

틸팅차량 완화곡선 증속 주행시 궤도작용력 검토

A Study on the Rail Force of Transition Curve Track to Speed Up of Tilting train

신태형*
Shin, Tae-Hyoung

최정열**
Choi, Jung-Youl

엄기영***
Eum, Ki-Young

박용걸****
Park, Yong-Gul

ABSTRACT

A trial run of locally-developed tilting train has been in process on Chungbuk line since the test vehicle was first produced. For the system stabilization, interface verification among the systems including track, structure, catenary and signaling system, not to mention the rolling stock, is very crucial.

Therefore, in this study, the dynamic rail force of the tilting (Hanvit 200), high-speed (KTX) and general (Mugunghwa) vehicle caused by driving in transition curve track was measured. And, it compared the tilting response with the other by using the measured wheel load data in transition curve track, and then evaluated probability the range of wheel load fluctuation for the variable dynamic vertical and lateral wheel load.

As a result, a range of wheel load by occurred a change of cant from the high-speed and general vehicle which had fixed bogie structure was distributed throughout small deviation ($\Delta 8\sim 13\text{kN}$). Otherwise, in case of the tilting train which was consisted of the pendulum bogie structure was distributed wide range about large deviation ($\Delta 25\sim 28\text{kN}$) by changed of cant.

key words : Tilting train (틸팅열차), transition curve (완화곡선)

1. 서 론

한국형 틸팅차량은 기존선 속도향상을 위해 개발되었고 기존 차량에 비해 승차감의 저하 없이 곡선부를 더욱 빠르게 주행할 수 있어 전체 운행시간을 단축시킬 수 있는 장점이 있다.

틸팅차량은 현재 시제차량 제작을 마치고, 충북선을 시작으로 시운전 시험이 단계적으로 진행되고 있으며 틸팅차량의 시스템 안정화를 위해 차량 외에 궤도, 구조물, 전차선, 신호 등 각 시스템 상호간의 인터페이스 검증에 관한 관련분야의 연구가 진행되고 있다. 따라서 본 연구에서는 현장측정을 통해 획득한 틸팅차량(한빛200호)과 고속차량(KTX) 및 일반차량(무궁화)의 완화곡선구간 주행시 발생하는 동적윤증 측정 데이터를 이용하여 캔트제감구간에서 틸팅차량과 기존 차량의 주행패턴을 비교하고 윤증변동량의 확실적인 검토를 하였다.

* 학생회원, 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과, 석사과정
E-mail : sss0930@nate.com
TEL : (02)978-6575 FAX : (02)978-6575

** 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원 뉴레일연구소, 연구원, 공학석사

*** 정회원, 한국철도기술연구원, 책임연구원, 공학박사

**** 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과, 교수, 공학박사

2. 이론적 배경[5]

2.1 완화곡선의 개념

곡선부 열차 주행시 탈선을 막기 위해 원심력과 차량 중량의 합력이 궤간내에 들어가도록 캔트를 설정한다. 곡선과 직선의 접속개소에서는 캔트를 연속적으로 체감시키는 완화곡선 구간이 필요하다. 캔트의 체감은 차량의 3점지지에 의한 탈선을 막기 위해 충분히 완만하여야 한다. 완화곡선에 대한 기본적인 개념도는 Fig. 1과 같다. 완화곡선의 역할은 곡률, 캔트 및 슬랙을 체감하여 직선과 원곡선을 원활하게 연결하는 것이므로 완화곡선의 길이는 주행하는 열차의 속도와 캔트에 따라 충분히 확보해야만 한다.

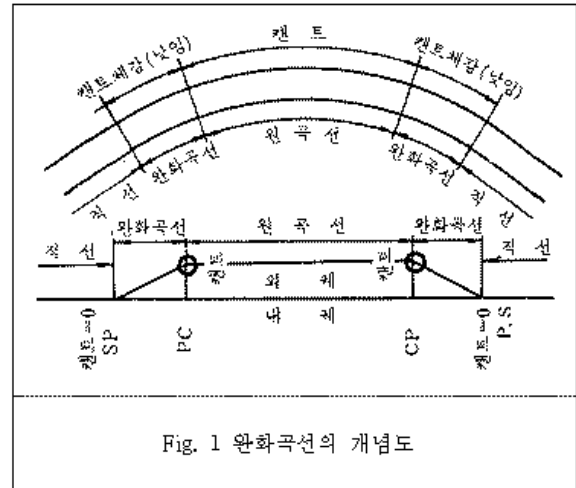


Fig. 1 완화곡선의 개념도

완화곡선의 길이는 차량에 3점지지 현상이 일어났을 때 차륜플랜지의 최소 높이(25mm)까지 부상하여도 탈선하지 않는 구배의 캔트 체감 거리 이어야 하고, 열차 주행시 속도에 따라 1초에 1/4"의 높이로 변화하기 때문에 이에 따른 충분한 완화곡선

Table. 1 국철에서의 완화곡선 삽입과 길이

선로 등급	완화곡선 삽입곡선의 반경(m)	완화곡선 길이
고속선	-	2,500 · C
1급선	5,000	1,700 · C
2급선	3,000	1,300 · C
3급선	2,000	1,000 · C
4급선	800	600 · C

길이를 정해야 한다. 캔트량의 급변화로 인해 열차 통과시 단위시간당 경사 정도와 열차가 받는 원심가속도의 변화 등으로 승차감이 나쁘지 않는 정도의 길이를 정하여야 한다. 현재 국철에서 완화곡선의 삽입과 길이 제한은 Table. 1과 같다.

2.2 곡선통과시 횡압의 발생원인과 저감대책

열차의 곡선통과시 발생하는 횡압의 주된 원인은 곡선부 캔트의 과부족에 기인하여 발생된 초과 원심력과 곡선통과시 대차나 차축이 궤도에 안내되어 방향을 바꿀 때에 차륜과 레일간 마찰력에 기인하여 발생하는 곡선방향 횡압을 비롯하여, 레도틀림으로 인한 차체와 대차의 동요나 사행동 등에 수반되는 차량동요 등이 있다. 또한 레일 이음매나 분기기, 신축이음매 등을 통과할 때의 충격에 수반하여 발생하는 충격적인 횡압 등도 있다.

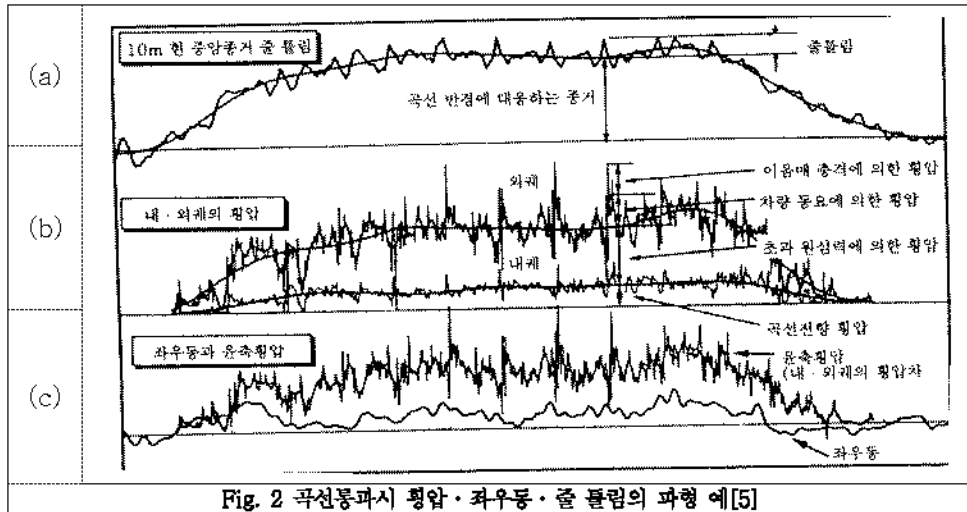


Fig. 2 곡선 통과시 횡압·좌우동·줄 틀림의 파형 예[5]

곡선부 발생 횡압 저감대책으로는 크게 차량측과 궤도측에서의 2가지 측면을 고려할 수 있다. 차량측의 횡압 저감대책으로는 차체의 경량화, 축거의 단축 및 차량의 좌우방향 진동특성 향상이 있으며, 궤도측의 횡압 저감대책으로는 곡선부 선형 개량, 궤도정비 상태의 개선, 레일의 장대화에 의한 이음매부의 제거, 내레측 레일 두부상면에 대한 살수, 기름칠(도유) 및 내외레 비대칭 레일단면의 채용 등의 방법이 있다.

2.3 측정 윤중 및 횡압의 판정기준[3]

현행 윤중과 횡압 측정치의 판정은 일본 신간선 고속열차의 측정기준을 준용하고 있으며 이 기준은 신간선 시험선에서의 증속시험시 각종 시험궤도의 성능시험 결과를 바탕으로 제정되었다. 이 기준에서 표준치는 설계 개념으로 극한한계치의 의미를 가지고 있으며 참고치는 측정결과를 바탕으로 측정결과가 통상 이 범위 내에 있는 값을 말하며 평균치의 의미를 가지고 있다. 또한 한국철도기술연구원에서도 고속선 KTX 증속시 주행 안전성 판단을 위해 사용한 독일기준과도 비교하였다.

Table. 2 신간선 및 독일의 궤도작용력 판정 기준

구분		신간선(일본)		KTX증속시 기준(독일)
		표준치	참고치	
윤중 (kN)	최대치	300	200	200
	최소치	25	35	
횡압(kN)		68	40	40

3. 현장측정

3.1 측정대상의 차량 현황

측정대상 차량은 크게 틸팅차량(한빛200호), 고속차량(KTX) 및 일반차량(무궁화)으로 구분되며, 열차별 완화곡선구간 주행에 따른 궤도작용력을 평가하고자 하였다. 측정구간을 통과하는 차량의 제원은 Table. 3과 같다.

Table. 3 열차별 설계하중 비교

열차종류		설계하중(kN)	윤중(kN)
무궁화	동력차	220	110
	객차	110	55
KTX		170	85
TTX(한빛200호)		150	75

3.2 측정구간 제원

완화곡선구간에서 틸팅차량 주행에 따른 궤도좌용력을 검토하기 위해 시운전 구간중 곡선반경이 600m이고 완화곡선상의 캔트변화가 뚜렷한 개소에서 윤중과 횡압을 측정하였다. Fig. 3은 완화곡선 구간에서 캔트체감에 따른 측정 위치를 나타내었다.

Table. 4는 측정구간의 궤도현황을 나타낸 것이며, 완화곡선부 주행전경은 Fig. 4와 같다.

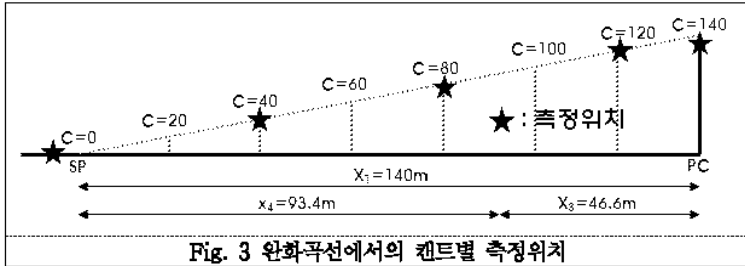
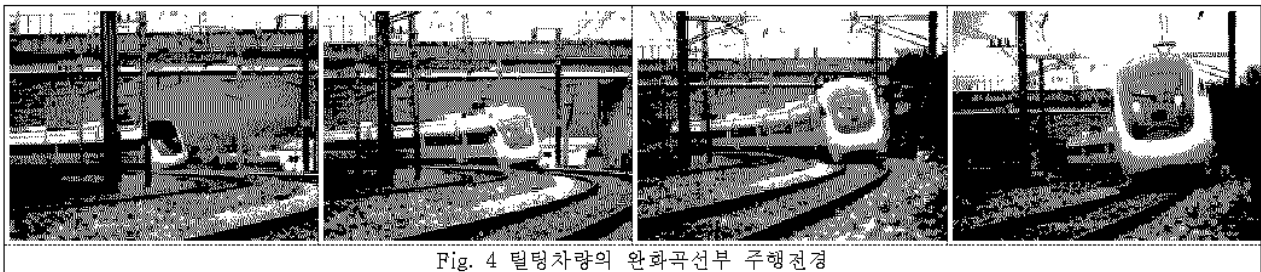


Table. 4 측정구간의 제원

구분	제원
선로등급	3급선
원곡선반경(R)	600m
완화곡선장	140m (1,000 · C)
캔트(C)	0, 40, 80, 120, 140mm
침목	PCT
체결구	e-clip



3.3 측정시스템 구축

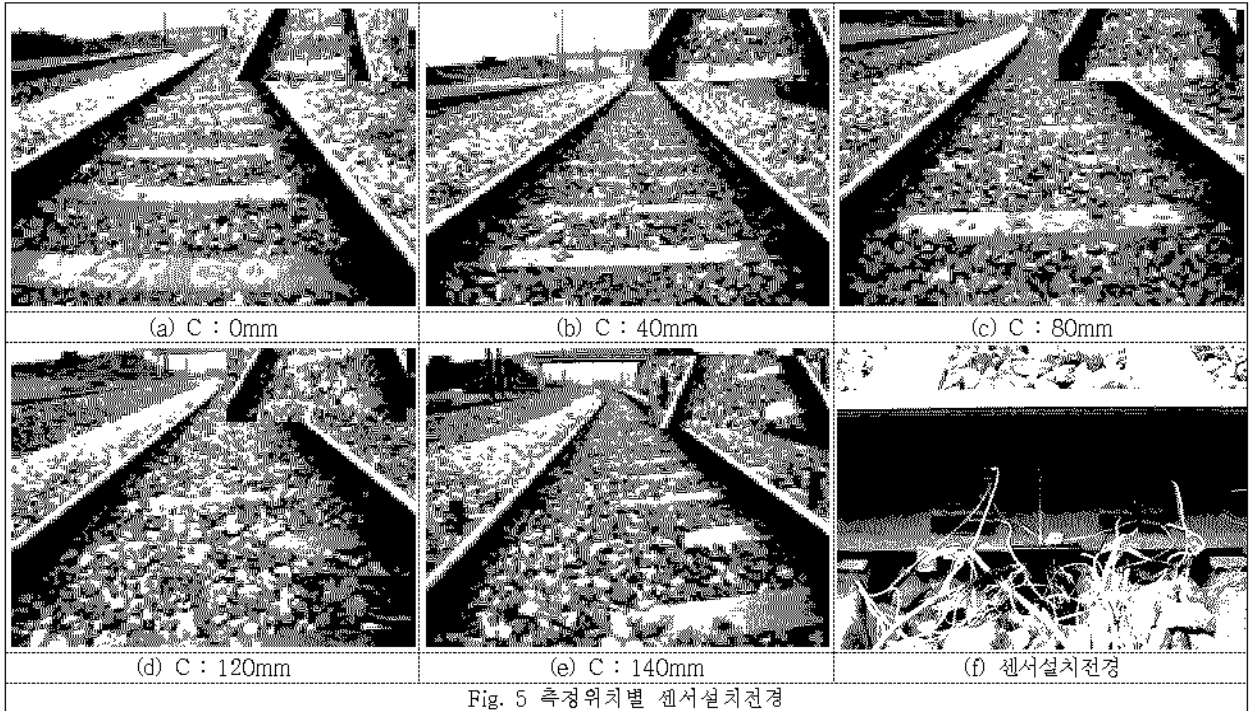
측정시 열차는 고속으로 주행하므로 실제 발생한 응답치를 왜곡하거나 데이터 손실을 방지하고자 충분한 데이터 수집율(Sampling Rate)을 설정하여 측정을 실시하였다. 또한 발생한 윤중 이외의 노이즈 성분들은 주파수 분석을 통해 디지털 필터로 로우패스 필터링과 하이패스 필터링 처리를 함으로써 데이터의 신뢰성을 높였다. Table. 5는 계측에 사용된 주요장비의 사양이다.

Table. 5 주요 계측장비 사양

장비명	용도	모델명	주요 사양
Data Acquisition System	신호증폭 및 센서구동	MGC-Plus	•Sampling rate : 2kHz •32-Channel
Strain Gauge	윤중 및 횡압측정	FCA-5-11-1L	•Resistance : 120 Ω

현장측정시스템은 Fig. 5와 같이 완화곡선구간내 총 5개소에서의 캔트체감에 따른 윤중과 횡압변형율의 변화를 동시에 측정할 수 있도록 시스템을 구성하였으며, 대상선로에서 측정된 윤중과 횡압은 증폭기를 통해 증폭되어 MGC-PLUS(Data Acquisition System)에 저장한 후, 오리진TM 프로그램을 사용하여 분석하였다.

캔트변화에 따른 측정위치별 센서설치 전경은 Fig. 5와 같다.



3.4 윤중 측정

윤중은 레일과의 접촉면을 통하여 차륜에서 궤도로 전해지는 힘으로서 차량의 중력에 기인하는 힘(정적 윤중)과 주행에 기인하는 동적인 변동분을 더한 것(동적 윤중)이며, 레일의 수직방향으로 작용하는 힘이다.

윤중게이지 설치위치는 측정구간의 내, 외측 레일에 Fig. 6과 같이 침목간 중심에서 각각 100mm 떨어진 위치에 레일복부의 중립축에 45°의 각도를 가지고 8방향으로 결선된 윤중게이지를 부착하여 측정한다. 계측시 열차는 고속으로 주행하므로 실제 발생한 윤중을 왜곡하거나 데이터의 손실이 발생되지 않도록 충분한 수집율(Sampling Rate)을 설정하였다.

3.5 횡압 측정

횡압게이지 부착위치는 곡선구간을 주행하는 열차에 의해 레일 및 궤도에 발생하는 동적횡압을 파악하기 위해 곡선구간 내, 외측 레일에 변형률 게이지를 부착하여 측정하였다. 레일에 발생하는 횡압을 측정하기 위한 횡압게이지 설치전경 및 부착도는 Fig. 6과 같다.

횡압측정은 Fig. 6과 같이 침목간 중심에서 각 100mm 떨어진 위치의 레일 플랜지 내, 외측에 변형률 게이지를 부착하고 결선면 레일 종방향 힘의 영향을 배제시켜 전단변형률로써 측정할 수 있다. 그 위치는 레일복부와 플랜지 사이의 우각부에는 변형률 게이지가 들어가지 않으므로 될 수 있는 한 복부에 가깝게 부착한다. 윤중게이지는 레일 복부상의 중립축에 부착이 가능하기 때문에 완전한 전단변형 측정이 될 수 있지만, 횡압게이지는 중립축에 부착이 곤란하기 때문에 이와 같이 배치한다.

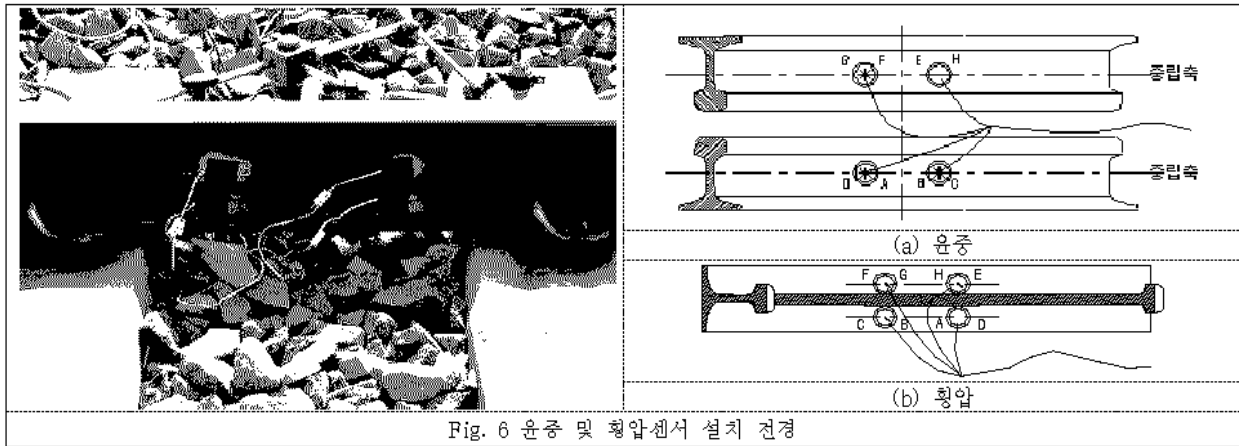


Fig. 6 운중 및 횡압센서 설치 전경

4. 측정결과 및 분석

4.1 열차종별 외측 운중 및 횡압 검토

열차종별 캔트변화에 따른 내, 외측 최대 운중 및 횡압을 비교하여 Table. 6에 나타내었으며, 열차 주행시 발생하는 열차종별 외측 운중, 횡압 파형의 예(C=80mm)는 Fig. 7과 같다.

Table. 6 열차종별 캔트변화에 따른 내, 외측 최대 운중, 횡압 비교

구분			C : 0	C : 40	C : 80	C : 120	C : 140
무궁화 객차 (88km/h)	운중	내측(kN)	143	133	141	146	138
		외측(kN)	145	142	150	154	146
	횡압	내측(kN)	12(-6)	10(-5)	25(-8)	40(-7)	49(-8)
		외측(kN)	20	9(-8)	21(-13)	37(-13)	45(-14)
KTX (107km/h)	운중	내측(kN)	113	98	110	107	94
		외측(kN)	115	130	126	142	133
	횡압	내측(kN)	12(-8)	15(-16)	17(-19)	47(-20)	35(-17)
		외측(kN)	29(-25)	18(-20)	19(-16)	36(-16)	25(-7)
TTX (128km/h)	운중	내측(kN)	110	73	101	91	89
		외측(kN)	110	106	118	123	131
	횡압	내측(kN)	13	8(-4)	15	13(-5)	16(-7)
		외측(kN)	15	11(-7)	13(-9)	18(-12)	28(-11)
TTX (129km/h)	운중	내측(kN)	110	75	101	88	82
		외측(kN)	110	106	123	124	124
	횡압	내측(kN)	10	8	14	13(-4)	16(-7)
		외측(kN)	15	10	14(-8)	19(-12)	26(-14)

열차종별 곡선통과시 캔트변화에 따른 내, 외측 횡압 측정결과, Fig. 2.(b)[5]와 같이 무궁화 및 KTX의 경우 캔트량 40mm 이상에서 내, 외측 횡압의 (+), (-) 방향 성분이 함께 발생하는 것으로 나타났다. 이는 기존 연구결과에서 나타났듯이 차량의 동요 및 초과원심력에 의한 내, 외측 횡압의 증가분으로써 틸팅차량의 경우 차체의 틸팅 작용에 의해 곡선주행시 차량의 동요 및 초과원심력에 의한 효과가 완화되어 (+), (-)횡압의 증가량이 비교적 작게 나타난 것으로 판단된다.

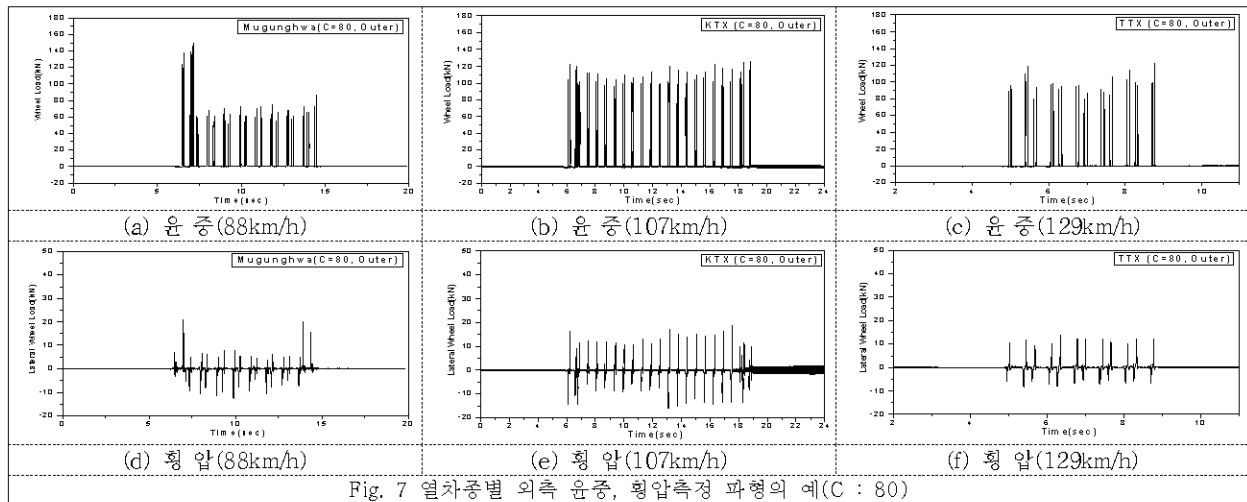


Fig. 7 열차종별 외측 운중, 횡압측정 파형의 예(C : 80)

4.2 열차종별 하중발생 확률분포 검토

열차 주행시 발생하는 열차종별 동적 하중발생 확률분포는 Fig. 8과 같다.

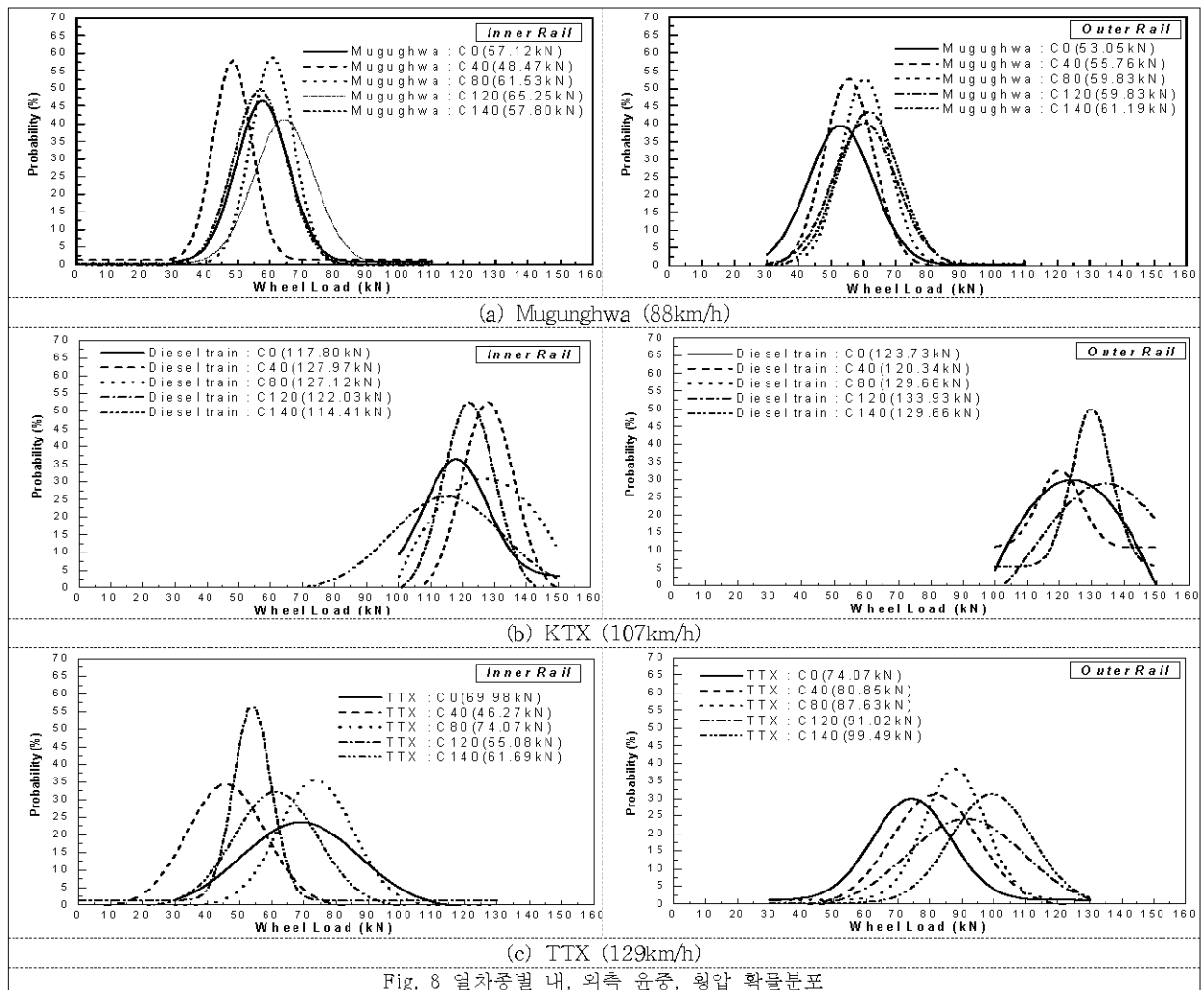


Fig. 8 열차종별 내, 외측 운중, 횡압 확률분포

틸팅효과가 없는 고정식 대차구조의 경우 일반적으로 캔트체감에 따른 운중발생의 분포범위가 일정범위 내에서 작은 편차로 나타났으나 틸팅차량의 경우, 차체의 틸팅효과로 인한 동적운중의 변동으로 인해 보다 큰 범위로 분포하는 것을 확인할 수 있다.

4.3 캔트별 하중발생 확률분포 검토

캔트변화에 따른 열차종별 하중발생 확률분포는 Fig. 10, Table. 7과 같다.

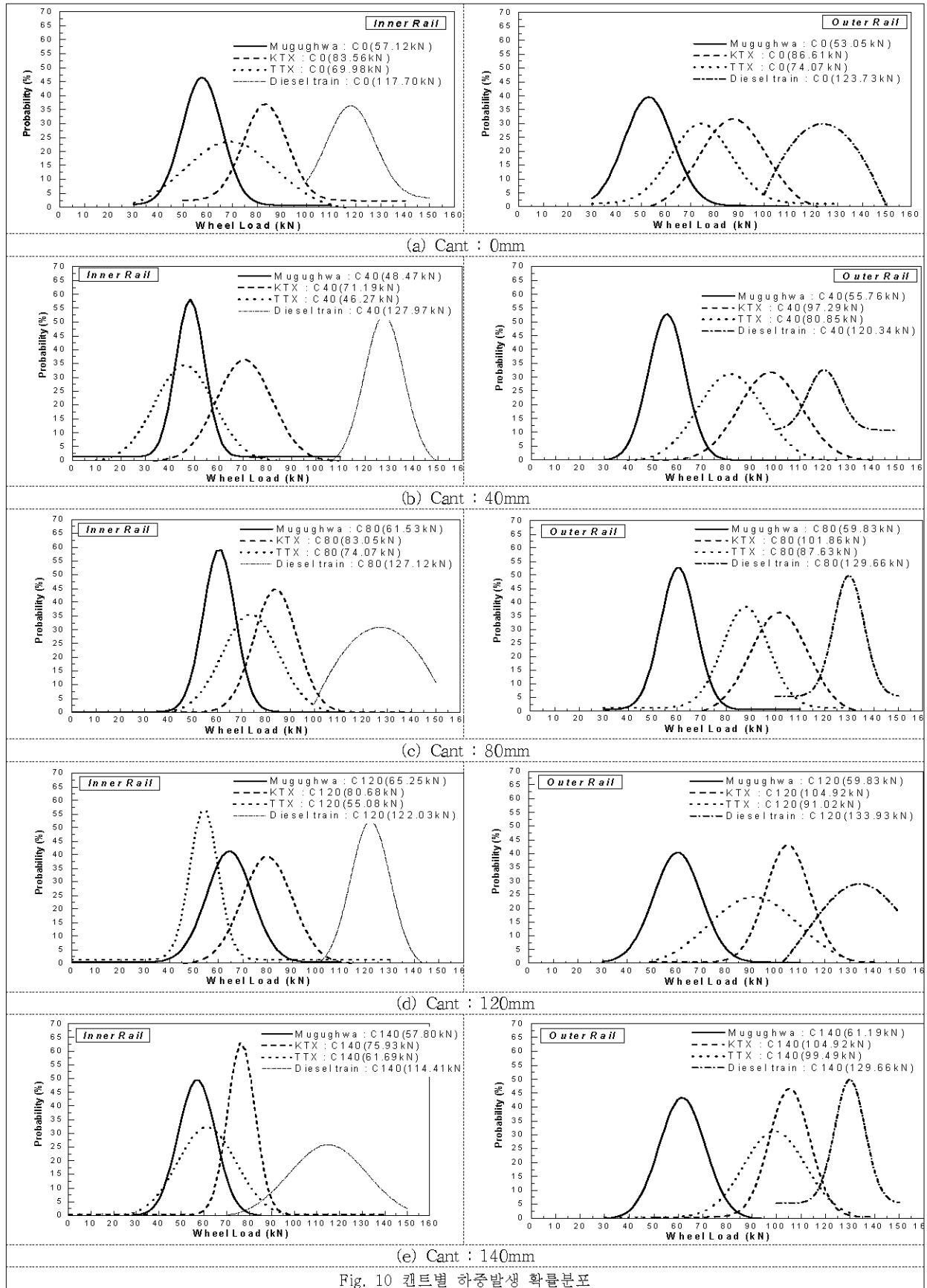


Fig. 10 캔트별 하중발생 확률분포

Table. 7 열차종별 캔트변화에 따른 하중발생 비교

구분		C : 0	C : 40	C : 80	C : 120	C : 140	설계윤중, 축중
무궁화 (88km/h)	내측윤중(kN)	57.12	48.47	61.53	65.25	57.80	55
	외측윤중(kN)	53.05	55.76	59.83	59.83	61.19	
	축중축중(kN)	110.17	104.23	121.36	125.08	118.99	
KTX (107km/h)	내측윤중(kN)	83.56	71.19	83.05	80.68	75.93	85
	외측윤중(kN)	86.61	97.29	101.86	104.92	104.92	
	축중축중(kN)	170.17	168.48	184.91	185.60	180.85	
TTX (129km/h)	내측윤중(kN)	69.98	46.27	74.07	55.08	61.69	75
	외측윤중(kN)	74.07	80.85	87.63	91.02	99.49	
	축중축중(kN)	144.05	127.12	161.70	146.10	161.18	
Diesel train (88km/h)	내측윤중(kN)	117.70	127.97	127.12	122.03	114.41	110
	외측윤중(kN)	123.73	120.34	129.66	133.93	129.66	
	축중축중(kN)	241.43	248.31	256.78	255.96	244.07	

열차종별 직선부(C=0mm) 주행시 내, 외측윤중이 유사하게 나타나지만 캔트가 증가함에 따라 다소 증가폭이 커지는 경향이 나타났다. 틸팅차량의 경우, 캔트 변화에 따라 설계축중과의 편차가 기존 일반차량보다 다소 크게 나타났다.

따라서 현행 틸팅차량의 궤도부담력 평가시 신간센 및 독일의 고속선 기준에 적용하여 비교하는 것은 틸팅차량을 일반 고정식 대차에 비교하는 것으로 비합리적이며 틸팅차량의 하중특성에 적합한 고유기준을 재정립 하는 것이 바람직하다고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 틸팅차량의 완화곡선 주행시 기존선 궤도에 미치는 작용력을 평가하고자 고속차량(KTX) 및 일반차량(무궁화)의 측정결과와 비교, 검토 하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 열차종별 곡선통과시 캔트변화에 따른 내, 외측 횡압측정결과, 틸팅차량의 경우 차체의 틸팅작용에 의해 곡선통과시 차량의 동요 및 초과원심력에 의한 내, 외측측 횡압 증가량이 기존 차량보다 최대 44% 감소하는 것으로 나타났다.

2. 캔트 및 열차종별 하중발생 확률분포 검토결과, 고정식 대차구조를 갖는 기존 차량의 캔트변화에 따른 발생 윤중의 분포범위는 일정 범위내에서 작은 편차($\Delta 8 \sim 13$ kN)로 분포하는 것으로 나타났으나 진자식 대차구조인 틸팅차량의 경우 캔트변화에 따라 차체의 틸팅작용에 따라 비교적 넓은 범위에 큰 편차($\Delta 25 \sim 28$ kN)로 발생 윤중이 분포하는 것으로 나타났다.

3. 따라서 현행 틸팅차량의 동적 윤중에 대한 궤도부담력 평가를 신간센 및 독일의 고속선 기준(고정식 대차 차량, 고속선로기준)과 같은 단일수치와의 비교, 평가보다는 틸팅차량의 하중특성에 적합한 고유기준을 재정립하여 합리적인 평가기법 및 기준을 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

6. 후기

본 연구는 국토해양부의 미래철도기술개발사업의 지원으로 수행하였으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국철도기술연구원, 2000, 기존선의 고속화를 위한 시스템에 관한 연구
2. 신광복 외, 2003, 틸팅 시스템 실용기술 개발,
3. 한국철도기술연구원, 2003, 기존선 속도향상을 위한 선로시스템 개선기술 개발
4. 강기동, 박종방, 나성훈, 김정환, 2000, 고속철도 궤도계측에 관한 연구, 대한토목학회 학술발표회 논문집, PP 435-438,
5. 서사범저, 선로공학, PP 311-313