



## 소셜 네트워크에서 공통믿음의 형성과 추론: 카카오톡 채팅방을 중심으로

### Achieving and Reasoning about Common Beliefs based on Social Networking Services: on the Group Chatting Model of KakaoTalk

김군오<sup>†</sup>  
Koono Kim<sup>†</sup>

한동대학교 글로벌리더십학부  
Global Leadership School, Handong University

#### 요약

이론적으로 분산 비동기 통신 환경에서 공통믿음 또는 공통지식의 형성은 불가능하다고 받아들여져 왔으나, 서로 신뢰하는 에이전트 그룹에서는 비동기 통신을 사용하더라도 데드라인이 있는 명제들은 공통믿음이 될 수 있고 이를 바탕으로 한 추론이 가능함을 보여준다. 일반적으로 멀티에이전트 환경에서 공통믿음의 형성은 통신의 문제로 접근하며 통신 시간의 제약이 없는 시스템 상에서는 공통믿음이 형성되지 않는다는 공통믿음 역설 문제를 느슨한 정밀도를 적용하고 필요한 요구조건을 완화시켜 공통믿음을 형성 할 수 있음을 카카오톡 채팅방 모델을 통해 확인한다. 또한 카카오톡 채팅방 모델의 각 에이전트에 추론 기능을 구현하여 생성된 공통믿음을 알고 있는지에 관한 질의를 통해 공통믿음을 확인하는 추론 기능을 실험하였다. 분산 멀티에이전트 환경에서 공통믿음의 표현과 추론을 메타논리 프로그래밍으로 형식화하였으며, 카카오톡 채팅방 모델을 통해 비동기 통신을 사용하는 분산 에이전트 그룹이 공통믿음을 형성할 수 있음을 실험적으로 보였다.

키워드 : 공통믿음, 메타논리프로그래밍, 비동기 통신, 멀티에이전트 시스템, 카카오톡 채팅방

#### Abstract

Theoretically, it is known that common beliefs and/or common knowledge cannot be attained in asynchronously distributed multiagent environments, however, it show that some propositions with deadlines can be attained as common beliefs among a set of fully trusted agents even when they communicate to each other asynchronously. Generally, in the multiagent environment, the attainment of common beliefs is approached as a problem of communication, and for the common beliefs paradox that the common beliefs is not attained on a system without communication time restriction is applied to loose coarser granularity and it prove that forming common beliefs is possible by relaxing necessary requirements through the KakaoTalk chatting model. I also experimented with the reasoning function that confirms the common beliefs by inquiring about the common belief generated by implementing the inference function in each agent of the KakaoTalk chatting model. Through utilizing metalogic programming, a formalization of the presentation and reasoning of common beliefs has been achieved, and the group chatting model of KakaoTalk was adopted in experiments to show that common beliefs can be formed among distributed agents using asynchronous communication.

Key Words : Common Beliefs, Metalogic Programming, Asynchronous Communication, Multiagent System, KakaoTalk chatting

Received: Jan. 18, 2017

Revised: Feb. 17, 2017

Accepted: Feb. 18, 2017

<sup>†</sup>Corresponding authors

kok@handong.edu

## 1. 서론

분산 멀티 에이전트 환경에서 공통믿음(common beliefs)이란 각 에이전트가 모두 믿고 있고, 에이전트는 또한 다른 에이전트들 역시 공통적으로 믿고 있다는 사실을 믿고 있으며, 이러한 순환이 무한 반복되는 개념을 가리킨다. 좀 더 구체적으로 에이전트들의 모임  $G$ 에서 명제  $p$ 가 공통믿음이라는 것은  $G$ 에 속한 각 에이전트가  $p$ 를 믿고 있고, 각 에이전트들은 또한 다른 에이전트들 역시  $p$ 를 믿고 있다는 사실을 믿고 있으며 등과 같이 무한히 반복된다.

인공지능 분야에서 공통지식에 대한 연구는 멀티 에이전트 환경에서 공통믿음이 어떻게 형성되고 표현되는가와 이를 기반으로 추론에 적용할 수 있는 다양한 응용 등의 주제들로 구분된다 [1,2]. 먼저, 멀티 에이전트 환경에서 공통믿음의 형성은 통신(communication) 문제로 접근해 왔다. 여러 가지 방법으로 공통믿음을 형성할 수 있지만 가장 대표적인 방법은 신뢰할 수 있는 공표

이 연구는 한동대학교 교내연구지원사업 제 20150088호(연구과제번호)에 의한 것임.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

(public announcement)를 통해서 공통믿음이 형성된다. 하지만 두 장군 문제(the problem of the two generals) 혹은 연합공격 문제(coordinated attack problem)에서처럼 신뢰할 수 없는 채널을 통해서 공통지식을 형성할 수 없다는 사실이 Halpern과 Moses에 의해 증명되었다[3]. 또한 통신 채널의 신뢰성이 보장된다고 하더라도 메시지가 수신되기까지 걸리는 시간에 제한을 두지 않는 시스템에서도 공통믿음은 형성되지 못함을 증명하였다. 시간적 부정확성으로 인해 공통믿음이 실제 세계에서는 만들어 질 수 없다는 “공통믿음의 역설” 문제를 Fagin은 느슨한 정밀도를 적용해서 세상을 리모델링하거나 필요한 요구 조건을 완화시켜 공통믿음을 형성할 수 있음을 보였다[4,5].

최근 소셜 네트워크 서비스나 대중화된 통신 매체를 통한 공통믿음의 형성에 대한 연구가 소개되고 있는데 그 중에서도 페이스북(Facebook)의 타임라인에 게시된 정보를 기반으로 정보의 확산에 대한 동적 게임이론 모델을 제시한 Korkmaz의 연구와[6,7], 한 그룹 내에서 에이전트가 다른 에이전트들에게 이메일(Email)을 전송하고 이 메일을 받은 에이전트가 또 다른 에이전트에게 메일을 전달하거나 회신 및 비밀참조(blind carbon copy) 등을 하게 될 경우 에이전트 그룹 안에서 이메일이 발송되었다는 공통믿음이 어떻게 형성되는지에 관한 Sietsma의 연구가 소개되고 있다[8]. Korkmaz가 제시한 CKF(Common Knowledge through Facebook)모델은 페이스북 타임라인을 통해 두 에이전트가 서로 연결되어 상호지식(Mutual Knowledge)을 공유하며 각 에이전트들이 가지는 네트워크의 한계점까지 확장하는 네트워크 구조를 정의하여 두 그룹의 에이전트들이 완전 이분 그래프(complete bipartite graph) 구조로 공통지식을 형식화한다. 하지만 CKF 모델에서는 특정 그룹에 속한 에이전트들 사이의 공통믿음 형성에 관해서는 다루지 않는다.

소셜 네트워크 서비스인 페이스북과 달리 카카오톡(KakaoTalk)은 1:1 혹은 그룹 채팅이 가능한 모바일 메신저이다. 이 논문에서는 카카오톡 채팅방의 그룹 채팅을 통해 에이전트들이 공통믿음을 형성하는 과정을 형식화 하고 이러한 환경을 CBK(Common Beliefs through KakaoTalk) 모델이라 부른다. CBK 모델에서는 그룹에 속한 모든 에이전트들이 특정 명제에 대해 완전 방향그래프(directed complete graph) 구조를 가지면서 공통믿음이 형성됨을 보일 것이다.

Sietsma의 이메일 프레임워크는 동기적 통신 방식으로 단순화시켜 공통믿음이 형성됨을 입증하였기 때문에 비동기 통신 환경에서 브로드캐스팅을 이용한 공표 방법으로 공통믿음을 형성한 본 연구의 CBK 모델이 더 현실적인 접근이라고 본다.

두 번째로 공통믿음의 표현과 추론에 관한 연구는 기본적으로 지식(knowledge) 또는 믿음(beliefs)의 표현 방법론을 따른다.

논리적 프레임워크 내에서 지식이나 믿음의 표현은 이를 일종의 연산자로 표현하는 모달 논리(modal logic)와 메타술어로 나타내는 메타논리(meta-logic)로 나눌 수 있다. 이 연구에서는 에이전트들 사이에 공통믿음을 표현하고 추론하는 것과 특정 조건들을 만족하는 비동기 통신 환경에서 공통믿음이 에이전트들 사이에서 형성될 수 있음을 보이기 위해 메타논리를 사용한 논리프로그래밍으로 형식화하고 구현할 것이다[2].

본 논문의 구성은 2절에서 공통믿음을 형성, 표현하고 추론하기 위한 동기가 되는 예제들과 공통믿음을 형성하기 위한 전제 조건들을 소개하고 3절에서는 메타논리를 이용하여 공통믿음의 표현에 대해 알아보고자 한다. 4절에서는 카카오톡 그룹 채팅방 모델을 사용하여 분산 비동기 통신 환경에서 공통믿음이 형성됨을 실제 prolog 언어로 구현하여 결과를 분석하고, 이를 바탕으로 관련 연구들의 내용과 비교하여 차이점을 5절에 설명한다. 6절은 본 논문의 효과와 향후 해결과제로 결론을 맺는다.

## 2 동기 예제

이 절에서는 둘 이상의 에이전트들 사이에서 공통믿음이 될 수 있는 예제들을 살펴보고자 한다. 예제1은 Lewis의 “사회적 관습(social convention)”에서 소개된 교통법규에 관한 예로서 [9], 두 에이전트 사이에서 공통믿음을 표현한 사례이고 예제 2는 카카오톡 그룹 채팅방에서 셋 이상의 에이전트 사이에서 공통믿음이 형성되고 추론할 수 있는 예제이다.

[예제1] 한국 사람인 내가 영국에 가서 운전을 한다고 가정한다. 좁은 골목길을 들어가다 앞에서 오는 차와 마주쳤을 경우 나는 왼쪽으로 비켜야 할까, 아니면 오른쪽으로 비켜야 할까? 우측통행을 명제  $p$ , 좌측통행을 명제  $q$ 라고 할 때 내가 한국에서 운전하는 경우라면 모든 운전자는 우측통행이란 사실,  $knows(koreans, p)$ 을 알고 있을 것이다. 그래서 규칙  $knows(self, p) \leftarrow knows(self, koreans)$  가정한다면, 나는 한국 사람인 것을 알고 있다면 우측통행을 하는 사실을 알고 있고 또한 상대방도 역시 내가 우측통행을 알고 있다는 사실,  $knows(other, knows(self, p))$ 을 알 것이다. 하지만 내가 영국에서 운전하는 경우라면 모든 운전자들은 좌측통행이라는 사실,  $knows(british, q)$ 을 알고 이것이 공통믿음이 되고 상대방도 영국인은 좌측통행을 알고 있다는 사실,  $knows(other, knows(british, q))$  것을 알 것이다. 그래서 영국에서라면 나는 좌측으로 차를 붙여야 한다는 것을 알 수 있다.

[예제2] 국내의 대표적인 모바일 메신저인 카카오톡의 그룹 채팅방에 A, B, C 3명의 대화자가 있다고 가정하자. 만약 A가 이 그룹 채팅방에 어떤 사실  $p$ 를 공표했다고 가정한다면 세

에이전트 모두에게  $p$ 라는 명제가 공통믿음이 되기 위해서는 먼저 모든 에이전트가  $p$ 라는 사실을 읽었는지 확인 작업이 필요하다. 만약 카카오톡 채팅방의 일대일 대화를 통해 한 에이전트가 각각 에이전트에게 사실  $p$ 를 전달했을 경우  $p$ 를 전달한 에이전트와 전달받은 에이전트 사이에서는 상호지식은 형성될 수 있지만 그룹 안의 다른 에이전트들이  $p$ 를 통보 받았는지는 알 수 없기에 그룹 안에서는 공통믿음이 형성될 수 없다. 또한 에이전트 A가 신뢰할 수 있는 채널을 통해서  $p$ 를 공표했지만 다른 에이전트가 이 사실을 읽었거나 알고 있는지 서로 간에 확인할 수 없다면 이 그룹 안에서는 공통믿음이 형성되지 않는다. 그룹 안에서 공통믿음이 형성되려면  $p$ 를 공표한 에이전트뿐만 아니라 그룹에 속해 있는 다른 에이전트들 역시  $p$ 를 읽어서 알고 있어야 하고 에이전트 사이에서도 모두  $p$ 라는 사실을 읽어서 알고 있다는 것을 서로 알고 있어야만 한다. 이런 경우에만 공통믿음이 형성될 수 있다. 다른 소셜 네트워크서비스와 달리 카카오톡의 그룹 채팅방에는 읽지 않는 사람의 수를 표시하는 기능이 있는데 이 기능을 활용하여 그룹 안에서 공통 믿음을 형성할 수 있다. 카카오톡 그룹 채팅방에  $p$ 를 읽지 않은 에이전트의 수가 2라고 나타나면 채팅방에 참여한 B와 C 모두  $p$ 를 읽지 않은 경우이다. 이 수가 1이라고 표시가 되면 B 또는 C 둘 중에 한 명은  $p$ 를 읽었고 다른 한 명은 아직 읽지 않은 경우임을 A는 알 수 있다.  $p$ 를 읽지 않은 수가 0이 되면 B와 C 둘 모두  $p$ 를 읽은 경우이기 때문에 세 에이전트 사이에  $p$ 는 공통믿음이 된다. 에이전트 B의 경우는  $p$ 를 확인하게 되면 공지를 읽지 않은 수가 1이 되고  $p$ 를 게시한 A와 자신이  $p$ 를 읽은 것을 알고 C가 아직 모른다는 것을 알 수 있다. 에이전트 C의 경우도 역시 B의 경우와 같음을 짐작할 수 있다. 결국 공지를 보낸 A의 경우 읽지 않은 수가 0이면 B와 C가  $p$ 를 알고 있다는 것을 알 수 있어야 한다. Fagin의 논문에 의하면 에이전트 A, B, C는 읽지 않은 사람의 수가 0이면  $p$ 가 공통믿음이란 것을 알게 된다[4,5].

CBK 모델에서 공통믿음을 형성하기 위해서는 몇 가지 전제 조건들의 명시가 선행되어야만 한다. 먼저, CBK 모델에서 이론(theory)은 사실(fact)과 규칙(rule)의 집합이고 에이전트는 하나 이상의 이론과 추론 엔진 그리고 자신의 이름으로 정의 하였고 여기서 한 개의 이론을 가진 에이전트는 이론과 에이전트 이름을 같도록 두었으며  $knows(a,p):a \vdash p$ 처럼 안다(know)와 믿는다(believe)는 따로 구별하지 않았다. 그리고 수신된 메시지는 반드시 읽는 우호적인 에이전트와 가능한 빠른 시간 안에 메시지를 읽는 협동적인 에이전트로 에이전트들의 특징이 필요하다. 카카오톡 대화방에 참여한 에이전트들은 우호적인 에이전트이어야 하고 가능한 빠른 시간 내에 메시지를 읽는 협동적인 에이전트이어야 하는 조건들이 필요하다.

### 3. 메타논리를 이용한 공통믿음의 표현

모달논리와 인식논리에서 표현된 공통지식과 믿음[10,11]을 논리 프로그래밍에서 표현하고자 할 때는 사실상 많은 제약이 따른다. 이를 해결하기 위해 메타 논리를 사용하는데 메타(meta)의 의미는 일반적으로 aboutness로 설명된다. 메타지식을 지식에 관한(about) 지식으로 설명하는 것이 그 한 예이다. 이때 앞에 언급된 “지식”을 대상 지식(object knowledge)이라 부르는데 이는 대상 지식이 메타지식의 객체 혹은 대상이 됨을 의미한다. 프로그래밍 기법에서 보면 이러한 대상대 메타의 개념구분은 이미 보편화 되어있다. 예를 들어, 메타인터프리터(meta-interpreter)란 대상언어로 작성된 프로그램을 입력 데이터로 보고 그를 번역 처리하는 프로그램을 의미하는 것이다.

모달논리에서의 지식은  $Kp$ 로 표현하고 ‘에이전트  $i$ 가  $p$ 라는 것을 안다’로 표현하고 사용한다면[12] 메타논리 프로그램에서는  $knows/2$ 라는 술어를 사용하여  $knows(i, p)$ 로 표현하고자 한다. 좀 더 확장하여 모달논리에서  $KKp$  즉, ‘에이전트  $i$ 가 자신이  $p$ 라는 사실을 알고 있는 것을 안다’라는 표현을 메타논리에서는  $knows(i, knows(i, p))$ 로 표현 할 수 있다. 이러한 표현은 기존 논리 프로그램에서의 1차 술어논리에서는 술어  $knows$ 안에 또 술어  $knows$ 가 들어갈 수 없는데 메타논리 프로그램에서  $knows$ 를 메타술어로 확장하여 처리하고자 한다. 예를 들어, 에이전트  $a$ 가 어떤 사실  $p$ 를 안다는 것을 메타술어를 사용하여  $knows(a, p)$ 처럼 표현한다. 동기 예제1의 교통법규 문제에서 에이전트 존(John)이 “모든 차는 오른쪽으로 운행해야 한다”는 사실을 알고 있다면 (1)처럼 나타낸다.

$$knows(john, drives(X, right) \leftarrow car(X)) \quad (1)$$

공통믿음을 나타내기 위해서 every/2와 common/2 두 메타술어를 사용한다:

- $every(G, P)$ : 그룹  $G$ 에 속한 각 에이전트들이  $P$ 를 알고 있다
- $common(G, P)$ : 그룹  $G$ 에 속한 모든 에이전트들에게  $P$ 는 공통믿음이다

그룹  $G$ 의 에이전트  $A$ 가 그 그룹의 모두가 알고 있는 사실  $P$ 를 알고 있음을 나타내기 위해서는  $A$ 가  $G$ 에 속한 구성원이라는 조건이면 충분하다. 따라서 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$knows(A,P) \leftarrow every(G,P) \wedge member(A,G) \quad (2)$$

따라서 한국에서 자동차를 운전하는 모든 운전자들은 오른쪽으로 운전해야 하는 것을 알기 때문에 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$every(drivers\_in\_korea, drives(X, right) \leftarrow car(X)) \quad (3)$$

에이전트 *john*이 한국에서 운전한다면

$$member(john, drivers\_in\_korea) \quad (4)$$

이므로 문장 (3)과 (4)를 (2)에 적용하여 (1)과 같은 결론을 얻을 수 있다. 하지만 어떤 그룹의 공통믿음 *P*는 그 그룹 내의 각 에이전트가 *P*를 알고 있을 뿐만 아니라, 각 에이전트는 모든 에이전트들이 *P*를 안다는 것을 알고 있으며, 또한 그러한 사실을 알고 있음을 알고 있고, ... 와 같은 순환의 개념을 나타낼 수 있어야 한다. 이와 같은 공통믿음을 여기서는

$$every(G, P) \leftarrow common(G, P) \quad (5)$$

$$every(G, knows(A, P)) \leftarrow member(A, G) \wedge$$

$$every(G, every(G, P)) \quad (6)$$

$$common(G, every(G, P)) \leftarrow common(G, P) \quad (7)$$

와 같이 정의한다. 공통믿음을 나타내는 (7)은 순환 프로그램으로서,

$$common(G, every(G, every(G, \dots every(G, every(G, P)) \dots)))$$

을 생성할 수 있다. 그룹 내의 에이전트 *A*가 에이전트 *B*의 지식에 대한 추론은

$$knows(a, knows(b, p)) ?$$

와 같은 질의를 통해 호출할 수 있고, 이것은 (2)에 의해 질의

$$every(g, knows(b, p)) \wedge member(a, g) ?$$

이 된다. *a*가 그룹 *g*의 구성원이므로 *member(a, g)*은 참이고 따라서 남은 질의

$$every(g, knows(b, p)) ?$$

을 해결해야 한다. 이것은 *member(b, g)*가 성립하므로 (6)에 의해

$$every(g, every(g, p)) ?$$

이 되고, (5)과 (7)에 의해

$$common(g, p) ?$$

로 추약되었다가 처음의 가정에 의해 참으로 성립하는 것이 증명된다.

## 4. 공통믿음의 형성과 추론

3절에서 설명한 메타논리로 공통믿음을 표현하는 방법으로 2절에서 제시한 카카오톡 그룹 채팅방 모델을 사용하여 공통믿음을 형성하고 추론 가능하도록 실험하고자 한다. 분산 비동기 통신 환경에서 에이전트들이 서로 대화하며 공통믿음을 만들고 추론할 수 있도록 구현하기 위해 Win-prolog의 에이전트 개발 툴킷인 Chimera를 이용하여 구현하였다[13].

### 4-1. 공통믿음의 형성

카카오톡 그룹 채팅방에 3명이 있다고 가정하자. 한 에이전트가 이 그룹 채팅방에 *p*라는 메시지를 전송하고 다른 2명의 에이전트가

표 1. 공통믿음 형성에 관한 메타논리식

Table 1. Meta-logic formulas about the formation of common beliefs

$$groupmsg(Message) \leftarrow member(Agent, Group) \wedge send\_msg(Agent, Group, Message, Msgid). \quad (1)$$

$$reasoner(send\_msg(Agent, Group, Message, Msgid)) \leftarrow Unread \text{ is } groupsize - 1 \wedge store(msg(Agent, Message, Unread, Msgid)). \quad (2)$$

$$reasoner(new\_msgcounter(Msgid)) \leftarrow Newcounter \text{ is } Counter - 1 \wedge delete(msg(Agent, Message, Counter, Msgid)) \wedge store(msg(Agent, Message, Newcounter, Msgid)). \quad (3)$$

$$reasoner(allread(Agents, Msgid)) \leftarrow store(common(Agents, msg(Agent, Message, Msgid))). \quad (4)$$

$$readmsg \leftarrow not \ readmsg \wedge Newcounter \text{ is } Counter - 1 \wedge delete(msg(Agent, Message, Counter, Msgid)) \wedge store(msg(Agent, Message, Newcounter, Msgid)) \wedge agent\_post(new\_msgcounter(Msgid)). \quad (5)$$

$$readmsg \leftarrow not \ readmsg \wedge Counter \text{ is } 1 \wedge delete(msg(Agent, Message, 1, Msgid)) \wedge store(common(Agents, msg(Agent, Message, Msgid))) \wedge agent\_post(allread(Agents, Msgid)). \quad (6)$$

$$readmsg \leftarrow readmsg \wedge !. \quad (7)$$



명제  $p$ 를 읽는다면  $p$ 는 3명의 에이전트 사이에서 공통믿음이 된다. 이를 해결하기 위해서는 먼저 모든 사람이  $p$ 라는 사실을 읽었는지 확인 작업이 필요한데 카카오톡의 그룹 채팅방에는 공표된 글을 읽지 않은 사람의 수가 표시되는 기능이 있다. 이 기능을 이용하여 공통믿음을 형성하도록 실험하였다. 표 1은 이 실험에서 주요하게 사용된 메타논리식들이다.

먼저  $kim$ ,  $lee$ ,  $park$  세 에이전트를 생성하고 통신채널을 연결한 후,  $kim$ 이 그룹 대화방에  $see\_you\_at\_7pm$  이라는 메시지를 포스팅 한다고 가정하자. 표 1의 (1)에서  $kim$ 은  $groupmsg(see\_you\_at\_7pm)$  라는 명령을 실행하면  $kim$ 이 그룹리스트  $[kim, lee, park]$ 의 멤버인지 확인한 후 모든 에이전트에게  $send\_msg(kim, [kim, lee, park], see\_you\_at\_7pm, \#msgid)$  메시지를 전송한다.  $kim$ 은 현재 카카오톡 그룹 채팅방에 세 에이전트 리스트  $[kim, lee, park]$  안에 있는 각 에이전트에게  $see\_you\_at\_7pm$ 이라는 메시지를 전송하는데 이 메시지는 고유한 메시지 번호가  $2^{32}$  가지 번호 가운데 랜덤하게 부여된 메시지 번호로  $Msgid$  인수에 매칭되어 전송된다. 표 1의 (2)~(4)의  $reasoner$ 는 공통믿음의 형성에 대한 추론기능을 수행하는 호른 절(Horn clause)이다. 식 (2)에서  $send\_msg$  메시지를 받은  $lee$ 와  $park$ , 그리고 메시지를 보낸  $kim$  모두는 자신의 지식베이스에 읽지 않은 에이전트 수 2를 계산하여  $msg(kim, see\_you\_at\_7pm, 2, \#msgid)$  지식을 저장하게 된다. 내용은  $kim$ 이 보낸 메시지 ( $see\_you\_at\_7pm$ )가 고유한 메시지 번호( $\#msgid$ )와 매칭되고 가운데 2라는 숫자는 전체 에이전트 가운데 아직 이 메시지를 확인하지 않은 에이전트의 수를 뜻하게 된다. 메시지를 보낸  $kim$ 은 이 내용을 알고 있기에 자동으로 제외하고 2라는 숫자가 표시된다.

만약  $lee$ 가 먼저 이 메시지를 확인한다고 가정하자. 표 1의 (5)번 식에 의해 메시지를 확인한 후  $readmsg$  라고 입력하고 실행하면  $not\ readmsg$  즉, 읽지 않은 메시지인지 확인하고 자신의 지식베이스에 적재된  $msg(kim, see\_you\_at\_7pm, 2, \#msgid)$  지식을 삭제하고 읽지 않은 수 2에서 1을 뺀 후  $msg(kim, see\_you\_at\_7pm, 1, \#msgid)$ 을 자신의 지식베이스에 다시 저장하게 된다. 그리고 다른 모든 에이전트에게  $new\_msgcounter(\#msgid)$ 를 전송한다. 이 메시지를 받은  $kim$ 과  $park$ 은 각각 자신의 지식베이스에 있는 표 1의 (3)번 추론 기능을 실행하여 이전  $msg(kim, see\_you\_at\_7pm, 2, \#msgid)$  지식을 삭제하고  $msg(kim, see\_you\_at\_7pm, 1, \#msgid)$ 을 저장한다. 만약  $lee$ 가 또  $readmsg$ 를 실행하게 되어도 표 1의 (7)에 의해 같은 에이전트가 이미 읽었던 메시지의 내용이므로 읽지 않은 수를 더 이상 감하지 않는다.

마지막으로  $park$ 이 메시지를 확인하고  $readmsg$ 를 실행하면 표 1의 (6)에 의해 자신의 지식베이스에 있는  $msg(kim, see\_you\_at\_7pm, 1, \#msgid)$ 를 삭제하고 대신 공통믿음

$common([park, kim, lee], msg(kim, see\_you\_at\_7pm, \#msgid))$ 을 생성한다. 그리고  $allread([kim, lee, park, \#msgid)$  메시지를  $kim$ 과  $lee$ 에게 전송하여 표 1의 (4)번을 실행하여 각각의 지식베이스에 동일한 공통믿음  $common([park, kim, lee], msg(kim, see\_you\_at\_7pm, \#msgid))$ 을 생성하게 한다.  $kim$ 이 보낸 메시지가 다른 에이전트들이 모두 읽었고 읽지 않은 수가 0이 되면 전체 에이전트는  $kim$ 이 보낸 메시지를 모두 알고 있기에  $see\_you\_at\_7pm$ 은 공통믿음이 된다.

추가적인 실험으로 카카오톡 그룹 채팅방에 넷 이상의 에이전트를 구성하여 실험한 결과도 동일한 결과가 나타남을 확인할 수 있었다.

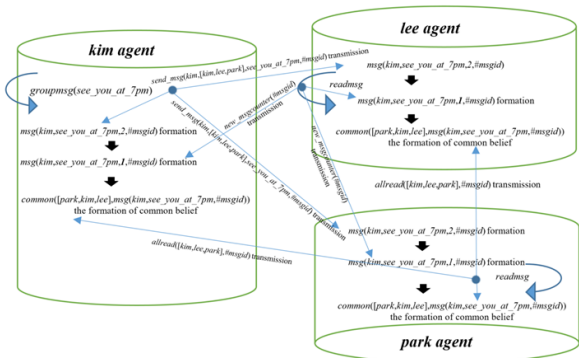


그림 1. 세 에이전트 사이에서 공통믿음의 형성  
Fig. 1. The formation of common beliefs among 3 agents

#### 4-2. 공통믿음의 추론

이 절에서는 공통믿음이 에이전트 그룹에 형성된 후 소속된 각 에이전트의 질의에 대한 추론 기능을 실험한다. 3절에서 설명한  $every/2$ 와  $common/2$  두 메타술어를 사용하여 정의한 수식을 기본으로 사용하였다. 그림 2에서처럼  $kim$ 이  $lee$ 에게  $see\_you\_at\_7pm$  이라는 사실을 알고 있는지 질의한다. “ $kim$ 이 ‘ $lee$ 는  $kim$ 이 보낸  $see\_you\_at\_7pm$  이라는 메시지를 알고 있는가?’라는 질의,

$knows(lee, msg(kim, see\_you\_at\_7pm, \#msgid))?$

를 실행하면  $lee$ 에게  $do\_you(lee, knows(lee, msg(kim, see\_you\_at\_7pm, \#msgid)))$  메시지를 전송한다.  $lee$ 는 자신의 지식베이스에 있는 추론기능을 사용하여  $knows(lee, msg(kim, see\_you\_at\_7pm, \#msgid))?$  질의에 대해 알고 있는지 여부를 확인하면 된다. 3절의 (2)에 의해

$knows(lee, msg(kim, see\_you\_at\_7pm, \#msgid)) \leftarrow$   
 $member(lee, [park, kim, lee]) \wedge$

$\setminus every((\{park, kim, lee\}, msg(kim, see\_you\_at\_7pm, \#msgid)))$ .

이 수식이 성립하는지를 확인하면 된다. If절의  $member(lee, \{park, kim, lee\})$ 은  $lee$ 가 그룹  $\{park, kim, lee\}$ 의 멤버이기에 참이 되기에  $every((\{park, kim, lee\}, msg(kim, see\_you\_at\_7pm, \#msgid)))$ 이 성립하는지 확인하면 된다. 3절의 (5)에 의해

$every((\{park, kim, lee\}, msg(kim, see\_you\_at\_7pm, \#msgid))) \leftarrow common(\{park, kim, lee\}, msg(kim, see\_you\_at\_7pm, \#msgid))$ .

이 수식이 성립하는지 다시 확인하면, If 절의  $common(\{park, kim, lee\}, msg(kim, see\_you\_at\_7pm, \#msgid))$ 은 4-1 절에서 공통믿음이 형성되는 추론과정을 통해 그림 1에서  $lee$ 의 지식베이스에 형성된 공통믿음이 존재하기에 참이 되고 결국  $knows(lee, msg(kim, see\_you\_at\_7pm, \#msgid))?$  절의 참이 된다. 추론 기능을 통해  $yes$ 라는 결과를 확인하고 다시  $yes(kim, knows(lee, msg(kim, see\_you\_at\_7pm, \#msgid)))$  메시지를  $kim$ 에게 전송한다.  $kim$ 은 자신의 지식베이스에  $lee$ 가 이 메시지를 알고 있다는  $holds(knows(lee, msg(kim, see\_you\_at\_7pm, \#msgid)))$  정보를 자신의 지식베이스에 추가로 저장한다. 저장된 추가 지식을 통해  $kim$ 이 같은 질문을 실행하더라도 알고 있다고 답을 할 수 있게 된다.  $lee$ 에서 “ $park$ 이 이 메시지를 알고 있는가?” 라는 질문이나  $park$ 이 다른 에이전트에게 “ $kim$ 이 보낸 메시지를 알고 있는가?” 라는 질문에 모두 알고 있다고 답을 확인 할 수 있다.

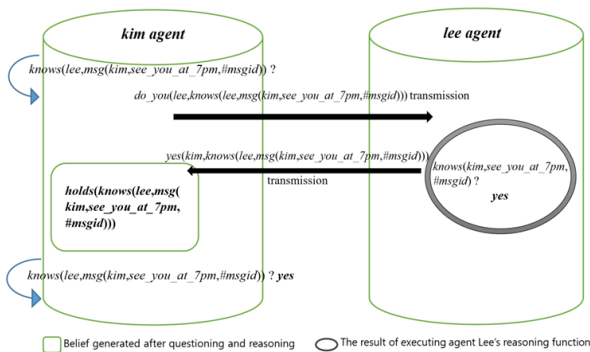


그림 2. 형성된 공통믿음을 기반으로 Kim 에이전트의 질의 처리 과정

Fig. 2. The handling process of agent Kim's question based on the formed belief

### 5. 연구 결과의 분석과 비교

본 논문에서 사용한 CBK 모델은 공통 믿음의 형성이 Fagin 과 Halpern 그리고 Moses가 제시한  $\epsilon$ -공통지식( $\epsilon$ -common

knowledge) 보다는 궁극적 공통지식(eventual common knowledge)에 좀 더 가깝다[3,4,5,14].  $\epsilon$ -공통지식 모델은 동기적 통신 환경에서  $\epsilon$  시간 단위 안에 다른 에이전트들에게 모두 메시지가 전달되고 또한 이 그룹의 모든 에이전트들은  $\epsilon$  시간 단위 안에 다른 에이전트들도 이 메시지를 받을 것이라는 사실을 알고 있으므로 공통믿음이 형성 된다고 가정한다. 하지만 CBK 모델의 경우 에이전트가 보낸 메시지가 채팅방에 있는 모든 에이전트들이  $\epsilon$  시간 단위 안에 확인 할 수 있다는 사실을 확신할 수 없기 때문에 공통믿음이 형성 될 수 없다. 이유는 CBK 모델은 에이전트가  $\epsilon$  시간이라는 마감 시간을 설정하지 않고 비동기 통신 환경에서 에이전트들 사이에서 공통믿음이 형성되기 때문이다. 또한 궁극적 공통지식은 메시지 전달 시간에 제한이 없는 비동기 통신 환경에서 공통지식을 형성 할 수 있는 아주 느슨한 정밀도를 가진 공통지식 모델이지만 CBK 모델처럼 메시지 카운터가 없기 때문에 “궁극적”이라는 시간적 모호성의 단점이 있다.

Sietsma의 이메일 상에서의 공통지식의 형성은 이메일이 보내졌다는 사실을 나타낸 공식을 언제 에이전트의 그룹이 공통지식으로 형성하게 되는가에 대해 밝히는 것으로 멀티캐스팅을 통한 공통지식 형성과는 근본적으로 다름을 인식론적(epistemic) 방법으로 증명하고 있다[8]. 또한 메일 전달(forward)의 경우는 원본 메시지에 포함되어 있는 인식론적 정보를 또한 공통지식이 된다는 것과 숨은 참조(blind carbon copy)로 보낸 메일에서는 일반적으로 공통지식을 생성하기 어렵다는 것을 증명하고 있다. Sietsma의 이메일 프레임워크는 단순한 멀티캐스팅 방식이 아닌 동기적 통신 방식으로 단순화시켜 공통지식이 형성됨을 증명하였다면 CBK 모델은 비동기 통신 환경에서 멀티캐스팅 방식으로 공통믿음을 형성한 것이 차이점이다.

공통지식을 표현하는 논리적 방법은 지식과 믿음을 나타내기 위해 모달 연산자를 사용하는 인식논리와 오브젝트 레벨의 정리를 에이전트의 지식과 믿음으로 보는 메타논리적 방법이 대표적이다 [2]. 본 연구에서는 논리프로그래밍에서  $knows(i, p)$ 처럼 메타술어  $knows/2$ 를 이용하여 지식을 나타내는 메타논리적 방법은 지식을 에이전트의 정리로 가정하고[15,16] 오브젝트 레벨의 추론을 이용하였다. 이러한 방법론이 가지는 장점 중 하나는 Prolog 처럼 기존 프로그래밍 환경에서 쉽게 구현하고 활용할 수 있다는 점이다.

### 6. 결론

본 논문에서는 분산 비동기 통신 환경에서 메타논리로 공통믿음을 표현하고 추론하는 방법을 연구하였다. 동기에제로

카카오톡의 그룹 채팅방을 통해 한 에이전트가  $p$ 라는 사실을 공지했을 때 다른 에이전트들이 이 공지를 읽었는지를 확인하여 모두 읽었을 경우 이 그룹 채팅방에 있는 에이전트들 사이에 명제  $p$ 는 공통믿음이 된다는 사실을 착안하여 에이전트들 사이에서 어떻게 공통믿음을 형성해 가는지에 대한 내용을 중심으로 실험하여 보았다. 메타논리 방법으로 공통믿음을 표현하고 형성하였고 추론엔진을 구현하여 공통믿음이 다른 에이전트들 사이에서 모두가 알고 있는 지식임을 추론하여 보았다.

본 논문의 연구결과로 이론적으로 분산 비동기 통신 환경에서 공통믿음의 형성은 불가능하다고 받아들여져 왔으나 서로 신뢰하는 에이전트 그룹에서, 카카오톡 그룹 채팅방 예제처럼 시간적으로 데드라인이 있는 명제들의 경우에는 비동기 통신을 사용하더라도 공통믿음이 형성될 수 있고 이를 기반으로 한 추론도 가능함을 메타논리적 프로그래밍 방법으로 구현 및 실험을 통해 검증할 수 있었다. 다만 이론의 간결함을 위해 특정 주제에 대해 에이전트들이 상호간의 의견 교환 과정을 거쳐 최종적인 공통지식에 도달하는 현실적인 상황은 반영할 수 없었고[17,18,19] 시간에 따른 이벤트의 변화된 사항까지 실험에 고려하지 못한 부분들이 향후 연구과제로 남아 있다. 또한 아직까지 공통믿음과 같은 지식표현에서 널리 사용되는 인식논리와 메타논리 사이의 체계적인 비교 연구가 많이 부족하며 향후 무인 자동차나 로봇 분야의 멀티에이전트 환경[20,21]에서 여러 에이전트들이 공통믿음을 형성하고 추론하여 협업[22,23]하기 위해 실제 응용이 되기 위해서는 공통믿음 형성과 추론에 더 많은 연구가 필요할 것으로 본다.

## References

- [1] K.A. Thomas, P. DeScioli, O.S. Haque and S. Pinker, "The Psychology of Coordination and Common Knowledge," *Journal of Personality and Social Psychology*, Vol. 107, No. 4, pp.657-676, 2014.
- [2] R. Fagin, J.Y. Halpern, Y. Moses and M.Y. Vardi, *Reasoning about Knowledge*, MIT Press, 1995.
- [3] J.Y. Halpern and Y. Moses, "Knowledge and common knowledge in a distributed environment," in *Proceedings of the 3rd ACM Symposium on Principles of Distributed Computing (PODS)*, 1984, pp. 50-61. A newer version appeared in *the Journal of the ACM*, vol. 37:3, pp. 549-587, 1990.
- [4] Ronald Fagin, Joseph Y. Halpern, Yoram Moses and Moshe Y. Vardi, "Common Knowledge Revisited," in *knowledge Contributors*, springer, pp. 87-104, 2003.
- [5] Ronald Fagin, Joseph Y. Halpern, Yoram Moses and Moshe Y. Vardi, "Common Knowledge Revisited," *Annals of Pure and Applied Logic* 96, pp. 89-105, 1999.
- [6] Gizem Korkmaz, Chris J. Kuhlman and Achla Marathe, "Collective Action Through Common Knowledge Using A Facebook Model," *Proceedings of the 13th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2014)*, May 5-9, pp. 253-260, 2014.
- [7] Gizem Korkmaz, Chris J. Kuhlman, S. S. Ravi and Fernando Vega-Redondo, "Approximate Contagion Model of Common Knowledge on Facebook," *HT' Proceedings of the 27th ACM Conference on Hypertext and Social Media*, July 10-13, pp. 231-236, 2016.
- [8] Floor Sietsma and Krzysztof R. Apt, "Common Knowledge in Email Exchanges," *ACM Transactions on Computational Logic*, vol. 14, no. 3, article 23, 2013.
- [9] D.K. Lewis, *Convention: A Philosophical Study*, Harvard University Press, Cambridge (MA), 1969.
- [10] Robert Moore, "A Fomal Theory of Knowledge and Belief," in *Fomal Theories of the Commonsense World (Hobbs J. and Moore R.C., editors)*, Ablex Pub. Corp., pp. 319-358, 1985.
- [11] Hans van Ditmarsch, Jan van Eijck and Rineke Verbrugge, "Common Knowledge and Common Belief," in *Discourses on social software*, Amsterdam University Press, pp. 99-122, 2009.
- [12] Wesley H. Holliday, "Epistemic Logic and Epistemology," in *the Handbook of Fomal Philosophy*, eds. S.O. Hansson and V.F. Hendricks, Springer, 2014.
- [13] Chimera Agents, Available:<http://www.lpa.co.uk/chi.htm>, 2017, [Accessed: January 12, 2017].
- [14] Gil Neiger and Sam Toueg, "Simulating Synchronized Clocks and Common Knowledge in Distributed Systems," *Journal of the ACM*, Vol 40, No 3, pp. 334-367, April 1993.
- [15] Kowalski, R. A. and Kim, J. S., "A metalogic programming approach to multi-agent knowledge and belief," in *Artificial Intelligence and Mathematical Theory of Computation*, edited by V. Lifschitz (NewYork: Academic Press), 1991.
- [16] Paolo Mancarella, Alessandra Raffaeta, and Franco Turini, "Knowledge representation with multiple logical theories and time," *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, vol. 11, no. 1, pp. 47-76, 1999.

[17] Michael Chwe, "Mark Zuckerberg wants people to understand common knowledge. What's common knowledge?", Available: <https://www.washingtonpost.com/blogs/monkey-cage/wp/2015/04/08/mark-zuckerberg-wants-people-to-understand-common-knowledge-whats-common-knowledge/>, 2015, [Accessed: January 12, 2017].

[18] Scott Aaronson, "Common Knowledge and Aumann's Agreement Theorem", Available: <http://www.scottaaronson.com/blog/?p=2410>, 2015, [Accessed: January 12, 2017]

[19] Ernest Davis and Gary Marcus, "Commonsense reasoning and commonsense knowledge in artificial intelligence," *Communications of the ACM*, vol. 58, issue 9, pp. 92-103, 2015.

[20] In-Hun Jang and Kwee-Bo Sim, "Multi Agent System (MAS) Framework for Home Network Application," *Journal of The Korean Institute of Intelligent Systems*, Vol. 17, No. 1, pp. 80-85, 2007.

[21] Young Im Cho, "An Intelligent Web based e-Learning Multi Agent System," *Journal of The Korean Institute of Intelligent Systems*, Vol. 17, No. 1, pp. 39-45, 2007.

[22] Myung-Jin Lee and Jin-Sang Kim, "A Negotiation Mechanism for BDI Agents in Distributed Cooperative Environments,"

*Journal of The Korean Institute of Intelligent Systems*, Vol. 13, No. 2, pp. 192-199, 2003.

[23] Eun Gyung Kim, "An Approach to Generate A Theory of Coordination for Multi-Agent Systems," *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, Vol. 4, No. 3, pp. 277-282, 2004.

## 저자소개



**김군오(Koono Kim)**

1993년 : 한남대학교 전자계산기공학과 공학사

1999년 : 계명대학교 컴퓨터공학과 석사 및 박사 수료

2000년~현재 : 한동대학교 글로벌리더십학부 ICT융합기초 부교수

관심분야 : Common Knowledge, MAS

Phone : +82-54-260-1494

E-mail : kok@handong.edu