

## FMECA 절차의 $\beta$ 값 추정

### Estimation of $\beta$ Value in FMECA Procedure

김영일\*(항공우주연구원), 변광식, 안상진(삼성테크윈)

#### 1. 서 론

최근 제품 또는 서비스에 대한 고객들의 높은 품질 기대 수준을 만족하며 경쟁력을 유지하고자 하는 기업들의 노력은 제품 또는 서비스의 기획 및 설계 단계부터 생산, 사후 관리에 이르기까지 전 과정에 걸쳐 이루어지고 있다. 이러한 기업의 노력에는 많은 도구들이 활용되고 있는 바, 1950년대 항공 우주 산업에서 체계의 신뢰성을 확보하기 위해 설계방법론의 도구로 사용되기 시작한 고장 유형, 영향 및 치명도 분석 (FMECA : failure mode, effects and criticality analysis) 도 그 중에 하나라고 말할 수 있다. 고장 유형 및 영향 분석 (FMEA: failure mode and effects analysis) 과 치명도 분석 (CA: criticality analysis)이 결합된 형태인 FMECA는 FMEA와 CA를 차례로 사용하는 것이 일반적이거나, FMEA만 따로 사용되는 경우도 많다. 특히 항공우주산업에서 시작된 FMECA가 다른 민간 산업 분야에서 품질관리 기법으로 적용되기 시작하면서 이러한 경향은 더욱 두드러지게 되었다. 1990년대 들어 FMEA는 ISO 9000 품질경영시스템과 6시그마 개선 기법의 중요 도구로도 활용되고 있다.

FMEA는 일반적으로 시스템, 설계 또는 프로세스로부터 알려진 혹은 잠재적인 고장이나 문제 등을 정의하고 확인하여 제거하는 공학적인 기법이라고 정의할 수 있다. (Stamatis, 1995) 반면에 CA는 각 고장 유형과 고장 확률을 연관시키는 절차로서 시스템의 성공적인 운용과 안전에 영향을 미치는 고장 유형의 상대적인 중요도를 예측한다 (RAC, 1993). 최근에는 FMEA를 서비스 분야에 활용하고자 하는 연구도 많이 이루어지고 있으며 품질시스템의 수준 향상에도 활용되는 등 (우정렬 등, 2001) 기존의 FMEA 적용 범위가 확장되고 있는 추세이다. 그러나 FMEA의 유용성에도 불구하고 현장에서 FMEA를 수행함에 있어 어려움을 겪게 되는 경우가 많은데 그에 대하여 Jeong, et al. (1995) 은 다음과 같은 점을 지적하였다. (1) 많은 시간을 들여 FMEA를 실시하

였으나 만족할 만한 충분한 결과를 얻지 못하였다. (2) 고장 유형의 예측을 너무 경험자에 의존함으로써 고장 유형의 누락이 발생할 수 있다. (3) 고장 유형의 치명도를 평가하는데 어려움이 있다. (4) FMEA의 경험을 재사용하기 어렵다. 이러한 문제점들은 여러 연구를 통하여 해결 방안이 제시되었는데 이와 관련된 연구를 간단히 살펴보면 다음과 같다.

Wang et al. (1995)은 FMEA와 BRM (Boolean representation method)을 조합한 접근법을 제시하였으며, 장중순과 안동근 (1997)은 효과적인 FMEA 실시에 필요한 요소들을 제시하고 FMEA 실시 목적에 따른 개선된 FMEA 양식을 제안하였다. Sankar and Probhhu (2000)는 고장 유형 사이의 우선순위 결정을 위한 RPR (risk priority ranks) 접근법을 제시하였다. Xu et al. (2002)은 FMEA를 위하여 불확실하고 정확하지 않은 정보를 가지는 다양한 고장 유형 사이의 상호의존성을 언급한 퍼지로지 기반의 방법을 제시하였다. Seyed-Hosseini et al. (2006)은 RPN (risk priority number)의 약점, 즉 구성품 간의 간접 관계를 고려하지 못하고 많은 서브시스템이나 구성품을 갖는 시스템에 적용이 어려운 문제점을 보완할 수 있는 효과적인 방법을 개발하였다. 김상연 등 (2007)은 현업에서 사용하는 FMEA의 RPN 평가 시의 문제점을 분석하고 평가자 간의 일치성을 개선시킬 수 있는 RPN 평가 기준을 재정립하였다.

그러나 이상의 연구들은 주로 FMEA와 관련된 것이며, CA(criticality analysis)에 관한 최근의 연구는 찾아보기 어려우며 아직까지 미국의 군용규격인 MIL-STD-1629를 기본 지침으로 활용하고 있다고 사료된다. 이런 현상은 부분적으로 현장에서 FMEA만을 사용하더라도 충분히 활용 목적을 달성하는 경우가 많기 때문이기도 하다. 그러나 군용 체계와 같이 체계의 성공적인 운용과 안전이 매우 중요한 경우에는 치명도 분석 (CA : criticality analysis)이 필수적인 분석 도구라고 할 수 있다. 현장에서 치명도 분석을 하기 위해서는 (1)  $\alpha$  (부품이 특정 고장 유형의 고장으로 고

장 나게 되는 비율), (2)  $\lambda_p$  (부품의 고장률), (3)  $\beta$  (고장영향 확률) 등 3개의 파라미터 값을 알아야 한다. 아울러 이 3개의 파라미터 값을 추정함에 있어 특히 고장영향 확률  $\beta$ 는 실제 현장에서 잘못 사용되는 경우가 많은편더러 추정 자체도 어려운 요소라고 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 치명도 분석의  $\beta$ 값에 대한 올바른 사용 방법과 새로운 추정 방법을 제시하고자 한다.

## 2. 고장 영향 확률 $\beta$ 의 올바른 사용 방법

고장 영향 확률  $\beta$ 값은 특정 고장 유형이 발생했다는 조건 하에 이 고장으로 인한 고장 영향이 특정한 치명도 분류에 속하게 될 조건부 확률을 의미한다. 이를 간단한 확률 모형으로 나타내면 다음과 같다.

만일 A를 특정 고장 유형이라고 하고 고장 유형 A에 따른 고장 영향 (failure effect) 을  $B_j$ ,  $j=1, \dots, k$  ( $B_i \cap B_j = \emptyset, i \neq j$ ) 라고 하면, 각 고장 영향  $B_j$  에 대한 고장 영향 확률  $\beta_j$  는 다음의 식(1)로 나타난다.

$$\beta_j = P(B_j | A) = P(A \cap B_j) / P(A) \quad \text{식 (1)}$$

여기서  $P(A)$ 는 특정 고장 유형 A가 발생할 확률을 나타내며,  $P(A \cap B_j)$ 는 특정 고장 유형 A가 발생하고 동시에  $B_j$ 의 고장 영향이 발생한 것을 의미한다. 그러므로 정확한  $\beta$ 값을 구하기 위해서는 식 (1)의 2가지 확률 값을 구해서 계산해야 한다. 그러나 현실적으로 많은 경우, 고장 영향 확률 값  $\beta$ 를 구할 때 MIL-STD-1629A에서 (MIL-STD-1629A, 1980) 제시한  $\beta$ 값에 대한 가이드를 (표1 참조) 활용하여 엔지니어가 주관적으로 값을 부여하는 경우가 많다. MIL-STD-1629A의 경우, 고장 영향을 체계 손실에 따른 4가지 범주로만 나누고 있고 더 구체적인 기준을 제시하지 않기 때문에 각 범주 내에서  $\beta$ 값을 정하는 것은 충분한 고장 데이터가 주어지지 않는 경우 엔지니어의 판단에만 의존하게 된다. 식 (1)의 두 가지 확률 값을 다른 정보를 이용하여 각각 구하여  $\beta$ 값을 구하는 경우에는 문제가 생기지 않으나, 표1을 이용하여  $\beta$ 값을 정하는 경우에는 주의할 점이 있다.

고장 영향	$\beta$ 값
Actual Loss	1.00
Probable Loss	>0.10 to <1.00
Possible Loss	>0 to 0.10
No Effect	0

표1. 전형적인 고장 영향 확률  $\beta$ 값

첫째, FMEA를 실시하는 대부분의 경우 하나의 고장 유형에는 하나의 고장 영향이 대응된다. 그러나 하나의 고장 유형에 여러 개의 고장 영향이 대응되는 경우가 존재하며, 이런 경우에 많은 분석자들이 최악의 고장 영향 하나만을 고려하여 하나의  $\beta$ 값만을 추정하는 잘못을 저지르는 경우가 많다.

둘째, 앞서 언급한 바와 같이 하나의 고장 유형에는 여러 개의 고장 결과가 나타날 수 있는데, 이러한 경우 각 고장 영향에 따라 구한  $\beta$ 값의 합이 1이 되는지 확인해야 한다. 왜냐하면 식 (1)의 고장 유형 A에 대하여  $B_j$  들은 서로 배반사상이기 때문에  $P(A \cap B_j)$ 를 모든 j에 대하여 합하면  $P(A)$ 가 되기 때문이다. 만일  $P(A \cap B_j)$  값의 합이 1보다 작다면 고려하지 않은 고장 영향이 존재함을 의미한다. 경우에 따라서는  $P(A \cap B_j)$  값의 합이 1보다 크게 나타나게 될 수도 있는데 이때는 개별  $\beta_j$  값 추정이 잘못된 것이므로 고장 영향 별로  $\beta_j$  값을 다시 확인해 보아야 한다. 식 (1)은 2 가지 확률의 비로 구성되어 있지만  $P(A \cap B_j)$ 를 모든 j에 대하여 합하면  $P(A)$ 가 된다는 성질로 인하여 실제로  $P(A)$  값을 정확히 추정 못해도  $P(A \cap B_j)$  간의 상대적인 크기만 알면 각  $\beta_j$  값을 충분히 추정할 수 있다.

셋째, 하나의 고장 유형에 하나의 고장 영향이 존재하는 경우, 즉  $A \subset B$  인 경우인데 (여기서 B는 하나의 고장 영향을 나타낸다.) 이 경우  $P(A \cap B) = P(A)$ 가 되어 식 (1)로부터 구한  $\beta$ 값은 1이 된다. 현장의 많은 FMECA 결과를 보면 이와 같은 상황에서  $\beta$  값이 1보다 작게 추정되는 경우가 나타나기도 하는데 이는 잘못된 것이며, 이 경우 해당 부품의 치명도를 과소 평가하게 되는 오류를 낳게 된다.

## 3. 고장 영향 확률 $\beta$ 의 추정 방법

고장 영향 확률  $\beta$ 는 식 (1)과 같이 구할 수

있으나, 정량적인 접근 방식의 경우 이를 추정할 수 있는 충분한 데이터가 부족한 경우가 대부분이며 불충분한 데이터로부터  $\beta$  값을 추정하는 경우 추정량의 산포가 커지게 된다. 식 (1)은 고장 유형을 기준으로 주어진 고장 유형에 대한 고장 영향의 조건부 확률을 추정하는 것으로, 확률을 구하기 위한 표본 공간이 특정 고장 유형으로 국한된다. 그러나 하나의 고장 유형에는 여러 개의 고장 영향이 존재할 수 있으므로, 역으로 생각하여 주어진 고장 영향을 표본 공간으로 하면 일반적으로 앞의 경우보다 더 많은 데이터를 얻을 수 있게 된다. 이를 수식으로 정리하면 다음과 같다.

$A_i, i=1, \dots, l$  를  $i$  번째의 고장 유형이라고 하고  $B_j, j=1, \dots, k$  를  $j$  번째의 고장 영향이라고 하면 (단,  $k > l$ ),  $P(A_i | B_j) = P(A_i \cap B_j) / P(B_j)$  의 관계로부터 조건부 확률  $P(B_j | A_i)$  는 다음의 식 (2)와 같이 주어진다.

$$P(B_j | A_i) = P(A_i | B_j)P(B_j) / P(A_i) \text{ 식 (2)}$$

여기서  $P(B_j)$ 는 각 고장 영향이 나타날 확률이며 만일 시스템에 관한 정보로부터 이를 얻을 수 있다면, 추정하고자 하는  $\beta$  값은  $P(A_i | B_j)$  들간의 상대적인 비율만을 이용하여 구할 수 있게 된다.  $P(A_i | B_j)$  값은 특정 고장 영향, 즉 특정 고장 결과가 발생한 경우 그 원인이 되는 고장들의 상대적인 비율을 의미하므로, FMECA를 실시하고자 하는 시스템과 유사한 시스템의 현장 운용데이터 등과 같은 정보가 존재할 경우 다음의 식 (3)으로부터 쉽게 추정할 수 있다.

$$P(A_i | B_j) = n_{ij} / n_j \text{ 식 (3)}$$

단,  $n_{ij}$  는  $A_i$  고장 유형에 의하여  $B_j$  고장 영향이 나타난 도수를 나타내며,  $n_j$  는  $n_{ij}$  를 모든  $i$  에 대하여 합한 값이다. 만일 식 (3)의 확률 값을 구하기 위한 데이터가 충분하지 않은 경우에는 엔지니어의 경험 등을 통하여  $P(A_i | B_j)$  에 대한 주관적 판단을 사용할 수도 있을 것이다.

예제 : 자동차 시스템에 대한 FMEA 결과 표2와 같은 고장 유형과 고장 영향 결과를 얻었다.

고장 유형	고장 유형 결과
브레이크 잠김	차량전복
	급정지
	차선이탈
조향장치 결함	차량전복
	차선이탈

표2. 자동차 시스템의 FMEA 결과

유사한 자동차 시스템에 대한 과거 데이터로부터 각 고장 유형과 그 결과에 대한 빈도수가 표3과 같이 주어졌다고 했을 때, 새로 제안된 방법에 따라 브레이크 잠김 고장에 대한 고장 영향별  $\beta$  값 추정은 다음과 같다. 단, 각 고장 결과인 고장 영향 범주별 발생 비율은  $P(\text{차량전복})=1/6, P(\text{급정지})=1/3, P(\text{차선이탈})=1/2$ 로 알려져 있다.

고장영향 고장 유형	차량전복	급정지	차선이탈
브레이크 잠김	2	6	6
조향장치 결함	2	0	4
합계	4	6	10

표3. 고장 유형 및 고장 영향별 발생 빈도(n=20)

(1) 차량전복의 경우 :

$$\beta_1 = \left( \frac{2}{4} \cdot \frac{1}{6} \right) / \left( \frac{43}{60} \right) = \frac{5}{43}$$

(2) 급정지의 경우 :

$$\beta_2 = \left( \frac{6}{6} \cdot \frac{1}{3} \right) / \left( \frac{43}{60} \right) = \frac{20}{43}$$

(3) 차선이탈의 경우 :

$$\beta_3 = \left( \frac{6}{10} \cdot \frac{1}{2} \right) / \left( \frac{43}{60} \right) = \frac{18}{43}$$

참고로 식(1)을 이용하여 각 경우의  $\beta$  값을 구한 결과는 각각 1/7, 3/7, 3/7이 된다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 FMECA 절차를 수행할 때 치명도분석에 필요한  $\beta$  값을 추정하는 문제를 다루었다.  $\beta$  값을 추정함에 있어 오용되는 부분을 지적하고 구체적인 지침에 대하여 살펴보았다. 특히 하나의 고장 유형에 대하여 여러 개의 고장 영향이 존재할 때  $\beta$  값이 과소 평가되어 해당 부품의 치명도 값이 실제보다 낮게 추정될 수 있음을 보였다. 또한  $\beta$  값을 구하기 위해 고장 유형을 기준으로 한 조건부 확률을 구하는 대신 고장 영향을 기준으로 한 조건부 확률을 구하여  $\beta$  값 추정하는 방법을 제시하였다. 그리고 새로 제시한  $\beta$  값 추정방법의 간단한 활용 예제를 보였다.

#### 참고문헌

- 1) Reliability Analysis Center, *Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA)*, 1993.
- 2) 김상연, 윤원영, 김호균, "가전용 모터의 FMEA 실시 과정에서의 RPN 평가방법 재정립," 품질경영학회지, Vol. 35, No. 1, 2007, pp. 1-9.
- 3) Seyed-Hosseine, S. M., Safaei, N., and Asgharpour, M. J., "Reprioritization of failures in a system failure mode and effects analysis by decision making trial and evaluation laboratory technique," *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 91, 2006, pp. 872-881.
- 4) Xu, K., Tang, L. C., Xie, M., Ho, S. L., and Zhu, M. L., "Fuzzy assessment of FMEA for engine systems," *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 75, 2002, pp. 17-29.
- 5) Sankar, N. R. and Prabhu, B. S., "Modified approach for prioritization of failures in a system failure mode and effects analysis," *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 18, No. 3, 2001, pp. 324-335.
- 6) 장중순, 안동근, "효과적인 FMEA 실시," 품질경영학회지, Vol. 25, No. 1, 1997, pp. 156-172.
- 7) Wang, J., Ruxtion, T., and Labrie, C. R., "Design for safety of engineering systems with multiple failure state variables," *Reliability Engineering and System Safety*,

Vol. 50, 1995, pp. 271-284.

- 8) Stamatis, D. H. *Failure Mode and Effect Analysis, ASQ*, 1995.
- 9) 우정렬, 황승국, 강성수, "시스템 FMEA를 이용한 품질시스템의 수준 향상에 관한 연구," 산업경영시스템학회지, Vol. 24, Dec. 2001, pp. 107-119.
- 10) Jeong, K. H., Kume, H., and Iizuka, "Implementing FMEA through multiple points of view," *ASIA Quality Management Symposium*, 1995, pp. 85-90.
- 11) Department of Defence, *MIL-STD-1629A*, Nov. 1980.