

작업자의 안전측면을 통합한 보전방법에 관한 연구

서 광 규*

*상명대학교 산업정보시스템공학과

A Study on a Maintenance Method Integrating Worker's Safety Aspects

Kwang Kyu Seo*

*Dept. of Industrial Information and Systems Eng, Sangmyung University

Abstract

This paper proposes a maintenance method to integrate worker's safety concerns into the process activities of the manufacturing system and it is to be considered as a part of the scope of maintenance engineering. The proposed method incorporates worker's health and safety considerations into maintenance engineering in each of the manufacturing process using reliability analysis. It can help to make a better planning and implementation of maintenance activities for the manufacturing system.

Keywords : Maintenance, Reliability, Worker's Safety

1. 서 론

보전(maintenance)은 제조공장이나 제조설비 등의 제조시스템을 운용하는데 가장 핵심적인 활동이다. 보전은 설비 및 부품의 보전에서부터, 설비의 점검, 윤활, 폐기물 처리를 통한 플랜트 보전, 오염예방 및 소음제어에 이르기까지 그 범위가 다양하다[1, 5]. 이러한 활동들은 제조시스템을 원하는 수준으로 운용하기 위해 반드시 필요한 보전활동이다[11].

제조공정에서 제조시스템의 성능 향상이나 원하는 수준으로 성능을 유지하려면, 시스템의 예방점검, 고장수리 등의 전통적인 보전활동은 물론, 근래 들어 그 중요성이 증가하고 있는 제조시스템 내에서의 작업자 안전문제도 중요하게 고려하여야만 하는데, 본 논문에서는 작업자의 안전문제를 작업자의 건강과 안전 두 측면을 모두 고려하기로 한다.

따라서 본 논문에서는 제조시스템 내에서의 제조공정과 관련 있는 주요한 작업자의 건강과 안전관련 특

징과 이슈들을 모두 기술하고, 이러한 작업자의 건강과 안전을 위한 고려 사항들을 통합한 새로운 보전 방법을 제안한다.

본 연구에서는 시스템의 고장요소로서, 작업자의 건강과 안전관련 특징과 이슈들을 가정하고, 이러한 요인들을 고장률 함수로서 채택하여 시스템 전체의 보전 신뢰도를 얻기 위한 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 제조업자들이 국·내외적으로 제정되고 있는 작업자의 안전을 고려한 표준안[7]이나 규제에 대응을 용이하게 해주는 동시에 제조공정의 품질을 향상시키고 보전의 효율성을 최대로 하는데 적용될 수 있으리라 판단된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 제 2장에서는 논문의 이론적 배경을 살펴보고, 보전활동에서 작업자의 건강과 안전을 위한 고려사항을 기술한다. 제 3장에서는 작업자의 안전 요소를 통합한 새로운 보전방법을 제안하고, 사례연구를 수행한다. 마지막 4장에서는 논문의 결론에 대하여 기술한다.

2. 이론적 배경

일반적으로 제조시스템 보전의 목적은 시스템의 유지보수 혹은 고장 발생 시 수리 및 특별한 수준에서 시스템 운용을 지속시키는 것이다. 산업계에서 적용하고 있는 보전 기법들은 매우 다양한데, 가장 기본이 되는 것이 예방 보전(Preventive Maintenance; PM)과 개량 보전(Corrective Maintenance; CM) 기법 그리고 이들이 혼재되어 나타나는 혼합 보전(mixed maintenance) 기법인데, 최근에는 총생산 보전(Total Productive Maintenance; TPM)이라는 용어가 등장했다. 개량 보전은 고장이 발생했을 때 적용하고, 설비를 만족할 만한 상태로 보수하는 활동이다. 예방 보전은 규칙적인 일정계획하에 공장이나 설비의 주기적인 조사를 수행한다. 설비의 신뢰도(reliability)는 이러한 보전의 타입에 따라 일반적으로 증가되기를 기대한다. 총생산보전은 보전 활동과 기계의 고장을 결정하는 과정에서 운용자들을 포함하는 예방 보전 기법이라고 할 수 있다[1, 5].

보전 활동의 신뢰도와 보전도(maintainability)는 제품과 공정 모두에 걸쳐서 고려되어야 하고 수행되어야 하는데, 이는 제조 공정에서 지속가능성을 달성하기 위한 방법과의 관계 설정을 용이하게 해 준다. 제품을 설계하고 개발하는 과정과 제조공정사이에는 많은 정보를 공유할 수 있는데, 실제로 공유될 수 있는 정보는 공장, 단위 생산, 설비, 도구, 노동, 에너지 등으로 그 범위가 다양하다[10].

제조 공정은 작업자의 안전에 다양한 형태의 영향을 미친다. 일반적으로 제조시스템 내에서 작업자의 안전 관련 이슈들은 보전활동과는 무관하게 고려되어 왔다. 그러나 일반적으로 시스템의 노화가 발생하면 시스템의 고장이 발생하고 제어가 용이하지 않아 다양한 형태의 배출물들이 방출되고, 이러한 제어되지 않는 방출물들은 작업자의 건강에 좋지 않은 영향을 미치는 물질이 포함될 수 있어, 작업자의 건강에 좋지 않은 영향을 미칠 수도 있고, 또한 오랜 기간동안의 작업은 다양한 직업병을 유발하여 작업자에게 해로운 영향을 미치게 된다.

또한 시스템의 고장으로 인한 누전, 감전, 가스배출 등에 기인한 안전문제들도 발생할 수 있다. 따라서 시스템의 노화와 장시간의 노동은 작업자의 건강 및 안전문제와의 상관관계를 가지게 되고, 이 문제는 시스템의 유지 보수와 직결되므로 작업자의 건강과 안전요인은 보전활동에서 중요하게 고려되어야만 한다.

현재까지 작업자의 건강과 안전을 위한 성능을 평가할 수 있는 객관적인 척도가 개발되어 사용되고 있지는 않으나, 이를 위한 가이드라인 등은 개발되어 사용

되고 있는 상황이다. 본 연구에서는 작업자의 건강과 안전요인들과 관련된 잠재적인 영향범주들을 문헌 자료 조사[3, 4, 7, 8] 등을 통해 분석하고, 분석된 작업자의 건강과 안전 요인들을 하나의 보전 프레임워크로 통합하여 평가할 수 있는 방법을 개발함으로써 제조시스템 내의 작업자의 건강과 안전을 평가할 수 있고 이를 통해 작업자의 건강과 안전을 강화할 수 있도록 한다.

이를 위해서는 작업자의 건강관련이 있는 잠재적인 영향 범주들이 분석하였는데[6, 9], 보건관련 영향범주들은 호흡기(respiratory), 심장혈관(cardiovascular), 생식, 행동 및 중앙 신경 시스템(reproductive, behavioral and central nervous systems), 발암(carcinogen), 자극과 민감성(irritant and sensitization)에 영향을 미치는 범주와 직업병 군으로 구분하였고, 본 연구에서는 이러한 범주들을 인간 보건을 위한 변수로서 사용하기로 한다.

작업자의 안전과 관련된 영향 범주들은 사고에 기인한 죽음 및 상해, 노동 관련 질병, 난청, 병가, 알레르기 등이 있다. 노동자의 상해(injury)의 발생과 부상 정도에 따른 직업 안전에 관련된 연구 결과도 본 논문에서 제안된 방법을 위해 검토되었는데[2], 본 연구에서는 작업자 안전의 변수로서 노동자의 부상을 사용하기로 한다.

3. 작업자의 안전측면을 통합한 보전방법

본 논문에서 제안하는 새로운 보전 방법은 제품의 제조공정에서의 보전 활동에 초점을 두어, 제고공정의 관리 기능으로서 보전의 설정을 가능하게 해준다. 이는 현존하는 공장과 설비들의 보전과 개선 및 작업자의 건강과 안전을 고려한 제조시스템의 설계를 가능하게 한다. 본 연구에서 제안하는 방법은 제조시스템이 어떻게 관리되고, 내·외부 고객들에 의해 요구된 생산율은 물론 작업자의 건강과 안전 등을 포함한 보전활동이 가능하게 한다. 이를 위해서 본 논문에서는 하향식 방법을 사용하여, 제조시스템내의 제고공정의 공정 성능을 분석하고, 작업자의 건강에 영향을 미치는 위험상황이 발생하거나, 부상이 발생하면 이를 시스템 고장으로 가정하기로 한다.

3.1 작업자의 건강과 고려한 신뢰도 평가 및 분석

신뢰도는 부품, 장치, 장비, 혹은 시스템이 주어진 조건하에서 특정한 기간동안, 의도된 기능을 만족하게 동작할 확률로 정의된다. 일반적으로 시스템 신뢰도는 개량 보전 활동들의 발생 빈도수에 반비례한다. 작업자의

건강과 안전은 이러한 신뢰도와 상관관계에 있고, 또한 이를 신뢰도 함수로 표현할 수 있다.

대부분의 시스템의 신뢰도는 시간을 변수로 갖는 지수확률밀도함수 (exponential probability density function)에 의해 잘 표현된다. 고장률은 단위시간 동안의 고장회수로 보통 평균 수명의 역수로 구하는데, 일반적인 신뢰도는 다음과 같이 표현된다.

$$R_M(t) = e^{-\frac{t}{MTBF}} = e^{-\lambda_M t} \quad (1)$$

where, $\lambda_M = \frac{\text{Number of failures}}{\text{Total operating hours}}$

MTBF = Mean time between failures.

고장률(λ)과 평균고장시간(MTBF)은 신뢰도 척도로 가장 보편적으로 사용하는 지수이다. 고장률은 시간에 따라 변하는 것을 살펴보면, 고장이 초기 고장이든, 우발적 고장이든, 노후화로 인한 고장이든, 고장의 성질에 관한 통찰이 가능하다. 고장률이 시간에 따라 변하는 것을 고장 방식의 관점에서 보면 이것은 서로 다른 메커니즘에 의해서 일어나는 고장들을 구별할 수 있다. 시간에 따라 변하는 체계의 고장률이 일단 지정되면, 그때에는 고장 후 수리되거나 교체되는 체계에서 발생하는 고장수에 관한 수식을 도출할 수 있다. 신뢰도 척도로서 고장률은 특별한 시스템이나 다양한 상황과 시나리오에 따라 적용될 수 있는데, 이는 고려되는 장비나 체계의 종류에 따라 상당히 달라질 수 있다.

본 연구에서는 작업자의 건강과 안전을 평가하기 위해 작업자의 건강과 안전의 신뢰도를 제안하고 이를 사용하기로 하는데, 작업자의 건강과 안전의 신뢰도 평가를 위한 수식은 다음과 같이 유도된다.

먼저, 이산적인 시간에서 작업자의 건강과 관련된 위험상황이 발생되었다고 가정하면, 식 (1)에서의 고장률(λ) 대신에 작업자의 건강에 대한 신뢰도 함수(RH(t))는 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$R_H(t) = e^{-\frac{t}{MTBH}} = e^{-\lambda_H t} \quad (2)$$

where, $\lambda_H = \text{Number of worker's health} / \text{Total operating hours}$
 MTBH=Mean time between worker's health

이렇게 유도된 식 (2)는 작업자의 건강의 신뢰도를 평가하는 함수로 사용된다.

또한 이산적인 시간에서 부상이 발생하거나 주어졌다고 가정하면, 위의 식 (1)에서의 고장률(λ) 대신에 안전에

대한 신뢰도 함수(RS(t))를 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$R_S(t) = e^{-\frac{t}{MTBI}} = e^{-\lambda_S t} \quad (3)$$

where, $\lambda_S = \text{Number of injuries} / \text{Total operating hours}$
 MTBI = Mean time between injuries

이렇게 유도된 식 (3)은 작업자 안전의 신뢰도를 평가하는 함수로 사용된다.

이상에서 유도한 함수 (2)와 (3)를 이용하면, 작업자의 건강 및 안전에 대한 기본적인 고장률을 얻을 수 있고, 이렇게 유도된 신뢰도 평가결과는 새로운 보전활동을 설정하는 데 사용될 수 있다.

3.2 사례 연구

본 연구에서 제안한 방법을 검증하기 위해서 A전자 회사에 부품을 납품하는 B사에서 수집한 데이터를 가지고 사례 연구를 수행하였다. B사는 S공단 내에 위치하고 있으며, 이 공단 지역 내의 제조기업들은 작업자의 건강과 안전 문제에 대하여 많은 관심을 가지고 있다. B사는 그들의 제조 공정이 작업자의 건강과 안전에 어느 정도 영향을 미치는지를 조사하려고 하는데, 실제로 B사는 개량 보전을 위한 기록들이 존재함에도 불구하고, 예방 보전은 공식적인 프로그램에서 계획되고 있지 못하고 있고, 운용자의 경험에 의한 보전활동만이 실행되고 있다. 또한 정확한 제조공정의 방출물이나 폐기물에 대한 자료도 없어서 작업자의 건강에 관한 데이터가 없는 상황이었다.

전절에서 기술한 바와 같이 제안한 새로운 보전방법을 위하여 유도한 신뢰도 공식들을 적용하기 위해서, 단위 수준의 공정들이 분석되었고, B사의 현장전문가와 모기업 A의 도움을 얻어 제조시스템의 고장, 작업자의 건강과 관련된 기준치 이상의 방출물 발생, 그리고 부상의 발생 등에 대한 자료들을 수집하였다.

이러한 단위 수준 분석에 기반을 두고, 어떻게 제안된 고려사항들이 전체 시스템의 신뢰도에 영향을 미치는지를 분석하였다. 이를 위하여 시스템의 모든 구성 요소들은 모두 직렬 네트워크이거나 병렬네트워크 아니면 이들의 혼합된 네트워크라고 가정하였다.

n개의 구성 요소가 모두 직렬 네트워크로 연결된 경우에 총 신뢰도는 다음의 식에 의하여 계산된다.

$$R(t) = R_1(t) \times R_2(t) \times \dots \times R_n(t) \quad (4)$$

$$\text{혹은, } R(t) = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)t} \quad (5)$$

마찬가지로 n개의 구성 요소가 모두 병렬 네트워크로 연결된 경우에 총 신뢰도는 다음의 식에 의하여 계산된다.

$$R(t) = 1 - (1 - R_1(t))(1 - R_2(t)) \cdots (1 - R_n(t)) \quad (6)$$

주어진 단위 수준에서, 전체성과는 시스템 고장, 작업자의 건강과 관련된 기준치 이상의 방출물 발생, 안전과 관련된 부상 사건에 의한 휴지 시간, 분해 검사 및 수리의 발생에 영향을 받는 사실을 확인할 수 있었다.

일반적으로 시스템이 여러 가지 요소로 구성되어 있고 각 요소의 고장이 독립적으로 발생하며 어떤 한 요소의 고장으로 인해 전체 시스템의 기능을 잃는 상태에 있는 경우를 직렬 네트워크이다.

본 논문에서 제한한 고장, 작업자의 건강과 관련된 기준치 이상의 방출물 발생, 그리고 부상의 세 가지 요소로 인한 고장은 독립적으로 발생하고 어떤 한 요소의 고장으로 인해 전체 시스템의 기능을 잃는 상태로 가정하였으므로, 본 시스템의 세 가지 특성들이 직렬 구조를 가진다.

본 연구에서는 실제로 수집된 자료(<표 1>)를 이용하여 각 경우의 신뢰도 요소를 계산하였다. 본 연구를 위해 수집된 데이터는 B사의 안전경영팀에서 1년간 수집한 자료로써 정상작업일 240일(8시간/일 × 240일 = 1,920시간)과 잔업일 40일(2시간/일 × 40일 = 80시간)간의 데이터이다.

<표 1> 신뢰도 평가를 위해 수집된 데이터

항목	총계 (amount)
자료수집기간	1년 (2,000 시간)
시스템 고장	9회
작업자의 건강과 관련된 기준치 이상의 방출물 발생	51회
노동자 부상	5회

<표 1>의 수집된 자료를 토대로 고장률을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \lambda_M &= 9/2,000 = 0.0045 \text{ failure/time} \\ \lambda_H &= 51/2,000 = 0.0255 \text{ failure/time} \\ \lambda_S &= 5/2,000 = 0.0025 \text{ failure/time} \end{aligned}$$

주어진 시스템은 직렬구조이므로, 이 요인들이 결합된 고장률을 구하면 다음과 같다.

$$\lambda = \lambda_M + \lambda_H + \lambda_S = 0.0325 \text{ failure/time}$$

따라서 총 신뢰도 R(t)는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} R(t) &= e^{-(\lambda_M + \lambda_H + \lambda_S)t} = e^{-0.0325t} \\ &= 0.9680 \end{aligned}$$

본 논문에서 구한 총 신뢰도는 96.80%로써, 이 결과 값은 작업자의 건강과 안전 요인을 고장률로 채택하고, 이러한 요인들을 모두 고려하였을 경우의 총 신뢰도 값이다. 기존의 신뢰도 평가방법은 기계나 시스템의 고장으로 인한 신뢰도 평가나 혹은 노동자 부상 등 안전 사고를 결합한 시스템 고장으로 신뢰도 평가를 수행한다. 본 사례연구에서는 기존의 방법에 의한 신뢰도가 모두 99%이상으로 매우 높게 나왔다(<표 2> 참조).

<표 2> 기존 방법과 제안 방법간의 신뢰도 비교

구분	고장 요인	고장률(λ)	신뢰도 (R(t))
기존 방법	고장	$\lambda_M = 0.0045$ failure/time	0.9955
	“고장+ 작업자 부상” 결합	$\lambda_M + \lambda_S = 0.0070$ failure/time	0.9930
제안 방법	“고장+ 작업자 건강+ 안전” 결합	$\lambda_M + \lambda_H + \lambda_S = 0.0325$ failure/time	0.9680

그러나 본 연구에서 제안한 방법에 의한 신뢰도는 상대적으로 낮게 나왔음을 확인할 수 있었다. 이러한 결과를 살펴보면, 기존의 신뢰도 분석방법과 달리 작업자의 건강과 안전요인을 고장률로 채택하여 분석함으로써 작업자의 건강과 안전 문제가 발생한 경우에는 시스템의 총 신뢰도가 낮아짐을 확인할 수 있었다.

따라서 시스템의 총 신뢰도는 작업자의 건강과 안전 요인을 고려하여 신뢰도를 결정함으로써 작업자의 건강과 안전 요인을 보다 강화한 시스템을 설계할 수 있고, 향후 이에 대한 규제가 강화되는 미래 상황에 대하여 충분히 대비할 수 있는 시스템을 설계가 가능하리라 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 제조시스템 내에서의 제조 프로세스와 관련 있는 주요 작업자의 건강과 안전 관련된 특징을 기술하고, 제조시스템의 보전 방법을 개발하기 위해 기존의 설비의 고장 요인 외에 작업자의 건강과 안전 측면에서의 고려 사항들을 통합하기 위한 새로운 보전 방법을 제안하였다. 이러한 고려사항을 토대로 보전 활동을 수행하면, 보전의 효과를 극대화할 수 있고, 각 제조 공정의 신뢰도를 좀 더 정확하고 실제적으로 평가할 수 있다.

향후에는 제조시스템 내의 설비의 고장, 작업자의 건강과 안전과 관련된 요인들 간의 상호관계에 대한 보다 정확한 분석이 필요하며, 이 요인들 간의 중요도를 평가하고 평가결과를 반영하여 제조 공정의 신뢰도를 평가할 수 있는 보다 엄밀한 보전 방법의 개발이 필요하다.

5. 참 고 문 헌

- [1] Blanchard, B. S. et al., Maintainability: A Key to Effective Serviceability and Maintenance Management, John Wiley & Sons, Inc., (1995)
- [2] Blandt, L. K. and Fox M. A., "Occupational Safety, Liability Costs per Total Life Cycle Assessment," Proceedings of the 1997 Total Life Cycle Conference, SAE (1997) : 207-209
- [3] Cadieux, J., Roy. M., Desmarais, L., "A preliminary validation of a new measure of occupational health and safety", Journal of Safety Research, Vol. 37(4) (2006): 413-419
- [4] Clausen, J., Hansson, S.O., Nilsson, F., "Generalizing the safety factor approach", Reliability Engineering & System Safety, Vol. 91(8) (2006): 964-973
- [5] Cunningham CE and Cox W., Applied maintainability engineering. New York: Wiley and Sons, (1972)
- [6] EcoBilan, TEAM 3.0 Users Manual, (1999)
- [7] Palassis, J., Schulte, P.A., Geraci, C.L., "A new American management systems standard in occupational safety and health - ANSI Z10", Journal of Chemical Health and Safety, Vol. 13(1) (2006): 20-23
- [8] Penas, F.J. et al, "Implementation of industrial health and safety in chemical engineering teaching laboratories", Journal of Chemical Health and Safety, Vol. 13(2) (2006): 19-23
- [9] PRe Consultants, SimaPro 5 User's Manual. The Netherlands: PRe Consultants, (1999)
- [10] Takata S, Hiraoka H, Asama H, Yamoka N, Saito D., Facility model for life-cycle maintenance system, Annals of the CIRP, 44 (1995): 117-121
- [11] Uetz H, Maintainability of production system, Maintenance Management International, 4 (1983): 55-68

저 자 소 개

서 광 규



고려대학교 산업공학과에서 박사학위 취득, 한국과학기술연구원 시스템연구부 연구원으로 재직, 현재 상명대학교 산업정보시스템 공학과 교수로 재직 중. 관심분야는 생산관리, SCM 정보시스템 등이다.

주소: 충남 천안시 안서동 산 98-20

상명대학교 공과대학 산업정보시스템공학과