

# GIS를 이용한 철도선형최적화

## Optimization of Railway Alignment Using GIS

강인준\*  
Kang, In-Joon

이준석\*\*  
Lee, Jun-Seok

김수성\*\*\*  
Kim, Su-Sung

### ABSTRACT

This study is to develop the model of alignment optimization based on design criteria by approaching through alignment of railway design and problems in economy, environment and technology for satisfying traffic volume of the main roads caused by economical and social developments.

Now, Geographic Information System isn't applied when designing a present railway in home. And the design of railway alignment is still set on importance of transition curves and cant according to passenger comfort in abroad so the study of railway alignment is at initiation phase so far.

This paper is about decision of optimal alignment between two stations such as starting point and ending point automatically using GIS in optimization of railway alignment. A route between Sungsan city and Shinpung city is the training area and the study compared and evaluated optimal railway route by GIS automatically with present railway route designed.

Present optimal formulas was used in this study for optimization of railway alignment. The model of optimization of railway alignment was developed through topographical elements and it was mentioned by the model of road alignment because of the similarity in design of alignment. But the design of lateral track irregularities, cant for passenger comfort and motion sickness followed by train rolling have to be considered more. Anyway, this study formed the basis of using GIS and the study should be keep going on in the future.

### 1. 서론

철도 노선 설계시 지역 사회에 편익이 크고 사업주체자의 이익도 높도록 고려되어야 하며 이를 위해서 많은 비교 안을 검토하여 가장 양호한 노선이 선정되어야 한다. 철도 선형 선정시 모든 설계조건을 만족하면서 최소비용을 통한 최대이익을 산출해 내는 선형이 필요하게 된다. 그리고 선형에 관련된 중요한 요소들과 비용을 고려해 선형 결정시 존재하는 많은 요인들을 최적화 할 수 있다. 현재 최적 선형 결정방법은 수작업에 의한 시간이 다소 필요한 작업이며 자동적인 계산에 의한 최적 선형 선정은 이러한 시간과 비용의 어려움을 해결해 낼 수가 있다.

국내에서 현재까지의 선형설계는 선형설계자의 경험에 의해 도출된 평면선형과 그에 따른 중단선형 비교대안들에 대한 반복적 검토작업에 의해 이루어지고 있으며 토목설계용

---

\* 부산대학교 토목공학과 교수, 051-510-2353, [kangprof@hanmail.net](mailto:kangprof@hanmail.net)  
\*\* 부산대학교 토목공학과 박사수료, 051-510-3209, [jaslee@pusan.ac.kr](mailto:jaslee@pusan.ac.kr)  
\*\*\* 부산대학교 토목공학과 석사과정, 051-510-3209, [marstar@pusan.ac.kr](mailto:marstar@pusan.ac.kr)

CAD 소프트웨어들은 이러한 반복적 검토작업을 전산화된 입력자료를 바탕으로 고속화함으로써 보다 많은 비교대안에 대한 검토를 용이하게 해주고 있다고 할 수 있다.

국외에서 선형과 칸트(super-elevation)는 모두 궤간확장, 철도 기울기, 철도 종단도, 노선틀림, 매끄러운 레일, 궤도 가파름과 진동의 감폭과 같은 궤도 특성들과 함께 궤도/운반차량 상호작용 부분에서 볼 때 운반차량 측면에 관한 연구는 그다지 많이 없었다(철도 국제연합연구소, 1990). 현재 연구는 수평 단곡선에서의 선형과 칸트에 초점을 맞추고 있는데 이런 경우, 반지름, 칸트 완화곡선 길이와 곡선 바깥쪽 면을 높인 경사로등과 같은 궤도 요소의 선택에 관한 부분이 연구되어진다. 그리고 각각 기존의 완화곡선과 선형 경사로를 가지고 완화곡선의 다른 형태들을 궤도의 거리와 같은 연계성에 관한 곡률의 비 선형 변화와 비 선형 S 모양의 바깥쪽 면을 높인 경사로등과 비교한다. 그리고 완화곡선의 변형된 형태로 인한 탈선은 궤도 틀림에 대한 유지보수 내구력만큼 중요하기 때문에 완화곡선을 지속적으로 발전시키는 진보된 형태가 유용한가에 대한 의문은 계속해서 제기되고 있으며 현재 GIS를 이용한 철도 선형에 관한 연구가 아직은 시작단계에 있다고 볼 수 있다.

본 연구의 목적은 경제, 사회발전과 더불어 성장하는 주요도로의 교통량을 충족시키기 위해서 철도 설계시의 선형과 경제적, 환경적, 기술적 문제를 통해 접근하며 요구조건들을 설계기준에 맞추어 설계의 시작점과 종점, 두 지점간의 최적 선형을 자동 결정하는 GIS 모델을 만드는 것이다.

## 2. 철도선형 최적화

### 2.1 철도선형의 구성

선로에서 곡선의 내측 레일에 비하여 외측 레일을 높게 하면, 이것에 의하여 곡선 내방으로 향하는 중력 성분을 가져와서 평면 곡선에서 발생하는 원심력(centrifugal force)을 완화할 수 있으므로 통상의 곡선에서는 이와 같이 하는데 "칸트(cant)"라고 한다. 차량에 있어서 차륜과 차축으로 구성되는 윤축은 차체 혹은 대차에 "고정축거"라고 부르는 일정한 간격으로 고정되어 있어, 운행의 편의를 위해 궤간을 확대할 필요가 있는데 이것을 "슬랙"이라 한다.

열차가 어느 속도로 곡선을 통과하는 경우에 원심력(centrifugal force)이 외측으로 작용하기 때문에 차량이 곡선 외방으로 전복(overturn)할 위험이 생기고 외측 레일에 큰 윤축이 작용함과 함께 차량의 전향에 의하여 큰 횡압이 가해짐으로 인해 궤도파괴가 크게 되어 보수량이 증가한다. 그리고 승객이 외측으로 당겨져 승차감이 나쁘게 되며 열차의 저항이 증가한다. 이들의 원심력에 의한 악영향을 방지하기 위하여, 이 힘을 상쇄 또는 경감하도록 곡선 선로에서는 외측 레일을 내측 레일보다 높게 하여 차량 중심에 작용하는 원심력과 중력과의 합력 작용선이 궤도 중심을 통과하도록 함으로서 열차운전의 안전, 궤도부담의 평균화를 피하고, 승차감을 좋게 한다. 이와 같이 궤도에 경사를 붙인 것, 즉 외측 레일과 내측 레일의 고저 차를 칸트(super-elevation, cant)라 한다.

$$C = \frac{GV^2}{13gR} = \frac{GV^2}{127R} \quad (mm) \quad (1)$$

표준궤간에서  $G = 1,500mm$ 로 하면, 칸트는 다음과 같다.

$$C = 11.8 \frac{V^2}{R} \quad (2)$$

## 2.2 선형의 수학적 기술

그림 1은  $x-y$  수평면에서 곡선 궤적을 그리는 철도선로를 나타낸다. 궤도의 거리는 궤도 중심선으로 간주하며  $s$ 로 나타낸다.

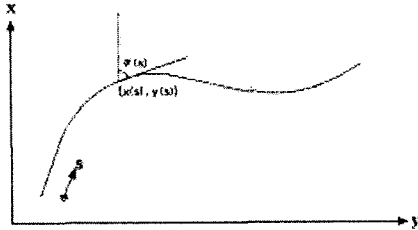


그림 1.  $x-y$  평면에서 곡선궤도

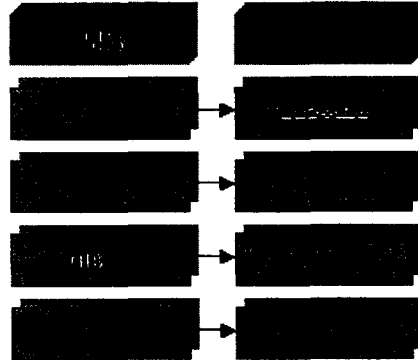


그림 2. 최적화 계산시 필요한 모듈

궤도  $\psi(s)$  rad의 방향은 곡률  $k(s)$ 를 적분함으로써 계산할 수 있다.

$$\psi(s) = \int d\psi = \int k(s) ds \quad (3)$$

그리고 궤도 중심선의  $x(s), y(s)$ 의 좌표는 이중적분으로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} x(s) &= \int \cos \psi(s) ds = \int \cos \int k(s) ds ds \\ y(s) &= \int \sin \psi(s) ds = \int \sin \int k(s) ds ds \end{aligned} \quad (4)$$

만약 궤도가 직선이나 원위를 움직인다면 곡률  $k(s)$ 은 상수값이다.

## 2.3 완화곡선의 형태

완화곡선의 형태에는 Helmert curve, Ruch curve, Bloss curve, Cosine curve, Gubar curve, Watorek curve 그리고 sinusoidal curve 등이 있다. 여기서는 Helmert curve와 Ruch curve에 관한 관계식을 설명하였다.

### 2.3.1 Helmert 곡선

Helmert 곡선에서, 곡률은 곡률  $k(s)$ 와 곡률 도함수  $k'(s)$ 가 연속함수인 2개의 2차 포물선의 형태를 가진다. 곡률  $k_0$ 과  $k_1$ , 최대 곡률 도함수  $k'_{\max}$ , 2차 곡률 도함수  $k''$ , 측면 변동  $w$ 와 인접한 성분요소  $\Delta L_0$ 와  $\Delta L_1$ 의 관계가 다음 식에 나타난다.

$$\begin{aligned} w &\approx \frac{1}{12} \cdot \frac{|k_1 - k_0|^3}{k'^2_{\max}} & \Delta L_0 \approx \Delta L_1 &\approx \left| \frac{k_1 - k_0}{k'_{\max}} \right| \\ w &\approx \frac{1}{12} \cdot \frac{(k_1 - k_0)^2}{k''} & \Delta L_0 \approx \Delta L_1 &\approx \left| \frac{k_1 - k_0}{k''} \right|^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (5)$$

### 2.3.2 Ruch 곡선

이러한 형태의 완화곡선은 Ruch에 의해 제안되었다(1903). Ruch 곡선의 목적은 전후, 상하 속도에서 표준 열차 질량 중심의 좌우 위치에 관한 부드러운 승차감을 만들기 위한 것이다. 정리하면 다음과 같다.

$$w \approx \frac{1}{24} \cdot \left( 1 + \left( \frac{e}{1-e} \right)^2 \right) \cdot \frac{|k_1 - k_0|^3}{k'^2_{\max}}$$

$$\Delta L_0 \approx \Delta L_1 \approx \frac{1}{2e \cdot (1-e)} \cdot \left| \frac{k_1 - k_0}{k'_{\max}} \right|$$

$$w \approx \frac{1}{24} \cdot \left( \frac{1}{e \cdot (1-e)} - 2 \right) \cdot \frac{(k_1 - k_0)^2}{k''}$$

$$\Delta L_0 \approx \Delta L_1 \approx \frac{1}{2} \cdot \left| \frac{1}{e \cdot (1-e)} \cdot \frac{k_1 - k_0}{k''} \right|^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

### 3. 모델링 알고리즘

#### 3.1 GIS를 이용한 철도 최적화

GIS는 철도 선형 최적화에서 중요한 역할을 할 수 있다. 이것은 지형 데이터 저장, 다양한 데이터세트의 위상관계 수립, 탐색과 질의 수행 등 철도 최적화를 수행하는데 필요한 많은 기능을 GIS가 제공할 수 있기 때문이다. 범람원, 습지, 지질구조, 수계망, 호수, 건물과 도로 네트워크 등의 지리적인 요소들은 최적 노선을 산정시 고려되어야 할 사항들이며 경계와 필지의 단가 등을 보여주는 속성지도는 철도 선형 최적화 모델을 개발하는데 필수적인 것이다.

#### 3.2 유전자 알고리즘

유전자 알고리즘(Genetic Algorithms)은 적자생존의 원칙과 자연도태 원칙을 이용하여 개발된 알고리즘이다. 이것은 수많은 지엽해가 존재하는 가운데 최적해를 찾을 수 있는 알고리즘이며 초기집단은 최적해에 관계없이 일반적으로 무작위로 발생하게 되는데 각각의 해가 서로 경쟁하여 새로운 해를 찾아내게 된다. 이 새로운 해와 진화되는 방향은 적합도에 의해 결정된다. 이러한 과정을 통해 해들이 점점 개선되고 발전되어 간다. 유전자 알고리즘에서 해들이 수렴이 되지 못할 경우도 있는데 특정한 세대에 도달하거나 적합도가 무시할 만큼 작거나 각 독립된 해들이 서로 같아지면 진화의 과정을 멈추게 되는 것이다. 철도선형 설계시 이러한 유전자 알고리즘을 이용하여 최적해에 접근하였다.

#### 3.3 알고리즘의 해석

철도 설계 최적화를 이루는 좋은 방법은 철도 선형 최적화를 이루는 것이다. 변수계산이나 동적 계획법과 같은 기존의 최적화 방법으로는 복잡한 철도 선형 최적화 모델을 이용한 적절한 해를 도출해 내기가 어렵다. 따라서 유전자 알고리즘을 통해서 이러한 단점을 보완하고 최적의 해를 얻을 수 있을 것이다.

철도 선형 최적화 문제는 위의 그림 2와 같이 4개의 모듈로 분류할 수 있다.

### 4. 연구대상지 적용사례

#### 4.1 연구대상지역

본 연구에서는 철도청에서 주관한 전라선 구간 중 철도개량 건설공사시 수행되었던 지역의 수송체계 개선 및 지역개발을 촉진하는 생산-신평 간 노선 ( 154km049.42, 연장 : 9km589.24) 으로 선정하였으며, 시점이 X : 159,024.845, Y : 249,636.053 종점이 X : 151,085.108, Y : 254,638.717 이다.

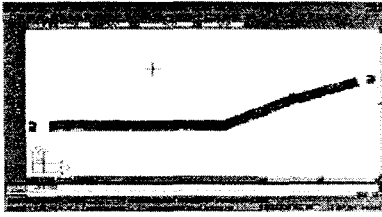


그림 3. 전라선 성산-신포간 평면실측도

국립교통연구원 철도노선선형설계연구부  
 노선명 : 전라선 성산-신포간 평면실측도  
 계획 : 1987.12.15

구분	구	구	구	구	구
구분	1	2	3	4	5
구분	150000.000	200000.000	250000.000	300000.000	350000.000
구분	150000.000	200000.000	250000.000	300000.000	350000.000
구분	150000.000	200000.000	250000.000	300000.000	350000.000
구분	150000.000	200000.000	250000.000	300000.000	350000.000
구분	150000.000	200000.000	250000.000	300000.000	350000.000

그림 4. 선형 계산서

#### 4.2 데이터베이스 구축

먼저, 수치지도 레이어(layer)를 shp파일로 변환시킨 후, Arcview에서 Grid로 export를 시키면서 Matlab상에서 grid 파일을 ascii파일로 변환시킨 후 0과 1값으로 변환시키는 프로그램을 작성하여 실행시킨다. 그리고 각각의 레이어 파일에 적절한 가중치를 주기 위해 Matlab상에서 프로그래밍한다.

#### 4.3 비교고찰

본 연구는 성산-신포간 노선 지역 일대를 연구 대상지역으로 하여 이미 설계된 기존 최적노선과 자동 선정된 최적노선을 비교하여 평가하였다. 그리고 노선의 선정시 GRID를 이용하여 고려되어야 할 여러 요소들에 각각의 가중치를 주어 최적노선의 활용 폭을 넓힐 수 있었다. 실제 설계한 노선과 비교하여 철도 노선 선정에 있어서 실시 설계에 고려된 세부적인 사항들을 고려할 때 여러 경험있는 기술자와 조언을 통해 효율적으로 고려될 수 있다면 GIS를 이용한 최적노선 선정시의 활용 범위는 더욱 넓어 질 것이다.

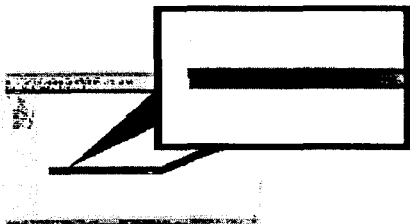


그림 5. Matlab과 유전자 알고리즘을 이용한 선형모습

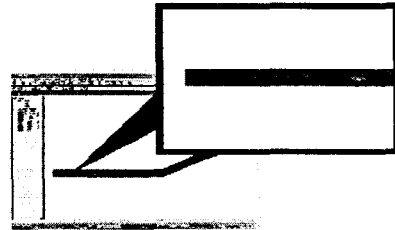


그림 6. 기존의 설계된 선형과 유전자 알고리즘을 이용한 선형비교

#### 5. 결론

본 연구에서는 GIS를 이용한 철도 선형 최적화 연구를 위해 기존의 최적화 공식을 이용하였으며 지형적인 요소를 통한 GIS 철도 최적화 선형 모델을 만들었다. 실제적인 철도 노선 최적화를 위해서 최적화 모델은 GIS데이터를 동적으로 사용할 수 있어야 하며 GIS에서 실시간으로 데이터를 읽어 들이는 모델링 툴 개발은 초기 선형 설정에 효율적이었다. 철도 선형 최적화 모델은 서로 다른 철도 선형간의 비교를 위한 자동화 도구로 사용될 수 있는데 여기서 IP 개수와 유전자 세대수를 변수로써 각각의 환경에 따라 다른 값을 줌으로써 개별적으로 선형이 산출되는 예를 보였다. 그리고 변수값에 상관없이 비용은 일정한 최적값에 수렴될 수 있었다. 철도선형 최적화를 위해 기존 도로선형 모델을 참조함으로써, 실제

철도설계시의 고려해야 할 측면 뒤틀림 예방 설계, 승객의 승차감 만족을 위한 캔트의 설계, 철도의 요동으로 인한 동요병 예방 설계등의 부분에서는 좀더 세밀한 연구가 뒷받침되어야 하며 이번 연구를 통해 철도 선형 최적화 선정시 GIS를 이용함으로써 그 토대를 마련할 수 있었고 지속적인 연구가 있어야 할 것이다.

#### 참 고 문 헌

1. 서사범, "선로공학", 일과알, 2002.
2. "고속전철기술개발", 한국고속철도건설공단, 1996.
3. 서선득 외1, "지역간 철도운행 비용 모형의 정립", 교통개발연구원, 1994.
4. 철도청, "철도설계기준(노반편)", 2001.
5. 박운용, "도로교통공학", 형설출판사, 1993, pp.147~234
6. 강인준, 장용구 "도로설계에 있어서 지형공간정보체계를 활용한 최적노선결정", 부산대학교 도시연구소, 제8권, pp.53-62
7. 서용운, "GIS 기법을 활용한 최적노선 선정에 관한 연구", 성균관대학교 대학원 석사학위 논문, 1991.
8. 강성철, 전경수, 박영옥 "중단선형설계 최적화 기법에 관한 연구", 1994, 대한교통학회지 12권, 3호, p5-13
9. Bjorn Kufver, "Optimization of single horizontal curves in railway alignments" Division of transport systems, Swedish National Road and Transport Research Institute, Sweden, TRITA-FKT Report 1997:45, ISSN 1103-470X, ISRN KTH/FKT/FR-97/45-SE, VTI Report 424A, KTH Hskoletryckeriet 1997.
10. Wolfgang S.Homburger, Louis E. Keefer and William F.McGrath "TRANSPORTATION AND TRAFFIC ENGINEERING HANDBOOK", ECMT(European Conference Of Ministers Of Transport), 1980.
11. "SCOPE FOR RAILWAY TRANSPORT IN URBAN AREAS", 1980.
12. ESRI, "Understanding GIS, The ARC/INFO Method", John Wiley & Sons Inc., 1995.
13. Kufver, B. (1998a). "Alignment optimization with vehicle reactions taken into consideration", Nordic Road & Transport Research, 1998(2), pp4-6