

다단 기어장치의 신뢰성 평가에 관한 연구

정태형*, 김용주⁺, 박승현⁺⁺

(논문접수일 2005. 9. 15, 심사완료일 2005. 11. 11)

Reliability Evaluation of Multi-Stage Gear Drive

Tae Hyong Chong*, Young Ju Kim⁺, Seung Hyun Park⁺⁺

Abstract

Recently the design of multi-stage gear drive is being highly concerned. Until now, since the researches of gear drive are focused on the design for satisfying safety factor, the reliability evaluation of multi-stage gear drive is not included. In this paper, the life and reliability models of multi-stage gear drive are proposed using methods of probability and statistics. The life and reliability of the multi-stage gear drive have been evaluated, which is based on the life and reliability of each stage gear drive. The pinion and gear lives of each stage are calculated using the Lundberg-Palmgren theory and the Weibull failure distribution. These lives are combined using methods of probability and statistics to produce a life and reliability model of multi-stage gear drive.

Key Words : Gear(기어), Reliability(신뢰성), Multi-Stage Gear Drive(다단기어장치), Weibull Distribution(와이블분포)

1. 서론

대부분의 기계장치에서 구동 및 동력 전달용으로 가장 많이 사용되는 다단 기어장치의 설계는 때때로 안전계수에 의한 강도계산의 불확실성을 포함하며, 따라서 각 단계 적절한 강도 및 수명의 배분이 이루어지지 않아 설계의 신뢰성에 대해 만족스럽지 못한 결과를 주는 경우가 있으며 재설계에 대한 요구에 유연하게 대처하지 못하고 있는 실정이다. 이에

따라 다단 기어장치의 파손을 확률적으로 고려한 설계기법에 관한 연구 및 재설계의 요구를 최소화하고 각 단계의 기어 장치에 적절한 강도 및 수명을 배분하기 위한 연구가 절실히 요구되고 있다. 기계 시스템에 대한 확률론적인 설계개념은 Haugen에 의해 적용되었고⁽¹⁾, Cockerham과 White는 동력 전달에 가장 많이 쓰이는 스퍼기어와 헬리컬기어의 설계에 신뢰성 방법을 이용하였고⁽²⁾, 양성모는 라비니오 유성기어의 신뢰성 및 수명에 관한 연구에서 기어시스템의 수명분

* 한양대학교 기계공학과
+ 한양대학교 대학원 기계설계학과
++ 교신저자, 한양대학교 대학원 기계설계학과 (dark@ihanyang.ac.kr)
주소: 133-791 서울시 성동구 행당동 17

포를 예측할 수 있는 알고리즘을 제안하였다³⁾. 이상과 같이 기어에 대한 접촉해석과 강도설계 및 신뢰성 설계 등 많은 연구가 이루어졌으나 여러 쌍(pair)의 기어들로 구성된 다단 기어장치에 대한 수명 및 신뢰성 평가는 다소 미흡하였다. 본 논문에서는 다단 기어장치의 기구학적 구성형태를 고려하여 기존의 신뢰성 이론을 다단 기어장치에 적용하여 다단 기어장치의 신뢰도 수식을 유도하고, 유도된 수식으로 다단 기어장치의 신뢰성 평가를 수행하여 신뢰성 평가 결과를 바탕으로 다단 기어장치의 재설계시 설계자에게 설계변경의 가이드라인을 제공한다.

2. 신뢰성 이론

2.1 신뢰성의 정의 및 평가 과정

신뢰성(reliability)이란 개념적으로는 시스템이나 장치가 정해진 사용조건하에서 의도하는 기간동안

만족하게 동작하는 시간적 안정성을 의미하며, 이를 정량적으로 표현하기 위해 0~1로 표현되는 확률값인 신뢰도를 사용한다. 신뢰성을 정량적으로 표현하는 척도는 신뢰도 이외에 고장분포함수, 고장률, 평균수명(MTBF, MTTF)등이 있으며 장치를 구성하는 각각의 부품에 대한 고장 데이터 수집, 수집된 데이터를 기초로 장치나 부품의 고장분포함수 및 모수를 추정하고, 추정 값의 적합도 판정등의 과정에 의해 결정된다. 그러나 기계부품에 있어서 고장시간이나 시장에서의 불량데이터의 수집이 제한적이므로 기계부품이나 장치의 신뢰성을 평가할 때는 고장분포함수나 고장률, 고장모드 등을 생산현장에서의 경험을 기초로 가정하는 방법이 일반적으로 행해진다. 이상과 같이 신뢰성평가척도를 계산하면 부품에 대한 고장의 특성이나 정도를 파악하고 수명을 보증하는 방식에 의해 장치의 신뢰성을 평가하는 것이다.

2.2 신뢰도함수

신뢰성을 평가하기 위해 가장 일반적으로 사용하는 척도인 신뢰도는 고장부품의 데이터를 수집하여 시간에 따른 고장의 발생정도를 수식으로 표현한 것으로 다음과 같이 유도할 수 있다.

장치나 부품이 작동을 시작하는 운전초기의 부품총수를 N , 특정 사이클 c 에서 잔존수를 $n(c)$ 라 하면 어떤 장치나 부품이 특정 사이클 c 나 사용시간 t 에서 정상적으로 작동할 확률인 신뢰도 $R(c)$ 및 특정 사이클 동안 고장이 발생할 확률인 불신뢰도 $F(c)$ 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R(c) = \frac{n(c)}{N} \quad F(c) = 1 - \frac{n(c)}{N} \quad (1)$$

또한, 단위 사이클(unit cycle)당 어떤 비율로 고장이 발생하고 있는가를 나타내는 고장확률밀도함수 $f(c)$ 는 식 (2)와 같다.

$$f(c) = \frac{dF(c)}{dc} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)의 관계를 이용하면 어떤 특정 사이클 c 와($c + \Delta c$)사이에서 발생한 고장률인 구간고장률을 구할 수 있으며, 이때의 Δc 를 0으로 수렴시키면 순간고장률인 고장률함수 $\lambda(c)$ 는 식 (3)과 같이 된다.

$$\lambda(c) = \frac{1}{R(c)} \cdot \left[-\frac{dR(c)}{dc} \right] = -\frac{R'(c)}{R(c)} \quad (3)$$

여기서 $\lambda(c)$ 는 신뢰성 평가척도중의 하나로서 사이클당 얼 마씩 고장이 나고 있는가를 나타내는 장치의 고장률로서 그 단위는 사이클(cycle)의 역수가 된다. 식 (3)을 사이클(cycle)에 따라 적분한 후 역대수(anti-log)를 취하면 식 (4)와 같이 신뢰도 함수 $R(c)$ 가 구해진다.

$$R(c) = \exp \left[-\int_0^c \lambda(c) dc \right] \quad (4)$$

식 (4)는 부품이나 장치의 고장확률로 나타낸 신뢰도 함수이며, 특정 사이클 c 에 있어서의 장치의 생존확률 또는 정상 작동확률이 된다. 즉, 작동 중의 기계 장치나 부품의 신뢰도 함수는 고장률함수나 고장확률밀도함수만 알면 구할 수가 있다. 또한 장치의 구성요소인 부품이나 소자의 신뢰도를 알면 전체 시스템의 신뢰도 R_s 는 요소의 직렬결합 확률이론에 관한 식 (5)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$R_s = R_1 \times R_2 \times \dots \times R_n \quad (5)$$

여기서 첨자 1, 2, ..., n 은 장치를 구성하는 부품의 개수이다.

3. 기어의 신뢰성

3.1 기어의 신뢰성 평가 방법

기어의 신뢰도를 구할 수 있는 방법은 피팅에 의해 파손될 가능성 예측을 위해 통계에 기초하여 만들어진 파손모델인 Palmgren-Lundberg 모델을 이용하는 방법이 대표적이다⁴⁾.

이 모델은 기어의 피팅 같은 파손가능성을 예측하기 위해 대량생산되는 베어링의 파손데이터를 통계적으로 분석하여 만들어진 것으로 기어의 치면(tooth surface)은 반복하중에 의해 피팅 파손모델인 Palmgren-Lundberg 모델을 따라 파손된다는 것이다. 또한, 여러 연구에 의하면 기어의 수명분포는 Weibull분포를 따르며 지수 β 는 2.5로 알려져 있다⁽⁵⁾. 다음의 식 (6)과 식 (7)은 수명분포가 Weibull분포를 따를 때의 파손모델과 신뢰성 평가척도들의 식을 나타낸 것이다.

$$c_{10Tooth} = \left[\frac{B_1 f \sin \phi}{F(1/R_1 + 1/R_2)} \right]^P \quad (6)$$

여기서 $c_{10Tooth}$ 은 기어 치면에 반복하중이 작용하여 치면의 90%가 잔존할 때의 수명을 나타내며 90% 신뢰도 수명이라고 하고, B_1 은 하중-응력계수로서 실험에 의해 1.35×10^8 이라고 알려져 있다. f 와 ϕ 는 각각 치폭과 압력각, F 와 R_1 , R_2 는 치면에 작용하는 반복하중의 크기와 피니언, 기어의 피치원 반경을 각각 나타내고, P 는 하중-수명계수로서 기어의 치면이 베어링과 유사한 운동에 의해 파손되어지므로 볼베어링과 유사한 3.0을 도입할 수 있다. 따라서 고장확률밀도함수 $f(c)$, 신뢰도함수 $R(c)$, 고장률함수 $\lambda(c)$ 를 Weibull분포로 표시하면,

$$f(c) = \left(\frac{\beta}{\alpha} \right) c^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{c}{\alpha} \right)^\beta \right] \quad (7)$$

$$R(c) = \exp \left[- \left(\frac{c}{\alpha} \right)^\beta \right] \quad (8)$$

$$\lambda(c) = \left(\frac{\beta}{\alpha} \right) \left(\frac{c}{\alpha} \right)^{\beta-1} \quad (9)$$

와 같다. 여기서, α 는 기어치면의 10%가 파손될 때 특성수명을 나타낸다.

3.2 기어의 신뢰도함수

기어의 치면파손확률이 10%(잔존수명 90%)일 때의 기어 신뢰도함수 $R(c)$ 는 식 (8)을 정리하여 식 (10)을 얻는다.

$$\ln \left[\frac{1}{R(c)} \right] = \ln \left(\frac{1}{0.9} \right) \left(\frac{c}{c_{10Tooth}} \right)^\beta \quad (10)$$

식 (10)은 기어 시스템의 작동회전수(특정사이클)가 c 일 때 기어 이(tooth)의 신뢰도 $R(c)$ 를 나타내는 Palmgren 피팅피로 수명모델에 의한 기어 이(tooth)의 신뢰도 함수이다. 식 (10)에서 $c_{10Tooth}$ 를 알면 특정 사이클 c 에서 기어 이(tooth)의 수명을 예측하고 신뢰성을 평가할 수 있다. 따라서

피니언과 기어에 대한 신뢰도식은 식 (11), 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln \left[\frac{1}{R(c)_{Pinion}} \right] = \ln \left(\frac{1}{0.9} \right) \left(\frac{c}{c_{10Pinion}} \right)^\beta \quad (11)$$

$$\ln \left[\frac{1}{R(c)_{Gear}} \right] = \ln \left(\frac{1}{0.9} \right) \left(\frac{c}{c_{10Gear}} \right)^\beta \quad (12)$$

여기서,

$$c_{10Pinion} = \left(\frac{1}{N_{T-Pin}} \right)^{\frac{1}{\beta}} (c_{10Tooth}) \quad (13)$$

$$c_{10Gear} = \left(\frac{1}{N_{T-Gear}} \right)^{\frac{1}{\beta}} (c_{10Tooth}) \quad (14)$$

이고, N_T 는 피니언과 기어의 잇수를 나타낸다. 식 (13)과 식 (14)의 값을 알면 특정 사이클에서 피니언과 기어의 신뢰도 분포를 알 수 있고, 피니언과 기어가 정상 작동할 확률을 구함으로써 피니언과 기어의 수명을 예측하고 신뢰성을 평가한다. 또한, 기어장치의 피니언과 기어는 다수의 기어 이(tooth)에 의한 직렬결합에 의해 이루어져 있으므로 식 (5)를 이용하여 직렬결합의 신뢰도를 얻을 수 있다.

4. 다단 기어장치의 신뢰성

4.1 다단 기어장치의 신뢰성 평가 절차

다단 기어장치의 신뢰성을 평가하는 순서는 피니언과 기어의 치면 하중을 계산하고, 피니언과 기어 및 기어장치의 90% 신뢰수명을 계산하여 각각에 대한 신뢰도를 산출한다. 계산된 신뢰도를 고려하여 각각의 피니언과 기어에 적절히 수명을 분포시켜 설계자가 의도하는 수명분산을 만족하면 강도를 평가하여 다단기어장치의 신뢰수명 평가에 의한 타당성을 제시하거나, 재설계에 유연하게 대처할 수 있는 지침(guide-line)을 제공하는 순서로 다단 기어장치의 신뢰성 평가가 이루어진다.

4.2 다단 기어장치의 치면 하중 및 신뢰도함수

다단 기어장치는 전달동력과 각 단의 감속비에 따라 각 단의 피니언과 기어의 이 접촉면(tooth surface)에 작용하는 하중 및 수명분포가 달라진다. 우선 기어장치에서 하중이 한 개의 이에 전하중이 작용하고 치폭 전체에 균일하게 분포된다고 가정하면 치면에 작용하는 하중(W_N)은 식 (15)와 같다.

$$W_N = T_N \times \frac{2000}{d_{N,P}} \quad (15)$$

여기서 T_N 은 기어장치의 N 번째 단의 입력토크, $d_{N,P}$ 는 N 번째 단 피니언의 피치원지름을 나타낸다.

다단 기어장치는 다수의 피니언과 기어로 구성되며 각 단을 구성하는 피니언과 기어가 파손되면 다단 기어장치 전체의 작동이 멈추게 되므로 다단 기어장치의 신뢰도함수 R_s 는 식 (11)과 (12), (6)을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\ln \left[\frac{1}{R(s)} \right] = \ln \left(\frac{1}{0.9} \right) \left[\left(\frac{c}{c_{10Pinion}} \right)^{\beta}_{1st} \times \dots \times \left(\frac{c}{c_{10Gear}} \right)^{\beta}_N \right] \quad (16)$$

여기서 R_s 는 다단기어장치의 신뢰성을 확률로 표현해주는 시스템 신뢰도(식 (5))이며 작동사이클 c 의 함수로 표현된다. 그러나 다단 기어장치의 각 단의 피니언과 기어들은 각 단의 기어비(gear ratio)에 따라서 동일 입력회전에 대한 회전수가 달라지고 각 단의 피니언과 기어의 수명분포도 달라지므로 적절한 보정을 한 후 각 단의 피니언과 기어에 대한 수명을 평가해야 한다.

본 논문에서는 다단 기어장치의 각 단의 회전수를 고려한 각 단의 피니언과 기어에 대한 90% 신뢰수명은 Table 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 C, F, N_T 는 각각 기본 동적 부하용량, 치면하중, 기어잇수를 나타낸다.

Table 1 The c_{10} for revolutions of gear drives

	Gear Ratio	$c_{10Pinion}$ & c_{10Gear}
1	m_1	$c_{10Gear1st} = \left(\frac{1}{N_T} \right)^{\beta} \left(\frac{C}{F} \right)^P$
2	m_2	$c_{10Gear} \times m_1$
		...
N	m_N	$c_{10Gear(N-1)} \times m_1 \times \dots \times m_{(N-1)}$

Table 2 Specifications of the elevator gear drive

Stage	1		2	
	Pinion	Gear	Pinion	Gear
Normal module(mm)	2.5		2.5	
No. of teeth	24	119	21	92
Pitch diameter(mm)	60	297	73	322
Face width(mm)	40		60	

5. 다단 기어장치의 신뢰성 평가 및 고찰

5.1 2단 기어장치의 신뢰성 평가

여기에서는 앞에서 유도된 다단 기어장치의 신뢰도 수식을 실제 사용되고 있는 2단 엘리베이터 기어장치에 적용하여 시간에 대한 신뢰도를 평가한다.

2단 엘리베이터 기어장치의 설계제원과 이를 바탕으로 계산된 각 단의 피니언과 기어의 신뢰수명은 Table 2와 Table 3과 같다.

이상의 결과를 바탕으로 2단 기어장치의 각 단에서의 피니언과 기어의 수명을 Fig. 1과 같이 시간에 대한 신뢰도의 그래프로 나타내었다.

Fig. 1로부터 2단 기어장치에서 1단 기어의 신뢰도가 가장 높고, 2단 피니언의 신뢰도가 가장 낮게 되어, 이 경우 기어장치의 각 단을 구성하는 피니언과 기어의 신뢰수명이 고르게 분포되어 있지 않아 신뢰성 측면에서 좋은 설계라 할 수 없다. 설계자는 이상의 결과를 바탕으로 다른 피니언과 기어에 비해 신뢰수명이 높거나 낮은 부품의 치목을 수정하는 방향으로 재설계를 하고 재설계를 한 제원에 대해 강도를 평가함으로써 설계변경 전과 후의 신뢰성 향상 정도와 강도의 배분 정도를 확인할 수 있다. 우선 각 단의 피니언과 기어에 신뢰수명과 강도를 적절히 배분하여 시스템

Table 3 The c_{10} for revolutions of elevator gear drive

Stage	Gear ratio	$c_{10Tooth}$ & c_{10Gear} (Hours)	
1	Pinion/Gear	2.5	127747.13/333828.47
2	Pinion/Gear	3.5	61366.41/148893.78

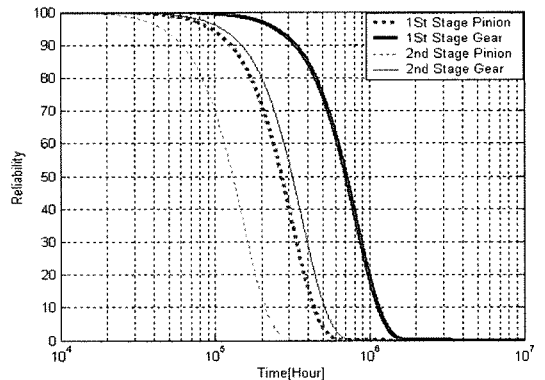


Fig. 1 Reliability of gears and pinions of existing 2 stage gear drives

수명을 향상시키기 위해 각 단의 90% 신뢰수명의 평균을 구하고 이 평균값에 대한 각 단의 편차를 고려하여 치폭을 변경하고 신뢰성을 재평가한다. 이때 설계 변경의 정도를 결정하는데 있어서 너무 과도한 변경을 하게 되면 각각의 피니언과 기어의 굽힘응력과 접촉응력이 허용응력을 초과하여 파손이 발생할 수 있으므로 설계 변경은 기어의 초기 설계 제원에 대한 25% 범위로 한정한다. Fig. 1의 결과를 바탕으로 재설계를 한 결과에 대한 그래프를 Fig. 2에 나타낸다.

위의 결과로부터 2단 기어장치를 구성하는 각 단의 피니언과 기어의 신뢰수명편차를 고려하여 설계자가 재설계를 함으로써 신뢰수명 배분이 상당히 향상되었음을 알 수 있다.

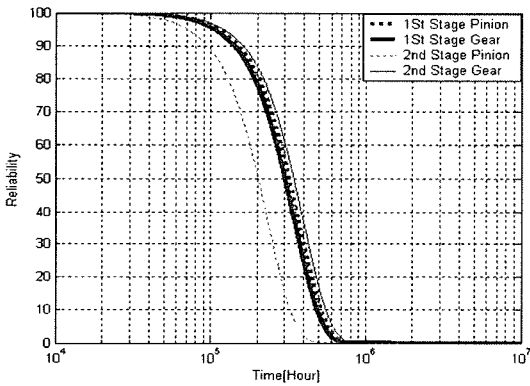


Fig. 2 Reliability of redesigned gears and pinions

5.2 5단 기어장치의 신뢰성 평가

5.2.1 5단 기어장치의 설계명세 및 치면하중

5.1에서 2단 기어장치의 신뢰성을 평가하고 각 단의 신뢰수명에 따라 설계변경을 한 후에 다단 기어장치의 신뢰성을 재평가하였다. 그러나 현재까지 다단 기어장치의 신뢰성평가 데이터의 부족으로 인하여 다단 기어장치의 신뢰성에 따른 적절한 수정량의 결정이 힘들고 수정에 관한 지침도 마련되어 있지 않은 실정이다. 그러므로 여기서는 현재 사용되고 있는 표준 이로 구성된 5단 감속기 제원과 자동설계 프로그램^(6,7)에 의해 설계된 제원에 대해서 신뢰성을 평가하고 강도평가 결과를 비교함으로써 신뢰성평가를 통한 효율적인 다단 기어장치의 설계에 관한 타당성을 입증한다. 적용 예제는 모터에 기어장치를 부착한 범용 기어드 모터(g geared motor) 감속부의 5단 기어장치로서 기어드 모터의 설계 명세는 Table 4에 보이는 바와 같다. 또한 Table 5에 현재 기어열과 관련된 설계 제원을 나타내었다.

Table 4 Specifications of the geared motor and gear drive

Transmitted power(kW)	0.025
Input speed(rpm)	1550
Total gear ratio	120
Number of stages	5
Gear material	Steel
Heat treatment	Carburized & case hardened
Minimum hardness(HRC)	55
Allowable contact stress(MPa)	1250
Allowable bending stress(MPa)	380

Table 5 Dimensional Specifications of the gear drive

Stage		Normal module (mm)	Number of teeth	Gear ratio	Total gear ratio	Pitch diameter (mm)	Face width (mm)
1	Pinion	0.8	10	3	120	8.0	8.0
	Gear		30			24.0	7.0
2	Pinion	0.8	12	3		9.6	8.0
	Gear		36			28.8	7.0
3	Pinion	1.0	12	2.67		12.0	8.0
	Gear		32			32.0	7.0
4	Pinion	1.5	10	2.4		15.0	9.0
	Gear		24			36.0	8.0
5	Pinion	1.5	12	2.08		18.0	14.0
	Gear		25			37.5	13.0

Table 6 The c_{10} of 5 stage gear drives

Stage		$C_{10Tooth}$ (Millions of cycles)	Dynamic load (N)	$C_{10Pinion}$ & C_{10Gear} (Millions of cycles)
1	Pinion	23835.84	1108.15	9489.22
	Gear	15968.15	969.63	4096.44
2	Pinion	2636.05	1329.77	975.62
	Gear	1765.95	1163.55	421.17
3	Pinion	339.59	1611.85	125.69
	Gear	227.50	1410.37	56.88
4	Pinion	88.60	2199.99	35.27
	Gear	62.23	1955.55	17.45
5	Pinion	63.18	3930.92	23.38
	Gear	50.59	3650.14	13.96

Table 7 The C_{10} for revolutions of each stage

Stage	Reliability for time(Hours)
1 Pinion/Gear	102034/132143
2 Pinion/Gear	31471/40758
3 Pinion/Gear	12163/14695
4 Pinion/Gear	9114/10823
5 Pinion/Gear	14500/18004

5.2.2 5단 기어장치의 신뢰수명

다단 기어장치를 구성하는 각 단의 기어 이(tooth) 및 기어쌍의 $c_{10Tooth}$ 값과 $c_{10Pinion}$, c_{10Gear} 을 구하고 기준이 되는 단을 1단으로 설정한 후 각 단의 기어비(gear ratio)를 고려하여 각 단의 회전수를 기준단에 일치시킨 $c_{10Pinion}$, c_{10Gear} 을 구하면 Table 6과 Table 7과 같다.

5.2.3 5단 기어장치의 신뢰도 그래프

Table 7의 $c_{10Pinion}$, c_{10Gear} 값을 이용하면 5단 기어장치의 각 단에서의 피니언과 기어의 수명을 시간에 대한 신뢰도의 그래프로 나타낼 수 있으며 결과는 Fig. 3과 같다.

이 그래프에서 보는 바와 같이 1단과 2단의 피니언과 기어의 신뢰수명이 가장 높은 분포를 보이고, 4단의 피니언과 기어가 가장 낮은 신뢰수명을 나타내고 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 다단 기어장치의 최적 수명은 각 단을 구성하는 피니언과 기어의 수명이 적절히 분포될 때 가장 이상적이라 할 수 있는데 1단과 2단의 피니언과 기어, 4단의 피니언과

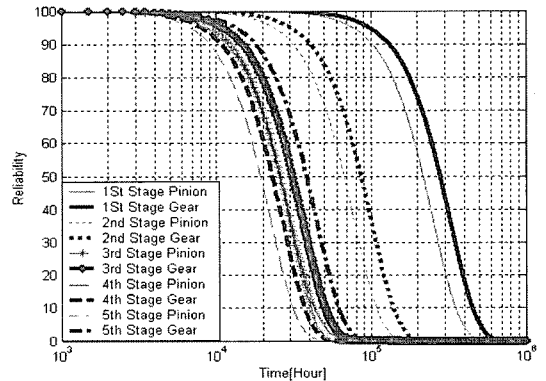


Fig. 3 Reliability of gears and pinions of existing 5 stage gear drives

기어의 수명이 필요 이상으로 높거나 낮으므로 다단 기어장치를 재설계할 경우에는 다단 기어장치에서 신뢰성이 지나치게 높거나 낮은 단의 치폭을 적절히 변경하는 것이 한 가지 방법임을 알 수 있다. 이러한 설계 변경으로 각 단을 구성하는 기어들의 신뢰수명의 분포를 적절히 배분할 수 있고 적절한 신뢰수명의 배분이 이루어진 다단 기어장치가 경제적이고 효율적인 설계라고 할 수 있다.

5.2.4 5단 기어장치의 재설계

Fig. 4는 현재 사용되고 있는 5단 기어장치의 재원에 대해 최적화 자동 설계 프로그램^(6,7)에 의해 재설계를 수행한 Table 8에 대한 신뢰성 그래프를 나타낸 것이다.

이상과 같이 최적설계 전의 다단 기어장치의 수명분포에 대한 신뢰도 그래프인 Fig. 3보다 최적설계 후의 다단 기어장치의 수명분포에 대한 신뢰도 그래프인 Fig. 4가 다단 기어장치에서 각 단의 수명배분이 상당히 개선되어진 것을 볼 수 있다. 이것은 적절히 각 단의 피니언과 기어에 신뢰수명 및 강도가 배분되었고 이전의 설계보다 신뢰성 측면에서 상당히 효율적인 설계라 할 수 있다. 또한 앞에서와 동일한 방식으로 구성된 5단 기어장치는 각 단의 피니언과 기어가 직렬 결합된 시스템으로 볼 수 있으므로 5단 기어장치의 전체 시스템수명을 계산할 수 있고 Fig. 5와 같은 그래프로 나타내어진다.

또한 이상에서 수행한 2단 및 5단 기어장치에 대한 설계 변경 전과 후의 AGMA강도 평가에 의한 안전계수는 Table 9와 같다.

Table 9에서 설계 변경 전의 제원에 대한 안전계수는 신뢰성 평가 후 수명을 적절히 배분하는 방향으로 설계 변경을 행한 경우의 안전계수보다 편차가 더욱 큰 것을 확인할 수 있으며, 이것은 앞에서 언급한 바와 같이 다단 기어장치의 각 단에 적절한 강도 배분이 이루어지지 않았다는 것을 나타낸다.

이상과 같이 2단 기어장치와 5단 기어장치를 구성하는 각 단의 피니언과 기어의 신뢰성을 살펴보고 각 단의 피니언과 기어의 치폭 등을 재설계 지침에 따라 적절히 변화시켜 다단 기어장치를 구성하는 각 단의 피니언과 기어에 적절히 신뢰수명, 강도 및 안전계수의 배분을 향상시키도록 함으로써 다단 기어장치의 시스템수명을 향상시킬 수 있고 재설계에 유

Table 8 Dimensional specifications of the redesigned gear drive

Stage		Normal module(mm)	Number of teeth	Face width(mm)
1	Pinion	0.6	10	4.2
	Gear		33	4.2
2	Pinion	0.6	12	6.6
	Gear		39	6.6
3	Pinion	1.0	11	10.0
	Gear		28	10.0
4	Pinion	1.25	11	13.75
	Gear		25	13.75
5	Pinion	1.5	12	15.0
	Gear		24	15.0

연하게 대처할 수 있는 다단 기어장치의 신뢰성평가에 관한 기반을 마련하였다.

Table 9 Strength and durability rating results of multi-stage gear drives in the existing design and redesign

existing design				
2 S T A G E	stage		S.F.	S.F.
			(contact)	(bending)
1	1	Pinion	1.45	2.15
		Gear	1.66	2.15
	2	Pinion	1.08	1.85
		Gear	1.20	1.85
5 S T A G E	1	Pinion	1.85	8.44
		Gear	1.97	11.79
	2	Pinion	1.52	4.21
		Gear	1.62	5.49
	3	Pinion	1.16	2.48
		Gear	1.22	3.19
	4	Pinion	0.90	2.03
		Gear	0.94	2.74
	5	Pinion	1.02	1.98
		Gear	1.06	2.45
redesign				
2 S T A G E	stage		S.F.	S.F.
			(contact)	(bending)
1	1	Pinion	1.44	1.95
		Gear	1.32	1.47
	2	Pinion	1.27	1.88
		Gear	1.45	1.62
5 S T A G E	1	Pinion	1.18	3.41
		Gear	1.26	4.84
	2	Pinion	1.20	3.05
		Gear	1.26	4.01
	3	Pinion	1.15	2.40
		Gear	1.23	3.16
	4	Pinion	1.14	2.78
		Gear	1.19	3.58
	5	Pinion	1.12	2.43
		Gear	1.16	2.98

note: S.F.=safety factor

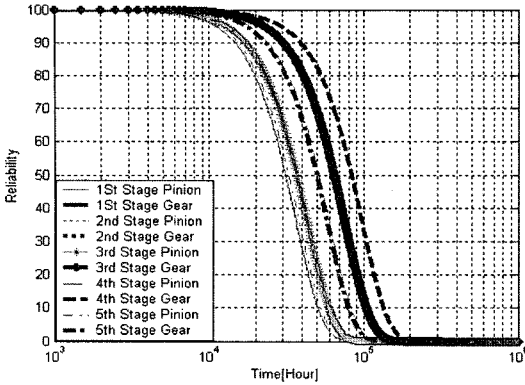


Fig. 4 Reliability of gears and pinions of redesigned 5 stage gear drives

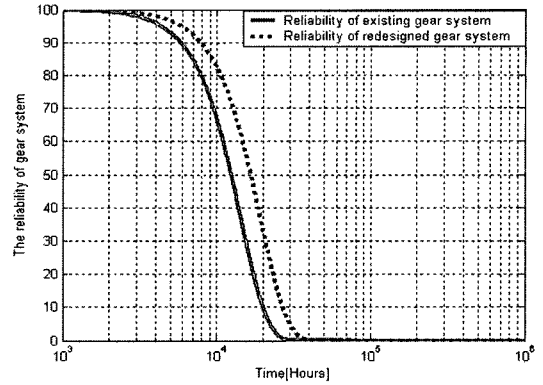


Fig. 5 Reliability of gear system of 5 stage gear drives

6. 결론

본 연구에서는 파손확률을 고려하지 않고 설계된 다단 기어장치에 포함되는 파손에 대한 불확실성을 보완하고 다단 기어장치의 재설계 과정에서 설계자에게 객관적인 지침을 제공하기 위해서 파손확률을 고려한 다단 기어장치의 신뢰도식을 유도하고, 원통기어로 구성된 2단 및 5단 기어장치에 적용하여 신뢰성 평가를 수행 후 평가 결과를 고려하여 재설계를 행하거나 설계자에게 객관적인 재설계의 지침을 제공함으로써 재설계에 유연하게 대처할 수 있도록 하여, 더욱 효율적이며 신뢰성을 만족하는 다단 기어장치의 설계 기반을 마련하였다.

참고 문헌

- (1) Haugen, E. G., 1980, *Probabilistic Mechanical Design*, Wiley, New York.
- (2) Cockerham, G. and White, D., 1975, "Computer-aided design of spur or helical gear train," *Computer Aided Design*, pp. 84-88.
- (3) Yang, S. M., Kang, H. Y., Kim, H. S. and Kim, T.

H., 1996, "A Study on Reliability and Life of an epicyclic gear," *J. of KSPE*, Vol. 13, No. 10, pp. 36-45.

- (4) Lundberg, G. and Palmgren, A., 1952, "Dynamic Capacity of Rolling Bearings," *ACTA Polytechnic, Mechanical Engineering series*, Vol. 2, No. 4.
- (5) Townsend, D. P., Coy, J. J. and Zaretsky, E. V., 1977, "Experimental and Analytical Load-Life Relation for AISI 9310 Steel Spur Gears," *NASA TMX-73590*.
- (6) Bae, I. H. and Chong, T. H., 2002, "A New Method to Find the Best Gear Ratio Using the Simulated Annealing Algorithm," *Proc. Korean Society of Machine Tool Engineers Spring Conference 2002*, pp. 687-692.
- (7) Bae, I. H., Chong, T. H. and Kubo, A., 2003, "Development and Application of an Automatic Design System for Multi-Stage Gear Drives," *Proc. DETC'03, ASME 2003 Design Engineering Technical Conference and Computers and Information in Engineering Conference*.