

## 지능형 토공을 위한 멀티에이전트 기반 협업시스템

김성근\*

Kim, Sung-Keun\*

# A Multi-agent based Cooperation System for an Intelligent Earthwork

### ABSTRACT

A number of studies have been conducted recently regarding the development of automation systems for the construction sector. Much of this attention has focused on earthwork because it is highly dependent on construction machines and is regarded as being basic for the construction of buildings and civil works. For example, technologies are being developed in order to enable earthwork planning based on construction site models that are constructed by automatic systems and to enable construction equipment to perform the work based on the plan and the environment. There are many problems that need to be solved in order to enable the use of automatic earthwork systems in construction sites. For example, technologies are needed for enabling collaborations between similar and different kinds of construction equipment. This study aims to develop a construction system that imitates collaborative systems and decision-making methods that are used by humans. The proposed system relies on the multi-agent concept from the field of artificial intelligence. In order to develop a multi-agent-based system, configurations and functions are proposed for the agents and a framework for collaboration and arbitration between agents is presented. Furthermore, methods are introduced for preventing duplicate work and minimizing interference effects during the collaboration process. Methods are also presented for performing advance planning for the excavators and compactors that are involved in the construction. The current study suggests a theoretical framework and evaluates the results using virtual simulations. However, in the future, an empirical study will be conducted in order to apply these concepts to actual construction sites through the development of a physical system.

**Key words :** Earthwork, Multi-agent, Construction automation, Coordination, Cooperation

### 초 록

최근 건설분야에 적용될 수 있는 자동화 시스템 개발을 위한 연구가 많이 수행되고 있다. 자동화 기술 적용시 효과가 높은 공종 중에서 건설기계의 의존도가 높고, 건축 및 토목공사에서 기본 공종인 토공을 대상으로 연구가 진행되어 왔다. 공사현장의 모델을 구축하여 자동화 시스템이 토공계획을 수립할 수 있는 기술과 단일 건설장비가 주어진 정보와 환경을 인지하여 작업을 수행할 수 있도록 하는 기술이 개발되었다. 자동화 토공시스템이 현장에 적용되기 위해서 해결되어야 할 문제들이 여전히 많이 있지만, 그중에서 중요한 한 가지는 다수 및 다종의 건설장비들이 협업작업을 수행할 수 있도록 하는 기술을 제공해야만 하는 것이다. 본 연구에서는 사람들의 협업시스템과 의사결정 방법을 모방한 건설시공 시스템을 개발하는 것을 목표로 하고 있으며, 시스템 개발을 위하여 인공지능 분야에서 사용하고 있는 멀티에이전트 개념을 적용하였다. 멀티에이전트 기반 시스템 개발을 위하여 에이전트의 구성과 기능을 제안하고 있으며, 에이전트간 협업 및 중재를 위한 프레임워크를 제시하였다. 그리고 투입되는 건설장비인 다수의 굴삭기와 다짐장비의 효율적인 진로계획과 협업작업시 간섭효과의 최소화 및 중복작업 방지를 위한 방안도 제시하였다. 아직은 이론적인 개념을 제시하고 있는 단계로 가상 시뮬레이션에 의하여 효과를 검증하고 있으나, 추후에는 물리적인 시스템의 구축을 통하여 현장에 적용하기 위한 실증연구를 수행해야 할 것이다.

**검색어 :** 토공, 멀티에이전트, 건설자동화, 조정, 협력

\* 정회원·교신저자·서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과 부교수, 공학박사  
(Corresponding Author·Seoul National University of Science & Technology·cem@seoultech.ac.kr)

Received June 25, 2014/ revised July 9, 2014/ accepted July 10, 2014

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

국내외에서 건설분야의 생산성 향상을 위하여 정보화 기술 및 자동화 기술을 적용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 다양한 건설공종 중에서 토공작업이 정보화 기술 및 자동화 기술을 적용할 경우에 많은 효과를 볼 수 있는 공종으로 조사되었으며, 토공작업의 효율성 증대를 위하여 각종 상용화된 시스템이 개발되었다. 사례로 Trimble사의 토공자동화 시스템과 듀얼 GPS를 이용한 모터그래이더, Sokkia사의 3D-MC GNSS 굴삭기와 mmGPS 모터그래이더, Prolec사의 3차원 머신 가이던스 콘트롤 시스템과 Digmaster Pro., 그리고 Volvo사의 Caretrack 등이 있다. 특히 국내에서는 국토교통부의 지원을 받아 지난 2012년에 개발된 지능형 굴삭기가 있는데, 이것은 아직 상용화 전단계의 프로토타입 형태이지만 현재까지의 상용화된 시스템과 비교하여 볼 때 발전한 형태의 연구결과물이다.

건설현장에서는 다수 및 다종의 건설장비가 투입되고 있으며 수시로 변화하는 환경 내에서 안전하고 효율적으로 작업이 수행되어야만 한다. 현재까지 개발된 연구결과물이나 상용화된 시스템을 살펴보면 주로 단일 작업과 단일 건설장비에 국한되어 적용된 것으로 주어진 작업을 좀 더 수월하게 하거나 장비조정이 효율적으로 될 수 있도록 지원하는 기능에 초점이 맞추어져 있다. 현장여건 변경으로 인한 작업계획의 수정 및 실시간 조치를 위한 요소기술이나, 다수 및 다종의 장비가 협업을 할 수 있도록 지원하기 위한 요소기술의 개발은 아직까지 매우 제한적으로 이루어지고 있다.

본 연구에서는 다수 및 다종의 건설장비가 변화하는 환경에 대응하고 토공작업의 효율성을 높이기 위한 지능형 시스템 구축을 위한 요소기술을 제시하는 것을 목적으로 한다. 지능형 토공을 위한 멀티에이전트 프레임워크의 제시와 에이전트간 협업을 위한 방법론을 제시할 것이다.

### 1.2 연구의 범위 및 방법

지능형 토공시스템을 위한 멀티에이전트 프레임워크를 제시하고 에이전트간 협업을 위하여 필요한 기능인 협업모델의 제시와 에이전트간 이해상충을 해결하기 위한 중재모델을 제시하고자 한다. 그리고 굴삭 및 다짐을 위한 작업 네트워크의 구성과 네트워크상 작업경로의 검색방법을 제시하고자 한다.

연구의 방법은 다음과 같다.

- (1) 분산인공지능(Distributed Artificial Intelligence: DAI) 분야를 고찰하고 에이전트 개념과 에이전트의 구성에 대하여 조사한다. 또한 멀티에이전트의 선행연구를 살펴보고 건설분야의 협업시스템을 위한 멀티에이전트의 적용성을

살펴본다.

- (2) 지능형 토공시스템을 구성하기 위한 멀티에이전트 시스템 구조를 제시한다. 각 구성요소를 정확히 정의하고 에이전트간 통신방법을 제시한다. 또한 제조업에서 사용되는 에이전트간 협업모델을 고찰하고 토공작업의 특성을 반영한 협업 모델 및 중재모델을 제시한다.
- (3) 토공작업시 작업현장의 정보와 각 건설장비의 작업경로 정보의 저장 및 활용을 위한 방안을 제시한다.

## 2. 관련 기술동향

### 2.1 에이전트 개념 및 분산인공지능

인공지능분야에서 에이전트(Agent)는 1990년 초반 이후부터 독립된 연구분야로 인식되고 있다. 특히 소프트웨어공학 분야에서는 미리 정의된 상호작용을 수행하는 구조를 갖는 객체와는 달리 주어진 환경에서 자신의 형식지와 수집된 정보에 근거하여 자신의 행동을 결정할 수 있는 객체를 에이전트의 의미로 보고 있다.

모든 분야에서 공통적으로 사용되고 있는 에이전트의 정의는 없지만 많은 연구자들이 에이전트에 관한 개념을 제시하고 있다. 대표적으로 Russell and Norvig (2010)의 정의에 의하면 에이전트는 자신의 센서를 통해 환경을 인지하여 작용기(Effectors)를 통해 그 환경에 대해 반응하는 시스템을 말한다. 에이전트는 로봇과 자동차 등과 같은 물리적 객체이거나 소프트웨어나 컴퓨팅 모듈과 같은 가상의 객체로 구분되며, Ferber (1999)에 따르면 에이전트는 다음과 같은 공통적인 특성을 갖는다.

- (1) 주어진 환경 내에서 자신만의 일을 수행할 수 있는 능력
- (2) 환경을 인식할 수 있는 능력
- (3) 다른 에이전트들과 직접적으로 통신하고 상호작용하는 능력
- (4) 자신만의 자원을 소유
- (5) 스킬 및 학습능력을 소유하고 서비스를 제공
- (6) 가용한 자원과 자신의 스킬을 고려한 목적 지향적인 능력 보유
- (7) 그 자신을 재생산할 수 있는 능력

DAI는 인공지능 분야의 세분야로 인공지능 및 다중문제해결 기술을 적용하여 주어진 문제를 다루도록 하고 있다. Rosenschein (1986)에 따르면 DAI 시스템은 적어도 두 개 이상의 에이전트로 구성되어야 하며, 에이전트들은 어느 정도의 지식과 자율성, 그리고 추론과 계획능력 등을 보유하고 있어야 한다. DAI는 분산문제해결(Distributed Problem Solving : DPS) 분야와 멀티에이전트시스템(Multi-Agent System: MAS) 분야로 구분될 수 있다. DPS는

복잡한 문제를 다수의 서브문제로 분할하고 각 에이전트에 의해 해결되는 서브문제들이 상호 의존적이며 문제가 중첩되는 경우에도 출되는 해의 비일관성을 줄이면서 최종해에 이르는 방식이며, MAS는 서브문제의 각 해를 구한 이후에 각 해들을 결합하여 최종해에 이르게 하는 방식으로 각 에이전트들이 자신의 지식, 스킬, 목적, 계획 등을 어떻게 조정하여 다른 에이전트들과 협력을 이루게 할 것인지에 중점을 두고 있다.

기본적으로 하나의 에이전트는 각자의 지식과 추론기능을 갖고 있지만 주어진 문제를 해결하기 위한 모든 능력을 갖고 있지는 않기에 다른 에이전트들과의 협력과 조정을 통하여 문제를 해결하는 방식을 취한다. 따라서 MAS는 다수의 에이전트들이 자율적이며 상호 협력적인 행동을 통하여 전체 시스템의 효율을 높이거나 주어진 문제를 해결하는 목적지향 시스템을 의미한다. Davis (1980)는 MAS에서 분산될 수 있는 영역으로는 공간, 시간, 수단, 자원, 정보, 이해로 구분하고 있다.

## 2.2 MAS 적용 연구

제조업 분야에서 지능형 제조시스템을 구축하기 위하여 MAS 개념을 도입하고 있으며, 최근까지 다수의 연구자들이 에이전트간 협업 및 지능화 기법, 기존 시스템의 통합방법, 제조기업 통합, 공급망사슬관리, 제조관리(기획, 설계, 제조), 실시간 자원관리, 스케줄링, 각종 제조시스템 통합 등과 같이 다양한 부분에 MAS를 적용하는 연구를 수행하고 있다. 최근 생산되는 제품은 라이프사이클이 짧아지고 있으며, 많은 제조업체들은 소비자의 요구에 빠르게 대응할 수 있는 생산시스템 및 비즈니스 환경을 구축하는 것에 많은 노력을 기울이고 있다. 연구자들은 변화에 유연하게 대처할 수 있는 제품생산 시스템 구축을 위하여 기존의 중앙집중형 시스템 보다는 분산형 시스템을 개발하고 있으며 이러한 시스템을 위하여 MAS 이론을 적용하고 있다. 제조업 부분에서는 정적인 제조환경에서 동적인 제조환경으로 변화하는 추세를 반영하기 위한 연구들

수행하고 있는 것으로 나타났다.

건설업 분야에서는 제조업 분야를 벤치마킹하여 2000년을 전후로 MAS를 프로젝트 관리, 자원관리를 위한 부분에 적용하는 연구를 시작으로 최근에는 건설장비 할당 및 협업설계 등에 적용하고 있으나 아직까지는 적용사례가 매우 제한적이다.

다음 Table 1은 제조업 및 건설업 분야에서 수행되었던 MAS 관련 연구사례를 언급한 것이다.

## 3. 지능형 토공시스템을 위한 MAS 적용성

다음과 같은 이유로 MAS 개념을 본 연구에서 적용하였다.

### 3.1 조건의 변경으로 인한 초기 계획변경

건설현장에서 작업을 진행하면서 수시로 변화하는 환경 및 조건으로 인하여 기존 계획을 자주 변경해야 한다. 현장의 물리적인 조건변경, 건설장비의 고장, 사고 그리고 예상하지 못한 조건의 변화에 의하여 계획변경이 발생하며 이러한 경우에 지능형 토공시스템 구축시 MAS가 적절한 도구로 사용될 수 있다.

### 3.2 건설장비 및 관리용 소프트웨어간 협업능력 필요

일반적으로 건설현장에는 다수의 건설장비(물리적 에이전트) 및 관리용 소프트웨어(가상 에이전트) 동시에 사용된다. 서로 다른 기능과 업무범위를 가진 건설장비들과 소프트웨어가 효과적으로 협업하여 시스템의 목적을 달성하도록 하기 위한 환경조성과 상호작용 방법이 필요하다. 또한 각 에이전트가 갖는 정보의 해석과 통합기능이 필요하다.

### 3.3 에이전트의 스킬 및 지식의 차이

시스템을 구성하는 각 에이전트는 각기 다른 용량과 능력을 갖고 있다. 이러한 사실은 주어진 임무를 수행하기 위하여 에이전트

Table 1. Applications of MAS Approach

Domain	Application
Manufacturing	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Manufacturing control (Parunak, 1987)</li> <li>■ Multi-agent robotic system (Lin and Hsu, 1996; Kim et al., 2012)</li> <li>■ Job-shop scheduling (Galinho et al., 1998)</li> <li>■ Integrated design system (Lee et al., 2005)</li> <li>■ Supply chain management (Park et al., 2007)</li> <li>■ Collaboration systems for I-manufacturing (Park et al., 2010)</li> </ul>
Construction	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Bathroom construction (Koo, 1987)</li> <li>■ Project management (Petrie et al., 1999)</li> <li>■ Resource management in civil engineering (Fonseca et al., 1999)</li> <li>■ Earthwork equipment allocation (Kim et al., 2005)</li> <li>■ Construction process simulation (Kim et al., 2007)</li> <li>■ Dynamic and collaborative design (Lee, 2009)</li> </ul>

를 어떻게 조합하느냐에 따라서 시공성에 많은 영향을 주게 된다. MAS는 각 에이전트들이 자신의 지식, 스킬, 목적, 계획 등을 조정하여 주어진 임무를 가장 효율적으로 달성하도록 하는 도구를 제공할 수 있다.

### 3.4 제한된 에이전트 지식의 효율적 사용

기존의 건설관련 시스템은 중앙제어 방식이었다면, 본 연구에서 개발하고자 하는 시스템은 에이전트별로 독립적으로 적용되는 분산제어 방식이다. 다수의 에이전트들이 포함하고 있는 고유의 정보와 더불어 실시간으로 제한적으로 취득되는 환경정보를 효과적으로 공유하며 이를 바탕으로 시스템의 목적을 달성할 수 있도록 하는 전략을 수립할 수 있는 기반으로 MAS의 적용이 필요하다.

## 4. 멀티에이전트 기반 시스템 구성

### 4.1 시스템 구조

시스템의 MAS를 위하여 Mediator approach를 적용하였다. 제시된 시스템(Fig. 1)은 Mediator, Database, Planning module, Execution & control module, 그리고 Resource module로 이루어져 있으며 각 Module은 세부의 에이전트들로 구성되어 있다.

#### 4.1.1 Mediator

시스템의 모든 프로세스를 총괄하는 역할을 담당하여, 에이전트 간 메시지 전송, 에이전트간 협업을 위한 조정, 및 에이전트간 협상시 Time-bound 부여 등과 같은 역할을 수행하게 된다. 각 에이전트간의 직접적인 통신도 가능하지만 대부분의 작업수행 관련 정보들은 Mediator와 에이전트간의 통신을 통하여 전달되며, 에이전트간 직접적인 통신은 초기 작업계획 수립 이후에 자원이 투입되고 작업을 수행하는 과정에서 발생하게 된다.

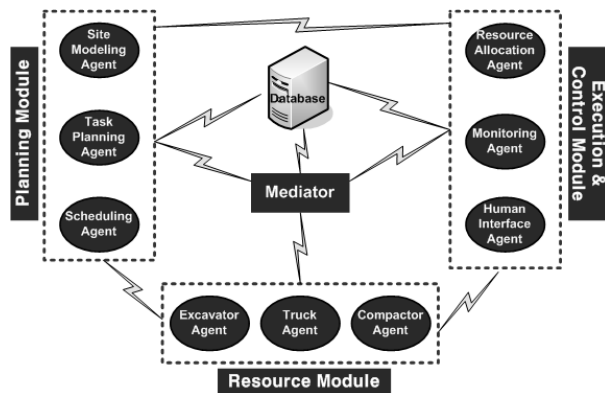


Fig. 1. System Architecture

### 4.1.2 Database (DB)

주어진 환경에 관한 정보와 설계정보를 포함하고 있다. 건설현장의 지형데이터, 지반조사 정보, 시공기면의 위치정보, 품질관련 정보, 투입자원에 관한 정보, 공중 프로세스에 관한 정보, 작업관련 정보(계획, 진행, 완료) 등에 관한 정보를 포함하고 있다. 해당 데이터의 저장, 검색 및 갱신에 관한 기능을 포함하고 있으며, 데이터 보안을 위하여 각 에이전트별로 권한을 부여하고 관리할 수 있는 기능을 포함한다.

### 4.1.3 Planning module

자동화된 작업계획 수립을 위한 모듈로 건설현장의 지형모델을 구성하고, 설계정보의 시공기면의 위치와 각 건설장비 에이전트들의 제원을 고려하여 토공계획을 수립하게 된다. 시공계획 수립을 위하여 Database로부터 필요한 정보를 얻게 되며 절성도 계획을 수립을 위한 절성도 작업량 결정, 토량이동 계획 및 토량다짐 계획수립을 위한 기능을 제공하고 있다.

### 4.1.4 Execution & control module

Planning module에서 수립된 작업계획을 수행하기 위하여 필요한 자원을 할당하고, 투입된 자원의 상태와 작업의 진행정도 및 설계정보에서 계획된 시공품질을 달성했는지 여부를 확인하는 기능을 수행하게 된다. 그리고 사용자 또는 관리자가 직접 협업시스템에 접속하여 정보를 취득하고 제어할 수 있는 인터페이스를 제공하고 있다.

### 4.1.5 Resource module

작업을 위하여 투입되는 다종 및 다수의 건설장비(굴삭기, 트럭, 컴팩터)들을 본 모듈에 속한 에이전트들로 본다. 에이전트들은 센서를 통하여 환경을 인지하고 스스로 움직이면서 주어진 작업을 수행할 수 있는 인공지능을 포함한 객체로 가정하였다. 각 건설장비 에이전트는 개별적인 목표를 갖고 있으며 다른 에이전트와 목표가 상충하는 경우에는 Mediator의 중재를 통하여 조정과정을 거치게 된다.

## 4.2 각 모듈의 구성

### 4.2.1 Planning module agents

Site modeling agent는 3D 스캐너를 이용하여 측정된 정보를 이용하여 삼각망을 구성하고 3차원 지형모델을 형성한다. 현장에서 작업이 진행됨에 따라서 다른 에이전트들로부터 전달해오는 지형 정보에 근거하여 지형모델을 갱신한다. 그리고 DB에서 설계정보를 참조하여 시공기면의 위치를 결정하고 Resource module에 속한 Excavator agent의 제원정보를 고려하여 구축된 3차원 지형모델을 이용하여 절토 Layer와 성토 Layer들로 구분한다.

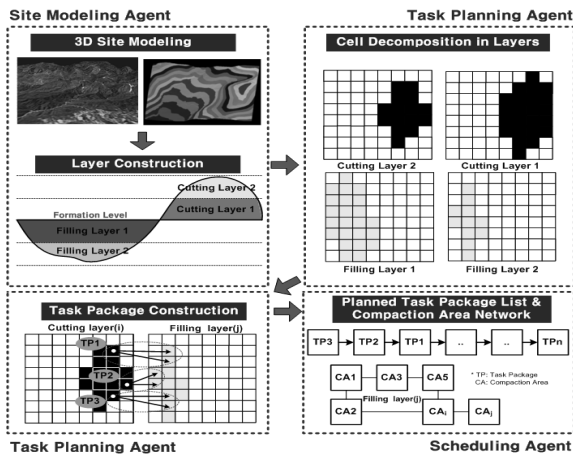


Fig. 2. Work Process of the Planning Module

Task planning agent는 Excavator agent가 플랫폼을 고정하고 작업을 수행할 수 있는 작업유�효반경을 고려하여 Site modeling agent에 의하여 생성된 절성토 Layer를 여러 개의 작업셀(Work cell)들로 구분한다. 절토작업을 수행하게 되는 작업셀과 성토작업을 수행해야하는 작업셀을 서로 매칭시켜 작업패키지(Task package: TP)를 구성하게 된다. 작업패키지는 5가지 종류로 구분되며 이러한 내용은 선행연구(Kim, 2013)에 언급되어 있다. 절토구역의 유용토를 최소의 비용으로 성토구역으로 운반하기 위하여 수송모델을 이용하여 작업패키지가 구성되도록 하는 기능을 갖고 있다.

Scheduling agent는 작업패키지의 우선순위를 결정하며, 우선순위에 따른 작업패키지 리스트를 생성하고 특정 작업패키지가 수행되면 다짐구역 네트워크를 형성하게 된다. 작업패키지 리스트를 생성할 때 Scheduling agent는 전체의 공사기간이 최소화되면서 작업 중에 투입되는 건설장비 에이전트 사이에 공간적인 간섭이 최소화되도록 계획을 수립하는 역할을 담당하게 된다.

Fig. 2는 상기에 언급된 내용을 개념적으로 나타낸 것으로 Planning module의 작업 프로세스를 보여주고 있다.

#### 4.2.2 Execution & control module agents

Resource allocation agent는 수행해야만 하는 작업패키지를 대상으로 투입 가능한 건설장비 에이전트들의 상태를 확인하여 시스템의 효율을 최대화할 수 있는 조합으로 건설장비 에이전트 클러스터 (Equipment Agent Cluster: EAC)를 형성한다. EAC는 1대의 Excavator agent, 다수의 Truck agent와 1대 이상의 Compactor agent들로 구성되는데, Truck agent의 수는 주어진 작업패키지와 가용한 Truck agent의 용량과 상태에 따라서 다르게 구성된다. 가능한 건설장비 에이전트의 가동률 향상과 전체 시스템의 효율성 향상을 추구할 수 있도록 그룹이 형성된다. 특정 작업패키지 수행을

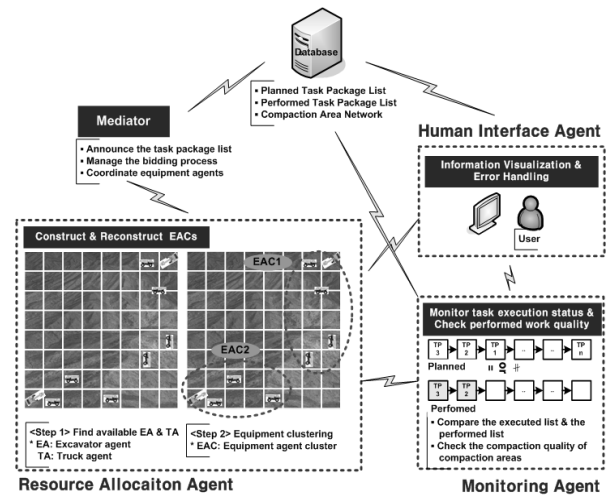


Fig. 3. Work Process of the Execution & Control Module

위하여 구성된 EAC는 주어진 작업을 완료되면 다른 작업패키지 수행을 위하여 다시 투입되지만 시스템의 효율을 고려하여 Truck agent의 수가 실시간으로 조절이 된다. 즉, 하나의 EAC가 형성되면 그 구성이 계속 지속되는 것이 아니라 주어진 상황에 따라서 건설장비 에이전트의 구성이 달라지는 것이다.

Monitoring agent는 작업패키지 리스트에서 작업의 완료여부를 파악하여 작업이 완료된 작업패키지 리스트를 구성하고, 이 2가지 리스트의 내용이 같아지게 되면 절성토 작업은 완료된 것이다. 그리고 다짐구역 리스트에 속해 있는 모든 구역의 다짐작업이 완료가 되었는지의 여부와 설계도서에서 지정한 다짐도를 달성했는지를 확인하는 기능을 수행하게 된다.

Human interface agent는 자동화된 시스템이 오류를 발생시키는 경우나 시스템이 스스로 주어진 업무를 처리할 수 없는 경우가 발생하면 작업자 또는 관리자에 의하여 처리될 수 있도록 하는 인터페이스를 제공한다. 그리고 사용자에게 작업수행과 관련된 각종 정보를 시각적으로 보여주는 기능도 제공한다.

#### 4.2.3 Resource module agents

Resource module은 Excavator agent (굴삭기), Truck agent (트럭), 그리고 Compactor agent (컴팩터)로 구성된다. Resource module에 속한 agent들은 인공지능을 가진 건설장비들로 통틀어 Equipment agent라고 할 수 있다. 기본적으로 각 에이전트는 주위 환경을 인지할 수 있는 통신장비, 센서와 GPS를 장착하고 있으며 주어진 업무를 스스로 수행할 수 있는 능력을 탑재하고 있다. 장비의 용량, 효율, 사이클타임, 고장률, 경제적 운반거리 등과 같이 각자의 특성에 관한 정보를 보유하고 있으며 상태를 파악할 수 있는 능력을 보유하고 있다. 또한 작업수행을 위하여 이동을 하는 경우에 안전하

며 효율적인 이동경로를 생성할 수 있는 경로계획 능력과 다른 에이전트들과 상호협력을 위한 능력을 보유하고 있다.

### 4.3 에이전트간 통신

멀티에이전트 시스템에 사용되는 통신언어는 미국방성에 의하여 제안된 ACL (Agent Communication Language)이 있으며, 이것은 어휘(Ontology), 내부언어인 KIF (Knowledge Interchange Language), 및 외부언어인 KQML (Knowledge Query and Manipulation Language)로 구성되어 있다. 특히 KQML은 에이전트간 통신을 지원하기 위하여 일차술어논리(First-Order Logic)를 갖는 메시지에 대한 문법구조와 통신 프로토콜을 제공하고 있다. 또한 에이전트가 정보나 지식을 교환할 수 있도록 하기 위한 기반을 제공하고 있으며 구조적으로 내용계층(Content layer), 메시지 계

층(Message layer), 통신계층(Communication layer)로 구성되어 있다(Finin et al., 1993).

## 5. 협업시스템 프레임워크

### 5.1 기본형 협업모델

에이전트간 기본적인 협상을 위하여 Contract Net Protocol (Smith, 1980; Davis and Smith, 1988)을 적용하였다. Contract Net Protocol은 주어진 작업을 수행하기 위하여 입찰(Bidding)을 하는 절차를 통하여 협상하는 프로세스를 제공한다(Fig. 4).

Mediator가 수행해야하는 작업이 있음을 알리면 Resource module에 속한 기존 작업에 투입되지 않은 가용한 Equipment agent들이 각자의 입찰값을 계산하여 Mediator로 전송하게 된다.

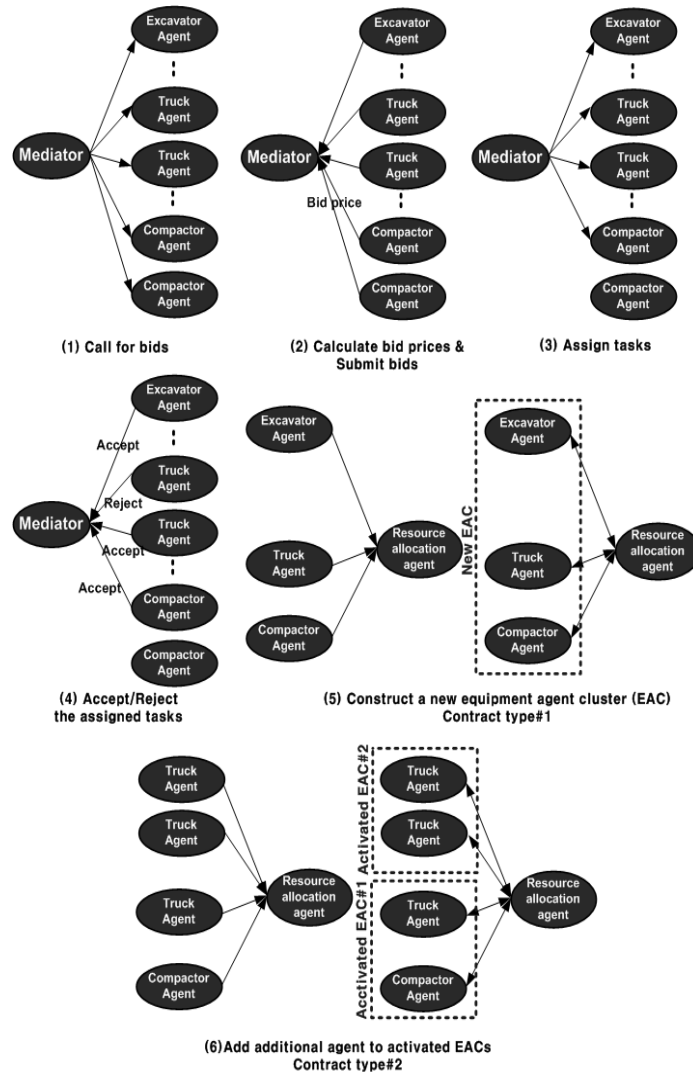


Fig. 4. Contract Net Protocol for a Negotiation Process

Mediator는 입찰값을 비교하여 우선순위를 정하여 Equipment agent에게 작업을 할당하게 되고, 작업을 할당받은 각 Equipment agent는 최종적으로 계약을 승낙할 것인지 아니면 거절할 것인지를 결정하게 된다. 만약 계약을 승낙하게 된다면 이러한 사항은 Resource allocation agent에 통보가 되고 Resource allocation agent는 주어

진 Task package 수행을 위한 EAC를 구성하게 되며, 작업이 종료될 때까지 EAC를 관리하게 된다. 상황에 따라서 계약에 승낙한 Equipment agent들을 합하여 새로운 EAC를 구성할 수도 있고, 이미 구성된 EAC에 할당할 수도 있다.

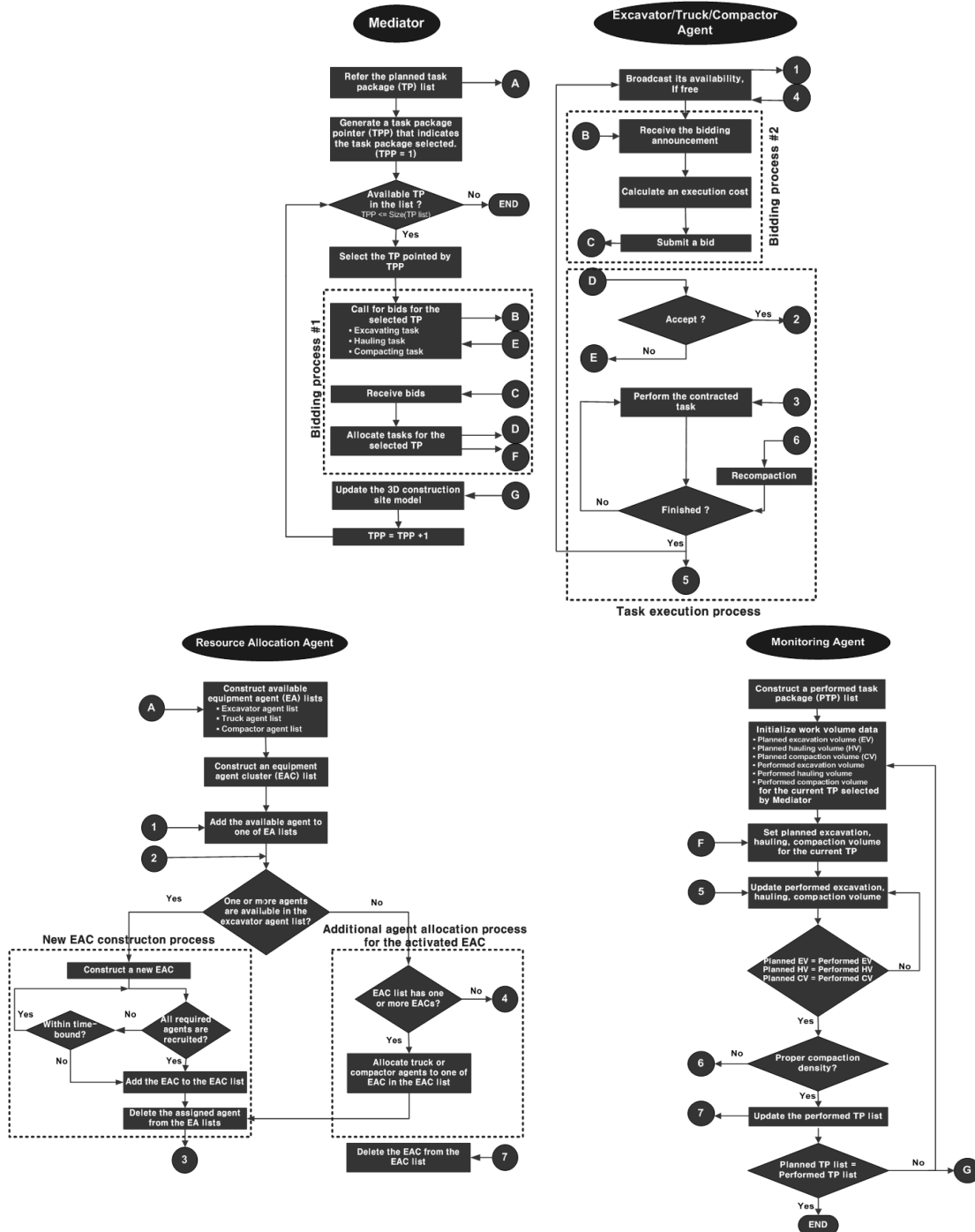


Fig. 5. Flow Chart for a Basic Collaboration Model

Fig. 5는 협업시스템을 구성하는 에이전트들 사이의 정보흐름 및 협상 진행절차를 상세히 보여주고 있다.

- (1) Mediator: Scheduling agent에 의하여 생성된 작업패키지 리스트를 참조하고 리스트에서 가장 첫 번째로 수행되어야 하는 작업패키지를 지시하는 포인터를 생성한다. 포인터가 작업패키지 리스트의 사이즈와 같거나 작으면 수행되어야 하는 작업패키지가 존재하는 것을 의미하며, 작업수행을 위한 입찰절차를 진행한다. 포인터가 위치한 작업패키지의 수행을 위하여 단위 작업으로 구분하여 Equipment agent들에게 입찰정보를 보낸다. 그리고 시스템을 구성하는 다른 에이전트가 활성화되지 않았다면 활성화하여 프로세스가 진행되기 위한 준비를 마칠 수 있도록 하는 기능도 수행한다.
- (2) Equipment agent : Mediator로부터 입찰정보를 받은 가용한 Equipment agent들이 Bidding process에 참여하게 된다. Contract Net을 이용한 Bidding process에 관한 사항은 이미 상기에 언급된 바와 같다.
- (3) Equipment agent: Mediator로부터 할당받은 단위 작업을 받아들이면 입찰 프로세스가 종료되고 EAC를 구성하기 위하여 Resource allocation agent로 정보를 보내게 된다.
- (4) Resource allocation agent: 활성화 단계에서 Equipment agent 종류별로 가용한 에이전트 리스트와 EAC 리스트를 생성하고 입찰 프로세스를 종료한 에이전트를 가용한 에이전트 리스트에 넣는다. 가용한 Excavator agent list에 가용한 Excavator가 존재하는지 확인을 하고 1대 이상 존재한다면 새로운 EAC를 구성하여 구성된 EAC의 구성원으로 편입시킨다. 만약 가용한 Excavator가 없다면 새로운 EAC를 구성하지 않고 기존에 구성된 EAC에 추가적인 구성원으로 편입시킨다. Resource allocation agent의 주요 기능 중의 하나는 EAC를 구성하기 위하여 수행되어야 하는 작업 패키지의 절절토 구역의 거리와 작업량을 고려하여 생산성이 증가되도록 각 Equipment agent의 필요한 대수를 산정한다. 필요한 Equipment agent 대수를 모두 만족할 때까지 새로운 EAC를 구성하는 프로세스가 계속 진행되는 것은 아니며 주어진 Time-bound 내에서만 진행된다. 하지만 최소한 1대의 Excavator agent, 1대 이상의 Truck agent, 1대의 Compactor agent가 EAC를 구성할 수 있도록 한다.
- (5) Monitoring agent: EAC가 구성되고 각 Equipment agent에게 할당된 단위작업을 완료하면 단위작업 종류별로 계획된 작업량과 수행된 작업량을 비교한다. 특히 다짐작업의 경우에는 시방서에 지시된 다짐도가 달성되었는지를 검토하게 된다. 그리고 작업이 완료된 작업패키지 리스트를 갱신

하게 되며 계획된 작업패키지 리스트와 완료된 작업패키지 리스트가 같아지게 되면 종료하게 된다. 이러한 정보를 Mediator로 전송되어 3D 건설현장모델이 작업이 수행된 이후의 모델로 갱신되게 된다.

### 5.2 확장형 협업모델

Contract Net을 기반으로 기본 협업모델을 구성하였으며 계약을 완료한 각 에이전트들은 작업이 완전히 완료될 때까지 주어진 업무에 자신을 투입하는 것을 전제로 하고 있다. 하지만 작업 중에 에이전트가 고장이 나거나 교착상태에 빠지는 경우나, 가용한 Equipment agent가 존재하지만 새롭게 할당될 수 있는 작업패키지가 존재하지 않는 경우에 정상적으로 시스템을 가동할 수 없는 경우가 생기게 된다. 이러한 상황이 발생하는 경우에도 안정적으로 전체 시스템의 효율을 높이고 에이전트 간에 협업을 할 수 있는 장치로써 확장형 협업모델(Fig. 6)을 제시한다.

기본형 협업모델과 차이가 나는 부분은 다음과 같다.

- (1) 만약 어느 특정 Equipment agent가 계약이 끝난 이후에 고장이 난 경우나 교착상태에 빠진 경우에는 Human interface agent에 정보를 보내어 오류를 정정하는 절차를 거치게 되며, 해당 에이전트에게 할당이 되었던 단위작업을 같은 종류의 가용한 다른 에이전트에 재할당하도록 한다. 그리

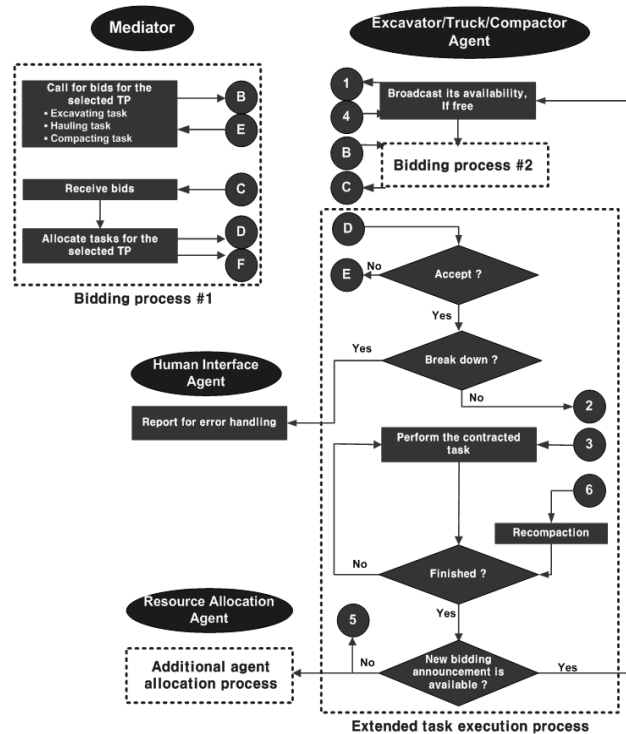


Fig. 6. Flow Chart for an Extended Collaboration Model



고 경우에 따라서는 기존의 구성된 EAC에 구성원인 에이전트에게도 재할당할 수도 있다. 이런 경우에는 단위작업을 할당받은 에이전트는 기존의 EAC에서는 빠지게 되며 주어진 단위작업을 수행하기 위하여 구성된 EAC에 속하게 된다.

- (2) Equipment agent가 주어진 단위작업을 완료하게 되면 Mediator로부터 공지된 새로운 작업패키지에 관한 정보가 있는지를 확인한다. 새로운 작업패키지 정보가 있다면 자신의 가용성을 알리고 Bidding process#2를 다시 수행하게 되고, 새로운 작업패키지 정보가 없다면 Resource allocation agent에 정보를 보내어 기존에 형성되어 작업을 진행 중인 EAC에 추가되도록 한다. 이러한 기능을 수행함으로써 의도하지 않은 변이에 대하여 대응을 할 수 있도록 하며 잉여의 에이전트를 신속히 작업에 재투입함으로써 전체 시스템의 효율을 향상시킬 수 있도록 하였다.

### 5.3 입찰값 계산

Mediator는 수행해야하는 작업패키지가 존재하는 경우에 작업을 할당하기 위하여 입찰을 진행하며, 가용한 Equipment agent는 입찰에 참가하기 위하여 각자의 입찰값을 산출하게 된다. 선행연구(Kim et al., 2005)에서는 토공장비 할당을 위하여 이동거리, 구름저항, 구매저항, 경제적 운반거리, 생산성, 효율성, 고장률을 고려요소로 제시하고 있으며 입찰값 계산을 위하여 각 요소들의 가중치를 산정하여 입찰값 계산모델을 제시하였다. 하지만 현실적인 적용을 감안할 때 제시된 요소들 중에서 이동거리, 효율성, 경제적 운반거리(운반장비 경우), 구름저항의 요소들만 반영을 하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

Task를 할당받기 위하여 각 Equipment agent들은 입찰값을 계산한다. 입찰값 계산에 사용되는 계수들은 다음과 같다.

#### 5.3.1 이동거리 계수(M)

작업이 수행되는 현장에서 토량운반 계획상 가능한 가장 긴 이동거리(M<sub>max</sub>)와 Mediator에 의하여 선택된 Task package의 절성토 구역사이의 거리(M<sub>Tpi</sub>)의 비를 이동거리 계수로 한다.

$$M = M_{Tpi}/M_{max}$$

#### 5.3.2 효율성 계수(E)

주어진 작업의 유형에 대하여 건설장비의 적용성에 따라 다음과 같이 효율성 계수를 산정한다.

$$E1 = \{매우적합:1, 적합: 0.75, 보통: 0.5, 부적합: 0.25, 적용불가: 0\}$$

다짐장비의 경우에는 현장의 토질조건과 적용가능한 롤러타입에 따라서 효율성 계수를 추가적으로 산정한다.

$$E2 = \{토질조건에 부합하는 롤러타입: 1, 그 이외: 0\}$$

#### 5.3.3 경제적 운반거리 계수(H)

작업패키지의 절성토 구역사이의 거리와 건설장비별로 제시된 경제적 운반거리를 고려하여 설정한 계수이다.

$$H = \{경제적 운반거리 이내: 1, 이외: 0\}$$

#### 5.3.4 구름저항 계수(R)

현장의 토질조건에 해당하는 최대 구름저항치(R<sub>max</sub>)와 각 Equipment agent의 구동부 타입에 따른 구름저항치(R<sub>Eai</sub>)의 비로 나타낸다.

$$R = R_{Eai}/R_{max}$$

입찰값 계산을 위한 식은 다음과 같다.

$$Bid Price = W_1*(1-M) + W_2*E + W_3*H + W_4*(1-R)$$

여기서, W<sub>1</sub>, W<sub>2</sub>, W<sub>3</sub>, W<sub>4</sub>는 항목 가중치

Kim et al. (2005)에서 조사된 요소별 가중치는 전체 7가지 항목에 관하여 설정하였으나 본 연구에서는 선행연구에서 제시된 값을 이용하여 4가지 요소만을 고려한 가중치를 계산하였다. 다시 계산된 가중치는 W<sub>1</sub>=0.41, W<sub>2</sub>=0.11, W<sub>3</sub>=0.28, W<sub>4</sub>=0.20이다.

Task package 수행을 위하여 가용한 Equipment agent들은 각자 입찰값을 계산하여 Mediator에게 입찰값을 제시한다. Mediator는 Equipment agent 종류별로 구분하여 제시된 입찰값을 평가하여 세부 업무를 할당한다. 세부 업무 할당순서는 높은 입찰값을 제시한 agent순으로 정하게 된다.

## 6. Resource module agents의 작업수행 관련 기능

### 6.1 경로계획 기능

Resource module에 속한 Equipment agent들은 기본적으로 자율주행 기능을 수행할 수 있는 것으로 본다. 따라서 각 Equipment agent들이 주어진 업무를 수행하기 위하여 건설현장에서 자율적으로 움직일 수 있도록 경로계획을 위한 기능이 필수적이다. 건설장비들이 토공현장에서 절토구역에서 성토구역으로 움직이거나 건설현장내에서 이동을 하는 경우에 적용되는 Global path planning과 굴착 및 다짐작업시 해당 작업구역내에서 효과적으로 움직이기

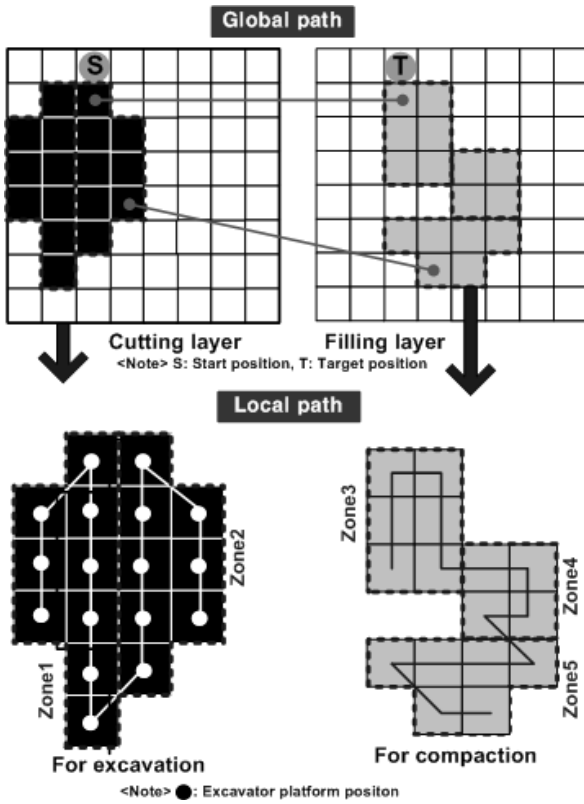


Fig. 7. Example of Global Paths and Local Paths

위한 Local path planning을 위한 알고리즘이 Kim et al. (2012)에 의하여 제시되었다.

Global path planning (Fig. 7)은 Kim et al. (2003)에 의하여 제시되었던 SensBug 알고리즘을 기반으로 하고 있다. Global path planning을 적용하기 위해서는 건설현장을 세부의 구역들로 나누고 Equipment agent들이 통과할 수 있는 구역인지에 대한 정보와 실시간으로 Equipment agent들에게 경로의 시작점과 종착점에 관한 정보를 제공한다. 이와같은 정보가 주어지면 Equipment agent들은 주위 환경을 센싱하면서 SensBug 알고리즘에 의하여 움직이게 된다. 현장적용을 위해서는 생성된 경로를 주행하는 도중에 지반의 경사와 여러 가지 요인들로 인하여 Equipment agent들이 전도되거나 사고가 발생하지 않도록 하는 방지책이 필요하다.

Local path planning에 의하여 굴착 및 다짐의 대상이 되는 구역을 세부구역(Zone)으로 구분하고 각 세부구역을 연결하는 네트워크를 구성한 이후에 Traveling Salesman Problem의 해를 적용하여 작업이 수행되어야 하는 세부구역의 순서를 설정한다. 그리고 Equipment agent의 작업 유효폭을 고려하여 각 세부구역에서 작업을 위한 이동패턴을 설정하여 최종적인 이동경로를 제시하게 된다. 굴삭작업을 위한 Local path는 작업대상 절토 레이어에서 굴삭기가 플랫폼을 이동하는 거리가 최소이면서 방향전환을 위하

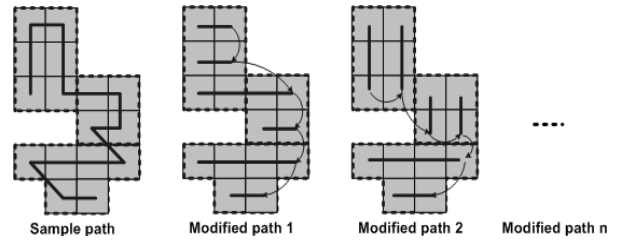


Fig. 8. Modified Local Paths for Compaction

여 회전을 하는 회수를 최소화한 경로가 된다. 하지만 기존의 연구에서 제시된 Local path를 다짐작업을 위하여 성토가 완료된 레이어에 적용하는 경우에는 실질적으로 다짐이 이루어지는 패턴과는 다른 양상을 보이게 된다. 다짐작업의 경우에는 실제 건설현장에서는 가능한 가장 심플하고 단순화된 작업패턴을 따르게 되며 요구되는 다짐도를 달성하기 위하여 동일한 경로에 대하여 여러 번 다짐작업을 수행해야만 한다. 따라서 다짐작업을 위한 Local path는 Fig. 8에서 보는 바와같이 심플하면서도 반복작업이 수월한 패턴으로 수정이 필요하다.

## 6.2 충돌방지 기능

Resource module에 속한 Equipment agent들이 이동경로를 따라서 움직이는 경우에 현장에 위치한 정지된 장애물 또는 움직이는 장애물과 접촉할 가능성이 있다. 각 Equipment agent들이 안전하게 주어진 임무를 수행하기 위해서는 현장의 장애물을 극복할 수 있는 기능을 제공하는 것이 필수적이다.

Kim et al. (2012)는 Equipment agent들이 주행 중 환경내에 존재하는 다른 객체들과의 충돌을 방지하기 위하여 Convex polygon 개념을 도입하고, Convex polygon의 변형을 고려하여 객체들의 원래 크기를 변화시킨 C-Space object라는 개념을 제시하였다. 기존의 많은 경로계획 관련 연구들은 로봇 또는 모바일 장비를 하나의 점으로 가정하여 경로를 생성하도록 하였다. 하지만 현실적인 경로계획을 위해서는 로봇 또는 모바일 장비의 크기를 고려하여 경로계획을 이루어지도록 해야 한다.

Fig. 9에서 보는 바와같이 Convex polygon은 각 Equipment agent의 크기와 작업범위를 포함할 수 있는 원을 의미하며, 건설현장 내에 존재하는 다른 장애물들(주로 정지된 장애물)은 원래의 경계로부터 Convex polygon의 반경 크기만큼 객체가 확장된 것(Obstacle size in C-Space)으로 본다. Equipment agent가 주행 중에 자신의 Convex polygon의 중심이 확장된 장애물의 경계를 침범하지 않으면 충돌하지 않는 것으로 인식한다. 그리고 확장된 장애물의 경계가 서로 겹치는 경우에는 공간간섭이 생긴 것으로 인지하고 Equipment agent가 통과하거나 지나갈 수 없는 것으로 판단한다. 주어진 환경 내에서 Equipment agent가 이동하는 것은

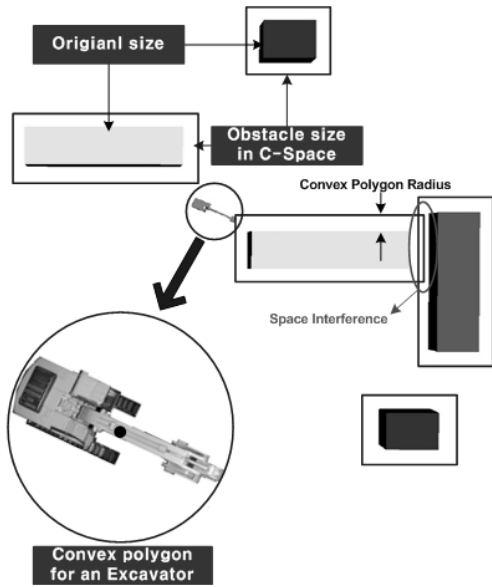


Fig. 9. Convex Polygon and Obstacle Size in C-Space

SensBug 알고리즘에 따르며, 기존의 SensBug 알고리즘과 차이점은 원래의 장애물의 경계를 사용하지 않고 확장된 장애물의 경계를 사용하는 것이다. 그리고 움직이는 장애물(주로 다른 Equipment agent)의 경우에는 GPS 좌표정보와 속도 및 방향정보를 이용하여 충돌을 회피하는 행위를 하게 된다. 자세한 회피방법은 Kim et al. (2012)의 논문에 제시되어 있다.

### 6.3 다짐작업 협업기능

본 연구에서는 다수의 Compactor agent가 투입되는 상황을 대상으로 다짐작업을 위한 협업기능을 제시하고자 한다. Planning module agent에 의하여 수행해야할 작업패키지 리스트가 완성되고 작업패키지가 수행되면서 특정 성토레이어에 다짐구역 네트워크가 구성된다. 다수의 Compactor agent들이 동일한 성토레이어 상에서 작업을 수행하는 경우에 각 Compactor agent는 다짐구역 네트워크를 효과적으로 이동하면서 다짐작업을 수행해야 하며, 에이전트간 충돌을 피해야 하고 간섭효과를 최소화 시켜야 한다. 동일한 구역에서 작업을 수행하는 경우에는 중복작업을 방지해야 하고 협업작업이 가능하도록 하는 기능이 필요하다. 그리고 각 Compactor agent는 다짐구역 네트워크에서 작업이 완료된 노드(Node, 다짐 작업셀)의 다짐도에 대한 정보를 제공해야만 한다.

#### 6.3.1 다짐 Network 구성

모든 작업패키지의 구성이 완료되면 Fig. 10에서 보는 바와같은 한 대의 Compactor agent가 연속적으로 작업을 수행할 Compaction zone이 형성되고, 이것은 다짐작업을 위한 Sub Network로 구성할

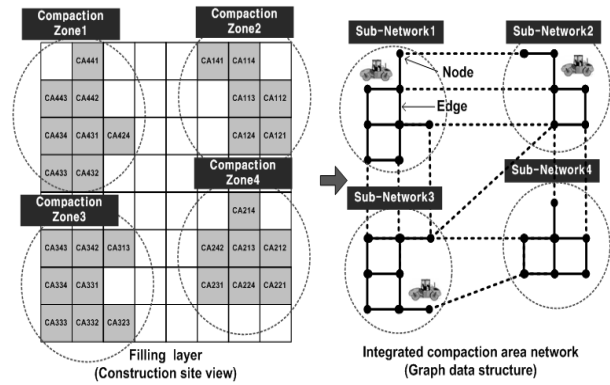


Fig. 10. Compaction Area Network Example

수 있다. 우선적으로 네트워크의 노드(Node)를 형성하게 되는데 성토가 완료된 작업셀의 중심좌표를 기준으로 생성이 되며, 이후에 노드를 연결하는 에지(Edge)를 형성하게 된다. 에지는 하나의 노드에서 다른 하나의 노드까지 이동 가능한 단거리 경로를 따라 생성된다. 하나의 성토 레이어는 다수의 Sub Network들로 구성될 수 있다. Sub Network들은 Compactor agent가 이동 가능한 최단 경로를 따라서 에지(Fig. 10에서 점선 부분)로 연결될 수 있고, Sub Network들이 모두 에지로 연결되면 통합된 형태의 다짐구역 네트워크를 형성하게 된다. 형성된 네트워크는 Compactor agent들이 해당 성토레이어에서 효율적으로 다짐작업을 수행하기 위한 정보관리용 자료구조로 사용된다.

#### 6.3.2 다짐 Network 검색 및 정보관리

현실적으로 성토레이어에 여러 개의 Compaction zone들이 존재하는 경우에 모든 Zone에 Compactor agent가 할당될 수는 없다. 이러한 경우에는 Compactor agent가 할당된 작업구역(Activated zone)과 그렇지 않은 구역(Deactivated zone)으로 구분되게 된다.

만약 Fig. 10과 같이 3개의 Compaction zone에 1대씩의 Compactor agent가 할당된 경우를 가정해 보면, Activated zone별로 작업이 완료되는데 걸리는 공기가 달라질 것이다. 특정 Activated zone의 작업이 우선 완료되면 여기에 할당된 Compactor agent는 Deactivated zone에 할당되거나 작업이 진행 중인 다른 Activated zone으로 할당되어 작업을 수행하게 된다. Compactor agent의 가동률을 높이기 위한 방법으로 작업이 수행되게 되는 것이다.

다짐작업을 위한 모듈도 분산형 제어를 기본으로 하고 있어서 Compactor agent는 특정 성토레이어에 속한 모든 Compaction zone의 Network 정보를 갖고 있지 않으며, 다른 Compactor agent의 의하여 작업이 완료된 노드에 관한 정보를 갖고 있지 않다. 따라서 이러한 정보를 취득하고 중복작업을 배제하고 효과적인 협업을 위하여 통합된 네트워크를 검색하기 위한 방법이 필요하다.

특정 Compactor agent는 성토레이어에서 최초로 자신이 작업을 수행해야 하는 Compaction zone의 노드정보와 각 노드별로 다짐 작업의 완료 유무에 관한 정보는 갖고 있지만, 전체 통합된 다짐구역 네트워크 정보와 Deactivated zone이나 다른 Compactor agent에 의하여 작업이 수행중인 Compaction zone 등에 관련된 정보를 갖고 있지 않다. 따라서 전체 통합된 다짐구역 네트워크에서의 이동과 관련한 의사결정과 정보가 없는 Zone에서 효과적으로 작업을 수행하기 위해서는 네트워크상의 새로운 노드의 검색과 더불어 다른 agent로부터 다짐작업의 진행과 관련한 정보를 주고받아야 한다.

통합된 다짐구역 네트워크에서의 검색방법은 깊이우선탐색(Depth First Search: DFS) 알고리즘을 사용하고 있다. 각 Compactor agent는 방문한 노드에 관한 정보를 스택(Stack) 자료구조에 순차적으로 저장하며 다음과 같이 2가지 정보로 나누어 관리하게 된다. 여기서 방문한 노드의 의미는 Compactor agent가 Compaction zone내의 해당 노드가 나타내는 구역에서의 다짐작업이 완료되었음을 나타낸다.

Compacted\_Area(I) = {node#, node#, node#, .....}:

자신이 다짐을 완료한 노드정보

Compacted\_Area(Other)={node#,node#,node#, .....}:

다른 agent에 의하여 다짐이 완료된 노드정보

### 6.3.3 협업다짐 모드

개별 Compactor agent가 특정 작업구역에 할당되며 형성된 Sub Network의 한 노드에서 다짐작업을 수행하게 된다. 해당 노드에서의 다짐작업이 완료되면 Compacted\_Area (I) 리스트를 업데이트하고 다짐도에 관한 정보도 업데이트하게 된다. 이후에 해당 Sub Network에서 아직 다짐작업이 수행되지 않은 인접한 노드를 선택하여 Compactor agent가 이동하여 다짐작업을 수행하게 된다. Activated zone의 Sub Network내에서 Compactor agent의 노드방문 패턴은 Fig. 8에서의 사례와 같이 다짐작업을 수행하는데 이동거리가 짧고 심플한 패턴을 따르게 되는데 현장여건에 따라서 다양한 방문패턴이 생길 수 있다.

협업다짐 모드는 특정 Activated zone의 다짐작업이 완료된 경우에 할당된 Compactor agent (Released agent)가 Deactivated zone에 할당되거나 작업이 진행 중인 다른 Activated zone으로 할당되는 경우에 사용된다. 협업다짐 모드에서는 기본적으로 Compactor agent가 자신이 작업을 수행한 노드에 관한 정보 (Compacted\_Area(I) 리스트)와 다른 Compactor agents에 의하여 작업이 수행된 노드에 관한 정보(Compacted\_Area (Other) 리스트) 이외의 노드에 관한 정보를 갖고 있지 않기 때문에 전체

다짐구역 네트워크에서 작업이 수행되지 않은 노드는 DFS 알고리즘을 이용한 탐색을 수행하여 이동할 노드를 결정해야만 한다. Released agent가 Deactivated zone에 해당하는 노드로 이동하게 되는 경우에는 해당 Zone이 Activated zone으로 변경되며 이동된 Released agent의 주도로 다짐작업이 수행되며, 다른 Compactor agent에 의하여 다짐작업이 수행되고 있는 기존의 Activated zone에 할당되는 경우에는 협업을 통하여 주어진 Zone내의 작업을 완료하게 된다.

만약 Released agent가 현재의 위치에서 이동을 할 수 있는 대상 노드가 여러 개가 존재한다면 이동비용(Moving value)을 계산하여 비용이 가장 저렴한 노드를 선택하여 이동하게 된다. 이동비용은 Released agent의 현재 노드에서 대상이 되는 노드의 중심간 거리와 다른 Compactor agent들의 위치에서 대상이 되는 노드 중심간 거리의 총합의 비로 계산된다. 기본적으로 전체 시스템의 효율이라는 측면에서 대상이 되는 노드에서의 다짐작업이 Released agent에 의하여 수행되는 것이 유리한지 아니면 다른 Compactor agent에 의하여 수행되는 것이 유리한지를 고려한 것이다.

Moving value =

$$\frac{\text{현재 노드와 대상 노드의 중심간 거리}}{\sum \text{타 Compactor agent의 현재 노드와 대상 노드의 중심간 거리}}$$

DFS 알고리즘을 이용하여 전체 다짐네트워크를 탐색하는 경우에 다음 Fig. 11와 같이 4가지 상황이 발생하게 된다. Type 1은 다음 방문대상 노드가 이미 작업이 수행된 노드라면 이전에 방문한 노드 중에서 아직 작업이 수행되지 않은 인접 노드를 포함한 가장 최근에 작업이 완료된 노드로 되돌아가는 경우이다. Type 2는 다음 방문대상 노드가 모두 다짐작업이 수행되지 않았으므로 이동비용을 계산하여 비용이 저렴한 노드로 이동하는 경우이다. Type

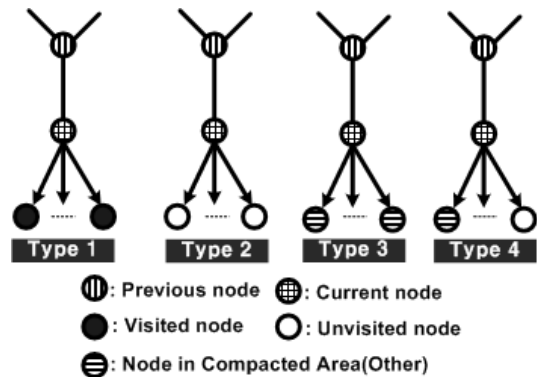
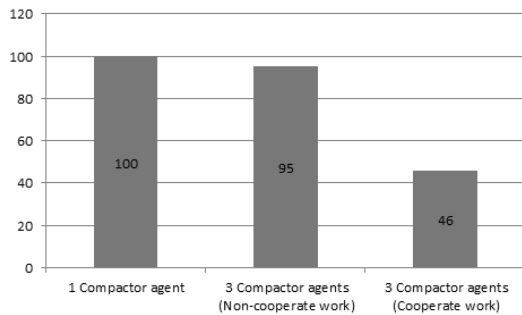


Fig. 11. Four Types of Compaction Network Condition for Visiting a New Node

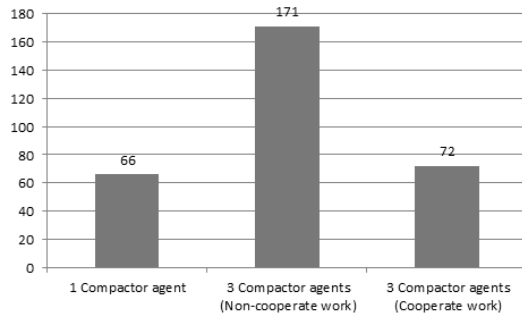
3은 다음 방문대상 노드가 다른 Compactor agent에 의하여 작업이 완료된 노드로 Type 1과 동일하게 이전에 방문한 노드 중에서 아직 작업이 수행되지 않은 인접 노드를 포함한 가장 최근에 작업이 완료된 노드로 되돌아가는 경우이다. Type 4는 다른 Compactor agent에 의하여 작업이 완료된 노드는 제외하고 작업이 수행되지 않은 노드들을 기준으로 이동비용을 계산하여 비용이 저렴한 노드로 이동하는 경우이다.

### 6.3.4 협업다짐 모드의 효율성

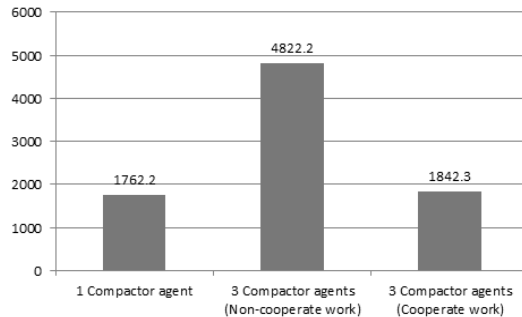
협업다짐 모드를 이용한 멀티에이전트 시스템의 효율성을 평가하기 위하여 모의조작 실험을 실시하였다. 프로그램은 C++로 구현하였으며, 한 개의 다짐셀 크기가 10×10m이고 전체 50개의 다짐드로 이루어진 네트워크를 이용하였다.



(a) Time



(b) Number of Visited Nodes



(c) Total Moving Distance

Fig. 12. Simulation Results

Compactor agent가 1대가 투입되는 경우와 3대가 투입되는 경우로 나누어 실험을 하였으며, 특히 3대가 투입되는 경우에는 협업다짐 모드가 사용되는 경우와 그렇지 않은 경우로 실험하였다. 효율성은 주어진 다짐노드를 모두 방문하는데 걸리는 시간과 전체 방문노드의 개수, 그리고 전체 이동거리를 기준으로 측정하였다. 5회 반복하여 실험을 하였으며 매번 Compactor agent의 출발점을 달리하였으며 결과는 평균값을 기준으로 비교를 하였다. 실험결과는 다음 Fig. 12와 같다.

결과에 따르면 모든 노드를 방문하는데 걸리는 시간은 3대의 Compactor agent가 협업모드를 사용하는 경우가 가장 짧았으며, 전체 방문노드의 수는 1대의 Compactor agent를 사용하는 경우와 3대의 Compactor agent가 협업모드를 사용하는 경우가 비슷하였으며, 전체 이동거리도 1대의 Compactor agent를 사용하는 경우와 3대의 Compactor agent가 협업모드를 사용하는 경우가 비슷하였다. 3대의 Compactor agent가 협업모드를 사용하지 않는 경우에는 노드 방문수와 전체 이동거리 항목에서 가장 나쁜 결과를 보여주고 있다. 본 모의조작 결과가 시사하는 바는 협업모드를 사용하는 멀티에이전트 시스템이 작업시간 측면에서 가장유리하며 노드 방문수와 전체 이동거리가 1대의 에이전트와 유사한 결과를 보이고 있다는 것은 멀티에이전트가 협업능력이 효율적임을 나타내는 것이다. 다수 및 다종의 건설장비가 건설현장에 투입되는 조건을 고려해 볼 때 협업모드가 적용되는 멀티에이전트 시스템을 이용하는 경우에 중복작업이나 비효율적인 작업이 최소화 될 수 있음을 보여주는 것이다.

## 7. 결론

본 연구는 토공을 대상으로 하고 있으며 지능형 토공시스템을 구현하기 위한 노력의 일부로 수행된 것이다. 기존의 연구들은 단일 건설장비 또는 시스템 개발에 초점이 맞추어져 왔던 반면에 본 연구는 다수 및 다종의 건설장비들이 협업을 통하여 토공작업을 수행할 수 있는 기반을 제공했다는 점에서 차별성이 있다고 판단된다.

지능형 토공시스템의 구현을 위해서는 변화가 많은 건설현장의 특성을 반영해야 하며 투입되는 다양한 장비의 협업에 관한 솔루션을 제공하는 것이 중요하다. MAS의 개념을 도입한 것도 이러한 측면에서 효율적인 도구를 제시할 수 있을 것으로 판단하였기 때문이다. 지능형 토공시스템의 각 구성 객체들이 모두 에이전트의 특성을 갖고 있다고 가정하고 멀티에이전트 시스템의 구조, 구성 및 기능을 제시하였다. 멀티에이전트 시스템에서는 각 에이전트별로 독립적인 기능과 목적을 갖고 있으며 각기 다른 용량과 능력을 갖고 있다. 주어진 토공작업을 수행하는 중에 에이전트간에 서로 목적이 상충하는 경우도 발생하며, 에이전트가 협업방법에 따라서

전체 시스템의 효율성이 많이 달라지게 된다. 따라서 전체 시스템의 효율성이라는 측면에서 각 에이전트들이 이해가 상충되는 경우에 중재 및 조정을 통하여 서로 협업을 할 수 있는 방안을 제시해야 하는데, 본 연구에서는 이러한 기능을 수행하기 위한 방법론을 제시하였다.

토공작업 중에 굴삭작업과 다짐작업의 계획수립과 작업수행을 위하여 건설장비의 이동계획 방법을 제시하였고, 또한 다짐작업시 다짐장비가 작업구역에 관한 제한된 정보에 근거하여 다른 다짐장비와의 협업을 통하여 효율적으로 작업을 할 수 있는 방안을 제시하였다. 협업다짐의 효율성을 확인해 보기 위하여 모의조작을 통하여 분석을 실시한 결과 생산성 측면과 효율성 측면에서 좋은 성과를 보이는 것으로 나타났으며, 이것은 제시된 멀티에이전트 시스템의 조정과 협업있기능이 잘 작동하고 있음을 보이고 있다.

아직까지 건설자동화 연구에서 인공지능을 도입하는 연구는 많이 진행되고 있지 않으며, 특히 건설분야에서는 MAS 개념을 도입하여 연구를 수행한 사례가 매우 제한적이다. 현재 건설현장에서 적용되는 자동화 장비 및 시스템이 매우 소수인 점은 제조업과는 다른 건설현장의 가변성에 기인한 작업수행의 불확실성 및 안전성 측면에서의 우려 때문이다. 이러한 가변성에 효과적으로 대응하기 위한 방법론으로 인공지능 기술의 도입이 필요하다고 판단된다. 본 연구가 건설자동화 시스템에 인공지능을 도입하기 위한 이론적인 기반을 제공할 수 있다고 사료되며, 추후 건설자동화 연구에서 다양한 인공지능 기법들이 적용된다면 실제로 현장 적용성이 높은 자동화 시스템들이 구축될 수 있을 것이다.

## 감사의 글

본 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국과학재단의 연구지원프로그램으로 지원받았습니다(연구과제 No: 2012-002104).

## References

Davis, R. (1980). "Report on workshop on distributed AI." Sigart Newsletter 73, pp. 45-52.

Davis, R. and Smith, R. G. (1988). "Negotiation as a metaphor for distributed problem solving." *Readings in Distributed Artificial Intelligence*, Morgan Kaufmann Publishers, Inc., San Mateo, CA, pp. 333-356.

Ferber, J. (1999). *Multi-agent systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence*, Addison-Wesley, New York, USA.

Finin, T., Weber, J., Wiederhold, G., Genesereth, M., Fritzson, F., McKay, D., McGuire, J., Pelavin, R., Shapiro, S. and Beck, C. (1993). *Draft specification of the KQML agent-communication*

*language*, Technical Report of the DARPA Knowledge Sharing Initiative External Interfaces Working Group. USA.

Fonseca, J. M., Oliveira, E. and Steiger-Garcia, A. (1999). "MACIV - A multi-agent system for resource management on civil construction companies." *The 16<sup>th</sup> International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Madrid, Spain, pp. 123-130.

Galinho, T., Cardon, A. and Vacher, J. (1988). "Genetic integration in a multi-agent system for job-shop scheduling." *Progress in Artificial Intelligence-IBERAMIA 98*, Lisbon, Portugal, pp. 76-87.

Kim, J. Y., Park, S. M., Ko, K. E., Jang, I. H. and Sim, K. B. (2012). "Design of communication system for intelligent multi agent robot system." *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 18, No. 8, pp. 758-767 (in Korean).

Kim, K. M., Kang, C. S. and Kim, K. J. (2007). "Development of prototype system of multi-agent based simulation for construction process." *Proceedings of 2007 Annual Conference & Eivil Expo*, 2007.10, pp. 1445-1449 (in Korean).

Kim, S. K. (2013). "3D-based earthwork planning and CO<sub>2</sub> emission estimation for automated earthworks." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 3, pp. 1191-1202 (in Korean).

Kim, S. K., Lee, D. K. and Kim, H. C. (2005). "A model for allocating automated earthwork equipment using contract net." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 25, No. 5D, pp. 721-727 (in Korean).

Kim, S. K., Russell, J. S. and Koo, K. J. (2003). "Construction robot path-planning for earthwork operations." *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 17, No. 2, pp. 97-104.

Kim, S. K., Seo, J. W. and Russell, J. S. (2012). "Intelligent navigation strategies for an automated earthwork system." *Automation in Construction*, Vol. 21, No. 1, pp. 132-147.

Koo, C. C. (1987). *A distributed model for performance systems synchronizing plans among agents via communication*, Ph.D. Thesis, Stanford University.

Lee, J. K., Park, S. H., Lee, J. W., Han, S. H. and Han, H. S. (2005). "Development of an integrated design system based on multi-agent." *Journal of the Korean Society of Precision*, Vol. 22, No. 1, pp. 14-18 (in Korean).

Lee, J. W. (2009). "The concept and simulation of a multi-agent based intelligent environment based on the theory of collaborative design." *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 25, No. 9, pp. 311-319 (in Korean).

Lin, F. C. and Hsu, Y. J. (1996). "Coordination-based cooperation protocol in multi-agent robotic system." *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Minneapolis, Minnesota, USA, pp. 1632-1637.

Pamuk, H. V. D. (1987). "Manufacturing experience with the contract net." *Distributed Artificial Intelligence*, M. Huhns (Ed.), San Mateo, CA., pp. 285-310.

Park, B. J., Choi, H. R. and Kang, M. H. (2007). "A multi-agent system based on genetic algorithm for integration planning in a supply chain management." *Journal of Korea Intelligent Information*

- System Society*, Vol. 13, No. 3, pp. 47-61 (in Korean).
- Park, Y. J., Ryoo, K. Y. and Lee, S. I. (2010). "Framework of multi-agent based collaboration systems with simulation study." *Proceedings of the Korean Institute of Industrial Engineers (Fall Conference)*, pp. 581-587 (in Korean).
- Petrie, C., Goldmann, S. and Raquet, A. (1999). "Agent-based project management." *Lecture Note in Artificial Intelligence*, No. 1600.
- Rosenschein, J. S. (1986). *Rational interaction: Cooperation Among Intelligent Agents*, Ph.D. Thesis, Stanford University, CA, USA.
- Russell, S. and Norvig, P. (2010). *Artificial intelligence: A Modern Approach (3rd Ed.)*, Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Smith, R. G. (1980). "The contract net protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver." *IEEE Transactions on Computers*, Vol. C-29, No. 12, pp. 1104-1113.