

영향면을 사용한 이동하중 식별 Identification of Moving Loads using Influence Surface

류지영* · 조재용** · 신수봉***
Ryu, Ji Young · Cho, Jae Yong · Shin, Soobong

ABSTRACT

Highway bridges are important infrastructures for national transportation systems. However, due to overweight trucks frequently moving on highways, highway structures have been gradually damaged and economical loss has grown severe. To maintain a highway bridge safe and sound, properties and loading characteristics of passing trucks on the bridge must be evaluated. WIM(Weigh-In-Motion) systems have been developed by many research groups for multiple purposes. Most of the developed WIM systems have applied moment influence lines to identify loading characteristics. Since passing trucks are dynamic loads, however, the identified loads by the influence lines for static loads cannot represent the actual situation correctly. The current research investigates the effects of problem of different loading characteristics on load identification and proposes a new algorithm using the concept of moment influence surface. A numerical simulation study is carried out.

1. 서론

국내 고속도로 상의 많은 교량들이 과적차량으로 인하여 심각한 피해를 입고 있으며, 이에 대한 과적차량의 단속 및 교량의 유지관리에 대한 관심이 점차 고조되고 있다. 이러한 교량구조물의 유지관리 및 설계를 위해 도로 및 교량을 주행하는 차량 특히 트럭과 같은 중차량의 통행에 대한 통계자료를 얻을 필요가 있으며, 이러한 중차량의 통계를 얻기 위해서 여러 가지 측정방법이 적용되고 있다. 그중 정적인 측정 방법의 경우는 차량을 일정한 위치에까지 유도하여 정지시킨 후 그 차량 하중에 관한 데이터를 측정함으로써 정확한 측정이 가능하다는 장점이 있는 반면 경제적인 비용이 많이 들며 위치가 노출되는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 차량이 운행 중에 차량의 하중을 측정할 수 있는 WIM 시스템이 개발되고 있다.

WIM시스템은 미국에서 FHWA(Federal Highway Administration)와 오하이오주 교통성(Ohio Department of Transportation)의 후원 하에 Case Western Reserve University에서 개발된 것이 국내에서는 일반적으로 널리 알려져 있다. 현재 국내에서는 한국도로공사에서 strain을 이용한 시스템을 해외에서 도입하여 현장실

* 동아대학교 토목공학과 석사과정
** 동아대학교 토목공학과 박사과정
*** 정회원 · 동아대학교 토목공학과 조교수

험을 중심으로 한 역구가 진행되고 있으며,^{(1),(2)} 그루정보통신에서 광섬유센서를 이용하여 WIM시스템을 개발한 것으로 소개되고 있다.⁽³⁾ 최근 해외에서는 홍콩대학 연구진에 의한 Tsing-Ma 현수교에 BWIM(Bridge Weigh-In Motion) 시스템을 설치하기 위한 연속적인 연구⁽⁴⁾⁻⁽¹⁰⁾와 미국 Nowak교수 연구진에 의해 개발되어 단순교량에 작용하는 하중을 식별하고 설계피로하중을 산정하기 위해 적용되고 있는 연구^{(11),(12)}, 일본의 나고야 대학의 Yamada Kentaro교수 연구진에 의한 피로하중에 관한 연구를 위한 Truss교에의 적용⁽¹³⁾, 아일랜드 Dublin 국립대학에서 Euro project 일환으로 진행중인 BWIM 시스템에 관한 연구 등 많은 곳에서 WIM 시스템에 관심을 가지고 연구가 진행 중에 있다.

국내에서 적용되고 있는 WIM 시스템은 기본적으로 거더에서의 strain을 측정하여 그 strain으로 계산되는 거더에서의 모멘트와 영향선을 사용하여 구해지는 정적모멘트와의 차이를 시간별로 최소화하여 재하되는 차량의 측하중을 식별하고 있지만, 복잡한 교량에 가능한 적용이 단순하도록 하기 위하여 거더마다의 영향선으로 계산하는 문제점을 안고 있다.^{(1),(2)} 영향선의 개념은 정적하중에 적용되는 것으로 이동중인 동적하중을 식별하기 위하여 정적하중의 영향선 개념을 사용함으로써 인하여 근본적인 오차를 갖게 되는 문제점이 있으나, 대부분 적용 예에서 보듯이 시간대별 평균의 개념으로 어느 정도의 오차를 감수하면서 차량하중을 식별하려는 개념을 근간으로 하고 있다. 이러한 동적하중과 추정 정적하중의 평균과의 필연적인 차이가 발생하는 문제점이 있음에도 불구하고, 아직까지 실험이 아닌 수치적인 접근에 의하여 그 영향이 분석에 미치는 정도를 다각도로 분석한 연구가 없었다. 따라서, 유사한 개념인 영향면을 사용한 하중역해석 알고리즘을 제안하고, 이를 통하여 근본적으로 성격이 다른 하중의 차이를 다양한 변수의 변화에 따라 분석하고자 한다.

본 논문에서는 차량 바퀴의 종방향 및 횡방향의 시간별 위치를 안다는 가정 하에 교량의 측정위치에 대한 모멘트의 영향면을 데이터베이스로 구축하여 차량의 각 바퀴하중을 효과적으로 식별하는 알고리즘을 제안한다. 제안된 영향면에 의한 이동하중 식별 알고리즘은 단경간 4주형 합성형교에 대한 수치예제를 통하여 그 효율성을 검증하고, 기존에 국내외에서 적용되고 있는 대부분의 방법들과 같이 동적하중을 정적하중에 대한 영향선 및 영향면의 개념으로 식별함으로써 인하여 발생하는 문제점을 검토하도록 한다.

2. 변형도 계측에 의한 WIM 알고리즘

교량 상을 운행하는 차량의 하중은 동적이동하중이다. 그러나, 정적하중에 대한 영향면을 사용하여 일정 시간대에 대한 평균을 구하여 동적이동하중의 크기를 추정할 수 있을 것이다. 본 논문에서 제안하는 WIM 알고리즘은 이와 같이 영향면을 사용한 다음 식(1)의 최적화기법으로 차량의 각 바퀴하중을 식별하고자 하는 것이다. 제안되는 WIM 알고리즘에서는 시간에 따른 하중의 종방향, 횡방향 위치는 최신 장비로 차량이 교량을 통과하는 도중에 각 시간별로 확인할 수 있다고 가정한다.

$$\text{Minimize } J(\mathbf{p}) = \sum_{t=t_0}^{t_f} \| \mathbf{Z}(t)\mathbf{p} - \mathbf{m}(t) \|^2 + \lambda^2 \| \mathbf{Lp} \|^2 \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{p} (N_f \times 1)$ = 식별하여야 할 미지의 바퀴 하중벡터, $\mathbf{m}(t)$ = 측정된 strain으로부터 계산되어진 합성단면의 모멘트벡터 $\mathbf{m}(t) (N_m \times 1)$, N_m = strain을 측정하는 측정위치 개수, $\mathbf{Z}(t)$ = 시각 t에서의 하중

위치에 따른 데이터베이스에서 추출한 영향면행렬 $\mathbf{Z}(t)$ ($N_m \times N_f$)로서 식(2)에서 정의하는 바와 같이 i 번째 strain 측정위치에서 구한 영향면 데이터베이스에서 j 위치에 하중이 작용할 때 그 위치에서의 영향면 종거 $\eta_{ij}(t)$ 를 모은 것이다. 식(1)에서는 측정오차에 따른 불안정성을 감소시키기 위해서 정규화항을 사용하며, λ = 정규화 계수, \mathbf{L} = 정규화합수를 구성하는 일종의 operator matrix이다.

$$\mathbf{Z}(t) = [\eta_{ij}(t)] = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots \\ \eta_{11}(t) & \cdots & \eta_{N_f}(t) \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (2)$$

식(1)에서 매시각 t 마다의 모멘트에 대한 오차를 $\mathbf{E}(\mathbf{p}, t) = \mathbf{Z}(t)\mathbf{p} - \mathbf{m}(t)$ 라고 하면, 최소값을 구할 1차 필요조건으로 식(3)을 유도할 수 있다.

$$[\mathbf{Z}(t)^T \mathbf{Z}(t) + \lambda^2 \mathbf{L}^T \mathbf{L}]\mathbf{p} = \mathbf{Z}(t)^T \mathbf{m}(t) \quad (3)$$

최소자승의 문제인 식(3)에서 하중벡터 \mathbf{p} 를 구하기 위해서는 $N_m \geq N_f$ 라는 조건이 만족되어야 한다. 만약, $N_m < N_f$ 일 경우에는 식별하여야 할 하중에 관한 미지수의 개수보다 세울 수 있는 수식의 수가 작아지는 under-determined 문제가 되어 무한대의 해가 존재할 수 있게 된다. 따라서, 이러한 상황을 피하기 위해서는 strain 측정점의 개수 N_m 을 증가시켜야 하지만, 일반적으로 측정점의 개수는 고정되어 있다는 문제점이 있다. 따라서, 본 논문에서는 다음과 같이 시간창(time window)의 개념을 적용하여 매시각별 오차를 최소화하는 것이 아니라 어느 정도 충분한 수식을 세울 수 있는 n_t 시간대의 측정자료를 사용하여 시간창별 평균적인 값으로 하중을 식별하는 방법을 적용한다. 시간창의 크기는 $(n_t \times N_m) \geq N_f$ 가 될 수 있을 정도의 시각대로 구성하며, 식별하여야 할 하중의 개수에 비하여 비정상적으로 큰 rectangular matrix가 되게 시간대를 정하지 않도록 한다. 여기서, 시간창에 사용할 시간대의 크기 n_t 는 전체 N_t 중 일부만을 사용한다.

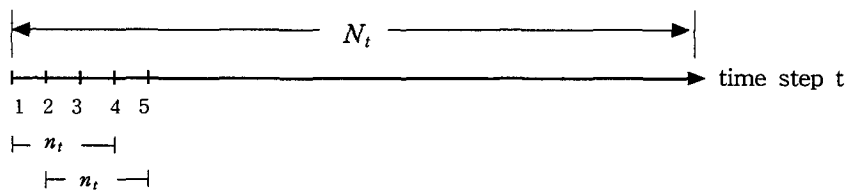


그림 1. 시간창의 개념도

3. 단경간 판형교에 대한 수치예제

3.1 해석모델

수치예제에 사용된 모델은 지간이 20m, 폭 10.8m인 단경간 4주형 판형교이다. 상부는 shell 요소로 하부는 frame 요소로 모델링 하였으며 슬래브와 거더는 강성연결(Rigid link)을 사용하였다. 하부에는 1m 마다 cross beam을 설치하였으며 각각의 재료 상수는 다음과 같다.

표 1. 재료상수

재료	탄성계수(KN/m ²)	포아송비	단위질량(KN/m ³)
Concrete	2.5497E7	0.18	24.52
Steel	2.0594E7	0.3	76.98

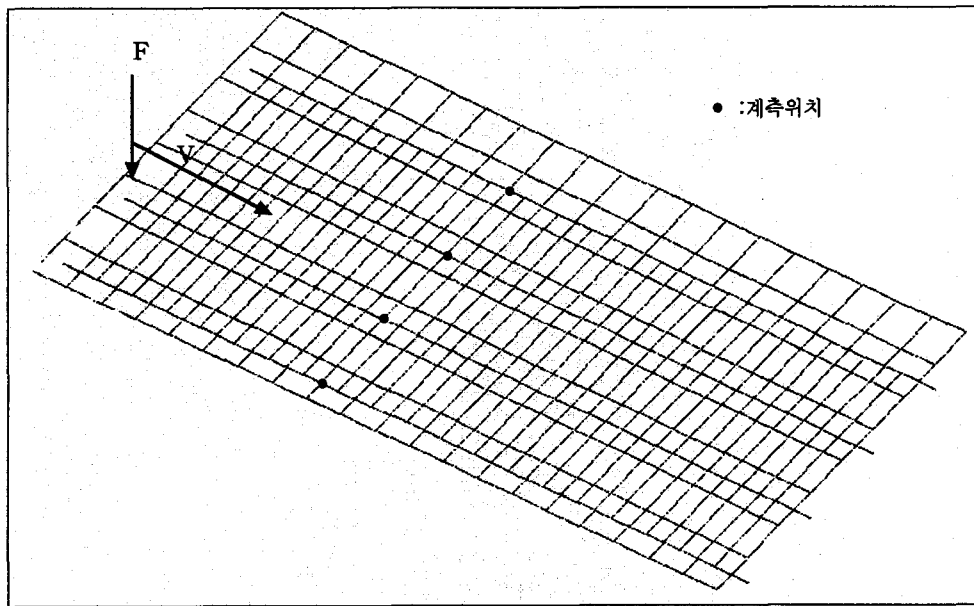
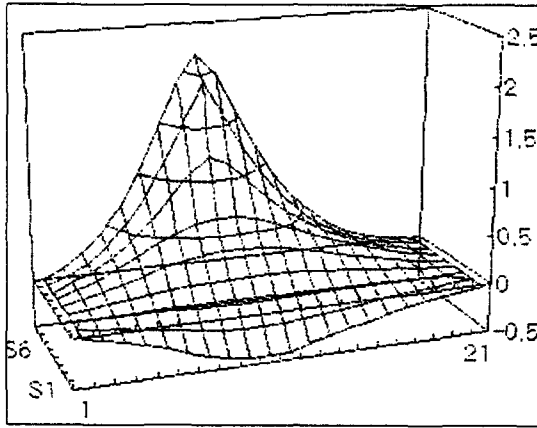


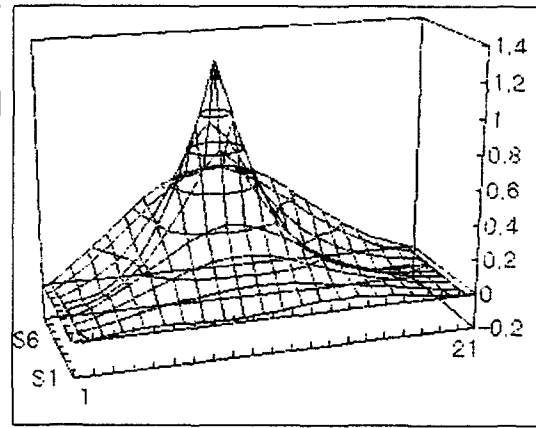
그림 2. 수치예제 모델링

3.2 영향면 계산

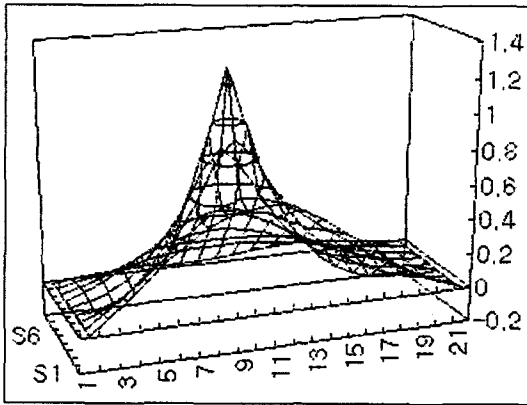
측정점의 위치는 각각의 거더 왼쪽 끝단에서 8m 떨어진 곳이며 측정점 4군데 위치 각각에 대한 모멘트의 영향면을 계산하여 데이터베이스를 구축한다. 모멘트의 영향면 값은 합성단면에 대한 것으로 계산하였으며, 축방향 하중과 모멘트하중이 평형을 이루는 상태에 대해 구하였다. 이동하중이 시각별로 데이터베이스를 구축한 위치들 사이에 있는 경우에는 절점들 사이에서 보간하여 사용하였다. 구축한 측정위치별 영향면은 그림 3과 같다.



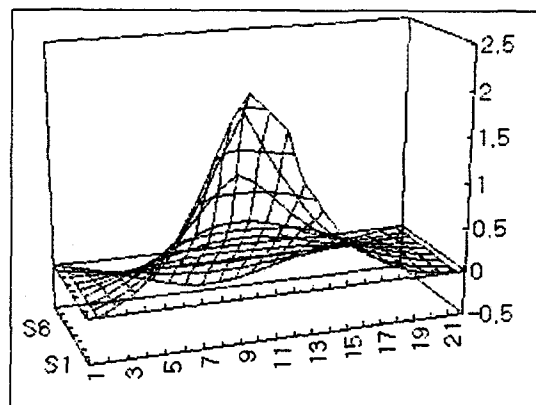
(1) 거더 1의 영향면



(2) 거더 2의 영향면



(3) 거더 3의 영향면



(4) 거더 4의 영향면

그림 3. 거더별 strain 측정위치에서의 모멘트 영향면

3.3 이동하중 식별

개발한 알고리즘의 적용성을 검증하기 위하여 일정한 속도로 이동하는 일정한 크기의 단일 하중을 이동시키는 동적해석을 수행하고, 그 계산된 결과를 사용하여 이동하중의 크기를 역으로 추정하였다.

하중의 크기는 100KN이며, 속도는 20m/s(72Km/hr)로 일정하게 주행한다고 가정하였다. 하중이 교량을 통과하는데 걸리는 시간은 1초이며, strain은 0.001초 마다 계측하는 것으로 하였다. 시간이력해석법에 의해 하중의 이동에 따른 거동을 계산하여 각각의 거더에 대한 모멘트와 축력의 데이터를 얻을 수 있었으며, 이 데이터를 가지고 시간에 따른 strain 측정 위치별 합성모멘트를 계산하였다.

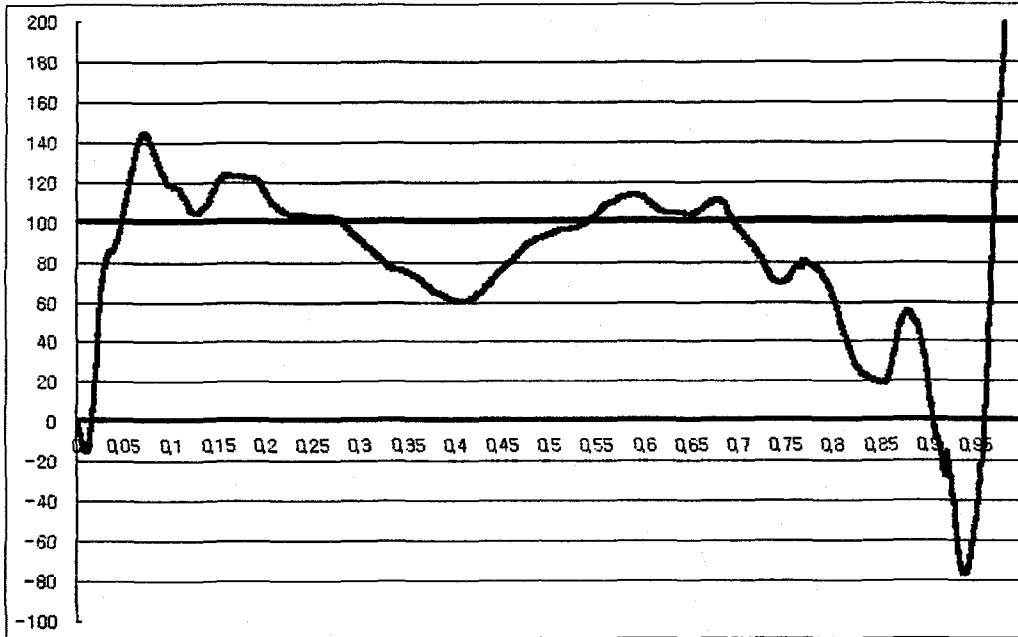


그림 4. 각 시각별 식별된 하중 결과

3.4 해석결과

해석 결과는 식별할 하중의 개수가 1개이므로, 연속 두개의 시각에 대한 시간차를 적용하여 연속적으로 시각별 평균값으로 하중을 계산하였다.

각 시간별 해석결과를 그래프로 나타낸 그림 4에서 보듯이, 시각별로 식별된 하중은 실제하중과 동떨어진 크기로 실제하중 크기 주위를 진동하고 있다. 특히, 하중이 교량에 진입하는 때와 하중이 측정점에서 멀어지는 위치에 가는 측정시간 후미에 식별된 하중의 진동이 크게 오차를 보이고 있으며, 데이터베이스에 구축한 정적하중에 의한 영향면 증거의 크기와 실제 동적하중에 의한 합성모멘트의 부호가 서로 바뀔에 따라 음(-)의 값을 갖는 하중이 식별되고 있다. Constrained optimization 기법을 적용시켜 하중이 음(-)의 크기를 갖지 않도록 하는 경우도 고려하였으나, 기본적으로 시간이력해석에 의한 모멘트와 축력에 의한 합성모멘트 값이 영향면 증거와 서로 다른 부호를 갖고 있는 것은 바꿀 수가 없기 때문에 그림에 그대로 표시하였다.

시각별 하중은 실제 하중에서 동떨어져 있어 보이지만, 대부분 영향선을 사용하는 WIM 알고리즘에서와 동일하게 어느 시간대에서 식별된 하중의 평균값을 구하면, 표 2에서와 같이 사용하는 시간대에 따라 상당히 정확한 실제 하중을 결정할 수 있음을 알 수 있다.

(단위 : KN)

표 2. 시간대에 따른 식별하중 크기

	실제하중	$N_T = 1000$ (0~1 sec)	$N_T = 750$ (0.05~0.8 sec)	$N_T = 700$ (0.05~0.75 sec)
하 중	100	92.1485	96.6688	99.4993

4. 결 론

본 논문에서는 연속적 시간창(sequential time window)을 적용하여 시간차별 평균적인 이동하중을 영향면을 사용하여 식별하는 알고리즘을 제안하였다. 측정된 strain에 의해 계산되어지는 합성단면의 모멘트와 미리 구축한 strain 측정점에서의 모멘트의 영향면을 사용한 모멘트와의 차이를 최소화시킴에 의해 이동하는 하중을 식별하도록 하였다. 본 알고리즘은 영향면을 사용하기 위하여 이동하는 하중의 교량 종방향 및 횡방향 모두에 대한 위치를 알아야 한다는 적용의 제약이 있으나, 발전하는 첨단기술에 의하여 이에 대한 한계는 빠른 시일 내에 벗어날 수 있을 것으로 기대한다.

개발된 알고리즘은 정적하중에 대한 영향면을 사용하여 동적이동하중의 크기를 식별하고자 하는 근본적인 한계를 갖고 있지만, 적용한 수치예제를 통하여 적절한 시간대의 선택에 의해 아주 정확하게 이동하중의 크기를 평균적으로 식별할 수 있다는 가능성을 확인할 수 있었다.

그러나, 시간대의 선택이 임의일 수 있고 단일하중이 아닌 복수의 하중이 교량상을 이동할 경우에 대한 알고리즘의 확인이 필요하다. 따라서, 차후의 연구로 이러한 복수하중 이동에 따른 식별의 문제와 측정오차 및 하중 위치 설정의 오차가 하중식별에 미치는 영향에 대한 분석을 할 것이며, 실내모형실험 및 현장실험을 통하여 실용적으로 사용할 수 있도록 개발할 수 있을 것이다.

5. 참고문헌

1. 한국강구조학회 (1997), 강형교의 교통량 분석을 통한 설계 피로하중산정과 발생응력의 모형화 연구, 한국 도로공사, 최종보고서, 12월.
2. 황의승, 배두병, 정경섭, 조재병 (1999), "BWIM시스템을 이용한 중차량의 통행특성 분석," 한국강구조학회 논문집, 11(2), 223-232, 4월.
3. (주)그루정보통신 : www.itskorea.com
4. Law, S.S., T.H.T. Chan, and Q. H. Zeng (1997), "Moving force identification: A time domain method," Journal of Sound and Vibration, 201, 1-22.
5. Chan, T.H.T., S.S. Law, T.H. Yung, and X.R. Yuan (1999), "An interpretive method for moving force identification," Journal of Sound and Vibration, 219, 503-524.
6. Zhu, X.Q. and S.S. Law (1999), "Moving force identification on a multi-span continuous bridge," Journal of Sound and Vibration, 228(2), 377-396.
7. Law, S.S. and X.Q. Zhu (2000), "Study on different beam models in moving force identification," Journal of Sound and Vibration, 234(4), 661-679.
8. Chan, T.H.T., L. Yu, and S.S. Law (2000), "Comparative studies on moving force identification from bridge strains in laboratory," Journal of Sound and Vibration, 235(1), 87-104.
9. Zhu, X.Q. and S.S. Law (2000), "Identification of vehicle axle loads from bridge dynamic responses," Journal of Sound and Vibration, 236(4), 705-724.
10. LAW, S.S. and Y.L. FANG (2001) "MOVING FORCE IDENTIFICATION: OPTIMAL STATE ESTIMATION APPROACH," Journal of Sound and Vibration, 239(2), pp.233-254.

11. Hwang, E.S. and Nowak, A.S. (1991), "Simulation of dynamic load for bridges," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 117(5), 1413-1434.
12. Nowak, A.S., Kim, S., and Saraf, V. (1996), "Monitoring truck loads and field testing of bridges," *Proceedings of the International Seminar on 'New Technologies for Bridge Management'*, edited by S.P. Chang and H.M. Koh, 219-248, December 6, Seoul, Korea.
13. Ojio, T., Yamada K. and Shinkai, H. (2000) , *BWIM System using Truss Bridge*, *Bridge Management 4*, Tomas Telford, London, pp. 378-385.