

컨테이너 크레인의 예방정비 일정에 관한 연구

윤원영* · 손범신** · 최용석†

* 부산대학교 산업공학과, ** 현대 유엔아이 IT서비스본부, † 순천대학교 물류학과

A Study on Preventive Maintenance of Container Cranes

Won-Young Yun* · Bum-Shin Son** · Yong-Seok Choi†

* Department of Industrial Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

** Hyundai Ubiquitous & Information Technology Co., Ltd. 540-742, Korea

† Department of Logistics, Suncheon National University, Suncheon 540-742, Korea

요 약 : 컨테이너터미널에서 사용되는 컨테이너 크레인은 컨테이너 선박의 컨테이너를 양적하하는 주요 장비이다. 크레인이 고장이 나면, 컨테이너터미널의 생산성을 감소시킬 것이다. 본 논문은 컨테이너 크레인에 대한 예방정비 일정을 다룬다. 컨테이너 크레인은 많은 부품으로 구성되고 3개의 모델을 사용하여 컨테이너 크레인의 구조를 분석한다. 그리고 최적의 예방정비 일정을 결정하기 위하여 유전자 알고리즘을 적용하고 시뮬레이션 시스템을 통해서 제안된 방법의 성능을 평가한다. 마지막으로 작업일정에 기초하여 산업체에서 발견된 예방정비 일정을 조정하는 방법을 설명한다.

핵심용어 : 컨테이너 크레인, 예방정비, 시뮬레이션 시스템, 유전자 알고리즘

Abstract : Container cranes are main equipments to load and unload containers to container ships at container terminals. If a crane breakdowns, it can reduce the productivity of container terminals. This paper deals with Preventive Maintenance (PM) schedules for the container cranes. The cranes consist of many parts and we analyze the structure of a container crane using the tree models. Next, we apply a Genetic Algorithm (GA) for determining optimal PM schedule and evaluate the performance of the proposed method through simulation system. Finally, we explain how to adjust the PM schedule found in industry based on work schedules.

Key words : Container Crane, Preventive Maintenance, Simulation System, Genetic Algorithm

1. 서 론

우리나라 항만에 입출항하는 선박은 매년 증가하고 있으며, 입항하는 선박수의 증가에 비하여 선박의 통수가 현저하게 증가하고 있다. 이는 선박의 대형화가 급속히 진행되고 있음을 보여주는 것이다. 이러한 상황에서 컨테이너 터미널의 생산성을 높게 유지하기 위해서는 터미널의 장비, 즉 크레인들을 항상 사용 가능한 상태로 유지시키는 것이 필요하다. 이를 위해서는 기본적으로 터미널 설계, 개발단계에서 고장이 잘 일어나지 않고 신뢰성이 높은 장비를 구매하거나 또는 여분의 장비를 보유하여야 예측할 수 없는 고장에 대한 대처가 가능할 것이다. 그리고 장비의 운영단계에서는 고장 시 신속히 수리가 이루어질 수 있도록 숙련된 정비기술자의 보유, 적절한 부품의 보유 등과 같은 물류문제가 있다. 특히 투자비를 증가시키지 않으면서도 터미널 운영사가 대응할 수 있는 방법으로는 장비들의 적절한 예방정비를 미리 하여 고장으로 인한 손실을 줄이는 것이다.

항만에서 사용되는 장비를 대상으로 한 고장형태와 예방대책에 대한 연구로는 한근조 외(2002)가 부산항을 대상으로 하여 고장발생분포 분석을 통해 시도하였다. 정비측면에서는 윤원영 외(2000)가 신뢰성기반 정비를 위한 시뮬레이션 시스템을 개발하였다. 그리고 윤원영 외(2006)는 트랜스퍼 크레인을 대상으로 고장 및 정비에 대한 표준화를 시도하고, 시스템으로 구현하였으며, 또한 윤원영 외(2006)는 컨테이너 터미널의 신뢰성 향상을 위한 관리시스템을 제안하였다. 김환성 외(2006)는 갠트리 크레인을 대상으로 고장분석 및 예방보전 주기를 결정하기 위한 예방보전주기 개선법을 제안하였다.

이러한 기존 연구와 달리 본 연구에서는 컨테이너터미널에서 사용되는 다수의 크레인들에 대한 예방정비 계획을 어떻게 최적화할 것인가를 다루고자 한다.

컨테이너 터미널에서 컨테이너를 취급하는 장비로는 크게 컨테이너 크레인(Container Crane : CC), 트랜스퍼 크레인(Transfer Crane : TC), 야드 트랙터(Yard Tractor : YT) 등이 사용되고 있다. 이들 여러 장비 중 컨테이너 터미널의 생산성에

* 정회원, wonyun@pusan.ac.kr 051)510-2421

** 정회원, sonbs011@pusan.ac.kr 010-5599-2047

† 교신저자 : 최용석(중신회원), drasto@sunchon.ac.kr 061)750-5115

가장 직접적인 영향을 미치는 컨테이너 크레인을 대상 장비로 선정하였다. 기존의 운영되고 있는 터미널의 정비활동에 관해서 조사한 결과 컨테이너 크레인은 트랜스퍼 크레인과 달리 고가의 장비로서 가용장비의 여유가 부족하여 하역 작업의 상황에 의존하여 최대한 생산성에 영향을 미치지 않는 장비의 유휴시점에 유동적으로 예방정비를 실시하고 있다(윤 외, 2006). 예방정비는 대개 평균 5시간 이내에 정비가 완료되며, 고장 수리는 2시간 가량 소요되고 있음을 알 수 있었다. 예방정비를 실시함으로써 작업 중의 장비 고장 현상을 감소시킬 수 있으므로, 예방정비를 언제 실시하느냐에 대한 의사 결정은 생산성에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 예방정비 실시 동안 장비작업의 중단으로 발생하는 생산성 감소와 고장의 발생으로 인한 생산성 감소의 두 가지 시점에서 최적의 예방정비 주기를 산출하는 것은 운영측면에서 중요한 일이다.

컨테이너 크레인의 고장은 선박의 일정과 장치장의 운영에 연쇄적으로 영향을 미치며 그 손실액 또한 예방정비 비용과 비교하면 상대적으로 훨씬 큰 손실을 발생시킨다. 따라서 비용 측면의 관점보다는 고장 발생의 방지와 생산성 향상의 관점에서 정비 활동을 실시하고 있다.

따라서 본 연구에서는 컨테이너 터미널의 생산성과 직접적인 관계가 있는 컨테이너 크레인의 가용도 최대화를 목적으로 하여 컨테이너 크레인 현대의 예방정비 활동에 대하여 시뮬레이션과 유전자 알고리즘을 이용하여 최적 주기를 결정하고 여러 대의 컨테이너 크레인의 연간 예방정비 주기를 계획하였다. 그리고 실제 컨테이너 크레인의 작업 일정이 확정되면, 초기에 계획된 예방정비 일정과 작업 일정을 비교하여 컨테이너 크레인 작업에 영향을 미치는 않는 유휴시점에서 예방정비 활동이 이루어질 수 있도록 예방정비 일정을 조정하도록 하는 방안을 다루었다.

2. 컨테이너 터미널의 예방정비 활동

컨테이너 터미널에서 가동되는 핵심 하역 장비인 컨테이너 크레인은 거의 24시간 동안 가동 되고 있다. 기존 터미널에서의 정비 활동에 관하여 조사한 결과 컨테이너 크레인에 계획된 예방정비 작업은 주로 장비의 유휴 시점에서 행하여지고 있으며, 장비 작업 중 고장이 발생하는 경우 즉각적인 수리 활동을 하고 있다. 고장정비 소요시간보다 예방정비 소요시간이 많으며, 이러한 컨테이너 크레인의 예방정비 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 예방정비 일정을 운영팀에게 넘겨주게 되고, 운영팀은 선석 계획 시 장비의 예방정비 일정을 고려하여 선석을 배정한다. 예방정비시기에 관해서는 제조업체에서 제공하는 지침서와 실제 장비를 운영하면서 얻은 경험을 바탕으로 정비활

동을 실시하게 된다. 예방정비 활동은 장비 전체에 대한 예방정비와 개별 부품에 대한 예방정비로 나눌 수 있다. 전자의 정비 활동은 정비 주기에 도달된 장비의 가동을 중지하고 장비 전체를 정비하는 방법이고, 후자의 경우 장비의 각 부품이 실제 사용된 시간을 파악하여 부품별로 정비를 실시하는 방법이다. 장비 전체에 대한 정비 활동은 여유장비가 있을 때 가능한 정비 활동으로서 컨테이너 크레인과 같은 고가의 장비는 여유분이 충분하지 않으므로 후자의 정비 활동이 보다 적절하다고 볼 수 있다. 예방정비의 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.

컨테이너 크레인에 대한 고장 및 예방정비 활동에 관한 자료를 살펴보면 고장 수리 보다는 예방정비에 의한 수리 시간이 더 길다는 것을 알 수 있다. 전문가의 의견으로는 고장 수리는 대개 2 시간 이내에 정비가 이루어지고 예방정비의 경우는 와이어로프 교체 작업을 제외하고는 대개 3~4 시간 정도가 소요된다고 한다. 기존의 물류시스템에서 정비 활동의 목적은 주로 예방정비 활동으로 인해 투입되는 비용과 그로 인한 이익의 균형을 최적화시키는 것이 주된 목적이었다. 하지만 컨테이너 터미널이라는 물류시스템은 취급하는 물동량이 많아 그 규모가 크고, 취급 장비 또한 고가의 장비이기 때문에 터미널 운영 중 장비의 고장이 발생한다면 장비 자체의 수리비 또한 큰 비용이 소요되며, 그로 인해 발생하는 컨테이너 취급의 지연과 선박의 체류 등으로 나타나는 작업 생산성의 감소는 엄청난 금전적인 손실을 발생시킨다. 이러한 손실은 예방정비 수행 시 발생하는 비용보다는 훨씬 크다고 할 수 있다.

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 손실을 초래할 수 있다. 따라서 예방 정비 실시 빈도와 생산성의 관계를 잘 파악하여 적절한 예방 정비 주기를 파악하는 것은 터미널 장비의 높은 신뢰도를 보전하기 위한 중요한 업무이며, 생산성 향상을 가져다주는 중요한 요소로 인식된다.

본 논문에서는 터미널의 핵심 하역 장비인 컨테이너 크레인의 최적의 예방 정비 주기를 산출하고 정비 활동을 실시함에 있어서 크레인의 작업에 영향을 주지 않는 범위로 정비 일정을 조정한다.

3. 기초 데이터의 분석

3.1 컨테이너 크레인의 구조 및 구성품 기능 분석

컨테이너 크레인은 다 부품으로 구성된 시스템이므로 여러 가지 종류의 고장이 발생한다. 그러므로 장비 구조를 명확히 표현하는 것이 중요하다. 우선 컨테이너 크레인의 주요 구성품을

정의하였다. 컨테이너 크레인의 전체 구조와 주요 구성품은 Fig. 1과 같다.

컨테이너 크레인의 고장을 정의하기에 앞서 각 구성품이 가지는 기능을 분석한 결과는 아래의 Table 1과 같다. 크레인의 구조와 기능분석을 통하여 다부품/복합 시스템의 고장을 보다 명확하게 정의할 수 있다.

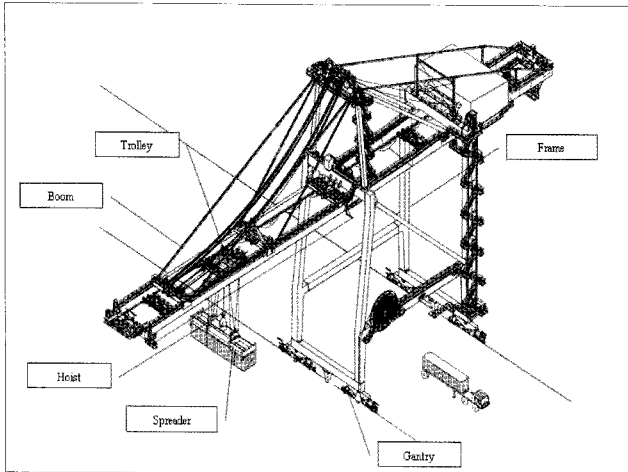


Fig. 1 The structure and components of container crane

Table 1 Function of each components of container crane

시스템	구성품	기능
Container Crane	Boom Part	선박과 충돌을 피하기 위하여 선박이 선석에 접안 전에는 붐을 들고 있는 상태를 유지하다가 접안이 끝나면 붐을 내려 작업을 시작함
	Operator's Cabin	스프레더의 수직 위에 위치하며 운전자가 크레인을 조작하는 곳
	Main Frame	컨테이너 크레인의 구조물
	Gantry Part	컨테이너 크레인을 좌우로 이동하게 하는 장치, 보통 레일 구조임
	Hoist Part	컨테이너를 들어올리거나 내리는 역할을 하는 장치
	Spreader Part	컨테이너를 집어주는 장치
	Trolley Part	작업을 위하여 전진 및 후진으로 이동하게 하는 장치

3.2 예방정비 정비 데이터의 분석

컨테이너 터미널에서 장비의 예방정비 활동은 모든 부품에 대해서 이루어진다. 하지만 모든 부품에 대해서 정비 주기를 파악하고 계획하여 정비 활동을 실시한다는 것은 현실적으로 불가능하며, 현장에서는 대표적인 예방정비 활동에 대해서만 스케줄을 생성하고 계획한다. 월말에 계획된 정비 목록 이외의 부품에 대해서는 일상적인 점검과 장비의 이상상태에 따라서 정

비 활동을 실시한다.

컨테이너 크레인 에 대한 최적 정비 주기를 결정하기 위해서 현재 실시하고 있는 예방정비의 목록 및 주기 그리고 정비 소요 시간과 정비 인원의 수를 조사하였다. 현재 실시 중인 예방정비 활동의 경우 대상 부품이 사용한계시간에 도달한 경우 한계 도달 시의 해당하는 주차에 장비의 유휴 시점에 정비를 실시하고 있다. 정비 활동 목록에 대해서는 약 10가지의 계획 정비를 실시하고 있는 것으로 나타났다.

현재 실시중인 정비 대상 부품에 대하여 통계 분석 프로그램인 미니탭을 이용하여 고장 분포 및 관련 수명 모수를 추정하였다. 먼저 데이터의 적합 분포를 알아보았으며, 해당 분포의 수명 모수를 추정하였다. 분포 적합성의 여부 및 모수 정보는 Table 2에 표기하였다.

Table 2 Fitness distribution and parameter estimates

부품명	적합 분포	모수 추정량
켄트리 안전시스템	정규 분포(와이블)	척도: 6310, 형상: 1.43
켄트리 DC 모터	로그 로지스틱(와이블)	척도: 3896, 형상: 1.18
케이블 릴	와이블 분포(와이블)	척도: 4347, 형상: 1.05
호이스트 DC 모터	로그 로지스틱(와이블)	척도: 3896, 형상: 1.18
호이스트 와이어	로그 정규분포(와이블)	척도: 1332, 형상: 2.37
Load Cell 시스템	로그 정규분포(와이블)	척도: 1726, 형상: 1.14
헤드블럭	와이블 분포(와이블)	척도: 8647, 형상: 1.70
트로리 DC 모터	로그 로지스틱(와이블)	척도: 3896, 형상: 1.18
트로리 와이어	정규 분포(와이블)	척도: 2455, 형상: 1.05
카테나리 와이어	로그 정규 분포(와이블)	척도: 1584, 형상: 8.45

Table 2와 같이 부품별 수명 분포는 와이블 분포, 로그 정규 분포, 정규 분포, 로그 로지스틱 분포로 추정되었으나, 신뢰성 분석 시 자주 사용되는 와이블 분포로 가정하고 수명 모수를 추정하였다. 장비 구조 및 기능 분석, 그리고 예방정비 데이터 분석을 통한 수명 정보는 예방정비 최적 주기 결정을 위한 데이터로 사용된다.

4. 부품별 최적 예방정비 주기 결정

4.1 시뮬레이션 및 유전자 알고리즘을 이용한 최적화

컨테이너 크레인의 최적 예방정비 주기를 산출하기 위하여 유전자 알고리즘을 이용하여 해를 구하고 객체지향 시뮬레이션을 이용하여 해를 평가한다. 시뮬레이션을 위한 모형과 작업과 유휴, 고장과 예방정비에 대한 가정은 Table 3과 같다.

Table 3 Assumptions for simulation

대 상	가 정
장비의 작업과 유휴	장비의 작업과 유휴는 서로 독립
	작업 시간 및 유휴 시간은 지수분포를 따름
	고장은 최하위 부품단위에서 발생
고 장	고장까지의 시간은 와이블 분포 (Wei(a, β)) 를 따름
	고장은 작업 중에만 발생
	최하위 부품에만 정비가 존재
	고장 정비와 예방정비는 완전 수리 모형으로 가정
정 비	모든 정비 시간은 지수분포를 따름
	예비품과 정비원은 항상 가용하여 고장 즉시 정비수행
	예방정비는 수명기반 교체 정책

유전자 알고리즘에서 사용되는 유전자 (Gene) 의 구성은 예방정비 대상 부품의 갯수이며, 각 유전자는 4자리 정수로 구성된다. 이는 해의 범위를 1~9999시간으로 두어 최소한 일 년 중 한번은 정비가 이루어져야 함을 의미한다. 따라서 총 염색체(Chromosome)의 개수는 4×총 정비 작업수로 구성된다. 모집단은 100, 교차는 이점교차, 그리고 선정(Selection)방식은 Top-pop-size방식으로 설정하였다. 최적해는 시뮬레이션 종료 시점에서 적합도(Fitness)가 가장 큰 염색체가 선택된다. 한 염색체의 적합도는 시뮬레이션을 이용하여 다음과 같이 추정한다.

$$\text{적합도(Fitness)} = \frac{\text{시뮬레이션에서 가용도의 총합}}{\text{시뮬레이션 반복 횟수}} \quad (1)$$

$$\text{가용도(Availability)} = \frac{\text{장비의 가동시간}}{\text{장비의 가동시간} + \text{정비 시간}} \quad (2)$$

위와 같은 방법으로 산출된 예방정비 일정은 시뮬레이션 상황에서 수명(Age) 시간 기반으로 산출된 결과이므로, 정비 일정을 계획하기 위해서는 달력(Calendar) 시간으로 변환시켜줘야 한다.

$$\begin{aligned} \text{Calendar Solution} = \\ \text{Optimal Solution} \times \frac{\text{Avg. Work Time} + \text{Avg. Idle Time}}{\text{Avg. Work Time}} \end{aligned} \quad (3)$$

4.2 연간 및 월간 예방정비 계획

4.1 절에서는 다 단계 다 부품으로 이루어진 컨테이너 크레인 단일 장비의 최적 예방정비 일정을 결정하는 방법에 대해 설명하였다. 하지만 실제 컨테이너 터미널에서는 동일한 구조를 가지는 여러 대의 장비가 가동되고 있다. 따라서 하나의 장비에 대해 정비 주기가 결정되면, 여러 대의 장비에 대한 예방정비

일정이 계획되어야 한다. 크레인 한 대에 대해 산출된 최적 주기를 여러 대의 장비로 적용하기 위해 최적 주기와 개별 부품의 현재 실 사용시간의 차이로 첫 번째 예방정비를 결정하고 다음부터는 부품별 최적주기를 더해가면서 일정을 계획하도록 한다.

[기호]

T_j : j 부품의 결정된 최적 예방정비 주기

A_{ij} : i 장비 j 부품의 현 시점까지의 사용시간

매년 첫 번째 예방정비 주기 : $T_j - A_{ij}$

그 이후의 예방정비 주기 : $(T_j - A_{ij}) + T_j$

여러 장비에 대한 개별 부품의 연간 예방정비 일정이 확정되었다면 실제로 월간 예방정비 일정 조정이 필요하다. 앞서 제시한 연간 예방정비계획은 크레인의 작업과 가용정비인원의 제약은 고려하지 않았다. 따라서 실제 크레인의 작업 일정이 수립되면 예방정비 일정과 겹쳐지는 상황이 발생할 수 있을 것이다. 만약 크레인의 작업 중에 장비 가동을 멈추고 예방정비를 실시하게 된다면 예정된 작업 완료 시점에 작업을 완료하지 못하여 터미널 운영에 있어서 커다란 손실을 초래할 수 있다. 이러한 상황에서는 컨테이너 크레인의 예방정비 실시 시점을 작업 시작 전이나 작업 종료 이후로 두어야 할 것이다.

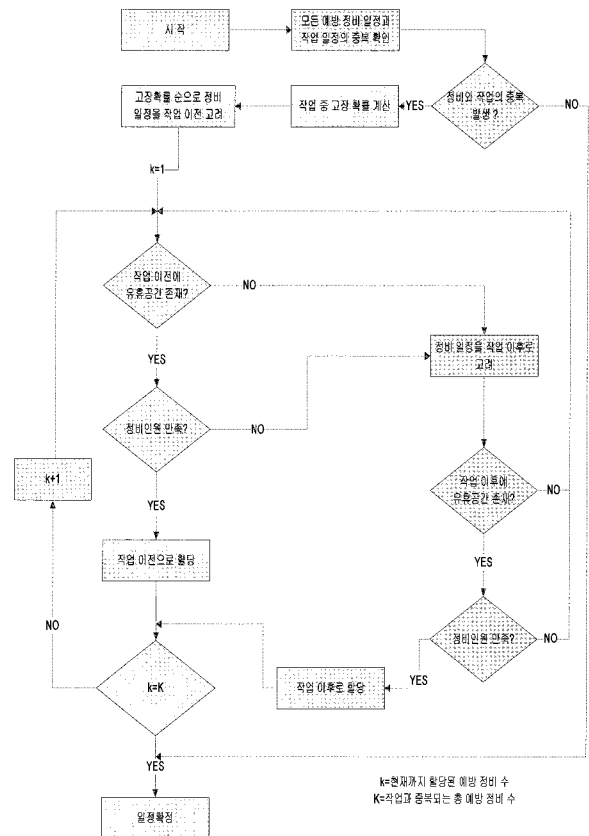


Fig. 2 The allocation method for preventive maintenance using failure probability

본 연구에서는 예방정비 일정과 크레인의 작업이 중복되었을 경우, 작업 중 고장 날 확률이 높은 부품을 우선순위로 작업이전에 예방정비를 할당하는 방법과, 초기 연간 계획에서 제시한 최적해의 이동을 최소로 하는 유전자 알고리즘을 개발하였다.

4.3 부품의 고장확률 우선순위 방법

장비 가용도를 높이기 위해서는 정해진 예방정비 실시 시점보다 앞서 정비를 실시하면 사전에 고장 확률을 줄여서 장비 가용도를 높일 수 있다. 하지만 너무 과도하게 일정을 앞당기면 다음 예방정비 시점과의 시간 차가 많이 생겨 그 사이의 고장 발생 확률은 다시 커지게 된다. 또한 작업 일정과 예방정비 일정이 중복된 경우 모든 예방정비를 작업 시작 이전에 실시한다고 하면 예방정비를 실시하는데 있어서 일일 가용정비인원을 초과하는 일이 발생할 수 있다. 따라서 예방정비 대상 부품이 작업 중 고장 날 확률을 계산하여 고장 발생 확률이 높은 부품을 우선적으로 작업 이전에 할당하고, 가용한 정비 인원을 넘어서게 되는 상황이 발생하면 크레인의 작업 종료 시점 이후에 예방정비를 할당한다. 또한 고장 발생 확률이 높은 정비 대상부품이라 할지라도 작업 시작 이전에 예방정비를 실시할만한 시간이 없다면 그 또한 작업 종료 이후에 실시하도록 한다. Fig. 2와 같은 방법으로 해당 월의 모든 장비의 정비활동에 대해서 고장확률을 계산하여 정비를 할당한다. 실제 사례를 적용하기 위해서는 부품의 현재까지의 실사용시간을 정확히 알 수 없으므로 역변환 방법을 이용하여 현재까지의 실 사용시간을 발생하도록 한다. 역변환 방법으로 실 사용시간을 발생하는 방법은 아래와 같다. 해당 모수 추정 은 미니탐을 이용하였으며, 0 ~1 사이의 수 범위에서 현재 시점까지의 사용시간을 발생시킨다.

[기호]

η : 척도 모수
 β : 형상 모수

$$U \sim U(0, 1)$$

$$\text{현재까지 사용시간(Age)} = \eta(-\ln U)^{\frac{1}{\beta}}$$

4.4 유전자 알고리즘을 이용한 방법

연간 예방정비 계획의 일정 조정 문제를 유전자 알고리즘을 사용해서 접근해 보고자 한다. 하지만 가용도 최대화 문제를 목적으로 하기에는 다 부품 복합구조 시스템의 가용도를 수리적으로 계산하기가 상당히 어려우므로 연간계획에서 제시된 해를 최대한 유지하는 것을 목적으로 하며, 제약 조건은 정비 인원, 작업과 예방정비 일정의 중복으로 한다. 문제를 해결하기 위한 수리모형은 아래와 같다.

[기호]

WS_{ik}^- : i 장비의 k 번째 작업 시작 시점
 WS_{ik}^+ : i 장비의 k 번째 작업 시작 종료 시점
 MS_{ij}^- : i 장비의 j 번째 계획된 예방정비 시작 시점
 MS_{ij}^+ : i 장비의 j 번째 변경된 예방정비 시작 시점
 U_j : j 부품의 예방정비 소요시간
 M_j : j 부품의 예방정비 소요인원
 R : 전체 가용한 정비 인원

$$WS_{ik}(d) : \begin{cases} 1 = WS_{ik}^- \leq d \leq WS_{ik}^+ \\ 0 = otherwise \end{cases}$$

$$A_{ij}(d) : \begin{cases} 1 = MS_{ij}^- \leq d \leq MS_{ij}^+ + U_j \\ 0 = otherwise \end{cases}$$

d : 1, 2, 3, ..., 720 (30일 시간 환산)

$$\text{Min } \sum_i \sum_j |MS_{ij}^+ - MS_{ij}^-| \quad (4)$$

$$\text{subject to } \sum_i \sum_j M_j \cdot A_{ij}(d) \leq R \quad \text{for } d=1, 2, 3, \dots, 720 \quad (5)$$

$$\sum_{d=MS_{ij}^-}^{MS_{ij}^+ + U_j} WS_{ik}(d) = 0 \quad \text{for } k=1, 2, 3, \dots, K \quad (6)$$

목적함수인 식(4)는 초기에 결정된 연간 계획에서의 예방정비 시작 시점과 변경된 예방정비 시작 시점의 차이를 최소화 한다는 것이다. 즉 예방정비 일정 변경을 최소화 하는 것이다. 제약식(5)는 예방정비가 할당된 시점에서 정비인원의 제약을 의미하는 것이며, 제약식(6)은 모든 예방정비에 대하여 크레인의 작업에 영향을 미치지 않아야 한다는, 즉 크레인의 유희에만 예방정비를 실시할 수 있다는 것이다.

유전자 알고리즘을 위한 염색체는 예방정비의 시작 시점으로 구성하고 염색체의 크기는 해당 월의 총 예방정비의 횟수이다. 초기해의 생성은 1 ~720 시간 사이에서 발생하고, 교차는 이점 교차, 선택 방식은 Top-pop-size 방식으로 한다. 적합도 함수는 목적함수로 평가하되, 제약을 벗어나는 경우 패널티를 부여하여 선정에서 탈락되게 한다.

5. 적용 사례

5.1 시뮬레이션과 유전자 알고리즘을 이용한 최적 예방정비 주기

주어진 입력 값에 의한 실험을 통하여 컨테이너 크레인의 최적 예방정비 주기를 산출하고자한다. 시뮬레이션을 위한 입/출력 데이터는 아래 Table 4에 정의한다.

Table 4 Input and output data for simulation

입력데이터	출력데이터
최하위 부품의 고장 분포 작업시간 분포, 유휴시간 분포 고장정비 소요시간 분포 예방정비 소요시간 분포 모든 예방정비 기준 시뮬레이션 수행 시간 및 반복 수	총 작업 시간 총 고장 시간 총 유휴 시간 가동률 가용도 예방정비 주기

또한 최적해를 제안해주는 유전자 알고리즘을 위하여, 교체률, 돌연변이율 그리고 세대 수와 모집단의 수를 입력하게 된다. 본 논문에서의 실험 조건은 시뮬레이션 수행시간 10,000시간으로 반복 10회 실시하였다. 교차율은 0.4, 돌연변이율은 0.5, 돌연변이는 각 비트단위로 수행되고 해의 0값 방지를 위해 수행 후 한 정비의 주기가 0인 경우 마지막 비트의 값은 1이 되도록 설정하였고 각 비율은 입력받도록 하였다. 세대수 100세대 진화도 하여 크레인의 예방정비 주기를 산출하고자 한다.

시뮬레이션과 유전자 알고리즘의 결과로 제안된 예방정비 주기는 Table 5와 같으며, 이때의 총작업 시간은 8,258시간, 총 가동시간은 6,031시간 그리고 총 예방정비 시간은 117시간으로 나타났다. 이때의 장비 가용도는 0.73으로 평가되었다.

Table 5 Optimal preventive maintenance period of container crane(unit: hour)

부품명	정비 내용	기존 정비 주기	제안된 정비 주기
켄트리 안전 시스템	점검	4,500	1,372
켄트리 DC 모터	수리	4,380	8,009
케이블 릴	수리	4,500	4,207
호이스트 DC 모터	수리	4,380	3,844
호이스트 와이어로프	교환	1,500	1,890
Load Cell 시스템	수리	800	4,947
헤드블럭	교환	2,000	8,161
트롤리 DC 모터	수리	4,380	5,076
트롤리 와이어로프	교환	1,100	1,047
카테나리 와이어로프	교환	900	1,665

5.2 연간 및 월간 예방정비 일정

컨테이너 크레인의 부품 별 예방정비를 결정하였으면 현재 시점까지의 부품의 사용시간과 최적주기를 이용하여 여러 대 장비의 연간 일정을 세운다. 4. 2절에서 언급한 방법으로 연간 계획을 실시하는데 있어서는 정비인원과 컨테이너 크레인의 작업 상황을 고려하지 않는다. 따라서 현재 계획된 연간 일정은 실제 예방정비를 실시하는데 있어서 불가능한 일정이며, 실제 가능한 일정으로 조정해줄 필요가 있다. 본 연구에서는 부산항의 실제 한달 간의 선박 입/출항 정보를 가지고

예방 실시 시점을 조정해보고자 한다. 본 논문에서는 선석은 5선석, 총 크레인수는 15대로 하며, 각 선석별로 3대의 크레인이 할당되어 있으며, 선박이 입항과 출항에 대해 동시에 작업을 시작하고 끝낸다고 가정한다. 컨테이너 크레인의 모든 예방정비활동은 작업에 영향을 주지 않는 유휴시간에만 이루어져야 하므로 작업과 중복이 되는 예방정비 일정은 조정되어야 한다. Table 6은 예방정비와 중복되는 작업에서 부품의 고장확률을 계산한 결과이다.

5.3 부품의 고장확률 우선 순위방법

여러 가지 중복된 작업 중 조정 우선순위를 결정하기 위해 각 부품별 고장확률을 계산한 결과는 Table 6과 같다. 작업과 중복된 예비 대상 부품의 작업중 고장발생 확률을 나타낸 것이다.

월간 예방정비 일정을 조정한 결과 개별 장비의 부품별 실시되는 예방정비의 시작시점의 변화는 Table 7과 같으며, *로 표시한 시간은 변경된 예방정비 시작시점을 의미한다. 총 15대의 컨테이너 크레인의 총 45가지 정비 활동이 계획되었으며, 45개의 예방정비 작업 중 25개의 정비 계획이 작업 일정과 겹치게 되었다. 25개의 예방정비에 대해서 고장확률을 우선으로 작업 이전에 예방정비 시작시점을 변경하였다.

Table 6 The failure probability of spare parts between works

장비 호기	부품명	작업시작시간	작업종료시간	고장확률
QC102	안전 시스템	4,099	5,007	0.095000
QC401	호이스트 와이어	872	890	0.012490
QC101	호이스트 와이어	736	753	0.011000
QC502	호이스트 와이어	660	668	0.004500
QC201	트롤리 와이어	690	703	0.004000
QC403	트롤리 와이어	958	972	0.003930
QC403	켄트리 DC 모터	396	414	0.003800
QC503	트롤리 와이어	356	367	0.003740
QC401	켄트리 DC 모터	2,338	2,356	0.002870
QC201	켄트리 DC 모터	1,694	1,709	0.002700
QC103	트롤리 와이어	1,624	1,636	0.002600
QC202	트롤리 와이어	1,989	2,002	0.002460
QC102	트롤리 와이어	746	754	0.002420
QC101	켄트리 DC 모터	2,001	2,014	0.002200
QC203	트롤리 와이어	1,121	1,129	0.002100
QC301	켄트리 DC 모터	2,995	3,007	0.001700
QC101	트롤리 와이어	765	773	0.001561
QC302	호이스트 와이어	2,239	2,251	0.001400
QC503	호이스트 와이어	141	154	0.001130
QC401	안전 시스템	3,889	3,899	0.001120
QC102	헤드블럭	2,634	2,646	0.001000
QC503	헤드블럭	947	959	0.000490
QC202	헤드블럭	1,459	1,467	0.000430
QC103	호이스트 와이어	2,686	2,697	0.000250
QC303	트롤리 와이어	630	642	0.000120

Table 7 The modification of preventive maintenance schedule by priority of failure probability (*: start time in changed schedule)

장비 코드	부품명	조정 전 (시)	조정 후 (시)
QC101	트롤리 와이어	32	41*
QC401	켄트리 DC 모터	32	1*
QC401	호이스트 와이어	32	1*
QC301	호이스트 와이어	56	56
QC203	호이스트 와이어	80	80
QC401	트롤리 와이어	104	104
QC402	호이스트 DC 모터	104	104
QC403	케이블 릴	104	104
QC103	호이스트 와이어	128	120*
QC201	호이스트 와이어	128	128
QC203	트롤리 와이어	176	172*
QC501	트롤리 와이어	176	176
QC101	켄트리 DC 모터	200	171*
QC302	안전 시스템	200	200
QC503	호이스트 와이어	200	186*
QC102	트롤리 와이어	224	210*
QC202	안전 시스템	224	224
QC501	호이스트 와이어	248	248
QC303	안전 시스템	272	272
QC101	호이스트 와이어	320	315*
QC403	켄트리 DC 모터	320	313*
QC102	안전 시스템	368	365*
QC203	안전 시스템	392	392
QC502	호이스트 와이어	392	412*
QC303	케이블 릴	416	416
QC502	켄트리 DC 모터	416	416
QC402	호이스트 와이어	440	440
QC402	트롤리 와이어	440	440
QC102	호이스트 와이어	464	464
QC301	호이스트 DC 모터	464	458*
QC302	호이스트 와이어	464	459*
QC303	트롤리 와이어	464	473*
QC201	켄트리 DC 모터	488	482*
QC303	호이스트 와이어	512	512
QC201	트롤리 와이어	536	528*
QC202	트롤리 와이어	536	528*
QC503	트롤리 와이어	536	521*
QC202	헤드블럭	560	559*
QC103	트롤리 와이어	584	578*
QC401	안전 시스템	584	581*
QC101	안전 시스템	632	632
QC403	트롤리 와이어	656	642*
QC403	안전 시스템	680	680
QC503	헤드블럭	704	695*
QC102	헤드블럭	728	721*

5.4 유전자 알고리즘을 이용한 방법

유전자 알고리즘을 위한 입력데이터는 Table 8과 같으며, 세대수와 돌연변이율, 교차율은 데이터를 변경시켜 가면서 실험한 결과 돌연변이율은 0.5, 교차율은 0.4에서 가장 좋은 해를 찾아 주었다.

Table 8 Input data for genetic algorithm

입력 변수	입력데이터
개체수	100
세대수	1000
돌연변이율	0.5
교차율	0.4

유전자 알고리즘을 이용하여 월간 예방정비 일정을 조정 한 결과는 Table 9와 같다.

Table 9 The result of monthly preventive maintenance schedule using genetic algorithm

장비호기	부품명	조정 전	유전자 알고리즘	고장확률 우선
QC101	트롤리 와이어	32	42	41
QC101	켄트리 DC 모터	200	208	171
QC101	호이스트 와이어	320	313	315
QC101	안전 시스템	632	631	632
QC102	트롤리 와이어	224	225	210
QC102	안전 시스템	368	365	365
QC102	호이스트 와이어	464	466	464
QC102	헤드 블럭	728	720	721
QC103	호이스트 와이어	128	119	120
QC103	트롤리 와이어	584	578	578
QC201	호이스트 와이어	128	126	128
QC201	켄트리 DC 모터	488	482	482
QC201	트롤리 와이어	536	528	528
QC202	안전 시스템	224	225	224
QC202	트롤리 와이어	536	528	528
QC202	헤드 블럭	560	557	559
QC203	호이스트 와이어	80	78	80
QC203	트롤리 와이어	176	171	172
QC203	안전 시스템	392	392	392
QC301	호이스트 와이어	56	56	56
QC301	호이스트 DC 모터	464	455	458
QC302	안전 시스템	200	203	200
QC302	호이스트 와이어	464	459	459
QC303	안전 시스템	272	272	272
QC303	케이블 릴	416	414	416
QC303	트롤리 와이어	464	457	473
QC303	호이스트 와이어	512	512	512
QC401	켄트리 DC 모터	32	40	1
QC401	호이스트 와이어	32	39	1
QC401	트롤리 와이어	104	105	104
QC401	안전 시스템	584	579	581
QC402	호이스트 DC 모터	104	105	104
QC402	호이스트 와이어	440	440	440
QC402	트롤리 와이어	440	439	440
QC403	케이블 릴	104	104	104
QC403	호이스트 DC 모터	320	313	313
QC403	트롤리 와이어	656	637	642
QC403	안전 시스템	680	680	680
QC501	트롤리 와이어	176	176	176
QC501	호이스트 와이어	248	253	248
QC502	호이스트 와이어	392	413	412
QC502	켄트리 DC 모터	416	417	416
QC503	호이스트 와이어	200	186	186
QC503	트롤리 와이어	536	539	521
QC503	헤드 블럭	704	709	695

Fig. 3은 유전자 알고리즘에서 모수 변화에 따라 목적함수의 값이 변화하는 것을 보여준다. 여기서 목적함수는 초기 연간 계획의 일정에서 변화를 최소화 하는 것이다.

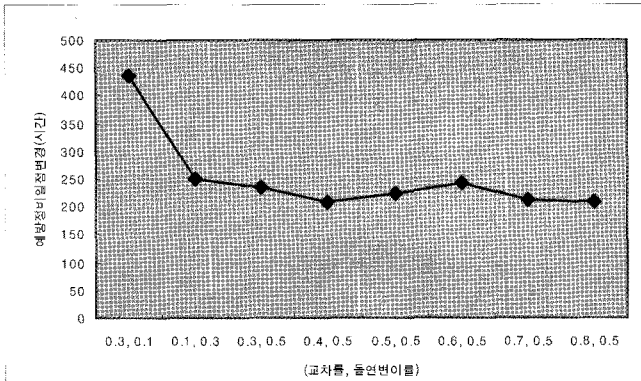


Fig. 3 The change of objective function by parameters of genetic algorithm

위의 결과와 같이 고장확률 우선조정 방법과 유전자 알고리즘을 이용한 조정 방법을 비교해보면 유전자 알고리즘을 사용한 방법이 제시된 고장확률 우선조정 방법보다 예방정비 시작 시점을 약 63시간 정도 적게 변경시켰다. 연간 계획에서 제시한 최적 예방정비 일정을 최대한 유지하는 것이 장비 가용도를 최대로 할 수 있다는 가정 하에서는 유전자 알고리즘이 고장확률 우선조정 방법보다 보다 효율적인 방법임을 알 수 있다.

6. 결 론

컨테이너를 이용한 물류가 지속적으로 증가되고 있고, 이에 따른 컨테이너 물류의 중요성이 높아지면서 운영 최적화에 관한 연구뿐만 아니라 항만 장비의 고 신뢰성을 위한 연구 또한 중요시 되고 있다. 본 논문에서는 컨테이너 터미널의 핵심 하역 장비인 컨테이너 크레인의 예방정비 일정을 수립하기 위하여 실제 터미널에서 수행하였던 고장 및 예방정비 데이터를 분석하고 예방정비 항목에 대해 부품별 수명 분포와 모수를 추정하였다. 다 부품 다 단계로 구성된 컨테이너 크레인의 구조를 명확히 정의하기 위해서 크레인을 트리 구조로써 표현하였다. 그리고 시뮬레이션 시스템과 유전자 알고리즘으로 최적 예방정비 주기를 결정하고 한 대의 장비로 구해진 최적 정비 주기를 동일한 복수 장비로 할당하여 연간 예방정비 일정을 계획하였다. 그리고 컨테이너 크레인의 작업과 예방정비 일정을 비교하여 크레인의 작업에 영향을 주지 않는 범위에서 월간 예방정비 일정을 수립하기 위하여 유전자 알고리즘을 개발하였다.

향후 연구 과제로는 예방정비 주기를 결정하는 시뮬레이션 시스템에서 단순히 장비의 작업과 유휴, 고장, 예방정비만을 고려할 것이 아니라 실제 터미널에서 운영되는 상황, 즉 선박의 도착과 이송 장비의 이동 및 야드 크레인의 작업과 고장까지 반영한 시뮬레이션 연구로 확장되어야 할 것이다.

후 기

이 논문은 2008년 교육과학기술부로부터 지원받아 수행된 연구임(지역거점연구사업/차세대물류IT기술연구사업단)

참 고 문 헌

- [1] 김환성, 김영호, 잔록황선(2006), "선박작업 생산성 향상을 위한 랜트리 크레인의 고장분석 및 예방보진 주기 결정에 관한 연구", 2006 한국항해항만학회 추계학술대회논문집, pp.339-344.
- [2] 윤원영, 김귀래, 하영주, 손범신, 김혜정(2006), "컨테이너 터미널의 RAM향상을 위한 관리시스템", IE Interfaces, 제19권, pp.245-254.
- [3] 윤원영, 손성민, 김종운(2000), "신뢰성기반 정비를 위한 시뮬레이션시스템개발", IE Interfaces, 제13권, pp.521-527.
- [4] 윤원영, 이윤희, 하영주, 김귀래, 손범신(2006), "Transfer Crane의 고장 및 정비 표준화", 한국항해항만학회지, 제30권 제6호, pp.525-531.
- [5] 한근조, 전영환, 심재준, 한동섭, 김병진(2002), "부산항 하역 장비에서 발생하는 고장형태와 예방대책", 한국항해항만학회, 제1권 제1호, pp.189-196.

원고접수일 : 2009년 4월 15일

심사완료일 : 2009년 8월 28일

원고채택일 : 2009년 8월 28일