고장해석수법으로서의 FMEA · FMECA 활용방안

KSA TPM컨설턴트/품질기술사 권오운

1. 고장해석(failure analysis)의 방법 및 특징

고장해석(failure analysis)은 설비의 신뢰성을 높히기 위한 기본적인 업무가 되며, 대상의 신뢰성에 대해서 개발 · 설계로부터 시작하는 일련의 라이프사이클에 대한 활동이 된다. 고장해석은 PDCA측면에서 보면 C에 대응한다. 개발 · 설계, 試作, 제조, 사용 등의 단계에서 발생하는 이상 및 고장은 그 원인을 조사해서 필요한 대책을 취하고 대상의 신뢰성을 향상시킬 필요가 있다. 고장해석이 없는 신뢰성개선 및 관리활동은 생각할 수가 없다고 볼 수 있다.

설비 및 제품의 고장해석을 위한 고장해석법의 방법 및 특징은 일반적으로 <도표1>과 같이 정리할 수 있는데, TPM활동중 고장문제의 개별개선시의 원인분석단계에서 자주 쓰이는 기법으로서는 FMEA, 신뢰성블록도 및 FTA, 신뢰성분석 및 가동성계산, PM분석 등이 있다.

본고에서는 우선 FMEA · FMECA에 대해 자세히 사례를 곁들여 소개해서, 개별개선시의 고장해석 및 원인분석의 합리화를 도모하고 또한 쉽게 사용할 수 있도록 하고자 함을 목적으로 하였다.

<도표1> 각종 고장해석법의 특징

고장해석방법	특징	적 용		
		사전	도중	사후
신뢰성블록도(RBD) FTA(고장나무분석)	*부분과 전체의 기능적 연관의 이해 *Top사상으로부터 하위사상으로의 고장원인의 분석(연역적)	●	○	○
FMEA,FMECA ETA(Event Tree Analysis)	*부분의 고장에서 전체고장으로(귀납적) *사상의 시간적 연쇄	●	○	○
신뢰성[신뢰도,고장률,MTBF]분석,가동성(A)의 계산	시스템 · 장치의 신뢰성설계 및 예측	●	○	○
기술계산, 기술시험,스트레스해석 시뮬레이션 환경 · 내구시험	*CAD/CAM, 유한요소법 등 *각종 수학모델, 지식공학적진단 *스크리닝에의 응용	●	한계여유도의 체크 ○	재현실험 ●
통계적,확률론적해석	통계분포,실험계획법,다변량해석, 품질기능전개,품질표(문제점의 적출)	●	○	●
설계심사(DR)	각방법의 결과를 리뷰시에 철저평가 및 개선	●		
모니터,상태감시 비파괴검사, 고유기술적해석 고장물리,진단	*고장메카니즘의 특징,파라메타계측, *계측방법과 신호처리,지식공학 *물리,화학,기계,전기,금속,인간공학 등의 고유기술에 의한 해석 *전자현미경 등 각종 표면해석법,계측방법	○ 테스트데이터해석	● 예지파라메타감시	● 고장,파괴원인추구
데이터뱅크, 과거사례활용	기술데이터,사례집,고장에 관한 데이터,체크리스트,고장표	●	○	●
PM분석	미결함이나 만성로스에 대한 원인분석수법(연역적)	●	○	○

2. FMEA(Failure Mode & Effect Analysis)

▶FMEA의 발전과 의의

FMEA는 1950년대초 구라망항공회사가 개발한 것이 시초로서, Bottom-up에 의한 분석을 하는 것이 특징이 되며, FMEA양식은 MIL-STD-1629-101에 따라 실시된다.

▶ FMEA실시절차

FMEA실시절차는 다음과 같다.

▷순서1: 시스템·서브시스템의 구성 과 임무의 확인
▷순서2: 시스템·서브시스템의 분석레벨결정
▷순서3: 기능별 블록의 결정
▷순서4: 신뢰성블록도 작성
▷순서5: 블록별 고장모드의 열거 및 검토
▷순서6: FMEA에 효과적인 고장모드의 선정
▷순서7: 선정된 고장모드에 대한 추정원인 열거
▷순서8: FMEA용지에 요약기입
▷순서9: 고장등급평가 및 결과정리(C_S,등급)
▷순서10: 고장등급이 높은 것에 대한 대책 및 개선제안(설계변경, 고신뢰성부품채용, 신뢰성관리절차의 변경, 시험 및 검사절차의 변경 등)

여기서, 순서1에서의 시스템·서브시스템의 구성은 「시스템→서브시스템→검포넌트→조립품→부품」의 5단계로 된다. 순서8에서의 FMEA표는 ①번호 ②대상품목 ③기능 ④고장모오드 ⑤추정원인 ⑥영향(서브시스템,시스템) ⑦고장검지법 ⑧고장등급평가(C_S,등급) ⑨대책 등으로 구성되는데 FMEA표사례는 <도표6 >과 같다.

▶ 고장등급 결정방법

고장등급 결정방법은 고장평점법, 치명도평점법의 2가지가 있다.

①고장평점법 : 고장평점법의 평가항목으로서는 5개의 평가항목인 C_1 C_5가 있고 이들의 평가항목에 의거 시스템의 평가등급인 C_S가 다음식과 같이 구해지며, C_1, C_2, C_3의 평가점은 <도표2>와 같다.

$$C_S = \sqrt[5]{C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot C_5}$$

<도표2> C_1, C_2, C_3의 평가점

C_1의 평가점		C_2의 평가점		C_3의 평가점	
기능적 고장영향의 중요도 (고장영향의 크기)	평가점	영향을 미치는 범위	평가점	고장발생의 빈도 (시간 또는 회수)	평가점
임무달성불능	10	실외 및 공장외에서의 사망사고	10	10^{-2} 이상	10
임무달성불능,대체방법에 의해 일부만의 임무달성가능	9	실외 및 공장내에서의 사망사고, 가옥 및 공장외에 피해	9	10^{-2} 3×10^{-3}	9
임무의 중요한 부분달성불능	8	실외 및 공장내에서의 사망사고, 가옥 및 공장내에 피해	8	3×10^{-3} 10^{-3}	8
임무의 중요한 부분달성불능,보조수단을 쓰면 달성가능	7	중상, 가옥 및 공장내에 피해	7	10^{-3} 3×10^{-4}	7
임무의 일부달성불능	6	중경, 가옥 및 공장내에 피해	6	3×10^{-4} 10^{-4}	6
임무의 일부달성불능,보조수단을 쓰면 달성가능	5	인재(人災)없음, 가옥 및 공장내에 피해	5	10^{-4} 3×10^{-5}	5
임무의 경미한 부분달성불능	4	인접한 설비 및 장치에 피해	4	3×10^{-5} 10^{-5}	4
임무의 경미한 부분달성불능,보조수단을 쓰면 달성가능	3	접속된 장치의 일부에 피해	3	10^{-5} 10^{-6}	3
외관기능을 저하시키는 경미한 고장	2	외벽의 진동, 고온, 외관변색	2	10^{-6} 10^{-7}	2
임무에 전혀 영향이 없음	1	전혀 피해없음	1	10^{-7} 이하	1

이상과 같은 방법에 의거 고장평점 C_S를 계산한 다음에는 <도표3>에 의거 고장평점에 대응한 고장등급을 결정한다.

<도표3> C_S에 따른 고장등급

C_S	고장등급
7점이상 10점	I
4점이상 7점미만	II
2점이상 4점미만	III
2점미만	IV

이상과 같이 고장평점을 계산하지 않고 간단히 임무달성에 중점을 두어 <도표4>와 같이 고장등급을 결정하는 경우 즉 고장평점법이 아닌 간단평가방법이 있는데, 고장등급으로서는 I IV등급이 있으며, I은 치명고장, II는 중고장, III은 경고장, IV는 미소고장으로 된다.

<도표4> 임무달성에 중점을 둔 고장등급

고장등급	고장구분	판단기준	대책내용
I	치명고장	임무수행불능,인명손실	설계변경이 필요
II	중대고장	임무의 중대부분 달성불가	설계의 재검토가 필요
III	경미고장	임무의 일부달성불가	설계변경은 불필요
IV	미소고장	영향이 전혀 없음	설계변경은 전혀 불필요

그리고, C_4 는 고장방지기능성, C_5 는 신규설계의 정도를 의미한다.

FMEA의 이해를 돕기 위해 브레이크시스템을 대상으로 상세히 시스템을 분해하여 시스템에 잠재해 있는 불합리 및 트러블을 적출하는 것을 FMEA실시사례에 의거하여 예를 들어 설명해 보기로 한다.

우선 브레이크시스템은 크게 나눠 페달, 유압장치, 브레이크의 3가지 부분으로 되어 있다. 페달을 밟음에 따라 유압장치가 작동하고 이어서 브레이크가 걸려 시스템이 정지한다. 이것을 신뢰성블록도로 나타낸 것이 <도표5>이다. 다시 FMEA실시절차에서 기술한 순서에 따라 <도표6>에 FMEA표를 만들었다.

FMEA실시순서는 다음과 같이 된다.

▷순서1 : 시스템·서브시스템의 구성 및 임무확인

▷순서2 : 시스템·서브시스템의 분석레벨 결정→여기서는 컴포넌트레벨로 한다.

▷순서3 : 기능별 블록 결정→ 다음 3가지의 기능별 블록도로 나눈다.→ 브레이크페달의 기능·유압장치기능·브레이크기능으로 3구분한다.

▷순서4 : 신뢰성블록도 작성→ <도표5>에 도시하는 바와 같이 기능별 신뢰성블록도를 상세하게 나타낸다.

▷순서5 : 블록별 고장모드 열거→ 다수의 고장모드를 적출하지만 여기서는 일부만 나타냈다.

▷순서6 : FMEA에 효과적인 고장모드 중에서 중요한 것을 선별하고 <도표6>에 기입한다.

▷순서7 : 선정된 고장모드에 대한 추정원인 열거→ 고장모드에는 다수의 추정원인이 있을 수 있다. 이 중에서 주요한 추정원인을 FMEA의 추정원인란에 기입한다.

▷순서8 : FMEA용지에 요약기입→ <도표6>은 FMEA표의 일부로서, 페달(페달장치), 유압파이프

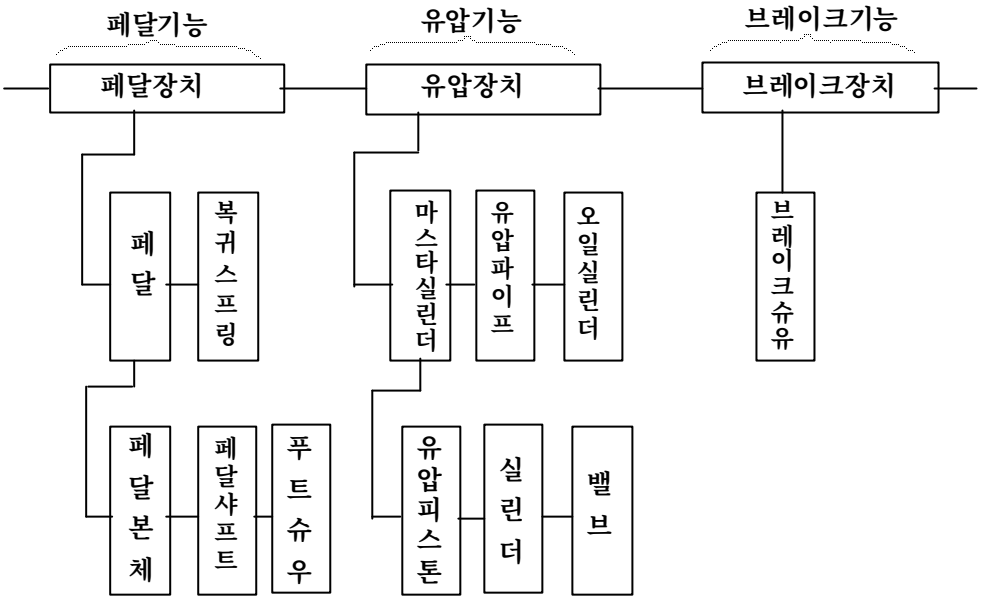
(유압장치) 및 브레이크 슈우(브레이크장치)만 나타냈다.

▷순서9 : 고장등급평가 및 결과정리(C_S,등급)→ FMEA표의 해당란에 기입한다.

▷순서10 : 고장등급이 높은 것에 대한 대책 및 개선제안→ FMEA표의 해당란에 기입한다.

이 순서1 10에 따라 작성된 FMEA표는 <도표6>이며, 이 표에서 고장평점은 C_1, C_3평가점에 의한 $C_S = \sqrt{C_1 \times C_3}$ 를 이용했다.

<도표5> 기능별 신뢰성블록도



<도표6> 브레이크시스템의 FMEA표(일부)

시스템: ○○수송시스템 **F M E A** 날짜: 1997년 02월16일

작성자: ○○○ (고장유형 및 영향분석) 승인자: ☆☆☆

서브시스템: 브레이크시스템

번호	대상품목	기능	고장모드	추정원인	영향		고장검지법	평가				대책
					서브시스템	시스템		기능 C_1	빈도 C_3	C_S	고장등급	
1	페달	유압장치(마스타실린더)를 작동시킴	페달을 밟아 누를 수 없음	1.페달크랭크 절손 2.페달아래에 이물질축적 3.마스터실린더로드 절손	제동불능	정지불능		10	1 2 5	3.2 4.5 7.7	III II I	로드재변경
			페달복귀불능	스프링절손	제동해제불가	브레이크기능정지		8	5	6.9	II	
2	유압파이프	유압전달	파이프연결부파손	1.과대응력 2.용접불량 3.부식	제동력감소	정지지연	오일누설	7	2 3 2	3.7 4.6 3.7	III II III	
			파이프의 크랙발생	1.피로 2.과대응력	제동력의 점차감소	정지불충분	오일스밈	4	1 2	2 2.8	IV III	
3	브레이크슈우	차륜의 제동	슈우의 미끄러짐	1.표면재불량 2.표면재피로	제동불량	정지거리가 크게됨		3	7 7	4.6 4.6	II II	
			슈우의 소음	1.재질불량 조립불량	소음발생	불쾌감		1	7 5	2.6 2.4	III III	

② 치명도 평점법

<도표7>와 같이 「고장영향의 크기」에 따라 평점을 구하고, 다음식에 의해 치명도평점(C_E)를 계산한 후에 이 점수에 대응하여 고장등급을 결정하는 방법이다.

치명도평점 $C_E = F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 \cdot F_4 \cdot F_5$

<도표7>고장영향의 크기에 따른 평점

항목	내용	계수
F_1 (고장영향의 크기)	치명적인 손실을 주는 고장	5.0
	약간의 손실을 주는 고장	3.0
	기능이 상실되는 고장	1.0
	기능이 상실되지 않는 고장	0.5
F_2 (시스템에 미치는 영향의 정도 · 범위)	시스템에 2가지 이상의 중대한 영향을 줌	2.0
	시스템에 한지 이상의 중대한 영향을 줌	1.0
	시스템에 미치는 영향은 그리 크지 않음	0.5
F_3 (발생빈도)	발생빈도가 높음	1.5
	발생가능성이 있음	1.0
	발생가능성이 적음	0.7
F_4 (방지의 가능성)	불능	1.3
	방지가능	1.0
	간단히방지됨	0.7
F_5 (신규설계여부)	약간변경된 설계	1.2
	유사한 설계	1.0
	동일한 설계	0.8

치명도평점 C_E에 대응하는 고장등급은 <도표8>에 의해 결정된다.

<도표8>

고장등급	치명도평점 C_E
I	3이상
II	1.0초과 3미만
III	1.0
IV	1.0미만

3. 치명도해석법(FMECA)

치명도해석법은 MIL-STD-162-102규격으로 제정되어 있으며, 치명도해석(criticality analysis)이란 FMEA를 실시한 결과 고장등급이 높은 고장모드가 시스템이나 기기의 고장에 어느 정도로 기여하는가를 정량적으로 계산하고, 고장모드가 시스템이나 기기에 미치는 영향을 정량적으로 평가하는 방법이다. 그리고 FMEA에다 치명도해석을 포함시킨 것을 FMECA(Failure Mode, Effect and

Criticality Analysis)라고 한다.

고장등급이 Ⅰ또는 Ⅱ인 고장모드의 일람표를 작성하고 이들 각각의 고장모드별의 치명도지수를 다음식에 의거 계산한다.

치명도지수 $C_r = \sum_{i=1}^{n} (a \cdot b \cdot k_A \cdot k_E \cdot l_G \cdot t)_i$

여기에서 C_r : 치명도지수

i : 구성품의 치명적 고장모드의 번호($i = 1,2,\cdots\cdots,n$)

k_A : 운용시의 고장률 보정계수

k_E : 운용시의 환경조건의 수정계수

l_G : 기준고장률(시간 또는 사이클당)

t : 임무당 동작시간(또는 회수), 운용시간(또는 회수)

a : l_G중에 당해 고장이 차지하는 비율(고장모드 차지비율)

b : 당해 고장이 발생하는 경우에 치명적영향이 발생할 확률(영향확률)

( )내: 기여율을 나타냄

윗식을 보아도 알 수 있는 바와 같이 치명도해석을 실시하기 위해서는 정량적 데이터가 필요하기 때문에 이 방법을 활용하기 위해서는 고장데이터를 수집하여 고장률을 명확히 알고 있지 않으면 안된다. 따라서 신규로 설계된 설비나 제품의 평가에는 어려움이 많기 때문에 FMEA만 사용하고, FMECA는 잘 사용하지 않는다.

FMEA와 마찬가지로 치명도해석을 실시하는 경우에는 <도표9>와 같은 양식을 사용한다.

<도표9> F M E C A(치명도해석)표

작성일자: 1996년 2월 16일

시스템: 추진 F M E C A(치명도해석)표 작성자 : ○○○

서브시스템: 에어압력 승인자 : ☆☆☆

대상품목 (번호)	치명적 고장										C_r
	모드	영향	data원	모드 차지 비율 a	영향 확률 b	운용 계수 k_A	환경 계수 k_E	기준 고장률 l_G	운용 시간 t	기여율 $(a\,b\,k_A\,k_E\,l_G\,t)\times10^4$	
파이로트 밸브	닫힘실패	실제임무불가	MIL-HD BK-217	0.1	1.0	100	50	0.04×10^{-4}	10	250	710
	닫힘상태 유지실패	임무불가확률 있음	상동	0.1	0.6	100	50	0.04×10^{-4}	10	150	
	닫힘상태 유지실패	실제임무불가	상동	0.1	1.0	100	50	0.04×10^{-4}	10	250	
	외부누설	임무불가확률 있음	상동	0.6	0.04	100	50	0.04×10^{-4}	10	60	
릴리프 밸브				(이	하	생	략)				