

지능형 철도선형계획 기술개발 최종보고서

2014. 03.

Infrastructure
R&D Report

주관연구기관 / 한국철도기술연구원
공동연구기관 / (주)평화데이터시스템

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부 장관 귀하

이 보고서를 "지능형 철도선형계획 기술개발"연구과제의 보고서로 제출합니다.

2014 . 03.

주관연구기관명 : 한국철도기술연구원

주관연구책임자 : 김 정 현

연 구 원 : 오 지 택

" : 구 동 회

" : 신 영 호

협동연구기관명 : (주) 평화데이타시스템

협동연구책임자 : 서 기 훈

보고서 요약서

과제고유번호	13PRTD-C 061721-02	해 당 단 계 연 구 기 간	2013.03.27.~ 2014.03.28	단 계 구 분	2/ 2
연 구 사 업 명	중 사 업 명	건설교통기술촉진 연구사업			
	세부사업명	지능형 철도선형계획 기술개발			
연 구 책 임 자	김정현	해당단계 참 여 연구원수	총 : 8 명 내부 : 4 명 외부 : 4 명	해당단계 연 구 비	정부 : 427,000천원 기업 : 143,000천원 계 : 570,000천원
		총연구기간 참 여 연구원수	총 : 9 명 내부 : 4 명 외부 : 5 명	총연구비	정부 : 708,000천원 기업 : 237,000천원 계 : 945,000천원
연구기관명 및 소 속 부 서 명	한국철도기술연구원 교통체계분석연구단		참여기업명	(주)평화데이타시스템	
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위 탁 연 구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약				보고서면수	329
○ 철도선형설계 시 최적노선을 도출하고, 건설비용을 산출하는 소프트웨어를 개발하고자 함 ○ 철도노선 최적화 기술, 노선선정 및 3D simulation을 개발하고 검증/보완함 ○ 개발 프로그램 적용 결과, 최적 노선(ei_rail 최적안)을 도출하였으며, 최적노선과 기본설계안의 비교를 실시함 ○ 기본설계안에 비해 ei_rail안이 8,914억원의 공사비가 절감되는 것으로 검토됨 ○ 공사비 절감 주요원인은 다음과 같음 - 구간연장이 짧고, 산지부보다 평지부의 비율이 높음 - 교량구간이 짧게 형성됨					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	지능형 철도선형설계, 설계노선 3D 시뮬레이션, TPS, 철도노선최적대안 선정			
	영 어	Intelligent railway linear planning, Planning route 3D simulation, TPS, Selection of optimization railway route			

요 약 문

I. 제 목

지능형 철도 선형계획 기술 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

최근 저탄소 녹색성장 패러다임으로 세계적으로 철도에 대한 투자가 확대되고 있으며, 이에 따라 철도시장이 발전하고 있는 추세이다.

철도시장의 비약적인 발전과 더불어 국내에서는 한국형 고속철도열차 개발 등 철도차량 분야에서 기술발전이 이루어지고 있다. 철도선형설계분야에서는 선형설계에서의 작업시간 절감을 위해 다수의 철도선형프로그램이 개발되었지만 국외 설계기준 미적용, User Interface의 불편함 및 수치데이터의 부정확성 등으로 인해 사용률이 저조하다.

국내 철도사업의 신속한 선형설계 및 국내 기업들의 해외 철도시장 진출을 위하여 국내 철도선형설계 기술자들의 손쉬운 사용, 국외 설계기준 반영, 3D 시뮬레이션 기능, 수치지도의 위성데이터와의 연계 기능 등이 포함된 한국형 철도선형설계 프로그램의 개발이 필요하다.

따라서, 본 연구의 목적은 지역간 중장거리 철도건설사업의 계획단계에서 수치지도 등을 이용하여 최적의 노선을 도출하고, 이에 소요되는 건설비용을 자동적으로 산출하는 소프트웨어를 개발하는 것이다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구는 1차년도와 2차년도로 나누어 수행하였다.

1차년도에는 개발하고자 하는 선형설계 프로그램을 위해 우선적으로 국내외 철도 설계 사례 분석 및 기술동향 파악, 철도설계 기준 분석, 설계옵션 관리기능 개발, 공사비 산정 모델 개발, 지형정보활용 기술 개발, TPS 제작을 위한 기초분석을 수행한다.

2차년도에는 철도노선 최적화 기술, 노선선정 통합 프로그램 및 3D 주행 시뮬레이션을 개발하고 검증/보완을 수행한다.

IV. 연구개발결과

1차년도 연구 내용을 바탕으로 2차년도에서는 철도선형설계 프로그램을 개발하고 검증을 실시하였다.

개발된 프로그램을 적용한 결과, ei_rail 도출 9개의 대안 중 공사비가 가장 저렴한 대안 1을 ei_rail 최적안으로 선정하여 기본설계안과 비교하였다. 기본설계안의 ei_rail 공사비 산출 기준에 따른 개략 공사비는 18,705억원, ei_rail 최적노선은 9,791억원으로 산출되어, 기본설계안에 비하여 ei_rail 안이 8,914억원 절감되는 것으로 검토되었다.

기본설계안에 비해 ei_rail안의 노반 공사비 절감 주요 원인을 살펴보면, 기본설계안에 비하여 구간 연장이 1.38km(1.6%) 짧고, 노선 통과 구간이 산지 부보다는 평지부를 통과하는 구간이 차지하는 비율이 많았다. 또한, 기본설계안이 아산만 신언천 통과 구간이 장대 교량으로 통과하는데 비하여, ei_rail 안은 노선을 우회하여 상대적으로 교량 연장이 짧게 형성되어 교량 연장을 축소하는 선형으로 계획되었고, ei_rail안이 기본설계안에 비하여 평지부를 통과하므로 터널구간을 축소하고, 토공구간의 연장이 상대적으로 많이 차지하고 있어, 전체 공사비를 절감하는 효과가 도출되었다.

V. 연구개발결과의 활용계획

본 연구의 철도선형설계 프로그램의 개발을 통하여 시장변화의 첫 걸음을 내딛었다고 볼 수 있다.

개발된 프로그램을 통해 새로운 철도건설사업 계획을 보다 효율적이고 다양한 평가척도를 적용하여 수립할 수 있을 것이다. 이러한 기술을 활용함으로써 글로벌한 저탄소 녹색성장 기조에 부합하는 우리나라 철도산업 성장 정책에 도움이 될 것이며, 해외 철도시장 진출에 있어서도 계획단계부터 건설, 운영에 이르기까지 전 분야를 지원 가능할 것으로 보인다.

향후 지속적인 투자가 이루어진다면 국내외의 철도경쟁력을 보다 빠르게 갖춰 나갈 것으로 기대된다.

CONTENTS

Chapter 1. Introduction

Section 1. Background and purpose -----	1
1. Background -----	1
2. Necessity -----	2
3. Purpose -----	4
Section 2. Contents of the study -----	5
1. Annual major contents -----	5
2. Method -----	7

Chapter 2. Summary of last year

Section 1. Literature review -----	8
1. Domestic technologies trend of railway alignment planning -----	8
2. Overseas technologies trend of railway alignment planning -----	14
3. Comparison of technique in domestic and foreign country and analysis of problem -----	19
Section 2. Set up design standard and developing of management function --	22
1. Summary -----	22
2. Set up design standard by rail type -----	23
3. Development of management function -----	34
Section 3. Development of cost estimation and technology using geographic information -----	45
1. Summary -----	45
2. Development of cost estimation model about rail route -----	46
3. Development of technology using geographic information -----	73

Chapter 3. Development of intelligent railway alignment planning program

Section 1. Railway optimization techniques -----	104
1. Major process for optimizing the railway -----	104
Section 2. Evaluation of railway alignment elements by AHP -----	117
1. Multi-criteria decision making -----	117
2. Summary of AHP -----	118
3. Theoretical background -----	119

4. AHP analysis	121
5. Evaluation of AHP	134
6. AHP for evaluation of railway linear design elements	137
7. Comprehensive weight for evaluation of railway linear design elements ..	142
Section 3. The positioning of the structure and the selecting of the type by characteristics	143
1. Bridge type selecion	143
2. Determine the location of the temporary bridge	145
3. Estimation of the total length by the location of the temporary bridge ..	145
4. Minimum required span length	146
5. Applicable bridge type selection	147
6. Cost selection of tunnel installation and Construction	154
Section 4. Development of integrated program selected railway route ..	156
1. Purpose and range	156
2. Gene design for linear optimization	156
3. Generation of linear	159
4. Development of system	169
5. Utilization of linear information about optimization alternatives ----	183
6. 3D Simulation	184
Chapter 4. Development of 3D Simulation program technology	
Section 1. Development of 3D Simulation program technology	186
1. Summary	186
2. 3D basic theory	186
3. Result of program execution	213
Chapter 5. Development of TPS program	
Section 1. Summary	219
Section 2. TPS interpretation	221
1. TPS performance analysis	221
2. Interpretation basic theory	222
Section 3. Vehicle Theory	226
1. Train resistances	226
2. Traction characteristics	233
3. Braking force characteristics	234

4. Characteristics of efficiency and power factor -----	236
5. Characteristics by vehicle type -----	236
6. RMS electric current -----	238
7. Characteristics of electric motor -----	238
Section 4. Route theory -----	243
1. Gradient -----	243
2. Curve -----	244
Section 5. Simulation theory -----	246
Section 6. Program -----	248
1. Development of associated interface -----	248
2. Input file -----	248
3. Output file -----	249
4. Program execution screen -----	250
5. Report -----	251
 Chapter 6. Verification of program	
Section 1. Summary -----	252
1. Review section -----	252
2. Review contents -----	252
3. Problems -----	252
4. Major review criteria -----	252
Section 2. Review results of West-Coast line -----	254
1. Route selection -----	254
2. Standard of cost estimation -----	312
3. Cost estimation by alternatives -----	313
4. Comparison on linear distribution of master plan and ei_rail ----	314
5. Comparison on status of major construction installation by alternatives ---	315
6. Comparison of cost -----	315
Section 3. Summary of result -----	328
 Chapter 7. Conclusion	
Section 1. Conclusion -----	329
Section 2. Future Direction -----	329

목 차

제 1장 서론

제1절 연구의 배경 및 목적	1
1. 연구개발의 배경	1
2. 연구개발의 필요성	2
3. 연구개발의 목적	4
제2절 연구의 내용	5
1. 연차별 주요 연구내용	5
2. 연구개발의 방법	7

제 2장 1차년도 연구요약

제1절 국내외 사례검토	8
1. 국내 철도선형계획 기술현황	8
2. 국외 철도선형계획 기술현황	14
3. 국내외 철도선형계획 기술 비교 및 문제점	19
제2절 철도 설계기준 정립 및 관리기능 개발	22
1. 연구개요	22
2. 철도 유형별 설계기준 정립	23
3. 철도설계 기준 옵션 등 관리기능 개발	34
제3절 공사비 산정 및 지형정보 활용 기술 개발	45
1. 연구의 개요	45
2. 철도노선에 대한 공사비 산정모델 개발	46
3. 지형정보 활용 기술 개발	73

제 3장 지능형 철도선형계획 프로그램 개발

제1절 철도노선 최적화 기술	104
1. 철도노선최적화를 위한 주요 프로세스	104
제2절 철도선형설계요소의 AHP 평가	117
1. 다 기준 의사결정	117
2. AHP기법의 개요	118
3. 이론적 배경	119
4. AHP 분석과정	121
5. AHP기법의 평가	134

6. 철도선형설계요소 평가를 위한 AHP기법 적용	137
7. 철도선형설계요소 평가를 위한 종합 가중치	142
제3절 구조물 위치 선정 및 특성에 따른 형식 선정	143
1. 교량 형식 선정	143
2. 교량 가설 위치 결정	145
3. 교량 가설 위치별 필요 총연장 산정	145
4. 최소 필요 경간장	146
5. 적용 가능한 교량 형식 선정	147
6. 터널 설치 및 공사비 산정	154
제4절 철도노선선정 통합프로그램 개발	156
1. 수행범위 및 목적	156
2. 선형최적화를 위한 유전자 설계	156
3. 선형생성	159
4. 시스템 개발	169
5. 최적화 완료 대안 선형 정보 활용	183
6. 3D 시뮬레이션	184
제 4장 3D Simulation 프로그램 개발	
제1절 3D 시뮬레이션기술 개발	186
1. 개요	186
2. 3D 기초 이론	186
3. 프로그램의 실행 결과	213
제 5장 TPS 프로그램 개발	
제1절 개요	219
제2절 TPS 해석 항목	221
1. TPS 성능 해석 항목	221
2. 해석 기초이론	222
제3절 차량이론	226
1. 열차저항	226
2. 견인력 특성	233
3. 제동력 특성	234
4. 효율 및 역율 특성	236
5. 차량 타입별 특성	236
6. RMS 전류	238

7. 전동기의 특성	238
제4절 노선이론	243
1. 구매	243
2. 곡선	244
제5절 시뮬레이션 이론	246
제6절 프로그램	248
1. 연계 인터페이스 개발	248
2. 입력파일	248
3. 출력파일	249
4. 프로그램 실행화면	250
5. 보고서	251
 제 6장 프로그램 검증	
제1절 개요	252
1. 검토 구간	252
2. 검토 내용	252
3. 검토시 문제점	252
4. 주요 검토 기준	252
제2절 서해안선 검토결과	254
1. 노선 선정	254
2. 공사비 산정 기준	312
3. 안별 공사비 산정	313
4. 기본 계획안 및 ei_rail안 선형분포 비교	314
5. 각 안별 주요 구조물설치 현황 비교	315
6. 사업비 비교	315
제3절 검토결과요약	328
 제 7장 결론	
제1절 결론	329
제2절 향후 발전 방향	330

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 건설교통기술촉진 연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.

제 1 장 서 론

- 제1절 연구의 배경 및 목적
- 제2절 연구의 내용

가. 연구의 배경 및 목적

1) 연구개발의 배경

세계적으로 지구온난화로 인한 환경문제가 글로벌 이슈화 되면서, 리우 UN회의(1992년), 교토 의정서(1997년) 및 발리로드맵(2007년) 등의 국제적 논의가 활발히 진행되어 왔으며, 교토의 정서에 따라 탄소배출량이 규제의 대상이 되고 탄소배출권 거래가 이루어지기 시작함에 따라, 세계 각국은 녹색기술을 선점하기 위한 치열한 경쟁 중에 있다.

이런 국제적인 상황에서 우리나라도 에너지소비 및 탄소저감에 기여하는 친환경 녹색성장 기술개발 등에 대한 새로운 정책방향들을 제시하고 구체적 실천방향을 모색 중에 있다.

- 2005년 기준으로 우리나라의 전체 탄소 배출량은 산업분야 52%, 건물 25%, 교통 17%, 기타 6%로 나타남

환경부는 전분야를 망라하여 최고 수치에 해당되는 수송분야 이산화탄소 배출량 감축률을 34.3%로 설정하였으며, 장거리 교통부문에서 탄소배출량을 감축할 수 있는 가장 효율적인 대안은 철도망 확충을 통한 자동차 교통수요의 철도교통으로의 전환이다.

- 고속철도차량의 지구온난화 가스 배출량은 승용차 대비 11%에 불과하고 일반 전기 철도차량은 이보다도 작은 규모이며, 디젤철도차량도 승용차의 41%에 불과함.

이에 정부는 『제2차 철도산업발전기본계획(2011~2015)』을 통하여 철도건설에 총 43조원을 투자하고, 해외철도시장 확대에 대한 지원을 강화하는데 초점을 맞추고 있으며, 『제2차 국가철도망구축계획(2011~2020)』에서는 이를 확대하여 2020년까지 총88조원 이상을 투자할 계획을 수립하였다.

현재 우리나라 철도정책의 방향은 ① 저비용 고효율, ② 안전성, ③ 친환경성, ④ 고속화에 초점을 맞추고 있으므로, 이제 부합하는 철도건설이 이루어져야 할 것이다.

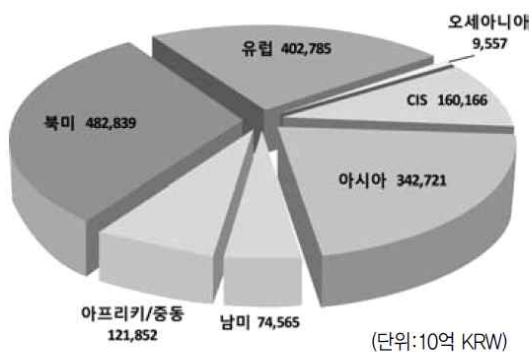
이에 부응하여 새로운 철도건설사업 계획을 보다 효율적이고 다양한 평가척도를 적용하여 수립하도록 지원할 수 있는 도구를 개발하는 것이 바람직할 것이며, 이러한 기술을 활용함으로써, 글로벌한 저탄소 녹색성장 기조에 부합하는 우리나라의 철도산업 성장 정책에 도움이 될 것이며, 해외 철도시장 진출에 있어서도, 차량시장 뿐만 아니라 계획 단계에서부터 건설, 운영에 이르기까지 철도관련 전 분야의 진출을 지원할 수 있을 것이다.

2) 연구개발의 필요성

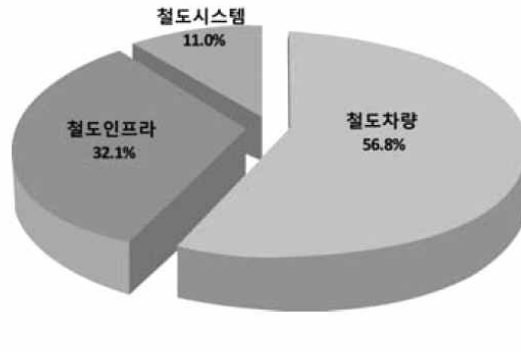
최근 저탄소 녹색성장 패러다임으로 세계적으로 철도에 대한 투자가 확대되고 있는 추세이다. 세계 철도시장은 2011년 1301억 유로로 한화 약 210조원에 이르고 있으며, 지역별로는 서유럽이 395억 유로(30.4%), 아시아가 365억 유로(27.9%), 북미는 195억 유로(14.9%), 기타 26억 유로(7.3%)를 차지하고 있다.

자료 : SCI Verkehr, 2011

세계 철도기술은 고유가와 환경보호, 민자철도시장 성장, 고속철도 수요 증대 등으로 2015년까지 연간 4.5%의 성장이 예측되며 규모는 약 1,600억 유로(약 250조원)로 전망된다. 특히 아시아는 중국 내 대규모 철도확장과 인도의 철도산업 육성을 위한 정책으로 낙후된 인프라 및 차량 개량 필요성 등에 따라 철도산업이 활성화될 것이다



[그림I-1] 지역별 철도시장 규모



[그림I-2] 철도시장의 분야별 비율

철도시장의 분야별 비율은 철도차량이 56.8%로 가장 많은 비중을 차지하고 철도인프라는 32.1%, 철도시스템은 11.1%로 구성되어 있으며, 연간 4~5% 성장이 예상되는 철도인프라 분야는 도시철도 및 고속철도의 성장으로 궤도산업이 58조원에 달할 전망이다.

철도시장의 비약적인 발전과 더불어 국내에서도 한국형 고속철도열차 개발 등 철도차량 분야에서 기술발전이 이루어지고 있으나 철도인프라 특히 철도선형설계분야에서는 십여년전과 비교해 큰 변화가 없다.

현재 철도분야의 설계파트에서 근무하는 기술자들은 대부분 CAD나 Excel을 이용하여 시공에 필요한 도면을 작성하고 수량을 계산하고 있다. 철도선형 및 토공분야의 설계 시 철도만의 여러 가지 특수한 기준이 적용되고 정형화되기 힘든 부분을 포함하고 있더라도 수작업에만 의존한 기존 설계방식은 신속한 Output을 요구하는 타당성분석 수준의 선형설계에서도 긴 작업시간이 필요하며 국내 기업들의 해외 철도시장 진출에 걸림돌이 되고 있다.

국내에는 선형설계에서의 작업시간 절감을 위하여 다수의 철도선형프로그램이 개발되었지만, 국외 설계기준 미적용, User Interface의 불편함 및 수치데이터의 부정확성 등으로 인해 설계자들의 사용률이 저조하다.

그와 달리 유럽에서는 국외 설계기준 반영, 3D 시뮬레이션 기능, 수치지도의 위성데이터와의 연계 기능을 포함한 철도선형설계프로그램을 개발사용 중이지만 국내에서는 높은 프로그램 기

능 습득 난이도와 도면작성방법의 차이로 적용이 어려운 실정이다.

따라서, 국내 철도사업의 신속한 선형설계 및 국내 기업들의 해외 철도시장 진출을 위하여 국내 철도선형설계 기술자들의 손쉬운 사용, 국외 설계기준 반영, 3D 시뮬레이션 기능, 수치지도의 위성데이터와의 연계 기능 등이 포함된 한국형 철도선형설계 프로그램의 개발이 필요하다.

3) 연구개발의 목적

본 연구의 최종목적은 지역간 중장거리 철도건설사업의 계획단계에서 수치지도 등을 이용하여 최적의 노선을 도출하고, 이에 소요되는 건설비용을 자동적으로 산출하는 소프트웨어를 개발하는 것이다. 이를 통해서 다음과 같은 내용을 달성하고자 하는 것이다.

- 공사비, 에너지 소비량, 표정속도 등 다양한 지표로써 평가가 가능한 안전하고 환경친화적인 철도선형계획을 자동적으로 수행할 수 있는 프로그램을 개발함
- 기개발된 지능형 도로설계 프로그램을 기반으로, 철도선형 설계기준을 포함한 다양한 철도설계요소를 반영하여 최적 선형 탐색 및 공사비 산출이 가능토록 함
- 생성된 선형대안을 (Train Performance Simulation) 프로그램과 연계하여, 선형대안에 대한 기술적 분석을 가능토록 함



[그림I-3]

나. 연구의 내용

1) 연차별 주요 연구내용

본 연구의 연차별 연구목표 및 주요 내용은 다음과 같다. 1차년도에는 개발하고자 하는 철도 선형설계 프로그램을 위해 우선적으로 철도설계 기준 분석, 설계옵션 관리기능, 공사비 산정 모델, 지형정보활용 기술 개발을 수행한다. 그리고 2차년도 철도 3D주행 시뮬레이션기술 및 TPS연계기술개발을 위한 TPS 기초분석을 수행 한다.

2차년도에는 철도노선 최적화 기술, 노선선정 통합 프로그램 및 3D주행 시뮬레이션 연계 기술을 개발하고 검증/보완을 수행 한다.

다음은 연차별 세부연구내용이다.

[표 I-3] 연차별 세부연구내용

구 분	연구개발 목표	연구개발 내용 및 범위
1차 년도	국내·외 철도 설계 사례분석 및 기술 동향 파악	- 국내·외 연구사례 및 문헌조사 - 최신 기술분석을 통한 연구개발 개념 및 상세 방향 설정
	철도 유형별 설계 기준 정립	- 철도건설지침 및 표준시방서 등을 검토하여 시설 유형별 설계기준 정립 - 철도 설계 방식(완화곡선설계) 적용 및 설계속도, 지역특성, 에너지효율, 환경성 등 설계제원특성에 따른 설계요소 반영
	철도설계 기준 옵션 등 관리 기능 개발	철도 설계 평면, 종단, 횡단별 설계기준 옵션 등을 관리·설정 할 수 있는 UI(User Interface) 개발
	철도 노선공사비 산정 모델 개발	- 토공, 배수공, 포장공, 부대공, 정거장, 설비(전기) 등 공사비 산정 - 교량 형식별 상부, 하부(교대,교각), 기초공 공사비 산정 - 터널 지보패턴별 공사비 산정 - Major 공종 및 Minor 공종 분류하여 물량, 단가 또는 효율적용
	지형정보 활용 기술 개발	- 수치지형도 및 사용자 layer 등에 대한 도면 표준화 - 수치지도 등고선(Contour) Map을 활용한 GIS Analysis(TIN, Grid, Aspect) 기술 개발 - 해외사업 등 수치지도 미확보 시 Google Earth 등의 위성지형데이터를 활용한 Contour Map 변환 기술 개발
	TPS 제작을 위한 기초 분석	- 기존 TPS에 적용된 방법론 검토 - TPS 관련 자료 검토 (문헌 조사) - 본 연구 적용 방법론 정립

2차 년도	철도노선 최적화 기술	▪ 철도노선 최적화를 위한 프로세스 정의 및 GALib 커스터마이징 ▪ GA 알고리즘 리팩토링을 통한 수행속도 및 대상범위 (연장) 확대 ▪ 유전자 변형 모듈 보완 및 복합유전자 처리기법 기술개발
	철도노선 평가항목 선정 및 정량화 기술 개발	▪ 관련연구사례 분석등을 통한 철도노선 평가 요소인자 도출 ▪ AHP기법 등을 통한 평가항목 등 가중치 도출 ▪ 지형특성에 따른 통과불과 지역 및 우선통과지역 등에 대한 가중치 설정
	구조물 위치 및 형식 선정 개발	▪ 교량, 터널등의 구조물 위치 선정 및 특성(경간장, 형하고 등)에 따른 형식 선정
	철도 노선 선정 통합프로그램 개발	▪ 각 단위모듈(공사비산정 및 최적화 등)에 대한 통합 인터페이스개발 및 UI 개선
		▪ 각종 설계결과 보고서 등 Report ▪ 철도설계 상용 프로그램 등과 데이터 연계 (Export/Import)
	3D 철도주행 시뮬레이션 개발	▪ 철도노선과 지형 합성 기술 ▪ 철도노선, 구조물(교량,터널), 부속시설 등에 대한 3차원 Object Modeling 기술
		▪ 3D 주행 시뮬레이션 Tools 개발
	TPS 연계	▪ TPS 프로그램 보완 ▪ 선형 프로그램과의 연계
	TPS Validation	▪ 타 TPS와의 산출결과 비교 및 보정 ▪ 기존 노선 적용을 통한 Validation
	프로그램 검증	▪ 기 수행된 철도 설계구간 적용을 통한 개발기술에 대한 평가 및 검증
		▪ 평가 및 검증 결과를 반영한 프로그램 보완

2) 연구개발의 방법

1차년도 연구에서는 본 연구의 최종목표인 지능형 철도선형 프로그램 개발의 기초가 되는 철도 설계기준 정립 및 공사비 산정기술 등을 개발하였다. 효율적이며 실질적인 연구결과물의 도출을 위해 산·연 전문가와 유기적인 협력체계 구축 및 역할을 분담하고 국내외 전문 인력을 활용하였다. 향후 철도선형 프로그램의 신속한 검증 및 활용을 위하여 철도선형 설계와 관련된 공기관/산업계 전문가를 대상으로 자문회의를 수시로 개최하여 전문가의 의견을 연구에 적극 반영하였다.



[그림I- 4] 연구개발 방법

제 2 장 1차년도 연구 요약

- 제1절 국내외 사례검토
- 제2절 철도 설계기준 정립 및 관리기능 개발
- 제3절 공사비 산정 및 지형정보 활용 기술 개발

다. 국내외 사례검토

도로를 포함한 토목분야에서는 응용 프로그램 및 CAD의 사용이 보편화되어 있으며, 특히 선형설계는 응용 프로그램 및 CAD를 대부분 사용하고 있다. 하지만 철도분야에서는 한정된 노선 및 인프라의 부족으로 선로설계에 대한 자세한 계산방법을 소개한 프로그램이 매우 드물고 또한 실무적으로 만족할 만한 수준의 프로그램 개발이 부진한 상황이다.

국내 철도선형설계 프로그램은 RD SmartPro, Tacoma, BlueTrack이 개발 상용화되어 있지만 반영 설계기준의 노후 및 UserInterface의 불편함으로 보급률이 높지 못하다. 이에 지능형 철도선형프로그램 개발에 앞서 국내·외 각 철도선형설계 프로그램의 특징을 고찰하고 장·단점을 분석하여 프로그램 개발에 반영하였다.

1) 국내 철도선형계획 기술현황

가) RD SmartPro

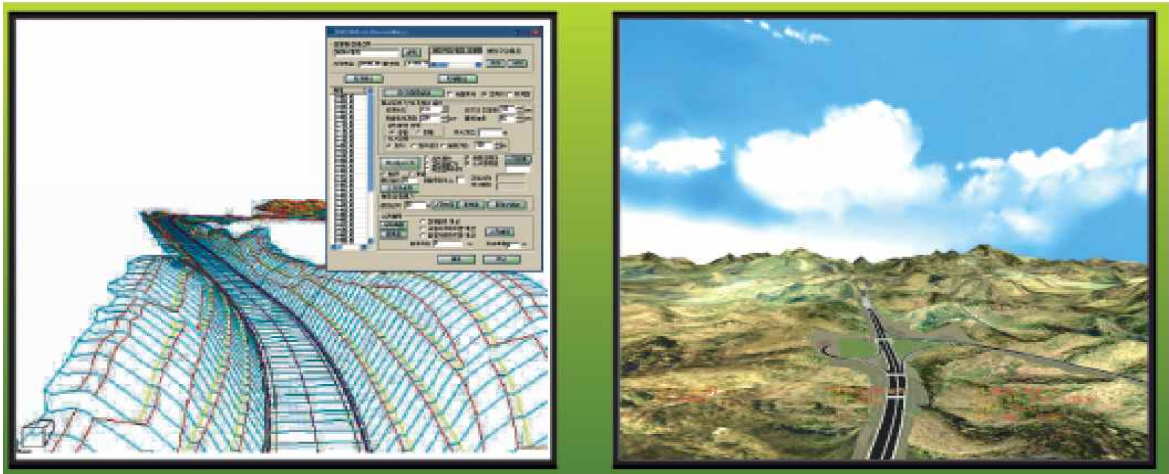
(1) 프로그램 특징

(주)평화데이터시스템의 RD SmartPros는 Autodesk사의 AutoCAD 엔진에서 개발되어 AutoCAD 2006버전 이상에서 운영되어 친숙한 사용자 환경을 제공하는 것이 특징이다. 철도 설계만이 아닌 도로설계/검토, 측량 등 전반적인 토목분야에 사용되어지고 있다.



[그림II-1] RD_SmartPro 구동 화면

RD SmartPro는 기본계획 수준의 선형계산서와 도면생성이 가능하며 3D 시뮬레이션 및 스마트기기와의 연계로 프로그램 사용자의 접근이 용이하다.

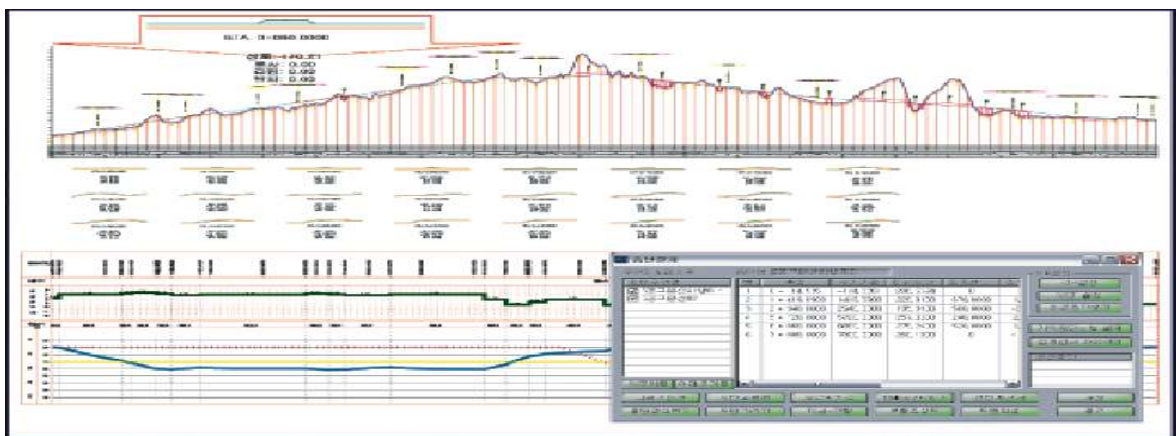


[그림 II- 2] RD SmartPro 3D 시뮬레이션 기능

철도건설규칙(2009)을 설계기준으로 반영하여 종단·횡단·평면설계가 가능하도록 제작되었으며 상세 프로그램 기능은 다음과 같다.

(가) 종단설계

- 개략종단선형 자동설계
- 교량, 터널 설치 가능
- 철도종단곡선(R, 1·2·3 법) 설계
- 지장무 위치, 지반선 및 암선 생성 기능

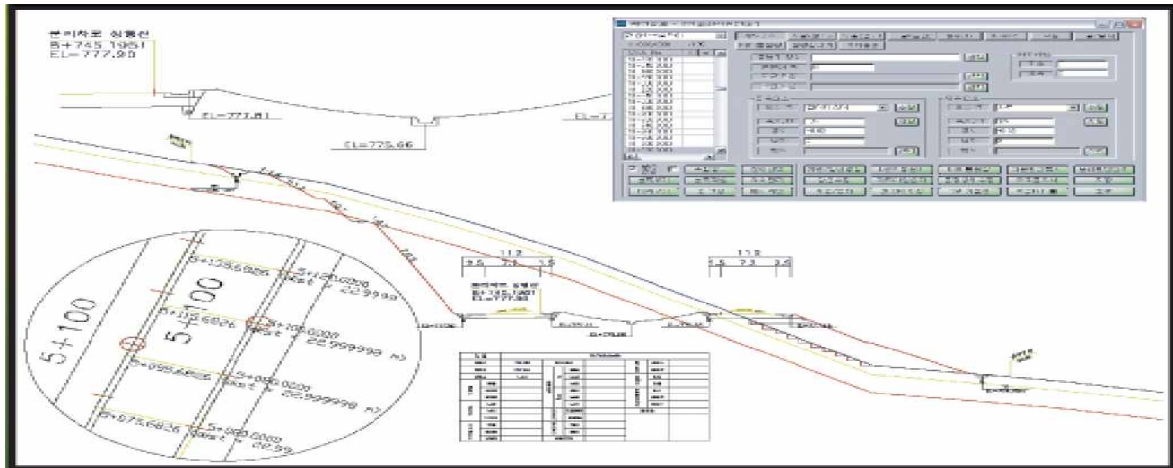


[그림 II- 3] RD_SmartPro 종단설계

(나) 횡단설계

- 토공횡단면도 작성 가능
- 횡단구조물 생성
- 토공량산출 가능

- 횡단구조물 생성 가능



[그림 II- 4] RD_SmartPro 평면설계

(2) 프로그램 문제점

RD SmartPro는 AutoCad 기반의 설계프로그램으로서 사용자가 프로그램 구동시 별도의 프로그램 교육이 필요하지 않다는 큰 장점이 있다. 하지만, 선형설계기준이 모두 프로그램 default 값으로 입력되어 있어 설계기준의 변경은 제작사에 요청시에만 가능하다는 문제점이 있다. 국외 철도노선 설계시 해당국가의 설계기준을 따라야 하기 때문에 사용자가 유동적으로 설계 기준을 변경할 필요성이 있다.

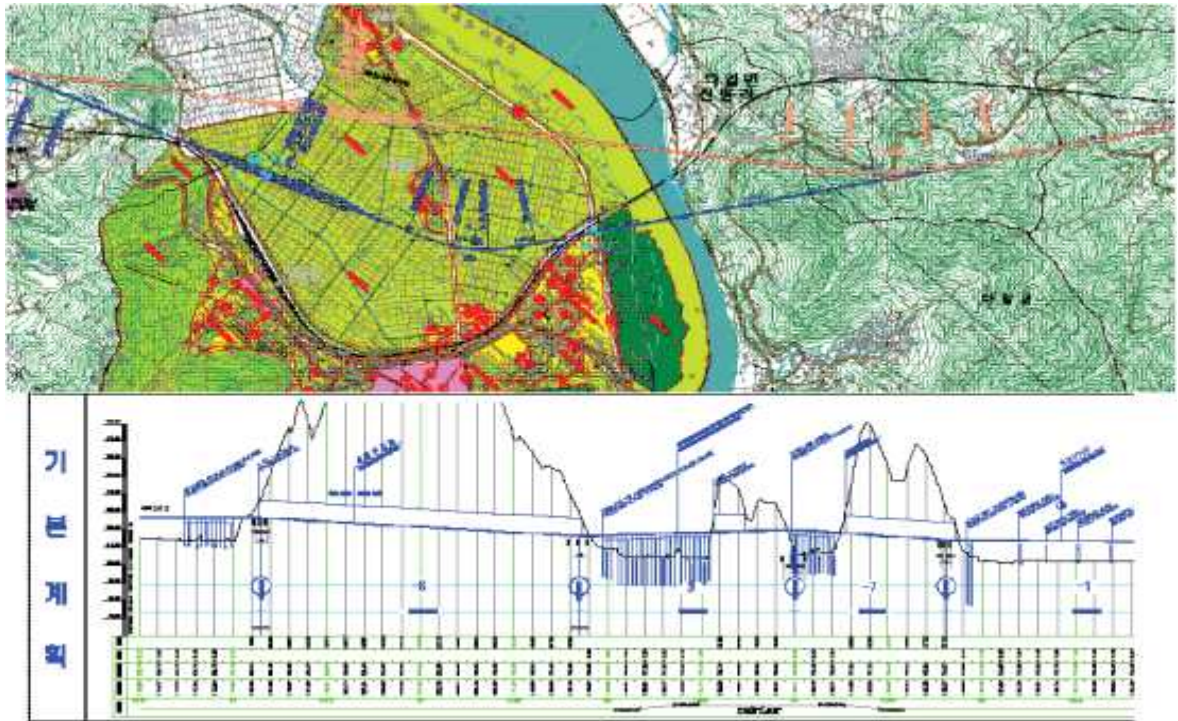
프로그램 기능측면에서 종단 및 평면설계에서는 특별한 문제점이 발견되고 있지 않지만, 횡단 설계시 횡단구조물 삽입시 빈번한 오류가 발생되며, 토공 수량 산출이 부정확하다.

위성데이터(등고선) 사용이 불가능하여 수치지도가 존재하지 않는 지역에 대해서는 노선계획 자체가 불가능한 단점이 있다.

나) Tacoma

서영엔지니어링에서 개발된 Tacoma 설계 프로그램은 평면·종단 선형계획만을 위하여 개발되어 구조물 위치 표기, 지장물 위치, 토공량 등에 대한 별도기능이 존재하지 않는다.

상기프로그램은 배포의 목적이 상업용이 아닌 학술·연구용으로 프로그램의 기능이 최소화되어 있어서 프로그램 사용자가 기능 습득에 있어 어려움이 없지만, 평면 선형 데이터 및 지반고까지 사용자가 수동으로 입력하여야하는 단점도 존재한다.



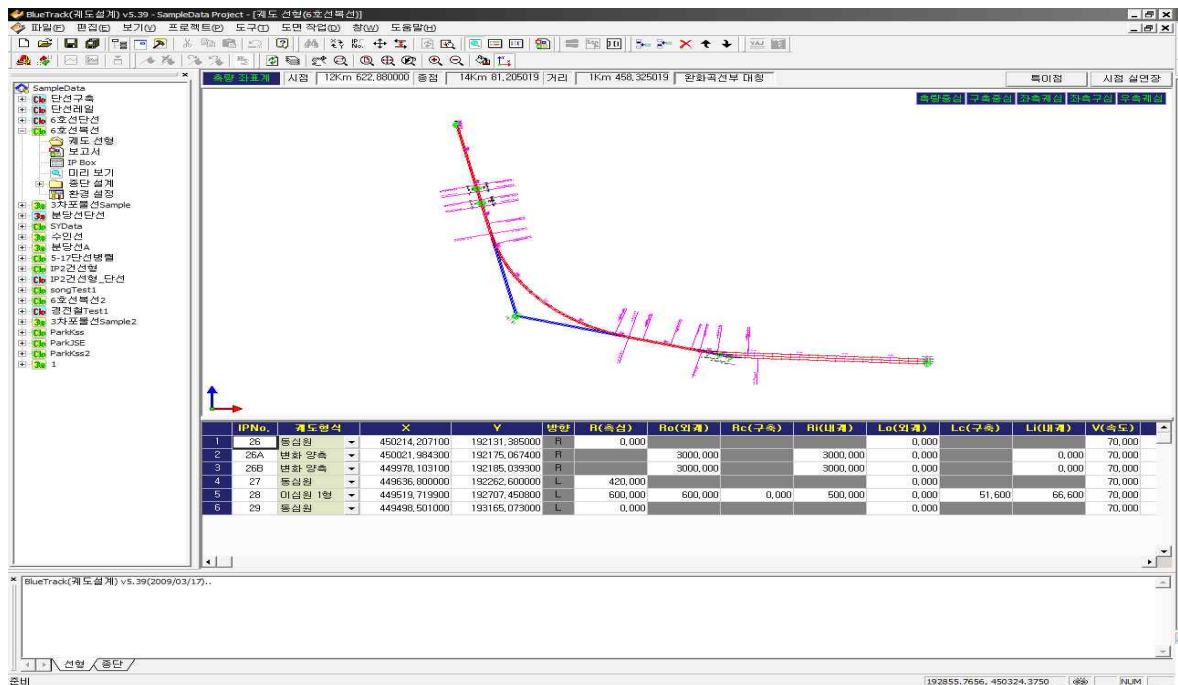
[그림 II- 5] Tacoma 구동화면

2010년 이재한 등은 Tacoma와 3D viewer 프로그램의 연계로 선형설계 및 횡단설계의 자동화 및 수량산출 등의 기능을 개선하려는 연구가 진행되었지만, 현재 연구결과가 미미한 수준이다.

다) Blue Track

(1) 프로그램 특징

Blue Track은 완화곡선 종류로 clothoid곡선과 3차포물선, 궤도 종류로는 단선궤도, 복선궤도 및 단선병렬궤도, 곡선 형태로는 동심원(同心圓), 이심원(異心圓 I型, II型) 및 궤간 변화구간(양측, 내측, 외측)을 처리하고, 선형계산서와 도면 작성을 하는 철도선형설계 프로그램으로 (주)삼안 연구개발원에서 개발되었다.



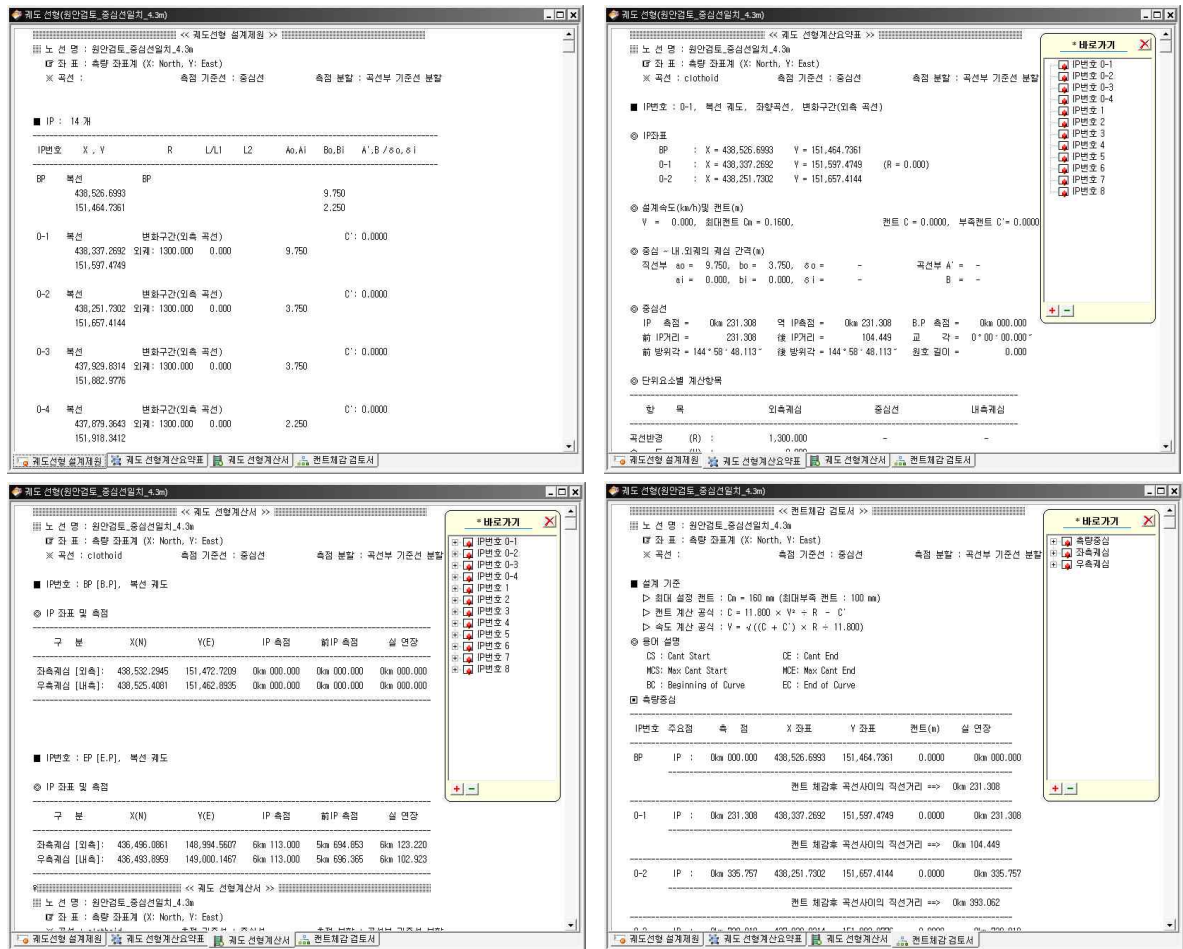
[그림 II- 6] BlueTrack의 초기화면

설계기능과 관련하여서는 다음과 같은 특징이 있다.

- 완화곡선 종류, 궤도의 종류, 곡선 형태 등을 처리한다.
- IP별로 측점계산 방법 및 캔트 체감방법을 지정할 수 있다.
- 선형 계산 및 도면 작성에 대한 상세한 제어가 가능하다.
- 각 중심선상의 임의의 지점에 대하여 좌표값 또는 측점으로 선형계산서를 작성할 수 있다.

선형계산서는 정의된 궤도 형식에 따라 해석한 후 환경설정의 측점기준선에 따라 외궤와 내궤의 제원을 만들고 개별 선형을 계산한 다음 측점기준선에서 투영시킨 환산 연장을 구하는 형태로 되어 있다.

계산서는 궤도선형설계제원, 계산 요약표, 선형계산서, 캔트체감 검토서로 이루어져 있다



[그림 II- 7] BlueTrack 선형계산서

(2) 프로그램 문제점

Blue Track은 국내 타 설계프로그램과 같이 해외설계를 고려하지 않아 유동적인 설계기준 적용이 불가능하며, 구 철도건설규칙이 적용되어 있어 수정이 필요하다.

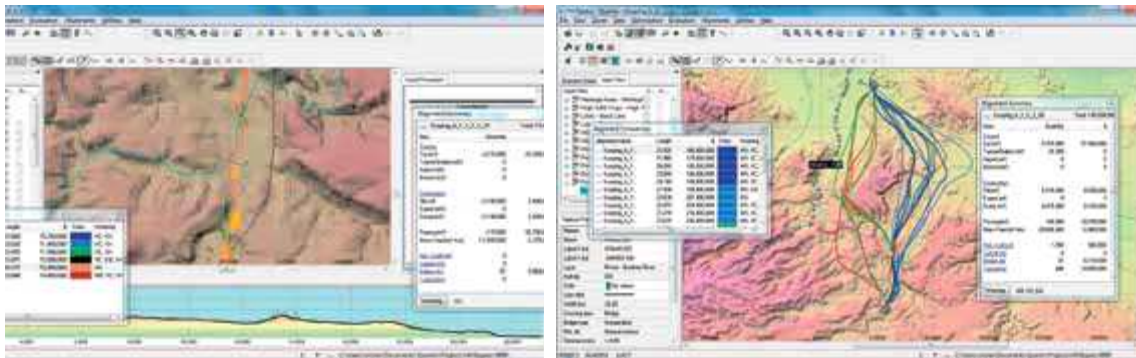
평면설계기능은 특별한 문제점이 발견되지 않았지만 중단설계에서 암선데이터를 수동으로 입력해야하는 단점이 있으며 횡단구조물 삽입 시 빈번한 오류가 발생하며, 터널, 교량, 각종시설물의 표현이 불가능하다.

그 외에 평면, 중단 선형계획, 횡단면도, 토고 사면 작성의 별도의 기능이 존재하지 않아 3D시뮬레이션 및 수치지도 삼각망 생성 시 별도의 프로그램을 이용하여야 한다.

2) 국외 철도선형계획 기술현황

세계철도시장은 녹색물류와 더불어 비약적으로 발전 중이며, 이중 유럽이 세계철도공급시장의 약 50%를 차지함으로써 유럽을 중심으로 형성되어 있다.

막대한 인프라 및 기술을 바탕으로 유럽에서는 철도선형계획기술과 관련하여서도 글로벌화를 추진 중이며, 선형계획 프로그램도 BSIL(Bentley Systems International Limited)사 및 Trimble사 등에서 연구 개발하여 상용화 및 아시아, 남미, 오세아니아 등지에 지사를 두어 마케팅활동을 진행 중이다.



[그림 II- 8] Trimble Quantum Desktop

상기 회사의 프로그램들은 기본적으로 해외 철도사업의 설계가 가능하도록 프로그래밍 되어 있어 본 절에서는 위 프로그램의 특징을 살펴보고 지능형 철도선형기술 프로그램 개발에 반영하였다.

Trimble사의 Quantum Desktop의 경우 프로그램 자체를 설계자들에게 판매하는 것이 아닌 Trimble사에서 직접 프로그램을 이용하여 선형설계를 기획해주는 방식이기 때문에 BSIL사의 Bentley Rail Track을 대상으로 검토하였다.

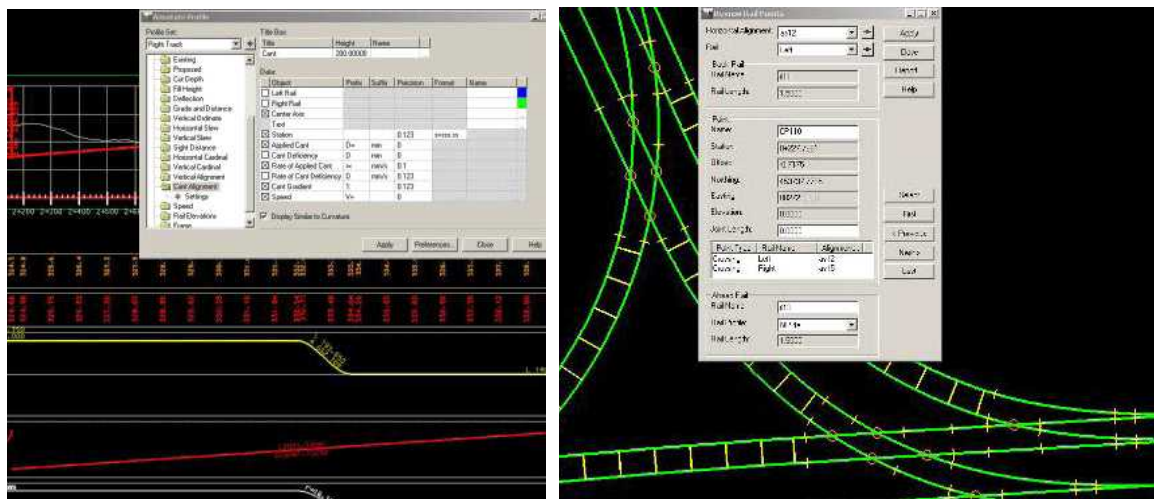
- Bentley Rail Track 프로그램의 검토를 위하여 2012년 6월 7일 BSIL사의 S/W 전문가 Julal Makwama 등을 초청하여 세미나를 진행하였으며, 선형 설계 프로그램의 특징 및 UserInterface 등 Bentley Rail Track프로그램의 전반적인 기능을 연구하였다.



[그림 II- 9] Bentley S/W 전문가 초청 세미나 장면

가) Bentley Rail Track의 특징

Bentley Rail Track은 AutoCad, MicroStation을 기반으로 프로그래밍 되었으며, 위성데이터를 사용하여 수치지도가 없는 지역에서의 설계가 가능하도록 하였으며, 상세 특징 및 기능은 다음과 같다.



[그림 II- 10] Bentley Rail Track 구동 사진

(1) 항공사진 및 측량데이터 인식기능

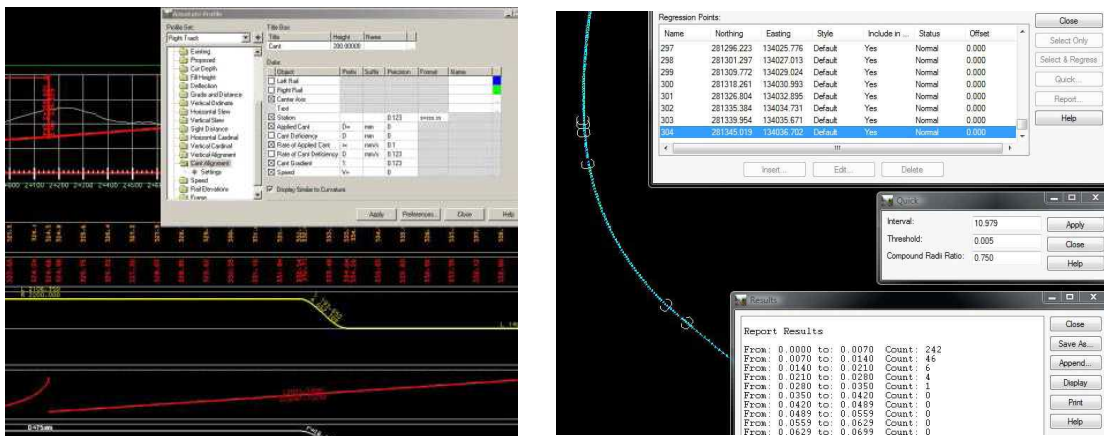
○ 사용자가 측량, GPS, LiDAR 및 기타 유형의 현장 데이터를 원활하게 작업할 수 있고
철도 측량 데이터의 궤도 선형 데이터를 가져올 수 있다.

- 2D/3D CAD 그래픽
- ASCII/텍스트 데이터 형식
- LandXML 형상(평면, 종단 및 캔트) 및 표면데이터
- LiDAR 데이터: ASCII 및 LAS
- USGS 디지털 표고 모델 데이터
- 항공 사진
- 래스터 파일
- 등고선 지도
- 사진 측량 데이터

(2) 궤도 선형의 효율적인 일치를 위한 회귀 분석

Bentley Rail Track은 단일 및 다중 요소 회귀 분석에서 최소 자승법을 사용하여 선형을 계산한다. 곡률도가 포함되어 있어 사용자가 곡선, 접선 및 나선을 쉽게 확인할 수 있으며 회귀 분석을 통해 궤도 선형 조정에 필요한 결과를 얻을 수 있다.

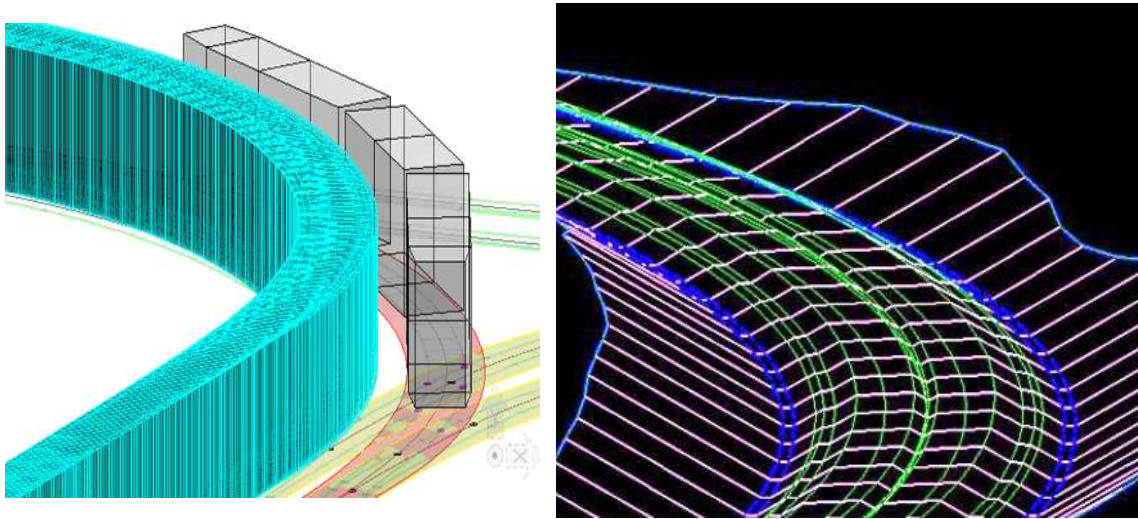
회귀점은 중심선 또는 철도 측량선(캔트 데이터)에서 파생될 수 있으며 분석 중 일관성 있게 임계점을 유지 관리하거나 최소 이격을 유지하기 위해 사용자가 가중치를 지정할 수 있도록 하였다.



[그림 II- 11] Bentley Rail Track 회귀분석 및 수치검증 화면

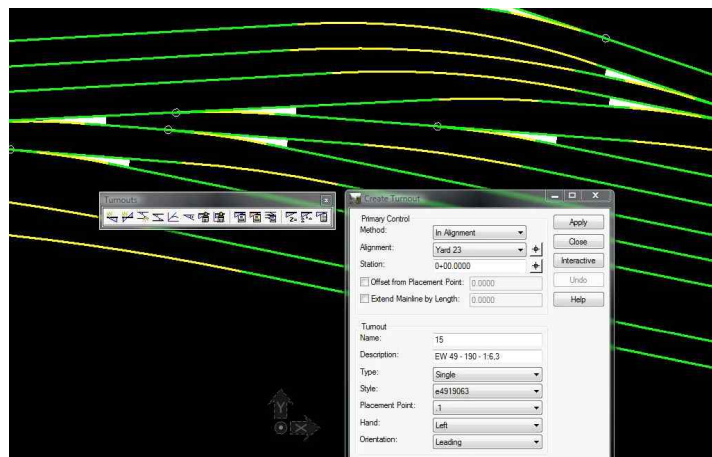
(3) 기타 기능

- 오스트리아 철도, CEN 표준, 덴마크철도, 네덜란드 철도, 독일 철도 등에 대한 산업 표준 설계 검사가 가능하다.
- 경전철 요소(레일, 접합부, 분기점, 교차점 및 간격 유지)가 포함되어 있어 이음매 레일, 사전 굽힘 레일 유형에 필요한 도면 및 시방서를 작성가능하다.
- 지형 및 선형을 기준으로 3D 모델을 생성할 수 있다.



[그림 II- 12] Bentley Rail Track 3D 뷰어 사진

- 분기기, 스위치 및 건널목을 파라메트릭 구성 요소로 배치할 수 있는 기능이 있어 라이브러리를 사용하여 분기기를 배치할 수 있다.



[그림 II- 13] Bentley Rail Track 분기기 설치 기능

나) Bentley Rail Track의 문제점

철도설계기준을 국가별 설계기준에 따라 사용자가 변경이 가능하지만, 설계기준의 세세한 내용까지 사용자가 입력하여야 하는 사용자 편의성이 부족하다. 비록 Bentley Rail Track 프로그램이 측량, GPS, LiDAR 데이터 및 항공사진과의 호환이 가능하며 분기기 및 건널목 설치 등 국내 프로그램 대비 철도설계기능이 다수 포함되어 있지만, 그에 따라 프로그램이 복잡하여 초기 프로그램 습득에 많은 어려움이 따른다.

계획평면도 작성 시 전체적인 표현은 가능하나 국내의 도면 디테일과의 차이가 발생하여 한국 기준으로 도면이 작성되어야 할 경우 노선 외 모든 작업을 별도로 진행하여야 한다. 이는 비단 한국뿐만 아니라 다른 국가의 계획평면도 작성기준을 반영치 못하였기 때문이다.

3. 국내의 철도선형계획 기술 비교 및 문제점

가. 국내의 철도선형계획 프로그램의 기능 비교

앞서 국내외 기개발된 철도선형계획 프로그램을 설계기준, 평면설계, 종단설계, 횡단설계 등으로 세분화하여 기능의 유무를 판단하고, 각각의 문제점을 비교 분석하였다.

[표 II- 5] 철도선형계획 프로그램의 기능 비교

구 분			RD SmartPro	Bentley Rail Track	Tacoma	Blue Track
1. 프로그램 제작사			(주) 평화데이터시스템	Bentley System Internatiolal Limited	서영엔지니어링	(주) 삼안
2. 언어	한국어		O	X	O	O
	영어		O	O	X	X
3. 기반프로그램			Autocad	Autocad, MicroStation	Autocad	Autocad
4. 프로그램기능	설계기준	반영 설계기준	철도건설규칙(2009)	오스트리아, CEN기준, 덴마크, 독일, 네덜란드, TransRapid	철도건설규칙(2005)	철도건설규칙(2005)
		설계기준 사용자 변경가능 여부	△(제작사에 요청시 추가 가능)	O	X	X
	평면설계	평면노선계획	O	O	O	O
		적용 가능 원곡곡선	3차포물선, 클로소이드	3차포물선, 클로소이드 , 브로스, 4차포물선, 사인곡선, 코사인, 빈-오스트리아	3차포물선	3차포물선, 클로소이드
		선형계산서 작성여부	O	O	O	O
		배선계획(분기기 삽입 포함)	X	O	X	X
	종단설계	종단노선계획	O	O	O	O
		종곡선	원곡선	원곡선, 포물선	원곡선	원곡선
		구조물 위치 표기	O	O	X	O
		지반선 및 암선 생성	O	O	X	O
		보링주상도 표기	O	O	X	X
		지장물 위치 표기	O	X	X	X
	횡단설계	토공 횡단면도 작성	O	O	X	O
		횡단구조물 생성	O	O	X	O
		토공량산출	O	O	X	O
		토공유동(1차운반)	O	O	X	X
		Cant 설계 가능 여부	O	O	X	X
	계획평면도	토공사면 표현	O	O	X	O
		교량 앞성토	O	X	X	X
		터널 갱구부 사면	X	X	X	X
		시설물 표현(옹벽, 울타리 등)	O	△	X	X
		용지 경계 표현	O	X	X	X
	건설비	개략건설비 산출	O	X	X	X
	Google Earth 호환	위성데이터 사용(등고선)	X	O	X	X
		노선 Google Earth 파일 변환	X	O	X	X
	기타	3D 시뮬레이션	O	O	X	X
		수치지도 삼각망 생성	O	O	X	△(별도의 프로그램 통해 생성)
		스마트 기기 연결	O	X	X	X
5. 문제점	설계기준		해외설계시 유동적인 설계기준 적용이 어려움	설계기준 작성시 설계기준의 세세한 내용까지 설계자가 입력하도록 되어 있어 사용자 편의성 부족	해외설계시 유동적인 설계기준 적용이 불가능 구 철도건설규칙 적용	해외설계시 유동적인 설계기준 적용이 불가능 구 철도건설규칙 적용
	평면설계		특별한 문제없음	특별한 문제없음	평면선형 데이터 수동 입력	특별한 문제없음
	종단설계		특별한 문제없음	특별한 문제없음	지반고, 종단 선형 데이터를 수동 입력	암선 데이터 수동 입력
	횡단설계		횡단구조물 삽입시 오류 자주 발생 터공 수량 산출 부정확	표준횡단면도 및 횡단구조물 작성이 어렵고 적용시 오류 자주 발생	작성 불가	횡단구조물 삽입시 오류 자주 발생 터공 수량 산출 부정확
	계획평면도		전체적인 표현 및 기본계획 수준의 도면 작성이 가능하나 실시설계를 위해서는 터널, 교량, 토공사면, 각종시설물 등에 대해 별도 작업 필요	전체적인 표현은 가능하나 한국의 도면 디테일과는 상당한 차이가 있어 한국 기준으로 도면이 작성되어야 할 경우 노선 외 모든 작업에 대해 별도 작업 필요	작성 불가	터널, 교량 각종시설물 표현 불가능
	기타		Google Earth와의 연동이 불가하여 수치지도 미입수시 노선계획 불가	프로그램이 국내 프로그램 대비 상당히 복잡하여 초기 프로그램 기능 습득에 어려움 발생	평면, 종단 선형계획 외 별도 기능 없음	평면, 종단 선형계획, 횡단면도, 토공 사면 작성 외 별도의 기능 없음

나. EI-Rail 과 퀴텀(Trimble) 비교

[표 II-2] 해외사업이 가능한 퀴텀과의 비교

구분	ei_Rail	퀴텀
특징	선형최적화	선형최적화
적용알고리즘	유전자 알고리즘	비공개
주요기능	선형의 기하구조 제공	기하구조가 아닌 폴리라인만 제공
	위성데이터를 이용한 수치지도 작성	X
	상용 철도설계프로그램과 데이터 호환	X
	상용카드상에서 가동되므로 결과물의 도면화가 용이	X
	TPS 시물레이션 가능	X
	편입용지계산프로그램과 데이터 호환되므로 용지보상비 계산이 용이	X
사용데이터	수치지도, 위성데이터	수치지도, 위성데이터
비주얼화 기능	3D 시물레이션 (가상주행, 속도, 보는위치 등 조정 가능)	X

다. 연구시사점

(1) 프로그램 기능의 간소화

본 연구의 목표는 타당성조사 수준의 철도선형설계 프로그램의 개발로서 프로그램 개발시 꼭 필요한 기능 및 설계요소만을 탑재할 필요가 있다. 프로그램 사용자에게 불필요한 기능의 추가는 빈번한 오류 발생의 원인이 되며 사용자의 초기 프로그램 기능 습득에 방해가 될 뿐이다.

프로그램 기능 설계시 철도선형설계 실무자들의 의견을 적극 반영하여 설계요소 및 기능을 간소화하여 사용자의 기능 습득 및 선형 data의 신속한 도출이 가능케 해야 한다.

(2) Google Earth 호환

Bentley Rail Track은 위성사진, 측량자료 등과의 호환성 증가로 수치지도의 입수가 불가능한 지역에 대하여서도 노선계획이 가능토록 하였다. 이는 해외 철도사업시 필수적인 요소로 프로그램 기능에 포함되지 않을 경우 국내 혹은 일부지역에서만 국한되어 사용될 수밖에 없다.

본 프로그램에서는 Google Earth 위성사진과의 연동 기술을 개발하여 프로그램 사용자 원하는 국가 및 지역에서의 선형설계가 가능케 해야 한다.

(3) 유동적인 설계기준 적용

철도설계기준은 국가별 연도별로 변동되기 때문에 유동적인 설계기준 적용이 필요하다. 물론 프

로그래밍 Version Update 및 제작사에 요청을 통한 변동이 가능할 수는 있지만, 사용자의 시간적 제약이 발생한다.

이를 보완하기 위해 철도설계기준의 default값 이외에 사용자가 필요에 따라 직접 설계기준을 작성할 수 있는 기능을 추가하여야 한다. Bentley Rail Track와 같이 세세한 내용까지 직접 입력시 편의성의 저하가 야기되지만 이는 프로그램 기능 및 설계요소의 간소화로 최소화시킬 수 있을 것이다.

(4) 3D 시뮬레이션 및 프로그램 검증

3D 시뮬레이션 사용은 설계자가 노선 형식의 타당성 및 선형의 문제점을 빠르게 발견할 수 있으며, 설계전문가 이외 관계자에게도 설계노선의 설명이 용이하다.

본 연구에서도 3D 시뮬레이션 및 TPS를 연계하여 노선의 문제점 파악 및 타당성 검증이 가능토록 해야 한다.

(5) 기반프로그램 선정

기반프로그램은 선형설계프로그램의 사용자가 친숙하게 접근할 수 있으며, 기존 설계방식과의 호환이 가능한 프로그램을 선정하여야 한다.

기 개발된 프로그램 역시 이를 고려하여 Autodesk사의 Autocad를 기반프로그램으로 사용 중이며 본 연구의 개발 프로그램 역시 Autocad를 기반프로그램으로 사용하여야 할 것이다.

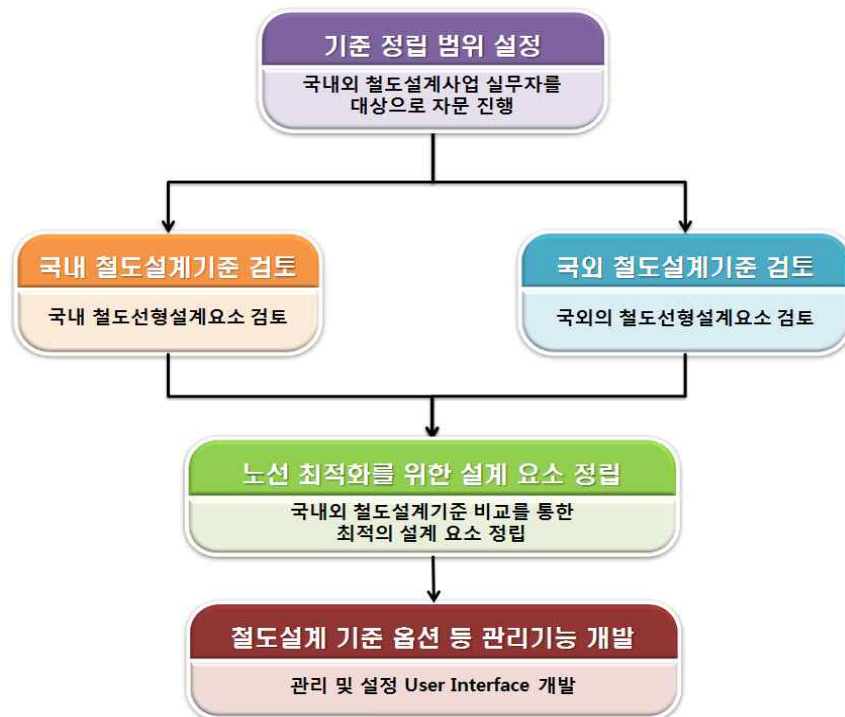
제4절 철도 설계기준 정립 및 관리기능 개발

1. 연구 개요

철도의 설계기준은 철도시설물이 위치하는 지형특성과 설계속도에 따른 차량특성을 고려하여 결정된다. 철도의 선형결정에 따라 철도시설물의 건설비와 유지보수비를 절감할 수 있을 뿐만 아니라 차량의 주행안전성과 이용승객에게 좋은 승차감을 제공할 수 있다. 철도 시설물은 공용기간이 매우 길고 한번 선로를 부설하면 그 개량에는 막대한 비용을 요구하기 때문에 설계 시에 신중한 검토가 필요하다.

철도선형설계는 지형에 따라 평면과 수직방향의 곡선을 필요로 하고 이에 따라 궤간, 곡선, 슬랙, 캔트, 완화곡선, 구배와 종곡선을 고려하고 다양한 곡선들이 서로 결합하면서 발생하는 경합조건들을 고려하여야한다.

철도선형설계 프로그램의 국내 활용뿐만 아닌 국외에서의 활용을 위하여 국내·외 철도설계기준을 검토 비교하여 철도노선 최적화를 위한 설계요소를 정립하였다.



[그림 II-14] 철도 설계기준 정립

2. 철도 유형별 설계기준 정립

가. 기준 정립의 범위 설정

본 연구의 최종성과품인 지능형 철도선형프로그램은 타당성분석수준의 선형설계프로그램으로 국내외 프로그램사용자의 편의 및 신속한 결과물 도출을 위한 최적의 철도설계기준정립이 필요하다.

우선, 2010년 개정된 철도건설규칙 이후로는 본 규칙에 설계속도 70km/h의 저속열차부터 350km/h 까지 선형설계에 관한 사항을 망라하고 있으므로 본 연구에서 고속철도와 일반철도를 구분하지 않았다

- 고속철도와 일반철도는 구조물설계기준인 하중체계에서 부터 차이가 발생하며 하중체계에 따라 구조물 설계기준이 달리 적용되게 되므로 선형계산부에서 굳이 고속철도와 일반철도를 구분할 필요 없음
- 선형계산부에서 철도의 분류는 일반구간과 전기동차전용선의 구분은 필요함. 그 사유는 예를 들어 곡선반경 및 기울기의 경우 전기동차 전용선의 경우는 설계속도에 관계없이 적용해야 하는 기준이 있기 때문이다.

또한, 최적 설계기준 정립을 위해 다음과 같이 5개의 부문으로 나누어 적용기준을 검토하였다.

- 평면선형계산
- 종단선형계산
- 정거장계획
- 구조물계획
- 설계비용 산정

이 중 평면선형 및 종단선형 계산은 정거장·구조물계획 및 설계비용 산정과 달리 설계의 안정성이 중시되는 항목으로 국가별 설계기준에 차이가 존재하기 때문에 국내 설계 기준은 물론 국외 설계 기준을 비교 분석하여 User Interface에 접목시킬 방안을 모색하였으며, 그 외 3개 부문에 대하여서도 본 연구의 목적에 부합되는 기준을 정립하였다.

나. 국내·외 철도 설계기준 검토

(1) 국내·외 철도선형설계 기준요소 설정

국내의 철도선형설계관련 규정은 2010년 개정된 철도건설규칙¹⁾을 따르고 있으며, 선형 설계시 고려하여야 할 요소는 제2장 제5조~제19조로 구분하고 있다.

[표 II-3] 철도건설규칙 중 선형관련 고려사항

구분	내용
제5조(설계속도)	선로의 설계속도는 해당 선로의 경제적·사회적 여건, 건설비, 선로의 기능 및 앞으로의 교통수요 등을 고려하여 정하여야 한다. 다만, 철도운행의 안정성 등이 확보된다고 인정되는 경우에는 철도건설의 경제성 또는 지형적 여건을 고려하여 해당 선로의 구간별로 설계속도를 다르게 정할 수 있다.
제6조(궤간)	궤간의 표준치수는 1천435밀리미터로 한다.
제7조(곡선반경)	곡선반경은 열차운행의 안전성 및 승차감을 확보할 수 있도록 설계속도 등을 고려하여 정하여야 한다. 다만, 정거장 전후 구간 및 측선과 분기기(分岐器)에 연속되는 경우에는 곡선반경을 축소할 수 있다.
제8조(캔트)	① 곡선구간에는 열차운행의 안전성 및 승차감을 확보하고 궤도에 주는 압력을 균등하게 하기 위하여 곡선반경 및 운행속도 등에 대응한 캔트를 두어야 하며, 일정 길이 이상에서 점차적으로 늘리거나 줄여야 한다. ② 제1항에도 불구하고 분기기 내의 곡선, 그 전 후의 곡선, 측선 내의 곡선 등 캔트를 부설하기 곤란한 곳에는 캔트를 설치하지 아니할 수 있다.
제9조(완화곡선의 삽입)	본선의 직선과 원곡선 사이 또는 두 개의 원곡선의 사이에는 열차운행의 안전성 및 승차감을 확보하기 위하여 완화곡선을 두되, 곡선반경이 큰 곡선 또는 분기기에 연속되는 경우에는 그러하지 아니하며, 그 밖에 완화곡선을 두기 곤란한 구간에서는 필요한 조치를 마련하여야 한다
제10조(직선 및 원곡선의 최소 길이)	본선의 경우 직선과 원곡선의 최소 길이는 설계속도를 고려하여 일정 길이 이상으로 하여야 한다.
제11조(선로의 기울기)	선로의 기울기는 해당 선로의 성격과 기능 및 운행 차량의 특성 등을 고려하여 정하여야 한다.

1) 철도건설규칙, 국토해양부령 제163호

[표 II-4] 철도건설규칙 중 선형관련 고려사항

구분	내용
제12조(종곡선)	선로의 기울기가 변화하는 곳에는 열차의 운행속도 및 차량의 구조 등을 고려하여 열차운행의 안전성 및 승차감에 지장을 주지 않도록 종곡선을 설치하여야 한다.
제13조(슬랙)	원곡선에는 선로의 곡선반경 및 차량의 고정축거(固定軸距) 등을 고려하여 궤도에 과도한 횡압(橫壓)이 가해지는 것을 방지할 수 있도록 슬랙을 두어야 한다. 다만, 궤도에 과도한 횡압이 발생할 우려가 없는 경우는 그러하지 아니하다.
제14조(건축한계)	① 직선구간의 건축한계의 범위는 별표 1과 같다. ② 건축한계 내에는 건물이나 그 밖의 구조물을 설치해서는 아니 된다. 다만, 가공전차선(架空電車線) 및 그 현수장치(懸垂裝置)와 선로 보수 등의 작업에 필요한 일시적인 시설로서 열차 및 차량운행에 지장이 없는 경우에는 그러하지 아니하다. ③ 곡선구간의 건축한계는 캔트 및 슬랙 등을 고려하여 확대하여야 하며, 캔트의 크기에 따라 경사시켜야 한다.
제15조(궤도의 중심간격)	① 직선구간의 경우 궤도의 중심간격은 차량한계(철도차량의 안전을 확보하기 위하여 궤도 위에 정지된 상태에서 측정한 철도차량의 길이·너비 및 높이의 한계를 말한다)의 최대 폭과 차량의 안전운행 및 유지보수 편의성 등을 고려하여 정하여야 한다. ② 곡선구간의 경우 궤도 중심간격은 곡선반경에 따라 건축한계 확대량에 상당하는 값을 추가하여 정하여야 한다.
제16조(시공기면의 폭)	직선구간의 경우 시공기면(노반을 조성하는 기준이 되는 면을 말한다)의 폭은 궤도구조의 기능을 유지하고, 전철주 및 공동관로 등의 설치와 유지보수 요원의 안전한 대피 공간 확보가 가능하도록 정하여야 하며, 곡선구간의 경우 캔트의 영향을 고려하여 정하여야 한다.
제17조(선로 설계 시 유의사항)	① 선로구조물은 표준 열차하중을 고려하는 등 열차운행의 안전성이 확보되도록 설계하여야 한다. ② 도상의 종류 및 두께와 레일의 중량 등 궤도구조는 해당 선로의 설계속도와 열차의 통과 톤수에 따라 정하여야 한다. ③ 선로구조물을 설계할 때에는 생애주기(生涯週期) 비용을 고려하여야 한다. ④ 교량, 터널 등의 선로구조물에는 안전설비 및 재난대비설비를 설치하여야 하고, 열차 안전에 지장을 줄 우려가 있는 장소에는 방호설비를 설치하여야 한다. ⑤ 선로를 설계할 때에는 향후 인접 선로(계획 중인 선로를 포함한다)와 원활한 열차운행이 가능하도록 인접 선로와 연결되는 구조, 차량의 동력방식, 승강장의 형식 및 신호방식 등을 고려하여야 한다.

철도건설규칙에서 규정한 16개의 요소에 대하여 국내외 철도설계사업 실무자들을 대상으로 선형설계요소에 자문을 진행하였으며, 최적의 선형설계요소는 다음과 같다.

- 설계속도
- 궤간
- 곡선반경
- 캔트
- 완화곡선
- 선로의 기울기
- 종단곡선
- 슬랙
- 궤도의 중심간격
- 시공기면의 폭

위 설정된 필수설계요소를 기준으로 국내·외 철도설계기준(한국철도설계기준, EURO-TSI, Technical Standard for Japanese Railway)을 비교·분석하여 각 설계요소에 대한 프로그램 반영 및 입력 방식을 고찰하였다.

(2) 국내·외 철도선형설계기준 검토결과

국내외 철도선형선형기준 검토결과 모든 철도선형설계요소는 설계속도에 따라 정해지는 것을 알 수 있다. 따라서 선형설계프로그램 계획시 사용자가 우선적으로 설계속도를 지정할 수 있도록 하여야 한다.

궤간, 궤도의 중심간격, 시공기면의 폭, 슬랙 등의 요소는 국내외 기준이 큰 차이를 보이지 않지만 곡선반경, 캔트, 완화곡선, 선로의 기울기, 종단곡선은 국내·일본·유럽의 기준 및 계산식의 차이를 보였다.(부록 참조)

따라서, 본 연구에서는 국내 철도설계기준을 기준으로 설계속도를 제외한 9개 요소에 대하여 프로그램에 default값으로 설정하고 타 설계기준은 프로그램 사용자가 직접 설계요소를 입력하는 방식으로 하였다.

다. 철도 노선 최적화를 위한 설계요소 정립 및 입력 방식 선정

철도 노선 최적화를 위해 평면선형계산, 종단선형계산, 정거장 계획, 구조물계획, 설계비용 산정 5개 부문에 대하여 설계요소를 정립하였으며 세부 요소에 대한 UserInterface 방식을 선정하였다.

(1) 평면선형 계산부

(가) 설계속도 입력

설계속도는 철도건설규칙에서 규정한 70km/h에서 350km/h 까지 10km/h 단위로 입력이 가능하도록 하여야 하며, 설계속도 입력시 다음과 같은 기준을 두어 구간별 설계속도를 다르게 지정할 수 있어야 한다.

- 철도건설규칙 제4조 설계속도 2항에 "도심지 통과구간, 시·종점부, 정거장 전후 및 시·화 구간등 노선내 타구간과 동일한 설계속도를 유지하기 어렵거나 동일한 설계속도 유지에 따르는 경제적 효용성이 낮은 경우에는 구간별로 설계속도를 다르게 정할수 있다"고 규정

- 선구 설계속도 동일시 : 해당 설계속도 입력
- 구간별 설계속도 상이시 : 도면상에서 구간 및 영역 선택구간 및 영역별 설계속도 입력

(나) 궤도종별 입력

선형설계에서 두 번째로 고려하여야 할 사항은 궤도의 형태이다. 철도건설규칙에 의하면 궤도의 도상종류에 따라 동일한 속도내에서 달라지는 요소들이 곡선반경(제6조), 캔트(제7조), 시공기면의 폭(제15조) 등이 존재하기 때문에 자갈도상궤도와 콘크리트도상궤도로 구분하여 궤도종류에 따라 설계기준을 달리 적용할 수 있게 한다.

- 자갈도상궤도
- 콘크리트도상궤도

(다) 노선 시·종점의 입력

설계속도와 같이 철도노선설계시 우선 입력되어야하는 항목은 노선의 시·종점이다. 시·종점의 입

력은 다음과 같이 두 가지 옵션으로 나눌 수 있다.

설계자의 편의를 위한 도면에서의 선택 방법, 정확한 시·종점 위치 파악을 위한 좌표 입력방식이다.

- 좌표입력
- 도면에서 선택



[그림 II-15] 시종점 선택 방식

좌하단 위도	좌하단 경도
-23.6	-47.25
우상단 위도	우상단 경도
-22.85	-46.4

[그림 II-16] 좌표 입력 방식

(라) 선로의 구분

앞서 3.1 기준정립의 범위설정에서와 같이 일반철도와 고속철도의 구분은 필요하지 않지만 일반선로와 전기동차전용선로는 최소곡선반경, 선로기울기 등에서의 계산방식에 차이가 존재하기 때문에 구분할 필요가 있다. 따라서 다음과 같이 두 종류의 선로를 평면선형 계산부에서 선택하여야 한다.

- 일반선로
- 전기동차전용선로

(마) 정거장 중심위치의 입력

- 좌표입력
- 도면에서 선택

정거장은 한 노선에서 다수를 선택하여야 할 필요가 있으므로 계속적으로 선택할 수 있도록 하고 정거장 중심위치도 입력할 수 있어야 한다.

선로 평면도에서는 정거장의 배선이 나타나지 않고 별도의 정거장 평면도에 표현되며 평면도상에서는 정거장 중심만이 표현되게 되므로 정거장의 배선에 관한 옵션은 필요하지 않다.

정거장 중심위치의 입력방식은 노선 시·종점 입력방식과 동일하게 설계자의 편의를 위한 도면에서의 선택 방법, 정확한 위치 파악을 위한 좌표 입력방식이다.

(2) 종단선형 계산부

(가) 측점의 설정

측점은 평면선형의 Chain을 결정하는 것으로 종단선형 계산시 측점의 설정이 필수적으로 기본계획의 1/5,000 지형도 사용시 측점간격은 보통 40m, 기본 및 실시설계 등에서는 20m를 설정하고 있다.

본 연구에서는 측점간격을 다음과 같이 선택이 가능하도록 한다.

- 측점간격 20m
- 측점간격 40m

(나) 종단길이의 설정

본 연구에서 종단길이의 설정은 한개 기울기의 최소 연장을 입력하게 하고 1개 기울기의 적용 연장은 보통 선로를 운행하는 1개 열차의 길이로 설정하는 것이 타당하다.

지형의 변화가 심한 구간에서는 가급적 1개 기울기의 길이를 최소로 하여 급기울기가 최소화 되도록 설정하게 한다.

(다) 종단 지반고의 설정

평면선형이 결정되고 측점간격이 설정되면 평면선형의 Chain에 따라 z좌표를 도상에서 취득하여 자동으로 지형 Profile을 생성·설정하는 방식을 적용한다.

(라) 종단 계획고의 설정

종단선형을 결정하는 단계로 평면선형 계산부에서 입력된 설계속도에 의하여 해당 노선의 최급 기울기, 종곡선 등이 결정되며, 이의 적용은 앞에 입력한 종단길이별로 구간을 설정하여 적용하게 된다.

기준에서의 기울기는 최급기울기를 적용한 것이므로 해당기준 적용시 최소 품질의 종단선형이 될 것으로 예상된다. 따라서 일정구간을 구획하여 지반고의 평균값을 적용한 높이로 종단선형을 결정하는 방식을 적용한다.

(3) 정거장계획

(가) 정거장 형식

정거장 형식은 토공정거장, 교량정거장, 터널(지하)정거장 3가지로 구분이 가능하며, 각 정거장 형식별로 설계비용 및 규모등에 차이가 발생한다.

따라서, 다음과 같이 정거장 형식을 선택하는 방식을 본 연구에서 적용한다.

- 토공정거장
- 교량정거장
- 터널(지하)정거장

(나) 정거장 규모

정거장 길이는 일반정거장의 경우 유효장 600m를 기준하여 입력하고 전동차 전용선의 경우 운행하는 전동차의 편성길이를 기준하여 입력하는 방식을 적용한다.

배선수는 본선, 부분선, 측선수를 입력하여 결정하도록 한다.

(다) 승강장의 규격

정거장 배선수 및 승강장 폭원 및 개수에 의해 정거장의 폭원이 결정되고, 승강장 길이에 의해 정거장의 길이가 결정되는 방식을 적용한다.

(라) 수요의 입력

일일 이용객 수요를 입력하면 해당 수요에 적절한 역사건축규모를 결정하는 방식이 타당하다. (예 : 일일 이용객 0만명 일경우 역사 연건축면적 000제곱미터)
공사비 산출방식은 제곱미터당 건축단가를 입력하고 여기서 산출된 면적으로 곱하는 방식이 적합하다.

(4) 구조물계획

(가) 종단상 구조물 적용 기준

종단상에서 경제적인 토공과 교량의 경계를 설정한다. 일반적으로 지반고에서 계획고까지 높이가 10m 이상인 곳은 교량, 이하는 토공으로 하나 해당구간 여건 및 비용 상 이를 조정할 필요가 있을시 적용 가능토록 옵션을 부여한다.

- 토공VS교량 구분
- 토공VS터널 구분

(나) 구조물의 설정

선형 설계시 종단계획상에서 계획고가 결정되고 각 측점상에서 지반고와의 차이에 의해 지반고-계획고간 높이차가 계산되면 위 항에서 설정한 높이 기준에 따라 구조물이 결정된다.
일반적으로 최소 길이는 20m 정도로 설정하여 연속 20m 이상일 경우만 해당 구조물을 적용하도록 함으로 본 연구에서도 상기 기준을 적용하여 구조물이 선택되도록 한다.

(다) 기타

토공구조물의 깎기 및 돋기 횡단설정 기준은 "철도설계기준 (노반편)2011"에 의하여 기준을 적용한다.

(5) 비용의 산정

건설 단가에 관한 부분은 도로·철도 부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 기준을 적용하거나 현실적인 사업비 산출을 위해 최근에 발주된 사업에서 해당 공종에 맞도록 미리 단가를 구성하여 입력해 놓고 매년 단가를 업그레이드하는 두 가지 방식으로 구분할 수 있다.

- 예타기준의 적용
- 실적단가의 적용

공사비 단가를 좌우하는 요소 중에 지형 및 지역적인 요인이 있어 2006년 한국철도시설공단에서 시행한 "설계속도 수준별 비용효과분석 연구"에 의하여 산정한 각 지역별, 설계 속도별로 산정한 비용을 적용하는 방안도 고려해볼 수 있지만, 본 연구에서 개발하고자 하는 프로그램의 범위는 실시설계가 아닌 타당성 조사 수준의 설계임을 고려할시 도로·철도 부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 기준을 적용하는 것이 타당하다.

3. 철도설계 기준 옵션 등 관리기능 개발

가. 개발 방법론

(1) 개발 방법론의 구성요소

- 작업 절차
 - 프로젝트 수행 시 이루어지는 작업단계의 체계
 - 단계별 활동, 활동별 세부작업 열거 및 활동의 순서를 명시
- 작업 방법
 - 각 단계별로 수행해야 하는 일이며, 절차/작업방법에 대해 기술
- 산출물
 - 각 단계별로 만들어야 하는 산출물의 목록 및 양식
- 기법/도구
 - 각 단계별로 작업수행 시 각 기법별 지원도구에 대한 구체적인 사용표준과 방법

(2) 구조적 방법론의 기본원리

- 추상화 원칙(Principle of abstract)
 - 특정 대상에 대한 실체로부터 분리된 개념이나 관점
 - 특정 대상을 “어떻게(HOW)”가 아닌 ”무엇(What)”으로 표현하는 간소한 방법
 - 실체를 둘러싸고 있는 사소한 것에 의한 제약을 받지 않고 문제의 해결을 고려할 수 있게 해줌
- 정형화 원칙(principle of formality)
 - 소프트웨어 프로젝트의 제어와 산출물의 품질관리를 위한 기초
 - 대상을 수학적 알고리즘과 같이 연구할 수 있도록 함
 - 형식이 생각과 명령을 자동화 시킬 수 있는 근거 제공
- 분할 정복의 개념(divide-and-conquer concept)

- 복잡하고 큰 시스템을 좀 더 작고 독립적인 서브 시스템으로 나누고(분할), 작게 분할된 시스템들을 쉽게 해결한다(정복)는 개념
- 추상화의 원칙과 함께 복잡도를 다루는 데 있어서 강력하고도 기본적인 도구
- 계층적 구조의 개념(hierarchical structure concept)
 - 분할 정복의 개념과 밀접하게 연관
 - 여러 개의 작은 독립적인 모듈로 나누어진 것들을 어떻게 배열하는 것에 대한 개념
 - 많은 부서를 가진 복잡한 시스템에서 일어날 수 있는 의사소통과 제어 문제를 다룰 수 있음

(3) 분석 절차

- 현 물리적 모형화(Current Physical Modeling)
 - 구조적 시스템 분석의 첫 번째 활동으로 분석자와 사용자의 반복적인 면담을 통해 사용자의 업무 수행 절차 및 환경을 있는 그대로 모형화하는 단계
- 현 논리적 모형화(Current Logical Modeling)
 - 현 물리적 모형에 존재하는 구현 의존적인 물리적 특성을 제거해 구현방법에 관계없이 현 시스템에서 수행하는 논리적 기능 및 유지해야 할 자료를 모형화하는 단계
- 신 논리적 모형화(New Logical Modeling)
 - 현 논리적 모형에 새롭게 추가되어야 할 기능이나 변경되어야 할 기능을 반영해 새로운 시스템에서 수행될 모든 기능 및 이에 필요한 자료에 대한 모형을 구축함으로써, 사용자의 요구사항을 논리적으로 표현한 최종 분석 명세서를 완성하는 단계
- 신 물리적 모형화(New Physical Modeling)
 - 이상적이고 개념적인 모형인 신 논리적 모형에 현실적인 물리적 환경을 감안해 최종 적용할 모형을 제시하는 단계

(4) 개발 절차 및 주요 산출물

표준화된 방법론을 테스크와 산출물을 기준으로 일부 커스터마징하여 분석, 설계, 구현, 시험, 전개 5 단계로 구분하고 다음과 같이 정의하였다.

[표 II-5] 개발절차 및 주요 산출물

구분	테스크명	주요 활동	주요 산출물
분석 단계	요구사항 정의	• 개발 환경 설정 • 업무범위 정의 • 개발 일정 계획 수립 • 요구사항 정의/분석	• 프로그램 사양서 • 요구사항 기술서 • 상세 개발 일정 • 회의록
설계 단계	윈도우 설계	• 윈도우 목록 정의 • 윈도우 레이아웃 • 윈도우 구성요소 정의 • 윈도우 구성요소 설명	• 윈도우 설계서 • 윈도우 구성요소 설명서
	프로세스 설계	• 프로세스 목록 작성 • 프로세스 정의 설명 • 프로세스 흐름도 작성	• 프로세스 정의서 • 프로세스 흐름도
구현 단계	Interface 구현	• 단계표준정의 • UI 구현 • 디자인 리소스 제작	• UI(User Ineterface) 리소스
	프로그램 구현	• 프로그램 코딩	• 프로그램 소스
	설명서 작성	• 사용자 설명서 작성 • 운영자 설명서 작성	• 사용자 지침서 • 운영자 지침서
시험 단계	테스트	• 테스트 시나리오 작성 • 테스트 시행 • 테스트 보고서 작성	• 테스트 결과 보고서
전개 단계	설치	• 사용자 교육 • 시스템 설치 • 시험 운영	• 완료보고서

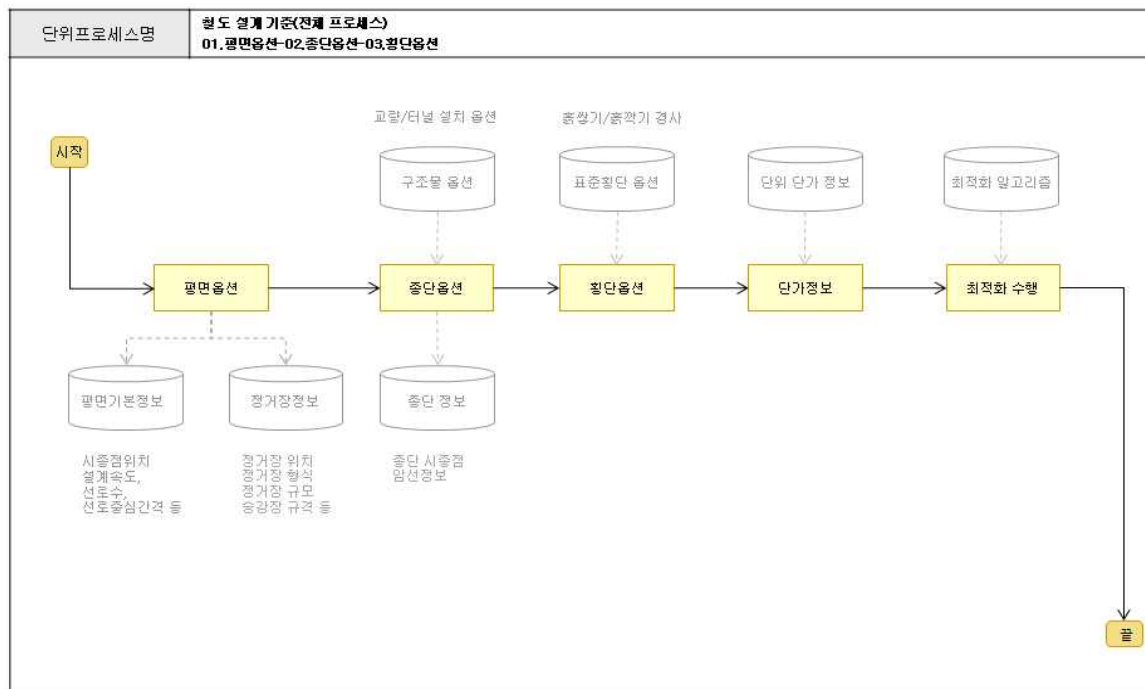
나. 관리·설정 User Interface 개발

앞에서 연구한 철도 설계기준을 본 프로그램에 반영하고, 효율적으로 관리할 수 있도록 단위 프로세스와 User Interface를 개발하였다.

(1) 프로세스 설계

(가) 전체 프로세스

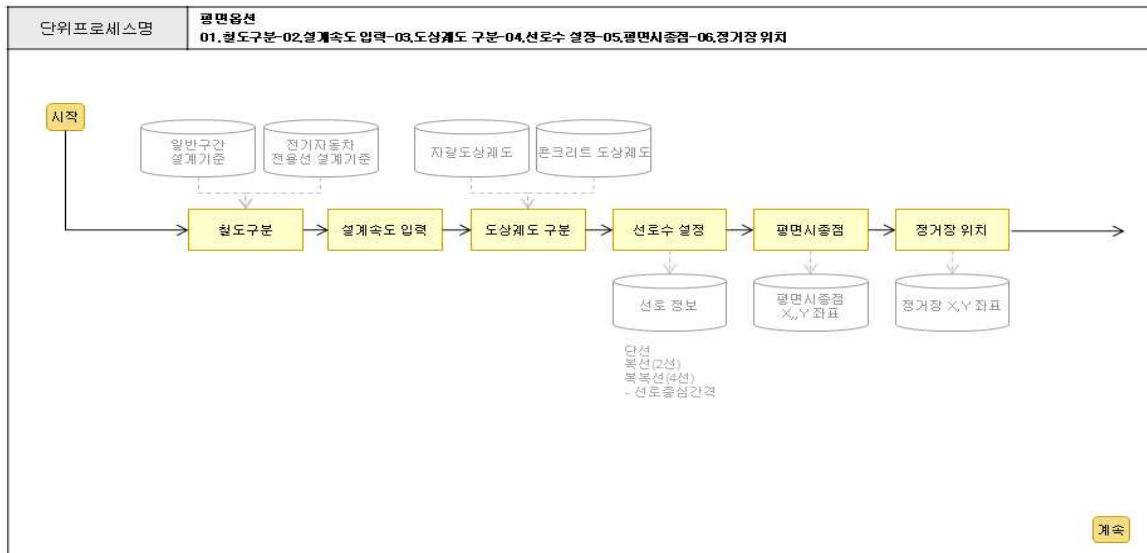
당해년도 연구범위인 철도설계 기준 반영 및 공사비 산정에 해당하는 프로세스를 정의하고 세분화하였다. 철도 노선 최적화 작업이전에 사용자는 프로그램에서 제공하는 평면(정거장 포함), 중단(구조물 포함), 횡단 등에 대한 설정정보 등을 해당 노선의 특성에 맞도록 단계별로 입력하거나 변경하여 해당 노선의 설계특성을 반영하는 시나리오를 가지고 있다.



[그림 II-17] 철도설계 시나리오(프로세스 구분)

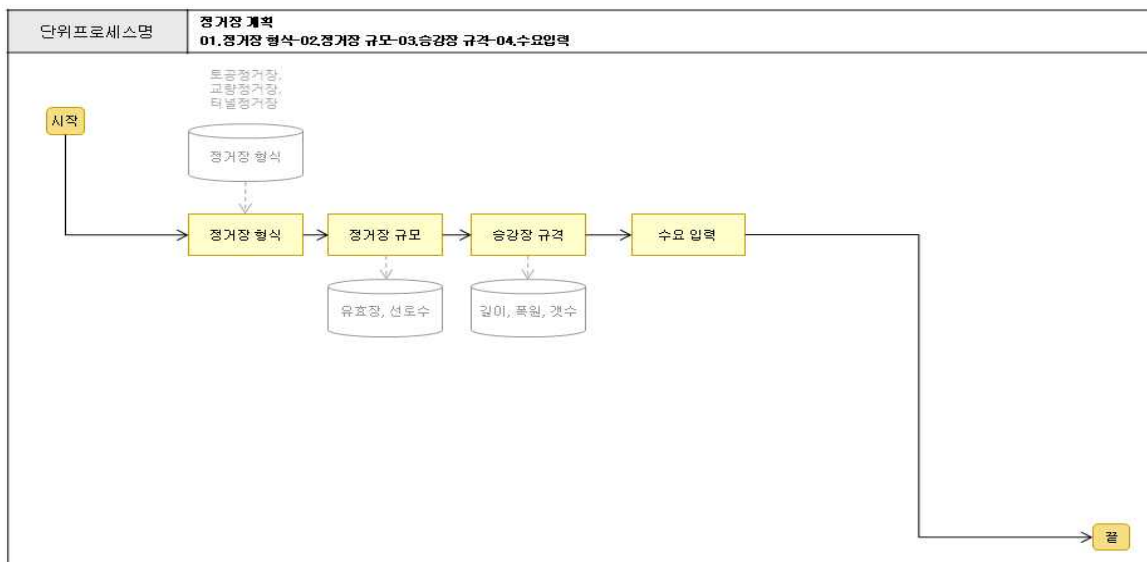
(나) 평면 옵션 설정

철도 평면 옵션으로는 철도구간(일반,전기자동차 전용선)을 선택하고, 설계속도, 도상레도(자갈, 콘크리트) 구분, 선로수 설정, 평면시중점 입력, 정거장 위치 등을 설정하도록 한다.



[그림 II-18] 평면옵션 프로세스

평면옵션에서 연속적으로 정거장 계획에 대한 제원(형식, 규모, 수요 등)을 입력할 수 있다.

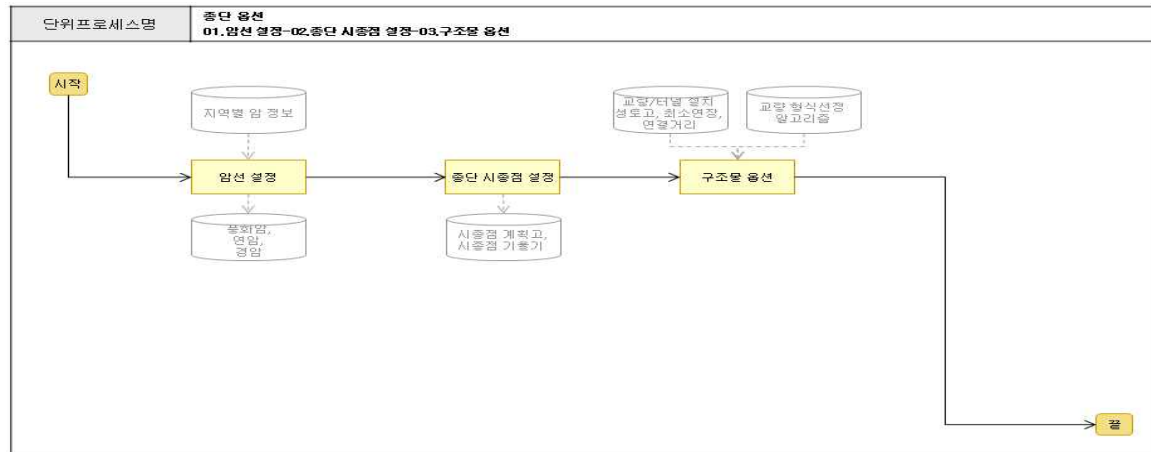


[그림 II-19] 단위프로세스 : 정거장 계획

(다) 중단 옵션 설정

철도 중단 옵션으로는 지반조사결과 있을 경우 풍화암, 연암, 경암의 높이를 입력할 수 있는 인터페이스를 제공하고, 지반조사결과가 없을 경우에는 해당 철도 노선 행정구역 지역별로 암선 정

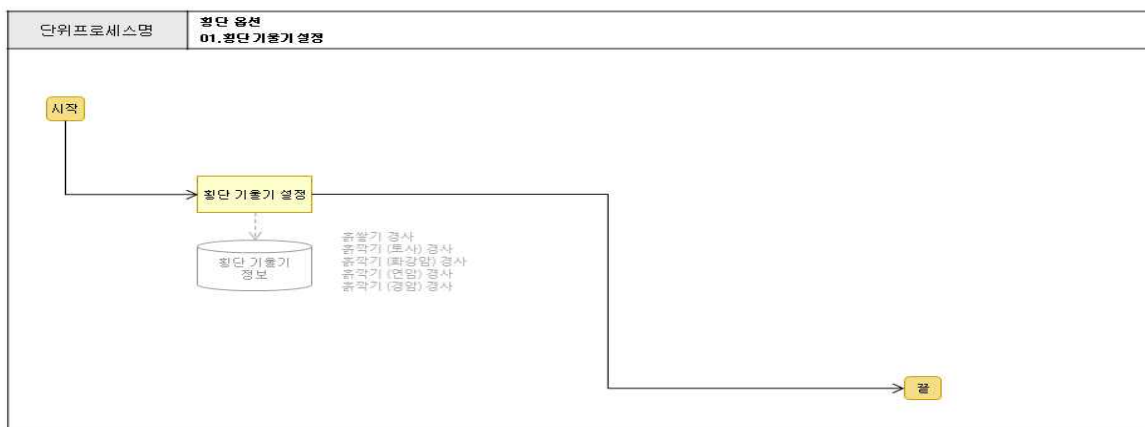
보 디폴트(default)값을 제공한다. 또한 중단면 시·중점에 대한 계획고 및 기울기를 설정하는 인터페이스 제공과 기준성토고와 구조물 최소연장 및 연결거리에 따른 구조물(교량, 터널) 설치 옵션을 제공한다.



[그림 II- 20] 단위프로세스 : 종단옵션

(라) 횡단옵션

횡단옵션으로는 철도 표준횡단면도의 단면적을 내부적으로 산출하기 위하여 흙쌓기, 흙막기 경사 기울기를 설정하여 반영하도록 한다.

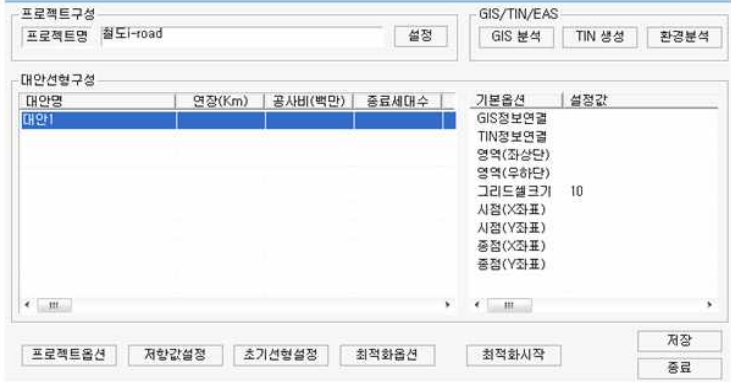


[그림 21] 단위프로세스 : 횡단옵션

(2) User Interface

(가) Main 화면

ei-RailRoad, 지능형 철도노선 설계 프로그램의 메인화면으로 프로젝트 및 대안별로에 한눈에 확인할 수 있는 리스트를 제공하고 각 세부(옵션) 등에 접근할 수 있는 인터페이스를 제공한다.

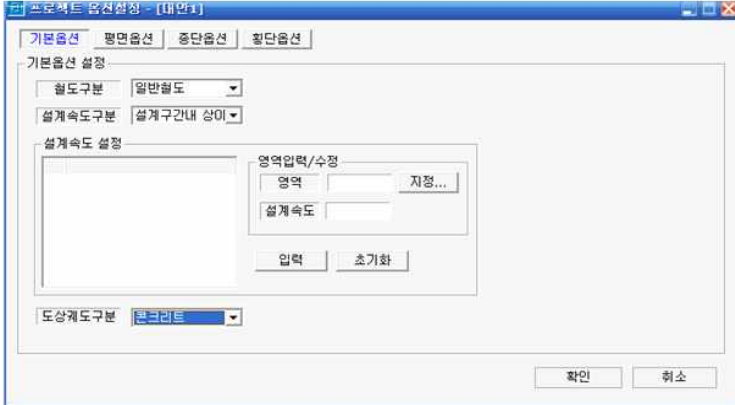
화면 ID		개요설명	프로젝트 구성, 대안선형부분, 기본옵션, 프로젝트 옵션 등에 접근할 수 있는 메인화면이다.
화면 명	메인 화면 구성		
레이아웃		구성항목 설명	
		1. 컨트롤 설정 -프로젝트 구성 -GIS/TIN/환경분석 -대안선형정보 -대안별 기본옵션 설정 -프로젝트 옵션 -GA 옵션 -평면시/종점 설정 등 2. 기타	

[그림 II-22] User Interface Main 화면

- 프로젝트 구성
 - 철도 노선설계 프로젝트에 대하여 신규등록 및 기존 프로젝트 선택 등에 대하여 설정 관리 한다.
- 대안 선형 구성
 - 하나의 프로젝트에 대하여 복수개의 대안 선형을 생성할 수 있으며, 각 대안별 기본옵션(GIS정보, TIN정보, 영역, 시중점 등)을 설정할 수 있다.
 - 리스트 컨트롤에서는 각 대안에 대한 기본정보(연장, 공사비, GA 세대 수 등을)을 확인할 수 있다.
- 각 세부 옵션(프로젝트 옵션, 저항값설정, 초기선형설정, 최적화옵션 등) 기능으로 연계되는 인터페이스를 제공한다.

(나) 기본 옵션 설정

등록한 프로젝트의 대안별로 철도노선의 기본 설계 기준을 정의한다.

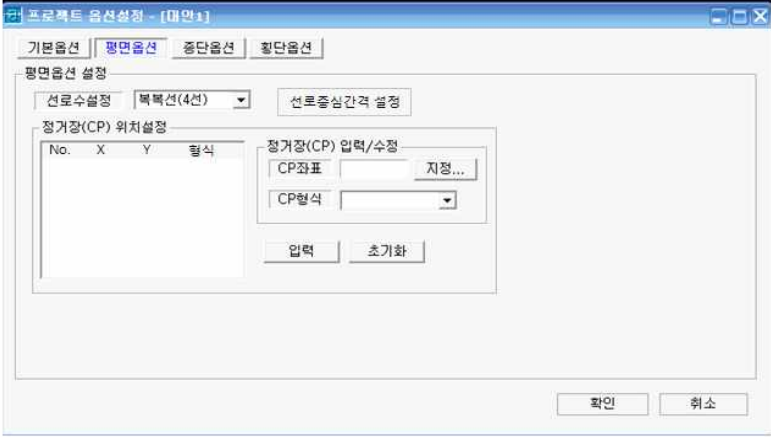
화면 ID		개요설명	철도 설계 프로젝트 설계기본 정보 등을 등록한다.
화면 명	기본옵션		
레이아웃			구성항목 설명
			1. 콘크리트 설정 - 철도구분 (선택) : 고속철도 : 일반철도 - 설계속도 구분 : 설계구간속도 동일이면 설계속도 입력 : 설계구간내 상이지 구간영역을 화면에서 선택하고, 구간별 설계속도 입력 - 도상계도 구분 (선택) : 자갈 : 콘크리트 2. 기타

[그림 II- 23] 기본옵션 설정

- ① 철도 구분
 - 해당 노선에 대하여 일반철도 구간인지, 전기동차 전용선이 선택한다.
- ② 설계 속도 구분
 - 설계속도 구간별 상이한 경우 영역(정거장을 기준)을 지정하여 설계속도를 입력한다.
- ③ 도상계도 구분
 - 해당 노선이 자갈도상계도인지 콘크리트도상계도인지 선택한다.

(다) 평면옵션 설정

철도 노선의 선로수(단선, 복선, 복복선 등)를 설정하고, 복복선인 경우 선로중심간격을 입력하여 표준횡단면 구성 시 활용되어진다. 또한 정거장의 위치 및 정거장의 제원(옵션)을 입력할 수 있다.

화면 ID		개요설명	철도 평면 속성(선로수, 정거장 정보 등)을 입력
화면 명	평면옵션 화면		
레이아웃		구성항목 설명	
		1.콘트롤 설정 -선로수 설정 :단선(1선) :복선(2선) :복복선(4선) 복복선(4선)에 대하여는 선로중심간격을 별도 선정함. -정거장위치 설정 :화면에서 정거장위치 지정하고 선로수에 따라 형식(1홈2선, 2홈2선, 2홈4선 등)을 설정 :정거장의 방향 순서 등을 리스트내에서 변경할 수 있음 2.기타	

[그림II- 24]평면옵션설정

○ 선로수 설정

- 해당 노선의 본선에 대하여 선로수 단선(1선), 복선(2선), 복복선(4선)을 구성하고, 복복선(4선)인 경우 선로중심간격을 입력받는다.

○ 정거장 위치설정

- 철도 노선인 경우 도로와 상이하게 정거장 정보가 중요한 요소로 작용하므로 별도로 정거장의 위치를 입력받아서 노선설계 및 공사비 산출 시 활용한다.
- 옵션으로 정거장 제원등을 입력할 수 있다.

(라) 중단옵션 설정

철도 중단에 대하여 중단 시·중점 계획고 및 경사에 대하여 설정하고, 암선정보(암 깊이) 풍화암, 연암, 경암별로 입력한다. 또한 교량/터널 구조물 설치 정보 기준 성토고, 최소연장, 연결거리에 대하여 설정할 수 있다.

화면 ID		개요설명	철도 종단에 대한 속성(시종점 계획고/경사, 암선 정보, 구조물 설치 정보 등)을 설정한다.
화면 명	종단읍선 화면		
레이아웃			구성항목 설명
			1. 컨트롤 설정 -시종점 계획고/경사 :시점계획고 :중점계획고 :시점경사 :중점경사 ** 신설선과 기존선을 별도 구분하여 입력받지 않음 -암선설정 :지반조사 유(사용자가 암깊이 입력) :지반조사 무(지역설정을 선택하면 해당 지역의 암깊이가 자동 설정됨) -구조물 설치 :교량 설치기준 (기준성토고, 최소연장, 연결거리) 입력 :터널 설치기준 (기준성토고, 최소연장, 연결거리) 입력 2. 기타

[그림 II-25] 종단읍선 설정

○ 종단 시·중점 계획고 및 경사

- 해당 노선의 종단 시·중점에 대한 시점계획고, 중점계획고 및 시점경사, 중점 경사에 대하여 입력한다.

○ 암선 설정

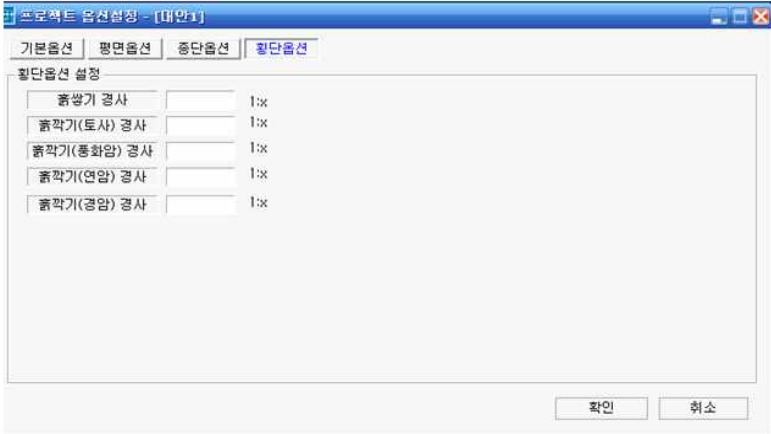
- 지반조사결과 유/무에 따라 풍화암, 연암, 경암의 암깊이를 사용자가 직접 입력할 수 있다.
- 지반조사결과가 없는 경우 해당 노선의 지역을 선택하면, 프로그램에서 기본값(Default)을 제공한다.

○ 구조물 설치

- 교량 및 터널 자동 위치 탐색기법에 적용되는 기준으로 기준 성토고, 구조물 최소연장, 구조물간 연결거리 입력값에 따라 교량 및 터널 구조물 설치 여부가 결정된다.

(마) 횡단읍선 설정

횡단읍선으로는 철도 표준횡단면도의 단면적을 내부적으로 산출하기 위하여 흙쌓기, 흙깎기 경사 기울기를 설정한다.

화면 ID		개요설명	철도 횡단에 대한 속성(휨각기 경사 등)을 설정한다.
화면 명	횡단옵션 화면		
레이아웃			구성항목 설명
			1. 컨트롤 설정 -휨쌍기 경사 -휨각기(토사) 경사 -휨각기(풍화암) 경사 -휨각기(연암) 경사 -휨각기(경암) 경사 2. 기타

[그림 II- 26] 횡단옵션 화면

○ 횡단옵션 설정

- 휨쌍기 경사, 휨각기(토사) 경사, 휨각기(풍화암)경사, 휨각기(연암), 휨각기(경암) 경사 등을 입력한다.

제5절 공사비 산정 및 지형정보 활용 기술 개발

1. 연구의 개요

가. 연구개발의 배경 및 필요성

철도부문 사업은 비용 추정에 있어서 도로부문과는 달리 접근방법이 복잡하고 고려요소가 많은 특징이 있다.

따라서, 기 개발된 지능형 도로설계 프로그램에서 만들어진 도로 공사비 모델을 철도 설계기준을 포함하여 최적 선형 탐색을 위한 공사비 산정 모델을 변경하도록 한다.

해외 사업 진출 시 개발도상국과 같은 수치지도 확보에 어려운 경우, 위성데이터 등을 활용하는 철도 노선 탐색에 활용도록 한다.

나. 연구개발의 목표 및 내용

[표 II- 6] 공사비산정 모델 및 지형정보활용기술의 주요내용

연구목표	주요 연구내용
철도 노선에 대한 공사비 산정 모델 개발	- 토공, 배수공, 부대공, 정거장, 설비(전기) 등 공사비 산정 - 교량 형식별 상부, 하부(교대, 교각), 기초공 공사비 산정 - 터널 지보패턴별 공사비 산정 - Major 공종 및 Minor 공종 분류하여 물량, 단가 또는 효율적용
지형정보 활용 기술 개발	- 수치지형도 및 사용자 layer 등에 대한 도면 표준화 - 수치지도 등고선(Contour) Map을 활용한 GIS Analysis(TIN, Grid, Aspect) 기술 개발 - 해외사업 등 수치지도 미확보 시 Google Earth 등의 위성지형데이터를 활용한 Contour Map 변환 기술 개발

2. 철도노선에 대한 공사비 산정모델 개발

가. 개요

철도부문 사업의 공사비는 도로부문과는 달리 접근방법이 복잡하고 고려요소가 많다는 특징이 있다. 철도부문 사업의 비용 산정은 예비타당성조사, 기본계획, 기본설계, 실시설계 등 각 단계에서 별도로 수행되며, 각 단계에서 요구되는 업무기준에 따라 정확도를 향상시키는 과정으로 산정 기준의 세분화와 고려 요소등의 다양화로 정의된다.

따라서 본 프로그램의 적용 범위인 예비타당성조사 단계 및 기본계획 단계 등에 적용할 수 범위에서 공사비 산정 모델의 개발하고 전산 프로그램을 개발 적용하여 보다 객관적이고, 정확도를 향상시켜 제공함으로써 합리적인 정책결정 및 비용 절감을 목적으로 한다.

나. 기존 공사비 산정 방법

현재 철도부문 사업의 초기사업비용 추정에서는 대부분 단위 가격법을 적용, 즉 개략적산 방식으로 과거에 시행된 유사한 공사에 적용된 단위 공사비를 기준으로 현재 물가에 대한 보정을 거쳐 반영하는 방법을 대부분 적용하고 있다.

(1) 사업 초기단계에서의 사업비 추정 방식

- 단위 가격법(Unit Estimate Method) : 기본단위에 근거하여 사업비를 산출하며 과거 유사 사업의 자료를 토대로 사업비를 산출 방법
- 계수 견적법(Factor Estimate Method) : 장비, 인력, 자재의 요소에 대한 공사비와 기준 요소에 대한 비용의 비율을 이용한 산출 방법
- 변수 견적법(Parameter Estimate Method) : 사업의 규모 또는 범위에 영향을 주는 설계 변수에 근거한 것으로, 즉 사업의 건축, 노반, 궤도, 설비, 전력, 신호 통신 등 각 시스템에 대한 공사비는 설계변수의 수량과 각 변수의 수량 단위에 대하여 산출된 시스템 비용을 곱하여 산출하며, 전체 사업비는 사업을 구성하는 모든 시스템들의 공사비 등을 합하여 산출하는 방법

(1) 주요 공사비

(가) 노반 공사비

철도 공사비 항목에서 가장 많은 비용이 소요되는 항목으로 노반은 크게 토공과 구조물로 구성되며, 토공은 다시 지반처리(흙쌓기, 흙깎기 등)으로 구성되고, 구조물은 터널과 교량이 주를 이룬다. 또한 정거장은 노반 형식에 따라 공사비 비용에서 큰 차이가 나므로 토공, 교량 및 지하구간으로 구분하여 산출되어야 한다.

(나) 궤도 공사비

궤도는 레일이 설치되는 구간을 대상으로 하여 총연장에 원단위를 곱하여 산출한다. 다만, 개량사업의 경우 단계별 시공에 따른 비용을 예상하여야 하므로 단계별 시공에 포함되는 임시선과 분기기에 대한 별도항목을 산출한다.

(다) 건축공사비

철도 건설에 건축물 중 일반적으로 정거장에 설치되는 역사, 각종 지원건물 등을 의미하며, 건축물에 설치되는 각종 전기설비 및 기계설비 등을 포함한다.

(라) 차량기지 공사비

차량기지 기능 확보를 위하여 소요되는 비용(건축, 설비등 포함)을 포함한다.

(마) 시스템 공사비

철도부문 사업의 노반, 궤도 및 정거장 등을 제외한 차량의 운행에 필요한 통신설비 및 신호설비 등을 총괄한다.

(2) 기타 공사비

(가) 부대비

부대비용은 설계용역비, 감리비, 측량비 등을 말하며, 시운전이 필요한 경우 비용을 포함한다.

(나) 용지보상비

용지보상비는 용지구입비와 지장물 보상비의 합으로 구성된다.

(다) 차량구입비

총사업비 산정에는 초기차량구입비만을 산정하고, 추가차량비용은 운영비로 산정한다.

(라) 예비비

사업비 산출의 오차 및 이에 따른 영향을 최소화하기 위하여 10%의 예비비로 책정한다.

(마) 운영비

유사한 철도경영 실적 자료를 토대로 산정하도록 권고하고 있다.

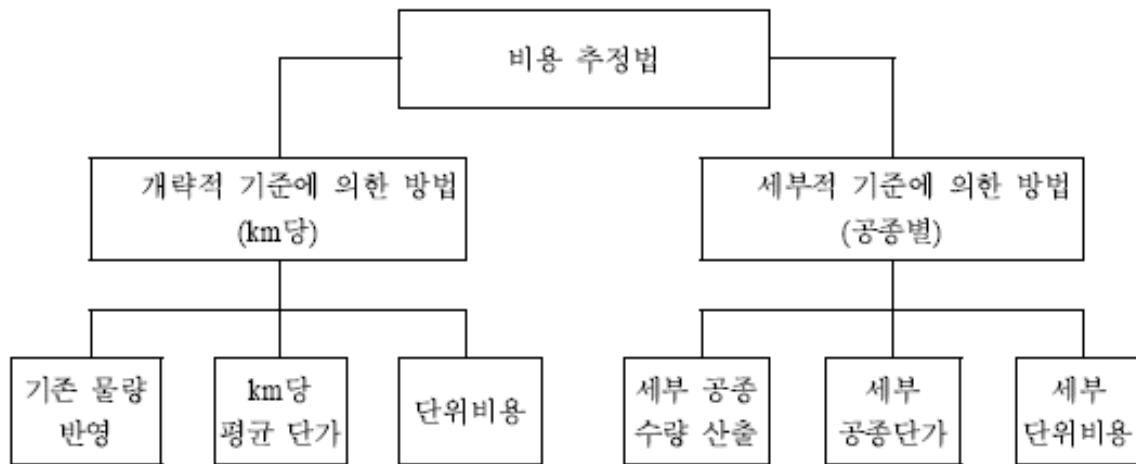
라. 공사비 추정기법

(1) 개략적 기준에 의한 방법(km당 철도건설 평균 단가 산정)

일반적으로 공사비 산출자료가 충분하지 않은 경우 통계적 접근을 통해 추정된 평균 건설단가인 공종별 **km당 공사비**를 산출하여 비용을 추정하는 방법이다.

(2) 세부적 기준에 의한 방법(세부 공종별 표준공사비 산정)

세부 공종에 대한 수량을 산출하고 세부 공종에 대한 단가를 적용하여 공사비를 산출하는 방식으로, 개략적 기준에 의한 방법과 비교하여 현장여건의 세부사항이 반영되므로 오차범위를 축소할 수 있다.



[그림 II- 27] 비용추정방법

본 연구에서는 두 가지 모형(개략적 기준에 의한 방법 및 세부적 기준에 의한 방법)을 혼합하여 철도 공사비 산정 방법 개발 적용하도록 한다.

일반적으로 단선, 복선 및 복선전철 등의 철도건설에 있어서 각종 시설에 소요되는 비용 중 65~85%는 노반의 건설에 소요되는 비용이며, 특히 노반공사비는 지형에 따라 변화되므로 공사비 산출의 정확도를 기하는 것이 가장 중요하다. 따라서 본 연구에서는 노반공사비 중 토공 공사비에 대하여 세부적 기준에 의한 방법을 적용함으로써, 산출되는 총공사비 오차범위를 축소할 것으로 판단된다.

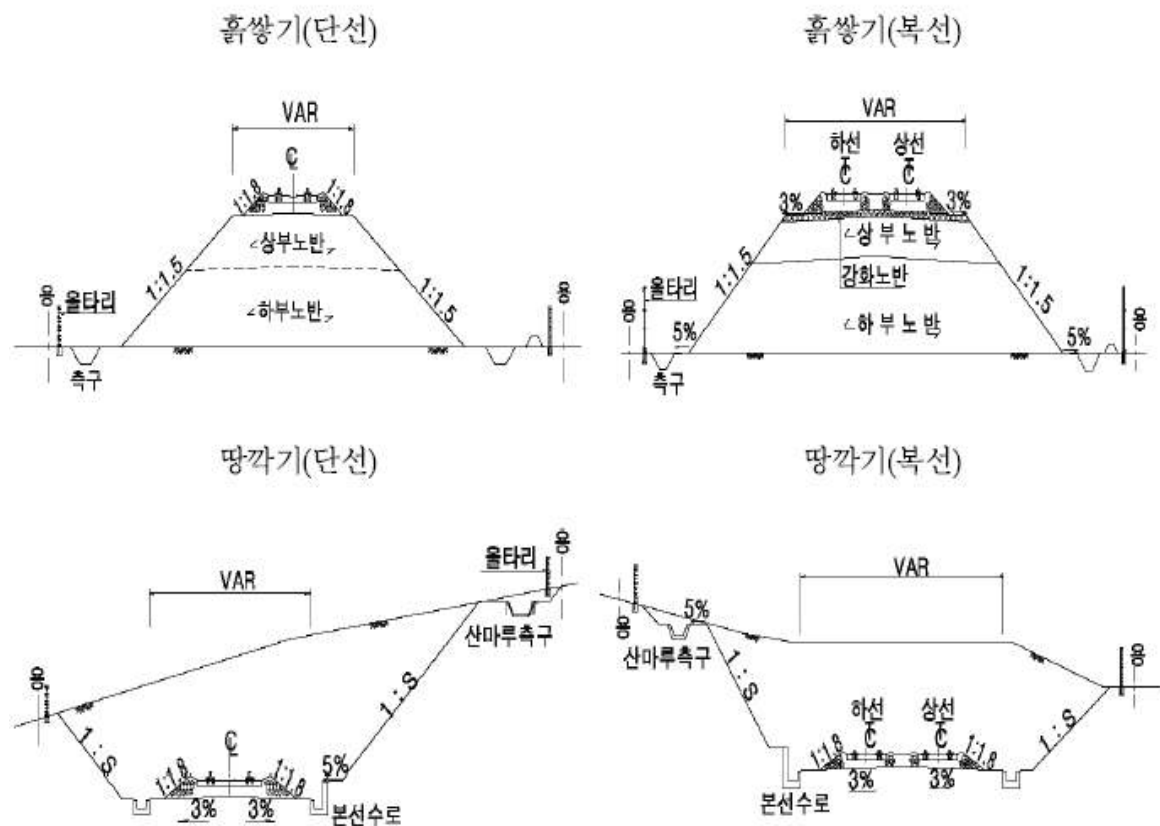
구 분			세 부 항 목		
건설비	공 사 비	노 반	토 공 사 비	• 토공(깎기, 흙쌓기, 지반개량, 본선부속시설 등)	
			교 공 사 비	• 교량 구조물 • B(함) 구조물 • 특수교량	
			터 공 사 비	• 개착터널 • NATM터널 • 특수터널(TBM 등)	
			정 거 장 공 사 비	• 여객전용 • 여객·화물 • 분기(중간기지 기능) • 지상, 선상, 선하, 지하 등	
			입 체 교 차 공 사 비	• 과선교 • 지하차도·라멘교 • 보도육교	
		궤 도	• 본선궤도부설(자갈도상, 콘크리트도상) • 정거장궤도부설		
		건 축	• 역사 및 유지보수건물, 위생 및 냉난방, 승강설비, 공조설비, 소방 • 승강장 및 화물 헛간, 보도육교		
		차량기지	• 전동차기지를 구분산정		
		시 통 신 스 테 일	전 력	• 송·수전설비 구내 배전선로 등 • 구내조명, 건물부대 전기설비	
			통 신	• 통신선로, 무선통신, 종합정보통신망구성 • 여객안내, 교환설비 등	
			신 호	• 열차제어설비 • 연동장치, 선로전환기 • 신호장치 • 건널목보안장치 ※ 지상·차상 방식으로 구분	
			전차선	• 송변전설비 • 전차선 • 원격제어설비	
		부 대 비	• 설계비, 감리비, 조사비 및 측량비		
		용 지 보 상 비	• 용지비 • 지장물, 이설도로 등에 관한 보상비		
		예 비 비	• (공사비 + 용지비 + 부대비)의 10%		
차량 구입비	• 초기차량구입비 • 추가차량구입비 및 대체투자비				

[그림 II- 28] 총사업비 세부항목

마. 철도 공사비 산정방법

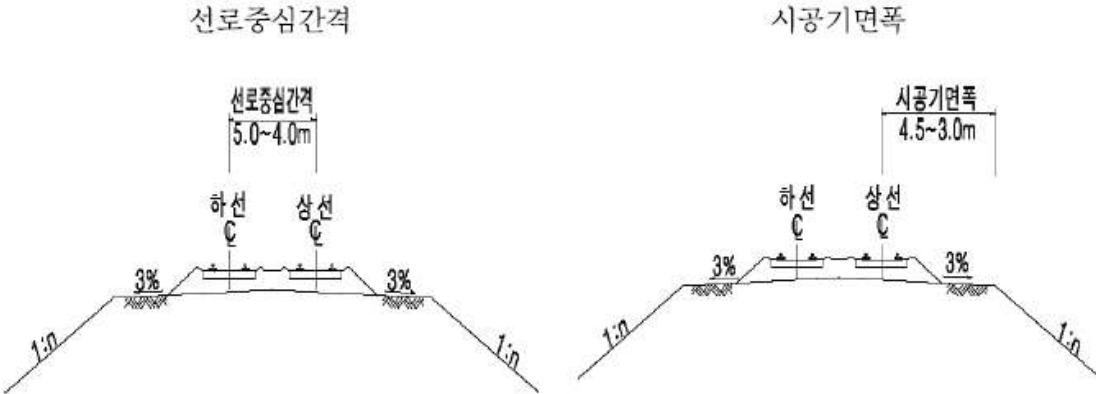
(1) 토공 공사비

기존 예비타당성조사 설계단계에서는 통계자료에 의한 평균 건설단가를 활용하여 개략 비용을 추정하는 개략적 기준에 의한 방법(km당 철도건설 평균 단가 산정)활용하고 있다. 본 연구에서는 정확도 향상을 위하여 토공에 대하여 세부적 기준(세부 공종별 표준공사비 산정)으로 추정하는 방법을 적용하였다.

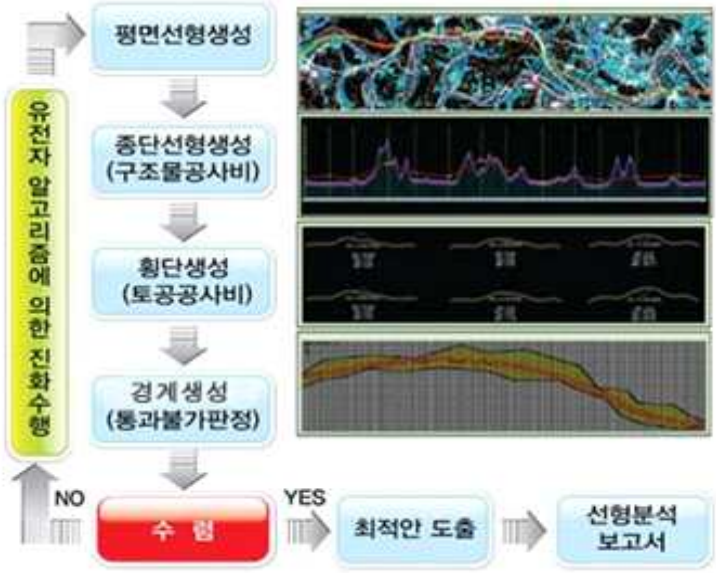


[그림 II-29] 본선토공 표준단면

토공노반의 폭은 선로 등급에 따라 선로중심간격 및 시공기면(노반을 조성하는 기준이 되는 면)의 폭이 달리 적용된다.



[그림 II-30] 선로중심간격 및 시공기면 폭



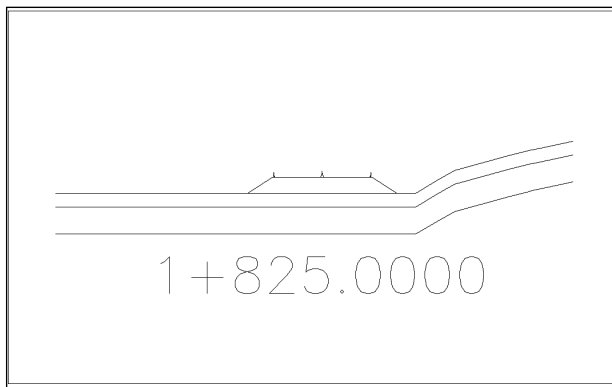
[그림 II- 31] 철도 노선 공사비 산정 흐름도

지능형 철도설계 프로그램에는 GA(유전자 알고리즘)을 활용하여 내부적으로 수많은 평면선형을 생성시키고 종단을 자동 구성한 후 측점별 2차원적인 횡단면도를 작성한다.

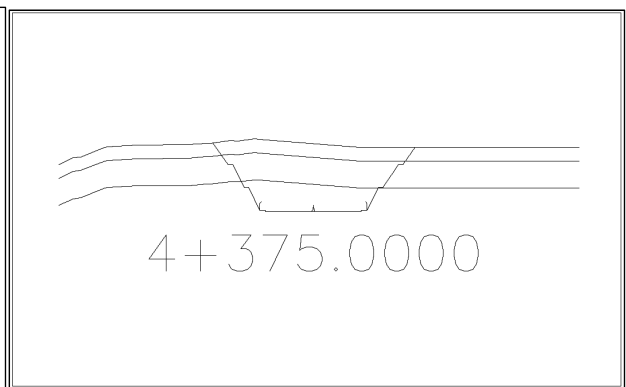
보통 횡단면도를 AutoCAD상에 작도할 때 철도중심이 되는 점을 먼저 구한다. X좌표는 0.0으로 설정하고 Y좌표는 현재측점의 계획고 값을 적용한다. 횡단상의 철도중심 좌표가 결정되면 철도중심을 기준으로 횡단의 구성 요소를 좌우로 구분하여 그려주면 된다. 횡단의 구성요소는 모두 폭을 가지고 있으므로 철도중심을 기준으로 우측과 좌측을 같은 방법으로 그린다. 단 이렇게 그려지는 횡단면도는 토공부의 횡단면만 해당된다.

철도선형은 토공구간과 교량구간, 터널구간으로 나뉘는데 교량 및 터널 구간의 단면을 그리는 방법은 미리 만들어 놓은 구조물 파일의 정보를 읽어들이어 횡단면을 구성한다. 구조물파일은 구조물을 구성하는 포인트간의 위상관계를 정의한 텍스트 파일로서 본 연구에서는 각 선로 별로 구조물 파일을 생성 하였다.

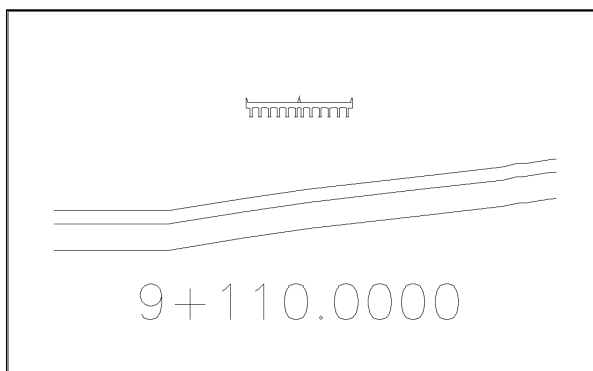
다음 그림은 토공부 성토 및 절토구간의 횡단면 및 교량/터널부의 횡단면을 보여준다.



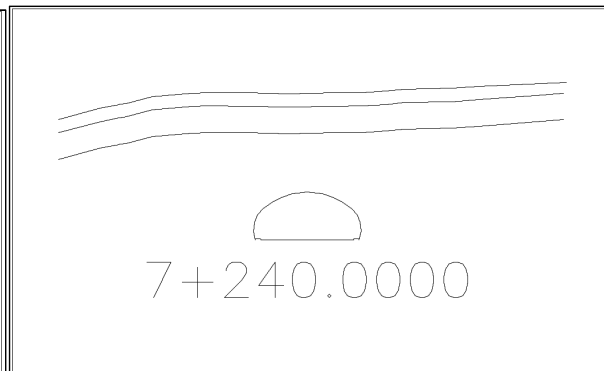
[그림 II- 32] 토공 성토부 횡단면도



[그림II- 33] 토공 절토부 횡단면도

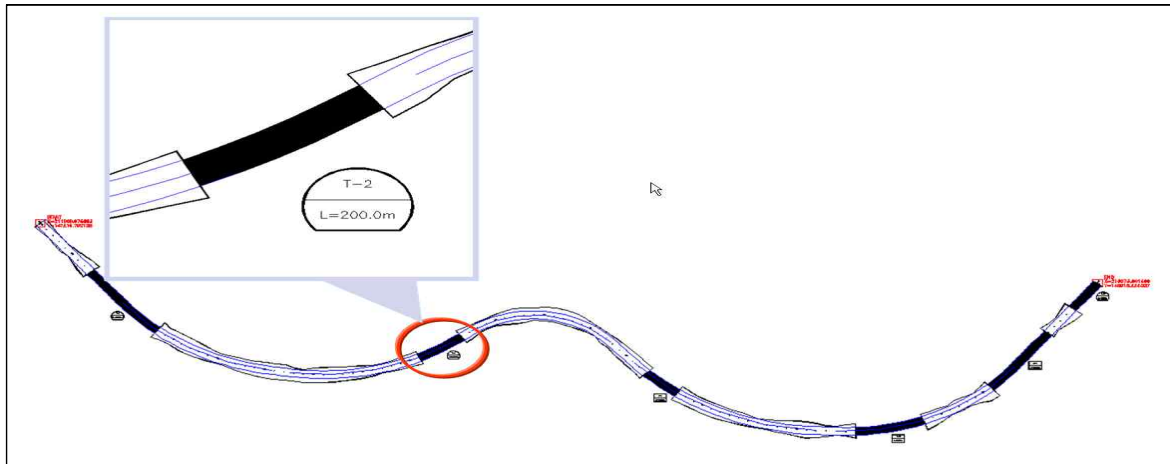


[그림 II 34] 구조물 교량 횡단면도



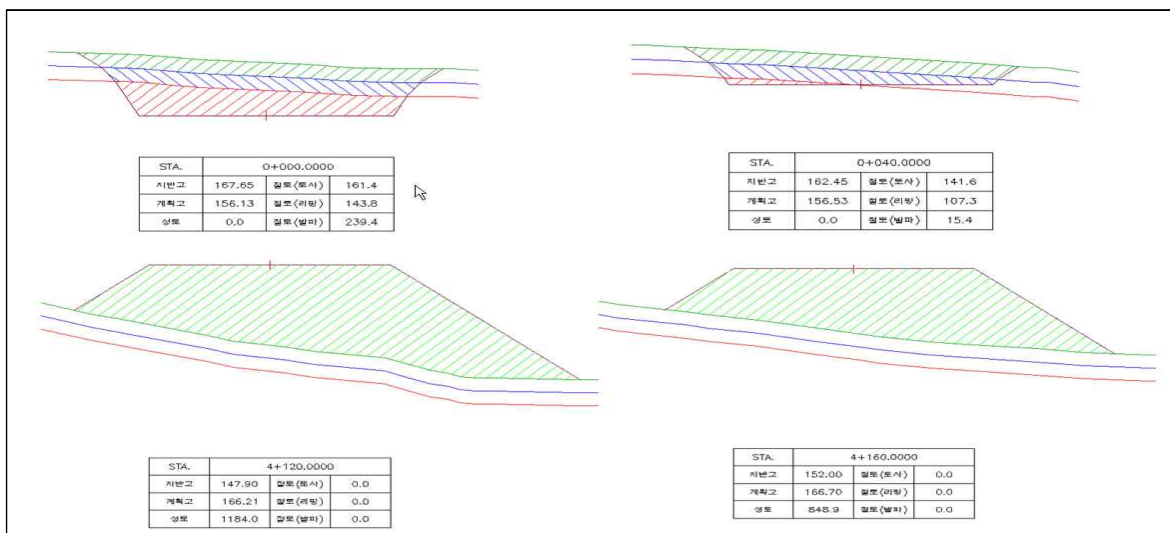
[그림 II- 35] 구조물 터널 횡단면도

이상과 같이 각 측점별로 횡단면도가 모두 구성 하고, 토공부 각 단면에 대하여 사면과 지반의 경계선(R.O.W.)을 구한다. 사면경계선은 토공부분에 해당하는 측점과 교량부분에 해당하는 측점 만 구한다. 이 경계영역은 현재 선형이 통과불가 영역 접촉 여부를 판단하는 아주 중요한 자료로 사용된다.



[그림 II- 36 립] 사면경계영역 생성화면

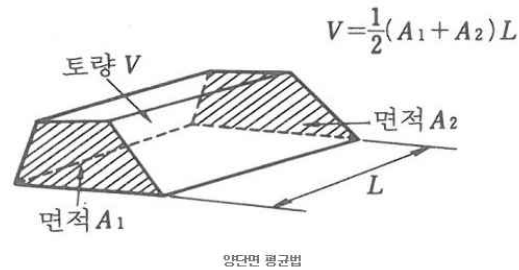
R.O.W.를 구성한 도로선형은 토적표 산출을 위하여 측점별 토공량을 계산한다. 토공항목은 성토, 절토(토사), 절토(리핑), 절토(발파)로 구분하고, 횡단면의 토공량계산 알고리즘에 의하여 신속하고 정확하게 측점별 토공 단면적을 계산한다. 다음은 토공부에 해당하는 각 측점에 대하여 토공 항목별로 단면적을 구한 그림이다.



[그림 II- 37] 각 측점별 토공면적을 구한 화면

전체 토공량은 측점별 토공면적을 기초하여 양단면 평균법(전후단면법)을 적용하여 구하는데, 전후단면법이란 두측점 사이의 면적물량을 체적으로 변환하기 위하여 (앞단면물량 + 뒷단면물량)

÷ 2 × 단면간거리 로 계산되며 횡단면구간의 평균물량을 구하기 위하여 사용되는 방식이다. 전 후단면법을 적용하여 토공구간 각 측점에 대하여 물량의 체적값을 구한후 토적표를 작성하면 토 공 공사비는 다음과 같이 계산된다.



[그림 II- 38] 양단면 평균법

산출된 물량에 대하여 단위공사비를 곱하여 세부공종별 공사비를 산정한다.

- 성토 공사비 = 성토수량 × 성토단가
- 토사 공사비 = 절토(토사)수량 × 토사단가
- 리핑암 공사비 = 절토(리핑암)수량 × 리핑암단가
- 발파암 공사비 = 절토(발파암)수량 × 발파암단가
- 기타 공사비 = (성토공사비+토사공사비+리핑암공사비+발파암공사비) × 15 %

물량별 토공 공사비를 구한후 최종적인 토공공사비는 성토공사비 + 토사공사비 + 리핑암공사비 + 발파암공사비 + 토공금액의 15%인 기타공사비의 합으로 계산된다.

[표 II- 8] 본선 및 지축토공 표준공사비(세부적 기준 : 2007년 기준)

(단위: 천원)

구 분				단위	단위공사비
1. 흙깎기	토사			m'	0.87
	풍화암			m'	1.73
	연암			m'	21.13
	경암			m'	22.54
2. 흙쌓기	상부노반			m'	1.37
	하부노반			m'	0.98
3. 아스팔트 깨기				m'	4.74
4. 터파기	토사			m'	0.98
	풍화암			m'	7.17
	연암			m'	19.27
	경암			m'	37.58
5. 폐기물 처리	아스콘	운반 및 처리		m'	72.00
6. 아스콘포장				m'	29.45
7. 유용토 운반	토사	덤프 트럭	불도지	m'	1.37
			운반거리 100m	m'	1.35
			운반거리 500m	m'	1.75
			운반거리 1000m	m'	2.25
	풍화암	덤프 트럭	불도지	m'	1.96
			운반거리 100m	m'	2.25
			운반거리 500m	m'	2.77
			운반거리 1000m	m'	3.43
	연암	덤프 트럭	불도지	m'	2.83
			운반거리 100m	m'	3.27
			운반거리 500m	m'	3.74
			운반거리 1000m	m'	4.33
	경암	덤프 트럭	불도지	m'	4.29
			운반거리 100m	m'	3.94
			운반거리 500m	m'	4.38
			운반거리 1000m	m'	4.92
8. 순성토 운반	토사	운반거리 10km	m'	3.93	
		운반거리 20km	m'	5.86	
		운반거리 30km	m'	7.79	
9. 사토 운반	토사	운반거리 10km	m'	3.23	
		운반거리 20km	m'	5.16	
		운반거리 30km	m'	7.09	
	풍화암	운반거리 10km	m'	5.20	
		운반거리 20km	m'	8.04	
		운반거리 30km	m'	10.88	
	연암	운반거리 10km	m'	6.93	
		운반거리 20km	m'	9.86	
		운반거리 30km	m'	12.79	
	경암	운반거리 10km	m'	9.36	
		운반거리 20km	m'	12.66	
		운반거리 30km	m'	15.93	
10. 기 타	토공의 15%~20%				
11. 제잡비	(1+2+3+4+5+6+7+8+9+10) x 요율				

주: 부가세 제외.

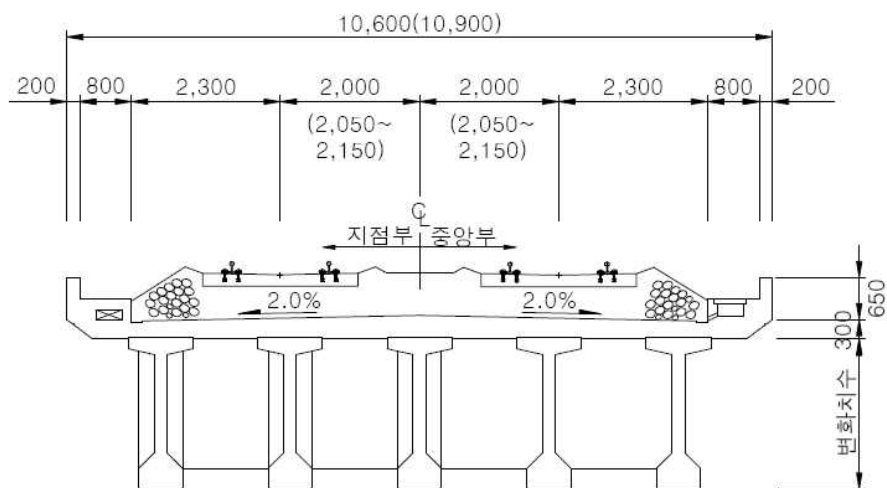
(2) 교량 공사비

교량 구조물은 토공, 터널, 정거장, 입체교차와 함께 노반을 구성하는 시설물로서 대표적인 교량 형식으로는 PSC Beam(Pre stressed Concrete Beam)교, PF Beam(Preflex Beam)교, ST Box Girder(Steel Box Girder)교 라멘교 및 B(함) 등이 있다.

공사비 범위는 상부공, 하부공(교대, 교각) 기초공 비용을 포함한 비용으로 교량연장으로 산출한다. 또한 대하천 및 도로 등을 횡단하기 위하여 특수교량이 필요한 경우는 별도로 산정하도록 명시되어 있다.



[그림 II- 39] 교량 표준단면



[그림 II- 40] 교량 복선 표준단면

교량의 공사비는 상부공, 하부공(교대, 교각) 기초공 비용을 포함한 비용으로 교량연장으로 산출한다.

다. 교량 형식별 표준연장과 표준높이를 정하여 표준 단위 수량을 이용하여 각 교량의 공사비를 형식별로 분석하여 경간장별 단위공사비를 산정한다.

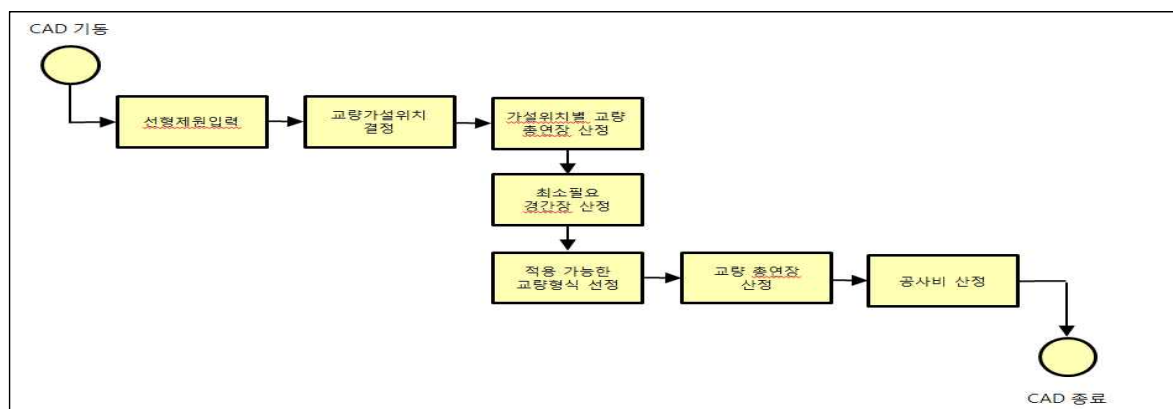
[표 II- 9] 각 교량의 공사비를 형식별 단가

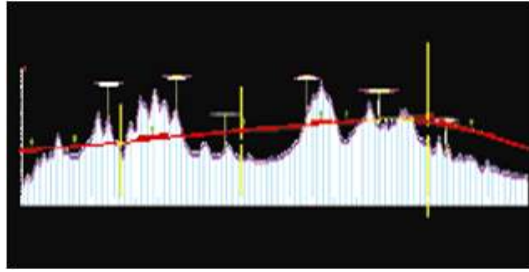
(단위: 천원)

공 종	규 격			단위	단선	복선	비고
상부공	PSC Beam교 슬라브 (L=25.0m)			M	7,408	10,227	
	PF Beam교 슬라브 (L=30.0m)			M	14,045	20,064	
	강합성교 슬라브 (L=40.0m)			M	19,765	28,236	
	PSC Box교 슬라브 (L=40.0m)			M	15,453	22,076	FSM 가설
하부공	경간 (25.0m)	교대	직접기초	개소	112,065	179,694	
			파일기초	개소	162,720	232,459	
		교각	직접기초	개소	115,879	165,541	
			파일기초	개소	208,384	297,691	
	경간 (30.0m)	교대	직접기초	개소	134,193	191,704	
			파일기초	개소	178,992	255,704	
		교각	직접기초	개소	127,466	182,095	
			파일기초	개소	229,222	327,460	
	경간 (40.0m)	교대	직접기초	개소	161,031	230,044	
			파일기초	개소	244,081	348,688	
		교각	직접기초	개소	155,171	221,674	
			파일기초	개소	334,368	477,668	
라멘	$\ell = 6.0\text{m}$			개소	79,200	143,900	복선 B= 10.9m 단선 B= 6.0m

주: 제압비 포함, 부가세 제외.

교량위치 및 형식 선정 방식은 다음과 같다.





[그림 II-42] 계략종단 구조물 위치 탐색

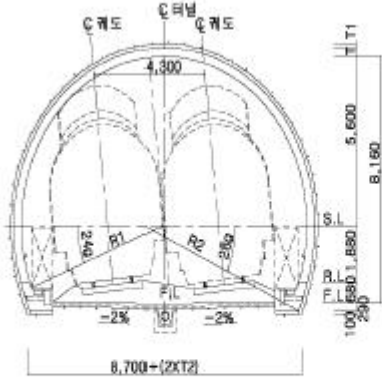
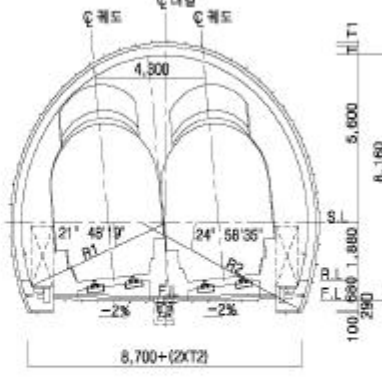
철도의 평면/종단 기하구조에 따라 평지의 경우 흙쌓기 높이 12m 이상인 구간이 100m 이상일 때 교량의 가설이 결정되거나 주어진 선형이 도로, 철도, 하천 등의 교차시설을 횡단할 때 교량이 가설된다. 흙쌓기 높이에 의해 교량의 가설이 결정된 경우 성토구간에 대해 교량의 총연장이 산정되고 30m를 최소 필요 경간장으로 설정한다. 기존 도로나 철도를 횡단하는 교량의 경우 횡단하는 도로, 철도 폭을 고려한 산식에 의해 총연장과 최소 필요 경간장이 결정되고, 하천을 횡단할 경우 하천폭을 교량 총연장으로 하여 최소 경간장이 결정된다.

총연장과 최소 경간장이 설정되면, 일반적으로 적용하는 경간장의 거리에 따라 25m~30m일 경우는 PSC계열(PSC Beam, IPC, e-Beam) 또는 PF Beam 거더를 적용, 30m~45m는 PSC Box 거더, Steel Box 거더를 적용, 45m~50m는 Steel Box 거더를 적용, 50m이상은 트러스교 등 특수형식의 교량을 적용하도록 한다. 또한 하부 지장물이 없을 경우는 경제성을 고려하여 25m 또는 30m의 PSC거더 계열(PSC Beam, IPC, e-Beam)의 상부형식을 적용한다.

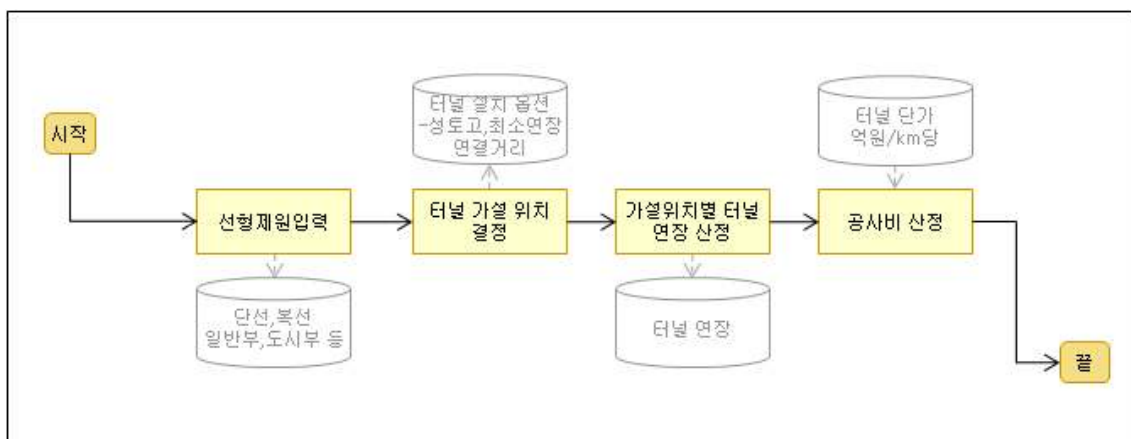
교량형식 선정 알고리즘에 대한 연구는 차년도에 보다 상세하게 연구하여 반영하도록 한다.

(3) 터널 공사비

터널공사는 시공성, 안전성 등을 고려할 때 국내에서 일반적으로 사용되는 터널 시공법으로 NATM, TBM 등이 있으나 장비수급, 공사비 및 시공성 측면에서 대부분 NATM으로 건설되고 있으므로, 본 연구에서는 NATM공법을 기준으로 한다.

구분	복선터널 표준단면(자갈도상)	복선터널단면(콘크리트도상)
표준 단면		
선로중심간격	4.3m	4.3m
보도폭	849	849
공동구	300×150	300×150
도상	자갈	콘크리트

[그림 II- 43] 일반철도 복선터널 현황



[그림 II- 44] 터널 공사비 계산 흐름도

철도 터널 공사비 계산은 위 그림과 같은 순서로 철도 노선의 평면/종단 기하구조에 의해 터널의 시종점 위치가 결정된다. 터널의 형성 조건은 최소 연장 120m 이상인 전 구간에 걸쳐 토피고 5m 이상이고 연장 구간 중에 토피고 40m 이상인 구간이 존재할 때 터널이 형성된다.

위의 방식으로 산출된 터널 연장에 개략적 기준에 의한 방법을 적용하여 철도 터널 공사비를

산정하도록 한다.

[표 II- 10] 터널 표준공사비(개략적 기준: 2007년 기준)

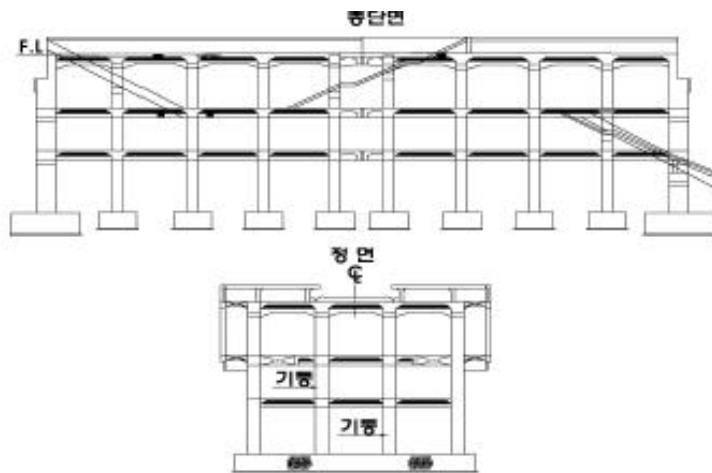
(단위: 억원/km)

구분	단 선		복 선		복선전철	
	일반부	도시부	일반부	도시부	일반부	도시부
NATM	124	174	163	228	163	228

주: 1) TBM 등 특수공법은 별도로 산출함.
2) 부가세 제외.

(4) 정거장 공사비

정거장 구조물의 범위는 토공정거장의 경우 본선노반의 시설물과 정거장 본선 및 지축토공, 지축옹벽을 포함한 시설물들로서 정거장 내 승강장과 적하장, 구내배수시설, 역사건물을 제외한 광장 및 주차장, 승객의 진출입을 위한 지하연결통로 등을 포함한다. 교량정거장의 경우 승강장을 포함한 라멘형식의 교량구조물로서 광장 및 주차장 등을 포함한다.



[그림 II-45] 선하(고가) 정거장 일반도(예)

(가) 개략적 기준에 의한 방법(km당 철도건설 평균 단가 선정) 적용

정거장 공사비는 개소당 비용으로 산정한다. 정거장 길이는 부분선(단선구간은 상하본선)을 설치하는 정거장을 기준으로 1,050m로 하고, 교량정거장의 개소당 공사비는 역사시설을 할 수 있는 라멘구조물(L=160m)과 확폭 교량 890m를 기준으로 하여 교량부 정거장 공사비를 산출한다.

[표 II- 11] 정거장 표준공사비(개략적 기준: 2007년 기준)

(단위: 억원/개소)

구 분			단 선		복 선		복선전철	
			일반부	도시부	일반부	도시부	일반부	도시부
토공부	간 선 철 도	2 홉 2 선	79	110	79	110	79	110
		2 홉 4 선			121	170	121	170
	전 동 차 전 용	2 홉 2 선	79	110				
		2 홉 4 선					121	170
교량부	2 홉	2 선	375	525	375	525	375	525
	2 홉	4 선			576	806	576	806

주: 1) 승강장 길이 $\ell=210(m)$ 기준.

2) 부가세 제외.

(5) 궤도 공사비

궤도공사비는 선로유형별 표준공사비(개략적 기준)를 이용하여 산출하는 방법과 세부적인 선로배선이나 구체적인 선로연장 계산이 가능할 경우에는 제시된 표준공사비(세부적 기준)를 이용하여 설치되는 구간의 유형에 따라 자갈도상, 콘크리트도상으로 구분하여 비용을 산출한다. 일반구간(토공, 교량)은 자갈도상, 터널구간은 콘크리트도상을 적용한다.

(가) 개략적 기준에 의한 방법(km당 철도건설 평균 단가 선정) 적용

[표 II- 12] 궤도공사비(개략적 기준: 2007년 기준)

(단위: 천원/m)

구분	공사비	주요 자재비	폐기물 처리비	장비 사용료	총계	비고
자갈도상 궤도부설	325	135	-	32	492	
콘크리트도상 궤도부설	747	175	-	-	922	
궤도철거	21	-	5	-	26	
선로전환기부설	18	75	-	1	94	백만원/틀당
선로전환기철거	4	-	-	-	4	백만원/틀당

주: 제잡비 포함, 부가세 제외.

(6) 건축 공사비

건축공사비는 전동차 운행구간과 일반열차 운행구간으로 구분하고 역사형태에 따라 지상, 지하, 선상, 선하 역사로 분류하였으며, 정거장 기능에 따라 중간역, 분기역, 종단역으로 구분한다.

(가) 개략적 기준에 의한 방법(km당 철도건설 평균 단가 선정) 적용

[표 II- 13] 건축공사비(개략적 기준: 2007년 기준)

(단위: 억원/개소)

구 분			단 선		복 선		복선전철	
			일반부	도시부	일반부	도시부	일반부	도시부
일반철도	선상	중간역	26	26	40	40	40	40
		분기역	55	55	84	84	84	84
		시·종단역	106	106	163	163	163	163
	지상	중간역	26	26	40	40	40	40
		분기역	55	55	85	85	85	85
		시·종단역	107	107	164	164	164	164
	선하	중간역	35	35	58	58	58	58
		분기역	52	52	87	87	87	87
전동차전용	선상						64	64
	선하						43	43
	지상						49	49

주: 부가세 제외.

(7) 시스템(전력, 신호, 통신) 공사비

전력, 신호, 통신 분야 등 시스템분야의 공사비 산출 범위 및 기준은 다음과 같으며, 다음에 제시된 표준공사비를 사용한다.

(가) 전력공사비

전력공사비 산출 범위는 송전선로, 변전설비, 전차선로 및 전력설비 등으로 구분하여 산출한다.

[표 II- 14] 전력공사의 표준공사비(개략적 기준: 2007년 기준)

(단위: 억원/km)

구 분		단 선		복 선		복선전철		비고
		일반부	도시부	일반부	도시부	일반부	도시부	
전 력		3.3	3.3	5.1	5.1	5.4	8.1	
전 철 화	송전선로					0.8	0.8	
	변전설비					5.2	5.2	60km환산
	전차선로					8.0	8.0	

주: 1) 송전선로, 변전설비, 전차선로는 간선철도 기준임.

2) 부가세 제외.

(나) 신호공사비

신호공사비는 지상신호방식(ABS방식)으로 산출한다.

[표 II- 15]신호공사의 표준공사비(개략적 기준: 2007년 기준)

(단위: 억원/km)

구 분	단 선		복 선		복선전철		비고
	일반부	도시부	일반부	도시부	일반부	도시부	
신 호	4.3	4.3	6.7	6.7	6.7	8.2	지상신호방식

주: 부가세 제외.

(다) 통신공사비

통신설비의 공사비는 전송망설비, 역무용 통신설비, 역무자동화설비, 열차무선시스템, 통신유도대책을 포함하는 공사비를 산출한다.

[표 II- 16] 통신공사의 표준공사비(개략적 기준: 2007년 기준)

(단위: 억원/km)

구 분	단 선		복 선		복선전철	
	일반부	도시부	일반부	도시부	일반부	도시부
통 신	4.9	4.9	4.9	4.9	7.4	9.8

주: 부가세 제외.

(8) 차량기지 공사비

차량기지 공사비는 유치선, 경수선 및 중수선 규모와 차량기지까지의 입출고선 연장에 따라 산출한다. 최근 건설된 차량기지 공사비를 분석한 결과 경수선을 위한 차량 기지는 개소당 1,870억원, 경수선 및 중수선용 차량기지는 2,340억원의 공사비가 소요된 것으로 나타났으나, 이러한 차량기지 공사비는 참고자료일 뿐 사업별로 차량검수 규모나 차량기지의 위치에 따라 용지보상비, 토목공사비 등이 사업별로 큰 차이를 보이고 있으므로 정확한 건설비는 시설규모 및 지역별 특성을 고려하여 입력하도록 한다.

[표 II- 17]차량기지 공사비

구분	투자비(백만원/량)	차량기지 면적(m ² /량)
경수선	850	1,215
중수선	1,035	

주: 부가세 제외.

자료: 대한교통학회, 「철도투자평가 비용부문의 합리화 방안 연구」, 2008.

바. 최신 단가 및 업데이트

일반적으로 KDI에서 발주하는 예비타당성 조사사업은 "도로·철도 부분 사업의 예비타당성조사 표준지침 수정·보안 연구(제5판)(2008.12, KDI)"를 적용하며 국토부에서 발주하는 타당성 조사사업은 “교통시설 투자평가지침(제4차개정)(2011.11, 국토해양부)”를 적용하고, 예비타당성 및 타당성 조사단계는 사업의 추진여부를 판단하는 것으로 실제 설계를 시행하는 것이 아니기 때문에 각종 지침의 단가를 적용하고 있으며 과거 단가를 현재에 적용하기 위해 한국은행 건설투자 GDP Deflator(연간)를 적용하여 단가를 escalation 또는 de-escalation을 하여 적용하도록 한다.

[표 II- 18] 한국은행 건설투자 GDP Deflator

한국은행 건설투자 GDP Deflator(연간)

연도	GDP Deflator	연도	건설투자 GDP Deflator											
2000	77.20	2000	100.00											
2001	80.70	2001	104.53	100.00										
2002	84.60	2002	109.59	104.83	100.00									
2003	90.50	2003	117.23	112.14	106.97	100.00								
2004	96.90	2004	125.52	120.07	114.54	107.07	100.00							
2005	100.00	2005	129.53	123.92	118.20	110.50	103.20	100.00						
2006	103.00	2006	133.42	127.63	121.75	113.81	106.30	103.00	100.00					
2007	107.90	2007	139.77	133.71	127.54	119.23	111.35	107.90	104.76	100.00				
2008	120.20	2008	155.70	148.95	142.08	132.82	124.05	120.20	116.70	111.40	100.00			
2009	122.30	2009	158.42	151.55	144.56	135.14	126.21	122.30	118.74	113.35	101.75	100.00		
2010	127.10	2010	164.64	157.50	150.24	140.44	131.17	127.10	123.40	117.79	105.74	103.92	100.00	
2011	134.70	2011	174.48	166.91	159.22	148.84	139.01	134.70	130.78	124.84	112.06	110.14	105.98	100.00

자료 : 한국은행 → 경제통계시스템 → 통계검색 → 간편검색 → 10 국민계정 → 10.4 부속표 → 10.4.3 디플레이터 → 10.4.3.2 국내총생산에 대한 지출 디플레이터(원계열, 분기 및 연간) → 총자본형성 → 총고정자본형성 → 건설투자

사. 철도 선형 공사비 레포트

본 연구의 최종 성과품인 「지능형 철도 노선 선정 프로그램」에서 선형분석보고서 중 일부인 공사비 항목에 대하여 “도·로·철도 예비타당성 조사 표준지침 수정·보안 연구(제5판)(2008.12, KDI)” 중 총사업비 집계표 양식을 참조하여 엑셀 레포트 템플릿을 작성하였다.

	A	B	C	D	E
2	III-7. 공사비정보				
3					
4	공종	구분	수량	단위	금액(백만)
5	1. 흙깎기	토사	147,239	m³	128
6		풍화암	89,325	m³	154
7		면암	3,215	m³	67
8		경암	258	m³	5
9	2. 흙쌓기	상부노반	25,315	m³	570
10		하부노반	1,894,351	m³	2,595
11	소계			m³	3,519
12	3. 교량	Bridge_01	16	m	530
13		Bridge_02	139	m	3,079
14		Bridge_03	16	m	521
15	소계				4,130
16	4. 터널공	Tunnel_01	2,595	m	422,985
17		Tunnel_02	8,895	m	125,993
18	소계				162,859
19	5. 정거장	중간역		m	400
20		분기역		m	850
21	소계				1,250
22	6. 궤도	중간역	12,200	m	18,300
23	소계				162,859
24	7. 시스템	전력	12,200	m	36,866
25		송전선로	12,200	m	125,993
26		변전설비	12,200	m	36,866
27		전차선로	12,200	m	125,993
28		신호	12,200	m	36,866
29		통신	12,200	m	125,993
30	소계				162,859
31	합계				168,799

[그림 II- 46] 공사비 집계

	A	B	C	D	E	F
2	Ⅲ-1. 토공공사비정보					
3						
4	공종	구분	수량	단위	단위공사비	금액(천원)
5	1.흙깎기	토사	147,239	m³	0,87	128,098
6		풍화암	89,325	m³	1,73	154,532
7		연암	3,215	m³	21,13	67,933
8		경암	258	m³	22,54	5,815
9	2.흙쌓기	상부노반	25,315	m³	22,54	570,600
10		하부노반	1,894,351	m³	1,37	2,595,261
11	3.기타					
12	합 계					3,522,239
13						

[그림 II- 47] 토공공사비 정보

	A	B	C	D	E	F	G
2	Ⅲ-2. 구조물 정보 (교량)						
3							
4	교량설치정보						
5	Bridge_02						
6	제원		시점	종점	경간수	형식	
4+475,2000			4+614,1000	3	PSC Beam교		
8	상부공		연장(m)		폭원(m)	단가(천/㎡)	공사비(천원)
138,9			6,4	10,227	1,420,530		
10	하부공		위치	기초	폭원(m)	단가(천/㎡)	공사비(천원)
11		시점교대	4+475,2000	직접기초	6,4	230044	230,044
12		종점교대	4+614,1000	파일기초	6,4	348688	348,688
13		교각(40M)	3개소	직접기초	6,4	221674	665,022
14		교각(40M)	개소	파일기초	6,4	477668	0
15		계					
16	총 공사비 (천원)		2,664,284				
17							

[그림 II- 48] 교량공사비 정보

	A	B	C	D	E	F	G	
2	Ⅲ-3. 구조물 정보 (터널)							
3								
4	터널설치정보							
5								
6	Tunnel_01							
7	제원		시점	종점	연장(m)	내공단면(㎡)	형식	
8			1615,000000	4210,000000		91,7	NATM	
9	구분		단위(억원/KM)			2,595,0		
10	복선	일반부	163					
11	총 공사비 (백만)		422,985					
12								

[그림 II- 49] 터널공사비 정보

	A	B	C	D	E	F	G
2	Ⅲ-4. 정거장 정보						
3							
4	정거장설치정보						
5							
6	일반철도						
7	제원		위치	연장(m)	구분		단위(억원/개소)
8	지상	중간역	2KM200	600	복선	일반부	40
9	총 공사비 (억원)		40				
10							

[그림 II- 50] 정거장공사비 정보

	A	B	C	D	E	F
2	Ⅲ-5. 궤도 정보					
3						
4	궤도공사비정보					
5						
6	재원	연장(m)		구분		단위(억원/KM)
7		12KM200		복선	일반부	15
8	총 공사비 (억원)		183			
9						

[그림 II- 51] 궤도공사비 정보

	A	B	C	D	E	F	G
2	Ⅲ-6. 시스템 정보						
3							
4	시스템공사비정보						
5							
6	재원		연장(m)	구분		단위(억원/KM)	금액
7		전력	12KM200	복선	일반부	5.4	65,880
8		송전선로				0.8	9,760
9		변전설비				5.2	63,440
10		전차선로				8	97,600
11		신호				6.7	81,740
12		통신				4.9	59,780
13	총 공사비 (억원)		378,200				
14							

[그림 II- 52] 시스템공사비 정보

3. 지형정보 활용 기술 개발

가. 개요

철도 사업 초기 단계에서 수치지도 및 지형정보를 활용하여 철도 노선 탐색 등을 지원하기 위한 요소기술을 보완 및 추가 개발하여 본 연구의 최종 성과품인 「지능형 철도노선 선정 프로그램」에서 활용하고자 한다.

(1) 종단선형 탐색 시 벡터방식을 이용한 VCP 처리기법 개선

기존 그리드분석을 통한 VCP 처리기법을 벡터방식으로 처리기법으로 변경하여 그리드분석의 문제점(오차 등)을 개선함으로써, 효율적인 종단선형 탐색 과 보다 정확도 향상 등을 기대할 수 있다.

(2) Google Earth 연계 기술 개발

위성영상 데이터를 활용하여 표고데이터(등고선)를 확보하는 기술을 개발하고, 「지능형 철도노선 선정 프로그램」에서 최종 결정된 철도 대안 노선에 대하여 KML(Keyhole Markup Language)로 변환하는 기술을 개발함으로써, Google Earth 프로그램과 연계 활용할 수 있다.

나. 종단선형 탐색시 벡터방식을 이용한 VCP 처리기법 개선

(1) 개요

EiRAIL(지능형 철도 노선선정 프로그램)을 이용하여 선형최적화를 수행하는 것은 컴퓨터 내부에서 수많은 평면선형이 생성되고 각각의 평면선형에 대하여 종단선형 최적화를 수행하는 과정의 반복 작업이라 할 수 있다. 종단선형 최적화시 구조물(교량/터널) 설치는 최적화옵션에서 설정한 절/성토고에 의한 교량/터널 설치옵션에 따르는 경우와 평면선형이 지장물(기존도로, 철도, 하천, 건물등)을 통과하는 경우 종단설계 상 지장물 접촉을 피하여 구조물을 설치 해야하는 두가지 경우가 발생한다.

절/성토고에 의하여 설치되는 구조물은 알고리즘에 의하여 최적화가 진행 되면서 공사비가 낮은 적절한 구조물이 설치되도록 프로그램 내부에서 자동으로 계획고를 설정하지만, 평면상 지장물을 통과하는 부분의 종단상 구조물은 설계자의 의도가 반영된 구조물이 설치되어야 한다는 차이가 있다. 평면선형과 접하는 지장물에 대하여 폭, 높이, 통과여유폭등을 사전에 지정(VCP설정)하여 종단선형이 지장물의 간섭을 피하여 원활한 종단계획이 이루어 져야 한다.

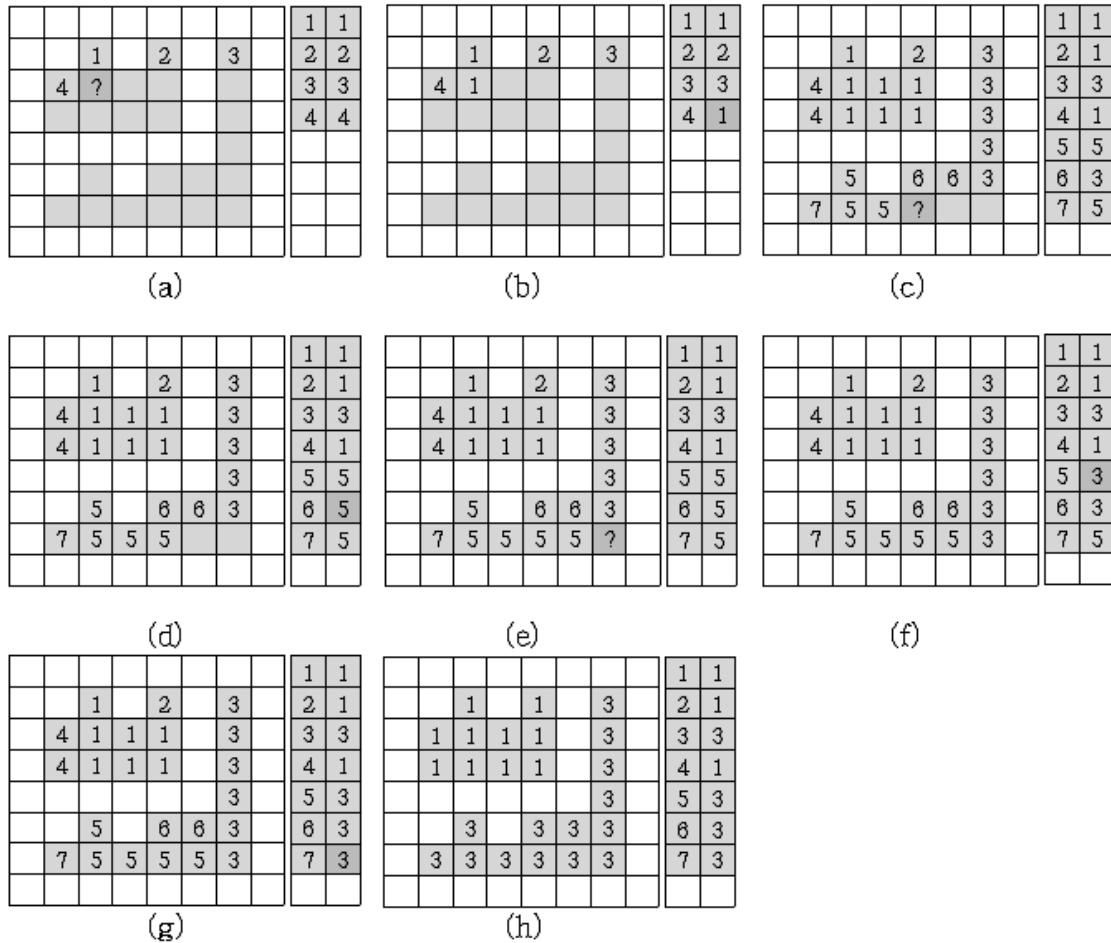
중단선형 최적화시 지장물을 고려한 구조물 설치를 위해서는 현재 작업중인 평면선형의 지장물 통과여부를 판단 하는 것은 매우 중요하고 반드시 필요한 정보이다. 단 한 개의 평면선형에 대하여 중단설계를 하는 경우는 평면선형이 지나는 노선상에 지장물 존재 여부만 판단하면 된다. 그러나 EIRAIL을 이용하여 노선선정을 할 경우 설계영역과 시종점만 주어진 상태에서 수천-수만개의 평면선형이 생성되며 각각의 평면선형은 서로 다른 지장물 정보를 가지게 된다. 각각의 지장물은 프로젝트 특성상 특정한 중단설계 방식(교량/터널/토공통과)을 요구 한다.

본 연구에서는 이런 설계 요구사항을 만족하기 위하여 수치지형도 엔티티를 이용한 VCP 속성정보를 설정하고 선형 최적화시 빠른시간내 관련정보를 획득하여 설계에 반영할 수 있는 방안을 도출 하였다.

(2) 그리드분석을 통한 기존 VCP 처리방법

지형분석을 통한 선형 탐색 기법에 적용되는 지장물 등은 한 개 이상의 인접한 셀(cell)들로 이루어진다. 하나의 선형에 지장물들간의 교차점에 해당하는 객체는 다수가 존재할 수 있고, 동일 객체에 속한 모든 셀들에 고유한 번호를 매기는 작업을 레이블링이라고 한다. 동일 객체를 정확히 파악해내야 교차점을 구할 시 동일 객체 내에서만 교차 시종점을 구할 수 있다.

이전 「지능형 도로설계 통합 프로그램」에서 사용된 그리드분석을 통한 VCP 처리 기법은 등가 테이블을 만들면서 모든 교차점 셀들을 두 번 스캔함으로써 레이블링을 수행한다. 스캔은 분석된 그리드 중에서 도로선형과 지장물들간의 교차된 셀들을 차례대로 모두 방문하는 것을 의미한다. 레이블링 기법의 첫 번째 스캔에서는 교차된 셀들을 저장된 순서대로 방문하면서 객체에 해당하는 셀인 경우 레이블을 지정한다. 이 때, 객체에 해당하는 셀의 이웃 셀 중 이미 스캔이 된 세 개의 이웃 셀의 레이블 정보를 검사하여 해당 셀의 레이블을 지정한다. 이미 스캔이 된 세 개의 이웃 셀의 레이블은 네 가지 경우로 분류할 수 있다.



[그림 II- 53] Grid 레이블링 기법 적용 절차

첫째로, 세 개의 이웃 셀에 레이블이 존재하지 않은 경우는 새로운 레이블을 지정하고, 자기 자신의 레이블을 가리키는 새 등가 테이블 항목을 생성한다.

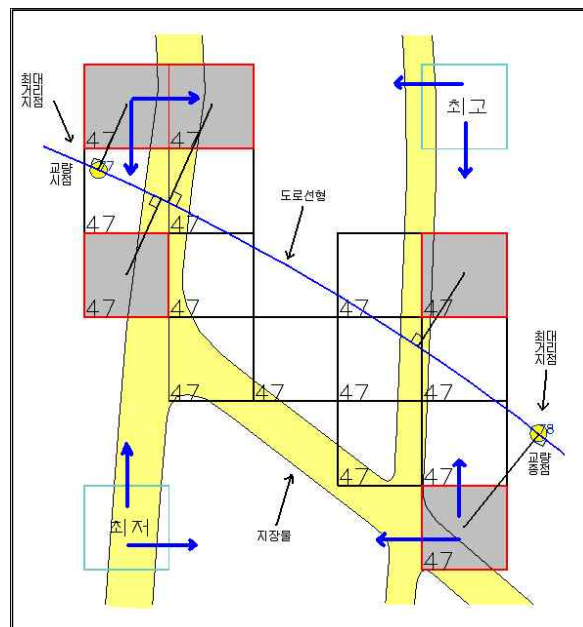
둘째로, 세 개의 이웃 셀 중 하나에만 레이블이 존재하는 경우는 이웃 셀과 동일한 레이블을 지정한다. 셋째로, 세 개의 이웃 셀 모두에 레이블이 존재하며, 서로 동일한 레이블인 경우는 이웃 셀과 동일한 레이블을 지정한다. 넷째로, 세 개의 이웃 셀 모두에 레이블이 존재하며, 서로 다른 레이블인 경우는 세 개의 레이블 중 가장 작은 번호의 레이블을 지정하고, 세 개의 레이블 중 큰 두 개의 번호의 레이블이 작은 번호의 레이블을 가리키도록 등가 테이블을 조정한다. 위의 첫 번째 경우 세 개의 이웃 셀에 레이블이 존재하지 않는다는 것은 세 개의 이웃 셀이 객체가 아닌 것임을 의미한다.

위와 같은 작업을 수행하면서 모든 셀을 방문하면 첫 번째 스캔이 완료된다. 첫 번째 스캔이 완료되면 등가 테이블을 정리하는 작업이 필요하다. 등가 테이블을 정리해야 하는 이유는 이웃 셀들이 동일한 레이블을 가져야 하기 때문이다. 등가 테이블에 존재하는 두 개의 레이블 쌍 (Llarge, Lsmall)이 서로 다른 경우, Lsmall의 값을 Eq(Lsmall)으로 변경해주어야 한다. 이때 함수 Eq(L)은 등가 테이블에서 레이블 L이 가리키고 있는 레이블을 반환하는 함수이다. 레이블링

기법에서 두 번째 스캔에서는 등가 테이블을 참조하여 객체에 해당하는 셀에 고유한 레이블을 부여한다. 즉 객체에 해당하는 셀에 현재 매겨진 레이블 번호가 L_k 라면, 등가 테이블을 참조하여 $Eq(L_k)$ 값을 새 레이블로 할당한다. 모든 객체 셀에 대하여 새로운 레이블을 할당하면 레이블링이 완료된다. 위에서 설명된 레이블링 기법의 적용 절차를 나타낸 것이다.

위에서 철도선형과 지장물들과의 교차지점을 레이블링 기법으로 객체로부터 나온 셀에 레이블을 할당함으로써 특정 객체의 셀들로 분류를 할 수 있었다. 이로써 특정 지장물에 대해 철도선형이 지나가는 위치에 교량이 설치될 수 있음이 명확하게 구분되었다.

위에서 설명된 철도선형과 교차 분류된 특정 지장물에 포함된 셀들로부터 VCP의 시점과 종점을 검출하여야 한다. 교차된 셀들을 철도선형 위의 수직 좌표로 나타내었을 때, 하나의 지장물에 속해있는 모든 셀들의 그룹에서 가장 먼 거리의 두 셀이 VCP의 시점과 종점부분이 된다. 즉, 철도선형의 시점에서 가까운 셀의 수직좌표가 VCP의 시점이 되고, 철도선형의 시점에서 먼 셀의 수직좌표가 VCP의 종점이 된다.



[그림 II- 54] 최외각 셀에서 시종점 검출

여기에서 모든 셀들의 거리를 구하기 위해 N^2 (N 은 셀의 개수)번 만큼 계산하게 되면, 속도가 저하되므로 교차된 셀들 중 실제로 계산에 필요한 최외각 셀이 될 후보를 결정한다. 최외각에 위치한 최저 X, Y 좌표 셀, 최고 X, Y 좌표 셀에 속해 있는 셀들인 4개의 모서리에서 상하좌우 방향으로 뻗어나가면서 처음 만나는 셀을 최외각 셀의 후보로 결정한다. 결정된 후보 셀들의 중심점에서 철도선형 위의 수직점을 찾고, 그 수직점 간에 거리가 가장 먼 두 수직점을 찾아낸 지점이 VCP의 시점과 종점이 된다.

(3) VCP처리를 위한 래스터방식 과 벡터방식의 비교

(가) 래스터 데이터

① 래스터 데이터 구조의 개념

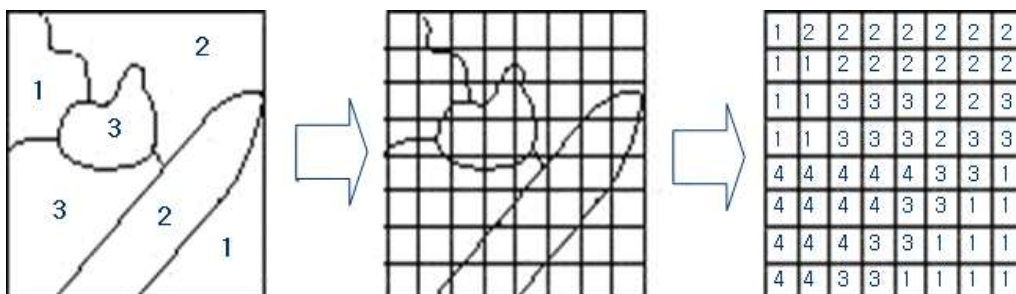
래스터 데이터 모델은 그리드 데이터(grid data) 모델이라고도 하며, 벡터 데이터 모델과 더불어 중요한 GIS 데이터 모델이다. 래스터 모델은 지표를 기하학적인 격자 형태로 나누어 공간 현상을 표현한다. 즉 그리드 셀(grid cell)이라고 불리는 정사각형의 최소단위들의 집합으로 공간 현상을 표현하려 고하는데, 일단 특정 크기의 그리드 셀로 특정 지역을 표현하면 그 단위 셀 크기를 변화하지 않는다.

래스터 데이터 구조는 정확한 위치 정보를 제공하지는 않는데, 왜냐하면 지리 공간을 격자형의 그리드로 나누고 특정 위치보다는 균일한 정사각형 픽셀들로 구성되기 때문이다. 그렇지만 비록 래스터 데이터 구조에서 정확한 절대 위치가 표현되지는 않지만, 그리드 셀의 상대적인 위치를 부여할 수 있다. 그리고 벡터 데이터 모델에서의 0,1,2차원 공간 유형은 하나의 픽셀, 또는 여러 픽셀들의 집합으로 표현된다.

래스터 데이터 구조는 데이터들의 기준점(origin)과, 행(column)과 열(row)의 수, 그리고 단위 픽셀의 크기 등의 정보로 구성된다. 래스터 데이터 시스템에서 공간객체와 관련하여 각 픽셀에 속성을 부여하는 두가지 일반적인 방법이 존재하는데, 손쉬운 방법으로는 각 픽셀 위치에 속성을 나타내는 일련의 단일 숫자 값을 부여하는 것이다. 이 경우 일반적으로 한가지 유형의 속성 값만을 저장할 수 있다. 두 번째 방법은 그리드 셀을 DBMS와 연결시키는 방법으로서, 각 픽셀에 해당하는 속성값들을 DBMS에 저장하고 고유 키 정보를 이용하여 액세스 하는 방법이다. 이때에는 한가지 이상의 속성 값들을 저장할 수 있으며, 속성을 DBMS에 저장, 유지 관리함으로써의 이점을 가질 수 있다.

다음은 벡터데이터를 래스터화하는 절차를 그림으로 나타낸 것이다.

래스터화(Rasterize)



[그림 II- 55] 래스터화(Rasterize)

② 래스터 데이터 구조의 장점

- 공간을 표현함에 있어서 상대적으로 구조가 단순하다. 각 셀에 하나의 숫자를 가진 그리드 셀로 표현되므로, 복잡한 실세계의 공간현상을 쉽게 개념화함으로써 보다 손쉽게 효율적으로 공간 분포와 패턴을 인식할 수 있다. 또한 실생활에 존재하는 다양한 데이터를 바로 래스터 데이터 구조로 변환할 수 있다.
- 래스터 데이터 구조를 이용하여 손쉬운 연산처리가 가능하다. 각 셀에 속성 값은 코드화되었기 때문에 지도 중첩이나 근접 등의 공간분석 기능을 쉽고 빠르게 처리할 수 있다.
- 원격탐사 영상자료와 연계가 용이하며, 영상자료는 래스터 데이터구조를 가지고 있기 때문에 GIS로 쉽게 통합된다.
- 래스터 데이터 모델은 다양한 모델링 작업을 쉽게 수행할 수 있다. 래스터데이터의 셀 값은 다양한 공식에서 입력 자료로 사용되기 쉽다.
- 래스터 데이터 모델은 상대적으로 단순한 구조이기 때문에 요구되는 컴퓨터의 사양은 저가이며 배우기도 쉽고 기술의 발달속도도 빠르다.

③ 래스터구조의 단점

- 래스터 데이터 모델은 시각적 효과도 떨어지며 공간적으로 부정확하다.
- 일반화에 의해 발생한 공간적 부정확성이 발생하며, 공간 정확도가 낮기 때문에 이로 인해 거리 측정이나 지역에 대한 면적 측정 등의 어려움이 있다.
- 벡터 데이터 모델과 비교해볼 때 상대적으로 해상력이 낮다. 해상력을 높이기 위해 아주 많은 숫자의 셀을 사용하는 경우 해상력은 좋아질 수 있지만 그래픽 자료의 양이 훨씬 많아져 많은 저장용량이 요구되면서도 만족할만한 정확도는 제공하지 못한다.
- 한 레이어에서의 해상도가 동일하게 적용되기 때문에 한 레이어내에서 상대적으로 상세하게 표현되어야 할 공간형상과 덜 상세할 필요가 있는 공간형상들이 동일하게 적용되어 표현된다. 즉, 각 셀들은 아무것도 존재하지 않더라도 코드화되기 때문에 많은 컴퓨터 저장용량을 필요로 한다. 특히 고해상도의 그리드의 경우에 더욱 많은 용량을 필요로 한다.

(나) 벡터 데이터

① 벡터 데이터 구조의 개념

벡터 데이터 구조는 다양한 실세계의 공간 현상을 기하학적인 정보를 토대로 하여 0,1,2,3차원 공간유형으로 개념화, 일반화하여 표현하는 방식이다. 이 모델에서는 현실세계의 지리공간을 연

속적이라고 가정하고 실세계의 공간현상의 기하학적 위치 정보를 정확하게 표현하려고 한다. 따라서 주택, 상점, 자동차, 우물 등의 공간현상들은 0차원 공간 유형으로 일반화되며, 이들의 기하학적 위치를 (x,y) 좌표로 저장하게 된다. 또한 도로, 하천 등의 공간현상들은 1차원 공간 유형으로 일반화되며, 그 공간현상을 따라 $(x_1,y_1), (x_2,y_2), \dots, (x_n,y_n)$ 의 집합으로 위치정보를 저장한다. 마지막으로 2차원 공간 유형은 연결된 선으로 폐곡 되어 구성되며, 선의 내부는 외부와 차단된 형태로 이질적인 특성을 가지게 된다.

이처럼 벡터 데이터 모델은 지도상에 공간현상을 표현할 때 공간차원(spatial dimension)이라는 개념을 토대로 하고 있으며, 이에 근거하여 0,1,2,3차원 공간 유형을 일반화한다. 이렇게 일반화된 공간 유형들은 각각 관련 속성들을 가지고 있으며 어떤 경우는 같은 저장 공간에서, 어떤 경우는 분리된 저장 공간에 유지 관리된다.

② 벡터 데이터 구조의 장점

- 좀 더 지도와 비슷하고, 시각적 효과가 높으며, 복잡한 현실세계의 묘사가 가능하다.
- 벡터 데이터 모델은 고해상력을 지원하기 때문에 결과물을 보다 상세하게 표현할 수 있으며, 높은 공간적 정확성을 제공한다.
- 벡터 자료는 위상관계를 나타낼 수 있다.
- 벡터 데이터 모델은 저장 공간을 적게 차지하며, 래스터 데이터 구조에 비해 저장능력이 우수하다.
- 공간객체에 대한 속성정보의 추출, 일반화, 갱신이 매우 용이하다.

③ 벡터 데이터 구조의 단점

- 벡터 데이터 구조는 복잡하며, 래스터 데이터 구조보다 관리하기가 어렵다.
- 래스터 데이터의 경우 데이터를 수정하는 경우 특성 셀의 값을 지우고 새로운 값을 입력하면 되지만, 벡터 데이터의 경우 노드와 버텍스 좌표와 긴 배열로 저장되어 있어 좌표 값과 연결성 등을 수정하여야 하기 때문에 벡터 데이터 모델은 보다 기술적인 지식을 요구한다.
- 래스터 데이터 모델을 기반으로 하는 GIS는 매우 간단하고 비교적 저렴하게 프로그램을

이용할 수 있는 반면에, 벡터 데이터 모델을 기반으로 하는 GIS는 보다 값비싼 하드웨어와 소프트웨어가 요구되므로 초기 비용이 많이 든다.

- 종종 벡터 데이터 모델은 중첩을 비롯한 다양한 공간분석 기능을 수행하는 경우 래스터 데이터에 비해 공간연산이 상대적으로 어렵고 시간이 많이 소요된다.

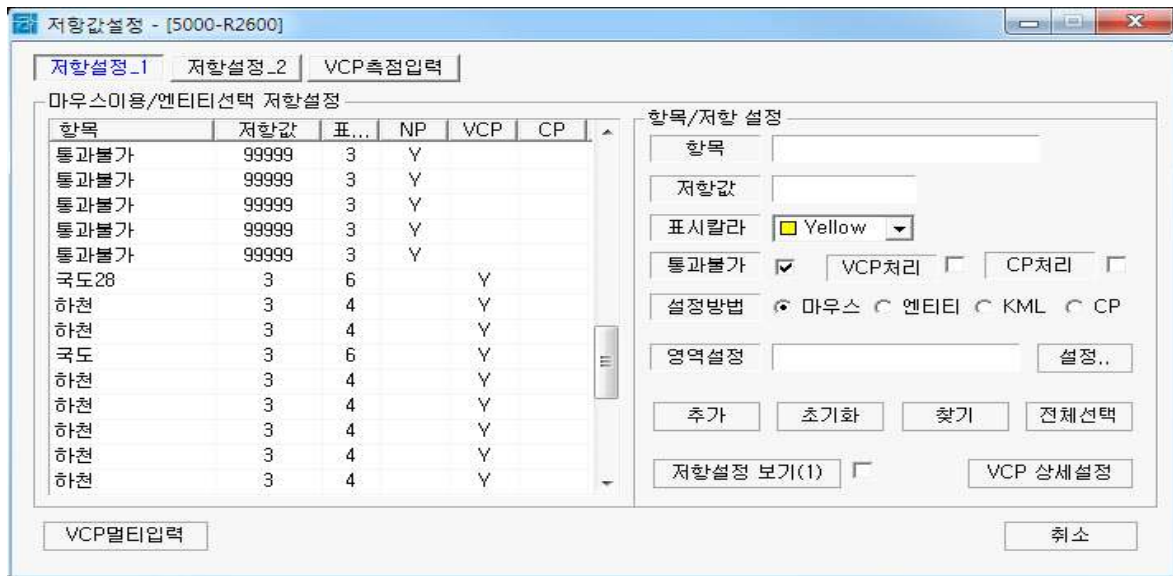
벡터 구조는 위치좌표로 표현된 점 정보나 선 정보를 표현하는 경우에 적합한 형태이고, 래스터 구조는 주로 평면상에 있어서 대상물의 분포 등을 표현하는 경우에 많이 이용되는 데이터 형식이다.

[표 II- 19] 벡터 데이터와 래스터 데이터의 비교

비교항목	벡터 데이터 구조	래스터 데이터 구조
데이터 구조	임의 표현 가능 데이터 구조가 복잡할 수 있음	정방향으로 일정(압축 형식 지원) 데이터 구조가 비교적 간단
정밀도	기본도에 의존	셀 간격에 의존
공간데이터 표현	점, 선, 면 등으로 표현	셀의 면 단위만 표현
속성 데이터와연계	점, 선, 면 각각의 공간 데이터와 결합 가능	셀 단위로 공간 데이터와 결합 가능
데이터 양	공간 데이터의 양에 의존	그림의 크기와 정밀도에 의존
확대/축소	지도를 확대/축소하여도 형상이 변하지 않음	지도의 확대/축소 시 거칠게 표현됨
선별적 관리	원하는 데이터 항목만 관리/출력이 가능	전체 그림 단위로만 관리
공간 해석	고도의 프로그램이 필요	매우 단순함
네트워크 해석	위상 표현이 가능	위상 표현 불가능

(4) 벡터방식의 VCP 입력방법

최적선형 탐색을 위한 VCP 관련 정보는 EiRAIL의 저항값 설정에서 입력 할 수 있으며 아래 그림은 저항값설정 대화상자 화면이다.

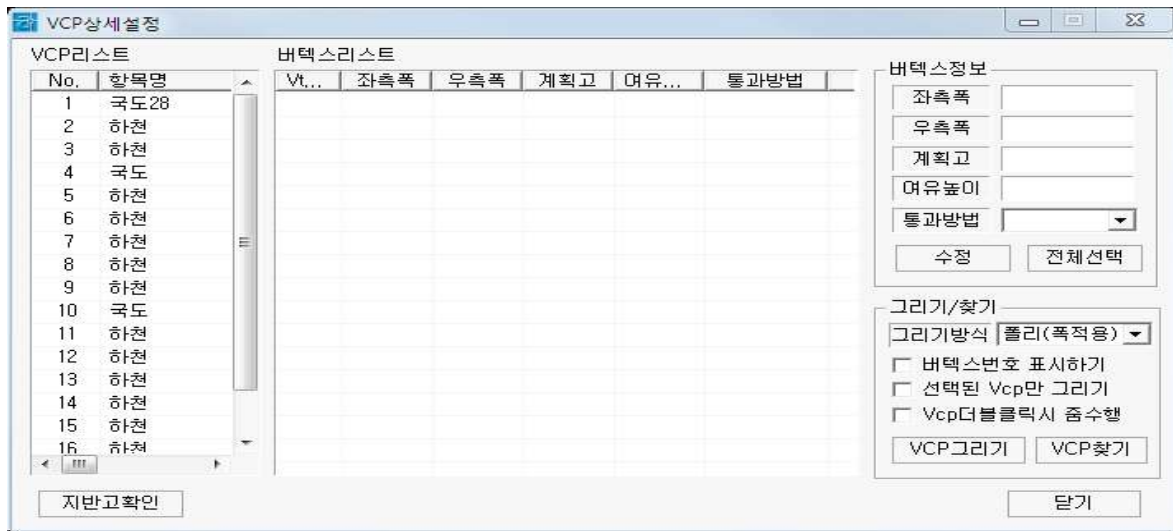


[그림 II- 56] VCP 1단계 입력화면

VCP설정은 2단계로 나누어 입력할 수 있는데 위 대화상자에서는 주로 VCP에 해당하는 하천, 도로, 철도, 기타 지장물 등에 대하여 먼저 폴리라인을 구성하는데 폴리라인 각각의 버텍스는 지장물의 중심을 지정하도록 한다.

화면에 보이는 대로 항목, 저항값, 표시칼라를 설정하고 입력구분으로 통과불가, VCP 또는 CP를 선택할 수 있다. 설정버튼을 클릭하여 설정방법에 따라 마우스로 캐드화면에 폴리라인을 작도하거나 이미 그려진 폴리라인 엔티티를 선택 할 수 있으며 구글에서 작성한 KML파일을 읽어들이 폴리라인을 구성 할 수 있다. 추가버튼을 클릭하면 입력한 내용이 좌측 저항설정 리스트에 등록되며 입력한 내용에 따라 NP(통과불가), VCP, CP등의 칼람에 Y표시가 됨을 알 수 있다.

설계영역의 모든 하천, 도로, 철도에 대하여 VCP입력을 완료한 후 VCP상세설정 버튼을 클릭하면 다음과 같은 VCP상세설정 대화상자가 나타난다. 이 대화상자는 저항설정에서 입력한 입력자료중 VCP설정으로 입력한 자료만 표시되며 설정을 원하는 VCP항목을 마우스로 선택하여 VCP 각 버텍스별로 좌우 폭 및 선형통과 시 통과방법 등을 설정할 수 있다.



[그림 II- 57] VCP 상세설정화면

EiRAIL에서 VCP처리의 기본단위는 VCP를 구성하는 폴리라인의 버텍스로부터 출발한다. 좀더 정밀한 VCP를 설정하기를 원하면 위 1단계 입력시 VCP의 폴리라인의 버텍스 간격을 조밀하게 구성하면 미세설정이 가능하다. 단 데이터구성시 소요되는 입력시간과 최적화 효율성을 전체적으로 감안하여 VCP폴리라인 버텍스간격은 적당히 조절 되어야 한다.

1단계 입력시 설정한 VCP는 폭이 없는 중심점만 가지고 있는 폴리라인이다. 위 대화상자에서는 이미 입력된 폴리라인에 대하여 각 버텍스별로 좌우 폭과 종단선형 통과시 통과 계획고, 여유높이 및 통과방법등을 상세 설정 할 수 있다.

좌측의 VCP리스트에서 상세 설정할 VCP를 마우스로 선택하면中间的 버텍스리스트에 선택한 VCP의 버텍스가 번호순으로 표시 된다. 입력을 원하는 버텍스를 마우스로 선택한후 우측의 버텍스정보 설정 에디트에서 좌우측폭, 계획고, 여유높이, 통과방법등을 선택한 후 수정버튼을 클릭하면 선택한 버텍스에 대하여 버텍스리스트에 입력값이 등록된다.

기존 도로 및 철도는 폭이 일정한 관계로 전체선택 버튼을 클릭하여 전체 버텍스에 대하여 입력한 버텍스 정보를 적용 할 수 있다. 계획고의 설정방식은 직접 EL값을 상수로 입력 할 수 있으며 계획고 입력란에 @를 먼저 입력한 후 이어서 EL값이 설정되면 종단선형이 해당 VCP 버텍스를 통과할 경우 종단지반 높이에서 EL값만큼 이격하여 통과하도록 설정한다는 의미이다. 또한 @-EL 값을 설정하면 종단지반 높이에서 EL값만큼 계획고를 낮추어 터널로 통과 하도록 설정할 수 있다. 계획고 설정부분은 종단선형 결정에 있어 상당히 중요한 입력정보 이므로 설정시 매우 신중하게 고려 해야한다. 예를들어 폭 100m 되는 하천을 종단선형이 통과하는 경우 계획고값을 @6.0을 지정 하였을때 삼각망(TIN)의 하천 지반고 오차 문제로 원치않는 종단 선형이 도출될 수도 있다. 이런 경우에는 지반고 확인 버튼을 클릭하여 계획고를 설정하고자 하는 VCP버텍스 부분을 마우스 클릭하면 현재 프로젝트에 사용되는 삼각망정보를 읽어들이 마우스로 클릭된

지점의 지반고를 즉시 화면에 표시한다. 이기능은 수치지도상에서 VCP를 설정할 때 현재 TIN이 가지고 있는 지반고 정보를 이용하여 즉시 지반높이를 확인할 수 있어 보다 세밀한 종단선형의 계획높이를 설정할 수 있도록 유용한 정보를 제공한다.

VCP 통과방법으로 교량, 터널, 토공중 하나를 선택할 수 있으며 입력한 VCP에서 최적선형이 어느 버텍스 부분을 통과 할지 모르는 관계로 각 버텍스별로 통과방법을 설정할 수 있도록 입력 방법을 설계 하였다. 다음은 VCP그리기 버튼을 클릭하여 입력된 VCP정보를 CAD화면에 출력한 것이다.

No.	항목명
1	도로1
2	도로2
3	도로3
4	도로4
5	도로5
6	도로6
7	하천
8	하천3
9	하천4
10	하천5
11	하천6
12	하천7
13	하천8
14	cpvip
15	cpvip
16	cnvin

Vt...	좌측폭	우측폭	계획고	여유...	통과방법
1	4	4	@6	6	교량
2	4	4	@6	6	교량
3	4	4	@6	6	교량
4	4	4	@6	6	교량
5	4	4	@6	6	교량
6	4	4	@6	6	교량
7	4	4	@6	6	교량
8	4	4	@6	6	교량
9	4	4	@6	6	교량
10	4	4	@6	6	교량
11	4	4	@6	6	교량
12	4	4	@6	6	교량
13	4	4	@6	6	교량
14	4	4	@6	6	교량
15	4	4	@6	6	교량
16	4	4	@6	6	교량

버텍스정보

좌측폭: 4

우측폭: 4

계획고: @6

여유높이: 6

통과방법: 교량 (dropdown menu with options: 교량, 터널, 토공)

[수정]

그리기/찾기

그리기방식: 폴리(폭적용) (dropdown menu)

☒ 버텍스번호 표시하기

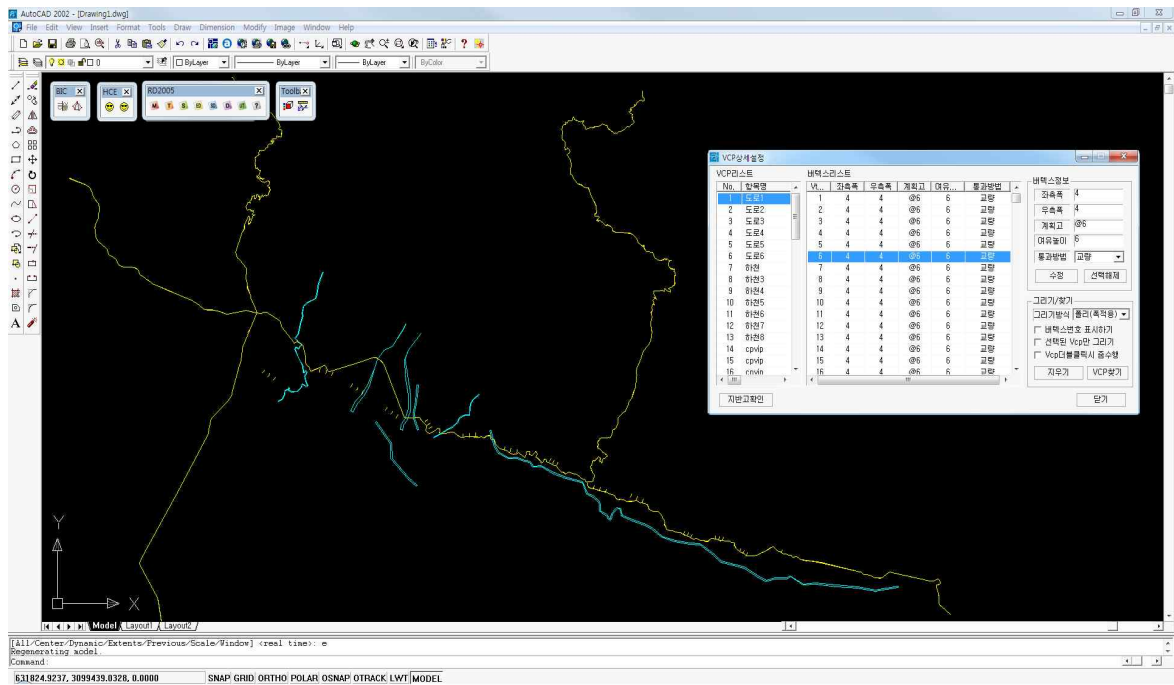
☐ 선택된 Vcp만 그리기

☐ Vcp더블클릭시 줌수행

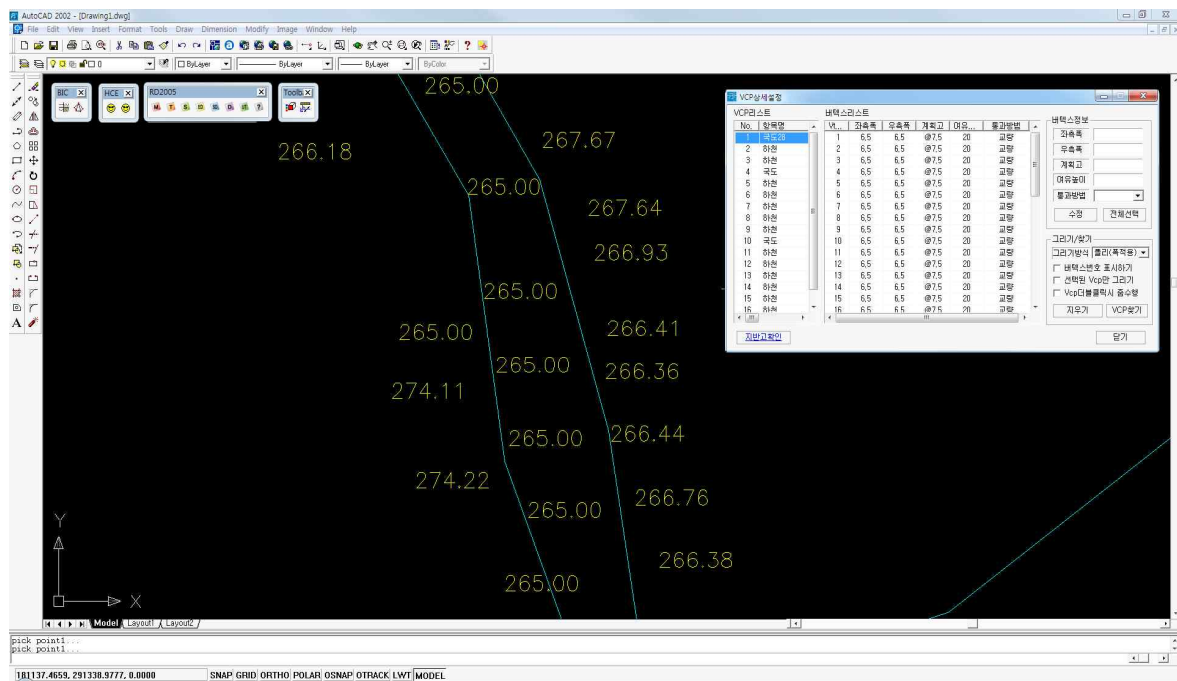
[지우기] [VCP찾기]

[지반고확인] [닫기]

[그림 II- 58] VCP입력화면



[그림 II- 59] VCP입력후 캐드출력화면

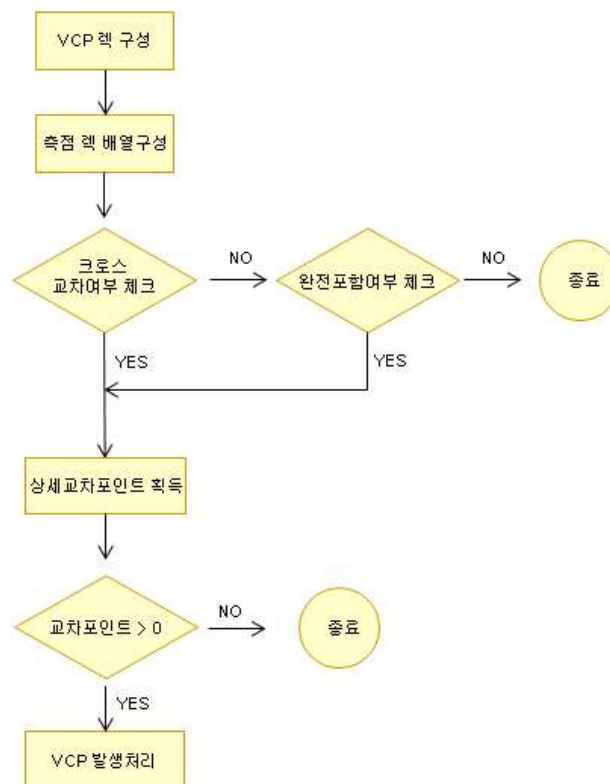


[그림 II- 60] VCP계획고설정시 지반고출력화면

(5) 속도개선을 위한 VCP 탐색방법

최적화시 수많은 평면선형에 대하여 사용자의 설계의도가 반영된 종단선형을 도출기 위하여 내부적으로 생성된 현재 평면선형이 사용자가 설정한 VCP 통과여부를 판단하는 과정이 반드시 필요하다. 이 과정에 소요되는 컴퓨터 계산시간이 전체 최적화 과정에서 차지하는 비율이 상당히 조금이라도 연산시간을 줄이려고 비록 오차는 발생하지만 그리드분석을 이용한 라스타방식을 적용하여 VCP정보를 구하였다. 그러나 본 연구에서는 VCP를 AutoCAD의 폴리라인으로 입력하고 각각의 버텍스에 속성(설계자의 의도)을 부여하여 최적화시 빠른탐색 알고리즘을 적용하여 종단선형 구성시 구조물설치의 정확성과 속도를 높이는데 중점을 두었으며 종전의 라스타방식을 탈피한 새로운 VCP 접근방법을 구현 하였다.

다음 그림은 평면선형과 VCP와의 교차발생 여부를 체크하는 방법을 순서대로 도식화 하였다. VCP렉과 축점렉 배열을 구성하는 이유는 선형중심 폴리라인과 VCP폴리라인과의 교차여부를 빠르게 확인하기 위함이다. 두 폴리라인은 버텍스들의 집합으로 이루어진 관계로 두 엔티티의 교차점 발생여부를 체크하는 원칙적인 방법은 각각의 버텍스를 선분으로 하여 상대 엔티티의 선분과 교차여부를 일일이 확인하는 방법이 있다. 이 방법을 수백, 수천개에 달하는 모든 VCP에 대하여 적용 하였을 경우 VCP 탐색시간이 너무 길어진다는 단점이 있다.

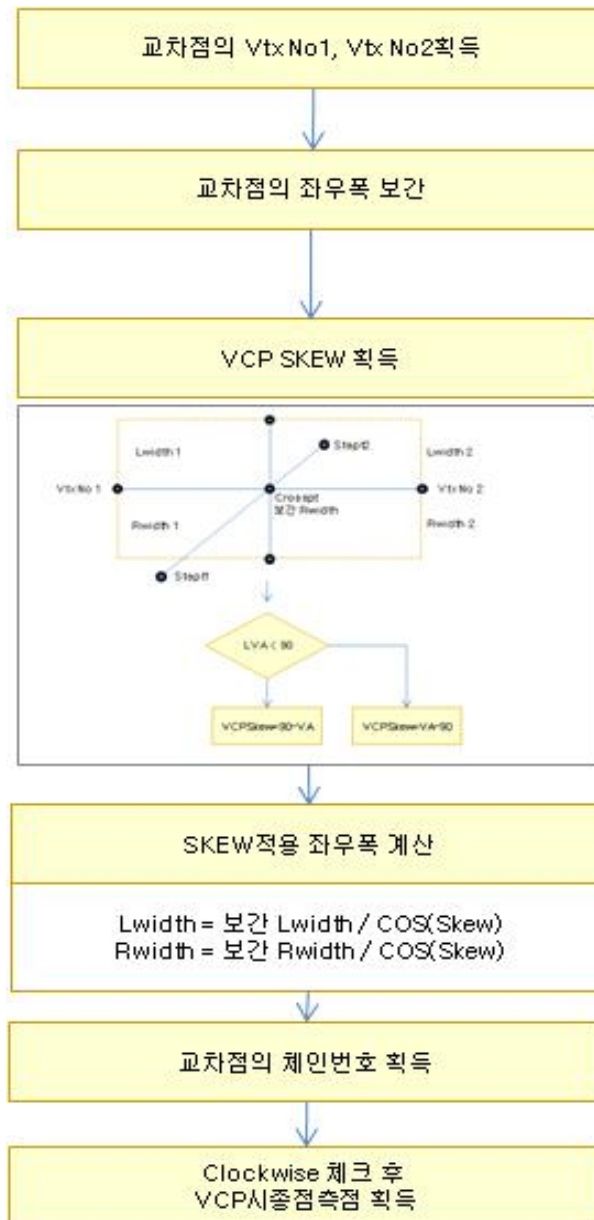


[그림 II- 61] VCP 시종점 발생 탐색 흐름도

본 연구에서는 두렉간의 교차 혹은 완전포함 여부만 일단 체크하여 두가지 경우에 해당이 되지 않는 VCP는 일단 교차발생 가능성이 없다고 판단한다. 두 렉이 교차 또는 완전포함이라도 두 폴

리라인이 교차한다고 판단할 수 없는 관계로 위에서 언급한 원칙적인 방법에 의하여 구체적인 교점을 구한다. 교점이 1개이상 일경우는 VCP가 발생 하였다고 판단한다. 이 방식의 서치 효율성을 제고 하기 위한 일환으로 VCP 입력시점에서의 렉포인트 배열 구성 및 측정 포인트배열의 적절한 배분등을 다양한 테스트를 통하여 설정 하였다.

(6) VCP 적용을 위한 시종점 계산 방법



[그림 II- 62] VCP 시종점 획득 흐름도

선형 중심선과 VCP와의 교차점이 1개 이상일 경우는 중단선형상 VCP 처리를 하여야 한다. 모든 VCP는 시종점을 가지므로 VCP탐색에서 구해진 교차점을 이용하여 VCP시종점을 계산한다.

먼저 측점포인트1,2 와 교차가 발생한 벡터1,2를 구한후 교차점(Crosspt)을 획득한다. VCP의 벡터는 좌/우측 폭을 가지며 두폭이 서로 다를수 있으므로 교차지점의 VCP 좌우폭을 보간한다. 아래 그림과 같이 보다 정확한 VCP 시종점을 구하기 위하여 교차가 발생한 선형라인과

VCP 라인에서 Vcp Skew를 구한다.

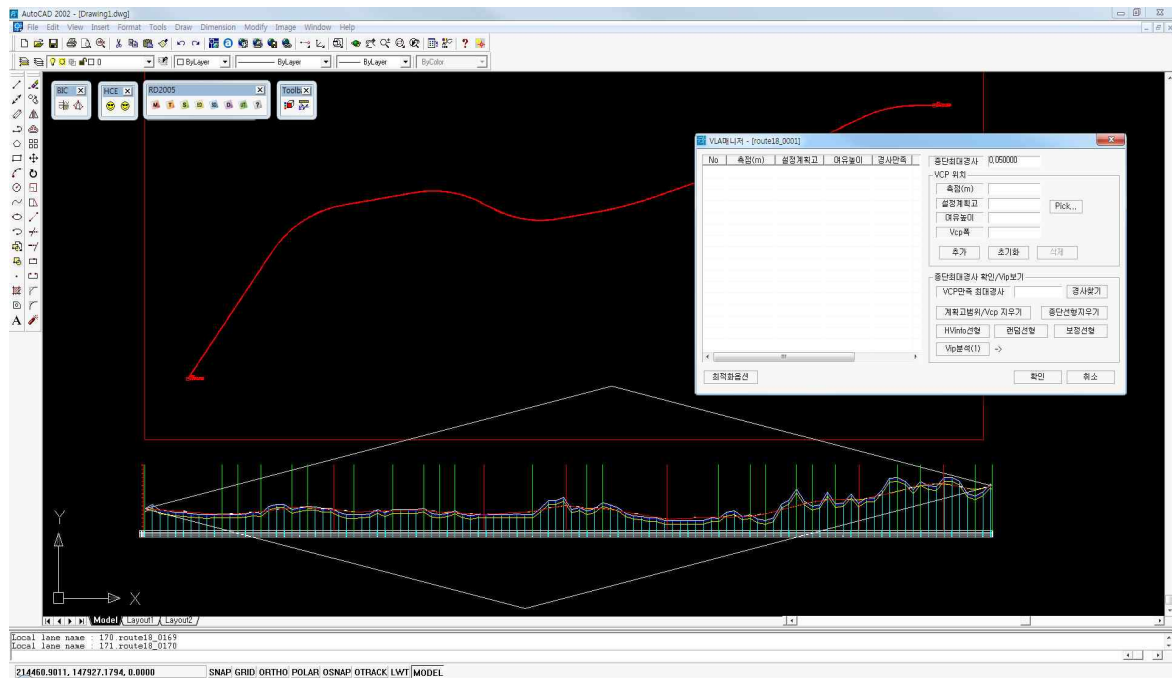
Vcp Skew를 위에서 구한 보간 좌우쪽에 적용하여 측점을 구성할 VCP 좌우 폭을 재계산 한다. 최종 VCP 좌우폭이 구해지면 교차점에 해당하는 측점번호를 구한후 점1(Stapt1), 점2(Stapt2), 점3(VtxNo2)의 클럭와이즈를 고려하여 VCP 시종점 측점번호를 계산한다.

(7) 종단선형에 VCP 속성정보 적용 방법

VCP의 속성정보를 종단 선형에 반영하기 위한 방법을 모색하고 VCP를 고려한 최적의 종단선형을 도출하기 위한 방안으로 VCP 적용 종단선형 최적화 PILOT 프로그램을 개발 하였다. 다음 그림은 VCP 매니저 대화상자 화면구성을 보여준다.

[그림 II- 63] VCP적용을 위한 PILOT 프로그램 화면

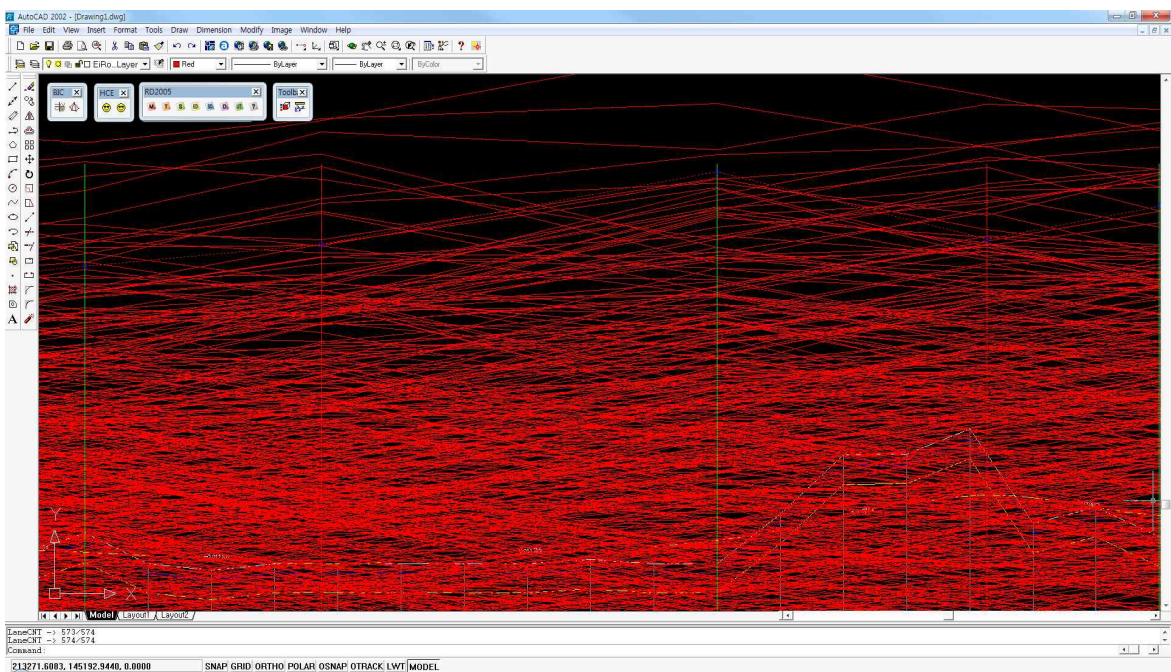
다음 그림은 테스트 프로젝트로서 시종점 계획고만 설정된 상태에서 종단 최적화 시작전 VIP 및 VIP 계획고 범위영역을 보여준다.



녹색 세로선은 지형을 분석하여 구해진 VIP 위치이며 적색 세로선은 평편선형 원곡선 중점에 해당하는 VIP 위치를 나타낸다. 시종점을 기준으로 보여지는 다이아몬드 영역은 현재 종단 최대 허용경사를 반영한 각 VIP가 가질 수 있는 VIP 범위영역 이다. 다음 그림은 현재 상태에서 종단 최적화를 위한 초기선형을 출력한 화면이다.

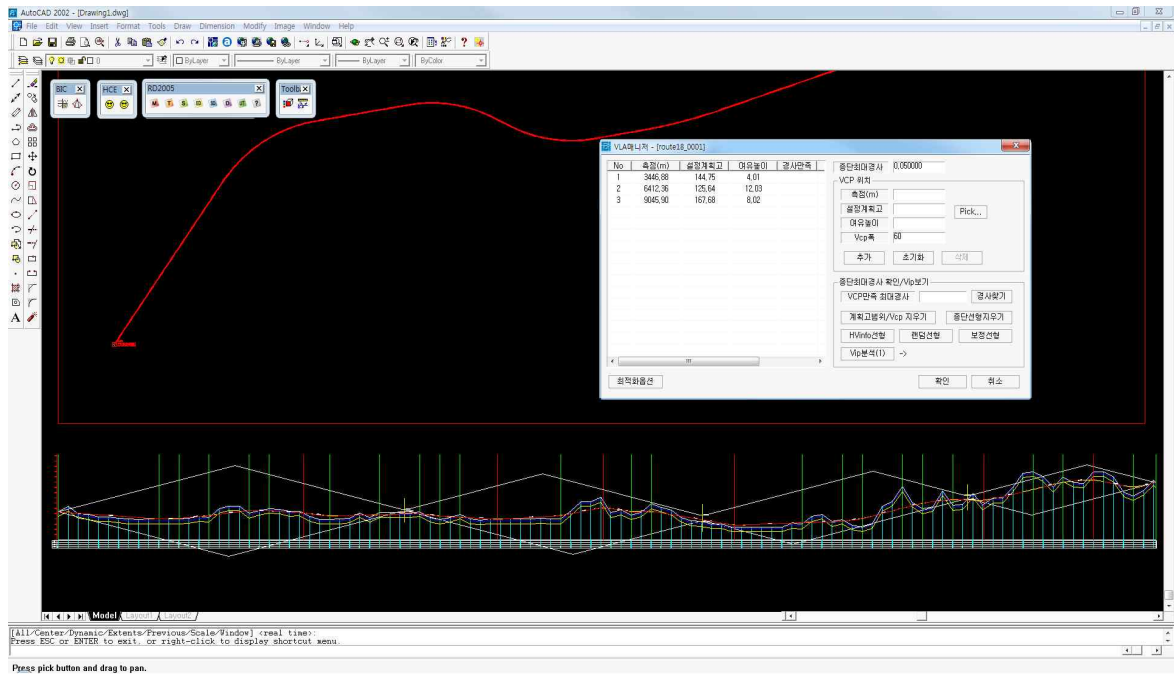
The screenshot shows the AutoCAD 2002 interface. The main window displays a 3D model of a road cross-section. A red surface represents the road grade, and a wireframe grid shows the underlying geometry. A dialog box titled "VIA로 나기 - [route19_0001]" is open, showing a table with columns: No, 측량(m), 설정계 획고, elev 높이, and 경사면 폭. The table is empty. The dialog also contains fields for "종단면대장사" (0.050000), "VCP 회차", "측량(m)", "설정계 획고", "elev 높이", "Vcp 폭", and buttons for "추가", "초기화", and "확인". Below the table, there are checkboxes for "종단면대장사 확인/Vcp 보기", "VCP입력 최대경사", "경사면기", "계획고별곡/Vcp 지우기", "종단선형기우기", "H/W비인형", "지우기", "보정선택", "Vcp분력(T) ->", "확인", and "취소".

< >

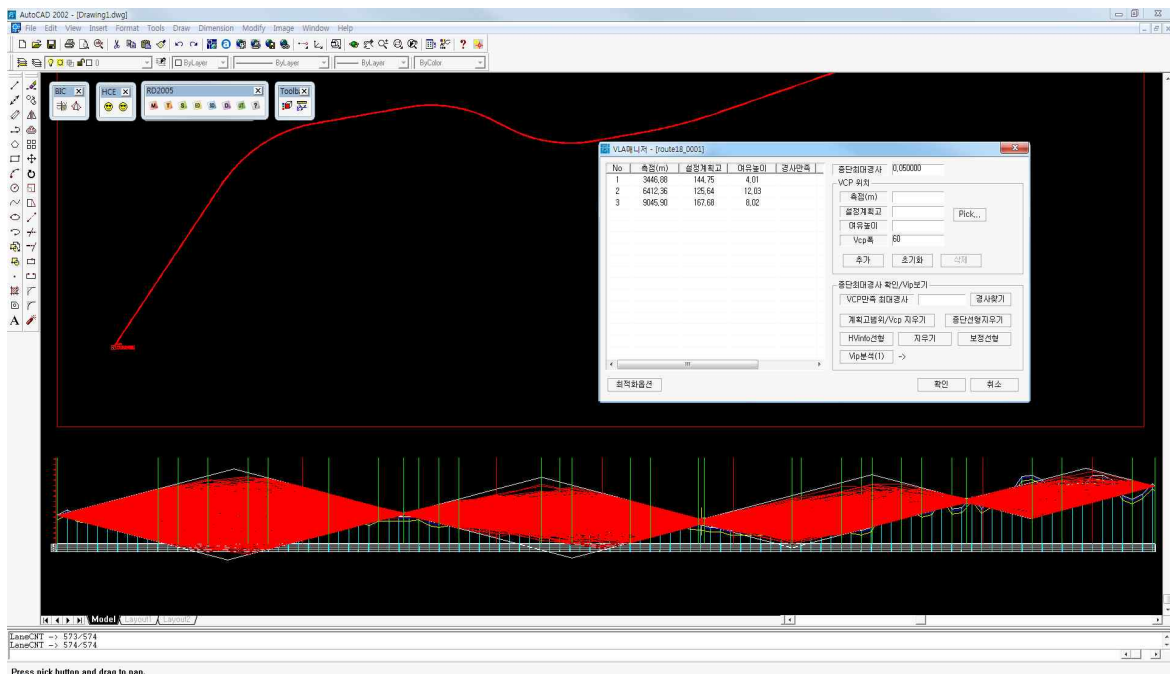


- 89 -

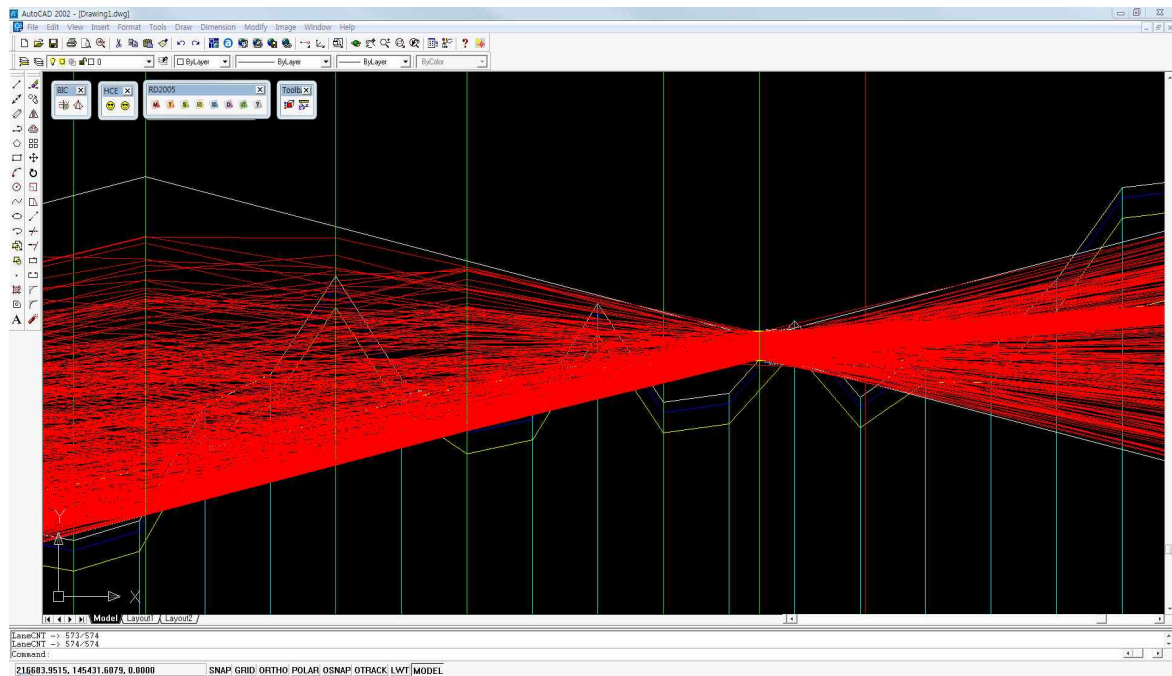
다음 그림은 사용자가 임의의 VCP 를 3개를 입력 하였을 때의 계획고 범위영역의 변화와 초기선형의 분포를 보여준다.



[그림 II- 67] VCP가 있는경우 계획고 범위영역

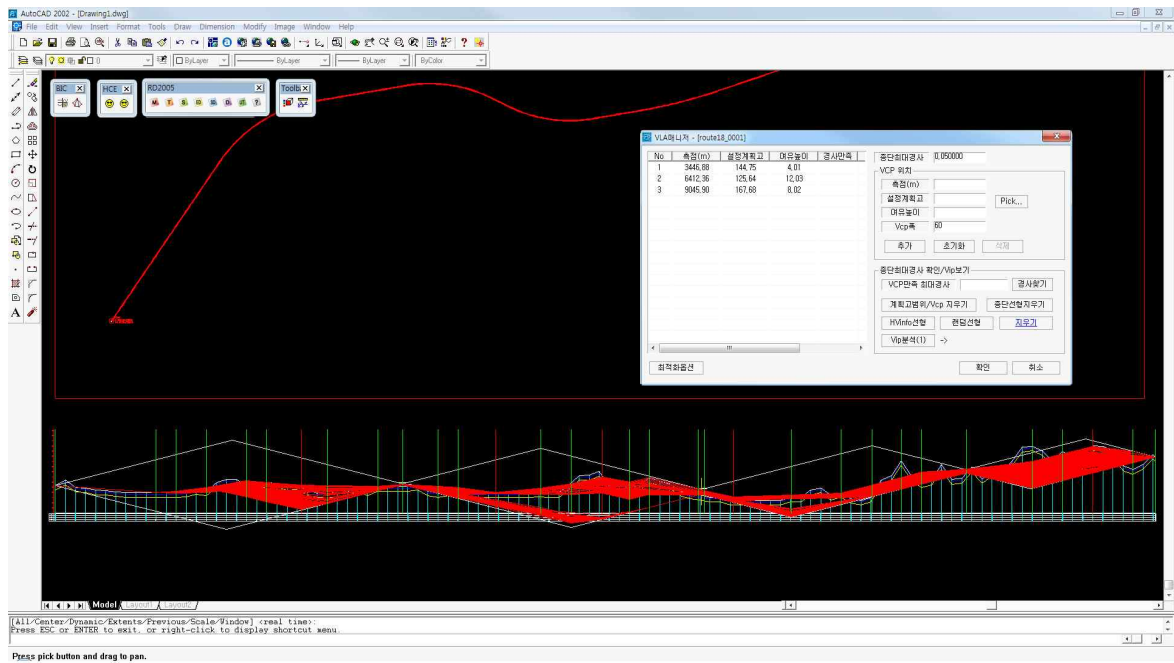


[그림 II- 68] VCP가 있는경우 최적화 시작전 초기선형

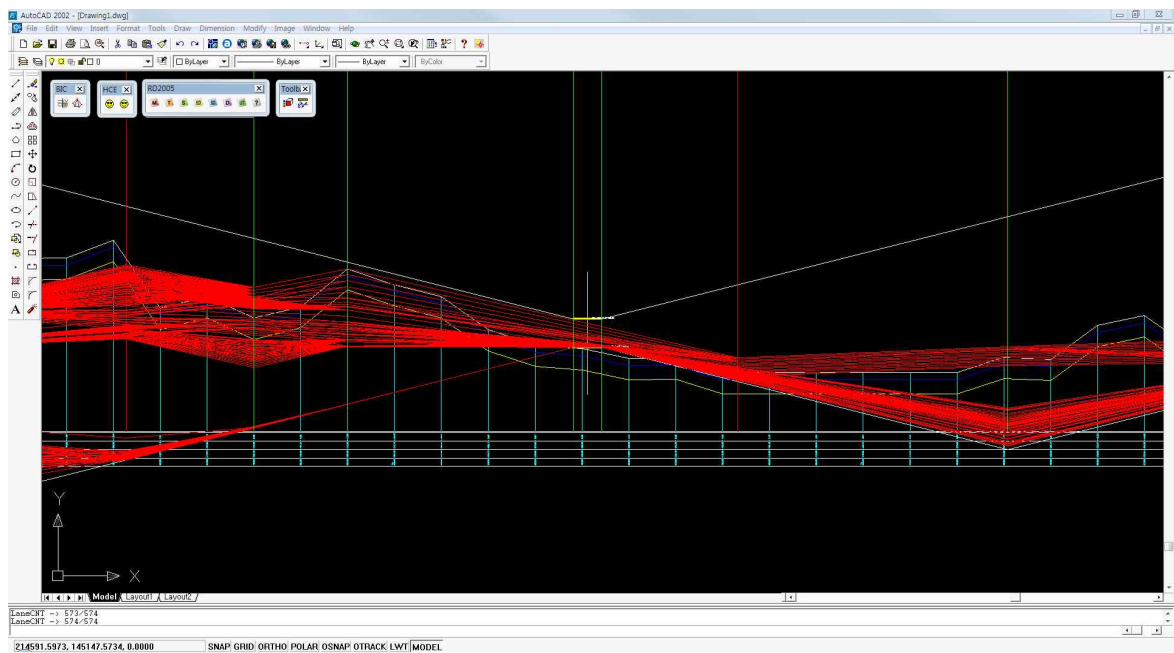


[그림 II- 69] VCP가 있는 경우 최적화 시작전 초기선형 확대화면

EiRAIL은 최적화시 초기선형으로 2가지의 선형군을 생성한다. 첫 번째는 위 그림에서 보는것 처럼 VIP가 계획고 범위라인을 벗어나지 않는 범위내에서 랜덤하게 VIP를 구성하는 방법이다. 두 번째 방법은 종단 지형분석 알고리즘을 이용하여 선형탐색시 최적선형에 조기 수렴 되어 최적화 효율이 좋도록 초기선형군을 생성하는 것이다. 다음 그림은 두 번째 방법을 이용하여 생성된 초기선형을 보여준다.



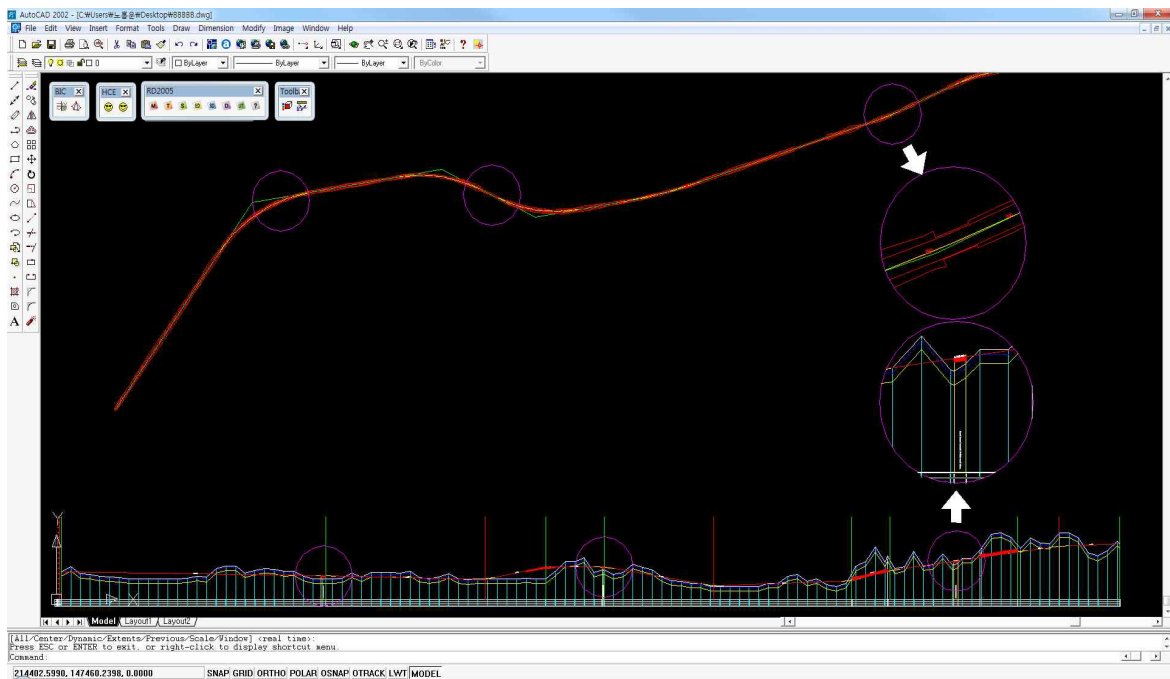
[그림 II- 70] 지형 분석후 최적화 시작전 초기선형 화면



[그림 II- 71] 지형 분석후 최적화 시작전 초기선형 확대 화면

(8) VCP를 적용한 최적 종단선형 도출

EiRAIL을 이용하여 종단최적화를 수행한 결과 화면은 다음과 같다. VCP 설정 부분은 세곳이고 모두 지반에서 6m 떨어져 교량으로 통과 하도록 설정 하였다. VCP 설정 구간은 평면선형상에 교량으로 표시되고 종단상에 VCP 속성 정보가 표시되는데 아래 그림의 평면/종단 선형에서 원으로 표시되는 부분이다. 이해를 돕기 위하여 세 번째 VCP에 대하여 AutoCAD를 수정하여 확대 편집 하였다.



[그림 II- 72] 최적 종단선형 도출 및 VCP부분 확대편집 화면

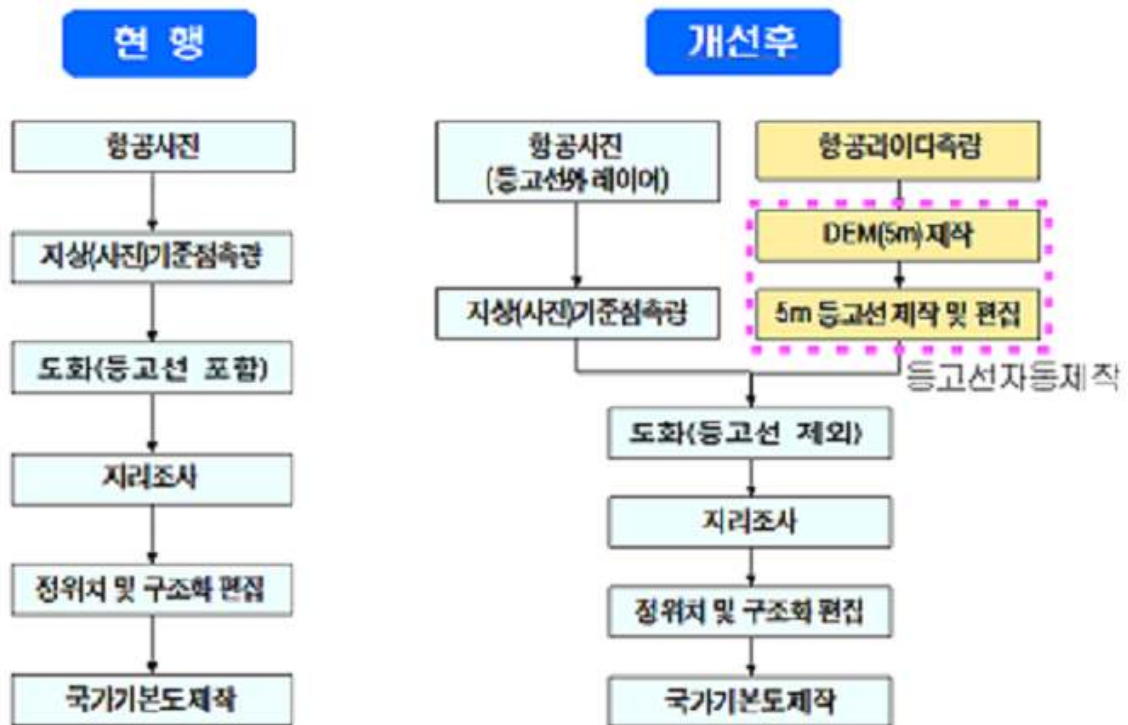
다. 철도 노선 탐색을 위한 Google Earth 활용

(1) 개요

철도 노선 선정에 있어서 현장답사 또는 수치지도를 활용하여 철도 노선을 탐색하는 방식으로 수행한다. 최근 국내 엔지니어링회사가 국외사업을 적극적으로 진출하고자 노력하는 가운데, 가장 어려워하는 부문이 해외 수치지도 확보하는데 어려움이 많음이 현실이다. 또한 현지답사를 통하여 측량한 정보를 가지고 수치지도를 제작하는거 역시 엄청난 시간과 비용 소모된다. 따라서 본 연구에서는 이와 같이 해외지역(개발도상국가)의 수치지도 확보가 어려운 나라에 대하여 사업 초기 개략적인 철도 노선 계획을 위한 수치지도(등고선,지반고)확보를 위한 방안으로 GoogleEarth 활용방안에 대하여 연구하였다.

(2) 수치지도 제작 기술 현황

수치지형도는 기존 지도를 디지털화(digitizing) 하거나 항공사진이나 위성영상 등을 스캐닝(scanning)함으로써 얻을 수 있지만 인화 및 영상처리과정에서 막대한 시간과 비용이 소요되는 실정이다. 최근에는 토탈스테이션(TS: Total Station)측량, 디지털 항공사진측량, 고해상도 위성영상의 지리정보시스템 분야 활용, GPS에 의한 3차원공간좌표 획득 등 기술적인 측면에서 급속하게 발전하고 있다. 국토해양부 국토리지정보원에서는 항공레이저 측량(항공기에 레이저측량장비를 장착하여 레이저를 지표면에 발사하고 그 반사파의 도달 시간을 정확히 측정함으로써 지표면의 3차원 위치를 획득하는 측량기법)을 1:5,000 국가기본도 등고선 제작에 일부 도입하였다.



[그림 II- 73] 수치지도 제작 개선후

항공레이저 측량 도입으로 기존 항공사진을 이용한 등고선 제작방식에 대비하여 45% 비용절감 및 디지털 방식으로 등고선 자동 제작에 따른 30% 작업시간 단축 등 성과를 보도하였다. 하지만, 여전히 한정된 사업예산에서 현장측량을 통한 수치지형도 제작은 엔지니어링사 등에게는 부담으로 작용하고 있는 실정이다.

(3) Goolge Earth 연계 기술

- 사업의 초기단계에서는 해외 사업 수치지도 확보가 어려운 개발도상국인 경우 Google Earth를 활용하여 위성영상 및 표고데이터를 수집할 수 있는 모듈 개발
- 노선대안의 결정이 완료된 후 지능형 철도 노선선정 프로그램의 노선데이터를 Google Earth와 연동하여 지형정보와 매핑함으로써, 철도 노선 확인 및 가상 모의 주행



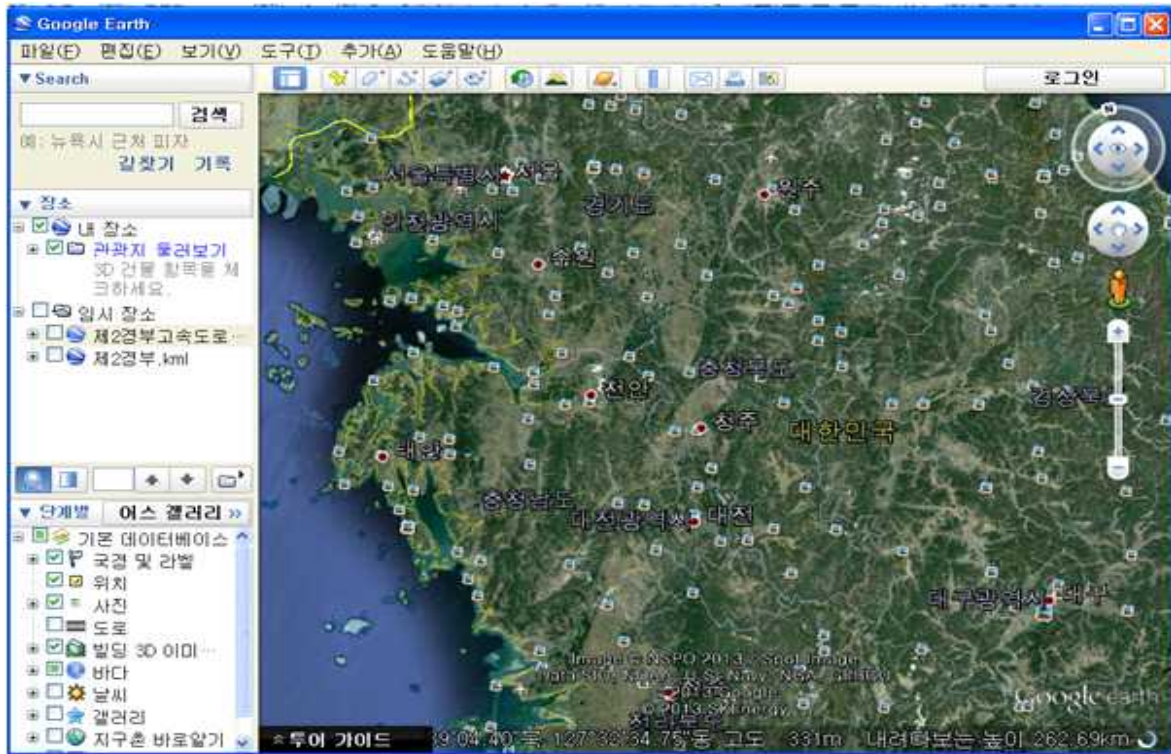
[그림 II- 74] 구글어스와 연계

(가) Google Earth에서 표고 데이터 추출

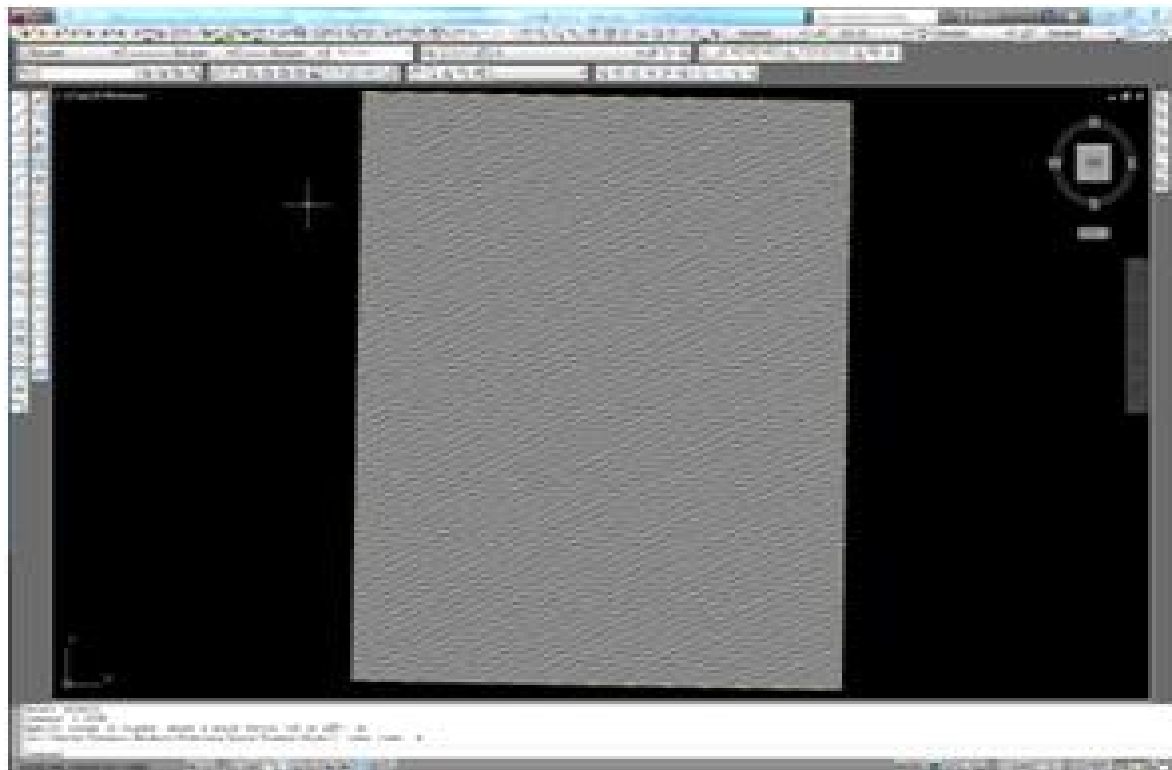


[그림 II- 75] 설정창

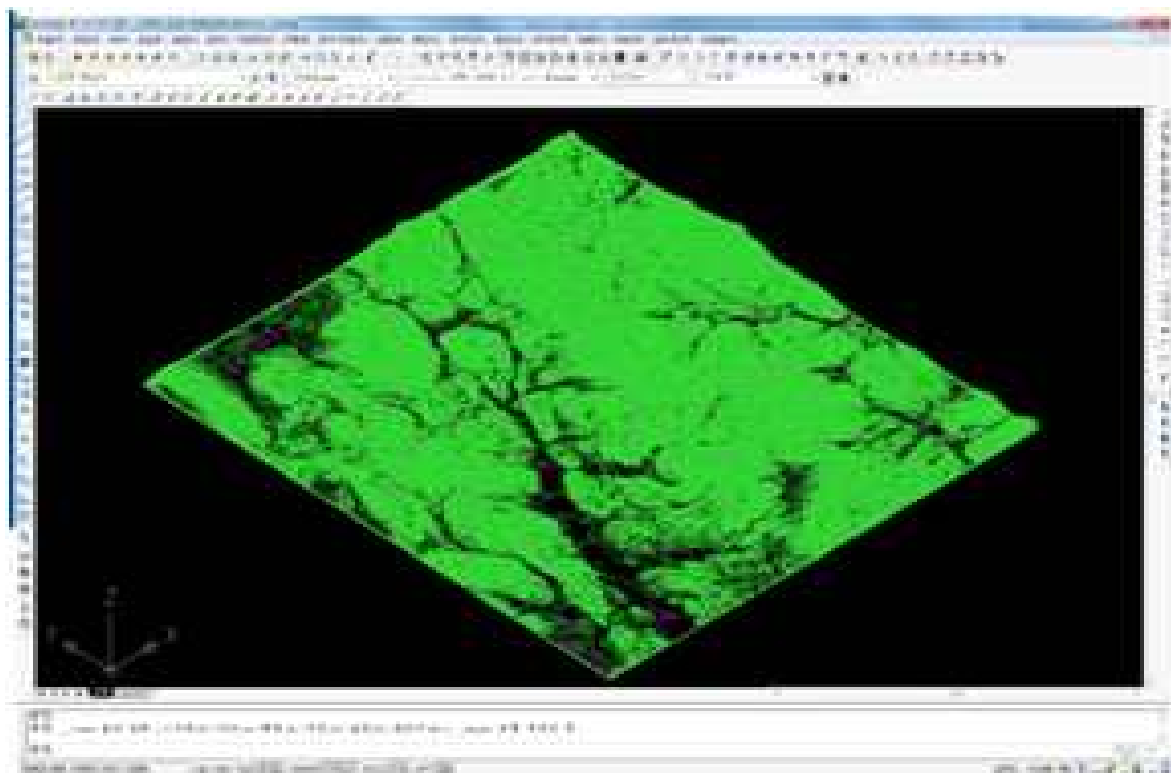
- ① google earth 실행 버튼 클릭
 - 표고데이터를 추출하는 경우 google earth의 옵션에서 '지형 화질'의 '지형표시' 체크
- ② 화면크기고정 버튼 클릭
- ③ 좌하단, 우상단의 위/경도를 10진수로 입력한다.
- ④ 카메라 높이를 입력한다.
- ⑤ 이동간격을 입력한다.
- ⑥ 시작인덱스와 끝인덱스를 입력한다.
 - 시작 인덱스 : 그림 추출 시작 행 인덱스
 - 끝 인덱스 : 그림 추출 끝 행 인덱스, -1이면 입력된 영역 전체에서 그림 추출
- ⑦ 높이(중심이동) 버튼 클릭
 - C:\ 에 Z값을 가진 포인트를 가지는 CAD파일이 출력된다. 파일 이름은 시작날짜와 시간으로 구분
 - CAD 파일과 함께 해당 영역의 상/하/좌/우의 UTM zone을 저장하고 있는 텍스트 파일이 생성



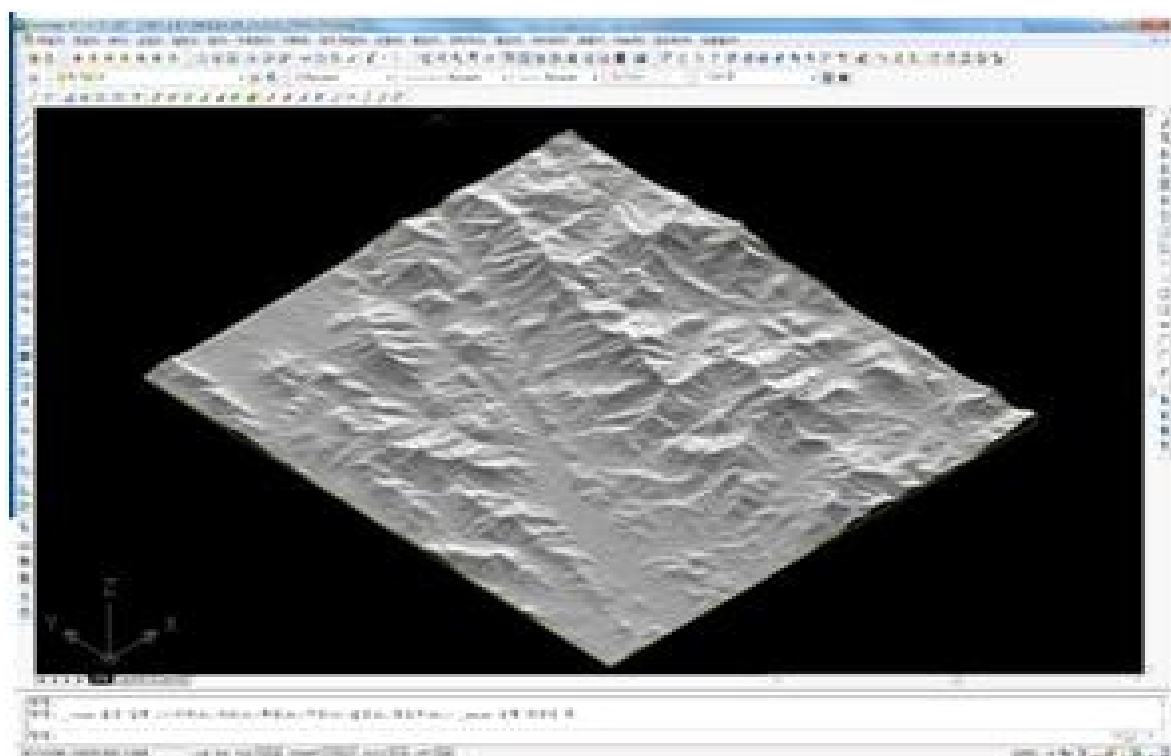
[그림 II- 76] 구글어스 실행 화면



[그림 II- 77] 표고데이터 내려받기



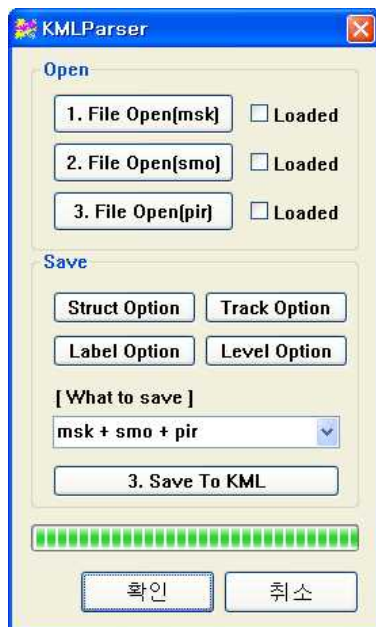
[그림 II- 78] 등고선 생성



[그림 II- 79] 3차원 데이터 생성

(나) Google Earth 연동 KML Parser 개발

생성된 철도 노선(Autodesk AutoCAD 파일)에 대하여, KML(Keyhole Markup Language)파일로 변환하여 Google Earth를 활용하여 지형정보 위성영상과 매핑 및 다양한 시뮬레이션 기능 등을 유용하게 활용할 수 있는 KML Parser를 개발하였다.



[그림 II- 80]KML Parser

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<kml xmlns="http://www.opengis.net/kml/2.2" xmlns:gx="http://www.google.com/kml/v2/gx" xmlns:atom="http://www.w3.org/2005/Atom">
  <Document>
    <name>제2경부.kml</name>
    <StyleMap id="msn_ylv-pushpin121">
      <Pair>
        <key>normal</key>
        <styleUrl>#sn_ylv-pushpin160</styleUrl>
      </Pair>
      <Pair>
        <key>highlight</key>
        <styleUrl>#sh_ylv-pushpin70</styleUrl>
      </Pair>
    </StyleMap>
    <StyleMap id="msn_ylv-pushpin130">
      <Pair>
        <key>normal</key>
        <styleUrl>#sn_ylv-pushpin60</styleUrl>
      </Pair>
      <Pair>
        <key>highlight</key>
        <styleUrl>#sh_ylv-pushpin110</styleUrl>
      </Pair>
    </StyleMap>
    <Style id="sn_ylv-pushpin24">
      <IconStyle>
        <scale>1.1</scale>
        <Icon>
          <href>http://maps.google.com/mapfiles/kml/pushpin/ylv-pushpin.png</href>
        </Icon>
        <hotSpot x="20" y="20" xunits="pixels" yunits="pixels"/>
      </IconStyle>
      <LineStyle>
```

[그림 II- 81]KML

① KML Parser 주요기능

- msk 형식 파일 로드(CAD데이터 추출 파일)
- smo 형식 파일 로드(RD에서 iphone을 위해 생성해주는 파일)
- pir 형식 파일 로드(RD에서 생성되는 도로,교량 정보파일)
- 구조물 표시 옵션
- Label 표시 옵션
- 트랙 표시 옵션
- 철/성토 표시 옵션
- 어떤 정보에 대해서 저장할지에 대한 옵션
- KML 저장

② KML Parser Optional



○ 철도/터널 옵션

- ① 보여질지 여부
- ② Outline 그릴지 여부
- ③ 채우기 색



○ Label 옵션

Icon URL : 아이콘 파일 저장된 곳 URL

Icon Scale : 아이콘 크기

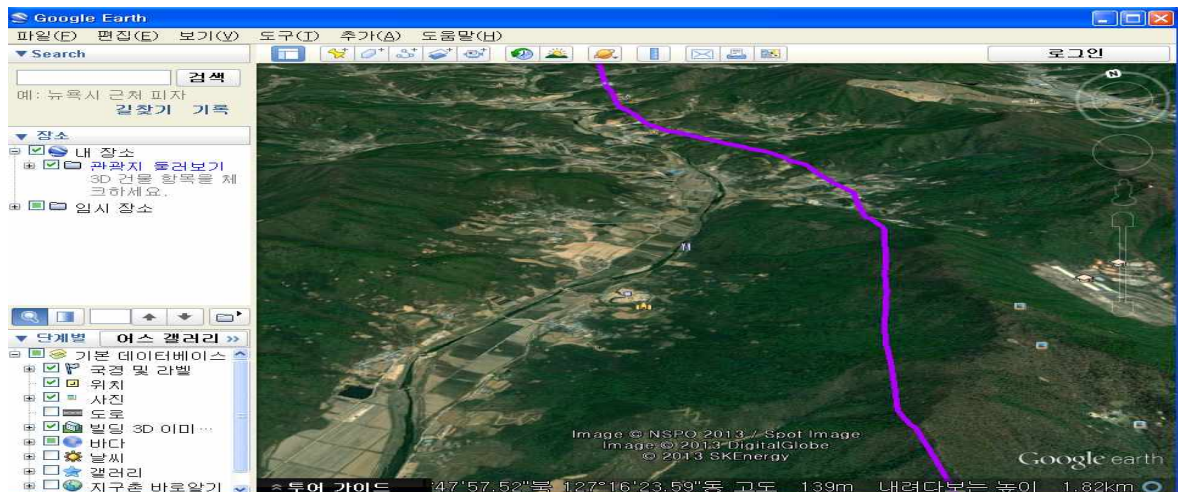
Label Color : 라벨 표시 색

Label Color Mode: 라벨 색 지정 방법

Label Scale : 라벨 크기

(다) Google Earth 업로드

dwg파일을 KML로 변환하여 Google Earth상에서 실행함으로써, 별도의 작업없이 위성영상과 함께 모의 주행과 같은 시뮬레이션을 실행할 수 있다.

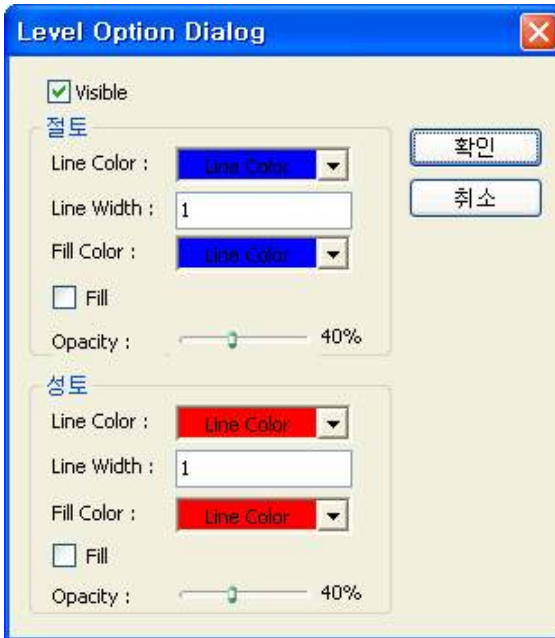


[그림 II- 84] 구글어스 시뮬레이션



○ Track 옵션

- Visible: 보여주기 여부
- Icon URL : 아이콘 파일 저장된 곳
URL
- Icon Scale : 아이콘 크기
- path step : 주행 시 패스 간격
- path height : 주행 높이



○ Level 옵션

- Visible : 보여주기 여부
- Line Color: 라인 색 지정
- Line Width: 라인 두께
- Fill Color: 채우기 색 지정
- Fill : 채우기 여부
- Opacity : 투명값

제 3장 지능형 철도선형계획 프로그램개발

- 제1절 철도노선 최적화 기술
- 제2절 철도선형설계요소의 AHP평가
- 제3절 구조물 위치 선정 및 특성에 따른 형식 선정
- 제4절 철도노선선정 통합프로그램 개발

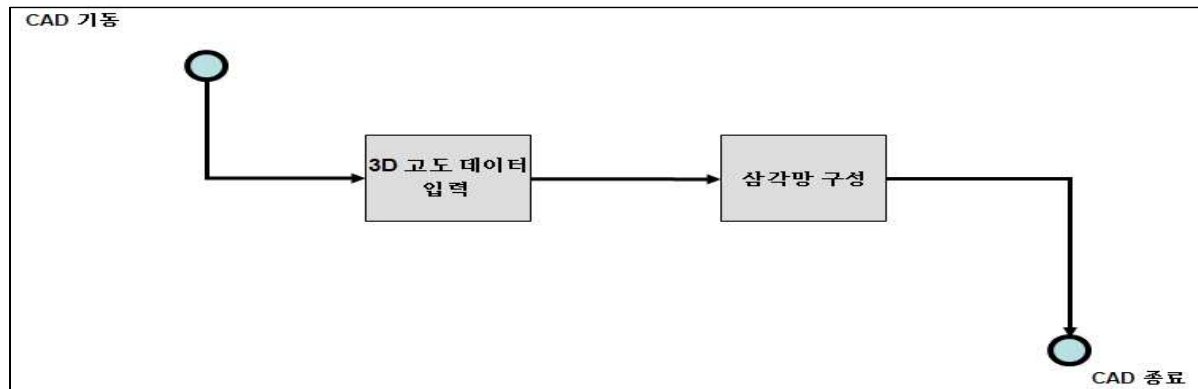
제6절 철도노선 최적화 기술

1. 철도노선최적화를 위한 주요 프로세스

가. 공간정보 분석 모듈

(1) TIN(삼각망) 분석 모듈

(가) 작업 개요

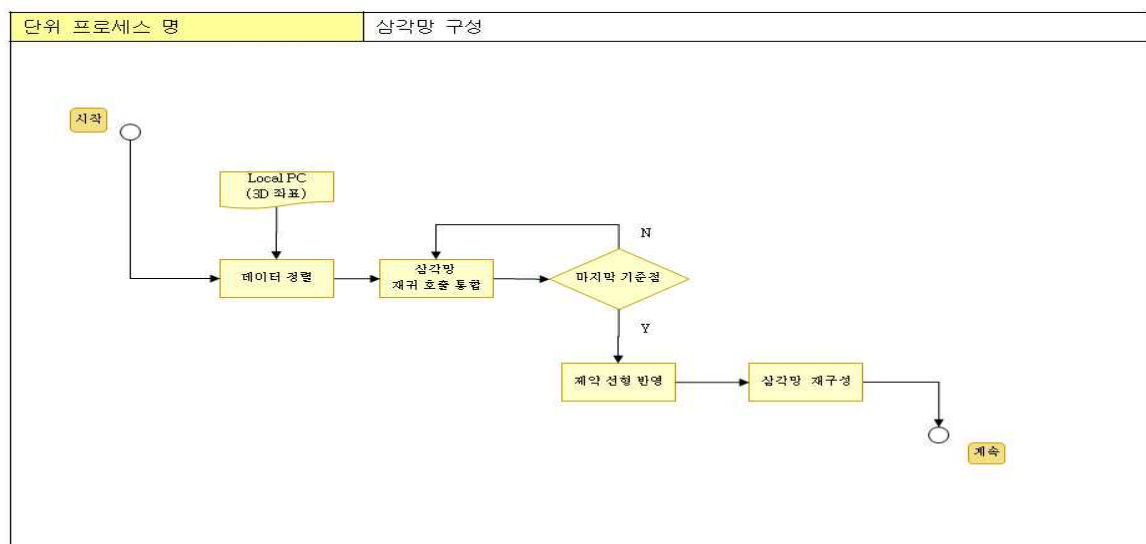


[그림 III- 1] TIN 업무 처리 흐름도

삼각망(틴, TIN) 모듈 개발				
Unit Process	정의	주요 Input	주요 Output	고려사항
1. 삼각망 생성	3차원 고도 데이터 좌표를 입력 받아, 이를 기반으로 삼각망(틴)을 구성한다.	3차원 좌표	삼각망 파일	

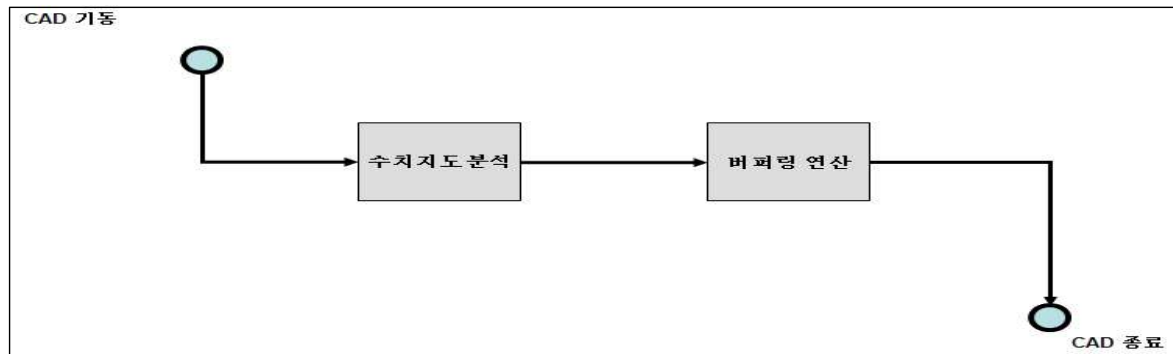
[그림 III- 2] TIN 업무정의서

(나) 단위 프로세스



[그림 III- 3] 삼각망 구성 단위 프로세스

(2) 버퍼링 분석 모듈
(가) 작업 개요

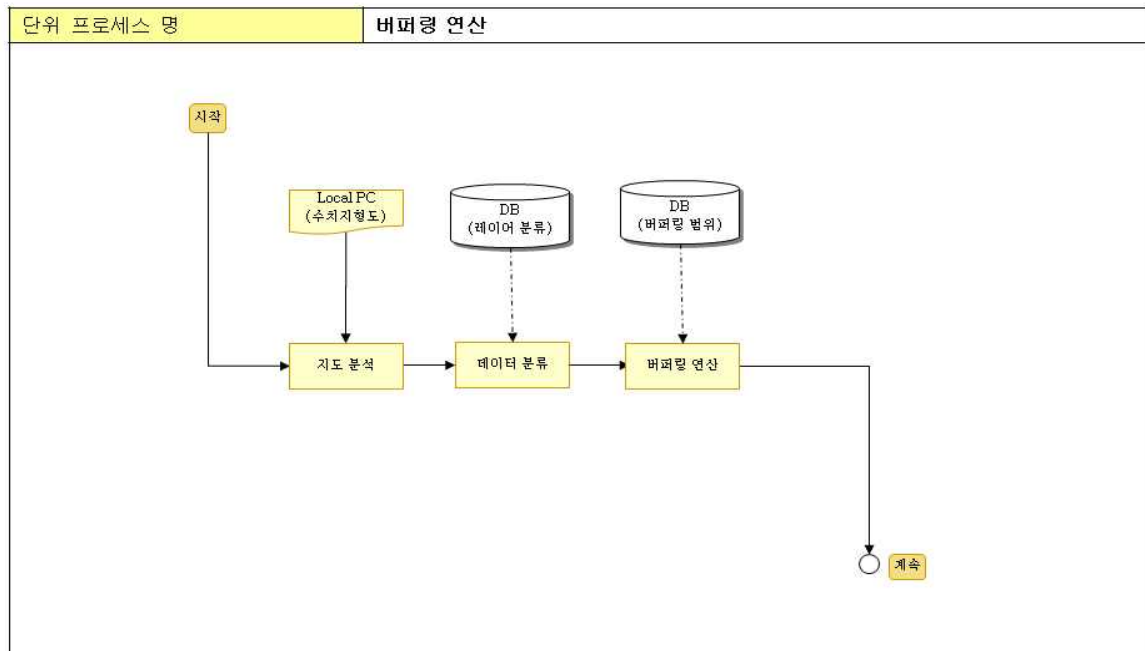


[그림 III-4]버퍼링 업무 처리 흐름도

Sub Process	버퍼링 모듈 개발			
Unit Process	정의	주요 Input	주요 Output	고려사항
01. 수치지도 분석	데이터를 시스템 자료 구조로 변환	수치지도		
02. 버퍼링 연산	자료 구조 데이터를 점, 선, 폴리라인, 폴리곤으로 분류	수치지도 자료 구조	버퍼링 연산된 데이터	

[그림 III- 5] 버퍼링 업무 정의서

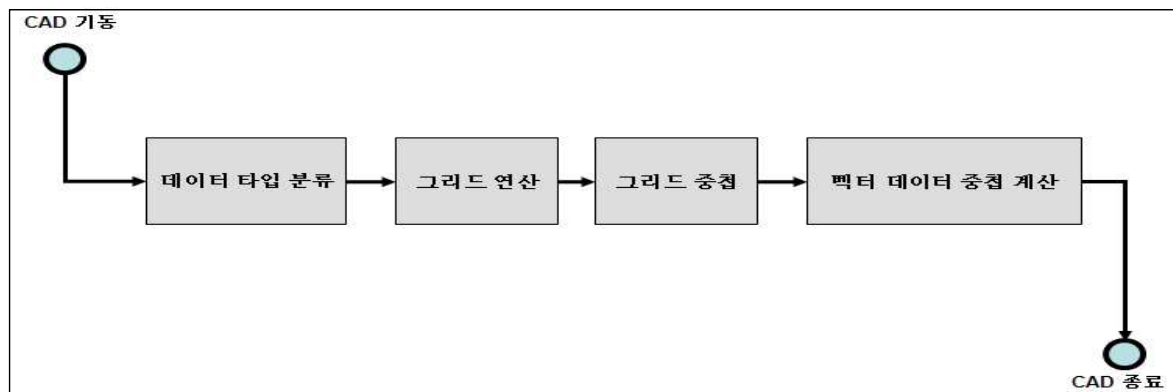
(나) 단위 프로세스



[그림 III- 6] 버퍼링 연산 단위 프로세스

(3) 그리드 분석 모듈

(가) 모듈 개요

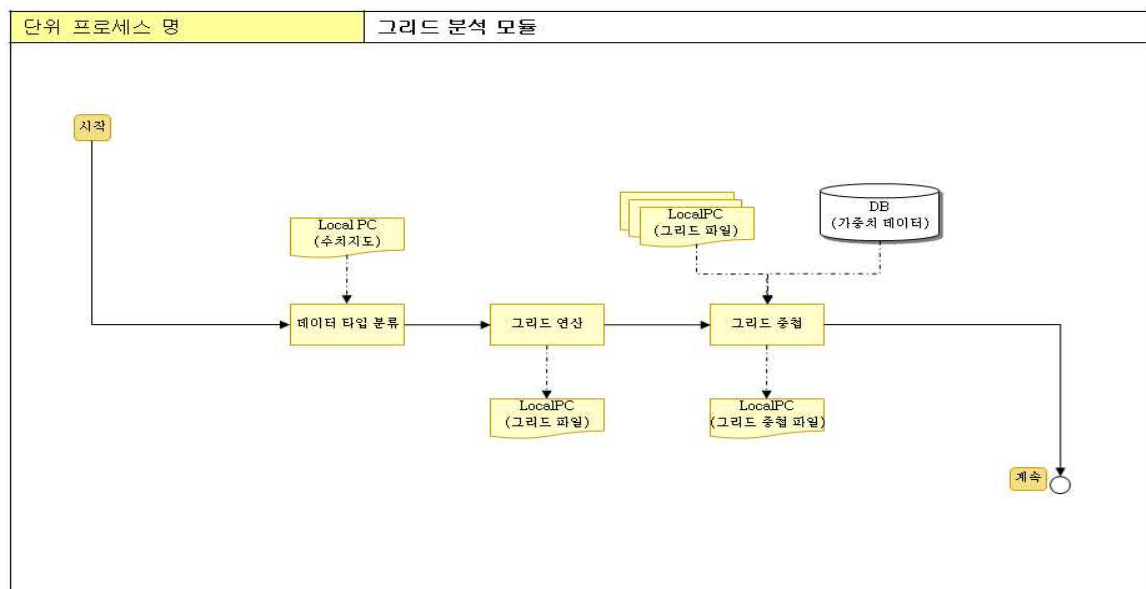


[그림 III- 7] 그리드 분석 업무 처리 흐름도

그리드 분석 모듈				
Unit Process	정의	주요 Input	주요 Output	고려사항
01. 데이터 타입 분류	도형 데이터를 점,선,폴리라인, 폴리곤으로 타입 분류하고 각 타입에 맞는 자료 구조를 준비한다.	수치지도		
02. 그리드 연산	데이터 타입에 맞게 데이 그리드 연산을 진행한다.	분류된 데이터	그리드 파일	
03. 그리드 중첩	각 그리드 파일에 별도의 가중치 값을 적용하여 중첩 진행 과정에서 가중치를 부여한 그리드 중첩 연산을 진행한다.	그리드 연산 파일, 가중치 데이터	그리드(중첩) 파일	
04. 벡터 데이터 중첩	벡터 데이터와 그리드 파일을 서로 중첩하여 몇 개의 그리드 셀이 해당 되는지, 얼마만큼의 가중치가 중첩되는지 탐색한다.	그리드 파일	중첩 평가 결과	

[그림 III- 8]그리드 분석 업무 정의서

(나) 단위 프로세스 정의



[그림 III- 9]그리드 분석 모듈 단위 프로세스

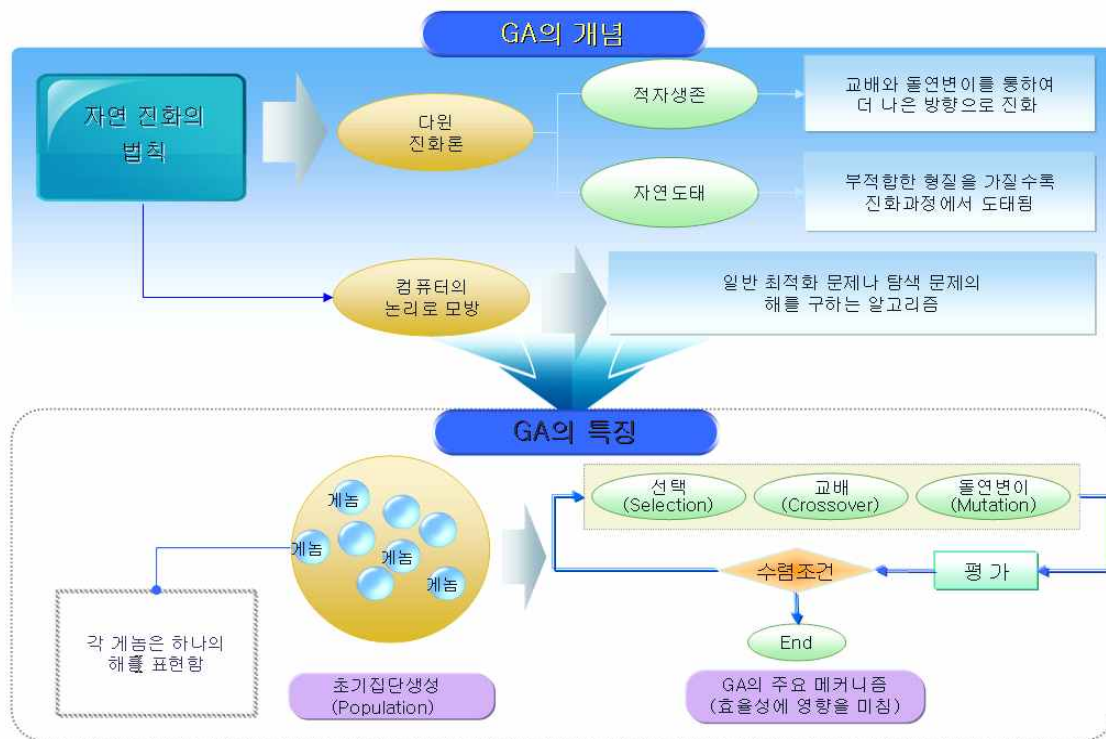
나. 최적선행 탐색 모듈

(1) 유전자 알고리즘

(가) GA의 개념과 특징

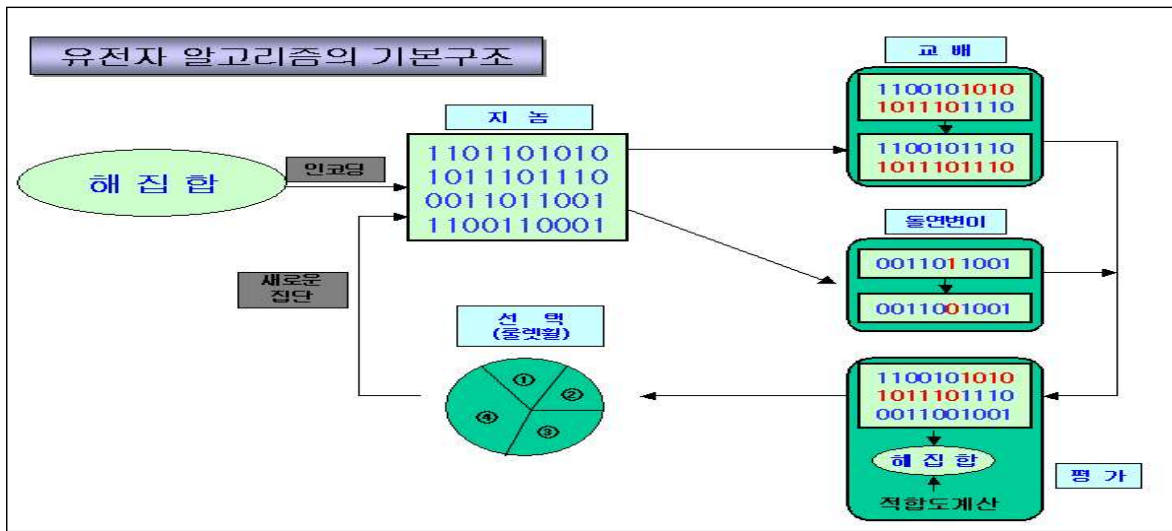
- 자연진화의 법칙을 컴퓨터의 논리로 모방하여 일반최적화 문제나 탐색문제의 해를 구하는 알고리즘

- 기존 탐색기법과는 달리 집단(Population)이라고 불리는 임의의 초기 해집단으로부터 출발함
- 집단을 구성하는 각 개체는 게놈(Genome) 혹은 염색체(Chromosome)라고 부르며 유전자알고리즘에서 해를 표현하는 역할을 함
- 선택(Selection), 교배(Crossover), 돌연변이(Mutation) 연산은 유전자알고리즘의 기본적인 연산으로서 알고리즘의 메커니즘을 규정하고 효율성에 영향을 미침



[그림 III- 10] GA 개념도

(나) GA의 기본구조



[그림 III- 11]GA의 기본구조

(다) GA를 이용하여 최적화문제 해결시 고려사항

- 해결해야할 문제를 유전자적인 형태로 표현하는 방법
- 해가될 가능성이 있는것들의 초기개체군을 만들어내는 방법
- 주어진 문제의 가능한 모든해를 평가하는 적합도 평가 함수 설정
- 다음세대 생성시 고려해야하는 선택, 교배, 돌연변이의 유전연산방법
- GA가 사용하는 여러 가지 매개변수의 값
(개체크기, 유전연산자를 적용시키는 확률)

(라) 본연구에서 GA를 이용한 최적선형탐색시 고려사항

- 평면선형을 계놈의 형태로 설계해야 함
- 초기집단(평면선형집단) 구성시 도로설계 기술자의 의견이 반영된 선형을 포함시키거나 무작위 평면선형을 발생시켜 평가한 후 그중 나은선형을 초기집단으로 설정함
- 적합도란 어느 계놈이 주어진 문제에 대해 더 나은 해를 나타내는지를 판단하는 기준이 되는 값이다. 진화를 효율적으로 진행시키기 위하여 계놈(선형)을 평가하기 위한 척도를 제공하는 선형평가함수를 작성한후 이 평가값에 선형스케일링 함수를 도입함
- 본 연구에서는 비교연산자(1개), 교배연산자(6개), 돌연변이연산자(7개)를 사용자화 하였음.
- GA 수행시 필요한 매개변수(집단크기, 세대수, 교체비율, 교배확율, 돌연변이확율, 수렴

조건)를 옵션처리 함.

(마) 사용 라이브러리

- 본 연구에서는 Mathew Wall(MIT)이 C++를 이용하여 만든 45개의 클래스와 400여개의 함수로 구성되어진 GaLib 를사용한다.
- GaLib는 이전세대를 교체하고 새로운 세대를 생성하는 방법에 따라 4개의 알고리즘을 제공하는데 본 연구에서는 중복집단을 사용하며 사용자가 각 세대에서 교체되는 교체비율이나 크기를 명시하는 정상적 유전자알고리즘(GASteadyStateGA)을 사용하였다.

(바) 평면 계놈설계

- 적절한 자료표현을 정의 하는 것은 GA를 사용하는 기술의 일부분이다. 최소한의 하지만 문제를 완벽히 나타낼 수 있는 자료구조를 사용해야 한다.
- 최적철도선형 탐색연구에서 최종적으로 구하고자 하는 해는 최적철도선형이다. 최적해를 유전자적인 형태로 구성하는 것이 GA를 적용한 탐색기법에서 우선적으로 고려해야 할 사항이라고 볼 수 있다.
- 평면선형계놈 클래스는 GaLib가 제공하는 GaGenome 클래스로부터 상속시킨후 평면선형을 정확히 표현할 수 있는 모든 정의를 멤버변수화 시킨다. 즉, IP정보, 평면곡선정보, 측점정보, 종단 최적화후의 VIP정보, 종단곡선정보, VCP정보, 지반고정보, 공사비등 수많은 정보를 가지고 있어야 한다.
- 또한 GA는 진화중 새로운 개체를 만들기 위해 계놈클래스에 정의된 계놈연산자를 사용하는 관계로 교배연산자, 비교연산자, 돌연변이연산자, 복사연산자등 각종 연산자를 최적화 문제해결에 적절한 형태로 재정의 해야한다.
- 마지막으로 평면선형(계놈)을 평가하기 위하여 목적함수를 구성해야 하는데 이 목적함수는 아래에서와 같이 구성한다.

(사) 목적함수의 구성

- 평가함수라고도 하는 목적함수는 GA에서 상당히 중요한 역할을 하며 보통 계놈의 멤버함수로 존재한다.
- GA에서 탐색을 위해 유일하게 필요로 하는것은 어떤 개체가 다른개체에 비해 얼마나 더 나은가를 나타내는 척도 뿐이다. 목적함수가 이척도를 제공하며 최적화에 대한 유일한 해

를 반영한다.

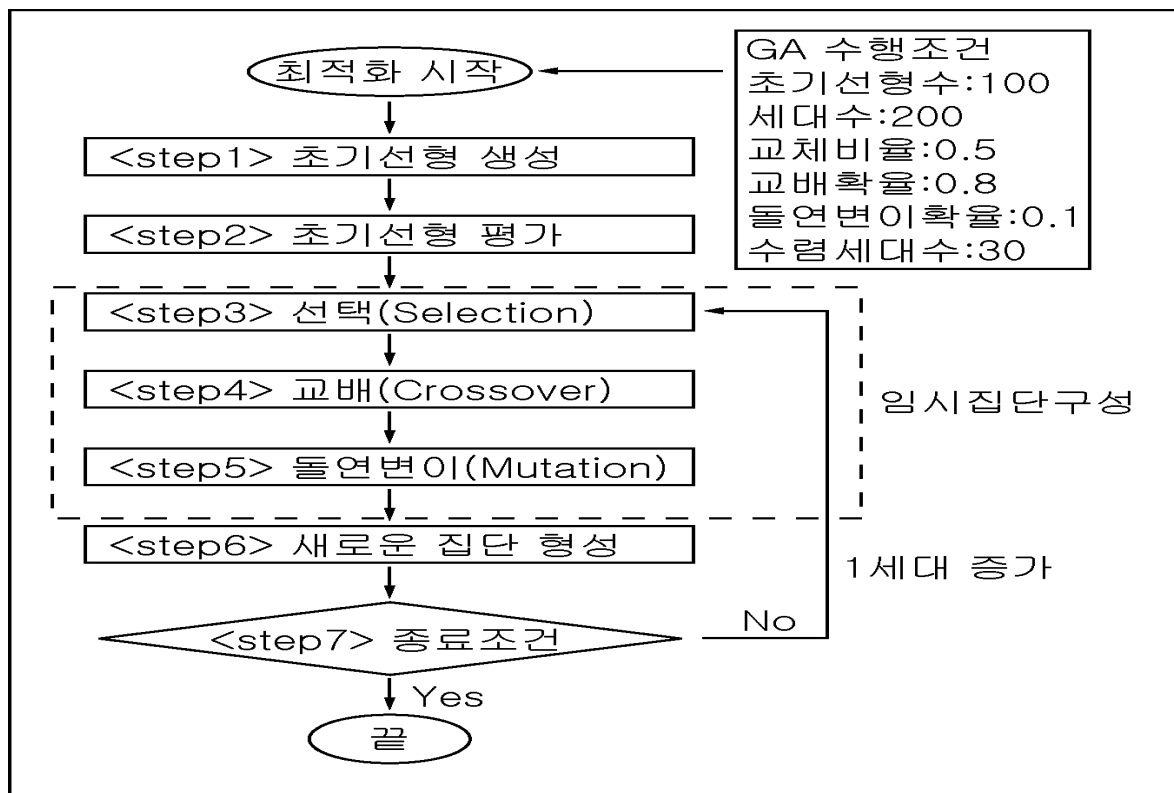
- 최적선형을 구하기 위한 진화 과정 중에 만들어지는 수많은 선형이 좋은 형질을 가지고 있는지를 평가하여 그 선형평가점수를 반환한다.
- 친환경 지능형 통합프로그램에서 사용될 목적함수는 선형을 평가함에 있어 친환경성, 안전성, 경제성, 공사비 등을 감안한 선형평가점수를 반환할 것이다.
- 이 목적함수의 반환값은 스케일링에 의해 적합도로 변환되어 다음세대를 위한 선택과정에서 사용된다.

(아) 선형최적화시 GA의 동작원리

다음 그림은 GA가 사용하는 여러가지 매개변수의 값을 설정한 후 선형최적화시 GA의 동작원리를 단계별로 나타낸 것으로 진화과정에서 선택, 교배, 돌연변이, 새로운 집단형성, 종료조건 체크 등의 일련의 과정을 보여준다.

알고리즘의 각 단계별 처리내용은 다음과 같다.

- GA수행조건 설정



[그림 III- 12] 선형최적화시 GA의 동작원리

- 초기선형수 : 100개
- 세대수 : 200 세대
- 교체비율 : 0.5
- 교배확율 : 0.8
- 돌연변이확율 : 0.1
- 수렴세대수 : 30 세대

- <Step1>초기선형 생성

- GA수행조건에서 설정한 초기선형수 만큼 시종점사이의 랜덤한 평면선형을 발생 시킨다.
- 만일 사용자가 지정한 초기선형이 있을 경우에는 그 선형을 우선적으로 초기선형에 포함시킨다.
- 평면선형 자체가 게놈인 관계로 100개의 게놈이 생성되었으며 이를 초기집단이라고 한다.
- 본 연구에서는 중복집단을 사용하는 정상적유전자 알고리즘을 사용하므로 교체비율을 적용한 임시집단을 만든다. GA수행조건 설정에서 교체비율을 50%로 설정 하였으므로 임시집단의 선형개수는 50개가 된다. 단, 임시집단의 선형(게놈)은 초기화를 거치지 않은 관계로 IP정보가 포함되지 않은 게놈의 메모리만 확보 된 상태라고 보면 된다.

- <Step2>초기선형 평가

- 초기집단 각각의 선형(게놈)에 대하여 목적함수를 호출하여 선형의 평가점수를 구한다.
- 초기집단을 평가하고 나면 이 집단이 1세대 집단이 되며 앞으로 진화과정에서 이 집단내의 100개의 선형이 점차 나은선형으로 바뀌게 된다.

- <Step3>선택(Selection)

- 집단에서 각 선형(게놈)의 평가점수를 적합도값으로 전환시킨다.
- 룰렛휠 방법을 이용하여 교배에 사용할 2개의 선형(부모선형)을 선택한다.
- 선택시 집단내 개체다양성(diversity)을 위하여 비교 연산자를 작성하였다. 예를들어 두선형이 교배를 하기 위하여 룰렛휠방법에 의해 선택되는데 전혀 비슷하지도 않은 평면선형을 교배했을 경우 생겨난 자손선형이 부모선형의 형질을 물려 받았다고 할 수 없다. 이를 방지하기 위하여 선택시 아래와 같은값에 기준하여 0.35 - 0.7 사이의 선형만 선택되도록

록 연산자를 구성 하였다.

1) 두선형의 IP갯수가 다름 -> -1적용

2) 두선형의 유전자가 같음(동일한 선형임) -> 0적용

3) 두선형이 비슷하게 다름(각IP간의 이격거리가 50m 이상인 IP가 전체IP 개수에서 차지하는 비율값 적용) -> 0.01 - 0.99적용

· 집단의 선형이 100개이고 교체비율이 50%이므로 총25번의 선택과정을 거친 후, GA 수행조건에 따라 다음의 교배 및 돌연변이를 수행한다.

- <Step4>교배(Crossover)

· 선택된 부모선형을 교배하여 자식선형을 생성한다.

· 이때 무조건 교배를 하는것이 아니라 GA수행조건에서 설정한 교배확율에 따라 교배를 수행한다. 위의 경우에서 교배확율을 80%로 설정한 관계로 한세대에서 약 20번의 선형 교배가 이루어진다.

· GA의 성능은 교배연산자의 성능에 크게 의존하는 관계로 도로선형탐색에 적당한 교배연산자를 재정의 하였으며 그 종류는 다음과 같다.

1) GaLib가 지원하는 교배방법

2) 최소거리 IP 교배

3) 최대거리 IP 교배

4) 임의IP 일점교배

5) 모든IP 다점교배

6) 위 여러 교배방법중 GA수행중 교배시마다 1가지 방법을 랜덤하게 선택하여 교배 수행

· 교배를 마친 자식선형은 모두 임시집단에 들어가게 된다.

- <Step5>돌연변이(Mutation)

· 새로 생성된 자식선형에 대하여 GA수행조건에서 설정한 돌연변이확율에 따라 돌연변이를 수행한다. 위의 경우에서 돌연변이 확율을 10%로 설정한 관계로 임시집단의 총 자식 선형수의 10%가 돌연변이를 수행한다.

· 돌연변이는 선형(개놈)의 패턴을 전환시키는 역할을 하며 선형의 탐색공간이 변경되어 전역(Global) 최적해를 구하기 위해서는 반드시 필요하다.

· 본 연구에서 새로 정의한 돌연변이 연산자의 종류는 다음과 같다.

1) GaLib가 지원하는 돌연변이 방법

- 2) 임의IP 1개 랜덤지정
- 3) 복수개 IP 랜덤지정
- 4) 임의IP 1개 추가 또는 삭제
- 5) 복수개의 임의IP 추가 또는 삭제
- 6) 평가점수가 낮은 IP구간을 선택하여 보정
- 7) 위 여러 돌연변이 방법 중 GA수행 중 돌연변이시마다 1가지방법을 랜덤하게 선택하여 돌연변이 수행

- <Step6>새로운 집단형성

- 집단으로부터 선택, 교배, 돌연변이 과정을 거쳐 새로운 선형(개놈)들을 생성 시켜 임시집단을 구성하였다.
- 이 임시집단의 선형들을 집단에 추가한후 다시 목적함수를 호출하여 추가된 선형에 대하여 평가한 후 전체선형을 점수별로 소트한다.
- 임시집단을 집단에 추가하여 집단의 선형수는 150개가 되었다. 이들중 점수가 나쁜 하위 50개의 선형을 추출하여 다시 임시집단을 구성하고 집단의 선형수는 100개를 그대로 유지하였지만 더 나은 선형들로 갱신 되었다.
- 새로운 집단을 형성하면 GA진화중 현재 세대수가 1 증가한다.

- <Step7>종료조건 체크

- 종료조건 체크란 GA의 진화를 언제 끝낼지를 결정하는 것이다. GA수행조건에서 설정한 지정된 세대수와 현재 세대를 비교하여 만약 현재세대가 지정된 세대보다 적다면 GA가 계속 수행될 것이다.
- 단, 여기서는 수렴조건으로 수렴세대 30을 설정한 관계로 최소한 30세대는 GA가 계속 수행된 후 종료조건을 체크 할 것이다. 수렴세대 30이란 현재집단의 가장좋은 선형의 점수가 30세대 전의 가장 좋은 선형의 점수와 같으면 GA의 진화를 종료하라는 뜻이다. 위의 경우에서 세대수는 200세대를 설정 하였지만 최소 30세대부터 경우에 따라 200세대를 초과하여 500세대 또는 1000 세대까지 진화가 계속 될 수도 있다. 그 이유는 진화를 거듭할수록 집단내 가장 좋은 선형의 점수가 자꾸 갱신되기 때문이다.
- 종료조건을 만족하면 진화를 중지하고 GA를 종료하게 되며 집단내의 첫 번째 선형이 최적선형이 된다.
- 최적화과정 중 각 연산자의 호출횟수는 다음과 같이 계산된다.

- 총선택횟수 = (초기선행수x교체비율/2) x 종료세 대수
- 총교배횟수 = (총선택횟수x교배비율) x 종료세 대수
- 총돌연변이횟수 = (초기선행수x교체비율 x 돌연변이비율)x종료세대수

(자) 본 연구 과제에서 사용되는 클래스

GAlib의 각 클래스로부터 유도되어 본 연구에 사용되는 클래스의 목록은 다음과 같다.

[표 III- 23] 클래스의 목록

재정의된 목록	클래스 명
게놈 클래스	CGARailGenome
초기화 클래스	CGARailInit
돌연변이 클래스	CUniformMutation CStraightMutation CNonUniform CWholeNonUniform
교배 클래스	COnePointCrossover CTwoPointCrossover CArithmeticCrossover CHeuristicCrossover
평가 클래스	CEvaluateRoad
유전자 알고리즘 클래스	CGaRailGA

- 유전자 변형 위치 수정

시종점 방위각과 평면 선형의 CP의 입력에 따라 교배, 돌연변이 등 유전자 변형에 관여하는 클래스의 수정이 이루어졌다. 우선, 시종점의 방위각이 고정되었으므로 시점, 종점을 제외한 선형의 각 앞뒤 두 IP는 유전자 변형이 이루어 지지 않는다. 또한, CP가 입력됨에 따라 CP가 입력된 곳을 기준으로 하여 CP 앞쪽 부분의 선형과 CP 뒤쪽 부분의 선형을 각각 유전자 변형을 시키고 변형이 완료된 시점에서 다시 하나의 선형으로 구성한다.

다음 표는 수정된 클래스의 목록을 보여준다.

[표 III- 24] 수정된 클래스의 목록

클래스 명	설명	수정 사항
CArithmeticCrossover	Arithmetic Crossover 클래스	시중점 방위각과 CP 입력에 따른 유전자 변형 위치 수정
CHuristicCrossover	Heuristic Crossover 클래스	
CUniformMutation	Uniform Mutation 클래스	
CStraightMutation	Straight Mutation 클래스	
CNonUniform	Non Uniform Mutation 클래스	
CWholeNonUniform	Whole Non Uniform Mutation 클래스	

(2) 최단거리패스 알고리즘

본 연구에서는 유전자알고리즘을 사용하는 방법과 최단경로알고리즘을 병용 사용하였으며, 최단경로알고리즘으로는 A* 알고리즘을 사용하였다.

(가) A* 알고리즘 개념

A* 알고리즘은 주어진 출발지 노드에서부터 목적지 노드까지 가는 최단 경로를 찾아내는 그래프/트리 탐색 알고리즘 중 하나이다. A*알고리즘은 두 종류의 상태 목록을 관리한다. 하나는 아직 조사하지 않은 상태들을 담은 열린목록(Open List)이고, 또 하나는 이미 조사한 상태들을 담은 닫힌목록(Closed List)이다. 알고리즘의 시작에서 닫힌 목록은 비어 있으며, 열린목록은 오직 시작상 태만을 가지고 있다.

각각의 반복에서 알고리즘은 열린 목록의 상태들 중 가장 유망한 것을 가져온다(이때 열린 목록에서 제거된다). 그 상태가 목표가 아니면 이웃한 위치들로 확장을 한다. 이웃 위치들이 새로운 것이면 열린목록에 넣고, 이미 열린목록에 있고 그것의 경로가 이전 것보다 가중치가 더 작으면 그 위치의 정보를 갱신한다. 반대로, 만일 그 위치들이 이미 닫힌 목록에 있는 것이면 이미 조사를 마친 것이므로 그냥 무시한다. 목표에 도달하기 전에 열린 목록이 비어지면 시작위치로부터 목표에 도달하는 경로가 존재하지 않는 것이다.

또한, 목표에 도달하면 목표에 도달하기까지 가장 작은 가중치를 찾아 지나온 경로를 역추적하면 최종 노선이 형성되게 된다.

(나) A* 알고리즘의 적용 절차

- 공간분석모듈을 이용하여 통과불가지역, 지장물(기존하천, 도로 등), 지형등을 분석하여 각 그리드별로 저항치 설정
- 그리드별 저항치와 지형, 기하구조조건, 공사비 등을 고려하여 다수의 최단경로(종단을 고려한 평면)를 생성한다.

최적화시 여기에서 생성된 평면선형을 이용하여 공사비를 산출한다.

제7절 철도선형설계요소의 AHP 평가

철도선형설계요소의 평가는 하나의 항목으로 평가될 수 없는 다 기준 의사결정 문제이다. 본 연구에서는 AHP(Analytic Hierarchical Process)를 사용하여 다 기준 의사결정을 하고자 한다.

1. 다 기준 의사결정

현실세계에서의 의사결정은 목적함수의 다양성, 다수의 대안, 평가요소 즉, 평가속성의 다양성이란 측면에서 매우 복잡한 양상이 나타나게 된다.

다수의 대안을 다 속성으로 평가하게 될 경우, 처리해야할 경우의 수는 기하급수적으로 증가하게 된다. 예를 들면, 함께 식사를 하러 간 일행이 메뉴를 고를 때 가격, 건강, 맛, 양의 속성을 생각하여 메뉴 중 고르게 한다면, 사람마다 견해차가 있고, 평가요소가 같다고 하더라도 가중치가 다르고 메뉴에 대해 모두 체험해본 경험이 없을 경우, 하나의 메뉴로 도출 되는 경우는 극히 드물다. 이렇게 간단한 사례에 있어서도 다양한 목적과 속성들을 종합적으로 고려한 의사결정이 이루어지는 셈이다. 현실의 의사결정주체들이 당면한 문제들은 대부분 일상의 문제에 비하여 복잡할 가능성이 높다. 특히, 공공부문의 의사결정문제는 다기준의사결정(MCDM: Multi-Criteria Decision Making)상황에서 대안을 결정하는 경우가 대부분이다.

다기준분석이란 다수의 속성(multi-attributes)이나 다수의 목적함수(multiobjectives)를 포함하는 의사결정을 최적화하는 방법을 탐색하는 기법이다. 따라서, 다기준분석은 하나의 속성이나 하나의 목적함수에 의한 의사결정과정에 비하여 좀더 체계적인 접근방법이 필요하다. 다기준분석은 크게 다목적의사결정법(MODM: Multiple Objective Decision Making)과 다속성의사결정법(MADM: Multiple Attribute Decision Making)으로 분류할 수 있다(이창효, 2000:132). MODM은 제약조건에 의해 함축적으로 정의된 무한 개의 대안집합에서 고려중인 목적을 가장 잘 만족하는 최적의 대안을 찾는 방법이며, MADM은 유한 개의 대안들의 집합에서 하나의 대안이나 그와 선호도가 같은 몇 개의 대안을 선정하는 것을 말한다. MADM이나 MODM의 선택은 주어진 문제상황에 따라 결정되게 되며, 각 방법의 구체적인 적용과정도 이론적으로 매우 다양한 형태를 띄고 있다. 이러한 현실을 반영하여 방법론에 따라서는 매우 복잡한 수학기법을 요구하거나, 적용과정에서 여러 가지의 제약적 가정들이 많은 경우들이 있다

2. AHP기법의 개요

AHP(Analytic Hierarchy Process; 계층화분석법)는 의사결정의 목표, 또는 평가기준이 다수이며 복합적인 경우 상호 배반적인 대안들의 체계적인 평가를 지원하는 의사결정 지원기법의 하나로써 정성적(qualitative) 요소를 포함하는 다기준(multi-criteria) 의사결정에 널리 사용되어 왔다. AHP기법은 1970년대 초 Pennsylvania 대학의 Thomas Saaty 교수가 미 국무부의 무기통제 및 군비축소국에서 세계적 경제학자, 게임이론 전문가들과 협력작업을 하는 과정에서 의사결정과정의 비능률을 개선하기 위한 대안의 일환으로 개발한 의사결정방법론이다.

AHP의 가장 큰 특징은 복잡한 문제를 계층화하여 주요 요인과 세부 요인들로 분해하고, 이러한 요인들에 대한 쌍대비교(雙對比較: pairwise comparison)를 통해 중요도를 도출하는 데 있다.

이 기법은 인간의 사고체계와 유사한 접근방법으로서 문제를 분석하고 분해하여 구조화할 수 있다는 점과, 모형을 이용하여 상대적 중요도 또는 선호도를 체계적으로 비율척도(ratio scale)화하여 정량적인 형태의 결과를 얻을 수 있다는 점에서 그 유용성을 인정받고 있다. 뿐만 아니라 간결한 적용절차에도 불구하고 척도선정, 가중치 산정절차, 민감도분석 등에 사용되는 각종 기법이 실증분석과 엄밀한 수리적 검증과정을 거쳐 채택된 방법들을 활용한다는 점에서 이론적으로 높이 평가되고 있다.

이러한 장점으로 인해 AHP는 현존하는 의사결정기법 중 가장 광범위하게 활용되고 있는 기법의 하나이다. 그 적용분야에 있어서도 에너지 수급·수송계획, 고등교육에 관한 계획, 대통령 선거, 북아일랜드 분쟁해결, 환경정책수립 등 공공부문 의사결정문제와 IBM, GM, Xerox, 3M을 비롯한 수많은 민간부문의 의사결정 과정에 활용되고 있다. AHP의 적용 영역에 관한 연구로서는 F.Zahedi(1986), Vargas(1990)의 연구를 들 수 있다. Zahedi는 1986년의 논문에서 당시까지 미국에서 발표된 논문들 중 AHP 적용 논문들을 27가지 영역으로 구분하여 57편의 논문을 소개하였으며 이후에도 AHP를 적용한 논문들이 지속적으로 소개되어 왔다. AHP기법의 활용과 함께 많은 학자들이 방법론 개발에 관심을 기울여 왔다. 최근에는 집단의사결정 과정에 AHP기법을 적극 활용할 수 있는 방법론들이 지속적으로 개발되고 있다.

세계 정부 및 각국의 활용사례에 관해서는 Expert Choice사의 홈페이지에 소개되어 있으며 국내의 적용사례에 관해서는 <http://www.expertchoice.co.kr> 에 소개되어 있다.

이러한 방법론은 Expert Choice사에서 제공하는 Team Expert Choice 소프트웨어 등에서 집단의사결정을 지원할 수 있는 소프트웨어에 활용되어지고 있다.

3. 이론적 배경

가. AHP의 원리

AHP는 문제해결을 위한 효과적 인간사고는 다음과 같은 3가지 원리가 지켜진다는 특징에 착안하여 개발된 의사결정기법의 하나이다(Saaty, 1995).

가) 계층적 구조설정(hierarchical structuring)의 원리이다. 인간은 복잡한 현상을 그 구성요소별로, 나아가 더 작은 부분으로 나누어 종국적으로 계층구조를 설정하여 사고하는 특징을 가지고 있다는 것이다. 인간은 어떤 한 현상을 동질성을 가진 부분으로 나누고, 다시 보다 더 작은 부분으로 나눔으로써 보다 많은 정보를 문제의 구조화에 포함시켜 보다 완벽한 전체 시스템을 구성하여 효과적으로 사고할 수 있다.

나) 상대적 중요도 설정(weighting)의 원리이다. 인간은 관측한 사물 사이의 관계를 인식하고, 유사한 사물들을 짝으로 묶어 특정 기준에 대비하여 비교하며, 짝을 이루는 구성인자 사이의 선호도를 판단하는 능력을 소유한다. 이러한 능력을 바탕으로 인간은 최종적으로 상상이나 논리적 과정을 통하여 그들이 내린 판단을 종합하여 전체 시스템에 대한 이해를 보다 강화할 수 있다.

다) 논리적 일관성(consistency)의 원리이다. 인간은 사물이나 생각들을 논리적 일관성을 갖도록 관계를 설정하는 능력을 보유하고 있다. 여기서 일관성이라 함은 두 가지 의미를 갖는다. 첫째는 유사한 사물이나 생각들을 동질성이나 관련성에 따라 묶는 것을 의미한다. 사과와 귤을 등글다는 기준으로 동질집단으로 분류하는 것이 한 예가 될 것이다. 둘째는 특정 기준이 있을 경우

쌍대비교의 원리는 Weber's law로 알려진 상대적 지각의 차이에 대한 인지심리학에 근거를 하고 있다. 이 법칙은 두 대상을 비교할 때 비교대상의 절대적 차이보다는 상대적 차이가 중요하다는 것으로서 판단의 수행에 있어서 쌍대비교의 유용성을 제시해주고 있다(Saaty, 1996). 또한, 생각이나 사물들의 관계의 강약을 그 기준에 따라 일관성 있게 구성하는 것을 의미한다. 만일 사과보다 귤이 두 배 맛있고, 귤보다 포도가 세 배 맛있다고 판단한다면, 사과보다 포도는 여섯 배 맛있다고 판단되어야 함을 의미하고 있다.

AHP에서 전제하고 있는 이러한 원리들은 모형의 구조 및 구축방법론에 구체적으로 반영된다. 즉, 계층적 구조를 설정하고, 설정된 구조를 구성하는 평가요소들에 대하여 상대적 중요도를 측정하며, 이러한 판단이 일관성이 있는지를 검증함으로써 모형의 구축이 완료된다.

나. AHP의 전제조건

AHP는 몇 가지 기본공리에 바탕을 둔다(Vargas, 1990). 이 공리는 실제 AHP를 적용하는 과정에서도 중요하게 고려되어야 할 것들이다.

공리 1. 상호비교(reciprocal comparison)

의사결정자의 두 대상에 대한 상호비교가 반드시 가능해야하며 중요성의 정도를 나타낼 수 있어야한다. 이 중요성의 정도는 반드시 역 조건이 성립하여야 한다. 즉, A가 B보다 x 배 중요하다면 B는 A보다 $1/x$ 배 중요시되어야 한다.

공리 2. 동질성(homogeneity)

중요성의 정도는 한정된 범위 내의 정해진 척도를 통해 표현되어야 한다.
즉, 비교대상간에는 비교가능한 일정한 범위를 갖는 기준들이 존재해야 한다.

공리 3. 독립성(independence)

상대적인 중요도를 평가하는 동일 수준의 요인들은 특성이나 내용 측면에서 서로 관련성이 없어야 한다.

공리 4. 기대성(expectation)

계층구조는 의사결정자들의 합리적 기대에 부합하는 완전한 구조를 갖고 있는 것으로 가정한다. 즉, 계층구조는 의사결정에서 고려되는 모든 사항을 완전하게 포함하고 있어야 하는 것이다. 한편, 수준의 수가 많아 계층 구조가 깊어지면 계산상의 복잡성이 유발되므로 통상 3~7 수준으로 계층을 형성한다.

위에서 언급된 4가지 공리는 AHP가 유지되거나 이론적 또는 실제 이용의 측면에서 타당성을 유지하기 위한 필수적인 요건이다. 각각의 공리가 위반될 때 발생하는 문제점을 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 공리 1의 위배는 모호한 질문 때문에 의사결정자가 질문을 이해하지 못하는 경우에 발생한다. 판단이나 쌍대비교를 이끌어 내는데 사용되는 질문이 명백하지 않거나 질문이 올바르게 언급되지 않았다는 것은 쌍대비교가 성립할 수 없다는 것을 의미한다.

둘째, 공리 2가 만족되지 못한다면 비교의 기준이 동질적이지 못하므로 쌍대비교가 성립할 수 없다. 동질적이라는 것은 비교 대상들이 비교가능하다는 것을 의미한다. 누구든지 별과 바위를 무게를 기준으로 비교하려고 하지는 않을 것이다. 왜냐하면 규모의 상한이 우리에게 알려져 있지 않기 때문이다. 비록우리가 별의 크기에 관한 개념이 있더라도 비교는 의미가 없다. 따라서, 공리 2는 현실에서 일반적으로 적용될 수 있다.

셋째, 공리 3은 판단기준의 가중치가 고려되는 대안들과 독립적이어야 한다는 것을 의미한다. 특정 대안의 선택에 유리한 가중치 산출을 피해야 한다는 것으로 두 기준을 쌍대비교할 때는 상위수준의 요소만을 고려해야한다. 공리 3의 위배를 다루는 방법은 초행렬 접근(supermatrix approach)으로 알려진 일반화된 AHP를 사용하는 것이다. 이에 대해서는 ANP(Analytic Network Process)기법이 있다.

넷째, 공리 4가 만족되지 않으면 의사결정자는 자신의 합리적 기대를 맞추는데 필요한 모든 대안이나 모든 판단기준을 사용하지 않는 것이다. 따라서, 의사결정이 불완전하게 이루어져 기대를 반영하지 못하게 된다.

4. AHP 분석과정

가. 분석과정 개요

일반적으로 AHP분석 과정은 다음과 같은 단계로 구성된다.

단계 1: 문제를 정확히 정의하여 문제의 요구사항을 명확히 한다.

단계 2: 문제와 관련된 모든 요소들을 조망하여, 최고 단계인 문제의 목표에서부터 중간수준의 평가항목 선정 및 배치를 거쳐 최하위 수준인 대안들의 비교까지를 포괄하는 계층구조를 구성한다.

단계 3: 중간 수준에 있는 한 평가항목을 기준으로 하여 하부 수준에 있는 종속 평가항목들이 어느 정도 중요한가를 판단하기 위해 평가항목들 간의 쌍대비교를 해당 종속 평가항목 전부에 대해 실시하여 상위 수준에 있는 평가항목에 대한 종속 평가항목들의 상대적 중요도를 비교행렬로 작성한다.

단계 4: 단계 3에서 구한 비교행렬로부터 평가항목간 상대적 추정 가중치를 구한 후 응답의 일관성을 검토한다. 만약 일관성이 없는 경우, 쌍대비교 결과를 재검토하여 일관성을 갖도록 한다. 응답의 일관성을 측정하는 척도로는 비일관성 비율(C.R.: inConsistency Ratio)을 사용한다. 계층구조의 복잡성에 따라 상이하기는 하나 일반적으로 비일관성 비율이 10% 이하의 경우 판단의 일관성에 문제가 없는 것으로 보고, 20% 이상이면 일관성 문제를 재검토한다.

단계 5: 단계 2에서 설정한 계층구조에 속한 모든 수준의 평가항목들에 대하여 앞의 단계 3~4 과정을 반복한다.

단계 6: 어떤 수준에 있는 평가기준의 상대적 가중치를 하위수준에 있는 종속 평가 기준의 상대적 가중치와 곱하는 과정을 최상위 수준부터 순차적으로 최하위 수준까지 실시한 후 평가 기준별로 구한 대안들의 상대적 가중치를 각각의 대안별로 합산(모든 평가 기준들을 종합적으로 감안한 대안간의 상대적 가중치)한다.

단계 7: 단계 6에서 구한 각 대안의 평가점수를 비교하여 가장 많은 점수를 얻은 대안을 선택한다.

단계 8: 평가결과에 대한 전체적인 일관성을 검토하여 일관성이 떨어지는 경우 비교판단상의 일관성이 결여되었는지 또는 처음부터 문제의 계층구조 설정에 잘못이 있었는지를 검

토한다.

위 과정을 간단하게 4단계로 구분하면,

브레인스토밍(brainstorming; 단계 1) → 계층구조의 설정(structuring; 단계 2) → 가중치의 설정(weighting; 단계 2~단계 5) → 측정(measurement; 단계 6~단계 7) → 검토(feedback; 단계 8)로 나눌 수 있다.

나. 브레인스토밍(brainstorming)

수준의 구성은 기본적으로 의사결정 문제의 특성과 관련이 있으며 문제의 계층화는 의사결정 문제를 분석적으로 파악하는데 도움을 주는데 여기에는 문제영역에 대한 경험과 지식이 필요하다. 평가항목의 선정과 계층구조를 설계할 때에는 일반적으로 여러 사람이 참석하여 마음에 떠오르는 모든 관련된 항목과 대안을 열거하는 등 주제에 대한 브레인스토밍 과정을 거치는 경우가 많다.

브레인스토밍은 1941년 알렉스 F. 오스본이 제안한 ‘아이디어를 내기 위한 회의기법’에서 비롯된 것으로 미국과 일본에서는 이미 30년 전부터 회사와 학교의 발명·발견 기법으로 활용되어 왔다. 브레인스토밍을 어떻게 정의하는가는 관점에 따라 다를 수 있으나 그 핵심은 의사소통의 장에 참여한 사람들이 문자 그대로 폭풍이 몰아치듯 두뇌를 자극하여 아이디어의 연쇄반응을 얻는 것이다. 브레인스토밍은 조사대상으로부터 개별 사업에 대한 핵심적인 정보를 추출하는 단계이다. 일반적으로 정보추출 단계는 1차 정보의 수집단계와 수집된 정보의 가공단계로 구분할 수 있는데 브레인스토밍은 1차 정보의 수집단계에 비중을 둔다.

브레인스토밍 과정이 여럿이 모여 하나의 문제에 대하여 아이디어를 내는 점에서는 일반적인 회의와 유사하나 효과적인 브레인스토밍을 적용하기 위해서는 다음과 같은 몇 가지 규칙이 제시된다는 점에서 일반적인 회의와 다른 특성이 있다.

첫째, 가치판단을 배제한다. 상대방을 비판하게 되면 폐쇄성이 심화되어 이질적인 주장을 하는 사람을 배제하게 되고 아이디어의 생산성이 낮아지게 되기 때문에 선입견을 최대한 억제하는 분위기를 제공해주어야 한다. 둘째, 자유분방한 분위기를 조장한다. 기발한 아이디어, 의외성이 있는 아이디어를 자유분방하게 내게 하면, 그것이 두뇌를 강력하게 자극하여 모두의 머리에 영감의 불이 붙게 된다. 따라서, 엉뚱하고 기발한 아이디어를 창출할 수 있게 된다.

셋째, 질보다는 양을 구한다. 오스본은 “아이디어는 양이다. 양에 비례해서 좋은 아이디어가 나온다”라고 주장하였다. 좋은 아이디어를 내야한다는 생각에 집착하면 오히려 아이디어 자체가 나오지 않는다. 많은 양의 아이디어를 내다보면 자연히 좋고 기발한 아이디어들이 나오게 된다. 넷째, 다른 사람이 낸 아이디어의 개선·결합을 추구한다. 이는 다른 사람이 여러 가지 아이디어를 냈지만 그것을 받아서 좋은 점을 개선하거나 결합해서 새로운 자신의 아이디어로 낼 수 있다는 것이다. 다른 사람의 아이디어 위에 자신의 생각을 덧붙이게 되므로 폭발적인 아이디어의 생산을 가져올 수 있게 된다.

다섯째, 가능한 한 의사결정이 갈등구조나 본질이 명확히 드러날 수 있도록 매우 이상적이거나 극단적인 주장들, 그리고 대립되는 의견들을 많이 생각해내도록 한다.

다. 계층구조의 설정(structuring)

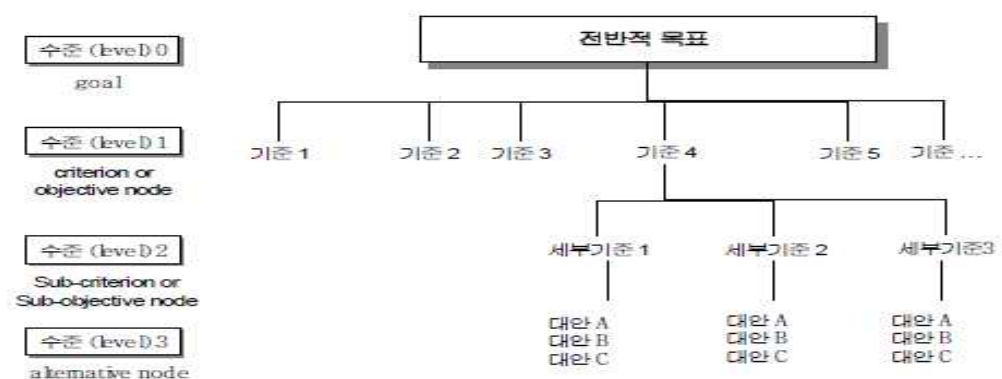
(1) 계층과 요소

계층이란 시스템의 특수형태로서, 계층구조를 설정한다는 것은 해결하고자 하는 문제의 요소를 먼저 파악하고, 요소를 동질적인 집합으로 군집화하여, 이 집합을 상이한 수준에 배열하는 것을 의미한다. 이때 각 집합들을 수준(level)이라고 부르며 각 수준은 요소(element)로 구성된다. 요소는 위 수준에서 식별된 상위요소를 구체적으로 정의하고 설명하는데 주로 기준이나 하위기준에 대한 정의 및 설명이 이루어진다. 기준들을 정확하게 정의하고 충분한 설명을 해야 정확한 평가가 이루어질 수 있다. 특히 의사 결정자가 다수인 경우에는 요소가 의미하는 바를 정확히 정의하지 않는다면, 의사결정자에 따라 요소에 대한 개념을 다르게 인식하고 평가에 임하게 되어 평가결과가 왜곡된다.

(2) 계층의 구성

AHP에서는 문제의 속성을 최종목표와 최종목표에 영향을 미치는 관련 속성들을 계층적으로 세분화하여 계층을 구성한다. 최상위 수준은 문제의 궁극적인 목표를 나타내고 제 1수준은 최종목표에 영향을 미치는 평가기준을 나타낸다. 제 2수준은 제 1수준에 영향을 미치는 세부 평가기준을 나타낸다. 이러한 반복과정을 통해서 문제의 속성을 계층적으로 분해해 간다. 마지막으로 최하위 수준에는 대안들이 있게 된다.

AHP이용을 위한 수준은 가장 단순한 2단계로 이루어 질 수도 있고 그림에서 보는 바와 같이 각 기준이 다시 하위의 세부기준으로 구성되는 3단계 이상의 계층을 형성할 수도 있다.



[그림 III- 13] 계층의 구성

계층의 구성은 반복적이며 상호 관련된 과정들을 거친다. 즉, 문제를 분석하여 계층과 계층 내에서 요소들을 확인하고 이들의 개념을 정립한 후 질문을 구성하게 되며, 이 수준에서 의사결정자로부터 질문의 명확성에 대한 수정을 받게 된다. 이러한 반복과정을 통해 계층적 분해에 의한 쌍대비교가 가능한 문제로 구성하고 나면 이를 쌍대비교와 우선순위 종합의 방법으로 타당성을 다시 검증하는 과정을 거친다.

라. 가중치 산정(weighting)

(1) 중요도의 측정방법 및 척도

가중치 산정을 위하여 전문가들에게 평가항목간 상대적 중요도 또는 선호도를 나타내는 쌍대 비교 형태의 설문을 실시한다. 쌍대비교 과정에는 평가자의 판단을 어의적인 표현으로 나타내고 이에 상응하는 적절한 수치를 부여하는 수량화 과정이 포함된다.

쌍대비교를 통한 상대평가를 위해서는 신뢰할 만한 평가척도가 필요하다. 이때 사용되는 척도는 인간이 느낄 수 있는 차이를 최대한도로 반영할 수 있는 범위로 정하여야 한다. 비율척도로 한 요소와 다른 요소를 비교하여 상대적 중요도를 측정할 때 상수합 측정척도와 언어적 표현의 9점 척도 두 가지 형태가 가장 널리 사용된다.

상수합 측정척도는 기본적으로 총 100점을 두 요소에 배분하도록 구성된다. 즉, 쌍대비교의 대상이 되는 두 요소 가운데 한 요소는 1에서 99까지 정수값(I)으로 주어지고, 다른 요소는 기대값(100-I)으로 주어진다. 예를 들면, 한 요소가 다른 요소보다 3배 중요하면 각각 75와 25로 나누어진다.

AHP기법에서는 두 척도 가운데 9점 척도를 기본형으로 이용하고 있다. 9점 척도의 채택은 1956년 밀러(Miller)의 심리학 실험에서 “인간은 7 ± 2 개의 대상을 혼동이 없이 동시에 비교 가능하다”는 결과에 기초하고 있다. Saaty(1995:pp.53-63)는 국가간 부(wealth)의 평가, 지역간 거리의 평가 등에 대한 가상적 실험 결과와 실제 자료를 비교한 결과 9점 척도를 이용한 의사결정의 강건성(robustness)이 가장 우수하다는 연구결과를 제시하였다.

구체적으로 9점 척도는 쌍대비교에 다음과 같은 형태로 활용된다. 의사결정자는 두 개의 비교 대상 a와 b를 놓고 a와 b의 ‘중요도가 같다(선호도가 같다)’,

a가 b보다 ‘조금 더 중요하다(조금 더 선호된다)’, ‘중요하다(선호된다)’, ‘상당히 중요하다(상당히 선호된다)’, ‘절대적으로 중요하다(절대적으로 선호된다)’와 같은 어의적 판단(verbal judgment)을 내린다. 가중치 산정과정에서 각각의 어의적 판단에 상응하는 1, 3, 5, 7, 9와 같은 수치적 판단(numerical judgment)으로 변환하여 입력자료로 사용한다. 2, 4, 6, 8은 각각 1과 3, 3과 5, 5와 7, 7과 9의 중간정도의 중요도(선호도)를 나타낸다. 만약, 중요도가 서로 반대되는 경우, 즉, b가 a보다 중요하다고 판단하는 경우에는 그 역수를 이용하여 자료를 입력하게 된다. <표 III-3>은 쌍대비교시 흔히 사용되는 9점 척도의 어의적 표현을 보여준다.

[표 III- 25] 9점 척도의 어의적 표현

언어적판단	계량적점수부여
극단적으로 선호	9
매우 강하게-극단의 중간	8
매우 강하게 선호	7
매우 강하게-강하게의 중간	6
강하게선호	5
강하게-약간의 중간	4
약간 선호	3
약간-동등하게의 중간	2
동등하게선호	1
주: Saaty and Vargas, 1982.	

(2) 상대적 가중치의 추정

쌍대비교를 통한 두 요소간 상대적 중요도의 측정결과를 종합하여 모든 수준을 구성하는 요소들의 상대적 가중치를 추정한다. 의사결정자가 한 수준에서 n개의 평가항목에 대해 ${}_nC_2$ 회의 쌍대비교를 수행하면 상대적 가중치를 알 수 있고, 이를 이용하여 아래의 쌍대비교행렬 $A_{n \times n}$ 를 구성할 수 있다.

$$A = [a_{ij}] = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix}$$

이때 행렬 A를 구성하는 a_{ij} 는 요소 j에 대한 i의 상대적 가중치 w_i/w_j 의 추정치이다.

행렬 A는 $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$, 주대각선의 원(element)의 값이 모두 1이 되는 성질을 가진 역수행렬(reciprocal matrix)이다.

가중치의 산출에 이용되는 방법은 고유벡터법, 최소자승법, 상수합법, 열행합법, 행평균법, 엔트로피법, LIMAP(Linear Programming technique for Multidimensional Analysis of Preference) 등이 있다(Ra and Kocaoglu, 1990).

Saaty(1990)는 고유벡터법이 다른 가중치 산출방법에 비해 더 좋은 추정치를 산출할 뿐만 아니라 쌍대비교시 응답자의 판단의 일관성을 측정할 수 있는 유일한 방법임을 주장한다. 이하에서는 AHP에서 사용되는 고유벡터법을 이용한 가중치 도출과정을 살펴본다.

행렬A에 평가항목간 상대적 중요도를 나타내는 가중치인 열벡터 $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ 를 곱하게 되면 식(1)의 관계를 갖는다.

$$\begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} nw_1 \\ nw_2 \\ \vdots \\ nw_n \end{bmatrix} \dots\dots\dots(1)$$

$$A \cdot w = n \cdot w \dots\dots\dots(2)$$

여기서 n 은 행렬 A 의 최대 고유치(maximum eigenvalue)이며 행(또는 열)의 수이다. 식(2)는 n 개의 연립방정식 체계에서 non-zero해를 구하는 고유치 문제 (eigenvalue problem)이다. 식(2)를 w 에 대해 정리하면 아래 식(3)을 얻는다.

$$(A - nI) \cdot w = 0 \dots\dots\dots(3)$$

식(3)을 만족시키는 영벡터가 아닌 w 는 요소간 상대적 중요도를 나타내는 가중치 벡터이다. 이 작업은 $|A - nI| = 0$ 을 만족시키는 n 의 값을 구하는 특성방정식(characteristic equation)을 푸는 과정이다. 이때 특성방정식의 근은 유일하지 않을 수 있으며 이에 대응하는 w 값들도 매우 다양하기 때문에 유일해를 구하기 위해서는 정규화 (normalize) 과정을 통해 제약을 가하게 된다. 이렇게 가해진 제약을 통해서 얻게 된 고유치(eigenvalue)에 대응하는 고유벡터의 유일성을 확보할 수 있게 된다. 그런데, 의사결정자는 일반적으로 행렬 A 와 같이 일관성 있게 요소들을 평가할 수 없어 실제조사를 통하여 얻은 쌍대비교행렬은 불일치를 포함한다. 따라서, 쌍대비교를 통하여 관찰한 쌍대비교행렬 A 와 $\lambda_{\max}$ (A 의 고유치중 가장 큰 값)을 이용하여 식 (2)의 대체식 (4)를 얻는다.

$$A \cdot w = \lambda \cdot w \dots\dots\dots(4)$$

단, λ : 고유치(eigenvalue); w : λ 에 상응하는 고유벡터(eigenvector) 식(4)는 일반적인 고유치 문제를 표현하는 식으로서 쌍대비교행렬 A 의 특성방정식(characteristic equation)의 해인 특성근(characteristic root) 또는 고유치(eigenvalue)를 산출하는 과정에서 우선순위 벡터의 추정치 w 를 유도할 수 있다.

식(4)를 w 에 대해 정리하면 식(5)를 얻는다.

$$(A - \lambda I)w = 0 \text{ 단, } 0 \text{은 } (n \times 1) \text{ 열벡터 } \dots\dots\dots(5)$$

식(5)는 n 개의 선형연립방정식이며 w 에 대한 non-trivial 해를 얻기 위해서는 식(6)이 성립하여야 한다.

$$|A - \lambda I| = 0 \dots\dots\dots(6)$$

Laplace 전개에 의해 식(6)을 전개하면 λ 에 대한 n 차 연립방정식을 얻으며 Laplace 전개식으로부터 λ 에 대한 n 개의 해를 구할 수 있다. 그러나, Laplace 전개식을 이용하여 특성방정식을 계산하는 방식은 행렬의 규모가 증가함에 따라 해를 구하는 과정이 복잡해진다. AHP에서는 일반적으로 고유벡터를 통해 얻어지는 우선순위벡터(priority vector)를 기하평균법이나 승수법(power method)을 사용하여 계산한다. 이렇게 해서 얻어진 우선순위벡터를 이용하여 $\lambda_{\max}$ 를 구할 수 있다. n 의 크기가 3 이하인 경우에는 기하평균법을 이용하여 우선순위벡터를 간단하게 구할 수 있으며 그 결과는 승수법을 이용한 방법과 동일하다. 한편, 쌍대비교행렬 A 가 완전한 기수적 일관성(cardinal consistency)을 갖는다면 특성방정식의 근 λ_i ($i = 1, 2, \dots, n$)는 가장 큰 근 $\lambda_{\max}$ 만이 n 의 값을 갖고 나머지 근들은 모두 0이다. 따라서, 완전한 일관성을 가진 쌍대비교행렬 A 는 식(7)의 관계가 성립한다.

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = \text{trace}(A)$$

$$\lambda_{\max} = n$$

$$\lambda_i = 0 \text{ 단, } \lambda_i \neq \lambda_{\max} \dots\dots\dots(7)$$

즉, ‘고유치의 합 = 행렬 A 의 대각행렬의 합’의 관계에서 식(1)에서 알 수 있는 바와 같이 쌍대비

교가 완전한 일관성을 가진 행렬A의 대각행렬의 합은 n이 된다.

그러므로 λ_{max} 는 n의 추정값이 된다. Saaty(1980)는 λ_{max} 는 n보다 항상 크거나 같으며 λ_{max} 값이 n에 가까울수록 쌍대비교행렬 A는 추정치와의 편차가 적어짐을 보인다. 즉, λ_{max} 값이 n에 근접할수록 쌍대비교시 응답의 일관성이 높다고 말할 수 있다.

이 성질이 뒤에서 논하게 되는 일관성 지수(C.I.:Consistency Index)를 유도하는 근거가 된다.

(3) 집단의 상대적 가중치

현실의 의사결정 상황에는 의사결정자가 다수인 경우가 흔히 발생한다. 따라서, 집단의사결정 상황에서 개인의 의견을 어떻게 종합할 것인가의 문제가 발생한다. 집단의사결정을 위해 AHP기법을 활용하는 방식은 기본적으로 개인의사결정과 동일한 절차를 거친다. 다만, 개인별로 얻어진 쌍대비교행렬을 종합하여 분석하는 추가적인 절차를 거친다는 차이점이 있다. 개인별 쌍대비교행렬을 종합하여 집단의 우선순위벡터를 산정하는 방법은 다음과 같은 두 가지가 있다. 첫째, 개인별 쌍대비교의 결과를 기하평균

(geometric mean)을 이용하여 구하는 방식이다. 이 방법은 개인별 쌍대비교에서 9점 척도로 표현된 요소간 가중치의 기하평균을 집단 쌍대비교의 요소간 가중치로 간주한다. 각각의 쌍대비교로부터 얻은 기하평균값을 이용하여 집단쌍대비교행렬을 구한 후, 개인별 우선순위벡터를 산정하는 방법과 동일한 절차를 거쳐 집단의 우선순위벡터를 산정한다. 이 방법은 의사결정에 관한 경험적인 자료나 선행연구가 부족하거나 이에 대한 정보가 부족한 비전문가집단의 의사결정에 활용된다.

둘째, 개인별 우선순위벡터를 이용하여 집단의 우선순위벡터를 구하는 방법이다. 이 방법은 개인별 쌍대비교행렬에서 개인별 우선순위 벡터를 구하는 과정을 완료한 이후, 개인별 우선순위 벡터의 값을 산술평균하여 최종적으로 집단의 우선순위벡터를 구하여 가중치를 산정하는 방식이다. 이 방법은 평가에 참여하는 개별 평가자의 견해를 집단의사결정에 종합적으로 반영하기 때문에 개별 전문가의 판단을 중시하는 방식이다. 따라서, 의사결정에 참여하는 개인의전문성이 높을수록 후자의 방법이 선호된다.

그러나, 양자의 방법 가운데 실제 어느 방법이 적절한가에 대해서는 아직도 이론적으로 검증되어야 할 부분들이 많이 남아있는 상태이다. 따라서, 대안간 우선순위 차이가 매우 적은 경우에는 양자의 방법을 동시에 적용하여 보고, 방법에 따라 대안의 우선순위가 바뀌는 경우에는 그 원인을 분석해 나가야 하는 검증절차가 필요할 것이다.

마. 일관성 검증(consistency test)

의사결정기법으로서 AHP기법의 장점은 가중치 산정과정에서 응답자들의 응답의 일관성을 검증할 수 있다는 것이다. 쌍대비교에 의하여 행렬 A를 얻는 방법은 각 열의 요소의 중요도를 1로 기준으로 한 후 대각선 하위에 있는 요소들의 상대적인 중요도를 결정한다. 즉, a_{ij} 는 1로 놓고 $a_{(i+1)i}, a_{(i+2)i}, \dots, a_{ni}$ 를 먼저 구하고, $a_{1i}, a_{2i}, \dots, a_{(n-1)i}$ 는 $a_{ji} = 1/a_{ij}$ ($j = 1, 2, \dots, i-1$)

의 관계로부터 얻어진다. 만일 쌍대비교에 의해서 얻어진 행렬 A의 원 a_{ij} 가 각각 $\frac{w_i}{w_j}$ 의 값을 갖고 있다면 기수적 일관성, 즉, $a_{ij} \times a_{jk} = a_{ik}$ 가 성립되어야 한다. $a_{ij} \times a_{jk} = a_{ik}$ 의 의미는 i를 j보다 x배 중요하게 생각하고 j는 k보다 y배 중요하게 생각한다면 i는 k보다 x×y배 중요하게 평가한다는 것이다. 그러나, 실제 응답에 있어서는 이러한 일관성이 완전히 지켜지기 어렵기 때문에 행렬 A의 논리적 일관성 정도를 검증하기 위한 기수적 일관성 측정이 필요하다. 기수적 일관성은 식(7)을 통하여 설명한 바와 같이, 쌍대비교에 대한 응답이 완전한 일관성을 유지하지 않을 경우

$$\lambda_{\max} > n \dots\dots\dots(8)$$

의 관계가 성립하는 성질을 이용한다. 쌍대비교의 대상이 되는 요소 j에 대한 요소 i의 상대적 중요도의 추정치 a_{ij} 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$a_{ij} = (1 + \delta_{ij}) \frac{w_i}{w_j}$$

단, δ_{ij} 는 $\frac{w_i}{w_j}$ 에 대한 불일치 정도로 $\delta_{ij} > -1 \dots\dots\dots(9)$

이때, 실제 관찰한 쌍대비교행렬에서 구한 최대고유치 $\lambda_{\max}$ 와 완전한 일관성을 가진 쌍대비교행렬의 최대고유치 n의 차이는 식(10)으로 표현된다.11)

$$\lambda_{\max} - n = 1/n, \sum_{1 \leq i < j \leq n} \frac{\delta_{ij}^2}{1 + \delta_{ij}} \geq 0 \dots\dots\dots(10)$$

식(10)에서 추정치 a_{ij} 가 정확히 $\frac{w_i}{w_j}$ 에 일치하면, $\delta_{ij} = 0$ 이 되어 $\lambda_{\max} - n = 0$ 이 성립함을 알 수 있다(Saaty, 1990).

따라서, $\lambda_{\max}$ 가 n에 가까울수록 평가자가 쌍대비교시 일관성 있는 판단을 내렸다고 간주할 수 있다. 이러한 성질에 착안하여 응답의 일관성지수(C.I.: Consistency Index)를 식(11)로 정의하여 사용한다.

$$Consistency \in dex = \mu = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \dots\dots\dots(11)$$

한편, 귀무가설 ' $H_0 : \lambda_{\max} - n = 0$ '를 이용하여 쌍대비교에 대한 일관성을 검정할 수 있다. δ_{ij} 가 정규분포를 따른다고 가정할 때 검정통계량 μ 는 Chi-square분포를 따른다. AHP에서는 일관성 검정 시 검정통계량 μ 를 사용하는 대신 일관성 지수를 경험적 자료에서 얻은 평균 무작위지수(R.I.: Random Index)로 나눈 비일관성 비율(C.R.)로 검정한다. 즉, 비일관성 비율을 식(12)로 정의하여 응답의 비일관도를 나타낸다.

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.}$$

여기서 C.R. : 비일관성 비율, C.I. : 일관성지수, R.I. : 무작위지수 $\dots\dots\dots(12)$

C.R.이 0의 값을 갖는다는 것은 응답자가 완전한 일관성을 유지하며 쌍대비교를 수행하였음을 의미한다. Saaty는 C.R.이 0.1 미만이면 쌍대비교는 합리적인 일관성을 갖는 것으로 판단하고, 0.2 이내일 경우 용납할 수 있는 수준의 비일관성을 갖고 있으나, 0.2 이상이면 일관성이 부족한 것으로 재조사가 필요하다고 제안한다.

바. 우선순위 도출(prioritization)

(1) 상대적 우선순위결정법과 절대적 우선순위결정법에 의한 우선순위 결정

문제상황을 상위목표와 하위목표 그리고 대안들로 계층화하여 해결하는 AHP기법은 기본적으로 동일한 수준에 있는 요소들은 상호 독립적이라고 가정한다. 예를 들어 공공사업의 타당성을 평가하는 문제에서 국가발전이라는 상위목표가 있고, 이 상위목표를 달성하기 위해 지역균형개발, 환경문제, 재원조달 문제와 같은 하위목표들이 있다면 이 하위목표들은 서로 간에 직교(orthogonal)되어 독립적이라고 가정을 한다.

그러나, 이론적으로는 의사결정에서 미처 고려하지 못한 하위목표나 대안들이 첨가됨에 따라 기존의 하위목표나 대안들간의 중요도가 변하게 된다면 의사결정의 강건성(robustness)을 상실하게 된다는 점에서 바람직하지 못한 의사결정 방법이 된다. 이렇게 새로운 대안이나 하위목표들의 추가로 인해 기존의 의사결정의 순위가 바뀌는 것을 순위역전(rank reversal)이라고 부르며 이러한 순위역전의 문제는 AHP기법에도 적용된다.

순위역전 자체가 의사결정에 긍정적인지 혹은 부정적인지에 대해서는 여전히 논쟁의 대상이 된다. 예를 들어, 사과, 배 두 개에 대해 선호의 크기를 결정하라고 했을 때 사과를 1순위 배를 2순위로 선택하였다고 하자. 그런데 만일 사과, 배, 오렌지 세 개를 대상으로 선호도를 결정하였을 때 오렌지 > 배 > 사과의 순서를 보인다고 하자. 이러한 선택은 새로운 오렌지라는 대안이 추가됨에 따라 배와 사과의 선호의 순서가 바뀌게 된 것이다. 만일 의사결정자가 완벽하게 일관성을 유지한다면 배와 사과의 순서를 제3의 대안이 첨가되더라도 선호의 순서를 바꾸지 않아야 한다. 그러나, 현실적으로는 신맛의 오렌지가 대안에 첨가됨으로써 시원한 배에 대한 선호의 강도가 높아져서 배와 사과에 대한 선호의 순서가 바뀔 수 있다는 점에서 순위역전이 반드시 잘못된 것은 아니다. 절대적 우선순위결정법은 위에서 설명한 전통적인 AHP기법이 사용하는 상대적 우선순위결정법이 갖고 있는 순위역전의 문제를 통제하기 위해 제기되었다. 그러나, 실제로는 AHP기법 자체가 순위역전에 취약할 수 있다는 점에서 본질적으로 절대적 우선순위결정법이 순위역전의 문제를 완전히 해결한다고 보기는 어렵다. 상대적 우선순위결정법과 절대적 우선순위결정법을 간략히 소개를 하면 다음과 같다.

먼저 상대적 우선순위결정법을 이용하여 대안간 우선순위를 종합해보자. 먼저 상위수준의 우선순위 벡터의 값을 한 축으로 하고 제 2수준의 우선순위 벡터값을 다른 축으로 하여 표를 만들면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

[표 III- 26] 2수준 우선순위 벡터값

요소	1	2	3	4	5	6	7	8	총 합
가중치	0.173	0.054	0.188	0.018	0.031	0.036	0.167	0.333	우선순위
A	0.754	0.233	0.754	0.333	0.674	0.747	0.200	0.072	0.396
B	0.181	0.055	0.065	0.333	0.101	0.060	0.400	0.650	0.341
C	0.065	0.713	0.181	0.333	0.226	0.193	0.400	0.278	0.263

제1행의 1부터 8까지는 제1수준에 있는 요소들의 번호를 나타내고, 제2행의 0.173, 0.054 등의

수치는 제1수준의 우선순위 벡터값, 즉 평가요소의 중요도를 나타낸다. 3~5행의 수치들은 제1수준의 요소들을 기준으로 제2수준의 요소(대안 A, B, C)들을 평가한 우선순위 벡터 값들이다. <표 III-4>에서 대안 A, B, C 각각의 종합우선순위는 전체 의사결정에서 제1수준의 중요성과 제2수준의 중요성을 나타내는 우선순위 벡터의 곱의 합으로 나타낸다. 예를 들어, 대안 A의 종합우선순위는 $(0.173 \times 0.754 + \{0.054 \times 0.233 + \{0.188 \times 0.754 + \{... + 0.333 \times 0.072\} \})$ 0.396으로 계산된다. 동일한 방법에 의해 B와 C의 종합우선순위를 산정하면 각각 0.341과 0.263을 얻는다. 종합우선순위 산정결과에 따르면 대안 A(0.396)가 가장 우수하고 대안 B(0.341)가 차선안임을 알 수 있다.

절대적 우선순위결정법은 다른 대안의 추가여부에 관계없이 현재의 우선순위를 유지하는 절대적 우선순위를 부여하기 위한 방법이다. 이를 위해, 제2수준의 대안 가운데 가장 높은 중요도를 갖는 대안에 해당하는 우선순위값을 기준으로 종합우선순위를 산정한다. 예를 들어, <표 III-4>에서 제1수준의 요소2의 관점에서 A, B, C의 우선순위 벡터값이 (0.233, 0.055, 0.713)으로 나타날 때, 가장 높은 중요도를 갖는 대안 C의 우선순위 벡터값 0.713을 기준으로 종합우선순위를 산정한다. 즉, 각 대안별 우선순위값을 가장 높은 우선순위값인 0.713으로 나누어주면, (0.327, 0.007, 1.000)의 값을 갖게 된다. 동일한 방식으로 모든 요소에 대한 우선순위벡터를 새롭게 구하면 <표 III-4>은 <표 III-5>로 수정된다.

[표 III- 27] 모든 요소에 대한 우선순위벡터

	1	2	3	4	5	6	7	8	종합
	0.173	0.054	0.188	0.018	0.031	0.036	0.167	0.333	우선순위
A	1.000	0.327	1.000	1.000	1.000	1.000	0.500	0.111	0.584
B	0.240	0.007	0.086	1.000	0.150	0.080	1.000	1.000	0.782
C	0.086	1.000	0.240	1.000	0.335	0.258	1.000	0.428	0.461

<표 III-5>로부터 종합우선순위를 구하는 과정은 상대적 우선순위결정방법과 동일하다. 예를 들어, A의 종합우선순위값은 $(0.173 \times 1 + \{0.054 \times 0.327 + \{... + \{0.333 \times 0.111\} \})$ 0.584가 된다. 유의할 점은 상대적 우선순위결정법을 이용하는 경우에는 종합우선순위 값의 합이 1이 되지만, 절대적 우선순위결정법으로 산정한 종합우선순위값의 합은 1을 초과할 수 있다는 점이다. 또한 종합우선순위를 산정하는 방법에 따라 대안의 우선순위가 변화할 수 있다. 상대적 우선 순위결정법에 따른 <표 III-5>에서는 A가 가장 좋은 대안으로 나타났지만, 절대적 우선순위결정법을 이용한 <표 III-5>의 경우에는 B가 가장 좋은 대안으로 나타나고 있다. 절대적 우선순위결정법에서 B가 가장 좋은 대안으로 선택된 이유는 A가 8개의 제1수준 요소들 중 5개 요소에서 가장 좋은 대안으로 평가되어 고른 점수를 얻었지만, 대안 B는 가중치가 가장 높은 제8요소에서 가장 좋은 대안으로 평가되어 절대적 우선순위방법을 택할 때 A대안과의 격차가 더 커졌기 때문이다.

결론적으로 AHP기법 자체가 순위역전의 가능성을 갖고 있다는 점에서 절대적 우선순위결정법은 이러한 순위역전을 해결할 수 있는 완벽한 방법이라 보기는 어렵다. 이러한 문제점을 내재하고 있는 상황에서 실제로 AHP기법을 적용하는 연구자는 무엇을 기준으로 종합우선순위 산정할 것인가? 이에 대하여 Saaty(1994:10)는 대안들간에 상호 의존관계가 있는 경우, 혹은 새로운 대안이 의사결정에 포함됨에 따라 기존의 대안들간의 우선순위가 바뀌는 것이 현실적으로 타당한 경

우 상대적 우선순위결정법을, 새로운 대안이 첨가되더라도 기존의 대안의 우선순위가 바뀌지 않도록 하는 경우 절대적 우선순위결정법의 사용을 권장한다. 또한, AHP기법을 적용하는 연구자의 특성에 따라서도 Saaty(1987)는 비교상의 선호도에 대한 이해가 부족할 경우에는 상대적 우선순위결정법을 그렇지 않을 경우에는 절대적 우선순위결정법을 적용할 것을 권장한다.

(2) 민감도분석

민감도분석은 의사결정문제의 주요 기준에 대한 우선순위값을 변화시키면서 의사결정 결과가 그 변화에 얼마나 민감하게 변화하는 가를 검증하는 과정이다. Saaty(1996:195-195)는 쌍대비교행렬의 특정 값이 변화함에 따라 고유벡터값이 얼마나 민감하게 변화를 하는지를 분석하였는데 쌍대비교행렬의 n 의 값이 9 이하인 경우에는 민감도가 작을 수 있음을 이론적으로 보여주고 있다. 그럼에도 불구하고, 고유벡터 값이 우선순위의 변화에 민감하게 반응할 수 있는 경우가 있으므로, 대안간 종합우선순위의 차이가 크지 않을 경우, 혹은 상위계층에서 요소간 가중치에 대한 의견차이가 심한 경우에는 민감도분석을 통해 의사결정의 강건성을 검토하는 절차가 필요하다.

AHP 소프트웨어에서는 민감도분석 모듈(module)을 제공하고 있다. Expert Choice 소프트웨어의 경우 그래프를 이용하여 민감도분석을 수행할 수 있는 다음과 같은 다섯 가지 방법을 제공하고 있다: 성과 민감도(performance sensitivity), 동적 민감도(dynamic sensitivity), 경사 민감도(gradient sensitivity), 2차원 민감도(two dimensional sensitivity), 가중차이 민감도(weighted difference sensitivity).

사. AHP의 반복과정(feedback)

AHP에 있어서 반복과정은 AHP의 유용성을 높이는 또 하나의 특성이다. 반복과정의 주안점은 응답의 일관성이 낮은 응답자에게 비일관성에 관한 정보를 제공하여 의사결정을 다시 수행하도록 함으로써 의사결정의 비일관성을 줄여나가는 데 있다. 만약, 의사결정자가 형식화된 질문에 적절하게 응답하지 못한다면 평가항목들의 계층적 구조는 재고되어야 한다. 계층구조를 형성하고 있는 각 개념들의 정의 및 설명이 잘못된 경우에도 마찬가지이다. 불일치정도가 심하고 반복과정에서도 일관성이 개선되지 않는다면, 평가항목들의 계층적 구조를 다시구성하거나 수준과 요소의 개념을 재정의 및 재설명한 후 AHP 절차를 다시 수행한다.

5. AHP기법의 평가

위에서 살펴본 AHP기법의 특성은 의사결정기법으로서의 장점 및 단점을 동시에 갖고 있다. 먼저 장점을 살펴보면 아래와 같다.

가. AHP의 장점

(1) 정보처리능력

의사결정자는 판단대상의 다른 측면이나 다른 요소들을 고려하지 않고 오직 한가지 성질을 기준으로 두 개의 요소만을 상호 비교하므로 비교의 단순화가 가능하다는 점에서 인간의 정보처리능력을 제고할 수 있는 이점이 있다.

(2) 척도의 통일

비교 대상이 되는 요소들을 통일된 비율척도를 이용하여 평가할 수 있으므로 주어진 자료에 대한 2차 가공이 유리하며 향후 추가되는 자료의 분석에도 활용할 수 있다.

(3) 정량적, 정성적, 직관적 정보를 모두 고려

비교과정에서는 두 요소의 선호도만을 필요로 하기 때문에 정량적 정보는 물론 정량적으로 표현하기 곤란한 의사결정자의 오랜 경험이나 정성적, 직관적 정보도 고려할 수 있다.

(4) 상대척도

정량적 정보의 경우에도 기준들의 측정 단위를 화폐, 미터 등의 표준단위(절대척도)로의 변환이 필요없는 상대척도(두 요소간의 의사결정자간의 주관적 선호도)를 이용하므로 각 요소를 절대척도화하는 어려움이 없다.

(5) 적용상의 편리

수학적 함수식을 이용하는 경우에 비해서 그 연산절차가 간편하고 활용절차가 간편하다.

나. AHP에 대한 비판

AHP기법은 여러 부분에 걸쳐 널리 활용되어 온 만큼 이에 대한 비판도 다양하게 행해져 왔다.

(1) 계층화 과정

계층적 구조가 AHP이외의 많은 다른 접근방법에서도 사용되었지만 의사결정 문제를 계층화할 때 그 이론적 틀이 존재하지 않는다. 따라서, 비전문가가 AHP분석을 수행하는 경우에는 자칫 계층구조를 구성하는 요소들간의 독립성 (independency)을 확보하지 못하거나 계층의 수준을 잘못 설정함으로써 부적절한 계층구조가 형성되는 경우가 발생할 수 있다.

(2) 가중치 산출법

고유벡터법이 가장 오랜 시간동안 사용되어져 왔고 상용화된 소프트웨어 제품(14)에서 채택되고 있어 쉽게 이용할 수 있다는 장점이 있지만 가중치 산출법에 대한 의견통일이 이루어진 것은 아니다.

(3) 집단의사결정화 문제

의사결정자가 다수인 경우에는 평가자들의 판단을 어떻게 집중시켜야 하는가의 문제가 있다. 집단의사결정 문제에 이용할 때 Saaty(1980)는 기하평균을 이용하면 해결 가능하다고 하였지만 체계적으로 논증되지 않았고 기하평균도 여러 방법들 중의 한가지 방법일 뿐이다.

(4) 계층의 깊이(수준의 수)와 넓이(요소의 수)

고려가능한 의사결정 대안들의 수가 제한적이고 수준의 수는 3-7개만이 고려된다. 대안과 수준의 수가 증가한다면 투입자료는 기하급수적으로 증가하게되어 계산이 상당히 복잡해 질 것이다. 따라서, 실제로 고려되는 수준의 상세성 정도와 요소의 수는 제한적일 수밖에 없다.

(5) 조작

AHP 분석결과가 의사결정자의 의도대로 조작될 수 있다. 개개의 선호들이 궁극적인 선호로 집적되는 AHP의 과정을 의사결정자가 사전에 파악하고서 최종결과를 조작하려 한다면 이를 막을 수 없다. 의사결정이 의미를 갖기 위해서는 의사결정자의 진실성이 절대적으로 요구된다.

(6) 의사결정자들간의 차이 제거

AHP는 의사결정이 절대적으로 필요한 경우에는 적당하지만 논쟁의 본질을 더 잘 이해하는데 필수적인 역할을 하는 프로파일의 차이를 제거하기 때문에 갈등자체의 분석에 유용하지 못하다 (Zahedi, 1986; Hamalainen, 1990).

AHP분석에 이용되는 대표적인 상용 소프트웨어로는 Decision Support Software (Pittsburg, PA)에서 1991년 제작한 Expert Choice와 Sygenex, Inc.(Redmond, WA)에서 1989년 제작한 Criterium이 있다.

다. AHP비판에 대한 반론

AHP에 대한 비판에도 불구하고 AHP를 이용하여 실제 의사결정문제를 성공적으로 해결한 연구들이 계속 발표되고 있으며 그 적용범위도 점차 넓어지고 있다. 이는 의사결정을 수행하여야 하는 제약요인하에서 AHP가 다른 의사결정기법에 있어 적용상 이점을 갖고 있다는 것을 반증한다. 또한, AHP에 대한 비판에 대한 반론도 충분하다.

(1) 계층화 과정

이것은 AHP에 대한 비판이 아니라 계층적 구조 자체에 대한 비판이다. 그러나 의사결정문제에 있어서 계층화 과정은 문제 해결에 접근하는 기본적인 방법의 하나로서, 휴리스틱한 접근과 병행하여 널리 사용되고 있는 방법이다. 또한, 계층화 과정에서 발생할 수 있는 문제점은 다른 의사결정과정에서도 동일하게 발생할 수 있다. 따라서, 계층화의 문제점에 대한 비판은 AHP가 갖고 있는 핵심적인 문제점이라고 보기는 어렵다.

(2) 가중치 산출법

가중치 산출의 문제는 AHP에 관한 이론적 논의들을 통해서 광범위하게 논의되어 왔다(Saaty, 1996). 비선형적 관계를 갖는 특수한 문제들을 제외하고는 선형적 관계를 갖는 각 계층의 구성요소들을 고유치를 이용하여 가중치를 산정하는 방식은 요인분석(factor analysis)을 비롯하여 최근에는 오차(noise)를 통제하는 기법으로 널리 활용되어지고 있다.¹⁵⁾

15) Flake, Gary William(1999), The Computational Beauty of Nature, The MIT Press.

pp.209-211 에서는 고유치와 고유벡터가 비선형 시스템의 오차를 통제하는 유용한 방안을 보여주고 있다.

(3) 집단 의사결정화 문제

AHP에서 개인별 의사결정 결과를 집단수준으로 통합(aggregate)하는 문제에 대한 명확한 기준이 존재하고 있지 않는 것은 사실이다. 그러나, 이는 AHP에 한정된 문제가 아니라, 의사결정분야의 연구의 전반적인 쟁점사항이자 개선하여야 할 분야이다. AHP기법이 유일한 결과를 확정적(deterministic)으로 제시하는 방법이라기보다는 의사결정지원(decision support)의 기능을 수행한다는 점에서 다른 다기준분석 방안들도 공통적으로 갖고 있는 한계점이라고 할 것이다.

(4) 계층의 깊이(수준의 수)와 넓이(요소의 수)

정보이론(information theory)에서 제시하고 있듯 복잡한 문제에 대해 가장 유용한 문제해결 알고리즘(problem solving algorithm)은 MDL(Minimum Description Length)를 만족해야 한다.¹⁶⁾ 즉, 복잡한 문제일수록 복잡도에 비례하여 계층수를 증가를 시키는 방식은 오히려 바람직하지 않을 수 있다. 또한 일관성의 관점에서 하나의 계층에서 요소의 수가 9를 넘지 않는 것이 바람직하다는 연구결과(Saaty, 1996:195)에 기초하여 적절하게 요소의 수를 조정함으로써 자의적인 계층과 요소의 수의 선택에 따른 문제를 최소화할 수 있다.

(5) 조작

의사결정자의 자의적 조작의 가능성은 모든 의사결정기법의 공통된 문제이다. 이를 통제할 수 있는 방안으로는 의사결정자의 성향을 분석함으로써 조작행위가 존재하는지 여부, 만약 존재한다면 어떠한 방식으로 이루어지고 있는지를 확인하여 이를 통제할 수 있다.

(6) 의사결정자들간의 갈등제거

의사결정기법은 의사결정을 위한 것이지 갈등 자체의 분석을 위한 것은 아니다. 이러한 AHP기법에 대한 비판과 반론을 종합하면 아래 표와 같다.

[표III- 28] AHP에 대한 비판과 반론

비판	반론
부적절한 계층화의 위험성	AHP에대한 비판이 아니라 계층적 구조 자체에 대한 비판이며 문제정의 단계에서 발생하는 의사결정과정의 공통문제
가중치 산출에 대한 통일된 견해 없음	비선형적관계를 갖는 특수한 문제를 제외 하고는 고유치를 이용한 산정방법이 널리 사용됨
집단의사결정문제에 적용하는 문제	의사결정분야의 전반적인 쟁점사항이며 의사결정지원 기능
수준의 수와 평가항목의 제한	복잡도에 비례하여 계층수를 증가를 시키는 방식이 오히려 바람직하지 않을 수 있음
의사결정자의의도대로조작될수 있음	모든 의사결정기법의 공통된 문제
의사결정자들간 차이를 제거하지 못함	의사결정기법은 의사결정을 위한 것이지 갈등 자체의 분석을 위한 것은 아님

6. 철도선형설계요소 평가를 위한 AHP기법 적용

Satty(1980)가 체계화한 AHP 기법모형 개발은 4단계 수준으로 구분할 수 있다. 1단계는 계층분석법(AHP) 모형의 설계에서 가장 중요한 단계로서 주어진 의사결정 문제를 상호 관련된 의사결정속성별로 계층화하여 분해(decomposition)하는 과정으로 한 계층내의 속성의 수가 9개를 넘지 않는 것이 좋다. 2단계는 각 계층에 있는 한 속성의 관점에서 직계 하위계층에 있는 요인에 대한 상대적 중요도를 평가하기 위하여 각 요인간의 쌍별 비교를 행하여 그 결과를 행렬로 나타내는 과정이다. 계층분석법의 수량화를 위한 척도는 9점 척도를 많이 사용하고 있다. 3단계는 쌍별 비교를 통하여 얻어진 행렬을 이용하여 각 계층에 있는 여러 속성에 대한 상대적 가중치를 추정하는 단계이다. 가중치의 추정방법으로서 가장 많이 사용되는 방법은 Saaty(1980)가 제안한 고유벡터(eigen vector)를 이용하는 방법이다. 4단계는 최하위 계층에 있는 여러 속성에 대한 상대적 비중 또는 우선순위를 구하기 위하여 상대적 가중치를 종합하는 과정이다. 종합가중치를 구함으로써 최상위 계층에 있는 의사결정 문제의 일반적 목표를 달성함에 있어서 최하위 계층에 있는 여러 속성들이 어느정도 영향을 미치는지를 구분할 수 있다. 대안의 종합가중치는 아래의 식을 통해 구할 수 있다.

가. 철도선형설계요소의 계층화 분해

계층화 분해를 위해서 본 연구에서는 전문가 집단의 의사결정의 도움을 받아 수행하였다. 철도노선에 대한 평가를 위하여 종합된 전문가 집단의 종합적인 의견은 다음 표와 같다.

[표 III- 29] 철도노선에 대한 평가의 전문가 집단의 종합적인 의견

Goal	1차분류	2차분류	설명
철도선형 설계 평가요소	공사비	토공수량	절토와 성토 운반을 고려
		교량수량	교량의 수량, 형식 고려
		터널수량	터널의 수량, 형식 고려
		시설비용	시설비용
	선형요소	설계속도	설계속도에 따른 비용변화가 상대적으로 크다
		곡선반경	곡선반경에 따른 비용변화가 상대적으로 크다
		구배	구배에 따른 비용변화가 상대적으로 크다
		캔트	캔트에 따른 비용변화가 상대적으로 크다
	운행요소	표정속도	전체구간의 표정속도
		운행시간	전체 구간의 운행시간
		노선길이	각 단위구간의 평균운행거리
		운행비용	전체구간의 운행비용
	지형요소	우선통과(불능)지형	우선통과(불능)지형이 설계에 주는 영향
		수계	수계지형이 설계에 주는 영향
		도심	도심 지형이 설계에 주는 영향
		산악	산악 지형이 설계에 주는 영향
	프로그램성능	수행시간	대안을 작성하기위한 컴퓨팅 타임
		수작업시간	데이터의 마련등 수작업을 필요로하는 시간
		비사용시 시간	프로그램을 사용하지 않고 수작업으로만 하였을 경우

나. 1차분류 평가요소의 정량화

위의 1차분류 및 2차 분류의 통계산출을 위해 각 항목별 해당하는 점수를 산출하였다. 산출방법은 기하평균을 사용하였으며 결과는 다음과 같다.

(1) 기하평균

1차 분류에 대한 응답자의 선호도를 합산하여 비교행렬을 구하기 위한 기하평균을 계산하였다. 이때 산출된 값은 선형요소 - 공사비 - 지형요소 - 운행요소 - 프로그램성능의 순으로 나타났다.

	공사비	선형요소	운행요소	지형요소	프로그램성능
기하평균	3.09	3.75	2.96	3.33	1.06

(2) 비교행렬

위에서 구한 기하 평균에 의한 비교행렬은 다음과 같다.

	공사비	선형요소	운행요소	지형요소	프로그램성능
공사비	1	0.3	1.1	0.8	3
선형요소	3.33	1	1.8	1.4	3.7
운행요소	0.91	0.56	1	0.6	2.9
지형요소	1.25	0.71	1.67	1	3.3
프로그램성능	0.33	0.27	0.35	0.30	1

(3) 가중치 산정

	공사비	선형요소	운행요소	지형요소	프로그램성능
Weight	0.169	0.358	0.168	0.237	0.068

(4) 일관성 검증

Consistency Index	0.0241
-------------------	--------

다. 2차분류 평가요소의 정량화

(1) 공사비 2차분류

(가) 가중치산정결과				
Weight	0.179	0.378	0.320	0.123
(나) 비교행렬				
	토공수량	교량수량	터널수량	시설비용
	1	0.4	0.5	1.9
교량수량	2.5	1	1.2	2.5
	2	0.833333	1	2.4
시설비용	0.526316	0.4	0.416667	1
(다) Consistency Index				
Consistency Index				0.0135

(2) 선형요소 2차분류

(가) 가중치산정결과				
Weight	0.425	0.300	0.178	0.096
(나) 비교행렬				
	설계속도	곡선반경	구배	캔트
	1	1.6	2.5	3.7
곡선반경	0.625	1	1.9	3.1
	0.4	0.526316	1	2.2
캔트	0.27027	0.322581	0.454545	1

(다) Consistency Index		
Consistency Index		0.0077

(3) 운행요소 2차분류

(가) 가중치산정결과				
Weight	0.472	0.189	0.094	0.245
(나) 비교행렬				
	표정속도	운행시간	노선길이	운행비용
	1	2.6	3.7	2.4
운행시간	0.384615	1	2.1	0.8
	0.27027	0.47619	1	0.3
운행비용	0.416667	1.25	3.333333	1
(다) Consistency Index				
Consistency Index			0.0174	

(4) 지형요소 2차분류

(가) 가중치산정결과				
Weight	0.386	0.167	0.280	0.166
(나) 비교행렬				
	우선통과(불능)지형	수계	도심	산악
	1	2.1	1.6	2.2
수계	0.47619	1	0.5	1.1
	0.625	2	1	1.6
산악	0.454545	0.909091	0.625	1
(다) Consistency Index				
Consistency Index			0.0064	

(5) 프로그램요소 2차분류

(가) 가중치산정결과			
Weight	0.412	0.294	0.294
(나) 비교행렬			
	수행시간	수작업시간	비사용시 시간
	1	1.4	1.4
수작업시간	0.714286	1	1
	0.714286	1	1

(다) Consistency Index	
Consistency Index	0.0000

라. 가중치의 적용

최소공사비 노선이 최적노선이 아니므로, 가중치를 활용하여 공사비 외의 요소들에 대한 상대적 평가가 가능하다. 즉, 여기서 산출된 가중치는 전문가 의견을 반영한 것으로써 향후 다양한 평가집단의 평가결과를 종합할 때 개별 가중치를 Normalize하는 역할을 수행한다. 따라서 특정지역 또는 구간의 선형설계내역을 평가하는데 있어서 최대한 관적인 의사결정을 수행할 수 있도록 한다.

7. 철도선형설계요소 평가를 위한 종합 가중치

[표 III- 39] 철도선형설계요소 평가를 위한 종합 가중치

Goal	1차분류	가중치	2차분류	가중치
선형설계평가	공사비	0.17	토공수량	0.18
			교량수량	0.38
			터널수량	0.32
			시설비용	0.12
	선형요소	0.36	설계속도	0.43
			곡선반경	0.30
			구배	0.18
			캔트	0.10
	운행요소	0.17	표정속도	0.47
			운행시간	0.19
			노선길이	0.09
			운행비용	0.25
	지형요소	0.24	우선통과(불능)지형	0.39
			수계	0.17
			도심	0.28
			산악	0.17
	프로그램성능	0.07	수행시간	0.41
			수작업시간	0.29
			비사용시 시간	0.29

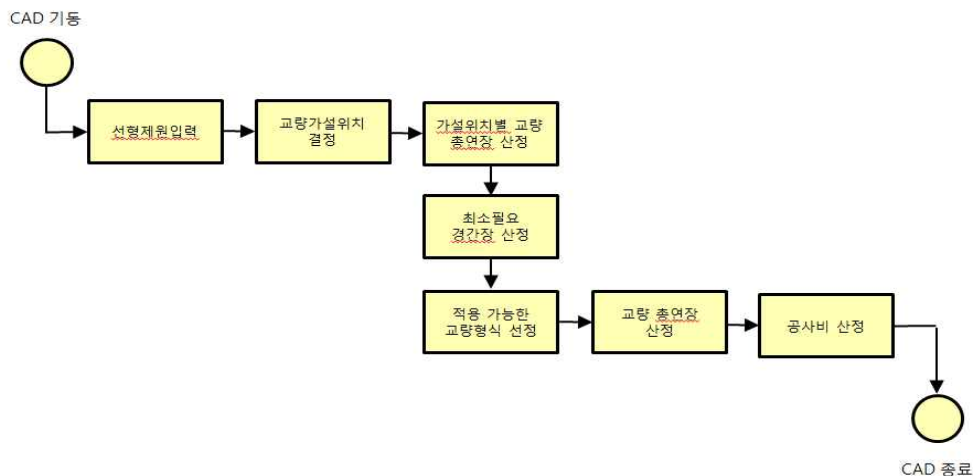
제8절 구조물 위치 선정 및 특성에 따른 형식 선정

1. 교량 형식 선정

가. 개요

터널 형식 선정 프로그램은 주어진 도로 선형의 기하구조에 대해 교량의 위치, 상부형식, 경간장, 교대 위치 및 높이, 교각 위치 및 높이 등을 연구된 알고리즘에 의해 설정하고 제공된 상부공 단가, 교대 단가, 교각 단가, 기초 단가를 이용하여 교량 공사비를 산출하는 전산 모듈이다. (주)다린이앤씨에서 교량 형식 선정에 대한 알고리즘을 제공하였고, (주)평화데이타시스템에서 프로그램으로 개발하였다. 본 프로그램에서는 RC 슬래브교, RC 라멘교, PSC Beam교, IPC Girder교, Steel Box Girder교, Steel Plate Girder교, PSC Box Girder교(FSM, ILM, FCM, MSS) 등 총 10종의 교량 상부형식이 적용되고 T형교각, 중공구형교각의 교각형식과 직접기초, 직접항타, 천공후매입(SIP, SDA, PRD)의 파일기초, 매스기초 등의 기초형식을 적용하여 공사비를 산출하게 된다.

나. 절차



[그림 III- 14]교량 형식 선정 흐름도

교량 형식 선정 프로그램은 제공된 알고리즘에 의해 <그림 III-14>와 같은 순서로 구성된다. 입력된 도로의 평면/종단 기하구조에 의한 일정 높이 이상의 흙쌓기 높이에 의해 교량의 가설이 결정되거나 주어진 선형이 교차시설을 횡단할 때 교량의 가설이 결정된다. 흙쌓기 높이에 의해 교량의 가설이 결정된 경우 성토구간에 대해 교량의 총연장이 산정되고 30m를 최소 필요 경간장으로 설정하여 교량형식을 선정한다. 도로를 횡단하는 교량의 경우 횡단하는 도로폭을 고려한 산식에 의해 총연장과 최소 필요 경간장이 결정되고, 하천을 횡단할 경우 하천폭을 교량 총연장으로 하며 홍수량에 의해 최소 경간장이 결정된다.

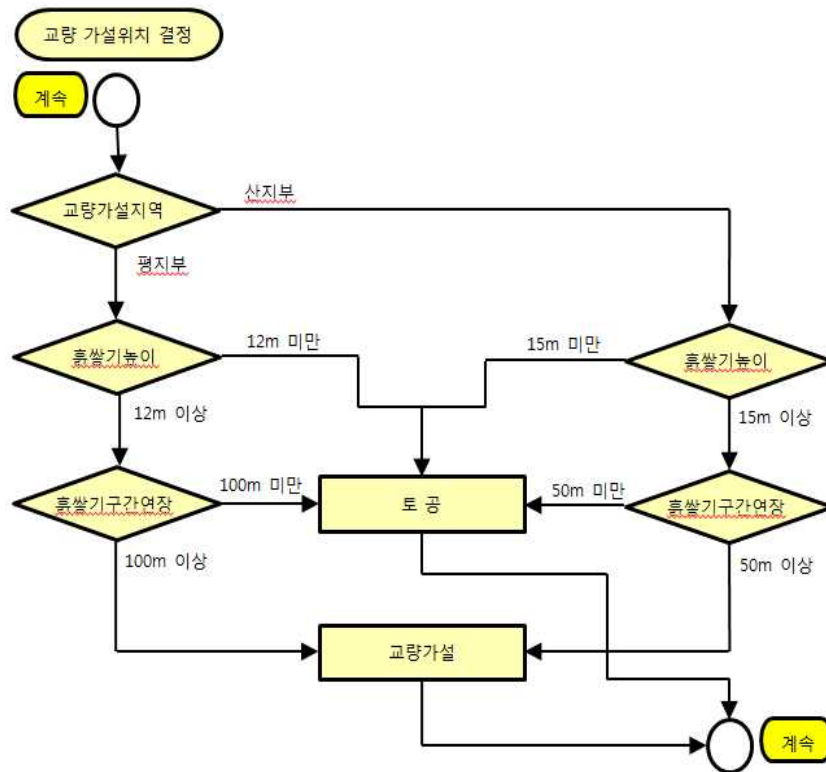
총연장과 최소 경간장이 설정되면 흙쌓기 높이 조건과 최소 필요 경간장 만족여부, 교량이 가설되는 위치의 평면 곡선 반경, 교량의 다리밀 공간 확보 가능여부 등의 조건을 복합적으로 고려하여 적용 가능한 교량 형식을 선정하게 된다. 선정된 교량 형식에 의해 경간장과 총연장이 조정되

고 교대 및 교각의 위치를 결정하게 되면 교대, 교각의 높이가 계산되어진다. 상술한 흐름에 의해 교량 연장, 교대, 교각 높이, 기초 형식이 정해지면 이를 이용하여 공사비를 산정하여 그 상세 결과를 보고서에 출력한다. <표 III-18>은 교량 형식 선정 프로그램의 프로세스 정의이다.

[표 III- 40] 교량 형식 선정 프로그램 - 프로세스 정의

Unit	Process	정 의	주요 Input	주요 Output
01. 선형 제원 입력		평면, 종단 선형 제원 입력	본선선형정보	
02. 교량 가설 위치 결정		교량 가설지역별 교량 가설 위치 결정	흙쌓기 높이	교량가설위 치
03. 가설 위치별 교량 총연장 산정		교량 가설위치별 최소로 필요한 교량 총연장 산정	하천폭, 도로폭	교량 필요 총연장
04. 최소 필요 경간장 산정		설치 구간별, 경간수별 최소 필요 경간장 산정	도로폭, 홍수량	최소 필요 경간장
05. 적용 가능한 교량형식 선정		흙쌓기 높이, 형하여유고, 적용가능한 경간장, 경간장에 따른 곡선반경 · 주거더높이 등을 고려한 교량 형식 선정	흙쌓기 높이	교량형식
06. 교량 총연장 산정		적용 교량 형식별 총연장 산정	경간장	총연장
07. 공사비 산정			단가	공사비

2. 교량 가설 위치 결정

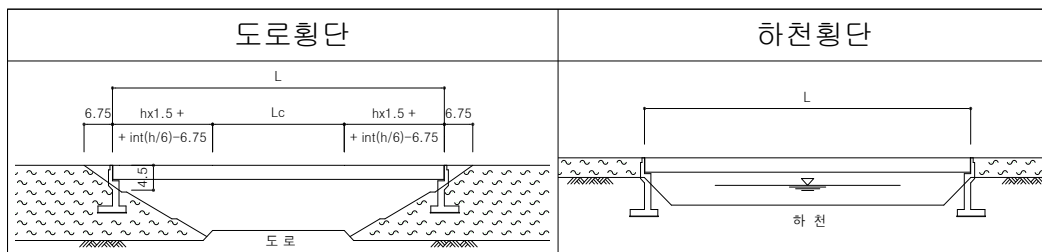


[그림 III- 15] 교량 형식 선정 프로그램

교량 형식 선정 프로그램에서 교량은 흙쌓기 높이 기준 또는 교차시설을 횡단할 때 가설된다. 고려되는 교차시설에는 도로, 철도, 하천 등이 있다. <그림 III-15>와 같이 흙쌓기 높이에 의해 교량의 가설위치를 결정할 때에는 산지부와 평지부로 나누어 고려되고 흙쌓기 높이와 흙쌓기 구간 연장에 의해 결정된다. 평지의 경우 흙쌓기 높이 12m 이상인 구간이 100m 이상일 때 교량이 가설되고 산지의 경우 흙쌓기 높이 15m 이상 연장 50m 이상이면 교량이 가설된다.

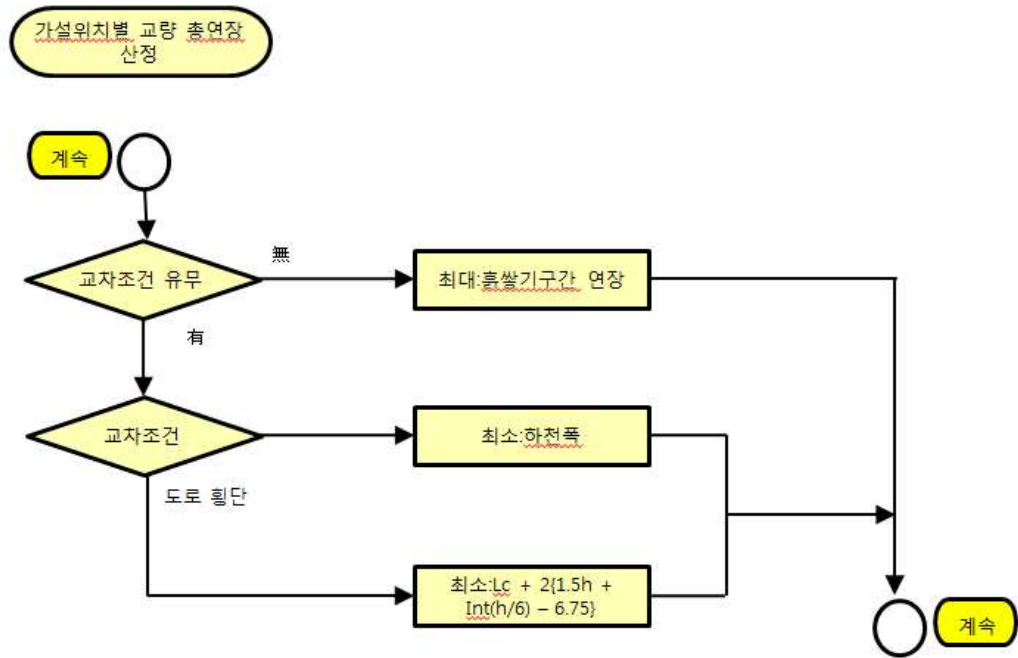
3. 교량 가설 위치별 필요 총연장 산정

[표 III- 41] 교차조건에 따른 교량 설치시 필요 연장



교량 가

설 위치가 결정되면 교량의 필요 총연장을 산정한다. 흙쌓기 높이와 연장에 의해 교량이 가설될 때의 총연장은 흙쌓기 구간 연장이 되고 교차조건에 의해 교량이 가설될 때에는 <표 III-19>와 같이 교차조건이 하천일 경우 하천폭이 총연장이 되고 도로를 횡단할 경우에는 도로폭을 고려한 산식으로 표현된다. <그림 III-18>은 가설 위치별 필요 총연장을 산정하는 흐름을 나타낸 것이다.



[그림 III- 18] 가설 위치별 교량 총연장 산정

4. 최소 필요 경간장

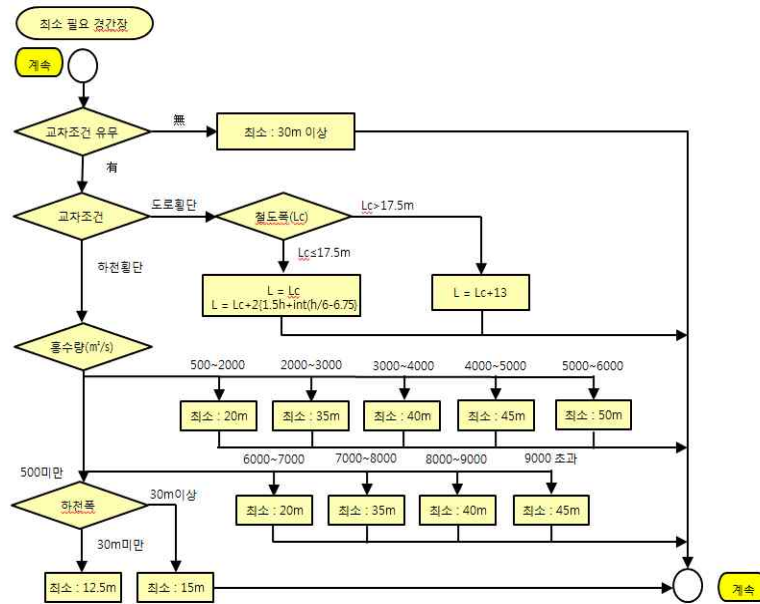
교량의 형식별로 표준적용지간, 거더 높이비는 설계조건에 따라 다르지만 본 프로그램에서는 교량의 가설 조건에 따라 최소 필요 경간장을 설정한다. 흙쌓기 높이와 연장에 의해 교량이 가설되면 최소 필요 경간장은 30m 이상으로 한다. 도로를 횡단하는 교차조건일 경우에는 <표 III-20>과 같이 단경간교인지 연속교인지에 따라서 도로폭을 고려한 산식에 의해 최소 경간장이 결정된다.

[표 III- 42] 도로 횡단 - 최소 필요 경간장

단경간교	연속교
$L_c \leq 17.5 : L = L_c$ $L \leq 55m :$ $L = L_c + 2\{h \times 1.5 + \text{int}(h/6) - 6.75\}$	$L_c > 17.5$ 또는 $L > 55m :$ $L = L_c + 2(1.0 + 0.5 + 5.0) = L_c + 13.0m$

여기서 가시설 설치공간은 1.0m+0.5m, 교각기초 폭은 10.0m로 가정하였다.

<그림 III-21>은 교량 가설되는 조건에 따라 최소 경간장이 산정되는 과정을 나타낸 것이다.



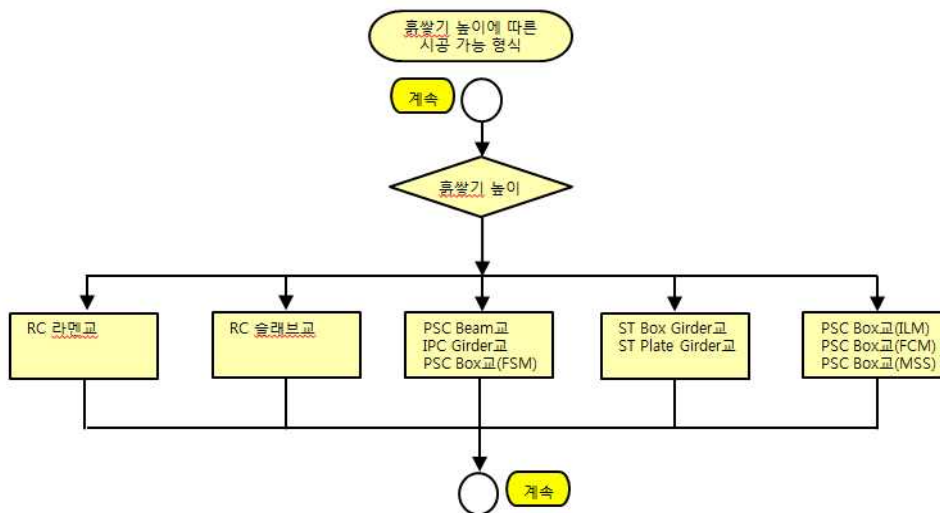
[그림 III- 21] 최소 필요 경간장

5. 적용 가능한 교량 형식 선정

교량 형식 선정 프로그램에서는 필요 총연장과 최소 필요 경간장이 결정되면 흠쌓기 높이, 최소 필요 경간장 만족 여부, 가설되는 위치의 평면 선형의 곡선 반경, 다리밑 공간 확보 가능 여부를 복합적으로 고려하여 현재 조건을 만족시키는 교량 형식군을 선정하고 최종적으로 적용 가능 교량 형식군에 대해 상부공사비 뿐만 아니라 교대, 교각, 기초 등의 하부 공사비까지 계산하여 최소의 공사비가 소요되는 교량 형식을 선정하게 된다.

가. 흠쌓기 높이에 따른 시공 가능 교량 형식

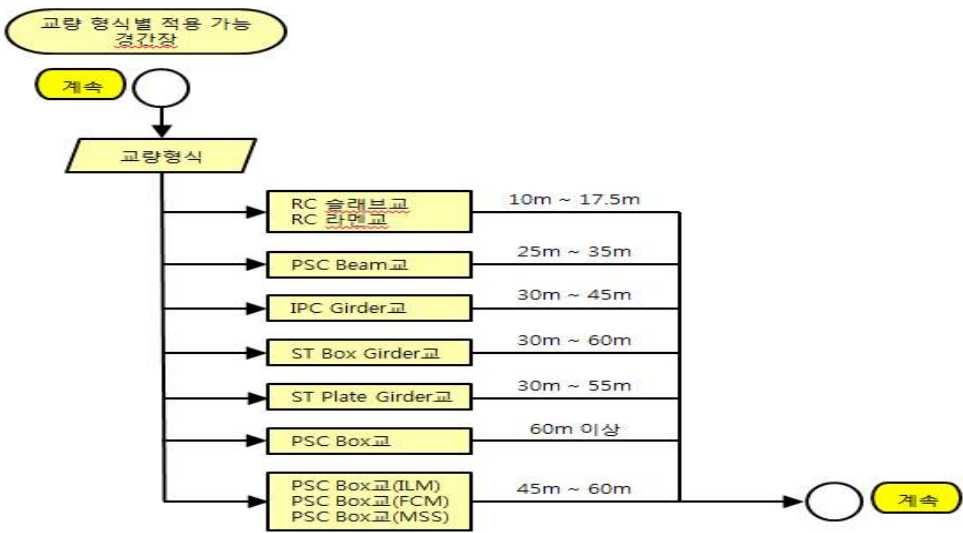
<그림 III-22>는 흠쌓기 높이에 따라 시공이 가능한 교량 형식을 선정하는 과정을 나타낸 것이다.



[그림 III- 22] 흠쌓기 높이에 따른 시공 가능 형식

나. 교량 형식별 적용 가능 경간장

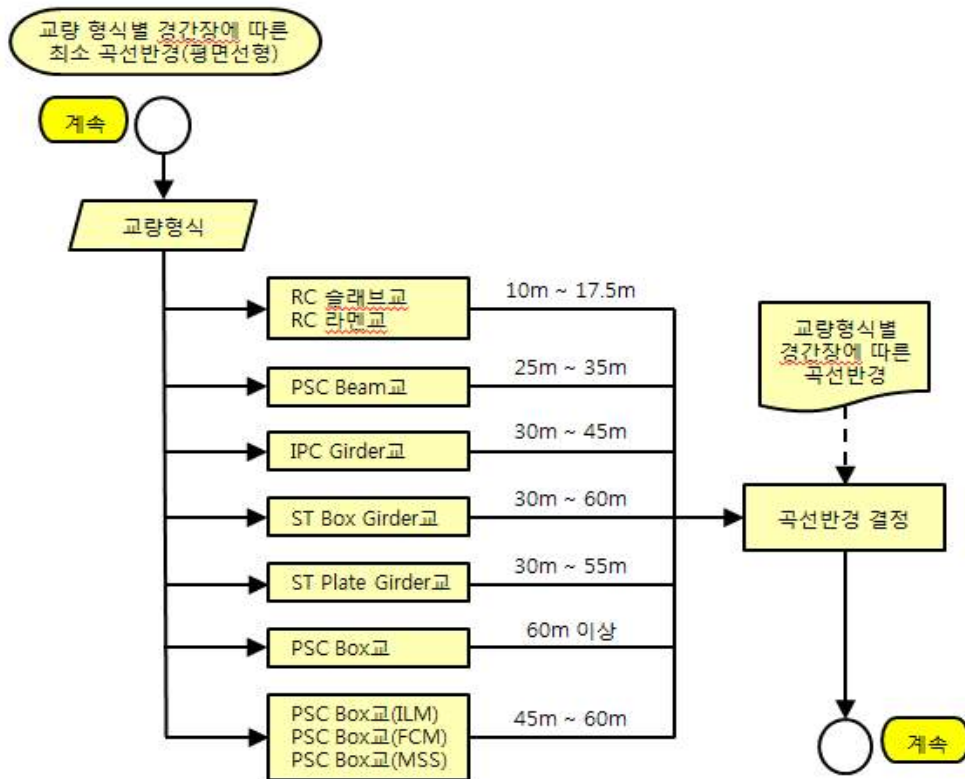
<그림 III-23>은 본 프로그램에서 적용하는 각각의 교량 형식에 대해 적용 가능 경간장을 나타낸 것이다.



[그림 III- 23] 교량 형식별 적용 가능 경간장

다. 교량 형식별 최소 곡선반경(평면선형)

교량 형식 선정 프로그램에서 교량 형식을 선정할 때에는 교량 가설 위치의 평면 곡선 반경을 고려한다. <그림 III-24>는 이 과정을 나타낸 것이다.



[그림 III- 24] 7 교량 형식별 경간장에 따른 최소 곡선반경

라. 교량의 다리밑 공간 확보 여부

교량의 가설 위치가 결정되면 교량 하부의 여건에 따라 다리밑 공간을 확보해야한다. 교량 형식과 경간장에 따라 거더 높이가 다르기 때문에 확보해야하는 다리밑 공간에 따라 적용 불가능한 교량 형식이 있을 수 있다. 교량의 소요 다리밑 공간 확보를 위한 중단 계획고는 다음과 같다.

도로 또는 철도 횡단 교량 계획 중단고 = 지반고 + 다리밑 공간 + 교량 높이

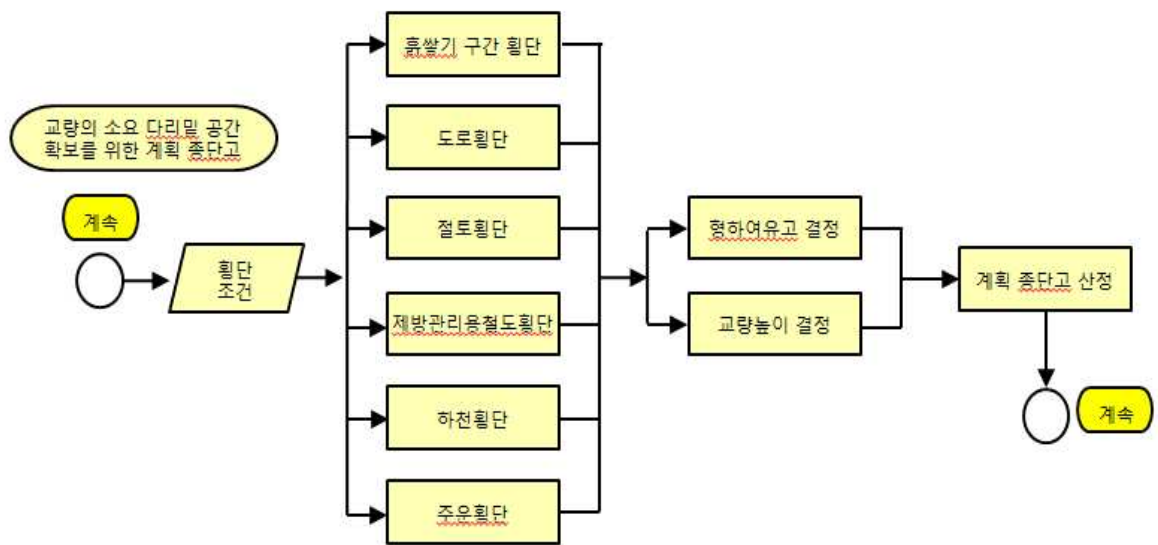
하천 횡단 교량 계획 중단고 = 계획 홍수위 + 다리밑 공간 + 교량 높이

여기서 교량 높이는 포장 두께, 슬래브 두께, 거더 높이, 교량 받침 높이 등을 고려한다. 본 프로그램에서는 교량 형식과 경간장 별로 거더 높이를 적용하고 포장(0.08m)이나 슬래브 두께(0.25m), 교량 받침 높이(0.4m)는 동일한 임의의 값을 사용한다. <표 III-21>은 교량 하부 여건별 일반적인 다리밑 공간을 나타낸 것이다. <그림 III-25>는 계획 중단고를 산정하는 흐름을 보여준다.

[표 III- 43] 다리밑 공간

구 분		다리밑공간(m)
흙쌓기 구간 횡단		5.0
도로횡단	고속국도,국도	5.0

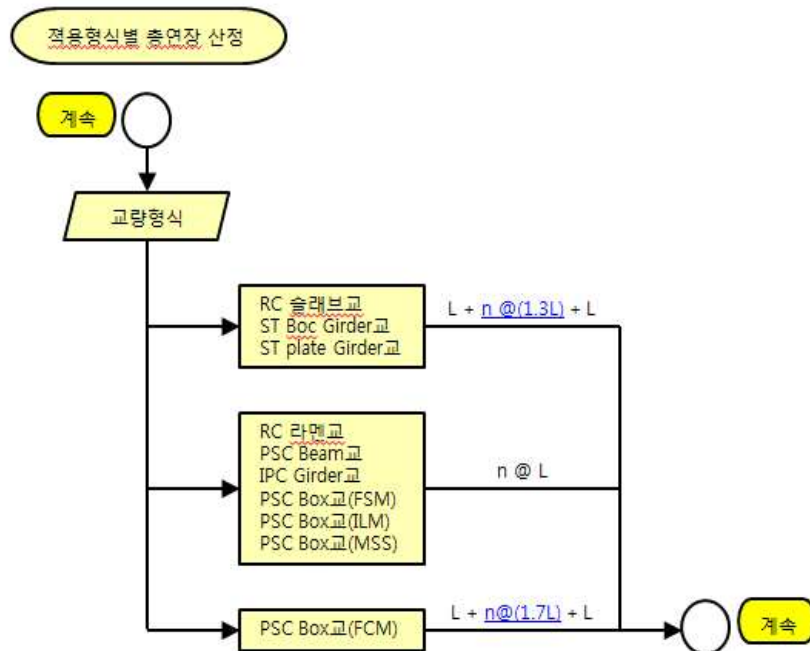
	군도	4.7
	리도,농로	4.7
철도횡단		7.0
제방관리용도로 횡단		4.5
하천횡단 (계획홍수량 대비)	200m ³ /sec 미만	0.6
	200m ³ /sec ~ 500m ³ /sec	0.8
	500m ³ /sec ~ 2,000m ³ /sec	1.0
	2,000m ³ /sec ~ 5,000m ³ /sec	1.2
	5,000m ³ /sec ~ 10,000m ³ /sec	1.5
	10,000m ³ /sec 이상	2.0
주운수로(운항가능 최고 수위 대비)		9.6



[그림 III- 25] 교량의 소요 다리밑 공간 확보를 위한 계획 종단고

마. 적용 형식별 총연장 산정

교량 형식과 경간장이 결정되면 총연장을 조정하게 된다. <그림 III-26>은 교량 형식별 경간 분할에 의한 총연장을 나타낸 것이다.



[그림 III- 26] 적용형식별 총연장

바. 물량 , 공사비 산출

예비타당성 단계에서 보통 사용하는 교량의 공사비 산출방식은 전체 교량 연장에 대해 단위 m 또는 단위 m2당 공사비를 통해 계산하는데 이 방식은 신뢰도가 낮다. 본 프로그램에서는 상부공에 대해서는 이전 방식으로 교량 형식에 따라 m2당 공사 단가를 이용하여 공사비를 계산한다. 하지만 하부공에 대해서는 교량의 시종점 위치에 의해 교대의 높이와 경간장 설정에 의해 교각의 위치와 높이가 산정되기 때문에 교대, 교각의 m당 공사단가를 이용하여 산정하고 여기에 기초공 공사비를 더하여 하부공 공사비를 좀더 정확하게 산정한다. 상부공 공사비와 하부공 공사비의 합이 10%를 부대공 공사비로 산정하여 총공사비가 계산된다.

<표 III-22>는 교량 형식 선정 프로그램에서 적용되는 상부공 단가와 교대, 교각공 단가 타입을 나타낸다. <표 III-23>은 교대, <표 III-24>는 교각의 타입별 단가이다.

[표 III- 44] 교량 형식에 대한 공사비 단가

구분		상부공 단가 (원/m ²)	교대공 단가 타입	교각공 단가 타입
RC 슬래브교		777,000	-	-
RC 라멘교		1455,000	-	-
PSC Beam교	25m	521,000	Type 1	Type 1

	30m	547,000	Type 1	Type 1
	35m	586,000	Type 1	Type 1
IPC Girder교	25m	666,662	Type 1	Type 1
	30m	663,643	Type 1	Type 1
	35m	689,355	Type 1	Type 1
	40m	742,177	Type 1	Type 2
	45m	766,525	Type 1	Type 2
	50m	810,695	Type 1	Type 2
ST.Box Girder교		단: 1,441,000 연: 1,310,000	Type 1	Type 2
ST.Plate Girder교		1,154,000	Type 1	Type 2
PSC Box Girder교	FSM	1,470,000	Type 2	Type 3
	ILM	848,000	Type 2	Type 3
	FCM	2,110,000	Type 2	Type 4
	MSS	902,000	Type 2	Type 3

[표 III- 45] 교대 타입별 단가

높이	교대 단가 (원/m)	
	Type 1	Type 2
7m	8,246,000	-
8m	8,421,000	9,014,000
9m	9,408,000	10,587,000
10m	10,013,000	11,646,000
11m	11,638,000	13,044,000
12m	12,756,000	14,379,000
13m	14,670,000	16,104,000

[표 III- 46] 교각 타입별 단가

높이	교각 단가 (원/m)		
	Type 1	Type 2	Type 3
~10m	117,074,000	117,074,000	290,441,900
11~15m	131,957,700	131,957,700	348,530,200
16~20m	140,987,700	140,987,700	418,236,300
20~25m	150,017,700	150,017,700	460,059,900
26~30m	159,047,700	159,047,700	502,656,600
31~35m	168,077,700	188,693,400	554,936,600
36~40m	177,107,700	199,718,400	610,430,300
41~45m			633,703,700

[표 III- 47] 기초공 단가

구분	기초공 단가 (원)
직접기초	-
파일-직접항타	215,000
파일-SIP	233,000
파일-SDA	245,000
파일-PRD	341,000
매스기초	70,000

교각 단가에서 Type4의 경우 $316,500 \times$ 상부공사비의 15%로 산정된다. <표 III-25>는 기초공의 단가이다.

6. 터널 설치 및 공사비 산정

가. 개요

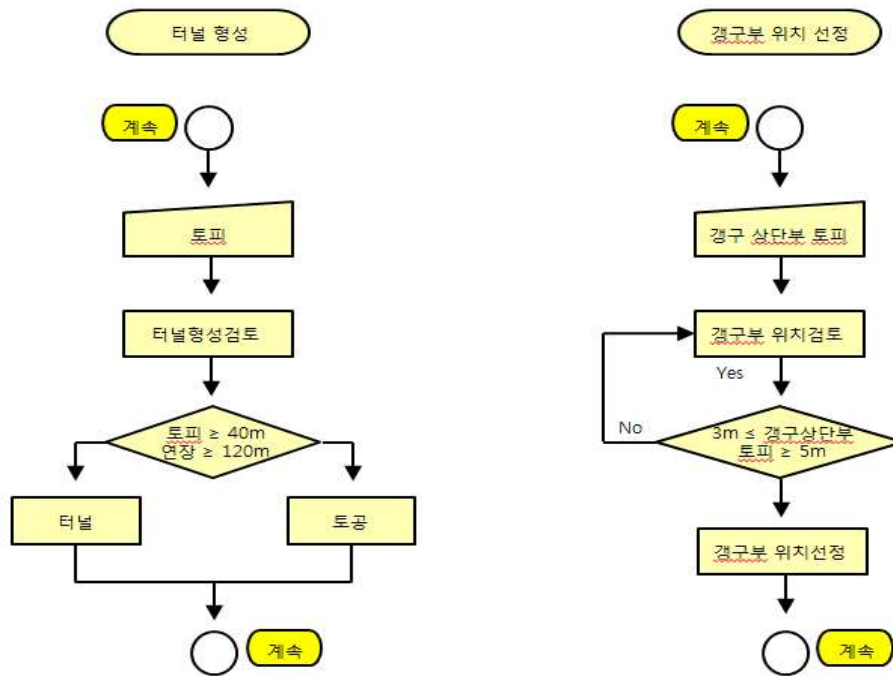
철도의 평면/종단 기하구조에 의해 터널의 시종점 위치와 터널 연장이 결정되고 단선, 복선에 따른 단위 공사비를 적용하여 전체 공사비를 산정, 그 상세 결과를 보고서에 출력한다.

[표 III- 48] 프로세스 정의

Unit	Process	정 의	주요 Input	주요 Output
01. 지형정보 분석		지형정보 분석하여 지반고 계산	지형 데이터	
02. 터널 형성 조건 검토		터널 설계조건에 부합되는 지형의 설정	토피고, 연장	선정된 시종점 위치
03. 갱구 위치 및 갱문형식 선정		일정 조건에 부합되는 갱구 위치설정	토피고,	갱구 위치
08. 물량, 공사비 산출		터널 선정으로 인해 발생된 물량 산출 및 공사비 산출	터널형식 데이터	물량 및 공사비

나. 터널 형성 조건 및 갱구부 위치 선정

터널 형식 선정 프로그램에서 터널의 형성 조건은 <그림 III-27>과 같이 토피고와 연장에 의해 결정된다. 최소 연장 120m 이상인 전 구간에 걸쳐 토피고 5m 이상이고 연장 구간중에 토피고 30m 이상인 구간이 존재할 때 터널이 형성된다. 갱구 위치는 갱구 상단부의 토피고가 3~5m 확보되는 위치를 기준으로 한다.



[그림 III- 27]터널 형성 조건 및 갱구부 위치 선정

다. 물량, 공사비 산출

단선, 복선에 따라 터널 총연장에 단위공사비를 곱하여 터널공사비를 산정한다.

제9절 철도노선선정 통합프로그램 개발

1. 수행범위 및 목적

본 연구의 목적은 IT기술(3차원시뮬레이션, 가상현실, 전문가시스템, GIS/GPS, GA, 최단경로알고리즘 등)을 이용하여 경제성을 고려한 안전하고 친환경적인 철도노선설계가 가능한 통합프로그램을 개발함에 있어, 그 핵심모듈인 유전자알고리즘(GA)과 최단경로 알고리즘을 적용한 철도선형 최적화 모듈을 위한 최적화 기법을 개발하는 것이다.

GA를 이용한 철도선형 탐색은 선형을 생성하는 부분과 선형을 평가하는 부분, 알고리즘에 의하여 최적선형을 도출하는 부분으로 크게 구분할 수 있다.

비용 사용되는 최단경로알고리즘은 다양한 대안노선을 생성하여 비교 검토하는데 효율적으로 활용될 수 있다.

효율적인 적용 순서는 최단경로알고리즘을 적용하여 대안노선을 생성한후 최적대안에 대해 미세조정시 GA를 적용하면 최대의 효과를 얻을 수 있다.

2. 선형최적화를 위한 유전자 설계

가. GALib

- GALib는 Mathew Wall(MIT)이 C++를 이용하여 만든 유전자 알고리즘의 구현을 위한 라이브러리로써 본 프로젝트에 사용된다.
- 45개의 클래스와 400여 개의 함수로 구성되어 있다.
- GALib는 기본적으로 유전자 알고리즘을 구현하기 위한 클래스와 함수들을 제공하지만 주어진 문제에 대한 해를 평가하는 평가함수는 반드시 사용자가 정해주어야 한다. 또한, 필요에 따라서 사용자가 필요한 함수를 재정의하여, GALib에서 제공하는 함수를 대체할 수 있다.

나. GALib 사용자화

사용자가 직접 자신의 게놈(genome)과 관련 연산자를 정의함으로써 GALib의 성능을 향상시키는 방법에 대해 알아본다. GALib를 본 연구 과제에 적용하기 위해서는 필수적인 항목이다. GALib는 프로그램적으로 판단할 때 템플릿 라이브러리(Template Library)라 할 수 있다. 즉, 사용자가 주어진 상황에 맞게 수정하여 사용하게끔 만들어진 라이브러리이다. 본 연구 과제에서도 선형 탐색 기법으로 사용되는 GALib를 연구 성격에 맞게 수

정하여 맞춤형 GAlib를 사용한다. 여기서는 GAlib를 어떤 방법으로 사용자화 하는지에 대하여 알아본다.

GAlib의 기능을 사용자화하기에 가장 좋은 방법은 새로운 클래스를 유도하는 것이다. 하지만 이러한 작업을 원하지 않는다면 새로운 함수를 정의하고 적용시킴으로써 GAlib에 있는 기존 클래스의 기능을 변경할 수 있다.

다. 선형최적화를 위한 유전자 설계

(1) 게놈(genome)설계 시 고려사항

본 연구에서 탐색을 위해 사용되는 유전자는 하나의 철도선형을 C++의 자료형으로 표현한 것을 말한다. 시점과 종점을 잇는 선형은 무수히 많이 생성될 수 있으며, 그 선형들 중 최적의 선형을 찾아내는 것이 본 연구의 목적이다. 하나의 선형을 하나의 유전자로 표현하고 이 유전자를 이용하여 유전자 알고리즘의 진화과정(선택, 교배, 돌연변이)을 거쳐 최적선형이 도출 되도록 하기 위해서는 다음에 제시하는 GA를 이용한 최적화문제 해결 시 반드시 고려해야 될 사항을 철도선형 최적화란 관점에서 바라 보아야 한다.

첫째로, 해결해야 할 문제를 유전자적인 형태로 표현하는 방법이다. 본 프로젝트에서 최종적으로 도출 되는 것이 최적철도 선형정보 이므로 새로 구성될 게놈은 가능한 많은 철도선형정보를 포함하는 구조로 설계 되어야 한다.

두 번째는 해가 될 가능성이 있는 것들의 초기개체군을 만들어내는 방법이다. GA는 진화를 수행할 때 초기개체군으로부터 알고리즘이 출발한다. 최적선형이 될 가능성이 높은 선형들을 초기집단으로 하여 진화를 수행시키는 것이 진화의 효율성도 높을뿐 아니라 글로벌 최적해를 도출할 가능성이 높아진다.

본 프로젝트에서는 초기선형구성 알고리즘을 적용하여 초기집단(평면선형집단) 구성 시 설계자의 의도가 반영된 선형을 포함시키거나 무작위 평면선형을 발생시켜 평가한 후 그 중 나은 선형을 초기 집단으로 설정한다.

셋째로 주어진 문제의 가능한 모든 해를 평가하는 적합도 평가함수인 목적함수를 설정한다. 본 프로젝트에서 사용될 목적함수는 공사비를 반환하게 된다.

넷째로 다음세대 생성 시 고려해야하는 선택, 교배, 돌연변이의 유전연산 방법을 규정해야 한다. GA의 성능은 교배연산자의 성능에 크게 의존하기 때문에 문제해결에 맞는 올바른 교배연산자를 정의할 필요가 있다.

다섯 번째로 돌연변이 연산자는 게놈의 패턴을 전환 시키는 역할을 하게 되며 이에 따라 탐색공간이 변경되어 전역(global) 최적해를 구할 수 있다.

라. 철도선형 게놈(genome) 설계

최적 철도선형 탐색연구에서 최종적으로 구하고자 하는 해는 최적 철도선형이다. 최적해를 유전자적인 형태로 구성하는 것이 GA를 적용한 탐색기법에서 우선적으로 고려해야 할 사항이라고 위에서 밝힌바 있다. 따라서 적절한 자료표현을 정의 하는 것은 GA를 사용하는 기술의 일부분이며 문제의 해를 완벽하게 나타낼 수 있는 자료구조를 구성해야 한다.

선형게놈 클래스는 GaGenome 클래스로부터 상속 시킨 후 철도선형을 정확히 표현할 수 있는 모든 정의를 멤버 변수화 시킨다. IP정보, 평면곡선정보, 측점정보, 종단 VIP정보, 종단곡선정보, VCP정보, 지반고정보, 계획고정보, 구조물설치정보, 공사비등 수많은 정보를 게놈이 가지고 있어야 한다.

또한 진화중 새로운 개체를 만들기 위해 게놈클래스에 정의된 게놈연산자를 사용하는 관계로 교배연산자, 비교연산자, 돌연변이연산자, 복사연산자등 각종 유전연산자를 철도선형 최적화 문제해결에 적절한 형태로 구성한다.

다. 유전연산자 설계

유전 연산자란 선택된 게놈을 서로 교배하고 돌연변이 시킴으로써 해당 게놈의 형태를 변형시키는 것을 의미한다. 게놈의 변형으로 보다 좋은 형질의 게놈으로 발전해 나아가는 것이므로 유전자 알고리즘에서 중요한 역할을 차지한다. 각 연산자의 개념을 설명하고, 본 프로젝트에서 어떤 방법으로 적용되는지에 대하여 설명한다.

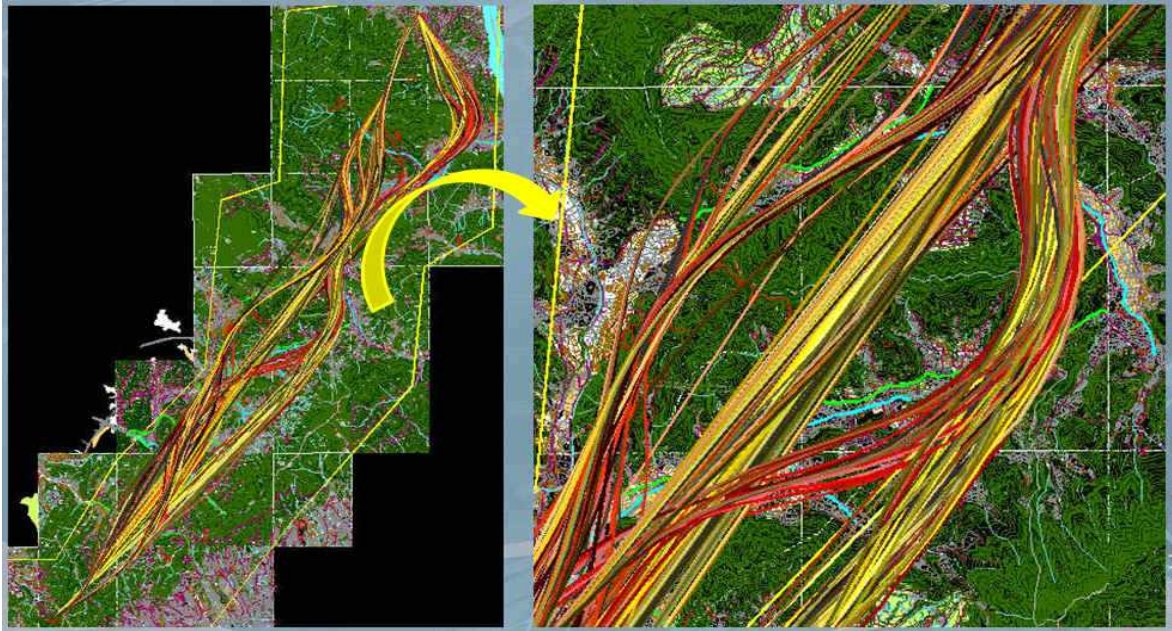
교배 연산자는 현 세대에서 선택된 두 개의 부모 선형을 통하여 새로운 두 개의 자식 선형 또는 하나의 자식 선형을 만들어 내는 과정을 말한다. 본 프로젝트에서는 One Point Crossover, Two Point Crossover, Arithmetic Crossover, Heuristic Crossover의 네 가지의 교배 연산자를 정의하고 있다. 진화 과정 중 임의의 순서로 적용되지만, 네 가지 연산자의 적용 비율은 동일하게 유지한다.

돌연변이 연산자는 선택된 하나의 선형을 변형 시켜 하나의 자식 선형을 만들어 내는 과정을 말한다. 본 프로젝트에서는 Uniform Mutation, Straight Mutation, Whole Non-Uniform Mutation, Non-Uniform Mutation의 네 가지의 돌연변이 연산자를 정의하고 있으며, 각 연산자는 진화 과정 중 임의의 순서로 적용되며, 적용 비율은 동일하다.

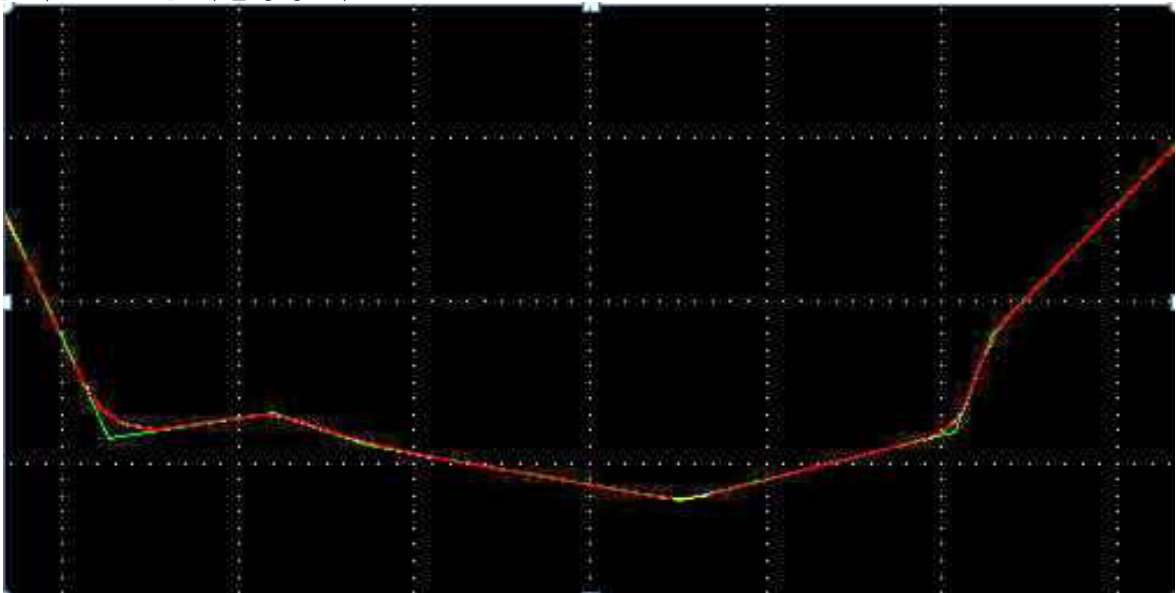
3. 선형생성

가. 평면 IP구성 및 곡선설치

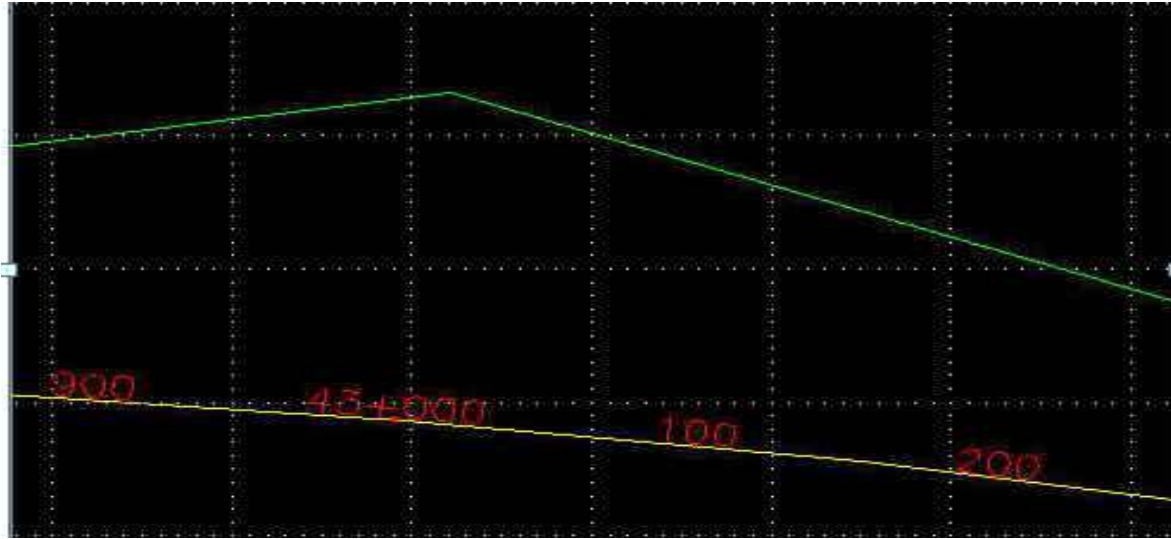
수백개의 대안선형을 생성하여 IP 및 곡선반경을 결정한다.



[그림 III- 28] 대안생성 화면



[그림 III- 29] IP 및 R 설치 화면



[그림 III- 30] 측점생성 화면

나. 측점생성 및 방위각계산

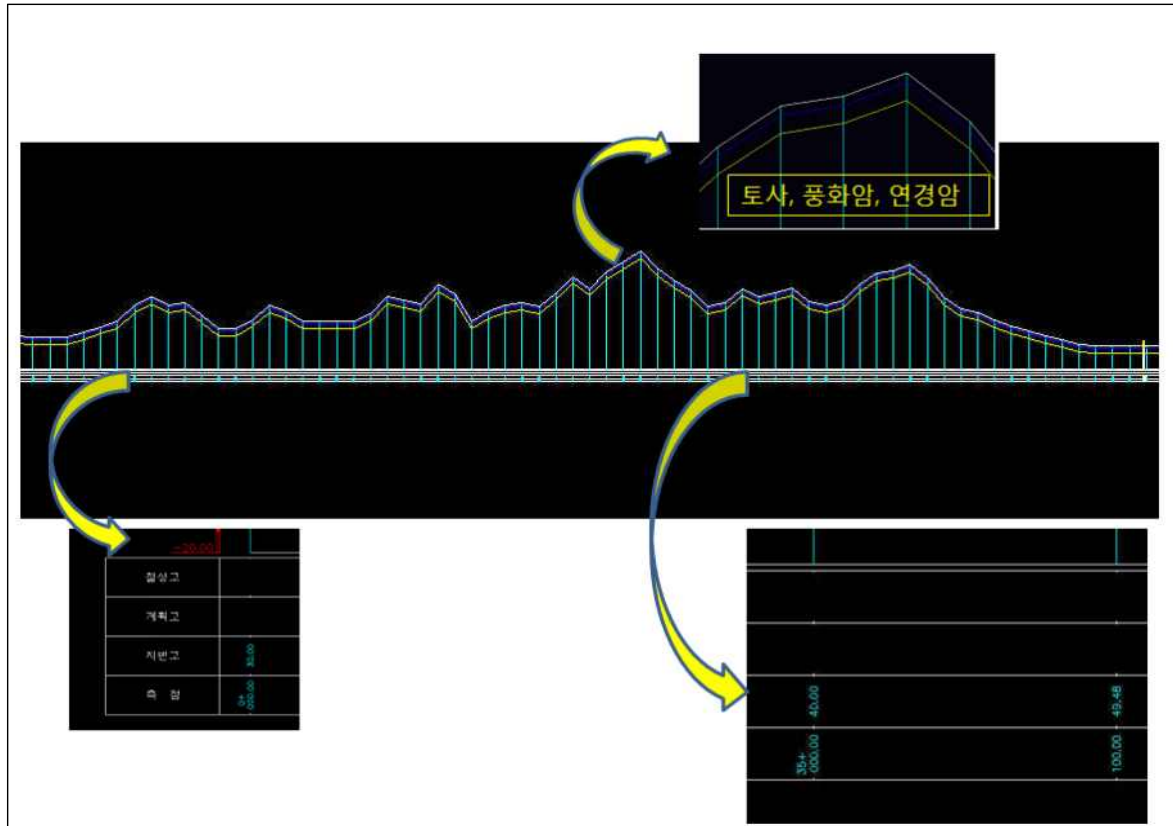
평면 곡선설치를 마치면 도로 중심선을 따라 측점을 설치한다. 시작 측점 및 측점간격은 최적화 옵션에서 별도로 지정할 수 있다. 측점 생성 시 각 측점의 평면좌표 및 방위각도 동시에 구한다.

다. 중심지반고 획득

점생성 시 구해진 측점좌표를 가지고 최적화 수행 전 구성된 TIN파일로부터 지반고를 구한다. 또한 최적화 옵션에서 예상 암선의 깊이를 입력받는데 그 입력 값을 이용하여 지반선 및 암선도 구성한다.

라. VCP 설정

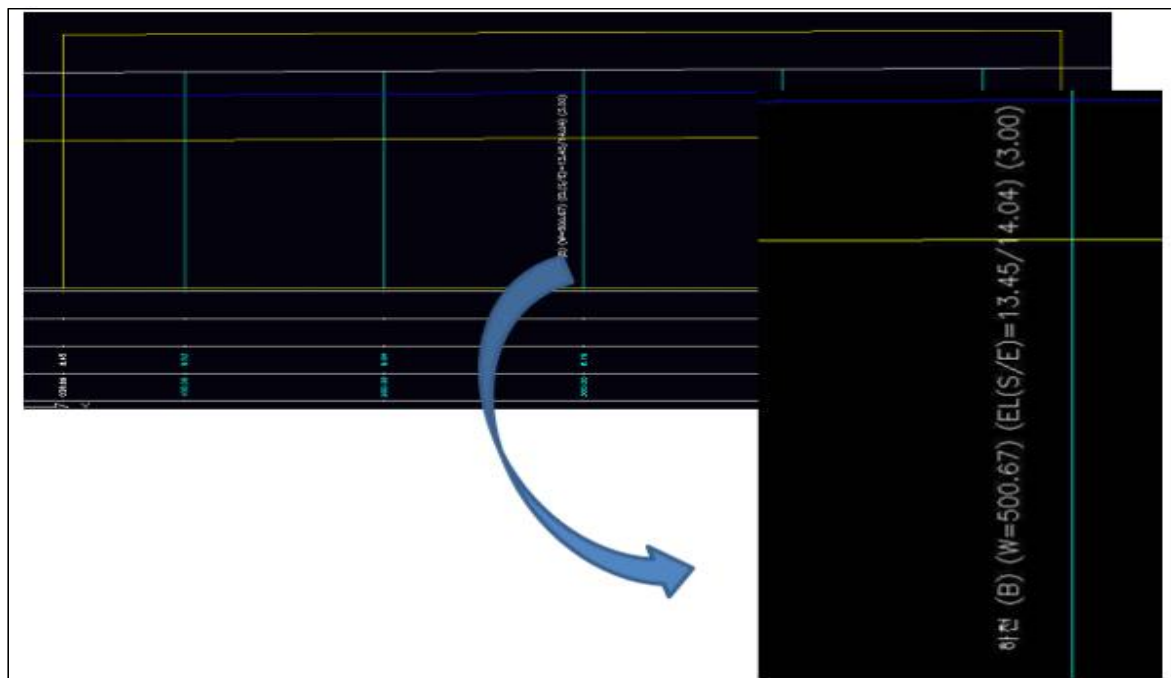
수치지도에서 평면선형이 지나가는 지점에 하천, 도로, 철도 등이 교차하는 경우는 선형 생성 시 종단면상에 표시한다. 이정보는 최적화 시작 전 수치지도로부터 구해진 GIS분석 데이터를 이용하여 실시간적으로 구한다.



[그림 III- 31] 중심지반고 및 암깊이 계산 화면



[그림 III- 32 하천 및 도로 등 VCP 상세설정 화면]

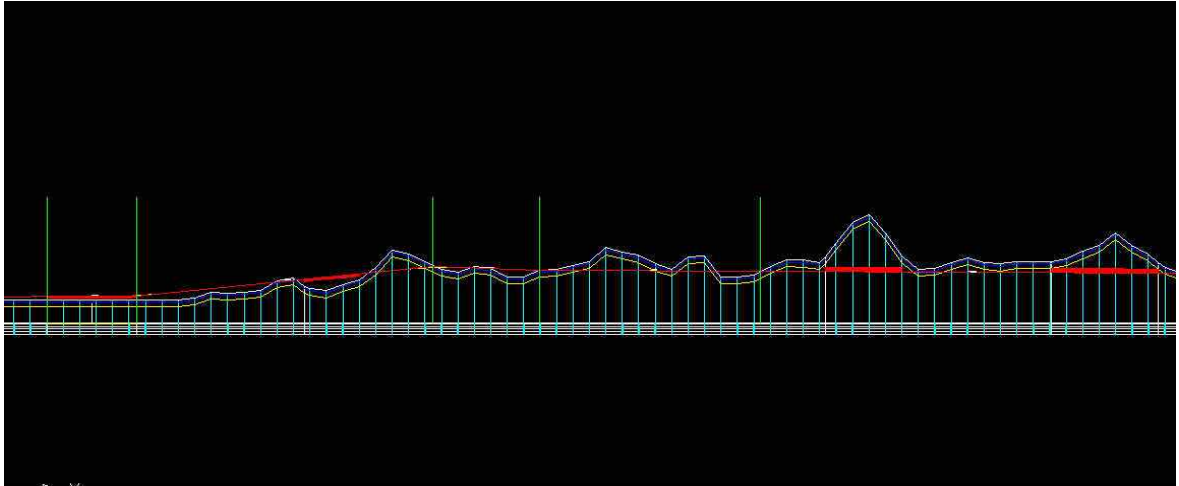


[그림 III- 33] VCP 자동탐색 및 종단상에 표현 화면

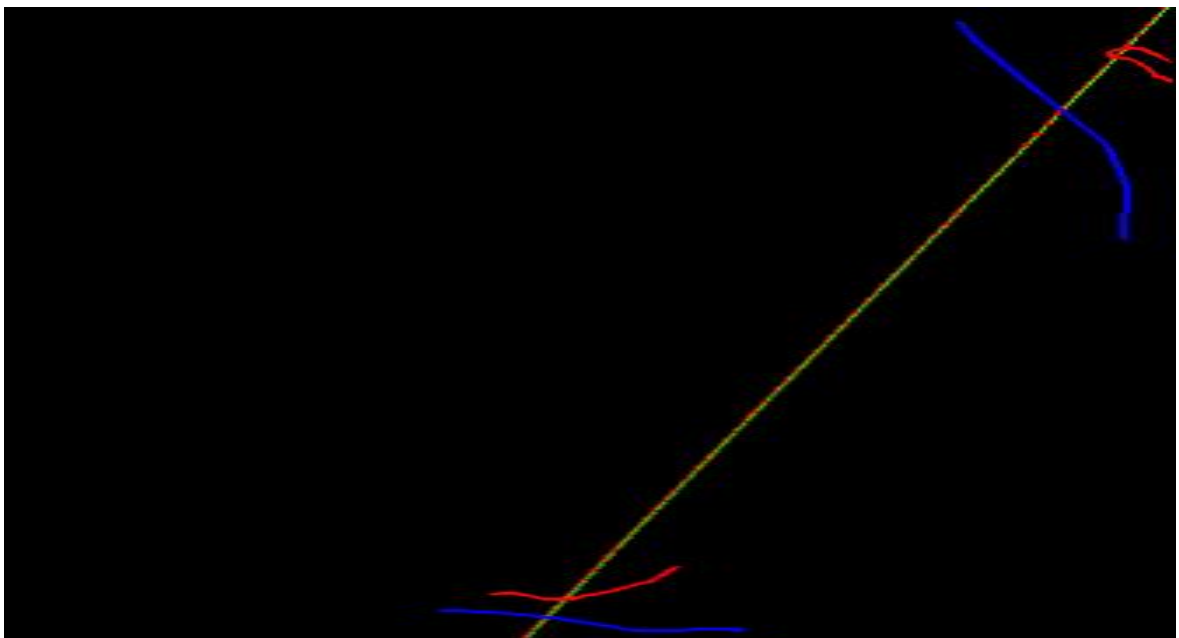
마. VIP구성 및 종단곡선 설치

VCP의 시중점은 플러스측점 이므로 평면 측점정보에 Insert한 후 VIP를 설정한다.

각각의 VIP X값은 평면선형 원곡선의 중심점이며 VIP의 Y값은 허용종단경사 범위내의 임의의 값이 된다. 최적화 옵션 중에서 시중점 계획고 및 시중점 종단경사를 지정한 경우는 옵션을 적용한 VIP를 생성한다. 다음 그림은 VIP를 설치한 그림이다.



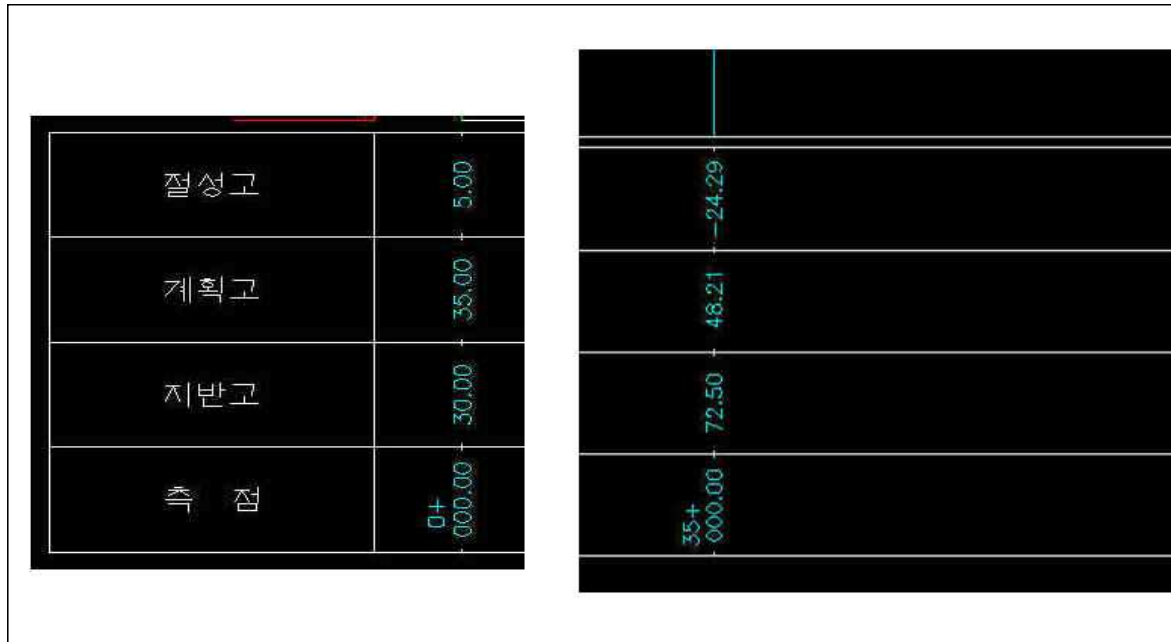
[그림 III- 34]VIP 및 종단곡선 설치화면



[그림 III- 35]VIP 및 종단곡선 설치화면

바. 계획고 계산

중단곡선 설치가 완료되면 계획고를 생성한다. 계획고는 교량/터널 설치 이전에 계산되는데 구조물 설치 시 각 측점별 절성고를 판별하여 구조물 자동설치의 입력 자료로 사용되기 때문이다. 계획고 계산은 각 VIP구간의 직선부와 곡선부 계산으로 나뉘며, 빠른 구조물 설치를 위한 사전작업으로 각 측점별 절성고(계획고-지반고) 정보를 여기서 구한다

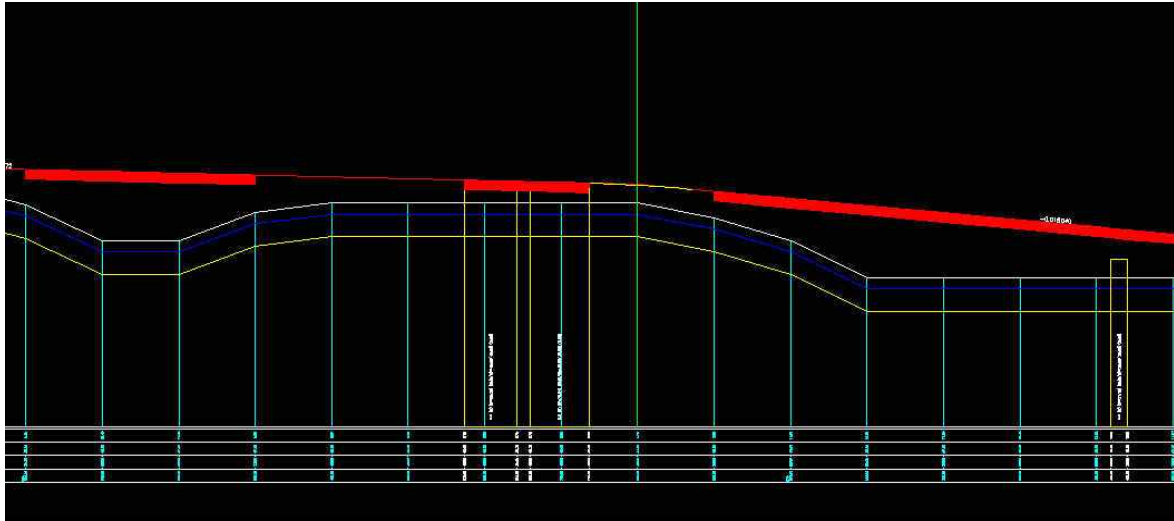


[그림 III-첨 36] 절성고 생성화면

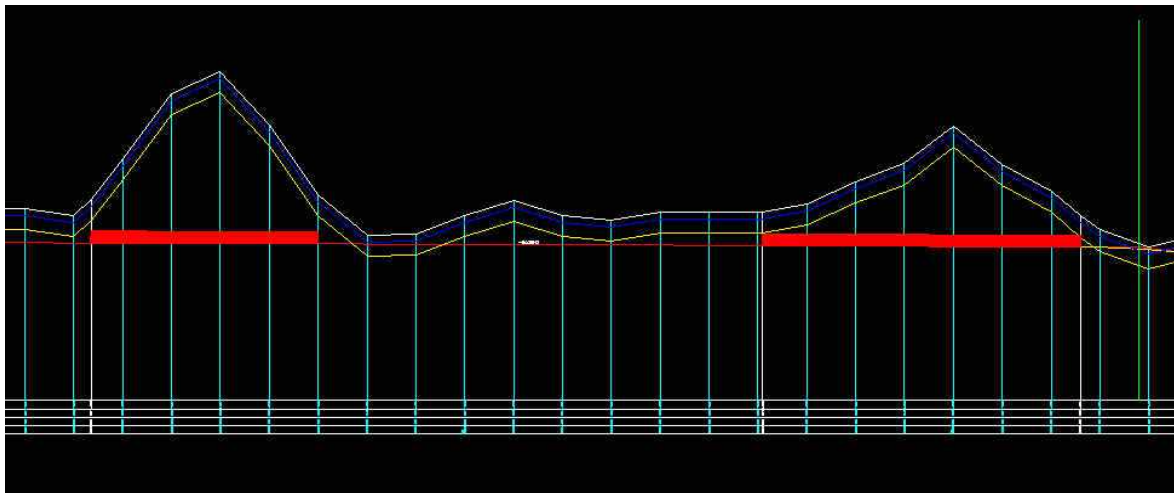
사. 교량/터널 설치

선형 생성 시 구조물 위치선정 알고리즘을 이용하여 보다 정확한 구조물 시중점을 구하여 중단 선형을 구성한다. 또한 구조물 시중점은 모두 Plus측점으로 처리되어 Plus측점 삽입에 소요되는 시간과 구조물선정 알고리즘의 수행시간 증가로 인하여 최적화시 전체 구조물 설치에 걸리는 시간은 조금 늘어났으나, 최적화시 다른 모듈들의 속도개선으로 구조물 설치시 소요시간이 전체 최적화 수행시간에 미치는 영향은 미미하다고 판단된다. 다음그림은 VCP가 위치한곳에 교량이 설치된 모습을 보여주며 성토고 12m이상 되는 곳 또한 교량이 설치 되었다.

터널 또한 터널 위치선정 알고리즘을 이용하여 설치하였으며, 임의의 평면 IP폴리라인에 대하여 곡선을 설치하고 측점을 생성한 후 VCP를 서치 하였다. 중단 지반고를 구한 후 VIP및 종곡선을 설치하고 교량/터널을 자동설치 하면 평면/중단설계가 일단락되며 1개의 IP 폴리라인에 대한 선형생성을 완료하였다. 일단 철도선형이 생성되면 생성된 선형에 대한 공사비를 계산한다.



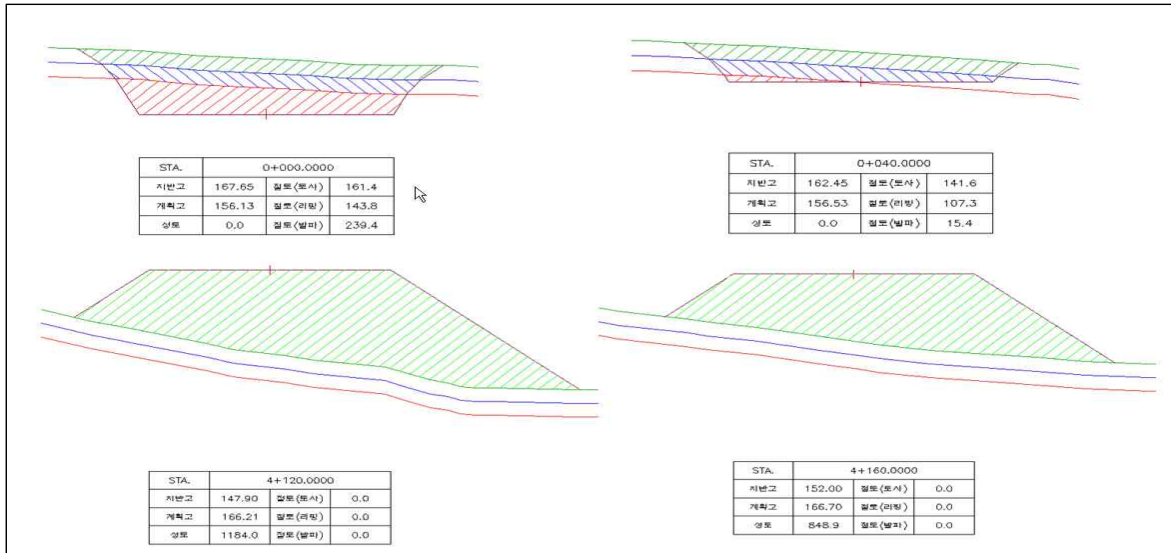
[그림 III-37] 교량설치 화면



[그림 III- 38] 터널 설치화면

아. 토공 공사비계산

R.O.W.를 구성한 도로선형은 토적표 산출을 위하여 측점별 토공량을 계산한다. 토공항목은 성토, 절토(토사), 절토(풍화), 절토(연경암)로 구분하고, 횡단면의 토공량계산 알고리즘에 의하여 신속하고 정확하게 측점별 토공 단면적을 계산한다. 다음은 토공부에 해당하는 각 측점에 대하여 토공 항목별로 단면적을 구한 그림이다.



[그림 III- 39] 각 측점별 토공면적을 구한 화면

전체 토공량은 측점별 토공면적에 기초하여 전후단면법을 사용하여 구하는데, 전후단면법이란 두 측점 사이의 면적물량을 체적으로 변환하기 위하여 (앞단면물량 + 뒷단면물량) ÷ 2 × 단면간거리 로 계산되며 횡단면구간의 평균물량을 구하기 위하여 사용되는 방식이다. 전후단면법을 적용하여 토공구간 각 측점에 대하여 물량의 체적값을 구한후 토적표를 작성하면 토공 공사비는 다음과 같이 계산된다.

- 성토 공사비 = 성토수량 × 성토단가
- 토사 공사비 = 절토(토사)수량 × 토사단가
- 풍화암 공사비 = 절토(풍화암)수량 × 풍화암단가
- 연경암 공사비 = 절토(연경암)수량 × 연경암단가
- 기타 공사비 = (성토공사비 + 토사공사비 + 풍화암공사비 + 연경암공사비) × 15 %

물량별 토공 공사비를 구한후 최종적인 토공공사비는 성토공사비 + 토사공사비 + 풍화암공사비 + 연경암공사비 + 토공금액의 15%인 기타공사비의 합으로 계산된다.

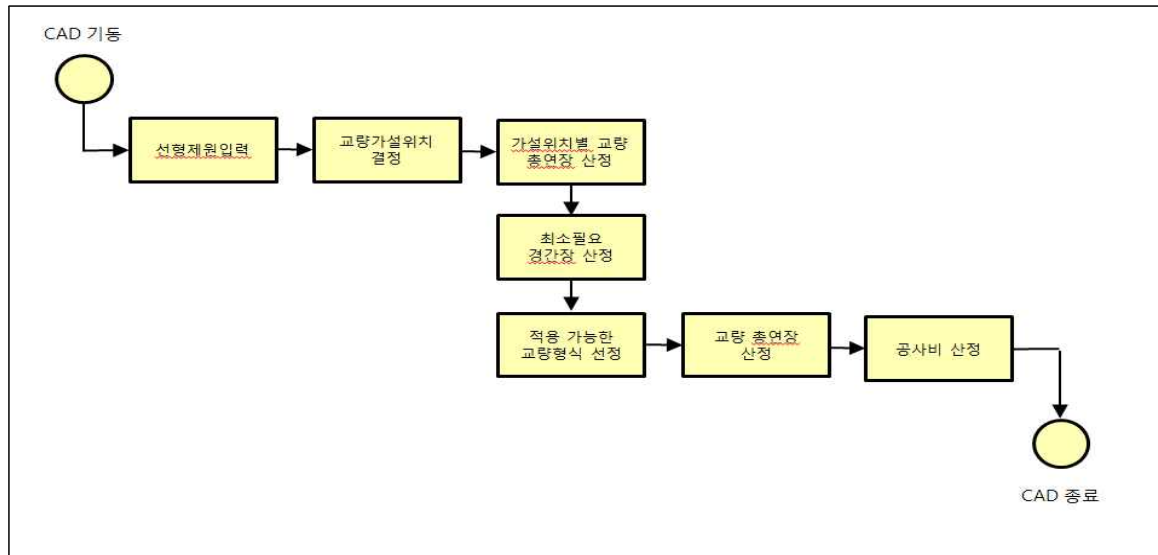
자. 교량공 계산

교량공은 다음과 같은 프로세스를 가진 세세부 과제의 교량형식선정 알고리즘에 의하여 교량형식이 결정되며 각각의 설치교량 형식이 결정되면 프로젝트 옵션의 교량형식별 공사비 단가 D/B에서 설치된 교량 단가를 가져와 다음과 같이 교량공사비를 산출한다.

- 각각의 교량 공사비 = 교량 연장 x 단복선에 따른 교량 형식별 단가

전체 교량공사비 는 교량1 공사비 + 교량2 공사비 ... + ... + 교량n 공사비 로 계산된

다



[그림 III- 40] 교량 형식 선정 프로세스 흐름도

[표 III- 49] 교량 형식 선정 및 평가 모듈

Sub Process	교량 형식 선정 및 평가 모듈		
Unit Process	정 의	주요 Input	주요 Output
01. 선형 제원 입력	평면, 종단 선형 제원 입력	본선선형 정보	
02. 교량 가설 위치 결정	교량 가설지역별 교량 가설 위치 결정	흙쌓기높이	교량가설 위치
03. 가설 위치별 교량 총연장 산정	교량 가설위치별 최소로 필요한 교량 총연장 산정	하천폭, 도로폭	최소 필요 교량 총연장
04. 최소 필요 경간장 산정	설치 구간별, 경간수별 최소 필요 경간장 산정	도로폭, 홍수량	최소 필요 경간장
05. 적용 가능한 교량형식 선정	흙쌓기 높이, 형하여유고, 적용가능한 경간장, 경간장에 따른 곡선반경 · 주거더높이 등을 고려한 교량 형식 선정	흙쌓기높이	교량형식
06. 교량 총연장 산정	적용 교량 형식별 총연장 산정	경간장	총연장
07. 공사비 산정		단가	공사비

차. 터널공 계산

- 각각의 터널 공사비 = 터널 연장 x 단복선에 따른 터널 단가

전체 터널공사비는 터널1 공사비 + 터널2 공사비 ... + ... + 터널n 공사비 로 계산된다

카. 배수공 계산

배수공 공사비 현재선형의 전체 토공구간에 대하여 각 횡단면별로 설치 연장을 계산한다. 성토부일 경우에는 J형측구를 설치하고 절토부일 경우에는 경사를 고려하여 산마루측구를 설치한다.

다음은 각 배수구조물에 따른 배수공사비 계산방법이다.

- 산마루측구 공사비 = 산마루측구 설치연장 x 단가
- J형측구 공사비 = J형측구 설치연장 x 단가
- 기타 공사비 = 배수공 공사비의 25 %

전체 배수공 공사비는 산마루측구 공사비 + J형측구 공사비 + 기타 공사비 로 계산된다.

타. 부대공 및 순공사비 계산

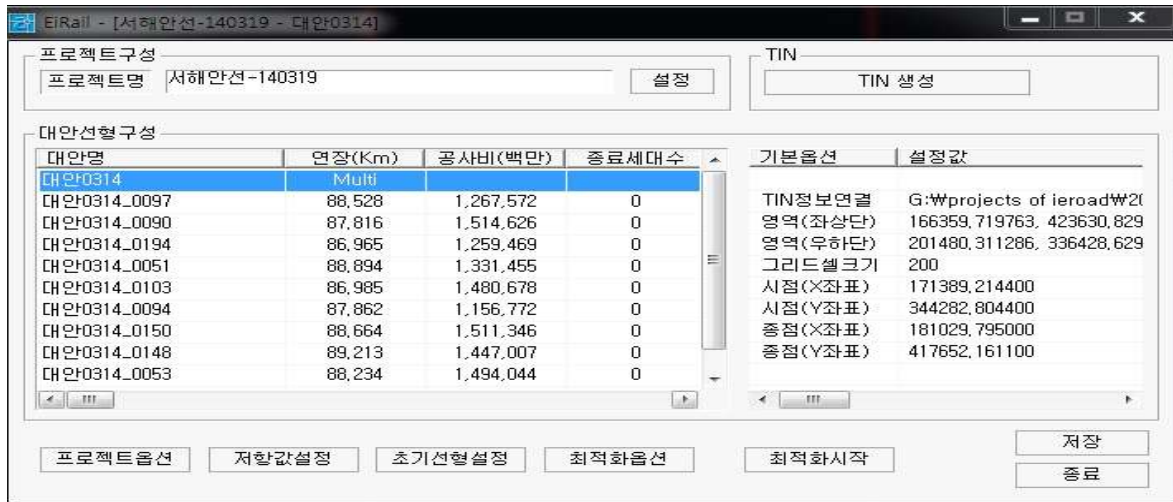
부대공 공사비는 (토공 공사비 + 배수공 공사비) x 15 % 로 계산한다.

부대공까지 계산이 되었으면 순공사비를 계산할 수 있다. 본 연구에서 순공사비는 토공 공사비 + 교량공사비 + 터널공사비 + 배수공 공사비 + 부대공 공사비의 합으로 계산되어진다.

4. 시스템 개발

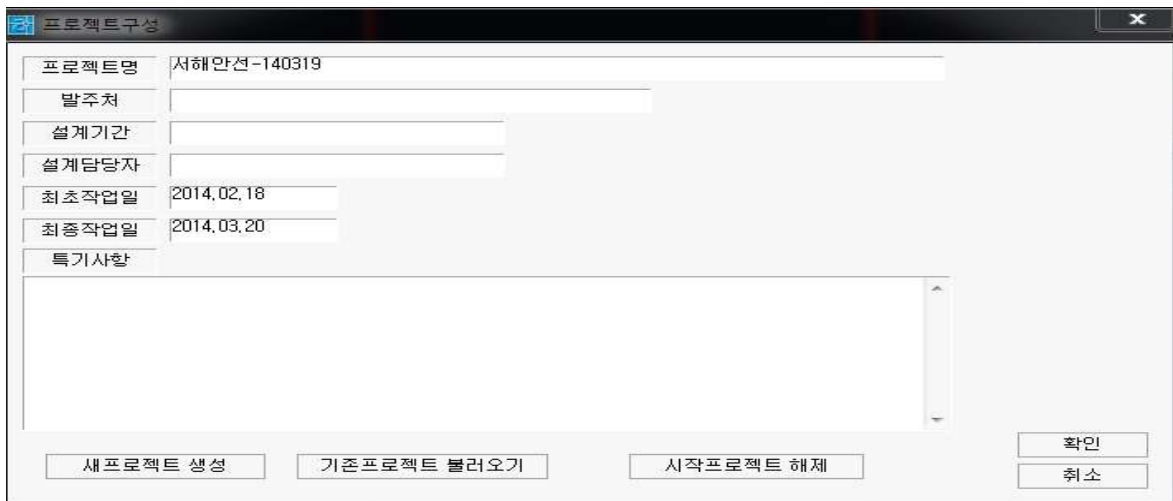
가. 프로젝트 설정(설정 > 새프로젝트 생성)

ei_rail 작업을 파일 관리를 위한 프로젝트의 생성/선택 등을 수행하는 과정



[그림 III- 42] ei_rail 초기화면

- ① 새프로젝트 생성 : 새로운 프로젝트 생성
- ② 기존프로젝트 불러오기 : 다른 프로젝트를 호출
- ③ 시작 프로젝트 해제 : 작업 프로젝트 해제/설정



[그림 III- 43] 프로젝트 구성 화면

나. tin 생성

지형정보를 분석하고 지반고를 구하기위해 TIN(Triangular Irregular Network; 삼각망) 생성

다. 기본 옵션 설정

ei_rail를 이용한 선형 최적화를 위한 지형 데이터, 검토 영역, 시종점 좌표등을 정의하는 프로젝트 초기 옵션 설정 화면

(1) 프로젝트 초기 옵션 설정 창

최적화 기본 자료를 정의하는 구역으로 tin화일/검토영역 정의/그리드 크기/시종점 좌표 등을 정의하며 옵션별 상세 내용은 아래표와 같음.

[표 III- 50] 옵션별 상세 내용

옵 션 명	상 세 내 용
Tin연결정보	참조할 tin화일
영역(좌상/우하)	검토 구역 정의
그리드셀크기	크기가 작을수록 정밀 검토가능하나 tin 구성 및 선형 길이 등을 종합적으로 고려하여 적절한 그리드 값을 결정해야 함.
시점/종점	검토구간 시·종점 좌표

(2) 대안선형 구성

- ① ei_rail에서 검토된 대안 노선이 표시되는 창
- ② 각 대안의 명칭 수정, 선형 추가, 삭제, 복사 등을 통하여 새로운 선형 검토를 수행하거나 필요 없는 선형의 삭제가 가능함.

라. 프로젝트 옵션

- ① ei_rail에서 초기선형 및 최적화시 기준에 되는 각 요소별 옵션을 정의함.
- ② 이 옵션의 설정에 따라 평면 및 종단 선형 요소들의 최소값을 기준으로 적정한 선형을 도출하고, 횡단옵션 및 단가 설정에 따라 최적화시 개략 공사비 산정등에 직접 영향을 미치는 요소임



[그림 III- 44] 프로젝트 옵션 설정

마. 평면옵션 : 평면 관련 옵션을 정의하는 창



[그림 III- 45] 평면옵션 설정 화면

- ① 속도/지역 설정 : 선로 등급 및 설계속도 정의
- ② 철도구분 : 단/복선 정의
- ③ 좌측폭/우측폭 : 철로 좌우측 폭 정의

바. 종단옵션 : 종단 관련 옵션 정의하는 참

종단옵션 설정

종단경사/계획고 설정

최대허용경사	0.025
시점계획고	13.12
중점계획고	10.13
시점종단경사	
중점종단경사	

교량/터널 설치기준

	설치	성절고	최소연장	연결거리
교량	☒	10	50	50
터널	☒	15	120	50

취소

[그림 III- 46] 종단옵션 설정 화면

- ① 종단경사/계획고 설정 : 선형최적화시 초기 종단선형 조건을 정의
- ② 최대허용경사 : 설계속도에 따른 최대 종단 경사
- ③ 시중점 계획고 : 검토 구간의 시점 및 중점 및 계획고
- ④ 시중점 종단경사 : 검토 구간이 전·후 연결 선형으로 이루어 졌을 경우 시·중점의 종단 경사 입력

사. 교량/터널 설치기준 : VCP 구간 및 구조물 설치 구간의 교량 및 터널 설치시 기준을 정의

- ① 성절고 : 구조물 설치 최소 성토 및 절토고 입력
- ② 최소연장 : 구조물 설치 최소 연장
- ③ 연결거리 : 동일 구조물이 연속적으로 설치되는 간격

아. 횡단옵션 : 횡단 관련 옵션 설정

[그림 III- 47] 평면옵션 설정 화면

- ① 횡단 옵션 설정 : 토공량 계산 방법 정의
- ② 토공부 경사 지정 : 토사/풍화암/연암(경암)의 절토부 경사
- ③ 횡단지반쪽 구하기 설정 : 좌우측 도로 횡단쪽 정의

자. 단가설정 : 공사비 산정을 위한 주요 공정별 기초 단가 입력

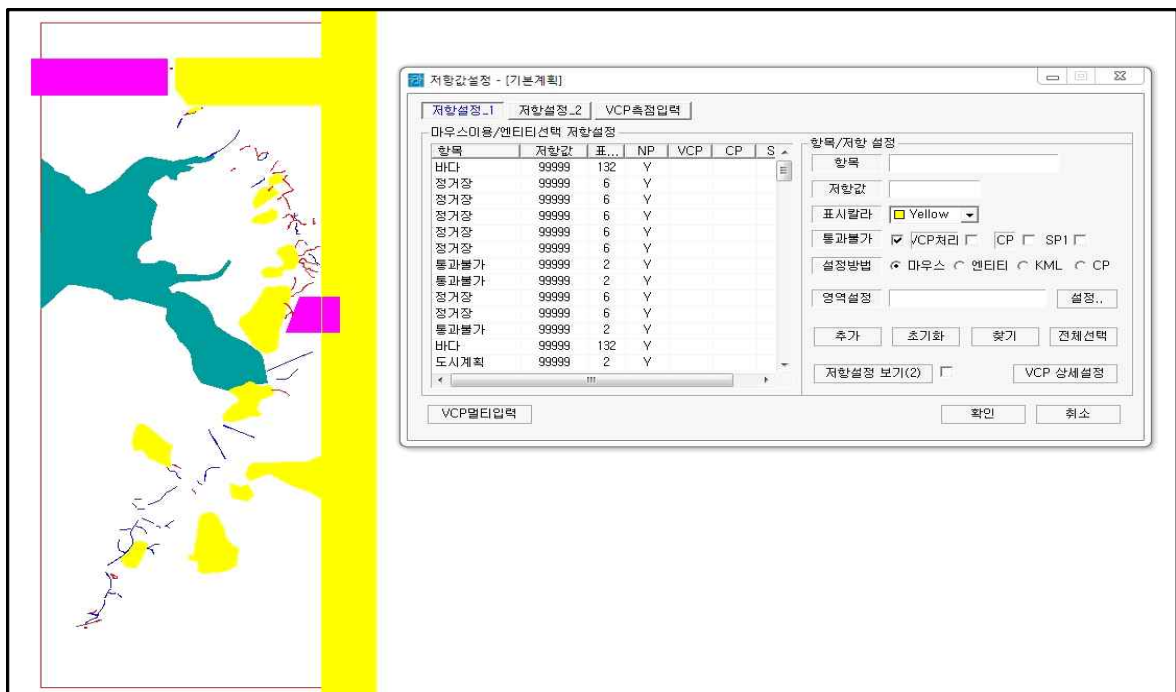
[그림 III- 48] 공사 단가 설정 화면

- ① 토공단가 : 쌓기/깎기부 암종별 토공 단가 정의
- ② 교량단가 : 단선/복선 교량 단가 정의
- ③ 터널단가 : 단선/복선 터널 단가 정의

- ④ 정거장 : 정거장 설치 공사비 정의
- ⑤ 궤도 : 궤도 공사비 정의
- ⑥ 건축 : 건축 공사비 정의
- ⑦ 시스템 : 시스템 설치 공사비 정의
- ⑧ 전차선 : 전차선 설치 공사비 정의
- ⑨ 부대비 : 부대비 비율 정의
- ⑩ 용지보상비 : 용지보상비 정의
- ⑪ 예비비 : (공사비+용지비+부대비)의 %로 정의

차. 저항값 설정

ei_rail의 초기 선형 검토 및 선형 최적화 과정에서 평면 및 종단 고려 요소를 정의하는 항목으로서 통과 불가 지역, 필수 통과지역, 하천, 기존도로 등을 정의함.



[그림 III- 49] 저항설정 보기 화면

- ① 통과불가 : 초기 선형 검토시 무조건 회피 지역
- ② VCP처리 : 초기 선형 검토시 통과방법에 따라 토공/교량/터널 등으로 통과하는 지점으로 하천, 기존도로 등의 정의 시 사용

카. VCP상세설정

하천, 도로, 기타 구조물 통과 구간에 대한 폭/통과높이/여유고 등을 정의하는 항목

[그림 III- 50] VCP 상세설정 화면

- ① VCP리스트 : 초기 저항 설정시 정의된 VCP 목록 표시
- ② 버텍스리스트 : 정의된 VCP의 각각의 절점에 대한 정의
- ③ 현재의 좌/우폭, 계획고, 여유고, 여유높이, 통과방법 등 표시
- ④ 버텍스정보 : 정의된 VCP의 각각의 절점에 대한 정보를 정의 및 수정
- ⑤ 좌/우측폭 : VCP의 좌우측 폭을 정의하고 정의된 폭에 따라 구조물의 최소 폭이 결정됨.
- ⑥ 계획고 : VCP 지반고를 기준으로 노선이 통과하는 계획고 정의
- ⑦ @elev : 지반고를 기준으로 elev 만큼 상부로 계획
- ⑧ elev : elev가 계획고
- ⑨ 여유높이 : 계획고에서 여유높이 정의
- ⑩ 통과방법 : VCP구간 통과 방법 정의하며 교량/터널/토공 중에서 선택

타. 초기선형 설정

ei_rail 선형최적화의 초기 단계의 프로젝트 옵션 및 저항 값을 설정된 조건을 고려하여 초기 노선대를 검토하는 과정

(1) 작업순서

특수저항 > Grid 정보생성 > 구간구성 > 분포별 저항구성

(2) 세부 옵션

- ① grid 생성 : ei_rail에서 초기선형 검토를 위한 지형 데이터를 격자형으로 구성하는 과정
- ② 구간구성 : 시종점 좌표를 기준으로 시종점을 정의
- ③ 분포구성/초기저항설정 : ei_rail에서 초기선형 구성을 위한 저항값을 설정

No	분포값	저항값	분포율(%)	SelfCNT
1	50.0 - 51.0	1.0	75.1	57753
2	51.0 - 52.0	2.0	0.1	95
3	52.0 - 53.0	3.0	0.1	109
4	53.0 - 54.0	4.0	0.1	112
5	54.0 - 55.0	5.0	0.2	131
6	55.0 - 56.0	6.0	0.2	127
7	56.0 - 57.0	7.0	0.2	120
8	57.0 - 58.0	8.0	0.1	105
9	58.0 - 59.0	9.0	0.2	118
10	59.0 - 60.0	10.0	0.1	106
11	60.0 - 61.0	11.0	0.2	119
12	61.0 - 62.0	12.0	0.1	102

[그림 III- 51] 초기선형 생성 초기 옵션 입력화면

파. 패스구성

주어진 조건을 고려하여 초기선형을 구성하는 과정

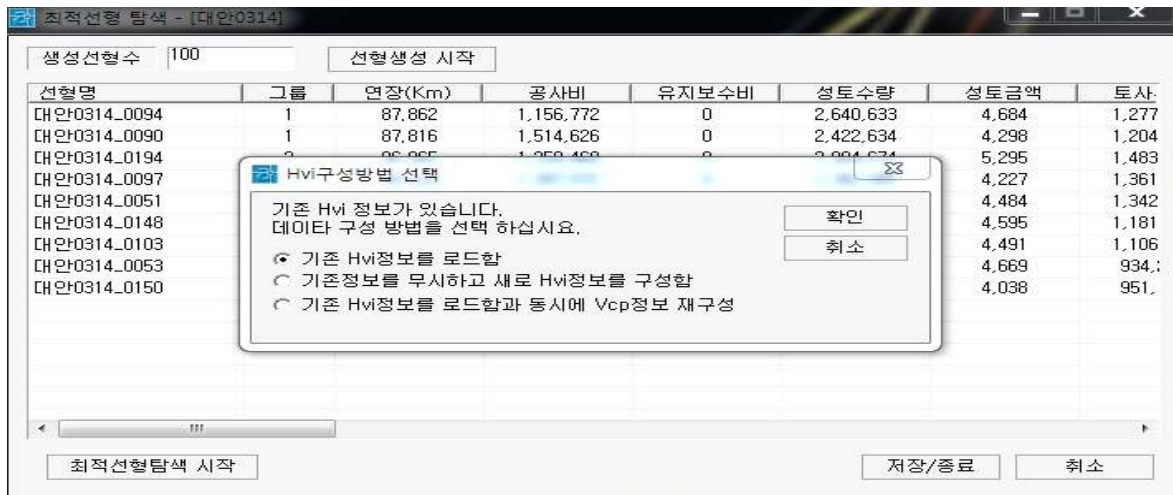
No	G	H	Divide	W	R	LEN	Gmul	v
1	0	3	D, W	1,0000	379	87745	70.0	0.0
2	0	3	D, W	1,0000	382	87960	70.0	0.0
3	0	3	D, W	1,0000	386	88075	70.0	0.0
4	0	3	D, W	1,0000	378	88406	70.0	0.0
5	0	3	D, W	1,0000	378	88840	70.0	0.0
6	0	3	D, W	2,0000	379	87745	70.0	0.0
7	0	3	D, W	2,0000	382	87960	70.0	0.0
8	0	3	D, W	2,0000	386	88075	70.0	0.0
9	0	3	D, W	2,0000	378	88406	70.0	0.0
10	0	3	D, W	2,0000	378	88840	70.0	0.0
11	0	3	D, W	3,0000	372	87658	70.0	0.0
12	0	3	D, W	3,0000	375	87866	70.0	0.0
13	0	3	D, W	3,0000	379	87981	70.0	0.0
14	0	3	D, W	3,0000	371	88314	70.0	0.0
15	0	3	D, W	3,0000	371	86752	70.0	0.0
16	0	3	D, W	4,0000	375	87654	70.0	0.0

[그림 III- 52] 초기선형 탐색 및 표시 화면

- ① 패스생성시작 : 프로젝트 옵션 및 초기 저항값을 고려한 초기 노선 형성

- 173 -

초기 선형 검토 시 도출된 개략 선형들에 대해 평면 선형 세부조정 및 중단 최적화를 통해 각 선형별 최적 선형을 완성하고 그에 따르는 안별 공사비를 산정하는 과정



[그림 III- 54]최적선형탐색시 Hvi구성방법 옵션 화면

(1) Hvi 구성방법 옵션

최적 선형 탐색을 위한 초기 세부옵션을 선택하며, 선택옵션에 대한 조건은 아래 표와 같음

[표 III- 51] 최적 선형 탐색을 위한 초기 세부옵션

선택옵션	선택 조건
기존 Hvi정보를 로드함	최초 선형 최적화 작업시 선택
기존 정보를 무시하고 새로 Hvi 정보를 구성함	초기선형 설정시 구간변경이나 분포구성/초기저항설정, 패스구성이 변경되는 경우 HVA를 재생성후에 선택 모드
기존 Hvi정보를 로드함과 동시에 Vcp정보 재구성	저항 설정 값이 변경되었을 경우에 선택

너. 중단 최적선형 탐색

초기 선형에서 도출된 수많은 선형들에 대해 중단 최적선형 탐색을 통한 공사비를 산정하는 과정으로, 여기서 노선대별 그룹화, 중단최적화, 공사비 산정 등이 이루어짐.

중단 최적화 탐색 - [대안0314-140319]

Selected Lane : 대안0314-140319_0007

중단선형구성 공사비리스트

선형명	그룹	연장(Km)	공사비
대안0314-1...	0	88,159	0
대안0314-1...	0	88,098	1,049,009
대안0314-1...	0	88,350	0
대안0314-1...	0	89,016	0
대안0314-1...	0	86,996	0
대안0314-1...	0	88,159	0
대안0314-1...	0	88,098	1,122,163
대안0314-1...	0	88,350	0
대안0314-1...	0	89,016	0
대안0314-1...	0	86,996	0
대안0314-1...	0	88,077	0
대안0314-1...	0	87,996	0
대안0314-1...	0	88,248	0
대안0314-1...	0	88,914	0
대안0314-1...	0	86,905	0
대안0314-1...	0	88,090	0
대안0314-1...	0	88,051	0

No	공사비	설토수량	설토금액	토사수량
24	1,210,387	2,000,931	3,550	1,580,175
25	1,220,326	1,991,389	3,533	1,568,284
26	1,242,134	1,940,012	3,442	1,542,238
27	1,257,263	1,905,797	3,381	1,527,167
28	1,240,352	1,839,798	3,264	1,596,731
29	1,269,969	1,767,118	3,135	1,571,154
30	1,272,375	1,759,430	3,121	1,568,962
31	1,178,803	1,801,072	3,195	1,661,811
32	1,175,975	1,782,212	3,162	1,682,887
33	1,177,179	1,764,968	3,131	1,683,927
34	1,177,096	1,769,403	3,139	1,681,099
35	1,175,975	1,771,311	3,142	1,682,649
36	1,187,874	1,724,413	3,059	1,684,091
37	1,191,425	1,712,599	3,038	1,687,434
38	1,192,563	1,716,014	3,044	1,690,305
39	1,194,511	1,714,401	3,041	1,697,844
40	1,190,524	1,649,011	2,925	1,765,982

선택선형 최적화시작 최적화옵션 종료

[그림 III- 55] 중단최적화를 통한 대안별 공사비 계산 화면

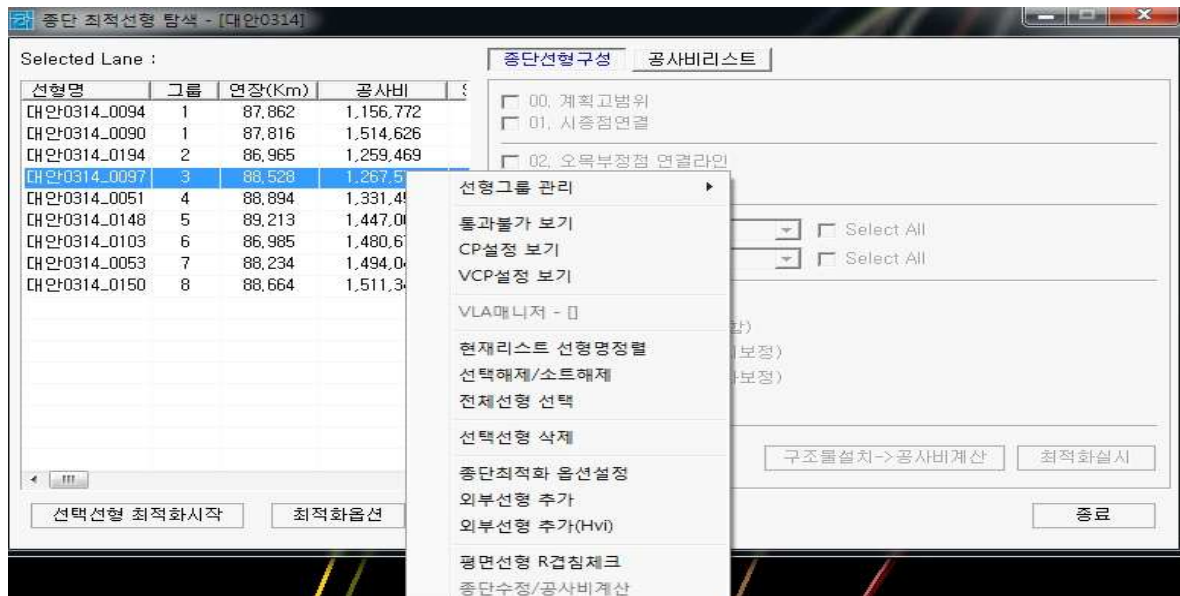
최적화 옵션 중에서 최적선형 검토시 필요한 옵션을 살펴보면 아래 표와 같음.

[표 III- 52] 최적선형 검토시 필요한 옵션

주요 옵션	선택 조건
중단곡선 처리방식	-중단 계획시 중단곡선 계산방식 L : 중단곡선 길이를 기준으로 중단곡선 설치 R : 중단곡선 반경을 기준으로 중단곡선 설치

더. 초기선형 그룹화 및 정보 확인

선형명을 선택한 후 우측 마우스를 클릭하면 아래 그림과 같은 창이 표시되며, <그림 III-55>와 같이 창에 표시된 각각의 옵션을 선택하여 작업을 수행함.



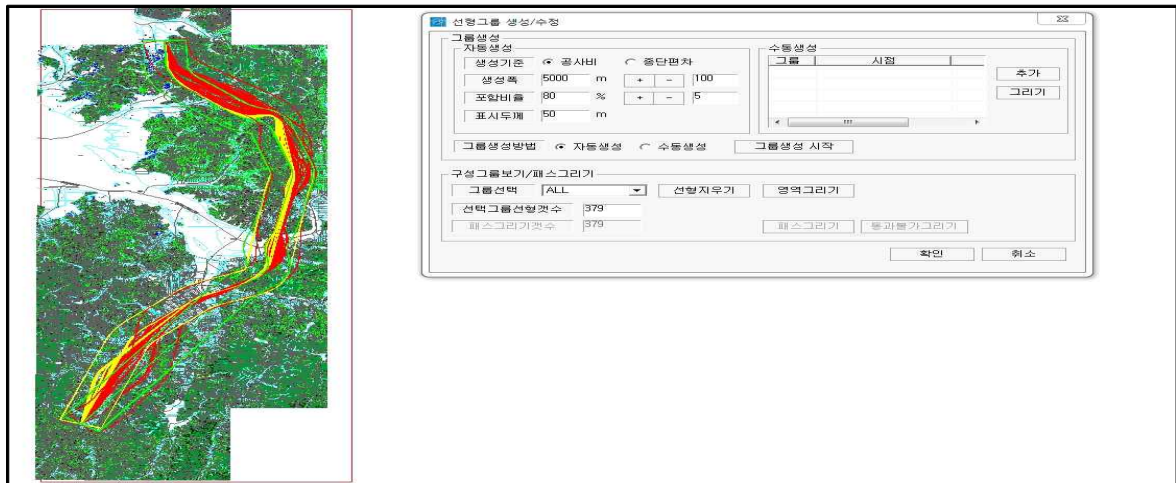
[그림 III- 56]선형 그룹화 및 정보 확인창

(1) 선형그룹관리

초기 선형 탐색시 도출된 수 많은 선형들을 일정 조건에 의해 유사한 형태의 선형들을 그룹화하는 과정으로 선형그룹관리를 선택하면 아래 표와 같은 하부 메뉴가 화면에 표시되며 각 메뉴별 세부 옵션 내용은 아래 표와 같음.

[표 III- 53] 선형들을 그룹화하는 과정

주요 옵션	세부 옵션 조건
선형그룹 생성/수정	도출된 초기 선형들에 대하여 조건에 따라 유사한 몇 개의 그룹으로 정의하여 선형대를 형성하는 옵션
그룹+ 공사비 선형정렬	선형 그룹화를 통해서 형성된 선형들을 조건에 따라 화면상에 정렬하는 옵션
그룹별 대안선형 그리기	선형 그룹별 선형을 화면에 표시해주는 옵션
그룹별 대안선형 비교표	선형 그룹별 대안선형에 대한 공사물량 및 공사비를 화면에 표시해주는 옵션



[그림 III- 57] 선형 그룹화 결과 화면

러. 종단 선형 최적화 및 공사비 산정

종단 선형 최적화를 통해서 공사비가 산정되는 과정으로 원하는 선형에 대한 종단최적화 과정과 공사비 산정과정을 화면에 구체적으로 표시해주는 방법과 많은 선형에 대하여 일괄적으로 순서대로 공사비를 산정하는 방법으로 작업을 수행 할 수 있음.

(1) 방법 (: 구조물설치→공사비계산)

선형 최적화시 공사비 산정과정을 자세하게 확인/검토하고자 하는 한개 선형에 대하여 종단 최적화와 공사비를 산정하는 옵션으로 약 780번의 종단선형 최적화를 통하여 토공, 교량공, 터널공 등의 세부 공종별 공사량 및 공사비 산정 과정을 화면에서 바로 확인이 가능함.

중단 최적선형 탐색 - [대안0314]

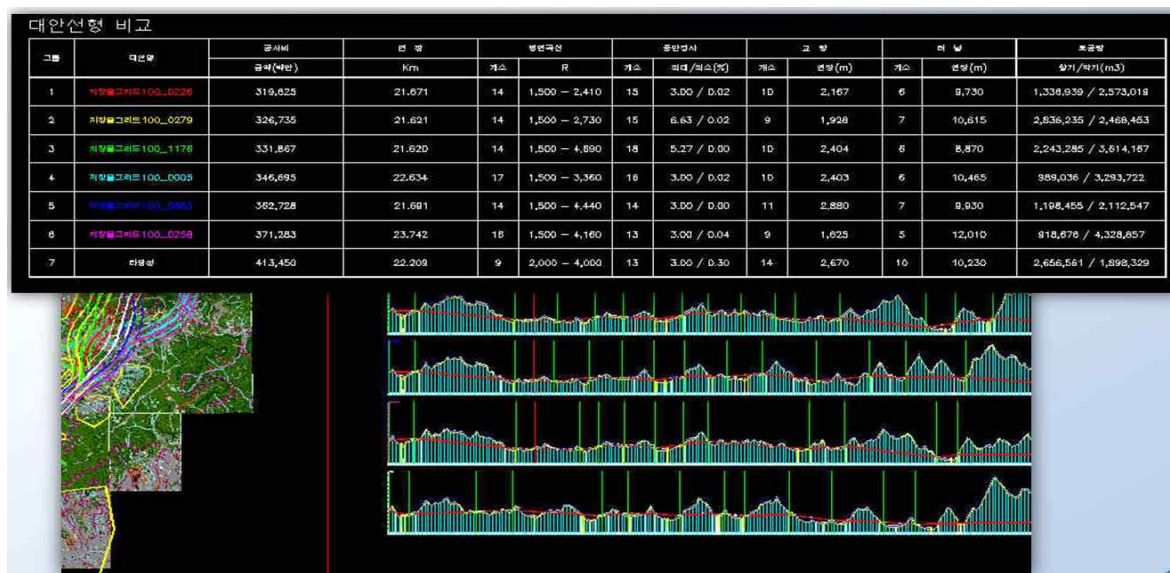
Selected Lane : 대안0314_0001

선형명	그룹	연장(Km)	공사비
대안0314_0001	1	87.862	1,322,342
대안0314_0002	1	87,816	1,514,626
대안0314_0003	2	86,965	1,259,469
대안0314_0004	3	88,528	1,267,572
대안0314_0005	4	88,894	1,331,455
대안0314_0006	5	89,213	1,447,007
대안0314_0007	6	86,985	1,480,678
대안0314_0008	7	88,234	1,494,044
대안0314_0009	8	88,664	1,511,346

No	공사비	OR/CR	유지보수비	페널티계
6	1,322,342	-30/-85	0	0
7	1,350,262	-30/-80	0	0
8	1,350,219	-30/-75	0	0
9	1,387,390	-30/-70	0	0
10	1,363,629	-30/-65	0	0
11	1,346,969	-30/-60	0	0
12	1,372,763	-30/-55	0	0
13	1,371,602	-30/-50	0	0
14	1,330,874	-30/-45	0	0
15	1,342,755	-30/-40	0	0
16	1,386,637	-30/-35	0	0
17	1,377,897	-30/-30	0	0
18	1,383,025	-30/-25	0	0
19	1,397,580	-30/-20	0	0
20	1,360,038	-30/-15	0	0
21	1,397,319	-30/-10	0	0
22	1,346,753	-30/-5	0	0

선택선형 최적화시작 최적화옵션 종료

[그림 III- 58] 종단선형 최적화 진행 화면

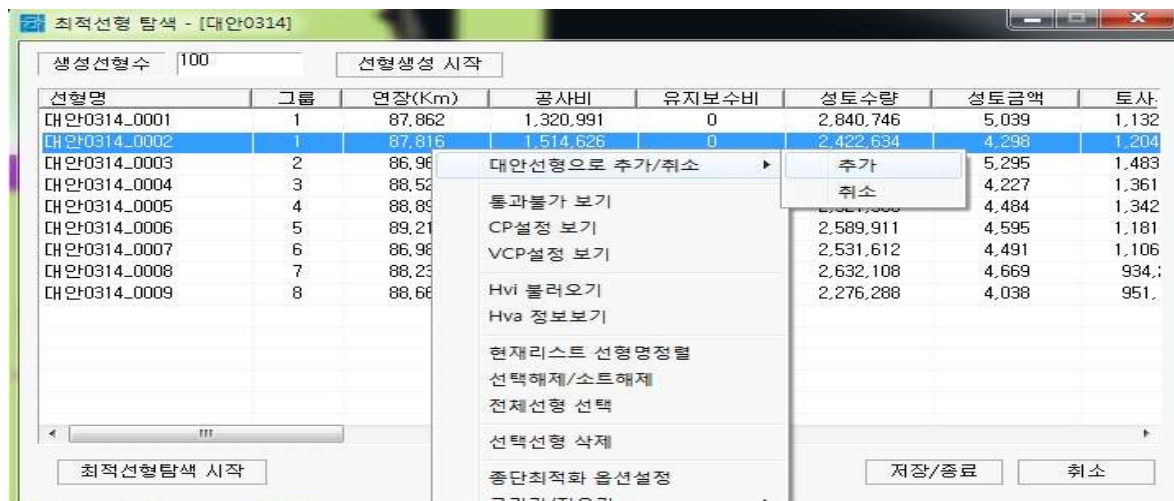


[그림 III- 59] 대안별 최적 선형 및 공사비 출력 화면

며. 대안 선형 구성

최적선형 탐색 완료 후 생성된 많은 선형 중에서 특정 선형을 대안 혹은 최적으로 선택하여 별도의 선형으로 구성하기 위해서 진행되는 작업으로 이 과정을 통해서 최종 대안선형 및 최적 선형이 도출됨.

(1) 작업순서 : 특정 선형명에서 마우스 우측 클릭 > 대안선형으로 추가/취소 > 추가



[그림 III- 60] 특정 선형 추가 시 작업 화면

대안선형 추가 후 최적화 과정을 빠져 나오면 추가된 대안 선형을 화면상에 확인이 가능함

프로젝트구성

프로젝트명

서해안선-140319

설정

TIN

TIN 생성

대안선형구성

대안명	연장(Km)	공사비(백만)	종료세대수
대안0314_0090	87,816	1,514,626	0
대안0314_0194	86,965	1,259,469	0
대안0314_0051	88,894	1,331,455	0
대안0314_0103	86,985	1,480,678	0
대안0314_0094	87,862	1,156,772	0
대안0314_0150	88,664	1,511,346	0
대안0314_0148	89,213	1,447,007	0
대안0314_0053	88,234	1,494,044	0
기본계획			
대안0314_0002	87,816	1,450,838	0

기본옵션

설정값

TIN정보연결	G:\Wprojects of leroad\W20
영역(좌상단)	166359, 719763, 423630, 829
영역(우하단)	201480, 311286, 336428, 629
그리드셀크기	200
시점(X좌표)	171389, 214400
시점(Y좌표)	344282, 804400
종점(X좌표)	181029, 795000
종점(Y좌표)	417652, 161100

프로젝트옵션

저항값설정

초기선형설정

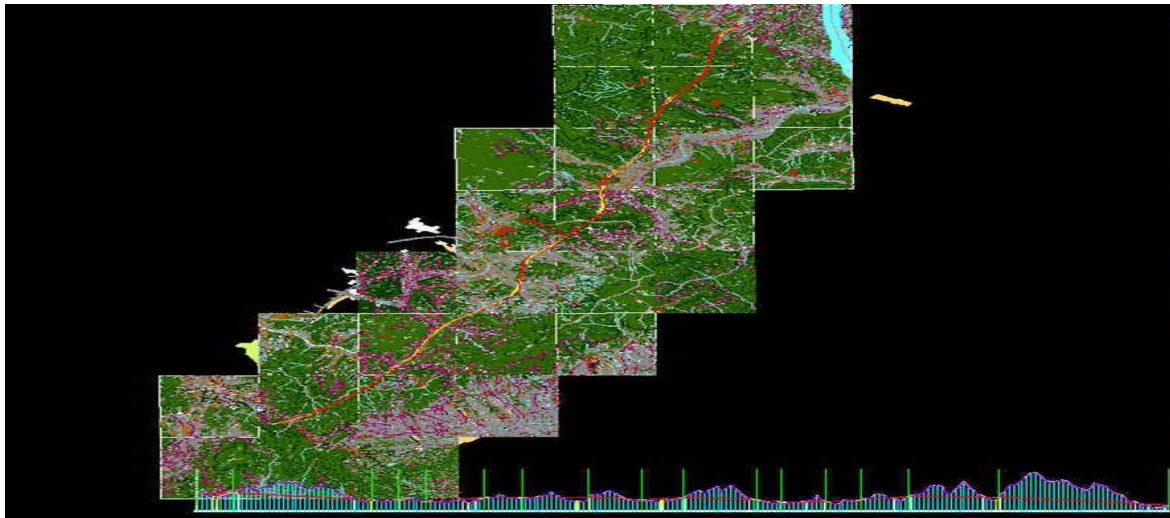
최적화옵션

최적화시작

저장

종료

[그림 III- 61] 최적화 완료된 대안선형 도출 화면



[그림 III- 62] 최적안 종평면도 출력 화면

5. 최적화 완료 대안 선형 정보 활용

최적화 과정을 거쳐 도출된 많은 선형중에서 선정된 몇 개의 대안이나 최적 선형에 대하여 각각에 대한 다양한 분석 정보를 파일로 출력하여 활용 가능하며, 출력 데이터는 평면 선형 좌표 및 종단 계획고 등의 기본적인 데이터뿐만 아니라, 공종별 세부 산출 물량 및 공사비, 사고율 분석 보고서, 주행 안전성 산정 결과 등의 자료의 출력이 가능하여 각각의 선형 들에 대한 종합적인 비교 및 판단의 자료로서 활용이 가능하고, 평면 및 종단 데이터, 구조물 현황 등을 상용 실시설계 운용 프로그램에서 읽어 들일 수 있는 자료의 형태로 내보내거나, 자료를 읽어 들일 수 있는 기능도 보유함.

(1) 작업순서 : 대안명에서 우측 마우스클릭 >

(2) 대안선형 정보 현황

ei_rail 최적화 과정의 결과로 도출 가능한 선형 정보는 아래 표와 같음.

[표 III- 54] ei_rail 최적화 과정의 결과

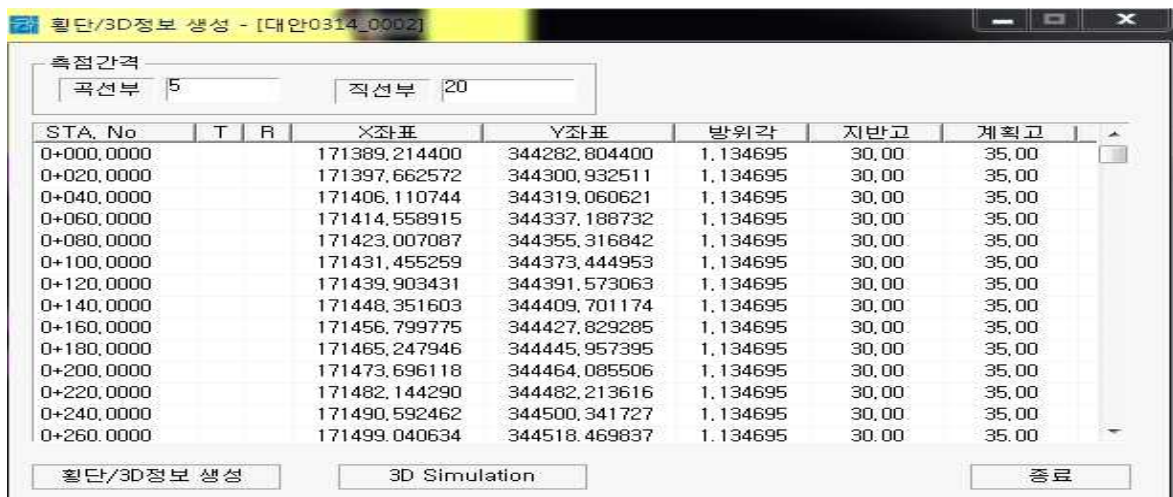
선형 정보	정보 세부 내용
상용S/W data input/output	-input : 상용S/W 에서 작성한 평면/종단/구조물 계획 데이터를 ei_rail로 불러드림 -output : ei_rail에서 생성된 대안별 선형데이터(평면/종단/구조물)를 상용S/W에서 사용 할 수 있도록 데이터를 작성
선형분석 보고서 출력	ei_rail 최적화 후 도출된 대안에 대한 평면/종단/구조물/공종별 공사비 등을 excel파일로 출력

6. 3D 시뮬레이션

ei_rail에서 최적화 완료후 생성되는 선형들에 대하여 3D 시뮬레이션을 통하여, 노선 건설 완료 후 주행 환경을 구현 하는 기능 별도의 복잡한 과정을 거치지 않고 ei_rail 시스템에서 시뮬레이션 구현 가능 주행속도 및 주행 시선 높이의 자유로운 변경 가능

가. 작업순서

최적화 완료된 대안명중에서 3D 시뮬레이션 작업 선형 우측 마우스 클릭 > 3D simulation > 3D/정보 생성 > 3D Simulation > 시작



[그림 III- 63] 3D 시뮬레이션 횡단/3D정보 생성 화면

나. 주요옵션 설정

- ① 측점 간격 : 3D 시뮬레이션 작업을 위한 대안의 측점 간격 설정 (곡선부/직선부)
- ② 구간갯수 : 전체 연장에서 3D 시뮬레이션 구간 분할 개수

제 4 장 3D Simulation 프로그램개발

● 제1절 3D 시뮬레이션 기술 개발

제10절 3D 시뮬레이션기술 개발

1. 개요

철도 경관 시뮬레이션 프로그램은 설계 데이터를 바탕으로 3차원모델을 만든다. 이렇게 구성된 모델을 통해 입체적인 철도 형상을 확인해 볼 수 있고, 또, 철도 위를 직접 시험 운전 해 볼 수 있다.

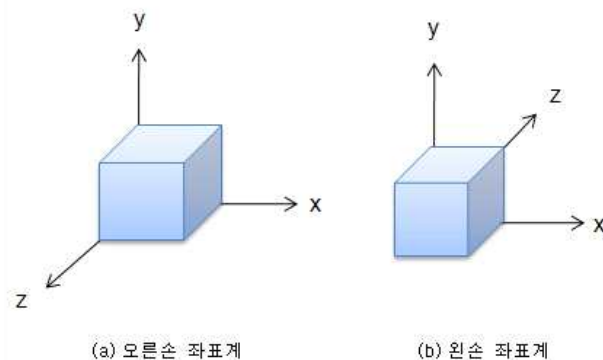
많은 VR(Virtual Reality)들이 존재하지만 설계데이터를 바탕으로 자동으로 모델링을 구성해 주는 프로그램은 없다. 설계 즉시 입체적인 가상 철도를 확인해 볼 수 있도록 경관시뮬레이션 프로그램을 제공하여 가시적인 판단을 돕고 설계의 정확도를 높이고자 한다.

2. 3D 기초 이론

(1) 3차원 좌표계

일반적으로 컴퓨터 그래픽스에서 사용하는 좌표계인 직교 좌표계(Cartesian Coordinate System)에서는 z 축의 방향에 따라 왼손 좌표계와 오른손 좌표계로 구분된다. 주먹을 원점에 두고 엄지 손가락을 x , 검지 손가락을 y 방향으로 맞췄을 때 중지 손가락의 방향을 z 축으로 한다.

왼손이 맞으면 왼손 좌표계이고, 오른손이 맞으면 오른손 좌표계이다. DirectX는 왼손 좌표계를, OpenGL은 오른손 좌표계를 사용한다.



[그림 IV- 1] 좌표계

(2) 벡터

어떤 장소의 위치를 물을 때 우리는 어떻게 대답하는가? 여기서부터 '어느 방향'으로 '얼마만큼' 떨어져 있다고 얘기해야 한다. 이처럼 방향과 크기(멀리 떨어진 정도) 전부를 표현해야 할 때 벡터를 사용한다.

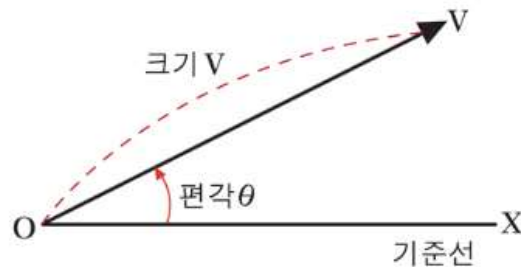
(가) 스칼라와 벡터

스칼라가 크기만을 가지고 있는 양임에 비해 벡터는 크기와 방향을 가지고 있으므로 두 가지 정보 모두를 나타내야 하는 양을 표현하기 위해서 쓰인다. 속도, 가속도, 힘, 전기장, 자기장 등 대부분의 중요한 물리량들이 그러한 예이다. 벡터(량)을 스칼라(량)과 구별하는 데는 일반적으로 그

양(量)을 표시하는 기호 a 에 화살표를 붙인 $a \rightarrow$ 로 표시하고 크기 방향을 그 크기에 비례하는 선분에 화살표를 붙여 나타낸다.

(나) 벡터의 연산

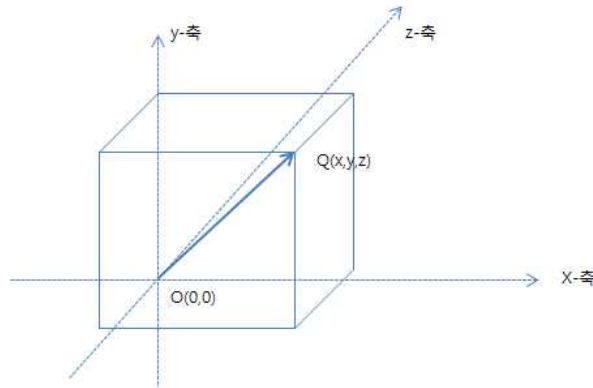
숫자에 사칙 연산이 적용되듯 벡터에도 더하기, 빼기, 외적, 내적과 같은 몇 가지 연산이 정의되어 있다. 벡터 덧셈은 힘의 합 등을 구할 때 쓰이며 벡터의 뺄셈은 변위를 구해서 속도, 혹은 가속도 벡터를 얻기 위해 주로 사용한다. 벡터 내적은 에너지에 관한 단원에서 힘이 한 일을 계산할 때, 벡터 외적은 자기장 속을 움직이는 전하가 받는 힘의 방향과 크기를 구할 때 각각 필요하다. 벡터는 물리학 전 범위에서 빠짐없이 사용되므로 네 가지 연산을 실제로는 어떻게 계산하는지 그리고 그 연산의 결과가 기하학적으로는 어떤 의미를 가지는지 이해하는 것이 좋다. 예를 들어 두 벡터의 외적은 각각을 두 변으로 가지는 평행사변형의 넓이를 구해서 두 벡터와 동시에 수직인 단위 벡터에 그 값을 곱해서 얻는 것과 같은 결과를 낳는다.



[그림 IV- 2] 벡터

(3) 정점

공간상에서의 위치(position)를 나타내는 것으로 일반적으로 여러 개가 모여서 특정 형태의 오브젝트(가장 간단한 형태는 폴리곤)를 구성하는 요소를 정점(vertex)이라고 한다. 그림의 $Q(x,y,z)$ 가 정점이다.



[그림 IV- 3] 정점

(4) 변환

가장 기본적인 변화(transform)에는 이동(transition), 회전(rotation), 크기(scale), 전단(shear) 변환이 있으며, 이들 변환은 모두 행렬로 표현된다. 이동, 회전, 전단만으로 이루어진 행렬을 아핀 변환(affine transform, 혹은 어파인 변환이라고도 한다)이라고 하는데, 이 변환은 계(system)를 유지하는 특성이 있어서 여러모로 유용하다.

예) 이동행렬:
$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ dx & dy & dz & 1 \end{bmatrix}$$

(5) 행렬

3차원 그래픽을 구성하는데 행렬(matrix)은 가장 편리한 제어 수단으로, 이동, 회전, 크기변환에 사용된다.

만약 행렬이 없었다면 3차원 그래픽이라는 장르 자체가 없었을지도 모른다.

예) x축 회전형렬:
$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(6) 폴리곤

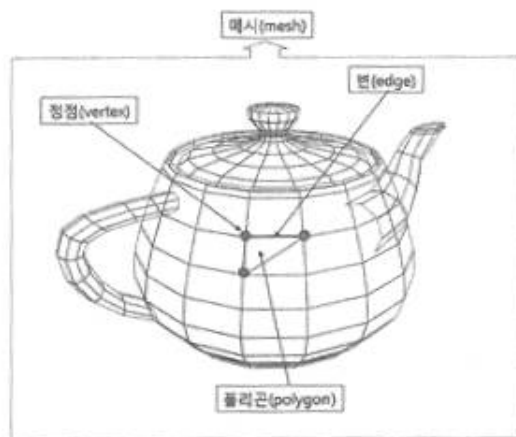
3개의 정점이 모이면 하나의 면(face)을 만들 수 있다. 이렇게 3개의 정점으로 만들어진 삼각형을 폴리곤(polygon)이라고 한다. 몇 개의 폴리곤이 모인 것을 면이라고 부르는 경우도 있지만 이 책에서는 면과 폴리곤을 동일하게 취급할 것이다.

(7) 변

폴리곤에서 정점과 정점을 연결하는 직선을 변 또는 모서리(edge)라고 한다. 일반적인 Direct3D 프로그래밍 시에는 변에 대한 데이터를 가공할 일이 없지만, 특별한 경우에는 이 데이터가 요긴하게 사용되기도 한다.

(8) 메시

폴리곤은 최소한의 3차원 공간상의 면을 만들지만 이것으로는 우리가 생각하는 복잡한 물체를 표현하는 데는 무리가 있다. 이러한 폴리곤들이 모여서 하나의 3차원 물체를 만들게 되는데 이것을 메시(mesh)라고 한다. 다시 말해서, 메시는 폴리곤이 모여서 만들어진 3차원 공간상의 객체(object)인 셈이다.



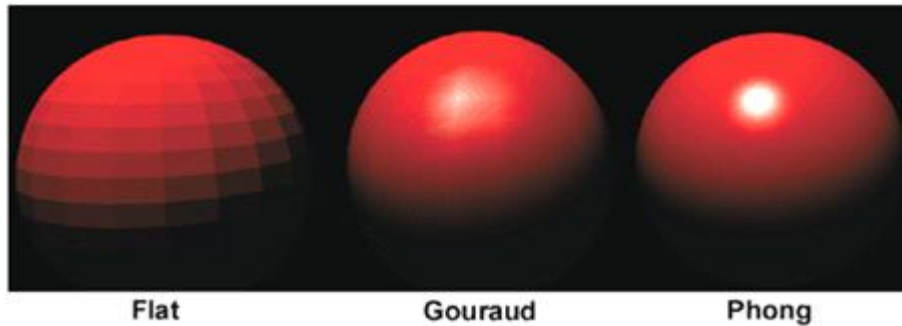
[그림 IV- 4] 정점, 폴리곤, 변, 메시

(9) 셰이딩

셰이딩(shading)이란 폴리곤에 음영을 넣는 작업을 말한다. 폴리곤은 3차원 상의 좌표값을 가진 정점으로 구성되므로 실제 이것이 화면에 표시(render)되기 위해서는 셰이딩이라는 과정이 필요하다. 셰이딩 기법에는 다양한 방법이 존재하는데, 대표적인 것으로 플랫 셰이딩(flat shading), 고로 셰이딩(gouraud shading), 풍 셰이딩(phong shading), 래디오시티(radiosity), 광선추적(raytracing) 등이 있다. 이중 대부분의 비디오카드에서 지원하는 기본적인 하드웨어 가속은 플랫 셰이딩과 고로 셰이딩의 두 가지다. 나머지 기법들은 셰이더 같은 고급 기술을 사용해서 직접 구현하는 것이 일반적이다.

플랫 셰이딩은 하나의 폴리곤을 단색으로 처리하는 방식으로 가장 빠른 방식이나, 딱딱하게 각진 모습을 볼 수밖에 없다. 과거에는 하드웨어의 성능 때문에 많이 사용되었으나 현재는 특별한 용도가 아니면 사용되지 않는 기술이다. 플랫, 고로, 풍 셰이딩 기법의 차이는 광원과 법선의 관계에 있다.

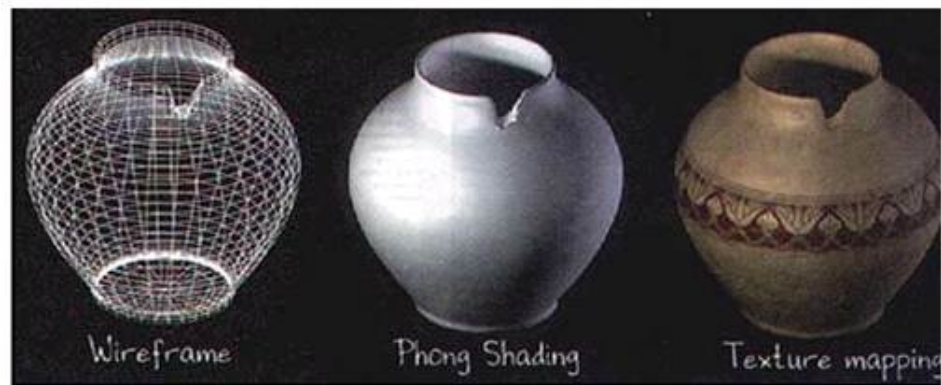
기법명	구현방법
플랫 셰이딩	면의 법선벡터와 조명벡터로 면의 밝기 계산
고로 셰이딩	정점의 법선벡터와 조명벡터로 정점의 밝기 계산
퐁 셰이딩	픽셀의 법선벡터와 조명벡터로 픽셀의 밝기 계산



[그림 IV- 5] 플랫 셰이딩, 고로 셰이딩, 퐁 셰이딩

(10) 텍스처

3차원 정점만으로 화면에 물체를 나타내는 것은 제약을 많이 갖게 된다. 섬세한 물체를 표현하기 위해서는 많은 수의 정점이 필요하고, 이는 PC 같은 제한된 메모리와 CPU의 시스템에서는 큰 문제가 아닐 수 없다. 물론 고가의 그래픽 전용 장비도 메모리가 무한대는 아니기 때문에 결국 같은 문제에 직면하게 된다.



[그림 IV- 6] 텍스처 맵핑의 개념

그림에 보이는 항아리는 동일한 정점을 가진 항아리지만, 하나는 단색 항아리인 반면 다른 하나는 무늬가 입혀진 항아리가 되었다. 텍스처란 이런 식으로 3차원 물체에 2차원의 이미지(jpg, bmp, gif 등)를 입혀서 폴리곤만으로는 나타낼 수 없는 훨씬 다양한 표현을 가능하게 해준다. 이렇게 3차원 정점에 2차원 이미지를 입히는 것을 맵핑(mapping)한다고 한다. 그래서 3차원 물체에 텍스처를 입히는 것을 텍스처 맵핑이라 하고, 맵핑이 되는 2차원 이미지를 텍스처(texture), 혹은 텍스처 맵이라고 부른다.

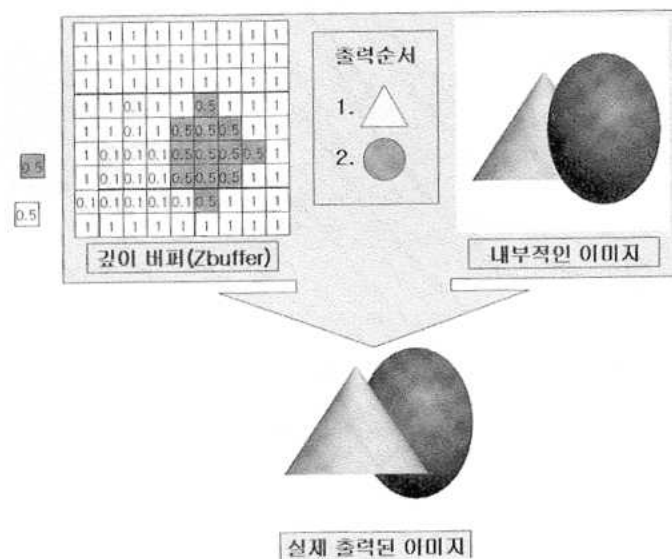
(11) 깊이버퍼(Z 버퍼)

3D 프로그래밍을 하다 보면 Z버퍼라는 것이 반드시 등장한다. Z버퍼란 깊이 버퍼를 나타내는 말

이다. 깊이 버퍼(Z buffer)란 화면에 그려질 하나하나의 픽셀에 대한 깊이 값을 보관하는 버퍼를 말한다.

3D 그래픽에서는 렌더링 파이프라인이라는 것이 존재하는데, 렌더링 파이프라인의 가장 핵심적인 내용 중의 하나가 3차원 공간을 2차원 모니터 상에 출력하도록 변환(transform)하는 과정이다. 이때, 월드(world) -> 카메라(camera) -> 투영(projection) 변환의 과정을 거치게 되는데, 최종적으로 카메라 변환과 투영 변환까지 거치게 되면 3차원 공간 상의 모든 정점은 $(-1, -1, 0) \sim (1, 1, 1)$ 사이의 공간에 위치하게 된다.

이때, (x, y, z) 를 보면 Z값이 0.0 ~ 1.0 사이의 값이라는 것을 알 수 있을 것이다. Z버퍼란, 화면에 그려질 픽셀들의 Z값을 보관하는 특별한 버퍼(0.0 ~ 1.0 사이의 값을 보관하는 소수점 버퍼)를 말한다. 아래 그림을 보자. Z값이 0.5에 위치하는 구(sphere)와 0.1에 위치하는 삼각뿔(cone)이 있다.



[그림 IV- 7] 깊이버퍼의 작동원리

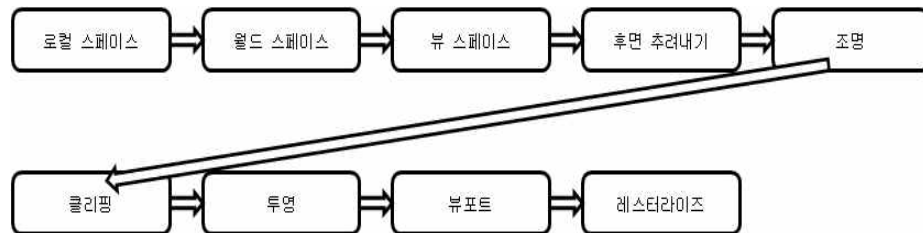
만약, 0.1에 위치하는 삼각뿔을 먼저 그리고, 0.5에 위치하는 구를 그 다음에 그린다면, 0.1에 있던 삼각뿔 위에 구가 겹쳐져서 그려질 것이다. 그러나 실제로 3차원 공간상의 물체를 2차원 투영 공간으로 변환하게 되면 0.0에 가까운 값일수록 카메라에 근접한 것이고, 1.0에 가까울수록 카메라에서 멀리 떨어진 것이다. 3차원 공간에서 본다면 0.1에 있는 물체가 카메라에서 더 가까운 곳에 있으니 0.5에 있는 물체가 겹쳐져서 그려지는 경우는 있을 수 없다.

이때, Z버퍼에 있는 값들을 비교해서, 그려질 픽셀의 Z값 0.5와 0.1을 비교한다. 만약 0.1이 먼저 그려졌다고 하더라도, 0.1이 0.5보다 작으므로 픽셀을 그리지 않아야 한다고 판단하는 것이다. 이것이 Z버퍼의 주된 용도다. 원래 깊이 값을 보관하는 버퍼이므로 깊이버퍼라고 하는 것이 정확한 명칭이겠으나 깊이 값이 Z값에 해당하므로 Z버퍼라고 부르는 것이다.

또한 Z버퍼는 DOF(Depth Of Field)나 모션블러, 그림자 처리 등의 용도로 다양하게 응용되어 사용되기도 한다.

(12) 렌더링 파이프라인

기하학적으로 3D 장면을 구성하고 가상 카메라를 설정한 뒤에는 모니터에 2D 표현을 만들어내는 과정을 수행해야 한다. 이와 같은 과정을 렌더링 파이프라인이라 한다. [그림 3-2-4-8]은 간단하게 정리한 파이프라인을 보여주고 있다.

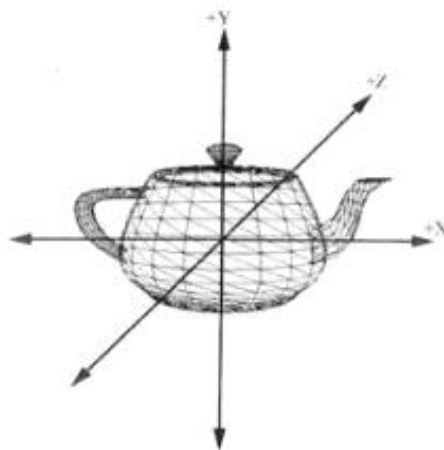


[그림 IV- 8] 렌더링 파이프라인

파이프라인 내에서는 몇 가지 단계에 의해 하나의 좌표 시스템에서 다른 시스템으로 기하물체를 변환하는 과정이 이루어진다. 이 변환에는 행렬이 이용되며, 변환 과정은 Direct3D의 책임 하에 이루어진다. 이 때, 하드웨어 변환 기능을 가진 하드웨어를 보유하고 있다면 그래픽 하드웨어 내에서 변환을 처리할 수 있다.

(가) 로컬 스페이스

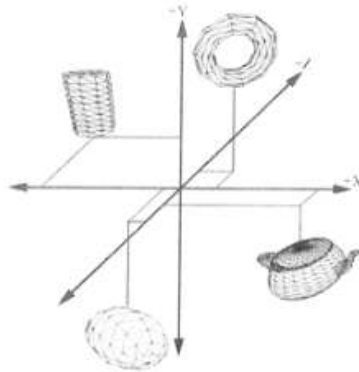
모델링 스페이스라고도 불리는 로컬 스페이스는 우리가 물체의 삼각형 리스트를 정의하는 데 이용하는 좌표 시스템이다. 로컬 스페이스는 모델링 과정을 쉽고 단순하게 만들어주며, 자체의 로컬 좌표 시스템을 이용하는 것이 월드에서 직접 모델을 구성하는 것보다 훨씬 쉽다. 예를 들어, 로컬 스페이스를 이용하면 위치나 크기, 월드 내의 다른 물체와의 관계 등을 고려하지 않고도 모델을 구성할 수 있다.



[그림 IV- 9] 자체의 좌표 시스템을 이용해 정의된 차 주전자

(나) 월드 스페이스

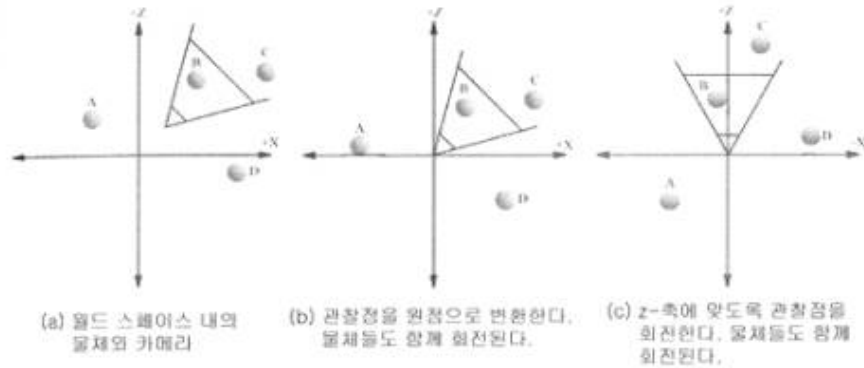
자체의 로컬 좌표 시스템 내에 다수의 모델을 구성한 다음에는 이를 전역(월드) 좌표 시스템으로 옮겨 하나의 장면을 구성해야 한다. 로컬 스페이스의 물체들은 이동, 회전, 크기 변형 등을 포함하는 월드 변환이라는 작업을 거쳐 월드 스페이스로 옮겨진다. 월드 변환은 위치와 크기, 방위를 포함하는 각 물체 간의 관계를 정의함으로써 이루어진다.



[그림 IV- 76] 여러 개의 3D
물체들이 하나의 월드 좌표 시
스템 내에서 서로 연결된다.

(가) 뷰 스페이스

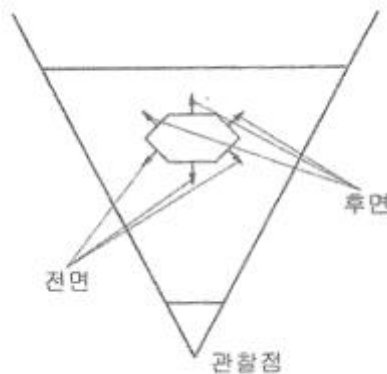
월드 스페이스 내에서 기하물체와 카메라는 월드 좌표 시스템과 연계되어 정의된다. 한편, 카메라가 월드 내 임의의 위치나 방위를 가진다면 투영이나 그 밖의 작업이 어렵거나 덜 효율적이 된다. 따라서 작업의 수월함을 위해 카메라를 월드 시스템의 원점으로 변환하고, 카메라가 양의 z-축을 내려다 보도록 회전시켜야 한다. 이때 월드에 대한 관점이 바뀌지 않도록 하기 위해서는 카메라에 맞추어 월드 내의 모든 기하물체를 변환해야 하는데, 이와 같은 변환을 뷰 스페이스 변환이라 하며, 이 변환을 거친 뒤의 기하물체는 뷰 스페이스 내에 위치한다고 말할 수 있다.



[그림 IV- 77] 월드 스페이스에서 뷰 스페이스로의 변환. 이 변환은 카메라를 시스템의 원점으로 변환하고 양의 z-축을 내려 보도록 한다. 스페이스 내의 모든 물체들은 카메라와 함께 변환되므로 카메라가 월드를 바라보는 관점에는 변화가 없다.

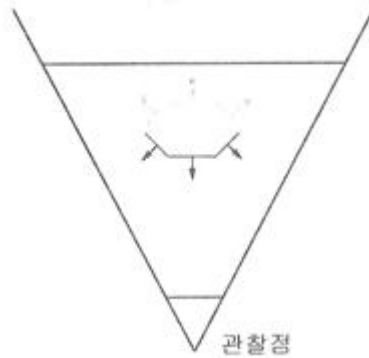
(나) 후면 추려내기

폴리곤은 두 개의 면을 가지고 있으며 하나의 면을 전면, 다른 면을 후면이라 부른다. 일반적으로 폴리곤의 후면은 절대 보여지지 않는데, 이는 장면 내의 물체들이 대부분 박스나 원기둥, 탱크, 캐릭터 등과 같은 채워진 볼륨이며, 채워진 물체의 내부로 카메라를 넣는 것이 허용되지 않기 때문이다. 즉, 카메라는 절대로 폴리곤의 후면을 보지 못한다. 이와 같은 사실은 매우 중요한데, 왜냐하면 폴리곤의 후면을 볼 수 있는 경우에는 후면 추려내기가 작동하지 않기 때문이다. [그림 IV-13]은 전면의 방향을 회살표로 표시한 물체의 예를 보여준다. 카메라에 전면을 향하고 있는 폴리곤을 전면 폴리곤이라 하며, 후면을 향하고 있는 폴리곤을 후면 폴리곤이라 한다.



[그림 IV- 78] 전면 폴리곤과 후면 폴리곤을 가진 물체

[그림 IV-13]을 자세히 살펴보면 전면을 향하고 있는 폴리곤들이 뒤쪽의 후면 폴리곤들을 가리고 있음을 알 수 있다. Direct3D는 후면 폴리곤을 추려냄으로서(이후의 처리에서 제거) 상당한 이득을 취한다. 이와 같은 과정을 후면 추려내기(backface culling)라 한다. [그림. IV-14]는 후면을 추려낸 뒤의 동일한 물체를 보여주고 있다. 카메라의 입장에서 후면은 어차피 가려져 보이지 않으므로 동일한 이미지가 만들어진다.



[그림 IV- 79] 후면 폴리곤이 추려진 뒤의 장면

물론, 이와 같은 처리를 위해서는 어떤 폴리곤이 전면 폴리곤이고 후면 폴리곤인지를 Direct3D의 입장에서 확인할 수 있어야 한다. 디폴트로 Direct3D는 두르기 순서의 시계 방향에(뷰 스페이스에서) 지정된 버텍스를 가진 폴리곤을 전면 폴리곤으로 취급하며, 두르기 순서의 시계 반대 방향에 지정된 버텍스를 가진 폴리곤을 후면 폴리곤으로 취급한다.

(다) 조명

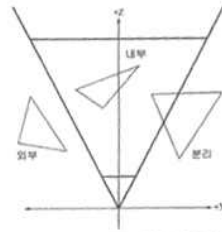
조명 모델이란 광원(light)으로부터 점들까지의 조도를 계산하는 방법을 말한다. 이 방법에는 여러 가지가 있는데, 크게 보면 경험모델과 물리모델로 나눌 수 있다. 경험모델(empirical model)이란 관찰된 현상을 근사값(approximation)으로 표현하기 위해서 간단하게 수식화한 것을 말하는 것으로, 근사값에 의한 결과를 만들어 내는 것이다. 정리하면 “해보니깐 결과가 괜찮더라.”라는 말이기도 한다. 이에 반해서, 물리모델(physical model)은 빛과 물질(혹은 매질)간의 상호작용을 실제 물리적 성질에 기반하여 모델링한 것을 말한다. 당연히 물리학적, 과학적 근거가 있는 모델을 말한다.

(라) 클리핑

시야 볼륨 외부의 기하물체를 추려내는 과정을 클리핑이라 한다. 시야 절두체에서의 삼각형 위치는 다음과 같이 세 가지로 분류할 수 있다.

- ① 완전한 내부 - 삼각형이 완전히 절두체 내부에 위치하면 그대로 보존되어 다음 단계로 진행한다.

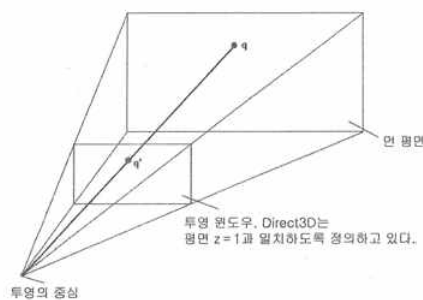
- ② 완전한 외부 - 삼각형이 완전히 절두체 외부에 위치하면 추려내어진다.
- ③ 부분적 내부(부분적 외부) - 삼각형이 부분적으로 절두체 내부에 위치하면 삼각형을 두 개의 부분으로 분리한다. 절두체 내부의 부분은 보존되며, 나머지는 추려내어진다.



[그림 IV- 80] 시야 볼륨 외부의 기하 물체를 추려낸다.

(마) 투영

뷰 스페이스에서는 3D 장면의 2D 표현을 얻는 과정이 남아있다. 이와 같이 n 차원에서 $n-1$ 차원을 얻는 과정을 투영(projection)이라 한다. 투영을 수행하는 방법에는 여러 가지가 있지만 우리가 관심을 가지고 있는 것은 원근 투영(perspective projection)이라는 방법으로, 원근 투영은 원근법을 이용하여 기하물체를 투사한다. 즉, 카메라에서 멀리 떨어진 물체는 가까운 물체에 비해 작게 나타난다. 이와 같은 타입의 투영은 3D 장면을 2D 이미지로 표현하는 데 가장 적합하다. [그림 3.4.1.15]는 원 투영을 통해 3D 포인트를 투영 윈도우에 투영하는 과정을 표현한 것이다.

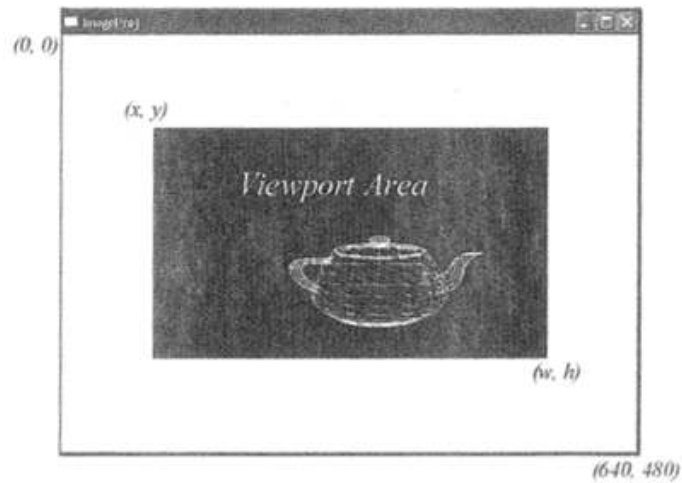


[그림 IV- 81] 투영 윈도우로의 3D 포인트 투영

(바) 뷰포트 변환

뷰포트 변환은 프로젝트 윈도우의 좌표를 뷰포트라 불리는 화면의 직사각형으로 변환하는 과정을 말한다. 게임에서의 뷰포트는 보통 직사각형의 전체 화면이 되지만, 윈도우 모드에서 실행하는 경우에는 클라이언트 영역이나 화면의 일부가 될 수도 있다. 뷰포트 사각형은 이를 포함하고

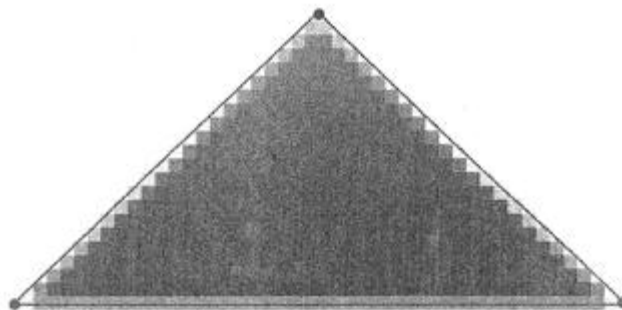
있는 윈도우와 상대적이며, 윈도우 좌표를 이용해 지정된다.



[그림 IV- 82] 뷰포트 사각형

(사) 래스터라이즈

스크린 좌표로 버텍스들을 변환한 다음에는 2D 삼각형들의 리스트를 가지게 된다. 래스터라이즈 단계는 각각의 삼각형을 그리는 데 필요한 픽셀 컬러들을 계산하는 과정이다.



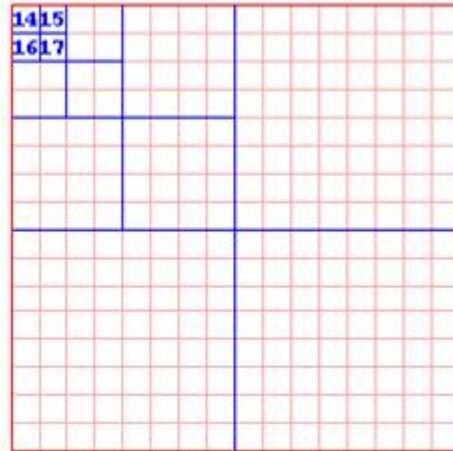
[그림 IV- 83] 래스터라이즈를 거친 스크린 삼각형

래스터라이즈 과정은 엄청난 작업 양을 필요로 하므로 반드시 전용 그래픽 하드웨어에서 처리되어야 한다. 래스터라이즈의 결과물은 모니터에 바로 디스플레이할 수 있는 2D 이미지가 된다.

(13)공간 자료 구조 - QuadTree(쿼드트리)

쿼드트리란 자료구조의 하나인 트리(tree)의 일종으로 자식 노드가 4개인 트리를 말한다. 4진 트리라고도 불린다.

쿼드트리는 공간(일반적으로 2차원)을 4개의 자식노드로 재귀적으로 분할하는 방법이다. 분할 전 단계에서 하나였던 지형을 1단계마다 1/4로 재귀적으로 분할하다가 일정크기 이하로 작아지면 분할을 멈춘다.

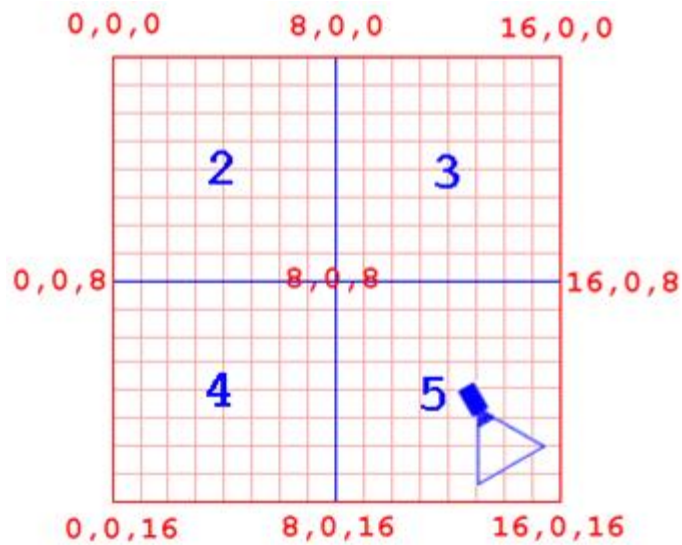


(가) 쿼드트리의 효과

쿼드트리를 사용하는 가장 큰 이유는 거대한 지형을 빠르게 검색할 수 있기 때문이다.

큰 덩어리 단위로 필요 없는 데이터를 제거함으로써, 3D 엔진이 처리해야 할 데이터량을 빠르게 줄일 수 있다. 이를 위해서는 반드시 쿼드트리가 절두체 컬링과 결합되어야만 제 성능을 발휘할 수 있다.

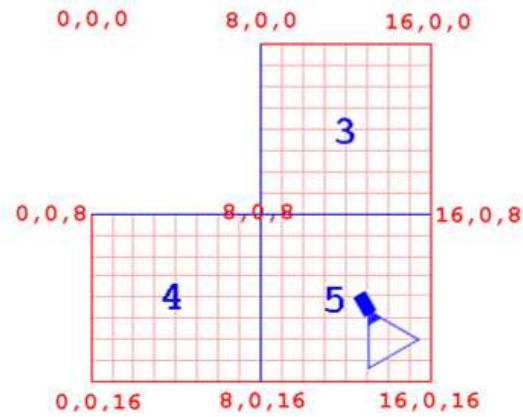
① 쿼드트리 컬링



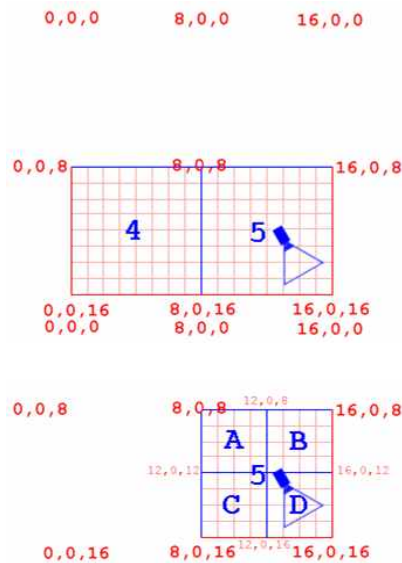
쿼드트리는 노드의 바운딩 좌표를 사용해서 작업한다.

맵이 X축 0-16 Z축 0-16이라면 맵의 바운딩 좌표는 (0,0,0), (16,0,0), (0,0,16), (16,0,16)이다.

루트노드를 쪼갤 때 맵의 바운딩 좌표도 같이 쪼개지므로 노드2의 바운딩 좌표는 (0,0,0), (8,0,0), (0,0,8), (8,0,8)이다.



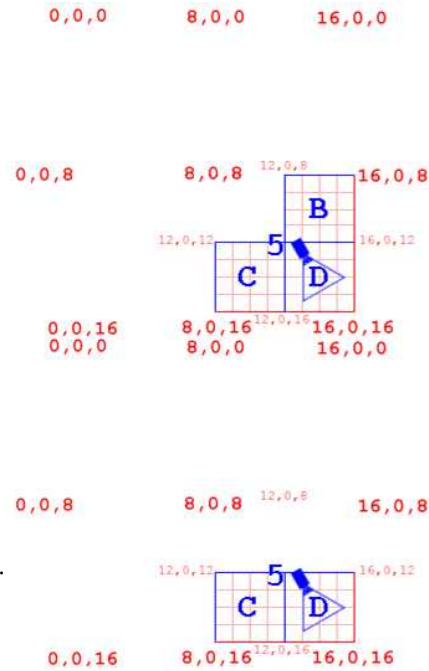
작업하는 방법은 먼저 루트에서 시작한다. 카메라가 루트의 바운딩 좌표안에 있는 것을 확인한다. 카메라가 노드2의 바운딩 좌표안에 있는 것을 확인한다. 카메라가 없으면 노드2를 제외하고 그것의 모든 자식들도 제외한다. 이렇게 해서 64개의 셀을 테스트하는 것을 처리.



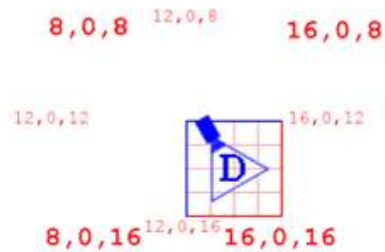
노드 2를 제거한 것과 같이 노드 3과 노드 4도 순서대로 카메라가 노드의 바운딩 좌표안에 있는지 확인하고 제거한다.

노드 5의 바운딩 좌표안에 카메라가 있는 것을 확인한다.

다시 4개의 자식마디로 나누고 편의상 A, B, C, D라고 한다



앞의 과정에서와 같이 노드 A의 바운딩 좌표에 카메라가 있는지 확인한다. 카메라가 없으므로 제외한다. 같은 방법으로 노드 B도 확인하고 제외한다.



카메라가 노드 D의 바운딩 좌표안에 있는지 확인한다.

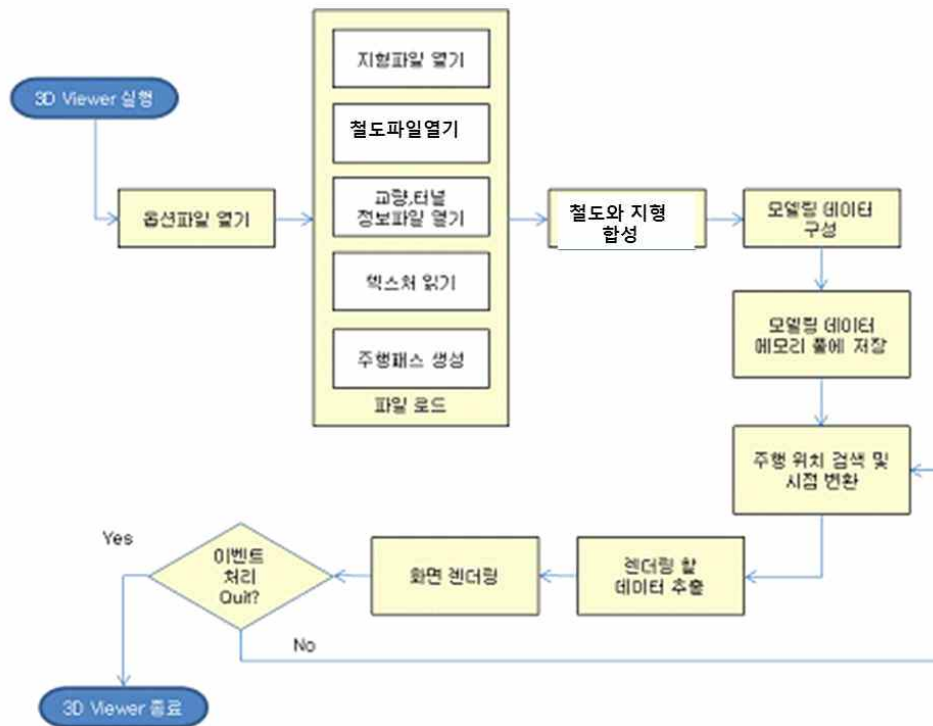
카메라가 있으므로 노드 D의 모든 자식들을 테스트 한다.(보여 지고 있는 5개의 셀의 결과물을 얻기 위해서 16개 이상의 테스트를 해야 한다.)

테스트의 총 합은 $7 + 16 = 23$ 으로 256번을 23번으로 줄일 수 있다.(루트는 테스트할 가치가 없기 때문에 실제로는 22번이다.)

쿼드트리를 이용해서 모든 셀/리프를 테스트하는 것에 비해 11.6%만으로 같은 작업을 할 수 있다.

나. 개발 내용

(1) 전체 프로세스 설계서

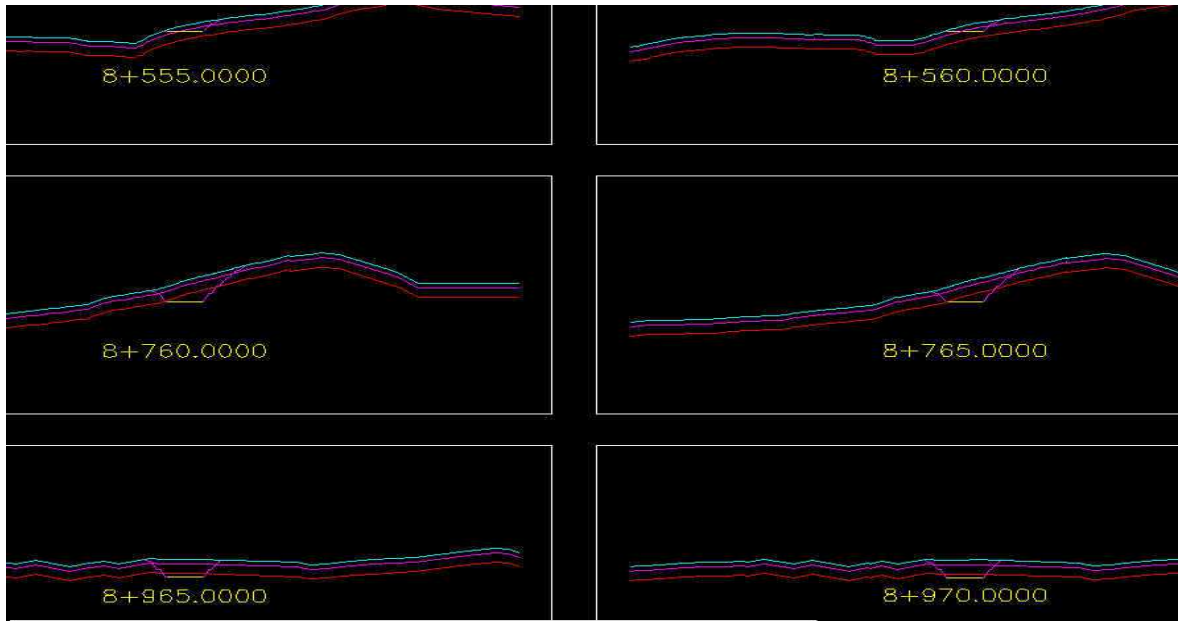


[그림 IV-84] 전체프로세스구성

최적 노선의 3차원 경관 시뮬레이션 프로그램의 전체 프로세스는 위 그림과 같다. 파일 정보가 들어있는 옵션파일을 열어 사용 되어질 지형, 철도, 교량, 터널 등 정보들을 얻어 해당 파일들을 읽어 들인다. 각 파일로부터 읽어 들인 정보를 바탕으로 철도, 교량, 터널, 지형을 모델링하고, 거기에 맞는 텍스처를 맵핑하여 메모리 풀에 저장한다. 마우스 및 주행 패스 값에 의해 변환된 시점을 적용하고, 시야에 보여지는 모델들을 걸러내어 렌더러로 보낸다. 이렇게 최적화된 데이터만을 화면에 뿌려주고 다음 장면을 준비한다. 이러한 작업의 반복으로 다양한 장면을 연출하고, Quit 이벤트가 발생하면 뷰어를 종료한다.

(2) 3차원 철도형상 모델링

iRail에서 철도의 횡단 정보를 만들어서 넘겨준다. 철도 모델링 파일은 『*.erm』 파일로 노반, 측구, 사면, 교량, 터널등 철도를 구성하는 요소들을 모델링하기 위한 기본 설계 정보가 들어있다. 측점별 데이터들을 연결하여 면 정보를 만들고, 또 U,V 값을 생성하여 각 요소에 맞는 텍스처를 맵핑시킴으로써 하나의 모델을 완성한다. 이렇게 생성된 모델들이 모여 거대한 철도를 형성하게 되는 것이다.



[그림 IV-85] 횡단면도

위 그림은 iRail의 횡단면의 일부이다. 매 측점마다 이와 같은 횡단이 구성되어 있다. 이렇게 측점별로 생성되어진 횡단 데이터들은 모델을 구성하는 소스가 된다.

[그림 IV-20]은 모델링이 어떻게 구성되는지를 보여준다. 점에서 면, 면에 텍스처를 추가하여 노면측구, 사면 같은 요소를 구성하고, 또, 이들 조합으로 철도가 만들어지는 것을 볼 수 있다.

(3) 3차원 지형 모델링

(가) Realtime Dynamic Level of Detail Terrain rendering with ROAM

① Introduction to Terrain Visualization: 지형 시각화에 대한 도입(소개).

LOD지형 알고리즘들을 참조하지 않고 지형시각화(Terrain Visualization)의 세계로 뛰어 들 수는 없다.

LOD알고리즘은 정확하게 보이기 위해 지형의 어떤 부분이 더 자세하게 보일 필요가 있는지를 결정하기 위해 경험치의 집합을 사용한다.

의심할 바 없이 여러분은 많은 지형에 대한 참조물과 GPS데이터를 구할 것이다. 이러한 모든 것들은 군용의 SimNet 어플리케이션에서 사용되었지만 지금은 좀 더 사소한 목적을 위해 사용되고 있다.

지형을 렌더링하기 위한 많은 기술적 변화들 중 하나는 지형자체에 존재하는 기능들을 저장하는 방법이다.

높이맵(height map)은 산업상의 표준이다. 간단히 말하면 높이맵은 그 위치에서의 지형의 높이값을 저장하고 있는 이차원 배열이다.

측량기사가 자신의 고도 측량틀을 사용하여 각 사각형을 채운 그래프 용지라고 생각하자. 높이필드는 높이맵이라고도 한다.

② Overview of LOD Terrain Algorithms : LOD 지형 알고리즘에 대한 개요

LOD지형 알고리즘에 대한 좋은 개요는 세 개의 논문에 잘 나타나 있다.

(1. Hoppe, 2. Lindstrom, 3. Duchaineau)

첫 번째 논문에서 Hoppe는 여러분이 좀 더 세밀한 지형이 필요할 때 임의의 메쉬에 삼각형들을 추가하는 다소 새롭고 깔끔한 적응적 메쉬에 기반한 알고리즘을 제시한다.

이 논문은 훌륭한 참조서이지만 우리의 요구에는 다소 복잡하고 많은 메모리를 요구한다. 좀 더 우리의 스타일에 가까운 두 번째 논문에서 Lindstrom은 지형의 조각(Patch)을 표현하기 위해 사용되는 쿼드트리라고 하는 구조체를 제시한다. 쿼드트리는 높이 맵에 대한 근사값을 생성하기 위해 지형을 재귀적으로 분할한다.

쿼드트리는 아래의 알고리즘과 많은 설계원칙을 공유하고 있으며 아주 간단하고 효율적이지만 아래의 논문은 추가적인 보너스를 제공한다.

마지막으로 세 번째 논문에서 Duchaineau는 이진 삼각형 트리(Binary Triangle Tree)에 기반한 알고리즘(Real-time Optimally Adapting Meshes: ROAM)을 제시한다.

여기에서 각 패치는 단순히 (우측의) 이등변 삼각형이다. 삼각형의 정점에서 이 삼각형의 빗변의 중점을 분할하면 두 개의 새로운 이등변(우측) 삼각형을 만든다. 이러한 분할은 재귀적이며 원하는 디테일 수준에 이를 때 까지 자식노드들에 대해 반복된다. 이 기법은 아주 기본적인 수준에서 부터 거의 연속적인 단계로 아주 진보된 최적화까지 구현할 수 있다. 각각의 단계는 계속하기 전에 유효화 될 수 있으므로 도움이 된다. 또한 ROAM은 아주 빠르게 분할하며 높이 맵을 동적으로 갱신할 수 있게 해준다.

③ ROAM Source Explanation: ROAM 소스 설명.

* 높이맵 파일은 메모리에 로드되며 LandScape클래스의 인스턴스와 연결된다. 여러개의 LandScape객체는 무한한 크기의 지형을 만들기 위해 링크될 수 있다.

* 새로운 LandScape오브젝트는 로드된 높이맵의 부분들을 새로운 Patch클래스 객체로 분할 할 수 있다.

이 단계의 목적은 두 가지 이다.

목적1) 이 알고리즘의 나머지 부분에서 사용된 트리구조는 깊이에 따라 지수적인 크기로 램의 사용량을 늘린다.

따라서 작은 영역을 유지하는 것은 그 깊이를 제한하는 것이다.

목적2) 높이맵의 동적갱신을 위해서는 변경된 지역에 대한 편차트리(Variance Tree)를 완전하게 다시 계산해야 한다.

아주 큰 패치의 경우 실시간 어플리케이션에서 계산하기에는 너무 느리다.

* 각각의 Patch객체는 메쉬 근사화(분할)를 위해 호출된다.

패치는 스크린상에 표시될 트라이앵글의 암시적좌표(x, y, z와 같은 명시적 좌표가 아님)를 저장하는 이진 삼각형트리이다.

논리적인 방식으로 버텍스들을 저장함으로써 ROAM은 트라이앵글당 36바이트 이상의 램 사용량을 절약한다.

좌표값들은 렌더링과정의 일부로서 효율적으로 계산된다.

* 분할이 끝난 후 엔진은 이전 단계에서 생성된 이진 삼각형트리를 순회한다.

이 트리내의 리프노드(잎노드- 차일드노드를 갖지 않는 노드)는 그래픽 파이프라인을 통해 출력될 필요가 있는 트라이앵글들이다. 삼각형들의 좌표는 순회 도중 즉석에서 계산된다.

④ Height Map File Format : 높이맵 파일형식.

행우선 형식으로 저장된 8비트의 높이 샘플을 담고 있는 raw파일을 읽어 들이는 가장 단순한 방법을 택했다.

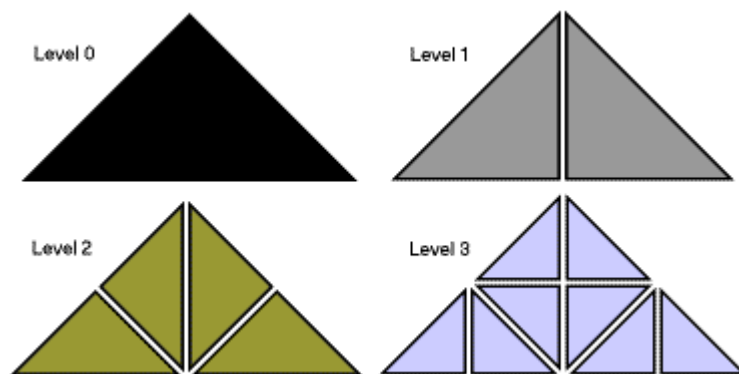
⑤ Binary Triangle Tree : 이진 삼각형 트리.

지형 메쉬를 표현하기 위해 거대한 삼각형좌표의 배열을 저장하는 대신 ROAM알고리즘은 이진 삼각형 트리라고 하는 구조체를 사용한다.

이 구조체는 지형을 삼각형플롯(작은 삼각형 영역)들로 분할하는 측량자의 결과로 볼 수 있다. 이러한 플롯들의 소유자들은 논리적으로 서로를 이웃하는 관계(좌, 우, 이웃 등)로 본다.

마찬가지로 어떤 소유자가 상속을 통해 지형을 주면 이 지형은 두 개의 차일드사이에서 동등하게 분할된다. 이러한 유추를 더 확장하기 위해 플롯의 원소유자는 이진 삼각형트리의 루트노드이다. 다른 원소유자는 그들이 소유한 트리의 루트노드이다. LandScape클래스는 지역적인 지형등록기와 같은 역할을 한다. 즉 플롯들의 원소유자를 추적하고 어떤 플롯이 여기에 속하는지를 기록한다. 이러한 등록은 또한 부모에서 차일드까지 모든 상속관계를 기록한다. 더 많은 차일드를 생성하면 할수록 지형은 좀 더 많이 조사된다.

좀 더 근사화가 필요한 영역의 경우 그 영역에서의 인구(차일드의 수)를 늘림으로서 원하는 정도의 디테일을 얻을 수 있다. 이는 [그림 IV-21]에 나타나있다.



[그림 IV- 86] Bindary triangle tree structure levels 0~3

이진 삼각형트리는 TriTreeNode구조체에 의해 표현되며 ROAM을 위해 필요한 다섯 가지의 기본적인 관계들을 추적 유지한다.

이러한 관계들에 대한 표준적인 관점은 [그림 IV-22]에 나타나있다.

```
struct TriTreeNode {  
    TriTreeNode *LeftChild; // Our Left child  
    TriTreeNode *RightChild; // Our Right child  
    TriTreeNode *BaseNeighbor;  
    // Adjacent node, below us
```

```

TriTreeNode *LeftNeighbor;

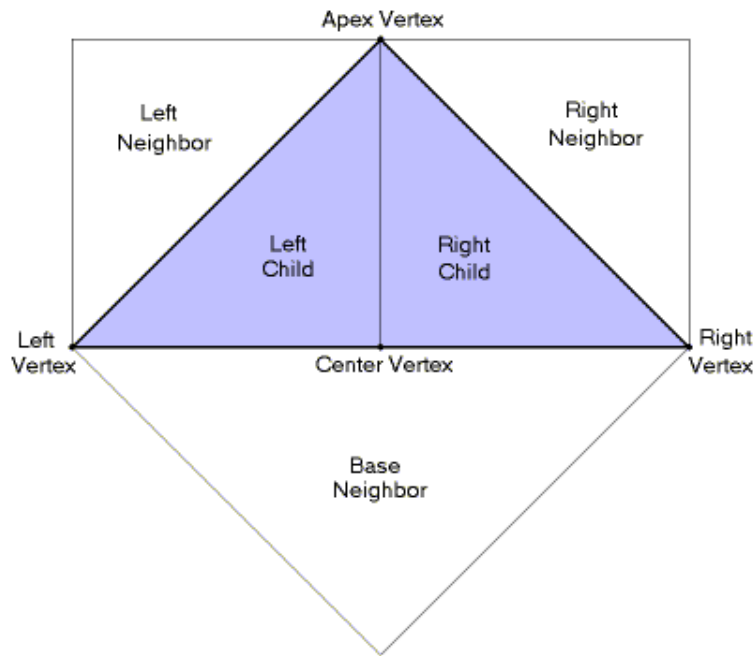
// Adjacent node, to our left

TriTreeNode *RightNeighbor;

// Adjacent node, to our right

};

```



[그림 IV- 87] Basic binary triangle with children and neighbors.

높이맵을 위한 메쉬 근사값을 생성할 때 우리는 원하는 디테일 레벨에 도달 할 때까지 트리에 차일드 노드들을 재귀적으로 추가한다.

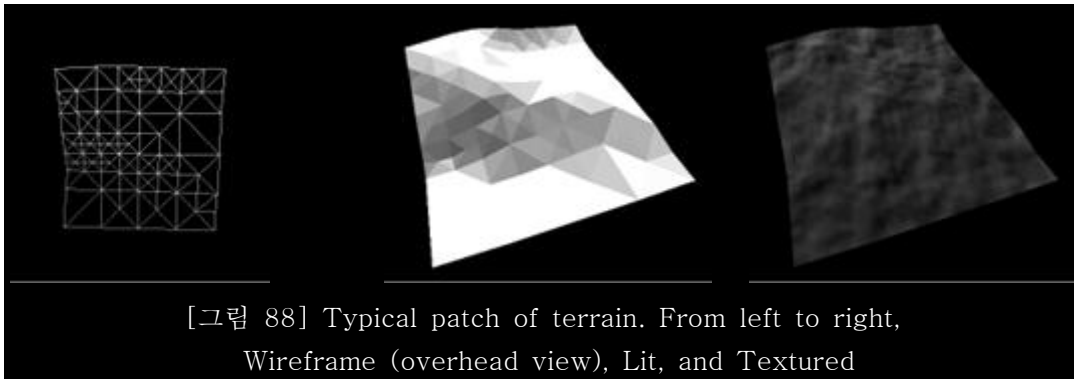
이러한 단계가 끝나면 이 트리는 다시 순회되고 이번에는 실제적인 스크린상의 트라이앵글로서 리프노드들을 렌더링한다. 이러한 이중패스방식은 기본적인 엔진이 되며 매 프레임마다 리셋 되어야 한다.

재귀적방법의 좋은 점 중 한 가지는 어떤 버텍스 당 데이터(per Vertex Data)도 저장하지 않는다(버텍스에 관련된 어떤 데이터도 저장하지 않음)는 점인데 이는 램의 사용량을 줄일 수 있다.

사실 TriTreeNode구조체는 너무 자주 생성되고 파괴되므로 가장 효율적인 방법으로 메모리를 할당하는 것은 반드시 필요하다.

또한 여기에는 이러한 구조체들이 수 만개가 있으므로 하나의 여분의 포인터도 엄청나게 많은 메모리를 요구하게 된다.

TriTreeNode구조체는 정적 메모리 풀(pool)에서 할당되며 따라서 동적인 메모리할당의 오버헤드를 피할 수 있으며 상태를 리셋팅하는 빠른 방법을 제공한다.

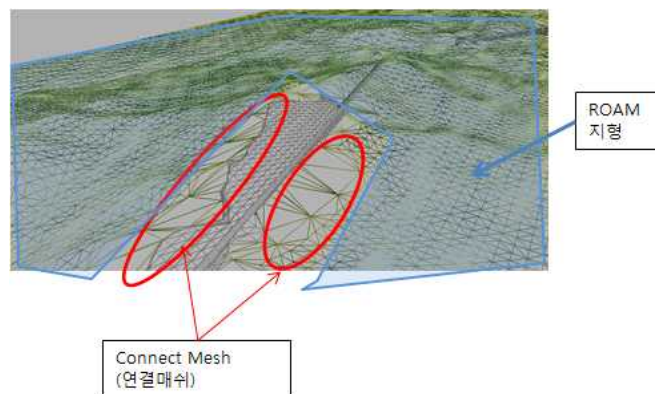


(나) 철도와 지형 합성

앞에서 철도와 지형을 형성하였다. 그런데 이것으로 끝난 것이 아니다. 생성된 철도와 지형을 그대로 렌더링하면 두 모델 사이에 깊이 값의 차이로 인해, 지형보다 높이가 낮은 곳에 생성된 철도(절토인 철도)는 지형에 가려져 보이지 않게 될 것이다. 즉, 실제 철도 공사하는 것과 같이 철도가 들어가는 곳의 산을 깎아내는 작업을 해야 한다. 현실에서는 포크레인으로 땅을 파내면 되지만, 프로그램에서는 해당 영역을 잘라내는 것으로 대신해야 한다. 여기서 주의해야 할 점은 LOD에 실시간으로 변하는 지형을 어떻게 잘라내는가 하는 점이다.

본 연구에서는 철도가 포함되는 지형 타일을 찾고, 해당 타일의 LOD를 Level 1으로 고정 시킨다. 그리고, 렌더링 시 이 타일은 렌더링 되지 않게 한다. 해당 타일에 대해 철도 바운더리 밖의 부분만을 걸러내고, 각 타일당 외곽 지형을 모델링한다. 이렇게 지형 외의 ConnectMesh가 생성되어, 철도와 지형 사이의 이음새를 매꿔주게 된다.

[그림 3.4.1.24] 는 지형과 철도가 합성 되어진 모습이다. 연결 매쉬 부분은 삼각형의 크기가 큰 반면, 밖의 지형부분은 삼각형의 크기가 작다. 이렇게 차이가 나는 것은 연결매쉬가 있는 부분은 LOD가 적용되지 않기 때문이다.



[그림 IV- 89] 지형 / 철도 합성

(4) 주행 시뮬레이션

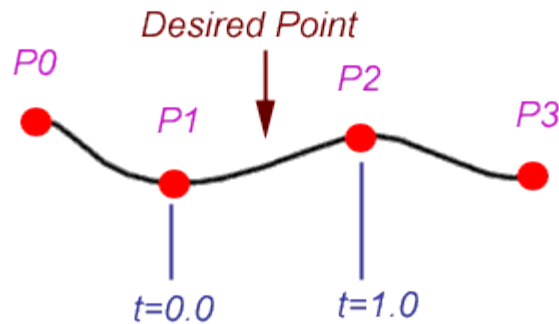
스플라인(Splines)은 곡선을 나타내는 수학적인 수단이다. 곡선을 따라 간격을 두고 일련의 지점을 지정하고, 간격 내에서 추가점을 허용하는 함수를 정의하여 위치가 계산된다.

철도 주행을 부드럽게 하려면 스플라인을 이용한 부드러운 곡선이 필요하다. 스플라인의 종류에는 캐트멀-롬 스플라인, 3차 스플라인, B-스플라인 등이 있다.

본 연구에서는 캐트멀-롬 스플라인을 이용해 주행 위치션을 구하였다.

■ Catmull-Rom Splines

스플라인을 정의하는 점은 “컨트롤 포인트”로 잘 알려져 있다. Catmull-Rom spline 의 하나의 특징은 명시된 커브가 모든 컨트롤 포인트를 통과할 것이라는 것이다.



[그림 IV- 90] Desired Point

커브 위의 점을 계산하기 위해서는, 위의 그림에서 보는 것과 같이 원하는 점의 양쪽으로 두 지점이 필요하다. 점은 t값에 의해 결정되는데 이 t 값은 가장 가까운 컨트롤 포인트 사이의 거리 값을 의미한다.

주어진 컨트롤 포인트 P0, P1, P2, P3 그리고 t 값으로 점의 위치를 계산할 수 있다. (컨트롤 포인트가 균일한 간격이라고 가정하면) 아래의 방정식에 의해 계산되어진다.

$$q(t) = 0.5 * (1.0t, t, t^2, t^3) * \begin{bmatrix} 0 & 2 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & -5 & 4 & -1 \\ -1 & 3 & -3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [P_0] \\ [P_1] \\ [P_2] \\ [P_3] \end{bmatrix}$$

Equation 1

다른 방식으로 표현하면 아래와 같다.

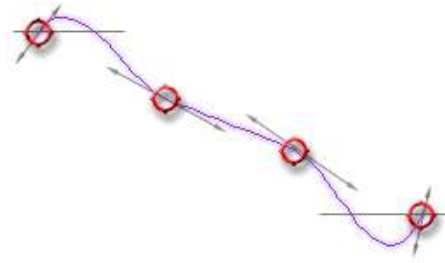
$$q(t) = 0.5 * ((2 * P_1) + (-P_0 + P_2) * t + (2 * P_0 - 5 * P_1 + 4 * P_2 - P_3) * t^2 + (-P_0 + 3 * P_1 - 3 * P_2 + P_3) * t^3)$$

Equation 2

이 수식은 Catmull-Rom spline 에게 다음과 같은 특징을 제공한다.

- 스플라인은 모든 컨트롤 포인트를 지나간다(참고. [그림 IV-25])

- 스플라인은 C1 지속성이다. 즉 접선 방향과 크기에 불연속성이 없다 (참고, [그림 IV-26])



[그림 IV- 91]

- 스플라인은 C2 지속성이 아니다. 두 번째 파생은 세그먼트의 길이를 통해, 선형을 다양하도록 곡률을 일으켜 선형을 보간한다.
- 세그먼트의 점은 $P1 \rightarrow P2$ 영역의 바깥에 존재할 수도 있다.

스플라인 세그먼트가 4개의 컨트롤 포인트를 사용하여 정의하는 동안 스플라인은 얼마든지 추가적인 컨트롤 포인트를 가질 수 있다. 각각은 세그먼트의 끝점을 형성하는 두 컨트롤 포인트에 의해 정의되는 세그먼트의 연속체인에서의 이 결과물은 끝점의 각 사이트의 추가된 컨트롤 포인트를 더한다. 따라서 끝점 P_n , P_{n+1} 로 주어진 세그먼트에 대해서 세그먼트는 $[P_{n-1}, P_n, P_{n+1}, P_{n+2}]$ 를 이용하여 계산된다.

세그먼트는 세그먼트 끝점의 바깥쪽을 향하는 컨트롤 포인트를 요구하기 때문에 스플라인의 최대 끝점에 있는 세그먼트들은 계산 될 수 없다. 따라서, 컨트롤 포인트 1에서 N까지 있는 스플라인에 대해서 공식화 될 수 있는 최소 세그먼트는 $P1 \leftrightarrow P2$ 이고 최대 세그먼트는 $P_{n-3} \leftrightarrow P_{n-2}$ 이다. 따라서 S 세그먼트를 정의하기 위해서는 $S+3$ 컨트롤 포인트가 필요하다.

(5) 3D Viewer 개발

앞에서 구성된 철도와 지형 및 기타 요소들은 3D 엔진을 통해 최적의 렌더링 환경을 만들어 내고, 최고의 화면을 만들어 낸다.

(가) 3D Engine 이란?

3D Engine 이란 일반적으로 Application과 Graphic Hardware를 연결시켜주는 일종의 Graphic Library로 3차원 공간상 (3D) 의 임의의 대상을 표현하고 제어할 수 있는 기능이 추가되어진 Library라 할 수 있다.

(나) 구성

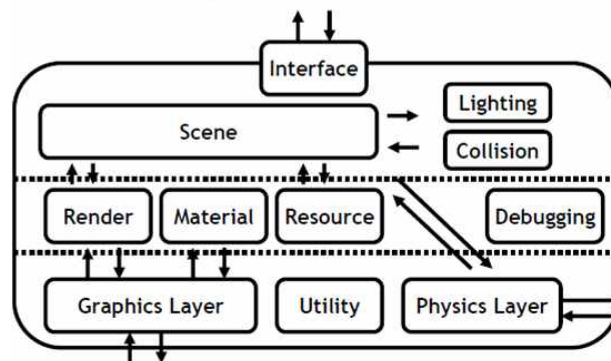
- Objects : 일반적으로 점, 선, 다각형으로 이루어진 공간상의 물체.
- Vector : Object를 바라보는 시점의 위치, 화상이 맺히는 면의 크기(film plane) , 초점의 거리.

- Light source : 빛의 위치(Location), 세기(Strength), 색(Color), 방향(Direction).
- Material property : 빛을 반사시키는 Object의 면의 속성.

(다) 엔진 흐름도

아래의 그림은 주요 엔진 흐름도이다.

인터페이스, Scene, Renderer, Resource 등이 연계되어 하나하나의 장면을 만들어 간다.



[그림 IV- 92] 엔진 흐름도

(6) 동영상 생성

방금했던 동작 및 상황을 다시 재현하기란 쉬운 일이 아니다. 이러한 상황을 저장해 놓았다가 필요할 때 언제든지 다시 볼 수 있다면, 같은 상황을 재현하려고 하는데 사용되는 많은 시간과 노력을 줄일 수 있을 것이다. 이 동영상 생성 기능은 뷰어에서 진행되는 상황을 동영상으로 저장 가능하도록 하여 이를 폭 넓게 활용할 수 있도록 도와준다.

VFW 와 코덱을 이용하여 동영상을 생성하도록 하였다.

- VFW(Video for window) : 윈도우즈에서 최적화되고 윈도우에서 재생이 가능하도록 MS에서 정한 미디어 군.

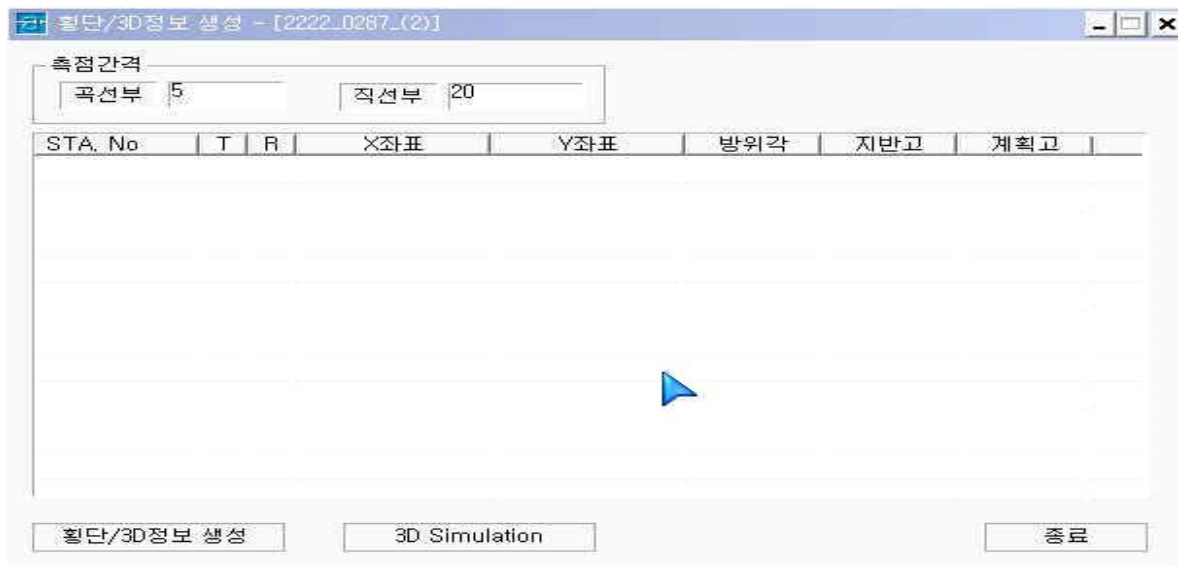
- 코덱(Codec) : 코더(coder)와 디코더(decoder)의 합성어로, 음성이나 비디오 데이터를 컴퓨터가 처리할 수 있게 디지털로 바꿔 주고, 그 데이터를 컴퓨터 사용자가 알 수 있게 모니터에 본래대로 재생시켜 주기도 하는 소프트웨어이다. 동영상처럼 용량이 큰 파일을 작게 묶어주고 이를 다시 본래대로 재생할 수 있게 해준다. 파일을 작게 해주는 것을 인코딩, 본래대로 재생하는 것을 디코딩이라고 한다.

인텔이 제안하여 많이 사용되고 있는 인디오(indeo)와 동영상 편집기에서 사용되는 엠펙(MPEG), 애플사의 MOV을 비롯해서, DivX·AVI·RLE·RA 등 여러 종류가 있다. 이중 마이크로소프트가 개발한 엠펙은 현재 가장 많이 사용되는 것으로 화질이 깨끗하지만 용량이 크다. 확장자는 mpg이며, 1·2·4 버전이 나와 있다. DivX는 엠펙4를 발전시킨 것으로 DVD에 비해 파일 용량은 작지만 DVD화질에 버금가는 영상을 보여준다.

3. 프로그램의 실행 결과

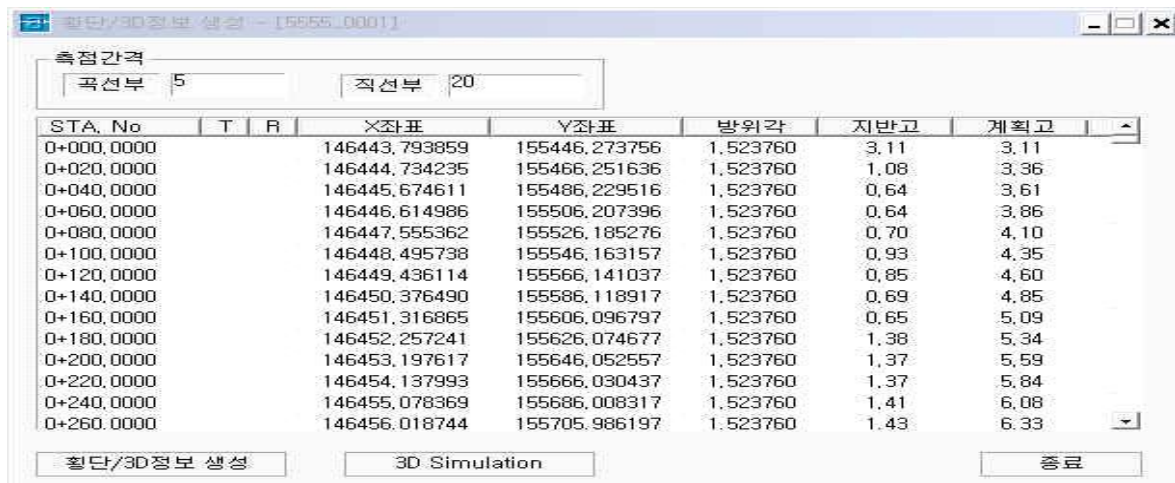
가. 실행 순서

선형을 최적화한 후 ei_Rail 메인화면에서 컨텍스트버튼을 사용하여 3D 시뮬레이션화면으로 진입한다. 그러면 아래의 화면이 나타난다.



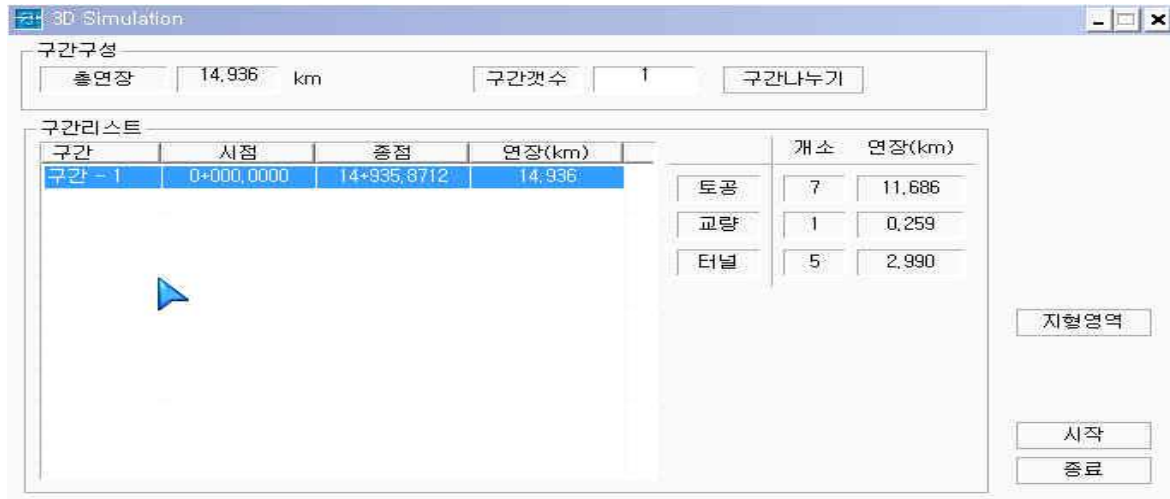
[그림 IV-93] 메인화면

여기서 횡단정보/3D 정보생성 버튼을 누르면 만들어진 최적선형의 정보를 이용하여 3차원 모델링데이터를 자동으로 생성하여 아래와 같이 보여준다.



[그림 IV- 94] 데이터 생성

다음 3D Simulation 버튼을 누르면 아래와 같은 화면이 나타난다.
여기서 시작 버튼을 누르면 3차원 시뮬레이션이 시작된다.



[그림 IV-95] 주행실행

나. 3D Simulation 실행

3D Viewer는 읽어 들인 철도 데이터를 이용하여, 자동으로 3D 모델을 만든 후, 이를 쉽게 볼 수 있도록 도와주는 툴이다. UI를 통해 눈높이, 속도, 녹화, 그래픽 옵션 제어 등을 할 수 있고, 마우스 컨트롤을 이용해 화면을 제어할 수 있다.

(1) 데이터 로딩

현재의 데이터 로딩 및 메쉬 생성 상태를 보여준다. 프로그래스 바와 텍스트를 이용하여 작업 상태를 알려준다.

작업 순서는 아래와 같다.

작업 순서 :

Step 1. 파일 옵션 정보 파일

Step 2. 텍스처 로드

Step 3. 텍스처 옵션 정보 로드

Step 4. 스카이 박스 생성

Step 5. 지형 정보 로드 및 생성

Step 6. 철도 정보 로드 및 생성

Step 7. 철도와 지형 합성

Step 8. 터널 정보 로드 및 생성

Step 9. 교량 정보 로드 및 생성

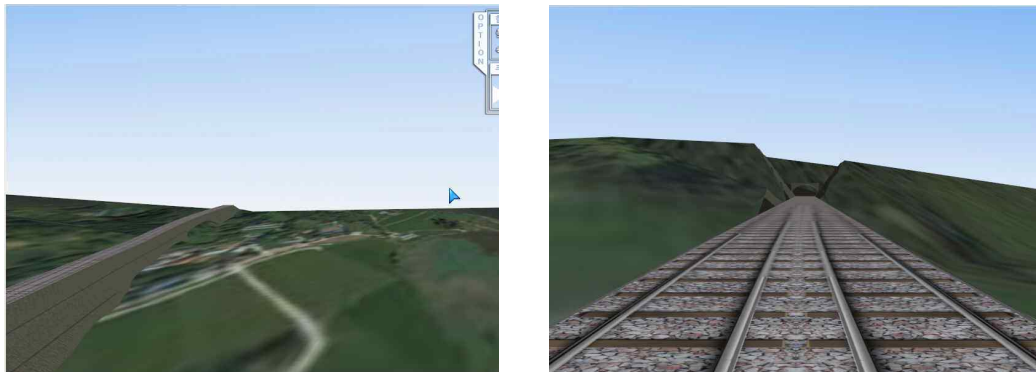


[그림 IV- 96] eiRail 초기 화면

(2) 실행 화면

로딩 화면이 끝나고 나면 아래와 같은 화면이 나온다. 뷰어가 데이터 로드 및 모델 구성이 끝나면 화면에 모델들을 렌더링하게 된다.

전체 화면을 통해 가상으로 구성된 세계를 볼 수 있게 하였고, 우측 위에 인터페이스를 위치시켜 눈높이와 속도를 조절하고, 녹화를 할 수 있게 하였다. 아래 그림은 사면이 있는 일반 구간과 터널 내의 모습, 그리고 교량을 보여주고 있다.

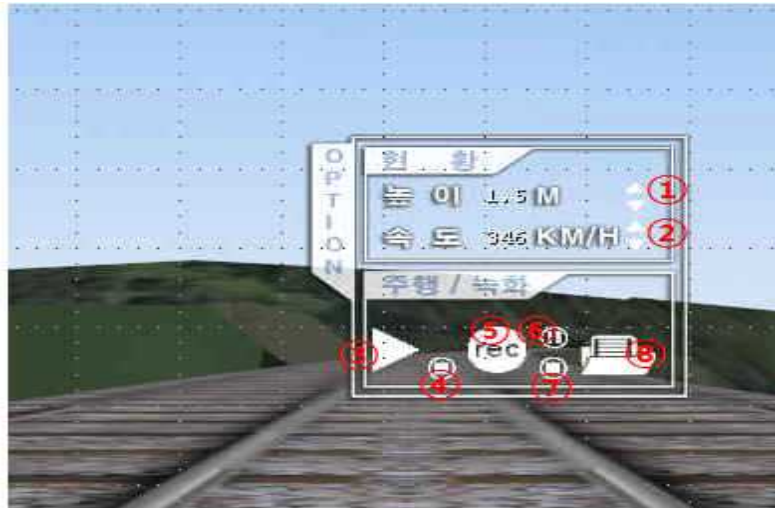


[그림 IV- 97] 실행화면]

(1) UI 설명

사용자와 프로그램이 소통하기 위해서는 중간 매개체가 필요하다. 아래와 같은 UI를 구성함으로써 높이와 속도 조절, 주행, 녹화를 컨트롤 할 수 있게 하였다.

(가) 화면 UI 설명



[그림 IV- 100] UI

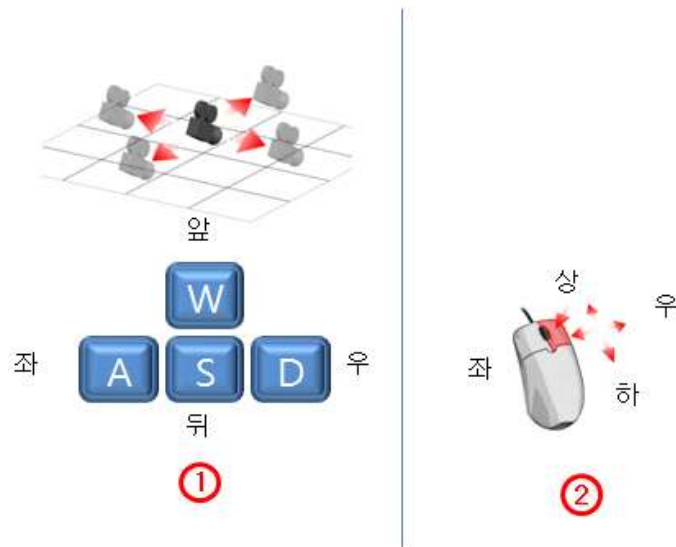
① Display 포맷

- 현황 : 운전자 높이, 주행 속도를 나타낸다.
- 주행/녹화 : 주행 시 또는 녹화 시에 필요한 버튼들을 보여준다.

② 이벤트 처리

- ① 높이 : 주행 시점의 높이를 조절한다.
- ② 속도 : 주행 시 주행속도를 조절한다.
- ③ PLAY : 철도 자동 주행을 시작한다.
- ④ STOP : 주행 시 주행을 정지 시킨다.
- ⑤ RECORD: 동영상을 녹화한다.
- ⑥ PAUSE : 녹화를 일시 정지 시킨다.
- ⑦ STOP : 녹화를 멈춘다.
- ⑧ SETUP FILE : 녹화 데이터를 저장할 파일명과 폴더를 지정한다.

③ 마우스 컨트롤 사용법



[그림 IV- 101] 마우스 컨트롤 사용법

④ 이벤트 처리

① 키보드 버튼 :

- W 버튼 - 앞으로 이동
- S 버튼 - 뒤로 이동
- A 버튼 - 왼쪽으로 옆걸음
- D 버튼 - 오른쪽으로 옆걸음

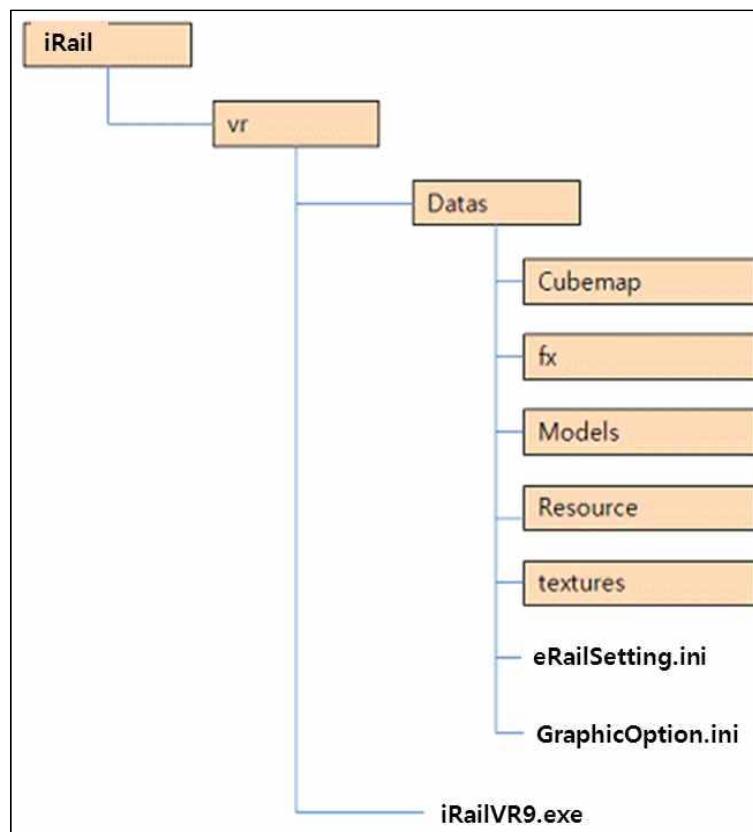
② 마우스 오른쪽 버튼 클릭: 마우스 오른쪽 버튼을 누른 채로 움직일 때

- 좌/우 - 시점을 좌/우로 움직인다.
- 상/하 - 시점을 위/아래로 움직인다.

(3) 파일 구성

- iRail : iRail 관련 루트 폴더
- vr : 시뮬레이션 관련 폴더
- iRailVR9.exe : VR 실행 파일
- Datas : VR에 필요한 리소스 저장된 폴더

- cubemap : 3D 텍스처(예:스카이박스) 저장 폴더
- fx : 셰이더 파일 저장 폴더
- Models : 맥스 모델링 데이터 저장 폴더
- Resource : UI를 위한 리소스 저장 폴더
- textures : 2D 텍스처(일반 텍스처들) 저장 폴더
- eRailSetting.ini : iRailVR이 실행 될 때 필요한 정보 데이터를 저장한 파일
- graphicoption.ini : 실행 시 화면의 크기를 설정하기 위한 파일



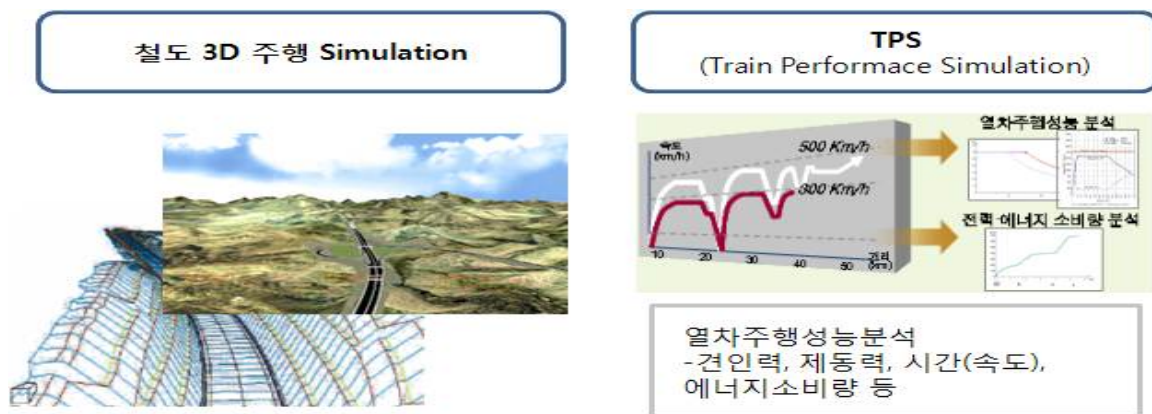
[그림 IV- 102] 파일구성

제 5장 TPS 프로그램개발

- 제1절 개요
- 제2절 TPS 해석 항목
- 제3절 차량이론
- 제4절 노선이론
- 제5절 시뮬레이션 이론
- 제6절 프로그램

제11절개요

철도를 구성하는 주요요소로는 궤도, 전기시설, 차량으로 분류된다. 그 중 차량은 국내뿐만 아니라 독일, 일본 등에서 고속화에 대한 개발이 진행 중이며, 일반철도의 표정속도 또한 증가하였다. 차량의 고속화에 따라 기존에 볼 수 없었던 많은 문제점이 발생하게 되어 궤도를 포함한 각종 구조물과 신호의 적합한 설계뿐만 아니라 차량주행에 대한 사전검토 또한 중요한 요소가 되었다. 차량주행에 따른 차량 각부의 적정용량 선정 및 노선의 적정성 판단을 위해서는 철도선형설계와 더불어 철도 주행 시뮬레이션이 요구되기 때문에 본 연구에서 개발 중인 철도선형프로그램 및 TPS(Train Performance Simulation) 연계기술을 개발하고자 한다.



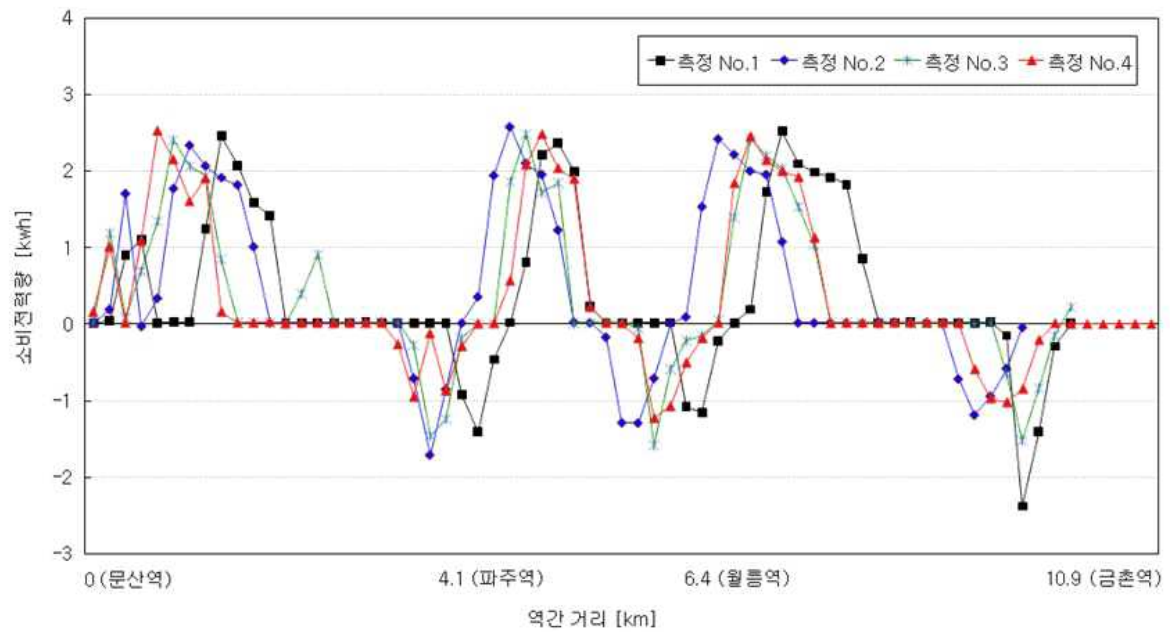
[그림 V- 103] 3D 주행 시뮬레이션 및 TPS 연계

TPS 용도는 전통적으로 선로설계, 신호시스템 설계, 운용설계에 사용되며, 구배, 곡선, 캔트 및 캔트 부족 등이 고려된 선형을 이용하여 이론적인 최대속도를 유추한다.

선형의 최대곡선에 터널, 연약지반 등과 같은 속도제약 명세를 고려하여 수정된 최대 속도곡선이 되며, 수정된 최대 속도곡선으로부터 최적의 선형이 도출되어 운용될 차량의 특성과 선형의 일치여부는 TPS를 이용하여 확인될 수 있다.

이런 TPS의 기능의 철도선형프로그램과의 연계는 프로그램에서 도출된 계획의 건설·운영시의 정확성 향상 및 열차주행성능을 고려한 선형설계가 가능하다.

1994년 구동회 등은 차량 및 운전성능 프로그램 연구를 통해 TPS관련 기술을 개발하였으며, 최근 지구 온난화 문제가 전 세계적으로 큰 문제가 되면서 전력계통의 에너지절약을 요구함에 따라 고속철도 KTX 및 경량전철 등 다양한 열차형식에 대한 연구가 진행 중이다.



[그림 V- 104] TPS 소비전력량 분석 예시

출처 : 장희주, 전동열차 소비전력 측정 및 분석 연구, 서울과학기술대학교, 2011.1

따라서, 본 장에서는 TPS관련 방법론을 검토하여 2차년도 TPS연계기술을 위한 차량, 노선, 시
물레이션 등에 대한 방법론을 정립하였다.

제12절 TPS 해석 항목

1. TPS 성능 해석 항목

TPS는 차량 및 노선의 적정성 평가에서 다음과 같은 항목을 분석함으로써 차량이 요구하는 성능을 만족하는지 또는 노선형태가 차량의 운행형태에 적합한지를 판단한다.

가. 고속성 및 가속성 평가

최고속도라 함은 평탄, 직선 선로에서 차량이 낼 수 있는 최대의 속도를 의미하며, 이는 차량이 공기저항, 차량중량, 견인력 등의 제요소를 수렴하는 중요한 변수이다.

나. 감속성 평가(제동력 평가)

감속성은 제동시 제동거리, 제동시간 등이 중요한 변수, ATC 등의 설계와 정상제동시 및 비상제동시에서의 감속성 등이 중요한 요소 변수이다.

다. 구배 등판 능력

선로의 구성은 곡선과 구배로 이루어져 있으며 고속철도의 경우 최대 3.0%의 구배를 가지고 있으므로 각 구배를 차량이 올라가 수 있는지의 판단은 노선의 건설비 등과 구분할 수 있는 중요한 요소가 된다. 따라서, 각각의 구배에서 차량이 어느 정도의 속도로 올라갈 수 있는지를 구분한다.

라. 노선에 따른 소요시간 최적화 계산 (정차역 및 운행방법에 따라)

노선에 따른 차량의 성능해석 후 소요시간이 계산되어진다. 여기서 계산되는 소요시분은 노선의 곡선, 구배, 제한속도, 터널 등의 영향에 따른 차량의 운행결과를 도출한다.

마. 노선에 따른 최적 에너지 소모 계산 (정차역 및 운행방법에 따라)

노선에 따른 차량의 성능해석 후 소요시간 이외에도 에너지 소모량이 계산되어진다. 이 계산 결과는 정차역의 조건을 부여하여 정차조건에 따라 에너지의 소요가 계산되므로 정차역 조건별로 계산결과를 볼 수 있다.

2. 해석 기초이론

가. 운행패턴 및 계산방법

(1) 계산 방법

차량의 기본운동방정식은 뉴턴의 운동방정식에서 도출된다.

$$Me \cdot \frac{dv}{dt} = F$$

위의 수식을 기본으로 Euler 방법을 이용하여 각 시간에서의 속도를 구하기 위해 아래와 같이 가속도가 적분되어 진다.

$$M(1+x)(dv/dt) = F - (R_r + R_g + B + R_c)$$

여기서, M : Mass of Trainset(kg)

x : Rotational inertia of Trainset

F : Tractive Effort of Trainset

R_r : Train Resistance(N)

R_g : Grade Resistance(N)

B : Braking Force(N)

R_c : Curve Resistance(N)

v : Velocity of trainset(km/h)

t : time(sec)

차량에 대한 수식 계산은 기본적으로 오일러의 방정식을 적용하여 속도, 거리, 에너지 계산이 이루어진다.

<전방진행>

$$V_{n+1} = V_n + dt \cdot A_n$$

$$S_{n+1} = S_n + dt \cdot (V_n + V_{n+1})/2$$

$$E_{n+1} = E_n + dt \cdot P_n$$

<후방진행>

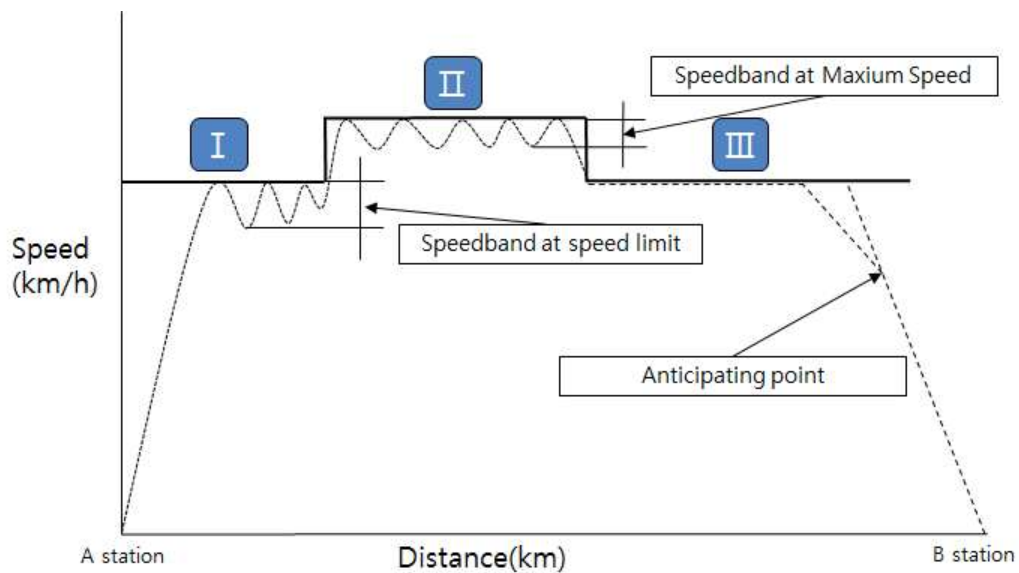
$$V_n = V_{n+1} - dt \cdot A_{n+1}$$

$$S_n = S_{n+1} - dt \cdot (V_n + V_{n+1})/2$$

$$E_n = E_{n+1} - dt \cdot P_{n+1}$$

(2) 운행패턴 분석

차량의 안전성, 정확성, 쾌적성을 고려하여 운전되어야 하지만 경제운전을 무시할 순 없다. TPS에서는 차량이 노선을 따라 운행할 때 주어진 노선을 최소의 시간에 최소의 에너지로 운전할 수 있도록 크게 3가지의 운행패턴방식을 취한다.



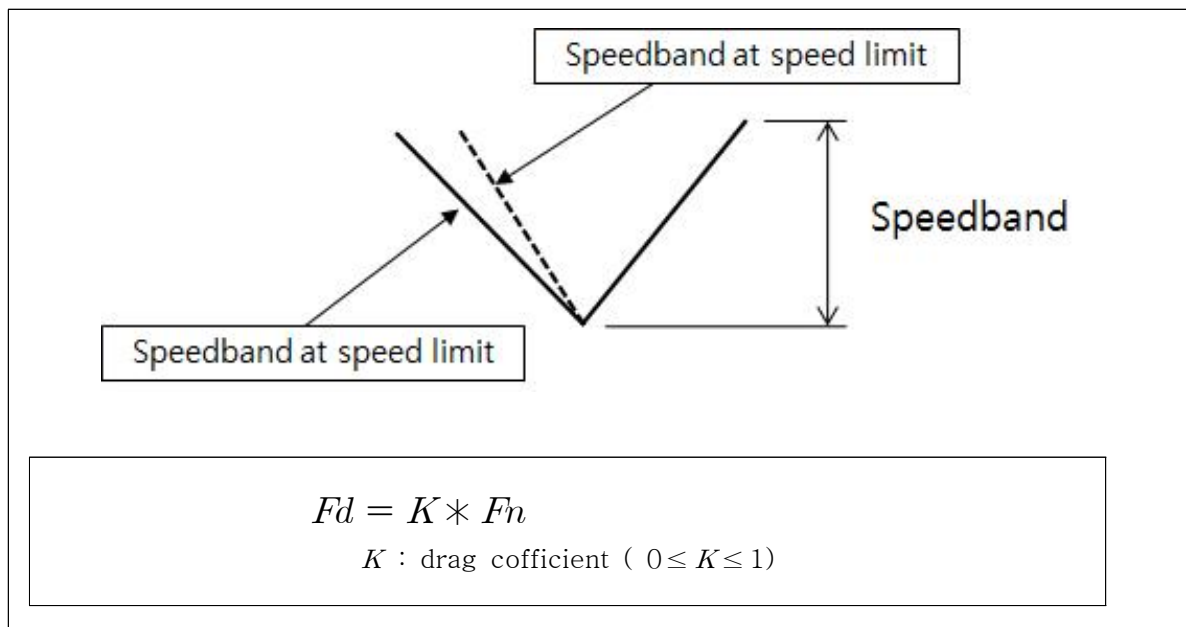
[그림 V- 105] 운행 패턴 방법

(가) 최고속도 운행

역간거리를 차량이 주행할 때 두 역 사이를 제한속도를 지키면서 최대가속, 최대제동값을 이용하여 가장 짧은 시간내에 두 역 사이를 주행하게 된다. 그 결과로 이 경우에는 에너지 소모는 많고, 주행시간은 짧다.

(나) 타행운전

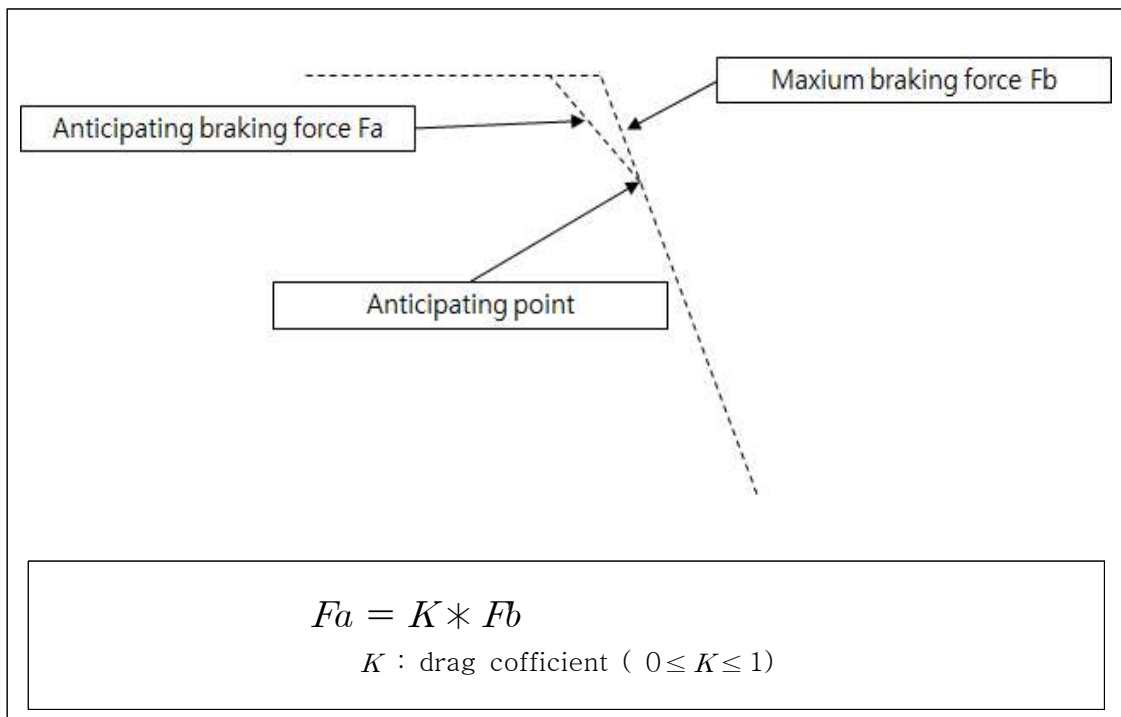
타행운전이란 감가속시 최대 감가속값을 이용하지만 제한속도나 최고속도에서 타행과 역행을 반복하면서 에너지를 절감할 수 있는 시스템이다. 이러한 운전을 함으로써 주행시간이 허용된다면 에너지 절감측면에서 경제적인 운전방법이다. 주어진 <그림 V-3> I,Ⅱ구역에서 제동율을 적정히 조정하여 타행성의 적정수준을 판단할 수 있다.



[그림 V- 106] 제동시 타행방법

(다) 예측타행운전

예측타행운전은 가속시는 최대가속도를 이용하지만 제동시 예측된 지점까지 주어진 제동율로 타행하다가 예측된 지점에서 주어진 최대 제동력으로 제동을 가함으로써 에너지를 절감하는 방법이다.



[그림 V- 107] 예측 타행방법

제13절차량이론

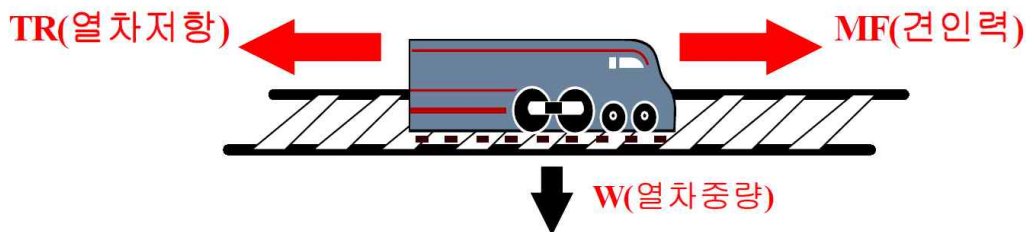
1. 열차저항

열차가 진행하는 경우 그 진행을 방해하는 힘, 즉 저항이 발생한다. 열차를 타행운전시키면 속도에 따른 저항이 발생하는데 이는 열차의 인장력에 저항하여 주행을 줄이는 방향으로 힘이 작용하고 있기 때문이다. 열차저항은 많은 인자가 관계되고 있어 매우 복잡하지만 이중 주요인자를 열거하면 다음과 같다.

- 차륜과 레일간의 마찰에 의한 저항
- 차륜과 베어링간의 마찰에 의한 저항
- 공기에 의한 저항
- 구배 또는 곡선에 의한 저항
- 속도 증가시 생기는 저항

위 저항들은 마찰저항, 구배저항, 가속저항 등 여러 조건에 따라 발생하며 이들을 총칭하여 열차저항이라 부른다.

차량이 주행 시 차량이 받는 주행저항은 크게 차량의 특성에 따른 저항, 노선훈성에 따른 저항, 기후에 대한 특성으로 구분된다.



[그림 V- 6] 열차에 가해지는 힘

선로의 상태에 의한 특성으로는 구배의 완급, 곡선반경의 대소, 레일의 크기, 레일의 구조 및 보수상태 등이 있으며 차량에 대해서는 차량의 구조, 보수의 상태, 회전부분의 급유, 적하의 상태로 구분되며 기후에 대해서는 강설 및 강우, 기온, 풍속, 바람위치와 열차 진행방향 등의 많은 인자가 있다.

이러한 인자에 대하여 정확하게 분석하는 것은 어려우나 통상 견인저항과 가속저항으로 표시되며, 견인저항은 주행저항과 거리저항으로 나눌 수 있다.

$$R = R_F + R_a \quad (3-2)$$

$$R_F = R_L + R_{str} \quad (3-3)$$

여기서, R = 전체저항

R_F = 견인저항(Traction Resistance)

R_a = 가속저항(accelerating resistance)

R_L = 주행저항(Rolling Resistance)

R_{str} = 거리저항(Distance Resistance)

가. 출발저항

일반적으로 베어링의 경우 정지하고 있는 차량을 기동시킬 때는 차축수의 마찰면 유막이 결핍된 상태이고 금속과 금속이 직접 접촉하기 때문에 마찰저항은 크다. 출발저항의 크기는 베어링의 종류, 차량의 정지시간, 기온에 따라 다르지만 속도검사 기준규정에 의해 출발저항은 다음 값을 적용하고 있다. 차량이 기동할 때 생기는 저항으로 속도와는 관계가 없으며 식으로는 다음과 같다.

$$R_s = r_s \cdot W$$

여기서 R_s = Starting Resistance(kgf)

r_s = Coefficient(kgf/t)

W = TrainWeight(ton)

○ 통상 발차시

- 평축 : 8kg/t
- Roller축 : 3kg/t

○ 도중 구배기동시

- 평축 : 8kg/t
- Roller축 : 3kg/t

나. 주행저항

열차가 평탄한 직선선로를 운전할 때 생기는 저항을 주행저항이라 하고 다음과 같은 원인에 의해 발생한다.

- 차축과 베어링간의 마찰에 의한 저항
- 차륜과 레일사이의 마찰저항
- 차량의 동요에 의해 생기는 저항

- 공기에 의한 저항
- 제륜차와 차륜이 접촉함에 의한 저항
- 기계부분의 마찰저항

위와 같은 저항 중 차륜과 레일사이의 마찰저항은 차륜이 레일 위를 회전할 때에 생기는 구름마찰과 타행 등에 의한 미끄럼 마찰에 의한 것이 중복되어 있다. 이 값은 선로의 상태에 따라 다소의 변화가 있으며 속도에 거의 비례하고 차량의 중량에도 비례하지만 차축의 마찰저항에 비해 훨씬 작다.

열차의 속도가 높아지면 차량이 전후, 좌우, 상하로 동요하고 저항이 발생하는데 이 저항은 속도의 자승에 비례한다. 열차가 주행 중은 주위의 공기를 밀어 헤쳐서 진행하기 때문에 공기에 의한 저항을 일으킨다.

이 저항은 열차전면에 가해지는 저항, 열차 후부가 진공상태로 되기 때문에 열차가 후부에 끌리는 저항, 각 차량간에 공기의 와류에 의한 저항, 열차 측면과 공기와의 마찰저항 4가지로 구분되며 차량의 형상, 단면적, 연결양수, 기타 궤간의 대소, 선로의 상태, 기후 등에 따라 다르다.

제륜차와 차륜의 접촉에 의한 저항은 차륜, 제륜차간의 간격이 근소한 경우에 발생하기 쉽고 크기는 피스톤 행정의 대소에 관계되지만 보통의 경우 작기 때문에 고려하지 않는다.

기계부분의 마찰저항은 전기자 베어링 대소치차, 주전도기 지지베어링 등의 부분에 있어서 마찰 혹은 충격에 의한 저항으로 타행운전 중에는 주행저항 속에 포함되지만 역행중은 동력전달 효율 속에 계산된다.

일반적으로는 아래와 같이 속도에 대한 함수로 표현할 수 있다.

$$R_L = A + B \cdot v + C \cdot v^2$$

위의 식에서 A 와 관계되는 항은 기계부분의 마찰저항, 차축베어링 사이의 마찰저항, 차륜의 회전마찰저항이며 B 에 관계되는 항은 후렌지와 레일사이의 마찰저항이며 C 에 관계되는 항은 공기저항 및 동요에 의한 저항이다.

또한, 주해저항은 기관차의 저항 R_{LT} 와 객차의 저항 R_{LP} 로 나누어 볼 수 있다.

기관차의 저항은 다음과 같다.

$$R_{LT} = g \cdot [(f_L \cdot m/1000) + (k_{stl} \cdot ((v + \Delta v) \cdot 3.6)^2)] \quad (3-10)$$

여기서 R_{LT} 는 기관차의 저항, $g = 9.81m/s^2$ 는 중력가속도 m 은 기관차의 무게(kg), v 는 열차의 속도(m/s), Δv 는 공기저항(4.17 m/s), $f_L = 3.3$ 은 Resistance factor, $k_{stl} = 0.03kg \cdot s^2/m^2$ 은 Resistance coefficient 이다.

객차의 저항은 다음과 같이 표현된다.

$$R_{LP} = g \cdot [(1.9 \cdot m/1000) + (k_{sa1} \cdot v \cdot 3.6 \cdot m/1000) + (k_{sa2} \cdot (n + 2.7) \cdot ((v + \Delta v) \cdot 3.6)^2)]$$

여기서, R_{LP} 는 객차의 저항, $k_{sa1} = 0.0025s/m$, $k_{sa2} = 0.00696kg \cdot s^2/m^2$ 는 Resistance coefficient, n 은 객차의 차량 수, v 는 열차의속도(m/s), Δv 는 공기저항(4.17 m/s)이다. 화물차량의 경우, 다음 식으로 표현된다.

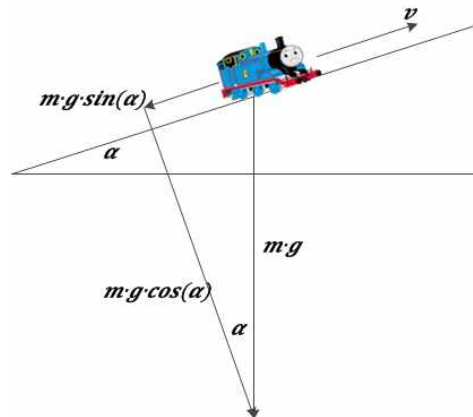
$$R_{LG} = g \cdot m/1000 \cdot [2.2 - k_{st2}/(v \cdot 3.6 + k_{st3}) + k_{st4} \cdot (v \cdot 3.6)^2] \quad (3-12)$$

여기서, R_{LG} 는 화물차량의 저항, $k_{st2} = 80m/s$, $k_{st3} = 38m/s$, $k_{st4} = 0.00032s^2/m^2$ 는 Resistance coefficient 이다.

다. 구배저항

열차가 구배를 오르거나 내릴 때 중력에 의해 작용하는 저항을 말하며 오를때는 열차를 가속시키는 저항으로 작용하나 내릴 때는 오히려 가속시키는 힘이 작용한다.

구배저항은 열차의 진행 방향과 반대방향으로 미치는 열차 무게에 의한 힘으로 다음 그림과 같다.



[그림 V- 7] Gradient Resistance

구배저항은 다음 식으로 나타낼 수 있으며

$$R_g = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (3-17)$$

R_g = 구배저항

m = 열차의 무게

g = 중력가속도

α = 기울기각도

여기서, α 값이 충분히 작을 때는 다음 식으로 표현이 가능하다.

$$\frac{Q}{W} = \frac{AC}{BC}$$

θ 는 매우 작기 때문에

$$AB \approx BC$$

따라서,

$$\frac{Q}{W} = \frac{AC}{AB} \approx, Q = W \frac{AC}{AB}$$

구배는 철도에서 천분율로 표시하기 때문에 i 의 구배는

$$i = \frac{AC}{AB} \times 1000 \text{ (0/00 : 구배)}$$

이상으로부터

$$Q = W \frac{i}{1000} = 1000 W \times \frac{i}{1000} [kg]$$

로 된다. 구배저항의 단위는 1ton 당 값이 되기 때문에 구배저항은 다음과 같이 계산된다.

$$R_g = \frac{Q}{W} = i$$

여기서, R_g = 구배저항

W = 열차중량

i = 구배

라. 곡선저항

차량이 곡선로에 들어가면 곡선저항을 받는다. 이 곡선저항을 일으키는 원인은 다음과 같다.

- 곡선에 따라서 주행함에 의한 차륜의 회전마찰저항
- 외측레일과 내측레일과의 길이차에 의해 생기는 외측차륜의 미끄럼 마찰저항
- 원심력에 의한 후렌지와 외측레일간의 마찰저항

곡선저항은 선로의 곡선반경의 대소, 곡선의 캔트, 슬랙, 고정축거, 후렌지와 레일간격의 대소 및 속도의 고저 등에 따라 다르지만 이러한 모든 조건을 곡선반경의 관계로서 표현하고 있으며 일반적으로 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$R_B = \frac{6.3}{r-55} \cdot m, \text{ when } r \geq 300 \quad (3-19)$$

$$R_B = \frac{4.91}{r-30} \cdot m, \text{ when } r < 300 \quad (3-20)$$

여기서, R_B = 회전저항

r = 회전반경(m)

m = 열차무게(kg)

$$R_c = \frac{800}{r} (\text{kg/t})$$

여기서, R_c = Curve Resistance(kg/t)

r = Curve radius(m)

마. 터널저항

열차가 터널내를 주행하는 경우에는 터널내에 발생하는 풍압의 변동에 의한 저항이 (+)가 되어 공기저항이 크게 발생된다. 이 때 증가하는 저항의 크기는 터널단면의 형상, 크기, 터널의 길이, 열차속도 등에 따라 달라지며 다음의 식으로 나타내어진다.

$$R_T = f_t \cdot v^2 \quad (3-13)$$

이때, R_T = 터널저항

f_t = tunnel factor

v = 열차의속도(m/s)

이며 터널이 아닌 구간에서는 $R_T = 0$ 이다.

바. 가속저항

열차가 등속도로 진행하기 위해서는 열차저항만의 인장력이 있으면 좋지만 다시 가속을 얻기 위해서는 거기에 상응하는 가속력을 필요로 한다. 이 가속력은 열차를 가속시키기 위해서 발휘해야 하는 여분의 인장력으로 일종의 저항이 작용하기 때문인 것으로 보고 가속저항이라 부른다.

즉, 열차를 가속시키기 위해서는 여분의 인장력을 필요로 하며 이 여분의 인장력이 가속력으로 가속력=가속저항이라 부른다.

가속저항을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$R_a = M \cdot a \cdot (1 + \alpha)$$

여기서, R_a = Accelerational resistance

M = Train mass

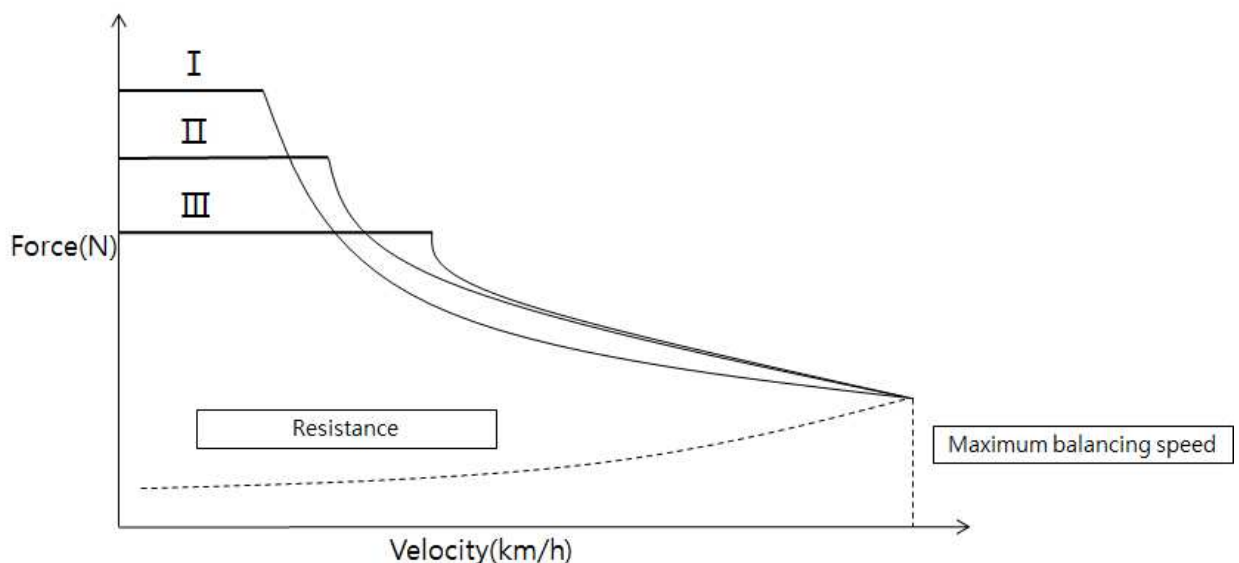
a = Acceleration

α = Rotational inertia

열차에는 차륜을 비롯하여 대차차, 소차차, 전기차 등의 회전부분이 있으므로 직진부분의 가속외에 회전부분의 속도를 상승시키지 않으면 안된다. 때문에 여분의 힘을 필요로 하며 통상적으로 기관차, 전동차는 10%증가, 부수차·제어차는 6%의 증가를 나타낸다. 편성으로 고려하면 일반열차는 6%, 전동차의 경우 8.8%의 증가를 나타낸다.

2. 견인력 특성

견인력의 문제는 최고속도 달성문제 및 가속성능과 밀접한 관계가 있으므로 전동기의 용량 산정시 차체와 승객의 무게, 역간 거리와 주행시간을 고려하여야 한다. 즉 전동기의 용량은 주어진 시간 안에 어떠한 무게를 싣고 요구된 거리를 달릴 수 있는 능력인데, 이 능력은 전동기의 출력에만 의해서 결정되는 것이 아니라 지상설비와 차상설비를 포함한 구동시스템 전체에 의해 결정된다.

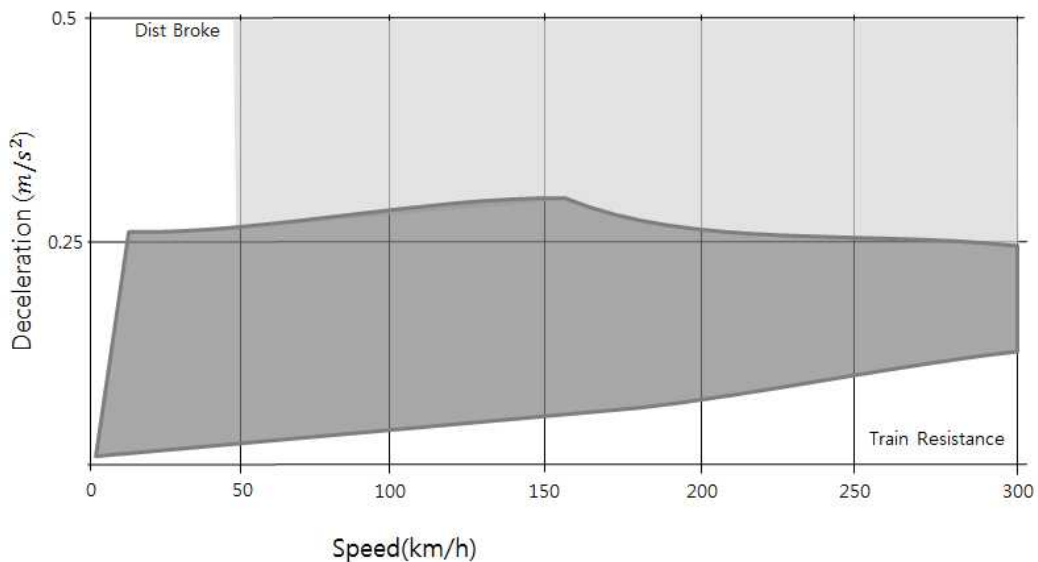


[그림 V- 8] 견인력에 따른 가속력 비교

위 <그림 V-8>과 같이 속도에 따른 견인력의 특성은 모터의 특성과 요구하는 특성에 따라 여러 가지 형태로 나타낼 수 있다. 이와 같은 3개의 모터 패턴을 고려할 경우 I형 경우 기동 가속력은 크지만 중간속도범위에 가속력이 최소가 되는 경우이고, II형, III형으로 갈수록 기동가속력은 작지만 중간속도 범위에서 가속력이 최대가 되는 구간이다. 일정속도에 대한 모의주행결과 정지상태에서 평행상태에 이르는 시간에 있어서는 단 몇%의 차만 생긴다. 그러므로 구체적인 견인특성을 고려할시 모든 철도구간에서 구배 증가 시 평행속도와 이 속도에 도달하기 위해 필요한 시간과의 관계를 모의주행시험을 통해 고려하여야 하며, 추가 역에서 가능한 구조와 역간 추정거리와의 관계 등을 고려하여 결정하여야 한다.

3. 제동력 특성

운동 중에 있는 물체를 정지시키는데는 그 물체가 가지고 있는 운동에너지를 제거하도록 힘을 가해야 한다. 차량이 가지고 있는 운동에너지를 제거해 차량을 정지시키는 힘을 브레이크힘이라 한다. 제동력은 견인력과 함께 차량에서 2개의 중요한 요소로서 항상 밀접한 관계가 있다. 제동장치는 크게 접촉식과 비접촉식 브레이크장치로 나눌 수 있으며 접촉식 브레이크는 수용브레이크, 차륜브레이크, 공기브레이크, 전기브레이크, 발전브레이크 등으로 분류되고 비접촉식 브레이크는 와전류 제동장치로 크게 나누어지며 제동력의 분담을 <그림 V-9>가 차량의 제동성과 유지보수 측면에서의 성능을 좌우한다.

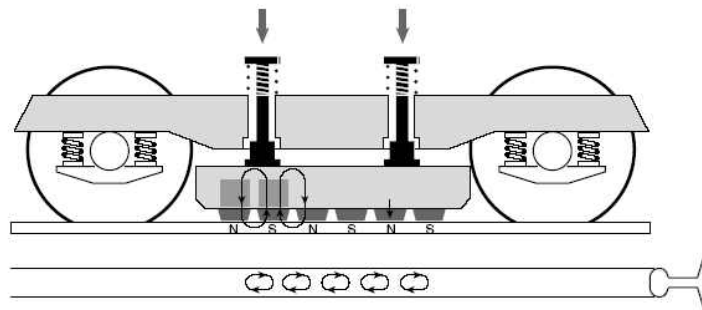


[그림 V- 9] 제동시스템의 속도에 따른 제동분담비율 예(ICE기준)

일반적으로 접촉식 브레이크 시스템으로 고속용에서는 디스크 브레이크 시스템<그림 V-10>과 전기브레이크 시스템이 주로 이용되며 보조적으로 답면 브레이크 시스템이 이용되고 있으며 저속용에서 답면 브레이크 시스템 <그림 V-11>과 전기브레이크 시스템이 주로 이용되며 보조적으로 답면 브레이크 시스템이 이용되고 있으며 저속용에서 답면 브레이크 시스템이 주로 사용되며 중속 및 전동차 시스템에서는 디스크 제동 및 발전제동 시스템으로 가고 있는 추세다. 고속에서 제동력의 확보와 유지보수 측면에서 비접촉 방식인 와전류 방식이 채용되는 추세로 가고 있다.



[그림 V- 10] 디스크브레이크 시스템



[그림 V- 11] 와전류 제동장치의 예

4. 효율 및 역율 특성

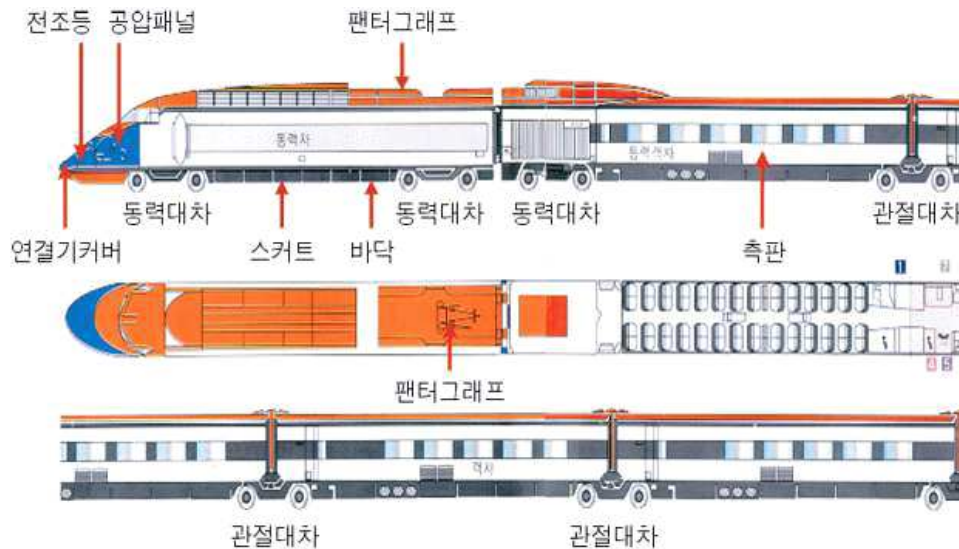
차량에 주어지는 견인력 및 제동력은 기초장치에 의해 제공되는 전달력이 차륜에 전부 전해지지 않는다. 견인력의 경우 견인전동기의 특성에 의해 차륜에 전해지는 특성이 어느 정도의 손실을 초래한다. 그러므로 이러한 손실을 고려한 것을 효율로 나타낼 수 있는. 제동 시에도 이와 같은 원리로 일정 효율하에서 특성 값이 역으로 전해지므로 실제 필요한 제동력 및 견인력이 더 크게 필요하다.

통상적으로 견인 시 효율 및 역율은 속도에 따라 다르게 나타내고 있다. 이러한 특성은 고속전철인 TGV시스템의 경우 속도와 견인력에 따라 그 값이 수시로 변한다. 일반적으로 효율 및 역율을 속도에 관계없이 85%~95% 정도로 산정하고 있지만 실제적으로 전기적인 FLOW를 상세하게 나타내기 위해서는 이를 명확히 나타낼 필요가 있다. 이에 대한 것은 제동시 및 회생시도 같은 방식으로 나타낸다.

5. 차량 타입별 특성

차량을 표현하는데 있어 기본적인 물리량의 표현이 기본적으로 필요하다. 고속차량이건 일반차량이고 간에 한편성이 이루는 차량의 종류는 여러 가지이다. 즉 전동차의 경우 운전차-1(무동력 운전차), 운전차-2(동력용 운전차), 객차-1(무동력 객차), 객차-2(동력용 객차) 등으로 여러 형태가

있으며 고속차량의 경우는 동력차, 동력객차, 객차 등으로 분류되고 이에 대한 대략적인 형태는 다음과 같다.



[그림 V- 12] 고속차량 일반 형태

자료 : 고속철도 차량일반, 한국철도공사, 2011년

객차의 경우 동력장치가 없으므로 물리적인 데이터가 필요하며 이에 대한 데이터는 다음과 같다.

- 차량 중량
- 공차시 중량
- 만차시 중량
- 승객중량
- 보조전력량(Hotel Power)

동력차의 경우 위의 데이터 외에 다음과 같은 데이터가 추가적으로 필요하다.

- 속도에 따른 견인력
- 속도에 따른 제동력
- 속도에 따른 견인 및 제동효율
- 제동시 역율 및 견인시 역율
- 회생이 가능하다면 회생제동 역율 및 효율

위와 같이 서로 다른 타입이 가지는 제원이 다르므로 이에 대한 데이터를 다르게 입력함으로써 이를 종합적인 데이터로 이용할 수 있다. 각 차량마다 주행저항을 표시하는 Flange Coefficient, 마찰계수등이 서로 다르나 이를 일일이 다르게 표시하면 더 번거로운 일이므로 주행저항과 관련된 데이터는 편성에 대하여 종합적으로 나타내는 것이 바람직하다.

6. RMS 전류

운전선도에서 주전동기의 온도상승을 추정하는 방법으로서 자승평균 평방근전류(RMS: Root Mean Square Current)를 구한다. 여기에 따라 선구역에 투입하는 전차의 형식, 편성을 결정하는 경우, 치차비, 전동차와 부수차의 비를 상정하여 운전선도를 그려서 경제 계산을 하고 병용해서 온도상승을 추정하여 여러 가지 무리가 있지 않나 혹은 역으로 체크하고 있다. RMS전류는 운전선도가 주어진 경우 이 선도에 대한 RMS전류는 다음 식에 의해 주어진다.

$$(S \text{ 전류})^2 = \frac{(\text{전류})^2 \times (\text{역행 및 발전브레이크 시분})}{\text{전운전 시분}}$$

7. 전동기의 특성

가. 전차용 주전동기

전차의 운전성능을 결정하는 기초는 주전동기 특성이며 그 전동기가 구비해야할 주된 조건은 다음과 같다.

- 기동시나 상구배 등에서 큰 회전력을 발휘할 것
- 속도제어가 넓은 범위에서 이루어 질 것
- 전력소비량이 적을 것

직류직권 전동기가 위에 기술 한 바에 가장 적합하며 전차용 주전동기에 사용하여도 부하의 요구에 적합하고 또한 전원 및 전동기에 무리가 없고 운전이 가능하다. 즉 직권 전동기는 다음과 같은 특성에 있어서 분권 및 복권전동기에 비해 전차용 주전동기로 적합하다.

전동기는 회전력이 크고, 일정 출력성이 요구되며 회전력의 독립성이 보장되어야 한다.

회전력과 관련하여 전동기의 회전력은 전기자 전류와 계자자속의 곱에 비례한다. 직권전동기는 계자코일과 전기자 도체가 직렬로 접속되어 있으므로 전기자 전류의 증가에 의한 회전력의 증가는 직권전동기가 제일 크다. 일정 출력성과 관련하여 전동기의 출력은 속도와 회전력의 곱에 비례한다. 직권전동기는 회전력이 증가할 때 속도가 현저하게 저하하므로 다른 전동기에 비해서 약간의 출력 증가로서 큰 회전력이 얻어진다. 따라서 상향구배 또는 기동시에 대해서도 전동기의 용량이 과대하지 않고 또한 변전소에 걸리는 부하도 과대하게 되지 않는다.

회전력의 독립성과 관련하여 분권계자의 강도는 전동기의 단자전압에 따라서 다르므로 회전력은 전압의 영향을 받지만 직권계자의 강도는 전기자 전류에만 관계가 있고 단자전압에는 직접 관계가 없기 때문에 직권전동기는 단자전압이 저하해도 소요의 회전력을 얻을 수가 있다. 이러한 이유로 특수한 경우 이외에는 이전동기가 전차용 주전동기로 사용된다. 교류전화구간의 전차도 교류전압을 실리콘 정류기등에 의해 정류하여 직류직권 전동기를 사용하는 방식을 채택하고 있다. 전차용(분산식) 주전동기는 주로 4극이고 출력은 차량이 구조상 공간의 제한을 받고 협궤용 전차는 150KW이하, 표준궤형 전차는 200KW이하이며, 고소차량의 경우 300KW정도 이상을 요구하

고 있다. 전동기 정격전압은 단위편성의 신형전차에서는 375V, 기타 전차에서는 750V이하이다. 또한 속도제어를 위해 약계자장치가 부속으로 설계되어 있는 것이 많다. 통풍은 자연통풍을 많이 사용하고 있다. 신형전차와 같이 발전제동을 사용하는 전차는 주전동기를 역행과 제동의 양쪽으로 사용하기 위해 용량적으로 여유를 가진다. 주전동기의 절연종별은 종래 B종절연이 사용되어 오다가 절연재료의 진보에 따라 앞으로의 주전동기는 H종 전연으로 시행되고 있는 경향이 있다. 주전동기의 지지방식은 주전동기 대부분을 차축에 걸어 붙이는 식이 채용되어 왔으며 이 방식은 스프링하 중량을 증대시켜 주전동기 자신이나 레일에도 악영향을 미치고 승차감 및 속도향상에 문제가 있으므로 신형차량에서는 스프링 하부 중량 경감요구에 따라 소형고속 주전동기를 사용함에 따라 대차현가 방식으로 되어 동력전달 방식에도 변화가 있다.

나. 전동기의 입력, 손실, 출력, 효율

전동기의 외부로부터 공급되는 전력을 전동기의 입력이라 하고 전동기의 단자전압과 전동기에 흐르고 있는 전류의 곱으로 표시한다.

$$\text{전동기입력}(KW) = \frac{\text{전동기전압}(A) \times \text{전동기전류}(A)}{1000}$$

전동기 입력단위는 KW로 표시하고 있다. 전동기 입력이라하면 전동기에서 소비되는 전기에너지의 크기를 표시하는 것이다. 전동기에 들어오는 전기에너지의 일부분은 전동기 내부에서 열에너지로 바뀌어 손실로 소비된다. 전동기 입력에서 이 손실을 뺀 것이 전동기 출력으로서 유효하게 사용되는 것이다. 이 손실은 전동기 각부의 온도를 상승시켜 전동기의 효율을 저하시키는 유효한 것으로 저항손실, 철손실(히스테리시스손, 와류손), 기계손실로 대별된다. 전동기는 전기에너지를 기계에너지로 변환시키는 전기기기로서 전술한 전동기 입력은 전부 전동기의 회전으로 되는 것은 아니다.

전동기 입력의 일부는 손실로서 전동기 내부에서 열에너지로 변환되어 없어지므로 전동기 입력에서 이 손실을 뺀 것이 전동기의 유효출력이 된다. 출력의 단위도 입력과 같이 WK를 사용한다.

$$\text{전동기출력}(KW) = \text{전동기입력}(KW) - \text{전동기손실}(KW)$$

전동기 출력은 회전력과 회전수의 곱에 비례한다. 요컨대 회전수, 회전력을 알면 위식에서 출력을 산출할 수 있다. 전동기의 입력과 출력과의 비를 전동기 효율이라 한다.

$$\text{전동기효율}(\%) = \frac{\text{출력}}{\text{입력}} \times 100, \text{전동기손실}(\%) = \frac{\text{입력} - \text{출력}}{\text{입력}} \times 100$$

위식에서 입력에 대한 손실의 크기를 알면 효율은 산출된다. 그러나 입력이 크면 손실도 커지기 때문에 일반적으로 정격전류 부근에 있어서 가장 좋은 효율이 되도록 설계되고 있다.

다. 전동기 정격

전동기는 단순히 출력만을 비교하여 그 크기의 대소 및 능력을 판단하는 것은 아니다. 사용전압, 사용시간, 보호방식 등에 관련하여 변하는 것이다. 그러므로 사용자가 요구하는 규격에 적합하게 지장 없이 사용하는 능력을 명확하게 하는 것은 정격출력, 정격전압, 정격전류, 정격회전수, 정격회전력 및 사용 시간 등을 명시하지 않으면 안 된다. 이러한 것을 통틀어 그 전동기의 정격이라 한다. 사용시간은 사용상태가 연속사용 및 단시간 사용에 따라서 연속정격과 시간정격으로 구별되고 있다.

정격전압의 경우 저전동기를 안전하게 사용하기 위해 최고허용전압에서 전동기의 (+), (-) 양단에 나타나는 전압으로 가선전압 1500V를 사용하는 경우 1/2인 750V이고, 신형의 경우 1/4인 375V이다. 정격전류는 전동기를 안전하게 사용하기 위한 최대허용 전류에서 주전동기의 입력전류를 말하며 1시간 정격과 연속정격이 있지만 보통 1시간 정격을 기준으로 하고 있다.

정격출력은 정격전류에 있어서의 주전동기 출력을 말하고 다음과 같이 표시한다.

$$\text{정격출력} = \text{정격전압} \times \text{정격전류} \times \text{효율}$$

전동기에 부하전류를 통하여 운전하면 그 손실에 따라 발생한 열에너지는 전동기 내부에 축적되어 각부의 온도를 높인다. 규정이상의 온도상승은 전동기 고장의 원인이 되고 또한 절연을 나쁘게 해 전동기의 소명을 단축시키는 결과가 된다. 그러므로 주전동기 각부에 사용되고 있는 절연물에 온도 상상의 한계를 정할 필요가 있으며 이 제한 내에 사용하는 조건을 정격이라 한다.

현재에는 절연재료의 개량과 함께 통풍효과의 비약적 상승에 따라 전동기의 온도상승을 완화하여 연속정격은 거의 1시간과 같게 되었다. 때문에 1시간 정격이 전동기의 열용량의 척도로서 가치가 적어지고 있다.

각종 손실에 따라서 전동기의 온도는 상승하지만 부하전류에 의한 요소가 대단히 크다. 주전동기의 정격전류라 함은 통상1시간 정격전류를 나타내지만 실제 주전동기 사용을 보면 1시간도 연속하여 사용하는 것은 거의 없으므로 단시간 사용의 경우는 1시간 정격을 표준으로 하여 어느 정도의 과부하는 허용하고 있다.

운전선도에서 주전동기 온도상승을 추정하는 방법으로 RMS전류를 구한. 여기에 따라 선구역에 투입하는 전차의 형식, 편성을 결정하는 경우 치차비, 부수차의 비를 상정하여 운전선도를 그려서 경제계산을 하고 병용해서 온도상승을 추정하여 여러 가지 무리가 있지 않나 혹은 역으로 여유를 체크한다.

라. 고속전동기

걸어붙이는 식의 전동기 결점을 제거하고 대차 스프링위에 올려놓아 차축과 분리함에 따라 치차장치에 무리를 주지 않고 치차비가 큰 것이 채용됨에 따라 높은 전기자 周速이 허용되는 전동기가 소형 경량화 되었다.

이 구동방식에 의한 이익은 스프링아래 중량경감의 문제로서 승차감이 좋아지고 궤도의 손상이 작아지며 레일과 차륜과의 마모가 감소한다. 또한 기기의 손상, 마모, 파괴가 작아지고 전동기의 진동충격의 감소로 인한 정류피해가 감소하는 등 여러 가지 이점이 있다. 이와같이 걸어 붙이는 식의 전동기에 비교해서 스프링 위 취부 전동기에서는 충격에 대한 설계상 대책이 필요 없으며 강, 철손 및 회전수 등의 증대 즉 출력의 증대로서 고속소형 전동기가 채용된 것이다. 또한 전기자 주속의 고속화에 따라 자기통풍형 전동기의 통풍량이 증대하여 냉각효과가 비약적으로 상승하고 절연물의 진보에 따라 전동기가 소형, 경량화 되었다.

전동기의 소형 경량화를 위해 크기와 중량을 감소시키는 중요한 요소는 치차장치이다. 종래의 직접구동방식에서는 치차비의 최대가 고작 5:1 이었지만 분리구동방식으로 하여 치차장치에 무리를 주지 않고 치차비는 전기자회전으로 얻는 최고경제속도까지 선택가능하게 되어 최고 12:1 까지 허용된다. 일반적으로 전동기 사이즈와 중량은 거의 회전력에 비례하고 또한 출력은 회전수와 회전력의 곱에 비례한다.

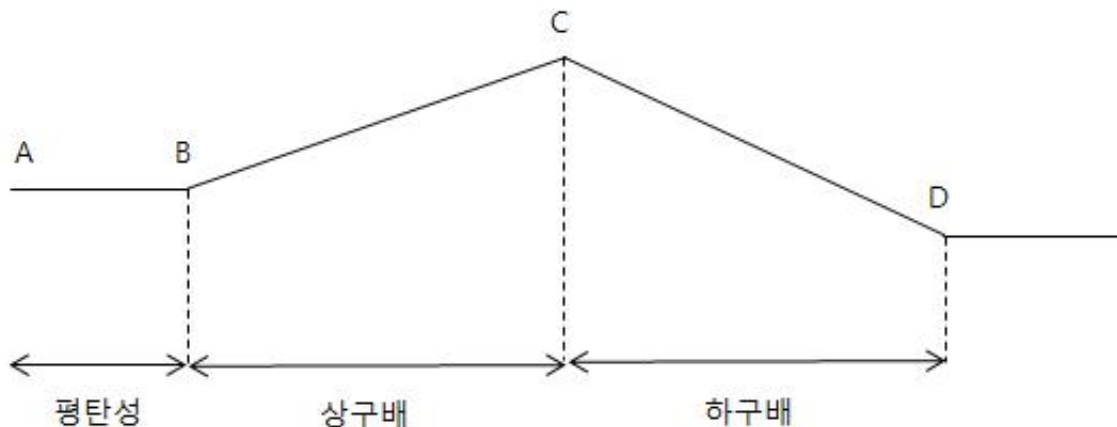
제14절노선이론

차량과 관련된 데이터 외에 차량이 주행하는 노선의 여러 가지 특징이 규명되고 정의되어야만 차량이 주어진 노선을 주어진 조건하에서 운행할 수 있다. 일반적으로 노선은 선형적인 특징으로 구배 및 곡선으로 이루어지며 전기적은 전원을 사용하는 전차선 타입의 경우는 전원과 관련된 노선의 특징을 가지고 있다. 이와 관련된 특징으로는 변전소와 변전소와의 구분을 위해 사구간을 설치하고 있다. 이와같은 조건에 의해 타행과 제한속도의 영향이 있으므로 이를 노선 파일에서 상세히 정의되어야 한다.

1. 구배

구배라 함은 노선의 수평 성분에 대한 수직 성분의 비율로 고도와 관련되며 보통 1000분율로 나타낸다. 즉 수평거리 1000m 에 대한 수직 방향의 높이(m)를 말하며 상구배일 경우 (+), 하구배일 경우(-)로 표시한다,

일반적으로 구배는 견인시 견인력 및 제동력의 가감에 필요하다. 상구배일 경우 같은 속도를 얻기 위해서 더 많은 견인력이 필요하고, 하구배에서는 같은 속도를 얻기 위해 더 적은 견인력이 필요하다. 제동시에는 이와 반대의 효과를 가져다준다. 그러므로 구배에 대한 제한이 필요하다.



[그림 V- 13] 구배의 정의

2. 곡선

열차가 곡선을 통과할 때 차량에서 발생하는 원심력이 곡선 외측에 작용하여 차량이 외측으로 전복, 승객이 외측으로 쏠리어 승차감을 해치고 차량의 질량과 횡압이 외측레일에 부담을 주게 되어 궤도 보수량을 증대시키는 악영향을 발생시킨다. 이러한 악영향을 방지하기 위하여 내측레일에 비례하여 외측레일을 높게 하여 합력 힘이 레일의 중앙점에 작용하게 하는 것을 캔트(Cant)라 한다.

일반적으로 고속철도 노선과 일반철도 노선의 가장 큰 특징적인 차이점은 곡률반경의 증대 즉 곡선부의 최소화이다. 현재 경부선의 경우 곡률반경 400~1200m가 대부분을 차지하고 있으므로 속도의 제한을 많이 받고 있으나 국내 고속철도의 경우 3000m 이상의 곡선이 대부분을 차지하므로 곡선에 의한 속도제한은 크게 받지 않는다.

한국, 일본, 유럽 등에서 사용하는 속도제한의 일반식은 다음과 같다.

$$C + C' = 11.8 \cdot \frac{V^2}{R}$$

C : Cant(mm)

C' : Cant Deficiency(mm)

V : Maximum speed on curve(Km/h)

R : Curve radius(m)

위 식에서 알 수 있듯이 곡선에서의 최대 통과 속도는 노선에서 부설되는 캔트, 최대 허용캔트, 곡선 반경에 의해 결정된다. 이론적인 공식에 의하여 구한 캔트량이 평형 속도 되는 열차에 대해서 가장 이상적이나 어느 곡선이건 통과열차의 속도와 곡선속도가 일정치 않으므로 이론식을 그대로 적용할 수는 없다. 그러므로 안전율과 승차감을 고려하여 허용 캔트부족량(Cant Deficiency)은 100mm 정도로 제한하고 있다. 최대 허용 캔트부족량은 차량이 곡선상을 통과할 때 발생하는 초과원심력으로 작용한다. 캔트 또한 전복을 고려하여 최대 160mm를 초과하지 말아야 한다. 외국의 경우도 최대 캔트가 150~160mm 정도로 정하고 있으며 캔트부족량도 80~100mm를 허용하고 있다.

가. 사구간

사구간이라 함은 전차선으로부터 전력을 공급받는 전기차와 관련된 사항으로 전력의 공백구간을 의미한다. 즉 사구간에서는 전력의 공급을 받지 않으므로 전력의 공급에 의해 작동되는 견인 및 전기제동, 회생제동등의 공급이 차단된다. 그러므로 사구간에서 견인 시 운행하게 되면 공기저항에 의한 저항에 의해서만 운행되는 타행운동으로 하게 되고, 제동 시에서는 기계 제동만 작동하고 전기 제동은 작동하지 않게 된다. 그러나 통상적으로 사구간은 전노선에 비해 매우 짧은 거리이므로 이에 대한 고려를 하지 않는 경우가 많으나 TPS의 정확한 시뮬레이션을 위해서는 사구

간을 고려한 방법을 사용하여야 한다.

제15절시물레이션 이론

차량 및 노선 데이터의 작업이 완료된 경우 프로그램을 시물레이션 할 경우 이와 관련된 기본적인 문제가 있다. 첫째는 차량의 길이와 관련된 문제와 둘째는 에너지의 계산문제가 발생한다. 시물레이션을 할 경우 이에 대하여 기본적으로 고려되어 길이에 의해 발생하는 계산상의 오류를 조금이나마 줄여야 함으로 에너지 문제는 에너지의 흐름 및 에너지의 소모량의 분류를 하여 에너지 소모의 Portion을 알아보고자 한다.

가. 차량의 길이문제

차량을 시물레이션을 할 경우 노선을 따라 차량이 일정한 질량을 가지고 Point 이동하는 것으로 시물레이션을 하므로 이에 대한 고려가 이루어져야 한다. 차량의 경우 보통 100~200m 정도의 길이를 가지며 고속전철의 경우 400m 정도의 차량 길이를 가지므로 이에 대하여 고려해야 한다. 이 문제는 차량이 제한속도를 진입할 경우나, 제한속도를 빠져 나오는 경우, 사구간을 통과할 경우 이에 대하여 고려해야한다.

차량이 제한 속도를 진입할 경우는 크게 두 가지로 나뉘 볼 수 있다. 속도가 큰 제한속도 구간에서 속도가 낮은 제한속도 구간으로 진입할 경우와 속도가 낮은 제한 속도 구간에서 속도가 높은 제한속도 구간으로 빠져 나가는 경우로 크게 나뉘어 진다. 차량이 높은 속도에서 낮은 속도로 진입할 경우 선두부가 낮은 제한속도의 영향을 받도록 하며, 낮은 속도에서 높은 속도로 진입할 경우 차량의 후미가 완전히 빠져 나온 후 높은 제한속도의 영향을 받도록 프로그램이 되어야 한다. 또한, 사구간을 통과할 경우는 선두부가 사구간을 진입하면서 회생저동이 off되고, 타행만을 하게 되다가 선부가 사구간을 통과하면서 재역행을 하도록 하였다. 본 프로그램은 차량의 선부를 기점으로 프로그램 되었으므로 입력되는 데이터 중 역데이터는 선두부를 중심으로 입력이 되어야 한다.

나. 에너지 계산문제

차량의 에너지는 전차선에서 에너지를 공급받아 차량의 내부에서의 에너지 소모, 차량내부의 에너지 손실 등을 감안하고 나머지가 차량의 견인 에너지로 쓰이게 되며, 차량이 회생이 가능한 경우는 차량의 에너지원으로 회생에너지가 사용된다.

차량의 에너지 성분을 분류해 보면 다음과 같다.

- 차량에의 순입력 에너지(Kwh)
- 차량에서의 소모 에너지(Kwh)
- 회생 에너지(Kwh)

위의 값들은 전차선에서의 입력에너지와 내부기기의 손실 및 효율성, 영율성 등에 순수하게 견인에 쓰이는 에너지는 한정되어 있다.

차량의 소모에너지는 견인 장치에서의 손실(전력변환 손실, 전동기 손실, 기어손실)과 전기 제동시 손실(전력변환 손실, 전동기 손실, 기어손실)이며 다른 부분에서의 손실(부수기기 손실, 전기 제동 저항기의 열 변환 손실, 마찰 제동 시 손실, 공기 저항에 의한 손실, 구름 저항 손실, 궤도에서의 커브손실)등으로 나뉜다.

제16절 프로그램

철도를 구성하는 주요요소로는 궤도, 전기시설, 차량으로 분류된다. 그 중 차량은 국내뿐만 아니라 독일, 일본 등에서 고속화에 대한 개발이 진행 중이며, 일반철도의 표정속도 또한 증가하였다. 차량의 고속화에 따라 기존에 볼 수 없었던 많은 문제점이 발생하게 되어 궤도를 포함한 각종 구조물과 신호의 적합한 설계뿐만 아니라 차량주행에 대한 사전검토 또한 중요한 요소가 되었다. 차량주행에 따른 차량 각부의 적정용량 선정 및 노선의 적정성 판단을 위해서는 철도선형설계와 더불어 철도 주행 시뮬레이션이 요구되기 때문에 본 연구에서 개발 중인 철도선형프로그램 및 TPS(Train Performance Simulation) 연계기술을 개발하고자 한다.

TPS 용도는 전통적으로 선로설계, 신호시스템 설계, 운용설계에 사용되며, 구배, 곡선, 캔트 및 캔트 부족 등이 고려된 선형을 이용하여 이론적인 최대속도를 유추한다.

선형의 최대곡선에 터널, 연약지반 등과 같은 속도제약 명세를 고려하여 수정된 최대 속도곡선이 되며, 수정된 최대 속도곡선으로부터 최적의 선형이 도출되어 운용될 차량의 특성과 선형의 일치여부는 TPS를 이용하여 확인될 수 있다.

이런 TPS의 기능의 철도선형프로그램과의 연계는 프로그램에서 도출된 계획의 건설·운영시의 정확성 향상 및 열차주행성능을 고려한 선형설계가 가능하다.

1994년 구동희 등은 차량 및 운전성능 프로그램 연구를 통해 TPS관련 기술을 개발하였으며, 최근 지구 온난화 문제가 전 세계적으로 큰 문제가 되면서 전력계통의 에너지절약을 요구함에 따라 고속철도 KTX 및 경량전철 등 다양한 열차형식에 대한 연구가 진행 중이다.

1. 연계 인터페이스 개발

최적화된 선형의 평면 및 종단 기하구조 등의 정보를 TPS 프로그램의 인풋파라미터로 넘겨주면 TPS 프로그램이 이를 분석하여 그 결과물을 파일로 생성해 준다. 이렇게 생성된 분석결과 파일을 읽어서 ei_Rail 프로그램에서 관련 분석 그래프 등을 그려준다.

2. 입력파일

eiRail TPS에서 사용하는 입력 파일은 *.tsr 포맷을 사용한다. 파일의 입력자료 구성은 다음과 같다.

- ① 일련번호
- ② 측정점의 X 좌표
- ③ 측정점의 Y 좌표
- ④ 측정점의 계획고
- ⑤ 측정점의 종류

N : 일반측점

U, V : 터널의 시종점

T : 터널

P, Q : 교량의 시종점

B : 교량

47,	4500.000,	147329.67295,	159468.21417,	12.630 T
48,	4600.000,	147272.44143,	159550.21754,	12.941 T
49,	4700.000,	147215.20991,	159632.22092,	13.252 T
50,	4800.000,	147157.97839,	159714.22429,	13.563 T
51,	4900.000,	147100.74687,	159796.22766,	13.873 T
52,	5000.000,	147043.51535,	159878.23103,	14.184 T
53,	5100.000,	146986.28383,	159960.23441,	14.495 T
54,	5200.000,	146929.05231,	160042.23778,	14.806 T
55,	5300.000,	146871.82079,	160124.24115,	15.116 T
56,	5400.000,	146814.58985,	160206.24493,	15.427 T
57,	5485.000,	146769.73432,	160278.40111,	15.691 V
58,	5500.000,	146762.60621,	160291.59898,	15.738 N
59,	5600.000,	146721.39189,	160382.64288,	16.049 N
60,	5700.000,	146691.55907,	160478.02431,	16.359 N
61,	5800.000,	146673.55090,	160576.32648,	16.670 N
62,	5900.000,	146666.55857,	160676.05436,	16.981 N
63,	6000.000,	146661.60999,	160775.93184,	17.292 N

[그림 V- 14]] 수행결과화면

3. 출력파일

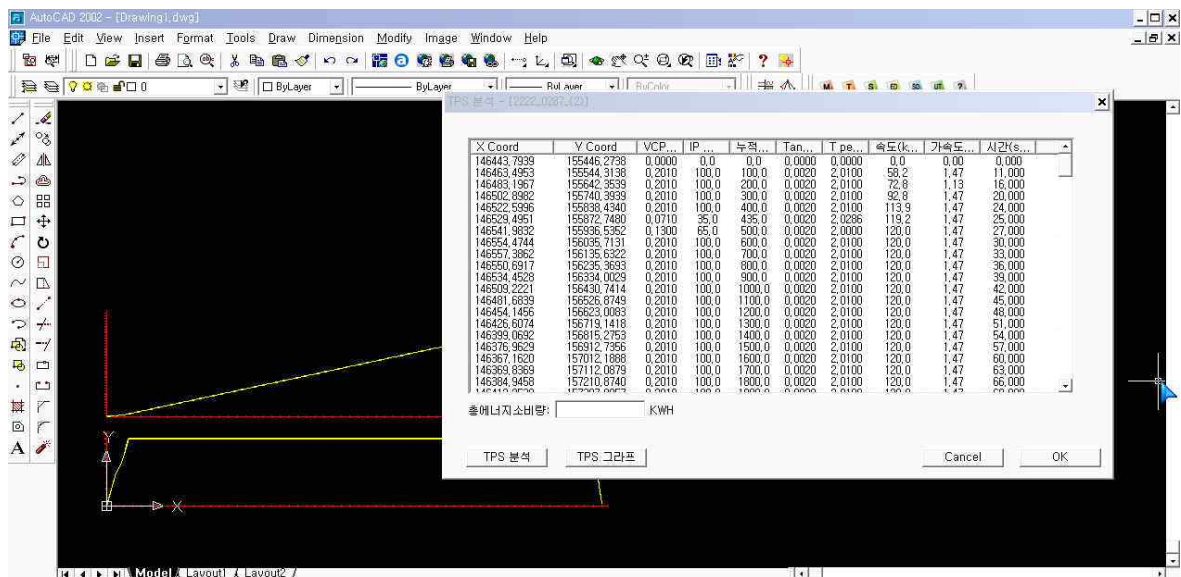
TPS 모듈에서 출력되는 아웃풋파일은 *.tso 포맷으로 다음의 내용을 포함하고 있다.

- ① 측점좌표(X, Y, Z)
- ② VCP Delta
- ③ 측점 간 거리(m)
- ④ 누적거리(m)
- ⑤ Tangent
- ⑥ T per Mil
- ⑦ 속도(km/h)
- ⑧ 가속도(m/s²)
- ⑨ 시간(sec)

146541.98324,155936.53518,4.118,0.13,65,500.000,0.002,2,120,1.47,27
 146554.47437,156035.71314,4.319,0.201,100,600.000,0.00201,2.01,120,1.47,30
 146557.38615,156135.63221,4.520,0.201,100,700.000,0.00201,2.01,120,1.47,33
 146550.69167,156235.36927,4.721,0.201,100,800.000,0.00201,2.01,120,1.47,36
 146534.45278,156334.00292,4.922,0.201,100,900.000,0.00201,2.01,120,1.47,39
 146509.22209,156430.74139,5.123,0.201,100,1000.000,0.00201,2.01,120,1.47,42
 146481.68385,156526.87487,5.324,0.201,100,1100.000,0.00201,2.01,120,1.47,45
 146454.14562,156623.00834,5.525,0.201,100,1200.000,0.00201,2.01,120,1.47,48
 146426.60738,156719.14182,5.726,0.201,100,1300.000,0.00201,2.01,120,1.47,51
 146399.06915,156815.27530,5.927,0.201,100,1400.000,0.00201,2.01,120,1.47,54
 146376.96291,156912.73561,6.128,0.201,100,1500.000,0.00201,2.01,120,1.47,57
 146367.16202,157012.18875,6.329,0.201,100,1600.000,0.00201,2.01,120,1.47,60
 146369.83690,157112.08786,6.530,0.201,100,1700.000,0.00201,2.01,120,1.47,63
 146384.94581,157210.87403,6.731,0.201,100,1800.000,0.00201,2.01,120,1.47,66
 146412.25296,157307.00573,6.932,0.201,100,1900.000,0.00201,2.01,120,1.47,69
 146451.33226,157398.98288,7.133,0.201,100,2000.000,0.00201,2.01,120,1.47,72

[그림 V- 15]수행결과화면 2

4. 프로그램 실행화면



[그림 V- 16] TPS메인화면

5. 보고서

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	x좌표	y좌표	z좌표	VCP Delta	IP간 거리(r	누적거리(r	Tangent	T Per mil	속도(km/h	가속도(m/ 시간(초)		
20	146369.8	157112.1	6.53	0.201	100	1700	0.00201	2.01	120	1.47	63	
21	146384.9	157210.9	6.731	0.201	100	1800	0.00201	2.01	120	1.47	66	
22	146412.3	157307	6.932	0.201	100	1900	0.00201	2.01	120	1.47	69	
23	146451.3	157399	7.133	0.201	100	2000	0.00201	2.01	120	1.47	72	
24	146501.6	157485.4	7.334	0.201	100	2100	0.00201	2.01	120	1.47	75	
25	146562.2	157564.8	7.535	0.201	100	2200	0.00201	2.01	120	1.47	78	
26	146629.7	157638.6	7.736	0.201	100	2300	0.00201	2.01	120	1.47	81	
27	146697.5	157712.1	7.937	0.201	100	2400	0.00201	2.01	120	1.47	84	
28	146765.3	157785.6	8.138	0.201	100	2500	0.00201	2.01	120	1.47	87	
29	146833	157859.2	8.339	0.201	100	2600	0.00201	2.01	120	1.47	90	
30	146900.8	157932.7	8.54	0.201	100	2700	0.00201	2.01	120	1.47	93	
31	146968.6	158006.2	8.741	0.201	100	2800	0.00201	2.01	120	1.47	96	
32	147036.4	158079.7	8.942	0.201	100	2900	0.00201	2.01	120	1.47	99	
33	147104.2	158153.3	9.143	0.201	100	3000	0.00201	2.01	120	1.47	102	
34	147171.9	158226.8	9.344	0.201	100	3100	0.00201	2.01	120	1.47	105	
35	147239.7	158300.3	9.545	0.201	100	3200	0.00201	2.01	120	1.47	108	
36	147307.5	158373.8	9.747	0.202	100	3300	0.00202	2.02	120	1.47	111	

[그림 V-17] 리포팅

제 6 장 프로그램검증

- 제1절 개요
- 제2절 중앙선 검토결과
- 제3절 서해안선 검토결과
- 제4절 검토결과요약

제17절개요

「철도 3D 주행 시뮬레이션 및 TPS 연계기술개발」사업 중 「철도 노선 최적화 시스템(ei_rail)」의 최적 노선 검토 및 개략 사업비 산출의 타당성을 검증하고자 기 완료된 사업 중 예비타당성 사업인인 「중앙선 도담~영천 건설사업」과 실시설계 사업인 「서해안선 홍성~송산 복선전철 제10공구 노반 기본 및 실시설계」자료와 비교 검토하였다.

이때, 사용된 비용은 2014년을 기준으로 Deflator를 적용하여 할인율 차이에 의한 오차발생을 방지하였다.

1. 검토 구간

본 과업의 검토 구간은 서해안선 1개 구간으로 [표 VI-1]과 같음

표 83 과업 구간

사 업 명	과업 연장	비 고
중앙선 도담~영천 건설사업 예비타당성 조사	150km	
서해안선 홍성~송산 복선전철 10공구 노반 기본 및 실시설계	10.66km	

2. 검토 내용

- 기 계획 노선과 “철도 노선 최적화 시스템(ei_rail)”(이하“ei_rail”로 칭함)에서 도출된 노선과의 적정성 비교 검토
- 기 계획 노선과 irail 도출 노선의 물량 및 개략 공사비 비교

3. 검토시 문제점

1) 중앙선 도담~영천 건설사업 예비 타당성 조사

- 기존 예비 타당성 조사 노선의 종단 지반고와 지형도상의 지반고 상이
ei_rail에서 노선 검토를 위해서 제공된 1/25,000 지형도의 지반 자료에서 얻은 지반고 데이터와 기존 예비타당성 조사 결과 도출된 노선의 종단 지반고 데이터가 서로 상이하여 ei_rail에서 초기 평면 선형 도출 및 종단 최적화를 통한 개략 공사비 산출에 따른 예비 타당성 노선과의 직접 비교 검토가 곤란함.

2) 서해안선 홍성~송산 복선전철 10공구 노반 기본 및 실시설계

- 노선 최적화 자동화 시스템인 ei_rail의 적용 단계는 노선의 타당성 조사 단계의 노선 탐색 및 개략 공사비산정을 목표로 연구 개발되어, 기본 및 실시 설계 적용시 상세 조건을 고려한 선형 검토 및 물량 산출에 따른 공사비 산정시에 한계로, 본 실시설계와의 노선대 비교는 과업의 성격상 만족스러운 결과의 도출이 불가함.

- 따라서, 본 노반 기본 및 실시설계의 평면 선형을 준용하고, 동일한 구조물 조건을 전제로 종단 선형 최적화를 통한 노반구간 개략 공사비를 비교 검토함.

4. 주요 검토 기준

가. 설계기준 설정

(1) 선로의 등급 및 설계 속도

검토 대상 노선의 최적화를 위해서 중앙선 도담~영천 건설사업 예비타당성 조사(이하 “영동선”) 및 서해안선 홍성~송산 복선 전철 10공구 노반 기본 및 실시설계(이하 “서해안선”)의 선로의 등급을 아래표2와 같이 설정함

표 2 노선 검토 구간 선로 등급

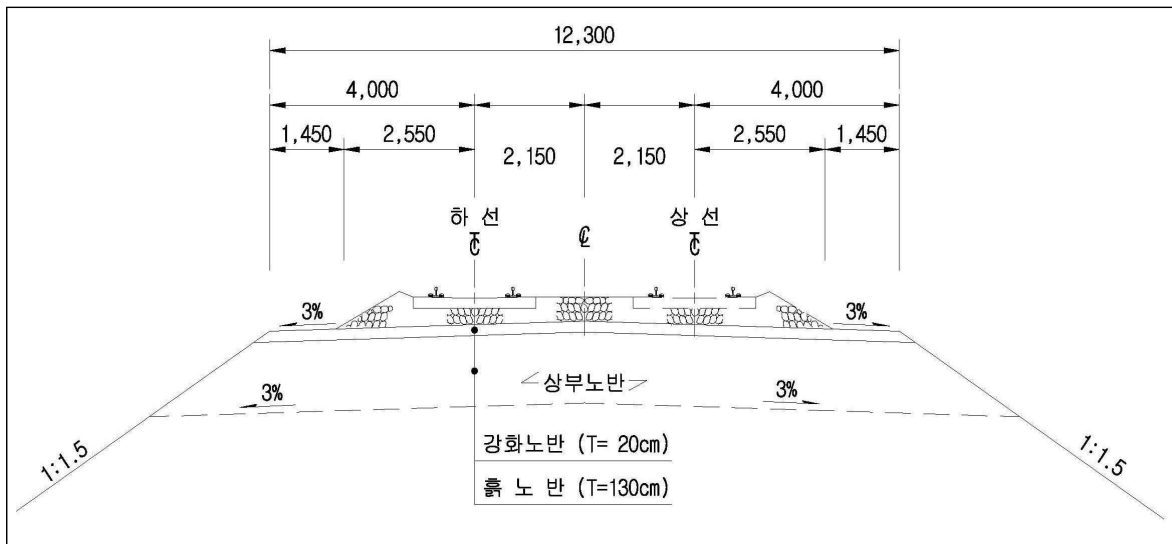
노 선 명	선로의 등급	설 계 속 도 (km/hr)	비 고
중앙선	고속선~1급선	230	복선전철 기준
서해안선	1급선	100~320	

(2) 노반폭

- 중앙선 및 서해안선의 설계시 노반폭과 동일한 폭으로 정의함

표 3 노선별 노반폭

노 선 명	선 로 수	노반폭 (m)	비 고
중앙선	2	12.3	
서해안선	2	12.3	



(3) 주요기하구조 기준

노선대 검토시 적용된 주요 기하구조 기준은 표4와 같음

표 4 주요 기하구조 기준

구 분	단위	중앙선	서해안선	비 고
최소곡선반경	m	1,900	1,900	
최소종단구배	‰	25	25	

제18절중앙선 검토결과

- 「중앙선 도담~영천 복선전철 타당성조사 및 기본계획(이하 “기본계획”으로 칭함)」의 구간연장은 84.16km로 정거장은 총 4개소로 계획됨.
- ei_rail 최적화 검토시 시·종점은 기본계획과 동일하게 설정을 하고, 검토 노선대의 주요 하천 및 도로, 산지부를 구조물로 통과하도록 설정하였으며,
- 주요 정거장 구간 4개소를 ei_rail 노선 검토시 통과하는 것으로 초기 조건을 설정함.
- 금번 노선 검토 지역은 제공된 수치지도(S=1/5,000), 평면 및 종단계획도, 설계보고서 등의 자료를 바탕으로 하여, ei_road 시스템 최적화를 수행 하였고,
- 개략 공사비 산정은 기본설계안과 ei_road 시스템 도출안을 ei_road 시스템 공사비 산정 방식으로 재산정하여, 공사비를 비교함.

1) 노선 선정

- ei_road 시스템에서 도출된 다양한 초기 노선의 연장 분포는 83.841km ~ 84.698km의 분포를 가지며, 도출 노선을 3개의 노선대로 분류하여 각 노선대별 연장 및 공사비 분포를 산정한 결과는 표5와 같으며, 도출된 노선대는 그림 2와 같음.

표 5 노선대 도출 현황

구 분	연장분포 (km)	공사비 분포 (억원)	비 고
노선대1	84.678	14,048	
노선대2	84.698	15,517	
노선대3	83.841	16,214	

- 도출된 3개의 노선대에서 각 노선대에서 가장 저렴한 노선을 각 노선대의 대안으로 선정 하였으며, 기본계획안과 각 대안의 각 주요 공종별 연장은 표 6와 같음

표 6 기본설계안 및 대안별 주요 연장 도출 현황

구 분	총연장 (km)	주요 공종별 연장(km)			비 고
		토공	교량공	터널공	
기본설계	84.16	26.398	12.422	45.340	
대안 1	84.678	37.558	14.661	32.459	
대안 2	84.698	41.323	9.342	34.033	
대안 3	83.841	37.779	8.847	37.215	

그림 2. 노선대 평면

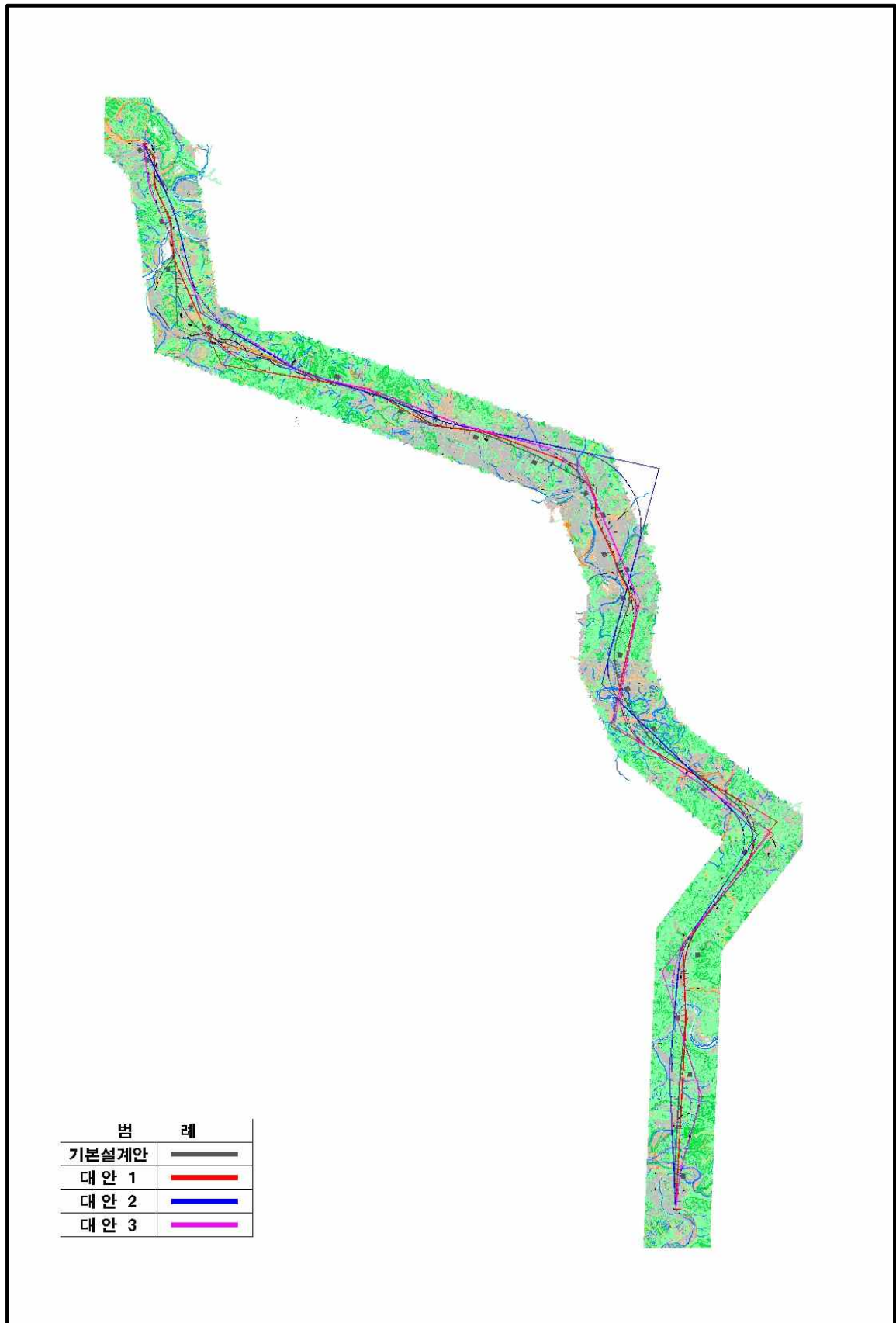
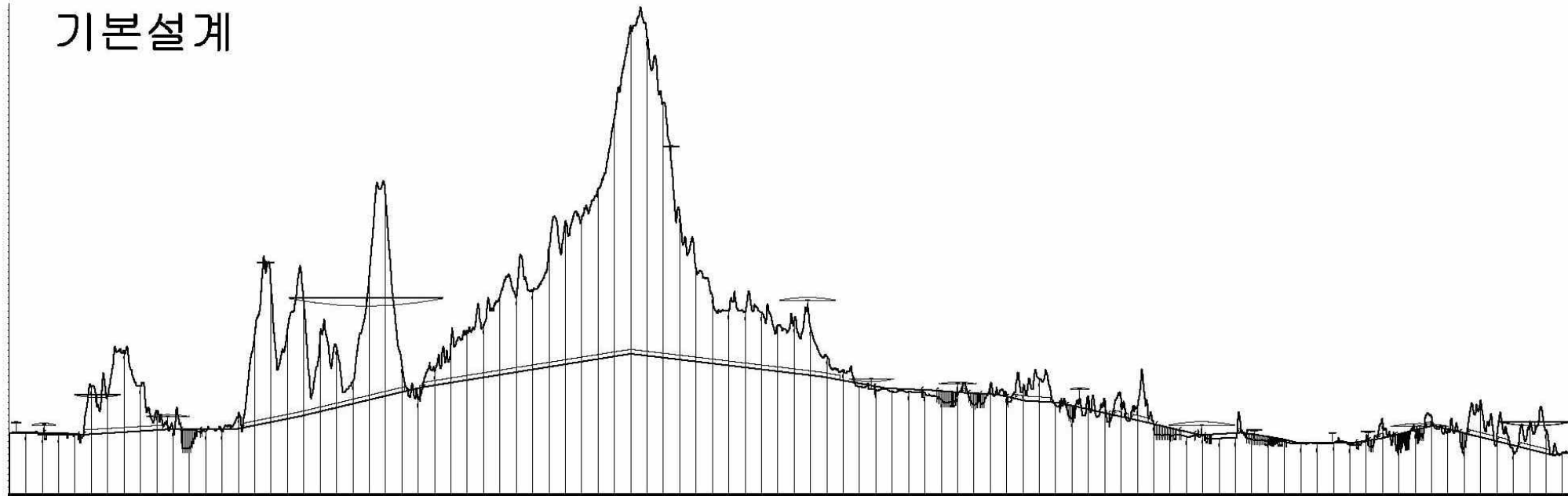
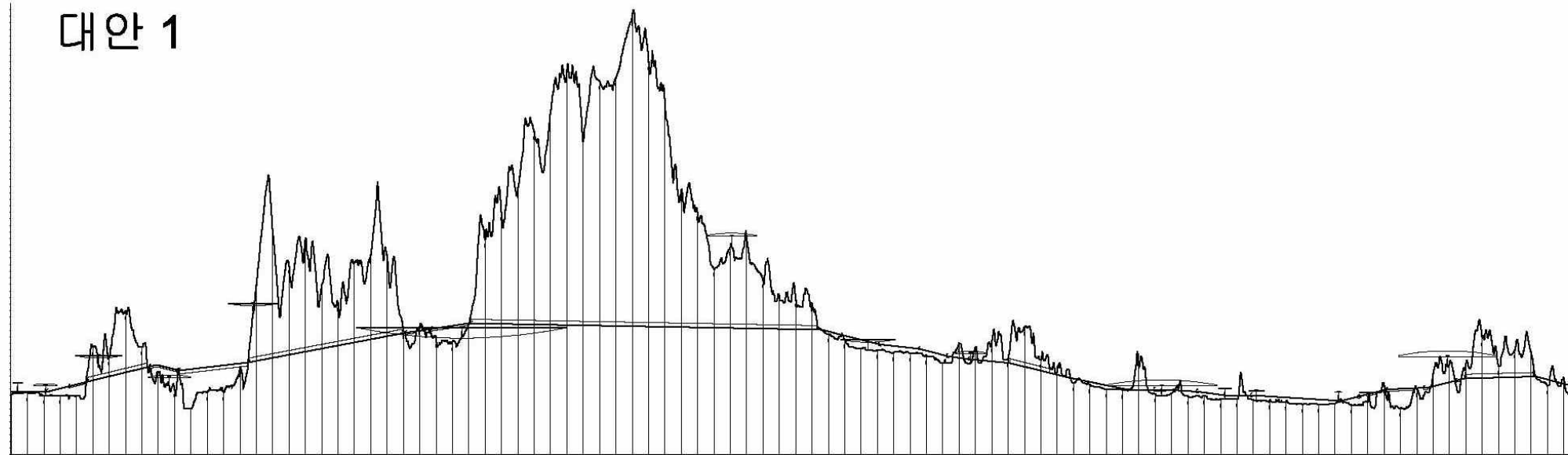


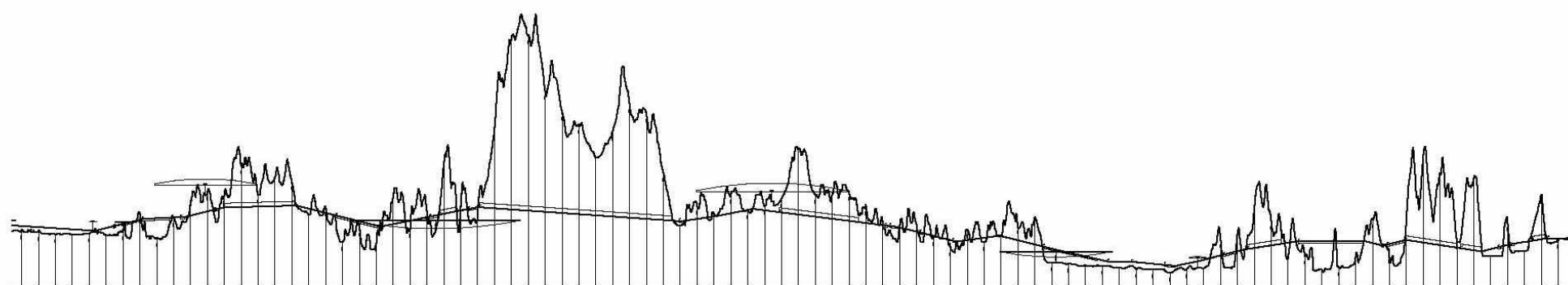
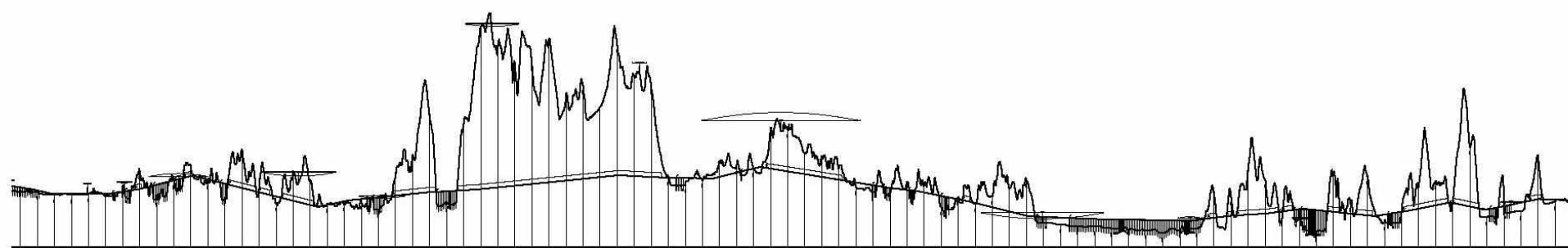
그림 3. 노선대 종단도

기본설계

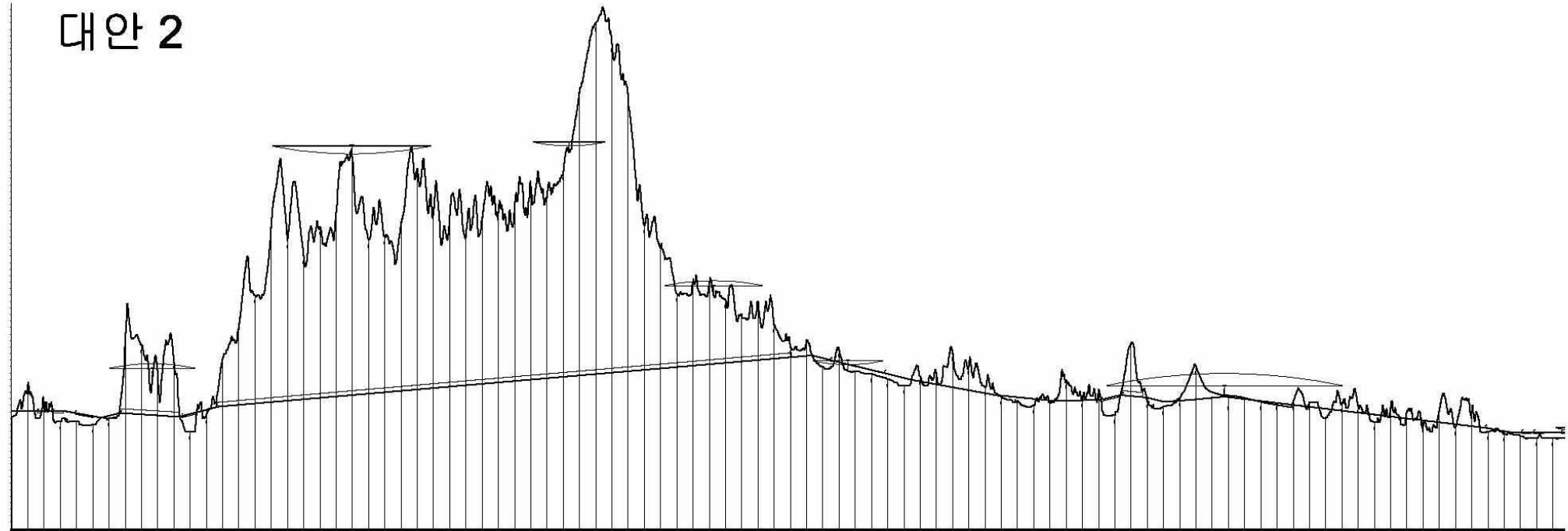


대안 1

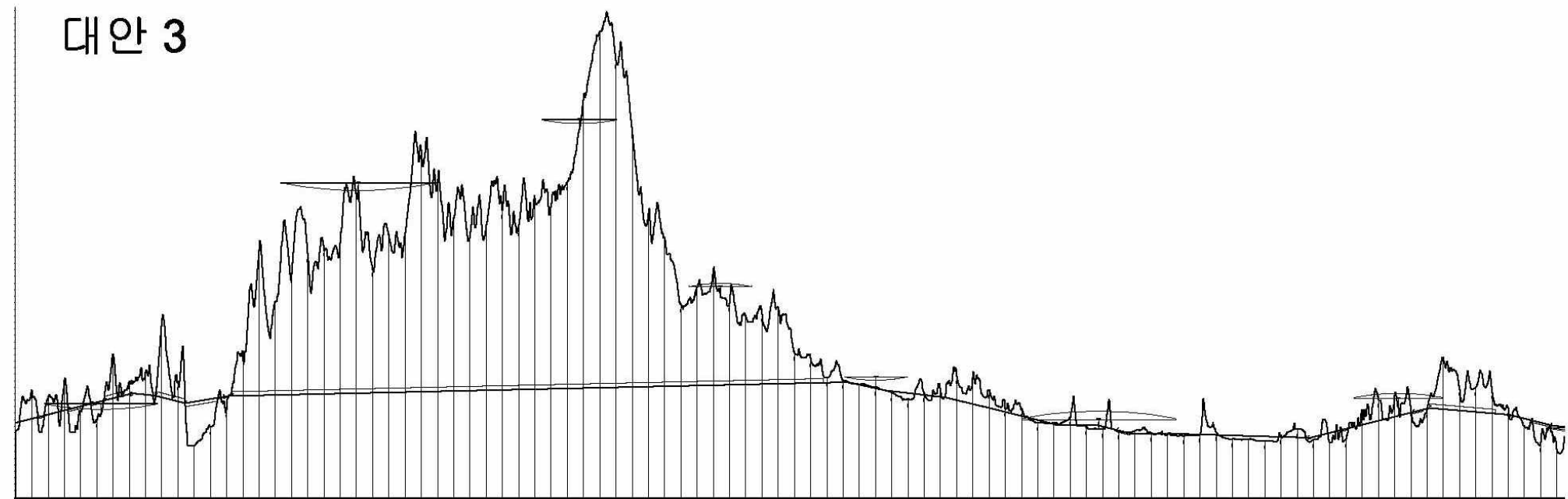


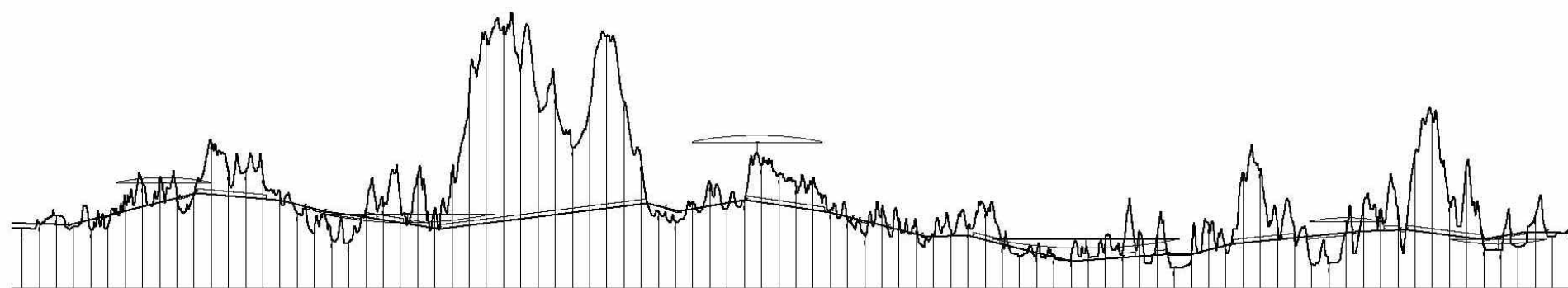
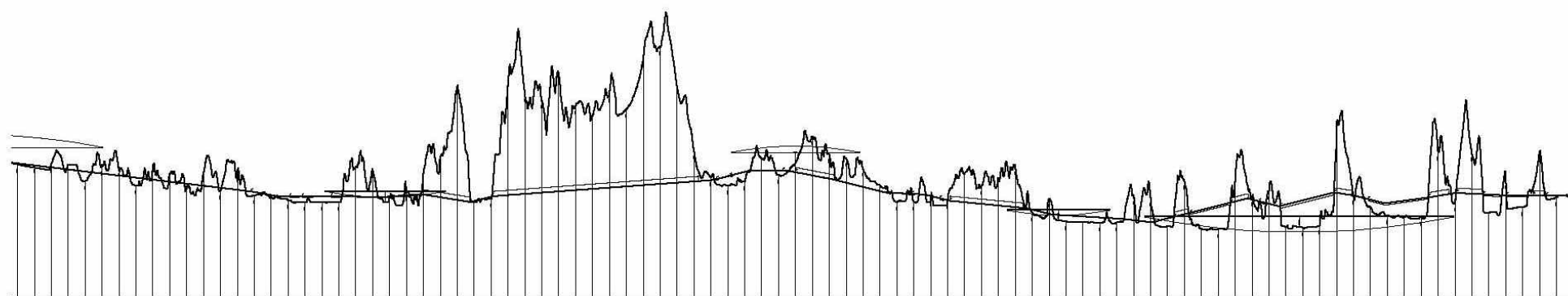


대안 2



대안 3





2) 주요 사항 검토

가) 공사비 산정 기준

- 철도사업에서 개략 공사비의 산정시, 주요 공사비 항목은 본선 및 정거장 노반, 기존 정거장 개량, 궤도, 건축 시스템 등으로 구분되어 산정 되나, 금번 검증 사업에서는 본선부 노반 공사에 대해서만 공사비를 비교함.
- 기본계획안과 ei_rail 공사비의 비교는 기본계획안이 ei_rail 시스템에서 비해서 상세하게 산정되어, 직접 비교는 불가함.
- 따라서 공사비의 비교는 ei_rail 시스템의 공사비 산정 방식에 의거, 본선부 노반 공사의 토공/교량/터널구간에 대한 공사비만 산출하여 비교 하였으며, 기본계획안 및 ei_rail의 비교 공종별 단가는 아래 표7과 같음.

표 7 ei_rail 적용 단가

공 종		단위	단가 (천원)	비고
토공	쌓기	m ³	1.774	복선 기준
	토사		0.661	
	꽂기 풍화암		1.312	
	연·경암		25.204	
교량공	복선	km	401	
터널공	복선	km	236	

나) 안별 공사비 산정

- 각 노선대별로 산정 공사비 항목 중 예비 타당성안과 ei_rail안의 직접 비교가 가능한 항목인 토공, 교량공, 터널공 공사비를 비교 하였으며, 가장 저렴한 대안별 노선은 표8와 같음.

표 8 대안별 연장 및 개략 공사비 현황

구 분	연장 (km)	공사비(억원)				비 고
		합계	토공	교량	터널	
대안1	84.678	14,048	1,007	6,466	6,575	
대안2	84.698	15,517	1,357	4,121	10,039	
대안3	83.841	16,214	1,335	3,901	10,978	

- 3개의 대안 노선 최적 선행은 기존노선을 활용한 대안 1로 선정하였고, 선정된 최적노선의 주요 공종별 현황 및 비율은 표9와 같음.

표 9 최적 노선 주요 구조물 현황

구 분	총연장 (km)	주요 구조물 현황						비 고
		토공		교량		터널		
		연장 (km)	비율 (%)	연장 (km/개소)	비율 (%)	연장 (km/개소)	비율 (%)	
대안1	84.678	37.558	41%	14.7/36	17%	32.5/12	42%	

- 기본 계획안과 ei_rail 도출안과 분석을 통해 ei_rail 시스템의 신뢰성 검증을 위해서는 기본 계획안에서 산정된 공사비와 ei_rail 시스템의 공사비를 직접 비교하는 것이 가장 객관적이고, 신뢰성 있는 확보되나
- 금번 검토시 기본 계획안의 공사비 산정 방식과 ei_rail안의 공사비 산정 방식이 서로 상이하여 직접 비교는 불가함.
- 따라서 금번 검증을 위한 시범 사업의 공사비 산정은 ei_rail안의 공사비 산정 방식으로 기본계획안 공사비를 재산정하여 각각의 공사비를 비교 하여, ei_rail 시스템의 적정성 및 신뢰성 검증의 결과를 도출함.

다) 기본 계획안 및 ei_rail안 선형분포 비교

기본 계획안 및 ei_rail안의 평면곡선반경 및 종단구배 분포현황은 표10과 같으며, 두 개안 모두 설계기준을 만족하는 것으로 검토됨.

표 10 안별 주요 선형 분포

구 분	총연장 (km)	평면곡선반경(m) (최소/최대)	종단구배(%) (최소/최대)	비 고
기본 계획안	84.16	1000이상	0.001/0.0015	정거장구간 고려
ei_rail안	84.678	1000이상	0.001/0.0025	정거장구간 고려

라) 각 안별 주요 구조물설치 현황 비교

- 기본설계안 및 ei_rail안의 주요 노반 구성부의 연장은 표11과 같으며, ei_rail안이 기본설계안에 비해 교량부 및 터널부는 짧으며, 토공부는 긴 것으로 산정됨.

표 11 주요 구조물 현황

구 분	총연장 (km)	주요 노반 구성부 연장(km)			비 고
		토공부	교량부	터널부	
기본 계획안	84.16	26.398	12.422	45.340	
ei_rail안	84.678	37.558	14.661	32.459	

마) 사업비 비교

- 기본설계안과 ei_rail안과의 노반 공사비 산정은 표7과 같은 기준으로 산정됨.
- 아래 표11의 공사비 비교는 각각 안에 대해서 도출된 공사비 현황을 나타냄.

표 12 안별 공사비 비교

구 분	총공사비 (억원)	주요 구간 공사비(억원)			비 고
		토공부	교량부	터널부	
기본 계획안	19,424	570	5,479	13,375	
ei_rail안	14,048	1,007	6,466	6,575	

그림 4. 기본계획 및 ei_rail 안 평면도

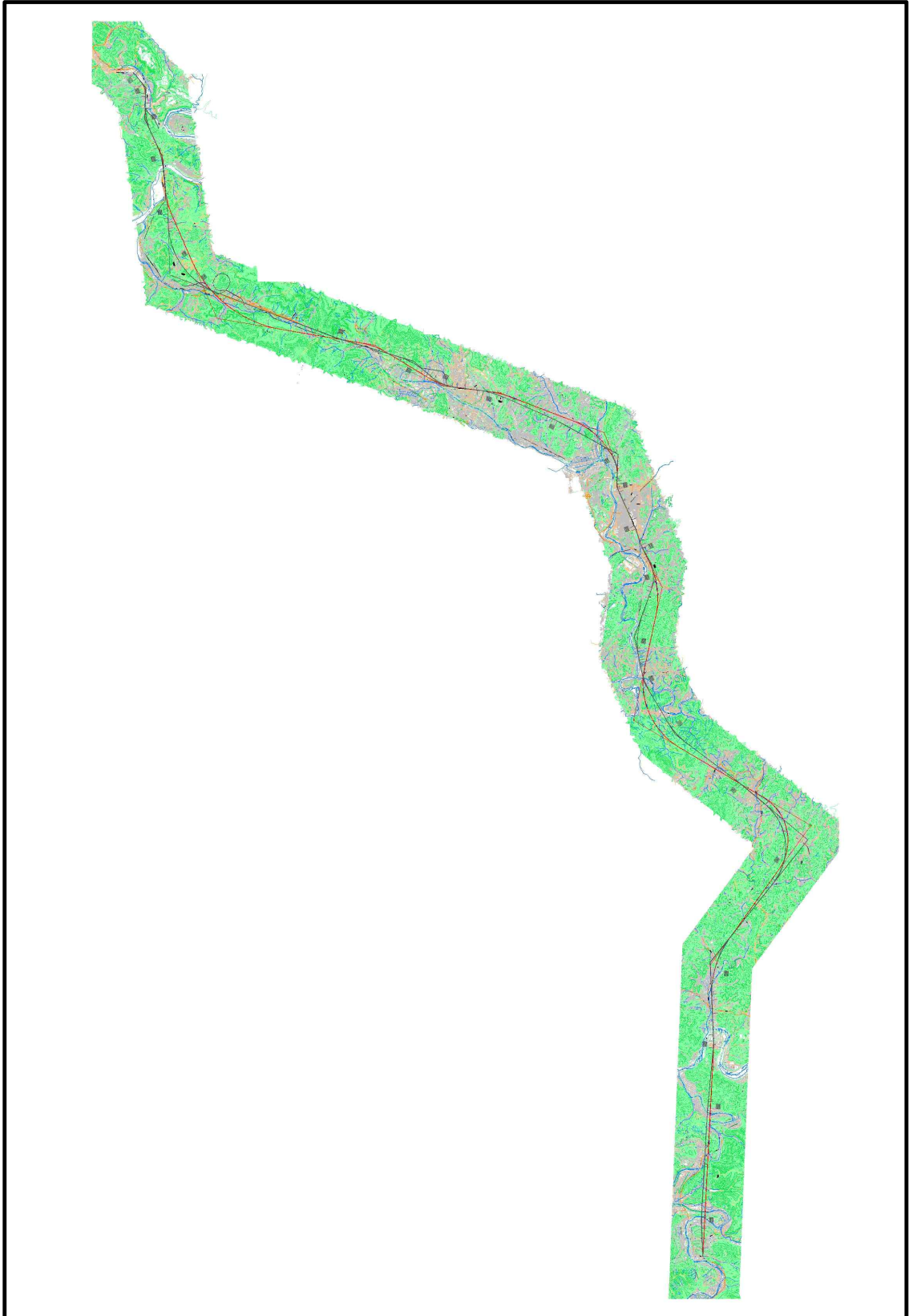
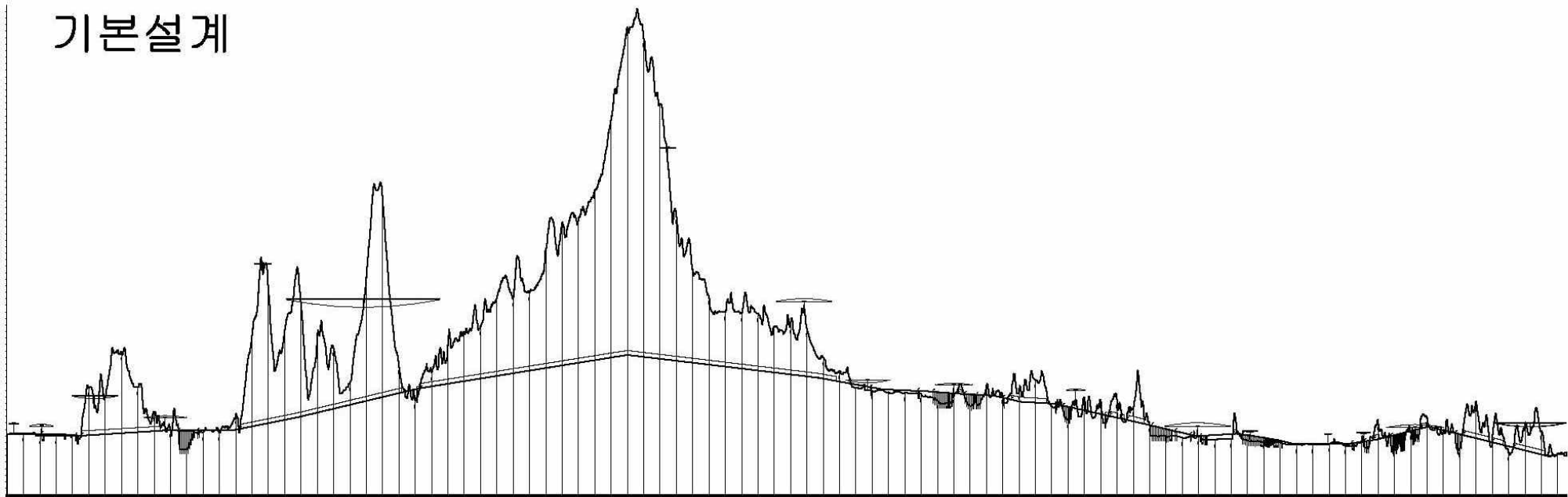
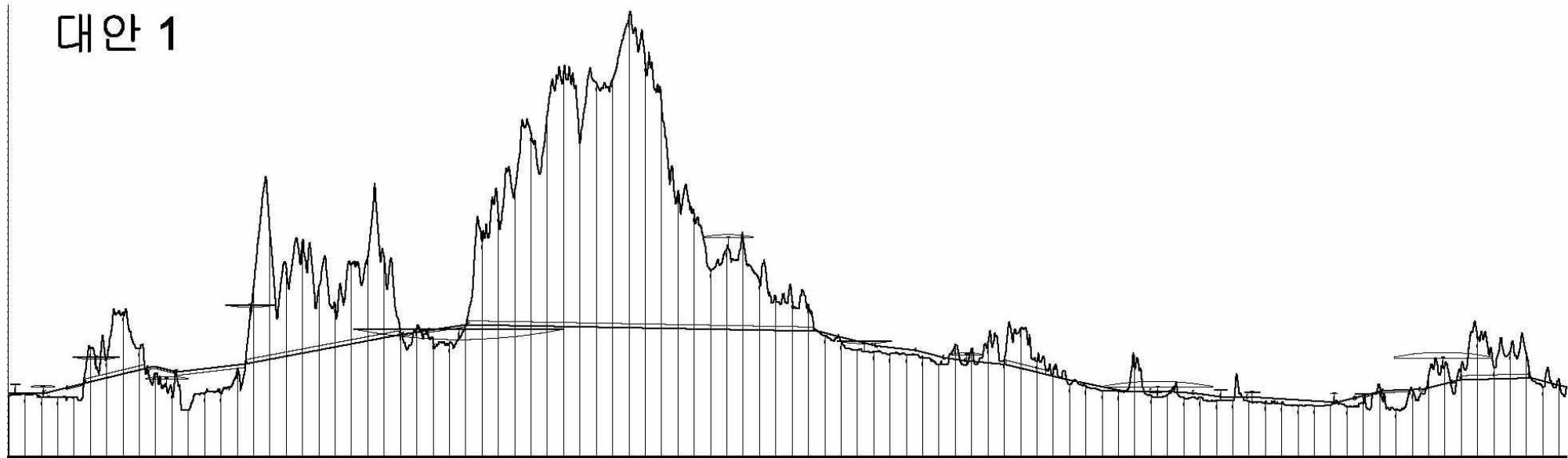


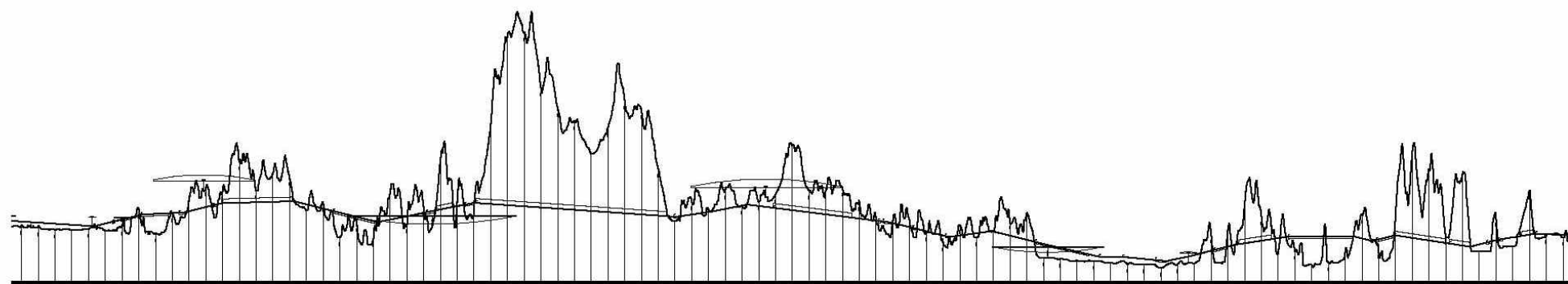
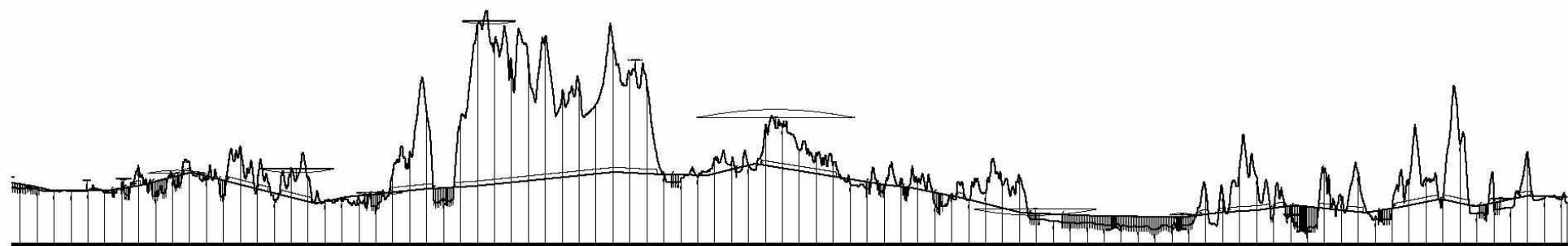
그림 5. 기본계획 및 ei_rail 안

기본설계



대안 1





3) 검토결과

- ei_rail 시스템은 시범사업의 주목적은 다양한 설계 조건 및 여건 등을 고려한 기존 철도 건설 계획시 짧은 시간동안 수많은 노선을 검토하여 최적 노선을 도출, 궁극적으로 시간/비용의 효율성 증대 및 공사비 절감.
- 본 과업의 목적인 선형 최적화 시스템의 적정성 검증을 통하여, 기대되는 효과 및 ei_rail 시스템의 적용성 검증을 위하여, 이미 완료된 기본계획 노선 대비 ei_rail 도출 최적선형과의 비교 검토를 시행함.
- 검토 결과 ei_rail 도출 3개의 대안중 공사비가 가장 저렴한 대안2를 ei_rail 최적안으로 선정하여 하나 기존노선을 벗어나므로 대안1을 기본설계안과 비교 하였고, 기본설계안의 ei_rail 공사비 산출 기준에 따른 개략공사비는 19,424억원, ei_rail 최적노선은 14,048억원으로 산출되어, 기본설계안에 비하여 ei_rail안이 5,376억원 절감되는 것으로 검토됨.
- 기본설계안에 비해 ei_rail안의 노반 공사비 절감 주요 원인을 살펴보면,
 - ei_rail안이 기본설계안에 비하여 노선 통과 구간이 산지부 보다는 평지부를 통과하는 구간이 차지하는 비율이 많으며, 터널 연장을 축소하는 선형으로 계획되었고, ei_rail안이 기본설계안에 비하여 평지부를 통과하므로 터널구간을 축소하고, 토공구간의 연장이 상대적으로 많이 차지하고 있어, 전체 공사비를 절감하는 효과가 도출됨.
 - 상기한 바와 같이 ei_rail안의 구조물 구간 비율이 기본설계안에 비하여 상대적으로 적음으로 인해서 전체 공사비 절감 요인으로 작용하였고, 그에 반해 ei_rail안의 토공공사비는 증가한 바, ei_rail의 구조물 구간 감소 원인을 살펴보면, 첫째, 지형 조건이 기본설계안에 비하여 양호한 평지부를 통과함으로 인해서 구조물 통과 구간을 줄였으며, 둘째, ei_rail의 경우 초기 선형 조건 입력시 교량이나 터널설치 조건을 일정 기준에 따라 설치 되도록 정의 하였기 때문에, 정의된 기준에 부합되는 구간에 적절한 연장으로 자동 계획되는데 반해, 기존 검토시 고려되는 자연 조건, 지역 조건, 환경 조건 등의 고려 요소는 배제 됨으로써, 기존 설계안에 비하여 구조물 연장이 짧아져, 구조물 공사비가 저렴하게 산출되는 요인으로 작용된 것으로 분석됨.
 - 이는 ei_rail 시스템이 수많은 제약 조건 및 다양하고 복합적으로 고려되어야 하는 설계 조건을 모두 고려하는 데는 한계가 있으며, 또한 기존 설계시에도 여러번의 검토 과정을 거쳐 최적 노선이 결정되는바, ei_rail 시스템에 의한 최적 선형 도출시에도 상기와 유사한 조건(다양한 제약 조건, 정책 결정자 및 사업시행자, 계획 입안자의 의지 등)하에서 검토 과정을 거친다면 기존 설계 방식과 유사한 정도의 결과를 도출 할 것으로 기대됨.

며. 서해안선 검토결과

- 「서해안선 홍성~송산 복선전철 제10공구 노반 기본 및 실시설계」의 구간 연장은 10.66km로 계획구간의 정거장은 총 2개소로 계획됨.
- ei_rail 최적화 검토시 시·중점은 동일하게 설정을 하고, 검토 노선대의 주요 하천 및 도로통과시 교량을 설치하고, 지형적으로 터널 설치가 필요한 구간은 ei_rail 터널 설치 기준에 따라 일정 구간의 터널을 설치하도록 검토하였으며, 통과 불가한 주요 지장물에 대해서는 최대한 회피하도록 선형을 계획함.
 - 현재 개발된 ei_rail 시스템은 정거장 구간의 계획이나 설치가 불가능하여, 기본 및 실시설계에서 계획된 주요 정거장 구간 2개소를 ei_rail 노선 검토시 최대한 근접하게 경유하는 것으로 초기 조건을 설정함.

- 금번 ei_rail 노선 검토 지역은 구간이 매우 짧고, 이미 실시설계 선형이 이미 확정되어 세부 사업비까지 산정되었으므로, 타당성 조사 및 기본설계 초기단계 수준으로 개발된 ei_rail 시스템으로 짧은 연장과 좁은 폭의 구간에서 평면 선형을 최적화 하는 것은 당초 ei_rail 개발 수준을 뛰어넘는 것으로 검토가 불가함.
- 따라서, 금번 ei_rail 시스템으로 본 프로젝트를 검증하는 방안으로, 서해안선 평면선형을 준용하여, 평면선형 통과구간에 주요 지장물(하천, 도로, 산지부)조건을 고려한 종단 최적화를 통한 개략 공사비를 산출하여 서해안선 기본 및 실시설계와 ei_rail 시스템의 최적화 결과를 비교 검토함.

1. 노선 선정

1) 종단선형 최적화

- ei_rail 시스템에서 비교 검토시 초기 평면 선형 최적화 과정은 생략을 하고, 서해안선의 최종 노선의 평면 선형과 동일한 선형으로 ei_rail 종단 최적화를 통한 구조물 조정 및 개략 공사비를 산정하여 서해안선 설계안과 비교 검토함.
- 산출된 ei_rail 공사비와 서해안선 세부 공사비의 비교를 위하여, 토공, 교량공, 터널공 등 3항목의 공사비를 비교하여, ei_rail 최적화 시스템의 적용성을 검토함.
- 종단선형 최적화 결과 설계안 및 ei_rail안의 연장은 10.66km로 동일하고, 최소 곡선반경이나 종단구배도 두 개안 모두 시설기준을 만족하는 것으로 분석 되었으며, 그 결과는 표13과 같음.(그림 3. 4 참조)

표 13 안별 종단 선형 분포 현황

구 분	연장 (km)	종단선형(%) (최대/최소)	종단곡선반경(m) (최대/최소)	비 고
설계안	10.66	0.025/0.001	2,300	
ei_rail안	10.66	0.025/0.001	2,300	

- 종단최적화 결과 설계안과 ei_rail안의 주요 구조물 현황은 표14와 같으며, ei_rail 시스템 최적화 안인 대안1의 경우 설계안에 비하여 터널 연장이 약 1.6km를 짧으며, 교량연장은 다소 증가하였고, 상대적으로 토공구간의 연장이 약 1km증가함.

표 14 최적 노선 주요 구조물 현황

구 분	총연장 (km)	주요 구조물 현황						비 고
		토공		교량		터널		
		연장 (km)	비율 (%)	연장 (km/개소)	비율 (%)	연장 (km/개소)	비율 (%)	
설계안	10.66	4.95	46	3.27/8	31	2.44/4	23	
ei_rail안		6.00	56	3.81/5	36	0.85/2	8	

2) 공사비 비교

- 본 비교 구간인 서해안선은 기본 및 실시설계가 완료된 구간으로서, 공사 발주를 위한 세부 공사비 항목중 ei_rail 시스템에 의한 개략 공사비 산출방식에서 산정되는 공통항목과 비교 검토한 결과 개략 공사비는 표15와 같음.
- 표15에서와 같이 전체공사비는 ei_rail안이 약90억원 절감되는 것으로 검토되었는데, 세부적으로 ei_rail안의 터널구간연장이 축소되어 터널구간의 공사비가 372억 감소하였고, 교량공사비는 연장이 증가하여 212억원 증가하는 것으로 나타남.
- 토공구간의 경우 ei_rail안이 설계안에 비하여 1.05km증가하였으나 공사비는 70억이 증가함. 연장대비 공사비 증가가 큰 이유는 설계안에 비해 ei_rail안의 종단선형이 절토고가 높아 연암 및 경암이 차지하는 비율이 높는데 기인한 것으로 분석됨.

표 15 대안별 연장 및 개략 공사비 현황

구 분	연장 (km)	공사비(억원)				비 고
		합계	토공	교량	터널	
설계안	10.66	1.905	19	1,312	574	
ei_rail안	10.66	1,815	89	1,524	202	

3) 검토 결과

- ei_rail 시스템의 적정성 검증을 위한 비교 자료로서 서해안선의 경우, 전체 서해안선 노선의 일부 구간으로 연장 약10km정도의 짧은 구간이며, 예타 및 타당성 조사와 같은 노선대 검토 및 개략 공사비 산정 방식이 아닌, 기본 및 실시설계로서
- 공사 발주를 위한 세부 공사비가 산정되어 ei_rail 시스템의 최적화 과정에서 도출되는 공종별 개략단가를 이용한 공사비 산정 방식은 직접 비교가 곤란함.
- 또한 계획 노선에 검토 좌우폭이 500m정도로 매우 제한되어 있어, 설계안과 ei_rail안의 평면 선형검토를 통한 설계안 대비 최적안 도출효과를 기대하기 어려움.
- 따라서, 상기와 같은 제약조건하에서 ei_rail 시스템의 적정성 검증방안으로 설계안 평면선형은 검토대상에서 제외하고, 종단선형 최적화를 통한 개략공사비 산정을 한 후, ei_rail안 공사비 산정방식에 따른 설계안 공사비를 도출하여 ei_rail 시스템 적정성 검토를 시행함.
- 검토결과 ei_rail안이 설계안에 비하여 교량 연장은 비슷하고, 터널연장은 축소되나, 상대적으로 토공 구간이 축소되어 전체공사비가 약 90억 정도 절감되는데 이는 설계안 대비 약 5%로의 공사비 절감효과가 있는 것으로 검토됨.
- 상기의 결과를 고려하면, 서해안선 기본 및 실시설계와 같은 연장이 짧고 검토 범위가 한정되어 있는 노선으로 ei_rail 시스템의 적정성 검토를 통한 효과 분석에는 한계가 존재하나, 검토 연장이 길고, 구간 폭이 광범위한 타당성 조사 수준의 프로젝트의 경우에는 상당한 효과를 기대 할 수 있을 것으로 사료되며,
- ei_rail 시스템의 내부 알고리즘 및 기본 자료(공종별 단가, 구조물 설치 조건)등의 추가 연구 개발을 통해 개선을 시행하면, 장래 효과적인 시스템으로, 활용이 가능할 것으로 기대됨

그림 4. 서해안선 계획평면도

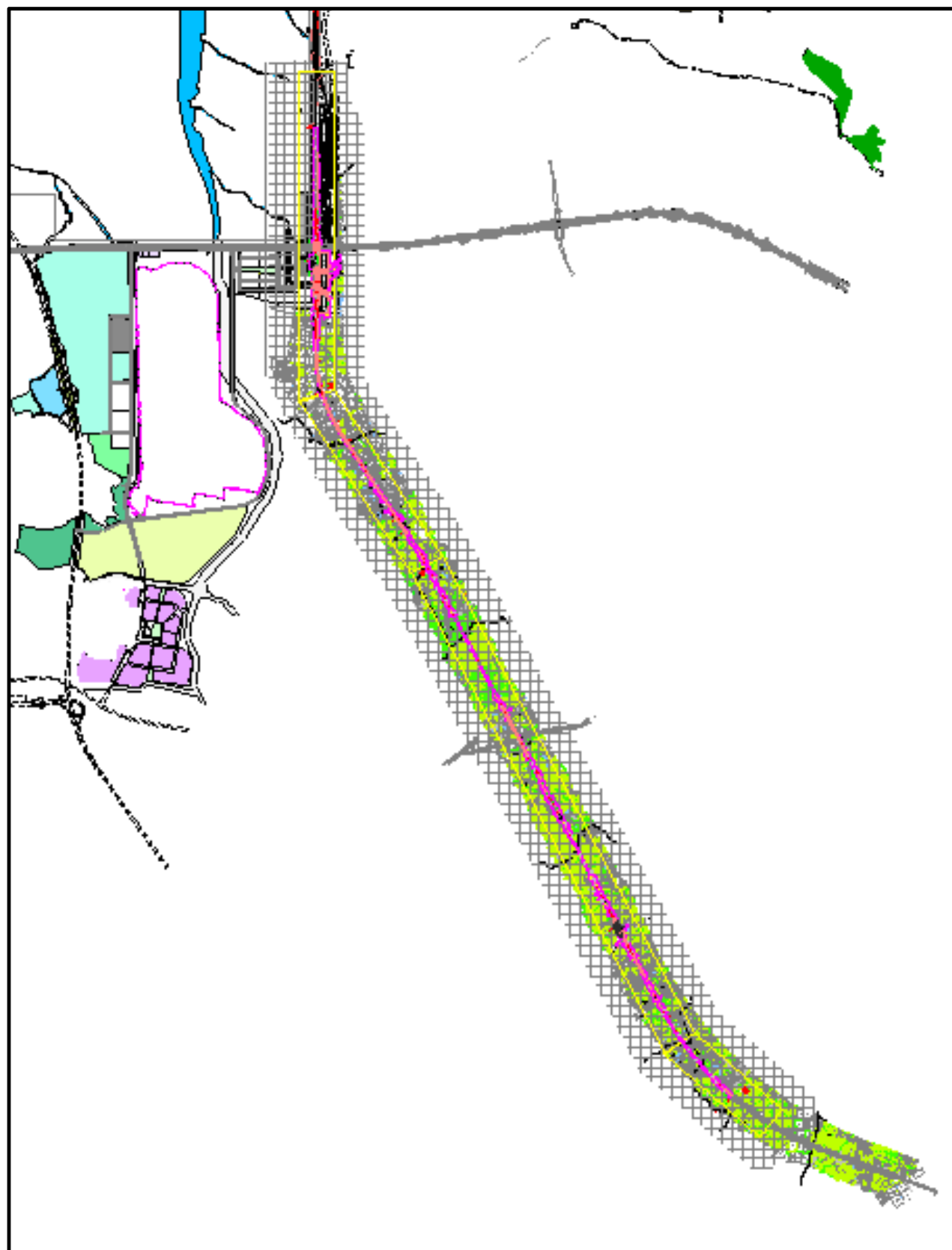


그림 4. 서해안선 계획 종단면도(1)

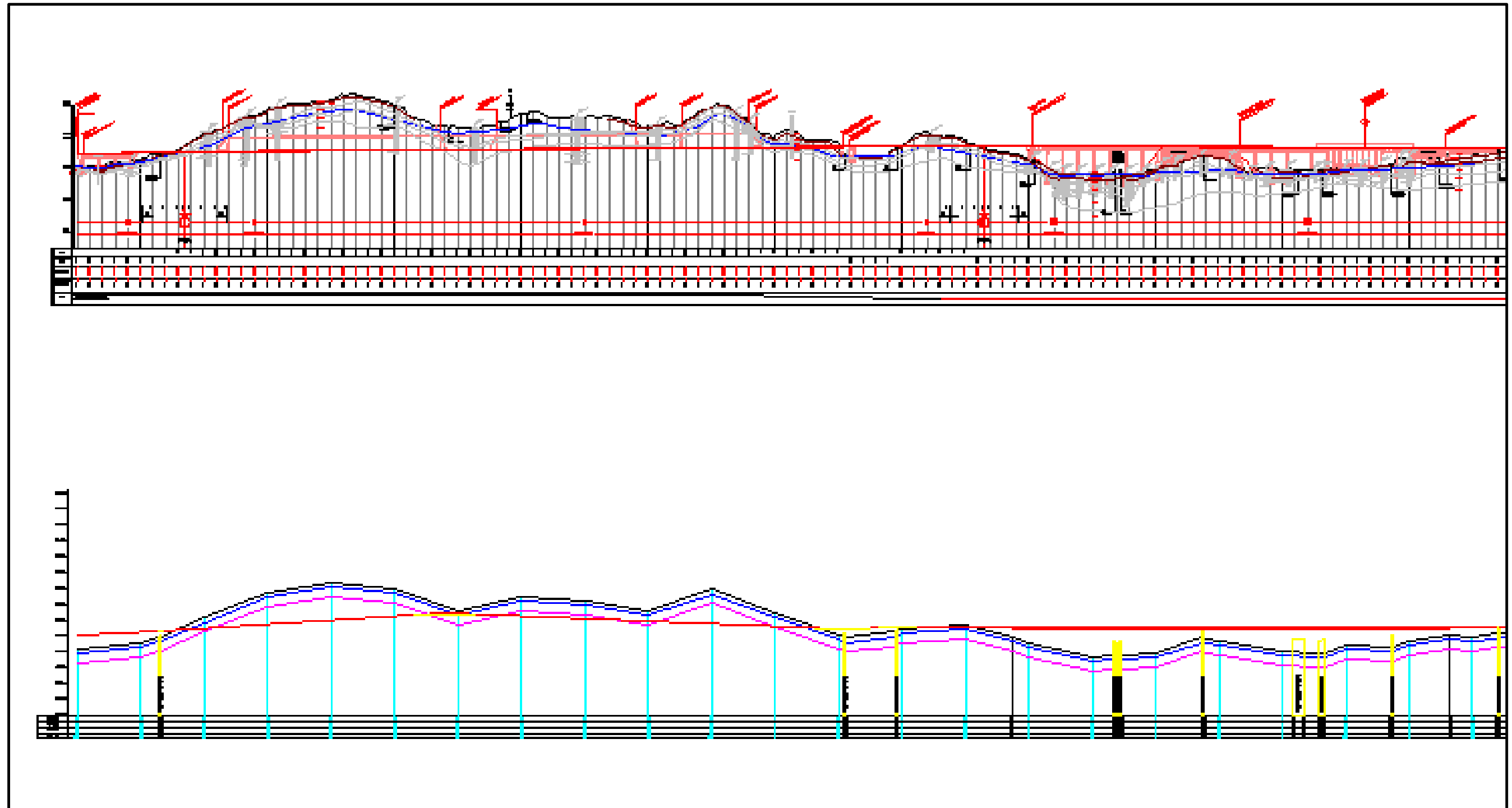


그림 4. 서해안선 계획 종단면도(2)

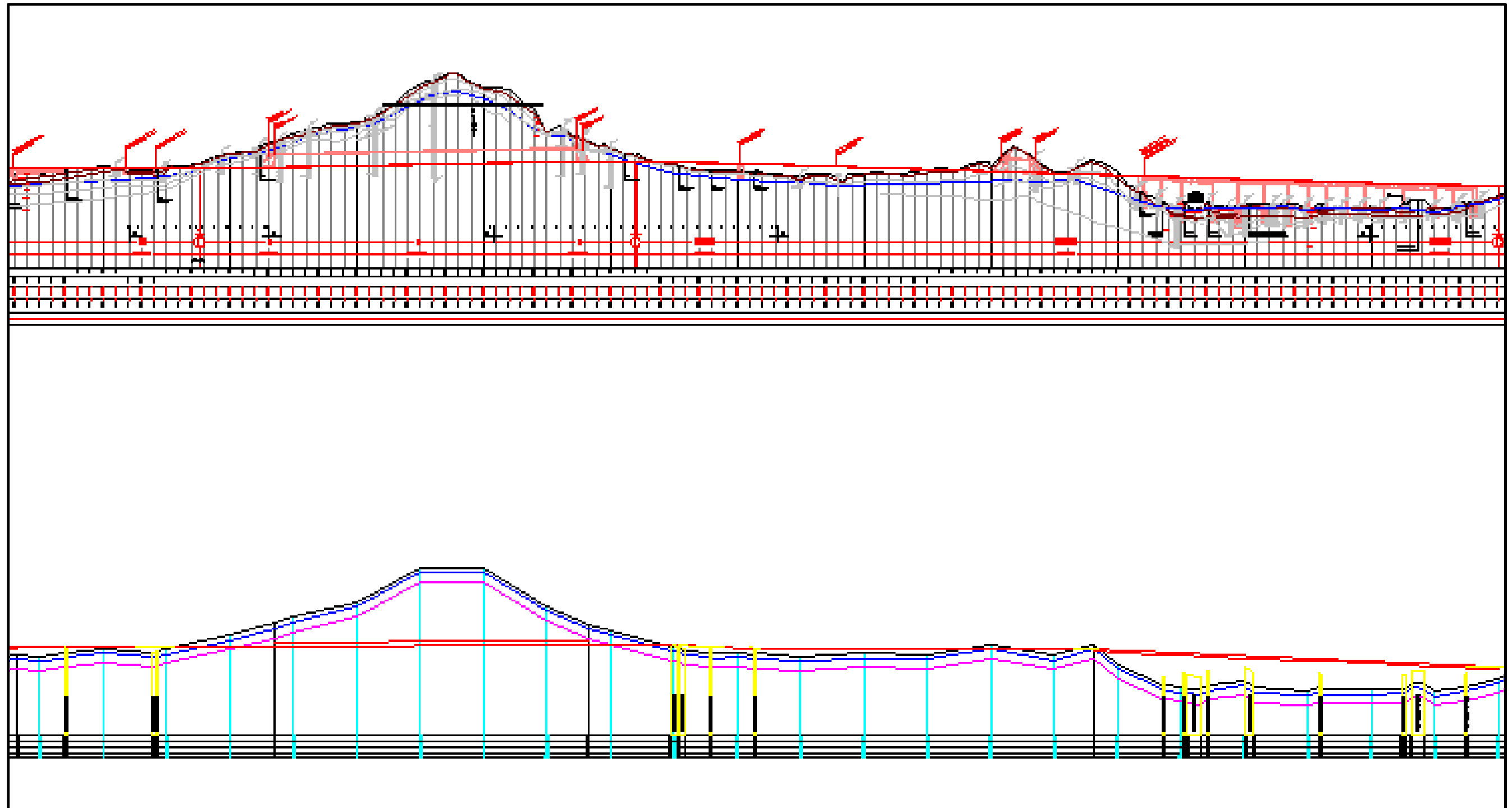


그림 4. 서해안선 계획 종단면도(3)

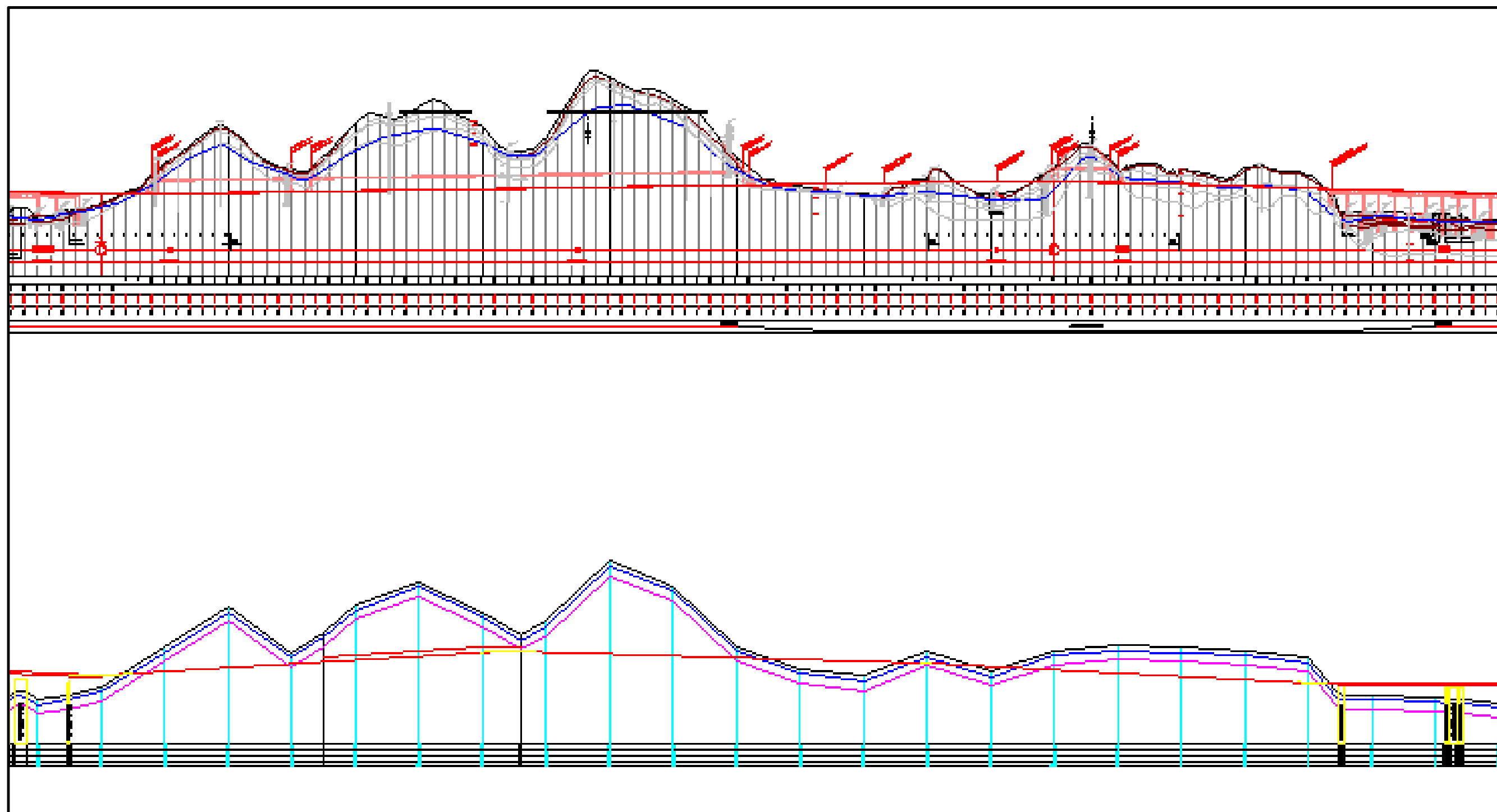


그림 4. 서해안선 계획 종단면도(4)

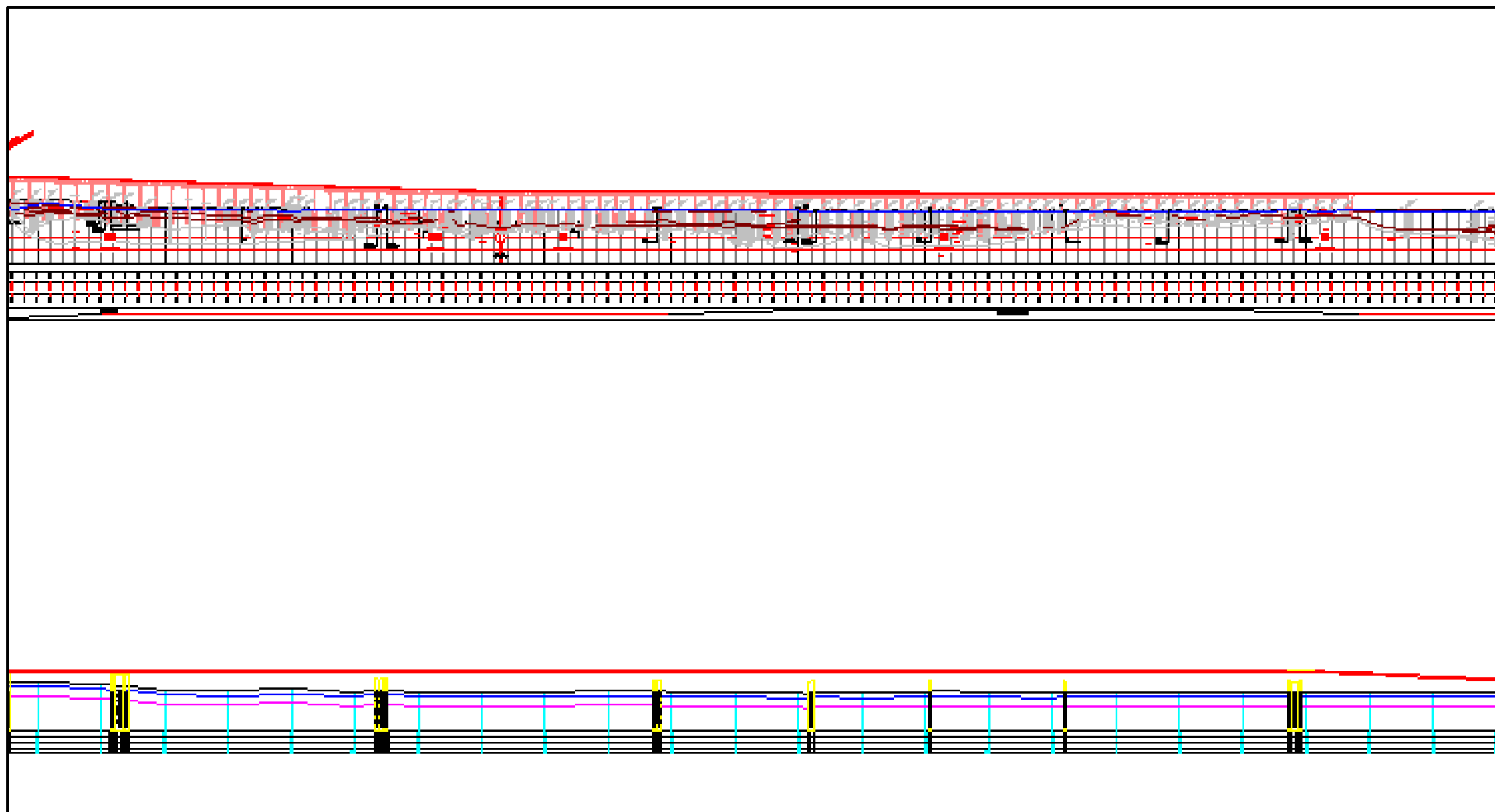
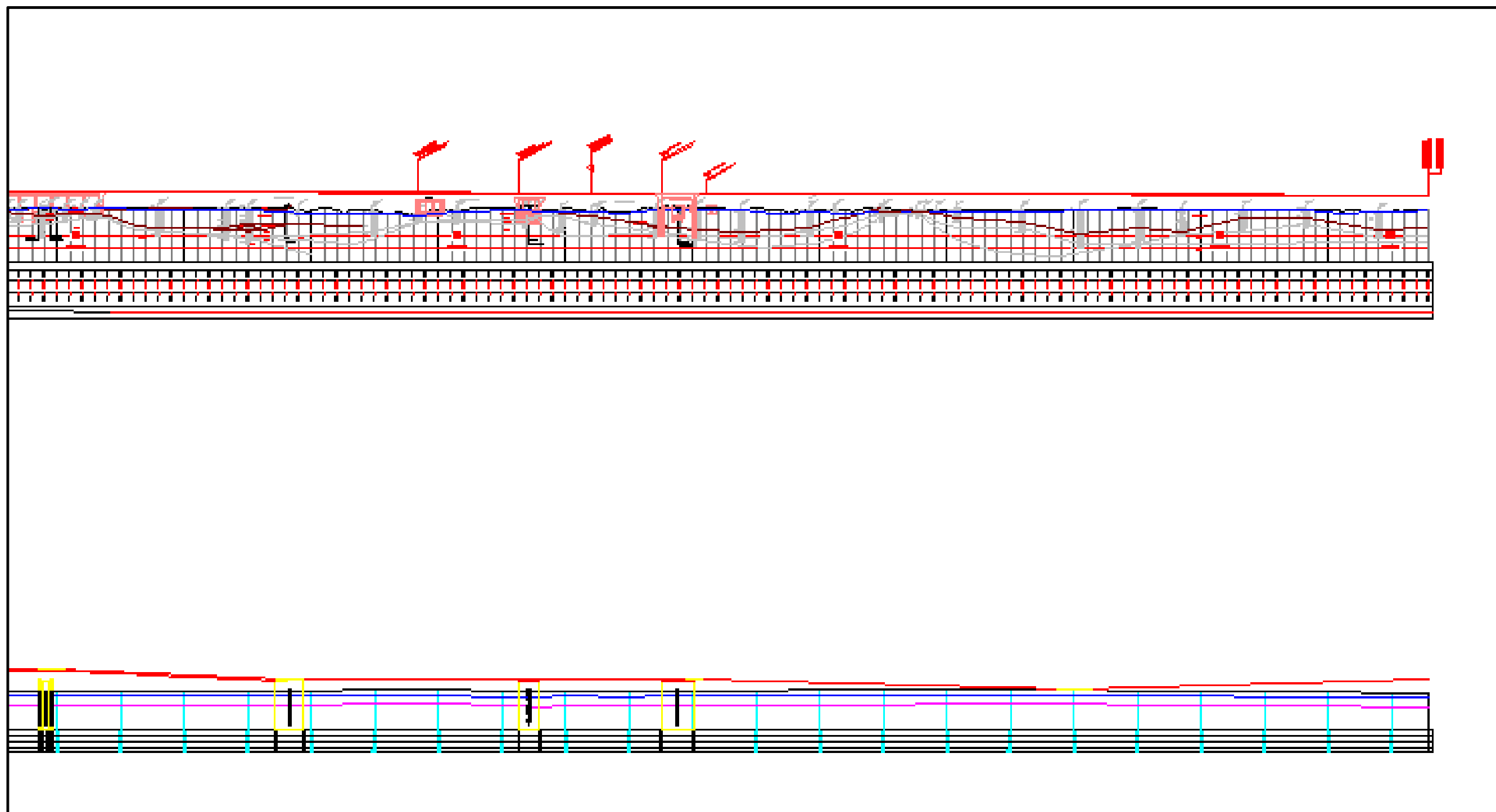


그림 4. 서해안선 계획 종단면도(5)



버. 검토결과요약

ei_rail 시스템은 시범사업의 주목적은 다양한 설계 조건 및 여건 등을 고려한 기존 철도 건설 계획 시 짧은 시간동안 수많은 노선을 검토하여 최적 노선을 도출, 궁극적으로 시간/비용의 효율성 증대 및 공사비 절감의 효과가 기대된다.

본 과업의 목적인 선형 최적화 시스템의 적정성 검증을 통하여, 기대되는 효과 및 ei_rail 시스템의 적용성 검증을 위하여, 이미 완료된 기본계획 노선 대비 ei_rail 도출 최적선형과의 비교 검토를 시행하였다.

서해선 검토 결과 검토결과 ei_rail안이 설계안에 비하여 교량 연장은 비슷하고, 터널연장은 축소되나, 상대적으로 토공 구간이 축소되어 전체공사비가 약 90억 정도 절감되는데 이는 설계안 대비 약 5%로의 공사비 절감효과가 있는 것으로 검토되었다.

상기의 결과를 고려하면, 서해안선 기본 및 실시설계와 같은 연장이 짧고 검토 범위가 한정되어 있는 노선으로 ei_rail 시스템의 적정성 검토를 통한 효과 분석에는 한계가 존재하나, 검토연장이 길고, 구간 폭이 광범위한 타당성 조사 수준의 프로젝트의 경우에는 상당한 효과를 기대 할 수 있을 것으로 사료되며, ei_rail 시스템의 내부 알고리즘 및 기본 자료(공종별 단가, 구조물 설치 조건)등의 추가 연구 개발을 통해 개선을 시행하면, 장래 효과적인 시스템으로, 활용이 가능할 것으로 기대된다

중앙선의 경우 기본계획안은 1조 9,424억원에서 1조 4,048 억원으로 약27.7% 감소한 것으로 나타났는데, ei_rail안이 기본설계안에 비하여 노선 통과 구간이 산지부보다는 평지부를 통과하는 구간이 차지하는 비율이 많으며, 기본설계안이 장대 교량으로 통과하는데 비하여, ei_rail 안은 기본설계안에 비하여 노선을 우회하여 상대적으로 교량 연장이 짧게 형성되는 구간으로 통과하는 등, 교량 연장을 축소하는 선형으로 계획되었고, ei_rail안이 기본설계안에 비하여 평지부를 통과하므로 터널구간을 축소하고, 토공구간의 연장이 상대적으로 많이 차지하고 있어, 전체 공사비를 절감하는 효과가 도출되었다.

상기한 바와 같이 ei_rail안의 구조물 구간 비율이 기본설계안에 비하여 상대적으로 적음으로 인해서 전체 공사비 절감 요인으로 작용하였고, 그에 반해 ei_rail안의 토공공사비는 증가한 바, ei_rail의 구조물 구간 감소 원인을 살펴보면, 첫째, 연장 감소 및 지형 조건이 기본설계안에 비하여 양호한 평지부를 통과함으로 인해서 구조물 통과 구간을 줄였으며, 둘째, ei_rail의 경우 초기 선형 조건 입력시 교량이나 터널설치 조건을 일정 기준에 따라 설치 되도록 정의하였기 때문에, 정의된 기준에 부합되는 구간에 적절한 연장으로 자동 계획되는데 반해, 기존 검토시 고려되는 자연 조건, 지역 조건, 환경 조건 등의 고려 요소는 배제됨으로써, 기존 설계안에 비하여 구조물 연장이 짧아져, 구조물 공사비가 저렴하게 산출되는 요인으로 작용된 것으로 분석되었다.

이는 ei_rail 시스템이 수많은 제약 조건 및 다양하고 복합적으로 고려되어야 하는 설계 조건을 모두 고려하는 데는 한계가 있으며, 또한 기존 설계시에도 여러번의 검토 과정을 거쳐 최적 노선이 결정되는바, ei_rail 시스템에 의한 최적 선형 도출시에도 상기와 유사한 조건(다양한 제약 조건, 정책 결정자 및 사업시행자, 계획 입안자의 의지 등)하에서 검토 과정을 거친다면 기존 설계 방식과 유사한 정도의 결과를 도출 할 것으로 기대된다.

제 7 장 결론

- 제1절 결론
- 제2절 활용방안

서. 결론

철도시장의 분야별 비율은 철도차량이 56.8%로 가장 많은 비중을 차지하고 철도인프라는 32.1%, 철도시스템은 11.1%로 구성되어 있으며, 연간 4~5% 성장이 예상되는 철도인프라 분야는 도시철도 및 고속철도의 성장으로 궤도산업이 58조원에 달할 전망이다.

철도시장의 비약적인 발전과 더불어 국내에서도 한국형 고속철도열차 개발 등 철도차량 분야에서 기술발전이 이루어지고 있으나 철도인프라 특히 철도선형설계분야에서는 십여년전과 비교해 큰 변화가 없었던 것이 사실이다

금번 2차년도 철도 선형설계 프로그램의 개발을 통하여 이러한 시장변화의 첫걸음을 내딛었다고 볼 수 있을 것이다. 실제 사용의 측면에서 볼 때, 앞으로 지속적인 프로그램 업그레이드가 필요한데 이는 발전하는 ICT기술을 융통성 있게 수용할뿐더러 자체 기능적인 측면, 그리고 사용자입장에서의 인터페이스 향상, 연구를 통한 보다 나은 알고리즘의 적용이 그 이유라고 하겠다.

개발된 프로그램을 적용한 결과, ei_rail 도출 9개의 대안중 공사비가 가장 저렴한 대안 1을 ei_rail 최적안으로 선정하여 기본설계안과 비교 하였고, 기본설계안의 ei_rail 공사비 산출 기준에 따른 개략 공사비는 18,705억원, ei_rail 최적노선은 9,791억원으로 산출되어, 기본설계안에 비하여 ei_rail 안이 8,914억원 절감되는 것으로 검토되었다.

기본설계안에 비해 ei_rail안의 노반 공사비 절감 주요 원인을 살펴보면,

구간 연장이 ei_rail안이 기본설계안에 비하여 1.38km(1.6%) 짧고, ei_rail안이 기본설계안에 비하여 노선 통과 구간이 산지부보다는 평지부를 통과하는 구간이 차지하는 비율이 많고, 기본설계안이 아산만 신언천 통과 구간이 장대 교량으로 통과하는데 비하여, ei_rail 안은 노선을 우회하여 상대적으로 교량 연장이 짧게 형성되어 교량 연장을 축소하는 선형으로 계획되었고, ei_rail안이 기본설계안에 비하여 평지부를 통과하므로 터널구간을 축소하고, 토공구간의 연장이 상대적으로 많이 차지하고 있어, 전체 공사비를 절감하는 효과가 도출되었다.

현 단계에서 볼 때, 유럽 또는 미국의 발전단계와는 규모, 양과 질, 지속적인 투자 측면에서 같을 수는 없으나 향후 지속적인 투자가 이루어진 다면 국내외의 경쟁력을 보다 빠르게 갖춰 나갈 것으로 기대된다.

어. 활용방안

국내의 철도선형설계는 계획단계에서 수행되는 타당성조사를 위한 기반데이터 수집, 노선대안의 설계, 비용산출, 시뮬레이션 등 대부분의 작업이 수작업에 의존한다. 이는 다양한 선형 설계요소를 고려하고 각종 설계기준, 비용제약, 다수의 대안에서 최적대안의 산출을 지원하는 등의 완벽한 설계도구가 현재까지는 존재하지 않았기 때문이다.

일부 프로그램에서 부분자동화 등을 지원하고는 있으나 이는 전체프로세스를 고려했을 때 매우 적은 범위의 과정을 지원할 뿐이다. 따라서 본 연구는 국내시장에서의 예비타당성조사를 지원 가능하며, 프로그램 업그레이드를 통해 나아가 실시설계단계에서도 활용할 수 있도록 하는 것이 바람직할 것이다.

세계 철도의 수송 분담율은 전체 수송부문에서 0.9%를 차지하고 있는 상황이다. 하지만, 해외 철도시장의 성장률은 2009년 207조원에서 2014년에는 242조 원으로 연평균 2.6% 수준의 성장률을 보일것으로 전망하고 있다.(Verker, 2009, 철도 기술시장 분석보고서)

이러한 세계시장 진출을 위해서는 설계를 위한 수치지도가 구비되어야 하는데, 선진국과 일부 개발도상국을 제외한 나라에서는 이러한 기초자료가 매우 부족한 현실이다. Ei-Rail은 이러한 문제점을 해결하기 위해 우리나라 및 미국, EU등에서 구축하고 있는 위성영상을 직접 활용할 수 있도록 설계되었다.

각 나라마다 정해진 설계기준을 적용할 수 있도록 프로그램에는 옵션 설정기능이 있는데, 이는 새로운 코딩없이 UIC등의 해외 설계기준을 사용할 수 있도록 설계옵션을 조정할 수 있다

또한, 시장경제연구원의 “글로벌 철도시장의 분석 및 해외진출 촉진정책 기반의 수립” 보고서에 따르면 2015년 이후에는 이전에 비하여 2배 이상의 시장규모를 나타내지만 아시아시장 오세아니아 시장은 정체될 것이며 아프리카/ 중동 시장은 절반 이하의 규모로 큰 축소가 예상된다.

2014년까지의 시장은 중국을 비롯한 아시아 시장이 가장 큰 규모를 차지할 것이나, 2015년 이후에는 북 미시장이 3배 이상 커져 아시아 시장의 3배, 서유럽 시장의 1.7배 규모로 확대될 것으로 전망하고 있다.

국가차원에서의 글로벌 시장진출을 다각적으로 모색하고 있는 만큼 이러한 신성장동력원으로써의 철도분야는 인프라, 시설, 차량, 운영 및 서비스 분야별로 해외 시장진출을 위한 노력을 기울이고 있다.

특히, 이러한 시장진출을 위해서는 계획단계에서 부터의 노력이 있어야 하는데 본 연구에서 개

발된 Ei-Rail은 이러한 해외 시장에서의 철도 노선설계분야 및 타당성 조사 분야의 업무를 효율적으로 할 수 있는 능력을 가지고 있다.

한국철도기술연구원에서는 시험적으로 태국의 철도시장진출을 위하여 시험적으로 사용하였으며, 향후 해외 시장 진출을 위한 초기 계획단에서 이를 적극 활용할 예정이다.