

고속전철의 압력과 영향에 대한 차체 기밀설계

The Design of Vehicle for Air tightness to Pressure wave of High Speed Train

박광복*

Park, Kaung-Bok

김현철**

Kim, Hyun-Cheol

ABSTRACT

This study is about the design of vehicle for air tightness to pressure waves of high speed train. When the train runs to high speed over 300km/h, the comfort of passenger come down due to difference pressure between inside and outside of passenger room. The car-body was carried out the design of air-tightness, and the analysis of inside pressure of vehicle in tunnel by TG_TUN of ALSTOM Co. The result of analysis should be used the design of air pressurized system and car-body of G7 high speed train project.

1. 서론

열차가 고속으로 주행하면 차내의 압력차로 인하여 승객의 안락도가 크게 떨어지게 된다. 특히 350km/h 전후 속도의 고속전철이 터널으로 진입시와 터널내의 교행시에는 압력의 변화가 커져 차체는 기밀설계를 요구하게 된다. 본 연구에서 G7 고속전철 차체의 기밀설계를 수행하고, 터널내 주행시 해석을 통하여 실내압의 변동을 설계기준치와 비교 분석하고자 한다. 또한 분석된 결과를 가지고 차체기밀설계와 실내 여압설계 기준치를 설정하고자 한다.

2. 기밀설계의 일반사항

2.1 압력과 발생 현상

고속으로 주행하는 열차의 압력과 발생은 두 열차의 교행시와 열차가 터널 진입시의 경우 일어난다.

* 대우중공업(주) 철차연구소 수석연구원, 정회원

** 대우중공업(주) 철차연구소 선임연구원, 비회원

1) 두열차의 교행시

열차의 교행과 관련된 순간 정압적 압력(quasi-static pressure) 지역의 통과는 전면코(Nose)와 꼬리 교행시에 압력 변동을 일으킨다. 이것의 압력파는 다음 요소와 같은

- a) 차량의 속도 (속도제곱 비례로 증가)
- b) 선로의 간격
- c) 차량의 단면적
- d) 차량 실내에서 위치
- e) 전두부의 형상

등에 관계된다. 이 현상은 순간적으로 발생되기 때문에 귀내로 전달되지 않아 승객의 인락감에는 영향을 주지 않는다.

2) 터널내 통과시

터널내에서 압력파는 열차가 터널 진입에 의해 발생된다. 전면코(Nose)의 진입은 과압파두(Over-Pressure wave front)를 발생하고, 후미는 부압파두(Depression wave front)가 일어난다. 그러므로 파행은 상승파두(rising wave front)와 하향파두(descending wave front)를 이룬다. 차체 내부로 전달되는 압력변동은 귀로 느끼게 된다. 이것은 귀가 아프거나, 멍멍하게 하여 승객에게 불쾌감을 줄 수 있다. 이것은 다음과 같은 두개의 요소를 완화함으로써 불쾌감을 감소 시킬 수 있다.

- 귀내의 압력과 차체외부의 압력간 차이 (Δp)
- 압력 변동 속도 ($\Delta p/t$)

2.2 기밀설계 방안

인락함을 얻기 위해서는 터널내부에 압력변동이 객실 내로 전파되는 것을 막아야 한다. 이를 달성하기 위하여 차체는 압력 변동에 대하여 기밀 되어야 한다. 이와 같은 요구사항들은 기능과 구조의 양측 모두 실내 인입 최소화를 위해 가능한 압력 변동을 감소 시킬 수 있는 구조로 해야 한다.

1) 구조적 인입

철도차량의 복잡함은 전체적인 기밀을 달성하기 어려운 것으로 알려져 있는 케이블 통로, 출입문, 갱웨이, 차체골조, 용접부분, 락테 시공 등의 밀폐처리에 의한 인입을 제한 할 수 있어야 한다. 이것은 피동 기밀 (Passive air-tightness)이라고 불리며 변할 수 없는 양이다.

2) 기능적 인입

터널 통과시 압력과 변동에 의해 기밀을 건디는 공기배출, 탱크배출, 배수 장치 등은 피할 수 없는 인입 장치들 이다. 이들은 능동기밀(Active air-tightness)로 불리며, 터널 입구에 가깝게 위치하면 신호에 의해 작동되는 자동장치로 해야 하며, 차체 구조에 관련된 장비의 큰 부분이 관계 된다.

- a) 차체 골조
- b) 차체
- c) 전기적 취부
- d) 냉난방 장치
- e) 위생설비 및 음식 설비
- f) 공압 장치
- g) 의장 취부품

2.3 압력파에 대한 설계 기준

1) 인체적 영향

압력파는 사람에 대해 정도 차이가 있지만 귀의 고막을 중심으로 내외부 압력차가 약 4,000 Pa 이상이 되면 불편함을 느끼는 것으로 알려져 있다. 어린이의 경우 예민해서 약 500 Pa 에서도 차이를 느끼게 된다.

2) 안락 기준

- 경부고속전철(K-TGV) : 모든 터널에서 $|\Delta P| \leq 2000 Pa$ and $\left| \frac{dP}{dt} \right| \leq 200 Pa/s$ (객실), $\left| \frac{dP}{dt} \right| \leq 400 Pa/s$ (운전실)
 5,000 이내 터널에서 $|\Delta p| + 5 * \left| \frac{dP}{dt} \right| \leq 2000 Pa$
 5,000 이상 터널에서 $|\Delta p| + 5 * \left| \frac{dP}{dt} \right| \leq 2500 Pa$
- 프랑스(SNCF) : $\left| \frac{dP}{dt} \right| \leq 400 Pa/s$
- 독일철도(DB) : $|\Delta P| \leq 1000 Pa$, $\left| \frac{dP}{dt} \right| \leq 200 Pa/s$
- 일본철도(JR) : $|\Delta p| + 5 * \left| \frac{dP}{dt} \right| \leq 2500 Pa$

3. 터널내의 압력파 영향 분석

3.1 파동 생성

열차가 터널에 진입할 때 노즈(Nose) 전단에 과압 파동이 생성되며 열차 후미가 진입되면 부압 파가 생성 된다. 이파동의 진폭 및 경사도는 대체로 열차 단면과 터널 단면의 비율에 비례하며, 차량속도의 제곱에 비례한다. 4 각형의 전두부 형상인 경우는 파동에 의한 압력이 더 커진다.

3.2 파동의 전파

파동이 생성되면서 파동은 터널 내에서 음속으로 전파되며, 열차가 터널내에 있는 동안 상승한 파동에 의하여 등압으로 거리에 따라 형성 된다.

$$d = l * \frac{c}{v} \quad \text{-----(1)}$$

d : 파동 (m)
 l : 열차길이 (m)
 c : 음속 (m/s)
 v : 열차속도 (km/h)

음속의 터널내에서 전파하는 과압군이 생성되며, 파동의 경사도는 시간에 따라 천천히 전개된다. 즉 공기가 압축될 때 음속은 빨라진다.

$$c = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} \quad \text{-----(2)}$$

γ : C_p / C_v
 P : 압력치 (P_a)
 c : 음속 (m/s)
 ρ : 공기밀도

3.3 터널 단부 반사

과두는 외부 압력이 일정하지 않기 때문에 벽을 따라서 터널 끝에서 반사 한다. 따라서 압출된 과두는 부압 과두로 반전 된다. 전두부 코(Nose)는 과두가 반사된 후에 과두가 교차할 때 과압된 플래티우(Plateau)는 음속의 반대방향으로 되면서 부압 플레이우로 변한다. 터널 양단에서 이 플래티우는 사인 곡선의 형태로 반사 된다.

3.4 열차의 압력 손실

열차 전면에는 열차 주위 빈 공간의 단면이 터널 잔여 단면 보다 작아지므로 공기속도가 빨라져 상대적으로 압력은 낮아진다 (유선선도를 따라 동압이 변동하기 때문이다, $p + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{일정}$).

이 현상은 열차의 속도에 따라 과두의 움직임이 갖는 플래티우를 유발하여 유속으로 이동하는 과두압력이 배가 된다.

3.5 마찰

살펴본 모든 현상은 열차와 터널 벽간 마찰에 의한 에너지 손실에 따른 고속의 공기이동을 수반 한다. 따라서 과두는 시간에 따라 감소하며 열차주변의 압력손실은 후미보다 전두부 코(NOSE)에서 더 감소한다.

3.6 현상 종합

전반적으로 터널내의 압력 과형은 그림 1과 같은 기대치를 나타내게 된다.

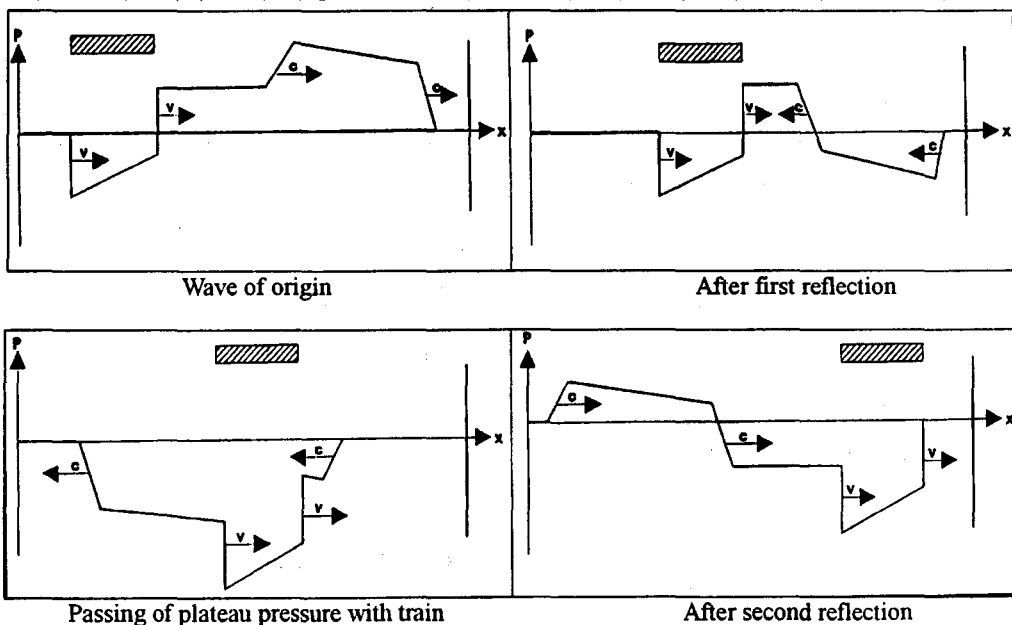


그림 1. PRESSURE PROFILES INSIDE THE TUNNELS

3.7 열차 교행

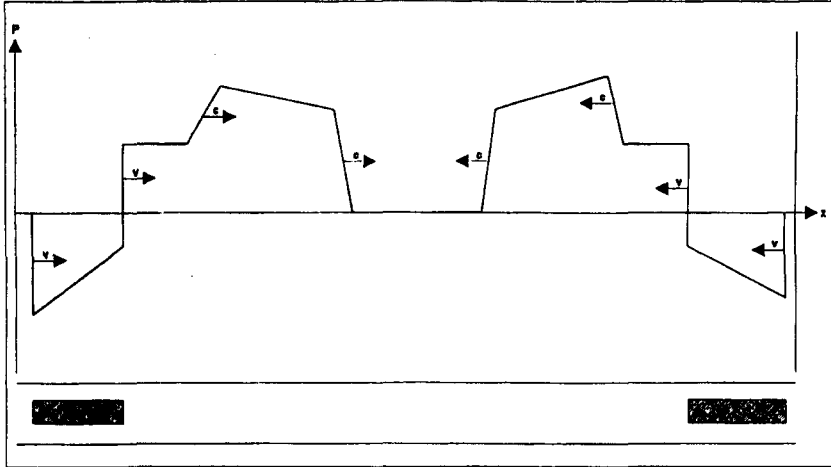


그림 2. CROSSINGS INSIDE TUNNELS

터널내에서 두개의 열차가 교행 할 때 양쪽입력 과형은 보통 1개 열차가 통과할때보다 더 크게 이중 생성 된다. 교행시 형상은 그림 2에 나타내었다.

4. 차량 내부 압력과 전달

4.1 누설 효과

차량내부에서 공기가 유입/유출되는 틈새는 출입문, 갱웨이, 전선관등이 있으며 외부에서 발생 되어 열차에 전달되는 압력파동으로 인해 많은 누설이 일어난다. 차량전체의 공기 누설량은 각 요소에서 누기량의 합으로 나타낼수 있다.

$$Q = \sum(\rho \cdot s \cdot v)$$

여기서 Q : 누설량
 ρ : 공기 밀도
 s : 차량 내부 단면적
 v : 차량 내부 공기속도

이 흐름은 차량내에서 압력변화를 유발하기 때문에 흐름은 등엔트로피로서 고려 한다

$$\frac{P}{\rho^\gamma} = \text{일정} \quad \text{따라서} \quad \frac{dP}{dt} = \gamma \rho^{\gamma-1} \frac{d\rho}{dt} \quad \text{-----}(4)$$

$$\text{또는 } \rho = \frac{V}{M} \quad \text{이므로} \quad \frac{dP}{dt} = \frac{\gamma \rho^{\gamma-1}}{V} \cdot \frac{dM}{dt} = \frac{\gamma \rho^{\gamma-1}}{V} \cdot Q \quad \text{-----}(5)$$

4.2 등가 누설 단면적의 누설 모델링간

등가누설을 결성하는 것은 상당히 어려우므로 계산방법에 의해 전체 누설량을 예측해볼수 있다. 모든 누설요소의 면적의 합은 등가누설 단면적(S_{eq})으로 표시하여 누설요소에서 누설된 양과 동일 하게 가정 한다. 공기밀도가 일정하다고 하면, 공기 누설량은 다음식으로 된다.

$$Q = S_{eq} \times \sqrt{\rho |P_e - P_i|}$$

차체가 기밀이 안되면 등가누설단면적이 커져 공기 누설량이 많아지게 된다.

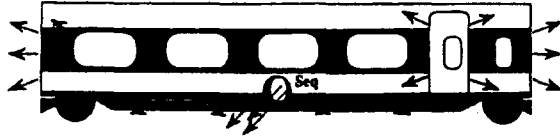


그림 3. EQUIVALENT LEAK SURFACE

4.3 등기 누설 단면적의 측정

등기누설 단면적은 객실내에 3,000Pa 까지 공기를 가압한후, 100Pa 까지 압력강하 시간(T)을 측정하여 산출한다. 이 방법은 NFF17-011 에 기록 되어 있다.

$$\text{계산식은} \quad S_{eq} = \frac{V}{\gamma P_e T} \sqrt{2\rho} (\sqrt{\Delta P(0)} - \sqrt{\Delta P(t)})$$

여기서 P_e : 대기압 (101300 Pa) $\Delta P(0)$: 차량내 가압된 초기압력
 T : 강하 시간 $\Delta P(t)$: t 초후 차량내 압력

4.4 열차편성에 의한 압력과 영향

열차가 고속으로 터널을 통과시 공기 흐름 및 마찰의 영향으로 전두부의 차량 외부 압력과 후두부의 압력은 1000Pa 이상의 차이가 발생하며 이 압력의 차이가 열차간의 통로를 따라 차량별 내부 압력의 변화에 큰 영향을 미치게 된다.

4.5 열차 편성 영향 모델링

차체의 내외부 사이에 누설, 등기누설표면의 방법으로 차체사이에 공기의 이동 모델을 간략하게 할 수 있다. 즉 각 차량의 외부 압력을 P_e , 내부 압력을 P_i , 내부에서 외부로의 누설량을 Q_e 와 누설면적 S_e , 그리고 차량간의 누설량을 Q_i 와 누설면적을 S_i 와의 관계를 그림 4 과 같이 모델링 된다. 모델링시 S_i/S_e 의 비율이 크게 영향을 미치며 P_e 는 선형적 비례로 가정하면, 다음과 같은 식을 얻을수 있다.

- 1) 외부로 향한 흐름 평형 : $P_{ij} - P_{ej} = \frac{\rho}{2S_e^2} Q_{ej} |Q_{ej}|$
- 2) 차체 사이의 흐름 평형 : $P_{ij} - P_{e_{j+1}} = \frac{\rho}{2S_i^2} Q_{e_{j+1}} |Q_{e_{j+1}}|$
- 3) 질량 보존 : $Q_{i_{j-1j}} = Q_{i_{jj+1}} + Q_{ej}$
- 4) 한계에 조건 : $P_{ej} = \frac{j-1}{N-1} \cdot \Delta P$

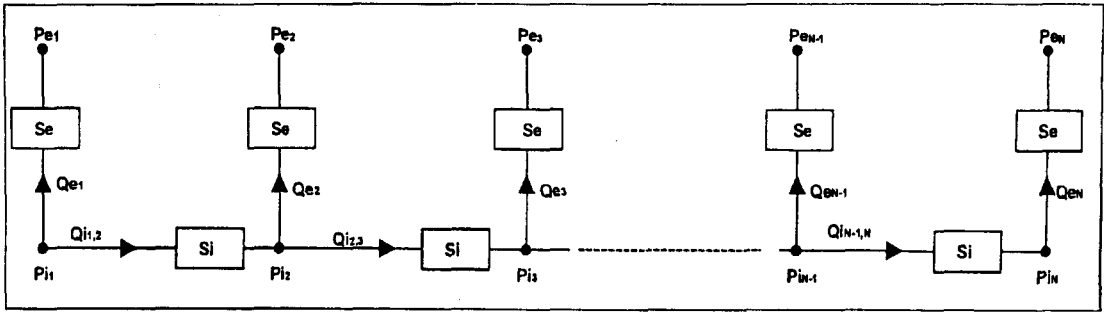


그림 4. TRAINSET EFFECT - MODELING

5. 차량 기밀 설계

본 연구에서는 열차중에 객차부분에 대해서 기밀설계 내용을 기술 하고자 한다, 객차는 승객을 수송하는 차량으로서 압력과의 영향으로 인하여 안락감에 가장 민감하게 작용하기 때문이다.

5.1 차체의 기밀설계

차체는 기밀설계의 중요한 역할을 담당하며 다음과 같은 연결부분은 확실하게 기밀 시키도록 설계를 수행한다.

- 모든 외판의 연결은 연속 용접하여 기밀 유지
- 객실과 연결되는 부분 골조의 기밀 용접
- Side Sill 의 Hole Plug 용접
- 링의 하부 가셋트 부위 기밀 용접
- 전선용 forming post 상부 연결부 기밀용접 및 putting 시공
- 출입문의 움푹 들어간 곳 기밀 putting 시공
- Lifting Socket 의 내부 중앙을 기밀 용접
- 안전 후쿠 상부에 외판 경계부 기밀 용접
- 출입대 공기 팽창부와 접촉되는 코어 부위 등글게 처리

5.2 측출입문 기밀 설계

1) 팽창 조인트(Inflatable joint)

열차 운행시에는 그림 5, 6 팽창 조인트에 공기 압력을 주어 차체의 받침대와 기밀을 유지하고, 팽창조인트가 작동 전에는 도어의 외측과 내측에 바람막이 고무를 설치 한다.

2) 공압 장비

열차의 발판에 설치된 공압배관이 객실의 도어 작동 배관으로 연결시에는 그림 7와 같이 기밀설계를 수행 한다.

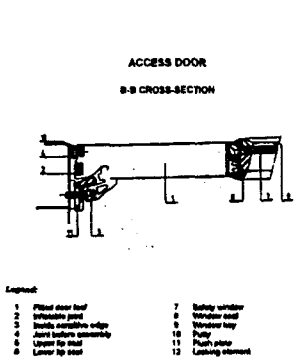


그림 5.

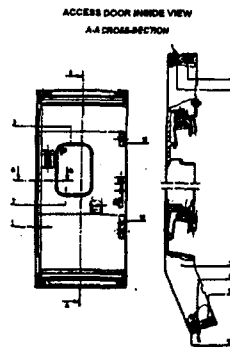


그림 6.

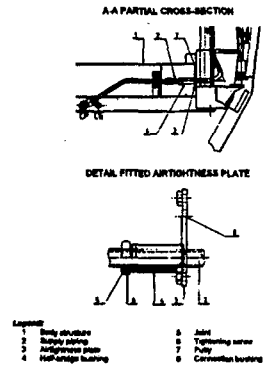


그림 7.

5.3 냉방장치 기밀 설계

1) 영구적 방법

에어컨 냉방장치와 관련된 일반적으로 사용되는 기밀설계 방법은 다음과 같이 수행되어야 한다.

- 환기, 재순환 및 긴 턱트에 배선 지지대 및 취부 요소의 부품의 취부는 기밀 리벳트 사용 (그림 8)
- 냉반용 신선 공기 흡입구 그릴과 차체의 기밀 putty 시공
- 재순환 턱트판에 기밀 putting 처리 (그림 8)
- 복합 조인트 연결을 통한 재순환 공기 턱트 기밀 처리 (그림 9)

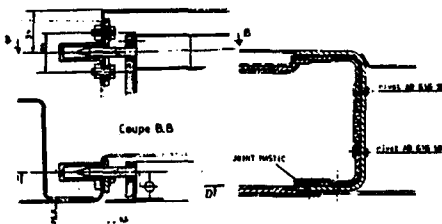


그림 8. FITTINGS

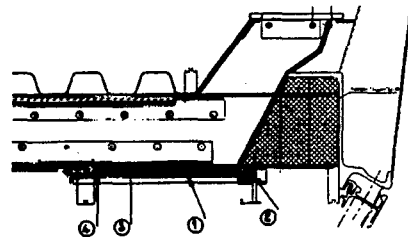


그림 9. RECYCLED AIR DUCT CLEANING TRAP

2) 에어컨 기기 제어 방법

열차가 터널 통과시에 선로에 설치된 Beacon 으로부터 신호를 받아 차상에 설치된 컴퓨터에 제어를 받아 객실 내부와 관련된 공기 흡입구를 밀폐 시킨다. 터널에서 정차시 (비상시) 16 분이 지나면 공기 흡입구는 다시 개방되게 설계 한다.

5.4 급수장치와 주방설비 기밀

1) 위생설비

터널내 주행시 수세기로부터 배출되는 사용된 물은 그림 10 에 보인 수집통(collectoe)에 차량 컴퓨터에서 전달되는 정보에 의해 다이아후램 밸브를 달아 보관 했다가, 터널 통과 후 밖으로 배출되게 설계 한다.

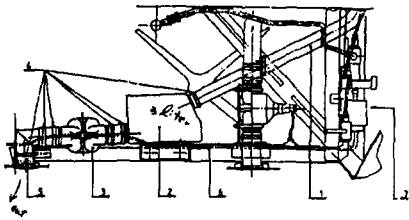


그림 10. Valve and Collector Assembly

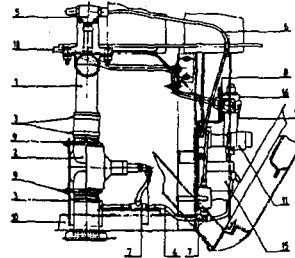


그림 11. Plugging the Revention tank vent

2) 화장실 오물 탱크

터널 통과시에 오물탱크에 배출구를 전자밸브를 통해 담고, 오물탱크가 감압시에는 전자밸브를 통해 압력을 공급해주는 구조로 설계 한다 (그림 11).

3) 음식설비

냉장고 응결수 배수구에는 그림 12 와 같은 Evacuator 를 설치하여 압력파를 차단토록 한다.그림과 같이 고무 발침과 floater 가 밖으로 밀려나가는 압력을 받아 기밀을 얻게 된다.

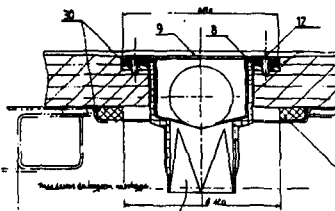


그림 12. WATER EVACUATION

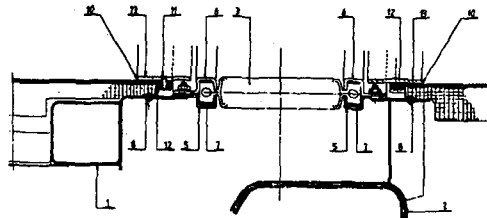


그림 13. Cross-Section along A-A

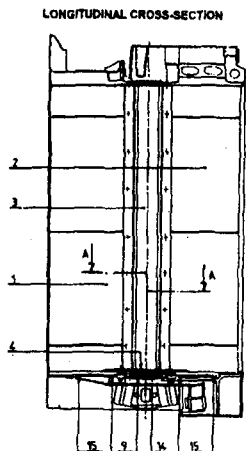
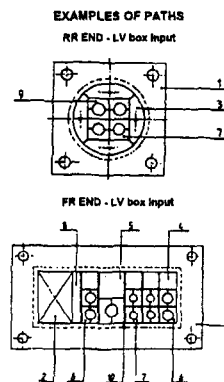


그림 14. GANGWAY



- Legend:
- 1 Aluminum frame thickness 5
 - 2 PTC 60 lock
 - 3 RPS 70 ring lock
 - 4 20G module
 - 5 30G module
 - 6 20/12 module
 - 7 20G module
 - 8 12/10 half-module
 - 9 20/11 module
 - 10 Anchoring plate

그림 15.

5.5 갱웨이

갱웨이 벨로즈 (Gangway Bellows) 설치시 고정링과 캐리어링 전부분에는 그림 13, 14 와 같이 Cellular form joint, mobile jaws 를 적용하여 기밀을 유지한다. 연결커버를 연결시는 리벳트를 사용하여 기밀이 되도록 링에 취부 한다. 벨로즈 연결부에는 Putting 시공하고, 갱웨이 연결구조와 바닥 사이에는 Celluar form 을 넣어 사용한다. 캐리어링 설치시에는 링과 차체 사이에 연결부가 압축되게 하여 갱웨이의 기밀이 유지되도록 한다.

5.6 전장품

전선이 차외부로 연결되는 부분에는 그림 15 와 같이 고무몰드가 전선을 감싸는 구조의 연결구조를 설치하여 기밀을 시켜야 한다

6. 기밀 해석

6.1 일반

터널 통과시 차체기밀 해석은 ALSTOM 사가 개발한 TG_TUN S/W 를 이용하여 경부고속전철과 G7 고속전철의 해석을 수행 하였다.

차량 및 터널조건

	TRAIN	TUNNELS
Length (m)	393	2260 (No.5) / 7825 (No.32)
Cross Section (m2)	8.80	100
Perimeter (m)	11.22	38
Coefficient of friction	0.004	0.0061
Atmospheric pressure (Pa)	101300	
Temperature (c)	11	

터널 및 차량의 기본 사양은 상기 표와 같으며 객실 및 운전실의 기밀조건은 경부선의 기준으로 해석 하였다 (기밀시험에서 3000Pa → 100Pa 도달시간, 객실: t=40sec, 운전실: t=8sec 인 경우).

6.2 해석 결과

No. 5 (2260 m)	300 km/h		350 km/h	
	$ \Delta P _{\max}$	$ dP/dt _{\max}$	$ \Delta P _{\max}$	$ dP/dt _{\max}$
객실	-1098	-118	-1090	-178
운전실	+1363	-442	1836	-605

No. 32 (7825 m)	300 km/h		350 km/h	
	$ \Delta P _{\max}$	$ dP/dt _{\max}$	$ \Delta P _{\max}$	$ dP/dt _{\max}$
객실	-1861	-112	-2392	-154
운전실	-1738	-320	-2611	-414

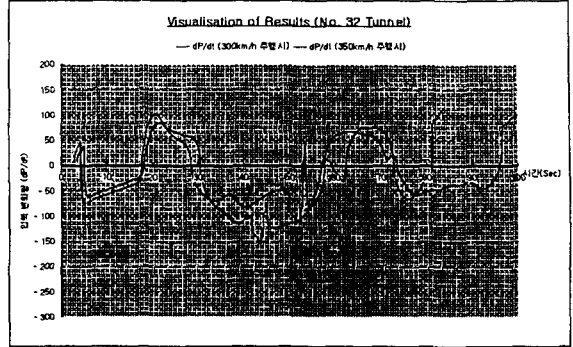
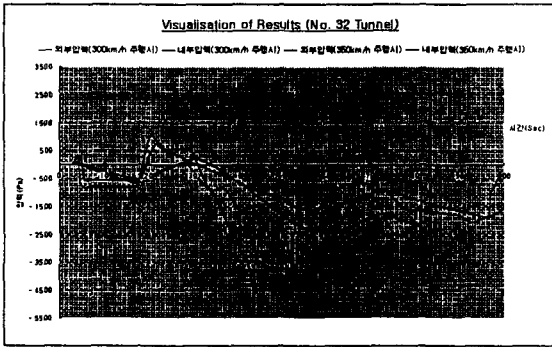
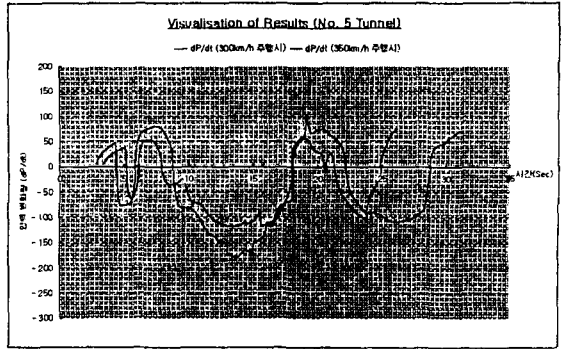
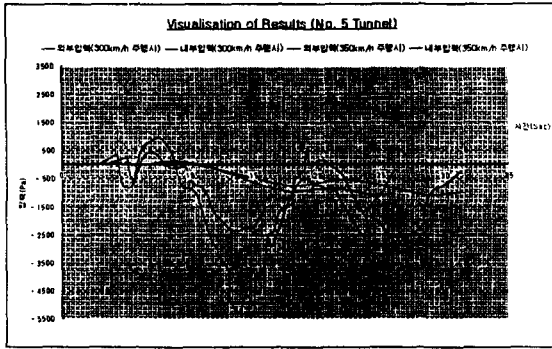
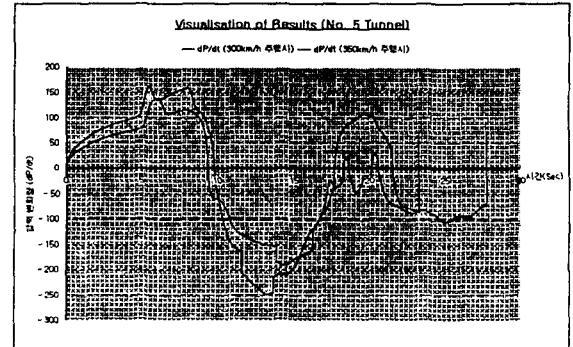
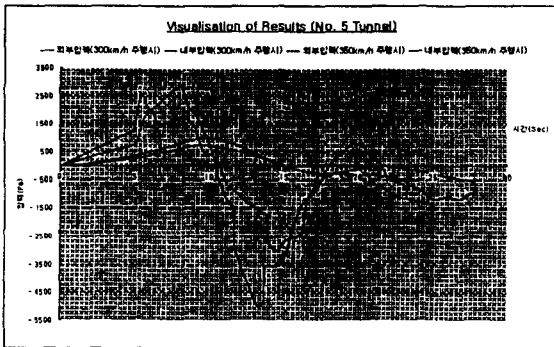


그림 16. 객실 기밀해석 결과

G7 고속전철 차량의 기밀설계를 한 후 ALSTOM사의 TG_TUN 기밀해석 S/W를 통하여 해석을 수행한 결과 350km/h 주행 시 운전실의 경우 No.5 터널에서 $|\Delta P| = 1876 \text{ Pa}$, $\left| \frac{dP}{dt} \right| = 605 \text{ Pa}$ 이며, No.32 터널에서는 $|\Delta P| = 2611 \text{ Pa}$, $\left| \frac{dP}{dt} \right| = 414 \text{ Pa}$ 로 기준치를 초과하고 있으나 객실의 경우는 No.5 터널에서 $|\Delta P| = 1090 \text{ Pa}$, $\left| \frac{dP}{dt} \right| = 178 \text{ Pa}$ 으로 경부선 기준을 만족하고 있는 반면 No.32 터널에서는 $|\Delta P| = 2392 \text{ Pa}$, $\left| \frac{dP}{dt} \right| = 154 \text{ Pa}$ 로 역시 기준치를 초과한 결과를 얻었다.



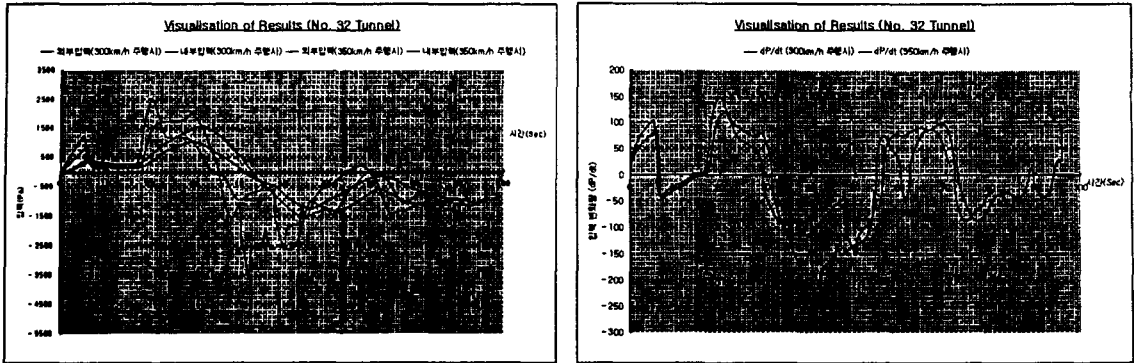


그림 17. 운전실 기밀해석 결과

7. 결론

해석은 두 가지 경우의 터널에서 계산 되었으며, 상대적으로 긴 터널에서 압력과의 영향이 커짐을 알 수 있다. 현재의 경부고속전철 기밀 사양으로 350 km/h의 속도로 운행시에는 객실의 경우 5km 이하의 터널에서 기준치를 만족하나, 5km 이상의 터널에서는 객실 및 운전실 모두 기준치를 초과하게 되며 기준치에 맞추기 위해서는 더욱더 기밀 설계를 하거나 또는 여압 시스템의 설치로 압력 보상이 이루어져야 할 것이다. 그러므로 앞으로 좀더 차량 설계 내용을 정밀 검토하고, 기밀 해석을 면밀히 분석하여 도출된 결과를 토대로 여압 시스템 설계에 기본 자료로 활용할 예정이다