

# Polynomial Time Algorithm for Satellite Communications Scheduling Problem with Capacity Constrained Transponder

Sang-Un Lee\*

## Abstract

This paper deals with the capacity constrained time slot assignment problem(CTSAP) that a satellite switches to traffic between  $m \times n$  ground stations using on-board  $k \leq \min\{m, n\}$ ,  $k$ -transponders switching modes in SS/TDMA time-division technology. There was no polynomial time algorithm to solve the optimal solution thus this problem classified by NP-hard. This paper suggests a heuristic algorithm with  $O(mn)$  time complexity to solve the optimal solution for this problem. Firstly, the proposed algorithm selects maximum packet lengths of  $\binom{mn}{c}$  combination and transmits the cut of minimum packet length in each switching mode(MSMC). In the case of last switching mode with inefficient transmission, we applies a compensation strategy to obtain the minimum number of switching modes and the minimum makespan. The proposed algorithm finds optimal solution in polynomial time for all of the experimental data.

▶ Keywords : Time slot, Makespan, Switch mode, Duration, Capacity constrained

## I. Introduction

SS/TDMA(satellite-switch, time division multiple access) 기법을 사용하는 통신위성(comsat)으로  $m \times n$ 의 지상 지구국(ground stations)들 간 정보 전송을 위해 통신위성은  $k$ 개 송수신기(transponders)를 장착하여  $k \times k$ 의 스위칭 모드(switching mode)로 시분할 기법을 사용한다. 여기서,  $m \times n$ 의 트래픽 행렬(traffic matrix)  $D$ 에 대한 모든 정보를 전송하기 위해 마지막 스위칭 모드 종료시간인 총소요시간(makespan) 뿐만 아니라 변환되는 스위칭 모드 수 또한 최소로 해야 한다. 이를 시간대 배정 문제(time slot assignment problem, TSAP) 또는 통신위성 일정관리 문제(satellite communications scheduling problem, SCSP)라 한다[1].

TSAP는 일반적으로  $m = n = k$ 인 경우를 다루고 있으며, 다항시간으로 최적 해를 얻을 수 있는 알고리즘이 알려져 있지 않아 NP-난제(NP-hard)로 분류되어 있다[2].

$m = n = k$ 인 TSAP에 대해, Inukai[1]는 간선 부분집합들을 이용한 SDR(system of district representatives) 법을,

Yeung[3]은 2-단계 TSA로  $D_{LB}$ 를 구하고,  $D_{LB}$ 의 임계선

상에 있는 트래픽을 첫 번째 모드로 설정하는 MRS(maximum remaining sum) 방법을, Wan et al.[4]은 망 흐름 알고리즘(network flow algorithm, NFA)을, Rote와 Vogel[2]은 간선 색칠하기, 비례 선출 시스템과 병목 할당 알고리즘(bottleneck assignment algorithm, BAA)을, Werra[5]은 선형계획법(linear programming, LP)을 적용하였다. 또한, Guéret et al.[6]은 선형계획법 소프트웨어 패키지를 활용하였으며, Edvall[7]은 수학적 기법인 CPLEX를 적용하였다. 그러나 수학적 프로그램의 일종인 선형계획법은 변수의 개수가 많아지면 문제의 크기는 기하급수적으로 증가하는 관계로 NP-완전으로 분류되어 실제적으로는 소규모 문제들에만 적용되고 있다[8],[9]. 또한, 단일위성 통신계획에 대해서는 Lee[10]이, 주파수 도약 지구국을 가진 다중빔 단일위성 일정계획에 대해서는 Lee[11], 다중위성 간 통신 일정계획에 대해서는 Lee[12]가 연구하였다. 그러나 이들 연구의 특징은  $k = \min\{m, n\}$ 인 경우에 한정되어,  $k \leq \min\{m, n\}$ 인 경우에 직접 적용할 수 없다.

$m = n = k$ 인 TSAP에 대해서는 이와 같이 다양한 방법들이 제안되고 있으나  $k \leq \min\{m, n\}$ 와 같이 통신위성의 용량이 제약

• First Author: Sang-Un Lee, Corresponding Author: Sang-Un Lee

\*Sang-Un Lee (sulee@gwnu.ac.kr), Dept. of Multimedia Engineering, Gangneung-Wonju National University

• Received: 2016. 02. 15, Revised: 2016. 03. 05, Accepted: 2016. 03. 09.

된 경우에 대한 연구는 극히 일부분에 불과하다. 이에 관한 연구로는 Brualdi[14], Acampora와 Davis[15], Huang과 Wen[16]이 있다.

본 논문에서는  $k \leq \min\{m, n\}$  인 용량제약(constrained TSAP, CTSAP)의 최적 해를  $O(mn)$ 의 다항시간으로 얻을 수 있는 휴리스틱 알고리즘을 제안한다. 2장에서는 TSAP 개념에 대해 연구 사례를 중심으로 고찰해 본다. 3장에서는  $O(mn)$  수행 복잡도로 CTSAP의 최적 해를 구할 수 있는 휴리스틱 알고리즘을 제안한다. 4장에서는 제안된 알고리즘을 실험 데이터에 적용하여 알고리즘 적합성을 평가해 본다.

## II. Optimal Time Slot Assignment of Satellite Communication

위성을 통한 디지털 통신 시스템은 하나의 통신위성과 지상과 이용 망과 인터페이스를 제공하는 지상 위성통신 지구국 집합으로 구성되어 있다[16]. SS/TDMA 기술을 사용하는 위성은 시간을 지구국들에게 분할하여 할당하는 시분할 다중접근법을 적용한다[10,17].

SS/TDMA를 장착한 하나의 통신위성은  $m \times n$  개의 다른 지상 지구국 들 간의 정보를 시분할로 전송한다. 전형적인 통신위성은 그림 1과 같이  $k$ 개의 송수신기를 장착하고 있어  $m \times n$  지상국들 중에서 한 번에  $k \times k$ 의 멀티플렉서 스위칭으로 상호 연결하여 데이터를 전송한다. 이 경우 멀티플렉서가 한 번에 처리할 수 있는 스위치 수  $k = \min\{m, n\}$  이다. 또한, 일단 멀티플렉스의 스위치 모드가  $k \times k$ 로 송신측과 수신측을 연결하면, 전송 효율을 극대화시키기 위해 항상 동일한 패킷 길이만을 전송하고 다음 스위치 모드로 전환된다.

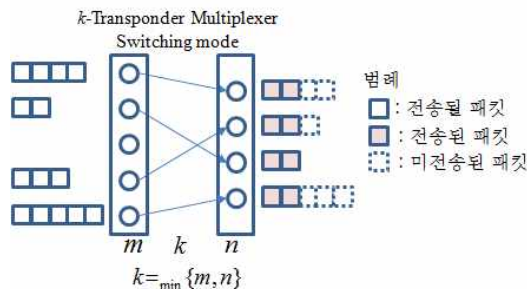


Fig. 1. Typical  $k$ -matching packet transmission of SS/TDMA MUX

그림 2와 같이  $k \leq \min\{m, n\}$  인 경우를 용량 제약 송수신기 통신위성이라 한다[13].

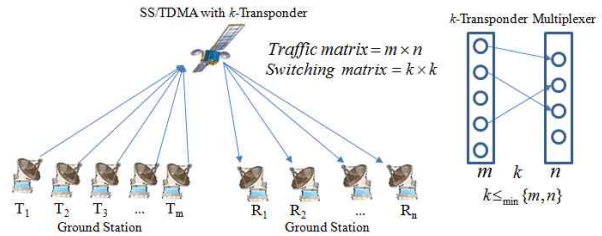


Fig. 2.  $k$ -matching transmission of SS/TDMA with capacity constrained transponder

$T_i, (i=1,2,\dots,m)$  를 송신 지구국,  $R_j, (j=1,2,\dots,n)$  를 수신 지구국,  $k$ 를 통신위성의 송수신기 대수,  $S_s, s=1,2,\dots$  를 스위칭 모드,  $l_s$ 를  $s$ 번째 모드의 지속기간 (패킷 길이)라 하자.

$k \times k$ 의  $k$ 개 상호연결 집합을 스위칭 모드라 하며 치환 행렬  $S_s = (d_s)$ 로 표현된다.  $m \times n$  트래픽 행렬  $D$ 의 쌍  $(i,j)$ 는  $i$ 에서  $j$  지구국으로의 전송이 요구되는 정보의 소요시간(또는 패킷 길이)  $p_{ij}$ 를 갖고 있다.  $D$  트래픽 행렬의 전체 데이터를 전송하기 위해서는 다수의 스위칭 모드들을 필요로 한다.  $l_s$ 를  $p_{ij} \geq l_s$ 라 하자. 스위칭 모드  $S_s$ 로  $l_s$  길이 동안 데이터를 전송하면 미 전송된 트래픽 행렬 값은  $p_{ij} - l_s S_s$ 가 된다. TSAP는 모든 정보가 최소 총소요시간으로 전송될 수 있도록 하는 스위칭 모드 수와 전송 길이  $d_s$ 를 찾고자 한다.

$m = n = k$  인 경우,  $D$  행렬에서 행의 합이 최대값을  $\max t_i$ , 열의 합이 최대값을  $\max r_j$ 라 하면, 총소요시간  $T^*$ 는 최적 해의 하한 값(lower bound, LB)로 식 (1)로 구해진다[1].

$$T^* = LB = \max(\max t_i, \max r_j) \tag{1}$$

such that 
$$\max t_i = \max_{1 \leq i \leq m} \sum_{j=1}^n p_{ij}$$

$$\max r_j = \max_{1 \leq j \leq n} \sum_{i=1}^m p_{ij}$$

이 문제는 식 (2)와 같이  $s$ 개 스위칭 모드 수를 사용한 최소 총소요시간  $T^*$ 와 식 (3)의 최소 스위칭 모드 수  $s^*$ 를 찾는다[4,6].

$$z_T = \text{minimize} \sum_{k \in S} l_s = T^* \tag{2}$$

$$z_s = \text{minimize } s^* \tag{3}$$

여기서  $s$ 의 하한값은  $mn/k$ 이며,  $m \times n$ 은  $p_{ij} > 0$ 인 개수이다.

표 1은 4개 송신 지구국에서 5개 수신 지구국으로 데이터를 전송하고자 하며, 통신위성은 3개의 송수신기를 갖고 있는 경우이다. 따라서  $4 \times 5$  트래픽 행렬의 모든 값을  $3 \times 3$ 의 송수신기 멀티플렉서로 송수신해야 한다[13].

Table 1. Traffic matrix of  $D_1$

	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$t_i$
$T_1$	3	2	4	2	0	11
$T_2$	0	5	0	3	0	8
$T_3$	0	0	3	4	2	9
$T_4$	2	0	2	0	6	10
$r_j$	5	7	9	9	8	LB=11

기계의 작업수행 방식은 비선점형(non-preemptive)과 선점형(preemptive)으로 구분된다. 하나의 기계에서 작업하는 시간동안 제어가 이 작업을 중단시킬 수 없는 경우를 비선점형이라 한다. 반면에, 제어가 이 작업을 중단시키고 다른 작업을 수행할 수 있도록 할 수 있는 경우를 선점형이라 한다. SS/TDMA의 시분할 방법은 트래픽의 패킷을 주어진 스위칭 모드 지속시간동안 전송하고, 나머지 패킷을 다음 스위칭 모드 지속시간에 전송이 가능하여 선점형 방식을 채택하고 있다.

TSAP는 Gonzalez와 Sahni[18]의 선점형 오픈숍 일정계획(open-shop scheduling) 알고리즘으로부터 Inukai[1] 알고리즘으로 변환되었다[19].

OSSP(OSS problem)은  $m$ 대의 기계와  $n$ 개의 작업이 주어졌으며, 각 작업은 모든 기계들로 작업되어야 한다. 단 기계 순서는 고려하지 않는다. 각 기계는 기껏해야 한 번에 하나의 작업에 대한 공정만을 수행하며, 하나의 작업은 2대의 기계에서 동시에 작업될 수 없다. 여기서  $m=n$ 이라 가정한다.  $T$ 를  $j$ 번째 작업이  $i$ 번째 기계에서의 작업시간  $t_{ij}$ 의 총량이라 할 때, OSSP는 최종 작업의 종료시간인 총소요시간을 가능한 작게 하는 일정을 찾는 것이다. OSSP 또한 NP-난제로 분류되어 있다[18].

$m=n=k$ 의 단일 통신위성에 대한 Gonzalez와 Sahni 알고리즘(GSA)은 다음과 같이 수행된다[18].

- Step 1.  $\exists ij, d_i \neq d_j$  인  $D$ 의 행과 열의 합들 중 최대값으로 LB 결정
- Step 2.  $D$ 에 가상의 트래픽을 추가하여  $\forall ij, \forall d_i = \forall d_j = LB$  인  $D_{LB}$  행렬로 변환
- Step 3. while  $\exists ij, d_{ij} > 0, d_{ij} \in D_{LB}$  do
- (1) 선형계획법(linear programming, LP)과 같은 수학적 프로그램 패키지나 이분 그래프에 대한 완전 매칭으로 0이 아닌 값을 가진  $d_{ij}$ 들로  $k$ 번째 모드 결정
  - (2)  $k$ 번째 모드의  $d_{ij}$ 들 중에서 최소 패킷 길이인  $d_{\min}$ 으로  $k$ 번째 모드의 지속기간  $l_k$  결정
  - (3) 모드  $k$ 의  $d_{ij}$ 들 값에서  $l_k$ 를 감소 시킴
- end do

Brualdi[13]는 표 1의 트래픽 데이터에 대해 이중 통계 행렬(doubly stochastic matrices, DSM)법을 적용하여 그림 3의 결과를 얻었다. 즉, 5개 스위칭 모드 변환으로 3+2+4+2+2=13의 총소요시간을 얻었다.

Mode 1	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	길이	Mode 2	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	길이
$T_1$	3	2	4	2	0		$T_1$	0	2	4	2	0	
$T_2$	0	5	0	3	0		$T_2$	0	2	0	3	0	
$T_3$	0	0	3	4	2		$T_3$	0	0	0	4	2	
$T_4$	2	0	2	0	6	3	$T_4$	2	0	2	0	6	2
Mode 3	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	길이	Mode 4	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	길이
$T_1$	0	2	4	0	0		$T_1$	0	2	0	0	0	
$T_2$	0	0	0	3	0		$T_2$	0	0	0	0	3	0
$T_3$	0	0	0	4	2		$T_3$	0	0	0	0	0	2
$T_4$	0	0	2	0	6	4	$T_4$	0	0	2	0	2	2
Mode 5	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	길이							
$T_1$	0	0	0	0	0								
$T_2$	0	0	0	0	1	0							
$T_3$	0	0	0	0	0	2							
$T_4$	0	0	2	0	0	2							
							<b>13</b>						

Fig. 3. Optimal schedule of DSM for  $D_1$  data

GSA는 최대 패킷 선택, 최소 패킷 길이로 절단하여 전송하는 방식으로  $m=n=k$ 인 경우에 한해  $D$ 를  $D_{LB}$ 로 치환하여 적용할 수 있다. 그러나  $k \leq \min\{m,n\}$ 인 경우 모든 행과 열을  $LB$ 로 증가시킨  $D_{LB}$ 를 적용할 수 없으며, 단지 최대 패킷 선택, 선택된  $k$ 개의 패킷들 중 최소 패킷 길이로 절단하여 전송하는 MSMC(max-select min-cut) 방식은 채택이 가능하다. 그러나 이 경우 스위칭 모드 수 뿐 아니라 총소요시간도 증가할 수 있다.

표 1의 데이터에 MSMC 방법을 사용한 경우는 그림 4에 제시되어 있다. 즉, MSMC는 7개 스위칭 모드 변환으로 총소요시간 13을 얻어, Brualdi[13]의 DSM에 비해 스위칭 모드 수가 2개 많이 소요됨을 알 수 있다.

Mode 1	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	길이	Mode 2	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	길이
$T_1$	3	2	4	2	0		$T_1$	3	2	0	2	0	
$T_2$	0	5	0	3	0		$T_2$	0	1	0	3	0	
$T_3$	0	0	3	4	2		$T_3$	0	0	3	4	2	
$T_4$	2	0	2	0	6	4	$T_4$	2	0	2	0	2	2
Mode 3	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	길이	Mode 4	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	길이
$T_1$	1	2	0	2	0		$T_1$	1	0	0	2	0	
$T_2$	0	1	0	3	0		$T_2$	0	1	0	1	0	
$T_3$	0	0	3	2	2		$T_3$	0	0	1	2	2	
$T_4$	2	0	2	0	0	2	$T_4$	2	0	2	0	0	2
Mode 5	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	길이	Mode 6	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	길이
$T_1$	1	0	0	0	0		$T_1$	1	0	0	0	0	
$T_2$	0	1	0	1	0		$T_2$	0	0	0	0	1	0
$T_3$	0	0	1	2	0		$T_3$	0	0	1	1	0	
$T_4$	2	0	0	0	0	1	$T_4$	1	0	0	0	0	1
Mode 7	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	길이							
$T_1$	1	0	0	0	0								
$T_2$	0	0	0	0	0								
$T_3$	0	0	0	1	0								
$T_4$	0	0	0	0	0	1							
							<b>13</b>						

Fig. 4. Optimal schedule of MSMC for  $D_1$  data

3장에서는, 본 문제와 관련하여 LP 또는 DSM과 같은 수학적 프로그램 패키지의 도움 없이 다항시간으로 최적 해를 구하는 규칙을 찾을 수 있는 휴리스틱 알고리즘을 제안한다.

### III. Improved Max-Select Min-Cut Algorithm

$k \leq \min\{m, n\}$  인  $m$  개 지구국에서  $n$  개 지구국으로  $k$  개의 송수신기를 장착한 하나의 통신위성을 통해 데이터를 전송하는 경우, 패킷 량  $p_{ij}$  를 가진 주어진  $m \times m$  의  $p_{ij}$  행렬  $D$  에 대해  $k \times k$  의 최소 스위칭 모드 수로 변환시켜 총소요시간을 최소로 전송시켜야 한다. 이 두 가지 목적을 달성하기 위해, 본 장에서는 기본적으로 MSMC 전략을 채택한다. 첫 번째 전략인 최대 길이 패킷 선택에 있어서, 각  $T_i$  의  $i$  오름차순으로  $\max p_{ij}$  를 선택하고, 이전에 선택된  $R_j$  에서 중복 선택된 경우,  $p_{ij} < p_{i'j}$  이면  $p_{i'j}$  를 선택하고,  $p_{ij} = p_{i'j}$ ,  $t_i < t_{i'}$  이면  $p_{ij(2)}$  를 선택한다. 두 번째 전략인 최소 패킷 길이 절단을 기본적으로 사용하며, 최종 스위칭 모드에서  $|\min p_{ij}| < \lfloor k/2 \rfloor$  이면  $\max p_{ij}$  로 스위칭 모드의 패킷 전송 길이를 결정하며,  $|p_{ij}| = 1$  이면 이 패킷의  $j$  열을 선택하지 않은 이전의 스위칭 모드의 길이를 1 감소시켜 재 수행한다. 이 방법을 적용하여 스위칭 모드 수를 감소시키거나 총소요시간을 감소시키는 최적화를 수행한다.

제안되는 방법을 개선된 최대 선택-최소 절단 알고리즘(improved max-select min-cut algorithm, IMSMCA)이라 하며, 다음과 같이 수행된다.

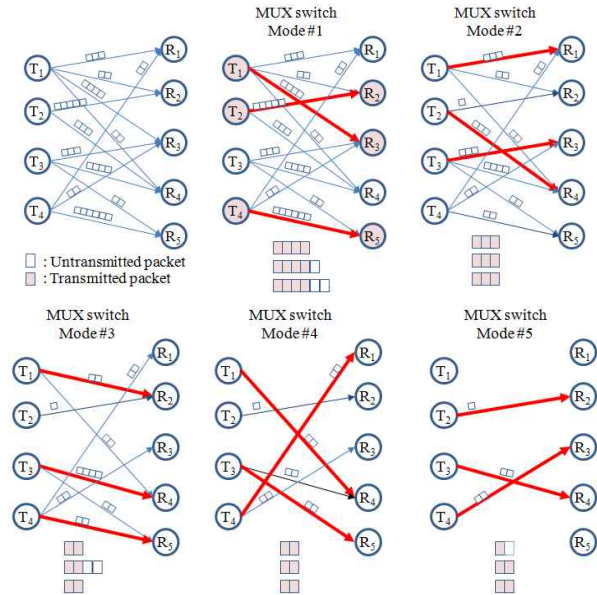
```

until  $\forall_{ij} p_{ij} = 0$  do /* 수행 복잡도 :  $O(mn)$  */
  if  $\forall_{ij} p_{ij} = 1$  then
    행과 열에서 최대로 많이 남은  $p_{ij}$  들을  $k$  개 선택
  else
    for  $i = 1$  to  $m$ 
       $\max p_{ij}$  선택
      if  $j = j'$  and  $p_{ij} < p_{i'j}$  then  $p_{i'j}$  선택
         $i$  는  $p_{ij}$  다음으로 적은  $p_{i'j}$  선택
      else if  $j = j'$  and  $p_{ij} = p_{i'j}$  and  $t_i < t_{i'}$  then
         $p_{i'j}$  선택
         $i$  는  $p_{ij}$  다음으로 적은  $p_{i'j}$  선택
      end
    end
  end
   $m$  개의  $p_{ij}$  내림차순으로  $k$  개 선택
   $s$  번째 스위칭 모드 길이 :  $l_s$ 
  if 최종 스위칭 모드가 아닌 경우 then  $l_s = \min p_{ij}$ 
  else if 최종 스위칭 모드 and  $|\min p_{ij}| < \lfloor k/2 \rfloor$  then
     $l_s = \max p_{ij}$  /* 다수결 원칙 적용 */
  end
do
  if 최종 스위칭 모드 and  $|p_{ij}| = 1$  then  $p_{ij}$  의  $j$  열이 선택되지 않은 스위칭 모드 길이를 1 감소시키고 알고리즘 재수행
  
```

제안된 알고리즘은  $O(mn)$  수행 복잡도로 단순히 구현할 수 있어 실무에 즉시 활용 가능한 장점을 갖고 있다.

표 1의  $D_1$  트래픽 행렬 데이터에 대해 IMSMCA를 적용한 결과는 그림 5에 제시되어 있다. 제안된 IMSMCA는 Brualdi[10]의

DSM과 동일하게 5개 스위칭 모드 변환으로 총소요시간(패킷 길이)=4+3+2+2+2=13을 얻었다. 여기서, 최종 스위칭 모드에서는 1,2,2로 길이를 1로 하지 않고 2로 설정하여 스위칭 모드 수 6을 5로 감소시킬 수 있었다.



Mode 1	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	길이	Mode 2	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	길이
$T_1$	3	2	<b>4</b>	2	0		$T_1$	<b>3</b>	2	0	2	0	
$T_2$	0	<b>5</b>	0	3	0		$T_2$	0	1	0	<b>3</b>	0	
$T_3$	0	0	3	4	2		$T_3$	0	0	<b>3</b>	4	2	
$T_4$	2	0	2	0	<b>6</b>	<b>4</b>	$T_4$	2	0	2	0	<b>2</b>	<b>3</b>
Mode 3	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	길이	Mode 4	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	길이
$T_1$	0	<b>2</b>	0	2	0		$T_1$	0	0	0	<b>2</b>	0	
$T_2$	0	1	0	0	0		$T_2$	0	1	0	0	0	
$T_3$	0	0	0	<b>4</b>	2		$T_3$	0	0	0	2	<b>2</b>	
$T_4$	2	0	2	0	<b>2</b>	<b>2</b>	$T_4$	<b>2</b>	0	2	0	0	<b>2</b>
Mode 5	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	길이							
$T_1$	0	0	0	0	0								
$T_2$	0	<b>1</b>	0	0	0								
$T_3$	0	0	0	<b>2</b>	0								
$T_4$	0	0	<b>2</b>	0	0	<b>2</b>							
							<b>13</b>						

Fig. 5. Optimal schedule of IMSMCA for  $D_1$  data

### IV. Applications and Evaluation

본 장에서는 그림 6의 5개 트래픽 데이터들에 대해 제안된 IMSMCA를 적용하여 본다.

Traffic	Receiver Stations			$d_i$	
	$R_1$	$R_2$	$R_3$		
Transmitter Stations	$T_1$	0	4	0	4
	$T_2$	0	1	0	1
	$T_3$	0	0	2	2
	$T_4$	2	0	0	2
	$T_5$	2	0	0	2
	$T_6$	1	0	0	1
$d_j$	5	5	2	<b>LB=5</b>	

(a)  $D_2$  data

(b)  $D_3$  data

Traffic		Receiver Stations				$d_i$
		$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	
Transmitter Stations	$T_1$	0	1	0	0	1
	$T_2$	0	0	0	4	4
	$T_3$	0	0	2	0	2
	$T_4$	0	0	0	2	2
	$T_5$	3	0	0	0	3
	$T_6$	3	0	0	0	3
$d_i$		6	1	2	6	LB=6

(c)  $D_4$  data

Traffic		Receiver Stations				$d_i$
		$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	
Transmitter Stations	$T_1$	1	2	4	2	9
	$T_2$	3	2	2	4	11
	$T_3$	1	3	1	1	6
	$T_4$	5	2	4	1	12
$d_i$		10	9	11	8	LB=12

(d)  $D_5$  data

Traffic		Receiver Stations				$d_i$
		$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	
Transmitter Stations	$T_1$	1	2	1	4	8
	$T_2$	2	3	3	1	9
	$T_3$	3	2	1	1	7
	$T_4$	1	1	2	1	5
$d_i$		9	10	8	10	LB=12

(e)  $D_6$  data

Fig. 6. Experimental data

$D_2$ 는  $m=n=4, k=3$  인 경우로 Acampora와 Davis[14]에서,  $m=6, n=3, k=3$  인  $D_3$ 과  $m=6, n=4, k=3$  인  $D_4$ 는 Petridou et al.[20]에서,  $m=n=4, k=3$  인  $D_5$ 와  $m=5, n=4, k=3$  인  $D_6$ 은 Huang과 Wen[15]에서 인용되었다.  $D_2$ 는 스위칭 모드 수 6, 총소요시간은  $5+3+2+1+1+1=13$ ,  $D_3$ 는 스위칭 모드 수 7, 총소요시간은  $4+3+2+1+1+1+1=13$ ,  $D_6$ 는 스위칭 모드 수 8, 총소요시간은  $3+3+1+2+1+1+1+1=13$ 으로 알려져 있다.

알고리즘 성능을 비교하기 위해, 실험 데이터에 MSMC를 적용하여 보았다. MSMC를 적용한 결과,  $D_2$ 는  $6+3+2+1+1+1=14$ 의 총소요시간으로 6개 스위칭 모드가 변환된다. 여기서 최종 스위칭 모드에서는 1,0,0으로 3개 채널 중 1개 채널만이 사용되어 효율성이 떨어진다.  $D_3$ 는  $2+2+1=5$ 로 3개 스위칭 모드가 변환되며, 최종 스위칭 모드에서는 1,1,0으로 3개 채널 중 2개 채널이 사용된다.  $D_4$ 는  $2+1+2+1=6$ 으로 4개 스위칭 모드로 변환되며 최종 스위칭 모드에서는 1,1,0으로 3개 채널 중 2개 채널이 사용된다.  $D_5$ 는  $4+3+2+1+1+1+1=13$ 으로 7개 스위칭 모드가 변환되며, 최종 스위칭 모드에서는 1,1,0으로 3개 채널 중 2개 채널이 사용된다.  $D_6$ 는  $3+2+1+1+1+1+1+1+1=13$ 으로 10개 스위칭 모드가 변환되며, 최종 스위칭 모드에서는 1,0,0으로 3개 채널 중 1개 채널만이 사용되어 효율성이 떨어진다.

제안된 IMSMCA를 적용한 결과는 그림 7 ~ 그림 11에 제시하였다.  $D_2$ 의 경우, IMSMCA를 1차로 수행한 결과 스위칭 모드 수는 6이며 총소요시간은  $6+3+2+1+1+1=14$ 를 얻었다. 그러나 최종 스위칭 모드 6에서 ( $T_4, R_4$ )의 1개만 선택되어 미 선택된  $R_1, R_2, R_3$ 에서 선택된 스위칭 모드 1에 대해 길이를 6에서 5로 감소시켜 IMSMCA를 재 수행하여 동일 스위

칭 모드 수 6에,  $5+3+2+1+1+1=13$ 의 총소요시간을 얻었다.  $D_3, D_4, D_5, D_6$ 는 이 경우가 발생하지 않아 IMSMCA를 단지 1회만 수행하여 최적 해를 얻었다.

Mode 1	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	길이
$T_1$	3	<b>6</b>	2	1	
$T_2$	<b>6</b>	4	0	0	
$T_3$	0	1	<b>6</b>	2	
$T_4$	2	0	2	4	<b>6</b>

Mode 2	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	길이
$T_1$	<b>3</b>	0	2	1	
$T_2$	0	<b>4</b>	0	0	
$T_3$	0	1	0	2	
$T_4$	2	0	2	<b>4</b>	<b>3</b>

Mode 3	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	길이
$T_1$	0	0	<b>2</b>	1	
$T_2$	0	1	0	0	
$T_3$	0	1	0	<b>2</b>	
$T_4$	<b>2</b>	0	2	1	<b>2</b>

Mode 4	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	길이
$T_1$	0	0	0	<b>1</b>	
$T_2$	0	1	0	0	
$T_3$	0	<b>1</b>	0	0	
$T_4$	0	0	<b>2</b>	1	<b>1</b>

Mode 5	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	길이
$T_1$	0	0	0	0	
$T_2$	0	<b>1</b>	0	0	
$T_3$	0	0	0	0	
$T_4$	0	0	<b>1</b>	1	<b>1</b>

Mode 6	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	길이
$T_1$	0	0	0	0	
$T_2$	0	0	0	0	
$T_3$	0	0	0	0	
$T_4$	0	0	0	<b>1</b>	<b>14</b>

Fig. 7. Optimal schedule of IMSMCA for  $D_2$  data

Mode 1	$R_1$	$R_2$	$R_3$	길이
$T_1$	0	<b>4</b>	0	
$T_2$	0	1	0	
$T_3$	0	0	<b>2</b>	
$T_4$	<b>2</b>	0	0	
$T_5$	2	0	0	
$T_6$	1	0	0	<b>2</b>

Mode 2	$R_1$	$R_2$	$R_3$	길이
$T_1$	0	<b>2</b>	0	
$T_2$	0	1	0	
$T_3$	0	0	0	
$T_4$	0	0	0	
$T_5$	<b>2</b>	0	0	
$T_6$	1	0	0	<b>2</b>

Mode 3	$R_1$	$R_2$	$R_3$	길이
$T_1$	0	0	0	
$T_2$	0	<b>1</b>	0	
$T_3$	0	0	0	
$T_4$	0	0	0	
$T_5$	0	0	0	
$T_6$	<b>1</b>	0	0	<b>5</b>

Fig. 8. Optimal schedule of IMSMCA for  $D_3$  data

Mode 1	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	길이
$T_1$	0	1	0	0	
$T_2$	0	0	0	<b>4</b>	
$T_3$	0	0	<b>2</b>	0	
$T_4$	0	0	0	2	
$T_5$	<b>3</b>	0	0	0	
$T_6$	3	0	0	0	<b>2</b>

Mode 2	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	길이
$T_1$	0	<b>1</b>	0	0	
$T_2$	0	0	0	0	
$T_3$	0	0	0	0	
$T_4$	0	0	0	<b>2</b>	
$T_5$	1	0	0	0	
$T_6$	<b>3</b>	0	0	0	<b>1</b>

Mode 3	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	길이
$T_1$	0	0	0	0	
$T_2$	0	0	0	<b>2</b>	
$T_3$	0	0	0	0	
$T_4$	0	0	0	1	
$T_5$	1	0	0	0	
$T_6$	<b>2</b>	0	0	0	<b>2</b>

Mode 4	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	길이
$T_1$	0	0	0	0	
$T_2$	0	0	0	0	
$T_3$	0	0	0	0	
$T_4$	0	0	0	<b>1</b>	
$T_5$	<b>1</b>	0	0	0	
$T_6$	0	0	0	0	<b>1</b>

Fig. 9. Optimal schedule of IMSMCA for  $D_4$  data

Mode 1	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	길이	Mode 2	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	길이
$T_1$	1	2	<b>4</b>	2		$T_1$	1	2	0	2	
$T_2$	3	2	2	<b>4</b>		$T_2$	<b>3</b>	2	2	0	
$T_3$	1	3	1	1		$T_3$	1	<b>3</b>	1	1	
$T_4$	<b>5</b>	2	4	1	<b>4</b>	$T_4$	1	2	<b>4</b>	1	<b>3</b>
Mode 3	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	길이	Mode 4	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	길이
$T_1$	1	2	0	<b>2</b>		$T_1$	1	<b>2</b>	0	0	
$T_2$	0	2	<b>2</b>	0		$T_2$	0	2	0	0	
$T_3$	1	0	1	1		$T_3$	<b>1</b>	0	1	1	
$T_4$	1	<b>2</b>	1	1	<b>2</b>	$T_4$	1	0	1	<b>1</b>	<b>1</b>
Mode 5	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	길이	Mode 6	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	길이
$T_1$	1	<b>1</b>	0	0		$T_1$	1	0	0	0	
$T_2$	0	2	0	0		$T_2$	0	<b>2</b>	0	0	
$T_3$	0	0	<b>1</b>	1		$T_3$	0	0	<b>0</b>	<b>1</b>	
$T_4$	<b>1</b>	0	1	0	<b>1</b>	$T_4$	0	0	<b>1</b>	0	<b>1</b>
Mode 7	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	길이						
$T_1$	<b>1</b>	0	0	0							
$T_2$	0	<b>1</b>	0	0							
$T_3$	0	0	0	0							
$T_4$	0	0	0	0	<b>1</b>						

Fig. 10. Optimal schedule of IMSMCA for  $D_5$  data

Mode 1	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	길이	Mode 2	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	길이
$T_1$	1	2	1	<b>4</b>		$T_1$	1	2	1	1	
$T_2$	2	<b>3</b>	3	1		$T_2$	2	0	<b>3</b>	1	
$T_3$	<b>3</b>	2	1	1		$T_3$	0	<b>2</b>	1	1	
$T_4$	1	1	2	1		$T_4$	1	1	2	1	
$T_5$	2	2	1	3	<b>3</b>	$T_5$	2	2	1	<b>3</b>	<b>3</b>
Mode 3	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	길이	Mode 4	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	길이
$T_1$	1	<b>2</b>	1	1		$T_1$	1	0	1	1	
$T_2$	2	0	0	1		$T_2$	<b>2</b>	0	0	1	
$T_3$	0	0	1	1		$T_3$	0	0	1	<b>1</b>	
$T_4$	1	1	<b>2</b>	1		$T_4$	1	1	0	1	
$T_5$	<b>2</b>	2	1	0	<b>2</b>	$T_5$	0	<b>2</b>	1	0	<b>1</b>
Mode 5	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	길이	Mode 6	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	길이
$T_1$	<b>1</b>	0	1	1		$T_1$	0	0	1	<b>1</b>	
$T_2$	1	0	0	<b>1</b>		$T_2$	1	0	0	0	
$T_3$	0	0	1	0		$T_3$	0	0	<b>1</b>	0	
$T_4$	1	<b>1</b>	0	1		$T_4$	1	0	0	1	
$T_5$	0	1	1	0	<b>1</b>	$T_5$	0	<b>1</b>	1	0	<b>1</b>
Mode 7	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	길이	Mode 8	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	길이
$T_1$	0	0	<b>1</b>	0		$T_1$	0	0	0	0	
$T_2$	1	0	0	0		$T_2$	<b>1</b>	0	0	0	
$T_3$	0	0	0	0		$T_3$	0	0	0	0	
$T_4$	<b>1</b>	0	0	<b>1</b>		$T_4$	0	0	0	0	
$T_5$	0	0	1	0	<b>1</b>	$T_5$	0	0	<b>1</b>	0	<b>1</b>

Fig. 11. Optimal schedule of IMSMCA for  $D_6$  data

실험 데이터들에 대해 제안된 IMSMCA와 기존 알고리즘들의 성능을 비교한 결과는 표 2에 제시하였다. 여기서 ‘-’는 해당 데이터에 대한 알고리즘 적용을 하지 않은 경우를 의미한다.

제안된 IMSMCA는 6개 실험 데이터 모두에서 최소 스위칭 모드 수 변환으로 최소의 총소요시간으로 전송할 수 있었음을 알 수 있다. 따라서 제안된 알고리즘을 활용 가능하여 현업에 종사하는 실무자에게 큰 도움을 줄 것이다.

Table 2. Performance comparison of five algorithms

알고리즘	평가기준	성능					
		$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$	$D_6$
Brualdi[10]의 DSM	스위칭 모드 수	<b>5</b>	-	-	-	-	-
	총소요시간	<b>13</b>	-	-	-	-	-
Acampora와 Davis[14]	스위칭 모드 수	-	<b>6</b>	-	-	-	-
	총소요시간	-	<b>13</b>	-	-	-	-
Huang과 Wen[15]	스위칭 모드 수	-	-	-	-	<b>7</b>	<b>8</b>
	총소요시간	-	-	-	-	<b>13</b>	<b>13</b>
MSMC	스위칭 모드 수	7	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>7</b>	10
	총소요시간	<b>13</b>	14	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>13</b>	<b>13</b>
IMSMC	스위칭 모드 수	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
	총소요시간	<b>13</b>	<b>13</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>13</b>	<b>13</b>

### V. Conclusions

본 논문은 다항시간으로 최적 해를 얻는 알고리즘이 알려져 있지 않은 용량제약 시간 대 배정 문제(CTSAP)에 대해  $O(mn)$  수행 복잡도로 최적 해를 구할 수 있는 알고리즘을 제안하였다.

제안된 알고리즘은 주어진 트래픽 행렬  $D$ 에서 최대 패킷 길이를 선택하고 선택된 패킷들 중에서 최소 패킷 길이로 절단하여 전송하는 기본적인 전략을 적용하였으며, 총소요시간과 스위칭 모드 수를 감소시키는 최적화 방법으로 최종 스위칭 모드에서 비효율적으로  $k$ 개 보다 적게 남은 경우 이를 보상하는 방법을 적용하였다.

제안된 알고리즘을 6개의 실험 데이터에 적용한 결과 모든 데이터에 대해 총소요시간 뿐 아니라 스위칭 모드 수도 최소로 하는 결과를 얻을 수 있었다.

결론적으로, 제안된 알고리즘은  $O(mn)$  수행 복잡도로 최적 해를 구할 수 있어 위성통신망의 정보 전송 분야 실무자에게 실제로 큰 도움을 줄 수 있을 것이다.

### REFERENCES

- [1] T. Inukai, "An Efficient SS/TDMA Time Slot Assignment Algorithm," IEEE Transactions on Communications, Vol. COM-27, No. 10, pp. 1449-1455, Oct. 1979.
- [2] G. Rote and A. Vogel, "A Heuristic for Decomposing Traffic Matrices in TDMA Satellite Communication," Zeitschrift für - Methods and Models of Operations Research, Vol. 38, No. 3, pp. 281-307, Oct. 1993.
- [3] K. L. Yeung, "Efficient Time Slot Assignment Algorithms for TDM Hierarchical and Nonhierarchical Switching Systems," IEEE Transactions on Communications, Vol. 49, No. 2, pp. 351-359, Feb. 2001.
- [4] X. Wan, F. Shan, and Z. Shen, "An Optimal Algorithm for Time-slot Assignment in SS/TDMA Satellite Systems," IEEE 22nd International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN), pp. 1-6, Jul. 2013.
- [5] D. Werra, "A Note on SS/TDMA Satellite Communication," Linear Algebra and Its Applications, Vol. 135, pp. 69-77, Jul. 1990.
- [6] C. Guéret, X. Prins, and M. Sevaux, "Applications of Optimization with Xpress-MP: 12.5 Scheduling of Telecommunications via Satellite," Dash Optimization

- Ltd., pp. 185-190, Feb. 2005.
- [7] M. Edvall, "Publicity Campaign," Tomlab Optimization Inc, [http://tomsym.com/examples/tomsym\\_satellite\\_comm.html](http://tomsym.com/examples/tomsym_satellite_comm.html), Apr. 2009.
- [8] T. H. Lee and S. S. Park, "An Integer Programming Approach to the Time Slot Assignment Problem in SS/TDMA Systems with Intersatellite Links," *European Journal of Operational Research*, Vol. 135, No. 1, pp. 57-66, Nov. 2001.
- [9] J. P. Jue, "Lightpath Establishment in Wavelength- Routed WDM Optical Networks," *Optical networks*, Kluwer Academic Publishers, pp. 99-122, 2001.
- [10] S. U. Lee, "Polynomial Time Algorithm for Satellite Communications Scheduling Problem," *Journal of KIIT*, Vol. 13, No. 4, pp. 27-36, Apr. 2015.
- [11] S. U. Lee, "Polynomial Time Algorithm for Multi-Beam SS/TDMA Satellite Communications Scheduling Problem with Frequency-Hopping Ground Stations," *Journal of KSCI*, Vol. 20, No. 7, pp. 33-40, Jul. 2015.
- [12] S. U. Lee, "Polynomial Time Algorithm for Multi-Satellite Communications Scheduling Problem with Intersatellite Links," *Journal of KIIT*, Vol. 13, No. 8, pp. 29-37, Aug. 2015.
- [13] R. A. Brualdi, "Some Applications of Doubly Stochastic Matrices," *Linear Algebra and Its Applications*, Vol. 107, pp. 77-100, Aug. 1988.
- [14] A. S. Acampora and B. R. Davis, "Efficient Utilization of Satellite Transponders via Time- Division Multibeam Scanning," *The Bell System Technical Journal*, Vol. 57, No. 8, pp. 2901-2914, Oct. 1978.
- [15] K. T. Huang and J. H. Wen, "A Traffic Reallocation Algorithm for an SS/TDMA System with Frequency-Hopping Earth Stations," *Proceedings of IEEE Vehicular Technology*, Tokyo, Japan, Vol. 2, pp. 1606-1610, May 2000.
- [16] D. L. Adamy, "EW 102: A Second Course in Electronic Warfare, Chapter 7: Communication Satellite Links," Horizon House Publications, Inc. 2004.
- [17] G. Maral and M. Bousquet, "Performance of Fully Variable Demand Assignment SS/TDMA Satellite Systems," *International Journal of Satellite Communications*, Vol. 5, No. 1, pp. 279-290, Jan. 1987.
- [18] T. Gonzalez and S. Sahni, "Open-Shop Scheduling to Minimize Finish Time," *Journal of the ACM*, Vol. 23, No. 4, pp. 665-679, Oct. 1976.
- [19] S. Martello, "Jenő Egerváry: From the Origins of the Hungarian Algorithm to Satellite Communication," *Central European Journal of Operations Research*, Vol. 18, No. 1, pp. 47-57, Mar. 2010.
- [20] S. G. Petridou, P. G. Sarigiannidis, G. I. Papadimitriou, and A. S. Pomportsis, "An Efficient Clustering Oriented Algorithm for Message Scheduling on WDM Star Networks," *14th IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology, Benelux*, pp. 143-147, Nov. 2007.

### Authors



Sang Un Lee received the B. Sc. degree in avionics from the Korea Aerospace University in 1997. He received the M. Sc. and Ph. D. degrees in Computer Science from Gyeongsang National University, Korea, in 1997 and 2001, respectively.

He is currently Professor with the Department of Multimedia Science, Gangneung-Wonju National University, Korea. He is interested in software quality assurance and reliability modeling, software engineering, software project management, neural networks, and algorithm.