

어포던스 기반 FSA 모델을 이용한 대피자 행동 모델링 및 시뮬레이션

주재구^{1*} · 김남훈²

¹인제대학교 시스템경영공학과 / ²UNIST(울산과학기술대학교) 디자인 및 인간공학부

Modeling and Simulation of Emergent Evacuation Using Affordance-based FSA Models

Jaekoo Joo¹ · Namhun Kim²

Department of Systems Management Engineering, Inje University, 607 Obang-Dong,
Gimhae, GyeongNam, 621-749, Korea

²School of Design and Human Engineering, UNIST(Ulsan National University of Science and Technology),
#100 Banyeon-ri, Eonyang-eup, Ulju-gun, Ulsan, 689-798, Korea

Modeling and simulation of human-involved complex systems pose challenges to representing human decision makings into logical systems because of the nondeterministic and dynamic nature of human behaviors. In modeling perspectives, human's activities in systems can increase uncertainty and complexity, because he or she can potentially access all other resources within the system and change the system states. To address all of these human involvements in the system, this research suggests applying the Finite State Automata (FSA)-based formal modeling of human-involved systems that incorporates the ecological concept of affordances to an evacuation simulation, so that human behavioral patterns under urgent and dynamic emergency situations can be considered in the real-time simulation. The proposed simulation methodologies were interpreted using the warehouse fire evacuation simulation to clarify the applicability of the proposed methodology. This research is expected to merge system engineering technologies and human factors, and come out to the new predictive modeling methodology for disaster simulations. This research can be applied to a variety of applications such as building layout designs and building access control systems for emergency situations.

Keywords: Affordance Theory, Formal Modeling, Finite State Automata, Human-Involved Complex Systems, Evacuation Simulation

1. 서론

최근, 전 세계적으로 증가하고 있는 자연재해와 테러 등으로부터 인간의 생명과 재산을 보존하기 위하여 재난 상황에서의 인간 및 군중의 행동에 대한 과학적 관찰과 통제 방안의 필요성이 증대되고 있다. 특히, 다중(多衆)이 이용하는 대형 쇼핑몰이나 지하 노래방 등에서의 화재나, 최근 전 지구적으로 빈발하는 지

진과 같은 재해 상황의 예를 생각해 볼 때, 군중이 대피 상황에서 어떠한 환경적 요소에 의해서 상황을 판단하고, 그에 따라 어떻게 행동을 취하는지를 예측할 수 있다면, 사전에 재난/재해 대비책의 체계적이고 효과적인 수립을 통해 인명 피해를 최소화시킬 수 있을 것이다. 그런데 재난 상황에서의 군중 행동의 예측은 그 위험성과 현실적인 한계로 인해 실험적 검증이 불가능한 경우가 대부분이다. 따라서 합리적인 수리모델을 통한 컴

이 논문은 2008년도 인제연구장학재단 교수연구년 지원에 의한 연구결과임.

* 연락처 : 주재구 교수, 621-749 경남 김해시 어방동 607 인제대학교 시스템경영공학과, Tel : 055-320-3669, Fax : 055-320-3632,

E-mail : jjoo@inje.ac.kr

2011년 4월 26일 접수; 2011년 5월 13일 게재 확정.

퓨터 시뮬레이션이 유일한 대안이라 할 수 있다. 하지만 이를 위해 출발 상황에서의 군중의 행동 양식을 예측하는 것은 인간의 판단과 행동의 합리적인 이론에 근거한 모델링이 선행되지 않고서는 실현이 불가능하다.

재난 상황에서의 군중 피난은 급박하게 변화하는 환경적인 위험 요소와 인간의 상호 작용이 이루어지는 일종의 인간-환경 복합 시스템(human-environment complex system)으로 볼 수 있다. 이러한 복합 시스템의 경우는, 시간의 흐름과 함께 사건의 발생에 따른 상태 변화를 모델 내에서 예측하는 이산-사건 시스템(discrete-event system)으로 바라보고 시스템의 동작과 운영을 모델링 하게 된다(Cassandra and Lafortune, 1999). 하지만 이는 시스템 요소들을 연속적이고 불확실성에 근거하여 무리하게 이산 시스템으로 가정하여 모델링하기 때문에, 확률에 근거한 시뮬레이션 방법에 주로 쓰이게 된다. 이러한 이유로 인해 최근에는 시스템 내에 이산성과 연속성이 동시에 존재하는 경우에 계층적(hierarchical) 오토마타(automata) 표현 방법을 이용한 복합 시스템의 모델이 널리 쓰여지고 있고, 이를 통해 행위자 기반 모델(agent-based model)을 구현하는 방법이 개발되었다(Zeigler, 1976). 인간이 배제된 물리적 시스템의 거동과는 달리, 인간이 환경과의 상호 작용을 통하여 자신의 행동의사결정을 함으로써 과업과 통제 작업을 수행하는 인간-환경 복합 시스템의 경우에는 그 동작과 운영을 모델링 하는 것이 쉽지가 않다. 그 주된 이유는, 인간 행동의 동적이고 불확실한 속성을 컴퓨터 환경에서 모델링 하는 것이 쉽지 않기 때문이다. 인간의 행동은 환경 속에서 발휘되는 인지능력에 따라 결정된다. 따라서 불확실한 환경에서의 인지적이고 복잡한 인간 행동에 대한 의사결정 과정을 단순한 논리 규칙기반 모델(logical rule-based model)로 기술하는 것은 한계가 있을 뿐 아니라, 이 모델로 인간의 행동을 예측하려는 시도는 고도의 복잡계 문제를 야기한다(Shin *et al.*, 2006). 이러한 이유로 인해, 그 동안 심리학과 인지공학 분야에서 인간 행동에 대한 모델링이 심도있게 논의되어 왔음에도 불구하고, 시스템 이론의 측면에서 인간의 인지적 행동을 정형적으로 표현하고 예측하기 위한 모델링과 시뮬레이션 연구는 상대적으로 미진했던 것이 현실이다. 실제로, 현재 상용화된 대피 시뮬레이션들 가운데 대표적인 것으로 알려진 Simulex®나 BuildingExodus® 등도 대부분 건물 구조와 같은 정적이고 기술적인(descriptive) 환경에서의 대피행동을 주로 다루고 있으며, 동적인 환경 요소에 대한 인간의 인지 기반 행동 예측 모델은 고려되지 않고 있다(Virtual Environment V 5.9.; Galea *et al.*, 2006).

Kim *et al.*(2010b)은 인간이 관여된 복합 시스템에서의 인간의 행동을 정형적으로 표현하기 위하여 어포던스 기반 FSA(affordance-based finite state automata) 모델을 제안하였다. 1979년에 Gibson에 의해 처음 이론화 된 어포던스 이론(affordance theory)은 인간-환경 시스템(animal(human)-environment system)에서의 인간의 행동에 대한 생태학적인 이해를 위한 것으로서, Gibson은 어포던스를 “그것이 좋든지 나쁘든지 관계없이 인간(동물)

에게 행동의 기회를 제공해 주는 환경적 특성”(a property of the environment that provides an action opportunity offered to an animal (human), either for its good or ill)이라고 정의하였다(Gibson, 1979). 즉, 인간은 환경에서 주어지는 행동 기회인 어포던스(affordance)와 그것을 이루기 위한 인간의 실행 능력인 이펙티비티(effectivity)에 대한 인지를 기반으로 행동을 결정한다는 것이다. Gibson의 어포던스 이론에 따르면, 인간의 행동은 사람에 의해 직접적으로 인지되는 일련의 어포던스와 이펙티비티의 병치과정(juxtaposition process)으로 간주될 수 있으며, 인간은 자신의 행동을 결정할 때에 어포던스와 이펙티비티의 조합과 관련된 눈, 귀, 피부, 코, 그리고 입 등의 감각기관을 통하여 수집되는 인지적 정보를 기준으로 한다는 것이다(Gibson, 1979). 따라서 인간의 미래 행동을 예측하고 제어하는데 있어서도 어포던스와 이펙티비티를 직접적인 인지적 속성으로 고려하는 것이 필연적이다(Turvey, 1992). 이와 같은 어포던스 이론을 바탕으로 제안된 어포던스 기반 FSA 모델은 인간이 관여된 복합 시스템(인간-기계 복합 생산 시스템)을 표현하기 위한 기술적 정형모델(descriptive formal model)로서, 인간-환경 시스템의 상태(states)를 이산적인 것으로 간주하며, 각 상태들 간의 전이(transition)는 인간의 행동들에 의해 유발되도록 모형화하였으며, 시스템 이론에서 사용되는 ‘시스템 내에서의 시스템’(system of systems’ in system) 개념을 적용하여 인간-환경 시스템을 계층적인 FSA 모델로 표현하였다(Kim *et al.*, 2010a; Kim *et al.*, 2010b).

본 논문에서는 화재와 같은 재난 상황에서의 인간의 인지적인 대피 행동 패턴을 예측하고 분석할 수 있는 대피 시뮬레이션 모델을 개발하기 위하여, Kim *et al.*(2010b)의 어포던스 기반 FSA 모델을 재난 상황에 적용하여 대피자의 행동을 기술하는 어포던스 기반 대피자 행동 정형모델을 개발한다. 또한 어포던스 기반 대피자 행동정형모델을 기반으로 재난 상황시 환경요소와의 인지적 상호 작용(어포던스와 이펙티비티의 인지특성들의 조합) 과정을 통해 출구를 향하여 탈출하는 군중의 행동 패턴을 분석하고 예측할 수 있는 어포던스 기반 대피 시뮬레이터의 기능적인 설계 구조를 제안한다. 본 논문에서 제안하는 재난 상황에서의 인간행동 정형모델 기반의 시뮬레이션 방법론은 재난, 사고 등의 재현 실험이 불가능한 상황에서 인간이 어떻게 행동을 취하며, 그 결과로 건물의 구조와 같은 환경의 설계를 어떻게 개선할 수 있을지에 대한 단초를 제공할 수 있으며, 향후 재난 시스템의 효과적인 설계와 운용을 위해 필수적인 예측과 분석 능력의 향상에 기여할 것으로 기대한다.

이후 본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 일반적인 인간 행동 모델링 방법론을 간략히 살펴본 후, 본 논문의 토대가 되는 어포던스 기반 FSA 정형모델링 방법론에 관해 자세히 살펴본다. 이어 제 3장에서는 어포던스 기반 FSA 정형모델링 방법론을 이용하여 개발된 재난 상황에서의 인간행동 정형모델을 설명한다. 제 4장에서는 제 3장에서 개발된 인간행동 정형모델을 기반으로 대피자의 피난 행동을 시뮬레이션에 반영하

기 위한 시스템의 구조와 요구사항들을 제안한다. 제 5장에서는 제 3장과 제 4장에서 제시한 인간행동 정형 모델 기반의 대피 시뮬레이션 방법론의 실제적인 유용성을 검증하기 위하여 창고 건물에서의 화재 대피 시나리오를 대상으로 그 적용성을 설명한다. 마지막 제 6장은 결론으로서, 본 연구의 기대효과와 도출된 문제점 및 향후 연구 과제에 대해 논의한다.

2. 연구 배경

2.1 인간 행동 모델링 방법론

일반적으로 시스템 이론의 측면에서, 인간 행동에 대한 모델링과 그 방법론은 크게 실험적 모델링(experimental modeling)과 정형 모델링(modeling formalism)의 두 가지 방법으로 접근되어왔다. 전자는, 특정 시나리오 상에서 인간의 행동을 실험적 관찰을 통해 모델링하는 방법이다(Lee *et al.*, 2008). 이 방법을 위해서는 인간이 포함된 시뮬레이션 방법론(human-in-the-loop)이 쓰이게 되는데, 많은 경우 보다 정확하고 현실적인 데이터를 얻기 위해서는 인간실험을 위한 인간-컴퓨터 인터페이스(human-computer interface)의 개발이 선행되어야 한다. 최근에는 가상현실(virtual reality) 기술의 발전으로 현실적인 인간-컴퓨터 인터페이스가 가능하여 많은 인지공학 실험에서 널리 쓰이고 있다. 하지만, 이 방법은 인간의 행동이나 인지에 대한 이론적 접근보다는 실험적인 접근에 치우쳐진 탓에 실험 모델의 결과의 일반성(generality)이 부족하다는 단점이 있다. 또한, 아무리 사실적인 가상현실 실험 환경을 구현한다고 해도, 실제 돌발 상황이나 스트레스 상황에서의 의사결정 상황을 실험실에서 재현하기 힘든 경우가 있기 때문에 심리적 압박 상황에서의 인간 행동을 사실적으로 표현하기 힘들다는 점도 자주 지적된다. 후자인 정형 모델링 접근법은 인간-기계 인터페이스 설계에 많이 사용되는 방법으로, 인간을 둘러싼 환경이 제공하는 속성들(properties)과 인간의 능력(capability)을 분석하여, 인간이 시스템 안에서 실현 가능한 행동들을 예측하는 방법이다. 이 방법은 어포던스 이론에 기반하여 발전해 왔는데, 전자인 실험적 모델링 방법보다 체계적이며 모델의 정형화가 가능하다는 강점이 있다(Kim *et al.*, 2010a). 또한, 정성적이고 동적인 시스템 속성과 불

확정적인 인간의 능력을 정형 모델 안에서 정량적으로 표현하기 때문에 시스템 거동의 예측이 용이하며 시스템 요소들의 특성 정의가 명확하다는 것이 시뮬레이션 모델링 관점에서는 큰 이점이라 할 수 있다. 위의 두 가지 접근 방법 중, 본 연구에서는 후자를 따르는 어포던스 이론에 기반한 인간행동 정형모델링 방법론을 사용하여 재난 상황에서의 인간행동 시뮬레이션 프레임워크를 제시 한다.

2.2 어포던스 이론

어포던스 이론은 1979년 Gibson에 의해 정의된 이후, 수십년 동안 심리학과 인지공학에서 인간 행동을 설명하는데 사용되어져 왔다(Kim *et al.*, 2010b). 어포던스를 설명하기 위해서는 시스템을 인간이 포함된 것으로 간주한다. 즉, 시스템(animal-environmental system)은 인간(human/animal)과 환경으로 구성되며, 어포던스는 인간의 행동이(좋은 결과로든, 나쁜 결과로든) 실현될 수 있도록 환경이 인간에게 제공하는 특성이다. 어포던스를 정의하는 데는, 반드시 그와 대응되는 특성인 이펙티비티(effectivity)가 정의된다. 이펙티비티란, 인간이 행동을 실현하기 위해 필요한 능력을 의미한다. 어포던스와 이펙티비티는 항상 쌍으로 존재하며, 이 두 가지 속성이 동일한 시간과 공간에서 병치(juxtaposition) 되어야만 실제 인간의 행동으로 실현이 가능하게 된다(Turvey, 1992). 예를 들면, <Figure 1>과 같이 어떤 사람이 계단을 올라가는(climb) 행동을 한다고 하면, 환경인 계단(stairs)은 인간에게 어포던스인 ‘걸어 올라 갈 만함’(walk-on-ability)이라는 특성을 제공하고, 인간은 ‘걸어갈 수 있음’(capability to walk)이라는 이펙티비티를 가지고 있어야 한다. 이 두 가지 특성이 동일 시간 동일과 공간에서 존재할 때, 이 사람은 계단을 올라갈 수 있는 것이다.

이와 같이 어포던스와 이펙티비티는 시스템 모델 안에서 선행조건의 개념으로 포함되게 되는데, 시스템 안의 인간이 이 선행조건들을 인지했는지 여부에 따라 인간의 행동이 발현되는 지가 결정되게 된다.

인간-환경 시스템 내에서의 특정 시간과 공간에서만 정의되는 어포던스와 이펙티비티는 동적이고 정성적인 특성들이므로 수학적인 모델을 통해 컴퓨터 시뮬레이션 모델 내에서 정량적으로 정의되기 위해서는 별도의 정형 모델링이 필요하다.

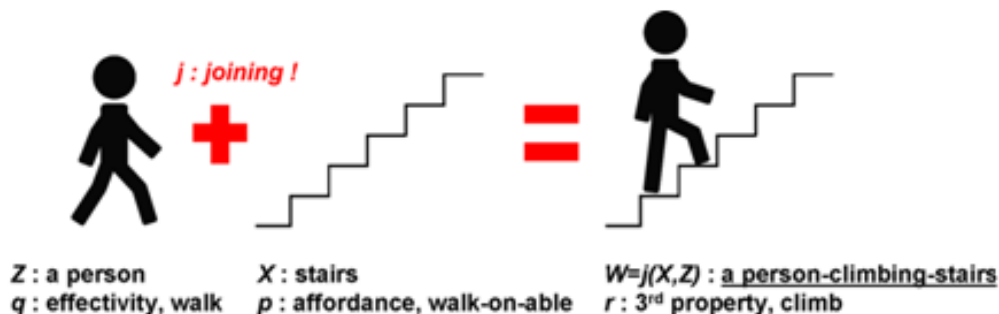


Figure 1. An example of a 'person-climbing-stairs' system(Kim *et al.*, 2010b)

Turvey는 다음과 같은 병치함수(juxtaposition function)를 이용하여 어포던스를 수학적으로 정형화하여 나타내었다(Turvey, 1992).

$W_{pq} = j(X_p, Z_q)$ 를 환경개체(environmental object)(X)와 인간(human/animal)(Z)로 구성된 하나의 함수이며, p 와 q 를 각각 X 와 Z 가 가지는 속성(properties)이라고 하자. 이 때 아래와 같은 조건을 만족하는 제 3의 속성인 r 이 존재하는 경우에 한해서 p 는 X 의 어포던스이며, q 는 Z 의 이펙티브리티라고 말할 수 있다.

- i) $W_{pq} = j(X_p, Z_q)$ 는 속성 r 을 가진다,
- ii) $W_{pq} = j(X_p, Z_q)$ 는 속성 p 나 q 를 가지지 않는다.
- iii) r 이 결합(joining) 혹은 병치(juxtaposition) 함수일 때 X 나 Z 가운데 그 어느 것도 속성 r 을 가지지 않는다.

위에서 살펴 보았던 인간-계단 시스템(W)을 예로 든다면, 사람(Z)은 ‘걸을 수 있음’(q)이라는 속성을 가지며, 계단(X)은 ‘어떤 것을 지지할 수 있음’(p)이라는 속성을 가지며, 이 두 가지 성질은 함께 ‘계단을 걸어서 올라감’(r)이라는 속성을 산출한다.

2.3 어포던스 기반 정형모델링

어포던스, 이펙티브리티, 그리고 병치 함수에 대한 이 같은 정형화된 Turvey의 정의는 많은 공학자들에 의해 컴퓨터 공학적

으로 해석되어 오토마타 이론(automata theory) 등과 결합됨으로써 인간-환경 시스템에 대한 컴퓨터 제어 시스템으로 구현되기도 하였다(Arkin, 1998; Norman, 1988; Kirlik *et al.*, 1993). 특히, 어포던스 정형모델링 방법론은 Finite State Automata(FSA)에서의 상태전이를 위한 사전 조건으로 맵핑될 수 있어서 어포던스 개념이 소프트웨어 엔지니어링과 시스템 이론과 결합될 수 있는 기반을 제공한다. 예를 들면, <Figure 1>의 인간-계단 복합시스템의 경우, 오토마타를 기반으로 한 시스템 이론적인 접근에서는 <Figure 2> 와 같이 표현이 될 수 있다.

이와 같은 어포던스 기반 정형모델링 방법론은 계층적인 2 단계 FSA 모델로 표현되며, 따라서 계층적인 모델링 구조와 인간-환경 시스템의 동적인 성질을 고려하여, 어포던스 기반의 FSA 모델은 6개의 튜플로 구성된 FSA로 정의된다(Kim *et al.*, 2010b). 이와 같은 어포던스 FSA 모델에서의 상태전이를 그림으로 표현하면 아래 <Figure 3>과 같다. 즉, 이 FSA 모델은 외부 상태 전이(external state transition)와 내부 상태 전이(internal state transition)의 2단계의 계층구조로 인간-환경 시스템을 표현한다. 외부 상태 전이는 시스템 내에서 인간의 특정한 행동에 의해서 일어나며 시스템의 실제적인 물리적 변화를 가져온다. 이에 반해 내부 상태 전이는 외부 상태 전이를 실행시키기 위해 만족되어야 하는 사전조건(pre-condition)과 관계된다. 내부 상태 전이는 특정한 어포던스(p_m)와 이펙티브리티(q_n) 조합으로 구

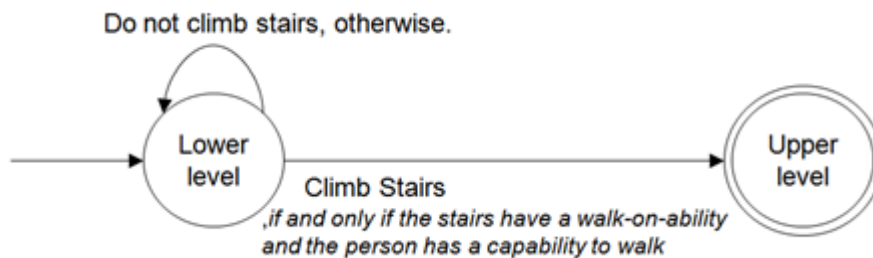


Figure 2. FSA representation of a ‘person-climbing-stairs’ system(Kim *et al.*, 2010b)

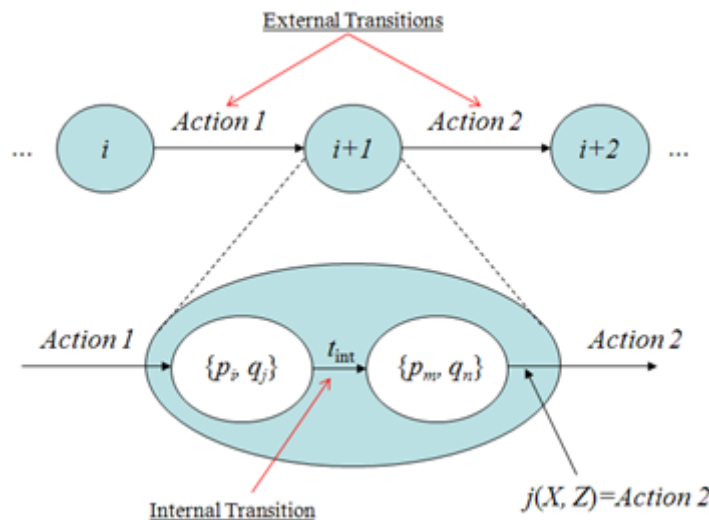


Figure 3. External and internal transitions of Affordance-FSA formalism(Kim *et al.*, 2010b)

성되는 2개의 상태들을 연결한다. 이 어포던스와 이펙티비티는 시간에 따라 변하는 속성으로서 환경에서의 물리적인 제약과 인간의 실행능력에 의해 결정되며, 얼마만큼의 시간, t_{int} ,이 흐른 후 어포던스와 이펙티비티 상태가 인간의 행동을 유발시킬 수 있는 사전조건인 p_m 과 q_n 으로 변하고 이때 병치함수는 p_m 과 q_n 조합에 근거하여 가능한 행동들의 집합을 생성한다. 만일, 특정한 행동 조건하에서 가능한 행동들 가운데 하나가 취해지면, 외부상태전이와 일어나고 시스템의 물리적인 상태가 다음 상태로 전이된다.

3. 어포던스 기반 FSA 모델을 이용한 대피자 행동 정형 모델

이번 장에서는 앞에서 설명한 어포던스 기반 FSA 모델링 방법을 기반으로 하여 대표적인 인간-환경 복합시스템의 사례라 할 수 있는 재난 상황에서의 인간의 행동을 관찰, 분석하고, 예측할 수 있는 대피자 행동 정형모델을 개발한다. 아래 <Figure 4>는 일반적인 셀 공간에서 현재 셀에서 이웃한 셀로의 이동 행위와 관련된 대피자 행동 정형 모델을 묘사한 것이다. 문제의 단순화를 위해, 대피자는 자신의 진행방향의 전, 후, 좌, 후 셀로만 이동이 가능하다고 가정한다. 따라서 이 모델은 대피자가 머무는 위치 상태에 따라 현재 셀(S_{ij})을 포함하여 북쪽에 인접한 셀($S_{i,j-1}$), 동쪽에 인접한 셀($S_{i+1,j}$), 남쪽에 인접한 셀 ($S_{i,j+1}$), 서쪽에 인접한 셀($S_{i-1,j}$)의 5개의 노드(nodes) 혹은 상태 (states)로 정의된다. 특히, 각 상태 노드는 인접한 각 셀로의 이동과 관련된 어포던스(‘각 인접한 셀에 불이나 장애물이 없어서 이동이 가능함’)와 이펙티비티(‘대피자의 이동능력’) 조건의 만족여부와 관련되는 서브상태들(sub-states)을 가진다. 즉, 어포던스와 이펙티비티의 초기 상태들(p^*, q^*)라고 할 때, 일정한 시간이 흐른 후에는 이웃 셀로의 이동이 가능한 조건인 상태 (p_m, q_n)($\{m = 1, 2, 3, 4\}, \{n = 1, 2, 3, 4\}$)으로 전이가 가능함을 표현하고 있다.

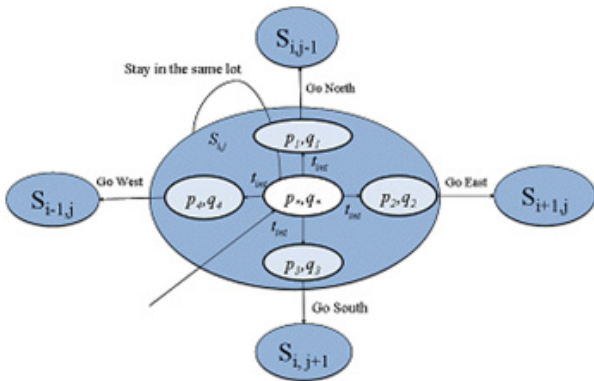


Figure 4. Human Behavior Model using Affordance-based FSA

<Figure 4>에서 보듯이 이 FSA 모델에서는 시스템의 상태 전이가 외부 상태 전이와 내부 상태 전이의 2단계 계층구조로 이

루어진다. 즉, 외부 상태 전이는 대피자의 현재 셀에서 이웃하는 특정 셀로의 이동 행위에 의해서 일어나며, 따라서 시스템 상태의 물리적 변화를 가져온다. 시스템의 물리적 상태 변화를 일으키는 외부 상태 전이, 혹은 대피자의 가능한 행동집합 (Possible Action : PA)으로는 ‘Go North’, ‘Go East’, ‘Go South’, ‘Go West’, 그리고 ‘Stay in the same lot’가 정의된다. 이에 반해 내부 상태 전이는 외부 상태 전이를 일으키기 위해 만족되어야 하는 전제조건(pre-condition)과 관계된 것으로서, 이웃 셀의 물리적인 제약에 관한 인지적 요소인 어포던스와 대피자의 실행능력인 이펙티비티의 조합의 조건 상태가 불만족의 상태에서 만족 상태로 변화되는 과정을 나타낸다. 이때 어포던스와 이펙티비티 조건은 다음 셀로의 이동을 위한 실행 조건이 된다. 이것은 인간의 행동과 관계된 인지적 요소를 모델에 반영한 것으로서, 어포던스와 이펙티비티를 인지하기까지 소요된 특정한 시간 (t_{int})으로 정의된다. 즉, 어포던스와 이펙티비티의 초기 상태가 p^* 와 q^* 라고 할 때, 특정한 시간(t_{int})이 흐른 후 이웃 셀로의 이동 조건을 만족시키는 p_m 과 q_n ($\{m = 1, 2, 3, 4\}, \{n = 1, 2, 3, 4\}$)으로 전이되었다면 대피자는 조건이 만족된 셀들로의 이동이 가능하며, 병치함수는 만족된 p_m 과 q_n 조합에 근거하여 대피자의 가능행동집합(PA)을 생성한다. 또한, 가능행동집합 가운데 실제적인 행동으로 실행이 되기 위해서는 인접한 셀에 관한 3가지의 물리적인 행동조건(action conditions)인 ‘인접한 셀에 불이 없음’, ‘인접한 셀이 비어있음’, 그리고 ‘인접한 셀에 벽과 같은 장애물이 없음’이 만족되어야 한다. 이와 같은 과정을 거쳐 걸러진 가능행동들 가운데, 대피자가 하나의 행동요소를 취할 경우, 시스템의 외부상태전이가 일어나고 시스템의 물리적인 상태가 다음 상태로 전이된다. 지금까지 설명한 재난대피상황에서의 인간행동 정형모델을 정형화된 수식으로 표현하면 아래와 같이 6개의 튜플을 가진 FSA로 정의된다.

$$M_{comb} = \langle \Sigma, S, S_0, M_{atom}, \delta_{ext}, F \rangle, \text{ and}$$

$$M_{atom} = \langle \{X, Z, W\}, \{P, Q, PA\}, Pr, j, \pi, ta, \delta_{int}, t_{int} \rangle :$$

$$\delta : S \times \Sigma \rightarrow S,$$

$$Pr : X_p \rightarrow P, Pr : Z_q \rightarrow Q, Pr : W_{pq} \rightarrow PA$$

$$j : X_p \times Z_q \rightarrow W_{pq}, \pi : P \times Q \times C \rightarrow PA, \text{ and}$$

$$\delta_{int} : \{P, Q\} \times t_{int} \rightarrow \{P, Q\}, \text{ where;}$$

$$\Sigma : \text{Set of transitions among system states,}$$

$$S = \{s_{ij} = \text{evacuee is on the lot}_{ij}, i = 1, \dots, 8, j = 1, \dots, 8\},$$

$$F = \{s_{28} = \text{exit 1}, s_{68} = \text{exit2}\}.$$

$$j : \text{Juxtaposition function,}$$

$$\delta_{ext} : \text{System state(external) transition function,}$$

$$\delta_{int} : \text{Time advance(internal) transition function,}$$

$$Pr : \text{Perceptual predicate function,}$$

$$\pi : \text{Possible action generation function,}$$

$$X : \text{A warehouse under fire,}$$

$$Z : \text{An operator working in the warehouse,}$$

$$W : \text{System of evacuation from warehouse fire,}$$

$$P = \{p_{ij} = \text{move-ability to the lot}_{ij}, i = 1, \dots, 8, j = 1, \dots, 8\},$$

$$Q = \{q_{ij} = \text{'evacuee's capability to move to the lot}_{ij}, i = 1, \dots, 8, j = 1, \dots, 8\},$$

$$C = \{c_1: \text{no fire on the next lot}, c_2: \text{emptiness of the next lot}, c_3: \text{no barriers between the current and next lot}\},$$

$$PA = \{(\text{go to lot}_{ij}), i = 1, \dots, 8, j = 1, \dots, 8\},$$

$$ta: \text{Target action, } ta \in PA \text{ and } ta \in \Sigma$$

$$t_{int}: \text{time advance function.}$$

<Figure 4>의 대피자 행동 정형모델을 대피자와 환경요소로 구성된 재난 시스템 모델로 확장하면 아래 <Figure 5>와 같은 셀룰라 FSA(cellular FSA)모델로 표현이 가능하다. 이 모델은 일반적인 셀 공간 안에 화재가 발생한 상황에서 인간(대피자)과 환경(불)의 동작과 운영을 기술하고 표현하는 시스템의 전체 상태공간을 제공한다. 이 모델은 재난 시스템 안에서의 개별 인간 에이전트와 환경 에이전트의 행동을 표현하고 기술하기 위한 정형화된 스키마를 제공할 뿐만 아니라, 목표 상태(goal state)를 포함하여 대피자의 행동에 의해서 전이될 수 있는 시스템의 전체 상태 공간(whole state space)을 정의함으로써 인간-환경 시스템을 표현하는 정형모델로서의 재난 대피 시뮬레이션에서 핵심적인 역할을 수행할 수 있다.

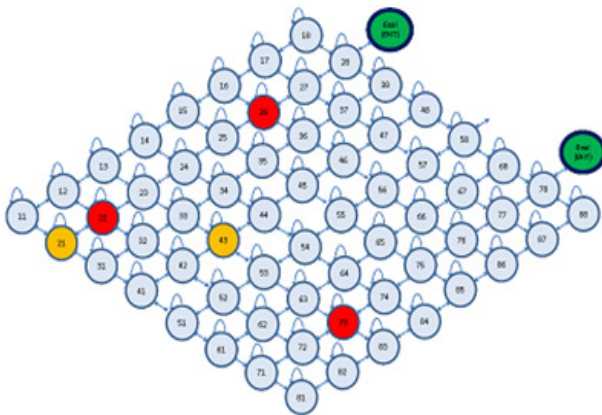


Figure 5. Cellular FSA Model for Evacuation Simulation

4. 어포던스 기반 대피 시뮬레이터의 기능적 설계 구조

이번 장에서는 어포던스 기반 대피자 정형 모델을 이용하여 대피자가 환경요소와의 다이내믹한 상호작용을 통해 출구까지 대피하는 재난 상황을 시뮬레이션 하기 위한 어포던스 기반 대피 시뮬레이터의 기본 구조를 설명한다. 어포던스 기반 대피 시뮬레이터는 아래 <Figure 6>과 같이 크게 어포던스 기반 대피자 정형 모델(affordance-based FSA), 에이전트 모델(agent model), 그리고 인간행동 플래너(human action planner), 그리고 이벤트 생성기(event generator)의 네 가지로 모듈로 구성된다. 이번 장에서는 이 4가지 모듈들의 기능적 특성들을 정리하고 각 모

듈간의 관계를 설명한다.

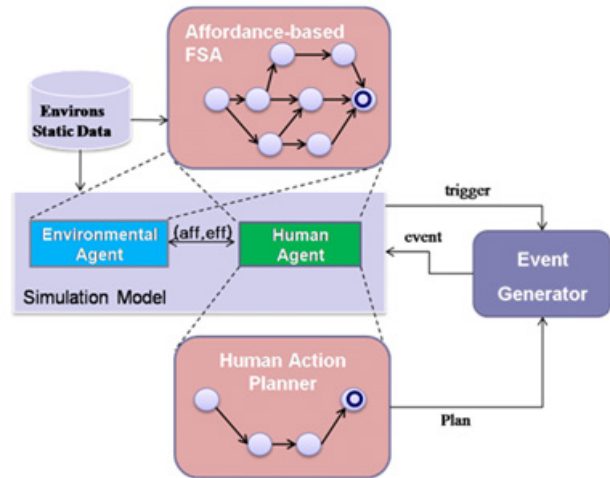


Figure 6. Design Structure of Affordance-based Simulator

먼저, 어포던스 기반 대피자 행동 정형모델은 재난 상황에서의 인간의 행동을 분석 및 예측하기 위한 대피 시뮬레이터의 핵심 모듈로서, 재난 시스템 안에서의 대피자의 행동과 동적인 환경 요소의 변화를 전체적으로 묘사하는 상태지도(state map)로서의 역할을 수행한다. 이 모델은 재난 시스템의 시간적이고 공간적인 상황 변화 뿐 아니라 그 안에서 인간 에이전트가 취할 수 있는 가능한 행동들의 전체 조건을 제공한다. 즉, 이 모델은 재난 시스템에서의 물리적인 요소 뿐 아니라 인간의 행동 능력에 대한 이펙티브리티와 행위의 환경적인 전제조건이 되는 어포던스 같은 인지적 요소를 정형화하여 표현한다. 이 모델은 시스템 내에 있는 모든 대피자에게 동일하게 적용될 수 있다.

에이전트 모델은 인간 에이전트(human agent)와 환경 에이전트(environment agent)로 구성된다. 인간 에이전트는 재난 시스템 내에서 활동하는 각각의 대피자를 표현하며, 각 에이전트는 출구까지 무사한 탈출이라는 목표를 가지고 행동한다. 환경 에이전트는 불이나 연기와 같이 사람의 판단에 영향을 미치는 환경요소로서 동적인 환경 속에서 정해진 물리적인 법칙들(예, 시간에 따른 화재의 전파, 등)에 근거하여 환경의 변화를 갱신시킨다. 즉, 통제함수(governing equations)를 사용하여 환경변수의 동적인 변화량을 계산함으로써 환경 에이전트의 특성을 시간에 따라 표현한다. 인간 에이전트의 경우는 앞에서 기술한 바와 같이 목표에 기반한 행동을 한다. 즉, ‘출구까지의 무사한 탈출’이라는 목표를 이루기 위하여 인지 가능한 행동 기회들을 미리 예측함으로써 자신이 취할 일련의 행동들에 대한 계획을 수립하도록 프로그래밍 된다. 이 과정에서 인간 에이전트는 재난 환경의 구조와 공간 배치 등과 같이 사전에 알 수 있는 정적인 지식을 바탕으로, 환경 에이전트와의 상호작용을 통해 얻은 어포던스와 이펙티브리티에 대한 동적인 인지적 정보를 이용하여 현재 위치에서 목표 지점까지 무사히 가기 위한 가능한 행동들의 순서를 계획함으로써 대피 경로를 수립하고 이동해 나간

다. 이때, 어포던스와 이펙티비티는 환경 에이전트가 제공하는 정보들(공간, 상태, 시간 등)을 입력으로 한 인간 에이전트의 평가의 결과이고, 두 에이전트 모델은 시뮬레이션 상에서 별개로 동작하지만, 동일 공간과 시간에서의 정보는 공유하게 된다.

행동 플래너는 인간 에이전트에 내재된 알고리즘으로서, 인간의 탈출 경로 분석에 대한 사고 과정을 모사하고, 출구까지의 안전한 탈출을 위한 대피 경로를 생성해주는 역할을 수행한다. 인간의 행동은 인지에 기반한 판단을 바탕으로 이루어진다고 할 때, 이는 인간과 환경의 상호작용의 결과로 나타난다. 이와 같은 인지에 기반한 인간 행동을 대피 시뮬레이션에서 반영코자 할 때에는 ‘인지 범위’(perceivable boundary)를 고려하여야 한다. 인간은 재난과 같은 위급한 상황을 만났을 때, 대개 자신의 주위에 있는 인지범위 내의 정보를 바탕으로 가능한 행동 방향을 판단하게 된다. 하지만, 목표지점인 출구가 멀리 떨어져 있는 상황에서는 인지범위 밖의 상황을 인지하기 힘들기 때문에 건물구조 등 자신이 처한 환경에 대한 사전지식을 바탕으로 판단할 수 밖에 없다. 따라서 행동 플래너는 인지 범위 내에 있는 위협이나 장애물과 같은 환경적인 제약 사항에 대한 인지와 인지범위 밖의 환경 구조물에 대한 사전지식을 바탕으로, 대피자의 행동계획을 생성한다. 예를 들어 창고 건물 내에 화재가 발생한 상황을 가정한다면, 창고의 구조에 관한 기하정보 및 출구에 관한 위치정보가 결정이 되면, 각 셀로부터 출구까지의 고정적인 거리를 나타내는 정적 플로어 필드 지표(Static Floor Field Indicator; SFFI)값이 할당된다(Varas *et al.*, 2007). 즉, 출구에 가까울수록 해당 셀의 SFFI 지표값은 작아지게 되고, 이 값은 각 대피자에게 출구로 가는 방향을 알려준다. 즉 대피자는 기본적으로 이 수치가 낮아지는 방향으로 이동을 전개하게 되며, SFFI가 ‘0’에 수렴하면 대피자는 목표지점에 도달한 것으로 간주되는 것이다. 만일, 해당 셀에 보관품이 적치되어있거나 불이 이미 번져 있을 경우에는 대피자가 그 셀로는 이동할 수 없으므로(즉 해당 셀은 이동 가능성의 어포던스가 존재하지 않으므로), 그 셀에는 매우 큰 값(예 : 9999)을 부여하여 이동을 제한할 수 있다.

이벤트 생성기는 시뮬레이션 모델 상에서 인간 에이전트 및 환경에이전트의 행동을 실행시키는 역할을 한다. FSA로 표현되는 어포던스 기반 대피자 정형모델은 그 자체가 목표 시스템의 기술 모델(descriptive model)이기 때문에 시뮬레이션 상에서 동적으로 전개되는 상황 변화에 따라 FSA 상태 공간에서 인간 에이전트와 환경 에이전트의 움직임을 드라이브 해주기 위해서는 이벤트 생성기가 필요하다. 이를 위해 이벤트 생성기는 행동 플래너에 의해 미리 만들어진 대피자의 행동계획인 대피 경로를 따라 환경요소의 상태에 대한 인간의 실시간 인지정보를 바탕으로 인간 및 환경 에이전트의 움직임을 드라이브 할 수 있는 이벤트들을 생성한다. 이때 인간의 행동 능력에 대한 인지적인 성질인 이펙티비티와 행동의 환경적인 전제조건이 되는 어포던스는 대피자의 행동을 촉발하는(triggering) 통제 변수로서 역할을 한다.

5. 사례연구 : 창고 화재 대피 모델

이번 장에서는 제안된 어포던스 기반의 대피 시뮬레이션 방법의 유용성을 검증하기 위하여 작은 창고에서 화재가 난 상황에서 작업자들이 대피하는 상황을 사용하여 재난 상황에서의 인지에 기반한 인간의 행동이 어떻게 정형화되어 시뮬레이션 모델로 만들어 질 수 있는지를 설명한다.

5.1 시나리오

작은 규모의 창고 안에서 갑자기 화재가 발생하였을 경우에 그 곳에서 일하던 작업자들이 대피하는 상황을 가정한다. 창고는 하나의 셀(cell) 크기가 $0.8 \times 0.8m^2$ 인 8×8 개의 셀 공간으로 정의되며, 오른쪽 중앙에 비상시 탈출구로 사용되는 두 개의 출구가 있다. 창고 안에는 2명의 작업자가 일하고 있으며, 보관품들이 놓여 있는 셀 공간을 제외한 공간은 통로로 사용이 가능하다. 먼저, 첫 번째 작업자가 자신의 주위에서 불이 났다는 것을 감지하고 급박한 화재 상황에서 탈출을 시도한다. 자신의 위치와 가장 가까운 출구를 생각하고 그곳까지의 최단 경로를 생각하며 이동해 나간다. 도중에 다른 작업자를 만나 그에게 화재 발생사실을 알려주고 자신의 탈출 계획을 공유하게 되고 이후 두 사람은 행동을 같이 한다. 그런데 출구로 이동하는 도중에 다른 곳에서 발화한 불로 인하여 출구까지의 계획 경로가 막혔다는 사실을 인지하게 되고 새로운 탈출 경로를 모색한다. 이를 위하여 자신의 주위 환경의 현재 상황(affordance)을 살핌과 동시에 또 다른 출구 위치 등 자신의 사전 지식을 동원한다. 새로운 탈출 경로에 대한 계획을 새로 수립하게 되면 다시 그 경로를 따라 이동해 나간다. 이 예제에서의 창고 건물의 레이아웃과 대피 상황은 <Figure 7>(a)에 나타나 있다.

본 논문에서는 위의 시나리오를 이용하여 대피자 정형모델링 및 시뮬레이션을 설명하기 위하여 아래와 같은 5가지 가정을 도입한다.

- 1) 시스템 안에서 행동하는 대피자는 공간상에서 다음 상태 전이까지 소요되는 시간 안에 자신을 포함한 주변 360도 방향의 인지가능 범위 내에 상황 판단이 가능하다.
- 2) 대피자는 탈출을 위한 경로 선택 시, 자신의 진행방향으로 전, 후, 좌, 우 방향 중 한 방향으로만 이동이 가능하며, 대각선 방향으로의 이동은 불가능하다.
- 3) 모든 대피자는 독립적으로 상황을 판단하여 행동한다. 하지만, 두 명의 대피자가 동일한 셀 상에 존재하게 되면, 그들은 정보와 지식을 공유하게 되고, 따라서 서로의 탈출 계획도 공유한다.
- 4) 불은 환경적인 요인으로 간주되며, 그 자체가 또한 하나의 에이전트로 모델링 된다(연기와 열은 모델의 단순화를 위해 배제된다).
- 5) 본 논문에서 다루는 대피 시스템의 모델링과 시뮬레이션 범위는 처음으로 불을 발견하고 탈출을 결심한 순간부터 모든

대피자가 탈출을 종료하는 순간까지로 한다.

5.2 대피 시뮬레이션 모델

위 시나리오에서 제시된 창고화재대피 예제는 본 논문에 제안하는 어포던스 기반의 대피시뮬레이션을 적용할 수 있는 전형적인 문제이다. 시뮬레이션 모델에서 각 대피자는 인간 에이전트로 표현되고, 불은 환경 에이전트로 모델링 된다. 자연 세계 속에서의 연속적인 시간 흐름은 시뮬레이션을 위한 단위 시간인 타임스텝(time step Δt)으로 이산화시킨다. 대피자인 인간 에이전트의 이동 속도는 평균 2m/s로 한다(Daoliang *et al.*, 2005). 만일 타임스텝 Δt 를 0.4s로 정한다면 인간 에이전트는 한 타임스텝당 0.8m를 움직일 수 있다. 화재가 발생될 때 불의 평균 전파 속도는 0.4m/s로 가정한다. 이것은 불이 평균 5타임스텝당 이웃한 셀로 번져 가는 것을 의미한다.

이 예제에서 제시된 다이내믹한 창고화재 상황은 창고건물 내에서 이루어지는 인간 에이전트(대피자)와 창고에서 발생하여 번져 나가는 환경 에이전트(불) 사이의 인지적 상호작용을 반영한다. 이 예제에서 창고 안의 특정 셀에 불이 번졌는지의 여부는 대피자의 그 셀로의 이동 행위와 관련된 어포던스 여부를 제공해준다. 또한 창고 안의 기둥이나 적재된 제품 등은 작업자가 특정 셀로의 이동하는 것을 제한하는 환경요소라 할 수 있다. 즉, 이 창고화재대피 예제에서는 어포던스는 “대피자에 대한 인접 셀로의 이동 가능성”이며, 여기에 대응하는 이펙티비티는 “대피자가 인접 셀로 이동 가능함”이라고 할 수 있다. 따라서 각 인간 에이전트의 행동은 자신의 인접 셀이 “이동 가능함”(is-move-able)을 제공해주는 지 여부를 인지를 전제로 한다.

어포던스 기반 대피시뮬레이션에서 각 인간 에이전트는 화재 발생 사실을 감지하게 되면서 탈출을 시작한다. 이때 인간 에이전트는 탈출을 위한 행동에 앞서 목표와 계획을 먼저 정한다. 대피자의 행동 목표는 화재가 번져나가는 동안에 창고의 여러 출구 가운데 하나의 출구를 통하여 창고건물을 빠져나가는 것

이다. 일단 행동 목표가 정해지면, 대피자는 출구까지의 통로를 따라 이동하기 위한 대피 계획을 인간행동플래너를 이용하여 수립한다. 인간행동플래너는 각 인간 에이전트에 내재된 행동모델로서 건물의 레이아웃에 대한 사전 지식뿐 아니라 인지 범위 내에 있는 자신의 주위 상황에 관한 인지 정보를 이용한다. 만일 시뮬레이션이 수행되는 과정에서 동적인 특성으로 인해 환경요소의 상태가 순식간에 바뀌어서 행동 플래너에 의해 수립된 대피자의 행동계획이 수행 불가능한 상황일 때는 마치 자동차 항법장치에서 경로를 재 생성하는 것과 같이 현재 상태에서 목표달성까지 가능한 계획을 재 생성할 수 있어야 한다. 이 같은 탈출을 위한 목표와 대피 계획 수립에 관한 개념은 <Figure 7>에 묘사되어 있다.

6. 결론 및 추후 연구 과제

본 연구에서는 환경이 제공하는 행동 기회인 어포던스와 그 기회에 대한 인간의 행위 능력인 이펙티비티의 병치과정을 통해 인간의 행동을 설명하는 어포던스 이론과 이를 이산-사건 시스템으로 정형화한 어포던스 기반 인간행동정형모델을 이용하여 동적이고 긴급한 판단이 요구되는 재난 상황 속에서 출구를 찾아 탈출하는 대피자의 행동을 표현하고 분석하기 위한 시뮬레이션 방법을 탐구하였다.

생태적 환경 속에서 인간은 자신을 둘러싼 환경 요소와의 상호작용을 통하여 얻어지는 인지적 정보를 바탕으로 자신의 행동을 결정하며, 목표로 하는 상태에 도달하기 위한 일련의 행동을 계획하고 실행함에 있어 그 인지적 정보를 사용한다. 이와 같은 어포던스 이론은 FSA 모델과의 접목을 통하여 기존의 시스템이론에서 예측이 힘들다고 알려져 왔던 인간의 행동에 대한 정량적이고 수학적인 모델링 방법으로 발전되었으며, 본 논문에서는 이를 재난 시스템에서의 대피자 행동 모델에 응용시킴으로써 동적인 재난 상황에서 대피자의 적응적인 행동을 예

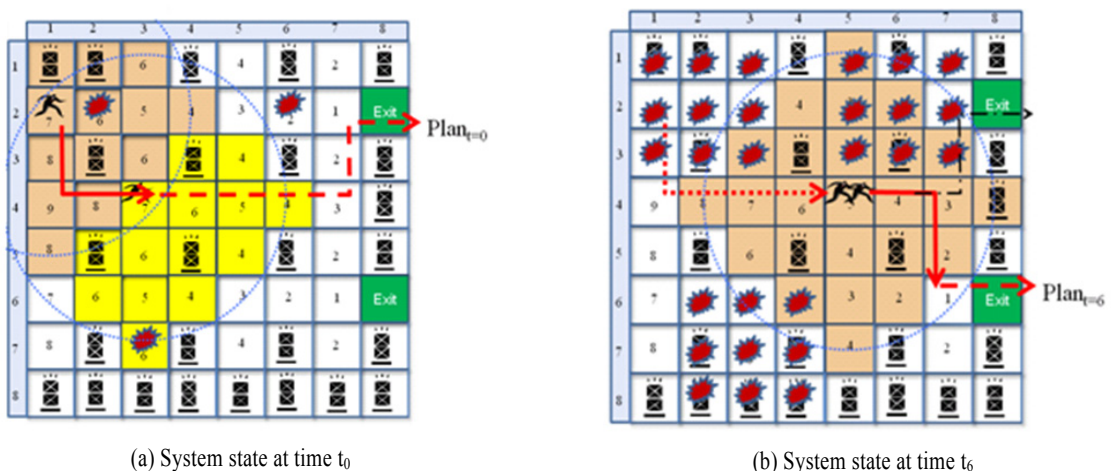


Figure 7. Simulation Model for Warehouse Fire Evacuation Problem

측, 통제할 수 있는 대피 시뮬레이션 방법론을 제시하였다. 재난 상황에서의 인간의 대피 행동을 시뮬레이션을 통하여 분석하고 예측하기 위하여서는 환경에이전트와 출구를 향하여 탈출하려는 인간에이전트 사이의 상호작용을 고려하는 것이 필수적이다. 왜냐하면 재난 상황에서의 복잡하고 불확정적인 인간의 행동을 시뮬레이션 하기 위해서는 인간과 환경 간의 상호작용을 고려하여 대피자가 취할 수 있는 행동의 경우의 수를 나타낼 수 있어야 하기 때문이다. 기존의 물리적 환경만을 고려한 대피 시뮬레이션에서는, 대피자의 행동을 단순한 규칙을 사용하거나 확률적으로 처리하여 표현하였다. 그러나 어포던스 기반 대피 시뮬레이션 방법은 특정 시간-공간 조건에서 환경이 제공하는 행동 기회인 어포던스와 인간의 행동 능력인 이펙티브티 조건을 고려함으로써 동적인 재난 상황에서의 대피자의 행동 예측을 가능하게 함으로써, 실제적인 대피 시뮬레이션 모델에서 유용하게 응용될 수 있다. 이 새로운 대피 시뮬레이션 방법은 기존의 정적인 대피 환경에서의 단순한 규칙을 이용하고 고정화된 대피경로 설정을 이용하는 상용 대피 시뮬레이션의 한계를 뛰어넘어, 화재나 테러와 같은 복잡하고 급박한 상황 변화에 대처하는 인간의 행동 패턴을 보다 사실적으로 분석하고 예측하는데 사용될 수 있다.

본 논문에서는 재난 상황에서의 군중의 인지적 대피 행동을 예측하고 분석하기 위한 어포던스 기반 대피 시뮬레이션을 위한 기초 연구로서 어포던스 기반 대피 시뮬레이터의 기능적 설계구조와 더불어 창고 화재대피 사례를 대상으로 새로운 시뮬레이션 방법론의 적용 가능성을 설명하였다. 그러나 보다 실제적인 모델 개발 및 적용성의 검증을 위하여서는 제안된 시뮬레이터의 세부 모듈의 개발과 더불어 병원이나 학교 등과 같이 좁은 공간 내에 많은 사람들이 공존하는 공간을 대상으로 다양한 재난 상황과 내부 사람들의 위치에 따른 예상 피해, 그리고 구조물의 안전 설계 변경이나, 대피 방안 수립 등의 시뮬레이션 연구가 추가적으로 되어야한다. 또한 보다 실제적인 사례로의 확장과 다음 응용의 단계를 위해서는, 화재와 같은 재난 상황에서 인간 행동과 탈출에 치명적인 영향을 주는 요인들(예를 들면, 사회적, 심리적, 문화적 요인 등)에 대한 광범위한 분석과 그 핵심적인 속성들을 데이터베이스화 하고 시뮬레이션 프레임워크와 연동함으로써 모델의 정확성과 활용도를 높이는 방안이 필요하다.

참고문헌

- Virtual Environment V 5.9*. Simulex User Guide, Integrated Environmental Solutions Ltd.
- Arkin, R. C. (1998), *Behavior-based robotics*, MIT Press, Cambridge, MA.
- Cassandra, C. G. and Lafortune, S. (1999), *Introduction to Discrete Event Systems*, Springer, Boston, MA.
- Daoliang, Z., Lizhong, Y., and Jian, L. (2005), Exit dynamics of occupant evacuation in an emergency, *A : Statistical Mechanics and its Applications*, **363**, 501-511.
- Galea, E. R., Lawrence, P. J., Gwynne, S., Filippidis, L., Blackshields, D., and Cooney, D. (2006), *BuildingEXODUS V 4.06*, User Guide and Technical Manual.
- Gibson, J. J. (1979), *The Ecological Approach to Visual Perception*, Boston : Houghton Mifflin.
- Shin, D., Wysk, R. A., and Rothrock, L. (2006), Formal model of human material-handling tasks for control of manufacturing systems, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A : Systems and Humans*, **36** (4), 685-696.
- Kim, N., Joo, J., Rothrock, L., and Wysk, R. (2010a), An Affordance-based Formalism for Modeling Human-Involment in Complex Systems for Prospective Control, Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference, Baltimore, USA.
- Kim, N., Shin, D., Wysk, R., and Rothrock, L. (2010b), Using Finite State Automata (FSA) for the Formal Modeling of Affordances in Human-Machine Cooperative Systems, *International Journal of Production Research*, **48**(5), 1303-1320.
- Kirlik, A., Miller, R. A., and Jagacinski, R. J. (1993), Supervisory control in a dynamic uncertain environment : A process model of skilled human-environment interaction, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, **23**(4), 929-952.
- Lee, S., Son, Y., and Jin, J. (2008), Decision field theory extensions for behavior modeling in dynamic environment using Bayesian belief network, *Information Sciences*, **178**(10), 2297-2314.
- Norman, D. (1988), *The psychology of everyday things*, Basic Books, New York, NY.
- Turvey, M. T. (1992), Affordances and Prospective Control : An Outline of the Ontology, *Ecological Psychology*, **4**, 173-187.
- Varas, A., Cornejo, M. D., Mainemer, D., Toledo, B., Rogan, J., Munoz, V., and Valdivia, J. A. (2007), Cellular automaton model for evacuation process with obstacles, *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, **382**, 631-642.
- Zeigler, B. P. (1976), *Theory of Modeling and Simulation*, 1st ed., John Wiley and Sons, Inc., New York, NY.