

이진코딩 유전알고리즘과 모드해석법을 이용한 선박 추진축계의 직경 최적설계

Optimum Design of Diameters of Marine Propulsion Shafting by Binary-Coded Genetic Algorithm and Modal Analysis Method

최명수 · 문덕홍 · 설종구
Myung-Soo Choi, Deok-Hong Moon and Jong-Ku Seol

Key Words : Optimum Design(최적설계), Genetic Algorithm(유전알고리즘), Modal Analysis Method(모드해석법), Propulsion Shafting(추진축계), Machine Design(기계설계)

Abstract : Genetic algorithm is a optimization technique based on the mechanics of natural selection and natural genetics. Global optimum solution can be obtained efficiently by operations of reproduction, crossover and mutation in genetic algorithm. The authors developed a computer program which can optimize marine propulsion shafting by using binary-coded genetic algorithm and modal analysis method. In order to confirm the effectiveness of the developed computer program, we apply the program to a optimum design problem which is to obtain optimum diameters of intermediate shaft and propeller shaft in marine propulsion shafting. Objective function is to minimize total mass of shafts and constraints are that torsional vibration stresses of shafts in marine propulsion shafting can not exceed the permissible torsional vibration stresses of the ship classification society. The computational results by the program were compared with those of conventional design technique.

1. 서 론

기계, 조선, 항공, 자동차, 토목 등 모든 공학분야 설계자들의 목표는 경제적이면서 최고의 성능을 발휘하는 기계나 구조물을 설계하는 것이다. 그러나 설계자 개인의 지식이나 경험에 의하여 임의로 설계변수를 수정한 후, 설계 조건을 만족하는지 여부를 확인하는 종래의 시행착오적인 설계 방법으로는 우수한 성능의 기계나 구조물을 설계하기가 쉽지 않다. 특히, 다양한 설계변수와 까다로운 제약조건이 존재하는 복잡한 설계 문제에서는 상당한 시간과 노력, 그리고 비용을 허비하고도 제대로 원하는 결과를 찾아내기 어려운 경우도 많다. 이러한 문제점을 효과적으로 해결하기 위하여 다양한 최적화 방법들이 개발·적용되었다^{1),2)}.

1975년 John Holland에 의해 처음 소개된 유전알고리즘(Genetic Algorithm)은 많은 설계변수와 구속조건을 가지는 비선형적인 실제 구조물의 설계에 용이하게 적용할 수 있고, 국부 최적해에 수렴하지 않도록 다양한 해들을 효율적으로 탐색하는 확률론적 탐색기법이다^{3~7)}. 기계분야에서는 현가장치⁸⁾, 축류펌프⁹⁾, 공작기계¹⁰⁾ 등에, 구조분야에서는 트러스 구조물¹¹⁾, 뼈대 구조물¹²⁾ 등의 최적설계에 적용된 바 있다.

본 연구를 통해 저자들은 이진코딩 유전알고리즘과 모드해석법(modal analysis method)¹³⁾을 이용하여 선박 추진축계의 직경을 최적설계할 수 있는 전산 프로그램을 개발하였다. 본 논문에서는 선박 추진축계의 최적설계를 목적으로 유전알고리즘과 모드해석법의 기본개념을 기술한 후, 선박 추진축계의 중간축과 프로펠러축의 직경을 설계변수로 하여 선급의 설계규정을 만족함과 동시에 축의 길이를 최소화하는 최적설계를 수행한다. 그리고 종래의 설계 방법과의 비교를 통해 본 전산 프로그램의 신뢰성 및 유용성을 확인한다.

접수일 : 2003년 2월 14일
 최명수 (책임저자) : 부경대학교 기계공학부,
 E-mail: vibsound@hanmail.net Tel. 051-620-1577
 문덕홍 : 부경대학교 기계공학부
 설종구 : 부경대학교 대학원

2. 유전알고리즘

2.1 유전알고리즘의 기본 개념

유전알고리즘은 생물의 자연진화 과정에서 나타나는 적자생존과 자연도태의 유전법칙을 모방한 확률론적 탐색기법이다.

유전알고리즘의 전반적인 내용은 Fig. 1의 순서도와 같다. 유전알고리즘의 요소로는 설계변수의 표현, 초기 모집단(initial population), 적합도 평가(evaluation of fitness) 그리고 재생산(reproduction), 교배(crossover), 돌연변이(mutation)와 같은 유전 연산자가 있다. 이 요소들에 대하여 간단히 살펴보면 다음과 같다.

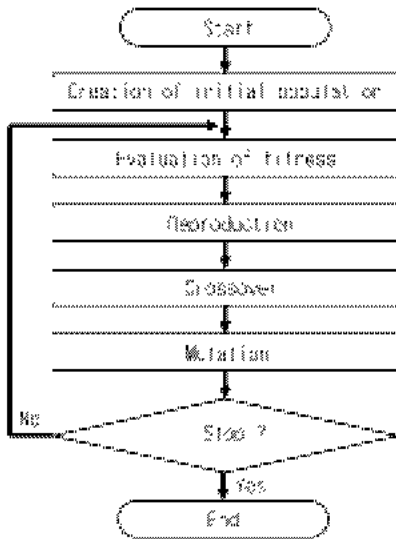


Fig. 1 Flowchart of genetic algorithm

2.2 설계변수의 표현

유전 알고리즘을 이용할 때 가장 먼저 해야 할 일은 설계변수의 유전적 표현방식을 결정하는 것이다. 주로 사용되는 표현방식으로는 이진코딩(binary encoding), 기호코딩(symbolic encoding), 실수코딩(symbolic encoding)이 있다⁶⁾. 이것은 알고리즘의 성능에 큰 영향을 주므로 문제의 특성을 잘 반영할 수 있어야 한다.

그리고 설계변수의 표현 시 염색체의 길이는 요구되는 정밀도를 만족할 수 있도록 설정되어야 한다.

2.3 초기 모집단

유전알고리즘은 개체들로 구성된 모집단을 운영하므로 초기에 모집단이 생성되어야 한다. 초기 모집단을 만드는 방법으로는 단순히 난수발생기에 의해 초기 집

단을 구성하는 무작위 초기화(random initialization) 법과 사전 지식 또는 경험을 기반으로 하는 유도된 초기화(directed initialization)법이 있다⁶⁾.

모집단의 크기는 모집단 내의 개체 수이며, 탐색 성능에 직접적인 영향을 미친다. 크기가 너무 작으면 유전적 다양성을 감소시켜 탐색은 국부해로 수렴할 수 있고, 너무 크면 탐색 성능은 우수하지만 연산시간이 크게 증가하는 문제점이 있으므로 적절한 모집단의 크기를 선정하는 일은 중요하다.

2.4 적합도 평가

자연계에서 주어진 환경에 적응을 잘 하는 생물은 다른 생물에 비해 생존능력이 우수하다. 즉, 자연개체의 생존능력은 환경에 대한 적합도를 반영한다. 유전 알고리즘을 이용한 최적화문제에서는 목적함수를 계산하여 각 세대마다 개체의 적합도를 평가한다.

2.5 재생산

재생산은 적합도에 의해 현 세대의 모집단으로부터 다음 세대에 생존할 우수한 개체를 선택하는 과정이다. 따라서 재생산 연산자는 모집단의 유전적 다양성(genetic diversity)을 유지하고 조기 수렴을 막기 위해 선택압력(적합도가 높은 우수 개체와 열성개체와의 생존확률)을 적절히 조절하여 좋은 해를 효율적으로 탐색하도록 해야 한다.

재생산 방법으로는 선택확률을 백분율에 따라 슬롯 면적에 할당하는 룰렛휠 선택(roulette wheel selection), 가장 우수한 개체부터 순위를 주어 그 순위에 따라 선택확률을 부여하는 순위 기초 선택(ranking-based selection), 두 개 또는 그 이상의 개체들을 비교하여 생존할 개체를 선택하는 토너먼트 선택(tournament selection) 등이 있다^{4~7)}.

2.6 교배

부모의 유전자를 조합하여 자손을 생산하는 교배는 최적화 문제에서 탐색공간 상의 새로운 점을 찾아가는 역할을 한다.

일반적인 교배과정은 임의로 부모 염색체 쌍을 선택하고 교배 확률(crossover probability)을 토대로 교배 유무를 결정한다. 염색체 내에서 임의로 교배점을 선정하여 그 점 이후의 비트들을 서로 교환 결합하고 자손을 생성한다.

교배 방법에는 일점교배(one-point crossover), 이점교배(two-point crossover), 순서교배(order crossover), 순환교배(cycle crossover) 등이 있고, Fig. 2는 일점

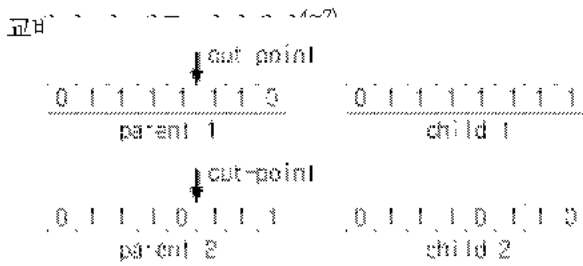


Fig. 2 One-point crossover

2.7 돌연변이

개체에 새로운 유전자가 생성되는 돌연변이는 최적화 과정에서 해공간을 다양하게 탐색하는 역할을 한다.

돌연변이 과정은 순차적으로 모집단 내의 염색체에서 비트 하나를 취하고 돌연변이 확률을 토대로 선택된 비트의 돌연변이 유무를 결정한다. 선택된 비트가 '1'이면 '0'으로, '0'이면 '1'로 변환시켜 돌연변이를 일으킨다.

돌연변이 확률이 너무 작으면, 초기 유전자의 교배 영역을 벗어나지 못하므로 지역해에 수렴해버릴 수 있다. 반면에, 확률이 너무 높게 설정되면 탐색이 한 점에서 다른 점으로 불규칙적으로 이동하여 비효율적인 탐색 결과를 초래한다.

3. 모드해석법에 의한 추진축계의 비틀림진동응력 해석

3.1 모델링

선박의 추진축계를 이산계(discrete system)로 모델링하면, 추진축계는 Fig. 3과 같이 질량극관성모멘트(J)를 갖는 집중원판, 인접한 집중원판 사이의 비틀림강성(K)과 점성감쇠(C), 기초(base)와 집중원판 사이의 점성감쇠(\tilde{C}), 그리고 가진토크(Q)로 모델링할 수 있다.

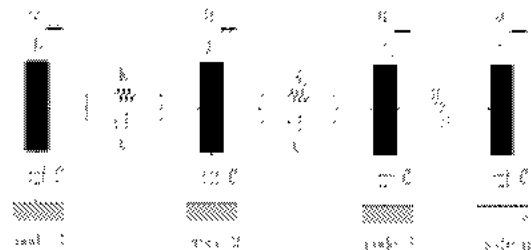


Fig. 3 Modeling of propulsion shafting

3.2 추진축계의 운동방정식

Fig. 3에 나타난 추진축계가 강제진동을 할 때, 추진축계의 운동방정식을 질량행렬(J), 감쇠행렬(C), 강성행렬(K), 외력벡터($Q(t)$) 및 각변위벡터($\theta(t)$)로 나타내면 다음 식이 되고

$$J\ddot{\theta}(t) + C\dot{\theta}(t) + K\theta(t) = Q(t) \quad (1)$$

여기서

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & J_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & J_3 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & J_n \end{bmatrix},$$

$$Q(t) = \begin{bmatrix} Q_1(t) \\ Q_2(t) \\ Q_3(t) \\ \vdots \\ Q_n(t) \end{bmatrix}, \quad \theta(t) = \begin{bmatrix} \theta_1(t) \\ \theta_2(t) \\ \theta_3(t) \\ \vdots \\ \theta_n(t) \end{bmatrix},$$

$$K = \begin{bmatrix} K_1 & -K_1 & 0 & \dots & 0 \\ -K_1 & (K_1+K_2) & -K_2 & \dots & 0 \\ 0 & -K_2 & (K_2+K_3) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & K_n \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} (\tilde{C}_1+C_1) & -C_1 & \dots & 0 \\ -C_1 & (\tilde{C}_2+C_1+C_2) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & (\tilde{C}_n+C_{n-1}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

이고, $\dot{\theta}(t)$ 와 $\ddot{\theta}(t)$ 는 각속도벡터와 각가속도벡터이다. 전개이론에 의하여 각변위벡터는

$$\theta(t) = Xp(t) \quad (3)$$

가 되고, 여기서 고유벡터로 구성되는 진동행렬(modal matrix) X 와 일반좌표 $p(t)$ 는

$$X = [X^{(1)} \ X^{(2)} \ X^{(3)} \ \dots \ X^{(n)}]$$

$$p(t) = [p_1(t) \ p_2(t) \ p_3(t) \ \dots \ p_n(t)]^T \quad (4)$$

이다. 그리고 $X^{(m)} = [\theta_0^{(m)} \ \theta_1^{(m)} \ \theta_2^{(m)} \ \dots \ \theta_n^{(m)}]^T$ 은 m 차 정규진동형이며, 식(5)와 같은 자유진동 운동방정식으로부터 고유치해석을 수행하여 구할 수 있다.

$$J\ddot{\theta}(t) + K\theta(t) = 0 \quad (5)$$

3.3 비틀림진동응력

식(1)의 양변에 X^T 를 곱한 후, 식(3)을 대입하면 다음 식과 같이 정리할 수 있고

$$\tilde{J}\ddot{p}(t) + \tilde{C}\dot{p}(t) + \tilde{K}p(t) = \tilde{Q}(t) \quad (6)$$

여기서

$$\tilde{J} = X^T J X, \quad \tilde{C} = X^T C X, \tag{7}$$

$$\tilde{K} = X^T K X, \quad \tilde{Q}(t) = X^T Q(t)$$

이다. 고유벡터의 직교성에 의해 \tilde{J} 와 \tilde{K} 는 각각 대각행렬이 되고, 축계의 감쇠가 비례감쇠인 경우 \tilde{C} 도 대각행렬이 된다. 따라서 식(6)은 n 개의 비연성 2계 선형 비제차 미분방정식이 된다. 식(6)의 비연성 미분방정식의 해를 각각 구한 후, 식(3)에 대입하면 각 절점의 변위벡터를 구할 수 있다.

비틀림 진동에 의해 축에 걸리는 토크는 축의 강성에 각변위의 차를 곱하면 구할 수 있다. 그리고 축에 걸리는 비틀림진동응력은 축에 작용하는 토크를 극단면계수로 나누면 구할 수 있다. 따라서 i 번째 축에 걸리는 비틀림진동응력은

$$\tau_i = \frac{K_i \Delta\theta_i}{Z_i} \tag{8}$$

이 되고, 여기서 $\Delta\theta_i = \theta_i - \theta_{i-1}$ 이고, Z_i 는 i 번째 축의 극단면계수이다.

4. 수치계산 및 고찰

4.1 계산 모델

Fig. 4는 2행정 7실린더 엔진이 장착된 44,300톤급 컨테이너 선박의 추진축계를 모델링한 개략도이다. 엔진을 포함한 추진축계의 주요 재원은 Table 1과 같다.

4.2 목적함수 및 제약조건

경제성 및 제작의 효율성을 감안하여 추진축계의 설계 시에 허용 범위내에서 축의 크기를 최대한 줄일 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 중간축의 질량과 프로펠러축의 질량의 합을 최소화하도록 목적함수를 설정하였다.

한국선급(KR, Korean Register of Shipping) 규정¹⁴⁾에 의한 본 선박의 중간축의 최소 직경은 0.593m이었고, 프로펠러축의 최소 직경은 0.723m이었다. 따라서 이 값을 하한치로 하고, 직경의 변화 폭을 0.030m로 하여 중간축 직경(d_I)과 프로펠러축 직경(d_P), 즉, 설계변수의 탐색 범위를 다음과 같이 설정하였다.

$$0.593\text{m} \leq d_I \leq 0.623\text{m}$$

$$0.723\text{m} \leq d_P \leq 0.753\text{m}$$

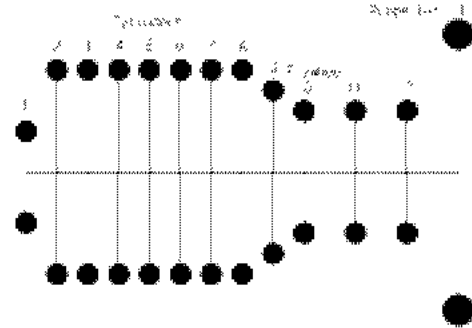


Fig. 4 Computational model

Table 1 Particulars of propulsion shafting

MAIN ENGINE	
Type	two stroke, single acting
Number of cylinder	7
Cylinder bore	0.840 m
Stroke	2.400 m
Max. continuous output	28,350 kW
Max. continuous revolution	102 rpm
Mean indicated pressure	19.1 bar
Firing order	1 6 3 4 5 2 7
Ratio of the connecting rod	0.348
Oscillating mass per cylinder	12,198 kg
Crank journal diameter	0.870 m
Crank pin diameter	0.870 m
SHAFT	
Intermediate shaft length	21.650 m
Propeller shaft length	12.082 m
Tensile strength	588 N/mm ²
PROPELLER	
Type	FPP
Number of blades	5
Diameter	7.860 m
Mass	50,300 kg
Mean Pitch	7.1526 m

설계변수의 표현방식은 이진코딩으로 하였고, 각 설계변수별 탐색체의 길이를 10으로 하였으므로, 총 탐색체의 길이는 20이 된다. 따라서 설계변수의 분해능은 2.9326×10^{-5} m이 된다.

제약조건은 축의 비틀림진동응력이 선급의 제한치를 넘지 않도록 설정하였다. 크랭크축의 비틀림진동응력은 엔진제조사(NSD, New Sulzer Diesel)와 국제선급협회(IACS, International Association Classification

Society)의 제한치인 32.0N/mm^2 을 초과하지 않도록 하였다. 중간축과 프로펠러축의 비틀림진동응력도 연속최대화전수의 105% 범위내에서 선급에 규정된 허용 응력을 초과하지 않도록 제한하였다¹⁴⁾.

4.3 수치계산 및 결과

최적설계 수치계산 시에 설계변수는 이진코딩 표현 방식을 채택하였다. 무작위 초기화법으로 초기모집단을 생성하였고, 룰렛휠 선택을 재생산 방법으로 선정하였다. 교배는 일점교배 방법을 이용하였고, 계산의 효율성을 고려하여 엘리트 전략(elitist strategy)⁶⁾을 도입하였다. 유전알고리즘에 사용된 주요 파라메타들은 Table 2와 같다.

Table 2 Setting of parameters

Population size	20
Maximum Generation	30
Crossover probability	80%
Mutation probability	1%

Fig. 5에는 제약조건을 만족하는 세대별 최우수개체의 질량 값을 나타내었다. 30세대에서 최우수개체의 설계변수 값은 중간축의 직경이 0.60643m, 프로펠러축의 직경이 0.73969m이었고, 이 때 중간축과 프로펠러축의 질량의 총합은 89,845kg이었다.

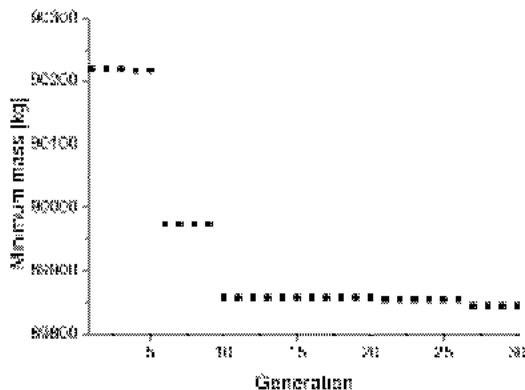


Fig. 5 Minimum mass of each generation

4.4 고찰

중간축의 직경이 0.595, 0.600, 0.605, 0.610, 0.615, 0.620m이고 프로펠러축의 직경이 0.725, 0.730, 0.735, 0.740, 0.745, 0.750m일 때 총 36가지 모든 경우의 수에 대하여 축의 질량과 제약조건의 만족 여부를 계산하였다. Table 3의 ‘-’는 제약조건을 위배하였음을 뜻

하고, 제약조건을 만족한 경우에는 축의 질량 값을 Table 3에 입력하였다. Table 3으로부터 중간축의 직경이 0.605m, 프로펠러축의 직경이 0.745m일 때 제약조건을 만족함과 동시에 축의 질량이 90,201kg으로 가장 작았다. 최적화 알고리즘을 고려하지 않은 기존의 설계 방법에 의한 계산결과인 Table 3와 앞절에서 계산한 최적설계 결과를 비교해 보면, 본 연구에서 개발된 최적설계 프로그램의 유용성을 알 수 있었다.

Table 3 Total mass for diameter design [kg]

$d_I \backslash d_P$	0.725	0.730	0.735	0.740	0.745	0.750
0.595	-	-	-	-	-	-
0.600	-	-	-	-	-	-
0.605	-	-	-	-	90201	90758
0.610	-	-	-	-	-	-
0.615	-	-	-	91276	91829	92386
0.620	90464	91006	91551	92101	92652	93211

Fig. 6은 중간축과 프로펠러축의 직경을 최적화한 추진축계에서, 즉, 중간축의 직경이 0.606m이고, 프로펠러축의 직경이 0.740m일 때, 크랭크축과 중간축 그리고 프로펠러축에서 발생하는 비틀림진동응력을 계산한 결과이다. 최적설계 계산 결과가 선급의 허용 기준을 잘 만족하고 있음을 확인할 수 있었다.

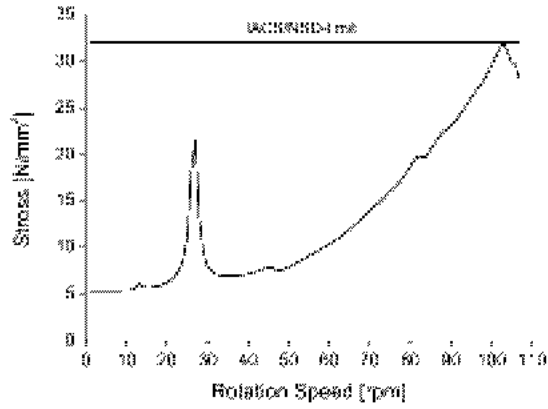
따라서 이진코딩 유전알고리즘과 모드해석법을 이용한 최적설계 전산프로그램을 사용하면 선박 추진축계의 설계를 효과적으로 수행할 수 있음을 알 수 있었다.

5. 결 론

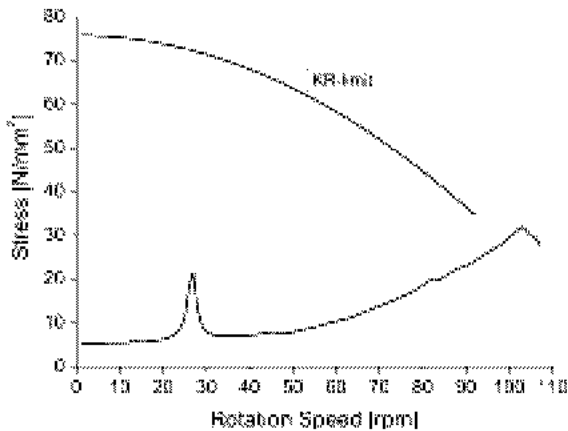
선박 추진축계의 설계시에 경제성 및 제작의 용이성 등을 고려하여 안정한 범위내에서 축의 질량을 최소화하는 일은 대단히 중요하다.

저자들은 이진코딩 유전알고리즘과 모드해석법을 이용하여 선박 추진축계의 직경을 최적설계할 수 있는 전산 프로그램을 개발하였다.

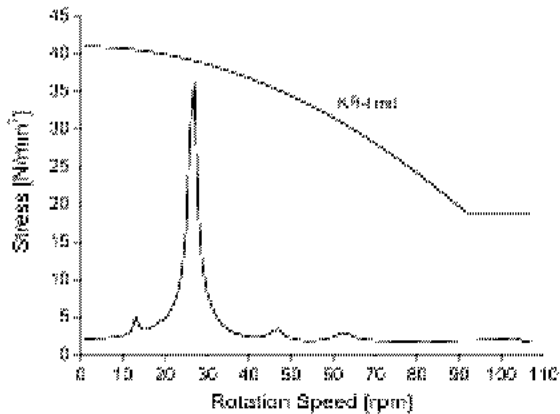
선박 추진축계의 중간축과 프로펠러축의 직경을 설계변수로 하여 선급의 설계규정을 만족함과 동시에 축의 질량을 최소화하는 수치 계산을 수행하였고 종래의 설계 방법과의 비교를 통해 본 전산 프로그램의 신뢰성 및 유용성을 확인하였다.



(a) Crank shaft



(b) Intermediate shaft



(c) Propeller shaft

Fig. 6 Torsional vibration stresses of optimized propulsion shafting

참고 문헌

1. A. D. Belegundu and T. R. Chandrupatla, 1999, "Optimization Concepts and Applications in Engineering", Prentice Hall, New Jersey.

2. S. S. Rao, 1996, "Engineering Optimization", John Wiley & Sons, New York.

3. D. T. Pham and D. Karaboga, 2000, "Intelligent Optimisation Techniques", Springer-Verlag, New York, pp. 51~147.

4. M. Gen, R. Cheng, 1997, "Genetic Algorithms And Engineering Design", John Wiley & Sons, New York.

5. D. E. Goldberg, 1989, "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning", Addison-Wesley, Massachusetts.

6. 진강규, 2000, "유전알고리즘과 그 응용", 교우사, 서울.

7. 김여근, 윤복식, 이상복, 2000, "메타 휴리스틱", 영지문화사, 서울.

8. 이덕희, 김태수, 김재정, 2000, "유전 알고리즘을 이용한 현가장치의 기구학적 최적설계", 한국자동차공학회논문집, 제8권, 제5호, pp. 138~147.

9. 송재욱, 오재민, 정명균, 2002, "유전적 최적화 기법을 이용한 축류 펌프의 설계", 대한기계학회논문집 B권, 제26권, 제6호, pp. 795~804.

10. 박종권, 성활경, 1997, "유전자 알고리즘을 이용한 공작기계 구조물의 정역학적 최적설계", 한국정밀공학회지, 제 14권, 제2호 pp. 66~73.

11. 백운태, 조백희, 성활경, 1996, "유전자 알고리즘을 이용한 트러스 구조물의 최적설계", 한국 CAD/CAM학회 논문집, 제1권, 제3호, pp. 234~241.

12. 정영식, 정석진, 2000, "유전자 알고리즘을 이용한 강 뼈대 구조물의 최적설계", 한국전산공학회논문집, 제13권, 제3호, pp. 337~349.

13. 이강복, 전효중, 남청도, 1985, "모드해석법에 의한 박용디젤기관추진축계의 합성비틀림진동계산에 관한 연구", 한국박용기관학회지, 제9권, 제2호, pp. 159~169.

14. 한국선급, 2003, "선급 및 강선규칙 (제5편 기관장치)", 한국선급, 대전, pp. 19~31.