

# 도로 설계 평가를 위한 3차원 도로 시뮬레이션 적용

이종출<sup>1)</sup> · 서동주<sup>2)</sup> · 김진수<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>부경대학교 건설공학부 교수

<sup>2)</sup>부경대학교 공과대학 공학연구원

## 1. 서 론

기존의 2차원적인 도로설계는 수많은 실험을 통하여 기준화된 지침에 따라 이루어지고 있지만, 설계기준과 운전자의 반응 사이에는 상이한 점이 많아 위험성을 내포하고 있다(도철웅 등, 2005). 또한 평면적인 설계의 한계로 인해 가시적 효과를 기대하기 어렵고, 이로 인해 업무 수행 시 발생하는 문제점을 사전에 인지하기 곤란한 단점이 있다(최현, 2005). 이러한 문제점을 해결하기 위한 대안으로 3차원적으로 도로를 설계하는 방법에 대한 연구가 진행 중에 있다.

기존의 연구는 3차원 설계된 도로의 가상주행을 통해 설계된 도로를 시각적으로 평가하는 정성적 평가가 주를 이루고 있다. 본 연구에서는 설계된 도로의 정성적 평가뿐만 아니라 정량적인 평가를 실시하여 객관적인 평가를 수행하고자 하였다.

본 연구의 선행 연구는 선형설계의 문제점 파악에 관한 연구와 노면 결빙구간 추출에 관한 연구로 나눌 수 있다. 국외의 경우 입체선형의 시거분석에 관한 연구로써 3차원으로 연결된 인터체인지 접속부의 선형과 시거간의 상호작용에 대한 연구가 수행되었다. 이 연구에서는 지형의 DTM을 생성하고, 생성된 DTM상에서 도로를 설계하였다. 그리고 설계된 3차원 도로에서 운전자의 시야와 장애물간의 투시선을 이용하여 입체시거를 산정하였다(Sanchez, 1994). 또한 2차원적 도로설계

의 한계를 극복하고자 하는 연구의 일환으로 1990년대 말 지형의 전체 모형을 DTM으로 구성하여 시거성, 쾌적성 및 안정성 등을 시각적으로 예측할 수 있는 합리적인 도로설계 방법에 관한 연구도 수행된 바 있다(Raper, 1998). 또한 기존의 연구 결과에서 3차원 도로설계 시 자료표현의 효율성이 중요하다는 문제가 대두되어, 3차원 자료의 효율적인 표현을 위해 원격탐사자료를 이용하는 연구도 수행되었다(Carlo, 1999). 이를 바탕으로 3차원 공간상에서 교통계획 및 설계를 수행하는 연구도 진행된 바 있다(Easa et al., 2002).

국내에서도 3차원 도로설계에 관한 연구가 많이 진행되고 있다(최현 등, 2001; 권혁춘 등, 2004; 김남희, 2004). 또한 3차원 도로설계와 GIS를 이용하여 후보노선들의 가상 주행을 통한 최적노선선정에 관한 연구도 수행되었다(최현 등, 2005). 기존의 연구 성과에서 도로 및 지형의 모델링이 가능해 짐에 따라 최근 관심이 고조되고 있는 일조권에 대한 연구도 진행 중에 있다. 일조분석을 위해 GIS를 활용하는 연구가 수행되었고(허윤경 등, 2002), 도로의 일조영향 및 노면결빙구간을 분석하는 연구도 수행되었다(이형석, 2005).

본 연구의 목적은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 도로를 3차원적으로 설계하고 설계된 도로의 주행 시뮬레이션 및 시거분석을 통해 설계된 도로의 선형을 평가하고자 하는 것이다. 두 번째는 일조 시뮬레이션을 실시하여 노면 결빙구간

을 추출하여 이를 설계에 반영하는 것이다. 본 연구의 흐름도는 그림 1과 같다.

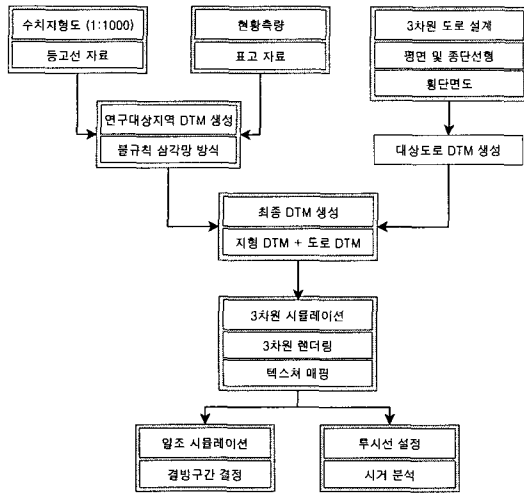


그림 1. 연구 흐름도

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 수치지형모델

수치지형모델(DTM; Digital Terrain Model)은 수치화 또는 기호화된 지표면의 관측 자료로부터 표고, 경사, 경사방향, 유역면적 등의 지형정보를 획득할 수 있는 모델을 의미한다. DTM 생성 방식은 지형정보의 종류와 추출점 배치에 의해 불규칙 삼각망(TIN; Triangulated Irregular Network), 격자망(GRID) 방식 등으로 분류된다. 불규칙 삼각망에 의한 DTM 생성은 다양한 측량기법에 의한 성과, 수치지도상의 등고선 자료, 벡터라이징에 의한 지점 자료 등을 이용하여 공간상의 삼각형으로 지형을 묘사하는 방법을 의미한다. 이는 임의의 지점 자료를 그대로 이용하기 때문에 추가적인 자료 보완작업이 필요 없으며, 격자망 방식에 비해 계곡, 도로, 하천 등의 선형 형상에서 지형을 더욱 정밀하게 표현할 수 있다. 본 연구는 선형 형상의 도로를 대상으로 시뮬레이션을 수행하

기 때문에 불규칙 삼각망에 의한 DTM을 적용하였다.

### 2.2 3차원 시뮬레이션

3차원 객체는 점, 선 또는 다각형 외에 면으로 구성되는 공간상의 입체적 요소에 의해 표현된다. 임의의 곡면은 다각형으로 구성된 메쉬(mesh)에 의해 표현되고, 부드러운 표면의 모델링에는 메쉬에 비해 곡면의 방향, 곡률 등의 기하학적 성질을 잘 반영하는 bezier 곡선, spline 곡선, nurbs 곡선 등이 주로 이용된다. 본 연구에서는 주행 시뮬레이션 수행 시, 불규칙 삼각망 방식을 이용한 삼각메쉬법을 이용하여 지형을 모델링하였으며, 구성요소별로 표현한 사각메쉬법을 이용하여 대상 도로를 모델링하였다.

모델링을 통해 3차원으로 생성된 대상물은 실제감과 사실감을 부여하는 렌더링 단계를 거치게 된다. 렌더링 기법에는 균일, 그로우, 푹 음영법 등이 있다. 균일 음영법은 다각형 한계의 명암의 차가 쉽게 눈에 띄어 부드러운 표현이 곤란하며, 그로우 음영법은 국소적인 색의 변화에 대응하지 못하는 단점을 지닌다. 본 연구에서는 법선 벡터를 면의 내부에서 보간하고, 음영계산을 하는 푹 음영법을 적용하여 렌더링을 실시하였다. 렌더링이 수행되면 3차원 객체의 표면에 재질 또는 질감을 부여하는 텍스처(texture) 매핑을 실시하게 된다.

## 3. 자료구축 및 시뮬레이션

본 연구에서는 울산광역시 남구에 소재한 두왕~무거간 총연장 6.182km의 국도를 대상 도로로 선정하였다.

도로 시뮬레이션을 위한 3차원 도로 설계는 DTM 상에서 수행된다. 도로 설계는 Bentley사의 도로설계 프로그램인 Inroads

를 이용하였다. Inroads는 ASCII 또는 Binary 형태의 자료, DEM, 수치지형도를 이용하여 간편하고 정밀하게 DTM을 생성할 수 있다. DTM 생성시에는 연구대상 지역의 1:1,000 수치지형도상의 등고선 자료와 실제 측량자료를 이용하였으며 TIN 방식을 이용하여 표현하였다. 그림 2는 DTM 생성에 사용된 등고선 자료와 실측 자료를 나타낸 것이며, 그림 3은 생성된 DTM을 나타낸 것이다.

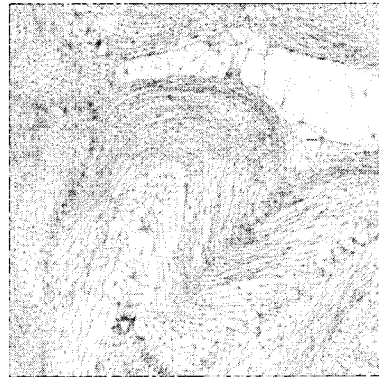


그림 3. 대상 지역의 DTM

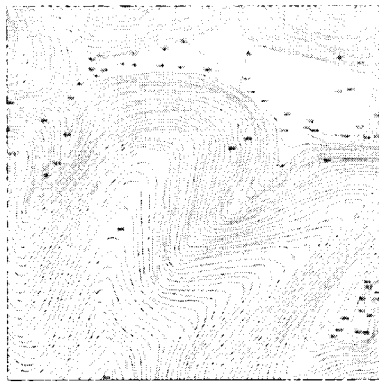


그림 2. 대상 지역의 표고자료

도로설계는 평면 및 종단선형, 확폭, 시거, 편경사 등을 고려하여 설계하였다. 설계조건은 설계속도 80km/h, 차로폭 3.5m, 중앙분리대 2m, 길어깨 2m, 보호길어깨 0.5m를 적용하여 설계하였다. 표 1은 설계된 도로의 평면선형 제원을 나타낸 것이며, 그림 4는 평면선형의 형상을 나타낸 것이다. 평면선형 설계 후 종단계획고 입력을 통해 종단선형을 설계하였으며, 표 2는 종단선형 제원을 나타낸 것이다.

표 1. 대상도로의 평면선형 설계제원

구분	X	Y	R(m)	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	
B.P	222302.107	227188.855	-	-	-	-	-	
IP	1	222339.842	227157.423	210	0	0	0	
	2	222445.727	227128.829	240	0	0	0	
	3	222751.219	226825.003	570	270	270	127.895	127.895
	4	222676.939	226054.609	610	320	320	167.869	167.869
	5	223440.287	225497.619	1100	0	0	0	0
	6	224408.548	223565.289	880	430	430	210.114	210.114
	7	225201.129	223374.93	480	240	240	120	120
	8	225426.248	222885.07	250	160	160	102.400	102.400
	9	225316.545	222646.733	150	0	118	0	92.827
P.E	22527.284	222383.757	-	-	-	-	-	

선형설계 후 표준횡단면을 작성하고 이를 3차원 지형에 적용하여 도로를 설계하였다. 그림 4는 대상 도로의 절토부와 성토부의 표준횡단면을 나타낸 것이다.

도로설계를 완료한 후에는 그림 5와 같이 설계된 도로의 TIN을 생성하고, 그림 6과 같이 지형의 TIN과 합성하여 지형과 합성된 3차원 도로를 완성하였다.

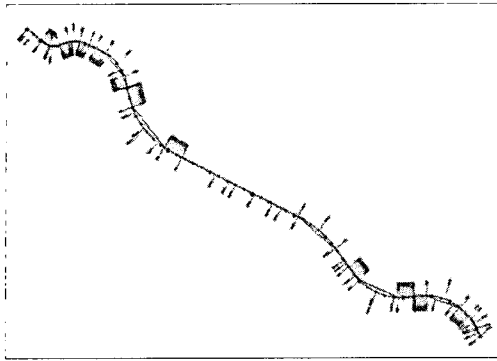


그림 4. 설계제원에 의한 평면선형

표 2. 대상도로의 종단선형 설계제원

구분	Sta.	Elev.(m)	L(m)	K
VPC	0+00	14.06	-	-
VPI	1 0+40	13.7	80	38.095
	2 1+70	9.8	180	25.714
	3 5+60	25.4	200	1000
	4 11+00	45.92	400	54.795
	5 16+80	25.62	200	45.455
	6 28+20	35.88	320	110.35
	7 33+20	25.88	240	40.678
	8 43+40	65.66	400	53.333
	9 49+20	44.78	200	64.516
	10 53+60	42.58	280	62.222
	11 56+10	52.58	100	20.073
	12 57+20	51.5	120	20.061
	13 58+80	59.5	200	20.289
	14 61+40	46.87	80	11.643
OPE	61+82.72	47.73	-	-



그림 4. 대상 도로의 표준횡단면도

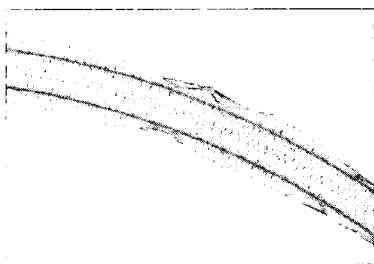


그림 5. 도로의 TIN 생성 결과



그림 6. 도로 및 지형 TIN 합성

설계된 도로를 가상으로 주행하는 주행 시뮬레이션은 도로선형 설계의 적합성 및 주변 지형과의 조화를 시각적으로 확인할 수 있다.

주행 시뮬레이션은 실시간 렌더링을 통해 구현하였다. 본 연구에서는 실시간 렌더링을 위해 Bentley사의 MicroStation을 이용하였다. 우선 설계된 3차원 도로와 지형에 텍스처 매핑을 실시하였다. 텍스처 매핑은 노면, 길어깨, 절·성토부, 중앙분리대 및 지형의 대표적인 이미지를 이용하여 실시하였다. 광원은 주변광 0.1, 태양광 1.0으로 설정하였다. 광원 설정 후 주행경로를 설정하고, 풍 음영법을 적용하여 실시간 렌더링을 실시하였다.



그림 7. 도로 주행 시뮬레이션 수행

도로설계의 결과를 3차원으로 형상화하여 주행 시뮬레이션을 실시함으로써 시공 전에 지형과 합성된 완공 후 도로 형상을 확인할 수 있었다. 이를 통해 도로 선형설계의 적합성 및 주위 지형과의 조화를 판

단할 수 있었다. 도로 설계 후 주행 시물레이션을 실시한다면 전반적인 도로설계의 적합성 및 오류를 감소시킬 수 있을 것이라 판단된다. 그림 7은 시물레이션을 실시하는 모습을 나타낸 것이다.

음영은 일출에서 일몰사이에 자연지형이나 인공장애물에 의해 태양빛이 가려져 그림자가 발생하는 것이다. 동절기 적설량이나 강수량이 많은 지역의 경우 도로노면에 발생하는 음영은 노면 결빙에 영향을 미치는 인자이다.

국토의 70% 이상이 산지인 우리나라 도로의 경우 대부분 산악지형을 관통하게 되며, 이때는 절토 후 도로를 시공하는 경우가 빈번하다. 절토구간에서는 일조시간이 짧아 음영이 오래 지속되는 곳이 발생하므로 동절기에 도로노면에 동결이 발생하는 경우가 많다. 따라서 도로선형 설계시 음영지역 발생에 따른 노면 결빙의 영향을 고려할 필요가 있다.

본 연구에서는 동지시의 태양고도 및 방위각을 설정하여, 시간대별로 3차원 설계된 도로를 대상으로 일조 시물레이션을 실시하였다. 태양광원의 위치는 미국 Astronomical Applications Department 자료를 바탕으로 동지 때, 경도 129°E 19', 위도 35°N 34'인 연구대상지역의 태양고도 및 방위각을 계산하여 사용하였다. 태양광은 1.0, 주변광은 0.1로 설정하였으며, 구름의 영향은 무시하였다. 음영을 부각시키기 위해 음영의 해상도는 최대값인 4096으로 설정하였다. 표 3은 계산한 태양고도 및 방위각을 나타낸 것이다.

태양의 위치변화에 따른 음영발생 지역의 변화를 확인하기 위해 MicroStation을 이용하여 일조 시물레이션을 실시하였으며, 3차원 공간에서 빛의 반사를 추적하는 광선추적기법을 이용하여 렌더링을 실시하였다. Sta.06+00~Sta.10+00구간의 일조 시물레이션 결과, Sta.08+20과 Sta.09+20에서 절토사면의 영향으로 인해 일조시간이

확보되지 않음을 확인할 수 있었다. 그림 8과 그림 9는 정오와 오후 3시의 일조 시물레이션 결과를 나타낸다.

일조 시물레이션을 실시한 결과, 대상 도로의 음영변화를 시각적으로 확인할 수 있었고, 음영이 지속적으로 반복되는 지역을 확인할 수 있었다. 이를 통해 상습 노면결빙 지역을 예측할 수 있었다. 일조 시물레이션의 결과는 벡터라이징을 통해 데이터베이스화 할 수 있으므로 도로계획 및 설계 시에 활용성이 있을 것으로 기대된다.

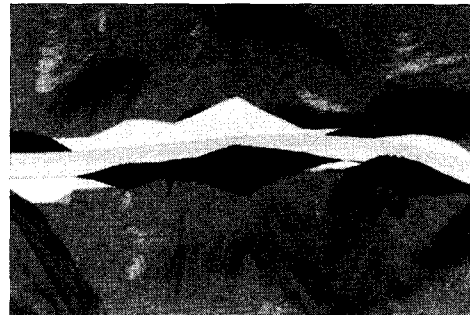


그림 8. 고도 : 30.8°, 방위각 : 174.4° (12:00)

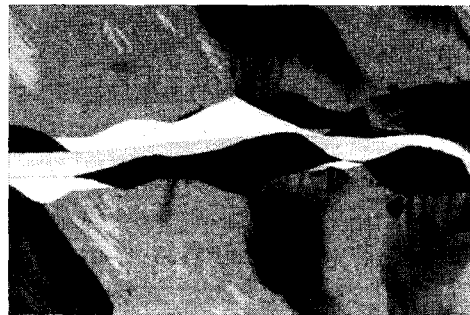


그림 9. 고도 : 20.1°, 방위각 : 218.6° (15:00)

기존의 2차원적 도로설계에서는 종단곡선과 평면곡선이 겹쳐져 있는 경우나 편경사가 있는 경우, 장애물이 운전자의 눈높이 보다 낮은 경우 및 부대시설물이 설치된 경우 등에서는 시거산정이 어려웠다. 그러나 3차원 설계에서는 운전자와 장애물을 연결하는 투시선을 설정하여 효율적으로 안전시거를 계산할 수 있다.

본 연구에서는 “도로의 구조·시설기준에 관한 규정 해설 및 지침”에 따라 운전자의 눈높이 1.0m, 장애물의 높이 0.15m를 적용하여 정지시거를 계산하였다. 정지시거의 기준은 설계속도 80km일 때의 시거인 140m를 적용하였으며, 이 기준을 만족하지 못하는 구간은 그림 10과 같이 시각적으로 확인할 수 있다.

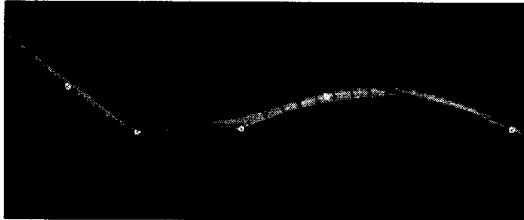


그림 10. 시거 분석 결과

#### 4. 결론

본 연구는 가상현실에 기반하여 설계된 도로 또는 계획된 도로에 대하여 완공상태를 가상으로 주행하는 시뮬레이션 기법을 통해 도로설계 평가를 위한 연구로서 수행되었으며, 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 수치지형모형을 통해 3차원 구조물과 경관요소를 동시에 고려한 설계가 가능하였다.

둘째, 다양한 환경하에서 가상주행을 실시함으로써 완공 후에야 파악할 수 있는 문제점을 시공 전에 미리 예측할 수 있어 도로설계에 시행착오를 감소시킬 수 있다.

셋째, 3차원 도로설계를 통한 주행 시뮬레이션은 공간문제의 인식과 파악, 대안 도출 및 평가 등에 활용이 가능할 것이라 판단되며, 비전문가도 쉽게 이해할 수 있으므로 지역주민과 마찰이 예상되는 부분에서 객관적인 해석이 가능할 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

- 권정훈, 2001, 가상 도로주행을 위한 시각 시뮬레이션 시스템의 개발, 중앙대학교 첨단영상 대학원 석사학위논문.
- 이형석, 2005, GIS를 이용한 도로의 일조 영향 및 노면결빙구간 분석, 한국측량학회지, 제23권 제3호, pp.293-301.
- 정연구, 1997, 3차원 시각정보의 자동추출 및 실감표현 기술 개발, 한국정보통신부, pp. 11-18.
- 최현, 강인준, 이병철, 2001, 3차원 지형공간 정보체계를 이용한 도로설계 시뮬레이션, 대한토목학회논문집, 제21권, 제2D호, pp.201-207.
- 최현, 2005, VGIS를 인요한 도로 시뮬레이션의 인터넷 제공, 대한토목학회논문집, 제25권 제6D호, pp.883-890.
- 최현, 송석진, 강인준, 2005, 도심지 도로설계에서 가능교통량과 가상 주행을 통한 최적노선선정, 대한지형공간정보학회논문집, 제12권, 제4호, pp. 39-46.
- 한병철, 2005, 웹 기반 VGIS를 이용한 도로 시뮬레이션 시스템 개발, 부산대학교 대학원 석사학위논문.
- Douglass Davis, William Ribarsky, T.Y. Jiang, and Nickolas Faust, 1998, Perception, and Out-of-Core Visualization Applied to Terrain, Report GIT-GVU-98-12, pp. 455-458, IEEE Visualization '98.
- Walter Di Carlo., 1999, A Virtual Environment for Remote Sensing Data Exploration, Proceeding of SPIE, Vol. 1. 3643, pp. 71-80.