

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.11.1169>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

발전설비 최적 정비를 위한 독립형 위험도 평가 소프트웨어 개발[§]

최우성^{*†} · 송기욱^{*} · 김범신^{*} · 장성호^{*} · 이상민^{*}

* 한국전력공사 전력연구원

Development of Stand-Alone Risk Assessment Software for Optimized Maintenance Planning of Power Plant Facilities

Woo Sung Choi^{*†}, Gee Wook Song^{*}, Bum Shin Kim^{*}, Sung Ho Chang^{*} and Sang Min Lee^{*}

* Power Generation Laboratory, KEPCO Research Institute

(Received February 2, 2015 ; Revised August 12, 2015 ; Accepted August 20, 2015)

Key Words: Risk Based Maintenance(위험도기반정비), Maintenance Period(정비주기)

초록: 위험도 평가 기술은 주로 플랜트의 많은 운영설비 중 대형사고나 피해를 유발할 수 있는 위험설비를 선별하는 목적으로 개발되었다. 현재 발전소에 설치되어 있는 설비관리시스템에는 초기 버전의 위험도 평가 모듈이 설치되어 있으나 문진 위주로 구성되어 통계적 기법에 기반을 둔 고장 확률 평가보다는 평가자의 주관적인 판단에 따라 평가 결과가 좌우되었다. 또한 발전회사 서버에 기반하였기 때문에 평가자가 공간 및 시간의 제약을 받을 수 밖에 없고 현장 활용에 한계가 있었다. 본 논문에서는 문진 대신 해석적 분석을 이용한 기본 고장확률을 계산하고 현장 검사 결과 및 검사 효율도를 분석할 수 있는 독립형 위험도 평가 소프트웨어를 개발하였다. 독립형으로 현장 운용이 가능하며 최적 정비주기 예측 및 현장검사 결과에 대한 입출력 기능이 있기 때문에 정비에 직접 참여하는 현장 사용자뿐만 아니라 발전 설비의 수명연장 및 교체를 결정해야 하는 엔지니어에게 유용한 정보를 제공할 것이다.

Abstract: Risk-Risk-based inspection (RBI) has been developed in order to identify risky equipments that can cause major accidents or damages in large-scale plants. This assessment evaluates the equipment's risk, categorizes their priorities based on risk level, and then determines the urgency of their maintenance or allocates maintenance resources. An earlier version of the risk-based assessment software is already installed within the equipment management system; however, the assessment is based on examination by an inspector, and the results can be influenced by his subjective judgment, rather than assessment being based on failure probability. Moreover, the system is housed within a server, which limits the inspector's work space and time, and such a system can be used only on site. In this paper, the development of independent risk-based assessment software is introduced; this software calculates the failure probability by an analytical method, and analyzes the field inspection results, as well as inspection effectiveness. It can also operate on site, since it can be installed on an independent platform, and has the ability to generate an I/O function for the field inspection results regarding the period for an optimum maintenance cycle. This program will provide useful information not only to the field users who are participating in maintenance, but also to the engineers who need to decide whether to extend the lifecycle of the power machinery or replace only specific components.

- 기호설명 -

- POF : 고장확률(Probability of failure)
- COF : 고장피해(Consequence of failure)
- POF_g : 재료 손상확률 인자
- POF_i : 비파괴 검사결과 인자

- POF_e : 검사 유효성 인자
- VI : 육안검사(Visual inspection)
- UT : 초음파 검사(Ultrasonic test)
- UTT : 초음파 두께측정(Ultrasonic thickness test)
- MT : 자분 탐상 검사(Magnetic test)
- PT : 침투 탐상 검사(Penetration test)
- RT : 방사선 검사(Radioactive test)
- RP : 표면복제(Replication)
- HD : 경도측정(Hardness measurement)
- SAM : 샘플링 검사(Sampling test)

§ 이 논문은 대한기계학회 2014년도 추계학술대회(2014. 11. 11.-14., 김대중컨벤션센터) 발표논문임.

† Corresponding Author, woosung@kepcoco.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서론

국내 발전회사는 남동, 서부, 남부발전의 설비관리 시스템인 GENi (Growth Engine of New integration), 동서발전의 발전소 관리 시스템 POMMS (Plant Operation Maintenance Management System), 중부발전의 정비관리 시스템 등의 도입으로 통합적 설비관리와 선진적 정비관리 기술을 접목할 수 있는 설비관리 시스템을 갖추게 되었다. 각 회사들이 운영하고 있는 설비/ 정비관리 시스템은 설비의 정비 및 운전이력 DB에 기반하여 정비 절차를 전산화해서 표준화된 정비설계가 가능하다. 또한 ERP(Enterprise Resource Planning)와 연계되어 부품재고와 예산관리가 가능하기 때문에 정비 수준을 한 단계 높일 수 있다. 발전회사에 설치된 설비관리 시스템에는 정비계획 수립을 지원하는 ‘위험도 기반 정비 모듈’과 ‘신뢰도 기반 정비 모듈’이 포함되어 있어 설비의 정비시기를 예측하고 정비시기를 정할 수 있다. 그러나 ‘위험도 기반 정비 모듈’의 경우 보수적 정비 기준을 완화하고 합리적인 정비계획을 수립할 수 있음에도 불구하고 위험도 평가를 위한 현장진단 및 평가 매뉴얼이 존재하지 않아 발전소에서 활용되기에 한계가 있다. 기존에 개발되었던 위험도 기반 정비모듈은 문진 위주로 구성되어 정량적인 고장 확률 평가 결과보다는 평가자의 주관적인 판단에 따라 평가 결과가 좌우되었다. 또한 발전회사 서버에 기반하여 운용되기 때문에 평가자가 공간 및 시간의 제약을 받을 수 밖에 없다. 결국 현장 활용도를 높이기 위해서 국내 발전사에서 시행하고 있는 실 정비절차를 반영하고 객관적인 평가가 가능한 시스템 개발이 필요하다.

본 논문에서는 위험도 기반 정비관리 시스템의 현장적용 활성화를 목적으로 주관적인 평가 요소의 비중을 낮춘 준정량적 위험도평가 기능과 설비별 차기 정비주기 선정 기능을 포함한 독립형 위험도 평가 소프트웨어를 소개하고자 한다.

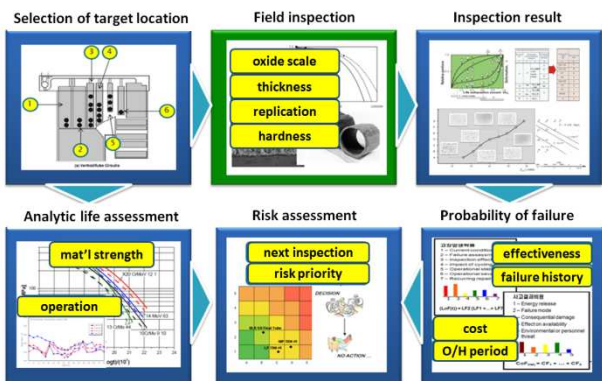


Fig. 1 The flow chart for risk assessment

2. 위험도 평가 방법

2.1 위험도 평가 절차

발전 설비의 위험도 평가를 위해서는 실제 발전사에서 수행하는 정비 절차에 기반한 Fig. 1의 표준석탄화력 위험도 평가 절차를 따라 평가 대상의 선정, 현장 검사 결과 반영, 통계기법 기반 고장 확률평가 그리고 차기 정비주기를 결정한다.

설비의 위험도는 평가 대상 설비나 부품별 손상 기구에 따라 계산된 고장확률로 결정되며 다음 세 가지 사항을 고려해야 한다.⁽¹⁾

- (a) 손상기구별 수명소비율 (잔여수명)
- (b) 현장 검사 결과
- (c) 검사방법의 효율도

평가 대상 설비나 부품이 결정되면 이전 고장이나 정비이력 등을 통해 검사 대상 위치를 결정하고 위치별 주요 손상기구 등을 정의한다. 다음으로는 운전 조건 및 사용 소재의 재료 강도 등의 정보를 이용한 해석적 방법으로 수명 소비율 및 고장확률을 계산한다. 수명 소비율 평가 결과에는 현재의 기기상태를 반영하기 위해 비파괴 검사 등의 현장 검사결과를 이용한다. 그리고 현장 검사 시 적합한 검사방법과 검사비용을 반영해서 검사의 효율도로 평가한다. 고장확률의 세 가지 사항을 고려하여 설비의 고장확률을 표현하면 식 (1)과 같다.⁽²⁾

$$POF = POF_g + POF_i + POF_e \tag{1}$$

식 (1)에서 POF_g 는 기본 고장확률, POF_i 는 검사 결과, POF_e 는 검사의 효율도이다. 설비나 부품의 손상기구에 대한 기본 고장확률 POF_g 은 해석적인 방법을 통해 계산한 수명소비율이나 잔여수명을 고장확률로 변환하여 적용한다. Table 1은 고장확률등급에 대응하는 수명소비율과 잔여수명 기준이다. 한편 POF_i 는 Table 2의 기준에 의해 평가되며 POF_e 는 Table 3에 의해 평가한다. Table 3에서 하나의 손상모드에 대해 검사 방법이 2 가지 이상일 때에는 가장 낮은 점수만 반영한다. 한편 예방정비시 설비의 상태나 현장 조건 등을 고려하여 전수검사를 하거나 일정한 비율로 검사 범위를 결정하게 된다. 이에 따라 검사 효율도를 계산할 때에는 Table 3을 참고하여 검사 효율도를 반영하고 검사비용에 따른 점수를 더하게 되면 최종적인 POF_e 를 계산할 수 있다.

Table 1 Failure probability by life consumption

Generic POF	Life consumption	Remaining useful life
< 10%	< 10%	< 100,000 hour
< 20%	< 25%	< 100,000 hour
< 30%	< 50%	< 60,000 hour
< 40%	< 75%	< 30,000 hour
40% <	75% <	< 10,000 hour

Table 2 POF_i guideline

Damage mode	Damage mechanism	Inspection result	%
Macro crack	Low cycle fatigue Creep-fatigue	No	1
		Yes (replacement)	3
		Yes (repair)	5
		Yes	10
Micro crack & creep void	Creep Low cycle fatigue	No	1
		Void at HAZ part	3
		Void at parent part	5
		Micro crack	7
degradation	Creep Low cycle fatigue	A/B	0
		C/D	1
		E/F	3
Strength degradation	Creep Low cycle fatigue	Average + std. <	1
		< Average ± std.	2
		< Average - std.	3
Thinning	Corrosion	No	1
		Yes (< 10%)	3
		Yes (10% <)	5
		< Allowable thickness	10
Swell	Creep	< 1%	1
		1% <	5
		2% <	10

Table 3 POF_e guideline

Inspection	V I	U T	UT T	MT	P T	R T	RP	H D	SA M
Thinning	G		VG			G			
Out-surface crack	A	VG		VG	G	P	A		
In-surface crack	A	VG				P			
Inner crack		VG		P		P			
Micro crack		A					G		
Crack							VG		
Deformation	G					V G			
Swell	G		VG						
Strength								G	G

VG : very good, G : good, A : average, P : poor

2.2 차기 정비주기 결정

위험도 평가 절차에 따라 설비별 고장확률 POF를 결정하면 설비의 고장형태, 고장기간, 종류, 운전조건 및 정비형태를 고려해서 고장피해 COF를 결정한다.⁽¹⁾ POF 및 COF가 결정되면 Fig. 2의 위험도 매트릭스에 최종 위험도를 표기할 수 있으며 기본 검사 주기를 기준으로 평가 결과에 따라 차기 정비주기를 결정한다. 위험도 등급은 고장발생확률 POF와 고장피해 COF의 등급으로 표현되는 위험도 매트릭스에 의해 최종적으로 나타나며 고장발생확률과 고장피해 등급은 Table 4의 기준을 따른다. 차기 정비주기의 경우 기본적으로 Table 5와 같이 위험도 평가 결과에 따라 결정되지만 실제 발전사에서 시행하고 있는 A, B 또는 C 급 예방정비주기가 최소 12개월이기 때문에 “매우 위험”의 경우에는 기본 검사 주기와 별개로 12개월로 설정하였다. 또한 차기 정비주기는 발전사 자체 운영기준에 따라 수정 보완하여 결정할 수 있다.

Table 4 POF and COF guideline

POF	score	COF	score
1	< 10%	A	< 8
2	10% ~ 20%	B	< 13
3	20% ~ 30%	C	< 20
4	30% ~ 40%	D	< 27
5	40% <	E	28 <

Table 5 Next maintenance period planning

Risk	Next inspection (month)
Severe	12
Significant	Flexible
Moderate	Basic inspection period
Minor	Basic inspection period + 12
Negligible	Basic inspection period + 24

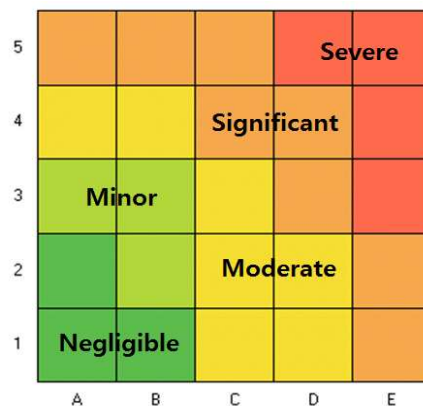


Fig. 2 Risk matrix

3. 위험도 평가 소프트웨어

3.1 위험도 평가 소프트웨어 구조

기존에는 발전소 예방정비(O/H)시 계획예방정비를 통해 얻어지는 현장검사결과를 독립적인 보고서 형태로 관리되어 왔기 때문에 본 연구를 통해 개발한 소프트웨어는 위험도 평가를 위한 연계 활용을 위해 Fig. 3 과 같은 기본 구조를 갖는다. 또한 설비 위험도 평가 관리자가 발전소 종합 설비 관리시스템 내 설치되어 있는 DB 서버와의 접속이 불가능한 상황에서도 로컬-데이터베이스를 활용하여 구동할 수 있도록 설계하였다. 이를 통해 사용자의 권한에 따라 독립적인 운용이 가능하고 서버에 저장된 위험도 평가결과 및 사전 정보 등의 정보 공유가 가능하다.

Fig. 4 는 Fig. 1 에서 제시된 위험도 평가 절차에 기반하여 단계별로 필요한 기능들을 정리한 모듈을 나타낸다. 평가하고자 하는 발전소 및 설비에 대한 기본정보를 토대로 설비별 손상기구에 대한 사전 정보가 있기 때문에 마스터라고 하는 표준서식에 현장검사에 관한 정보를 입력, 관리한다. 위험도 평가를 수행하면 이전에 수행되어 DB 에 저장되어 있는 현장 검사 결과나 위험도 평가 이력들을 비교 분석할 수 있다.

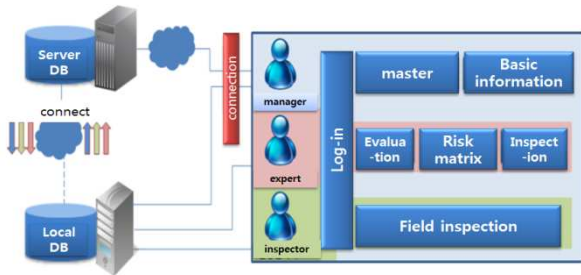


Fig. 3 The architecture of RBM software

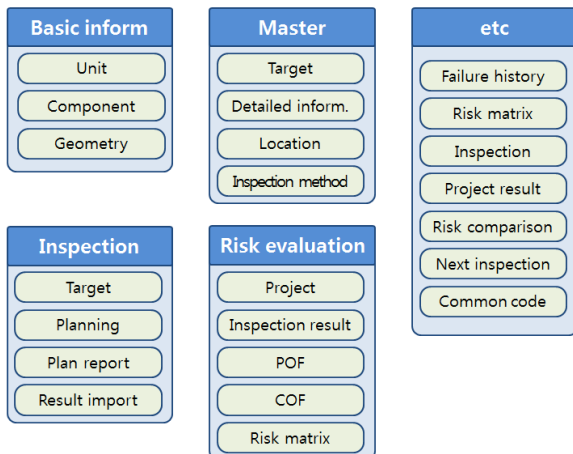
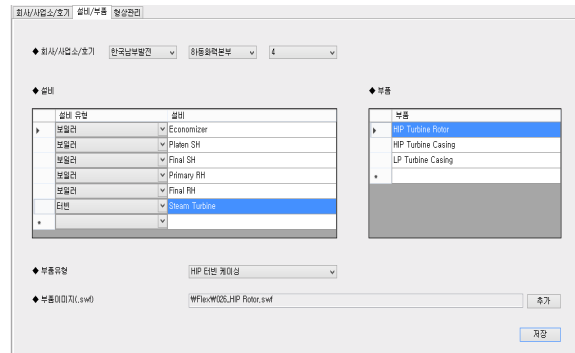
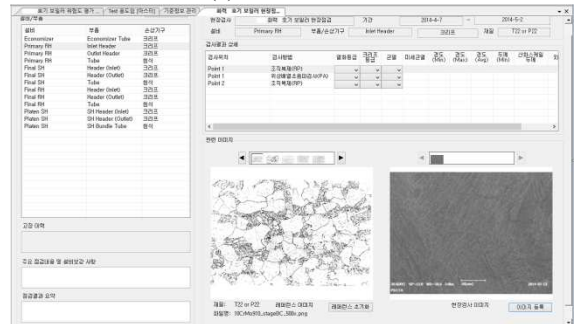


Fig. 4 RBM software module

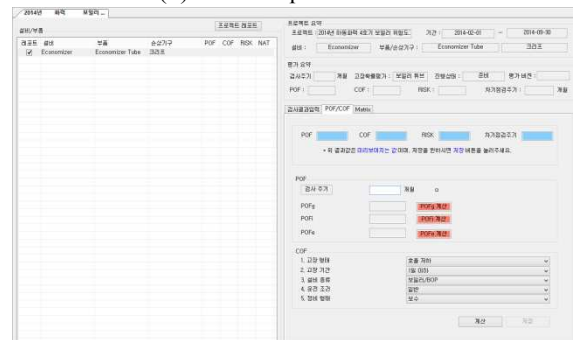
위험도 평가 절차에 따라 구성된 Fig. 4 의 개별 모듈들에 대한 예시 화면은 Fig. 5 와 같다. Fig. 5(a)에서는 평가하고자 하는 설비, 부품들을 정의하고 개별 형상정보 및 도면정보를 보여준다. 지정된 검사위치에서의 손상 기구별 현장검사 방법 및 결과는 Fig. 5(b)에 나타난다.



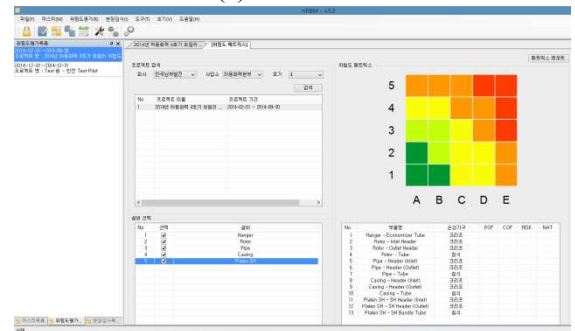
(a) Basic information



(b) Field inspection information



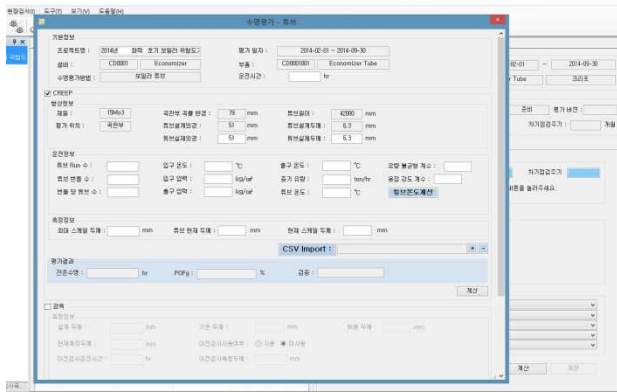
(c) Risk assessment



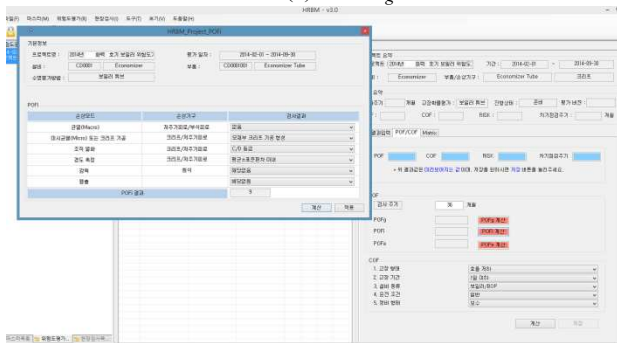
(d) Risk matrix

Fig. 5 Example display of RBM software

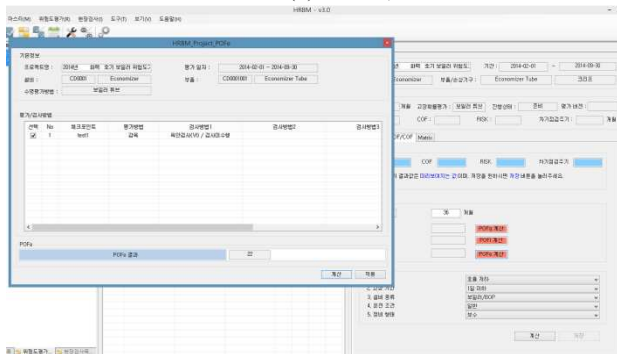
Fig. 5(c)는 설비별 위험도를 평가하는 화면으로 식 (1)의 POF_g , POF_i , POF_e 를 계산하는 대표화면은 Fig. 6과 같다. 기본 고장확률 POF_g 는 Fig. 1의 위험도 평가 절차 중 해석적 손상평가를 통해 결정되며 크리프 및 감속 손상을 고려한 보일러 튜브에 대한 예시 화면은 Fig. 6(a)와 같다.⁽⁴⁾ 설비별로 주 손상기구가 다르기 때문에 보일러 세부 부품이나 터빈 설비에 따라 평가화면은 다르게 구성된다. 검사결과 POF_i 및 검사 효율도 POF_e 예시 화면은 Fig. 6(b), (c)에 나타난다. 한편 Fig. 5(d)는 위험도 평가 결과가 도시되는 위험도 매트릭스 화면으로 고장확률 POF 및 고장피해 COF가 결정되면 해당 매트릭스안에 결과가 표시된다.



(a) POF_g



(b) POF_i



(c) POF_e

Fig. 6 Example display of failure probability evaluation

4. 위험도 평가 사례

본 연구를 통해 개발된 독립형 위험도 평가 소프트웨어를 이용하여 위험도 평가를 수행하고 정비주기를 선정하는 사례는 다음과 같다. 국내 500MW 급 ‘A’ 발전소 보일러는 124,415 시간동안 운전되었고 40 회의 기동정지를 수행한 노후설비로서 경년손상에 민감하고 노후화에 따른 검사주기 단축과 검사범위 확대로 운영비용의 증가가 예상된다.⁽⁵⁾ 보일러 구성 부품별 손상특성을 고려한 위험도 평가와 이를 기반으로 하는 검사 및 정비 계획을 수립한 결과는 Table 6 및 Fig. 7 과 같다. 위험도 평가 결과 판형과열기(platen superheater tube), 최종과열기(final superheater tube), 최종재열기(final reheater tube) 및 수냉벽(waterwall)이 위험한 설비로 평가되었다. 위험도 평가 결과는 대상 발전사에서는 Table 6의 결과에 따라 향후 정비계획을 수립하는데 사용된다.

Table 6 Risk assessment result

Facility	Result	Risk	Month	Maintenance
Hanger	thinning	3C	24	
Platen SH	creep	1C	24	
	thinning	4C	18	UTT
Final SH	creep	2C	24	
	thinning	4C	18	UTT
Primary RH	creep	2C	24	
	thinning	3C	24	
Final RH	creep	2C	24	O-HDR vent
	thinning	4C	18	UTT
Economizer	thinning	3B	36	UTT
Waterwall	thinning	5B	18	Replace
MSP	creep	3C	24	
HRP	creep	3C	24	

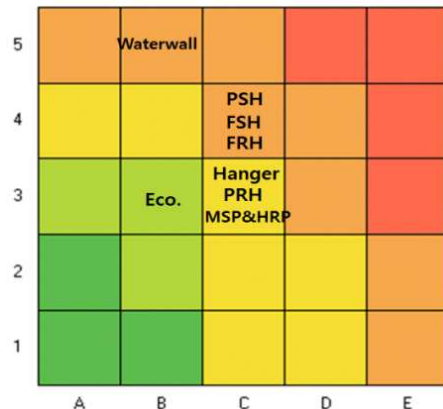


Fig. 7 Risk matrix result

기존 발전사의 정비주기는 위험도 평가를 적용하지 않았기 때문에 부품의 상태와 상관없이 24 개월 및 48 개월로 결정되어 운영되었다. 독립형 위험도 평가 소프트웨어에는 500MW 급 보일러 설비 및 부품에 대한 형상, 재료 DB 가 내장되어 있기 때문에 현장 검사 결과를 반영하여 Table 6 에 서와 같이 위험도에 따른 차기 정비주기를 결정할 수 있다. 개발된 소프트웨어로부터 설비별 위험도를 결정할 수 있으며 위험도가 상대적으로 높게 나온 4 개 설비들(4C, 5B)에 대해서는 정비주기를 18 개월로 단축해야 하며 안전하다 판단되는 절탄기(3B)의 경우에는 36 개월로 정비주기를 연장할 수 있다.

5. 결 론

(1) 본 연구에서는 주관적인 평가 요소를 낮추고 현장 활용성을 향상시켜 발전설비 정비 최적화에 유용하게 사용할 수 있는 독립형 위험도 평가 소프트웨어를 개발하였다.

(2) 위험도 평가 프로그램은 정량적 해석을 목표로 해석적 분석을 이용해서 기본 고장확률을 계산하고 현장 검사 결과 및 검사 효율도를 분석하는 기능을 갖고 있다.

(3) 서버에 기반하지 않는 독립형으로 개발되었기 때문에 정비에 직접 참여하는 현장 사용자 뿐만 아니라 발전 설비의 수명연장 및 교체를 결정해야 하는 엔지니어에게 유용한 정보를 제공할 것이다.

(4) 최적 정비시기 예측을 통해 발전소 이용을 향상시키고 안정적으로 전력을 공급하는데 기여할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 “발전설비 예측정비를 위한 위험도 평가 현장적용 및 실증(2011.4.1 2013.12.31)”과제와 관련하여 남동, 서부, 중부, 남부발전의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

- (1) Torigoe, M., Saito, N., Tarimi, K., Okatsuka, Y., Fuji, A. and Kihara, S., 2002, "Maintenance Planning and Cost Reduction by RBM Techniques in Fossil-Fired Power Boilers," *Risk Based Management of Power Plant Equipment Seminar, ETD*, pp.9-15
- (2) Song, G. W., Kim, B. S., Choi, W. S., Park, M. S., 2013, "Prediction of Maintenance Period of Equipment Through Risk Assessment of Thermal Power Plant," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No.10, pp.1291~1296
- (3) KEPIC, 2014, "Inspectio Planning Using Risk Based Method – Boiler/Piping," MMI-1
- (4) Choi, W. S., Song, G. W., Chang, S. H., Park, M. S. and Lee, S. M., 2014, "Evaluation of Boiler Tube Failure Probability Considering Thinning Damage," *KSME Spring Conference*, Vol. 34, No. 9, pp.1265~1272
- (5) Choi W.S., Song G.W., Chang S. H., Lee S.M., 2014, "Verification and Application of Risk Assessment for Predictive Maintenance," KEPRI report, TR.9336.S2014.0559
- (6) HITACHI, 2013, "Risk-Based Maintenance(RBM) Assessment Report," KCM 3761
- (7) KEPRI, 2014, HRBM User manual