율을 의미한다. 한편 α 는 개별 부품이 가지는 고장형태의 비율이다. 표 2 의 스위치경우 Open, Close 두개의 고장형태를 갖는데, 각각이 발생할 수 있는 비율을 의미한다. 한편 고장형태의 치명도는 다음 표 3 과 같다.

부품의 고장형태	β	λ_p	C_m
Open	1.0	\times 0.02336	= 0.02336
Close	0.8	\times 0.02336	= 0.01868

표 3. 스위치의 고장형태별 치명도

여기서 β 값이 의미하는 것은 개별 고장형태가 발생한 경우 그 영향의 정도를 확률 값으로 나타낸 것이다. 한편 개별 고장형태의 치명도를 합하면 하나의 부품에 대한 치명도가 정의되는데 다음과 같다.

$$C_r = \sum_{n=1}^k (\beta \alpha \lambda_p t)_k = \sum_{n=1}^k (C_m)_k, n=1,2,3...k$$

C_r : 개별 부품에 대한 치명도

n : 개별부품의 고장형태의 수

로봇시스템의 경우 표 3 을 통해 $C_r = 0.04204$ 임을 알 수 있다. 이러한 계산방법을 시스템 전체로 확대하여 평가하는 방법을 치명도행렬(Criticality Matrix)이라 하는데 앞선 RPN 평점법에 대비하여 스위치의 치명도 행렬을 도시하면 다음과 같다.

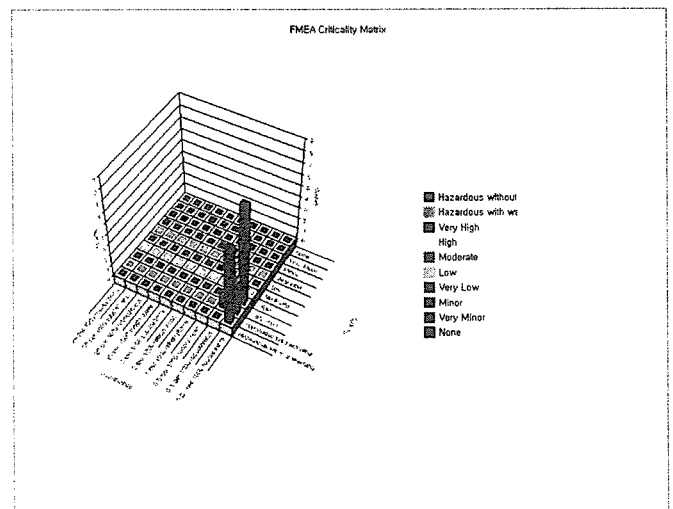


그림 6. 스위치의 치명도행렬

3. 시스템 재구성

FMEA 및 CA 분석결과 개별 부품 및 하위시스템에 대

한 고장형태 그리고 개선방안은 크게 두 가지로 요약된다. 하나는 하위 시스템들에 대한 고장율을 낮추어 시스템의 수명을 늘리고 근본적인 고장요인을 낮추는 방안이고, 다른 하나는 중복설계 등 시스템의 재구성을 통해 시스템의 고장요인을 분산시키는 방법이다. 본 논문의 로봇시스템의 경우 치명도가 높은 스위치부분에 대해 중복구조(Redundancy)로 설계를 변경하므로 근본적인 고장요인을 분산시켰다. 고장요인에 대한 분산의 정도는 다음 그림 7 과 같다. 즉 시간이 길어질수록 분산의 효과는 더 커진다고 생각할 수 있다. 따라서 스위치개별과 전체에 대한 고장형태의 고장율 및 치명도 등도 같은 비율로 분산된다.

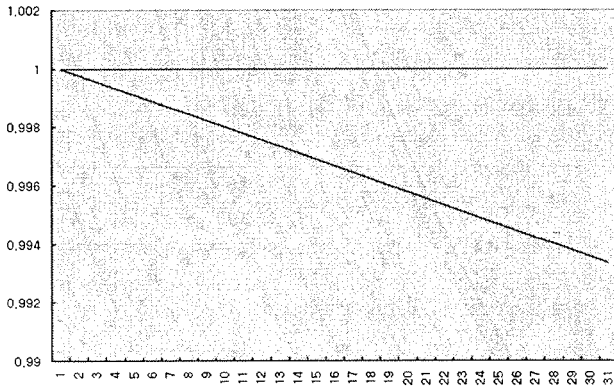


그림 7. 중복설계의 시간에 따른 신뢰도추이

그림 7의 그래프 중 위는 중복설계 상태이고, 아래는 중복구조를 도입하기 전의 상태이다.

IV. 결론

하나의 시스템에 대한 신뢰성분석 및 안정성분석에는 FMEA 및 CA 뿐만 아니라 보다 복잡한 여러 가지 과정이 있다. 즉 분석의 목적을 어디에 두느냐에 따라 분석에 사용되는 방법론이 다를 수 있다는 것이다. 본 논문의 분석 대상인 로봇시스템 또한 마찬가지인데, 여기서의 분석 목적은 시스템의 안전에 보다 무게를 두었다. 이유는 산업현장에서 일반 사람과 같이 작업하는 기계인 로봇시스템은 자체의 수명보다는 로봇시스템이 가지는 오동작(malfunction) 또는 제어시스템의 고장이 경우에 따라서는 심각한 재난을 가져올 수 있다는 것 때문이다. 이에 대한 대처 방안으로는 로봇을 운용하는 현장의 엔지니어가 로봇시스템에 대해 잘 이해하고 관리한다면 최선의 대책이 될 수 있으나 이를 위한 경제적 비용은 커진다고 볼 수 있다. 따라서 설계시점부터 시스템에 대한 정확한 식별과 잠재적 고장형태 등을 미리 예상하여 반영하는 것이 보다 경제적인 결과를 갖는다고 볼 수 있기 때문이다.

로봇시스템에 대한 FMECA 분석을 통해 직접적으로 얻을 수 있는 효과는 첫째, 예상치 아니했던 고장형태

를 추론할 수 있었고 이를 통해 설계시점에서 미리 예방조치를 할 수 있었다는 것이다. 둘째는, 시스템차원의 고장-메커니즘(Failure Mechanism and Distribution)을 정립하여 고장과 고장에 따른 사후처리라는 과정이 보다 신속하게 진행될 수 있었고 유지보수에 보다 효율을 기할 수 있었다는 점이다. 마지막으로 고장형태의 분류를 통해 시스템차원의 신뢰성향상 방안이 정의될 수 있었다는 점이다.

참고문헌

- [1] ㈜모아소프트 신뢰성기술연구소, 신뢰성예측 가이드북, 교우사(2002).
- [2] Reliability Analysis Center, Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (1993).
- [3] Reliability Analysis Center, Mechanical Applications in Reliability Engineering(1993).

부록

POTENTIAL FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS (DESIGN FMEA)

System: _____
 Component: _____
 Model/Family/Version: _____
 Process Responsibility: _____
 Core Team: _____

FMEA Number: _____
 Prepared By: _____
 FMEA Date (Orig.): _____
 Key Date: _____

Item	Function	Potential Failure Mode	Potential Effect of Failure	S	O	D	PRIORITY	Cause	Effect	M	R	C	M	R	C	REMARKS			
																1	2	3	4
1	Control valve	Control valve failure	Control valve failure	1	1	1	1	Control valve failure	Control valve failure	1	1	1	1	1	1				
2	Control valve	Control valve failure	Control valve failure	1	1	1	1	Control valve failure	Control valve failure	1	1	1	1	1	1				

FMEA sheet : Relex

Criticality Analysis Report

Part Number: _____
 Reference Doc: _____
 Date: 5-6-2003

Revision: _____
 Date: _____

Prepared By: _____
 Date: 4-14-03

Item	Description	Failure Mode	Mechanism	Severity	FCR	Effect Prob	MCR	Failure Rate	Opn Time	MCR	RPN	Remarks
1	Control valve	Control valve failure	Control valve failure	1	1	1	1	Control valve failure	Control valve failure	1	1	Control valve failure
2	Control valve	Control valve failure	Control valve failure	1	1	1	1	Control valve failure	Control valve failure	1	1	Control valve failure

CA sheet : Relex