

## 몬테카를로 시뮬레이션을 통한 노후 디젤발전설비 교체기준 고찰

박명수\* · 송기욱\* · 서상일\*\* · 원동주\*\*

\* 한국전력공사 전력연구원, \*\* 한국전력공사 배전운영처

### Investigation on Replacement Criteria for Aged Diesel Driven Power Generation Facility by Monte Carlo Simulation

Myungsoo Park<sup>\*†</sup>, Gee Wook Song<sup>\*</sup>, Sang Il Seo<sup>\*\*</sup> and Won Dong Ju<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Korea Electric Power Corporation, KEPCO Research Institute

<sup>\*\*</sup> Korea Electric Power Corporation, Distribution Operations Department

(Received April 25, 2014 ; Revised June 3, 2014 ; Accepted June 10, 2014)

**Key Words:** Diesel Driven Power Generation Facility(디젤발전설비), Monte Carlo Simulation(몬테카를로 시뮬레이션), Sensitivity Analysis(민감도 분석), 교체기준(Replacement Criteria)

**초록:** 내륙의 주전력 공급계통과 단절되어 있는 도서지역은 대부분의 전력공급을 디젤발전설비가 담당하고 있다. 디젤발전설비는 특성상 예방정비 및 유지보수를 통해 사용수명을 연장시킬 수 있으나, 계속 사용에 따른 기계설비의 노후화 및 발전 효율 감소로 인해 운영비가 증가한다. 즉, 적기에 노후 발전설비를 교체할 경우 발전소 운영비용을 줄일 수 있다. 이에 본 연구에서는 디젤발전설비의 상태를 대표할 수 있는 지표를 도출하고, 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 각 지표별 민감도 분석을 수행하고자 한다. 이를 통해 디젤발전설비의 현상태를 정량적으로 나타낼 수 있는 상태점수를 정의하고 이를 바탕으로 설비 교체의 기준을 마련하고자 한다.

**Abstract:** The diesel driven power generation facility provides most of electricity of island region where is isolated from the main land power supply system. It is possible to extend the life of diesel driven power generation facility by periodic maintenance. However, the long-term use of diesel driven power generation facility increases the operating cost due to aging hardware and reduced plant efficiency. In other words, on-time replacement of aging diesel driven power generation facility reduces plant operation cost. The purpose of this study presents major indicators to represent the characteristics of the diesel generator and conducts sensitivity analysis using Monte Carlo analysis. In addition, status core which indicates quantitatively the state of the diesel driven power generation facility is defined and prepare the replacement criteria based on the state score.

## 1. 서론

국내에는 3000여개의 섬이 있으며, 429개 섬에서 사람이 거주하고 있다. 이중 302개 섬은 육지와 인접하여 철탑 또는 해저 전력케이블 등을 통하여 내륙의 주전력계통과 연계되어 있다. 한편에서는 백령도, 울릉도와 같은 대형 섬을 포함하여 63개 도서에 약 91MW 용량의 자가발전설비를 운영하고 있다. 도서 지역은 내륙에 비하여 상대적으로 전력수요가 작아 내륙의 원자력발전이나 기력발전과 같이 대용량 발전소의 건설 및 운영이 어렵다. 이에 대부분의 전력공급을 독립적으로 운영이 가능한 디젤발전설비가 담당하고 있다.<sup>(1,2)</sup> 국내에 설치되어 운영되고 있는 디젤발전설비는 Cummins 등의 외산 발전기가 다수

<sup>†</sup> Corresponding Author, mspark@kepcoco.kr

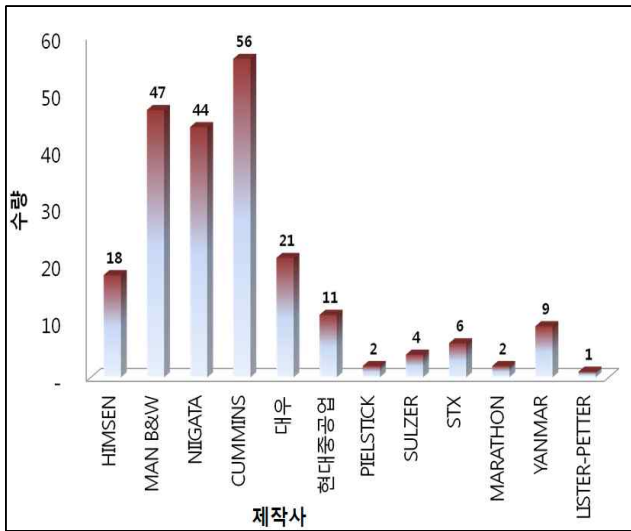


Fig. 1 Manufacturer of diesel generator

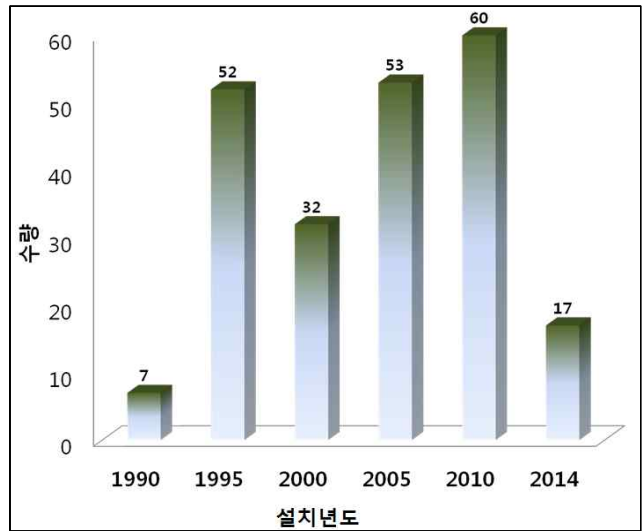


Fig. 2 Installation year of diesel generator

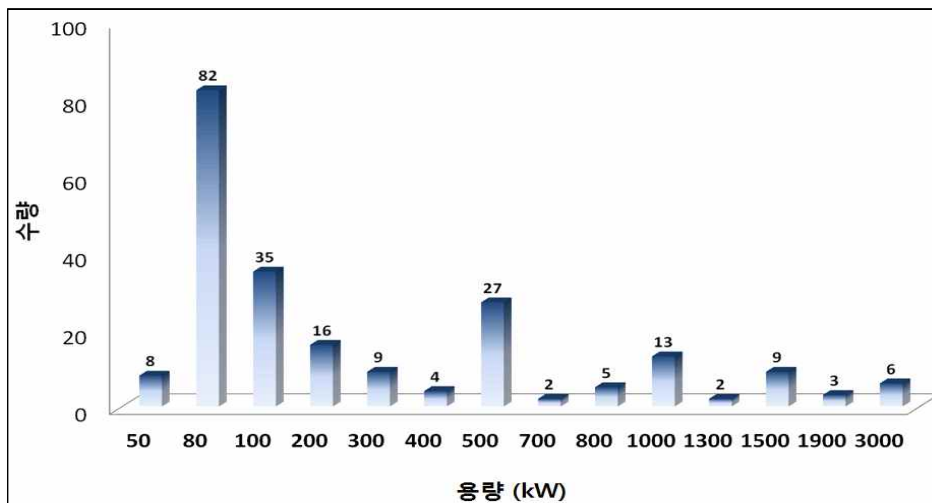


Fig. 3 Capacity of diesel generator

포함되어 있다(Fig. 1). 또한, Fig. 2 및 Fig. 3과 같이 10년 이상 운영된 발전설비가 약 40%에 이르며, 대부분이 1MW이하의 소용량 설비임을 알 수 있다. 디젤발전설비는 정기적인 예방정비, 중간점검 및 유지보수를 통해 높은 가용률을 유지할 수 있다. 그러나, 장기 사용 시 그에 따른 설비 노후화 및 발전효율 저감에 따른 설비운영비가 증가한다. 특히, 내연기관과 관련한 기술의 지속적인 발전으로 장기 사용 발전설비 대비 신규 발전설비의 효율 및 정비 용이성은 점차적으로 개선되고 있어 노후 디젤발전설비의 운영비는 상대적으로 지속 증가할 수밖에 없다. 이러한 이유로 도서지역의 전력공급을 담당하고 있는 디젤발전설비의 노후 상태를 확인하고 적기 교체시점을 결정하는 것은 더욱 더 중요한 사안이 되고 있다.

기존에는 이러한 디젤발전설비와 관련하여 설비의 진동저감, 발전기 건전성 평가 등과 같이 특정 요소의 신뢰성 확보를 위한 연구<sup>(3,4)</sup>는 다수 진행되었다. 그러나 디젤발전설비 전체에 대한 노후화 진행정도 및 상태를 정량적으로 확인하고 그 결과를 바탕으로 교체시기를 판단하는 등의 연구 활동은 활발하지 않았다. 이에 본 연구에서는 디젤발전설비의 특성을 파악하여 노후화를 대표할 수 있는 지표를 도출하고자 한다. 또한, 몬테카를로 분석법을 이용하여 각 지표의 민감도 분석을 수행하고 이를 바탕으로 디젤발전설비의 현상태를 정량적으로 나타낼 수 있는 상태점수를 파악하여 적절한 디젤발전설비의 교체기준 정립에 이바지 하고자 한다.

## 2. 발전용 디젤엔진의 특징

### 2.1 용량

발전용 디젤엔진은 운전속도에 따라 1000rpm 이하를 중속모델, 1000rpm 이상을 고속 모델로 분류한다. 중속 모델은 상대적으로 효율이 우수하며, 대용량 설비에 사용된다. 따라서 기존에는 선박 추진용과 같이 이동 설비중 대용량의 구동력이 필요한 곳에 중속모델을 적용하였다. 이에 반해 상대적으로 소용량이 요구되는 일반 산업계 및 발전설비에는 저속 모델을 사용하였다. 기존에는 원자력발전이나 화력발전과 같은 대형 발전설비에 비하여 비싼 연료 가격으로 인하여 가격 경쟁력이 떨어지는 디젤발전 방식은 제한적으로만 사용되었다. 그러나 근래에는 이와 같은 디젤 연료유 가격에 대한 부담을 느끼지 않는 산유국에서 국내와 다르게 기저부하용 대용량 디젤발전소를 건설하기 시작했다. 해외의 이러한 수요에 맞추어 일부 디젤엔진 제작사에서는 최대 79MW급 발전용 디젤엔진을 제작하고 있다. 또한, 부득이하게 디젤발전설비를 사용할 수밖에 없는 도서지역 중에서도 울릉도와 같이 관광객 및 전력 사용 편이시설이 급증하는 섬에서는 발전설비 증설 시 상대적으로 효율이 우수한 대용량 중속모델을 채택하고 있다. 추가로, 디젤발전소는 여러대의 디젤발전기를 병렬로 연결하여 운전하므로 예상 전력 수요에 따라 추가 디젤발전기 설치 및 부속설비의 개선을 통해 용량 증설이 가능하다.

### 2.2 효율

국내에 90년대 이전에 보급된 디젤발전기의 효율은 주로 20% 후반에서 30% 대에 분포하였다. 그러나 내연기관과 관련한 많은 기술 발전으로 그 효율은 꾸준히 증가하였다. 특히 대용량 디젤엔진은 용량이 커질수록 효율이 함께 증가하는 경향이 있다. 근래에 제작되고 있는 대형 디젤엔진의 경우 효율이 약 40% 중·후반대에 이르고 있다. 특히 Fig. 4에서 볼 수 있는 바와 같이 터보차저(Turbo Charger)와 함께 연소가스를 이용하여 보조터빈을 회전시켜 발전량을 증가시키거나(TCS, Turbo Compound System), 가스 복합발전과 같이 연소가스를 이용하여 증기를 발생시키고 증기터빈을 연결하는 디젤엔진 복합발전시스템을 구성할 경우 Fig. 5와 같이 최대 54%대에 도달할 수도 있다. 그러나 일반적인 기계설비와 마찬가지로 디젤발전설비도 장기 사용 시 각종 연결부의 기밀유지가 어렵고, 배관내 스케일 생성 및 침부식으로 인해 누유·누수가 발생할 수 있다. 이와 같은 기계설비의 노후화로 인해 사용기간 경과에 따라 전체 디젤발전기의 효율은 감소하게 된다.

이러한 현상을 확인하기 위해 현재 운영중인 2개 도서 발전소의 효율 변화 추이를 분석하였다. A 발전소는 1994년도에 설치된 80kW 급 모델 3개 호기가 운영중이며, B 발전소에는 1993년도에 설치된 450kW급 모델이 운영중이다.

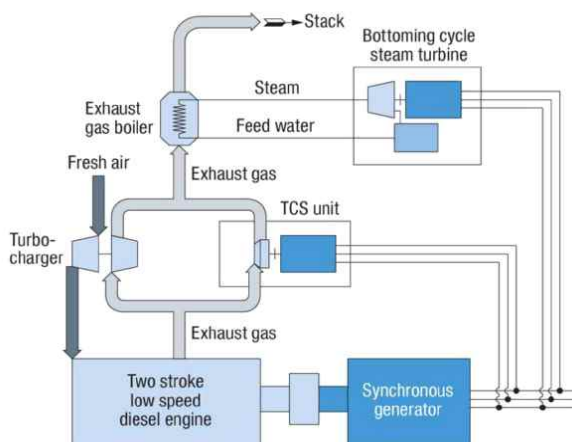


Fig. 4 System Configuration of Diesel Engine Combined Cycle

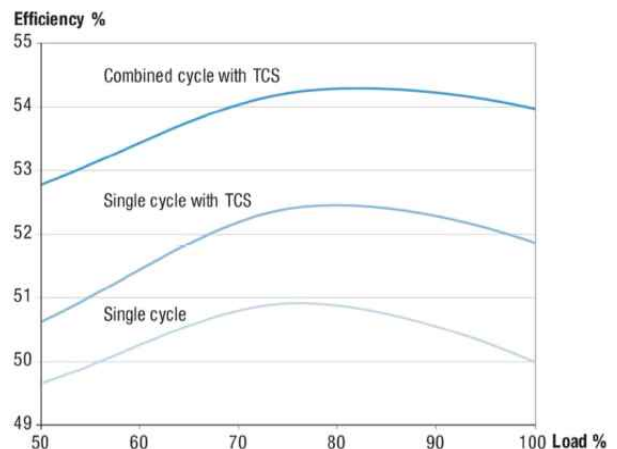


Fig. 5 Efficiency Change according to System Configuration

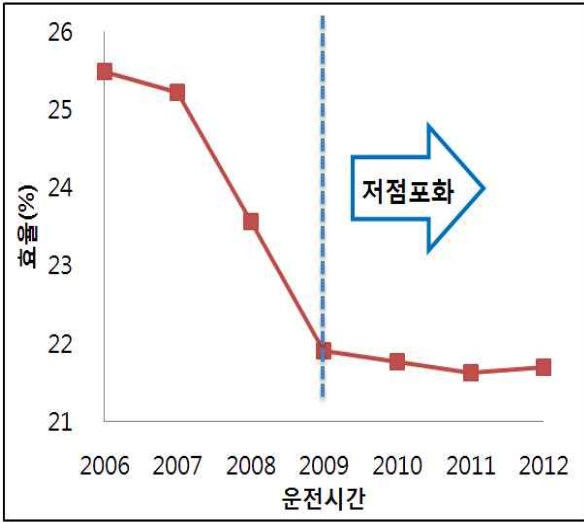


Fig. 6 Power generation efficiency of A

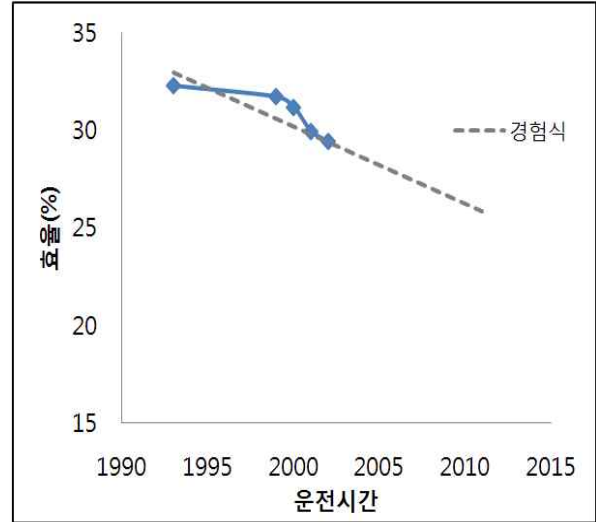


Fig. 7 Power generation efficiency of B

A 발전소는 호기별 연료사용량 정보 확인이 불가능하나, 1~3호기가 동일모델이고 동일시점에 설치되어 전체 발전소의 특성을 통해 개별 설비의 효율을 추정할 수 있다. A 발전소의 발전효율을 분석한 결과, Fig. 6과 같이 시간이 경과함에 따라 감소하는 경향을 보인 후 2009년부터 큰 변화가 없었다. 즉, A 발전소는 준공 후 약 15년, 5만 5천 시간 운전 후 발전효율이 저점 포화됨을 확인하였다. 이때의 효율은 초기 발전효율인 26% 대비 약 5% point 감소한 21%임을 알 수 있다. B 발전소 모델의 경우 과거 일시적으로 유량계를 이용하여 호기별 연료사용량을 기록한 자료를 확보하여 개별효율을 산정하였다. 그 결과 Fig. 7과 같이 1993년 설치 당시 인수 성능검사보고서를 통해 확인된 초기 설치 시 효율 32.3%와 1999년 31.7%에서 2002년 29.4%로 감소한 효율을 바탕으로 경험식을 추정한 결과 2013년 B 발전소 해당호기의 발전효율은 26%에 이를 것으로 예상되었다. 이는 초기 효율 32.3% 대비 6.3% point 감소한 수치이다. 초기 효율대비 약 20% 감소할 것으로 예상되는 시점을 상기의 경험식을 통해 역산하면 2011년이며, 그 당시의 누적 운전시간은 5만5천 시간이다.

2.3 유지보수

발전용 디젤엔진은 크게 피스톤, 크랭크축과 같은 구동부, 실린더 및 실린더헤드와 같은 정지부, 그 외의 연료공급설비, 냉각설비와 같은 부속설비 등으로 구성되어 있다. 이중 장기 사용에 따라 건전성에 문제가 발생하는 부분은 주로 각 부품의 연결부와 연료분사노즐, 각종 밸브와 같은 연료유·윤활유의 마지막 배출부 및 피스톤링, 실린더 라이너와 같은 구동부내 상대운동이 발생하는 부분이다. 실제로 디젤 발전설비의 예방정비 시 상기에서 언급한 부분은 주요 점검 사항으로써 다음 예방정비시까지 운전중 이상 발생이 예상될 경우 해당 부품을 교체하게 된다. 반면, 엔진블럭, 크랭크축과 같은 주요 대형 부품은 시간 경과에 따른 노후 정도가 상대적으로 크지 않다.

Table 1은 일반적인 디젤발전설비의 고장 발생이 잦은 품목을 나열한 것이다. 물론 이는 모델별, 설비별, 운영 장소의 특성 등에 따라 다소 다를 수 있다.

유지보수와 관련한 디젤엔진의 가장 큰 특징은 모든 부품이 분해·조립이 가능하다는 것이다. 다시 말해 특정 부품 고장 시 해당 부품의 교체를 통해 계속 운영이 가능하다. 즉, 지속적인 소모성 부품의 정비 및 교체 시 발전용 디젤엔진의 수명은 연장될 수 있다. 특히 선박 추진용으로 쓰이는 대형 디젤엔진의 경우 초기 도입비가 매우 높으므로 소모성 부품 뿐 아니라 크랭크 축 및 실린더 블록과 같은 주요 부품 고장 시에도 교체 수리를 통해 해당 설비를 연장 운영하기도 한다.

**Table 1** Often-failure part list of diesel driven power generation facility

고장빈도 순위	품 목
1	피스톤 및 링
2	연료분사노즐
3	실린더라이너
4	실린더헤드
5	커넥팅로드
6	흡기밸브
7	연료분사펌프
8	과급기

**Table 2** Part cost comparison of 80kW model

정비부품	조달가격(원)		비율 (%)
	구형	신형	
노즐팁	132,800	23,200	572
실린더 라이너	880,500	77,500	1,136
실린더 헤드	4,800,000	440,000	1,091
커넥팅 로드	1,800,000	124,000	1,452
피스톤	1,000,000	97,650	1,024
피스톤 링	105,000	20,150	521
평균	1,453,050	130,417	966

**Table 3** Part cost comparison of 450kW model

정비부품	조달가격(원)		비율 (%)
	구형	신형	
노즐팁	822,800	368,740	223
실린더 헤드	20,552,400	6,541,000	314
커넥팅로드	16,848,000	2,720,250	619
베어링	2,832,960	366,730	772
피스톤	12,292,800	5,762,900	213
피스톤 링	670,800	458,445	146
평균	7,968,251	2,613,359	381

2.4 정비비용 및 부품 조달 소요시간

통상 디젤발전설비 제작사에서는 일상적인 소모성 부품의 교체 및 정상적 유지보수 수행 시 평균 수명을 20년으로 예상하고 있다. 즉, 20년 경과 후에는 기존 모델에 대한 서비스 투자를 점차 줄이고, 모델 자체를 단종하기도 한다. 이에 따라 구형 모델의 경우 정비부품 조달소요 기간이 길어지고, 조달비용 역시 증가할 수밖에 없다. 이러한 현상은 장기간 운전된 외산 모델의 경우 정도가 더욱 심하다. Table 2 및 Table 3은 국내에서 약 20년간 운전된 80kW 및 450kW 용량 디젤발전설비의 주요 소모성 부품 단가 및 유사 용량의 최근 생산되고 있는 모델의 부품 단가를 비교한 것이다. 분석 결과 품목별로 다소 차이는 있으나 80kW 모델의 경우 평균 9.6배, 450kW 모델의 경우 평균 3.8배의 조달비용 차이가 발생한다. 이는 상기 모델이 모두 단종된 모델로 시장에서 해당 모델의 부품에 대한 수요량이 적어 공급자가 가격 주도권을 확보하기 때문이다.

그러나 앞서 언급한 바와 같이 디젤발전설비는 작동부 및 연결부에서 마모 및 누설로 인해 효율 저하가 발생하거나 정도에 따라서는 발전 정지에 이를 수도 있어 예방정비 중 각종 부품은 항상 구비할 수밖에 없다.

3. 도서발전설비의 상태평가

3.1 상태지표

도서지역 발전설비의 노후 상태는 앞서 살펴본 설비의 특징 고려시 운전기간 등의 사용성, 발전효율 등의 내구성, 정비비용 등의 경제성 항목으로 나누어 표현이 가능하다. 발전설비의 노후화를 정량적으로

표현하기 위해 도서발전소의 운영경험을 토대로 발전설비의 항목별 노후 상태를 나타내는 요소를 지표 변수로, 그리고 각 지표변수를 이용하여 설비의 현상태를 정량적으로 나타낸 값의 합을 상태점수로 정의하고 하였다. 각 항목별로 지표변수를 알아보면 다음과 같다.

운전기간이 장기화됨에 따라 설비의 노후화가 진전되는 특성이 있으므로 사용성은 운전기간을 통해 나타낼 수 있다. 설비의 계속 사용에 따라 초기 인수시험시에 측정된 수준대비 발전효율은 감소하고, 유허유 소모량은 증가한다, 그리고, 설비의 마모 또는 결함 진행 등으로 인해 중고장의 발생빈도가 증가하게 되므로, 이러한 요소들을 내구성 지표변수로 사용할 수 있다. 또한, 설비가 단종되거나, 자재조달 소요기간이 장기화 될수록 정비부품조달을 위한 비용이 증가하므로 설비 단종여부, 자재 조달소요기간 및 경장사재비, 돌발복구비, 예방정비등의 정비비용을 이용하여 경제성 표현이 가능하다. 각 항목별 상태지표 및 상태점수의 구성 상세 내용은 Fig. 8과 같다.

3.2 항목별 민감도 분석

발전설비의 노후화 상태를 적절하게 표현하기 위해서는 각 항목이 전체 노후화에 기여하는 정도, 즉 민감도를 확인하여야 한다. 그러나 발전설비의 노후화는 지표변수들간의 관계를 수식과 같은 분석적 방법으로 표현할 수 없다. 이에 다변수가 하나의 결과에 미치는 영향을 평가하는데 유용한 통계적 기법인 몬테카를로 분석법<sup>6)</sup>과 실험계획법을 적용하였다. 우선 사용성, 내구성, 경제성 항목의 배점을 2가지 수준으로 나누어 Table 4와 같이 실험계획표를 구성하였다. 그리고 분석번호별 상태점수를 산출하기 위해 몬테카를로 해석법을 적용하였다. 각 분석번호에 해당하는 항목별 배점기준으로 3만 셋트의 임의의 지표값을 구성하고 셋트별 상태점수를 계산한 후 그 평균값을 분석번호에 해당하는 상태점수로 사용하였다. 그리고 항목별로 배점이 25점인 경우와 35점인 경우의 비율을 이용하여 Table 5와 같이 항목별 민감도를 얻을 수 있다.

각 항목의 민감도는 해당 항목이 상태점수에 기여하는 정도를 의미하므로, 민감도를 항목별 배점으로 적용이 가능하다. 이렇게 산정된 항목별 배점과 설비의 운영 경험을 토대로 하여 지표변수의 구간을 설정하고, 구간별 배점을 부여하여 발전설비의 노후도를 평가할 수 있는 평가표를 Table 6과 같이 제시하였다.

Table 4 Application design of experiment for sensitivity analysis

분석번호	민감도			상태점수	
	사용성	내구성	경제성	중속	고속
1	25	25	25	43.6	47.5
2	35	25	25	49.9	55.4
3	25	35	25	50.1	54.1
4	35	35	25	56.3	61.8
5	25	25	35	48.1	52.0
6	35	25	35	54.3	59.8
7	25	35	35	54.7	58.6
8	35	35	35	60.8	66.3

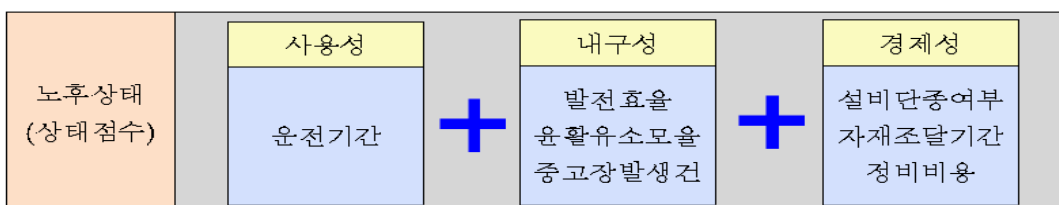


Fig. 8 Aging indicators and aging status score



**Table 5** Sensitivity analysis result

구분		사용성	내구성	경제성
민감도	중속	0.35	0.35	0.30
	고속	0.40	0.35	0.25

**Table 6** Score card for aging assesment

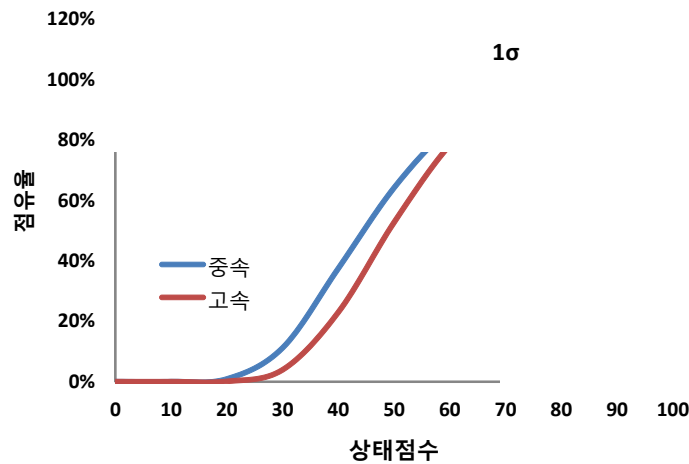
구분			배점	
			중속	고속
사용성	운전시간 (시간)	4만 미만	5	10
		4만 이상 6만 미만	15	20
		6만 이상 8만 미만	25	30
		8만 초과	35	40
내구성	발전효율 (%)	인수시험치의 98 이상	5	
		인수시험치의 94 이상 98미만	10	
		인수시험치의 94 미만	15	
	윤활유 소모율 (%)	인수시험치의 105 이하	5	
		인수시험치의 105 초과 110 이하	10	
		인수시험치의 110 초과	15	
최근 2년간 중고장발생 (횟수)	1 이상 3 미만	1		
	3 이상 5 미만	3		
	5 이상	5		
경제성	설비 단종여부	생산중	0	
		단종	5	
	자재조달 소요기간 (일)	60 이하	0	
		60 이상 90 미만	5	
		90 이상	10	
	정비비용	동일용량 타기종 대비 20% 초과	15	10

#### 4. 도서발전설비의 교체기준

위에서 제시된 노후도 평가표를 근간으로 하여 가능한 한 많은 수의 발전설비를 점검 후 그 결과를 바탕으로 상태점수의 확인이 필요하다. 그러나 현재 운전되고 있는 발전설비의 수를 고려할 경우, 평가표 상의 지표변수인 운전시간, 발전효율 등의 7가지 변수가 다양하게 분포되어 있는 실제 발전설비를 찾는 것은 매우 어렵다. 이에 대한 해결책으로 몬테카를로 해석법을 이용하여 다양한 상태변수값을 갖는 발전설비를 생성하였다. 임의의 3만개 발전설비를 생성하되 각 발전설비를 7개의 상태지표로 나타내었다. 각 상태지표의 최대값 및 최소값은 자료 확보가 가능한 현존 설비 및 폐지된 설비들의 최대값 및 최소값을 적용하였다. 예를 들어 생성된 발전설비의 운전시간은 0 시간과 10만시간 사이 임의의 값으로

**Table 7** Expected status of suggested replacement facility

구분	사용기간 (시간)	인수치 대비 발전효율비(%)	인수치 대비 운활유소모율(%)	자재조달 소요기간(일)
중속	7.7만	94.9	107.6	65.7
고속	7.3만	95.0	107.4	64.1



**Fig. 9** Expected cumulative distribution of facility in terms of aging status score

지정된다.

이렇게 생성된 3만개 발전설비의 상태지표 및 노후도 평가표를 이용하여 각 발전설비의 상태점수를 산출하였다. 그리고 계산된 3만개의 상태점수를 토대로 Fig. 9와 같이 발전설비의 누적분포를 확인하였다. 이때 각 상태점수에 해당하는 발전설비의 수량을 백분율로 나타내었다. 본 연구에서는 전체 분포의 1σ 수준(84.1%)이상을 노후화가 진행되어 교체가 필요한 후보군으로 제시하였고 이는 상태점수 기준으로 70점에 해당하는 수준이다. 생성된 3만개의 발전설비 중 상태점수가 70점인 설비를 도출하고 각 상태 지표값의 평균값을 확인한 결과는 Table 7과 같다. 본 연구에서 제시한 교체 기준인 1σ 수준, 상태점수 70점에 해당하는 설비는 중속모델 기준으로 약 7.7만 시간 운전되었고, 교체부품의 조달 소요기간이 65.7일에 이르는 등 현장에서 계속 운전 시 정비가 어렵고, 신형 모델 대비 발전효율이 낮아 경제성이 떨어지는 것을 확인하였다.

### 5. 결론

본 연구에서는 도서지역의 전력공급을 위해 주로 사용되고 있는 디젤발전설비의 특징을 살펴보았다. 그 결과 장기 사용 시 설비 노후화에 따른 효율저하, 정비비용 증가 등과 같이 운영효율성이 떨어짐을 확인하였다. 이에 디젤발전설비의 상태를 나타낼 수 있는 상태변수를 설비의 운영 경험 등을 토대로 사용성, 내구성, 경제성 항목으로 구분하여 도출하고 설비의 노후도를 정량적으로 나타낼 수 있는 상태점수를 정의하였다. 또한, 몬테카를로 분석법과 실험계획법등의 통계적 기법을 이용하여 항목별 민감도 분석 및 발전설비의 상태점수 분포를 예측하였다. 그 결과를 바탕으로 노후화로 인해 교체가 필요한 설비의 기준점을 제시하였다. 본 연구를 통해 도서지역 디젤발전설비를 적기에 교체함으로써 도서지역 발전소의 운영비용이 절감되고, 정비 효율성이 증대되어 안정적 전력공급에 기여할 것으로 예상된다.



참고문헌  
(References)

- (1) Seo, S. I., 2012, "Current Status of Electric Power Business in Island Region and Electric Self-Sufficiency Island," *Journal of Korean Soc. Elec. Eng.*, Vol. 428, pp. 38~43.
- (2) Seo, S. I., 2013, "Support for Stable Electric Power Supply to Island and Isolated Regions," *Journal of Korean Soc. Elec. Eng.*, Vol. 444, pp. 43~47.
- (3) Bae, Y. C., 2011, "Vibration Analysis and Reduction for Large-scale Diesel Engines," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng.(B)*, Vol. 35, No. 10, pp. 1047~1052.
- (4) Lee, Y. J., 2011, "A Study on Effective Management Method for Engine Generator," *Proceeding. of Korean Soc. Elec. Eng.*, pp. 1626~1627.
- (5) Yoon, H. Y., 2008, "Evaluation for Probabilistic Distributions of Fatigue Life of Marine Propeller Materials by a Monte Carlo Simulation," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 32, No. 12, pp. 1055~1062.