

■ 論 文 ■

# 이분산성을 고려한 영상검지기 정확도 추정

## Accuracy Estimation of Video Image Detector Considering Heteroscedasticity

**이 청 원**

(서울시립대학교 교통공학과 교수)

**송 영 화**

(서울시립대학교 교통공학과 석사과정)

### 목 차

- I. 서론
- II. 기존문헌 고찰
- III. 영상검지기 정확도 자료 수집 방안
  - 1. 현장조사 개요
  - 2. 현장자료수집 기준장비 선정 및 정확도 평가
  - 3. 현장조사 절차
  - 4. 평가지표 선정
- IV. 수집자료 분석
  - 1. 수집자료 개요
  - 2. 수집자료에 대한 회귀진단
  - 3. 수집자료 분석
- V. 이분산성을 고려한 영상검지기 정확도 감소함수 추정
  - 1. 이분산성 개요
  - 2. 이분산성 문제 해결 방안
  - 3. 수집자료의 이분산성 확인
  - 4. 영상검지기 정확도 감소 함수 추정
- VI. 결론
- 참고문헌

Key Words : 영상검지기, 이분산, 정확도, 평균절대오차백분율, 지능형교통체계  
Video Image Detector, Heteroscedasticity, Accuracy, MAPE, ITS

### 요 약

ITS(Intelligent Transportation Systems)는 도로이용자에게 정확한 통행시간정보를 신속히 전달함으로써 도로이용의 효율 극대화를 목표로 하고 있다. 이러한 통행시간정보는 ITS장비에 의해 수집되는 자료를 기반으로 생성되므로 ITS장비의 신뢰성 유지가 매우 중요하지만 국내 설치·운영중인 ITS장비의 신뢰성을 확보하기 위한 교정(Calibration) 등과 같은 유지관리활동은 매우 미흡한 상태이다. 만약 고장, 수리, 교체 등과 관련된 장기간의 이력자료가 축적되어 있다면 신뢰성공학 등과 같은 기존 연구를 활용하여 체계적인 유지관리계획을 산정할 수 있겠지만, 현재 각 센터별로 충분한 이력자료를 확보하지 못하는 실정이다.

이에 본 연구에서는 설치 연도별로 영상검지기의 성능수준을 평가하고 시계열적인 분석을 위한 현장자료를 수집하였다. 또한, 제조회사, 설치년도 등 각각의 영상검지기의 특성이 동일하지 않기 때문에 발생하는 이분산성(heteroscedasticity) 문제를 고려하여 영상검지기의 정확도 감소 곡선을 추정하였다. 궁극적으로, 장기간의 이력자료 분석을 통해 체계적인 유지관리계획을 산정하여 ITS장비의 신뢰성을 유지하고 운영·관리하는 것이 바람직하겠지만 이력자료 축적에 소요되는 기간 동안 본 연구결과를 광범위하게 활용할 수 있을 것이다.

The accuracy of a Video Image Detector (VID) is gradually reduced due to various environmental and mechanical factors. However, there has been no systematic research about the decrease of VID accuracy. To maintain a proper level of VID accuracy for advanced traffic management, a regular VID calibration process needs to be introduced. However, the calibration cannot be performed frequently because of the cost.

In this study, the researchers collected field data for accuracy estimation and inferred an accuracy decreasing function by using regression and considering the heteroscedasticity problem. Using the invented data collection equipment which was used for checking adaptability, some data in the field were collected and analyzed. Although the data were limited, the results are promising. More data need to be investigated in the future and this study will help to maintain the data quality for broad utilization of the data in ITS centers.

## I. 서론

현재 서울시를 포함하여 전국적으로 운영 혹은 설치중인 지능형 교통체계(ITS, Intelligent Transportation Systems)는 도로이용자에게 정확한 통행시간 정보를 신속히 전달함으로써 도로이용의 효율 극대화를 목표로 하고 있다.

이러한 통행시간정보는 ITS장비에 의해 수집되는 자료를 기반으로 생성되므로 ITS장비의 신뢰성 유지가 매우 중요하지만 국내 설치·운영 중인 ITS장비의 신뢰성을 확보하기 위한 교정(Calibration) 등과 같은 유지관리활동은 매우 미흡한 상태이다. 만약 고장, 수리, 교체 등과 관련된 장기간의 이력자료가 축적되어 있다면 신뢰성공학 등과 같은 기존 연구를 활용하여 체계적인 유지관리계획을 산정할 수 있겠지만, 현재 각 센터별로 충분한 이력자료를 확보하지 못하는 실정이다.

이에 본 연구에서는 ITS 중 하나인 영상검지기의 정확도 감소함수의 추정을 위해 현재 운영 중인 영상검지기의 정확도 자료를 수집하여 분석을 시도하였다. 수집 자료 분석중 이분산성(heteroscedasticity) 문제가 발생하는것을 확인하여 이분산성 문제를 고려한 영상검지기의 정확도 감소 곡선을 추정하였다.

## II. 기존문헌 고찰

영상검지기의 정확도 감소와 관련된 연구는 많지 않다. 이청원(2005)은 영상검지기 교정에 소요되는 비용과 시간에 따라 신뢰도가 감소하는 영상검지기 자료로 인한 손실 비용을 비교할 수 있는 Disutility Function이라는 새로운 개념을 도입하여 적정 교정주기를 산정한 바 있다.

유사한 연구로는 Stephane Schanne(2001)가 인공위성의 각 부품별 교정주기를 제시한바 있다. 또한 산업자원부 기술표준원의 한국교정시험인정기구에서는 여러 장비에 대한 교정주기나 교정항목 등을 규정하고 있지만 명확한 산정근거는 알기 어려운 실정으로 장비의 운영목적, 환경, 사용빈도 등을 감안해서 합리적인 기준을 설정할 것을 권장하고 있다.

다만, 가속수명시험(ALT, Accelerated Life Testing)과 같이 일반적인 사용환경보다 가혹한 상황을 인위적으로 제공하여 제품의 신뢰도를 빠른 시간 안에 추정하는 방

안이 있지만, 제품의 고장과 관련해서만 적용할 수 있는 한계가 있고 현실적으로 24시간 운영되고 있는 영상검지기 정확도 분석에는 적용할 수 없다.

## III. 영상검지기 정확도 자료 수집 방안

### 1. 대상검지기 선정 및 현장조사 개요

본 연구에서는 조사대상 영상검지기들을 선정할 때, 운영개시 직전에 정확도 검사를 실시하여 일정수준 이상의 정확도를 확보한 것들만을 대상으로 하였다. 또한 운영개시 후, 본 연구에서 정확도를 측정할 때까지 정확도 제고를 위한 Calibration이 이루어지지 않은 검지기들만을 선정하였다. 즉, 초기 정확도 수준이 유사하고, 운영 중 인위적인 정확도 변화가 없었던 검지기들만을 대상으로 하되, 이 조건을 검지기 유지관리 이력자료를 토대로 확인할 수 있는 경우만을 대상 검지기로 하였다. 따라서 연구대상 영상검지기들이 운영개시 후, 지속적으로 정확도 감소가 계속되고, 그 현상을 자료수집을 통해 분석할 수 있을 것으로 판단하였다. 한편, 자연환경, 제조사 등에 따라 감소형태가 다양할 수도 있을 것이나, 관련 연구를 통한 객관적 결과가 전무한 상태에서 그 개연성을 연구에 반영하지는 못하였다. 향후, 방대한 자료수집을 토대로 이를 고려한 분석이 필요하며, 이때 본 연구의

〈표 1〉 현장자료수집기간

| 항목         | 내용                              | 비고      |
|------------|---------------------------------|---------|
| 조사기간       | 06년2월                           |         |
| 조사장비수      | 총 15개 장비                        | 〈표 2〉참조 |
| 조사인원       | 현장 4인 / 센터 1인                   |         |
| 평가기준장비     | 레이저 방식, Tape Switch방식           | 현장 수집   |
| 평가대상장비     | 본문의 선정기준 만족 영상검지기               |         |
| 평가항목/ 분석단위 | 속도/5분                           |         |
| 평가지표       | MAPE<br>(Mean Absolute % Error) |         |

〈표 2〉 조사대상장비 현황

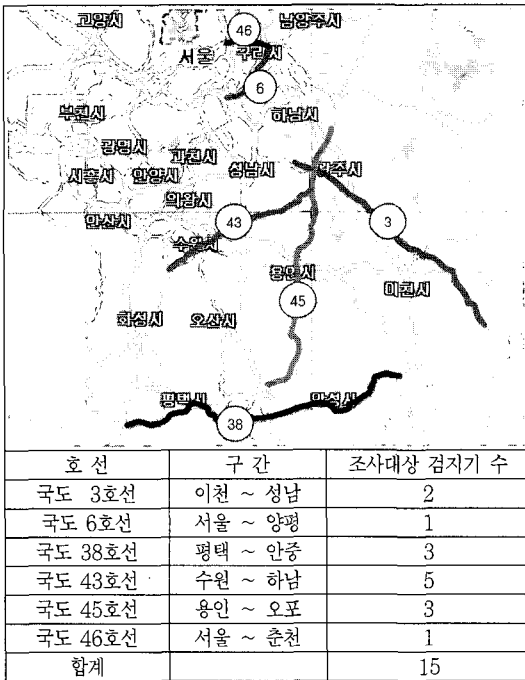
(06년 2월 기준)

| 구축연도      | 1998 | 1999 | 2001 | 2002 | 2003 | 2005 | 합계 |
|-----------|------|------|------|------|------|------|----|
| 운영 개월수    | 90개월 | 78개월 | 51개월 | 38개월 | 33개월 | 2개월  | -  |
| 조사 대상 장비수 | 2    | 2    | 3    | 3    | 3    | 2    | 15 |

수집자료는 추가 자료에 합쳐져 활용될 수 있을 것이다. 본 연구는 제시된 선정기준 하에서 1998년부터 2005년까지 준공연도가 다른 세 지역에서 기준을 만족하는 영상검지기들에 대한 현장조사를 실시하였다.

조사대상 영상검지기는 다음 사항을 고려하여 수도권 남부국도 일대로 한정하였다.

- 접근성 : 대상지역까지의 거리 및 조사차량의 활용 가능여부
- 용이성 : 수집자료 및 분석대상자료 획득의 용이성
- 안전성 : 조사중 발생할 수 있는 안전사고에 대한 위험성 여부

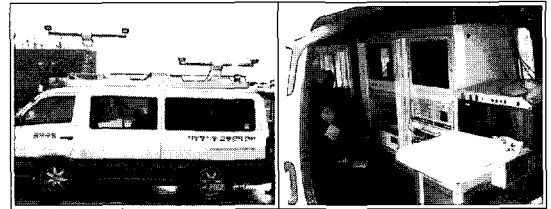


(그림 1) 현장자료 수집 대상 구역

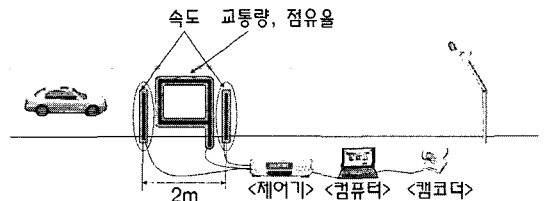
## 2. 현장자료수집 기준장비 선정 및 정확도 평가

현재 수도권 남부국도 일대에 구축·운영중인 영상검지기의 성능수준을 파악하기 위한 평가기준장비는 한국건설기술연구원의 협조를 구해 레이저방식과 1Loop+2Tape Switch 방식의 기준장비를 이용하였다. (그림 2)와 같이 레이저방식의 수집시스템은 차량위에 레이저센서를 부착한 후 도로를 주행하는 차량의 검지 유무에 따라 교통자료를 수집하는 시스템이다. 1Loop+2Tape Switch 방식

은 (그림 3)과 같이 도로위에 교통량과 점유율 수집을 위한 루프와 속도자료를 수집하기 위한 2개의 Tape Switch로 구성되어 있다.

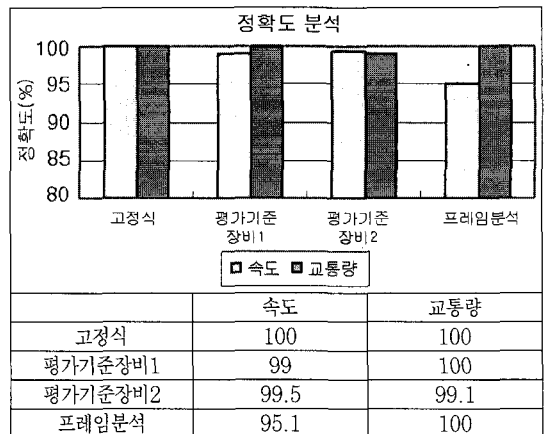


(그림 2) 레이저방식 교통자료수집시스템



(그림 3) 1Loop+2Tape Switch 교통자료수집시스템 개념도

현장조사에 앞서 기준장비의 정확도를 검증하기 위해 곤지암 무인센터의 고정식 검지기와, 프레임 분석 등을 통해 30분 단위로 여러 차례에 걸쳐 기준장비의 정확도를 평가하였다.



(그림 4) 각 평가기준장비의 정확도 비교

평가 결과, 이동식 기준장비는 정확도 수준이 매우 높은 것으로 나타나 자료수집에 문제가 없는 것으로 나타났다.

또한 평가기준장비의 설치 및 자료수집 과정이 비교적 간단하여 활용성이 매우 높을 것으로 본 연구의 기준 장비로 적합한 것으로 파악되었다.

### 3. 현장조사 절차

성능수준을 파악하기 위한 조사 수행시 항상 안전에 유의하여야 한다. 특히 곡선부나 경사가 있는 구간과 같이 시거가 충분히 확보되지 않는 경우에는 안전장비를 충분히 설치하여 조사 수행에 있어 안전을 확보할 수 있도록 하여야 한다.

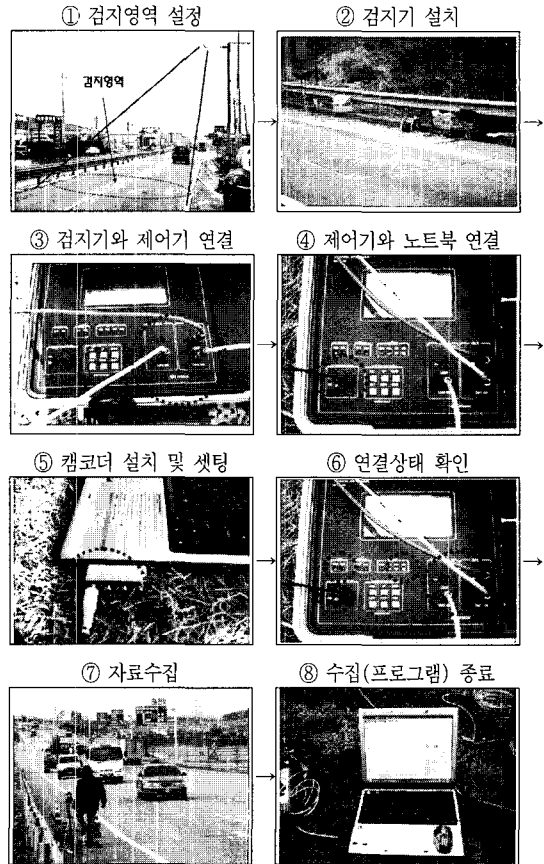
먼저 레이저 방식의 경우 차량을 길어깨에 안전하게 주차한 후 차량위의 레이저가 도로면의 신호를 반사할 수 있는 약 20cm<sup>2</sup>의 반사지를 도로면에 부착한 뒤 차량 내 장착된 컴퓨터를 이용해 자료를 수집한다.

1Loop+2Tape Switch 방식의 경우 <그림 5>와 같은 순서로 진행되며 캠코더를 설치하여 사후 검지영역 통과시 발생할 수 있는 차량진행의 이상유무 등을 파악한다.

조사 중에는 기준장비가 교통자료를 정확하게 수집하고 있는지를 실시간으로 확인해야 하는데 부득이하게 교량이나 지방도로와 같이 길어깨폭이 좁은 지점에서 조사를 실시할 경우, 주행차선에서 최대한 멀리 떨어져 장비를 설치하고 노트북을 주행차선을 마주보고 설치하여 차량의 주행상태와 자료수집이 정확하게 이루어지고 있는지를 동시에 확인하는 것이 바람직하다.



<그림 5> 레이저방식 교통자료수집시스템 자료수집 절차



<그림 6> 1Loop+2Tape Switch 교통자료수집시스템 자료수집 절차

### 4. 평가지표 선정

본 연구에서는 평이하고 활용성이 높은 평균절대오차백분율(MAPE)을 평가지표로 선정하였으며 수집주기는 활용성을 보다 강조하여 5분을 설정하였다. 평균절대오차백분율은 관측값이 기준값에 대해 어느 정도의 오차를 나타내는지를 평가하는 지표로 식(1)과 같이 정의되며 개별 차량 또는 분석 시간 간격에 따른 오차백분율의 평균을 의미한다.

$$MAPE(\%) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^I \frac{|Y_i - X_i|}{Y_i} \times 100 \quad (1)$$

- 여기서,  $i$  :  $i$ 번째 단위시간
- $I$  : 얻어진 자료의 총 주기수
- $Y_i$  :  $i$ 번째 단위시간에서의 기준자료 값
- $X_i$  :  $i$ 번째 단위시간에서의 대상자료 값

현재 운영중인 검지기의 수준을 명확히 파악할 수 있는 적절한 평가방안을 산정하여 시간에 따른 검지기 성능수준을 지속적으로 기록한다면, 시간에 따른 성능수준의 변화를 파악할 수 있을 것이다.

#### IV. 수집자료 분석

##### 1. 수집자료 개요

2006년 2월 수집된 자료는 9개소 총 54개이다. 다만, 2005년 2월 수집된 자료 역시 2006년과 동일한 방법에 의해 수집된 자료로 분석에 활용하기에 무리가 없다 판단되어 함께 <표 3>과 같이 분석을 시도하였다.

##### 2. 수집자료에 대한 회귀진단

앞서 영상검지기 정확도 감소함수 추정을 위해 각 연도 별로 구축된 영상검지기의 정확도 자료를 수집하였다. 수집자료 분석에 앞서 수집자료의 이상여부 유무에 대한 회귀진단을 실시하였다. 이상점 확인을 위해 SAS Windows Ver. 9.1.를 이용하여 스트던트화 잔차(studentized residual) 검정을 실시한 결과, 2001년에 구축된 영상검지기인 37번~42번의 데이터가 이상점인 것으로 나타났다.

$$r_i^* = \frac{e_i}{s(i)\sqrt{1-h_{ii}}} \quad (2)$$

스트던트화 잔차는 식(2)과 같이 정의되는데 이때  $y_i$ 가 이상치가 아니라면  $|r_i^*|$ 는 자유도  $n-k-2$ 인  $t$ 분포를 따른다. 즉, 스트던트화잔차  $|r_i^*| \geq t(n-k-2; \alpha/2)$ 일 경우 유의수준  $\alpha$ 에서 이상치라고 판정할 수 있다. 판정결과  $\alpha = 0.01$  에서도  $|r_i^*|$  값이 임계값의 범위를 벗어나 이상점인 것으로 나타났다.

이상점이 발견되면 특별히 주의를 기울여야 하는데 두 가지 경우로 생각할 수 있다. 첫째는 이상점이 잘못된 값인 경우로 측정을 잘못된 경우, 기록을 잘못된 경우, 계산 착오, 측정 기구의 문제 등으로 인해 발생한 것들이다. 이러한 경우는 수정하거나 아예 제거하는 것이 바람직하다. 둘째는 이상점이 보기와는 달리 실제 값인 경우로 단순히 제거하는 것은 바람직하지 않으며 표준화 잔

<표 3> 조사자료 결과 요약

| No | 호선 -ID | 운영 개월수 | 속도의 MAPE | No | 호선 -ID | 운영 개월수 | 속도의 MAPE |
|----|--------|--------|----------|----|--------|--------|----------|
| 1  |        |        | 5.04     | 43 |        |        | 4.52     |
| 2  |        |        | 7.07     | 44 |        |        | 6.39     |
| 3  | 38     | 51     | 3.41     | 45 | 43     | 33     | 5.24     |
| 4  | -210   |        | 1.13     | 46 | -550   |        | 4.04     |
| 5  |        |        | 1.87     | 47 |        |        | 6.83     |
| 6  |        |        | 1.15     | 48 |        |        | 5.78     |
| 7  |        |        | 20.47    | 49 |        |        | 13.29    |
| 8  |        |        | 23.20    | 50 |        |        | 11.46    |
| 9  | 38     | 51     | 21.81    | 51 | 43     | 33     | 14.08    |
| 10 | -220   |        | 27.34    | 52 | -560   |        | 12.59    |
| 11 |        |        | 22.70    | 53 |        |        | 14.39    |
| 12 |        |        | 23.60    | 54 |        |        | 12.01    |
| 13 |        |        | 17.49    | 55 |        |        | 6.79     |
| 14 |        |        | 6.39     | 56 |        |        | 4.01     |
| 15 | 45     | 38     | 5.24     | 57 | 45     | 25     | 3.58     |
| 16 | -330   |        | 4.04     | 58 | -380   |        | 5.14     |
| 17 |        |        | 6.83     | 59 |        |        | 2.00     |
| 18 |        |        | 16.07    | 60 |        |        | 6.48     |
| 19 |        |        | 0.25     | 61 |        |        | 10.02    |
| 20 |        |        | 5.12     | 62 |        |        | 6.42     |
| 21 | 45     | 38     | 2.85     | 63 | 45     | 25     | 6.25     |
| 22 | -380   |        | 1.67     | 64 | -390   |        | 5.34     |
| 23 |        |        | 4.37     | 65 |        |        | 8.18     |
| 24 |        |        | 1.87     | 66 |        |        | 4.31     |
| 25 |        |        | 15.12    | 67 |        |        | 0.39     |
| 26 |        |        | 15.49    | 68 |        |        | 6.88     |
| 27 | 45     | 38     | 14.89    | 69 | 43     | 20     | 3.19     |
| 28 | -390   |        | 14.51    | 70 | -550   |        | 5.91     |
| 29 |        |        | 15.20    | 71 |        |        | 5.01     |
| 30 |        |        | 15.07    | 72 |        |        | 5.54     |
| 31 |        |        | 3.14     | 73 |        |        | 1.76     |
| 32 |        |        | 1.90     | 74 |        |        | 1.58     |
| 33 | 38     | 38     | 0.96     | 75 | 6      | 2      | 3.21     |
| 34 | -190   |        | 5.77     | 76 | -120   |        | 2.58     |
| 35 |        |        | 1.88     | 77 |        |        | 3.25     |
| 36 |        |        | 1.00     | 78 |        |        | 5.85     |
| 37 |        |        | 36.26    | 79 |        |        | 5.28     |
| 38 |        |        | 36.77    | 80 |        |        | 3.64     |
| 39 | 38     | 38     | 36.62    | 81 | 45     | 2      | 2.37     |
| 40 | -230   |        | 34.77    | 82 | -020   |        | 2.22     |
| 41 |        |        | 37.68    | 83 |        |        | 1.78     |
| 42 |        |        | 35.36    | 84 |        |        | 5.04     |

□ : 2005년 조사결과

□ : 2006년 조사결과

차(standardized residual)검증, 스트던트화 잔차(studentized residuals) 검증 등을 이용하여 특이점의 제거 여부를 적절히 판단해야 할 것이다.

이상치로 발견된 데이터는 2005년에 수집한 데이터

로 30개의 데이터로 분석을 시도한 당시에는 이상점으로 파악하지 못하였다.

또한, 2005년 분석당시에는 2001년에 구축된 데이터가 가장 오래된 영상검지기였기 때문에 시간 증가에 따른 영향을 고려할 수 없어 이상치의 유무를 판정할 수 없었다고 판단된다.

본 연구를 수행하면서 2005년 2월에 수집된 자료와 2006년 2월에 수집된 자료를 활용하여 기상조건 등과 같은 환경의 영향을 최소화하려고 노력하였다. 이상치로 판정된 데이터의 경우, 2005년 2월에 조사한 지점으로 약 15개월이 지난 현재 재실험을 하여 데이터를 다시 수집하는 것은 사실상 불가능하다.

따라서, 현실적으로 재실험을 통한 데이터 대체가 불가능하고 본 연구에서 주로 활용하는 데이터자체가 2006년도의 데이터이기 때문에 이상치를 제거하여 분석을 실시하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

### 3. 수집자료 분석

이상점으로 확인된 37번~42번 데이터를 제외한 총 78개의 데이터를 이용하여 다음과 같이 선형회귀분석을 실시하였다.

$$H_0 : \beta_1 = 0 \text{ 선형회귀모형이 적합하지 않음}$$

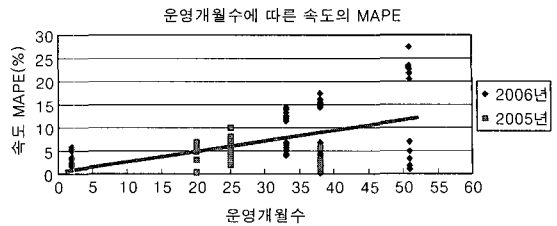
$$H_1 : \beta_1 \neq 0 \text{ 선형회귀모형이 적합함}$$

회귀모형식은  $Y = 1.79 + 0.19X$ ,  $R^2$ 이 0.19인 것으로 나타났으며 F-통계량이 17.97, P-Value가 0.00006으로  $\alpha = 0.001$ 에서도 선형모형이 매우 유의한 것으로 나타났다.

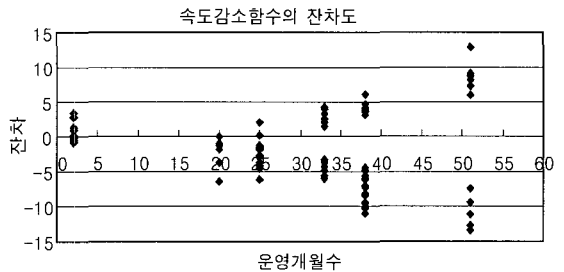
〈표 4〉 2005년과 2006년 조사결과 요약통계량

| 변수     | 계수     | 표준오차       | t 통계량          |
|--------|--------|------------|----------------|
| X      | 0.1864 | 0.043961   | 4.239236       |
| Y 절편   | 1.7946 | 1.48399    | 1.209338       |
| n = 78 |        | s = 5.7715 | $R^2 = 0.1912$ |

다만, 〈그림 8〉과 같이 추정된 속도 정확도 감소 함수의 잔차도를 살펴본 결과 시간증가에 따라 잔차의 폭이 지속적으로 증가하는 이분산성 문제가 발생하는 것으로 나타났다.



〈그림 7〉 운영개월수에 따른 속도의 MAPE 추정식



〈그림 8〉 속도에 대한 정확도 감소함수 추정식의 잔차도

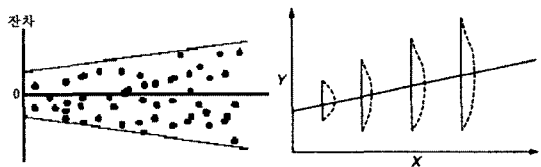
## V. 이분산성을 고려한 영상검지기 정확도 감소 함수 추정

### 1. 이분산성 개요

회귀분석의 기본전제 중의 하나는 잔차가 상호 독립적인 무정형의 분포를 보인다는 것이다. 이를 충족시키지 못하는 경우, 회귀식이 부적절하거나, 변수가 추가로 도입되어야 하며 자료 중의 일부가 이상점을 포함하고 있음을 의미한다.

잔차가 이질적인 분산을 보일 때 OLS 방식으로 산출된 회귀계수는 최소분산의 가정을 만족시키지 못해 계수 추정의 정확성을 상실하며 이는 회귀계수의 표준오차가 커지는 것을 의미한다.

즉, 오차항의 분산이 모든 독립변수의 범위에서 동일하다는 기본가정 동분산(homoscedasticity)이 위배되었을 때 이분산(heteroscedasticity)이 존재한다고 한다.



〈그림 9〉 이분산성(heteroscedasticity)의 예

이분산성이 발생하는지에 대한 검정방법은 화이트(White, 1980), 브로이쉬-파간(Breusch and Pagan, 1979), 골드펠트-퀀트(Goldfeld and Quandt, 1972) 검정 등 다양한 방법이 있다.

1) 화이트(White, 1980) 검정

화이트의 검정방법은 설명변수와 그 제곱에 대한 잔차제곱  $e_i^2$ 을 회귀시키는 방법이다. 즉  $X_i$ 와  $X_i^2$ 에 대하여  $e_i^2$ 을 회귀시켜서 추정된 회귀식의 결정계수( $R^2$ )가 유의적으로 높은 경우에 동분산 가정을 기각하게 된다(이우리, 2003).

2) 브로이쉬-파간 검정

브로이쉬-파간 검정은 오차분산을  $V(e_i) = \sigma_i^2$ 로 나타내고 이 오차분산에 영향을 미치는 변수들을  $Z_1, Z_2, \dots, Z_r$ 이라고 하여 오차분산을 다음과 같이 나타낸다.

$$\sigma_i^2 = f(\alpha_0 + \alpha_1 Z_{1i} + \alpha_2 Z_{2i} + \dots + \alpha_r Z_{ri})$$

이 때 검정을 위한 귀무가설과 검정통계량은 다음과 같다.

$$H_0 : \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_r = 0$$

$$\text{검정통계량: } BP = \frac{RSS_0}{2 \times \hat{\sigma}^2}$$

여기서  $\hat{\sigma}^2 = \sum \frac{e_i^2}{n}$ ,  $RSS_0$ 는  $Z_1, Z_2, \dots, Z_r$ 에 대해  $e^2$ 을 회귀했을때의 회귀제곱합을 의미하며 검정통계량  $BP$ 는 자유도  $r$ 인  $\chi^2$ -분포를 따른다(이우리, 2003).

2. 이분산성 문제 해결 방안

산업, 경제, 생물학 등 통계응용분야에 대한 회귀분석에서 오차항의 동분산성이 만족되지 않을 경우, 잔차플롯에서 잔차의 변이가 설명변수의 값에 따라 같이 변화하는 경향을 보이는 경우가 발생한다.

오차항의 이분산 문제는 대부분의 경우 대수변환, 역변환 등과 같은 변수변환을 통하여 어느정도 해결할 수

있다. 다른 방법으로는 가중최소제곱(Weighted least squares: WLS)법 혹은 최우추정(ML)법을 사용할 수 있다. 선형회귀분석에서 이분산성의 문제는 가중최소제곱(WLS)의 방식으로 해결될 수 있는데 독립변수와 종속변수를 각각  $\frac{1}{X}$ 와  $\frac{Y}{X}$ 로 변환시켜 OLS방식으로 분석한 것이 결국 WLS방식에 해당된다.

OLS방식이 잔차의 최소제곱합의 원칙에 의하여  $\sum (Y_i - a - BX_i)^2$ 를 최소로 하는 회귀계수를 구하는 데 비해 WLS방식은 잔차의 제곱에 가중치를 부여한 합을 최소로 하는 회귀계수를 구하는 것이며 여기서 가중치는 오차분산에 역비례하게 부여되며 따라서 WLS방식으로  $\sum \frac{1}{X_i^2} (Y_i - a - BX_i)^2$ 을 최소로 하는 회귀계수를 구하는 것이 되며 WLS방식은 중다회귀모형에도 마찬가지로 적용될 수 있다(김두섭, 2000).

3. 수집자료의 이분산성 확인

앞에서 분석한 영상검지기 속도의 정확도 감소 추정식의 잔차도를 살펴본 결과 이분산성이 발생하는 것으로 추정되었다. 따라서 화이트검정과 브로이쉬-파간 검정을 활용하여 이분산성 발생 여부를 살펴보았다. 먼저 브로이쉬-파간 검정방법을 적용을 위한 가설은 다음과 같다.

$$H_0 : \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_r = 0$$

$$H_1 : \alpha_1 \neq \alpha_2 \neq \dots \neq \alpha_r \neq 0$$

앞에서 구해진 회귀잔차의 제곱  $e^2$ , 설명변수  $X$  및  $X^2$ 을 이용하여  $e^2$ 에 대한 회귀식을 추정하였을 때,  $RSS_0$ 는 93882.55이고  $\hat{\sigma}^2$ 는 32.46으로 검정통계량은 44.523이 된다.

유의수준 1%이고 자유도가 2일때의 임계값은 9.21이므로 귀무가설을 기각한다. 즉 수집자료의 분석결과가 동분산이 아니라고 할 수 있다.

화이트 검정의 경우 귀무가설은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_r^2$$

$$H_1 : \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2 \neq \dots \neq \sigma_r^2$$

$X$ 와  $X^2$ 에 대하여  $e^2$ 을 회귀시켜서 추정된 회귀식의

결정계수가 0.63으로 유의적으로 높기 때문에 귀무가설은 기각되며 분석결과가 동분산이 아니라고 할 수 있다.

#### 4. 영상검지기 정확도 감소 함수 추정

2005년과 2006년 조사결과를 바탕으로 회귀분석을 실시한 결과 이분산성의 문제가 발생하는 것을 그래프와 통계적 방법을 통해 확인하였다.

이분산성 문제가 있는 회귀모형식을 그대로 사용하는 것은 무의미하기 때문에 WLS를 통해 이분산성 문제를 해결한 새로운 회귀모형식을 추정하였다.

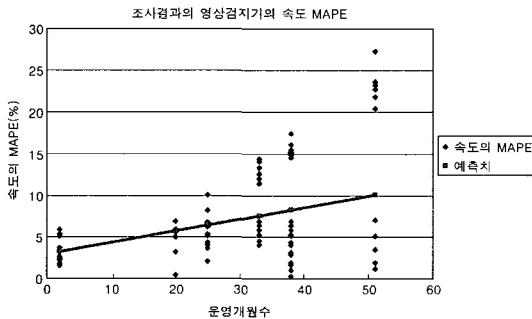
$H_0: \beta_1 = 0$  선형회귀모형이 적합하지 않음

$H_1: \beta_1 \neq 0$  선형회귀모형이 적합함

회귀모형식은  $Y = 2.93 + 0.14X$ ,  $R^2$ 이 0.19인 것으로 나타났으며 F-통계량이 17.97, P-Value가 0.00006으로  $\alpha = 0.001$ 에서도 선형모형이 매우 유의한 것으로 나타났다.

〈표 5〉 이분산성을 제거한 후의 요약 통계량

| 변수     | 계수         | 표준오차           | t 통계량   |
|--------|------------|----------------|---------|
| X      | 0.1419     | 0.0041         | 3.4310  |
| Y 절편   | 2.9255     | 0.2086         | 14.0232 |
| n = 78 | s = 0.3125 | $R^2 = 0.7213$ |         |



〈그림 10〉 운영개월수에 따른 속도의 MAPE 추정식

추정된 새로운 회귀모형식의 화이트검정 결과 결정계수가 0.04로 매우 유의하지 않은 것으로 나타나 동분산가정을 채택할 수 있다. 브로이슈-파간 결과 역시 검정 통계량이  $6.61 \times 10^{-27}$ 으로 이분산 문제가 더 이상 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이분산성 문제 해결 전·후

의 주요통계량은 〈표 6〉과 같이 표준오차와 결정계수 등 여러 통계량이 개선되는 것을 확인하였다.

〈표 6〉 이분산성 문제 해결 전·후의 주요 통계량 비교

| 구분      | 이분산성 제거전           | 이분산성 제거후               |
|---------|--------------------|------------------------|
| 회귀모형식   | $Y = 1.79 + 0.19X$ | $Y = 2.93 + 0.14X$     |
| F-통계량   | 17.97              | 196.65                 |
| P-Value | 0.00006            | $8.85 \times 10^{-23}$ |
| s(표준오차) | 5.7715             | 0.3125                 |
| $R^2$   | 0.19               | 0.72                   |

#### Ⅶ. 결론

본 연구의 핵심이 되는 시간에 따른 영상검지기의 정확도 감소 함수 추정을 위해서는 개별 장비의 장기간의 축적된 이력자료 확보가 필수적이지만 현재 ITS장비에 대한 이력관리는 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 각 장비의 특성이 구축년도나 제조회사 등에 영향을 받지 않고 모두 동일하다는 기본 가정하에 1998년부터 2005년까지 구축된 영상검지기를 대상으로 분석을 시도하였다.

분석 중 조사자료에 나타나는 이분산성(heteroscedasticity)문제가 발생함을 확인하였고 그에 따라 이분산성을 고려하여 영상검지기 정확도 감소함수를 추정하였다.

본 연구는 비록 조사대상수가 충분하지 않아 일반화하기에는 다소 무리가 있지만 ITS장비의 신뢰성 유지를 위한 유지관리 활동에 필수적인 영상검지기 정확도 감소 함수를 추정하기 위해 2005년과 2006년에 수집한 자료를 바탕으로 분석을 시도하였는데 의의가 있을 것이다.

ITS장비의 이력자료 축적할 수 있는 시스템이 시급히 선행되어야 할 것이나 현실적으로 어쩔 수 없이 시간이 소요되는 만큼 본 연구결과가 적정 교정주기 산정, 점검주기, 교체주기 등 유지관리활동을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

또한 일회성 조사가 아니라 꾸준히 추가의 연구를 진행하여 분석을 위한 충분한 자료를 획득한다면 보다 정확한 영상검지기의 정확도 감소 추이 분석이 가능할 것으로 앞으로도 지속적인 연구가 필요할 것이다.

#### 참고문헌

1. 이우리·오광우(2003), "회귀분석 입문 및 응용",



도서출판 탐진.

2. 박성현(1999), "제3판 회귀분석", 민영사.
3. 김종덕(2000), "SAS를 이용한 선형회귀분석", 자유아카데미.
4. 성내경(2004), "제3판 SAS/STAT 회귀분석", 자유아카데미.
5. Samprit Chatterjee, Bertram Price(1991), "Regression Analysis by Example", John Wiley & Sons, Inc., 김기영, 전명식 공역(1998), "예제를 통한 회귀분석", 자유아카데미.
6. 김두섭, 강남준(2000), "회귀분석 기초와 응용", 나남출판.
7. 이청원 · 백남철 · 송영화 · 장진환(2005), "영상검지기 교정주기 설정방안", 대한교통학회지, 제23권 제5호, 대한교통학회, pp.177~185.
8. 한국건설기술연구원(2005), "ITS장비 검 · 교정주기 분석DB제작".
9. 배도선·전영록(1999), "신뢰성분석", 도서출판 아르케.
10. Simon P. Washington, Matthew G. Karlaftis, Fred L. Mannering(2003), "Statistical And Econometric Methods For Transportation Data Analysis".
11. Australian Government(2004), "Calibration of test equipment for maintenance purposes".
12. Stephane Schanne(2001), "The on-ground Calibration Campaign of the Spectrometer aboard the INTEGRAL Satellite".
13. P. Vijayaraghavan(2000), "NDE of Flight Hardware Exported to Aircraft Manufacturers in Europe and USA".
14. Barringer H, "Cost Effective Calibration Intervals Using Weibull Analysis".
15. Nelson, W(1990), "Accelerated Testing-Statistical Model, Test Plans and Data Analyses", John Wiley & Sons.
16. Michael S. Lewis-Beck(1993), "Regression Analysis", SAGE Publications/Toppan Publishing.
17. <http://www.kolas.go.kr> (한국교정시험인정기구).

♣ 주 작 성 자 : 이청원  
 ♣ 교 신 저 자 : 이청원  
 ♣ 논문투고일 : 2006. 7. 3  
 ♣ 논문심사일 : 2006. 9. 2 (1차)  
                   2006. 10. 20 (2차)  
                   2007. 2. 3 (3차)  
 ♣ 심사판정일 : 2007. 2. 3  
 ♣ 반론접수기한 : 2007. 8. 31