

코리올리 효과를 고려한 유성기어열의 동특성

윤인성* · 천길정†

(2001년 12월 26일 접수, 2003년 2월 11일 심사완료)

Dynamic Characteristics of an Epicyclic Gear Train Considering Coriolis Effect

Youn In-Seong and Cheon Gill-Jeong

Key Words: Epicyclic Gear Train(유성기어열), Dynamic Characteristics(동특성), Gear Locus(기어 궤적), Coriolis Effect(코리올리 효과)

Abstract

In this paper, dynamic characteristics of an epicyclic gear train considering Coriolis effect have been studied. High speed transmissions such as in an aircraft engines will be strongly influenced by Coriolis effect. Gear meshes were modelled as springs and dampers with periodically varying mechanical constants with time. The loci of planet gear, sun gear, and carrier were analyzed. Maximum values of mesh forces between sun gear and planet gear(S/P) as well as between planet gear and ring gear(P/R) have been simulated as function of rotating speed.

기호설명

F : 치물림력
 J : 관성모멘트
 K : 강성
 M : 질량
 n : 유성기어 개수
 R : 기초원 반경
 R_C : 캐리어 중심에서 유성기어 베어링 중심까지의 거리
 T : 토크
 x : 수평변위
 y : 수직변위
 β_i : x 축에서 1번째 유성기어까지의 각도

ω_C : 캐리어의 각속도
 ϕ : 수직 압력각
 θ : 회전각
 ζ_G, ζ_S : 임계감쇄계수

하첨자

C : 캐리어
 D : 구동기
 L : 부하
 P : 유성기어
 S : 썬기어
 DS : 구동축
 LS : 부하축
 i : i 번째 유성기어
 i/C : 캐리어 좌표에 대한 1번째 유성기어
 PK_i, SP_i : 유성기어/링기어 물림, 썬기어/유성기어 물림
 e, out : 입력, 출력

* 원광대학교 대학원 기계공학부

† 책임저자, 회원. 원광대학교 기계공학부

E-mail : gjcheon@wonkwang.ac.kr

TEL : (063)850-6686 FAX : (063)850-6686

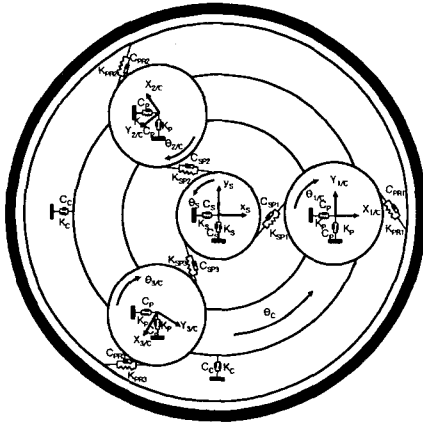


Fig. 1 Schematic diagram of planetary gear train system

1. 서론

거의 모든 기계시스템의 동력전달장치로 이용되는 기어열(gear train)은 기계 시스템의 성능과 수명에 다양한 형태로 영향을 미친다.

여러 가지 기어열 중에서도 특히 유성기어열(epicyclic gear train)은 일반 감속기에 비해 체적이 작고, 동력 전달 효율이 높으며, 입출력축이 일직선상에 위치하게 되므로, 시스템 구성에 유리하여 산업 전반에 걸쳐 중요한 기계요소로 사용되고 있다.

기어의 치강성에 대한 연구는 Cornell,^(1,2) Tavakoli & Houser⁽³⁾ 등에 의해 연구되어졌고, 이를 이용한 유성기어열의 해석과 각 인자들에 관한 연구는 Kasuba⁽⁴⁾와 Kahraman⁽⁵⁾ 등에 의해 수행되어졌다.

Hidaka⁽⁶⁾ 등은 유성기어열에 대한 실험을 집중적으로 수행하였고, 천^(7,8) 등은 저널베어링으로 지지된 유성기어열에 대하여 동특성 해석을 수행하였으며, Parker⁽⁹⁾ 등은 플래너리형 유성기어열을 대상으로 위상차에 의한 고유진동모드를 해석하였다.

항공기에 사용되는 터보엔진이나 터보식 발전기에 사용되는 유성 기어열은 고속으로 회전하기 때문에 코리올리 효과를 많이 받을 것으로 예상되나, 아직까지 캐리어의 회전에 의한 코리올리 효과를 고려한 고속 동특성에 대한 연구 결과는

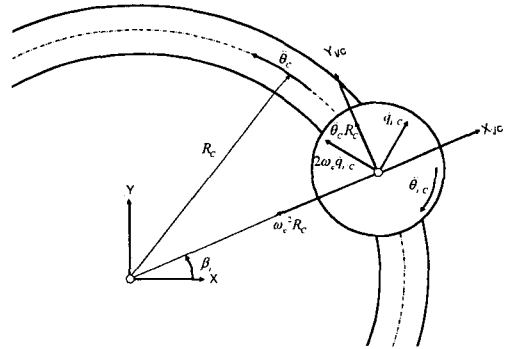


Fig. 2 Acceleration of planet gear

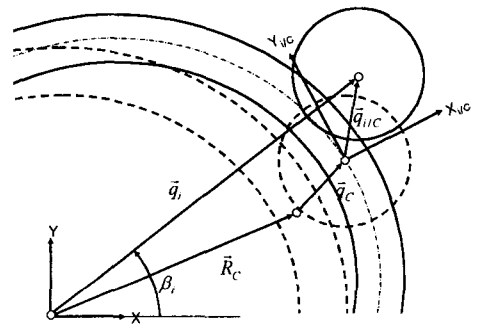


Fig. 3 Mapping of planet gear's displacement

발표되고있지 않다.

따라서 본 연구에서는 링기어가 고정되고 캐리어가 회전하는 경우인 플래너리형 유성 기어열을 대상으로 코리올리 효과를 고려한 동특성을 해석하고, 그에 따른 영향을 검토하였다.

2. 동특성 해석

2.1 유성기어열의 모델링

i 번째 유성 기어에서의 토크 평형을 고려하면 다음의 운동방정식이 얻어진다.⁽⁴⁾

$$J_P \ddot{\theta}_{i/c} + R_P(F_{PRi} - F_{SPi}) = 0 \quad (1)$$

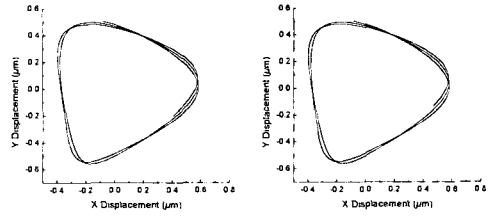
Table 1 Specification of the gears

Parameter	Sun Gear	Planet Gear	Ring Gear
Number of Teeth	26	25	76
Modulus of Elasticity	200 GPa		
Poisson's Ratio	0.3		
Number of Planet	3, 4, 5		
Module	2.5 mm		
Width	30 mm		
Pressure Angle	22.5 Degree		

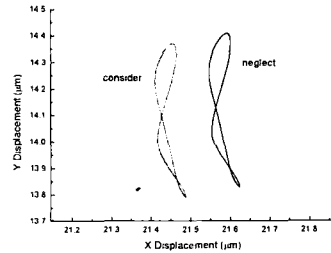
Table 2 Specification of Planetary gear train

Parameter	Value
Mass of Driver	4.295 kg
Mass of Loader	8.590 kg
Mass of Sun Gear	0.503 kg
Mass of Planet Gear	0.465 kg
Stiffness of Planet Bearing	1.0×10^8 N/m
Stiffness of Shaft	5.0×10^7 N/m
Stiffness of Ball Bearing	1.0×10^7 N/m
Inertia of Driver	0.0124043 kg-m ²
Inertia of Loader	0.024086 kg-m ²
Inertia of Sun Gear	1.6991×10^{-4} kg-m ²
Inertia of Planet Gear	1.4524×10^{-4} kg-m ²
Bearing Width	30 mm
Diameter of Journal Bearing	25 mm
Viscosity	0.01 Pa-sec

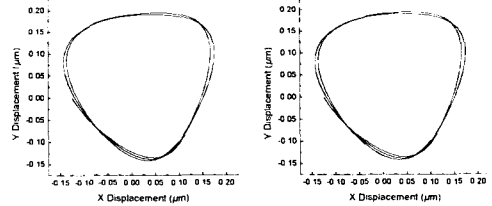
i 번째 유성 기어에서의 x, y 방향 힘 평형을 고려하면 다음과 같은 운동방정식이 얻어진다.



(a) Sun(neglect) (b) Sun(consider)



(c) Planet



(d) Carrier(neglect) (e) Carrier(consider)

Fig. 4 Gear center locus of 3-Planet gear train : 20000 rpm

$$M_P \ddot{x}_{i/C} - F_{SPi} \cos \alpha + F_{PRi} \cos \alpha + F_{Ni} = 0 \quad (2)$$

$$M_P \ddot{y}_{i/C} - F_{SPi} \sin \alpha - F_{PRi} \sin \alpha + F_{Ti} = 0 \quad (3)$$

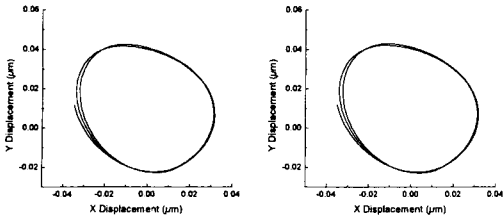
단,

$$F_{Ni} = K_{Px} \ddot{x}_{i/C} + C_P \dot{x}_{i/C}$$

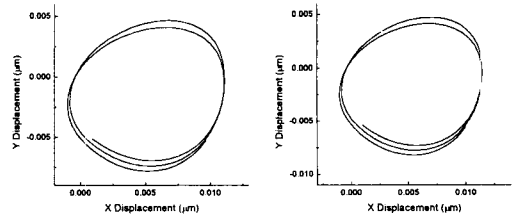
$$F_{Ti} = K_{Py} \ddot{y}_{i/C} + C_P \dot{y}_{i/C}$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \phi \text{ 이다.}$$

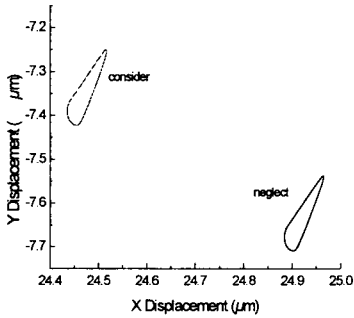
캐리어 기준좌표계로 기술한 유성기어의 가속도를 전체좌표계에 대하여 나타내주기 위하여 유성기어가 가지는 모든 가속도 성분을 표시하면



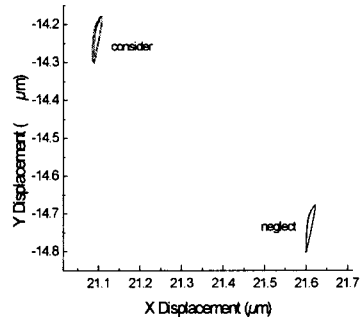
(a) Sun(neglect) (b) Sun(consider)



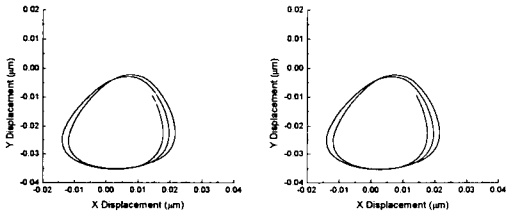
(a) Sun(neglect) (b) Sun(consider)



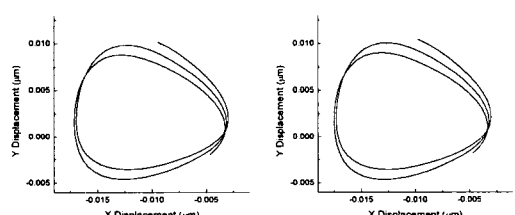
(c) planet



(c) Planet



(d) Carrier(neglect) (e) Carrier(consider)



(d) Carrier(neglect) (e) Carrier(consider)

Fig. 5 Gear center locus of 3-Planet gear train : 50000 rpm

Fig. 6 Gear center locus of 3-Planet gear train : 70000 rpm

Fig. 2와 같다.

Fig. 3은 전체좌표계에 대한 유성기어의 변위를 캐리어 기준 좌표계에 대한 성분으로 나타내기 위한 그림이다.

2.2 유성기어열의 동특성 해석 결과

해석에 이용된 기어열의 제원은 Table 1, 2와 같다.

2.2.1 기어 중심의 궤적

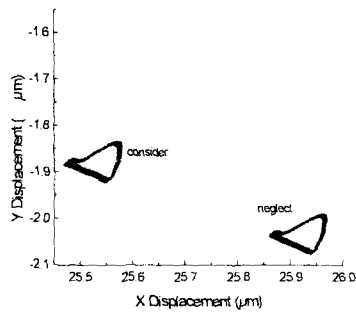
Fig. 4~6은 유성기어가 3개인 경우에, 입력축의 속도 변화에 따른 기어 중심의 궤적이다.

선기어와 캐리어의 중심은 원점을 중심으로

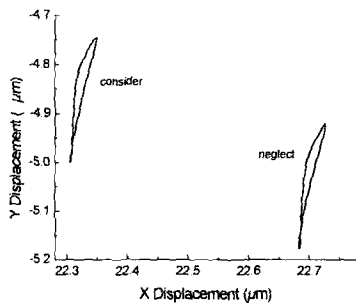
회전하는 궤적을 이루고, 회전속도가 증가할수록 원형에 가까워진다.

반면에 유성기어의 궤적은 중심으로부터 바깥 방향으로의 편심이 있는데, 이는 캐리어의 자전에 따른 원심력 때문인 것으로 판단된다. 또한 속도가 증가할수록 진행방향과 반대방향으로 궤적 중심이 이동하는 경향을 보이는데, 이것은 유성기어의 관성에 의한 영향 때문일 것으로 판단된다.

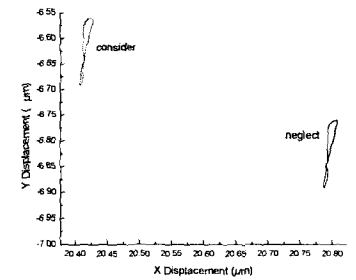
선기어와 캐리어 궤적의 크기나 모양은, 속도 변화에 관계없이 코리올리 효과를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우에 모두 있어서 거의 차이가 없다. 반면에 유성기어의 경우에는 대략 20,000



(a) 3-planet



(b) 4-planet



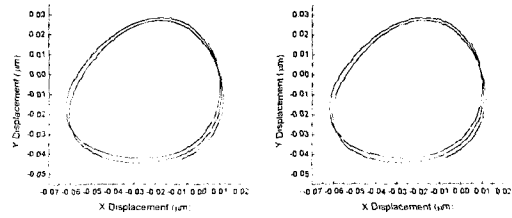
(c) 5-planet

Fig. 7 Planet gear center locus : 40000 rpm

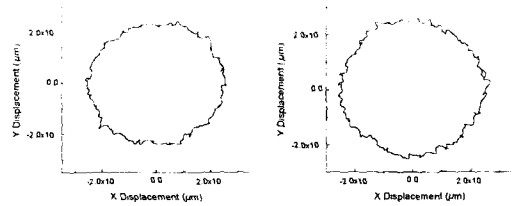
rpm 이상에서부터, 두 경우 사이에 궤적의 위치 차이가 발생하는데, 코리올리 효과를 고려한 경우가 그렇지 않은 경우에 비하여 궤적이 중심 안쪽으로 치우쳐 나타나며, 회전 속도가 높아질수록 치우치는 경향이 증가한다.

Fig. 7~8은 입력축의 회전속도가 40000 rpm인 경우에 대하여, 유성기어 개수 변화에 따른 유성기어와 캐리어의 궤적을 서로 비교한 결과이다.

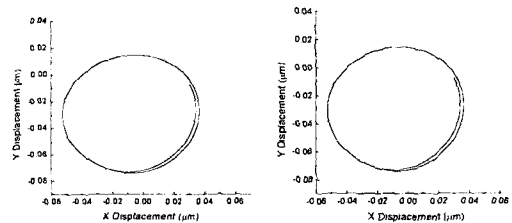
코리올리 효과에 따른 영향은 역시 유성기어의



(a) 3-planet(neglect) (b) 3-planet(consider)



(c) 4-planet(neglect) (d) 4-planet(consider)



(e) 5-planet(neglect) (f) 5-planet(consider)

Fig. 8 Carrier center locus : 40000 rpm

경우에만 나타나며, 유성기어의 개수가 4개인 경우가 3개나 5개인 경우보다 궤적의 크기가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 유성기어의 개수가 짝수인 경우, 대칭위치에 배치된 유성기어들끼리 가 진력을 서로 상쇄시키는 효과에 기인하는 것으로 추정된다.

2.2.2 치면력

Fig. 9는 3개의 유성기어를 가지는 유성기어열에 대하여 코리올리 효과를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 치면력을 보여준다.

S/P 물림의 경우가 P/R 물림의 경우보다 치면력이 크게 발생되며, 코리올리 효과는 S/P 물림이나 P/R 물림 모두에 있어서 치면력에 별다른 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

Fig. 10은 4개와 5개의 유성기어를 가지는 유성기어열의 치면력을 나타낸다. 대체적으로 S/P 물

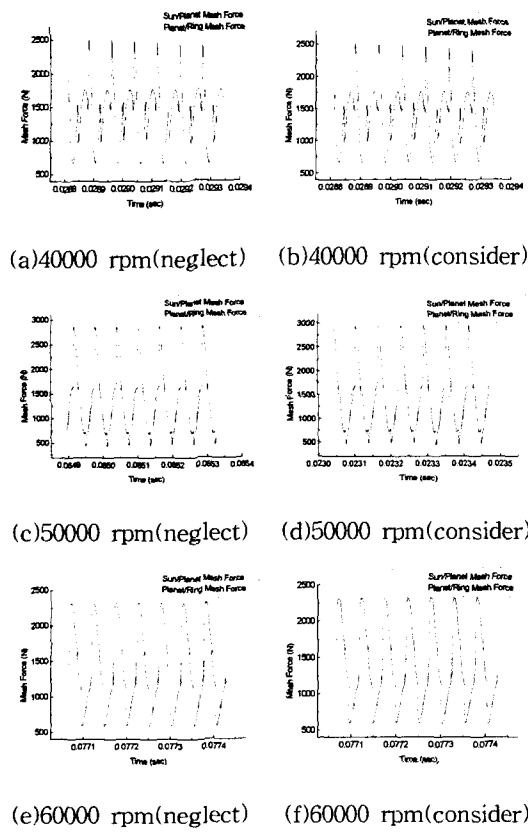


Fig. 9 Mesh force of 3-planet gear train

림간 치면력이 P/R 물림간 치면력보다 크게 나타난다.

치면력은 유성기어의 개수가 증가할수록 감소하는데, 입력축의 부하가 유성기어의 개수만큼 여러 곳으로 분담되기 때문이다.

2.2.3 베어링 반력

Fig. 12와 Fig. 13은 선기어의 회전속도가 60000rpm일 때 코리올리스 효과를 고려한 선기어 지지 베어링 반력과 유성기어 지지 베어링 반력을 각각 나타낸다.

4개의 유성기어를 가지는 유성기어열의 선기어 베어링 반력이 3개와 5개의 유성기어를 가지는 기어열들의 그것 보다 훨씬 작은 이유는, 4개의 유성기어를 가지는 유성기어열의 선기어 궤적이 훨씬 작기 때문인 것으로 판단된다.

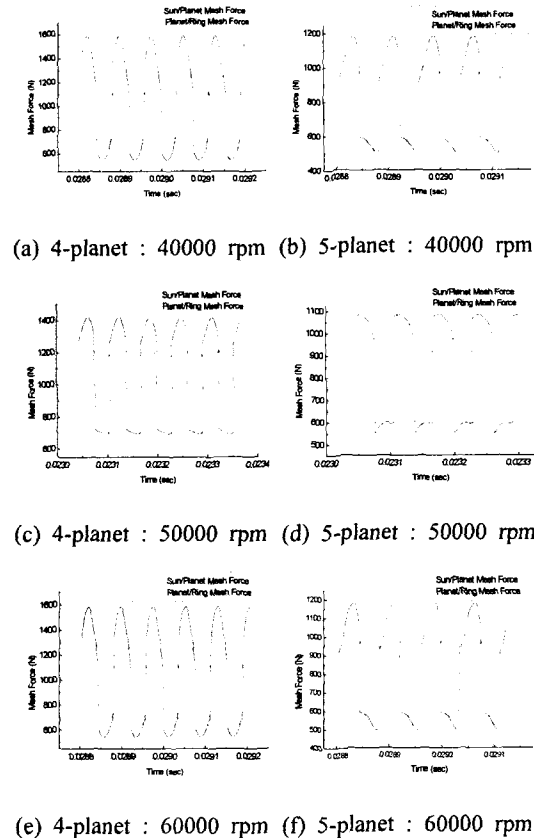
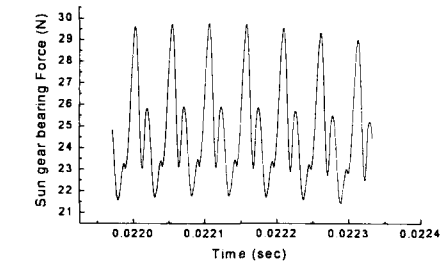


Fig. 10 Mesh force of 4-planet and 5-planet gear train

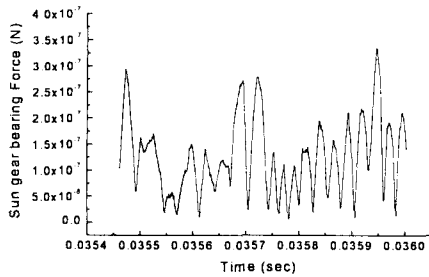
유성기어 베어링 반력이 선기어 베어링 반력보다 훨씬 큰 이유는 유성기어 베어링 강성이 선기어 베어링 강성보다 크기 때문이다.

3. 결론

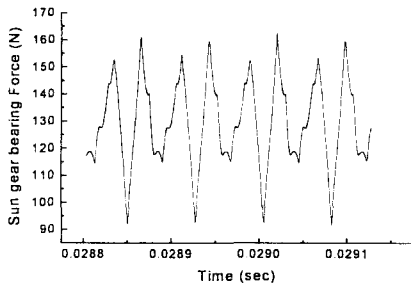
기어치를 시간에 따라 값이 변하는 스프링과 감쇠기로 근사하여 유성 기어열의 회전 진동에 의한 동특성을 규명하였다. 코리올리 효과를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대하여, 입력 회전수와 유성기어의 개수를 변화 시켜가면서 치면력과 기어의 중심 궤적, 기어 지지 베어링에 작용하는 동하중을 구하였다.



(a) 3-planet

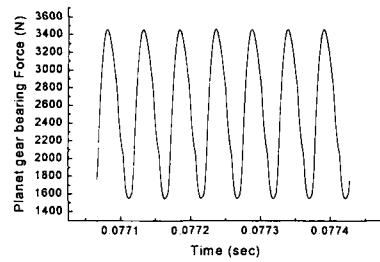


(b) 4-planet

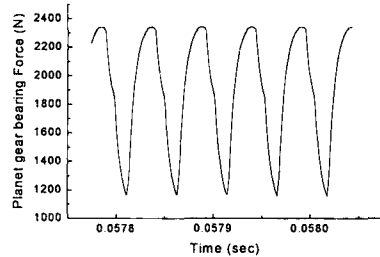


(c) 5-planet

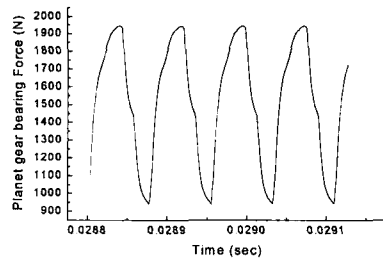
Fig. 11 Sun gear bearing force : 60000 rpm



(a) 3-planet



(b) 4-planet



(c) 5-planet

Fig. 12 Planet gear bearing force : 60000 rpm

참고문헌

이상의 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 코리올리 효과는 선기어의 회전속도가 20000 rpm 이상부터 점차 나타나고, 속도가 증가할수록 그 경향이 증가한다.
- (2) 코리올리 효과는 기어 중심 궤적의 크기, 형상 및 치면력에 거의 영향을 미치지 않는다.
- (3) 코리올리 효과는 유성기어 중심 궤적의 위치를 안쪽으로 치우치게 한다.
- (4) 유성기어가 4개인 경우가 3개나 5개인 경우에 비하여 기어 중심 궤적과 베어링 반력이 작다.

- (1) Cornell, R. W., Westervelt, W. W., 1978, "Dynamic Tooth Loads and Stressing for High Contact Ratio Spur Gears," *Trans. ASME J. of Mechanical Design*, Vol. 100, pp. 69~76.
- (2) Cornell, R. W., 1981, "Compliance and Stress Sensitivity of Spur Gear Teeth," *Trans. ASME J. of Mechanical Design*, Vol. 103, pp. 447~459.
- (3) Tavakoli, M. S., Houser, D. R., 1986, "Optimum Profile Modifications for the Minimization of Static Transmission Errors of Spur

- Gears," *Trans. ASME J. of Mech. Transm. and Auto. in Design*, Vol. 108, pp. 86~95.
- (4) Kasuba, R., August, R., 1984, "Gear Mesh Stiffness and Load Sharing in Planetary Gearing," *ASME, 84-DET-229*.
- (5) Kahraman, A., 1994, "Planetary Gear Train Dynamics," *Trans. ASME J. of Mechanical Design*, Vol. 116, pp. 713~720.
- (6) Hidaka, T., Terauchi, Y., 1976, "Dynamic Behavior of Planetary Gear (1st Report, Load Distribution in Planetary Gear)," *Bulletin of JSME*, Vol. 19, No. 132, pp. 690~698.
- (7) Lee Jeong-Han, Ryu Hyoung-Tae, Cheon Gill-Jeong,, 1998, "A Study on the Dynamic Characteristics of Epicyclic Gear Train Supported with Journal Bearing," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 22, No. 1, pp. 198~205.
- (8) Ruy Hyoung-Tae, Lee Dong-Hwan, Cheon Gill-Jeong, 1998, "An Experimental Study on the Dynamic Characteristics of Epicyclic Gear Train Supported with Journal Bearing," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 22, No. 8, pp. 1566~1576.
- (9) Lin, J., Parker, R. G., 1999, "Analytical Characterization of the Unique Properties of Planetary Gear Free Vibration," *Trans. ASME J. of Vibration and Acoustics*, Vol. 121, pp. 316~321.