

마이크로 유전알고리즘을 적용한 구조물의 변위 추정 기술 Displacement Detection Technologies of Structures Using Microgenetic Algorithms



이 상 열^{1)*}

Lee, Sang Youl



강 영 종²⁾

Kang, Young Jong

1. 서론

토목 구조물, 특히 교량에 발생하는 손상은 대중의 안전과 경제적 유지관리 통한 공익의 실현 측면에서 매우 중요한 문제가 되어 왔다. 교량의 손상은 차량에 의한 사고, 노후화 등의 원인으로 인하여 그 발생 자체가 불가피하다고 할 수 있다. 따라서 고도화된 비파괴 상태평가기술의 개발은 구조물의 치명적인 결함에 따른 보수보강, 교체 등 막대한 손실 발생 이전에 이를 탐지하고 관리하여 사회 안전과 공익 증대에 기여할 수 있을 것이다.

교량과 같은 구조물은 각종 동하중에 대하여 다양한 응답을 보이는데, 구조물의 건전성을 평가하기 위하여 계측하는 대표적인 응답으로는 가속도, 변형률 및 변위가 있다. 구조물의 건전성 모니터링은 대부분 가속도 데이터를 활용하는데, 이러한 경우 구조물의 전체 거동 파악은 불가능하며 계측 부위의 부분적인 파악만 가능하다. 가속도 뿐 아니라 변형률 계측도 빈번하게 이루어지는데 이 계측 값들은 구조물의 국부적인 영향에 의해 전체 구조계의 거동성능을 과대·과소 평가하는 오류를 범할 가능성이 높다. 따라서 궁극적으로 구조물의 건전성 평가를 정확하게 수행하기 위해서는 구조물의 변위를 계측하여 활용하는 것이 가

장 바람직하다. 최근 GPS 등 다양한 첨단 계측 장비가 발전하면서, 난해했던 변위 계측이 가능해지고 있다. 그러나, 첨단 변위 계측 장비는 고가이므로 한정된 지점에 최소한으로 설치하는 것이 경제적인 것이다. 이러한 관점에서 적은 수의 변위 계측으로부터 전체 구조물의 거동을 파악할 수 있는 기법의 필요성이 제기된다.

구조물의 다양한 응답을 이용하여 하중 또는 손상 유무를 역으로 탐지하는 역문제(Inverse problem)에 관한 이론적 연구는 지난 20여년간 국내외에서 다양한 방법으로 꾸준히 발전되어 왔다 (Doebbling 등, 1998; Yang 등, 1985; Morassi and Rollo, 2001; 한국건설기술연구원, 2003). 그러나 이에 관한 해석적인 연구는 대부분 구조물의 정적 처짐 혹은 고유진동으로부터 손상의 위치 혹은 상태를 추정하는 기법이며, 단순보 혹은 간단한 뼈대구조물에 시험적으로 적용되었다. 따라서 개발된 모델의 하중 및 경계조건이 제한적일 수밖에 없다. 최근에는 수치해석에 의한 최적화 기법이 다양하게 시도되고 있다(Mares and Surace, 1996; Friswell 등, 1998; Suh 등, 2000; Rus 등, 2006; 이상열 and 노명현, 2010). 특히 생물학적 진화원리를 컴퓨터 시뮬레이션 기법으로 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, 토목 구조물의 역문제 해결 및

1) 안동대학교 토목공학과 조교수, 공학박사

2) 고려대학교 건축사회환경공학학과 교수, 공학박사

* E-mail : lsy@anu.ac.kr

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 개선된 마이크로 유전 알고리즘(Microgenetic algorithm, μ -GA)은 단순유전알고리즘보다 적은 수의 개체를 사용하면서 더 빠른 수렴성을 갖는 장점을 가지고 있다(Abu-Lebedh and Benekothal, 1999). 따라서 본 기술 기사에서는 기존의 단순유전알고리즘의 몇 가지 단점들을 극복한 마이크로 유전알고리즘에 대하여 설명하고 이를 적용하여 한정된 변위 계측 데이터로부터 구조물의 전체의 변위 추정하는 기법을 기술하고자 한다.

2. 역문제와 마이크로 유전알고리즘

모델 기반의 역문제는 Fig. 1과 같이 계측된 데이터와 수치해석 모델에서 추출한 응답과의 비교를 통하여 에러를 최소화시키는 과정으로 요약할 수 있다. 이러한 역문제를 해결하는 기법은 다양하게 적용되어 왔으나, 복잡하고 해석이 난해한 구조물의 경우는 기존의 고전적 역해석 알고리즘은 국지해로 빠지거나 효율성이 떨어지는 경우가 빈번하다. 특히 동적 자료를 이용하여 알고리즘을 실행하는 경우 컴퓨터 계산 시간이 매우 길어 고전적 역해석 기법으로는 효과적인 변위 추정이 어렵게 된다.

본 기사에서 기술하고자 하는 유전 알고리즘은 자연선택과 유전학에서 발견된 몇몇 중요한 특징과 컴퓨터 알고리즘을 접목한 확률적 탐색도구로서 Holland(1975, 1991)에 의하여 처음 개발된 후 다양한 개발연구가 진행되었다. 유전 알고리즘은 기존의 알고리즘들이 해결하기 어려웠던 복잡한 문제를 성공적으로 해결할 수 있으며 근래에는 다양한 공학문제에 응용되고 있다. 다양한 분야에서 여러 형태의 유전알고리즘이 개발되었으나 재생산을 알고리즘으로 구현하는 룰렛 휠선택(Roulette wheel selection) 기법은 수치적 효율성을 좌우하는 요인이 되고 있다. 따라서 본 기사에서는 한번 실행하는데 많은 시간이 걸리는 여러 가

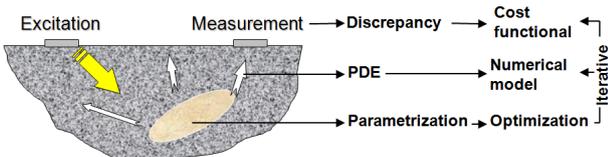


Fig. 1 모델기반 역문제 기본 개념

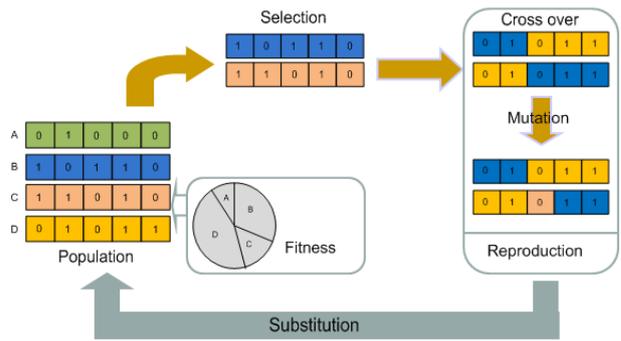


Fig. 2 유전알고리즘의 기본 원리

지 역문제를 유전알고리즘으로 접근하는 경우 초기 집단 (Initial population)의 크기 및 선택을 최적화 할 수 있는 개선된 마이크로 유전알고리즘(Microgenetic algorithm)을 설명하고자 한다. 이 방법은 기존의 단순 유전알고리즘(Simple genetic algorithm)에 비하여 매우 작은 집단을 취급함으로써 기존의 단순 유전알고리즘의 단점으로 알려진 수치계산 속도를 크게 향상시켰다(Krishnakumar, 1989; Carroll, 1996).

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. 마이크로유전 알고리즘의 일반적인 상세 과정에 관한 설명은 참고문헌으로 대체하여 생략하기로 한다(Goldberg, 1989).

마이크로유전 알고리즘은 변위 추정과 같은 역문제를 해결하기 위한 solver로서 핵심적인 도구라고 할 수 있다. 그러나 현실적인 구조물은 계측 데이터에 노이즈와 같은 불필요하면서 불확실한 정보를 포함하게 된다. 이러한 노이즈는 최적화된 필터링 기법을 통하여 사전에 제거하여, 역해석의 정확도를 높여야 한다. Fig. 3은 다양한 노이즈 필터링 기법을 도입하여 역문제를 해결해 가는 과정을 보여준다.

3. 변위 추정 알고리즘

제한된 계측 변위를 이용하여 구조물의 전체 거동 형상

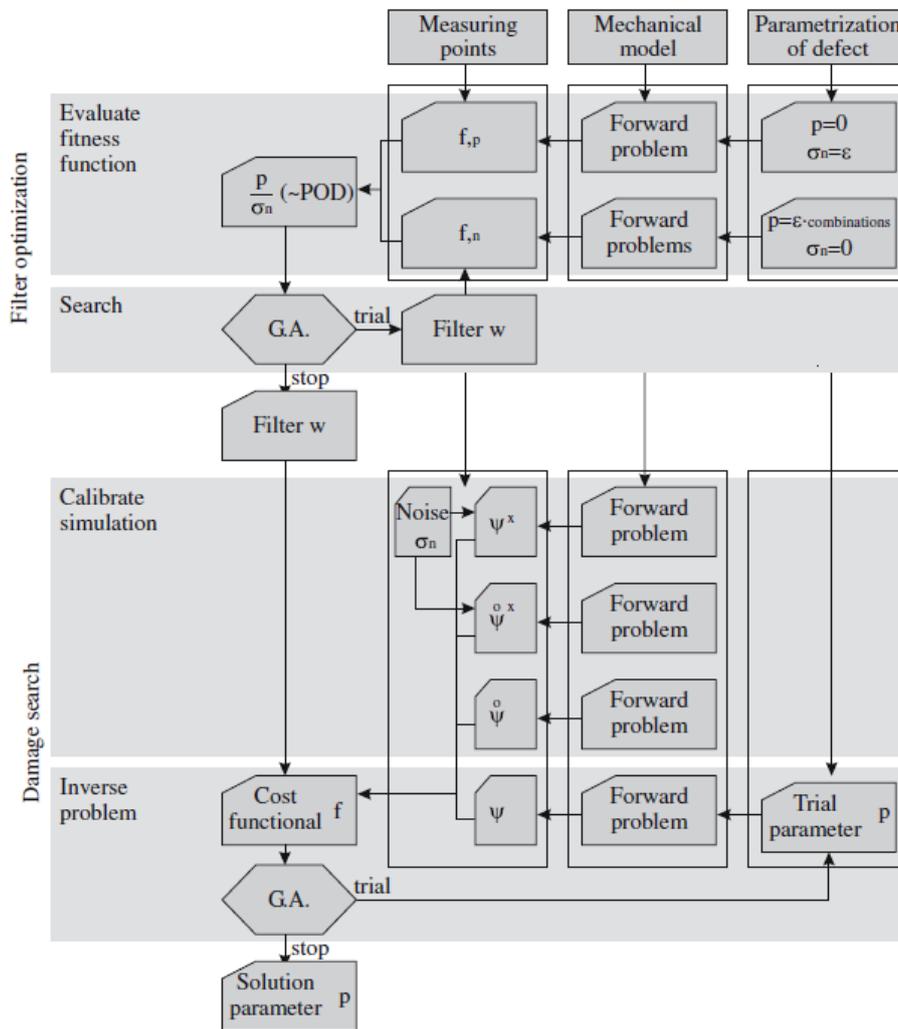


Fig. 3 최적화된 역해석 과정

을 추정하기 위해 유한 요소 상용프로그램을 이용하여 제한된 계측 변위를 통한 전체 구조물 형상 추정을 위한 목표 변형함수(Object Shape Function)을 정립하고 구조물에서 실제 계측된 변위가 목표 변형함수와 동일한 변위를 나타내거나 변위 오차를 최소화 시키는 일반화된 좌표를 구해 미지의 계측 노드까지도 변형 형상을 추정하는 방법을 적용할 수 있다. 제한된 계측 변위를 통한 전체 구조물 형상 추정을 위한 목표 형상 함수는 다음과 같이 정의할 수 있다 (최준호 등, 2013).

$$\begin{aligned} \bar{u}(x) &= \alpha_1\Phi_1 + \alpha_2\Phi_2 + \alpha_3\Phi_3 + \dots + \alpha_n\Phi_n \quad (1) \\ &= \sum_{i=1}^n \alpha_i\Phi_i \end{aligned}$$

여기서, \bar{u} 는 목표 형상 함수, α_i 는 기저 형상 함수 가중치-일반화된 좌표, Φ_i 는 기저 형상 함수, 그리고 n 은 고려된 기저 형상 함수 개수를 각각 의미한다.

마이크로 유전알고리즘을 적용한 변위 추정은 기존의 최소자승법 등의 고전적 방법에 비하여 편미분 등의 과정이 필요없어 간편하고, 정확성 또한 개선할 수 있다. 또한, 변위벡터와 가중치를 동시에 미지 변수로 두고 추정하는 기법을 사용하면 매우 빠른 수렴성을 보이게 된다. 기본 알고리즘은 다음과 같다.

$$f_i = k_i \cdot x_i \quad (2)$$

여기서, f_i 는 i 번째 절점의 기저(측정) 또는 추정 변위 벡터이며, 식 (1)에서 \bar{u} 에 해당하며, k_i 는 기저형상함수

```

Subroutine func(j,funcval,parent,iparent)
USE conrl
implicit none
REAL(8) :: parent(nparmax,indmax)
INTEGER :: iparent(nohrmax,indmax)
REAL(8) :: funcvalff(7),pi,f1,f2,x1,x2
INTEGER :: j,nvalley,i,jjj,iiii
REAL(8) :: DDS,tt,dtt,pp,dis(3),force(7),stiff(7,5),funcvalk,funcval,xxxx(2)

funcval=1.0d0

do i=1,2
  xxxx(i)=parent(i,j) ! Unknown displacements
enddo

do i=3,5
  dis(i-2)=parent(i,j) ! Unknown weghit vectors
enddo

dtt=0.01

OPEN (UNIT=27, FILE='stiff.dat', STATUS='OLD')
REWIND (27)
DO I=1,7
  READ (27,*) (stiff(I,jjj),jjj=1,3) ! Read the base shape function data
ENDDO

force(1)=-5.63e-4 ! Insert the known(measuring) displacement
force(2)=-0.00063133 ! Insert the known(measuring) displacement
force(3)=xxxx(1) ! Unknown(determining) displacement
force(4)=0.001242 ! Insert the known(measuring) displacement
force(5)=-2.32E-03 ! Insert the known(measuring) displacement
force(6)=xxxx(2) ! Unknown(determining) displacement
force(7)=1.02e-3 ! Insert the known(measuring) displacement
    
```

Fig. 4 변위와 가중치의 미지수 함수 지정 프로그램 Subroutine

벡터 (ϕ_i)에 해당한다. 또한, x_i 는 미지의 추정하는 가중치벡터 (α_i)에 해당한다. 마이크로 유전알고리즘에서는 다음과 같은 목적함수(Ψ)를 사용하여 변위벡터와 가중치를 동시에 추정하도록 하는 것이 가능하다.

$$\Psi = \left[\bar{f}_i - \sum_{i=1}^n k_i \cdot x_i \right]^2, \quad \Psi^* = \min\{\Psi\} \quad (3)$$

Fig. 4는 식 (2)~(3)을 Fortran 언어를 사용하여 마이크로 유전알고리즘과 연동하여 변위와 가중치를 동시에 추정하는 프로그램 code를 보여준다.

4. 수치 해석 예제

전술한 마이크로 유전알고리즘의 적용성을 검증하고자 트러스 구조물 모델에 대하여 제한된 변위 계측치로부터 전체 구조물의 변위를 추정하는 예제를 도시하였다. 마이크로 유전알고리즘은 (1) 미지의 변위벡터, (2) 미지의 가중치벡터, 그리고 (3) 두 변수의 동시 추정의 3가지 목적을 실현하고자 실행되었다. 수치해석은 집중하중이 재하된 트러스 구조를 대상으로 하였다. 여기서 전향문제 (Forward problem)을 해결하기 위하여 사전에 정확한 하중 정보를 입력하지 않아도 된다는 점에 주목해야 한다. 그 이유는 차량이 불규칙적으로 상시 통과하는 교량 구조물의 경우는 이동하중의 정확한 값을 알 수 없는 경우가 대부분이기 때문이다. 사전 정보가 없는 경우는 유한요소법에 기반한 기

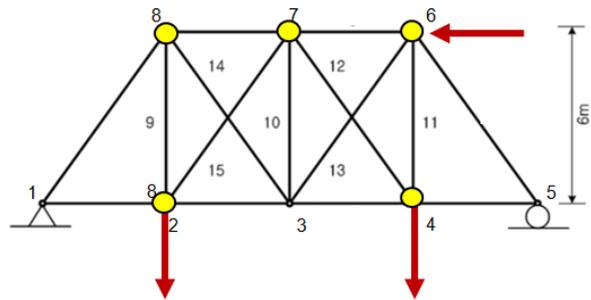


Fig. 5 해석 대상 수치 모델

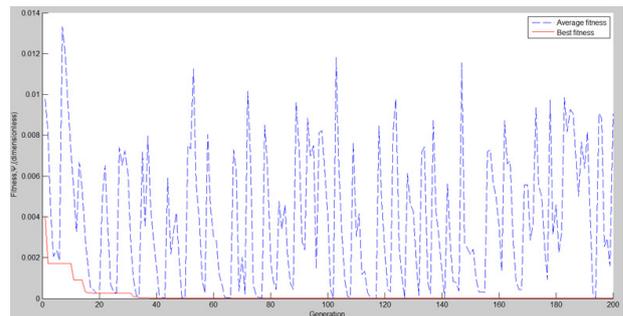


Fig. 6 세대별 최적함수의 평균값 및 최적값 변화

저 형상함수에 의해서 입력값을 도출 할 수 있다. Fig. 4는 해석대상 모델을 보여준다. 그림에서 절점 2, 4, 6, 7, 8에서 변위를 계측하였다. 본 예제에서는 미지의 3,4,5,7에서의 변위를 추정하게 된다. 트러스 구조는 2방향으로의 하중이 작용하고 여러 부재가 연결되어 있고 미소한 변위 발생을 보이고 있어 미지 변위 추정에 불리한 경우이다. 사전 테스트 결과 최소자승법을 적용한 경우 결과 추정이 오류가 크음을 알 수 있었다. 따라서, 마이크로 유전알고리즘을 적용하여 추정 에러를 개선하고자 하였다. 마이크로 유전알고리즘은 비교적 적은 200세대까지 실행하였으며, Fig. 6은 세대가 증가됨에 따른 최적함수(Ψ)의 평균값 및 최적값을 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이, 최적 함수값은 이미 약 40세대 이후부터 0에 가까워지고 있음을 관찰할 수 있다. 이는 계측치와 추정치의 오차가 최소화되어 최적의 상태가 되었음을 의미한다.

Fig. 7은 마이크로 유전알고리즘(M-GA)과 기존의 최소자승법 (LS-method)에 의한 미지 변위 추정 결과를 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 마이크로 유전알고리즘에 의한 변위 추정에 대한 결과의 오차가 기존 방법보다 크게 개선되었음을 알 수 있다. Table 1은 동일한 경우에 대하여 측정치와 추정치를 비교한 것이다. Fig. 8 및 Table 2는 절점 4와 7에서의 변위 추정을 각각 비교한 것

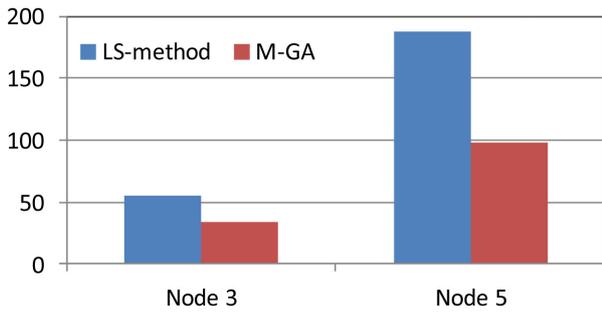


Fig. 7 3, 5 절점에서의 변위 추정 비교

Table 1 LS-Method와 M-GA의 오차 비교 (절점 3, 5)

절점	측정치 (mm)	LS-method		M-GA	
		추정치 (m)	Error (%)	추정치 (m)	Error (%)
3	-0.00063	-0.00028	55.5556	-0.00041	34.1269
5	0.001242	-0.00109	187.761	0.000024	98.6796

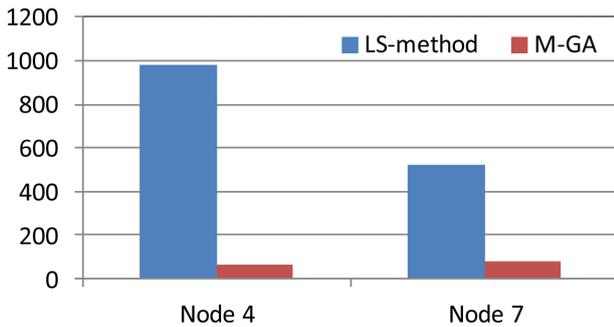


Fig. 8 4, 7 절점에서의 변위 추정 비교

Table 2 LS-Method와 M-GA의 오차 비교 (절점 4, 7)

절점	측정치 (mm)	LS-method		M-GA	
		추정치 (m)	Error (%)	추정치 (m)	Error (%)
4	-0.00007	0.000615	978.5714	-0.000024	65.71429
7	-0.00013	-0.00081	523.0769	-0.000024	81.53846

이다. 절점 4와 7의 경우는 마이크로 유전알고리즘에 의한 결과가 기존 결과보다 더욱 크게 개선되었음을 관찰할 수 있다. 마이크로 유전알고리즘의 경우 본 예제에서는 200 세대까지만 실행하여 미지 변위를 추정하였으나, 세대 수를 증가시키고 목적함수를 최적화한다면 변위 추정의 정확도는 더욱 높일 수 있다.

5. 결론

본 기사에서는 마이크로 유전알고리즘을 이용한 역 기법을 적용하여 몇 가지 계측된 변위 데이터를 활용하여 미지의 변위를 추정할 수 있는 기법을 기술하였다. 본 기사에서 소개한 역해석 기법인 마이크로 유전알고리즘은 기존의 단순 유전알고리즘에 비하여 수치적으로 매우 효율적이며, 구조물의 변위 추정에 효과적인 방법임을 알 수 있었다. 본 기사에서 기술한 방법의 효율성 여부는 변위의 정확한 계측을 전제로 한다. 따라서 변위 계측기술이 발전할 수록 이와 같은 추정알고리즘의 실용적은 적용 범위는 더욱 확대될 것으로 기대된다. 따라서 보다 복잡한 실제 교량 구조물과 같은 경우에 대하여 보다 빠르고 정확하게 수렴할 수 있는 알고리즘의 보완이 필요하다. 또한, 계측시스템과 연동하여 실제 구조물 현장에 적용하여 제안한 기법의 개념을 검증하도록 해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신 연구개발사업의 연구비지원(과제번호 10기술혁신 E05)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 이상열 (2005), 마이크로 유전알고리즘을 이용한 자유진동 박판구조물의 비파괴 손상 규명, 한국강구조학회논문집, 제17권, 제2호, pp.173-181.
- 최준호, 김승준, 한승룡, 강영종 (2013), 한정된 계측 변위를 이용한 구조물 변형 형상 추정, 대한토목학회논문집, 제33권, 제4호, pp.1295-1302.
- 이상열, 노명현 (2010), 불완전 동적 데이터로부터 복합소재로 보강된 교량의 함수기반 역해석에 의한 성능 평가, 한국복합신소재구조학회논문집, 제1권, 제2호, pp.51-58.
- 한국건설기술연구원 (2003), 노후 교량의 성능향상 기술 개발, 연구보고서, 건설기술연구원 2005-087.
- 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.
- Bathe, K. J. (1996), The finite element procedures in engineering analysis, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, pp.768-785.
- Carroll, D. L. (1996), Chemical laser modeling with genetic algorithms, AIAA J., Vol.34(2), pp.338-346.
- Doebbling, S. W., Farrar, C. R. and Prime, M. B. (1998), A summary review of vibration-based damage identification methods, Shock Vibration and Digest, Vol.30, pp.91-105.
- 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.
10. Goldberg, D. E. (1989), Sizing populations for serial and parallel genetic algorithms, *Proc., 3rd Conference. Genetic Algorithm*, Fairfax, VA, Vol.5, pp.29-37.
 11. 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.
 12. 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.
 13. 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.
 14. MIDAS. (2006), Civil analysis reference manual, civil (v7.12 Release No.1), Midas Information Technology, Livonia, Mich.
 15. 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.
 16. 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.
 17. 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.
 18. Suh, M. W., Shim, M. B. and Kim, M. Y. (2000), Crack identification using hybrid neuro-genetic technique, *Journal of Sound Vibration*, Vol.238(4), pp.617-635.
 19. Yang, J. C. S., Tsai, T., Pavlin, V., Chen, J. and Tsai, W. H. (1985), Structural damage detection by the system identification technique, *Shock and Vibration*, Vol.55, pp.57-68.

담당 편집위원: 박규식
(포스코 수석연구원)
kyusik.park@posco.com