

불완전 동적 데이터로부터 복합신소재로 보강된 교량의 함수기반 역해석에 의한 성능 평가

Performance assessment using the inverse analysis based a function approach of bridges repaired by ACM from incomplete dynamic data

이상열 Lee, Sang-Youl* · 노명현 Noh, Myung-Hyun **

(Received April 31, 2010 ; Revised May 25, 2010 ; Accepted June 2, 2010)

ABSTRACT

This work examines the identification of stiffness reduction in damaged reinforced concrete bridges under moving loads, and carries out the performance assessment after repairing using advanced composite materials. In particular, the change of stiffness in each element before and after repairing, based on the Microgenetic algorithm as an advanced inverse analysis, is described and discussed by using a modified bivariate Gaussian distribution function. The proposed method in the study is more feasible than the conventional element-based method from computation efficiency point of view. The validity of the technique is numerically verified using a set of dynamic data obtained from a simulation of the actual bridge modeled with a three-dimensional solid element. The numerical examples show that the proposed technique is a feasible and practical method which can inspect the complex distribution of deteriorated stiffness although there is a difference between actual bridge and numerical model as well as uncertain noise occurred in the measured data.

요 지

본 연구는 차량 이동하중을 받는 손상된 콘크리트 슬래브교량의 강성저하를 규명하고, 복합신소재를 사용하여 보강 후 성능평가를 수행한다. 특히 마이크로 유전알고리즘에 의한 역해석에 기반하여 보강 전·후 각 요소에서의 강성변화를 수정된 2차변수 Gaussian 분포함수를 사용하여 정식화하였다. 본 연구에서 제안한 방법은 기존의 요소기반 접근 방식에 비하여 수치해석적인 관점에서 효율성을 갖는다. 개발한 알고리즘은 3차원 솔리드 요소를 사용하여 모델링한 교량의 동적 거동 시뮬레이션으로부터 측정한 데이터를 사전정보로 사용하여 검증하였다. 몇 가지 수치예제는 본 연구에서 개발한 방법이 실제교량과 수치모델간의 차이로 인한 오차 및 노이즈 등으로 인한 동적 측정치 오류 등이 고려되었음에도 강성분포 추정 및 성능 평가를 효율적으로 수행함을 보여준다.

Key Words: Inverse analysis(역해석), microgenetic algorithm(마이크로 유전알고리즘), Gaussian distribution function(가우시안 분포함수), Performance assessment(성능 평가)

1. 서 론

지금까지 건설재료분야에서 콘크리트와 강재의 사용빈도는 경제성이나 내구성면에서 거의 절대적인 우위를 점유하고 있는 것으로 인식되어 왔으나 구조형식이 장대화 및 경량화를 추구함으로써 재료의 비강도를 향상시켜야하는 필요한 시점에서 획기적인 신소재를 요구되고 있다. 최근 반영구적인 복합 신소재를 건설 분야에 적용하려는 노력은 국내외적으로 일부 구조물에 대하여 시도되고 있다. 주로 선박이나 항공기 분야에 적용된 신소재는 점차 토목·건축 분야를 비롯한 산업구조물 전반에 걸쳐 응용 가능함으로 이에 부응코자 관련 기술의 보급과 기술개발에 대한 연구 활동이 활발하게 진행되고 있다. 국내 건설 분야의 경우 주로 FRP 시트를 보강용으로 적용하거나 일부 복합 신소재 구조물을

설계 제작하여 현장에 건설하고 있으며 앞으로 본격적으로 실용화될 전망이다. 또한, 구조물로부터 측정된 다양한 응답 자료로부터 손상 및 특성을 탐지하는 기술이 개발되고 있다. 향후 GPS 등을 이용한 첨단 측정 기술의 발전과 함께 역해석을 이용한 고도화된 비파괴 상태평가기술의 개발은 구조물의 치명적인 결함에 따른 보수 보강, 교체 등 막대한 손실발생 이전에 이를 탐지하고 관리하여 사회 안전과 공익 증대에 기여할 수 있을 것이다.

구조물의 다양한 응답을 이용하여 손상을 역으로 탐지하는 역문제(Inverse problem)에 관한 이론적 연구는 지난 20여년간 국내외에서 다양한 방법으로 꾸준히 발전되어 왔다(Morassi and Rollo, 2001; 한국건설기술연구원, 2003). 그러나 이에 관한 해석적인 연구는 대부분 구조물의 정적 처짐 혹은 고유진동수로부터 손상의 위

*[†] 정회원·충부대학교 토목공학과 전임강사, 교신저자(leesy72@joongbu.ac.kr)

** 정회원·포항산업과학연구원 토목연구본부 선임연구원

치 혹은 상태를 추정하는 기법이며, 단순보 혹은 간단한 뼈대구조물에 시험적으로 적용되었다. 따라서 개발된 모델의 하중 및 경계조건이 제한적일 수밖에 없다. 최근에는 구조물의 손상을 감지하는 방법으로 수치해석에 의한 최적화 기법이 다양하게 시도되고 있다(Mares and Surace, 1996; Friswell 등, 1998; Rus 등, 2006). 특히 생물학적 진화원리를 수치적으로 모사한 유전알고리즘(Genetic algorithm, GA)은 역문제를 해결하는 데 있어서 비교적 적은 사전정보를 필요로 하고, 국지해로 빠지는 위험이 적은 장점을 갖는다. 따라서 유전알고리즘은 공학문제에 다양하게 적용되고 있으며, 토목구조물의 손상추정 및 최적화 설계에 대한 적용에도 시도되고 있다(이상열, 2005). 그러나 기존의 단순유전알고리즘(Simple genetic algorithm, S-GA)은 수많은 반복계산으로 인하여 상당히 긴 전산처리시간을 필요로 하게 된다. 반면에 마이크로 유전알고리즘(Micro-genetic algorithm, μ -GA)은 단순유전알고리즘보다 적은 수의 개체를 사용하면서 더 빠른 수렴성을 갖는다(Abu-Lebedh and Benekothal, 1999). 따라서 본 연구에서는 기존의 단순유전알고리즘의 몇 가지 단점들을 극복한 마이크로 유전알고리즘을 역기법으로 적용하기로 한다. 이러한 마이크로 유전알고리즘을 이용한 구조물의 역추정은 Lee and Wooh(2004,2005)에 의하여 박판 및 복합재료 판구조물에 적용되어 손상의 분포뿐만 아니라 위치 및 크기까지 규명할 수 있음을 검증하였다. 그러나 이 연구에서는 손상된 실제 구조물의 성능 평가와 보강한 후의 구조물 상태 및 성능평가에 대한 적용성에 대한 검증이 부족하여 한계성이 있다. 부재의 손상 및 FRP 보강에 대한 역해석 기법 적용은 건설 기술연구원(2003)에 의한 주파수영역 역해석 및 시간영역 역해석 기법 등 해석적 연구뿐만 아니라 실험적 검증이 시도되었다. 이 연구에서는 해머의 충격 타격에 의한 RC 보의 수직진동 가속도를 계측하여 균열의 정도와 손상 또는 보강된 경우의 성능변화를 추정하였다. 그러나 교량 모델이 아닌 RC 보, 즉 단순 부재에 대한 연구로 실제 교량에서 발생하는 차량 주행하중이 아닌 단순 충격 하중이 적용되었으며, 손상 또는 보강 후 교량의 휨성능에 대하여 확인할 수 없는 상대적인 손상지수를 사용했다는 한계점이 있다. 또한 사전에 결정된 정확한 분할 요소에 대하여 추정한 것이므로 임의의 손상 형태에 대한 탐지를 위한 방법으로 적용하기에는 손상 분포 모델의 한계를 가지고 있다. 본 연구에서는 이러한 분할 요소수의 한계를 극복하고, 임의의 손상 형태를 갖는 박판 구조물에 대하여 가정된 강성저하 분포식을 수립하며 충격하중으로부터 서로 다른 위치에서 계측된 동적 데이터를 사용하여 강성저하 분포를 마이크로 유전알고리즘을 적용하여 역추정한다. 최종적으로 동적데이터의 불확실성(노이즈 효과)를 고려한 경우에 대하여 제한한 방법의 타당성을 확인하기로 한다. 또한, 본 연구에서는 기존의 역해석 적용 사례의 제한

성을 극복하고 복합신소재에 의한 주요 보강 대상인 RC 슬래브를 현실에 근접하도록 모델링하기 위하여 3차원 고체 요소를 사용하였고, 실시간 모니터링이 가능한 하중인 주행하중에 의하여 발생한 동적응답 계측정보로부터 교량 구조물을 평가하였다. 또한, 복합신소재 보강 후 RC 슬래브의 성능 향상을 강성 및 휨 성능으로 평가하고 정량화할 수 있는 시스템을 개발하였다.

2. 계측 절차

역해석 수행을 위해 실제 교량에서 획득한 계측 정보가 사전정보로 필요하게 된다. 본 연구는 Fig. 1과 같이 3차원 고체 요소를 사용하여 RC 슬래브 교를 실제 상태와 유사하게 모델링하였으며, 주행하중에 의한 상부 슬래브의 동적 수직변위를 계측 값으로 사용하였다. 교량 성능평가를 위한 단면력 산출 시에는 보다 더 정해에 가까운 동적응답을 얻기 위하여 요소 수 대비 단면력의 수렴 여부를 검토하여 실제 교량과 유사하게 모의 구현하였다.

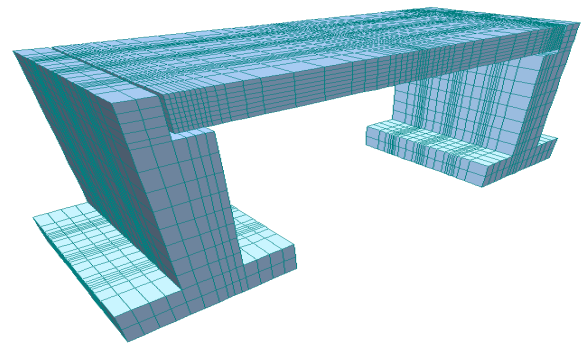


Fig. 1 슬래브 교량 3차원 모델링

교량을 통과하는 교통 하중은 교량의 각 위치에 대한 동적 거동에 영향을 주어 사전 계측 정보로 활용하는데 효과적이다. 그러나 계측 데이터에서 발생할 수 있는 여러 가지 오류는 역해석 적용 시 민감도를 저하시키는 원인이 된다. 본 연구에서는 상용프로그램에서 모델링된 3차원 교량으로부터 획득한 계측데이터에 랜덤 노이즈 χ 를 적용하여 불완전 계측데이터를 구현하였다. Gaussian 정규분포를 갖는 랜덤 편차를 구현하기 위하여 Box-Muller 방법이 사용되었다. 실제 센서에서 계측오류의 효과는 i 번째 시간에 대하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$${}^i\chi = \gamma \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N {}^i\psi + \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N {}^i\psi^2} \sqrt{\frac{-2 \log S}{S}} {}^i u \right) \quad (1)$$

여기서, N 은 계측시간의 분할 개수를 의미하며, γ 는 노이즈의 비율, S 는 i 번째 시간대에서 산출한 난수 ${}^i u$

의 Euclidean 거리의 제곱을, $^i\psi$ 는 노이즈를 고려하지 않는 3차원 교량 모델로부터 측정한 응답 데이터를 각각 의미한다. 노이즈가 추가된 측정데이터는 다음과 같이 표현된다.

$$^i\tilde{\Psi} = ^i\psi + ^i\chi \quad (i = 1 \dots N) \quad (2)$$

이와 같은 측정오류가 포함된 동적 응답데이터는 역해석을 위한 입력 자료로 이용된다.

3. 역해석 절차

3.1 손상으로 인한 강성저하 분포 함수식

균열과 같은 손상을 포함하는 3차원 교량 모델로부터 측정한 동적데이터를 사용하여 역해석을 통해 균열로 인한 교량 상판의 강성저하 분포를 추정할 수 있다. 역해석을 위한 교량 모델은 해석의 편의성을 위하여 2차원 판요소를 사용하며, 균열로부터 발생하는 상판의 강성저하분포는 2방향 Gaussian 분포함수로 가정하였다. 가정된 분포함수의 미지변수는 마이크로 유전 알고리즘을 실행하여 역추정하게 된다. 2차원 유한요소 모델에 대하여 균열에 의해 강성이 저하된 요소에 대한 강성매트릭스는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{\mathbf{K}}^{(m)} = \beta^{(m)} \int_V \mathbf{B}^{(e)T} \mathbf{D}^{(m)} \mathbf{B}^{(e)} dV \quad (3)$$

여기서, $\beta^{(m)}$ 은 m 번째 손상된 요소에서의 손상 계수 (0.0~1.0)을, $\mathbf{B}^{(e)}$ 는 요소 e 에서의 변형률-변위 관계 매트릭스, 그리고 $\mathbf{D}^{(m)}$ 은 m 번째 손상된 요소에 대한 재료강성 매트릭스를 각각 의미한다. 본 연구에서는 손상으로 인한 2차원 판의 강성저하 분포를 다음과 같은 수정된 2차 Gaussian 분포 함수로 가정하였다.

$$f(\mathbf{x}) = \frac{1}{2\pi|\Lambda|} \exp\left[-\frac{1}{2}(\mathbf{x}-\boldsymbol{\mu})^T (\Lambda^{-1})^2 (\mathbf{x}-\boldsymbol{\mu})\right] \quad (4)$$

여기서, $|\Lambda|$ 는 강성분포의 표준편차 매트릭스 $[\lambda_{ij}]$ ($i, j = 1, 2$)이고, \mathbf{x} 는 강성저하 최고점의 좌표 벡터, 그리고 $\boldsymbol{\mu}$ 는 평균 벡터를 의미하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \rho\lambda_{12} \\ \rho\lambda_{21} & \lambda_{22} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{x} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix}; \quad \boldsymbol{\mu} = \begin{Bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{Bmatrix}; \quad (5)$$

여기서 ρ 는 x_1 과 x_2 사이의 상관계수를 의미한다.

식 (4)에서 지수 함수 앞에 곱해진 상수항 부분은 강성 저하분포로 가정했을 때 강성저하의 최대점의 크기

를 의미한다. 예를 들면, 손상이 전혀 없는 상태인 경우, 상수항은 0이 되어 강성저하가 0이 됨을 의미한다. 따라서 식 (4)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta^{(m)}(\mathbf{x}) = d^{(m)} \exp\left[-\frac{1}{2}(\mathbf{x}-\boldsymbol{\mu})^T (\bar{\Lambda}^{-1})^2 (\mathbf{x}-\boldsymbol{\mu})\right] \quad (6)$$

여기서,

$$d^{(m)} = \frac{1}{2\pi|\Lambda|}; \quad \bar{\Lambda} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix}; \quad (7)$$

여기서, $d^{(m)}$ 은 0.0~1.0의 범위 값을, 좌표 x_1 및 x_2 는 전체 길이 L_{x1} 및 L_{x2} 의 범위에서 변화한다. 표준편차 λ_1 및 λ_2 는 0부터 L_{x1}/c_1 및 L_{x2}/c_2 의 범위안에서 산정되며, c_1 및 c_2 는 특정 손상 형태를 구현하고자 할 때 사용되는 0부터 1사이의 값이다.

한편, 임의의 각도로 회전된 강성저하 분포를 구현하기 위하여 다음과 같은 회전 변환식을 적용하였다.

$$\bar{\mathbf{x}} - \bar{\boldsymbol{\mu}} = \mathbf{R}_\theta (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}) \quad (8)$$

여기서, \mathbf{R}_θ 는 각도 θ 로 회전하는 회전매트릭스를 의미한다. 즉,

$$\mathbf{R}_\theta = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (9)$$

식 (6)을 식 (9)를 사용하여 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\beta^{(m)}(\bar{\mathbf{x}}) = 1 - d^{(m)} \exp\left[-\frac{1}{2}(\bar{\mathbf{x}}-\bar{\boldsymbol{\mu}})^T \mathbf{R}_\theta (\bar{\Lambda}^{-1})^2 \mathbf{R}_\theta^{-1} (\bar{\mathbf{x}}-\bar{\boldsymbol{\mu}})\right] \quad (10)$$

여기서 $\bar{\mathbf{x}}$ 는 초기좌표 \mathbf{x} 에 대하여 θ 만큼 회전된 좌표를 의미한다. 식 (10)은 분할된 ($i \times j$)번째 요소에 대하여 분배하는 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{\beta}^{(m)}(\boldsymbol{\xi}) = 1 - d^{(m)} \exp\left[-\frac{1}{2}(\boldsymbol{\xi}-\boldsymbol{\mu})^T \mathbf{R}_\theta (\bar{\Lambda}^{-1})^2 \mathbf{R}_\theta^{-1} (\boldsymbol{\xi}-\boldsymbol{\mu})\right] \quad (11)$$

여기서,

$$\boldsymbol{\xi} = \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i \times L_{x1} / N_{x1}^d \\ j \times L_{x2} / N_{x2}^d \end{bmatrix} \text{ 이고,} \quad (12)$$

N_{x1}^d 와 N_{x2}^d 는 x_1 과 x_2 방향으로 분할한 요소 수를 의미한다. 식 (11)에서 역추정하는 변수는 총 6개이며 다음

과 같다.

$$\mathbf{q} = [q^1 \ q^2 \ q^3 \ q^4 \ q^5 \ q^6]^T = [d^{(m)} \ \mu_1 \ \lambda_1 \ \mu_2 \ \lambda_2 \ \theta]^T \quad (13)$$

국부좌표계에서 k 번째 손상된 요소에서의 강성매트릭스는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{\mathbf{K}}^{(k)} = \tilde{\beta}^{(m)}(\xi^{(k)}) \mathbf{K}^{(m)} \quad (14)$$

여기서, $\xi^{(k)}$ 는 k 번째 요소의 좌표벡터이다. 식(14)를 적용하여 시스템 운동방정식을 구성하면 다음과 같다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \tilde{\mathbf{K}}\mathbf{U} = \bar{\mathbf{F}}(t) \quad (15)$$

여기서, \mathbf{U} , $\ddot{\mathbf{U}}$, 그리고 \mathbf{M} 은 변위벡터, 가속도 벡터 및 질량벡터를 각각 의미한다. 여기서 질량벡터는 손상 전·후에 손실없는 질량상태이며 $\tilde{\mathbf{K}}$ 는 손상으로 인하여 저하된 강성 매트릭스를 의미한다. $\bar{\mathbf{F}}(t)$ 는 이동하중의 시간이력을 나타낸다. Fig. 2는 식 (13)에 적당한 6개의 미지 값을 가정한 다음 구현한 판의 손상에 따른 국부 강성 변화 분포 형상의 예를 보여준다. 손상의 형태와 크기를 결정하는 미지수들은 3.2에 기술되는 역문제 해법을 통하여 추정하게 된다.

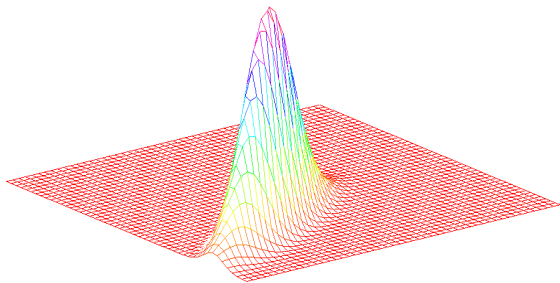


Fig. 2 2차원 판구조의 국부 강성 변화 예

3.2 마이크로 유전알고리즘과의 연동

본 연구에서는 역문제를 해결을 위한 기법으로 마이크로 유전알고리즘을 제안하고 있으며, 식 (15)의 동적 평형방정식을 만족하는 구조물의 강성을 역추정하기 위하여 교량 제원, 지점 조건, 재료물성, 그리고 하중조건 등을 전항 절차와 동일하게 적용한다. 측정된 동적응답 결과로부터 손상의 위치 및 정도를 추정하는 과정에서 마이크로 유전 알고리즘은 k 번째 세대, 총 N 개의 분할 시간에서 원래의 측정치 $\bar{u}[n]$ 과 각각의 단계에서의 계산치 $u_k[n]$ 을 비교하여 오차 ϵ_k 를 계산하고 그 오차를 미리 결정한 값 이하로 최소화시키

는 과정을 통하여 식 (13)에서 나타낸 6개의 미지변수들을 역추정하게 된다. 본 연구는 식 (16)에 의하여 각 세대(Generation)에서의 대표오차 값을 결정하였다.

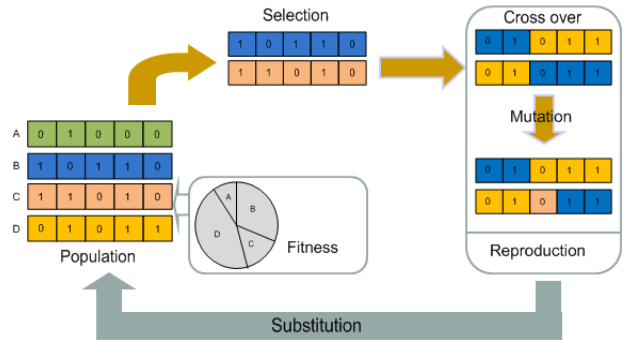


Fig. 3 유전알고리즘의 기본 개념도

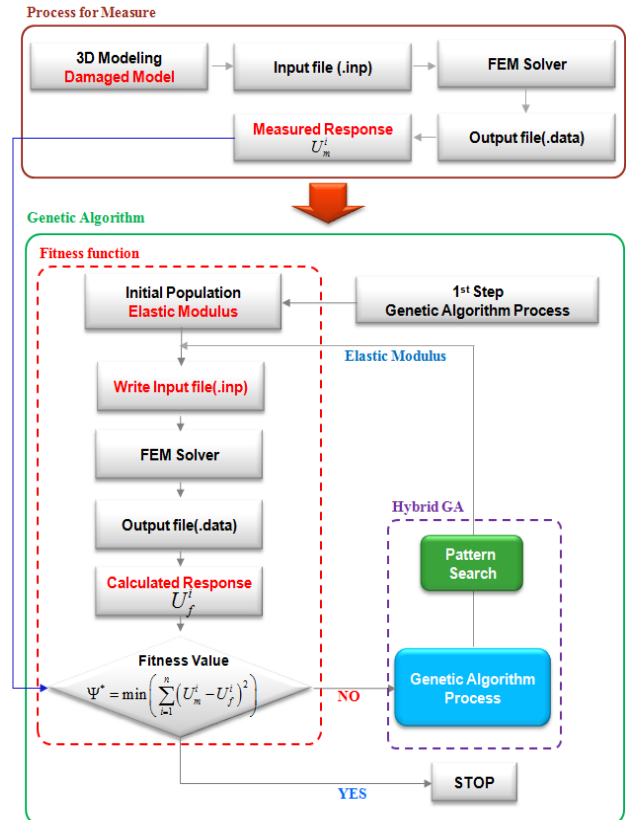


Fig. 4 상용프로그램과 유전알고리즘의 연동 흐름도

$$\epsilon_k = \sum_{n=1}^N (\bar{u}[n] - u_k[n])^2, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (16)$$

식 (16)에 의하여 계산된 각 세대에서의 대표 값은 살아남아 다음 세대로 전달되고 나머지 개체에 의해 계산된 값들은 소멸된다. 이러한 대표 값들은 각 세대를 지나면서 발전하여 실제 계측한 값으로 수렴하게

되며 각 세대 당 M 개의 개체를 갖는 경우, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Psi = \min\{\varepsilon_k\}, \quad k = 1, 2, \dots, M \quad (17)$$

식 (17)에서 구한 Ψ 가 미리 결정한 오차보다 작으면 계산은 종료되며, 요소별 최종 강성을 결정하게 된다. 이러한 역문제 해결에 적용되는 유전자 알고리즘은 Goldberg(1989)에 의하여 본격적으로 개발되었으며, Krishnakumar(1989)와 Carroll(1996) 등에 의하여 기존의 단순 유전알고리즘의 단점들을 개선한 마이크로 유전알고리즘 기법으로 발전하였다. 마이크로 유전알고리즘은 기존의 단순 유전알고리즘에서 25~30개의 개체로 출발하는 것에 비하여 5~6개의 적은 개체로 출발한다. 이러한 적은 수의 개체는 유전자의 결핍으로 인하여 반복계산 과정에서 잘못된 국지해로 빠질 우려가 있다. 그러나 마이크로 유전알고리즘은 국지적인 특정한 목적 값에 수렴된 후에는 가장 강한 유전자 개체의 정보만이 살아남아 다음 세대로 전달되고 내부의 루프 안에서 다시 처음부터 가정된 개체로 출발하는 방법을 사용함으로써 유전자 개체의 결핍 현상을 극복할 수 있다. Fig. 3은 유전알고리즘의 기본 절차를 보여준다. 또한 Fig. 4는 상용프로그램을 이용한 계측절차와 마이크로 유전알고리즘에 의한 역해석의 연동 과정의 흐름도를 보여준다.

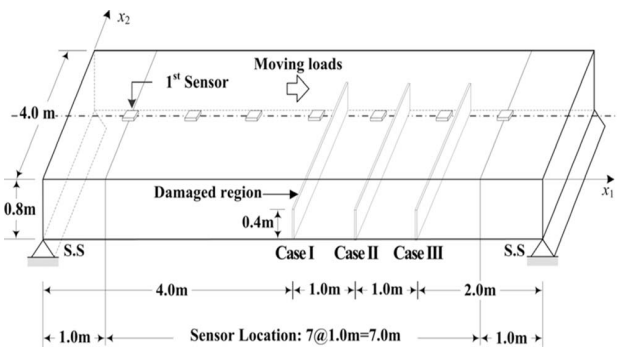


Fig. 5 손상 유형 및 3D 모델 제원

4. 수치 예제

4.1 교량바닥판의 손상위치 추정

개발된 해석프로그램을 검증하기 위하여 Fig. 5와 같이 3개의 위치(Case I~III)에 대하여 균열 손상을 유한요소 상용프로그램 MIDAS/CIVIL를 사용하여 3차원 모델링한 후 동적계측 데이터로부터 손상위치를 역으로 추정하였다. 모의 구현한 RC 슬래브 상판은 지간 $L=8.0m$, 폭 $B=4m$, 형고 $H=0.8m$ 의 제원을 가지며, 지점조건은 시점 측에 힌지, 종점 측에 로울러의 경계조건을 갖는다. 여기서 콘크리트의 재료 물성치는 KS

기준 $f_{ck}=24.0MPa$, $\nu=0.167$ 을 적용하였다. 하중은 주행하중 $432kN$ (KS DB24 집중하중)을 $10\sim 100km/hr$ 까지 $10km/hr$ 단위로 구분하여 재하하였다. 다양한 계측위치에 대한 시뮬레이션을 실시하여 Fig. 5와 같은 7개의 최적 계측위치를 결정하였다.

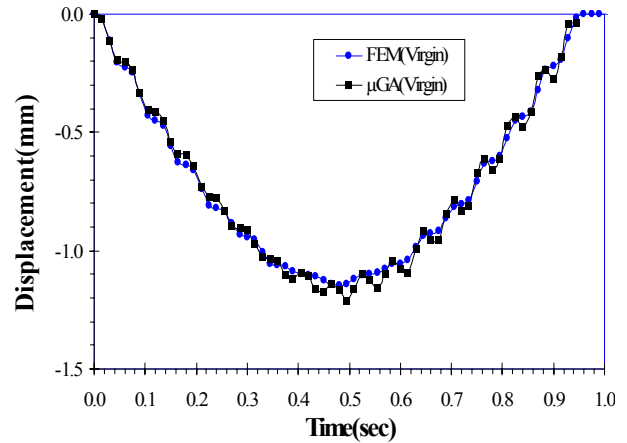
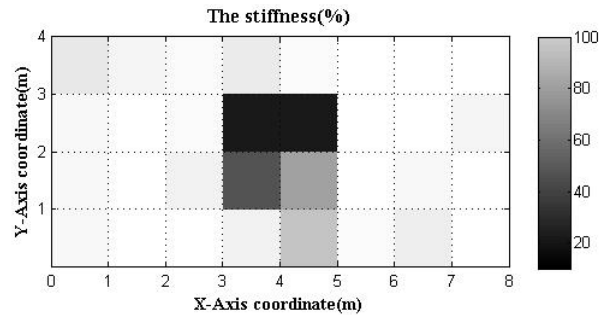
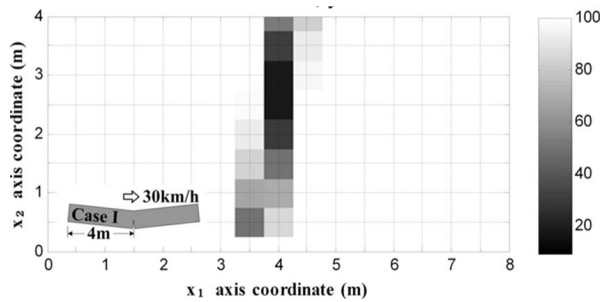


Fig. 6 3D 교량 모델과 2차원 역해석 모델의 동적 응답비교 (차량속도 30km/h)

Fig. 6은 상용프로그램에 의한 3D 교량 모델과 2차원 역해석 모델에 의한 동적 계측데이터를 비교한 것이다. 분석 결과 데이터는 상관계수로 99% 일치함에 따라 3D 모델링으로부터 획득한 데이터는 역해석을 위한 2D 모델의 입력자료로 사용하여도 무방함을 알 수 있다.



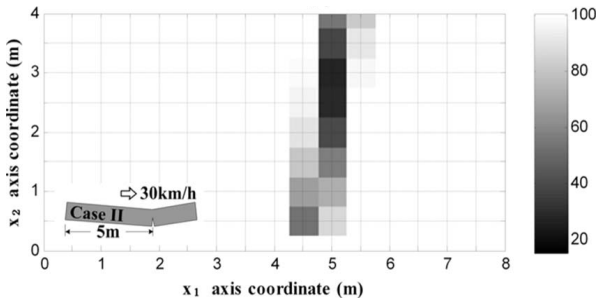
(a) 요소기반 강성저하 역추정(32개 요소)



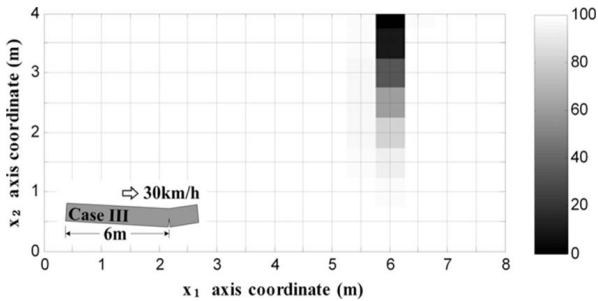
(b) 분포함수기반 강성저하 역추정

Fig. 7 분할요소 및 분포함수기반 Case I에 대한 강성저하(손상위치) 역추정 비교 (차량속도 30km/h)

Fig. 7(a)은 32개 분할요소의 강성을 모두 미지수로 가정된 기존의 방법으로서 균열 손상으로 인한 강성저하를 추정하고 있음을 시각적으로 관찰할 수 있으나, Fig. 7(b)와 같은 함수기반의 추정방법에 의한 결과와 비교하였을 때 정확도 및 계산속도가 저하됨을 알 수 있다.

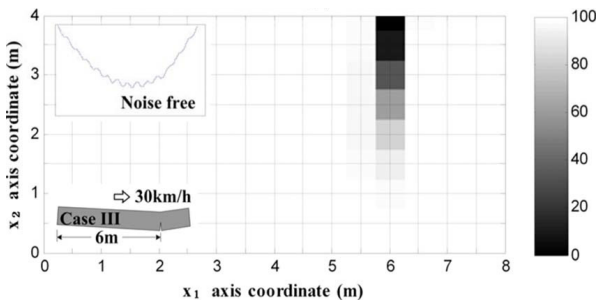


(a) 요소기반 강성저하 역추정(32개 요소)

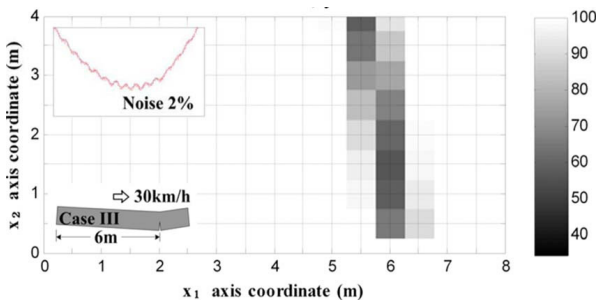


(b) 분포함수기반 강성저하 역추정

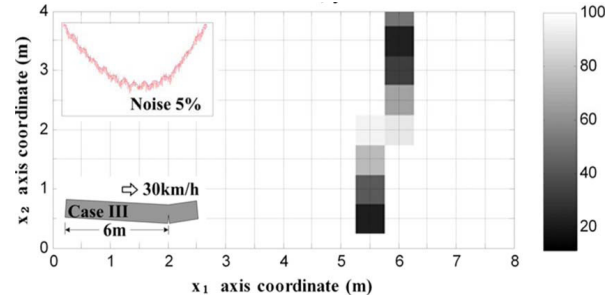
Fig. 8 분포함수기반 Case I 및 Case II에 대한 강성저하(손상위치) 역추정 (차량속도 30km/h)



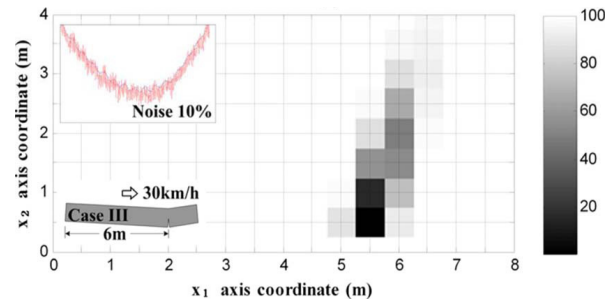
(a) Noise free



(b) 2% Noise



(c) 5% Noise



(d) 10% Noise

Fig. 9 불완전 동적데이터로부터 Case III에 대한 강성저하(손상위치) 역추정 (차량속도 30km/h)

Fig. 8은 시속 30km/h의 경우 손상 Case II~III에 대하여 강성저하를 정확히 추정함을 보여준다. Fig. 9는 노이즈 0~10%를 포함하는 불완전 동적데이터로부터 Case III에 대한 강성저하 위치를 역추정한 것이다. 그림의 결과로부터 노이즈의 영향에도 불구하고 약간의 오차를 보이고 있으나 전반적으로 손상저하 위치를 효과적으로 탐지하고 있음을 관찰할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 마이크로 유전알고리즘에 의한 역해석은 계측 오류를 포함하고 있는 경우에 대해서도 신뢰할만한 결과를 보여준다.

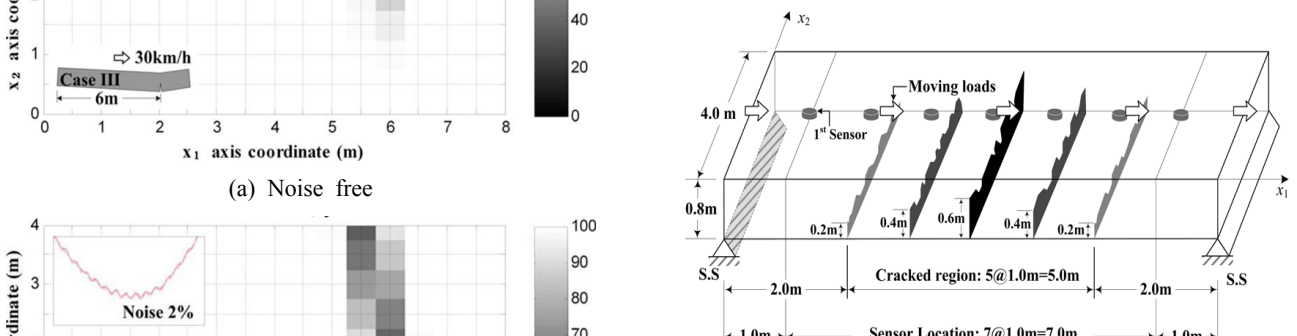


Fig. 10 중앙부를 중심으로 분포손상 모델(Case IV)

4.2 복합신소재 보강후 성능향상 평가

역기법에 의한 복합신소재로 보강된 교량(RC 슬래브) 성능평가를 위해 Fig. 10과 같이 실제 휨 부재에서 나타날 수 있는 균열과 유사하게 중앙부를 중심으로

균열이 고르게 분포하는 손상 모델링(Case IV)을 수행하였다. 보강 재료는 탄성계수=460GPa, 두께=0.165mm의 고탄성복합 섬유시트(Carbon ExNR53S)를 사용하였으며, 정착 길이는 1.0m를 적용하였다.

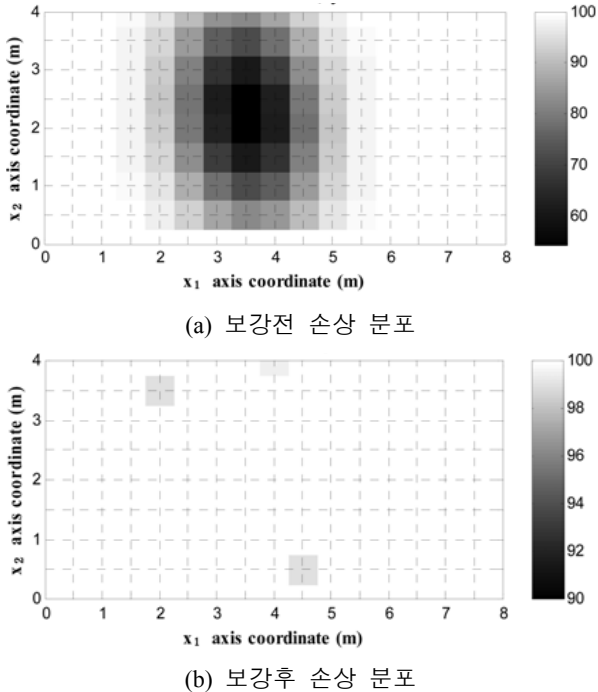


Fig. 11 Case IV에 대한 보강 전후 강성분포 추정 (Noise fee, 차량속도 30km/h)

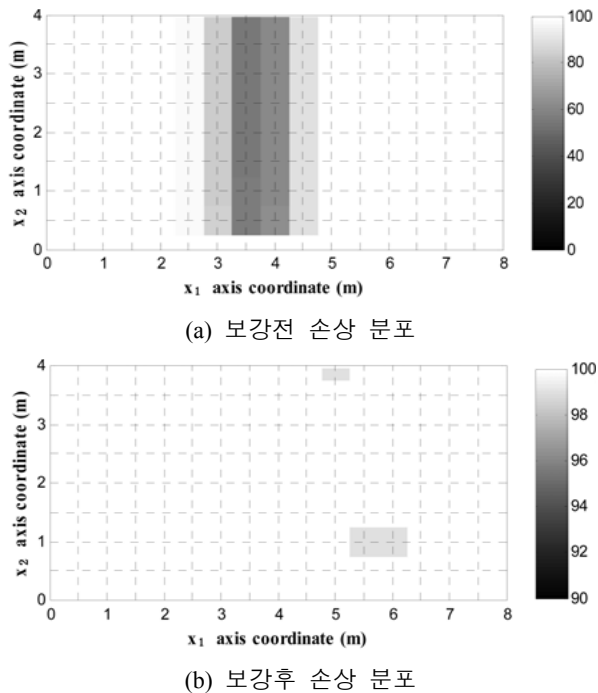


Fig. 12 Case IV에 대한 보강 전후 강성분포 추정 (2% Noise, 차량속도 30km/h)

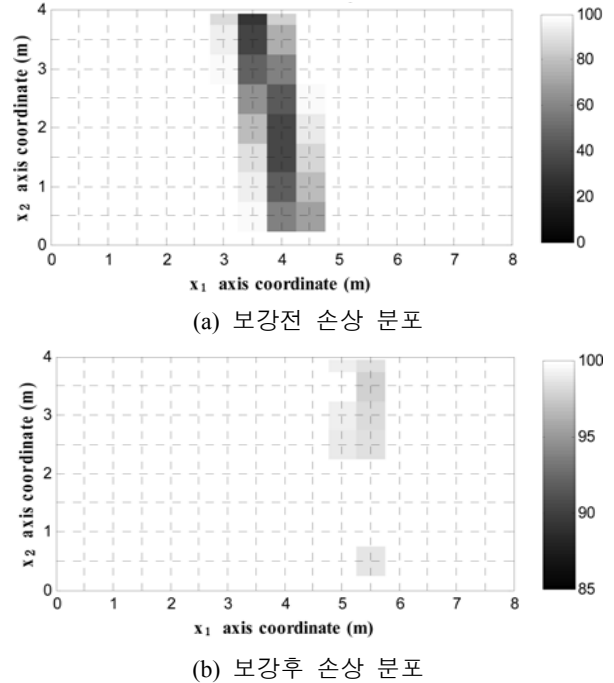


Fig. 13 Case IV에 대한 보강 전후 강성분포 추정 (5% Noise, 차량속도 30km/h)

Fig. 11~13은 Case IV에 대하여 손상 및 복합신소재로 보강한 후 강성 분포를 노이즈의 변화에 따라 도시한 것이다. 강성 추정 알고리즘을 수행한 결과 손상상태에 대한 강성저하 분포와 보강한 후 강성 증진 효과를 시각적으로 확인할 수 있다. 또한 계측오류를 2~5% 고려하였을 경우에도 보강 후 강성 복원효과를 정확하게 보여준다.

Table 1은 주행속도에 따른 정상상태, 손상상태, 보강후에 대한 강성저하계수(β)의 평균값을 나타낸 것이다. 결과로부터 복합신소재로 보강한 후 강성증진효과를 확인할 수 있다. 보강 후 효과확인을 위한 교량의 성능평가는 교량의 유지관리 문제에 있어서 매우 중요한 문제 중 하나이다. 본 연구에서는 Case IV에 대하여 역해석에 의해 추정된 강성의 변화 값을 이용하여 변위 및 모멘트를 다시 계산한 후, RC 슬래브의 성능평가를 실시하였다. 성능 평가를 위한 상재하중, 하중조합 등의 설계기준은 현재 국내에서 적용되고 있는 도로교설계기준(건설교통부, 2005)을 준용하였다. 역 기법에 의한 교량의 성능평가 결과를 요약하면 Table 2와 같다. 교량의 평가 결과 DB 24급으로 시공된 구조물의 KS 기준 성능이 균열상태의 경우 DB18급으로 감소한 후, 보강상태에서 다시 DB24급으로 회복됨을 확인할 수 있었다. 따라서 주행하중에 대한 동적응답결과의 실시간 계측을 통한 모니터링으로 본 연구에서 제안한 마이크로 유전알고리즘에 의한 역 기법을 이용하면 보강후의 교량 성능 평가가 가능할 수 있음을 확인하였다.

Table 1 주행속도에 따른 정상상태, 손상상태, 보강후에 대한 강성저하계수(β)의 평균값

주행 속도	정상 상태	손상 상태	보강후
30 km/hr	0.9861	0.8946	0.9408
40 km/hr	0.9743	0.8834	0.9138
50 km/hr	0.9719	0.8624	0.8994
60 km/hr	0.9885	0.8693	0.9347
70 km/hr	0.9725	0.8497	0.8956

Table 2 Case IV에 대한 복합신소재 보강후 성능평가 (차량속도 30 km/hr)

상 태	평균 β	계산 모멘트	performance	safety factor for DB24
정상 상태	0.9861	806 kN·m/m	DB24	1.41
손상 상태	0.8946	1,326 kN·m/m	DB18	0.86
보강 상태	0.9408	1,018 kN·m/m	DB24	1.11

6. 결론

본 연구에서는 복합신소재로 보강된 RC 슬래브(3D 고체 모델)의 동적 거동을 실제와 유사하게 모의 시뮬레이션한 후, 마이크로 유전알고리즘(2D 판 모델)을 이용한 역 기법을 적용하여 저하된 교량의 성능 회복 효과를 추정하였다. 또한 구조시스템의 사전정보로서 좀 더 다양한 정보를 활용하고, 실무에 쉽게 적용할 수 있도록 기존의 정적 처짐 혹은 고유진동수 대신 주행하중에 대하여 노이즈가 포함된 불완전 동적응답 정보를 사용하였다. 특히, 분할 요소 기반이 아닌 수정된 분포함수를 사용하여 분할 요소수에 관계없이 임의형태의 강성저하분포를 나타낼 수 있는 방법을 제안하였다. 수치해석 예제로부터 임의의 형태의 손상을 갖는 RC 슬래브에 대하여 본 연구에서 개발한 역해석 모델은 동등한 강성저하 분포를 효과적으로 추정하고 있음을 알 수 있었다. 계측점이 7개의 경우에는 RC 슬래브의 균열 위치를 임의로 변경하였을 경우에도 손상의 위치를 비교적 정확히 탐지하였으며, 복합신소재로 손상된 슬래브 밀면을 보강하였을 경우에도 강성의 증진 효과를 확인할 수 있었다. 또한, 추정된 분할 요소의 강성 변화 값을 이용하여 변위 및 단면력을 다시 계산하여 정상상태, 균열상태 및 보강 상태에 대하여 정량적인 내하성능 평가(KS DB하중 등급) 시스템을 개발하였다. 본 연구에서 제안한 역해석 기법인 마이크로 유전알고리즘은 기존의 단순 유전알고리즘에 비하여 수치적으로 매우 효율적이며, 주행하중을 받는 교량의 성능 평가에 효과적인 방법임을 알 수 있었다. 향후 동적 응답의 계측 위치 및 응답 정보를 더욱 최적화하는 시스템의 개발 및 실제 현장 실험을 통한 제안된 방법의 상호 검증이 지속적으로 필요할 것이다.

참고 문헌

1. 이상열(2005) 마이크로 유전알고리즘을 이용한 자유진동 박판구조물의 비파괴 손상 규명, **한국강구조학회논문집**, 제17권, 제2호, pp.173-181.
2. 한국건설기술연구원(2003) **노후 교량의 성능향상 기술 개발**, 연구보고서, 건설기술연구원 2005-087.
3. Abu-Lebedh, G. and Benekothal, R.F. (1999) Convergence variability and population sizing in micro-genetic algorithms, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol.14, pp.321-334.
4. Bathe, K.J. (1996) *The finite element procedures in engineering analysis*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, pp.768-785.
5. Carroll, D.L. (1996) Chemical laser modeling with genetic algorithms, *AIAA J.*, Vol.34(2), pp.338-346.
7. Friswell, M.I., Penny, J.E.T. and Garvey, S.D. (1998) A combined genetic and eigensensitivity algorithm for the location of damage in structures, *Computers and Structures*, Vol.69, pp. 547-556.
8. Goldberg, D.E. (1989) *Sizing populations for serial and parallel genetic algorithms*, Proc., 3rd Conference. Genetic Algorithm, Fairfax, VA, Vol.5, pp.29-37.
9. Gudmudson, P. (1982) The dynamic behaviors of slender structures with cross section cracks, *Journal of Mechanics and Physics. of Solids*, Vol. 31(4), pp. 329-345.
10. Lee, S.Y. and Wooh, S.C. (2005) Detection of stiffness reductions in laminated composite plates from their dynamic response using the microgenetic algorithms, *Computational Mechanics*, Vol.36, pp.320-330.
11. Lee, S.Y. and Wooh, S.C. (2005) Waveform-based identification of structural damage using the combined finite element method and microgenetic algorithms, *Journal of Structural Engineering ASCE*, Vol.31(9), pp. 1464-1472.
12. MIDAS. (2006) *Civil analysis reference manual, civil (v7.12 Release No.1)*, Midas Information Technology, Livonia, Mich.
13. Mares, C. and Surace, C. (1996) An application of genetic algorithms to identify damage in elastic structures, *Journal of Sound Vibration*, Vol.195, pp. 195-215.
14. Ruotolo, R. and Shifrin, E.I. (1999) Natural frequencies of a beam with arbitrary number of cracks, *Journal of Sound Vibration*, Vol.223(3), pp.409-423.
15. Rus, G., Lee, S.-Y., Wooh S.-C., and Chang S. Y. (2006) Optimized damage detection of steel plates from noisy impact test, *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, Vol.68, pp.707-727.