

개선용이성을 고려한 P-FMEA 전개 방법에 관한 연구

김성민, 김채수*

동아대학교 대학원 스마트생산융합시스템 학과

A Study on the Implementation Method of P-FMEA Considering Easiness of Improvement

Sung min Kim, Chae soo Kim*

Department of Smart Manufacturing Convergency Systems Engineering, Dong-A University

요약 본 연구는 제조 공정에서의 핵심 고장 유형을 알아내기 위한 목적으로 수행되는 공정 고장 유형 영향 분석(Process-Failure Mode & Effect Analysis; 이하 P-FMEA) 전개 과정에서 개선용이성을 반영하기 위한 연구이다. 기존 FMEA의 RPN(Risk Priority Number)은 심각도(Severity), 발생도(Occurrence), 그리고 검출도(Detectability)의 3가지 평가기준을 동일한 중요도로 인식하고 단순히 곱하여 결정하지만 업종별 특성에 따라서 각 평가기준의 중요도가 달라질 수 있으며 개선용이성 또한 평가기준으로 추가되어야 할 필요가 있으므로 본 연구에서는 RPN을 개선한 개선 우선순위(Improvement Priority Number, IPN) 지수를 제안한다. IPN은 기존의 3가지 평가기준에 개선용이성이 추가된 형태이며, 계층화분석법(Analytic Hierarchy Process, AHP)을 활용하여 4가지의 각 평가기준별 중요도를 산정하고 이를 기반으로 고장유형별 종합점수가 산출되므로 IPN은 개선용이성 및 특정 공정의 특성을 반영한 지표가 된다. 본 연구 내용의 타당성을 살펴보기 위하여 IPN기반의 P-FMEA전개를 항공기 부품 제작 공정에 적용하여 기존 RPN방식의 차이를 비교하였으며, IPN방식이 개선효과의 효율성 증진과 개선활동 만족도 측면에서 RPN방식보다 높게 평가되었다.

Abstract This study reflects the ease of improvement in P-FMEA implementation, which was carried out to identify the key failure modes in the manufacturing process. The existing FMEA RPN (Risk Priority Number) was determined by simply multiplying the three evaluation criteria of severity, occurrence, and detectability with the same importance. This paper proposes an IPN (Improvement Priority Number), which is a revised form of RPN, because the weight of the criteria can vary, and the ease of improvement needs to be added as an evaluation criterion. The weight of each of the four evaluation criteria was calculated using the AHP (Analytic Hierarchy Process) method, and the core failure mode was derived by calculating the overall score, which reflects the characteristics of the process and the easiness of improvement. The validity of this study was examined by applying the IPN-based P-FMEA to an aircraft parts machining process. This study compared the core failure modes driven by the RPN and IPN methods. The IPN method was evaluated higher than the RPN method in terms of the improvement effect efficiency of the process and satisfaction with improvement activities.

Keywords : P-FMEA, RPN, Improvement Priority Number, Easiness of Improvement, AHP

본 논문은 동아대학교 대학원 석사 학위 과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Chae-Soo Kim(Dong-A Univ.)

email: cskim@dau.ac.kr

Received October 12, 2022

Revised November 14, 2022

Accepted December 7, 2022

Published December 31, 2022

1. 서론

1.1 연구 배경

프로세스 고장 형태 및 영향 분석법(P-FMEA)은 공정 내에서 발생할 수 있는 모든 고장 형태를 식별하고 그 원인에 대한 해결 방안을 계획하고 이행하여 품질 및 서비스의 신뢰성을 보증하기 위한 체계적인 방법론적 문제 해결 기법으로서 제조 공정에 발생 가능한 고장, 결함 또는 부적합에 대한 사전 검토와 대책을 세우는데 적합한 종합적이고 체계적인 접근방법이다.

그러나 학계에서의 다수 연구자들은 평가 기준이 주관적이고 평가 산정 방식이 모호하다는 한계점이 있다고 평가하였으며, 또한 RPN 평가 과정에서 중복 값 발생으로 인하여 개선의 우선순위를 판단하기 어렵다고 주장하였다(유재민, 2019) [1]. 김상연 외[2], Ling 외[3], 이창희 외[4]는 RPN 평가가 적용되고자 하는 제품에 적합하지 못한 평가 방식이 적용될 수 있으며, 평가 기준의 모호성으로 인하여 평가자 간, 평가결과와 불일치를 가져올 수 있다고 주장하였다. 그리고 Gilchrist는 RPN의 세 가지 준거를 단순한 곱으로 산출하는 근거가 없다고 주장하였다(Gilchrist W, 1993)[5].

1.2 연구 필요성 및 목적

최근 항공기 제작 산업에서는 신규 사업 수주 및 공정 변경 시, 품질 요구 조건으로 '사전 제품 품질 설계 및 양산품 승인 과정 요구조건(Requirements for Advanced Product Quality Planning and Production Part Approval Process, AS9145)'을 따르도록 규정되어 있으며, 이 규정에는 P-FMEA를 실시하도록 명문화되어 있다.

그러나 기존의 P-FMEA 전개방식은 각각의 개선 조치의 이행 완료 시기에 대한 적합성 및 총체적인 개선 효율성을 고려하지 않고 있다. 본 연구에서는 최대한 빠른 시일 내에 개선이 필요한 많은 고장유형의 원인들이 조속히 제거되어 전체적인 차원에서의 개선 효과를 높이기 위한 목적으로 기존의 RPN 평가기준에 개선용이성을 새로이 추가하고, 각 평가기준에 AHP법을 적용하여 중요도를 가중치로 나타내어 고장유형별로 가중합계치인 IPN을 구하여 개선 효과의 효율성 관점에서의 우선순위를 결정하고자 한다.

1.3 이론적 고찰 및 문헌연구

1.3.1 FMEA 및 P-FMEA

FMEA 초기문헌은 1949년 11월 9일에 제정된 MIL-P-1629, 'Procedure for performing a failure mode effect and critical analysis' 로 군수산업에서 비롯되었다(송인식, 2014)[6].

1960년대에 신뢰성 및 안정성을 요구하는 항공 우주 산업의 설계방법론의 정형으로 개발되었으며(김태혁 외, 2010)[7], 미국 자동차 공학 학회에서는 2016년 AS9145를 개정·공표하였고, 그 이후 다양한 산업분야에서 연구되고 있으며, 1967년 민간 항공 산업을 비롯하여 1970년 Ford 社의 Pinto 사건을 계기로 잠재된 설계 문제를 줄이기 위해 설계 단계에서의 FMEA와 공정 단계에서의 FMEA를 도입하였다.

2019년에는 미국의 AIAG와 독일의 VDA가 협력을 통한 예방을 강조하고 Risk 감소를 우선시하는 표준화 버전인 'AIAG-VDA 통합 매뉴얼' 을 제공하고 FMEA 프로세스를 수립하여 각 공급업체에 일관성 있는 지침과 가이드를 제공하였으며, 리스크 우선순위인 RPN의 우선순위를 'Action Priority'로 변경하는 등으로 발전되어 왔지만 많은 변화는 이루어지지 않았다.

미국 국방성의 신뢰성 분석 센터인 RAC (Reliability Analysis Center)에서 제정한 FMECA 규격에서는 고장 유형 및 영향 분석 접근법을 각 하드웨어의 아이템들을 목록화한 뒤, 가능한 고장유형을 분석하는 '하드웨어 접근법', 모든 제품 혹은 부품은 고유의 기능이 존재한다고 판단하고 각 기능을 나열하고 기능이 안 되는 것들에 대한 유형을 찾는 '기능 접근법', 그리고 이러한 두 가지 접근법을 조합한 '결합 분석법'으로 분류하고 있지만, ISO/TS16949, AIAG, VDA 등 최근 자동차 규격들과 대부분의 OEM 社 매뉴얼은 기능접근법을 기반으로 하는 분석절차를 제안하고 있다.

또한 AIAG-VDA FMEA 핸드북은 FMEA 7단계 방법론을 제시하였다 (Tzvetelin Gueorguiev 외, 2020)[8]. 이러한 규격에서의 심각도, 발생도, 검출도와 같은 RPN 평가 기준은 MIL-STD-1629를 기반으로 QS9000, IATF16949, AS9145, AIAG - VDA 통합 매뉴얼에 이르기까지 지속적으로 변경되어 발전해 왔으며, 자동차/항공기 제조기업을 비롯한 많은 기업들은 이를 신뢰성 확보의 필수 요건으로 채택하고 있으나, 이행에 많은 어려움을 겪고 있으며 기대한 만큼의 효과를 거두지 못하는 사례가 발생되고 있다.

1.3.2 AHP

AHP기법은 계량적 접근이 어려운 분야의 의사결정을 위해 의사결정자의 판단을 구조화 및 체계화하여 가중치를 설정하는 의사결정기법이다(T.L. Saaty, 1990)[9]. 1970년대 Saaty에 의해 고안된 AHP기법은 미 국무부 내에서 효율적인 의사결정이 이루어지도록 고안된 분석기법으로 분석 절차는 다음과 같이 총 5단계로 이루어져 있다. 1단계는 의사결정 문제를 계층화하는 것으로 제안된 전략 혹은 의사결정과 관련된 가능성이 있는 요인들을 확인하는 과정이며, 2단계는 각 요인들 간의 쌍대비교를 통해 쌍대비교 행렬을 구성하는 단계이다. 즉 계층구조가 만들어지면 각 계층별 요인들이 비교 가능하도록 쌍대비교 행렬을 작성하고, 고유치 방식(Eigenvalue Method)등을 사용하여 평가한 다음 우선순위를 도출한다(H.I.Ahn, 2007)[10]. 3단계는 쌍대비교 행렬을 기준으로 각 요인의 상대적 가중치를 산출하는 단계이고, 4단계는 산출된 상대적 가중치의 일관성을 검증하는 단계이다. 상대적 중요도가 신뢰성을 갖기 위해서 한 위계 내에 쌍대비교의 판단에 일관성이 유지되어야 하므로 (J.C.Lee 외, 2014)[11] (K.W.Song 외, 2013)[12], 가중치 판단이 유의미한지를 확인하기 위해 일관성 지수(Consistency Index, CI)와 일관성 비율(Consistency Ratio, CR)을 산출하여야 한다. AHP기법에서 일관성이 결과의 신뢰성 확보에 중요한 역할을 하기 때문에 일관성 검증이 요구되므로 CI를 무작위 지수(Random Index, RI)로 나눈 CR값을 산출하여 검증한다(K.W.Song 외, 2013)[12]. 여기서 CR이 0.1보다 낮은 경우, 응답자의 판단이 일관성을 갖는 것이라 판단할 수 있다. 마지막으로 5단계는 각 계층의 상대적 가중치를 단순가중합법을 이용해 종합하는 단계로 이를 통해 대안별 순위를 도출하고 최상위 계층인 최종 목표를 달성하기 위해 하위 계층의 요인들의 상대적 중요도를 판별하고, 각 대안의 우선순위를 평가한다(T.L. Saaty, 1980)[13], (T.L. Saaty, 1989)[14].

AHP기법은 전문가의 경험과 직관이 포함될 수 있을 뿐만 아니라, 계량화에 의한 데이터 분석도 가능하여 전문가의 경험과 식견을 과학적으로 반영하는 방법이 될 수 있으며(B.W.Kim, 2015)[15], AHP법을 활용하기 위해 실무지식과 전문적인 경험이 있는 집단의 규모는 집단의 특성이 동질적일 때 10 명 이내 소수의 표본 수도 충분하다(C.H.Lee, 2019)[16].

본 연구는 2장에서 기존 RPN기반의 고장유형 평가기준에 개선용이성을 추가하고, 추가된 4가지의 평가기준

각각에 대해 AHP기법을 적용하여 IPN을 도출하는 절차를 적용사례와 함께 소개하고, 3장에서는 결론을 도출하였다.

2. 본론

2.1 개선용이성을 고려한 고장유형의 우선순위

IPN 지수를 기반으로 우선순위를 결정하기 위하여 새로이 추가된 평가항목인 "개선용이성"의 평가기준을 제시하고, 각각의 평가항목에 가중치를 구하기 위하여 AHP기법을 적용한다.

2.1.1 개선용이성

핵심 고장 유형을 선정하기 위해 기존 RPN의 평가 기준인 심각도, 발생도, 검출도와 더불어 전반적인 개선 효과의 효율성 제고를 위해 개선용이성을 Table 1과 같이 평가한다.

Table 1. Rating scale of improvement easiness

Description	Definition	Rating
Very easy	Within 1 day or under \$100	10
	Within 3 days or within \$300	9
Easy	Within 1 week or within \$1,000	8
	Within 2 weeks or within \$1,000	7
Moderate	Within 1 month or Within \$5,000	6
	Within 60 days or Within \$10,000	5
Hard	Within 3 months or Within \$30,000	4
	Within 6 months or Within \$50,000	3
Very Hard	Within 9 months or Within \$100,000	2
	Over 9 months or Over \$100,000	1

2.1.2 평가방법

개선용이성을 고려한 평가 지수인 "IPN"의 계산식은 아래의 Eq. (1)과 같으며, 여기서 S는 심각도, O는 발생도, D는 검출도, I는 개선용이성을 뜻하고, W_S , W_O , W_D , W_I 는 각각 S, O, D, I의 가중치를 의미한다.

$$IPN = SW_S \times OW_O \times DW_D \times IW_I \quad (1)$$

2.1.3 평가기준별 가중치

1) 계층도

본 연구에서는 4가지의 평가기준을 Fig. 1과 같이 계층도로 표현하였다.

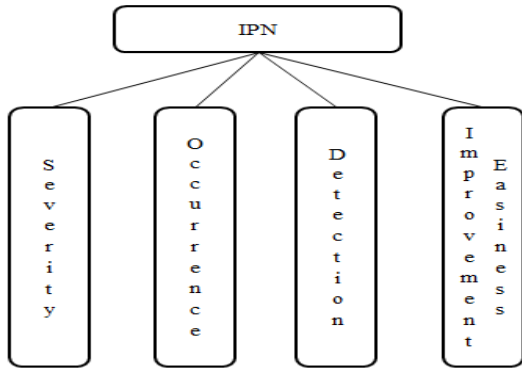


Fig. 1. AHP hierarchy structure

2) 설문대상

중소 제조 기업의 실정 및 효과적인 P-FMEA 운영을 고려하기 위하여 FMEA 운영에 전문적 판단이 가능한 부산/울산/경남 지역의 중소기업에서 활동하고 있는 인원 10명을 대상으로 설문조사를 실시하였으며, 응답자는 자동차/항공기/조선 산업의 중소기업 종사자로 모두 근속 연수가 10년 이상인 실무 경험을 가진 인원을 대상으로 실시하였다.

3) 설문조사 및 쌍대비교

본 연구에서는 가중치 산정을 위한 설문지를 Table 2와 같이 쌍대비교 방식으로 구성하고, 설문 대상자를 대상으로 설문조사하였다.

Table 2. Questionnaire format

	←Extreme importance		Equivalent		Extreme importance→					
SEV	⑤	④	③	②	①	②	③	④	⑤	OCC
SEV	⑤	④	③	②	①	②	③	④	⑤	DET
SEV	⑤	④	③	②	①	②	③	④	⑤	I.E
OCC	⑤	④	③	②	①	②	③	④	⑤	DET
OCC	⑤	④	③	②	①	②	③	④	⑤	I.E
DET	⑤	④	③	②	①	②	③	④	⑤	I.E

설문조사 결과 중 하나를 쌍대비교 행렬로 나타내면 Table 3과 같으며, 이를 표준화 행렬(standardized matrix)을 활용하여 가중치 산정하면 Table 4와 같다.

Table 3. Pair wise comparison matrix result

	SEV	OCC	DET	I.E
Severity	1	0.33	2.00	3.00
Occurrence	3.00	1	4.00	5.00
Detection	0.50	0.25	1	2.00
Improvement Easiness	0.33	0.20	0.50	1
Total	4.83	1.78	7.50	11.00

Table 4. Normal matrix and weight calculation result

	SEV	OCC	DET	I.E	Weight
Severity	0.21	0.19	0.27	0.27	0.232
Occurrence	0.62	0.56	0.53	0.45	0.543
Detection	0.10	0.14	0.13	0.18	0.140
Improvement easiness	0.07	0.11	0.07	0.09	0.085
Total	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

가중치는 4 가지 항목의 평균값으로 Table 4와 같이 발생도의 가중치가 0.54로 가장 높았으며, 심각도 0.23, 검출도 0.14, 개선용이성 0.08 순위로 평가되었으며, 가중합계와 일관성 측도는 Table 4의 데이터에 아래의 Eq. (2), Eq. (3)을 대입하여 구할 수 있다.

$$Weighted \sum = SW_S + OW_O + DW_D + IW_I \quad (2)$$

$$Consistency measurement = \frac{weighted \sum}{weight} \quad (3)$$

4) 일관성 검증

이론적으로 AHP기법에서는 일관성을 평가하는 지표인 CR값이 0.1을 초과하게 되면 의사결정자의 쌍대비교 결과는 재조사 혹은 폐기한다.

본 연구에서는 고유치 근사법으로 일관성 검증을 실시하였으며, 실무적으로 많이 활용되는 CR값 기준을 0.2 이하이면 일관성이 있다고 판단하기로 하였으며, Table 3의 쌍대비교행렬을 대상으로 실시한 결과는 다음과 같다.

Eq. (4)에 의거하여 최대고유치 (maximum eigenvalue)는 4.05로 계산되었고, 일관성지수인 CI(Confidence Index)값은 Eq. (5)에 의거하여 0.016, 그리고 일관성 비율인 CR(Confidence Ratio)값은 Eq. (6)에 의거하여 0.017로 계산되었다. Eq. (6)에서 RI(Random index)는 무작위 지수로서, 쌍대비교 항목 수(n)에 따라서 RI값은 Table 5와 같다.

$$\lambda_{\max} = \frac{\text{All factors of consistency measurement } \sum}{\text{umber of factor}(n)} \quad (4)$$

$$CI = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n - 1)} \quad (5)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

Table 5. Random index value

n	2	3	4	5	6	7
RI	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32

2.2 개선용이성을 고려한 P-FMEA 절차

개선 효과의 최대 효율성을 보장하기 위하여 개선활동에 소요되는 시간과 비용을 사전에 검토하여야 한다. 이를 위하여 기존 P-FMEA 절차와는 다른 절차를 제시할 필요가 있다. 새로이 제시되는 절차는 다음과 같다.

2.2.1 운영 조직 구성

P-FMEA 주관부서에서는 관련된 모든 부서에서 이를 전담하여 관리할 수 있는 인원 선정을 요청하여 적절한 인원으로 FMEA 운영조직을 구성한다.

2.2.2 공정흐름도 작성

해당 제품 또는 서비스의 전체 흐름공정도를 작성한다. 흐름공정도는 필요에 따라 작업 단위로 세분화할 수 있다.

2.2.3 고장유형/원인분석

FMEA 운영조직은 이전의 고장유형을 학습하고 해당 제품 및 서비스의 각 공정에서 발생 가능한 고장 유형을 식별하고 그 원인(스트레스)을 분석한다.

2.2.4 RPN 평가

RPN 평가 후, 각 산업군의 특수성을 고려하여 개선 조치가 필요한 고장유형을 선정한다.

2.2.5 개선 계획 수립

이 단계에서는 식별된 고장모드가 개선 조치로 인하여 다시는 재발하지 않도록 하는 개선 계획을 수립하여야 한다.

2.2.6 개선용이성 및 IPN 지수 평가

개선용이성 평가 후, 각각의 평가기준별로 가중치를 고려하여 IPN 지수를 산출한다.

2.2.7 개선 계획 이행

수립된 개선 조치 계획은 주관 부서 이외에 관련된 모든 부서에서의 전사적 관심이 필요하며, 모든 계획은 최종 의사결정권자의 적극적인 개선 의지 및 지원 없이는 효과적인 결과를 기대할 수 없다.

각각의 개선 계획별 전담 부서를 결정하고 이행완료까지의 전 과정이 모니터링 되어야 한다. 전체 시정 조치 계획을 리스트 하여 주기적으로 그 이행 여부를 확인하는 과정이 필요하며 모든 시정 조치 계획이 완료될 때까지 지속하여야 한다.

2.3 IPN 지수를 활용한 P-FMEA 전개

본 연구에서 제시한 개선용이성과 함께 심각도, 검출도, 발생도의 가중치가 객관적으로 평가된 IPN 지수를 기반으로 A 항공기 부품 제조사의 공정에 P-FMEA를 전개하였다.

2.3.1 적용 대상

본 연구의 사례 연구 대상은 국내 항공기 기체 단품 및 조립품을 생산하는 A 중소기업으로 최근 주요 고객사들로 부터 AS9145 적용과 관련된 요구가 발효되어 신규 사업 및 제품 수주 시, P-FMEA의 이행 요청이 늘고 있는 추세이다.

대상 기업은 제조공정이 다양한 제품들을 제작하고 있으며, 본 연구의 P-FMEA 전개 대상 제품은 단품으로써 Sheet metal 소재의 가공 및 성형품이다.

2.3.2 흐름공정도

해당 부품의 흐름공정도는 공정 분석 기호를 활용하여 공정 분석한 결과는 Table 6과 같다.

일련번호는 공정 흐름상의 진행 순서를 가리키는데, 원 소재 불출 공정에서부터 시작되며 이후 원소재의 형상을 결정하기 위하여 가공 및 성형 공정이 진행되고 원소재의 경도를 결정하기 위하여 열처리 공정과 전도도(혹은 경도) 검사, 형상 검사가 진행된다. 그리고 아웃소싱된 화공 공정을 위해 입/불출 후, 다시 입고되어 페인트 공정 및 페인트 검사 공정을 하고 최종적으로 모든 요구조건에 제품이 만족하는지를 위하여 최종 검사가 수행

되고 재고 창고로 이동하게 된다.

Table 6. Flow process chart

No.	Process flow					Process description
	work	Move	Inspect	stragnation	Save	
1	○					Material release
2			□			Material inspection
3	○					Material cutting
4	○					Machining
5	○					Break sharp edge
6	○					Forming
7	○					Heat Treatment
8	○					Check & straightening
9			□			Dimension inspection
10			□			Temper inspection
11		⇒				Move
12			□			Penetrant inspection
13	○					Chemical process
14		⇒				Move
15	○					Painting
16			□			Painting inspection
17	○					Part marking
18			□			Final inspection
19		⇒			▽	Packing & Save

2.3.3 고장 유형 및 원인 분석과 현 관리 상태

P-FMEA를 전개하기 위해서 각 공정에서 발생 가능한 잠재적 고장 유형과 그 원인을 식별하고 분석한다.

Table 7. Failure mode and Cause

No.	Failure mode	Cause
1-1	Material discrepancy	Handling error
3-1	Cutting size error	Handling error
4-1	Configuration/dimension error	Incorrect tool use
4-2	Configuration/dimension error	Use of damaged tool
4-3	Configuration/dimension error	Tool set up miss
4-4	Configuration/dimension error	Material set up miss
4-5	Configuration/dimension error	Mis-using of PGM
4-6	Roughness error	Drill vibration
4-7	Oversized holes	Chip

4-8	Undersized holes	Drill wear
5-1	Burr, sharp edge	Workmanship error
6-1	Configuration/dimension error	Misreading of DWG
6-2	Angle/Radius error	Mis-using of tool
7-1	Hardness error	Temperature set up miss
7-2	Configuration/dimension error	Improper heat distribution
8-1	Configuration/dimension error	Lack of workmanship
11-1	Contamination	Packing error
13-1	Contamination	Handling error
13-2	Coating thickness error	Lack of skill
14-1	Contamination	Improper packing material
15-1	Appearance error	FOD control error
15-2	Adhesive error	Dry/cure error
15-3	Coverage error	Lack of skill
17-1	ID error	Typo
19-1	Part damage	Lack of workmanship

각 공정에서 분석된 고장 유형 및 원인은 Table 7과 같이 나타났으며, 고장유형의 영향은 모두 부적합으로 후속 공정 진행 불가로 판정되었고, Table 7에서의 일련 번호는 고장유형의 식별번호를 가리키며, 이후 표와 연계하여 표기된다.

Table 8은 각 고장유형에 대한 현재 공정의 관리 상태로 이후 각 고장유형에 대한 개선 대책 수립 시에 이를 고려하여야 한다.

Table 8. Current status for process control

No.	Current process control
1-1	Material inspection
3-1	Self inspection
4-1	Checking of tool No.
4-2	Checking of tool condition
4-3	Checking of tool's setting
4-4	Checking of material setting condition
4-5	Matching check of PGM No. to work order
4-6	Cutting oil check
4-7	Checking of drill size
4-8	Checking of drill size
5-1	Self inspection
6-1	Layout before working
6-2	Checking of tool
7-1	TUS/ISC control
7-2	TUS/ISC control
8-1	Self inspection
11-1	Checking before working
13-1	Checking before working

13-2	Coating thickness test
14-1	Checking before working
15-1	Periodic education
15-2	Adhesive test
15-3	Visual inspection
17-1	ID inspection
19-1	Checking before shipment.

2.3.4 RPN 평가

RPN 평가는 심각도, 발생도, 검출도에 대한 평가를 위하여 FMEA 일반적 평가 기준을 적용하였으며, RPN 평가방법으로는 다음의 Eq. (7)과 같고, 산출된 결과는 Table 10과 같고, 점수가 높은 순으로 리스크가 큰 것으로 분석된다.

$$RPN = S \times O \times D \quad (7)$$

일반적으로 항공 산업에서 FMEA를 전개하면 심각도, 발생도, 검출도 각각에서 7점 이상이 되는 고장유형과 RPN 점수가 125점 이상인 고장 유형, 그리고 고객사에서 지정한 주요특성치(Key characteristic) 또는 Critical items에 대해서 개선 조치 계획을 수립하고 운영한다.

Table 9의 RPN 평가 점수는 최대 80에서 3점까지로 평가되었으며, 심각도, 발생도, 검출도의 각 평가기준에서 7점 이상인 고장유형은 1-1, 5-1, 7-1, 17-1의 총 4 가지 항목에만 나타났다. 이는 해당 공정의 오랜 기간 축적된 제조기술 노하우로 인하여 공정 능력이 상대적으로 안정되어 있기 때문인 것으로 판단된다.

Table 9. RPN assessment result

No.	SEV	OCC	DET	RPN	RANK
1-1	10	1	1	10	10
3-1	5	1	1	5	15
4-1	5	1	3	15	5
4-2	5	1	1	5	15
4-3	5	1	3	15	5
4-4	5	1	2	10	10
4-5	5	1	3	15	5
4-6	3	1	1	3	22
4-7	5	1	4	20	4
4-8	5	3	3	45	3
5-1	3	9	2	54	2
6-1	5	1	3	15	5
6-2	5	1	3	15	5
7-1	10	1	1	10	10
7-2	5	1	1	5	15

8-1	5	1	1	5	15
11-1	3	1	1	3	22
13-1	3	1	1	3	22
13-2	5	1	1	5	15
14-1	3	1	1	3	22
15-1	5	2	1	10	10
15-2	5	1	1	5	15
15-3	5	2	1	10	10
17-1	10	2	4	80	1
19-1	4	1	1	4	21

2.3.5 IPN 평가

개선용이성은 개선에 소요되는 시간과 비용이 적게 들어, 단 기간 내에 개선 효과가 나타나게 되는 항목이 높게 평가되는 평가 기준이다. 기존의 RPN 평가 기준과 같이 최하 1점에서 최대 10점까지로 평가되며, 평가자들은 개선용이성에 대하여 Table 1에 근거하여 Table 7의 고장유형을 평가하였다.

평가한 결과는 Table 10과 같다.

Table 10. Improvement easiness assessment result

No.	Rating	No.	Rating	No.	Rating
1-1	3	4-8	6	13-2	8
3-1	6	5-1	7	14-1	7
4-1	6	6-1	7	15-1	8
4-2	6	6-2	7	15-2	8
4-3	6	7-1	8	15-3	8
4-4	7	7-2	8	17-1	4
4-5	7	8-1	7	19-1	7
4-6	6	11-1	7		
4-7	6	13-1	8		

Table 11은 RPN 평가결과에 Table 10의 개선용이성 평가결과를 추가하고, 기 산출된 가중치를 적용하여 각 항목별로 가중치를 곱한 후, Eq. (1)에 대입하여 IPN을 계산한 결과이다. 예를 들어, 고장 유형 1-1번은 심각도 10점, 발생도 1점, 검출도 1점, 개선용이성 3점을 받았으며, 각 가중치를 곱하면 심각도(가중치) 점수는 2.30, 발생도(가중치)는 0.54, 검출도(가중치)는 0.14, 개선용이성(가중치)는 0.24가 된다.

또한 Eq. (1)에 의거하여 가중치가 적용된 네 가지의 평가 기준 결과를 곱하면 IPN 점수는 0.04로 계산되며, 평가된 IPN 점수가 높은 순으로 고장 유형별로 개선 순위를 결정하여 개선 계획 일정을 수립한다.

Table 11의 IPN에 의한 순위와 Table 9의 RPN의

우선순위를 비교하면 고장유형 5-1, 7-2, 13-2, 15-2는 우선순위가 다소 앞당겨 졌으며, 고장유형 1-1은 10위에서 18위로, 고장유형 3-1은 15위에서 18위로, 고장유형 4-1은 5위에서 8위로 조정되는 등 대부분 고장유형의 우선순위가 바뀌게 되는 바, IPN방식의 평가는 기존 RPN 방식과 상당한 차이가 있음을 확인할 수 있다.

Table 11. IPN by Failure mode

No.	Weight & Evaluation				IPN	Rank
	SEV	OCC	DET	I.E		
	0.23	0.54	0.14	0.08		
1-1	2.30	0.54	0.14	0.24	0.04	18
3-1	1.15	0.54	0.14	0.48	0.04	18
4-1	1.15	0.54	0.42	0.48	0.13	8
4-2	1.15	0.54	0.14	0.48	0.04	18
4-3	1.15	0.54	0.42	0.48	0.13	8
4-4	1.15	0.54	0.28	0.56	0.10	13
4-5	1.15	0.54	0.42	0.56	0.15	5
4-6	0.69	0.54	0.14	0.48	0.03	25
4-7	1.15	0.54	0.56	0.48	0.17	4
4-8	1.15	1.62	0.42	0.48	0.38	3
5-1	0.69	4.86	0.28	0.56	0.53	1
6-1	1.15	0.54	0.42	0.56	0.15	5
6-2	1.15	0.54	0.42	0.56	0.15	5
7-1	2.30	0.54	0.14	0.64	0.11	10
7-2	1.15	0.54	0.14	0.64	0.06	14
8-1	1.15	0.54	0.14	0.56	0.05	17
11-1	0.69	0.54	0.14	0.56	0.03	23
13-1	0.69	0.54	0.14	0.64	0.03	22
13-2	1.15	0.54	0.14	0.64	0.06	14
14-1	0.69	0.54	0.14	0.56	0.03	23
15-1	1.15	1.08	0.14	0.64	0.11	10
15-2	1.15	0.54	0.14	0.64	0.06	14
15-3	1.15	1.08	0.14	0.64	0.11	10
17-1	2.30	1.08	0.56	0.32	0.45	2
19-1	0.92	0.54	0.14	0.56	0.04	21

2.3.6 개선효과 비교

개선효과는 성공한 개선 활동들의 정량적 효과를 금액으로 환산해야 하며, 이를 연간효과로 산출해야 하는 것이나, 통상 개선효과는 공정에서 발생하는 고장유형별 개선활동이 대부분 완성되었을 때 도출될 수 있으므로 고장유형별 효과를 금액으로 사전에 환산하기는 현실적으로 어려운 일이다.

따라서 본 연구에서는 IPN 지수가 개선용이성을 고려

한 방식으로 단시간에 개선 완료 가능한 고장유형이 많으며 해당 품목의 제조 공정 이외의 공정에도 파급되는 효과가 있으므로 개선효과의 효율성을 정량화하기로 하고, 전체 개선완료 시점까지 개선 완료되어 발생하는 효과가 발휘되는 누적시간을 계산하였다.

Table 12는 RPN 방식으로 개선 완료되어 누적된 전체 고장유형의 개선 완료 누적시간을 나타낸 것이고, Table 13은 IPN 방식의 개선 완료 누적시간을 나타낸 것 이다.

모든 개선 활동이 완료될 때까지의 전체 소요 시간은 655일이며, Table 12에서 RPN 점수가 가장 높은 17-1 번의 고장유형의 개선활동 소요시간은 90일이므로 17-1 번의 개선효과 지속시간은 655일에서 90일을 뺀 565일 만큼의 효과 일수가 발생하였고, 두 번째 우선순위를 가진 5-1번의 고장유형의 개선활동 소요시간은 14일이므로 우선된 개선활동이 끝난 시점을 시작으로 개선 활동에 소요되는 14일이 경과한 104일이 지나서 완료되므로 655일에서 104일을 뺀 551일 만큼 개선효과가 지속된다.

이러한 방식으로 모든 고장유형의 개선활동에 소요되는 처리시간을 고려하여 활동을 하고 각 고장 유형의 개선 효과 누적 시간이 산출되는데, 모든 개선 효과 지속 시간을 모두 합치면 RPN방식에 따른 개선 효과 누적 지속시간은 5,934일이 된다.

이와 같은 방식으로 IPN 방식에 따른 개선 계획을 수립하면, 그 효과 누적 시간은 7,743일로 산출되며, 이는 RPN 방식에 비하여 효과 누적 시간이 1,809일 길게 나타나므로 30.48%의 효율성이 높은 것으로 그 결과를 유추해볼 수 있게 된다.

Table 12. Effect duration of RPN (Unit : day)

No.	Priority	Process time	Completed date	Effect duration	Effect accumulated duration
17-1	1	90	90	565	565
5-1	2	14	104	551	1,116
4-8	3	30	134	521	1,637
4-7	4	30	164	491	2,128
4-1	5	30	194	461	2,589
4-3	5	30	224	431	3,020
4-5	5	14	238	417	3,437
6-1	5	14	252	403	3,840
6-2	5	14	266	389	4,229
1-1	10	180	446	209	4,438
15-1	10	7	474	181	5,002
15-3	10	7	481	174	5,176
4-4	10	14	460	195	4,633

7-1	10	7	467	188	4,821
13-2	15	7	569	86	5,720
15-2	15	7	576	79	5,799
3-1	15	30	511	144	5,320
4-2	15	30	541	114	5,434
7-2	15	7	548	107	5,541
8-1	15	14	562	93	5,634
19-1	21	14	590	65	5,864
13-1	22	7	641	14	5,934
4-6	22	30	620	35	5,899
11-1	22	14	634	21	5,934
14-1	22	14	655	-	5,934

2.3.7 개선활동 만족도

본 연구의 '개선용이성을 고려한 P-FMEA 적용방안'에 대한 현업 관계자의 만족도를 파악하기 위하여 공정 관리자와 개선활동 참여자 20명을 대상으로 기존방식과의 만족도 비교 설문조사를 실시하였다. Table 14와 같이 응답자의 85%가 기존 방식의 개선우선 순위보다 개선된 방식의 개선우선 순위가 더 현실적이고 개선 효과 또한 더 효율적이라는 응답을 하였다. 전개방식의 난이도는 기존방식과 별 차이는 없으나 개선활동에 소요되는 시간 및 비용에 대한 사전분석으로 절차상의 용이성에 대한 응답으로는 75%가 만족한다는 응답 결과가 나왔으므로, 본 연구결과를 현업에 적용하면 개선활동의 만족도가 더욱 높아질 것이라고 해석된다.

Table 13. Effect duration of IPN (Unit : day)

No.	Priority	Process time	Completed date	Effect duration	Effect accumulated duration
5-1	1	14	14	641	641
17-1	2	90	104	551	1,192
4-8	3	30	134	521	1,713
4-7	4	30	164	491	2,204
4-5	5	14	178	477	2,681
6-1	5	14	192	463	3,144
6-2	5	14	206	449	3,593
4-1	8	30	236	419	4,012
4-3	8	30	266	389	4,401
15-1	10	7	280	375	5,158
15-3	10	7	287	368	5,526
7-1	10	7	273	382	4,783
4-4	13	14	301	354	5,880
13-2	14	7	315	340	6,567
15-2	14	7	322	333	6,900
7-2	14	7	308	347	6,227
8-1	17	14	336	319	7,219
1-1	18	180	516	139	7,358
3-1	18	30	546	109	7,467

4-2	18	30	576	79	7,546
19-1	21	14	590	65	7,611
13-1	22	7	597	58	7,669
11-1	23	14	611	44	7,713
14-1	23	14	625	30	7,743
4-6	25	30	655	-	7,743

Table 14. Satisfaction survey result

No.	Description	Satisfaction rate
1	Satisfaction for Process easiness	75%
2	Satisfaction for effectiveness	100%
3	Satisfaction compared to the RPN method	85%

3. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 제조 공정에서의 핵심 고장 유형을 알 아내기 위한 목적으로 수행되는 P-FMEA 전개 과정에 개선용이성을 추가 반영하고, 기존 FMEA의 RPN 산출 요소인 심각도, 발생도, 검출도의 중요성을 업종별 특성에 따라서 차별화될 수 있도록 가중치를 적용한 IPN 지수를 제안하였다. 또한 AHP기법을 활용하여 각 평가 기준의 가중치를 산정한 결과, 발생도가 54%, 심각도가 23%, 검출도가 14%, 그리고 개선용이성이 8%로 평가되어 적용하였다. 본 연구 내용의 타당성을 살펴보기 위하여 IPN 기반의 P-FMEA 전개를 특정 항공기 기체 부품 제조사에 적용하여 기존 RPN 방식에 의한 핵심 고장 유형 도출 결과와의 차이를 비교한 결과, RPN 방식의 개선 효과 누적 시간이 총 5,934일이었던 것에 비하여 IPN 방식의 개선 효과 누적 시간이 7,843일로 집계되어 30.48% 더 효율성이 향상되는 것으로 분석되었다. FMEA운영 인원과 개선활동 참가 인원을 대상으로 실시한 만족도 조사 결과, IPN방식이 RPN 방식보다 더 만족한다는 응답률이 85%로 집계되었으므로 항공기 부품 제조 중소기업에 적용한 본 연구 결과를 바탕으로 타 부문에서도 유사한 방식으로 IPN을 활용한다면 개선 효과의 정량적 향상뿐만 아니라 개선활동에 긍정적 효과를 불러올 것으로 기대된다.

항공기 기체 부품 제조 산업이 아닌 다른 제조 공정을 대상으로 한 P-FMEA 전개 방법 또한 향후 연구 주제가 될 것이며, 본 연구 결과와의 차이점 등을 살펴보고 제조 공정 전체로 일반화할 수 있는 방안에 대한 연구도 필요하겠다.

References

- [1] Jae Min Yoo, Dong Geun Ahn, Joong Soon Jang. Review of FMEA, Journal of applied reliability, pp.318-333, (2019).
- [2] Kim, S. Y., Yun, W. Y., and Kim, H. G. "Re-establishment of RPN evaluation method in FMEA procedure for motors in household appliances". Journal of the Korean society for Quality Management, Vol. 35, No. 1, pp. 1-9, (2007).
- [3] Ling, D., Huang, H., Song, W., Liu Y., and Zuo, M. J. "Design FMEA for a diesel engine using two risk priority numbers". 2012 Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, Reno, NV, pp. 1-5, (2012).
- [4] Lee, C. H., Yang, K. W., and Kim, S. B. "Re-establishment of RPN evaluation method in FMEA procedure for K21". Journal of the Korean Society for Quality Management, Vol. 40, No. 3, pp. 306-315, (2012).
- [5] Gilchrist W., Modeling failure modes and effects analysis, International Journal of Quality & Reliability Management Vol.10 (1993).
- [6] Song, I. S. "Quality bible: FMEA". Edam books, (2014).
- [7] T.H Kim, Joong Soonn Jang, E.Y. Lee, Practical criteria for Process FMEA Journal of applied reliability, pp 123-135, (2010).
- [8] Tzvetelin Gueorguiev/Miroslav Kokalarov/Boris Sakakushev, Recent Trend in FMEA Methodology (2020).
- [9] T.L. Saaty. How to make a decision: the analytic hierarchy process. European journal of operational research, 48(1), 9-26, (1990).
- [10] H.I. Ahn. "Comparative study on weight and eigenvalue calculation method in hierarchical analytical decision-making process. Industrial Engineering & Management Systems. 953-960, (2007).
- [11] J. C. Lee., M. S. Jeon. & H. C. Jeong. A Statistical Testing of the Consistency Index in Analytic Hierarchy Process. The Korean journal of applied statistics 27(1), 103-114, (2014).
- [12] K. W. Song. & Y. Lee Re-scaling for Improving the Consistency of the AHP Method. Social Science Research Review 29(2), 271-288, (2013).
- [13] T.L. Saaty. The analytical hierarchy process, planning, priority, Resource allocation. RWS publications, USA, (1980).
- [14] T. L. Saaty. Group decision making and the AHP. In The analytic hierarchy process. 59-67, (1989).
- [15] B.W.Kim, Decision-making layer analysis method. Kims information strategy Institute, (2015).
- [16] C.H. Lee, D.M. Lee & I., Chen. Relative Importance of Executive Competency Factors of SMEs and Venture Firms in Credit Evaluation, Journal of Digital Convergency, 17(4), 123-136, (2019).

김 성 민(Sung-Min Kim)

[준회원]



- 2021년 2월 : 동아대학교 산업공학과 (공학사)
- 2021년 3월 ~ 현재 : 동아대학교 동아대학원 스마트생산융합시스템학과 석사과정

<관심분야>

품질관리, 생산관리

김 채 수(Chae-Soo Kim)

[정회원]



- 1991년 2월 : KAIST산업공학과 (공학석사)
- 1999년 2월 : KAIST산업공학과 (공학박사)
- 2013년 7월 ~ 현재 : 동아대학교 산업경영공학과 교수

<관심분야>

자동입출고시스템의 설계와 운영, 항만물류시스템 운영 효율화, OR 및 Simulation 기반의 생산시스템 최적화