

다품목 시스템의 Hidden Failure를 고려한 계획정비 스케줄링에 관한 연구 : 검사비용을 중심으로

김만수*, 현도경, 김성환, 지웅기, 권기상
LIG넥스원 ILS연구소

A Study on the Scheduling of Planned Maintenance for Multicomponent System with Hidden Failures : Focusing on Inspection Cost

Mansoo Kim*, Do Kyung Hyun, Sung Hwan Kim, Woong Ki Ji, Ki-Sang Kwon
ILS(Integrated Logistics Support) R&D Lab, LIG Nex1

요약 본 논문에서는 다수의 구성품으로 구성된 시스템에 대해 Hidden Failure를 고려하여 최적의 계획 정비 스케줄링 문제에 대해 연구하였다. 계획 정비 스케줄링의 목적은 장기 운용 유지비용 최소화이다. 시스템 측면에서는 다수의 구성품을 그룹화하여 검사함으로써 시스템이 정지함으로 인해 발생할 수 있는 비용을 최소화 할 수 있다. 또한 각 구성품 별로 적절한 검사 주기를 선정하여 고장을 조기에 확인함으로써 고장 발생으로 인한 비용을 최소화 할 수 있다. 본 논문에서는 계산의 복잡성을 줄이기 위해 기존 연구에서 사용한 "Base interval approach"를 적용하였으며 추가적으로 다수 구성품의 동시 검사를 통한 검사비용 절감 효과를 고려하였다. 검사비용은 소요되는 시설, 장비 및 인력 비용으로 구성된다고 가정하였으며 유사한 구성품을 동시에 검사함으로써 검사비용이 절감되는 경우에 대한 분석을 실시하였다. 본 논문에서는 검사비용 절감 효과를 비교하기 위해 기존 연구에서 활용한 사례를 대상으로 분석을 실시하였고 이에 따른 비용 절감 효과를 시뮬레이션을 통해 비교하여 제시한다.

Abstract The scheduling of planned maintenance problem of a system consisting of a number of components was studied. The purpose of maintenance scheduling is to minimize the cost of maintaining long-term operations. On the system side, the cost of a system shutdown can be minimized by grouping and inspecting a number of components. In addition, proper inspection cycles can be selected for each component to identify the failure sufficiently early to minimize the cost of the failure. To reduce the complexity of the calculations, the 'base interval approach' used in previous studies was applied and, in addition, the inspection cost savings from simultaneous inspections of multiple components were considered. To compare the effectiveness of inspection cost savings, this paper presents the results of simulation analysis performed by referring to the cases in the existing studies.

Keywords : Maintenance, Scheduling, Inspection Cost, Base Interval Approach, Hidden Failure

1. 서론

현대의 산업시스템은 기술집약적인 복합시스템으로

구성되어 있다. 무기체계 및 자동차, 조선, 철도, 발전 등 여러 산업은 하나의 시스템이 아닌 복합시스템으로 구성되며, 다중 시스템은 유지 보수의 최적화는 무시할 수 없

*Corresponding Author : Mansoo Kim(ILS R&D Lab, LIG Nex1)
email: mansoo.kim@lignex1.com

Received July 10, 2019
Accepted October 4, 2019

Revised August 12, 2019
Published October 31, 2019

는 요소이다. 복잡한 다수의 구성품으로 이루어진 시스템은 고장이 발생할 경우 고장발생 시기와 원인을 정확하게 파악하기 어려우므로 적절한 예방 정비 주기의 산출을 통해 고장을 사전에 예방하는 것이 중요하다.

복합시스템의 총 수명주기 비용 중 운용 및 유지단계의 비용은 전체 비용의 약 70% 이상을 차지하고, 가용도 유지를 위한 정비 활동비용이 큰 비중을 차지한다. 이렇듯 복합시스템의 가용도와 예방정비 주기 및 비용은 서로 밀접한 관계가 있다[1].

송홍준 등은 다수의 고장유형을 갖는 제철설비의 최적 정비주기 산출 방법을 분석하였고[2], 정진태 등은 고속철도차량(KTX)의 1차 구동장치인 모터 감속기와 견인전동기의 완전분해정비 최적 주기를 산출하기 위해 유전자 알고리즘을 활용하여 연구하였다[3].

본 논문에서는 다품목 시스템의 최적 검사주기 스케줄링 방법에 대해서 연구한다. 이 연구의 목적은 각 구성요소의 최적 예방정비 주기를 설정하여 최종적으로 TLCSM(Total Life Cycle Systems Management) 측면에서 장기 운용 유지비용을 최소화하는 것에 있다. 본 연구에서는 Bin Liu 등의 기본주기접근법(base interval approach)에 기반을 둔 휴리스틱 방법을 사용하여 분석하였다[4]. 기본주기접근법은 각 구성 요소의 검사 간격을 기본주기의 정수배 기간으로 설정하여 공통된 다운타임비용(Down Time Cost)을 공유하고 총 유지보수비용을 줄이는데 목적이 있다.

2. 본론

2.1 기존 연구 및 가정 설명

복합시스템을 구성하는 구성품은 특정 수명 분포를 따르며, 열화과정에 따라 고장이 발생하고 수리가 불가능하다고 가정한다[4]. 만약 구성품의 고장이 확인되면, 그 구성품은 새것으로 교체하며 교체 후에 모든 구성품이 동시에 교체 되는 경우를 제외하고 시스템 전체가 처음 상태로 복원되는 것은 아니다. 구성품은 주기적으로 검사하며 이때 검사비용(c_j^i)이 발생한다. 검사 시 고장을 발견하면, 즉각 교체하며 교체비용(c_r^i)이 발생한다. 숨겨진 고장이 있는 상태로 운용 중인 기간에는 성능 손실로 인한 다운타임비용(c_d^i)이 발생한다. 시스템 수준의 비용인 공동다운타임비용(C_I)은 계획정비를 위해 장비를 멈춘

경우 발생하며, 2개 이상의 계획정비를 같이 수행 할 경우 1회만 발생하는 것으로 가정한다. 현실적인 모델링을 위해 다음을 가정한다.

구성품 고장은 검사를 통해서만 발견할 수 있다. 각 구성품에 대한 검사가 가능하며 고장이 발생하면 그 고장은 검사 시에 항상 발견할 수 있다. 각 검사 시점마다 C_I 가 발생하며, 다수의 구성품에 대한 검사를 동시에 수행할 경우 이를 나누어 부담한다. 구성품은 수리가 불가능하며, 교체만 할 수 있다. 교체는 즉시 이루어지며, 구성품은 “새 상태”로 복구된다. 구성품의 열화는 검사 중에는 발생하지 않는다.

n 개의 구성품으로 구성된 시스템에서 각각의 구성품이 τ_i 의 검사 주기를 갖는다고 가정할 경우 구성품 i 에 대해서 시점 t 까지 발생하는 총 비용은 다음과 같다[4].

$$\widetilde{H}_i(t; \tau_i) = (C_I + c_j^i)N_I^i(t; \tau_i) + c_r^i N_r^i(t; \tau_i) + c_d^i T_d^i(t; \tau_i)$$

N_I^i 는 구성품 i 의 t 까지의 검사 횟수, $N_r^i(t; \tau_i)$ 는 구성품 i 의 t 까지의 누적 교체 횟수, $T_d^i(t; \tau_i)$ 는 구성품 i 의 t 까지의 누적 다운타임이다. C_I 를 무시한 경우 위 식은 다음과 같다[4].

$$H_i(t; \tau_i) = c_j^i N_I^i(t; \tau_i) + c_r^i N_r^i(t; \tau_i) + c_d^i T_d^i(t; \tau_i)$$

여러 구성품의 검사를 동시에 할 때 C_I 를 함께 부담하므로, 그룹으로 검사 주기를 설정하므로써 이 공통비용을 절감할 수 있다. 그러나 그룹의 검사 주기가 짧아지는 경우 검사비용 부담이 올라가고, 주기가 길어지는 경우 다운타임비용 비용 부담이 올라가게 된다. 따라서 검사비용과 다운타임비용을 함께 고려하여 최적의 검사주기를 선정해야한다.

각 구성품을 주기 $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_n$ 에 각각 검사하는 경우, 시스템 장기 비용 비율(Long-run cost rate)은 다음과 같이 표시될 수 있다[4].

$$G^{(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n H_i(t; \tau_i) + N_d(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) C_I}{t}$$

여기서 $N_d(t)$ 는 시간 t 까지의 계획정비로 인한 시스템의 정지 횟수이다. 이 문제는 최적해를 찾기 위해 기본주기접근법을 적용한 휴리스틱 방법을 적용한다. 기본주기접근법은 Laggoune et al.[5] 등에서 제안된 방법으로써 기본주기(τ) 시간마다 시스템이 정지되고 모든 구성

품은 기본주기의 정수 배 간격($k_i\tau$)에 검사하게 된다. 다시 말해, 기본주기접근법의 목표는 시스템의 장기 비용을 최소화할 수 있는 기본주기 τ 와 정수($k_i, i = 1, 2, \dots, n$)를 찾는 것이다. 이를 식으로 표현하면,

$$\min_{\tau, k_1, k_2, \dots, k_n} \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n H_i(t; k_i \tau)}{t} + \frac{C_I}{\tau}$$

$$\text{s.t. } \tau > 0, k_i \in \mathbb{Z}^+ \forall i = 1, 2, \dots, n$$

여기서 \mathbb{Z}^+ 는 양의 정수 집합을 말한다[4].

검사 도중 구성품이 교체되면 구성품은 새 구성품이 되었다고 가정하며 이는 갱신 주기가 된다. 구성품 i 의 시스템 장기 비용 비율은 다음과 같다[4].

$$G_i(\tau_i) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{H_i(t; \tau_i)}{t} = \frac{E[H_i(S_i)]}{E[S_i]}$$

여기서 S_i 는 구성품 i 의 교체간격이다[4].

T_i 를 구성품 i 의 고장 발생 시간, $R_i(t)$ 를 구성품 i 의 신뢰도 함수, $F_{T_i}(t)$ 를 고장 시간의 누적밀도함수(cdf), N_I^i 를 구성품 i 의 고장탐지까지의 기대 검사횟수라고 정의할 때, N_I^i 는 다음과 같다[4].

$$\begin{aligned} E[N_I^i] &= \sum_{j=1}^{\infty} j P\{(j-1)\tau_i < T_i \leq j\tau_i\} \\ &= \sum_{j=1}^{\infty} j (F_{T_i}(j\tau_i) - F_{T_i}((j-1)\tau_i)) = \sum_{j=0}^{\infty} R_i(j\tau_i) \end{aligned}$$

구성품 i 의 다운타임을 T_d^i 로 정의할 때, T_d^i 는 $T_d^i = N_I^i \tau_i - T_i$ 이며, $E[T_d^i] = \tau_i \sum_{j=0}^{\infty} R_i(j\tau_i) - \mu_i$ 이다 [4]. 여기서 μ_i 는 구성품 i 의 MTTF(평균고장시간)이다. 고장을 탐지하는 시점 S_i 는 다음과 같다[4].

$$S_i = N_I^i \tau_i$$

S_i 의 기대값은 $E[S_i] = \tau_i \sum_{j=0}^{\infty} R_i(j\tau_i)$ 과 같다. 구성품 i 의 교체 주기까지의 평균 발생 비용 $E[H_i(S_i)]$ 은 다음과 같다[4].

$$\begin{aligned} E[H_i(S_i)] &= c_d^i (\tau_i \sum_{j=0}^{\infty} R_i(j\tau_i) - \mu_i) + c_r^i \\ &\quad + c_j^i \sum_{j=0}^{\infty} R_i(j\tau_i) \end{aligned}$$

구성품의 장기 비용 비율은 다음과 같다[4].

$$\begin{aligned} G_i(\tau_i) &= \frac{E[H_i(S_i)]}{E[S_i]} \\ &= c_d^i + \frac{-c_d^i \mu_i + c_r^i + c_j^i \sum_{j=0}^{\infty} R_i(j\tau_i)}{\tau_i \sum_{j=0}^{\infty} R_i(j\tau_i)} \quad (1) \end{aligned}$$

시스템의 검사는 기본주기 τ 의 정수 배수에서 수행되기 때문에 최적 k_i 는 비용적인 측면을 고려하여 $\lfloor \tau_i^*/\tau \rfloor$ 또는 $\lceil \tau_i^*/\tau \rceil$ 중 하나이어야 한다. k_i 를 표현하면 다음과 같다[4].

$$k_i = \begin{cases} \left\lfloor \frac{\tau_i^*}{\tau} \right\rfloor, & \text{if } \frac{-c_d^i \mu_i + c_r^i + c_j^i \sum_{j=0}^{\infty} R_i(j \lfloor \tau_i^*/\tau \rfloor \tau)}{\lfloor \tau_i^*/\tau \rfloor \tau \sum_{j=0}^{\infty} R_i(j \lfloor \tau_i^*/\tau \rfloor \tau)} \\ < \frac{-c_d^i \mu_i + c_r^i + c_j^i \sum_{j=0}^{\infty} R_i(j \lceil \tau_i^*/\tau \rceil \tau)}{\lceil \tau_i^*/\tau \rceil \tau \sum_{j=0}^{\infty} R_i(j \lceil \tau_i^*/\tau \rceil \tau)} \\ \lceil \tau_i^*/\tau \rceil, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

시스템 $G(\tau)$ 의 장기 비용이 최소화되는 최적의 기준 간격 τ 는 다음과 같다[4].

$$\begin{aligned} \min_{\tau > 0} G(\tau) &= \frac{C_I}{\tau} + \sum_{i=1}^n c_d^i \\ &\quad + \sum_{i=1}^n \left[\frac{-c_d^i \mu_i + c_r^i + c_j^i \sum_{j=0}^{\infty} R_i(j \lfloor \tau_i^*/\tau \rfloor \tau)}{\lfloor \tau_i^*/\tau \rfloor \tau \sum_{j=0}^{\infty} R_i(j \lfloor \tau_i^*/\tau \rfloor \tau)} \right. \\ &\quad \left. \wedge \frac{-c_d^i \mu_i + c_r^i + c_j^i \sum_{j=0}^{\infty} R_i(j \lceil \tau_i^*/\tau \rceil \tau)}{\lceil \tau_i^*/\tau \rceil \tau \sum_{j=0}^{\infty} R_i(j \lceil \tau_i^*/\tau \rceil \tau)} \right] \quad (3) \end{aligned}$$

여기서 연산자 $(x \wedge y)$ 은 $\min(x, y)$ 을 의미한다. 식 (2)의 최적해는 다음에서 설명되는 알고리즘을 이용하여 구할 수 있다.

1) 초기화 : 각 구성품별로 최적 검사 간격

$(\tau_i^*, i = 1, 2, \dots, n)$ 을 계산한다.

2) 작은 τ 부터 시작한다.

3) 식 (2)에 따라 각 구성품의 k_i 결정한다.

4) 식 (3)에 따라 $G(\tau)$ 값을 계산한다.

5) 조금씩 τ 를 증가시키면서

$\tau > \max\{\tau_i^*, i = 1, 2, \dots, n\}$ 가 될 때까지

3)과 4) 절차를 반복한다.

Table 1. Component-Specific Weibull Parameters and Cost Items[4]

Component	Code	Shape Parameter β_i	Scale Parameter θ_i	Replacement Cost C_r^i (€)	Inspection Cost C_I^i (€) (Assumed)	Downtime Cost C_d^i (€) (Assumed)
Sheathing	C286	1.73	486	14868	1200	350
Sheathing	C285	1.88	507	39204	320	1100
Tightness	C275	2.43	286	44880	330	1000
Stub bearing	C230	2.53	898	57876	1180	1600
Tightness ring	C460	2.14	905	73860	420	1900
Carrying bearing	C419	3.55	736	46752	360	1600
Stub bearing	C401	2.68	1094	48568	1670	1700
Labyrinth support	C780	2.09	1388	74232	1700	1800

6) 최소 $G^*(\tau)$ 와 관련 τ^* 를 산출한다.

[4]의 Refinery centrifugal compressor 예시에 제시된 각 구성품별 고장분포 모수, 교체비용, 검사비용은 Table 1과 같다. 시스템 전체를 고려하지 않고 각각의 구성품만을 고려하였을 경우 최적검사주기는 Table 2와 같다. 8개 구성품을 모두 고려한 최적검사주기는 Table 2와 같이 각 구성품의 최적검사주기의 최소주기인 15일과 최대주기 58일 사이에 존재하고, 공통다운타임비용 (C_I)를 2500(€)으로 가정한 경우 최적기본주기는 Table 3과 같이 29일이다. 이 경우 29일 주기로 5개 품목(C285, C275, C230, C460, C419)을 검사하고, 나머지 3개 품목(C286, C401, C780)은 58일 주기로 검사하는 것이 최적이다[4]. C_I 는 최적 기본주기 선정에 민감한 영향을 주며 [4]의 Refinery centrifugal compressor 예시에서 공통다운타임비용이 500(€)에서 4500(€)으로 변경된 경우 최적기본주기는 Fig. 1과 같이 19일에서 36일로 변경된다[4].

2.2 시뮬레이션 가정

본 연구에서는 2.1에서 설명한 [4]의 연구방법에 추가적으로 계획정비 스케줄링 시 검사비용 절감이 가능한 경우를 고려하여 다음과 같이 시스템을 가정한다. 계획정비 수행 시 발생하는 검사비용은 시험장비 및 시설에 소요되는 설비비용과 시험 인원에 소요되는 인건비로 구성된다고 가정한다. 검사비용은 2개 이상 구성품을 동시에 검사하는 경우, 상황에 따라 비용 절감이 가능한 경우를 고려하여 다음 3가지 경우를 고려한다.

Table 2. Optimal Inspection Policy for Individual Component[4]

Component	Code	Optimal Inspection Interval τ_i^* (Days)	Optimal Individual Long-Run Cost Rate $G^*(\tau_i)$ (€)
Sheathing	C286	58	37
Sheathing	C285	17	65
Tightness	C275	15	275
Stub bearing	C230	36	159
Tightness ring	C460	19	36
Carrying bearing	C419	18	175
Stub bearing	C401	48	269
Labyrinth support	C780	54	390

Table 3. Optimal Inspection Interval for Base Interval Policy[4]

Component	Code	K_i Associated With Optimal Base Interval	Optimal Inspection Interval $K_i \tau_i$ (Days)
Sheathing	C286	2	58
Sheathing	C285	1	29
Tightness	C275	1	29
Stub bearing	C230	1	29
Tightness ring	C460	1	29
Carrying bearing	C419	1	29
Stub bearing	C401	2	58
Labyrinth support	C780	2	58

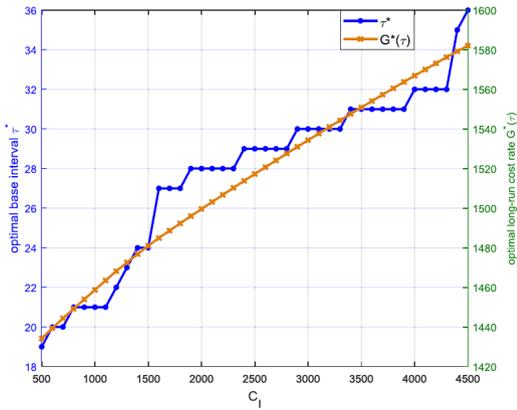


Fig. 1. Sensitivity analysis on CI[4]

- 1) Case 1 (개별 검사비용 소요) :
검사 업무 수행 시 각 시험 대상 구성품의 검사 비용이 발생한다.
- 2) Case 2 (그룹별 검사비용 소요) :
검사 업무 수행 시 각 시험 대상 구성품의 검사 비용이 발생하지만, 동일한 그룹에서 2개 이상

구성품의 검사가 수행될 경우 해당 그룹의 가장 큰 검사비용만 발생한다. 본 연구에서는 Table 4와 같이 4개의 그룹으로 구성된다고 가정한다.

- 3) Case 3 (최대 검사비용 소요) :
검사 업무 수행 시 개별 검사비용 중 가장 큰 검사비용만 발생한다.

예를 들어 기본주기가 25일이고 8개 구성품의 그룹, 검사주기 및 검사비용이 Table 4와 같은 경우를 가정했을 때의 각 Case 별 검사비용은 Table 5와 같다. 25일에는 4개 구성품을 검사하며, Case 1은 각각의 검사비용의 합인 1,430이 소요되고, Case 2는 그룹별 최대 검사비용만 발생하므로 C275와 C460은 같은 2그룹에 속하므로 더 큰 420만 발생하며 총 검사비용은 Case 1 보다 적은 1,100이 소요된다. Case 3은 검사하는 4개의 구성품의 검사비용 중 가장 큰 Tightness ring(C460)의 420만 소요된다. 50일에는 8개 구성품 모두 검사하며 Case 1은 7,180, Case 2는 4,990, Case 3은 1,700이 소요된다. 3가지 가정에 대한 단위시간당 비용은 다음과 같다.

Table 4. Inspection Interval for Base Interval Policy with Base Interval 25day

No	Group (Assumed)	Component	Code	K _i Associated With Base Interval (25 Day)	Inspection Interval K _i τ(Days)	inspection Cost C _i (€)
1	1	Sheathing	C286	2	50	1200
2		Sheathing	C285	1	25	320
3	3	Stub bearing	C230	2	50	1180
4	2	Tightness	C275	1	25	330
5		Tightness ring	C460	1	25	420
6	3	Carrying bearing	C419	1	25	360
7		Stub bearing	C401	2	50	1670
8	4	Labyrinth support	C780	2	50	1700

Table 5. Inspection Cost for 3 cases with Base Interval 25day

Inspection Time	Inspected Components	Case 1 Inspection cost	Case 2 Inspection cost	Case 3 Inspection cost
25	C285, C275, C460, C419	320+(330+420)+360 = 1430	320+420+360 = 1100	420
50	C286, C285, C275, C460, C230, C417, C401, C780	(1200+320)+(330+420)+(1180+360+1670)+1700=7180	1200+420+1670+1700 = 4990	1700
75	C285, C275, C460, C419	320+(330+420)+360 = 1430	320+420+360 = 1100	420
100	C286, C285, C275, C460, C230, C417, C401, C780	(1200+320)+(330+420)+(1180+360+1670)+1700=7180	1200+420+1670+1700 = 4990	1700
...

2.2.1 Case 1 (개별 검사비용 소요)

기본검사주기가 τ_i 이고, m 번째 구성품의 검사 주기가 $k_m \tau_i$ 일 때, 검사로 인한 단위 시간 당 다운타임비용과 교체비용의 합 $G_m(k_m \tau_i)$ 은 다음과 같다.

$$G_m(k_m \tau_i) = \lim_{T_S \rightarrow \infty} \frac{\sum_{j=1}^{T_S / k_m \tau_i} \{ (IT_j^m - IT_j^m) c_d^m + c_r^m \}}{T_S}$$

IT_j^m : m 번째 구성품의 j 번째 고장을 탐지하는 검사 시간

IT_j^m : m 번째 구성품의 j 번째 고장 발생 시간

c_d^m : m 번째 구성품의 단위 시간당 다운타임비용

c_r^m : m 번째 구성품의 교체 비용

검사로 인한 단위 시간 당 다운타임비용, 교체비용 및 검사비용의 합 $G(\tau_i)$ 은 다음과 같다.

$$G(\tau_i) = \sum_{m=1}^8 G_m(k_m \tau_i) + \lim_{T_S \rightarrow \infty} \frac{\sum_{f=1}^{T_S / \tau_i} (I_f^1 c_f^1 + \dots + I_f^8 c_f^8)}{T_S} + \frac{C_I}{\tau_i}$$

I_f^m : m 번째 구성품이 $f \tau_i$ 시점에 검사할 경우 1, 아닌 경우 0

c_f^m : m 번째 구성품의 검사비용

2.2.2 Case 2 (그룹별 검사비용 소요)

검사로 인한 단위 시간 당 다운타임비용과 교체비용의 합 $G_m(k_m \tau_i)$ 은 Case 1과 동일하며, 8개의 구성품의 기본 검사 주기 τ_i 에 검사를 통해 발생하는 단위 시간 당 다운타임비용, 교체비용 및 검사비용의 합 $G(\tau_i)$ 은 다음과 같다.

$$G(\tau_i) = \sum_{m=1}^8 G_m(k_m \tau_i) + \lim_{T_S \rightarrow \infty} \frac{\sum_{f=1}^{T_S / \tau_i} \max(I_f^1 c_f^1, I_f^2 c_f^2) + \max(I_f^3 c_f^3, I_f^6 c_f^6, I_f^7 c_f^7) + \max(I_f^4 c_f^4, I_f^5 c_f^5) + I_f^8 c_f^8}{T_S} + \frac{C_I}{\tau_i}$$

2.2.3 Case 3 (최대 검사비용 소요)

검사로 인한 단위 시간 당 다운타임비용과 교체비용의 합 $G_m(k_m \tau_i)$ 은 Case 1과 동일하며, 8개의 구성품의 기본 검사 주기 τ_i 에 검사를 통해 발생하는 단위 시간 당 다운타임비용, 교체비용 및 검사비용의 합 $G(\tau_i)$ 은 다음과 같다.

$$G(\tau_i) = \sum_{m=1}^8 G_m(\tau_i) + \lim_{T_S \rightarrow \infty} \frac{\sum_{f=1}^{T_S / \tau_i} \max(I_f^1 c_f^1, \dots, I_f^8 c_f^8)}{T_S} + \frac{C_I}{\tau_i}$$

3. 시뮬레이션 및 결과 분석

이 장에서는 [4]의 Refinery centrifugal compressor 예시에 3가지 경우의 검사비용을 고려한 분석결과를 제시한다. 시뮬레이션은 통계분석 소프트웨어인 “R”을 사용하여 수행하였으며 Fig. 2의 순서로 진행하였다. 기본 주기는 최소 3일에서 최대 58일로 가정하였으며 58일은 8개 구성품 중 가장 긴 최적검사주기와 같다. 각각의 기본주기(τ)에 대해 각 구성품은 정수배(k_i)의 주기에 검사하게 되는데, 이 때 각 구성품이 가질 수 있는 가장 검사 주기는 개별 최적 검사주기를 고려하여 시험한다. 예를 들어 C285의 최적 검사주기는 17이고 기본주기(τ)가 3이면 C285의 가장 검사주기는 6τ 로 가정하였다. 그룹화를 통한 검사비용의 감면 효과를 예상하므로 전체 시스템적의 최적 검사주기는 더 짧아질 것으로 예상하였다. 검사비용은 앞에서 설명한 3가지 경우를 고려하여 계산하고 각각의 기본주기(τ)와 k_i 에 대하여 전체 비용 $G(\tau)$ 를 구한 후 비용이 최소가 되는 최적기본주기(τ)와 이때의 최적 검사주기 $k_i \tau$ 를 산출하였다. Fig. 3은 $C_I = 2,500$

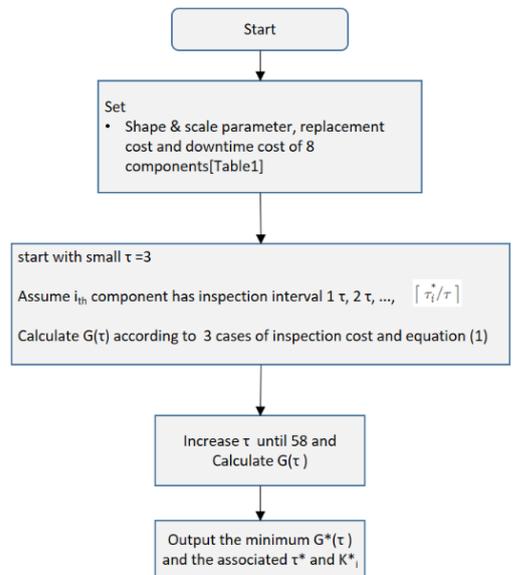


Fig. 2. simulation flow chart

(€) 일 때, Case 1, Case 2 및 Case 3에 대하여 각 기본검사주기 별 장기비용비율과 최적기본주기를 나타낸다. 가정에 따라 검사비용은 Case 1 일 때 가장 크고, Case 3 일 때 가장 작게 되는데 시뮬레이션 결과 Case 1, 2, 3 일 때 최적기본주기는 각각 29일, 26일 및 22일로 확인되었다.

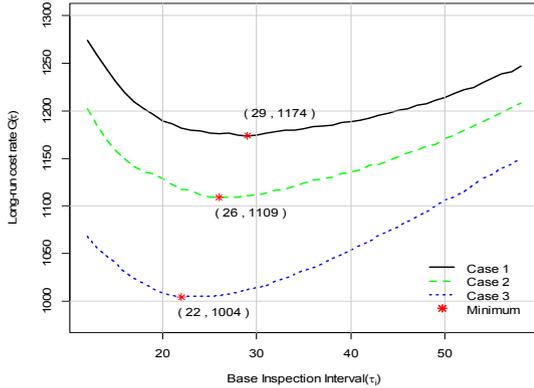


Fig. 3. Plot of Long-run Cost rate

Case 1, 2, 3의 최적기본주기의 정수배 주기로 식별된 각 구성품별 최적 검사주기는 다음 Table 6, Table 7 및 Table 8과 같다. Case 1의 C286, C401 및 C780은 최적기본주기의 2배인 58일 마다, 그리고 나머지 5개 구성품은 최적기본주기인 29일 마다 검사하는 것이 최적으로 분석되었다. Case 2의 C286과 C780은 최적 기본주기 26일의 2배인 52일 마다, 나머지 6개 구성품은 26일 마다 검사하며 C401은 Case 1과 다르게 최적 기본주기에 검사하는 것이 최적으로 분석되었다.

Table 6. Optimal Inspection Interval for Case 1 with $C_f=2,500$

Component	Code	K_i Associated With Optimum Base Interval (29 Day)	Inspection Interval $K_i \tau$ (Days)
Sheathing	C286	2	58
Sheathing	C285	1	29
Stub bearing	C230	1	29
Tightness	C275	1	29
Tightness ring	C460	1	29
Carrying bearing	C419	1	29
Stub bearing	C401	2	58
Labyrinth support	C780	2	58

Table 7. Optimal Inspection Interval for Case 2 with $C_f=2,500$

Component	Code	K_i Associated With Optimum Base Interval (26 Day)	Inspection Interval $K_i \tau$ (Days)
Sheathing	C286	2	52
Sheathing	C285	1	26
Stub bearing	C230	1	26
Tightness	C275	1	26
Tightness ring	C460	1	26
Carrying bearing	C419	1	26
Stub bearing	C401	1	26
Labyrinth support	C780	2	52

Table 8. Optimal Inspection Interval for Case 3 with $C_f=2,500$

Component	Code	K_i Associated With Optimum Base Interval (22 Day)	Inspection Interval $K_i \tau$ (Days)
Sheathing	C286	1	22
Sheathing	C285	1	22
Stub bearing	C230	1	22
Tightness	C275	1	22
Tightness ring	C460	1	22
Carrying bearing	C419	1	22
Stub bearing	C401	1	22
Labyrinth support	C780	1	22

Table 8과 같이 Case 3은 C286과 C780의 개별 최적검사주기는 58일, 54일이지만 8개 구성품을 모두 최적기본주기인 22일 마다 검사하는 것이 최적으로 분석되었다. Case 1, 2, 3의 공통다운타임비용(C_f)과 최적기본주기의 관계는 Fig. 4, Fig. 5 및 Fig. 6과 같다. Case 1, 2, 3 모두 공통다운타임비용이 작아지면 최적기본주기는 모두 작아진다. Case 1의 경우 동시 검사를 통한 검사비용 할인이 없으므로 $C_f=500$ (€) 인 경우에도 최적기본주기는 각 구성품의 최적검사주기 중 가장 짧은 C275의 15일 보다 더 긴 20일이었으며 그룹별 검사비용 할인이 적용되는 Case 2의 경우에는 최적 기본주기가 17일, 전체적으로 검사비용 할인이 적용되는 Case 3은 최적 기본주기가 C275의 최적 검사주기인 15일 보다도 짧은 12일로 확인되었다. $C_f=500$ (€) 인 경우 각각의 Case에 대한 최적기본주기가 적용된 각 구성품별 최적 검사주기는 다음 Table 9, Table 10 및 Table 11과 같다.

C_I 가 작아지면 검사에 의한 시스템정지비용 부담이 작아 지므로 C_I 가 2500(€) 경우보다 500(€) 일 때 Case 1, 2, 3 모두 최적기본주기는 더 짧은 것으로 확인되었다. Case 1의 경우 개별 구성품의 최적 검사주기가 15일에서 19일 사이인 C285, C230, C460, C419는 20일 마다 검사하고 개별 최적 검사주기가 36일, 48일인 C275, C401은 40일 마다, 개별 최적 검사주기가 58일, 54일인 C286과 C780은 60일마다 검사하는 것이 최적으로 분석되었다. Case 2의 경우는 Case 1과 검사를 함께 수행하는 구성품의 조합은 동일하지만 주기는 각각 17일, 34일, 51일로 분석되었다. Case 3인 경우에는 4개 구성품은 12일 마다 검사하고, 나머지 구성품은 24일 마다 검사하는 것이 최적으로 분석되었다.

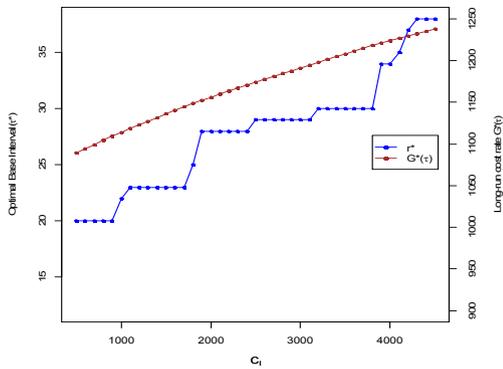


Fig. 4. Sensitivity Analysis on C_I with Case 1

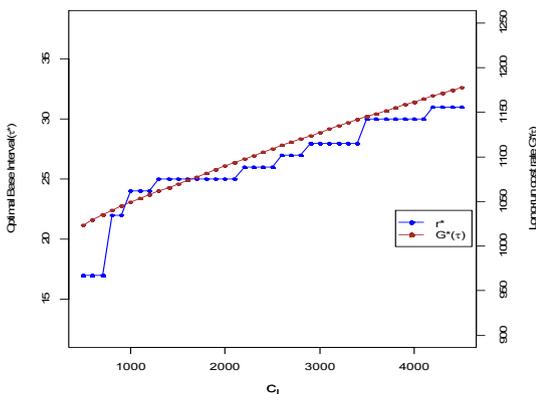


Fig. 5. Sensitivity Analysis on C_I with Case 2

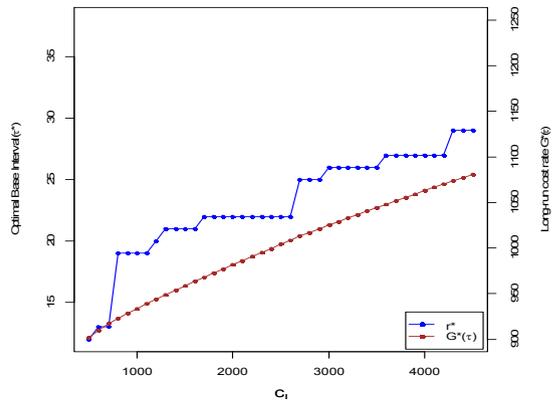


Fig. 6. Sensitivity Analysis on C_I with Case 3

Table 9. Optimal Inspection Interval for Case 1 with $C_I=500$

Component	Code	K_i Associated With Optimum Base Interval (20 Day)	Inspection Interval $K_i r$ (Days)
Sheathing	C286	3	60
Sheathing	C285	1	20
Stub bearing	C230	1	20
Tightness	C275	2	40
Tightness ring	C460	1	20
Carrying bearing	C419	1	20
Stub bearing	C401	2	40
Labyrinth support	C780	3	60

Table 10. Optimal Inspection Interval for Case 2 with $C_I=500$

Component	Code	K_i Associated With Optimum Base Interval (17 Day)	Inspection Interval $K_i r$ (Days)
Sheathing	C286	3	51
Sheathing	C285	1	17
Stub bearing	C230	1	17
Tightness	C275	2	34
Tightness ring	C460	1	17
Carrying bearing	C419	1	17
Stub bearing	C401	2	34
Labyrinth support	C780	3	51

Table 11. Optimal Inspection Interval for Case 3 with $C_T=500$

Component	Code	K_i Associated With Optimum Base Interval (12 Day)	Inspection Interval $K_i \tau$ (Days)
Sheathing	C286	2	24
Sheathing	C285	1	12
Stub bearing	C230	1	12
Tightness	C275	2	24
Tightness ring	C460	1	12
Carrying bearing	C419	1	12
Stub bearing	C401	2	24
Labyrinth support	C780	2	24

시뮬레이션 분석 결과를 종합한 각 개별 구성품의 최적 검사주기와 C_T 가 500(€), 2500(€)일 때 각 Case 별 최적 검사주기는 Table 12와 같다.

Table 12. Optimal Inspection Interval for Case 1, 2, 3 with $C_T=500$ and 2500

Component	Code	Individual Inspection Optimal	$C_T = 2500$			$C_T = 500$		
			Case			Case		
			1	2	3	1	2	3
Sheathing	C286	58	58	52	22	60	51	24
Sheathing	C285	17	29	26	22	20	17	12
Stub bearing	C230	15	29	26	22	20	17	12
Tightness	C275	36	29	26	22	40	34	24
Tightness ring	C460	19	29	26	22	20	17	12
Carrying bearing	C419	18	29	26	22	20	17	12
Stub bearing	C401	48	58	26	22	40	34	24
Labyrinth support	C780	54	58	52	22	60	51	24

시뮬레이션 분석 결과 검사 장비와 검사 인원 등을 고려하여 동시 검사를 통한 검사비용 절감 효과가 있는 경우에는 최적 기본주기가 짧아지며, C_T 가 작아지는 경우에도 최적기본주기가 짧아지는 것으로 확인하였다. 검사비용 절감 효과가 없는 Case 1의 경우 C_T 가 작아지면 Table 12와 같이 각 구성품의 최적 검사주기는 각 개별 구성품의 최적검사주기와 더 유사한 주기로 선정되는 것으로 확인하였다. Case 3과 같이 검사비용 절감효과가 커질수록 검사주기는 짧아지며, 다수의 구성품을 함께 검사하는 것이 더 적절하며 이때의 검사주기는 각 개별 구성품의 최적검사주기 보다 크게는 절반이상 짧아지는 것을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 복잡한 시스템을 구성하는 다수의 구성품을 대상으로 검사 스케줄링을 계획하는 경우를 가정하여 각 개별 구성품에 대한 고장분포, 검사비용, 교체비용, 다운타임비용 및 시스템정지비용을 고려하여 분석을 수행하였다. 기본주기 개념을 적용한 기존의 연구 사례에 추가적으로 동시 검사를 통한 검사비용 절감 개념을 함께 고려하여 분석을 수행하였으며, 이때 검사비용 절감이 가능한 경우 시스템의 전체적인 계획정비 비용은 줄어들게 되는데 이때 최적 계획정비주기는 기존의 연구사례와 비교하여 더 짧은 주기로 검사하는 것이 더 적합함을 확인하였다. 따라서 복잡한 시스템의 계획정비를 계획할 경우 검사비용을 면밀히 고려하여 전체적인 운용유지비의 절감이 가능할 것으로 판단된다.

References

- [1] J. T. jung, C. S. Kim. "An Evaluation of Preventive Maintenance Period of Power Transmission for The High-Speed Rolling Stock", Korea Academia-Industrial Cooperation Society. Vol.2015, No.1, pp. 251-253, 2015
DOI: http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07217643&language=ko_KR
- [2] H. J. Song, C. H. Jun. "Determining the Optimum Maintenance Period of the Steel Making Equipment Having Multiple Failure Types". IE Interfaces Vol.16, No. 1, pp. 27-33, March 2003.
DOI: <http://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200329256811551.page>
- [3] J. T. jung, C. S. Kim. "Evaluation of Optimal Time Between Overhaul Period of the First Driving Devices for High-Speed Railway Vehicle", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society. Vol.16, No.12, pp. 8700-8706, 2015
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.12.8700>
- [4] Bin Liu, Ruey-Huei Yeh, Min Xie, Fellow. "Maintenance Scheduling for Multicomponent Systems with Hidden Failures", IEEE Transactions on reliability, Vol. 66, No. 4, DECEMBER 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TR.2017.2740562>
- [5] R. Laggoune, A. Chateaneuf, and D. Aissani. "Opportunistic policy for optimal preventive maintenance of a multi-component system in continuous operating units", Comput. Chem. Eng., vol. 33, no. 9, pp. 1499-1510, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2009.03.003>

김 만 수(Mansoo Kim)

[정회원]



- 2006년 2월 : 한양대학교 산업공학과 (공학학사)
- 2009년 2월 : 한양대학교 대학원 산업공학과 (공학석사)
- 2013년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원 선임연구원

<관심분야>

종합군수지원, 신뢰성분석

지 응 기(Woong Ki Ji)

[정회원]



- 2006년 2월 : 경희대학교 전자공학과 (공학학사)
- 2005년 12월 ~ 현재 : LIG넥스원 선임연구원

<관심분야>

종합군수지원, 신뢰성분석

현 도 경(Do Kyung Hyun)

[정회원]



- 2010년 2월 : 아주대학교 산업공학과 (공학학사)
- 2012년 2월 : 한국과학기술원 산업공학과(공학석사)
- 2012년 2월 ~ 현재 : LIG넥스원 선임연구원

<관심분야>

종합군수지원, PHM

권 기 상(Ki-Sang Kwon)

[정회원]



- 1993년 2월 : 금오공과대학교 전자제어공학과 (공학학사)
- 2000년 6월 : 해군 대위 전역
- 2000년 6월 ~ 현재 : LIG넥스원 ILS팀 팀장

<관심분야>

정보경영, 정보통신

김 성 환(Sung Hwan Kim)

[정회원]



- 1998년 2월 : 경희대학교 기계공학과 (공학학사)
- 2000년 8월 ~ 현재 : LIG넥스원 수석연구원

<관심분야>

PHM, 인간공학