한국기계가공학회지, 제13권, 제5호, pp.8～14 (2014.10) ISSN 1598-6721 (Print)
Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol.13 No.5, pp.8~14 (2014.10) ISSN2288-0771 (Online)

http://dx.doi.org/10.14775/ksmpe.2014.13.5.008

◆특집◆ 기어

굴삭기용 선회감속기의 베어링 특성이 기어 하중 분포에 미치는 영향 분석

김정길*, 박영준#, 이근호*, 김재훈**
(#,*한국기계연구원 시스템신뢰성연구실, ** 충남대학교 기계설계학과)

Effects of Bearing Characteristic on the Gear Load Distribution in the Slewing Reducer for Excavator

Jeong-Gil Kim*, Young-Jun Park#, Geun-Ho Lee*, Jae-Hoon Kim*
(Received 29 September 2014; received in revised form 5 October 2014; accepted 9 October 2014)

ABSTRACT

A slewing reducer consists of two planetary gearsets which require a good load distribution over the gear tooth flank for enhanced durability. This work investigates how the bearing characteristics influence the load distribution over the gear tooth flank. A complete system model is developed to analyze a slewing reducer, including the non-linear mesh stiffness of the gears and the non-linear stiffness of bearings. The results indicate that the type, arrangement and preload of the output shaft bearings greatly influence the gear mesh misalignment, contact pattern, face load factor, gear safety factor and lifetimes of the parts.

Key Words : Excavator(굴착기), Slewing reducer(선회감속기), Bearing(베어링), Gear mesh misalignment(기어 물림 미스얼라인먼트), Gear load distribution(기어 하중 분포)

1. 서 론

굴착기(excavator)는 토사나 암석을 채굴할 때 사용되는 건설기계로서, 유압실린더, 붐, 버켓, 엔진, 펌프, 선회감속기, 선회베어링 등의 상부 회전체와 펌프, 주행감속기, 궤도 등의 하부 주행체로 구성된다.

선회감속기는 선회베어링과의 기어 물림을 통해 상부 회전체를 정/역 방향으로 회전시키는 역할을 하며, 주로 유성기어세트를 만들어진다.

유성기어세트는 선기어, 유성기어, 링기어 및 캐리어로 구성되며, 선기어로 입력된 동력이 다수의 유성기어로 동력 분할(power split)이 이루어지므로 동력 밀도가 높고, 소형화 및 경량화가 가능하다는 장점이 있다. 그러나 다수의 유성기어가 장착된 캐리어가 회전함에 따라 외부하중, 기어

* Department of System Reliablity, Korean Institute of Machinery & Materials.
** Chungnam National University.
# Coresponding Author : Department of System Reliablity, Korean Institute of Machinery & Materials.
E-mail : yjpark77@kimm.re.kr

물림 미스얼라인먼트, 제작오차, 축/베어링/하우징의 변형은 유성기어세트의 하중 분포에 영향을 미친다.

본 연구에서는 굴삭기용 선회감속기의 출력축 베어링이 기어 물림 미스얼라인먼트와 치면 하중 분포에 미치는 영향을 분석하였다. 상용 프로그램을 이용하여 출력축 베어링의 조합이 다른 2개의 모델을 구성하였으며, 베어링의 예압(preload) 변화에 따른 유성기어의 물림 미스얼라인먼트와 치면 하중 분포를 비교분석하였다.

2. 굴삭기용 선회감속기 모델

2.1 선회감속기의 구조

선회감속기는 그림 1과 같이 2단 유성기어세트로 구성되며, 1단 선기어를 통하여 입력된 동력이 1단 캐리어를 통하여 2단 선기어로 전달되며, 이것이 다시 2단 캐리어를 통하여 출력축 피니언 기어에 전달된다.

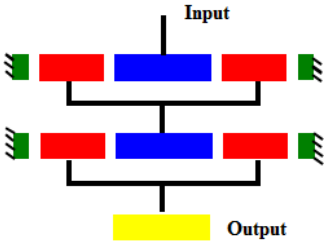

Fig. 1 Configuration of slewing reducer

2.2 선회감속기 모델

선회감속기 모델은 기어의 모듈, 압력각, 잇수, 중심거리 등과 같은 매크로 지오메트리(macro-geometry)뿐만 아니라 치형 수정(profile modification), 리드 수정(lead modification) 등과 같은 마이크로 지오메트리(micro-geometry)를 모사하였고, 기어 접촉 해석을 위한 물림 강성과 베어링 강성이 모두 비선형으로 고려되었다. 즉, 베어링에 작용하는 하중이 변화함에 따라 베어링의 강성도 달라지는 것이다. 이것은 선회감속기 시스템의 변형을 예측하는데 있어서 매우 중요한 요소이다[1,2,3,4].

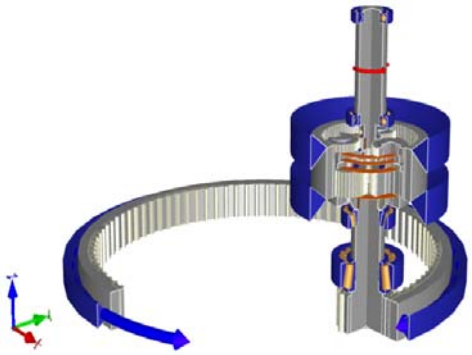

Fig. 2 Entire model of slewing reducer used in this study

2.3 선회감속기의 출력축 베어링

선회감속기의 출력축 베어링 조합으로 테이퍼 롤러 베어링(Taper Roller Bearing, TRB)을 사용하였으며, 베어링의 품번 및 동정격 하중은 표 1과 같다.

Table 1 Bearings designation of output shaft

Case	Type (position)	Designation	Dynamic capacity (Static capacity)
I	TRB (left)	32320A (d:100 mm, D:215 mm, B:77.5 mm)	6.2e5 N (8.5e5 N)
	TRB (right)	32218A (d:90 mm, D:160 mm, B:42.5 mm)	2.6e5 N (3.6e5 N)
II	TRB (left)	32320A (d:100 mm, D:215 mm, B:77.5 mm)	6.2e5 N (8.5e5 N)
	TRB (right)	30318A (d:90 mm, D:190 mm, B:46.5 mm)	3.3e5 N (4.0e5 N)

3. 굴삭기용 선회감속기 해석

3.1 출력축 베어링의 예압량 선정

선회감속기의 출력축은 그림 3과 같이 2개의 테이퍼 롤러 베어링으로 지지되어 있으며, 테이퍼 롤러 베어링에 예압을 가하게 되면 베어링의 강성이 증가하여 출력축의 변형량이 감소한다. 이는 유성기어세트의 미스얼라인먼트를 감소시켜 기어의 치면 하중 분포를 균일하게 한다[5].

그림 4는 첫 번째 모델에 대한 베어링 예압과 수명과의 관계를 그래프로 나타낸 것이다. -300 μm 까지 예압을 가할수록 출력축 왼쪽 베어링(32320A)의 수명은 증가하는 반면, 출력축 오른쪽 베어링(32218A)의 수명은 감소함을 확인하였다. 베어링 틈새가 300 μm일 때 두 베어링의 수명 최적화는 이루어지나 베어링 틈새를 증가시키면 베어링 수명은 증가해도 출력축 피니언의 변위가 증가하기 때문에 예압량을 0 μm을 선정하였다. 그림 5는 두 번째 모델에 대한 베어링 예압과 수명과의 관계를 그래프로 나타낸 것이다. -400 μm 까지 예압을 가할수록 출력축 왼쪽 베어링(32320A)의 수명은 증가하는 반면, 출력축 오른쪽 베어링(30318A)의 수명은 감소하였다. 베어링 수명의 최적화를 위하여 두 베어링의 수명이 동일한 경우의 예압량인 −150 μm을 선정하였다.

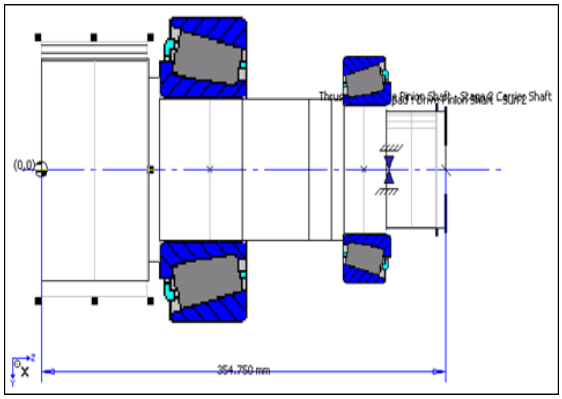

Fig. 3 Output pinion shaft with two taper roller bearings

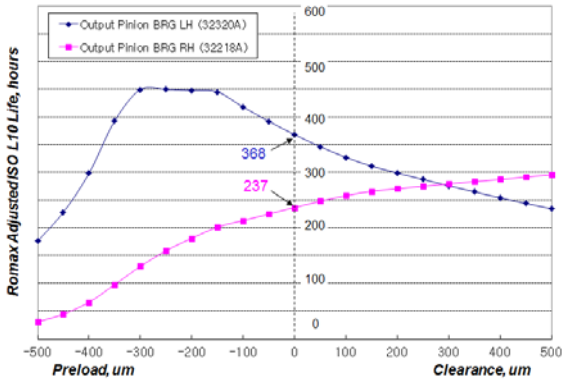

Fig. 4 Bearing life with respect to preload of TRBs on the case I

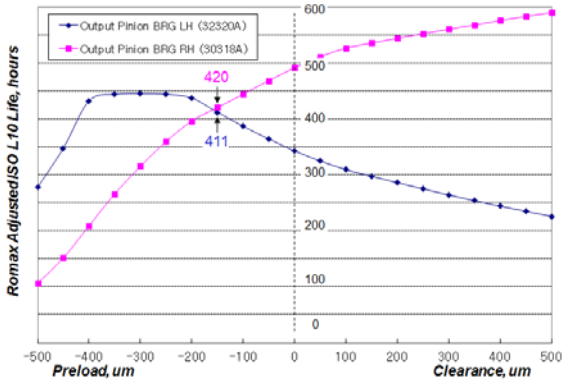

Fig. 5 Bearing life with respect to preload of TRBs on the case II

3.2 기어 물림 미스얼라인먼트 해석

유성기어의 물림 미스얼라인먼트는 기어, 축, 베어링의 축, 베어링 및 하우징의 변형을 고려하여 기어의 작용선(line of action)에서 계산하였다. 기어의 물림 미스얼라인먼트가 작을수록 기어 물림에 의해 하중 분배가 균일함을 의미한다. 해석상의 편의를 위하여 기어 물림 미스얼라인먼트가 (+)면 기어 물림이 치폭의 왼쪽에, (-)면 기어 물림이 치폭의 오른쪽에 발생한다고 정의하였다[4].

그림 6은 첫 번째 모델에 대하여 캐리어 회전각에 따른 유성기어의 물림 미스얼라인먼트를 나타낸 것이다. 물림 미스얼라인먼트가 캐리어 회전

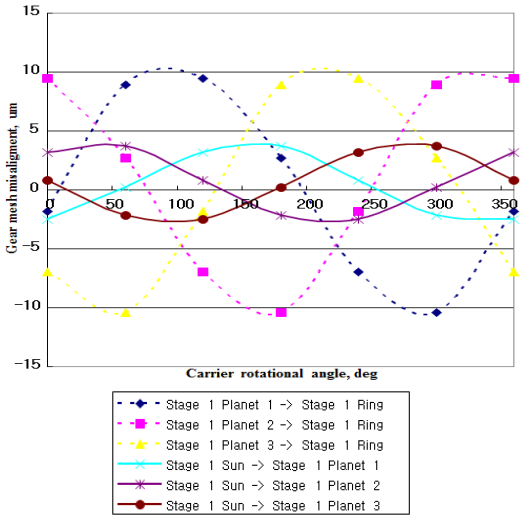

Fig. 6 Gear mesh misalignment of 1st stage planetary gear on the case I

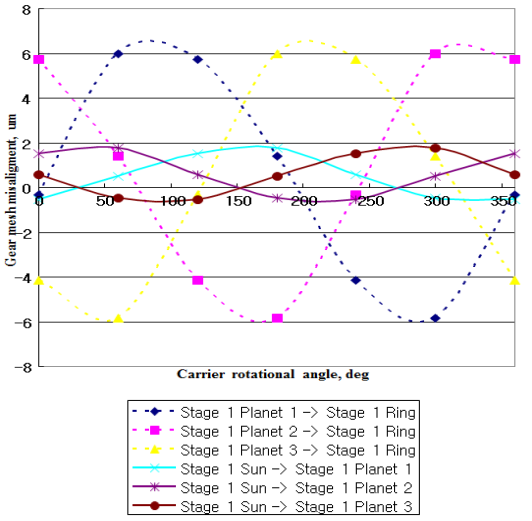

Fig. 7 Gear mesh misalignment of 1st stage planetary gear on the case II

각과 유성기어 위치에 따라 주기적으로 변화함을 알 수 있었다. 1단 선기어와 유성기어의 물림 미스얼라인먼트는 -4 μm ~ 4 μm, 유성기어와 링기어의 물림 미스얼라인먼트는 -10 μm ~ 10 μm으로 주기적으로 변동하며, 기어 치폭의 중간을 중심으로 왼편과 오른편을 번갈아가면서 기어 물림이 이루어짐을 알 수 있었다.

그림 7은 두 번째 모델에 대하여 캐리어 회전각에 따른 유성기어의 물림 미스얼라인먼트를 나타낸 것이다. 1단 선기어와 유성기어의 물림 미스얼라인먼트는 -2 μm ~ 1 μm, 유성기어와 링기어의 물림 미스얼라인먼트는 -6 μm ~ 6 μm으로 주기적으로 변동함을 알 수 있었다.

3.3 치면 하중 분포 해석

유성기어세트의 치면 하중 분포 계수는 식 (1)과 같이 계산할 수 있으며, 기어 치면에 작용하는 하중 분포가 얼마나 균일한가를 수치로 나타낸 것이다. 이 값이 1에 가까울수록 치폭 방향에 따른 치면의 하중 분포가 균일함을 의미한다[6].

$$K_{H\beta} = \frac{(\mathrm{max}imum\ load\ per\ unit\ face\ width)}{(average\ load\ per\ unit\ face\ width)} = \frac{(F/b)_{\max}}{F_m/b} \quad (1)$$

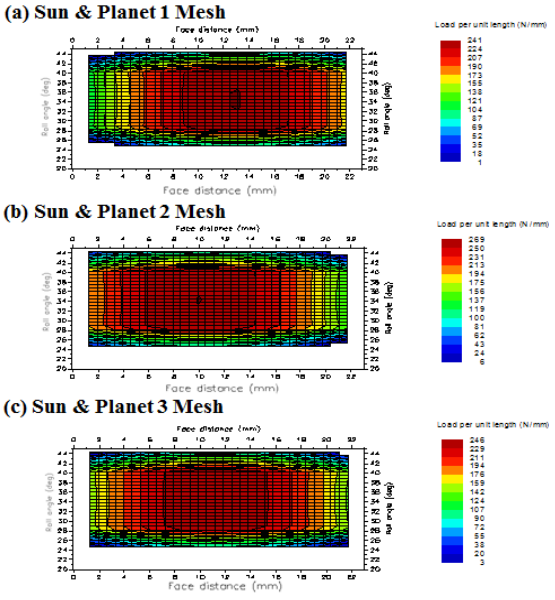

Fig. 8 Contact pattern between sun and planet mesh of 1st stage planetary gear on the case I

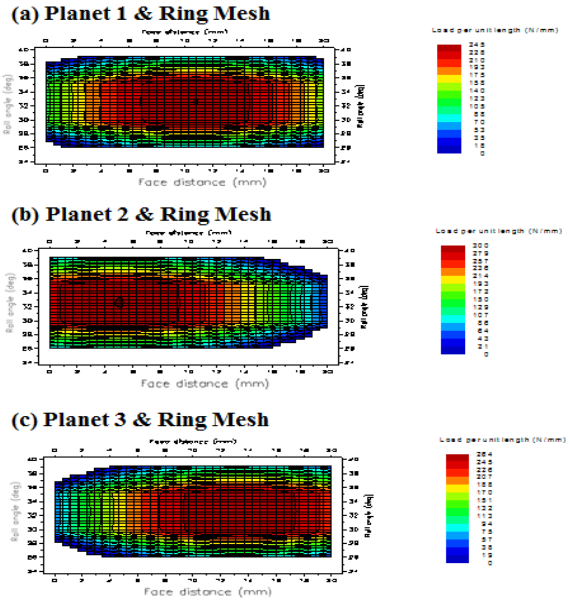

Fig. 9 Contact pattern between planet and ring mesh of 1st stage planetary gear on the case I

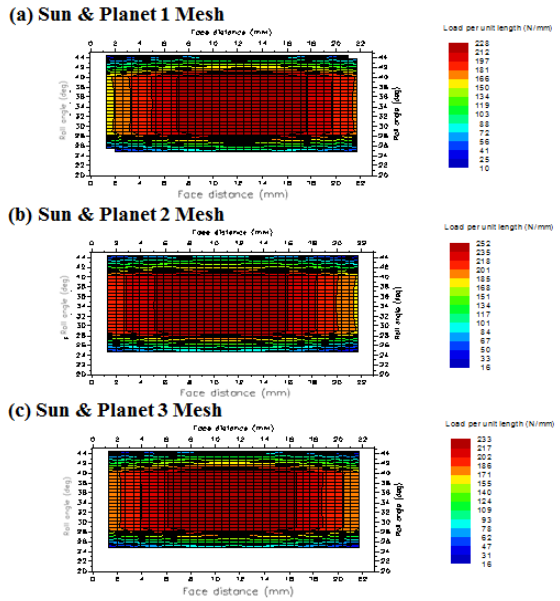

Fig. 10 Contact pattern between sun and planet mesh of 1st stage planetary gear on the case II

여기서, F는 기어 치면에서 최대 하중, b는 기어의 치폭, F_m은 기어의 기준원에서 평균 하중을 나타낸다. 치면 하중 분포 계수는 시뮬레이션 모델을 이용한 기어 치면의 접촉 패턴 해석을 통하여 계산되었다[7,8].

그림 8~9는 캐리어 회전각이 0 °일 때 첫 번째 모델에 대한 선기어와 유성기어, 유성기어와 링기어의 물림에 의한 접촉 패턴을, 그림 10~11은 두 번째 모델에 대한 선기어와 유성기어, 유성기어와 링기어의 물림에 의한 접촉 패턴을 나타낸 것이다.

그림 8과 10에서는 선기어와 유성기어의 물림이 기어 치폭의 중앙에 형성됨을 알 수 있었다. 그림 9와 11에서는 유성기어와 링기어의 물림이 기어 치폭의 중앙을 기준으로 왼쪽과 오른쪽으로 치우쳐 있음을 알 수 있었다.

그림 8과 10과 같이 선기어와 유성기어의 물림에 대한 단위 길이당 최대 하중은 첫 번째 모델의 경우 241 N/mm, 269 N/mm, 246 N/mm, 두 번째 모델의 경우 228 N/mm, 252 N/mm, 233 N/mm로

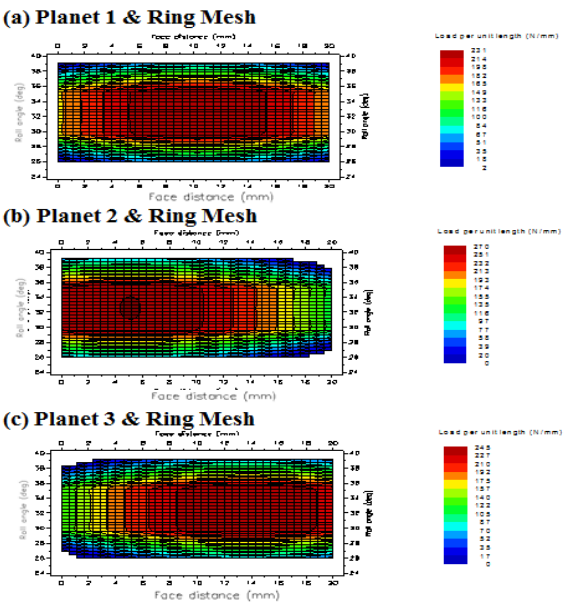

Fig. 11 Contact pattern between planet and ring mesh of 1st stage planetary gear on the case II

Table 2 Comparison of face load factor, $K_{H\beta}$

	Sun-Planet		Planet-Ring	
	Case I	Case II	Case I	Case II
Stage 1	1.186	1.104	1.197	1.113
	1.163	1.094	1.291	1.170
	1.171	1.099	1.249	1.151
Stage 2	1.058	1.045	1.065	1.049
	1.048	1.037	1.070	1.052
	1.061	1.048	1.060	1.046
	1.047	1.036	1.074	1.056

유성기어의 위치에 따라 최대 하중이 변화함을 알 수 있었다. 또한 그림 9와 11의 유성기어와 링기어의 물림에서도 유성기어의 위치에 따라 최대 하중이 변화함을 확인하였다.

표 2는 두 모델에 대한 치면 하중 분포 계수를 비교한 것이다. 베어링 품번과 예압량에 따라 기어의 치면 하중 분포 계수가 달라짐을 확인할 수 있었다. ISO 6336 규격에서 치면 하중 분포 계수는 기어의 안전계수와 반비례 관계이며, 이 계수가 증가하면 기어의 수명 및 안전 계수는 감소한다[7,9].

4. 결 론

본 연구에서는 굴삭기용 선회감속기의 출력축 베어링의 특성이 유성기어세트의 물림 미스얼라인먼트와 치면 하중 분포에 미치는 영향을 비교 분석하였으며, 해석을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 굴삭기용 선회감속기와 같이 유성기어세트로 구성된 기어박스에서는 기어 치면에 작용하는 하중과 유성기어의 하중 분포를 정확히 예측하기 위해서 기어, 축, 베어링, 캐리어 및 하우징 등 기어박스를 구성하는 모든 요소를 정확히 모델링하고 각 요소간의 상호 작용을 고려할 수 있는 시스템 모델 및 해석 기법이 적용되어야 한다.

2) 선회감속기 출력축 베어링의 종류, 배열, 예압량에 따라 유성기어세트의 물림 미스얼라인먼트, 치면 접촉 패턴 및 치면의 하중 분포가 모두 달라지며, 이로 인하여 기어의 안전 계수와 수명도 달라짐을 예측할 수 있다.

REFERENCES

(1) Abe, T., Cheng, Y., and Felice, M., "Advanced CAE Methods for Automotive Drivetrain System Gear Whine Optimization", *Proceedings of MPT2009-Sendai, JSME International Conference on Motion and Power Transmission*, pp. 1-15., 2009

(2) Kamaya, F., Eccles, M., and Pears, J., "A Rapid Method for the investigation of System-Wide Parameter Variation Effects on Epicyclic Gear Whine", *Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan*, Vol. 39, No. 6, pp. 6_47-6_52., 2008

(3) Pears, J., Curtis, S., Poon, A., Smith, A., Poon, D. and Palmer, D., "Investigation of Methods to Predict Parallel and Epicyclic Gear Transmission Error", *2005 SAE World Congress*, SAE Technical Paper: 2005-01-1818., 2005

(4) Pears, J., Smith, A., Platten, M., Willson, B., Cheng, Y., and Felice, M., "Predictin Variation in the NVH Characteristics of an Sutomatic Transmission using a Detailed Parametric Modeling Approach", *SAE 2007 Noise and Vibration Conference and Exhibition*, SAE Technical Paper: 2007-01-2234., 2007

(5) Hong, S. O. and Cho, G. J., "A Study on Preload and Arragement of Combined bearing on Feed Drive System", *Proc. of KSMTE Autumn conference*, pp.440-445., 1999

(6) American Gear Manufacturers Association (AGMA), "Design Manual for Enclosed Epicyclic Gear Drives", *ANSI/AGMA 6123-B06.*, 2006

(7) International Organization for Standardization (ISO), "Calculation of load capacity of spur and helical gears", *ISO 6336-1.*, 2007

(8) Romax Technology Ltd, *RomaxDesigner Software Manual*, Nottngham, UK., 2003

(9) Kim, J. G., Lee, G. H., Park, Y. J., and Kim, J. H., "Effects of Bearing Internal Clearance on the Load Distribution and Load Sharing in thr Pitch Reducer for Wind Turbines", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 22 No.1 (2013), pp. 29-35., 2013