

플러그 방식 승객용 출입문의 변속장치 개발

Development on a Transmission Unit for a Plug Type Passenger Door

김연수*¹, 홍제성*¹, 박성혁*¹, 이관섭*¹, 백영남*²

Yeon-Su Kim, Jai-Sung Hong, Sung-Hyuk Park, Kwan-Sup Lee, Young-Nam Paik

Key Words : *plug type passenger door(플러그 방식 출입문), complex planetary gear train(복합유성기어장치), interference(간섭), efficiency(효율), torque ratio(토크비)*

Abstract

Since the plug type passenger door has two modes of motion, a power transmission unit must be capable of plug-in or plug-out mode, and sliding mode. Complex planetary gear train is proposed, which is composed of two 2K-H, I type planetary gear units. For the proposed complex planetary gear train, ranges of addendum modification coefficients which would not lead to interferences are analyzed, and optimal addendum modification coefficients among these ranges which generate the maximum efficiency are presented. Based on the results of analysis on interferences, efficiencies and torque ratios, the specifications for the complex planetary gear train were determined. It has been shown by tests of the complex planetary gear train manufactured that the gear train worked well with good agreements of analysis.

1. 서론

국내 도시철도 차량의 승객용 출입문은 승객의 신속하고 안전한 승하차를 위해 충분한 수량과 크기를 가져야 하며 자동으로 개폐가 되어야 하고 차량의 추진장치와 연동되도록 설계되어야 한다. 또한 출입문의 모든 부품은 차량의 주행 중 발생하는 진동 및 충격에도 원활한 작동이 가능해야 하며 방수, 방음 및 단열이 우수한 구조를 갖도록 규정되어 있다[1].

승객용 출입문은 크게 구동방식과 구조에 의해 분류된다. 구동방식에 따른 출입문의 분류는 공기식과 전기식이 있으며, 공기식 출입문은 차량의 공기압축기에서 생성되는 압축공기와 공기실린더를 이용하여 출입문을 구동하는 방식이다. 전기식 출입문의 경우 독립된 전동기를 설치하여 출입문을 제어하며 공기식에 비해 정밀

한 출입문제어가 가능하다. 구조에 따른 출입문의 종류는 크게 포켓방식(pocket type), 플러그 방식(plug type), 외부 슬라이딩 방식(external sliding type)이 있다. 포켓방식은 현재 운행 중인 국내 지하철에 적용되는 방식으로서 차체의 외장판과 내장판 사이에서 출입문이 미끄럼 운동을 하는 방식이며 창문의 배치와 크기에 제한이 있는 것이 단점이다. 플러그 방식은 차량 횡방향으로의 플러그 인(plug-in) 및 플러그 아웃(plug-out) 운동과 길이방향으로의 미끄럼 운동을 동시에 구현하는 방식으로서 차량한계에 영향을 주지 않고 창문 등 차량설비에 영향을 미치지 않지만, 2가지 동작 모드를 구현하기 위한 변속장치가 복잡하다는 것이 단점이다. 외부 슬라이딩 방식은 차량 외부에서 출입문이 미끄럼 운동을 하는 방식이며, 창문 등의 설비에 영향을 미치지 않지만 차량한계를 증가시키고 외관상 미려도에 좋지 않은 영향을 미치는 것이 단점이다[2].

*1 정회원, 한국철도기술연구원 도시철도기술개발사업단

*2 정회원, 경희대학교 기계·산업시스템공학부 교수

플러그 방식 출입문의 2가지 동작모드를 일반 기어열을 사용하여 구현할 경우 구조가 복잡해지고, 기어 및 베어링 등의 부품수가 증가되어 신뢰성이 감소할 우려가 있다. 반면 유성기어열을 사용할 경우 원하는 속도비를 구현하면서 소형·경량화 설계가 가능하지만, 링기어(ring gear)와 같은 내접기어(internal gear)로 구성되므로 원활한 작동을 위해서는 구성요소간 간섭을 피해야 하는 여러 가지 설계 제한조건이 존재하여 설계 및 제작에 많은 어려움이 있다. 해외에서는 유성기어열의 효율특성과 다양한 기하학적 해석에 관한 연구가 진행된 바 있으며[3-7], 국내에서도 유성기어열이 차동기어장치로 사용되는 경우에 대한 간섭과 효율해석을 수행하고, 실험을 통해 타당성을 증명한 연구가 발표된 바 있다[8-9].

본 논문에서는 플러그 방식 출입문의 2가지 동작모드를 구현할 수 있는 복합유성기어장치의 구조를 제안하고, 구성요소 사이의 간섭해석에 의해 사용 가능한 전위계수의 범위, 동력전달효율, 구성요소의 전달토크비 등을 해석하였다. 이러한 해석결과를 이용하여 플러그 방식 출입문의 변속장치용 복합유성기어장치를 제작하고 2가지의 동작모드의 원활한 구현을 확인하였다.

2. 변속장치의 구조 및 기능

2.1 플러그 방식 출입문의 동작모드

플러그 방식 출입문은 Fig. 1과 같이 차량의 횡방향으로의 플러그 인 및 플러그 아웃 운동과 차량 길이 방향으로의 슬라이딩 운동의 2가지 운동형태를 갖는다. 또한 출입문이 열릴 때는 플러그 아웃과 슬라이딩 운동이 결합되고, 출입문이 닫힐 때는 슬라이딩 운동과 플러그 인이 결합되어 작동된다.

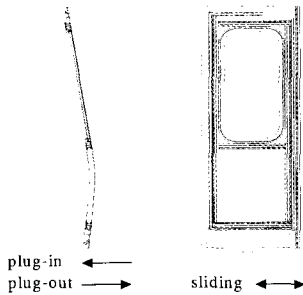


Fig. 1 Two modes of motion of a plug type door

2.2 변속장치의 설계 요구사항

플러그 방식 출입문의 변속장치는 다음과 같은 설계 요구사항이 만족되도록 개발되었다.

- 1) 기존에 운행되는 도시철도 차량에 설치 가능한 크기를 가져야 한다.
- 2) 출입문의 개폐기능의 대부분을 수행하는 슬라이딩 모드의 동력전달효율이 커야한다.
- 3) 변속장치의 구조는 단순해야 하고, 가능한 동일부품으로 구성되어야 한다.

2.3 복합유성기어장치의 제안

Fig. 2와 같은 2K-H형 I 형식 유성기어장치 1개만으로는 Fig. 1과 같은 2가지 운동모드의 구현이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 2의 단순 유성기어장치 2개를 연결한 복합유성기어장치를 플러그 방식 출입문의 변속장치로 제안하였다.

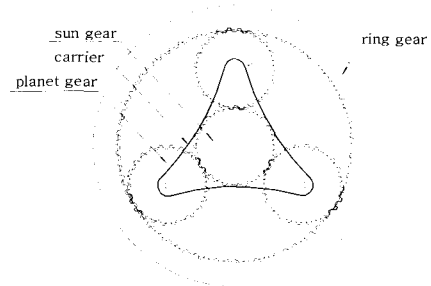


Fig. 2 2K-H, I type planetary gear train

2K-H형 I 형식은 링기어, 태양기어, 캐리어를 기본축으로 하고 있으므로 다양한 연결방법이 있으나 Fig. 3과 같이 요소 1과 2의 태양기어(s_1, s_2)를 서로 연결시키고 요소 2의 링기어(r_2)를 영구적으로 고정시키는 구조를 갖는 복합유성기어장치를 구성하였으며, 변속장치의 개념도는 Fig. 4와 같다.

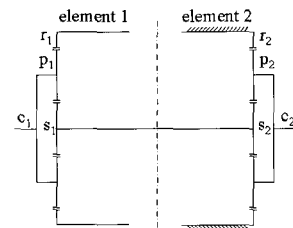


Fig. 3 Complex planetary gear train for a plug type door

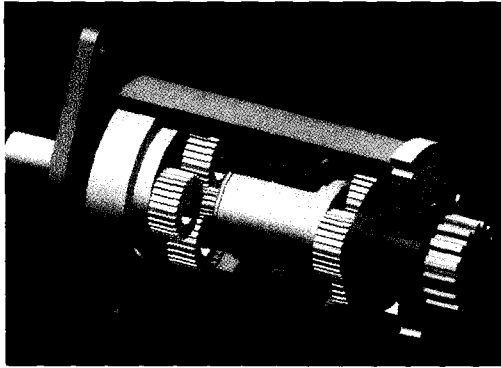


Fig. 4 Proposed complex planetary gear train

플러그 인과 플러그 아웃 운동을 모드 1로 정의하고 슬라이딩 운동을 모드 2로 정의하면 모드 1의 경우는 Fig. 3에서 요소 1의 캐리어(c_1)가 입력축이고, 요소 2의 캐리어(c_2)가 출력축이 된다. 이때 요소 2의 링기어(r_2)는 영구 고정요소이고, 요소 1의 링기어(r_1)는 고정된다. 모드 2의 경우는 Fig. 3에서 요소 1의 캐리어(c_1)가 입력축이고 요소 1의 링기어(r_1)가 출력축이 되며, 이때 요소 2의 링기어(r_2)는 영구 고정요소이고, 요소 1과 2의 태양기어(s_1, s_2)는 고정된다. 모드 1과 2의 입력, 출력, 고정요소, 속도비를 정리하면 Table 1과 같으며, i_1 은 모드 1의 속도비, i_2 는 모드 2의 속도비, $\omega_{c1}, \omega_{c2}, \omega_{r1}$ 은 캐리어 c_1, c_2 와 링기어 r_1 의 회전속도이다. 또한 $z_{s1}, z_{s2}, z_{r1}, z_{r2}$ 는 태양기어 s_1, s_2 , 링기어 r_1, r_2 의 잇수이다.

Table 1 Two modes of motion of complex planetary gear train

mode	input	output	fixed	speed ratio
mode 1 (plug in or plug out)	c_1	c_2	r_1, r_2	$i_1 = \frac{\omega_{c2}}{\omega_{c1}} = \frac{1 + \frac{z_2}{z_1}}{1 + \frac{z_1}{z_2}}$
mode 2 (sliding)	c_1	r_1	s_1, s_2, r_2	$i_2 = \frac{\omega_{r1}}{\omega_{c1}} = \frac{z_{s1} + z_r}{z_{r1}}$

모드 1은 요소 2의 캐리어(c_2)에 별도의 기어가 설치되어 출입문의 플러그 인 및 플러그 아웃 운동을 구현하고, 모드 2는 요소 1의 링기어(r_1)에 벨트가 설

치되어 출입문의 슬라이딩 운동을 수행하게 된다. 따라서 모드 2에서 요소 1의 링기어(r_1)는 벨트 풀리의 역할을 수행한다.

3. 복합유성기어장치의 설계

3.1 주요제원

Fig. 4와 같이 제안된 복합유성기어장치의 잇수와 모듈은 국내 지하철의 설치공간을 고려하여 결정하였으며, 출입문 개폐에 요구되는 전달력을 이용하여 강도 측면도 고려되었다.

또한 Fig. 3에서 요소 1의 잇수와 요소 2의 잇수는 요구사항에 따라 동일하게 설정하였으며, 제안된 복합유성기어장치의 주요제원을 정리하면 Table 2와 같다.

Table 2 Specifications of the complex planetary gear train

element	number of teeth			cutter pressure angle (degree)	module (mm)	gear type
	sun gear	planet gear	ring gear			
1	14	28	70	20.0	0.75	spur
2	14	28	70	20.0	0.75	spur

3.2 간섭조건

Fig. 4와 같은 복합유성기어장치는 링기어와 같은 내접기어와 유성기어와 같은 일반 외접기어가 서로 맞물리며, 여러 개의 유성기어가 링기어와 태양기어 사이에서 공전과 자전운동을 수행하므로 구성요소 사이의 간섭이 발생될 가능성이 매우 높은 기구이다. 따라서 본 연구에서는 2K-H형 I 형식 유성기어열을 구성하는 각 기어들의 설계조건과 기하학적 특성을 이용하여 수행된 간섭해석[8-9]을 이용하여 간섭이 발생되지 않는 각 구성기어의 전위계수 범위를 분석하였다.

유성기어장치의 각종 간섭조건을 정리하면 다음과 같다[7-9].

- 1) 링기어의 이끝원 지름은 기초원 지름보다 반드시 커야 한다.
- 2) 링기어, 유성기어, 태양기어의 이끝원은 뾰족한계 이

내로 설계되어야 한다.

- 3) 유성기어 및 태양기어는 언터컷이 발생하지 않는 전위계수 범위 내에서 설계되어야 한다.
- 4) 링기어와 유성기어의 맞물림 압력각은 반드시 0보다 커야한다.
- 5) 태양기어와 유성기어, 링기어와 유성기어 사이의 물림율은 반드시 1.0보다 커야 한다.
- 6) 링기어의 이끝이 그리는 트로코이드(trochoid) 곡선이 유성기어의 이뿌리와 간섭을 일으키지 않도록 설계해야 한다.
- 7) 유성기어의 이끝은 링기어의 이끝과 간섭이 발생되지 않도록 설계해야 한다.

3.3 조립조건

복합유성기어장치는 여러 개의 유성기어가 링기어와 태양기어 사이에 배치되므로 원활한 조립과 작동을 위해서는 다음과 같은 조립조건[7-9]을 반드시 만족해야 한다.

- 1) 복합유성기어장치에서는 링기어, 태양기어, 캐리어의 축 중심이 동축(concentric)이어야 한다. 즉 링기어와 유성기어의 축간거리는 태양기어와 유성기어의 축간거리와 동일해야 한다.
- 2) 태양기어와 링기어 사이에 배치되는 유성기어들은 서로 이웃한 유성기어들 사이에서 간섭이 발생하지 않아야 한다.
- 3) 유성기어가 태양기어와 링기어 사이에서 등간격으로 배치되기 위해서는 링기어의 잇수와 태양기어의 잇수의 합을 유성기어의 수로 나누었을 때 정수가 되어야 하는 조건을 만족해야 한다.

3.4 이론효율 및 전달 토크비

일반적으로 기어전동장치의 동력손실은 맞물리는 기어 치면사이의 마찰손실과 베어링 손실, 윤활손실로 분류되지만, 베어링손실과 윤활손실은 치면의 마찰손실에 비해 매우 작기 때문에 본 연구에서는 치면의 마찰손실만을 고려하였으며, 치면의 마찰계수는 순간 마찰계수의 평균값인 평균마찰계수로 가정하였다[7-9].

유성기어장치의 초기 설계시 고려할 사항으로는 속

도비, 이론효율, 전달 토크비이며, 이러한 설계인자들에 대해 다양한 방법론[3-6]이 발표되어 왔으며, 본 논문에서는 최근에 兩角宗晴[7]에 의해 제안된 방법을 이용하여 복합유성기어장치의 이론효율과 전달 토크비를 해석하였다. 모드 1의 이론효율(η_I)과 모드 2의 이론효율(η_{II})는 다음과 같다.

$$\eta_I = \frac{\eta_{01}(1 + i_{01})(\eta_{02} i_{02} + 1)}{(\eta_{01} + i_{01})(1 + i_{02})} \quad (1)$$

$$\eta_{II} = \frac{\eta_{01}(1 + i_{01})}{1 + \eta_{01} i_{01}} \quad (2)$$

위식에서 η_{01} , η_{02} 는 Fig. 3의 요소 1과 2의 기본 효율로서 각각 링기어와 유성기어의 물림효율과 태양기어와 유성기어의 물림효율의 곱이다. i_{01} 과 i_{02} 는 Fig. 3의 요소 1과 2의 기본 속도비로서 각각 링기어와 태양기어의 잇수비($i_{01}=z_{r1}/z_{s1}$, $i_{02}=z_{r2}/z_{s2}$)이다.

모드 1에서 입력축의 토크에 대한 태양기어 연결축의 토크비(T_{s1}/T_{cl}), 고정요소인 요소 1의 링기어(r_1) 토크비(T_{r1}/T_{cl})와 요소 2의 링기어(r_2) 토크비(T_{r2}/T_{cl})는 다음과 같다.

$$T_{s1}/T_{cl} = \frac{\eta_{01}}{\eta_{01} + i_{01}} \quad (3)$$

$$T_{r1}/T_{cl} = \frac{i_{01}}{\eta_{01} + i_{01}} \quad (4)$$

$$T_{r2}/T_{cl} = \frac{\eta_{01}\eta_{02} i_{02}}{\eta_{01} + i_{01}} \quad (5)$$

모드 2에서 입력축 토크에 대한 고정요소인 요소 1의 태양기어(s_1) 토크비(T_{s1}/T_{cl})는 각각 다음과 같다.

$$T_{s1}/T_{cl} = \frac{1}{1 + \eta_{01} i_{01}} \quad (6)$$

본 연구에서 효율과 전달 토크비 해석을 위해 설정된 가정들을 정리하면 다음과 같다[8-9].

- 1) 기어 치면 사이의 마찰계수는 평균마찰계수로서 0.1로 가정하였다.
- 2) 기어 치면의 법선하중은 평균법선하중을 적용하여 회전하는 동안 변화하지 않는다

- 3) 복합유성기어장치의 구성기어인 태양기어, 링기어, 유성기어를 가공하기 위한 피니언 커터의 이끝높이는 모듈과 같은 값을 갖는 것으로 가정하였다.
- 4) 백래쉬의 영향이 아주 미미하므로 백래쉬는 없는 것으로 가정하였다.
- 5) 플러그 방식 출입문 변속장치인 복합유성기어장치는 스퍼기어로 제작된다.

4. 결과 및 고찰

4.1 간섭해석 결과

Fig. 4와 같은 복합유성기어장치의 간섭조건과 조립조건을 이용하여 각종 간섭이 발생하지 않는 전위계수의 범위를 해석하여 Fig. 5와 같은 결과를 얻었다. 사용 가능한 태양기어의 전위계수 범위는 0.2~0.9, 링기어의 전위계수 범위는 -0.3~1.9, 유성기어의 전위계수 범위는 -0.4~0.8을 얻었다. 링기어는 상대적으로 넓은 전위계수 범위를 가지며 태양기어의 경우는 반드시 (+) 방향으로 전위를 시켜야 한다. 또한 각 구성기어의 전위계수는 반드시 대응되는 값을 선택해야 한다.

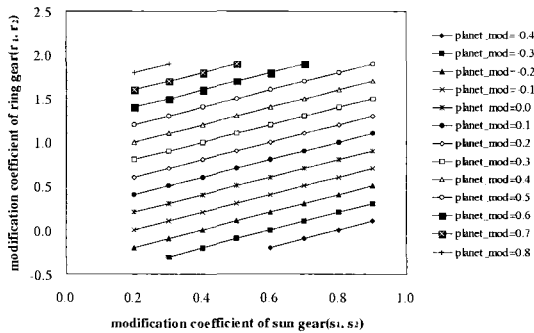


Fig. 5 Range of tooth modification coefficients of the complex planetary gear train

4.2 효율해석 결과

복합유성기어장치의 동작모드 1과 2에 대한 이론해석 결과는 각각 Fig. 6, 7과 같다. 모드 1의 효율은 링기어, 유성기어, 태양기어의 전위계수가 큰 영역에서 높은 경향을 보였으며, 약 94~96%의 효율범위를 갖는 것으로 나타났다. 또한 임의의 유성기어 전위계수

에서 링기어의 전위계수가 낮고 태양기어의 전위계수가 높을수록 효율은 증가하는 경향을 갖는다. 효율측면에서는 각 구성기어의 전위계수를 높게 설정하는 것이 유리하지만 전위계수가 지나치게 커지면 베어링 하중이 증가하는 등 단점도 있으므로 여러 가지 측면을 고려하여 전위계수를 선택해야 한다.

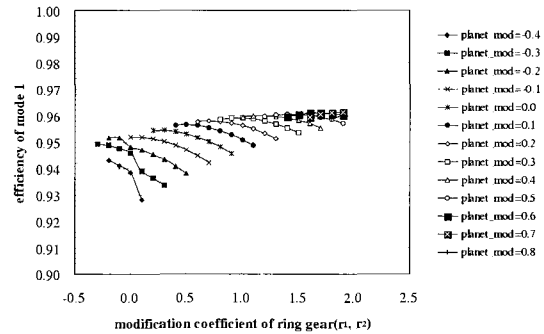


Fig. 6 Theoretical efficiency of mode 1

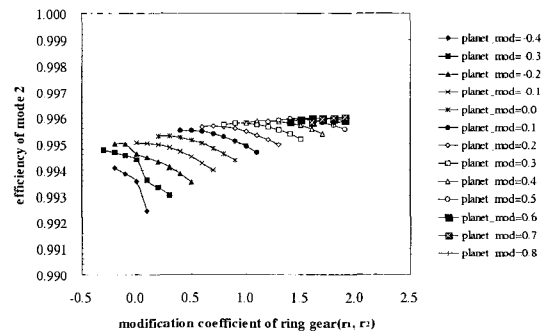


Fig. 7 Theoretical efficiency of mode 2

모드 2의 효율해석 결과는 모드 1의 해석결과와 거의 동일한 경향을 갖지만 약 3~5% 높은 효율을 유지하였다. 플러그 방식 출입문에서 대부분의 동작을 담당하는 슬라이딩 운동의 효율이 높은 결과를 가지는 것으로서 본 연구에서 제안한 Fig. 4의 복합유성기어장치는 플러그 방식 출입문의 변속기어장치로서 유효한 것으로 분석된다.

4.3 전달 토크비 결과

모드 1에서 입력축 토크에 대한 태양기어 연결축의 토크비(T_{s1}/T_{c1}), 고정요소인 요소 1의 링기어(r_1) 토크

비(T_{r1}/T_{c1})와 요소 2의 링기어(r_2) 토크비(T_{r2}/T_{c1}) 해석 결과는 Fig. 8~10과 같다. 토크비 T_{s1}/T_{c1} 와 토크비 T_{r2}/T_{c1} 는 효율과 같이 링기어와 유성기어, 태양기어의 전위계수가 높은 범위에서 전달 토크비가 증가하지만, 토크비 T_{r1}/T_{c1} 은 이와는 반대되는 경향을 갖는다.

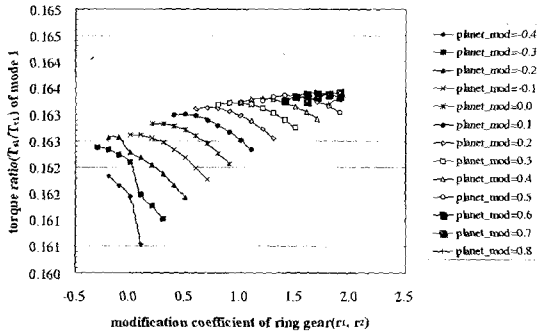


Fig. 8 Torque ratio(T_{s1}/T_{c1}) in mode 1

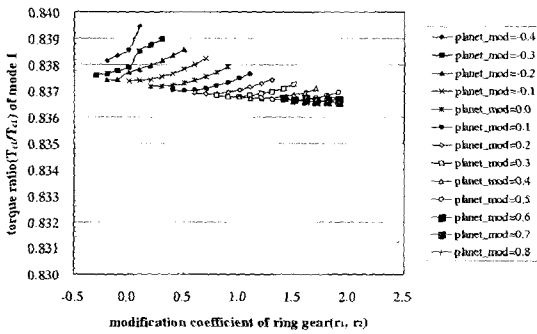


Fig. 9 Torque ratio(T_{r1}/T_{c1}) in mode 1

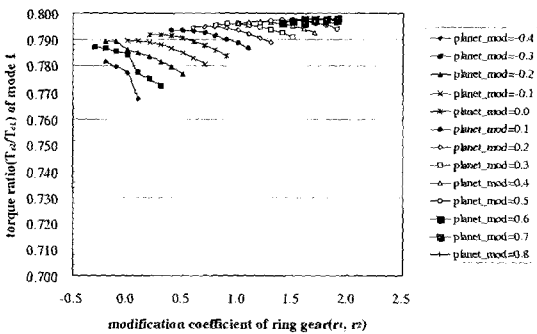


Fig. 10 Torque ratio(T_{r2}/T_{c1}) in mode 1

모드 2에서 입력축 토크에 대한 태양기어($s1$)의 토

크비(T_{s1}/T_{c1}) 해석 결과는 Fig. 11과 같으며, 모드 1의 T_{r1}/T_{c1} 과는 동일한 경향을 갖는다.

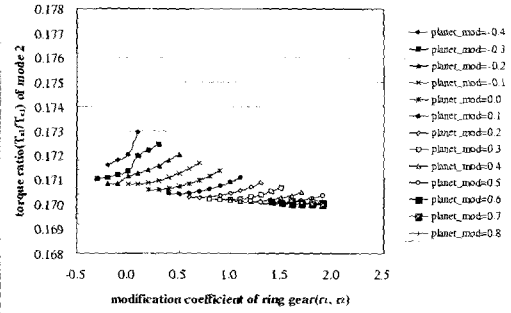


Fig. 11 torque ratio(T_{s1}/T_{c1}) in mode 2

4.4 복합유성기어장치의 제작

제안된 복합유성기어장치에 대한 간섭해석, 효율해석, 전달토크비 해석결과를 이용하여 Fig. 12와 같이 플러그 방식 출입문의 변속기어장치를 제작하였다. 제작된 복합유성기어장치는 모드 1과 2로 동작하는데 간섭이 발생하지 않고 원활하게 작동됨을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 제작된 복합유성기어장치의 동력전달 효율과 전달 토크비에 대한 실험은 수행되지 않았으나, 실험적으로 증명된 선행연구[8,9]와 동일한 방법으로 해석된 결과이므로 신뢰성을 갖는다고 할 수 있다.

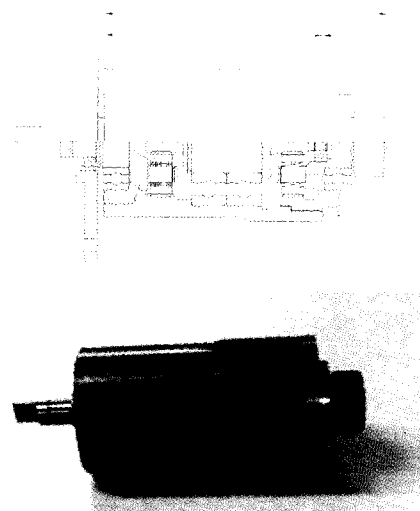


Fig. 12 Drawing and photograph of the complex planetary gear train manufactured

5. 결 론

2K-H형 I 형식 유성기어장치 2개를 연결하여 플러그 방식 출입문의 2가지 동작모드를 구현 가능한 복합유성기어장치를 제안하였다. 또한 간섭조건과 조립조건을 이용하여 제안된 복합유성기어장치에 대해 간섭이 발생하지 않는 전위계수 범위를 해석하였고, 이를 바탕으로 이론효율과 전달 토크비를 해석하였다. 또한 해석 결과를 이용하여 복합유성기어장치를 설계 제작하고 해석결과의 타당성을 확인하였다. 슬라이딩 운동을 수행하는 모드 2의 효율이 플러그 인과 플러그 아웃을 수행하는 모드 1에 비해 약 3~5% 높은 효율을 유지하였고 전달 토크비 해석 결과 또한 원활한 출입문 구동이 가능하였으므로 제안된 복합유성기어장치는 플러그 방식 출입문의 변속장치로서 유효한 것으로 분석되었다.

참고문헌

1. 건설교통부, "도시철도차량 표준사양," 건설교통부 고시 제 1998-53호, pp. 31-33, 1998.
2. 한국철도기술연구원, "전동차 표준사양 연구보고서(분야 : 차체 및 설비)," pp. 59-66, 1997.
3. D. Yu, N. Beachley, "On the Mechanical Efficiency of Differential Gearing," ASME Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, Vol. 107, pp. 61-67, 1985.
4. E. Pennestri, F. Freudenstein, "The Mechanical Efficiency of Epicyclic Gear Trains," ASME Journal of Mechanical Design, Vol. 115, pp. 645-651, 1993.
5. R. J. Willis Jr., "On the Kinematics of the Closed Epicyclic Differential Gears," ASME Journal of Mechanical Design, Vol. 104, pp. 712-723, 1982.
6. 欠田恒二, "齒車應用機構の設計 (1)-(20)," 機械の研究, 1997-1999.
7. 兩角宗晴, "遊星齒車と糸動齒車の理論と設計計算法," 日刊工業新聞社, pp. 89-134, 1989.
8. 김연수, 최성욱, 최상훈, "2K-H형 유성기어장치의 효율해석에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제17권 제3호, 2000.
9. Yeon-Su Kim, Sang-Hoon Choi, "Interference and efficiency analysis of 2K-H I type differential gear unit," International Journal of the KSPE, Vol. 1, No. 1, pp. 5-13, 2000.