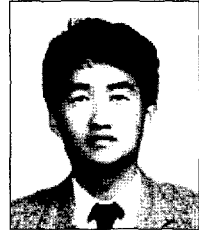


유전적 알고리즘 적용을 통한 선박설계 기술 향상

Improvement of Ship Design Technology by the Application of Genetic Algorithm



이 제 명*



김 수 영**

*부산대학교 조선해양공학과 조교수
**부산대학교 조선해양공학과 교수

1. 서 언

진화적 알고리즘(Evolutionary algorithm)은 원래 생물학전 진화과정을 모사하기 위해 개발된 방법으로, Genetic algorithm 그리고 Genetic programming으로 구분될 수 있다.

Genetic Programming은 1990년 MIT대학의 Koza에 의해 시작된 진화적 알고리즘의 하나로서 자연계의 진화과정을 Computer상에서 Simulation함으로써 실세계의 문제를 해결하고자 하는 계산 모형이다. GP의 기본 특성은 어떤 입력을 가지고 원하는 출력을 낼 수 있도록 하는 진화적 접근을 이용한 Program의 발전이라 할 수 있다.

GP는 자연선택(natural selection)과 돌연변이(natural genetics)의 메카니즘에 기초한 검색 알고리즘으로, 유전적 알고리즘(Genetic Algorithm)의 일종이다. GP와 GA는 모두 fitness의 복제에 기초한 개체의 Population을 진화시키고, Population내의 새로운 요소의 도입에 대한 주요한 연산자로서 교차를 적용하고 있다. 기본적 차이점은 진화 과정에 있어서 사용하는 구조의 종류이다. GA가 고정된 2진 string에 작용하는 반면에, GP는 function과 terminal로 구성되는 다양한 크기와 형상을 가지는 tree 구조에 의해 수행된다.

개체의 tree구조는 LISP의 S-expression의 형태로

program의 parse tree를 표현한다. 해의 차원과 구조는 머리 정해지지 않으며, 개체에 고정된 길이의 제약을 주어 탐색 공간을 감소시킨다. 이 표현법의 장점은 Computer program의 구조를 잘 반영한다는 점이다. LISP는 리스프 처리언어라고도 부르며, 미국 매사추세츠공과대학(MIT)의 매카시(J. McCarthy)교수 연구팀이 개발하여 1960년에 발표했다. 리스트(자료구조의 하나로 순서가 매겨진 0개 이상의 원소들의 집합)형태로 된 데이터를 처리하도록 설계되었는데, 데이터와 프로그램이 모두 S-식(S-expression)이라고 하는 일반화된 리스트형태로 기술되므로 프로그램이 데이터처럼 취급되는 것이 특징이다.

즉, 프로그램과 자료가 같은 형태이기 때문에 자료구조가 프로그램처럼 시행될 수 있으며, 프로그램이 자료처럼 연산될 수도 있고, 기본 자료구조가 연결리스트를 사용하여 일반적인 연산을 수행하기도 한다. 또한 다른 프로그래밍언어와 달리 특수한 표기법을 필요로 하지 않는다. 따라서 여러 개의 명제를 모아서 하나의 지식데이터를 형성하고, 필요한 지식을 찾아서 사용하는 일에 알맞게 설계된 비수치형 연산에 적합한 언어라고 할 수 있다. 일련의 지식들을 규칙적으로 모아서 사용하는 인공지능 분야에 많이 사용하며, 식의 전개, 인수분해를 비롯해 미적분, 정리 증명, 게임 문제, 자연어 처리 등에 적합하다.

본고에서는 유전적 알고리즘의 선박설계에의 적용 예에

관한 소개를 위해, 다수 보고되고 있는 유전적 알고리즘 채용 성공사례 중에서 선형설계 개선과 강도해석 성능개선에 대해 기술한다.

2. B-Spline Form Parameter 방법의 성능개선

선박의 설계를 위한 가장 기초적인 단계는 선주의 요구에 맞는 성능을 갖춘 선형의 생성이라고 볼 수 있다. 이미 건조한 경험이 있는 경우는 기존 선형을 바탕으로 변경 혹은 추가를 통해 선형결정이 이루어지지만, 유사 실적선이 없는 신형선의 경우는 원하는 선형을 얻을 때 까지 반복적인 작업을 통해 선형 결정이 이루어지며, 신형선 선형 생성방법은 자유형상 정의, form parameter 방법 등이 있다. 자유형상 정의 방법은 설계조건을 만족하는 선형을 생성하기까지 많은 반복과정을 필요로 한다. 반면, form parameter 방법은 선형의 기하학적인 조건이 되는 배수량, 부심, 부면심, 면적 등을 바탕으로 초기 선형을 직접 생성할 수 있으므로 신형선의 설계에 적합하다고 알려져 있다. 하지만 순정도(Fairness)의 보장과 선수미 형상 결정, 그리고 form parameter유용영역의 제한 등에 어려움도 지적되고 있다.^{1)~3)} 최근 이러한 단점의 극복을 위해 form parameter 방법에 의한 선형 생성을 최적화 과정으로 생각하고, 설계변수를 조정점, 제한조건은 형상조건, 목적함수는 순정도를 치환한 유전적 알고리즘 기반 선형생성기술이 시도되고 있다.

본 장에서는 유전적 알고리즘을 채용한 form parameter 방법의 개선을 통해 선형생성기술의 성능개선에 관한 내용을 소개한다.

2.1 기존의 연구 동향

Creutz는 14개의 form parameter를 사용하여 7개의 조정점을 가지는 평면 3차 B-spline 방법을 제시하였다.⁴⁾ 사용된 form parameter는 곡선 양 끝의 위치, 1, 2차 미분값, 곡선과 축으로 둘러싸인 부분의 면적과 면적 1차 모멘트이다.

Nowaki등은 2차 파라메트릭 기준인 E2를 사용하여 Bezier곡선의 미결정 조정점을 도출하였다.⁶⁾

Harries는 E2에 의한 B-spline조정점을 도출하는 방법을 제안하였다. Harries는 B-spline form parameter방법을 이용한 곡선 설계 문제를 최적화 과정으로 취급하였다.⁸⁾

하지만 Harries가 제안한 방법은 국부 해에 빠질 가능성이 존재한다. 본 연구에서는 전역해의 탐색을 용이하게

하도록 최적화에 GA(Genetic Algorithm)를 사용하였다. 그리고 본 연구에서 GA를 통한 결과 값보다 더 우수한 해를 구하기 위해서 다음절에서 소개되는 최적성 기준과 GA를 함께 사용하여 곡선을 생성한다.

2.2 곡선 설계최적화 문제의 정식화 및 목적 함수

본 연구에서는 B-spline form parameter방법을 이용한 곡선 설계 문제를 최적화 과정으로 취급한다. 설계 변수는 선형을 결정하는 조정점들이고, 목적함수로는 순정도 기준을 사용한다. 제약조건은 설계자에 의해 주어지는 form parameter들을 등호 제약조건으로 사용하였다. 기존의 B-spline form parameter 방법은 form parameter들을 조합하여 직접적으로 곡선식을 결정한다. 본 연구에서는 곡선의 순정도를 평가하는 함수를 도입하고 이를 선형생성을 위한 최적화의 기준으로 삼는다. 식 (1)은 n차 곡선의 순정도를 평가하는 식이다.⁵⁾

$$F = sS + e_1E_1 + e_2E_2 + e_3E_3 + \dots + e_nE_n \quad (1)$$

여기서, S는 곡선의 길이이고, E_n은 순정도 기준(fairness criteria)이며, e₁, e₂, e₃, s는 순정도 기준과 곡선 길이의 가중치 계수이다. 매개변수 t에 의해 표현되는 곡선의 S와 E_n은 식 (2)와 식(3)으로 주어진다.

$$E_n = \int_{t_a}^{t_b} \left\{ \left(\frac{d^n x}{dt^n} \right)^2 + \left(\frac{d^n y}{dt^n} \right)^2 \right\} dt \quad (2)$$

$$S = \int_{t_a}^{t_b} \sqrt{\left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy}{dt} \right)^2} dt \quad (3)$$

E₂만을 사용하여도 순정도가 보장되므로 본 연구에서는 E₂와 S만을 사용한 (4)식을 목적함수로 사용한다.

$$F = e_2E_2 + sS \quad (4)$$

2.3 설계변수와 제약조건

선형 표현을 위한 조정점이 8개이고, order가 4인 Open Uniform B-spline curve를 사용할 경우, 선형 생성을 위한 제약조건으로 사용되는 form parameter들은 곡선 양단의 위치, 양단에서 1차 및 2차 미분 값, x축과 y축 사이의 면적, 면적의 x축과 y축에 대한 도심으로 정의된다. 결국 선형을 표현하는 B-spline의 8개의 조정점은 설계변수

로 취급하여 목적함수와 제약조건을 만족하는 최적화 과정을 통해서 결정된다. 제약조건은 생성되는 곡선이 주어지는 form parameter를 정확하게 만족하기 위해 Table 1의 등호제약조건을 사용하였다.

Table 1 Equality constraints

		Equality constraint
h_1	x_B	$x_0 - x_{B_{given}} = 0$
h_2	y_B	$y_0 - y_{B_{given}} = 0$
h_3	x_E	$x_7 - x_{E_{given}} = 0$
h_4	y_E	$y_7 - y_{E_{given}} = 0$
h_5	α_B	$\alpha_{B_{actual}} - \alpha_{B_{given}} = 0$
h_6	α_E	$\alpha_{E_{actual}} - \alpha_{E_{given}} = 0$
h_7	C_{AB}	$C_{AB_{actual}} - C_{AB_{given}} = 0$
h_8	C_{AE}	$C_{AE_{actual}} - C_{AE_{given}} = 0$
h_9	Area	$A_{actual} - A_{given} = 0$
h_{10}	x_C	$M_{y_{actual}} - x_{C_{given}} \cdot A_{given} = 0$
h_{11}	y_C	$M_{x_{actual}} - y_{C_{given}} \cdot A_{given} = 0$

Table 2 Form parameter set

		input value	result value
1	x_B	0.0	0.0
2	y_B	0.998204	0.998240
3	x_E	1.0	1.0
4	y_E	0.33031	0.33031
5	α_B	-5.0	-5.0
6	α_E	-85.0	-85.0
7	C_{AB}	-0.5	-0.500872
8	C_{AE}	-1.5	-1.505363
9	Area	0.8103	0.810308
10	x_C	0.4330	0.432774
11	y_C	0.42195	0.421918

2.4 GA와 최적성기준을 이용한 곡선 생성

본 연구에서는 곡선최적화 문제를 다루기 위해 Simple GA를 사용하였다. 탐색체는 16bit의 2진 binary형을 사용하였고 모집단은 크기가 40이고, 교차와 돌연변이 확률은 각각 60%, 1%로 하였다.^{7),9)} GA에서 제약조건을 다루기 위하여 벌점(penalty)함수를 도입하였다. 표 2에서 볼 수 있듯이 GA를 사용하여 얻어진 해는 설계자에 의해 주어진 form parameter값을 거의 만족하지만 정확한 엄밀해(exact solution)는 아니다. 따라서 본 연구에서 GA를 통한 결과 값보다 더 우수한 해를 구하기 위해서 최적성 기준과 GA를 함께 사용하여 곡선을 생성한다. 본 연구에서는 최적성 기준으로 Newton-Raphson방법을 사용하였다.

Fig. 1은 본 연구의 개념적 흐름도를 나타낸다. Form parameter들이 주어지면, GA를 사용하여 생성된 곡선을 초기 해로 설정한다. 그리고 최적성 조건을 사용하여 설계자가 만족할 만한 최적의 곡선이 얻어질 때까지 곡선의 조정점들의 수정을 통하여 반복된다.

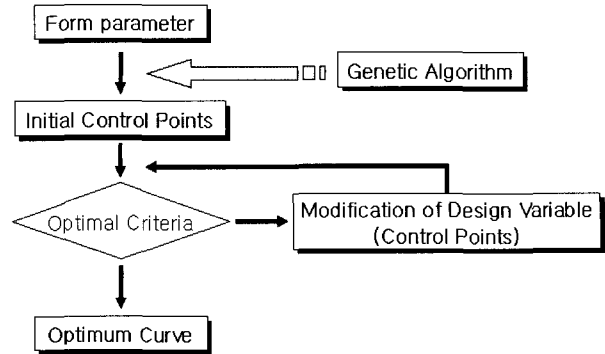


Fig 1. Curve generation algorithm using GA and optimality criteria

Fig. 2는 GA만을 사용하여 생성시킨 곡선과 GA와 최적성 기준을 함께 사용한 곡선을 비교하여 보여준다. 여기서 GA만을 사용하여 생성된 곡선은 초기 해로 취급된다. GA와 최적성 기준을 함께 사용한 결과는 Table 3에서 표현된 수치결과에서 볼 수 있듯이 시작점과 끝점(x_B, y_B, x_E, y_E) 그리고 양 끝점에서의 tangent 벡터의 방향(α_B 와 α_E)에서 GA만을 사용한 경우와 같은 결과를 갖지만, 곡률(C_{AB}, C_{AE})과 면적(Area), 도심(x_C, y_C)에서는 GA 단독으로 사용할 경우보다 더욱 정도 높은 결과 값을 보여준다.

2.5 적용 예

본 연구에서 제시하는 방법의 실용성을 검토하기 위해

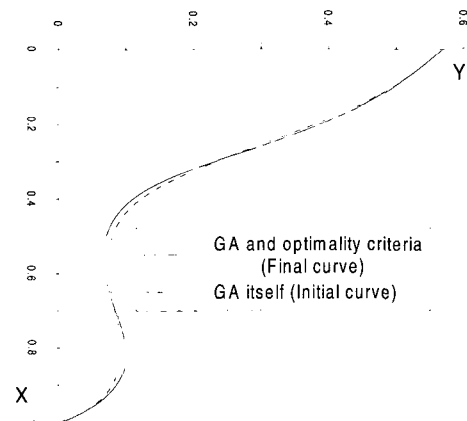


Fig 2. Generated curve using GA and optimality criteria

Table 3 Comparison of two methods

	Form parameter	input value	GA	GA & optimality criteria
1	x_B	0.0	0.0	0.0
2	y_B	0.569026	0.569026	0.569026
3	x_E	1.0	1.0	1.0
4	y_E	0.0	0.0	0.0
5	α_B	-31.0	-31.0	-31.0
6	α_E	-58.0	-58.0	-58.0
7	C_{AB}	-1.5	-1.500425	-1.499957
8	C_{AE}	-4.41	-4.409601	-4.409994
9	Area	0.1925	0.193116	0.1924999
10	x_C	0.28489	0.28488	0.28489
11	y_C	0.16952	0.169334	0.16952

Tornado급 요트의 초기 선형을 본 논문에서 제시한 방법으로 생성해 보았다. 주요제원은 다음과 같다. LWL: 5.9m, Δ : 150kg, LCB: 54% form FP, CP: 0.55 Fig. 4는 본 방법에 의해 생성된 Shaded model이며 Fig. 5는 Basic curve이다. 이와 같은 결과를 통해 본 논문에서 제시하는 방법이 초기선형 설계에 있어서 매우 실용적이며 효과적인 방법임을 알 수 있었다.



Fig 4. Shaded model of yacht

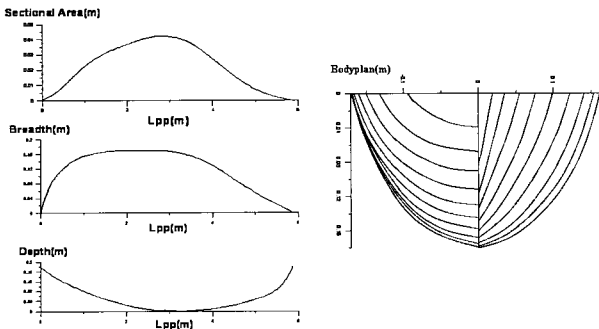


Fig 5. Basic curve of yacht

3. 유전적 프로그래밍을 이용한 강도해석용 구성방정식 최적화

선박, 해양구조물, 항공기 등 과도한 환경이 예상되는 구조물의 설계에는 구조부재에 발생하는 비탄성 거동의 정확한 파악이 필수적이다. 최근 컴퓨터기술의 급격한 발전과 함께 수치전산해석을 위한 구성방정식 개발 및 제안

이 다수 이루어지고 있다.¹⁰⁾ 그러나 구성방정식 자체의 복잡함이나 재료정수 결정의 어려움 등의 이유로 실제 활용되고 있는 예는 흔하지 않다. 따라서 비교적 단시간의 고정도 해석을 위하여 진화적 알고리즘을 이용한 재료정수 결정 등과 같은 선행적 연구가 이루어지고 있다.¹¹⁾ 본 장에서는 이러한 연구동향의 일환으로 강도해석을 위한 유한요소해석용 구성방정식 및 재료정수 결정에 유전적 프로그래밍 기법을 이용한 개선사례를 소개한다.

먼저, 모든 종류의 파손문제의 가장 근본적인 원인이 되는 재료파괴현상을 모델링하는 기술을 비선형 최적화 알고리즘의 하나인 유전적 알고리즘 기법을 이용하여 모델링 한다. 이 기술을 바탕으로 각종 구조물의 강도특성을 평가할 수 있는 일체형 강도평가기법을 개발하여 정밀 재료성능평가 및 구조물 거동특성평가용 기반기술을 개발한다. 개발 기법을 수시로 설계변경이 요구되는 선박 및 해양구조물에 사용되는 강제 혹은 용접부를 대상으로 적용하여 활용가능성을 검토한다.

3.1 재료의 손상모델의 정식화

구조물이 임의의 하중을 받을 때 구조물 내부에서는 변형을 일으키고, 하중에 의한 외력이 어느 한계에 이르면 손상이 발생한다. 이러한 손상의 발생은 구조물변형거동, 피로거동 및 수명을 지배한다고 손상역학에서는 규명하고 있다.¹²⁾

비선형 유한요소해석에 있어서 증분형 요소강성 방정식은 초기변형률법에 의해 다음과 같이 구해진다.¹³⁾

손상발전을 고려한 소성 변형률속도는 다음과 같이 주어진다.

$$\left\{ \dot{\epsilon}^p \right\} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\sigma}^d}{\sigma_{eq}} \quad (5)$$

여기서,

$$\dot{p} = \left(\frac{2}{3} \left\{ \dot{\epsilon}^p \right\}^T \left\{ \dot{\epsilon}^p \right\} \right)^{1/2} = \left(\frac{\sigma_{eq} / (1-D) - R - k}{K} \right)^N \quad (6)$$

$$R = Q_1 p + Q_2 [1 - \exp(-bp)] \quad (7)$$

(7)식 중에서, \dot{p} 는 누적 소성변형률 속도를 나타내며, 6개의 파라미터 K, N, k, Q_1, Q_2, b 는 재료정수이다. 손상의 발전은 다음 식에 의해 표현된다.

$$\dot{D} = \left(-\frac{Y}{S_1} \right)^{s_2} \dot{p} \quad (8)$$

여기서, S_I 및 S_2 는 손상발전에 관계하는 재료정수이며, 손상의 발전에 의해 해방된 변형률에너지밀도에 해당되는 량 Y 는 다음과 같이 정의된다.

$$-Y = \frac{1}{2E(1-D)^2} \left[\frac{2}{3}(1+\nu)\sigma_{eq}^2 + 3(1-2\nu)\sigma_H^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

식 (7)에 의해 계산되는 손상증분에 대해 시간적분을 수행하여 일정수준에 도달하면 재료파괴가 발생한 것으로 평가한다.^{13), 14)}

단축 인장시험에 대하여 손상발전 방정식을 채용한 유한요소 해석을 수행하여 각 재료정수를 결정한다. 기준값으로 사용되는 재료정수의 결정은 Ramberg-Osgood equation 모델에서 유도되어 결정할 수 있다.^{15), 16)}

3.2 유전적 알고리즘기반 최적화기법

강재의 기본적인 기계적 특성치를 입력값으로 내부에 탑재된 유한요소 해석 프로그램에 필요한 각종 해석용 재료상수를 자동추출하는데 다음과 같이 오차를 최소화하기 위해 3가지 기법을 사용한다.

첫째로 기억기반 추론 방법으로 기존의 기데이터를 이용하여 해석용 재료정수를 구한다. 두 번째로 Fig. 6과 같이 기데이터에서 실험적인 수치값을 기계적인 특성치와 해석용 재료정수의 상관관계를 이용하여 상관관계형 추론식을 정의 할 수 있다. 여기에서 강재의 기계적 특성치는 재료 및 구조의 피로, 재료 인장 시험결과 그리고 시뮬레이션 결과를 이용하여 상관 관계형 검증데이터값을 취득하였다. 이는 다양한 금속재료의 데이터 확보 및 분석이 철저히 이루어져야만 기억기반과 상관관계형 추론의 오차

율을 극복할 수 있다는 단점이 있다.

상기 방법은 미경험강재의 대해서 재료정수의 분석 과정에서 기인하는 오차율이 발생할 수 있으므로 이를 극복해야 할 필요성이 있다. 따라서 목적함수는 오차율이 되고 최소함수로 제한해야 한다. 비선형 최적화 방법에 사용되는 전통적인 최적화 방법 중 가장 일반적인 Gradient방법 중에서 최소 강하법은 처음부터 전체 목적 변수 영역을 대상으로 탐색을 시작하며 국부 최적해에 빠져 벗어나지 못할 수도 있다. 그러므로 이러한 국부적인 최적화에서의 위험 부담을 감소시킬 수 있는 방법으로 세 번째의 방법인 유전자 알고리즘 (Genetic Algorithm) 비선형 최적화 기법을 적용하였다.

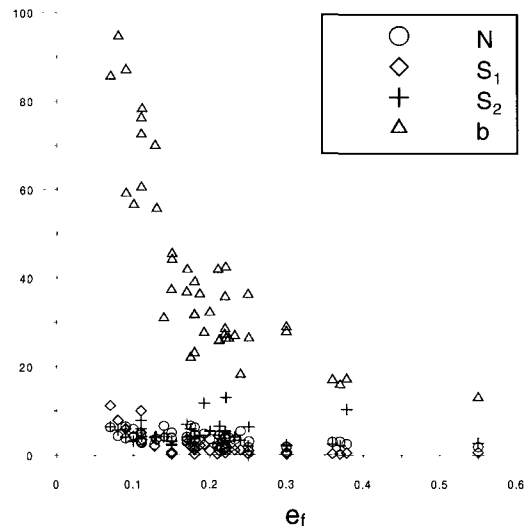


Fig 7. The relationship between fracture elongation and visco-plastic constants, k , Q_1 , Q_2 , K

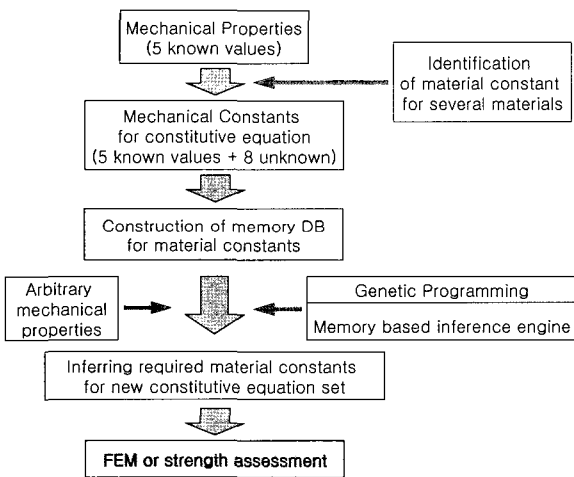


Fig 6. A schematic of genetic algorithm based material constants inferring procedure and its application for strength assessment

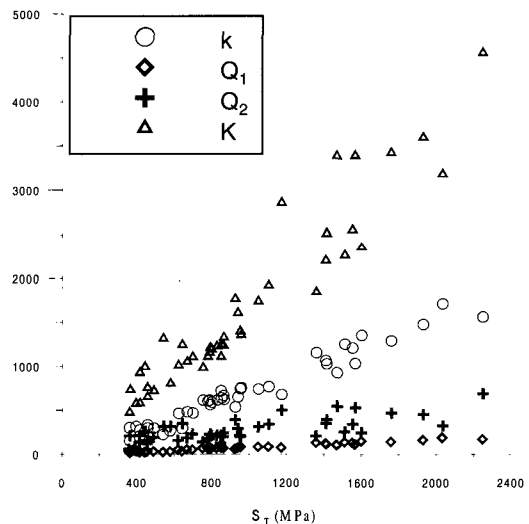


Fig 8. The relationship between ultimate tensile strength and visco-plastic, damage constants, N , b , S_1 , S_2

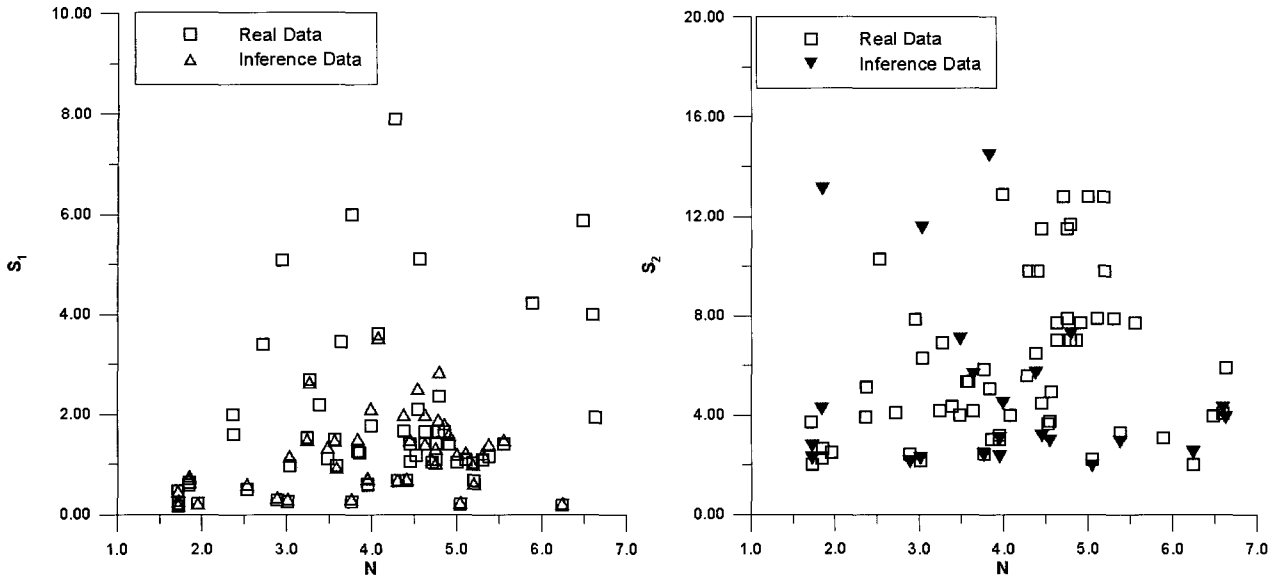


Fig 9. The relation between hardening parameter N and damage related parameter s_1 , s_2

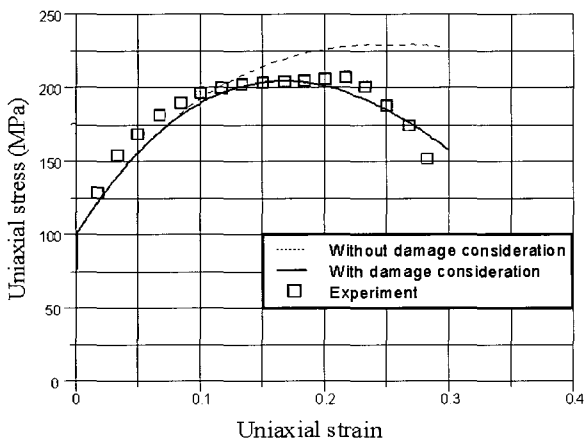


Fig 10. Validation for uni-axial characteristics

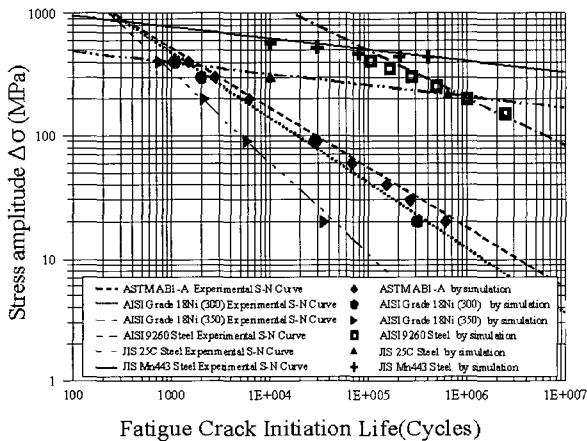


Fig 11. Validation for fatigue characteristics

전술한 바와 같이 상관관계형 및 기억기반 추론으로 각각의 재료정수 관계식을 이용하여, k , Q_1 , Q_2 , KN , b , S_1 , S_2 와 같은 재료정수를 결정한다.

즉, 다양한 강재에 대하여 기계적 특성치와 해석용 재료정수사이의 관계를 정의하는 상관관계식 시스템을 구성하고 이를 이용하여 기억기반형 추론을 위한 데이터베이스를 구축해 둔다. 해석에 필요한 해당 구조물 혹은 재료의 기계적 특성치가 기. 구축되어 있는 데이터베이스의 범위(항복응력, 최대인장응력, 파단변형률 및 상호간의 비율 등)에 속하면 추론엔진을 가동하여 기계적 특성치의 간단한 입력만으로 해석용 재료상수를 추출하게 된다.

반면 신강재 등과 같이 데이터베이스를 벗어나는 재료의 기계적특성치가 입력되면 1차적으로 상기의 추론엔진을 가동하여 최근접 재료상수를 추출한 후 각 재료상수를 입력자료로 삼아 식 (5)~(9)를 채용한 구성방정식을 이용한 시뮬레이션을 수행하고 계산결과와 시뮬레이션 결과와의 오차를 최소화시키는 과정인 최적화과정을 거쳐 새로운 해석용 재료정수를 결정하게 된다.

본 연구에서는 일반적인 주요 용접구조용 강재 50여 종에 대한 데이터베이스를 충실히 구축해 두고 있으며 대부분의 산업구조물인 경우 신강재라 하더라도 2, 3번의 오차수정을 거치면 대부분 원하는 정도의 해석용 입력자료 추출결과를 얻을 수 있었다.¹⁵⁾

Figs. 7~9는 수많은 조합의 형태로 존재하는 재료상수간의 관계 중에서, 기계적 특성치, 즉 재료항복응력 및 최대인장응력과 경화관련 재료정수들의 관계, 경화지수 N과 손상발전방정식용 자료정수 S_1 , S_2 사이의 관계를 대표적으로 나타내고 있다.

Fig. 10 및 11은 단축인장실험결과 및 피로실험결과와 전술한 유전적알고리즘 기반 재료정수 추론엔진 이용 수

치해석 결과를 비교하고 있으며 그림으로부터 확인할 수 있듯이 매우 높은 정도로 실험결과를 예측할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 언

본 고에서는 유전적 알고리즘 적용을 이용한 선박설계 기술 향상을 위해 시도된 몇 가지 연구 중에서 선형생성과 구조강도해석용 재료정수 자동추출 기법 및 적용에 관하여 관련 이론의 간단한 소개를 포함한 실제 적용사례를 정리하였다. 관련 연구내용을 정리하면 다음과 같이 적용의 효과 및 향후 적용 분야를 제안할 수 있다.

- 1) 기존의 방법에서는 곡선 생성을 위한 form parameter 가 고정되었던 것과 달리 본 방법은 설계자가 form parameter를 선택하여 사용할 수 있다.
- 2) 기존의 form parameter 방법과 비교하여 이전에 표현하기 어려웠던 굴곡이 심한 형상이 표현 가능하게 되었다.
- 3) 선형생성에 많은 시간과 비용이 필요한 점을 감안하면, 1), 2)로부터 실질적인 데이터를 사용하지 않더라도 선형선의 초기 설계시의 활용이 가능하다. time-saving, cost-effective 설계지원용 도구로 활용할 수 있다.
- 4) 유한요소해석용 알고리즘 및 소요 재료정수를 동시에 동정하기 위한 유전적 알고리즘 기반 추론기법이 제안되었다.
- 5) 고정도 강도해석에 필요한 해석용 자료정수를 일관된 이론적 근거를 바탕으로 손쉽게 추출할 수 있다.
- 6) 재료 자체의 정밀성능평가가 가능해지므로 해당 재료로 구성되는 구조물의 강도평가에 대한 정량적 신뢰성이 향상되며 위험요소가 예견되는 구조물의 안전성 평가에 유용하게 활용될 수 있는 기반을 구축할 수 있다.

참 고 문 헌

1. 김수영, 강사원, "B-spline 형상계수 방법에 의한 선형 생성", 대한조선학회 논문집 제29권 제1호, 1992
2. 김수영, 김현철 "NRUBS 곡선을 이용한 선형의 수치적 표현", 대한조선학회 논문집 제32권 제1호, 1995
3. 김수영, 강사원 "B-Spline Form Parameter방법에 의

- 한 선형생성", 대한조선학회 proceeding, 1990
4. C. Creutz, "Curve and Surface Design from form parameter by means of B-splines", (In Germany), Doctoral Thesis, University of Berlin, 1977
5. G. Farin, "Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design A Practical Guide", Dept. of Computer Science, Arizona State University, 1977
6. H. Nowacki, M.I.G Bloor, B. Oleksiewicz, "Computational Geometry for ships", World Scientific, London, 1995
7. L. Davis, "Handbook of Genetic Algorithms", Van Nostrand Reinhold, 1991
8. S. Harries, "Parametric Design and Hydrodynamic Optimization of Ship Hull Forms", Mensch & Buch Verlag, Berlin, 1998
9. Z. Michalewicz, "유전자 알고리즘", 도서출판 그린, 1995
10. Dunne, FPE, Hayhurst, DR "Continuum damage based constitutive equations for copper under high temperature creep and cyclic plasticity". Proc. R. Soc. Lond., A Vol.437, No.1901, pp. 567~589, 1992
11. Furukawa, T., Yagawa, G., "Parameter identification of inelastic constitutive equations using an evolutionary algorithm", Proc. of ASME/JSME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP-Vol.305, pp. 347~444
12. Lemaitre, J., Mechanics of Solid Materials, Cambridge University Press, 1990
13. Lee, JM "A study of computational mechanics of thermal damage problem for structural members", Ph.D. Dissertation, University of Tokyo, 1999
14. Lee, JM, Toi, Y "Elasto-Plastic Damage Analysis of Functionally Graded Materials Subjected to Thermal Shock and Thermal Cycle," *JSME Int. J. Ser. A* Vol.45, No.3, pp. 331~338, 2002
15. Lee JM, Paik JK, Kim MH, Toi, Y "Development of Damage Assessment Method for Steel Structures Using Material-Structure Coupling Analysis" Key Engineering Materials. (in press), 2005
16. Mostaghel, N, Byrd RA "Inversion of Ramberg-Osgood equation and description of hysteresis loops," *Int. J. of Non-Linear Mechanics* Vol.37, pp.1319~1335, 2002