

GIS를 이용한 철도 선형 최적화에 관한 연구

The Study of Optimization in Railway Alignment Using GIS

이준석*, 강인준**, 김상석***, 김수성****

Lee, Jun Seok · Kang, In Joon · Kim, Sang Suck · Kim, Su Sung

1. 서론

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

열차가 어느 속도로 곡선을 통과하는 경우에 원심력(centrifugal force)이 외측으로 작용하기 때문에 차량이 곡선 외방으로 전복(overturn)할 위험이 생기고 외측 레일에 큰 윤증이 작용함과 함께 차량의 전향에 의하여 큰 횡압이 가해짐으로 인해 궤도파괴가 크게 되어 보수량이 증가한다. 그리고 승객이 외측으로 당겨져 승차감이 나빠지며 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.

* 정회원 · 부산대학교 공과대학 토목공학과 박사수료(jaslee@pusan.ac.kr)
** 정회원 · 부산대학교 공과대학 토목공학과 교수(kangprof@hanmail.net)
*** 정회원 · 부산대학교 공과대학 토목공학과 박사과정(civil-1614@hanmail.net)
**** 정회원 · 부산대학교 공과대학 토목공학과 석사과정(marstar@pusan.ac.kr)

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

표준 궤간에서 $G=1,500mm$ 로 하면, 캔트는 다음과 같다.

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

2.2 선형의 수학적 기술

2.2.1 Ψ 방향과 x, y 좌표에 대한 차분방정식

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

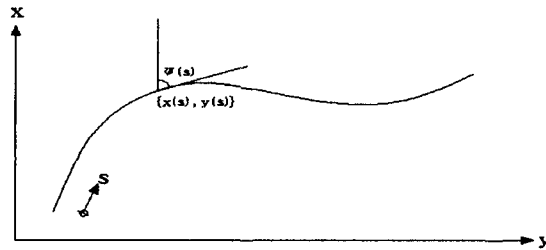


그림 1. $x-y$ 평면에서의 곡선궤도

궤도 $\Psi(s)$ (rad)의 방향은 곡률 $k(s)$ 를 적분함으로써 계산할 수 있다.

$$\Psi(s) = \int d\Psi = \int k(s)ds \quad (2-3)$$

그리고 궤도 중심선의 $x(s)$ 와 $y(s)$ 의 좌표는 이중 적분으로 구할 수 있다.

$$x(s) = \int \cos \Psi(s)ds = \int \cos \int k(s)ds ds \quad (2-4)$$

$$y(s) = \int \sin \Psi(s)ds = \int \sin \int k(s)ds ds \quad (2-5)$$

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

2.2.2 S 곡률함수를 가진 다른 형태의 완화곡선 비교

가. 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 ΔL_0 와 ΔL_1 의 관계가 다음 식에 나타난다.

$$w \approx \frac{1}{12} \cdot \frac{|k_1 - k_0|^3}{k'^2_{\max}} \quad (2-6)$$

$$\Delta L_0 \approx \Delta L_1 \approx \left| \frac{k_1 - k_0}{k'_{\max}} \right| \quad (2-7)$$

$$w \approx \frac{1}{12} \cdot \frac{(k_1 - k_0)^2}{k''} \quad (2-8)$$

$$\Delta L_0 \approx \Delta L_1 \approx \left| \frac{k_1 - k_0}{k''} \right|^{\frac{1}{2}} \quad (2-9)$$

나. 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.

$$w \approx \frac{1}{24} \cdot \left(1 + \left(\frac{e}{1-e} \right)^2 \right) \cdot \frac{|k_1 - k_0|^3}{k'_{\max}{}^2} \quad (2-10)$$

$$\Delta L_0 \approx \Delta L_1 \approx \frac{1}{2e \cdot (1-e)} \cdot \left| \frac{k_1 - k_0}{k'_{\max}} \right| \quad (2-11)$$

$$w \approx \frac{1}{24} \cdot \left(\frac{1}{e \cdot (1-e)} - 2 \right) \cdot \frac{(k_1 - k_0)^2}{k''_{\max}} \quad (2-12)$$

$$\Delta L_0 \approx \Delta L_1 \approx \frac{1}{2} \cdot \left| \frac{1}{e \cdot (1-e)} \cdot \frac{k_1 - k_0}{k''_{\max}} \right|^{\frac{1}{2}} \quad (2-13)$$

다. Bloss 곡선

완화곡선의 이러한 형태는 Bloss(1936)에 의해 제시되었다. Bloss 곡선의 곡률은 3차 포물선으로 구성된다. 2차 도함수가 아닌 곡률의 도함수는 접점에서 연속함수이다. 정리하면, 다음과 같다.

$$w \approx \frac{9}{160} \cdot \frac{|k_1 - k_0|^3}{k'_{\max}{}^2} \quad (2-14)$$

$$\Delta L_0 \approx \Delta L_1 \approx \frac{3}{4} \cdot \left| \frac{k_1 - k_0}{k'_{\max}} \right| \quad (2-15)$$

$$w \approx \frac{3}{20} \cdot \frac{(k_1 - k_0)^2}{k''_{\max}} \quad (2-16)$$

$$\Delta L_0 \approx \Delta L_1 \approx \left| \frac{3}{2} \cdot \frac{(k_1 - k_0)}{k''_{\max}} \right|^{\frac{1}{2}} \quad (2-17)$$

라. Cosine 곡선

코사인 함수의 모양을 한 곡률의 완화곡선은 Vojacec(1868)에 의해 제시되었다. 곡률은 코사인 함수주기의 절반으로 구성된다. 2차 미분 도함수가 아닌 곡률 도함수는 접점에서 연속 함수이며 다음의 관계를 가진다.

$$w \approx \left(\frac{\pi^2}{32} - \frac{1}{4} \right) \cdot \frac{|k_1 - k_0|^3}{k'_{\max}{}^2} \quad (2-18)$$

$$\Delta L_0 \approx \Delta L_1 \approx \frac{\pi}{4} \cdot \left| \frac{k_1 - k_0}{k'_{\max}} \right| \quad (2-19)$$

$$w \approx \left(\frac{\pi^2}{16} - \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{(k_1 - k_0)^2}{k'_{\max}} \quad (2-20)$$

마. Watorek 곡선

이 완화곡선은 Watorek(1907)에 의해서 제안되었다. 곡률함수는 접점에서 1차, 2차 미분 도함수 두 가지 모두 연속함수이므로 다항식에 의해서 구성된다. 연속 2차 곡률 도함수를 가지는 주된 이유는 캔트의 연속 2차 도함수를 풀기 위함이며 그것은 차량의 질량 중심에서 좀더 부드러운 측면 승차감을 주도록 하기 위한 것이다.

$$w \approx \frac{225}{3584} \cdot \frac{|k_1 - k_0|^3}{k'_{\max}^2} \quad (2-21)$$

$$\Delta L_0 \approx \Delta L_1 \approx \frac{15}{16} \cdot \left| \frac{k_1 - k_0}{k'_{\max}} \right| \quad (2-22)$$

$$w \approx \frac{5}{28 \cdot \sqrt{3}} \cdot \frac{(k_1 - k_0)^2}{k'_{\max}} \quad (2-23)$$

$$\Delta L_0 \approx \Delta L_1 \approx \frac{1}{2} \cdot \left| \frac{10}{\sqrt{3}} \cdot \frac{k_1 - k_0}{k'_{\max}} \right|^{\frac{1}{2}} \quad (2-24)$$

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 해석 알고리즘의 개발

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 해석 알고리즘의 개발

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.

4. 연구대상지 적용 사례

4.1 연구대상지역

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

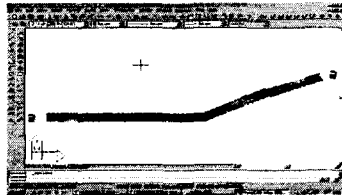


그림 2. Cad에서 전라선
성산-신평간 선로평면(실측)도

<> 사 명 명 : 전라선 성산 신평간 철도개량 건설공사
계 목 : 분 선

SP	X	Y	R	M	V
BP	159,024.845	249,636.053			
1	154,089.965	252,000.639	18,000.000	0.000	130.000
2	154,089.967	251,414.977	2,400.000	130.000	130.000
3	152,347.084	251,461.382	5,000.000	0.000	130.000
EP	151,085.108	254,638.717			

계 목 : 연결상자선

SP	X	Y	R	M	V
BP	156,603.361	249,793.221			
1	156,426.337	249,400.419	2,400.000	0.000	130.000
2	156,626.009	249,509.899	400.000	100.000	71.646
EP	160,646.320	250,504.098			

그림 3. 선형계산서

4.2 데이터베이스 구축

4.2.1 ArcGis를 이용한 Export to Grid

Shape파일은 geometry저장을 위한 ArcView GIS 포맷이고 지리적 특징들의 설정에 대한 속성정보이다. 형태에 대한 기하학은 vector와 대등한(점, 선, 다각형)집합을 포함한 모양으로서 저장된다. Shape 파일 포맷으로는 각 shape파일에 대해 ArcView가 생성하는 3개의 파일로 볼 수 있다. 변환시킨 Shape파일을 Theme 으로 불러들여 관심지역을 설정한 후 rectangular 명령어를 통해 지역의 경계를 만든다. 그리드 변환(export to Grid) 명령어를 통해 변환하면 다음 창에서 셀크기 10으로 설정하고 그리드로 변환시킨다.

4.2.2 Matlab을 이용한 프로그래밍

Matlab은 Matrix laboratory를 위한 단순 행렬 연산을 위해 개발되었다. 프로그래밍 언어와 데이터를 그래픽하게 처리하기 위한 후처리기와 GUI lc 기타 애플리케이션 등으로 사용할 수도 있고 SIMULINK라는 도구를 내장하여 동적 시스템을 그래픽하게 simulation 할 수도 있다. Matlab은 M-file을 분야별로 모아놓은 Toolbox(도구상자)를 제공하여 해당 분야에서 MATLAB을 강력하고 편리하게 사용할 수 있도록 해준다.

프로그래밍을 위해서 matlab상에서 grid 파일을 ascii파일로 변환시킨후 0과 1값으로 변환시키는 프로그램을 작성하여 실행시킨다. 그리고 임의의 Matlab 파일 loaddata.m에서 각각의 layer에 가중치를 주기위해 프로그래밍한다.

4.3 비교고찰

본 연구는 성산-신평간 노선 지역 일대를 연구 대상지역으로 하여 이미 설계된 기존 최적노선과 GIS에 의해 자동 선정된 최적노선을 비교하여 평가하였다. 기존의 수작업에 의한 방법은 각종 자료의 공간분석 능력의 부족으로 인해 기존의 많은 경험을 가진 소수의 선형 기술자들에 직관적이고 주관적인 판단으로 대부분의 최적 노선이 결정되어지는 것이 현실이다. 하지만 GIS 기법을 통해서 자료의 종합적이고 객관적인 분석을 토대로 하여 GIS 기법을 이용한 선형선정에서 좀더 효율적이고 IP개수와 유전자 세대수에 따라서 빠른 시간 내에 선형을 얻을 수 있는 장점이 있었다.

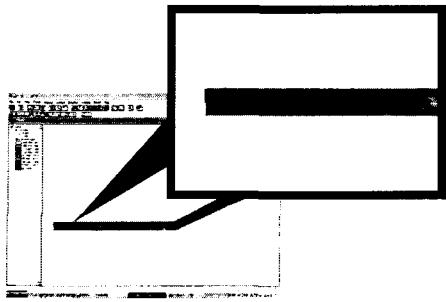


그림 4. Matlab과 유전자 알고리즘을 이용한 선형모습

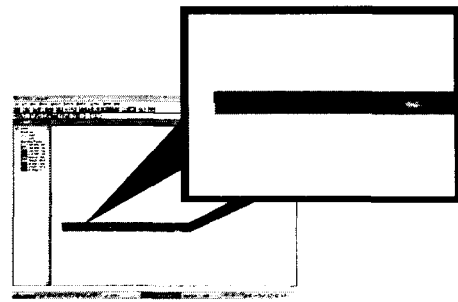


그림 5. 기존의 설계된 선형과 유전자 알고리즘을 이용한 선형 비교

본 연구에서 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 조인을 통해 효율적으로 고려될 수 있다면 GIS를 이용한 최적노선 선정시의 활용 범위는 지금에 비해 훨씬 일반화 될 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 GIS를 이용한 철도 선형 최적화 연구를 통해 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

기존의 최적화 공식을 이용하여 지형적인 요소를 통해 철도 최적화 선형 모델을 만들었으며 실제적인 철도 노선 최적화를 위해서는 최적화 모델은 GIS데이터를 동적으로 사용할 수 있어야 하며 GIS에서 실시간으로 데이터를 읽어 들이는 모델링 툴 개발은 초기 선형 설정에 효율적이었고 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 보였고 그러한 변수값에 상관없이 비용은 일정한 최적값에 수렴될 수 있었다. 철도선형 최적화를 위해 기존 도로선형 모델을 참조함으로써, 실제 철도설계의 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 있었다.

참 고 문 헌

1. 서사범, "선로공학", 열과알, 2002.
2. 강인준, "측량지형정보공학(II)", 문운당, 2001.
3. 한국고속철도건설공단, "고속전철기술개발", 1996
4. 이종득, "철도공학", 노해출판사, 1989.
5. 김계영, "GIS 개론", 대영사, 1998.
6. 철도청, "철도설계기준(노반편)", 2001.
7. "GIS를 이용한 도로설계 수립 연구", 국토개발연구원
8. 강인준, 장용구 "도로설계에 있어서 지형공간정보체계를 활용한 최적노선결정", 부산대학교 도시연구소, 제8권, pp.53-62
9. 강성철, 전경수, 박영욱(1994) "중단선형설계 최적화 기법에 관한 연구", 대한교통학회지 12권, 3호,

p5-13

10. Bjorn Kufver, "Optimisation 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.
11. Wolfgang S.Homburger, Louis E. Keefer and William F.McGrath "TRANSPORTATION AND TRAFFIC ENGINEERING HANDBOOK", ECMT(European Conference Of Ministers Of Transport), 1980.
12. "SCOPE FOR RAILWAY TRANSPORT IN URBAN AREAS", 1980.