

컨테이너 크레인의 예방 정비 일정에 관한 연구¹⁾

A Study on Preventive maintenance Schedules of Container Crane

윤 원 영, 손 범 신, 김 귀 래, 하 영 주

부산대학교 산업공학과
부산광역시 금정구 장전 2동 산 30 번지

Abstract

Container crane in container terminal have a lot of parts, and a crane breakdown affects the productivity of terminal. In this paper, we decide Preventive Maintenance (PM) schedules for container crane in container terminals. We define structure of container crane using the tree model. Also we develop a simulation system and genetic algorithm for decision PM schedules based on failure and maintenance data collected from container terminal. We compare the work schedule with PM schedules of container crane, then regulate PM schedules using heuristic method.

1. 서론

1. 1 연구 배경

우리나라 항만에 입출항하는 선박은 매년 증가하고 있으며, 입항하는 선박수의 증가에 비하여 선박의 톤수의 증가가 현저하여 선박의 대형화가 급속히 진행되고 있음을 알 수 있다. 이러한 입출항 선박의 증가와 대형화에 있어서 컨테이너 터미널의 생산성 향상을 위한 중요한 역할을 담당하고 있는 것은 컨테이너 터미널의

작업 장비라고 할 수 있다. 각 작업을 담당하고 있는 개별 장비들의 고 신뢰성을 보전하는 활동이 필요하며, 이들 장비의 신뢰성을 높이기 위하여 각 장비의 맞는 최적의 예방 정비 계획이 수립되어야 한다. 이러한 계획적인 정비 활동의 효과로 고장 발생 현상을 최소화 할 때 비로소 컨테이너 터미널에서의 생산성 향상을 가져다 줄 수 있는 것이다.

컨테이너 터미널의 핵심 하역 장비인 컨테이너 크레인의 고장은 선박의 일정과 장치장의 운영에 연쇄적으로 영향을 미치며 그 손실액 또한 예방 정비 비용에 비교해 볼 때 상대적으로 훨씬 큰 손실을 발생시킨다. 따라서 비용 측면의 관점보다는 고장 발생의 방지와 생산성 향상의 관점에서 정비 활동을 실시 하고 있다. 이에 본 연구에서는 생산성과 직접적인 관계가 있는 장비 가용도의 최대화를 목적으로 하여 컨테이너 크레인 한대의 예방 정비 활동에 대하여 시뮬레이션을 이용하여 최적 주기를 결정하고 여러 대의 컨테이너 크레인의 연간 예방 정비 주기를 산출한다. 그리고 작업 일정과 예방 정비 일정의 범위를 비교하여 예방 정비 일정을 재조정한다.

1) 이 논문은 2006년도 2단계 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음

1.2 연구 현황

컨테이너 터미널에 관한 연구는 운영 최적화를 중심으로 많이 진행되어 왔으며 장비의 고장 및 정비 활동에 관한 연구는 활발히 이루어지지 못하였다. 컨테이너 터미널 운영에 관한 시뮬레이션 연구로써 최용석[3]은 수평배치하의 터미널에서 운영 계획의 타당성 검증 및 터미널 설계 대안의 효율성 측정을 목적으로 대상 터미널의 모형화가 용이하고 시스템의 변경 시 유연성을 제공하는 시뮬레이션 시스템 개발에 관하여, 객체지향 언어인 VC++를 사용하여 객체의 재사용성과 모델의 확장성이 용이한 시뮬레이션 시스템을 개발하는 연구를 하였다. 컨테이너 터미널 장비의 보전 정책에 관한 연구로서 윤원영 외[2]은 컨테이너 터미널의 계획, 설계 및 능률분석에 있어서 중요한 요소인 컨테이너 크레인(CC)의 하역 능력을 추정함에 있어 고장 현상을 반영한 대기 모형으로 접근하여 시뮬레이션 모델을 제시하였고, 윤원영 외[3]는 컨테이너 터미널의 RAM 향상을 지원하는 시스템 관한 연구를 하였다. 서정훈[1]은 SIMPLE++를 이용하여 컨테이너 터미널의 장치장 평가를 위한 시뮬레이터 개발에 관한 연구를 하였다.

기존의 연구에서는 컨테이너 터미널의 운영 시스템에 관한 최적화 설계 및 분석에 관한 연구가 대부분이며, 반면 장비의 신뢰도 향상에 관한 연구는 제조 현장에 관한 연구가 대다수를 이루며 컨테이너 터미널의 장비 보전에 관한 연구는 미비한 상태이다.

2. 연구 대상 및 정비 데이터 분석

2.1 대상 장비 구조

다 단계 다 부품으로 복잡하게 이루어진 시스템을 정의하기에는 트리 구조 모형이 가장 적합하다. 따라서 본 연구에서는 컨테이너 크레인을 시스템 - 구성품 - 모듈 - 최하위부품으로 [그림 1] 과 같이 총 4단계로 정의하였다. 컨테이너 크레인의 모든 부품을 세부적으로 정의하기에는 현실적으로 어려움이 많으

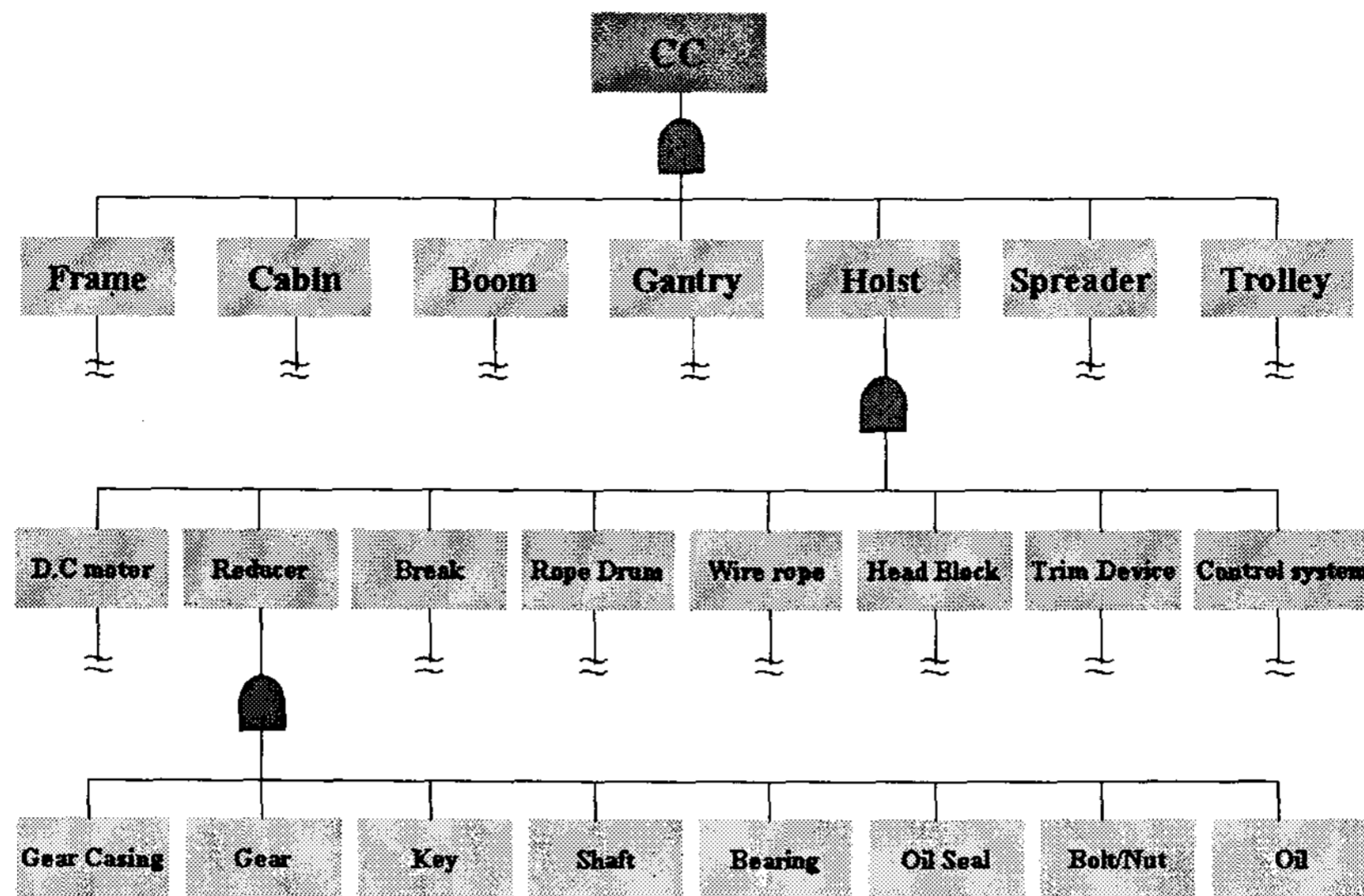
로 최하위 부품을 4단계로 정의하였다. 이와 같이 컨테이너 크레인을 트리 구조로 정의하여 다 단계 다 부품으로 이루어 시스템의 신뢰도를 보다 명확하게 분석할 수 있다.

2.2 컨테이너 터미널의 예방 정비 활동

컨테이너 터미널에서 가동되는 핵심 하역 장비인 컨테이너 크레인은 거의 24시간 동안 가동되고 있다. 기존 터미널에서의 정비활동에 관한 조사한 결과 컨테이너 크레인에 계획된 예방 정비 작업은 주로 장비의 유휴 시점에서 행하여지고 있으며, 장비 작업 중 고장이 발생하는 경우 즉각적인 수리 활동을 하고 있다. 고장 정비소요 시간보다 예방 정비소요 시간이 많으며, 이러한 CC의 예방 정비 및 고장 수리 활동은 안벽 작업의 생산성에 직접적인 영향을 미친다.

일반적으로 컨테이너 크레인의 예방정비는 과거 오랜 기간 터미널을 운영해 오면서 얻어진 자료를 바탕으로 정비팀에서 월말에 예방 정비 일정을 운영팀에게 넘겨주게 되고, 운영팀은 선석 계획 시 장비의 예방 정비 일정을 고려하여 선석을 배정한다. 예방정비 활동은 장비 전체에 대한 예방 정비와 개별 부품에 대한 예방 정비로 나눌 수 있다. 전자의 정비 활동은 정비 주기에 도달된 장비의 가동을 중지하고 장비 전체를 정비하는 방법이고, 후자의 경우 장비의 각 부품의 실제 사용된 시간을 파악 하여 부품별로 정비를 실시하는 방법이다. 장비 전체에 대한 정비 활동은 여유장비가 있을 때 가능한 정비 활동으로써 컨테이너 크레인 과 같은 고가의 장비는 여유분이 충분하지 않으므로 후자의 정비 활동이 보다 적절하다고 볼 수 있다. 예방 정비의 구분은 지침서와 과거 활동 및 현재의 운영 상황을 고려하여 연간 정비, 월간 정비, 주간 정비로 나누어지나 현실적으로 선박의 스케줄 및 여러 작업 상황에 크게 의존되므로 정비 실시 일이 유동적으로 변하는 것이 현실이다.

생산성의 향상을 고려하고자 할 때 너무 잦은 예방 정비의 실시는 오히려 생산성을 감소시키며, 반면 예방 정비의 실시 횟수를 줄이면 작업 중 장비의 고장이 증가하여 더 큰 손



[그림 1] 컨테이너 크레인의 구조

실을 초래할 수 있다. 따라서 예방 정비 실시 빈도와 생산성의 관계를 잘 파악하여 적절한 예방 정비 주기를 파악하는 것은 터미널의 장비의 고 신뢰도를 보전하기 위한 중요한 업무로 인식 된다.

3. 예방 정비데이터 분석

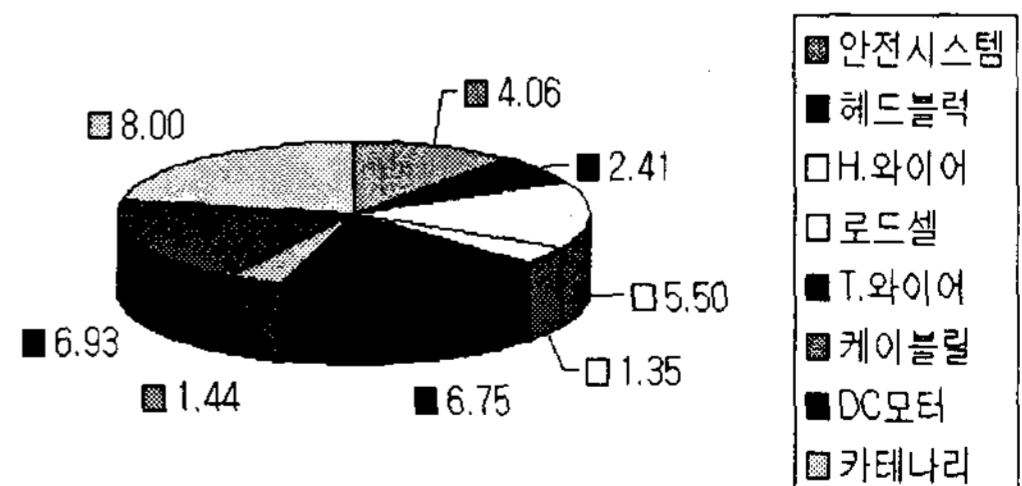
컨테이너 터미널에서 장비의 예방 정비 활동은 모든 부품에 대해서 이루어진다. 하지만 모든 부품에 대해서 정비 주기를 파악하고 계획하여 정비 활동을 실시한다는 것은 현실적으로 불가능하며, 이에 현장에서는 대표적인 예방 정비 활동에 대해서만 스케줄을 생성하고 계획한다. 월말 계획된 정비 목록 이외의 부품에 대해서는 일상적인 점검과 장비의 이상상태에 따라서 정비 활동을 실시한다. 컨테이너 크레인에 대한 최적 정비 주기를 결정하기 위해서 현재 실시하고 있는 예방 정비의 목록 및 주기 그리고 정시 소요 시간과 정비 인원의 수에 대하여 조사하였다([표 1]). 예방 정비 소요 시간을 파악하기 위해 [표 1]의 데이터를 분석해본 결과 예방 정비 목록에 해당하는 정비의 평균 소요 시간은 아래 [그림 2]와 같이 보여 진다.

예방 정비 목록에 대하여 모든 날짜 단위

를 시간으로 환산하여 통계 분석 프로그램인 미니탭을 이용하여 고장 분포 및 관련 수명 모수를 추정하였다. 먼저 데이터의 적합 분포를 알아보았으며, 해당 분포의 수명 모수를 추정하였다.

부품명	정비내용	주기	소요시간
안전 시스템	점검	4500	4.06
젠트리 DC	수리	4380	6.93
케이블 릴	수리	4500	1.44
호이스트 DC	수리	4380	6.93
호이스트 와이어	교환	1500	5.50
Load Cell	수리	800	1.35
헤드블럭	교환	2000	2.41
트로리 DC	수리	4380	6.93
트롤리 와이어	교환	1100	6.75
카테나리 와이어	교환	900	8.00

[표 1] 예방 정비 관련 정보



[그림 2] 예방 정비 평균 소요시간 고장 분포의 추정 결과 대부분 와이블 분포를

따르는 것으로 나타났으나, 대수 정규 및 정규 분포에 적합한 부품도 존재하였다. 하지만 본 연구에서는 신뢰성 분석에 자주 사용되는 와이블 분포를 따르는 것으로 가정하여 수명 모수를 추정하였다. 수명 추정 결과 모든 부품은 형상 모수가 1보다 큰 증가형 고장률을 가지는 것을 알 수 있다.

4. 예방 정비 주기의 결정

4.1 시뮬레이션 시스템

시스템 상태는 작업과 유휴, 고장 정비, 예방 정비 상태로 구분한다. 작업시간은 지수분포, 유휴시간은 지수분포, 고장 정비 소요시간은 지수분포로 가정한다. 고장은 시스템의 최하위 부품에서만 발생하고 모든 최하위 부품의 고장은 와이블 분포를 따른다고 가정한다. 분포의 형태는 시뮬레이션 시스템에 특별한 제약은 아니다. 각 부품의 고장은 작업 중에만 발생하고 유휴 중에는 고장이 발생하지 않는다. 고장 및 예방 정비 모두 교체를 실시하고 예비품 및 정비원은 항상 가용하다고 가정한다. 이런 경우에 각 부품의 예방정비는 수명기반교체 정책(Age Based Replacement Policy)을 따르며 기준시점(예방정비 계획시점) 보다 큰 첫 유휴시간에 실시한다. 여러 작업들이 해당되면 동시작업들은 동시에 시작하고 동시 가능 작업이 아닌 경우 순차적으로 실시한다. 시뮬레이션 시스템을 위한 입/출력 값은 아래 [표 2]와 같다.

입력 값	출력 값
최하위 부품의 고장 분포	장비의 총 작업 시간
작업 시간 분포	총 가동시간
유휴 시간 분포	총 고장 시간
고장 정비 시간 분포	총 유휴 시간
예방 정비 시간 분포	총 예방 정비 시간
예방 정비 기준(T_i)	총 고장 회수
시뮬레이션 수행 시간	가동률, 가용도
반복 회수	정비 단위별 최적주기
동시 정비 가능 작업 목록	예비품 연간 소모량

[표 2] 시뮬레이션을 위한 입/출력값

4.2 유전자 알고리즘을 이용한 최적화

모든 부품에 대하여 1년에 한번 이상은 예방 정비가 이루어진다고 가정하여 해의 범위를 1~9999시간으로 정하였다. 따라서 한 정비 주기의 유전자(Gene)는 4자리의 정수가 되고 한 염색체(Chromosome)의 자리 수는 4 * 총 정비 작업 수로 구성하였다. 전체 모집단의 수는 100으로 설정하였고, 교차는 이점교차(Two-Point Crossover), 돌연변이는 각 비트 단위로 수행된다. 해의 0값 방지를 위해 수행 후 한 정비의 주기가 0인 경우 마지막 비트의 값은 1이 되도록 설정하였고, 각 Rate는 입력 받도록 하였다. 부모와 자식들 중 가장 우수한 것(적합도가 큰 것)들만 모집단 수만큼 선택하여 100세대를 진화한다. 최적해는 시뮬레이션 종료 시점의 적합도가 가장 큰 염색체(Chromosome)가 선택된다. 한 염색체의 Fitness는 시뮬레이션을 이용하여 다음과 같이 추정한다.

$$Fitness = \frac{\text{각시뮬레이션에서의가용도}}{\text{시뮬레이션반복회수}}$$

최적해가 결정되면 최적 Age를 작업시간의 비율을 가지고 다음과 같이 달력주기로 변환해 준다.

$$\text{달력주기} = \text{최적해} \times \frac{\text{평균 작업시간} \times \text{평균 유휴시간}}{\text{평균 작업시간}}$$

4.3 예방 정비 일정의 연간 계획

앞 절에서는 다 단계 다 부품으로 이루어진 단일 장비의 최적 예방 정비 일정을 결정하는 문제에 대해 설명하였다. 하지만 실제 컨테이너 터미널에서의 컨테이너 크레인 은 동일한 구조의 여러 대의 장비가 가동되고 있다. 따라서 하나의 장비에 대해 정비 주기가 결정되었다면, 복수 장비로의 연간 예방 정비 일정이 계획 되어야 한다. 복수 장비의 연간 예방 정비 일정은 앞서 제시된 예방 정비 최적 주기와 개별 부품의 현재 실 사용 시간의 차이로 첫 번

째 예방 정비 일정을 할당하고 첫 번째 일정에 서부터 부품 별 제안 주기를 더해가면서 일정을 계획한다. 매년 첫 번째 예방 정비 주기와 그 다음 번의 예방 정비 주기를 구하는 방법은 아래와 같다.

[기호]

T_j : j 부품의 제안된 최적 예방 정비 주기
 A_{ij} : i 장비 j 부품의 현재까지의 사용시간

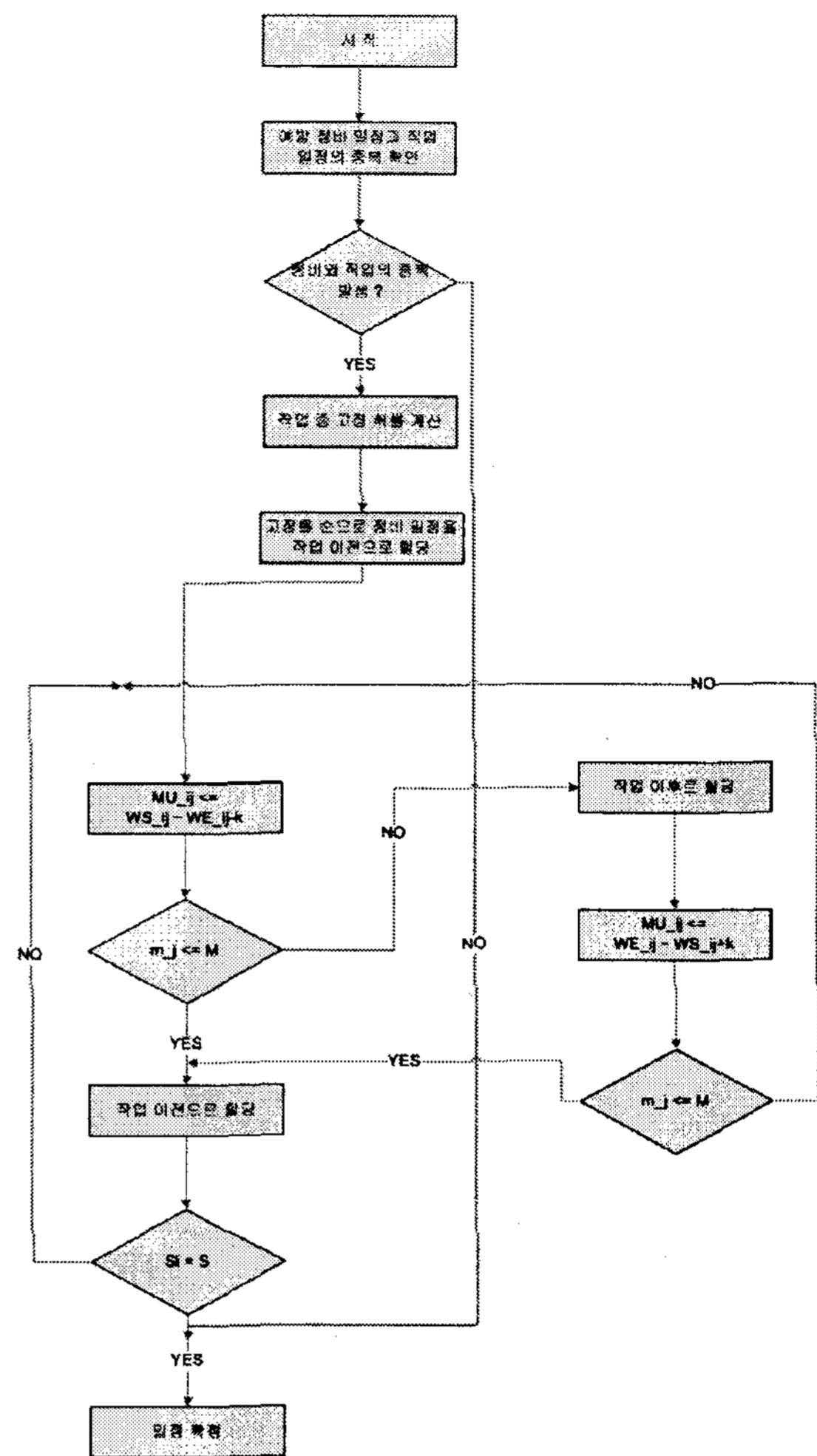
- 매년 첫 번째 예방 정비 주기 : $T_j - A_{ij}$
- 이 후의 주기 : $(T_j - A_{ij}) + T_j$

4. 4 월간 예방 정비 일정

실제 크레인의 작업 일정이 수립되면 예방 정비의 일정과 겹쳐지는 상황이 발생할 수 있을 것이다. 이러한 상황에서는 컨테이너 크레인의 예방 정비 실시 시점을 작업 전이나 작업 이후로 두어야 한다. 장비 가용도를 최대로 하기 위해서는 정해진 예방 정비 실시 시점보다 앞서 실시하면 사전에 고장률을 줄여 장비 가용도를 높일 수 있다. 하지만 너무 앞당겨 예방 정비를 실시하는 경우는 다음 예방 정비와의 시간이 멀어지므로 그 사이 고장 발생 확률이 커지게 된다. 또한 작업 일정과 예방 정비 일정이 겹쳐진 경우 모든 예방 정비를 작업 시작 이전에 실시한다고 하면 예방 정비를 하는데 있어서 하루 가용한 정비인원을 초과하는 일이 발생할 수 있다. 따라서 이 경우 예방 정비 대상 부품이 작업 중 고장이 발생하는 확률을 계산하여 고장 발생 확률이 높은 순으로 작업 이전에 정비를 할당하고, 가용한 정비인원의 수를 넘어서게 상황이 발생하면 작업 끝난 시점 이후로 예방 정비 일정을 할당한다.

5. 적용 사례

본 연구에서의 실험 조건은 시뮬레이션 수행시간은 10,000 시간, 반복 10회로 실시하였으며, 교체율은 0.1, 돌연변이율은 0.5 100세대 진화하여 컨테이너 크레인의 최적 예방정비 주기를 산출해 보았다. 주기 산출 결과는[표 3]과



[그림 3] 월간 예방 정비 일정 조정

[기호]

- WS_{ij} : i 장비 j 일자의 작업 시작 시점
- WE_{ij} : i 장비 j 일자의 작업 시작 시점
- MU_{ij} : i 장비 j 일자의 예방 정비 소요 시간
- m_j : j 일자의 소요 정비 인원
- M : 일일 가용한 정비 인원의 총 수
- S_i : 작업과 중복되는 예방 정비의 현재까지 변경된 일정 수
- S : 작업과 중복된 예방 정비 일정 총 수

같으며, 총 작업 시간은 8,258시간, 총 가동시간은 6,031시간 그리고 총 예방 정비 시간은 117시간, 이때 장비 가용도는 0.73으로 평가되었다. 최적 주기가 산출되면 개별 부품의 사용시간에서 최적 주기를 더해 가면서 연간 예방 정비를 계획한다. 계획된 작업 일정과 해당 월의 예방 정비 일정을 비교하여 중복되는 일정을 재조정한다.

부품명	정비내용	제안주기
젠트리 안전 시스템	점검	1372
젠트리 DC 모터	수리	8009
케이블 릴	수리	4207
호이스트 DC 모터	수리	3844
호이스트 와이어	교환	1890
Load Cell 시스템	수리	4947
헤드블럭	교환	8161
트롤리 DC 모터	수리	5076
트롤리 와이어	교환	1047
카테나리 와이어	교환	1665

[표 3] 제안된 최적 예방 정비 주기

[표 4]는 실제 터미널의 2006년 8월 작업 일정과 제시된 8월 예방 정비 일정을 비교해 본 결과이다

장비 코드	부품 코드	조정전	조정후
QC203	카테나리와이어	80	80
QC103	카테나리와이어	128	56*
QC301	카테나리와이어	152	152
QC303	케이블 릴	152	152
QC203	트롤리 와이어	176	128*
QC303	트롤리 와이어	200	200
QC302	케이블 릴	248	248
QC201	카테나리와이어, 안전시스템	272	248*
QC101	카테나리와이어	296	440*
QC403	호이스트와이어	344	392*
QC201	호이스트와이어 호이스트 DC	344	344
QC201	트롤리 DC	368	392*
QC101	트롤리 와이어	368	464*
QC303	카테나리와이어	392	392
QC102	트롤리 DC	416	440*
QC501	트롤리 DC	512	512
QC203	호이스트와이어	512	512
QC101	호이스트와이어 호이스트 DC	584	606*
QC301	트롤리 DC	584	585*
QC302	카테나리와이어	608	608
QC202	카테나리와이어	608	608
QC301	트롤리 와이어	632	632
QC201	카테나리와이어	632	632
QC401	트롤리 와이어	632	632
QC201	트롤리 와이어	680	680
QC401	카테나리와이어	728	728
QC403	트롤리 와이어	720	720

[표 4] 월간 예방 정비 일정 조정 결과

2006년 8월의 정비 작업은 12대의 컨테이너 크레인의 총 27가지 정비 활동이 계획되어 있었고, 10개의 정비 계획이 작업 일정과 겹치게 되었다. 현장에 운영 중인 컨테이너 크레인의 가용도는 대략 0.65에서 0.70 사이이다. 현재 컨테이너 크레인의 가용도는 0.73정도, 시간당 컨테이너 크레인의 처리능력이 30개라고 하면 적게는 7844 개, 많게는 21024 개 정도로 연간 컨테이너 처리량이 증가될 것으로 기대된다.

6. 결론

본 연구에서는 실제 터미널에서 수행하였던 고장 및 예방 정비 데이터를 분석하고 예방 정비 항목에 대해 부품 별 수명 분포와 모수를 추정하였다. 컨테이너 크레인의 구조를 명확히 정의하기 위해서 크레인을 트리 구조로써 표현하였다. 그리고 시뮬레이션 시스템과 유전자 알고리즘으로 최적 예방 정비 주기를 결정하고 연간 예방 정비 일정을 계획하였으며 컨테이너 크레인의 작업과 예방 정비 일정을 비교하여 크레인의 작업에 영향을 주지 않는 범위에서 월간 예방 정비 일정을 수립하였다. 향후 연구 과제로는 월간 예방 정비 일정 계획 시 일정 변경에 따른 가용도 변화에 대한 연구도 수행될 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] 서정훈, "컨테이너 터미널의 장치장 평가를 위한 시뮬레이터 개발", 석사학위논문, 부산대학교, 1998
- [2] 윤원영, 최용석, 송진영, 양창호 "컨테이너 크레인의 하역능력 추정에 관한 시뮬레이션 연구", *IE Interface*, 14(1), 67-78
- [3] 윤원영, 김귀래, 하영주, 손범신, 김혜정 "컨테이너 터미널 장비의 RAM 향상을 위한 보전관리 시스템", *IE Interface*, 19(3), 245-254
- [4] 최용석, "컨테이너 터미널의 객체지향 시뮬레이션 시스템", 박사학위논문, 부산대학교, 2001