

## Tire Fluid-Structure Interaction Noise에 관한 연구 A Study on Tire Fluid-Structure Interaction Noise

김기전\*·배철용·이동하\*\*

Gi-Jeon Kim, Chul-Yong Bae, Dong-Ha Lee

Key Words : Tire, Cavity Resonance, Fluid-Structure Interaction

### ABSTRACT

Recently, the various performances of vehicle are rapidly improved. Therefore tire noise is recognized as important noise source because vehicle noise is considerably reduced. This study is performed for the control of the cavity resonance noise that is structure-borne noise, due to fluid(air)-structure interaction. For this investigation, FRF analysis has been carried out using FEM and we found an important factor affecting cavity resonance. The effect of this factor is confirmed by objective noise test. We confirmed that the result of FRF analysis and objective noise test is that the structure control of tire sidewall can reduce cavity resonance noise due to fluid-structure interaction.

#### 기호설명

$f$  : First natural frequency, Hz

$c$  : Velocity of sound

$L_c$  : Median circumferential length of tire cavity

### 1. 서 론

최근 생활수준의 향상과 더불어 자동차의 성능 역시 급속한 성능향상이 이루어지고 있다. 이에 소비자들의 선호도는 저가격, 고연비에서 안락함과 편의성, 쾌적함을 추구하는 방향으로 바뀌고 있다. 이러한 운전자의 요구에 큰 영향을 미치는 인자로 차량소음이 크게 대두되고 있다. 차량소음은 시내 주행 모드를 모사한 ISO362 시험법에 의하여 규제를 해오고 있다. 이러한 규제로 인하여 차량의 기계적 소음이 많이 개선됨으로써, 타이어 소음은 중요한 소음원으로 남아 있게 되었다.

타이어의 소음은 크게 Structure-borne Noise와 Air-borne Noise로 나눌 수가 있다. Air-borne Noise는 타이어 패턴형상과 air-flow에 기인하여 발생하는 소음으로서, 패턴 형상이 결정되면 쉽게 조절할 수 없는 소음원이다. 이에 반하여 Structure-borne Noise는 노면과 타이어의 상호 가진 및 차량의 진동전달 특성에 기인하여 운전자에게 까지 전달되는 구조진동 소음이다. 이러한 구조진동 소음은 일반적으로 500Hz 미만 대역의

주파수 성분을 갖는 저주파로 운전자에게 들리게 되어, 운전자는 심한 압박감과 불쾌감을 느끼게 되는 소음원으로 간주되고 있다. 특히, Toroid 형상을 갖는 타이어의 특성상, 230Hz 대역의 Cavity Resonance Noise가 발생하게 된다. 이는 타이어의 Structure와 타이어 내부의 Fluid(air)의 상호작용에 기인하여 발생하는 소음으로써, 소음 정도 차에 의하여 운전자에게 심한 불쾌감을 초래할 수도 있다. 따라서 이러한 Cavity Resonance Noise의 발생과 저감을 위하여 많은 연구가 진행 중이다.

R.W.Scavuzzo<sup>(1)</sup>는 타이어 Fluid의 매질을 공기(air)와 헬륨(helium)으로 나누어 주입한 후, Cavity Resonance Frequency가 Shift되는 현상을 실험적으로 입증하고, 타이어 휠의 종류(스틸&알루미늄)에 따라 Wheel Resonance 현상이 저감됨을 입증하였다. J.K. Thompson<sup>(2)</sup>은 Unloaded 상태와 Loaded 상태에서의 Cavity Resonance Frequency를 이론적으로 예측하였다. 특히, Loaded 상태에서 발생 가능한 두 가지 Cavity Resonance Frequency를 이론적으로 예측하고, 이를 실험적으로 입증한 바 있다. R.Gunda<sup>(3)</sup>는 FEA 기법을 적용하여 타이어 구조진동 모드해석과 Cavity 모드해석을 수행한 후, Structural/Acoustic Coupling Matrix를 이용하여 Cavity Resonance를 예측할 수 있는 해석모델 및 해석기법을 제안하였다.

본 연구에서는 타이어 구조에 따른 FEM 해석을 통하여 타이어 요소의 민감도를 해석하였다. 이를 통하여 Fluid-Structure Interaction에 의한 Cavity Resonance Noise의 저감 가능성을 실험을 통하여 확인하였다.

\* 금호타이어 기술연구소 NVH 팀  
E-mail : gjkim@tire.kumho.co.kr  
Tel : (062) 940-2805, Fax : (062) 940-2850

\*\* 금호타이어 기술연구소 NVH 팀

## 2. Tire Cavity Resonance Noise

### 2.1 타이어의 구조

타이어는 하중을 지지하고, 충격을 완화하며, 차량 이송을 가능하게 하는 세 가지 기본기능을 토대로 개발되어진다. 또한 타이어는 다양한 노면을 주행해야 하므로 외부로부터의 충격이나 손상에 충분히 견딜 수 있어야 하며, 정상적인 마모로 인하여 타이어를 교환할 때까지 일정하게 기본기능을 유지해야만 한다. Fig. 1은 타이어 각부의 명칭을 나타내며, 크게 Tread 부, Sidewall 부, Bead 부로 구분되며, 각각의 목적에 따라 최적 설계가 이루어진다.

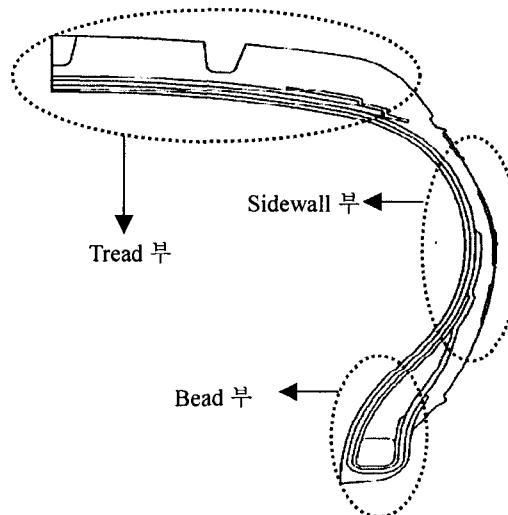


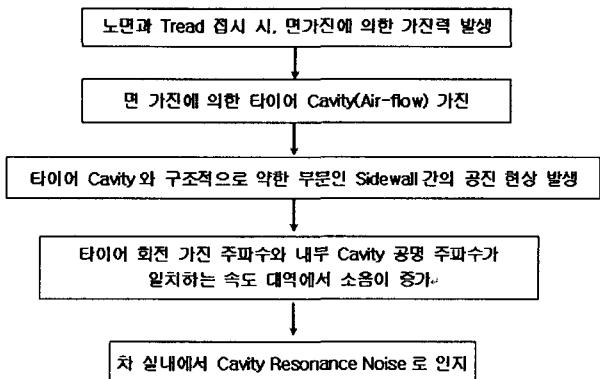
Fig. 1 The Structure of Radial Tire

### 2.2 Tire Cavity Resonance Noise 의 정의

Tire Cavity Resonance Noise는 타이어의 패턴 및 구조에 기인하여 발생하는 가진 주파수와 타이어 내부 Air-flow의 상호작용에 기인하여 발생하는 Pure Tone의 소음을 말한다. 소음의 크기는 타이어 Cavity와 타이어 구조진동간의 Coupling이 일어나는 정도에 의해 좌우되며, 이러한 Coupling은 주로 타이어 강성이 약한 부위에서 주로 발생한다.

## 2.3 Tire Air Cavity Models

### (1) Tire Cavity Resonance Noise 발생 메커니즘



### (2) The Undeflected and Deflected Model

Undeflected 상태의 타이어는 Fig. 2와 같이 가장 단순한 모델링으로 표현 가능하다. 여기서 Cavity Resonance Frequency는 식(1)과 같이 표현되며 실제 시험을 통하여 측정된 값과 일반적으로 1~2%의 오차율을 보인다. 또한 타이어의 원주길이의 변화는 큰 차이를 발생시키지 않으므로, 일반적인 승용차 타이어의 Frequency 범위는 210~250Hz 구간에서 발생하게 된다.

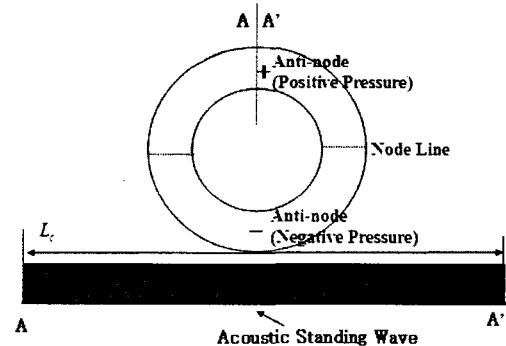
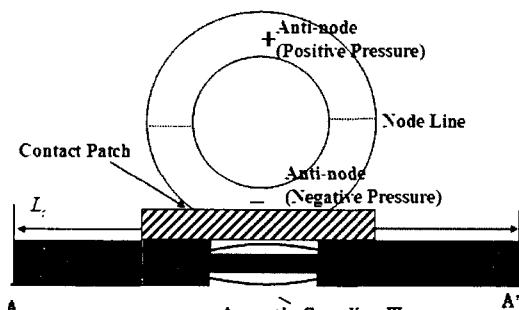


Fig. 2 Schematic of Tire Cavity Resonance

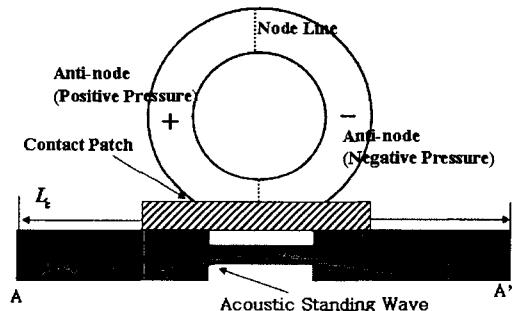
$$f = \frac{c}{L_c} \quad (1)$$

Deflected 상태에서의 타이어는 보다 더 복잡한 양상을 나타낸다. 일반적으로 Deflected 상태의 타이어는 두 개의 Resonance Frequency를 갖게 된다. 이러한 현상은 타이어가 지면과 접지할 때 접지면에서 압력의 변화가 발생하고, 타이어 고유의 기하학적 형태인 환상면(Toroid Shape)의

비틀림이 반복적으로 발생하게 된다. 따라서 Fig. 3 과 같이 Acoustic Standing Wave 가 타이어 내부를 진행할 때 Nodal Line 의 위치가 다르게 발생되고, 이에 따라 Undeflected 상태 타이어에서 발생하는 Cavity Resonance Frequency 를 기준으로 약간 높고, 낮은 두 개의 Resonance Frequency 가 발생하게 된다.



(1) Vertical cavity resonance (high freq.)



(2) Fore/Aft cavity resonance (low freq.)  
Fig. 3 Cavity resonance for deflected tire

### 3. Structure 유한요소 해석

#### 3.1 Tread Compound 에 따른 유한요소 해석

Tread Compound 는 타이어에 있어서 가장 핵심이 되는 설계 요소이다. Compound 의 재질 변화에 따라 타이어의 Friction Noise, Wet Performance, Braking Distance, Handling, Ride Comfort 등 주요한 타이어 성능을 크게 좌우하게 된다. 이에 타이어의 주요한 Structure 요소인 Compound 의 재질변화에 따라 가장 민감하게 반응하는 타이어 구조요소를 찾기 위하여 FEM 을 이용한 FRF 해석을 수행하였다.

#### (1) FEM 해석 조건

동일한 구조를 갖고 Table 1 과 같이 서로 상이한 Hardness 조건을 갖고 있는 Compound 를 해석 대상으로 삼았으며, Fig. 4 와 같은 가진 포인트 (타이어의 굴신운동이 시작되는 부분)와 타이어의 주요 구조 요소에 응답 포인트를 설정하여 FRF 응답을 해석하였다.

Table 1 Analysis Condition for Compound Variation

	Hardness	Air Pressure	Load	Friction Coefficient
Ver. 1	68	30 psi	358kgf	
Ver. 2	63			1.0

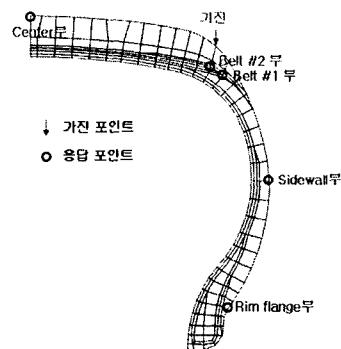


Fig. 4 Excitation & Response Positions

#### (2) FRF 해석 결과

각 응답위치에서의 FRF 해석결과, Fig. 5 와 같이 Ver.1 에 대한 응답이 Ver.2 에 비하여 큰 Amplitude 를 발생시키고 있음을 확인할 수 있다. 특히, Sidewall 부와 Rim Flange 부의 경우 230Hz 대역부터 300Hz 대역까지 저주파 영역 대비 상대적으로 큰 응답의 차이를 나타내고 있다. 이는 타이어 구조의 핵심 요소인 Compound 변화에 따라 Sidewall 부가 민감하게 반응하고 있음을 나타내며, Tire Cavity Resonance Frequency 영역에 지배적인 영향은 미칠 수 있음을 확인할 수 있다. 따라서 Sidewall 부의 Structure Control 을 통하여 Tire Cavity Resonance 를 조절 할 수 있음을 유추할 수 있다.

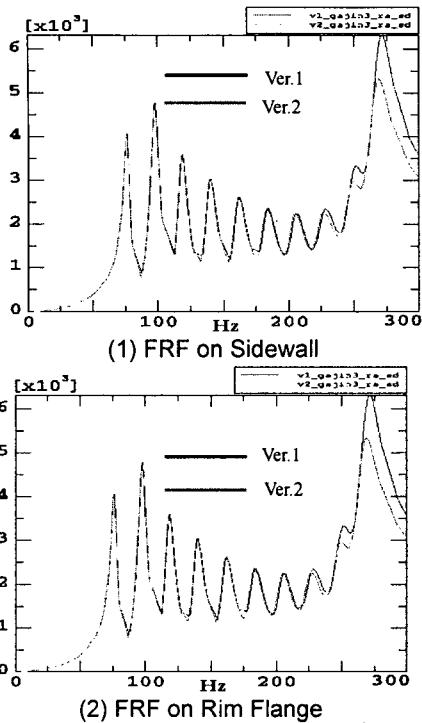


Fig. 5 FRF result due to variation of compound

### 3.2 Structure 변화에 따른 FEM Analysis

#### (1) FEM 해석 조건

Fig. 6은 각기 다른 타이어 Profile과 구조를 갖는 타이어의 FEM 해석모델을 보여주고 있다. 가진 포인트와 응답 포인트는 Tread Compound FEM 해석과 동일한 위치로 선정하였다. 또한, 표 2는 각 구조 요소의 변경 내용을 보여주고 있다.

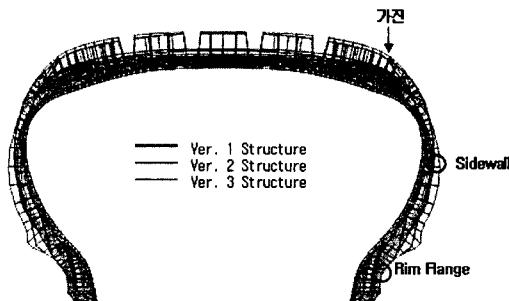


Fig. 6 FEM Analysis Models

Table 2 Analysis Condition for Structure Variation

	Variation	Air Pressure	Load
Ver.1	Structure A + Mold A	26psi	475kgf
Ver.2	Structure A + Mold B		
Ver.3	Structure B + Mold B		

#### (2) FRF 해석결과

각 응답위치에서의 FRF 해석결과, 구조와 서로 다른 Mold를 갖고 있는 경우에서도 Sidewall 부의 응답이 가장 민감한 반응을 보이고 있다. 특히 민감도가 상대적으로 큰 주파수 영역은 200~300Hz 대역으로 Tire Cavity Resonance 주파수 영역과 일치함을 확인할 수 있다. 따라서 Sidewall 부의 Structure Control을 통하여 타이어에서 발생하는 Fluid-Structure Interaction에 기인한 Cavity Resonance를 저감할 수 있음을 확인할 수 있다.

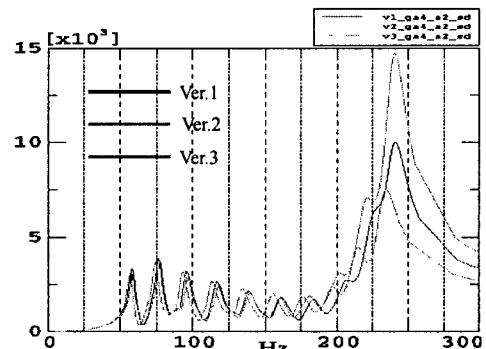


Fig. 7 FRF result due to variation of structure

## 4. 구조 변경을 통한 Cavity Resonance Noise Control

### 4.1 타이어 Body Ply Height 변경

#### (1) 시험조건 및 시험타이어 사양

타이어의 구조 요소 중 하나인 Body Ply는 타이어 Steel Belt 아래쪽에서 Tread 면을 감싸고, 다시 Bead 부를 감싼 후, Sidewall 부로 올라오는 구조를 갖는다. 특히, Body Ply가 끝나는 지점이 Sidewall의 굴신운동이 최대로 일어나는 부분이기 때문에 Body Ply가 끝나는 지점은 Sidewall부의 굴신운동에 많은 영향을 미칠 수 있다. 따라서 시험타이어는 동일한 구조에 Sidewall 부의 Body Ply가 Sidewall 부에서 끝나는 위치를 Fig. 8과 같이 Apex 가 끝나는 기준점 A로부터 5~20mm 까지 5mm 단위로 편차를 주어 제작하였다. 이후 시험은 차량 실내 보조석 왼쪽 귀의 위치에 B&K 社 Microphone을 설치하여 110km/h 속도로 정속주행하여 음압을 측정하였다. 측정된 음압은 LMS CADA-X를 이용하여 주파수 분석을 수행하였다. Table 3은 시험타이어 버전별 Body Ply Height의 변화를 보여주며, Fig. 8은 Body Ply의 위치를

보여주고 있다.

Table 3 Tire Specification

	Ver.1	Ver.2	Ver.3	Ver.4
Body Ply Height	20mm	15mm	10mm	5mm

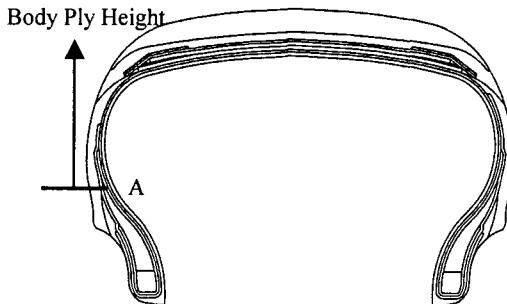


Fig. 8 Body Ply Height

#### (2) Objective Noise Test Result

Fig. 9 는 각 버전별 시험결과를 나타내고 있다. 115Hz 부근에서 Half Mode 의 Cavity Resonance Peak 가 발생하고 있으며, 230Hz 대역에서 1<sup>st</sup> Cavity Resonance Peak 가 발생하고 있다. 특히, Body Ply Height 가 낮을수록 Cavity Resonance Peak 가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이는 타이어 Sidewall 부의 불균형 강성이 발생하여 타이어 Cavity 와의 공진현상이 가속화된 것으로 분석되어진다. 따라서 타이어 Body Ply Height 조절을 통하여 타이어 안에 주입된 공기와 Sidewall 구조 간의 상호작용에 기인한 Cavity Resonance Noise 를 Control 할 수 있음을 확인할 수 있다. Table 4 는 각 버전별 1<sup>st</sup> Cavity Resonance Noise Peak 의 음압을 나타낸다.

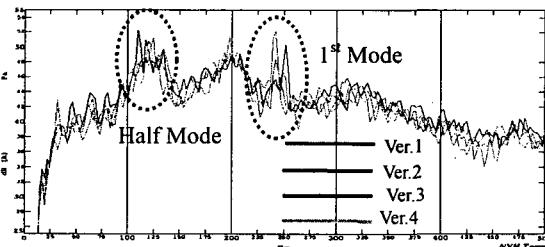


Fig. 9 Objective Noise Test Result (Turn-up Height)

Table 4 Cavity Resonance Peak Sound Pressure

	Pressure Level (dB(A))	Comment
Ver.1	46.6	Pressure Level at 230Hz Band
Ver.2	48.4	
Ver.3	50.4	
Ver.4	52.1	

#### 4.2 타이어 Sidewall Gauge & Tread Gauge 변경

##### (1) 시험조건 및 시험타이어 Specification

타이어의 Tread 면은 노면과 처음으로 접하는 부분으로써, 타이어와 차량에 대한 가진력을 일차적으로 흡진하는 부분으로써, 타이어의 Noise/Ride 성능을 좌우한다. 또한 Sidewall 부의 Gauge 조절은 타이어 전체적인 강성값을 변화시킬 수 있는 중요한 구조 설계인자로써, FEM 해석결과를 통해 Cavity Resonance 를 Control 할 수 있는 중요한 구조 설계요소이다. 이를 시험적으로 확인하기 위하여 시험타이어는 동일한 구조에 Sidewall Gauge 및 Tread Gauge 에 변화를 주어 제작하였다. 시험은 80~30km/h 까지 기어중립 상태로 Coast Down 방식으로 수행하였으며, 이때 보조석 왼쪽 귀의 위치에 B&K Microphone 을 설치하고, 측정된 데이터는 LMS CADA-X 로 주파수 분석을 수행하였다. Table 5 는 각 시험버전별 구조사양을 보여주고 있다.

Table 5 Tire Specifications for Gauge Control

구 분	Tread Gauge (Center/Middle/Shoulder)	Sidewall Gauge
Ver.1	7.5/7.5/9.0 mm	4.0mm
Ver.2	8/8/9.2 mm	3.3mm

##### (2) Coast Down Test Result

Fig. 10 은 각 버전별 Coast Down 결과를 나타내고 있다. Tread Gauge 가 두껍고, Sidewall 부의 Gauge 가 얕은 Ver.2 에서 300Hz 대역의 Cavity Resonance Noise 의 음압이 Ver.1 대비 상당히 저감되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 Sidewall 부의 Gauge 조절을 통하여 전체적인 타이어 Stiffness 를 저감시켜 Cavity Resonance 대역을 저주파 대역으로 Shift 시킨 것으로 분석되어진다. 따라서 Ver.1 대비 Ver.2 에서 100~200Hz 영역의 음압은 상대적으로 높게 발생하고 있다.

본 시험결과를 통하여, Tread Gauge 와 Sidewall 부는 타이어의 전체적인 강성을 조절할 수 있는 중요한 구조설계 요소이며, 이를 통하여 타이어에서 Fluid(air)-Structure 의 상호작용에

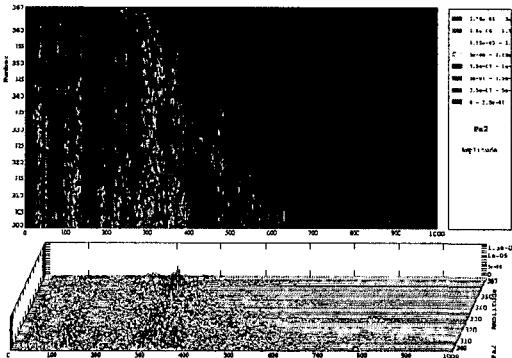
기인하여 발생되는 Cavity Resonance Noise 를 Control 할 수 있음을 확인할 수 있었다.

## 참고문헌

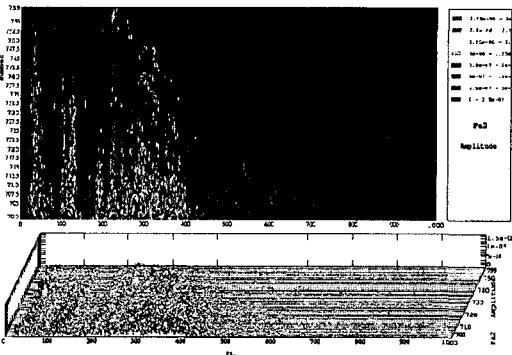
(1) R.W.Scavuzzo and L.T. Charek and P.M.Sandy, 1994, Influence of Wheel Resonance on Tire Acoustic Cavity Noise, SAE, 940533.

(2) J. K. Thompson, 1995, Plane Wave Resonace in the Tire Air Cavity as a Vehicle Interior Noise Source, Tire Science and Technology, Vol. 23, pp. 2~10.

(3) R. Gunda and S. Gau and C. Sohrmann, Analytical Model of Tire Cavity Resonance and Coupled Tire/Cavity Modal Model, Tire Science and Technology, Vol. 28, pp.33~49.



(1) Coast Down Test Result for Ver.1



(2) Coast Down Test Result for Ver.2

Fig. 10 Coast Down Test Result(Gauge Control)

## 5. 결 론

본 연구에서 FEM 을 이용한 FRF 해석결과와 이를 적용한 실차 시험결과를 통하여 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) FEM 해석결과 Tread 부 가진에 대한 응답 특성은 Sidewall 부에서 가장 민감한 응답 특성을 나타냄을 확인할 수 있었다.
- 2) FEM 해석을 통하여 Sidewall 부의 가장 민감한 FRF 응답 대역은 200~300Hz 대역임을 확인하였다.
- 3) FEM 해석 결과를 적용한 실차 시험을 통하여 Sidewall 부의 구조 Control(Gauge 및 Body Ply Height)은 타이어의 Fluid(air)-Structure 의 상호작용에 기인하여 발생하는 Cavity Resonance Noise 의 Control 이 가능함을 확인할 수 있었다.