

타이어 유니포머티에 기인한 조향휠의 시미현상 연구

Shimmy Phenomena of Steering Wheel Due to the Tire Uniformity

김 종 관*, 송 상 기**, 오 진 우***
(Jong-Kwan Kim*, Sang-Kee Song**, Jin-Woo Oh***)

이 논문은 1996년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

요 약

자동차의 진동은 공기저항력, 엔진가진력, 타이어의 불균형 질량 그리고 타이어 유니포머티에 의한 가진력의 결과이다. 특히 조향계의 세이크와 시미현상은 차체 진동, 타이어 불균형 진동 그리고 타이어 유니포머티와 관련이 깊다. 본 연구에서는 타이어의 불균형 질량과 타이어 유니포머티에 의한 시미현상을 연구하였다.

ABSTRACT

The vehicle vibrations result from the exciting forces which are caused by air resistance, engine firing, tire mass unbalance and tire uniformity. Especially, the shake and shimmy phenomena in the steering system are closely related to the vehicle vibration, the tire unbalance, and the tire uniformity. This study presents the shimmy phenomena due to the tire mass unbalance and the tire uniformity in order to investigate their effects.

I. 서 론

최근의 자동차 산업은 급격한 기술적 발전과 더불어 차량의 고속화 및 경량화추세에 있다. 이에 따라 소비자 뿐만 아니라 국내 메이커에서 생산한 승용차의 외국 수출을 위하여 선결해야 할 여러 문제 중 자동차의 진동·소음문제가 중요한 문제로 대두되고 있다. 특히, 승용차의 조향휠에 나타나는 진동인 시미와 세이크 현상은 운전자의 쾌적한 승차감과 고속 주행시 조정성능을 나쁘게하기 때문에 그 개선책들이 요구되어 왔다. 조향휠의 회전방향의 진동인 시미 현상은 현가계, 조향계, 차체, 엔진과 트랜스미션 그리고 타이어 등과 서로 복잡하게 연결되어 주로 고속에서 나타난다¹⁾.

본 연구에서는 타이어의 유니포머티에 의한 조향휠의 진동을 해석하기 위해 일반 승용차 메이커에서 사용하고 있는 설계 좌표(T.L.H.)를 기준으로 하여 현가계와 조향계의 각 시스템들을 모델링하였으며 엔진과 트랜스미션의 운동, 차체의 동특성 그리고 타이어 불균형 질량과 유니포머티 성분 중 전후방향의 힘 변동(TFV), 좌우방향의

힘 변동(LFV), 상하방향의 힘 변동(RFV) 등이 조향휠의 회전방향 진동인 시미 현상에 어느정도 영향을 미치는지를 알아보고 시미에 미치는 중요 인자들을 밝혔다.

II. 시스템 모델링

자동차 조향휠의 시미현상을 해석하기 위해서는 조향계, 현가계, 차체, 타이어 등을 각각 모델링하여야 하며 특히 타이어의 유니포머티에 의한 힘 변동 값들을 가진력에 포함하여 다음과 같이 모델링하였다²⁾.

첫째, 조향계는 조향휠, 타이어, 칼럼, 링키지, 로어 암과 부쉬들로 이루어졌다. 그들은 각각 질량과 스프링 그리고 감쇠특성을 갖으며 각 조향계의 운동은 19자유도로 모델링하였다. 각 재료의 특성에 따라 감쇠는 구조감쇠, 점성감쇠 그리고 로어 암과 타이로드의 볼 조인트 부위의 건마찰감쇠는 등가점성감쇠로 모델링하였다.

둘째, 차체는 조향휠의 진동과 관련된 차체의 탄성 진동 중 상하 굽힘진동, 비틀림 진동 그리고 좌우 굽힘진동 중 1, 2 차를 고려하여 4자유도로 모델링하였다.

셋째, 조향휠의 진동에 가장 큰 영향을 주는 가진력으로서 타이어의 불균형 질량과 유니포머티 성분이 있으며, 이들을 각각 시스템의 가진력 항으로 고려하여 모델링하였다³⁾. 일반적으로 승용차 제조회사에서는 타이어

*조선대학교 기계공학과 교수
**순천공업전문대학 조교수
***인하대학교 대학원
접수일자: 1996년 9월 10일

의 중량불균형만을, 타이어 제조회사에서는 유니포머티 성분만을 관리하고 있다. 따라서 본 연구는 타이어의 가진력에 의한 조향휠의 진동 연구를 위하여 엔진과 트랜스미션의 6자유도를 포함하여 총 29자유도로 모델링하였다.

III. 타이어의 유니포머티 해석

타이어는 금속제품에 비해 여러 가지 재료의 복합재료로 Fig.1과 같이 만들어져 있으며 부분적인 치수변화와 강성변화, 비대칭성등이 금속제품보다 나쁘다.

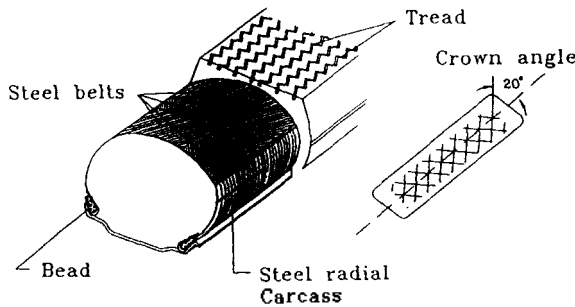


Fig. 1 Structure of Radial Tire

주행시 차량은 노면으로 부터 이상한 힘과 주기적으로 변동하는 반력을 받는다. 타이어가 회전함에 따라 타이어 구조 내의 결합들이 타이어와 노면의 접촉면에서 힘 또는 모멘트 변화와 그 복합된 두 성분의 변화를 발생시키는데 힘 또는 모멘트 변화의 1차 하모닉은 타이어 1회전당 1회씩 반복하고, 2차 하모닉은 타이어 1회전당 2회씩 반복한다. 저속에서 타이어 유니포머티는 타이어 구조를 자극하여 타이어 스피들에 힘과 모멘트를 야기시킨다. 타이어의 속도가 증가함에 따라, 타이어와 노면의 접촉면에서 힘과 모멘트의 변화는 크기가 증가할 것이며 더욱 심하게 타이어를 자극할 것이다.

또한, 타이어의 유니포머티 특성은 중량의 불균일성(mass unbalance), 강성의 불균일성(force variation), 치수(길이)의 불균일성(run-out)등 크게 세가지로 나눌 수가 있으며, 중량의 불균일성은 타이어의 질량분포가 불균일하여 발생하는 것으로 일반적으로 휠밸런스를 통하여 상쇄시킬 수 있다. 그리고 강성의 불균일성으로 인한 힘은 타이어에 일정한 하중을 가하면서 회전을 시켜 힘성분을 구할 수 있는데, 상하방향으로 나타나는 힘의 변화량(RFV: Radial Force Variation), 좌우방향으로 나타나는 힘의 변화량(LFV: Lateral Force Variation), 그리고 전후방향으로 나타나는 힘의 변화량(TFV: Tractive Force Variation) 등 세방향 성분으로 나눌 수 있다⁶⁻¹⁰⁾.

Fig.2에 고속 유니포머티 시험기(HISUM(HOFMANN RGM-LT3): high speed uniformity machine)의 구조와 TFV, RFV, LFV의 관계를 도시하였다.

또한 치수(길이)의 불균일로 인한 힘 성분은 반경방향

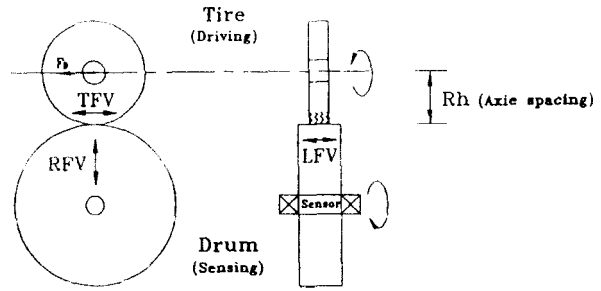


Fig. 2 High Speed Uniformity Machine & Its Force Variations

런아웃(RR: Radial Run-out)과 횡방향 런아웃(LR: Lateral Run-out)으로 나눌 수 있는데, 먼저 반경방향 런아웃은 타이어의 종진동 즉, 반경방향진동으로 타이어의 단면형상의 크기가 부분적으로 다른 경우와 트레이드 부위의 두께가 부분적으로 다를 때 또는 립의 회전중심이 편심되었을 때 일어나며 RFV와 대응특성을 지닌다. 그리고 횡방향 런아웃은 타이어 트레이드 부의 횡방향진동으로 타이어 자체의 횡진동과 립의 횡진동이 그 원인이다.

타이어 유니포머티 실험은 각 타이어별 고속 유니포머티 시험기로 행하였으며 유니포머티로 인한 시미 양상을 해석하기 위해 유니포머티가 좋은 타이어 2본(185/60R 14)과 나쁜 타이어 2본(185/60R 14)에 대해 각각 차체 설계시 하중에 해당하는 하중을 걸고 일정한 공기압(30psi)을 유지시키면서, 300~1300(rpm) 까지를 100(rpm) 간격으로 유니포머티 실험을 행하였다. 유니포머티 실험을 통하여 얻은 각 타이어의 런아웃 데이터는 표 1에 나타내었다. 또한, 각 타이어 1회전당 힘 변동 함수를 구하기 위하여 타이어를 7.5° 간격으로 48점을 얻어 각 타이어별 속도별 힘 변동식을 2차나 3차 함수로 구하였다.

Table 1. Runout data for tire types

Tires		Radial Runout (RR)				Remarks
		RR1	RR2	RR	1.ha RR	
Good uniformity	Left (1) [3469-8(12)]	0.51	0.46	0.485	0.21	Accuracy 0.05 mm (Standard deviation)
	Right (2) [1346-3(13)]	0.52	0.52	0.52	0.21	
Bad uniformity	Left (3) [1346-17(11)]	0.68	0.73	0.705	0.58	
	Right (4) [1346-16(15)]	0.79	0.95	0.87	0.64	

RR1 : left radial runout,
RR : averaging runout,
Tire pressure : 2154 pa,

RR2 : right radial runout
1.ha RR : 1st harmonic radial runout
Tire load(front) : 390 kgf

표 1에서 유니포머티의 좋고 나쁨에 따라 반경방향의

편이웃 값의 차이가 크며 이로 인한 힘 변동에 영향을 준다.

Fig.3에 도시한 각 타이어에 대한 힘 변동은 타이어 1회전당 나타나는 주기함수로 하모닉 성분들의 합으로 나타낼 수 있으며 그러한 힘의 전체 크기(peak-to-peak)와 타이어의 탄성진동 이내의 하모닉 성분들을 유니포머티 수준별, 타이어 종류별 그리고 속도대에 따라 유니포머티 실험을 각각 행하여 구하였다.

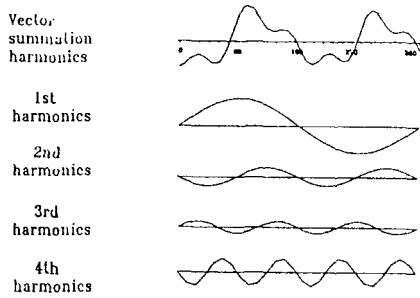


Fig. 3 Force Variations & Its harmonics

승용차가 실제 주행시 타이어의 유니포머티로 인하여 가진되는 힘 변동들을 고려한 시미 해석을 하기 위해서 Fig.4에 유니포머티 성분이 좋은 타이어의 1차 TFV, RFV, LFV를 각각 도시하였고, Fig.5에서는 유니포머티 성분이 나쁜 타이어의 1차 TFV, RFV, LFV를 각각 나타내었다.

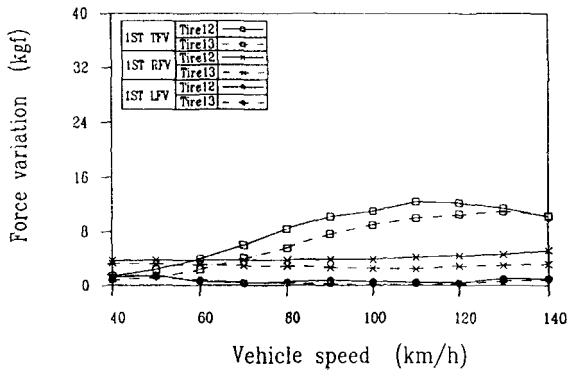


Fig. 4 1st TFV, RFV, LFVs for Good Uniformity

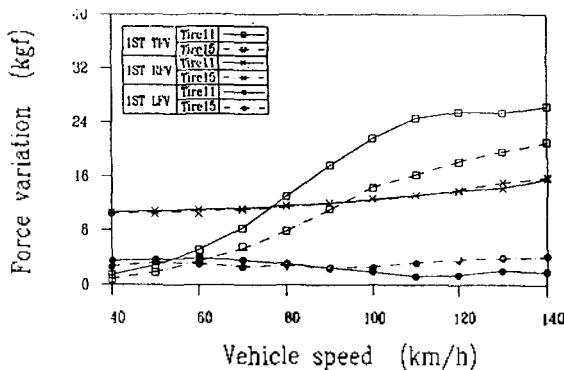


Fig. 5 1st TFV, RFV, LFVs for Bad Uniformity

LFV와 RFV는 Fig.4와 Fig.5에서 알 수 있는 바와 같이 속도의 증가에 따라 그다지 큰 변화가 없지만 TFV는 속도의 제곱에 비례하여 증가함을 알 수 있으며 그러한 경향은 유니포머티 성분이 좋은 타이어보다 나쁜 타이어가 훨씬 뚜렷한 경향을 나타내고 있다. Fig.4와 Fig.5에서 나타난 각 힘 변동들의 일차 하모닉 값을 속도에 대한 함수식으로 만들어 조향계 진동인 시미해석을 위한 수치해석을 수행하였다. 여기에서 각 힘 변동값 중 일차 하모닉에 대한 식만을 고려하였는데 이는 일반적으로 차량의 진동 중 20(Hz) 미만의 낮은 주파수 분체를 해석할 때는 힘 변동 중 일차 하모닉의 값이 중요한 의미를 갖기 때문이다. 또한, RFV와 LFV는 속도에 독립적이기 때문에 2차식으로, TFV는 속도의 의존성이 크기 때문에 3차식으로 가정하였다.

IV. 이론해석과 실험해석과의 비교

실험해석과 비교하기 위한 수치해석은 먼저, 운동방정식을 풀기 위하여 다음과 같은 해밀톤 방정식을 사용하였다.

$$\int_{t_1}^{t_2} (\delta T_{tot} - \delta V_{tot} + \delta W) dt = 0 \tag{1}$$

위의 해밀톤 방정식에 각 시스템의 에너지 식을 대입하여 다음과 같은 타이어의 유니포머티로 인한 행렬식 형태의 운동방정식이 유도되었다^[2].

$$[M] \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \dot{x} \\ x \end{Bmatrix} + [G] \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ x \end{Bmatrix} + [C] \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ x \end{Bmatrix} + [K] \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ x \end{Bmatrix} = \{F\} + \{F_u\} \tag{2}$$

여기서,

[M]: 질량행렬, [G]: 자이로스코픽 행렬, [C]: 감쇠행렬, [K]: 강성행렬, {F}: 가진력 벡터, {F_u}: 유니포머티에 의한 가진력 벡터이다.

승용차가 고속 주행시 조향휠에 나타나는 진동중 시미 현상은 로드 휠의 회전에 의한 가진 주파수가 조향휠의 고유진동수와 일치하기 때문에 발생하는 공진 현상으로서 조향휠의 진동과 관련된 각 시스템들을 모델링하여 시스템 모델에 대한 검증과 그때의 진동모우드를 해석하기 위하여 운동방정식 (2)로 부터 감쇠항과 가진항을 제외하고 다시 쓰면 다음과 같다.

$$[M] \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \dot{x} \\ x \end{Bmatrix} + [G] \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ x \end{Bmatrix} + [K] \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ x \end{Bmatrix} = \{0\} \tag{3}$$

Fig.6에 시미에 해당하는 시스템의 고유진동수와 모우드 형상을 나타냈으며 주행시 실제 조향휠의 공진에 해당하는 고유진동수는 12번째의 17.26(Hz)에 해당함을 알 수 있다.

조향휠에 발생하는 진동 문제는 일반적으로 타이어의 편마모등으로 인한 중량 불균형이 주 원인이지만 타이어

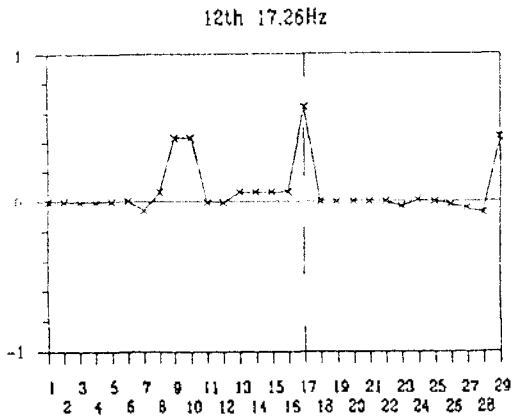


Fig. 6 Fundamental Modes

제조공정상 수공업에 의한 불균일성으로 타이어의 유니포머티 성분이 여러가지 차량의 진동에 크게 기여하고 있다. Fig.7의 시미 실험결과에서도 알 수 있듯이 중량 불균형을 거의 완전하게 한 후 시미 실험을 행하여도 즉 중량 불균형이 3(g) 일때도 시미 응답은 상당히 크게 나타남을 알 수가 있다. 따라서 이와같은 조향휠의 진동 원인에 가장 민감한 타이어의 가진원 중 중량 불균형이 아닌 타이어의 치수변화나 강성 변화등에 따른 유니포머티 성분들이 조향휠의 진동에 중요하게 작용함을 알 수가 있다.

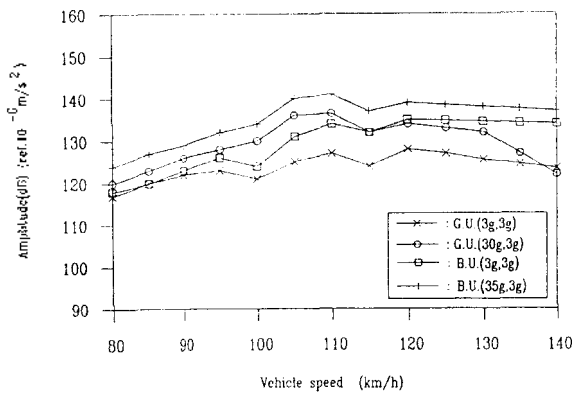


Fig. 7 Experimental Shimmy Response

위와 같이 중량 불균형 만이 아닌 타이어의 유니포머티를 고려한 조향휠의 동적 응답을 고찰하기 위하여 정상상태인 경우 다음과 같이 해를 가정하였다.

$$\{x\} = \{X\} \cdot e^{i\omega t} \quad (4)$$

식 (4)를 식 (2)에 적용하여 정리하면 다음과 같은 형태의 식이 유도된다.

$$-\omega^2 [M] \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{Bmatrix} + i\omega [G] \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{Bmatrix} + i\omega [C] \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{Bmatrix} + [K] \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} = \{F\} + \{F_d\} \quad (5)$$

식 (5)는 비선형 대수 방정식이므로 이를 풀기 위해 IMSL

서브루틴 중 DNEQNF를 사용하여 수치해석을 행하였다^[11].

Fig.8은 시미 현상에 대한 수치해석 결과이다. Fig.7의 실험결과와 Fig.8의 이론해석 결과를 비교하여 보면 시미 현상이 가장 심각한 주행속도의 영역이 비교적 잘 일치하고 있으며, 시미의 분포양상도 유사한 형태로 나타나고 있음을 알 수 있다.

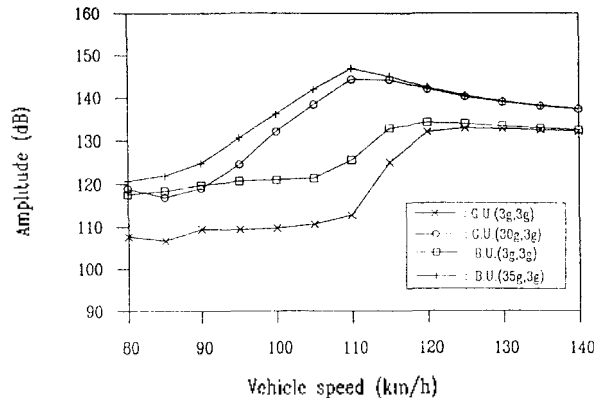


Fig. 8 Numerical Analysis of Shimmy

이론해석과 실험해석 결과를 비교하여 보면 응답이 가장 크게 나타나는 부분은 잘 일치하고 있고 속도 90~100(km/h)에서는 응답의 크기도 순수 시미 수준과 잘 일치하고 있으나 속도가 증가할수록(110 km/h 이상) 실험결과와 이론 결과의 차이가 다소 커지고 있음을 알 수 있다. 이는 실험 타이어가 유니포머티가 좋지않은 타이어이기 때문에 야기된 문제로써 유니포머티가 나쁘면 차량의 진동에 높은 속도에서 특히 많은 진동 문제를 일으키고 있음을 알 수 있다.

조향계 진동에 미치는 타이어 가진력은 타이어 불균형이 맞지 않았을 때는 조향휠의 진동 문제가 심각하지만 질량 불균형이 맞았을 때는 타이어의 가진력은 주로 타이어 유니포머티 성분에 의해 발생된다. 따라서, 타이어 유니포머티 성분(TFV, RFV, LFV)들이 시미현상에 미치는 영향을 알아보기 위해 Fig.9, Fig.10 그리고 Fig.11에 각각 도시하였다.

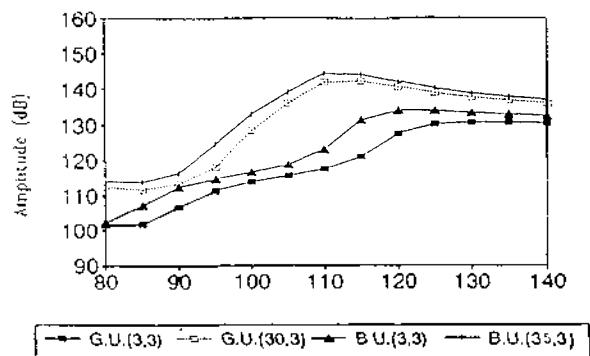


Fig. 9 Shimmy Response for TFV

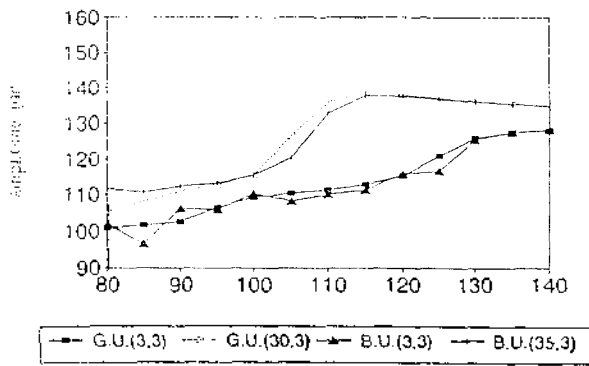


Fig. 10 Shimmy Response for RFV

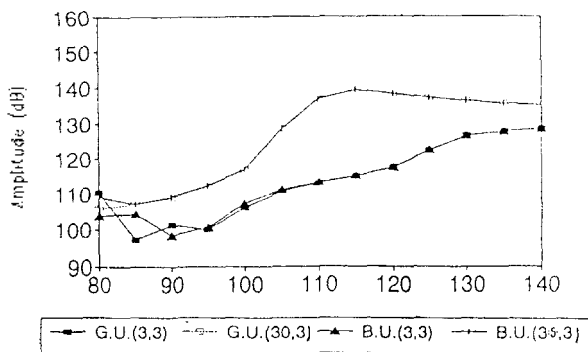


Fig. 11 Shimmy Response for LFV

Fig.10에서 알 수 있는 것과 같이 유니포머티 상태에서 TFV의 영향은 발란스 된 타이어에서의 시미에 미치는 영향이 중량 불균형이 있을때 보다 더 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 또한 TFV에 의한 시미의 영향은 TFV의 값이 속도의 자승에 비례하여 증가하므로 시미가 발생하는 속도대에서는 상당히 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

Fig.11에서는 유니포머티 성분중 RFV만의 영향을 고찰하였다. 그림에서 유니포머티 성분의 고려 여부에 따라 전체적인 응답의 양상에는 큰 변화가 없지만 특정한 속도영역에서는 RFV가 응답의 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 이것은 RFV가 차체나 조향휠의 셰이크에 영향이 크며 조향휠의 시미 현상에는 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

Fig.12에서는 LFV의 영향을 고찰한 것으로서 유니포머티 수준에 따른 변화와 불균형 질량을 부가한 경우의 영향도 큰 변화가 없는 것은 타이어에 작용하는 하중에 비해 LFV의 값이 너무 작기 때문이라고 생각된다.

또한, 각 힘 변동들의 중요도를 알아보기 위하여 각 힘 변동을 각각 증감시켜 얻은 시미 응답은 타이어의 유니포머티 성분중 TFV 증가의 영향이 시미에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 따라서 타이어 유니포머티에 의한 힘 변동이 시미에 미치는 영향은 TFV가 지배적이며 RFV와 LFV은 속도에 독립적이며 시미에는 그다지 큰

영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 시미 현상을 해석하기 위해 연구 대상 차량의 모델링 뿐만아니라 차량진동의 가장 큰 가진원인 타이어의 유니포머티 성분을 고려하여 이론해석과 실험 해석을 비교·검토하여 다음 결과를 얻었다.

- 1)타이어 유니포머티와 불균형 질량이 극히 적은 상태에서 유니포머티 수준별 시미 응답을 구할 수 있었다. 또한 조향계 진동을 해석할 때에는 반드시 질량 불균형뿐만 아니라 타이어 유니포머티 성분도 고려하여야 한다.
- 2)타이어 유니포머티 실험 의해서 힘 변동을 도시하였으며 RFV나 LFV는 속도에 독립적이지만 TFV는 속도의 자승으로 증가함을 알 수 있다.
- 3)타이어 유니포머티에 의한 힘변동들 중에 TFV가 시미 현상에 가장 큰 영향을 주고 있으며 시미현상을 줄이기 위해서는 타이어 유니포머티 중 TFV의 저감에 노력해야 된다.

참 고 문 헌

1. "P/EXCEL Steering Wheel Shimmy 현상 Test(1)", 현대자동차, 승용차시 구동설계부, 1986. 5.
2. 송상기, 승용차 조향계의 shimmy 모델개발과 주요 인자의 영향해석, 인하대학교 박사학위 논문, 1994. 2.
3. Clarence Hofelt, H. D. Tarpinian, C. Z. Draves, "Measuring Tire Uniformity", SAE 650522, pp.1-15
4. Donald L. Nordeen, Richard E. Rasmussen, "Factors Influencing the Measuring of Tire Uniformity", SAE 650734, pp. 71-76.
5. James Hamburg, John Horsch, "Reduction of Tire Nonuniformities by Maching Techniques", SAE 710089, pp. 1-9.
6. W. K. Klamp, J. Meingast, "Higher Orders of Tire Force Variations and Their Significance", SAE 720463, pp. 1-5.
7. J. C. Walker, N. H. Reeves, "Uniformity of Tires at Vehicle Operating Speeds", Tire Science and Technology, 1974, pp. 163-178
8. L. M. Morrish 의 "The Effect of Loaded Radial Run-out on the Roughness and Shake", SAE Paper No. 322 E(1961).
9. 酒井秀男, "Tire 工学(入門から 應用まで)" クラフリ 出版, 1987.
10. Pottinger, M. G., Marshall, K. D., Lasfer, J. M., "A Review of Tire/Pavement Interaction Induced Noise and Vibration", The Tire Pavement Interface, ASTP STP American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1986, pp. 183-287.
11. IMSL math library

▲김 중 권(J. K. Kim) 1947년 1월 30일생
1972년:조선대학교 기계공학과 졸업
1972년~1981년:화천기공 설계개발과장
1983년:조선대학교 대학원 기계공학과 공학석사
1993년:인천대학교 대학원 기계공학과 공학박사
1981년~현재:조선대학교 기계공학과 교수
※주관심분야:공작기계의 설계 및 진동, CAD/CAM

▲송 상 기(S. K. Song)
제 10권 제 5호 참조

▲오 진 우(J. W. Oh) 1965년 1월 20일생
1987년:인하대학교 기계공학과 졸업
1989년:인하대학교 대학원 기계공학과 공학석사
1990년~현재:인하대학교 대학원 기계공학과 박사과정
※주관심분야:동력학, 자동차 진동, 최적설계