



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

3차원 레이저 스캐닝 자료를 이용한
도로의 평면선형정보 구축



2007년 8월

부 경 대 학 교 산 업 대 학 원

토 목 공 학 과

최 상 식

공학석사 학위논문

3차원 레이저 스캐닝 자료를 이용한
도로의 평면선형정보 구축

지도교수 이 중 출

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2007년 8월

부경대학교 산업대학원

토목공학과

최 상 식

최상식의 공학석사 학위논문을 인준함

2007년 8월 30일



주 심 공 학 박 사 이 환 우 (인)

위 원 공 학 박 사 정 진 호 (인)

위 원 공 학 박 사 이 종 출 (인)

목 차

List of Tables	iv
List of Figures	v
Abstract	vii
1. 서 론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구동향	3
1.3 연구방법 및 적용범위	7
2. 3차원 레이저 스캐너 이론	9
2.1 레이저의 응용	9
2.1.1 레이저의 역사	9
2.1.2 레이저의 발진 원리	9
2.1.3 레이저의 특징	15
2.2 레이저를 이용한 거리측정	16
2.2.1 TOF 방식	17
2.2.2 위상차방식	18
2.2.3 삼각측량법	20
2.3 3차원 레이저 스캐닝의 특징	21
2.4 다중 스캔 자료의 정합	22

3. 도로 선형의 구성요소 추출	23
3.1 직선 및 곡선구간 자동 분리 알고리즘	23
3.2 평면선형 설계요소 추출	27
3.2.1 최소제곱선 결정	28
3.2.2 원곡선의 반경 결정	29
3.2.3 완화곡선길이 및 파라미터 결정	33
4. 레이저 스캐닝 및 도로중심선자료 추출	37
4.1 연구대상지 선정	37
4.2 관측 시스템의 구성	38
4.3 대상 도로의 레이저 스캐닝	40
4.3.1 3차원 레이저 스캐닝	40
4.3.2 지상 기준점 측량	44
4.4 자료처리 및 중심선 자료 추출	45
4.4.1 정합 및 지리참조	45
4.4.2 정확도 분석	48
4.4.3 중심선 자료 추출	50
5. 도로 선형요소 산정	53
5.1 평면선형 설계요소 산정	53
5.2 평면선형의 재현	55
5.3 도로선형정보 시스템 구축	57

6. 결 론 61

참고문헌 63



List of Tables

Table 2.1 Classification of 3D laser scanners	17
Table 2.2 Comparison of photogrammetry and 3D laser scanning	21
Table 3.1 Plane curve radius	30
Table 3.2 Length of transition curve in compliance with design speed ·	33
Table 4.1 Specification of SET230RK3	38
Table 4.2 Specification of 3D laser scanner	39
Table 4.3 Form of point cloud data	41
Table 4.4 Result of 3D laser scanning(Right line)	43
Table 4.5 Result of 3D laser scanning(Left line)	43
Table 4.6 The result of check point	44
Table 4.7 Comparison of check point	49
Table 5.1 Determined least square line and IP location	54
Table 5.2 Comparison between designed and extracted values	55
Table 5.3 Comparison between designed and extracted alignments ·	56
Table 5.4 Composition of S/W employed for road alignment information system	57

List of Figures

Figure 1.1 Flowchart of research	8
Figure 2.1 Interaction between incident light and energy level	12
Figure 2.2 Principle of laser oscillator	14
Figure 2.3 Transmitted signal and received signal	17
Figure 2.4 The description of phase shift	18
Figure 2.5 Geometric structure of triangulation	20
Figure 2.6 Principle of registration and geo-referencing	22
Figure 3.1 Douglas-Peucker algorithm	25
Figure 3.2 Effect of Douglas-Peucker algorithm	26
Figure 3.3 Flowchart of Douglas-peucker algorithm	27
Figure 3.4 Error of least square circle	32
Figure 3.5 Shift of transition curve	34
Figure 4.1 Highway on test field	37
Figure 4.2 Shape of Total Station	38
Figure 4.3 Shape of 3D Laser Scanner	39
Figure 4.4 Constitution diagram of 3D laser scanning	40
Figure 4.5 Shape of 3D laser scanning on research highway	41
Figure 4.6 Panoramic view of a sub-project	41
Figure 4.7 Cloud points data obtained from 3D laser scanner	42
Figure 4.8 Target fitting for registration	45
Figure 4.9 Process of registration	46

Figure 4.10 Result view of geo-referencing for overall section	47
Figure 4.11 Lightproof net prop which used for check	48
Figure 4.12 Data for extracting horizontal alignment	50
Figure 4.13 Process of extracting center line data in part section	51
Figure 4.14 Process of extracting center line data in all section	52
Figure 5.1 Flowchart for extracting horizontal alignment	53
Figure 5.2 Reconstruction of designed and extracted alignments	56
Figure 5.3 User interface of Ropad alignment information system	58
Figure 5.4 Raw data of screen view	58
Figure 5.5 Extracted alignment of screen view	59
Figure 5.6 Comparison of extracted alignment and design alignment	58



*Construction of Horizontal Alignment Information on Highway
using 3D Laser Scanning Data*

Sang-Sik, Choi

*Department of Civil Engineering, Graduate School of Industry,
Pukyong National University*

Abstract

A highway geometric information system has been developed in this study by utilizing the advantages of the laser scanning technique. The system can accurately interpret the geometric information of highway and can be applied to actual works.

To accurately interpret the geometric information of highway, horizontal data on highway were collected promptly and accurately, and then transmitted on a real-time basis using the socket network method.

Continuously scanned data were then registered and geo-referenced and the developed technique was verified to have a higher accuracy than other techniques through an accuracy analysis.

An algorithm that can automatically separate a horizontal alignment into a straight line, a transition curve, and a circular curve to develop the highway geometric information system. It can increase its efficiency compared to the conventional methods. In addition, an algorithm that can automatically extract design elements of horizontal alignments of highway and applied to an object highway.

If we used the construction system that was built, it is judged that it can contribute to use of the development of extraction road element technology.

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

도로는 국토의 골격으로써 경제활동으로 발생하는 통행수요를 담당하고 국가경제활동과 산업발전의 원동력이 되는 주요한 시설로써 다양하고 여유 있는 생활환경을 유도하기도 하며, 공익시설의 수용 및 방재기능 강화 등 공간적 기능을 수행하기도 한다(이종출, 2001).

우리나라는 최근 30여 년간 급격한 경제성장을 이루어왔으며, 이러한 경제성장은 교통수요의 급격한 증가를 동반하여 왔다. 그러나 교통수요의 증가는 자동차 운행으로 인한 환경피해와 교통사고 발생이라는 문제를 발생시켰으며, 이 두 가지 문제는 앞으로 우리나라에서 삶의 질을 제고하기 위하여 반드시 개선하여야 할 현안과제로 대두되고 있다.

최근 정부기관과 민간부문에서 도로교통부문의 안전성 제고를 위한 지속적인 노력이 진행되고 있으며, 일부 선진국에서 도입되어 실행되고 있는 도로안전진단제도(RSA: Road Safety Audit)의 도입을 법적·제도적으로 시행하려는 방안이 모색 중에 있다(건설교통부, 2004; 김홍상, 2005).

도로안전진단은 신설도로의 경우 계획·설계단계에서 적절한 설계 기준의 적용 등을 평가하여 기본 설계부터 개통 전·후 단계까지 계속적으로 안전성을 진단하게 되고, 기존 도로의 경우 도로 개통 후 운영단계에서 발생하는 문제점을 파악하고 도로 기하구조 및 시설에 따른 교통안전상의 문제점을 평가하고 개선하게 된다. 이러한 도로안전진단에 있어서 주행안전에 가장 큰 영향을 주는 도로의 기하구조와 노면상태에 대한 안전성 분석을 자동으로 수행할 수 있는 기술개발에 관련한 연구가 활발히 진행되고 있다(한국건설기술연구원, 2003, 2004, 2005).

도로에서 평면선형, 종단선형 및 횡단경사 등과 같은 기하구조는 도로의 특성을 설명하거나 도로의 안전성 분석에 필요한 중요한 요소이다. 특히, 평면 및 종단선형은 도로의 사용성 측면에서 직접적으로 영향을 미치며, 선형의 양부는 주행의 안전성과 직접관련이 있다.

기존도로에 대하여 선형 개량 및 확포장을 하거나 안전성 분석을 하기 위해서는 도로의 선형요소가 필요하다. 도로의 선형요소는 설계도를 이용하여 취득할 수 있지만 기존 도로의 경우 그동안의 건설위주의 국가정책으로 인해 시설물 관리가 합리적으로 수행되지 못하여 설계도가 없는 경우가 있을 수 있으며, 설계도가 존재하는 경우라도 선형 개량 등의 이유로 기존 도면과 상이한 경우가 있다. 이러한 경우 도로의 선형을 정확히 분석하기 위해서는 도로 중심선에 대한 3차원 위치정보 뿐만 아니라 기하구조에 관련한 위치정보의 획득이 선행되어야 한다.

종래에는 재래식측량, 사진측량, 원격탐사, GPS 측량 등을 이용하여 도로중심선에 대한 3차원 위치정보 및 속성 정보를 취득하였으나, 최근에 과학과 측량기술의 발전으로 건설 분야에 적용 가능한 레이저스캐닝 기술이 개발 되었다. 그리고 레이저스캐닝 기술은 종래의 측량방식과 비교하여 높은 위치정확도로 고밀도의 점군 자료의 취득이 가능함으로써 이를 도로에 적용할 경우 방대한 양의 자료 취득과 보다 정확한 도로의 기하구조를 해석할 수 있다.

따라서 본 연구는 도로에 대해 3차원 레이저 스캐너를 이용하여 도로공간정보를 획득하고 도로 중심선에 대한 자료를 추출하여 평면선형 요소를 산정함으로써 선형개량 및 도로안전성 분석에 요구되는 선형요소를 제공하고 하며, 이러한 자료를 바탕으로 도로 선형 정보 시스템을 구축함으로써 효율적인 도로의 유지관리에 이바지 하고자 한다.

1.2 연구동향

본 연구는 3차원 레이저 스캐닝으로 측정된 점군 자료를 이용하여 도로의 선형요소를 추출하는 연구로서 레이저 스캐닝기법과 관련된 연구와 도로선형요소 추출과 관련된 연구로 나누어 고찰 하였다.

3차원 레이저 스캐닝 기법은 가장 최근에 도입된 측량방법 중 하나로서 레이저라는 특수한 매개체를 사용하여 측량하기 때문에 재래식 측량, 항공사진측량, 위성영상 등 광학원리를 이용한 측량과 EDM, 토탈스테이션 등 전자기과를 이용한 측량과는 다른 성격을 가지고 있다(오윤석, 2005). 그리고 자료의 정밀도 측면뿐만 아니라 자료 처리속도, 처리의 자동화 등으로 인하여 동일한 목적을 위한 다른 방법보다 매우 경제적이다.

최초의 광학레이저는 1960년 휴즈항공사에 의하여 개발되었고, 곧 레이저송신기와 수신기 사이를 오가는 빛의 이동시간을 포착하여 거리를 측정하게 되었다(Ritchie, 1996). 1970~1980년대 미국과 캐나다 등지에서 3차원 레이저 스캐닝 기술이 개발되었으며, 지오매틱스 분야에서는 1988~1993년 높은 기하학적 정확도를 제공할 수 있는 Laser Profiler가 독일 슈트트가르트 대학의 연구진에 의해 개발되었다(Ackermann, 1999). 그 이후 GPS, INS 등 항공기의 정확한 위치와 자세정보를 제공할 수 있는 보조장비의 성능이 향상되어 1990년대 들어 항공 LiDAR 관측 장비가 상업화되게 되었다(김형태, 2000).

1990년대 후반 이후 LiDAR 자료를 이용한 공간정보 추출과 관련된 연구는 주로 건물과 지형의 3차원 모델링에 관한 연구에 집중되었으나 최근에는 도로와 같은 연속적인 면에 대한 정보를 추출하고자 하는 연구가 시도되기 시작했다. Pattnaik 등(2003)은 도로의 종단경사와 횡단경사 정보를 LiDAR 자료를 이용하여 추출하는 연구를 수행하였고, Hatger와 Brenner(2003)는 차량항법용 수치지도(GDF)의 도로 중심선과 도로의 중

단경사정보를 이용하여 레이저 스캐닝 자료에서 도로지역만을 자동으로 영역분할하는 연구를 수행하였다.

일반적인 LiDAR의 점밀도가 1점/m² 이하인 것을 감안할 때, 정확한 지상 시설물의 추출에 있어서 많은 어려움이 따른다. 이러한 점밀도를 이용하여 도로의 기하구조 및 노면상태에 관련한 다양한 요소뿐만 아니라, 도로 선형요소인 도로 중심선자료를 추출하기는 어렵기 때문에 이를 보완하기 위해서는 지상측량방식이 병행될 필요가 있다. 이에 김민석(2004)은 LiDAR의 고도정보와 수치지도의 도로중심선을 이용하여 실제도로의 선형 설계요소를 자동으로 추출하는 알고리즘을 제안하였다.

지상부문에서의 3차원 레이저 스캐닝 기술의 보급은 1990년대 중반이후 제조업, 문화재 등의 분야에서부터 리버스 엔지니어링 개념의 발전을 도모하게 되었다. 이후 3차원 레이저 스캐닝 시장 규모의 성장으로 인해 다양한 제품군을 형성하면서 기존 CMM(Coordinate Measurement Machine) 기반의 측정 기술이 개척한 인스펙션 및 리버스 엔지니어링 분야를 필두로 이를 뛰어넘는 다양한 응용분야를 이끌어가고 있다(CAD&GRAPHICS, 2004).

최재원(2001)은 간단함 형상의 대상물에서 비교적 복잡하면서 자유형상을 갖는 대상물까지 3차원 레이저 스캐너를 이용하여 기존 역공학 분야에서 수작업을 필요로 하는 점군 자료의 적합화 작업에 대한 알고리즘을 제안하고, 곡면을 자동 생성하였다. 박홍기(2002)는 삼각측량 기술을 이용한 스캐닝 장비를 개발하고, 점군자료의 개수를 변화시키면서 해상도를 조절하여 석고상의 형상을 측정하였으며, 한승희(2006)는 패턴 스캐너를 이용한 3차원 모델링 기법을 소개하였다.

이상과 같이 지상부문에서의 3차원 레이저 스캐닝 기술에 관련한 대부분의 연구는 비교적 근거리에 있는 대상물의 형상 해석에 국한되어 이루어 졌다. 그러나 2000년대 초반 고정밀도의 중·장거리용 3차원 레이저 스

캐너의 보급으로 인해 그 활용범위가 더욱 다양해지고, 토목, 문화재 등의 분야에서도 이러한 기술에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다.

Bauer과 Paar(2003)는 중·장거리 관측이 가능한 레이저 스캐너를 이용하여 빙하와 암석빙하를 대상으로 1년에 4회 관측하고, 고해상도의 3차원 표면변형 자료를 취득하였다. Mills와 Barber(2004)는 구조물의 형상을 관측하는데 있어서 지상에서의 해석적 사진측량방식과 3차원 레이저 스캐닝 방식에 의해 획득된 자료들의 정밀도를 비교·분석하였으며, 각각의 방식의 이점을 이용한 정밀하고 정확한 구조물 측량 방식을 제안하였다. 그리고 Collins와 Sitar(2005)는 지질학적으로 활동이 많은 해안의 절벽을 3차원 레이저 스캐너를 이용하여 모니터링하고 안전성을 예측하였으며, Alba 등(2005)은 3차원 레이저 스캐닝 기법을 이용하여 절취사면을 모델링함으로써 지상 레이저 스캐너의 활용 가능성 및 문제점을 제시하였다.

레이저 스캐닝 기법을 도로에 적용한 연구를 살펴보면 차량에 장착된 2차원 레이저 스캐너와 디지털 카메라를 이용하여 획득된 연속된 연속된 2차원 표면 점군자료와 수치영상으로부터 도시 지역의 건물을 대상으로 3차원 질감을 갖는 구조로 생성하기 위한 알고리즘을 Frueh 등(2004)이 제안하였다. Walters와 Jaselskis(2005)는 도로 포장 전·후의 노면을 3차원 레이저 스캐너를 이용하여 실시간으로 스캐닝하고 포장의 두께를 결정할 수 있는 시스템을 제안하였고, Chang 등(2005)은 3차원 레이저 스캐너를 이용하여 포장 노면에 관련한 점군자료를 취득하여 포장 노면의 팬 곳의 범위를 결정하여 채움 재료의 양을 정량적으로 제시하였다. 또한 Jaswlskis 등(2005)은 3차원 레이저 스캐닝 기법이 토양과 암석의 체적, 도로 노면의 높이 값, 교량 범의 챔버(chamber) 등을 결정하는데 적합하고, 완공상태의 도면을 3차원으로 작성하는데 매우 큰 효과를 나타내는 것을 입증하였다. 국내에서도 3차원 레이저 스캐너 등과 같은 다양한 센서를 장착한 도로안전성 조사 분석 차량을 이용하여 도로의 횡단경사를 측정하는 방법에 대

하여 소개하고, 취득된 점군 자료를 이용하여 도로 노면정보 뿐만 아니라 입체시거를 산정할 수 있는 가능성을 윤덕근 등(2006)이 제시하였다.

도로의 3차원 위치정보 획득 방법과 도로 선형의 구성요소의 추출에 관한 기존 연구를 살펴보면, 먼저 종래의 도로 노선측량을 대신하여 효율적이고 자동화된 방법으로 도로의 3차원 위치정보를 획득하기 위한 연구들이 진행되고 있다. 이종출(2000, 2001)은 GPS 측량방법 중 실시간 동적 측위법을 이용하여 기존 도로의 중심선 자료를 취득하고, 이러한 자료를 이용하여 최소제곱법에 의한 평면선형 설계요소를 추출하는 알고리즘을 제안하였다. 노태호 등(2002)은 RTK GPS/GLANASS 자료를 이용하여 도로 중심선의 3차원 위치정보를 획득하고 이를 분석함으로써, 기존 RTK GPS 측위방법으로 취득된 자료보다 더욱 향상된 자료 취득률과 정도를 획득하였으며, 서동주(2003)는 수치사진 측량기법을 이용하여 설계 자료가 없는 도로를 대상으로 3차원 위치정보를 획득하고, 도로선형 및 시설물에 관련한 정보체계를 개발하였다. 그리고 정의환(2004)은 도로의 기하구조와 유사한 철도선형을 복원하기 위해 GPS 측량자료로부터 불필요한 부분을 제거하고 위치정확도를 확보할 수 있는 방법을 찾고자 일반화 방법 중 4개의 알고리즘을 적용하여 Douglas-Peukcer 선형 단순화 알고리즘이 가장 효과적임을 증명하였다.

1.3 연구방법 및 적용범위

본 연구에서는 3차원 레이저 스캐너에 의해 취득된 점군 자료를 이용하여 도로 중심점의 좌표를 추출하고 이를 이용하여 평면 및 종단선형 요소를 산정하는 것에 목적을 두고 있으며, 연구를 위한 흐름도는 Figure 1.1과 같다.

먼저 울산광역시 남구에 소재한 OO~OO간 도로 4차로 확장공사 구간 내 평면 및 종단선형 요소를 모두 포함하고 있는 1km구간을 연구대상도로로 선정하고 3차원 레이저 스캐너를 이용하여 3차원 점군자료를 취득하였다. 또한 연속된 다중 점군자료를 처리하고 그 결과의 정확도를 분석하기 위하여 무프리즘 토달스테이션에 의한 지상기준점 및 검사점 측량을 동시에 수행하였다. 이렇게 저장된 자료들은 정합(registration) 및 지리참조(geo-referencing) 등의 처리과정을 거쳐 다중스캔자료를 형성하게 된다.

정합과정을 거친 점군자료는 검사점과 비교하여 정확도를 분석하고 도로 중심선에 해당하는 자료를 추출하게 된다. 도로중심선에 해당하는 점군자료는 선형화 알고리즘 중 Douglas-Peucker 알고리즘을 적용하여 직선 및 곡선구간으로 분리하였으며, 분리된 자료를 이용하여 평면선형 요소를 산정하였다. 산정된 선형요소는 도면으로 재현하여 그 결과를 실제 연구대상도로의 선형설계제원과 설계도와 비교하였다.

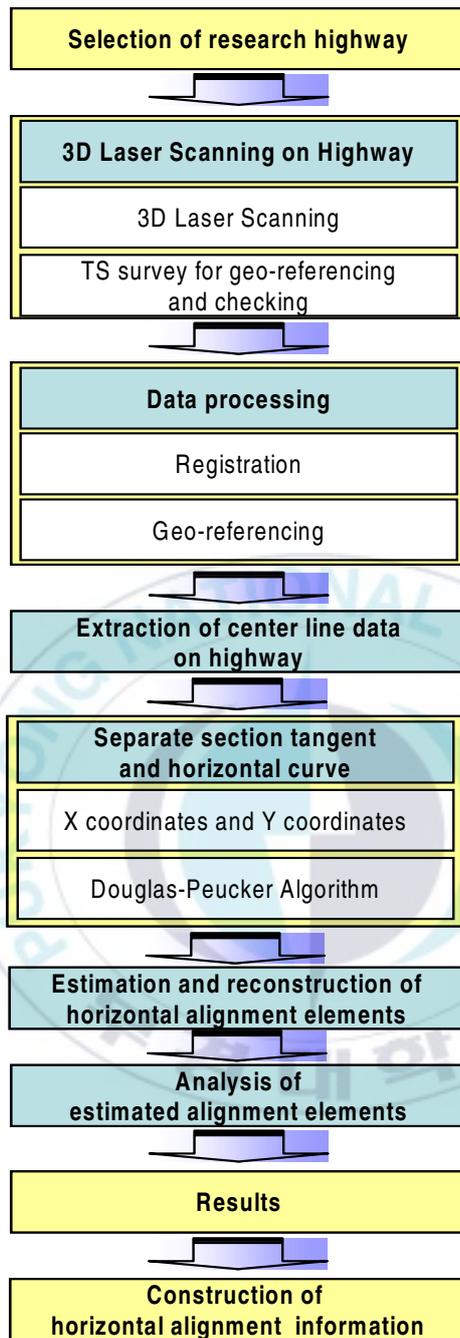


Figure 1.1 Flowchart of research

2. 3차원 레이저 스캐너 이론

2.1 레이저의 응용

2.1.1 레이저의 역사

레이저(LASER)는 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation이란 영어의 각 단어 머리글자를 따서 조합한 합성어로서 “유도 방출에 의한 빛의 증폭”이라는 뜻이며, 일반적으로 레이저광을 발생하는 장치를 지칭한다.

레이저의 동작원리는 1917년 Albert Einstein이 빛과 물질의 상호작용에 있어서 유도방출 과정이 있음을 이론적으로 보인 것이 시초이다. 그 후 1950년대 초반 Charles Hard Townes가 암모니아에서 마이크로파의 유도 방출이 실험적으로 가능함을 처음으로 보였다. 곧이어 가시광 영역에도 유도 방출에 의한 빛의 증폭이 가능함이 Charles Hard Townes와 Arthur L. Schawlow의 연구에서 밝혀졌고, 실제로 1960년 Hughes 연구소의 Theodore H. Maiman에 의해 가시광 영역인 694.3nm의 루비 레이저광이 최초로 발견되었다. 현재 여러 형태의 레이저가 등장하였으며, CD, DVD와 같은 음향영상장비, 프린터, 거리관측, 바코드 인식, 안과, 치과용 의료장비 등 다양한 용도로 사용되고 있으며, 레이저를 이용한 빛의 공연 등을 통해 예술 장르에도 활용하고 있다.

2.1.2 레이저의 발진 원리

모든 물질은 원자로 구성되며, 각 원자는 마치 작은 태양계와 같아 중심에 양전하를 가진 원자핵과 그 주위를 원운동하고 있는 음전하의 전자군

으로 구성되어 각자 에너지를 갖고 있다. 원자의 에너지 준위는 이들 전자의 상황에 따라 결정되는데, 전자가 원자핵에 가장 가까운 위치에 있을 때의 상태를 바닥상태(기저상태:ground state)라 하며, 원자에너지는 최저이며 가장 안정하다. 이 원자가 빛을 흡수하거나 다른 원자와 충돌하여 에너지를 받으면, 전자는 보다 바깥쪽의 궤도로 이동하게 된다. 즉 전자는 원래 상태보다 큰 에너지를 갖게 된다. 이러한 상태를 전자가 에너지를 얻어 들뜬상태(여기상태:excited state)에 있다고 하고, 이와 같이 전자나 원자에 에너지를 주는 것을 여기(pumping)라 한다.

보아의 진동수 조건에 따르면 원자의 천이주파수 또는 공진주파수 ν 는 두 에너지준위의 에너지 차에 의해 결정된다. 두 준위의 에너지를 각각 E_1 및 E_2 라 하면, 공진주파수는 식(2.1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad (2.1)$$

여기서, $h : 6.626 \times 10^{-34} \text{ J S}$

에너지준위 E_1 과 E_2 를 갖는 원자에 외부에서 진동수 ν 의 전자파를 입사시킬 때 원자는 진동수 ν 의 광에 공진하여 효율 좋게 그 광의 에너지를 흡수하고 에너지준위 E_1 에서 E_2 로 여기 된다. 이같이 광의 흡수는 원자와 공명하는 특정의 파장에서 일어나는 것이다. 이때의 전자파 상태를 에너지로 표현하면, 식(2.2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_2 - E_1 = h\nu \quad (2.2)$$

여기서, $h\nu$ 는 두 에너지준위 사이의 차 $E_2 - E_1$ 과 같은 크기가 된다. 이

$h\nu$ 의 에너지를 갖는 입자를 광자라 하는데, 광이 에너지를 갖는 양자역학적인 입자라고 생각하게 만드는 것이다. 그러므로 광은 광자의 집합체가 되고, 광의 흡수는 광자의 흡수라고 한다.

다음으로 들뜬 에너지준위 E_2 에 있는 원자는 일반적으로 불안정하고, 짧은 시간 안에 안정한 상태인 E_1 준위로 이동한다. 이때 여기에서 얻어진 여분의 에너지를 광자로 하여 외부에 방출한다. 이렇게 에너지 준위 E_2 에서 E_1 으로 원자의 상태가 변하는 것을 천이(transition)라 한다. 이 때 방출된 광자가 갖는 에너지는 당연히 준위 E_2 와 E_1 의 에너지 차에 상당하는 것으로 식 (2.2)에 의해 계산된다. 또 준위 E_2 에서 E_1 으로 천이는 완전히 자연적인 것인데 이를 자연천이라고 한다. 자연천이에 의한 광의 방출을 자연방출(spontaneous emission), 방출된 광을 자연광이라 하며, 이 자연방출광은 무수한 원자로부터 무질서하게 방출되어 위상도 파장도 고르지 못한 결 안맞는 광이다.

주파수 ν 인 전자파가 존재할 때, 원자는 E_1 에서 E_2 로 천이하고 그 과정에서 전자파로부터 에너지 $h\nu$ 의 광자를 흡수한다. 만일 원자가 준위 2를 채우고 있을 때 전자파가 증가하면, 역으로 준위 1로 향한 천이가 일어나고 에너지 $h\nu$ 의 광자를 방출한다. 다시 말해, 들뜬준위 2에서 자연천이가 일어나기 전, 즉 완화시간이전에 광자가 입사되면, 이 광자의 자극으로 일종의 공명현상을 일으키고, 원자는 준위 2에서 1로 천이한다. 이 때 주파수, 위상 및 편광이 모두 같은 광자를 방출하게 된다. 이것을 유도방출(stimulated emission)이라 하는데, 방출하는 전자파는 입사된 전자파와 일정한 위상관계를 갖는다.

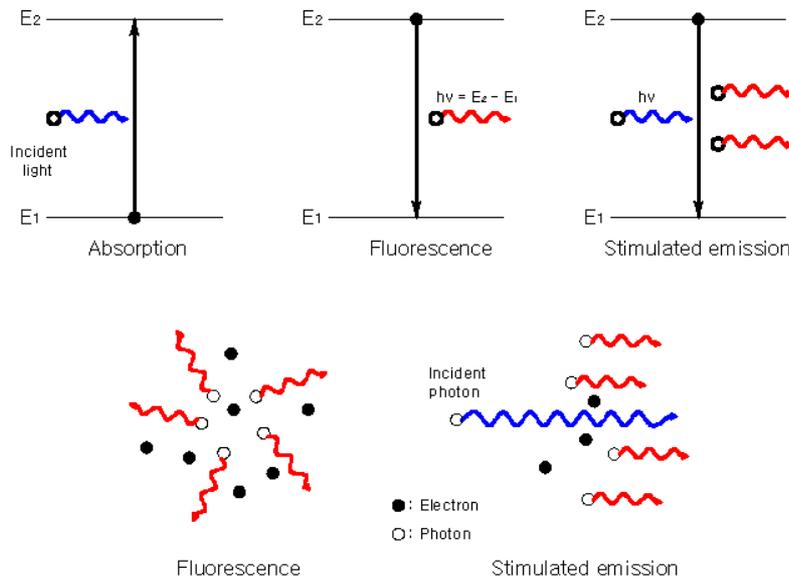


Figure 2.1 Interaction between incident light and energy level

결맞은 빛을 방출하기 위해서는 대부분의 빛을 자극에 의한 방출로 채워야 하고 이르기 위해서는 높은 에너지 준위에 있는 원자의 수를 많게 해야 한다. 이를 밀도반전(population inversion)이라고 한다. 물질이 이러한 밀도반전의 상태가 되면 수많은 높은 에너지 상태의 원자 중 한 개가 어찌다가 자발적으로 빛을 내는 순간 여기서 방출된 빛이 주변의 다른 들뜬 원자 하나를 자극하여 빛을 내게 하여 결국 두 개의 광자가 된다. 또 이 두개는 다른 두 원자를 자극하여 네 개가 되고, 이러한 연쇄적인 과정에 의해 기하급수적으로 결맞은 빛의 개수가 성장하게 된다. 이를 레이저 발진이라 한다. 이러한 일이 일어날 수 있도록 물질의 상태를 만드는 일은 바로 레이저를 가능하게 하는 관건이 된다.

그러나 통상적인 열적평형상태에 이렇게 밀도를 반전시키는 것은 불가능하다. 이용할 정도의 밝기의 빛을 내기 위해서는 이에 관여하는 원자의 수가 아보가드로 수 정도로 매우 많아야 하고, 따라서 에너지 준위 E_1 ,

E_2, E_3 등의 상태에 있을 확률은 그 에너지 값과 온도에 의해 결정된다. 온도 T 로 열적 평형상태에 있는 원자에서 E 의 에너지 준위에 있을 확률은 식(2.3)과 같다.

$$P(E) = Ce^{-E/kT} \quad (2.3)$$

여기서 k 는 볼츠만상수로 $k = 1.38 \times 10^{-23} J/K = 8.62 \times 10^{-5} eV/K$ 이고 C 는 전 에너지 준위에 대한 확률을 합하면 1이 되게 하는 상수이다. 이렇게 에너지 값이 커지면 그 확률이 지수 함수적으로 줄어들어야 한다는 것은 볼츠만(L. E. Boltzmann)이 열역학을 통계역학적인 관점에서 연구하여 알아낸 것이다. 이에 의하면 E_1 과 E_2 의 두 에너지 준위에 있는 원자 수의 비는 식(2.4)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-(E_2 - E_1)/kT} \quad (2.4)$$

따라서 온도가 올라가면 높은 에너지 준위에 더 많은 수의 원자가 있게 되고 온도도가 무한대가 되더라도 모든 에너지 준위의 원자 수는 그 에너지에 관계없이 같아지기만 하고 원하는 반전의 상황은 일어나지 않는다. 위 볼츠만의 관계식으로 반전이 되는 온도를 역지로 추정한다면 음의 온도상태이나 음의 온도는 있을 수 없다. 따라서 통상적인 원자의 에너지 준위사이에서는 반전이 결코 일어날 수 없고 특별히 어떤 원자에서 에너지 준위사이를 특이하게 전이가 선택적으로 일어나는 경우에는 가능해질 수 있다.

근본적으로 반전을 시키는 것은 불가능하며, 밀도반전을 실현하기 위해서는 어떤 방법으로 외부로부터 매질로 에너지를 공급할 필요가 있는데

이것을 펌핑(pumping)이라고 한다. 이와 같은 펌핑 방법에는 매질에 따라서 여러 종류가 있다. 빛을 조사하는 방법(광펌핑), 방전에 의한 전자충돌을 시키는 방법(전기적펌핑), 전류를 주입시키는 법(전류펌핑)등이 있다.

증폭만으로 레이저광을 연속적으로 뽑아내는 것, 즉 레이저 발진상태를 만드는 것은 불가능하다. 그래서 레이저에서 광을 공진시킬 수 있는 두 장의 평행한 거울이 필요한 것이다. 평행한 두 장의 거울로 구성된 것을 광공진기(optical resonator)라 한다. 이 두 장의 거울은 정면으로 마주보고 있으며 그 중 하나는 입사광을 전부 반사시키는 전반사경이고 다른 하나는 발진된 광을 내보내기 위해 입사광 중 일부는 통과시키는 거울로써 부분반사경이라 불리 운다. 마주한 두 거울 사이에 특별한 원자로 채워진 물체가 있는데 이것은 두 거울 사이를 왕복하는 빛이 유도과정으로 증폭되어 쉰 빛이 되도록 하는 광증폭기(optical amplifier)라하며 증폭기가 광의 증폭이 가능하도록 외부에서 에너지를 가하는 장치인 펌프(pump)가 있다. 이 세 가지는 특별한 경우를 제외하고는 거의 대부분 레이저에 있어서 공통적인 요소들이며, Figure 2.2로 설명될 수 있다.

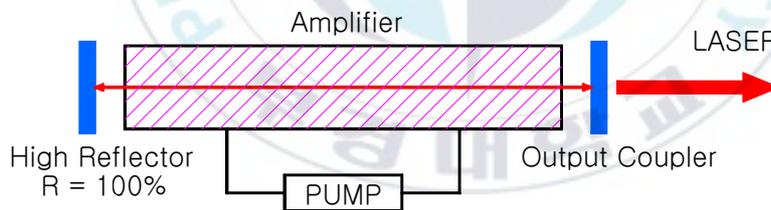


Figure 2.2 Principle of laser oscillator

레이저의 종류는 증폭기의 상태에 따라 기체레이저, 액체레이저, 고체레이저, 반도체레이저의 네 가지로 분류하는데 기체레이저에 속하는 것으로는, He-Ne 레이저, CO₂ 레이저, Ar 레이저 등이 있고 액체레이저로는 염

료(dye)를 알콜, 에칠렌그리콜 등과 같은 용매에 녹여서 증폭기로 쓰는 색소 레이저(dye laser)가 있으며, 루비(ruby)레이저, nd:YAG레이저 등은 대표적인 고체 레이저이다. 반도체 레이저는 요즘 응용도가 많은 GaAlAs 등이 있다.

2.1.3 레이저의 특징

다른 모든 광원과 비교한 레이저광의 특징은 가간섭성(coherence)라는 한마디로 설명될 수 있다. 가간섭성은 대단히 높은 규칙성, 즉 시간적 및 공간적으로 예측할 수 있는 성질을 말한다.

만약에 어떤 광원의 빛이 시간과 공간영역에서 완전한 가간섭성을 가지면, 임의의 한 점에서의 전계의 변화와 다른 점에서의 변화사이에는 대단히 높은 상호관계가 있게 된다. 이 두 점에서의 전계의 변화를 한번 측정하고 나면, 임의의 시간이 지난 후에도 첫 번째 점의 전계측정으로 두 번째 점의 전계를 완전히 알 수가 있다. 이러한 시간 및 공간영역에서의 완벽한 가간섭성은 단색광에서만 얻을 수 있다. 단색광의 전계강도는 식(2.5)로 표시할 수 있다.

$$E(x, y, z) = A(x, y, z) \cos [ut + \theta(x, y, z)] \quad (2.5)$$

여기서 $\theta(x, y, z)$ 는 공간적으로 변하는 위상이다. 공간의 한 점에서의 전계는 각주파수 w 를 갖고 정현적으로 변한다. 따라서 위치의 함수인 A 와 θ 를 알면, 임의의 시간 t 에서 공간의 모든 점의 E 를 알 수 있다. 대단히 높은 가간섭성을 갖는 광파에서는 A 와 θ 를 알 수 있다.

레이저는 이러한 가간섭성이 다른 광원에 비해서 대단히 높고 유도방출에 의한 빛이기 때문에 백열전구나 형광등, 태양광 등의 일반적인 빛과는 다른 독특한 성질인 단색성, 지향성, 간섭성을 띄고 있다.

첫째, 단색성(monochromatic)이란 통상의 광원은 넓은 파장 범위의 빛이 나오는 데 비하여 레이저 광은 단일 파장의 빛만이 방출된다. 프리즘 또는 회절격자를 통과시켜 분광시켜볼 때, 통상의 광원은 무지개와 같이 여러 색깔의 빛으로 분리되어 나타나는 데 반하여 레이저의 빛은 프리즘을 통과하여도 원래의 색과 같게 보인다는 것이다.

둘째, 지향성(directional)이란 보통의 빛은 모든 방향으로 고루 퍼지는데 반하여 레이저로부터의 빛은 일정한 방향으로만 진행되는 광선으로 나타난다. 레이저 광선을 달 표면에 비추었을 때 달 표면에서의 광선의 직경이 수 미터에 불과하다고 한다.

셋째로 간섭성(coherent)이란 백열등에서 볼 수 없는 성질로 백열등에서 나오는 빛을 선속 분할기로 나눈 다음 중첩시키면, 스크린 상에 간섭무늬가 생기지 않으나 레이저 광에서는 밝고 어두운 띠 모양의 간섭무늬를 볼 수 있는 것으로 레이저 광은 파장과 위상이 매우 일률적이고 구분되는 광파라는 것이다.

2.2 레이저를 이용한 거리측정

레이저 스캐닝은 이동(rotating 또는 sweeping)거울에 의한 레이저의 방향, 객체의 표면에서 레이저빔의 반사, 그리고 레이저빔의 수신으로 설명할 수 있다.(Schulz 등, 2004) 레이저를 이용한 거리측정 방식에 따라 TOF 방식, 위상차방식, Triangulation방식 등으로 분류될 수 있으며, 각 방법에 따른 관측가능거리와 정확도는 다르다. Table 2.1은 각각의 측정방식에 따른 관측가능거리와 정확도를 나타낸다.

Table 2.1 Classification of 3D laser scanners

Measurement system	Range(m)	Range accuracy(mm)
Time of Flight	~ 1000	> 10
Phase shift	< 100	< 10
triangulation	< 10	< 1

2.2.1 TOF 방식

TOF(Time-of-flight) 방식은 레이저를 발사하여 반사되어 오는 시간적인 차이로 거리를 계산하며, 레이저 송신부, 수신부, 처리부로 구성되어 있다. Figure 2.3에서 송신과 수신사이의 경과시간 Δt 는 $t_2 - t_1$ 의 식으로 계산되어질 수 있다. 여기서 t_1 은 송신된 주파수가 f_1 에서 f_2 로 변할 때의 시간이며, t_2 은 수신된 주파수가 f_1 에서 f_2 로 변할 때의 시간이다. 따라서 경과된 시간에 빛의 속도(c)를 곱하면 왕복거리가 산출되며, 측정대상물까지의 거리는 식(2.6)과 같다.

$$d = \frac{c \times (t_2 - t_1)}{2} \quad (2.6)$$

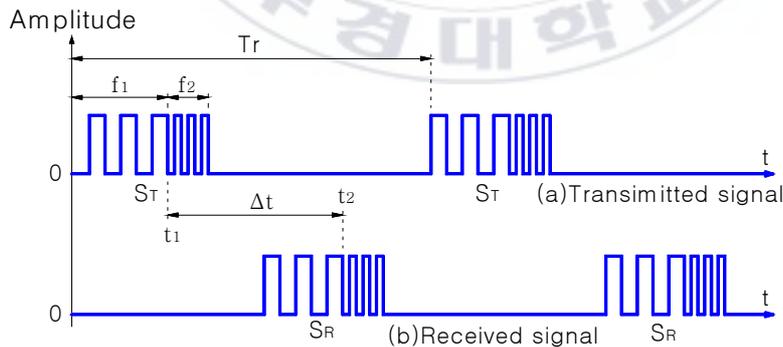


Figure 2.3 Transmitted signal and received signal

2.2.2 위상차 방식

주파수가 다른 파를 동시에 발산하여 생성된 두 파의 위상변위는 거리와 시간에 따라(1p)로 시작하여 점진적으로 큰 위상변위를 생성한다. 동일한 거리에서 두 신호를 검출하고 두 파의 출발시간을 알면 위상변위(np)는 (1p)로 나누어 질 수 있다. 측정된 위상변위를 발생하기 위해 생성된 파의 수와 일정한 속도가 주어진다면, 측정거리는 계산될 수 있으며, 이러한 관계는 Figure 2.4에서 볼 수 있다.

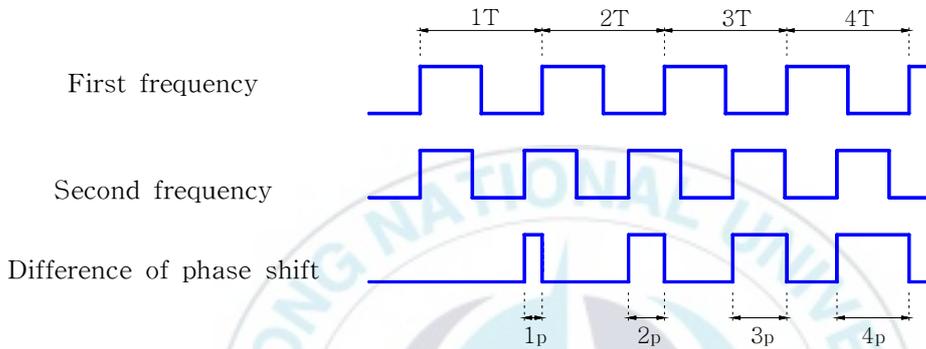


Figure 2.4 Description of phase shift

위상변위의 검출은 두 개의 연속파(TFCW:Two Frequency Continuous Wave)에 기반을 두고 있다. 아래에는 TFCW에 대한 방법을 설명하고 있다. 첫 번째 주파수(f_1)의 연속파가 송출된다. 송수신 신호에서 처음의 위상변위(ϕ_1)은 수치화된 위상정보로부터 계산된다. 처음 보내진 파의 송신/수신/계산이 완료되면 두 번째 주파수(f_2)의 연속파가 송신되고 위상변위(ϕ_2)가 계산된다. 두 위상변위의 비교를 통하여 거리는 다음 식(2.7)과 식(2.8)으로 계산될 수 있다.

$$d = \left(n_1 + \frac{\phi_1}{2\pi} \right) \times \lambda_1 \quad (2.7)$$

$$d = \left(n_2 + \frac{\phi_2}{2\pi} \right) \times \lambda_2 \quad (2.8)$$

여기서, d 는 관측거리이며, λ 는 파장, n 은 정수, ϕ 는 위상변위이다. 두 파의 파장이 다르기 때문에 위상변위에 대한 차이는 식(2.7)과 식(2.8)에 의해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$d = \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) = \frac{\Delta\phi}{2\pi} \quad (2.9)$$

여기서 모호정수 n 은 오직 $n_1 = n_2$ 이거나 $n_1 = n_2 + 1$ 의 2가지 값을 가진다. 그래서 위상변위의 차이는 다음의 알고리즘으로 정의 할 수 있다.

$$\phi_1 > \phi_2 \text{이면, } \Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$$

$$\phi_1 < \phi_2 \text{이면, } \Delta\phi = \phi_1 + 2\pi - \phi_2$$

빛의 속도는 일정하기 때문에

$$\lambda_2 = \frac{c}{f_2}, \quad \lambda_1 = \frac{c}{f_1} \quad (2.10)$$

이 된다. 따라서 측정거리 d 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$d = \frac{\Delta\phi}{2\pi} \times \frac{c}{\Delta f} \quad \Delta f = f_1 - f_2 \quad (2.11)$$

위의 식은 식(6)과 유사하다. 최대의 변이가 주파수차이(Δf)의 한 구간을

초과하지 않는다면 관측거리 d 는 위상변위의 차이($\Delta\phi$)로 유일하게 결정된다. 하지만 위상의 모호성이 발생할 수 있으므로, 최소 해상력과 최대 측정범위는 주파수 선택에 의해 결정된다.

2.2.3 삼각측량법

삼각측량법은 일반적으로 공간관계를 결정하기 위해 사용되는 기술이며, 지도 제작법이나 GPS측위에 사용된다. 또한, 렌즈를 통한 센서에 의해 레이저 점이 관측되는 능동형 센서기술로 알려져 있다. 센서에서 레이저 점의 위치는 삼각측량법을 이용하여 결정하며, 객체표면위치와의 관계를 결정할 수 있다(William 등, 1996, 1998).

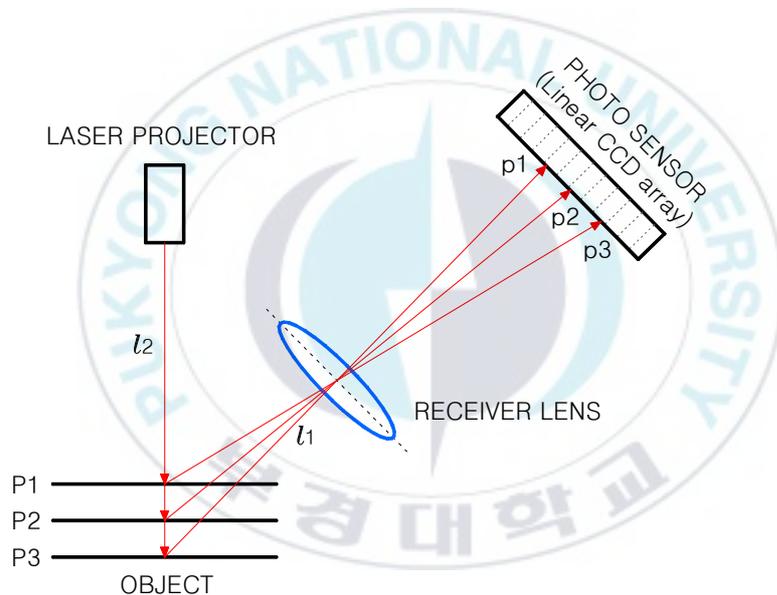


Figure 2.5 Geometric structure of triangulation

Figure 2.5에서 나타낸 것과 같이 레이저빔은 객체에 발사되며 센서는 반사된 레이저를 수신 받게 된다. 센서와 레이저주사장치는 이들과 관계한 좌표체계를 가지고 있다. 센서와 레이저주사장치사이의 거리는 기선으로 정의된다. 레이저가 객체의 3차원 점 P에 도달하면 발산이 되고, 센서는

객체의 3차원 점 P를 p로 인식하게 된다. 여기서 센서의 초점거리, 화소크기, 카메라 주점위치 등과 같은 calibration matrix(Ma 등, 2003)를 알 수 있다면 점P는 l_1 의 선상에 놓여 있다는 것을 알 수 있다. 또한 주사기와 센서 사이의 6 DOF(degree of freedom) 변환과 주사기 좌표계와 관계한 레이저빔 광선을 알 수 있다면 센서좌표계에 상응하는 레이저빔 광선 l_2 을 그려낼 수 있다. 따라서 l_1 와 l_2 을 교차함으로서 점 P의 3차원 좌표를 결정할 수 있다.

2.3 3차원 레이저 스캐닝의 특징

3차원 레이저 스캐닝 기술은 다양한 분야에서 대상물의 3차원 재현과 모델링에 대한 관심이 증대되면서 사진측량기술과 더불어 새로운 측량기술로 발전하고 있다. 두 시스템간의 가장 큰 차이점은 Table 2.2에 나타낸 것과 같이 수동형 센스와 능동형 센서의 사용이다. 사용하는 센서의 차이와 이로 인한 자료의 취득에서 처리까지의 방법, 자료의 형태 등이 모두 상이하다(Guarnieri 등, 2004; 오윤석, 2005).

Table 2.2 Comparison of photogrammetry and 3D laser scanning

Item	Photogrammetry	3D Laser Scanning
Sensor	passive sensor	active sensor
Data	image(analogue/digital)	3D point cloud
Band	multi	single
Advantages	very portable system	fast acquisition of a huge of 3D data
	wide availability of commercial processing/modeling software	recording of intensity and color data
Disadvantages	time consuming	data handling
	(semi-automated measurement)	edges
	image resolution	noise

2.4 다중 스캔 자료의 정합

하나의 대상물을 대상으로 취득된 다중 점군 자료는 3차원 공간상의 상대적인 위치정합에 관련한 정합(registration) 과정과 3차원 모델좌표를 대상물의 절대좌표로 변환하는 지리참조(geo-referencing) 과정을 거치게 된다. 정합은 Figure 2.6에 나타낸 것과 같이 서로 다른 스캔 방향에서 측정된 다중 점군 자료를 형상적으로 서로 공통되는 부분의 거리 차이를 이론적으로 0에 가깝게 하는 상대 위치를 계산하는 과정이다.

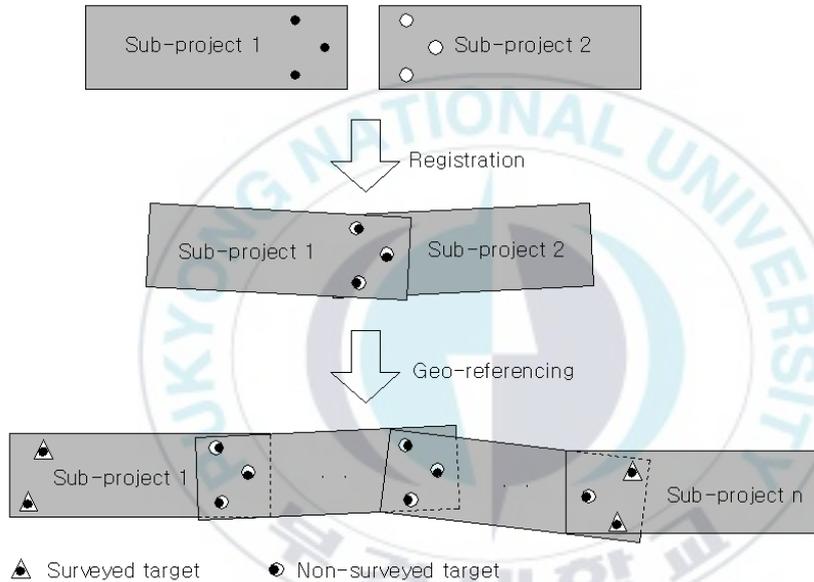


Figure 2.6 Principle of registration and geo-referencing

이는 연속된 두 개의 점군 자료가 동일 좌표계를 형성할 수 있도록 좌표변환을 실시하는 과정이며, 3차원 공간상의 회전 요소에 의해 결정되어진다. 정합 과정을 거쳐 동일 좌표계를 형성한 다중 스캔 자료들은 Figure 2.6에 나타낸 것과 같이 지리참조 과정을 통해 지상 기준점과 결합되어 대상물의 절대좌표로 변환된다.

3. 도로 선형의 구성요소 추출

도로의 선형은 평면선형 및 종단선형으로 구성되며, 선형설계 시에는 평면선형과 종단선형의 연계를 고려하여 적절한 크기의 선형요소를 갖는 도로중심선을 결정하여야 한다. 그러나 도로의 특정구간에서 교통사고 발생률이 평균값 이상으로 높으면, 도로의 선형에 불합리한 요소가 반영된 것으로 판단할 수 있다(이중출, 2001).

또한 기존 도로의 설계도가 분실 또는 훼손되었거나, 최근 발생하는 각종 재난으로 인해 도로가 유실된 경우 도로 선형의 개량 또는 복원이 필요하다. 이를 위해서는 도로 중심선의 정확한 3차원 위치정보의 획득이 선행되어야 하며, 획득된 위치정보를 이용하여 도로 선형의 구성요소를 추출해야만 한다.

본 장에서는 도로 선형에 있어서 평면선형 및 종단선형에 관련한 설계 요소에 대해 설명하고, 3차원 레이저 스캐너에 의해 취득된 점군 자료를 이용하여 도로의 선형을 추출하는 알고리즘에 대해 기술하였다.

3.1 직선 및 곡선구간 자동분리 알고리즘

도로 선형에 있어서 평면선형은 직선, 완화곡선, 원곡선으로 구성되며, 종단선형은 직선과 곡선으로 구성된다. 이러한 도로 선형의 구성요소를 추출하기 위해서는 평면선형에서의 IP(intersection point) 위치와 종단선형에서의 VPI(vertical point of intersection) 위치가 우선 결정되어야 하며, 이를 위해 직선 및 곡선구간의 분리가 선행되어야 한다.

3차원 레이저 스캐너에 의해 취득된 점군 자료는 점밀도가 매우 높으므로, 방대한 양의 도로 중심선 자료를 이용하여 도로 선형의 구성요소를

추출하기 위해서는 선형 자료의 일반화가 필수적이다.

일반화와 관련된 주요 알고리즘은 여러 응용분야에서 개발된 것으로, 이들 알고리즘은 간단히 기하학적 성질을 이용한 것부터 플랙탈 차원을 이용한 다양한 알고리즘이 개발되었다(김감래 등, 1996).

본 연구에서는 선형 자료의 일반화 전·후의 데이터에 의한 선형의 기하학적 특성에 큰 영향을 주지 않고, 자료의 처리속도를 크게 줄일 수 있는 Douglas-Peucker 알고리즘을 이용하여 선형을 일반화하였다(정의환, 2004).

Douglas-Peucker 알고리즘은 선형사상을 구성하고 있는 전체 점들을 동시에 고려하는 전역적 단순화 기법으로써 단순화 정도를 결정하는 최소 기준치의 임계띠(tolerance band, ϵ)를 설정하여 필요 없는 점들을 제거하는 방식의 알고리즘이다(Douglas, D.H. et al, 1973).

Douglas-Peucker 알고리즘의 절차는 다음과 같다. 먼저 양 끝점을 이은 선분의 양쪽에 최소기준치 만큼의 임계띠를 씌우고, 중간에 있는 모든 점들과 선분에 내린 수선의 길이를 비교하여 그 최대길이를 갖는 점을 구한다. 그 점이 임계띠 외부에 존재할 경우, 최소기준치를 초과하므로 제거되지 않으며, 스택(stack)에 저장된다. 다음 단계에서 임계띠는 저장된 점을 유동점으로 양 끝점과의 사이에 걸쳐지고 전 단계의 작업을 반복하여 최대 수선길이를 갖는 점을 구하고 stack에 저장한다. 이와 같은 방법으로 임계띠가 계속 이동하면서 임계띠 외부에 해당되는 점들을 찾아 stack에 저장한다. 이렇게 탐색이 진행되면서 부동점과 유동점사이에 중간점이 없거나 중간점들이 모두 최소기준치 미만인 경우 stack에 저장된 점을 유동점으로 이용하게 된다. 결국 stack에 저장된 점들은 일반화가 진행된 후의 최종 선형을 이루는 점들만 남게 되어 선형 단순화가 이루어지게 된다.

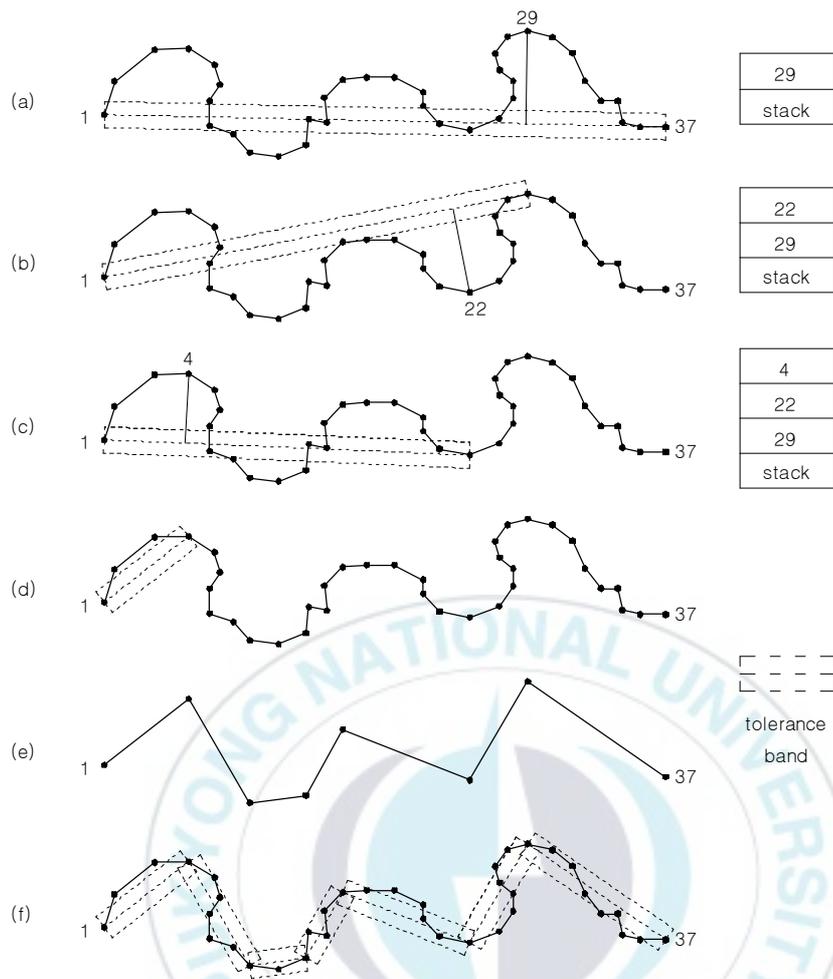


Figure 3.1 Douglas-Peucker algorithm

Douglas-Peucker 알고리즘의 계산과정은 Figure 3.1과 같이 나타낼 수 있다. (a)에서 점 1을 부동점으로, 점 37을 이동점으로 하여 임계띠를 씌우고, 중간에 있는 모든 점들(2~36)에서 점 1과 점 37을 연결한 선분에 내린 수선의 길이를 구한다. 각 수선의 길이를 비교하여 최대 길치를 갖는 점 29를 구한다. 점 29는 임계띠 외부에 존재하므로 제거되는 점에서 제외되며 stack에 저장된다. (b)에서 임계띠는 점 29를 유동점으로 점 1과 점 29사이에 걸쳐지고, 전 단계의 작업을 반복하여 최대 수선길이를 갖는 점

22를 구한다. 점 22도 임계치 외부에 존재하므로 제거되는 점에서 제외되며 stack에 저장한다. (c)에서 점 22를 유동점으로 하여 계산하여, 임계치 외부에 존재하는 최대수선길이를 갖는 점 4를 stack에 저장한다. (d)에서 점 4를 유동점으로 하여 계산하면, 모든 수선의 길이가 임계치 범위내에 있으므로 점 2, 3을 제거한다. 부동점과 유동점 사이의 모든 점들이 삭제되었으므로, 유동점을 부동점으로 하고 stack에서 새로운 유동점 22를 불러온다. 이와 같은 방법으로 계속 계산해 가면 (e)에서 나타나는 최종 선형을 얻을 수 있다. (f)는 Douglas-Peucker 알고리즘에 의한 일반화 처리 과정에서 부동점과 유동점 사이의 모든 점들이 임계치 내부에 있는 경우를 나타낸 것이다.



Figure 3.2 Effect of Douglas-Peucker algorithm

Douglas-Peucker 일반화 알고리즘을 적용하여 도로 중심선을 단순화하면 Figure 3.2와 같이 직선구간에서는 같은 직선상에 있는 절점들이 제거되면서 세그먼트의 간격이 넓어지고 곡선구간에서는 세그먼트의 간격이 상대적으로 좁게 형성된다(김성민, 2004).

Douglas-Peucker 알고리즘을 이용하여 일반화하는 프로그램의 흐름도는 Figure 3.3과 같다.

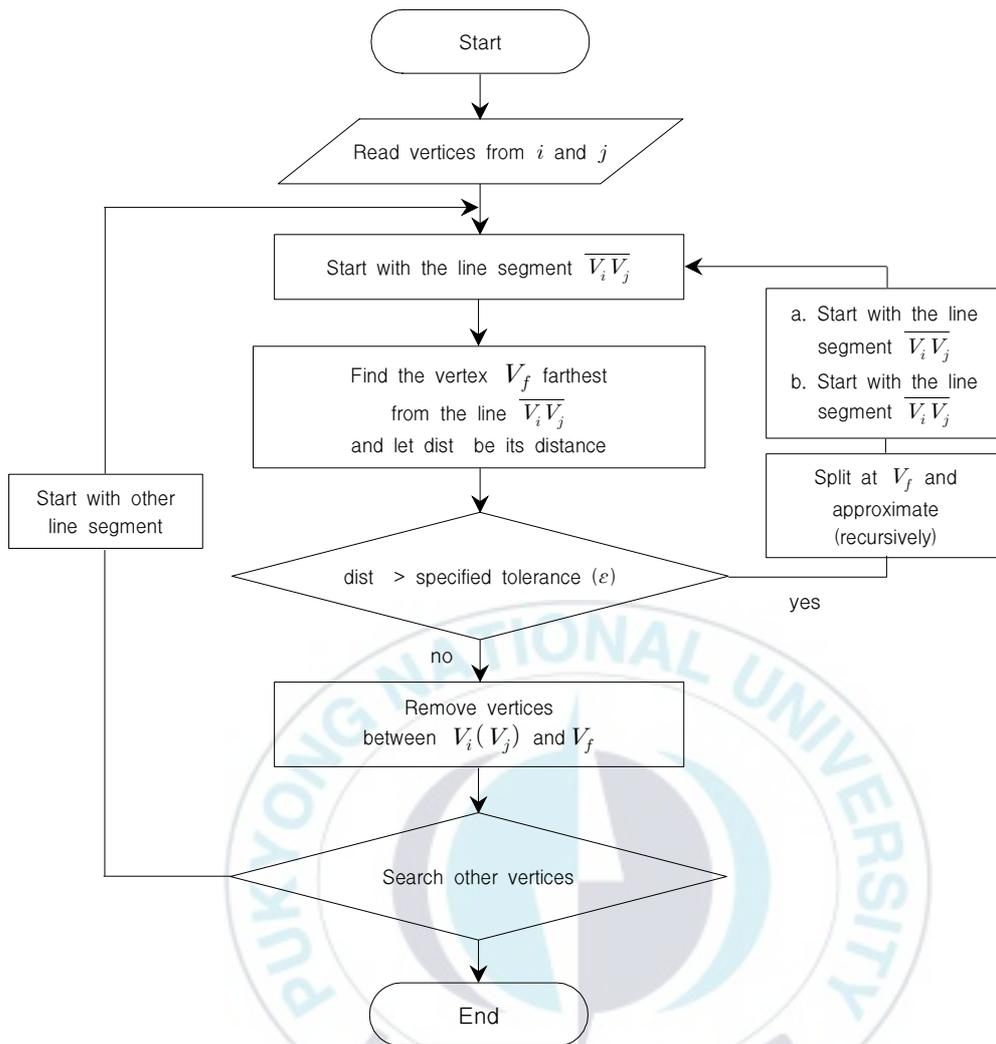


Figure 3.3 Flowchart of Douglas-peucker algorithm

3.2 평면선형 설계요소 추출

도로의 평면선형은 도로의 사용성 측면에서 직접적으로 영향을 미치며, 특히 평면선형의 양부는 주행의 안전성과 직접 관련된다. 평면선형 설계요소에는 직선, 원곡선, 완화곡선의 3 종류가 있으며, 완화곡선에서도 여러 종류가 있으나 도로 설계에서는 자동차의 주행궤적과 형상이 비슷한 클로

소이드 곡선을 주로 사용하고 있다.

평면선형 설계요소를 추출하기 위해서는 1) IP 위치 결정, 2) 원곡선의 반경(R) 결정, 3) 완화곡선의 길이(L) 및 파라미터(A)의 결정이 순차적으로 이루어져야만 한다.

3.2.1 최소제곱선 결정

도로 중심선에 관련한 점군 자료를 이용하여 평면선형의 구성요소를 추출하기 위해서는 IP(intersection point) 위치가 결정되어야 하며, 이를 위해서는 표본관측치 (x_i, y_i) 를 이용한 2개의 표본회귀선의 결정이 우선시 된다.

본 연구에서는 최소제곱법을 이용하여 IP 결정을 위한 두 개의 표본회귀선을 결정하였다. 최소제곱법을 행렬로 표시할 때의 정규방정식은 식 (3.1)과 같다.

$$X^T \cdot Y = X^T \cdot X \cdot B \quad (3.1)$$

여기서,

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ 1 & x_n \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ y_n \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}$$

여기서, X^T : X 의 전치행렬

x_1, x_2, \dots, x_n : 관측된 x 값

y_1, y_2, \dots, y_n : 관측된 y 값

b_1, b_2 : 미지수

미지수 행렬 B 는 식 (3.2)에 의하여 구할 수 있다.

$$B = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y \quad (3.2)$$

취득된 두 개의 직선구간 자료를 식 (3.2)에 대입하면 식 (3.3)과 식 (3.4)와 같이 두 개의 최소제곱선이 결정되어진다.

$$Y = b_{21} \cdot X + b_{11} \quad (3.3)$$

$$Y = b_{22} \cdot X + b_{12} \quad (3.4)$$

식 (3.3)과 식 (3.4)를 연립하면 식 (3.5)와 같이 교점의 좌표 (X_{IP}, Y_{IP})를 계산할 수 있다.

$$X_{IP} = -\frac{b_{11} - b_{12}}{b_{21} - b_{22}}, \quad Y_{IP} = -\frac{b_{11} - b_{21}}{b_{21} - b_{22}} \cdot b_{21} + b_{11} \quad (3.5)$$

$$\text{or } Y_{IP} = -\frac{b_{11} - b_{21}}{b_{21} - b_{22}} \cdot b_{22} + b_{12}$$

3.2.2 원곡선의 반경 결정

도로의 원곡선 구간에서는 설계속도와 편경사에 따라 Figure 3.1과 같이 최소곡선반경을 정하고 있으며, 이는 직선 및 완화곡선 구간과 조화를 이루어야만 한다.

Table 3.1 Plane curve radius

Design speed (km/hr)	Minimum radius of circular curve (m)		
	Maximum superelevation		
	6%	7%	8%
120	710	670	630
110	600	560	530
100	460	440	420
90	380	360	340
80	280	265	250
70	200	190	180
60	140	135	130
50	90	85	80
40	60	55	50
30	30	30	30
20	15	15	15

원곡선의 반경(R)은 도로 선형의 설계에 있어서 가장 중요한 요소로써, 완화곡선의 제원을 결정하기 위해서는 직선구간의 표본회귀선과 함께 원곡선의 반경이 결정되어야만 한다. 본 연구에서는 최소제곱원리를 이용한 LSC(least square circle) 기법을 이용하여 원곡선에 관련한 다중회귀 방정식을 결정하였다.

원곡선 구간의 중심선 좌표를 (x_i, y_i) 로 하고, 원곡선의 중심 좌표 및 반경을 (a, b) 와 r 로 하는 원곡선의 방정식은 식 (3.6)과 같다.

$$(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 = r^2 \quad (3.6)$$

식 (3.6)을 원곡선에 관련한 최소제곱법에 적용하면 식 (3.7)과 같이 잔차의 제곱합(I)으로 나타낼 수 있으며, 이를 전개하면 식 (3.8)과 같다.

$$I = \sum_{i=1}^n [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2]^2 \quad (3.7)$$

$$I = \sum_{i=1}^n [x_i^2 + y_i^2 - 2ax_i - 2by_i + a^2 + b^2 - r^2]^2 \quad (3.8)$$

식 (3.8)에 $A = -2a$, $B = -2b$, $C = a^2 + b^2 - r^2$ 을 적용하면

$$I = \sum_{i=1}^n [x_i^2 + y_i^2 + Ax_i + By_i + C]^2 \quad (3.9)$$

이고, 식 (3.9)를 각 항에 대해 편미분하면 식 (3.10)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial I}{\partial A} &= 2 \sum_{i=1}^n [x_i^2 + y_i^2 + Ax_i + By_i + C][x_i] \\ \frac{\partial I}{\partial B} &= 2 \sum_{i=1}^n [x_i^2 + y_i^2 + Ax_i + By_i + C][y_i] \\ \frac{\partial I}{\partial C} &= 2 \sum_{i=1}^n [x_i^2 + y_i^2 + Ax_i + By_i + C][1] \end{aligned} \quad (3.10)$$

또한 식 (3.10)은 식 (3.11)과 같은 행렬식으로 나타낼 수 있으며,

$$\begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n (x_i^2) & \sum_{i=1}^n (x_i * y_i) & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n (x_i * y_i) & \sum_{i=1}^n (y_i^2) & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i & n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sum_{i=1}^n (x_i^3) - \sum_{i=1}^n (x_i * y_i^2) \\ -\sum_{i=1}^n (y_i^3) - \sum_{i=1}^n (x_i^2 * y_i) \\ -\sum_{i=1}^n (x_i^2) - \sum_{i=1}^n (y_i^2) \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

여기서, x_i, y_i : 원곡선 구간의 중심선 좌표

n : 원곡선 구간의 중심선 측정 개수

최종적으로 결정된 미지수 A, B, C 를 이용하여 원곡선의 중심 좌표 (a, b) 및 반경(r)을 결정할 수 있다.

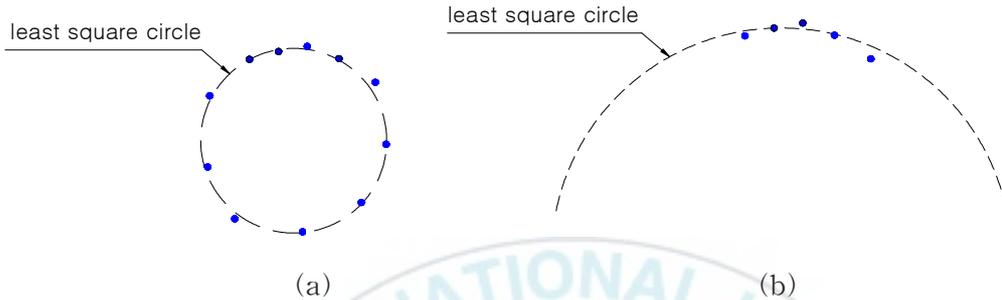


Figure 3.4 Error of least square circle

그러나 Figure 3.4(a)와 같이 원곡선 구간의 중심선 자료의 분포가 양호한 경우에는 LSC 기법의 결과가 비교적 정확하게 결정되지만, 그 분포가 Figure 3.4(b)와 같이 편중된 경우에는 원곡선의 반경(r)의 크기가 매우 크게 결정되므로 신뢰할 수가 없다. 따라서 본 연구에서는 식 (3.11)과 같이 LCS 기법에 의해 결정된 원곡선의 중심 좌표(a, b)와 원곡선 구간의 중심선 좌표(x_i, y_i)간의 길이를 평균하여 원곡선의 반경을 최종적으로 결정하였다.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (\sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2})}{n} \quad (3.12)$$

여기서, R : 원곡선의 반경

x_i, y_i : 원곡선 구간의 중심선 좌표

a, b : 원곡선의 중심 좌표

n : 원곡선 구간의 중심선 측점 개수

3.2.3 완화곡선길이 및 파라미터 결정

평면곡선부에는 곡률이 서서히 변화하고 직선과 원곡선을 매끄럽게 연결할 수 있는 완화곡선이 필요하며, 설계속도가 60km/hr 이상인 도로의 곡선부에는 Table 3.2에 나타낸 것과 같이 완화곡선을 설치해야만 한다.

Table 3.2 Length of transition curve in compliance with design speed

Design speed (km/hr)	Minimum length of transition curve (m)
120	70
110	65
100	60
90	55
80	50
70	40
60	35

완화곡선에서도 여러 종류가 있으나 도로 설계에서는 자동차의 주행궤적과 형상이 비슷한 clothoid 곡선을 주로 사용하고 있다. 클로소이드 완화곡선의 파라미터(A)의 크기는 접속하는 원곡선의 반경(R)의 크기와 균형이 필요하며, 그 크기의 상한은 실용성을 고려하여 1,000m이하로 하는 것이 바람직하다. 또한 직선과 원곡선 사이에 완화곡선을 설치할 경우에는 직선과 원곡선을 직접 접속하는 경우에 비하여 Figure 3.5에서와 같이 이정량(ΔR)을 고려해야만 한다.

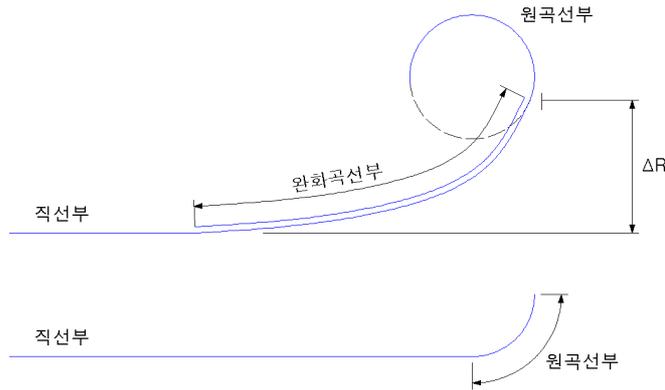


Figure 3.5 Shift of transition curve

본 연구에서는 이미 결정된 원곡선의 반경(R)과 이정량(ΔR)을 이용하여 평면선형의 중요 설계요소인 완화곡선의 파라미터(A)와 완화곡선의 길이(L)를 결정하였다.

이정량(ΔR)은 이미 결정된 원곡선의 중심 좌표(a, b)에서 식(3.3)과 식(3.4)에 나타낸 두 개의 최소제곱선에 내린 수선의 길이(l)와 원곡선의 반경(R)의 차이로 설명될 수 있다.

$$\Delta R_1 = \sqrt{\left(\frac{b_{21} \cdot b - b_{21} \cdot b_{11} + a}{b_{21}^2 + 1} - a\right)^2 + \left(\frac{b_{21}^2 \cdot b + b_{21} \cdot a + b_{11}}{b_{21}^2 + 1} - b\right)^2} - R \quad (3.13)$$

$$\Delta R_2 = \sqrt{\left(\frac{b_{22} \cdot b - b_{22} \cdot b_{12} + a}{b_{22}^2 + 1} - a\right)^2 + \left(\frac{b_{22}^2 \cdot b + b_{22} \cdot a + b_{12}}{b_{22}^2 + 1} - b\right)^2} - R \quad (3.14)$$

여기서, ΔR_1 과 ΔR_2 는 원곡선의 시점부와 종점부에서의 이정량이다. 또한 각각의 이정량은 식(3.15)와 식(3.16)과 같이 원곡선의 반경(R)과 시·종점부의 완화곡선의 길이(L)의 관계식으로 산정할 수 있다.

$$\Delta R_1 = \frac{1}{24} \cdot \frac{L_1^2}{R} \quad (3.14)$$

$$\Delta R_2 = \frac{1}{24} \cdot \frac{L_2^2}{R} \quad (3.15)$$

위의 두 식을 단위 클로소이드 곡선의 요소로 전개하면 식 (3.16)과 식 (3.17)과 같다.

$$l_1 = \left(24 \times \frac{\Delta r_1}{r}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (3.16)$$

$$l_2 = \left(24 \times \frac{\Delta r_2}{r}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (3.17)$$

여기서, l_1, l_2 : 시·중점부에서의 단위 clothoid 곡선의 길이

$\Delta r_1, \Delta r_2$: 시·중점부에서의 단위 이점량

r : 단위 clothoid 곡선에서의 곡선반경

이렇게 결정된 시·중점부에서의 단위 클로소이드 곡선의 길이를 이용하여 식 (3.18)과 식 (3.19)에 의해 완화곡선의 파라미터(A)가 결정된다.

$$R \cdot l_1 = A_1 \quad (3.18)$$

$$R \cdot l_2 = A_2 \quad (3.19)$$

최종적으로 아래의 식들에 의해 완화곡선의 길이(L)이 결정되어진다.

$$L_1 = \frac{A_1^2}{R} \quad (3.20)$$

$$L_2 = \frac{A_2^2}{R} \quad (3.21)$$



4. 레이저 스캐닝 및 도로중심선자료 추출

4.1 연구대상지 선정

본 연구는 3차원 레이저 스캐너를 이용하여 도로의 평면 및 종단선형 요소를 추출하기 위한 것으로 선형요소가 잘 나타난 도로를 연구대상도로로 선정하였다. 연구대상도로는 국도 4호선 OO~OO간 도로 4차로 확장공사 구간 내 직선, 완화곡선, 원곡선 및 종단곡선 요소를 모두 포함한 약 1km의 구간이다. 공용예정일이 2006년 후반으로 아직 차량의 유출입이 없어 레이저 스캐닝을 하기에 적합하며, 강성포장으로 시공되어있어 연성포장에 비해 레이저의 반사강도가 뛰어나 이로 인한 스캔 데이터의 취득률도 높다. Figure 4.1의 (a)는 IRS 위성영상으로 나타낸 대상지역의 위치를 나타내며 (b)는 강성포장으로 설계된 연구대상도로의 일부분을 나타낸다.



(a) Location of test field

(b) View of test field

Figure 4.1 Highway on test field

4.2 관측 시스템의 구성

지상 기준점 및 검사점을 측정하기 위하여 사용된 TS는 Sokkia사에서 제작된 SET 230RK3을 사용하였다. 무 프리즘 모드에서 최대 350m의 거리측정이 가능하며 그 형상은 Figure 4.2에서 볼 수 있으며, 장비의 제원은 Table 4.1과 같다.



Figure 4.2 Shape of Total Station

Table 4.1 Specification of SET230RK3

SOKKIA SET230RK3		
Laser class		Class 3R Laser Product
Laser output		Reflectorless mode : Class 3R
		Prism/Sheet mode : Class 1
Measuring range	Reflectorless	0.3 to 350m(white side, 90% reflective)
	(with Kodak Gray Card)	0.3 to 170m(gray side, 18% reflective)
Accuracy	Reflectorless (Fine mode)	0.3 to 200m : $\pm(3+2\text{ppm}\times D)$ Over 200 to 350m : $\pm(5+10\text{ppm}\times D)$
	Reflectorless (Rapid single mode)	0.3 to 200m : $\pm(6+2\text{ppm}\times D)$ Over 200 to 350m : $\pm(8+10\text{ppm}\times D)$

본 연구에서 대상도로구간의 선형정보를 추출하기 위해 사용된 장비로는 Trimble사에서 제조한 GS200 3D Laser Scanner이며, 장비의 형상 및 제원은 Figure 4.3과 Table 4.2에 나타내었다.



Figure 4.3 Shape of 3D Laser Scanner

Table 4.2 Specification of 3D laser scanner

Trimble GS200 3D Laser Scanner			
General	instrument type	long range laser mapping system	
	Metrology method	time of flight	
Specification	laser	pulsed 532nm, green	
		class 3R (IEC 60825-1)	
		class 2 (21 CFR §1041.10)	
	field of view	360° × 60° continuous single scan	
Performance	range	standard 200m	
	scanning speed	up to 5,000 points per second	
	standard deviation	1.4mm @ ≤ 50m	2.5mm @ ≤ 100m
		3.6mm @ ≤ 150m	6.5mm @ ≤ 200m
	single point accuracy	position	12mm @ 100m
distance		7mm @ 100m	
	scan resolution	spot size ; 3mm	

4.3 대상 도로의 레이저 스캐닝

도로의 선형요소를 추출하기위해 3차원 레이저스캐닝을 수행하여 점군 자료를 취득하고, 이와 동시에 Total Station을 사용하여 지리참조에 사용되는 지상기준점 및 취득된 점군자료의 정확도 검증을 위한 검사점을 측정하였다.

4.3.1 3차원 레이저 스캐닝

레이저 스캐너는 관측거리가 200m이며 도로의 경우 스캐너에서 방출하는 레이저의 입사각 및 반사각이 낮아 그 관측가능거리가 50m정도로 한정되어있다. 1개의 세부 프로젝트(sub-project)에 연구대상도로를 모두 포함하기는 어려울 뿐만 아니라 중앙분리대 및 차광망이 설치되어 양방향의 정보를 수집하기에는 더욱 어려움이 많다. 따라서 1km 연장의 대상도로를 모두 스캐닝하기 위해서는 중앙분리대를 기준으로 양방향에 대한 측정결과가 중복될 수 있도록 다중의 sub-project가 요구된다. 본 연구에서는 Figure 4.4에서 볼 수 있듯이 19개의 sub-project로 나누어 스캐닝을 하였다. 또한 다중의 sub-project를 정합하기 위해 sub-project간의 중복 영역에서는 3개의 타켓을 설치하여 정밀하게 스캐닝 하였으며, 정합이 스캔자료를 절대좌표로 변환하기 위해 지상기준점을 대상도로의 시·종점부에 설치하여 정밀스캐닝 하였다. Figure 4.5는 대상도로에 대하여 3차원 레이저 스캐닝모습과 설치된 타켓의 형상 보여주고 있다.

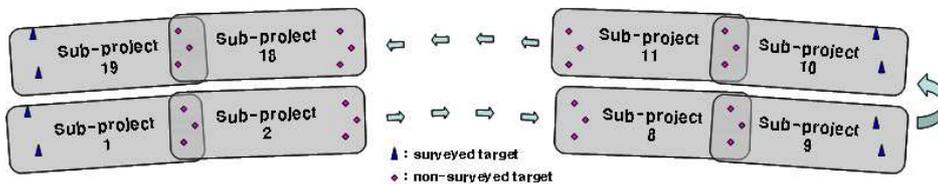


Figure 4.4 Constitution diagram of 3D laser scanning



(a) 3D laser scanner

(b) Targets

Figure 4.5 Shape of 3D laser scanning on research highway

하나의 sub-project에서 스캐너는 수평 360°, 연직 60°의 범위로 스캔하였다. 취득된 데이터는 Figure 4.6에 보이는 것처럼 스캐너의 관측범위를 모두 포함하는 mosaic 영상과 Table 4.3과 같이 X, Y, Z의 3차원 위치정보, RGB의 색상정보, 반사강도 정보를 포함하고 있으며 여기서의 위치정보는 레이저 스캐너의 위치를 중심으로 표현된다.

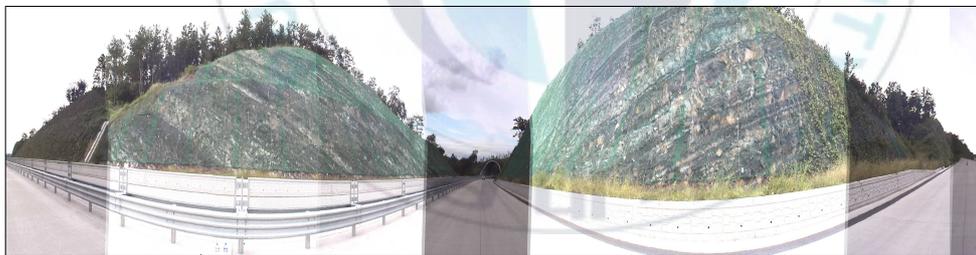


Figure 4.6 Panoramic view of a sub-project

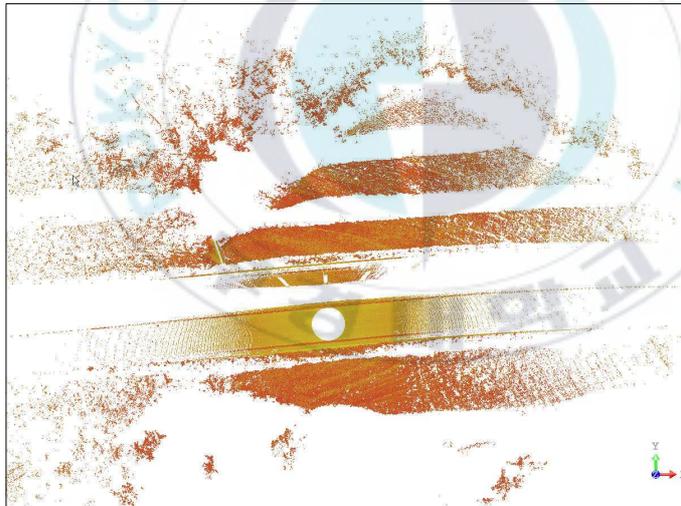
Table 4.3 Form of point cloud data

X (m)	Y (m)	Z (m)	Red	Green	Blue	Intensity
7.609	2.367	-1.056	193	108	233	62

Figure 4.7은 대상도로의 한 위치에서 스캐닝으로 취득된 점군데이터를 RGB와 반사강도에 따라 나타낸 것이다.



(a) RGB



(b) Intensity

Figure 4.7 Cloud points data obtained from 3D laser scanner

19번의 sub-project 과정에서 취득된 점군 자료의 개수와 다중 점군자료의 정합을 위한 타겟의 배치 형태를 진행 방향별로 나타내면 Table 4.4 및 Table 4.5와 같다.

Table 4.4 Result of 3D laser scanning(Right line)

Station	number of points	Targets for Registration
sub-project 1	1,751,599	
sub-project 2	1,634,231	Target 1, 2, 3
sub-project 3	1,314,034	Target 3, 4, 5
sub-project 4	1,748,289	Target 7, 8, 9
sub-project 5	1,649,970	Target 10, 11, 12
sub-project 6	1,408,481	Target 13, 14, 15
sub-project 7	1,735,561	Target 16, 17, 18
sub-project 8	2,434,417	Target 19, 20, 21
sub-project 9	1,437,382	Target 22, 23, 24

Table 4.5 Result of 3D laser scanning(Left line)

Station	number of points	Targets for Registration
sub-project 10	1,503,360	
sub-project 11	1,481,647	Target 25, 26, 27
sub-project 12	1,178,201	Target 28, 29, 30
sub-project 13	1,837,995	Target 31, 32, 33
sub-project 14	1,203,314	Target 34, 35, 36
sub-project 15	1,463,540	Target 37, 38, 39
sub-project 16	1,770,082	Target 40, 41, 42
sub-project 17	1,220,616	Target 43, 44, 45
sub-project 18	1,711,716	Target 46, 47, 48
sub-project 19	2,000,986	Target 49, 50, 51

4.3.2 지상 기준점 측량

지상 기준점 측량은 각 sub-project에 정합 과정을 거쳐 동일 좌표계로 형성된 다중스캔자료를 절대좌표로 변환시키기 위한 중요한 요소로서, 아주 정밀한 관측이 요구되는 작업이다. 또한 최종 처리단계를 거친 3차원 점군 자료의 정확도를 분석하기 위해 33개의 검사점을 TS을 이용하여 측정 하였으며, 그 측정 결과는 Table 4.6에 나타낸 것과 같다.

Table 4.6 The result of check points

Check Points							
No	X(m)	Y(m)	Z(m)	No	X(m)	Y(m)	Z(m)
1	226138.494	222745.150	40.657	18	226531.390	222722.930	36.157
2	226146.028	222742.530	40.863	19	226511.520	222721.137	36.910
3	226153.604	222739.985	41.008	20	226507.547	222720.768	37.058
4	226238.912	222718.705	42.191	21	226503.565	222720.406	37.207
5	226326.388	222709.964	41.956	22	226231.030	222720.126	42.133
6	226423.981	222713.184	40.048	23	226058.040	222780.576	37.886
7	226427.945	222713.471	39.931	24	226051.037	222784.350	37.608
8	226431.942	222713.803	39.806	25	225970.886	222836.742	34.200
9	226435.903	222714.111	39.673	26	225964.592	222841.677	33.946
10	226439.923	222714.427	39.557	27	225958.325	222846.645	33.655
11	226443.889	222714.767	39.429	28	225899.808	222901.039	30.828
12	226447.880	222715.135	39.292	29	225894.352	222906.904	30.558
13	226511.520	222721.137	36.910	30	225888.981	222912.821	30.292
14	226515.490	222721.497	36.761	31	225843.134	222968.247	27.923
15	226519.477	222721.868	36.612	32	225838.277	222974.571	27.717
16	226523.464	222722.245	36.455	33	225833.431	222980.923	27.518
17	226527.420	222722.589	36.307				

4.4 자료처리 및 중심선 자료 추출

3차원 레이저 스캐닝으로 취득된 점군 자료는 Trimble사의 RealWorks Survey를 이용하여 처리하였다. 처리 단계에서는 각 sub-project의 점군자료에 대하여 registration 및 geo-referencing을 실시하였고, 처리가 완료된 점군 자료의 정확도를 분석하였다. 최종적으로 처리된 자료를 이용하여 도로의 선형요소를 산정하기 위한 중심선 자료를 추출하였다.

4.4.1 정합 및 지리참조

각 sub-project의 registration을 위해 중복된 영역에는 3개의 타겟이 설치되었고, 스캐닝과정에서 타겟을 정밀하게 스캔하였다. 타겟의 중심은 정밀 스캐닝된 타겟의 점군 자료로부터 결정되며, 연속된 sub-project는 중복되는 3개의 타겟 중심을 이용하여 registration이 이루어진다. Figure 4.8은 정밀 스캐닝 된 타겟을 이용한 registration 처리모습을 보여주고 있으며, Figure 4.9는 두 개의 sub-project에 대한 registration 과정과 결과를 나타낸다.

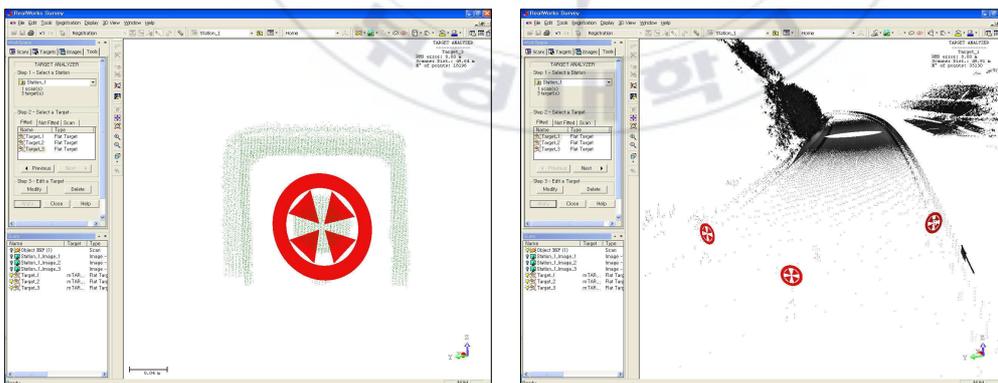


Figure 4.8 Target fitting for registration

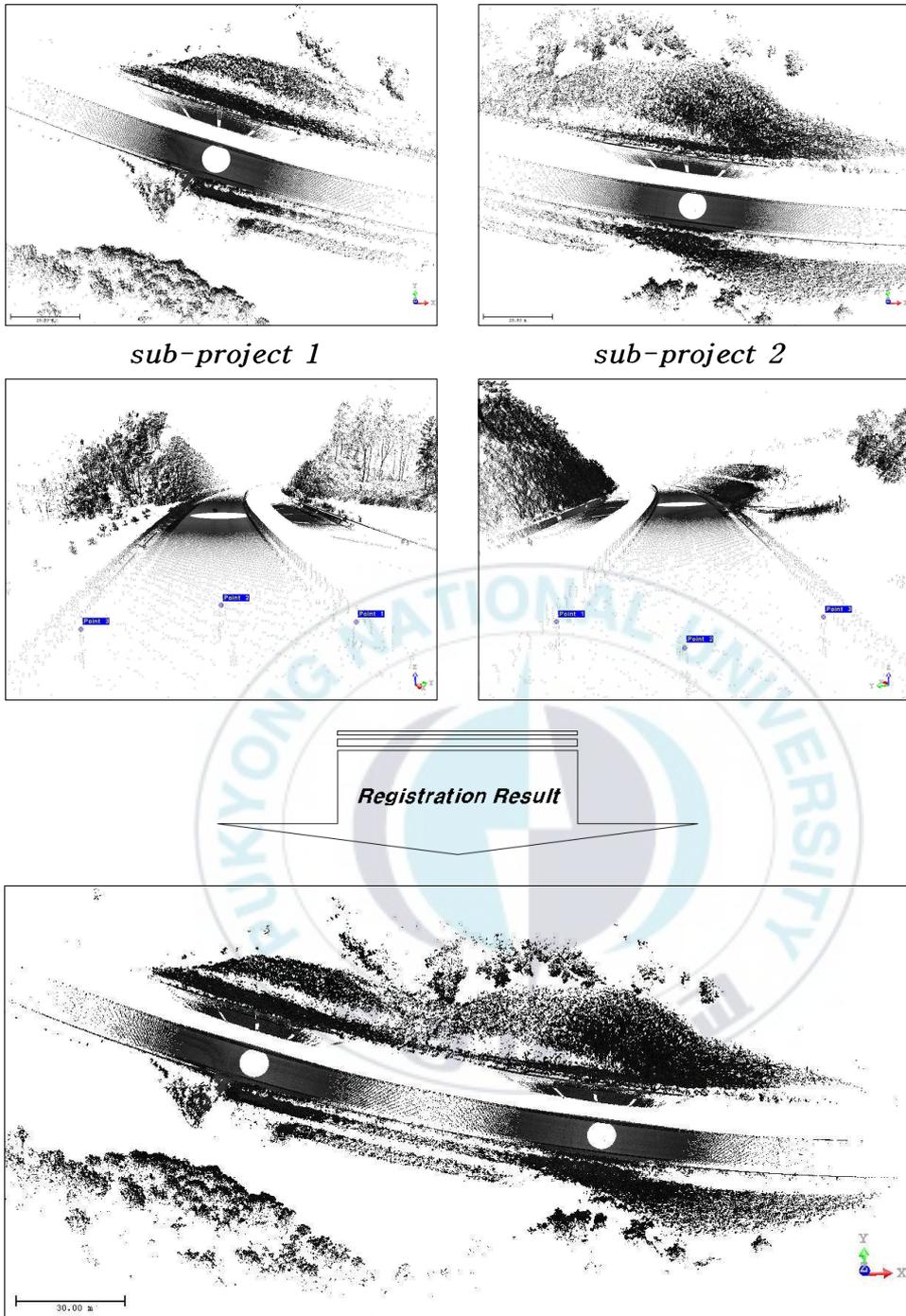


Figure 4.9 Process of registration

이러한 registration 과정을 거쳐 동일 좌표계로 형성된 다중스캔자료들은 geo-referencing을 과정을 통하여 지상 기준점과 결합된 절대좌표로 변환된다. Figure 4.10은 연구대상도로 약 1km 구간을 대상으로 취득된 다중스캔자료를 registration하고, 최종적으로 geo-referencing한 결과를 나타낸다.



Figure 4.10 Result view of geo-referencing for overall section

4.4.2 정확도 분석

연구대상도로의 다중스캔자료는 registration 및 geo-referencing 과정을 거치면서 실제 지상좌표체계로 회전, 이동하게 된다. 따라서 최종적으로 결정된 3차원 점군의 정확도를 분석하기 위해 TS로 측정된 33개의 검사점과 비교·분석 하였다. 사용된 검사점은 Figure 4.11에 나타낸 것과 같이 도로 중심선상에 설치된 차광망 지주를 사용하였으며, 사용된 검사점은 대상도로 1km 구간에 고루 분포되어 있다.

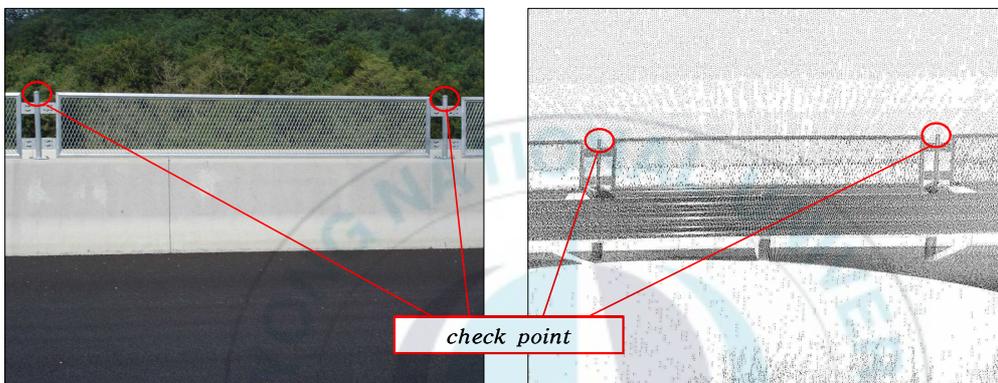


Figure 4.11 Lightproof net prop which used for check

검사점의 비교·분석 결과는 Table 4.7에 나타낸 것과 같이 각 방향별 잔차는 X방향으로 $-0.068 \sim 0.066\text{m}$, Y방향으로 $-0.096 \sim 0.079\text{m}$ 의 분포를 보였다. 또한 각 방향별 RMSE를 산정한 결과, X방향으로 0.041m , Y방향으로 0.041m 을 나타내었다. 이러한 결과는 공공측량의 작업규정 세부기준에 명시된 축척 1:600에서의 지상 기준점 정확도를 만족하는 결과로써, 3차원 레이저 스캐너로 취득된 점군자료가 선형을 분석하는데 그 활용성이 충분하다고 판단된다.

Table 4.7 Comparison of check point

No	Total Station		3D Laser Scanner		Residual	
	X(m)	Y(m)	X(m)	Y(m)	v_x (m)	v_y (m)
1	226138.494	222745.150	226138.554	222745.133	-0.060	0.017
2	226146.028	222742.530	226146.069	222742.481	-0.041	0.049
3	226153.604	222739.985	226153.591	222739.945	0.013	0.040
4	226238.912	222718.705	226238.916	222718.713	-0.004	-0.008
5	226326.388	222709.964	226326.369	222710.060	0.019	-0.096
6	226423.981	222713.184	226423.970	222713.185	0.011	0.000
7	226427.945	222713.471	226427.953	222713.470	-0.008	0.001
8	226431.942	222713.803	226431.924	222713.761	0.018	0.042
9	226435.903	222714.111	226435.879	222714.072	0.024	0.039
10	226439.923	222714.427	226439.865	222714.391	0.058	0.036
11	226443.889	222714.767	226443.840	222714.731	0.049	0.036
12	226447.880	222715.135	226447.817	222715.100	0.063	0.035
13	226511.520	222721.137	226511.485	222721.108	0.035	0.029
14	226515.490	222721.497	226515.467	222721.466	0.023	0.031
15	226519.477	222721.868	226519.439	222721.827	0.038	0.041
16	226523.464	222722.245	226523.421	222722.187	0.043	0.058
17	226527.420	222722.589	226527.392	222722.510	0.028	0.079
18	226531.390	222722.930	226531.344	222722.869	0.046	0.061
19	226511.520	222721.137	226511.454	222721.199	0.066	-0.062
20	226507.547	222720.768	226507.490	222720.829	0.057	-0.061
21	226503.565	222720.406	226503.510	222720.454	0.055	-0.048
22	226231.030	222720.126	226231.015	222720.143	0.015	-0.017
23	226058.040	222780.576	226058.121	222780.582	-0.081	-0.006
24	226051.037	222784.350	226051.105	222784.387	-0.068	-0.037
25	225970.886	222836.742	225970.846	222836.762	0.040	-0.020
26	225964.592	222841.677	225964.583	222841.710	0.009	-0.033
27	225958.325	222846.645	225958.340	222846.667	-0.015	-0.022
28	225899.808	222901.039	225899.769	222901.024	0.039	0.015
29	225894.352	222906.904	225894.377	222906.912	-0.025	-0.008
30	225888.981	222912.821	225889.041	222912.818	-0.060	0.003
31	225843.134	222968.247	225843.150	222968.191	-0.016	0.056
32	225838.277	222974.571	225838.303	222974.535	-0.026	0.036
33	225833.431	222980.923	225833.475	222980.884	-0.044	0.039
R M S E					0.041	0.041

4.4.3 중심선 자료 추출

도로의 선형설계요소를 산정하기 위해서는 도로중심에 대한 3차원 위치자료가 필요하다. 스캐닝으로 취득된 데이터는 3차원 위치정보, RGB의 색상정보, 반사강도 정보를 포함하고 있으며, 이러한 정보를 이용하여 도로 중심에 대한 3차원 위치자료를 추출하기 위해서는 다음 과 같은 두 가지 방법이 있다. 첫째, 도로에 차선이 도색되어 있을 경우로서 스캐닝자료의 RGB 및 반사강도에 의해 노면과 차선의 정보를 분리할 수 있다. 따라서 차선에 해당하는 RGB 및 반사강도의 3차원 자료를 연결하여 하나의 선형자료로 추출할 수 있다. 둘째, 도로의 횡단구성요소중 중앙분리대가 설치되어 있는 경우로서 스캐닝으로 측정된 3차원 위치정보를 이용하여 도로의 노면과 중앙분리대의 위치정보를 분리할 수 있다. 따라서 노면과 분리된 중앙분리대의 3차원 자료를 연결하면 하나의 선형자료로 추출 될 수 있다. 본 연구대상도로는 가드레일형식의 중앙분리대와 차광망이 설치되어 있어 도로선형설계요소를 산정하기 위해 Figure 4.12에서 보이는 것과 같이 차광망 상단부의 3차원 좌표를 추출하였다. Figure 4.13 및 Figure 4.14에서는 도로중심선자료추출의 처리과정으로 보여주고 있으며, 전 구간에 대하여 46,280개의 중심자료를 추출하였다.

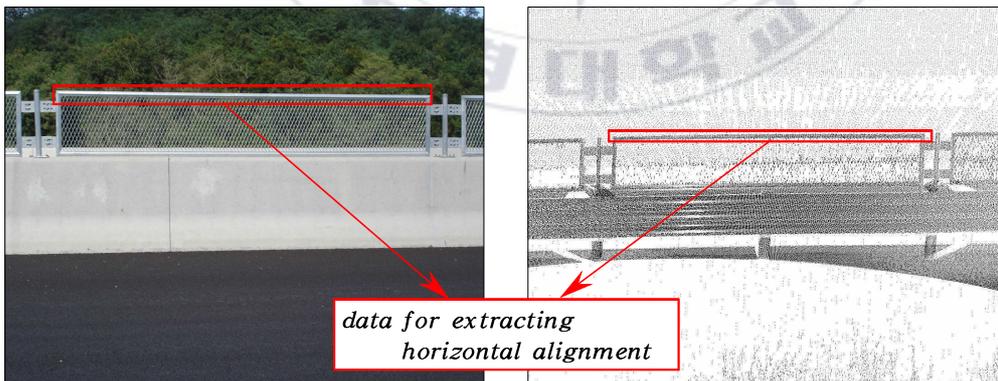
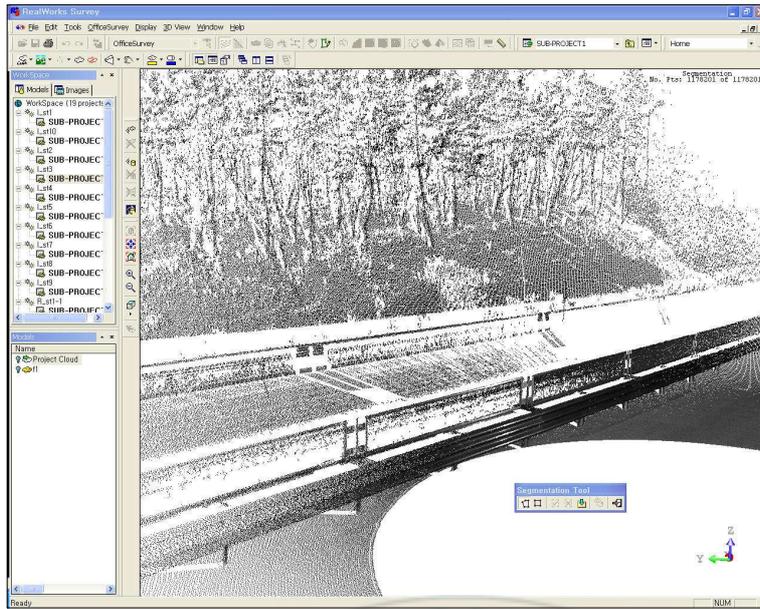


Figure 4.12 Data for extracting horizontal alignment



**Extracting
Center line data**

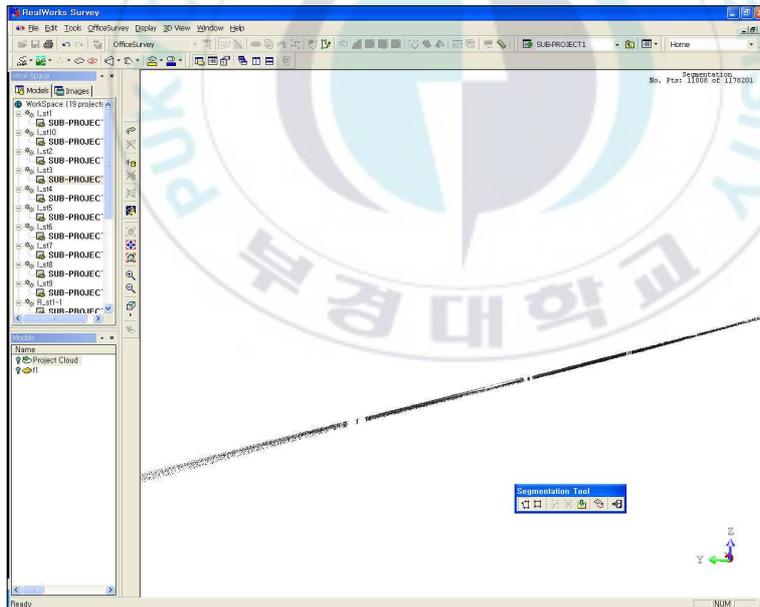
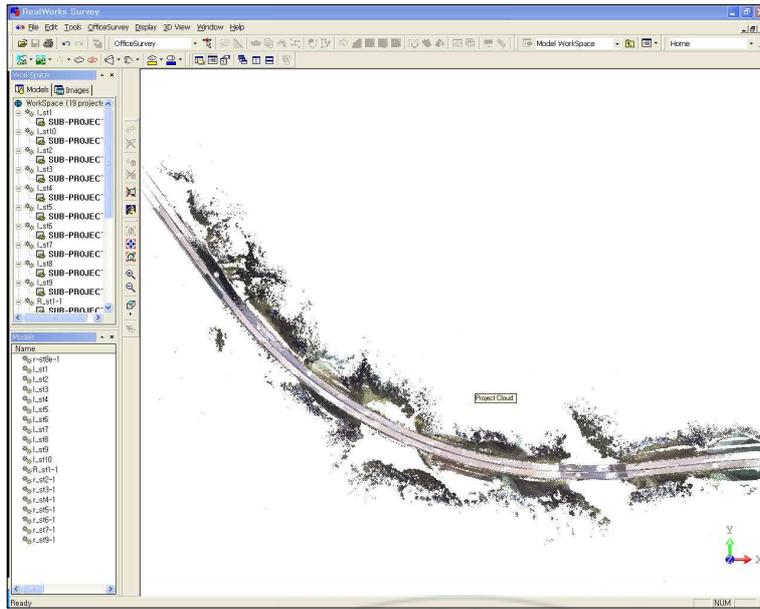


Figure 4.13 Process of extracting center line data in part section



**Extracting
Center line data**

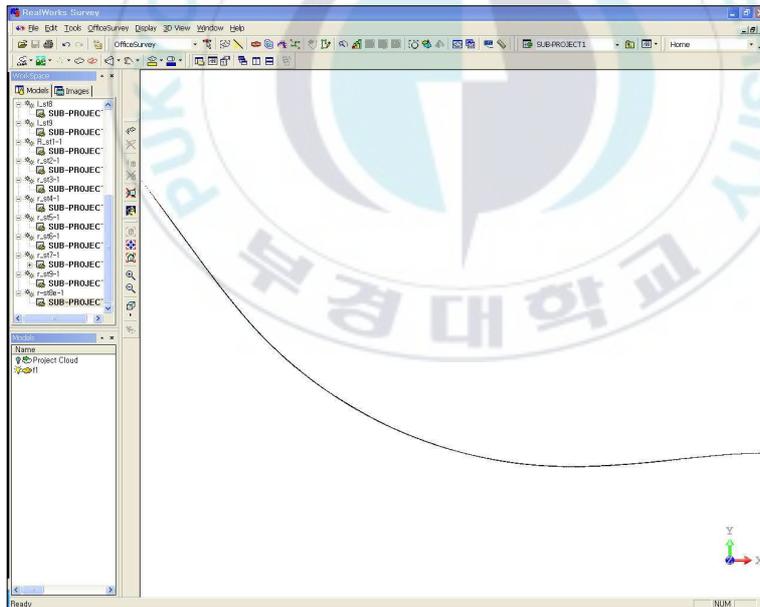


Figure 4.14 Process of extracting center line data in all section

5. 도로 선형요소 산정

5.1 평면선형 설계요소 산정

도로의 선형 분석은 도로가 자동차의 운동역학적 특성에 맞추어 기능을 제대로 하는가에 대한 분석에서 필요하다(이종출, 2001). 본 연구에서는 추출된 도로중심선자료 46,280개의 자료를 이용하여 Figure 5.1에 나타낸 일련의 과정을 통해 설계요소를 산정하고, 평면선형을 재구성 하였다.

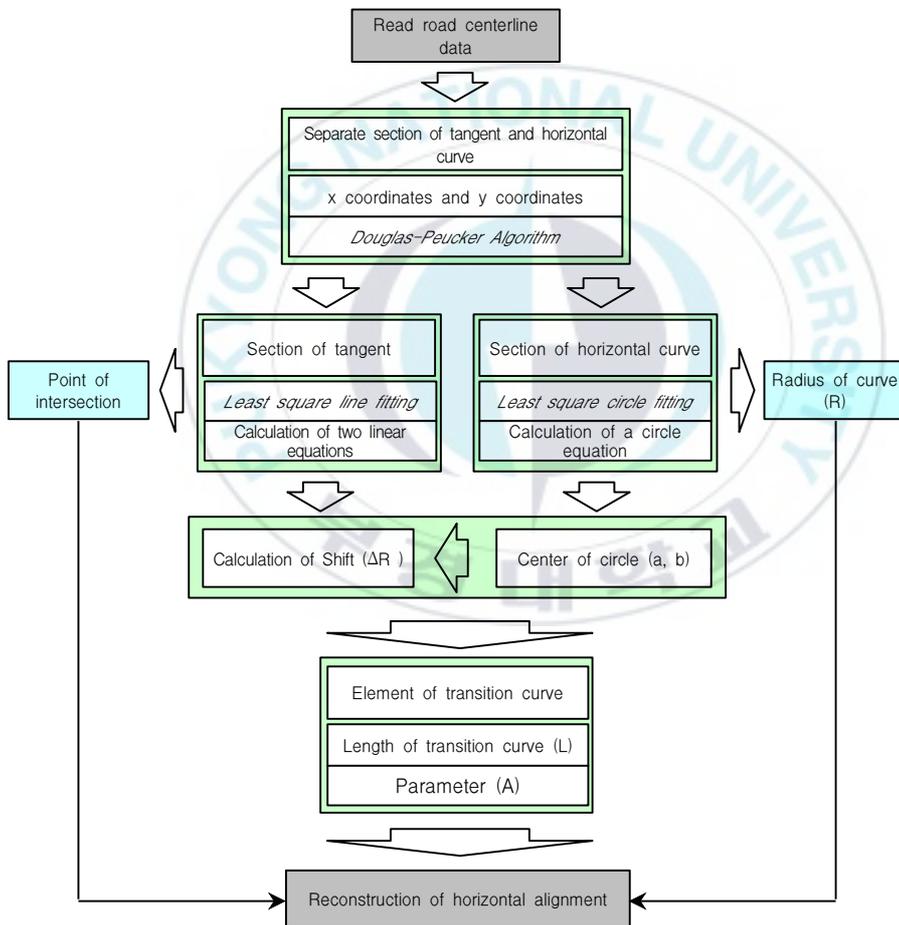


Figure 5.1 Flowchart for extracting horizontal alignment

먼저 추출된 46,280개의 자료를 Douglas-Peucker 알고리즘을 이용하여 직선과 곡선구간으로 분류하였다. 직선과 완화곡선이 접속하는 구간에서는 임계치의 범위 내에 있는 완화곡선에 해당되는 자료가 직선으로 간주될 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 직선구간의 종점으로 결정된 자료에서 시점 방향으로 40% 구간 내에 있는 자료는 제거하고, 나머지 60%의 자료를 이용하여 최소제곱선을 결정하였다. 그 결과 46,280개의 자료 중 1~200번째, 43,597~46,280번째 자료가 직선식을 결정하기 위한 자료로 추출되었으며, 결정된 직선 구간의 최소제곱선과 IP 위치는 Table 5.1에 나타낸 것과 같다.

Table 5.1 Determined least square line and IP location

Least Square Line 1		$Y = 200819.750 + 0.096690178X$
Least Square Line 2		$Y = 533700.625 - 1.375883102X$
IP	X (m)	226053.861
	Y (m)	222676.938

또한 곡선 구간에 해당되는 자료중 시·종점 구간의 자료 25%를 제거한 나머지 50%자료를 LSC기법에 적용하여 원곡선의 반경(R)과 중심 위치를 결정하였다. 그러나 도로와 같이 원곡선을 이루는 자료가 편중된 경우에는 원곡선의 반경(R)의 크기가 매우 크게 결정되므로 신뢰할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 LSC기법에 의해 결정된 원곡선의 중심 좌표와 원곡선 구간의 중심선 좌표간의 길이를 평균하여 원곡선의 반경을 최종적으로 결정하였다.

이렇게 결정된 최소제곱선과 곡선반경을 이용하여 이정량(ΔR)을 산정한 후, 완화곡선의 곡선장(L) 및 파라미터(A)를 산정하였다. 최종적으로 산정된 평면선형 설계요소와 실시설계 당시의 설계요소를 비교하면 Table 5.2과 같다.

Table 5.2 Comparison between designed and extracted values

		Drawings values	Observed values	Remarks
<i>IP</i>	X(m)	222676.939	222676.938	0.001
	Y(m)	226054.609	226053.861	0.748
<i>R</i>		610	610.475	0.475
<i>I</i>		59° 23 ' 25.114 "	59° 30 ' 46.400 "	0° 7 ' 21.290 "
ΔR_1		1.924	1.869	0.055
ΔR_2		1.924	2.097	0.173
L_1		167.869	165.478	2.391
L_2		167.869	175.276	7.407
A_1		320	317.837	2.163
A_2		320	327.111	7.111

IP 위치는 X방향으로 0.001m, Y방향으로 0.748m의 차이를 보였으며, 곡선반경(*R*)은 0.062m의 차이를 나타내었다. 이는 중심선 시공 시 발생하는 시공오차에 의한 값으로 판단되며, 종래의 평면선형 추출에 관련한 연구결과와 비교해 볼 때, 더욱 정확한 값으로 결정되었다(이종환, 2000; 정의환, 2004).

5.2 평면선형의 재현

산정된 평면선형요소를 사용하여 평면선형을 재현하였다. 재현한 평면선형은 Figure 5.2와 같으며, 실제 선형 설계도와 중첩하여 나타내었다. 또한 산정된 선형과 설계도의 선형이 어느 정도의 오차를 가지고 있는지 분석하였다. 이는 두 선형의 이격량을 비교하였으며, 산정된 선형을 20m 간격의 46개의 측점으로 나누고 각 측점에서 설계 선형의 중심선까지 거리를 이용하여 분석하였다. 그 결과는 Table 5.3에 나타낸 것과 같다. 46개의 측점에서 0.177~0.295m의 이격거리로 평균 0.231m의 차이로 나타났으며, 이는 산정된 선형이 설계 선형과 거의 동일한 것으로 판단된다.

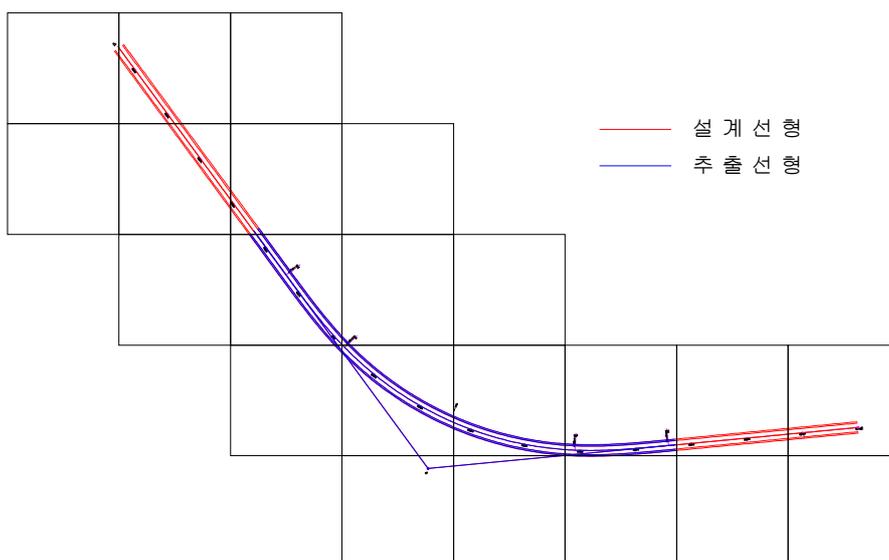


Figure 5.2 Reconstruction of designed and extracted alignments

Table 5.3 Comparison between designed and extracted alignments

No	Distance(m)	No	Distance(m)	No	Distance(m)
1	0.191	17	0.235	33	0.297
2	0.186	18	0.241	34	0.293
3	0.181	19	0.246	35	0.277
4	0.178	20	0.251	36	0.253
5	0.177	21	0.256	37	0.226
6	0.177	22	0.261	38	0.202
7	0.179	23	0.265	39	0.184
8	0.182	24	0.270	40	0.177
9	0.186	25	0.274	41	0.187
10	0.195	26	0.277	42	0.218
11	0.199	27	0.281	43	0.219
12	0.205	28	0.284	44	0.220
13	0.212	29	0.287	45	0.221
14	0.218	30	0.290	46	0.223
15	0.224	31	0.293	Ave.	0.231
16	0.230	32	0.295		

5.3 도로선형정보 시스템 구축

본 연구에서 구축한 시스템은 Table 5.4과 같이 GIS Tool인 ESRI사의 Arc View를 이용하여 자료에 대한 전처리 과정을 수행하였으며, 개발언어는 Visual Basic 6.0을 이용하여 구축하였다.

Table 5.4 Composition of S/W employed for road alignment information system

Species	Local system
O/S	Window XP
Map construction	AutoCAD 2002, Arc View
Development Tool	Map Object
Development language	Visual Basic 6.0

시스템의 구성은 Figure 5.3과 같이 첫 상단의 메뉴에서는 도로관련 도면이나 문서 등과 선형에 대한 정보, 구조물 등에 대한 정보 등을 연계 및 구축할 수 있도록 구성하였고, 평면도를 확대, 축소, 이동, 전체화면에 대한 아이콘 등을 적용함으로써 사용자의 의도에 따라 도면의 크기를 나타낼 수 있도록 하였으며, 오른쪽 상단의 mini map을 통하여 확대된 도면에 대한 사용자의 위치를 쉽게 알 수 있도록 하였다.

Figure 5.4는 3차원 레이저 스캐닝을 이용하여 원시 자료를 획득하여 본 시스템에 불러오는 모습으로서, 관측된 자료의 형태와 모습을 관측 직후 실시간으로 모니터링 할 수 있으므로 보다 효율적인 관측자료의 관리가 용이하다.

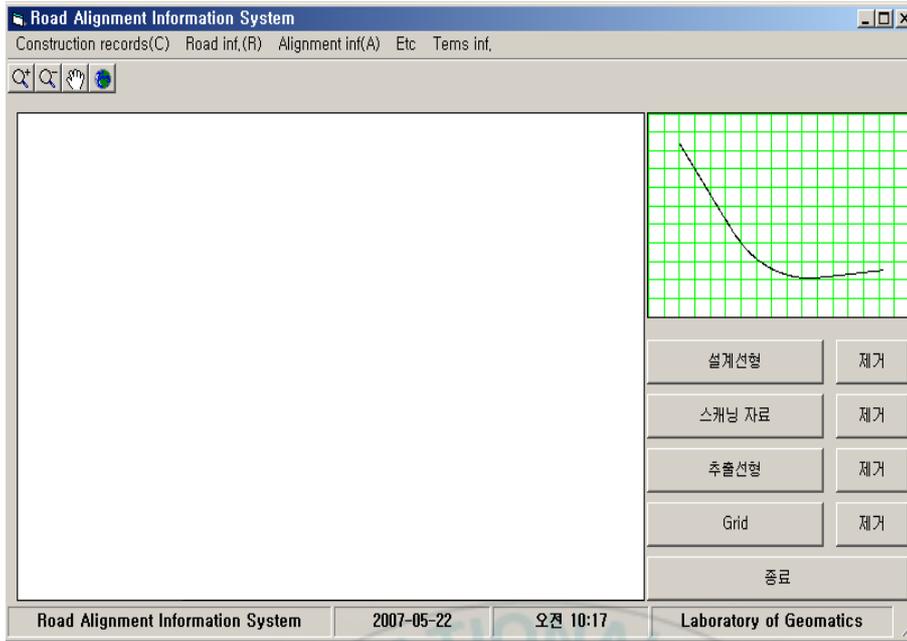


Figure 5.3 User interface of Road alignment information system

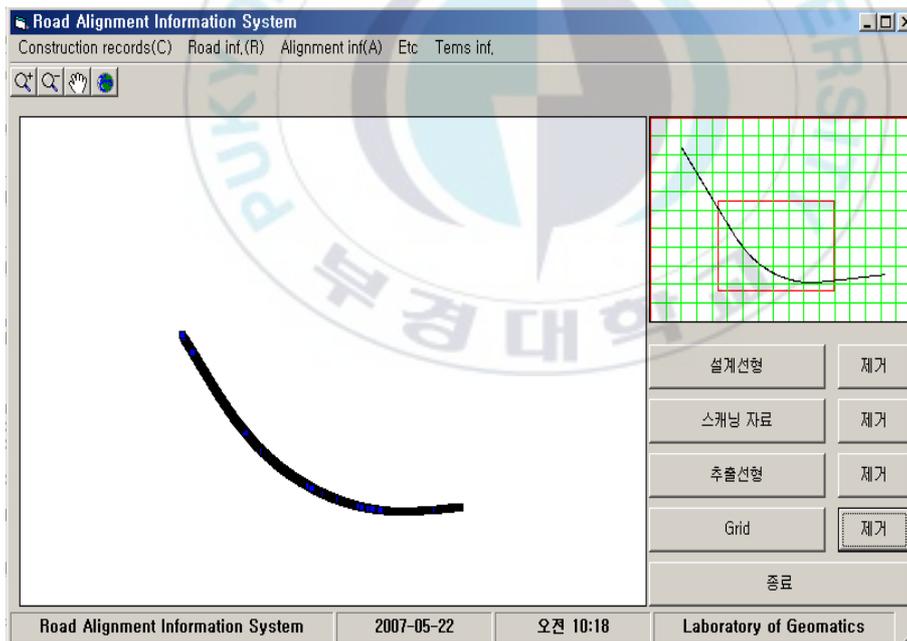


Figure 5.4 Raw data of screen view

또한, Figure 5.5는 3차원 레이저 스캐이닝으로서 획득된 자료를 이용하여 추출된 선형의 모습을 나타내고 있다.

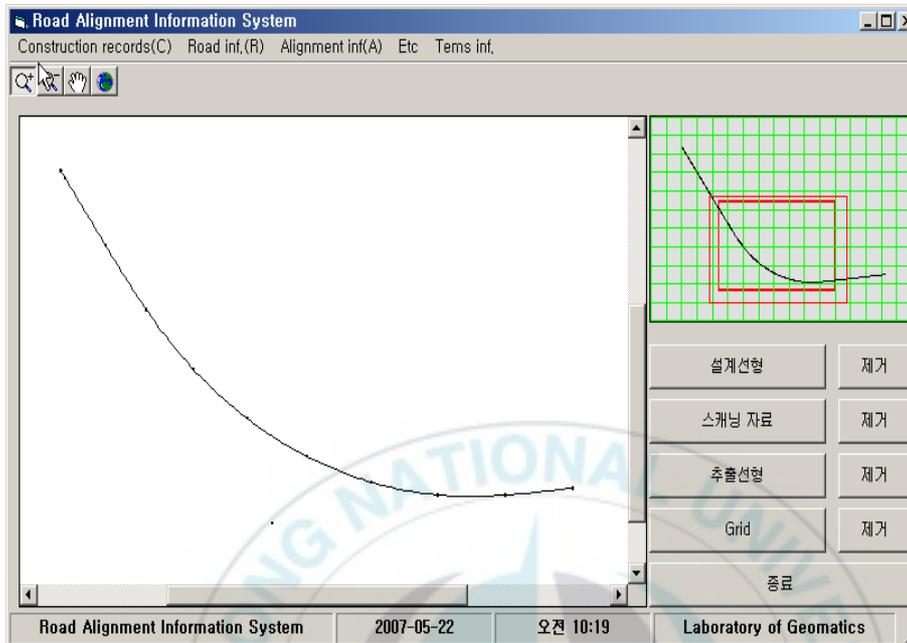


Figure 5.5 Extracted alignment of screen view

최종적으로 Figure 5.6과 같이 획득된 자료를 이용하여 추출된 선형과 설계된 선형과의 차이를 비교함으로써 보다 효율적인 도로정보의 이용에 사용할 수 있도록 구축하였다.

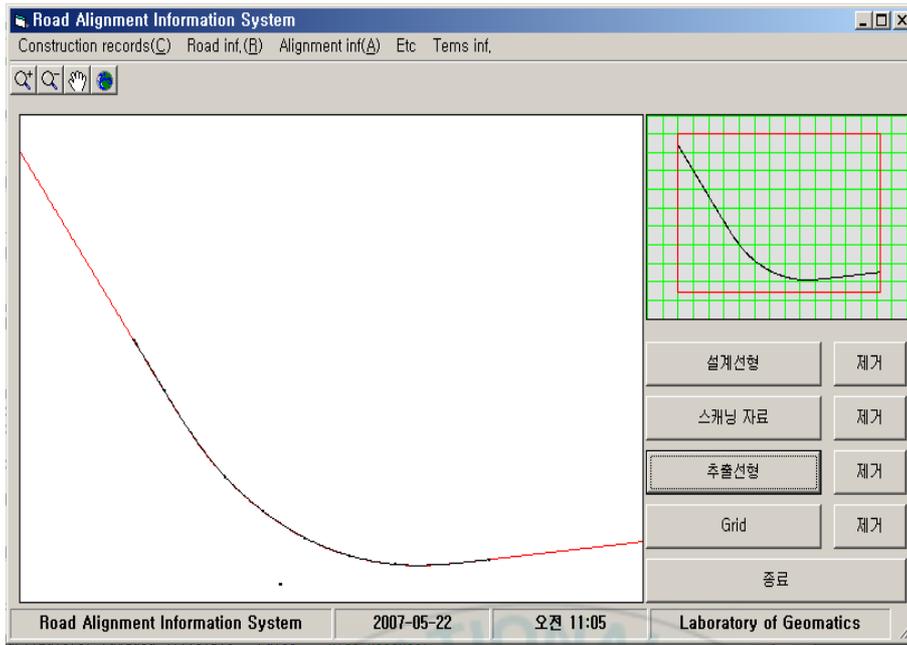


Figure 5.6 Comparison of extracted alignment and designed alignment



6. 결 론

본 연구에서 3차원 레이저 스캐너에 의해 취득된 점군 자료를 이용하여 도로의 평면선형 및 종단선형요소를 산정한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 3차원 레이저 스캐너를 이용하여 3차원 점군자료를 취득하여 registration 및 geo-referencing한 결과, X방향 4.1cm, Y방향 4.1cm의 RMSE를 나타내었다. 이는 공공측량의 작업규정 세부기준에 명시된 축척 1:600 에서의 지상 기준점 정확도를 만족 할 뿐만 아니라, LiDAR 시스템의 수평 위치정확도 30cm에 비해 매우 양호한 결과를 나타낸다.

둘째, 도로의 점군자료에서 추출된 도로중심선자료를 Douglas-Peucker에 의해 개발된 선형 일반화 알고리즘을 적용하여 직선 및 곡선구간으로 자동 분리하는 알고리즘을 개발하였다. 이는 수동으로 결정된 이전의 방식에 비해 효율성을 높일 수 있었으며, 상이한 구간의 자료를 이용한 설계요소의 추출에 있어서 발생될 수 있는 오차를 줄일 수 있었다.

셋째, 자동 분리된 직선 및 곡선구간 자료를 이용하여 평면 및 종단선형의 설계요소를 추출하는 알고리즘을 개발하고, 대상 도로에 적용하여 평면 선형 및 종단선형 요소를 산정하고 재현하였다. 기존 설계제원과 비교한 결과, 미소한 차이를 나타내었으며 이는 중심선 시공 시 발생하는 시공오차에 의한 값으로 판단된다. 또한 수많은 점군자료를 최소제곱법에 의한 방법으로 산정함으로써 종래의 도로 선형 추출에 관련한 연구 결과와 비교해 볼 때 더욱 정확한 값으로 결정될 수 있었다.

넷째, 본 연구에서 결정된 선형요소와 3차원 레이저 스캐너로 취득된 도로의 수많은 점군 자료를 이용하여 설계도면이 없는 도로의 기하구조정보와 주변 시설물에 대한 정보를 과학적이고 효율적으로 취득할 수 있을 것이며, 도로의 선형 정보에 대한 시스템을 구축함으로써 유지관리 및 안전진단에 있어 중요한 기반자료를 제공 할 수 있을 것으로 판단된다.



참 고 문 헌

- 김민석, 2004, “수치지도와 LiDAR 자료를 이용한 도시지역 도로의 선형 설계요소 추출에 관한 연구”, 공학석사학위논문, 서울대학교 대학원.
- 김진수, 2007, “레이저 스캐닝 기법에 의한 도로기하정보시스템 개발”, 공학박사학위논문, 부경대학교 대학원.
- 김홍상, 2005, “우리나라 도로안전을 위한 발전방향”, 한국도로학회지, 제7권 4호, pp.4-11.
- 김형태, 2000, “GIS 건물레이어 자동구축을 위한 Lidar 데이터와 항공사진의 융합”, 공학석사학위논문, 서울대학교 대학원, pp.8-9.
- 노태호, 장호식, 이종출, 2002, “RTK GPS/GLONASS 조합에 의한 도로의 평면선형 정확도 분석”, 한국지형공간정보학회논문집, 제10권 제2권, pp.29-37.
- 박홍기, 2002, “레이저 빔 스캐닝 기술을 이용한 3차원 형상 측정”, 공학석사학위논문, 경희대학교 대학원.
- 서동주, 2003, “수치사진측량에 의한 도로정보체계 개발”, 공학박사학위논문, 부경대학교 대학원.
- 서재수, 2007, “3차원 레이저 스캐닝 자료를 이용한 도로 선형의 구성요소 추출”, 공학석사학위논문, 부경대학교 대학원.

오윤석, 2005, “LiDAR와 칼라항공영상을 이용한 산림지역 내 위험지역 판정기법 개발”, 공학박사학위논문, 인하대학교 대학원, pp.38-39.

윤덕근, 정동훈, 성정근, 이상화, 2006, “센서를 장착한 차량을 이용한 도로 횡단경사 측정에 관한 연구”, 한국도로학회논문집, 제8권 제2호, pp.105-116.

이종환, 2000, “선형 GPS 데이터의 감축방안 및 도로 평면선형 설계제원 추정”, 공학석사학위논문, 경기대학교 대학원, pp.54-55.

이종출, 2001, “동적 GPS 관측에 의한 도로의 평면선형 분석”, 한국측량학회지, 제19권 제1호, pp.39-45.

정의환, 2004, 철도 선형 복원을 위한 GPS 데이터 단순화 방법의 적용, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제22권 제1호, pp.63-71.

한국건설기술연구원, 2003, “도로 선형 및 노면 안전성 분석 모형 개발(1차년도)-평면선형 조건에 따른 안전성 분석 기술 개발”

한국건설기술연구원, 2004, “도로 선형 및 노면 안전성 분석 모형 개발(2차년도)-종단선형 조건에 따른 안전성 분석 기술 개발”

한국건설기술연구원, 2005, “도로 선형 및 노면 안전성 분석 모형 개발(3차년도)-선형 조건에 따른 시거 산출과 안전성 분석 기술 개발”

한승희, 2006, “패턴스캐너를 이용한 자동차부품의 3차원 모델링 및 효용

성 분석”, 한국측량학회지, 제24권 제1호, pp.1-8.

허정훈, 2004, "3차원 스캐닝 시장 현황과 기술적 쟁점", *CAD&Graphics* 2004/8.

최재원, 2001, “레이저 스캐너를 이용한 측정점으로부터 자유곡면생성에 관한 연구”, 공학석사학위논문, 부산대학교 대학원.

Ackermann, F., 1999, “Airborne Laser Scanning—Present Status and Future Expectations”, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol.54, pp.64-67.

Alba, M., Longoni, L., Papini, M., Roncoroni, F. and Scaioni, M., 2005, “Feasibility and problems of TLS in modeling rock faces for hazard mapping”, *ISPRS Workshop Laser Scanning 2005*, September, pp. 156-161.

Bauer, A. and Paar, G., 2003, “Terrestrial laser scanning for rock glacier monitoring”, *The 8th International Conference on Permafrost*, July, pp.55-60.

Chang, K. T., Chang, J. R. and Liu, J. K., 2005, “Detection of pavement distresses using 3D laser scanning technology”, *ASCE Proceedings of the 2005 International Conference on Computing in Civil Engineering*, July.

Collins, B. D. and Sitar, N., 2005, "Monitoring of coastal bluff stability using high resolution 3D laser scanning", *ASCE Proceedings of the Geo-Frontiers 2005 Congress*, January.

Frueh, C., Jain, S. and Zakhor, A., 2004, "Data processing algorithms for generating textured 3D building facade meshes from laser scans and camera images", *International Journal of Computer Vision*, 61(2), pp.159-184.

Guarnieri, A., Vettore, A., El-Hakim, S. and Gonzo, L., 2004, "Digital photogrammetry and laser scanning in cultural heritage survey", *XXth ISPRS Congress*, Commission V, WG V/2, July, pp.154-158.

Hatger, C. and Brenner, C., 2003, "Extraction of road geometry parameters from laser scanner and existing database", *ISPRS Workshop : 3-D reconstruction from laser scanner and InSar data*.

Jaselskis, E., Gao, S., and Walters, R. C., 2005, "Improving transportation projects using laser scanning", *ASCE Journal of Construction Engineering and Management*, Vol.131. No.3, pp.377-384.

Ma, Y., Soatto, S., Kosecka, J., and Sastry, S. An Invitation to 3D Vision: From Images to Geometric Models, chapter 3.

Springer-Verlag, 2003.

Mills, J. and Barber, D., 2004, "Geomatics techniques for structural surveying", *ASCE Journal of Surveying Engineering*, Vol.130, No.2, pp.56-64.

Pattnaik, S. B., Hallmark S. and Souleyrette, R., 2003, "Collecting road inventory using LiDAR surface models", *Map India Conference 2003*.

Ritchie, J. C., 1996, "Remote Sensing Applications to Hydrology: Airborne Laser Altimeters," *Hydrological Sciences Journal*, 41(4):625-636.

Schulz, T., Ingensand, H. Terrestrial Laser Scanning - Investigation and Application for High Precision Scanning. FIG Working 2004. May 22-27 2004.

Walters, R. C. and Jaselskis, E., 2005, "Using scanning lasers for real-time pavement thickness measurement", *ASCE Proceedings of the 2005 International Conference on Computing in Civil Engineering*, July.

William P. Kennedy, the basics of Triangulation Sensors. *Sensor Magazine*(www.sesnormag.com). May 1996.

William P. Kennedy, Can Laser Triangulation Help You? QUALITY
(www.qualitymag.com). September 1998.



감사의 글

부경대학교 산업대학원 토목공학과에 입학한 것이 엇그제 같은데 벌써 졸업을 준비하게 되었습니다. 이렇게 빠르게 느껴지는 것은 학교생활이 저에게는 무척 소중한 값진 것이었기 때문일 것입니다. 직장생활과 학업을 병행하는 일이 결코 쉽지는 않았지만 뒤쳐지지 않고 무사히 졸업을 할 수 있게 된 것을 뒤돌아보면 그동안 저를 도와준 많은 고마운 분들이 계셨다는 것을 다시금 생각하게 합니다.

좁은 지면에 그분들을 일일이 열거하면서 감사의 마음을 전하지는 못하지만 이 모든 것이 결코 저 혼자 힘만으로 된 것이 아니었음을 고백하지 않을 수 없습니다.

먼저 이 논문이 완성되기까지 많은 관심과 격려로 늘 변함없이 따뜻하게 지도해 주신 이종출 교수님께 진심으로 감사드리며, 바쁘신 와중에 본 논문을 위해 정성을 다하신 이환우 교수님, 정진호 교수님께도 진심어린 감사의 인사를 드립니다.

제가 토목공학과 측량연구실에서 폭넓은 식견을 가질 수 있도록 도움을 주신 연구실 가족들 서동주 박사님, 노태호 박사님, 김진수 박사님, 남일현님, 송영귀님, 배상원님, 박상묵님, 최홍준님, 그밖에 도우회 회원님들께도 고마움을 전합니다.

더욱 값진 것은 교수님들은 물론 선후배들과 인간적인 교류를 하면서 돈독한 유대감을 형성하고 따뜻한 마음을 배운 점입니다. 앞으로 따뜻한 마음으로 불우한 이웃을 생각하고 남을 배려하는 자세로 살아가고자 합니다. 끝으로 여러 가지로 많은 양해를 해 주신 같이 근무했던 직원들과 아낌없는 지원과 믿음으로 지켜봐 주신 정신적인 지주 현동호님, 한선오님 에게도 감사의 마음을 전합니다.

오늘의 작은 열매에 자만하지 않고 계속 정진하면서 살아가도록 하겠습니다.

최상식 올림