

스러스트 베어링 동력 손실을 고려한 자동변속기 유성기어 헬릭스 각 방향 선정에 관한 연구

권 현 식*

동의대학교 자동차공학과

A Study on the Selection of Helix Angle Directions of Planetary Gear Sets of an Automatic Transmission for Considering Thrust Bearing Power Losses

Hyun Sik Kwon*

Department of Automotive Engineering, Dong-eui University, Busan 47340, Korea
(Received 17 October 2023 / Revised 21 June 2024 / Accepted 6 August 2024)

Abstract : A study was performed on thrust bearing power loss that occurred by the directions of helix angles of the planetary gear sets constructing an automatic transmission. A sample transmission structure was built as a three-dimensional model, and analyses of axial load and bearing power losses of thrust bearings in the transmission system were conducted for all speed ratios, considering various combinations of helix angle directions. The total bearing load and total power loss results for each helix direction were examined, and the bearing load and power losses were analyzed for a few cases of helix angle directions that yielded the minimum power loss for each speed ratio. Furthermore, the power losses at each speed ratio were analyzed, and the gear helix angle directions advantageous for low or high-speed ratios were examined for thrust bearing power losses.

Key words : Automatic transmission(자동변속기), Thrust bearing(스러스트 베어링), Power loss(동력 손실), Planetary gear set(유성기어), Helix angle(헬릭스 각), Gear design(기어 설계)

1. 서론

변속기는 동력원인 엔진과 차량을 연결하는 동력전달의 기계 시스템으로서 다양한 운전 환경에 적합한 속도와 토크를 차량에 제공하며 연비 운전점(Sweet spot)에서 엔진의 연소를 가능하게 한다. 차량과 엔진에 대한 최적운전을 가능하게 하는 변속기는 내부 동력 전달 요소 부품의 종류와 배치에 따라 분류되며, 차량과 요구 성능, 탑재 엔진과의 매칭을 고려하여 적합한 변속기를 적용한다. 자동변속기는 여러 개의 유성기어 세트와 변속기 구인 브레이크와 클러치의 요소 부품으로 구성되는 변속기이며, 다만 변속과 부드러운 변속의 장점이 있어 차량에 가장 많이 적용되는 변속기이다.

환경 오염 저감에 대한 중요도가 강조되며 자동차의 연비 향상을 위한 다양한 연구가 수행되고 기술 개발이

되고 있다. 이러한 연비 향상에 관한 연구와 기술 개발의 방향성에 맞추어 차량의 핵심 동력전달 시스템인 자동변속기의 전달효율(Transmission efficiency) 향상을 위한 많은 연구와 설계기술 개발이 추진되고 있다. 변속기의 전달효율 관련 연구는 기어, 샤프트, 클러치, ATF(Automatic Transmission Fluid) 윤활량, 점성, 하중, 회전 속도 등 다양한 요소가 영향을 미치며, 이러한 이유로 시스템 단계의 해석을 통한 전달효율과 동력 손실에 관한 해석이 가능하다.

자동변속기 구조 분석에 관한 연구로서 Kahraman 등¹⁾과 Raghavan²⁾은 변속기 컨셉 구조의 주요 회전 요소에 대한 회전 속도와 토크비 분석에 대한 해석법을 제시하였다. Kahraman 등¹⁾이 제시한 해석법은 일반화된 행렬식 구성에 따른 해석법으로서 여러 개의 유성기어 세트

*Corresponding author, E-mail: hskwon@deu.ac.kr

¹⁾This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

로 구성되는 기어트레인 해석에 적합하다. Raghavan²⁾은 레버(Lever)를 활용하는 자동변속기 구조 해석법을 제시하였다. 자동변속기의 기본 요소를 본드 그래프(Bond-graph)로 구성하고 행렬식으로 변환하여 회전 속도를 해석하는 연구³⁾가 제시되었다.

자동변속기를 구성하는 유성기어 세트 관련 연구로는, Buckingham⁴⁾과 Kelley⁵⁾는 유성기어 세트를 구성하는 선기어-피니언기어의 외접 기어 물림과 링기어-피니언기어의 내접 기어 물림에 대한 기구학적 이론과 유성기어 세트 설계법 관련 연구를 제시하였다. Kwon 등⁶⁾은 외접 기어 물림과 내접 기어 물림으로 구성되는 단순 유성기어 세트와 더블(Double) 유성기어 세트에 대하여 Run-Many Cases 기반의 설계법을 제안하였으며, Kwon과 Kahraman⁷⁾은 유성기어 세트 설계 인자의 기어 물림 과정에서 발생하는 동력 손실에 관한 영향성 연구 결과를 제시하였다.

베어링의 동력 손실은 하중의 크기, 접촉, 구름, 윤활, 온도, 표면 조도 등 다양한 인자의 복합적인 영향에 의한 결과로서 개별 인자의 영향성에 대한 분석과 이론에 기반한 해석 모델을 제시하기 어려운 이유로 하중과 점성을 고려하는 동력 손실과 마찰 해석의 경험적 모델⁸⁻¹⁰⁾이 제시되었다. Harris와 Kotalas⁸⁾는 다양한 종류의 베어링에 대하여 하중과 점성을 주요 인자로 고려하는 동력 손실 모델을 제시하였으며, SKF Group은 구름체의 구름과 미끄럼, 실링, 드래그 등의 영향성을 포함하는 모델¹¹⁾을 제시하였다. Yilmaz 등¹²⁾은 구름 베어링의 물 포함 윤활 유에 대한 동력 손실 연구 결과를 제시하였다.

동력전달 시스템 단위의 연구로서, Talbot 등¹³⁾은 하이포이드 기어의 치 접촉부 구름과 미끄럼, 경방향 구름 베어링의 영향성을 포함하는 동력 손실 모델을 제시하였으며, Michaelis 등¹⁴⁾은 기어 박스에 대한 베어링, 기어 물림, 윤활유 온도, 기어 처닝(Churning)의 동력 손실에 대한 영향성을 분석하였다. Dick 등¹⁵⁾은 자동변속기의 전달효율을 구성하는 요소별 동력 손실 영향성을 분석하고, 동일 구조 기반의 토크 용량이 다른 변속기의 전달효율 구성을 분석하였다. 자동변속기의 클러치 드래그 토크 손실을 고려하는 효율 모델을 구성하고 연비 최적의 변속맵 선도를 도출하는 연구¹⁶⁾가 수행되었다.

특히, 자동변속기 적용의 스러스트 베어링 관련 연구로는 유성기어 세트의 헬릭스 각 방향에 따른 스러스트 베어링 하중과 동력 손실 해석에 관한 연구^{17,18)}가 수행되었다. 그러나, 기어 헬릭스 각 방향에 따른 베어링에 작용하는 하중의 크기와 동력 손실량을 해석하고 총량 결과의 비교를 통하여 하중과 동력 손실 최소의 기어 헬릭스 각 방향 선정에 관한 연구 결과를 제시하였으나, 각

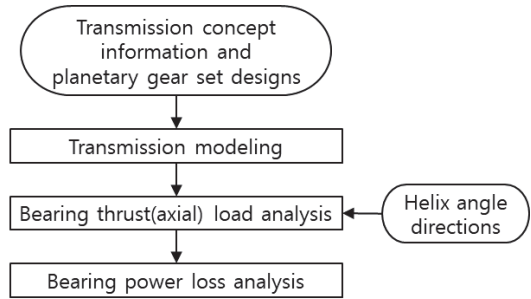


Fig. 1 A flowchart presenting the processes

속도단에서의 헬릭스 각 방향에 따른 베어링 작용 하중과 동력 손실에 관한 상세 분석은 수행되지 않았다.

변속기 전달효율의 개선은 차량의 연비 성능 향상을 위한 핵심 요소이다. 따라서, 자동변속기 설계와 개발 과정에서 탑재 공간과 입력 토크에 대한 고려뿐만 아니라 전달효율 향상을 위한 동력 손실 저감의 설계도 필수적으로 고려되어야 한다. 변속기 전달효율 향상을 위하여, 기존의 베어링 작용 하중과 총 동력 손실만을 고려하여 베어링 하중과 동력 손실 최소의 설계안을 도출하는 방법이 아닌, 변속기의 모든 속도단에서 발생하는 동력 손실을 고려하여 차종과 차급, 운행 패턴에 적합한 설계안을 도출하는 연구는 필수적으로 수행되어야 한다.

본 연구는 광범위하게 적용되고 있는 자동변속기에서 속도단과 유성기어 세트의 헬릭스 각 방향에 따라 변화하는 스러스트 베어링에 작용하는 축 방향 하중과 동력 손실량을 해석하여, 자동변속기의 각 속도단과 고단 및 저단에 발생하는 스러스트 베어링 동력 손실 분석을 통한 기어 헬릭스 각 방향 선정에 관한 연구 결과를 제시하고자 한다.

본 연구의 목적인 자동변속기를 구성하는 유성기어 세트의 헬릭스 각 방향에 따라 변화하는 축 방향의 하중을 해석하고 유성기어 세트의 주요 회전 요소를 지지하며 상대 회전을 가능하게 하는 스러스트 베어링의 동력 손실 분석을 위하여 Fig. 1과 같이 연구 과정을 구성하였다.

2. 스러스트 베어링 동력 손실 모델

베어링은 동력전달 시스템의 필수 기계요소로서 인접한 두 부품이 서로 다른 각속도에서 상대적으로 회전 가능하게 하며 동력전달의 샤프트와 기어에 대하여 하중 지지의 역할을 한다. 구름체(볼 혹은 롤러)와 내/외측(혹은 좌/우측) 레이스 구성의 조립체인 베어링의 레이스가 상대 회전하는 동안 구름체와 레이스 접촉부에서 구름과 미끄러짐이 발생한다. 이러한 물리적 현상은 기계적 측면에서 마찰 손실을 초래할 뿐만 아니라, 유체 역학 측

면에서 점성 마찰의 형태로 ATF의 점도와 회전에 따른 동력 손실을 발생시킨다.

베어링 동력 손실은 기계적, 점성적, 열적 및 기타 역학적 현상의 복합적인 결과로서 개별 요인에 의한 영향성 예측과 이론적 모델 개발은 어렵다. 이러한 이유로 실험 자료에 기반하며 주요 매개변수를 포함하는 경험적 모델에 관한 많은 연구가 수행되었다.⁸⁻¹¹⁾ 본 연구에서는 실링, 윤활량, 온도 등 상세 요건을 포함하지 않으며 운동학적 및 구조적 분석 결과를 통해 직접적으로 분석할 수 있는 베어링 동력 손실의 주요 요소인 기계 손실과 점성 손실로 구성되는 Harris의 베어링 동력 손실 모델⁸⁾을 스러스트 베어링의 동력 손실 예측에 적용하였다.

Harris는 축과 반경 방향의 하중을 지지하는 구름 베어링의 동력 손실 P_b 을 식 (1)과 같이 하중에 기인하는 기계 동력 손실 P_m 과 하중에 독립적인 점성 동력 손실 P_s 로 구분하여 정의하였다. Harris의 동력 손실 모델은 볼과 롤러의 구름체, 축과 반경 방향의 하중, 롤러와 레이스 간 마찰 등 다양한 베어링에 대한 동력 손실 모델을 제시하고 있다. 본 연구는 변속기의 동력전달 과정 중 헬릭스 각에 의해 발생하는 축 방향 하중 지지의 스러스트 베어링에 대한 동력 손실을 분석한다. 따라서, 축 방향 하중 지지의 스러스트 베어링에 대한 동력 손실 모델만을 선별적으로 활용하였으며, 이에 대한 기계와 점성 동력 손실 모델은 식 (2)와 (3)과 같다. 모델에 대한 자세한 내용은 Harris와 Kotzalas의 연구⁸⁾를 참고하길 바란다.

$$P_b = P_m + P_s \tag{1}$$

$$P_m = 1.5705 \times 10^{-7} F_a d_m n \tag{2}$$

$$P_s = \begin{cases} 1.047 \times 10^{-11} f_o (\nu_o n)^{2/3} d_m^3 n & \text{for } \nu_o n \geq 2000 \\ 167.52 \times 10^{-11} f_o d_m^3 n & \text{for } \nu_o n < 2000 \end{cases} \tag{3}$$

여기서 F_a , d_m , n 는 축 방향 하중, 베어링 피치 경, 회전 속도를 의미하며, f_o 와 ν_o 는 윤활 타입 계수와 동점성 계수를 의미한다.

3. 해석 및 결과 분석

본 연구의 목적인 자동변속기 내 스러스트 베어링 동력 손실을 고려한 유성기어 헬릭스 각 방향 선정에 관한 연구를 위하여 샘플 변속기 구조와 유성기어 설계 제원을 바탕으로 자동변속기를 모델링하였다. 스러스트 베어링에 지지되는 요소에 의한 베어링 상대 회전 속도, 축 방향 작용 하중, 헬릭스 각 방향에 따른 베어링 동력 손

Table 1 Clutch actuation scheme for yielding 8 forward and 1 reverse speed ratios of the transmission^{17,18)}

Speed ratio	Brake		Clutch			Gear ratio
	BR1	BR2	CL1	CL2	CL3	
1st	●	●	●			4.714
2nd	●	●			●	3.143
3rd		●	●		●	2.106
4th		●		●	●	1.667
5th		●	●	●		1.285
6th			●	●	●	1.000
7th	●		●	●		0.839
8th	●			●	●	0.667
REV.	●	●		●		-3.295

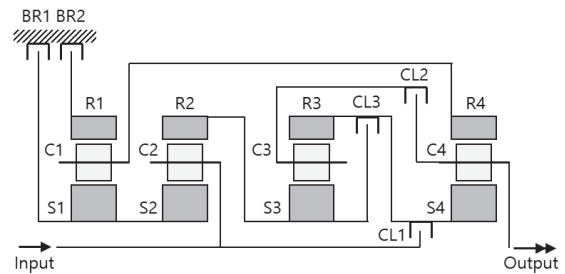


Fig. 2 Schematic diagram of a conceptual design of 8HP45 automatic transmission^{17,18)}

실을 해석하여 결과를 분석하였다. 본 연구를 위한 샘플 변속기는 ZF사의 8HP45 모델로서 전진 8단과 후진 1단의 변속비를 제공하는 자동변속기¹⁵⁾이다. 본 변속기의 기본 구조는 Fig. 2와 같이 4개의 단순 유성기어 세트와 5개의 변속 기구(브레이크 2개 + 클러치 3개)로 구성되어 있으며 Table 1의 변속표에 따라 해당 변속 기구를 작동하여 전진과 후진의 속도단을 구현한다. Fig. 2의 Si, Ci, Ri에 대하여 S/C/R은 선기어/캐리어/링기어를 의미하며, i는 유성기어 세트 숫자를 의미한다. BRj와 CLj에 대하여 BR/CL은 브레이크/클러치를 의미하고, j는 브레이크 및 클러치의 번호를 의미한다. 예를 들어 C1과 R3는 1번 유성기어 세트의 캐리어와 3번 유성기어 세트의 링기어를 나타내며, BR2와 CL1은 2번 브레이크와 1번 클러치를 의미한다.

3.1 변속기 모델링

자동변속기에 적용되는 스러스트 베어링의 동력 손실 해석을 위하여 각 속도단별 베어링에 작용하는 축 방향 하중의 크기와 베어링 지지부의 상대 회전 속도에 대한

해석이 필요하다. 이러한 해석 결과는 자동변속기에 대한 시스템 해석을 통하여 가능하므로 변속기 시스템 모델링을 수행하였다.

Fig. 2에서 찾을 수 있는 유성기어 세트의 주요 회전 요소와 변속 기구 간 연결과 Table 1의 각 속도단 별 변속 기구 작동표에 따라 기어의 회전 속도비와 토크비를 분석하였다. 회전 입력 $\omega_{in} = 1 [RPM]$ 과 토크 입력 $T_{in} = 1 [N \cdot m]$ 에 대한 샘플 변속기를 구성하는 유성기어 세트의 주요 회전 요소의 각 속도단별 회전 속도비와 토크비의 결과는 Table 2 및 Table 3과 같다. 회전 속도비는 베어링 지지부의 상대 회전 속도 크기 도출에 사용되며, 토크비는 유성기어 세트의 설계와 헬릭스 각에 의한 축 방향 하중 해석에 활용된다.

샘플 자동변속기를 구성하는 유성기어 4세트의 설계는 입력 토크 $T_{in} = 550 [N \cdot m]$ 에 대하여 선-피니언 기어 물림과 링-피니언 기어 물림에서 발생하는 접촉 응력

Table 2 Results of rotation speed ratios of sun, carrier and ring members of the example planetary transmission

Speed ratio	PG1			PG2			PG3			PG4		
	S1	C1	R1	S2	C2	R2	S3	C3	R3	S4	C4	R4
1st	0	0	0	0	1.0	1.5	1.5	1.2	1.0	1.0	0.2	0
2nd	0	0	0	0	1.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	0.3	0
3rd	1.0	0.3	0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	0.3
4th	1.8	0.6	0	1.8	1.0	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
5th	2.2	0.7	0	2.2	1.0	0.4	0.4	0.8	1.0	1.0	0.8	0.7
6th	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
7th	0	1.2	1.9	0	1.0	1.5	1.5	1.2	1.0	1.0	1.1	1.2
8th	0	1.5	2.3	0	1.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
REV.	0	0	0	0	1.0	1.5	1.5	-0.3	-1.4	-1.4	-0.3	0

Table 3 Results of torque ratios of sun, carrier and ring members of the example planetary transmission

Torque ratio	PG1			PG2			PG3			PG4		
	S1	C1	R1	S2	C2	R2	S3	C3	R3	S4	C4	R4
1st	1.2	-3.7	2.5	0	0	0	0	0	0	1.0	-4.7	3.7
2nd	0.8	-2.5	1.7	-0.3	1.0	-0.7	0	0	0	0.7	-3.1	2.4
3rd	0.5	-1.6	1.1	-0.5	1.6	-1.1	0	0	0	0.5	-2.1	1.6
4th	0.3	-1.0	0.7	-0.3	1.0	-0.7	0.2	-0.4	0.2	0.3	-1.3	1.0
5th	0.1	-0.4	0.3	-0.1	0.4	-0.3	0.3	-0.7	0.4	0.1	-0.5	0.4
6th	0	0	0	0	0	0	0.4	-1.0	0.6	0	0	0
7th	0	0	0	-0.2	0.5	0.3	0.3	-0.8	0.5	0	0	0
8th	0	0	0	-0.3	1.0	-0.7	0.3	-0.7	0.4	0	0	0
REV.	-1.3	3.9	-2.6	-0.3	1.0	-0.7	0.6	-1.7	1.1	-1.1	5.0	-3.9

σ_c 5,500 MPa 이하의 설계 재원을 선정하였으며 유성기어 세트의 설계 재원은 Table 4와 같다. Table 4에서 PG는 유성기어 세트를 의미하고, S, P, R은 각각 선기어, 유성기어, 링기어를 의미한다. Z, m, CD, FW는 기어 잇수, 모듈, 중심 거리, 치 폭을 의미한다. PA와 HA는 기어의 압력 각과 헬릭스 각을 나타내며, Do와 Dr은 기어의 외경과 루트경을 나타낸다. TT는 기어의 치 두께를 의미하며, TTD는 TT를 측정할 위치의 지름을 의미한다. 자동 변속기를 구성하는 샤프트, 베어링, 연결부 형상 등을 포함하는 전체 시스템은 기존의 연구 자료를 참고하여 구

Table 4 Designs of planetary gear sets consisting of the transmission

	PG1&2			PG3			PG4											
	S	P	R	S	P	R	S	P	R									
Z	48	24	96	60	18	96	28	38	104									
m (mm)	1.22			1.26			1.26											
PA (deg.)	18			20			18											
HA (deg.)	22			18			22											
CD (mm)	48.2			52.3			45.4											
FW (mm)	22	22	22	17	17	17	17	17	17									
Do (mm)	66.8	34.6	126.2	83.0	26.8	126.3	41.0	54.7	140.5									
Dr (mm)	61.3	29.2	131.5	77.4	21.1	131.8	35.4	49.3	146.1									
TT (mm)	2.07	2.07	2.07	1.87	2.28	1.87	2.13	2.13	2.13									
TTD (mm)	64.3	32.1	128.5	80.5	24.1	128.7	38.5	52.3	143.1									
σ_c (MPa)	3937			-			2456			-			5425			-		
	-	2738		-	3255		-	2719		-			-			-		

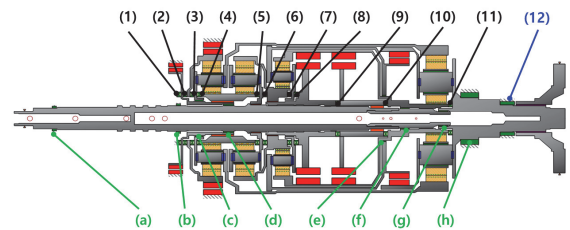


Fig. 3 Cross-section of the automatic transmission model with bearing installations^{17,18)}

성하였으며 SMT MASTA S/W를 이용하여 Fig. 3과 같이 시스템 모델을 완성하였다. Fig. 3의 변속기 모델은 상대 회전부의 경 방향 하중 지지를 위한 베어링(a-h), 축 방향 하중 지지를 위한 베어링(1-11), 경 방향과 축 방향 하중 지지를 위한 베어링(12)를 적용하였으며, 모든 베어링은 컨셉 베어링으로 모델링하였다. 특히, 베어링 12의 경우 경 방향과 축 방향의 하중이 상호 독립적으로 작용하는 컨셉 베어링으로 설정하였다.

3.2 스러스트 베어링 하중 및 동력 손실 해석

샘플 자동변속기의 입력축에 토크 T_{in} 와 $\omega_{in} = 3,000 \text{ RPM}$ 의 회전 속도의 입력 조건으로 스러스트 베어링에 작용하는 축 방향 하중과 하중에 의한 동력 손실 해석을 진행하였다. 스러스트 베어링 동력 손실 해석을 위하여 베어링(1-12)의 피치 경 크기는 Table 5와 같이 설정하였다. 자동변속기 내 유회 타입은 오일 잠김 $f_o = 3.5$ 으로 가정하였으며, 동점성 계수는 $\nu_o = 7.1$ 으로 설정하였다. 기어의 헬릭스 각 방향은 오른손 방향(Right-handed)과 왼손 방향(Left-handed)의 두 개 방향이 있으므로, 유성기어 4 세트로 구성된 자동변속기에 대하여 총 16개($= 2^4$) 경우의 헬릭스 각 방향 조합에 따른 하중 해석과 베어링 동력 손실 해석을 수행하였다.

Fig. 4는 샘플 자동변속기 유성기어 세트의 헬릭스 각 방향 조합에 대한 1-12번 베어링에 작용하는 축 방향 최대 하중의 합을 보여주고 있다. 유성기어 세트 헬릭스 각 방향은 Fig. 3 기준 맨 좌측에 위치한 유성기어 세트의 선기어 헬릭스 각 방향부터 표시하였다. 예를 들어, RRLR 경우의 헬릭스 각 방향은 1/2/4번 유성기어 세트의 선기어 헬릭스 각 방향은 오른손 방향이고 3번 세트만 왼손 방향임을 의미한다. 선기어, 유성기어, 링기어의 외접 및 내접 기어 물림에 따라 한 기어의 헬릭스 각 방향이 정해지면 나머지 기어의 헬릭스 각 방향은 자동으로 결정된다. 상대 회전하는 부품에 적용하는 베어링 선정 시 베어링에 작용하는 하중의 크기와 베어링의 상대 회전 속도를 고려해야 한다. 특히, 베어링의 크기는 베어링 하중에 크게 영향을 받으므로 베어링 하중에 대한 분석과 하중 최소화를 위한 엔지니어링은 변속기 개발에서 필수적이다. 본 연구는 변속기 시스템 단위 작용 하중에 의한 동력 손실 분석을 목적으로 하나, 변속기 구성 측면 최대 하중을 지지할 수 있는 베어링 적용이 필요하다. 따라서, 각 베어링의 전진단과 후진단의 동력전달 과정에서 발생하는 최대 베어링 하중의 총합을 헬릭스 각 방향에 대한 분석 지표로 선정하였다. 샘플 변속기에 대한 해석 결과(Fig. 4)에서 RRLR의 경우 최소값(약 170 kN)을 보이며, LLRR은 최대값(약 230 kN)을 보임을 확인할 수 있다.

Table 5 Pitch diameters of bearings supporting thrust loads in the transmission

Bearing #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
d_p [mm]	55	55	55	55	60	60	60	60	39	39	38	45

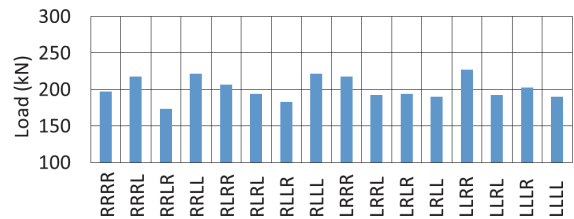


Fig. 4 Total bearing thrust loads of the transmission of all combinations of helix angle directions

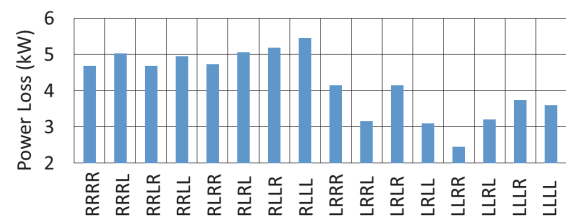


Fig. 5 Total power losses of thrust bearings of the transmission

Fig. 5는 유성기어 세트 헬릭스 각 방향 조합에 대한 스러스트 베어링(혹은 축 방향 하중에 의한) 동력 손실량의 총합을 보여주고 있다. 모든 전진단의 동력전달 과정에서 발생하는 각 베어링의 동력 손실량을 식 (1)을 활용하여 예측하였다. 변속기 시스템 단위의 헬릭스 각 방향에 따른 스러스트 베어링 동력 손실량을 분석하기 위하여, 모든 베어링의 동력 손실량에 대한 총합을 분석 지표로 활용하였다. 변속기 단위 스러스트 베어링에 의한 동력 손실량 PL (Power Loss)은 다음과 같이 정의하였다.

$$PL = \sum_{i=1}^{N_b} \sum_{j=1}^{N_F} b_i^j \quad (4)$$

여기서 N_b 는 스러스트 하중을 받는 베어링 수이며, N_F 은 변속기의 전진단 수이다. 여기서 주목해야 할 점은 베어링 Max. 하중에 대한 해석은 후진단의 경우도 포함하여 결과(Fig. 4)를 도출하였으나, 스러스트 베어링에 대한 동력 손실량 해석 결과(Fig. 5)는 전진단의 경우만 고려하였다. 이러한 이유는 변속 시스템에서 베어링의

선정은 최대 하중을 지지할 수 있는 베어링을 선정해야 하나, 동력 손실은 전진단이 주를 이루는 주행 상황을 고려하여 후진단을 배제하여 분석을 수행하였다. Fig. 5의 결과로부터 유성기어 세트의 헬릭스 각 방향이 LLRR 경우는 스러스트 하중에 의한 동력 손실량의 최소값 2.46 kW를 보이며, RLLL의 경우 최대값 5.45 kW의 동력 손실 결과를 보인다.

변속기 스러스트 베어링의 동력 손실 최소를 위한 유성기어 세트의 헬릭스 각 방향은 Fig. 5의 결과에 따라 LLRR 방향으로 선정해야 한다. 그러나, Fig. 4의 축 방향 최대 하중 결과로부터 헬릭스 각 방향이 LLRR 경우는 지지해야 하는 베어링 하중의 크기가 최대임을 확인할 수 있다. LLRR 경우가 스러스트 베어링의 최소 동력 손실과 최대 베어링 하중의 결과를 보이는 이유는 Fig. 6을 통해서 확인할 수 있다. 스러스트 베어링의 동력 손실은 베어링 하중에 큰 영향을 받는데, LLRR은 후진단에서 5-10번 베어링 하중이 최대를 보이며 최대 베어링 하중의 결과를 나타낸다. 반면, 전진단에서 5-10번 베어링에 작용하는 하중의 크기는 다른 베어링에 비하여 상대적으로 적다. 따라서, 베어링 하중의 크기는 최대이나 후진단을 포함하지 않는 베어링 손실 해석에서 최소값을 보임을 확인할 수 있다.

LLRR 경우는 스러스트 베어링 동력 손실 측면 우수하다고 볼 수 있으나, 최대 베어링 하중 지지를 위하여 상대적으로 큰 베어링을 설치해야 하는 점이 열세하다고 볼 수 있다. 따라서, Fig. 5의 결과에서 LLRR 다음으로 동력 손실이 작은 LRRL(3.16 kW), LRL(3.09 kW), LLRL(3.21 kW) 경우를 분석하였다. Fig. 4의 최대 베어링 하중 측면에서 LRRL, LRL, LLRL의 경우는 각각 192 kN, 190 kN, 192 kN의 최대 하중을 지지하는 결과를 보여준다. LRRL, LRL, LLRL 경우의 속도단별 개별 베어링에 작용하는 하중의 결과는 Figs. 7 ~ 9에서 확인할 수 있다. 세 헬릭스 각 조합의 경우는 기어비가 큰 1단과 후진단에서 하중의 크기가 가장 크게 작용하며, 각 속도단에서 3-10번 베어링에 작용하는 하중이 비슷한 크기로 분포하여 작용함을 확인할 수 있다.

LLRR와 LRRL, LRL, LLRL 경우에 대한 속도단별 각 베어링의 동력 손실 결과는 Figs. 10 ~ 13과 같다. LLRR의 경우는 후진단에서 5-10번 베어링 하중이 크게 작용하여 동력 손실량이 많음을 확인할 수 있다. 나머지 세 조합의 경우에서도 후진단의 동력 손실이 크며, 특히 7-8번과 10-11번 베어링에서 동력 손실량이 많음을 확인할 수 있다. 4개 경우의 헬릭스 각 조합에 대하여 각 전진 속도단별 스러스트 베어링 총 동력 손실 결과는 Fig. 14와 같다. 총 스러스트 하중이 최대이나 동력 손실량이 최

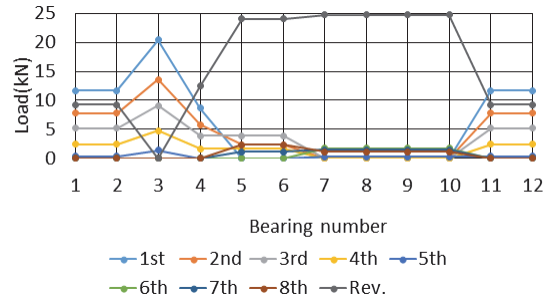


Fig. 6 Thrust bearing loads of LLRR direction of helix angles

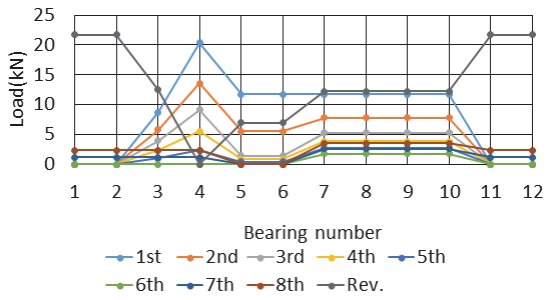


Fig. 7 Thrust bearing loads of LRRL direction of helix angles

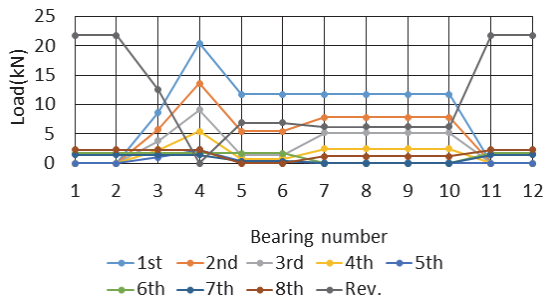


Fig. 8 Thrust bearing loads of LRL direction of helix angles

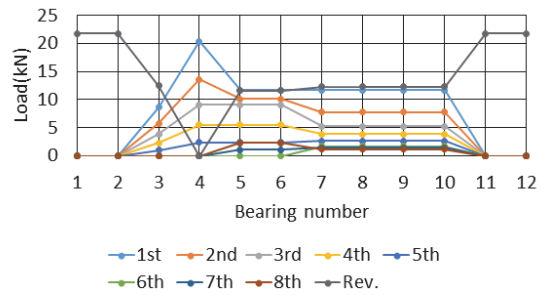


Fig. 9 Thrust bearing loads of LLRL direction of helix angles

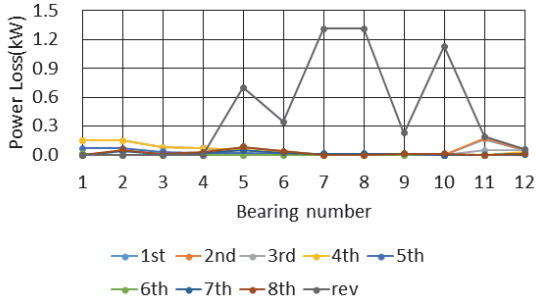


Fig. 10 Power loss of thrust bearing of LLRR direction of helix angles

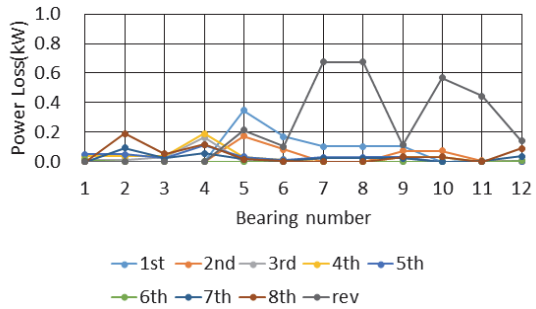


Fig. 11 Power loss of thrust bearing of LRRL direction of helix angles

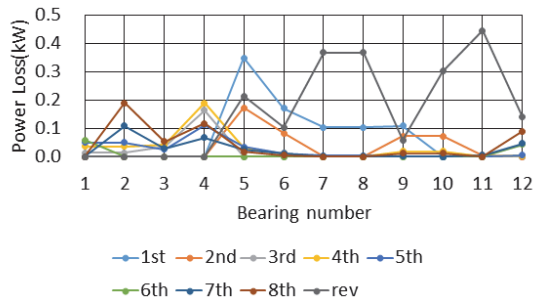


Fig. 12 Power loss of thrust bearing of LRLR direction of helix angles

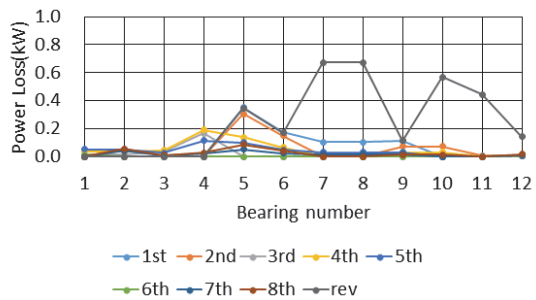


Fig. 13 Power loss of thrust bearing of LLRL direction of helix angles

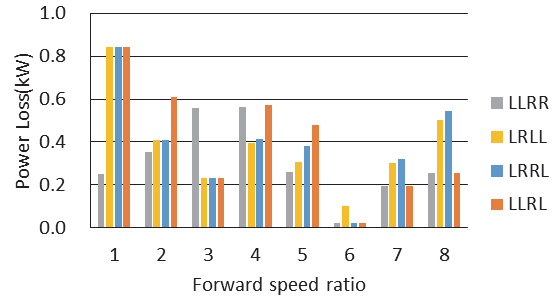


Fig. 14 Total power loss of thrust bearing of LLRR, LRLL, LRLR, LLRL direction of helix angles for forward speed ratios

소인 LLRR은 3단과 4단을 제외한 전진단에서 낮은 동력 손실 결과를 보이고 있으며, 특히 1단 동력 손실량의 큰 차이를 확인할 수 있다. LRLL과 LRLR은 모든 전진단에서 유사한 동력 손실량을 보여준다. 그러나, LRLR은 4/5/7/8단에서 약간 높은 손실량을 보이나, LRLL은 6단에서 높은 손실량을 갖는다. LRLR과 비교하여 LRLL과 LRLR은 속도단 중 저단에 속하는 2/4/5단에서 상대적으로 낮은 동력 손실량을 보여주며, 고단에 속하는 7/8단에서 상대적으로 높은 손실량이 발생함을 확인할 수 있다.

반면, LLRL은 2/4/5단에서 상대적으로 높으며 7/8단에서 상대적으로 낮은 손실량을 보임을 확인할 수 있다. 이러한 경향으로부터 고속 위주 혹은 저속 위주 운행의 차량에 대하여 변속기의 헬릭스 각 방향을 다르게 적용하여 스러스트 베어링에 의한 동력 손실량 저감을 통한 전달효율 향상을 예상해 볼 수 있다.

4. 결론

자동변속기를 구성하는 유성기어 세트의 헬릭스 각 방향에 따른 축 방향 하중 변화에 의한 스러스트 베어링에서 발생하는 동력 손실량에 관한 연구를 수행하였다. 샘플 변속기 구조를 모델링하고, 헬릭스 각 방향 조합에 대하여 속도단별 변속기 시스템 단위의 스러스트 베어링에 작용하는 축 방향 하중 해석과 베어링 동력 손실 해석을 수행하였다. 헬릭스 각 방향 조합에 대한 총 베어링 작용 하중과 총 동력 손실 결과를 분석하였고, 최소 동력 손실의 4개 헬릭스 각 조합의 속도단별 베어링 하중과 동력 손실량을 분석하였다. 그리고, 속도단별 동력 손실량을 분석하여, 스러스트 베어링 동력 손실 측면 저단 혹은 고단에 유리한 기어 헬릭스 각 방향 조합에 대하여 분석하였다.

변속 시스템 단위의 해석을 통한 자동변속기의 속도단별 축 방향 하중을 지지하는 스러스트 베어링의 동력

손실량과 설계의 영향성에 관한 연구는 찾기 힘들다. 그러나, 본 연구 수행을 통하여 도출된 유성기어 세트 설계와 스러스트 베어링 동력 손실에 관한 연구 결과는 자동 변속기 및 다른 동력전달 시스템 연구의 빈 곳을 채울 것이며 연관 기술 개발에 도움이 될 것으로 기대한다.

References

- 1) A. Kahraman, H. Ligata, K. Kienzle and D. M. Zini, "A Kinematics and Power Flow Analysis Methodology for Automatic Transmission Planetary Gear Trains," *Journal of Mechanical Design*, Vol.126, pp.1071-1081, 2004.
- 2) M. Raghavan, "The Analysis of Planetary Gear Trains," *Journal of Mechanisms and Robotics*, Vol.2, No.2, 021005, 2010.
- 3) D. Shin, "Development of Algorithm for Automotive Powertrain Analysis," *KSAE Annual Conference Proceedings*, pp.207-208, 2014.
- 4) E. Buckingham, *Analytical Mechanics of Gears*, Dover Publications, New York, 1987.
- 5) O. Kelley, "The Design of Planetary Gear Trains," *SAE 590059*, 1959.
- 6) H. S. Kwon, A. Kahraman, H. K. Lee and H. S. Suh, "An Automated Design Search for Single and Double-Planet Planetary Gear Sets," *Journal of Mechanical Design*, Vol.136, Paper No.061004, 2014.
- 7) H. S. Kwon and A. Kahraman, "Influence of Design Parameters on Mechanical Power Losses of Planetary Gear Sets," *Proceedings of the ASME 2015 IDETC & CIE Conference*, DETC2015-47283, 2015.
- 8) T. A. Harris and M. N. Kotzalas, *Rolling Bearing Analysis - Essential Concepts of Bearing Technology*, 5th Edn., Taylor and Francis Group, FL, 2007.
- 9) ISO 14179-1, *Gear Thermal Capacity - Part 1: Rating Gears Drives with Thermal Equilibrium at 95°C Sump Temperature*, ISO Technical Report, Geneva, 2001.
- 10) ISO 14179-2, *Gear Thermal Capacity - Part 2: Thermal Load-Carrying Capacity*, ISO Technical Report, Geneva, 2001.
- 11) SKF Group, *SKF Rolling Bearings Catalogue*, <https://www.skf.com/africa/en/products/rolling-bearings/principles-of-rolling-bearing-selection/bearing-selection-process/operating-temperature-and-speed/bearing-friction-power-loss-and-starting-torque>, accessed on 2023-10-21.
- 12) M. Yilmaz, T. Lohner, K. Michaelis and K. Stahl, "Bearing Power Losses with Water-Containing Gear Fluids," *Tribology Transactions*, Vol.59, pp.707-719, 2016.
- 13) D. Talbot, A. Kahraman, S. Li, A. Singh and H. Xu, "Development and Validation of an Automotive Axle Power Loss Model," *Journal of Mechanical Design*, Vol.136, Paper No.061004, 2014.
- 14) K. Michaelis, B. R. Hohn and M. Hinterstoiber, "Influence Factors on Gearbox Power Loss," *Industrial Lubrication and Tribology*, Vol.63, pp.46-55, 2011.
- 15) A. Dick, J. Greiner, A. Locher and F. Jauch, "Optimization Potential for a State of the Art 8-Speed AT," *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems*, Vol.6, No.2, pp.899-907, 2013.
- 16) J. H. Han, H. U. Jeong and S. H. Hwang, "Design of Gear Shift Map for Automatic Transmission Considering Transmission Efficiency," *Transactions of KSAE*, Vol.27, No.8, pp.611-617, 2019.
- 17) H. S. Kwon, "A Study of Effects of the Helical Angle Directions of Planetary Gear Sets on the Axial Forces on Thrust Bearings in an Automatic Transmission," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol.20, No.3, pp.92-99, 2021.
- 18) H. S. Kwon, "Investigation of the Influences of Thrust Loads Resulted by Helix Angle Directions of Planetary Gear Sets on Bearing Power Losses in Automotive Planetary Gear Trains," *Applied Science*, Vol.11, No.19, Paper No.8827, 2021.