한국형 틸팅차량 차체구조물의 개발을 위한 개념설계

study on conceptional design of car-body structure for Korean tilting train

문형석 *, 유원희 ***, 최성규****, 엄기영 **, 한성호 **, 이수길 *
Mun, Hyung-Suk * You, Won-Hee *** Choi, Sung-Kyou ****
Eun, Ki-Young ** Han, Seong-Ho ** Lee, Su-Gil *

ABSTRACT

A first evaluation of the possibilities of high speed trains in conventional railway in Korea have been investigated. The radius of curvature was considered the major problem with high-speed trains in Korea. If KNR(Korea National railway) likes to increase the speed, is then whether KNR shall construct straigthen the track or develop a train that can reduce travel time in curves The research concerns structural design of train car-body is to reduce heavy stress concentration. Using 3D solid modeling, Finite Element analysis and shape optimization combined with powerful postprocessing, graphical display and animation to achieve complete and accurate design and performance will be carried out further project.

Main purpose of this project is to provide korean tilting train car body's conceptional design. Based on first year research results, the design of car-body will be performed by train manufacture.

1. 서론

한국에서는 기존선의 속도를 향상하기 위한 가능성에 검토가 이루어 왔다. 철도청은 곡선부 속도향상을 위해서 기존의 곡선 선로를 직선 선로로 바꾸는 공사를 하던지 아니면 곡선부에서 속도를 향상시킬 수 있는 차량을 개발하여야 한다. 틸팅차량은 곡선부를 고속 주행할 수 있는 차량이며 이와 관련된 차체구조물을 개발하는 것이 본 연구의 목적이다.

특히 차체 구조물의 경량화는 차체의 합리적인 구조설계를 기본으로 하게되며, 실제 운행중 차체 각 부위에 작용하는 하중의 크기 및 특성에 대한 축적된 자료를 기본으로 응력집중을 완화시키고 구조 전체적으로 균형있는 외력을 감당하도록 설계하는 것으로서 현재 국내의 철도차량 차체기술은 구조용강이나 스테인레스 차체를 제작할 경우 주어진 구조형상 및 배열조건 하에서 구조체의 경량화를 추구하는 최적 구조설계 기술은 어느 정도 확보되어 있다고 볼 수 있다. 본 논문에 소개되는 차체구조물의 개발을 위한 연구에서는 틸팅차량 특성의 분석을 기초로 한국형 틸팅차량의 개념설계의 제시를 목적으로 한다. 차후 진행될 연구에서는 틸팅 차량의 차체 각 부위별 3차원 모델링을 기초로 최적설계를 위한 해석 작업이 이루어질 예정이다.

* 한국철도기술연구원 주임연구원 ** 한국철도기술연구원 선임연구원
*** 한국철도기술연구원 책임연구원 **** 한국철도기술연구원 수석연구원

1. 틸팅차량 차체 구조물의 재질선정

세계 각국은 도시간의 사람과 물류를 신속하고 원활하게 수송하기 위해 철도차량의 고속화에 박차를 가하고 있으며, 이를 위해 주행장치의 성능 향상 및 차량의 경량화에 경쟁적으로 많은 노력을 기울이고 있다. 그 중에서도 철도차량의 고속화를 위해서 철도차량의 경량화가 가장 중요한 요소로 부각되고 있는데 이는 주행장치의 성능 향상에도 영향을 줄 뿐 아니라 에너지 절약 측면에서도 중요한 요소이기 때문이다.

표 1 강재와 알루미늄 합금의 물리화학적 성질

성질	알루미늄	강재
융점(℃)	660	660x1.6
잠열(cal/g)	93	93x0.7
비열(cal/g℃)	0.22	0.22x0.5
열전도율(cal/cm℃)	0.53	0.53x0.3
탄성계수(10^3kg/mm^2)	6.9	6.9x3
선팽창계수(10^{-6}/℃)	23.8	23.8x0.5
고유저항(μΩcm))	2.65	2.65x4.0
산화피막	Al_2O_3	Fe_2O_3

표 2 외국 틸팅열차 차체의 재질

운영처	열차	차체재질
DB AG(독일)	VT610	알루미늄
	VT611(612)	
	TALGO.P	
FS(이탈리아)	ETR450	알루미늄
	ETR460	
	ETR480	
BV/SJ(스웨덴)	X2000	스테인레스
CFF/FS(스위스/이태리)	ETR470	알루미늄
RENFE(스페인)	TALGO P.	알루미늄
VR(핀란드)	S220	알루미늄
SNCF(프랑스)	TGV-P	스테인레스
	AXIS	-
DB-AG (독일)	ICT-VT	알루미늄
	ICE-T	알루미늄
CD(체코)	S680	알루미늄
CFF/SBB (스위스)	ICN	알루미늄
CP(포르투칼)	Pendoluso	알루미늄
RENFE (스페인)	IC2000	-
	TRD594	알루미늄
	Electro Prototipo	-
SZ(슬로베니아)	SZ-310	-
AMTRAK(미국)	Acela	스테인레스

틸팅열차는 선로의 곡선구간에서 기존 열차보다 고속으로 주행하기 위해 대차를 제외한 차체을 틸팅시키는 열차인데 기존열차와 중량이 동일한 경우 틸팅열차의 속도가 기존 열차보다 더 크기 때문에 선로에 가해지는 원심력이 더 커져서 궤도의 보수유지비가 증가하게 된다. 따라서 틸팅열차가 선로의 곡선구간에서 속도를 크게 할수록 열차의 중량을 가볍게 하여야 한다. 차량의 경량화를 위해서 차체구조물의 재질을 중량대비 강도가 큰 알루미늄 합금을 많이 사용하며, 현재 외국의 틸팅열차 차체 구조물에 사용되고 있는 재질은 표2 에서 보듯이 알루미늄합금을 많이 사용하고 있음을 알 수 있다.

알루미늄 합금을 적용한 차체는 철강재 차체나 스테인레스 강재 차체에 비해 재료비가 비싼 단점이 있지만, 근래 선진 각국에서 실용화를 완료한 대형 압출재를 활용한 차체설계 및 제작기술은 소재의 가공 및 용접에 따른 작업 시수를 절반 이상이나 대폭적으로 절감할 수 있게 되어 인건비의 감소분이 재료비 상승분을 흡수할 수 있으므로 경제적으로도 결코 불리한 것은 아니다.

2. 틸팅차량 차체의 전두부 형상 기본설계(안)

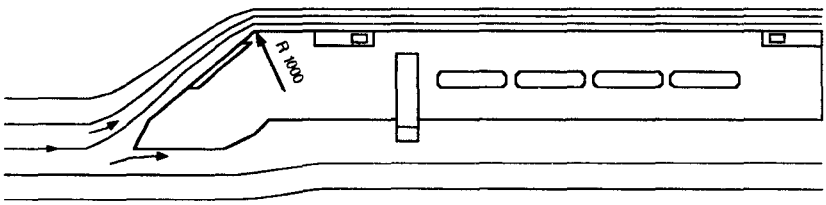

그림 1 차체 전두부 공력해석 도

한국형 기존선 고속 틸팅열차의 외형 형상 주요 설계기준으로는 다음의 두 가지 항목으로 요약할 수 있다. 첫째는 외관이 미려하고 깔끔한 디자인을 통해 공력저항을 가능한 최소화하는 것이고, 둘째는 전면창을 일체 형으로 차량의 미관을 미려하는 것이다. 이런 사항들은 현재 세계 각국에서 운행되고 이 고속전철 및 특급열차의 외부 형상과도 부합한다.

전두부의 경우는 한국적 고유미를 갖춘 미려한 유선형 전두부를 개발 목표로 한다. 전두부 nose 끝단에서 지붕까지 완만한 곡선으로 하고, 이것은 단면적의 변화율이 작을수록 터널에서의 공력저항이 적게 작용토록 하는 것이다.

한국형 기존선 고속 틸팅열차은 전두부 전체 즉, Nose 끝단에서 운전실 Partition까지를 복합재료로 제작한다. 현재 세계적 경향인 단일 구조 전면창으로 할 것이며 이 창은 전두부의 곡면과 일치하는 곡면 형상을 가진 구조로 한다. 동력차 단면 형상의 경우에는 최대한 각을 없앤 곡면형상을 갖게 하기 위해 지붕을 라운딩 처리한다.

특히 해외의 경우 이태리의 Pendolino 차량의 전두부 형상을 많이 참고하여 개념설계(안)

을 제시하게 되었는데 상세한 사양의 결정은 2차년도의 상세설계를 위한 도면 및 해석 작업 시 공력, 충돌 해석을 근거로 제시되어야하며 차량의 미려한 외관을 위한 전두부 곡선 처리 및 색상은 이와 관련한 전문과의 과제참여를 통한 조언과 승객들의 의견도 충분히 수렴하여 결정하여야 할 것이다.

기본치수인 객실에서 전두부 Nose까지의 거리(3700mm), 객실에서 앞쪽 스커트까지의 거리(2800mm), 레일 상면에서 스커트 하면까지의 거리(310mm) 및 전두부의 최대폭(3000mm)을 바탕으로 Nose에서 객실지붕까지의 연결선이 부드러운 유선형의 곡선형태가 되도록하고 재질은 중량이 가볍고 형상구현이 용이한 복합재료를 사용하여 제작한다.

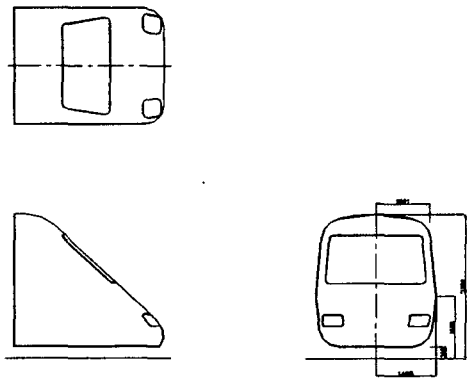

그림 2 차체 전두부 개념설계 (안)

3. 틸팅차량 차체의 단면 형상 기본설계 (안)

- 단면형상 기본 검토

차량이 곡선구간을 주행할 때 선로의 Cant량과 차량의 속도 때문에 차체는 그림과 같이 선로의 바깥쪽으로 변위가 발생한다. 이러한 차체의 변위는 속도가 클 경우 선로의 Cant의 부족에 따른 것과 속도에 의한 원심력에 따른 것이 있으며, 최대의 변위는 차체의 단부에 발생한다. 능동제어를 하는 틸팅차량에서는 위와 같은 변위의 방향과 반대 방향으로 아래의 그림과 같이 차체를 강제로 틸팅시켜서 차량의 승차감을 향상시킨다. 이러한 차체의 강제 틸팅으로 인하여 곡선구간의 안쪽에 있는 차체의 상부 모서리부가 차량의 한계를 벗어나거나 근접할 수 있어 일반 열차보다 모서리부의 곡률을 아래의 그림과 같이 더 크게 해주어야 한다.

국철의 차량한계선 내에 각 차량의 단면도를 그리면 그림 3 과 같고, 8^0만큼 틸팅시키면 아래의 그림들과 같으며 세 차종의 단면도 치수를 비교하면 표 3과 같다. 여기서 틸팅열차의 단면은 기존 선로에서의 운행을 전제로 하고 있기 때문에 기존선로에서 현재 최고속도로 운행을 하고 있고 운행에 문제가 없는 새마을호 열차에 준하여 결정하고, 단, 틸팅열차는 곡선

선로에서 틸팅이되므로 Cant Rail부의 곡선반경과 측골조의 차량 안쪽으로의 기울어진 각도를 더 크게 하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

따라서 한국형 틸팅차량 차체의 단면치수는 차량 한계선 내에서 틸팅된 새마을호의 치수 중 측골조의 경사각만 5^0로 하고 나머지는 동일한 치수로 선정하였다. 이 치수에 따라 한국형 틸팅차량 차체 구조물의 윤곽선을 그리게 되었다.

차 종	새마을호	무궁화	고속전철 (G7)	ETC-T
차체 폭(mm)	3,000	3,200	2,970	3,000
측골조 경사각(°)	4	2.17	2.6	5
차체 높이(mm)	3,700	3693	3,690	3,700
상면높이(mm)	1,100	1,196	1,212	1,100
Cant Rail 3 곡율반경(mm)	750	300	500	750

표 3 차량 단면 치수

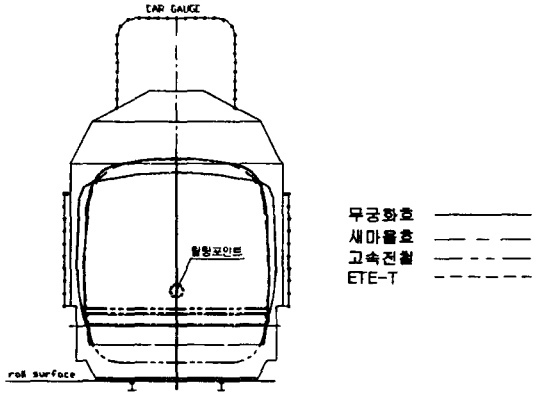

그림 3 차량한계선 내에서의 차량 단면도

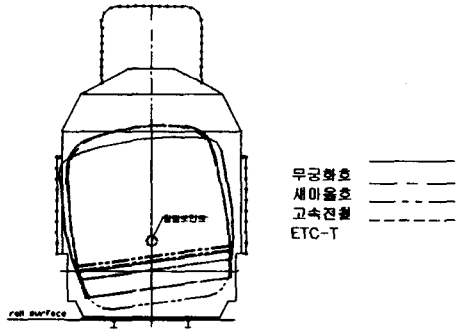

그림 4 차량한계선 내에서 틸팅된 차량 단면도

구분	직선에서	곡선통과
	- 좌우:109mm 이동 - 틸팅: 8도	- 좌우:109mm 이동 - 틸팅: 8도 - 캔트 6도
1안 원형단면 차폭 2,950mm	차량한계 내에 65mm 여유공간	- 확대건축한계 내에 167mm 여유공간 (직선의 차량한계에서 75mm초과, 건축한계 이내)
2안 사각단면 차폭 2,950mm	차량한계 내에 65mm 여유공간	확대건축한계 내에 91mm 여유공간 (직선의 차량한계 151mm초과, 건축한계 76mm 초과)
새마을 객차 차폭 3,000mm	차량 한계내에 17mm 여유공간	확대건축한계 내에 59mm 여유공간 (직선의 차량한계 242mm초과, 건축한계167mm 초과)

표 4 차량한계 검토결과

기존선 고속 틸팅열차의 차량 단면은 최신 모델 감각과 미려하고 공기저항을 최소화시키면서 실내의 승객 편의시설, 의자공간 확보, 선반 및 창문 등의 설치가 최적이 되는 조건으로 승객의 활동공간을 충분히 확보해야 한다. 특히 지붕 또는 상하에 설치될 냉난방장치, 인버터/컨버터, 변압기 등의 설비를 고한 차체 구조가 될 수 있도록 한다.

이와 같은 단면 형상에 대하여 다음과 같은 목적으로 즉, 1안 단면은 부드러운 곡선으로 된 원형단면과 2안 각진 형상의 단면을 형상화 시켰다. 1안은 안정감과 아름다운 형상을 구현했고, 2안은 단선으로 간단하고 힘찬 느낌을 줄 수 있는 단면 형상이다.

앞으로 실내설비, 지붕설비, 승객편의성, 차량형상 및 상하기기에 따라 검토될 것이며, 특히 곡선통과 등을 면밀히 차량한계 및 건축한계와 더불어 검토될 것이다.

- 차량한계 및 곡선 통과 검토

최고운행속도 180 km/h로 운영하게 될 기존선 고속 틸팅열차는 기존선 및 개량선에서 고속으로 주행하게 되므로 선로 주변에 건축되는 각종 구조물과 차량 사이에는 적절한 여유를 두어 주행차량의 움직임에 대해서 위험이 없도록 하여야 한다. 차량설계에 있어서 차량의 전체적인 동적 운동은 차량의 좌우운동 내에 있어야 하며, 또한 이는 선로의 건축한계에 부합되어야 한다. 이러한 한계는 suspension 의 좌우 변위량을 stopper로서 제한함으로 한계 게이지에 적합한 설계를 할 수 있게 된다.

4. 대차와 차체의 연결을 위한 언더프레임 구조

일반 차량과는 달리 틸팅차량의 경우 대차와 차체의 연결구조는 틸팅시스템이 적용된 대차의 구조에 따라 달라지게 된다. 그 주 요 특성은 다음과 같다.

- 이태리 ETR460

이태리의 ETR460 대차에는 차체 구조물과 결합되는 프레임이 따로 있어 이 프레임이 차체 구조물과 볼트로 조립되어 있는 것을 알 수 있다. 이 프레임에 2차현가장치 와 댐퍼들이 직접 결합되게 된다.

틸팅시스템은 대차에만 적용이 되고 차체는 단순히 대차 위에 장착되는 형태이다. 대차와 차체 사이에는 2차 현수장치 및 댐퍼 등이 조립이 되므로 이들을 조립하기 위한 브라켓만을 차체 구조물의 압출재을 설계할 때 고려해 주면 된다. 연결골조가 차체의 솔바에 스크류로 고정되어 차체와 대차의 연결방식이 간단한 반면 솔바에 차량전체 하중이 걸리어 이에 대한 접합방식에 상당한 고려가 요구된다.

- 스웨덴 X-2000

Bombardier에서 개발한 X-2000도 2차 현수장치와 댐퍼 등이 바로 차체 구조물과 연결되며, 언더프레임이 요철구조로 대차와 범프스톱과 고정되어 틸팅시 차체의 좌우 변위를 잡아주게 된다

- 독일 ICT

독일 ICT 차량 차체구조물의 경우3개의 링크가 언더프레임에 연결되고 이를 지지대로 틸팅 작동이 이루어 지게된다. 따라서 차체언더프레임 설계시 링크연결 방식을 고려하여야 할 것이다.

- 한국형 틸팅차량 차체·대차 기본 연결방식 개념설계 (안)

이태리 Fiat, 독일 ICT, 스웨덴의 X-2000 차량의 대차시스템을 조사하고 이를 근거로 한국형 틸팅차량 차체-대차의 연결방식 개념설계를 아래와 같이 제시하게 되었다

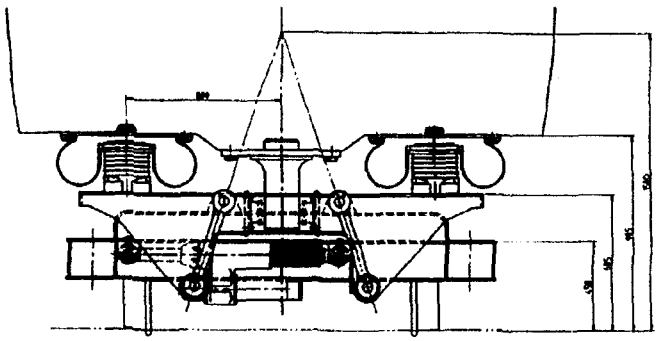

그림 5 한국형 틸팅차량 차체 · 대차연결방식 개념설계 (안)

5. 결론 및 향후 과제

현재 고속차량용 차체구조물을 개발하기 위한 국내의 기술수준은 요소기술의 경우 어느 정도 확보하고 있으나 총체적 경험이 부족한 실정이므로 고속차량용 차체 구조물을 개발하기 위해서는 해당 차량에 대한 경량소재 적용, 최적 구조설계, 구조안전성 평가 방법들에 대한 기술 개발이 선행되어야 한다. 이는 고속의 차량이 기존선로에서 운행될 경우, 속도향상에 따른 횡압의 증가가 예상되고 이는 궤도의 손상에 직접적으로 영향을 미치는 요인이 될 수 있으므로 기존의 선로조건을 크게 변경하지 않은 상태에서 속도를 향상시키고 에너지 소모량을 줄이기 위한 차체 구조물의 경량화 및 최적설계가 검토되어야 한다.

선진 각 국에서 개발 경쟁을 벌이고 있는 고속철도차량도 대부분 알루미늄 합금을 차체 재질로 선택하고 있다. 독일의 ICE는 ICE1에서부터 알루미늄 합금을 적용하였으며, 프랑스의 TGV 역시 강재 차체에서 차세대 차량은 알루미늄 합금 차체로 추진되고 있는 상황이다. 일본의 신간선도 알루미늄 합금 차체를 적용하고 있다. 이탈리아의 ETR이나 스위스의 ICN 등 외국의 틸팅열차의 차체구조물의 재질도 거의 모두 알루미늄 합금으로 하고 있다.

본 연구 논문에서 제시하는 한국형 틸팅차량의 개념설계 사양은 차체구조물 제작시 필요한 일부분이며 추후 틸팅 차량 제작시 선행되어야 할 기본 · 상세 설계시 설계자가 고려하여야 할 사항을 요약 정리하였다. 추후 연구에서 차체구조물의 전두부 형상 압출제의 상세 형상 설계 등의 작업이 구조해석과 함께 이루어질 전망이다.

6. 감사의 글

본 연구는 철도청의 철도기술개발사업 1차년도 과제 중 차체구조물개발 연구 결과물의 일부로서 본 연구를 수행하는데 많은 도움을 주신 철도청관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

7. 참고문헌

1) "철도공학" 여종득, 1997

2) "곡선부 고속주행용 대차설계기술개발" 1차년도 보고서 1999 한국철도기술연구원

3) " 최신기구학" 안락선 1992