

최적화 해법을 이용한 열차경합 해소와 한국철도 적용방안

Railway Conflict Resolution using Optimization Techniques and Its Application to KNR

오 석 문¹⁾
Oh Seog Moon

ABSTRACT

열차경합의 사전검지 및 해소 시스템(Railway Conflict Detection and Resolution System, RCDRS)은 열차운행관리 시스템(Railway Traffic Management System, RTMS)의 최상위 의사결정지원 모듈이다. 본 논문에서는 한국철도에서 RCDRS의 필요성과 국외 적용현황 및 기존 연구현황을 분석한다. 또 RCDRS를 한국철도에 적용하기 위한 전반적인 방안을 한국철도 주요 노선별 열차운영 여건을 고려하여 제시한다. 또, 철도청에서 실시하는 '사령실 통합 신호설비 시설' 사업에 관한 RCDRS의 1단계 적용방안을 제시한다.

1. 서 론

철도 네트워크에서 운행하는 모든 열차들은 사전에 계획된 스케줄에 따라 운행하도록 되어있다. 그러나 전국에 걸친 철도 네트워크에서는 열차 스케줄 작성 당시에 고려하지 못하는 이례적인 상황이 매일 발생한다. 표 1에는 당일 운행중에 발생하는 이례사고의 종류와 각 사고형태에 따른 처리소요시간의 통계자료가 제시되어 있다²⁾.

표 1 열차사고의 발생 및 처리소요시간 현황
(B. Adenso-Diaz et. al, 1999, [1])

Incident	Duration Average (min)	Duration Max (min)
Signals problems	11.8	76
Centenary Problems	10.7	72
Engine breakdown	19.9	65
External causes (weather conditions, ...)	13.7	60
Human errors in circulation	9.0	15
Incident on the track (works, ...)	5.2	28
Staff of shortage	7.0	12
Maneuvering delays in stations	17.5	28
Various	8.9	33

표 1에서 보는 바와 같이 각각의 사고가 발생하여 처리되는데 소요되는 시간은 수 분에서 수

1) 정희원, 한국철도기술연구원 선임연구원
2) 이 표는 Australia의 통계자료이다.

십 분에 이르고 있음을 알 수 있다. 이러한 사고가 당일 열차운행 중에 발생할 경우, 해당 사고와 시간적 또는 공간적으로 인접한 열차들은 사전 스케줄에 정해진 운행시간을 지키기 어렵다.

위와 같은 이례사고 외에 사전 계획에 따른 선로구간의 유지보수 작업의 경우에도, 유지보수 계획단계에서 철저히 고려하지 못하는 각종의 현장 상황에 따라 추가적인 지연이 발생할 수 있다. 이렇게 발생하는 지연은 대부분 열차가 잔여 여정(Remain itinerary)을 운행할 때, 열차 스케줄에 포함된 회복여유(Recovery margin) 시간에 의해 자연적으로 회복되는 경우가 많다. 그러나 경우에 따라서는 잔여 여정에 대해 현재의 지연이 회복되지 않거나, 현재의 지연이 더욱 확대되는 상황이 발생할 수 있다.

열차사령(Train dispatcher)들은 이와 같이 이례적으로 발생하는 운행상황에 대처하기 위해 열차집중제어장치(Central Traffic Control, CTC)를 이용하여 전국의 네트워크를 실시간 감시하고 통제(Regulation)한다. 열차사령이 열차제어 사무소에서 수행하는 이러한 업무를 '열차운행관리(Railway Traffic Management)'라고 하고, CTC 및 각종 부가적인 시스템을 포함하여 열차사령이 효율적인 열차운행관리를 위해 사용하는 시스템을 '열차운행관리 시스템(RTMS)'이라고 한다. 하나의 열차제어 사무소에서 수행하는 열차운행관리 업무는

- 이례적으로 발생하는 열차경합의 사전검지 및 검지된 열차경합의 효율적인 해소(RCDRP),
- 열차계획에 맞는 기관차(또는 동차) 및 승무원의 적시 충당,
- 대규모 사고 및 지연발생에 따른 대체 서비스 계획의 편성 및 실시,

등 매우 광범위하다. 본 논문에서는 당일 열차운행에서 발생하는 열차경합의 사전검지와 검지된 경합의 최적 해소에 관한 문제(RCDRP)를 대상으로 한다. RCDRP의 관점에서 볼 때, 현재 한국철도에는 다음과 같은 중요한 변화들이 진행되고 있다.

- 철도청의 '사령실 통합 신호설비 시설' 사업에 따른 전국 열차제어 사무소의 통합 및 시스템의 전반적인 개선.
- 기존 ATS 방식 열차제어시스템의 ATP 방식 시스템으로 점진적 이전.
- 경부고속철도 개통에 따른 기존 경부선의 여객열차/화물열차 운행비율 변경.
- 장항선 등 기존 단선구간의 복선화 및 전철화.

본 논문에서는 위와 같은 여건하에서 한국철도에 RCDRS 도입을 위한 전반적인 방향을 제시하고, 특히 이번 철도청의 '사령실 통합 신호설비 시설' 사업에서 1단계로 도입해야하는 시스템의 범위와 대상문제 및 해법에 대한 개요를 제시한다. 또, 한국철도의 각 노선을 특징에 따라 구분하여, 각 노선에 적합한 최적화 해법의 개요를 제시한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2절 RCDRS의 필요성 및 국외현황에서는 RCDRS의 필요성을 통계 및 연구자료를 바탕으로 제시한다. 또 RCDRS의 국외 적용사례와 기존연구 현황을 소개하고, 이에 대한 견해(노선 및 열차운행 현황에 따른 문제의 특성화 등)를 제시한다. 다음 3절 한국철도의 적용 방안에서는 주요 노선들의 열차운행 현황, 문제의 범위와 유형 및 노선별 RCDRS 적용방안을 제시한다. 4절 RCDRS의 1단계 적용방안에서는 RCDRS의 범위 및 대상문제, 그리고 문제의 해법에 대해 제시한다. 마지막으로 5절에서는 결론을 제시한다.

2. RCDRS의 필요성 및 국외현황

RCDRS의 필요성

당일 운행하는 열차가 사전 스케줄에 따라 정시에 운행하는 정도를 열차서비스의 정시성(on-time performance or punctuality)이라고 한다. 정시성이 열차서비스의 품질을 평가하는 중요한 척도임은 주지하고 있는 사실이며, 여객열차의 경우 열차서비스의 정시성은 타 공로서비스(public road service)에 비해서 우월한 중요한 장점이다. 그러나 화물열차의 경우 현재 열차서비스의 정시성은 화물트럭에 비해 높은 상태임을 보장할 수 없다. Lang 등(1972)은 연장길이가 320km(200마일) 정도의 노선에서 열차의 도착시간에 대한 표준편차는 1시간~3시간에 이르는 것으로, 화주(Freight owner)가 자기 화물의 도착시간에 대한 불확실성(Uncertainty)이 높은 수준인 것으로 보고하였다. 또 평균 도착시간도 사전 스케줄의 도착시간 보다 1시간~2시간 정도 늦어, 열차서비스의 정시성도 낮은 것으로 보고하였다. 이 연구의 화물열차 지연에 관한 주요 항목들이 표 2에 정리되어 있다.

표 2 화물열차의 정시성 관련 자료
(Lang et. al., 1972, MIT, [3])

Variance in	Contribution to Train Arrival Time Variance
Train Departure Time	38% of total variance
Train Running Time	45% of total variance
Intermediate Yard Time	21% of total variance

화물열차의 정시성이 낮은 것은 미국만의 문제는 아니다. Lang 등의 연구에서 나타난 결과는 장거리/단선/화물열차(Long-haul freight trains in a single line)의 운영에서 공통적으로 나타나는 현상이다. 이것은 RCDRP에 대한 초기 연구가 북미(Petersen 등(1974[4], 1975[5], 1982[6], 1986[7], 1988[8], 1990[9]), Sauder(1983[10]), Jovanovic 등(1989[11], 1991[12]))과 호주(Mills 등(1991[13]), Higgins 등(1993[14], 1994[15], 1996[16]), Ferreira 등(1995[17])) 등에 집중된 사실로부터 유추할 수 있다. 즉 이들 국가는 모두 장거리/단선/화물열차를 운영하는 국가이고, 이들의 연구는 주로 화물열차의 RCDRP에 관심을 기울이고 있다.

여객열차에 있어, 철도청에서는 열차서비스의 정시성에 관한 항목을 고객서비스헌장(1998.7.15 제정, 2000.1.20 개정)에 명시하여 열차서비스의 품질을 관리하고 있다. 철도청의 정시성에 대한 고객과의 약속은 10분 이상 지연되는 열차를 전체 열차의 4% 이내로 유지하는 것으로, 고객서비스헌장 제정 이후 계속 만족할 만한 수준으로 유지되고 있다. 따라서, 여객열차서비스의 정시성 확보 수준은 상당히 높은 수준임을 알 수 있다³⁾. 이것은 RTMS 구성에 있어, 복선 여객열차 운행에서는 단선 화물열차의 운행과는 다른 관점의 목적함수(Objective function)가 설정되어야함을 나타낸다(Sahin, 1999[19], and [20], [21], [22], [23]).

3) 철도청 여객열차의 정시성에 관한 최근 조사에서 실적이 다소 낮아지고 있으나, 이것은 경부고속철도 건설과 관련된 공사의 영향으로 일시적인 것으로 분석되고 있으며, 공사가 마무리된 후에는 다시 높은 수준으로 회복될 것으로 전망된다.

Petersen 등(1986)은 열차사령의 업무수행 시간중 창의적이고, 의사결정에 관련된 업무에 사용되는 시간의 비율이 단순 반복적인 업무수행에 사용되는 시간에 비해 현저하게 낮은 상태라고 지적하였다[7]. 표 3은 이 들이 제시한 열차사령의 업무시간 사용형태를 나타낸다.

표 3 열차사령의 업무시간 사용형태
(Petersen, E. R. et. al., 1986[7])

75~80%	Information gathering, record keeping
	90% routine
	Maintenance of train sheets, train graph, etc.
	10% dispatcher judgment
	Identifying and coping with unpredictable events
20~25%	Control and planning of control
	85% routine
	Clearing signals ahead of train
	Clearing trains out of sidings
	15% dispatcher judgment
	Planning of meet/pass locations

표 3에 따르면, 사령의 전체 업무시간 중 75%~80%가 정보수집 및 단순기록에 사용되고 있으며, 나머지 20%~25%의 시간 중에서도 해당 시간의 85%는 단순 진로제어의 업무임을 알 수 있다. 이것은 RCDRS가 도입되는 경우, 열차사령의 업무내용을 의사결정을 위한 창의적인 부분으로 전환할 수 있음을 나타낸다. 한국철도에서는 열차선도와 그래프의 유지 및 갱신과 관련된 반복적인 작업은 이미 상당부분 전산화되어 있다. 그러나 장래 이레사고의 예측 및 효율적인 교행/추월 계획의 실행과 관련된 부분에서는 아직 시스템이 미비한 실정이다.

미국 연방철도국(FRA)에서는 2002년 8월 열차사령의 작업부하(workload), 스트레스(stress) 와 피로(fatigue)에 대한 연구를 실시하였다[18]. 이 연구에서는 열차제어 사무소 2곳에서 37명의 열차사령을 무작위로 추출하여, 앞에서 언급한 항목들에 대해 조사하여, 다음과 같은 결과들을 제시하였다.

- 25세~44세의 사령들의 요통, 두통 및 피부질환이 미국 동일 연령대의 평균치에 비해 매우 높은 수준으로 나타났다.
- 근무시간 중의 식사나 간헐적인 휴식시간이 없어 곤란하다.
- 근무시간 중 피로도에 대한 지수가 근무의 시간에 비해 2배 이상 높은 수준으로 나타났다.

이 결과는 열차사령의 건강상의 업무여건이 일반 사무직에 비해 열악함을 보여주는 것으로, 지능적인 시스템을 도입하여 열차사령의 업무여건을 완화해야 할 필요가 있음을 보여준다.

RCDRS 도입의 필요성과 관련하여 제시하는 마지막 항목으로, 스웨덴에서 RCDRS를 도입하기 위해 1997년에 실시한 사령과의 인터뷰 내용을 제시한다(Hellstrom 등, 1997[24], Andersson 등, 1997[25]). SJ에서는 1997년 5월에 RCDRS를 도입하기 위해, 사령들과의 인터뷰를 실시하여, 다음과 같은 결과들을 제시하였다.

[일반]

- 거의 모든 사령이 현재 사령업무의 의사결정체계에서 상당수준 개선의 여지가 있음에 동의함.
- 특히 연쇄지연의 효율적인 처리를 위해 필요함(SJ에서 연쇄지연은 전체지연의 35%)

[제어]

- 막상 경합이 생겼을 때, 사령은 충분히 생각할 시간적 여유가 없다.
- 사령은 장래 상황의 예측에 한계가 있다.

- 사령이 고려할 수 있는 시간과 위치의 정밀도에 한계가 있다.
- 사령은 동시에 고려할 수 있는 정보의 양과 처리속도에 한계가 있다.
- 경우에 따라 경합의 검지가 너무 늦게 이루어지는 경우가 있다. (기술적인 이유 또는 조직상의 이유로)
- 지역사령은 전역적인 고려에 한계가 있다.

[체계]

- 사령 개인간의 성향이 매우 다르다.
- 사령은 매 업무마다 그때 그때의 창의적인 생각과 발전적인 절차를 추구한다. 그러나 문제에 대한 처리절차가 한결같이 유지되어야하는 경우가 많다.

적용사례

앞에서와 같은 필요성에도 불구하고, 기존의 적용사례에서 볼 때, 철도운영기관에서 RCDRS를 도입하기 위한 결정은 매우 신중하게 내려졌음을 알 수 있다. RCDRS에 대한 연구는 1970년초부터 시작되어 현재까지 30여년에 이르고 있다. 표 4는 현재 RCDRS를 적용하고 있는 대표적인 사례를 제시한다. 표 4에서 제시하는 현황은 연구 단계에서 그치지 않고, 현실에 도입된 사례를 위주로 구성한 것이다.

표 4 RCDRS 적용사례[10, 26~35]

국가/회사	시스템	적용 수준
Bombardier	EBICOS TMS	• 상용 판매품
Alstom	ICONIS	• 상용 판매품
네덜란드	CD/DS	• Feasibility Test : 1996, 1998 • 현재 : TRACE PSS와 통합
일본	ESTRAC-III	• Feasibility Test : 1992 • 1993년 이후 적용
	COSMOS	• JR-EAST • 지연확산 시뮬레이션 수준(예측진로제어)
스페인	SIRO/SIRAT	• Madrid 1,2 호선
프랑스	SEPIA	• 1996년 중반까지 TGV Le Mans의 실험완료
미국	Sauder & Westerman(1983)	• Norforks-Southern Railroad • Low ~ Moderate Traffic Volume

Bombardier의 EBICOS TMS[26]와 Alstom의 ICONIS는 RCDRS[27]의 상용품으로 판매되고 있다. 이와 같은 유명 제조회사 제품의 특징은, 구매자의 RTMS 구성원칙에 따라, 모듈화된 소프트웨어 패키지(package)를 제공하므로, 납기를 단축시킬 수 있다는 점이다. 또 이와 같은 기성 패키지들은 현장 적용성 및 사용자 친화성에서 이미 일정 수준 이상 검증된 것으로 판단되나, 최적화와 관련된 내부 엔진의 알고리즘 구성 형태를 파악할 수 없어, 관련 자국기술의 발전이 어렵게 되는 단점이 있다.

현재 국내 제조회사들은 CTC를 설계하고 개발할 수 있는 능력은 충분한 것으로 판단된다. 그러나 RCDRS와 같은 의사결정지원 모듈이나, 효율적인 열차운행관리를 위해 필요한 각종의 시뮬레이션 모듈이 포함된 RTMS의 개발능력은 아직 미흡한 것으로 판단된다. 국내 제조회사의 입장에서 볼 때 이러한 원인은 비단 기술적인 부분에 국한된다고 보기 어렵다. 좁은 시장여건과 상대적으로 높은 경쟁체계, 그리고 제작회사의 영세성 등이 종합적인 원인으로 작용하고 있다고 보는

것이 타당하다. 뿐만 아니라 Bombardier나 Alstom과 같이 이미 국제적 경쟁력을 갖춘 기업의 세계시장 통제 능력은 국내 영세 제조회사의 RTMS 개발에 대한 투자를 위축시키기에 충분하다.

네델란드는 RCDRS를 도입하기 위해 CD/DS(Conflict Detection and Decision Support System)를 시범적으로 개발하였다[28, 29]. 개발된 시작품은 1996년에 Eindhoven역에서 그리고 1998년에 Uhrecht역에서 현장실험을 거쳐 효과가 입증되었다. CD/DS는 이후 네델란드 열차운행관리 시스템(TRACE PSS)과 통합 시험이 추진되고 있음이 보고되었다. 네델란드에서는 CD/DS 개발을 위해 다음과 같은 세 가지의 기법들을 검토하였다.

- 제약만족기법(Constraint Satisfaction Programming, CSP)
- 전문가 시스템(Expert System, ES)
- 인공지능 해법(Artificial Intelligence, AI)

이 연구에서 전문가 시스템에 대해서는 규칙기반(Rule base)을 유지보수하는 것이 비효율적이라고 판단하고 고려에서 제외하였으며, 시스템 자체의 학습능력(Knowledge base)을 갖춘 인공지능 해법이 전향적(Prospective)이라고 판단하였다.

일본에서는 여객열차를 대상으로 비교적 초기인 1993년에 ESTRAC-III를 적용하였다⁴⁾[30, 31]. ESRTAC-III는 ESTRAC-I으로부터 발전해 온 전문가시스템 기반의 제품으로 미쓰비시(Mitsubishi Electric Co.)에서 개발하였다⁵⁾. JR-East의 신간선 열차운행관리시스템인 COSMOS에서는 지연확산 시물레이션 수준의 RCDR 기능을 내장하고 있다. COSMOS에서 RCDRS로 시물레이션 기능까지 만을 포함시킨 것은 열차의 속도중별이 평이한 신간선 열차만을 대상으로 한다는 점에서 현실적으로 적합한 선택이라고 판단된다.

스페인에서는 마드리드 1, 2호선에 RCDRS를 적용하고 있다. 스페인의 시스템은 철도신호회사(Dimetronic S. A.)와 대학(Universiada Pontifica Comillas)이 공동연구를 수행하여 개발하였다. 개발된 시스템은 바르셀로나 소재의 열차제어 사무소에서 시험운전을 통해 현장에 적용하였다.

기타 프랑스에서는 1996 중반까지 TGV LeMans역에서 현지 실험을 완료하였으며[35], 미국의 경우에는 1983년에 Norfolk~Southern Railroad(Sauder, 1983)에서 적용하였다.

기존연구 현황

RCDRP에 대한 기존연구 현황은 적용사례에 비해 매우 광범위하다. 여기서는 특히 주목할 만한 대규모 프로젝트 위주로 수행된 연구들을 소개한다. 최근 유럽에서 ERTMS 프로젝트를 추진하고 있는 것은 주지의 사실이다. 이것은 전유럽 국가들의 철도운영에서 연계운영성(Interoperability)을 확보하기 위한 목적으로 수행하고 있는 것이다. 이러한 체제에서 국가간을 운행하는 열차들(Boarder crossing trains)의 운행시간에 대한 정시성 확보는 매우 중요한 문제가 된다. 따라서 유럽연합(EC)에서는 열차서비스의 정시성 확보를 위해 RCDRP 연구에 대해 지속적인 투자를 이어왔다. 표 5는 이와 같은 배경에서 수행된 유럽의 RCDRP관련 프로젝트 현황이다.

4) 문헌에서 구체적인 적용기관을 밝히지 않았으나, DIAPLAN과 연관성이 언급된 정황으로 판단해 볼 때 JR-East일 것으로 판단된다.

5) 네델란드의 사례와 달리 ESTRAC-III에서 전문가 시스템을 적용한 이유는 ESTRAC-III가 시기적으로 앞서있으며, 1990년 초에는 전문가 시스템의 연구가 매우 활발했던 점을 들 수 있을 것이다. 전문가시스템을 이용하는 방법은 일본에서 뿐만 아니라 독일에서도 연구하여 발표하였다(Schaefer and Pferdmenages, 1994).

표 5 유럽의 RCDRP 프로젝트 현황[20~23, 36, 37]

프로젝트	기간	프로젝트 목적	프로젝트 산출물	참여기관
OPTIRAIL	~ 1999. 11	유럽 국가간 장거리 운행열차의 최적행로 재설정	ERTMS하에서 국가간 TMS의 전환적 사양	•STERIA •SYSTRA •HALCROW •DB Netz AG
MARCO	1996.1.1~ 1999.6.30 (3년6개월)	열차운행을 자동화 및 지능화하여 안전비 절감	•사용자 요구사항 •계약조건 정의 •알고리즘 검토 •데모 프로그램 개발	•Adtranz Italy(IT) •AEA Tech.(GB) •ATM(IT) •NMBS/SNCB(BE) •3 Univ.s
COMBINE	MARCO의 후속	TMS와 ERTMS의 인터페이스 정의 및 각 시스템에서 허용 가능한 지연의 정도 파악	•인터페이스 •허용 가능한 지연의 정도	•ABB Daimler-Benz (IT) •ABB Daimler-Benz (FI) •CO.S.MO.S. s.r.l. (IT) •Univ. Rome (IT) •Univ. Genova (IT) •Holland Railconsult (NL) •On AIR (IT) •Rained B.V. (NL)
COMBINE II	2002.3.1~ 2002.6.30 (3개월)	COMBINE 보완	COMBINE 보완	•Bombardier Trans. •Rained •Holland Railconsult. •NS Railinfrabeheer •On Air •CO.S.MO. •3 Univ.s

OPTIRAIL 프로젝트는 유럽 국가간 장거리 운행열차 행로의 최적 재설정에 관한 연구로 SYSTRA 등 4 기관이 참여하였다. MARCO 프로젝트에서는 전유럽 지역의 열차운행에서 RCDRS를 적용하기 위한 실행가능성 평가의 연구로서 Adtranz IT(당시) 등 10개 기관이 참여하였다. 이 연구에서는 전유럽의 RCDRS 적용을 위한 사용자 요구사항 도출, 계약조건 정의, 최적화 알고리즘 검토, 데모 프로그램 개발 등의 내용을 수행하였다[20~23, 36].

COMBINE 프로젝트에서는 MARCO에서 ERTMS/ETCS-I을 기반으로 고려된 RCDRS의 제반 체계를 ERTMS/ETCS-II/-III로 확장하여 검토하였다. COMBINE 프로젝트의 전반적인 흐름은 MARCO 프로젝트로부터 계승하였지만, MARCO 프로젝트가 소프트웨어 에이전트(Software agent) 기반의 Greedy Rule Base 해법을 검토한 반면[37], COMBINE II에서는 Job Shop 스케줄링 기반의 수리모형에 의한 최적화 해법을 검토하였다[38, 39]. 이것은 전유럽 RCDRS에 적용될 해법이 아직 명확히 정해지지 않았음을 시사하는 측면이라고 판단된다.

지금까지 소개한 적용사례와 기존연구들을 바탕으로, 우리는 한국철도에 RCDRS를 도입하기 위해 다음과 같은 몇 가지 관점을 갖게된다.

- RCDRS의 초기적용은 장거리/단선/화물열차를 운행하는 경우를 위주로 하였다. 호주, 미국, 등의 초기 연구들이 여기에 해당한다. 이것은 장거리/단선/화물열차 운영에 대한 RCDRS의 적용이 효과가 크다는 사실을 시사한다.
- 복선/여객/화물의 구간에 대한 전반적인 프로그램은 세계적인 개발회사에서만 제품을 가지고 있다. Bombardier(EBICOS TMS), Alstom(ICONIS) 등이 대표적인 예이다. 현재 이들 제품의 내부 엔진은 밝혀지지 않았다. 따라서 이들 패키지를 적용하는 것은 사업의 성공 가능성은 높을 것으로 판단되나, 제품이 고가이고, 내부기술의 축척을 기대하기 어렵다.
- 복선구간 여객열차는 운행시격이 짧으므로 최적화 해법의 적용을 위한 대규모 수리모형의 해결이 어렵다. 따라서, 운행시격이 짧은 여객열차 위주의 구간에서는 시스템의 자동화 및 지능화에 집중하는 것이 경향이다. MARCO 프로젝트에서는 '유럽의 경우 당일 열차운행 업

무의 95% 이상을 자동화하는 것이 가능하다'는 연구결과를 제시하였다. 또 COSMOS의 예
 에서와 같이 지연확산 시뮬레이션 결과만으로도 열차사령에게는 충분한 자료가 될 수 있다.

- 도시철도나 고속열차와 같이 최고속도종별이 유사한 시스템에서는 RCDRS의 적용이 용이하
 다. 스페인 마드리드 1, 2호선(SIRO/SIRAT), 네델란드(CD/DS), 프랑스(SEPIA)의 사례가 여
 기에 해당한다.

3. 한국철도의 적용 방안

한국철도의 네트워크는 서울을 중심으로하여 각 지방으로 분산하는 수지형 네트워크(tree
 network)를 구성하고 있다. 뿐만 아니라 서울을 시종착으로 하여 각 지방으로 분산하는 종단형 열
 차운행 패턴을 취하고 있으므로 서울~대전 구간에는 거의 모든 행선의 열차들이 혼재하게 된다.
 또 한국철도에서 운영하는 열차들은 속도종별이 다양하고, 주요 구간에서의 열차 운행시격이 매우
 짧다. 표 6에서 보는 바와 같이 지역간 열차가 운행하는 복선구간의 비율이 25%에 국한되지만 이
 구간을 운행하는 열차의 비율은 표 7에서 보는 바와 같이 매우 높게 나타나고 있다.

표 6 노선 및 열차운행의 특징에 따른 문제의 특성화
 (2002 철도통계연보, 교통개발연구원 국가교통DB 2001 및 [24, 25])

구분	국내노선 연장 비율	수송밀도 (Typical Headway)	운행 형태	경합지리 여지	지연확산
대도시 광역철도망	637.1km 17%	매우 높음	여객	낮음	<ul style="list-style-type: none"> • 작은 지연이 빨리 많은 열차에 영향을 미친다. • 작은 지연이 큰 지연으로 확산되는 경 우는 드물다.
지역간 복선구간	923.4km 25%	높음	여객 + 화물(少)	다소 낮음	<ul style="list-style-type: none"> • 작은 지연이 많은 열차로 확산되지는 않는다. • 또 큰 지연으로 확산되는 경우도 드물 다.
지역간 단선구간	2125.2km 58%	낮음	여객 + 화물(多)	높음	<ul style="list-style-type: none"> • 작은 지연이 많은 열차로 확산된다. • 또 큰 지연으로 확산되는 경우가 많다.

이와 같이 복잡한 양상을 갖는 네트워크에 범용적으로 적용할 수 있는 모형과 해법은 개발이
 어려울 뿐만 아니라, 개발을 가정하더라도 높은 성능을 기대하기도 어려울 것으로 판단된다. 따라
 서 각각의 노선에는 열차운행의 특징을 고려하여 해당 노선에 특성화된 모형과 해법을 개발해야
 한다.

표 7은 한국철도 주요 노선의 열차운행 현황을 좀더 자세하게 정리한 현황이다. 표 6과 표 7에
 서 보는 바와 같이 경부선과 호남선을 제외하면 대부분이 단선구간으로 한국철도 전체 노선연장
 의 58%에 해당한다. 또 한가지 특징은 복선구간에서는 여객열차의 비율이 모두 70%를 상회하고
 있고, 열차의 평균 운행시격도 대체로 15분 이하로(특히 경부선에서는 10분 이하로) 나타나고 있
 다. 반면 단선 구간에서는 전반적으로 여객열차의 비율이 50% 이하 수준을 유지하고 있고, 열차
 의 평균 운행시격도 20분 이상으로 나타나고 있다. 이것은 단선구간의 열차운행에서 여객열차의
 우선순위 때문에 화물열차의 정시성이 지나치게 낮아질 가능성이 있음을 시사한다.

표 7 한국철도 주요노선의 열차운행 현황 (2002 철도통계연보)

노선	평균시각, 분	선로구성, km	선로용량 사용율, %	열차운행, 회
경부선 (서울~대전)	6.8~7.9	복선 : 444.5	88~104	여객 : 108~123 (85%) 화물 : 6~35 (15%)
경부선 (대전~부산)	10.0~11.1		65~68	여객 : 65~77 (74%) 화물 : 23~28 (26%)
호남선	16.5~40.8	복선 : 245.2 단선 : 7.4	34~63	여객 : 20 ~ 46 (77%) 화물 : 5~16 (23%)
전라선	26.8~30.9	복선 : 31.1 단선 : 162.9	63~87	여객 : 16~21 (55%) 화물 : 13~17 (45%)
중앙선	12.3~39.2	복선 : 7.1 단선 : 380.1	57~95	여객 : 6~21 (25%) 화물 : 19~62 (75%)
장항선	36.4~39.2	단선 : 143.1	74~76	여객 : 19 (70%) 화물 : 7~9 (30%)

본 논문에서는 표 6과 표 7에 나타난 노선별 열차운행의 특징을 고려하여, 다음과 같이 4가지 유형의 RCDRP를 정의한다.

- 문제 1 (정상 운행중의 지연) - 이 문제는 당일 열차 운행 중 특정열차의 과지연 문제를 대상으로 한다. 이 문제에서는 열차의 부분 타절 및 교행/추월 계획을 고려한다.
- 문제 2A (복선사고에 의한 선로폐쇄) - 무작위로 발생하는 사고에 의해 선로가 폐쇄되는 경우의 문제를 대상으로 한다. 이 문제에서는 복선구간의 단선운행 재스케줄링을 고려한다.
- 문제 2B(단선사고에 의한 선로폐쇄) - 문제 2A와 유사하나, 단선구간의 선로폐쇄에 관한 문제이므로, 단선 부분운행에 관한 재스케줄링은 고려하지 않는다.
- 문제 3 (도시철도의 연쇄지연확대) - 이 문제에서는 도시철도의 연쇄지연에 따른 지연 확대 문제를 대상으로 한다. 이 문제에서는 열차간의 간격조정 및 반복 기지에서 차량충당의 최적화를 대상으로 한다.

표 8에는 한국철도의 노선별 RCDRS 적용방안을 제시하였다.

표 8 한국철도의 노선별 RCDRS 적용방안

노선	적용 문제	기준	해법
경부선	문제 1	Min SD	Dynamic Priority based Simulation Technique
	문제 2A	Max TV	B&B, Heuristic
호남선	문제 1	Min SD	Dynamic Priority based Simulation Technique
	문제 2A	Max TV	B&B, Heuristic
전라선	문제 1	Min EC, Min SD	B&B, Heuristic
	문제 2B	Max TV	B&B, Heuristic
중앙선	문제 1	Min EC, KDCT	B&B, Heuristic
	문제 2B	Max TV	B&B, Heuristic
장항선	문제 1	Min SD	B&B, Heuristic
	문제 2B	Max TV	B&B, Heuristic
도시철도	문제 3	BTI	On-line & Real-time Approach, Heuristic

- SD - Schedule Deviation
- EC - Energy Consumption
- BTI - Balancing Train Intervals

- TV - Traffic Volume
- KDCT - Keeping Delivery Completion Time

지역간 열차가 운행되는 노선에서는 문제 1과 문제 2가 혼재한다. 도시철도에서 문제 2를 고려하는 것은 현실적으로 무의미하다. 복선구간에서 문제 1의 목적함수는 기존열차 스케줄과의 편차(Schedule Deviation, SD)를 최소화하는 하는 것이다. 표 6 및 표 7에서 볼 수 있는 것처럼, 이 구간에서는 작은 지연이 큰 지연으로 확산되는 경우가 적고, 열차 운행시격이 짧으므로, 동적으로 조정되는 우선순위를 적용한 지연확산 시뮬레이션 기법을 이용하는 것이 적합하다. 이것은 COSMOS의 예측진로제어 방법론과 유사하며, 동적 우선순위 조정 알고리즘의 성능에 따라서 COSMOS의 지연확산 시뮬레이션 기능보다 우수한 기능이 될 것으로 판단된다[40].

복선구간에서 선로가 부분적으로 폐쇄되는 경우에는 문제 2A와 같은 형태로 모형화 된다. 문제 2A의 목적함수는 수송량(Traffic Volume, TV)을 최대화하는 하는 것이 적절하다. 문제 2A의 경우에는 문제 1과 비교해 볼 때, 사고의 범위는 넓어지지만 상대적으로 대응시간의 여유가 있으므로 기본적으로 정수계획법(Integer Programming, IP)의 일반 해법인 B&B(Branch and bound)를 적용할 수 있다[7, 11, 13, 16]. 그러나 문제 2는 현재까지 NP-Hard의 문제로 분류되고 있으므로, 네트워크의 규모가 커지는 경우 계산시간은 기하급수적으로 증가하게 된다[11]. 따라서, 문제 2에 적합한 효율적인 휴리스틱 해법의 개발이 필요한 실정이다.

전라선, 중앙선, 장항선은 대부분 단선구간이지만 각 노선의 특징이 뚜렷하다. 먼저 전라선의 경우 여객열차와 화물열차의 비율이 비슷하고, 복선구간이 30km 정도 포함되어 있다. 따라서, 이 구간은 기본적으로 단선구간에서 여객열차와 화물열차 교행/대피가 주요 문제가 되며, 복선구간을 이용하여 보다 유연한 대안을 찾을 수 있을 것으로 판단된다. 이 구간에서 문제 1은 다른 노선들의 경우와 같이 기본적으로 기본열차 스케줄과의 편차를 최소화하는 목적함수를 갖고, 부가적으로 열차운행에 따른 에너지 소모를 최소화하는 목적식을 추가로 검토한다. 에너지 소모를 최소화하는 목적식은 일반적으로 장거리/단선/화물열차를 운영하는 구간에서 주로 고려하는 목적식이다.

중앙선은 화물열차의 운행이 지배적인 노선이고, 연장길어도 380km에 달하는 비교적 장거리 노선이다. 또, 구간에 따라 선로용량 사용률의 변동이 크다. 따라서, 이 구간에서 문제 1은 에너지 소모 최소화와 화물의 최종 하차시간 준수와 같은 목적식을 수립하여, 화물열차 위주의 노선운영 특성을 고려해야 한다.

장항선은 중앙선과 반대로 여객열차의 운행이 지배적이다. 따라서, 이 구간에서 문제 1의 목적식은 기본열차 스케줄로부터의 편차를 최소화하는 것이 적합하다. 전라선, 중앙선, 장항선의 문제 2B는 기본적으로 문제 2A와 같은 해법에 따른다. 다만, 문제 2B의 경우에는 단선 부분운행에 관한 재스케줄링 절차가 불필요하게 된다.

도시철도는 지역간 열차 운행노선에 비해 운행시격이 매우 짧고, 열차의 속도종별이 동일하다. 문제 3은 이와 같은 도시철도의 운영특성을 고려한 것이다. 문제 3의 목적식은 각 열차의 운행간격을 평준화하는 것이다. 도시철도에서 열차 운행간격 평준화를 달성하기 위해서는 혼잡역에서 탑승시간 증가에 따른 연쇄지연과 반복역에서의 차량충당이 효율적으로 이루어져야 한다.

이상적으로는 한국철도의 모든 노선에 적절한 타당성 조사를 거쳐 RCDRS가 도입되어야 한다. 그러나, 이와 같은 범위는 1회의 사업으로 달성하기 어려운 목표이다. 뿐만 아니라 한국철도에서는 RCDRS에 대한 개발 및 사용경험이 없으므로 정확한 사용자 요구사항, 문제에 대한 제약조건 및 효율적인 해법을 1회의 사업으로 모두 정확히 파악하기는 불가능하다. 유럽의 RCDRS 프로젝트 수행실적(표 5)을 보면 이점이 분명해 진다. 유럽의 경우 ERTMS를 통한 연계운영성의 목표가 세워지고, RCDRS에 대한 연구를 1996년 이후 계속해서 수행하고 있다. 이것은 RCDRS의 현장 적용이 매우 신중하게 결정되어야 함을 의미하는 것이다. 따라서, 한국철도에 RCDRS를 적용하는 것은 공간적 범위나 문제의 범위에 있어서 단계적으로 진행되어야 한다. 작고 쉬운 문제를 해결하여 경험을 쌓은 후, 크고 어려운 문제를 다루어야 한다. 다음절에서는 한국철도에서 1단계로 적용

하는 RCDRS의 방안에 대해 제시한다.

4. RCDRS의 1단계 적용방안

철도청에서는 현재 '사령실 통합 신호설비 시설' 사업을 수행하고 있다. 본 논문은 국가에서 시행한 연구과제의 결과로서, 연구과제의 결과가 현행사업에 적용될 수 있도록 철도청의 RCDRS 1단계 적용방안을 제시한다[41, 42, 43].

앞 절에서, 한국철도에 RCDRS는 단계적으로 도입되어야함을 언급하였다. 이 절에서는 RCDRS가 가장 필요한 노선과 해결하고자 하는 문제의 범위, 그리고 RCDRP에 관한 한국철도의 보유 기술 및 이번 사업의 여건(납기 및 예산 등) 등을 고려하여 1단계 적용방안을 제시한다.

- 먼저, 노선과 관련하여, 경부선과 호남선은 한국철도의 대표적인 노선이다. 따라서, 경부선과 호남선이 RCDRS 1단계 적용대상이며, 이 두 노선 중에서도 경부선이 우선이고 호남선이 나중인 점은 명백하다.

문제의 범위에 있어서는 문제 1이 1단계 적용대상으로 적합하다. 이것은 문제 1이 문제 2A에 비해 용이하며, COSMOS 등의 적용사례로부터 효과를 간접적으로 예측할 수 있기 때문이다.

문제의 해법으로는 동적으로 조정되는 우선순위를 고려한 시뮬레이션 기법이 적합하다. 이 해법 역시 COSMOS의 적용사례로부터 문제 1을 해결하기 위해 적절한 방법론임이 실증적으로 입증된 상태이다. 또, 동적으로 조정되는 우선순위를 추가적으로 고려하므로써 좀더 효율적인 대안을 제시할 수 있을 것이다. 이 해법과 관련하여 동적 우선순위 조정기술과 이산 시간 시뮬레이션 기술이 핵심일 것으로 판단된다.

현재 철도청의 사업은 민간업체에서 수주하여 진행중에 있다. 지금까지 제시한 내용들이 철도청의 RCDRS 1단계 도입에 대한 기본적인 방향으로 유효하다고 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 화물의 도착시간에 대한 신뢰성 및 예측 가능성, 여객열차 운영관리 업무에서 사령의 의사결정 고도화, 열차제어 사무소에 근무하는 열차사령의 건강상태 및 스웨덴에서 실시한 사령들과의 인터뷰 내용들로부터 RCDRS의 필요성을 제시하였다. 또 해외 적용사례 및 유럽의 기존 프로젝트 현황들로부터 RCDRP 연구에 대한 해외동향을 제시하였다. 이와 같은 고찰로부터 한국철도에서도 RCDRP에 대한 집중적인 연구 및 개발이 필요함을 알 수 있다.

또 RCDRS를 한국철도에 적용하기 위한 방안으로 노선의 특성(도시철도, 지역간 복선 또는 지역간 단선)에 따른 지연확산의 경향 및 경합처리의 여지를 정리하였다. 한국철도의 주요 노선(경부선, 호남선, 전라선, 장항선, 중앙선, 도시철도)들에 대한 열차운행 현황을 조사하여 제시하였으며, 각 노선에 적용하기 위한 문제를 4가지 형태(문제 1, 문제 2A, 문제 2B, 문제 3)로 제시하였다. 각 노선별 RCDRS 적용방안으로 각 노선에 대한 적용문제, 목적함수 및 해당 문제의 해법에 대한 기본방향을 제시하였다. 이와 같이 제시한 자료들을 바탕으로 한국철도의 RCDRS 적용은 단계적으로 진행되어야 하며, 작고 쉬운 문제로부터 크고 어려운 문제로 확장하여 적용해야함을 제

시하였다.

현재 철도청이 수행하는 '사령실 통합 신호설비 시설' 사업과 관련하여, RCDRS의 1단계 적용방안을 제시하였다. 철도청에서는 RCDRS를 경부선 및 호남선의 문제 1을 대상으로 RCDRS를 적용하고, 동적 우선순위를 적용하는 시뮬레이션 기법을 이용하여 개발하는 것이 유효한 방향임을 제시하였다.

참고문헌

1. B. Adenso-Diaz, M. Oliva Gonzalez, P. Gonzalez-Torre, On-line timetalbe re-scheduling in regional train services, Transportation Research Part B, vol. 33, 1999, p.p. 387-398.
2. 철도연, CTC 통합을 위한 Traffic Management 실시설계 자문, 2001. 12
3. A. S. Lang and C. D. Martland, Reliability in Railroad Operations: Studies in Railroad Operations and Economics, vol. 8, MIT Report No. R72-74, Transportation System Devison, M.I.T. (Cambridge, MA, 1972)
4. Peterson, E. R., Over the Road Transit Time for a Single Track Railway, Transportation Science, vol. 8, 1974.
5. Peterson, E. R., Interference Delays on a Partially Double-Trackd Railway with Intermediate Signaling, Proceedings of Sixteenth Annual Meeting Transportation Research Forum, Toronto, 1975
6. Peterson, E. R. and Taylor A. J., A Structured Model for Rail Line Simulation and Optimization, Transportation Science, vol. 16, 1982
7. Peterson, E. R., Taylor A. J., and Martland, C. D., An Introduction to Computer Assisted Train Dispatch, Journal of Advanced Transportation, vol. 20, 1986.
8. Peterson, E. R., An Optimal Scheduling System for the Welland Canal, Transportation Science, vol. 22, 1988.
9. Peterson, E. R., Talbot, F. B., Solowinski, R., and Weglarz, J., Computational experience with a backtracking algorithm for solving a general class of precedence and resource-constrained scheduling problems, European Journal of Operational Research, vol. 49, 1990.
10. Sauder, R. L. and W. M. Westerman, Computer Aided Train Dispatching Decision Support Through Optimization, Interfaces, vol. 13, no. 6, 1983.
11. Jovanovic, Dejan Nenad, Improving railroad on-time performance: Models, Algorithms and Applications, Ph.D Dissertation, 1989, Univ. of Pennsylvania.
12. Jovanovic, Dejan Nenad and Harker, P. T., A Decision Support System for Train Dispatching: An Optimization-Based Methodology, Journal of the Transportation Research Forum, vol. 32, 1991.
13. R. G. J. Mills, S. E. Perkins, and P. J. Pudney, Dynamic Rescheduling of Long-Haul Trains for Improved Timekeeping and Energy Conservation, Asia-Pacific Journal of Operational Research vol. 8, 1991, pp. 146-165.

14. A. Higgins, E. Kozan, and L. Ferreira, Optimal Scheduling of Trains with Dynamic Priority, Queensland Univ. of Technology, Physical Infrastructure Center, Research Report 93-22, 1993.
15. A. Higgins, L. Ferreira, and E. Kozan, Mathematical Modelling of Train Delays, Queensland Univ. of Technology, Physical Infrastructure Center, Research Report 94-20, 1994.
16. A. Higgins, and E. Kozan, L. Ferreira, Optimal Scheduling of Trains on A Single Line Track, Transportation Research Part B, vol. 30, no. 2, 1996, pp. 147-161.
17. L. Ferreira, and A. Higgins, Improving the Reliability of Train Arrival Times, Queensland Univ. of Technology, Physical Infrastructure Center, Research Report 95-21, 1995.
18. FRA, A Preliminary Examination of Railroad Dispatcher Workload, Stress, and Fatigue, PR02-04, 2002.
19. Ismail Sahin, Railway Traffic Control and Train Scheduling based on Inter-train Conflict Management, Transportation Research Part B, vol. 33, 1999. pp. 511-534.
20. MARCO Project Deliverable Documnet 3.1.
21. MARCO Project Deliverable Documnet 5.1.
22. MARCO Project Deliverable Documnet 7.1.
23. MARCO Project Deliverable Documnet 9.1.
24. Peter Hellstrom, Ingemar Frej, Anders Gideon, and Bengt Sandblad, Algorithms and Control Systems for Computer-Aided Train Dispatching, Proceeding of WCRR 1997.
25. Arne W. Andersson, Ingemar Frej, Anders Gideon, Peter Hellstrom, and Bengt Sandblad, A System Analysis Approach to Modelling Train Traffic Control, Proceeding of WCRR 1997.
26. ADtrnz-DaimlerChrysler Rail Systems (Signal) DK, System Introduction Traffic Management System, version 1, 2000.
27. S. Berge-Brezetz, S. Benoliel, G. Bain and G. Menapace, Computer aided methods for railway operation conflict solving, Computers in Railways, 1998, p. 563~572.
28. A. Stolk, Automatic Conflict Detection and Advanced Decision Support for Optimal Usage of Railway Infrastructure : Purpose and Concept, Computers in Railways, 1998, p. 629~638.
29. F. Makkinga, and S. Metselaar, Automatic Conflict Detection and Advanced Decision Support for Optimal Usage of Railway Infrastructure : Prototyping and Test Results, Computers in Railways, 1998, p. 907~915.
30. Kiyotoshi Komay, and Toyoo Fukuda, A Knowledge-Based Approach for Railway Scheduling, Proceeding of the 7th Conference on Artificial Intelligence Application, 1991, 404-411.
31. Kiyotoshi Komaya, An Integrated Framework of Simulation and Scheduling in Railway Systems, Computers in Railway, 1992. 611-622.
32. H. Schaefer and S. Pferdenges, An Expert System for Real-Time Train Dispatching, Computers in Railway, 1994. (Siemens)
33. A. Fernandez, F. de Caudra, and A. Garcia, SIRO : An Optimal Regulation System in

- an Integrated Control Center for Metro Lines, *Computers in Railway*, 1996. pp. 300-308.
34. A. Fernandez, F. de Caudra, and A. Garcia, Results of the Implementation of an Optimal Control System in an Integrated Control Center for Metro Lines, *Computers in Railway*, 1998, 553-562.
 35. Y. Larroche, R. Moulin, and D. Gauyacq, SEPIA: A Real-Time Expert System that Automates Train Route Management, *Control Eng. Practice*, vol. 4, no. 1, 1996, pp. 27-34.
 36. M. Mazzarello, and R. Copello, Conflict Resolution in Railway Traffic Control by a Distributed Intelligence Approach, *Computers in Railway*, 2000, pp. 789-798.
 37. Faruk Polat, Shashi Shekhar, and H. Altay Guvenir, Distributed Conflict Resolution Among Cooperating Expert Systems, *Expert Systems*, vol. 10, no. 4, 1993, pp. 227-236.
 38. A. Mascis, D. Pacciarelli, and S. van de Stouwe, DSS for Real Time Traffic Optimization, Working Paper.
 39. Alessandro Mascis, and Dario Pacciarelli, Job-shop scheduling with blocking and no-wait constraints, *European Journal of Operational Research*, vol. 143, 2002, pp. 498-517.
 40. Kengo TSUTUI, COSMOS, the Latest Comprehensive Control System for the Shinkansen, *Japanese Railway Engineering*, no. 140, 1998, pp. 23-25.
 41. 오석문, 김영훈, 김성호, 김동희, 홍순흠, 유전자 알고리즘을 이용한 열차경합 해소문제에 관한 연구, *대한전기학회 하계 학술대회 논문집*, 2002.
 42. 오석문, 홍순흠, 열차경합 해소에서 유전자 알고리즘의 적용에 관한 연구, *한국철도학회 춘계 학술대회 논문집*, 2002.
 43. 오석문, 홍순흠, MARCO · COMBINE 프로젝트의 조사 연구, *한국철도학회 춘계 학술대회 논문집*, 2003.