



## 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.
- 저작권으로부터 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](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

레이저 스캐닝 기법에 의한  
도로편경사 추출



부 경 대 학 교 대 학 원

토 목 공 학 과

남 일 현

공 학 석 사 학 위 논 문

레이저 스캐닝 기법에 의한  
도로편경사 추출

지도교수 이 종 출

이 論文을 工學碩士學位論文으로 提出함

2007년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

토 목 공 학 과

남 일 현

# 남일현의 공학석사 학위논문을 인준함

2007년 8월 30일

주 심 농 공 학 박 사 이 영 대 (인)

위 원 공 학 박 사 김 명 식 (인)

위 원 공 학 박 사 이 종 출 (인)

# 목 차

|                                      |           |
|--------------------------------------|-----------|
| List of Tables .....                 | iii       |
| List of Figures .....                | v         |
| Abstract .....                       | vii       |
| <br>                                 |           |
| <b>1. 서 론 .....</b>                  | <b>1</b>  |
| 1.1 연구배경 및 목적 .....                  | 1         |
| 1.2 연구동향 .....                       | 2         |
| 1.3 연구방법 및 적용범위 .....                | 6         |
| <br>                                 |           |
| <b>2. 레이저 스캐닝과 도로 편경사이론 .....</b>    | <b>9</b>  |
| 2.1 레이저 스캐닝 .....                    | 9         |
| 2.2 평면곡선반경 .....                     | 14        |
| 2.3 편경사 .....                        | 19        |
| <br>                                 |           |
| <b>3. 레이저 스캐닝 및 도로중심선자료 추출 .....</b> | <b>29</b> |
| 3.1 연구대상지 선정 .....                   | 29        |
| 3.2 관측 시스템의 구성 .....                 | 30        |
| 3.3 대상 도로의 레이저 스캐닝 .....             | 33        |
| 3.3.1 3차원 레이저 스캐닝 .....              | 33        |
| 3.3.2 지상 기준점 측량 .....                | 37        |
| 3.4 자료처리 및 중심선 자료 추출 .....           | 38        |

|                                            |           |
|--------------------------------------------|-----------|
| 3.4.1 Registration 및 Geo-referencing ..... | 38        |
| 3.4.2 정확도 분석 .....                         | 41        |
| 3.4.3 중심선 자료 추출 .....                      | 43        |
| <b>4. 추출결과 및 분석 .....</b>                  | <b>46</b> |
| 4.1 편경사 추출 .....                           | 46        |
| 4.2 결과 분석 .....                            | 51        |
| <b>5. 결 론 .....</b>                        | <b>57</b> |
| <b>참고문헌 .....</b>                          | <b>58</b> |



# *List of Tables*

|                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Table 2.1 The Minimum Radius of curvature(Superelevation) .....                                                             | 17 |
| Table 2.2 The Minimum Radius of curvature(Country) .....                                                                    | 18 |
| Table 2.3 The Maximum Superelevation Rates .....                                                                            | 20 |
| Table 2.4 Radius of circular curve depending on design speed and<br>superelevation .....                                    | 22 |
| Table 2.5 Maximum superelevation rates in accordance with design<br>speed .....                                             | 23 |
| Table 2.6 Adjustment factor for number of lane rotated .....                                                                | 24 |
| Table 2.7 Superelevation run off .....                                                                                      | 26 |
| Table 3.1 Specification of 3D laser scanner .....                                                                           | 31 |
| Table 3.2 Specification of SET230 <sub>RK3</sub> .....                                                                      | 32 |
| Table 3.3 Form of point cloud data .....                                                                                    | 34 |
| Table 3.4 Result of 3D laser scanning(Right line) .....                                                                     | 36 |
| Table 3.5 Result of 3D laser scanning(Left line) .....                                                                      | 36 |
| Table 3.6 The result of check point .....                                                                                   | 37 |
| Table 3.7 Comparison of check point .....                                                                                   | 42 |
| Table 4.1 Result of superelevations extracted on the object highway at an<br>interval of 5m by total station (BTC-BC) ..... | 47 |
| Table 4.2 Result of superelevations extracted on the object highway at an<br>interval of 5m by total station (EC-ETC) ..... | 47 |
| Table 4.3 Result of superelevations extracted on the object highway at an<br>interval of 5m by total station (BC-EC) .....  | 48 |

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Table 4.4 Result of superelevations extracted on the object highway at an interval of 5m by laser scanner (BC-EC) ..... | 49 |
| Table 4.5 A comparative analysis of superelevations (BC-EC : Right) .....                                               | 52 |
| Table 4.6 A comparative analysis of superelevations (BC-EC : Left) .....                                                | 53 |





## *List of Figures*

|                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1.1 Flowchart of research .....                                                                         | 8  |
| Figure 2.1 Principle of registering point clouds data measured from different locations .....                  | 9  |
| Figure 2.2 Rotation of X, Y, and Z axes in 3-D space .....                                                     | 10 |
| Figure 2.3 Continuous rotation of X, Y and Z axes in 3-D space .....                                           | 11 |
| Figure 2.4 Principle of geo-referencing point clouds data passed through a registration process .....          | 13 |
| Figure 2.5 Centrifugal Force .....                                                                             | 15 |
| Figure 2.6 Design superelevation rates for radius of curve .....                                               | 21 |
| Figure 2.7 Methods of attaining superelevation .....                                                           | 24 |
| Figure 2.8 Typical cross section slope .....                                                                   | 25 |
| Figure 2.9 Method of superelevation attainment( $TL \leq \text{Length of a transition curve} \leq TL'$ ) ..... | 26 |
| Figure 2.10 Method of superelevation attainment( $\text{Length of a transition curve} \geq TL'$ ) .....        | 27 |
| Figure 2.11 Method of superelevation attainment( $\text{Length of a transition curve} \leq TL$ ) .....         | 27 |
| Figure 2.12 Method of superelevation attainment(Line-Curve-Line) .....                                         | 28 |
| Figure 3.1 Location of test field .....                                                                        | 29 |
| Figure 3.2 View of test field .....                                                                            | 30 |
| Figure 3.3 Shape of 3D Laser Scanner .....                                                                     | 31 |
| Figure 3.4 Shape of Total Station .....                                                                        | 32 |
| Figure 3.5 Constitution diagram of 3D laser scanning .....                                                     | 33 |

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 3.6 Shape of 3D laser scanning on research highway .....                        | 34 |
| Figure 3.7 Panoramic view of a sub-project .....                                       | 34 |
| Figure 3.8 Cloud points data obtained from 3D laser scanner .....                      | 35 |
| Figure 3.9 Target fitting for Registration .....                                       | 38 |
| Figure 3.10 Process of Registration .....                                              | 39 |
| Figure 3.11 Result view of Geo-referencing for overall section .....                   | 40 |
| Figure 3.12 Lightproof net prop which used for check .....                             | 41 |
| Figure 3.13 Data for extracting horizontal alignment .....                             | 43 |
| Figure 3.14 Process of extracting center line data in part section .....               | 44 |
| Figure 3.15 Process of extracting center line data in all section .....                | 45 |
| Figure 4.1 Comparison of superelevations between drawing and<br>extracted values ..... | 50 |
| Figure 4.2 A comparative analysis of superelevations .....                             | 54 |
| Figure 4.3 Distribution chart of estimated errors depending on direction               | 55 |
| Figure 4.4 Distribution chart of estimated RMSE's depending on direction               | 56 |

*Extraction of Road Superelevation  
by Laser Scanning Technique*

*Il-Hyeon, Nam*

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

*Abstract*

Because of the nature of the topographic characteristics, in Korea, there are many curve sections in horizontal alignment on road. Driving a car in curve section is very dangerous, because the car could be seriously affected by centrifugal force. To prevent this hazardous matter, superelevation must be installed on road surface for the stable driving of crossway direction. Superelevation must be precisely constructed, because they affect closely the safety of vehicle.

In former days, the traditional methods such as conventional surveying, photogrammetry, remote sensing and GPS measurement were utilized to obtain 3-dimensional location and attribute information of the road. But, recently, laser scanning technique which applicable in construction fields was developed with the growth of science and survey technology. This laser scanning methods are enable to obtain high density of point-set data with high positional accuracies.

Therefore, if this methods are applied on road, more precise road geometric structures would be analyzed with obtaining of large amount of data.

In this study, therefore, the superelevation in circular curve section was extracted from obtained road space information using laser scanning technique. Besides, the obtained scanning data was compared with the result data which measured by Total Station method to prove the usefulness of 3-dimensional laser scanning technique on the field of road.



# 1. 서론

## 1.1 연구배경 및 목적

국토가 좁고 산악지형이 많은 우리나라에서는 하나의 도로가 완성되기 까지 계획에서부터 완공까지 많은 어려움이 따른다. 도로의 설계단계에서 도로선형은 도로의 서비스를 얼마만큼 만족시킬 수 있는지 또는 임의의 도로 지점에서 과연 안전한 주행이 가능한지를 우선적으로 고려해야한다. 지형 특성상 우리나라 도로는 평면선형에서 곡선부가 많이 설치되고 있는 상황이다. 따라서 곡선부에서는 자동차가 주행시 원심력을 받게 되어 주행 안전상 많은 위험을 가지고 있다. 이를 방지하기 위하여 노면에 편경사를 설치하여 횡단방향으로 안정된 주행을 유지할 수 있도록 설계해야 한다. 이렇게 설계된 사향은 주행차량의 안전과 밀접한 영향을 미치므로 정밀하게 시공되어야 한다. 그러나 도로설계단계에서는 매우 중요한 설계요소로 취급한 편경사를 시공후에는 검증하는 절차가 대부분 무시되는 경우가 많고, 사고율이 증가하면 도로기하구조에서 원인을 분석할 때 편경사를 고려하는 경우가 종종 발생한다. 그리고 도로준공검사시 편경사를 재래의 측량 기법으로 정확히 시공 되었는지를 검토하기 위해서는 많은 시간과 경비가 소요된다.

종래에는 재래식측량, 사진측량, 원격탐사, GPS 측량 등을 이용하여 도로에 대한 3차원 위치정보 및 속성정보를 취득하였다. 그러나 최근에는 과학과 측량기술의 발전으로 건설 분야에 적용 가능한 레이저스캐닝기술이 개발 되었다. 이러한 레이저스캐닝기술은 종래의 측량방식에 비하여 높은 위치정확도로 고밀도의 점군 자료의 취득이 가능함으로써 이를 도로에 적

용할 경우 방대한 양의 자료 취득과 함께 보다 정확한 도로의 기하구조를 해석할 수 있게 되었다.

따라서 본 연구에서는 도로에 대해 레이저 스캐닝 기법을 이용하여 도로공간정보를 획득하고, 이를 통해 원곡선구간의 편경사를 추출하였다. 또한 취득된 스캐닝 자료를 Total Station으로 측정된 결과와 비교함으로써 도로에 대한 3차원 레이저 스캐너의 활용성을 높이하고자한다.

## 1.2 연구동향

본 연구는 레이저 스캐닝 기법으로 측정된 점군자료를 이용하여 도로의 기하구조 중 편경사를 추출하는 연구로서 레이저 스캐닝 기법과 관련된 연구와 편경사추출과 관련된 연구로 나누어 연구동향을 살펴보았다.

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, Total Station 등 전자기파를 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.

먼저 국내의 레이저 스캐닝 기법에 대한 연구를 살펴보면 지오매틱스 분야에서의 3차원 레이저 스캐닝 기술의 적용은 1990년대 말 LiDAR 기술의 도입으로 시작되었다. 국내 중소기업에서 임대 도입하여 경기도 성남시 분당구 인근을 촬영하고, 국내 최초로 LiDAR 자료로 지표면을 묘사하였다.(과학기술부, 2003). 그리고 김형태(2000)의 연구로 GPS, INS 등 항공기의 정확한 위치와 자세정보를 제공할 수 있는 보조장비의 성능이 향상

되어 항공 LiDAR 관측 장비가 상업화되게 되었다.

최재원(2001)은 간단한 형상의 대상물에서 비교적 복잡하면서 자유 형상을 갖는 대상물까지 3차원 레이저 스캐너를 이용하여 기존 역공학 분야에서 수작업을 필요로 하는 점군 자료의 적합화 작업에 대한 알고리즘을 제안하고, 곡면을 자동 생성하였다. 박흥기(2002)는 삼각측량 기술을 이용한 스캐닝 장비를 개발하고, 점군자료의 개수를 변화시키면서 해상도를 조절하여 석고상의 형상을 측정하였으며, 김민석(2004)은 LiDAR의 고도정보와 수치지도의 도로중심선을 이용하여 실제도로의 선형설계요소를 자동으로 추출하는 알고리즘을 제안하였다. 그리고, 한승희(2006)는 패턴 스캐너를 이용한 3차원 모델링 기법을 소개하였다.

다음으로 국외의 레이저 스캐닝 기법에 대한 연구를 살펴보면, 1970~1980년대 미국과 캐나다 등지에서 3차원 레이저 스캐닝 기술이 개발되었다. 그 이후 지오매틱스 분야에서는 1988~1993년 높은 기하학적 정확도를 제공할 수 있는 레이저 프로파일러(laser profiler)가 독일 Stuttgart 대학의 연구진에 의해 개발되었다(Ackermann, 1999).

1990년대 후반 이후의 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 횡단경사정보를 LiDAR 자료를 이용하여 추출하는 연구를 수행하였고, Hatger와 Brenner(2003)는 차량항법용 수치지도(GDF)의 도로 중심선과 도로의 종단경사정보를 이용하여 레이저 스캐닝 자료에서 도로지역만을 자동으로 영역분할하는 연구를 수행하였다.

지상부문에서의 3차원 레이저 스캐닝 기술의 보급은 1990년대 중반이



후 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).

3차원 레이저 스캐닝은 2000년대 초반 고정밀도의 중·장거리용 3차원 레이저 스캐너의 보급으로 인해 그 활용범위가 더욱 다양해지고, 토목, 문화재 등의 분야에서도 이러한 기술에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. Bauer와 Paar(2003)는 중·장거리 관측이 가능한 3차원 레이저 스캐너를 이용하여 빙하와 암석빙하를 대상으로 1년에 4회 관측하고, 1년 동안의 암석빙하의 고해상도 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.

레이저 스캐닝 기법을 도로에 적용한 연구를 살펴보면 차량에 장착된 2차원 레이저 스캐너와 디지털 카메라를 이용하여 획득된 연속된 연직 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 정략적으로 제시하였다. 또한 Jaswlskis 등(2005)은 3차원 레이저 스캐닝 기법이 토양과 암석의 체적, 도로 노면의 높이 값, 교량 빔의 chamber 등을 결정하는데 적합하고, 완공상태의 도면을 3차원으로 작성하는데 매우 큰 효과를 나타내는 것을 입증하였다.

Kotsis 등(2005)은 3차원 레이저 스캐너에 의해 취득된 자료를 이용하여 터널 면의 3차원 표면모델, 종·횡단 정보, 여굴량과 미굴량 등을 결정함으로써, 터널 측량에서의 3차원 레이저 스캐닝 기술의 활용을 제안하였다.

도로의 3차원 위치정보 획득 방법과 편경사추출과 관련된 국내의 연구를 살펴보면, 종래의 도로 노선측량을 대신하여 효율적이고 자동화된 방법으로 도로의 3차원 위치정보를 획득하기 위한 연구들이 진행되고 있다. 이종출(2001) 등은 위성측량 방법 중 RTK(Real Time Kinematic) 방법을 이용하여 선형의 지반고를 신속히 추출한 후, 이를 바탕으로 대상구간의 편경사 및 편경사도를 보여주는 편경사 자동추출 알고리즘을 개발하였다. 이종달(2001) 등은 곡선부 편경사 결정에 있어서, 차량의 무게중심을 고려해 대형차를 기준으로 한 편경사 설치에 중점을 두고 좀더 실제에 적합한 구조로 개선하고자 하였다. 서동주(2002) 등은 GPS 실시간 동적측위법을 이용하여 도로의 편경사를 추출하는 연구를 수행하였다. 김용길(2003) 등은 곡선부 도로 변이구간에서의 주행속도와 주행반경을 고려한 지점별 횡방향 가속도와 횡방향 가속도 변화율을 산정하고, 이를 고려한 곡선부 도로 변이구간의 설계안전성을 평가하여 편경사, 곡선반경 등의 선형 설계요소를 검토하였다. 이상하(2003) 등은 바람직한 도로선형설계를 위해 복합선형에서의 설계속도별 적정 평면곡선반경 범위의 기준을 정립하고, 운전자의 인지행태를 나타낼 수 있는 인지반경을 정립하여 바람직한 도로설계기

준을 제시하였다. 서동주(2003)는 수치사진 측량기법을 이용하여 설계 자료가 없는 도로를 대상으로 3차원 위치정보를 획득하고, 도로선형 및 시설물에 관련한 정보체계를 개발하였다. 이종출(2004) 등은 수치사진 측량기법을 이용하여 도로의 편경사를 추출하여 분석하였다. 이상화(2005) 등은 도로안정성 분석차량을 이용하여 도로의 편경사를 추출하고 분석하였다. 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.

유차정(2005) 등은 입체선형에서 현장 조사를 통하여 얻어진 자료를 통계 분석하여, 현행의 최대편경사와 곡선부 85백분위 주행속도를 근거로 하는 편경사를 비교하였다. 윤덕근(2006) 등은 GPS/INS 및 레이저 스캐너 등을 장착한 도로안전성 조사 분석 차량으로 주행 중 횡단경사를 측정하는 알고리즘을 개발하였다. 또, 현장에서 개발된 알고리즘의 적용성을 검토하기 위해 횡단경사 중 편경사가 설치된 곡선구간을 선택하여 레이저 스캐너와 GPS/INS 통합시스템을 사용하여 주행 중 편경사를 측정하고, 이를 통계적으로 검증하였다. 심관보(2006) 등은 2차로도로의 사고유형별 원인을 규명하고 그에 따른 교통운영 및 안전성 측면에서 횡단면 개선 방안을 수립하고, 새로운 횡단면 설계기준을 제시하였다.

### 1.3 연구방법 및 적용범위

본 연구에서는 3차원 레이저 스캐너에 의해 취득된 자료를 이용하여 도로 중심점의 좌표를 추출하고 이를 이용하여 평면 및 종단선형 요소를

산정한 선행연구자료를 이용하여 도로의 편경사를 추출하는 것에 목적을 두고 있으며, 연구를 위한 흐름도는 Figure 1.1과 같다.

먼저 울산광역시 남구에 소재한 두왕~무거간 도로 4차로 확장공사 구간내 직선, 원곡선, 완화곡선 등의 평면 구성요소와 종단 및 횡단 구성요소를 모두 포함한 약 1km의 구간을 연구대상도로로 선정하고, 3차원 레이저 스캐너를 이용하여 3차원 점군자료를 취득 하였다. 또한 연속된 다중점군자료를 처리하고 그 결과의 정확도를 분석하기 위하여 무프리즘 토탈스테이션에 의한 지상기준점 및 검사점 측량을 동시에 수행하였다. 이렇게 저장된 자료들은 Registration 및 Geo-referencing의 처리과정을 통해 다중스캔자료로 정합하게 된다.

이러한 다중스캔자료는 검사점과 비교하여 정확도를 분석하고 도로 중심선에 해당하는 자료를 추출하고, 선형화 알고리즘을 적용하여 직선 및 곡선구간을 분리하였으며, 분리된 자료를 이용하여 편경사를 추출하여 대상 도로의 전반적인 기하구조에 관련한 도면자료를 작성하였다. 도면으로 작성된 결과를 실제 연구대상도로의 기하구조제원과 설계도와 비교하였다.

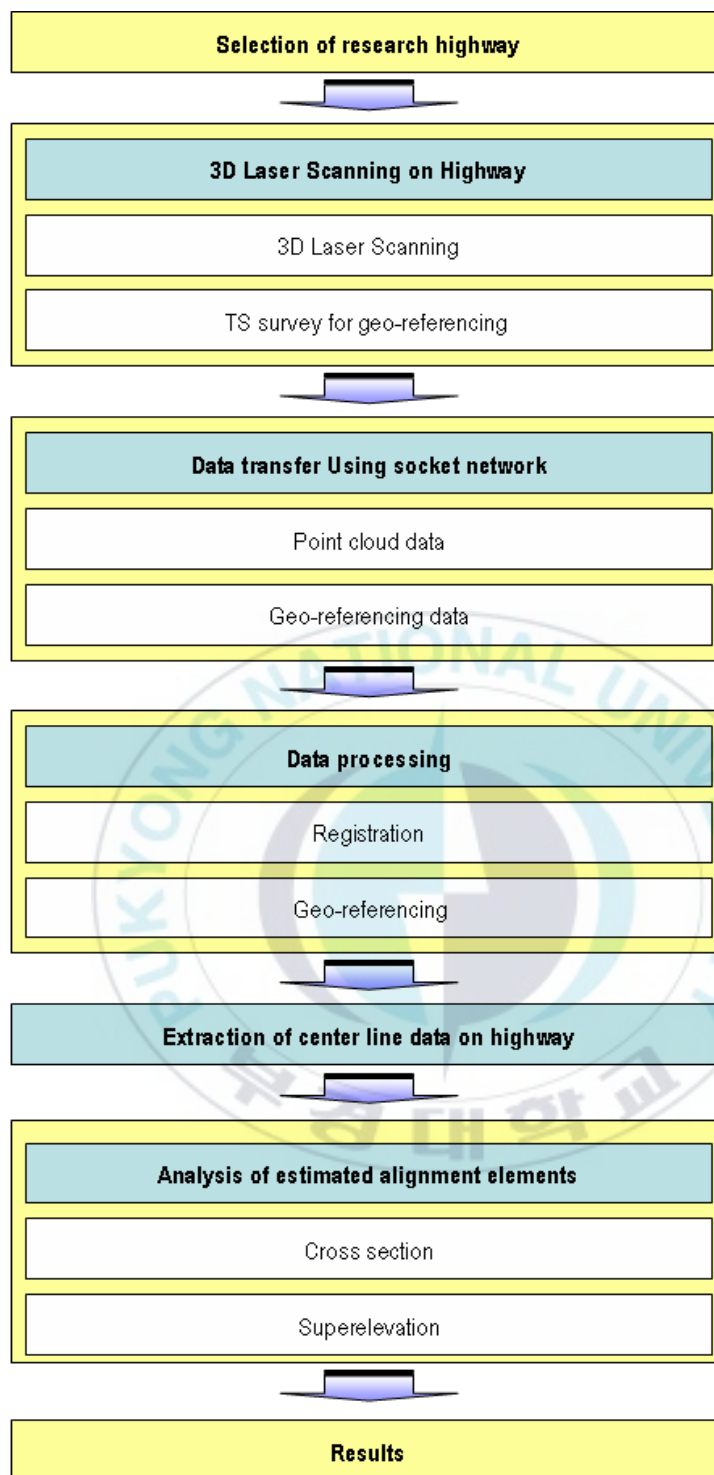


Figure 1.1 Flowchart of research

## 2. 레이저 스캐닝과 도로 환경사이론

### 2.1 레이저 스캐닝

하나의 대상물을 대상으로 취득된 다중 스캔 자료는 3차원 공간상의 상대적인 위치정합에 관련한 Registration 과정과 3차원 모델좌표를 대상물의 절대좌표로 변환하는 Geo-referencing 과정을 거치게 된다.

Registration은 Figure 2.1에 나타낸 것과 같이 서로 다른 좌표계를 가지는 자료를 기준이 되는 하나의 공통된 좌표계로 일치시켜주는 과정이다.

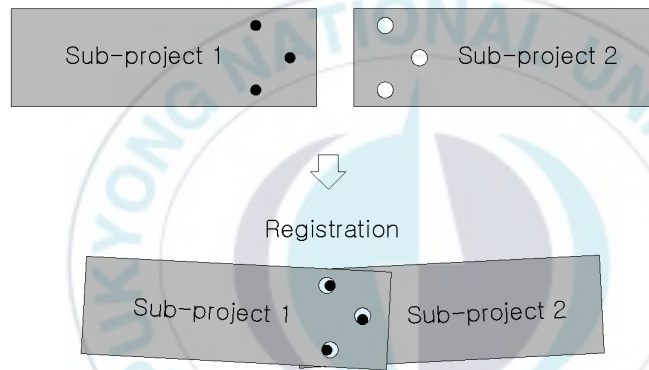


Figure 2.1 Principle of registering point clouds data measured from different locations

Registration은 3차원 공간상의 회전 요소에 의해 결정되어진다.

$X, Y, Z$  좌표를 축  $x', y', z'$  좌표축으로 회전할 때 회전각  $\omega, \phi, \kappa$ 는 Figure 2.2에 나타낸 것과 같다.

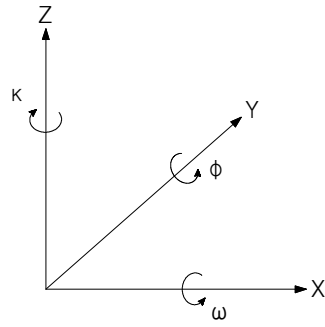


Figure 2.2 Rotation of X, Y, and Z axes in 3-D space

Figure 2.3과 같이 연속적으로 세 축에 대해 회전시킬 경우  $X$ 축에 대해  $\omega$ 만큼 회전한 후  $Y_{\omega}$ 축에 대해  $\phi$ 만큼 회전하고 마지막으로  $Z_{\omega\phi}$ 축에 대해  $\kappa$ 만큼 순차적으로 회전하면 회전에 의한 좌표계의 변환식은 식 (2.1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = R_{\omega\phi\kappa} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R_{\omega} R_{\phi} R_{\kappa} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

여기서,  $x', y', z'$  : 변환 좌표축

$X, Y, Z$  : 기본 좌표축

$R_{\omega}, R_{\phi}, R_{\kappa}$  : 각 축에 관련한 회전요소

$\omega$  회전을 기본좌표계  $(X, Y, Z)$ 와 변환좌표계  $(x', y', z')$ 를 고려한 행렬형태로 나타내면 식 (2.2)와 같고, 역변환하면 식 (2.3)과 같다.

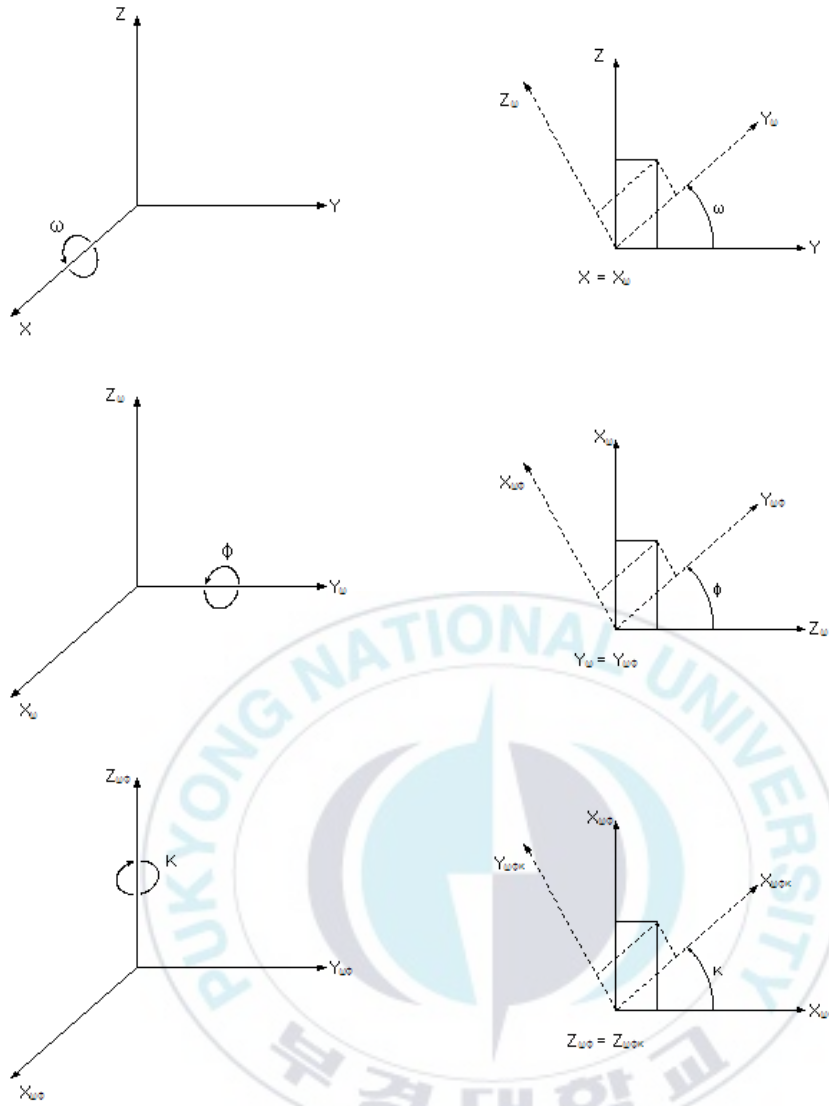


Figure 2.3 Continuous rotation of X, Y and Z axes in 3-D space

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R_{\omega} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & -\sin\omega \\ 0 & \sin\omega & \cos\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = R_w^T \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$\phi$  회전인 경우,

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & -\sin\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\phi & 0 & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R_\phi \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & \sin\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\phi & 0 & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = R_\phi^T \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

이며,  $\kappa$  회전인 경우

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\kappa & \sin\kappa & 0 \\ -\sin\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R_\kappa \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\kappa & -\sin\kappa & 0 \\ \sin\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = R_\kappa^T \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

와 같다.

이렇게 Registration 과정을 거쳐 동일 좌표계를 형성한 다중 스캔 자료들은 Figure 2.4에 나타낸 것과 같이 Geo-referencing 과정을 통해 지상



기준점과 결합되어 대상물의 절대좌표로 변환된다.

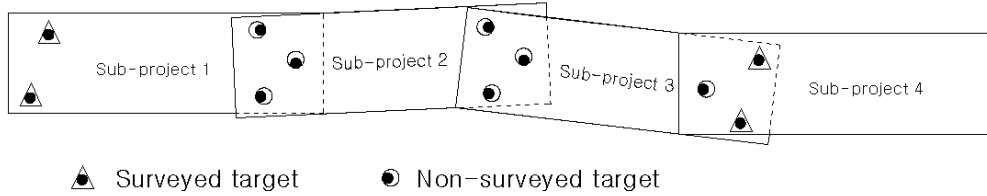


Figure 2.4 Principle of geo-referencing point clouds data passed through a registration process

또한 Registration 과정을 거친 다중 스캔 자료를 Geo-referencing 하기 위한 변환식은 식 (2.8)과 같다.

$$\begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix} = R_\omega R_\phi R_\kappa \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

여기서,  $X_G, Y_G, Z_G$  : 절대 좌표축

$R_\omega, R_\phi, R_\kappa$  : 각 축에 관련한 회전요소

$x', y', z'$  : Registration에 의해 변환된 좌표축

$X_0, Y_0, Z_0$  : 각 축에 관련한 평행 이동량

## 2.2 평면곡선반경

자동차가 평면곡선부를 주행할 때에는 원심력에 의하여 자동차는 곡선 바깥쪽으로 힘을 받게 되며 이때 원심력은 자동차의 속도 및 중량, 평면곡선반경, 타이어와 포장면의 횡방향마찰력 및 편경사와 관련하여 자동차에 작용하게 된다.

이와 같이 평면곡선부를 주행하는 자동차에 작용하는 힘의 요소들에 대하여 주행의 안전과 쾌적을 확보할 수 있도록 횡방향미끄럼마찰계수와 편경사의 값으로 설계속도에 따른 최소 평면곡선반경을 산정하게 된다. 이때 직선부에서와 같이 안전하고 쾌적한 주행이 가능하도록 횡방향마찰계수와 편경사의 값을 결정하게 되므로 두 요소는 주행의 안전과 쾌적에 가장 큰 영향을 미치는 기본적인 요소라 할 수 있다.

평면곡선부를 주행하는 자동차는 원운동을 하기 위하여 구심력이 필요하며, 그에 반하여 평면곡선반경과 속도에 따라 Figure 2.5와 같은 크기의 원심력이 작용하게 된다.

Figure 2.5에서 보듯이 평면곡선부를 주행하는 자동차의 원심력은 식 (2.9)와 같다.

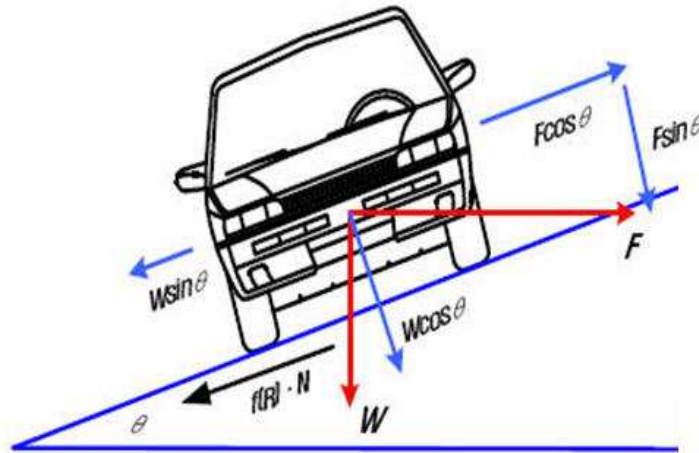


Figure 2.5 Centrifugal Force

$$F = \frac{W}{g} \times \frac{v^2}{R} \quad (2.9)$$

여기서,  $F$  : 원심력 (kg)

$W$  : 자동차의 총 중량 (kg)

$g$  : 중력가속도 ( $\approx 9.8 \text{ m/sec}^2$ )

$v$  : 자동차의 속도 (m/sec)

$R$  : 평면곡선반경 (m)

횡방향 마찰력에 의한 횡방향마찰계수를  $f$ 라 하면 자동차의 안전을 위해서 식 (2.10)을 만족하여야 한다.

$$(F \cos \theta - W \sin \theta) \leq f (F \sin \theta + W \cos \theta) \quad (2.10)$$

양변을  $\cos\theta$ 로 나누어 정리하면 식 (2.11)과 같다.

$$(F - W \tan\theta) \leq f(F \tan\theta + W) \quad (2.11)$$

식 (2.11)에서  $\tan\theta=i$ (편경사)를 대입하면 식 (2.12)와 같이 된다.

$$(F - Wi) \leq f(Fi + W) \quad (2.12)$$

이 식에 식 (2.9)을 대입하고, 양변을  $W$ 로 나누어 정리하면

$$R \geq \frac{v^2(1+fi)}{g(i+f)} \quad (2.13)$$

와 같이 정리되고,  $f$ 는 미소하드로 생략하고 정리하면 다음과 같다.

$$R \geq \frac{v^2}{g(i+f)} \quad (2.14)$$

위의 식에서 속도( $v$ :m/sec)를 설계속도 ( $V$ :km/hr)로 정리하면

$$R \geq \frac{V^2}{127(i+f)} \quad (2.15)$$

통상의 경우, 원심력에 의하여 자동차는 전도보다는 횡방향미끄럼의 영향을 먼저 받게 되므로 횡방향미끄럼에 안전할 수 있는 한계치의 평면곡선반경을 최소 평면곡선반경으로 결정하게 되며 식 (2.15)에 의하여 최소 평면곡선반경은 식 (2.16)로 구한다.

$$R = \frac{V^2}{127(i+f)} \quad (2.16)$$

식 (2.16)에 의해 설계속도와 최대편경사별로 최소곡선반경을 구하면 Table 2.1과 같다.

Table 2.1 The Minimum Radius of curvature(Superelevation)

| Design speed<br>(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  |

Table 2.2 The Minimum Radius of curvature(Country)

| Division                               | Design Speed(km/hr)                  | 120         | 100       | 80        |
|----------------------------------------|--------------------------------------|-------------|-----------|-----------|
| Korea(1990)                            | Minimum radius of circular curve (m) | 710         | 460       | 280       |
|                                        | f                                    | 0.10        | 0.11      | 0.12      |
| Korea(1999)                            | 6%                                   | 710         | 460       | 280       |
|                                        | 7%                                   | 670         | 440       | 265       |
|                                        | 8%                                   | 630         | 420       | 250       |
|                                        | f                                    | 0.10        | 0.11      | 0.12      |
| America(AASHTO)                        | 6%                                   | 755         | 435       | 250       |
|                                        | 7%                                   | 710         | 415       | 240       |
|                                        | 8%                                   | 665         | 395       | 230       |
|                                        | f                                    | 0.09        | 0.12      | 0.14      |
| Japan                                  | 6%                                   | (1,000) 710 | (700) 460 | (400) 280 |
|                                        | 7%                                   | 630         | 410       | 250       |
|                                        | 8%                                   | 570         | 380       | 230       |
|                                        | f                                    | 0.10        | 0.11      | 0.12      |
| Germany(RAS)                           | q : 7.0%, n : 50%                    | 720         | 450       | 250       |
|                                        | q : 2.5%, n : 10%                    | 2,700       | 1,700     | 980       |
| Reference<br>(Highway standard design) | 6%                                   | (1,000) 710 | (700) 460 | (280)     |
|                                        | 7%                                   | (1,000) 670 | (660) 440 | (265)     |
|                                        | 8%                                   | (900) 630   | (630) 420 | (250)     |
|                                        | f                                    | 0.10        | 0.11      | 0.12      |

국내외 외국 모두 최대편경사, 마찰계수에 근거하여 최소곡선 반경 기준을 설정하고 있고 큰 차이가 없음을 Table 2.2에서 알 수 있다. 설계속도에 따른 최소곡선반경만 제시되어 있어, 대부분의 설계자들이 이 값에 맞춰 설계를 하고 있는 실정이다. 따라서 최저값 또는 바람직한 값이 제시될 수 있도록 이 부분에 대한 연구가 필요하다.

## 2.3 편경사

자동차가 평면곡선부를 주행할 때 작용하는 원심력에 저항하는 힘은 횡방향마찰력과 설치된 편경사에 의해 도로 포장면에 수직으로 작용하는 분력이다. 원심력 가운데 운전자에게 불쾌감을 주는 횡방향력을 작게 하기 위해서는 가능한 한 편경사를 크게 하여야 한다. 하지만, 편경사가 너무 클 경우에는 저속으로 주행하는 자동차는 횡방향으로 미끄러지려 하기 때문에 운전자가 주행방향을 유지하기 위하여 부자연스러운 핸들조작을 하여야 하며, 또한 포장면이 결빙되었을 때 자동차의 정지 및 출발시 횡방향으로 미끄러질 우려가 있어 최대 편경사를 제한하고 있다. 최대 편경사를 결정하는데 고려하여야 할 요소는 ① 주행의 쾌적성 및 안전 ② 적설 및 결빙 등의 기상조건 ③ 지역구분 ④ 저속 주행자동차의 빈도 ⑤ 시공성 및 유지관리 등이 있다. 이러한 요소들을 고려할 때 최대 편경사를 모든 도로에 획일적으로 적용하는 것은 비합리적이므로 대상도로에 맞게 6~8%로 결정하였으며, 도시부 도로에서는 교차로의 접속, 횡단보도, 연도이용 및 자동차의 빈번한 정지 등을 고려하여 작은 편경사를 두거나 설치하지 않도록 하였다.

AASHTO에서는 일반적으로 최대 편경사 8%를 바람직한 값으로 추천하고 있다.

차도의 평면곡선부에는 도로가 위치하는 지역, 적설정도, 설계속도, 평면곡선반경 및 지역상황 등에 따라 Table 2.3의 비율 이하의 최대 편경사를 두어야 한다.

Table 2.3 The Maximum Superelevation Rates

| Division   |                            | The Maximum Superelevation rates (%) |
|------------|----------------------------|--------------------------------------|
| Rural Area | In Areas with Snow and Ice | 6                                    |
|            | Other Area                 | 8                                    |
| Urban Area |                            | 6                                    |
| Ramp       |                            | 8                                    |

평면 곡선반경을 고려하여 편경사가 필요 없는 경우와 설계속도 60 km/hr 이하인 도시지역의 도로에서 도로 주변과의 접근과 다른 도로와의 접속을 위하여 부득이하다고 인정되는 경우에는 편경사 설치가 곤란한 경우에는 편경사를 두지 않는다.

도로의 평면곡선부를 원심력을 받으며 주행하는 자동차는 노면에 설치된 편경사와 노면과 타이어간의 마찰에 의하여 안정된 주행을 할 수 있으며, 이때 자동차가 받는 원심가속도를 이용하여 편경사와 횡방향마찰력과 관계로 나타내면 식 (2.17)과 같다.

$$\frac{v^2}{R} = gf + gi \quad (2.17)$$

자동차가 받는 원심가속도는 편경사와 횡방향마찰력이 분담하게 되는데, 편경사가 분담하는  $gi$ 는 노면에 수직으로 작용하는 성분이며 횡방향마찰력이 분담하는  $gf$ 는 운전자에게 횡방향으로 작용하는 성분이다.



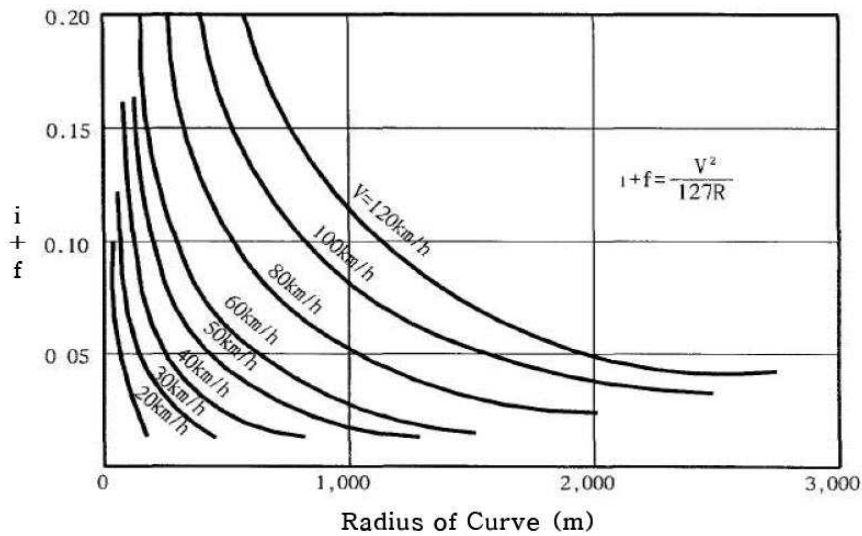


Figure 2.6 Design superelevation rates for radius of curve

설계시 평면곡선반경의 크기가 결정되면 그 도로의 설계속도와 평면곡선반경에 따른 적절한 편경사를 결정하여야 한다.

설계속도와 평면곡선반경에 대하여 자동차가 안전하게 주행할 수 있는 편경사와 횡방향마찰계수의 크기는 식 (2.15)에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$i + f = \frac{V^2}{127R} \quad (2.18)$$

식 (2.18)에 따라, 곡선반경(R)과 (i+f)와의 관계를 각 설계속도에 따라 도식하면 Figure 2.6과 같다. 식 (2.18)에서 속도가 일정할 경우 (i+f)의 값과 곡률(1/R)은 정비례하고 있다. 따라서, 곡률에 대응하는 (i+f)의 값에서 곡률반경과 편경사의 관계를 결정하는 것이 용이하게 된다. 그리고 곡률에

대응하는  $(i+f)$ 의 값을 어떻게 분배할 것인가에 대해서는 안전성과 쾌적성을 고려하여 결정된다.

도로의 횡단경사는 노면배수를 원활하게 처리할 수 있는 크기를 확보하여야 하나 편경사가 너무 작은 경우에 노면배수의 처리가 원활하게 이루어지지 못하는 경우가 발생하게 된다. 그러므로 편경사를 생략할 수 있는 평면곡선반경은 편경사의 값이 1.5% 이하인 평면곡선반경의 크기로 설정하였다.

Table 2.4 Radius of circular curve depending on design speed and superelevation

| Design speed<br>(km/hr) | Maximum superelevation 6% |        | Maximum superelevation 7% |        | Maximum superelevation 8% |        |
|-------------------------|---------------------------|--------|---------------------------|--------|---------------------------|--------|
|                         | R(m)                      | f      | R(m)                      | f      | R(m)                      | f      |
| 120                     | 6,900                     | 0.0364 | 7,100                     | 0.0360 | 7,200                     | 0.0357 |
| 110                     | 5,800                     | 0.0364 | 5,900                     | 0.0361 | 6,000                     | 0.0359 |
| 100                     | 4,800                     | 0.0364 | 4,900                     | 0.0361 | 5,000                     | 0.0357 |
| 90                      | 3,900                     | 0.0364 | 4,000                     | 0.0359 | 4,000                     | 0.0359 |
| 80                      | 3,100                     | 0.0363 | 3,100                     | 0.0363 | 3,200                     | 0.0357 |
| 70                      | 2,300                     | 0.0368 | 2,400                     | 0.0361 | 2,400                     | 0.0361 |
| 60                      | 1,700                     | 0.0367 | 1,800                     | 0.0357 | 1,800                     | 0.0357 |
| 50                      | 1,200                     | 0.0364 | 1,200                     | 0.0364 | 1,200                     | 0.0364 |
| 40                      | 800                       | 0.0357 | 800                       | 0.0357 | 800                       | 0.0357 |
| 30                      | 400                       | 0.0377 | 450                       | 0.0357 | 500                       | 0.0342 |
| 20                      | 200                       | 0.0357 | 200                       | 0.0357 | 200                       | 0.0342 |

Table 2.4에서 보듯이 설계속도에 따라 편경사를 생략할 수 있는 평면곡선반경의 횡방향마찰계수의 값은  $f=0.0342\sim0.0368$ 의 범위로서 원심력에 대항하여 주행의 안전성과 쾌적성을 충분히 확보할 수 있음을 알 수 있다.

또한, 표준 횡단경사가 1.5%인 경우에는 횡방향마찰계수의 값은 더 작게 나타나게 되므로 Table 2.4의 평면곡선반경을 편경사를 생략할 수 있는 평면곡선반경으로 적용하여도 자동차의 주행에 충분히 안전과 쾌락을 확보할 수 있다.

편경사의 회전축으로부터 편경사가 설치되는 차로수가 2개 이하인 경우의 편경사의 접속설치길이는 설계속도에 따라 Table 2.5의 편경사 최대 접속설치율에 의하여 산정된 길이 이상이 되어야 한다.

Table 2.5 Maximum superelevation rates in accordance with design speed

| Design speed (km/hr) | Maximum superelevation rates |
|----------------------|------------------------------|
| 120                  | 1 / 200                      |
| 110                  | 1 / 185                      |
| 100                  | 1 / 175                      |
| 90                   | 1 / 160                      |
| 80                   | 1 / 150                      |
| 70                   | 1 / 135                      |
| 60                   | 1 / 125                      |
| 50                   | 1 / 115                      |
| 40                   | 1 / 105                      |
| 30                   | 1 / 95                       |
| 20                   | 1 / 85                       |

Table 2.6 Adjustment factor for number of lane rotated

| Number of lanes rotated | Adjustment Factor |
|-------------------------|-------------------|
| 3                       | 1.25              |
| 4                       | 1.50              |
| 5                       | 1.75              |
| 6                       | 2.00              |

편경사의 회전축으로부터 편경사가 설치되는 차로수가 2개를 초과하는 경우의 편경사의 접속 설치길이는 Table 2.5에 의하여 산정된 길이에 Table 2.6의 보정계수를 곱한 길이 이상이 되어야 하며, 노면의 배수가 충분히 고려되어야 한다.

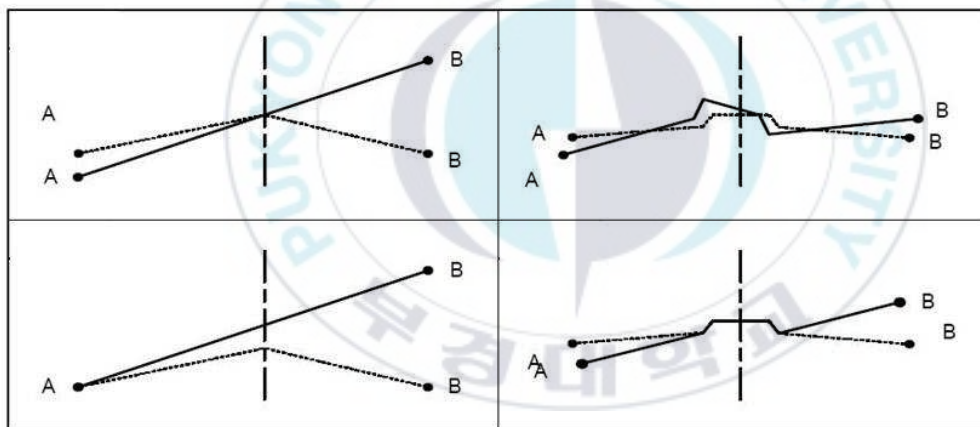


Figure 2.7 Methods of attaining superelevation

편경사의 설치의 기준점을 취하는 방법에는 Figure 2.7과 같이 차도 중심선을 회전축으로 잡는 경우와 차도의 끝단을 회전축으로 잡는 경우의 두 가지 방법이 있다. 일반적으로 우열을 비교하면 차도 중심선으로 잡는

경우가 차도 끝단보다 유리하며, 분리도로의 폭이 좁거나 지형이 평탄한 경우 및 시공성 측면에서 차도 중심선이 유리하다.

편경사를 설치하는 방법은 평면곡선부의 구성조건에 따라 달라진다. 일반적인 편경사 설치방법은 첫째, 설계속도와 평면곡선반경에 따른 편경사( $i$ )의 크기를 선정하고, 둘째, 설계속도에 따른 편경사 접속설치율( $q$ )을 선정하고, 셋째, 표준 횡단경사와 편경사를 더한 값이 변화하여야 할 총길이( $TL$ )을 산정하고, 넷째, 편경사가 변화하여야 할 길이( $L$ )를 산정하고 마지막으로 변화길이 전체에 설치될 최대의 편경사를 보간법으로 변화시켜 설치한다. 편경사 설치시 설계 및 시공상의 편의를 위하여 편경사 접속설치 변화구간의 변곡점은 정수(5m 단위)가 되는 측점으로 한다.

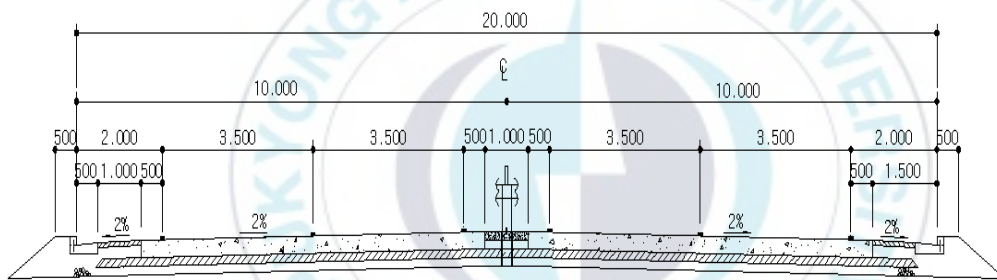


Figure 2.8 Typical cross section slope

Figure 2.8의 표준 횡단구성에 따라 평면곡선부의 구성조건을 보면 평면곡선부가 완화곡선과 원곡선으로 구성된 경우 완화곡선의 길이는 자동차의 주행과 관련하여 확보하여야 할 길이 외에 편경사의 변화를 수용할 수 있는 길이를 확보하여야 한다.

Table 2.7 Superelevation run off

| Typical cross section slope \ Number of lanes rotated | 2   | 3    | 4    |
|-------------------------------------------------------|-----|------|------|
| 1.5 %                                                 | 60m | 75m  | 90m  |
| 2.0 %                                                 | 80m | 100m | 120m |

완화곡선의 길이가 편경사 접속설치길이보다 크고 배수를 고려한 편경사 접속설치길이보다 작은 경우에는 Figure 2.9와 같이 완화곡선 전 구간에 걸쳐 일률적으로 변화하도록 편경사를 설치하고, 완화곡선의 길이가 배수를 고려한 편경사 접속설치길이보다 큰 경우에는 Figure 2.10과 같이 낮은 경사 구간의 편경사 변화속도를 높여야 하고, 완화곡선의 길이가 편경사 접속설치길이보다 작은 경우에는 Figure 2.11과 같이 직선구간에 부족한 만큼의 길이를 확보하여 직선구간과 완화곡선구간에서 편경사를 변화시키며, 원곡선 시점부터는 최대 편경사를 설치하여야 한다.

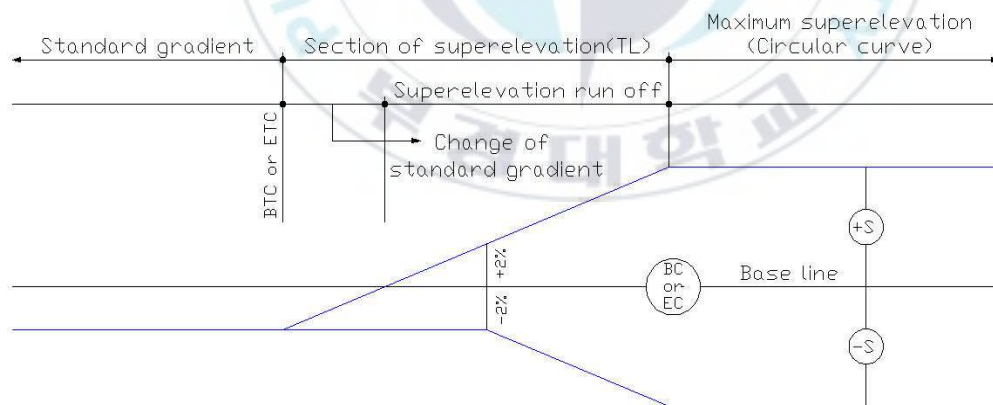


Figure 2.9 Method of superelevation attainment( $TL \leq \text{Length of a transition curve} \leq TL'$ )

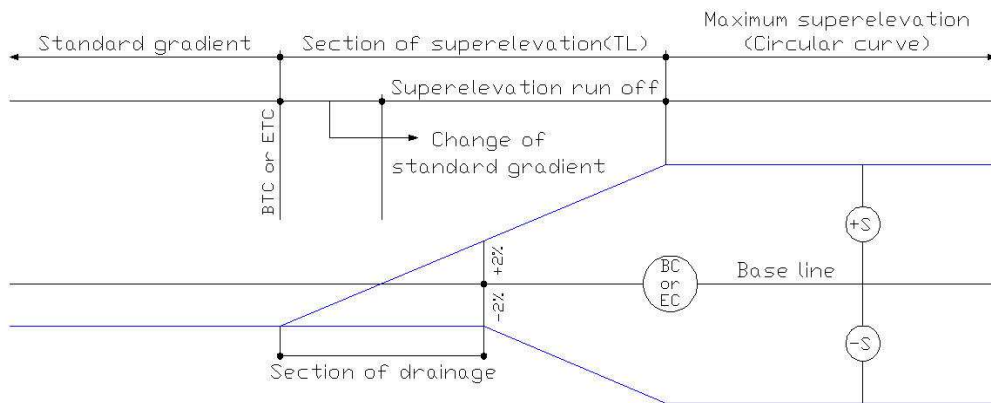


Figure 2.10 Method of superelevation attainment(Length of a transition curve  $\geq$  TL')

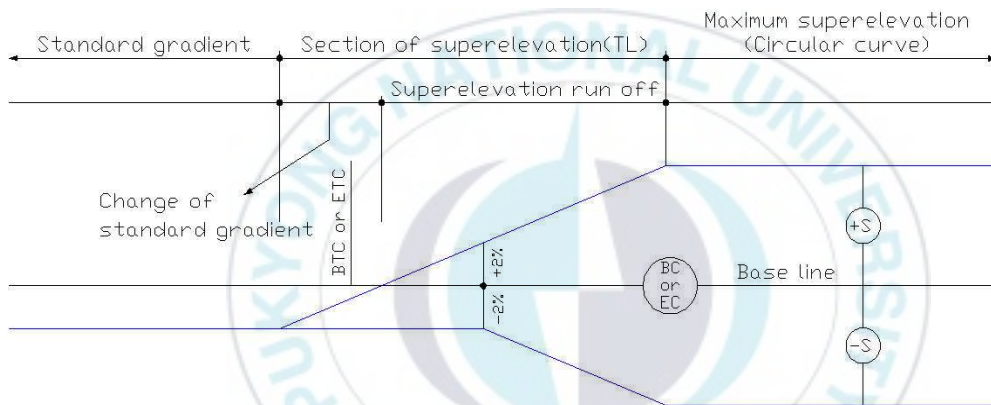


Figure 2.11 Method of superelevation attainment(Length of a transition curve  $\leq$  TL)

평면곡선부가 원곡선만으로 구성된 경우는 원곡선이 상당히 커서 완화곡선을 설치할 필요가 없거나, 설계속도가 60 km/hr 미만인 도로이다. 완화곡선이 설치되지 않으므로, Figure 2.12와 같이 부득이 편경사의 변화는 직선구간에서부터 시작하게 되며, 편경사 변화구간길이중 1/3은 원곡선구간에 두어 최대 편경사가 원곡선 시종점부를 지나가게 설치하여야 한다.



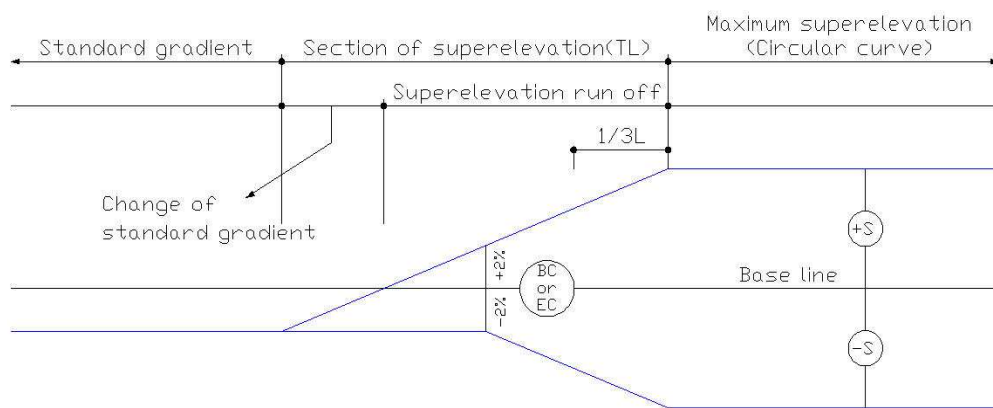


Figure 2.12 Method of superelevation attainment (Line-Curve-Line)





### 3. 레이저 스캐닝 및 도로중심선자료 추출

#### 3.1 연구대상지 선정

레이저 스캐닝 기법을 이용하여 도로의 편경사를 추출하기 위해 선형요소가 잘 나타난 도로를 연구대상도로로 선정하였다. 연구대상도로는 국도 14호선 두왕~무거간 도로 4차로 확장공사 구간 내 직선, 원곡선, 완화곡선 등의 평면 구성요소와 종단 및 횡단 구성요소를 모두 포함한 약 1km의 구간이다. 이중 편경사가 잘 나타나 있는 원곡선구간을 대상구간으로 정하였다. 연구대상지역의 IRS(Indian Remote Sensing Satellite)-1D 영상은 Figure 3.1과 같다.

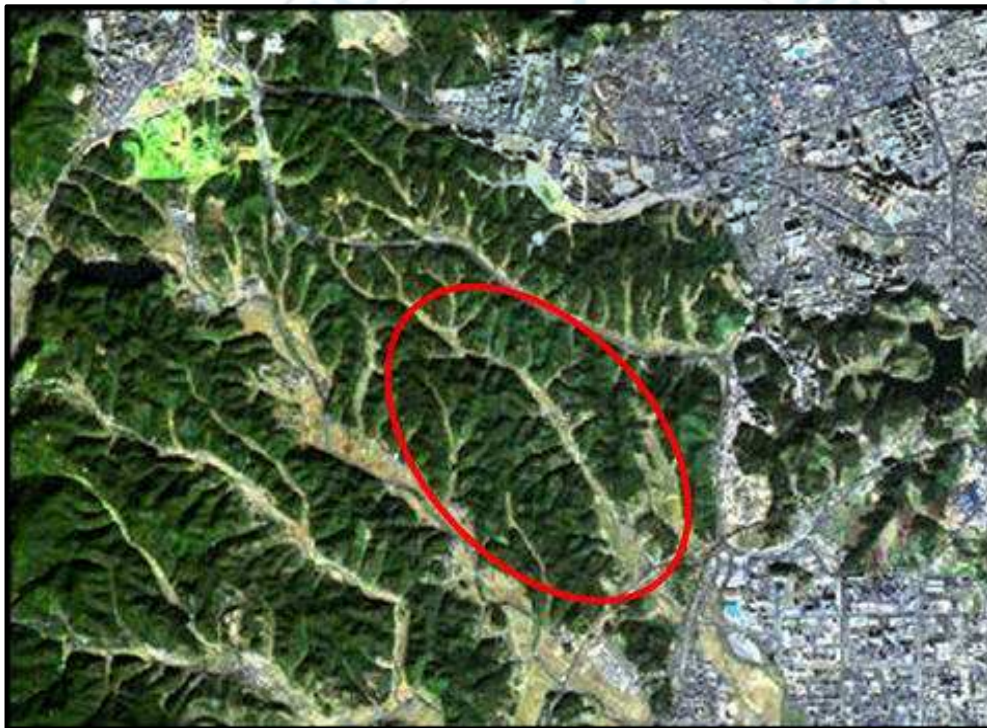


Figure 3.1 Location of test field

본 연구대상지역은 설계속도 80km/hr의 국도로 아직 차량의 유출입이 없어 레이저 스캐닝을 하기에 적합하며, Figure 3.2와 같이 강성포장으로 시공되어있어 연성포장에 비해 레이저의 반사강도가 뛰어나 이로 인한 스캔 데이터의 취득률도 높다.



Figure 3.2 View of test field

### 3.2 관측 시스템의 구성

본 연구에서 대상도로구간의 선형정보를 추출하기 위해 사용된 3차원 레이저 스캐너는 Trimble사에서 제조한 GS200 3D Laser Scanner이며, 반사강도 18%의 대상물에 대해 약 200m 거리까지 측정이 가능하다. GS200 장비의 형상 및 제원은 Figure 3.3과 Table 3.1에 나타내었다.



Figure 3.3 Shape of 3D Laser Scanner

Table 3.1 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                   |                |

지상 기준점 및 검사점을 측정하기 위하여 사용된 Total Station은 Sokkia사에서 제작된 SET 230<sub>RK3</sub>을 사용하였다. 무 프리즘 모드에서 최대 350m의 거리측정이 가능하며 그 형상은 Figure 3.4에서 볼 수 있으며, 장비의 제원은 Table 3.2와 같다.



Figure 3.4 Shape of Total Station

Table 3.2 Specification of SET230<sub>RK3</sub>

| SOKKIA SET230 <sub>RK3</sub> |                                         |                              |                                                                                                |
|------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Laser class                  |                                         | Class 3R Laser Product       |                                                                                                |
| Laser output                 |                                         | Reflectorless mode : Class 3 |                                                                                                |
|                              |                                         | Prism/Sheet mode : Class 1   |                                                                                                |
| Measuring range              | Reflectorless<br>(with Kodak Gray Card) |                              | 0.3 to 350m(white side, 90% reflective)<br>0.3 to 170m(gray side, 18% reflective)              |
|                              | prism                                   |                              | 1.3 to 4,000m                                                                                  |
| Accuracy                     | Reflectorless<br>(Fine mode)            |                              | 0.3 to 200m : $\pm(3+2\text{ppm}\times D)$<br>Over 200 to 350m : $\pm(5+10\text{ppm}\times D)$ |
|                              | prism                                   | (Fine mode)                  | 0.3 to 200m : $\pm(2+2\text{ppm}\times D)$                                                     |
|                              |                                         | (Rapid single mode)          | 0.3 to 200m : $\pm(5+2\text{ppm}\times D)$                                                     |



### 3.3 대상 도로의 레이저 스캐닝

도로의 선형요소를 추출하기 위해 3차원 레이저스캐닝을 수행하여 점군 자료를 취득하고, 이와 동시에 TS를 사용하여 Geo-referencing에 사용되는 지상기준점 및 취득된 점군자료의 정확도 검증을 위한 검사점을 측정하였다.

#### 3.3.1 3차원 레이저 스캐닝

레이저스캐너는 관측거리가 200m이며 도로의 경우 스캐너에서 방출하는 레이저의 입사각 및 반사각이 낮아 그 관측가능거리가 50m정도로 한정되어있다. 본 연구의 대상도로는 Figure 3.2와 같이 도로 중앙에 중앙분리대 및 차광망이 설치되어 있어 1개의 sub-project에 연구대상도로를 모두 포함하기는 어려울 뿐만 아니라 양방향의 정보를 수집하기에는 더욱 어려움이 많다. 따라서 1km 연장의 대상도로를 모두 스캐닝하기 위해서는 중앙분리대를 기준으로 양방향에 대한 측정결과가 중복될 수 있도록 Figure 3.5에서와 같이 19개의 sub-project로 나누어 스캐닝을 하였다. 또한 다중의 sub-project를 Registration하기 위해 sub-project간의 중복 영역에서는 3개의 타켓을 설치하여 정밀하게 스캐닝 하였으며, Registration이 완료된 스캔자료를 절대좌표로 변환하기 위해 지상기준점을 대상도로의 시·종점부에 설치하여 정밀스캐닝 하였다. Figure 3.6은 대상도로에 대하여 3차원 레이저 스캐닝모습과 설치된 타켓의 형상을 보여주고 있다.

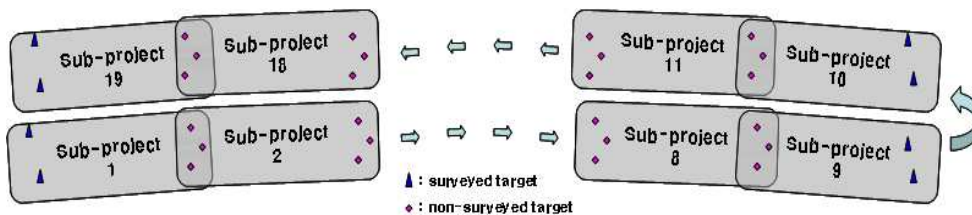


Figure 3.5 Constitution diagram of 3D laser scanning



(a) 3D laser scanner



(b) Targets

Figure 3.6 Shape of 3D laser scanning on research highway

하나의 sub-project에서 스캐너는 수평 360°, 연직 60°의 범위로 스캔하였다. 취득된 데이터는 Figure 3.7에 보이는 것처럼 스캐너의 관측범위를 모두 포함하는 mosaic 영상과 Table 3.3과 같이 X, Y, Z의 3차원 위치 정보, RGB의 색상정보, 반사강도 정보를 포함하고 있으며 여기서의 위치 정보는 레이저 스캐너의 위치를 중심으로 표현된다.

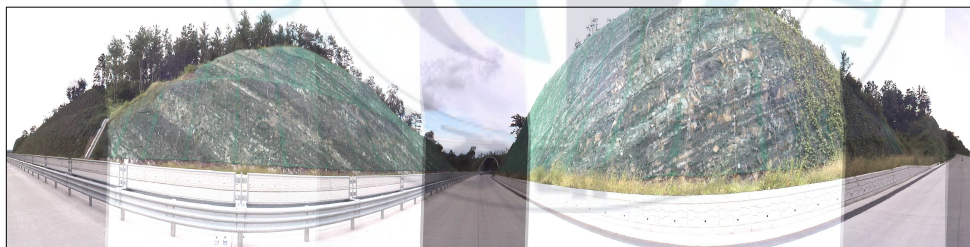


Figure 3.7 Panoramic view of a sub-project

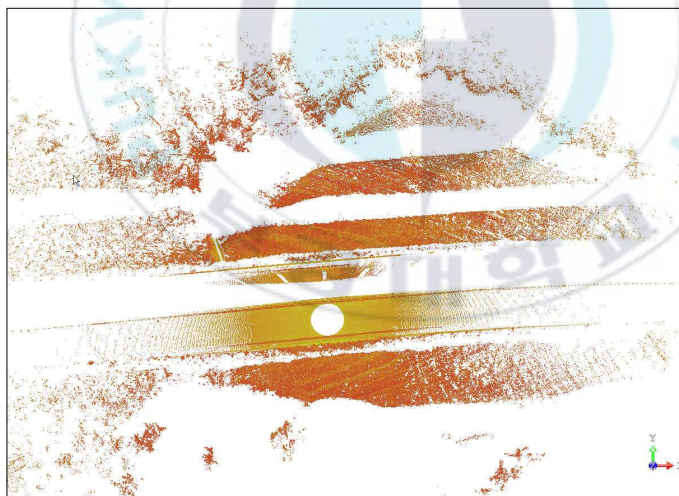
Table 3.3 Form of point cloud data

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

Figure 3.8은 대상도로의 한 위치에서 스캐닝으로 취득된 점군데이터를 RGB와 반사강도에 따라 나타낸 것이다.



(a) RGB



(b) IntensityFigure

Figure 3.8 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 3.4 및 Table 3.5와 같다.

Table 3.4 Result of 3D laser scanning(Right line)

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

Table 3.5 Result of 3D laser scanning(Left line)

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



### 3.3.2 지상 기준점 측량

지상 기준점 측량은 각 sub-project에 Registration 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 3.6에 나타낸 것과 같다.

Table 3.6 The result of check point

| Check Point |            |            |        |    |            |            |        |
|-------------|------------|------------|--------|----|------------|------------|--------|
| 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 |    |            |            |        |

### 3.4 자료처리 및 중심선 자료 추출

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

#### 3.4.1 Registration 및 Geo-referencing

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 3.9는 정밀 스캐닝된 타겟을 이용한 Registration 처리모습을 보여주고 있으며, Figure 3.10은 두 개의 sub-project에 대한 Registration 과정과 결과를 나타낸다.

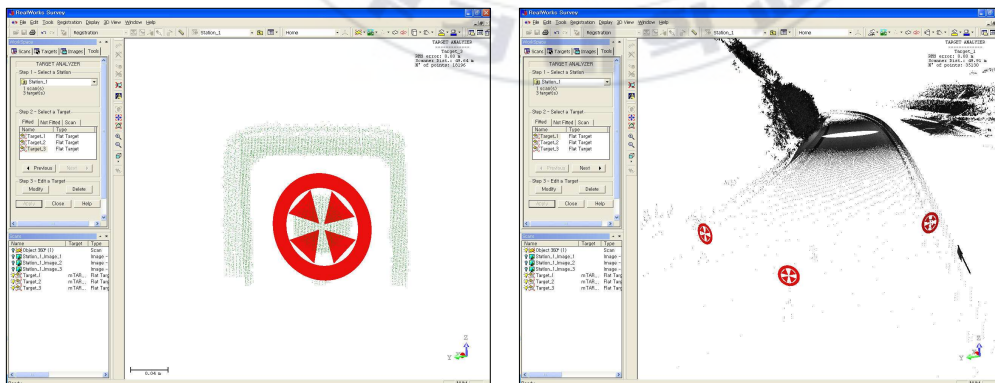


Figure 3.9 Target fitting for Registration

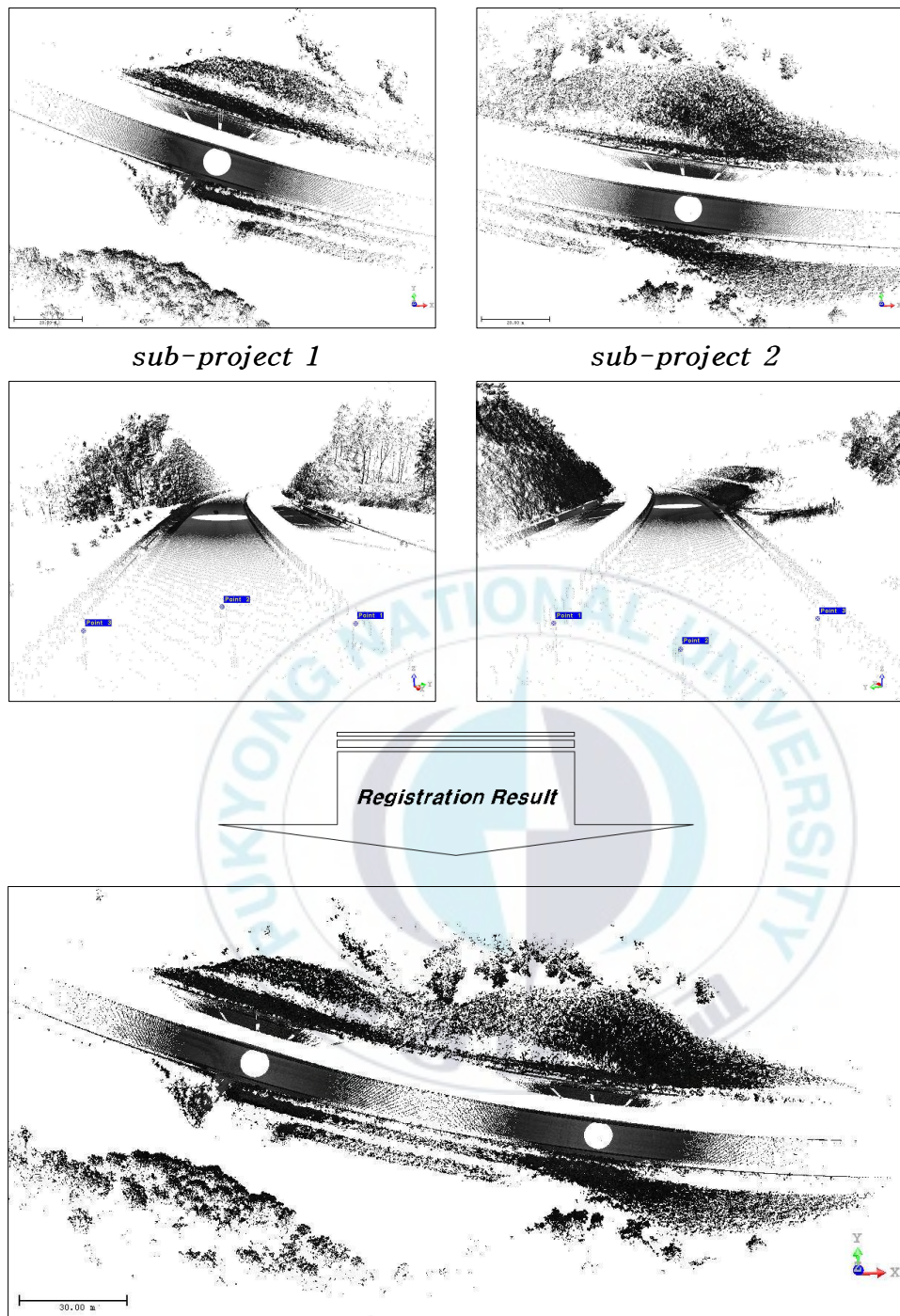


Figure 3.10 Process of Registration

이러한 Registration 과정을 거쳐 동일 좌표계로 형성된 다중스캔자료들은 Geo-referencing을 과정을 통하여 지상 기준점과 결합된 절대좌표로 변환된다. Figure 3.11은 연구대상도로 약 1km 구간을 대상으로 취득된 다중스캔자료를 Registration하고, 최종적으로 Geo-referencing한 결과를 나타낸다.



Figure 3.11 Result view of Geo-referencing for overall section



### 3.4.2 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 3.12에 나타낸 것과 같이 도로 중심선상에 설치된 차광망 지주를 사용하였으며, 사용된 검사점은 대상도로 1km 구간에 고루 분포되어 있다.

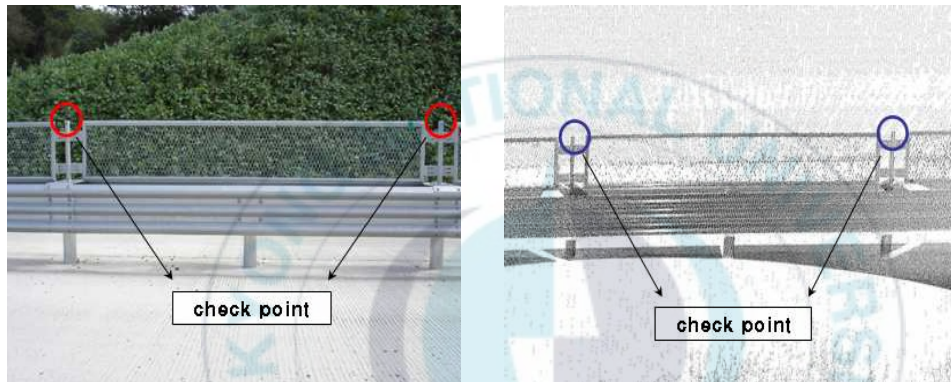


Figure 3.12 Lightproof net prop which used for check

검사점의 비교·분석 결과는 Table 3.7에 나타낸 것과 같이 각 방향별 잔차는 X방향으로  $-0.068 \sim 0.066\text{m}$ , Y방향으로  $-0.096 \sim 0.079\text{m}$ , Z방향으로  $-0.007 \sim 0.090\text{m}$ 의 분포를 보였다. 또한 각 방향별 RMSE를 산정한 결과, X방향으로  $0.041\text{m}$ , Y방향으로  $0.041\text{m}$ , Z방향으로  $0.025\text{m}$ 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 3.7 Comparison of check point

| No      | Total Station |            |        | 3D Laser Scanner |            |        | Residual  |           |           |
|---------|---------------|------------|--------|------------------|------------|--------|-----------|-----------|-----------|
|         | X(m)          | Y(m)       | Z(m)   | X(m)             | Y(m)       | Z(m)   | $v_x$ (m) | $v_y$ (m) | $v_z$ (m) |
| 1       | 226138.494    | 222745.150 | 40.657 | 226138.554       | 222745.133 | 40.633 | -0.060    | 0.017     | 0.024     |
| 2       | 226146.028    | 222742.530 | 40.863 | 226146.069       | 222742.481 | 40.798 | -0.041    | 0.049     | 0.065     |
| 3       | 226153.604    | 222739.985 | 41.008 | 226153.591       | 222739.945 | 40.933 | 0.013     | 0.040     | 0.075     |
| 4       | 226238.912    | 222718.705 | 42.191 | 226238.916       | 222718.713 | 42.112 | -0.004    | -0.008    | 0.079     |
| 5       | 226326.388    | 222709.964 | 41.956 | 226326.369       | 222710.060 | 41.878 | 0.019     | -0.096    | 0.079     |
| 6       | 226423.981    | 222713.184 | 40.048 | 226423.970       | 222713.185 | 39.970 | 0.011     | 0.000     | 0.078     |
| 7       | 226427.945    | 222713.471 | 39.931 | 226427.953       | 222713.470 | 39.872 | -0.008    | 0.001     | 0.059     |
| 8       | 226431.942    | 222713.803 | 39.806 | 226431.924       | 222713.761 | 39.764 | 0.018     | 0.042     | 0.042     |
| 9       | 226435.903    | 222714.111 | 39.673 | 226435.879       | 222714.072 | 39.628 | 0.024     | 0.039     | 0.045     |
| 10      | 226439.923    | 222714.427 | 39.557 | 226439.865       | 222714.391 | 39.503 | 0.058     | 0.036     | 0.054     |
| 11      | 226443.889    | 222714.767 | 39.429 | 226443.840       | 222714.731 | 39.378 | 0.049     | 0.036     | 0.051     |
| 12      | 226447.880    | 222715.135 | 39.292 | 226447.817       | 222715.100 | 39.227 | 0.063     | 0.035     | 0.065     |
| 13      | 226511.520    | 222721.137 | 36.910 | 226511.485       | 222721.108 | 36.880 | 0.035     | 0.029     | 0.030     |
| 14      | 226515.490    | 222721.497 | 36.761 | 226515.467       | 222721.466 | 36.726 | 0.023     | 0.031     | 0.035     |
| 15      | 226519.477    | 222721.868 | 36.612 | 226519.439       | 222721.827 | 36.580 | 0.038     | 0.041     | 0.032     |
| 16      | 226523.464    | 222722.245 | 36.455 | 226523.421       | 222722.187 | 36.422 | 0.043     | 0.058     | 0.033     |
| 17      | 226527.420    | 222722.589 | 36.307 | 226527.392       | 222722.510 | 36.263 | 0.028     | 0.079     | 0.045     |
| 18      | 226531.390    | 222722.930 | 36.157 | 226531.344       | 222722.869 | 36.090 | 0.046     | 0.061     | 0.067     |
| 19      | 226511.520    | 222721.137 | 36.910 | 226511.454       | 222721.199 | 36.908 | 0.066     | -0.062    | 0.002     |
| 20      | 226507.547    | 222720.768 | 37.058 | 226507.490       | 222720.829 | 37.047 | 0.057     | -0.061    | 0.011     |
| 21      | 226503.565    | 222720.406 | 37.207 | 226503.510       | 222720.454 | 37.189 | 0.055     | -0.048    | 0.018     |
| 22      | 226231.030    | 222720.126 | 42.133 | 226231.015       | 222720.143 | 42.043 | 0.015     | -0.017    | 0.090     |
| 23      | 226058.040    | 222780.576 | 37.886 | 226058.121       | 222780.582 | 37.881 | -0.081    | -0.006    | 0.005     |
| 24      | 226051.037    | 222784.350 | 37.608 | 226051.105       | 222784.387 | 37.615 | -0.068    | -0.037    | -0.007    |
| 25      | 225970.886    | 222836.742 | 34.200 | 225970.846       | 222836.762 | 34.133 | 0.040     | -0.020    | 0.067     |
| 26      | 225964.592    | 222841.677 | 33.946 | 225964.583       | 222841.710 | 33.902 | 0.009     | -0.033    | 0.044     |
| 27      | 225958.325    | 222846.645 | 33.655 | 225958.340       | 222846.667 | 33.615 | -0.015    | -0.022    | 0.040     |
| 28      | 225899.808    | 222901.039 | 30.828 | 225899.769       | 222901.024 | 30.740 | 0.039     | 0.015     | 0.088     |
| 29      | 225894.352    | 222906.904 | 30.558 | 225894.377       | 222906.912 | 30.506 | -0.025    | -0.008    | 0.052     |
| 30      | 225888.981    | 222912.821 | 30.292 | 225889.041       | 222912.818 | 30.227 | -0.060    | 0.003     | 0.065     |
| 31      | 225843.134    | 222968.247 | 27.923 | 225843.150       | 222968.191 | 27.876 | -0.016    | 0.056     | 0.047     |
| 32      | 225838.277    | 222974.571 | 27.717 | 225838.303       | 222974.535 | 27.670 | -0.026    | 0.036     | 0.047     |
| 33      | 225833.431    | 222980.923 | 27.518 | 225833.475       | 222980.884 | 27.452 | -0.044    | 0.039     | 0.067     |
| R M S E |               |            |        |                  |            |        | 0.041     | 0.041     | 0.025     |

### 3.4.3 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 도로중심에 대한 3차원위치자료를 추출하기 위해서는 다음과 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 횡단구성요소 중 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 3.13에서 보이는 것과 같이 차광망 상단부의 3차원 좌표를 추출하였다. Figure 3.14 및 Figure 3.15에서는 도로중심선자료추출의 처리과정으로 보여주고 있으며, 전 구간에 대하여 46,280개의 중심자료를 추출하였다.

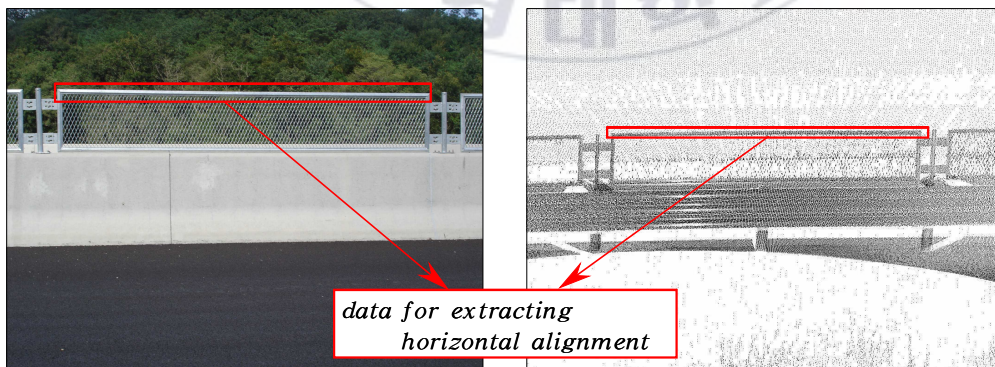
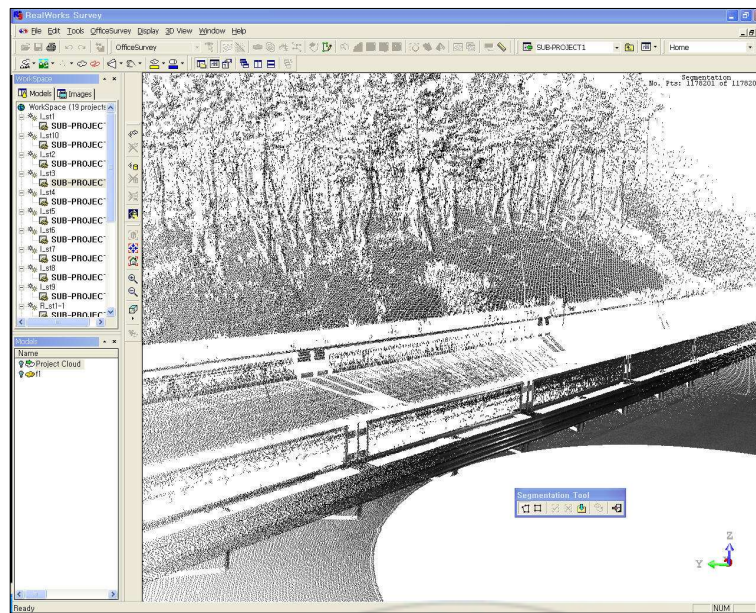


Figure 3.13 Data for extracting horizontal alignment





**Extracting  
Center line data**

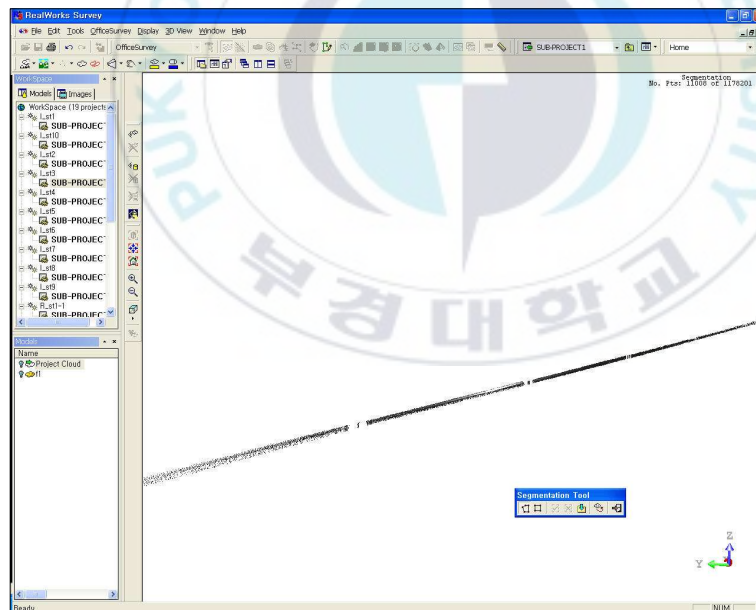
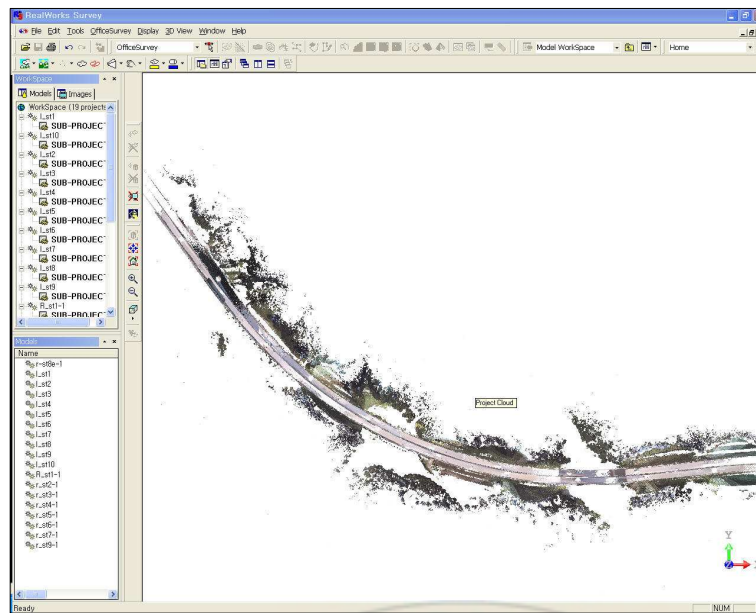


Figure 3.14 Process of extracting center line data in part section



**Extracting  
Center line data**

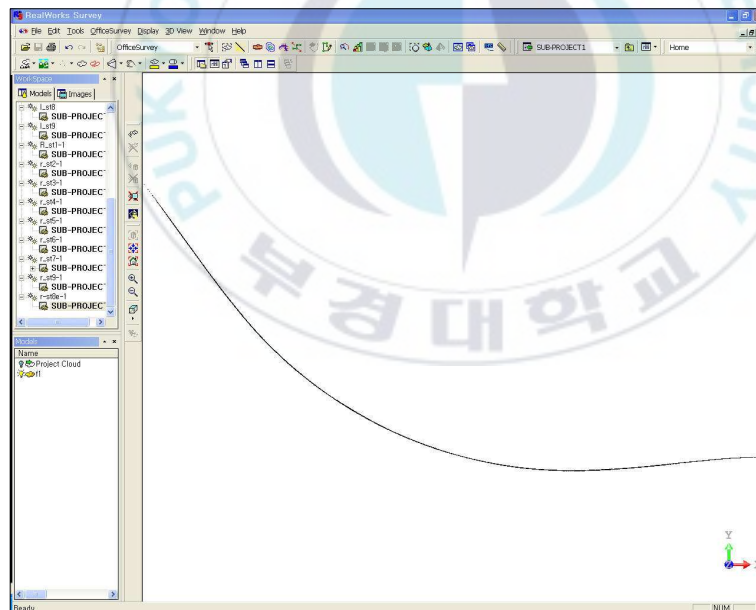


Figure 3.15 Process of extracting center line data in all section

## 4. 추출결과 및 분석

### 4.1 편경사 추출

본 연구의 대상 도로는 설계속도 80km/hr, 편경사 설치폭(B) 8.0m, 최대 편경사(s) 5%, 배수를 고려한 접속설치율 1/250을 고려하여 편경사 접속설치를 위한 변화구간의 총길이(TL)를 식 (4.1)에 의해 140m로 설치하여야 한다.

$$TL = \frac{B \times (s + 2)}{q} \quad (4.1)$$

그러나 대상 구간에 설치된 완화곡선의 길이(L)가 편경사 접속설치를 위한 총길이(TL)보다 크기 때문에 완화곡선의 길이로 설치되어야 하며, 5m 단위로 설치하는 것을 고려하여 170m로 설치되어있다.

본 연구에서는 Total Station을 이용하여 Table 4.1~Table 4.3과 같이 대상 구간 내의 편경사를 5m 간격으로 결정하였으며, 결정된 편경사를 이용하여 편경사도를 작성하였다.

Table 4.3에서는 원곡선 구간으로서 편경사는 -5.268%~+5.456% 범위를 나타내었다. 원곡선 구간에서는  $\pm 5\%$ 를 기준으로 미소한 차이를 나타내며, 이로 인해 대상 도로가 최대 편경사 5%로 설치된 것을 판단할 수 있다. Table 4.4는 레이저 스캐너에 의해 추출된 원곡선구간의 편경사로서 Total Station의 결과와 유사하게 나타났다. Figure 4.1은 작성된 편경사도와 설계도서에 의한 편경사도를 비교한 것으로, 설계제원과 비슷한 편경사변화를 나타낸다. 또한 편경사 접속설치를 위한 변화구간의 총길이는 약 180m로 설계제원보다 약 10m정도 크게 결정되었다.

Table 4.1 Result of superelevations extracted on the object highway at an interval of 5m by total station (BTC-BC)

| STA.<br>(m) | Left<br>(%) | Right<br>(%) | STA.<br>(m) | Left<br>(%) | Right<br>(%) | STA.<br>(m) | Left<br>(%) | Right<br>(%) |
|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|
| 0+885       | -1.504      | -1.666       | 0+945       | 0.783       | -2.270       | 1+005       | 3.471       | -3.301       |
| 0+890       | -1.358      | -1.757       | 0+950       | 1.043       | -2.290       | 1+010       | 3.435       | -3.551       |
| 0+895       | -1.098      | -1.723       | 0+955       | 1.268       | -2.212       | 1+015       | 3.447       | -3.665       |
| 0+900       | -0.822      | -1.771       | 0+960       | 1.630       | -2.192       | 1+020       | 3.625       | -3.702       |
| 0+905       | -0.956      | -2.135       | 0+965       | 1.908       | -2.222       | 1+025       | 3.723       | -3.921       |
| 0+910       | -0.710      | -2.192       | 0+970       | 2.012       | -2.498       | 1+030       | 3.948       | -4.038       |
| 0+915       | -0.572      | -2.116       | 0+975       | 2.090       | -2.552       | 1+035       | 4.164       | -4.058       |
| 0+920       | -0.366      | -2.117       | 0+980       | 2.106       | -2.580       | 1+040       | 4.133       | -4.192       |
| 0+925       | -0.048      | -2.107       | 0+985       | 2.447       | -2.494       | 1+045       | 4.125       | -4.309       |
| 0+930       | 0.165       | -2.134       | 0+990       | 2.777       | -2.607       | 1+050       | 4.259       | -4.549       |
| 0+935       | 0.378       | -2.215       | 0+995       | 3.030       | -2.765       | 1+055       | 4.448       | -4.749       |
| 0+940       | 0.711       | -2.157       | 1+000       | 3.240       | -3.029       | 1+060       | 4.714       | -4.886       |

Table 4.2 Result of superelevations extracted on the object highway at an interval of 5m by total station (EC-ETC)

| STA.<br>(m) | Left<br>(%) | Right<br>(%) | STA.<br>(m) | Left<br>(%) | Right<br>(%) | STA.<br>(m) | Left<br>(%) | Right<br>(%) |
|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|
| 1+525       | 5.123       | -4.477       | 1+585       | 3.054       | -2.597       | 1+645       | 0.589       | -1.634       |
| 1+530       | 4.992       | -4.269       | 1+590       | 2.917       | -2.348       | 1+650       | 0.422       | -1.562       |
| 1+535       | 4.753       | -4.194       | 1+595       | 2.806       | -2.115       | 1+655       | 0.126       | -1.664       |
| 1+540       | 4.437       | -4.109       | 1+600       | 2.592       | -1.977       | 1+660       | -0.132      | -1.718       |
| 1+545       | 4.170       | -4.093       | 1+605       | 2.356       | -1.846       | 1+665       | -0.306      | -1.587       |
| 1+550       | 4.024       | -3.888       | 1+610       | 2.160       | -1.749       | 1+670       | -0.494      | -1.526       |
| 1+555       | 3.845       | -3.615       | 1+615       | 1.888       | -1.791       | 1+675       | -0.731      | -1.468       |
| 1+560       | 3.713       | -3.445       | 1+620       | 1.717       | -1.821       | 1+680       | -0.901      | -1.518       |
| 1+565       | 3.511       | -3.258       | 1+625       | 1.529       | -1.819       | 1+685       | -1.157      | -1.477       |
| 1+570       | 3.331       | -3.119       | 1+630       | 1.286       | -1.821       | 1+690       | -1.283      | -1.486       |
| 1+575       | 3.191       | -3.013       | 1+635       | 1.000       | -1.742       | 1+695       | -1.453      | -1.523       |
| 1+580       | 3.075       | -2.840       | 1+640       | 0.723       | -1.733       | 1+700       | -1.444      | -1.594       |

Table 4.3 Result of superelevations extracted on the object highway at an interval of 5m by total station (BC-EC)

| STA.<br>(m) | Left<br>(%) | Right<br>(%) | STA.<br>(m) | Left<br>(%) | Right<br>(%) | STA.<br>(m) | Left<br>(%) | Right<br>(%) |
|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|
| 1+060       | 4.714       | -4.886       | 1+215       | 4.993       | -4.949       | 1+370       | 4.939       | -4.847       |
| 1+065       | 5.055       | -4.934       | 1+220       | 4.964       | -5.018       | 1+375       | 4.842       | -4.898       |
| 1+070       | 5.308       | -4.971       | 1+225       | 5.099       | -4.961       | 1+380       | 4.812       | -4.979       |
| 1+075       | 5.104       | -4.961       | 1+230       | 4.964       | -5.148       | 1+385       | 4.805       | -4.864       |
| 1+080       | 4.875       | -4.953       | 1+235       | 4.919       | -5.268       | 1+390       | 4.792       | -4.751       |
| 1+085       | 4.835       | -4.923       | 1+240       | 5.117       | -5.111       | 1+395       | 4.784       | -4.774       |
| 1+090       | 4.922       | -4.909       | 1+245       | 5.018       | -5.021       | 1+400       | 4.835       | -4.735       |
| 1+095       | 4.994       | -4.895       | 1+250       | 4.879       | -4.963       | 1+405       | 4.953       | -4.663       |
| 1+100       | 4.948       | -4.966       | 1+255       | 4.884       | -4.997       | 1+410       | 4.914       | -4.694       |
| 1+105       | 4.943       | -4.994       | 1+260       | 4.898       | -4.944       | 1+415       | 4.876       | -4.769       |
| 1+110       | 4.974       | -5.016       | 1+265       | 4.939       | -4.942       | 1+420       | 4.814       | -5.044       |
| 1+115       | 5.021       | -5.027       | 1+270       | 4.945       | -4.986       | 1+425       | 5.110       | -4.773       |
| 1+120       | 5.060       | -5.017       | 1+275       | 4.950       | -5.024       | 1+430       | 5.168       | -4.692       |
| 1+125       | 4.992       | -5.055       | 1+280       | 4.864       | -5.154       | 1+435       | 5.068       | -4.701       |
| 1+130       | 4.924       | -5.088       | 1+285       | 4.891       | -5.117       | 1+440       | 4.894       | -4.940       |
| 1+135       | 4.937       | -5.036       | 1+290       | 4.983       | -4.963       | 1+445       | 4.878       | -4.982       |
| 1+140       | 4.992       | -4.929       | 1+295       | 5.104       | -4.954       | 1+450       | 4.916       | -4.844       |
| 1+145       | 5.050       | -4.855       | 1+300       | 5.141       | -4.943       | 1+455       | 4.917       | -4.891       |
| 1+150       | 4.928       | -4.980       | 1+305       | 5.070       | -5.047       | 1+460       | 4.903       | -4.916       |
| 1+155       | 4.827       | -5.067       | 1+310       | 4.844       | -5.140       | 1+465       | 4.953       | -4.927       |
| 1+160       | 4.828       | -5.053       | 1+315       | 4.607       | -5.146       | 1+470       | 4.929       | -4.874       |
| 1+165       | 4.857       | -4.999       | 1+320       | 4.572       | -5.087       | 1+475       | 4.951       | -4.785       |
| 1+170       | 4.865       | -5.005       | 1+325       | 4.571       | -4.995       | 1+480       | 5.026       | -4.729       |
| 1+175       | 4.963       | -4.966       | 1+330       | 4.519       | -4.916       | 1+485       | 5.062       | -4.661       |
| 1+180       | 4.948       | -4.956       | 1+335       | 4.612       | -4.892       | 1+490       | 5.134       | -4.614       |
| 1+185       | 4.799       | -5.023       | 1+340       | 4.670       | -4.834       | 1+495       | 5.249       | -4.589       |
| 1+190       | 4.741       | -4.951       | 1+345       | 4.751       | -4.832       | 1+500       | 5.361       | -4.540       |
| 1+195       | 4.795       | -5.033       | 1+350       | 4.819       | -4.762       | 1+505       | 5.456       | -4.562       |
| 1+200       | 4.806       | -5.206       | 1+355       | 4.829       | -4.704       | 1+510       | 5.356       | -4.543       |
| 1+205       | 4.939       | -5.126       | 1+360       | 4.857       | -4.807       | 1+515       | 5.271       | -4.549       |
| 1+210       | 5.053       | -4.903       | 1+365       | 4.905       | -4.851       | 1+520       | 5.213       | -4.548       |



Table 4.4 Result of superelevations extracted on the object highway at an interval of 5m by laser scanner (BC-EC)

| STA.<br>(m) | Left<br>(%) | Right<br>(%) | STA.<br>(m) | Left<br>(%) | Right<br>(%) | STA.<br>(m) | Left<br>(%) | Right<br>(%) |
|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|
| 1+060       | 4.746       | -4.886       | 1+215       | 5.003       | -4.928       | 1+370       | 4.950       | -4.832       |
| 1+065       | 5.087       | -4.919       | 1+220       | 4.970       | -5.013       | 1+375       | 4.827       | -4.891       |
| 1+070       | 5.344       | -4.962       | 1+225       | 5.118       | -4.958       | 1+380       | 4.806       | -4.959       |
| 1+075       | 5.131       | -4.959       | 1+230       | 4.988       | -5.139       | 1+385       | 4.800       | -4.852       |
| 1+080       | 4.905       | -4.946       | 1+235       | 4.947       | -5.250       | 1+390       | 4.802       | -4.729       |
| 1+085       | 4.862       | -4.918       | 1+240       | 5.152       | -5.088       | 1+395       | 4.811       | -4.740       |
| 1+090       | 4.922       | -4.920       | 1+245       | 5.037       | -5.026       | 1+400       | 4.864       | -4.713       |
| 1+095       | 5.009       | -4.872       | 1+250       | 4.899       | -4.982       | 1+405       | 4.985       | -4.660       |
| 1+100       | 4.956       | -4.968       | 1+255       | 4.882       | -5.020       | 1+410       | 4.931       | -4.693       |
| 1+105       | 4.964       | -4.992       | 1+260       | 4.893       | -4.948       | 1+415       | 4.897       | -4.755       |
| 1+110       | 4.979       | -5.032       | 1+265       | 4.941       | -4.937       | 1+420       | 4.827       | -5.035       |
| 1+115       | 5.018       | -5.055       | 1+270       | 4.950       | -4.984       | 1+425       | 5.116       | -4.773       |
| 1+120       | 5.080       | -5.018       | 1+275       | 4.977       | -5.015       | 1+430       | 5.176       | -4.693       |
| 1+125       | 5.004       | -5.051       | 1+280       | 4.860       | -5.159       | 1+435       | 5.087       | -4.692       |
| 1+130       | 4.937       | -5.069       | 1+285       | 4.873       | -5.119       | 1+440       | 4.905       | -4.935       |
| 1+135       | 4.939       | -5.046       | 1+290       | 4.953       | -4.971       | 1+445       | 4.893       | -4.969       |
| 1+140       | 4.999       | -4.954       | 1+295       | 5.092       | -4.952       | 1+450       | 4.903       | -4.859       |
| 1+145       | 5.047       | -4.898       | 1+300       | 5.145       | -4.938       | 1+455       | 4.918       | -4.898       |
| 1+150       | 4.927       | -5.029       | 1+305       | 5.062       | -5.050       | 1+460       | 4.907       | -4.920       |
| 1+155       | 4.840       | -5.107       | 1+310       | 4.848       | -5.132       | 1+465       | 4.925       | -4.953       |
| 1+160       | 4.847       | -5.069       | 1+315       | 4.610       | -5.157       | 1+470       | 4.921       | -4.872       |
| 1+165       | 4.894       | -4.981       | 1+320       | 4.586       | -5.094       | 1+475       | 4.930       | -4.791       |
| 1+170       | 4.887       | -5.006       | 1+325       | 4.579       | -4.993       | 1+480       | 5.016       | -4.725       |
| 1+175       | 4.981       | -4.978       | 1+330       | 4.533       | -4.899       | 1+485       | 5.063       | -4.655       |
| 1+180       | 4.970       | -4.975       | 1+335       | 4.631       | -4.875       | 1+490       | 5.133       | -4.627       |
| 1+185       | 4.817       | -5.057       | 1+340       | 4.706       | -4.809       | 1+495       | 5.271       | -4.601       |
| 1+190       | 4.791       | -4.948       | 1+345       | 4.780       | -4.812       | 1+500       | 5.352       | -4.553       |
| 1+195       | 4.833       | -5.044       | 1+350       | 4.825       | -4.746       | 1+505       | 5.430       | -4.566       |
| 1+200       | 4.851       | -5.212       | 1+355       | 4.830       | -4.679       | 1+510       | 5.340       | -4.539       |
| 1+205       | 4.966       | -5.136       | 1+360       | 4.860       | -4.789       | 1+515       | 5.266       | -4.538       |
| 1+210       | 5.041       | -4.925       | 1+365       | 4.921       | -4.828       | 1+520       | 5.223       | -4.541       |



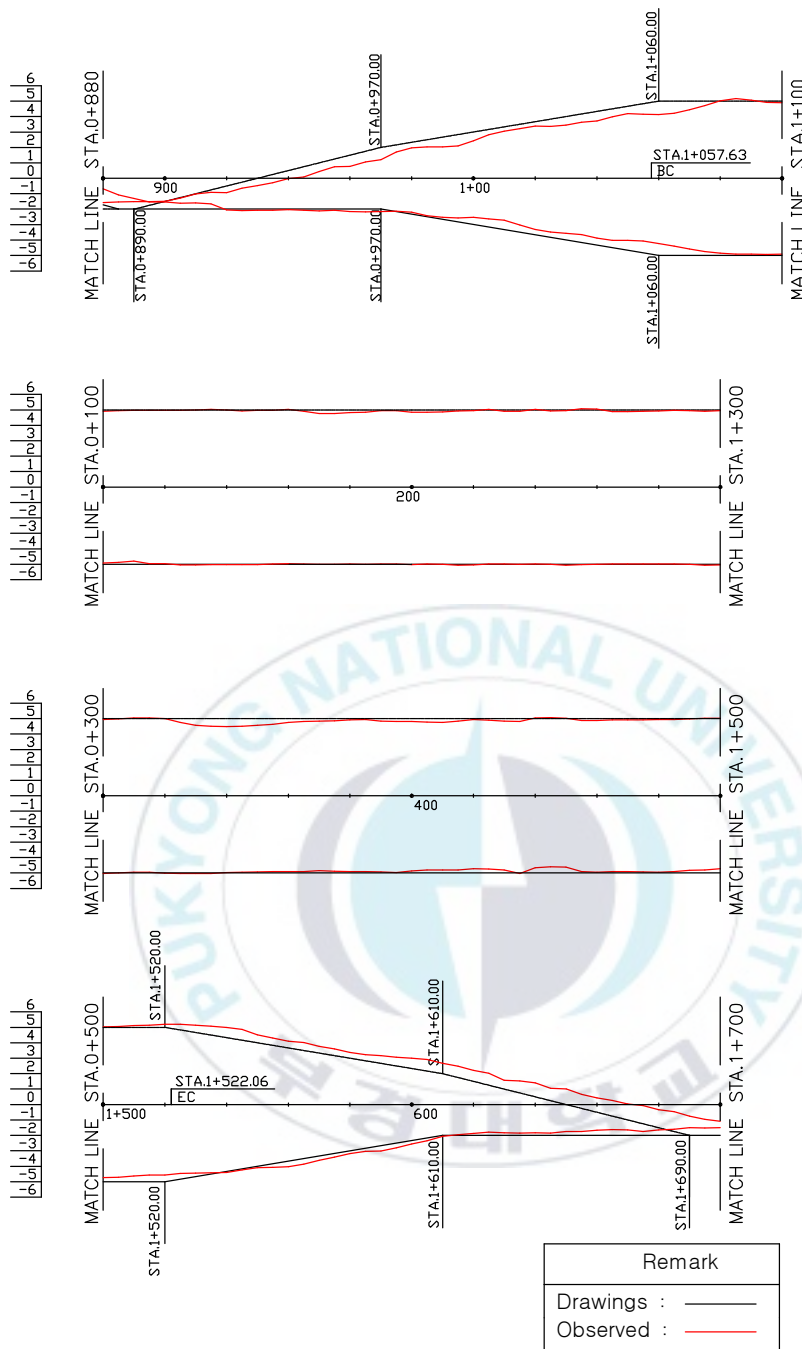


Figure 4.1 Comparison of superelevations between drawing and extracted values

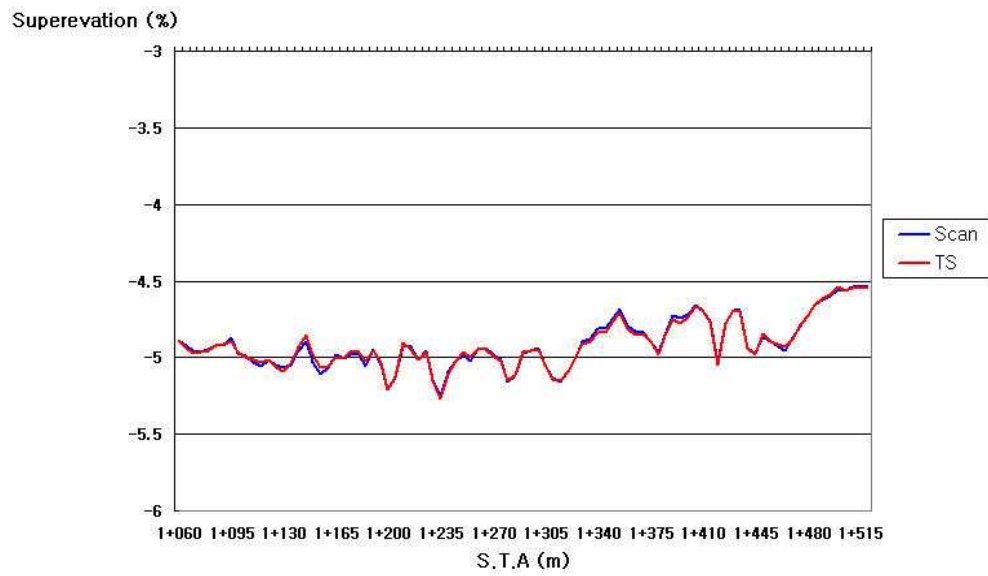
## 4.2 결과 분석

3차원 레이저 스캐너에 의해 산정된 편경사를 Total Station에 의해 산정된 편경사와 비교해보았다.

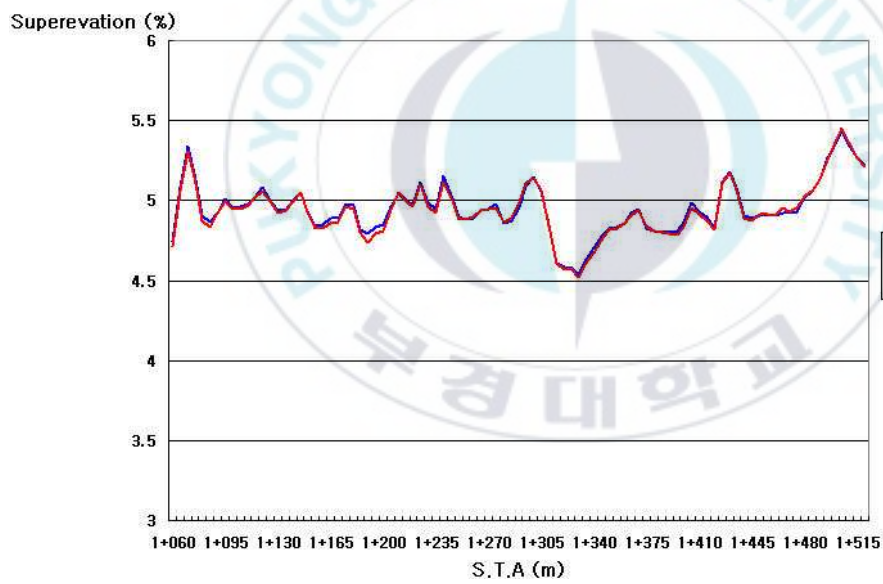
Figure 4.2는 레이저 스캐너에 의해 산정된 편경사와 Total Station에 의해 산정된 편경사를 비교하여 나타내었다. 그 결과, Table 4.5~Table 4.6에 나타낸 것과 같이 상행선에서의 오차는  $-0.049 \sim +0.034\%$ , 하행선에서의 오차는  $-0.030 \sim +0.050\%$ 로 나타났으며, Figure 4.3과 같은 분포를 나타내었다.

또한 각 방향별 RMSE를 산정한 결과, Figure 4.4와 같이 상행선에서는  $\pm 0.016\%$ , 하행선에서는  $\pm 0.017\%$ 로 나타내었다.





(a) Right



(b) Left

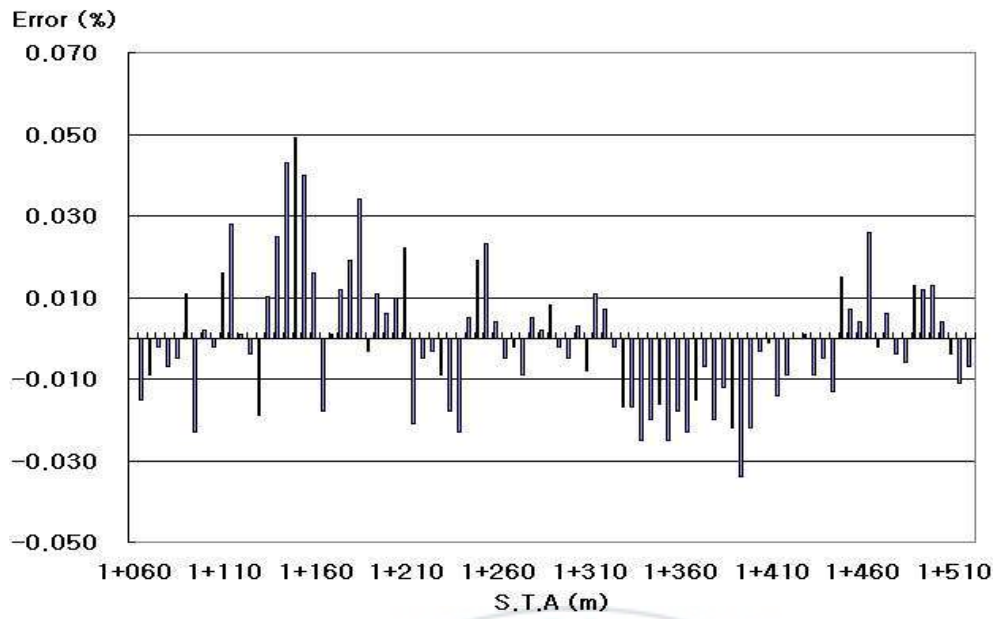
Figure 4.2 A comparative analysis of superelevations

Table 4.5 A comparative analysis of superelevations (BC-EC : Right)

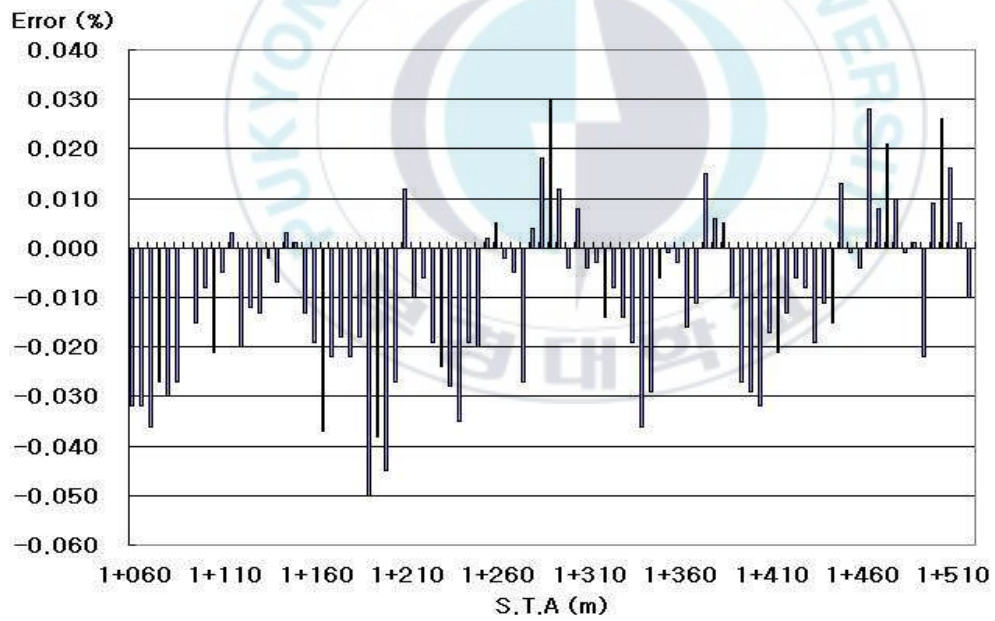
| STA.<br>(m) | Right (%) |        | Residual<br>(%) | STA.<br>(m) | Right (%) |        | Residual<br>(%) | STA.<br>(m) | Right (%) |        | Residual<br>(%) |
|-------------|-----------|--------|-----------------|-------------|-----------|--------|-----------------|-------------|-----------|--------|-----------------|
|             | Scan      | T.S    |                 |             | Scan      | T.S    |                 |             | Scan      | T.S    |                 |
| 1+060       | -4.886    | -4.886 | 0.000           | 1+215       | -4.928    | -4.949 | 0.021           | 1+370       | -4.832    | -4.847 | 0.015           |
| 1+065       | -4.919    | -4.934 | 0.015           | 1+220       | -5.013    | -5.018 | 0.005           | 1+375       | -4.891    | -4.898 | 0.007           |
| 1+070       | -4.962    | -4.971 | 0.009           | 1+225       | -4.958    | -4.961 | 0.003           | 1+380       | -4.959    | -4.979 | 0.020           |
| 1+075       | -4.959    | -4.961 | 0.002           | 1+230       | -5.139    | -5.148 | 0.009           | 1+385       | -4.852    | -4.864 | 0.012           |
| 1+080       | -4.946    | -4.953 | 0.007           | 1+235       | -5.250    | -5.268 | 0.018           | 1+390       | -4.729    | -4.751 | 0.022           |
| 1+085       | -4.918    | -4.923 | 0.005           | 1+240       | -5.088    | -5.111 | 0.023           | 1+395       | -4.740    | -4.774 | 0.034           |
| 1+090       | -4.920    | -4.909 | -0.011          | 1+245       | -5.026    | -5.021 | -0.005          | 1+400       | -4.713    | -4.735 | 0.022           |
| 1+095       | -4.872    | -4.895 | 0.023           | 1+250       | -4.982    | -4.963 | -0.019          | 1+405       | -4.660    | -4.663 | 0.003           |
| 1+100       | -4.968    | -4.966 | -0.002          | 1+255       | -5.020    | -4.997 | -0.023          | 1+410       | -4.693    | -4.694 | 0.001           |
| 1+105       | -4.992    | -4.994 | 0.002           | 1+260       | -4.948    | -4.944 | -0.004          | 1+415       | -4.755    | -4.769 | 0.014           |
| 1+110       | -5.032    | -5.016 | -0.016          | 1+265       | -4.937    | -4.942 | 0.005           | 1+420       | -5.035    | -5.044 | 0.009           |
| 1+115       | -5.055    | -5.027 | -0.028          | 1+270       | -4.984    | -4.986 | 0.002           | 1+425       | -4.773    | -4.773 | 0.000           |
| 1+120       | -5.018    | -5.017 | -0.001          | 1+275       | -5.015    | -5.024 | 0.009           | 1+430       | -4.693    | -4.692 | -0.001          |
| 1+125       | -5.051    | -5.055 | 0.004           | 1+280       | -5.159    | -5.154 | -0.005          | 1+435       | -4.692    | -4.701 | 0.009           |
| 1+130       | -5.069    | -5.088 | 0.019           | 1+285       | -5.119    | -5.117 | -0.002          | 1+440       | -4.935    | -4.940 | 0.005           |
| 1+135       | -5.046    | -5.036 | -0.010          | 1+290       | -4.971    | -4.963 | -0.008          | 1+445       | -4.969    | -4.982 | 0.013           |
| 1+140       | -4.954    | -4.929 | -0.025          | 1+295       | -4.952    | -4.954 | 0.002           | 1+450       | -4.859    | -4.844 | -0.015          |
| 1+145       | -4.898    | -4.855 | -0.043          | 1+300       | -4.938    | -4.943 | 0.005           | 1+455       | -4.898    | -4.891 | -0.007          |
| 1+150       | -5.029    | -4.980 | -0.049          | 1+305       | -5.050    | -5.047 | -0.003          | 1+460       | -4.920    | -4.916 | -0.004          |
| 1+155       | -5.107    | -5.067 | -0.040          | 1+310       | -5.132    | -5.140 | 0.008           | 1+465       | -4.953    | -4.927 | -0.026          |
| 1+160       | -5.069    | -5.053 | -0.016          | 1+315       | -5.157    | -5.146 | -0.011          | 1+470       | -4.872    | -4.874 | 0.002           |
| 1+165       | -4.981    | -4.999 | 0.018           | 1+320       | -5.094    | -5.087 | -0.007          | 1+475       | -4.791    | -4.785 | -0.006          |
| 1+170       | -5.006    | -5.005 | -0.001          | 1+325       | -4.993    | -4.995 | 0.002           | 1+480       | -4.725    | -4.729 | 0.004           |
| 1+175       | -4.978    | -4.966 | -0.012          | 1+330       | -4.899    | -4.916 | 0.017           | 1+485       | -4.655    | -4.661 | 0.006           |
| 1+180       | -4.975    | -4.956 | -0.019          | 1+335       | -4.875    | -4.892 | 0.017           | 1+490       | -4.627    | -4.614 | -0.013          |
| 1+185       | -5.057    | -5.023 | -0.034          | 1+340       | -4.809    | -4.834 | 0.025           | 1+495       | -4.601    | -4.589 | -0.012          |
| 1+190       | -4.948    | -4.951 | 0.003           | 1+345       | -4.812    | -4.832 | 0.020           | 1+500       | -4.553    | -4.540 | -0.013          |
| 1+195       | -5.044    | -5.033 | -0.011          | 1+350       | -4.746    | -4.762 | 0.016           | 1+505       | -4.566    | -4.562 | -0.004          |
| 1+200       | -5.212    | -5.206 | -0.006          | 1+355       | -4.679    | -4.704 | 0.025           | 1+510       | -4.539    | -4.543 | 0.004           |
| 1+205       | -5.136    | -5.126 | -0.010          | 1+360       | -4.789    | -4.807 | 0.018           | 1+515       | -4.538    | -4.549 | 0.011           |
| 1+210       | -4.925    | -4.903 | -0.022          | 1+365       | -4.828    | -4.851 | 0.023           | 1+520       | -4.541    | -4.548 | 0.007           |

Table 4.6 A comparative analysis of superelevations (BC-EC : Left)

| STA.<br>(m) | Left (%) |       | Residual<br>(%) | STA.<br>(m) | Left (%) |       | Residual<br>(%) | STA.<br>(m) | Left (%) |       | Residual<br>(%) |
|-------------|----------|-------|-----------------|-------------|----------|-------|-----------------|-------------|----------|-------|-----------------|
|             | Scan     | T.S   |                 |             | Scan     | T.S   |                 |             | Scan     | T.S   |                 |
| 1+060       | 4.746    | 4.714 | 0.032           | 1+215       | 5.003    | 4.993 | 0.010           | 1+370       | 4.950    | 4.939 | 0.011           |
| 1+065       | 5.087    | 5.055 | 0.032           | 1+220       | 4.970    | 4.964 | 0.007           | 1+375       | 4.827    | 4.842 | -0.014          |
| 1+070       | 5.344    | 5.308 | 0.036           | 1+225       | 5.118    | 5.099 | 0.019           | 1+380       | 4.806    | 4.812 | -0.005          |
| 1+075       | 5.131    | 5.104 | 0.026           | 1+230       | 4.988    | 4.964 | 0.024           | 1+385       | 4.800    | 4.805 | -0.005          |
| 1+080       | 4.905    | 4.875 | 0.030           | 1+235       | 4.947    | 4.919 | 0.028           | 1+390       | 4.802    | 4.792 | 0.010           |
| 1+085       | 4.862    | 4.835 | 0.027           | 1+240       | 5.152    | 5.117 | 0.035           | 1+395       | 4.811    | 4.784 | 0.028           |
| 1+090       | 4.922    | 4.922 | 0.000           | 1+245       | 5.037    | 5.018 | 0.020           | 1+400       | 4.864    | 4.835 | 0.029           |
| 1+095       | 5.009    | 4.994 | 0.015           | 1+250       | 4.899    | 4.879 | 0.020           | 1+405       | 4.985    | 4.953 | 0.031           |
| 1+100       | 4.956    | 4.948 | 0.008           | 1+255       | 4.882    | 4.884 | -0.002          | 1+410       | 4.931    | 4.914 | 0.017           |
| 1+105       | 4.964    | 4.943 | 0.021           | 1+260       | 4.893    | 4.898 | -0.005          | 1+415       | 4.897    | 4.876 | 0.021           |
| 1+110       | 4.979    | 4.974 | 0.005           | 1+265       | 4.941    | 4.939 | 0.002           | 1+420       | 4.827    | 4.814 | 0.013           |
| 1+115       | 5.018    | 5.021 | -0.003          | 1+270       | 4.950    | 4.945 | 0.005           | 1+425       | 5.116    | 5.110 | 0.005           |
| 1+120       | 5.080    | 5.060 | 0.020           | 1+275       | 4.977    | 4.950 | 0.027           | 1+430       | 5.176    | 5.168 | 0.008           |
| 1+125       | 5.004    | 4.992 | 0.012           | 1+280       | 4.860    | 4.864 | -0.004          | 1+435       | 5.087    | 5.068 | 0.019           |
| 1+130       | 4.937    | 4.924 | 0.014           | 1+285       | 4.873    | 4.891 | -0.018          | 1+440       | 4.905    | 4.894 | 0.011           |
| 1+135       | 4.939    | 4.937 | 0.002           | 1+290       | 4.953    | 4.983 | -0.030          | 1+445       | 4.893    | 4.878 | 0.014           |
| 1+140       | 4.999    | 4.992 | 0.007           | 1+295       | 5.092    | 5.104 | -0.012          | 1+450       | 4.903    | 4.916 | -0.012          |
| 1+145       | 5.047    | 5.050 | -0.003          | 1+300       | 5.145    | 5.141 | 0.004           | 1+455       | 4.918    | 4.917 | 0.001           |
| 1+150       | 4.927    | 4.928 | -0.002          | 1+305       | 5.062    | 5.070 | -0.008          | 1+460       | 4.907    | 4.903 | 0.004           |
| 1+155       | 4.840    | 4.827 | 0.013           | 1+310       | 4.848    | 4.844 | 0.004           | 1+465       | 4.925    | 4.953 | -0.028          |
| 1+160       | 4.847    | 4.828 | 0.020           | 1+315       | 4.610    | 4.607 | 0.003           | 1+470       | 4.921    | 4.929 | -0.008          |
| 1+165       | 4.894    | 4.857 | 0.038           | 1+320       | 4.586    | 4.572 | 0.014           | 1+475       | 4.930    | 4.951 | -0.020          |
| 1+170       | 4.887    | 4.865 | 0.022           | 1+325       | 4.579    | 4.571 | 0.008           | 1+480       | 5.016    | 5.026 | 0.009           |
| 1+175       | 4.981    | 4.963 | 0.018           | 1+330       | 4.533    | 4.519 | 0.014           | 1+485       | 5.063    | 5.062 | 0.001           |
| 1+180       | 4.970    | 4.948 | 0.022           | 1+335       | 4.631    | 4.612 | 0.019           | 1+490       | 5.133    | 5.134 | -0.001          |
| 1+185       | 4.817    | 4.799 | 0.017           | 1+340       | 4.706    | 4.670 | 0.036           | 1+495       | 5.271    | 5.249 | 0.022           |
| 1+190       | 4.791    | 4.741 | 0.049           | 1+345       | 4.780    | 4.751 | 0.028           | 1+500       | 5.352    | 5.361 | -0.008          |
| 1+195       | 4.833    | 4.795 | 0.038           | 1+350       | 4.825    | 4.819 | 0.006           | 1+505       | 5.430    | 5.456 | -0.026          |
| 1+200       | 4.851    | 4.806 | 0.045           | 1+355       | 4.830    | 4.829 | 0.001           | 1+510       | 5.340    | 5.356 | -0.016          |
| 1+205       | 4.966    | 4.939 | 0.027           | 1+360       | 4.860    | 4.857 | 0.003           | 1+515       | 5.266    | 5.271 | -0.005          |
| 1+210       | 5.041    | 5.053 | -0.013          | 1+365       | 4.921    | 4.905 | 0.015           | 1+520       | 5.223    | 5.213 | 0.010           |



(a) Right



(b) Left

Figure 4.3 Distribution chart of estimated errors depending on direction



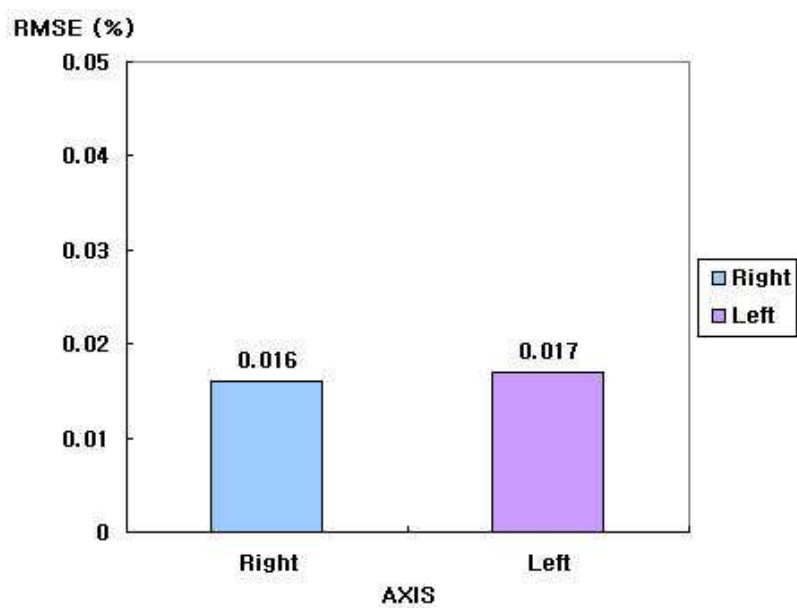
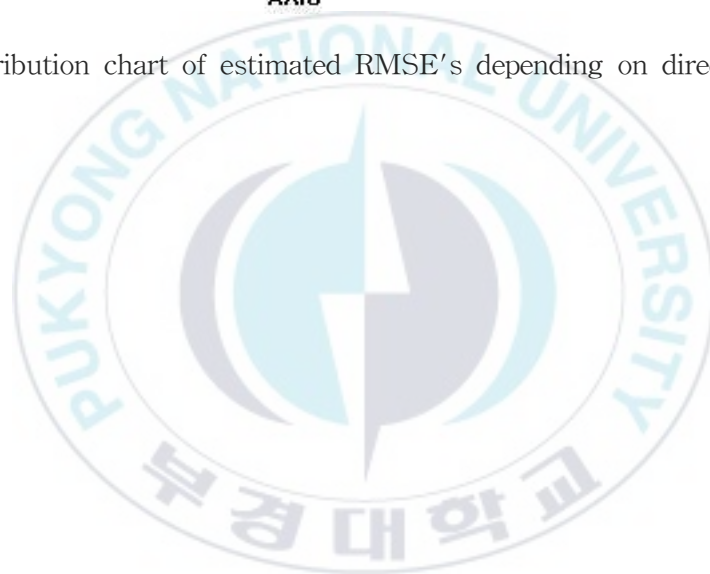


Figure 4.4 Distribution chart of estimated RMSE's depending on direction



## 5. 결 론

본 연구에서는 레이저 스캐닝 기법에 의해 취득된 점군 자료를 이용하여 도로편경사를 산정한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 레이저 스캐닝 기법에 의해 취득된 도로의 점군자료를 이용하여 원하는 측점에서 도로 편경사를 추출할 수 있었다.

둘째, 레이저 스캐닝 기법을 이용하여 3차원 점군자료를 신속, 정확하게 취득할 수 있었다. 취득된 자료의 정확도를 분석한 결과 X방향으로 4.1cm, Y방향으로 4.1cm, Z방향으로 2.5cm의 RMSE를 나타내었다. 이는 공공측량의 작업규정 세부기준에 명시된 축척 1:600에서의 지상 기준점 수평위치정확도 10cm와 수직 위치정확도 5cm를 만족하였으며, LiDAR 시스템의 수평위치정확도 30cm와 수직 위치정확도 15cm에 비하여 매우 향상된 결과로 나타났다.

셋째, 레이저 스캐닝 기법에 의해 추출된 편경사를 TS에 의해 추출된 편경사와 비교한 결과, 각 방향별 RMSE가 상행선에서  $\pm 0.016\%$ , 하행선에서  $\pm 0.017\%$ 로 나타났다.

넷째, 향후 첨단도로정보화에 필요한 도로공간정보확보를 위해 레이저 스캐너 기법의 활용이 극대화되리라 판단된다.

## 참 고 문 헌

- 건설교통부, 2000, “도로의 구조 및 시설 기준에 관한 규칙 해설 및 지침”.
- 과학기술부, 2003, “ALS와 SSS를 이용한 하천 및 댐정밀 DEM 제작 및 수량계산 시스템 개발” - 연구책임자 : 김병국.
- 김민석, 2004, “수치지도와 LiDAR 자료를 이용한 도시지역 도로의 선형 설계요소 추출에 관한 연구”, 공학석사학위논문, 서울대학교 대학원.
- 김용길, 박성용, 하태준, 2003, “횡방향 가속도 모형을 이용한 곡선부 도로의 변이구간 평가에 관한 연구”, 대한교통학회논문집, pp.1-6.
- 김형태, 2000, “GIS 건물레이어 자동구축을 위한 LiDAR 데이터와 항공사진의 융합”, 공학석사학위논문, 서울대학교 대학원.
- 박홍기, 2002, “레이저 빔 스캐닝 기술을 이용한 3차원 형상 측정”, 공학석사학위논문, 경희대학교 대학원.
- 서동주, 장호식, 이종출, 2002, “GPS 실시간 동적측위법을 이용한 도로 편경사 추출”, 한국측량학회지 제20권 제2호, pp.183-190.
- 서동주, 2003, “수치사진측량에 의한 도로정보체계 개발”, 공학박사학위논문, 부경대학교 대학원.

심관보, 최재성, 2006, “2차로도로 효율성 제고를 위한 횡단면 설계 방안”,  
한국도로학회논문집, 제8권 제2권, pp.75-85.

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

유차정, 박태훈, 박제진, 하태준, 2005, “입체선형의 주행속도를 특성을 고  
려한 편경사 안전을 산정에 관한 연구”, 대한토목학회논문집,  
pp.4666-4670.

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

이상하, 박성용, 하태준, 2003, “도로 곡선반경 개선에 관한 연구”, 대한교  
통학회논문집, pp.1-6.

이상화, 손영태, 김범진, 2005, “도로안전성분석차량을 이용한 도로의 편경  
사 추출방법에 관한 연구”, 대한교통학회논문집, pp.571-579.

이종달, 이영욱, 권기욱, 정규수, 2001, “차량의 무게중심을 고려한 도로의  
편경사 개선에 관한 연구”, 대한토목학회논문집, 제21권 제1권,  
pp.53-59.

이종출, 노태호, 허종호, 김진수, 2001, “위성측량에 의한 도로 편경사 자동  
추출 알고리즘 개발”, 대한토목학회논문집, pp.1-4.

이종출, 차성렬, 이영도, 김세준, 2004, “수치영상을 이용한 도로편경사 추출”, 한국측량학회논문집, pp.233-238.

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

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

한승희, 2006, “패턴스캐너를 이용한 자동차부품의 3차원 모델링 및 효용성 분석”, 한국측량학회지, 제24권 제1호, pp.1-8.

Ackermann, F., 1999, “Airborne Laser Scanning-Present Status and Future Expectations”, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol.54, No.2, pp.64-67.

Bauer, A. and Paar, G. and Kaufmann, V, 2003, “Terrestrial laser scanning for rock glacier monitoring”, *The 8th International Permafrost Conference*, 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, pp.12-15..

Frueh, C., Jain, S. and Zakhor, A., 2005, “Data processing algorithms

for generating textured 3D building facade meshes from laser scans and camera images”, *International Journal of Computer Vision*, Vol.61, No.2, pp.159–184.

Hatger, C. and Brenner, C., 2003, “Extraction of road geometry parameters from laser scanning and existing database”, *ISPRS Workshop : 3-D reconstruction from airborne laser scanner and InSar data, IAPRS, Dresden, Germany*.

Jaselskis, E. J., Gao, Z., 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.

Mills, J. and Barber, D., 2004, “Geomatics technique 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, New Delhi, India*.

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, pp.12–15.



## 감사의 글

저에게 대학원에서의 2년은 사랑하는 많은 사람들과의 만남을 만들어주었고 같이 기뻐하고, 같이 슬퍼하면서 많은 추억들을 제 인생의 일기장에 남겨놓았습니다. 부족함이 많은 저에게 아낌없는 사랑으로 지켜보아 주시며 끊임없이 힘을 주신 많은 분들께 이 글을 통해 감사의 마음을 전해드리고자 합니다.

옛말에 君師父一體라고 하였습니다. 부족한 저를 위해 가까운 곳에서 많은 가르침과 조언을 아끼지 않으시고 생활의 지혜를 가르쳐주신 이종출 지도교수님께 진심으로 감사드리며, 진심어린 말씀 하나하나 새겨가며 최선을 다해 살아가겠습니다.

그리고 바쁘신 와중에 본 논문을 위해 정성을 다하신 이영대 교수님, 김명식 교수님께 깊은 감사를 드리며, 대학원 생활을 비롯하여 학문연구에 아낌없는 가르침을 주신 국승규 교수님, 손인식 교수님, 이동욱 교수님, 이상호 교수님, 이종섭 교수님, 이환우 교수님, 장희석 교수님, 정두희 교수님, 정진호 교수님, 김수용 교수님께도 진심어린 감사의 인사를 올립니다.

또한, 연구실의 발전과 가족들의 우애를 위해 항상 노력하시는 서동주 박사님, 친형처럼 자상함으로 보살펴주신 노태호 박사님, 연구실에 활기가 넘치게 이끌어주시는 장호식 박사님, 2년 동안 미흡한 저에게 많은 경험으로 성장하게 해주신 김진수 박사님, 후배에게 따뜻한 격려를 해주신 조용재 선배님, 1년 동안 애정으로 같이 지낸 김성호 선배님, 김세준 선배님, 강운성 선배님, 지난 2년 동안 힘든 생활속에서 함께 지내온 유영화 선배님, 1년 반동안 동고동락하며 미운정 고운정이 많이 쌓인 서재수 선배님께 고마움을 전합니다. 그리고 이제 막 대학원 생활을 시작한 신형건 후배님과 학부과정에서 연구실 생활을 하고 있는 신주연 후배님, 오현우 후배님, 정영화 후배님에게도 감사의 마음을 전합니다.

특히, 언제나 마음만은 항상 연구실 가족들과 함께하며 후배들에게 용기를 북돋아 주시는 서정훈 선배님, 허종호 선배님, 서유미 선배님, 강성원 선배님, 남신 선배님, 강상민 선배님, 박규열 선배님께 감사의 마음을 전하며, 직장생활과 학업을 병행하시면서 연구실에 많은 애정을 보여주시는 김종원 박사님, 이영도 박사님, 임창식 님, 송영귀 님, 배상원 님, 최상식 님, 박상묵 님, 최홍준 님, 이탁곤 선배님, 그밖에 도우회 회원님들께도 고마움을 전합니다.

그리고 부경대학교 대학원의 화합과 발전을 위해 노력하시는 백동일 박사님, 정인주 박사님, 이정민 박사님, 윤은찬 선배님을 비롯한 부경토사모의 여러 학우님께도 감사드리며, 2년 동안 동고동락하며 지낸 동기 애숙이 누나, 병훈이를 비롯하여 새로운 인연으로 맺어진 양우, 대학원과정동안 같이 수업을 들었던 동원, 강민, 관수, 춘진, 희준, 희호, 미은, 태석, 원일이형, 정민, 중식, 대희, 래규, 상우, 종식, 창수, 동엽, 수호, 찬우, 원식, 재민, 민호, 종래, 강석, 담, 오랫동안 곁에서 힘이 된 친구 정식, 종우, 상호, 상언, 영주, 진혁, 호일, 정화, 어린총고로 마음을 든든하게 했던 울동생 정은이, 같은 길을 걸어가고 있는 대학동기 모임인 토목굿볼 회원 모든 분들과 대학 동문동기인 청록, 언제나 변함없는 우정을 나누고 있는 대학친구모임 포커스, 20년의 우정을 간직한 초등학교 동창친구들, 태원도 동아리 여을 선·후배님께 감사의 마음을 전합니다. 그리고 저를 믿고 지켜봐준 동생 수현이와 누나에게 고마움을 전합니다.

끝으로, 성실한 삶의 모습을 몸소 보여주시고 자식을 믿고 자식만을 위해 살아오신 아버님과 항상 자식 걱정애 하루도 편한 날이 없이 사랑과 정성으로 돌봐주신 어머니께 감사드리며, 그 깊은 은혜에 보답하겠습니다.

이 자리에 서기까지 관심을 아끼지 않고 도움을 주신 모든 분들께 깊은 감사의 마음을 전합니다.

남 일 현 올림