게임상황하에서 Capacity Pooling 효과에 관한 연구

남윤진¹ · 윤봉규^{2*}

¹육군 제1군수지원사령부 / ²국방대학교 운영분석학과

Analysis on the Effectiveness of Capacity Pooling Under Game Situation

Yoon-Jin Nam · Bong-kyoo Yoon

¹The First Logistics Support Command, Army

²Department of Operations Research, Korea National Defense University, Seoul 122-875

Since pooling is a popular scheme in many areas to attain operational excellence, many researchers investigated the performance of pooling systems. However, rare research could be found on pooling with game situation which has much applicability to real world phenomenon. We analyze the performance of non-cooperative pooling system with two servers having different sharing capacity. We investigate the sensitivity of the advantage of capacity pooling on the variation of system parameters, including sharing capacity numbers, pooling probability, pooling strategy and traffic intensity. As a result, we suggest an efficient control policy which facilitate the performance of pooling in a game situation.

Keyword: game theory, operational transportation vehicles, resources pooling, queueing system

1. 서 론

풀링(Pooling)은 유연생산능력을 통한 위험회피 전략으로 여러 시설에 있는 설비를 통합/공유하여 하나의 시스템처럼 운영하는 것을 의미한다. 풀링은 제조, 통신, 서비스 시스템, 인력운영 등의 분야에서 생산의 유연성과 업무의 효율성을 높이기 위해 활용되고 있다. 풀링된 프로세스는 사용가능한 공급능력을 효율적으로 사용할 수 있게 하며 자원을 공유함으로써 업무량을 균형있게 해주어 대기시간을 단축시켜 시스템의 효율성을 높인다. 풀링한 시스템이 풀링을 하지 않은 시스템보다 효율성이 높지만, 현실세계에서 풀링 시스템을 갖추더라도 시스템의 행위자는 상호작용을 하는 가운데 자신에게 더 큰 이득을 주는 기회주의적인 전략적 의사결정을 할 수 있다. 예를 들어 자기설비는 공유하지 않고 상대방 설비만 활용하고자 하면, 한쪽은 큰 이득을 얻을 수 있으므로 기회주의적인 의사결정의 유인은 항상 존재한다.

전략적 상호의존성이 있는 상황에서 행위자들은 자신에게

가장 큰 이득을 주는 전략을 찾아내고 이를 기반으로 행동한다는 전제하에서 풀링 시스템의 행위자도 이득에 따른 전략적 선택을 하게 되므로, 행위자들의 의사결정과 이득에 대한 상호작용을 고려하여 그것이 초래할 결과를 분석하는 것은 최적의 의사결정을 하기 위하여 반드시 필요하다. 이에 Capacity 풀링을 할 때 시스템 행위자 간의 전략적 의사결정에 따른 결과를 분석하여 이를 통해 최적의 효율을 달성하기 위한 연구는 의의가 있다. 본 논문에서는 이러한 게임상황하에서 Capacity 풀링 행위자간의 전략적 의사결정과 이득의 관계를 대기행렬 이론을 이용하여 분석한다.

풀링은 Smith and Cruz(1981)의 연구 이후 Jordon and Graves (1995)의 GM 자동차 공장 사례연구 등 많은 연구자에 의해 효율성 증대 방안으로 제시되어 왔다. 최근에는 주로 통신 설비 성능 향상을 위한 방안으로 많은 연구가 이루어져 왔다. 관련연구는 Andrew *et al.*(2008)과 Ozel *et al.*(2010)의 연구와 해당 연구에 포함된 참고문헌에 자세히 제시되어 있다. 한편 Van Dijk *et al.*(2008)과

*연락처 : 윤봉규 교수, 122-875 서울특별시 은평구 수색동 205번지 국방대학교 운영분석학과, Fax : 02-309-6233,

E-mail : bkyoon@gmail.com

투고일(2012년 01월 12일), 심사일(1차 : 2012년 05월 01일, 2차 : 2012년 05월 30일), 게재확정일(2012년 06월 04일).

Yu and Gerchak(2009)는 콜센터나 기업설비 등의 물리적 시설의 공유(Pooling) 효과에 대해 연구했으며, 특히 비용을 고려한 성과 분석을 시도했다는 점에서 의의가 있다. Mandelbaum *et al.*(1998)와 Smith and Cruz(2005)는 Queueing Network에서 풀링의 효과 분석에 관한 연구를 수행했다. 이상의 연구들은 풀링 시스템간의 게임상황을 고려하지 않고 투명한 정보 및 설비공유가 가능하다는 가정하에서 분석한 결과를 제시했다는 점에서 현실세계와는 거리가 있는 결과를 제공했다는 단점이 있다.

Christ *et al.*(2002)과 Chin *et al.*(2010)은 풀링 시스템 상호간의 전략적 선택이 가능한 게임 상황에 처해진 두 개의 경쟁서버에서 최대 효율을 내기 위한 방안을 시뮬레이션을 활용해서 제시했다. 그러나 시뮬레이션에 의한 결과 산출로 다양한 상황에 대한 민감도 분석이 어려우며 풀링이 진행됨에 따라 발생할 수 있는 상호 신뢰의 동적변화를 고려하지 못했다. 한편 Bae *et al.*(2008)은 풀링을 대기행렬이론을 활용하여 풀링 분석을 위한 모형을 제시했으나 게임 상황을 고려하지 못했다는 한계가 있다.

본 연구는 Capacity 풀링의 행위자간 전략적 의사결정과 성과의 관계를 분석하기 위한 모형을 제시하고 최선의 효율을 달성하기 위한 최적의 의사결정 전략을 도출했다. 이를 위해서 각 서버의 공유 Capacity의 수, 공유전략, 교통밀도 등의 변화에 따라 풀링된 시스템의 성능척도를 구하기 위해 전이율 다이어그램과 전이율 행렬을 통하여 시스템을 모델링하였다. 모델링한 알고리즘은 Matlab을 활용하여 각 상태(state)에서의 확률을 수치해로 구하여 서버 이용률과 고객 손실확률의 변화를 비교 분석 하였다.

이를 위해 제 2장에서는 본 모형의 이론적 배경과 연구의 목적이 되는 Capacity 풀링의 개념에 대하여 정리하고, 제 3장에서는 상호 신뢰수준과 의사결정 전략에 기초한 Capacity 풀링 모형을 수립하고 결과를 분석한다. 제 4장에서는 풀링 모형을 육군 수송교육단의 차량배차시스템에 적용한 응용 사례를 살펴보고, 제 5장에서는 본 논문에서 연구한 결과를 토대로 추후 연구과제에 대하여 기술한다.

2. 대기행렬 모형과 Capacity 풀링

본 논문은 현실문제에 적합하게 유한한 자원을 보유한 게임 상황을 연구하기 위하여 대기공간이 유한한 M/M/1/K 대기행렬 시스템을 가진 두 개의 독립된 서버간의 게임 상황을 분석했다. 분석에 앞서 M/M/1/K와 게임 상황하의 풀링에 대해 살펴본다.

2.1 M/M/1/K 대기행렬 시스템

이 시스템에서 고객들은 포아송 과정으로 도착하고 서비스 시간은 평균 $1/\mu$ 의 지수분포를 따른다. 상태(state)를 시스템 내의 고객수로 정의하면 M/M/1/K는 식 (1)의 출생률과 사멸률을 갖는 출생사멸과정이다.

$$\lambda_n = \begin{cases} \lambda & (n=0, 1, 2, \dots, K-1) \\ 0 & (n \geq K) \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu_n = \begin{cases} \mu & (n=0, 1, 2, \dots, K) \\ 0 & (n \geq K+1) \end{cases}$$

M/M/1/K의 안정 상태 확률은 식 (2)의 P_n 과 같으며, PASTA에 의해 도착하는 고객들 중에서 차단되는 고객들은 안정 상태에 K명의 고객이 있을 확률과 같다. 따라서 고객의 차단확률은 식 (3)과 같이 정의된다.

$$P_n = \begin{cases} \frac{(1-\rho)\rho^n}{1-\rho^{K+1}} & (\rho \neq 1) \\ \frac{1}{K+1} & (\rho = 1) \end{cases} \quad (n=0, 1, 2, \dots, K) \quad (2)$$

$$P\{loss\} = P_K \quad (3)$$

M/M/1/K에 대한 자세한 논의는 Lee(2006), Chae(2004)를 참고하기 바란다.

2.2 게임상황하의 Capacity 풀링

Capacity 풀링은 유연생산능력을 통한 리스크 풀링 전략으로 복수시설에 있는 용량을 통합하여 하나의 시스템으로 운용하는 것을 의미한다. 풀링 되지 않은 시스템에서 각자의 용량은 자신의 수요만 담당하지만 통합된 시스템에서는 설비를 공유하여 통합된 수요로 처리한다. 이러한 풀링의 효과는 수요가 변동적일 때 더욱 효과적이다.

풀링 시스템은 설비(서버)를 공유하는 방법과 범위에 따라 부분풀링 시스템과 완전풀링 시스템으로 분류된다. 부분풀링 시스템에서의 고객은 해당 설비의 용량(상품, 수요)이 초과될 때 인접한 회사의 용량이 초과하지 않은 유휴 설비를 이용하며, 인접한 설비가 용량을 초과하였으면 고객은 손실된다.

<Figure 1>은 완전풀링과 부분풀링을 표현한 것이며, 여기서 완전풀링 시스템의 고객은 도착한 회사의 용량을 초과할 때 인접한 다른 회사의 용량이 초과하지 않은 설비를 이용한다는 점은 부분 풀링과 같다. 그러나 인접한 다른 회사의 용량을 다시 초과하였으면 그 다음의 인접한 회사의 설비를 동일한 방식으로 활용하며, 만일 모든 회사의 용량이 초과하였을 경우에만 고객이 손실된다는 점이 부분 풀링과 차이가 난다.

Figure 1. Example of Capacity Pooling

본 연구에서는 두 개의 서버를 가정하므로 부분풀링이자 완전풀링인 상황을 고려한다. 게임의 상황이란 행위자 사이에 전략적 상호의존성이 존재하여 참가자들의 합리성을 전제로 전략적 의사결정을 하는 것이다. 본 논문에서는 M/M/1/K 시스템을 가진 두 개의 독립된 서버간의 상호작용에서 발생하는 게임의 상황을 연구하였으며, 이러한 상황에서 자신의 이득만을 위한 행동을 추구하면 사회적 딜레마가 발생한다. 사회적 딜레마는 우월전략해보다 협조해가 우월한 결과값을 갖는 것이며, 죄수의 딜레마 게임이 대표적인 예이다. 게임상황에서 비협조적 행위는 자신의 비협조 행위에 보복을 받을 수 있다는 가능성이 있을 경우 비협조 행위를 통제하여 협조 행위를 하도록 유도할 수 있다.

보복을 통해 비협조행위를 통제할 수 있는 전략은 티포탣(Tit for Tat), 티포투탣(Tit for Two Tat) 전략 등이 있다. 본 논문에서는 이러한 전략을 사용하여 비협조행위를 통제할 경우의 성과를 측정하고, 효율적인 전략을 제시한다. 티포탣 전략은 상대방이 직전 라운드에 비협조한 행동에 대하여 그 다음 라운드에서 한 번 비협조함으로써 반응하는 전략이다. 티포투탣 전략은 상대방의 비협조에 대하여 한번은 봐주고 다음에 복수하는 전략이다.

3. 게임상황을 고려한 시스템의 풀링 모형

3.1 모형설명

시스템 내에는 2개의 서버가 존재하고 각자의 Capacity를 공유하여 사용하며 독립적으로 운영된다. 고객은 도착률 λ 의 포아송 과정에 따라 도착하며 서비스 시간은 서비스율이 μ 인 지수분포를 따른다. 이때 각 서버는 K개의 유한한 Capacity를 가지고 있으며, 인접서버의 공유 Capacity가 모두 바쁠 때 도착한 고객은 차단되는 것으로 가정한다.

모형에서는 상호 서버간의 신뢰가 존재하는데 신뢰는 서버가 다른 시스템의 고객을 받아서 서비스 해주는(Accept) 확률로 반영된다. 즉 서버가 상대방의 고객을 받아서 서비스할 때 신뢰가 증가하고, 고객을 받아주는 것을 거부할 때 신뢰가 감소하게 되는데, 상호간에 신뢰가 있을시 상대방은 높은 확률로, 신뢰가 적을 때는 낮은 확률로 인접한 서버의 고객을 받아들인다.

이러한 서버간의 신뢰의 수준은 0, 1, 2로 표현되며 서버가 고객을 받아들일 확률은 p_{ij} 로 표현되고 i는 서버, j는 신뢰의 상태를 말한다. p_{11} 은 서버1(S_1)의 신뢰수준이 1일 때 서버1의 고객을 서버 2(S_2)가 받아서 서비스해줄 확률로 정의되며, 이때, p_{ij} 에서 $p_{i,j_1} > p_{i,j_2}$ 가 반드시 성립하는데($j_1 > j_2$), 이는 신뢰가 높을수록 다른 서버가 고객을 받아서 서비스 해줄 확률이 높기 때문이다.

본 논문에서 자주 사용되는 기호를 정리하면 다음과 같다.

<Notation>

S_i	i번째 서버(System)
c_i	S_i 의 신뢰수준($c_i = 0, 1, 2$)
K_i	S_i 의 Capacity
K_i^p	S_i 의 공유 중단수준
p_{ij}	S_i 가 신뢰수준이 j인 경우 상대방에게 풀링 요청이 받아들여질 확률

상호 전략적인 게임상황하에서 서버가 할 수 있는 행위인 협조, 비협조, 통제전략에 대한 정의는 다음과 같다. 서버1이 서버 2에게 서비스를 부탁하였을 때 서버 2가 받아주는 경우($\lambda_1 p_{1j}$)는 협조이며, 서버 2가 받아주지 않는 경우($\lambda_1(1-p_{1j})$)는 비협조이다.

통제전략은 티포탣과 티포투탣으로 적용될 수 있는데, 티포탣이란 상호 협조를 약속하고 한쪽에서 비협조 행위를 했을 때 이에 대해 한 라운드의 보복행위를 하고 다시 협조행위를 하는 것이다. 서버 1이 티포탣 전략을 사용할 때 서버 2가 비협조를 했을 경우, 이에 대하여 서버 2가 풀링 요청을 하면 무조건 풀링을 거부(보복행위)한다. 티포투탣은 상대방이 두 라운드에 걸친 비협조 행위에 대해 한 라운드의 보복행위를 하는 것으로, 서버 1이 티포투탣 전략을 사용할 때, 서버 2가 비협조를 두 번 연속했을 경우 이에 대하여 서버 2가 풀링 요청을 하였을 경우 서버 1이 무조건 풀링을 거부(보복행위)한다.

3.2 전이율 다이어그램 및 전이율 행렬

전 절에서 설명한 모형의 이해를 위해 서버의 수가 2개이고 K_i 가 3, K_i^p 가 2, 상호 신뢰가 1인 경우의 전이율 다이어그램을 그려보면 <Figure 2>와 같다.

전이율 다이어그램의 상태는 (n_1, n_2, c_1, c_2) 로 표현되는데, 이는 서버의 고객수 (n_1, n_2) 와 신뢰의 상태 (c_1, c_2) 를 나타내는 것으로 상태 (3, 0, 1, 1)는 S_1 에 고객이 3명, S_2 는 idle의 상태(고객수 0명)이며, 각 서버의 신뢰가 1이 인 상태이다.

Figure 2. Partial Transition Diagram($K_i = 3, K_i^p = 2$)

풀링은 상대방의 서버의 용량이 다 찼을때 도착하는 고객에 대해 인접 서버에서 서비스를 해주는 것이다. 예를 들어 상태(3, 0, 1, 1)에서 서버 1에 고객이 도착(λ_1) 했을 때 인근 서버 2가 비어 있어 서버 2에서 서비스를 받을 수 있으므로 고객이 손실되지 않고 전이율 $\lambda_1 p_{11}$ 로 상태(3, 1, 1, 2)로 전이한다. 만약 상태(3, 0, 1, 1)에서 $\lambda_1(1-p_{11})$ 의 rate로 서버1(S_1)의 서비스를 거절하면, 서버 2가 신뢰를 잃으며 상태 (3, 0, 1, 0)으로 전이한다. 이때, 서버1의 고객이 손실되는 경우는 서버2에 공유 중단수준 이상의 고객(2명)이 있는 (3, 2, i, j), (3, 3, i, j)의 경우와 (3, 1, i, j), (3, 0, i, j)의 상태에서 공유요청이 확률 $1-p_{ij}$ 으로 거부되는 경우이다.

이러한 풀링은 서버가 보유한 버퍼에 여유가 없는 상태에서, 상대방의 서버의 고객수가 공유중단수준(K_i^p) 이하인 경우 나타나며 이는 전이율 다이어그램의 맨 우측과 맨 아래의 경계치에서 표현된다.

전체 모형은 서버의 수가 2개이고, K_i 가 3인 경우로 전이율 다이어그램은 <Figure 3>과 같다. 즉, 풀링은 서버가 보유한 버퍼에 여유가 없는 상태에서 전이율 다이어그램의 맨 우측과 아래의 경계치에서만 발생한다. 본 논문에서는 이를 통해서 풀링의 전이의 규칙을 확인하고, 이를 통해 쉽게 모형화 할 수 있는 방법을 제시한다.

Figure 3. Full Transition Diagram($K_1 = 3, K_2^p = 2$)

신뢰의 상태(0, 1, 2)에 따라 3^2 개의 차원으로 전이율 다이어그램이 형성되며, 이러한 상태변화를 나타내는 전이율을 표로 나타낸 것이 <Table 1>이다.

전이율은 고객의 도착과 서비스, 풀링, 공유전략(티포텐, 티포투텐)에 따라서 구분된다. 다른 서버의 고객을 받아서 풀링을 하는 경우, 상태(n_i)와 신뢰상태(c_i)가 1씩 증가하고 다른 서버의 고객을 받아 주지 않은 경우는 신뢰상태(c_i)만 1 감소한다.

Table 1. Transition Rate

Division	To	Rate
Customer arrive	$(n_1 + 1, n_2, c_1, c_2)$	λ_1
	$(n_1, n_2 + 1, c_1, c_2)$	λ_2
Customer service	$(n_1 - 1, n_2, c_1, c_2)$	μ_1
	$(n_1, n_2 - 1, c_1, c_2)$	μ_2
Pooling (Accept)	$(n_1, n_2 + 1, c_1, c_2 + 1)$	$\lambda_1 p_{1j}$
	$(n_1 + 1, n_2, c_1 + 1, c_2)$	$\lambda_2 p_{2j}$
Pooling (Blocking)	$(n_1, n_2, c_1, c_2 - 1)$	$\lambda_1 (1 - p_{1j})$
	$(n_1, n_2, c_1 - 1, c_2)$	$\lambda_2 (1 - p_{2j})$
Tit for tat	$(n_1, n_2, c_1 + 1, c_2)$	λ_1
	$(n_1, n_2, c_1, c_2 + 1)$	λ_2
Tit for two tat	$(n_1, n_2, c_1 + 2, c_2)$	λ_1
	$(n_1, n_2, c_1, c_2 + 2)$	λ_2

티포텐 전략은 보복 전략으로 상대방의 풀링 요청을 무조건 거부(λ_i)하고, 신뢰회복 후 협조체제로 다시 돌아가므로, 고객 수(n_i)의 변화없이 신뢰상태(c_i)가 1 증가한다. 티포투텐 전략은 상대방의 비협조행위가 2번 반복되어 신뢰가 0으로 감소된 상태에서 보복행위(λ_i)가 일어나므로 고객 수(n_i)의 변화 없이 협조체제로 돌아가기 위해서 신뢰상태(c_i)가 2 증가한다.

전이율 다이어그램과 전이율 표를 기준으로 서버 1과 서버 2의 전이율을 표현하면 <Table 2>와 같은 전이율 행렬을 얻을 수 있다.

본 논문에서 전이율 행렬은 기존의 연구와는 다르게 고객수준(Level)이 아닌 단계(Phase)로 모델링하여 전이과정을 쉽게 묘사하고 확장이 용이하도록 했다. <Table 3>에서 A_{ij} (Accept)는 S_i 가 다른 서버의 고객을 신뢰상태 j에서 받아들이는 전이율 행렬로, S_2 가 λ_1 의 비율로 도착하는 고객을 받아 서비스 했을 경우(A_{1j})와 S_1 이 λ_2 도착율을 갖는 S_2 의 고객을 받아 서비스 했을 경우(A_{2j})로 분류된다.

B_{ij} (Blocking)는 S_i 가 다른 서버의 고객을 차단하는 상태로 S_2 가 λ_1 의 도착율을 갖는 S_1 의 고객을 서비스 해주지 않을 경우(B_{1j})와 S_1 이 λ_2 의 도착율을 갖는 S_2 의 고객을 서비스 해주지 않을 경우(B_{2j})로 분류된다.

상대 서버의 비협조에 대해 보복을 하는 전략은 티포텐과 티포투텐 전략으로 나눌 수 있다. 보복전략은 $\delta_T \delta_T' T_{ij}$ 과 같이 표현되는데 δ_T 는 보복전략의 사용유무($\delta_T = 1$ 은 사용, 0은 미사용), δ_T' 은

Table 2. Transition Rate Matrix

Division	00	10	20	01	11	21	02	12	22
00	$Q\{2\} + B_{10} + B_{20}$	$A_{20} + \delta_T \delta_T' T_{10}$	$\delta_T(1 - \delta_T') \times T_{10}$	$A_{10} + \delta_T \delta_T' T_{20}$			$\delta_T(1 - \delta_T') \times T_{10}$		
10	B_{20}	$Q\{2\} + B_{11}$	$A_{20} + \delta_T \delta_T' T_{11}$		$A_{11} + \delta_T \delta_T' T_{20}$			$\delta_T(1 - \delta_T') \times T_{10}$	
20		B_{20}	$Q\{2\} + B_{12} + A_{20} + \delta_T \delta_T' T_{12}$			$A_{12} + \delta_T \delta_T' T_{20}$			$\delta_T(1 - \delta_T') \times T_{10}$
01	B_{10}			$Q\{2\} + B_{21}$	$A_{21} + \delta_T \delta_T' T_{10}$	$\delta_T(1 - \delta_T') \times T_{10}$	$A_{10} + \delta_T \delta_T' T_{21}$		
11		B_{11}		B_{21}	$Q\{2\} +$	$A_{21} + \delta_T \delta_T' T_{11}$		$A_{11} + \delta_T \delta_T' T_{21}$	
21			B_{12}		B_{21}	$Q\{2\} + A_{21} + \delta_T \delta_T' T_{12}$			$A_{12} + \delta_T \delta_T' T_{21}$
02				B_{10}			$Q\{2\} + B_{22} + A_{10} + \delta_T \delta_T' T_{22}$	$A_{22} + \delta_T \delta_T' T_{10}$	$\delta_T(1 - \delta_T') \times T_{10}$
12					B_{11}		B_{22}	$Q\{2\} + A_{11} + \delta_T \delta_T' T_{22}$	$A_{22} + \delta_T \delta_T' T_{11}$
22						B_{12}		B_{22}	$Q\{2\} + A_{12} + A_{22} + \delta_T \delta_T' T_{12} + \delta_T \delta_T' T_{22}$

전략의 종류($\delta_T' = 1$ 은 텃포켓, 0 은 텃포투켓 전략)를 의미한다. 전이율행렬을 Kronecker Product를 사용하여 표현하면 식 (4)와 같다. Kronecker Product에 관한 자세한 내용은 Graham(1981)을 참고하기 바란다.

$$\begin{aligned}
 D_1(2) &= U_{K_1} \otimes \lambda_1 + L_{K_1} \otimes \mu_1 \\
 Q\{n\} &= I_{K_2} \otimes D_1(2) \\
 &\quad + ((U_{K_2} \otimes I_{K_1}) \times \lambda_2 + (L_{K_2} \otimes I_{K_1}) \times \mu_2) \\
 A_{1j} &= S_K \otimes (A_1 \otimes (U_{K_2^p} \otimes E_{K_1})) \\
 A_{2j} &= A_2 \otimes (S_K \otimes (E_{K_2} \otimes U_{K_1^p})) \\
 B_{1j} &= S_K \otimes (B_1 \otimes (I_{K_2^p} \otimes E_{K_1})) \\
 B_{2j} &= B_2 \otimes (S_K \otimes (E_{K_2} \otimes U_{K_1^p})) \\
 \delta_T \delta_T' T_{1j} &= I_{(3)} \otimes (T_1 \otimes (E_{K_2} \otimes I_{K_1^p})) \\
 \delta_T \delta_T' T_{2j} &= R_K \otimes (T_2 \otimes (I_{K_2^p} \otimes E_{K_1})) \\
 \delta_T \delta_T' T_{1j} &= I_{(3)} \otimes (T_K \otimes (E_{K_2} \otimes I_{K_1^p})) \\
 \delta_T \delta_T' T_{2j} &= T_K \otimes (I_{(3)} \otimes (I_{K_2^p} \otimes E_{K_1})) \\
 Q\{n\} + A_{ij} + B_{ij} + \delta_T \delta_T' T_{ij} \quad &(\delta_T, \delta_T' = 1 \text{ or } 0)
 \end{aligned} \tag{4}$$

식 (4)에서 I_{K_i} 는 K_i 차원의 항등행렬을 나타내며, U_{K_i} 는 K_i 차원의 대각행렬을 주 대각행렬에서 1단계 위로 올라간 행렬이며, L_{K_i} 는 주 대각행렬에서 1단계 아래로 내려간 행렬이다. E_{K_i} 는 대각행렬의 마지막 요소만 1인 행렬이며, T_K 는 1행의

마지막 열만 1인 행렬이다.

<Table 3>과 식 (4)에서 정의된 전이율행렬 Q 의 안정상태 확률은 아래 식 (5)에 따라 구한다.

$$\Pi Q = 0, \sum_{i=1}^{\infty} \pi_i = 1 \tag{5}$$

본 논문에서는 안정상태 확률을 식 (5)에 따라 Matlab을 활용하여 수치적으로 구했다.

3.3 분석방향

본 연구에서는 비교분석 가능한 입력변수로 공유 Capacity 수, 공유전략, 다른 서버의 고객을 서비스 할 확률(p_{ij}), 교통밀도(ρ)를 선택했으며, 성능척도는 서버이용률과 고객손실확률을 활용했다. S_i 의 고객손실확률(B_i)은 자신의 용량(K_i)과 인근서버가 공유 중단 수준(K_i^p)을 넘었을 확률이므로 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned}
 P_{1Blocking} &= \sum_{n_2=K_2^p}^{K_2} \sum_{j_2=0}^2 \sum_{j_1=0}^2 P_{K_1 n_2 j_1 j_2} (1 - p_{ij}) \\
 P_{2Blocking} &= \sum_{n_1=K_1^p}^{K_1} \sum_{j_2=0}^2 \sum_{j_1=0}^2 P_{n_1 K_2 j_1 j_2} (1 - p_{ij})
 \end{aligned} \tag{6}$$

본 모형에서는 공유 Capacity와 p_{ij} 의 변화를 통해 서버간의 풀링 결과를 산출하여 변화추이를 분석한다. 이를 통해 게임이론

에서 제시된 딜레마 상황이 발생하는 것을 확인하고, 이를 극복하기 위해 서버의 Capacity 공유전략이 협조, 비협조, 티포탯, 티포투탯 전략으로 변할 때 성과(이득행렬)의 변화를 분석한다.

이러한 이득행렬에서 최선의 내쉬균형을 얻을 수 있는 전략과 각 전략에 대응하는 우월전략과 열등전략을 판단하고 상대방의 비협조와 이탈을 방지할 수 있는 최선의 해를 수치적으로 도출한다.

이러한 게임 상황에서 공유가 확률적이라는 것은 서버의 성향이 게임의 협조 정도로 표현됨에 따라서 공유 확률이 높아질 수 있고 낮아질 수 있다는 것을 의미한다. 이에 서버의 성향을 협조, 중립, 비협조적 측면으로 분류하고 신뢰에 따른 확률을 성향의 수준에 따라 변화시켜 서버 성향의 형태를 분류하고, 서버의 성향에 따라 게임을 통제할 수 있는 전략의 변화 여부도 살펴본다.

3.4 결과분석

고객은 단위시간당 3명($\lambda = 3$)이 도착하고 서버는 단위시간당 5명($\mu = 5$)을 서비스하는 서버가 2개가 있을 경우의 시스템에서의 서버의 공유 Capacity의 크기 변화에 따른 고객손실확률(B_i)을 구한 결과는 <Table 3>과 같다.

Table 3. Pay-Off Matrix(Shared Capacity)

S_1	S_2	$p_{i0} = 0.2, p_{i1} = 0.5, p_{i2} = 0.8(i = 1, 2)$			
		3	2	1	0
3	3	0.0642	0.0584	0.0551	0.0341
	2	0.0642	0.0753	0.0899	0.1169
2	3	0.0753	0.0691	0.0653	0.0493
	2	0.0584	0.0691	0.0838	0.1080
1	3	0.0899	0.0838	0.0798	0.0698
	2	0.0551	0.0653	0.0798	0.1022
0	3	0.1169	0.1080	0.1022	0.0993
	2	0.0341	0.0493	0.0698	0.0993

서버별 Capacity를 3개 공유시 완전풀링이며 이때의 효율은 풀링을 하지 않는 상황보다 1.5배(1.546) 이상 고객이 차단될 확률이 줄어든다. 반면 서버 1이 3개, 서버 2가 0개의 Capacity를 공유할 때 서버 2의 고객이 차단될 확률이 0.0341로 완전 풀링보다 약 2배 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 즉 자신의 자원은 소모하지 않고 상대방의 자원을 활용함으로써 자신의 시스템의 효율을 높일 수 있는 결과를 가져온다. 이러한 상황에서 서버 간 상호작용이 존재하여 전략적 의사결정을 하는 게임 상황이 발생하게 된다.

<Table 3>에서 서버 간에 Capacity 공유를 낮게 하는 것이 두 서버의 우월전략 균형이며 내쉬균형이 된다. 즉 서버 공유를 낮게 하는(비협조전략) 균형 상태에서 선택을 바꿈으로써 더 높은 효율을 달성하는 유인이 없다. 이는 각 서버에게의 입

장에서는 합리적으로 보이지만, 두 서버가 협조한다면 더 낮은 고객차단확률을 얻을 수 있는 협조균형을 달성하지 못하는 열등한 결과를 초래하는 사회적 딜레마 상황이 발생한다.

이러한 사회적 딜레마의 비협조적인 행위를 통제하여 더 나은 결과를 얻기 위한 수단으로 협조전략(Cooperation Policy), 비협조전략(Non Cooperation Policy), 티포탯(Tit for tat), 티포투탯(Tit for two tat)에 대한 4가지 전략을 게임에 적용하여 구한 이득행렬은 <Table 4>와 같다.

Table 4. Pay-Off Matrix(Server Policy)

$S_1 \backslash S_2$	CP	Tit for tat	Tit for two tat	NCP
CP	0.0642 / 0.0642	0.0351 / 0.0467	0.0518 / 0.0573	0.0341 / 0.1169
Tit for tat	0.0467 / 0.0351	0.0281 / 0.0281	0.0460 / 0.0350	0.0341 / 0.1169
Tit for two tat	0.0573 / 0.0518	0.0350 / 0.0460	0.0557 / 0.0557	0.0341 / 0.1169
NCP	0.1169 / 0.0341	0.1169 / 0.0341	0.1169 / 0.0341	0.0993 / 0.0993

위의 이득행렬에서 보면 대응하는 전략이 변함에 따라 서버 간의 효율이 차이가 나게 되는데, 협조전략에 대한 최적전략은 티포탯 전략, 티포투탯 전략은 티포탯 전략, 비협조 전략에는 비협조 전략을 적용할 때 최선의 효율을 얻게 된다.

위의 이득행렬에서 상호 같은 전략을 사용할 때 가장 낮은 고객차단확률을 가지는 전략은 상호 티포탯 전략, 티포투탯 전략, 협조전략을 사용하는 순이다. 이때의 내쉬균형은 (티포탯, 티포탯)과 (비협조전략, 비협조전략)이나 이 게임에서 두 플레이어에게 (티포탯, 티포탯)이 더 좋다는 사실 때문에 이 전략이 게임의 네 전략 균형 가운데 선택될 가능성이 높다.

도착하는 고객의 증감에 따른 추이를 분석하기 위하여 $\lambda_i = 3$, $\mu_i = 5$, $K_i^c = 3$, $K_i^p = 2$ 인 상태에서 교통밀도 ρ 를 증가시켜 고객손실확률의 변화를 구한 결과는 <Figure 4>와 같다.

Figure 4. B_i , according to Change of ρ and Pooling Policy

ρ 가 0.8일 때 티포넷 전략을 사용한 서버가 비협조전략을 사용한 서버보다 차단확률이 3.6배 낮게 나타났고, ρ 가 증가해도 티포넷 전략이 항상 가장 낮은 차단확률을 보였다. 즉, <Figure 4>를 통해 Traffic에 관계없이 티포넷 전략이 우월하다는 것을 확인할 수 있다.

3.5 서버성향 분석

다양한 확률 변화(서버성향)에 대한 분석을 위해 Blocking 확률(B_i)과 서버이용률(Utilization)을 고려한 서버성향에 대한 군집 분석을 수행했다.

게임상황에서 서버의 성향을 분석하는 목적은 서버의 성향을 일반화하여 성향에 따른 효율을 판단하고 성향의 변화에 따른 통계 전략을 수립하기 위함이다.

서버 성향분석을 위해 서버성향을 신뢰상대별 p_{ij} 의 변화로 협조수준(Cooperation Level)을 정의한다. 이러한 서버의 협조성향은 신뢰의 상태에 따라 협조를 높게(High, $0.7 \leq H \leq 0.9$), 중립(Neutrality, $0.4 \leq N \leq 0.6$), 낮게(Low, $0.1 \leq L \leq 0.3$)하는 것으로 구분한다. 이때, 신뢰가 높으면 더 높은 확률로 다른 서버가 고객을 받을 수 있으므로 $p_{i2} > p_{i1} > p_{i0}$ 이 성립된다. 서버의 성향은 <Table 5>와 같이 구분될 수 있다.

Table 5. Server's Tendency, according to Trust Levels

No	Server's tendency	Explanation	p_{ij}
1	H H H	General HC	0.7, 0.8, 0.9
2	N H H	HC(having trust)	0.4, 0.8, 0.9
3	N N H	HC(only high trust)	0.4, 0.5, 0.9
4	N N N	NC	0.4, 0.5, 0.6
5	L H H	HC(only trust)	0.1, 0.8, 0.9
6	L N H	Proportionate cooperation	0.1, 0.5, 0.9
7	L N N	NC(only trust)	0.1, 0.5, 0.6
8	L L H	HC(only high trust)	0.1, 0.2, 0.9
9	L L N	NC(only high trust)	0.1, 0.2, 0.6
10	L L L	General NC	0.1, 0.2, 0.3

※ H = High, N = Neutral, L = Low, C = Cooperation.

※ p_{ij} : High(0.7, 0.8, 0.9), Neutral(0.4, 0.5, 0.6), Low(0.1, 0.2, 0.3).

군집분석을 실시하는 이유는 다양한 성향에 대한 분석을 통해 분석수준을 높이고, 성향간의 차이를 확인하기 위함이다. 군집분석은 비계층적 군집분석(K-means)을 실시하였다. <Figure 5>는 군집분석을 실시한 결과로 그림의 숫자는 <Table 5>의 성향별로 분류된 숫자를 뜻하며, 군집분석 결과 6가지 서버의 성향으로 분류할 수 있다. 군집은 매우 협조하는 성향(A), 신뢰가 있을 때 높은 협조성향(B), 신뢰의 유무에 상관없이 보통으로 협조성향(C), 신뢰의 수준에 따라 비례적으로 협조하는 성향(D), 신뢰가 있을 경우 중간 협조적인 성향(E), 전반적으로 협조하지 않는 성향(F)으로 분류됐다.

Figure 5. Cluster Analysis of Server's Tendency

위에서 분류된 6가지의 서버성향에 더하여 서버간 상호 완전 협조하는($p_{ij} = 1$)전략(α)과 완전비협조($p_{ij} = 0$) 전략(β)을 추가하여 총 8가지로 서버성향을 분류하였다. 이러한 성향분류를 통해 확률적 공유게임을 할 경우 존재하는 전략적인 상호관계에서 상대방의 성향에 따라 자신의 공유성향을 선택하여 이득을 확보하거나, 손해를 볼 것인지를 판단할 수 있게 된다.

서버상호간 성향의 변화에 따른 성능척도를 그래프로 나타낸 것이 <Figure 6>이다. 상호 협조적 성향인 경우($B_i = 0.0263$)는 상호 비협조적 성향인 경우($B_i = 0.1107$)보다 4.2배 높은 효율을 나타냈으며, 상호 협조적인 성향을 가질수록 시스템의 효율이 높아지는 것을 볼 수 있다.

Figure 6. B_i , according to Change of Server's Tendency

<Figure 7>은 서버 1이 보통협조 성향일 때 서버 2의 성향변화에 따른 성능척도이다.

Figure 7. B_i , S_1 is Normal Cooperation Tendency

<Figure 7>에서 서버 2가 협조적 성향, 비협조적 성향보다 높은 협조성향을 가져야 서버 1에게 이득이 되며, 자신의 협조 성향에 대해 상대방의 협조정도가 이득에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

Figure 8. S_2 's B_i , according to Change of S_1 's Tendency

<Figure 8>은 서버 1이 완전, 보통, 완전비협조적 성향일 때, 서버 2의 성향 변화에 따른 고객차단확률이다. 서버 2의 성향이 변화하더라도 서버 1이 완전협조일 경우 서버 2의 고객차단 확률이 가장 낮다. 이는 자신의 성향보다는 상대방의 성향에 따라 시스템의 효율이 달라지는 것을 의미하며, 이를 통해 협조성향이 높은 서버와 풀링시 높은 효율을 달성할 수 있다는 것을 의미한다.

게임 상황하의 의사결정을 하기 위해서 서버 간 전략적 상호관계가 존재하고 상대방의 비협조적인 성향을 통제하기 위해서는 상대방의 행동에 대한 통제 전략이 필요하다. 서버간 성향이 상이할 때 비협조적인 행동에 대한 통제전략으로 협조, 티포렛, 티포투렛, 비협조 전략을 사용한 결과는 <Figure 9>이다.

Figure 9. B_i , according to Change of Pooling Policy and Server Tendency

<Figure 9>는 서버 1의 차단확률(B_i)을 다양한 전략을 사용하는 상황에서 서버 간 동일한 성향을 가졌을 경우 나타나는 성능척도 결과이다.

통제전략을 적용하지 않은 것은 서버 1만 티포투렛 전략을 사용한 결과와 비슷한 효율을 보이며, 서버 1만 티포렛 전략을 사용할 경우는 상호간에 티포렛 전략을 사용한 것 보다 낮은

효율을 보이나, 다른 경우보다는 높은 효율을 보인다.

이렇게 상호 티포렛 전략을 사용하여 비협조자에 대한 보복을 통해 시스템의 효율을 증가시킬 수 있으며, 공유 전략을 사용하지 않는 것 보다는 사용하는 것이 효율이 높다는 것을 확인할 수 있었다.

4. 사례연구 : 수송교육단 차량배차 시스템

4.1 차량배차 시스템

본 절에서는 게임상황하의 풀링 모형을 군 수송교육단 차량배차 시스템에 적용하여 효율적인 차량 공유전략에 대하여 알아보도록 하겠다.

육군의 수송교육단은 군 차량을 활용하여 신병에 대해 운전교육을 실시하고 군 운전면허를 발급해주는 운전병 교육기관이다. 수송교육단은 운전 주특기가 부여된 신병을 2개 중대(A, B중대)에서 교육을 실시한다. 대형차량반의 운전교육은 5주 동안 진행되는데 입교시부터 수료까지 각 학급별 교육 전담 중대를 운영하고 있다. 운전교육을 지원하기 위해서는 차량과 조교가 소요되는데, 각 중대별 자원(차량과 조교)의 수는 한정되어 있고, 교육에 필요한 자원 소요는 보유한 자원보다 많이 필요한 경우가 있어 부족소요가 발생한다.

2011년 운전병 교육은 총 00명을 교육하게 되며, 학급당 교육을 위한 차량배차는 교육생 4명당 1대의 차량이 필요하다. 해당 학급별로 A, B중대가 전담으로 조교 및 차량지원을 하다 보면 교육학급의 불균형 편성으로 인해 A중대는 교육학급이 많이 편성되어 여유차량이 부족할 때 B중대에는 유휴차량이 남아있는 현상이 발생할 수 있다.

이러한 현실문제에서 중대간의 효율적인 자원(차량) 운영을 위한 차량배차 정책과 상호 이해관계가 대립되었을 때 비협조를 통제하기 위한 전략 등을 실제 자료를 통하여 수치적으로 분석했다.

4.2 데이터 수집/분석

교육에 필요한 차량 소요량은 교육계획의 배차소요를 통해 산출하였으며, 배차율은 차량 배차지시에 의해 교육에 지원된 차량의 수를 산출하였고, 그 결과는 <Table 6>과 같다.

Table 6. Company's Numerical Value

Division	A Com.	B Com.
Retention Vehicle	31	34
Available Vehicle	26	28
Average Requirements number(λ)	22.62	23.43
Average Allocation number(μ)	20.73	20.48

위의 <Table 6>에서 가용차량에 비해 차량소요가 낮음에도 평균 배차율이 낮은 이유는 차량의 소요량의 변화가 큰 것에 비해 가용차량은 변하지 않으므로 차량이 부족한 현상과, 남은 현상이 반복되기 때문이다. 이는 B중대의 주별 차량소요와 배차를 나타낸 <Figure 10>에 잘 나타나 있다.

Figure 10. Requirement and Allocation Rate of B Company's Vehicle

풀링을 하지 않고 개별 시스템으로 배차 시스템을 운용하였을 경우 평균 차량소요량(λ) > 평균 배차율(μ)이므로, 요구되는 차량 소요를 100% 만족할 수 없다. 이러한 상황에서 두 중대의 차량의 풀링을 통하여 차량운용의 효율을 증가시킬 수 있다.

중대의 공유차량은 중대별 최소 교육 소요차량 대수인 17대를 제외한 A중대 9대, B중대 11대를 공유하는 것에 대한 성능척도를 분석하였다.

중대를 서버, 가용한 차량의 대수를 Capacity로 하여 평균 차량소요량(λ)과 평균 배차율(μ)에 의해 성능치를 계산한 결과는 아래 표와 같다.

Table 7. B_i , according to Change of Share Capacity

A Com. B Com.	11	8	5	3	0
9	0.0730 0.0730	0.0501 0.1408	0.0449 0.1678	0.0434 0.1792	0.0502 0.2095
7	0.1287 0.0519	0.1151 0.0994	0.0898 0.1433	0.0870 0.1552	0.0927 0.1759
5	0.1576 0.0450	0.1290 0.1025	0.1179 0.1303	0.1145 0.1422	0.1174 0.1587
3	0.1780 0.0418	0.1502 0.0959	0.1387 0.1230	0.1349 0.1348	0.1353 0.1491
0	0.2190 0.0465	0.1809 0.0975	0.1653 0.1215	0.1601 0.1319	0.1572 0.1435

위의 <Table 7>은 공유 Capacity의 변화에 따른 차단확률의 변화를 나타낸 것이다. 중대가 보유한 차량을 완전히 풀링했을 경우 B_i 가 7.3%로 92%의 차량소요를 충족할 수 있고, 풀링을 하지 않았을 경우 85%만 차량소요를 충족할 수 있다.

Table 8. UT_i , according to Change of Share Capacity

A Com. B Com.	11	8	5	3	0
9	0.9769 0.9559	0.9756 0.9555	0.9726 0.9547	0.9698 0.9543	0.9642 0.9593
7	0.9769 0.9545	0.9757 0.9543	0.9727 0.9536	0.9699 0.9533	0.9642 0.9576
5	0.9766 0.9511	0.9755 0.9511	0.9727 0.9506	0.9699 0.9504	0.9642 0.9540
3	0.9764 0.9460	0.9753 0.9461	0.9726 0.9458	0.9699 0.9457	0.9642 0.9483
0	0.9792 0.9345	0.9777 0.9345	0.9744 0.9345	0.9744 0.9345	0.9642 0.9345

<Table 8>은 Capacity의 변화에 따른 중대별 차량이용률을 나타낸 것이다. A중대는 96%, B중대는 97.6% 사용하면서 최대한의 효율을 유지하고 있다. 상호 모든 차량을 공유하는 것은 협조전략은 상호 이득을 가져올 수 있으나, 1개 중대가 비협조 행위를 할 경우에는 비협조한 중대는 95%, 비협조행위를 당한 중대는 80% 정도의 차량지원을 할 수 있다. 이렇게 자신의 이득을 위하여 비협조적인 행동이 일어났을 경우 상대방은 피해를 입는다.

이러한 상대방의 비협조 행동에 대해 통제할 수 있는 전략은 앞에서 소개한 비협조, 티포탯, 티포투텃 전략이며, 결과값은 <Table 9>와 같다.

Table 9. Pay-Off Matrix(Server Policy)

S_2	CP	Tit for tat	Tit for two tat	NCP
S_1				
CP	0.0730 0.0730	0.0386 0.0532	0.0783 0.0830	0.0502 0.2095
Tit for tat	0.0532 0.0386	0.0318 0.0318	0.0415 0.0363	0.0502 0.2095
Tit for two tat	0.0830 0.0783	0.0363 0.0415	0.0702 0.0702	0.0502 0.2095
NCP	0.2190 0.0465	0.2190 0.0465	0.2190 0.0465	0.1572 0.1435

위의 통제전략중 상호 티포텃 전략을 사용할 때 최대한 상호 이득을 얻을 수 있다는 결론을 얻었다. 즉 상대방이 비협조 전략을 시도하려 할 때 티포텃 전략을 통해서 상대방에게 보복을 하고 다시 협조상태의 균형을 이뤄 높은 효율을 달성할 수 있다. 즉, 모든 차량을 공유하고 티포텃 전략을 사용하면 96.8% 차량소요에 대해 지원이 가능하다. 이는 각 중대의 차량 배차에 대한 정보를 상호 인지하지 못하는 상황에서 차량을 관리하는 중대장의 입장에서 상대방의 비협조적 행위에 대한 통제 전략으로 티포텃 전략을 사용하면 효율이 높아질 수 있다는 시사점을 제시한다.

5. 결 론

본 연구에서는 Capacity 풀링의 서버 간 전략적 의사결정과 이득의 관계를 모델링하여 공유 Capacity의 수, 상대방 서버를 풀링하는 확률, 공유전략, 교통밀도의 변화에 따른 이용률과 고객 손실확률을 산출하였다. 분석 상호 이해관계가 존재하는 서버의 풀링 시스템에서 서버간 이해관계에 따른 사회적 딜레마가 발생하게 되고, 반복되는 게임의 상황에서 상호 틱포택 전략을 사용할 경우 최적의 효율을 달성할 수 있다는 것을 확인하였다. 또한 확률적 공유상황에서 서버의 협조성향을 확률에 따라 분류하여 성향간의 성능척도를 분석하고, 협조성향간의 관계에 대하여 연구하여 자신의 성향보다는 상대방의 성향에 따라 시스템의 효율이 달라지고, 이를 통해 협조성향이 높은 서버와 풀링시 높은 효율을 달성할 수 있다는 것을 확인했다.

본 연구는 풀링의 상황에서도 상호 전략적 의사결정을 하는 게임 상황을 모델링하여 수치적으로 분석했다는 의의가 있다.

향후 연구에서는 다인 게임으로 확장하여 다수가 협조하여 여론을 형성하는 연합전략과 소수가 비협조하여 결과를 뒤집는 회방전략 등 2인 게임에서는 다룰 수 없는 전략을 반영한다면 현실 적합성이 높은 분석 결과를 얻을 수 있을 것이다. 또한, 다양한 신뢰수준을 보이는 서버의 조합에 따라 풀링이 어떤 방향으로 진화할 것인가를 연구하는 것도 의미있는 향후 연구주제이다.

참고문헌

- Andrew, L., Hanly, S., and Mukhtar, R. (2008), Active Queue Management for Fair Resource Allocation in Wireless Networks, *Ieee Transactions on mobile computing*, 7(2), 231-246.
- Bae, T. H., Kim, S. K., and Yoon, B. K. (2008), An Analysis on the Performance of Capacity Pooling Using Queueing Model, *Korea SCM Journal*, 8(2), 41-51.
- Chae, K. C. (2004), *Queueing Lecture*, Technical Report #04-2004-01, KAIST.
- Chin, W.-K., Choi, S.-M., and Huang, M. (2010), Optimal Service Capacity in a Multiple-Server Queueing System : A Game Theory Approach, *Journal of Industrial and Management Optimization*, 6, 73-102.
- Christ, D. and Avi-Itzhak, B. (2002), Strategic equilibrium for a pair of competing Servers with convex cost and balking, *Management science*, 48(6), 813-820.
- Graham, A. (1981), *Kronecker Products and Matrix Calculus With Applications*, Halsted Press, John Wiley and Sons, NY.
- Jordon, W. and Graves, S. (1995), Principles on the benefits of manufacturing process flexibility, *Management Science*, 41(4), 577-594.
- Kim, Y. S. (2011), *Game Theory*, Pakyounhsa.
- Lee, H. W. (2006), *Queueing Theory*, Sigma press.
- Mandelbaum, A. and Reiman, Martin I. (1998), On Pooling in Queueing Networks, *Management Science*, 44(7), 971-981.
- Ozel, O., Uysal-Biyikoglu, E., and Girici, T. (2010), *Optimal Buffer Partitioning on a Multiserver Wireless Link*, Information Theory and Applications Workshop, 1-10.
- Smith, D. R. and Whitt, W. (1981), Resource sharing for efficiency in traffic systems, *Bell System Technical Journal*, 60(1), 39-55.
- Smith, J. M. and Cruz, F. R. B. (2005), The Buffer Allocation Problem for General Finite Buffer Queueing Networks, *Taylor and Francis*, 37(4), 343-365.
- Van Dijk, N. M. and Van der Sluis, E. (2008), To Pool or Not to Pool in Call Centers, *Production and Operations Management*, 17(3), 296-305.
- Yu, Y., Benjaafar, S., and Gerchak, Y. (2009), *Capacity Pooling and Cost Sharing Among Independent Firms in the Presence of Congestion*, Working Paper, University of Minnesota.

남 윤 진

육군사관학교 경영학사
국방대학교 운영분석학과 석사
현재 : 육군 제1군수지원사령부
관심분야 : Stochastic Models and Queueing Theory, Military O.R, 국방물류

윤 봉 규

연세대학교 경영학사
한국과학기술원 산업공학 석사
한국과학기술원 산업공학 박사
현재 : 국방대학교 운영분석학과 부교수
관심분야 : Biz. Performance Optimization and Innovation, Stochastic Models and Queueing Theory, Datamining, Military O.R,