링기어의 경계조건이 가공오차를 가지는 유성기어열의 정특성에 미치는 영향

천 길 정† · 오 재 국*

Influence of Ring Gear Boundary Conditions on the Static Characteristics of Epicyclic Gear Trains with Manufacturing Errors

Cheon Gill-Jeong† · Oh Jae-Kook*

Key Words : Epicyclic Gear Train(유성기어열), Load Sharing(부하율), Manufacturing Error(가공오차), Position Error(위치오차), Runout Error(런아웃오차), Rim Thickness Ratio(림두께비율), Teeth Thickness Error(이두께오차)

Abstract

A hybrid finite element analysis was used to analyze the influence of ring gear rim thickness and spline number on the static properties of an epicyclic gear system with manufacturing errors. Both of these parameters affected the bearing force and critical stress. The effect of changes in the rim thickness on the load sharing between the gears depended on the type of manufacturing error. Ring flexibility improved the load sharing between planetary gears only in systems with planet tooth thickness or planet tangential errors; for other types of error, ring flexibility worsened the load sharing. To improve load sharing, rim thickness and spline number should be controlled within a specific range. The effect of the ring gear boundary condition was more apparent in a system with errors than in a normal system.

1. 서 론

유성기어열은 많은 장점이 있는데 반하여 그 구조가 복잡하기 때문에, 가공 오차가 있는 경우에 시스템에 미치는 부정적 영향이 매우 크다.[1, 2] 가공오차는 현실적으로 피할 수 없기 때문에, 오차에 의한 부정적 영향을 감소시키기 위한 대책이 필요하나, 기어와 관련된 설계변수들은 기어가 사용되는 시스템의 기능요구조건에 의해 직접적으로 결정되기 때문에, 설계변수들을 변화시킬 수 있는 범위는 극히 제한되게 마련이다. 그에 비하여 비교적 용이하게 변화 시킬 수 있는 설계변수가 링기어의 경계조건에 해당하는 림두께와 지지스플라인에 관련한 설계변수 들이다.

링기어의 림두께가 유성기어의 특성에 미치는 영향에 관해서는 실험적으로나 해석적으로 다수의 연구가 행해졌는데,[3,4] 지금까지의 연구들은 아무런 오차가 없는 이상적인 시스템을 대상으로 하여 림두께 변화에 따른 영향을 규명한 것이 대부분이었으며, 오차를 가지는 유성기어열의 링기어 경계조건에 의한 영향을 분석한 연구는 거의 수행되지 않았다.

Kahraman 과 Vijayakar[3]는 림두께가 유성기어열의 준정적 특성에 미치는 영향을 분석함으로써, 유성기어에 접선방향 오차가 있을 때에 림이 충분한 피로강도를 가지면 림의 유연성이 증가할수록

† 회원, 원광대학교 기계공학부
E-mail : gjcheon@wonkwang.ac.kr
TEL : (063)850-6686 FAX : (063)850-6691
* 원광대학교 대학원 기계공학부

유성기어간의 부하 분배특성이 좋아진다는 사실을 밝혔다. Kahraman 과 Umrani[4]는 림의 유연성이 유성기어열의 동 특성에 미치는 영향을 분석 함으로써, 림두께에 따라 기어열의 공진주파수와 동적응력이 영향을 받는다는 사실을 규명하였다.

하지만 여러 가지 가공오차를 가지는 유성기어열의 정특성에 링기어의 림두께와 지지 스플라인 수가 미치는 영향을 종합적으로 규명한 연구는 아직까지 수행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는, 링기어의 림두께와 링기어를 지지하는 스플라인의 개수를 경계조건을 규정짓는 설계변수로 고려하여, 이들의 변화가 가공오차를 가지는 유성기어시스템의 정특성에 미치는 영향을 검토하였다. 고려한 가공오차는 이두께오차, 런아웃오차 및 위치오차이며, 정특성 비교를 위한 상태변수로는 기어의 지지베어링 반력과 부하분배율 및 임계 치응력을 선정하였다. 본 연구의 결과는 향후에, 다양한 가공오차를 가지는 유성기어시스템의 성능을 개선하기 위한 링기어 설계변수와 지지조건을 최적화 하는데 이용될 수 있을 것으로 예상된다.

2. 본 론

2.1 해석 방법

시스템을 구성하는 요소들의 강체 운동은 기본 운동 방적식을 적용하여 해석하며,[5, 6] 이빨의 변형과 응력 및 베어링 하중들은 복합 유한요소해석법을 적용하여 구한다.[7, 8] 한 쌍의 기어가 맞물리면서 회전할 때, 연속적으로 변화하는 접촉점에서의 치물림 강성과 접촉력을 매 순간 순간 반복적으로 계산하며, 각 기어들의 변형은 기구학적 강체운동 위치에 대해 상대적으로 구해진다.

본 연구에서는 가속도항과 속도항을 무시한 정적 해석을 수행 하였으며, 시스템을 이루는 모든 요소와 링기어 전체를 동시에 고려한 모델링을 이용하였다.

해석에 이용된 모델은 미군용 헬리콥터 (Army OH-58 Kiowa)에 이용되는 시스템으로서, 개략도는 Fig. 1 과 같다.

기어는 평기어이기 때문에 2 차원 모델을 이용하였고, 치형은 수정량 없는 완전 인볼류트 치형으로 가정 하였다. 태양기어와 유성기어의 내륜은 등방성 선형베어링으로 지지되는 것으로 모델링하였다. 병진강성 값은 모두 87.6×10^6 N/m 이며, 회전 강성은 무시하였다. 부하 분배율을 좋게 하기 위하여 캐리어 지지 베어링의 강성은 0 으로 하였다[1, 2]. 유성기어의 개수는 네 개이며, 일정한 크기의 (14000N-m) 입력토크가 외력으로 작용하고, 한 쌍의 이물림 기간 동안에 적용되는 계산회수는 18 회이다. 베어링 반력은 방향은 고려하지 않은 절대치로 계산하였고, 이뿌리에서 이끝까지의 전 표면에서 발생되는 주응력중, 최대 인장응력과 압축응력을 각각 최대 최소 임계응력으로 정의 하였다.

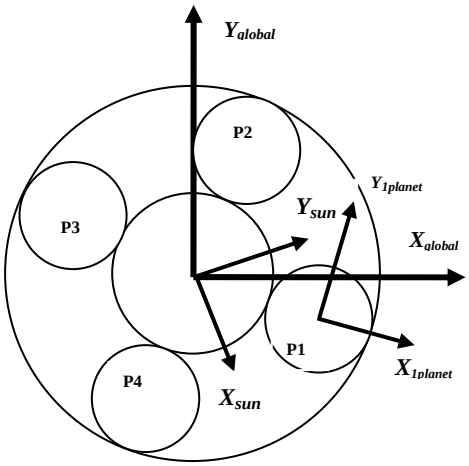

Fig. 1 Schematics of an epicyclic gear train system

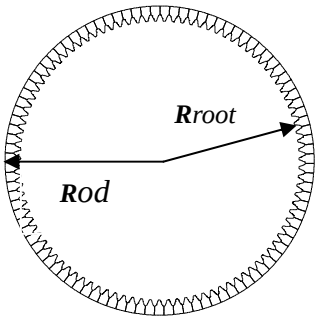

Fig. 2 Parameters related with rim thickness ratio

부하율(load sharing)은 각 유성기어 반력을 전체 반력의 합으로 나눈 값으로 정의하며, 과부하율(overload)은 최대부하율에서 평균부하율(25%)을 뺀 값으로 정의 하였다.

링기어의 림두께는 식 (1)과 같이 정의되는 무차원변수 림두께비율(RTR: Rim Thickness Ratio)로 규정하였으며, 0.05, 0.06, 0.1 및 0.2 의 값을 갖도록 변화 시켰다(Fig. 2). 스플라인의 폭은 2.5mm, 높이는 3.36mm 이고 압력각은 14.5 °이며, 스플라인 수(NS: Number of Spline)는 4, 16 및 64 개까지 변화시켰다.

태양기어와 유성기어의 베어링 반력은 오차가 없고 링기어의 변형도 없는 경우의 반력값에 대한 백분율로 계산되었으며, 임계응력은 오차가 없고 RTR=0.2, NS=64 인 경우의 값에 대한 백분율로

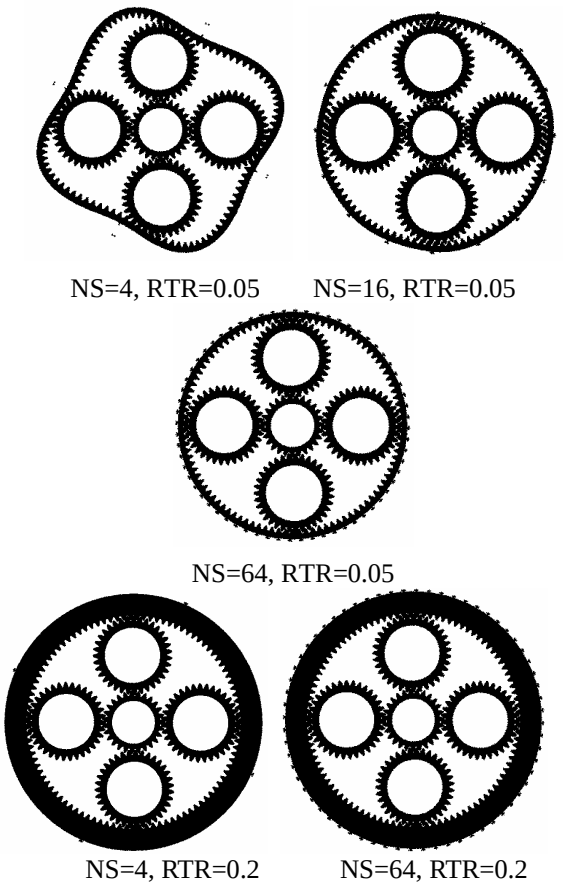

Fig. 3 Deformed shapes of the models with various design parameters

계산되었다.

$$RTR = \frac{Rod - Rroot}{Rroot} \tag{1}$$

캐리어의 중심위치를 전체좌표계의 기준위치로 간주하였으며, 태양기어와 링기어의 위치오차는 양의 x 방향 만으로 발생하는 것으로 가정하였고, 유성기어의 위치오차는 1 번 유성기어(p1)만이 유성기어의 국소좌표계에 대하여 반경방향(x)과 접선방향(y)으로 발생할 수 있는 것으로 가정하였다 (Fig. 1). 런아웃 오차는 기어의 축중심을 피치원 중심과 어긋나게 하여 주어지며, 이두께 오차는 피치원주 상에서 이가 두꺼워지는 방향으로 잇면을 증가시켜 부여하였다.

2.2 해석 결과

Fig. 3 은 오차가 없는 정상조건의 경우, 여러 가지 림두께와 스플라인수 변화에 따른 링의 변형과 응력을 보여준다. 상대적 비교를 쉽게 하기 위해서 변형량을 모두 30 배 확대하였다.

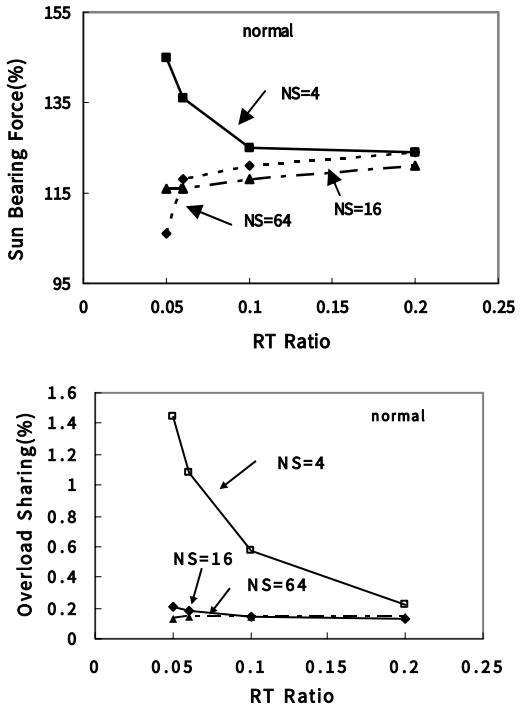

Fig. 4 Sun-bearing forces and overload sharing as a function of NS and RTR under normal condition

림두께가 작고(RTR=0.05) 스플라인수도 적을 때(NS=4)는 링의 전역적 변형과 발생응력의 크기가 크지만, 스플라인수가 증가하여 16 개 정도만 되더라도 링의 변형과 응력이 많이 억제되며, 64 개인 경우에는 링의 변형이 거의 발생하지 않는다. 림두께가 클 때는(RTR=0.2) 스플라인수 변화에 따른 영향이 매우 적다. 이는 림이나 스플라인이 모두 링기어의 지지 조건으로 작용한다는 걸 의미한다.

정상상태에서 스플라인수와 림두께 변화에 따른 태양기어 지지베어링의 반력과 과부하율을 Fig. 4 에 나타내었다.

림두께가 작을수록 스플라인수에 의해 많은 영향을 받으며, 스플라인수가 많은 경우와 아주 적은 경우는 서로 반대의 경향을 갖는다. 림두께가 작고 스플라인수도 매우 적은 경우에는, 림의 전역적 비대칭 변형이 커서 유성기어간의 부하분배율이 나빠지기 때문에 과부하율과 함께 태양기어 지지베어링의 반력이 증가하나, 림두께가 작고 스플라인수가 매우 많은 경우에는, 많은 지지 스플라인 때문에 전역적 변형은 억제되나 얇은 림두께에 기인하는 림의 유연성 때문에 국부적 변형이 수월하여, 유성기어간 부하분배가 좋아지고 아울러 태양기어 지지베어링의 반력도 감소하는 것으로 추정된다.

스플라인수가 어느 정도 이상인 경우에는 림두

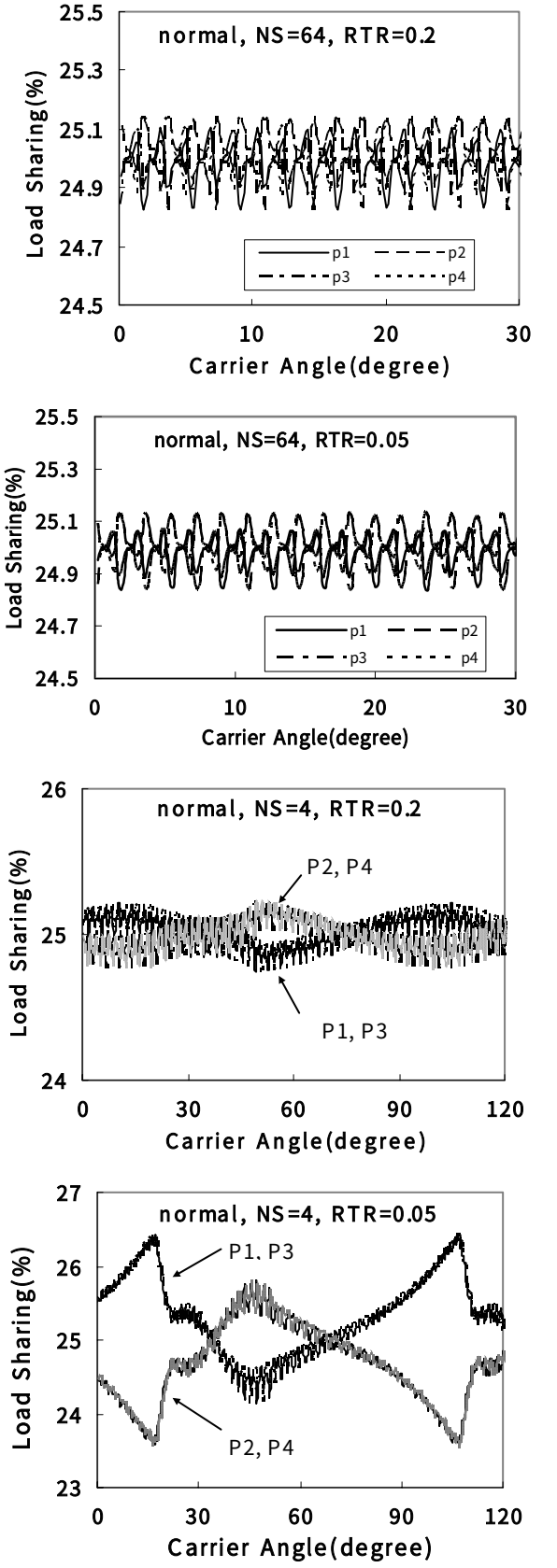

Fig. 5 Load sharing as a function of the carrier angle for various values of NS and RTR under normal condition

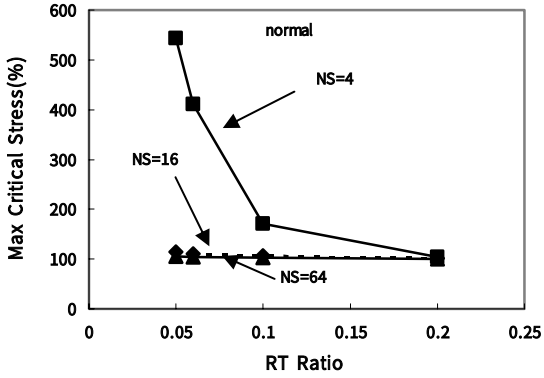

Fig. 6 Maximum critical stress as a function of NS and RTR under normal condition

께가 달라져도 과부하율에 거의 차이가 없기 때문에 적절한 림두께와 스플라인수를 결정할 필요가 있다.

스플라인수와 관계없이 림두께가 작은 경우가 림두께가 큰 경우보다 언제나 과부하율이 크게 나타나는데, 이와 같은 결과는 림두께가 얇을수록 부하분배율이 좋다는 기존에 발표된 결과와는 상반된 결과이다.[1~3]

Fig. 5 는 정상상태에서의 여러 가지 경계조건에 따른 부하율을 보여주고 있다. 스플라인수가 많을 때에는 림두께가 달라져도 부하율이 거의 변하지 않고 치물림에 의한 변동 성분 만이 발생하나, 스플라인수가 적을 때에는 유성기어들이 스플라인부위를 지나는 주기에 해당하는 변동성분이 추가로 발생함으로써, 이 성분이 림의 전역적 변형에 기인하는걸 확인할 수 있다. 또한 림의 전역적 변형에 기인하는 부하율의 변동폭은 치물림에 기인하는 변동폭 보다 훨씬 더 크다.

마주보는 한 쌍의 유성기어의 부하가 증가하는 만큼 다른 한 쌍의 부하가 줄어들기 때문에, 변동폭이 증가할수록 과부하율도 증가하며, 바로 이러한 현상 때문에 림두께가 얇아질수록 부하분배율이 나빠지게 된다.

Fig. 6은 정상조건에서의 최대임계응력을 보여주는 그림이다. 본 연구에서는 링기어의 림두께만을 변화시켰기 때문에 링기어의 치응력만을 임계응력으로 고려하였다.

스플라인수가 일정 수 이상인 경우에는 림두께 변화에 따른 임계응력의 차이가 거의 없으나, 스플라인수가 특정치 보다 적을 때에는 림두께 변화에 따라 임계응력에 큰 차이가 발생하며, 특히 림두께가 작을수록 급격히 증가한다. 그 이유는 림두께와 스플라인수가 매우 작을 경우 링기어가 매우 큰 전역적 변형을 일으키기 때문인 것으로 추

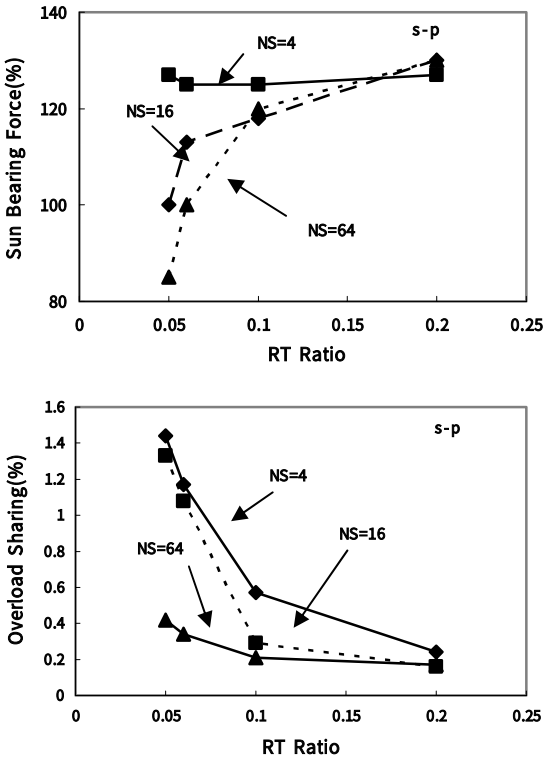

Fig. 7 Sun-bearing forces and overload sharing as a function of NS and RTR in a system with a sun positioning error

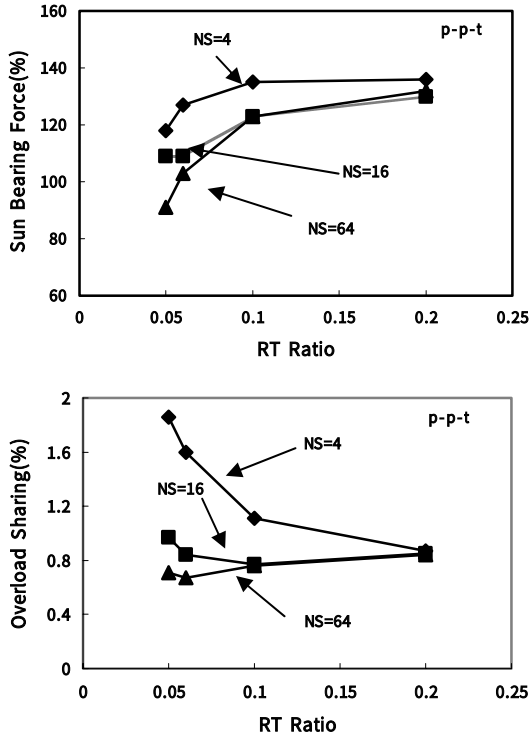

Fig. 8 Sun-bearing forces and overload sharing as a function of NS and RTR in a system with a planet tangential positioning error

정된다.

링기어의 경계조건이 임계응력에 미치는 영향은, 여러 가지 가공오차가 있는 경우에도 모두 정상조건에서와 동일한 경향을 보인다.

Fig. 7은 태양기어에 위치오차가 있을 경우의 태양기어 지지베어링의 반력과 과부하 변화 경향을 보여준다. 전체적인 경향은 정상조건에서와 유사하나, 설계변수에 의한 영향이 정상조건에서 보다도 더 크다.

태양기어에 런아웃오차가 있는 경우에, 상태변수들의 전체적인 경향은 위치오차가 있는 경우에서와 거의 유사하다.

태양기어에 이두께오차가 있을 경우의 과부하율은 정상조건에서와 유사한 경향을 보이나, 태양기어 지지베어링의 반력은 다른 경우와 달리 스플라인수가 많을 때가 적을 때보다 오히려 반력이 더 크다. 그 이유는 양의 이두께오차가 있을 경우, 정상조건의 경우보다 회전 진행방향으로 이가 앞서서 진행하는 효과가 있고, 그로 인하여 회전방향 변위와 물림위상(phasing)에 영향을 미쳐 유성 기어들간의 대칭성을 악화시키는데, 스플라인수가 적은 경우에 스플라인수가 많은 경우보다 림의 변형이 쉬워 이의 위치가 쉽게 이동함으로써 비대칭성을 많이 완화시키기 때문인 것으로 추정된다.

링기어에 위치오차와 런아웃오차 및 이두께오차가 있는 경우에 여러 가지 상태변수들의 변화 경향은, 태양기어에 동일한 오차가 있을 때의 변화 경향과 유사하다. 그 이유는, 링기어의 제반 오차들이 가지는 기구학적 효과들이 태양기어의 오차들이 가지는 기구학적 효과들과 유사하기 때문인 것으로 추정된다.

유성기어에 반경방향(x) 위치오차가 있을 경우의 제반 상태변수들의 변화 경향은 정상조건에서와 유사하다.

Fig. 8 은 유성기어에 접선방향(y) 위치오차가 있을 경우의 태양기어 지지베어링 반력과 과부하율의 변화 경향이다.

다른 경우들과는 달리 스플라인수가 매우 적은 경우에도 림두께가 작을수록 반력이 줄어든다. 또한 스플라인수가 일정 크기 이상인 경우, 특정 범위 이내에서 림두께가 얇아질수록 과부하율이 감소하여, 기존에 발표된 결과와 일치 하는 현상을 보인다. 유성기어가 접선방향 위치오차를 가지면, 마주 보는 한 쌍의(p1-p3, p2-p4) 유성기어들이 서로 다른 평균값을 가지는데, 림두께가 작거나 스플라인수가 적은 경우 림의 유연성에 의한 변형이 특정 유성기어의 접선방향오차에 의해 과도하게

집중된 과부하를 완화시키는 효과를 내는 것으로 사료된다. 이와 같은 결과에 따르면, 림두께가 얇아질수록 부하분배율이 좋아진다는 기존의 연구결과들은 림의 과도한 변형을 허용하지 않을 정도의 경계조건을 가지는 대상들을 모델로 하였을 것으로 추정되며, 따라서 유성기어열의 부하분배율을 좋게 하기 위해서는 림두께를 무조건적으로 얇게 하는 것보다 림두께나 지지스플라인수를 적정 범위 내에서 종합적으로 관리하는 편이 합리적일 것으로 판단된다.

유성기어의 런아웃오차에 의한 상태변수들의 변화 경향은 태양기어나 링기어의 런아웃오차에 의한 변화 경향과 유사하다.

유성기어에 이두께오차가 있는 경우에 상태변수들의 변화 경향은 접선방향 위치오차가 있는 경우와 유사하다. 태양기어 지지베어링의 반력은 스플라인수가 많고 림두께가 얇을수록 작아지며, 과부하율은 스플라인수와 림두께가 특정 범위내에 있을 때에만 림두께가 얇아질수록 줄어든다.

부하율에 관한 이와 같은 경향은 유성기어에 접선방향 오차가 있는 경우와 동일한데, 두 경우 모두 네 유성기어가 가지는 부하율의 평균값이 서로 같지 않다는 공통점이 있다. 그 밖의 다른 종류의 오차가 있거나 정상조건인 경우에는, 유성기어들의 부하율이 동일한 평균값을 중심으로 변동하기 때문에, 림의 유연성 증가로 인한 부하율 변동폭의 증가는 유성기어들 사이의 부하율 차이를 증가시키는 효과를 갖는다.

이상의 결과를 종합하면, 림이 두꺼운 경우에는 응력 측면에서는 유리하나 태양기어지지 베어링의 반력면에서 불리하고, 림이 얇고 스플라인수가 적은 경우에는 베어링반력 및 부하분배율 모든 면에서 불리하며, 림이 얇고 스플라인수가 많은 경우가 모든 측면에서 제일 적합한 설계조건인 것으로 판단된다.

3. 결 론

복합유한요소법을 이용하여, 유성기어시스템에 여러 가지 가공오차들이 있는 경우에, 링기어의 림두께와 지지 스플라인수가 지지베어링반력과 부하분배율 및 임계응력등과 같은 상태변수에 미치는 영향을 분석하였다.

상태변수들은 링기어의 경계조건에 의해 많은 영향을 받으며, 오차의 종류에 따라 그 영향이 다르고, 링기어 경계조건이 상태변수에 미치는 영향은 정상조건에서보다도 오차가 있을 경우에 더 크다.

지지베어링의 반력 측면에서는 오차의 종류에 관계없이 대체로 림두께가 얇고 스플라인수가 많을수록 유리하며, 임계응력 측면에서는 림두께가 두껍고 스플라인수가 많을수록 유리하다.

유성기어 사이의 균등한 부하분배 측면에서는 오차의 종류에 따라 경계조건에 의한 영향이 다르다. 유성기어에 접선방향오차나 이두께오차가 있는 경우에는 부하분배를 좋게 하는 림두께와 스플라인수에 최적치가 존재하며, 정상상태나 다른 종류의 오차가 있는 경우에는 림이 두껍고 스플라인수가 많을수록 유리하다. 따라서 링기어의 최소 림두께는 임계응력 측면뿐만 아니라 부하분배 측면까지도 고려하여 결정되어야 한다.

여러가지 오차들 중에서 유성기어의 접선 방향 오차가 시스템의 특성에 미치는 영향이 제일 크므로, 림두께와 스플라인수는 적정 범위 내에서 최적치를 갖도록 결정되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

(1) Bodas, A., Kahraman, A, 2001, “Influence of Carrier and Gear Manufacturing Errors on the static Planet Load Sharing Behavior of Planetary Gear Sets,” *Proc. JSME Int. Conf. on Motion and Power Transmissions*, MPT2001-Fukuoka, pp. 633~638.

(2) James, B., Harris, O., 2002, “Predicting Unequal Planetary Load Sharing Due to Manufacturing Errors and System Deflections, With Validation Against Test Data”, *SAE2002-01-0699*.

(3) Kahraman, A, Vijayakar, S., 2001, “Effect of Internal Gear Flexibility on the Quasi-Static Behavior of a Planetary Gear Set,” *ASME J. of Mechanical Design*, Vol. 123, pp. 408~415.

(4) Kahraman, A, Umrani, M., 2001, “A Deformable Body Dynamic Analysis of Planetary Gears with Thin Rims,” *Proceedings of 2001 India-USA Symposium on Emerging Trends in Vibration and Noise*, pp. 1~10.

(5) Lin J., Parker R. G., 1999, “Analytical Characterization of the Unique Properties of Planetary Gear Free Vibration,” *ASME J. of Vibration and Acoustics*, Vol. 121, pp. 316~321.

(6) Lee Jeong-Han, Ryu Hyoung-Tae, Cheon Gill-Jeong, 1998, “A Study on the Dynamic Characteristics of an Epicyclic Gear Trains Supported with Journal Bearing,” *Transactions of the KSME*, A, Vol. 22, No. 1, pp. 198~205.

(7) Vijayakar, S., 1991, “A Combined Surface Integral and Finite Element Solution for a Three-Dimensional Contact Problem,” *Int. J. of Numerical Methods Eng.*, Vol. 31, pp. 525~545.

(8) Parker, R. G., Agashe, V., Vijayakar, S. M., 2000, “Dynamic Response of a Planetary Gear System using a Finite Element/Contact Mechanics Model,” *ASME J. of Mechanical Design*, Vol. 122, pp. 304~310.