

사출성형기의 고장모드 영향분석(FMEA)을 활용한 위험 우선순위

신운철[†] · 채종민^{*}

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원 · *삼성디스플레이 환경안전팀
(2015. 1. 29. 접수 / 2015. 9. 2. 수정 / 2015. 9. 8. 채택)

Risk Priority Number using FMEA by the Plastic Moulding Machine

Woonchul Shin[†] · Jongmin Chae^{*}

Department of Safety Research, Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA

^{*}Department of Envirment & Safety, Samsung Display

(Received January 29, 2015 / Revised September 2, 2015 / Accepted September 8, 2015)

Abstract : Plastic injection moulding machine is widely used for many industrial field. It is classified into mandatory safety certification machinery in Industrial Safety and Health Act because of its high hazard. In order to prevent industrial accidents by plastic injection moulding machine, it is necessary for designer to identify hazardous factors and assess the failure modes to mitigate them. This study tabulates the failure modes of main parts of plastic injection moulding machine and how their failure has affect on the machine being considered. Failure Mode & Effect Analysis(FMEA) method has been used to assess the hazard on plastic injection moulding machine. Risk and risk priority number(RPN) has been calculated in order to estimate the hazard of failures using severity, probability and detection. Accidents caused by plastic injection moulding machine is compared with the RPN which was estimated by main regions such as injection unit, clamping unit, hydraulic and system units to find out the most dangerous region. As the results, the order of RPN is injection unit, clamping unit, hydraulic unit and system units. Barrel is the most dangerous part in the plastic injection moulding machine.
Key Words : FMEA, plastic injection moulding machine, risk priority number, severity, probability, detection.

1. 서론

사출성형기는 열(熱)가소성의 플라스틱 원료를 가열 용융시킨 후 노즐을 통하여 높은 압력으로 금형 안에 밀어 넣어 원하는 형상으로 성형하는 기계를 말한다.

사출성형기는 휴대전화기, 장난감, 각종 전자제품 등 다양한 제품생산에 폭넓게 사용되고 있는 기계중 하나이지만 금형의 개폐동작 중에 신체 일부의 끼임, 고온부 접촉에 의한 화상, 통전부위 접촉에 따른 감전 등 재해발생의 위험이 높은 기계이다. 이러한 위험성 때문에 산업안전보건법에서는 사출성형기를 안전인증 대상으로 지정하여 관리하고 있다.

최근 산업용 기계류에 대한 제품의 내구성과 안전성을 요구하는 소비자의 요구가 증대됨에 따라 신뢰성 개념을 도입한 제품의 설계 및 위험성 평가가 보편화 되고 있는 추세이다.

이러한 추세를 반영하여 신뢰성과 안전성을 높이기

위하여 많은 분야에서 고장모드영향분석(Failure Mode & Effect Analysis : FMEA)을 반영한 위험성 평가를 실시하고 있다. FMEA는 시스템의 설계단계에서 잠재적인 위험요인을 도출하여 그 발생원인과 고장모드가 시스템의 성능에 미치는 영향을 체계적으로 분석하는 기법으로서 다양한 분야에 폭넓게 적용할 수 있다.

강명석 등¹⁾은 한국형 핵융합 설비에 이 기법을 적용하여 위험성을 평가하였고, Levent Kurt 등²⁾은 터키의 유가공제품 생산 공정의 안전성 향상을 위하여 이 기법을 적용하였으며, Kadir Cicek 등³⁾은 이 기법을 이용하여 선박의 엔진 크랭크 실에 대한 폭발 위험성에 대한 평가를 실시하였다. 또한, 심규형 등⁴⁾은 사출 성형 기과 유사한 타워크레인에 대해 이 기법을 적용하였다.

국내의 사출성형기 제조회사에서 이 이러한 추세를 반영하여 설계·제조단계에서 FMEA를 이용한 위험성 평가를 시도해 왔었다. 하지만, 국내의 사출성형기 제조회사를 대상으로 AS 데이터에 기반하여 위험성을

[†] Corresponding Author : Woonchul Shin, Tel : +82-52-7030-850, E-mail : s88119@kosha.net

Department of Safety Research, Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA, 400, Jongga-ro Jung-gu, Ulsan 44429, Korea

분석한 연구는 수행된 적이 없었다.

사출성형기는 금형을 개폐하는 형체부, 성형재료를 가소(용융)화하는 사출부, 제어를 위한 시스템 제어부, 성형 구동을 위한 유압부, 프레임(Frame)부로 구분할 수 있고 각 부분은 다시 수많은 기계 및 전기·전자부품으로 구성된다.

FMEA을 이용하여 복잡한 기계시스템의 위험성성을 평가, 예측하기 위해서는 1차적으로는 기존의 데이터 베이스를 활용할 수 있지만 자료가 없는 부품들은 신뢰성 시험이나 현장의 고장 이력 데이터 등을 이용하여 고장률을 예측⁵⁾ 하여야 한다. 하지만, 국내 제조업체의 경우 사출성형기 제조에 사용되는 사출실린더, 가열실린더, 스크루 회전 장치, 형체 실린더 등 주요부품은 물론 위치감지센서, 유압밸브, 온도센서 등에 관한 고장률 자료를 보유하고 있지 않은 실정이다.

이 연구에서는 국내의 사출성형기 제조업체로부터 수집한 고장/수리 데이터 714건의 자료를 바탕으로 사출성형기에 고장이 발생한 경우 그것이 사출성형기의 성능 및 안전성에 미치는 영향을 FMEA를 활용하여 분석하고자 한다. 이를 바탕으로 사출성형기의 제조·설계단계에서 신뢰성 및 안전성을 향상시키기 위해 많은 관심을 기울여야 할 부위가 어느 곳인지에 대한 정보를 설계자에게 제공하고자 한다.

2. 고장모드 영향분석

FMEA은 기계 또는 시스템의 잠재적인 고장모드 또는 위험요인을 파악하여 그에 따라 초래되는 영향을 정성적으로 분석하는 체계적 방법이다. 이 방법은 시스템에 영향을 미치는 전체 요소의 고장을 형태별로 분석하여 시스템 또는 서브시스템이 가동 중에 기기나 부품의 고장에 의해서 재해나 사고를 일으킬 위험이 있는가를 해석함으로써 위험도가 높은 부분에 조치를 취하도록 하기 때문에 위험성 분석기법으로 널리 사용되고 있다.

FMEA는 1950년대 미국 육군에서 군사장비의 기능 이상에 의해 초래되는 문제점을 연구하기 위하여 개발된 정성적 신뢰성 해석방법이다⁶⁾. 이후 1970년대에 우주항공, 자동차 제조분야에 적용되기 시작했으며, 오늘날에는 기계 및 전기·전자부품의 설계·제조분야까지 적용되고 있다.

FMEA에서는 고장모드의 발생빈도(Occurrence)인 가능성, 고장이 초래하는 피해의 심각도(Severity)인 중대성, 검출도(Detection)를 등급별로 구분하여 점수를 부여한 후 위험우선순위(Risk Priority Number ; RPN)를

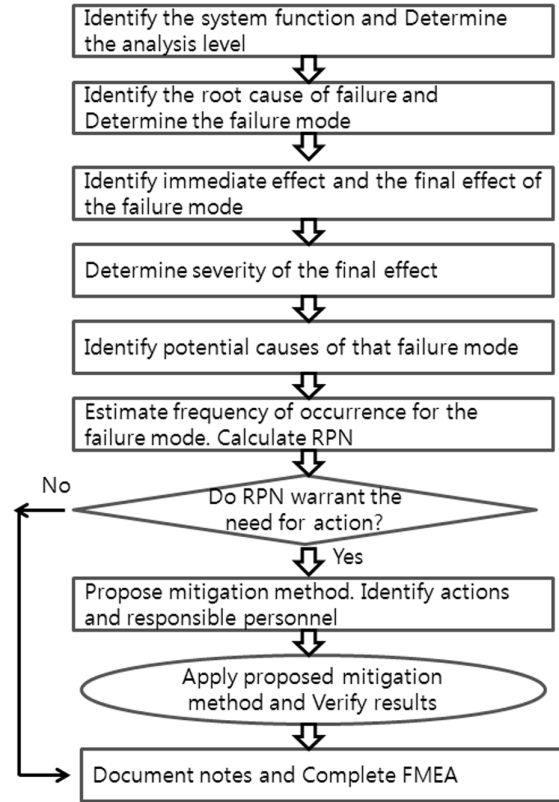


Fig. 1. Analysis flowchart of FMEA.

도출하게 된다. 이렇게 도출된 RPN 값에 따라 위험성의 수준을 판단하게 된다.

FMEA는 크게 고장모드 선정, 고장원인 분석, 고장 영향 평가 및 각 고장모드별 중요도 계산의 4단계⁷⁾로 구분할 수 있다.

기계 설비에 있어서 일반적으로 시스템(system)은 요구되는 기능을 충족시키기 위해 몇 개의 서브시스템(sub-system)의 조합으로 구성되고, 또 이 sub-system은 다시 조립품(assembly), 부품(part)의 조합으로 구성된다. 이 연구에서는 사출성형기를 주요한 5개의 부위(unit)로 구분한 후 각 부위별로 주요 부품 군에 대하여 분석을 실시하였다.

FMEA의 실행순서는 Fig. 1과 같다.

3. 고장모드 영향분석의 적용 및 평가

사출성형기는 주요부인 형체부(Clamping unit), 사출부(Injection unit), 시스템부, 유압장치 등의 서브시스템으로 구분하고, 이 서브시스템은 각각의 조립품, 서브어셈블리(Sub-assembly), 부품으로 구분할 수 있다. 즉, 사출성형기는 온도, 압력 등을 감시하는 각종 센서, 유압밸브, 압력계, 전기부품 등 수 많은 부품이 연계되어

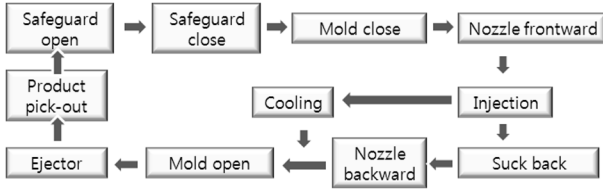


Fig. 2. Semi-auto operating cycle of machine.

요구되는 기능을 충족시키고 있으며 분석대상인 사출성형기의 작동 흐름도는 Fig. 2와 같다.

이 연구에서는 고장모드영향 분석에서 일반적으로 많이 이용되는 EN 60812:2006⁸⁾에 제시된 방법을 이용하였다.

이 연구에서는 사출성형기의 고장빈도에 대한 정량적 분석을 위하여 국내 사출성형기 제조업체를 방문하여 2011년도에 발생한 유압식 사출성형기 170톤급의 고장수리 자료 714건을 수집하였고, 이를 Table 1과 같이 5개의 서브시스템과 26개의 주요 부품 군으로 분류하여 분석을 실시하였으며, 인적 요소는 사고시의 상황이나 요소가 다변하고, 다양하기 때문에 이 연구에서는 인적 오류에 대해서는 고려하지 않았다.

26개의 부품 군으로 분류한 후에는 사출성형기 제조사업장에서 수집한 고장수리 자료를 분석하여 고장모드를 기계적 고장, 전기적 고장, 재료 및 구조적 불량 등 16개의 모드로 Table 2와 같이 구분하였다.

분석과정에서 시스템의 위험성을 정량적으로 표현하고 점검 및 보수에 대한 중요성과 우선순위를 부여

Table 1. Sub-systems and main part of plastic injection moulding machine

Sub-sys.	Main parts	Sub-sys.	Main parts
Injection unit	Safety device, Safety guard, Nozzle, Screw, Screw driver, Barrel, Injection cylinder, Nozzle touch cylinder	Frame unit	Frame
System unit	Operator system, Controller unit	Clamping unit	Safety cover, Stationary-platen, Moving platen, Tie bar, Mold adjustment part, Toggle link, Safety device, Clamp cylinder, Ejector cylinder
Hydraulic unit	Servo motor, Hydraulic hose, Oil tank, Hydraulic pump, Hydraulic parts, including valves		

Table 2. Classification of failure modes

Mechanic	Electric	Material
Mechanical fracture	Poor insulation	Material defect
Elimination	Electric disorder	Fatigue
Degradation	Output error	Poor Structure
Stuck on	Software error	
Malfunction		
Assembly trouble		
Leak		
Adjustment fail		
High noise		

하기 위하여 RPN 부여하였다. 이를 위해서 각각의 부품 군에 대하여 제조업체로부터 수집한 고장발생 자료에 근거하여 부품 군별 고장발생 가능성과 중대성에 의한 위험성(Risk)를 평가한 후, 검출도를 고려한 RPN 값을 계산하였다.

가능성, 중대성, 검출도는 각각 독립된 변수로서 통상 1부터 10까지의 단계로 분류하여 사용하지만, 결과에 영향을 크게 미치지 않는다면 분석대상의 특성을 감안하여 등급의 정도를 변경하여 사용할 수 있다. 이 연구에서는 각 범주를 다섯 등급으로 분류하여 각 등급별로 점수를 부여하였다.

중대성은 고장이 기계시스템에 미치는 최종 영향의 정도를 등급별로 분류하여 정량화 시킨 것으로서 할당된 점수가 높으면 Table 3과 같이 시스템에 미치는 영향이 크다는 것을 의미한다.

Table 3. Severity of failure modes

Severity	Criteria
5	Very High : Item/system is inoperable and loss of primary function
4	High : Item/system is operable but at a reduced level of performance. Loss of some control functions and/or data acquisition.
3	Low : Item/system is operable but a reduced level of performance
2	Minor : Item/system is functional & performing but there is(are) loss(es) of some cosmetic function(s).
1	No effect : item/system is fully functional.

가능성은 해당 고장이 발생할 빈도를 의미한다. 이 연구에서는 사출성형기 제조업체에서 직접 수집한 고장수리 자료를 바탕으로 자료의 최대치를 감안하여 고장발생 횟수가 35회 이상인 경우 5등급, 25회 이상 35회 미만인 경우는 4등급, 15회 이상 25회 미만인 경우 3등급, 5회 이상 15회 미만은 2등급, 5회 미만은 1등급으로 Table 4와 같이 구분하였다.

Table 4. Probability of occurrence at failure modes

Proba-bility	Criteria	Failures
5	Very High: Failures must be addressed	more than 35 cases
4	High: Failures cause frequent downtime	over than 25 less than 35 cases
3	Moderate: Failures cause some downtime	over 15 than less than 25 cases
2	Low: Failures cause very little downtime	over 5 than less than 15 cases
1	Remote: Downtime due to failure is unlikely	less than 5 cases

Table 5. Evaluation criteria of detection at failure modes

Detection	Criteria
5	Very High Uncertainty :There is no design control or the design control will not/or cannot detect a root cause/mechanism & subsequent failure mode.
4	High Uncertainty : There is only a remote chance that the design control will detect a root cause/mechanism & subsequent failure mode.
3	Low Uncertainty : There is a good chance that the design control will detect a root cause/mechanism & subsequent failure mode.
2	Very Low Uncertainty : The design control will almost always detect a root cause/mechanism & subsequent failure mode.
1	No Uncertainty : The design control will always detect a root cause/mechanism & subsequent failure mode.

검출도는 고장이 발생하기 전 그 원인을 발견할 수 있는 가능성의 정도를 의미하는 것⁹⁾으로 검출 가능성이 낮은 경우에 높은 등급을 부여하고 검출이 쉬운 경우에는 낮은 등급을 Table 5와 같이 부여하였다.

3.1. 위험성(Risk) 평가

고장모드 영향분석을 이용한 위험성 평가에서는 고장모드의 가능성과 그 영향을 고려한 분석기법이 사용되기도 한다. 위험성 평가에서는 고장발생이 시스템에 미치는 영향에 주안점을 두고 분석하게 되는데 계산의 편리를 위하여 행렬을 사용하기도 한다. 이를 리스크 행렬(Risk matrix)이라고 한다.

위험성은 고장모드의 발생빈도와 그 고장이 시스템에 미치는 영향을 평가하는 것으로 (1)식과 같이 계산하며, 그 분류 기준은 Table 6과 같다.

$$\text{위험성} = \text{가능성} \times \text{중대성} \dots\dots\dots (1)$$

리스크의 수용(acceptability)여부는 주관적 판단에 의해서 이루어지는 경우가 많지만, 대부분의 경우 전문

Table 6. Risk matrix

S. \ P.	1	2	3	4	5
1	Ne	Ne	To	To	Un
2	Ne	To	Un	Un	In
3	To	Un	Un	In	In
4	To	Un	In	In	In
5	Un	In	In	In	In

※ P : Probability, S : Severity, Ne :Negligible, To : Tolerable, Un : Undesirable, In : Intolerable

가의 경험과 경제적 측면을 고려하여 해당 리스크를 수용할 것인지를 결정하게 된다. 한정된 시간과 경제적 여건을 고려한다면 가능성이 낮고, 중대성이 낮은 사건에 대해서는 큰 문제가 되지 않는다. 반면 가능성은 낮지만 그에 따라 초래되는 피해의 크기가 심각한 경우, 또는 가능성이 높고 피해의 규모도 큰 경우는 이를 예방하기 위해 많은 관심을 기울여야 할 것이다¹⁰⁾.

기계시스템의 안전성은 이러한 유형의 재해 또는 고장의 발생을 구별해 내고 이를 예방하기 위해 최대한 노력함으로써 확보할 수 있다.

사출성형기의 개별 부품의 경우 해당 부품에서 발생할 수 있는 여러 가지의 고장모드를 고려하여 각각의 고장모드가 발생할 가능성과 중대성을 곱하여 얻은 각각의 중요도를 합산하여 산출하였고, 그 산출 결과가 Table 7과 같이 나타났다.

고장이 많이 발생하는 부위를 순서별로 나타내면 System unit 222건, Injection unit 190건, Clamping unit 160건, Hydraulic unit 140건, Frame unit 2건의 순이었고, 고장이 가장 많이 발생하는 부품은 Fig. 3에서 사출성형기의 조작에 사용되는 터치판넬로서 전체 고장의 약 22.6%를 점유하는 것으로 나타났다.

Table 7. Criticality of machine parts

Failure part	Failure mode	Probability (No.)	Severity	Risk	Detection	RPN
Injection unit		(190)		194		380
Barrel		(38)		41		91
	Mechanical fracture	1	4	4	2	8
	Malfunction	2	4	8	1	8
	Leak	1	2	2	3	6
	Degradation	2	3	6	4	24
	Material defect	1	4	4	4	16
	Electric disorder	1	4	4	1	4
	Assembly trouble	1	3	3	3	9
	Adjustment fail	2	3	6	2	12
	Elimination	1	4	4	1	4

Nozzle	(11)		20	33
Nozzle touch cylinder	(52)		29	66
Injection Cylinder	(48)		39	76
Screw	(12)		21	41
Screw driver	(25)		29	53
Safety guard	(3)		10	15
Safety device	(1)		5	5
System unit	(222)		103	142
Control box	(61)		29	53
Touch panel	(161)		74	89
Hydraulic unit	(140)		119	231
Valve etc.	(50)		35	57
Servo MTR	(5)		5	5
Oil Tank	(16)		21	43
Hydraulic Motor	(26)		21	37
Hydraulic Pump	(35)		28	51
Hydraulic hose	(8)		9	24
Frame unit	(2)		8	14
Frame	(2)		8	14
Clamping unit	(160)		183	322
Fixed die platen	(6)		13	30
Safety cover	(5)		15	20
Safety device	(24)		38	50
Ejector cylinder	(36)		22	44
Moving die platen	(18)		20	36
Tie bar	(9)		17	44
Toggle link	(19)		25	41
Clamping cylinder	(36)		23	39
Mold adjuster	(7)		10	18

반면, 위험성은 평가 결과 터치판넬, 바렐, 사출 실린더 등의 순서로 Fig. 4와 같이 나타났다.

3.2. 위험우선순위 평가

사출성형기의 주요 부품별 위험우선순위는 (1)식에 검출도를 곱하여 (2)식과 같이 계산하였다. 검출도는 부품에 고장이 발생하여 시스템 또는 근로자에게 영향을 미치기 전에 발견함으로써 필요한 조치를 취할 수 있는 가능성의 정도로서 검출이 어려울수록 높은 점수를 부여하였다.

$$RPN = \text{위험성} \times \text{검출도} \dots\dots\dots (2)$$

위험우선순위는 값이 클수록 해당 부품의 고장으로 인해 사출성형기에 안전성 또는 근로자에게 미치는 영향이 증가한다는 것을 의미하며, 각 부품에 대하여 산출된 RPN 값은 Fig. 5와 같이 나타났다.

일반적으로 유사하게 적용되는 파레토의 원리를 적용하면 위험우선순위가 높은 상위 20%에 해당하는 부품은 바렐, 터치판넬, 사출실린더, 노즐터치 실린더, 유압밸브류로 나타나고 있어 신뢰성이 높은 부품을 선정하여 설치하고, 작업 중 많은 주의를 기울여야 한다.

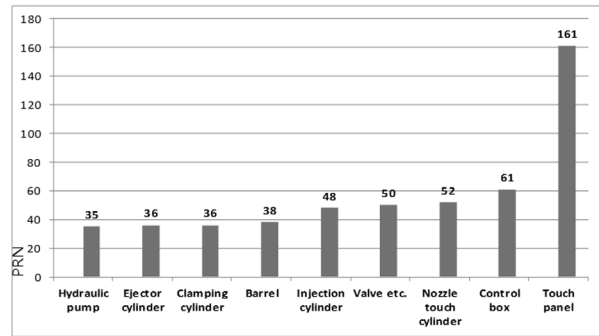


Fig. 3. Number of failure by major parts.

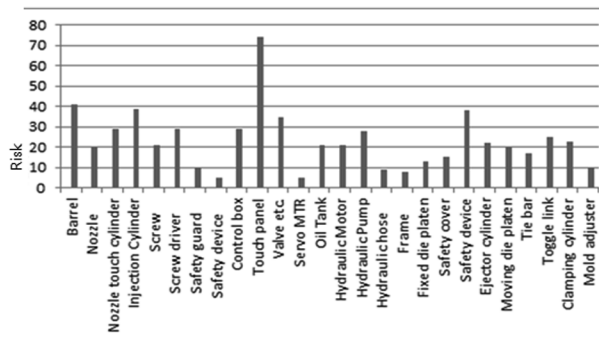


Fig. 4. List of risk.

3.3. 재해발생 부위 분석

2008년부터 2012년까지 근로복지공단에 접수된 산재요양신청서 및 산업재해 조사 자료에 의하면 사출성형기에 의해 발생한 재해는 총 917건으로 나타났으며 이를 재해발생 부위별로 분류하여 분석하였다. 그 결과 재해가 가장 많이 발생하는 부위는 형체부로 Table 8과 같이 나타났다. 이는 FMEA 분석에 따라 사출성형기의 부위별 RPN 값을 합산하였을 때 사출부의 값이 Table 6과 같이 가장 크게 나타난 것과 대조된다. 이는 바렐, 노즐터치 실린더, 스쿠로 회전 장치 등 사출부의 주요 부품 군이 고온 환경에 노출된 상태에서 가동되기 때문에 고장이 빈번하게 발생하고 이에 따라 RPN

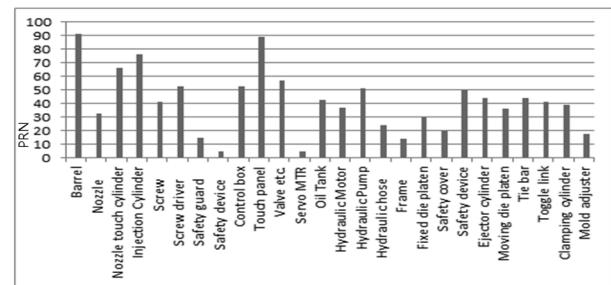


Fig. 5. RPN of FMEA.

Table 8. Accident analysis from 2008 to 2012

	Total	2008	2009	2010	2011	2012
Total	917	243	166	141	202	165
Clamping	700	197	129	113	143	118
Injection	194	37	35	27	50	45
Hydraulic	12	5	2		5	
System	6	1		1	2	2
Not classified	4	3			1	

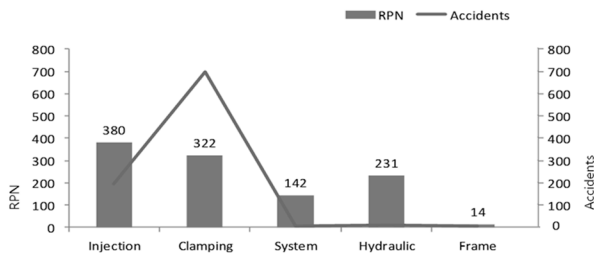


Fig. 6. Comparison of RPN and accidents.

값이 높게 나타나는 것이라 판단된다.

4. 결론

이 연구는 사출성형기에 의한 재해를 예방하기 위하여 위험성 평가 기법의 하나인 FMEA를 이용하여 분석을 실시하였으며 RPN을 도출한 결과는 다음과 같다.

첫째, 사출성형기의 위험우선순위는 사출부가 380으로서 위험순위가 322로 나타난 형체부에 비하여 높게 나타났다. 이는 사출과정에서 여러 부품이 고열 상황에서 빈번한 동작에 의해 사출되기 때문으로 고열에 대한 고장을 감소시키기 위한 성능 향상의 신뢰성 있는 설계가 필요하다.

둘째, 사출성형기에서 RPN 값이 가장 큰 부품은 바렐로 나타났다. 이는 고온의 히터를 사용, 용융물 취급 및 잦은 왕복운동에 따른 기능저하 등이 근본원인으로 작용하기 때문이다. 또한, 고장이 가장 많이 발생하는 부품군은 터치판넬로 나타났다. 이는 터치판넬의 내부에는 많은 전자부품 및 소프트웨어를 사용하기 때문에 사출성형기 구동에 따른 진동발생, 시스템의 불안정 등이 고장발생의 근본원인으로 작용하기 때문이다.

셋째, 재해발생 부위별 통계자료와 비교한 결과 재해분석 결과 위험성이 가장 높은 부위는 형체부, 사출부, 유압부, 시스템부 순으로 나타났으나 RPN값에 근거하였을 때 위험성이 높은 부위는 사출부, 형체부, 유압부, 시스템부, 프레임부의 순으로 나타났다.

넷째, 재해 예방측면에서 본다면 재해가 가장 많이 발생하고, RPN 값도 높게 나타난 형체부의 위험요소에 대하여 더 많은 주의를 기울일 필요가 있다.

References

- 1) M. -s. Kang et al., "Design Failure Mode and Effect Analysis for Korean Fusion DEMO Plant", Fusion Engineering and Design, Vol. 87, pp. 412-417, 2012.
- 2) L. Kurt et al., "Failure Mode and Effect Analysis for Dairy Product Manufacturing: Practical Safety Improvement Action Plan with Cases from Turkey, Safety Science, Vol. 55, pp. 195-205, 2013.
- 3) K. Cicek et al., "Application of Failure Modes and Effects Analysis to Main Engine Crankcase Explosion Failure On-board Ship", Safety Science, Vol. 51, pp. 6-10, 2013
- 4) K. -h. Shim and D. -h. Rie, "A Quantitative Risk Analysis of Related to Tower Crane using the Fmea", Journal of the Korean Society of Safety, Vol.25, No.6, pp. 34-39, 2010.
- 5) B. -s. Kim et al., "Reliability Assessment of Machine Tools using Failure Mode Analysis Programs", Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers Vol. 14 No. 1, pp. 15-23, 2005
- 6) <http://en.wikipedia.org/wiki>
- 7) R. Ahmad et al., "Failure Analysis of Machinery Component by Considering External Factors and Multiple Failure Modes - A Case Study in the Processing Industry-", Engineering Failure Analysis, Vol. 25, pp. 182-192, 2012.
- 8) BS EN 60812:2006 Analysis Techniques for System Reliability - Procedure for Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), 2011.
- 9) H. Arabian-Hosynabadi et al., "Failure Modes and Effects Analysis(FMEA) for Wind Turbines", Electric Power and Energy Systems, Vol. 32, pp. 817-824, 2010.
- 10) D. H. Kim et al., "Failure Mode and Effect Analysis on the Temporary Electric Power Installations, Journal of Industrial Science and Technology Institute, Vol.18 No.1, pp.97-102, 2004.