

자동화 컨테이너 터미널에서 AGV 교착 방지와 회귀 분석을 이용한 경로 선정 방안

전진표* · 류광렬** · 윤항묵***

* 부산대학교 컴퓨터공학과 대학원, ** 부산대학교 컴퓨터공학과 교수, *** 동의대학교 도시공학과 부교수

A Deadlock Avoidance Method and a Regression-Based Route Selection Scheme for AGVs in Automated Container Terminals

Jin-Pyo Jun* · Kwang-Ryel Ryu** · Hang-Mook Yoon***

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

*** Department of Urban Engineering, Donggeui University, Busan 614-714 Korea

요 약 : 본 논문은 AGV 주행 영역을 그리드 단위로 나누어 관리하는 자동화 컨테이너 터미널에서 AGV들 간의 교착을 방지할 수 있는 방안과 목적지까지의 예상 소요 시간이 짧은 경로를 효율적으로 선정할 수 있는 방안을 함께 제안한다. AGV들 간의 교착을 방지하기 위하여 그리드를 노드로 하여 AGV 주행 중 점유 순서의 선후를 연결한 그래프에서 교착 발생 가능성이 있는 강결합 요소를 파악한다. 운행 시에는 강결합 요소에 해당되는 그리드들에 AGV들이 진입하는 것을 통제함으로써 교착 발생을 방지한다. 이와 함께 AGV들 간의 간섭에 의한 지연까지 고려하여 목적지에 보다 일찍 도착할 수 있는 경로를 실시간에 선정할 수 있도록 주행 소요 시간을 추정할 수 있는 회귀 분석 함수를 생성하고 활용하는 방안을 함께 소개한다. 제안한 방안을 시뮬레이션 한 실험 결과 48시간동안 교착 발생 없이 AGV들을 운행할 수 있었으며, 회귀 분석 함수를 이용하여 선정된 경로 이용 시 QC별 AGV 방문 횟수를 2~10회 향상시킬 수 있었다.

핵심용어 : AGV, 교착 방지, 경로 선정, 그리드 제어 방식, 자동화 컨테이너 터미널

Abstract : This paper presents a deadlock avoidance method for AGVs in automated container terminals. For a more efficient use of AGV traveling area, we divided the area into small-sized grids not enough to cover a whole AGV. Our deadlock avoidance method controls AGVs by identifying strongly connected components(SCCs) in a graph derived from the paths of AGVs on the grids. Also in this paper we suggest a route selection scheme which selects a route by predicting and comparing travel times of candidate routes by using a regression formula. Simulation experiments have shown that the proposed method can control AGVs for 48 hours without deadlocks and the count of AGV visits per QC is increased by 2~10 an hour.

Key words : Automated guided vehicle, Deadlock avoidance, Routing, Grid-based control, Automated container terminal

1. 서 론

자동화 컨테이너 터미널에서 생산성을 높이기 위해서는 선석(berth)과 장치장(yard) 사이를 오가며 컨테이너 운송을 담당하는 무인 유도 자동차(Automated Guided Vehicle; AGV)들이 지정된 시간에 목적지에 효율적으로 도달할 수 있어야 한다. 이를 위하여 AGV 운영 시스템은 터미널 운영 시스템의 다른 세부시스템들부터 요청 받은 컨테이너 이송 작업들을 가능한 효율적으로 수행할 수 있도록 여러 AGV들을 제어하고 감독하는 기능을 수행한다.

AGV 운영 시스템의 주요 기능은 Table 1과 같이 작업 지

시, 주행 관리, 장비 관리의 크게 세 가지 측면으로 나눌 수 있다. 작업 지시 기능은 요청된 컨테이너를 이송할 AGV를 결정(dispatching)하고 AGV가 목적지까지 주행할 경로를 선정(routing)하는 세부 기능을 가지고 있다. 주행 관리는 경로가 설정되면 AGV가 효율적으로 주행할 수 있도록 AGV들 간의 충돌과 교착(deadlock)을 방지하는 기능을 수행한다. 장비 관리는 다른 AGV들의 주행을 방해하지 않도록 작업이 없는 AGV들을 대기 위치로 이동시키고 연료가 부족한 AGV들을 사전에 파악하여 연료 보급을 지시하는 기능을 포함하고 있다. 본 논문에서는 이 중에서 Table 1에서 회색으로 표시된 주행 관리 기능과 경로 선정 기능을 다루고자 한다.

* 대표저자 : 전진표(정회원), doume@korea.com 051)515-9308

** 정회원, krryu@pusan.ac.kr 051)510-2453

*** 종신회원, hmyoon@deu.ac.kr 051)890-1636

Table 1 Principal Functions of the AGV Operating System

기능	작업 지시	주행 관리	장비 관리
세부 기능	AGV 할당	충돌 방지	주차 지시
	경로 선정	교착 방지	연료 보급 지시

주행 관리는 AGV의 주행 영역을 어떻게 나누어 관리하느냐에 따라 큰 차이가 있다. 기존 연구들은 주로 존(zone) 단위로 주행 영역을 나누어 관리하였다(임, 2000 ; Evers and Koopers, 1996 ; Yeh and Yeh, 1998). 존 제어 방식은 AGV가 주행 가능한 모든 경로들을 존으로 분해하여 세분화하고 주행 경로상에 이어지는 존들은 링크(link)로 연결하여 그래프 형태로 표현한다. 하나의 주행 경로에서 교차로, 작업장 그리고 이들을 연결하는 트랙들은 각각 하나의 존으로 정의된다. 존 제어 방식은 비교적 교통 통제가 용이하지만 각 존에 진입할 수 있는 AGV의 수(일반적으로 1대)가 제한되어 AGV 운행 효율성이 떨어질 수 있다. 또한 운행 영역에 명시적이고 고정적인 경로들의 집합인 유도 경로(guide path)를 사전에 효율적으로 계획하여야 한다는 점이 터미널 설계 시 부담으로 작용한다. 즉, 유도 경로를 어떻게 설계하느냐에 따라 AGV 운행 효율이 달라질 수 있으며, 자동화 컨테이너 터미널과 같이 매일 매일의 작업 형태¹⁾와 작업량이 달라지는 경우에는 각 상황마다 최적의 유도 경로가 다를 수 있어 고정된 유도 경로를 사용하는 존 제어 방식은 자칫 AGV의 운행 효율을 떨어뜨릴 수 있다. 본 연구에서는 유도 경로의 형태에 관계없이 적용이 가능하고 AGV 주행 영역의 활용 효율도 높일 수 있도록 그리드(grid) 단위로 주행 영역을 나누어서 관리하는 방식을 따른다(이 등, 2003 ; Kap et al., 2004).

그리드 제어 방식은 AGV 주행 영역을 격자 형태의 그리드라는 작은 단위로 나누어 관리한다. 하나의 그리드는 AGV보다 크기가 작으므로 AGV는 주행 시 여러 개의 그리드들을 동시에 점유하게 된다. 이렇게 주행 영역을 작은 크기의 영역으로 잘게 나눌수록 공간 효율을 높일 수 있다. 하나의 그리드는 충돌을 방지하기 위하여 한 시점에 하나의 AGV만이 점유할 수 있도록 허용되며, 경로는 AGV가 목적지까지 주행할 때 점유하는 그리드들의 순서로 표현된다. AGV는 AGV 운영 시스템에 운행 경로상 다음에 점유할 그리드를 요청하고, 지나온 그리드에 대해서는 점유 해제를 요청한다. 이러한 방식으로 운행하는 과정에서 2대 이상의 AGV가 서로 상대방이 점유한 그리드를 요청하게 되면 어느 AGV도 더 이상 움직일 수 없는 교착 상태에 빠지게 된다. AGV 운영 시스템은 이러한 교착 상태를 실시간에 파악하여 회피할 수 있는 기능을 갖추고 있어야 한다. 본 논문에서는 교착 상태를 방지하기 위하여 AGV들의 경로를 그래프로 표현하고, 그래프에서 교착 발

생 가능성이 있는 강결합 요소(strongly connected component ; SCC)를 파악하여 이에 진입하려는 AGV들을 통제함으로써 교착을 방지하는 방안을 제안한다.

AGV 운영 시스템의 또 다른 주요 기능의 하나인 경로 선정 기능은 주어진 목적지까지 AGV가 주행할 효율적인 경로를 선정하는 것으로, 단순히 거리가 가장 짧은 경로를 선택하는 것이 반드시 효율적이라 말하기는 어렵다. 이는 동일한 길이의 경로라도 운행 중에 발생할 수 있는 교통 혼잡에 의한 지연 정도가 다를 수 있으며, 상황에 따라서는 다소 돌아가는 것이 목적지까지 도착할 때까지의 주행 소요 시간을 줄일 수도 있기 때문이다. 본 논문에서는 회귀 분석(regression)으로 주변 상황을 고려하여 후보 경로의 예상 소요 시간을 추정하고, 이를 이용하여 경로를 선정하는 방안을 제안한다.

시뮬레이션 실험 결과 본 논문에서 제안한 교착 방지 방안으로 48시간 동안 교착 없이 AGV들을 운행할 수 있었으며, 회귀 분석을 이용한 경로 선정 시 QC별 AGV의 시간당 방문 횟수를 2~10회 향상시킬 수 있었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서 관련 연구들을 소개하고, 3장에서는 자동화 컨테이너 터미널에서의 AGV 운행에 대하여 살펴본다. 4장에서는 본 논문에서 제안하는 교착 방지 방안을 자세히 소개하고 5장에서는 회귀 분석 기법을 이용한 경로 선정에 대하여 설명한다. 이어지는 6장에서는 제안한 방안들을 이용한 실험 결과를 정리하여 분석하고, 마지막 7장에서 결론과 향후 연구 과제로 매듭을 짓는다.

2. 관련 연구

교착 상태를 예측하고 방지하는 방법은 주로 존 제어 방식을 기반으로 연구되어 왔다(임, 2000; Rajeeva et al, 2003; Reveliotis, 2000). 존 제어 방식을 기반으로 한 교착 방지 방법은 공장 자동화와 같이 적은 수의 AGV를 사용하고 복잡하지 않은 유도 경로를 자연스럽게 설계할 수 있는 경우에 효율적으로 적용할 수 있다.

그리드 제어 방식에서 AGV 교착 방지에 관한 연구는 비교적 최근에 이루어졌다. (이 등, 2003)은 그리드 제어 방식에서 적용할 수 있는 AGV 운영 시스템의 구조를 소개하였으며, AGV들 간의 교착을 방지하기 위한 비교적 단순한 휴리스틱을 제안하였다. 이 방법은 AGV가 직진하는 경우와 회전하는 경우를 구분하여 앞으로 지나갈 고정된 수의 그리드들을 사전 예약하는 방식이다. 하지만 이 연구에서 제안한 방안은 주행하고 있는 AGV 자신 이외의 다른 AGV들을 고려하지 않기 때문에 계산 비용이 매우 적은 장점이 있지만 교착 상태를 완벽하게 방지할 수 없다.

(Kim et al., 2004)는 그리드 기반의 AGV 운영 시스템에서 교착을 방지할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 이 방법은 먼

1) 선박의 선석에서의 위치, 장치장에서 수출입 컨테이너들의 위치 분포, 투입할 AGV 대수 등이 이와 관련되어 있다.

저 각각의 AGV의 주행 경로 즉 그리드들의 점유 순서를 이용하여 그래프를 만들고, 그래프의 그리드들 간의 전이(transitive) 관계를 구하여 우선순위 테이블을 생성한다. 생성된 우선순위 테이블에 위배되지 않는지 개별 AGV의 그리드 예약 순서를 검사하여 위반 상황이 발견되면 해당 AGV의 그리드 예약 정책을 변경한다. 예를 들어 만약 AGV a가 그리드 1→2→3의 순서로 주행하고, AGV b는 2→1→4의 순서로 주행한다고 가정하자. AGV b는 AGV a의 1→2의 선후 순서 관계를 위배하게 되므로, AGV b는 2번 그리드를 점유할 때 1번 그리드를 함께 점유하도록 한다. 따라서 AGV b는 (1, 2)→4로 예약 정책을 변경하여 교착 상태를 방지한다. 하지만 이 연구에서 제안된 교착 방지 알고리즘은 그 계산 비용이 상당히 높고 본 논문에서 제시하고자 하는 회귀 분석을 이용한 경로 선정 방안을 실시간에 적용하기가 어렵다. 따라서 본 논문에서는 실시간에 교착 방지가 가능한 보다 복잡도가 낮은 알고리즘을 제안한다.

AGV 경로 선정과 관련된 기존 연구들을 살펴보면, (신 & 조, 2002)는 운행 중인 한 대의 AGV가 정지함으로 뒤따르는 AGV들이 함께 정지하여야 하는 상황을 줄이기 위하여 AGV들이 상호 협동하며 동적으로 경로를 변경할 수 있는 방안을 제안하였다. (오, 1995)는 공장자동화에서 AGV에 대한 최적 경로와 AGV 대수를 결정할 수 있는 방안을 제안하였다. 이 연구에서는 작업장과 작업장까지의 운반 물량과 거리를 쌍비교법과 정수 계획법을 적용하여 최적 경로를 결정하고 작업량이 주어졌을 때 필요한 최소의 AGV 대수를 산출할 수 있는 모델을 소개하였다. 이러한 방법은 AGV 대수가 적고 대안 경로의 수가 적으며 유도 경로가 비교적 단순한 경우에 적합한 방법이다.

AGV들 간의 간섭에 의한 지연까지 고려하여 목적지까지 소요시간이 적게 걸리는 경로를 결정하는 방안에 대한 연구로는 (Seifert et al., 1995)이 있다. 이 연구에서는 계층적 시뮬레이션을 이용하여 경로를 선정하는 방안을 제시하였다. 이 방안은 AGV의 경로를 선정하여야 할 때, 목적지까지의 여러 후보 경로들 각각을 대상으로 시뮬레이션을 수행하고, 얻어진 주행 시간을 이용하여 경로를 선정한다. 목적지까지의 후보 경로의 개수에 의해 수행하여야 하는 시뮬레이션 횟수가 결정되는데, 후보 경로의 수가 많거나, 시뮬레이션을 수행하는 것 자체가 부담스러운 경우에는 실시간으로 경로를 결정하기 어려워진다. 본 논문에서는 경로 선정을 위하여 시뮬레이션을 수행하지 않고 사전에 수집한 데이터를 이용하여 생성한 회귀 분석 함수를 이용하여 각 후보 경로를 평가한다.

3. 자동화 컨테이너 터미널

본 논문에서 실험 대상으로 가정한 자동화 컨테이너 터미널의 구조는 현재 개발 중인 광양항 무인 자동화 터미널의 건설 계획안을 바탕으로 하였다(한, 2001). 자동화 컨테이너 터미널의 일반적인 구조는 대략 Fig. 1과 같다. 그림에는 하나의 선박이 정박한 경우를 보이고 있다.

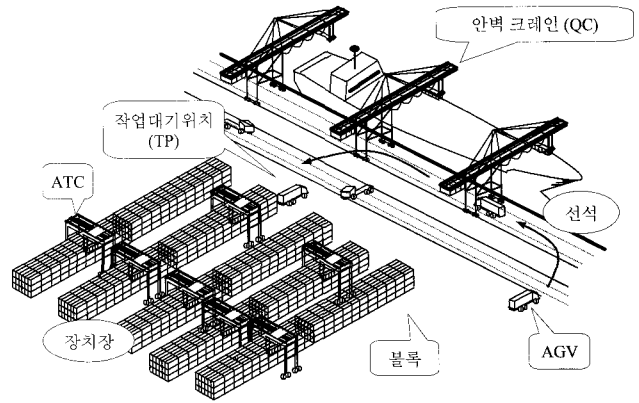


Fig. 1 A bird's-eye view of a typical automated container terminal

자동화 컨테이너 터미널은 해측의 선석과 육측의 장치장으로 구성된다. 선석에는 선박으로부터 수입 컨테이너를 내리거나 수출 컨테이너를 선박에 싣는 안벽 크레인(Quay Crane; QC)들이 있다. QC는 AGV에 선박의 컨테이너를 싣거나 들어낸다. 장치장은 수출입 컨테이너를 적재해두는 곳으로 자동 트랜스퍼 크레인(Automated Transfer Crane; ATC)을 이용하여 컨테이너를 AGV에 싣거나 내린다. 장치장은 여러 개의 블록으로 구성되며 각 블록마다 AGV가 정차할 수 있는 공간으로 작업대기 위치(Transfer Point; TP)가 있다. AGV가 TP에 도착하면 ATC는 AGV에 수출 컨테이너를 싣거나 양하 되어 운반된 수입 컨테이너를 AGV에서 집어 블록 내에 장치하게 된다. AGV들은 블록의 TP와 선석의 QC사이를 오가면서 컨테이너를 운반한다.

QC의 작업 처리량은 QC가 처리하는 양적화 컨테이너 개수로 컨테이너 터미널의 생산성과 직결되는 중요한 평가 요소이다. QC가 쉬지 않고 지속적으로 작업을 할 수 있기 위해서는 AGV들이 QC 및 ATC가 요구하는 시간 이전에 목적지에 도착해 있어야 한다. 결국 자동화 컨테이너 터미널의 생산성을 향상시키기 위해서는 AGV들을 효율적으로 운영할 수 있어야 하며 이는 AGV 운영 시스템의 목표이다.

3.1 AGV의 유도 경로

대부분의 자동화 컨테이너 터미널에서 사용하는 AGV는 주행 경로에 대한 특별한 제약 없이 운행이 가능하도록 설계되어 있다. 하지만 운행 경로를 제약하지 않고 AGV들을 운행하면 목적지까지의 거리가 짧은 경로를 설정할 수 있지만, 그만큼 교통 통제가 어려워지며 AGV들 간의 간섭에 의한 지연도 증가할 수 있다. 이러한 점은 실시간에 AGV들을 제어하고 운영하여야 하는 AGV 운영 시스템 측면에서 큰 부담이 된다. 따라서 AGV 주행 영역에 장치장의 TP와 선석사이를 오갈 수 있는 가상의 경로 즉 유도 경로를 만들고 AGV들은 그 경로를 따라서만 주행할 수 있도록 하는 방안을 채택한다. 본 논문에서는 Fig. 2와 같이 AGV들의 주행 영역을 나누고 각 레인마다 진행 방향을 미리 지정하였다.

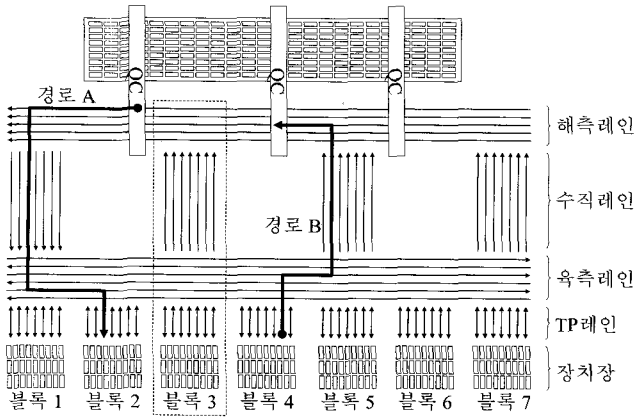


Fig. 2 Example routes and guide paths

선석 부분에는 총 5개 해측 레인을 두는데 이들 해측 레인에서는 오른쪽에서 왼쪽 방향으로 AGV들이 주행한다. 각각의 QC별로 전용 레인을 할당하여 다른 QC의 작업을 처리하는 AGV들과는 간섭이 발생하지 않도록 하였다. 총 5개의 해측 레인이 있으므로 하나의 선박에 최대 5대의 QC를 투입할 수 있다. 각 블록 입구에는 해당 블록의 TP 구역으로 들어오고 나갈 수 있는 TP 레인을 두었다. 블록별로 최대 7대의 AGV가 정차할 수 있다고 가정하여 TP 레인을 설정하였으며, TP 레인에서 AGV들은 양방향으로 주행할 수 있다. TP 레인을 빠져나오거나 들어가고자 하는 AGV들은 총 6개의 레인을 가진 육측 레인을 지나가야 한다. 육측 레인에서는 QC까지의 주행 거리를 가능한 줄일 수 있도록 절반은 왼쪽에서 오른쪽 방향으로 나머지 절반은 오른쪽에서 왼쪽 방향으로 주행한다. 육측 레인과 해측 레인을 연결하기 위하여 수직 레인을 두는데 수직 레인은 그림의 왼쪽부터 1, 3, 5, 7번 블록의 수직 방향에 위치한다. 1번 블록의 수직 방향에 위치한 수직 레인은 해측 레인에서 육측 레인으로 즉, 선석에서 장치장으로 주행 방향을 설정하였으며, 나머지 수직 레인들은 장치장에서 선석으로 AGV들이 주행하도록 설정하였다. 2, 4, 6번째 블록에 해당되는 수직 레인 공간은 유휴 AGV들이 대기하는 장소로 설정하였다.

AGV는 장치장과 선석사이를 오가며 컨테이너를 운반하므로, 경로의 출발지와 목적지는 QC 또는 TP가 된다. 출발지가 QC이고 목적지가 TP인 경우에는, Fig. 2의 경로 A와 같이 해측 레인을 따라 주행한 뒤, 맨 왼쪽에 있는 수직 레인 중에 하나를 따라 내려온다. 육측 레인 중에서 목적 블록이 있는 방향과 일치하는 레인을 따라 주행하다가 목적 블록의 TP 레인들 중에서 정차할 공간이 있는 레인으로 진입한다. 이와 반대로 출발지가 TP이고 목적지가 QC인 경우에는 경로 B와 같이 TP 레인을 지나 육측 레인을 주행한 뒤 적절한 수직 레인을 따라 해측 레인 구역까지 도착한다. QC별로 해측 레인이 따로 있으므로 목적 QC에 할당된 해측 레인을 따라 목적 QC까지 주행한다.

3.2 그리드 기반의 제어 방식

본 논문에서 AGV들을 제어하기 위하여 앞의 AGV 주행 영역

을 Fig. 3과 같이 그리드 단위로 나누었다. Fig. 3은 Fig. 2에서 점선 사각형으로 표시된 구역을 확대하여 보여 주고 있다. 그림에서 표시된 사각형 각각이 그리드에 해당되며, 점선 화살표는 AGV의 주행 방향을 나타내고 있다. 그리드의 가로는 6m~7.5m이며 세로는 3.5m~16m이다. 시뮬레이션 실험에서는 가정된 AGV의 규격은 폭 2.7m, 길이 15.8m로, AGV가 수직 방향으로 직진 주행하면 최대 5개의 그리드를 동시에 점유하게 된다.

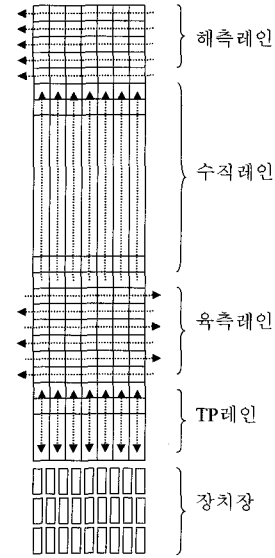


Fig. 3 An example of grid partitioning

AGV 운영 시스템의 경로 선정 기능은 요청된 작업을 처리하기 위하여 출발지에서 목적지까지 AGV가 주행할 구체적인 경로를 선정한다. Fig. 2에서 표현된 수직 레인, 육측 레인 그리고 TP 레인을 적절히 조합하면 동일한 목적지와 출발지를 가진 여러 대안 경로들을 생성할 수 있다. 일단 하나의 구체적인 경로가 선정되면, 경로상에 위치한 그리드들을 찾아낼 수 있으므로, AGV가 어떤 순서로 해당 그리드들을 지나갈 것인지 파악하여 점유 그리드 순서를 생성한다. AGV는 목적지에 도달할 때까지 각 그리드에 대하여 ‘예약 요청’ → ‘예약’ → ‘점유’ → ‘점유 해제’의 과정을 반복적으로 수행한다.

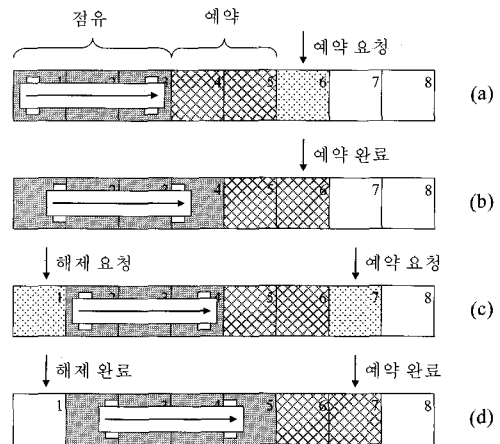


Fig. 4 An AGV moving straight from left to right

Fig. 4는 경로에 속하는 그리드들을 AGV가 어떻게 지나가는지 단계별로 설명하기 위하여 직진으로 주행하는 경우를 예로 들었다. 그림에서 AGV는 왼쪽에서 오른쪽으로 주행한다고 가정하였다. 먼저 단계 (a)에서 AGV는 1, 2, 3번 그리드들을 점유하고 있으며, 4, 5번 그리드는 예약 상태, 6번 그리드는 AGV 운영 시스템에 예약 요청을 한 상태이다. 현 시점에서 점유하지 않은 4, 5번 그리드가 예약 상태인 이유는 긴급히 정지하여야 하는 상황에서도 다른 AGV들과 충돌하지 않고 안전하게 정지할 수 있는 영역을 확보하기 위함이다. 예약 요청한 6번 그리드가 다른 AGV에 의하여 이미 예약 또는 점유²⁾되어 있다면 예약 요청은 보류될 것이다. 이 경우 AGV는 다른 AGV와의 충돌을 피하기 위하여 정지하게 되고 6번 그리드의 예약 요청이 받아들여지면 다시 주행을 재개하게 된다. 예약 요청이 즉각 받아들여진다면 단계 (b)와 같은 상태가 될 것이다. AGV는 그 사이 주행을 계속하였으므로 위치가 이동되었다. 단계 (c)는 AGV가 1번 그리드를 완전히 벗어났다고 확신하여 AGV 운영 시스템에 점유 해제를 요청하고 7번 그리드에 대해서는 예약 요청을 한 상태이다. 단계 (d)는 1번 그리드의 경우 점유 해제 요청이 처리되어 다른 AGV가 예약 요청할 수 있는 상황이 되었으며, 7번 그리드는 예약되었다. AGV는 이러한 방식으로 진행 방향에 있는 그리드들에 대해서는 예약을, 지나온 그리드들에 대해서는 해제를 요청하면서 주행하게 된다. Fig. 5는 Fig. 4의 그리드들 간의 점유 순서를 표현한 것이다.

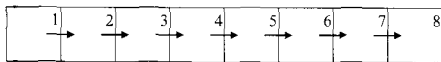


Fig. 5 The grid reservation sequence for the AGV in Fig. 4

Fig. 6은 AGV가 90도 각도로 회전하는 경우로 AGV가 회전을 시작할 때부터 완료할 때까지 지나가게 되는 모든 그리드들을 회색으로 나타내었다. AGV의 회전은 직진 주행과는 달리 여러 그리드들을 다소 불규칙한 형태와 순서로 점유하게 된다. 회전 주행 시에 그리드들의 실제 점유 순서를 그대로 반영하는 경우, 그리드들 간의 점유 순서 관계를 이용하여 교착을 방지하는 방안을 실시간에 처리하기가 어려워진다. 따라서 본 논문에서는 교착 방지 알고리즘의 복잡도 증가를 최소화하기 위하여 AGV의 회전이 완료될 때까지 지나가게 되는 모든 그리드들 즉 Fig. 6의 회색으로 표시된 그리드들을 회전 시작 전에 한꺼번에 예약하는 방식을 채택하였다. 직진 주행의 경우 개별 그리드 단위로 점유 순서가 결정되는데 비해 회전 주행인 경우에는 동시에 점유되는 그리드들의 집합이 나타난다. 이렇게 복수의 그리드들을 한꺼번에 예약하게 되면 이들 간에는 점유 순서상의 선후 관계를 고려하지 않아도 되므로, 선후 관계를 단순하게 가정하여도 무방하게 된다. Fig. 7은 Fig. 6의 경우에 대하여 그리드들 간의 점유 순서를 단순하게 표현한 하나의 예이다.

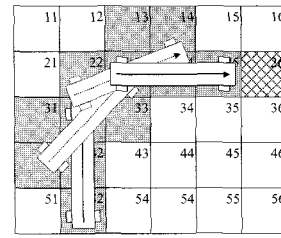


Fig. 6 An AGV turning to the right

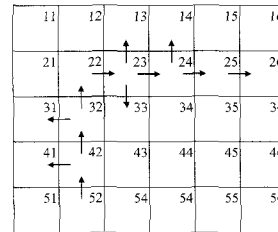


Fig. 7 Simplified grid reservation sequence for the AGV in Fig. 6

4. AGV 교착 방지 방법

3장에서 소개한 직진 및 회전 주행 방법으로 AGV들을 주행시키면 충돌은 방지되지만 간혹 어느 AGV도 더 이상 움직일 수 없는 교착 상태가 발생할 수 있다. 교착이란 2대 이상의 AGV 각각이 다른 AGV가 점유하고 있는 그리드들을 예약요구하는 상황이 순환을 이루는 경우로, 관련된 AGV들 모두 예약 요청에 대한 허가를 받을 수 없는 상태를 의미한다. 교착이 발생하게 되면 관련된 AGV들은 모두 정지하게 된다. 교착이 발생하게 되면, 이를 해소하기 위한 시간 비용이 발생하게 되므로 AGV 운영 시스템은 이러한 교착의 발생을 가능한 사전에 방지하는 것이 유리하다. 본 장에서는 먼저 AGV들 간의 교착을 예와 함께 설명하고 본 논문에서 제시하는 교착 방지 방안을 소개한다.

4.1 AGV들 간의 교착

Fig. 8은 AGV들의 주행 중에 발생할 수 있는 교착 상태의 예를 보이고 있다. 그림에서 (a)는 4대의 AGV들이 각각 직진으로 주행하고 있는 상황이다. (b)는 (a)에서 시간이 조금 더 경과한 후로 아직까지는 각 AGV의 주행에 별다른 문제가 발생하지 않았다. (c)에서 각각의 AGV는 자신이 주행하는 방향으로 추가의 그리드를 예약하고자 하지만, 해당 그리드들은 이미 다른 AGV에 의하여 예약되어 있는 상태이다. 이러한 경우 4대의 AGV가 모두 정지하는 교착 상태에 빠지게 된다.

Fig. 9는 Fig. 8의 AGV들의 주행 경로들을 3장에서 소개한 표현 방법인 그리드간의 점유 순서 관계로 표현한 것이다. 관련 그리드들만으로 표현한 Fig. 9의 (b)를 살펴보면 교착이 발생한 부위인 44, 45, 54, 55번 그리드들 간의 사이클(cycle) 44

2) AGV 운영 시스템은 예약과 점유를 특별히 구분하지는 않는다. 예약과 점유는 AGV가 구분하는 개념이다.

→54→55→45→44가 있음을 확인할 수 있다. 교착 상태는 이와 같이 그리드들 간의 점유 순서를 그래프로 표현하였을 때 사이클이 있는 부위에서 발생하게 되므로, 사전에 이러한 사이클들을 파악하고 이들 사이클에 진입하는 AGV들을 적절히 통제한다면 교착 상태에 이르지 않게 할 수 있다³⁾.

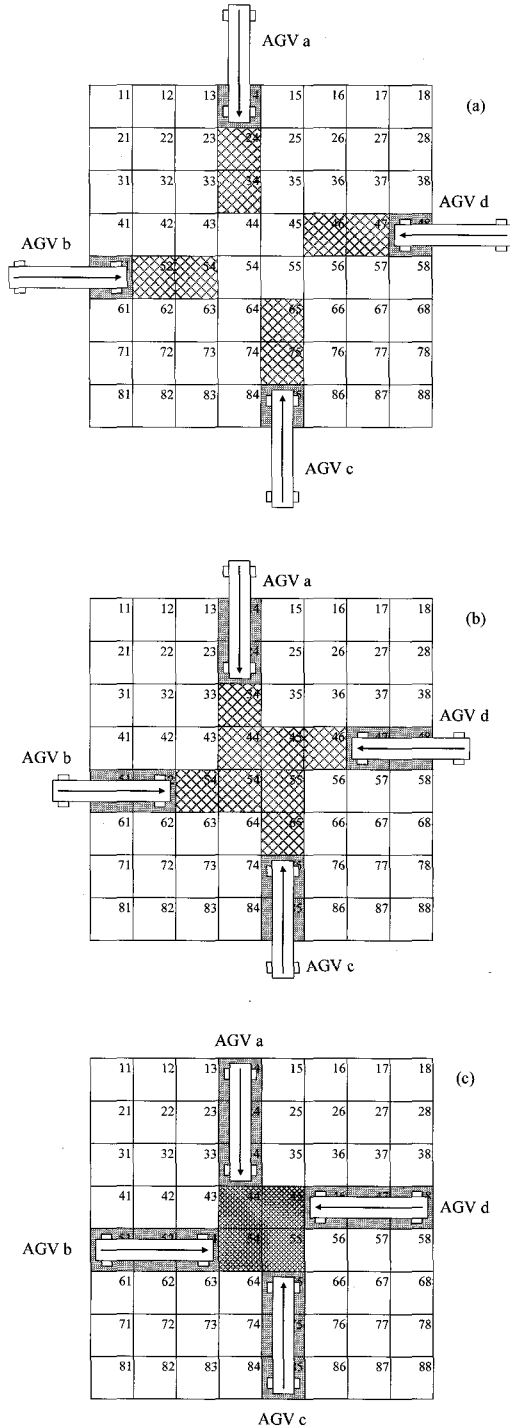


Fig. 8 An example of deadlock situation

4.2 AGV 경로의 그래프 표현과 교착 방지

교착을 해결하는 가장 간단한 방법은 경로 정보를 분석하여 모든 사이클들을 발견하고 AGV는 하나의 사이클을 이루는 그리드들을 한꺼번에 예약하면서 주행하는 방안이 있을 수 있다. Fig. 9의 경우라면 사이클과 관련된 44, 45, 54, 55번 그리드들 중에서 어느 하나라도 예약 요청이 있으면 이들 그리드 모두를 함께 예약하는 것이다. 이 방법은 두 가지 단점을 가지고 있다. 첫 번째는 사이클이 있는 영역을 통과할 때 주행 효율이 떨어질 수 있다는 점이다. Fig. 8의 경우에는 좌우로 주행하는 2, 4번 AGV 그리고 상하로 주행하는 1, 3번 AGV 간에는 각각 서로간의 간섭 없이 동시에 주행이 가능하다. 만일 하나의 사이클을 이루는 모든 그리드들을 하나의 AGV가 예약하도록 하면, 1, 3번 AGV와 2, 4번 AGV는 동시에 주행할 수 없게 된다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 본 논문에서 제시하는 방안은 사이클과 관련된 그리드들 모두를 예약하는 것이 아니라 그 중에서 자신이 지나갈 그리드들만 예약하는 방식을 채택하였다.

사이클을 이용한 교착 방지의 또 다른 문제점은 AGV 수가 많아지면, 경로상에 존재하는 모든 사이클들을 실시간에 발견하기가 어렵다는 점이다. 즉, AGV의 수가 많아지고 이들의 경로가 복잡하여 교차하는 그리드 수가 증가할수록 발견되는 사이클의 수는 기하급수적으로 많아진다. 이는 실시간에 AGV들을 제어하여야 하는 AGV 운영 시스템에 큰 부담이 된다. 본 논문에서 이를 위하여 개개의 사이클을 발견하지 않고 그래프에서 강결합 요소를 찾아 사이클 대응으로 사용하는 방안을 적용하였다.

강결합 요소는 방향성이 있는(directed) 그래프의 부분 집합으로 하나의 강결합 요소에 포함되는 모든 노드들끼리는 상호 접근⁴⁾이 가능하다. 따라서 하나의 사이클을 이루는 노드들은 같은 강결합 요소에 포함되게 된다. 강결합 요소와 사이클의 차이점은 복수의 사이클이 하나의 강결합 요소가 될 수 있다는 점이다. 하나의 그래프 상의 모든 강결합 요소들을 선형 시간 내에 발견할 수 있는 알고리즘이 존재한다. (Tarjan, 1972)

AGV들의 주행 경로가 Fig. 10의 (a)와 같은 경우 이를 그래프로 표현하면 (b)와 같은 형태가 된다. 이 그래프에는 모두 3개의 사이클이 존재한다. 1→4→5→2→1과 5→6→9→8→5는 사이클을 이루는 경로상에 동일한 노드가 반복하여 나타나지 않는 단순 사이클(simple cycle)이며, 이 두 사이클이 결합된 5→2→1→4→5→6→9→8→5는 경로상에 5번 그리드가 중복하여 나타나는 복합 사이클이다. 이 그래프에서 강결합 요소는 두 단순 사이클이 결합되어 복합 사이클을 이루는 그리드들의 집합 {1, 2, 4, 5, 6, 8, 9}가 된다⁵⁾.

3) 교착의 정의는 연관된 그리드들 간의 예약 요구와 점유 상황이 사이클을 이루는 관계이므로 모든 교착은 하나 이상의 사이클과 관련이 있게 된다.

4) 방향성이 있는 그래프에서 노드 v에서 노드 w로 경로가 존재할 때 노드 v에서 노드 w로 접근 가능하다고 표현한다.

5) 강결합 요소를 이루는 노드들 간에는 상호 연결이 가능한 경로가 존재하므로 집합 형태로만 표현하였다.

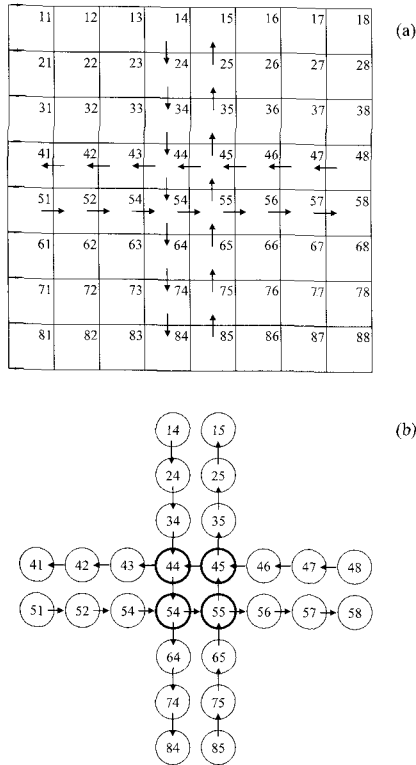


Fig. 9 The graph model of Fig. 8

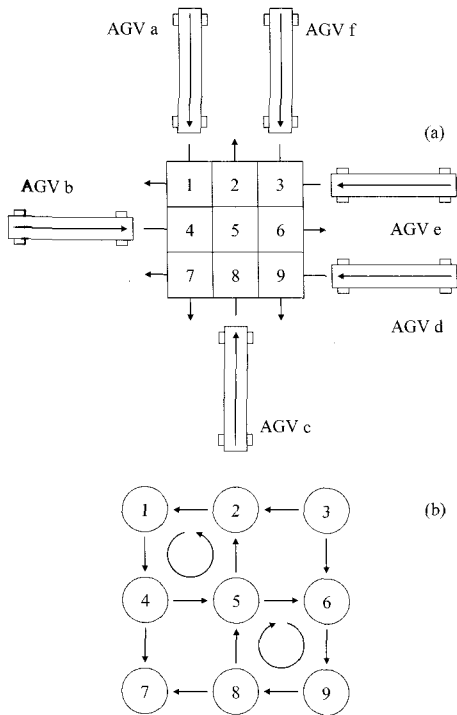


Fig. 10 An example of AGV routes and simple cycles

Fig. 11은 Fig. 10의 (a) 상태에서 본 제안 방안으로 교착을 회피하는 예를 단계적으로 보이고 있다. AGV a부터 AGV f 까지 총 6대의 AGV가 순서대로 진입 요청하였다고 가정하자. 각 그림에서 강결합 요소에 포함된 그리드들은 굵은 사각형으로 표시하였다. AGV a가 처음 예약 요청한 그리드 1은 강결

합 요소의 일부이므로 AGV 운영 시스템은 AGV a가 지나갈 경로상에 있는 그리드 4를 함께 예약시키게 된다. 따라서 이후 그리드 4를 요청한 AGV b의 예약은 보류될 것이다. AGV c가 그리드 8을 예약 요청하면, 강결합 요소에 포함된 그리드 5와 2가 함께 예약된다. AGV d가 그리드 9에 대한 예약을 요청하면, 그리드 9와 함께 경로상에 위치한 강결합 요소에 소속된 그리드 8이 이미 AGV c에 의해 예약되었으므로 AGV 운영 시스템은 이를 보류시킨다. AGV e는 강결합 요소에 포함되어 있지 않은 그리드 3의 예약에는 성공하지만, 그리드 2는 AGV c에 의해 먼저 예약되어 있어 더 이상 진행하지 못한다. AGV f는 AGV e가 그리드 3을 먼저 예약하였으므로 대기 상태에 있게 된다. 이러한 상태를 Fig. 11의 (a)에 표현하였다.

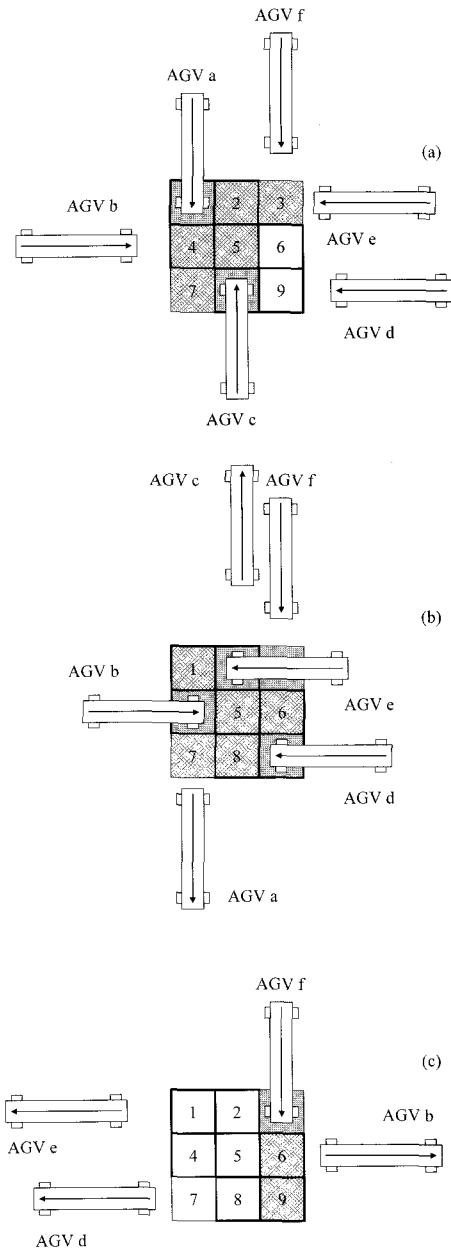


Fig. 11 An example of deadlock avoidance with the proposed method from the situation of Fig. 10 (a)

Fig. 11의 (a)에서 예약 요청이 받아들여져 주행이 가능한 AGV a와 c가 강결합 요소와 관련된 그리드들을 모두 지나가면, 보류되어 있는 예약들 중에서 AGV b, d, e에 대한 예약이 허가된다. 여기서는 먼저 요청된 예약이 먼저 처리된다고 가정하였다. 강결합 요소를 이루는 그리드들 중에서 AGV b, d, e가 각각 점유하고자 요청한 그리드들은 서로 간에 공통된 그리드가 없으므로 모두 예약이 허가되어 이들 AGV들이 진행할 수 있게 된다. AGV f의 경우에는 AGV e가 먼저 예약 요청한 그리드 3이 아직 해제되지 않았기에 계속 대기 상태로 있게 된다. Fig. 11의 (b)에 이러한 상태를 보이고 있다. AGV d, e가 강결합 요소와 관련된 그리드들을 빠져나가면 Fig. 11의 (c)와 같이 AGV f의 예약 요청이 받아들여지게 되고, AGV f는 주행이 가능하게 된다.

본 논문에서는 AGV 운영 시스템이 실시간에 교착을 방지할 수 있도록 강결합 요소를 이용하는 방안과 함께 AGV 별로 출발지부터 목적지까지의 완전한 경로가 아닌 일정 시간 이내에 주행할 경로를 대상으로 제안한 방안을 반복적으로 적용하였다. 즉, 현시점에서 AGV들이 t 시간 이내에 도달할 수 있는 경로에 대해서만 그래프로 표현하고 여기에서 강결합 요소를 파악하여 AGV 주행 관리에 사용한다. u ($u < t$) 시간이 경과한 후에 이러한 과정이 반복된다.

5. 회귀 분석을 이용한 경로 선정 방안

AGV 운영 시스템이 특정 AGV를 목적지까지 이동시켜 달라는 요청을 받으면, 해당 AGV가 현 상황에서 목적지까지 도착할 수 있는 가능한 효율적인 경로를 실시간에 결정할 수 있어야 한다. 목적지까지 도달 가능한 후보 경로들이 여럿 있다면 이들 각각을 평가하여 그 중에서 가장 적절한 하나를 선정하여야 한다. 간단한 주행 경로 선정 방안으로 목적지까지의 길이가 가장 짧은 경로를 선정하는 방안이 있을 수 있다. 하지만 다른 AGV들의 현재 위치와 그들의 경로에 따라 동일한 경로라고 하더라도 주행 도중에 발생하는 대기 시간은 다를 수 있어 언제나 거리가 짧은 경로를 선정하는 것은 적절치 못하다. 따라서 AGV 운영 시스템이 실시간에 경로를 효과적으로 선정하기 위해서는 각 후보 경로의 주행 소요 시간을 현재 상황을 반영하여 효율적으로 추정할 수 있는 방안이 필요하다.

경로를 결정하여야 하는 모든 상황에 대하여 모든 가능한 후보 경로들의 소요 시간을 시뮬레이션이나 실측지로 구해 두었다면, AGV 운영 시스템은 현재 상황과 같은 사례를 찾아 주행 소요 시간이 가장 적은 후보 경로를 선택함으로써 최적의 경로를 설정할 수 있을 것이다. 하지만 각 AGV의 현재 위치와 경로 등에 따른 모든 상황에 대하여 이러한 데이터를 수집하여 유지하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 이에 대한 대안으로 충분한 수의 상황에서 주행 소요 시간과 관련성이 높은 정보를 해당 경로의 주행 소요 시간과 함께 수집하고, 이를 이용하여 각 후보 경로들의 대략적인 주행 소요 시간

을 추정하고 비교하여 경로를 선정하는 방안을 사용할 수 있다. 이러한 방안 적용 시 각 후보 경로에 대하여 추정한 주행 소요 시간에는 오차가 있어 언제나 최적의 경로가 선정되는 것을 보장하지 못하지만, 상대적으로 적은 소요 시간이 걸리는 후보 경로들 중에 하나가 선정될 가능성은 높다.

본 논문에서는 각각의 후보 경로의 예상 소요 시간을 추정하여 비교하기 위하여 회귀 분석을 사용하였다. 회귀 분석은 주어진 데이터를 이용하여 변수간의 함수 관계를 밝혀내고, 이 함수 관계를 이용하여 독립 변수값에 대응되는 종속 변수의 값을 추정 또는 설명하는 분석 방법이다(Witten and Frank, 1999). 경로 선정 문제의 경우 독립 변수들은 후보 경로 및 다른 AGV들과의 관계에 관한 정보이며, 종속 변수는 주행 소요 시간이 된다. 선형 회귀 분석은 X (독립 변수들의 벡터)와 y (종속 변수)로 구성된 데이터를 이용하여, 오차가 가장 적은 $y = a + BX$ 형태의 1차 함수를 생성한다. 회귀 분석으로 생성된 함수를 이용하면 임의의 X 에 대해 y 값을 대략적으로 추정할 수 있게 된다.

회귀 분석을 하기 위해서는 독립 변수와 종속 변수에 해당되는 데이터를 먼저 수집하여야 한다. 종속 변수는 이미 소요 시간으로 결정되어 있지만, 독립 변수는 어떤 것을 사용할지 결정하여야 한다. 본 논문에서는 후보 경로와 관련하여 경로의 길이, 강결합 요소와 겹치는 그리드의 수, 목적지가 같은 AGV 수와 같은 총 21가지 정보를 독립 변수로 사용하였다. 선정된 독립 변수들은 AGV의 경로가 확정되어 주행을 시작하기 이전에 파악할 수 있으며, 독립 변수의 대부분은 AGV 운영 시스템이 AGV 관리를 위하여 필수적으로 유지하여야 하는 정보이므로 이를 획득하는데 소요되는 비용은 그다지 크지 않다.

선정된 독립 변수들과 종속 변수에 대한 데이터는 시뮬레이션을 통하여 수집이 가능하다. 본 연구에서는 데이터 수집을 위하여 목적지까지의 경로를 임의로 선정하여 주행하게 하였으며, AGV가 목적지에 도착한 시점과 출발 시점을 비교하여 소요 시간을 얻었다. Table 2에 이러한 방식으로 얻은 데이터의 일부를 보이고 있다. 표에서 Distance는 목적지까지의 경로상의 거리, nSCCGrid는 후보 경로상에서 강결합 요소와 겹치는 그리드의 수이며 nSameDest는 동일한 목적지로 향하는 AGV 수이다.

Table 2 Part of the data collected from simulations

Distance(m)	nSCCGrid	nSameDest	...	Time(sec.)
358.2	0	0	...	145.8
266.2	0	2	...	155.9
287.2	0	3	...	335.3
593.8	2	0	...	287.7

데이터가 수집되면 회귀 분석 소프트웨어(Weka3)를 이용하여 종속 변수인 소요 시간을 추정할 수 있는 함수를 얻을 수 있다. AGV 운영 시스템은 가능한 각각의 후보 경로들에 대해

여 생성된 함수를 이용하여 소요 시간을 추정하고 그 중에서 가장 짧은 시간에 도달할 수 있는 것으로 예상되는 경로를 AGV에 할당한다. 본 연구에서 AGV가 QC에서 TP로 향하는 경우 선택 가능한 수직 레인 및 TP 레인의 수가 각각 7개와 3개이므로 총 21개의 후보 경로가 생성되어 평가되게 된다. 이러한 경로 선정 방식은 시뮬레이션을 통해 소요 시간을 직접 얻는 방식(Seifert et al, 1995)과 비교할 때 시스템 운영상의 부담을 줄일 수 있다.

본 논문의 제안 방안으로 생성된 선형 수식은 그 적용 환경(주행 영역의 크기, 유도 경로, AGV 사양, AGV 수, 교통 통제 방안 등)에 특화된 결과이다. 따라서 다른 환경의 터미널에서 이를 적용하고자 하는 경우에는 해당 환경에 맞는 시뮬레이션 실험을 통하여 데이터를 수집하고 선형 수식을 도출하는 과정을 다시 수행하여야 한다. 자동화 컨테이너 터미널의 경우 해당 터미널 환경에 맞는 시뮬레이터가 있으므로, 이를 이용하여 본 제안 방안을 적용할 수 있다.

6. 실험 및 분석

이상에서 제안한 방안들의 실효성을 확인하기 위하여 현재 건설 중인 광양항 자동화 컨테이너 터미널 설계를 기반으로 Fig. 12와 같은 환경 하에서 시뮬레이션 실험을 수행하였다.

1. 시뮬레이션은 선석 하나를 대상으로 수행한다. (장치장 블록 7개, QC 3대) (Fig. 2 참조)
2. 직진 주행하는 AGV는 안전(비상 시 정지 등)을 위하여 점유한 그리드들 이외에 3개의 추가 그리드를 예약한다. (Fig. 4 참조)
3. 회전 주행하는 AGV는 회전이 완료될 때까지 점유하게 될 그리드들을 한꺼번에 예약한다. (Fig. 6 참조)
4. AGV는 주행 시 가속하지 않으며, 직진과 회전 주행 모두 4m/s로 움직인다.
5. QC와 TP에서 AGV에 컨테이너를 실거나 내리는 작업에 20초의 시간이 소요된다.
6. QC와 ATC는 AGV가 도착하면 곧바로 작업을 시작할 수 있다.
7. AGV는 이전 작업이 완료되면 해당 위치에서 임의로 목적지로 향하는 새로운 작업이 할당된다.
8. 유휴 AGV는 없다.
9. AGV 운영 시스템은 현 시점에서 20초 동안 각각의 AGV가 주행할 경로 정보를 그래프로 표현하고, 강결함 요소를 파악하여 주행 관리 기능을 수행한다. 이러한 과정은 매 10초마다 반복한다.
10. 회귀 분석을 위한 데이터는 48시간 분량에 해당되는 시뮬레이션을 수행하여 수집하였다.
11. 각 실험은 12시간 분량의 시뮬레이션을 수행한 후 QC별 AGV의 시간당 방문 횟수의 평균을 구하였다.

Fig. 12 The experimental procedure

본 연구에서는 모두 4가지의 경로 선정 방안을 구현하여 비교 실험하였다. 각 방안에 대하여 간단하게 살펴보면 임의로 경로를 선정하는 방안(임의), 목적지까지의 길이가 가장 짧은 경로 중에서 하나를 선정하는 방안(최단거리), 간단한 휴리스틱을 이용하여 경로를 선정하는 방안(휴리스틱), 그리고 본 논문에서 제안하는 회귀 분석 결과를 적용하여 경로를 선정하는 방안(회귀분석)이다. 최단거리 방안 적용 시 길이가 가장 짧은 후보 경로가 여럿인 경우에는 이 중에서 임의로 선정하였다. 휴리스틱 방안은 주행 중에 다른 AGV에 의한 지연이 가능한 적은 경로를 선정하기 위하여 경로상에서 교차하는 AGV 수가 가장 적은 후보 경로를 선정하였다. 동물이 발생할 경우에는 거리가 짧은 경로를 우선하였다. 회귀분석 방안은 임의 방안으로 시뮬레이션을 48시간 동안 수행하여 얻은 데이터를 활용하였다.

Fig. 13은 임의, 최단거리, 휴리스틱, 회귀분석의 4가지 경로 선정 방안을 실험한 후 각 QC별 시간당 평균 AGV 방문 횟수를 나타낸 것이다. QC별 시간당 평균 AGV 방문 횟수는 AGV들이 얼마나 효율적으로 QC와 TP사이를 왕복할 수 있는지에 대한 척도로 각 경로 선정 방안들의 성능을 비교할 수 있다. 시간당 평균 AGV 방문 횟수는 AGV 대수가 증가함에 따라 점진적으로 증가하다가 일정 수준 이상이 되면 오히려 감소한다. 이는 AGV 대수가 증가할수록 교통 혼잡도도 함께 증가하기 때문에 일정 수 이상의 AGV들을 투입하게 되면 작업 생산성을 향상시키기 어렵다는 의미이다. 특히 AGV 대수가 13대를 넘어가면 단순 방안이 최단거리 방안보다 더 우수한 성능을 보이고 있는데, 이는 AGV 수가 증가할수록 최단거리만을 고집하게 되면 오히려 교통 혼잡을 유발시켜 운행 효율이 떨어질 수 있다는 것을 의미한다. 휴리스틱 방안을 임의와 최단거리 방안과 비교 시 AGV 수가 많아질수록 성능상의 우위를 확실하게 보여주고 있다. 본 논문에서 제안한 회귀 분석 방안은 다른 방안과 비교하여 가장 우수한 성능을 보였으며, 임의 또는 최단거리 방안보다 적게는 2회에서 많게는 10여회 이상 AGV 방문 횟수를 향상시킬 수 있었다.

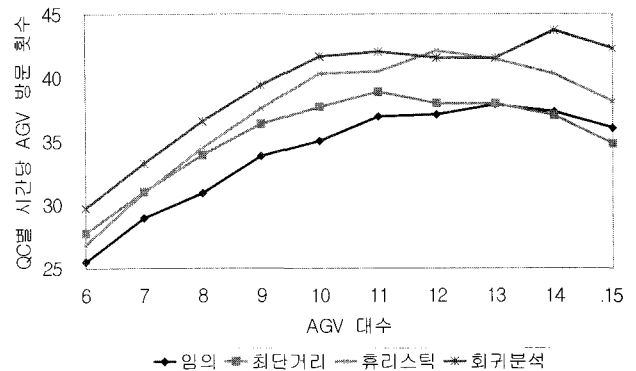


Fig. 13 Average count of AGV visits per QC

Fig. 14는 각 방안별로 AGV가 한 번 주행할 때 지연되는 평균 시간을 표시한 것이다. AGV 대수가 증가함에 따라 지연

시간이 점차 증가하는 것을 살펴볼 수 있으며, 본 논문에서 제안한 회귀 분석 방안의 경우 이러한 평균 지연 시간이 가장 적을 것을 확인할 수 있다. 이는 회귀 분석을 이용하여 선정된 경로가 상대적으로 다른 방안들이 추천한 경로에 비해 주행 중에 지연이 적게 발생함을 의미한다.

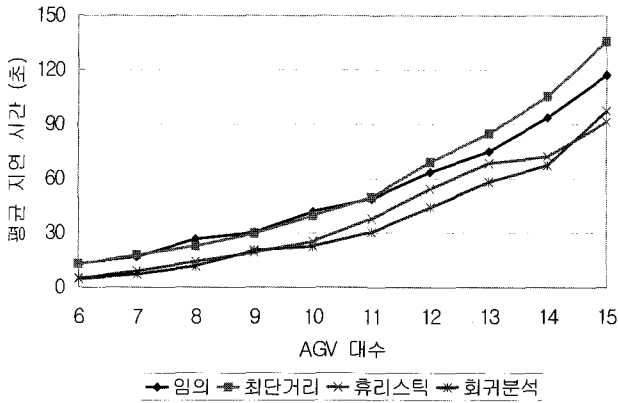


Fig. 14 Average waiting time per AGV

어떠한 독립 변수들이 소요 시간을 추정하는데 어느 정도 영향을 미치는지 살펴보기 위하여 종속 변수와 독립 변수들의 값을 0부터 1사이로 정규화(normalize)하여 그 값들의 크기를 비교하여 보았다. 모든 변수들을 정규화 하였기 때문에 각 독립 변수가 주행에 소요되는 시간을 추정하는데 있어 활용된 그 비중을 파악할 수 있다. Fig. 15에는 주행 시간에 가장 큰 영향을 미치는 3개의 독립 변수들을 나타내었다. 소요 시간을 결정하는데 가장 큰 비중을 가지는 속성은 경로의 길이(Distance)였으며, AGV 대수가 증가하게 되면 상대적으로 다른 요인에 의한 지연이 증가하므로 그 비중은 줄어들었다. 그 다음으로는 지연의 주요 요인인 강결합 요소와 겹치는 그리드들의 수(nSCCGrid)와 육측 레인에서 우에서 좌로 주행하는 AGV 대수(nAGVInHinterRev)였으며, 이들 독립 변수들의 비중은 AGV 대수가 증가할수록 대체적으로 증가함을 볼 수 있다.

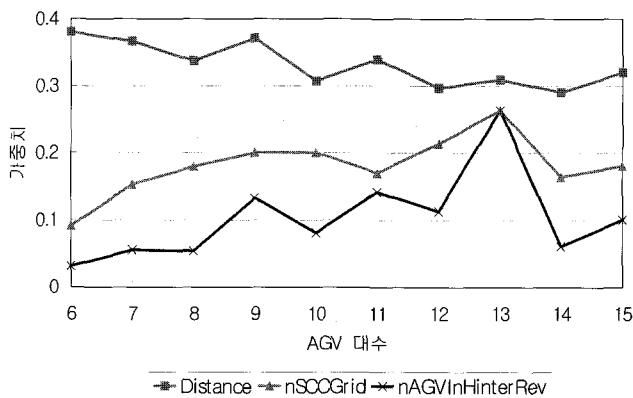


Fig. 15 Change of weights of some independent variables as the number of AGVs increases

7. 결론 및 향후 과제

본 논문은 AGV 주행 영역을 그리드 단위로 관리하는 자동화 컨테이너 터미널에서 AGV들 간의 교착을 방지할 수 있는 방안과 목적지까지의 예상 소요 시간이 적은 경로를 효율적으로 선정할 수 있는 방안을 함께 제안하였다. 제안한 방안을 시뮬레이션 한 실험 결과 그 실용성을 확인할 수 있었다.

본 논문에서 제시한 회귀 분석 방안은 AGV의 경로가 결정되어 주행하는 도중에도 경로를 변경하는 것이 더 효율적인지 평가하고 변경할 수 있는 동적 경로 선정 방안으로 확장이 가능할 것이다. 향후 이러한 점을 고려하여 본 제안 방안을 보다 정교화 하여 적용할 수 있는 연구가 필요하다.

후 기

본 논문은 산업자원부의 출연금 등으로 수행한 지역전략산업 석박사 연구인력 양성사업의 연구 결과입니다.

참고 문헌

- [1] 신성영, 조광현(2002), "제어자동화시스템공학 논문지", 8권, 9호, pp. 795-802.
- [2] 이용환, 박은경, 박태진, 류광렬, 김갑환(2003), "그리드 단위의 제어에 기반한 자동화 컨테이너 터미널의 AGV 운영 방안", 한국항해항만학회지 제27권 제2호, pp. 223-231.
- [3] 임동순(2000), "존 조정 하에서의 AGV 교착 방지, 대한선업공학회지", Vol. 26, No. 4, pp. 392-401.
- [4] 오명진(1995), "최적 경로와 최소 AGV 대수를 갖는 AGVS에 관한 연구", 한국공업경영학회, 18권, 36호, pp. 105-112.
- [5] 한국해양수산개발원(2001), 광양항 3단계 자동화 컨테이너 터미널 개발 기본 계획.
- [6] Evers, J. J. M and Koppers, S. A. J.(1996), "Automated guided vehicle traffic control at a container terminal, Transportation Research-A 30", pp. 2134.
- [7] Kim, K. H., Jeon, S. M., and Ryu, K. R.(2004), "A deadlock detection method for automated guided vehicles in port container terminals, Proceedings of the 33rd international conference on computers and industrial engineering".
- [8] Rajeeva, L. M., Wee, H. G., Ng, W. C., and Teo, C. P. (2003), "Cyclic deadlock prediction and avoidance for zone-controlled AGV system, International Journal of Production Economics 83", pp. 309-324.
- [9] Reveliotis, S. A.(2000), "Conflict resolution in AGV Systems", IEEE Transactions, Vol. 32, pp. 647-659.
- [10] Seifert, R. W., Kay, M. G., and Wilson, J. R.(1995), "Evaluation of AGV routing strategies using hierarchical

- simulation, ACM, Proceedings of the 27th conference on Winter simulation”, pp. 850-856.
- [11] Tarjan, R. E.(1972), “Depth-first search and linear graph algorithms”, SIAM Journal on Computing, Vol. 1, No. 2, pp. 146-160.
- [12] Weka3 - Data Mining with Open Source Machine Learning Software in Java <http://www.cs.waikato.ac.nz/~ml/weka/>
- [13] Witten, I. H. and Frank, E.(1999), “Data Mining- Practical Machine Learning Tools and Techniques with Java Implementations”, Morgan Kaufmann Publishers
- [14] Yeh, M. S. and Yeh, W. C.(1998), “Deadlock Prediction and Avoidance for Zone-control AGVs”, International Journal of Production Research, Vol. 36, No. 10, pp. 2879-2889.

원고접수일 : 2005년 2월 23일

원고채택일 : 2005년 10월 21일