

궤도차량 변속기 출력 축 지지구조에 따른 베어링 수명 영향 평가에 대한 연구

박종원 · 김형의

한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부

A Study on the Lifetime Assessment of Bearings According to the Output Shaft Supporting Structures in Transmissions of a Tracked Vehicles

Jong Won Park · Hyoung Eui Kim

Systems Engineering Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials

Abstract

The transmission of tracked vehicles performs complex functions as steering, shifting, braking, etc. and the system level life time has been a key influenced by the number of sub-parts like as gear assembly, torque converter, clutches, bearings and so on. In particular, the mechanical type steering system in tracked vehicle has impact shock torques in steering shift and those kind of shock torques can effect on the durability of many sub-parts in power train system. The field failure modes of gear assembly, steering assembly and the bearings of output shaft appear as a very complex phenomenon. In this study, the actual failure, which may occur in field, of the transmission was investigated comprehensively and that the endurance test on the resulting output shaft bearing failure analysis and life assessment was performed. Life time test method used in this study, developed for the purpose of the internal usage, and under these testing techniques the impact of the each bearing damage, which used in tracked vehicle transmission left / right outputs of different structures, was analyzed.

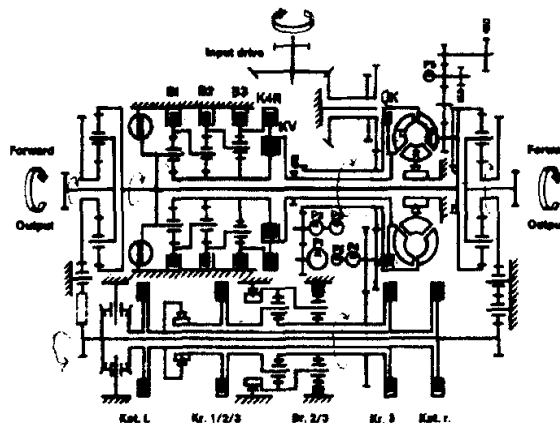
Keywords: Transmission, Lifetime test, ball bearing, bearing stiffness, rotating unbalance

1. 서론

궤도차량의 동력전달을 담당하는 변속기는 조향, 변속, 제동 등의 복합적인 기능을 수행하는 핵심기계부품으로써, 많은 상대운동부와 하위단품수로 인해 시스템 수준의 내구수명에 관한 문제가 제기되어왔다. 특히 궤도차량에 주로 사용되고 있는 기계식 조향방식의 변속기는 조향 변속시 변속충격에 의한 쇼크토크(shock torque)를 유발하는데, 변속기 내구성과 관련하여 이 과도토크를 예측하고 분석하는 다수의 연구들이 있어왔다 송창섭 외(1996), 김동규 외(2004). 하지만 조향과 주행변속시 발생하는 쇼크토크에 의한 변속기어 조립체와 조향기어 조립체에서의 파손이 다수를 차지하면서도, 이 밖에 좌/우 회전출력부를 포함한 주축 베어링들의 파손 등 현장에서 발생하는 고장모드(failure mode)는 다양한 부품들에 대하여 매우 복합적인 현상으로 나타난다 Jung and Lee(2001), Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment(2007). 본 연구에서는 현장에서 실제 발생할 수 있는 변속기의 고장을 종합적으로 살펴볼 수 있는 내구시험 및 그 결과로 나타난 출력축 베어링에 대한 고장 분석과 수명영향 평가를 수행하였다. 본 연구에 사용된 내구시험법은 한국기계연구원의 내부적인 목적으로 개발된 방법으로, 이 시험법은 조향/변속/제동 등의 실차조건을 최대한 고려한 높은 가속도의 시험기법이며, 이러한 시험기법 하에서 궤도차량용 변속기의 좌/우측 상이한 구조가 각 출력부 베어링의 파손에 미치는 영향을 분석하였다.

2.1 시험대상체 및 해석 모형

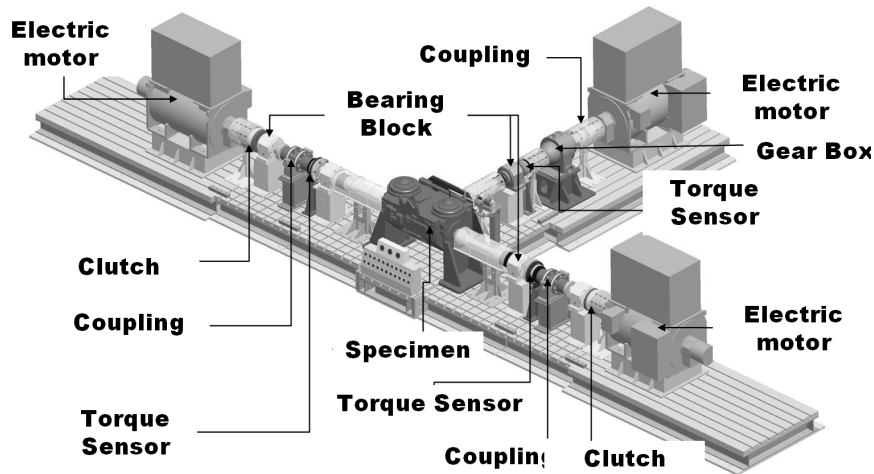
<그림 1>은 엔진 구동, 기계식 조향 방식의 시험 대상체의 구조를 나타낸 그림이다. 좌측은 변속기어와 리타더(retarder)로 구성되고 우측은 토크컨버터(torque converter)로 이루어진 좌우 비대칭 구조이다. 유성기어(sun and planetary gear)로 구성된 좌/우 출력축은 조향기어에서 들어온 토크가 쥘기어에 물리고 주축과 함께 회전하는 링기어와 맞물린 유성기어 캐리어는 출력축과 함께 회전한다. 이러한 동일한 유성기어유닛이 상이한 좌/우측 내부 회전구조와 맞물려 베어링 장착 구조에 있어 차이점을 보이고 있다.



<그림 1> 궤도차량용 자동 변속기의 구조

2.2 내구시험 시스템 구성 및 시험절차

<그림 2>는 전기모터로 구동되는 속도제어 1개의 입력축과 토크제어 2개의 출력축을 가진 변속기 내구시험 장비의 모형도이다. 내구시험은 3.2시간을 한 사이클로 하여 125사이클인 400시간 동안의 내구시험을 위해 조향/변속/제동 횟수를 <표 1>에 표기한 대로 부하를 인가하였다. 3대의 변속기를 사용하였고, 매 사이클마다 입출력 회전수를 비교하며, 각각의 작동압력을 확인하여 조향기어와 변속기어, 하우징 부의 파손유무를 확인하였고, 변속기 출력 회전부를 점검함으로써 출력부에 물린 4개의 베어링과 쉘의 손상을 확인하였다. 고장부위에 대한 검사는 육안판별 후 고장부위를 분해하여 분석을 수행하였다.



<그림 2> 궤도차량용 변속기의 내구시험 시스템 모형도

<표 1> 궤도차량용 변속기의 내구시험 조건

Steering No.	Transmission No.	Braking No.	Test time(hr)
10500	76375	7500	400

2.3 회전동역학 모형

본 연구에서 고려된 해석 대상체의 주회전부는 유성기어 조립체이지만 링기어, 유성기어, 쉘기어는 각각 회전수가 다르다. 가능한 간단한 모형을 수립하기 위해 유일한 회전질량을 유성 기어 캐리어 조립체로 간주하고 <그림 3(가)>와 같이 모델링 하였다. 궤도차량용 변속기의 생산과정에서 베어링 및 축과 같은 회전 부품간의 공차들과 가공오차로 인해 회전체의 기울어짐 (tilt)과 불균형질량이 발생 할 수 있고 이러한 인자들은 부품 수명에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 실제 생산 공정에서의 품질관리에 대한 정보 입수가 불가능 하여 최대한

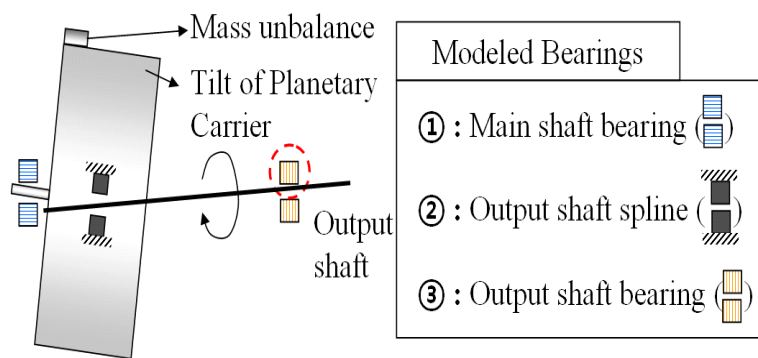
보수적인 관점에서 발생가능성이 있는 값으로 회전체의 불균형 질량과 부품간 공차를 가정하여 해석 및 평가를 수행하였다. 이러한 가정을 근거로 연구 대상 변속기의 출력축 회전부에 대한 강체(rigid body) 운동을 비대칭 회전관성을 포함한 오일러 방정식(full Euler equations)으로 식 (1)과 같이 회전체 운동 방정식으로 유도하였다 Ehrich(1999), Greenwood(2003). 식 (1)에서 회전체의 불균형 질량은 유성기어 캐리어 조립체의 회전관성 모멘트인 I_{xy} , I_{yz} , I_{xz} 항목을 계산할 때 원래의 부품질량에 가정한 불균형 질량이 더해져서 최종적으로 회전관성 모멘트 항목으로 모델링 될 수 있다. 회전 불균형 질량과 베어링 공차를 가정하고 식 (1)에 가정한 값이 적용된 계수들을 대입하여 Runge Kutta 4th method를 이용한 수치적분을 수행하면 회전체의 몸체 좌표계에 대한 회전 각속도, 회전 각도 및 모멘트를 산출할 수 있고, 이로부터 출력축 베어링의 틸팅 각도와 반경방향 하중을 알 수 있다. 또한, 베어링의 반경방향 하중으로부터, 잘 알려진 베어링 수명식 $L = (C/P)^\lambda$ 을 활용하여 시험대상 베어링의 이론수명을 산출할 수 있으며, 이렇게 산출된 베어링의 이론수명과 시험결과로부터 얻은 베어링의 수명을 비교하여 초기에 가정한 회전체 불균형질량과 공차의 적합성을 규명하고 수명에 미치는 영향을 검증할 수 있게 된다.

$$\begin{aligned}
 I_{xx}\dot{\omega}_x + I_{xy}(\dot{\omega}_y - \omega_z\omega_x) + I_{xz}(\dot{\omega}_z + \omega_x\omega_y) + (I_{zz} - I_{yy})\omega_y\omega_z + I_{yz}(\omega_y^2 - \omega_z^2) &= M_x \\
 I_{yy}\dot{\omega}_y + I_{xy}(\dot{\omega}_x + \omega_y\omega_z) + I_{yz}(\dot{\omega}_z - \omega_x\omega_y) + (I_{xx} - I_{zz})\omega_z\omega_x + I_{xz}(\omega_z^2 - \omega_x^2) &= M_y \\
 I_{zz}\dot{\omega}_z + I_{yz}(\dot{\omega}_y + \omega_z\omega_x) + I_{xz}(\dot{\omega}_x - \omega_y\omega_z) + (I_{yy} - I_{xx})\omega_x\omega_y + I_{xy}(\omega_x^2 - \omega_y^2) &= M_z
 \end{aligned} \tag{1}$$

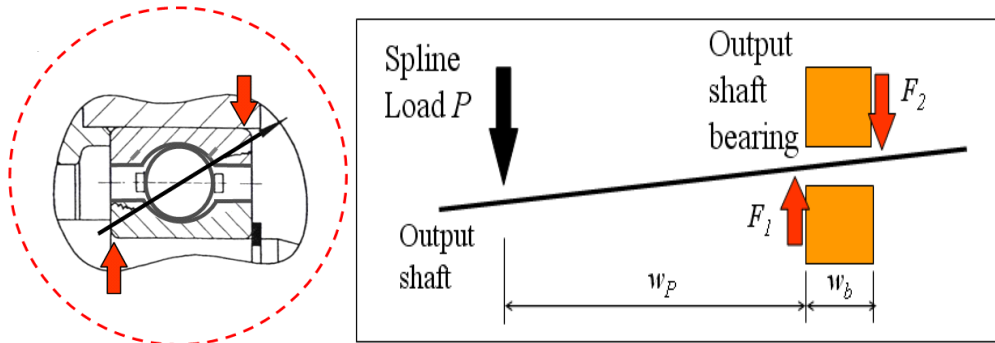
여기서, I : Moment of inertia, x, y, z : Body 좌표계,

θ : XZ 평면과 축벡터가 이루는 각도, ω : 회전속도

$\omega_x = \dot{\theta}$, $\omega_y = \dot{\psi} \cdot \cos \theta$, ψ : YZ 평면과 축벡터를 XZ 평면에 조사한 벡터와 이루는 각도



(가) 해석 모형



(나) 변속기 출력부 베어링의 짝힘 현상(Coupled forces)

<그림 3> 변속기 출력부 회전체의 동역학 모형

2.4 베어링 하중과 강성

이러한 물리적 조건에서는 관성과 회전속도에 의해 발생하는 비대칭 힘들이 <그림 3(나)>와 같이 출력부 베어링에 파손을 유발시키는 짝힘(coupled forces)을 발생시킨다. 짝힘의 크기는 스플라인 하중 P와 $\frac{w_p}{w_b}$ 에 비례한다.

또한 베어링의 탄성에 의한 강성을 고려하면 운동중에 발생하는 축의 진동을 계산할 수 있는데 강성 식은 아래 식(2)와 같다 Braun et al(2002).

$$K_r \left(\frac{daN}{mm} \right) = \frac{W}{\delta_r} = \frac{\cos \alpha}{2.5 \times 10^{-3}} (W D_b)^{1/3} \cong 10^8 (N/m) \quad (2)$$

여기서, K_r : 볼 베어링의 반경방향 강성, W : 반경방향 하중, δ_r : 반경방향 변위

α : 베어링 접촉각, D_b : 볼 베어링의 지름

베어링의 탄성에 의한 강성은 식(2)에서 알 수 있는 바와 같이 10^8 의 값을 가지므로 본 연구에서는 해석의 편의를 위하여 베어링의 하중과 변위에 따라 강성 값의 변화가 미미하므로 10^8 으로 가정하고 수명평가를 수행하였다. 또한, 베어링 수명평가에서 고려해야 할 중요한 또 다른 인자는 공차이다. 통상 상용 베어링의 공차는 제품 카탈로그 상에 언급이 되어있지 않는 경우는 $0\mu m$ 로 가정하지만, 실제의 경우 $10\mu m - 20\mu m$ 정도의 공차가 제품 조립시에 발생하는 것으로 추정된다. 송창섭 외(1996)의 고장분석을 통해 <그림 3(가)> 베어링 ①이 부실하다는 사실을 기반으로 베어링 ②, ③에 비해 ①(Main shaft bearing)의 공차가 현저히 큰 것으로 간주하고 이에 대응하여 파손 베어링 ③(Output shaft bearing)의 공차가 $0\mu m$, $10\mu m$, $20\mu m$ 일 때, 유성기어 캐리어의 틸트각과 파손 베어링에 걸리는 모멘트를 구하고, 시험 중 파손된 베어링의 수명평가를 수행하였다.

3. 시험 및 해석 결과

3.1 내구시험 결과

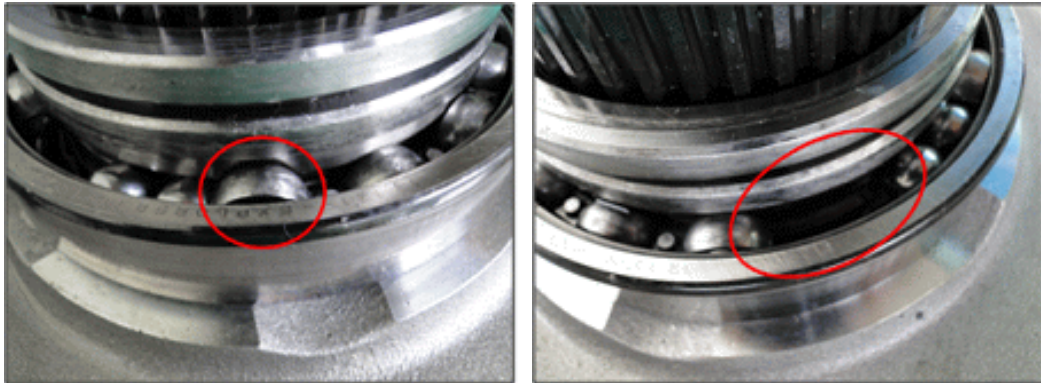
<표 2>에 400시간 내구시험 후 고장 부위 검사에서 발견된 이상들을 나타내었다. 볼트의 풀림, 스냅이탈, 기어치 파손, 기어이탈, 불순물 적체 등의 손상이 관찰 되었다. 예상과는 달리 변속기어부에는 눈에 띄는 손상이 발견되지 않았고, 다수의 파손현상들은 조향동력의 흐름과 관계된 것으로 추정되므로, 조향횟수를 증가시키면 더 많은 파손현상들이 관찰될 것으로 예측된다. 또한, 변속기어부 파손이 필드에서 관찰되는 제품에 대한 내구시험조건을 결정할 때는 동적완전부하에 해당하는 변속횟수를 내구시험 중 더 늘려줘야 할 것으로 사료된다.

<표 2> 내구시험 후 부위별 이상발생 현황

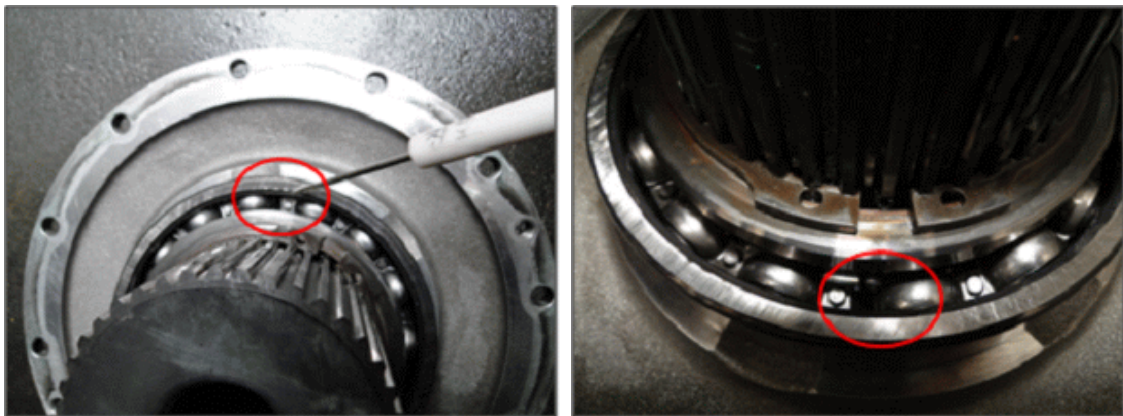
Damage mode 1	Bolt loosening
Damage mode 2	shaft snap escape
Damage mode 3	Gear loosening
Damage mode 4	Gear tooth breakage
Damage mode 5	Bearing cage breakage
Damage mode 6	Housing cracking

내구시험을 통해 주목할 만한 사항은 <그림 4>에서 보는 것처럼 출력부 베어링 케이지(cage)의 파손이 발생하였다는 점이다. 시험대상 변속기 3대 모두 내구시험 시간인 400시간을 채우지 못하고 우출력축 베어링부에서 고장이 발생하였고, 특히 3대중 2대는 변속기의 우측 출력부에 물린 베어링의 파손으로 변속기 출력축에서 누유가 발생하였다. 출력부 회전체들의 내구수명시험 후의 고장현상을 분석해 보면 본 연구의 내구시험 조건하의 조향시험에 의해 생기는 충격 토크 하중은 회전체의 고장을 유발할 정도로 크지는 않다는 것을 알 수 있다. 따라서 주행기어 조립체나 조향기어 조립체 등에 파국고장을 야기하지는 않지만, 출력부 베어링 케이지의 파손이 주고장형태로 일어나는 것이 확인 되었다. 필드의 운용상황으로 보았을 때는 실험실에서 진행되는 내구시험과는 달리 궤도차량 주행 중의 출력축 누유와 같은 고장은 운전자가 쉽게 발견할 수 있는 고장이 아니므로 여기서부터 파급된 이차고장이 결국에는 주행기어 조립체와 조향기어 조립체의 파국고장을 유발했을 것으로 사료된다. 본 연구에서 관찰된 출력축 베어링 케이지의 파손은 주로 회전부의 정렬불량 (misalignment)으로 인해 발생하는데 본 변속기의 경우에도 출력부의 높은 회전속도와 관성질량이 포함되어

있으므로 정렬불량과 질량불균형의 영향이 크다는 것을 유추할 수 있다. 특히 <표 2>에 나타난 부위별 이상발생 현황에서 볼트 풀림, 축 스냅링 이탈, 기어의 풀림, 기어 치 파손현상 등으로 보아 변속기 구동 중 불균형이 점점 더 심화되었을 것으로 추정된다.



(가) 베어링 케이지 파손(시료 1)



(나) 베어링 케이지 파손(시료 2)

<그림 4> 내구시험 후 출력축 베어링 부 고장발생 현상

3.2 해석 결과

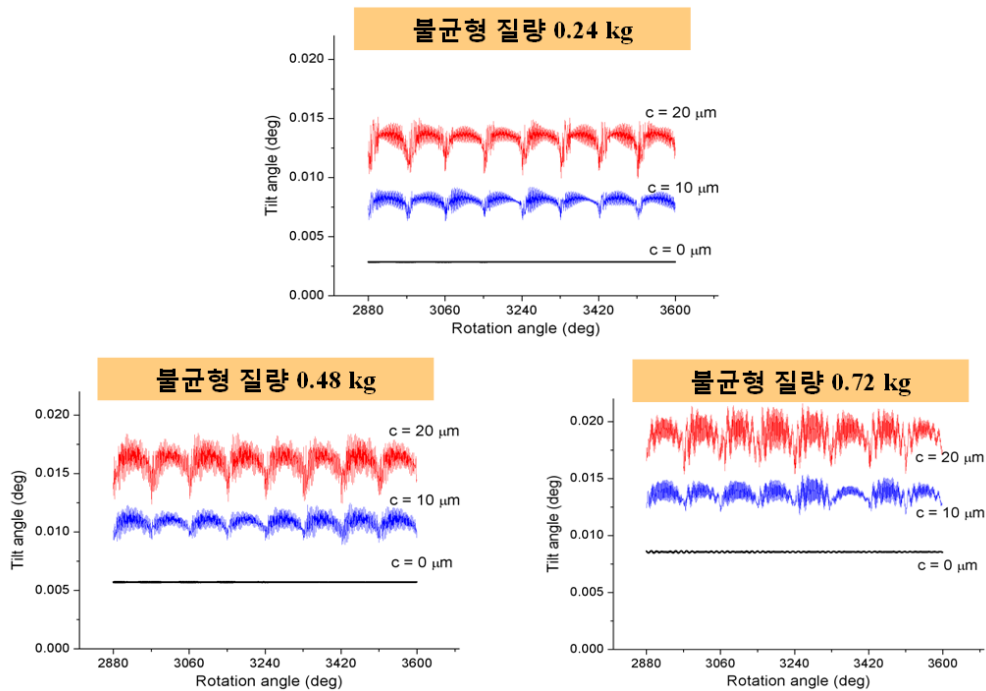
회전질량 불균형에 의한 회전체 운동해석의 모델사양은 <표 3>과 같다. 이중 유성기어 캐리어 조립체(planetary carrier assembly)에 원래의 질량 대비 불균형 질량을 1%, 2%, 3% 씩 <표 3>에 표기된 원 질량에 부가하여 구한 회전관성 모멘트 값을 식 (1)의 회전체 운동방정식에 대입하여 해석을 수행하였고, 각각의 경우에 대하여 파손 베어링 ③의 공차가 $0\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$, $20\mu\text{m}$ 일 때, 유성기어 캐리어의 틸트각과 파손 베어링에 걸리는 모멘트를 구하였다.

<표 3> 회전체 운동해석 모델의 사양

No.	Part name	Mat.	Mass(kg)	Moment of inertia J(kg · m ²)
1	Left output shaft	Steel	8.202	0.018
2	Left planetary carrier assembly	Steel	23.838	0.430
3	Left ring gear assembly	Steel	14.946	0.412
4	Right ring gear assembly	Steel	12.408	0.384
5	Right planetary carrier assembly	Steel	23.838	0.430
6	Right output shaft	Steel	8.202	0.018

3.2.1 캐리어의 틸트 각도

<그림 5>는 주어진 불균형 질량과 공차에 대한 틸트 각을 나타내며, 여기서 c 는 출력축 베어링의 공차를 의미하고 $0\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$, $20\mu\text{m}$ 각각에 대하여 검은색, 파란색 및 붉은색 실선으로 나타내었다. <표 4>는 회전진동에 대한 틸트 각을 표로 정리한 것이다. 출력축 공차와 회전체의 불균형 질량이 클수록 평균값과 진폭의 증가를 볼 수 있다.



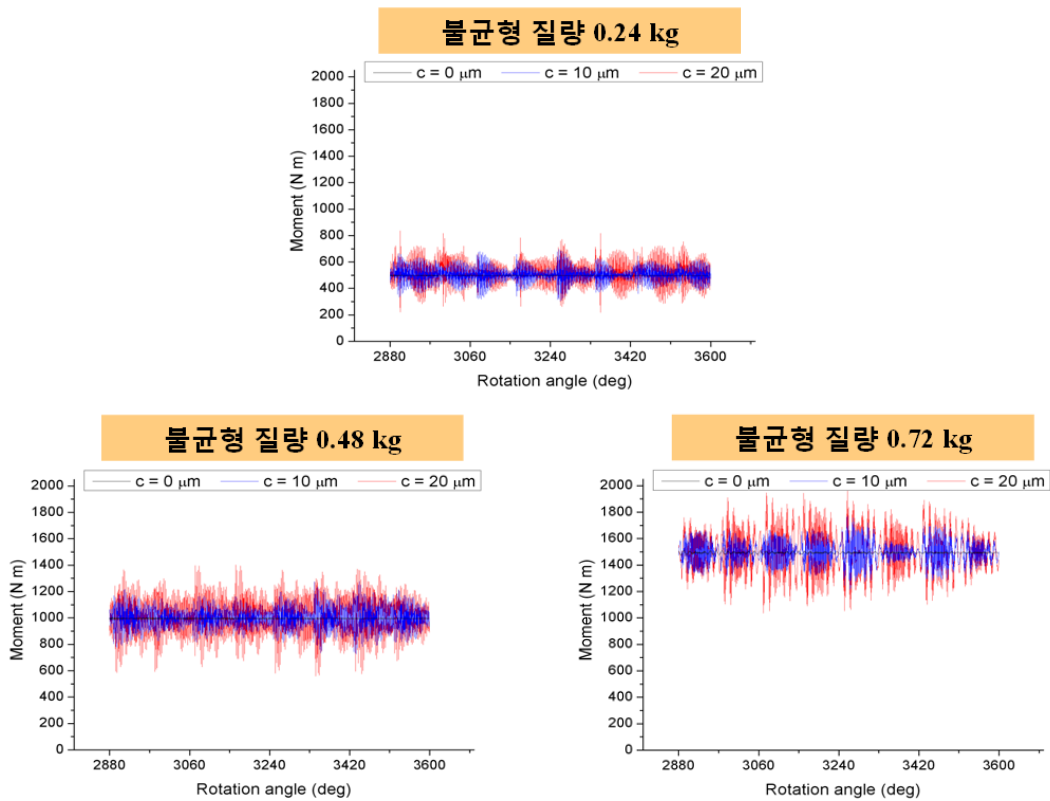
<그림 5> 캐리어의 불균형 질량과 공차에 대한 틸트 각

<표 4> 캐리어의 회전체 회전진동에 대한 틸트 각

$dm(kg)$ \ $c(\mu m)$	0	10	20
0.24 (M_b 의 1%)	$2e^{-3} \pm 1e^{-7}$	$7.5e^{-3} \pm 1e^{-3}$	$1.3e^{-2} \pm 4e^{-3}$
0.48 (M_b 의 2%)	$3e^{-3} \pm 1e^{-6}$	$1.1e^{-2} \pm 2e^{-3}$	$1.6e^{-2} \pm 5e^{-3}$
0.72 (M_b 의 3%)	$4e^{-2} \pm 2e^{-5}$	$1.8e^{-2} \pm 2e^{-3}$	$1.8e^{-2} \pm 5e^{-3}$

3.2.2 출력축 베어링에 걸리는 모멘트

주어진 불균형 질량과 공차에 의해 출력축 베어링에 전달되는 모멘트의 해석결과를 <그림 6>에 나타내었다. 여기서 c 는 출력축 베어링의 공차를 의미하고 $0\mu m$, $10\mu m$, $20\mu m$ 각각에 대하여 검은색, 파란색 및 붉은색 실선으로 나타내었다. 모멘트 해석결과와 평균값들을 회전체 불균형 질량과 축 공차별로 <표 5>에 나타내었다. 3.2.1절의 틸트각 해석결과와 마찬가지로 불균형 질량과 축 공차가 증가할수록 모멘트의 평균값과 진폭이 증가하는 것을 알 수 있으며, 이는 베어링 하중에 영향을 미쳐 수명단축 효과를 가져오게 된다.



<그림 6> 출력축 베어링의 불균형 질량과 공차에 대한 모멘트

<표 5> 출력축 베어링의 불균형 질량과 공차에 대한 모멘트 평균값

$dm(kg)$ \ $c(\mu m)$	0	10	20
0.24 (M_b 의 1%)	500 ± 0.01	500 ± 150	500 ± 175
0.48 (M_b 의 2%)	1000 ± 0.2	1000 ± 175	1000 ± 350
0.72 (M_b 의 3%)	1500 ± 3	1500 ± 200	1500 ± 350

3.2.3 베어링 하중증가와 수명저하

3.2.2절에서 산출된 주어진 불균형질량과 공차에 의해 발생하는 모멘트는 출력축 베어링에 짝힘을 발생시켜 부하증가로 이어지고, 베어링의 수명과 부하의 일반적인 관계를 나타내는 식(3)에 의하여 부하증가에 따른 수명을 평가할 수 있다. 연구대상 베어링은 NTN6017로 베어링 동적 부하 용량(동정격하중)은 49500N이다. 이 때 짝힘에 의해 발생한 베어링 하중을 동정격 하중으로 단순 대치했을 경우, 정격수명 대비 수명변화율 평가 결과는 <표 6>과 같다. 수명변화율 평가 결과에서 알 수 있듯이 변속기 출력축 회전체의 질량 불균형과 축 공차에 의해 베어링의 수명은 기존 수명대비 최고 15%까지 단축 될 수 있다. 따라서 변속기의 수명시험 중 발생하는 출력축 베어링의 고장시에는 회전체의 질량 불균형 효과와 가공 및 조립시 발생할 수 있는 축 공차에 대한 고려가 중요한 고장원인이 될 수 있다고 사료된다.

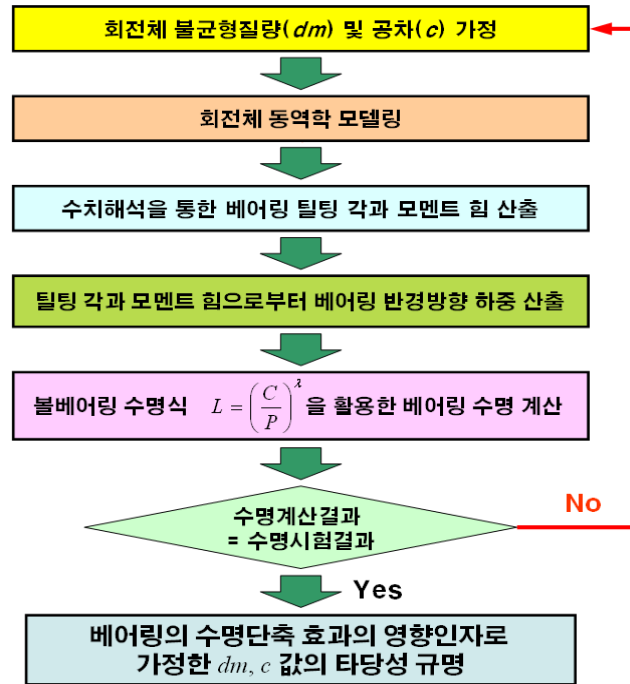
$$L_{10} = 10^6 \times \left(\frac{C}{P} \right)^3 \text{ cycle} \quad (3)$$

여기서, L_{10} : 베어링 수명, C : 베어링 동적 부하 용량, P : 베어링 하중

<표 6> 베어링 하중 증가에 따른 수명 변화율

$dm(kg)$ \ $c(\mu m)$	0	10	20
0.24 (M_b 의 1%)	776%	353%	315%
0.48 (M_b 의 2%)	97%	60%	39%
0.72 (M_b 의 3%)	29%	20%	15%

전술한 베어링 수명단축 효과 영향인자인 회전체 불균형질량 및 공차에 대한 분석과정을 흐름도로 표시하면 <그림 7>과 같이 나타낼 수 있다.



<그림 7> 베어링 수명단축 효과 영향인자의 규명 과정

4. 결 론

본 연구에서는 궤도차량용 기계식 조향변속 방식의 변속기에 대하여 개발된 내구시험법에 따른 수명시험 결과로부터 수명에 영향을 미치는 인자들을 분석하였고, 특히 출력축 베어링 고장에 대하여 고장원인과 수명단축 효과의 규명을 위한 해석 평가를 수행하였다.

고장분석을 통해 변속기 내부의 체결력 완화와 상대운동부의 파손/마모 등으로 인한 회전부의 축정렬불량과 회전체 질량 불균형의 영향에 의한 베어링 파손이 관찰되었고, 고장부위의 회전체 동역학 해석을 통해 베어링 케이시 파손에 대한 고장메커니즘 규명을 수행하였다.

실제 내구시험에서 정격수명의 40% 지점에서 베어링 파손이 관찰된 것으로 보아 출력축 공차 20 μ m에 불균형 질량 2%의 조건으로 시험대상 변속기가 수명시험 된 것으로 판단되며, 이는 출력축 베어링 부의 수명단축 평가 결과로서 검증되었다.

결론적으로 내구시험 중 발생된 출력축 베어링 부의 고장을 감소시키기 위하여는 우측 출력부의 링기어 불베어링과 주축 불베어링의 강성을 더 크게 하고, 가공 및 조립시에 유성기어 조립체에서의 상대운동부 공차를 더 줄여야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] 김동규, 박호, 강서익(2004), 궤도차량용 자동변속기의 변속충격에 관한 연구, 한국공작기계학회논문집, Vol 13, No. 1, 100-106.
- [2] 송창섭, 강서익, 전의식(1996), 궤도차량용 자동변속기의 변속조향특성 해석, 한국공작기계기술학회, 96년도 춘계학술대회 논문집, 67-71.
- [3] Jung, G. H. and Lee, G. I.(2001), A Development of Hardware-In-the Loop Simulation System of Automatic Transmission for the Simulation of Shifting Characteristics, Transaction of Korea Society of Automotive Engineers, Vol. 9, No.6, 143-151.
- [4] S. G. Braun et al.(2002), Encyclopedia of vibration, Academic press, 158.
- [5] D. T. Greenwood(2003), Advanced Dynamics, Cambridge, 170.
- [6] Fredric F Ehrich(1999), Handbook of Rotordynamics, Krieger Publishing.
- [7] Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment(2007), Carderock Division, Naval Surface Warfare Center.