

차량에서 유성기어 소음 발생 예측에 대한 실험적 연구[#]

An Experimental Study for Predicting the Planetary Gear Noise in the Vehicle

이 현 구[†] · 강 석 찬^{*} · 허 진 옥^{*} · 배 덕 한^{*} · 강 구 태^{**}
Hyun Ku Lee, Seock Chan Kang, Jin Wook Hur, Douck Han Bae
and Koo Tae Kang

(2007년 11월 26일 접수 ; 2008년 4월 23일 심사완료)

Key Words : Planetary Gear System(유성기어시스템), Masking Effect(마스킹 효과)

ABSTRACT

In this paper, various methods to improve the planetary gear noise in vehicles were introduced. Those cases of improvement have been used as good guidelines and references to prevent planetary noise problems. In this research, different types of planetary gear systems were also analyzed. The consequences of those analysis said in common that the planetary gear set generating noise mainly is the one which takes power directly from the turbine. Furthermore, a frequency versus vibration level map was introduced to judge how to solve the noise problem quickly in a vehicle development process. Besides, it is provided a predicting method which planetary gear set most contributes to noise problem taking in the vehicle and how to design the planetary gear set robustly.

1. 서 론

소비자의 자동차 품질에 대한 욕구는 이동의 편리함을 추구하던 시대에서 육체적 및 정신적인 안락함까지 요구하는 단계에 이르렀다. 따라서 이러한 감성적인 요소에 영향을 미치는 소음과 진동이 소비자가 차량을 선택하는 아주 중요한 요소로 자리잡고 있다.

자동변속기를 구성하는 기어장치로 사용되는 유성기어 방식은 단순 축 기어 방식에 비하여 집약적이면서도 무게 대비 고용량의 토크를 전달할 수 있고

반경방향 베어링의 부하를 줄일 수 있을 뿐 아니라, 소음도 적은 장점을 가지고 있다.

이러한 유성기어의 소음진동에 대한 연구는 크게 세 부분으로 나누어지는데, 시스템의 공진주파수를 예측하는 연구⁽¹⁻²⁾와 유성기어(planetary)에 의한 위상차(phase difference)에 의해 발생하는 소음과 진동 메커니즘을 연구하는 부분⁽³⁻⁵⁾ 그리고 기어 매쉬(gear mesh)에 추가되는 동적하중과(dynamic loads) 강제 진동 응답(forced vibration response)을 연구하는 연구자들로 분류할 수 있다⁽⁶⁻⁸⁾. 이러한 연구자들의 궁극적인 목적은 헬리컬 기어를 가진 유성기어 세트의 동적 모델링(dynamic modeling)과 이러한 모델링에 의한 유성기어의 치합에 영향을 주는 파라미터 연구에 있다고 할 수 있다.

현재 상용화 되어있는 자동변속기는 2~4개 정도의 유성기어세트의 조합으로 구성되어 있다. 설계자는 동일한 조건으로 설계를 하고 공장에서 동일한

† 교신저자: 정회원, 현대자동차
E-mail : hk-lee@hyundai-motor.com
Tel : (031)368-2380, Fax : (031)368-6095

* 현대자동차

** 정회원, 현대자동차

이 논문은 2007 추계학술대회에서 우수논문으로 추천되었음.

조건으로 생산하여 동일한 수준의 품질을 유지하지만, 특정한 유성기어세트만이 차량에서 소음 문제를 유발시킨다.

이에 이 연구에서는 (1) 소음 발생 측면에서의 일반 외접기어와 유성기어 세트의 기본적인 특성을 살펴 보고, (2) 차량상태에서 문제가 되었던 유성기어 세트의 개선 사례를 간단히 고찰해서 어느 아이템들이 영향성이 있는지 살펴보고자 한다. (3) 그리고, 개선된 사례를 포함하여 다양한 유성기어 시스템의 진동 수준 데이터를 근거로 어느 정도 수준의 진동이 차량 상태에서 이상이 없는지를 정리하여 유성기어 발생 주파수별 진동레벨 맵을 제시하고자 한다. (4) 뿐만 아니라, 각기 상이한 차량과 상이한 변속기에서 문제가 되었던 유성기어 세트들의 시스템 분석을 통하여 소음 문제가 발생하는 공통점을 찾고, 차량 주행 시 소음 문제가 발생할 가능성이 있는 유성기어세트를 예측하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 유성기어의 특성과 소음 개선사례

2.1 유성기어와 일반 외접기어 소음

일반적으로 유성기어는 물림률이 외접기어의 약 3~4배 정도이고, 하중에 의한 처짐이 없고, 접선속도가 작기 때문에 소음과 진동이 작은 특징을 가지고 있다. Table 1은 외접기어와 유성기어의 특징적인 차이를 표기한 것이다.

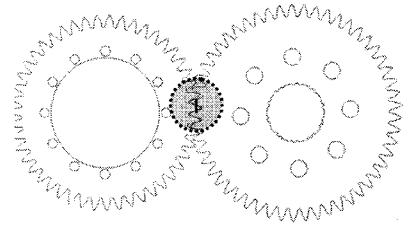
Fig. 1은 일반 외접 기어와 더블피니언 유성기어가 작동될 때, 치 접촉(tooth contact)에 대한 특징적 차이를 나타낸 것이다. Fig. 1(a)의 일반 외접기어는 구동기어와 피동기어 한 쌍의 접촉에 의해서만 기어소음이 발생하고, (b)의 더블피니언 유성기어 세트의 경우에는 링(ring) 기어와 아우터(outer) 피니언 기어, 아우터 피니언 기어와 이너(inner) 피니언 기어, 그리고 이너 피니언 기어와 썬(sun) 기어 등 여러 쌍의 기어가 동시에 맞물리면서 치접촉이 발생한다. 유성기어세트의 소음 발생에 대한 분석이 상대적으로 불리한 것이 여기에 있다.

2.2 유성기어 시스템 분석

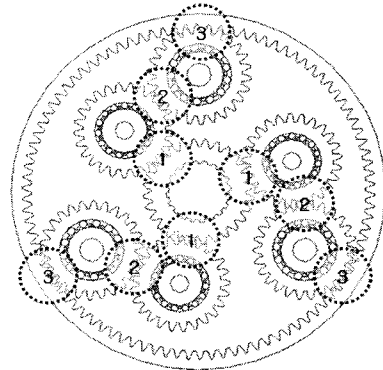
일반적으로 자동변속기의 유성기어는 단순과 복합 유성기어의 조합 등으로 구성되어 있고, 각각의 구속조건에 의해 단이 구분된다.

Table 1 Comparison between the external gear and planetary gear

Item	External gear	Planetary gear
Power in-out	Parallel or rectangular	Circular
Contact ratio	3 ~ 4	9 ~ 12
Shaft support	Rectangular	Axial
Tangential speed	Large	Small
NVH	Large	Small



(a) External gear



(b) Double pinion planetary gear

Fig. 1 Tooth contact of the planetary gear and external gear

특히 기어 소음이 각 기어의 회전, 적용 부하 등과 관련되어 있으므로, 유성기어 시스템 분석은 무엇보다 중요하다. 식 (1a)와 식 (1b)는 각각 싱글피니언 유성기어와 더블피니언 유성기어의 각 구성 요소 회전수와 관련된 식으로 모든 유성기어 시스템은 이들의 관계에 의해 표현될 수 있다⁽⁹⁾.

$$\theta_{RING}Z_{RING} + \theta_{SUN}Z_{SUN} = \theta_{CARRIER}(Z_{RING} + Z_{SUN}) \quad (1a)$$

$$\theta_{RING}Z_{RING} - \theta_{SUN}Z_{SUN} = \theta_{CARRIER}(Z_{RING} - Z_{SUN}) \quad (1b)$$

θ : 회전수, Z : 잇수

2.3 유성기어 소음의 개선사례

이 논문에서는 유성기어 소음의 개선사례를 크게 차량 전달계를 통한 개선 사례와 변속기 단품의 개선사례로 분류하여 간단히 살펴보고자 한다.

(1) 마운팅을 통한 개선

Fig. 2는 'A'와 'D' 변속기가 장착된 각기 다른 차종의 유성 기어 소음 개선 사례를 보인 것이다. 문제 발생 차량의 진동 전달 특성이 조사하였고, 변속기와 차체로 연결된 마운트가 상대적으로 취약하다는 것을 확인하였다. 변속기 마운트의 리브 보강을 통하여 차량 실내 소음을 각각 10 dBA 개선하였다.

(2) 쉬프트케이블(shift cable)을 통한 개선

Fig. 3은 'B'변속기와 'C'변속기가 장착된 다른 차종의 개선사례이다. 'B'변속기가 장착된 차종은 주행 시, 전 구간에서 'C'변속기가 장착된 차량의 경우는 차량이 움직이기 시작하는 초기 주행 시 발생되었다.

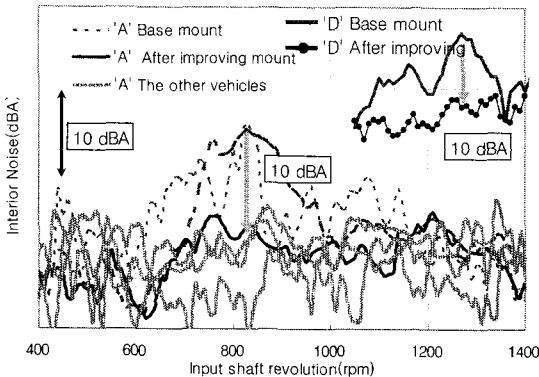


Fig. 2 Noise reduction of the transmission 'A' and 'D'

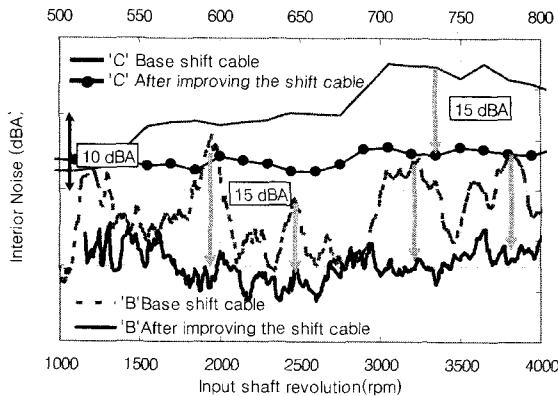


Fig. 3 Noise reduction of the transmission 'B' and 'C'

해당 변속기들은 이미 다른 차종에 적용되어 양산되던 변속기로, 차량을 새로 개발하면서 전달계통이 변경되면서 발생된 현상이었다. 두 차종 모두 쉬프트 케이블에 댐퍼를 삽입하여 변속기로부터 차체로 전달되는 진동을 최소화하여 차량 실내소음을 각각 15 dBA정도 개선하였다.

(3) 기어 제원 변경을 통한 개선

Fig. 4는 'C'변속기의 기어 제원 변경을 통하여 소음을 개선한 사례이다. 썸 기어, 피니언 기어, 링 기어의 잇수를 ±1 전후로 변경하여 양산하기 용이한 제원으로 개발하였다. 변속기 단품 시험 결과, 소음 레벨이 15 dBA 정도 차이를 보였다.

(4) 기어 치형 변경을 통한 개선

2.1절에 언급된 것과 같이 유성기어는 동시에 여러 기어가 접촉되므로 모든 기어의 품질 확보가 중요하다. 특히 구성요소 중 내접기어인 링기어의 치형품질 확보가 가장 중요하다.

외접기어는 호빙 → 웨이빙 → 열처리 → 호닝 혹은 그라인딩이라는 과정을 통하여 치형을 교정한다. 그러나 링기어와 같은 내접기어의 경우에는 브로칭 → 열처리로 제작 공정을 마친다. 이 경우, 링기어의 몸체가 얇아서 열처리 후에 전체적으로 비틀어지고 치가 안쪽으로 들어가는 현상이 발생한다. 현실적으로 열처리 후 가공 공정이 없기 때문에 이러한 현상은 개선하기 어렵다. 따라서 상대 물림 기어인 피니언 기어의 크라운을 부가하여 불록하게 만들어서 치 접촉을 좋게 유도하는 방법을 사용한다. Fig. 5에서 'A' 변속기의 피니언 기어의 리드 크라운(lead crown)을 기존의 2배 정도 증대시켜 10 dBA 개선한 것이고 'G' 변속기의 링 기어 치형에 맞추어

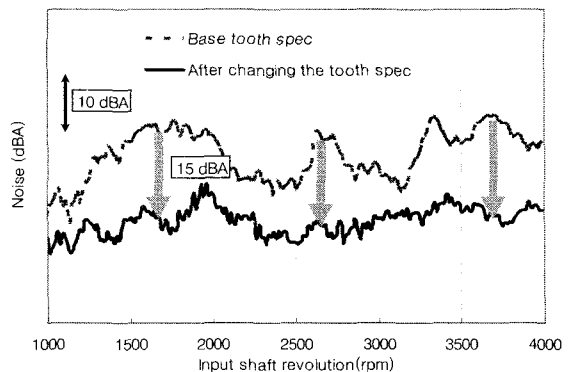


Fig. 4 Noise reduction of the transmission 'C'

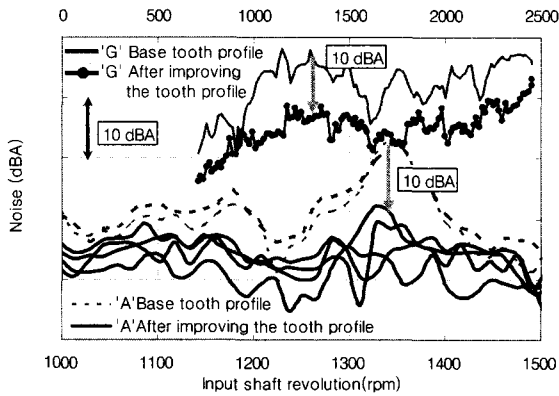


Fig. 5 Noise reduction of the transmission 'A' and 'G'

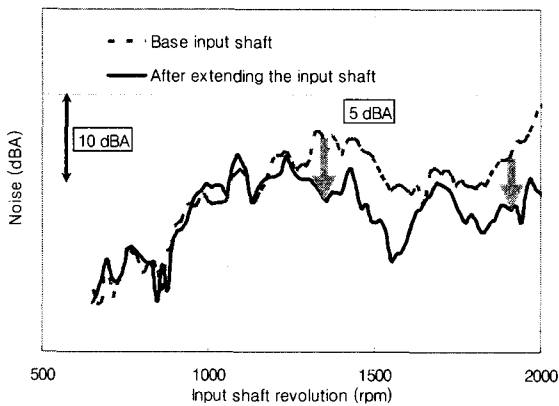


Fig. 6 Noise reduction of the transmission 'G'

피니언 기어와 쉐어 기어의 치형을 모두 변경하여 10 dBA 개선한 사례를 보인 것이다.

(5) 유성기어 지지구조 변경을 통한 개선

유성기어 시스템에서는 구성하는 각 기어의 중심도 유지가 무엇보다 중요하다. Fig. 6은 'G' 변속기의 쉐어 기어와 이를 지지하는 축과의 결합길이를 기존 대비 30% 이상 증대하여 쉐어 기어가 축에서부터 흔들리는 것을 최소화 하였다. 이를 통하여 대상 소음을 약 5 dBA 개선하였다.

3. 주파수 별 유성기어 진동 레벨 맵

차량 개발 시 유성기어 소음이 발생하면 어떠한 방법을 통하여 개선하는 것이 가장 효율적이고, 효과적인지 신속한 판단이 필요하다. 따라서 이러한 판단을 문제 발생 초기에 할 수 있는 객관적인 기준

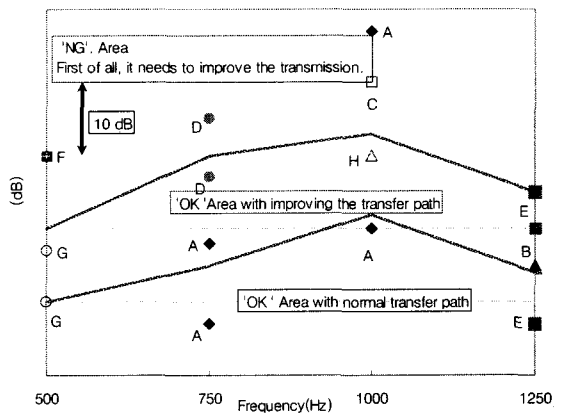


Fig. 7 Frequency versus vibration level map

이 필요하다.

Fig. 7은 유성기어 소음이 발생한 다양한 변속기가 장착된 다양한 차종의 데이터를 토대로 작성한 것으로, 변속기 케이스에서 계측된 유성기어 진동 성분을 발생 주파수별로 작성한 것이다.

Fig. 7에 보여진 것과 같이, 1000 Hz 영역을 살펴 보면 'A', 'C' 변속기의 경우 일정 레벨 이상의 진동을 가지고 있다. 이것은 차량 전달계 개선을 통해서 개선이 안되기 때문에 변속기 단품의 품질 개선이 선행되어야 한다. 뿐만 아니라, 약 1250 Hz에 있는 'E' 변속기의 경우에는 변속기 단품의 품질 산포가 약 20 dB이다. 이 정도의 산포에서도 차량의 전달계가 강건하면 전혀 문제가 되지 않는다는 것을 보여준다.

따라서 이 논문에서 제시된 맵을 통하여 유성기어 소음이 발생하였을 때, 우선적으로 변속기 진동 수준을 파악하고 차량의 전달계 개선을 통한 개발을 진행할 것인지, 변속기 단품의 품질을 향상시킬 것인지를 개발 비용과 시간을 고려하여 판단할 수 있을 것이다.

4. 청감특성과 유성기어 소음 발생예측

4.1 청감특성과 유성기어 소음 발생 주파수

인간의 귀는 특정소리가 발생하더라도 주변 소리가 크면 감지하지 못하는 마스킹이라는 청감 특성을 가지고 있다.

일반적으로 자동변속기가 장착된 차량이 주행하는 동안 엔진 작동음과 풍절음, 타이어음 등 차량 소음으로 느끼는 실내 소음의 분포를 살펴보면, 차속이

낮은 1단과 후진 단의 경우 250 Hz 미만, 2단의 경우 500 Hz 미만, 3단의 경우 1000 Hz 미만, 그리고 4단 이상의 경우에는 2000 Hz 미만 등에서 분포한다. 이러한 주행 소음 분포를 배경소음으로 하고 유성기어 소음 발생 주파수가 각각의 단에서 제시된 배경 소음 주파수보다 높으면 운전자가 감지하고 불만을 제기할 가능성이 높다.

4.2 유성기어 소음 발생 이력 분석

한 기종의 변속기에는 대략 2~4종의 유성기어 세트가 존재한다. 동일한 조건으로 설계를 했어도 소음 문제가 되는 유성기어 세트가 있고 문제가 되지 않는 유성기어 세트가 있다. Table 2는 차량을 개발 하면서 유성기어 소음이 발생하였던 변속기와 소음이

발생하는 단, 그리고 유성기어 세트를 정리한 것이다. 특히 문제가 발생된 모든 변속기들의 유성기어 세트는 내구문제에 의한 소음 발생을 제외하고는 변속기 종류와는 상관없이 문제 발생 시 터빈으로부터 바로 동력이 전달되는 유성기어 세트라는 공통점이 있다.

4.3 유성기어 소음 발생 예측과 강건설계

Table 3은 'G' 변속기에 대하여 유성기어 소음 발생 여부에 대한 것을 분석한 것이다. 식 (1)을 이용하여 'G' 변속기의 유성기어 시스템을 분석하여 유성기어 회전 주파수를 분석한 것이다. 4.1절에서 언급된 것과 같이 1단과 R단에서는 250 Hz 이상, 2단은 500 Hz 이상, 3단은 1000 Hz 이상, 4단 이상은 2000 Hz 이상의 유성기어 성분 주파수 분포와 4.2절에서 언급한 터빈 동력이 초기 입력으로 작용하는 유성기어 세트 성분의 분포를 동시에 표기한 것이다. 특히 표에서 굵은 라인 안에 표기한 곳은 언급된 조건의 공통점이 있는 것으로, 1단과 2단에서 리어(rear) 유성기어 소음이 그리고 R단에서 미들(middle) 유성기어 소음이 발생할 가능성이 있다는 것을 보여준다. 초기 개발 차량이 제작되고 변속기가 장착되었을 때, 예측된 유성기어 소음 문제가 발생하였다.

이 연구에서 제시된 분석을 통하여 초기 개념 설

Table 2 Transmissions and stages generating the planetary gear noise

Transmission	Stage	Front	Middle	Rear
A	1st	○		
B	1st		○	
C	1st, 2nd, 3rd	○		
D	1st, 6th			○
E	3rd	○		
F, G	1st, 6th			○
	Rev		○	

Table 3 Table for predicting the planetary gear noise of the 'G' transmission

Stage	Revolution Planetary gear set	600	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	Note
		1st	69	115	172	229	287	344	401	
	Rear	280	467	700	933	1167	1400	1633	1867	Input
2nd	Front			250	333	417	500	583	667	
	Middle			225	300	375	450	525	600	
	Rear			509	679	848	1018	1188	1357	Input
3rd	Front			435	580	724	869			
	Middle			247	330	412	495			Input
	Rear			247	329	412	494			
4th	Front			577	770	962	1155			Input
	Middle			661	881	1102				
6th	Front			612	815	1019				
	Middle			700	933	1167	1400	1633	1866	Input
R	Front	492	820	1229	1639	2049	2459	2869	3279	
	Middle	280	467	700	933	1167	1400	1633	1867	Input
	Rear	280	467	700	933	1167	1400	1633	1867	

계 시, 문제가 발생될 것으로 예측되는 유성기어 세트에 대해서 다른 유성기어세트보다 다음과 같은 신중한 설계가 필요하다.

(1) 링 기어의 림(rim) 두께를 보강, 열 변형에 둔감하도록 하고, 진공침탄이나 고주파 열처리 등에서 열처리 변형이 최소화되는 열처리 방법을 적용한다.

(2) 기어의 잇수를 최소화하거나 최적화하여 유성기어 성분 발생 주파수를 최소화 한다.

(3) 동력이 전달되는 축의 변형을 최소화 한다.

(4) 일방향 클러치 등 변속기 내부의 진동 전달 요소의 위치, 형상 등을 최적화하며, 차량의 전달계와 연결되는 부분을 보강한다.

5. 결 론

이 연구를 통하여 다양한 유성기어 소음의 개선사례 데이터베이스와 유성기어 시스템 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 차량에서의 유성기어 소음 개선사례를 정리하였으며, 데이터베이스를 토대로 유성기어 성분의 주파수별 진동레벨 맵을 제시하였다.

(2) 특히 유성기어 시스템의 분석과 발생조건 분석으로 각각의 단에서 초기 터빈 동력이 들어오는 유성기어 세트가 문제가 된다는 공통점을 찾았고, 차량의 청감 특성을 고려하여 유성기어 소음이 발생할 수 있는 유성기어 세트를 미리 예측하는 방법을 제시하였다.

(3) 이를 통하여, 변속기 초기 개념 설계 단계에서 특정 유성기어 세트와 구성요소에 대한 강건설계를 하여 소음을 미연에 방지할 수 있는 안을 제시하였다.

후 기

이 논문은 약 6년간, 개발된 차량들에서 문제시되었던 것을 개선한 실험 데이터를 정리하여 연구한 것입니다. 특히 현대자동차에 개설된 특별 프로그램을

통하여 (美) Ohio State University, Prof. Kahraman의 6개월 동안의 연구 지도는 이 연구결과를 얻는데 중요한 시발점이 되었습니다. 회사 관계자와 Prof. Kahraman께 감사의 말씀을 드립니다.

참 고 문 헌

(1) Botman, M., 1976, "Epicyclic Gear Vibrations", ASME Journal of Engineering for Industry, pp. 811~815.

(2) Antony, G., 1984, "Untersuchung des Dynamisches Verhaltens von Planetengetrieben", Ph. D. Dissertation, RWTH, Aachen, Germany.

(3) Seager, D. L., 1970, "Load Sharing Among Planet Gears", SAE700178.

(4) Palmer, W. E., Fuehrer, R. R., 1977, "Noise Control in Planetary Transmission", SAE770561.

(5) Toda, A. and Botman, M., 1979, "Planetary Indexing in Planetary gears for Minimum Vibration", ASME 79-DET-73.

(6) Kahraman, A., 1994, "Load Sharing Characteristics of Planetary Transmission", Mechanisms and Machine Theory, 29, pp. 1151~1165.

(7) Kahraman, A., 1994, "Planetary Gear Train Dynamics", Journal of Mechanical Design, Vol. 116, pp. 713~720.

(8) Kahraman, A., 2001, "Effect of Internal Gear Flexibility on the Quasi-static Behavior of a Planetary Gear", ASME, Vol. 123, pp. 408~415.

(9) Kahraman, A., Kienzle, K. and Zini, D. M., 2003, "A Generalized and Power Flow Analysis Methodology for Automatic Transmission Gear Trains", ASME/AGMA 2003 International Power Transmission and Gearing Conference, DETC2003-48079.