

DGPS 기법을 이용한 자정식 현수교의 정동적 변위응답 측정 및 분석[#]

Application of Differential GPS for the Displacement Measurement of Self-anchored Suspension Bridge under the Static and Dynamic Loading Cases

김 형 태*·서 주 원*

Hyungtae Kim and Juwon Seo

(2009년 5월 26일 접수 ; 2009년 10월 27일 심사완료)

Key Words : DGPS(범지구 위성항법 보정시스템), Suspension Bridge(현수교), Displacement Response Measurement(변위 응답 측정), Static and Dynamic Loading Test(정동적 재하 실험), Laser Displacement Sensor(레이저 변위계)

ABSTRACT

Bridge structures are designed to support ordinary loadings such as vehicles, wind, temperature and current as well as unexpected loadings like earthquakes and storm. Especially, the displacement of Flexible bridges like an suspension bridge under ordinary loading conditions is necessary to be monitored. In case of long span bridges, there are some difficulties in monitoring the displacement of center of the main span using traditional laser displacement sensors. In this study, the static and dynamic displacement responses due to vehicle loadings were measured by DGPS(differential global positioning system) technique. The displacement response data were compared with data obtained from traditional laser displacement sensors so that the static and dynamic behavior of the bridge under vehicle loadings was examined and the applicability of the displacement response measurement using DGPS technique was verified. The static and dynamic loading test for an self-anchored suspension bridge, So-rok Bridge, was performed using vehicles. The displacement response from DGPS technique and that from laser displacement sensors of the bridge monitoring system were compared. The amplitude of white noise from DGPS based measurement was about 7 mm and that of laser displacement sensor based measurement was about 3 mm. On the other hand, dynamic behavior of the center of main span from DGPS based measurement showed better agreement with influence line of the bridge than that from laser displacement sensors. In addition, there were some irregular and discontinuous variation of data due to the instability of GPS receivers or frequent appearance of GPS satellites. Post-processing via the reference station close to an observation post provided by NGII(National Geographic Information Institute) will be a counter-plan for these defects.

1. 서 론

† 교신저자; 정회원, 현대건설 기술품질개발원

E-mail : imshap2@hdec.co.kr

Tel : (031)280-7220, Fax : (031)280-7070

* 정회원, 현대건설 기술품질개발원

이 논문은 2009 춘계 소음진동 학술대회에서 우수논문으로 추천되었음.

교량 구조물은 차량, 바람, 온도, 조류와 같은 상시적인 하중에서부터 지진, 태풍 등의 예기치 않은 하중까지 지지하도록 설계, 시공된다. 그중 큰 비중을 차지하는 것이 바로 차량하중이다. 이러한 차량하중에 의하여 발생하는 교량의 여러 가지 응답 중 안전성과 사용성의 평가에 있어 가장 중요한 요소는 변위이다. 그러나 장대교량의 변위를 현장에서 측정하는 데 있어서 많은 어려움이 따른다. 비교적

계측이 손쉬운 가속도계를 사용하여⁽¹⁾ 이중적분을 통한 변위 추출은 초기조건에 따라 민감하게 반응하며, 측정오차가 전파되는 단점을 가지고 있다. 일반적인 접촉식 변위계는 기준이 되는 고정물이 필요한데 장대교량에서 중앙경간의 변위를 측정하는 경우 기준점 설정이 곤란하다. 광파기와 같은 장비를 사용할 경우에는 거리에 따른 오차가 누적되고 기상상태에 따라 계측 자체가 불가능할 수가 있다. 기존의 장대교량 변위계측 방법의 단점을 극복하기 위한 방편으로 GPS(global positioning system)를 사용한 좌표결정을 통해 변위를 측정하는 방법이 고안되었고 이를 실제로 적용하여 구조물의 변위응답을 계측하는 연구가 진행되고 있다⁽²⁻⁵⁾. 이러한 단계의 GPS를 이용한 변위 측정에 있어서는 2.2절에서 언급할 여러 오차들이 상재해 있었으며 그로 인하여 계측한 응답의 신뢰성이 결여되는 문제가 있었다. 이러한 문제를 해결하고자 하는 시도가 지속되어오다 2000년대에 들어서서 검증된 요소기술을 융합하여 DGPS(differential global positioning system) 기법을 통한 구조물 응답 계측 시스템의 구축에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다⁽⁶⁻⁸⁾. 이 연구에서는 이러한 기존 연구보다 오차 저감 알고리즘과 수신기 및 안테나 성능이 더욱 향상된 DGPS 기법을 사용하여, 준공 후 사용상태가 아닌 교량을 대상으로 차량하중의 영향으로 일어나는 정동적 변위응답을 측정하고 그 오차를 최소화함으로써 계측응답의 신뢰성을 확보하고자 하였다. 이를 위하여 DGPS 기법을 통해 얻은 응답 데이터를 교량 자체의 계측시스템의 레이저 변위계로 얻은 데이터와 비교 분석하여, 차량하중에 의한 교량의 정동적 변위응답을 규명하고, DGPS 기법을 통한 변위 응답 계측의 적용성을 검증하고자 하였다.

2. DGPS 기법을 이용한 교량 변위응답 측정

2.1 측정 대상 구조물

이 연구의 수행 대상 구조물은 전라남도 고흥군 도양읍에 소재한 소록대교이다. 주경간 250 m, 양측 경간 110 m로 총경간 470 m의 자정식 현수교로 콘크리트 주탑과 강상판으로 이루어져 있다. Fig. 1에 소록대교의 개략도를 나타냈다.

2.2 DGPS 위치 측정 시스템

교량의 변위응답 측정을 위하여 구비한 시스템은 크게 GPS 수신기, 안테나, 측정 및 후처리 소프트웨어로 구성된다. GPS 위성으로부터 송출되는 신호를 안테나가 수집하여 수신기로 보내면 수신기에서 연산을 수행하여 현재 위치를 결정하게 된다. 그러나 일반적인 GPS 기법에 의한 위치 데이터는 대기층 및 전리층에 의한 신호 교란, 위성의 궤도 및 시계 오차, 수신기의 잡음 및 시계 오차 등으로 수 미터 수준의 오차를 포함하고 있는데 이를 극복하기 위한 방편이 DGPS 기법이다. 기본원리는 망조정을 통하여 좌표를 정확히 알고 있는 기지의 위치에 기준 수신기를 설치하여 위성 신호를 받아 좌표를 계산하게 된다. 계산을 통해 얻은 좌표와 기지의 좌표의 차이를 오차로 인식하여 후처리 및 보정하는 것이다. 이때 이용되는 기지점은 국가에서 제공하는 관측소가 대표적이다. 국토지리정보원에서 44개소, 한국천문연구원에서 7개소, 한국지질자원연구원에서

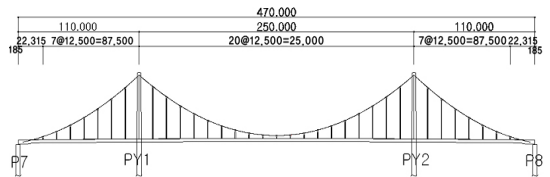


Fig. 1 Schematic picture of So-rok Bridge

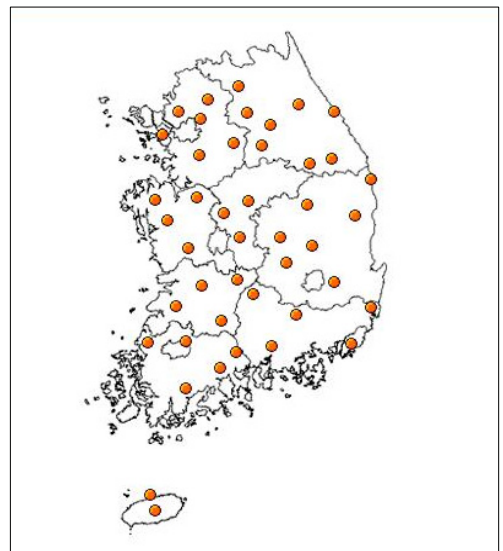


Fig. 2 Observation posts provided by NGII



Fig. 3 The DGPS system installed on So-rok Bridge



Fig. 4 Reference station of the DGPS system

Table 1 Coordinates of GPS receivers (WGS84)

Receiver	Latitude	Longitude	Ellipsoidal height
Reference	34°31'49.71734"	127°07'22.59023"	65.582 m
Deck	34°31'35.90657"	127°07'22.34034"	63.274 m
Cable	34°31'35.86692"	127°07'22.44816"	67.173 m

4개소 총 55개소이며, 국토지리정보원에서 제공하는 관측소의 위치를 Fig. 2에 나타내었다. 위성 신호 수신 및 후처리 시, 이러한 기지점의 개수가 많을수록 기선처리를 할 수 있는 경우의 수가 많아지게 되어 망조정의 효과를 거둘 수 있게 되고 결과적으로 좌표 결정에 있어서의 정확도가 높아지게 된다. Fig. 3은 소록대교 경간 중앙의 상판과 케이블에 안테나 및 수신기를 설치한 모습, Fig. 4는 소록대교 인근에 설치한 기준국, Table 1은 이들 수신기의 좌

표를 후처리를 통해 계산한 결과이다.

2.3 정동적 차량재하실험 응답 비교 및 분석

(1) 정적실험

30 tonf 중량의 화물트럭을 사용하여 정동적 재하를 하였다. 정적 실험의 경우 트럭을 Fig. 5에 도시한 측정간 1/2 및 주경간 1/4, 3/8, 1/2 위치에 5분간 정차시켜 경간중앙의 처짐을 측정하였다. 차량하중의 제하 및 재하 시점의 WGS84 지구타원체고를 측정하여 그 상대적 차이를 중앙경간의 처짐으로 추정한다. DGPS 측정결과와 비교하기 위해 교량 유지관리시스템에 포함되어 있는 기존의 레이저 변위계의 경우도 동일한 시점의 변위를 측정하여 그 상대적 차이를 처짐으로 추정하였다.

직관적으로 예측할 수 있듯이 재하차량의 위치가 경간 중앙에 가까워질수록 처짐이 더 커지는 경향을 보였으며, 측정간에 차량하중을 재하한 경우 반대 방향의 처짐이 생기는 것을 관찰할 수 있었다. 정적 변위응답 특성을 보여주는 한 예로 중앙경간 상판(GPS-D)과 케이블(GPS-C)에 설치된 GPS 수신기와 레이저 변위계(laser)로부터 얻은 변위응답을 Fig. 6에 도시하였다. 레이저 변위계의 결과와 비교하여 GPS로 얻은 결과는 변위를 다소 크게 평가하고 있으며, 잡음의 진폭이 5~10 mm 수준이 되어 3 mm 내외의 레이저 변위계의 잡음과 비교하여 상대적으로 불안정적인 것을 확인할 수 있다.

또한, Fig. 7에서 확인할 수 있듯이 측정간에 차량하중을 재하하였을 때에 GPS를 통한 응답은 양의 값을 가졌고, 레이저 변위계의 응답은 음의 값을 가졌다. 교량의 영향선에 따르는 경향에 있어서 GPS의 응답이 더욱 신뢰성을 가지는 것으로 나타났다.

한편, GPS 측정에 있어서 Fig. 8과 같은 불연속적인 변동이 산발적으로 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 이에 대한 원인을 다음과 같이 파악하였다. Fig. 9는 측정위치에 설치된 GPS 수신기가 위치를 파악하고 신호를 받을 수 있는 위성의 개수를 시간대 별로 나타낸 그래프로 Fig. 8의 불연속적 응답시점에서 수신가능 위성이 2개 감소하는 것을 알 수 있었다. 그로 인해 좌표 결정의 정밀도를 나타내는 정량적 지표인 DOP(dilution of precision, 정밀도저하율)가 급격하게 증가하는 것을 Fig. 10에서

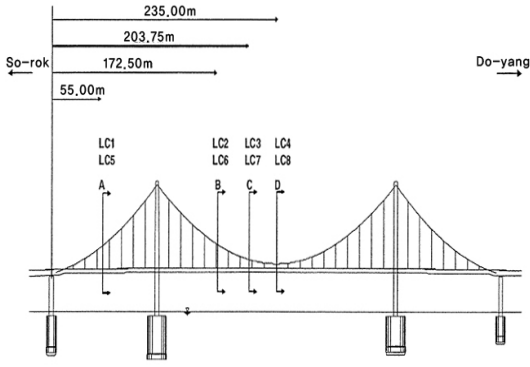


Fig. 5 Location of static and impact loadings

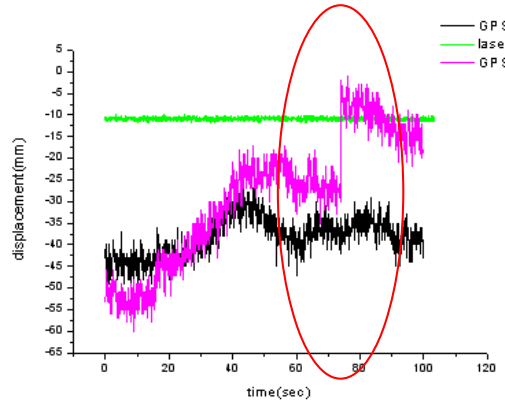


Fig. 8 Discontinuous variation of response from GPS

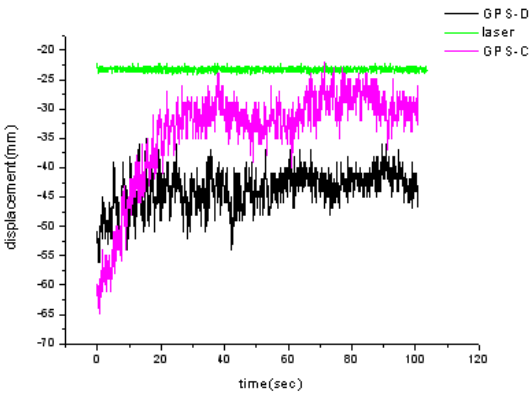


Fig. 6 Displacement response of static loading (loading for 3/8 location of main span)

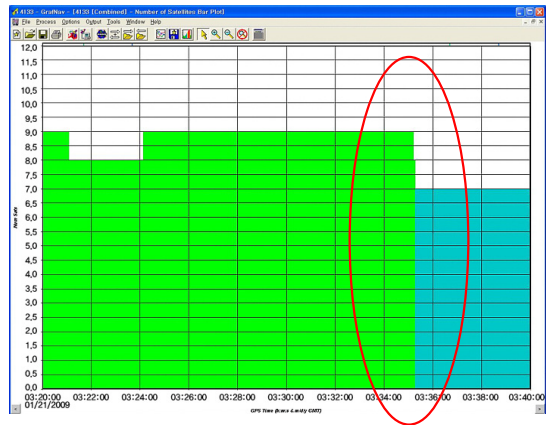


Fig. 9 The number of receivable GPS satellites

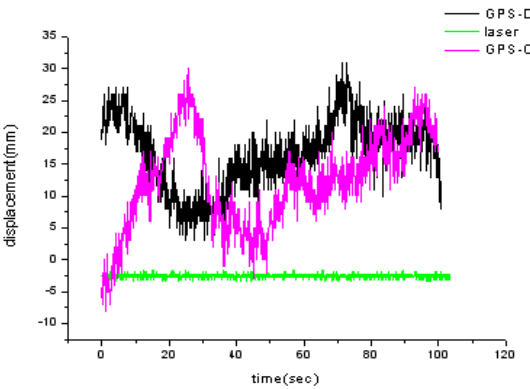


Fig. 7 Displacement response of static loading (loading for 1/2 location of side span)

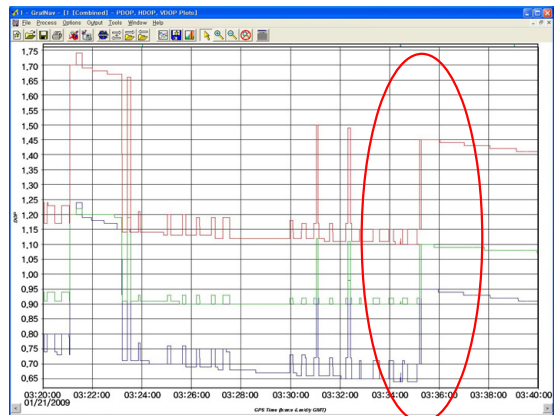


Fig. 10 Discontinuous variation of DOP

확인할 수 있다.

여기서 DOP는 식 (1), (2), (3)에 의해서 계산할 수 있다⁹⁾. SV_x , SV_y , SV_z , R_x , R_y , R_z 는 각각 위

성과 수신기의 x좌표, y좌표, z좌표를 나타내고, 0에서 3까지의 정수로 이루어진 첨자는 각기 다른

위성을 뜻한다. 또한 i 번째 위성에서 수신기까지의 의사거리는 식 (1)과 같이 주어진다. 그리고 식 (2)에 의하여 x, y, z 축과 시간에 대한 방향 미분계수를 구한다. 최종적으로 식 (3)에 따라 수신기와 위성 사이의 의사거리 GDOP(geometric dilution of precision), PDOP(position dilution of precision), TDOP(time dilution of precision)를 구할 수 있다.

$$R_i = \sqrt{(SV_{x_i} - R_x)^2 + (SV_{y_i} - R_y)^2 + (SV_{z_i} - R_z)^2} \quad (1)$$

$$D_{x_i} = \frac{SV_{x_i} - R_x}{R_i}, \quad D_{y_i} = \frac{SV_{y_i} - R_y}{R_i}$$

$$D_{z_i} = \frac{SV_{z_i} - R_z}{R_i}, \quad D_{t_i} = -1 \quad (2)$$

$$A = \begin{bmatrix} D_{x_0} & D_{y_0} & D_{z_0} & D_{t_0} \\ D_{x_1} & D_{y_1} & D_{z_1} & D_{t_1} \\ D_{x_2} & D_{y_2} & D_{z_2} & D_{t_2} \\ D_{x_3} & D_{y_3} & D_{z_3} & D_{t_3} \end{bmatrix}, \quad P = (A^T A)^{-1} \quad (3)$$

$$GDOP = \sqrt{P_{0,0} + P_{1,1} + P_{2,2} + P_{3,3}}$$

$$PDOP = \sqrt{P_{0,0} + P_{1,1} + P_{2,2}}$$

$$TDOP = \sqrt{P_{3,3}}$$

이러한 DOP가 급격히 증가해 정밀도가 떨어지는 문제점은 국토지리정보원에서 미리 예보하는 GPS 위성들의 궤도 일정을 파악하여 시공이나 실험 일정을 조정하거나 지상에 pseudolite를 설치하여 유사 신호를 송신함으로써 극복 가능할 것이다⁽¹⁰⁻¹²⁾.

(2) 충격실험

정적실험과 같이 30 tonf 중량의 화물트럭을 사용하여 충격 재하를 하였다. 충격 실험의 경우 Fig. 11에 나타낸 것과 같이 트럭이 축경간 1/2 및 주경간 1/4, 3/8, 1/2 위치에서 각목을 넘으면서 낙하할 때의 충격으로 재하를 하여 경간중앙의 처짐을 측정하였다. 그러나 Fig. 12에서와 같이 모든 충격 실험에 있어서 눈에 띄는 큰 응답은 얻을 수 없었다. 앞 절에서 기술한 바와 같이 GPS를 통한 응답은 약 7 mm, 레이저 변위계를 통한 응답은 약 3 mm 가량의 진폭을 지니는데 충격으로 인한 변위의 변동은 그보다 작다고 판단되었다. 다음 절에서 다를

동적재하에 의한 변위 응답은 최대 3~4 mm 수준인 것으로 나타났는데⁽¹³⁾, 충격하중에 의한 변위 응답이 이보다 작다면 GPS 기법이나 레이저 변위계를 통하여 충격하중에 의한 변위 변동을 포착하지 못



Fig. 11 Impact loading using vehicles

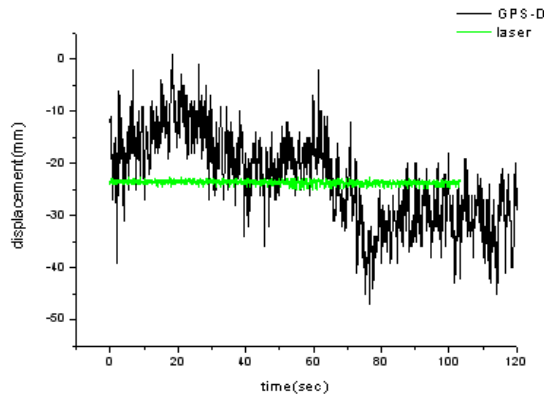


Fig. 12 Displacement response of impact loading (loading for 1/2 location of main span)

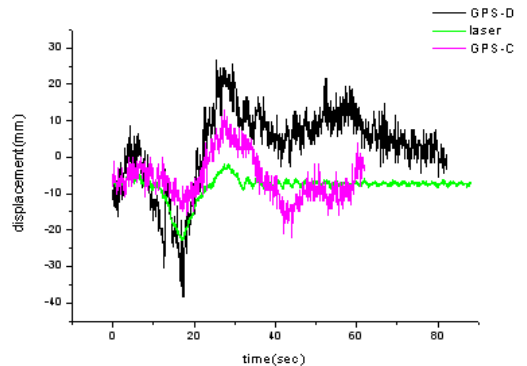


Fig. 13 Displacement response of dynamic loading at 70 km/h

하는 것이 타당하게 된다.

(3) 동적실험

동적실험은 차량속도를 시속 5 km에서 70 km까지 조정하여 등속주행으로 교량을 통과할 때 주경간 중앙의 동적 변위응답을 10 Hz의 sampling rate로 측정하였다. 속도가 빠를수록 변위가 커지는 경향을 보였으며, 영향선 분석과 같이 차량이 측정간을 지날 때 솟아오르고 주경간에 진입했을 때 처지는 양상을 보여주었다.

정적실험에서와 같이 레이저 변위계의 응답이 가장 작게 평가되었으며 교량 상판에 위치한 GPS수신기를 통한 응답은 차량이 지나간 후에도 안정화가 느리게 진행되는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 13에 중앙경간 상판과 케이블에 설치된 GPS 수신기와 레이저 변위계로부터 얻은 변위응답을 비교하였다.

3. 분석 요약 및 결론

준공 후 사용 이전의 자정식 현수교인 소록대교에 대하여 차량을 이용한 정동적 재하실험을 실시하였고, 그 변위응답을 DGPS 기법을 통하여 측정하여 교량자체 계측시스템의 레이저 변위계의 결과와 비교하여 내린 결론은 다음에 열거한 바와 같다.

(1) 상시진동에 대한 계측 시, 변위 변동폭이 있어서 레이저 변위계는 3 mm 내외, DGPS 시스템은 7 mm 내외로 정밀도는 다소 떨어지는 경향을 보인다.

(2) 차량하중 재하 시, 영향선에 따른 변위 양상을 따르는 경향은 레이저 변위계보다 DGPS 시스템이 더욱 우수하다.

(3) DGPS 시스템의 경우 수신기의 불안정성에 따른 데이터의 불규칙적/불연속적 변동이 존재한다.

(4) 레이저 변위계에 비하여 DGPS 시스템이 변위를 상대적으로 크게 평가하는 경향이 있다.

(5) 이 연구에서 나타난 DGPS 시스템의 단점은 국토지리정보원에서 제공하는 관측소로부터 근접한 기지점을 기준으로 후처리하거나 pseudolite를 설치하여 유사신호를 송신함으로써 보완할 수 있을 것이다.

후 기

이 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업 초장대

교량사업단의 연구비지원(과제번호 : 08기술혁신E01)에 의하여 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다. 또한 연구수행에 협조해 주신 내풍기술연구단에 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Kim, B. H., 2008, "Modal Parameter Extraction Using a Digital Camera," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 12, pp. 1229~1236.

(2) Ashkenazi, V., Dodson, A. H., Moore, T. and Roberts, G., 1997, "Monitoring the Movements of Bridges by GPS," In: Proc 10th Int. Tech. Meeting of the Sat. Div. of the U.S. Inst. of Navigation, 16-19 September 1997, Kansas City, USA, pp. 1165~1172.

(3) Guo, J., Xu, L., Dai, L., McDonald, M., Wu, J. and Li, Y., 2005, "Application of the Real-time Kinematic Global Positioning System in Bridge Safety Monitoring," Journal of Bridge Engineering, Vol. 10, No. 2, pp. 163~168.

(4) Dodson, A. H., Meng, X. and Roberts, G., 2001, "Adaptive Method for Multipath Mitigation and Its Applications for Structural Deflection Monitoring," In: Proc International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation, 5-8 June 2001, Banff, Alberta, Canada, pp. 101~110.

(5) Fujino, Y., Murata, M., Okano, S. and Takeguchi, M., 2000, "Monitoring System of the Akashi Kaikyo Bridge and Displacement Measurement Using GPS," In: Proceedings of SPIE, Nondestructive Evaluation of Highways, Utilities, and Pipelines IV, edited by Aktan, A.E. and S.R. Gosselin, pp. 229~235.

(6) Meng, X., 2002, "Real-time Deformation Monitoring of Bridges Using GPS/Accelerometers," PhD Thesis, The University of Nottingham.

(7) Ogaja, C., 2002, "A Framework in Support of Structural Monitoring by Real Time Kinematic GPS and Multisensor Data," PhD Thesis, The University

of New South Wales.

(8) Aktan, A. E., Catbas, N. C., Grimmelsman, K. A. and Pervizpour, M., 2003, "Development of a Model Health Monitoring Guide for Major Bridges," Report to Federal Highway Administration Research and Development.

(9) Dana, P. H., 1994, "The Geographer's Craft Project, Retrieved September 28, 2009, from Department of Geography, The University of Colorado at Boulder, Web site : <http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gif/gdop.gif>

(10) Barnes, J., Rizos, C., Wang, J., Meng, X., Dodson, A. H. and Roberts, G. W., 2003, "The Monitoring of Bridge Movements Using GPS and Pseudolites," 11th Int. Symp. on Deformation Measurements, pp. 563~572.

(11) Meng, X., Roberts, G. W., Dodson, A. H., Cosser, E. and Noakes, C., 2002, "Simulation of the Effects of Introducing Pseudolite Data Into Bridge Deflection Monitoring Data," In Proc. 2nd Symp. on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, ISBN 3-9501492-1-X, pp. 372~381.

(12) Dai, L., Zhang, J., Rizos, C., Han, S. and Wang, J., 2000, "GPS and Pseudolite Integration for Deformation Monitoring Applications," In: Proc 13th Int. Tech. Meeting of the Sat. Div. of the U.S. Inst. of Navigation, pp. 1~8.

(13) Lee, H. S. and Hong, Y. H., 2009, "An Application of the Displacement Reconstruction Scheme on Measured Acceleration from So-Rok Bridge," Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 320~325.