

유전자알고리즘과 GIS를 이용한 도로선형 최적화 모형

김 응 철*

1. 서론

도로의 선형은 크게 평면선형과 종단선형으로 구별할 수 있는데, 어느 특정도로(예로, 서울과 평양을 잇는 고속도로)의 선형 최적화란 그 도로의 중심선을 나타내는 3차원 좌표를 구함을 의미하며 이들 좌표들의 관계에서 종단선형과 평면선형을 구하게 된다.

도로선형최적화는 이론적으로 무한한(서울과 평양을 잇는 고속도로대안은 이론적으로 무한함) 대안노선중 비용을 최소화하는 동시에 다양한 설계제약요소들을 만족시키는 최적노선을 탐색하는데 목표를 둔다. 도로의 노선선정 과정은 많은 요소들을 고려해야 하기 때문에 쉽게 접근하기 어려운 복잡한 문제이다. 고려해야 할 많은 요소들 중 대표적인 것들을 언급해 보면, 터널, 교량, 교차로, 인터체인지와 같은 구조물들, 지형, 사회경제적 영향, 생태, 지질, 토지이용, 환경 및 지역정서까지 정량적 및 정성적 요소들을 망라한다.

이러한 요소들은 노선선정과정의 각 단계에서 다양한 형태로 영향을 미치고 있으며 관련 부서, 도로설계 담당자, 계획가 및 주민간의 이해관계상충 등으로 인해 상당한 시간과 노력을 요구하고 있다. 또한, 도로선형 최적화 과정은 다양한

비용항목, 계량화하기 어려운 여러 항목들의 존재, 초기계획 단계에서 인지되지 못하는 여러가지 돌발요소들 등으로 인하여 모형화하는데 어려움이 있었다.

그러나, 선형 최적화 과정을 수학적 모형의 개발과 컴퓨터를 이용하여 상당한 시간과 비용을 절감할 수 있음이 확인되고 있고(OECD, 1973: Shaw and Howard, 1982: Fwa, 1989), 다양한 비용항목을 고려한 도로선형의 3차원 최적화 모형 등이 개발되고 있다(Jong, 1998: Jha, 2000: Kim 2001). 도로선형최적화를 위한 수학적 모형구축과 컴퓨터 모델의 개발은 몇 가지 이유에서 노력할 만한 준거가 있다. 우선, 각종 도로계획시 노선선정과정의 그 중요도에 비해 매우 단순하게 진행될 뿐 아니라, 선정된 노선에 대한 근거 자료가 불충분하다.

우리나라의 경우 현실에서 실제 나타나고 있는 도로노선선정과정을 살펴보면, 도로분야에서 전문적 지식을 취득한 몇 명의 전문가에 의해 불과 몇 개의 대안을 지도상에서(대개 1/5000 정도의 축척 지도를 이용하여) 선정한 후 공사비를 엔지니어링 회사의 도움을 빌어 개략 계산한 후 최소비용의 노선을 선정한다. 물론, 그렇게 선정된 노선이 추후 실시설계, 공사과정을 거치면서 최적

* 한양대학교 첨단도로연구센터 email: kimeungcheol@hanmail.net

의 노선으로 확인될 수도 있다. 그러나 그 확률이 매우 낮을 것임은 분명하다. 어떤 특정 개인이 다양한 혹은 모든 정보를 보유한다는 것은 현실적으로 불가능하며, 그렇다 하더라도, 다양한 정보들의 조합을 통해 만들어지는 수많은 노선대안들을 종합적으로 분석할 수는 없다.

또한, 이해 당사자간의 노선협의시 너무 많은 시간과 비용이 소모된다는 점이다. 즉, 다양한 노선대안들을 검토하고 평가한 후 최적노선을 선정하는 체계적이고 공학적인 노력은 상대적으로 매우 빈약하며, 이해 관련자들 간의 협의나 알력 등에 의한 시간과 비용의 소진이 너무 크다는 점이다. 본 글에서는 현재까지 개발되어진 다양한 도로선형최적화 모형들을 분석하고 그 장·단점을 살펴보고자 한다. 더불어, 최근에 개발된 모형으로서, 유전자 알고리즘과 지리정보체계시스템(Geographic Information Systems: GIS)을 이용하여 단순한 토공비용 뿐만이 아닌 사용자 비용과 구조물들을 고려한 3차원 선형최적화 모형과 그 적용사례를 소개하고자 한다.

2. 도로선형 최적화 모형의 비용항목

기실, 어떠한 최적화 모형에서도, 중요한(significant) 비용항목의 선정은 매우 중요하다. 중요한 비용항목이 누락되어 있는 최적화 모형은 실제 적용에 한계를 태생적으로 내재할 수 밖에 없다. 예로, 도로선형최적화 모형의 경우, 토공비용이나 지가보상비가 모형에서(구체적으로는 모형의 목적함수내에서) 빠져있다면 완전한 모형으로 인정하기 힘들다.

도로선형 최적화 모형 내에서 중요한 비용항목은 다시 지배적(dominating)이며 민감한(sensitive) 비용항목으로 분류된다. 전체 도로건설 비용 중 특정 비용항목이 높은 점유율을 보일 때 그 비용항목은 지배적인 항목으로 분류되며, 도로선형의 미

세한 차이에 의해 크게 비용이 변화할 때 민감한 비용항목으로 분류된다. 즉, 도로선형 최적화시 지배적 및 민감한 비용을 포함시키는 것은 필수적이다. 한편, 도로선형은 설계 및 운영적 요소들에 의해 제약을 받고 있기 때문에, 특정구간의 선형변경 혹은 설계요소 변화는 노선전체의 선형에 영향을 미치고 결국 상당한 비용변화를 유발한다. 예를 들면, 설계속도, 설계교통량, 최소곡선반경 및 최대구배 등이 그러하다. 또한 도로선형에 구조물들 즉, 교량, 터널, 교차로 등이 포함되어 있으면, 선형최적화 과정은 그런 구조물들을 모델링할 수 있는 기능을 수행할 수 있어야 한다. 이는 구조물들이 선형 최적화모형 내에서 중요한 비용항목이기 때문이다.

표 1. 도로건설 비용항목 및 선형에 대한 각 항목의 민감도

대분류	세부분류	비용항목	선형에 대한 민감도
공급자 비용	행정비	계획, 자문 및 관리비용	낮음
	건설비	토공비용	높음
		지가보상비용	높음
		포장비용	높음
		배수관련시설비용	낮음
		안전시설물 비용	낮음
	유지관리비	포장 유지보수관련 비용	낮음
		도로변 관리 비용	낮음
		안전시설물 관리비용	낮음
	구조물비	교차로 건설비용	높음
교량 및 터널 건설비용		높음	
인터체인지 건설비용		높음	
단순입체교차 건설비용		높음	
사용자 비용	주행비	VKT (Vehicle Kilometer Traveled)	높음
		교통사고비	교통사고율
	차량운영비	연료, 타이어 마모 등 차량노후비용	높음
		환경비	소음관련 비용
	오염관련 비용		중간
	환경 및 사회적 비용	높음	

표 1은 도로건설의 비용항목을 공급자와 사용자 비용으로 세분한 결과이며, 도로선형에 대한 민감도 예측내용이다. 표 1을 통해 얻을 수 있는 중요한 사실은 공급자 비용만이 아닌 사용자 비용이 선형최적화 모형내에 반드시 포함되어야 하며, 선형에 대한 민감도가 높은 비용항목은 목적함수에 반영되어야 한다는 점이다.

3. 개발된 도로선형 최적화모형 및 탐색알고리즘

아래 표 2는 최근까지 개발된 도로선형최적화와 관련한 모형들 및 최적화 방법들을 소개하고 있다.

표 2. 도로선형최적화 모형들

최적화 대상	탐색 알고리즘	연구사례
평면선형	Calculus of variations	Wan(1995), Howard et al. (1968), Thomson and Sykes (1988), Shaw and Howard (1981 and 1982)
	Network optimization	OECD(1973), Turner and Miles (1971), Athsanassoulis and Calogero (1973), Parker(1977), Trietsch (1987)
	Dynamic programming	Hogan(1973) and Nicholson et al.(1976)
	Genetic algorithm	Jong(1998)
중단선형	Enumeration	Easa(1988)
	Dynamic programming	Puy Huarte(1973), Murchland(1973), Goh et al. (1988) and Fwa(1989)
	Linear programming	Reville et al.(1997) and Chapra and Canale(1988)
	Numerical search	Hayman(1970), Goh et al.(1988), Robinson(1973), Fwa(1989) and MINERVA (OECD, 1973)
	Genetic algorithm	Jong(1998)
평면 및 중단선형	Dynamic programming	Hogan(1973) and Nicholson et al.(1976)
	Numerical search	Chew at al.(1989)
	Two-stage optimization	Parker(1977) And Trietsch (1987)
	Genetic algorithm	Jong(1998), Jha(2000) and Kim(2001)

최적화 대상으로는 평면선형만을 대상으로 한 모형, 중단선형만을 대상으로 한 모형, 평면 및 중단선형을 3차원적으로 동시에 대상으로 한 모형 등 3가지 유형으로 분류할 수 있다. 모형개발 초기인 60~70년대에는 주로 2차원적인 평면선형이나 중단선형만을 대상으로, 하나 혹은 두가지 비용항목(예로, 토공비용) 및 단순한 연구대상 지역 상에서 모형개발이 이루어졌으나, 최근 유전자 알고리즘을 이용한 3차원 최적화 모형의 개발이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

한편, 모형에 사용된 탐색알고리즘은 Calculus of variations, Network optimization, Dynamic programming, Enumeration, Linear programming, Numerical search 및 유전자알고리즘(Genetic algorithm) 등 7가지 방법이 사용되었다.

도로선형최적화 모형내에서 빠르고 효과적인 탐색알고리즘의 개발 및 적용은 필수적인데 이는, 평가해야 할 무수한 대안이 존재하고, 비용함수가 복잡한 양상을 나타내기 때문이다. 도로선형최적화 문제위 비용함수는 일차방정식이나, 이차방정식처럼 미분가능하지 않다(non-differentiable).

즉, 문제를 단순화 하지 않는 한 전통적인 수학적 접근방법으로는 해를 도출하기가 매우 어렵다는 것이다. 더불어, 선형최적화 문제는 국소 최적점이 많이 존재한다(noisy)는 것이다. 즉, 어느 특정 노선대안이 여타 노선대안(연구자들이 생성한 대안들)에 비해 상대적으로 뛰어나다고 평가되었다 하더라도 더 좋은 노선대안이 어딘가에 존재할 가능성을 배제할 수 없다는 점이다.

또 다른 어려운 점은 노선대안의 비용함수가 명확(explicit)하지 않고 함축적(implicit)이라는 점이다. 예를 들어, 포장비나 사용자 통행시간비용 등은 노선대안의 기·종점이 최종적으로 연결되지 않는 한 계산해 낼 수 없다는 점이다. 즉, 노선을 부분적으로 최적화 할 수 없다는 점이 문제해결을 더욱 어렵게 한다는 점이다.

사실, 최근에 많은 연구자들이 고민하고 있는 최적화 문제에는 분야에 관계없이 위에서 제기한 세가지 어려움이 존재하고 있다. 이러한 최근 경향은 많은 연구자들이 인공지능방법(AI: Artificial Intelligence)에 관심을 가지게 했고 그 결과로 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm), 퍼지이론(Fuzzy Theory), 인공신경망 이론(Neural Network Theory) 및 다중대리탐색(Multi-Agent Search) 등의 방법이 개발중에 있으며, 많은 부분에서 그 뛰어난(평가의 신속성 및 최적해의 높은 도출가능성)과 적용성(미분 불가능한 목적함수에의 적용가능성, 특정부분이 아닌 해가 존재할 수 있는 전체영역의 탐색) 등이 증명되고 있다.

물론 어떤 방법도 최적해(Global Optimum)를 도출한다는 보장을 하지는 못한다. 어떤 문제에도 적용할 수 있고 동시에 최적해를 도출해내는 알고리즘은 현재로서는 개발되지 않고 있다. 그러나 위에서 열거한 최신의 탐색알고리즘 중 유전자 알고리즘은 도로선형최적화 문제에 충분히 적용할 만한 가치가 있으며 최근의 적용사례가 존재한다.

Goldberg(1989)는 기존의 탐색방법들이 가지지 못한 유전자 알고리즘의 특징을 다음의 4가지로 요약한다:

- (1) 유전자 알고리즘은 파라미터가 아닌, 그들의 조합을 이용한다.(GAs work with a coding of the parameter set, not the parameters themselves)
- (2) 유전자 알고리즘은 특정 해가 아닌 해들의 집합으로부터 탐색한다.(GAs search from a population rather than a single point)
- (3) 유전자 알고리즘은 목적함수 자체를 이용하며, 미분이나 다른 정보를 필요하지 않는다.(GAs use objective function information, not derivatives or other auxiliary knowledge)
- (4) 유전자 알고리즘은 확정적이 아닌 확률적 탐색을 사용한다.(GAs use probabilistic transition rules, not deterministic rules)

4. 선형최적화를 위한 구조물들의 모델링 필요성 및 특성

도로선형최적화에 영향을 미치는 많은 요소(도로상 구조물, 지형, 토지이용, 환경요소, 사회경제 지표, 지역관심)들 중 도로상의 구조물 즉 교차로, 터널, 교량, 단순입체교차시설 및 인테체인지 등이 도로건설비용 및 최적노선 선정에 크게 영향을 미친다는 것이 주지의 사실임에도 불구하고, 기존의 도로선형최적화 모델은 목적함수에 도로상 구조물의 영향이 반영되지 못했을 뿐만 아니라, 그 영향을 다각도로 분석하지 못하였다. (대형터널, 대형교량, 대형 인테체인지 등은 본 글에서 소개하는 도로선형최적화 모형에서 제외되어 있다. 그 이유는 대형구조물의 경우 연관된 선형들을 제약하는 경우가 대부분이기 때문이다. 즉, 연관된 선형이 대형구조물에 의해 결정되는 연유로 더 이상 선형최적화 문제가 아니기 때문이다.) 도로상 구조물을 고려하지 않은 도로선형최적화 모델이 실제 적용에 심대한 제약을 내재하고 있음은 많은 연구에서 지적되어 온 바 있다. 본 글에서는 도로상의 구조물들의 특성을 소개하며 자세한 모델링 기법들은 참고문헌(Kim, 2001)을 통해 알 수 있다.

4.1 평면교차로 특성

교차로는 관련된 도로와 그 도로들이 서비스하는 지역들에 직접적이고도 지대한 영향을 미친다. AASHTO(2001)는 교차로 설계의 큰 4가지 기본 요소 즉, 인간특성, 교통상황, 물리적 요소 및 경제적 요소들을 소개한다. 그 중의 많은 세부요소들 중 도로선형에 직접적 영향을 미치는 중요한

요소들은 설계속도, 교차로상의 중단 및 평면선형, 기존도로와의 교차각, 교차로 지형, 교통량 및 정지시거 등이다.

설계속도는 도로선형에 가장 중요한 영향을 미치는 요소의 하나로서, 특히 곡선구간상에 교차로가 형성될 경우 설계속도는 곡선반경과 편구배의 결정요소이다. 교차로상의 중단 및 평면선형은 토공비에 큰 영향을 미치는 요소인데 이는, 두 교차도로의 표고차에 의해 토공량이 결정되기 때문이다. 또한, 기존도로와의 교차각은 도로선형에 결정적 영향을 미치는 요소이다. 즉, 교차각이 너무 예각인 경우, 안전과 소통측면에서 교차로 운영이 불가능하기 때문에 AASHTO(2001)의 경우 60도~120도 이내로 제한하고 있다. Walker (1993)는 교차로의 교차각이 90도에서 벗어남으로 인한 문제점을 다음의 5가지로 요약하고 있다: (1) 간섭지역의 증가, (2) 운전자 시야확보의 취약성, (3) 회전차로 면적의 과다 증대, (4) 교차로 통과 시간의 증가 및 (5) 교통사고 위험의 증대.

한편, 교차로의 지형은 토공비, 포장비 및 배수비용 등에 영향을 미치며, 교통량(특히 회전교통량)은 부가차선의 설치 여부에 중요한 요소이다. 마지막으로, 시거는 교차로내 사고와 차량간의 간섭 등에 크게 영향을 미치는 요소이며, 교차로 인근의 지장물들의 제거 여부에 결정요소임으로 보상비 등의 산정에 사용된다.

이러한 교차로가 도로선형최적화 모형에 접목될 경우, 도로기본구간 이외에 추가적으로 소요되는 비용은 토공비, 보상비, 포장비, 사고비용, 지체비용 및 연료소모비 등이다. 이러한 추가비용들은 도로선형최적화 모형의 비용함수에 반드시 내재되어 있어야 한다.

4.2 소형교량의 특성

도로상 교량이 도로선형에 미치는 특성을 고려

하기 위해서는 토공량, 특히 성토량에 주목할 필요가 있다. 도로노선이 계획되는 대상지역의 특성에 따라 변화가 있을 수는 있지만, 성토량과 교량건설사이에 경제적 균형분할점(Break-even point)이 존재하기 때문이다. (물론, 강이나 하천 등을 통과하는 경우와 같이 교량건설이 유일한 대안인 경우에는 그렇지 아니하다).

이외에 중요한 요소들은, 곡선반경(개발된 모형에서는 곡률을 가지는 교량의 모델링이 가능함), 지간장(교량의 교각간 거리: Span lengths), 지간의 수 및 피어(교각)의 높이(Heights of piers) 등이 있다. 한편, 교량의 건설비용은 Superstructure(상관부분) 비용과 Substructure(교각 및 기초부분) 비용으로 구분될 수 있는데(Xanthakos, 1994; O'Connor, 1971), 지간장, 지간의 수 및 피어의 높이가 매우 중요한 변수이다.

또하나의 중요한 교량설계요소는 지간장(Span lengths)의 연속성이다. 이 연속성은 두가지의 경우로 해석이 가능한데, 첫째는 하나의 교량에서 서로 다른 지간(Span)이 사용되는 경우 총교량비용이 더 소요된다는 점이다. 즉, 하나의 교량에 30m, 80m, 10m 등의 지간이 혼용되지 않는 것이 효과적이라는 점이다. 둘째는, 서로 다른 지간(Span)이 사용되는 경우에도 규칙성이 유지되는 것이 효과적이라는 점이다. 즉, 50m, 45m, 40m와 같이 규칙적으로 배치되도록 하는 것이 경제적이다. 개발된 선형최적화모형에서는 이러한 교량건설의 특징들이 모형화되어 구축되었으며 자세한 기법은 참고문헌(Kim, 2001)을 통해 알 수 있다.

4.3 단순입체교차시설의 특성

도로선형은 기존도로와의 연결없이 고가 혹은 지하의 형태로 교차할 수 있다. 이러한 단순입체교차시설은 기본적으로 전 장에서 논의한 소형교량과 동일한 특성을 지님으로 소형교량에 사용된

모델링 기법을 준용할 수 있다.

그러나, 단순입체교차시설은 고려해야 할 두가지 설계요소가 더 있는데, 이는 수직적 및 횡적 안전거리(Vertical and lateral clearances)이다. AASHTO(2001)에 의하면, 길 끝단면에서부터 방호책까지의 최소횡적안전거리는 기본적으로 정상적인 길어깨 폭을 유지하도록 제시하고 있으며, 수직적 안전거리도 5m를 안전치로 제시하고 있다. (적용되는 수치는 4.1~4.4m이나, 재포장, 적설 등에 대비하기 위해 4.4m가 권장치로 적용되고 있음)

4.4 소형터널의 특성

도로상 터널이 도로선형에 미치는 특성을 고려하기 위해서는 소형교량의 경우와 반대로 절토량에 주목할 필요가 있다. 즉, 절토량과 터널건설사이에는 경제적 균형분할점(Break-even point)이 존재하기 때문이다.

터널건설의 경우, 토공비 이외에도, 환기시설 비용, 조명비용, 화재대비시설비용, 교통관제비용등이 추가로 소요된다(King and Kuesel, 1996).

개발된 모형에서는 기본적으로 토공비용이 비용함수에 적용되었으며 기타 비용은 필요시 추가되도록 구축되었다. 예로, 터널의 길이가 180m미만인 경우에는 자연환기시스템을 사용하기 때문에(Bendelius, 1996) 터널길이가 180m를 초과할 경우에만 환기비용을 추가로 적용하였다.

4.5 인터체인지의 특성

인터체인지의 일반적 설계요소는 형식, 평면 및 종단선형, 횡단면 구성요소들, 교량과 같은 구조물, 시거 등을 꼽을 수 있다. 이러한 인터체인지를 세부적으로 모형화하기는 매우 복잡하다.

그러나, 인터체인지는 기본적으로 위에서 제시한 다양한 구조물들의 복합체로 해석할 수 있다. 예로, 다이아몬드 인테체인지의 경우, 하나의 교량과 두개의 새로운 평면교차로 및 4개의 연결로로 구성되어 있는 것이다.

그러므로, 개발된 모형에서는 다이아몬드 인터체인지의 건설비용을 추정하기 위해 교량의 건설비 추정방법, 교차로의 건설비 추정방법 및 기본 구간 건설비 추정방법들을 합성하여 사용하는 방법을 채택하였다.

한편, 트럼펫 인터체인지가 3방향 인터체인지의 기본형태로 도입되었으며, 다이아몬드 인터체인지 혹은 클로버 인터체인지가 4방향 인터체인지의 대안으로 설정되었다.

5. 유전자 알고리즘과 GIS를 이용한 3차원 도로선형최적화 모형

5.1 모형의 개요

도로선형 최적화모형의 출발은 노선대안의 비용을 노선대안의 3차원 좌표와 연결하여 수학적으로 구축함을 의미한다. 과거 모형개발의 초기에는 노선대안의 평면선형을 기초로 하여 토공비용만을 최소화하는 노선을 선정하는 것으로 출발하였으나, 최근 도로선형의 도로중심선 좌표와 지리정보시스템의 자료들을 수학적 모형 및 컴퓨터를 이용하여 위에서 제시한 건설비 즉, 토공비, 지가보상비 뿐만 아니라 포장비를 포함하고 사용자 비용(통행시간비용, 연료소모비 및 사고비용)까지 함께 평가하고 최적화 할 수 있는 모형이 개발되었다(Jong, 1998; Jha, 2000).

이러한 모형들은 유전자 알고리즘을 이용, 수백 혹은 수천개의 노선대안을 무작위로 발생시켜 각각의 노선대안을 개발된 목적함수에 근거하여

평가한 후 최적의 노선을 찾아가는 과정을 거친다. 한편, 개발된 모형들은 위치벡터(Position Vector)를 이용하여 선형의 중심선을 나타내는 3차원 좌표를 획득한 후 노선의 평가에 필요한 각종 비용을 GIS를 이용하여 도출해 낸다. 즉, 도로선형 최적화 모형을 통한 도로선형 대안을 획득함은 도로 중앙선을 나타내는 점들의 3차원 좌표를 구함을 의미한다.

즉, 위치벡터를 이용하여, 개발된 모형에서는 선형의 어떤 점도 그 3차원 좌표를 획득할 수 있을 뿐만 아니라, 노선의 전체 길이, 직선부 및 곡선부 등의 파악이 가능하게 됨으로써 관련된 비용들을 평가할 수 있는 것이다.

더불어 4장에서 설명된 도로상의 구조물들 즉, 교차로, 교량, 터널 및 인터체인지들도 함께 고려한 모델링이 노선선정 단계 즉, 타당성조사나 기본계획 단계에서 가능하다. 이러한 수학적 모형의 개발은 기본적으로 전산화를 통한 평가 및 최적화의 필요조건인 것이다. 자세한 내용은 참고 문헌(Jong, 1998; Jha, 2000; Kim, 2001)을 통해 알 수 있으며 개발된 모형의 개요를 정리하면 아래 표 3과 같다.

표 3. 도로선형 최적화 모형의 개요

목적함수	노선대안의 비용함수
최적화목표	노선비용최적화
탐색 알고리즘	유전자 알고리즘(Genetic algorithm)
노선비용	공급자비용, 사용자비용 및 노선상의 구조물
최적화대상	평면 및 종단(3차원) 도로선형
모형의 결과물	노선 총비용 및 도로중심선의 3차원 좌표
사용되는 Language 및 GIS Software	C, Visual C++ 및 ArcView

5.2 GIS와 유전자 알고리즘의 결합

도로선형 최적화 모형의 결과에 대한 신뢰도는 모형의 타당성과 적용성도 중요하지만, 신뢰할 만한 자료(Reliable Database)의 구축여부가 중요하다. 예를 들어, 지가보상비를 파악하고 싶어도, 성토 및 절토량을 세밀히 파악하고 싶어도, 신뢰할 만한 자료가 없거나 전산화되어 있지 않는 한 다양한 노선대안을 선정하고 평가하는 데에는 너무 많은 시간과 비용이 소요된다는 것이다.

다행히도 최근 지리정보시스템(Geographic Information Systems: GIS)이라는 믿음만한 정보관리 컴퓨터 시스템이 개발되어 있고, 그 안에 신뢰할 만한 자료들이 속속 입력되고 있다. 최근 우리나라가 보유하고 있는 지리정보시스템내의 자료들은 적어도 도로 노선선정 단계에서 충분히 활용될 수 있는 수준으로 파악되고 있다.

Hanson(1995)에 따르면 미국에서는 교통분야의 계획, 관리 및 집행분야를 보다 체계적으로 수행하기 위한 노력의 일환으로 Intermodal Surface Transportation Efficiency Act(ISTEA, 1991), the Clean Air Act Amendments(CAAA, 1990) 및 Americans with Disabilities Act(ADA, 1990) 등의 법률을 제정하였다. 이러한 노력의 구체화를 위한 방법으로, GIS가 효과적임을 보여주고 있는데 이는 기존의 다른 전산툴(Tool)들이 보유하지 못한 정보들간의 관계 분석, 패턴인지 및 시간적 경과에 따른 경향들을 시각화(Visualization) 할 수 있다는 점이다.

이러한 장점들은 지리정보체계시스템을 교통분야에 접목하는 데 지대한 요인이었으며 교통분야에서 "GIS-T"로 자리잡게 되었다.

표 4. GIS-T 응용의 분류 및 연구사례

응용분야	연구사례
공간구조분석 및 데이터 관리	Simkowitz(1989), Abkowitz et al.(1990), Evans et al.(1993), Hammad et al.(1993), Warwick and Hanes(1993), Lamm et al.(1994), Sarasua(1994), Lee and Clover(1995), Bartlett(1996), Olivera and Maidment(1998)
다른 응용분야와 연계한 전문가 시스템 개발	Evans et al.(1993), Sarasua(1994), Lee and Clover(1995), Bartlett(1996), Gilbrook(1999) and Jha(2000)

한편, “C” language로 구현된 유전자 알고리즘과 GIS 소프트웨어간의 연결은 특히, 지가보상비를 평가하기 위해 필수적이다. GIS는 보상비의 산정에 필요한 각종 정보들을 보유하고 있기 때문이다.

즉, 유전자 알고리즘을 이용하여 생성된 노선대안과 그 대안의 좌표정보를 GIS에 전달하고 GIS내에서는 넘겨받은 좌표정보와 필요한 정보 Layer(토지 및 건물 등의 가격과 위치 및 크기, 기존 도로들, 토지이용현황, 토질, 지형 및 각종 지장물 및 문화재, 환경보전지역 등의 정보)를 이용하여 보상비의 평가를 수행한 후 그 결과를 다시 “C” language로 구현된 유전자 알고리즘으로 재전송하는 과정을 거친다.

유전자 알고리즘과 GIS간의 기술적 연결과정을 간략히 소개하면 우선, *Avhelp.DLL* (ESRI, 1998)로 불리는 ArcView(대표적인 GIS 소프트웨어) 기반 Dynamic Link Library(DLL)를 이용한다. 즉, *Avhelp.DLL*은 *AVRun*과 *AVScript*의 두 기능을 가지는데 *AVRun*이 “C”환경내에서 ArcView의 명령을 수행하는데 사용되었다. (자세한 사항은 참고 문헌(ESRI, 1997; Jha, 2000)을 통해 알 수 있다).

6. 모형의 적용사례

본 장은 기 설명된 GIS와 유전자 알고리즘을 이용하여 개발된 도로선형 최적화 모형을 가상의 연구대상지와 GIS를 이용한 실제대상지 등 두개의 사례연구를 통해 간략히 소개한다. 그림 1은 상당히 복잡한 지형, 기존도로 및 강 등을 포함하는 가상의 사례지역을 보여준다. 대상지역내의 기존도로는 북쪽에서 남쪽으로 걸쳐 있으며, 3개의 산악 봉우리가 있고, 하나의 강이 북쪽쪽 모서리에서 남쪽으로 흐른다. 음영이 짙은 셀일수록 높은 표고를 의미하며 각각의 셀은 서로 다른 지가보상단가를 가지고 있다. 모형의 목표는 그림에 표시된 기·종점을 연결하는 새로운 도로의 최적선형을 찾는 것이다. 새로운 도로가 기존의 도로와 교차할 시 모형은 자동적으로 가능한 교차형태 즉, 교차로, 단순한 분리 및 인터체인지 중에서 가장 효과적인 구조물을 선정하게 구축되었으나, 본 글에서는 교차형태를 사용자가 교차로로 기 지정한 것으로 가정하였다.

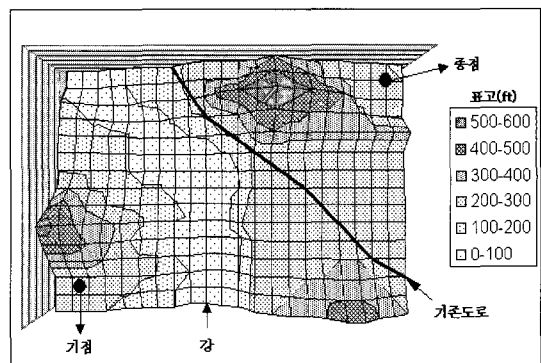


그림 1. 가상연구대상지역의 지형

그림 2와 표 5는 모형의 적용 후 도출된 최적 선형의 정보를 보여준다. 총 도로길이는 약 2.4 km이며 비용은 \$21.03 Million(약 273억원)으로 나타났다.

표 5. 가상 연구대상지의 최적화된 도로선형의
일반정보 및 비용분포

분류	비용(\$) 및 분포(%)	컴퓨터 사양 및 사용시간
총비용	21,032,874 (100.00)	사양: 1GHz CPU Speed 261 MB RAM 사용시간: 4분 50초
교차로비용	1,488,056 (7.07)	
포장비	1,944,525 (9.25)	
보상비	4,583,726 (21.79)	
차량운행비	957,023 (4.55)	
운전자시간비용	5,685,093 (27.03)	
사고비용	195,153 (0.93)	
토공비	1,722,632 (8.19)	
교량비용	2,110,944 (10.04)	
터널비용	2,345,722 (11.15)	

그림 2는 크게 세부분으로 구성되어 있다. 중심부분은 최적노선의 평면선형을, 그 상단은 종단선형을 나타내며, 화면의 오른쪽은 유전자 알고리즘의 세대(Generation) 번호와 목적함수(여기서는 노선의 비용함수, 즉 총도로비용) 값을 알려준다. 유전자 알고리즘내에서는 각 세대안에서 알고리즘의 개발자가 선정한 특정한 수의 대안을 발생시킨 후 평가한다.

한편, 최적노선내에는 두개의 터널과 두개의 교량이 포함되어 있으며, 교차로의 비용도 세부적으로 계산하여 그 결과를 제시한다. 본 가상연구대상지의 경우 교차로 비용은 \$1.49 Million (약 19억원)로 집계되었으며(표 6 참조), 지체와 사고비용이 교차로 비용의 많은 부분을 차지함을 알 수 있다.

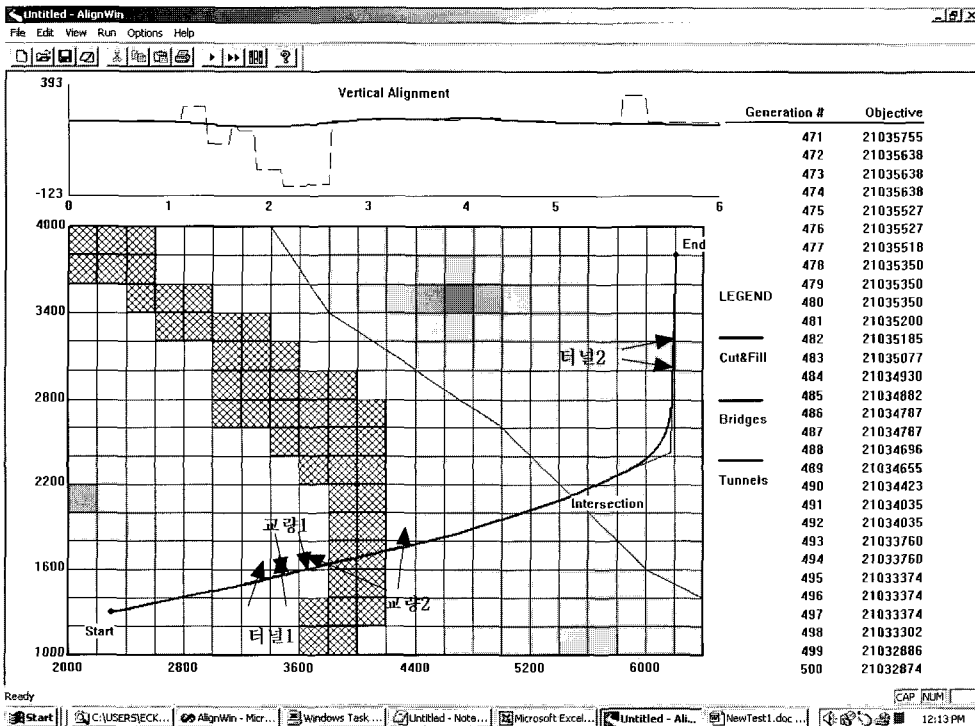


그림 2. 가상 연구대상지의 최적화된 도로선형

표 6. 가상연구대상지의 교차로 세부비용항목 및 분포

분류	비용(\$) 및 분포(%)
총비용	1,488,056(100.00)
포장비	11,809(0.79)
토공비	34,625(2.33)
보상비	279,953(18.81)
지체비용	509,549(34.24)
차량운행비	27,415(1.84)
사고비용	624,705(41.98)

그림 2에 도출된 노선대안이 최적해(Global Optimum)인지는 현 단계에서 확인할 수 있는 근거는 없으나, 각 비용항목의 분포와 평면·종단 선형의 위치 및 형태 등으로 보아 타당한 노선임을 인정할 수 있다.

이러한 검증하에, 개발된 모형을 GIS지도를 이용한 실제연구대상지에 적용하였다. 사례대상지역은 미국 메릴랜드(Maryland)주의 Garrett County 일부지역이며 약 90개의 소유권이 존재하는 곳으로서 면적기준으로는 대부분이 농업지역이다.(46개의 주거지역, 19개의 상업지역 및 24개의 농업지역) 대상지역에는 Youghiogheny강이 북에서 남으로 걸쳐 흐르며 두개의 기존 2차선 도로(White Rock Run road 및 Bishoff road)가 있고, 면적은 약 0.66 km^2 이다. 토지보상단가는 $\$0.22 (\text{₩}290) / \text{m}^2$ 에서 $\$5.22 (\text{₩}6,800) / \text{m}^2$ 까지 분포하며, 토지 내 건물보상비는 $\$730 (\text{₩}949,000)$ 에서 $\$122,040 (\text{₩}158,652,000)$ 까지 분포한다.

그림 3 과 그림 4 는 사례대상지역의 지형정보를 개략적으로 알려주는데 사례대상지역의 중앙지역에는 구릉지가 있음을 알 수 있고 Youghiogheny강의 존재로 인해 교량이 건설되어야 함을 모형의 적용 전에 알 수 있다.

그림 5 는 개발된 모형을 적용한 후에 최적화된 즉, 가장 비용(건설비 및 운전자 비용 모두 고려)이 적게 드는 도로선형을 나타낸다.

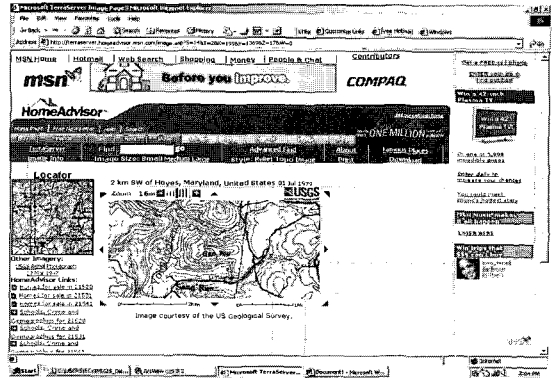


그림 3. 사례대상지역(Garrett County, Maryland, USA)의 지형

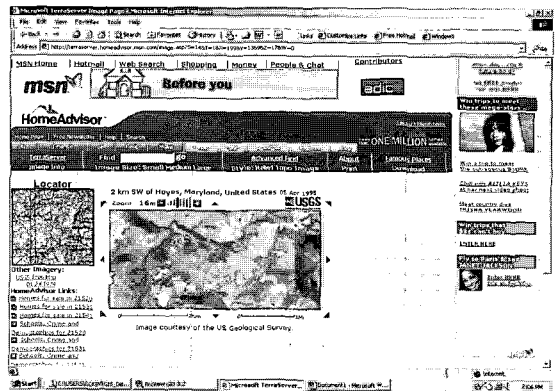


그림 4. 사례대상지역(Garrett County, Maryland, USA)의 항공사진

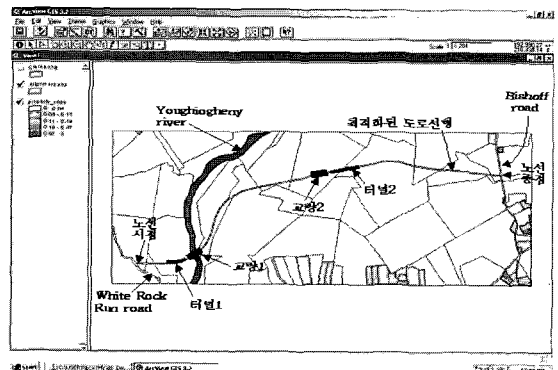


그림 5. 최적화된 도로선형대안(Garrett County, Maryland USA)

최적화된 도로선형은 두개의 교량과 두개의 터널을 가지며 최소화된 도로건설비용은 \$12.05 Million(약 1,567억원)인 것으로 나타났다. 참고로, 총 네 개의 도로상 구조물들은 분석자가 임의로 지정한 것이 아닌, 모형을 통해 자동적으로 찾아진 결과이다.

표 7 및 그림 6은 최적화된 도로선형의 각 비용을 보여준다. 즉, 최적노선이 농업지역을 통과함으로 인해, 지가보상비는 상대적으로 적게 나타나고 있다. 두개의 터널과 두개의 교량비용은 각각, \$1.73 Million(약 22.49억원, 14.37%) 및 \$0.77 Million(약 10.01억원, 6.4%)으로 집계되었으며 사용자 비용은 \$7 Million(약 91억원)으로 집계되어 전체비용의 상당부분인 58%를 점하는 것으로 분석되고 있다.

한편, 컴퓨터(1 GHz CPU speed, 261 MB RAM) 사용시간은 7,419초(약 2시간 3분)가 소요되었다. 몇 달 혹은 수년이 걸리는 실제 도로노선 선정과정에 비하면 극히 미미한 시간이 소요되었음을 알 수 있다. 또한, 3개 내지 10개가 아닌 수천개의 노선대안이 평가된 결과에 주목할 만 하며, 무엇보다도 노선선정의 근거를 제시할 수 있음은 매우 중요한 시사점이다.

표 7. 최적화된 Garrett County 도로노선의 비용항목 분포

분류	비용(\$) 및 분포(%)	
총비용	12,049,816(100.00)	
포장비	1,512,952(12.56)	
지가보상비	107,254(0.89)	
차량운행비	768,089(6.37)	
사용자시간비용	6,245,318(51.83)	
교통사고비	297,212(2.47)	
토공비	616,483(5.12)	
터널비	터널1	558,505(4.63)
	터널2	1,172,861(9.73)
교량비	교량1	368,686(3.06)
	교량2	402,456(3.34)

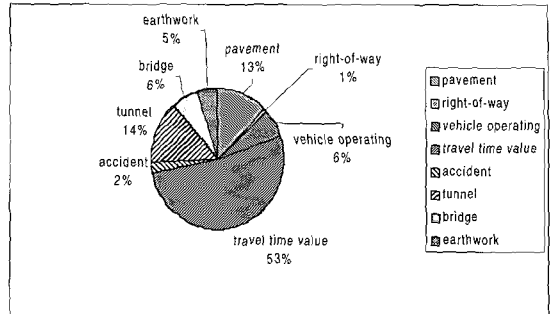


그림 6. 최적화된 Garrett County 도로노선의 비용항목 분포

7. 결론

도로선형 최적화 문제는 매우 복잡하다. 목적함수(비용함수)의 수학적 구축이 난해할 뿐 아니라 다양한 설계 및 운영적 제약요소가 존재하며 평가해야 할 노선대안이 이론적으로 무한하기 때문이다. 또한 다양한 집단의 이해관계와 계량화하기 어려운 비용항목, 여러 가지 돌발요소 등이 모형의 구축을 어렵게 한다. 그러나, 최근 수학적 모형의 구축과 효과적인 탐색 알고리즘, 신뢰할 만한 자료들을 이용한 3차원 도로선형 최적화 모형의 개발이 시도되고 있다.

이 글에서는 최근에 개발된 유전자 알고리즘과 GIS를 이용한 3차원 도로선형 최적화 모형이 간략히 소개되었고, 최적해의 탐색에 사용되는 여러 가지 알고리즘과 방법론이 분석되었다. 우선, 문헌연구를 통한 기존의 도로선형최적화 모델 소개, 장·단점 비교평가 및 가능한 개선방향이 제시되었고 다음으로는, 도로상 구조물들의 다양한 설계 특성들이 도로선형최적화에 미치는 영향들이 검토되었으며 그 결과는 목적함수의 설계에 반영되었다. 대안노선들을 발생시키고, 평가하며 최적노선을 선택하기 위한 탐색알고리즘은 인공지능 방법 중 도로선형최적화의 목적함수와 같이 미분 불가능하며, 수많은 국소최적점이 존재하고, 함축

적인 경우 그 우수성이 입증된 유전자 알고리즘이 적용되었다. 한편, 본문에서는 설명되지 않았지만 개발된 모형의 적용성과 유연성을 증진시키기 위한 '교차로 세부 최적화 (Local Optimization of Intersections)', '교차로 설계비용산정 모델 개발 (Intersection Cost Evaluation Processes)', '토공 비용산정을 위한 면적보간법 및 가중보간법 (Planar and Proportionally Weighted Interpolations for Improving the Precision of Earthwork Costs)', '교량지간장 최적화를 위한 수치해석적 탐색 (Numerical Search for Optimizing Bridge Spans)', '2단계 도로선형최적화 (Two-Stage Alignment Optimization Approach)' 등의 세부방법들이 개발되었으며, 이러한 세부방법들은 유전자 알고리즘에 성공적으로 접목되어 모형의 완성도를 높여주고 있다.

개발된 모형의 실용성과 우수성을 평가하기 위해 GIS를 이용한 실제 사례지역 및 인공적으로 설계된 다양한 연구대상자들이 모형적용의 대상지로 선정되었으며, 도출된 최적노선들의 검토결과 개발된 도로선형 최적화 모형이 타당하고 실제적인 도로선형을 결과로 제시함이 입증되었다.

참고문헌

1. OECD (1973). "Optimisation of Road Alignment by the Use of Computers". Organisation of Economic Co-operation and Development, Paris.
2. Shaw, J. F. B. and Howard, B. E. (1982). "Expressway Route Optimization by OCP". Transportation Engineering Journal of ASCE, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, ASCE, Vol. 108, No. TE3, pp. 227-243.
3. Fwa, T. F. (1989). "Highway Vertical Alignment Analysis by Dynamic Programming". Transportation Research Record 1239, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 1-9.
4. Jha, Manoj K. (2000). "A Geographic Information Systems-Based Model for Highway Design Optimization". Ph. D. Dissertation, University of Maryland, College Park.
5. Jong, J-C (1998). "Optimizing Highway Alignments with Genetic Algorithms", Ph. D. Dissertation, University of Maryland, College Park.
6. 김응철(2001). "Modeling Intersections and Other Structures in Highway Alignment Optimization". 박사학위논문. University of Maryland, College Park.
7. Goldberg, D. E. (1989). "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning". Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Massachusetts.
8. AASHTO (2001). "A Policy on Geometric Design of Highways and Streets". American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C.
9. Walker, R. J. (1993). "Coordination of Basic Intersection Design Elements: An Overview". Transportation Research Record 1385, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 51-59.
10. Xanthakos, P. P (1994). "Theory and Design of Bridges". John Willey & Sons.
11. O'Connor, C. (1971). "Design of Bridge Superstructures". John Wiley & Sons, Inc.
12. King, E. H. and Kuesel, T. R. (1996). "An Introduction to Tunnel Engineering", Chapter 1 of "Tunnel Engineering Handbook", 2nd Edition by Bickel, J. O., Kuesel, T. R. and King, E. H.. An International Thompson Publishing Company.
13. Bendelius, A. G. (1996). "Tunnel Ventilation ". Chapter 20 of "Tunnel Engineering Handbook", 2nd Edition by Bickel, J. O., Kuesel, T. R. and King, E. H.. An International Thompson Publishing Company.
14. Lovell, D. J. (1999). "Automated Calculation of Sight Distance from Horizontal Geometry". Journal of Transportation Engineering, Vol. 125, No. 4, pp. 297-30
15. Mortenson, M. E. (1997). "Geometric Modeling". 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York.
16. Hanson, S. (1995). "The Geography of Urban Transportation". The Guilford Press, New York.
17. ESRI (1998). "Getting to Know ArcView GIS". Environmental Systems Research Institute, Inc.