

## 밀집리더환경에서 RFID 리더를 위한 채널 할당

손석원\*

# Channel Assignment for RFID Readers in Dense Reader Environments

Surgwon Sohn\*

### 요 약

RFID 시스템에서 리더간 간섭은 일정한 서비스 영역에서 제한된 주파수를 사용하기 때문에 발생하며 수동형 태그의 가독율을 떨어뜨리는 주요 원인이 된다. 그러므로 제한된 주파수 자원 환경에서 가독율을 최대화하려면 리더간 주파수 간섭을 최소화시켜야 한다. 본 논문에서는 RFID 리더간 주파수 간섭 최소화 문제를 FDM/TDM 혼합 방식의 제약만족문제로 모델링하고 기존의 백트래킹 탐색 알고리즘을 적용하여 각각의 리더에게 최적의 채널을 할당한다. 제약 만족 문제의 해를 구하기 위해서 백트래킹을 이용한 깊이우선탐색을 실행하는데 이 때 탐색되는 노드의 순서를 효과적으로 배열하는 변수 순서화 방법이 중요하다. 본 논문의 실험에서 적용된 변수 순서화 알고리즘들은 그래프 채색에 효과적인 것으로 알려져 있다. 제한한 제약만족문제 모델의 성능을 입증하기 위하여 수동형 UHF RFID 시스템 환경에서 시뮬레이션하여 간섭조건을 만족하면서 각각의 리더에게 최적의 채널을 할당한다.

▶ Keywords : 밀집 리더 환경, 채널 할당 알고리즘, 그래프 채색, 제약 만족 문제, 백트래킹 탐색

### Abstract

Reader-to-reader interference in RFID system is occurred due to the use of limited number of frequencies, and this is the main cause of read rate reduction in the passive RFID tags. Therefore, in order to maximize the read rate under the circumstances of limited frequency resources, it is necessary to minimize the frequency interference among RFID readers. This paper presents a hybrid FDM/TDM constraint satisfaction problem models for frequency interference minimization problems of the RFID readers, and assigns optimal channels to each readers using conventional backtracking search algorithms. A depth first search based on backtracking are accomplished to

• 제1저자 : 손석원

• 투고일 : 2012. 8. 7, 심사일 : 2013. 1. 22, 게재확정일 : 2013. 2. 4.

\* 호서대학교 벤처전문대학원(Graduate School of Venture, Hoseo University)

※ 이 논문은 2011년도 호서대학교의 재원으로 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구임(2011-0046)

find solutions of constraint satisfaction problems. At this moment, a variable ordering algorithm is very important to find a solution quickly. Variable ordering algorithms applied in the experiment are known as efficient in the graph coloring. To justify the performance of the proposed constraint satisfaction problem model, optimal channels for each readers in the passive UHF RFID system are allocated by using computer simulation satisfying various interference constraints.

▶ Keywords : Dense Reader Environment, Channel Assignment Algorithm, Graph Coloring, Constraint Satisfaction Problem, Backtracking Search

## I. 서 론

유호히 Gen2라고 불리는 EPCglobal Class1 Generation2 무선 인터페이스 표준은 수동형 태그(Tag)를 사용하는 UHF RFID 시스템에서 사용된다. 주파수 분할 다중(Frequency Division Multiplexing)을 사용하는 RFID 네트워크에서 사용 채널 수보다 많은 리더가 있을 때 밀집 리더 모드(Dense Reader Mode)라 하고 이 때 리더 사이에 전파간섭이 발생한다[1]. 이것을 리더간 간섭(Reader-to-Reader Interference)이라 하고 리더가 태그 정보를 읽지 못하게 되는 주요한 이유이다. 밀집 리더 환경에서는 Reader-to-Tag 즉 forward link의 간섭 거리(Interference Range)가 Tag-to-Reader의 거리 즉, backward link의 리드 거리(Read Range)보다 훨씬 크므로 서비스 영역에서 같은 주파수의 중복 사용은 바람직하지 않다[2]. 예를 들어 그림 1에서 리더 R1과 리더 R2가 같은 채널을 사용한다면 R2의 신호가 R1에까지 간섭을 주므로 R1은 태그 T1의 신호를 듣지 못하게 된다. 이 문제를 해결하기 위해서 R1과 R2의 사용 주파수를 다르게 한다. 그러므로 RFID 서비스 영역에서 채널수보다 많은 리더가 있는 환경에서는 주파수 확산(Spread Spectrum) 변조방식과 주파수 호핑(Frequency Hopping) 방법을 혼용하는 것이 유리하다[3].

리더의 간섭을 최소화시키기 위하여 기존 연구들은 주파수 분할 다중화(Frequency Division Multiplexing) 또는 시분할 다중화(Time Division Multiplexing) 방법을 사용한다. 최근 연구에서는 이 둘을 혼합한 방법이 우수함을 보인다[4,5]. 리더간 간섭은 리더 충돌 문제(Reader Collision Problem)를 야기하며 이것은 기본적으로 채널 할당 문제(Channel Assignment Problem)와 같다.

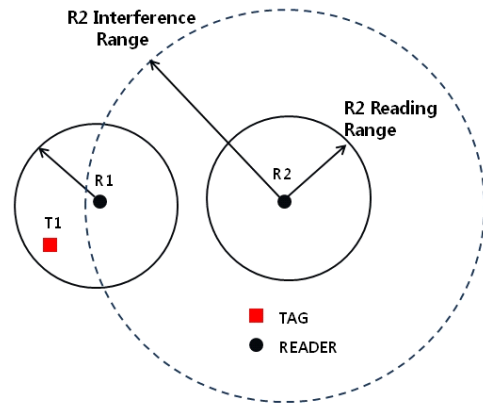


그림 1. 리더간 간섭  
Fig. 1. Reader-to-Reader Interference

1980년에 Hale은 채널 할당 문제는 단순 그래프 채색(Graph Coloring) 문제로 모델링되어 해결될 수 있다는 것을 밝혔다.[6] 이외에도 많은 연구자들은 간섭거리 이내에서 같은 채널을 사용할 수 없다는 동일 채널 제약만 존재한다면 채널 할당 문제는 그래프 채색문제가 된다는 것을 발표하였다. 그러나 실제 채널할당 문제는 동일 채널 제약 조건 외에도 다른 제약조건 등이 존재하기 때문에 순수 그래프 채색문제는 아니지만 유사하게 모델링하여 문제를 풀 수 있다.

본 논문은 일정한 서비스 영역에서 RFID 리더간 간섭 조건들을 만족하면서 주파수와 타임 슬롯을 각각의 리더에게 할당하는 채널 할당 모델링과 구현에 관한 것이다. 즉, FDM과 TDM을 혼합한 간섭모델을 제안하고 이 문제를 다시 제약 만족 문제로 변환하여 해를 구하는 것이다. 이 때 기존의 그래프 채색문제에 효과적인 백트래킹에 기반을 둔 깊이 우선 탐색 알고리즘을 적용한다. II장에서는 RFID 리더의 FDM/TDM 혼합 간섭 모델을 제시하고 이것을 그래프 채색

문제로 변환한 모델링에 대하여 기술한다. III장에서는 이 그래프 채색문제를 제약 만족 문제로 모델링하고 그에 대한 적절한 탐색 알고리즘을 적용한다. IV장은 국내의 UHF 대역의 RFID 시스템에 할당된 주파수 및 리더의 출력전력 등을 고려하여 시뮬레이션 환경을 만든 다음 제약 프로그래밍 기법을 사용하여 각각의 리더에게 최적의 채널을 할당한다.

## II. RFID 리더의 FDM/TDM 혼합 간섭 모델

RFID 시스템에서 리더간의 전파간섭을 최소화하여 전체 시스템의 가독률(Read Rate)을 높이는 것이 리더 간섭 최소화 문제인데 이것은 많이 연구되어지는 리드 거리에서의 다수 태그(Tag)간 충돌문제(7)와는 다른 것이다.

RFID 리더 간섭 최소화 문제는 간섭 제약 조건들을 만족하는 채널 할당 문제이므로 그래프 채색문제로 모델링할 수 있다(8). 그래프 이론에서 정점(Vertex)의 집합을  $V$ 라 하고 임의의 두 노드  $v_i, v_j \in V$ 를 연결하는 선(Edge)의 집합을  $E$ 로 표현한다. 이 때 그래프  $G = (V, E)$ 와 같이 유한한 두 집합의 쌍(Pair)으로 표현된다. 정점  $v_i$ 와  $v_j$ 가 선으로 연결되어 있을 때 즉, 선  $(v_i, v_j) \in E$ 일 때 두 정점  $v_i, v_j$ 는 인접(Adjacent)하다고 말한다. 그리고 그래프의 채색이라 함은 두 이웃하는 점이 같은 색을 갖지 않도록 색을 할당하는 문제로 정의한다.

RFID 리더기는 특정 범위의 지역 안에 있는 다수 개의 태그 신호를 수신하는데 이 수신 거리를 리드 거리라 하고 리드 거리를 반지름으로 하는 원의 영역을 리드 영역이라 한다. 리더의 간섭을 모델링할 때 이 범위의 영역을 셀(Cell)이라고 표현한다. 이 때 정점의 집합  $V$ 는 RFID 리더기로 표현한다. 즉,  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 은 리더기의 집합을 나타낸다. 이 때 집합  $E$ 는 주파수 간섭으로 발생하는 리더기 간의 충돌로 설명할 수 있다. 이것은 한 점에서 두 개 이상의 다중 선이 없는 단순 그래프(Simple Graph)로 가정한다면 주파수 분할다중을 사용하는 RFID에는 적용 가능한 모델이 된다. 그러나 시분할 다중 방식이 첨가된 주파수와 시분할 방식이 혼합된 FDM/TDM 혼합 모델에서는 단순 그래프 모델은 적용이 어렵다. 주파수 및 시분할 혼합방식은 주파수 채널과 타임 슬롯(Time Slot)을 동시에 고려하여야 하므로 점에서의 색채를 정할 때 제약조건으로 채널뿐만 아니라 타임 슬롯도 동시에 생각하여야 한다. 따라서 두 개 이상의 선이 한 점에 연

결되는 다중그래프(Multigraph)를 이용하여 모델링하여야 한다. 다중 그래프는 점의 집합  $V$ , 선의 집합  $E$ , 그리고 함수  $f$ 로 이루어진다. 즉,  $G = (V, E, f)$ 로 표시되며 이 때 함수  $f$ 는

$f: E \rightarrow \{\{i, j\}: i, j \in V, \text{ and } i \neq j\}$ 로 표현한다. 만약 선  $e_1, e_2 \in E$ 이고  $f(e_1) = f(e_2)$ 이면  $e_1$ 과  $e_2$ 는

다중선(Multiple Edge)이라고 말한다. 즉, FDM/TDM 혼합형 RFID 시스템에서는 자신의 타임 슬롯 안에서 할당된 주파수 채널을 사용하여 태그를 인식한다. 따라서 한 셀에서 리더는 주파수 채널뿐만 아니라 타임 슬롯에도 제약이 없어야 한다. 이 뿐만 아니라 전파의 간섭현상에서 기인하는 다양한 제약 조건들이 발생하는데 이것은 RFID 리더간 간섭문제를 단순한 그래프 채색문제보다 더 복잡하게 만든다.

$i, j \in V, i \neq j$ 일 때  $f_{ik}$ 는 타임 슬롯  $k$ 에서 리더기  $i$ 에 할당된 채널을 의미하며  $V$ 는 리더기의 집합을 나타낸다.  $d_{ij}$ 는 리더  $i$ 와 리더  $j$ 사이의 거리를 나타내며  $d_j$ 는 간섭 거리를 나타내고  $d_R$ 은 리드 거리를 나타낸다. 다음에는 RFID 리더의 FDM/TDM 혼합 간섭 모델에 사용되는 제약 조건에 대하여 기술한다.

1) 동일 사이트 제약(Co-Site Constraint: CSC) : 리드 영역 안에 있는 두 개 이상의 리더기는 동일 타임 슬롯에서 동일 채널을 사용할 수 없다. 즉, 동일 리드 영역에 있는 모든 리더기에는 간섭을 최소화하기 위하여 서로 다른 타임 슬롯이 할당되며 또한 동일 채널이 할당되지 않는다.

$$f_{ik} \neq f_{jl} \quad (\text{if } d_{ij} \leq d_R, i \neq j \text{ and } k \neq l)$$

2) 인접 슬롯 제약(Adjacent Slot Constraint: ASC) : 리더기의 리드 영역 안에서 이웃하는 타임 슬롯에서는 이웃 채널을 사용하지 않는다. 1)에서 기술한 CSC는 ASC의 특수한 경우로 생각할 수 있다.

$$|f_{ik} - f_{j(k+1)}| \geq 2 \quad (\text{if } d_{ij} \leq d_R, i \neq j)$$

3) 동일 채널 제약(Co-Channel Constraint: CCC) : 두 리더기는 리드 간섭거리 이내에 있으면서 동일 타임 슬롯에서 동일 채널을 사용해서는 안 된다.

$$f_{ik} \neq f_{jk} \quad (\text{if } d_{ij} \leq d_I)$$

4) 인접 채널 제약(Adjacent Channel Constraint: ACC) : 이웃한 리드 영역 즉, 이웃한 셀에 있는 두 리더기는 동일 타입 슬롯에서 인접 채널을 사용할 수 없다. 흔히 간섭의 영향을 최소화하기 위하여 이웃한 셀의 범위를 리드 영역의 정수배만큼 확장한다. 인접 채널은 보통 1-4 채널만큼 떨어진 채널을 말한다. 즉, 거리가 가까운 곳의 두 리더기는 4채널만큼 채널 이격이 있어야 하고 두 리더 사이가 먼 경우는 1채널만큼 이격이 있어도 된다. 따라서 이 제약조건은 다음과 같은 식으로 표현한다.

$$|f_{ik} - f_{jk}| \geq c_{ij} \text{ (if } d_{ij} \leq d_I \text{)}$$

$c_{ij}$ 는  $n$  정점의 제약 그래프에서  $n \times n$  행렬로 나타나어지며 각각의 리더기 쌍  $(i, j)$ 에 대해서  $i \neq j$ 이다. 이 행렬은 리더간 필요한 최소 주파수 이격을 나타낸다. 이것은 동일 채널 제약조건에 채널 제약을 더 가하는 것으로 해석할 수 있다. 즉, CCC는 이웃한 셀의 범위를 리더간 간섭거리로 확대한 경우의 ACC로 생각할 수 있다. 따라서 CCC는 ACC의 특수한 경우로 생각할 수 있다.

### III. 제약만족문제 모델과 알고리즘

RFID의 밀집리더 환경에서의 리더간 간섭문제는 기본적으로 주파수와 타임 슬롯을 리더기에 할당하는 문제로서 그래프 채색문제인 k-coloring 문제와 매우 유사하게 모델링할 수 있다. 순수 그래프 채색문제와 다른 점은 색을 정할 때 다양한 제약조건들이 존재한다는 점이다. 따라서 이것은 제약만족 문제(Constraint Satisfaction Problem)로 모델링하고 문제를 푸는 것이 효율적이다[9-11]. 일반적인 제약만족 문제(CSP)는 정의 1과 같이 변수의 집합, 변수에 할당되는 값들의 집합인 도메인 (Domain), 그리고 변수들 사이에 동시에 할당되는 값을 제한하는 제약조건 (Constraint) 들로 구성되며[12] 문제의 해를 구하는 것은 변수에 제약조건을 만족하는 값을 할당하는 것이다.

**정의 1.** CSP 문제는  $\langle V, D, C \rangle$  트리플(Triple)이다. 이 때

- $V = \{V_1, \dots, V_n\}$ 는 변수들의 유한집합이고
- $D = \{D_1, \dots, D_n\}$ 는  $V$ 에 할당 가능한 값들의 유한집합이다. 여기서  $D_i$ 는 변수  $V_i$ 의 도메인이다.

- $C = \{C_1, \dots, C_k\}$ 는 제약조건들의 유한집합이다.

CSP 문제는 일반적으로 백트래킹(Backtracking) 탐색이나 지역탐색(Local Search)을 이용하여 문제를 풀 수 있다[13]. 백트래킹은 깊이 우선 탐색(Depth First Search)에 바탕을 두고 나무(Tree)를 탐색하는 것이며 지역탐색은 타부 탐색(Tabu Search) 또는 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing)같은 것을 말한다. 본 논문에서는 백트래킹 탐색에 국한하여 논한다. 백트래킹 나무 탐색에 있어서 미래에 탐색할 노드를 결정하는 것은 해를 구하는데 있어서 매우 중요하다. 탐색 노드를 결정하는 방법을 변수 순서화라 하며 기본적으로 변수의 도메인(Domain)과 차수(Degree)를 기준으로 탐색 순서를 결정한다[14].

그래프 이론에서 정점은 변수로 해석되며 이 변수에 할당될 수 있는 색의 수가 많은 경우 변수의 도메인이 크다고 말한다. 또한 정점의 차수는 그 정점에 연결된 선의 수를 의미한다. 따라서 차수가 크다는 것은 그만큼 정점에 할당되는 색을 취할 때 제약조건이 많다는 것을 의미한다. 변수 순서화 방법에는 전통적으로 변수의 도메인이 제일 작은 정점을 선택하여 색을 할당하는 동적 변수 순서화[15,16] 방법과 변수의 차수가 제일 큰 정점을 선택하여 색칠하는 정적 변수 순서화 방법[17]으로 크게 나뉜다. 변수의 도메인은 탐색 과정에 있어서 그 크기가 변하기 때문에 동적이라고 하고 변수의 차수는 탐색 처음부터 끝까지 고정되어 있는 것이다.

지금까지 그래프 채색에 가장 효과적인 방법은 Brelaz[18]가 제안한 포화도(Saturation Degree) 알고리즘인 D<sub>satur</sub>로서 이것은 동적 변수 순서화 방법에 해당된다. 즉, 이 문제를 변수의 도메인이 탐색 과정에 따라 변화하는 동적 문제인 D-type[8]으로 해석하고 그에 따른 알고리즘을 적용한 것이다. 이것은 주파수 값들의 도메인이 가장 작은 변수 즉, 주파수 채널의 도메인이 작은 리더를 찾아서 주파수를 할당한 다음 할당된 변수를 제거하고 계속 도메인이 작은 변수를 찾아 주파수를 할당한다. 만약에 도메인 크기가 같은 변수가 나타나면 정점의 연결도 또는 차수(Connectivity or Degree)가 큰 변수를 선택한다. 연결도는 Freuder가 제안한 것으로서 탐색하기 전에 이미 변수의 순서가 정해지는 정적 변수 순서화 방법(S-type)이다[8]. 즉, D<sub>satur</sub> 알고리즘에 있어서 연결도는 변수를 선택할 때 도메인 크기가 같을 경우 차선택으로서 변수 선택의 판단 근거가 되는 것이다.

주파수 할당 문제 같은 그래프 채색문제를 문제분류규칙[19]에 적용하면 탐색 가치의 순서에 따라 도메인의 크기와 연결도가 크게 변화하기 때문에 이 문제를 단순한 동적 변수

문제인 D-type으로 보지 않고 동적문제와 정적 문제가 혼합된 DS-type으로 간주하는 것이 효율적인 알고리즘을 구하는데 유리하다. 따라서 변수 순서화 알고리즘도 도메인의 변화뿐만 아니라 정점들의 연결도를 동시에 고려하는 혼합(Hybrid) 알고리즘이 더 우수하다는 것을 예측할 수 있다. 즉 도메인의 변화에 주목하는 동적 변수 순서화법과 연결인접도의 변화에 주목하는 정적 변수 순서화법을 동시에 고려하는  $\alpha dom - deg$  [19],  $dom/deg$  [20],  $dom/\omega deg$  [21] 같은 알고리즘이 우수한 성능을 나타낼 수 있다는 것을 예측할 수 있다. 여기서  $dom$ 은 변수들이 가질 수 있는 값들의 집합이고  $deg$ 은 변수들의 연결도를 뜻한다. 즉, 가지마다 크기가 달라지는 동적 요소인  $dom$ 과 정적요소인  $deg$ 을 복합적으로 사용하여 변수 순서화를 진행한다.  $\alpha$ 와  $\omega$ 는 도메인과 연결도의 크기가 매우 다를 경우, 변수 선택에 있어서 한 쪽으로 치우치는 것을 방지하기 위한 것으로 실험적으로 얻어진 가중치이다.

백트래킹 탐색에 있어서 변수 순서화와 이외에 또 다른 중요한 것은 제약 전파(Constraint Propagation)이다[13]. 이것은 탐색트리에 적용되어서 가능 해에 나타나지 않을 도메인의 값들을 미리 제거하는 것이다. 변수  $v_1$ 에 값이 할당되었을 때 값이 할당되지 않은 변수  $v_2$ 를 조사하여 이 변수에 할당될 수 없는 값을  $v_2$ 의 도메인으로부터 삭제한다. 따라서 제약전파는 탐색 실패를 줄이는 동시에 백트래킹이 빨리 발생하게 만든다. 본 논문은 그래프 채색에 효과적인 변수 순서화 알고리즘과 제약 전파를 이용하여 탐색공간을 깊이 우선 탐색으로 실시하여 CSP 문제의 해를 구한다. 다음 절치는 변수 즉 리더기에 채널을 할당하는 것을 설명한다.

단계 1: 모든 변수의 도메인( $dom$ )과 차수( $deg$ )를 조사하여 알고리즘의 수식에 대입하여 얻어진 값을 기준으로 변수들을 오름차순으로 정렬하여 스택에 넣는다.

단계 2: 지금까지 사용이 많이 된 순서대로 주파수 채널을 정렬하여 스택에 넣는다.

단계 3: 채널 스택에서 값을 꺼내어 변수 스택에서 값을 꺼낸 변수에 할당한다. 만약 제약조건에 위배되면 할당을 취소하고 표시한다. 제약조건은 크게 두 가지인데 인접 슬롯 제약과 인접 채널 제약이다. 동일 사이트 제약은 인접 슬롯 제약의 특수한 경우이고 동일 채널 제약은 인접 채널 제약의 특수한 경우로 해석하여 프로그램 한다.

단계 4: 모든 변수에 채널이 할당되었다면 끝내고 그렇지 않으면 단계 3으로 점프한다.

### IV. 실험

2008년 12월 29일에 개정된 무선설비규칙에 의해 국내에서 RFID로 사용되는 주파수 대역은 917-923.5MHz이다. 채널 대역은 200KHz이며 총 32개의 채널을 사용할 수 있다. 안테나에서 복사되는 전력이 200mW 이하로 사용할 수 있는 채널수는 총 19개로 한정되어 있는데 이것을 집합으로 표현하면 {2,5,8,11,13,17,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32}이다. 실험을 위해 편의상 리드 거리를 반지름으로 하는 원에 외접하는 정사각형을 리드 영역 또는 셀이라고 정의한다. 전체 서비스 영역은 100m x 100m로서 한 변이 10m인 셀이 서비스 영역에 총 100개 존재한다. 하나의 셀 안에는 리더기가 설치되지 않거나 또는 설치되거나 둘 중 하나이다. 리더기가 위치하는 셀은 임의로 선택되지만 시스템에서 지원가능한 채널수는 19개이고 동일 채널 제약으로 인해서 셀 개수는 총 19개만 선택한다. 리더기가 사용할 수 있는 타임슬롯 개수는 5개이다.

리더가 태그를 인식할 수 있는 리드 거리는 5m이고 리더간 채널 간섭거리는 서비스 영역 전체로 가정하므로 약 141m가 된다. 안테나에서의 출력전력은 20dBm(100mW)이하로 하고 LBT(Listen Before Talk)를 사용하지 않는다고 가정한다. 이상과 같은 시뮬레이션 파라미터는 표 1과 같다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터  
Table 1.Simulation Parameters

파라미터(Parameter)	값
서비스 영역	100m x 100m
셀 크기	10m x 10m
서비스영역에서 전체 셀	100개
리더기가 설치된 셀	19개
전체 리더기 개수	95개
주파수 대역	917-923.5MHz
채널 대역폭	200KHz
사용가능 채널 수	19개
사용 타임 슬롯 수	5개
리더의 전송출력	100mW(20dBm)
리드 거리	5m
간섭 거리	141m

알고리즘의 구현은 제약 프로그래밍에 적합한 ILOG OPL Studio 3.51을 사용하였다. 시뮬레이션에서 변수 순서화 알고리즘은  $dom$ ,  $D_{satur}$ ,  $dom/deg$ ,  $dom/\omega deg$  및  $\alpha dom - deg$  로서 다섯 개를 사용하여 채널할당을 시도 하였으나  $dom$  및  $dom/deg$  알고리즘은 30분 이상 계

산하여도 결과를 얻지 못하여서 알고리즘 비교표에서는 제외하였다. dom 알고리즘은 그래프 채색문제에 효율적이지 못하여 해를 구하지 못하는 것이고 dom/deg 알고리즘은 정교하지 못한 것으로 해를 단시간에 구할 수 없다. 표2는 이 두 알고리즘을 제외한 나머지 세 개의 알고리즘의 성능을 탐색 노드(Choice Point)와 계산 시간으로 성능을 비교하였다. 탐색노드수와 시간은 서로 다른 5개의 경우를 실험하여 평균한 값이다. 탐색 노드수는 적을수록 백트래킹이 적어서 효율적인 변수 순서화 알고리즘으로 생각할 수 있다. 표 2에서와 같이 dom/ωdeg 와 αdom - deg 알고리즘이 비슷한 성능을 보였다.

표 2. 변수 순서화 알고리즘의 성능비교  
Table 2. Performance Comparison among Variable Ordering Algorithms

적용 알고리즘	탐색노드수 (Choice Points)	계산시간(sec.)
Dsatur	9,997	2.156
dom/ωdeg	5,316	1.394
αdom - deg	4,951	1.452

표 3은 αdom - deg 알고리즘을 이용하여 구한 문제의 해 중 하나로 세로축은 각각의 셀 번호를 나타내고 가로축은 리더기에 할당된 타임 슬롯을 나타낸다. 하나의 셀 안에는 5개의 리더기가 있으며 각각의 리더기는 정해진 타임 슬롯을 가지고 있다. 따라서 표 3에서 셀 행과 슬롯 열이 만나는 곳에 있는 숫자는 각각의 리더기에 할당된 채널을 의미한다.

표 3. RFID 리더기에 할당된 채널번호  
Table 3. Channel Numbers Assigned to the RFID Readers

슬롯 셀	S1	S2	S3	S4	S5
C2	27	23	21	29	32
C6	20	29	17	31	22
C10	29	32	23	25	17
C29	22	26	28	14	24
C31	23	30	26	5	28
C36	25	2	11	21	8
C43	30	11	2	24	5
C49	32	20	25	30	2
C54	2	5	8	11	14
C58	28	14	20	26	31
C61	26	24	30	28	21
C66	14	8	27	17	25
C70	24	17	32	22	27

슬롯 셀	S1	S2	S3	S4	S5
C73	11	28	22	20	30
C77	8	22	14	2	11
C89	5	27	29	32	23
C92	31	21	5	23	26
C95	17	25	31	27	20
C98	21	31	24	8	29

셀 C2의 슬롯 S1에는 채널 27번이 할당되어 있고 (C2, S1, 27)으로 표현한다. 타임 슬롯이 S1일 때 셀 C29번과 C31번에 할당된 채널이 22번과 23번으로 인접한 이유는 두 리더기의 거리가 충분히 떨어져서 인접한 셀의 범위를 넘어서기 때문이며 이것은 인접 채널 제약 조건을 만족하는 것이다.

### V. 결론

본 논문에서 RFID 리더간 주파수 간섭 조건을 만족하면서 밀집리더환경에서 주파수 분할다중 방식(FDM)과 시분할다중 방식(TDM)을 혼합하여 리더에게 최적의 채널을 할당하였다. 현재 국내에서 사용하는 RFID 시스템의 무선설비규칙에 따르는 조건을 가지고 실험하였다. 이것을 수행하기 위해 그래프 채색문제와 제약 만족 문제로 모델링하고 제약 프로그래밍 기법으로 시뮬레이션을 행하였다. 제약 만족 문제를 풀기 위해서 백트래킹을 이용한 깊이우선탐색을 실행하는데 여러 가지 변수 순서화 방법을 적용하여 채널을 할당하였는데 dom/ωdeg 와 αdom - deg 변수 순서화 방법이 가장 우수한 성능을 보였다.

본 방법은 서비스 영역이 고정된 리더에 국한하기 때문에 이동형 리더에게는 적용할 수 없다. 따라서 향후 연구에서는 이동형 리더도 적용할 수 있는 채널할당 방법과 중앙처리식이 아닌 분산처리 방식의 알고리즘에 관한 연구가 필요하다.

### 참고문헌

[1] D.S. Zhou, Z. Luo, E. Wong, C.J. Tan, and J. Luo, "Interconnected RFID Reader Collision Model and its Application in Reader Anti-collision," 2007 IEEE International Conference on RFID, pp.212-219, 2007.  
[2] D.Y. Kim, J.G. Yook, H.G. Yoon and B.J. Jang,

- "Interference Analysis of UHF RFID Systems," Progress in Electromagnetics Research B, Vol.4, pp.115-126, 2008.
- [3] M. Buettner and D. Wetherall, "An Empirical Study of UHF RFID Performance," *MobiCom'08*, pp. 14-18, Sep. 2008.
- [4] M.V. Bueno-Delgado, J. Vales-Alonso, C. Angerer and M. Rupp, "A Comparative Study of RFID Scheduler in Dense Reader Environments," Proc. of IEEE ICIT 2010, pp. 1353-1358, Mar. 2010.
- [5] H. Seo and C. Lee, "A New GA-based Resource Allocation Scheme for a Reader-to-reader Interference Problem in RFID Systems," Proc. of IEEE ICC 2010, pp. 1-5, May 2010.
- [6] W.K. Hale, "Frequency Assignment: Theory and Applications," Proceedings of the IEEE, vol. 68, pp. 1497-1514, 1980.
- [7] Y.H. Cho and J.G. Kook, "Energy Effective Tag Anti-collision Protocol for Mobile RFID System," Journal of The Korea Society of Computer and Information, Vol. 17, No. 2, pp.207-214, Feb. 2012.
- [8] S. Sohn, "A Backtracking Search Framework for Constraint Satisfaction Optimization Problems," The KIPS Transactions:Part A, Vol. 18A, No. 3, pp. 115-122, Jun. 2011.
- [9] M. Carlsson, M. Grindal, "Automatic Frequency Assignment for Cellular Telephone Using Constraint Satisfaction Techniques," Proceedings of the Tenth International Conference on Logic Programming, pp. 647-665, 1993.
- [10] J.P. Walsher, "Feasible Cellular Frequency Assignment Using Constraint Programming Abstractions," Proceedings of the Workshop on Constraint Programming Applications, 1996.
- [11] M. Yokoo, K. Hirayama, "Frequency Assignment for Cellular Mobile Systems Using Constraint Satisfaction Techniques," IEEE Int'l Proceedings of Vehicular Technology Conferences, 2000.
- [12] E. Tsang, Ed., "Foundations of Constraint Satisfaction," Academic Press, 1993.
- [13] F. Rossi, P. van Beek, and T. Walsh (Eds.), "Handbook of Constraint Programming," Elsevier, 2006.
- [14] R.J. Wallace, "Determining the principles underlying performance variation in csp heuristics," International Journal on Artificial Intelligence Tools, Vol. 17 Issue 5, pp.857-880, Oct. 2008,
- [15] F. Bacchus and P. van Run, "Dynamic Variable Ordering in CSPs," CP '95 Proceedings of the First International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming, pp. 258 - 275, 1995.
- [16] I. P. Gent, E. MacIntyre, P. Prosser, B. M. Smith, and T. Walsh, "An empirical study of dynamic variable ordering heuristics for the constraint satisfaction problem," in Principles and Practice of Constraint Programming, pp. 179 - 193, 1996.
- [17] E. C. Freuder, "A sufficient condition for backtrack-free search," Journal of ACM, vol. 29, no. 1, pp. 24 - 32, 1982.
- [18] D. Brelaz, New Methods to Color the Vertices of a Graph, Communication of the ACM 22(4), pp.251-256, 1979.
- [19] S. Sohn, "Variable Ordering Algorithms Using Problem Classifying Rule," Journal of The Korea Society of Computer and Information, Vol. 16, No. 4, Apr. 2011.
- [20] C. Bessi`ere and J.-C. R`egin, "MAC and combined heuristics: Two Reasons to Forsake FC (and CBJ?) on Hard Problems," Lecture Notes in Computer Science 1118, pp.61 - 75, 1996.
- [21] F. Boussemart, F. Hemery, C. Lecoutre, and L. Sais, "Boosting Systematic Search by Weighting Constraints," In Proceeding of the ECAI, pp.146 - 150, 2004.

## 저 자 소 개



손 석 원

1985: 인하대학교 전자공학과 공학사.

1987: 인하대학교 전자공학과 공학석사.

2007: 인하대학교

컴퓨터정보공학과 공학박사

현 재: 호서대학교 벤처전문대학원

부교수

관심분야: 무선센서네트워크,

이동통신, 제약만족최적화

Email : sohn@hoseo.edu