

구름 베어링 설계를 위한 유전 알고리즘 기반 조합형 최적설계 방법

윤기찬 · 최동훈* · 박창남

FAG한화베어링 연구소

*최적설계기술센터, 한양대학교

Genetic-Based Combinatorial Optimization Method for Design of Rolling Element Bearing

Ki-Chan Yoon, Dong-Hoon Choi*, Chang-Nam Park

R&D Center, FAG HANWHA Bearings Corp.

*Center of Innovative Design Optimization Technology, Hanyang University

Abstract - In order to improve the efficiency of the design process and the quality of the resulting design for the application-based exclusive rolling element bearings, this study propose design methodologies by using a genetic-based combinatorial optimization. By the presence of discrete variables such as the number of rolling element (standard component) and by the engineering point of views, the design problem of the rolling element bearing can be characterized by the combinatorial optimization problem as a fully discrete optimization. A genetic algorithm is used to efficiently find a set of the optimum discrete design values from the pre-defined variable sets. To effectively deal with the design constraints and the multi-objective problem, a ranking penalty method is suggested for constructing a fitness function in the genetic-based combinatorial optimization. To evaluate the proposed design method, a robust performance analyzer of ball bearing based on quasi-static analysis is developed and the computer program is applied to some design problems, 1) maximize fatigue life, 2) maximize stiffness, 3) maximize fatigue life and stiffness, of a angular contact ball bearing. Optimum design results are demonstrate the effectiveness of the design method suggested in this study. It believed that the proposed methodologies can be effectively applied to other multi-objective discrete optimization problems.

Key Words - rolling element bearing, quasi-static analysis, combinatorial optimization, genetic algorithm, constraints, multi-objective optimization, ranking penalty method.

1. 서론

최근 기계 시스템의 발전 동향과 관련하여 줄어드는 설계공간, 고속화, 경량화 및 고온 분위기 등의 외부 요인을 만족시키기 위한 구름 베어링에 대한 설계 요구조건으로는 Fig. 1에 보는 바와 같이 장수명, 고강성, 저토크 및 저발열로 요약될 수 있다.[1] 구름 베어링에 대한 특별한 요구조건을 갖는 적용분야에 범용으로 설계된 표준 베어링만으로 그 요구조건을 만족시키기에는 역부족이며, 이러한 이유로 응용분야의 요구조건을 만족시키기 위한 전용 베어링에 대한 요구가 점차 증가하고 있다. 또한, 구름 베어링의 적용한계를 뛰어 넘고자 하는 노력이 베어링 제조업체를 중심으로 계속되고 있다. 그러나, 베어링에 대한 요구조건들은

베어링 설계관점에서 상충효과(trade-off)를 갖고 있으므로 응용분야에서 요구하는 최적의 베어링을 설계하기란 쉬운 일이 아니다.

구름 베어링 설계자들은 용도에 맞는 최적의 전용 베어링을 설계하기 위하여 기계설계 분야에서 이미 기본 툴로서 자리잡고 있는 수치 최적설계 기법(numerical optimization technique)에 관심을 갖게되었다. 그러나, 구름 베어링의 설계변수는 이산 설계변수를 포함하고 있는 점과, 성능해석 프로그램의 강건성(robustness) 미확보로 인하여 구름 베어링 설계를 위한 최적화 기법의 적용은 지극히 제한적이었다.[2]

이에 본 연구에서는 구름 베어링의 설계를 위한 유전 알고리즘 기반 조합형 최적화 방법을 제안하였으며, 볼 베어링의 기본 성능 해석을 위한 준정적 해석의 강건성을 확보한 성능해석기를 이용하

여 실제 볼 베어링의 설계문제에 제안된 설계방법을 적용하여 그 유용성을 확인하였다.

2. 조합형 최적설계 방법

2.1 구름 베어링의 최적설계 문제 정의

최적설계란 수학적으로 정식화된 설계문제의 범주 내에서 자동으로 설계변수를 갱신하면서 기계시스템의 요구조건을 최대화 혹은 최소화시킬 수 있는 최적의 해를 찾아주는 방법이다. 최적설계분야에서 가장 중요한 부분은 설계문제를 정식화하는 과정에 있다고 할 수 있다. 일반적인 최적설계 문제는 다음의 식(1)과 같이 정식화된다.

$$\begin{aligned} & \text{Find } X \\ & \text{maximize } F(X) \\ & \text{subject to } g_j(X), j=1, \dots, NCON \\ & X_i^{LB} \leq X_i \leq X_i^{UB}, i=1, \dots, NDV \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, X 는 설계변수 벡터이고, $F(X)$ 는 목적함수, $g_j(X)$ 는 구속조건이다. 또한, X_i^{LB} 및 X_i^{UB} 는 각 설계변수의 상·하한값이다.

한편, 구름베어링의 설계 문제는 전동체 개수와 같은 전형적인 정수형 설계변수와 경제적인 관점에서 표준 전동체를 사용해야하므로 전동체 치수는 이산설계변수가 된다. 따라서, 구름 베어링 설계 문제는 최적설계 관점에서 이산설계변수를 포함하고 있는 혼합 이산 최적화 문제가 된다. 또한, 나머지 설계변수들은 이론적으로 연속 설계변수이지만 엔지니어링 관점에서 도면치수로 기록되어야 하므로 해당 정밀도에 따라 고정 소숫점에서 반올림(round-off)이나 버림(truncation)과 이산화 절차가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 구름 베어링의 최적설계 문제를 식(2)와 같이 설계자가 정한 유한개의 설계변수(X_d) 셋으로부터 최적의 설계변수 조합을 찾는 조합형 최적설계(combinatorial optimization) 문제로 정의하였다.

$$\begin{aligned} & \text{Find } X_d \\ & \text{maximize } F(X_d) \\ & \text{subject to } g_j(X_d), j=1, \dots, NCON \\ & X_i^{LB} \leq X_i \leq X_i^{UB}, i=1, \dots, NDV \end{aligned} \quad (2)$$

이상에서 조합형 최적화 문제로 정의한 베어링의 설계문제를 효율적으로 풀기 위하여 일반적으로 이산설계 변수의 처리가 용이하고 미분정보가 필요 없는 유전 알고리즘을 이용하였다. 유전 알고리즘은 구속조건을 직접 처리하지 못한다는 단점을 가지고 있다. 실질적으로 유전 알고리즘에서 구속조건을 효과적으로 처리하기 위한 방법에 대한 연구는 이 분야의 주된 논제 중에 하나이다.[3]

2.2 구속조건 처리 방법의 제안

유전 알고리즘에서는 구속조건에 기인한 무용

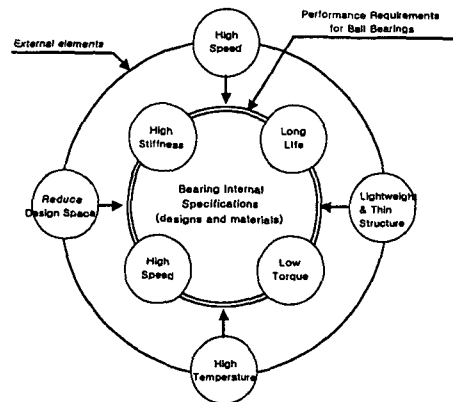


Fig.1 Required performances of rolling element bearings

(infeasible) 해를 다루기 위하여 일반적으로 벌칙방법(penalty method)을 사용한다. 이 방법은 무용해에 벌칙을 가함으로써 구속조건이 있는 최적화 문제를 구속조건이 없는 최적화 문제로 변경시킨다. 식(3)에서 보는 바와 같이, 전통적인 벌칙방법에서 적합도 함수 $eval(x)$ 는 구속조건이 위배되는 경우의 벌칙항을 목적함수에 더함으로써 구성되어 진다.

$$eval(x) = F(x) + r_p \left[- \sum_{j=1}^{NCON} \max\{0, g_j(x)\} \right] \quad (3)$$

그러나, 벌칙방법에서의 벌칙계수(r_p)는 최적화 문제마다 다르며, 벌칙계수의 선정에는 많은 시행착오와 경험을 필요로 한다. 이러한 이유 때문에 유전 알고리즘을 이용한 최적설계 분야에서는 구속조건 처리 방법이 중요한 논제로 남아있다.

본 연구에서는 구속조건을 효과적으로 처리하기 위한 방법으로 순위벌칙(ranking penalty) 방법을 제안하였다. 이 방법은 현재 해의 집단에서 각 개체의 목적함수 순위와 구속조건 위배량 합을 더함으로써 최대화 문제에 대하여 식(4)와 같이 적합도 함수가 구성되게 된다.

$$eval(x) = Rank[F(x)] + rank \left[\sum_{j=1}^{NCON} \max\{0, g_j(x)\} \right] \quad (4)$$

여기서, $Rank[\bullet]$ 은 내림차순(ascending order)의 순위이고, $rank[\bullet]$ 은 오름차순(descending order)의 순위이다. 최대화 문제의 경우, 현재 해의 집단에서 목적함수 $F(x)$ 의 값이 클수록, 구속조건 위배량의 합 $\sum \max\{0, g_j\}$ 이 작은 개체일수록 높은 적합도 함수를 갖게 되고, 이로서 다음 세대에 생존할 확률이 높아지게 된다. 순위벌칙 방법은 목적함수와 구속조건에 대한 정규화(normalization) 효과를 제공하며, 최적설계 문제에 무관하게 벌칙계수의 선정

에 대한 부담감을 해소시킬 수 있는 방법이다.

2.3 다중 목적함수의 처리 방법

구름 베어링의 설계 시, 응용분야의 중요 요구 조건이 다수(multi)인 경우, 이러한 문제를 다중목적 최적설계라 한다. 다중 목적 최적화 문제를 수행하기 위하여 요구특성들 중 하나만을 목적함수로 취하고 나머지를 구속조건으로 처리하여 최적 설계를 수행할 수 있으나, 이러한 방법은 목적함수간의 갈등현상(conflicting situation)이 나타난다. 특히, 구름 베어링의 요구조건들은 서로 상충효과(trade-off)가 존재하게 되며, 이러한 특성들을 파악하여 최적설계를 수행하는 과정에는 많은 시행착오와 어려움이 존재하게 된다. 또한, 다중목적 최적화 문제의 또 다른 문제점은 수없이 많은 파레토(pareto) 해가 존재한다는 것이다.

대표적인 다중 목적함수 처리 방법으로는 가중값 방법(weighting method), 구속조건 방법(constraint method), 거리 방법(distance method) 및 최소-최대 방법(min-max method) 등이 있으나, 목적함수의 가중값 설정, 이상적인 해의 결정, 각 목적함수 값의 오차차이에 따른 스케일링 등 설계자가 결정해야 할 많은 문제점들이 노출되어 있다.[4]

본 연구에서는 모집단을 운영하는 유전 알고리즘에서 다중 목적함수로 구성된 설계문제를 효과적으로 처리하기 위하여 구속조건 처리를 위한 순위별 적합도의 개념을 다중목적 함수의 처리 방법에 확대 적용한 순위 방법(ranking method)을 제안하였다. 순위 방법은 모집단의 각각의 목적함수 순위를 정하여 그 순위에 가중값을 곱하여 다중 목적함수를 처리하는 방법이다. 이를 수학적으로 표현하면 다음 식(5)와 같다.

$$F(X) = \sum_{j=1}^{MOBF} w_j \text{Rank}[f_j(X)] \quad , \text{ where, } \sum_{j=1}^{MOBF} w_j = 1 \quad (5)$$

최대화 목적함수는 내림차순(ascending order)으로 순위를 정하고, 최소화 목적함수는 오름차순(descending order)으로 순위를 정한다. 이렇게 정한 순위에 가중값을 곱하여 다중 목적함수를 하나의 목적함수로 구성한다. 여기서, 각각의 목적함수에 곱해진 가중값의 합은 1이 되도록 함으로써 가해지는 각각의 가중값은 설계자가 판단하는 목적함수의 중요도를 의미하게 된다. 또한 이 방법에서는 함수값이 아닌 순위를 이용함으로써 함수값에 대한 정규화(normalization) 효과를 제공함으로써 스케일링 효과를 포함하게 된다.

이상에서 정의한 순위 방법을 이용하여 구속조건이 있는 다중 목적 최적화 문제의 적합도 함수를 구성하면 식(6)과 같다.

$$\text{eval}(X) = \sum_{j=1}^{MOBF} w_j \text{Rank}[f_j(X)] + \text{rank} \left[\sum_{k=1}^{NOBF} \max\{0, g_k(X)\} \right] \quad (6)$$

2.4 최적설계 흐름도

Fig. 2는 앞에서 설명한 볼 베어링의 설계를 위한 조합형 최적설계 문제를 풀기 위하여 제안된 설계방법의 전반적인 흐름도이다. 첫 번째로 설계 변수의 개수, 각 설계변수 셋의 개수에 따라 모집단의 수, 최대 세대수 등의 유전 알고리즘 파라미터들을 설정하고 이산설계변수 셋으로부터 초기모집단을 생성한 후, 현 세대의 각 개체(설계점)의 목적함수와 구속조건을 계산한다. 다음으로 최대화 문제의 경우, 목적함수들의 값이 큰 순서대로 내림차순으로 순위를 결정하고, 구속조건 위배량의 합이 작은 순서로 오름차순으로 순위를 결정한다. 이들 순위로부터 식(6)을 이용하여 현세대 각 개체의 적합도 함수를 계산한다. 엘리트 보전을 위하여 가장 큰 적합도 함수를 갖는 개체를 보존한 후, 이들 적합도 함수를 이용하여 다음세대에 생존할 개체를 토우너먼트 혹은 룰렛 휠 선택을 하고, 교배와 변이를 이용한 유전자 연산을 거쳐 다음 세대의 모집단을 구성한다. 설계변수들의 변경은 이 단계에서 이루어진다. 이러한 전체과정은 미리 정해진 최대 세대수만큼 반복하게 된다. 각 세대에서 적합도 함수에 의하여 판정된 우성인자가 다음세대에 생존할 수 있는 확률이 높기 때문에 유전 알고리즘은 세대를 거듭할수록 최적해에 수렴하게 된다. 특히, 모든 설계변수가 이산설계변

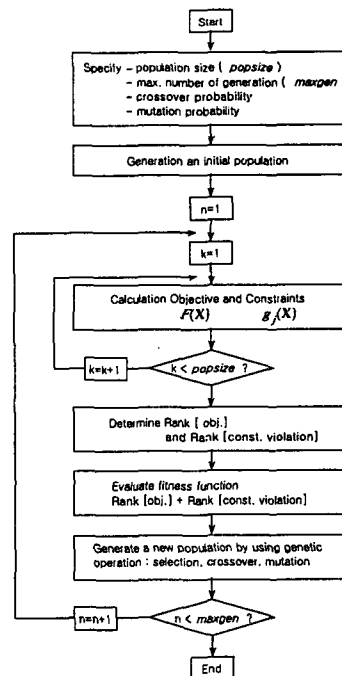


Fig. 2 Flow chart for the optimum design of ball bearings

수로 정의되었고 설계변수의 변경이 주어진 설계 변수 셋에서 선택되어지므로 세대수를 충분히 진행시키면 주어진 설계변수 셋 중 전역최적의 해를 찾을 수 있다.

3. 앵글러 컨택 볼 베어링의 최적설계

2장에서 제안한 구름 베어링 설계를 위한 최적 설계 방법의 유용성을 확인하기 위하여 준정적해석의 강건성을 확보한 볼 베어링 전용 해석기를 이용하여 최적설계를 수행하였다.[5] 준정적 해석은 전동체 하중분포에 영향을 미치는 외력과 회전 속도의 영향을 반영한 구름 베어링의 하중해석 방법으로 Jones[6]에 의하여 체계적으로 정리되었으며, 오늘날 가장 기본적인 구름 베어링 해석 틀로 자리잡고 있다.

3.1 설계문제 정식화

제안된 설계방법을 이용하여 앵글러 컨택 볼 베어링(angular contact ball bearing)의 최적설계를 수행하였다. 준정적해석 기반 볼 베어링 단품해석기를 이용하여 반지름방향 하중(17,800 N)과 축방향 하중(17,800N)을 동시에 받는 내경 90 mm, 외경 160 mm, 폭 30 mm인 7218B 상용 베어링에 대하여 3가지 최적설계를 수행하여 그 결과를 비교하였다.

설계변수 : 볼 베어링의 최적설계를 위한 4개의 설계변수로 베어링 성능지수를 결정하는 초기 접촉각(α_0), 볼지름(d_b), 피치지름(d_m) 및 볼개수(z)를 설계변수로 선택하였다. 이외에 베어링 성능에 영향을 미치는 내·외륜 궤도곡률반지름비 (f_i, f_o)는 피로수명 및 강성에 대하여 즉, 설계변수 하한값인 0.5에서 최대 값을 갖게되므로 설계변수에서 제외하였다. 이들 변수들은 피로수명과 강성에 대한 영향력(감도)이 다른 변수에 비하여 매우 낮으며, 주로 베어링의 윤활 특성과 조합되어 결정되는 변수들이다.

목적함수 : 식(7)에서 보는 바와 같이 목적함수로는 베어링의 피로수명[7] 최대화(case 1), 강성의 최대화(case 2), 피로수명과 강성의 최대화(case 3)로 하였다. case 3에서 각 목적함수의 가중값 0.5로 응용분야에서 피로수명과 강성의 중요도를 동일하게 가정하였음을 의미한다.

$$\text{Case 1 :} \\ \text{maximize } F(\mathbf{X}) = L_{10}(\mathbf{X}) \quad (7-1)$$

$$\text{Case 2 :} \\ \text{maximize } F(\mathbf{X}) = \sum [K_{xx} + |K_{zz}|] \quad (7-2)$$

$$\text{Case 3} \\ \text{maximize } F(\mathbf{X}) = (50\%)L_{10}(\mathbf{X}) \\ + (50\%)\sum [K_{xx} + |K_{zz}|] \quad (7-3)$$

구속조건 : 베어링의 가공상의 변형이나, 끼워맞춤시의 변형을 방지하기 위하여 베어링 내·외륜의 최소 궤도두께 ($t_{min,o}, t_{min,i}$)는 베어링의 크기와 재질에 따라 정의된 최소 두께(\tilde{t}_{min}) 보다 커야한다. 이러한 구속조건을 수학적으로 표현하면 식(8) 및 식(9)와 같다.

$$g_1(\mathbf{X}) = \tilde{t}_{min} \leq t_{min,o} \quad (8)$$

$$g_2(\mathbf{X}) = \tilde{t}_{min} \leq t_{min,i} \quad (9)$$

볼의 충돌을 방지하고 볼을 등간격으로 유지시키는 기능을 하는 리테이너를 장착시키기 위하여 볼을 원주방향으로 등간격으로 위치시킨 후 이웃하는 볼과의 최소 틈새 (C_{balls})는 리테이너의 종류에 따라 정의된 최소틈새 (\tilde{C}_{balls}) 보다 커야 하며, 베어링이 기계시스템에 장착된 후, 케이스의 폭방향 유격으로 인하여 조립부품과의 간섭이 발생하면 안되므로 케이스의 가공을 위한 최소두께를 고려하여 케이스 장착공간이 필요하다. 따라서 식(10) 및 식(11)의 구속조건이 필요하다.

$$g_3(\mathbf{X}) = \tilde{C}_{balls} \leq C_{balls} \quad (10)$$

$$g_4(\mathbf{X}) = \tilde{S}_{cage} \leq S_{cage} \quad (11)$$

또한, 볼과 궤도의 최대 접촉응력에 의한 영구손상을 방지하기 위하여 베어링이 감당할 수 있는 접촉응력의 상한값 보다 작아야 한다. 궤도와 전동체 사이의 접촉응력(σ_{max})은 정정적하중을 정의하는 최대 접촉응력($\tilde{\sigma}_{max}$) 보다 작아야 한다. 이 조건을 수학적으로 표현하면 식(12)와 같다.

$$g_5(\mathbf{X}) = \sigma_{max} \leq \tilde{\sigma}_{max} \quad (12)$$

이상에서 정의한 설계문제를 Table 1의 이산 설계변수 셋을 이용하여 최적설계를 수행하였다. 최적설계에 이용한 유전 알고리즘 파라미터는 다음과 같다.

Crossover Probability	= 0.5
Mutation Probability	= 0.01~0.1
Population Size	= 40
Max. number of Generation	= 200

3.2 최적설계 결과

Fig. 3은 case 1의 세대 진행에 따른 목적함수인 베어링 수명의 변화를 나타낸 그래프로 112세대에서 접촉각의 변화로 수명이 증가한 이후, 세대가 진행되어도 설계변수 값의 변화가 없었다. 이로써 최적화과정은 최적해에 수렴했음을 알 수 있다. 각각의 최적설계 경우에 대하여 최적설계 결과를 Table 2에 나타냈으며, 그 결과를 초기 설계값에 대하여 정규화(normalization)하여 Fig. 4에 나타내

Table 1 Pre-defined set of design variables for combinatorial optimization.

α_0 (mm)	d_B		d_m (mm)	z (ea)
	(mm)	(in)		
0	17.0		121.0	14
1		11/16	121.5	15
2	18.0		122.0	16
3		23/32	122.5	17
4	19.0		124.0	18
5		3/4	124.5	19
.		25/32	124.0	20
.	20.0		124.5	
.		13/16	125.0	
38	21.0		125.5	
39		27/32	126.0	
40	22.0		126.5	
41		7/8	127.0	
42	24.0		127.5	
43		29/32	128.0	
44		15/16		
45	24.0			

었다. Case 1의 베어링의 피로수명을 극대화하기 위한 최적설계 결과 초기 설계값에 비하여 수명이 약 1.7배 상승한 결과를 보였으며, 베어링의 반지름방향 및 축방향 강성함은 약 1.2배 증가한 결과를 보였다. Case 2의 강성함의 극대화를 위한 최적설계 결과, 수명은 초기값에 비해 약 32% 감소하였으며, 강성함은 초기값에 비해 약 2배 향상된 결과를 보였다. 마지막으로 Case 3의 피로수명과 강성에 대한 다중목적 최적설계의 결과, 초기 설계값에 비하여 피로수명은 1.4배 증가하였고 강성함 역시 1.4배 향상된 결과를 보였다. Fig. 5는 최적설계 결과를 이용하여 베어링 단면을 설계한 것이다. Case 1의 경우, 초기값에 비하여 큰 지름의 볼이 선택되었으며, 접촉 궤도면의 증가로 인하여 접촉응력이 작아지는 효과로 인하여 피로수명이 증가한 것으로 판단된다. 반면, Case 2의 경우, 초기값에 비하여 작은 지름의 볼이 선택되었으며, 볼 개수가 1개 증가한 결과를 보였다. 이는 전동체 하중 부하율이 커짐으로 인하여 초기 설계 베어링에 비하여 많은 수의 전동체가 하중을 분담하게 됨으로서 베어링의 전체 변위가 감소하게 되었고 이로 인하여 강성값이 증가되었을 것으로 판단된다. 또한, 접촉각이 작을수록 강성에 유리함을 알 수 있다. Case 3의 경우, 초기값과 동일한 크기의 볼이 선택되었으며, 볼 개수는 한 개 증가하였다. 베어링의 수명과 강성함의 증가율이 비슷하게 나타남으로 이는 다중 목적함수 처리를 위한 순위 방법에서 순위에 부여하는 가중값이 성능지수의 중요도로 직접 반영되었음을 의미한다. 여기서, 각 최적설계 경우의 베어링 단면은 미소한 차이를 보이지만, 베어링 성능에는 지대한 영향을 미친다는 사실을 알 수 있다.

본 최적설계 예를 통하여 피로수명과 강성과 같

은 볼 베어링의 요구조건에 따라 동일한 설계 공간에서도 서로 다른 베어링 성능을 보이는 설계가 가능함을 알았다. 베어링에 대한 다양한 요구조건들에 대하여 성능해석 및 평가가 가능하다면, 응용분야의 특정 요구조건을 극대화하기 위한 최적설계가 가능하며, 베어링 내부설계만을 변경하여도, 기계 시스템에서 요구하는 성능을 충족시킬 수 있는 설계가 가능할 것으로 사료된다. 고급 기계 시스템의 요구조건을 제한된 설계공간에서 만족시킬 수 있는 응용분야 전용 베어링의 설계 및 제작이 가능함을 시사한다.

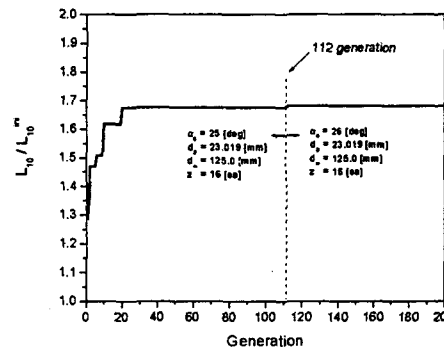


Fig. 3 Convergence history (case 1)

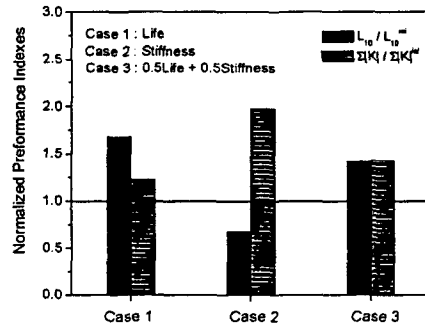


Fig. 4 Normalized bearing performances of each optimization cases

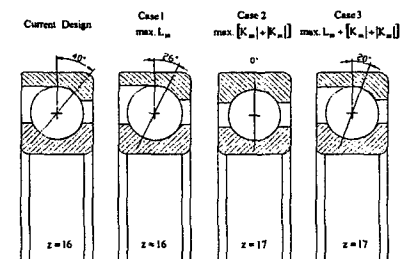


Fig. 5 Cross-section views of each optimum design cases

Table 2 Optimization results of an ACBB.

	Design Variables				Performances	
	α_0 (deg.)	d_p (mm)	d_m (mm)	z (ea)	L_0 (10^6 rev.)	$[K_{rad} + K_{ax}]$ (kN/mm)
Initial Design	40	22.225	125.26	16	6.05	630.1
Case 1 L_0	26	24.019	125.0	16	10.18	774.4
Case 2 $[K_{rad} + K_{ax}]$	0	21.431	124.5	17	4.46	1236.7
Case 3 $(50\%)L_0 + (50\%)\sum K_i $	20	22.225	125.0	17	8.619	902.3

본 연구에서 정의한 베어링 설계문제와 같은 조합형 설계 문제의 경우, 세대수를 증가시키는 것 보다는 모집단의 수를 증가시키는 것이 유리하였으며, 정체 구간에서의 해의 다양성을 고려하기 위한 동적 변이율의 적용이 효과적이었다. 실제로 유전 알고리즘에서 설계변수의 변화는 세대 초반에 활발히 이루어지며 세대 중반 이후에 미미한 목적함수의 변화를 위하여 너무 많은 해석 시간을 소비한다는 근본적인 문제점을 갖고 있다. 따라서, 엔지니어링 설계 관점에서 세대수를 제한하거나, 특정 세대 동안 설계변수의 값이 변화하지 않는 경우, 해석을 멈추게 하는 보다 실질적인 수렴조건을 적용이 검토되어야 한다. 또한, 설계시간을 줄이기 위해 무엇보다도 중요한 것은 가능한 한 설계변수 셋의 개수를 최소화하는 것이 가장 효과적인 방법임을 강조한다.

4. 결론

본 논문에서는 응용분야의 요구조건을 만족하는 전용 베어링 설계 효율 향상을 목적으로 유전 알고리즘 기반 조합형 최적설계 방법에 관한 연구를 수행하였다. 이산 최적설계 문제로 정의한 구름 베어링의 조합형 최적설계 (combinatorial optimization) 문제를 효과적으로 풀기 위하여 유전 알고리즘을 이용하였으며, 유전 알고리즘에서 구속조건을 효과적으로 처리하기 위하여 순위방법을 제안하고, 다중목적 함수의 효과적인 처리를 위하여 이 개념을 확대 적용하였다.

베어링 설계 요구조건 및 제작을 위한 요구조건들을 정리하여 볼 베어링의 설계 문제를 이산 최적설계 문제로 정의하였다. 조합형 최적설계 문제로 정식화된 볼 베어링의 설계문제는 최적설계 결과를 반올림이나 버림과 같은 이산화 절차 없이 바로 베어링의 설계치수로 사용할 수 있으므로 현장 설계 자동화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

이산 최적설계 문제로 정의된 볼 베어링의 최적설계를 효과적으로 수행하기 위하여 유전 알고리즘을 적용하였으며, 본 논문에서 제안한 순위방법 (ranking method)으로 구성된 적합도 함수는 벌칙계

수의 도입없이 구속조건을 효과적으로 처리하였다. 또한, 가중값 또는 제한값에 대한 시행착오 없이 다중목적 함수를 효과적으로 처리할 수 있었다.

축방향 및 반지름 방향의 복합하중을 받는 앵글러 컨택 볼 베어링에 대하여 수명 최대화, 강성 최대화 및 수명과 강성의 다중 목적 최적설계를 수행한 결과, 응용분야에서 요구하는 설계 요구조건에 따라 베어링 설계를 달리함으로써 베어링의 성능을 향상시킬 수 있음을 알았다.

후기

본 연구는 한국과학재단 지정 최적설계신기술센터 및 FAG한화베어링(주)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Furumura, K., "Recent Trends in Research and Development of Rolling Bearings at NSK," Motion & Control No., pp5-12, 1996.
- [2] Wan, C., 1991, "Analysis of Rolling Element Bearings," Mechanical Engineering Publications Ltd., London.
- [3] 조영석, 1999, "구속조건의 효율적인 처리를 위한 유전자 알고리즘의 개발," 석사학위 논문, 한양대학교.
- [4] Osyczka, A., 1984, "Multicriterion Optimization in Engineering with FORTRAN program," Ellis Horwood Limited.
- [5] 윤기찬, 2001, "유전 알고리즘을 이용한 응용분야 기반 전용 볼 베어링의 설계 방법," 박사학위논문, 한양대학교.
- [6] Jones, A. B., "A General Theory for Elastically Constrained Ball and Radial Roller Bearings Under Arbitrary Load and Speed Conditions", Journal of Basic Engineering, Vol. 82, pp.309-320, 1960.
- [7] Lundberg, G. and Palmgren, A., "Dynamic Capacity of Rolling Bearings," ACTA POLY-TECHNICA, Mechanical Engineering Series 1, Royal Swedish Academy of Engineering Science, No.3, Vol.7., 1947.
- [8] Harris, T. A., 1991, "Rolling Bearing Analysis : 3rd ed.," John Wiley and Sons, Inc.