

# 국가 측지망의 정밀도 향상을 위한 최적 측지망 설계에 관한 연구

## Optimal Network Design for Enhancing the Precision of National Geodetic Network

조재명<sup>1)</sup> · 윤홍식<sup>2)</sup> · 위광재<sup>3)</sup>

Cho, Jae Myoung · Yun, Hong Sik · Wie, Gwang Jae

### Abstract

This paper describe the optimal design of geodetic network by analytical technique based on the quality criteria of network. We described an example of geodetic network design taking into account the precision, reliability and robustness that are the main criteria of network design. The main goal of this paper is to evaluate the criteria to design the geodetic network coinciding with the criteria of high precision(error ellipse, 2DRMS, CEP), reliability(internal and external reliability) and robustness(maximum shear strain, principal strain, dilatation). The network design parameters computed in this study show that precision and reliability has not much improved by about 2% and 3%, respectively, than the observed network, while robustness has much improved by about 3,100%. It also shown that maximum errors of precision, reliability and robustness were reduced by 5%, 7% and 16,957%, respectively.

Keywords : Geodetic Network, Optimal Network Design, Precision, Reliability, Robustness

### 초 록

측지망은 측량작업과 조정계산의 기준으로써 그 구성이 측량성과의 품질에 많은 영향을 미침에도 불구하고 대부분의 측지망 설계는 경험적 또는 단순한 기하학적 강도만을 기준으로 설계되어진다. 본 논문은 해석적 기법에 의한 측지망의 최적화 설계를 위하여 측지망의 품질을 평가하기 위한 다양한 기준을 분석하고 제시하기 위한 것으로써 측지망 품질평가 기준으로 정밀도(오차타원, 2DRMS, CEP), 신뢰성(내적신뢰성, 외적신뢰성) 및 견인성(최대전단변형률, 주변형률, 면적변형률)을 제시하고 이를 실제 측지망의 설계에 적용함으로써 그 효용성을 평가하였다. 기관측된 실제 측지망에 8가지 품질평가 인자를 적용하여 측지망 최적화 설계의 효용성을 평가한 결과, 최적화 설계 전 · 후 품질평가 인자는 평균값에 있어서 정밀도는 2%, 신뢰성은 3%, 견인성은 3,001%로 향상되었으며, 최대값에 있어서 정밀도는 5%, 신뢰성은 7%, 견인성은 16,957% 향상된 것으로 분석되었다.

핵심어 : 측지망, 최적화 망설계, 정밀도, 신뢰성, 견인성

## 1. 서 론

측지망(geodetic network)은 측지기준점 또는 측량점들을 연결한 망으로써 측량작업 계획단계에서는 측량기법, 측량방법별 측량작업의 순서를 결정하고 계획하는 기준이 되며, 측량작업 후에는 측지망의 기하학적 구속

조건을 이용하여 측량의 오차를 점검하고 배분하는 조정계산의 기준이 된다. GPS를 이용하여 전체 관측점들 동시에 관측할 경우에는 관측값의 공분산 매트릭스에 의하여 최적기선을 결정할 수 있으므로 이를 이용하여 최적 측지망을 구성할 수 있지만 대부분의 실제 측량기준점 관측에서는 모든 관측점들을 동시에 관측하기 힘

1) 주저자 · 정희원 · 성균관대학교 사회환경시스템공학과 겸임교수(E-mail:jmcho@skku.edu)

2) 교신저자 · 정희원 · 성균관대학교 사회환경시스템공학과 교수(E-mail:yoons@skku.edu)

3) 정희원 · 성균관대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 · 한진정보통신(주) GIS 기술연구소(E-mail:gjwe@hist.co.kr)

들고, 세션별로 나누어 순차적으로 측량을 하게 되므로 사전 측지망 설계에 의하여 측지망을 구성하고 측량을 실시하게 된다. 측지망의 설계는 측량작업 일정 계획, 측량기기 및 인력의 배치와 같은 측량의 경제적 효율성뿐만 아니라 정밀도 같은 측량성과의 품질에도 많은 영향을 미친다. 따라서 측지망을 계획하고 설계하는데 있어서 설계 기준과 척도가 주어진다면 보다 정밀하고 효율적인 측량을 수행할 수 있을 것이다. 그러나 실제 GPS, 토탈스테이션(Total Station) 등을 사용하여 기준점을 측량하는 경우에 대부분 경험적인 방법에 의하여 기선거리 또는 망의 형태만을 고려하여 측지망을 설계하기 때문에 설계자 또는 설계방법에 따라서 측지망의 품질이 변할 수 있다. 대부분의 경험적인 측지망 설계에서는 기선 거리가 가능한 짧고 고르게 분포하도록 설계하거나 삼각각형에 가깝도록 설계함으로써 망의 강도를 높이는 방법을 사용한다. 또한 신속한 측량 작업의 진행을 위하여 동시 관측조건이 우수한 점들을 우선시 하는 측지망 설계 방법을 사용하기도 한다. 이러한 경험적인 방법들은 측지망의 단순 오차배분이나 작업 조건만을 고려하는 것이기 때문에 관측 기선별 정밀도, 측지망의 기하학적 특성, 과대오차의 점점, 오차의 배분 등 실제 측지망 조정시에 발생하는 다양한 처리 조건과 문제점에 대한 고려가 필요하다. 측지망의 최적화 설계에서는 이러한 실제적인 다양한 조건과 문제점 등을 고려하고 점검할 수 있어야 하며, 설계된 측지망의 최종적인 품질을 정량적으로 평가할 수 있어야 한다. 따라서 본 논문에서는 최종 측량성과의 정밀도와 신뢰성을 향상시키기 위한 측지망 최적화 설계 기준으로써 해석적으로 분석 가능한 품질평가 인자를 제시하고 이를 실제 측지망에 적용하여 그 효용성을 평가함으로써 과학적이고, 합리적인 측지망 및 국가 기준점망 설계에 대한 기준을 마련하고자 한다.

## 2. 측지망의 최적화 설계 기준

측지망을 설계하고 최적화하는 것은 정밀도와 신뢰성이 높은 측지망인 동시에 경제적인 효율성까지 갖춘 측지망을 설계하는 것을 뜻한다. 측지망 설계는 시행착오(trial and error)법과 해석적 방법으로 실시할 수 있는데 시행착오법은 설계자가 경험에 의거하여 수많은 설계를 실시하고 이를 비교하여 최적의 측지망을 선택하는 방법이며, 해석적인 방법은 특정한 수학적 알고리즘을 사용하여 이 수학적 알고리즘을 최적화할 수 있는 측지망을 자동적으로 생성하는 방법이다. 대규모 측지망 설계에서 해석적

인 방법에 의한 최적 측지망의 설계는 고려해야 할 경우의 수와 계산량이 매우 많기 때문에 컴퓨터 기술이 발전하기 이전에는 대부분 시행착오법에 의하여 측지망을 설계하였으며, 소규모 측지망의 설계에서도 망의 정밀도 보다는 경제적인 측면을 중요시 하여 경험적인 방법에 의하여 설계를 실시하였다(Even-Tzur 등, 1996). 최근들어 GPS, 토탈스테이션과 같이 고정밀 측량기기가 등장하면서 기선 측정 정밀도에 비례하여 정밀도와 신뢰성이 높은 측지망을 구성하기 위한 다양한 해석적인 측지망 설계방법과 기준이 연구되어지고 있다. Helmert(1868)는 정밀도와 신뢰성 인자를 이용한 측지망 설계 이론을 최초로 제시하였으며, Schreiber(1882), Jung(1924)는 Helmert의 이론을 실제 측지망 설계에 적용하고 평가함으로써 보완 발전시켰다. Grafarend(1974), Cross(1985), Schaffrin(1985), Schmit(1985)은 정밀도와 신뢰성 및 경제성을 고려한 해석적인 측지망의 최적화 설계방법을 제시하고 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 이를 분석하였다. Baarda(1968)는 측지망의 신뢰성 기준으로써 관측값 내에서 과대오차들을 조사하거나 제거할 수 있는 기준에 대하여 연구하였다. 이 연구에서 신뢰성은 과대오차(gross error), 과오(blunder) 또는 이상관측값(outlier)과 관련된 고정점의 품질을 나타내기 위해 사용되었는데, 신뢰성이 높을수록 작은 이상관측값들을 검출할 수 있다. 또한 Baarda는 신뢰성을 내적신뢰성과(internal reliability), 외적신뢰성(external reliability)으로 구분하여, 측정값이나 최종 성과에 제거되지 않고 남아 있을 수 있는 과대오차의 검출 능력을 나타냈다. 한편, Thapa(1980)는 변형률을 이용한 측지망의 기하학적 강도(strength) 분석방법을 최초로 연구 하였으며, Dare 등(1982)은 실제 관측된 측지망의 변동량을 바탕으로 수평 측지망의 변형률과 강도를 계산하는 방법을 연구하였다. 이후 Vaniček 등(1991)은 측지망의 강도 분석방법과 신뢰성 분석방법을 결합하여 측지망의 품질을 평가하기 위한 견인성(robustness) 분석방법을 제시하였다.

선행 연구를 분석한 결과 측지망의 최적화 설계 기준에는 정밀도, 신뢰성, 견인성, 경제성의 4가지 요소가 있으며, 이 중 정밀도, 신뢰성, 견인성은 측지망의 품질을 나타내는 요소이다. 측지망의 정밀도를 분석할 수 있는 기준으로는 오차타원, 2DRMS(Distance Root Mean Square error), CEP(Circular Error Probability)가 있으며, 신뢰성을 분석할 수 있는 기준으로는 외적신뢰성과 내적신뢰성이 있다. 측지망의 견인성은 주변형률 또는 최대전단변형률을 기준으로 분석할 수 있다. 경제성 분석은 지역이나 측량장비에

다른 다양한 변화 인자들에 대한 표본 값들을 필요로 하기 때문에 본 연구에서는 측지망의 최적화 설계 방법으로써 경제성을 제외한 품질 요소만을 대상으로 연구를 진행하였다.

## 2.1 정밀도 기준

### 2.1.1 오차타원

오차타원은 기준점의 위치가 측지망내에 적용된 기하학적 특성과 중량결정에서 발생할 것으로 예측되는 실제 위치에 대한 확률의 면적을 나타내는 것으로써 타원체의 방향, 장반경 및 단반경 3개의 파라미터들로서 표시된다. 오차타원의 방향은 식 (1)을 사용하여 계산되며, 장반경 ( $\sigma_{max}$ )과 단반경 ( $\sigma_{min}$ )의 크기는 식 (2)로부터 계산된다(Bomford, 1980).

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2\sigma_{xy}}{(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)} \quad (1)$$

$$\sigma_{max} = \sqrt{\frac{1}{2} \{ (\sigma_x^2 + \sigma_y^2) + \sqrt{(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2 + 4\sigma_{xy}^2} \}} \quad (2)$$

$$\sigma_{min} = \sqrt{\frac{1}{2} \{ (\sigma_x^2 + \sigma_y^2) - \sqrt{(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2 + 4\sigma_{xy}^2} \}}$$

여기서,  $\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_{xy}$  : 관측값 중 x, y축 방향에 대한 분산 및 공분산

계산된 모든  $\sigma$  값들은 39.4%의 확률을 가지는데 일반적으로 95%의 확률을 필요로 하므로 모든  $\sigma$  값 ( $\sigma_{max}, \sigma_{min}$  포함)에 2.447을 곱한다(Craymer 등, 1990).

### 2.1.2 2DRMS

2DRMS는 DRMS의 2배라는 것을 의미하며, 2차원의 RMSE를 표시하는 것은 아니다. 데이터들로부터 DRMS를 계산하기 위해서는 측정된 위치와 기지(또는 평균)위치간의 선형거리에 대한 RMSE를 계산하여야 하며, DRMS는 식 (3)으로부터 계산된다(Leick, 2004).

$$DRMS = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (3)$$

2DRMS를 사용하는 경우의 단점은 일정한 확률을 가지지 않는다는 것이다. 기본적으로 관련 확률은 특정한 기하학으로부터 얻어지는 오차타원의 타원체 함수로 표시되며, 관측오차가 정규분포를 이룬다고 가정하면 이 확률은 95.4%~98.2%의 범위에 놓이게 된다.

### 2.1.3 CEP

CEP는 값들이 발생할 수 있는 확률이 50%인 원의 반경을 나타내는 것으로써 CEP가 100 m라는 것은 계산된 기준점 중 50%가 실제위치의 100m이내에서 결정됨을 표시하는 것이다. CEP는 식 (4)를 사용하여 계산할 수 있다(Leick, 2004).

$$CEP = (0.615\sigma_y + 0.562\sigma_x) \quad (4)$$

위치결정에 있어서 50%의 확률은 너무 작으므로 보다 높은 95%의 확률을 사용하는데 이를 구분하기 위하여 R50, R95와 같이 표현하기도 한다.

## 2.2 신뢰성 기준

### 2.2.1 내적신뢰성

측지망의 품질을 나타내기 위한 신뢰성은 내적신뢰성(internal reliability)과 외적신뢰성(external reliability)으로 구분할 수 있는데, 이 중 내적신뢰성은 검정통계를 사용하여 검출해 낼 수 있는 과대오차(gross error)와 이상값(outlier)들의 크기를 나타내기 위하여 사용된다. MDE(Minimum Detectable Error)는 내적신뢰성의 기준으로서 특정 유의수준의 규정된 확률내에서 검출되지 않고 남아 있을 수 있는 오차의 크기를 나타낸다. 통계학적 검정 시나리오를 고려하였을 때 측량에 의한 관측값들은 다양한 통계학적 분포들 중의 하나에 속할 수 있다(Baarda, 1968). 그림 1에 표시한 바와 같이 과대오차가 포함되지 않은 분포( $F_I$ )와 과대오차가 포함된 분포( $F_{II}$ )가 있다면, 과대오차의 크기가 작을수록 불량 데이터가 통과될 수 있는 확률도 커진다. 불량 데이터가 통과되거나 되지 않는 경우에 대한 특정 확률을 결정하기 위해서는 관측값에 포함될 수 있는 오차의 최소 크기를 결정하여야 하는데 이것이 MDE이다.

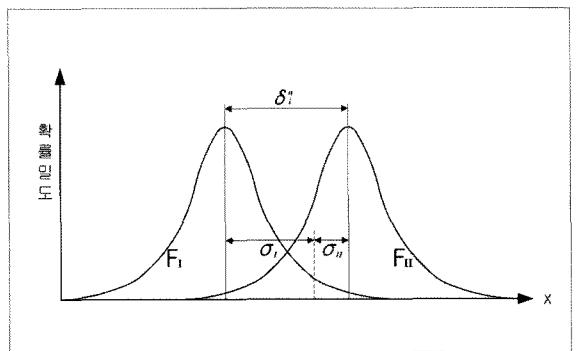


그림 1. 내적 신뢰성

상관관계가 존재하지 않는 데이터에 대해서 식 (5)와 같이 각 관측값에 대하여 MDE를 계산할 수 있다. 식 (5)에서  $\delta$  값은 통계표로부터 직접 결정할 수 있으며, 신뢰구간과 검정력에 의해 좌우된다(Baarda, 1968).

$$MDE_i = \delta_i^u \frac{\sigma_i^2}{\sigma_{v_i}} \quad (5)$$

여기서,  $\delta_i^u : \sigma_I + \sigma_{II}$

$\sigma_i$  : 관측값의 표준오차(standard error)

$\sigma_{v_i}$  : 대각요소의 표준편차(standard deviation)

### 2.2.2 외적신뢰성

외적신뢰성은 검출되지 않은 과대오차가 추정된 파라미터나 전체 계산값에 미치는 영향을 평가하기 위한 기준이다. 즉, 외적신뢰성은 측지망내의 좌표들과 좌표로부터 계산된 값들에 포함되어 있는 과대오차 중 검출할 수 없는 과대오차들의 영향을 측정하는 것이다(Even-Tzur & Papo, 1996). 관측오차가 발생하였으나 검출되지 않는 경우에 '위치에 얼마나 큰 영향을 줄 것인가'와 '어떤 관측값에 오차가 포함되어 있는가'를 검토하여야 한다. 따라서 실질적인 측지망 계산에서는 내적신뢰성 보다 외적신뢰성이 더 중요하게 취급되기도 한다. 외적신뢰성은 각 관측값의 MDE를 이용하여 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다(Baarda, 1968).

$$\Delta x_i = (A^T W A)^{-1} A^T W \Delta b_i \quad (6)$$

여기서,  $A$  : 설계행렬(design matrix)

$W$  : 무게행렬(weighted matrix)

$$\Delta b_i = [0 \ 0 \ \dots \ MDE_i \ \dots \ 0 \ 0]^T$$

### 2.3 견인성 기준

2차원 또는 3차원 도형을 구성하는 점에 변위가 발생할 경우 도형을 이루는 변들은 이로 인해 변형률이 발생하게 되는데 동일한 점들로 구성된 도형이라도 변의 구성 형태에 따라서 도형 전체의 변형에는 차이가 발생한다. 변형률은 물리적으로 견인성과 관련이 있으며, 변형률이 작을수록 견인성이 높다는 것을 의미한다. 따라서 측지망의 견인성은 기선의 변형률 분석을 통해서 나타낼 수 있다. 그림 2에서 x, y 평면상의 2점 P, Q가 P', Q'로 이동하였다면 P'에 대한 Q'의 상대적인 변위벡터의 성분  $u_q, v_q$ 는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

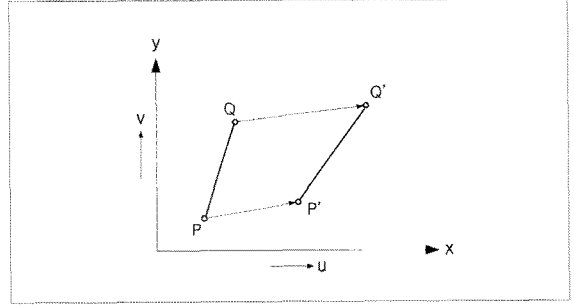


그림 2. 탄성변형에 의한 x-y평면에서의 두 점의 변위

$$\begin{bmatrix} u_q \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서,  $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}$  : x, y축 방향 변형률

$\gamma_{xy} = \gamma_{yx}$  : 전단변형률( $\epsilon_{xy} + \epsilon_{yx}$ )

측지망을 구성하는 삼각망 각 변의 조정계산 전·후 기선의 신축량을 식 (7)에 적용하면 변형률 요소  $\epsilon_{xx}, \gamma_{xy}, \epsilon_{yy}$ 를 구할 수 있다. 도형의 찌그러짐이나 비틀림의 정도를 나타낼 수 있는 변형률에는 주변형률, 최대 전단변형률 및 면적변형률이 있으며, 변형률 요소를 이용하여 다음의 식에 의하여 계산할 수 있다(Vaniček 등, 1991).

$$\epsilon_{1,2} = \frac{\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \quad (8)$$

$$\gamma_{max} = \epsilon_1 - \epsilon_2 \quad (9)$$

$$\Delta = \epsilon_1 + \epsilon_2 \quad (10)$$

여기서,  $\epsilon_{1,2}$  : 주변형률

$\gamma_{max}$  : 최대전단변형률

$\Delta$  : 면적변형률

## 3. 측지망의 최적화 설계 실험

본 연구에서는 측지망의 최적화 설계 실험을 위하여 2009년도에 국토지리정보원에서 실시한 광주지구 통합기준점 GPS 관측망을 이용하였다. 광주지구 통합기준점은 그림 3에 표시한 것과 같이 광주를 비롯하여 장성, 나주, 해남, 광양 등에 총 150점이 분포하며, 본 연구에서는 광주, 나주에 위치하는 37점의 통합기준점으로 구성된 GPS 관측망을 사용하여 최적화 측지망 설계를 실시하였다.

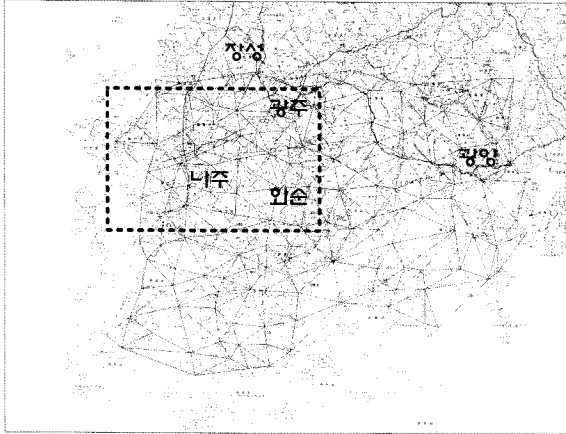


그림 3. 광주지구 통합기준점 GPS 관측망도(2009) 및 연구대상 관측망(점선내)

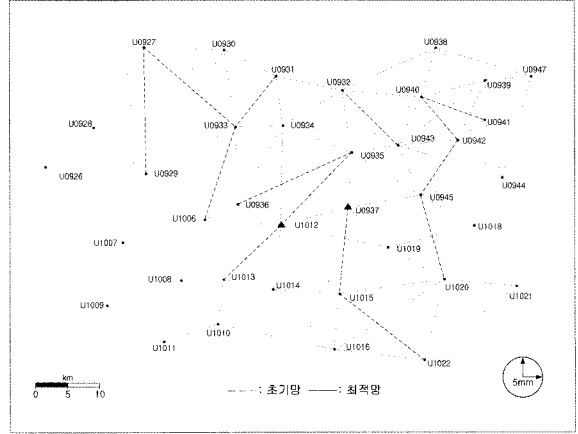


그림 4. 실험대상 통합기준점의 초기망(점선)과 최적망(실선)

측지망의 최적화 설계와 평가는 2009년 국토지리정보원에서 실제 관측한 GPS 관측망을 초기망으로 하고 동일한 관측점을 대상으로 앞에서 제시한 측지망 품질평가 인자인 정밀도, 신뢰성, 견인성을 기준으로 이들의 값이 가장 좋은 최적 측지망을 구성한 후 8가지 품질평가 인자를 비교 평가하였다. 측지망 조정은 각 기선당 1cm±0.5ppm의 동일 관측 정밀도를 적용하고, 측지망의 중심부에 위치한 U1012, U0937 두 점을 고정점으로 하여 실시하였다. 그림 4는 국토지리정보원의 GPS 관측망(실선)과 본 연구에서 결정된 최적 측지망(점선)을 동시에 표시한 것이다. 그림에서와 같이 초기망과 최적망을 비교하였을 때 총 86개의 기선 중 13개 기선이 재설정 되어 비교적 그 변화가 많지 않은 것을 알 수 있는데, 이는 초기망이 비교적 양호하게 설계되었기 때문이다.

#### 4. 최적화 설계 분석결과

초기망과 최적망에 대하여 정밀도, 신뢰성 및 견인성을 계산하여 비교한 결과는 표 1과 같다. 본 연구에서는 두 측지망의 품질을 평가하기 위하여 정밀도는 오차타원, 2DRMS 및 CEP를 이용하여 평가하였고, 신뢰성은 내적신뢰성과 외적신뢰성을 이용하여 평가하였으며, 견인성은 최대전단변형률, 주변형률 및 면적변형률을 이용하여 평가하였다. 각각의 품질평가 인자는 측지망 내의 각 기선 또는 각 점에 대하여 계산을 실시하고 전체 측지망에 대한 인자별 평균, 최대값 및 최소값을 비교 평가하였다. 단, 오차타원은 장반경과 단반경의 제곱합의 제곱근을 사용하여 표시 하였다.

표 1. 최적망 설계 전·후의 측지망의 비교 평가

항 목	초기망			최적망			
	평균	최 대	최 소	평균	최 대	최 소	
정밀도 (mm)	오차타원	7.64	12.77	3.78	7.52	11.93	4.08
	2DRMS	6.24	10.44	3.10	6.15	9.75	3.34
	CEP	5.16	8.24	2.61	5.08	8.10	2.79
신뢰성 (mm)	내적신뢰성(MDE)	7.82	22.28	5.13	7.66	20.47	5.20
	외적신뢰성 (최대오차)	9.09	14.76	3.08	8.69	14.19	4.99
견인성	최대전단변형률	$5.84 \times 10^{-5}$	$2.00 \times 10^{-3}$	$1.19 \times 10^{-8}$	$2.04 \times 10^{-6}$	$1.21 \times 10^{-5}$	$8.83 \times 10^{-8}$
	주변형률	$2.92 \times 10^{-5}$	$2.07 \times 10^{-3}$	$2.79 \times 10^{-9}$	$1.09 \times 10^{-6}$	$1.20 \times 10^{-5}$	$1.91 \times 10^{-8}$
	면적변형률	$5.76 \times 10^{-5}$	$2.07 \times 10^{-3}$	$2.88 \times 10^{-8}$	$1.53 \times 10^{-6}$	$1.19 \times 10^{-5}$	$7.41 \times 10^{-9}$

초기망과 최적망의 품질평가 인자를 비교한 결과, 정밀도에서는 오차타원, 2DRMS, CEP 모두에서 초기망에 비하여 최적망이 우수한 것으로 나타났으나 그 차이가 평균 1mm정도로써 그리 크지는 않았다. 그러나 오차타원, 2DRMS 최대값의 차이가 약 7mm로써 최적망의 최대오차가 확연하게 감소한 것으로 나타났다. 한편 신뢰성은 내적, 외적신뢰성 모두 최대오차의 크기로 그 품질을 평가 하였는데 정밀도에서와 마찬가지로 초기망에 비하여 최적망이 평균 약 3mm 우수한 것으로 나타났으며, 최대오차는 약 18mm 감소한 것으로 나타났다. 견인성은 망조정에 따른 측지망의 물리적 변동량의 크기를 최대전단변형률, 주변형률 및 면적변형률을 이용하여 분석하였는데 모든 인자에서 최적망의 견인성이 초기망에 비하여 평균 약 3배 우수한 것으로 나타났으며, 최대값은 최적망이 약 60배 우수한 것으로 나타났다.

그림 5부터 그림 8은 초기망과 최적망의 정밀도와 신뢰도를 나타내는 6가지 인자들에 대한 평가 결과를 그림으로 표시한 것으로써 점선으로 표시된 측지망과 오차의 크기는 초기망의 것을 나타내는 것이며, 실선으로 표시된 측지망과 오차의 크기는 최적망의 것을 나타내는 것이다. 모든 그림에서 보여지는 바와 같이 최적망의 오차 크기가 초기망에 비하여 작은 것을 알 수 있다. 내적신뢰성을 나타내는 MDE는 점이 아닌 기선에 대한 값으로써 두 가지 망에 대한 동시 표현이 매우 복잡하여 본 연구결과 그림에서는 제외하였다. 한편, 그림 9부터 그림 12는 초기망과 최적망의 견인성을 나타내는 최대전단변형률과 주변형률을 그림으로 표시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 최적망의 주변형률과 전단변형률이 초기망에 비하여 현저하게 감소함으로써 견인성이 우수한 것을 알 수 있다.

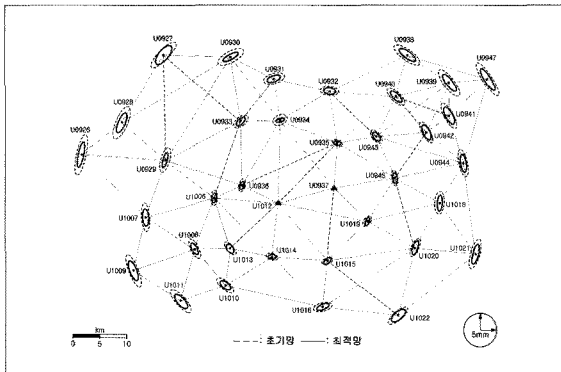


그림 5. 초기망과 최적망의 오차타원

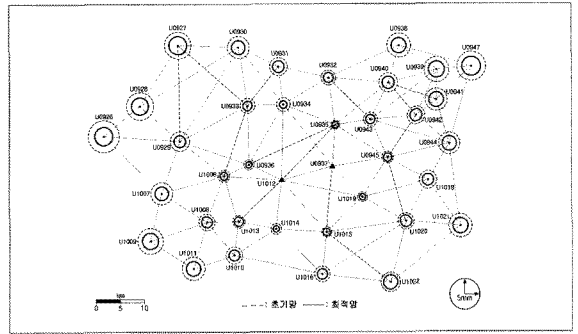


그림 6. 초기망과 최적망의 2DRMS

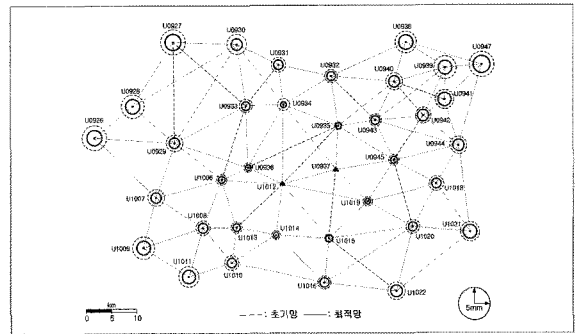


그림 7. 초기망과 최적망의 CEP

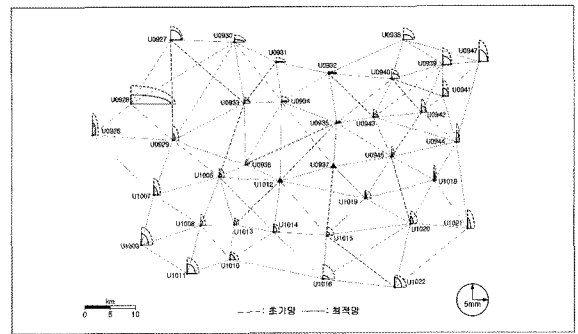


그림 8. 초기망과 최적망의 외적신뢰성(최대오차)

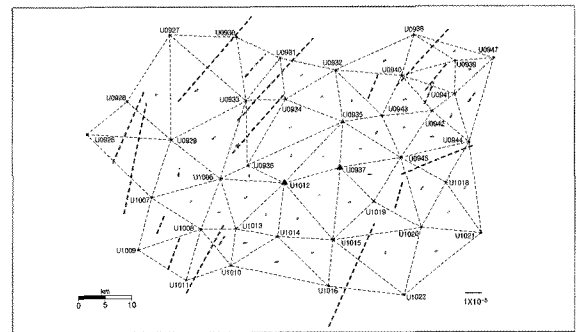


그림 9. 초기망의 최대전단변형률

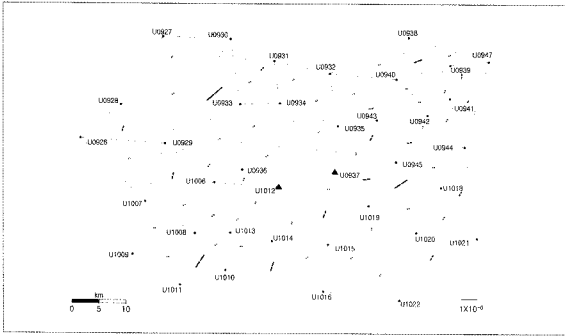


그림 10. 최적망의 최대전단변형률

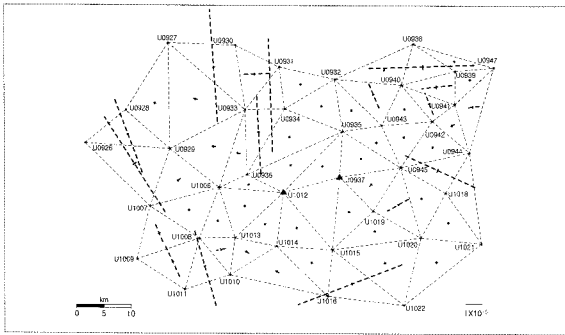


그림 11. 초기망의 주변형률

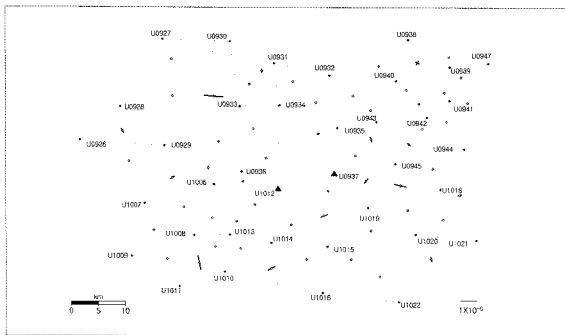


그림 12. 최적망의 주변형률

## 5. 결론

본 논문에서는 측량성과의 정밀도를 향상시키기 위한 방법으로 측량 작업 계획단계에서 설계되어지는 측지망에 대하여 그 품질을 평가하기 위한 기준으로 정밀도, 신뢰성 및 견인성과 관련된 8가지 인자들을 이론적으로 분석하고 제시함으로써 그동안 경험적인 방법에 의존하여 설계되던 측지망을 해석적 방법에 의하여 최적화 설계할 수 있는 방안을 제시하였다. 본 연구에서 제시된 측지망 품질평가 방법을 이용하여 실제 관측된 측지망에 최적화 설계를

적용한 결과, 평균값에 있어서 정밀도는 2%, 신뢰성은 3%, 견인성은 3,001% 향상되었으며, 최대값에 있어서 정밀도는 5%, 신뢰성은 7%, 견인성은 16,957% 향상된 것으로 분석되었다. 최적화 설계 전·후 품질평가 인자의 평균값 차이가 비교적 작은 반면에 최대오차의 차이가 매우 큰 것은 실험에 사용된 초기망이 경험적인 방법에 의하여 설계되어지긴 하였지만 전체적인 망의 구성이 비교적 양호하게 설계되었고 망의 일부분, 특히 외곽부에 위치한 망에서의 설계가 양호하지 못했기 때문인 것으로 분석되었다. 한편, 측지망의 품질평가 기준 중 견인성이 다른 기준에 비하여 확연한 차이를 나타내는 것으로부터 측지망 품질에 대한 민감도가 매우 높은 것을 알 수 있었으며, 최적 측지망 설계는 정밀도와 신뢰성을 기준으로 1차적인 설계를 실시하고 견인성을 기준으로 최종적인 설계를 하는 것이 효율적인 것으로 판단된다.

본 연구결과를 바탕으로 향후 최적 측지망의 자동화 설계 프로그램을 개발할 경우 측량 계획시에 실시하는 관측망의 설계를 효과적으로 수행할 수 있을 것이며, 보다 과학적이고 합리적인 측지망을 구성함으로써 정밀도와 신뢰성이 높은 국가 측지기준망을 구축할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- 윤홍식 (2003), 최적화 설계 기법에 의한 차세대 국가 측지기준점 체계 구축방안 연구, 국가GIS 지원연구 2003-67, 국토해양부.
- Ashkenazi, V., Cross, P. A. (1972), Strength analysis of block VI of the European triangulation, *Bull. Geod.*, 103, pp. 5-24
- Baarda, W. (1968), *A Testing Procedure for use in Geodetic Networks*, Publication on Geodesy, New Series, Vol. 2, No. 5, Netherland Geodetic Commission, Delft, Netherlands.
- Bomford, G. (1980), *Geodesy*, 4th edition, Oxford University Press Inc., New York, pp. 719-720.
- Choi, J. H. and H. Sato (1997), Horizontal Strain of the Crust in Korea inferred from Geodetic Data, *Journal of the Geodetic Society of Japan*, Vol. 43, No. 3, pp. 159-180.
- Cross, P. A. (1985), *Numerical Methods in Network Design. In : Optimization and Design of Geodetic Networks*, Edited by E. W. Grafarend and F. Sanso, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York, Tokyo, pp. 429-435.
- Craymer, M. R., Wells, D. E., Vaniček, P. and Devlin, R. L. (1990), Specifications for Urban GPS Surveys, *Surveying*

- and Land Information Systems*, Vol. 50, No. 4, pp. 251-259.
- Dare, P. and Vaniček, P. (1982), Strength Analysis of Horizontal Networks Using Strain, *Proceedings of the Meeting of FIG Study Group 5B*, Survey Control Networks, Aalborg University, Denmark, pp. 181-196.
- Even-Tzur, G. and Papo, H. (1996), Optimization of GPS Networks by Linear Programming, *Survey Review*, Vol. 33, No. 262, pp. 537-545.
- Grafarend, E. (1974), Optimization of Geodetic Networks, *Bolletino di Geodesia Science. Affini.*, Vol. 33, No. 4, pp. 351-406.
- Leick, A. (2004), *GPS Satellite Surveying*, 3th edition, John Wiley & Sons, Inc., pp. 150-169.
- Schmitt, G. (1985), *Second Order Design. In: Optimization and Design of Geodetic Networks*. Edited by E. W. Grafarend and F. Sanso, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York, Tokyo, pp. 74-120.
- Thapa, K. (1980), *Strain as a Diagnostic Tool to Identify Inconsistent Observations and Constrains in Horizontal Geodetic Networks*, Department of Surveying Engineering, Technical Report No:68, UNB, Fredericton, Canada.
- Vaniček, P. Krakiwsky, E. J., Craymer, M.R., Gao, Y. and Ong, P. (1991), *Robustness Analysis*, Contract Rep. 91-002, Geodetic Survey Division, Geomatics Canada, Ottawa.
- Helmert, F. R. (1868), Studien über rationelle Vermessungen, im Gebiete der höheren Geodäsie, *Zeitschrift für Mathematik und Physik*, Vol. 13, pp. 73-129.
- Jung, I. (1924), *Über die günstigste Gewischtsverteilung in Basisnetzen*, Akdem, Abh, Uppsala.
- Schreiber, O. (1882), Anordnung der Winkelbeobachtungen im Göttinger Basisnetz, *Z. Vermessungswesen*, Vol. 7, pp. 129-161.

---

(접수일 2010. 11. 01, 심사일 2010. 11. 13, 심사완료일 2010. 11. 18)