

G7 시제 차량의 터널내부 압력파에 대한 수치적 연구

A Numerical Study of the Pressure Wave in the Tunnel for G7 Test Train

권재현*, 권혁빈**, 김태윤*, 이동호*, 김문상***

Jae-Hyun Kwon, Hyeok-Bin Kwon, Tae-Yoon Kim, Dong-Ho Lee, Moon-Sang Kim

ABSTRACT

열차가 고속으로 터널에 진입하게 되면 터널 내부에서 극심한 압력 교란이 발생하게 되며 이로 인한 이명현상은 승객들에게 불쾌감을 크게 유발시키고, 열차 구조물에 작용하는 반복적인 하중변화 또한 구조상 큰 문제를 일으킬 수 있게 된다. 따라서 이를 해결하기 위해서는 터널 내부의 유동장에 대한 정확한 예측이 필요하다. 본 논문은 긴 터널을 효율적으로 해석하기 위해서 최소 차원의 공간 가정을 통하여 계산 시간을 절약할 수 있는 혼합차원 기법을 이용하여 현재 G7 시제차의 시험 운행 구간내의 터널들에 대해서 수치 해석을 수행하였다. 해석 결과 터널 내부에서는 압축파, 팽창파의 상호 작용에 의한 복잡한 압력 교란이 발생하였고, 이러한 압력 변화는 열차 속도, 터널 길이, 측정위치에 따라 각각 다르게 나타났다. 따라서 터널 내부의 유동장을 정확히 예측하려면 열차 속도, 터널 길이, 열차 길이, 열차/터널 단면적 비, 측정 위치 등을 고려하여 해석을 수행하여야 한다. 이러한 수치 해석 결과는 시제차 시험 계획의 수립 및 시험기기의 선택과 설치 위치 등을 결정하는 중요한 자료로 활용될 수 있을 것이며, 고속 열차의 여압 시스템과 외부 부착 구조물에 대해서도 중요한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

1. 서 론

고속열차의 터널 진입 시 발생하는 압축파는 음속의 속도로 출구방향으로 진행하게 되며, 터널 출구에서 외부로 미기압파 형태인 충격성 소음으로 일부가 방사되고, 일부는

* 서울대학교 기계항공공학부 석사과정, 회원

** 한국철도기술연구원, 선임연구원, 회원

* 서울대학교 기계항공공학부 박사과정, 회원

* 서울대학교 기계항공공학부 교수, 회원

*** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 교수, 비회원

다시 팽창파의 형태로 터널 입구로 반사된다. 또한 열차 후미부의 터널 진입으로 인한 팽창파 역시 동일한 현상을 보이게 된다. 따라서 터널 내부는 열차가 터널을 진행하는 동안 발생하는 압축파와 팽창파 및 열차 진행에 의한 압력 변화로 인하여 매우 복잡한 비정상 압력장을 형성하게 된다. 이러한 터널 내부의 압력 변화는 승객에게 이명현상을 야기시키고, 열차에 반복적인 구조 하중을 발생시키므로 정확한 예측이 필요하다.

이를 위한 기초연구로서 서울대학교와 NLR 은 공동으로 열차-터널 축소 모델에 대한 비정상 시험 장치를 제작, 실험적 연구를 수행하였다.[3] 또한 수치해석의 경우 권혁빈[1]은 열차-터널 상호 작용을 해석할 수 있는 비정상 해석 기법과 긴 터널을 해석할 수 있는 혼합차원 기법을 개발하였다. 본 연구는 이러한 기법을 이용하여 현재 시험 운영 중인 G7 시제차가 시험구간 터널을 통과할 때 발생하는 터널 내부 유동장을 해석하였으며, 이 결과는 G7 고속 열차의 시험 계획 수립에 중요한 자료로 활용되어 시험 기기의 선택과 장비의 설치 위치 등의 결정에 큰 도움을 줄 것이다. 또한 열차 내 압력을 일정하게 조절하여 승객의 쾌적한 승차 환경을 위한 여압 시스템을 구축, 구동하는데 필요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 본 론

(1) 지배방정식 및 수치 해석 기법

본 연구는 일반 곡면 좌표계에서 유도된 축대칭 압축성 Euler(식 1) 방정식을 사용하였으며, 공간 변수들은 터널 직경, 나머지 변수들은 자유류 값들로 무차원화하였다. 대류항의 플럭스는 Roe 의 FDS 를, 공간정확도를 높이기 위해서 Koren 의 limiter 를 도입한 MUSCL 기법을 사용하였고, 시간 적분법은 AF-ADI 를 사용하였다.

$$\partial_t \hat{Q} + \partial_\xi \hat{F} + \partial_\eta \hat{G} + \hat{H} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

초기 조건은 열차가 터널에 진입하기 전에 발생할 수 있는 수치적 압축파를 피하기 위해서 완만한 출발(Smooth start)을 사용하였고, 터널 벽면의 속도는 열차의 상대적 운동에 의해 결정되며, 벽면에서의 압력은 벽면에 수직한 운동량 방정식을 통하여 구할 수 있다. 원방 경계조건은 자유흐름 조건과 유동의 방향에 따라 Riemann 불변량의 외삽을 통하여 속도, 압력 및 밀도를 구하였고, 무반사 조건을 부여하였다.

(2) 혼합차원기법

열차-터널 상호작용의 문제는 터널 입/출구와 열차 주위를 제외하면 터널 내부의 대부분 유동장은 1 차원 특성을 갖는다. 이와 같은 유동장 특성에 따라 물리적인 공간 차원을 적절히 가정하여 유동장을 계산함으로써 계산 시간과 계산용량을 줄이는 방법을 혼합차원기법이라 하며, 열차-터널 상호작용 해석 문제에 적용하였다. 혼합차원기법은 열차 원방 부근, 즉 열차 전두부와 후미부로부터 열차 지름의 0.8 배 이상 떨어진 영역에서의 횡방향 속도 성분이 거의 0 이 되기 때문에 1 차원 유동으로 가정할 수 있다는 것에서

시작한다.[1] 따라서 열차 근방의 유동장은 축대칭 Euler 방정식을 이용하여 해석할 수 있으며, 열차로부터 멀리 떨어진 유동장은 1 차원 Euler 방정식을 이용하여 해석을 수행하였다(그림 1 참조). 이에 대한 자세한 내용은 참고 문헌 1를 참고하기 바란다.

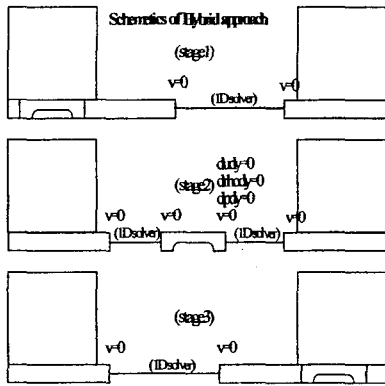


그림 1 혼합 차원 기법 구성도

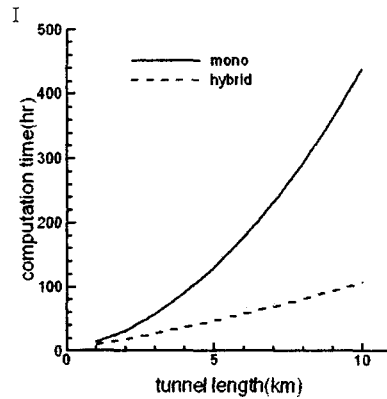


그림 2 터널 길이와 계산시간 비교

그림 2는 혼합차원 기법이 적용된 경우와 단일 영역으로 계산하였을 때의 계산 시간의 차이를 나타낸 것으로서 터널 길이가 1km 이상인 경우 혼합차원 기법을 적용하였을 때 계산시간을 크게 줄일 수 있는 것을 알 수 있다.

(3) 계산 조건

G7 시제차량의 경부선 운행 구간 중 현재 시제차량의 시험이 이루어지고 있는 표 1에 해당하는 터널에서 운행 속도 80, 130, 200, 300, 350km/h에 대하여 해석을 수행하였다. 열차 길이는 시제차 길이인 7량 기준 140m, 경부선 터널 단면적 107m², G7 열차 단면적 8.5 m²을 적용하여 계산을 수행하였다.

표 1 시제차 시험 주행 구간 내 터널

터널 이름	터널 길이	터널 이름	터널 길이	터널 이름	터널 길이
용화	1,800	휴대	720	고등	1,460
운주	4,020	노장 1	850	노장 2	200
심중	920	상봉 1	337	상봉 2	730
궁현	950	비룡	2,910	문곡	3,000
시목	390				

(4) 결과 및 토의

그림 3과 그림 4는 터널 길이 850m인 노장 1 터널에 대해서 터널입구로부터 20m, 400m, 800m 떨어진 지점에서의 시간에 대한 압력 변화와 터널 내 x-t 선도를 나타낸 그래프이다.

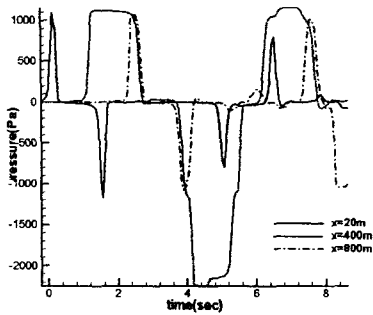


그림 3. 열차 속도 350km/h 일 때 터널 입구로부터 20m, 400m, 800m 지점에서의 압력변화

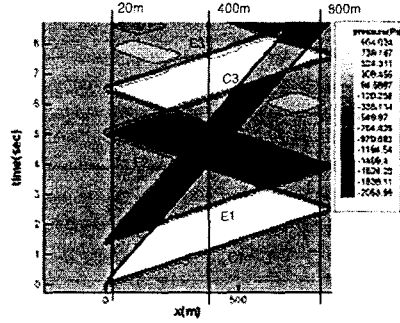


그림 4. 열차속도 350km/h 일때 x-t 선도 (터널길이 850m)

그림 3 을 보면 터널 내부 특정지점에서의 압력 변화의 양상이 서로 다른 것을 알 수 있는데, 이러한 차이는 그림 4 의 x-t 선도를 통해 그 원인을 유추할 수 있다. 먼저 터널 입구로부터 20m 떨어진 지점에서의 초기 압력 상승은 400m 에서의 초기 압력 상승과 달리 압력이 상승하다가 바로 하강하는 모습을 보인다. 이는 터널 내 20m 지점에서는 열차 진입시 발생한 압축파로 인해서 압력이 상승하다가 열차가 바로 그 지점을 통과할 때 압력이 하강하기 때문이다. 그러나 400m 떨어진 지점에서는 진입시 발생한 압축파의 영향으로 압력이 상승하지만, 압력 하강은 진입시 발생한 압축파가 출구에서 팽창파로 반사되어 열차보다 먼저 도달함으로써 발생하게 되는데, 이는 압력파의 전파속도가 열차의 속도보다 훨씬 빠른 음속에 가깝기 때문이다. 그리고 이 지점에서 4.5 초 후에 매우 큰 음의 압력장이 형성되는 것을 볼 수 있는데, 이는 열차 진입시 발생한 압축파가 터널 출구에서 팽창파로 반사되어 터널 내를 주행 중이던 열차와 만나면서 열차 주변의 팽창영역과 중첩되어 발생하는 현상이다. 다음으로 터널 출구에 가까운 800m 지점에서는 압축파가 지나간 바로 직후 출구에서 반사되는 파의 영향을 받아 압력이 상승한 후 바로 하강하는 현상을 볼 수 있다.

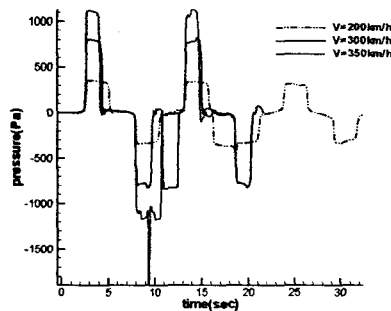


그림 5. 터널 길이 1800m 에서 속도에 따른 압력변화 (터널 입구로부터 900m 떨어진 지점)

그림 5 는 터널 길이 1,800m 인 용화 터널에서의 터널 입구로부터 900m 떨어진 지점에서 속도변화에 따른 터널 내부 압력 변화를 나타낸 그래프이다. 열차 속도의 차이는 열차가 터널을 통과하는 시간과 압력파의 크기를 변화시켜 200 km/h 로 터널을 통과할 경우 350 km/h 로 통과할 때보다 압력 교란의 크기는 작지만, 교란을 받는 시간은 길어지게 된다. 또한 열차 진행 속도의 차이로 300km/h 일 때에는 파의 중첩이 발생하지 않았으나 350km/h 일 때에는 팽창파와 열차주변의 팽창영역의 중첩으로 압력이 크게 떨어지는 현상이 나타난다.

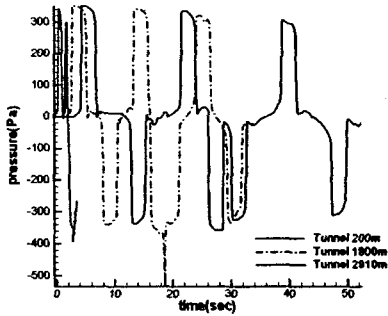


그림 6. 속도 200km/h 일 때 터널길이에 따른 압력변화(터널 길이 200, 1800, 2910m), 측정위치(각 터널 중심)

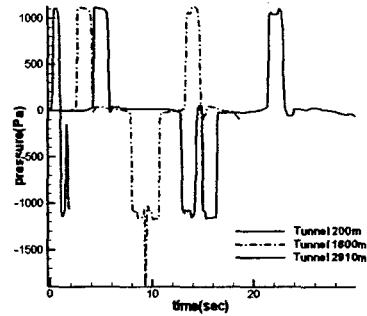


그림 7. 속도 350km/h 일 때 터널길이에 따른 압력변화(터널 길이 200, 1800, 2910m), 측정위치(각 터널 중심)

그림 6 과 그림 7 은 터널 길이에 따른 터널 내부의 압력 변화를 나타낸 것으로서 터널 길이 200, 1,800, 2,910m 에 대하여 각각 터널 중심에서 시간에 대한 압력 변화를 해석하였다. 터널 길이에 따라 압축파와 팽창파의 간섭 영향이 달라지기 때문에 터널 내부의 압력장의 형태가 달라지는 것을 확인할 수 있다.

이와 같이 측정위치, 열차 속도, 터널 길이에 따라 다양하게 형성되는 터널 내부의 유동장에서 발생할 수 있는 극한값(즉, 최고, 최저 압력)의 크기와 형성 위치를 표 2 와 같이 정리하였다.

표 2. 용화 터널에 대한 속도 별 최고 최저 압력 크기 및 형성 위치

터널길이	열차 속도(km/h)	최고 압력 (Pa)	최고압력형성 위치(m)	최저 압력 (Pa)	최저압력형성 위치(m)
용화 터널 1,800m	80	58.24	28	-84.25	263
	130	153.99	627	-287.59	355
	200	355.89	1,162	-699.75	511
	300	830.31	1,030	-1,630.05	712
	350	1,145.56	991	-2,266.66	809

3. 결 론

현재 G7 고속 열차는 시제차가 완성되어 시험 운행중에 있다. 이 시제차가 터널에 진입하였을 때 형성되는 터널 내 비정상 유동장을 해석하기 위하여, 시험 구간내 13 개의 터널에 대하여 수치해석을 수행하였으며, 다음과 같은 해석 결과를 얻었다.

1. 고속 열차의 터널 통과 시 열차 진입에 의한 압축파와 팽창파 및 반사파의 상호 교란으로 터널 내부에는 복잡한 압력 변화가 발생하게 된다.
2. 이런 압력파의 상호 교란으로 터널 내부는 파가 중첩되거나 진행되는 열차와 만나 압력이 급격하게 변하는 현상이 일어나고, 이런 압력의 변화는 측정 위치, 열차 속도, 터널 길이에 따라 다른 양상을 보이므로, 터널 내부 유동장의 정확한 해석을 위해서는 위의 변수들을 모두 고려하여 해석을 수행해야 한다.
3. 시제차 시험 운행 구간 13 개의 터널 길이 별로 각각의 열차 운행 속도에 따라 수치 해석을 수행한 결과 압축파 크기의 2 배정도의 부의 압력장이 형성되며, 열차 속도에 따라 형성되는 위치가 달라지는 것을 확인할 수 있었다.

이러한 결과는 터널을 통과하는 열차 주변의 압력 변화로 발생하는 승객의 이명현상을 줄이는 여압시스템에 기본자료로 제공되며 현재 진행중인 시제차 실험 결과에 대한 보완자료로 활용될 수 있을 것이다. 또한 터널 내부에서 측정을 위해서 사용하는 실험장비의 선택과 설치 위치 등을 결정하는데 도움을 줄 수 있을 것이다.

후 기

본 논문은 2002 년도 “두뇌한국 21 사업”과 “I-I-6 고속전철설계기반기술개발” 과제의 “공력설계 및 해석기술 개발”의 연구 결과의 일부분임을 밝힙니다.

참고문헌

1. 권혁빈, “터널을 통과하는 고속철도차량에 의해 형성되는 비정상 압축성 유동장의 수치해석”, 2000 년도 한국 철도 학회 논문집 ,p229~236, 한국철도학회, 2000
2. 황재호, “교행하는 고속전철 주위의 비정상 공기력에 대한 수치적 연구”, 2000 년도 춘계학술발표대회논문집 B, p599~604, 대학기계학회 , 2000
3. 김태윤, “고속 열차의 터널 진입 시 발생하는 압력파의 실험적 연구”, 2001 년도 춘계 학술발표회 논문집, p96~99, 한국항공우주학회, 2001
4. Maeda, T., Matsumara, T., Iida, M., Nakatani, K. and Uc Uchida, K., "Effect of Shape of Train Nose on Compression Wave Generated by Train Entering Tunnel", *Proc. International Conference on speedup technology for railway and maglev vehicles*, Yokohama, Japan, Vol. 2, pp. 315-319, JSME, 1993
5. Ogawa, T. and Fujii, K., "Numerical Investigation of Three-dimensional Compressible Flows induced by a Train Moving into a Tunnel", *Comp & Fluids* Vol.26, No.6 pp. 565-585, 1997.