

# 지구관측/정찰 위성군의 임무 및 통신 스케줄링

제9회 한국 대학생 SCM 경진대회

---

공군사관학교 시스템공학과  
엄도연 [지도교수 : 김홍섭]

---

# 목 차

1 연구 배경 및 목적

2 문 제 정 의

3 최적화 수 리 모 형 설 계

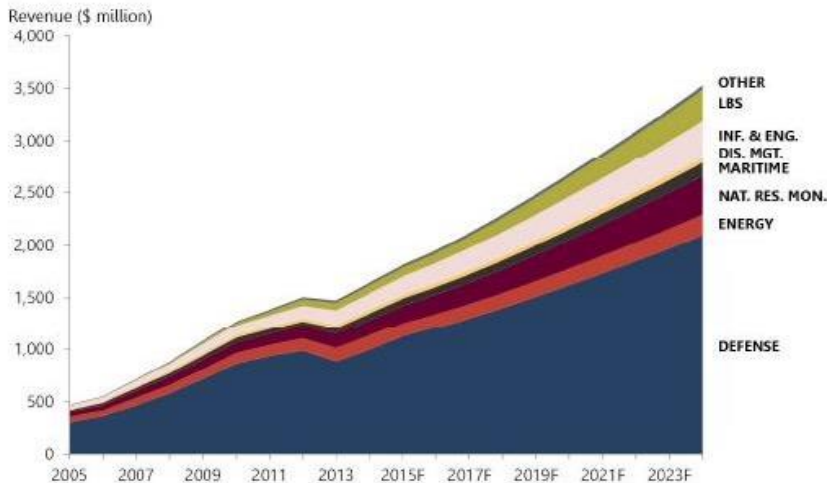
4 수 치 실 험

5 결 론

# 연구배경 및 목적

- 지구관측 위성영상 서비스 산업의 지속적인 성장 추세(연 평균 10% 이상) (그림 1. 참조)
  - 매출액으로 계산되지 않는 활용분야가 많아 잠재적인 산업의 규모 더욱 클 것으로 추정
  - 인공위성 영상의 활용도 증가로 위성영상 서비스 산업은 지속적으로 성장할 것으로 전망
- 전시작전권 전환, 핵·미사일 위협 대응 등을 위해 **軍정찰위성군(425사업/1조원)** 개발 중
  - 위성군(총 5기) : 고성능 영상 레이더(SAR) 위성 4기, 전자광학/적외선(EO/IR) 위성 1기
  - 정찰위성은 한국형 3축 체계(킬체인, 미사일방어체계, 대량응징보복)의 핵심 자산 (그림 2. 참조)
- 인공위성 사업은 **고비용, 장기간 투자**를 필요로 하는 고가치 사업으로 **효율성 극대화 필요**

[그림 1] : 산업용 지구관측 위성정보 매출규모 추이



[그림 2] : Kill Chain 과정



# 연구배경 및 목적

## ● 기존 연구문헌 : “인공위성의 임무/통신을 개별적으로 스케줄링”

통신 스케줄링	임무 스케줄링
<p>Li, H. J., Lu, Y., Dong, F. H., &amp; Liu, R. (2012).</p> <p>Lee, C. H., &amp; Cheung, K. M. (2012, March).</p> <p>Xhafa <i>et al.</i>(2013).</p> <p>Spangelo, S., Cutler, J., Gilson, K., &amp; Cohn, A. (2015).</p> <p>Salman, A. A., Ahmad, I., &amp; Omran, M. G. (2015).</p> <p>Lee, J., Kim, H., Chung, H., &amp; Ko, K. (2016).</p> <p>Luo, K., Wang, H., Li, Y., &amp; Li, Q. (2017).</p> <p>Jeong, E., &amp; Kim, H. (2018).</p>	<p>Wang, P., Reinelt, G., Gao, P., &amp; Tan, Y. (2011).</p> <p>Sarkheyli <i>et al.</i>(2013).</p> <p>Wu, G., Liu, J., Ma, M., &amp; Qiu, D. (2013).</p> <p>Xiaolu, L., Baocun, B., Yingwu, C., &amp; Feng, Y. (2014).</p> <p>Kim, H., &amp; Chang, Y. K. (2015).</p> <p>Wang, J., Zhu, X., Yang, L. T., Zhu, J., &amp; Ma, M. (2015).</p> <p>Xu, R., Chen, H., Liang, X., &amp; Wang, H. (2016).</p> <p>Zheng, Z., Guo, J., &amp; Gill, E. (2017).</p> <p>Chu, X., Chen, Y., &amp; Tan, Y. (2017).</p>

임무명령 전송, 임무결과(영상, 데이터) 수신 등  
→ 위성-지상국 간 통신 필수

효율적 임무 스케줄링 → 인공위성 활용도 제고



인공위성의 운용 환경을 고려하여 **임무와 통신에 대한 통합적 스케줄링 필요**

● **인공위성 운용 환경** : 지구를 공전하면서 임무와 통신을 병행 → **임무/통신의 통합적 스케줄링 필요**

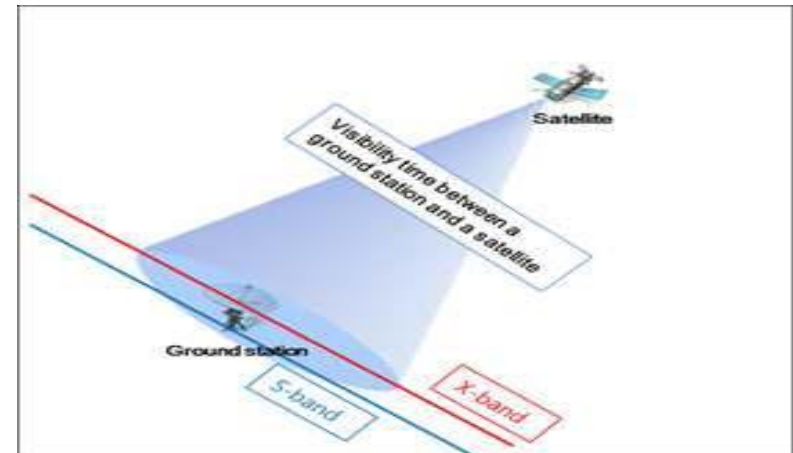
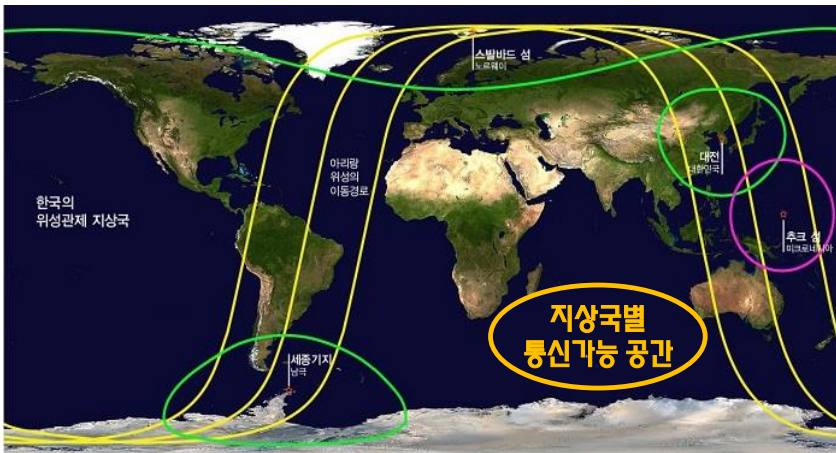
※ 예시 : 정찰(영상, 북한) – 정찰(영상, 중국) – 통신(지상국/대전) – 정찰(영상, 일본) – 통신(지상국/대전)...



# 문 제 정 의 [우주 임무/통신 환경]

- ❑ **인공위성이 관측/정찰하거나 지상국과 통신할 수 있는 시간은 제한적 (그림 3. 참조)**
  - 인공위성은 특정 제한된 공간 내에 위치하는 시간(Visibility Time)동안에 한해 임무/통신수행 가능
  - 인공위성이 복수의 지역에 대한 동시 임무(관측) 및 임무/통신 동시 수행 불가
  - 위성-지상국 간 통신은 1:1만 가능 → 한 지상국이 복수의 위성, 한 위성이 복수의 지상국과 동시 통신 불가
- ❑ **인공위성과 지상국은 임무/통신을 위해 사전 준비시간(Set-up time) 필요**
  - 인공위성은 다음 임무/통신을 위해 카메라 또는 안테나의 지향점 변경을 위한 기동(Maneuvering) 수행
  - 지상국은 인공위성과 교신을 위해 안테나 지향점 조정, 통신모드 변경/설정 등을 수행
- ❑ **인공위성에 탑재된 데이터 저장용 메모리(Memory) 용량의 제한**

[그림 3] : 인공위성-지상국의 통신가능 영역

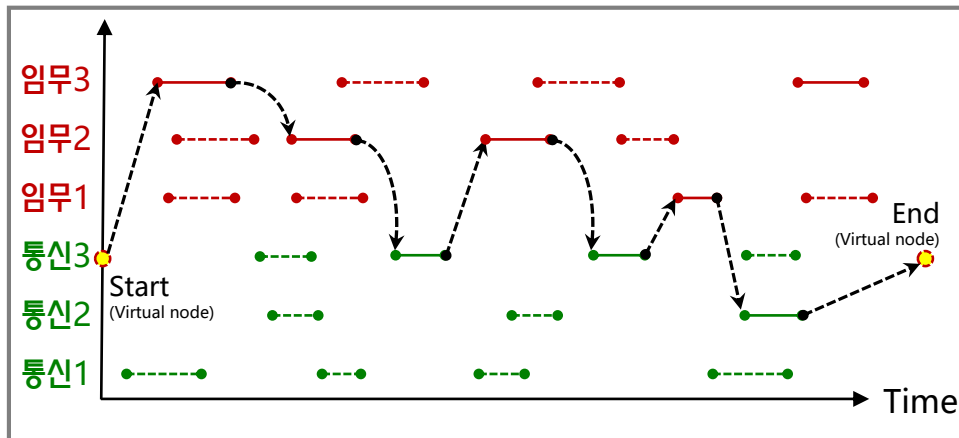


# 최적화 수리모형 설계

## 시공간 네트워크 모델링

- 임무/통신 시간대를 방문지점(Node)으로 고려하여 차량 경로문제(VRP)로 변환 → “Time-Space Network”

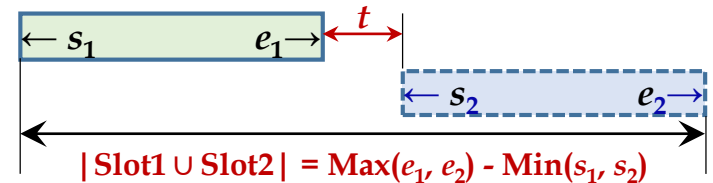
VRPPD	This study
차량(Vehicle)	인공위성
화물적재(Pickup)	임무(영상촬영 등) 데이터 저장
화물배송(Delivery)	임무 데이터 전송 후 삭제
적재량 제한	메모리 용량의 제한
물류센터(Depot)	Virtual node
Node	임무/통신 시간대(Slot)



## 주요 임무/통신환경 모델링

- 임무/통신시간 중복할당(Overlapping) 방지 제약

- 내용 : 할당된 두 Slot의 중복여부(겹침) 확인
- 중복할당 방지 논리 ( $t$  : 준비시간)



■ 지상국 ■

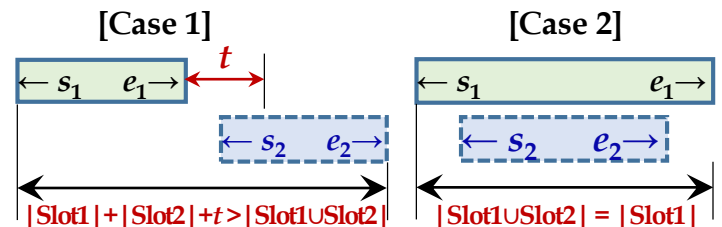
$$\frac{(e_1 - s_1) + (e_2 - s_2) + t}{|Slot1| + |Slot2|} \leq \text{Max}(e_1, e_2) - \text{Min}(s_1, s_2)$$

■ 위성 ■

$$e_1 + t \leq s_2$$

(Slot 1 종료 + 준비시간) 이후 Slot 2 시작

- 중복할당 예시



# 최적화 수리모형 설계

## 표기(Notation)

- $\mathbf{K}$  : 인공위성의 인덱스 집합 ;  $\forall k \in \mathbf{K}$
- $\mathbf{W}$  : 임무의 인덱스 집합 ;  $\forall w \in \mathbf{W}$
- $\mathbf{N}$  : 통신의 인덱스 집합 ;  $\forall n \in \mathbf{N}$
- $\mathbf{L}$  : 임무/통신의 인덱스 집합 ;  $\forall l \in \mathbf{L} = \{0\} \cup \mathbf{W} \cup \mathbf{N}$
- $\mathbf{P}$  : 임무/통신 수행가능 시간대의 인덱스 집합 ;  $\forall p \in \mathbf{P}$
- $M$  : Big M(충분히 큰 수)
- $(l, p)$  :  $l$  번째 임무/통신의  $p$  번째 Slot의 인덱스
- $a_l^k$  : 위성  $k$ 의  $l$  번째 임무/통신 수행 시, 데이터 획득/전송 속도 (Mbps : Mega-byte per minute)
- $s_{(l,p)}^k, e_{(l,p)}^k$  : 위성  $k$ 의 Slot  $(l, p)$ 의 시작과 종료시간
- $t^n, t^k$  : 지상국  $n$ 과 위성  $k$ 의 임무/통신 준비시간(Set-up time) (분)
- $c^k$  : 위성  $k$ 의 초기 데이터 저장량 (MB)
- $C^k$  : 위성  $k$ 의 메모리 용량 (MB)

## [결정변수(Decision variables)]

- $u_{(l,p)}^k$  : 위성  $k$ 가 Slot  $(l, p)$ 에서 임무/통신을 수행한 후 데이터 저장량 (MB)
- $x_{(l,p)(r,q)}^k = \begin{cases} 1, & \text{위성 } k \text{가 Slot } (l, p) \text{에서 } (r, q) \text{로 이동하는 경우,} \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases}$

# 최적화 수리모형 설계

$$\begin{aligned}
 \text{Maximize } & \sum_{k \in \mathbf{K}} \sum_{l \in \mathbf{L}} \sum_{w \in \mathbf{W}} \sum_{p \in \mathbf{P}} \sum_{q \in \mathbf{P} \setminus \{0\}} a_w^k \left( e_{(w,q)}^k - s_{(w,q)}^k \right) x_{(l,p)(w,q)}^k \\
 & + \sum_{k \in \mathbf{K}} \sum_{l \in \mathbf{L}} \sum_{n \in \mathbf{N}} \sum_{p \in \mathbf{P}} \sum_{q \in \mathbf{P} \setminus \{0\}} \min \left[ a_n^k \left( e_{(n,q)}^k - s_{(n,q)}^k \right) x_{(l,p)(n,q)}^k, u_{(l,p)}^k \right] \quad (1)
 \end{aligned}$$

목적함수

위성이 수행한 임무의 데이터 용량

위성-지상국 간 통신 데이터 용량

subject to

임무/통신 Slot의 이동경로	$\sum_{r \in \mathbf{L}} \sum_{q \in \mathbf{P}} x_{(0,0)(r,q)}^k = 1, \quad \forall k \in \mathbf{K}$	(2)	임무/통신 스케줄 경로는 Virtual Node({0})에서 시작과 종료
	$\sum_{l \in \mathbf{L}} \sum_{p \in \mathbf{P}} \sum_{q \in \mathbf{P} \setminus \{0\}} x_{(l,p)(0,q)}^k = 0, \quad \forall k \in \mathbf{K}$		
	$\sum_{l \in \mathbf{L}} \sum_{p \in \mathbf{P}} x_{(l,p)(r,q)}^k \leq 1, \quad \forall k \in \mathbf{K}, \forall r \in \mathbf{L}, \forall q \in \mathbf{P}$	(3)	임의의 Slot을 1회 이하 선택
	$\sum_{l \in \mathbf{L}} \sum_{p \in \mathbf{P}} x_{(l,p)(r,q)}^k - \sum_{l \in \mathbf{L}} \sum_{p \in \mathbf{P}} x_{(r,q)(l,p)}^k = 0, \quad \forall k \in \mathbf{K}, \forall r \in \mathbf{L}, \forall q \in \mathbf{P}$	(4)	경로 연속성 제약 (Route continuity)

임무/통신 Slot 간의 중복 방지	$\left[ s_{(r,q)}^k - \left( e_{(l,p)}^k + t^k \right) \right] x_{(l,p)(r,q)}^k \geq 0, \quad \forall k \in \mathbf{K}, \forall l \in \mathbf{L}, \forall r \in \mathbf{L} \setminus \{0\}, \forall p \in \mathbf{P}, \forall q \in \mathbf{P} \setminus \{0\}$	(5)	임의의 위성에 대해 뒷 시간대의 Slot으로만 이동가능
	$\left( e_{(n,p)}^k - s_{(n,p)}^k \right) + \left( e_{(n,q)}^h - s_{(n,q)}^h \right) + t^n \leq \max \left[ e_{(n,q)}^k, e_{(n,q)}^h \right] - \min \left[ s_{(n,p)}^k, s_{(n,q)}^h \right] + M \left[ 2 - \sum_{l \in \mathbf{L}} \sum_{v \in \mathbf{P}} \left( x_{(l,v)(n,p)}^k + x_{(l,v)(n,q)}^h \right) \right],$ $\forall k \in \mathbf{K}, \forall h \in \mathbf{K} (h \neq k), \forall n \in \mathbf{N}, \forall p \in \mathbf{P} \setminus \{0\}, \forall q \in \mathbf{P} \setminus \{0\}$		

Slot 선택여부 판별식 (未방문 시, 제약 무력화)



# 최적화 수리모형 설계

■ 임무 Slot ■  
데이터 저장 용량

$$\begin{aligned}
 u_{(w,q)}^k &\leq u_{(l,p)}^k + a_w^k \left( e_{(w,q)}^k - s_{(w,q)}^k \right) x_{(l,p)(w,q)}^k + M \left( 1 - x_{(l,p)(w,q)}^k \right), \\
 &\quad \forall k \in \mathbf{K}, \forall l \in \mathbf{L}, \forall w \in \mathbf{W}, \forall p \in \mathbf{P}, \forall q \in \mathbf{P} \setminus \{0\} \\
 u_{(w,q)}^k &\geq u_{(l,p)}^k + a_w^k \left( e_{(w,q)}^k - s_{(w,q)}^k \right) x_{(l,p)(w,q)}^k - M \left( 1 - x_{(l,p)(w,q)}^k \right), \\
 &\quad \forall k \in \mathbf{K}, \forall l \in \mathbf{L}, \forall w \in \mathbf{W}, \forall p \in \mathbf{P}, \forall q \in \mathbf{P} \setminus \{0\}
 \end{aligned} \tag{7}$$

Slot (w, q)에서의 데이터 획득량

■ 임무가능 조건 ■

메모리 잔여량 (용량-저장량) 이  
임무 데이터량 이상인 경우  
임무수행 가능

■ 통신 Slot ■  
데이터 저장 감 소

$$\begin{aligned}
 u_{(n,q)}^k &\leq u_{(l,p)}^k - \min \left[ a_n^k \left( e_{(n,q)}^k - s_{(n,q)}^k \right) x_{(l,p)(n,q)}^k, u_{(l,p)}^k \right] + M \left( 1 - x_{(l,p)(n,q)}^k \right), \\
 &\quad \forall k \in \mathbf{K}, \forall l \in \mathbf{L}, \forall n \in \mathbf{N}, \forall p \in \mathbf{P}, \forall q \in \mathbf{P} \setminus \{0\} \\
 u_{(n,q)}^k &\geq u_{(l,p)}^k - \min \left[ a_n^k \left( e_{(n,q)}^k - s_{(n,q)}^k \right) x_{(l,p)(n,q)}^k, u_{(l,p)}^k \right] - M \left( 1 - x_{(l,p)(n,q)}^k \right), \\
 &\quad \forall k \in \mathbf{K}, \forall l \in \mathbf{L}, \forall n \in \mathbf{N}, \forall p \in \mathbf{P}, \forall q \in \mathbf{P} \setminus \{0\}
 \end{aligned} \tag{8}$$

Slot (n, q)에서  
전송 가능한 데이터량

Slot (l, p)에서의  
데이터 저장량

■ 통신가능 조건 ■

통신 시 전송 가능한 데이터  
용량과 기존 데이터 저장량과  
중 작은 크기만큼 전송

데이터 저장 용량

$$u_{(0,0)}^k = c^k, \quad \forall k \in \mathbf{K} \tag{9}$$

위성의 초기 데이터 저장량

$$0 \leq u_{(l,p)}^k \leq C^k, \quad \forall k \in \mathbf{K}, \forall l \in \mathbf{L}, \forall p \in \mathbf{P} \tag{10}$$

위성의 데이터 저장량은  
메모리 용량 초과 불가

# 수 치 실 험 데 이 터

- ❑ **인공위성의 임무/통신가능 시간대 데이터** : 우주비행 시뮬레이션 전문 소프트웨어(STK) 활용  
System Tool Kit (AGI社)
- 🌐 **현용 지상국들(Ground stations)을 임무/통신지역으로 가정하여 Visibility를 시뮬레이션**
- 🌐 **임무/통신 스케줄은 24시간(1,440분) 단위로 수립 (1차 실험: 1일차, 2차 실험: 2일차)**

## 위성 데이터

구분 (k)	인공위성	메모리용량 (MB)	초기 데이터 저장량		임무 준비시간 (기동 및 자세제어)
			1차 ()	2차	
1	ARIRANG-3	500	0 MB	<b>1차 실험결과</b>	3.2 분
2	RAPIDEYE-5	700			5.1 분
3	COMPASS-1	400			3.4 분

## 데이터 획득/전송 속도(Mbpm)

Slot(p) 위성(k)	1	2	3	4	5	6
1	17	16	20	8	10	10
2	17	16	24	11	10	9
3	11	13	10	8	9	7

## 임무지역/지상국 데이터

구 분	인덱스	지상국명(名)	통신 준비시간(분)
임 무 지 역	임무1	KGS	불필요
	임무2	SOUTHAFRICA	
	임무3	POKERFLAT	
지상국	통신1	MASSDA	4.6 분
	통신2	WALLOPS	4.4 분
	통신3	GSOC	6.0 분



# 수 치 실 험 [1일차]

● 임무/통신 데이터 총량 : 3,662.76 MB

구 분	ARIRANG-3	RAPIDEYE-5	COMPASS-1
임 무 (영상촬영)	754.40	1,104.47	663.75
통 신 (지구 전송)	278.56	526.18	335.40

● 최적해 탐색 시간(CPLEX) : 3.98 초

## ● COMPASS-1

순서	지상국명(名)	구분	시작시간	종료시간	데이터 저장량
1	SOUTHAFRICA	임무지역	720	727.12	92.56
2	GSOC	지상국	789.1	801.98	2.40
3	KGS	임무지역	867.87	871.05	37.38
4	WALLOPS	지상국	888.63	901.48	0
5	KGS	임무지역	957.82	970.23	135.41
6	WALLOPS	지상국	985.97	994.03	62.87
7	MASSDA	지상국	1073.67	1083.03	0
8	POKERFLAT	임무지역	1275.7	1288.28	125.80
9	GSOC	지상국	1350.3	1360.65	53.35
10	POKERFLAT	임무지역	1371.88	1383	164.55
11	SOUTHAFRICA	임무지역	1422.45	1435.05	328.35

## ● ARIRANG-3

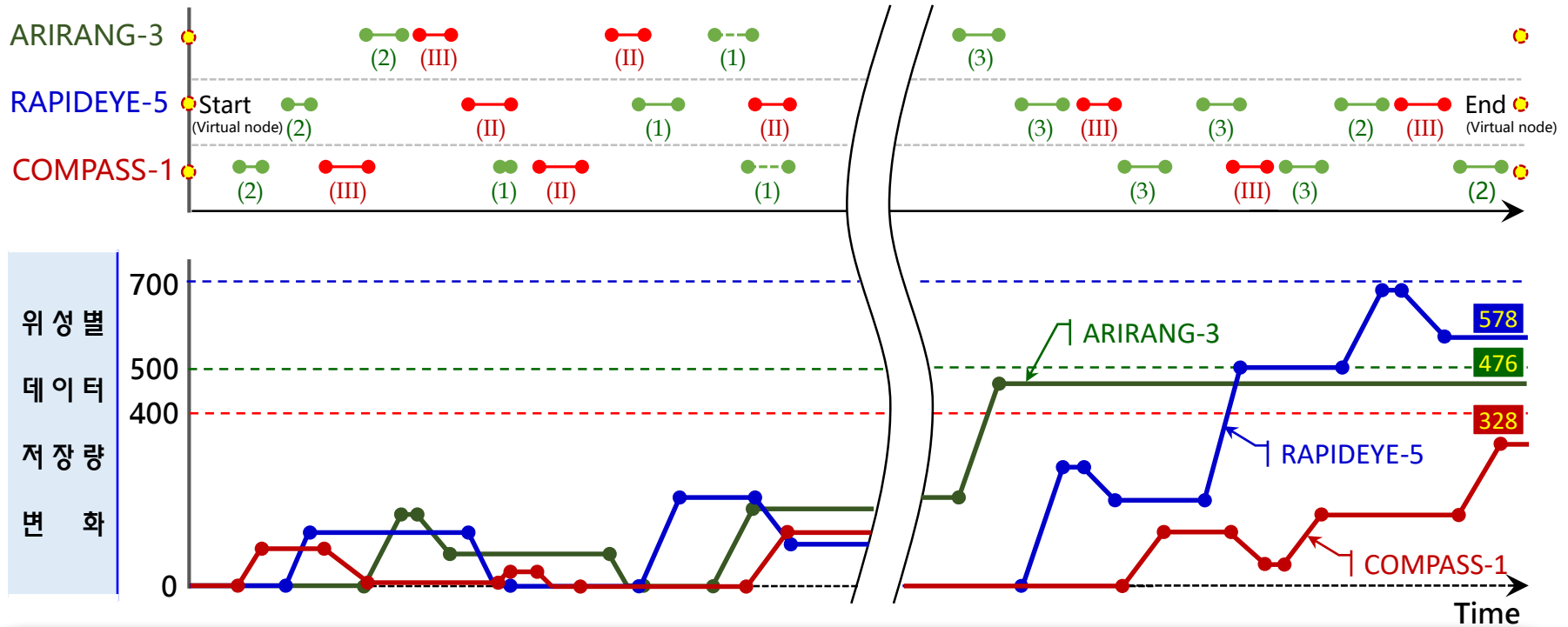
순서	지상국명(名)	구분	시작시간	종료시간	데이터 저장량
1	SOUTHAFRICA	임무지역	801.28	812.25	175.52
2	GSOC	지상국	825.83	835.43	79.52
3	WALLOPS	지상국	921.25	931.28	0
4	KGS	임무지역	950.37	961.82	194.65
5	MASSDA	임무지역	1046.65	1059.53	91.61
6	KGS	임무지역	1146.98	1153.57	203.64
7	POKERFLAT	임무지역	1216.87	1230.48	475.84

## ● RAPIDEYE-5

순서	지상국명(名)	구분	시작시간	종료시간	데이터 저장량
1	SOUTHAFRICA	임무지역	784.03	791.25	115.52
2	WALLOPS	지상국	859.78	872.72	0
3	KGS	임무지역	929.88	941.95	205.19
4	WALLOPS	지상국	956.88	967.45	99.49
5	MASSDA	지상국	1024.52	1036.43	0
6	POKERFLAT	임무지역	1249.7	1261.68	287.52
7	GSOC	지상국	1325.28	1334.95	200.49
8	POKERFLAT	임무지역	1345.92	1358.23	495.93
9	SOUTHAFRICA	임무지역	1397.17	1409.72	696.73
10	GSOC	지상국	1419.07	1432.23	578.29

# 수 치 실 험 [1일차]

인덱스	임무1 (1)	임무2 (2)	임무3 (3)	통신1 (I)	통신2 (II)	통신3 (III)
지상국	KGS	SOUTH AFRICA	POKERFLAT	MASSDA	WALLOPS	GSOC

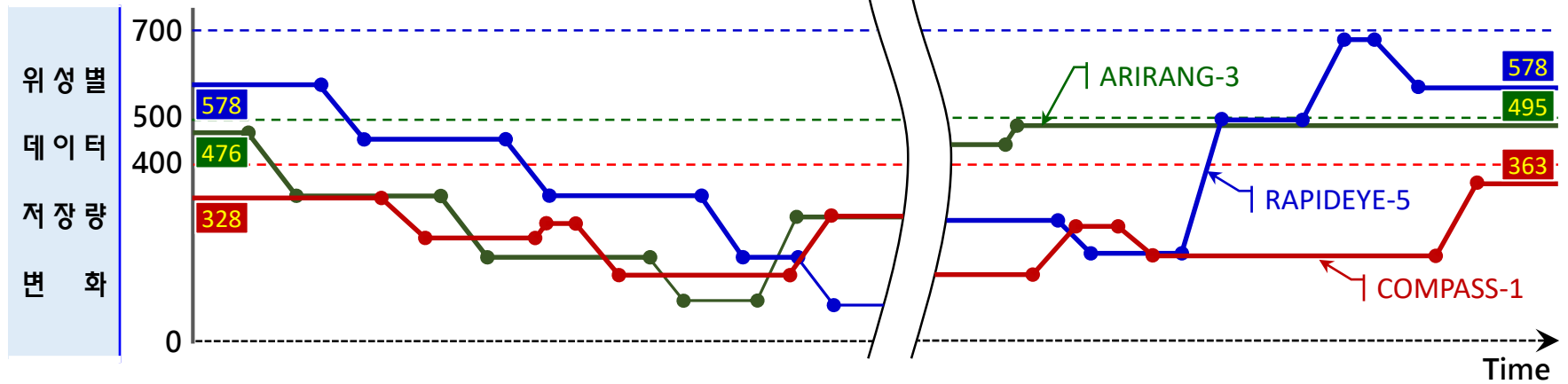
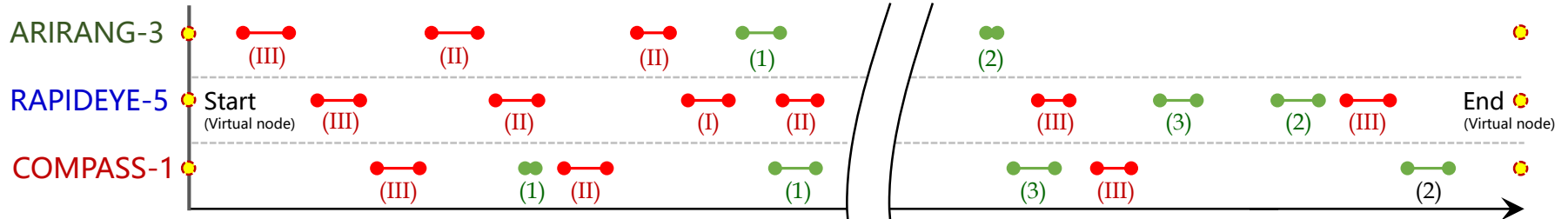


## 실 험 결 과

- 임무/통신 데이터의 총량(약 3,663MB)을 최대화하는 최적 임무/통신 스케줄 경로 도출
- 인공위성별 메모리 용량을 고려한 임무와 통신 스케줄링
  - ※ 임무 후 데이터 저장량 증가 시, 통신을 통해 지구로 데이터 전송(데이터 저장량 감소)
- 1일차末 데이터 저장량 : ARIRANG-3(476MB), RAPIDEYE-5(578MB), COMPASS-1(328MB)

# 수 치 실 험 [2일차]

인덱스	임무1 (1)	임무2 (2)	임무3 (3)	통신1 (I)	통신2 (II)	통신3 (III)
지상국	KGS	SOUTH AFRICA	POKERFLAT	MASSDA	WALLOPS	GSOC



## 실 험 결 과

● 임무/통신 데이터 총량 : 3,463.3 MB

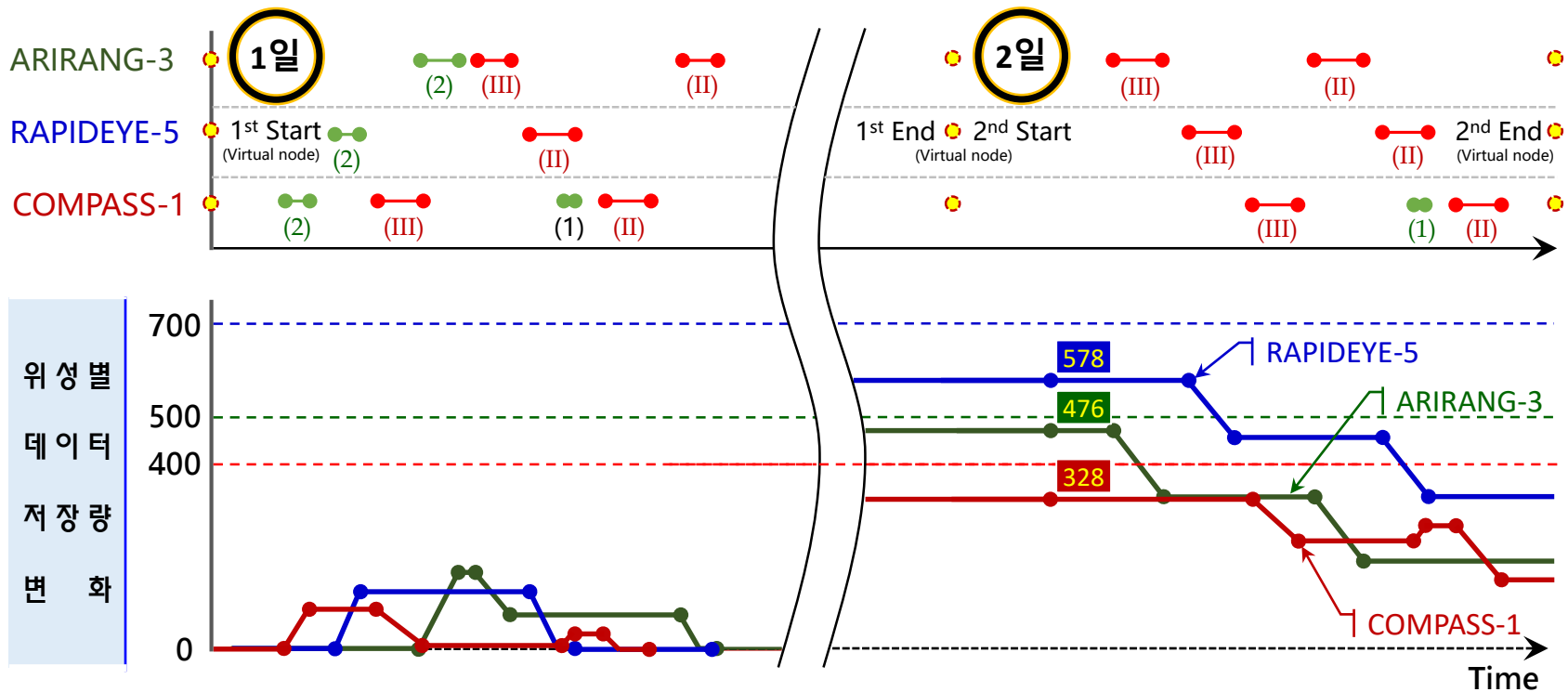
● 최적해 탐색 시간(CPLEX) : 26.2 초

구 분	ARIRANG-3	RAPIDEYE-5	COMPASS-1
임 무 (영상촬영)	500.96	783.76	456
통 신 (지구 전송)	482.14	783.76	425.68



# 수 치 실 험 비 교 [1일차/2일차]

인덱스	임무1 (1)	임무2 (2)	임무3 (3)	통신1 (I)	통신2 (II)	통신3 (III)
지상국	KGS	SOUTH AFRICA	POKERFLAT	MASSDA	WALLOPS	GSOC



## 실 험 결 과

- 2일차에는, 1일차 임무 데이터 저장량으로 인해 **인공위성들이 통신을 우선적으로 수행**
  - 인공위성별 초기 데이터 저장량이 있는 경우, 최적해 탐색 시간 증가
- ※ CPU time : 1일차 실험(4초), 2일차 실험(26초, 1일차 대비 6배 이상 소요)

# 결론 및 향후 연구방향

## ● 연구성과

□ 지구관측/정찰 위성군의 임무·통신 통합적 스케줄링 최적화를 위한 수리모형 제안

- 모델링 방법론 : 시·공간 네트워크 모형(Time-Space Network Model) 활용
- 목적함수 : 임무 및 통신 데이터량 최대화 ← 임무/통신 가능 Slot 을 최대한 활용 유도
- 인공위성의 임무·통신 환경과 성능제한에 대한 모델링
  - ① 임의의 인공위성과 복수 지상국, 한 지상국이 복수 위성과의 동시 통신 불가 (Visibility Conflict)
  - ② 임의의 인공위성이 복수 임무 또는 임무와 통신 동시 수행 불가
  - ③ 메모리 용량(인공위성 설계 요소)를 고려한 임무·통신 스케줄링 → 위성설계 시 활용 가능

## ● 향후 연구방향

□ 인공위성 운용 목적(상업용, 군사용, 과학기술 등)을 고려하여 다양한 목적함수 개발/적용

□ 대형 위성군 임무/통신 스케줄링을 위해 효율적인 해법(메타 휴리스틱 등) 연구 필요

※ 2일차의 최적해 탐색 시간이 1일차 대비 6배 이상 소요 → 대형 위성군에 적용 시, 계산시간 과다 소요 예상

# 참 고 문 헌

- [1] Li, H. J., Lu, Y., Dong, F. H., & Liu, R. (2012). Communications satellite multi-satellite multi-task scheduling. *Procedia Engineering*, 29, 3143-3148.
- [2] Lee, C. H., & Cheung, K. M. (2012, March). Mixed integer programming & heuristic scheduling for space communication networks. In *Aerospace Conference, 2012 IEEE* (pp. 1-10). IEEE.
- [3] Xhafa, F., Herrero, X., Barolli, A., Barolli, L., & Takizawa, M. (2013). Evaluation of struggle strategy in Genetic Algorithms for ground stations scheduling problem. *Journal of computer and system sciences*, 79(7), 1086-1100.
- [4] Spangelo, S., Cutler, J., Gilson, K., & Cohn, A. (2015). Optimization-based scheduling for the single-satellite, multi-ground station communication problem. *Computers & Operations Research*, 57, 1-16.
- [5] Salman, A. A., Ahmad, I., & Omran, M. G. (2015). A metaheuristic algorithm to solve satellite broadcast scheduling problem. *Information Sciences*, 322, 72-91.
- [6] Lee, J., Kim, H., Chung, H., & Ko, K. (2016). Genetic algorithm-based scheduling for ground support of multiple satellites and antennae considering operation modes. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 17(1), 89-100.
- [7] Luo, K., Wang, H., Li, Y., & Li, Q. (2017). High-performance technique for satellite range scheduling. *Computers & Operations Research*, 85, 12-21.
- [8] Jeong, E., & Kim, H. (2018). A Mathematical Model for Optimal Communication Scheduling between Multiple Satellites and Multiple Ground Stations. *산업경영시스템학회지*, 41(1), 39-49.
- [9] Wang, P., Reinelt, G., Gao, P., & Tan, Y. (2011). A model, a heuristic and a decision support system to solve the scheduling problem of an earth observing satellite constellation. *Computers & Industrial Engineering*, 61(2), 322-335.
- [10] Sarkheyli, A., Bagheri, A., Ghorbani-Vaghei, B., & Askari-Moghadam, R. (2013). Using an effective tabu search in interactive resources scheduling problem for LEO satellites missions. *Aerospace Science and Technology*, 29(1), 287-295.
- [11] Wu, G., Liu, J., Ma, M., & Qiu, D. (2013). A two-phase scheduling method with the consideration of task clustering for earth observing satellites. *Computers & Operations Research*, 40(7), 1884-1894.
- [12] Xiaolu, L., Baocun, B., Yingwu, C., & Feng, Y. (2014). Multi satellites scheduling algorithm based on task merging mechanism. *Applied Mathematics and Computation*, 230, 687-700.
- [13] Kim, H., & Chang, Y. K. (2015). Mission scheduling optimization of SAR satellite constellation for minimizing system response time. *Aerospace Science and Technology*, 40, 17-32.
- [14] Wang, J., Zhu, X., Yang, L. T., Zhu, J., & Ma, M. (2015). Towards dynamic real-time scheduling for multiple earth observation satellites. *Journal of Computer and System Sciences*, 81(1), 110-124.
- [15] Xu, R., Chen, H., Liang, X., & Wang, H. (2016). Priority-based constructive algorithms for scheduling agile earth observation satellites with total priority maximization. *Expert Systems with Applications*, 51, 195-206.
- [16] Zheng, Z., Guo, J., & Gill, E. (2017). Swarm satellite mission scheduling & planning using Hybrid Dynamic Mutation Genetic Algorithm. *Acta Astronautica*, 137, 243-253.
- [17] Chu, X., Chen, Y., & Tan, Y. (2017). An anytime branch and bound algorithm for agile earth observation satellite onboard scheduling. *Advances in Space Research*, 60(9), 2077-2090.