

배치설계를 고려한 다단 기어장치 설계 시스템 개발

정태형*(한양대), 김지철, 배인호(한양대 대학원)

Development of a Design System for Multi-Stage Gear Drives Considering Configuration Design

Tae Hyong Chong*(Hanyang Univ.), Jee Chul Kim, Inho Bae(Graduate School, Hanyang Univ.)

Abstract

The design of multi-stage gear drives is a time-consuming process that includes additional design problems, which are not considered in the design of single-stage gear drives. In the previous research works, the authors have proposed a new algorithm to design multi-stage gear drives at the preliminary design phase. The proposed design algorithm automates the design process by integrating the dimensional design and the configuration design process. In the configuration design process, the positions of gears and shafts are determined by minimizing the geometrical volume (size) of a gearbox. However, various types of spatial constraints should be satisfied in practical design situation. To locate input and output shaft in specified positions is the typical example of such problems. In this paper, the authors show the formulations of spatial constraints applied to the design of four-stage gear drives. The design solution shows considerably good results, and the design system is confirmed to be readily applicable to practical design situation.

Key Words : Gear(기어), Multi-Stage Gear Drive(다단 기어장치), Gear Design(치차 설계), Configuration Design(배치 설계), Spatial Constraints(공간 제약조건)

Nomenclature

d_p	: pitch diameter of a gear	[mm]
d_o	: outer diameter of a gear	[mm]
f	: face width	[mm]
m	: module	[mm]
u	: gear ratio	
z	: number of teeth	

1. 서론

다단 기어장치 설계는 1단 기어장치와는 달리 전 잇수비에 따른 적절한 단수의 결정과 각 단에서의 잇수비 배분이 요구되며, 이와 함께 각 단에서의 전달하중을 수용할 수 있도록 적절한 기어의 제원을 결정해야 한다. 또한, 설계한 기어를 다른 기어 또는 축 등 다른 기계요소들과의 간섭을 피하며 한정된 공간 내에 적절하게 배치하기 위한 설계도 필요하다. 그러나 지금까지 다단 기어장치에 대한 설계는 전적으로 설계자의 경험과 감각에 의지하여, 제원설계와 배치설계를 반복적인 시행착오에 의해 설계하는 것이 대부분이었다. 이에 저자들은 다단 기어장치의 잇수비 배분, 기어 제원의 설계, 기어장치의 배치설계를 모두 자동적으로 행할 수 있는 알고리즘을 제안하고, 설계 시스템을 개발 중에 있다^{[1],[2]}. 이 설계 알고리즘은 Fig. 1에 보인 바와 같이 제원 설계와 배치 설계를 반복적으로 수행하여 적절한 설계해를 구하는 것이다. 여기서 배치 설계는 기어들 사이의 물림 제약 조건과 간섭 제약 조건을 설정하고, 기어상자의 부피를 최소화하도록 하였

다. 그러나 실제 설계 상황에 따라서는 기어상자의 부피를 최소화하는 방향으로 설계가 이루어지지 않는 경우도 존재한다. 예를 들어, 입출력축의 위치가 설정되어 있거나 기어박스의 크기가 제한되어 있는 경우 등은 실제 설계 상황에서 많이 발생하고 있다. 따라서 본 논문에서는 이와 같은 다양한 배치 제약 조건을 포함시키기 위한 정식화를 수행하고, 이를 4단 기어장치의 설계에 적용한 예를 보인다.

2. 배치 제약 조건의 정식화

Fig. 1에 보인 다단 기어장치의 설계 알고리즘은 단수의 결정, 각 단의 잇수비 결정, 각 기어의 제원 설계 및 배치 설계의 4 단계 과정으로 이루어져 있다. 우선 단수 결정 단계에서 설계자에 의해 적절한 단수를 입력받은 후, 두 번째 단계에서 각 단의 잇수비를 임의 탐색(random search)을 통해 결정한다. 세 번째 단계에서는 각 단 기어의 모듈(module), 잇수, 치폭을 기본 파라미터로 하여 피치원 직경과 치폭 등 기어의 제원을 결정한다. 네 번째 단계에서는 이상의 단계에서 잠정적으로 결정된 각 기어의 제원을 이용하

여, 중심거리, 간섭 등 설계 제약 조건을 만족하는 기어장치의 배치 설계를 수행한다. 이상의 각 단계는 반복적으로 수행되어 적절한 설계해를 구하게 된다.

여기서 배치 설계는 시뮬레이티드 어닐링 알고리즘(simulated annealing algorithm)^{[3],[4]}을 적용하여, 기어장치 요소를 3차원 공간 내에 적절히 배치하도록 하였다. 여기서 기어장치 요소의 배치를 위한 목적함수로는 식 (1)과 같이 가상적인 기어상자의 부피, 즉 배치한 기어를 모두 감싸는 직육면체의 부피와 제약조건들의 선형합을 최소화하는 것으로 하였다.

$$F = W_0 P_0 V + \sum_{i=1}^{nc} W_i P_i C_i \quad (1)$$

여기서, F 는 목적함수(objective function), W 는 가중치 계수(weighting factor), P 는 표준화 계수(normalizing factor), V 는 기어상자의 부피, C 는 제약조건, nc 는 제약조건의 수를 나타낸다.

제약 조건으로는 물림 제약 조건(meshing

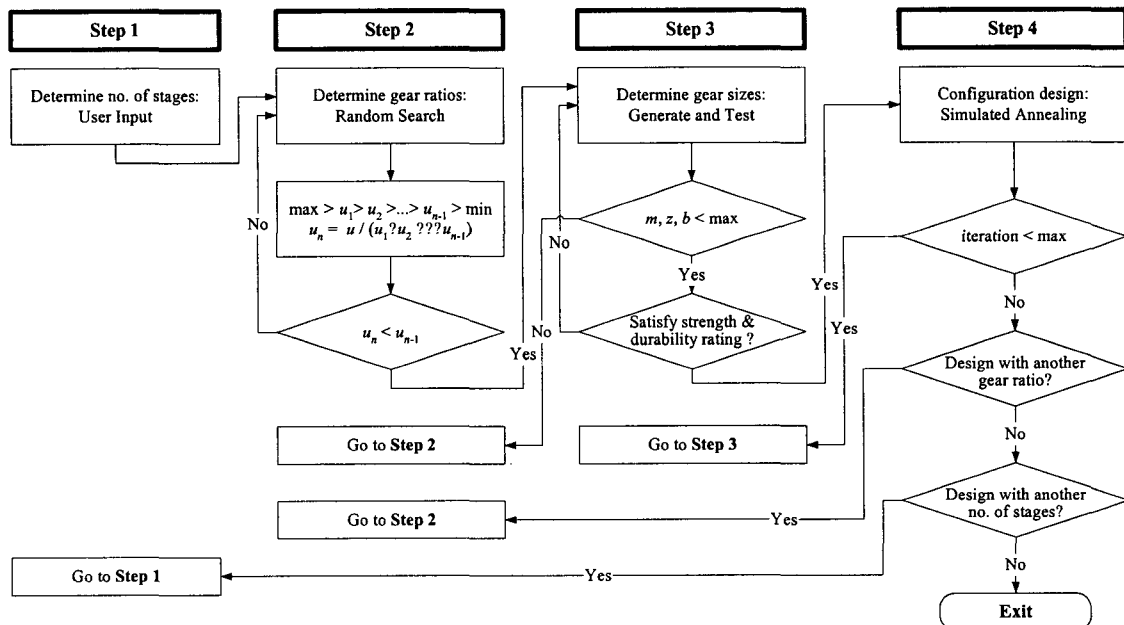
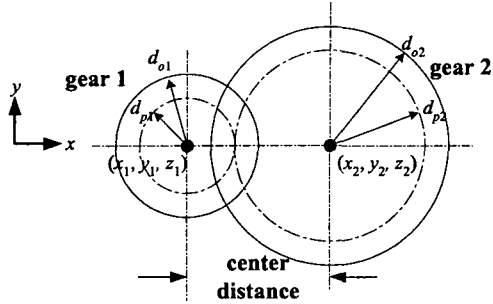


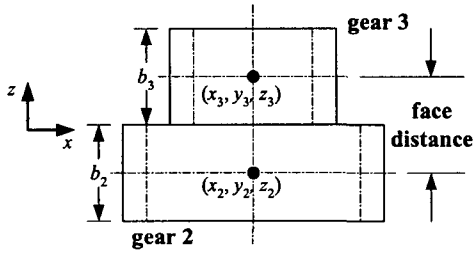
Fig. 1 Proposed design algorithm for multi-stage gear drives

constraints)과 간섭 제약 조건(interference constraints)으로 구별할 수 있다.

물림 제약 조건은 Fig. 2에 보인 바와 같이 각 단의 피니언과 기어가 적절한 물림을 이루기 위해 중심거리와 치폭의 관계에 대해 설정해 준 것이다. 이 경우 각각의 제약 조건은 식 (1) 및 (2)와 같이 표현할 수 있다.



(a) Center distance constraint



(b) Face width constraints
Fig. 2 Meshing constraints

$$\left. \begin{aligned} \frac{d_{p1} + d_{p2}}{2} - \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} &= 0 \\ z_1 - z_2 &= 0 \end{aligned} \right\} (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{b_2 + b_3}{2} - |z_2 - z_3| &= 0 \\ x_2 - x_3 &= 0 \\ y_2 - y_3 &= 0 \end{aligned} \right\} (3)$$

간섭 제약 조건은 Fig. 3에 보인 바와 같이 기어들 사이 또는 기어와 축 사이에 간섭을 회피하기 위한 관계에 대해 설정해 준 것이다. 이 경우 제약 조건은 식 (3)과 같이 표현할 수 있다. 여기서 부등호는 0보다 큰 경우, 즉 간섭이 발생되는 경우에 한해 목적함수에 포함되는 것을 나

타낸다.

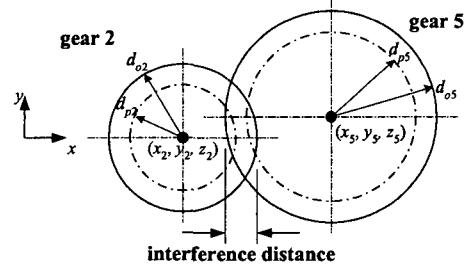


Fig. 3 Interference constraints

$$\frac{d_{o1} + d_{o5}}{2} - \sqrt{(x_1 - x_5)^2 + (y_1 - y_5)^2} > 0 \quad (4)$$

이상의 제약 조건들은 기어 장치 요소들간의 상대적인 배치 제약 조건으로 볼 수 있지만, 입출력축의 위치 설정, 기어박스의 크기 제한 등 실제 설계에서 필요한 절대적 배치 조건 또한 유사한 방식으로 설정해 줄 수 있다.

3. 4단 기어장치에 대한 설계 예

이상과 같이 개발한 설계 알고리즘을 4단 기어장치의 설계에 적용한 예를 보인다. 기본 설계 명세는 Table 1과 같다. 또한, Table 2에 설계 예에서 사용한 기본 파라미터인 각 단의 잇수비, 모듈, 피니언 잇수, 치폭의 상하한치를 보인다. 여기서 각 단의 피니언과 기어는 동일한 치폭을 갖는 것으로 가정하였다.

Table 1 Design specifications

Transmitted power [kW]	8
Input speed [rpm]	6000
Total gear ratio	300
Gear type	External spur
Pressure angle [deg.]	20
Material	Steel
Heat treatment	Carburized & case hardened
Hardness [HRC]	55
AGMA quality no.	11
Load cycles [cycle]	1 × 10 ⁷

Table 2 Min. and max. values and the types of the basic design parameters

	min.	max.	variable types
Gear ratios	1.0	9.0	continuous
Module*	1.0	6.0	discrete
No. of teeth in pinion	14	25	integer
Face width factor	4	25	integer

* : 1.0, 1.25, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 5.0, 6.0

$$\left. \begin{aligned}
 C_1 &= (d_{p1} + d_{p2})/2 - \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \\
 C_2 &= (d_{p3} + d_{p4})/2 - \sqrt{(x_3 - x_4)^2 + (y_3 - y_4)^2} \\
 C_3 &= (d_{p5} + d_{p6})/2 - \sqrt{(x_5 - x_6)^2 + (y_5 - y_6)^2} \\
 C_4 &= (d_{p7} + d_{p8})/2 - \sqrt{(x_7 - x_8)^2 + (y_7 - y_8)^2} \\
 C_5 &= z_1 - z_2 \\
 C_6 &= z_3 - z_4 \\
 C_7 &= z_5 - z_6 \\
 C_8 &= z_7 - z_8 \\
 C_9 &= x_2 - x_3 \\
 C_{10} &= y_2 - y_3 \\
 C_{11} &= x_4 - x_5 \\
 C_{12} &= y_4 - y_5 \\
 C_{13} &= x_6 - x_7 \\
 C_{14} &= y_6 - y_7 \\
 C_{15} &= (b_2 + b_3)/2 - |z_2 - z_3| \\
 C_{16} &= (b_4 + b_5)/2 - |z_4 - z_5| \\
 C_{17} &= (b_6 + b_7)/2 - |z_6 - z_7|
 \end{aligned} \right\} (5)$$

$$\left. \begin{aligned}
 C_{18} &= (d_{o1} + d_{o5})/2 - \sqrt{(x_1 - x_5)^2 + (y_1 - y_5)^2} > 0 \\
 C_{19} &= (d_{o1} + d_{o6})/2 - \sqrt{(x_1 - x_6)^2 + (y_1 - y_6)^2} > 0 \\
 C_{20} &= (d_{o1} + d_{o7})/2 - \sqrt{(x_1 - x_7)^2 + (y_1 - y_7)^2} > 0 \\
 C_{21} &= (d_{o1} + d_{o8})/2 - \sqrt{(x_1 - x_8)^2 + (y_1 - y_8)^2} > 0 \\
 C_{22} &= (d_{o2} + d_{o5})/2 - \sqrt{(x_2 - x_5)^2 + (y_2 - y_5)^2} > 0 \\
 C_{23} &= (d_{o2} + d_{o6})/2 - \sqrt{(x_2 - x_6)^2 + (y_2 - y_6)^2} > 0 \\
 C_{24} &= (d_{o2} + d_{o7})/2 - \sqrt{(x_2 - x_7)^2 + (y_2 - y_7)^2} > 0 \\
 C_{25} &= (d_{o2} + d_{o8})/2 - \sqrt{(x_2 - x_8)^2 + (y_2 - y_8)^2} > 0 \\
 C_{26} &= (d_{o3} + d_{o7})/2 - \sqrt{(x_3 - x_7)^2 + (y_3 - y_7)^2} > 0 \\
 C_{27} &= (d_{o3} + d_{o8})/2 - \sqrt{(x_3 - x_8)^2 + (y_3 - y_8)^2} > 0 \\
 C_{28} &= (d_{o4} + d_{o7})/2 - \sqrt{(x_4 - x_7)^2 + (y_4 - y_7)^2} > 0 \\
 C_{29} &= (d_{o4} + d_{o8})/2 - \sqrt{(x_4 - x_8)^2 + (y_4 - y_8)^2} > 0
 \end{aligned} \right\} (6)$$

$$\left. \begin{aligned}
 C_{30} &= x_1 - x_1^* \\
 C_{31} &= y_1 - y_1^* \\
 C_{32} &= x_8 - x_8^* \\
 C_{33} &= y_8 - y_8^*
 \end{aligned} \right\} (7)$$

설계에 사용한 제약 조건은 식 (5)~(7)과 같다. 식 (5)는 피니언과 기어의 물림 제약 조건을 나타내며, 식 (6)은 기어들 사이의 간섭 제약 조건을 나타낸다. 또한, 식 (7)은 입력축 및 출력축의 위치 제약 조건을 나타낸다.

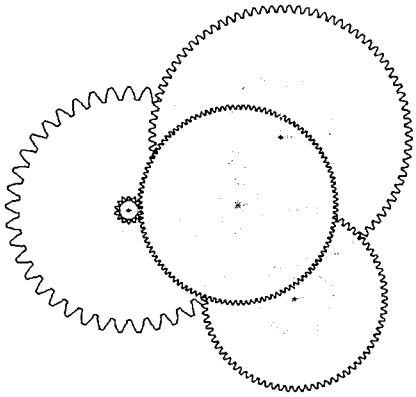
이상의 설계 명세와 제약 조건으로 설계한 4단 기어장치의 설계해를 Table 3과 Fig. 4 (Case 1) 및 Table 4와 Fig. 5 (Case 2)에 보인다. 각 설계해는 모두 입출력축의 위치와 기어박스의 크기가 제한되어 있는 경우에 수행한 결과이다.

Table 3 Design result : Case 1

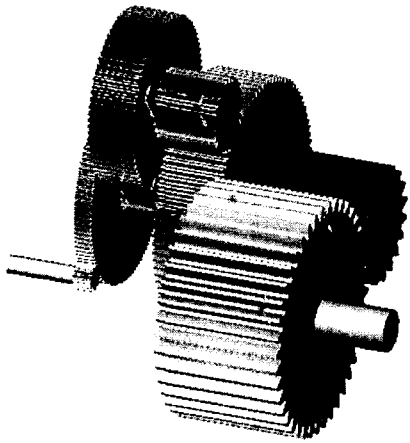
Stage	1	2	3	4
Module [mm]	1.5	2.0	2.5	5.0
Number of teeth, pinion	14	18	25	19
Number of teeth, gear	116	80	91	41
Gear ratio	8.286	4.444	3.64	2.158
Pitch diameter, pinion [mm]	21.0	36.0	62.5	95.0
Pitch diameter, gear [mm]	174.0	160.0	227.5	205.0
Face width [mm]	18.0	46.0	62.5	125.0
Face width factor	12	23	25	25

Case 1의 설계는 입출력축의 위치를 모두 (0, 0)으로 설정하였고, 기어박스의 크기는 400×400으로 제한하였으며, 입출력축 방향 (z축 방향)의 크기 및 위치는 제한하지 않았다. Table 3에 보인 제원 설계 결과에서 각 단의 잇수비는 8.286, 4.444, 3.64, 2.158과 같이 의도한 바대로 일반적인 경험적 설계치와 비교해도 좋은 결과를 나타내었다고 볼 수 있으며, 각 단의 모듈 및 치폭 등 기어 제원에 관한 설계 또한 잘 수행된 것을 알 수 있다. 이것은 잇수비 설정을 위해 임의 탐색을 수행하고 있으나, 여기서 설정된 잇수비가 기어의 제원은 물론 배치 설계와 상호 영향을 주기 때문에 분석할 수 있으며, 이러한 경향은 Fig. 4에서 명확히 확인할 수 있다. Fig. 4는 제원 설계를 통해 얻어진 Table 3의 각 기어를 배

치한 설계 결과를 나타낸 도식해를 보이고 있는 것이다. 배치 설계 결과를 보면 각 기어는 입출력축의 위치는 물론 각 기어간의 물림과 간섭 조건을 만족시키며 적절히 배치된 것을 알 수 있다.



(a) Two dimensional representation



(b) Three dimensional representation

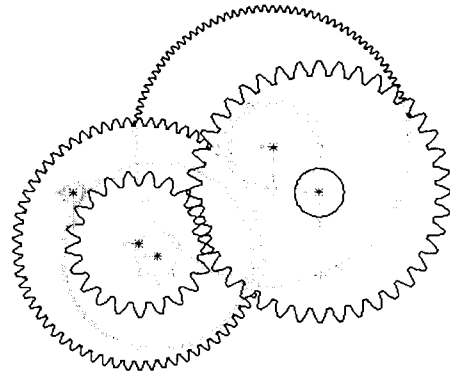
Fig. 4 Configuration result of Case 1

Case 2의 설계는 입출력축의 위치를 각각 (0, 0), (200, 0)으로 설정하였고, 기어박스의 크기는 500×300으로 제한하였으며, 마찬가지로 입출력축 방향 (z축 방향)의 크기 및 위치는 제한하지 않았다. Table 4의 제원 설계 결과도 Table 3의 설계 결과와 마찬가지로 각 단의 잇수비와 모듈, 치폭 등에서 좋은 결과를 얻은 것을 알 수

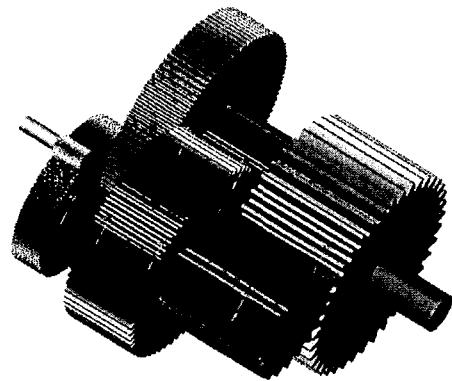
있다. Fig. 5에 보인 배치 설계 결과에서도 각 기어는 입출력축의 위치는 물론 각 기어간의 물림과 간섭 조건을 만족시키며 적절히 배치된 것을 볼 수 있다.

Table 4 Design result : Case 2

Stage	1	2	3	4
Module [mm]	1.25	2.0	3.0	5.0
Number of teeth, pinion	14	18	24	21
Number of teeth, gear	123	112	66	40
Gear ratio	8.786	6.222	2.75	1.905
Pitch diameter, pinion [mm]	17.5	36.0	72.0	105.0
Pitch diameter, gear [mm]	153.75	224.0	198.0	200.0
Face width [mm]	31.25	48.0	75.0	115.0
Face width factor	25	24	25	23



(a) Two dimensional representation



(b) Three dimensional representation

Fig. 5 Configuration result of Case 2

4. 결론

본 연구에서는 원통기어로 구성된 다단 기어 장치 설계를 위한 기본설계 및 배치설계 알고리즘을 제안하고, 설계 시스템을 구성하여 4단 기어 장치에 대한 설계를 수행하였다. 기본 설계에서 각 단의 잇수비 설정은 임의 탐색을 사용하였으며, 각 잇수의 제원 설계를 위해서는 전역탐색을 사용하였고, 또한 배치 설계를 위해 시물레이티드 어닐링 알고리즘을 이용하여 기어의 위치를 결정하였다. 개발한 시스템은 배치 설계를 위한 다양한 제약 조건을 상당히 용이하고, 효율적으로 구성할 수 있게 해주며, 4단 기어 장치에 대한 설계 수행 결과, 일반적인 설계 의도에 부합하는 좋은 설계 결과를 제시함을 알 수 있었다. 일반적인 다단 기어장치의 설계가 많은 시간과 비용이 소비된다고 하는 관점에서 볼 때, 본 시스템을 이용하는 경우 상당히 효율적이고 편리하게 기본설계를 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] 정태형, 이성주, 배인호, 박경진, 2000, “다단 치차장치의 설계 시스템 개발에 관한 연구 (제1보: 정식화된 제원설계 프로세스의 제안)”, 한국정밀공학회지, 제17권 제9호.
- [2] 정태형, 배인호, 박경진, 2000, “다단 치차장치의 설계 시스템 개발에 관한 연구 (제2보: 일반화된 신설계 알고리즘의 개발)”, 한국정밀공학회지, 제17권 제10호.
- [3] Szykman, S., and Cagan, J., 1997, “Constrained Three-Dimensional Component Layout Using Simulated Annealing”, *ASME Journal of Mechanical Design* Vol. 119, No. 2, pp. 28-35.
- [4] Goffe, Ferrier and Rodgers, 1994, “Global Optimization of Statistical Functions with Simulated Annealing,” *Journal of Econometrics*, vol. 60, no. 1/2, Jan./Feb. pp. 65-100.