제조업 공정 안전을 위한 평가기법 제안 연구

- A Study on Propose to Evaluation Method for Process Safety in Manufacturing -

양 광 모 *
Yang Kwang Mo
이 병 기 **
Lee Byung Gi
강 경 식 ***
Kang Kyong Sik

Abstract

In manufacturing industry of the modern industrial society, people increasingly become concerned the awareness of safety increasingly although they have regarded production the most important factor. Even though, as people make efforts on accident preventions, the number of accidents is decreasing, fatal major industry accidents are rather thanincreasing so that the number of deaths has not decreased. Under these conditions, there is an attempt to introduce and perform the process safety management system as a means for keeping from major industry accidents. However, it leaves to be desired on the methods of measuring process safety in the general manufacturing industry, while it is available to do that in the chemistry industry. Therefore, in this paper, we analysis processes of manufacturing industry in safety point of view and suggest the technique efficiently measuring and managing each process. Proposed the technique shows that the specification on safety determines AHP weight through the managers of firms and each process is suggested by using normalized matrix.

Keyword : Process, AHP-weight, Safety measurement

† 본 연구는 명지대학교 안전경영연구소 지원으로 수행되었음

* (주) 썬더 부설연구소 수석연구원
** 명지대학교 산업공학과 박사과정
*** 명지대학교 산업시스템공학부 교수

2005년 9월 접수; 2005년 10월 수정본 접수; 2005년 10월 게재 확정

1. 서 론

현대 산업사회의 제조업에서는 생산을 가장 중요시하고 있지만 안전에 관한 의식도 많은 관심의 대상이 되고 있다. 사고예방을 위한 지속적인 노력에 따라 사고 건수는 점차 줄어들고 있으나 치명적인 중대 산업사고는 오히려 증가하여 산업재해로 인한 사망자 수는 줄어들지 않고 있다.

이와 같은 상황에 따라 중대 산업사고를 예방하기 위한 수단으로 공정안전관리제도를 도입하여 시행하고자 하고 있다. 하지만 일반 제조업에서는 화공안전의 경우와 같은 공정안전을 측정하는 방법이 아직 미흡한 실정이다[3]. 따라서 본 연구에서는 제조업의 공정을 안전에 대한 관점에서 분석하고 효율적으로 공정별로 측정하여 관리할 수 있는 기법을 제시하고자 한다. 제안되는 기법은 안전에 대한 항목은 기업의 관리자들을 통한 AHP 가중치를 결정하고 각 공정을 정규화된 행렬을 이용하여 제안하였다.

사고예방을 위한 지속적인 노력에 따라 사고 건수는 점차 줄어들고 있으나 치명적인 중대 산업사고는 오히려 증가하여 산업재해로 인한 사망자 수는 줄어들지 않고 있다. 이와 같은 상황에 따라 중대 산업사고를 예방하기 위한 수단으로 공정안전관리제도를 도입하여 시행하고자 하고 있으며, 그 목적과 주요 내용은 다음과 같다[1].

① 제조 공정 관련 기술자료 및 도면의 체계화
② 체계화된 자료를 바탕으로 한 위험성 평가 실시 및 필요한 조치 이행
③ 안전 운전절차 · 하도급 관리기준을 설정하여 작업실수의 최소화 강구
④ 설비의 완벽한 안전성 유지를 위한 설계 · 설치 · 운전 및 정비기준 제도화 실행
⑤ 사고 발생시 피해 최소화를 위한 비상조치 계획 수립 및 실현
⑥ 기타 각종 절차, 기준 준수를 위한 종업원의 교육 훈련의 정기적 실시
⑦ 공정안전관리의 계획에 따른 추진여부를 정기적인 자체검사 실시를 통해 확인, 개선

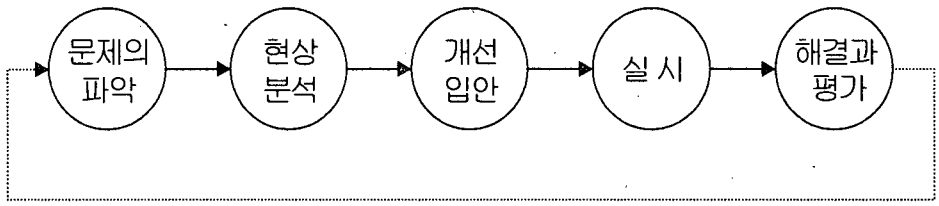
원활한 생산시스템의 유지는 자체의 결함과 무리한 지시나 행동, 무지한 태도 등을 제거함으로써 기업이 원하는 이윤추구의 목적이 달성 될 것이다. 안전은 생산매체를 올바르게 유지시키는 촉진 역할을 하고 있다. 또한 지금까지 국내 제조업은 많은 산업현장에서 크고 작은 산업재해가 계속해서 일어나고 있고 최근에는 사망 등 중대재해가 급증하여 그 심각성이 커지고 있다[1, 2]. 따라서 산업사고를 방치하면 기업의 생산성과 경쟁력을 저하시키는 결과를 초래하기 때문에 본 연구에서는 제조업의 공정을 분석[4]하여 불안전한 요소를 제거하고 이에 따르는 사전 안전성 평가 제도를 제안하고자 한다.

2. 공정 안전 개선 방법의 이론적 고찰

생산 공정의 안전 작업관리는 현재 작업을 좀더 안전하고 쾌적한 작업환경으로 개선하는 것과 새로운 작업방법으로 설계하는 2가지가 있으며 이 문제의 해결을 위하여 문제 해결 절차기법이 있다. 문제해결 절차 기법에는 설계적 접근법과 분석적 접근법이 있다.

먼저 설계적 접근법은 문제자체를 좀 더 근본적인 시각에서 바라보자는 것으로서 생산시스템, 작업시스템 또는 신제품 개발에 있어서 각각의 기능을 명확히 하고 제약 조건을 제거하여 이상적인 대안을 만들기 위한 현실적인 해결안을 만들자는 기법이다. 다음으로 분석적 접근법은 먼저 현황분석을 통해 대상 작업과 공정의 구성요소를 명백히 한 후에 검토를 하여 정확한 문제의 해결대책을 수립하고 하는 접근기법으로 개선, 개량을 위해 쓰이는 기법이며, 이러한 접근법 중 본 절에서는 과학적 접근법을 가지고 공정안전 방법에 접근하고자 한다.

과학적 접근 절차는 < 그림 1 >과 같은 사이클에 의해서 문제를 해결한다든가 현상을 다시금 고도의 수준으로 발전시키는 과정을 반복하는 기법이다. 과학적 접근절차를 이용 생산성과 안전에 대한 문제를 해결하고자 할 경우 다음과 같은 진행방법으로 한다.

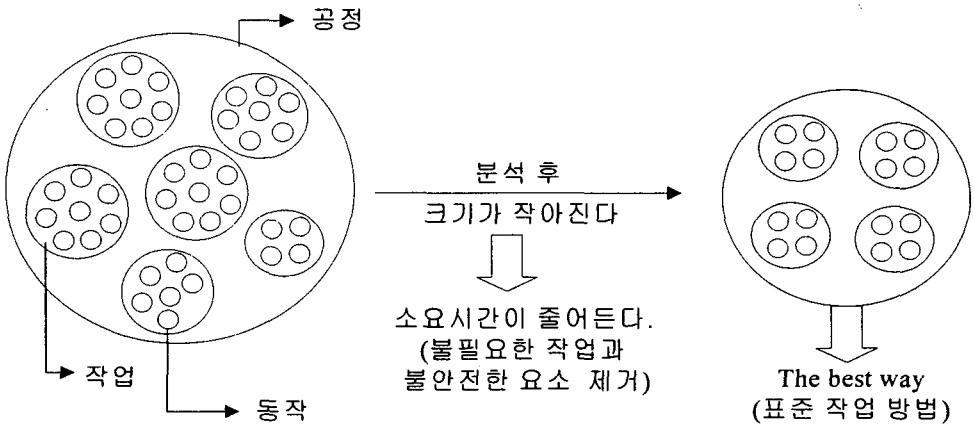


< 그림 1 > 과학적 접근절차

표준 작업지도서를 작성하여 부품・제품의 표준화, 재료・원료의 표준화, 기계설비의 표준화, 부대설비의 표준화(작업대, 의자, 컨베이어 등), 치구・공구・도고의 표준화, 가공조건의 표준화, 작업절차의 표준화, 환경조건의 표준화, 안전조건의 표준화와 같은 표준화를 병행하여 실시하게 되면 표준 작업의 실시가 가능하다.

하지만 개선을 한다는 것은 새로운 변화를 가져오기 때문에 작업자의 협조적인 태도는 물론 자료를 얻는 것에 대한 어려움과 상사나 동료들에게 개선 아이디어를 납득시키기 어렵다는 점과 개선된 작업방법< 그림 2 >을 작업자들에게 교육시킬 때의 기술적인 지식 외에도 인간관계를 원만히 유지시켜야 하는 어려움을 극복해야 한다.

따라서 작업방법을 개선하기 위해서는 관리감독자들의 기술적인 지식 외에도 인간관계를 원만히 유지시켜야 할 것이다[2, 4].



< 그림 2 > 공정분석의 결과

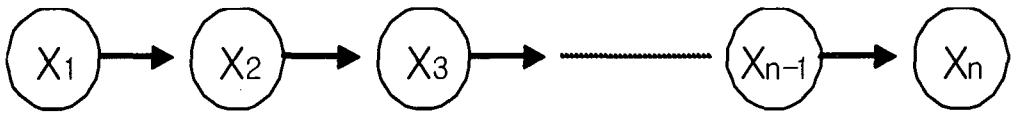
3. 안전 측정 기법 구조

안전은 각 공정에서 꼭 필요한 조건이다. 또한 설비나 인간은 필수적으로 안전이 유지됨으로써 생산성 향상에 기여할 수 있다. 그러므로 안전과 생산 공정은 서로 밀접한 관계가 있다. 기업에서 생산이 원활하지 않고 생산성이 떨어지고 있다면 현장에 잠재 위험요인이 존재하고 있다는 증거이다. 작업자가 생산 활동에 종사할 때에는 작업자 자신의 능력 및 자격에 맞도록 작업 방법 및 작업조건을 선택해야 하며 생산 공정에서는 생산 조건 및 생산 설비의 올바른 선택이 매우 중요하다[1].

공정안전에 관련된 주된 조사항목은 다음과 같다.

① 불량의 발생상황, 공정별로 불량에 의한 폐품 등의 발생상황을 조사
② 작업정지에 관계가 있는 결근, 기계고장 그 밖의 사고의 발생상황 조사
③ 예정변경, 설계변경, 돌발공사 등의 발생상황 조사
④ 그 밖에 문제점의 발생상황 조사

각 공정의 안전측정을 위해서 먼저 공정을 정의한다. < 그림 3 >에 나타나 있는 것처럼 각각의 공정을 X_n로 정의한다.



< 그림 3 > 공정 라인의 정의

정의된 공정의 안전성 평가를 실시하기 위해서 다음과 같은 절차에 따라 실시한다.

절차 1) 각 공정라인의 안전관리에 영향을 줄 수 있는 요인 결정
절차 2) 안전 측정 요인에 대한 AHP 가중치 결정
절차 3) 각 공정에 대한 측정요인 결과 정량화 작업
절차 4) 공정 평가를 위한 정규화된 행렬 계산
절차 5) 각 공정의 안전계수를 식(1)을 통하여 결정

$$XSI_i = \sum_{j=1}^{m} (AHPW_m \times NMXS_{im})$$

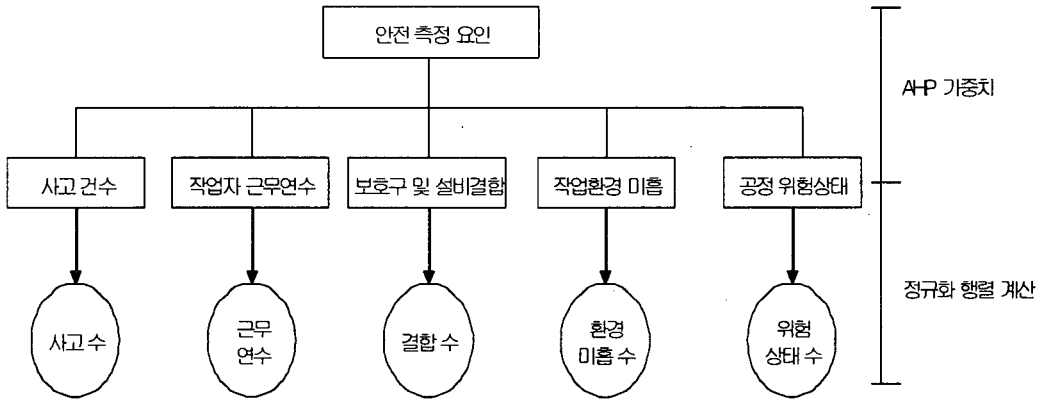
(1)

여기서 XSI_i = X_i 공정의 안전계수

$AHPW_m$ = m 안전 측정 요인의 AHP 가중치 값

$NMXS_{im}$ = X_i공정의 m요인에 대한 정규화된 행렬 값

각 공정에 대한 안전성 평가를 위한 요인은 < 그림 4 >와 같이 정의할 수 있으며, 다음 절에서 AHP와 정규회된 행렬을 통해 위험성 평가기법을 제안한다.



< 그림 4 > 공정 안전 측정 구조도

4. 공정안전 평가의 적용방법

4.1 안전 측정 요인의 AHP 가중치 결정

기업 내의 안전관리자나 관리감독자들로부터 설문을 받아 일관성 비율(CR)을 검사한 후, 계층분석과정을 통하여 공정상의 안전관리 중점 부분을 중요 순으로 분석한다. 한편, 이러한 계층구조를 이용하여 각 단계에서의 요인들은 다음 상위 단계(Higher Level)의 모든 요인들에 의하여 평가된다[5, 6, 7, 8, 9].

AHP는 의사결정에 매우 유용하게 활용될 수 있다. AHP는 복잡한 문제를 세분화하고 계층화하여 접근하는 방법이므로 AHP 과정상 더 많은 정보와 지식이 이용 가능하고, 많은 대안을 생성하고 평가할 수 있다. 또한 다양한 기준을 수립하여 문제를 규명하고 분석함에 따라 폭넓은 관점을 동원할 수 있으므로 의사결정에 매우 적합하다고 할 수 있다. 이외에도 실무자의 평가를 수합하여 의사결정을 하게 되므로 의사결정자의 사고의 획일성과 의사결정자들 사이의 합의에 의한 결정을 배제할 수 있다. 즉, AHP는 의사결정의 장점을 더욱 강화하고, 적당한 기준과 대안으로 구성되어 있는 의사결정일 경우에 의사결정의 단점을 축소시킬 수 있다는 것이다. 이러한 그룹의사결정 과정에서 AHP의 유용성에도 불구하고, AHP를 의사결정에 사용할 경우에 많은 사항들에 대한 고려가 필요하다. 다음에서 의사결정 고려사항과 문제 해결 방법에 대해 제시한다. 9점 척도를 사용할 때에는 다음과 같은 3가지 문제들을 심각 하게 고려하여 문제를 해결한다.

(1) 평가자의 성향에 관계없이 동일한 척도를 사용하는 문제
(2) 규격화된 평가척도를 사용하는 문제
(3) C.R이 적정수준을 초과할 경우 사용하기 어려운 문제

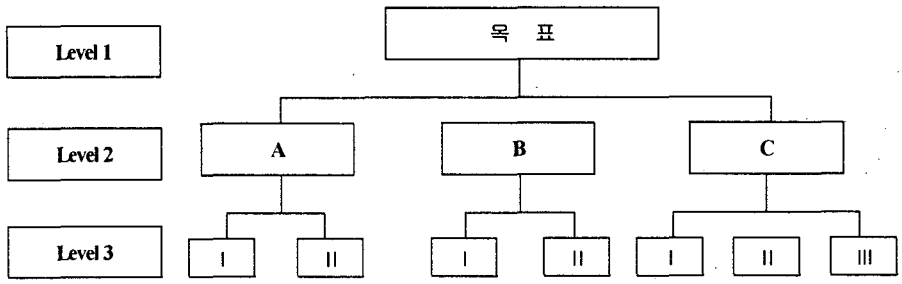
이러한 문제를 고려할 때 굳이 Saaty가 제안한 9점 척도만을 고집할 필요성은 없고 상황에 따라 다양한 척도를 사용한다. 즉, 평가척도는 문제의 성격과 의사결정자의 능력을 고려하여 적용해야 한다는 것이다.

의사결정에서 나타날 수 있는 문제는 특정한 의사결정자의 의사결정이 다른 구성원들의 의사결정과 현저하게 다른 경우에 어떻게 할 것인가 하는 것이다. 이러한 경우에는 첫째로 이탈자(Outlier)를 찾아내야 한다. 의사결정과정에서 이탈자는 변동계수(coefficient of variation; CV)를 계산함으로써 찾아낼 수 있다. 먼저 변동계수를 계산하여 의견의 불일치 정도가 높은 요인을 조사하고, 이러한 요인들에 있어서 의사결정자 중에서 특히 의견의 불일치 정도가 높은 이탈자를 찾아낼 수 있다는 것이다. 또한 이탈자를 확인함으로써 그 요인에 대한 더 많은 토론을 할 수 있을 것이며, 원래의 결정에 대하여 지식획득(Knowledge Acquisition), 영향(Influencing), 재고(Re-thinking)의 과정이 동시에 발생할 수 있다. 이렇게 함으로써 특정한 의사결정 문제에 있어서 계획된 목표를 달성할 수 있다.

4.2 공정안전관리의 AHP 설계

공정안전관리 부분에 AHP를 적용하는 단계를 설계하면 다음과 같다.

1) **1단계** : 공정안전에 대한 문제를 정의하고 안전에 대한 목표치를 결정한다.
2) **2단계** : 안전활도을 위한 계층구조를 만든다.
< 그림 5 >와 같이 안전목표에 대한 세부 계층구조를 세운다.



< 그림 5 > 계층 구조도

3) **3단계** : 각각의 안전에 대한 문제점(대안)에 대한 비교 행렬을 만든다.
level 1, 2의 모든 항목에 대해 비교행렬을 만든다.

4) **4단계** : 3단계에서 만들어진 행렬들에 주관적으로 n개의 대안을 갖는다고 할 때 대각 행렬을 기준으로 $\frac{n(n-1)}{2}$ 회의 비교를 하여 상대적 중요도를 평가한다.
아래의 < 표 1 >은 상대적 중요도는 임의 선호도를 기준으로 할 때 대각 행렬을 기준으로 역수의 상태를 보여주고 있다.

< 표 1 > 상대적 중요도

Factor	A	B	C
A	1	7	5
B	1/7	1	3
C	1/5	1/3	1

Factor	A	B	C
A	1	3	1/2
B	1/3	1	1/7
C	2	7	1

▶ 2 단계의 각각의 모든 대안의 매트릭스를 만든다.
▶ 쌍별 대안의 모든 항목에 대해서 비교를 한다.

5. **5단계** : 상대적 중요도를 합성하고 아이겐 값(Eigenvalues), 일관성 지수(C.I ; Consistency Index), 비일관성 지수(I.I ; Inconsistency Index), 그리고 일관성비율 (C.R ; Consistency Rate)을 구한다. 계산과정이 복잡하므로 대개의 경우 컴퓨터 프로그램이 이 과정을 대신해 준다< 그림 6 >.
다음 식 (2)는 쌍별 비교 매트릭스를 구하기 위한 것이다.

$$A^{*}w = \lambda^{*}_{max} u_{max} * w \qquad (2)$$

단, A는 쌍별 비교 매트릭스이고 w는 목적 우변의 아이겐벡터이다.
식 (2)로부터 각 선호도의 가중치를 구하기 위해 식 (3)을 사용하고 비 일관성 지수의 계산은 식 (4)를 사용하여 구한다.

$$w_i = \sum_{j=1}^{n} a_{ij} w_{ij} / \lambda_{max} \qquad (3)$$

$$C.I = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n-1)} \qquad (4)$$

어떤 기준에 대한 요소나 활동의 우선순위를 설정하는데 있어 정확한 결과를 얻기 위하여 일관성의 정도는 확실해야 한다. AHP는 식 (5)로 일관성 비율의 판단에 대한 일관성을 측정한다. 일관성 비율의 값은 10% 이내여야 한다. 3×3 매트릭스에서는 5%, 4×4 매트릭스에서는 9%, 그 이상의 매트릭스에서는 10%로 규정하고 10%보다 크면 그 판단은 다소 무작위적인 것으로 간주되어 수정되도록 요구한다[4, 8].

6. **6단계** : 3, 4, 5 단계를 계층 구조의 최고 수준의 우선순위 벡터를 구할 때까지 반복한다.

7. **7단계** : 최종 수준의 행렬에서

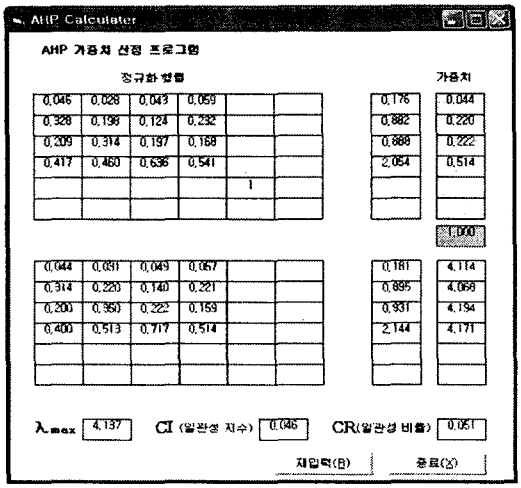
$$C.R = \frac{C.I}{R.I} \leq 0.1 \qquad (5)$$

(단, R.I 는 n 값에 따라 주어지는 상수로 R.I 값은 아래의 < 표 2 >에 의해 구한다.)이면 이 분석을 인정하고 그렇지 않으면 3 단계에서부터 다시 반복한다.

< 표 2 > n 변화에 따른 RI 값

n의 수	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI 값	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.51

AHP 가중치 결정의 절차는 매우 복잡하므로 본 연구에서는 < 그림 6 >, < 그림 7 >과 같은 AHP 프로그램을 개발하여 활용한다.



< 그림 6 > AHP 계산 프로그램 화면

```
Frm_AHP.Lamda = FormatNumber(((CDbl(Frm_AHP.H_1_1.Text)
                + CDbl(Frm_AHP.H_2_1.Text)
                + CDbl(Frm_AHP.H_3_1.Text)
                + CDbl(Frm_AHP.H_4_1.Text)
                + CDbl(Frm_AHP.H_5_1.Text)
                + CDbl(Frm_AHP.H_6_1.Text)) / Count_Chk), 3)
Frm_AHP.CI = FormatNumber((((CDbl(Frm_AHP.Lamda) - Count_Chk)
             / (Count_Chk - 1))), 3)
Frm_AHP.CR = FormatNumber((CDbl(Frm_AHP.CI) / CDbl(1.24)), 3)
```

< 그림 7 > 가중치 결정을 위한 AHP 프로그램

4.3 공정 측정에 의한 행렬 계산

모든 안전평가 요소를 i라 표시하고 i=1,.... s이다. 각 안전 요소(j = 1,..., l)의 정규화는 다음과 같이 표현한다. 만일 요소가 요소값이 클수록 좋은 경우에는 NOV (Nomalized Objective Attribute Value)는

$$NOV_{ij} = OV_{ij}/(OV_{i1}+OV_{i2}+\ldots+OV_{il}) \quad (6)$$

이고, 요소값이 작을수록 좋은 경우는 아래와 같다.

$$NOV_{ij} = (1/OV_{ij})/[(1/OV_{i1})+(1/OV_{i2})+\ldots+(1/OV_{il})] \quad (7)$$

따라서 먼저 앞에서 결정한 안전 측정 요인을 기호로 정의하면 다음과 같다.

NA_i : 공정 i에 대한 사고건수의 정규화 값
NY_i : 공정 i에 대한 작업자 근무연수의 정규화 값
NM_i : 공정 i에 대한 보호구 및 설비결함의 정규화 값
NE_i : 공정 i에 대한 작업환경상태 미흡의 정규화 값
NS_i : 공정 i에 대한 공정 위험 상태의 정규화 값

또한 공정의 안전 특정 요소는 요소값이 작을수록 좋은 경우이므로 정규화된 값은 아래와 같으며. 그 값의 설정은 <표 1>과 같이 한다.

$$NA_i = (1/A_i)/[(1/A_1)+(1/A_2)+\ldots+(1/A_n)] \quad (8)$$
$$NY_i = (1/Y_i)/[(1/Y_1)+(1/Y_2)+\ldots+(1/Y_n)] \quad (9)$$
$$NM_i = (1/M_i)/[(1/M_1)+(1/M_2)+\ldots+(1/M_n)] \quad (10)$$
$$NE_i = (1/E_i)/[(1/E_1)+(1/E_2)+\ldots+(1/E_n)] \quad (11)$$
$$NS_i = (1/S_i)/[(1/S_1)+(1/S_2)+\ldots+(1/S_n)] \quad (12)$$

< 표 3 > 행렬 계산을 위한 측정 요인 값

요인	측정 값
사고 건수	사망 : 4점/건 중상 : 3점/건 경상 : 2점/건 무재해 사고 : 1점/건
작업자 근무연수	1년 미만 : 4점/명 2-5년 : 3점/명 6-9년 : 2점/명 10년 이상 : 1점/명
보호구 및 설비결함	보호구 및 설비결함 수
작업환경상태 미흡	작업환경 상태가 미흡한 부분 수
공정 위험 상태	측정된 공정 작업역의 위험 건수

< 표 3 >에 제시되어 있는 변수들은 안전관리 전문가들 8명으로 구성된 델파이 기법을 통하여 결정된 변수들이다. 따라서 직접적으로 기업에 적용이 되는 경우에는 기업 환경에 적합한 변수가 적용되어야 한다.

5. 결론 및 향후 연구과제

안전관리(Safety Management)란 생산성 향상과 재해로부터의 손실을 최소화하기 위하여 행하여지는 것으로 생산과 안전은 항상 밀접한 관계를 가지고 있다고 볼 수 있다. 현재 국내 기업들은 안전보다는 생산을 더 중요시 하고 있지만 안전에 대한 중요성을 부각시키고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 안전관리의 효율성을 높이기 위하여 제조라인에 대한 안전 평가기법을 제안하고자 한다.

현재 국내의 공정안전관리 제도는 1996년 1월 1일부터 화공안전 분야에서만 실시되어지고 있지만 앞으로는 제조업이나 건설업에서도 생산현장의 통합적인 작업의 안전관리를 위해서 실시되어져야 할 것이다. 본 연구에서 제시하고 있는 공정에 대한 안전관리를 제조업에서 실시하기 위해서는 작업공정 위해·위험표를 작성하여 평가방법을 적용하는 것이 효율적인 방법이다. 또한 이러한 사전 예방을 실시하여 제조업의 많은 사고를 줄일 수 있다.

본 연구는 제조업에 일반적으로 적용할 수 있는 공정안전 평가기법을 제안하였다. 하지만 계속되는 연구로 인해서 평가변수의 확립과 사례기업에 적용에 따른 평가방법의 효율성에 대한 증명도 이루어져야 할 것이다.

6. 참 고 문 헌

[1] 김병석, 『신산업안전관리』, 형설출판사, 2002

[2] 구해운 외 10인, 『관리감독자를 위한 사업장 안전보건』, 대한 산업안전협회, 1999

[3] 박필수, 『산업안전관리론』, (주)중앙경제, 2001

[4] 조문수, 윤용훈, 박성하, 『방법과 표준을 고려한 인간 중심의 작업관리』, 사이텍미디어, 2000

[5] Leung Lawrence C., Cao Dong, "On the Efficacy of Modeling Multi-Attribute Decision Problems Using AHP and Sinarchy" Eurpean Journal of Operational Research (132)1 (2001) pp.39-49

[6] Harker P.T., "Incomplete pairwise comparisons in the analytic hierarchy process", Mathematical Modeling, Vol. 9, No. 11(1987), pp. 837-848

[7] Harker P.T., and Vargas L.G., "Theory of Ratio Scale Estimation: Saaty's Analytic Hierarchy Process", management Science, Vol. 33(1987), pp. 1383-1403

[8] Saaty Thomas L., "Highlight and Critical Points in the Theory and Application of the Analytic Hierarchy process, Eur. J. Operational Research (74)3 (1994) pp.426-447

[9] Saaty T.L., "The Analytic Hierarchy Process", Mcgraw-Hill, 1980

저 자 소 개

양 광 모 : 현 (주)썬더 부설연구소 수석연구원, 공학박사
관심분야 생산관리, 안전관리, 경영과학

이 병 기 : 연세대학교 졸업, 현재 동두천시 부시장으로 재직중
관심분야는 가스안전 등이다.

강 경 식 : 현 명지대학교 산업공학과 교수, 경영학박사, 공학박사
대한 안전경영과학회 회장