

# KTX 고속열차 안티롤바 너클부의 동특성 및 구조 안전성 평가

전광우\* · 신광복\*\*† · 김진우\*\*\* · 정연일\*\*\*

\* 한국로봇융합연구원, \*\* 한밭대학교 기계공학과, \*\*\*한국철도공사 연구원 기술연구처

## Study on Structural Integrity and Dynamic Characteristics of Knuckle Parts of KTX Anti-Roll Bar

Kwang Woo Jeon\*, Kwang Bok Shin\*\*†, Jin Woo Kim\*\*\* and Yeon Il Jeong\*\*\*

\* Applied Technology Division, Korea Institute of Robot and Convergence

\*\* Dept. of Mechanical Engineering, Hanbat Nat'l Univ.,

\*\*\* Korea Railroad Corporation, Research Institute

(Received January 15, 2013 ; Revised April 24, 2013 ; Accepted April 27, 2013)

**Key Words:** Anti-Roll Bar(안티롤바), Elastic Knuckle(탄성너클), Rigid Knuckle(강체너클), Structural Dynamic Characteristics(구조동특성), Surface Fatigue Wear(표면피로마모)

**초록:** 본 논문은 KTX 안티롤바 너클부의 동특성 및 구조 안전성 평가를 위해 시험 및 수치적 방법을 사용하였다. 시험적 방법에서는 KTX와 KTX-산천 안티롤바 너클부의 동특성을 비교 평가하기 위해 호남선의 운행환경을 고려한 가속도 및 변형률 데이터를 각각 측정하였으며, 수치적 방법에서는 너클부에 대해 LS-DYNA 3D를 사용하여 구조 안전성 평가를 수행하였다. 이때 해석에 사용된 유한요소모델은 시험과 비교평가를 통해 신뢰성을 검증하였다. 수치해석 결과, 얇은 금속판 및 고무의 적층구조로 이루어진 너클부의 응력 및 속도장이 너클과 커넥팅로드 사이의 상대적 접촉 감소로 인해 두꺼운 강재로만 이루어진 너클부에 비해 좀 더 완화된 경향을 보였다. 그 결과 얇은 금속판과 고무로 구성된 너클 구조가 반복적인 외력 하중하에서 KTX 안티롤바의 탄성거동을 허용하여 동적 거동하의 구조적 안전성을 향상시키기 위한 최선의 방법임을 확인하였다.

**Abstract:** To evaluate the structural integrity and dynamic characteristic of the knuckle part of a KTX anti-roll bar, an experimental and a numerical approach were used in this study. In the experimental approach, the acceleration and strain data for the knuckle parts of the KTX and KTX-SANCHUN anti-roll bar were respectively measured to evaluate and compare its structural dynamic characteristics under the operating environments of the Honam line. In the numerical approach, the evaluation of its structural integrity was conducted using LS-DYNA 3D, and then, the reliability of the finite element model used was ensured by a comparative evaluation with the experiment. The numerical results showed that the stress and velocity field of the knuckle part composed of a layered structure of a thin steel plate and rubber were more moderate than those of the knuckle part made of only a thick steel block owing to the reduction of relative contact between the knuckle and the connecting rod. It was found that the knuckle part made of a thin steel plate and rubber was recommended as the best solution to improve its structural integrity resulting from the elastic behavior of the KTX anti-roll bar being enabled under a repeating external force.

### 1. 서론

21세기 친환경적 신교통 수단으로 알려진 철도는 2004년 국내의 고속철도 개통과 더불어 도시와 도시간을 이어주는 장거리 운송수단으로 각광받고 있다. 세계에서 5번째로 개통된 한국의 고속철도는 철도분야의 수송분담율 향상과 더불어 전

국을 단일 생활권으로 변경함으로써 삶의 변혁(life innovation)을 일으키고 있다.<sup>(1,2)</sup>

고속철도는 승객의 승차감 향상과 운행속도 유지를 위해 전용선로를 이용하고 있으며, 곡선주로의 경우 열차의 최고설계속도에 맞추어 최소곡선반경을 산정하고 있다.<sup>(3,4)</sup>

그러나, 국내의 경우 각 역사의 이용인원을 고려하여 고속철도를 위한 전용선로와 기존선로를 혼용하여 사용하고 있으며, 호남고속철도의 경우 제 4차

† Corresponding Author, [shin955@hanbat.ac.kr](mailto:shin955@hanbat.ac.kr)

국토종합계획 및 국가기간교통망 계획에 따라 2020년까지 기존선로를 이용하여야 한다.<sup>(5)</sup> 이때, 기존선로를 주행하는 고속철도의 경우 궤도틀림에 의해 차량의 롤링이 발생하게 되며 차량의 안전성과 승차감을 저하시키는 요인으로 알려져 있다.<sup>(6)</sup> 이에, 철도차량의 경우 객차용 대차 및 동력 대차에 안티롤바(anti roll bar)를 장착하고 이를 통해 롤링을 방지하고 있다. 레버(lever), 커넥팅로드(connecting rod), 너클(knuckle), 토션바(torsion bar)로 구성되는 안티롤바는 운행중 발생하는 차량의 롤링(rolling)을 커넥팅로드의 상·하 상대운동을 통해 토션빔에 전달함으로써 비틀림 강성에 의해 차체의 롤링운동을 제한하는 역할을 수행한다. 야스도시 외 3명<sup>(7)</sup>은 고속철도용 토션바의 국산화를 위해 안티롤바 어셈블리용 토션바를 개발하였다. 안티롤바를 구성하는 부품인 너클은 커넥팅 로드, 레버와 차체를 연결해주는 관절역할을 담당하고 있으며, KTX 안티롤바 너클부에는 강체구조인 강체너클(rigid knuckle)이 적용되었다. 반면, KTX-산천은 얇은 금속판 및 고무가 층을 이루는 적층 구조인 탄성너클(elastic knuckle)이 적용되어 운행중에 있다.

주행 중인 철도차량의 진동 및 구조소음은 대차에서 유발되는 진동이 센터피봇과 안티롤바를 통하여 차량 바닥에 전달된다.<sup>(8)</sup> 따라서, 안티롤바는 차체 운행 중 대차와 지속적인 상대거동으로 인해 동적하중이 발생하고, 이는 구조적 안전성을 저하시키는 요인으로 작용한다. 이때, 안티롤바의 경우 동적하중에 의한 파손발생 시 차량 탈선, 전복등 승객의 안전을 위협할 수 있어 구조 안전성 확보가 반드시 필요한 실정이다.

최근 강체너클이 적용된 KTX의 경우 차량운행시 발생하는 동적하중에 의해 너클과 커넥팅로드의 금속과 금속간의 마찰에 의한 소음이 유발되며 탑승객의 민원제기 사례가 종종 발생하고 있다. 이를 해결하기 위해 KTX 안티롤바 강체너클에 대한 잦은 점검과 보증기간 이전의 부품교체가 발생해 인력 및 금전적 손실이 발생하고 있는 실정이다.<sup>(9)</sup> 반면, KTX-산천에 적용된 탄성너클은 초탄성 거동(hyper elastic behavior) 특성을 갖는 고무완충체를 통해 대차에서 발생하는 진동을 완화하여 강체너클에서 나타나는 금속과 금속간의 소음현상은 발생되지 않고 있다.

본 연구에서는 고속열차에 적용되는 안티롤바 너클의 종류에 따른 동특성과 구조 안전성을 비교하기 위해 실제 운행환경을 고려한 계측시험을 수행하였

고 수치적 기법을 통해 개선방안을 제시하였다. 계측시험에서는 실제 운행 중인 KTX와 KTX-산천의 안티롤바 너클부에 가속도센서와 스트레인 게이지를 부착하여 가속도와 응력 값을 비교하였으며, 계측된 가속도와 응력 값은 구조해석에 사용된 유한요소모델 검증에 위한 자료로도 사용되었다. 수치적 기법에서는 KTX 안티롤바에 강체너클과 탄성너클을 각각 적용하여 운행 중 발생하는 외력에 의한 동특성 거동을 비교분석하여 구조개선 방안을 제시하였다.

## 2. 고속열차 안티롤바 너클부의 개요

### 2.1 안티롤바 너클부의 구조

Fig. 1은 고속열차 안티롤바의 전형적인 모습을 나타낸 것으로 커넥팅로드, 레버, 그리고 너클로 구성되어 있다. 이때, KTX에 적용된 너클은 열처리된 고강도의 강재로 만들어져서 강체너클이라 불리우고, KTX-산천에 적용된 너클은 얇은 강재판과 고무층으로 이루어진 적층구조를 가져 탄성너클이라 부른다.

### 2.2 KTX 강체너클과 KTX-산천 탄성너클의 비교

Fig. 2는 KTX에 적용된 강체너클과 KTX-산천에 적용된 탄성너클의 형상을 보여준다. 강체너클의 외륜은 커넥팅로드에 고정되어 있고 내부 볼은 차체에 링키지로 연결되어 있어 차체가 좌우로 흔들리면 내부 볼이 회전하면서 외륜의 내벽에 코팅되어 있는 내마모재(PTFE)와 내부 볼 사이에 접촉이 발생하여 차체의 흔들림을 완화시키는 구조이다. 반면, 탄성너클은 외륜과 내부 볼 사이에 얇은 금속판 및 고무가 여러 층으로 겹겹이 쌓여 있는 적층구조로 고무완충체에서 차체의 흔들림을 완화시킬 수 있는 구조로 되어 있다. 이때, KTX에 적용된 강체너클의 경우 외륜과 코팅체의 지속적인 동적거동에 의해 마모가 발생하고 이는, 금속과 금속간의 마찰로 작용하여 이상소음을 차체에 전달한다.

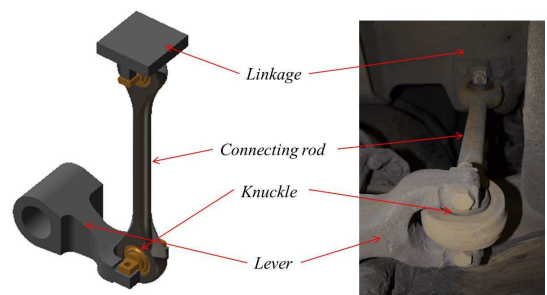


Fig. 1 Configurations of anti-roll bar of KTX

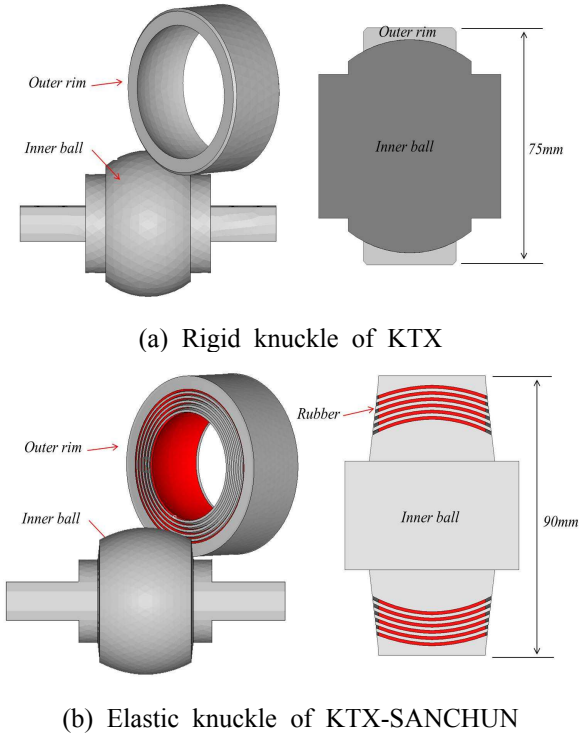


Fig. 2 Configurations of rigid knuckle and elastic knuckle

### 3. 안티롤바 너클부 구조동특성 계측시험

#### 3.1 계측시험 장치의 구성

안티롤바 너클부 동특성 파악을 위한 시험은 호남선을 운행하는 KTX와 KTX-산천 차량에 대해 각각 수행하였다. 이때, 1번째 객차 하부의 안티롤바 너클부에 발생하는 3방향(x, y, z) 가속도를 측정하였으며 커벵팅로드의 각 위치에 발생하는 변형률을 측정하였다. Fig. 3은 너클부 동특성 계측시험을 위한 가속도 센서와 스트레인 게이지를 부착한 형상을 보여준다. 너클에 발생하는 가속도는 상부와 하부에 3축 가속도계를 부착하였으며, 너클과 커벵팅로드의 원공형 연결부 외측에 부착한 3축 스트레인 게이지를 통해 운행에 따른 변형률 이력을 측정하고 이로부터 응력결과를 도출하였다.

#### 3.2 가속도 이력 및 변형률 측정 결과

안티롤바 너클부 동특성 계측시험을 통해 측정된 가속도 이력은 해석수행 시 하중조건으로 사용하였으며, KTX는 총 11개 구간, KTX-산천은 총 14개 구간에 대해 측정을 수행하였다. 계측시

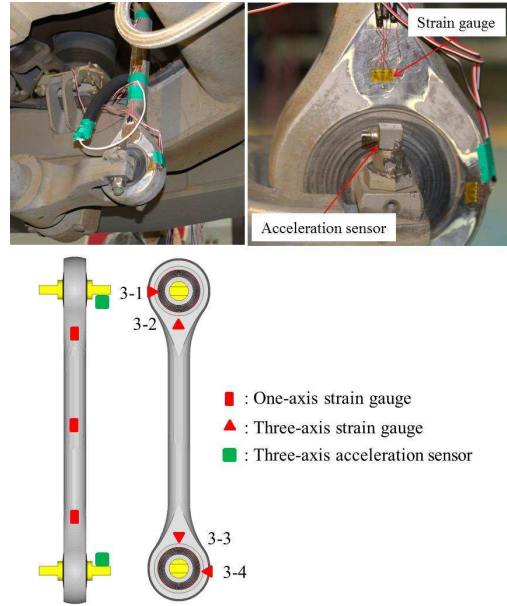


Fig. 3 Experimental setup for measurement of acceleration and strain data

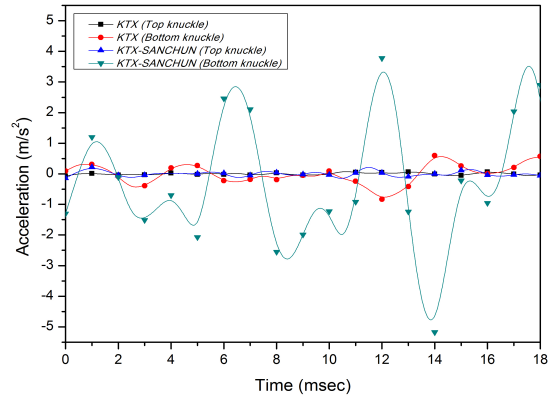


Fig. 4 Acceleration measurement data at Iksan-Gimje section for KTX and KTX-SANCHUN

험데이터는 각 구간 동일하게 1kHz로 측정하였으며, 동적데이터 수집은 IMC社의 CRONOSflex 모델을 사용하였다. Fig. 4는 익산-김제 구간의 계측시험을 통해 측정된 KTX와 KTX-산천의 너클부 가속도를 비교한 것이다. 이때, 고속열차 전용선로에 비해 상대적으로 진동이 크게 발생하는 기존선로인 익산-김제 구간에서 나타난 최대 가속도를 상하부 너클에 대해 나타내었다.

너클부에 발생하는 가속도를 확인한 결과 KTX와 KTX-산천의 상부 너클에서 발생하는 가속도보다 하부 너클에서 발생하는 가속도가 크게 나타남을 확인하였다. 이는 궤도틀림으로 인한 진동이 하부너클이 연결된 대차에는 전달되나 상부너

클이 연결된 차체와 대차사이에 위치한 코일스프링, 에어스프링 등의 현가장치에 의해 진동이 감쇠되기 때문이라 사료된다. 또한, KTX에 비해 KTX-산천의 가속도가 최대 5배 가량 크게 나타났는데, 이는 KTX-산천에 적용된 탄성너클의 경우 KTX에 강체너클에 비해 상대적인 변형을 허용하기 때문이라 사료된다.

커넥팅 로드와 부착된 3축 스트레인 게이지에서는 주응력 변환 식인 식 (1)을 적용하여 각 위치별 주응력 값을 도출해 내었다.

$$\sigma_{1,2} = E \left[ \frac{\epsilon_a + \epsilon_b}{2(1-\nu)} \pm \frac{1}{2(1+\nu)} \times \sqrt{(\epsilon_a - \epsilon_c)^2 + (2\epsilon_b - \epsilon_a - \epsilon_c)^2} \right] \quad (1)$$

이때, 도출된 커넥팅로드의 주응력은 수치모델 검증에 위해 사용하였다. 여기서,  $E$ 는 재료의 강성을 나타내며,  $\nu$ 는 푸아송비,  $\epsilon_a, \epsilon_b, \epsilon_c$ 는 3축 스트레인 값을 나타낸다.

#### 4. 안티롤바 너클부 구조 안전성 평가

##### 4.1 유한요소모델링 및 재료물성

KTX 강체너클과 KTX-산천 탄성너클의 운행환경을 고려한 구조 안전성 평가를 수행하기 위해 외연유한요소 해석프로그램인 LS-DYNA3D를 사용하였다. Fig. 5는 구조 안전성 해석을 위한 강체너클부와 탄성너클부의 유한요소모델링 및 모델 정보를 나타낸다.

금속재의 경우 재료의 소성구간까지 모사가 가능한 Mat\_24-Piecewise\_Linear\_Plasticity를 사용하였으며, 너클과 커넥팅로드 사이에는 접촉조건을 부여하여 실제 너클부와 동일하게 모사하였다. KTX-산천 탄성너클에는 고무를 모사하기 위한 Mat\_27-Mooney-Rivlin\_Rubber를 사용하여 나타내었으며, 물성은 참고문헌<sup>(10)</sup>을 통해 초탄성(hyper elastic)재료의 물성치를 부과하였다.

이때, 초탄성 재료 모델 중에서 일반적으로 사용되는 1차 Mooney-Rivlin 계수(A, B)를 사용하였다. 이에 대한 변형 에너지로서의 지배방정식은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있고 본 식의 기본 계수인 A는 0.5404, B는 0.0476으로 부과하였다.

$$U = A(I_1 - 3) + B(I_2 - 3) + \frac{1}{D_1} (J^{el} - 1)^2 \quad (2)$$

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$$

$$I_2 = \lambda_1^{(-2)} + \lambda_2^{(-2)} + \lambda_3^{(-2)}$$

여기서,  $J^{el}$ 은 탄성 체적비이고  $\lambda_i$ 는 주방향 신장을 의미한다. 그리고  $I$ 는 right Cauchy-Green 텐서를 나타낸다. 재료상수  $D_1$ 의 값은 식 (3)과 같이 얻을 수 있다.

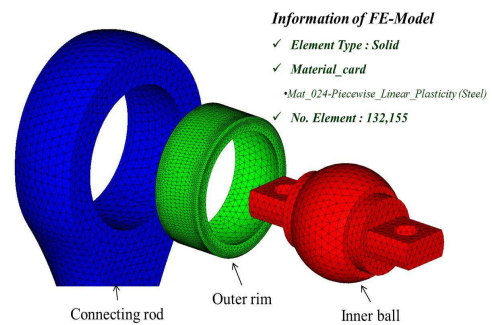
$$D_1 = \frac{3(1-2\nu)}{G_0(1+\nu)} \quad (3)$$

여기서,  $\nu$ 는 푸아송비,  $G_0$ 는 초기전단계수를 나타낸다.<sup>(11)</sup>

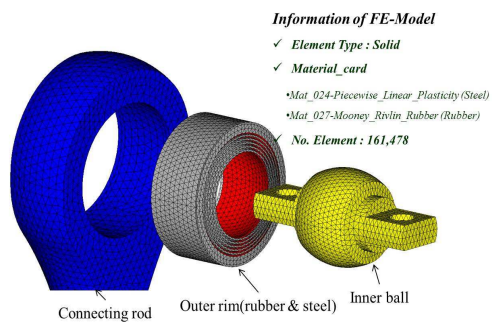
Table 1은 유한요소모델에 적용된 재료의 물성 정보를 나타낸다.

**Table 1** Material properties used to finite element analysis

Material properties	SCM 435 (Connecting rod)	Steel S235 (Knuckle)	Rubber
Elastic Modulus (GPa)	210	210	-
Poisson's ratio	0.3	0.3	0.499
Yield Stress(MPa)	205	225	-
Constant A	-	-	0.5404
Constant B	-	-	0.0476
Density (kg/m <sup>3</sup> )	7850	7850	1.120



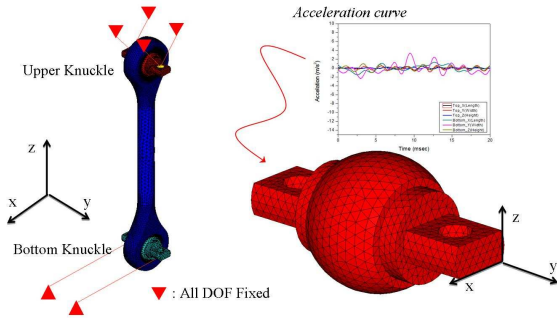
(a) Rigid knuckle of KTX



(b) Elastic knuckle of KTX-SANCHUN

**Fig. 5** Finite element models of rigid knuckle and elastic knuckle





(a) Boundary condition (b) Load condition

Fig. 6 Load and boundary conditions of anti-roll bar knuckle parts of KTX

4.2 구조 안전성 해석조건

해석적 평가를 위한 안티롤바의 구속조건은 실제 차량과 동일한 조건을 모사하기 위하여 레버와 링크지 위치에 모든 자유도를 구속하였으며, 너클과의 볼트체결을 나타내기 위해 질량-스프링 요소를 적용하였다.<sup>(12)</sup> 하중조건인 경우 전체 가속도 이력을 적용하기에는 해석에 많은 시간이 소요됨에 따라 가속도가 가장 높게 나타난 일부 구간을 선정하여 너클부에 적용하였다. Fig. 6은 안티롤바 너클부의 구속조건과 하중조건을 나타낸 것이다.

4.3 구조 안전성 해석결과

Table 2는 대표적으로 KTX와 KTX-산천 안티롤바 너클부의 구조 안전성 해석 결과를 시험과 비교하여 나타낸 것으로 1차 주응력의 경우 매우 낮은 응력분포가 발생하였으며, 시험과 해석결과의 경향이 비교적 잘 일치함을 확인하였다. 시험과 해석 결과의 오차율은 평균 8%가량으로 나타났다. 이때, 시험적 계측과 해석적 평가의 오차율이 높은 이유는 커넥팅로드에 발생한 응력 값이 매우 작으며, 실측시험 시 발생한 노이즈, 센서부착의 정밀도 등에 의한 것으로 사료된다. 해석을 통해 본 너클부의 최대 Von-Mises 응력의 경우 너클과 커넥팅로드가 만나는 부분에서 최대 응력이 발생하였으며, 재료의 항복강도(205MPa)보다 낮은 응력이 발생하여 구조적으로 안전함을 확인하였다.

이때, 탄성너클이 적용된 KTX-산천의 커넥팅로드에서 발생하는 주응력과 Von-Mises 응력이 강체너클이 적용된 KTX와 비교하여 다소 높은 경향을 보이지만 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.

Table 2 Comparisons of analysis and experiment results of KTX and KTX-SANCHUN

[Unit : MPa]		Location of stress				Max. Von-Mises Stress	
		3-1	3-2	3-3	3-4		
KTX*	1 <sup>st</sup> Principal Stress	Test	2.47	1.57	1.86	1.84	-
		Analysis	2.12	1.71	1.79	1.77	
	Von-Mises Stress	Test	1.93	1.29	1.38	1.37	14.24
		Analysis	1.40	1.05	1.12	0.98	
KTX-SANCHUN**	1 <sup>st</sup> Principal Stress	Test	2.11	2.80	2.10	2.40	-
		Analysis	1.99	2.45	2.24	2.31	
	Von-Mises Stress	Test	1.56	2.06	1.52	1.78	21.01
		Analysis	1.35	1.82	1.37	1.45	

\*Rigid knuckle, \*\*Elastic knuckle

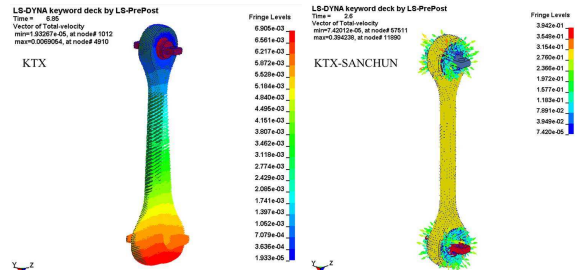


Fig. 7 Contours of velocity field for KTX and KTX-SANCHUN

그러나, 커넥팅 로드에서 발생하는 방향별 가속도 값은 탄성너클이 적용된 KTX-산천이 강체너클이 적용된 KTX에 비해 약 5배가량 높게 나타났다. 이는 동일한 하중조건하에서 탄성너클이 강체너클에 비해 우수한 응력 감소효과를 가지는 결과로 판단된다.

Fig. 7은 KTX 강체너클과 KTX-산천 탄성너클의 속도장을 비교한 것으로 강체너클부의 경우 너클에서 작용한 가속도에 의한 하중이 커넥팅로드의 접촉면을 통해 모두 전달되는 반면, 탄성너클이 적용된 KTX-산천은 고무완충체가 이를 감소시킴을 확인하였다. 실제 운행조건을 모사한 동적하중하의 구조 해석을 통해 너클부에서 발생한 응력 값은 매우 낮은 값으로 구조적 안전성에는 큰 의미 없는 값이지만, 탄성너클의 경우 5mm의 탄성변형 허용 값을 가져 안티롤바에 작용하는 충격하중을 흡수하게 된다. 이에, 커넥팅로드 부위에 발생하는 동적하중에 의한 응력이 감소될 것으로 판단된다.

**Table 3** Analysis results of KTX-rigid knuckle and KTX-elastic knuckle

	1 <sup>st</sup> Principal Stress(MPa)				Max. Von-Mises Stress(MPa)
	3-1	3-2	3-3	3-4	
KTX*	2.12	1.71	1.79	1.77	14.24
KTX**	1.55	0.47	0.98	1.26	11.01

\*KTX with rigid knuckle of 75mm diameter  
 \*\*KTX with elastic knuckle of 90mm diameter

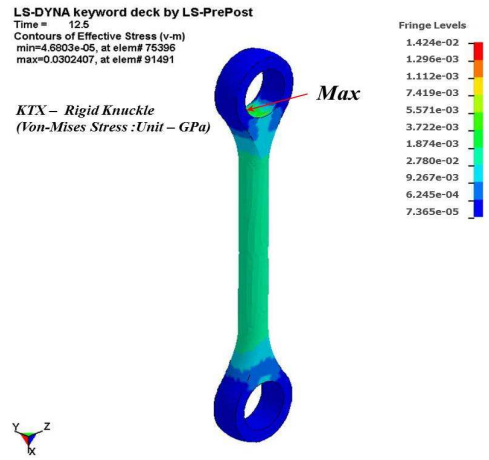
4.4 KTX 안티롤바 너클부 구조 안전성 향상 방안 제시

강체너클이 적용된 KTX와 탄성너클이 적용된 KTX-산천모델의 해석결과 탄성너클의 적용이 동적하중하에서 구조적 안전성을 향상시키는 것으로 판단되어 기존 KTX모델에 탄성너클을 적용하여 해석적 평가를 수행하였다. KTX 안티롤바 너클부에 탄성너클을 장착할 경우, 탄성너클이 갖는 탄성거동으로 인해 차량 운행시 발생하는 응력이 구조 안전성에 영향을 미치지 않는 지에 대한 검토가 필요하다. 또한, 탄성너클을 장착하기 위해서는 기존 커넥팅로드 원공부위에 확공을 위한 가공이 요구되는 데, 이 역시 구조적인 안전성을 만족하는지 여부를 확인해야 한다.

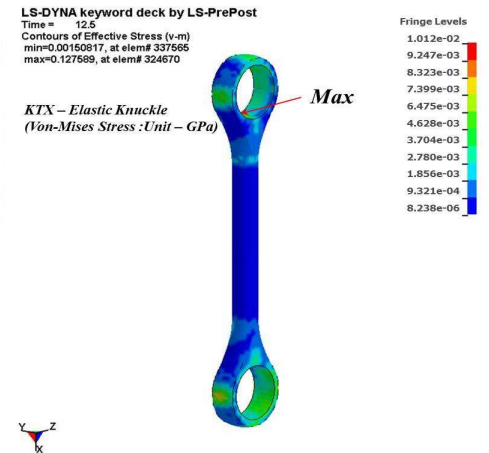
본 연구에서는 탄성너클의 외경(90mm)이 강체너클(75mm)보다 크기 때문에 커넥팅로드의 홀 사이즈를 변경하여 탄성너클을 적용하였다. Table 3은 기존 KTX모델(강체너클 적용)과 확공된 모델(탄성너클 적용)의 해석결과를 비교하여 나타낸 것으로 확공 모델의 1차 주응력 값이 최소 26%에서 최대 76% 가량 감소되었으며 최대 Von-Mises 응력은 약 50%가량 낮게 나타남을 확인하였다.

Fig. 8은 KTX와 KTX확공 모델의 Von-Mises Stress를 나타낸 것으로 너클과 만나는 접촉면에서 최대 Von-Mises Stress 값이 발생함을 알 수 있다.

KTX 고속열차 안티롤바에 탄성너클을 적용함으로써 운행 중에 발생하는 반복하중에 의한 커넥팅로드의 동적 구조 안전성 향상을 기대할 수 있으며, 탄성너클 적용에 의한 커넥팅 로드 구멍 확공 역시 구조적으로 안전함을 확인하였다. 따라서, 향후 KTX 고속열차 안티롤바에 탄성너클을 적용한다면, 소음으로 인한 민원제기 감소와 유지보수비용 절감 등의 효과를 얻을 것으로 판단된다.



(a) KTX with rigid knuckle



(b) KTX with Elastic knuckle

**Fig. 8** Contours of Von-Mises stress for KTX and KTX-Elastic knuckle

5. 결론

본 연구에서는 KTX와 KTX-산천 안티롤바 너클부에 대해 호남선의 운행조건을 고려한 구조동특성 계측시험을 수행하였으며, 수치적 기법을 통해 구조 안전성 개선방안을 제시하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) KTX와 KTX-산천 안티롤바 너클부에서 발생하는 응력과 속도장을 얻기위해 실차에 대한 시험적 평가를 수행하였으며, 이를 바탕으로 수치해석을 통한 동적 안전성을 평가하였다. 이때, 탄성너클의 적용이 고속열차 차량운행시 발생하는 반복적인 동적하중하에서 커넥팅로드의 구조 안전성을 향상 시킬 수 있을 것으로 판단된다.
- (2) 유지보수성 향상을 위해 기존 커넥팅 로드(KTX 적용)구멍을 확공시켜 탄성너클을 적용한

경우, 기존 강체너클에 비해 비교적 낮은 응력결과를 보여 확공을 통한 너클 구조변경 역시 차량의 구조 안전성에 영향을 미치지 않음을 확인하였다. 따라서, KTX 안티롤바에 탄성너클을 적용할 경우, 불필요한 점검과 보증기간 이전의 부품교체를 방지함으로써 경제적인 손실을 절감할 수 있을 것으로 기대된다.

(3) KTX와 KTX-산천 안티롤바 동특성 계측시험결과의 경우 오차율이 최소 3%에서 최대 13.5%가 발생하였다. 이때, 최대 오차율이 13.5%로 비교적 높게 발생하였으나 시험 수행 시 프리스트레인을 제거할 수 없었고 발생한 응력이 매우 작기 때문인 것으로 판단된다. 속도장 비교결과 강체너클이 적용된 KTX 너클부의 경우 너클과 커넥팅 로드 접촉면에서 지속적인 접촉하중이 발생하여 속도장이 높게 나타났다. 반면, 탄성너클이 적용된 KTX-산천 너클부의 경우 고무부분에서 가속도에 의한 하중을 감소시켜 비교적 속도장이 낮게 나타남을 확인하였다.

## 후 기

본 논문은 한국철도공사의 “고속열차 안티롤링 바-커넥팅 로드 소음저감 방안 연구”의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Kim, K. T. and Lee, J. S., 2004, "KTX Impact on the Railroad Transportation," *Conference of the Korean Society for Railway*.
- (2) Kang, J. Y., 2010, "Establishment of Structural Technology for Future Railway System," *Korea University*.
- (3) Chung, S. Y., An, S. J. and Kim, P. J., 2009, "An Analysis on the Railway Vehicle System for the Introduction of New Transit Systems," *Conference of the Korean Society for Railway*, Changwon, Korea, pp. 388~395.
- (4) Kim, S. D., 2010, "A Study on the Rationality for Choosing Proper Routes & Stations of the KTX Gyeongbu Line," *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 30, No. 2, pp. 181~190.
- (5) Jung, K. Y., Park, T. W., Jeon, K. J. and Han S. Y., 2009, "A Study of Dynamic Model for Analysis of the Next Generation Express Train," *Conference of the Korean Railway Society*.
- (6) Choi, Y. I., Koo, D. H., Hwang, S. Y. and Lim, Y. S., 2010, "Analysis on Safety and Ride Comfort of KTX According to Track Surface," *Korean Society for Railway*, Vol. 13, No. 6, pp.583~588.
- (7) Tominaga, Y., Pyun, Y. S., Kim, D. I. and Choe, D. H., 2012, "Development of Torsion Bar for Antiroll-Bar Assembly for Express Train," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, No. 9, pp. 979~984.
- (8) Park, H. J. and Woo, K. J., 2008, "The Study of the Effects to the Structure Borne Noise in Term of the Anti-roll Bar's Mounting Position," *Conference of the Korean Society for Railway*.
- (9) Jung, D. W., 2010, "Fracture Analysis and Statistical Fatigue Life Evaluation of the Hybrid Composite Joints for Car Body," *Hanyang University Polymer*, Vol. 38, No. 3, pp. 571~576.
- (10) Chen, C. H. and Wang, Y. C., 1997, "An Extended Nonlinear Mechanical Model for Solid-filled Mooney-Rivlin Rubber Composites," *Polymer*, Vol. 38, No. 3, pp. 571~576.
- (11) LSTC, LS-DYNA keyword user's manual version 971.
- (12) Ko, K. H. and Lee, J. M., 2001, "Dynamic Modeling of Bolt Joints Using Lumped Mass-Spring Model," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 23, No. 3, pp. 495~501.