J. Korea Saf. Manag. Sci. Vol. 23 No. 3 September 2021
http://dx.doi.org/10.12812/ksms.2021.23.3.027
ISSN 1229-6783(Print)
ISSN 2288-1484(Online)

F-RPN(Failure-RPN)을 이용한 장비 고장률 개선 연구: 반도체 식각 공정을 중심으로

이 형 근* · 홍 용 민* · 강 성 우*
*인하대학교 산업경영공학과

A Study on Machine Failure Improvement Using F-RPN(Failure-RPN): Focusing on the Semiconductor Etching Process

Hyung-Geun Lee* · Yong-Min Hong* · Sung-Woo Kang*
*Department of Industrial Engineering, INHA University

Abstract

The purpose of this study is to present a novel indicator for analyzing machine failure based on its idle time and productivity. Existing machine repair plan was limited to machine experts from its manufacturing industries. This study evaluates the repair status of machines and extracts machines that need improvement. In this study, F-RPN was calculated using the etching process data provided by the 2018 PHM Data Challenge. Each S(S: Severity), O(O: Occurence), D(D: Detection) is divided into the idle time of the machine, the number of fault data, and the failure rate, respectively. The repair status of machine is quantified through the F-RPN calculated by multiplying S, O, and D. This study conducts a case study of machine in a semiconductor etching process. The process capability index has the disadvantage of not being able to divide the values outside the range. The performance of this index declines when the manufacturing process is under control, hereby introducing F-RPN to evaluate machine status that are difficult to distinguish by process capability index.

Keywords : F-RPN, Repair Status of Machine, Process Capability Index

1. 서 론

제조 산업분야에서 장비의 관리 개선을 통해 생산 우위를 가지는 것은 필수적이다. 반도체 공정은 8대공정(웨이퍼 제조, 산화, 포토, 식각, 박막, 배선, 테스트, 패키지)이라 불리는 다양한 공정들로 구성이 되어 있으며 그 중 식각 공정은 불필요한 부분을 선택적으로 제거해 반도체의 구조를 형성하는 공정이다. 이러한 식각 공정을 잘못하게 되면 회로 절단이나 웨이퍼의 불균형을 초래한다. 식각 공정은 수율과 직접적으로 연관되므로 양산에 있어서 매우 중요하지만 장비에 대한 결함 관리는 장비 제조 업체 중심으로 진행되고 있다. 따라서 양산을 수행하는 업체는 생산성과 안전성 손실을 겪을 수 있으므로 공정 불량률과 장비 결함을 종합적으로 분석할 수 있는 지표를 산출해 식각 공정 장비에 대한 고장 및 생산 효율을 개선할 필요가 있다. 현재 장비 관리 개선을 위해 널리 알려진 방법으로는 센서를 부착해 이상을 탐지하는 진단 및 전문가의 유지보수 등이 있다. 해당 방법들은 모두 장비 결함 데이터 위주로 분석됨으로써 반도체 양산에서 제일 중요한 지표 중 하나인 공정 불량률을 포함하지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 공정 데이터를 통해 장비의 관리 개선을 하고자 고장률을 평가 할 수 있는 공정능력지수와 F-RPN을 도입한다.

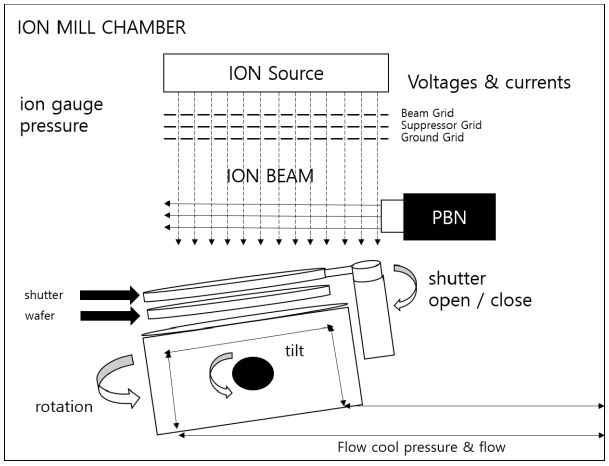
†이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-현장맞춤형 이공계 인재양성 지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 64420-27)
†Corresponding Author : Sung-Woo Kang, Industrial Engineering, INHA UNIVERSITY, 100, inha-ro, Nam-gu, Incheon, E-mail: kangsungwoo@inha.ac.kr
Received August 25, 2021; Revision September 09, 2021; Accepted September 17, 2021

F-RPN은 기준치를 초과하는 특이사항에 따라 장비의 상태를 평가하고 고장률을 개선한다. RPN으로부터 차용한 F-RPN은 S, O, D를 장비 고장 기준으로 재정의하여 생산자 관점을 반영한 평가 기준을 제시한다. 본 논문에서는 장비의 관리 상태를 평가하고 고장률을 개선하는 연구를 제안함으로써 공정의 불량률을 개선하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 식각(Etching)

식각공정은 불필요한 부분을 선택적으로 제거해 반도체의 구조를 형성하는 공정이다. 반도체의 수율 향상을 위해 회로의 선폭 감소가 요구되고 있다. 이에 따라 건식 식각이 주로 사용되고 있는 실정이다. 건식 식각은 반응성 기체, 이온 등을 이용해 특정 부위를 제거하는 방법이다. 건식 식각은 속도가 느리다는 단점이 있지만, 원하는 방향으로 식각이 가능한 이방성 특징을 가지고 있어 미세패턴 생성이 용이 하다는 장점이 있다[1]. 건식 식각은 습식 식각과 다르게 에첸트 대신 외부에서 플라즈마를 인가해 식각을 진행한다. 플라즈마는 물질의 제 4 상태로 많은 수의 자유전자, 이온, 중성의 원자 또는 분자로 구성된 이온화된 기체이다[2]. 본 연구에서 사용한 건식 식각의 한 종류인 Ion Mill Etching의 프로세스는 다음 [Figure 1]과 같다[3].



[Figure 1] Process of Ion Mill Etching

2.2 공정능력지수

공정능력지수(Process Capability Index, PCI)는 공정이 가동 상태일 때, 공정을 통해 생산되는 제품의 품질 특성치를 계산하기 위해 사용되는 지수이다[4]. 제품의 규격상한을 USL, 규격하한의 LSL, 규격의 표준편차를 σ라고 할 때, 계산과정은 다음 <Table 1>과 같다.

<Table 1> Process Capability Index

Condition	Formula
Only upper standard limit	$\frac{USL - Mean}{3\sigma}$
Only lower standard limit	$\frac{Mean - LSL}{3\sigma}$
Both upper, lower standard limit	$\frac{USL - LSL}{6\sigma}$

산출한 공정능력지수를 통해 공정의 능력을 평가하는 기준은 다음 <Table 2>와 같다.

<Table 2> Evaluation for PCI[5]

C_P	Stage	Evaluation
$C_P \geq 1.67$	Level 0	Very Sufficient
$1.67 > C_P \geq 1.33$	Level 1	Sufficient
$1.33 > C_P \geq 1.0$	Level 2	Suitable
$1.0 > C_P \geq 0.67$	Level 3	Poor
$0.67 > C_P$	Level 4	Very Poor

본 연구에서는 F-RPN을 이용한 장비 고장률 개선을 위하여 반도체 식각 공정 데이터를 활용할 것이며, 공정능력지수와의 비교를 통해 F-RPN의 실효성을 검증할 것이다. 반도체 식각 공정 데이터는 규격상하한이 모두 주어진 경우로써 USL, LSL, σ를 고려해 산출된다.

2.3 RPN(Risk Priority Number)

RPN은 기능의 위험도를 상대적으로 평가하는 지표이다. RPN은 심각도(Severity: S), 발생도(Occur ance: O), 검출도(Detection: D)의 곱으로 계산되고 심각도는 고장이 발생할 경우 공정이나 제품에 미치는 정도, 발생도는 고장이 발생할 가능성, 검출도는 고장의 발생원인을 검출할 확률이다[6]. RPN은 일반적으로 10점법을 사용해 계산되며 RPN에서 신속한 조치가 요구되는 조건은 <Table 3>과 같다[7]. RPN 평가방법을 현업에 적용하기 위해서는 관련 제품의 특성에 따라 기준을 구분해야 한다. 관련 연구로 가전용 제품의 특성에 근거해 RPN 평가기준을 재정립한 연구가 있다[8]. 해당 연구는 불량 발생 이전의 S, O, D를 제대로 평가하지 못하는 한계가 있었다. 따라서 본 연구에서는 불량이 장비에 영향을 미치는 것까지

ISSN 1229-6783(Print)
ISSN 2288-1484(Online)

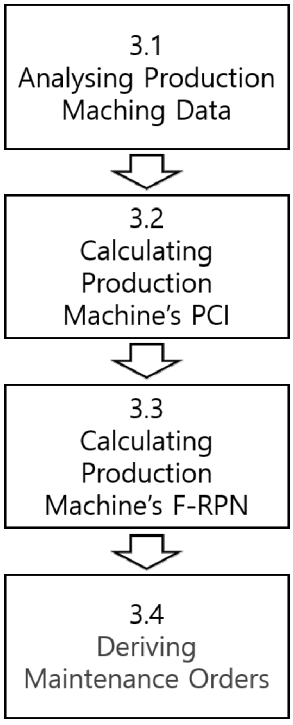
고려한 새로운 S, O, D를 통해 장비의 위험도 계산을 수행할 것이다. 이를 통해 수율 향상에 도움을 주는 위험도 평가 방법을 제안하고자 한다.

<Table 3> Conditions of High Risk

Conditions	Judgment Criteria
Condition1	S >= 8
Condition2	O >= 8
Condition3	D >= 8
Condition4	RPN >= 100

3. 방법론

이번 장에서는 본 논문에서 제안하는 F-RPN을 이용한 장비 고장률 개선 연구의 방법론을 설명한다. 방법론은 [Figure 2]에서와 같이 총 4단계로 구성된다.



[Figure 2] Process of Methodology

3.1 생산 장비 데이터 분석

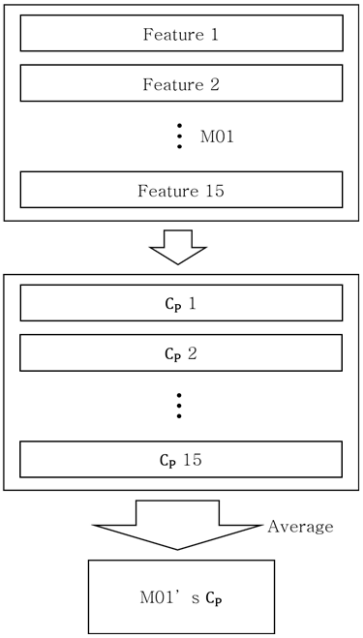
본 연구에서는 반도체 식각 공정의 공정능력 평가를 위한 F-RPN 도입을 위해 2018 PHM Data Challenge에서 제공하는 데이터를 활용한다[9]. 해당 데이터는 10개의 장비에 대해서 동일한 20개의 공정 데이터를 포함한다. 각 공정 데이터는 시계열 센서 데이터를 통해 수집된 압력/전압/전류 등으로 구성된다. 추가로 장비에 발생한 결함을 대상으로, 결함 발생 시간 및 결함의 종류를 포함한 데이터 세트를 활용한다. 결함 데이터세트에 존재하는 결함의 종류(Flowcool Pressure Dropped Below Limit, Flowcool Pressure Too High Check Flowcool Pump, Flowcool leak)는 총 3가지로, 각 결함 발생 수는 다음 <Table 4>와 같다.

<Table 4> Count for Each Type of Fault

Type of Fault	Count
Flowcool Pressure Dropped Below Limit	328
Flowcool Pressure Too High Check Flowcool Pump	128
Flowcool Leak	66

3.2 생산 장비의 공정능력지수

본 연구에서는 F-RPN의 유효성 검증을 위해 공정능력지수를 도입하여 F-RPN과 비교한다. 연구에 사용한 데이터는 양산되는 반도체 제품에 대한 데이터가 아닌 식각 공정에 사용되는 장비의 변수 데이터이므로 규격 상하한에 대한 재정의가 필요하다. 따라서 각 장비의 공정능력지수 산출을 위해 해당 장비의 변수마다 최댓값과 최솟값을 구하고, 이를 각각 USL과 LSL로 규정한다. 이후 <Table 1>의 공식에 따라서 각 변수의 공정능력지수를 계산하고 평균을 구해 장비의 공정능력지수를 산출한다. 공정능력지수의 산출과정은 다음 [Figure 3]과 같다.



[Figure 3] Process for Calculating PCI

3.3 생산 장비의 F-RPN

기존 RPN이 제품 및 시스템을 담당하는 제조업자의 주관적인 평가인 것에 비해 F-RPN은 장비 관리 개선을 위한 객관적인 지표이다. F-RPN에 해당하는 S, O, D는 다음 <Table 5>와 같다.

<Table 5> Definition of S, O, D Index

	S	O	D
RPN	Severity	Occurence	Detection
F-RPN	Idle Time	Fault Data	Failure Rate

<Table 5>에서 볼 수 있는것처럼 F-RPN의 경우 심각도 S는 생산자의 입장을 고려할 때 유휴시간(초)으로 산출된다. O는 고장의 개수이고, D는 고장데이터를 전체 데이터로 나눔으로써 고장률을 산출한다. 본 연구에서 제시하는 F-RPN은 위험도 평가 요소로써 위와 같이 변형한 S, O, D를 사용하고, 각 지표의 곱으로써 계산된다.

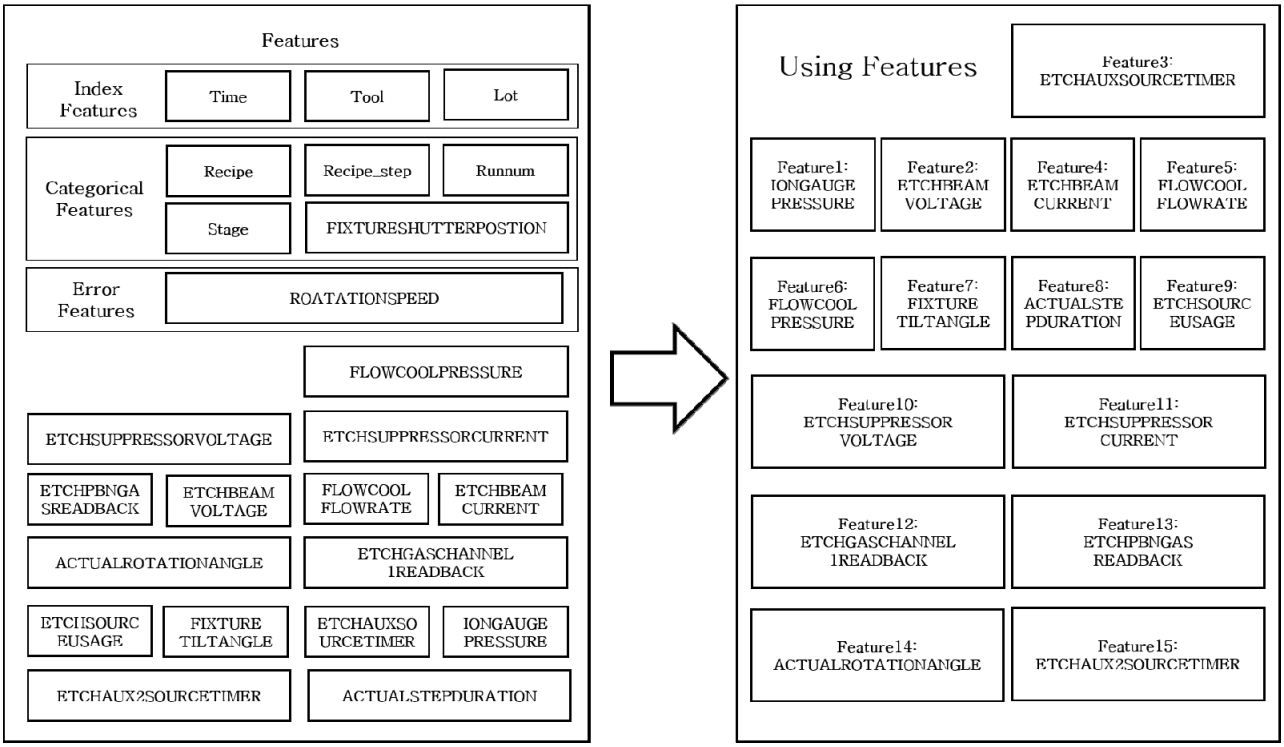
3.4 장비 안정 상태에 따른 관리 순위 도출

F-RPN의 실효성 검증을 위해 공정능력지수를 도입한다. F-RPN은 그 숫자가 클수록 장비에 대한 즉각적인 조치를 요구하며 안정된 공정을 평가하는 공정능력지수는 안정한 상태일수록 큰 값으로 산출된다[10]. 본 연구에서는 공정능력지수 상 안정한 장비들을 F-RPN으로 추가 검증해 식각 장비 데이터를 비교한다. 안정된 장비에서도 공정능력지수의 세분화가 가능하다면 F-RPN은 유지보수 시급성과 관리파악을 할 수 있는 지표라고 해석할 수 있다.

4. 실험 및 결과 해석

4.1 생산 장비 데이터 분석

각 장비에 대한 공정능력 평가를 위한 F-RPN의 도입을 위해 본 연구에서는 중복된 장비를 제외한 데이터만을 사용하여 F-RPN을 산출한다. 실험에 사용되는 데이터 세트는 총 10개이다. 또한, F-RPN 산출에 있어 사용하지 않는 범주형 변수(Stage, Runnum, Recipe, Recipe_step, FIXTURESHUTTERPOST ION) 및 인덱스로 쓰이는 변수(Time, Tool, Lot)들을 제외하였다. 추가로 ROTATIONSPEED 변수는 데이터에 오류가 있어 F-RPN 산출 및 C_P 산출에는 사용하지 않아서. 총 15개의 변수만을 F-RPN 산출에 사용하였다. 사용한 변수의 종류는 다음 [Figure 4]와 같다.



[Figure 4] Feature Extraction for the Experiment

ISSN 1229 - 6783(Print)
ISSN 2288 - 1484(Online)

4.2 생산 장비의 공정능력지수

3.2의 방법에 따라서 본 연구에서 사용한 장비의 공정능력지수를 산출하였다. M05 장비의 Feature 1([Figure 4] 참조)을 예시로 들면, USL, LSL, Sigma는 각각 21.87, - 1.91, 1.02이다. 식1을 통해 얻어진 Feature 1의 공정능력지수는 3.89이다.

$$\frac{USL - LSL}{6\sigma} = \frac{21.87 - (-1.78)}{6 * 1.02} \qquad (1)$$

이처럼 사용한 15개의 Feature([Figure 4] 참조) 각각의 공정능력지수를 산출한 뒤, 평균을 낸 결과는 2.6464이다. 산출한 각 장비의 공정능력지수는 다음 <Table 6>과 같다.

<Table 6> Result of Machine's C_P

Machine	C_P
M01	2.6360
M02	2.4370
M03	2.6908
M04	2.4959
M05	2.6464
M06	2.6478
M07	2.5099
M08	2.3705
M09	2.4090
M10	2.7511

4.3 생산 장비의 F - RPN

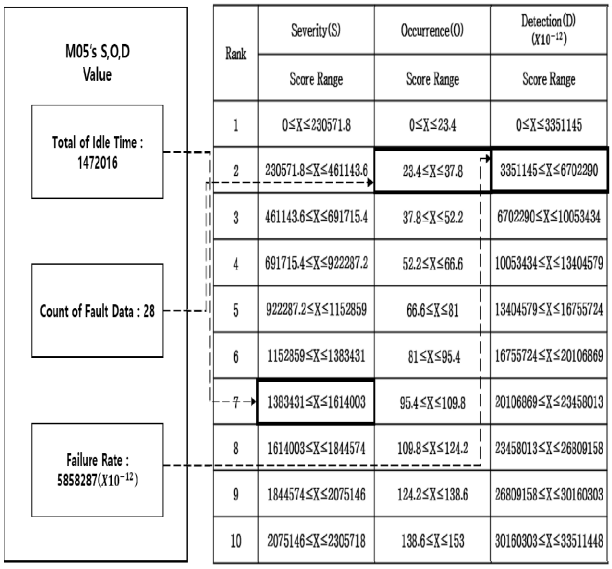
3.3절의 S, O, D 산출을 위해서는 결함에 따른 장비의 유휴시간(초)을 계산해야 한다. 장비의 유휴시간(초)은 다음 Algorithm 1을 통해 계산된다. 결함이 발생한 이후에 장비가 가동된 시각과 그 바로 이전 시각의 차이를 통해 유휴시간(초)을 계산한다.

Algorithm 1 : Idle Time Calculation

Input: FD: Fault Data of each Machine
TD: Total Data of each Machine
Output: IT: Idle Time(sec)

Procedure:
for time in range(FD):
1. tmp1=first TD[time] over FD[time]
2. tmp2=TD[time] previous tmp
3. IT = tmp1 - tmp2

이 유휴시간(초)의 최댓값과 최솟값을 차이를 10개의 급간으로 나누어 각 결함의 심각도 S를 산출하고, 이 값의 평균을 통해 장비의 유휴시간(초) S를 구하게 된다. O와 D는 각각 고장의 개수, 고장데이터를 전체 데이터로 나누어 산출한 고장률의 최댓값과 최솟값의 차이를 10개의 급간으로 나누어 계산한다. 최종적인 F - RPN은 앞서 계산한 S, O, D의 곱으로 구한다. M05 장비를 예시로, F - RPN을 산출하는 과정은 다음 [Figure 5]와 같다. 유휴시간(초)의 총 합이 1,472,016초이고, 이는 7등급에 해당한다. O와 D도 마찬가지의 방법으로 모두 2등급에 해당하였고, F - RPN은 28이 계산되었다. 이처럼 산출한 장비 10개의 S, O, D 및 F - RPN은 다음 <Table 7>과 같다.



[Figure 5] Process of Calculating F - RPN

<Table 7> Result of Machine's F - RPN

	S	O	D	F - RPN
M01	1	1	6	6
M02	2	1	2	4
M03	5	6	9	270
M04	1	1	1	1
M05	7	2	2	28
M06	2	1	2	4
M07	3	2	2	12
M08	10	8	10	800
M09	9	10	10	900
M10	1	2	4	8

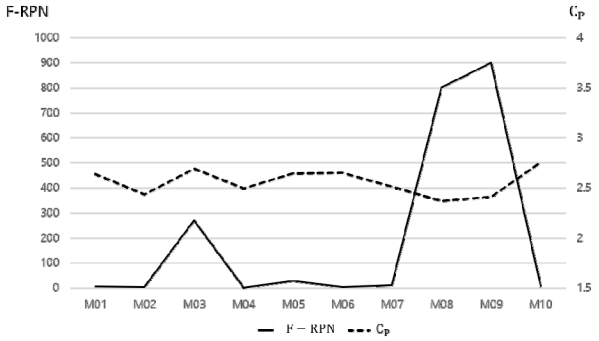
4.4 장비 안정 상태에 따른 관리 순위 도출

장비별 F - RPN과 C_P 값은 다음 <Table 8>과 같고,

[Figure 6]에서 볼 수 있듯이 C_P는 M01~M10 장비에서 전반적으로 양호하지만(C_P가 1.67이상, <Table 2> 참조) F - RPN은 M03, M08, M09 장비에서 높은 수치를 나타낸다. 위 그래프에서 볼 수 있듯이 공정능력지수로 안정된 장비라고 검출되더라도 F - RPN의 결과는 상이할 수 있다. 따라서 3.4절에 의거하여 F - RPN을 통해 기존 공정능력지수를 세분화하였으므로 장비 관리 측면에서 F - RPN은 유효한 지표로 해석되며 M03, M08, M09는 고장률 개선이 요구되는 장비일 수 있다. 반도체 제조 공정에서 해당 장비의 문제점을 파악해 그에 상응하는 조치를 취한다면 반도체 식각공정 장비의 고장률 개선에 도움이 될 것으로 보인다.

<Table 8> Rank for Machine's C_P and F - RPN

Machine	C_P	F - RPN
M01	2.6360	6
M02	2.4370	4
M03	2.6908	270
M04	2.4959	1
M05	2.6464	28
M06	2.6478	4
M07	2.5099	12
M08	2.3705	800
M09	2.4090	900
M10	2.7511	8



[Figure 6] Correlation of F - RPN and C_P

5. 결 론

본 논문은 장비의 안정 상태를 F - RPN으로 비교함으로써 장비 고장률을 향상시키는 연구를 제안한다. F - RPN의 산출 및 검증을 위해서 반도체 8대 공정 중 하나인 식각 공정을 다루는 2018 PHM Data Challenge의 데이터를 활용하였다. 해당 데이터 속 범주형 변수 및 이상 변수 들을 제외한 변수들을 사용해 데이터프레임을 구성하고, 장비의 유휴시간(초)을 통해 장비의 심각도 S를 산출한다. 유휴시간(초)은 결함이 발생한 이후에 장비가 가동된 시각과 그 바로 이전 시각의 차이를 통해 계산된다. O와 D는 각각 식각 공정 장비의 고장횟수와 시계열 데이터로 구성된 식각 공정 장비의 고장률이다. 이처럼 기존의 RPN 기반 S, O, D를 변형한 지표를 통해 계산한 값을 10개의 급간으로 나누고 서로 곱해줌으로써 F - RPN을 계산하였다. RPN과 달리 보다 객관적인 지표의 도입을 통해 효율적인 장비 고장률 개선을 가능하게 할 것으로 보인다. 추가로 F - RPN의 실효성을 검증하기 위해 공정능력지수를 도입했다. 본 연구에서는 식각 장비 데이터에서 각 장비(M01~M10)의 공정능력지수를 산출했다. 공정능력지수의 경우 모든 식각 장비는 1.67을 초과해 가장 안정된 상태로 평가되지만 보다 높은 생산성을 위해 장비의 관리 상태를 세분화할 필요가 있다. 따라서 값이 클수록 즉각적인 장비의 조치를 요구하는 F - RPN과의 대조를 통해 M03, M08, M09 장비의 경우 다른 장비에 비해 100이상의 큰 차이를 보이므로, 제조 공정에서 유지보수 및 장비 고장률에 대한 주의가 필요한 장비라는 결론을 얻었다. 따라서 F - RPN은 공정능력지수를 보완하는 지표로써 장비 고장률 개선을 위한 기준으로 해석될 수 있다는 점에서 의의를 가진다. 본 연구에서는 10개의 식각 공정 장비에 대한 Case Study를 진행하였지만, 현업에서 사용되는 많은 장비로부터 획득한 실제 데이터로 실험을 진행한다면 공정능력지수를 보완하는 F - RPN 지표로 보다 정확한 산출값을 얻을 수 있을 것으로 보인다. 또한 유사한 F - RPN의 수치를 나타내는 두 장비에 있어서, 품질 및 납기 우선순위에 따라 장비 개선의 시급성이 서로 상이할 수 있다. 해당 문제의 해결책으로 품질과 납기의 Trade - off를 고려해 시급성을 산출하는 지표에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

6. References

[1] C. S. Park, C. W. Hur(2009), "The wet and dry etching process of thin film transistor." Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering, 13(7):1393 - 1398.

[2] G. C. Jeong, S. G. Roh(2013), "Characteristic experiment of SD plasma actuator for reducing air resistance of highspeed trains." The Korean Society For Railway, 1086 - 1091.

[3] PHM Society(2018), https://phmsociety.org/confer

ence/annual - conference - of - the - phm - society/annual - conference - of - the - prognostics - and - health - management - society - 2018 - b/phm - data - challenge - 6/

[4] I. J. Jeong(2017), “An interactive process capability - based approach to multi - response surface optimization.” J Korean Soc Qual Manag., 45(2):191 - 208.

[5] N. Abbes(2018), “Application of six sigma in clothing SMEs: A case study.” IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 460, 18th World Textile Conference(AUTEX 2018) 20–22 June 2018, Istanbul, Turkey.

[6] L. Ouyang, W. Zheng, Y. Zhu, X. Zhou(2019), “An interval probability - based FMEA model for risk assessment.” The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 112:1409 - 1436.

[7] I. H. Yoo, W. K. Kang(2019), “CRPN (Customer - oriented Risk Priority Number): RPN evaluation method based on customer opinion through SNS opinion mining.” J Korean Soc Qual Manag., 47(1): 97 - 108.

[8] S. Y. Kim, W. Y. Yun(2007), “Reestablishment of RPN evaluation method in FMEA procedure for motors in household appliances.” J Korean Soc Qual Manag., 35(1):1 - 9.

[9] S. K. Seo(2013), “Lifetime performance index for Weibull distribution: Estimation and applications.” Journal of Applied Reliability, 13(3):191 - 206.

저자 소개

이 형 근
현재 인하대학교 산업경영공학과 학사 취득 후, 인하대학교 대학원 산업경영공학과 석사 과정 중
관심 분야 : 빅데이터를 이용한 고장진단, 신뢰성 관리

홍 용 민
현재 인하대학교 산업경영공학과 학사 과정 중
관심 분야 : 데이터 사이언스, 머신러닝

강 성 우
인하대학교 산업경영공학과에서 학사를, 펜실베니아 주립 대학 산업제조공학과에서 석사와 박사를 취득 현재 인하대학교 산업경영공학과 조교수로 재직 중
관심 분야 : 빅데이터(3D 이미지, 텍스트 데이터) 프로세싱을 기반한 제품 설계, 공학 설계, 생산 장비 예측 진단 및 관리이다.