

# 복합화력발전기의 신뢰도 기반 유지보수를 위한 확률론적 FMECA 평가

論 文  
56-2-5

## Stochastic FMECA Assessment for Optimal RCM of Combustion-Turbine Generating Unit

朱宰明\* · 李丞熾\*\* · 辛竣碩\* · 金鎮吾†  
(Jae-Myung Joo · Seung-Hyuk Lee · Jun-Seok Shin · Jin-O Kim)

**Abstract** - PM(Preventive Maintenance) can avail the generating unit to reduce cost and gain more profit in a competitive supply-side power market. So, it is necessary to perform reliability analysis on the power systems in which reliability is essential. Thus, to schedule optimal PM planning based on reliability that is defined RCM(Reliability-Centered Maintenance), FMECA(Failure Mode Effects and Criticality Analysis) assessment is very important. Therefore, in this paper, the procedure of FMECA assessment for optimal RCM is proposed by probabilistic approach using real historical failure data of combustion-turbine generators in Korean power systems. The stochastic FMECA is performed based on the effects of probable failure modes of combustion-turbine generating unit.

**Key Words** : RCM, FMECA, Failure Probability, IOC(Index of Criticality)

### 1. 서 론

신뢰도 기반 유지보수(RCM: Reliability Centered Maintenance)는 설비 신뢰성 중심의 유지 보수 방법으로서 각 설비의 특성 파악과 운용 환경에 따른 설비의 고장모드 분석 및 임계해석(FMECA: Failure Mode, Effects and Criticality Analysis) 평가를 통해 설비의 목표한 신뢰도를 유지하기 위한 가장 효율적이고 경제적인 유지보수계획을 수립한다.

RCM 기법을 수립하기 위하여 FMECA 평가는 중요한 단계가 되며, 이는 정확하게 평가되어야한다. 기존 FMECA는 평가자의 주관적인 면이 많이 내포되어 있어 정확하지 않은 평가가 이루어져 왔다. 또한 우리나라의 전력계통 설비들은 고장률이나 고장확률에 대한 데이터가 존재하지 않으므로 기존의 FMECA 평가방법으로는 현재 우리나라 전력계통설비의 FMECA 평가가 정확하게 이루어지기는 어렵다고 판단된다.

본 논문에서는 RCM 평가를 위한 중요한 단계인 FMECA 평가에 대해 새로운 확률론적 평가 지수인 IOC(Index of Criticality)를 이용하는 간략화 된 방법을 제안하였고, 수명에 의한 노화고장(Aging Failure)과 예측하지 못한 고장에 의한 고장 데이터를 취득하여 통계적 분석 방법(Data Analytic Method using Type II Censoring Algorithm)를 이용하여 Weibull 분포의 각 모수를 추정하고, 고장밀도함수를 구함으로써 고장확률을 계산하였다. 여기서

Weibull 분포를 이용한 이유는 모수추정에 있어 복잡성을 갖는다는 단점을 지니지만, 정확한 평균수명 예측과 수학적 으로 함수가 유연성을 갖는 장점을 가지고 있기 때문이다 [1].

### 2. 기존 FMECA 평가 기법

#### 2.1 고장모드 및 영향 분석(FMEA)

FMEA(Failure Mode Effects Analysis)란 시스템이나 설비의 잠재적인 고장 모드를 찾아내고, 시스템이나 설비의 작동 중에 이와 같은 고장이 발생하였을 경우 임무달성에 미치는 영향을 검토하여 평가하고, 영향이 큰 고장모드에 대하여 적절한 대책을 세워 고장을 사전에 방지하는 방법이다. 다음 그림 1은 기존 FMEA의 평가절차를 나타내고 있다.

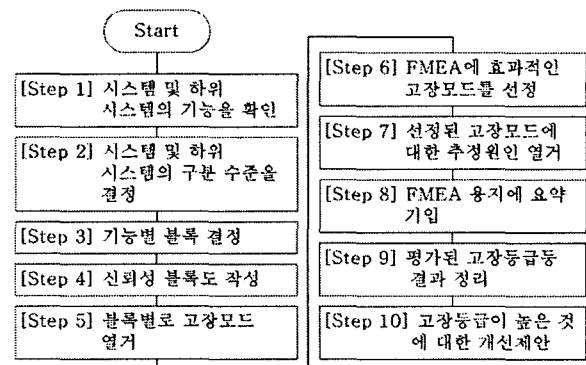


그림 1 기존 FMEA 평가절차  
Fig. 1 General FMEA assessment procedure

† 교신저자, 正會員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 正教授 · 工博  
E-mail : jokim@hanyang.ac.kr

\* 學生會員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 碩士課程

\*\* 正會員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 工學博士

接受日字 : 2006年 11月 23日

最終完了 : 2006年 12月 6日

### 2.2 임계 해석(Criticality Analysis)

임계 해석이란 FMEA를 실시한 결과 고장 등급이 높은 고장모드가 시스템이나 기기의 고장에 어느 정도로 기여하는가를 정성적이나 정량적으로 계산하고 고장모드가 시스템이나 기기에 미치는 영향을 정량적으로 평가하는 방법이다.

### 2.3 FMECA 평가

FMEA와 CA(Criticality Analysis)의 평가를 포함한 FMECA 평가는 유지보수를 위한 해석과 고장에 대한 정성적 및 정량적 예측을 가능하게 하며, 기타 정보제공을 위해 필요에 따라 FMECA 평가 양식을 변경하여 사용할 수 있다. 아래 표 1은 기존 FMECA 평가지를 나타내고 있다.

### 3. 제안한 FMECA 평가 기법

기존 FMECA 평가방법은 평가하고자 하는 설비나 기기의 선행된 검사의 고장률이나 고장확률을 알고 있어야 기준에 대한 현재 설비에 대한 평가가 가능하다. 만일 평가하고자 하는 설비의 고장확률이나 고장률을 모르는 경우는 평가자의 주관적 평가가 많이 개입될 수 있다는 큰 단점을 가지고 있다. 또한 우리나라의 전력계통설비는 특성상 선행된 검사의 고장률이나 고장확률에 대한 데이터가 존재하지 않는다. 따라서 기존 FMECA 평가 방법을 사용하여 우리나라의 전력계통설비에 적용하기는 어려움이 많기 때문에 새로운 확률론적 평가 지수인 IOC를 이용하는 간략화 된 방법을 제안하여 우리나라 실정에 맞는 FMECA 평가절차를 제안하고자 한다. 절차는 그림 2와 같다.

제안한 FMECA의 1단계부터 3단계까지는 기존 FMEA의 1단계부터 5단계까지와 동일한 과정을 가지며, 6단계에서는 제안한 IOC 지수를 계산하기 위한 단계이다. 편의를 위해 FMECA 절차를 최대한 간략화 된 FMECA 평가지를 제안 하였고, 아래 표 2는 제안한 평가지를 나타내고 있다.

표 1 기존 FMECA 평가지

Table 1 General FMECA worksheet format

식별번호 (Identification number)	Item or 기능명 (Item or Functional)	기능 (Function)	고장 형태/원인 (Failure Modes and Causes)	고장영향 (Failure Effects)			가혹도 (Severity Class)	고장예측 (Failure Predictability)	고 장 검지법 (Failure Detection)	기본정비 실 행 (Basic Maintenance Actions)	비고 (Remarks)
				부분영향 (Local Effects)	상위수준 영 향 (Next Higher Level)	최종품 영 향 (End Effects)					

표 2 제안한 FMECA 평가지

Table 2 Proposed FMECA worksheet format

Item	Function	Failure Modes and Causes	Effects	Occurrence	Severity Class	Failure Probability	IOC (Ranking)
가스 터빈 연소실	가스로 인한 열에너지를 이용하여 가스터빈 구동	가스터빈 출력이 없어지면 발전기가 정출력을 내지 못함	발전력 상실	5	1.0	0.00000016	0.00000016

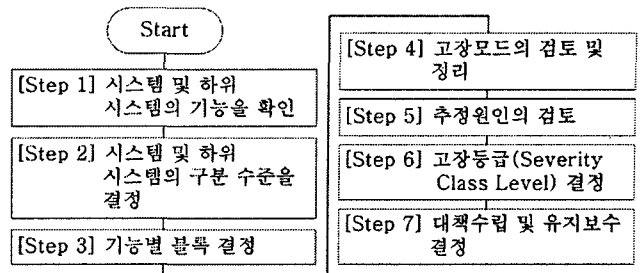


그림 2 제안한 FMECA 평가절차

Fig. 2 Proposed FMECA assessment procedure

관측시점  $t$ 에 대한 새로운 유지보수의 임계정도를 나타내는 지수인 IOC는 식 (1)처럼 정의 할 수 있다.

$$IOC_i(t) = Q_i(t) \times Severity\ Class \quad (1)$$

여기서  $Q_i(t)$ 는 고장확률을 나타내며, Severity는 임계수준(Severity Class)을 나타내고 있는 것으로서 다음 식 (2)처럼 나타낼 수 있다.

$$Severity\ Class = 1 + (F_1 \times F_2 \times F_3 \times F_4 \times F_5) \quad (2)$$

여기서 각  $F_i$ 의 평점은 표 3의 평점표를 이용하여 구할 수 있으며, 여기서 평점표는 MIL-STD을 참고하여 평가하고자 하는 설비에 맞게 계수를 정하였다. 고장등급표의 항목에 1을 더한 것은 수명을 고려한 고장확률에 가중치의 개념으로 임계수준을 정해 IOC 지수를 결정하기 위함이다

여기서 각 설비를 이루고 있는 요소는 각각 노후도(Aging)가 다르므로 각 구성요소에 대해서도 고려해야 한다. 또한 FMECA를 이용하여 RCM 계획수립을 위해서는 미래의 IOC 지수에 대한 평가가 필요하다. 그래서 전세 설비의 고장확률을 계산한 후 평가하려는 설비의 노후도를 고

려한 조건부 확률(Conditional Probability)을 이용하면 다음 식 (3)으로 정의된다[3].

$$IOC_i(t) = Q_i(t_0|t_\phi) \times Severity Class \quad (3)$$

설비  $i$ 에 대한 Weibull 분포의 누적 고장확률함수  $Q_i(t_0)$ 는 식 (4)와 같다

$$Q_i(t_0) = \left[ 1 - \exp\left(-\frac{1}{\alpha_i}(t-t_i)\right)^{\beta_i} \right] \quad (4)$$

여기서,  $\alpha_i > 0, \beta_i > 0, (t-t_i) \geq 0, 0 \leq Q_i(t) \leq 1$ 이고,  
 $t$  : 관측년도  
 $t_i$  : 설비  $i$ 의 설치 년도  
 $t_0 = (t-t_i)$  : 설비수명  
 $\alpha_i$  : Weibull 분포의 척도모수  
 $\beta_i$  : Weibull 분포의 형상모수

고장확률은 식 (4)와 조건부 확률을 이용하여 예측할 수 있으며, 그림 3은 시간영역에서 현재 시간  $t_\phi$ 와 다음 고장이 발생할 시간  $t_0$ 사이의 관계를 나타내고 있다.

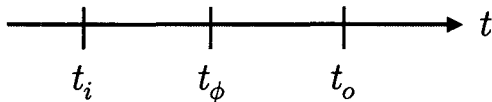


그림 3 조건부 확률을 위한 고장 관측 시간  
 Fig. 3 Failure observation time for conditional probability

다음 고장시간  $t_0$ 가 현재 시간  $t_\phi$ 에 가까워질수록  $Q_i(t_0)$ 의 시간 축이 0이 되므로  $Q_i(t_0) = Q_i(t_0|t_\phi)$ 의 관계로 나타낼 수 있으며, 조건부 확률이론에 따라 고장확률함수 식 (4)을 고려하면 조건부 확률함수를 식 (5)와 같이 표현된다.

$$Q_i(t_0|t_\phi) = \frac{Q_i(t_0) - Q_i(t_\phi)}{1 - Q_i(t_\phi)} \quad (5)$$

식 (5)의 분자와 분모는 각각 식 (6)과 (7)과 같이 정의된다.

$$Q_i(t_0) = \left[ 1 - \exp\left(-\frac{1}{\alpha_i}(t_0-t_i)\right)^{\beta_i} \right] \quad (6)$$

$$Q_i(t_\phi) = \left[ 1 - \exp\left(-\frac{1}{\alpha_i}(t_\phi-t_i)\right)^{\beta_i} \right] \quad (7)$$

여기서,  $\alpha_i > 0, \beta_i > 0, t_0 > t_\phi, t_\phi > t_i$  이다.

이는 운영자에게 유지보수 판단 기준이 되는 IOC값을 알

므로 몇 년이 지났을 때 고장이 발생할 확률을 알 수 있으므로 운영자에게 중요한 정보를 제공한다.

표 3 고장 영향 크기에 따른 평점  
 Table 3 Proposed score according to failure effect

항 목	내 용	계수
F1 (고장 영향의 크기)	- 치명적인 손실을 주는 고장	1.0
	- 약간의 손실을 주는 고장	0.7
	- 기능이 상실되는 고장	0.4
	- 기능이 상실 안 되는 고장	0.1
F2 (시스템에 미치는 영향의 정도)	- 시스템에 2가지 이상의 중대한 영향을 준다	1.0
	- 시스템에 한 가지 이상의 중대한 영향을 준다	0.7
	- 시스템에 미치는 영향은 그렇게 크지 않다.	0.5
F3 (발생빈도)	- 발생빈도가 높다.	1.0
	- 발생 가능성이 있다.	0.7
	- 발생 가능성이 적다.	0.5
F4 (방지의 가능성)	- 불능	1.0
	- 방지가능	0.7
	- 간단히 방지된다	0.5
F5 (신규설계 여부)	- 약간 변경된 설계	1.0
	- 유사한 설계	0.7
	- 동일한 설계	0.5

#### 4. 사례 연구

제안한 FMECA 평가지를 이용하여 확률론적 FMECA 평가를 실행하기 위하여 임의의 발전회사 복합화력 발전설비를 고려하였다. ○○복합화력 발전설비는 1992년 6월에 설치된 후 기존의 PM 계획에 의해 4.8년만인 1997년 3월에 A급 유지보수를 실행 하였고, 그 다음 유지보수는 2002년 2월에 실행 하였다. 본 논문에서는 취득된 데이터가 2003년 6월까지의 데이터이므로, 2002년 4월 이후 A급 유지보수를 실행하지 않은 것으로 가정하고 FMECA를 평가하였다. 결국 평가할 기간은 2002년 4월부터 관측시점인 2006년 2월까지의 3.917년이라는 기간이 되며, 다음 그림 4에 이를 표현 하였다.

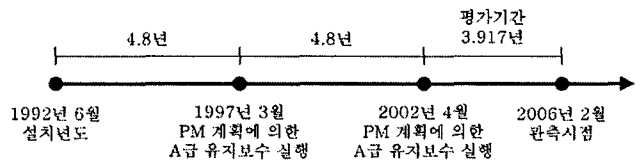


그림 4 FMECA 평가를 위한 timetable  
 Fig. 4 The timetable for FMECA assessment

우선 제안한 FMECA 평가 절차에 따라서 ○○ 복합화력 발전설비를 가스터빈 설비, 보일러 설비, 전기 설비, 제어계측 및 전산설비 4가지 하위시스템으로 분류하여 평가하였으며, 다음 그림 5에 하위시스템 분류를 표현 하였다.

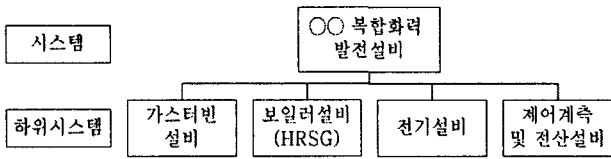


그림 5 복합화력발전기의 하위시스템의 구분  
 Fig. 5 Decomposition level of sub-system of combustion turbine generation unit

각 하위시스템의 노화고장(Aging Failure)과 예측하지 못한 고장에 의한 고장을 고려하였다. 또한, 각 하위시스템의 노화고장확률(수명확률)은 데이터 존재가 불투명하여 제작사의 명시된 권고 사용 수명을 최대한 반영하였다.

취득된 데이터를 가지고 Data Analytic Method를 이용하여 Weibull 분포 함수를 위해 각 하위시스템의 모수를 추정하였으며, 그림 6은 모수를 추정하기위한 일차함수 회귀를 나타내고 있다.

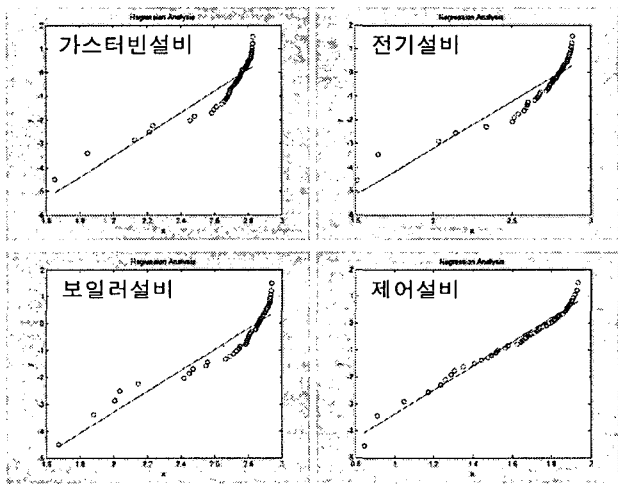


그림 6 선형회귀를 이용한 Weibull 분포의 각 모수추정  
 Fig. 6 Estimation for the shape and scale parameters Weibull distribution using linear regression

선형회귀 시킨 후 각 하위시스템의 척도모수와 형상모수를 정리하여 표 4에 나타내었다.

표 4 각 하위시스템의 척도모수 및 형상모수  
 Table 4 Scale and shape parameters of each sub-system

No	Sub-system	$\alpha$	$\beta$
1	가스터빈 설비	16.0771	4.5166
2	보일러 설비	16.6632	3.9319
3	전기설비	17.3402	3.8691
4	제어계측 설비	5.7943	4.4652

이 모수를 통해 Weibull 분포 함수를 알 수 있으며, 그림 7에 각 하위시스템의 고장밀도함수를 나타내었다.

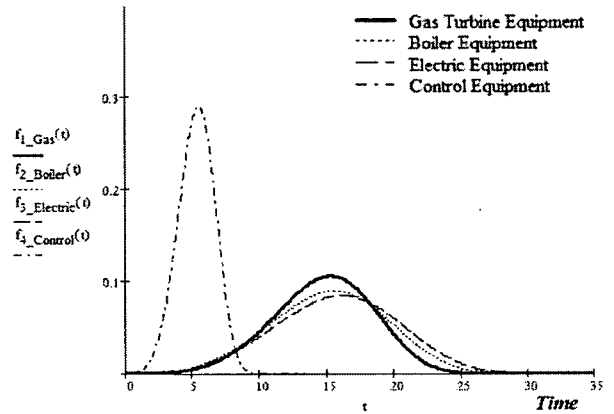


그림 7 각 하위시스템의 고장밀도함수  
 Fig. 7 Failure density function of each sub-system

고장밀도함수로부터 누적고장밀도함수를 알 수 있으며 각 하위시스템의 관측시점에서 고장확률을 알 수 있다. 표 5는 각 하위시스템을 본 논문에서 제안한 FMECA 평가지를 이용하여 나타내고 있다.

표 5에서 관측시점에서의 고장확률이 보일러 설비가 전기 설비보다 높게 나왔으나, Severity Class에 의해 IOC 지수

표 5 각 하위시스템의 FMECA 평가지  
 Table 5 FMECA worksheet format of each sub-system

Item	Function	Failure Modes and Causes	Effects	Occurrence	Severity Class	Failure Probability	IOC (Ranking)
가스터빈 설비	가스와 공기를 이용하여가스터빈구동	발전기가 정출력을 내지 못하고열에너지 공급중단	발전력 및 난방, 온수 공급중단	1	1.245	0.00169749	0.0021134 (4)
보일러 설비	열에너지를 수용가에 공급	수용가에 열에너지(난방, 온수공급)원을 공급하지 못함	난방/온수공급 불가	-	1.061	0.0033641	0.0035693 (3)
전기설비	발전기로 인해 전기에너지를 발생	수용가에 전기에너지를 공급하지 못함	전력공급 불가	3	1.172	0.0031585	0.0037018 (2)
제어계측 및 전산설비	설비들의 출력 상태를 감시하거나 제어	전력이나 열에너지 공급의 적절한 제어가 되지 않으며, 현재시스템 상태를 알 수 없음	제어상실 및 감시불능	-	1.120	0.159755	0.178926 (1)

는 보일러 설비보다 전기설비가 높은 것으로 나타났다. 이는 운영자가 판단하여 관측시점에서 유지보수를 할 경우 보일러 설비보다 전기 설비를 우선시하여 유지보수 해야 함을 의미하며, 그림 5는 각 하위시스템의 IOC 지수 함수를 나타내고 있다.

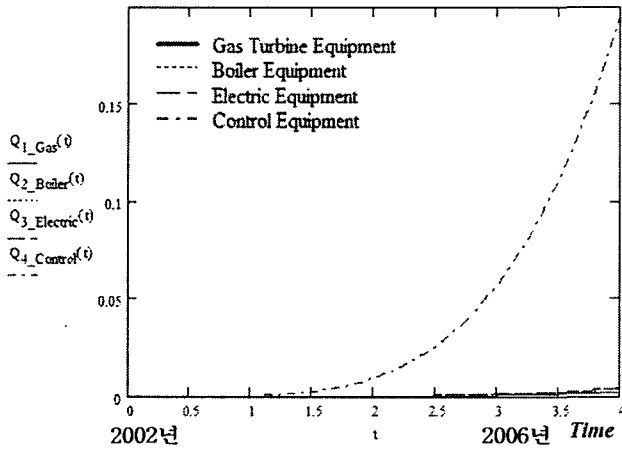


그림 8 각 하위시스템에 대한 IOC 지수 함수  
Fig. 8 IOC index function for each sub-system

조건부 확률을 이용하여 고장확률을 예측하기 위해서는 연도별 누적된 고장확률이 필요하다. 아래 그림 9는 Weibull 분포 함수로부터 얻은 그림 7을 이용하여 가스터빈 설비의 고장누적함수를 나타내고 있다[4].

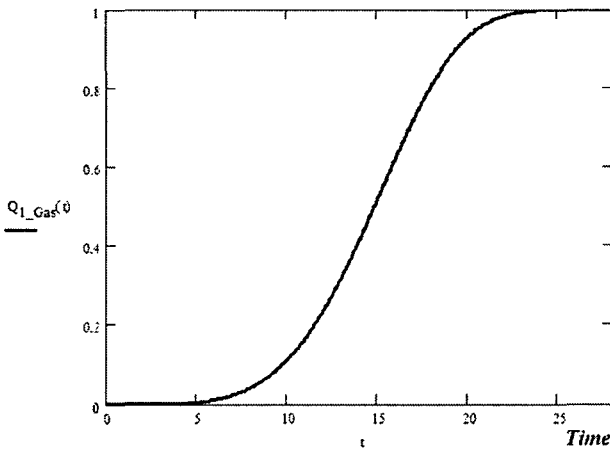


그림 9 가스터빈 설비의 누적 고장누적함수  
Fig. 9 Cumulative probability function for gas turbine equipment

가스터빈 설비의 고장확률 예측은 조건부 확률함수 식 (5)와 표 5의 데이터를 이용하여 식 (8)과 같이 계산할 수 있다.

$$Q(8, 3.917) = \frac{0.041849325 - 0.001697491}{1 - 0.001697491} = 0.0402201 \quad (8)$$

표 5 가스터빈설비 누적고장확률

Table 5 Results of cumulative failure probability of gas turbine equipment

Year	누적고장확률	Year	누적고장확률
1	0.000003565	15	0.518620202
2	0.000081594	16	0.624133749
3	0.000509211	17	0.723827947
4	0.001865954	18	0.810948439
5	0.005103869	19	0.880743343
6	0.011590737	20	0.931495864
7	0.023117618	21	0.964626079
8	0.041849325	22	0.983806481
9	0.0701887	23	0.993525624
10	0.110524232	24	0.997776517
11	0.164841968	25	0.999354037
12	0.234214446	26	0.999844398
13	0.318235215	27	0.999969499
14	0.414540221	28	0.999995234

가스터빈 설비의 고장확률 예측과 같은 방법으로 나머지 설비에 대해서도 조건부 확률을 이용하여 다음 표 6을 나타내었다. 표 6은 현재 관측시점(2006년 2월)에서의 IOC 값과 앞으로(2010년 3월)의 IOC 값을 나타내고 있으며, 관측시점인 3.917년에는 전기 설비를 2번째로 우선시하여 유지보수를 하였으나 4.083년이 지난 2010년 3월에는 보일러 설비를 2번째로 우선시해야 함을 알 수 있다. 이는 본 논문에서 제안한 IOC 지수의 중요함을 의미하는 부분으로서, 제안한 FMECA의 평가지를 이용하여 평가자가 유지보수 하고자하는 관측시점에서의 각 설비의 고장과급 효과를 IOC 지수를 통하여 보다 쉽게 알 수 있도록 제공함으로써 평가자가 어떤 설비를 먼저 우선시해야 함을 알 수 있다.

표 6 IOC 지수의 고장확률 예측값

Table 6 Expected failure probability of IOC index

Item	관측시점 고장확률 (2006년 2월)		고장확률예측 (2010년 3월)	
	Failure Probability	IOC (Ranking)	Failure Probability	IOC (Ranking)
가스터빈 설비	0.0016974	0.0021134 (4)	0.0402201	0.0513447 (4)
보일러 설비	0.0033641	0.0035693 (3)	0.0511274	0.0562147 (2)
전기설비	0.0031585	0.0037018 (2)	0.0458832	0.0557948 (3)
제어계측 및 전산설비	0.159755	0.178926 (1)	0.9825429	1.2229312 (1)

## 5. 결 론

본 논문에서는 신뢰도기반 유지보수의 중요한 단계인 FMECA에 대하여 기존 방법이 아닌 새로운 지수 IOC를 이용하여 확률론적 FMECA를 제안하였다. 또한 지수 IOC를 구하기 위해 Weibull 분포의 모수를 통계적 분석방법을 이용하여 구하였고, Weibull 분포와 조건부 확률을 이용하여 고장확률을 예측함으로써, 앞으로의 설비에 미치는 고장 파급효과를 고려함으로써 운영자가 설비를 운영하는데 있어서 아주 유용한 정보를 제공 할 것으로 사료된다.

향후 연구방향으로는 확률론적 FMECA를 이용하여 유지 보수 비용을 고려한 최적의 신뢰도기반 유지보수 계획을 수립하는 방법을 제안할 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] 이성훈, 이승혁, 김진오, "통계적 분석방법을 이용한 복합화력 발전설비의 평균수명 계산 및 고장확률 예측," 전기학회 논문지, 제 54A권, 제 10호, pp. 480-486, 2005, 10.
- [2] Cheng Yun, T. S. Chung, C. W. Yu, C. Y. Chung, Zeng Ming, and Sun Xin, "Application of Reliability-Centered Stochastic Approach and FMECA to Conditional Maintenance of Electric Power Plants in China," *IEEE International Conference on Electric DRPT*, April 2004.
- [3] R. M. Bucci, R. V. Rebbapragada, A. J. McElroy, E. A. Chebli and S. Driller, "Failure Prediction of Underground Distribution Feeder Cables," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, No. 4, October 1994.
- [4] M. J. Crowder, A. C. Kimber, R. L. Smith and T. J. Sweeting, *Statistical Analysis of Reliability Data*, Chapman and Hall, 1991.
- [5] R. Rillinton and R. N. Allan, *Reliability Evaluating of Engineering System*, Plenum Press, 1992
- [6] MIL-STD 1629A, *Reliability-Centered Maintenance*, US Department of Defense, Washington DC 20301.

## 저 자 소 개



### 주 재 명 (朱宰明)

1979년 3월 25일생. 2005년 호서대학교 전기공학과 졸업. 2005년~현재 한양대학교 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 02-2220-0347

E-mail : jjm54217@hanyang.ac.kr



### 이 승 혁 (李丞熾)

1974년 8월 3일생. 2003년 2월 한양대학교 대학원 전기공학과 공학석사. 2007년 2월 동 대학원 전기공학과 공학박사.

Tel : 02-2220-0347

E-mail : leesh93@hanyang.ac.kr



### 신 준 석 (辛竣碩)

1980년 5월 15일생. 2006년 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 2006년~현재 한양대학교 전기공학과 석사과정.

Tel : 02-2220-0347

E-mail : jsshin@hanyang.ac.kr



### 김 진 오 (金鎭吾)

1956년 1월 17일생. 1980년 서울대 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업. 1991년 Texas A&M Univ. 전기공학과 졸업 (공박). 현재 한양대 전기공학과 정교수.

Tel : 02-2220-0347

E-mail : jokim@hanyang.ac.kr