

궤간가변 윤축시스템의 내구성 평가

안승호¹, 정광우¹, 장승호², 김철수^{3*}

¹한국교통대학교 철도안전시스템공학과, ²한국철도기술연구원 예코시스템연구실,

³한국교통대학교 철도차량시스템공학과

Durability Evaluation of the Korean Gauge - Adjustable Wheelset System

Seung-Ho Ahn¹, Kwang-Woo Chung¹, Seung-Ho Jang² and Chul-Su Kim^{3*}

¹Dept. of Railway Operation System Engineering, Korea National University of Transportation

²ECO-Transportation System Research Division, Korea Railroad Research Institute

³Dept. of Railway Vehicle System Engineering, Korea National University of Transportation

요 약 이중궤간(표준궤/궤궤)이 존재하는 유라시아 철도네트워크(TKR, TCR 및 TSR)의 화물운송시간 및 비용을 절감하기 위해서는 이 구간을 자유롭게 운행할 수 있는 궤간가변 윤축시스템의 개발이 중요하다. 국내에서는 기존 해외 윤축시스템을 보완하고자 새로운 한국형 궤간가변 윤축시스템을 개발 및 제작중이다. 본 연구에서는 안전-수명설계관점에서 강도와 내구성해석을 수행하였다. 본 시스템의 내구성해석결과로서, 주요부품은 1×10^7 사이클까지 안전하였다. 또한, 주행중 안전성을 확인하기위하여 국제철도규정 UIC에 따라 리그피로시험을 수행하였다. 이 시험을 통하여 본 궤간가변 윤축시스템은 관련 안전규정에 만족함을 확인하였다.

Abstract To reduce the cost and the time of transport in Eurasian railroad networks such as TKR(Trans-Korea Railway), TCR(Trans-China Railway) and TSR(Trans-Siberia Railway) owing to the problem of different track gauges (narrow/standard/broad gauge), it is important to develop the gauge-adjustable wheelset(GAW) system to adapt easily to these gauges. The Korean GAW system is developing and will be adapting to the brand new freight trains' to improve the conventional overseas GAW system. In this study, structural and durability analyses are performed from the viewpoint of the safe-life design. The core parts of the system might be safe in range of 1×10^7 cycles from the result of durability analysis. Moreover, to examine the safety of the system while running on a track, rig fatigue test was performed according to UIC code. The safety of the Korean GAW system is demonstrated through testing that all safety-relevant conditions are satisfied.

Key Words : Durability Evaluation, Freight Trains, Gauge-Adjustable Wheelset, Track Gauges

1. 서론

최근 우리나라 철도는 21세기 세계적인 교통 물류 중심지로 도약을 마련하기 위하여, 남북한 직결운행 및 유라시아 대륙철도 연계운행으로 부터 아시아 철도의 표준화까지 많은 관심 및 노력을 집중하고 있다. 그러나 대륙철도의 연계운행은 각 국의 궤간의 상이함으로 인한 대

차교환이나 환적의 어려움으로 많은 문제점을 초래한다. 환적, 윤축 또는 대차교환의 방법들은 운영비용, 용량의 제한, 윤축 또는 대차를 보관할 큰 공간 등으로 인하여 최선의 시스템으로 선정되기가 어렵다. 그러므로 이중 궤간 주행에서 안전성을 유지하면서 국경에서 특정 부품을 장착하거나 제거하기 위하여 정차가 필요 없는 자동 궤간변환 장치가 요구된다. 즉, 서로 상이한 궤간(궤궤/표준

본 논문은 한국교통대학교 교내학술연구비의 지원과 한국철도기술연구원 주요 R&D 사업의 연구비를 받아 수행한 연구임.

*Corresponding Author : Chul-Su Kim (Korea National University of Transportation)

Tel: +82-070-8855-1649 email: chalskim@ut.ac.kr

Received November 15, 2012 Revised (1st December 3, 2012, 2nd December 5, 2012) Accepted December 6, 2012

궤(광궤)에서 선로를 대차교환이나 환적 없이 신속하고 안전하게 직결 운행할 수 있는 궤간가변 윤축시스템 (gauge-adjustable wheelset system)이 필요하다[1-3]. 이 시스템은 이종궤간(협궤/ 표준궤/광궤)을 겸용 운행하므로 동북아 물류 운송시간 및 비용을 절감할 수 있다[4].

궤간가변 차량에 대하여 해외각국은 자국의 상황에 적합한 기술 개발 및 운영을 추진하는 중이다[1-4]. 예를 들어 폴란드의 SUW2000은 궤간가변동안 차륜을 축방향으로 이동시켜 20~30개의 잠금기구를 반복적으로 사용하므로 높은 피로파손과 과도한 제작/유지 보수비용의 문제점을 갖는다[3]. 독일의 DBAG/RAFIL-V는 3쌍의 잠금레버를 잠금기구와 원주방향 배열의 압축스프링을 채택한 구조를 가지며, 이 중에서 잠금레버는 축의 원주 외측으로 돌출하도록 내설되어 큰 부피와 복잡한 형태로 구성되는 문제점을 갖고 있다[5]. 이러한 기존 해외궤간가변 윤축시스템의 문제점을 해결하기 위하여 국내에서는 개념설계[2,6]로부터 한국형 궤간가변 윤축시스템을 개발 중이다. 본 시스템은 부품 갯수와 제작비용을 절감하고, 독창적인 변환메커니즘으로부터 장차의 편의성과 회전관성을 줄이는 장점을 갖는다[2,5]. 이의 개발연구는 개념설계를 거쳐 제작중이지만, 현재 이를 검증할 수 있는 국내 관련규격 및 내구성검증과 같은 체계적인 연구는 미비한 실정이다.

한국형 궤간가변 화차(Gauge-adjustable freight train)의 안전성을 확보하기 위해서는 국제 철도규정인 UIC 510-4[7]에 준한 궤간가변 윤축의 내구성을 평가하는 것이 중요하다. 그러나 이를 위해서는 복잡한 실물시험과 다수의 시제품을 사용하여 오랜 기간 내구성 실물시험과 같은 리그피로시험을 수행하는 것이 필요하다.

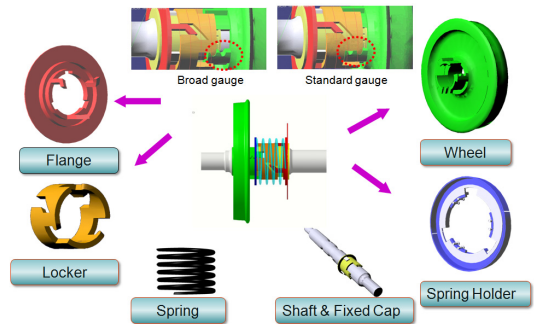
따라서 본 연구에서는 현재 설계중인 궤간가변 윤축에 대한 개발기간 및 시제품 제작비용의 최소화를 위하여, 피로해석 상용소프트웨어를 이용하여 한국형 궤간가변 윤축시스템의 내구성 해석을 수행하고자 한다. 또한 UIC 510-4[7]에 의거한 리그피로시험을 수행함으로써, 궤간가변 윤축시스템의 안전성을 검토하고자한다.

2. 궤간가변 윤축시스템

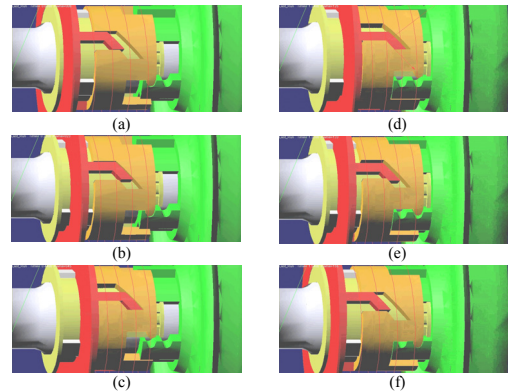
본 윤축시스템은 그림 1과 같이 크게 6가지 부품으로서, 고정캡을 갖는 차축(shaft), 구르브 원통을 갖는 차륜(wheel), 압축코일스프링(Spring), 플랜지(flange), 잠금기구(locker), 스프링 홀더(Spring holder)로 구성된다.

그림 2는 표준궤도에서 광궤로 변환시 궤간가변장치 의 윤축시스템 동작 메커니즘을 순차적으로 나타낸 것이

다. 이의 동작 메커니즘을 살펴보면 다음과 같다. 그림 2(a)~(c)에서 플랜지는 잠금기구에 삽입되고, 삽입한 상태로 잠금기구는 시계방향으로 회전하면서 차륜의 구르브 원통은 해제된다. 이로 인하여 그림 2(d)와 같이 가이드레일에 따라 차륜의 구르브 원통은 이동하므로 표준궤도에서 광궤로 변환된다. 그리고 그림 2(e)~(f)에서 변환중에 플랜지와 잠금기구는 다시 분리되고, 잠금기구는 반시계방향으로 역회전하면서 다시 차륜 구르브 원통에 구속된다.



[Fig. 1] The core parts of Korean GAW system



[Fig. 2] The changing process of the GAW system

3. 시험방법

3.1 시험 규정

본 연구에서 개발 예정인 궤간가변 윤축시스템은 UIC 510-4[7]에 의거 표준궤에서 유라시아 철도 운행에 투입되기 전에 임시 허가서를 얻기 위하여 안전 관련 모든 조건들을 만족하는 시험을 통하여 검증 받아야한다. 이 규정은 이종궤간을 가진 노선 위를 운행 할 수 있는 자동 궤간가변 대차에 대한 리그피로시험기준을 포함하고 있

다. 부하조건은 표준궤를 설정한 상태에서 표 1과 같이 총 3단계 피로하중 프로그램을 실시한다. 본 연구에서 축중(axle load, P)은 화차용 궤간가변 윤축을 고려한 22ton이다. 그림 3은 UIC 510-4에 준한 윤축의 리그시험에서 수직(P_V) 및 횡방향(P_t) 하중이력을 나타낸 것이다. 참고로 그림 4는 궤간가변 윤축시스템에 대한 리그피로시험의 실제모습을 나타낸 것이다. 궤간가변 윤축시스템은 UIC 규정에 준한 시험을 통하여 피로수명 10^7 cycles까지 각 부품에서 파손 또는 균열발생의 유무로부터 이의 안전성을 검토한다.

3.2 시험방법

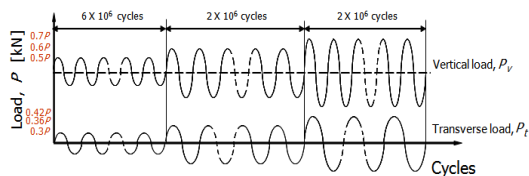
3.2.1 재료

본 연구에 선택한 재질은 5종류의 탄소강으로서 고정캡, 플랜지, 잠금기구의 재질은 SF50A이며, 스프링의 재질은 SUP9강이며, 스프링홀더 및 플랜지 재질은 SC410, 차축과 차륜은 KS R 9220 및 KS R 9221 규격에서 제시된 RSW1, RSA1이다[5]. 표 2는 본 시스템의 재질에 따른 기계적 특성을 정리한 것이다.

[Table 1] Fatigue test conditions of UIC 510-4

Stage	No. of Cycles	Vertical load, P_V [kN]	Transverse load, P_t [kN]
		Dynamic	Dynamic
I	6×10^6	$\pm 0.5P$ at 4Hz	$\pm 0.3P$ at 2Hz
II	2×10^6	$\pm 0.6P$ at 4Hz	$\pm 0.36P$ at 2Hz
III	2×10^6	$\pm 0.7P$ at 4Hz	$\pm 0.42P$ at 2Hz

* P : axle load(22ton)



[Fig. 3] Fatigue load histories of UIC 510-4

2.2.2 피로특성

궤간가변 윤축의 내구성 해석을 위해서는 응력 해석 결과 및 하중이력과 함께 재질의 피로물성치가 필요하다. 각 재질에 대한 피로물성치는 식 (1)의 응력-수명 선도(S-N curves)로부터 표 3과 같다[5].

$$\sigma_{ar} = A N_f^b \quad (1)$$

여기서 σ_{ar} =응력진폭(stress range), N_f = 파손사이클 수(cycles to failure), A , b 는 재료상수(material constant)이

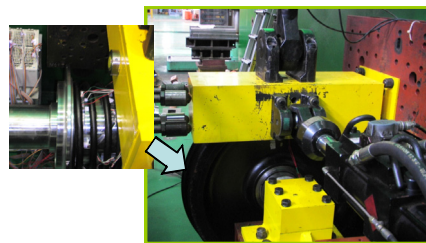
다. 이들은 본 시스템의 내구성 해석의 피로특성 자료로서 사용된다.

4. 해석 및 시험결과

4.1 정하중하에서 응력해석결과

4.1.1 경계조건

그림 5는 한국형 궤간가변 윤축시스템의 피로강도 및 응력해석을 위한 주요 부품에 대한 유한요소망 생성(finite element mesh generation) 및 경계조건을 나타낸 것이다. 요소형태는 3차원 해석을 위한 8절점 직육면체 요소이며, 총 요소수와 노드수는 각각 52,992개와 79,471개이다. 해석에 입력 자료로 사용되는 재질의 탄성계수(elastic modulus)는 207GPa, 프와송비(poisson's ratio)는 0.29이다. 요소망 모델링은 요소망 생성 전용 소프트웨어인 MSC.PATRAN[8] 및 MSC.MENTAT[9]를 사용하였으며, 응력해석 시뮬레이션은 MSC.MARC[9]로 수행하였다. 그림 5(a)의 경계조건은 양 끝부분에서 리그피로 시험조건을 고려하여 변위 및 회전에 대한 6자유도($U_x=U_y=U_z=0, R_x=R_y=R_z=0$)를 모두 구속하였다. 또한 스프링과 스프링홀더 및 축의 경계조건은 접촉지점에서 6자유도를 서로 구속하고 있는 ‘Glue Contact’이다. 그리고 플랜지와 잠금기구 및 차륜사이의 경계조건은 궤간가변 구간에서 작동을 고려하여 ‘Touch Contact’이다. 그림 5(b)는 UIC510-4에 따라 표준궤의 주행조건에서 수직 및 좌우하중 조건이다.



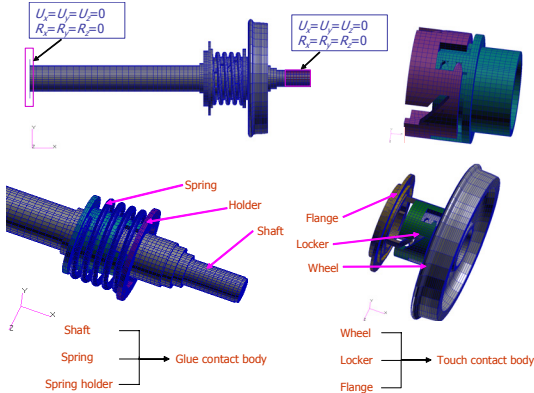
[Fig. 4] Rig fatigue test of the GAW system

[Table 2] Mechanical properties of materials for GAW system[5]

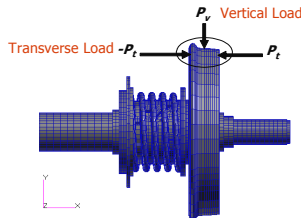
Materials	Yield Strength [MPa]	Tensile Strength [MPa]	Elongation [%]
SF50A	330	526	39
SC410C	247	476	31
SUP9	1275	1324	34
RSW1	420	835	14
RSA1	295	590	20

[Table 3] Material constant of S-N curves[5]

Materials	A	b
SF50A	360.58	-0.038
SC410	518.08	-0.084
SUP9	734.51	-0.029
RSW1	467.74	-0.015
RSA1	495.79	-0.039



(a) Contact conditions



(b) Applied loading type condition

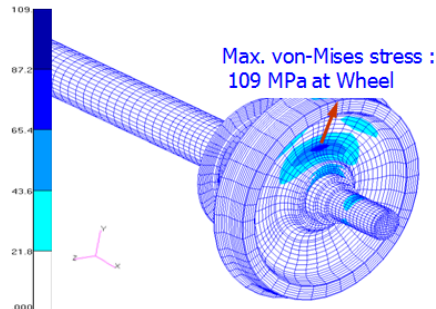
[Fig. 5] Boundary and contact condition in standard gauge

4.1.2 응력해석 및 시험결과

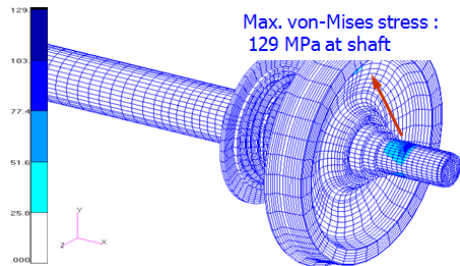
그림 6은 표준궤(1435mm)에서 최대 수직 및 횡방향하중하에 궤간가변 윤축시스템에 대한 응력해석결과를 나타낸 것이다. 작용하중값은 표 1에서 UIC 510-4의 3단계 최대하중조건이며, 그림 6(a) 및 그림 6(b)는 각각 수직하중 및 내측 횡방향하중($0.7P_V$ and $-0.42P_t$)조건과 수직하중 및 외측 횡방향하중($0.7P_V$ and $0.42P_t$)하에서 von-Mises 응력분포를 나타낸 것이다. 그림 6(a)와 그림 6(b)에서 동일 수직하중조건에서 내측($-0.42P_t$) 및 외측($0.42P_t$) 횡방향하중하에서 취약부는 각각 차륜판부 및 차축상의 끝부분이며, 이의 최대 von-Mises 응력은 각각 109MPa와 129MPa이다. 참고로 표 4는 그림 6(b)의 하중

조건하에 차륜 판부에서 반지름방향의 응력해석결과와 변형률계이지로부터 변환된 응력값을 비교한 결과이다. 변형률계이지 부착위치는 그림 7에서 나타난 바와 같다. 부착된 단축 변형률계이지는 차륜에 반지름방향으로 축 중심으로부터 140mm지점에 40mm간격으로 내면 2개 및 외면에 1개를 부착하였다. 각 지점에서 응력해석결과와 계측값의 오차는 7%이내이다. 이로부터 측정시험의 측정정확도, 센서부착 위치와 해석 취약부사이의 변동성을 감안할 때, 본 응력해석결과는 시험조건을 비교적 잘 반영하였다고 판단된다. 이상의 응력해석결과는 궤간가변 윤축시스템의 피로해석의 입력 자료로서 사용된다.

그림 8은 광궤에서 그림 7과 동일 조건하에 본 시스템의 응력해석결과이다. 광궤의 취약부위는 표준궤경우와 유사하며, 최대 von-Mises 응력은 각각 110MPa와 116MPa이다. 참고로 표 5는 표준궤(1435mm) 및 광궤(1520mm)조건하에 강도설계관점에서 주요 부품들의 최대 von-Mises 응력과 안전계수를 정리한 것이다. 여기서 안전계수는 항복강도에 대한 최대응력값을 의미한다. 표에서 보는 바와 같이 궤간가변 윤축시스템의 부품들은 최대하중 부여에서도 최소 2.3이상의 안전계수를 가진다.



(a) $0.7P_V$ and $-0.42P_t$

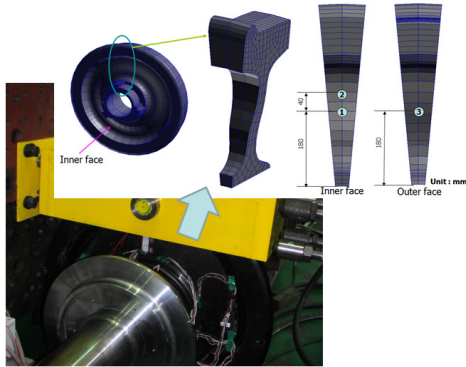


(b) $0.7P_V$ & $0.42P_t$

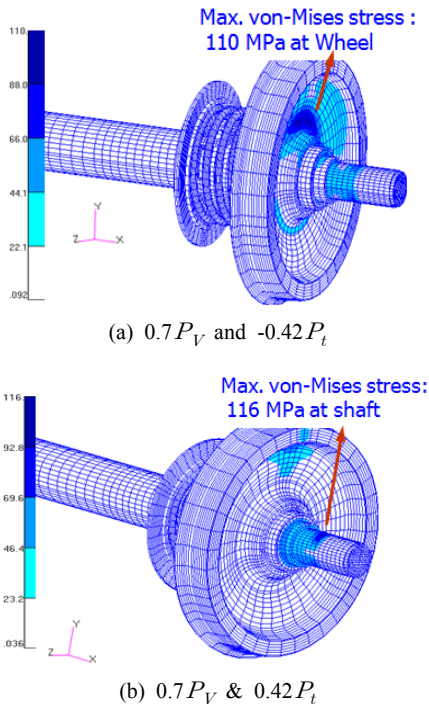
[Fig. 6] Stress analysis results of the GAW system in standard gauge

[Table 4] Comparison of static test and analysis results of wheel

	Test		Analysis		Error(%)
Wheel	1	-34MPa	1	-35MPa	1
	2	-48MPa	2	-49MPa	2
	3	-14MPa	3	-15MPa	7



[Fig. 7] Measurement position of strain gauge in the GAW system



[Fig. 8] Stress analysis results of the GAW system in broad gauge

[Table 5] Safety factors of major parts for GAW system

GAW System	Materials	Max. von-Mises stress [MPa]		Yield Strength [MPa]	Factor of Safety		
		(a)	(b)		(a)	(b)	
Standard gauge	Locker	SF50A	45	89	330	7.3	3.7
	Wheel	RSW1	109	61	420	3.9	6.9
	Shaft	RSA1	100	129	295	3.0	2.3
Broad gauge	Locker	SF50A	16	8	330	20.6	41.3
	Wheel	RSW1	110	58	420	3.8	7.2
	Shaft	RSA1	89	116	295	3.3	2.5

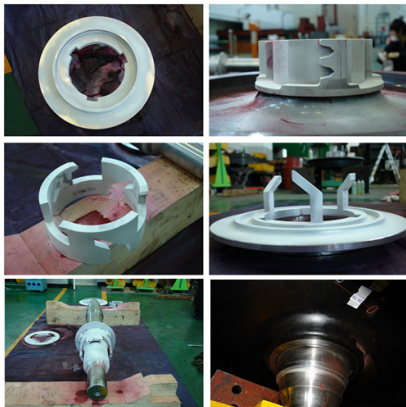
(a): $0.7P_V$ and $-0.42P_t$, (b): $0.7P_V$ and $0.42P_t$

4.2 피로해석 및 리그피로시험 결과

그림 9는 표준궤 조건하에 그림 2의 하중이력으로부터 본 시스템의 주요 부품의 피로해석결과를 나타낸 것이다. 재료의 피로특성은 표 3의 피로물성치를 사용하였고, 피로해석시물레이션은 상용소프트웨어 MSC.FATIGUE 2006을 이용하여 수행하였다. 그림에서 보는 바와 같이 궤간가변 윤축시스템의 부품들의 내구성은 10^7 cycles 까지는 안전하다. 그리고 그림 10은 1000만회 리그피로시험 종료후 주요 부품의 비파괴검사 사진이다. 시험 전 및 피로 하중시험의 각 단계에서 피로균열은 비파괴검사(염료침투법)에서 발견되지 않았다. 참고로 표 6은 응력해석결과 및 시험결과를 UIC 510-4과 비교한 것이다. 이로부터 본 궤간가변 윤축시스템은 UIC 510-4의 안전요구조건을 만족하였다.



[Fig. 9] Results of durability analysis according to UIC code



[Fig. 10] Results of Non-destructive testing after rig fatigue test(10^7 cycles)

[Table 6] Comparison of results between rig fatigue test and durability analysis according to UIC code

Type of gauge	Max. von-Mises stress[MPa]		Durability analysis ($\leq 10^7$ cycles)	Rig fatigue test*
	(a)	(b)		
Standard	109	129	Safe	No crack
Broad	110	116	Safe	No crack

(a): $0.7P_V$ and $-0.42P_t$, (b): $0.7P_V$ and $0.42P_t$

*: UIC code 5104-4(on the condition of Fig. 3)

4. 결론

본 연구에서는 궤간가변 윤축시스템에 대한 안전성 검토의 연구 일환으로, UIC규정에 의거한 내구성해석 및 리그피로시험을 수행하였다. 이로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 표준궤에서 응력해석결과로부터 궤간가변 윤축시스템의 주요 취약부는 차륜 판부 및 차축상의 끝부분이며, 이의 최대 von-Mises 응력은 각각 109MPa와 129MPa이다. 응력해석결과와 검증용 변형률게이지로 측정된 결과, 해석값과 계측값의 오차는 7%이내이므로 응력해석결과는 시험조건을 비교적 잘 반영하였다고 판단된다. 참고로 광궤조건에서 최대von-Mises 응력은 차축에서 발생하였으며, 이는 표준궤조건보다 약간 작은 116MPa이다.
2. 보수적인 정적 설계 관점에서 궤간가변 윤축시스템의 각 부품들은 표준궤 최대하중조건하에서 최소 2.3이상의 안전계수를 가진다.

3. 본 윤축시스템의 내구성해석 및 리그피로 시험 결과, 각 부품들의 내구성은 10^7 cycles까지 안전하였다. 또한 리그피로시험 종료후에 비파괴시험(염료 침투법)으로부터 각 부품의 피로균열은 없으므로 UIC 510-4에서 제시하는 안전요구조건을 만족하였다.

References

- [1] H. S. Na, S-H Jang, J-S Han, "A Comparative Study of the Technical Characteristics of Variable-Gauge Systems," Proc. of 2004 Spring Conference for Railway, pp. 645-651, 2004.
- [2] C. S. Kim, et al., "Structural Analysis of Locking Parts in the Gauge - Adjustable Wheelset", Journal of the Korean Society for Railway, pp. 33-38, 2008.
- [3] SUW2000, "Polish System of Automatic Track Gauge Changing for Wagons, Coaches And Traction Vehicles in Transcontinental Railway Traffic", pp. 1-34, 2000.
- [4] K. W. Chung, C. S. Kim and S. H. Jang, "Technical Evaluation of Railway Transportation System with the Change of Gauge", Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 13, No. 5 pp. 1954-1962, 2012.
- [5] KRRI, "Technical Development of Gauge-Adjustable System", Korea Institute of Construction & Transportation Technology Evaluation and Planning, pp. 29-150, 2008.
- [6] M. H. Park and C. S. Kim, "Conceptual Design on Doorstep Equipments Used for Low and High Level Railway Platforms, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 13, No. 9 pp. 3882-3888, 2012.
- [7] UIC 510-4, 2nd ed., "Wagons; Variable-Gauge Running Gear for 1435mm/1520mm and 1668mm - Recommendations for Bilateral Agreements", Union International Railway, 2000.
- [8] MSC.SOFTWARE, "MSC.PATRAN ver. 2006 User's Manual", 2006.
- [9] MSC. SOFTWARE, "MSC.MARC/MENTAT ver. 2006 User's Manual", 2005.
- [10] MSC. SOFTWARE, "MSC.FATIGUE ver. 2006 User's Manual", 2006.

안 승 호(Seung-Ho Ahn)

[정회원]



- 2004년 2월 : 한양대 대학원 기계공학과 졸업(공학박)
- 1981년 ~ 1996년 2월 : 철도청 근무
- 1996년 3월 ~ 2012년 2월 : 한국철도대학 철도운전기전과 교수
- 2012년 3월 ~ 현재 : 한국교통대학교 철도운전시스템공학과 교수

<관심분야>

철도운전이론, 철도안전, 용접공학

김 철 수(Chul-Su Kim)

[정회원]



- 2002년 8월 : 한양대 일반대학원 기계설계학과 졸업(공학박사)
- 2008년 1월 ~ 현재 : 국토해양부 철도기술 심의위원
- 2003년 3월 ~ 현재 : 한국교통대학교 철도차량시스템공학과 부교수

<관심분야>

철도차량설계, 철도차량RAMS

정 광 우(Kwang-Woo Chung)

[정회원]



- 1991년 2월 : 성균관대학교 일반대학원 전자공학과 (공학석사)
- 1995년 2월 : 성균관대학교 일반대학원 전자공학과 (공학박사)
- 1996년 2월 ~ 현재 : 한국교통대학교 철도운전시스템공학과 교수

<관심분야>

철도차량, 철도신호, 철도RAMS

장 승 호(Seung-Ho Jang)

[정회원]



- 1997년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)
- 2002년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
- 2003년 4월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

철도차량기계, 소음진동