

도로의 실측 좌표 데이터를 이용한 이론적 평면선형 분석알고리즘 개발

Development of Theoretical Horizontal Alignment Analysis Algorithm Using Highway Coordinate

윤덕근 * · 김정곤 * *

Yun, Duk Geun · Sung, Jung Gon

1. 서론

도로 기하구조 요소 및 선형 정보는 도로를 분석하고 나아가 안전성을 평가하는데 중요한 요소이다. 이러한 기존의 도로 기하구조 요소 및 선형 정보의 대부분은 설계도면을 이용하여 취득하고 있으나 모든 도로에 설계도면이 존재하지 않고, 설계도면이 존재하는 구간이라도 도로 선형개량이나 덧씌우기 등으로 인하여 실제 도로와 설계도면간에 차이가 발생하는 경우가 많이 발생하고 있다. 이에 한국건설기술연구원에서는 도로의 선형 정보를 취득하기 위하여 차량에 GPS(Global Positioning System), IMU(Inertial Measuring Unit), DMI(Distance Measuring Instrument), CCD 카메라 등 각종 센서를 부착한 도로안전성 조사 분석 차량(Road Safety Survey and Analysis Vehicle, RoSSAV)을 개발 중에 있다. 이 RoSSAV는 도로를 주행함으로써 설계도면 없이 기존 도로의 선형을 분석하고, 나아가 안전성을 평가할 수 있는 차량이다. 이에 본 연구에서는 RoSSAV에서 취득한 좌표를 이용하여 도로의 평면선형을 분석할 수 있는 알고리즘과 설계 프로그램을 이용하여 설계한 도면에서 본 알고리즘을 적용한 사례에 대하여 기술하였다.

2. 기존 연구 고찰

차량을 이용하여 도로의 시설물을 조사하는 등의 사례는 있지만 도로 선형을 조사하고 분석하고 안전성을 평가하는 시스템에 관한 연구는 국내에서 아직까지 수행된 사례가 없다. 국외에서는 위스콘신 주에서 도로조사분석 차량을 이용하여 도로 기하구조 정보 수집 및 분석을 수행한 사례가 있다.

위스콘신 주에서 수행한 연구는 1992년 William D. Berg 등이 수행한 연구로 0.01mile마다 취득한 정보를 Highway Project Development Program(HPDP)을 사용하여 도로의 평면선형 및 종단선형을 분석하는 알고리즘을 개발하였다. 또 이를 이용하여 도로의 결함구간을 판단하는 방법론을 제시하였다.

그러나 HPDP는 평면선형의 경우 직선과 원곡선만을 구분하여 실제 도로에서 존재하는 완화곡선을 판단하지 못하는 한계점이 있다. 즉, 평면선형의 경우 직선 다음에 나오는 곡선은 원곡선으로 판단을 하는 구조로 되어 있다. 이에 본 연구에서는 평면선형에서 직선과 원곡선뿐만 아니라 완화곡선도 판단할 수 있는 알고리즘을 개발하여 실제 도로에 적용가능한 알고리즘을 개발하고자 한다.

3. 실제 도로에서의 좌표 취득 및 선형 분석 방법

실제 도로에서 도로 선형의 좌표를 취득하는 방법은 현재 한국건설기술연구원에서 개발중인 도로안전성 조사 분석 차량을 이용하여 취득할 수 있다. 도로안전성 조사 분석 차량에는 도로를 따라 주행하는 차량의 위치 정보와 자세 정보를 획득할 수 있는 GPS, IMU 등 각종 센서가 부착되어 있어 이 센서들로부터 도로 선형의 좌표를 취득하게 된다.

* 정회원. 한국건설기술연구원 연구원, 공학석사, 031-910-0159(E-mail : dkyun@kict.re.kr)

* * 정회원. 한국건설기술연구원 수석연구원, 공학박사, 031-910-0179(E-mail : jgsung@kict.re.kr)

3.1 평면선형의 분석

도로안전성 조사 분석 차량으로부터 취득한 데이터는 차량의 위치정보(x, y, z 좌표 등)와 자세정보(각도)로 출력형태는 text 형태로 출력된다. 이 text 형태의 데이터를 본 연구의 목적에 부합하도록 분석하는 과정이 필요하다.

조사차량으로부터 취득한 좌표들을 이용하여 평면선형을 분석하는 알고리즘 절차는 다음 그림 2와 같다.

평면선형을 분석하기 위한 절차는 도로안전성 조사 분석 차량으로부터 차량의 위치정보 x, y를 취득한 후 직선과 평면곡선의 구분, 평면곡선내 완화곡선과 원곡선의 구분, 각 기하구조 요소 분석 등으로 1) 평면곡선부 시·종점부 분석, 2) 평면곡선부 내 완화곡선 및 원곡선 판단, 3) 원곡선 기하구조 정보 획득, 4) 완화곡선 기하구조 정보 획득 순으로 이루어진다.

1) 평면곡선부 시·종점부 분석

도로에서 취득한 좌표 값으로부터 평면곡선의 시·종점부를 판단하는 절차는 다음과 같다. 우선 연속된 두 좌표의 기울기를 비교한 후 기울기의 변화가 발생하는 구간은 평면곡선 구간, 기울기의 변화가 일정한 구간은 직선구간으로 알고리즘은 판단을 하게 된다.

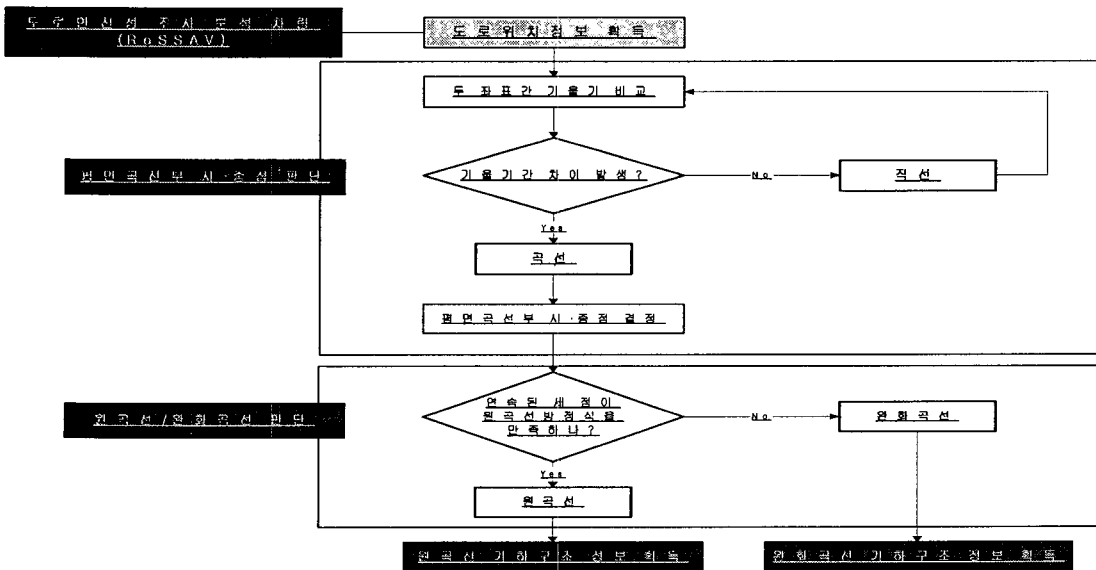


그림 1 평면선형 분석 알고리즘

㉔ 연속된 두 좌표의 기울기 비교

$$\delta_{2,1} = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)}, \delta_{3,2} = \frac{(y_3 - y_2)}{(x_3 - x_2)}, \dots, \delta_{i,i-1} = \frac{(y_i - y_{i-1})}{(x_i - x_{i-1})} \quad \text{<식 1>}$$

$\delta_{i,i-1}$: $(x_{i-1}, y_{i-1}), (x_i, y_i)$ 좌표간 기울기

㉕ 기울기가 변하는 좌표 값의 추출

연속된 두 점간의 기울기를 비교할 때 두 점간의 기울기가 만약

- 일정하다 $\delta_{i,i-1}$ 에서 변하게 될 경우 : 점 $(x_{i,i-1})$ 은 곡선부 시점
- 변화하다 $\delta_{i,i-1}$ 에서 일정하게 될 경우 : 점 $(x_{i,i-1})$ 은 곡선부 종점

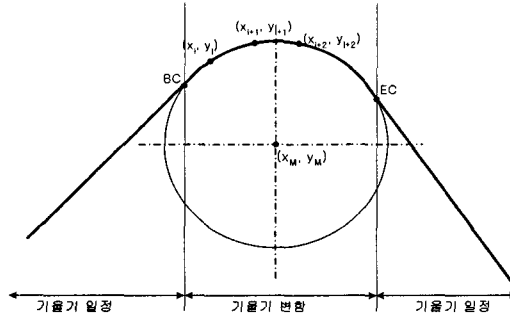


그림 2 직선과 곡선에서의 기울기 변화

2) 평면곡선부 내에서 완화곡선 및 원곡선의 판단

평면곡선은 일반적으로 완화곡선과 원곡선으로 구성되어 있다. 앞의 절차에서 직선과 평면곡선을 구분한 후에 평면곡선내에서 완화곡선과 원곡선을 구분하여야 한다.

㉑ 원 방정식의 정의

일반적인 원곡선의 방정식을 <식 2>와 같이 정의한다.

$$(x - x_M)^2 + (y - y_M)^2 = R^2 \quad \text{<식 2>}$$

x_M, y_M : 원 중심 좌표, R : 반지름

㉒ 평면곡선내의 연속된 세 점의 추출

평면곡선내에서 연속된 세 점을 추출하여 다음 <식 3>~<식 5>를 대입하여 <식 2>의 원곡선의 중심점 (x_M, y_M) 과 곡선반경 R 의 값을 구한다.

$$x_M = \frac{(x_{c+2}^2 + y_{c+2}^2) - (x_c^2 + y_c^2) + \left\{ \frac{(x_{c+1}^2 + y_{c+1}^2) - (x_c^2 + y_c^2)}{(y_{c+1} - y_c)} \right\} (y_c - y_{c+2})}{2 \left\{ (x_{c+2} - x_c) + \frac{(x_c - x_{c+1})}{(y_{c+1} - y_c)} (y_{c+2} - y_c) \right\}} \quad \text{<식 3>}$$

$$y_M = \frac{(x_{c+1}^2 + y_{c+1}^2) - (x_c^2 + y_c^2) + 2x_M(x_c - x_{c+1})}{2(y_{c+1} - y_c)}$$

<식 4>

$$R = \sqrt{(x_c - x_M)^2 + (y_c - y_M)^2} \quad \text{<식 5>}$$

㉓ 완화곡선 및 원곡선의 판단

평면곡선내의 연속된 세 점을 <식 3>~<식 5>에 대입하여 나온 원곡선의 중심점 (x_M, y_M) 과 곡선반경 R 을 순차적으로 비교하였을 때, 그 값이 일정하면 세 점은 원곡선에 포함되는 점이고, 일치하지 않으면 그 점은 완화곡선에 포함하는 점으로 프로그램은 판단할 수 있다.

$$\frac{(x_{M:c \sim c+2})}{(x_{M:c+1 \sim c+3})} \times \frac{(y_{M:c \sim c+2})}{(y_{M:c+1 \sim c+3})} \times \frac{R_{c \sim c+2}}{R_{c+1 \sim c+3}} = 1 \quad : (x_c, y_c) \sim (x_{c+3}, y_{c+3}) \text{은 원곡선 좌표}$$

$$\frac{(x_{M:c \sim c+2})}{(x_{M:c+1 \sim c+3})} \times \frac{(y_{M:c \sim c+2})}{(y_{M:c+1 \sim c+3})} \times \frac{R_{c \sim c+2}}{R_{c+1 \sim c+3}} \neq 1 \quad : (x_c, y_c) \text{ 또는 } (x_{c+3}, y_{c+3}) \text{은 완화곡선의 좌표}$$

단, $x_{M:c \sim c+2}, y_{M:c \sim c+2}, R_{c \sim c+2}$: 평면곡선의 연속된 세 점 $(x_c, y_c), (x_{c+1}, y_{c+1}), (x_{c+2}, y_{c+2})$ 의 x_M, y_M, R



3) 원곡선의 기하구조 정보 획득

평면곡선에서 원곡선과 완화곡선을 판단 한 후에 <식 3>~<식 5>를 통하여 원곡선 중심점과 반경 R을 구할 수 있다. 또 원 곡선의 길이 S를 구하기 위한 절차는 다음과 같다.

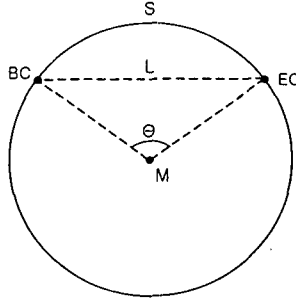


그림 3 원곡선의 기하학

㉔ 원곡선 길이 결정

그림 4에서 원곡선의 시·종점을 BC, EC라고 하고 각각의 좌표를 각각 (x_{BC}, y_{BC}) , (x_{EC}, y_{EC}) 라고 할 때 원의 시·종점간 직선길이 L은 다음 <식 6>과 같이 나타낼 수 있다.

$$L = \sqrt{(x_{BC} - x_{EC})^2 + (y_{BC} - y_{EC})^2}$$

<식 6>

이 때, 원의 시점과 종점을 이루는 내부 각 θ 는 다음 <식 7>과 같이 구할 수 있다.

$$\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{L}{2R}, \quad \theta = 2\sin^{-1}\left(\frac{L}{2R}\right) \tag{식 7}$$

원의 호 길이 S는 <식 5>와 <식 7>에서 구한 곡선반경 R과 θ , L을 통해서 구할 수 있다.

$$S = R \cdot \theta = R \cdot 2\sin^{-1}\left(\frac{L}{2R}\right) = R \cdot 2\sin^{-1}\left(\frac{\sqrt{(x_{BC} - x_{EC})^2 + (y_{BC} - y_{EC})^2}}{2R}\right) \tag{식 8}$$

4) 완화곡선 기하구조 정보 획득

본 연구에서는 완화곡선을 클로소이드 곡선을 사용한 것으로 가정하였다. 따라서 평면곡선부에서 원곡선 이 아닌 모든 곡선은 클로소이드 곡선으로 판단을 한다.

클로소이드 곡선의 일반식은 다음 <식 9>와 같이 나타낼 수 있다.

$$L \times R = A^2 \tag{식 9}$$

단, L : 클로소이드 곡선길이, R : 원곡선 반경, A : 클로소이드 파라미터

평면곡선의 시점(BTC)부터 원곡선의 시점(BC)까지를 클로소이드 곡선으로 간주하기 때문에 <식 9> 클로소이드 곡선길이 L은 평면곡선의 시점부터 원곡선의 시점까지 차량이 주행한 거리로 산출할 수 있고, 원곡선 반경 R은 앞의 절차에서 구할 수 있다. 따라서 클로소이드 파라미터 A는 기존의 취득한 값으로부터 구할 수 있다.

4. 평면선형 분석 사례

본 연구에서는 그림 5와 같이 직선-완화곡선-원곡선-완화곡선-직선으로 구성된 대표적인 평면선형을 설계하였으며, 이 설계도면으로부터 좌표 값을 추출하여 본 연구에서 개발한 알고리즘을 이용하여 선형분석을 수행하였다.

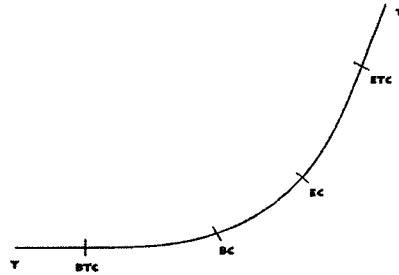


그림 4 평면선형 분석의 도로설계 예

그림 5의 평면선형의 x, y 좌표 값과 기울기, 원곡선 반정식을 이용한 원중심점 및 곡선반경을 을 분석한 결과와 이를 이용하여 선형을 분석한 결과는 표 1과 같이 나타났다.

또 그림 5의 설계에 실제 사용한 직선, 완화곡선, 원곡선의 설계 값과 본 연구에서 개발한 알고리즘을 통해 도출한 결과 값을 비교한 내용은 표 2에 나타났고, 그 결과 값은 거의 차이가 나지 않는 것으로 나타났다.

또 설계시 사용한 각 기하구조 요소 값과 실제 값을 비교한 결과는 표 3에 나타내었다.

표 1 평면선형 좌표 값과 선형 분석 결과

측점	x	y	기울기	xM	yM	R	비고	측점	x	y	기울기	xM	yM	R	비고
1	473.7956	196.7059					직선구간	887	1279.8697	136.6538	0.918485	1874.8209	657.7408	790.885	원곡선2구간
2	474.6587	196.2009	-0.585034			888		1280.6071	137.3292	0.915854	1753.0176	-511.8384	802.864		
3	475.5218	195.6959	-0.585034	-9.26E+11	-6.E+02	9.E+11		889	1281.3456	138.0036	0.913231	1753.0176	-379.2251	700.000	
4	476.3850	195.1910	-0.585034	1.76E+13	-2.E+12	2.E+13		890	1282.0849	138.6769	0.910614	1753.0176	-379.2251	700.000	
5	477.2481	194.6860	-0.585034	2.06E+13	3.E+13	4.E+13		891	1282.8253	139.3491	0.908004	1753.0176	-379.2251	700.000	
중략								중략							
246	685.2647	72.9893	-0.585034	1.35E+12	6.E+12	6.E+12	원곡선1시점	1583	1927.6011	298.6544	-0.256782	1753.0176	-379.2251	700.000	원곡선3시점
247	686.1279	72.4843	-0.585034	-1.10E+12	2.E+12	3.E+12		1584	1928.5693	298.4043	-0.258305	1753.0176	-379.2251	700.000	
248	686.9910	71.9794	-0.585034	-1.12E+13	-2.E+12	1.E+13		1585	1929.5372	298.1528	-0.259830	1753.0176	-379.2251	700.000	
249	687.8543	71.4746	-0.584696	2.69E+03	-2.E+13	2.E+13		1586	1930.5048	297.9005	-0.260786	1648.1210	-379.2251	733.648	
250	688.7184	70.9714	-0.582348	9.76E+02	4.E+03	3442.385		1587	1931.4728	297.6495	-0.259288	2109.9088	-782.9377	1095.221	
251	689.5836	70.4699	-0.579672	9.40E+02	6.E+02	553.867	1588	1932.4412	297.4001	-0.257510	2081.5817	987.8184	706.343	원곡선3구간	
252	690.4497	69.9701	-0.577004	9.40E+02	5.E+02	500.000	1589	1933.4100	297.1524	-0.255734	2081.5817	878.5689	600.000		
253	691.3169	69.4721	-0.574341	9.40E+02	5.E+02	500.000	1590	1934.3793	296.9062	-0.253959	2081.5817	878.5689	600.000		
254	692.1850	68.9758	-0.571684	9.40E+02	5.E+02	500.000	중략								
255	693.0542	68.4812	-0.5690	939.9039	503.2975	500.000	2384	2609.4686	593.3753	1.847295	2081.5817	878.5689	600.000		
중략								중략							
882	1276.1834	133.2758	0.9070	939.9039	503.2975	500.000	2385	2609.9432	594.2555	1.854672	2081.5817	878.5689	600.000	직선시점	
883	1276.9228	133.9491	0.9106	939.9039	503.2975	500.000	2386	2610.4166	595.1364	1.860812	1971.6183	878.5689	698.854		
884	1277.6608	134.6238	0.9143	939.9039	503.2975	500.000	2387	2610.8899	596.0173	1.861446	-3589.3838	937.8588	6209.690		
885	1278.3975	135.3001	0.9180	939.9039	503.2975	500.000	2388	2611.3631	596.8982	1.861446	-9.01E+15	3926.3402	9.007E+15		
886	1279.1332	135.9774	0.9206	798.1278	503.2975	605.219	2389	2611.8364	597.7791	1.861446	-9.01E+15	5.E+15	1.023E+6		
							2390	2612.3096	598.6601	1.861446	2.120E+12	5.E+15	4.839E+15	직선구간	



표 2 계산 좌표 값과 실측 좌표 값 비교

구분		계산 좌표	실측 좌표
완화곡선 시점 (BTC)	x	165.1767	165.6701
	y	19.44084	19.4989
원곡선 시점 (BC)	x	469.3157	469.6823
	y	90.75371	90.9323
원곡선 종점 (EC)	x	652.3714	652.5209
	y	253.6001	253.8314
완화곡선 종점 (ETC)	x	758.6182	758.4308
	y	548.4075	547.6157

표 3 각 요소간 계산 값과 실제 값 비교

설계요소	계산 값	실제 값	적용 식
곡선반경(R)	460m	460m	<식 5>
원곡선길이(S)	246m	247.9m	<식 8>
원곡선 각도	30.6°	30°	<식 7>
클로소이드 파라미터(A)	380m	380m	<식 9>

5. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 도로의 설계 좌표를 이용하여 도로의 평면선형을 분석하는 알고리즘과 그 결과를 살펴 보았다. 본 연구에서 개발한 알고리즘을 이용하여 도로의 측량 좌표를 가지고 선형 분석을 수행한 결과 설계 값과 거의 같은 값을 도출하였다.

본 연구에서는 알고리즘 검증을 위해 설계도면의 좌표를 이용하여 이론적 알고리즘 검증에 대해 유효성을 검토하였다. 그러나 실제 도로에서 취득한 실측 도로 좌표 데이터는 오차를 포함하고 있어 이 오차에 대한 calibration에 대해 점진적인 연구가 수행되어야 요구되고 있으며, 현재 연구를 수행 중에 있다.

또 현재 평면선형에 대해 연구를 수행하였으나 평면선형 뿐만 아니라 종단선형, 나아가 평면과 종단선형 그리고 횡단경사가 함께 존재하는 입체선형 분석이 요구되어 현재 이와 관련하여 연구를 수행 중에 있으며, 나아가 평면, 종단시거 분석을 수행 중에 있다.

참고문헌

1. 건설교통부, (2000) 도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙 해설 및 지침
2. 한국건설기술연구원, (2003) 도로 안전성 조사 분석 차량 개발 1차년도 최종보고서
3. William D. et al. (1992) Development of a Computerized Deficiency Analysis Methodology for The WISDOT Highway Datalog System, WISDOT
4. 윤천주, 성경곤, 도로안전성 조사·분석을 위한 차량 개발에 관한 연구, 대한교통학회 학술발표, 2003