

차량에서 유성기어 소음 발생 예측에 대한 실험적 연구

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

이현구† · 강석찬*, · 배덕한*, · 강구태*

Lee, Hyun Ku†, Kang, Seock Chan*, Bae, Douck Han*, Kang, Koo Tae*

Key Words: Planetary gear system(유성기어시스템), Masking Effect (마스킹 효과)

ABSTRACT

Various methods to improve the planetary gear noise in the vehicle were introduced. And planetary gear systems were analyzed. Therefore a common thing among the different planetary gear systems which generate the gear noise in the vehicle was founded. Most importantly, a frequency versus vibration level map was introduced and a predictive method, which is considering the masking effect, to design the planetary gear sets in the concept design stage was described.

기호설명

θ : 회전 수
 z : 잇수

1. 서론

소비자의 자동차 품질에 대한 욕구는 이동의 편리함만을 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 고 용량의 토크를 전달할 수 있고 반경방향 베어링의 부하를 줄일 수 있을 뿐 아니라, 소음도 적은 장점을 가지고 있다. [1]

이러한 유성기어의 소음진동에 대한 연구는 크게 세 부분으로 나누어지는데, 시스템의 공진주파수를 예측하는 연구(Botman 1976, Antony 1984)와 플레너터리(Planetary)에 의한 위상차(Phase difference)에 의해 발생하는 소음과 진동 메커니즘을 연구하는 부분(Seager 1970, Fuehler 1977, Toda and Botman 1979), 그리고 플레너터리 기어 트레인의 기어 메쉬(Gear Mesh)에 부가되는 다이내믹 로드와(Dynamic loads) 강제 진동 응답(forced vibration

response)을 연구하는 연구자들(Seager 1970, Kahraman 1993)로 분류할 수 있다. 이러한 연구자들의 궁극적인 목적은 헬리컬 기어를 가진 플레너터리 기어세트의 다이내믹 모델링(Dynamic Modeling)과 이러한 모델링에 의한 플레너터리 기어의 치합에 영향을 주는 파라미터 연구에 있다고 할 수 있다. [2]

현재 상용화 되어있는 자동변속기는 2 ~ 4 개 정도의 유성기어세트의 조합으로 구성되어 있다. 설계자는 동일한 조건으로 설계를 하고 공장에서 동일한 조건으로 생산하여 동일한 수준의 품질을 유지하지만, 특정한 유성기어세트만이 차량에서 소음 문제를 유발시킨다.

이에 본 연구에서는

- (1) 일반 외접기어와 유성기어 세트의 기본적인 특성을 살펴 보고,
- (2) 차량상태에서 문제가 되었던 유성기어세트의 개선 사례를 고찰해보고자 한다.
- (3) 그리고, 상기 개선된 사례와 다양한 유성기어 시스템의 진동 레벨 데이터를 토대로 발생 주파수 별 유성기어 진동레벨 맵을 제시하고자 한다.
- (4) 뿐만 아니라, 각기 다른 차량과 변속기에서 문제가 되었던 유성기어 시스템의 분석을 통하여 공통점을 찾고, 청감 특성을 고려하여, 문제 발생 가능성이 있는 유성기어세트를 예측하고자 한다.
- (5) 여러가지 강건설계안을 제시하고, 제시된 설계안이 설계 초기시 소음 발생이 예측된 유성기어세트에 반영토록 하여, 소음발생을 최소화할 수 있다.

† 교신저자 ; 현대자동차

E-mail : hk-lee@hyundai-motor.com

Tel : (031) 368-2380, Fax : (031) 368-6095

* 현대자동차

2. 유성기어의 특성과 소음 개선사례

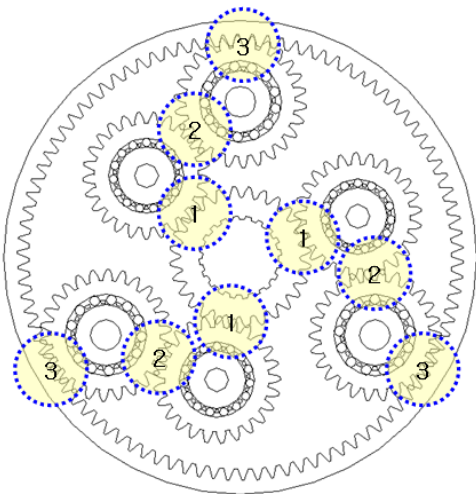
2.1 유성기어와 일반 외접기어 소음

일반적으로 유성기어는 물림율이 외접기어의 약 2 ~ 3 배 정도이고, 하중에 의한 처짐이 없고, 접선속도가 작기 때문에 소음과 진동이 작은 특징을 가지고 있다. 표 1. 은 외접기어와 유성기어의 특징적인 차이를 표기한 것이다.

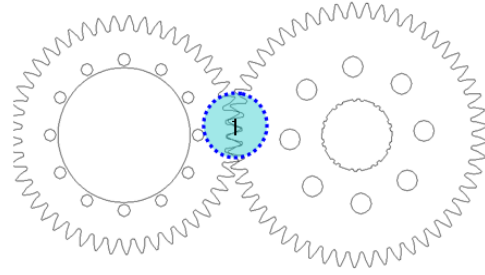
표 1. 외접기어와 유성기어

항목	외접기어	유성기어
입출력	평형 및 직각	동심원
물림율	약 3 ~ 4	약 8 ~ 9
지지구조	축과 직각	축 방향
접선속도	큼	작음
소음진동	큼	작음

Fig. 1 은 더블 피니언 유성기어와 일반 외접기어가 작동될 때, 치 접촉(Tooth Contact)에 대한 특징적 차이를 나타낸 것이다. Fig. 1 (a)의 더블 피니언 유성기어세트의 경우에는 링 기어와 외접 피니언 기어, 외접 피니언 기어와 내접 피니언 기어, 그리고 내접 피니언 기어와 썸 기어 등 여러 쌍의 기어가 동시에 맞물리면서 치접촉이 발생하고, (b)의 일반 외접기어는 구동기어와 피동기어 한 쌍의 접촉에 의해서만 기어소음이 발생한다. 유성기어세트의 소음 발생에 대한 분석이 상대적으로 불리한 것이 여기에 있다.



(a) 더블 피니언 유성기어



(b) 외접기어

Fig. 1 유성기어와 외접기어의 치접촉

2.2 유성기어 시스템 분석

일반적으로 자동변속기의 유성기어는 단순과 복합 유성기어의 조합으로 구성되고, 각각의 구속 조건에 의해 단이 구분된다. 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. [3]

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

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

2.3 유성기어소음의 개선사례

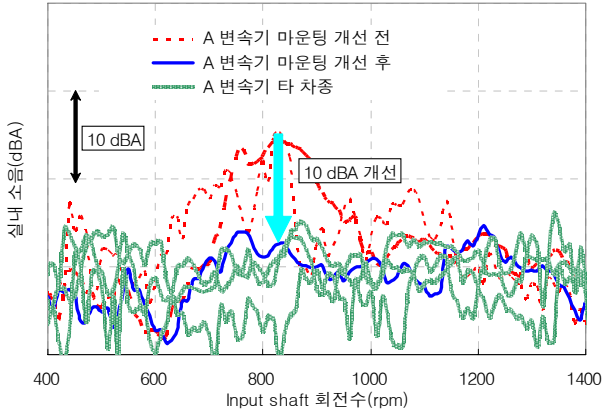
유성기어소음의 개선사례는 크게 차량 전달계를 통한 개선 사례와 변속기 단품의 개선사례로 분류할 수 있다. 본 사례들을 통하여, 각각의 구성요소가 미치는 영향에 대해 살펴보고자 한다.

(1) 마운팅을 통한 개선

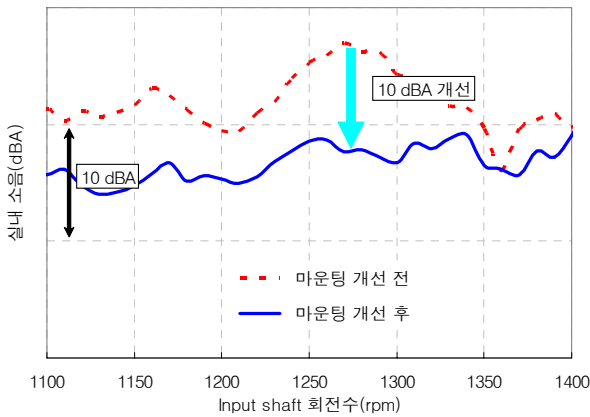
Fig. 2 의 (a)와 (b) 는 각각 'A', 와 'D' 변속기가 장착된 각기 다른 차종의 유성기어 소음 개선 사례이다. 'A' 변속기는 동일 변속기가 동급의 다른 차종에 탑재되어 양산이 되는 것으로, 문제가 없었던 것이다. 이에 문제 발생 차량의 마운팅 진동 전달 특성을 조사하였고, 변속기 상부 마운트가 상대적으로 취약하다는 것을 확인하였다. 변속기 상부 마운트의 보강을 통하여 차량 실내 소음을 10dBA 개선하였다.

Fig. 2 의 (b) 의 'D' 변속기는 일반 주행 중

6 속에서 문제 시 되었던 것으로 역시 변속기 상부 마운트를 보강하여 차량 실내 소음을 10 dBA 개선하였다.



(a) 'A' 변속기 유성기어소음 개선



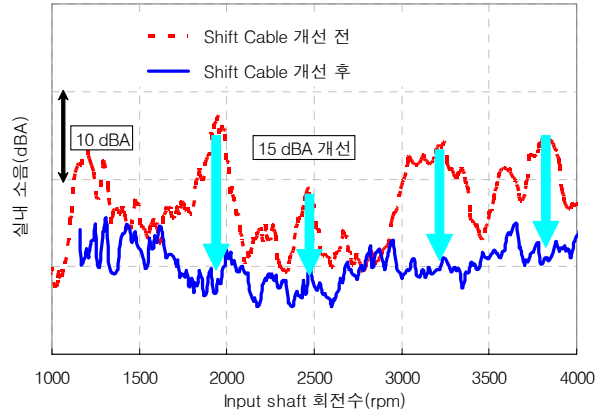
(b) 'D' 변속기 유성기어소음 개선

Fig. 2 'A' 와 'D' 변속기 유성기어소음 개선

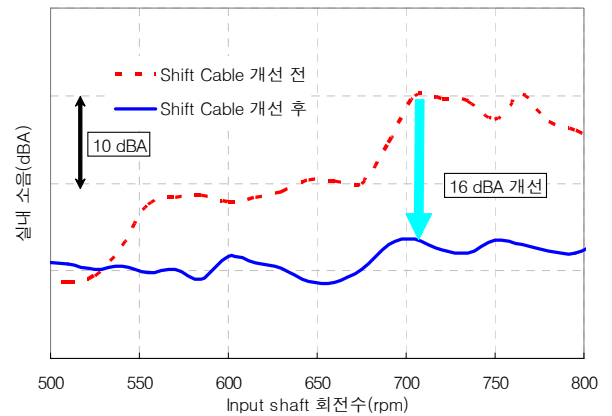
(2) Shift Cable 을 통한 개선

Fig. 3 의 (a) 와 (b) 는 각각 'B' 변속기와 'C' 변속기의 각기 다른 차종의 개선사례이다. 'B' 변속기가 장착된 차종은 주행 시 전구간에서 발생되었던 것이고, 'C' 변속기가 장착된 차량의 경우는 정지 후 초기 크립 주행 시 발생되었다. 해당 변속기들은 이미 다른 차종에 적용되어 양산되었던 변속기이다. 차량을 새로 개발하면서 전달계통이 변경되면서 발생한 현상이었다. 두 차종 모두 진동전달 특성 분석을 통하여 Shift Cable 의 진동 특성이 악화되어 발생된 것을 확인하였고, Shift Cable 의 진동

특성 개선으로 유성기어 소음을 각각 15 dBA 정도 개선한 사례이다.



(a) 'B' 변속기 유성기어소음 개선



(b) 'C' 변속기 유성기어소음 개선

Fig. 3 'B' 와 'C' 변속기 유성기어소음 개선

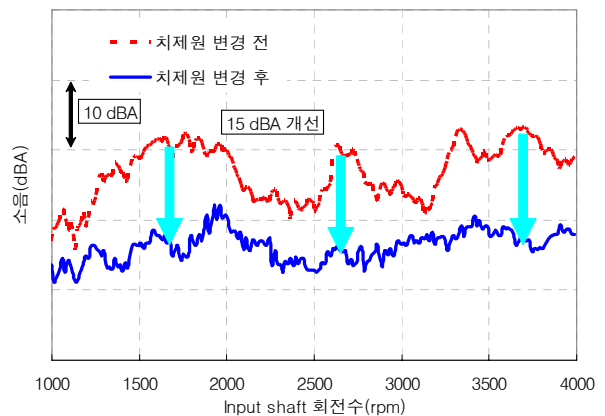


Fig. 4 'C' 변속기 유성기어소음 개선

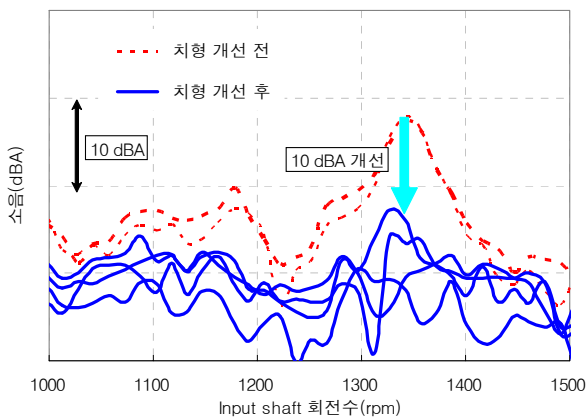
(3) 기어 제원 변경을 통한 개선

Fig. 4 는 ‘C’ 변속기의 개발 당시에는 문제가 없었으나, 양산라인의 생산 품질문제에 기인한 소음이다. 변속기 단품 시험 결과 기존 제원과 소음 레벨이 15dBA 정도 차이를 보였다. 양산 라인의 안정화를 추구하다가 개선이 안되어 기어 제원을 변경하여 양산 개발하였다.

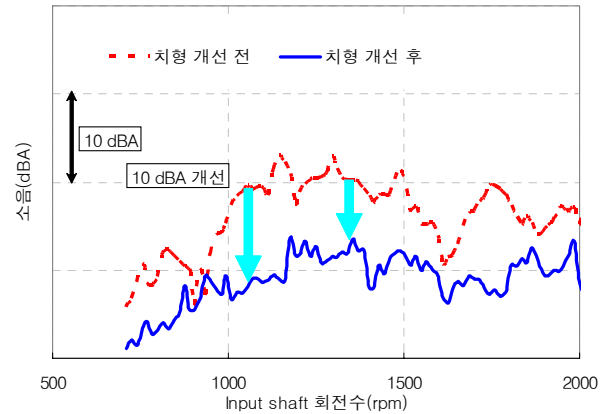
(4) 기어 치형 변경을 통한 개선

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

외접기어는 호빙 → 셰이빙 → 열처리 → 호닝 혹은 그라인딩이라는 일련의 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 ANTI-CROWN 현상이 발생 한다. 현실적으로 열처리 후 공정이 없기 때문에 이러한 현상은 개선하기 어렵다. 따라서 상대 물림 기어인 피니언 기어의 크라운을 부가하여 불록하게 만들어서 치 접촉을 좋게 유도하는 방법을 사용한다. Fig. 5 의 (a) 는 ‘A’ 변속기의 피니언 기어의 LEAD CROWN 을 기존의 3 ~ 6 um 인 것을 7 ~ 10 um 로 증대시켜 대상에서 10dBA 개선한 것이고 Fig. 5 의 (b)는 ‘G’ 변속기의 링 기어와 피니언 기어 그리고 썸 기어의 치형을 개선하여 10dBA 개선한 사례를 보인 것이다



(a) ‘A’ 변속기 유성기어소음 개선



(b) ‘G’ 변속기 유성기어소음 개선

Fig. 5 ‘A’ 와 ‘G’ 변속기 유성기어소음 개선

(5) 유성기어 지지구조 변경을 통한 개선

유성기어 시스템에서는 시스템을 구성하는 각 기어의 중심도 유지가 무엇보다 중요하다. Fig. 6 은 ‘G’ 변속기의 썸 기어와 축의 결합길이를 증대하여 썸 기어가 축에서부터 흔들리는 것을 최소화하였다. 이를 통해 대상에서 약 5dBA 개선한 사례를 보인 것이다.

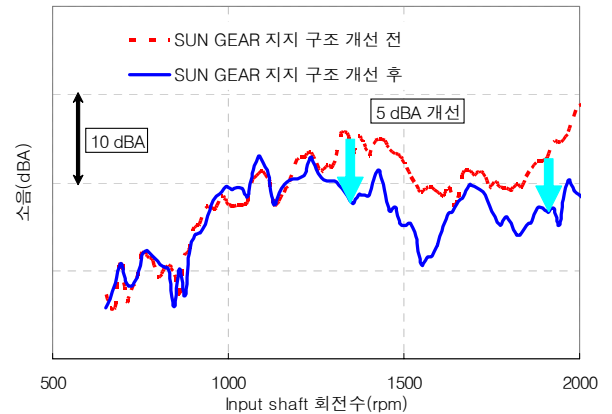


Fig. 6 ‘G’ 변속기 유성기어소음 개선

3. 주파수 별 유성기어 진동 레벨 맵

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

Fig. 7 은 주파수별 유성기어 진동 레벨맵을 표기한 것이다. 이것은 유성기어 소음이 발생한 다양한 변속기가 장착된 다양한 차종의 개선사례 데이터를 정리한 것이다.

Fig. 7 에 보여진 것과 같이, 특정한 주파수에서 어느 레벨 이상의 진동을 가진 변속기의 유성기어 소음은 전달계 개선을 통해서 개선이 안되므로, 단품의 품질 개선이 선행되어야 함을 알 수 있다.

제시된 본 맵을 통하여 변속기 양산 산포를 고려하여 차량의 전달계 개선으로 개발 방향을 설정할 것인지, 변속기 단품의 품질 향상을 시킬 것인지는 개발 비용과 시간을 고려하여 판단할 수 있을 것이다.

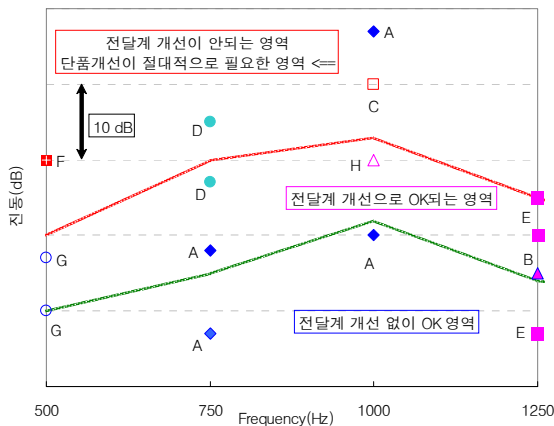


Fig. 7 주파수별 유성기어 진동레벨 맵

4. 청감특성과 유성기어소음 발생예측

4.1 청감특성과 유성기어소음 발생 주파수

인간의 귀는 특정소리가 발생하더라도 주변 소리가 크면 감지하지 못하는 마스킹이라는 특성을 가지고 있다. [4] Fig. 8 은 자동변속기 차량이 주행시 발생하는 실내 소음의 분포를 보인 것이다. 1 단의 경우 250Hz 미만, 2 단의 경우 500Hz 미만, 3 단의 경우 1,000Hz 미만, 그리고 4 단 이상의 경우에는 2,000Hz 미만 등에서 차량주행의 일반적인 소음들이 분포한다. 이러한 주행 소음 분포를 배경소음으로 간주하고 마스킹 효과를 고려한다면, 유성기어 작동 주파수가 각각의 단에서 제시된 배경 소음 주파수 보다 높으면 감지가 될 가능성이 높다.

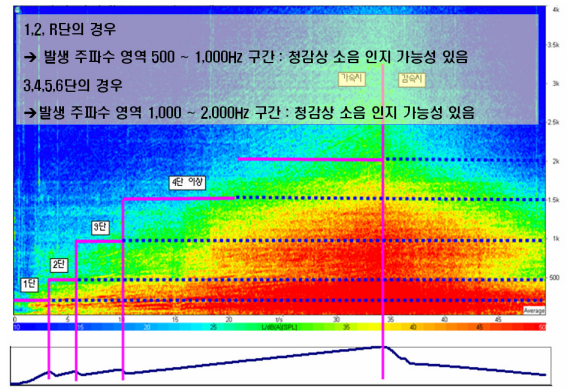


Fig. 8 차량실내 소음 분포

4.2 유성기어소음 발생 이력 분석

한 기종의 변속기에서 동일한 조건으로 설계를 했어도 소음 문제가 되는 유성기어세트가 있고 문제가 되지 않는 유성기어 세트가 있다. 표 2. 는 유성기어소음이 발생한 변속기와 발생 단을 정리한 것이다. 특히 문제가 발생된 모든 변속기들의 유성기어 세트는 내구문제에 의한 소음 발생을 제외하고는 변속기 종류와는 무관하게 문제 발생 단에서 터빈으로부터 바로 동력이 전달되는 유성기어 세트라는 공통점이 있었다.

표 2. 유성기어소음 발생 변속기와 단

변속기	단	Front	Middle	Rear
A	1	○		
B	1		○	
C	1	○		
	2	○		
	3	○		
D	1			○
	6			○
E	3	○		
F / G	1			○
	6			○
	R		○	

4.3 유성기어소음 발생 예측과 강건설계

표 3. 은 'G' 변속기에 대하여 앞 절에서 언급한 주행 소음 분포와 귀의 청감 특성 그리고 터빈 동력이 초기 입력으로 작용하는 유성기어

세트 성분의 분포를 동시에 표기한 것이다. 표에서 노란색으로 표기한 곳은 언급된 조건의 공통점이 있는 것으로, 1 단과 2 단에서 Rear 유성기어 소음이 그리고 R 단에서 Middle 유성기어 소음이 발생할 가능성이 있다는 것을 보여준다. 초기 차량이 제작되고 예측된 문제가 Fig. 9 와 같이 나타났다.

표 3. 유성기어소음 발생 예측표

단	회전수	600	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	비고
1단	Front	89	115	172	229	287	344	401	459	
	Rear	280	467	700	933	1167	1400	1633	1867	Input
2단	Front			250	333	417	500	583	667	
	Middle			225	300	375	450	525	600	
	Rear			509	679	848	1018	1188	1357	Input
3단	Front			435	580	724	869			
	Middle			247	330	412	495			Input
	Rear			247	329	412	494			
4단	Front			577	770	962	1155			
	Middle			861	881	1102				
6단	Front			612	815	1019				
	Middle			700	933	1167	1400	1633	1866	
R단	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	

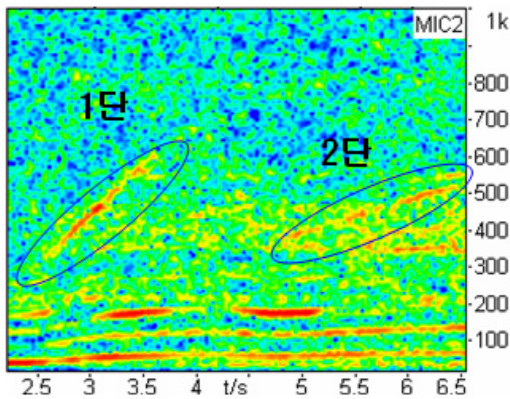


Fig. 9 차량 실내 소음

본 연구에서 제시된 분석을 통하여 초기 컨셉 설계시 문제가 발생할 것으로 예측되는 유성기어 세트가 확인이 되면 다음과 같은 강건설계가 필요하다.

- (1) 링 기어의 림(RIM) 두께를 보강, 열 변형에 둔감하도록 유도한다. 특히 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) 원웨이 클러치 등 변속기 내부의 진동 전달 요소의 위치, 형상 등을 최적화 한다.
- (5) 그 외 차량의 전달계와 연결되는 부분을 보강한다.

5. 결 론

본 연구에 의해 다양한 유성기어 소음의 개선사례와 데이터 베이스 그리고 유성기어 시스템의 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

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

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

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

후 기

본 논문은 약 6 년간, 개발한 여러 차량에서 문제 제시되었던 것을 개선한 실험 데이터를 정리하여 연구한 것입니다. 차량과 변속기 개발에 협조해 주신 여러분께 감사의 말씀 드립니다.

특히 현대자동차에 개설된 특별 프로그램을 통하여 (美) Ohio State University, Prof. Kahraman 의 6 개월 동안의 연구 지도는 본 연구결과를 얻는데 중요한 시발점이 되었습니다. 회사 관계자와 Prof. Kahraman 께 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

- (1) H. W. Muller, 1982, "Epicyclic Drive Trains", Wayne State University Press.
- (2) A. Kahraman, 1994, "Planetary Gear Train Dynamics", Journal of Mechanical Design, Vol. 116, 713-720.
- (3) A. Kahraman, K.Kienzle, D.M.Zini, 2003, " A generalized and Power Flow Analysis Methodlogy for Automatic Transmission Gear Trains", ASME/AGMA 2003 International Power Transmission and Gearing Conference, DETC2003-48079.
- (4) 정성택 외, 1995, 한국소음진동공학회, 소음진동 편람, 22.