

MARCO · COMBINE 프로젝트의 조사 연구  
A Survey on the MARCO and COMBINE projects

오석문\*, 홍순홍\*\*

Oh, Seog-Moon, Hong, Soon-Heum

---

ABSTRACT

In this paper, we presents the results of the leading 2 European projects in the real-time train conflict dection and resolution field. One is MARCO(Multi-level Advanced Railways Conflicts Resolution and Operation Control) and the other is COMBINE(enhanced Control center for a Moving Block sigNaling systeEm) project. From the results of the survey, we derive the basic principles in order to use in the similar project of Korea Nation Railway.

---

1. 서 론

열차운행제어의 지능화 기술은 당일 열차 운행에서 예고없이 발생하는 각종 사건·사고로부터의 영향을 최소화하여 계획된 열차의 스케줄을 유지하는 기술이다. 이레 사태로부터의 기본스케줄에 대한 영향을 최소화하기 위해서는 열차 경합에 대한 사전 검지와 이에 대한 효율적인 해소 대책이 필요하다. 선진국에서는 새로운 트래픽 관리 시스템을 개발하는 과정에서 경합검지 및 해소에 관한 대책을 포함시키고 있는 추세이다. 특히 ADTrans사의 EBICOS TMS와 같은 제품은 이러한 부분의 개념을 상당부분 도입하고 있다<sup>[1]</sup>.

유럽의 경우 열차 경합의 검지 및 해소를 위해 많은 연구·개발을 수행하였다. 대표적으로, MARCO 프로젝트와 COMBINE 프로젝트는 유럽연합이 지원한 대규모의 연구·개발 프로젝트이다. MARCO 프로젝트에서는 유럽의 주요 간선에서 열차 운행에 따른 경합 검지 및 해소를 자동화 및 지능화하기 위한 기초연구와 시작품에 의한 현장 적용가능성을 검토한 프로젝트였다. 한편 COMBINE 프로젝트는 현재 유럽에서 추진하고 있는 대규모 프로젝트인 ERTMS에 따라 유럽의 철도 시스템이 변화할 경우, MARCO 프로젝트에 의해 제시되었던 주요 간선의 경합 검지 및 해소 방안을 재검토하여, 적용 방안을 제시하는 프로젝트이다. 이와 같은 유럽의 대규모 프로젝트들은 모두 본 사업이전의 사전 연구에 해당하며, 대부분 유럽철도의 연계 운용성(interoperability)이라는 큰 목표를 달성하기 위한 것이다<sup>[2]</sup>.

2개의 열차가 동시에 역에 도착하여 진로 경합이 예견될 때, 현재의 연동장치는 하나의 진로만 허용한다. 이렇게 먼저 도착하는 열차에 대해서만 배타적으로 진로를 허용하고, 다음 열차의 진로를 허용하지 않을 때(FCFS, First Come First Served Strategy), 이러한 절차는 열차의 안전은 보장하지만, 열차운행의 효율성은 현저히 저하될 가능성이 많다. 따라서, 향후 열차운행의

지능화 방향은 열차의 안전확보를 기본전제로 열차운행의 효율성을 최대화하고자 하는 것이어야 한다. MARCO 프로젝트와 같은 경합 검지 및 해소 시스템에서는 시스템이 전자연동장치를 제어하여 진로의 자동설정이 가능함을 가정한다. MARCO의 실험적인 연구에서는 당일 열차운행 중에 발생하는 전체 경합 중에서 95% 이상의 경합이 인간의 손을 거치지 않고 해결될 수 있음을 확인하였다.

본 논문에서는 열차 경합의 검지 및 해소에 관한 유럽의 대표적인 프로젝트인 MARCO · COMBINE 프로젝트의 조사결과를 제시하여 한국철도의 열차운행 지능화 분야에 기여하기 위한 것이다. 논문의 구성은 제2장에서 MARCO 프로젝트의 구성 및 주요내용, 제3장에서 COMBINE 프로젝트의 구성 및 주요내용을 제시한다. 마지막으로 제4장에서 결론을 제시한다.

## 2. MARCO 프로젝트 [3,4,5,6]

### 가. 구성

MARCO 프로젝트는 ABB Tecnomasio(Italy) 등 8개의 유럽지역 철도운영회사, 시스템 개발회사 및 대학 등이 컨소시엄을 구성하고, 유럽연합 DGXIII에서 연구비의 일부를 지원한 범 유럽적 프로젝트로 1996년부터 3년 동안 수행되었다. 프로젝트의 일반사항은 아래와 같다.

- 프로젝트 기간 : 1996. 1. 1 ~ 1999. 6. 30 (3년 6개월)
- 프로젝트 책임자 : Alessandro Mascis (ADtranz Italy).
- 참여기관 : ABB Tecnomasio(Italy), ADtranz Italy(IT), AEA Technology Rail (GB), ATM(IT), NMBS/SNCB(BE), University of Joensuu(FI), University of Hannover - IVE(DE), University of Genoa(IT).
- 프로젝트 산출물 : 사용자 요구사항, 제약조건 정의, 알고리즘 검토(description and assessment), HTA(High Traffic Area) 및 GAN(Global Area Network) 시뮬레이터, GAN 데모 프로그램 및 최적화 엔진 개발.

### 나. 개요

MARCO 프로젝트의 주요 목표는 다양한 종류의 컴퓨터 알고리즘을 검토하여, 당일 열차운행에서 무작위(random)로 발생하는 경합문제를 실시간으로 검지하고 해소할 수 있는 최적의 알고리즘을 찾아내는 것이다. 유럽 철도망의 구조가 전체적으로 유사하여 열차 경합 검지 및 해소 문제가 동일한 알고리즘에 의해 해결될 가능성이 높다. 따라서 서부 유럽의 많은 철도운영회사들이 열차 경합 해소 알고리즘의 공동개발에 동의하였으며, 일반 산업체 회사 및 대학들이 MARCO 프로젝트에 참여하여 컨소시엄 형태를 구성하였다. 이 프로젝트의 수행 과정에서 각 열차운영회사들은 분야별로 자신의 사용자 요구사항을 정의하고, 대학에서는 알고리즘을 개발하고 시험하였으며, 산업체 회사에서는 시뮬레이터를 개발하였다. 마지막으로 모든 분야별 책임자가 모여 알고리즘을 시험하고 검증하였다.

MARCO 프로젝트에서는 철도 네트워크에서 열차운행 관리 문제를 다음과 같이 4가지로 구분하여 고려하였다.

- LM(Line Management) : 단순노선에서의 열차운행 관리.
- HTA-M(High Traffic Area Management) : 집중운행 영역에서의 열차운행 관리.
- GAN-M(Global Area Network Management) : 전역 네트워크에서의 열차운행 관리.
- Metro : 대도시권 영역에서의 열차운행 관리.

Mazzarello와 Copello(2000)는 MARCO의 모형에 대해 간략히 정리하여 제시하였다. MARCO 프로젝트에서는 분지한계법(B&B : Branch and Bound), 분지절단법(B&C : Branch and Cut), 무작위 탐색법(random search), 제약만족기법(GENET), 지능형 탐색법(intelligent search), 분산 지능형 탐색법(distributed intelligent search), 시뮬레이티드 어닐링(simulated annealing), 유전자 알고리즘(genetic algorithm) 등의 다양한 해법절차를 검토하여, 가장 적합한 알고리즘을 선택하였다. MARCO 프로젝트에서는 HTA-M과 GAN-M 문제에 대해 분산 지능형 탐색 알고리즘이 적합하다고 결론을 내렸다. 분산 지능형 탐색 알고리즘에서는 전국의 네트워크를 여러 개의 경합해소를 위한 지역센터(CRC : Conflict Resolution Centers)로 나누고, 각 지역에서 발생하는 경합을 해당 CRC에서 해소하는 구조를 채택하였다.

하나의 CRC가 관할 지역에서 발생하는 경합을 해소하기 위해서, 각 열차별 동적 우선순위(dynamic priority)를 정의한다.

$$P_d(T_k) = A[P_s(T_k) + kf(\Delta_k) + \lambda_{\max} P_s(T_k)^q] + B \cdot P_d(\text{last CRC})$$

각 CRC에서 열차별 동적 우선순위를 결정하기 위해서는 다음과 같은 정적 데이터(static data)와 동적 데이터(dynamic data)가 필요하다.

- 정적 데이터 : 네트워크 구성에 관한 데이터.
- 동적 데이터 : 열차운행(traffic)에 의해 좌우되는 데이터.

앞의 식에서,

- $P_d(T_k)$  :  $T_k$  열차의 동적 우선순위.
- $P_s(T_k)$  :  $T_k$  열차의 정적 우선순위.
- $f(\cdot)$  : 지연 가중치 함수.
- $\Delta_k$  :  $T_k$  열차의 지연.
- $P_s(T_k)^q$  : 동일한 CRC 내에서,  $T_k$  이후  $q$  번째 열차의 정적 우선순위.
- $A, B, k, \lambda$  : 정규화 상수.

각 열차에 대해서 정의되는 변수들이다. 여기서, 사용된 부호와 식은 Mazzarello와 Copello(2000)에 의한 것이다.

GAN-M 문제의 경우에는 여러 CRC의 의사결정을 조율해야하는 경우가 필요하다. 이 경우에는 각 CRC에 대한 동적 우선순위가 유지되어야 한다. 각 CRC의 동적 우선순위를 유지하기 위해 필요한 데이터는 대략 다음과 같다.

- 해당 CRC 내의 열차 목록.

- 그 CRC의 조치와 관련된 열차 목록.
- CRC내의 각 폐색구간에 대한 상태 정보 : 4현시 및 3현시에 따라 상이하다.
- CRC내의 트랙(플랫폼)에 대한 상태 : 4현시 및 3현시에 따라 상이하다.
- 선행 CRC에서 결정된 해의 목록.
- 최종 경합에 대한 해.

·  $P_d(CRC) = P_s(CRC) + P_d(T_k)$  : 해당 CRC의 동적 우선순위. 이것은 임의의 시간에 해당 CRC가 수행하는 운행제어의 양에 해당한다.

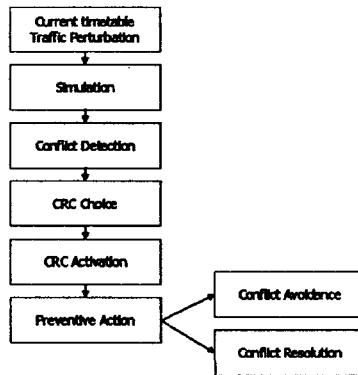


그림 1 MARCO의 의사결정 구조

그림 1은 MARCO에서 열차경합을 해소하기 위해 수행하는 의사결정 구조의 개략이다. MARCO 프로젝트에서 경합의 검지를 위해 시뮬레이션의 방법이 적용되고 있다. 가장 적합한 CRC를 선택한 이후에는 다음과 같은 작업들이 자동적으로 실행된다.

- 가능한 제어행위의 생성.
- 현재의 시각표상에서 적용할 수 있는 제어행위를 생성하기 위한 지역 규칙 실행.
- 지역 시뮬레이션을 통해 제안된 제어행위 시험.
- 공동으로 연관된 CRC의 동의.

경합회피가 제대로 이루어지지 않으면, 결국 경합이 실현된 CRC에서 경합을 해소해야 한다. 경합에 관련된 시간은 처음 경합이 발생하는 시간으로부터 그 경합에 관련된 열차 중 마지막 열차가, 정상운행을 가정하여, 주어진 스케줄을 종료하는데 소요되는 시간이다.

경합해소에 적용되는 알고리즘은 다음 3가지의 규칙을 기본으로 한 추론과정이다.

- 회복(recovery) : 이 규칙은 시각표상 회복시간 > 0인 열차에 대해 적용한다. 이 규칙은 경합이 예측되지 않은 열차에 대해서도 적용할 수 있다.
- 행로 재설정(re-route) : 이 규칙은 2개 이상의 열차에 경합이 발생할 경우에 적용한다.
- 지연(delay) : 이 규칙은 위의 2가지 규칙에 의해 가능해를 찾을 수 없을 때 적용한다.

## 다. 결과

### HTA 데모 프로그램

MARCO 프로젝트에서, HTA 데모 프로그램이 밀라노 중앙역을 대상으로 개발되었다. 밀라노 중앙역은 유럽에서 열차운행이 가장 복잡한 역 중의 하나로 그 현황은 다음과 같다.

- 열차종별 : 고속열차, 지역간 열차, 지역열차, 화물열차.
- 선로구성 : 대부분이 복선 구간. 반경 25km 이내에 10개의 역이 존재. 가장 짧은 패색거리는 200m.
- 고려시간 : 자정~오전 9:00, 200 열차, 1시간 당 40 열차.

### GAN 데모 프로그램

MARCO 프로젝트에서 GAN 데모 프로그램은 벨기에의 수도 브뤼셀~독일의 국경에 해당하는 영역을 대상으로 개발되었다. 이 구간에서 GAN-M과 관련된 주요 이벤트는 일시적인 선로 보수(사고)로 단선 운행계획의 수립 또는 열차 행로 변경이다. GAN 데모 프로그램에서 열차경합의 검지의 해소와 함께 경합의 해소 방안에 의해 추가적으로 발생하는 2차 경합의 검지 및 해소를 고려한다.

MARCO 프로젝트의 HTA 및 GAN 데모 프로그램들은 모두 성공적으로 경합을 해소하고 있음을 보고하였다. HTA, GAN의 시험으로부터 각각의 문제에 대한 알고리즘 수행시간은 2~3초와 10~15초의 수행도를 보였다.

## 3. COMBINE 프로젝트 [7]

### 가. 개요

COMBINE 프로젝트는 MARCO 프로젝트의 후속 프로젝트로, ERTMS/ETCS Level 3인 GSM-R에 의한 이동폐색(moving block) 시스템을 가정하는 경우의 열차 경합의 검지 및 해소에 관한 프로젝트이다. 따라서 이 프로젝트에서는 MARCO 프로젝트의 경험을 기반으로 하고 있다.

COMBINE 프로젝트의 한가지 목적은 열차운행에 관한 최적 의사결정지원 시스템의 개발을 위해 데모 프로그램을 먼저 개발하여 방법론의 적절성을 검토하는 것이다. COMBINE에서는 최적해를 구성하는 파라미터들에 대한 중요성을 검사하고, 열차 운행관리 시스템의 기본적 구성과의 관계에 대해 검토한다. COMBINE 프로젝트에서 또 하나 중요한 목표는 열차운행관리 시스템과 ERTMS 사이의 인터페이스를 정의하고, 각 제어계에 허용 가능한 지연의 정도를 연구하는 것이다.

그림 2는 COMBINE 프로젝트의 기본 구성을 나타낸다. 이 그림에서는 COMBINE 프로젝트에 대한 전반적인 내용과 COMBINE 프로젝트의 환경 요소인 ERTMS의 연관 관계를 표시하였다.

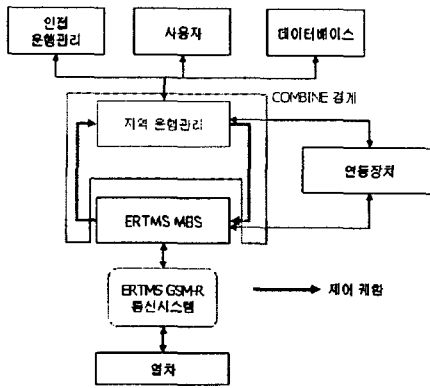


그림 2 COMBINE 프로젝트의 구성

여기서, 음영 부분에 있는 굵은 화살표(제어 권한)는 경합 검지 및 해소 기능을 포함하고 있는 열차운행관리 시스템(TMS)이 이동폐색 시스템을 피드백 제어하는 상황을 표시하고 있다. 그림 2에서 이동폐색 시스템 이하는 ERTMS를 개념을 나타내는 것이다. 여기서 데이터베이스는 MARCO의 경우와 마찬가지로 정적/동적 데이터를 취합하고 있다.

그림 2의 제어루프 관련 기능이 이동폐색 시스템에서 열차 경합을 해소하는 부분이다. 제어루프를 명시적으로 재구성하면 그림 3과 같다.

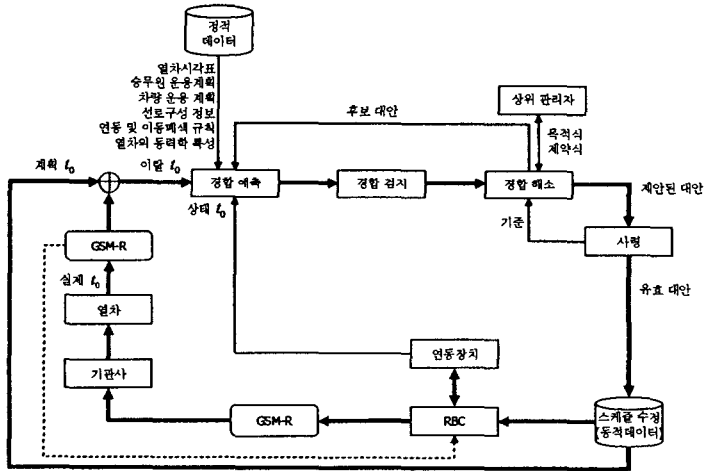


그림 3 COMBINE의 제어루프

이 제어루프를 수행하는데 소요되는 시간은,

Loop Time = {위치 및 속도 측정 시간 + 측정된 위치 및 속도 기록 시간 + 기록된 정보를 GSM-R을 통해 열차에서 RBC(Radio Block Controller)로 전송하는 시간 + RBC에서 시스템으로 전송하는 시간 + 결합처리 시간 + 시스템에서 경합관련 계획을 로드하는 시간 + 경합관계 계획을 갱신하는 시간 + 갱신된 계획을 RBC에 전송하는 시간 + 연동장치 및 RBC에서 처리하는 시간 + 운행승인(MA, Moving Authorities) 할당 시간 + 운행승인을 GSM-R을 통해 RBC에서 열차에 전송하는 시간 + 운행승인을 차상컴퓨터에서 처리하는 시간 + 기관사 반응시간 + 열차의 가속 및 감속 시간}

여기서,

경합처리 시간 = {i \* (j \* (k \* (예측시간 + 검지시간 + 해소시간) + 사령의 입력 및 검증시간) + 실행 가능성 시뮬레이션 시간(인접 제어사무소, 상위 제어시스템, 연동장치 및 RBC에서))}

이고, i, j, k는 적절한 대안을 선정하기 위한 반복횟수(number of iteration)이다.

## 나. 개념설계

요구사항을 명확하게 정형화하기 위해서는 먼저 시스템에 대한 개념설계가 필요하다. COMBINE에서 고려하는 시스템의 개념설계는 ERTMS 범주 내에 있도록 하였다. 개념설계의 내용을 다음과 같이 3단계의 제어수준으로 구분하여 검토하였다.

### 제 1 단계

- 제어수준 : 스케줄을 재구성하지 않는다.
- 예 : 열차 속도조정

### 제 2 단계

- 제어수준 : 스케줄을 재구성한다. 재구성 범위는 지역적이다. 전역적으로 영향을 미치지 않는다.
- 예 : 특정 지역의 열차 순서 변경, 열차 접속 취소, 열차 행로 재설정, 정차역 추가 및 취소.

### 제 3 단계

- 제어수준 : 전역적으로 영향을 미치는 범위로 스케줄을 재구성한다.
- 예 : 열차 순서 변경, 열차 행로 재설정, 열차 추가 및 취소.

위의 각 업무에 대해서는 별도의 목적식과 알고리즘이 존재한다. 특히 두 번째 단계의 문제에 대해 최적해를 구하는데는 매우 많은 계산량이 발생할 가능성이 있다. 따라서 이 단계의 알고리즘은 문제를 지능적으로 다룰 수 있어야 하고, 사령과 의사소통이 가능해야 한다. 즉 실행 불가능한 해는 가능한 알고리즘 초기단계부터 모두 제거해 나가는 것이다. 행로 설정하는 문제에 있어서는 몇 가지 제약이 추가된다. 예를 들어 플랫폼과 열차장이 고려되어야 하고, 새로운 행로의 시종착은 최초 행로의 시종착과 같아야 한다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 한국철도기술연구원에서 수행하는 기본연구사업 중 스마트레일 기술개발 소과제에 속한 연구로서, 열차 경합의 검지 및 해소에 관한 프로그램의 조사결과와 소개를 위한 것이다. 본 논문의 결론으로 앞에서 조사한 내용을 바탕으로 한국철도에 열차 경합 검지 및 해소 시스템을 적용하기 위한 기본방향을 다음과 같이 제안한다.

### 문제정의

- 한국철도의 열차 경합 문제에서 우선 전체 네트워크를 대도시권 전철과 지역간 철도로 구분하고, 각각의 경우를 네트워크의 복잡도에 따라 다시 단순노선, 집중 운행영역, 전역 네트워크로 나누어 정의한다.
- 단순노선과 집중 운행영역은 각각 선로의 일부 구간으로 정의된다. 단순노선은 2개의 집중 운행영역의 연결부분으로 정의된다.
- 각 개별 관리 단위의 네트워크 구간에 대한 선로구성 조건, 열차운행 형태 및 지연발생 형태를 면밀하게 분석하여, 각 지역에 발생하는 경합의 종류 및 발생형태를 정의한다.
- 관리 단위별 경합 문제를 분류에 따라 모두 정의해야하고, 각 단순노선 및 집중 운행영역의 문제는 상호 독립적이어야 한다. 따라서 특정 구간의 선로의 개량 및 변경이 전체 문제 구조에 영향을 미치지 않아야 한다.
- 전역 네트워크는 개별 단위 문제(집중 운행영역 및 단순노선)를 조정하는 기능을 한다. 전역 네트워크 문제는 단순노선 및 집중 운행영역의 문제와 표준적인 인터페이스 정의에 의해 기능하므로써 개별 단위 문제의 변경에 대해 독립적이어야 한다.
- 연쇄 경합에 대한 문제(cascaded conflict problem)가 고려되어야 한다.

## 시스템 구축

- 경합 검지 및 해소 시스템은 현재 CTC를 최상위에서 제어하는 소프트웨어적 모듈로 인식하고, 예약시스템과 온라인/오프라인의 인터페이스를 가정한다.
- 경합 검지 및 해소 시스템은 다음과 같이 크게 3가지의 부분으로 구성된다.

### 1) 경합 예측 및 판단

- CTC 기본 기능과 인터페이스 : 기본 스케줄, 변동 스케줄, 실시간 위치.
- 예약시스템과 인터페이스 : 오프라인 통계 데이터 처리(향후 온라인 인터페이스).
- 경합예측 : 계획대비 예측의 차이가 임계치 이상을 검지.
- 경합판단 : 현재 검지된 경합의 유형판단, 문제설정, 해당 모형 선택.
- 경합 예측 및 판단은 전역 네트워크 단위로 모듈화 되어 개발된다.

### 2) 경합 해소

- 경합 검지 및 판단부의 결과에 따라 적절한 알고리즘에 의한 다수의 대안 산출.
- 각 대안에 대한 비용 함수값 부기.
- 경합해소는 각 관리 단위로 개별적으로 개발된다.

### 3) 시뮬레이션 모형

- 경합 해소 모형이 제시한 대안들을 우선순위에 따라 정밀하게 시뮬레이션하여 실행가능성 검토.
- 우선순위별 각 대안의 실행가능성 검토.



- 시뮬레이션은 전역 네트워크 단위로 시행한다.

#### 알고리즘 개발

- 전체적인 판단 기준은 동적으로 조정되는 열차별 우선순위를 기준으로 한다. 동적 우선순위는 요일별, 열차별 탑승 통계치를 사용한다.
- 개별 관리 단위별로 문제를 구성하고 각 문제에 적합한 알고리즘을 결정한다.
- 알고리즘은 OR, (메타) 휴리스틱, 전문가 시스템 등을 각 경우에 따라 검토하되, 가급적 선행연구가에 효용성을 밝힌 방법론을 따르도록 한다(예, MARCO 프로젝트의 분산 지능형 탐색기법).

철도청에서는 현재 각 지역별로 운영되고 있는 지역사령실 및 고속철도 사령실의 열차 집중 제어 장치(CTC)를 하나의 사령실 내에 통합 설치하는 사업을 진행 중에 있다. 이 사업의 목표는 열차 운행관리 업무에 효율성을 기하고, 지휘계통을 단순화함으로써, 인력 및 설비의 유지관리 비용구조를 개선하며, 이례적인 상황에서도 신속하게 대처하기 위한 것이다<sup>8)</sup>. 이번 통합 CTC 사령설비 시설 사업은 한국철도에서 수행한 그 동안의 CTC 관련 사업들과는 달리, 효율적인 열차 운행관리를 위한 소프트웨어 개발 부분이 상당한 범위로 포함되어있으며, 특히 열차의 경합을 자동으로 검지하고 해소하는 시스템의 지능화를 위한 방향설정이 분명하다. 본 논문은 한국철도의 이러한 방향에 기여하기를 바란다.

#### 참고문헌

- [1] ADtranz EBICOS TMS, Product Documentation.
- [2] 한국철도기술연구원 운영·정보시스템 연구팀, Multi-level Advanced Railway Conflict Resolution and Operation Control, 2002. 10, 내부자료.
- [3] MARCO Project, WP-3/SP/C5/01-2, D3.1 User Requirements.
- [4] MARCO Project, WP-5/TR/C5/01-1, D5.1 Description and Assessment of the Algorithm.
- [5] MARCO Project, WP-7/TR/12/01-1, D7.1 GAN Demonstrator and Implementation of the Optimization Kernel.
- [6] MARCO Project, WP-9/TR/C7/02-4, D9.1 Verification Report.
- [7] COMBINE Project, WP-3/D/C2/01/4F, D3.2 Functional Requirement - System Performance Part 1.
- [8] 철도청 전기본부, 철도청 사령실 통합 신호설비 시설을 위한 제안요청서, 2002. 6.