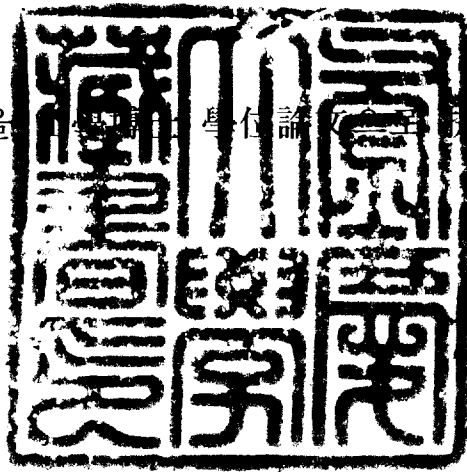


工學博士 學位論文

安全性과 經濟性を 考慮한 原子力 發電所
設備管理 最適化에 관한 研究

指導教授 金 東 祚

이 論文을 釜慶大學校 大學院 機械工學部 知能機械工學專攻 李 雨 芳 提出함



2005年 8月

釜慶大學校 大學院

機械工學部 知能機械工學專攻

李 雨 芳

李雨芳의 工學博士 學位論文을 認准함.

2005年 8月 31日

主	審	工學博士	양 보 석
副	審	工學博士	이 내 우
委	員	工學博士	김 상 봉
委	員	工學博士	안 남 성
委	員	工學博士	김 동 조



목 차

List of Figures	iv
List of Tables	vi
Abstract	viii
I. 서 론	1
1. 연구 배경	1
2. 논문의 구성	2
2.1 기능적 중요도 결정 및 예방정비 템플릿	2
2.2 수명주기비용	3
2.3 계층 분석적 의사결정기법	3
II. 관리의 기본	5
1. 설비 관리의 개념	5
2. 설비관리에 관련된 용어	6
3. 설비관리의 전략과 전술	7
3.1 전략 및 전술	7
3.2 고장 특성의 분석	8
3.3 고장 확률과 정비 주기	9
4. 예지정비 및 예방정비 전략	10
5. 선진 사례 모델	11
6. 프로세스 별 주요 활동	12
7. 자재 관리	15
8. 마스터 데이터	16
III. 기능적 중요도 결정 방안 및 예방 정비 템플릿	17
1. 기능적 중요도 결정	17
2. 기능적 중요도 결정의 절차	21
2.1 기능적 중요도 분류	22
2.2 예방정비 그룹화	28

2.3 운전 빈도 및 운전 환경의 결정	32
3. 기능적 중요도 결정의 예방정비 템플릿에의 적용	34
4. 원전의 예방정비 현황	35
5. 예방정비 템플릿의 사례	36
5.1 표준 예방정비 템플릿	36
5.2 정의와 업무우선순위	37
6. 기능적 중요도 결정과 예방정비 템플릿의 시범 적용	40
6.1 시범 발전소 등록설비 현황	40
6.2 기능적 중요도 등급 및 운전 빈도	41
6.3 설비유형별 예방정비 그룹화 현황	42
6.4 최적 설비유형과 기존 설비유형의 비교	43
6.5 설비 유형별 예방정비 직무 리스트 등록현황	44
6.6 설비관리 최적 프로세스 도입 시의 정량적 효과	47
6.7 국내 원자력발전소 정비주기의 비교	48
6.8 설비관리 최적 프로세스 도입 시의 정량적 비교	49
 IV. 발전 설비관리에 수명주기비용의 적용 연구	51
1. 경제성 평가기법	51
2. 수명주기비용에 관련된 용어	53
3. 수명주기 비용 프로세스	57
4. 수명주기 비용 수목	58
5. 취득비용과 유지비용 수목	59
6. 수명주기비용의 공식	60
7. 수명주기비용의 분석	62
8. 웹 프로그램 소개	64
8.1 수명주기비용 웹 프로그램 흐름도	64
8.2 수명주기비용의 평가 시작	65
8.3 수명주기비용의 리스트 화면	66
8.4 수명주기비용의 계산	67
9. 적용 사례	72
9.1 대상기기의 선정	72
9.2 단계별 프로세스	72

V. 투자 우선순위 결정을 위한 계층적 의사결정 기법	80
1. 투자 분석의 현실과 계층적 의사결정 기법	80
1.1 투자 분석 현실	80
1.2 AHP 도입의 필요성	81
2. 투자지표 선정	81
2.1 투자지표 의미	81
2.2 투자지표 선정 방법	82
3. 투자 평가지표의 적용	83
4. 투자 평가 지표의 주요항목	84
4.1 안전성 향상	84
4.2 필수 정비	85
4.3 신뢰성	85
4.4 출력 증강	86
4.5 생산성	86
5. 계층적 의사결정 기법을 이용한 투자타당성 평가	87
5.1 순위선정 방법	87
5.2 계층적 의사결정 수행 과정	90
6. 평가 기법 개발 및 검증	92
6.1 개요	92
6.2 평가지표별 중요도 산정	92
6.3 계층구조 구축	92
6.4 상위계층의 중요도 산출	92
6.5 쌍대 비교	94
6.6 평가지표의 가중치와 우선순위 연산	95
6.7 하위계층의 등급 결정	97
6.8 종합 평가 결과	101
7. 설비투자에 계층적 의사결정 기법 도입효과	102
VI. 결 론	103
참고 문헌	105

List of Figures

Fig. 1. 1	The block diagram of optimized plant maintenance process	4
Fig. 2. 1	Optimized preventive maintenance period	7
Fig. 2. 2	The malfunction characteristic of the past days	8
Fig. 2. 3	The various malfunction characteristic of the present	8
Fig. 2. 4	Average span of life and practical use	10
Fig. 2. 5	Best practice model	11
Fig. 2. 6	Plant maintenance and material management process	16
Fig. 3. 1	Flow chart for functional importance determination	22
Fig. 3. 2	Functional importance determination: main frame	23
Fig. 3. 3	critical component classification: main frame	24
Fig. 3. 4	critical component classification: critical grade	25
Fig. 3. 5	critical component classification: minor grade	26
Fig. 3. 6	Plant maintenance grouping	29
Fig. 3. 7	Create plant maintenance group	30
Fig. 3. 8	Determine duty cycle and service condition	33
Fig. 3. 9	PM templates	37
Fig. 3.10	The definitions of PM templates	38
Fig. 3.11	PM task list	39
Fig. 3.12	The distribution map of the model plant's PM grouping	42
Fig. 3.13	Compare optimized with exist equipment type	44
Fig. 3.14	Compare equipment types with task list	45
Fig. 3.15	Required manpower for horizontal centrifugal pump	49
Fig. 4. 1	Life cycle cost process	58
Fig. 4. 2	The upper level at the life cycle cost trees	59
Fig. 4. 3	Acquisition cost trees	59
Fig. 4. 4	Maintenance cost trees	60
Fig. 4. 5	The life cycle cost trees of the SAE model	61
Fig. 4. 6	LCC analysis examples	63
Fig. 4. 7	Flow chart of web program for life cycle cost	64
Fig. 4. 8	Main picture of web program	65

Fig. 4. 9	Equipment search	65
Fig. 4.10	Life cycle cost list	66
Fig. 4.11	Determination of life cycle cost	67
Fig. 4.12	Calculation of capital cost	69
Fig. 4.13	Calculation of operating expenses (list)	69
Fig. 4.14	Detailed calculation of operating expenses	71
Fig. 4.15	Deletion of a record	71
Fig. 4.16	Cost element analysis on the valves(V and C company)	74
Fig. 4.17	Annual cost profile for "V" company's dump valves	75
Fig. 4.18	Annual cost Profile for "C" company's dump valves	76
Fig. 4.19	Breakeven chart	78
Fig. 4.20	Comparison of LCC and efficiencies	79
Fig. 5. 1	Determination system using AHP	93
Fig. 5. 2	Hierarchical structure of Investment priority order	93
Fig. 5. 3	Examples of weighting factor	95
Fig. 5. 4	Absolute evaluation on the lower hierarchy	98
Fig. 5. 5	The rate of importance	100
Fig. 5. 6	The rate of absolute evaluation	101
Fig. 5. 7	The result of prioritization for the evaluation	101

List of Tables

Table 2. 1	Process on establishing work plan	13
Table 2. 2	The roles of planner	13
Table 2. 3	The roles of scheduler	14
Table 2. 4	The roles of supervisor	14
Table 2. 5	The roles of craftsman	15
Table 3. 1	The grade of functional importance determination	18
Table 3. 3	Service condition examples (valve-check, switchgear low-voltage)	20
Table 3. 4	Criteria on the critical and minor grade	27
Table 3. 5	Criteria on the no impact grade	28
Table 3. 6	The classification classified by equipment types	30
Table 3. 7	Generic criteria	34
Table 3. 8	The comparison on task lists and periods	36
Table 3. 9	Task list descriptions	40
Table 3.10	The present state of model plant's equipments	40
Table 3.11	FID statistics(model plant)	41
Table 3.12	The present state of model plant's PM grouping	42
Table 3.13	Optimized equipment types	43
Table 3.14	The present state of model plant's task lists	45
Table 3.15	Comparison between foreign and domestic plants	48
Table 4. 1	Discount rates examples	53
Table 4. 2	System efficiencies examples	62
Table 4. 3	Comparison of equipment specifications	72
Table 4. 4	Basic information on the V and C company	73
Table 4. 5	The cost element analysis on the mechanical fields	74
Table 4. 6	The cost element analysis on the I&C fields	75
Table 4. 7	Comparison of net present value and efficiencies	76
Table 4. 8	Comparison of present and accumulative value	77
Table 4. 9	Life cycle cost and system efficiencies	78
Table 5. 1	Investment fields on the operation plants	83
Table 5. 2	The matrix of pair-wise comparison	88

Table 5. 3 The upper class	90
Table 5. 4 The lower class(absolute)	91
Table 5. 5 Random Index	91
Table 5. 6 The importance grade of upper class	94
Table 5. 7 The indicator of relative evaluation	94
Table 5. 8 Priority vector	95
Table 5. 9 Consistency rate	96
Table 5.10 Test data and results	97
Table 5.11 The importance grade of lower class	98
Table 5.12 The criteria of absolute evaluation	98

Optimization of Maintenance Management for a Nuclear Power Plant Considering Its Safety and Economics

Woo-Bang Lee

Major of Intelligent Mechanical Engineering
Division of Mechanical Engineering
Graduate School
Pukyong National University

Abstract

We can highly improve the economical efficiency as well as the safety of nuclear power plants by optimizing plant maintenance, as they need a large source of capital. Although various methodologies on plant maintenance have been introduced across the globe till now, it is still being developed, or if ever, partially adopted at this moment to apply scientific analysis methodologies on the selection of crucial investment factors and their prioritizations, covering the equipment reliability improvement, cost and effect analysis during its life cycle and other important decision-making processes needed. Accordingly, in an effort to optimize not only the safety but also the economical efficiency of nuclear power plants, this dissertation deal with the followings:

1. To evaluate the importance of each piece of plant equipment, define its appropriate maintenance task lists and periods, and develop the methodologies and tools which include the relevant processes and feed-back systems, all these allowing us to focus our resources such as man-power, materials and costs on the most optimized plant maintenance and to continuously improve our equipment management capabilities.
2. To develop methodologies for selecting the alternatives by using (cost and effect risk oriented) economical evaluation and implement a computer program by which we can evaluate efficiently when equipments should be replaced or improved.

3. To develop and apply the most optimized investment decision-making methodologies for nuclear power plants by using Analytical Hierarchy Process (AHP), which define investment factors of equipments and assist in their prioritizations from the perspective of the business management of the power plant in general.

To summarize, this paper is to not only delve into the methodologies which can optimize the safety and the economics of plants but also implement the methodologies through IT systems. In this regard, we intend to establish plant maintenance theories and provide the hands-on guidance applicable to operating power plant and the IT systems after applying these methodologies to a selected site, operating the pilot systems and evaluating the results.

I. 서 론

1. 연구 배경

원자력발전소(이하 원전이라 함.)는 설비 중심의 산업으로 전력생산 원가에 있어서 원료인 연료의 비용은 10% 이하인 반면에 감가상각비 및 이자와 설비관리의 비용이 매우 높다. 감가상각비와 이자는 설비의 설치 즉, 건설비용을 말하며 건설이 완료된 후에는 변경이 거의 불가능하지만, 설비를 관리하면서 발생하는 비용은 새로운 기법을 연구 개발하고 적용함으로써 발전소의 안전성 및 신뢰성과 더불어 경제성을 크게 향상시킬 수 있다.

현재 국내 원전의 설비관리는 ERP(enterprise resources planning) 시스템[1,2]에 의한 최상의 운전사례를 기반으로 하여 추진되고 있고, 이와 함께 발전소 설비의 예방정비를 효과 중심으로 시행하기 위하여 외국의 우수 발전소에서 시행하고 있는 신뢰도 기법을 도입하고자 노력하고 있다. 이러한 신뢰도 기법은 발전소의 모든 설비를 기능적 중요도로 분리하고 안전성 및 경제성과 관련된 중요기기를 선별함으로써 인력, 자재 및 비용과 같은 자원을 효과적으로 적재적소에 배분 할 수 있다. 아울러 정비 주기를 유동적으로 조정하여 안전성 및 경제성 측면에서의 설비관리의 효과를 극대화 하는 것이다.[4,5]

또 비용 측면에서 설계, 개발, 생산 등의 총 비용을 고려한 현재가액 및 미래가액을 결정하고 설비의 수명기간 중의 모든 비용을 예측함으로써 대체 설비의 선택 시에 효과적인 방법으로 용이하게 선택할 수 있는 신 개념을 적극적으로 활용하려는 노력을 기울이고 있다. 또한 수명주기비용의 투자 결정 방법에 추가하여 과학적인 설비의 투자결정방법을 제공하는 계층 분석적 의사결정 기법(AHP, analytic hierarchy process)을 원전의 설비관리에 적용하기 위한 지속적인 연구를 수행하고 있다.

설비의 신뢰도 및 수명 주기 비용, 계층 분석적 의사결정 기법 등에 대한 현재까지의 연구결과 및 시행 현황을 고찰하여 볼 때, 이들 세 가지 방법이 통합적으로 운영되지 못하고 각 설비에 대해 개별적인 평가만을 수행하여 왔다. 또한 설비의 신뢰도 측면에서는 각 발전소의 정비 방법이 통일화 및 체계화 되어

있지 못하고, 각 발전소의 정비 문화에 따라 정비 주기 및 정비 항목이 각기 다르다.

이에 본 논문에서는 안전성과 경제성을 제고하는 효과적인 원전 설비 관리로도모하기 위해, 가동 중인 원전의 모든 설비에 대하여 설비의 신뢰도 및 수명 주기 비용, 계층 분석적 의사결정 기법을 이용하여 설비에 대한 투자 우선순위를 정하고 주요설비에 통합적으로 적용하여 효과적으로 자원을 배분하는 방법을 제시한다. 아울러 발전소 별로 상이한 설비유형 별 정비 항목 및 정비 주기를 통일화, 체계화하여 표준안을 작성하며, 이를 전산시스템으로 개발하여 정비 주기의 선정, 자재 배분, 대체 설비의 선정 등의 관리를 과학적으로 수행할 수 있도록 안전성 및 경제성을 제고하는 최적의 설비관리 방법론 및 도구를 개발한다.

특히 본 논문은 발전소 설비의 안전성 및 경제성을 제고하기 위하여 각 설비에 대해 설비신뢰도 프로세스를 적용하여 기능적 중요도 결정 및 예방정비 템플릿을 개발하고, 수명 주기비용을 계산하며 발전소 실정에 맞는 지표를 설정한다. 투자 우선순위 결정을 위한 계층 분석적 의사결정 기법을 개발하여 하나의 설비에 세 가지 방법이 적용됨으로써 안전성과 경제성을 제고하는 총체적인 설비관리 데이터베이스 시스템을 구축하여 활용하고자 하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 논문의 구성

2.1 기능적 중요도 결정 및 예방정비 템플릿

설비관리에 있어서 예방 및 예지정비를 효과적으로 수행 할 수 있는 프로세스를 개발하고 전략적인 관점에서 동일 설비이라도 그 설비가 수행하는 기능과 운전 환경에 따라 설비의 관리 등급을 결정하는 기능적 중요도 결정(FID, functional importance determination) [4]을 시행하여 그 등급에 맞는 예방정비 템플릿(preventive maintenance templates) [4]을 개발한다. 그리고 이를 사용하여 효과적으로 인력, 자재, 비용 등 자원을 배분하고자 한다. 설비의 운전 상태나 점검 결과를 토대로 피드백하여 최적의 관리 상태를 유지하고, 동일 유형의 설비에 대해 동일한 예방정비 템플릿을 적용하여 설비관리업무에 통일화, 단일화를

기할 수 있도록 한다.

- 1) 해외의 우수 발전소에서 수행하고 있는 기능적 중요도 결정 기준을 도입하여 발전소 실정에 적합한 기준을 개발
- 2) 가동 원전 중에서 시범 발전소를 선정하여 수립된 기능적 중요도 결정 기준을 적용하고 중요 기능의 결정 절차에 대한 타당성 평가
- 3) EPRI(electric power research institute)에서 제공한 74개 기본 예방정비 템플릿[3]을 중요도 결정 결과에 따라 적용하고, 제공된 템플릿 이외의 추가적인 템플릿은 발전소의 운전 및 정비 경험을 반영하여 자체의 실정에 맞게 작성.

2.2 수명주기비용

설비의 신규 취득이나 설비 교체 시의 비용 측면에서 설계, 개발, 생산의 총 비용을 고려한 현재가액(NPV, net present value)과 효율을 결정하고, 설비 수명 기간 중 모든 비용을 예측하여 대체 설비 선택을 효과적으로 수행할 수 있도록 수명주기비용(LCC, life cycle cost)을 결정하며, 그 순서는 다음과 같다.

- 1) 자본 비용, 취득 비용 카테고리의 각 입력 항목을 선정
- 2) 입력된 항목에 대해 감가상각, 순수익, 현금 흐름, 할인율, 현재가액 등의 정보가 자동으로 출력될 수 있는 시스템 구축
- 3) 연간 재발 비용에 있어서는 설비 각 부품(예를 들면 펌프의 베어링, 임펠러, 전동기 등)의 MTBF(mean time between failure), 연간 고장 건수, 수리 시간, 활동 비용 등의 입력 요소에 대해 손실액 및 MTBF를 고려한 총비용 등의 출력 자료가 자동으로 출력될 수 있는 시스템 구축
- 4) 최종적으로 각 설비에 대한 현재가액 및 효율을 데이터베이스화하여 각 설비에 대한 우선순위를 매길 수 있도록 한다.

2.3 계층 분석적 의사결정기법

설비의 교체, 보강 등 발전소 설비관리에 필수적으로 수반되는 투자 행위에 대하여 계층 분석적 의사결정기법(AHP, analytic hierarchy process)을 활용하여 원자력발전소의 설비관리를 위한 투자 평가지표를 선택 발전소에 국한하여 선정

하고 우선순위 결정에 적용할 수 있도록 개발한다.

- 1) 평가항목 지표의 선정 시에 가동 원전의 자체 실정 및 중요도 등을 반영하여 작성
- 2) 의사결정 작업 시에 최소 5명 이상이 평가를 수행 한 후, 이의 평균값을 적용하여 개인별 주관이 반영될 수 있는 소지를 최소화하며 일관성 지수가 1을 초과하는 결정 작업에 대해서는 제외[74]

상기의 설비관리에 관련된 기능적 중요도 평가(FID) 프로그램, 수명주기 비용 평가(LCC) 프로그램, 계층적 의사결정(AHP)에 의한 투자우선순위 결정을 할 수 있는 프로그램을 개발하고, 실제 설비관리를 수행할 수 있는 비즈니스 프로그램인 ERP(enterprise resources planning) 시스템에 적용하여 설비를 관리하는 프로세스 모델을 제시한다.[7,8]

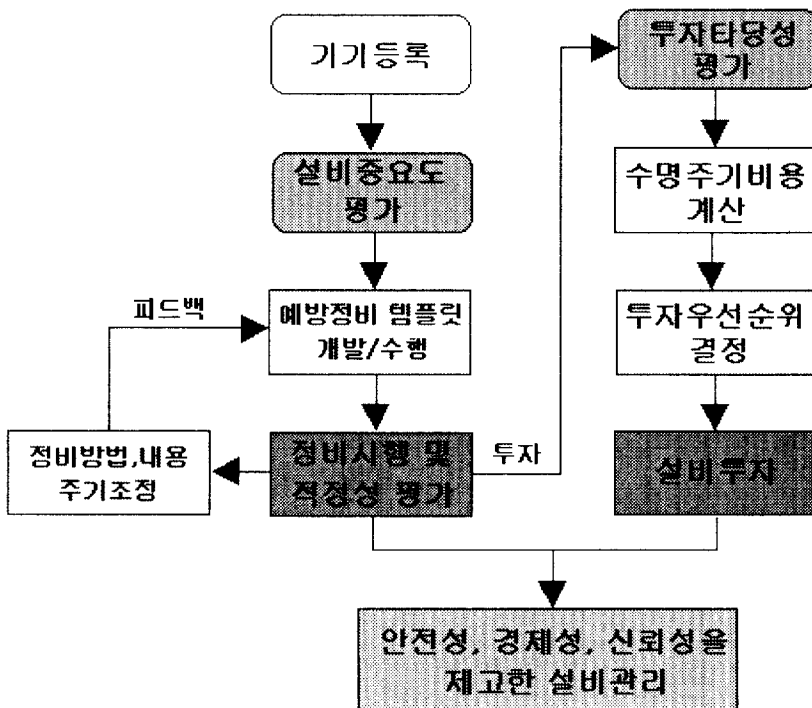


Fig. 1.1 The block diagram of optimized plant maintenance process

II. 관리의 기본

1. 설비 관리의 개념

설비관리의 개념은 사전적 의하면 기존의 상태를 지속 또는 유지하기 위한 일련의 활동을 말한다. 다시 말하면 물리적 자산이 의도된 기능을 지속적으로 유지할 수 있도록 해주는 것이며, 설비의 성능을 요구되는 표준성능으로 유지시키는 것이다. 설비관리는 하나의 프로세스로 정의될 수 있으며, 자산이 취득되어 폐기될 때까지의 전 기간동안 관리를 하는 일종의 서비스이다.[5,6]

설비관리를 하는 목적은 자산의 운영자에게 요구되는 신뢰성 및 가용성을 보증하는 것이며, 단지 설비를 현 상태로 유지하는 것보다는 설비의 신뢰성 및 생산성을 향상시키고, 수명을 최적화하며, 정비를 위한 비용을 최소화하여 운영자의 경제적 이득을 최대화하는데 있다. 또한 원전과 같이 안전성을 최우선으로 하는 플랜트의 설비에 대해서는 안전은 물론 환경적인 법 기준을 준수할 수 있음은 물론 단기적으로 고장을 줄이고 장기적으로 정비물량을 최소화 할 수 있어야 한다. 다시 말하면, 설비관리를 하는 목적은 지속적인 향상과 혁신을 통해 정비의 요구를 최소화하는 것이다.[5,6]

설비관리의 핵심영역은 작업 스케줄링, 수리 시간 및 고장 대응 시간, 예비품의 가용성을 취급하는 설비 가용성과 작업 및 작업자의 품질, 정비 후 제 기능을 발휘할 수 있는 설비의 신뢰성, 투입된 작업 인력과 수리 시간 등을 고려하는 정비 비용, 설비 및 작업자의 안전, 방사능 피폭 관리 및 폐기물 등을 고려하는 방사선 환경 분야를 포함한다.

효과적인 설비 관리는 중장기, 연간, 주간 등의 계획을 치밀하게 수립하여 안전성 및 경제성을 제고할 수 있어야 한다. 중장기 계획수립은 회사 경영전략 중의 하나로써 자산 수명에 대한 장기적인 예측을 하며 설비관리의 장기 비전을 달성하기 위한 실행계획이라 할 수 있고, 원자로, 증기발생기 등 핵심자산에 대한 투자계획을 수립한다. 연간계획수립은 설비의 휴지계획, 계획 예방정비 및 중요검사작업을 취급하며, 설계변경 및 투자공사와 같은 주요 개선활동과 새로운 기술 및 시스템의 도입, 장기 조달자재의 검토를 수행한다. 주간계획수립은 주간단위의 정비작업 일정 조정 및 수립뿐 만 아니라 자원의 효율적인 배분을

하고 발전계획과 연계하여 중복작업이 될 수 있는 소지를 사전에 차단할 수 있어야 한다.

2. 설비관리에 관련된 용어

1) 설비의 가용성(availability) [10,53-55]

설비가 전체의 가동 계획 기간 중에 얼마나 가용한 상태에 있는지를 나타내는 지표를 말한다. 가용성의 향상은 설비 신뢰성(reliability)과 정비 용이성(maintainability)의 향상을 통해 성취할 수 있고, 가용성은 평균 고장간격시간(MTBF, mean time between failure)과 정비용이성(MTTR, mean time to repair)으로부터 다음과 같이 계산 할 수 있다.

$$\text{가용성(availability)} = \text{MTBF} / (\text{MTTR} + \text{MTBF})$$

2) 설비 신뢰성[10,53-55]

설비의 신뢰성은 평균 고장간격 시간(MTBF)으로 나타낼 수 있으며, 이는 설비의 고장이 얼마나 자주 발생하는가를 나타내는 지표이다. 설비의 신뢰성을 향상시키기 위해서는 MTBF를 연장시키는 전략이 요구된다.

$$\text{MTBF} = \text{전체 가동 계획 기간} / \text{총 고장 회수}$$

3) 정비 용이성[10,53-55]

정비 용이성은 평균 수리 시간(MTTR)을 말하며, 이는 설비수리 시에 평균 소요 작업시간이 어느 정도 걸리는가를 나타내는 지표이며, 정비 용이성을 향상시키기 위해서는 MTTR을 줄이는 전략이 요구된다.

$$\text{MTTR} = \text{총 작업 시간} / \text{고장 회수}$$

4) 설비 종합 효율[10,53-55]

설비 종합 효율(OEE: overall equipment efficiency)은 설비운영에 대한 전체적인 효율을 측정하는 하나의 지표로써 다음과 같이 계산 할 수 있다.

$$\text{OEE} = \text{가용성} \times \text{효율성} \times \text{품질}$$

3. 설비관리의 전략과 전술

3.1 전략 및 전술

설비관리를 효과적으로 수행함에 있어서 전략(strategy) 및 전술(tactics)의 수립은 필수불가결한 사항이다. 설비관리의 전략은 회사의 전략과 연계되어 수립되어야 하며, 현재의 상황을 명확히 인식하고 미래에 대한 비전을 개발하여야 한다. 설비관리 전략요소로 설비관리가 제공할 서비스의 영역을 명확히 제시하여야 하며 전사 통합적 프로세스 및 정보인프라의 구축은 물론, 내부 작업과 위탁 업무, 그리고 기술교육이 뒤따라야 한다.

수립된 전략에 따라 설비를 정비하는 전술활동을 펼쳐야 한다. 사후 고장관리는 물론, 예비설비의 효과적 운영, 계획정비, 시간기준 및 성능기준정비 시스템의 구축, 설계변경활동, 예지정비 등이 전술에 포함된다.[6]

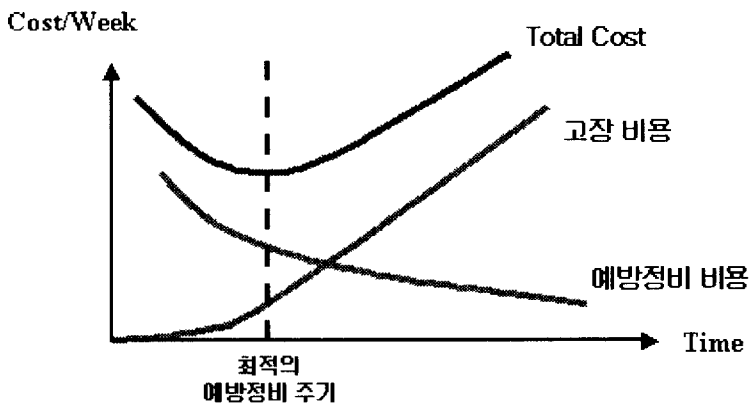


Fig. 2.1 Optimized preventive maintenance period [6]

그리고 예방정비 기준설정에 있어서 가장 중요한 요소 중의 하나는 최적의 정비주기를 설정하는 것이다. Fig. 2.1에서 보는 바와 같이 시간이 경과함으로 고장발생의 확률 증가로 인해 수리비용과 생산손실액과 같은 고장비용은 증가하고 예방정비 측면에서는 주기를 길게 할수록 비용은 줄어든다. 정비주기는 비용 효율적 측면에서 최적화 된 지점에서 결정되어야 하는 것이다.

3.2 고장 특성의 분석

1950년대 이전의 설비고장은 설비 사용시간과 비례하여 증가한다고 판단하였으며, 이러한 고장유형의 관리 전술은 주기적인 설비의 수리 및 교체를 통해 고장을 예방하였다. 그러나 1970년대에 접어들어 설비의 자동화, 컴퓨터화, 기계/전기/전자 기술이 복합된 복잡한 설비로 전환되면서 대부분의 설비고장은 설비의 사용기간과 연계되지 않음을 알게 되었다. Fig. 2.3은 항공 산업 분야에서 시간경과에 따른 고장률을 나타낸 것이다.

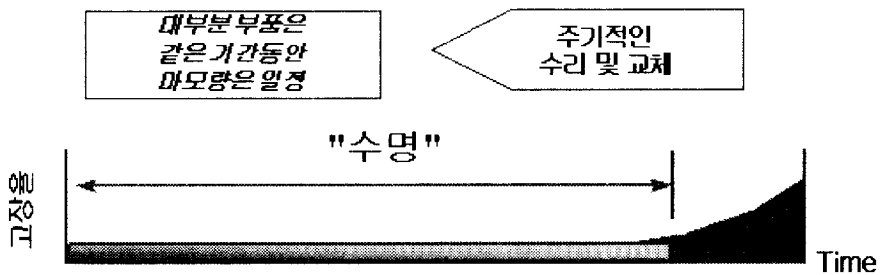


Fig. 2.2 The malfunction characteristic of the past days [27]

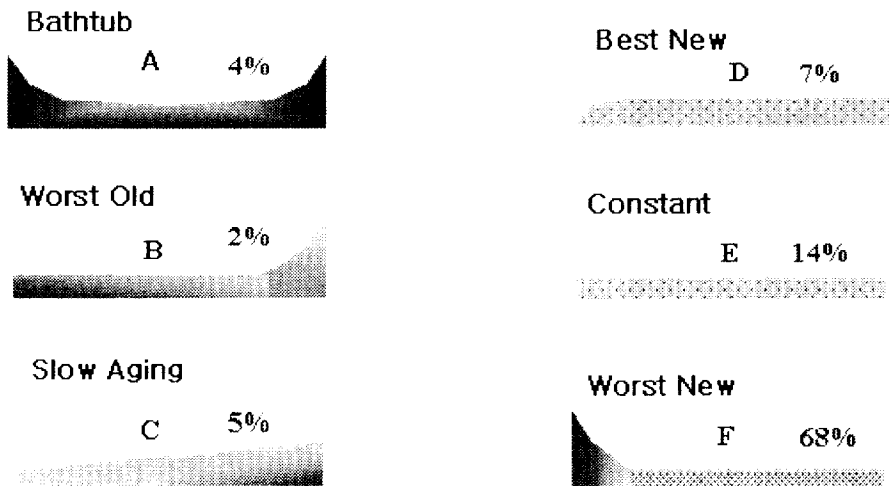


Fig. 2.3 The various malfunction characteristic of the present [27]

현재의 고장특성은 Fig. 2.3에서 보는 바와 같은 6가지 고장특성에서 좌측 그래프는 시간과 관계된 고장으로 전체 고장의 11%를 점유하고 있으며, 우측의 그래프는 시간과 무관한 고장으로 89%를 나타내고 있다. 가장 많은 고장으로 나오는 유형은 “F”로 전체 고장의 68%를 나타내고 있다. 근래에 들어서는 시간과 무관한 고장예방을 위한 전략으로 예지 정비(predictive maintenance)전략[29]이 강조되고 있다.

“F” 유형의 고장특성에서 설비가동 초기에 고장이 많이 나타나는 것을 “infant mortality”라 부른다. 이러한 고장을 미연에 방지하기 위해서는 초기의 고장방지 대책이 요구되며, 주기적인 정비활동을 최소화 하여야 한다. 이러한 고장유형은 특히 복잡한 설비에서 많이 나타난다. Infant mortality의 원인을 분석해 보면, 잘못된 설계, 제작사의 품질불량, 부적당한 설치작업 및 설비운전, 불필요한 정비 또는 과도한 예방정비, 품질에 미달한 정비활동 등이 도출된다.

설비관리 전술은 설비의 고장특성 분석을 통해 수립되어야 하며, 6가지 고장 유형에서 성숙단계의 고장을 방지하기 위하여 설비관리 전략과 전술을 개발함으로써 고장을 방지할 수 있는 연구가 지속적으로 필요하다.

3.3 고장 확률과 정비 주기

Fig. 2.4는 기간 별 고장건수를 나타낸 것이다. 평균수명은 고장 확률이 50%가 되는 지점을 말하며, 사용수명은 설비관리 전략에 따라 언제 예방정비를 할 것인가에 따라 결정된다. 상기와 같은 고장확률을 통해 사용수명을 정의하여 예방정비 할 경우, “0”의 고장확률을 가지고 예방정비주기를 설정하지 않는다. 때문에 예방정비주기가 설비의 신뢰성 및 비용측면을 고려하여 설정되어야 한다. 예방정비주기를 설정할 경우, “과연 몇 %의 고장확률을 수용하여 예방정비 전략을 수립할 것인가 ?” 라는 명제가 가장 중요한 요소이다. 만약 1년에 5%의 고장확률을 가지고 주기를 설정할 경우, 이 확률에 대한 운전부서, 설비관리부서 및 관련부서 간에 공유하고 인식을 같이 하는 것이 무엇보다 중요하다. 이러한 확률을 통해 설정된 예방정비 전략에서 설비 고장이 내일 발생할 수도 있고 아니면 1년 내내 고장이 발생하지 않을 수도 있다. 통상 사용수명은 고장이 급격히 증가하기 시작하는 시점에서 설정하는 것이 일반적이다.

고장건수

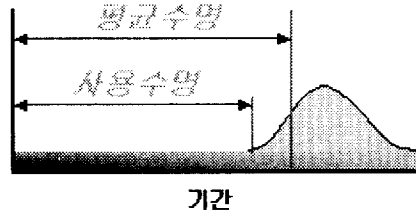


Fig. 2.4 Average span of life and practical use [27]

4. 예지정비 및 예방정비전략

예지정비(predictive maintenance)[6]는 어떤 부품이나 설비에 고장이 발생할 것 인지를 확인하기 위해 사전에 정해진 주기에 의해 검사 또는 시험을 하는 정비 활동을 말하며, 고장의 결과를 예방하기 위한 적당한 정비활동이 수행될 수 있도록 충분한 경고시간을 가져야 한다. 예지정비의 장점은 불필요한 예방정비 작업을 감소시키고, 대형 고장을 예방할 수 있으며, 일반적으로 다른 전술에 비해 정비비용이 가장 낮다. 반면에 단점은 잠재적 고장기간 및 고장 메커니즘의 이해가 어려우며, 운전과 정비간의 원활한 의사소통과 합의가 필요하고, 복잡한 검사 기술에 대해서는 오히려 비효과적일 경우가 있다. 예지정비 수단으로는 진동, 입자분석, 오일분석, 초음파검사, 화학분석을 수행하는 상태감시기술 및 유량, 온도, 압력을 측정하는 성능감시, 운전원 또는 작업자가 수행하는 현장순시동을 통한 것들이 있다.

예방정비(preventive maintenance)[6]는 특정시점에서의 부품이나 설비의 상태와 관계없이 사전에 정해진 주기에 의해 부품을 수리하거나 교체하는 정비활동을 말하며 고장유형은 전형적으로 시간에 의한 마모(열화, wear-out) 형태를 나타내어야 한다. 예방정비의 장점은 사후작업보다 통상 40%까지 비용측면에서 효과적이고, 복잡하게 계획된 정비작업을 실시할 수 있는 반면, 부품의 정확한 수명 예측이 요구되며, 예지정비보다 비용적으로 비효과적이며, 오히려 과도한 정비비용을 초래할 수 있는 등의 단점이 있다.

5. 선진 사례 모델

가동 중인 원전의 설비관리는 크게 통지, 작업계획, 일정계획, 작업실시, 작업종결 및 분석의 6가지 프로세스가 설비관리 패키지에 구현되어 있다. 이와 같이 프로세스 중심의 설계는 BPR(business process re-engineering)의 핵심요소이며, 모든 업무를 프로세스별로 표준화, 단순화, 통합화 하여 업무의 효율성을 향상시킬 뿐 아니라 고객을 만족시킬 수 있는 프로세스라 볼 수 있다. 프로세스 중심에서 가장 큰 이슈는 프로세스 간에 정보 및 의사전달의 공유를 얼마나 잘 할 것인가와 프로세스별로 역할과 책임을 명확히 구분하는 것이다. Fig. 2.5에서 설비관리 프로세스는 경영전략을 달성하기 위한 설비관리의 전략과 전술이 설정되어 설비관리 업무가 프로세스로 진행된다. 설비관리 프로세스는 지속적인 PDCA (plan-do-control-action) 사이클에 의해서 향상되어야 한다.

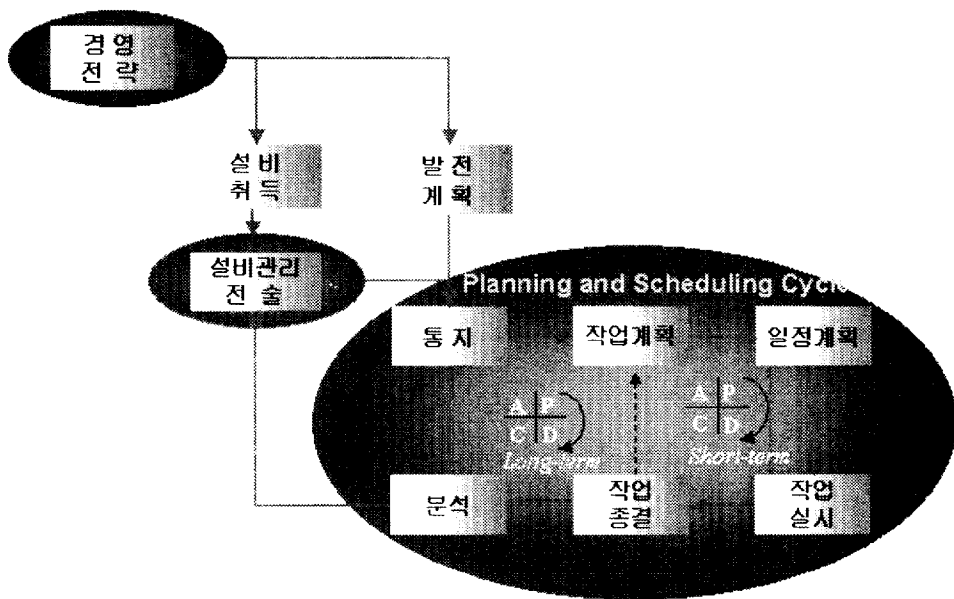


Fig. 2.5 Best practice model [1,5]

Fig. 2.5에서 설명한 선진 사례의 설비관리 프로세스에 대한 특징은 작업계획과 일정계획에 중점을 둔 프로세스라 할 수 있으며, 이를 통해 정비의 효율성을 극대화시킬 수 있다. 선행정비(proactive maintenance)를 위해서는 작업계획과 일

정계획 프로세스가 핵심이 되어야 한다. 이때 주의해야 할 점은 작업계획과 일정계획 프로세스의 완전한 수행을 위해서는 역할분담, 기능개발 및 훈련 없이 효과만 극대화해서는 안 된다. 관리자들은 성공적인 작업계획 수행을 위한 작업계획에 필요한 자원, 요구되는 프로세스의 이해와 훈련의 중요성을 간과해서는 안 된다. 또한, 프로세스는 한 부서에서만 처리하는 것이 아니라, 상호 의존적이기 때문에 서로 회사의 경영목표를 달성할 수 있도록 협력해야 한다.

6. 프로세스 별 주요 활동

1) 통지 [1,5]

통지(notification) 프로세스에서 요청되는 작업유형으로는 고장작업과 타 부서에서 설비관리부서로 설비관리 작업의 요청, 통지를 통한 간단한 업무처리를 위한 내부보고문서, 자체 수행한 작업 등 완성작업이 있으며, 작업요청은 시스템(SAP PM모듈의 통지)을 통해 관련 부서로 전달하거나 또는 긴급한 사항의 경우에는 유선을 통해 정보를 제공할 수 있다. 작업요청이 필요할 경우, 요청자는 요구하는 작업 내용을 명확히 작성하며, 내부 승인 절차, 통지 통보절차 등의 정해진 업무 절차를 통해 수행한다. 작업을 요청하는 사람은 작업계획수립에 필요한 모든 정보를 제공하여야 하며, 또한 모든 부서에서 발행할 수 있어야 한다. 설비관리부서는 통지내용을 확인하고 검토결과를 통지에 반영하며, 통지 발행자는 의뢰한 작업이 현재 어떻게 진행되고 있는지를 확인할 수 있다.

2) 작업 계획

작업 계획(planning)이란 작업수행 시에 무엇이 필요한 지를 정의하는 것이다 [14]. Table 2.1은 작업계획수립 시의 절차를 기술하였고, Table 2.2는 작업계획수립 시에 작업계획자(planner)가 수행하여야 할 역할에 대해 설명하고 있다.

Table 2.1 Process on establishing work plan [1,5]

단계	명제	내용
1	필요한 작업이 무엇인가?	요구되는 작업의 확인 및 작업범위 확정
2	어떻게 할 것인가?	작업절차, 안전조치 절차 등
3	누가 이것을 해야 하는가?	기술 및 인력
4	무엇이 필요한가?	자재 및 공구
5	언제 할 예정인가?	작업 계획일
6	필요한 문서는 무엇인가?	기술문서, 도면, 작업에 필요한 기타 문서 등

Table 2.2 The roles of planner [1,5]

완결성 작업을 위한 작업범위 확정	작업범위를 명확히 하기 위한 현장 방문
요구되는 작업인력 예측	요구되는 자재의 예측
작업 착수 전에 시행될 예비 작업	작업 완료 후에 시행될 사후작업
부품리스트 또는 bill of material을 준비	자재 요청 준비(procurement request)
스케줄링 되기 전에 자재의 가용성을 확보	실제 작업완료 시간과 계획시간의 비교
백로그 데이터의 준비 및 배포	주간단위로 직무 별 백로그 추이 분석
반복적인 작업에 대한 작업 표준(직무 리스트) 개발	설비의 기본정보를 관리
설비 이력의 관리	예방정비 프로그램의 개발 및 조정

3) 일정 수립

일정 수립(scheduling)이란 작업이 언제 수행되어야 하는지를 결정하며, Table 2.3의 항목을 계획자가 최종 확정한다. 일정이 확정된 작업 지시내용에 대해서 각 작업장 별 작업 감독자는 작업 내용별로 적당한 작업자를 할당한다.

일정계획의 가장 큰 목적 중의 하나는 모든 자원이 가장 효율적으로 사용되고 작업이 효율적으로 완수되도록 하는 것이다. 일정 계획 수립 시 유의해야 할

사항은 설비 별, 우선순위 별, 작업기한 별로 백 로그(back log)에 있는 데이터, 기술인력 및 자재, 공기구의 가용성, 작업 계획 및 발전 계획과 발전소 위험도의 맵핑을 통해 작업 실행여부를 확인하여야 한다. 또한 작업과 인력, 자재, 비용 등의 자원에 대한 균형적인 조정을 실시하며, 운전부서와 위험도 평가자의 일정수립에 대한 협의가 이루어져야 한다.

Table 2.3 The roles of scheduler [1,5]

순 가용 인력의 계산	작업 오더에 대한 작업 일정계획
주간 단위 별 작업 일정 계획 보완	일일 작업 일정 검토회의 참석
스케줄 된 작업 오더 작업 수행을 분석	발전소 위험도 감시기의 위험도

4) 작업 실시

작업자가 할당된 작업 내용에 대하여 작업 계획에 요청된 사항이 만족되도록 작업을 완료하는 프로세스이다. 작업 실시 전 자산운영 책임부서에 작업투입에 대한 허가가 이루어 져야 하며, 특히 안전이 요구되는 작업에 대해서는 작업 승인 및 안전 조치가 완료된 후에 실시되어야 한다. 작업 전후에 취하게 될 안전 조치는 자산 운영부서의 책임 하에서 이루어 져야 하고, 작업감독자는 작업 완료에 필요한 품질 검사 또는 시운전 검사 요건을 감안하여 작업 진행에 대한 관리감독을 실시하여야 한다. Table 2.4는 작업감독자(supervisor)의 역할, Table 2.5는 작업자(craftsman)의 역할을 각각 설명하고 있다.

Table 2.4 The roles of supervisor [1,5]

작업자의 동기부여	작업자 별 능력 평가
작업자의 능력개발	각 작업에 대한 작업자 할당
작업자의 안전교육 관리	작업자 별 퍼포먼스 검토
비용 절감 계획	작업 품질관리
휴가 관리	긴급 작업에 대한 작업계획

Table 2.5 The roles of craftsman [1,5]

할당된 작업의 품질관리	안전하고 정돈된 작업장 관리
작업결과에 대한 문서화	작업 변경사항에 대한 통지

5) 작업 종결 [5]

작업 종결은 완료된 작업에 대하여 결과를 처리하는 프로세스이며, 작업감독자 또는 작업자는 작업결과에 대한 기록을 철저히 수행하여야 한다. 기록내용으로는 자재의 사용실적 처리 및 자재 반납내용을 기록하고 작업결과와 품질확인, 작업소요 시간 및 투입인력, 고장결과 코드의 입력 작업 등을 기록한다.

6) 분석 [5]

분석작업은 작업종결 후 수행하는 하나의 과정으로써 지속적인 향상을 도모하기 위한 절차이다. 이러한 분석 작업을 위한 지표는 가능하면 간단하고 의미가 있으며 계산이 용이하여 이해 및 해석이 용이하고, 관리자가 성과를 주기적으로 검토할 수 있어야 한다.

7. 자재 관리[5]

설비관리 시스템은 설비관리와 자재관리가 유기적으로 연결되어 있다. 이는 설비에 대한 자재가 창고에서 바닥나기 전에 시스템을 통해 자동으로 보충될 수 있음을 보여준다. 또한 주문시점과 수량이 조달기간, 안전재고 및 경제적인 측면을 반영하여 결정된다. Fig.2.6은 자재관리 및 설비관리의 연관성에 대한 흐름을 나타내고 있다.

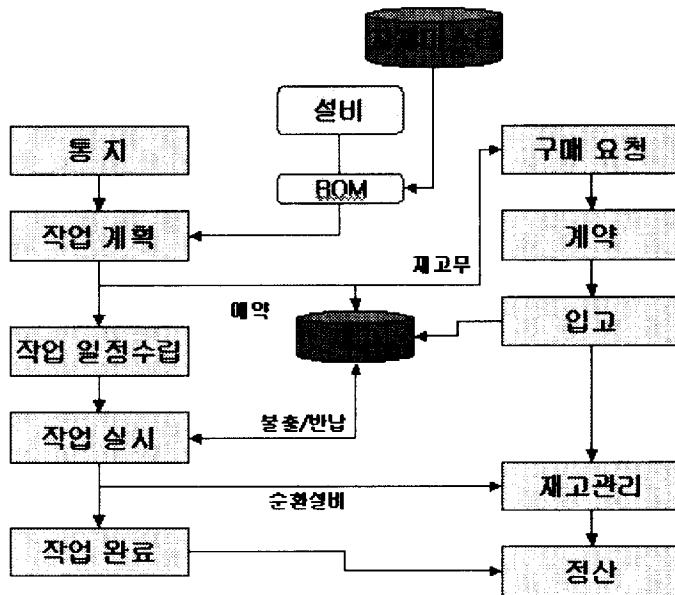


Fig. 2.6 Plant maintenance and material management process [4,5]

8. 마스터 데이터

설비관리 모듈을 구성하는 기본 데이터이며, 기능위치(functional location), 설비(equipment), 사양(description), 직무리스트(task list) 등으로 구성된다.[1,5]

기능위치는 설비가 위치한 영역을 나타낸 것으로 고정적 개념을 갖는다. 이는 여러 단계의 계층구조를 가지고 있어 사용자로 하여금 검색을 용이하게 할 뿐 아니라, 기능위치 계층 별로 실적 집계를 용이하게 할 수 있도록 해 준다.

설비는 관리 활동의 대상으로 항상 이동적이거나 순환적인 개념을 갖는다. 때문에 설비는 항상 기능위치와 연계되어 설정된다. 즉, 사람이 이사할 때 주소를 변경하듯이 기능위치는 주소 개념이고 설비는 사람과 같다고 볼 수 있다.

설비 사양은 설비를 관리하는 데이터로써 설비의 기본정보를 제공한다. 설비 사양 검색 시에 설비 사양의 특성 및 특성 값의 조건에 맞는 모든 관련된 설비를 조회할 수 있다.

직무리스트는 작업의 절차, 작업에 소요되는 인력, 자재 및 비용 등의 자원, 소요시간, 활동형태 등을 설정하여 작업 표준을 만드는 것이다. 반복적인 작업에 대하여 직무 리스트를 작성해 놓음으로써 작업 계획을 쉽게 세울 수 있다.

Ⅲ. 기능적 중요도 결정 방안 및 예방 정비 템플릿

기능적 중요도 결정을 기반으로 하는 설비관리의 최적 프로세스 도입은 전 세계적인 추세이며, 설비관리의 표준화, 효과적인 자원의 배분, 안전성 및 경제성을 제고하기 위해 필수불가결한 것이다. 다시 말하면, 발전소 설비에 대한 예방정비를 예방정비 템플릿을 적용하여 효과중심으로 시행하기 위한 것으로 전사적인 발전소 계통구조를 설비의 기능적 중요도, 운전 빈도 및 운전 환경으로 체계적인 분류와 관리를 해야 하는 것이다. 이 장에서 국내 원전에 가장 적합한 설비관리의 최적 프로세스를 구축할 필요성이 있음을 인식하고, 발전사협회(INPO: institute of nuclear power operations), 미국 전력연구원(EPRI, electric power research institute) 및 해외 발전소의 기능적 중요도 결정 기준을 검토하여, 국내 원자력 발전소를 위한 사용자 정의와 설비관리 최적 프로세스를 구축할 수 있도록 기능적 중요도 결정과 예방정비 템플릿을 제안한다. [3,4,16-20]

1. 기능적 중요도 결정 [3,4,16-20,23,24,34,43,45,50]

기능적 중요도 결정(FID, functional importance determination)은 관리 대상 기기를 중요도에 따라 구분하는 기능적 중요도 분류 및 분류된 기기를 예방정비 템플릿에 적용하기 위한 예방정비 그룹화 작업, 기기의 운전 빈도, 운전 환경의 결정을 포함한다. 원자로, 터빈, 발전기와 같은 대규모 설비를 제외한 일반적인 소규모 기기의 예방정비 그룹화 및 운전 빈도, 운전 환경의 기준은 EPRI에서 제공하는 74개 설비유형별 지침을 참조한다. 추가적인 설비유형 및 이에 대한 예방정비 템플릿이 요구되는 경우에는 발전소의 운전경험 및 정비이력 등을 충분히 반영하여 각 발전소에 부합하는 최적의 설비유형 및 예방정비 템플릿을 작성한다. 국내 원전의 기능적 중요도 분류는 그 중요도에 따라 critical A, critical B, minor, no impact의 4등급으로 분류하며 INPO에서 제시하는 기본 분류방법과의 관계는 다음과 같다.

Table 3.1 The grade of functional importance determination

외국 기준(INPO) [4]	국내 원전 분류 기준
critical	critical A
	critical B
non critical	minor
RTF	no impact

1) critical component [3,4,16-20,23,24,34,43,45,50]

발전소의 설비가 안전성 및 신뢰성, 경제성에 지대한 영향을 미치는 경우, 이 설비를 필수기기로 지정할 수 있다. 기기의 고장이 다음과 같은 결과를 하나 또는 그 이상 유발할 경우에는 이를 critical component(critical A, critical B)로 정의한다.(기능적 중요도 분류 기준 참조)

- 기기의 고장이 운전제한 조건으로 진입할 때
- 기기의 고장으로 출력 감발 또는 원자로 정지를 유발할 때
- 기술지침서 운전 제한조건 14일 이내의 조치사항으로 진입 시
- 안전 기능의 상실
- 공학적 안전설비 작동신호를 발생시키는 설비 등

2) minor component [3,4,16-20,23,24,34,43,45,50]

기기가 필수기기에 포함되지 않고, 중대한 계통기능의 손실로 이어지지 않는으나, 비용대비 이익이 크기 때문에 예방정비를 수행하는 측면에서 관리할 가치가 있는 기기를 말한다. 즉, 안전성, 신뢰성 측면에서는 중요하지 않으나 경제적인 면에서 중요한 설비이다.

3) no impact [3,4,16-20,23,24,34,43,45,50]

critical 또는 minor로 분류되지 않은 모든 기기로서, 안전성, 신뢰성, 발전소 출력 및 경제성에 대한 기능은 거의 없거나 영향을 미치지 않는다.

4) 설비유형

밸브, 펌프, 열교환기 등 발전소에서 운전되고 있는 설비의 종류를 정의한 것으로 EPRI에서 제시한 74개의 기존 설비 유형과 시범발전소 기능적 중요도 결정 작업 시에 추가 생성된 36개의 최적 설비 유형의 두 가지 종류가 있다.[3]

5) 예방정비 템플릿 [21,22,25,51,52]

특정한 설비유형에 대한 정비전략을 문서화 한 것으로 기기 감시 및 고장을 찾기 위한 시험, 검사뿐만 아니라, 중대한 고장모드에 대한 목록, 성능저하에 대한 가능한 발생유형 목록, 추천된 예방정비주기 등을 보여준다. 현재 EPRI에서 74개의 설비유형[12]에 대해 표준 예방정비 템플릿을 제시하고 있으며 시범발전소에서 작업 시에 추가적으로 36개의 설비유형 및 예방정비 템플릿을 신규로 작성하였다.

6) 예방정비 그룹화

기기가 예방정비 템플릿에 효율적으로 적용될 수 있도록 설비유형에 따라 분류하는 작업으로써 각 설비의 유형마다 예방정비 템플릿이 작성된다.[3]

7) 운전 빈도

기기의 운전되는 빈도를 말하며, 밸브의 경우에는 개폐 동작의 회수, 펌프의 경우에는 가동시간을 예로 들 수 있다. 회수 및 시간에 따라 high 및 low의 두 가지로 구분한다. 설비유형별로 운전 빈도 결정기준 예시를 참조 할 수 있다.[3]

- high : 운전 빈도가 기준치에 비해 높은 경우
- low : 운전 빈도가 기준치에 비해 낮은 경우

Table 3.2는 설비유형 Valve-MOV 및 수평펌프에 대한 일례를 표로 나타낸 것이다.

Table 3.2 Duty cycle examples(valve-MOV, pump-horizontal) [3]

설비명	Duty Cycle	
	high	low
Valve - MOV	개폐횟수(전후단 차압 없음) 모든 밸브유형: high > 20 cyc/yr 개폐횟수(전후단 차압 있음) 게이트 밸브 유형: high > 4 cyc/yr 글로브 밸브 유형: high > 8cyc/yr	개폐횟수(전후단 차압 없음) 모든 밸브유형: high < 20 cyc/yr 개폐횟수(전후단 차압 있음) 게이트 밸브 유형: high < 4 cyc/yr 글로브 밸브 유형: high < 8cyc/yr
Pump-Horizontal	연속적인 운전	대기운전 상태

8) 운전 환경

기기가 운전되고 있는 조건 또는 주변 환경을 말하며, 주위 온도, 습도, 부식, 방사능, 진동 등을 예로 들 수 있다. 정도에 따라 severe 및 mild의 두 가지로 구분한다. 설비유형별 운전 환경 결정기준 예시를 참조 할 수 있다.[3]

- severe : 운전조건 및 환경이 제시된 기준치를 초과하여 열악한 경우
- mild : 운전조건 및 환경이 제시된 기준치 이하인 경우

Table 3.3은 설비유형 valve-check 및 switchgear low-voltage에 대한 일례를 표로 나타낸 것이다.

Table 3.3 Service condition examples (valve-check, switchgear low-voltage)[3]

설비명	operation condition	
	severe	mild
Valve- Check	난류 또는 높은 속도의 유량, 침전유체 또는 찌꺼기가 함유된 유체에서의 급속한 열림 또는 닫힘, 진동, 떨림 상태 발생	정상적인 상태
Switchgear - low Voltage	높거나 과도한 습도 또는 초과된 온도. 과도한 환경적인 조건 (예 : 염분, 부식, 고방사능, 진동 등).	청정지역(공기정화가 필요 없음), OEM(Original Equip. Manufacturing)에서 권고한 내역 이내의 온도조건, 정상적인 환경조건

원전 설비의 기능적 중요도를 분류 시에 no impact로 분류하고 예방정비를 수행하지 않는다는 것은 예방정비 물량의 최적화 측면 및 효과적인 자원의 배분이라는 점에서 중요한 의미를 가진다. 따라서 critical 기기의 분류 못지않게 no impact 기기의 분류 시에도 상당한 주의가 요망된다. 기능적 중요도 분류 작업 시에 최종안전분석보고서(FSAR), 계통도 등 관련도면, 절차서, 공급자 지침서, 국내외 기술정보, 과거 운전, 정비이력 등을 종합적으로 검토하고, 신규 생성할 필요가 있는 설비유형에 대해서는 공급자 지침서, 기술지침서, 운전 경험 등을 참고자료로 활용하여 발전소 자체의 설비 유형과 고유 예방정비 템플릿을 작성한다.

2. 기능적 중요도 결정의 절차

기능적 중요도 결정의 흐름도는 발전소의 기능적 중요도의 결정 작업을 수행할 때 활용할 수 있다. 어떤 기기에 대한 기능적 중요도 결정을 시작할 때, 가장 먼저 그 기기가 필수기기의 기준 요건에 맞는지의 여부를 먼저 평가한다. 필수기기 A 또는 B의 기준에 부합되면 그 기기는 critical로 분류한다. 만일, critical의 어떤 기준도 만족하지 못한다면, 기능적 중요도 분류는 minor 분류 단계로 자동적으로 이동하게 된다. 이때 minor 설비에 포함된다면 minor 기기로 분류된 후 critical로 분류된 기기와 함께 예방정비 그룹화 단계를 수행하게 되며 critical 및 minor의 어떤 기준도 만족하지 못한다면, no impact 설비로 분류되고, 이 설비에 대한 예방정비는 시행하지 않는다.[17-20]

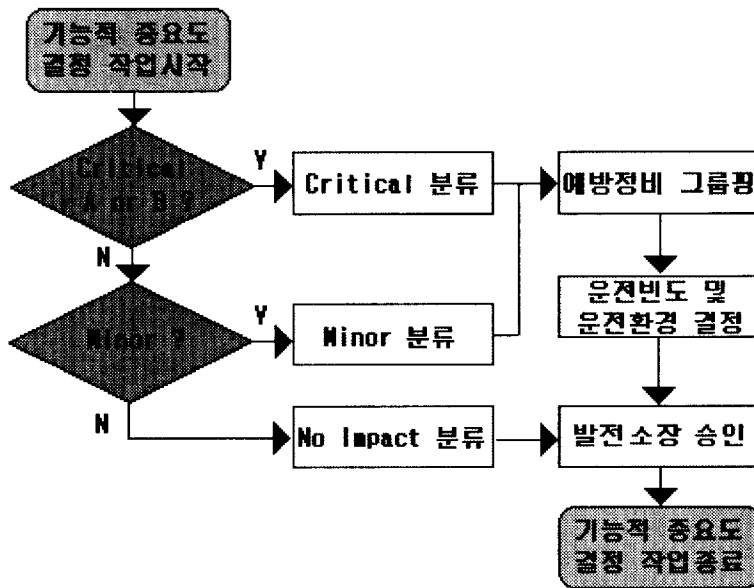


Fig. 3.1 Flow chart for functional importance determination

2.1 기능적 중요도 분류

발전소 전 계통의 기기에 대해 수행하며, 최종 안전성 분석보고서(FSAR) 계통도, 관련 도면, 절차서, 공급자 지침서, 국내외 기술정보, 과거 운전 정비이력 등을 종합적으로 검토하여 기능적 중요도 분류 작업을 수행한다. 이때, critical A 및 B를 먼저 평가하며, critical 항목에 해당 사항이 없을 경우 minor평가를 수행한다. 이때 minor 분류기준에도 만족하지 않을 경우, “no impact”기기로 정의한다. 상기의 모든 결정 작업은 본 연구에서 개발한 기능적 중요도 결정 프로그램을 통해 수행할 수 있으며, 이하의 기능적 중요도 결정 작업은 개발된 웹 프로그램을 위주로 하여 설명한다.

본 연구에서 개발된 웹 프로그램을 간략히 설명하면 다음과 같다.

- 사용언어(computer language) : ASP, JAVA
- 데이터베이스(database) : MS Access
- 전체용량 : 263개 웹 페이지 (40MB)
- 개발기간 : 2004. 11 ~ 2005. 02(약 4개월)

1) 기능적 중요도 분류

메인 화면에서 원하는 설비를 선택 한 후에 FID (기능적 중요도 결정) 하단의 Evaluate!! (또는 결정된 분류등급) 하이퍼링크를 클릭하여 기능적 중요도 분류를 시작한다. 평가가 완료되면 critical A, B, minor, no impact의 평가된 내역이 등록되고 평가되지 않은 기기에 대해서는 Evaluate!! 텍스트가 표기된다.

 Plant Maintenance Considering Safety & Economy			설비 ▼ 11404949	Sea
Func. Location	Equip.	Description	Field	FID
2435-431-M-PP05A	11404949	RCP OIL LIFT PUMP	Mech	critical A

Fig. 3.2 Functional importance determination: main frame

Evaluate!! 또는 결정된 분류 텍스트(critical A 등) 하이퍼링크를 클릭하면, Fig. 3.3과 같은 화면으로 이동한다. “1”에서는 해당 설비에 대한 기본적인 정보를 볼 수 있고, “2”에서 본격적으로 해당 설비의 기능적 중요도 분류를 수행하게 된다. 이 기능적 중요도 분류는 설비관리에서의 핵심 사항이므로, 가급적 발전소에서 해당 설비에 대해 해박한 지식을 소유하고 있는 시스템 엔지니어에 의해 수행한다. “3”의 예방정비 그룹화 및 “4”의 운전 빈도/환경 결정은 추후 다시 언급하도록 한다.

 Functional Importance Determination ID : 아우방																		
Functional Location	2435-431-M-PP05A	Equipment	11404349															
Description	RCP OIL LIFT PUMP																	
Supplement	▼	Object Type/Planner Grp.	M01 / 330															
System Engineer	2	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Functional Importance Determination</th> <th>Last Updated</th> <th>Name</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>critical A</td> <td>Indiv. Eval.</td> <td>Batch. Eval.</td> <td>2004-11-30 오후 3:33:23</td> <td>94102693</td> </tr> </tbody> </table>		Functional Importance Determination			Last Updated	Name	critical A	Indiv. Eval.	Batch. Eval.	2004-11-30 오후 3:33:23	94102693					
Functional Importance Determination			Last Updated	Name														
critical A	Indiv. Eval.	Batch. Eval.	2004-11-30 오후 3:33:23	94102693														
Maintenance Dept.	3	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">PM Group Determination</th> <th>Last Updated</th> <th>Name</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="3">PPPD[PPPD Pump - Positive Displacement]</td> <td>2004-10-27 오후 3:11:01</td> <td>89104016</td> </tr> <tr> <td>Indiv. Eval.</td> <td>Batch. Eval.</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		PM Group Determination			Last Updated	Name	PPPD[PPPD Pump - Positive Displacement]			2004-10-27 오후 3:11:01	89104016	Indiv. Eval.	Batch. Eval.			
PM Group Determination			Last Updated	Name														
PPPD[PPPD Pump - Positive Displacement]			2004-10-27 오후 3:11:01	89104016														
Indiv. Eval.	Batch. Eval.																	
Operation SRO	4	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Duty Cycle</th> <th>Service Condition</th> <th>Last Updated</th> <th>Name</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Low</td> <td>Mid</td> <td>2004-11-01 오후 3:04:01</td> <td>94102693</td> </tr> <tr> <td>Indiv. Eval.</td> <td>Batch. Eval.</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Duty Cycle	Service Condition	Last Updated	Name	Low	Mid	2004-11-01 오후 3:04:01	94102693	Indiv. Eval.	Batch. Eval.					
Duty Cycle	Service Condition	Last Updated	Name															
Low	Mid	2004-11-01 오후 3:04:01	94102693															
Indiv. Eval.	Batch. Eval.																	
PM Task	5	Preventive Maintenance Task List Check																
		Functional Importance Determination MAIN Window																

Fig. 3.3 critical component classification: main frame

2) 개별평가 버튼

개별 평가 버튼을 클릭하면, Fig. 3.4에서 보는 바와 같은 기능적 중요도 분류 화면(critical)으로 이동한다. 이때, 분류 흐름도에 따라 분류하려는 설비가 critical 기기인지 아닌지를 먼저 평가한다. Fig. 3.4의 “1”에서는 기기의 기본 정보 및 입력자 정보를 볼 수 있고 “2”에서는 기기가 critical A 또는 B의 기준 중 어떤 항목을 만족하는지 평가한다. Fig. 3.4에서는 이 설비를 critical A로 평가한 것을 볼 수 있다. 마지막으로 “3” comments 란에 평가한 사유 또는 근거에 대해 기술한다.

 Functional Importance Determination (Critical)			
1	기문정보		
	기능위치	2435-431-M-PP05A	설비
	Description	RCP OIL LIFT PUMP	
	담당부서	Mechanical Field	입력자
11404349			
Evaluate Critical A and Critical B			
Category	Definition	Classification	Selection
원자로 안전	원자로 정지를 유발시키는 기기	Critical A	▼
	안전설비 작동신호(ESF) 발생 관련기기	Critical A	▼
	단일계열 안전기능의 상실	Critical A	▼
	필수안전기능을 제어하는 기기의 고장(원자로 압력지시계, 원자로 냉각재 온도계 등)	Critical A	▼
	고장발생시 기술지침서 운전제한조건 72시간 조치사항 적용	Critical A	▼
	고장발생시 기술지침서 운전제한조건 7일 또는 14일 조치사항 적용	Critical B	▼
	다중 계열기기중 중복 안전기능 상실	Critical B	▼
	발전소 과도상태 유발, 비상운전절차 기능장애 유발	Critical B	▼
	Critical A에 속한 설비의 제어 또는 보호기능을 담당하는 기기	Critical A	2 ▼
	Critical B에 속한 설비의 제어 또는 보호기능을 담당하는 기기	Critical B	▼
비용/환경	고장발생시 소외방출이 원자력법령 및 규제위반을 초래하는 기기(10CFR100)	Critical A	▼
	고장발생시 소외방출이 발전소 행정제한치 초과 방사능 방출 우려 또는 심각한 환경영향을 초래하는 기기	Critical A	▼
	고장발생시 수리/교체 비용이 10억원 이상인 기기	Critical B	▼
3	Comments	9. RCP 상부윤활유 저장조 유류 비정상시 기동(비정상-20)	
Critical FID MAIN Window			

Fig. 3.4 critical component classification: critical grade

분류하고자 하는 기기가 최초 critical A 또는 critical B의 기준을 만족하지 못했다면 분류의 흐름은 자동적으로 기기의 minor 기준 만족 여부를 질의한다. critical 결정과 마찬가지로 minor에 해당되는 기준이 있을 경우, 해당 항목을 선정하고 하단의 Comments 란에 사유를 입력하면 된다. 만일 minor 기준항목에도 적합한 내용이 없다면, 이 설비는 자동적으로 no impact 설비로 분류되며 이 설비는 발전소 운전에 있어서 안전성 및 신뢰성에 지장을 주지 않는 설비로 판단하여 예방정비를 수행하지 않고 고장정비(사후정비)만을 수행하게 된다. 최종적으로 분류가 완료되면 메인 화면에서 보는 바와 같이 FID 하단에 결정된 내용(critical A)이 표시된다.

 Functional Importance Determination (Minor)			
기본정보			
기능위치	2435-431-M-PP05A	설비	11404949
Description	RCP OIL LIFT PUMP		
담당부서	Mechanical Field	입력자	이두발
Evaluate Minor			
Category	Definition	Classification	Selection
원자로안전	고장발생시 기술지침서 운전제한조건 30일 초과사항 적용가까	Minor	▼
	Minor에 속한 설비의 제어 또는 보호기능을 담당하는 기기	Minor	▼
전력생산	기기고장 또는 단독 기능상실로 부하 또는 출력감압에 10%미만 발생하는 기기	Minor	▼
	대기상태인 병렬기기 작동중에서 출력감압 유발기기	Minor	▼
	Critical 기기의 정비시 필요한 기기(예 : 격리밸브)	Minor	▼
비동/환경	고장발생시 소외방출이 발전소 한정제한치 이하 방사능 방출에 우연되는 기기	Minor	▼
	고장발생시 수리/교체비용이 10억원 이하인 기기	Minor	▼
	고장정비 이력이 과다한 기기(>3회/1년)	Minor	▼
	고장정비 비용이 예방정비 비용을 초과하는 기기	Minor	▼
	기기의 부품교체 시 1년 이상 소요되는 기기	Minor	▼

Fig. 3.5 critical component classification: minor grade

3) 일괄평가 버튼

일괄 평가 버튼은 기기 별 평가를 일괄적으로 처리하여 평가하는데 있어서 시간을 절약할 수 있다. 예를 들면, RCP를 평가한다고 하였을 때, 보통 3~4대의 RCP가 각 발전소에서 운전되고 있다. 이때, RCP 각 기기에 대하여 평가하는 것이 아니라, 한 대의 RCP를 먼저 평가한 후 나머지 RCP에 평가한 내용을 일괄적으로 적용하는 것이다. RCP를 예로 들었으나, 계기 분야의 제어카드와 같은 경우는 동일한 카드설비가 수십에서 수백 개에 이르는 경우도 있기 때문에, 이러한 일괄처리 기능은 유용하며 반드시 필요하다고 할 수 있다.

기능적 중요도 분류 기준은 Table 3.4 및 Table 3.5와 같다.

Table 3.4 Criteria on the critical and minor grade[3,4,16-20,23,24,34,43,45,50]

범주	항목	필수분류
원자로 안전	원자로 정지를 유발시키는 기기	critical A
	안전설비 작동신호(ESF) 발생 관련기기	critical A
	단일계열 안전기능의 상실	critical A
	필수 안전기능을 제어하는 기기의 고장(원자로 압력 지시계, 원자로 냉각재 온도계 등)	critical A
	고장발생 시 기술지침서 운전제한조건 72시간 조치사항 적용	critical A
	고장발생 시 기술지침서 운전제한조건 7일 또는 14일 조치사항 적용	critical B
	다중계열 기기 중 중복 안전기능 상실	critical B
	발전소 과도상태 유발, 비상운전절차 기능 장애 유발	critical B
	critical A에 속한 설비의 제어 또는 보호기능을 담당하는 기기	critical A
	critical B에 속한 설비의 제어 또는 보호기능을 담당하는 기기	critical B
	고장발생 시 기술지침서 운전제한조건 30일 조치사항 적용기기	minor
	minor에 속한 설비의 제어 또는 보호기능을 담당하는 기기	minor
전력생산	발전정지를 유발시키는 기기	critical A
	기능 상실로 발전 정지를 유발하지 않으나, 정비를 위해 발전 정지가 불가피한 기기	critical A
	대기상태인 병렬기기 작동실패 시 발전정지 유발 기기	critical B
	기기고장 또는 단독 기능상실로 부하 또는 출력감발이 50%이상 발생하는 기기	critical A
	기기고장 또는 단독 기능상실로 부하 또는 출력감발이 10% 이상, 50% 미만 발생하는 기기	critical B
	고장발생 시 발전소 가동에 1일 이상의 지연을 초래하는 기기	critical A
	고장발생 시 발전소 가동에 8시간 이상 1일 이하의 지연을 초래하는 기기	critical B
	기기고장 또는 단독 기능상실로 부하 또는 출력감발이 10%미만 발생하는 기기	minor
	대기상태인 병렬기기 작동실패 시 출력감발 유발 기기	minor
	critical 기기의 정비 시 필요한 기기(예 : 격리밸브)	minor
비용/환경	고장발생 시 소외방출이 원자력법령 및 규제위반을 초래(10CFR100)	critical A
	고장발생 시 소외방출이 발전소 행정 제한치 초과 방사능 방출 우려 또는 심각한 환경영향을 초래하는 기기	critical B
	고장발생 시 수리/교체비용이 10억원 이상인 기기	critical B
	고장발생 시 소외방출이 발전소 행정 제한치 이하 방사능 방출이 우려되는 기기	minor
	고장발생 시 수리/교체비용이 10억원 이하인 기기	minor
	고장정비 이력이 과다한 기기(>3회/1년)	minor
	고장정비 비용이 예방정비 비용을 초과하는 기기	minor
	기기의 부품교체 시 1년 이상 소요되는 기기	minor

Table 3.5 Criteria on the no impact grade[3,4,16-20,23,24,34,43,45,50]

범주	항 목	필수분류
원자로 안전	고장발생 시 원자로 안전과 관련 없는 기기로서 원자로안전 카테고리의 critical 및 minor 분류기준에 속하지 않는 기기	no impact
전력생산	고장발생 시 계통 및 발전소 운전과 관련 없는 기기로서 전력생산 카테고리의 critical 및 minor 항목에 속하지 않는 기기	no impact
비용/환경	고장발생 시 수리 또는 교체를 하는 것 보다 고장을 허용하는 것이 경제적인 기기	no impact
	고장정비 비용이 예방정비 비용 미만인 기기	no impact

2.2 예방정비 그룹화

기능적 중요도 분류 작업이 종료된 기기에 대하여 예방정비 그룹화를 수행한다. 이것은 각 기기에 대하여 적합한 설비유형을 선택하여 예방정비 템플릿을 적용하고자 하는 것이다. 이때, 대분류를 먼저 선택하고 상세분류를 선택하여, 해당 기능위치가 정확한 예방정비 템플릿을 적용할 수 있도록 한다. 현재 운영되고 있는 설비유형 74개에 대해 18가지의 대분류를 설정하였으며, 이는 추가되는 예방정비 템플릿에 의해 변경될 수 있다. 여기서 가장 중요한 것은 기능적 중요도 분류에서 "no impact"로 선정된 설비에 대해서는 예방정비 그룹화 작업을 수행하지 않는다는 것이다. no impact로 정의된 설비는 안전성과 경제성에 영향을 미치지 않는 설비를 의미하므로, 예방정비에서 제외하겠다는 의미이며 따라서 예방정비 템플릿을 적용할 필요가 없다. 이미 언급한 바와 같이, 예방정비 그룹화 작업 중 기 제공된 예방정비 그룹 74개에 해당되지 않는 설비에 대해서는 공급자 지침서, 기술지침서 등을 참고자료로 활용하여 예방정비 그룹, 태스크, 수행주기가 포함된 발전소 자체의 예방정비 템플릿을 작성한다. Fig. 3.3의 "3"에서 보는 바와 같이 개별입력버튼을 클릭하여 예방정비 그룹화 작업 화면으로 이동한다. 예방정비 그룹화 작업을 효과적으로 할 수 있도록 발전소의 모든 설비를 설비 대분류 및 설비 상세분류로 나누어 놓았다. 설비 대분류는 총 18개 카테고리로 구성되어 있으며 대분류의 설비유형을 선택하면 상세분류에서는 그 하위 설비유형에 대해 자동으로 출력될 수 있도록 하였다. 설비 대분류 및 설비상세분류를 선택한 후 evaluation 버튼을 클릭하면 해당 설비에 대한 설

비 분류는 완료된다. 예방정비 그룹화 작업을 수행하는 목적은 전 원자력 발전소에서 공통적으로 사용되는 설비를 예방정비 템플릿을 작성하여 표준화하고 설비를 이 표준화된 예방정비 템플릿에 적용하고자 하기 위해서이다.

PM Group Evaluation

기본정보			
기능위치	2435-431-M-PP05A	설비	11404949
Description	RCP OIL LIFT PUMP		
담당부서	Mechanical Field	입력자	이우방

입력사항 : PPPD

설비대분류	설비상세분류/선택
▼	PPPD ▼

기타

Air dryer
Battery
Circuit Breaker
Compressor
Diesel
Heat Exchanger
HVAC

Evaluation

MAIN Window

New Equip.

Fig. 3.6 Plant maintenance grouping

기존 사용되고 있는 74개의 설비유형 이외에 기기가 제안된 설비유형에 포함되지 않는 경우, 임의의 설비그룹으로 등록하여 사용할 수 있다. Fig. 3.6의 예방정비 그룹화 작업 화면에서 “New Equip.” 버튼을 클릭한 후, 설비 대분류 및 설비 상세 분류 Code란에 설비 고유의 내역을 입력하여 새로운 설비그룹으로 사용할 수 있다. Fig. 3.7의 “1”에서는 현재 운영되고 있는 설비 유형을 참조하여 신규 설비그룹을 작성함에 있어 편의를 도모하였고 “2”의 Code는 설비의 고유 명칭으로 타 설비 유형과 중복되지 않도록 유의하여 정의하였다.


Add PM Group

기본정보			
기능 위치	2435-431-M-PF05A	설비	11404949
Description	11404949		
담당부서	Mechanical Field	입력자	이우방

입력참조 PM Group : Pump - Positive Displacement

설비대분류	Pump - 동기전동
설비상세분류	Pump - Positive Displacement - 중복금지
Code	PPPD - 중복금지

설비상세분류 및 Code는 기존 데이터베이스와 중복금지

PM Group 신규저장 MAIN Window

Fig. 3.7 Create plant maintenance group

설비별 대분류 및 상세분류표를 Table 3.6에 나타내었다.

Table 3.6 The classification classified by equipment types [3]

대분류	상세분류	코드	비고
Air Dryer	Air Dryer -Heat of Compression Drum Type	ADHC	
	Air Dryer - Heated	ADHT	
	Air Dryer - Unheated	ADUH	
Battery	Battery - Charger	BTCG	
	Battery - Flooded Lead Acid - Lead Calcium/Antimony	BTFL	
	Battery - Flooded Lead Acid - Plante	BTFP	
	Battery - Inverter	BTIN	
	Battery - NICAD	BTNC	
	Battery - Valve Regulated Lead Acid	BTVR	
Circuit Breaker	Circuit Breaker - Substation - Oil Filled	BKOF	
	Circuit Breaker - Substation - SF6 Dual Pressure	BKSD	
	Circuit Breaker - Substation - SF6 Single Pressure	BKSS	

Table 3.6 The classification classified by equipment types [3] (continued)

Compressor	Compressor - Centrifugal	CMCF	
	Compressor - Reciprocating	CMRP	
	Compressor - Rotary Screw	CMRS	
	Compressor & Pump - Rotary, Liquid Ring	CMPP	
Diesel	Diesel - Small Standby	DISS	
Heat Exchanger	Heat Exchanger - Feedwater Heater	HEFW	
	Heat Exchanger - General Tube Type	HEGT	
	Heat Exchanger - Main Condenser	HECD	
HVAC	HVAC - Air Handling Equipment	HVAH	
	HVAC - Chiller & Centrifugal Compressor	HVCC	
	HVAC - Chiller & Reciprocating Compressor	HVCR	
	HVAC - Chiller & Rotary Screw Compressor	HVCS	
	HVAC - Dampers & Ducting	HVDD	
I&C	I&C-Analog Electronic Controller	ICAC	
	I&C- Booster	ICBS	
	I&C- DC Power Supply	ICDC	
	I&C- Electrolytic Capacitor	ICEC	
	I&C- I/P and E/P Transducer	ICTD	
	I&C- Pneumatic Controller	ICPC	
	I&C- Positioner	ICPO	
	I&C- Pressure Regulator	ICPR	
	I&C- Pressure Sensor and Transmitter	ICPT	
	I&C- Pressure Switch	ICPS	
	I&C- Signal Conditioner	ICSC	
	I&C- Temperature Switch	ICTS	
Motor	Motor - Direct Current	MTDC	
	Motor - low Voltage - <600V	MTLV	
	Motor - low Voltage Wound Rotor - <600V	MTLW	
	Motor - Medium Voltage - <15kV	MTMV	
Pump	Pump - Horizontal With Couplings	PPHC	
	Pump - Positive Displacement	PPPD	
	Pump - Vertical	PPVT	

Table 3.6 The classification classified by equipment types [3] (continued)

Relay	Relay - Control - Electromechanical	RYCE	
	Relay - Control - Solid State	RYCS	
	Relay - Protective - Electromechanical	RYPE	
	Relay - Protective - Solid State	RYPS	
	Relay - Timing	RYTM	
Switchgear	Switchgear - low Voltage	SWLV	
	Switchgear - Medium Voltage - 1kV to 7kV	SWMV	
	Switchgear - Motor Control Centers	SWMC	
Transformer	Transformer - Station Aux_Startup - LTC	TRSL	
	Transformer - Station Aux_Startup - No LTC	TRSN	
	Transformer - Station Load Center Oil Fill Bushing	TROB	
	Transformer - Station Load Center Solid Bushing	TRSB	
	Transformer - Station MPT_GSU	TRSM	
	Transformer - Substation - LTC	TRBL	
	Transformer - Substation - No LTC	TRBN	
Turbine	Turbine - Feedwater Pump (Main)	TAFW	
	Turbine - Main Turbine EHC Hydraulics	TAEH	
	Turbine - Terry - Single Stage	TATS	
Valve	Valve - Air Operated - AOV - Diaphragm	VVAD	
	Valve - Air Operated - AOV - Piston	VVAP	
	Valve - Check - Duo	VVCD	
	Valve - Check - Piston - Lift	VVCP	
	Valve - Check - Swing	VVCS	
	Valve - Check - Tilting Disk	VVCT	
	Valve - Motor Operated - MOV	VVMO	
	Valve - Power Operated Relief - Pneumatic Actuated	VVPP	
	Valve - Power Operated Relief - Solenoid Actuated	VVPS	
	Valve - Pressure Relief - Spring Actuated	VVRS	
	Valve - Solenoid Operated - SOV	VVSO	
Voltage Regulator	Voltage Regulator - Substation	VRSB	

2.3 운전 빈도 및 운전 환경의 결정

운전 빈도 및 운전 환경의 결정은 예방정비 템플릿을 적용하기 위한 필수 조건 중 하나이다. 이때 유의해야 할 점은 반드시 예방정비 그룹화 작업을 수행한

후 운전 빈도 및 운전 환경을 결정하여야 한다는 것이다. 이는 그룹화 된 설비 중에서 펌프, 밸브, 열교환기 등과 같은 유형에 따라 운전 빈도 및 운전 환경을 결정조건이 상이하기 때문이다.

예를 들면 펌프의 경우, 회전기기의 지속적 운전여부로 운전 빈도를 결정하고 밸브의 경우, 단위 시간당 개폐 회수로 운전 빈도를 구분한다. 또한 동일 유형의 설비일지라도 그 설비가 방사능 지역에 있는지 고온지역에 있는지에 따라 운전 환경이 서로 다를 수 있다. 구분 기준은 해당 기기에 대하여 운전 빈도인 경우 "high" 또는 "low", 운전 환경인 경우에는 "severe" 또는 "mild"를 선택한다.

운전 빈도 및 운전 환경을 결정하는 또 하나의 중요한 이유는 예방정비 템플릿에서의 정비주기가 운전 빈도 및 환경에 따라 다르다는 것이다. 다시 말하면, 운전 빈도와 운전 환경이 높거나 열악한 경우가 그 반대인 경우보다 동일한 설비일지라도 예방정비 템플릿에서의 정비 주기는 더욱 빈번하다. 예방정비 그룹화 작업에서와 마찬가지로 기능적 중요도 결정에서 "no impact"로 선정된 기기에 대해서는 운전 빈도 및 운전 환경의 결정 작업을 수행하지 않는다.

Fig. 3.3의 "4"에서 보는 바와 같이 Indiv. Eval. 버튼을 클릭하여 운전 빈도/운전 환경 화면으로 이동한다. Fig. 3.8은 펌프의 운전 빈도, 운전 환경에 대한 예시를 보여주고 있다.

 Duty Cycle & Service Condition			
기본정보			
기능위치	2435-431-M-PF05A	설비	11404349
Description	RCP OIL LIFT PUMP		
담당부서	Mechanical Field	입력자	이우방
Evaluate Duty Cycle and Service Condition [Pump - Positive Displacement]			
Duty Cycle Definitions:			
High - Continuous operation; includes alternating between pumps.		Duty High : ☐	
Low - Standby; does not include alternating between the operating pumps.		Duty Low : ☒	
Service Condition:			
Severe - When experiencing any of the following conditions: frequent starts under load when there is no pump recirculation or auxiliary lubrication capabilities; frequent starts with >48 hours between starts; multiphase flow conditions; high temperatures; cavitation; low NPSHA; hydrogen coming out of solution; pumps solutions containing corrosive chemicals.		Condition Severe : ☐	
Mild - Temperatures within OEM specifications, AND experiences normal environmental and process conditions.		Condition Mild : ☒	
Evaluated MAIN Window			

Fig. 3.8 Determine duty cycle and service condition

최적 설비유형의 운전 빈도 및 운전 환경의 기준은 미국 내 각 발전소에서 사용하고 있는 일반적인 운전 빈도 및 운전 환경 기준[18]을 활용하였다.

Table 3.7 Generic criteria[18]

General Classification Criteria		
Duty Cycle	high	연속적인 운전
	low	대기상태 또는 연속적인 운전 중 하나를 선택하는 경우
Service Condition	severe	높거나 과도한 습도 또는 초과된 온도, 과도한 환경적인 조건 (예 : 염분, 부식, 고방사능, 진동 등). 기기의 주변온도가 120F를 초과할 경우
	mild	청정지역 (공기정화가 필요없음), OEM (Original Equip. Manufacturing) 에서 권고한 내역 이내의 온도조건, 정상적인 환경조건. 기기의 주변온도가 120F 미만일 경우

3. 기능적 중요도 결정의 예방정비 템플릿에의 적용

기능적 중요도 분류를 활용하여 예방정비 템플릿을 효과적으로 적용하기 위해서는 미국 발전소의 예방정비 프로그램의 역사를 조사할 필요가 있다. 미국과 같은 원전 선진국에서도 초기에는 제작사가 공급한 예방정비 프로그램과 예방정비기반 없이 운영이 되었다. 그러나 체르노빌(Chernobyl) 및 TMI(Three Mile island) 원전사고 이후 제작사 권고 및 미 해군 경험 자료를 반영하여 예방정비 프로그램을 개발하게 되었고[3], EPRI의 예방정비 프로그램을 거치면서 최적화 되었다. 미국 산업계의 예방정비 프로그램은 현재 지속적으로 업그레이드가 진행 중인 상태이며, 업그레이드의 초점은 안전성 및 신뢰도 관련 설비라고 할 수 있다. 현재 미국의 산업계에서는 총체적인 설비관리 최적 프로세스를 INPO에서 제시한 AP-913[4]을 통해 향상시키고 있는 것이다. EPRI에서 제공하는 예방정비 프로그램의 목적은 각 설비의 예방정비 직무 및 주기를 산업계의 전문가들이 참여하여 도출된 결과 및 그 경험을 제공하기 위한 것이며, 산업계의 예방정비 경험을 즉시 반영하고, 정비기술을 단일화 하는데 있다. 예방정비 프로그램의 하나인 예방정비 템플릿의 경우, 처음에는 39개의 템플릿을 갖춘 설비보고서를

시작으로 2004년에는 74개의 설비유형[4]에 대한 템플릿을 개발하였고, 올해에는 더욱 발전된 시스템인 웹 프로그램을 기반으로 100여개의 템플릿을 제공할 예정이다. 그러나 미국의 발전소에서도 원자로, RCP, 증기발생기 등과 같은 대규모의 중요 설비에 대해서는 각 발전소 별 사용자 정의된 예방정비 템플릿을 구성하여 사용하고 있다. 이렇듯 미국에서는 거의 모든 발전소에서 예방정비 템플릿을 활용하여 설비 유형을 단일화 표준화하는 추세에 있다.

4. 원전의 예방정비 현황

국내 원전은 이용률 측면에서 세계 상위 원전 국가로 발돋움 한 것은 사실이다. 그러나 지나치게 보수적인 정비주기 및 정비방법을 고수하여 온 것 또한 사실이다[2]. 설비 측면에서도 각 설비 별로 표준화된 정비체계가 아직 수립되어 있지 않다. 예를 들면 A 발전소와 B 발전소에서 운전 중인 동일 설비 일지라도 각 발전소에 따라 정비주기는 물론 작업항목(task list)도 상이한 경우가 많다. 정비 최적화를 위해서 시급히 정비해야 할 사안이라 아니할 수 없다[31,32]. 그러므로 현재 우리나라 전체 발전소의 설비에 대한 현행의 예방정비 프로그램을 미국 표준안으로 제시된 EPRI의 예방정비 기준과 비교하여 그 시행주기의 적정성 및 정비항목 등을 면밀히 검토하여 향후 예방정비 효과를 극대화 할 수 있는 최적의 정비기준을 마련하여야 할 필요성이 있다. Table 3.8은 우리나라 원전의 전력용 변압기의 예방정비프로그램을 EPRI 제시안(EPRI PM basis)과 비교한 것이다.

이 안은 미국 원전의 예방정비비용 감소와 기기성능 제고를 목적으로 EPRI에서 필수기기 유형 별로 예방정비활동의 기술적 준거를 정리한 보고서이며, 미국 대다수 발전소에서 이를 채택하거나 보완 및 수정하여 사용하고 있다.

Table 3.8 The comparison on task lists and periods [2]

직무 리스트	EPRI					국내			
	3M	6M	1Y	2Y	4Y	1~3M	6M	1~3Y	3~5Y
유중 가스 분석	●								
열상 점검		●							
절연유 여과			●				▲		
진동/음향/소음 측정			●			▲			
냉각기 정비				●				▲	
탭 절환기 정비				●				▲	
교정 및 시험					●			▲	▲

주) 직무리스트 : 정비에 필요한 작업항목과 시간, 작업부서, 자재 및 장비를 정의

주) ▲ : 해당 직무리스트의 작업항목 중 부분 적용

비교표에서 보는 바와 같이 발전소 별 예방정비 기준이 서로 상이한 것은 물론 정비주기가 보수적임을 볼 수 있다. 특히 유중가스 분석 및 열상점검에 대해서는 우리나라의 경우에는 그 직무항목이 존재하지 않는다. 이러한 직무항목은 대체로 신기술인 경우가 대부분이다. 우리나라 발전소는 이러한 직무리스트를 표준화하여 정비기준 및 정비주기 등을 발전소 자체에서는 물론이고, 전 발전소의 동일 설비에 대해 표준화하고 신기술을 접목하고 직무리스트 내용을 보완하여 정비 항목 누락 방지는 물론 체계적인 이력 관리를 해야 한다. 보수적인 정비주기의 최적화로 설비의 신뢰도 향상은 물론 경제성을 고려한 설비 관리가 시급히 수행해야 할 과제로 대두되고 있다.

5. 예방정비 템플릿의 사례

5.1 표준 예방정비 템플릿

EPRI에서는 2004년 원자력발전소를 포함한 전체 산업계의 설비유형을 74개로 분류[3]한 후, 그 분류된 설비유형에 대해 직무명, 주기, 정의, 작업우선순위, 고장원인분석, 운전 빈도 및 환경 등을 정의한 표준 예방정비 템플릿을 개발하였다. 금번 시범 적용한 발전소의 경우, EPRI에서 제공한 표준안을 일반적인 설비

에 채택하였고, 원자로, 터빈 등의 대형 설비 및 중요 설비에 대해서는 각 발전소의 운전경험 및 정비경험을 반영하여 발전소의 고유특성에 맞는 템플릿을 제작하였다.

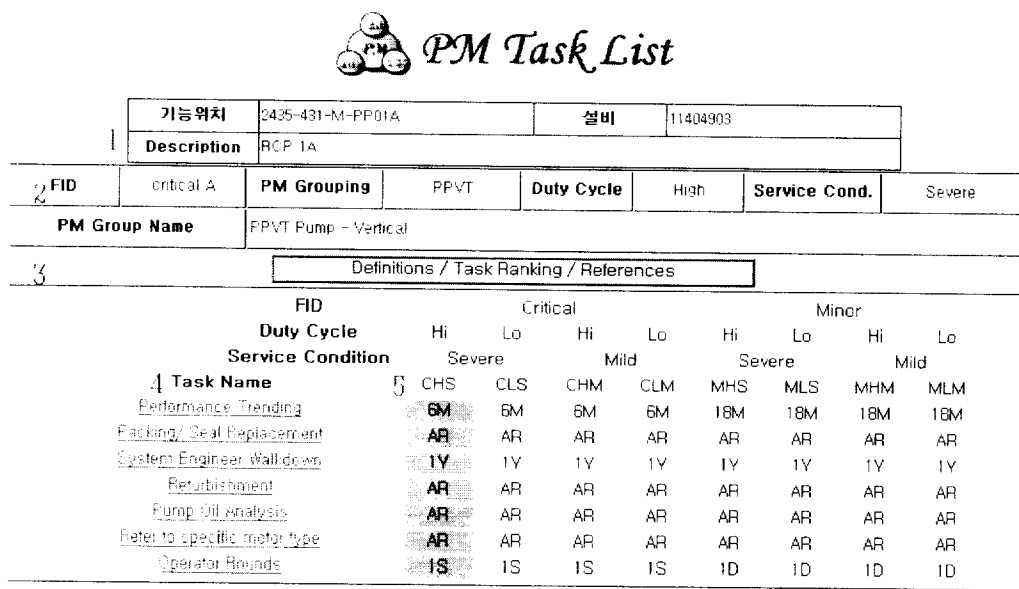


Fig. 3.9 PM templates [3]

Fig. 3.9는 예방정비 템플릿의 한 예제를 보여주고 있다. 일반적인 수직펌프에 대해 적용할 수 있는 예방정비 템플릿이다. “1”에서는 각 기능 위치 및 설비내역 등 설비의 기본정보를 제공하고, “2”에서는 예방정비 템플릿을 적용하기 위한 기능적 중요도 결정 내역을 표시하고 있다. 예제에서는 필수기기 분류를 "critical A"로 결정했고, 운전 빈도 및 운전 환경은 각각 "high" 및 "severe"를 선택했다. 한 가지 주목할 점은 예방정비 그룹화이다. 예방정비 그룹화 작업이 되어 있어야 해당 설비의 예방정비 템플릿이 출력되고 관련 직무를 참조할 수 있다. Fig. 3.9에서는 수직 펌프를 나타내는 코드 "PPVT"를 그룹화 하였고, 결정된 그룹화에 따라 "PPVT"에 해당하는 직무명이 출력된 것을 볼 수 있다.

5.2 정의와 업무우선순위 [3]

EPRI에서 제공한 데이터베이스에는 각 설비 유형 별 정의를 수록하고 있다.

또한 각 직무 별로 우선순위(task ranking)를 두어 어떤 직무가 중요한 지에 대해서도 언급하고 있다. “Reference”는 이러한 설비 유형의 정의 및 랭킹, 주기선정 시 어떠한 자료를 참조하였는지를 나타내는 근거문서 목록이다.

PM Task List

가능위치		2123-LCC-ABPV101		설비	11305436		
내역		K34 Main Steam Power Operated Relief Valve					
FID	Critical A	PM Grouping	PPVT	Duty Cycle	High	Service Cond.	Severe
PM Group Name		[PPVT] Pump - Vertical					

정의

		수직형펌프의 영역은 아래와 같다.	
기기영역		모터를 제외한 플랜지	
		커플링	
		출구 플랜지 또는 헤드	
		입구 흡입측 플랜지	
		집프록	
		외부 윤활계통	
		셀 주입계통은 제외	
		견본가 그룹에서 다음과 같은 공통 원인 고장원인을 제시	
공통원인고장		셀 고장	
		패킹에서의 축 및 축 슬라브 손상	
		축에서의 제작사 권고된 린아웃	
		허용범위 초과	
		배머링 간격 과다	
		축 커플링	
		펌프 용체의 부식/침식	
		임펠러의 마모 및 캐비테이션	
		정비작업 수행시 위험요소	
		이 설비유형에 대해서는 영향을 미치는 정비시 위험요소는 없다.	

Fig. 3.10 The definitions of PM templates [3]

참조할 수 있는 정보는 다음과 같다.

- Component boundary definitions : 기본적인 설비의 범위 및 부품
- Common failure causes : 고장원인에 대한 공통 요소
- Items contributing to the risk of doing maintenance : 정비 시 발생할 수 있는 위험인자에 대한 설명
- criticality duty cycle service condition : 설비 유형에 대한 운전 빈도 및 운전 환경 정의

Fig. 3.9의 예방정비 템플릿 “4”는 예방정비 그룹화 작업 시 결정된 그룹코드 "PPVT"에 대한 직무명을 보여준다. Vertical type pump(Code: PPVT)의 설비유형

에 7건의 직무리스트가 있는 것을 볼 수 있고, 작업자는 해당 지침에 따라 정비 작업을 수행한다. “4”의 직무명 중 packing/seal replacement 직무를 클릭하면, Fig. 3.11과 같은 내용을 참조할 수 있다. 여기에는 해당설비의 기본적인 정보는 물론 각 기능적 중요도 결정에 해당되는 주기 및 직무의 목적, 상세한 직무 내역과 주요 고장원인 및 위치, 성능저하 원인 그 밖에 직무수행 시 소요시간 및 필요시의 기기 정지시간을 명시해 놓고 있다.

 PM Task List									
기능위치	D123-LCC-ABPV101				설비	11305436			
내역	K34 Main Steam Power Operated Relief Valve								
설비유형명	Pump - Vertical								
직무명	Packing/ Seal Replacement								
PM Grp./Code/List	PPVT/PAC/PPVT1A01								
정비 주기	CHS AR	CLS AR	CHM AR	CLM AR	MHS AR	MLS AR	MHM AR	MLM AR	
작무 목적	패킹 및 메카니컬 씰의 교체								
작무 내용	패킹 및 씰 교체시 - 축 및 축 슬라브의 결합 또는 손상을 검사 - 헐거워지거나, 손상됨, 손상된 볼트, 스터드, 너트, 부품을 조사 - 축의 런아웃 상태 확인 - 스터핑박스의 마모, 손상 및 부식여부를 검사 씰: - 마모를 평가할 통한 씰 면의 마모량 점검, 탄성체의 상태, 피거기의 존재여부, 스프링의 상태와 같은 노화된 씰에대한 진단검사 수행 - 씰 주입 파이프의 상태 및 유량의 확인 - 신품 씰의 교체 패킹: - 제거된 패킹 및 패킹 슬라브의 상태를 검사 - 패킹 및 랜턴링의 부품상태 확인 - 재질, 수량 등을 정확히 점검하여 신품 패킹으로 교체 - 발전소 절차서에 의거하여 정확히 교체								
주요 고장위치 및 원인	직무명에서 알 수 있는 바와 같이 이 항목은 패킹 및 메카니컬 씰에서 주로 고장이 발생한다.								
성능저하 진단	이 항목은 광범위한 메카니즘에 의해 고장이 발생한다. 몇몇은 인적실수이고 대부분은 임의적인 고장에 의해 발생한다. 결과적으로 고장발생은 임의적이며 씰의 고장은 펌프에 의한 것이 주된 요인이다. 패킹 마모의 영향은 축의 마모에 영향을 끼치며 이것 또한 펌프 성능저하 메카니즘이다.								
정비주기 선정 및 타 직무와의 관계	씰 및 패킹의 성능저하는 보호장치를 제공한다. 고장사고 발생은 규칙적으로 계획된 직무를 요구하기에 충분하지 않다. 따라서 고장이러는 이 직무가 계획적으로 수행될 것인지를 판단하는 주된 요소가 된다. 시스템 엔지니어의 현장순사로 증가하는 누설 및 진동점검을 수행할 수 있고 이것으로 악화된 씰의 상태를 파악할 수 있다. 템플릿은 직무가 As-Required로 수행되어야 한다는 것을 나타내며, 노화된 씰의 검사 및 진단시험은 만일 정기적인 교체가 바람직하다면 주기의 확장을 수행할 수 있다. 이러한 시험은 동일한 위치에 처해있는 다른 펌프의 예측 수명을 제시해 줄 수 있다.								
작무수행시 소요되는 Man Hour						8	+/- 0		
작무수행시 기기정지 시간						4	0		
FID Back									

Fig. 3.11 PM task list [3]

Table 3.9 Task list descriptions

직무 리스트 내역	
1. 기기유형 명	6. 직무명
2. 예방정비 그룹명/코드명	7. 추천된 정비주기
3. 직무의 목적	8. 수행 직무 상세내용
4. 주요 고장위치 및 원인	9. 성능저하 진행절차
5. 직무주기를 위한 지원(직무수행자 등)	10. 직무수행 시간/기기정지시간

6. 기능적 중요도 결정과 예방정비 템플릿의 시범 적용

세계 6위의 설비 용량을 보유하고 있는 우리나라 원자력 산업의 설비 표준화 및 정비 최적화를 위해 우리 실정에 맞는 예방정비 템플릿의 활용 필요성이 강하게 제기되었고[33], 우리나라 원전 특성에 적합하도록 사용자 정의된 기능적 중요도 결정 도구를 작성하여 시범 발전소 전체 설비에 대한 기능적 중요도 결정을 수행하였다.

- 수행기간(일시) : 2004. 10. 30 ~ 2005. 01. 15 (약 75일, 2개월 15일 소요)
- 입력자 : 기계분야 시스템 엔지니어(3명), 전기분야 시스템 엔지니어(3명), 계측분야 시스템 엔지니어(4명)

6.1 시범 발전소 등록설비 현황

시범 발전소는 공용 설비를 포함하여 모두 50,420건의 설비가 등록되어 있고 이 중 기계분야가 약 44%, 전기분야 16%, 계측분야가 약 40%의 비율을 각각 점유하며 이는 Table 3.10에 나타내어져 있다.

Table 3.10 The present state of model plant's equipments

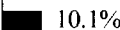
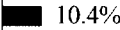
분야	전체 설비 (5호기/공용)	기계분야	전기분야	계측분야
입력완료 설비 수	50,420 (100% 완료)	22,142 (43.9%)	8,224 (16.3%)	20,048 (39.8%)

6.2 기능적 중요도 등급 및 운전 빈도

Table 3.11은 시범 발전소의 중요도 분류 및 운전 빈도, 운전 환경 통계표이다. 총 50,420건의 기기목록 중 10,349건이 critical A 및 B를 포함한 critical 기기로 분류되었다. critical로 분류된 설비는 모든 인력, 자재, 비용 등의 자원이 우선 배정되고 안전성 및 신뢰도 제고를 위해 예방정비를 우선 수행해야 하는 중요설비이다. minor로 분류된 기기는 28,434건, no impact로 분류된 기기는 11,637건이다. 여기서 주목할 점은 no impact로 분류된 기기는 원자로 안전성 및 신뢰성에 영향을 끼치지 않는 기기를 말하며 예방정비를 필요로 하지 않고, 고장 시에 고장정비를 수행하면 된다는 점이다. 시범발전소의 분류결과를 볼 때, no impact로 분류된 약 20%의 기기를 예방정비를 수행하지 않고 고장정비만을 수행하므로 예방정비 시에 인력, 자재 등의 모든 자원을 critical 및 minor로 분류된 중요설비에 집중시킬 수 있는 장점이 있다.

운전 빈도 및 운전 환경은 각 설비유형 별로 조건은 상이하나 분류결과를 볼 때, 대체적으로 운전 빈도 low 및 운전 환경 mild에 많이 집중되어 있는 것을 볼 수 있고, 운전 빈도가 낮은 기기가 많다는 것은 운전대기 상태인 설비가 많음을 의미하며, 이것은 원전설비가 안전성 차원에서 중복(redundancy) 설치된 기기가 많다는 것을 의미한다.

Table 3.11 FID statistics(model plant)

항목		그래프	설비 수
총 설비 (기계/전기/계기)		50,420 (100.0%)	
중요도분류	critical A	 10.1%	5,085
	critical B	 10.4%	5,264
	minor	 56.4%	28,434
	no impact	 23.1%	11,637
운전 빈도	high	 29.8%	15,027
	low	 70.2%	35,393
운전 환경	severe	 34.5%	17,392
	mild	 65.5%	33,028

주) no impact로 분류된 설비에 대해서는 운전 빈도 및 환경 분류작업 미 수행

6.3 설비유형별 예방정비 그룹화 현황

시범발전소 설비에 대한 예방정비 그룹화의 적용 건수를 Table 3.12 및 Fig 3.12에 나타내었다. 약 1만 여건의 설비가 글로브, 게이트, 버터플라이 등과 같은 수동밸브로 그룹화 되었고 전체 50,420건의 대상설비 중, 상위 10개의 설비 유형에 32,745건의 설비(약 65%)가 집중되어 있는 것을 볼 수 있다.

Table 3.12 The present state of model plant's PM grouping

Code	Group Name	설비 수	Code	Group Name	설비 수
VVMA	Valve- Manual- Globe_Gate_Butterfly	11,809	HSAL	공통- HAND SWITCH & STATUS LAMP	2,652
SWMC	Switchgear- Motor Control Centers	4,310	ICSS	I_C- Set-point Switch (Signal Conditioner 경유 안함)	1,609
ICSC	I_C- Signal Conditioner	3,633	VVME	Valve- Manual- Ball_Plug_ETC	1,159
ICID	계측설비 INDICATOR	2,793	VVMD	Valve- Manual-Diaphragm	1,076
ICSE	I_C- Sensor & Sensing Element	2,698	LCCP	현장 제어 패널	1,006

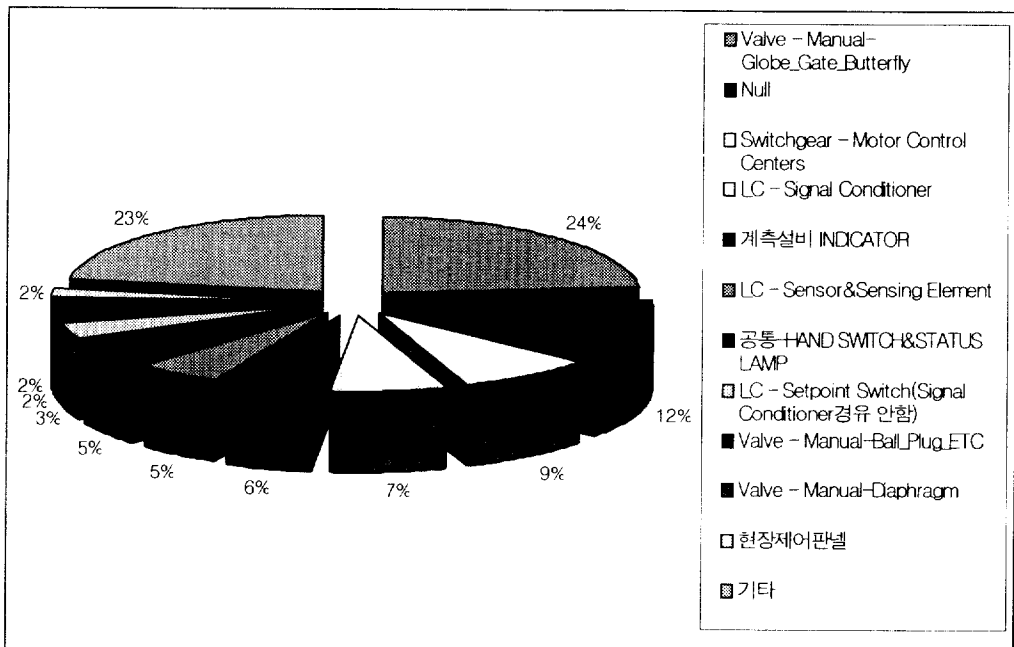


Fig. 3.12 The distribution map of the model plant's PM grouping

6.4 최적 설비유형과 기존 설비유형의 비교

시범발전소에서 수행한 기능적 중요도 결정 중 예방정비 그룹화 작업 시 EPRI에서 제공한 74개의 설비유형 이외에 추가적으로 생성한 최적 설비 유형은 Table 3.13에서 보는 바와 같이 null 포함 총 36건이다. 특히, 발전기나 주 터빈, 원자로와 같은 대형설비의 경우, EPRI에서도 각 발전소 고유의 운전경험 및 정비경험을 반영하여 적용 가능한 예방정비 템플릿의 작성을 요구하고 있다. 시범발전소의 예방정비 그룹화 작업 시에 추가된 설비유형에 대해서는 예방정비 템플릿 역시 추가로 작성하였고 그 결과에 대해서는 다음 장에서 자세히 설명한다.

Table 3.13 Optimized equipment types

Code	Group Name	Code	Group Name
TAMG	Main Generator	CTTR	변류기
VVMA	Valve - Manual-Globe_Gate_Butterfly	DSCS	단로기
VVMD	Valve - Manual-Diaphragm	HEAT	전열기(heater)
ICID	계측설비 INDICATOR	GDSW	접지 개폐기
POID	전력설비 INDICATOR	LTAR	파괴기
PPIL	Pipe & In Line Instru. Orifice, Venturi	LCCP	현장 제어 패널
TANK	Tank-General, 멤브레인형 [수직_수평형] 전체포함	PTTR	계기용 변압기
FILT	Filter-공기필터_액체필터	OFCA	유입케이블
VVME	Valve - Manual-Ball_Plug_ETC	HEPT	Heat Exchanger - Plate Type
HSAL	공통-HAND SWITCH&STATUS LAMP	MTBN	주 터빈
ICSE	I_C - Sensor&Sensing Element	TAML	Turbine-Main TBN(LP TBN A, B, C)
VVCY	Valve - Check - Y-type-spring	TAMH	Turbine-Main TBN(HP TBN)
ICLT	I_C - Level Transmitter	ICSS	I_C - Setpoint Switch
ICFT	I_C - Flow Transmitter	ZZZZ	기타 설비
ICVT	I_C - Vibration Transmitter	MREA	원자로
ICST	I_C - Speed Transmitter	MRCP	원자로 냉각재 펌프
ICXT	I_C - Miscellaneous Transmitter (FT, LT, VT, PT제외)	MSTG	증기발생기

시범 발전소의 기능적 중요도 결정 작업 수행 시에 기존 74개의 설비유형에 36개의 설비유형이 새로이 추가되었고 설비유형에 대한 예방정비 템플릿을 작성하였다. 설비 건수로 비교해 본다면, 기존 설비유형 74개에 포함되는 기기 총 건수는 16,742건 최적 설비 유형에 속하는 기기는 33,667건(약 66.7%)이다. Fig3.13에서는 기존 설비유형과 최적설비유형을 설비유형과 설비건수로 서로 비교하였다.

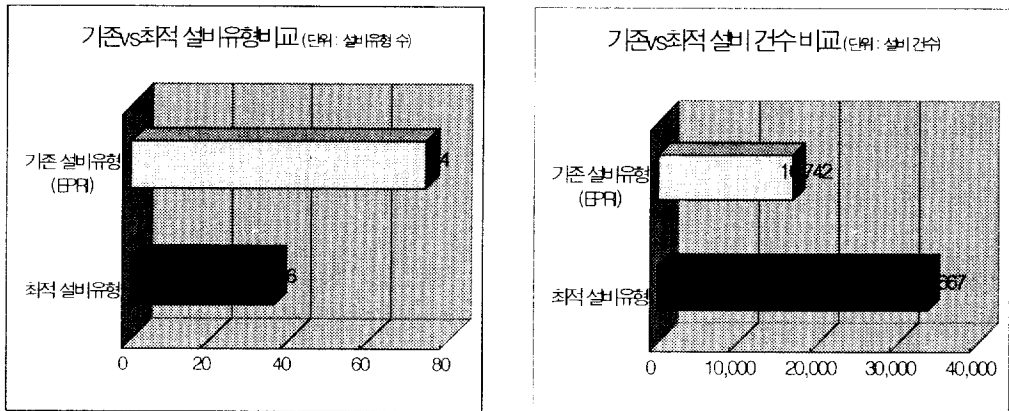


Fig. 3.13 Compare optimized with exist equipment type

6.5 설비 유형별 예방정비 직무 리스트 등록현황

기능적 중요도 분류를 수행하는 두 가지 중요한 이유는 필수기기와 필수기기가 아닌 것을 분류하여 필수기기에 자원을 집중하고, no impact로 분류된 설비에 대해서는 예방정비에서 제외하여 더욱 효과적인 설비관리를 하기 위함이다. 다른 한 가지는 정비작업의 단일화 표준화, 정비주기의 최적화를 위한 예방정비 템플릿이라고 할 수 있다. 예방정비 템플릿은 각 설비유형 별로 존재하며, 현재 기존 EPRI에서 제공한 74개의 설비유형에 대한 템플릿을 포함하여 시범발전소의 기능적 중요도 결정 작업 시에 신규 생성된 36개의 설비유형에 대한 템플릿이 있다. Fig. 3.14의 그래프는 설비유형 대비 각 설비유형별 템플릿에 포함된 직무 리스트의 숫자를 비교한 것이다.

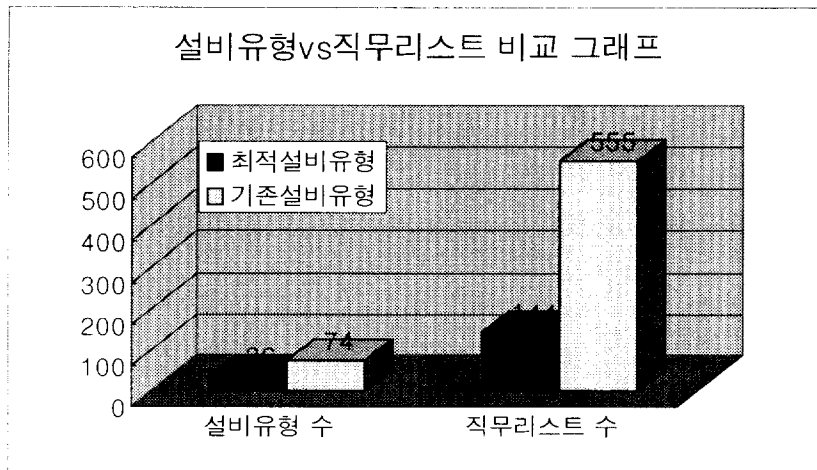


Fig. 3.14 Compare equipment types with task list

기존 설비유형 74개와 최적 설비유형 36개를 포함하여 총 110개의 설비유형에 대한 직무 리스트의 숫자를 내림차순으로 정렬하였다. 빗금으로 처리한 설비유형은 시범발전소 기능적 중요도 결정 작업 수행 시 추가된 설비유형이다.

Table 3.14 The present state of model plant's task lists

Code	Group Name	건수	Code	Group Name	건수
TAMG	Main Generator	28	VVPS	Valve - Power Operated Relief - Solenoid Actuated	5
TAEH	Turbine - Main Turbine EHC Hydraulics	21	ICLT	I_C - Level Transmitter	5
DISS	Diesel - Small Standby	20	HEFW	Heat Exchanger - Feedwater Heater	4
MREA	원자로	18	ICAC	I_C - Analog Electronic Controller	4
TAFW	Turbine - Feedwater Pump (Main)	17	ICPO	I_C - Positioner	4
MRCP	원자로 냉각재 펌프	16	ICPR	I_C - Pressure Regulator	4
CMPP	Compressor_Pump - Rotary, Liquid Ring	15	ICPT	I_C - Pressure Sensor and Transmitter	4
TRSL	Transformer - Station Aux_Startup - LTC	15	RYCE	Relay - Control - Electromechanical	4
ADHT	Air Dryer - Heated	14	RYTM	Relay - Timing	4
HVAH	HVAC - Air Handling Equipment	14	VVCD	Valve - Check - Duo	4
TRSN	Transformer - Aux_Startup - No LTC	14	VVCP	Valve - Check - Piston - Lift	4
TRSM	Transformer - Station MPT_GSU	14	VVCS	Valve - Check - Swing	4
TRBL	Transformer - Substation - LTC	14	VVCT	Valve - Check - Tilting Disk	4
TAMH	Turbine-Main TBN(HP TBN)	14	VVSO	Valve - Solenoid Operated - SOV	4
PPHC	Pump - Horizontal With Couplings	13	ICBS	I_C - Booster	3

Table 3.14 The present state of model plant's task lists (continued)

Code	Group Name	건수	Code	Group Name	건수
TRBN	Transformer - Substation - No LTC	13	ICTD	I_C - I/P and E/P Transducer	3
TAML	Turbine-Main TBN(LP TBN A,B,C)	13	ICPS	I_C - Pressure Switch	3
VVAD	Valve - Air Operated - AOV - Diaphragm	12	ICSC	I_C - Signal Conditioner	3
VVAP	Valve - Air Operated - AOV - Piston	12	ICTS	I_C - Temperature Switch	3
CMRP	Compressor - Reciprocating	11	RYCS	Relay - Control - Solid State	3
HVCC	HVAC - Chiller _ Centrifugal Compressor	11	TROB	Transformer - Station Load Center Oil Fill Bushing	3
HVCR	HVAC - Chiller _ Reciprocating Compressor	11	TRSB	Transformer - Station Load Center Solid Bushing	3
HVCS	HVAC - Chiller _ Rotary Screw Compressor	11	DSCS	단로기	3
MTMV	Motor - Medium Voltage - <15kV	11	GDSW	접지개폐기	3
TATS	Turbine - Terry - Single Stage	11	MTBN	주 터빈	3
CMRS	Compressor - Rotary Screw	10	ICDC	I_C - DC Power Supply	2
MTLW	Motor - Low Voltage Wound Rotor - <600V	10	ICEC	I_C - Electrolytic Capacitor	2
PPPD	Pump - Positive Displacement	10	RYPE	Relay - Protective - Electromechanical	2
ADUH	Air Dryer - Unheated	9	RYPs	Relay - Protective - Solid State	2
CMCF	Compressor - Centrifugal	9	SWMC	Switchgear - Motor Control Centers	2
MTLV	Motor - Low Voltage - <600V	9	VVRS	Valve - Pressure Relief - Spring Actuated	2
VVMO	Valve - Motor Operated - MOV	9	ICID	계측설비 INDICATOR	2
HVDD	HVAC - Dampers _ Ducting	8	POID	전력설비 INDICATOR	2
MTDC	Motor - Direct Current	8	HSAL	공통-HAND SWITCH&STATUS LAMP	2
SWMV	Switchgear - Medium Voltage - 1kV to 7kV	8	HEPT	Heat Exchanger - Plate Type	2
ADHC	Air Dryer - Heat of Compression Drum Type	7	VVMA	Valve - Manual-Globe_Gate_Butterfly	1
BKOF	Circuit Breaker - Substation - Oil Filled	7	VVMD	Valve - Manual-Diaphragm	1
BKSD	Circuit Breaker - Substation - SF6 Dual Pressure	7	PPIL	Pipe&In Line Instru. Orifice, Venturi, SG, Flge	1
BKSS	Circuit Breaker - Substation - SF6 Single Pressure	7	TANK	Tank-General, 멤브레인형 [수직_수평형] 전체포함	1
HECD	Heat Exchanger - Main Condenser	7	FILT	Filter-공기필터_액체필터	1
PPVT	Pump - Vertical	7	VVME	Valve - Manual-Ball_Plug_ETC	1
VRsB	Voltage Regulator - Substation	7	ICVT	I_C - Vibration Transmitter	1
ICSE	I_C - Sensor&Sensing Element	7	ICST	I_C - Speed Transmitter	1

Table 3.14 The present state of model plant's task lists (continued)

Code	Group Name	건수	Code	Group Name	건수
ICSS	I_C - Setpoint Switch(Signal Conditioner경유 안함)	7	ICXT	I_C - Miscellaneous Transmitter (FT, LT, VT, PT 제외)	1
BTIN	Battery - Inverter	6	HEAT	전열기(heater)	1
HEGT	Heat Exchanger - General Tube Type	6	LCCP	현장제어패널	1
VVPP	Valve - Power Operated Relief - Pneumatic Actuated	6	PTTR	계기용변압기	1
ICFT	I_C - Flow Transmitter	6	OFCA	유입케이블	1
BTCG	Battery - Charger	5	null	null	0
BTFL	Battery - Flooded Lead Acid - Lead Calcium/Antimon	5	VVCY	Valve - Check - Y-type-spring	1
BTFP	Battery - Flooded Lead Acid - Plant	5	CTTR	변류기	1
BTNC	Battery - NICAD	5	LTAR	파괴기	1
BTVR	Battery - Valve Regulated Lead Acid	5	KKKK	특수	1
ICPC	I_C - Pneumatic Controller	5	ZZZZ	기타 설비	1
SWLV	Switchgear - Low Voltage	5	MSTG	증기발생기	1

주) 직무리스트 건수 별 내림 차순

6.6 설비관리 최적 프로세스 도입 시의 정량적 효과[2,44]

설비관리 최적 프로세스의 핵심이라고 할 수 있는 예방정비 템플릿은 최적화된 예방정비주기 뿐 아니라, 직무의 표준화, 단일화 기준을 제공한다. 이는 설비 유형에 따라 요구된 기능을 발휘할 수 있도록 구체적이고 표준화된 직무활동(PM task)과 최적화된 정비주기를 미리 정해 둔 것이다. 그러므로 미흡한 예방정비 템플릿은 설비고장으로 인한 손실과 사후 수리에 따른 보전비용의 증대를 초래할 수밖에 없다. 우리나라 원전의 예방정비 체계는 제작사의 권고 또는 설비운영 경험을 바탕으로 정해지고 있으나, 다른 나라와 마찬가지로 정비기준의 기술적 근거가 미흡하며 지나치게 보수적인 것이 사실이다. 보수적인 정비주기로 인한 과도한 정비활동은 설비가용도를 저하시키고 정비비용의 증가를 초래한다. 이에 정비효과 중심으로 정비체계를 최적화 할 필요가 있다.

시범발전소의 예방정비 템플릿은 일반적인 소규모 기기에 대해서는 미국 전력연구소에서 개발한 예방정비 기준 데이터베이스(PMBD)의 표준 예방정비 템플릿을 활용하였다. 이는 신뢰도중심정비(RCM: reliability centered maintenance) [15] 기술 및 분야 별 전문가그룹을 활용하여 미국 내 제작사, 발전소, 연구소

인력이 참여하였고, 수십 년간 미국 내 원자력발전소 기기에 대한 고장 및 정비 이력을 분석한 결과이다. 2004년도 시범발전소에서 적용한 예방정비 템플릿은 기존의 74개 설비 유형에 덧붙여 36개의 설비 유형에 대한 신규 예방정비 템플릿을 개발하여 총 110개의 설비유형에 대한 예방정비 템플릿을 적용하게 되었다.

6.7 국내 원자력발전소 정비주기의 비교

Table 3.15는 수평 원심펌프에 대한 우리나라 원자력발전소의 정비주기와 표준안과의 비교표이다.

Table 3.15 Comparison between foreign and domestic plants [2]

발전소명 \ 직무명	A	B	C	D	E	F	G	H	I	평균	미국	국내 표준안
Vibration Analysis	1W	1M	2W	1W	1M	2W	2W	1M	2W	1M	1M	1M
Oil Analysis	1M	3M	3M	1M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M	3M
Performance Trending											6M	6M
Oil Filter Change, Clean, and Inspect	1F	1F	1F	1F	1F	1F	1F	1F	1F	1.5Y	1.5Y (18M)	1.5Y (18M)
Coupling Inspection	1F	1F	1F	1F	1F	1F	1F	1F	1F	1.5Y	1.5Y (18M)	1.5Y (18M)
Nozzle NDE Inspection											10Y	10Y
Partial Disassembly	1F	1F	1F	1F	1F	1F	1F	1F	1F	1.5Y	AR	AR
Refurbishment	2F	3F	6F	3F	3F	3F	2F	5F	3F	5Y	AR	AR
Motor Current Trending											3M	3M
Thermography											6M	6M

우리나라 원전에서 주목할 점은 performance trending, motor current trending, thermography와 같은 직무 활동에 대해서는 부분적이고 제한적으로 적용하는데 반해, 표준안에서는 그 정비주기까지 명확하게 제시하고 있다. 또한 partial disassembly 및 refurbishment에 대해서는 기존 발전소에서는 평균 1.5년 및 5년의 주기에 정비활동을 수행하는 데 반해 표준안에서는 필요에 따라 수행 할 수 있는 AR(as required)로 제시함으로써 과도한 예방정비 활동을 최적화 할 수 있다.

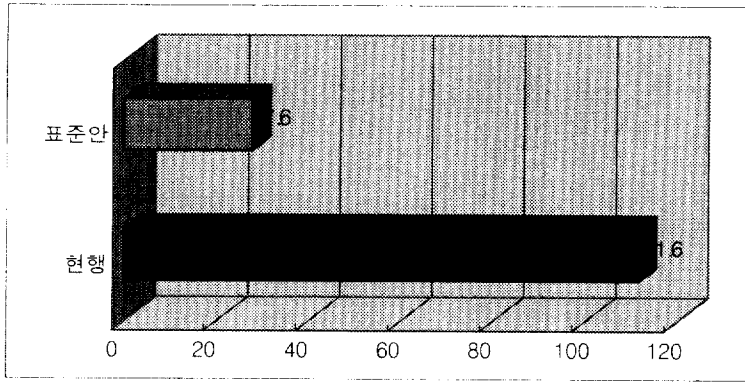


Fig. 3.15 Required manpower for horizontal centrifugal pump

수평 원심펌프의 예방정비 소요인력을 비교하였을 때, 현행 예방정비는 보수적인 기업문화의 특성상 연간 111.6MH의 인력이 소요되었으나, 표준안에서는 27.6MH의 인력소요율을 보였다. EPRI에서 제공하는 표준 예방정비 템플릿 활용 시 man hour가 약 1/4이상 감소하는 것을 확인할 수 있다.

6.8 설비관리 최적 프로세스 도입 시의 정량적 비교

1) 비용절감 분석

설비관리를 위한 최적 프로세스 도입 시에 정비비용 절감을 분석했을 때, 예방정비 템플릿 적용 시 정비물량의 약 20% 정도 감소를 기대할 수 있다.

2) 직무리스트 분석

직무리스트의 수량은 현재의 2% 수준으로 감소할 것으로 보인다. 동일 직무리스트를 사용하는 설비가 발전소 당 10개 이상이며, 이는 직무리스트의 감소가 한 발전소 내에서 1/10로 감소하는 것을 의미한다. 더불어 한 발전소 뿐 아닌 전체 10개의 발전소에 확대 적용하여 수치를 적용해 보면, $1/10 \times 1/10 = 1\%$ 까지 직무리스트가 감소될 수 있다.[2]

만일 정비 용역비 뿐만 아니라 정비 소요자재 비용까지 고려할 경우에는 더욱 큰 비용절감 효과를 기대할 수 있고 정비물량 최적화와 정비기준 표준화에 의해 정비관련 업무가 20%가 감축되어 작업자 및 감독자의 업무 부담도 감소될 것으로 전망된다.

현재 국내 원자력 산업계는 기능적 중요도 결정 및 예방정비 템플릿을 기반으로 설비관리를 위한 최적 프로세스를 활용한 전략집중 정비체제(strategy focused maintenance)[46,47]를 통해 안전성 및 신뢰성 그리고 경제적인 면에서 최적의 예방정비 프로그램을 구축하여야 하는 시점인 것이다.

IV. 발전 설비관리에 수명주기비용의 적용 연구

설비의 노후화에 따른 정비 또는 신설 설비를 취득할 경우, 일반적으로 취득 금액과 투자 후에 발생하는 단순 이익이나 손실에 대하여서만 고려하고 장기간의 설비 관리 차원에서 수명기간 동안 발생하는 비용이나 경제성은 그 복잡성과 이를 평가 적용하는 방법론과 기법이 체계화되지 못하고 논리적으로 타당한 프로세스가 정립되어 있지 못하여, 일반적으로 규격을 만족하는 경우 입찰에 의한 저가의 기자재를 구입하거나 투자 할 수밖에 없는 실정이다 [56,57].

이에 대하여 본 연구에서는 설비의 정비 중 그 분석 결과가 성능향상을 위한 정비를 필요로 하는 경우나 신규 설비 투자가 필요한 경우 발전소 입장에서 비용의 요소를 연구 발췌 하고 수명기간 동안에 적용하여야 할 비용에 대한 공식을 개발하고 이를 프로그램화하여 실무자가 쉽게 평가하고 경영자가 회사의 전략적 목표에 비추어 판단 할 수 있는 결과를 제공하여 실제 발전소 투자 결정에 사용 할 수 있게 하여 동일한 비용으로 최대한의 효과를 거둘 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

1. 경제성 평가기법

1) 회수기간법(payback period method)[66,67,69]

회수기간이란 투자안을 수행하기 위해 수행초기에 지출된 투자비용을 회수하는 데 걸리는 기간을 말한다. 이 방법을 적용할 때는 현금흐름이 기간 중 균등하게 발행한다고 가정하고 계산한다. 투자결정기준은 회수기간법에 의하여 산출한 기간이 기업내부에서 정한 회수기간보다 짧으면 투자안을 선택하고 길면 기각하며, 복수의 투자안이 있을 경우 회수기간이 가장 짧은 투자안부터 선택한다. 장점으로서는 계산이 용이하고, 이해가 쉬운 반면, 화폐의 시간적 가치를 고려하지 못하고, 회수기간 이후의 현금흐름양상을 반영하지 못한다는 단점이 있다.

2) 회계적 이익률법(accounting rate of return method)[66,67,69]

회계적 이익률법은 투자안의 평균이익률을 산출하여 이를 투자안의 평가기준

으로 이용하는 방법이다. 회계적 이익률 ARR은 다음과 같이 산출한다.

$$ARR = \text{연평균 순 이익} / \text{연평균 투자액}$$

여기서 연평균순이익(annual average net return)은 투자기간동안의 회계적 순이익(EAT: earning after tax)의 합을 투자기간으로 나눈 값이고, 연평균 투자액은 초기투자비용과 잔존가치(salvage value)의 산술 평균 값이다. 투자의사결정기준은 투자안의 회계적 이익률이 기업내부에서 미리 정해놓은 이익률 보다 높으면 채택하고 낮으면 기각하며, 복수 투자안의 경우 이익률이 가장 높은 투자안부터 선택한다. 장점으로는 단순하고 적용이 편리하며, 회계장부의 자료를 그대로 사용할 수 있으나, 화폐의 시간적 가치를 고려하지 않는다는 단점이 있다.

3) 순현재가액법(net present value method) [66,67,69]

순현재가치란 투자안을 선택함으로써 예상되는 미래 현금유입액의 현재가액에서 투자안에 소요되는 비용의 현재가액을 차감한 값을 말하며, 아래와 같이 계산한다.

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1 + IRR)^t} - C_0$$

단, C_t : t 시점의 현금흐름, C_0 : 최초 투자액, k : 할인율이다.

투자의사결정기준은 투자안의 NPV가 0보다 큰 투자안만을 선택하는 것이다. 이는 투자에 소요되는 한계수익(C_t 의 현재가액의 합)이 한계비용(C_0)보다 큰 투자안만을 선택함으로써 기업의 가치를 증대시키는 경제학적 원리와 일맥상통하는 결정원리이다. 복수 투자안의 경우 NPV가 가장 큰 순서부터 선택한다.

4) 내부수익률법(internal rate of return method)

내부수익률이란 투자안의 수행결과로 발생하는 미래 현금유입의 현재와 투자안의 현금유출의 현재를 일치시켜주는 할인율을 의미한다. 따라서 내부수익률은 아래의 식을 만족하는 할인율이 된다.

$$\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1 + IRR)^t} - C_0 = 0$$

이 때의 할인율은 투자로 인하여 발생하는 미래 현금흐름이 투자비용을 회수하기 위한 할인율로, 이 값이 기업내부에서 정한 할인율보다 크면 투자안을 선택하고, 작으면 투자안을 기각한다. 즉, 투자안으로부터 발생하는 이익률이 투자안의 기회비용보다 크다면 투자가치가 있다는 의미이다.

2. 수명주기비용에 관련된 용어

1) 현재가액 및 미래가액 [58,60-73]

현재가액(PV, present value)이란 미래에 발생할 것으로 예상되는 화폐적인 가치를 할인율을 고려하여 현재시점으로 환산한 금액을 말한다. 예를 들어, 20년 후의 \$1의 가치를 할인율 12%를 적용하여 현재가액으로 환산하면, 그 가치는 0.1\$가 됨을 알 수 있다. 미래가액(FV, future value)이란 현재가액과 역의 개념으로 현재의 1\$가 일정시점이 경과한 후 미래의 물가수준 등을 고려하였을 얼마의 가치를 지니는가 하는 개념이다. 즉, 이자율 12%를 감안할 경우 현재의 \$1은 20년 후 \$9.65와 동등한 가치를 지니게 된다.

Table 4.1 Discount rates examples

할인율 : 12%																					
경과연도	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
PV(US \$)	1.00	0.89	0.80	0.71	0.64	0.57	0.51	0.45	0.40	0.36	0.32	0.29	0.26	0.23	0.20	0.18	0.16	0.15	0.13	0.12	0.10
FV(US \$)	1.00	1.12	1.25	1.40	1.57	1.76	1.97	2.21	2.48	2.77	3.11	3.48	3.90	4.36	4.89	5.47	6.13	6.87	7.69	8.61	9.65

현재가액 및 미래가액은 다음과 같은 공식으로 구할 수 있다.

$$FV = PV \cdot (1 + i)^n$$

여기서 FV 는 미래가액, PV 는 현재가액, i 는 할인율, n 은 경과연도이다.

2) 할인율[58,60-73]

할인율(discount rate)이란 시간의 경과에 따른 가치의 변화를 반영하기 위한 요소로써, 이는 크게 화폐의 시간적 가치(time value of money)와 현금흐름에 내

포된 위험(uncertainty embedded in cash flow)에 의하여 구성된다. 화폐의 시간적 가치란 시간 차이에 따른 화폐가치의 차이로써 앞서 말한바와 같이 할인율 12%를 고려할 경우 현재의 \$1이 1년 뒤의 \$0.89와 동등한 값을 가지는 것은 오늘의 \$1과 1년 후의 \$1사이에 \$0.11만큼 시간 가치가 내포되어 있기 때문이다. 또한 현금흐름에 내포된 위험이란 현금흐름의 가치를 평가할 때 시간의 가치뿐만 아니라 현금흐름의 불확실성에 따라 할인율을 상이하게 조정하여야 한다는 것을 의미한다. 즉, 1년 뒤의 확실한 현금 \$0.5와 50%의 확률로 각각 \$1 또는 \$0의 가치를 가지는 현금흐름의 할인율은 서로 다른 값을 가지게 된다. 따라서 확실한 현금흐름의 경우 할인율에는 화폐의 시간적 가치만이 반영되어 있을 뿐이며, 불확실성이 있는 경우 그러한 불확실성을 반영하여 할인율은 투자안마다 상이하게 결정된다.

3) 현금흐름[58,60-73]

일반화되어 있으며 돈의 흐름으로 언급되고 수익 또는 수입의 회계항목으로 확인되지 않는다. 또한 이것은 수익증대, 비용절약, 감가상각, 세금 등으로부터 기인되며 현재가액을 계산하기 위하여 할인요소에 의해 조정된다.

현금흐름 측정의 기본원칙으로는 다음을 들 수 있다.

- 증분현금흐름기준(measure incremental cash flow base) : 해당 투자안으로부터 발생하는 현금흐름의 증가분만을 고려하여 측정한다.
- 매몰비용 무시(forget sunk costs) : 해당 투자안을 결정하기 이전에 투자된 비용은 투자안의 의사결정시 무시한다.
- 기회비용 고려(include opportunity costs) : 경제성 평가 시 해당 투자안의 결정으로부터 발생 가능한 기회비용을 모두 고려하여야 한다.
- 운전자본 소요를 고려(don't forget working capital requirements) : 해당 투자안의 결정으로 인하여 추가적인 운전자본의 충당이 필요하다면, 이를 반영하여 경제성 평가를 수행해야 한다.

4) 순현재가액[58,60-73]

순현재가액(NPV)[71-73]은 특정 또는 다수의 투자프로젝트에 대하여 할인율 및 현금흐름(cash flow)을 고려하여 경제적 가치를 판단하는 방법으로, 투자안으로부터 창출되는 미래수익(현금유입)의 현재가액과 투자비용(현금유출)의 현재가

액의 차이를 말한다. 즉, 순현재가액은 투자안의 수명주기 동안의 순현금흐름의 현재가액의 총합이다.

5) 계통 효율[58,60-73]

최종적으로 얻고자 하는 것으로써 계통효율은 효율을 수명주기비용으로 나눈 값과 같다.

$$\text{계통효율} = \text{효율} / \text{수명주기비용} [53,54,55]$$

이것은 계통효율이 좋으려면 효율은 높을수록, 수명주기비용은 낮을수록 효과적이라는 것을 말해준다. 계통효율의 분자항인 효율에 관한 공식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{효율} &= \text{가용도} \cdot \text{신뢰도} \cdot \text{지속도} \cdot \text{성능} \\ &= \text{가용도} \cdot \text{신뢰도} \cdot \text{수행도}(\text{지속도} \cdot \text{성능}) \\ &= \text{가용도} \cdot \text{종속성}(\text{신뢰도} \cdot \text{지속도}) \cdot \text{성능} \end{aligned}$$

효율 계산 공식을 적용하는 조건은 설비 및 계통은 항상 가용이며, 주어진 시간에는 고장 없이 운전되고, 추가적인 정비시간 없이 수리, 표준에 의거한 생산 활동을 수행하는 것이다.

6) 가용도[58,60-73]

가용도는 운전 시에 가동시간의 기한을 다루고 얼마나 자주 계통이 살아있는 지에 대한 척도를 표시하며 증가하는 고장시간 및 수리 또는 계획정비 등에 기인한 비가동시간 감소 등의 주요 요소를 다룬다.[53-55]

$$\text{가용도} = (\text{가동시간}) / (\text{가동시간} + \text{비가동시간})$$

$$A = A_{\text{hardware}} \cdot A_{\text{software}} \cdot A_{\text{interface}} \cdot A_{\text{process}}$$

- 고유가용도(inherent availability) : 정비직원에 의해 관찰되는 것으로써 웹 프로그램에서 사용하고 있는 가용도를 기준으로 하며 예방정비, 공급지연, 행정적인 지연은 제외된다.

$$A_i = \text{MTBF}/(\text{MTBF}+\text{MTTR})$$

- 성취가용도(accomplish availability) : 정비부서에 의해 관찰되는 것으로써 수리정비 및 예방 정비를 포함하며 공급 지연 및 행정상 지연은 포함하지 않는다.

$$A_a = \text{MTBM}/(\text{MTBM} + \text{MAMT})$$

MTBM : mean time between corrective and preventive maintenance action

MAMT : mean active maintenance time

- 운전가용도(operational availability)는 사용자에게 의해 관찰된다.

$$A_o = \text{MTBM}/(\text{MTBM} + \text{MDT})$$

여기서 MDT는 평균 운전정지시간(mean downtime)이다.

98%의 가용도의 예제는 $0.98 \times 8760 = 8584.8 \text{ hr/yr}$ 의 가동시간과 $0.02 \times 8760 = 175.2 \text{ hr/yr}$ 의 비가동시간을 말해준다. 따라서 가용도 + 비가용도 = 1이 된다.

7) 신뢰도[58,60-73]

신뢰도(reliability)는 시간주기 동안의 고장의 빈도를 감소하는 것을 다룬다. 주어진 기간동안 무고장 운전의 확률을 나타내는 척도이다.[53-55]

$$R(t) = \exp(-t/\text{MTBF}) = \exp(-\lambda t)$$

여기서 λ 는 상시 고장율, MTBF(mean time between failure)는 계통고장 사이의 시간을 말하며, 높은 신뢰도를 달성하기 위해서 긴 시간의 MTBF가 요구된다.

$$R = R_{\text{utility}} \cdot R_{\text{feed-plant}} \cdot R_{\text{processing}} \cdot R_{\text{packaging}} \cdot R_{\text{shipping}}$$

8) 지속도[58,60-73]

기존 데이터와 비교하여 정비활동을 쉽고 빠르게 하는데 시간이 걸렸는지를 다루고 정비내역을 포함하는 데이터는 특정수준의 기술수준을 갖는 직원 및 이

미 작성된 적정한 수준의 정비수준에 기인한 절차서 등에 의해 수행된다. 지속도의 특징은 정비절차서 및 수리기간을 결정해주는 설비 설계에 의해 보통 결정된다는 것이다. 주요특징은 MTTR(mean time to repair)에 의해 표시되며 최대 수리시간을 제한한다.[53-55]

정비시간을 위한 진단, 제거, 교체, 시험 등, 총 비 가동시간에 근거한다.

$$M(t) = 1 - \exp(-t/MTTR) = 1 - \exp(-\mu t)$$

여기서 μ 는 상시 정비율이다.

MTTR은 얼마나 빠른 시간 내에 계통이 수리되는지를 나타내는 산술평균 수치를 말한다. 지속도의 목표는 가용도를 높게 유지하여 짧은 수리시간을 성취하는데 있다. 효율을 구성하는 가용도, 신뢰도, 지속도는 가능한 높은 수치로 유지하는 것이 바람직하다.

3. 수명주기 비용 프로세스

수명주기 비용을 사용하여 최적안을 선택하기 위해서는 Fig4.1과 같은 프로세스를 마친 후 적용한다[28,64,65]. 수명주기비용에서의 문제점을 정의하고 대체안 및 취득/유지비용을 준비하며 고장 시에 발생비용을 준비한다. 이후 비용분석모델을 선정하고 비용예측 및 비용모델 연계분석 후에 각 연도별 비용윤곽을 예측하여 작성한다. 또한 각 대체안의 손익분기차트 작성 및 파레토 차트 작성, 민감도분석 및 고비용 항목의 위험분석을 수행하여야 한다. 물론 고비용 항목의 위험분석 수행 후 만족하지 못할 경우에는 단계2, 단계3, 단계4, 단계5로 피드백하여 프로세스를 재 수행하여야 한다.

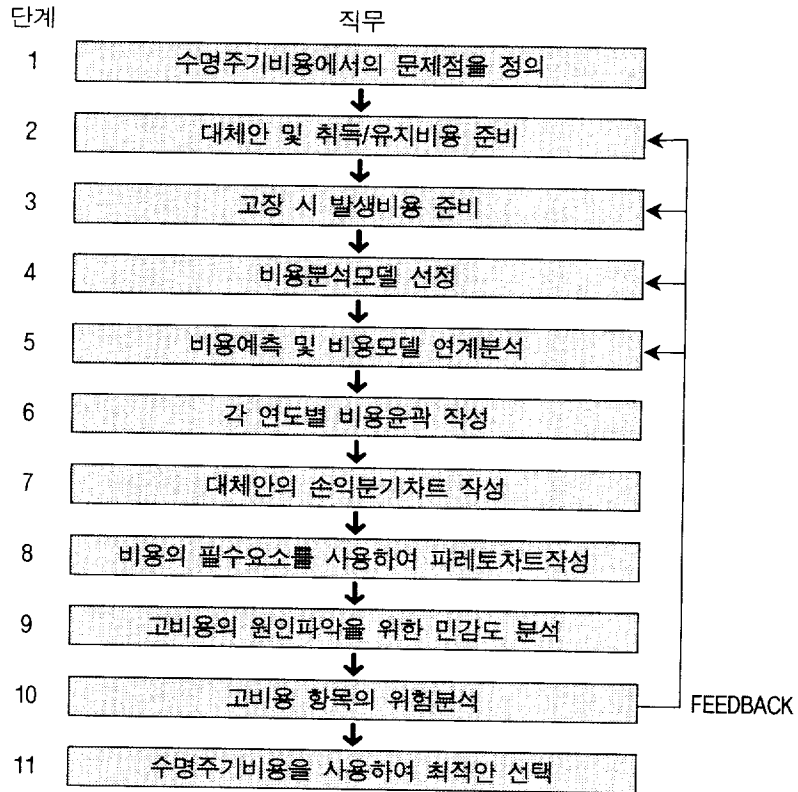


Fig. 4.1 Life cycle cost process [53]

4. 수명주기 비용 수목

수명주기 비용은 수명주기 동안의 취득비용 및 유지비용으로부터 출발한다. 취득 및 유지비용은 상호 배타적인 성격을 가지고 있으며, 설비를 취득할 때 유지하기 위한 추가비용이 요구된다. 여기서 유의해야 할 점은 설비를 유지하기 위한 비용은 취득비용의 2배 내지는 20배에 달한다는 것이다. 따라서 취득비용은 사용되는 비용 중 가장 작다고 할 수 있다. 대부분의 유지비용은 명확하지 않으므로 최적의 수명주기비용을 찾는 것은 취득 및 유지비용의 상세내역을 필요로 하게 된다. Fig4.2는 수명주기비용은 취득비용과 유지비용으로 구분되고 있음을 보여준다.

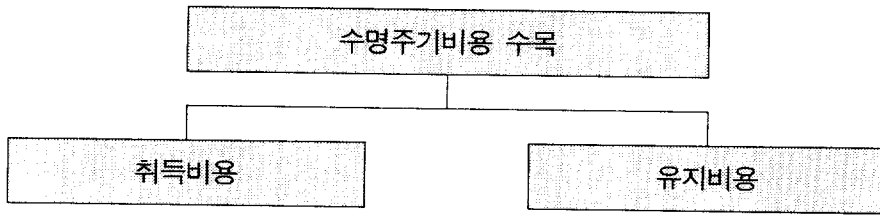


Fig. 4.2 The upper level at the life cycle cost trees [53,78]

5. 취득비용과 유지비용 수목

Fig. 4.3은 취득비용에 대하여 상세히 도시한 것이다. 현재 국내 원전에서 사용하고 있는 취득비용을 세분화하면 설계비용, 구매비용, 시공비용의 3가지로 구분할 수 있다. 설계비용에는 기술규격서, 도면, 데이터시트(calculation data sheet)로 상세히 구분되고, 구매비용은 자재비, 운송비, 보험료를 포함하며, 시공비용에는 시공비, 설치비, 시운전비용 등으로 구성되어 있다.

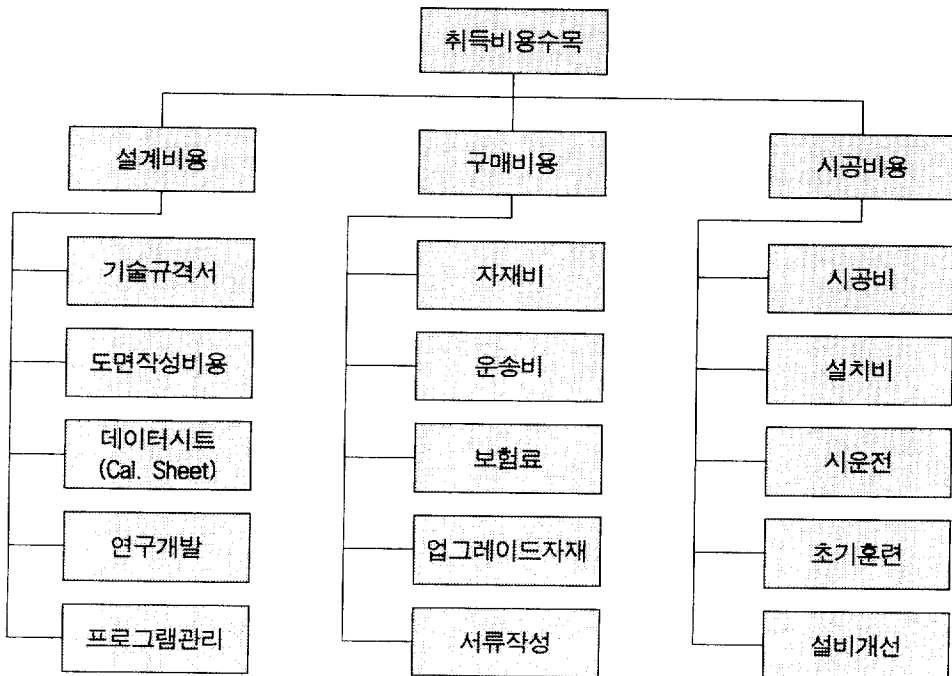


Fig. 4.3 Acquisition cost trees [53,78]

Fig. 4.4는 유지비용에 대하여 상세히 도시한 것이다. 유지비용수목은 기기설치 후의 운전 중에 사용되는 비용에 관련된 비용항목이다. 취득비용과 마찬가지로 크게 3가지로 분류할 수 있고, 이에는 계획/경상 정비비용, 설비사용비용 그리고 기기수명이 종료된 후 처분하는 처분비용의 3가지로 구분할 수 있다.

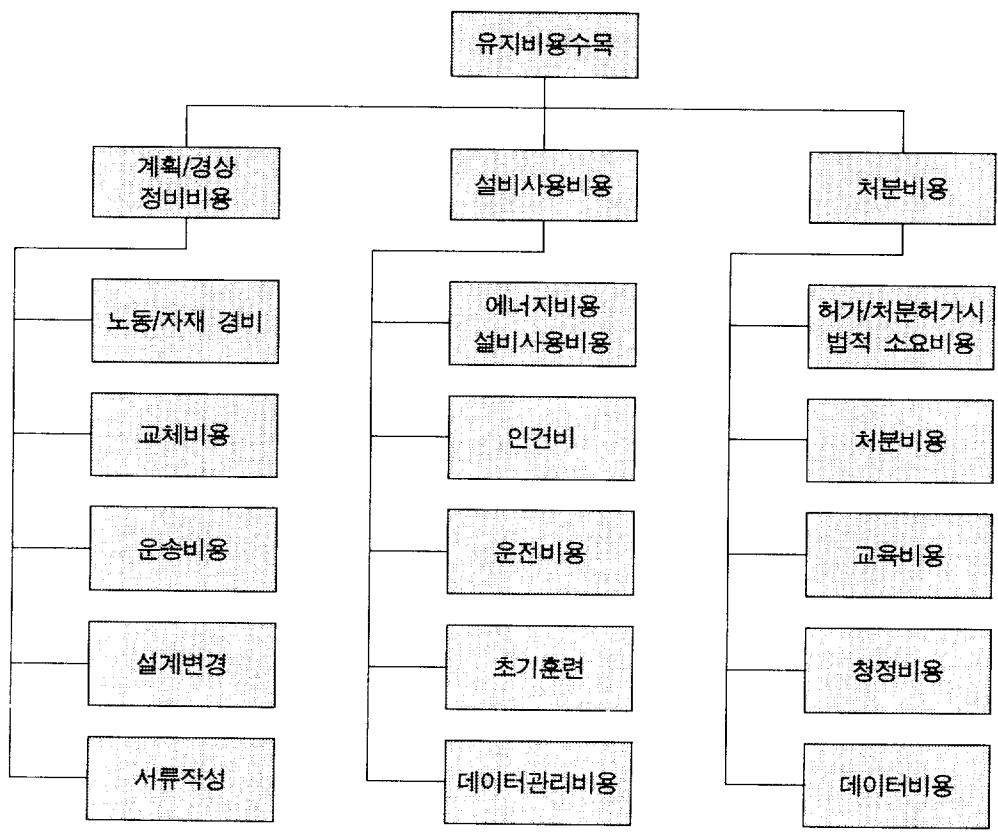


Fig. 4.4 Maintenance cost trees [53,78]

6. 수명주기비용의 공식

수명주기비용 방법론을 활용하여 최종적으로 얻고자 하는 것은 수명주기비용 (LCC) 및 계통 효율이다. 먼저 수명주기비용을 구할 수 있는 공식에 대해 정의를 하면 다음과 같이 표현할 수 있다.[53-55]

- 수명주기비용(LCC) = 비순환비용 + 순환비용
- 수명주기비용(LCC) = 초기가격 + 보증비용 + 수리, 정비, 및 운전비용
- 수명주기비용(LCC) = 생산자비용 + 정비비용 및 비가동시 소요비용
- 수명주기비용(SAE model, LCC) = 취득비용 + 운전비용 + 계획정비 + 비계획 정비 + 폐로비용

위에 나타낸 공식 중 SAE(society of automotive engineers) 모델의 비용 구조는 다음과 같이 설명할 수 있다. 취득비용은 구매비용, 행정적 엔지니어링 비용, 설치비용, 훈련비용, 운송비용 등이 포함되며 운전비용에는 직접비, 설비, 소모품, 폐기물취급 등이 있고, 발전소 등에서 수행하는 계획예방정비 및 경상정비에는 자재 및 노동비용(인건비), 계획 및 경상정비비용, 자재비용 등으로 구성되며 폐로비용에는 개조비용이나, 폐로, 보험료, 청소, 폐기물처분비용 등이 포함된다. SAE 모델은 상기에서 언급한 취득비용 및 유지비용수목을 합쳐놓은 것이라 볼 수 있다. 수명주기비용 SAE 모델의 구조는 다음과 같다.

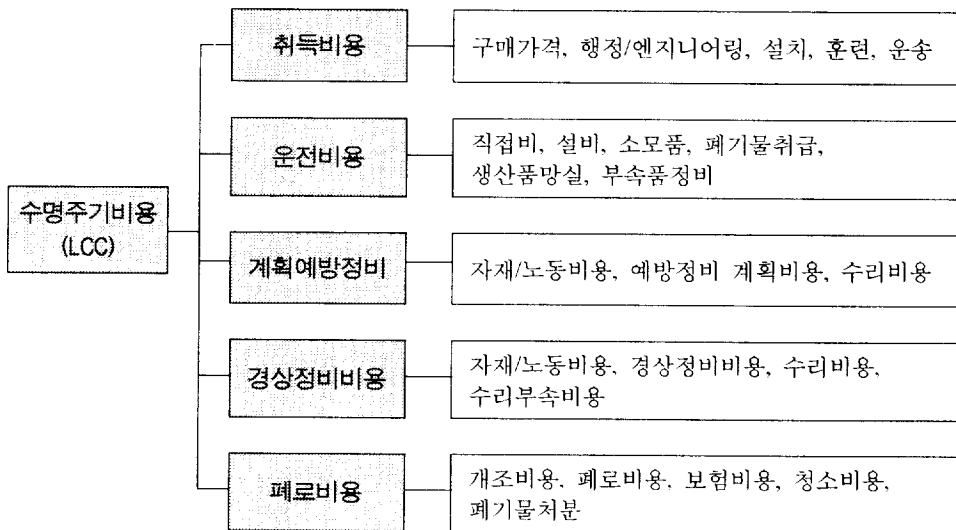


Fig. 4.5 The life cycle cost trees of the SAE model [53]

7. 수명주기비용의 분석

계통 효율 공식(효율/LCC)은 최종적으로 우리가 설비를 평가하기 위한 도구이다. 계통효율을 활용하여 비용효과적인 대체안을 선택할 수 있고 최소비용자산 취득 및 최적가격 선정이 가능하다. 다음 Table 4.2는 계통효율을 쉽게 이해하기 위한 예제이다. Table 4.2는 계통효율 예제에서 나타난 바와 같이 수명주기 비용은 낮을수록 효율은 높을수록 최적의 설비임을 보여준다. A, B, C 발전소의 효율 및 수명주기 비용을 비교해 보면 각기 효율 및 수명주기 비용 측면에서 장단점을 보인다. 이때, 계통효율을 구해보면 A, B, C 발전소 중 어떤 발전소가 최적인지 쉽게 알 수 있다.

Table 4.2 System efficiencies examples [53]

	A	B	C
파라미터	최종발전소	신규발전소	최적발전소
가용도	0.95	0.95	0.98
신뢰도	0.3	0.4	0.6
지속도	0.7	0.7	0.7
성능	0.7	0.8	0.6
효율	0.14	0.22	0.25
수명주기비용	80	100	95
계통효율	0.00175	0.0022	0.00263

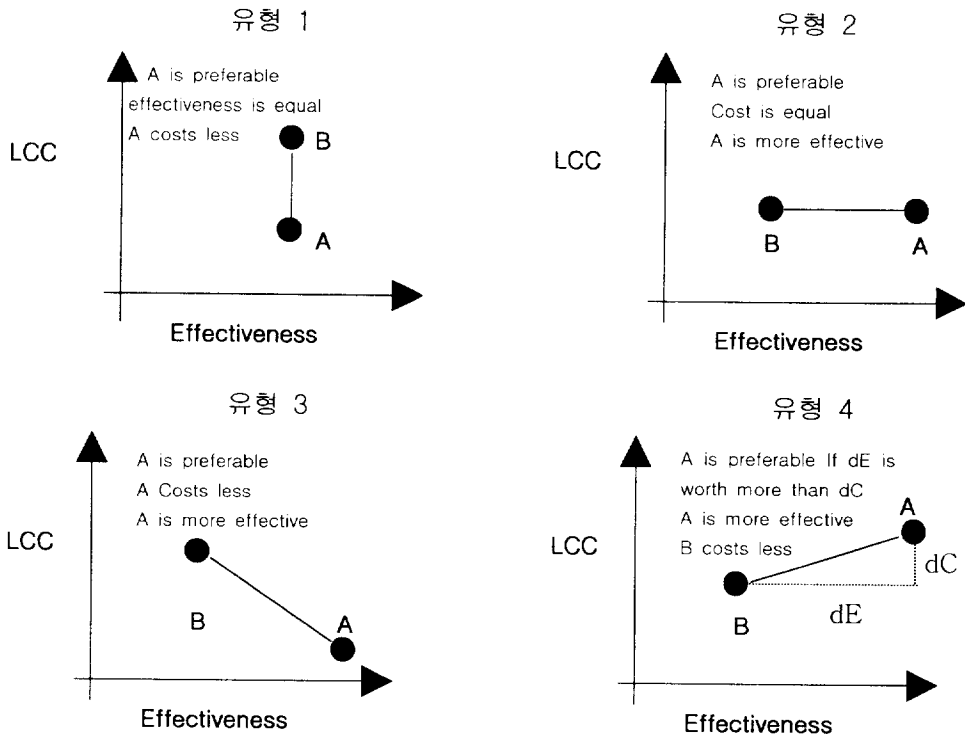


Fig. 4.6 LCC analysis examples [53]

Fig. 4.6은 수명주기비용과 효율간의 관계 중에서 발생가능한 대표적인 예제 4가지를 보여주고 있다. 유형 1에서는 A와 B의 두 가지 대안 중의 동일한 효율에서 A의 수명주기 비용이 낮으므로 A안이 효율적이라는 것을 알 수 있다. 유형 2에서는 동일한 수명주기비용 중 효율이 A가 더 좋으므로 A안이 효율적이다. 유형 3은 A안이 효율과 비용측면에서 월등하다. 유형 4가 문제가 될 수 있는데, A와 B의 기울기를 구해보면 답을 쉽게 찾을 수 있다. 여기서 말하는 기울기는 A와 B의 계통효율을 말하는 것이며 계통효율 공식은 다음과 같다.

$$\text{계통효율} = \text{수명주기비용} / \text{효율}$$

8. 웹 프로그램 소개

많은 수명주기비용 프로그램이 시중에서 구할 수 있는 대부분은 엑셀 스프레드시트를 활용하거나 로컬컴퓨터에 파일을 설치하여 활용할 수 있는 것들이 대부분이다. 본 연구에서는 전 세계적으로 널리 사용되고 있는 웹 기반(web basis)을 사용한 프로그램을 작성하여 언제 어디서나 쉽게 접근하고 활용할 수 있는 수명주기비용 프로그램을 제작해야 한다는 필요성 때문에 웹 기반 수명주기 비용 웹 프로그램을 개발하였다. 이 수명주기비용 웹 프로그램은 모든 설비에 대하여 앞에서 언급했던 설비관리 프로세스와 더불어 수명주기비용계산을 수행할 수 있도록 구성되어 있다.

8.1 수명주기비용 웹 프로그램 흐름도

Fig. 4.7은 수명주기 웹 프로그램의 간략한 흐름도이다. 사용자 확인 및 계통/부서/담당을 선택 후 설비목록화면으로 접속한 후 수명주기비용을 결정하고 각 설비에 대해 자본취득 비용을 계산하고, 유지비용 항목을 계산한 후 계산 값이 설비의 NPV 및 효율을 리스트화면에 보내주며 최종적으로 사용자는 NPV, 효율을 사용한 계통효율을 활용하여 설비의 현재가액 및 대체안에 대한 평가를 수행한다.

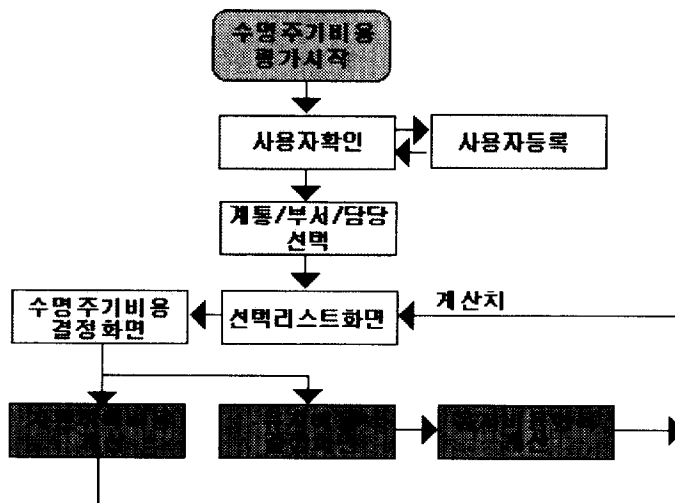


Fig. 4.7 Flow chart of web program for life cycle cost

8.2 수명주기비용의 평가 시작

Fig. 4.8은 수명주기비용 웹 프로그램의 메인화면을 보여주고 있다. “1”은 웹 프로그램의 제목으로 안전성과 경제성을 고려한 설비관리를 나타내는 “plant maintenance considering safety & economy”를 나타내고, “2”는 설비관리를 설비관리 최적 프로세스(ER, equipment reliability), 수명주기비용(LCC, life cycle cost), 계층적 분석 프로세스(AHP, analytic hierarchy process)의 3가지 방법론을 활용하였다는 것을 나타내는 프로그램 로고이다. “3” 영역을 통해 간단한 인증을 거친 후 프로그램에 접속할 수 있고 프로그램 최초 사용자는 “4”를 통해 사용자 등록을 할 수 있다. 정상적인 프로그램 접속 시에 다음과 같은 화면을 볼 수 있다.

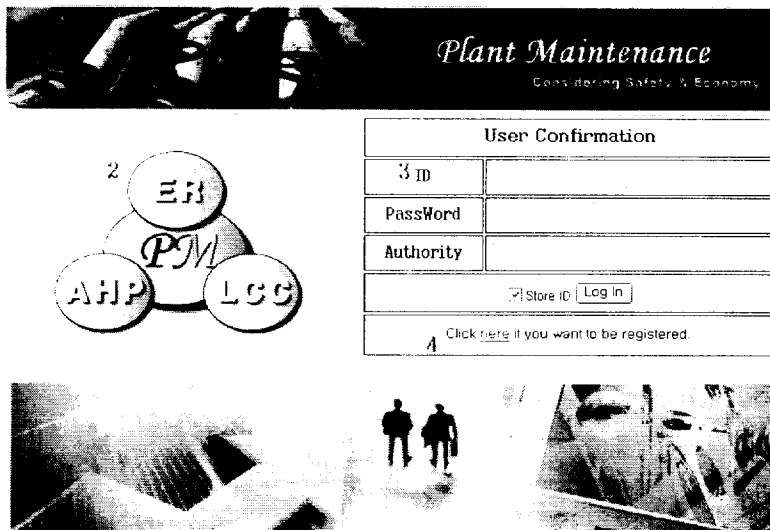


Fig. 4.8 Main picture of web program

Equipment Search	
System	▼
Field	▼
Classification	☐ Critical ☐ Minor ☐ No Impact
Confirmation	

Fig. 4.9 Equipment search

수명주기비용을 평가하기 위한 설비를 검색하는 화면이다. 계통 및 분야별로 기계, 전기, 계측분야를 선택한 후 기능적 중요도가 결정되었다면, 원하는 분류 등급을 선택하고 수명주기비용 리스트 화면으로 이동한다.

8.3 수명주기비용의 리스트 화면

수명주기 비용화면으로 이동하면 Fig. 4.10과 같은 화면을 볼 수 있다. “1”은 평가하고자 하는 설비의 기능위치 및 설비번호 “2”는 설비내역을 표시한다. “3”은 이미 평가한 기능적 중요도 결정이며 critical A로 분류된 것을 볼 수 있다. “5”는 추후 다루게 될 AHP에 대한 평가항목이다. “4”의 NPV 또는 Effec의 수치를 클릭하게 되면 수명주기 비용을 평가하는 화면으로 이동하게 되며 Fig. 4.10 중 설비번호 1, 3, 4번은 이미 NPV 및 효율이 계산된 것을 볼 수 있다. 반대로 설비번호 3은 아직 적절히 평가되지 않았다는 것을 의미하며 수명주기비용 관련 레코드가 하나도 생성되지 않은 경우에는 NPV 또는 Effec란에 Evaluate!! 라는 문구가 생긴다.

 Plant Maintenance Considering Safety & Efficiency			Search MAIN Window			
			이우방			
1 Func. Location	Equip.	2 Description	3 FID	4 LCC		5 AHP
				NPV [₩]	Effec. [%]	
2435-LCC-ANSIdual	2	Ansi Dual Pump	ech Critical A	0	0.000	0
2435-LCC-ANSIsolo	1	Ansi Solo Pump	ech Critical A	114,504	66,127	0
2435-LCC-ANSIsolo 비교	4	Ansi Solo Pump Another	ech Critical A	102,014	62,796	0
2435-LCC-API	3	API Pump	ech Critical A	183,328	49,232	0

Fig. 4.10 Life cycle cost list

8.4 수명주기비용의 계산

Life Cycle Cost										LCC Add Main Page		
가용위치 : 245-LCC-ANS-010			설비번호 : 1			내역 : Area 3-13 Flang						
경과 연수	자본비용(\$)	경상비용(\$)	효율정보		출력데이터(\$)							
	최초취득가액	연간발생비용	가용도	신뢰도	취득비용	감가상각	세전이득	순수익	현금흐름	할인율		
0	\$ 8000	4\$0	6.793	0.000	\$ 0	0	0	0	-8.000	1.0000		
1	\$ 0	\$ 75.160	99.954	76.009	\$ 100	0.000	83.167	-77.059	43.559	0.9829		
2	\$ 0	\$ 54.827	99.905	52.855	\$ 4.827	0.000	-62.827	-58.058	-30.958	0.7972		
3	\$ 0	\$ 54.827	99.905	52.855	\$ 4.827	0.000	-62.827	-58.058	-30.958	0.7118		
4	\$ 0	\$ 54.827	99.905	52.855	\$ 4.827	0.000	-62.827	-58.058	-30.958	0.6355		
순현재가액(Net Present Value:NPV)			6		\$ 113,270							
효율(Effectiveness)			66.127 7		신뢰도 R (%)		88.133 8		이용도 R (%)		92.832 9	
									운전연수 : 5년		10	

Fig. 4.11 Determination of life cycle cost

NPV 또는 Effect 하단의 수치를 클릭하면 수명주기를 본격적으로 계산할 수 있다. “1”에서는 해당설비의 간략한 정보를 나타낸다. “2”는 해당설비의 경과년수를 보여주고 경과년수는 오른쪽 상단의 LCC Add 버튼을 클릭하여 생성할 수 있고 경과년수는 자동으로 부여된다. “3”과 “4”는 자본비용 및 경상비용을 구체적으로 입력할 수 있으며 입력한 수치에 따라 계산하여 버튼위에 계산결과를 출력하게 된다. 흐름도에서 보는 바와 같이 최초취득가액 및 연간발생비용은 별도로 계산하며 계산 값이 출력된 버튼을 클릭하면 이동하게 된다. “5”는 입력한 수치에 대한 자동 계산 값을 보여주며 자동계산이 수행된 리스트는 다음과 같다.

자동 계산값
가용도, 신뢰도, 취득비용 합, 감가상각, 세전이득, 순수익, 현금흐름, 할인율, 현재액 등

“6”은 현재액으로 인해 계산된 NPV 값을 출력하며 이 버튼을 클릭하면 리스트화면으로 이동함과 동시에 NPV값과 효율이 데이터베이스에 저장된다. “7”은 효율을 표시하며 효율은 “8”과 “9”에서 계산된 신뢰도 및 가용도의 곱으로 계산된다. 신뢰도 및 가용도는 각각 고장건수를 사용한 MTBF와 고장시간을 계산식에 대입하여 계산하였으며 공식은 다음과 같다.

$$\text{신뢰도 } R(t) = \exp(-t / \text{MTBF})$$

상기 식에서 MTBF는 고장사이의 평균시간으로 만일 20년간 1건의 고장이 발생하였다고 하면 $\text{MTBF} = 20$ 이 된다. 1년간의 신뢰도를 계산하고자 하면 t 값은 1을 대입한다. 이때 MTBF의 고장건수를 계산할 때 단위를 연(year)으로 하여야 한다.

$$\text{가용도 } A = (\text{가동시간}) / (\text{가동시간} + \text{비가동시간})$$

어떤 설비가 1년간에 13시간 동안 가동되지 못하였다면, $A = 8760 / (8760 + 13) = 99.852\%$ 가 된다.

“10”은 운전연수를 나타내며 건설이나 설치 이후 총 5년의 기간이 지났음을 의미한다.

1) 자본비용의 계산

수명주기비용 결정화면 오른쪽 상단의 “추가”버튼을 클릭하면 위와 같은 화면이 출력되고 자본비용 및 기타비용에 대한 입력 작업을 수행할 수 있다. “1”은 설비의 기본정보를 나타내고 입력할 수 있다. 기기설계수명 및 세율, 할인율을 입력할 수 있고, 경과년수는 입력된 레코드에 따라 자동으로 저장된다. “2”는 자본비용인 최초취득가액 및 그 구성요소에 대한 입력을 수행할 수 있다. 최초취득가액은 설계비용, 시공비용, 구매비용의 세 가지 카테고리로 구분된다. “3”은 기타 비용, 처분비용 등을 입력할 수 있다.


Life Cycle Cost [Add] 이우형

기본정보 1			
설비	1	기능위치	2435-LCC-ANSIsolo
내역	Ansi Solo Pump		
가기설계수명[Yr]		경과연수[Yr]	
세율[%]		할인율[%]	
자본비용 (\$) 2			
최소최대가액	0		
설계비용 (\$)	기술규격서	0	시공비용 (\$)
	도면	0	
	Cal. Sheet (Data Sheet)	0	
구매비용 (\$)	자재대	0	시운전
	운송비	0	
	보험료	0	
기타 (\$) 3			
기타 비용 (\$)	0	처분비용 (\$)	0
연간유지감액 (\$)	0		

Fig. 4.12 Calculation of capital cost

2) 경상비용의 계산


Annual Sustaining Cost 이우형

1 Sustaining Cost Add Main Page

경과연수 1		설비번호 1		내역 : Ansi Solo Pump								
LN	비용요소(작업내역)	MTBF	연간고장 건수	수리(작업) 시간 (h)	활동비용 (\$/hr)	노동비용(\$)	자재비용(\$)	물류비용(\$)	정지시간당 손실액(\$/hr)	총 손실액 (\$)	전력비용(\$)	총비용(MTBF) (\$)
2	전기	3	0	0.0000	0	0	0	0	0	0	16,500	16,500
3	유	3	0.3333	8	100	60	500	50	4,000	17,600	0	17,600
4	축	2	0.5000	10	100	500	150	50	4,000	5,050	0	5,050
5	임펠러	12	0.0833	8	100	50	500	50	4,000	5,050	0	5,050
6	하우징	18	0.0556	14	100	50	500	50	4,000	5,050	0	5,050
7	플로베어링	4	0.2500	8	100	500	250	50	4,000	5,050	0	5,050
8	모터	12	0.0833	8	100	50	500	50	4,000	5,050	0	5,050
9	커벨링	8	0.1250	8	100	500	50	50	4,000	5,050	0	5,050
10	장비에방검	0	0.0000	12	50	500	0	0	0	0	0	500
11	유전기에방검	0	0.0000	10.4	35	500	0	0	0	0	0	364
12	전동점검	0	0.0000	10.4	50	500	0	0	0	0	0	520
13	훈련비용	0	0.0000	0.5	255	50	0	0	0	0	0	127.5
총 비용(W/yr.MTBF)			\$ 75,160									
효율(Effectiveness)		23.736	1년 신뢰도 R (%)	99.999	9	1년 사용도 A (%)	99.999	10				
		8	계통고장률	0.0000	0.0000	계통 MTBF(연산)	0.0000					

Fig. 4.13 Calculation of operating expenses (list)

Fig. 4.13은 수명주기비용 결정화면에서의 연간발생비용 내역이다. “1” Sustaining Cost Add 버튼을 클릭하여 얼마든지 경상비용요소를 입력할 수 있다.

“2”는 비용요소 내역을 나타내며 “3”은 MTBF를 보여준다. 특히 MTBF는 정비 이력을 참조하여 연간고장건수를 산출하여 그 역수를 MTBF로 계산한다. “\$”는 수리작업시간 등 비가동시간을 산출하여 가용도를 계산한다. “6”의 청색은 입력된 수치에 대하여 자동계산 값을 출력한다. 자동으로 출력되는 값들은 다음과 같다.

자동 계산 값
연간고장건수, 노동비용, 자재비용, 물류비용, 총 손실마진, 총 비용, 효율, 연간신뢰도, 가용도, 계통 고장율, 계통 MTBF

“7”은 해당연수에 사용된 모든 비용의 총합이며, 자동 계산된다. 이 계산 값이 출력된 버튼을 클릭하면 데이터베이스에 자동 저장되며 수명주기비용 결정 화면으로 이동한다. “8”의 효율은 연간효율을 말하며 1년 신뢰도와 1년간의 가용도 곱으로 계산된다. “9”, “10”의 1년 신뢰도 및 가용도는 1년간 발생한 모든 항목의 MTBF 및 비가동시간을 사용하여 계산한다. 이때의 공식을 다시 한번 언급하면

$$\text{신뢰도 } R(t) = \exp(-t/MTBF_{sum})$$

$$MTBF_{sum} = \frac{1}{\frac{1}{MTBF_a} + \frac{1}{MTBF_b} + \frac{1}{MTBF_c} \dots \dots}$$

MTBF_{sum} : 당해년도 발생한 항목의 MTBF 합

MTBF_{a,b} : 당해년도 발생한 각 항목의 MTBF

여기서, 가용도 A = (가동시간)/(가동시간+비가동시간의 합), 비가동시간의 합 = 비가동시간 a + 비가동시간 b, 비가동시간의 합 = 당해년도 발생한 항목의 비가동 시간 합, 가동시간 a, b = 당해년도 발생한 각 항목의 비가동시간이다.

 Annual Sustaining Cost [Update]이우방			
설비	I	Lnumber	9
비용요소(작업내역)	임펠러		
정지시간당 손실액(\$)	4000		
MTBF	12		
수리(작업)시간(Hr)	8		
노동비용(\$)	100	자재비용(\$)	4800
물류비용(\$)	450	전력비용(\$)	0
비고			

Fig. 4.14 Detailed calculation of operating expenses

“1” Sustaining Cost Add 버튼을 클릭하여 설비에 대한 비용요소를 추가하는 화면이다. 비용요소 “임펠러”에 대하여 정지시간 당 손실액 MTBF, 수리시간 노동비용, 자재비용, 물류비용, 전력비용을 입력하여 저장하면 자동으로 해당설비의 연간비용요소에 추가되며 리스트 계산 값에 포함된다.

Delete Sustaining Cost	
입력자 : 이우방	권한입력 :
초기 웹페이지 접속시 부여된 권한을.....를 입력해 주세요	
삭제는 권한을 가진 입력자에 한해 삭제됩니다.	
Delete Sustaining Cost	MAIN page

Fig. 4.15 Deletion of a record

자산비용 또는 경상비용 입력 중 오류가 발생하였을 경우에 해당 레코드를 삭제할 수 있다. 이때에 마스터로부터 부여된 권한을 입력한 후 삭제처리 한다.

9. 적용 사례

9.1 대상기기의 선정[53,62]

앞에서 설명한 수명주기비용 웹 프로그램을 사용하여 실제 발전소에서 사용하고 있는 설비에 대해 평가를 수행한다. 대상 설비는 원전에서 사용되고 있는 대기덤프밸브를 2개의 회사 제품으로 나누어 비교하도록 한다.

Table 4.3 Comparison of equipment specifications

비교 항목		A발전소 Dump Valve	B발전소 Dump V.alve	비고
가능위치		AB-PV101	521-V-0171	
설비번호		11305436	10075895	
내역		SG PORV	SG MSADV	대기방출밸브
기능적 중요도 결정	필수분류	critical A	critical A	기능적 중요도 결정은 동일함.
	설비유형	Valve-MOV	Valve-MOV	
	운전 빈도/환경	high/severe	high/severe	
최초취득가액		\$16,717	\$29,342	
자산번호		4010000251	4010009021	
제작사		V사	C사	
계획자그룹		240 [기계부]	240 [기계부]	
밸브유형		Globe	Globe	
사용유체		Steam	Steam	
설계압력		2485Psig	2485Psig	
설계온도		650F	650F	

9.2 단계별 프로세스

Table 4.3에서 언급한 두 가지 설비유형에 대해 운전기간 3년간의 자본취득비용 및 경상비용 그리고 고장건수를 입력하여 NPV 및 효율을 계산하고자 한다. 최종적으로 계통효율을 계산하여 차후에 대기덤프밸브를 구매하거나 투자계획을 수립할 때 훌륭한 평가도구로서의 역할을 수행할 것이다.[53-55]

1) 단계 1: 문제의 정의

신규 대기덤프밸브를 구매하고자 할 때 현재 발전소에서는 V 회사 및 C 회사의 대기덤프밸브를 사용하고 있다. 덤프밸브 구매 시에 두 제작사 중 효과적인 수명주기비용 대체안은 과연 무엇인가?

2) 단계 2: 대체안 및 취득/유지비용

Table 4.4는 V 및 C사의 밸브 제품에 대하여 정보를 제공한다.

Table 4.4 Basic information on the V and C company

V사	최초취득비용 : \$16,717 연간 필요 정비작업 * PORV 교정 작업(계측) * PORV 분해 점검(기계)
C사	최초취득비용 : \$29,342 연간 필요 정비작업 * PORV 교정 작업(계측) * PORV 분해 점검(기계)
비고	V사 및 C사의 밸브는 계획예방정비 시 교체하므로 정지 중 손실비용은 없는 것으로 가정

3) 단계 3: 비용분석 구조/수목 준비

각 대체안에 대한 비용분석을 하기 위해 해당 항목을 선정한 후 분석 작업을 수행한다.

(1) V사와 C사의 제품은 회사는 다르나 대체적으로 동일한 기능을 수행하는 설비이므로 취득비용 및 유지비용수목은 동일하게 구성한다.

(2) V사와 C사의 비용분석 구조

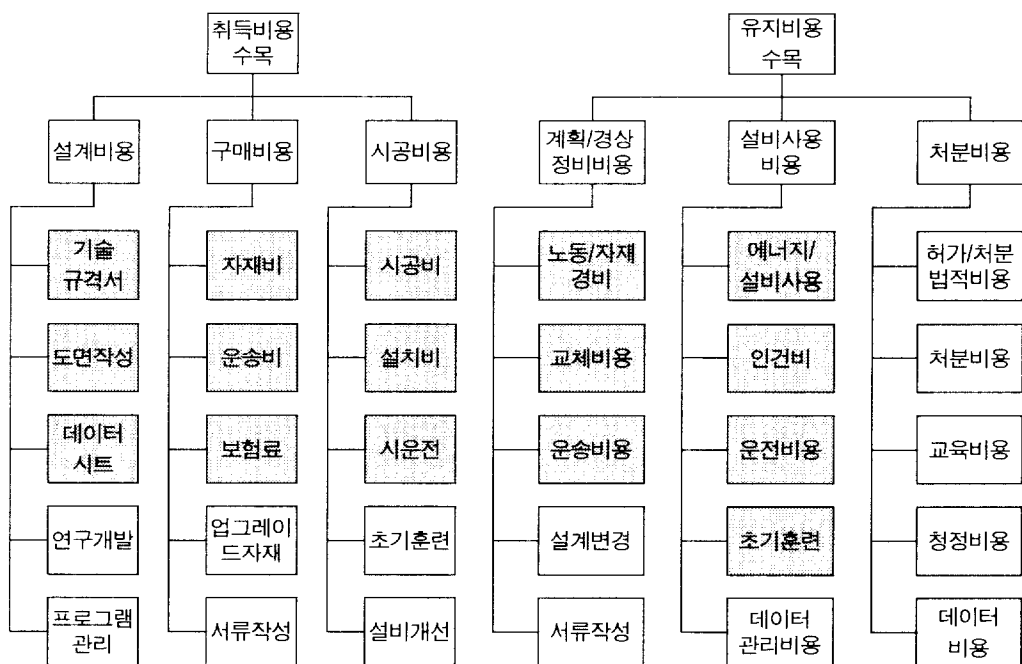


Fig. 4.16 Cost element analysis on the valves(V and C company) [53]

4) 단계 4: 분석비용모델 선정

자체 개발한 웹 프로그램을 사용하여 분석 작업을 수행하며, 고장비용은 고장이 발생한 구체적 시간을 기준으로 각 연도에 할당한다.

Table 4.5 The cost element analysis on the mechanical fields

대기덤프밸브 분해점검(기계)								
항목	V사				C사			
비용요소(작업내역)	MTBF	연간고장 건수	작업시간 (h)	활동비용 (\$/hr)	MTBF	연간고장 건수	작업시간 (h)	활동비용 (\$/hr)
작업 종료 후 품질 검사 비용	0	0	60	588	0	0	60	588
분해부품 비파괴검사	0	0	8	157	0	0	8	157
실 교체(밀봉형) 1set	2	0.5000	4	0	9	0.1111	4	0
개스킷 교체(나선형 160*172*4.5) 2ea	2	0.5000	5	0	9	0.1111	5	0
개스킷 교체(나선형 180*192*4.5) 2ea	2	0.5000	5	0	9	0.1111	5	0
분해점검(O/H) 수행	0	0	72	294	0	0	72	294

Table 4.6 The cost element analysis on the I&C fields

대기덤프밸브 교정작업(계측)								
항목	V사				C사			
비용요소(작업내역)	MTBF	연간고장 건수	작업시간 (h)	활동비용 (\$/hr)	MTBF	연간고장 건수	작업시간 (h)	활동비용 (\$/hr)
서류정리 및 행정처리	0	0	1	10	0	0	1	10
교정 작업(계측)	0	0	6	20	0	0	4	15
Control Valve 교정	0	0	5	20	0	0	5	20
Limit Switch On/Off 테스트	0	0	1	20	0	0	1	20
누수점검	0	0	1	20	0	0	1	20
I/P 변환기 교체	4	0.2500	5	10	12	0.0833	5	10
Cable 단자교정	0	0	1	20	0	0	1	20

5) 단계 5: 각 연도의 비용 윤탁 작성

각 연도에 부과된 금액을 입력하여 각 연도의 비용 윤탁을 작성한다.

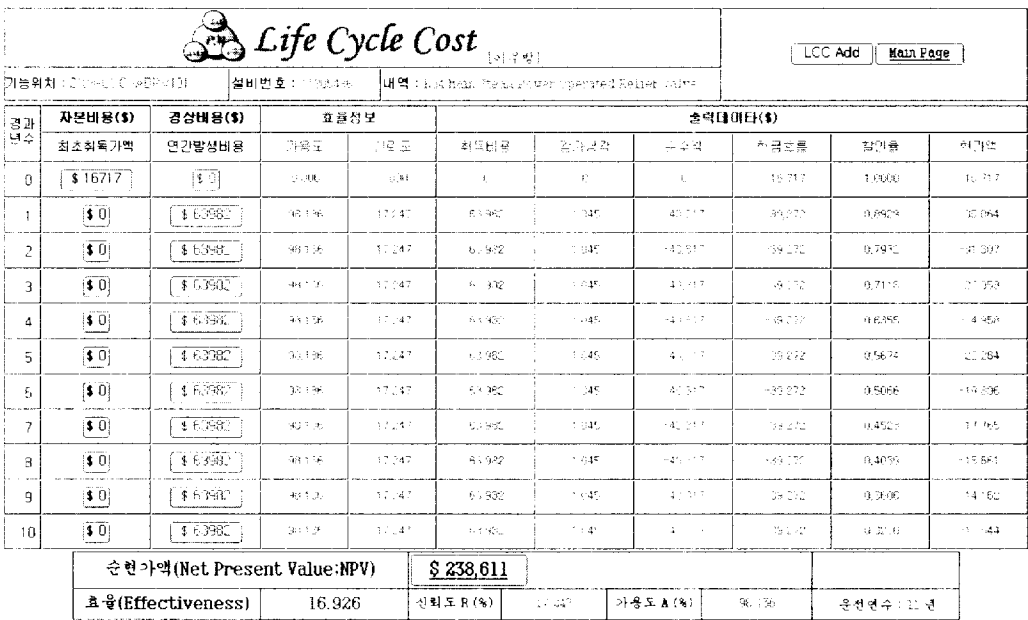


Fig. 4.17 Annual cost profile for "V" company's dump valves

결론적으로 말하자면 C사의 제품이 V사의 제품보다 투자타당성 평가에서 우위에 있다. C사의 경우 초기 투자액은 V사 보다 약 \$13,000이 더 소요되나 높은 품질로 인한 신뢰도의 상승으로 연간 소요비용은 V사보다 적게 소요된다. 손익분기차트에서 보는 것과 같이 손익분기점은 6~7년 사이에 형성되며, 이는 초기투자비가 6~7년이 경과되면 회수되는 것을 의미한다.

Table 4.8 Comparison of present and accumulative value

경과연수	V사		C사	
	현가액	누적액	현가액	누적액
0	16,717	16,717	29,342	29,342
1	35,064	51,781	32,497	61,839
2	31,307	83,088	29,016	90,855
3	27,953	111,041	25,907	116,762
4	24,958	135,999	23,131	139,893
5	22,284	158,283	20,653	160,546
6	19,896	178,179	18,440	178,986
7	17,765	195,944	16,464	195,450
8	15,861	211,805	14,700	210,150
9	14,162	225,967	13,125	223,275
10	12,644	238,611	11,719	234,994

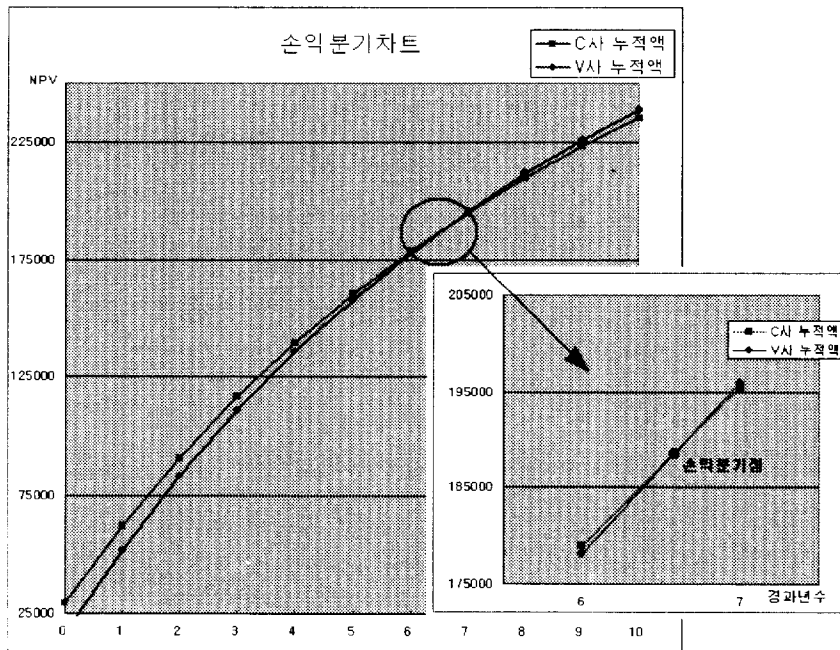


Fig. 4.19 Breakeven chart

7) 단계 7: 고 비용의 원인파악을 위한 민감도 분석

이 단계는 수명주기비용의 주요 파라미터를 연구하는 단계이다. 민감도 분석은 MTBF를 선정함으로써 시작되고, 이때 비신뢰도는 높은 등급의 밸브를 사용함으로써 감소시킬 수 있다. 신뢰도가 높은 등급의 밸브를 사용하면 MTBF가 증가하게 되고 이는 고장건수를 감소시켜 연간 발생하는 비용 또한 줄이게 된다.

Table 4.9 Life cycle cost and system efficiencies

대기덤프밸브 분해점검(기계)				
항목	V사		C사	
	MTBF	고장건수	MTBF	고장건수
비용요소(작업내역)				
실 교체(밀봉형) 1set	2	0.50	9	0.11
개스킷 교체(나선형 160*172*4.5) 2ea	2	0.50	9	0.11
개스킷 교체(나선형 180*192*4.5) 2ea	2	0.50	9	0.11
I/P 변환기 교체	4	0.25	12	0.08

V사 및 C사의 효율 및 LCC(NPV)		
항목	V사	C사
가용도	98.136	98.231
신뢰도	17.247	65.806
효율	16.926	64.642
수명주기비용	\$238,611	\$234,994
계통효율	7.09E-5	2.75E-4

V사 및 C사의 밸브에 대한 효율과 수명주기비용을 구한 후 계통효율을 계산 하면, V사의 경우 효율 및 수명주기비용에 대한 계통효율이 7.09×10^{-5} , C사의 경우 2.75×10^{-4} 의 값이 도출되었다. 이 결과는 V사 및 C사의 밸브 중 C사 제품의 선택이 더욱 합리적이며 바람직한 방법이라는 것을 알려준다.

8) 단계 8: 수명주기비용을 사용한 최적안 선택

모든 결과를 종합해 볼 때, C사 밸브 제품의 선택이 V사의 밸브보다 바람직 하며 C사 밸브의 제품사용으로 가용도 및 경제적인 측면에서 더욱 높은 이득을 얻을 수 있고, 높은 신뢰도를 바탕으로 많은 비용을 감소시킬 수 있다는 것을 알 수 있다.

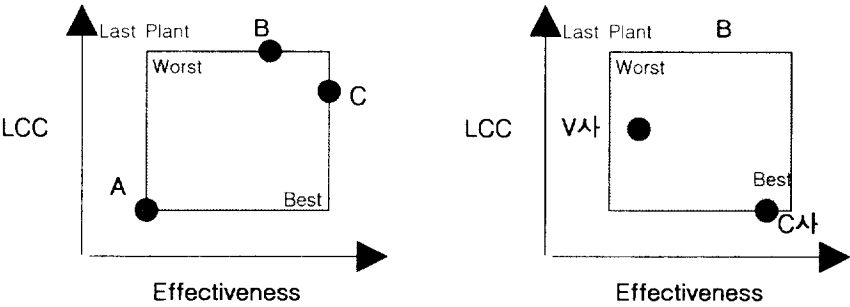


Fig. 4.20 Comparison of LCC and efficiencies

V. 투자 우선순위 결정을 위한 계층적 의사결정 기법

가동 중인 발전 설비에 대한 합리적인 투자 평가 즉, 투자 타당성을 판단하는 것은 단순한 비용 산정이 아니라 투자비용과 함께 편익(benefit)을 측정하여 투자의 우선순위를 결정해야 한다. 이러한 분석을 통해서만 투자를 결정하는데 합리적인 판단의 의사 결정을 할 수 있다. 계층 분석적 의사 결정 기법 (AHP, analytic hierarchy process)을 이용하여 경영 목표를 달성할 수 있도록 목표를 견인하는 핵심 요소들을 투자 평가지표로 선정하였다. 이렇게 선정된 지표에 대해서 AHP를 적용하여 실무 종사자들이 쉽게 발전설비 투자의 우선순위를 결정하도록 하였다. 따라서 가동 중인 원전의 시설보강에 투자되는 다양한 분야의 설비와 기기에 대한 투자 우선순위를 결정하는데 체계적이고 합리적인 방법을 제시하여 투자의 효율성을 향상 하고자 한다.[74-77,83,90]

1. 투자 분석의 현실과 계층적 의사결정 기법

1.1 투자 분석 현실

가동 중인 원전의 설비투자 시에 타당성 분석을 통한 사업의 시행여부를 종합적으로 평가 할 때 비용 효과 산정의 어려움이 있다. 원전은 안전성에 대한 고려도 하여야하므로, 투자에 대한 효과 및 편익과 같은 경제적인 지표인 NPV(net present value), IRR (investment return rate), 회수기간으로 환산하여 평가하는 것이 어렵고 특히, 발전소의 안전성과 신뢰성 분석결과가 투자에 있어서 가장 중요한 요소이나 기술적으로 실무적인 내역들이 보편화 되어있지 않아 적합성 평가가 어려우며, 분석결과를 정량화 할 경우에도 크기의 척도와 특성이 다른 평가항목을 통합하기에도 어려움이 있어 지금까지 특정부분에 사용한 예는 있으나 종합적인 분석에 사용된 예는 없다.[76,84,86-90]

1) 계속 운전(continuous operation)

원전의 건설이 완료되어 발전설비 운영을 정부로부터 인가를 받으면 발전소를 운전하는데 이때 기술지침, 운전기간 등이 포함 되어있다. 장기간 운영 후에

운영 허가기간이 완료되면, 주요기기 등을 정비하여 설비의 안전성을 평가하고 재 사용여부를 결정하여 수명연장 허가 요청을 정부에 제출하여 정부로부터 재 운영 기간을 허가 받는데 이를 수명 주기연장이라 한다.[76,90]

2) 계층 분석 프로세스(analytic hierarchy process) 기법

피츠버그 대학 경영학 교수인 Thomas Saaty가 1980년대 개발한 의사결정 기법으로, 의사 결정시의 핵심 요소를 계층적으로 분류하고 이 요소에 대해 상대적 중요도를 산출하여 이를 근거로 의사 결정을 수행한다[77,90]

1.2 AHP 도입의 필요성

가동 중인 원전의 시설보강 투자는 발전설비의 다양한 기기들에 대해 투자 필요성을 제기하고 타당성을 분석, 협의와 조정으로 사업 시행여부를 결정 하였으나, 이는 체계적으로 표준화 되어있지 않고 시행 주체마다 분석 및 적용방법이 통일되지 않아 일관성도 미흡하다. 이러한 비합리적인 사항을 개선하여 최적의 투자로 기업의 전략적 목표를 달성하도록 투자의 의사결정을 계층적으로 분류하고 계층별 투자목표를 설정하여 이를 측정요소로 선정된 통합 평가 시스템으로 구축하고 최종적인 투자 의사결정시에 지원이 되도록 정성적 요소와 정량적인 요소를 포함하는 계층 분석적 의사 결정 기법이 도입이 되어야 한다.[96,98]

2. 투자지표 선정

2.1 투자지표 의미

투자지표(investment index)란 투자대상에 대해 총체적인 성과의 변동을 측정하고 이를 이용하여 상황을 파악하여 의사결정 및 예측에 사용하는 해당 분야의 대표적인 측정(measurement)지표이다. 가동 원전 시설보강 투자분야는 관례에 따라 안전성과 경제성을 우선적으로 투자 하였으나 체계적으로 우선순위를 결정하지 못하고 개별 투자에 초점이 맞추어 졌다. 타당성 평가는 평가 지표를 이용하여 평가 기준이 합리적으로 선정되어야 하나 구체적인 지표 개발이 미진하

여 전략적 목표를 달성을 위해서는 지표 개발이 시급한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 투자 우선순위를 결정 할 수 있는 투자 에 있어서 핵심인 평가 지표를 개발한다.

2.2 투자지표 선정 방법[96]

투자 평가지표(investment evaluation index) 선정은 국내 발전소의 설비 투자 이력과 동 분야의 장기간 근무한 설비 전문가들을 대상으로 설문 조사결과 및 해외의 우수한 운영실적을 보이고 있는 발전소의 투자 평가항목을 대상으로 사례를 분석 통합하여 평가지표를 선정하였다. 본 평가지표는 최종 중요도 평가의 확인을 통해 채택하였다.

1) 국내사의 투자항목과 성능 평가항목 사례 분석

국내 가동 중인 원전은 설비 기능별 안전성의 7개 항목이 관리되고 성능 감시대상을 선정 운영하고 있다. 투자는 발전 설비 신뢰도 개선 계획에 따라 각 설비 별 목표성능을 설정하고 주기적인 시험으로 현재의 성능을 점검한다. 이러한 과정에서 성능차이가 발생하면 발전설비 수명 주기 관리(life cycle plan)계획에 따라 중장기 투자계획이 수립되고 그

계획에 따라 투자가 수행 한다. 이 과정의 의사결정은 전통적인 그룹의사 결정 방법인 투표제와 설문 조사로 이용해 왔으나 지표를 이용한 개관적인 평가 방법이 필요하다.

2) 설문 사례

평가 항목에 있어 안전성의 7개 지표를 대상으로 가상 투자 평가 지표를 선정, 설비전문가의 설문을 통해 중요도를 점수화 하여 상위 5개 항목을 대표지표로 선정하였다.

3) 해외사의 투자 평가 항목 사례 분석[90]

운영성과가 우수한 해외 가동원전에서 자본투자의 설비성능 향상 계획 시 의사결정 평가항목으로는 분야별 긴급성과 중요성을 점수제도로 이용한다. 가동 중인 원전의 경영 목표는 발전소의 안전성을 확보하여 고장을 최소화 하여 운

전주기 동안 지속적인 전력을 생산하고 회사 이미지 제고 등 가치를 향상하는 것이다. 이를 성취하도록 평가지표를 우리의 실정에 적합 하도록 외국의 사례를 참고하여 안전성 향상, 신뢰성 향상, 필수정비, 생산성 향상, 출력 증강의 5가지 핵심요소를 설정한다(Table 5.1). 모든 투자 대상에 본 평가 지표를 적용 하고, 투자의 우선순위를 결정한다. 운전 중 각 분야의 성능 시험결과에 따라 핵심 내역의 결과를 얻을 수 있으나 발전소 관리자는 발전설비의 성능을 최적화하기 위하여 설비성능 모니터링 결과에 따라 설비에 대한 투자를 시행한다.

Table 5.1 Investment fields on the operation plants [26]

투자분야	해외 A사	해외 B사	국내 사	비고
안전성 향상	○	○	○	
신뢰성 향상	○	○	○	
필수 정비	○	○	○	
생산성 향상	○	○	○	
출력 증강	○	○	○	
기 타	○	○	○	

3. 투자 평가지표의 적용

투자 평가지표는 “계층 분석적 의사결정” 기법을 도입하는데 핵심 측정요소로 전략적 목표를 설정하고 선정된 측정요소를 대표적 성과로 향상시켜 목표를 달성하는데 적용된다. 적용 방법은 투자 전과 투자 후 관점이 보완 결합되어 지표선정의 결과를 제공 한다. 지표를 평가하는 데는 상대측정에 의한 방법과 절대측정에 의한 방법이 있다.

1) 상대적 측정[90-92]

선정된 평가지표 각각에 대하여, 하위계층에 있는 평가대상들을 상대적으로 비교하여 쌍대비교행렬의 요소를 결정하고, 이 행렬의 고유치문제 해석으로 평가대상의 평가지표에 대한 우선순위를 결정하는 방식을 상대측정에 의한 방법이라 한다. 주로 이용하는 방법이지만, 평가대상의 수가 9개 이하일 때 이며,

하나의 평가지표에 대하여 평가대상 간의 상대적인 비교가 가능할 때 이용한다. 본 평가는 설비투자 우선순위 결정에 크게 기여하는데 발전소의 운전 기간 및 설비의 경연 열화에 따라 차이가 있으며 평가자의 결정에도 차이가 있다.

2) 절대적 측정[90-92]

절대측정에서는 하나의 평가지표 또는 평가항목에 대하여, 평가대상들 간의 쌍대비교에 의하지 않고, 평가항목 각각에 대하여 서로 다른 객관적 등급척도(rating scale)를 적용한다. 척도의 등급을 쌍대비교로 계량화 하여 강도(intensity)를 구하고 평가대상에 강도등급의 가중치를 부여하는 방식이 절대측정에 의한 방식이다. 이 방식은 평가대상의 수가 10개 이상으로 요소 간 1대1 쌍대비교가 어렵거나, 공통의 속성을 따라 대안을 쌍으로 비교하기 어려울 경우 적용한다. 절대측정에서는 등급의 구성이 중요하기 때문에 평가자의 결정을 신뢰할 수 있어야 하므로, 평가자는 평가 자료의 검정을 거쳐 선정되어야 한다.

4. 투자 평가 지표의 주요항목[78,79,90,95]

4.1 안전성 향상

1) 정의

원전 원자로계통, 안전계통 및 안전관련 계통 분야의 성능개선 요구에서 설비정비, 교체, 보강 및 개선사항, 규제기관의 규제사항, 즉 인허가 사항을 만족을 위한 투자, 공중의 건강과 안전을 보증하기 위한 설비보강, 설비교체 및 개선을 위한 투자, 종사자의 안전사고 예방을 위한 설비설치, 보강 및 개선 및 방사선 안전관리 부분의 설비보강, 개선 및 조치 그리고 운영기법 개발 등을 대상으로 하는 투자 분야의 평가지표 등을 포함한다.

2) 절대 평가 방법

본 지표의 등급은 확률론적 안전성 평가(PSA)를 근간으로 연료 손상빈도(CDF), 대량조기누출빈도(LERF) 및 공중안전 빈도의 개선정도, 의미 있는 빈도 감소(예시-E2 f/r-y), 상당한 감소(예시 -E5 f/r-y), 방사능 집단조사선량 저감, 산업안전의 향상 정도, 의미 있는 저감, 상당한 저감 및 규제기관 규제사항에서

의미 있는 만족정도, 상당한 만족 등을 평가한다.

3) 경제성 평가법

비용 대 편익에서 비용은 관련계통의 성능개선 비용이며, 편익계산은 사고결말(조치비용)을 예상하여 평가비용으로 계산한다.

4.2 필수 정비 [90,95]

1) 정의

발전소 내 발전기를 포함한 전력 생산계통의 설비에 대한 성능을 개선하기 위한 경년열화 기기의 즉시 정비, 교체 및 개선 사업, 연간 자본 투자 사항, 열화에 의한 주기가 완료된 고장 기기 또는 고장 예상기기 즉, 밸브, 전동기, 펌프 및 차단기, 베어링 등의 분야를 포함한다.

2) 절대평가 방법

한 주기 운전 기간동안에 정상 출력에서 기기 문제 발생 시, 미조치 시 출력 감발을 예상하거나, 의미 있는 출력 감발은 출력 100% · 5% · 2시간 이상, 상당한 출력 감발은 출력 100% · 50% · 5시간 이상으로 절대 평가한다.

3) 경제성 평가

비용은 처리비용, 편익은 고장으로 인한 예상 출력 감발 전력을 판매단가로 변환하여 평가한다.

4.3 신뢰성[90,95]

1) 정의

발전소 내 설비의 성능과 가치를 향상하는 개선사항(upgrade), 발전소 내 기기들에 대한 신뢰성 향상을 위한 조치 사항, 생산이 중단된 설비에 대한 설계변경 사항, 주요기기 고장 시 불확실성 제거와 응급조치 개선사항, 발전소의 중장기 개선사항 등을 포함한다.

2) 절대평가 방법

예상사고(consequence) 결과에 대비한 의미 있는 개선 정도, 주요 대형기기, 주요기기 부품 등의 문제가 발생 시 그 사고결과를 대비한 개선 정도, 해외에서 경험한 조치비용을 참고로 하여 등급을 결정하는 방법으로 평가를 수행한다.

3) 경제성 평가

비용은 신뢰도 향상을 위한 준비 비용, 편익은 사고의 결말에 대한 조치 및 추가비용으로 계산한다.

4.4 출력 증강[90,95]

1) 정의

발전소의 효율을 증가시켜 전력생산을 증가 시키는 설비 개선, 송전 전력량의 증가를 가져올 수 있는 설비개선, 출력증강 사업(power uprate), 계속운전(continuous operation)등을 포함한다.

2) 절대평가 방법

의미 있는 출력 향상, 열 출력, 전기 출력 향상 등을 평가한다.

3) 경제성 평가

비용은 설비개선 및 출력증강에 투자되는 비용, 편익은 출력 증강분의 판매 금액으로 계산한다.

4.5 생산성[90,95]

1) 정의

초기비용 감소를 위한 개선사항, 생산성 향상위한 개선사항, 예방정비(outage duration) 기간을 단축시키기 위한 개선사항, 규제기관의 규제사항을 보다 용이하게 적용하는 설비개선, 사업소의 간접적 가치를 향상시키는 설비 개선 또는 투자 등을 포함한다.

2) 절대적 평가

생산성향상에 대하여 평가를 수행한다.

3) 경제성 평가

비용은 생산성향상을 위한 투자비용, 편익은 투자에 따른 변환되는 경제가치로 경제성 평가를 수행한다.

5. 계층적 의사결정 기법을 이용한 투자타당성 평가

5.1 순위선정 방법

AHP기법에서 우선순위 선정은 평가자가 고유특성이 전혀 다른 평가항목에 대해 정량적으로 평가하는데 사용한다. 평가지표를 계층으로 구성하고, 상대적 평가와 절대적 평가요소를 혼합하여 중요정도를 점수로 산출하여 순위(ranking)화 한다.[91] 이를 위해서는 다음과 같은 과정을 수행한다.

1) 평가지표별 중요도 산출 방법[89]

하나의 계층이 n 개의 평가지표(b_n)로 구성되면 지표들의 상대적인 중요도 또는 우선순위를 결정하기 위하여 쌍대비교행렬(pair wise comparison matrix)을 작성하게 된다. AHP의 적용 환경에 따라, 평가지표를 평가대상, 평가항목, 의사결정대안 등 여러 가지로 부른다. 평가자는 이들 대안들 상호간의 상대적 중요도 비교를 비의 값으로 추정하여 쌍대비교행렬의 요소로 한다. 쌍대비교행렬 $A = [a_{ij}]$ 의 주대각선 요소 a_{ii} 값은 1이 되며, 대각선 상부요소 a_{ij} 들과 대칭되는 하부요소 a_{ji} 들 간에는 역수관계가 성립 된다. Table 5.2는 쌍대 비교행렬의 작성모형이다.

Table 5.2 The matrix of pair-wise comparison [90,91]

	b_1	b_2	$\cdots$	b_n	중요도
b_1	a_{11}	a_{12}	$\cdots$	a_{1n}	w_1
b_2	a_{21}	a_{22}	$\cdots$	a_{2n}	w_2
$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$
b_n	a_{n1}	a_{n2}	$\cdots$	a_{nn}	w_n

쌍대비교행렬로 고유치문제의 식을 유도하면 식(5-1)의 관계를 갖는다.

$$A \cdot v = \lambda v \text{ (단, } v \neq 0 \text{)} \quad (5-1)$$

여기서, A : 쌍대비교행렬, v : 고유벡터(eigen vector), λ : 고유치(eigen value), n : 평가지표(항목)의 수이다.

식(5-1)을 고유치를 계산하기 위한 식으로 변환하면 식(5-2)와 같다.

$$(A - \lambda I) \cdot v = 0 \quad (5-2)$$

고유치문제의 식(5-2)에서 행렬 $(A - \lambda I)$ 과 열벡터 v 중 어느 하나라도 0 행렬 또는 0 벡터이면, 식의 성립이 무의미하므로 행렬과 벡터 모두가 0이 아니면서 그 곱이 0이기 위해서는 행렬의 역행렬이 존재하지 않아야 하고, 역행렬이 존재하지 않기 위해서는 행렬식(determinant)이 0이 되어야 한다는 조건식이 성립한다. 그 조건이 식(5-3)이며 고유치방정식 또는 특성방정식(characteristic equation)이라 한다.

$$|A - \lambda I| = 0 \quad (5-3)$$

특성방정식 (5-3)에서 구하는 근(root) λ 를 고유치라 하며, 일반적으로 지표수(n)와 같은 개수의 고유치가 구해진다. 그러나 n 개의 고유치 가운데 최대고유치($\lambda_{\max}$)를 제외한 나머지 고유치들은 특별한 의미를 갖지 않기 때문에 최대고유치로 고유벡터 v 를 구한다. 이 고유벡터는 평가대상의 중요도를 나타내며, 다른 계층과의 연관성을 고려하여, 상대적 비율로 표시된 벡터요소들을 그 합이 1이 되도록 정규화(normalization)하여 표현한다.

2) 일관성 지수 검증(consistency index verification)

쌍대 비교행렬 A의 요소들이 완전한 일관성을 갖는다면 특성방정식의 근 $\lambda_{\max}$ 만이 n 값 즉, 평가항목의 숫자 n 의 숫자 값을 갖고 나머지 근들은 모두 0 또는 허수 값이다. 그러나 쌍대비교에 대한 응답이 완전한 일관성을 가지고 있지 않을 경우 $\lambda_{\max}$ 는 n 보다 큰 값을 가지게 된다. 최대 고유치($\lambda_{\max}$)를 이용하여 다음과 같은 일관성 지수(consistency index)를 얻는다.

$$\text{일관성 지수(CI)} = \frac{\lambda_{\max}}{n - 1} \quad (5-4)$$

여기서 $\lambda_{\max}$: 최대 고유치, n : 평가 항목 수이다.

Saaty는 식 (5-4)를 이용한 일치지수와 실험값의 난수지수를 이용하여 일관성 비율(consistency rate)을 구하여 일관성을 검증법을 제시 하였다.

$$\text{일관성 비율(CR)} = \text{일관성지수(CI)} / \text{난산지수(RI)} \quad (5-5)$$

[난산지수(RI : Random Index) : Saaty의 일관성 비율의 실험값]

Saaty는 쌍대 평가결과에 대한 일관성 평가에서 일관성 지수를 이용한 일관성 비율을 구하여 판정 할 수 있다고 결론을 내리고 일관성 비율 값이 0.1이내면 일관성을 가지고 있는 것으로 판단하고, 0.2이내면 허용할 수 있는 일관성 지수로 판단하며, 비율이 0.2이상이면 일관성이 없다고 판단하였다.

3) 절대평가 수행

절대평가는 투자 예상효과를 반영하는 것을 의미한다. 투자 효과 등급은 평가지표에 대한 개선등급에 따라 부여한다. 취득 점수는 중요도와 같이 혼합점수로 계산된다.

5.2 계층적 의사결정 수행 과정

1) 평가항목 선정

의사결정이 필요한 전략적 목표를 설정하고 적합한 추진 항목을 평가지표로 선정한다.

2) 계층구조

계층구조는 인간의 사고를 반영하는 중요한 지원 도구로써 문제의 상대적 평가지표의 중요도를 판별할 수 있는 계층과 절대적 평가를 판별할 수 있도록 등급화 하여 평가항목을 계층구조화 한다.

3) 상대적 평가인 쌍대비교를 통한 평가행렬 구축

의사결정의 주요인자로 선정된 평가항목으로 상대적 중요도를 비교하는 평가행렬을 구축한다. 보다 효과적인 질의(query) 과정을 통해 획득한 자료와 기준척도(pair-wise scale)를 이용하여 중요도를 비교한다(Table 5.3). 상대적 중요도 평가는 일관성 검증이 이루어져 최선의 의사결정 판단으로 의사결정이 되었음을 보장해야 한다.

Table 5.3 The upper class [74]

상대적 중요도	중요도 정의
1	동등
2	약간 중요
3	중요
4	매우 중요
5	절대 중요

4) 절대평가 결과의 정량적 표현

상대적 평가항목에 대한 각 인자의 절대 평가를 수행해야 한다. 절대적 평가의 점수화는 하위계층(절대적)평가 등급점수를 참조하여 정성적인 항목을 정량적으로 변환한다(Table 5.4).

Table 5.4 The lower class(absolute) [74]

등급	정의	점수
2	상당 향상	9
1	약간 향상	7
0	변화 없음	5
-1	약간 감소	3
-2	상당 감소	1

5) 상대적 평가의 중요도 산정[91]

중요도는 쌍대비교를 통해 상대적 평가행렬로부터 고유벡터를 산출하고 이를 비율의 척도(총 100%)로 산정하여 구한다.

6) 절대적 평가의 점수화 산정

상대적인 비교 계층과 동일한 구조로 구성된 하위 계층은 의사결정 대안에 대해 상대적 비교 계층과 동일그룹으로 연계되어 목표성취의 의사결정에 대한 기여정도를 점수로 평가한다.

7) 상대적 평가에 대한 일관성 검증[91]

쌍대비교를 통해 중요도를 산출한 결과 전이성(transitivity)을 사전에 예방하기 위해 일관성을 검증해야 한다. 일관성 비율(consistency ratio) 산출은 상대비교 평가 계층의 평가행렬에서 구한 최대고유치(maximum eigenvalue)와 난수지수(RI)를 이용하여 식(5-5)에서 구한다.

일관성지수는 쌍대 비교행렬의 일관성의 정확도를 나타내는 지표로 최대고유치가 평가항목 수에 접근할 때 일관성이 있다.

난수지수(RI)는 Saaty의 시험결과로 얻어진 것이고, Table 5.5와 같이 평가항목 수에 따라 결정되는 값이며, 일관성 검증 보정에 사용된다.

Table 5.5 Random Index [91]

항목 수	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RI	0.00	0.11	0.58	0.91	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

8) 항목별 점수산정 및 순위 결정

상위계층의 중요도결정과 하위계층의 절대적 평가가 완료되면 대안별 전체적인 평가점수가 결정되고 이를 순위별로 정리하여 대안의 우선순위가 결정된다.

6. 평가 기법 개발 및 검증

6.1 개요

본 연구에서는 가동 중인 원전의 시설 보강을 위한 투자에 대해서 한정된 예산을 가정하여 여러 투자 대안에 대한 최적화(안)을 나열하여 우선순위에 따른 의사결정을 평가하도록 프로그램을 개발하였다(Fig 5.1). 이는 평가지표 별 상대적 중요도를 결정하고 각 평가지표 별 투자목표 성취 등급정도를 평가하여 이를 점수로 산출, 우선순위를 결정한다.

6.2 평가지표별 중요도 산정

가동 중인 원전에 대한 경영목표의 중요도 산정은 평가지표를 쌍대 비교하여 비교결과를 행렬 테이블표로 구축하고, 이 행렬을 기반으로 중요도를 산출한다.

6.3 계층구조 구축

가동 중인 원전의 투자부분에서 투자 목적을 실현시키기 위한 각 평가지표를 Fig. 5.2에서 보는 바와 같이 상위계층에 대하여 평가지표를, 부분 별 기여도인 절대평가를 하위계층으로 구축하였다. 절대측정을 위한 등급척도(rating scale)는 Table 5.6과 같다.

6.4 상위계층의 중요도 산출

가동 중인 원전의 투자목표에 대한 평가지표의 상대적 중요도산출은 지표 간 쌍으로 비교하여 행렬을 구하고, 이를 기반으로 고유벡터를 산출한다.



Analytic Hierarchy Process

과제번호 : AHP1

작성자 : 비두방

항목	내	역
번호 및 제목	1	발전소 비상발전기 제어설비 교체
설비가능	발전소 외부전원 상실시 비상디젤발전기가 10초 내 기동 안전설비 전원공급	
문제점 결과	발전소 기술자침서 불만족으로 원자로 정지, 발전기 정지	
조치방법	경연열화(15년 운전)로 제어설비 교체 필요	
비용	10억원	
분야 및 편익	안전성 향상	기술자침서 만족으로 정상운전 가능
기타	원자로 안전성	/ 편익의 절대 평가: 후자시 안전성 상당 향상

Assess Upper Class [상대평가]

	안전성	필수정비	신뢰성	출력증강	생산성	Remark
안전성	1	1	2	2	2	
필수정비	1.00	1	3	3	3	
신뢰성	0.50	0.33	1	2	2	
출력증강	0.50	0.33	0.50	1	1	
생산성	0.50	0.33	0.50	1.00	1	
W.F[%]	27.15	34.62	16.48	10.87	10.87	

Consistency Index : 0.02290

Consistency Rating(<0.1) : 0.02044

Judgment : Acceptable!!!

Assess Lower Class [절대평가]

Rating	1	1	-2	2	-1	Total
Results	190.05	242.34	16.48	97.83	32.61	530

Save Calculations

MAIN Page

Fig. 5.1 Determination system using AHP [85]

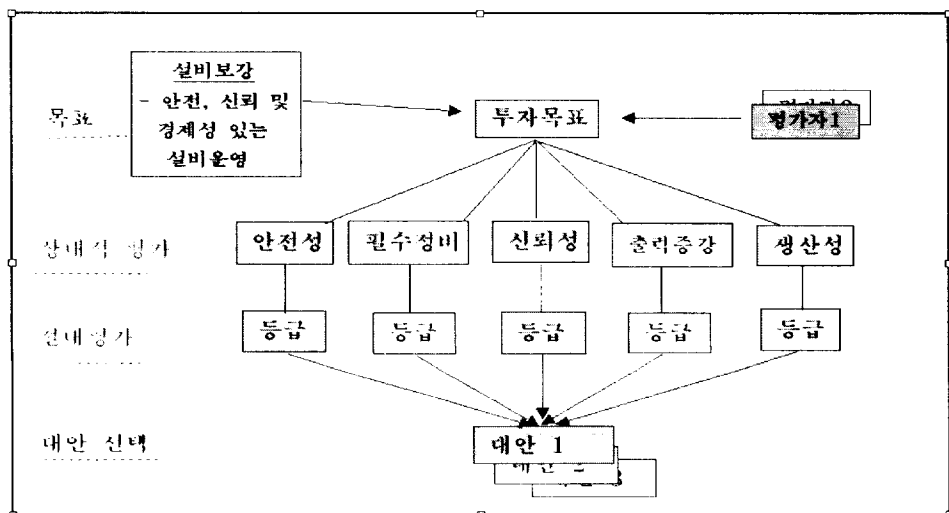


Fig. 5.2 Hierarchical structure of Investment priority order

6.5 쌍대 비교

상위계층의 평가지표 의미는 Table 5.7에서 보는 바와 같으며 이의 상대비교 방법은 아래의 Fig. 5.3과 같다. 이는 X축을 기준으로 Y축과 비교한 결과를 정방행렬로 표현한다. 본 시스템 설계에서는 평가결과가 5차원 정방행렬이며 이원 비교시의 결과는 다음과 같다.

Table 5.6 The importance grade of upper class

중요도 등급	내용
1	비슷함 (Equal Importance)
2	약간 중요 (Slight Importance)
3	매우 중요 (Strong Importance)
4	확실히 중요 (Demonstrated Importance)
5	절대적으로 중요 (Absolute Importance)

Table 5.7 The indicator of relative evaluation

번호	평가지표
1	안전성(Must Do Regulatory or Safety) 가. 규제기관 규제요건 나. 공중위해 방지 다. 인적사고 예방
2	필수정비(Must Do Asset Repair & Replace) 가. 발전정지 가능(유발)항목 나. 고장기기 교체
3	신뢰도향상(Powerblock Plant Upgrade) 가. 기기신뢰도 향상 나. 단종기기 대체 다. 기기 성능향상(Performance)
4	출력증강(Power Uprate) 가. 발전소 효율향상 나. 출력증강
5	생산 및 효율성 향상(Productivity or Efficiency) 가. 원가절감 요인 나. 인력생산성 향상 다. 예방정비기간 단축 라. 규제 부담 절감 마. 현장지원설비(Structure Infra) 보강

Assess Upper Class [상대평가]

	안전성	필수정비	신뢰성	출력증강	생산성	Remark
안전성	1	1	2	2	2	
필수정비	1.00	1	3	3	3	
신뢰성	0.50	0.33	1	2	2	
출력증강	0.50	0.33	0.50	1	1	
생산성	0.50	0.33	0.50	1.00	1	
W.F[%]	27.15	34.62	16.48	10.87	10.87	

Fig. 5.3 Examples of weighting factor [85]

6.6 평가지표의 가중치와 우선순위 연산

1) 고유벡터

평가항목별 중요도를 결정하는 요소로 쌍대 비교결과의 정방행렬에 대해서 PERT공식에 따른 최빈치 도출 방식에 따라 기하평균으로 연산을 수행[94]하였다.

2) 우선순위

고유벡터를 이용하여 특정 평가지표의 우선순위(priority vector)는 전체의 분류로 계산을 수행하였다.

3) 평가항목 가중치

우선순위에 대한 계산 결과를 분율(%)로 표현된다.

Table 5.8 Priority vector [94]

쌍대비교행렬	고유벡터	우선순위(priority vector)
$\begin{bmatrix} 1 & a & b \\ 1/a & 1 & c \\ 1/b & 1/c & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \sqrt[3]{1 \times a \times b} \\ \sqrt[3]{(1/a) \times 1 \times c} \\ \sqrt[3]{(1/b) \times (1/c) \times 1} \end{bmatrix}$	$\begin{aligned} u &= \sqrt[3]{1 \times a \times b} / Tsum \\ v &= \sqrt[3]{(1/a) \times 1 \times c} / Tsum \\ w &= \sqrt[3]{(1/b) \times (1/c) \times 1} / Tsum \end{aligned}$
	$Tsum$	

4) 쌍대비교의 일관성지수 계산 및 프로그램에 의한 간략계산과 MATLAB을 이용한 계산의 비교

(1) 일관성 검사[89]

평가자의 논리적 모순을 측정하는 것. 즉, "A가 B보다 중요, B가 C보다 중요, C는 A보다 중요하다." 라는 전이성(transitivity)의 논리적 모순성을 예방하기 위함이며 일관성 비율(CR,consistency ratio)의 크기에 따라 일관성이 유무를 판단한다. 그 기준은 비율이 0.1이하이면 일관성이 있으며, 0.2 이하는 약하지만 대체로 일관성이 있음을 판단한다.

(2) 최대 고유치 [89]

일관성 지수 연산은 최대 고유치를 근간으로 연산된다. 쌍대평가 결과의 정방행렬을 이용하여 선형함수로 표현되는 고유치 문제의 방정식으로부터 최대고유치를 구한다. 일관성지수는 최대고유치에 좌우되기 때문에 보다 정확성을 기해야 한다. 본 시스템에서는 웹 프로그램을 이용하여 수행되므로 보다 간략한 방법의 계산 기법으로 상기와 같이 연산하며, MATLAB을 이용하여 계산 값을 비교한 결과 정확성이 있는 것으로 판단되었다.

Table 5.9 Consistency rate

쌍대비교행렬	중요도	최대고유치
$\begin{matrix} 1 & a & b \\ 1/a & 1 & c \\ 1/b & 1/c & 1 \end{matrix} \times \begin{matrix} u \\ v \\ w \end{matrix} = \begin{matrix} d+e+f \\ g+h+i \\ j+k+l \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} (d+e+f)/u \\ (g+h+i)/v \\ (j+k+l)/w \end{matrix}$		
$\frac{Tsum}{3} = \lambda_{max}$		
☐ 난수지수(RI) = 1.45 (saaty의 실험결과 n=9일 경우) ☐ 일관성지수(CI) = $\frac{(\lambda_{max}) - n(9)}{n - 1}$ ☐ 일관성비율(CR) = $\frac{\text{일관성지수}(CI)}{\text{난수지수}(RI)}$		

(3) MATLAB 계산과 Excel 계산 결과의 비교 [89]

계층분석적 의사결정 기법은 평가지표에 대한 상대적 중요도(eigenvector: 고

유벡터) 계산과 이를 이용한 최대 고유치(maximum eigenvalue) 계산 결과에 따라 평가 신뢰에 차이가 있다. 개발된 "가동원전 투자 우선순위 결정시스템"은 모든 계산을 excel sheet로 처리하므로 이의 적절성을 검증하였다. 시험조건은 일반적인 평가결과의 자료를 사용하여 Excel Sheet 계산 결과 값과 MATLAB 계산 결과 값을 비교하였다. 계산 결과는 양호하였다.

Table 5.10 Test data and results

	a	b	c	d	e	f	g	h	i
a	1	2	3	3	3	1	1	1	5
b	0.5	1	2	1	1	2	1	2	1
c	0.33	0.5	1	2	2	1	3	1	3
d	0.33	1	0.5	1	1	3	1	3	4
e	0.33	1	0.5	1	1	1	2	1	3
f	1	0.5	1	0.33	1	1	5	1	1
g	1	1	0.33	1	0.5	0.2	1	1	3
h	1	0.5	1	0.33	1	1	1	1	1
i	0.2	1	0.33	0.25	0.33	1	0.33	1	1

	최대고유치	가중치
Excel	10.3623	0.195, 0.122, 0.127, 0.127, 0.104, 0.102, 0.081, 0.085, 0.052
MATLAB	10.387	0.196, 0.118, 0.126, 0.131, 0.096, 0.115, 0.085, 0.082, 0.052

최대 고유치의 차는 0.02로 계산되었다. 최대고유치는 일관성 검증에서 중요한 요소이다. 본 방법에서 적절성을 검증하기 위하여 검토한 결과 일관성 평가에서 기준값의 허용범위 0.1내 있어 일관성 검증에 문제점이 없다. 또한 가중치의 차는 0.008로 계산되었으며 고유벡터의 중요도 판단에서도 기준값과의 차는 평가항목별 가중치로 큰 의미가 없다.

6.7 하위계층의 등급 결정

평가지표에 대한 상대적 중요도를 보완하기 위해 절대적 평가를 수행한다. 평가시의 평가기준은 Table 5.9에 따라 정도를 파악하여 등급에 따라 하위 평가

를 수행하고 그 결과는 Fig. 5.4와 같이 개발화면에 제공된다. 발전소에서 적용 가능한 하위계층평가를 위한 5개 평가항목과 이에 대한 상세한 평가 기준 및 등급내역은 Table 5.10과 같다.

- 1) 하위계층의 절대적 평가
- 투자계획 대안의 투자평가 대상에 대해서 투자 후에 예상되는 효용(benefit)가치를 5개 항목 분야로 등급이 부여되고 각 항목별로 절대적 점수로 가산되도록 5등급으로 평가하고 각기 점수를 차등화 한다.

Table 5.11 The importance grade of lower class

하위계층의 중요도 등급	내용
"+2" (평가점수 : 9)	투자 전보다 효용가치가 상당히 큼
"+1" (평가점수 : 7)	투자 전보다 효용가치가 조금 큼
"0" (평가점수 : 5)	투자 전후 차이가 없음
"-1" (평가점수 : 3)	투자 전보다 효용가치가 감소
"-2" (평가점수 : 1)	투자 전보다 효용가치가 상당히 감소

Assess Lower Class [절대평가]					
Rating	1	1	-2	2	-1
Results	190.05	242.34	16.48	97.83	32.61

Fig. 5.4 Absolute evaluation on the lower hierarchy

Table 5.12 The criteria of absolute evaluation

	1. 안전성		점수
평가	규제기관 규제요건, 공중위해 방지, 인적사고 예방		
등급구분	2	안전성 향상 상당히 있음	9점
	1	안전성 향상 약간 있음	7점
	0	안전성 영향이 없음	5점
	-1	안전성 감소가 약간 있음	3점
	-2	안전성 감소가 상당히 있음	1점

Table 5.12 The criteria of absolute evaluation(continued)

	2. 필수정비		점수
평가	발전정지 가능(유발)항목, 고장기기 교체		
등급구분	2	발전정지 방지 향상 상당히 있음	9점
	1	발전정지 방지 향상 약간 있음	7점
	0	발전정지 방지 정도가 없음	5점
	-1	발전정지 증가 있음	3점
	-2	발전정지 증가 상당 정도 있음	1점
	3. 기기 신뢰도 향상		점수
평가	기기 신뢰도 향상, 단종기기 대체, 기기 성능향상		
등급구분	2	신뢰도 향상 상당히 있음	9점
	1	신뢰도 향상 약간 있음	7점
	0	신뢰도 향상이 없음	5점
	-1	신뢰도 감소가 약간 있음	3점
	-2	신뢰도 감소가 상당히 있음	1점
	4. 출력 증강		점수
평가	발전소 효율 향상, 출력증강		
등급구분	2	출력증강 정도가 상당히 있음	9점
	1	출력증강 정도가 약간 있음	7점
	0	출력증강 정도가 없음	5점
	-1	출력 감소가 약간 있음	3점
	-2	출력 감소가 상당히 있음	1점
	5. 생산성 향상		점수
평가	원가절감, 생산성향상, O/H기간 단축, 규제부담 절감, 지원설비 보강		
등급구분	2	생산성 향상이 상당히 있음	9점
	1	생산성 향상이 약간 있음	7점
	0	생산성 향상이 없음	5점
	-1	생산성 감소가 약간 있음	3점
	-2	생산성 감소가 상당히 있음	1점

2) 투자지표의 중요도 비교

선정된 설문자로 하여금 15개 투자 요청항목에 대해서 "설비 투자 우선순위 평가" 시스템을 이용하여 예시된 설비투자의 상대적 중요도를 평가한 결과 및 비율은 Fig 5.5와 같다. 본 평가시스템에서 가장 강력한 부분이 평가요소별 상대적 중요성 판단이다.

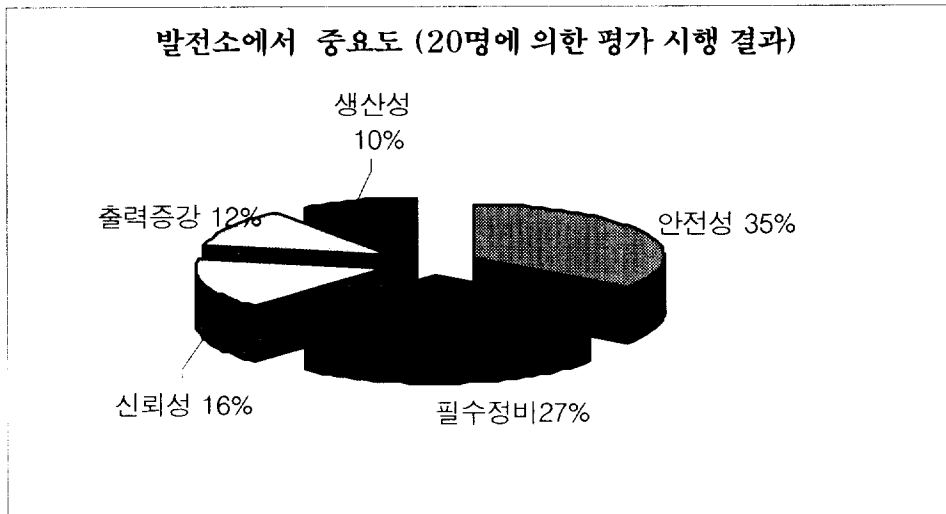


Fig. 5.5 The rate of importance

3) 투자지표의 절대적 평가

계층적 의사결정(AHP)에서 난해한 평가로 지목되는 부분이 절대적 평가이다. 이는 투자의 경제성 향상과 감소의 정도를 비용 대 편익(benefit)을 분석한 결과로 정량적 평가 방법이 도입되어 충분한 사전 준비와 분석이 요구되나 개발된 평가에서는 상위 2단계 및 하위 2단계로 구분하여 평가자로 하여금 부담을 줄이고 보다 정도의 차를 두어 평가가 되도록 구분하였다. 점진적으로 본 분야는 계속 보완하고 개발하여 평가기법을 향상시켜야 한다. 본 평가는 상대적 중요도를 보다 강화시키도록 가중치를 두었으며 기본 등급 등의 비율은 Fig. 5.8과 같이 절대평가 결과를 보여준다.

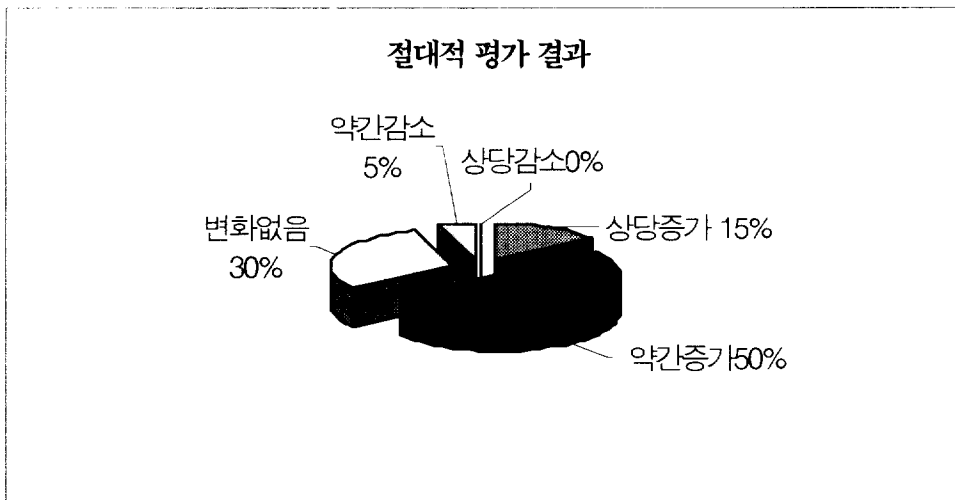


Fig. 5.6 The rate of absolute evaluation

6.8 종합 평가 결과

발전소 설비에 대한 경영의 주요책임자가 복잡하고 다양한 설비의 투자 대상을 선정하고 결정하는 것은 쉽지 않다. 설비전문가들이 계획하고 분석한 자료를 이용하여 투자에 대한 의사결정시에 경영자의 주관성이 도입되어 투자의 효율성이 저하 될 수가 있다. 하지만 체계적인 의사결정기법이 개발되어 의사결정 지원도구로써 이용하면 투자 목표가 선명하고 평가지표의 중요도에 따른 투자가 객관화 되어 발전소의 안전성, 신뢰성 및 경제성 등 성과와 가치가 향상 된다. Fig. 5.7은 개발된 투자우선순위의 평가결과를 보여준다.

시설보강 투자 우선순위 평가 결과					계 시작
평가일자	2005-05-09 10:51				
항목번호	투자 항목 내역	총점수	Ranking	비고	
1.	RCP Internal 점검용 제염 설비 제작구제	4755.2	3		
2.	백연로 교체 기중기 교체	4569.8	4		
3.	Feed wtr Isolation 밸브 교체	4977.2	1		
4.	CWP 펌프 교체	4956.3	2		
5.	출력증강을 위한 터빈 브레이드 교체	4507.3	5		

Fig. 5.7 The result of prioritization for the evaluation

7. 설비투자예 계층적 의사결정 기법 도입효과

- 1) 설비투자에서 안전성, 신뢰성, 경제성 등의 평가지표를 개발하여 적용함으로써 투자의 내실을 기함으로써 발전설비의 종합적인 안전성 향상을 도모한다.
- 2) 경쟁적인 경영여건에서 수명주기와 투자타당성 평가에 의한 설비 투자를 수행함으로써 경영의 위험성을 사전에 예방할 수 있다.
- 3) 우리 실정에 적합한 투자 평가지표를 개발하여 전략적 경영목표를 달성할 수 있도록 이를 핵심 성공요소로 이용하고 AHP의 의사결정을 도입하여 설비의 종합적인 관점에서 효과적인 설비투자를 수행하여 설비자산의 가치를 향상할 수 있다.
- 4) 발전 수명주기 동안의 비용을 산정할 수 있고 특히 발전운영 주기에 따른 설비 보강사업에서 설비 투자기준을 개발하여 보다 객관적으로 투자 평가를 수행할 수 있다.
- 5) 과학적인 설비투자 평가를 도입하여 한정된 예산범위 내에서 효과적으로 설비운명을 기할 수 있다.
- 6) 가동 중인 원전의 시설 보강사업에 최고경영자의 경영목표를 달성하기 위한 객관적이고 과학적인 평가기법으로 의사결정을 할 수 있다.
- 7) 표준화된 객관적인 타당성 평가를 통한 설비투자가 시행되어 효과적인 설비관리로써 적재적소에 투자를 수행할 수 있다.
- 8) 투자관리에서 투자평가를 도입하여 회사의 전략적 대처를 기할 수 있다.

VI. 결 론

전 세계적인 자산관리 시스템인 ERP를 기반으로 한국에서 가동 중인 원자력 발전소의 설비관리는 그 자체로써도 설비관리의 혁신이라는 큰 의미가 있다. 이러한 혁신적인 시스템의 기반위에 설비관리의 최적 프로세스, 계층적 분석도구 및 수명주기 비용분석 등을 보다 효과적으로 수행한다면 안전성과 신뢰도를 극대화한 최적의 설비관리시스템이 될 것이기 때문에 원자력 발전소 설비관리 최적화에 관한 연구를 수행한 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 설비관리의 최적 프로세스를 활용하여 발전소의 설비를 중요도로 구분하여 필수기기에 인력, 자재, 비용 등의 자원을 효과적으로 집중하고, 예방정비 템플릿을 필수기기와 조합하는 설비관리 프로세스를 도입하여 최적의 주기를 갖는 예방정비 시스템을 구축하여 총 정비물량을 20% 이상 감소시켜 그에 상응하는 비용을 절감할 수 있다.
- 2) 투자타당성 평가의 도구에 머물러 있던 수명주기비용의 개념을 설비관리에 도입하여 총 비용에 대한 순 현재액 및 효율을 설비단위로 계산하여 투자타당성 평가도구 뿐만 아니라, 자재구매, 작업 스케줄링 등의 설비관리 프로그램 수행 시에도 우선순위를 통한 효과적인 관리를 수행 할 수 있도록 하였다.
- 3) 의사결정의 전 과정을 여러 단계로 분류하여 심층 분석하고 정량화한 결과를 최종의사결정에 반영할 수 있는 계층분석적 의사 결정 방법을 설비관리에 도입기 위하여 투자 평가 지표를 선정하고 이를 절차를 만들고 프로그램으로 구현하여 실용성을 한층 높였다.
- 4) 설비관리에 있어서 우선순위에 따른 자원을 집중시키고 프로세스를 감시하고 분석하여 지속적인 향상을 도모하고 투자가 필요 할 경우에는 수명기간비용을 계산하고 투자항목에 따른 우선 순위를 결정 할 수 있도록

하는 등 경영차원에서 종합적으로 관리할 수 있는 기틀을 마련함으로써 이러한 기법은 원자력 발전소 뿐만 아니라 화력발전소, 수력발전소, 화학 플랜트 등 다양한 분야의 설비관리에 적용할 수 있다.

참고 문헌

- [1] J. H. Hwang, J. Y. Song, S. C. OH, "SAP R/3," SAP Korea, 1999
- [2] S. Y. Moh, "Optimizing PM Program Based on DREAMS," KHNP PI Office, 2004
- [3] EPRI, "EPRI PM Basis Database ver. 5.0," EPRI, 2004
- [4] INPO, "Equipment Reliability Process Description," INPO, 2001
- [5] Woo-Bang Lee, Sung-Mok Min, Dong-Jo Kim "System Oriented Plant Maintenance," Asian Pacific Conference for Fracture and Strength, 2004
- [6] 김창은, 권중근, 채일병, 문영길 공저, "신 설비관리", 영진서관, 1999
- [7] 박찬권, 정한일 공저, "ERP 도입전략과 비즈니스 개혁," 박영사, 2001
- [8] 오라클 솔루션 연구회, "정보화의 새로운 패러다임 e-비즈니스 시스템," 교우사, 2001
- [9] 후지타 마사히로 저, 홍종희 역, "표준화와 기업전략," KSA 한국표준협회, 2000
- [10] 박창규, 하재주, "확률론적 안전성 평가," 브레인코리아, 2000
- [11] B. Stengl, R. Emartering, "SAP R/3 Plant Maintenance," SAP Press, 2001
- [12] EPRI, "The Work Control Process Module in Support of a Living Maintenance Program (EPRI TR-108559)," EPRI, 1997
- [13] Y. S. Kwon, D. H. Kim, "e-Business System," Kyowoo Sa, 2001
- [14] D. Palmer, "Maintenance Planning and Scheduling Handbook," McGraw Hill, 1997
- [15] J. Moubray, "Reliability Centered Maintenance Second Edition," ButterWorth, 1991
- [16] Prairie Island NPP Corporate office, "Component Classification FP-E-SE-02 Rev. 0," Prairie Island NPP, 2004
- [17] TVAN Standard Department, "System and Component Health Equipment Failure Trending," NEDP-12 rev. 3, Tennessee Valley Authorities, 2004
- [18] Exelon Nuclear, "ER-AA-10 Equipment Reliability Process description," Exleon,

2004

- [19] Exelon Nuclear, "ER-AA-3001 Long Term Asset Management Strategies," Exelon, 2004
- [20] Cooper Nuclear Station, "Equipment Reliability Improvement Project FEG and CCD Project procedure," Cooper Nuclear, 2003
- [21] INPO, 99-002 "European Reliability Benchmarking," INPO, 1999
- [22] INPO, AP-925 "Outage Process Description," INPO, 1998
- [23] EPRI, "Guide- Critical Component Identification Process 1007935," EPRI, 2003
- [24] St. Lucie NPP, "SCEG-006 System and Component Guideline," St. Lucie NPP, 2000
- [25] NEI, "The Standard Nuclear Performance Model - A Process Management Approach rev.4," NEI, 2003
- [26] Byron NPP, "Long Range Plan," Exelon, 2004
- [27] J. Moubray, "Maintenance Management(A New paradigm)," Aladon Ltd, 1995
- [28] G. Sliter, J. Carey, "Nuclear plant life cycle management implementation guide," TR-106109 Final Report, EPRI, 1998
- [29] EPRI, "Predictive maintenance primer," NP-7205 Research project 2814-22 Final report, EPRI, 1991
- [30] Onmarc Consulting, "The work control process module in support of a living maintenance program," EPRI, 1997
- [31] Chavet & Anderson Inc, "Graded approach to maintenance optimization decision making," 2003
- [32] Cooper Nuclear Station, "Maintenance optimization graded approach to MO decision making," Cooper Nuclear Station, 2003
- [33] Comanche Peak NPP, "Preventive maintenance program procedure No. STA-677 rev. 7," Comanche Peak Steam Electric Station, 2004
- [34] Prairie Island NPP, "Engineering fleet procedure- component classification," NMC, 2004
- [35] Prairie Island NPP, "Plant preventive maintenance program rev.14," NMC, 2004
- [36] INPO, "AP-928 Work Management process description," INPO, 2000
- [37] K. Huffman, "Equipment reliability activities," EPRI, 2002

- [38] Entergy NPP, "Equipment reliability process description," Entergy, 2005
- [39] F. C. Gomez, L. Hijes, J. J. R. Cartagena, "Maintenance strategy based on a multicriterion classification of equipment," 2005
- [40] L. Krishnasamy, F. Khan, M. Haddara, "Development of a risk-based maintenance Strategy for a power-generating plant," Journal of Loss Prevention, 2005
- [41] EPRI, "Advanced maintenance strategies for power plant operators-introducing inter-plant life cycle management," Fuel and Energy Abstracts, 2005
- [42] EPRI, "Integrated equipment reliability improvement project," Report, 2005
- [43] PSEG, "Critical Component Identifical Process," EPRI, 2003
- [44] S. Matorell, A. Sanchez, S. Carlos and V. Serradell, "Comparing effectiveness and efficiency in technical specifications and maintenance optimization," Reliability Engineering & System Safety, 2002
- [45] B. J. Garrick, R. F. Christie, "Probabilistic risk assessment practices in the USA for nuclear power plants," Safety Science, 2002
- [46] L. Swanson, "Linking maintenance strategies to performance," International Journal of Production Economics, 2001
- [47] J. G. Anderson, J. D. E. Jeffries, T. P. Mairs, F. J. Rahn, "Optimized work control process to improve safety and reliability in a risk-based and deregulated environment," 1999
- [48] 신철, "알기 쉬운 ERP," 미래와 경영, 2000년
- [49] R. 제임스 저, 이재욱, 이해승 역, "e-비즈니스와 ERP - 엔터프라이즈 혁명," 물푸레, 2000
- [50] 고리원자력 제2발전소, "운영지침서: 필수기기 관리지침 2발- 업무지침- 13 개정번호 0," 한국수력원자력(주), 2002
- [51] 고리원자력 제2발전소, "설비관리 개선계획," 한국수력원자력(주), 2002
- [52] 한국수력원자력 (주) , "원전 안전성능지표 평가," 한국수력원자력(주), 2004
- [53] H. P. Barringer, D. P. Weber, "Life cycle cost tutorial," Barringer & Associate. Inc, 1996
- [54] Zerbe, R. Jr. and D. Dively, "Benefit-Cost Analysis: In theory and practice," Harper Collins, 1994

- [55] R. Flanagan, G. Norman, "Life Cycle Costing," BSP Professional Books, 1989
- [56] H. M. Steiner, "Engineering Economic Principles," McGraw-Hill, 1992
- [57] G. J. Thuesen, W.J. Fabrycky, "Engineering Economy," Prentice-Hall, 2001
- [58] W. J. Fabrycky, "Life-Cycle Cost and Economic Analysis," Prentice-Hall, 2004
- [59] L.E. Bussey, "The Economic Analysis of Industrial Project," Prentice-Hall, 1978
- [60] S. Kirk, "Life Cycle Costing for Design Professionals," McGraw Hill, 1981
- [61] A.D. Kawanowski, "A Standardized Approach to Cost-Effectiveness Evaluation in Cost Effectiveness," John Wiley, 1968
- [62] F. Giudice, G. L. Rosa, A. Risitano, "Materials selection in the life-cycle design process : A method to integrate mechanical and environmental performances in optimal choice," Material & Design, 2005
- [63] W. Byrd, C. A. Ntuen, E.H. Park, "A Computer-based model for system level reliability and maintainability allocation," Computers & Industrial Engineering, 1992
- [64] Y.S. Sherif, "An optimal maintenance model for life cycle costing analysis," Reliability Engineering, 1982
- [65] P. Gluch, H. Baumann, "The life cycle costing(LCC) approach: a conceptual discussion of its usefulness for environmental decision-making," Building and Environment, 2004
- [66] 강석호, "공업 경제론," 박영사, 1984
- [67] 강석천, "설비투자분석입문," 한국경제신문사, 2001
- [68] 강일규, 원종근, "설비투자과 설비금융," 한국경제신문사, 1993
- [69] 김동건, "비용편익분석," 박영사, 1997
- [70] 한국수력원자력 (주), "Cost Benefit Analysis Workshop," 한국수력원자력(주), 2004
- [71] 유일근, "최신 경제성 공학," 형설출판사, 2000
- [72] 김성집, "경제성 공학," 한경사, 2001
- [73] 함효준, "최신 경제성 공학," 동현출판사, 1998
- [74] T.L. Saaty, "The Analytic Hierarchy Process," McGraw-Hill, 1980
- [75] Al-Hamadi, "A Comparative study of multiple attribute decision making techniques using a subjective experiment," 1995

- [76] Kaynama, "Comparing the analytic hierarchy process with a modified fishbein behavioral intention model: An application in consumer decision-making," 1991
- [77] T. Saaty, "Models, Methods, Concepts & Application of the Analytic Hierarchy Process", Kluwer Academic Publisher, 2001
- [78] M. Bevilacqua, M. Braglia, "The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection," *Reliability Engineering & System Safety*, 2000
- [79] A. Stam, A.P. Duarte Silva, "On multiplicative priority rating methods for the AHP," *European Journal of Operational Research*, 2003
- [80] D.M. Karyds, J.F. Gifun, "A method for the efficient prioritization of infrastructure renewal projects," 2005
- [81] C.C. Wei, C.F. Chien, M.J. Wang, "An AHP-based approach to ERP system selection," *International Journal of Production Economics*, 2005
- [82] G.E. Phillips-Wren, E.D. Hahn, G.A. Forgyionne, "A multiple-criteria framework for evaluation of decision support systems," *Omega*, 2004
- [83] O.S. Vaidya, S. Kumar, "Analytic hierarchy process: An overview of applications," *European Journal of Operational Research*", Corrected Proof, 2004
- [84] M.J. Beynon, "A method of aggregation in DS/AHP for group decision-making with the non-equivalent importance of individuals in the group," *Computers & Operations Research*, 2005
- [85] R.P. Sundarraj, "A Web-based AHP approach to standardize the process of managing service-contracts," *Decision Support Systems*, 2004
- [86] L. Bodin, S.I. Gass, "On teaching the analytic hierarchy process," *Computers & Operations Research*, 2003
- [87] J.S. Ha, P.H. Seong, "A method for risk-informed safety significance categorization using the analytic hierarchy process and bayesian belief networks," *Reliability Engineering & System Safety*, 2004
- [88] T.L. Saaty and M. Ozdemir, "Negative priorities in the analytic hierarchy process," *Mathematical and Computer Modelling*, 2003
- [89] T.L. Saaty, "Decision-making with the AHP : Why is the principal eigenvector necessary," *European Journal of Operational Research*, 2003
- [90] Woo-Bang Lee, Suk-Jin Jeun, "Assessment of capital investment by analytic

hierarchy process," Trans. Korean Nuclear Society, 2005

- [91] 조근태 외, "계층분석적 의사결정," 동현출판사, 2003
- [92] 민재형, "AHP를 이용한 측정과 평가에 관한 연구," 2002
- [93] 허용 외 3명, "AHP를 이용한 GIS 타당성 조사에 관한 연구," 2002
- [94] 문민석 외 공저, "엑셀을 이용한 경영과학," 학현사, 2002
- [95] KAERI, "원전 확률론적 안전성 평가와 위험도 정보 활용 개론," KAERI, 2003
- [96] 김재경 외 2인, "의사결정분석 및 응용," 영지문화사, 2003
- [97] 이창효, "집단의사결정론," 세종출판사, 2000
- [98] 이성근, 윤민석, "AHP 기법을 이용한 마케팅 의사 결정," 석정, 1994

감사의 말씀

그동안 학문뿐 아니라 인생에 있어서 많은 가르침과 도움을 주신 은사님이시자 평생의 지도교수이신 김 동조 교수님께 먼저 무한한 감사의 말씀을 드립니다.

본 과정 입학에서부터 수료 때까지 지도하여 주시고 수고하여 주신 양보석 교수님께도 진심으로 감사의 말씀을 드립니다.

바쁘신 가운데도 논문심사 과정에서 큰 도움을 주신 이 내우 교수님, 김 상봉 교수님, 안 남성 박사님께도 감사의 인사를 드립니다. 또한 본 교과 과정을 통하여 지도하여 주신 백 윤경, 권 순재, 이 수종, 안 두성 교수님께 감사의 말씀을 드립니다.

특히 본 논문을 쓸 수 있는 분야에 근무할 수 있게 하여 주시고 격려해 주신 회사의 모든 선배님과 동료, 후배님께 진심으로 감사하다는 말씀을 드리며, 자료수집과 원고정리에 직접 참여하여 수고하여 주신 민 성목 과장님과 전 석진 과장님, 연구실의 이 창묵 씨, 하 종용 씨에게도 고마운 마음을 전합니다.

마지막으로 공부하느라 힘들어 할 때 묵묵히 인내하며 사랑으로 도와준 아내와 옆에서 응원을 아끼지 않은 딸 은영, 아들 진욱에게도 감사와 사랑을 전합니다.

2005. 8

李 雨 芳