재난 발생 시 이송 및 병원 자원 제약을 고려한 이송환자 우선순위 결정 연구

Priority Assignment for Emergency Medical Service Provision in Disaster by Considering Resource Limitation

신교홍* · 이태식**

Shin, Kyohong*, Lee, Taesik**

Abstract

EMS resources management is one of the determinants to maximize the number of survivors effective first response in the aftermath of mass casualties. This paper concerns a problem of patient prioritization for EMS provision by constructing a Markov Decision Processes(MDP) model. While prior research tends to focus solely on transport resources (i.e., ambulance), we show that factors on the involved hospitals (i.e., capacity and capability) in the disaster response affect optimal response policies. Experiments on hypothetical scenarios are conducted to compare the proposed model with the existing algorithms from the literature, including the standard triage practice known as START(Simple Triage And Rapid Treatment). We show that considering hospital factors can save more patients than the other algorithms in most scenarios. The results of the study suggest that capacity and capability of the hospitals participating in the response should be factored into decision makings in the EMS response to maximize the life savings.

Key words : Emergency Medical Service(EMS), Disaster, Priority assignment, Hospital selection, Markov Decision Processes(MDP)

요 지

재난으로 인해 다수 환자가 동시에 발생하는 경우, 효과적인 가용자원 운용을 위해서 고려해야할 요인으로 응급의료서비스 제공의 우선순위 결정과 해당 환자를 이송할 병원 선정이 있다. 이에 본 연구에서는 두 가지 요인을 동시에 결정하는 연구를 진행하였다. 각 병원의 서비스율과 중증 환자에 대한 치료 역량이 고려된 Markov Decision Processes 모델을 설계하여 기대 생존 환자 수를 최대화 하는 최적 결정을 구했다. 모델로부터 얻어진 최적 결정은, 재난 현장 주변 병원의 진료 자원 여유 상태에 따라 우선적으로 이송해야하는 환자 집단이 달라짐을 보여준다. 계산된 최적 결정의 성능을 평가하기 위해 최근 관련 연구 문헌의 알고리즘 및 실제 재난 현장에서 일반적으로 사용되고 있는 START(Simple Triage And Rapid Treatment)방법과의 비교를 수행하였고, 타 알고리즘에 비해 대부분의 시나리오에서 더 많은 환자를 살릴 수 있다는 결과를 얻었다. 이러한 결과에 바탕하여, 발전된 재난사고 대처가 이루어지도록 재난 발생 시 사고 현장 주변의 응급실 정보를 신속하게 공유하여 이송환자 우선순위를 결정하는 것을 제안한다.

핵심용어 : 응급의료서비스, 재난, 우선순위 결정, 병원 선정, Markov Decision Processes(MDP)

1. 서 론

1.1 연구 배경

응급의료서비스는 병원 전 단계와 병원 후 단계로 나눌 수 있으며, 이 중 병원 전 단계는 응급의료가 필요한 환자에게 이송자원(구급차)을 배정하여 환자 발생 현장에서 1차 치료를

제공하고 환자가 적절한 최종 치료를 받을 수 있도록 병원(응급실)으로 이송하는 서비스를 의미한다. 양질의 응급의료서비스를 제공하기 위해서는 적절한 수의 구급차와 함께 충분한 응급실 내 환자 수용능력이 필요하다(Sung and Lee, 2012).

다수의 환자가 짧은 시간 내에 발생하는 재난 상황에서는 동시에 많은 사상자들이 응급의료서비스를 필요로 한다. 그러

*교신저자. 정회원. 한국과학기술원(KAIST) 산업 및 시스템 공학과 석사과정(Tel: +82-42-350-5166, Fax: +82-42-350-3110, E-mail: hong906@kaist.ac.kr)

Corresponding Author: Member, Master's Student, Department of Industrial & Systems Engineering, KAIST

**한국과학기술원(KAIST) 산업 및 시스템 공학과 부교수

Associate professor, Department of Industrial & Systems Engineering, KAIST

나 이송자원의 수나 응급실의 환자 수용능력은 제한적이기 때문에 이 수요를 동시에 모두 충족시킬 수 없다. 따라서 한정적인 자원을 사용하여 피해를 최소화 할 수 있도록 자원 운용 관리를 하는 것이 재난 시 응급의료서비스 제공의 중요한 문제이다. 재난 현장에서 고려할 수 있는 주요 자원운용 관리의 사상자를 분류하여 응급의료서비스 제공의 우선순위를 결정하는 것과 환자를 이송할 병원을 선정하는 것 두 가지가 있다.

1.2 관련 연구 동향

재난 발생 시 병원 전 단계 응급의료 운영과 관련된 대다수의 연구는 사상자 분류 및 응급의료서비스 제공의 우선순위 결정에 집중하였다. 사상자 분류 및 응급의료서비스 제공의 우선순위 결정이란, 현장의 사상자들을 분류하고, 분류된 등급을 토대로 병원으로의 이송 우선순위를 정하는 것을 말한다. 일반적으로 널리 사용되고 있는 사상자 분류로는 Simple Triage And Rapid Treatment (START) 방법이 있다. Fig. 1은 START 방법의 분류 기준을 보여준다. START 방법은 환자의 걷기 능력, 기도의 개방 정도, 호흡 속도, 혈압, 지시에 따른 이행 정도를 통해 환자들을 총 4가지 등급 - 사망(expectant), 긴급(immediate), 응급(delayed), 비응급(minor) - 으로 나눈다. 분류를 마친 후, 긴급환자 집단을 먼저 이송하기 시작하며 다음으로 응급환자 집단을 이송한다(Jenkins *et al.*, 2008).

START 방법에서 시간에 따른 환자의 상태 악화나 사용 가능한 자원의 제한 등을 고려하지 않는다는 점이, 최근 관련 연구에서 문제점으로 지적되어왔으며(Garner *et al.*, 2001; Frykberg 2005; Sacco *et al.*, 2005; Jenkins *et al.*, 2008), 이러한 문제점을 해결하고자 더 많은 환자를 생존시키기 위한 알고리즘 개발 연구가 최근 들어 시도되고 있다(Sacco *et al.*, 2005; Li and Glazebrook 2010; Mizumoto *et al.*, 2011; Jacobson *et al.*, 2012; Kashiyaama *et al.*, 2013; Mills *et al.*, 2013).

Fig. 1. START Algorithm.

특히, Li and Glazebrook(2010), Jacobson *et al.*(2012) 등의 연구에서는, 시간에 따른 환자의 악화나 이송 자원의 서비스 시간 등을 지수 분포와 같은 특정 분포로 표현함으로써 START 방법의 문제점을 보완하는 확률적 모델을 설계하였다. 이에 대한 수학적 분석을 통하여 환자의 생존가능 시간 및 이송 시 소요시간 등을 고려하는 경우 기존의 START 방법의 이송환자 우선순위 결정이 최적일 아닐 수 있다는 것을 보였다.

Li and Glazebrook(2010)은 생존자 분류 문제에 대하여 서비스를 완료한 작업(job) 수를 최소화하는 작업 스케줄링(job scheduling) 문제로 변형하여 접근했다. 각 작업은 만기일로 정의되는 수명을 가지고 있으며 수명이 다할 때까지 서비스를 받지 못하면 버려지는 것(즉, 환자 사망)으로 가정한다. 이들은 두 유형의 작업을 처리함에 있어서 시간에 따른 우선순위를 결정하기 위해 연속시간 모델을 도입하였다. 연구 결과, 더 긴급한(만기일이 짧은) 작업을 우선적으로 처리하는 것이 최적의 결정이 아니었으며 각 작업 종류 별 만기일의 길이와 현재 각 작업 종류 별로 몇 개의 작업이 남아있는지를 고려하여 우선순위를 결정해야 한다고 주장했다. 해당 연구는 START를 이용한 분류에서 긴급환자와 응급환자의 우선순위를 결정하는 문제로 대입시킬 수 있다.

Jacobson *et al.*(2012)는 Li and Glazebrook(2010)과 유사한 설정으로 접근하였다. 각 환자 집단은 생존 가능 시간이 있으며 각 집단을 처리할 때 걸리는 시간과 얻을 수 있는 보상이 다르다고 가정하여, 재난 현장에 남아있는 환자 수의 변화에 따른 우선순위 결정 문제를 풀었다. 또한 한 집단이 다른 집단보다 항상 우선순위가 높은 경우를 찾고 이를 증명함으로써 사고 현장에 남아있는 환자 수에 대한 정확한 정보 없이 각 환자 집단의 특성만을 가지고 우선순위를 내릴 수 있는 방법을 제안했다. 이 연구 역시 START 분류의 긴급환자와 응급환자의 경우로 생각할 수 있으며, 환자가 많은 상황에서는 응급환자를 먼저 처리하는 것이 좋을 보였다.

이러한 연구들은 재난 현장 내의 환자들에 대해서는 자세히 묘사했지만 선택된 환자가 이송될 병원에 대해서는 간단히 표현하는 것에 그친 문제점이 있다. Li and Glazebrook(2010)과 Jacobson *et al.*(2012)의 경우, 병원으로의 이송이라는 구체적인 표현을 사용하지 않고, 두 유형의 환자 집단이 선택된 이후에 각기 다른 서비스 시간동안 서비스를 받는 것으로 표현되어있다. 즉, 선택된 유형에 따라 다음으로 환자 이송이 가능한 시간이 달라지도록 설정하였다. 또한 이들은 단 하나의 이송 대상 병원만을 고려하였고 한 병원으로의 계속된 환자 이송으로 발생하는 과밀화와 이에 따른 처치 지연 등이 환자의 생존율에 미칠 수 있는 영향을 고려하지 못했다.

환자를 이송함에 있어서 적절한 병원의 선정은, 이송 우선순위와 더불어 응급의료 운영에 있어 매우 중요한 요소이다. 실제 2010년 7월에 발생한 인천대교 버스 추락 사고는 이송

병원 선택이 제대로 이루어지지 않았을 때의 문제점을 보여 주었다. 이 사고로 인해 많은 사상자가 발생한 것도 문제였지만 적절한 사상자 이송이 이루어 지지 않은 것이 더 큰 문제였다. 발생한 사상자의 대부분이 가까운 병원이라는 이유로 인하대 병원으로 이송되어 응급실에 상당한 혼란을 주었다(Kang *et al.* 2013). 이처럼 한 병원으로의 이송은 병원 내 혼잡도를 증가시킨다. 적절한 시간 내에 근본적 처치(definitive care)를 제공하는 것이 환자의 생존에 중요한 요소임을 고려할 때, 혼잡도가 증가한 병원으로 환자를 이송하는 것보다 조금 멀지만 혼잡도가 낮은 병원으로 이송하는 것이 근본적 처치 제공의 지연을 줄일 수 있으며 따라서 환자의 생명을 살리는 데에 더 도움이 될 수 있다. 또한 병원마다 환자를 처치하는데 걸리는 시간과 중증도가 높은 환자에 대한 처치 역량이 다를 수 있기 때문에 병원 별 치료 역량에 대한 고려가 필요하다. 또한 재난 현장으로부터 병원까지의 거리는, 이송 소요 시간과 이에 따른 이송 자원의 가용률에 영향을 주고, 결과적으로 현장에 남아있는 환자들의 생존율에 영향을 주기 때문에 어떤 병원으로 환자를 이송하는가는 환자 우선순위 결정에 고려되어야 한다.

1.3 연구 방법

본 연구에서는 이송 병원을 고려하는 것이 응급의료서비스 제공의 우선순위 결정에 어떠한 영향을 주는지 보기 위해 사상자 분류 후 응급의료서비스 제공의 우선순위 결정과 이송 병원 선정을 하나의 모델로 설계하였다. 재난으로 발생한 환자들의 생존가능 시간과 이송자원의 서비스 시간, 병원 내 환자 처치 시간 등을 지수 분포로 표현하고, 병원 별 치료 역량에 차이를 둬으로써 이송 병원 선택이 이송 환자 우선순위 결정에 주는 영향을 수학적으로 분석할 수 있도록 하였다. 이를 통해 생존자 수를 최대화하기 위한 이송 환자 결정 및 해당 환자의 이송 병원 선정 연구를 진행하였다.

재난 현장에서 발생 가능한 각 상황에 따라 상황별 최적 의사결정 도출이 가능한 Markov Decision Processes(MDP)를 이용하여 확률적 모델을 수립하였다. MDP는 불확실성 하에서 현재 내린 결정에 따른 직접적 보상과 해당 결정이 미래에 주는 영향을 고려하여 단기간 또는 다기간의 의사결정 문제를 해결하는 데 사용되는 방법이다(Puterman, 1994).

본 논문에서는 중앙응급의료센터의 분류를 참고하여 자원을 어떻게 운용 관리하는지에 따라 생존에 많은 영향을 받는 긴급환자 집단(Immediate, I로 표현)과 응급환자 집단(Delayed, D로 표현)을 중점적으로 고려하였다(중앙응급의료센터 분류체계, 2013). 또한 해당 모델을 통하여 재난이 발생한 지역의 응급의료체계 특성이 최적 의사결정에 주는 영향을 분석하기 위해, 도시지역(urban)과 비도시지역(rural)에서의 재난 상황을 가상 시나리오로 설정하였고 각 경우에 대한 최적 우선순위 의사결정의 구조를 살펴보았다. 이 분석을 통해 사고 지역

내 응급의료자원의 구성에 따라 우선적으로 이송되어야 하는 환자 집단이 달라져야함을 보인다.

추가적으로 이산 사건 시뮬레이션을 이용하여, 설계한 모델로부터 얻어진 의사 결정 방침의 성능을 평가하였다. 이를 통해, 재난 현장의 정보만을 이용하여 진행되는 START 방법 및 Jacobson *et al.*(2012)이 제안한 알고리즘보다 병원이송 단계까지 고려한 본 논문의 방법이 더 많은 환자를 생존시킬 수 있음을 보인다.

2. 마코비안 모델

본 연구에서는 사고현장 주변 병원의 특성 및 대기 환자 수를 고려하는 것이 이송 환자 우선순위 결정에 미치는 영향을 명료하게 파악하기 위해 다음과 같은 재난 상황을 가정하였다.

재난으로 인해 사고현장에 다수의 긴급환자(I)들과 응급환자(D)들이 발생하였고, 한 대의 구급차가 이들을 이송한다. 긴급환자는 응급환자보다 생존가능 시간이 짧다. 이 때 생존가능 시간이란 환자의 생존을 위해서 의학적으로 근본적 처치가 시행되어야 하는 한계 시간을 의미한다. 사고 현장 주변에는 두 종류의 병원이 있으며 현장으로부터의 거리, 서비스 시간, 긴급환자에 대한 치료 역량이 다르다. 서비스 시간은 해당 병원에서 환자 1명을 처치하는데 걸리는 평균 시간으로 정의하며, 긴급환자에 대한 치료 역량은 긴급환자가 생존 시간 내 해당 병원에서 치료를 받았을 때 생존 확률의 보장정도를 의미한다. 본 논문에서는 거리가 짧고, 서비스 시간이 길며 긴급환자에 대한 치료역량이 낮은 병원을 1차 병원이라 하고, 반대의 병원을 2차 병원이라 표현한다. 이는, 일반적으로 재난 현장으로부터 대형 병원 (예를 들어 상급종합병원)은 상대적으로 멀리 위치하고 있음을 반영한 정의이다. Fig. 2는 본 연구에서 고려한 상황에 대한 표현이다.

고려한 상황은 총 3가지의 이벤트에 의해 진행된다. 각 이벤트는 Fig. 3에서 볼 수 있다. 첫 번째는 사고 현장에서 대기 하던 환자가 사망하는 이벤트이다. 각 환자들은 주어진 생존가능 시간 내에 치료를 받지 못하면 사망한다. 사고 현장에서 생존가능 시간이 모두 지나 사망한 환자들은 모델의 구조상 가장 마지막으로 이송하도록 결정된다. 두 번째 이벤트는 구급차의 이동 이벤트로 현장의 환자 한 명을 병원으로 이송하고 다시 현장으로 돌아오는 이벤트이며 마지막은 환자가 병원에서 퇴원하는 이벤트이다. 병원에 도착한 환자는 대기환자들의 치료가 모두 끝나고 나서 치료를 받을 수 있으며 치료가 완료된 후에 퇴원하게 된다.

해당 재난 상황은 MDP(Markov decision Processes) 방법론을 통해 모델링 되었다. MDP 모델은 의사결정 시점(decision epoch), 시스템 상태(state), 행동(action), 보상(reward), 추이확률(transition probability)로 구성된다. 의사결정 없이

Fig. 2. The Environment Used in the Markovian Model.

Fig. 3. Three Events in the Model.

추이확률을 따라서 자연스럽게 상태가 변화하는 과정을 자연 과정(natural process)이라고 하며 의사결정자가 의사결정 시점에 특정 행동을 결정함에 따라 상태가 변화하는 과정을 의사결정 과정(decision process)이라고 한다. 결정된 행동을 통해 상태가 변화할 때, 변화할 상태는 추이확률에 의해 결정된다. 예를 들어, 현재 상태 S 에서 의사결정자가 행동 a 를 시행하면, 상태는 $P_a(S, S' = s')$ 의 확률로 상태 s' 로 변화하며 의사결정자는 $r(S, a)$ 의 보상을 받는다. 이와 같은 구성요소들을 사용하여 각 상태들은 Eq. (1)의 가치함수를 갖는다(Puterman 1994).

$$V(S) = \max_{a \in A} \left(r(S, a) + \sum_{s' \in S} P_a(S, S' = s') V(s') \right) \quad (1)$$

본 연구의 모델링에 사용된 변수들은 Table 1과 같다.

모델에서 고려한 주요 인자들은 환자의 생존가능 시간과 현장-병원 간 이동 시간, 병원의 서비스 시간이다. 지금까지 이 세 인자들을 잘 표현할 수 있는 분포에 대해 뚜렷한 결과를 보이는 연구는 진행되지 않았다. 이에 본 연구에서는 모델링을 통해 보이하고자 한 재난 환자 이송 시 병원 고려를 통한 영향을 수학적으로 분석하고 모델로부터 얻어지는 최적 의사결정의 경향을 살펴보기 위해 세 인자들의 분포를 지수분포로 가정했다(Jacobson et al. 2012).

긴급환자와 응급환자는 각각 평균 $1/r_I$ [시간]과 $1/r_D$ [시간]의 지수분포를 따르는 생존가능 시간을 가진다. r_i 는 중증도 $i(i \in \{I, D\})$ 환자가 시간당 평균적으로 사망하는 비율을 의미하는 값으로 평균 생존가능 시간의 역수로 표현된다. 각 병원은 각각의 평균 $1/w_1$ [시간], $1/w_2$ [시간]의 지수분포를 따르는

Table 1. Variables and Parameters

State variables	
$P_I, P_D > 0$	The number of remaining patients of type $i \in \{I, D\}$ at incident site
$h_1, h_2 > 0$	The number of patients waiting to be admitted at hospital of type $j \in \{1, 2\}$
Parameter	
$r_I, r_D > 0$	Abandonment (death) rate of patient of type $i \in \{I, D\}$ ($= 1/\text{lifetime}$)
$\mu_1, \mu_2 > 0$	Travel rate between the site and hospital of type $j \in \{1, 2\}$ ($= \text{travel speed}/\text{travel distance}$)
$w_1, w_2 > 0$	Service rate of hospital of type $j \in \{1, 2\}$ ($= 1/\text{service time}$)
$a_{ij} > 0$	Expected survival probability for patient of type $i \in \{I, D\}$ when treated at hospital of type $j \in \{1, 2\}$

서비스 시간을 가지며, 병원과 재난 현장 간의 이동 프로세스 역시 병원 별 평균 이동 시간인 $1/\mu_1$ [시간], $1/\mu_2$ [시간]의 지수 분포를 따른다. w_j 는 $j(j \in \{1, 2\})$ 병원의 서비스율이며 μ_j 는 단위 시간동안 사고 현장에서 $j(j \in \{1, 2\})$ 병원까지 편도로 이동할 수 있는 평균 횟수이다. 추가로 병원에 따라 환자를 치료할 수 있는 역량이 다르다고 가정하고, i 중증도의 환자가 생존 가능 시간 내에 j 병원에서 치료를 받을 때의 생존 확률의 보장 정도를 a_{ij} 로 표현한다. 긴급환자가 1차 병원으로 이송되는 경우에는 2차 병원으로 이송되는 경우에 기대할 수 있는 생존 확률의 20%의 생존 확률을 갖는 것으로 가정한다.

시스템의 상태는 $(P_I, P_D, h_1, h_2, A_i^0 \text{ or } A_j^1)$ 로 구성된 벡터로 정의한다. p_i 는 사고 현장에 남아있는 중증도 $i(i \in \{I, D\})$ 의

환자 수를 의미하며, h_j 는 유형 $j(j \in \{1, 2\})$ 병원 내에 현재 존재하는 대기 환자 수이다. A_j^0 or A_j^1 는 구급차의 상태를 나타내며, 위 첨자 0은 병원(j)에서 현장으로 돌아오는 중, 1은 병원(j)으로 환자를 이송하는 중임을 의미한다. 의사결정 시점은 구급차가 사고 현장으로 돌아온 시점이며 의사결정 시점에서 이송하고자 하는 환자 중증도 i 와 이송할 병원 유형 j 을 결정한다.

각 상태는 앞서 설명한 3가지 이벤트(재난 현장에서의 환자 사망 이벤트, 병원 내 환자 퇴원 이벤트, 구급차의 이동 이벤트)에 의해 다른 상태로 전이한다. 환자 사망 이벤트와 퇴원 이벤트, 구급차의 병원 도착 이벤트는 의사결정을 내리지 않는 자연 과정이며 구급차의 사고 현장 도착 이벤트는 의사결정을 내리는 의사결정 과정이다.

앞서 설명한 바와 같이 본 모델에서는 각 이벤트들이 발생하는 분포를 지수분포로 가정하였다. 이에 본 모델을 도착률(arrival rate)이 각기 다른 3종류의 이벤트가 시스템으로 유입되는 모델로 생각해보면 본 모델의 이벤트 발생 과정은 포아송 과정(Poisson process)을 따르게 된다(Ross, 1996). 따라서 각 이벤트가 발생하는 비율을 모든 비율들의 합으로 나눈 값이 각각의 추이확률이며 추이확률에 따라 상태가 변화한다. 우선 각 이벤트가 발생하는 비율의 합은 Eq. (2)와 같다.

$$\gamma = (\mu_j) + (r_I p_I + r_D p_D) + (1_{h_1 > 0} w_1 + 1_{h_2 > 0} w_2) \quad (2)$$

첫 번째 괄호는 구급차가 현장으로 도착하는 이벤트가 발생할 비율이며 두 번째 괄호는 현장에서 환자가 사망하는 이벤트가 발생할 비율이다. 마지막 괄호는 병원에서 환자가 처치를 받고 퇴원하는 이벤트가 발생할 비율로 $1_{h_j > 0}$ 은 현재 j 병원에 대기환자가 존재할 시 1 값을 가지며 존재하지 않을 시 0 값을 가지는 함수이다.

따라서 구급차가 사고 현장으로 오고 있는 상태일 때 3가지 이벤트의 추이확률은 다음과 같다.

$$\text{환자 사망 추이확률} = \frac{r_I p_I}{\gamma}, \quad i \in \{I, D\} \quad (3)$$

$$\text{환자 퇴원 추이확률} = \frac{1_{h_j > 0} w_j}{\gamma}, \quad j \in \{1, 2\} \quad (4)$$

$$\text{구급차의 현장 도착 추이확률} = \frac{\mu_j}{\gamma} \quad (5)$$

중증도 i 환자 사망 이벤트의 발생 비율은 남아있는 해당 중증도 환자 수에 해당 중증도 환자의 시간당 사망률을 곱하여 계산되며, Eq. (3)의 확률로 해당 중증도 환자 한 명이 줄어든 상태로 이동한다. 병원의 경우, 대기환자가 존재할 때 환자 처치가 이루어질 수 있으므로 Eq. (4)의 확률로 유형 j 병원 대기환자가 한 명 줄어든 상태로 변한다. Eq. (5)의 확률로 상태가 변하는 경우, 의사결정 시점이 되며 내린 결정에 따라 선

Fig. 4. A State Transition when the Ambulance is Returning to the Site.

택된 중증도 환자 한 명이 줄어든 상태로 이동한다. 구급차가 병원으로 환자를 이송하는 상태일 때의 추이확률 역시 같은 값이지만, 병원 도착 시에는 의사결정을 내리지 않기 때문에 j 병원의 대기환자 수가 한 명 증가한 상태로만 변화한다.

의사결정 시점에서는 어떤 중증도의 환자를 어떤 유형의 병원으로 이송할 것인가를 결정한다. 결정할 수 있는 행동은 4가지로 (환자 중증도, 병원 유형) 표현한다.

앞서 설명한 구급차가 사고 현장으로 오고 있는 상태일 때 추이확률에 따른 상태전이를 그림으로 표현하면 Fig. 4와 같다.

행동을 시행함에 따른 즉각적인 보상(immediate reward)은 해당 환자가 진료를 받기 전까지 생존해있을 확률 값이다. 해당 확률 값은 Eq. (6)와 같다.

$$P\left(T > t + \frac{1}{\mu_j} + \sum_{k=0}^{h_j} \left[P\left(N\left(\frac{1}{\mu_j}\right) = k\right) \times \frac{(h_j - k)}{w_j} \right] \middle| T > t\right) \quad (6)$$

여기서 T 는 선택된 환자 중증도 i 의 생존가능 시간 분포를 나타내는 확률 변수이고, t 는 환자가 선택된 시각을 의미하며 $1/\mu_j$ 는 현장에서 j 유형 병원으로의 평균 이동 시간이다. 시그마로 표현된 부분은 환자가 j 병원에 도착한 후 대기 시간의 기대 값으로, t 시점에 j 병원에 h_j 명의 대기 환자가 있을 때 t 시점부터 j 병원으로 이동하는 시간 동안 j 병원에서 서비스를 받고 나갈 환자 수를 고려한다. 병원의 서비스 시간은 지수분포를 따르기 때문에 이동 시간 동안 서비스를 받을 환자 수는 $N(1/\mu_j) \sim \text{Poi}(w_j/\mu_j)$, (포아송 분포)로 표현된다. k 명의 환자가 빠져나갈 확률과 남은 환자를 처리하는데 걸리는 시간을 곱하고 가능한 k 에 대하여 해당 값을 모두 더해 평균 대기시간을 계산하였다.

두 중증도의 환자들은 지수분포를 따르는 생존가능 시간을 가지므로 지수분포의 특징인 무기억성에 의해 최종적으로 Eq. (7)과 같이 표현된다.

$$e^{-r_i \left(\frac{1}{\mu_j} + \sum_{k=0}^{h_j} \left[P \left(N \left(\frac{1}{\mu_j} \right) = k \right) \times \frac{(h_j - k)}{w_j} \right] \right)} \quad (7)$$

여기에 해당 환자가 j 병원에서 치료받을 때의 생존 확률 감소 정도를 곱하여 최종적으로 Eq. (8)과 같은 즉각적인 보상 값을 갖는다.

$$\alpha_{ij} \times e^{-r_i \left(\frac{1}{\mu_j} + \sum_{k=0}^{h_j} \left[P \left(N \left(\frac{1}{\mu_j} \right) = k \right) \times \frac{(h_j - k)}{w_j} \right] \right)} \quad (8)$$

이와 같은 MDP의 모든 구성 요소들을 토대로 표현한 특정 상태($S = (P, P_D, h_1, h_2, A_j^0)$)에서의 가치함수는 Eq. (9)과 같다.

$$V(S) = \frac{1}{\gamma} \left[\mu_{j, \max} \begin{pmatrix} \text{reward}(I, 1) + V(p_I - 1, p_D, h_1, h_2, A_1^1) \\ \text{reward}(I, 2) + V(p_I - 1, p_D, h_1, h_2, A_2^1) \\ \text{reward}(D, 1) + V(p_P, p_D - 1, h_1, h_2, A_1^1) \\ \text{reward}(D, 2) + V(p_P, p_D - 1, h_1, h_2, A_2^1) \end{pmatrix} \right. \\ \left. + p_I r_I V(p_I - 1, p_D, h_1, h_2, A_j^0) \right. \\ \left. + p_D r_D V(p_P, p_D - 1, h_1, h_2, A_j^0) \right. \\ \left. + 1_{h_1 > 0} w_1 V(p_P, p_D, h_1 - 1, h_2, A_j^0) \right. \\ \left. + 1_{h_2 > 0} w_2 V(p_P, p_D, h_1, h_2 - 1, A_j^0) \right] \quad (9)$$

최적 해는 평가가치 반복법(value iteration)을 이용하여 구한다. 평가가치 반복법은 각 상태 별 초기 가치함수를 0으로 설정한 후 즉각적인 보상 계산을 통해 각 상태 별 가치함수를 갱신해 나가는 방법으로 모든 상태의 가치함수 값이 더 이상 갱신될 수 없는 상태가 되면 종료한다.

3. 재난 발생 지역의 응급의료체계 구성에 따른 의사결정 방침 구조

3.1 응급의료체계 구성 시나리오

본 논문에서는 재난 발생 지역의 응급의료체계에 대해 크게 두 가지 구성을 고려하였다. 두 가지 구성은 시스템이 잘 갖춰진 병원들이 가까운 곳에 위치한 도시지역(urban)의 응급의료체계와 병원의 시스템이 잘 완비되어있지 않으며 원거리에 위치한 비도시지역(rural)의 응급의료체계이다. 실제로 응급의료체계는 수도권 및 도시지역에 집중되어 있으며 농어촌 지역과 같은 비도시지역은 취약한 상황이다(Ministry of Health & Welfare, 2009). 이를 묘사하기 위해 도시지역에서 발생한 재난 상황의 경우, 비교적 두 병원 모두 가까운 위치에 있으며 환자를 진료하는 시간인 서비스 시간도 빠른 값을

Table 2. EMS System Parameters in Urban and Rural Scenario

	Average travel time (min)		Average service time (min)	
	Primary hospital	Secondary hospital	Primary hospital	Secondary hospital
Urban	7.5	15	6	5
Rural	20	40	15	10

가지도록 설정하였다. 반대로 비도시 지역에서 발생한 재난은 사고 현장으로부터 두 병원 모두 멀리 떨어져 있으며 각 병원의 서비스 시간도 느린 값으로 설정하였다. Table 2는 실험 시나리오에 대한 설정 값을 나타낸다.

3.2 환자 생존 가능 시간 시나리오

Table 1의 Parameter 부분을 보면 병원과 관련된 매개 변수 값 외에도 환자들의 생존가능 시간이라는 매개변수 값이 존재한다. 아직까지 환자들의 중증도 별 생존가능 시간에 대해 널리 통용되는 구체적인 연구는 없으며, 이에 본 논문에서는 Jacobson *et al.*(2012)이 예제로 사용한 값과 응급의료전문의 인터뷰를 통해 추정한 값 두 가지를 사용하였다. 전자의 경우, 두 환자 집단 모두 짧은 생존 가능 시간을 가졌으며 후자의 경우, 비교적 긴 생존 가능 시간을 가졌다.

두 경우의 생존가능 시간 값들을 Table 2에 명시된 두 응급의료체계 구성과 조합하여 총 4가지 시나리오를 생성하였다. 첫 번째와 두 번째는 각각 도시지역과 비도시지역에서 짧은 생존 가능 시간을 가지는 환자들 발생 시나리오이고 세 번째와 네 번째는 도시지역과 비도시지역에서 생존가능 시간이 긴 환자들 발생 시나리오를 표현하였다. 모든 시나리오의 초기 환자는 긴급 환자 15명과 응급 환자 15명으로 구성되어있다. Table 3은 각 시나리오에 사용된 매개변수 값을 보여준다.

3.3 시나리오 별 의사결정 방침 구조

Fig. 5는 각 시나리오에서 나온 의사결정 방침 구조의 일부를 보여준다. 각 시나리오 별로, 현장에 남은 환자 수 조합의 세 가지 경우에 대하여 최적 의사결정 방침을 보였다. 각 그

Table 3. Model Parameters in Each Scenario

	Average survival time (min)		Average travel time (min)		Average service time (min)	
	I^*	D^*	P^*	S^*	P^*	S^*
S1-Urban	60*	72	7.5	15	6	5
S1-Rural	60	72	20	40	15	10
S2-Urban	150	750	7.5	15	6	5
S2-Rural	150	750	20	40	15	10

*I=Immediate, D=Delayed, P=Primary hospital, S=Secondary hospital

Fig 5. Example of Optimal Policy Structure under Various Settings.

래프 상단의 (p_b, p_d)는 현장에 남아있는 환자 수이며 x 축은 1차 병원 내 대기 환자 수, y 축은 2차 병원 내 대기 환자 수이다. 즉, 각각의 그래프는 사고 현장 내 남아 있는 긴급환자, 응급환자 수가 그래프의 상단의 (p_b, p_d)와 같을 때, 1차, 2차 병원 내 대기환자 수를 고려한 의사결정을 보여준다. 각 상태별 최적결정은 그래프에 표시된 원의 색으로 나타내었으며, 검정색 원의 경우, 응급환자(D)를 1차 병원으로 이송, 흰색 원은 긴급환자(I)를 2차 병원으로 이송, 회색 원은 응급환자(D)를 2차 병원으로 이송하는 결정을 의미한다. 예를 들어 Fig. 5(a)의 사각형 부분을 보자. 사고 현장에 긴급 환자가 2명, 응급 환자가 5명이 있을 때, 1차 병원에 대기환자가 2명, 2차 병원에 대기환자가 7명인 경우의 최적 결정은 검정색 원이다. 따라서 응급 환자를 1차 병원으로 이송하는 행동이 최적의 결정이라는 것을 보여준다. 기본적으로 하나의 현장 내 환자 구성에 대하여 각 병원 별 대기환자 수에 따라 최대 3가지의 다른 행동을 취해야 함을 보여준다. 기존의 연구들에서는 사고 현장에 남은 각 중증도의 환자 수 구성에 대하여 하나의 최적 행동을 제공하였다. 이는 이송 병원의 상태를 보지 않음으로 생긴 차이로 실제 기존 연구들로부터 얻어진 의사결정 방침을 적용 시 좋지 않은 결과를 보일 수 있다. 예를 들어 현장에 긴급 환자 2명과 응급 환자 5명이 있을 때, START 방법을 적용하여 이송환자를 선정한다면 긴급환자를 이송하여야 하나, 2차 병원 내 대기 환자가 많은 경우였다면 이는 최적의 선택이 아닌 것이 된다. 즉, 환자 분류 후 이송 우선순위 결정 시 환자를 이송할 인근 병원의 상태에 대한 파악이 중요함을 알 수 있다.

또한 환자에 대한 매개 변수 값이 같고 현장에 남아 있는 환자 구성이 같음에도 불구하고 재난 발생 지역에 따라 서로 다른 최적 결정 방안을 가지고 있다. 즉, 현장에 남아 있는 환자 정보만으로는 최적의 환자 이송 우선순위 및 이송 병원을 결정할 수 없다.

시나리오 별 의사결정 방침의 구조를 자세히 살펴보자. 도시지역에서의 재난과 비도시지역에서의 재난을 비교해보면 도시지역에서의 재난 시나리오보다 비도시지역에서의 재난 시나리오의 경우, 긴급환자(I)가 남아있더라도 응급환자(D)를 이송하는 것이 최적 결정인 경우가 더 많은 것을 볼 수 있다. 응급환자는 병원에 상관없이 치료를 받는 순간 모든 보상을 받지만 긴급환자는 1차 병원으로 이송되면 보상의 일부(20%) 밖에 받을 수 없다. 또한 보상이 시간과 밀접한 관계가 있는 값이기 때문에 비도시지역에서의 재난과 같이 병원까지의 이동시간이 긴 경우에는 1차 병원이 선호될 수밖에 없다. 결국 1차 병원으로의 이송 시 더 큰 보상을 받을 수 있는 응급환자가 선택되는 상황이 많이 발생하는 것이다. 마찬가지로 환자들의 생존시간이 짧은 S1-도시지역과 S1-비도시지역의 경우에 S2-도시지역과 S2-비도시지역보다 응급환자 이송 결정이 최적 결정인 경우가 더 많았고 이는 동일한 이유로 설명이 가능하다.

그러나 전체적으로 현장에 남은 환자 수가 줄어들수록 긴급 환자 이송 결정이 차지하는 부분이 늘어짐을 알 수 있다. 이는 긴급환자를 2차 병원으로 이송할 때 이동시간 동안 생존가능 시간이 감소하는 현장 내 환자 수가 줄어들면서 긴급환자를 살리려는 시도를 통해 얻는 보상이 현장 내 환자들의 생존을 감소보다 더 커지기 때문이다.

생존가능 시간이 긴 환자들 발생한 도시지역에서의 재난(S2-도시지역)의 경우는 어느 환자 구성에서도 긴급환자 이송이 최적 결정인 경우가 더 많다. 이는 긴급환자를 2차 병원으로 이송하여도 현장 내 응급환자들의 생존가능 시간이 길기 때문에 긴급환자를 2차 병원으로 이송하는데 소요되는 시간이 응급환자들의 생존가능 시간 대비 크지 않아 생기는 현상이다. 즉, 상대적으로 생존가능시간이 짧은 긴급환자를 우선적으로 이송하여도 응급환자들에게는 큰 손해가 가지 않는다는 뜻이다. 따라서 이 경우에만 긴급환자의 이송이 더 많은 부분을 차지할 수 있다.

정리하면 재난 초기 환자들의 상태와 재난이 발생한 지역의 응급의료체계 특성을 파악해 전반적인 환자들의 생존 가능성을 판단해야 한다. 전반적인 환자들의 생존 가능성이 높다는 판단이 서면 긴급환자를 우선적으로 2차 병원으로 이송하고 시간이 흘러감에 따라 각 병원의 대기환자를 파악하여 1차 병원에 대기환자가 많은 경우에는 긴급환자를 2차 병원으로 이송하고 2차 병원에 대기 환자가 많은 경우에는 응급환자를 1차 병원으로 이송한다. 반대로 전반적인 환자들의 생존 가능성이 낮은 것으로 판단된다면 응급환자를 1차 병원으로 이송하는 것이 우선시되어야 한다. 그 후 앞서 언급한 것과 같이 각 병원의 대기환자를 파악하여 이송할 환자와 이송 병원을 정하는 것이 바람직하다.

위 결과가 시사하는 바는, 재난 발생 지역의 응급의료자원 구성과 재난 현장 및 각 병원들의 대기환자 수의 변화가 의사 결정에 상당한 영향을 준다는 것이다. 재난 발생 초기에 현장 및 인근 응급의료기관의 상태를 빠르게 파악하여, 몇 명의 환자가 발생했으며 이송 가능한 인근 병원이 어떻게 구성되어 있는지에 대한 정보를 얻어야 하며, 대응 과정에서는 이송이 진행되면서 현장에 남아있는 환자들의 상태, 각 병원들의 혼잡도는 어떻게 변화하고 있는지 신속하게 정보를 수집해야 함을 보여준다.

4. 타 알고리즘과의 성능 비교 실험

3절에서 논의한 각 상황 별 최적 결정이 얼마만큼의 효과를 줄 수 있는지 앞선 시나리오들에 대해 시뮬레이션을 이용하여 타 알고리즘과의 비교 실험을 진행하였다.

4.1 비교 대상 알고리즘

비교할 타 알고리즘으로 두 가지를 선정하였다.

첫 번째는 현재 일반적으로 사용되고 있는 START 방법과 Greedy 알고리즘을 혼합한 방법이다. START 방법은 긴급환자(I)가 언제나 이송 우선 대상이 되므로, 긴급환자를 모두 이송한 다음 응급환자를 이송한다. START에는 병원 선정이 포함되지 않으므로, 병원 선정은 Greedy 알고리즘으로 결정한 다. Greedy 알고리즘은 결정을 내리는 순간의 이익을 최대화 하는 알고리즘이다(Cormen *et al.* 2001). 이렇게 얻어진 알고리즘에서는, 긴급환자를 2차 병원으로 모두 이송하고 난 뒤, 응급환자를 1차 병원으로 이송하게 된다.

두 번째로는 최근 관련 연구인 Jacobson *et al.*(2012)의 알고리즘과 Greedy 알고리즘을 혼합한 방법을 사용했다. Jacobson *et al.*(2012)의 알고리즘은 현장 내 남아있는 긴급 및 응급환자의 수와 각 환자 유형마다 주어진 서비스 시간을 통해 응급 의료서비스 제공의 우선순위를 정하는 알고리즘이다. 여기에 Greedy 알고리즘을 적용하여 긴급환자의 서비스시간은 긴급환자를 2차 병원으로 이송하고 돌아오는데 걸리는 시간으로 설정하고 응급 환자의 서비스 시간은 1차 병원으로 응급환자를 이송하고 돌아오는데 걸리는 시간으로 설정하였다.

본 연구에서 설계한 모델의 적용은 현재 사고 현장에 남아 있는 긴급, 응급환자의 수와 각 병원 내 대기환자 수를 파악하여 그 상황에 주어진 최적 결정을 수행하는 형식으로 구현되었다.

4.2 시뮬레이션 설정

시뮬레이션 설정은 다음과 같다. 시뮬레이션 시작과 함께 15명의 긴급환자와 15명의 응급환자가 발생한다. 추가적인 환자는 없으며 환자들의 생존 가능 시간, 병원과 사고 현장 간의 이동시간, 병원 내 서비스 시간들은 모델의 가정과 같이 지수분포에서 확률적으로 추출하여 부여하였다.

4.3 실험 결과

3장에서 사용한 네 가지 시나리오에 대해 두 가지의 타 알고리즘과 설계한 모델의 최적 의사결정 방침을 적용하여 각 방법 당 50회씩 실험을 진행하였다.

Table 4는 각 방법의 평균 생존자 수와 표준편차를 보여주며 각 방법의 평균 생존자 수의 차이는 Fig. 6를 통해 비교하였다.

대부분의 시나리오에서, 본 연구의 MDP 모델을 통해 도출한 이송 결정이 START+Greedy 알고리즘에 비해 평균적으로 2명의 환자를 더 생존시키고 Jacobson+Greedy 알고리즘에 비해 1명의 환자를 더 생존시키는 것을 볼 수 있다.

각 시나리오 별로, 본 연구 모델에서 도출한 이송 결정의 우위가 통계적으로 유의한지 *t-test*를 진행하였다. Fig. 6에서 괄호 밖의 값은 Jacobson+Greedy 알고리즘과 비교한 경우의 *P-value*이며, 괄호 안은 START+Greedy 알고리즘 비교 경우의 *P-value*이다. Jacobson+Greedy 알고리즘과의 평균 생존자 수

Table 4. Average Number of Survivors; Standard Deviation is Shown in Parenthesis

Algorithm \ Scenario	START + Greedy	Jacobson + Greedy	Proposed Algorithm
S1-Urban	5.56(1.72)	7.56(2.02)	7.88(1.87)
S1-Rural	2.18(1.39)	3.42(1.37)	4.08(1.70)
S2-Urban	16.7(2.39)	16.2(2.16)	16.9(2.07)
S2-Rural	10.5(1.98)	11.2(1.79)	12.1(1.55)

Fig. 6. t-test Results between Jacobson+Greedy and Proposed Model, and between START+Greedy and Proposed Model (in parenthesis).

차이는 S1-도시지역을 제외하고 유의미한 것으로 나타났으며, START+Greedy 알고리즘과의 평균 생존자 수 차이는 S2-도시지역을 제외하고는 유의미한 것으로 나타났다.

전체 환자가 30명으로 정해져 있는 상황에서 평균적으로 1명에서 2명의 환자를 더 생존시킨다는 것은 적지 않은 효과이다. 특히, S1-비도시지역과 같이 환자들의 생존시간이 짧으나 병원과의 거리가 먼 비도시지역에서 발생한 재난의 경우에는 타 알고리즘에 비해 큰 증가 폭을 보이는 것을 볼 수 있다.

5. 결 론

효과적인 재난 대응을 위해서 응급의료서비스 제공의 우선순위 결정과 이송병원 선정이 필요하다. 대다수의 연구는 응급의료서비스 제공의 우선순위 결정에 집중해왔다. 그러나 어떤 병원을 선정하는가에 따라 환자가 받는 치료 수준이나 환자가 진료를 받기까지의 대기시간이 달라진다. 이 요소들은 환자들의 생존에 영향을 줄 수 있다. 즉, 이송병원 선정은 응급의료서비스 제공의 우선순위 결정에 영향을 주기 때문에 이송환자 우선순위를 결정할 시 이송병원 선정도 같이 고려해주어야 한다.

이송 병원 고려를 통한 영향을 확인하기 위해 재난 현장에서 발생하는 프로세스와 병원들의 프로세스를 MDP 모델로 설계하여 두 의사결정 문제를 한문제로 표현하였다.

설계한 모델을 통해 얻어진 의사결정 방침의 구조를 분석함으로써 재난 발생 시 재난 발생 지역의 응급의료체계 특성과 재난 현장 및 인근 병원들의 환자 수 변화가 의사결정에 많은 영향을 미치는 것을 확인하였다. 응급의료체계가 어떻게 구성되어있는가에 따라 긴급환자를 우선적으로 보내는 것이 최적의 선택이 아닐 수 있다. 긴급환자를 먼저 이송하는 전략은 환자들의 생존가능 시간이 전체적으로 길며 각 병원들이 현장에서부터 가까운 곳에 위치한 경우에 최적의 전략이 될 수 있다.

추가적으로 본 논문에서 설계한 모델의 의사결정 방침이 타 알고리즘보다 성능이 우수함을 보이기 위해 응급의료서비스 시스템을 모사한 시뮬레이션을 제작하고 도시지역과 비도시 지역을 배경으로 두 가지 알고리즘과 비교 실험을 진행하였다.

실험 결과로 타 알고리즘에 비해 평균적으로 1명에서 2명 정도 더 많은 환자를 생존시키는 것을 보였다. 이는 이송환자 우선순위 결정을 위해서 단순히 재난 현장의 정보만을 활용하기보다 인근 병원들의 정보를 같이 활용하는 것이 더 많은 환자를 생존시킬 수 있음을 의미한다.

현재 우리나라에는 실시간 응급실 정보를 가지고 있는 응급 의료정보센터가 구축되어 있으므로, 이를 활용한 재난 현장과 인근 병원들 간의 신속한 정보 교류를 통해 더 많은 환자를 살려낼 수 있을 것이다. 이를 위해, 구축된 시스템을 잘 활용할 수 있도록 원활한 정보 교류를 위한 제도적 시스템 보완이 필수적이며, 구축된 시스템들을 잘 활용하여 신속하게 정보를 수집한다면 기존보다 발전된 재난대응이 가능해질 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 소방방재청 인적재난안전기술개발사업의 지원으로 수행한 ‘국지적 재난시 피해자 대응, 이송, 처치 시뮬레이션 개발’[NEMA-인적-2013-36]과제의 성과입니다.

References

- Cormen, T.H., Leiserson, C.E., Rivest, R.L., and Stein C. (2001) *Introduction to Algorithms*, 2nd ed, MIT Press, Cambridge, MA.
- Frykberg, E.R. (2005) Triage: Principles and practice, *Scandinavian Journal of Surgery*, Vol. 94, No. 4, pp. 272-278.
- Garner, A., Lee, A., Harrison, K., and Schultz, C.H. (2001) Comparative analysis of multiple-casualty incident triage algorithms, *Annals of Emergency Medicine*, Vol 38, No. 5, pp. 541-548.
- Jacobson, E.U., Argon, N.T., and Ziya, S. (2012) Priority Assignment in Emergency Response, *Operation Research*, Vol. 60, No. 4, pp. 813-832.
- Jenkins, J.L., McCarthy, M.L., Sauer, L.M., Green, G.B., Stuart, S., Thomas, T.L., and Hsu, E.B. (2008) Mass-casualty triage: Time for an evidence-based approach, *Prehospital and Disaster Medicine*, Vol. 23, No. 1, pp. 3-8.
- Kang, S., Yun, S., Jung, H., Kim, J., Han, S., Kim, J., and Paik, J. (2013) An Evaluation of the Disaster Medical System after an Accident which Occurred after a Bus fell off the Incheon Bridge, *Journal of The Korean Society of Emergency Medicine*, Vol. 24, No. 1, pp. 1-6.
- Kashiyama, A., Uchiyama, A., and Higashino, T. (2013) *Depth limited treatment planning and scheduling for electronic triage system in MCI*, *Wireless Mobile Communication and Healthcare*, Vol. 61, pp. 224-233.
- Li, D. and Glazebrook, K.D. (2010) An approximate dynamic programming approach to the development of heuristics for the scheduling of impatient jobs in a clearing system, *Naval Research Logistics*, Vol. 57, No. 3, pp. 225-236.
- Mills, A.F., Argon, N. T., and Ziya, S. (2013) Resource-Based Patient Prioritization in Mass-Casualty Incidents, *Manufacturing & Service Operations Management*, Vol. 15, No. 3, pp. 1-17.
- Ministry of Health & Welfare (2009) 2010-2012 Plan for Advancement of Emergency Medical Service.
- Mizumoto, T., Sun, W., Yasumoto, K., and Ito, M. (2011) *Transportation scheduling method for patients in mci using electronic triage tag*, eTELEMED 2011, The Third International Conference on eHealth, Telemedicine, and Social Medicine, pp. 156-163.
- National Emergency Medical Center URLs, (http://www.nemc.or.kr/emergency/emergency_flow.jsp), Access on August 27 2013.
- Puterman, M.L. (1994) *Markov Decision Processes: Discrete Stochastic Dynamic Programming*, Wiley, New York, United States of America.
- Ross, S.M. (1996) *Stochastic processes Second ed*, Wiley series in probability and mathematical statistics.
- Sacco, W.J., Navin, D.M., Fiedler, K.E., Waddell II, R.K., Long, W.B., and Buckman Jr, R.F. (2005) Precise Formulation and Evidence-based Application of Resource-constrained Triage, *Academic Emergency Medicine*, Vol. 12, No. 8, pp. 759-770.
- Sung, I. and Lee, T. (2012) Modeling Requirements for An Emergency Medical Service System Design Evaluator, *In Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference*.

Received	February 14, 2014
Revised	February 21, 2014
Accepted	March 31, 2014