고속철도차량의 유지보수계획

Rolling Stock Maintenance Scheduling for High-Speed Railway

김 동 희 *
Kim Dong Hee
홍 순 흠 **
Hong Sun Heum

Abstract

The process of railway traffic planning is composed of several steps such as long - term, mid - term, short - term, and real - time plan. The plannin g of v ehicle and manpower resources is a main research topic in tactical short - term planning step . Railway vehicle is usually consisted of a power car, passenger/freight cars and human resource is composed of engine driver, cabin crew, ground personnel. So far , power car was main research target in railway vehicle scheduling problem. Recently according as the light electric railway or high - speed railway is introduced, the operational planning of train set vehicles become important . In this paper , we introduce the conceptional model for trainset rostering problem and developed heuristic algorithm.

1 . 서론

철도에서 고품질의 수송서비스를 제공하기 위해서는 제한된 자원을 효율적으로 이용하기 위한 운영체계의 구축과 운영기술의 확보는 필수적이다. 이러한 철도운영기술에는 수송수요 예측 및 수익관리, 철도 네트워크 설계 및 선로계획, 수송계획, 열차계획, 차량운용계획, 승무원운용계획, 실시간 제어관리 등 다양한 연구개발 분야들이 포함된다. 이들은 장기계획, 중기계획, 단기계획, 실시간 계획과 같이 단계적으로 해당 범위의 문제들을 해결함으로써 수행될 수 있으며 이러한 일련의 과정을 철도교통계획(railway tr affic plannin g)이라 부른다[6]. 전략적 수준인 장기계획은 신선 혹은 역건설, 용량증설/ 감소계획, 수송수요예측과 같은 내용을 포함하고 있는 네트워크 계획(network planning)이 해당되며, 전략적 혹은 전술적 수준인 중기계획에는 운행노선선정 및 운행횟수결정, 선로이용율 극대화 및 균형활용 등과 같은 내용을 포함하는 선로계획(line planning)이 해당된다. 그리고 전술적 수준인 단기계획에는 정규열차 스케줄 작성 및 조정(train schedule generation)과 차량 및 승무원 스케줄 작성(rolling stock & personnel schedule generation)이 해당된다.

* 한국철도기술연구원, 운영 · 정보시스템연구팀, 선임연구원, 공학박사, 031- 460- 5483, kdh777@krri.re .kr
** 한국철도기술연구원, 운영 · 정보시스템연구팀장, 공학박사, 031- 460- 5480, shong@krri.re .kr

마지막으로 계획대로 운영하면서 실시간으로 발생되는 지연, 사고, 고장과 같은 외란요인들에 대한 대처와 그로 인한 스케쥴의 국부적 조정문제와 같은 운영수준의 실시간 흐름제어 기능(real-time traffic control)이 있다. 전술적 단기계획에서 가장 중요한 자원으로는 차량과 인적자원이 있다. 차량은 동력차와 객화차, 그리고 단거리 철도교통 혹은 고속열차에 사용되는 편성단위가 있으며, 인적자원에는 기관사, 객식승무원, 지상요원이 있다.
지금까지 차량 스케쥴 문제들은 상대적으로 중요도가 높은 동력차에 높은 관심을 가져왔으나, 최근에는 경량전철 및 고속열차가 도입되면서 차량편성 단위의 자원운용계획이 중요하게 대두되었다[2]. 특히 고속철도의 경우 항공기 수준의 유지보수가 필요하게 되었으며, 본 연구에서는 이러한 고수준의 유지보수를 고려한 철도차량 편성 스케쥴링 문제를 위한 개념적 모델과 발견적 해법 및 그 적용사례를 제시하고자 한다.

2 . 차량 스케쥴링

차량 및 승무원 스케쥴링 문제는 추가제약이 고려된 경로설정 문제로 볼 수 있다. 일반적으로 경로설정 문제는 수행되어야 할 활동의 공간적 특성, 즉 차량의 연속적인 공간이동에 주안점을 두고 있다. 그러나 스케쥴링 문제에서는 각 활동에 시간이 부여된다. 결과적으로 각 활동에는 공간과 시간 양자가 다 고려되어야 하며, 이러한 특성은 철도차량 스케쥴링 문제에서도 마찬가지이다[4]. 철도에서 수송계획 혹은 열차스케쥴을 현실화하기 위해서는 필요한 차량을 순환시키는 것이 필요하며, 각 차량은 기관차(locomotive or engine)와 객화차(carriages)로 구성된다.
열차편성은 객화차의 결합(coupling)과 분해(decoupling)로 인해 서비스 도중에 변하게 된다. 장거리 철도교통에서는 가장 중요하게 요구되는 것은 스케쥴상의 열차에 기관차를 할당하는 것이며, 가용한 차량에 따라서 어떤 역에서 열차편성을 결합 또는 분해할 것인지를 결정해야 한다. 경량전철과 같은 단거리 철도교통이나 고속철도에서 사용되는 차량은 주로 단일 열차편성으로 구성된다.
차량 스케쥴링 혹은 차량운용계획은 열차계획에 명시된 열차에 일련의 제약조건을 만족하면서 효율적으로 차량을 할당하는 방법에 관한 계획이다. 즉, 다양한 제약들에 대하여 관련 비용을 최소화시키면서 주어진 스케쥴을 수행할 수 있도록 철도 네트워크의 경로에 차량을 할당하는 문제이며, 열차할당문제(train assignment problem), 열차로스터링문제(train rostering problem), 차량 스케쥴링(vehicle scheduling), 차량 로스터링(rolling stock rostering)과 같이 다양하게 불린다[5]. 철도에서의 차량운용계획은 주로 비용관점에서 중요성이 높은 기관차의 운용계획을 의미하게 된다. 열차스케쥴은 철도회사가 보유한 차량 및 종업원 등 자원을 투입하여 생산해야 하는 수송서비스의 목록이다. 효율적인 자원의 활용이라는 관점에서 동력차 혹은 기관차를 수송서비스에 할당하는 계획이 수립되어야 하며, 이를 동력차 운용계획(locomotive scheduling)이라 한다[1].
이러한 차량운용계획은 전술적(tactical) 및 운영상 단계(operational level)에서 모두 다루어질 수 있다. 전술적 단계에서 다루어지는 차량운용문제는 그림 1과 같이 주로 주간단위로 직무(열차서비스)를 수행하면서 차단(fleet)을 순환시키는 로테이션(rotation)을 생성하는 문제이다. 이러한 로테이션 생성은 작성한 스케쥴이 실제로 차량운용시 가능한지를 판단할 수 있는 중요한 근거가 될 수 있다. 이를 위하여 차량에 대한 기본적인 주기검수가 고려되어야 하며, 검수 체크가

각 차단에 주어질 수 있는지 그리고 역에서의 열차가 연결규칙이 위배되지 않는지를 체크하는 도구가 된다. 또한 이렇게 유지보수 검사(maintenance check)와 연결규칙(connection rules)를 고려하여 생성된 주간로테이션의 수는 스케줄을 수행하기 위해 필요한 최소 차량편성수를 결정하는 중요한 요소이게 된다. 운영 단계에서 다루어지는 차량운용문제에서는 로테이션 생성문제에서보다 더 실질적이고 구체적인 검수조건들과 각종 운영상 규칙들을 고려하여 상세한 차량별 운용계획, 즉 차량할당계획 혹은 차량 로스터링을 수립하게 된다[3].

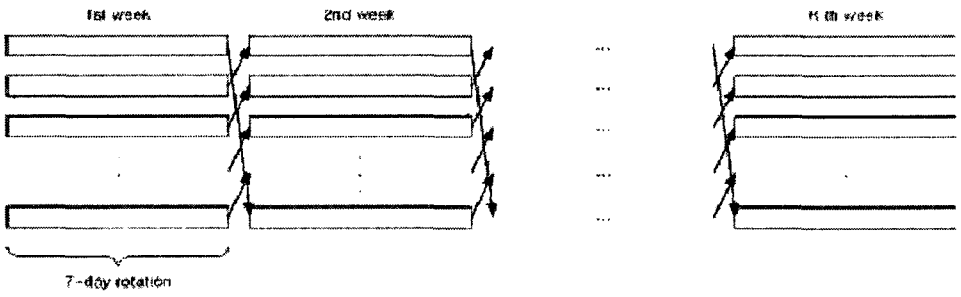

그림 1. 주간 로테이션의 개념

3 . 철도차량 로스터링 모델과 발견적 해법

철도에서의 로스터링(rostering) 문제라 함은 수송서비스를 최대한 달성하면서 경제적이고 효율적인 철도자원의 활용이라 할 수 있다. 이는 자원할당(resource allocation) 문제로도 볼 수 있으며, 이러한 철도자원에는 크게 차량자원과 인적자원이 있다. 차량자원은 다시 동력차, 객화차, 그리고 동력차와 객차의 편성단위가 있으며, 인적자원은 기관사(동력차승무원), 객실승무원, 지상요원으로 구성된다(그림 2 참조). 지금까지 차량자원의 로스터링 문제들은 앞서 언급한 바와 같이 대부분 상대적으로 중요도가 높은 동력차 쪽이 많은 관심을 받아왔으며, 인적자원 로스터링 문제에서는 주로 승무원 쪽에 많은 비중을 두어왔다. 그러나 최근 고속철도의 도입과 더불어 고가이면서 편성단위로 운행하는 고속열차가 투입되게 되었으며, 따라서 동력차(engine)/객차(car) 개념이 아닌 차량편성(trainset) 단위의 차량자원계획이 필요하게 되었다. 본 장에서는 이러한 고속철도 차량을 대상으로 하여 차량편성 단위의 차량할당 혹은 로스터링 문제를 위한 개념모델을 수립하고, 실시간으로 해를 산출할 수 있는 휴리스틱 알고리즘(발견적 해법) 개발결과를 제시한다.

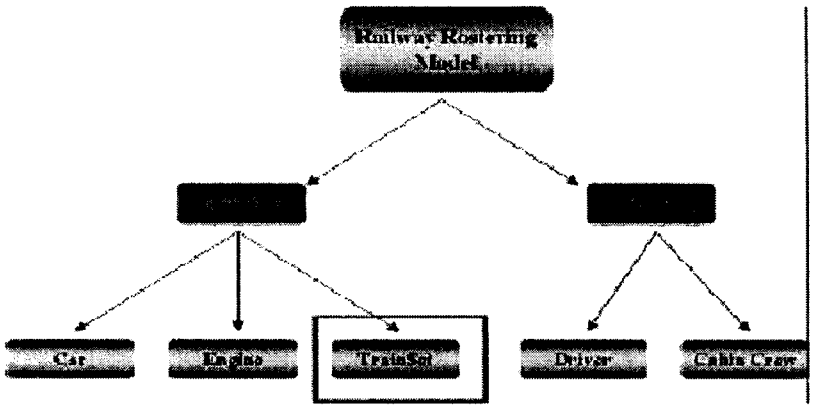

그림 2. 철도에서의 로스터링 모델의 분류

3.1 차량편성 로스터링 모델

로스터링 모델에서 목적함수로는 검수량 최적화, 편성별 주행거리 최적화, 기지간 검수부하 최적화, 정지시간 최소화 등을 사용할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 검수량 최소화로 설정하였으며, 이는 총 검수횟수를 최소화하는 개념으로 검수횟수를 합하거나 검수주기에 도달할 때까지 남아있는 잔여일수 또는 잔여거리를 누적함으로써 달성될 수 있다. 로스터링 결과에서 만족해야하는 기본제약조건으로는 다음과 같이 운용관련제약과 검수관련제약 2가지가 있다.

- 직무관련제약 : 수행해야 하는 각 직무는 어느 편성이든 반드시 한군데만 포함되어야만 한다. 이러한 직무에는 계획작성자가 지정한 휴지나 예비차량 개념도 포함시킬 수가 있다.
- 검수용량제약 : 특정시간대/특정검수의 누적갯수가 해당 검수종류/시간대의 처리능력한도 이내이어야만 한다.

위의 기본제약조건 외에 기타조건으로는 다음과 같은 것들이 있다.

- 각 차량편성에 대한 시단역은 해당 편성이 현재 위치해 있는 위치이어야 한다
- 각 차량편성에 대한 할당안에서 선행직무의 종단역과 후행직무의 시단역은 동일해야만 한다.
- 차량편성 유형과 직무유형이 대응 가능해야만 한다(고속열차의 경우 항상 만족함).
- 각 차량편성에 대한 할당안은 그림 3에서와 같이 검수체계에 규정된 주기검수 조건을 만족해야만 한다.

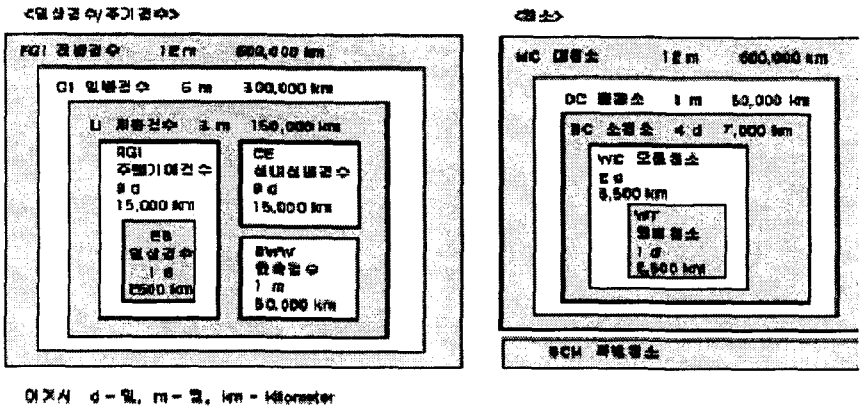

그림 3. 규정된 검수체계

3.2 발견적 해법

전술한 차량편성 로스터링 모델을 해결하기 위해서는 우선 개념적 모델의 목적함수와 각 제약을 수학적 수식으로 표현해야만 하며, 이것이 가능할 경우(수학적 표현이 불가능한 복잡한 제약도 상당수 존재함) 이미 알려져 있는 (혼합)정수계획법(mixed integer programming) 알고리즘을 사용하여 해결 가능할 것이다. 그러나 이러한 방법은 적은 규모의 문제에 대해서만 실시간 이내에 해결가능하며, 현장의 실제 대규모 크기(Large Scale)문제에 대해서는 허용 가능한 시간 이내에 해를 구하기란 불가능한 것으로 알려져 있다.
따라서 본 연구에서는 반드시 최적해는 아니더라도 대규모의 문제에 대하여 실시간(real time)으로 양질의 해를 도출할 수 있는 휴리스틱으로 차량충당 알고리즘을 제시한다. 우선 알고리즘 수행을 위한 기본가정으로는 다음과 같은 것들이 있다.

- 일일 기반의 검수인 일상검수(ES)가 포함되어 있는 7일 운용(7-day rotation)자료가 주어져야 한다.
- 7일 운용 내에 포함되어 있는 일상검수에서만 차량을 교체하며, 차량 교체와 동시에 상위검종을 수행할 수가 있다. 즉, 상위검종을 수행하지 않을 경우에는 7일 운용의 경로를 그대로 수행하게 된다.
- 검수의 효율적 반영을 위하여 그림 4에서와 같이 3가지 검종으로 분류하고 이들을 검종계열이라 명한다. 검수는 각 검종계열 내에서 검수주기를 따져서 적용하게 되며, 계열2의 경우 그림5와 같이 순서대로 수행하게 된다.

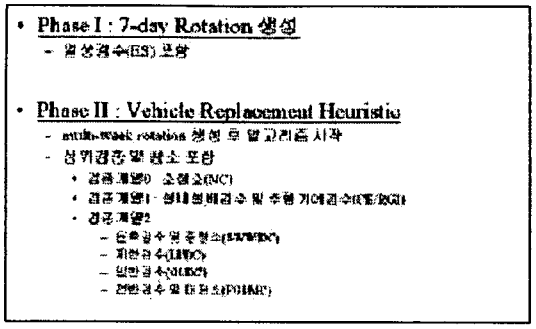

그림 4. 차량충당 알고리즘의 구성

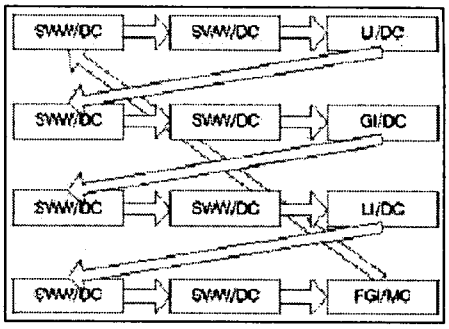

그림 5. 검종계열2의 적용순서

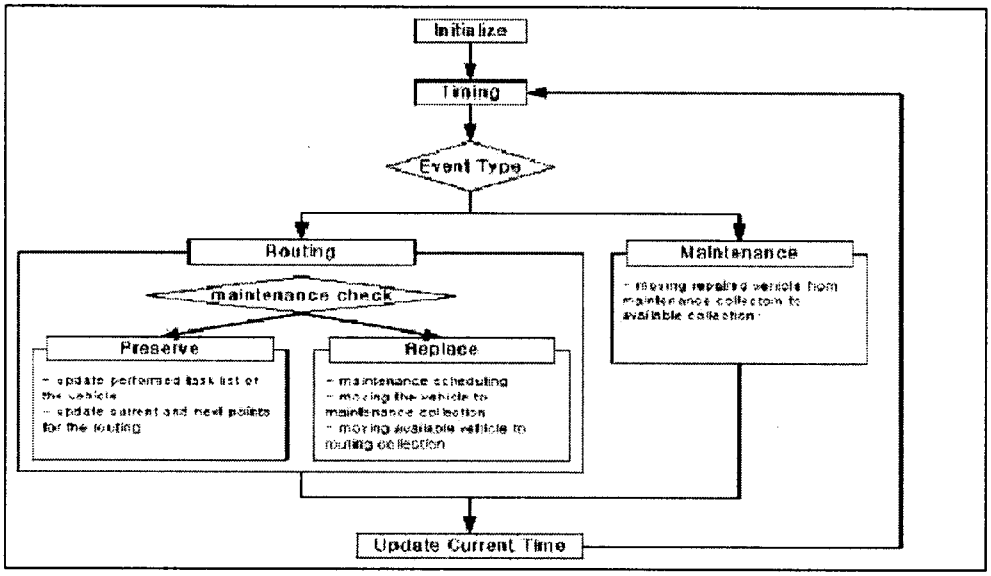

그림 6. 차량충당 알고리즘의 흐름도

차량충당 알고리즘은 앞에서 생성된 다주간 로테이션을 기반으로 차량을 할당/교체해 가는 방식의 알고리즘이다. 알고리즘의 기본 골격은 그림 6에서와 같이 사건기반(event driven)구조로 되어 있으며, 시간증가는 이산형 시간증분(discrete time advancing) 방식으로 다음의 가장 빠른 차량 교체 포인트를 찾아가면서 시간이 증가된다.

3.3 차량충당 알고리즘의 자료구조

제시된 차량충당 알고리즘에서는 개체개념의 자료구조를 사용하고 있으며, 각 개체는 고유의 속성을 가지고 있다. 사용된 개체는 다음과 같이 크게 6가지의 종류로 구성되어 있다.

○ 컬렉션 개체(collection obj ects) : 컬렉션 개체는 차량 개체들을 모아서 보유하고 있는 집합 개체로서 다음과 같은 3가지 종류가 사용된다.

· ColRouting : 운용 수행중인 차량 개체들을 보유함
· ColMaintenance : 검수 수행중인 차량 개체들을 보유함
· ColAvailableVeh : 운용도 검수도 수행하지 않는, 즉 기지에서 검수 후 대기중인 차량 개체들을 보유함

○ 차량 개체(vehicle object) : 차량개체는 다음과 같은 속성들을 갖는 기본적인 독립 엔터티(entity)로서 위에서 설명한 컬렉션 개체에 포함되는 개체이다. 차량개체는 본 절의 앞부분에서 설명한 검종계열별로 수행이력에 대한 정보를 가지고 있으며, 지금까지 수행한 작업의 이력정보를 갖는 작업리스트 컬렉션을 포함하고 있다.

· 차량번호 : 차량 개체의 고유 일련번호
· 검종계열0 일시, 누적거리 : NC 검종에 대한 수행이력
· 검종계열1 일시, 누적거리 : CE/RGI 검종에 대한 수행이력
· 검종계열2 일시, 누적거리, Point : 검종계열2 검종에 대한 수행이력
· 작업리스트 컬렉션 : 수행한 작업에 대한 이력으로 작업개체를 포함

○ 직무 개체(task obj ect) : 직무 개체는 차량 개체가 수행해야 하는 작업으로서 운용이나 검종에 대한 수행이 여기에 해당된다. 다음과 같이 각 직무는 시작시간과 종료시간을 그 속성 값으로 가진다. 직무 개체는 앞에서 설명한 차량 개체의 작업리스트 컬렉션에 작업이력으로서 저장된다.

· 작업종류 : 운용, 검종 · 시작시간 · 종료시간

○ 경로 개체(routing obj ects) : 경로 개체는 입력받은 다주간 로테이션을 저장하고 있는 개체로서, 각 운용별 시간대에 따른 직무 및 일상검수 수행정보를 가지고 있다. 이러한 정보유지를 위하여 다음과 같은 4가지 정보를 동시에 관리하게 된다.

○ 검수 개체(maintenance obj ects) : 검수종류별 보유 검수라인에 대한 작업시간대별 자원이용현황을 저장하고 있는 자료로 검수계획시 가용상황을 판단하고 검수작업을 기록하게 된다.

○ 시간관리 개체(timing obj ects) : 시간관리 개체는 사건기반 알고리즘 구조에서 가장 핵심이 되는 자료구조로 시간증분을 관리하기 위한 기본정보가 된다.

· NextTiming_RoutingPoint : 경로들 중 가장 빠른 다음 경로교체 체크 포인트
· NextTiming_Maintenance : 검수 중인 차량들 중 검수가 가장 빨리 끝나는 시간
· NextTiming_EventType : 가장 빠른 다음 처리할 이벤트 유형

3.4 적용사례

입력자료로는 일상검수가 포함된 7일간의 33개 운용(routing)을 사용하였으며, 차량의 검종별 검수이력은 각 검종의 검수주기 내에서 랜덤하게 생성하여 초기 데이터를 만들었다. 또한 일상검수가 야간에만 계획이 되어있는 자료(시나리오1)와 야간/주간에 고루 분산되어 있는 경우(시나리오2)를 나누어 실험하였다.

표 1. 시나리오1의 경우에 대한 수행결과

계획주기	소요차량수	검종별회수							검수총회수	소요시간(초)	입력ES수
		ES	NC	CE/RGI	SWW/DC	LI	GI	FGI/MC			
1주일	49,50,51	204	68	24	10	0	0	1	309	7.66	231
2주일	53,54,55	392	158	66	11	1	2	2	631	24.86	462
3주일	52,54,56	582	232	108	19	1	3	2	945	75.06	693

표 2. 시나리오2의 경우에 대한 수행결과

계획주기	소요차량수	검종별회수							검수총회수	소요시간(초)	입력ES수
		ES	NC	CE/RGI	SWW/DC	LI	GI	FGI/MC			
1주일	48,49,50	164	66	31	8	4	0	0	273	9.66	192
2주일	48,50,51	328	139	70	11	2	1	0	551	26.47	396
3주일	51,52,53	497	211	105	15	6	1	0	835	53.68	600

수행결과를 살펴보면 일상검수가 야간에만 계획되어 있는 시나리오1의 경우보다는 야간 및 주간 양쪽에 다 분포되어 있는 시나리오2의 경우가 약간 우월한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 시나리오1의 경우 검수 후 작업에 다시 투입되기까지 낭비요소가 시나리오2의 경우보다 상대적으로 많게 되는 때문인 것으로 설명된다. 또한 계획주기가 커질수록 고려되어 포함되는 상위검종이 추가되는 이유로 소요차량수가 다소 증가되는 현상을 보이고 있다. 즉, 고정 차량수를 운영할 경우 여유율이 적어진다는 것으로 해석할 수 있을 것이다. 그림 7,8은 시나리오2에서 3주일간의 차량할당 결과를 간트챠트로 보여주고 있다.

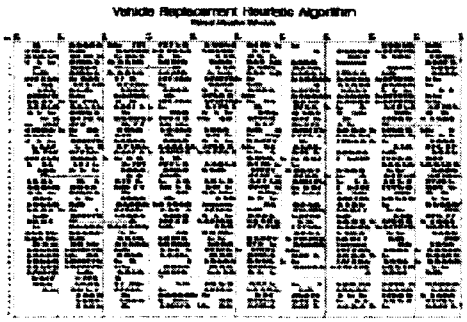

그림 7. 간트챠트1

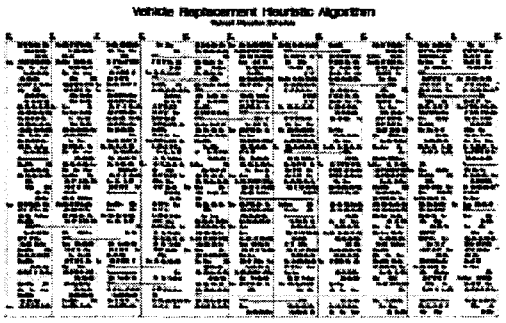

그림 8. 간트챠트2

4 . 결론

철도시스템은 거대·복잡한 시스템으로 고가의 인프라와 차량, 그리고 인력자원을 활용하고 있다. 따라서 차량이나 승무원 같은 철도자원을 효율적으로 활용함으로써 많은 비용이 절감 가능할 것이다. 특히 고속열차의 도입으로 차량 구입을 위한 비용은 더욱 커졌으며, 이러한 환경에서 현재 수작업의 일일기반으로 철도차량을 할당하여 운영하는 방식에서 탈피할 필요가 있다. 본 연구에서는 고속철도에서와 같이 편성단위로 차량운용계획을 수립하는 차량편성 로스터링 문제를 정의하고 그 개념적 모델을 제시하였다. 또한 이를 해결하기 위한 발견적 해법인 차량충당 알고리즘을 개발하였으며, 그 적용사례를 제시하였다.

추후과제로는 보다 최적해에 가까우면서 실시간에 적용 가능한 알고리즘의 개발이 필요하며, 현장에서 사용 가능한 시스템으로 설계와 개발이 필요할 것이다. 또한 연구결과를 확장하여 승무원 문제로의 변형적용이 가능할 것이다.

5. 참고문헌

[1] 한국철도기술연구원, 동력차 및 중장거리 동차운용 스케줄의 최적화에 관한 연구, KRRI 연구 99- 06, 1999

[2] 한국철도기술연구원, 수송계획 및 제어관리 최적화, KRRI 연구 01- 61, 2001

[3] K.Ziarati, F.Soumis , J.Desrosier s , S.Gelinas and A.Saintonge, "Locomotive as signment with heterogeneous consists at CN North America", European Journal of Operations Research 97, 1997

[4] L.Bodin , B.Golden , A.As sad and M.Ball, "Routin g an d scheduling of v ehicles and crews ", Comput . & Ops Res ., Vol. 10, No. 2, 1983

[5] M.R.Bussieck, P.Kreuzer and U.T.Zimmermann , "Optimal lines for railway systems ", European Journal of OR 96, 1996

[6] M.R.Bussieck , T.Winter and U.T.Zimmermann , "Discrete Optimization in public Rail Transport ", Working Paper , 1997