

이진코딩과 실수코딩이 조합된 유전 알고리즘을 이용한 다단 기어장치의 최적설계

정태형* (한양대), 홍현기+ (한양대 대학원), 이정상++ (한양대 대학원)

Optimum Design of Multi-Stage Gear Drive Using Genetic Algorithm

Mixed Binary and Real Encoding

Tae Hyong Chong*, Hyun Ki Hong+, Joung Sang Lee++

Abstract

In this study, genetic algorithm mixed binary and real encoding is proposed to deal with design variables of various types. And that is applied to optimum design of Multi-stage gear drive. Design of pressure vessel which is mixed discrete and continuous variables is applied to verify reasonableness of proposed genetic algorithm. The proposed genetic algorithm is applied for the gear ratio optimization and the volume minimization of geared motor which is used in field. In result, it shows that the volume has decreased about 8% compared with the existing geared motor.

Key Words : Gear(기어), Optimum Design(최적설계), Genetic algorithm(유전 알고리즘), Multi-Stage Gear Drive(다단 기어장치), integer, discrete and continuous variables (정수, 이산, 연속변수)

1. 서론

기어장치는 대부분의 기계장치에 구동 및 동력 전달용으로 사용되는 필수적인 기계장치이다. 현재까지 기어장치 설계에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 최근에는 다단 기어장치의 설계법⁽¹⁾과 복합 다단기어장치의 메커니즘 생성 및 초기설계⁽²⁾에 관한연구가 진행되어왔다. 하지만 다단 기어장치의 최적설계에 관한 연구는 유전 알고리즘(이하 GA)을 이용한 기어장치의 최적설계⁽³⁾와 다단 기어장치의 계원 및 배치설계⁽⁴⁾에 관한 연구뿐이며, 실제 다단 기어장치의 최적설계에 대한 연구는 미비하다. 또한 이산변수, 정수변수, 연속변수와 같은 설계변수들이 혼재된 기

어장치의 최적설계는 수행되지 않았다. 설계변수가 다양하게 혼재된 설계문제는 기존의 도함수기반의 최적화 방법으로는 해결이 곤란하며, 복잡한 구속조건으로 인하여 최적해가 초기값에 영향을 많이 받는 문제점을 가지고 있다. 따라서 더욱 간편하고 효율적이며 초기값의 영향을 줄이기 위한 방법과 연구의 필요성이 증대되고 있다.

이에 본 논문에서는 이산변수, 정수변수와 연속변수를 더욱 효과적으로 다루기 위하여 GA의 탐색체 코딩법인 이진코딩(binary encoding)법과 실수코딩(real encoding)법이 조합된 GA를 제안하고 자동화 시스템을 구현하였다.

* 주저자, 한양대학교 기계공학과 (thchong@hanyang.ac.kr)
주소: 133-791 서울시 성동구 행당동
+., ++ 한양대 대학원 기계설계학과

2. 이진코딩과 실수코딩이 조합된 GA

2.1 GA의 개요

GA는 생물진화 과정을 단순수리 모델로 치환한 방법으로 Holland(1975)에 의해 제안되었다. GA는 이산최적화 문제의 해를 효과적으로 구할 수 있는 방법으로 Goldberg(1989)에 의해 공학에 적용될 수 있음을 보여 주었다. GA는 설계들의 집합의 크기를 일정하게 유지하면서 각 설계에 해당되는 적합성으로부터 확률적인 규칙 하에서 최적설계하는 반복시행과정이다. GA에서는 일반적인 최적화방법과는 달리 세대와 설계집단을 사용한다. 여기서 세대(Generation)란 한 사이클에서 다른 사이클로 진행되는 반복단계를 말하며, 집단(Population)이란 일정한 크기의 설계집합을 말한다.

본 논문에서는 이산변수와 정수변수의 처리를 위해 GA의 이진코딩법을 사용하였고, 연속변수의 처리를 위해 GA의 실수코딩법을 사용하였다. 즉, 혼재된 설계변수를 효율적으로 처리하기 위하여 이진코딩과 실수코딩이 조합된 GA를 제안하였다.

2.2 조합된 GA의 메커니즘

이진코딩과 실수코딩이 조합된 GA의 메커니즘은 Fig. 1과 같다. 초기에 이진 집단과 실수 집단이 각각 생성된다. 이진 집단은 이산변수와 정수변수의 염색체 길이 합에 의해서 총 염색체 길이가 결정되어지며, 총 염색체 길이 × 집단 수만큼 이진코드가 무작위 법으로 생성된다. 여기서 염색체 길이를 구하는 식은 다음과 같다.

$$\text{정수변수} : 2^\lambda = \text{정수변수의 개수} \quad (1)$$

$$\text{이산변수} : 2^\lambda = \text{이산변수의 개수} \quad (2)$$

여기서 λ 는 염색체 길이이다.

실수 집단은 연속변수의 개수가 염색체의 길이와 같으므로 염색체 길이 × 집단 수만큼 실수가 생성된다.

두 번째 단계는 적합도 함수를 이용하여 이진 집단과 실수 집단의 적합도를 평가하게 된다. 집단 사이의 적합도 값이 상대적으로 너무 크거나 적을 경우 선택(Selection)과정에서 적절한 선택이 불가능하므로 적합도의 정규화가 필요하다.

세 번째 단계는 수렴관계를 판별하는데 본 연구에서는 최대 반복수로 설정하였다. 최대 반복수 이전까지 선택(Selection), 교배(Crossover), 돌연변이(Mutation)가 반복되면서 적합도가 높은 집단으로 수렴해 가고 최적 해가 생성된다.

네 번째 단계에서는 수렴조건을 만족하면 최적해가 생성되고 GA가 종료된다.

2.3 유전 연산자

선택 연산과정은 적합도의 값을 이용하여 계산되어 지므로 이진 집단과 실수 집단 모두 같은 방법으로 수행되어진다. 하지만 이진집단과 실수집단은 서로 다른 코딩 방법을 사용하기 때문에 염색체의 구조는 서로 다르다. 따라서 교배 연산과 돌연변이 연산은 이진 집단에 사용되는 방법이 실수 집단에 적용하기 힘들고 새로운 형태의 연산자가 요구된다.

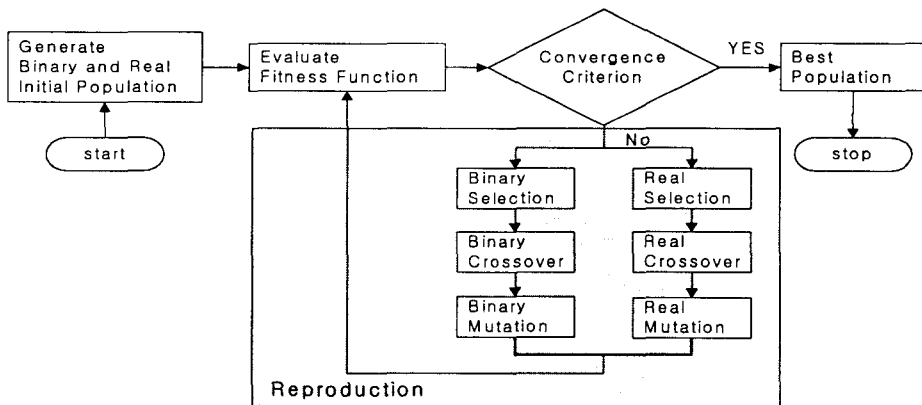


Fig. 1 Mechanism of GA mixed binary and real encoding

2.3.1 선택 연산자

선택 연산자는 적합도 값을 기반으로 현 세대의 집단에서 개체를 선택하여 다음 세대의 개체로 복사하는 방법이다. 선택과정은 집단을 강하게 만들어 주는 특징을 가진다. 즉 약한 개체들을 집단에서 몰아내고 강한 개체를 선택함으로써 이들 유전자들이 다음 세대에 넓게 퍼지게 한다.

본 연구의 선택 연산자는 토너먼트 선택을 사용하였다. 토너먼트선택은 스포츠나 게임에서 자주 접할 수 있는 방식으로서 경쟁적으로 개체를 선택하는 방식이다. 즉 한번의 시도에서 $L \in [2, N]$ (여기서 N 은 집단의 수)개의 개체를 선택하고, 이중 최적의 개체를 골라내어 교배급원에 복제한다. 이 과정은 N 개체가 선택 되어질 때까지 반복된다.

2.3.2 교배 연산자

교배는 탐색 공간에서 가능한 새로운 점을 찾기 위하여 현 집단으로부터 부모(parent)염색체 쌍을 임의로 선택하고, 교배 점 이후의 비트들을 서로 교환 결합함으로써 자손(offspring)을 생성하는 과정이다.

이진코딩을 위한 교배 연산자는 이점 교배(two-point crossover)를 사용하였다. 이점 교배방법은 부모 염색체의 두 교배 점에 의해 절단되어지는 부스트링(substring)을 서로 교환함으로써 자손을 생성하는 방법이다. 교배 점은 염색체 안에서 임의로 선택된다. 이점 교배의 원리는 Fig. 2와 같다.

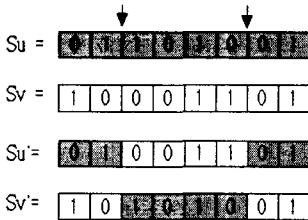


Fig. 2 Two-point crossover

여기서 S_U 와 S_V 는 부모 염색체이고 $S_{U'}$ 와 $S_{V'}$ 는 자손 염색체이다. 화살표는 교배 점을 나타낸다.

실수코딩을 위한 교배 연산자는 산술적 교배(arithmetical crossover)를 사용하였다. 이 연산자는 실수 코딩의 단순교배 시 발생되는 교배지점의 불연속성을 완화시켜줄 수 있는 방법으로 부모염색체 쌍의 일차결합(linear combination)에 의하여 자손을 생성한다. 일차결합에 사용되는 계산식은 식(3),식(4)과 같다.

$$x_j^U = \lambda x_j^V + (1 - \lambda)x_j^{\tilde{V}} \quad (3)$$

$$x_j^V = \lambda x_j^{\tilde{U}} + (1 - \lambda)x_j^{\tilde{V}} \quad (4)$$

여기서 x_j^U 와 x_j^V 는 j 번째 자손 개체이고, $x_j^{\tilde{U}}$ 와 $x_j^{\tilde{V}}$ 는 부모 개체이다. λ 는 곱인수(multiplier)로서 고정되거나 또는 각 요소마다 독립적으로 결정될 수 있는 값이다. 본 연구에서는 0과 1 사이의 난수 값으로 λ 를 결정하였다.

2.3.2 돌연변이 연산자

GA는 초기 강한 개체가 생성되면 지역해(local solution)나 사점(dead corner)에 빠지는 요인이 되는데 돌연변이는 이를 극복하는 메커니즘이다.

이진코딩을 위한 돌연변이는 단순돌연변이(simple mutation)를 사용하였다. 단순돌연변이 방법은 돌연변이 확률을 만족하면 '0'은 '1'로 '1'은 '0'으로 비트를 반전시키는 것이다.

실수코딩을 위한 돌연변이는 동적돌연변이(dynamic mutation)를 사용하였다. 돌연변이 값이 정의 영역의 균등한 값으로 반전되는 균등돌연변이와는 달리 동적돌연변이는 정밀도를 높이기 위하여 미세조정이 가능하도록 불균등한 값으로 반전되는 특징을 가진다. 만약 j 번째 개체에서 돌연변이가 일어난다면 x_j 는 식(5)로 결정된다.

$$x_j = \begin{cases} \tilde{x}_j + \Delta(k, x_j^{(U)} - \tilde{x}_j), & \tau = 0 \\ \tilde{x}_j + \Delta(k, x_j - x_j^{(L)}), & \tau = 1 \end{cases} \quad (5)$$

여기서 \tilde{x}_j 는 돌연변이 되기 전의 개체 값이고, τ 는 0 또는 1 둘 중의 하나를 취하는 난수이다. $x_j^{(U)}$ 와 $x_j^{(L)}$ 는 각각 설계변수 x 의 상한 값과 하한 값이다. $\Delta(k, y)$ 는 식(6)로 나타낼 수 있다. y 는 $x_j^{(U)} - \tilde{x}_j$ 또는 $\tilde{x}_j - x_j^{(L)}$ 이다.

$$\Delta(k, y) = y \cdot \tau \cdot (1 - \frac{k}{T})^b \quad (6)$$

여기서 τ 은 0과 1 사이의 실수 난수이고, T 는 알고리즘이 실행되는 최대 세대수, k 는 현재 세대수이다. b 는 불균등 정도를 나타내는 매개변수로서 사용자에게 의해서 결정되어지는 값이다. 따라서 초기 세대에서는 전 공간을 균등한 확률로 탐색하다가 세대수가 증가하면서 매우 지역적으로 탐색하도록 해주는 특징을 나타낸다.⁽⁶⁾

3. 적용 사례

적용 사례에서는 구조적 설계문제에서 많이 사용되고 있

는 압력용기 최적설계모델을 제시하였으며 이를 기존의 이진코딩 GA, 실수코딩 GA 및 본 연구에서 제안한 이진코딩과 실수코딩이 조합된 GA와 비교를 수행하였다.

본 연구에서 수행하고자하는 압력용기는 fig.3에 제시되었으며 최소 750 feet³의 부피와 3000 psi의 압력에도 견딜 수 있는 압축공기 저장탱크이다.

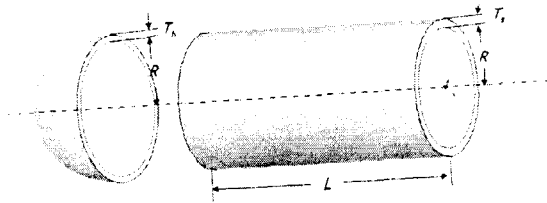


Fig. 3 Structure of pressure vessel

fig.3에 제시된 압력용기의 두께(T_h , T_s)는 이산 값으로 0.0625"의 정수배수(integer multiples)로 규정되어지며, 각각 2"를 넘지 못한다. 또한 T_h 는 1.1"보다 커야 하며 T_s 는 0.6"보다 커야한다. 압력용기의 길이(L)와 반지름(R)은 각각 40"~80", 20"~60" 내에서 설계되어야 한다. 그 밖의 필요한 상수와 변수는 압력용기설계의 설계규정에 따라 미리 정해진다.⁽⁶⁾

계산의 편의 상 설계변수는 식(7)로 나타내어지고, 목적함수와 제약조건은 식(8)~식(14)와 같으며, 주어진 제약하에서 압력용기의 제작에 필요한 총제조비용을 최소화하는 것이 목적이다..

$$\begin{aligned} \text{find } X &= [T_s, T_h, R, L]^T \\ &= [x_1, x_2, x_3, x_4]^T \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{minimize } F(x) &= 0.6224x_1x_3x_4 + 1.7781x_1x_3^2 \\ &+ 3.1661x_1^2x_3 + 19.84x_1^2x_3 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{subject to } G_1(x) = 0.0193x_3 - x_1 \leq 0 \quad (9)$$

$$G_2(x) = 0.00954x_3 - x_2 \leq 0 \quad (10)$$

$$G_3(x) = 750 \times 1728 - \pi x_3^2 x_4 - \frac{4}{3} \pi x_3^3 \leq 0 \quad (11)$$

$$G_4(x) = x_4 - 240 \leq 0 \quad (12)$$

$$G_5(x) = 1.1 - x_1 \leq 0 \quad (13)$$

$$G_6(x) = 0.6 - x_2 \leq 0 \quad (14)$$

이상과 같은 연속, 이산변수가 포함된 구조적 설계문제에

대해 기존의 GA 및 제안된 GA를 적용하였으며 사용된 모수는 Table 1과 같다.

Table 1 Input parameters of genetic algorithm

	Binary encoding	Real encoding	Binary + Real encoding
MAXGEN	2000		
Popsiz	160		
Pc (crossover rate)	0.8	0.8	0.8 / 0.8
Pm (mutation rate)	0.005	0.25	0.005 / 0.25

여기서 MAXGEN은 최대 반복횟수를 나타내며, Popsiz은 집단 수이다. Pc와 Pm은 각각 교배확률과 돌연변이 확률이다. 돌연변이 확률은 이진코딩방법과 실수코딩방법의 연산방법이 다르기 때문에 실수코딩의 값을 크게 적용하였다. Table 2는 비교한 결과를 나타내며 수렴과정은 fig. 4와 같다.

Table 2 Comparison of result for three encoding types

	Binary encoding	Real encoding	Binary + Real encoding
$x_1 (T_h)$	1.125	1.125	1.125
$x_2 (T_s)$	0.625	0.625	0.625
$x_3 (R)$	62.72	57.685	59.3
$x_4 (L)$	21.28	47.062	38.6
min. $F(x)$	7459	7235	7192

Table 2를 분석하면 Binary+Real encoding방법이 가장 우수한 성능을 나타내는 것을 알 수 있다. 이진코딩방법의 경우 x_3 과 x_4 와 같은 연속변수들의 정밀도를 높이기 위해서 염색체의 증가가 요구되었으며 그 결과 최적 값과의 큰 차이가 발생하였다. 실수코딩방법은 이산변수를 처리가 까다롭고 구속조건을 위배하는 값이 자주 발생하였다. 제안된 방법은 기존의 단점을 보완함으로써 적은 노력으로 쉽게 최적 값을 구할 수 있다.

fig. 4는 목적함수의 최소 값 수렴과정을 하나의 그래프로 나타내었다. 제안된 방법의 수렴곡선의 경우 세대가 진행될수록 다양한 해를 발생시키면서 우수한 해로 향해서 계속 수렴해가는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 기존의 방법들은 각 설계변수들의 최적조합을 찾지 못하여 탐색공간에 대한 해의 발생을 다양화 시키지 못한 것으로 사료된다.

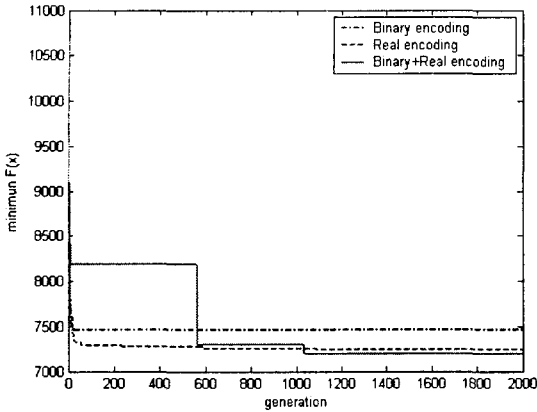


Fig. 4 Convergence curve of minimum F(x)

4. 다단 기어장치의 최적설계

다단 기어장치의 설계 예제로 실제 사용되고 있는 기어 모터(g geared motor)의 감속부인 5단 기어장치를 선택하였으며 설계명세는 Table 3과 같다.

목적함수로는 속도 비 최적화 및 부피 최소화로 두 가지 목적함수를 동시에 만족시켜야 하는 다중 목적함수 최적화 문제이다.

Table 3 Specifications of the geared motor

Transmitted power [kW]	0.025
Input speed [rpm]	1550
Total gear ratio	120
Number of stages	5
AGMA quality number	11
Gear material	Steel
Allowable contact stress [Mpa]	1250
Allowable bending stress [Mpa]	386.7

5단 기어장치의 설계변수로는 이산변수인 모듈과 정수변수인 잇수, 연속변수인 치폭으로 나눌 수 있다. 치폭 변수의 경우 기어와 피니언이 각각 다른 치폭을 가질 수 있지만 본 연구에서는 같은 치폭을 갖는다고 가정하여 설계변수를 설정하였다. 설계변수를 정리하면 Table 4와 같다.

Table 4 Design variables of geared motor

	1st stage	2nd stage	3rd stage	4th stage	5th stage
discrete (m)	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5
integer (Z_1)	Z_{1s1}	Z_{1s2}	Z_{1s3}	Z_{1s4}	Z_{1s5}
integer (Z_2)	Z_{2s1}	Z_{2s2}	Z_{2s3}	Z_{2s4}	Z_{2s5}
continuous (b)	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5

여기서 m은 모듈이며 z_1 과 z_2 는 각각 피니언 잇수와 기어의 잇수이고 b는 치폭이다. 설계변수의 개수는 총 20개이다.

목적함수는 복잡한 구속조건을 해결하기 위하여 벌칙함수법(exterior penalty function method)를 사용하였고 다중 목적함수 계산을 위하여 가중합법(weighted sum method)를 사용하였다. 벌칙함수를 위한 구속조건은 강도, 물림률, 종횡비, 간섭이 일어나지 않을 최소 잇수, 접선속도 등을 고려하였다. 목적함수 식은 식(15)와 같다.

$$\begin{aligned} & \text{minimize} \\ & F_{objective} = u_1 F_{obj1} + u_2 F_{obj2} \\ & \quad + \sum_{j=1}^n \gamma_j (\text{MAX}(G_j, 0))^2 \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 F_{obj1} 은 속도 비에 대한 목적함수이고, F_{obj2} 는 부피 합에 대한 목적함수이며 식(16)과 식(17)과 같다. w_1, w_2 는 각 목적함수의 가중치이고, γ 는 벌점계수, G_j 는 벌점함수이다.

$$F_{obj1} = \left| u - \frac{z_{2s1}}{z_{1s1}} \times \frac{z_{2s2}}{z_{1s2}} \times \dots \times \frac{z_{2s5}}{z_{1s5}} \right| \quad (16)$$

$$F_{obj2} = \sum_{j=1}^5 (z_{1sj}^2 + z_{2sj}^2) m_j^2 b_j \quad (17)$$

여기서 u 는 요구되는 전 기어 비이고, z_{1s1}, z_{2s1} 은 각각 1단의 피니언과 기어의 잇수이다.

GA를 위한 모수로서 집단수는 80, 이진코딩과 실수코딩의 교배확률은 모두 0.8이며, 돌연변이 확률은 각각 0.003과 0.2를 사용하였다. 최대 반복회수는 500으로 설정하였다. 소형 기어 모터를 설계하기 위해 피니언과 기어의 최소 잇수 설정을 언더컷이 발생하지 않을 최소 잇수보다 작게 하였다. 최소 잇수보다 작은 잇수는 언더컷방지를 위해 각 잇수에 전위계수를 적용하여 피니언과 기어의 물림률 및 이두께 값을 재 계산하여 물림률과 이두께의 제한조건을 만족하는가 확인하였다.

기어모터의 실제 제원과 최적화된 제원 비교는 Table 5와 같다. Table 5에서 최적화된 제원 결과 값은 괄호안의 굵은 글씨로 표시하였다. Table 5를 분석하면 전 기어비의 오차는 0.46%로 모터의 회전속도 및 기어열의 회전 지연 등을 감안하여 실용적으로 무시할 만한 수준이다. 부피 감소를 위하여 1단의 모듈이 기존보다 작아 졌으며, 각단의 굽힘강도와 면압강도를 통하여 각단에 하중이 적절히 분배된 것을 알 수 있다. 기존 설계제원으로 계산된 5단 기어장치의 부피는 59750 mm³으로 최적화 수행 후 54942 mm³으로 감소하였다. 이는 기존 설계의 약 8%의 부피감소 향

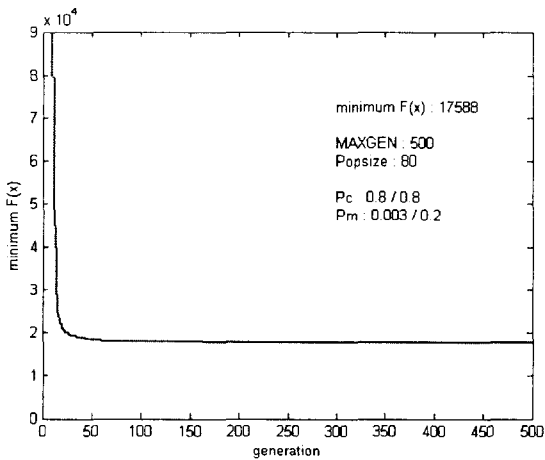
Table 5 Calculated dimensional specifications and rating result of geared motor

Stage	1		2		3		4		5	
	Pinion	Gear	Pinion	Gear	Pinion	Gear	Pinion	Gear	Pinion	Gear
Normal module [mm]	0.8 (0.6)		0.8 (1.25)		1.0 (1.25)		1.5 (1.5)		1.5 (2)	
Number of teeth	10 (11)	30 (37)	12 (11)	36 (30)	12 (10)	32 (25)	10 (10)	24 (25)	12 (12)	25 (25)
Gear ratio	3 (3.364)		3 (2.727)		2.67 (2.5)		2.4 (2.5)		2.08 (2.08)	
Total gear ratio	119.96 (119.45)									
Face width [mm]	8.0 (3.04)	7.0 (3.04)	8.0 (4.75)	7.0 (4.75)	8.0 (7.0)	7.0 (7.0)	9.0 (10.65)	8.0 (10.65)	14.0 (7.68)	37.5 (7.68)
Strength and durability rating result										
Bending stress [MPa]	45.8 (194.5)	32.8 (159.2)	91.9 (134.2)	70.4 (114.4)	155.7 (139.3)	121.1 (122.9)	190.1 (153.5)	141.0 (135.4)	195.0 (192.2)	157.6 (175.7)
Allowable bending stress [MPa]	386.7									
Contact stress [MPa]	675.0 (1239.2)		822.9 (1090.6)		1079.9 (1244.5)		1390.3 (1246.7)		1230.5 (1243.8)	
Allowable contact stress [MPa]	1250.0									

상을 나타내며, 설계 예제가 소형 기어모터이기 때문에 커다란 부피 감소는 예상하기 힘들다.

목적함수의 수렴곡선은 fig. 5와 같다.

Fig. 5 Convergence curve of minimum F(x) for geared motor



5. 결론

본 논문에서는 다단 기어장치를 설계함에 있어서 이진코딩과 실수코딩이 조합된 GA를 적용하여 보다 우수한 설계가 되도록 하였다. 이상의 연구 내용과 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 이산변수, 정수변수, 연속변수가 혼재된 설계공간에서 각 변수의 처리를 효과적으로 하기 위한 방법으로 이진코딩과 실수코딩이 조합된 GA를 제안하였다.
- (2) 제안된 GA를 압력용기 설계문제에 적용하여 기존의 단일코딩방법인 이진코딩GA와 실수코딩GA와의 비교를 통하여 유용성을 검증하였다.

(3) 실제 사용되고 있는 범용 기어 모터의 감속부인 5단 기어장치의 속도 비 최적화 및 부피 최소화 설계를 수행하여 속도 비 오차 약 0.46%내에서 기존 설계 제원에 비하여 약 8%의 부피 감소를 확인하였다.

(4) 제안된 GA를 이용하여 설계하기 까다로운 다단 기어장치의 제원설계를 쉽게 간편하게 얻을 수 있다. 또한 다양한 설계변수들이 혼재된 설계문제에도 적용이 가능하므로 효과적인 해결방안으로 기대된다.

참고 문헌

- (1) Chong, T. H., Bae, I. H. and Lee, S. J., 1999, "Design Method for Multi-Stage Gear Drive," *Proc. of the KSMTE Fall Conference*, pp.470-475.
- (2) Chong, T. H., Kim, J. S., Park, S. H., 2003, "Generation and Preliminary Design of Compound Multi-Stage Gear Drive Mechanisms," *Proc. of the KSMTE Fall Conference*, pp.53-58.
- (3) Chong, T. H., Lee, J. S., 1998, "Optimum Design of Gear Train Systems Using a Genetic Algorithm," *Proc. of the KSME Spring Conference*, pp.654-659.
- (4) Chong, T. H., Bae, I. H., 2002, "Design Method for Multi-Stage Gear Drive," *Proc. of the KSMTE Spring Conference*, pp.687-692.
- (5) Jin, K. G., 2000, *Genetic Algorithms and Their Applications*, Kyo Woo Sa
- (6) Yun, Y. S., Yi, S. Y., 1998, "Hybrid Genetic Algorithm for Optimizing Structural Design Problems," *KORMS*, Vol. 23, No. 3, pp.1-15.