

궤간가변운축의 차축 강도 평가

The calculation of axle for the gauge changeable wheel-set

최세영*[†], 이원상*, 정훈*

Se Young Choi*[†], W.S. Lee*, H. Jeong*

초 록 본 연구에서는 궤간가변운축의 강도를 일반 차축과 대비하여 평가하였다. 차축에 일체형 철제 차륜이 강제 압입된 일반적인 철도차량 운축의 구성과 달리 궤간가변운축은 궤간가변 시에 궤간을 고정하는 부품이 일시적으로 궤간고정을 해제하면서 차륜-차축이 독립회전을 하는 구조이며, 궤간이 일정한 구간에서는 별도 부품과의 메커니즘을 통해 차축과 차륜 간 회전력이 전달되는 구조이다. 따라서, 일체형 운축과는 별개로 차량의 구동 및 제동 시에 해당 부품이 끼워지는 차축 부위의 강도가 충분한 지 검토할 필요가 있다. 특히 구동대차용으로 궤간가변운축을 적용하고자 하는 경우에는 더욱 중요하게 검토되어야 하겠다.

주요어 : 궤간가변, 차축, 차축강도, Gauge changeable wheel-set, Gauge variable wheel-set

1. 서론

본 연구에서는 궤간가변용 차축에 대한 강도를 계산하고 평가하였다. 강도 계산은 폐기된 UIC 515-3을 대체하는 EN 13103-1:2017을 적용하였다. 차축의 형상은 표준궤(1435 mm)와 광궤(1520 mm)를 운행하기 위한 궤간가변 메커니즘의 기본적인 설계인자에 의해 결정되는 설계 경계조건 내에서 결정하였다. 이는 궤간가변용 차축의 강도평가 모델을 제시하고 향후 상세한 연구/개발 진행 시 완성도를 높여 활용하기 위함이며, 또한 본 연구를 통해 운축의 한정적인 Envelope이 궤간가변용 특수 차륜을 포함한 궤간가변 장치와 운축 구성품(구동장치 혹은 제동장치)와의 구성이 가능한 수준인지, 그 구성 안에서 차축의 강도가 충분한 지를 검토하기 위함이다.

2. 본론

2.1 궤간가변용 차축 강도 계산

2.1.1 궤간가변운축 계산모델 선정

국내외를 통틀어 현재 상용운행 중인 궤간가변운축(시스템)은 스페인의 Talgo-RD와 BRAVA, 폴란드의 POLSUW, 스위스의 Prose 가 대표적이며, 독일의 DBAG-Rafil, 한국의 철도기술연구원, 일본의 개발품은 상용화 전으로, 개발완료/시험 중 상태이다.

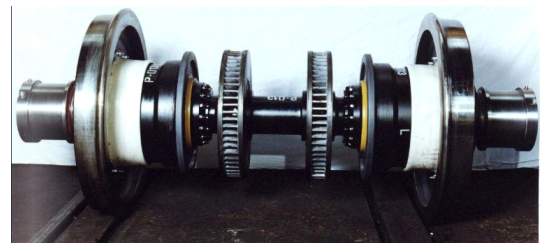


Fig. 1 폴란드 POLSUW(궤간가변타입 참고)

계산을 수행한 차축 모델은 상용운행 중인 시스템 중에서 POLSUW를 기초로 하였다. 운축상태로 기존 차량에 적용 가능하며, 차축에서 궤간가변 장치가 차지하는 영역 이외의 부위에 제동 디스크 설치 및 구동장치 설치를 고려할 수 있는 설계 확장

[†] 교신저자: 현대로템 주행장치개발팀
(csy@hundai-rottem.co.kr)

* 현대로템

가능성을 갖고 있다.

2.1.2 차축 강도계산 모델

궤간가변용 차축 계산 모델은 차축 베어링 설치부위(A)와 차륜의 설치 부위(B) 그리고 궤간가변장치 압입 부위(C)를 기본으로 갖는 형상을 기본으로 하며, 다음의 사항들을 함께 고려하여 계산 모델을 생성하였다.

- 기존 차량(대차)과 호환 가능한 수준의 기하학적 치수 제한
- 궤간 변환을 위한 차축 이동거리
- 통용되는 차축베어링 치수
- 제동디스크 및 구동장치 크기
- EN 13103-1의 차축형상 Recommendation

다음 그림(Fig.2)은 위에서 언급한 사항을 고려한 차축 모델과 표면의 기능으로 구분한 부위 표시(A,B,C,D)이다.

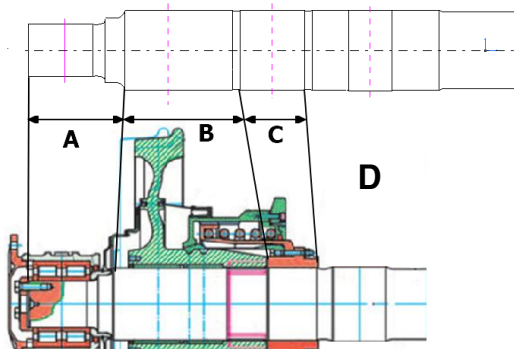


Fig. 2 차축 강도계산 모델(위),
참고 궤간가변윤축: SUW 2000(아래)

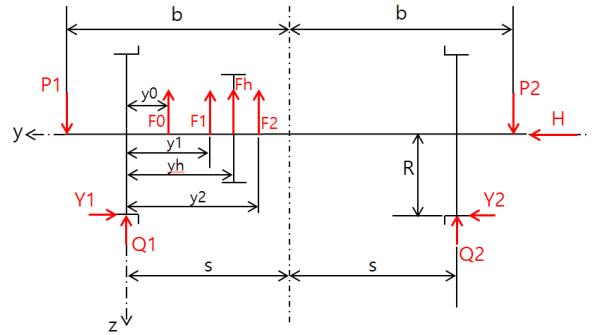
일반적인 차축의 구성에 궤간가변장치를 압입하기 위한 부위가 추가된 형상이며 C 안쪽으로 구동장치 또는 제동디스크 설치 공간을 검토할 수 있다.

2.1.3 차축 강도계산

Fig.2의 형상을 기반으로 하여 강도계산을 수행하였다. D공간에 구동장치가 배치된 것으로 가정하였고, 재질은 EA4T를 적용하였다.

계산은 서두에 언급한 EN 13103-1:2017에 의거하여 수행하였으며, 일반적인 계산의 입력조건에 궤간가변장치에 의한 형상조건, 하중조건을 추가로 고려한다. 그것은 하기

자유 물체도에서 F_0 , y_0 에 해당되며 궤간의 변화에 따라 y 와 s 도 표준궤(1435 mm), 광궤(1520 mm) 에 해당되는 값으로 2가지 경우를 고려하였다.



(x:차량 주행방향, y:차축중심선)
Fig.3 차축계산 기본하중 자유물체도

기호의 의미는 다음과 같다

b : 차축베어링의 하중 지지점

s : 차륜의 하중 지지점

(Wheel rolling circle distance)

R : 차륜 반경

y_0 : 궤간가변장치 하중 작용점

y_1, y_2 : 구동장치 베어링 하중 작용점

y_h : 구동기어 하중 작용점

F_0 : 궤간가변장치 하중

F_h : 구동기어 하중

F_1, F_2 : 구동장치 베어링 하중

각 하중의 계산은 EN 13103-1:2017에 제시된 일반적인 차축에 대한 하중 계산식을 그대로 적용하되, 진술한 바와 같이 일반적인 윤축에 대비하여 궤간가변장치로 인해 추가되는 하중조건(궤간가변장치 하중 작용점, 차륜으로 전달되는 회전토크 등)을 차량 운행조건에 따른 CASE별로 고려하여 계산하였다.

Table 1 차축 하중 CASE

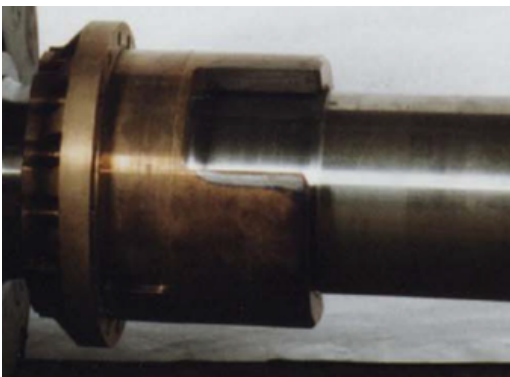
CASE	설명
CASE 1	정지상태에서 견인을 시작하는 순간
CASE 2	Short circuit ¹⁾ moment 발생 순간
CASE 3	마찰제동의 경우

¹⁾ 전기오류로 인한 일시적인 견인전동기 회전모멘트 과다 발생 현상

Table 2 CASE 별 입력 Data

정의	CASE 1	CASE 2	CASE 3
공통	P1, P2, Y1, Y2, Q1, Q2, H, F0, F1, F2, F3		
비틀림 토크	M'y1	M'y2	M'y3
축당 견인력 (At wheel/rail contact)	Mh	-	-
Short circuit 토크	-	Ms	-
견인 토크에 의한 수직하중 (구동기어상)	Fv	Fv	-
견인 토크에 의한 x 방향하중 (구동기어상)	Fh	Fh	-
견인 토크에 의한 구동장치 베어링 수직하중(차축상)	Rvl	Rvl	-
견인 토크에 의한 구동장치 베어링 X 방향하중(차축상)	Rhl	Rhl	-
견인 토크에 의한 수직하중 (구동장치 베어링상)	Fxvl	Fxvl	-
견인 토크에 의한 수직하중 (차축 베어링시트상)	Rxv	Rxv	
궤간가변장치&차륜 키홈 ²⁾ 접촉력	Fch	Fch	Fch
마찰제동 모멘트	-	-	Mb
제동 마찰력	-	-	Fb
축당 제동력	-	-	Fbk

²⁾ 차축에 압입된 궤간가변장치의 부품이 차륜을 회전시키기 위한 키홈 구조



공통으로 분류한 하중은 EN13103-1:2017 의 Table 3 및 CASE1(견인시작)의 경우 Table 6에 따라 계산하여 사용하였고, 차축에 발생하는 나머지 하중의 계산은 다음과 같다.

- Mx: 차량하중에 의한 x축 굽힘 모멘트
(b-s부위) $M_x = P1 \cdot y$
(s부위) $M_x = P1 \cdot y - Q1(y-b+s) + Y1 \cdot R - \sum_i Fi(y-b+s-y_i)$

- M'x: 견인/제동에 의한 x축 굽힘 모멘트
(b-s+y0부위) $M'_x = Rxv \cdot y$
(y1-y0) $M'_x = Rxv \cdot y - Fch(y-b+s-y0)$
(yh-y1) $M'_x = Rxv \cdot y - Fch(y-b+s-y0) - Fxvl(y-b+s-y1) + Rvl(y-b+s-y1)$
(y2-yh) $M'_x = Rxv \cdot y - Fch(y-b+s-y0) - Fxvl(y-b+s-y1) + Rvl(y-b+s-y1) - Fv(y-b+s-yh)$

- M'y: 견인/제동에 의한 y축 전단 모멘트
(b-s+y0부위) $M'_y = 0$
(yh-y0부위) $M'_y = Mh/2 + Fch \cdot Rc$
[여기서, Rc: 차축중심~접촉점 반경 거리]
(s-yh부위) $M'_y = -Mh/2 - Fch \cdot Rc$

- M'z: 견인/제동에 의한 z축 굽힘 모멘트
(b-s부위) $M'_z = Mh \cdot y / 2R$
(y0부위) $M'_z = Mh(b-s) / 2R + Fch(y-b+s-y0)$
(yh-y1부위)
 $M'_z = Mh(b-s) / 2R + Fch(y-b+s-y0) + Rhl(y-b+s-y1)$
(y2-yh부위)
 $M'_z = Mh(b-s) / 2R + Fch(y-b+s-y0) + Rhl(y-b+s-y1) - Fh(y-b+s-yh)$

CASE 2의 경우에는 차축 단면의 회전방향에 해당하는 성분은 Short circuit 최대값(Ms)를 사용하며, CASE 3에는 제동 시 발생하는 힘의 크기와 위치를 대입하여 위의 과정과 마찬가지로 계산한다.

2.1.4 차축 강도계산 결과

이상의 계산식으로 Fig.4와 같이 차축 위치별 차축직경 등의 형상정보에 대한 계산결과를 Fig.5,6으로 확인할 수 있다.

다만, 차륜 미끄럼 부위에 대하여 별도의 추가 연구를 통해 허용응력기준의 정립이 필요하다.

3. 결론

레간가변용 차축에 공통적으로 필요한 형상의 차축 계산 모델로 강도를 검토하였다. 상용 철도차량 제작 시 설계에 활용되는 차축 강도검토 기술기준(EN13103-1:2017)을 적용하였고, 구동장치와 레간가변장치, 차륜, 베어링 등 필수 윤축구성요소를 설계 실현 가능한 수준에서 배치한 차축 형상 및 하중 경계조건을 고려하였으며, 축중 22ton의 수준에서 일부 가정을 포함, 실제 운행 중인 차량의 수치를 참고하여 입력 data 값을 적용한 계산을 수행하였다. 차량 운행 시 발생 가능한 견인/제동 CASE로 구분하여 레간가변용 차축의 강도를 계산하는 방법을 제시하였고, CASE별, 표준케&광케 등 레간 종류의 구분에 따른 결과를 확인할 수 있다.

향후 레간가변 시 차륜이 미끄러지는 차축면에 대한 허용응력기준의 정립 및 레간가변 메커니즘 설계, 윤축 조립체 구성 등의 상세설계를 통해 정합성 및 완성도를 향상하면 차축 설계 시에 본 연구결과가 구체적으로 활용 가능할 것이다.

참고문헌

- [1] Ryszard Maria Suwalski, SUW 2000, A system for automatic gauge changing of wheel-set wheels in freight wagons and passenger coaches, PKP CARGO S.A.
- [2] EN13103-1:2017, Railway applications. Wheelsets and bogies. Design method for axles with external journals

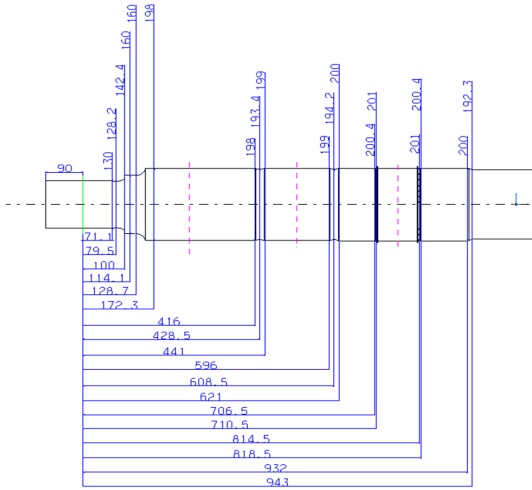


Fig. 4 강도평가 차축 형상 및 치수

각 차축 단면은 EN 13103-1에서 정의한 대로 해당되는 응력집중계수 (K)와 영역 (Zone)의 구분에 따른 최대허용응력 기준을 적용하여 안전계수를 확인하고, 강도의 적정성을 판정하였다.

영역(Zone)구분 시에 특별히, 레간변환 시 차륜이 미끄러지는 B부위는 베어링시트 구름면과 같은 Zone 2로 분류하여 일반 차축면 대비 악조건에서 평가되도록 하였다.

section	y	d	d'	D	r	r/d	D/d	A	B	K	zone	Mx	M'y	M'z	M'y	MR	σ	σmax	s
1	71.1	130	0	-	-	-	-	-	-	1.00	2	7.79	0.88	0.57	0	8.68	40.2	87	2.162
2	79.5	128	0	230	40	0.312	2	0.073	2.083	1.15	1	8.71	0.98	0.63	0	9.71	54	145	2.684
3	100	142	0	230	8	0.056	2	0.474	1.857	1.88	1	10.95	1.23	0.80	0	12.21	81.0	145	1.790
4	114	160	0	265	25	0.156	2	0.191	2.019	1.39	1	12.49	1.41	0.91	0	13.93	48.0	145	3.019
5	128	160	0	-	-	-	-	-	-	1.00	2	14.09	1.59	2.29	3.43	16.21	40.3	87	2.158
차륜 윤곽이입(6)	172	198	0	-	-	-	-	-	-	1.00	2	18.87	2.13	2.29	3.43	21.39	28.1	87	3.099
차륜 중심																			
7	416	198	0	258	21	0.106	1	0.153	2.539	1.39	2	39.91	5.13	2.29	3.43	45.23	82.4	87	1.056
8	428	193	0	258	21	0.109	1	0.163	2.450	1.40	2	39.91	5.29	2.29	3.43	45.38	89.4	87	0.974
9	441	199	0	260	21	0.106	1	0.156	2.522	1.39	2	39.90	5.44	2.29	3.43	45.52	81.9	87	1.062
가변장치																			
10	596	199	0	265	20.3	0.102	1.333	0.174	2.410	1.42	2	39.78	7.35	2.29	3.43	47.31	86.8	87	1.002
11	609	194	0	259	20.3	0.105	1.333	0.169	2.426	1.41	2	39.77	7.51	2.29	3.43	47.45	83.1	87	0.936
12	621	200	0	267	20.3	0.102	1.333	0.175	2.406	1.42	2	39.75	7.66	2.29	3.43	47.59	86.1	87	1.010
기어하우징(13)																			
13	707	200	0	265	25.3	0.126	1.322	0.132	2.610	1.34	2	39.70	8.71	2.29	3.43	48.59	82.7	87	1.052
14	711	201	0	225	-	-	-	-	-	1.00	2	39.69	8.76	2.29	3.43	48.63	61.0	87	1.142
차축기어 중심																			
15	815	201	0	225	-	-	-	-	-	1.00	2	39.45	10.05	2.29	3.43	49.66	62.3	87	1.397
16	819	200	0	265	25.3	0.126	1.322	0.132	2.610	1.34	2	39.44	10.10	2.29	3.43	49.70	84.6	87	1.029
하우징(17)																			
17	932	200	0	245	16	0.080	1	0.159	2.614	1.42	2	39.02	11.50	2.29	3.43	50.68	91.4	87	0.953
18	943	192	0	-	-	-	-	-	-	1.00	2	38.98	11.63	2.29	3.43	50.77	72.7	87	1.196

Fig. 5 CASE 1 계산 결과(표준케)

section	y	d	d'	D	r	r/d	D/d	A	B	K	zone	Mx	M'y	M'z	M'y	MR	σ	σmax	s
1	71.1	130	0	-	-	-	-	-	-	1.00	2	7.79	0.90	0.57	0	8.71	40.4	87	2.155
2	79.5	128.2	0	230	40	0.312	2	0.073	2.083	1.15	1	8.71	1.01	0.63	0	9.73	54	145	2.676
3	100	142.4	0	230	8	0.056	2	0.474	1.857	1.88	1	10.95	1.27	0.80	0	12.25	81.2	145	1.765
4	114.1	160	0	265	25	0.156	2	0.191	2.019	1.39	1	12.49	1.45	0.91	0	13.97	48.2	145	3.010
5	128.7	160	0	-	-	-	-	-	-	1.00	2	14.09	1.63	1.95	3.43	16.21	40.3	87	2.158
차륜 윤곽이입(6)	172.3	198	0	-	-	-	-	-	-	1.00	2	18.87	2.19	1.95	3.43	21.42	28.1	87	3.095
차륜 중심																			
7	416	198	0	258	21	0.106	1	0.153	2.539	1.39	2	35.26	5.28	1.95	3.43	40.73	74.2	87	1.172
8	428.5	193.4	0	258	21	0.109	1	0.163	2.450	1.40	2	35.25	5.44	1.95	3.43	40.88	80.5	87	1.081
9	441	199	0	260	21	0.106	1	0.156	2.522	1.39	2	35.24	5.60	1.95	3.43	41.03	73.8	87	1.178
가변장치																			
10	596	199	0	265	20	0.102	1.333	0.174	2.410	1.42	2	35.15	7.56	1.95	3.43	42.89	78.7	87	1.106
11	608.5	194.2	0	259	20	0.105	1.333	0.169	2.426	1.41	2	35.13	7.72	1.95	3.43	43.04	84.4	87	1.030
12	621	200	0	267	20	0.102	1.333	0.175	2.406	1.42	2	35.12	7.88	1.95	3.43	43.18	78.1	87	1.114
기어하우징(13)																			
13	706.5	200.4	0	265	25	0.126	1.322	0.132	2.610	1.34	2	35.07	8.97	1.95	3.43	44.22	75.2	87	1.156
14	710.5	201	0	225	-	-	-	-	-	1.00	2	35.07	9.02	1.95	3.43	44.26	55.5	87	1.567
차축기어 중심																			
15	814.5	201	0	225	-	-	-	-	-	1.00	2	34.84	10.34	1.95	3.43	45.34	56.9	87	1.530
16	818.5	200.4	0	265	25	0.126	1.322	0.132	2.610	1.34	2	34.83	10.39	1.95	3.43	45.38	77.2	87	1.127
하우징(17)																			
17	932	200	0	245	16	0.080	1	0.159	2.614	1.42	2	34.42	11.83	1.95	3.43	46.42	83.7	87	1.040
18	943	192.3	0	-	-	-	-	-	-	1.00	2	34.38	11.97	1.95	3.43	46.51	66.6	87	1.306

Fig. 6 CASE 1 계산 결과(광케)