

G7 시제 차량의 터널내부 압력파에 대한 수치 해석

The Numerical Simulation of the Pressure wave for G7 Test Train in the Tunnel

권혁빈¹, 김태윤², 권재현², 이동호³, 김문상⁴

Hyeok-bin Kwon, Tae-yoon Kim, Jae-hyun Kwon, Dong-ho Lee, Moon-sang Kim

Keywords : G7 Test Train(G7 시제차량), Hybrid dimension approach(혼합차원기법)
Pressure wave(압력파), Pressurization Equipment(여압시스템)

Abstract

A numerical simulation has been performed to estimate the transient pressure variation in the tunnel when G7 test train passes through the test tunnel in the Kyeong-Bu high-speed railway. A modified patched grid scheme is developed to handle the relative motion between a train and a tunnel. Also, a hybrid dimensional approach is proposed to calculate the train-tunnel interaction problem efficiently. An axi-symmetric unsteady Euler solver using the Roe's FDS is used for analyzing a complicated pressure field in tunnel during the test train is passing through the tunnel. Usually, this complex phenomenon depends on the train speed, train length, tunnel length, blockage ratio between train and tunnel cross-sectional area, relative position between train and tunnel, etc. Therefore, numerical simulation should be done carefully in consideration of these factors. Numerical results in this study would be good guidance to make test plans, test equipments selection and to decide their measuring locations. They will also supply important information to the pressurization equipment for high-speed train.

1. 서론

고속열차가 터널에 진입하게 되면 열차 전두부에서 발생한 압축파가 거의 음속으로 터널 출구방향으로 진행하고, 출구에 도달한 압축파는 다시 팽창파의 형태로 터널 입구 방향으로 전파하게 되며, 이때 압축파의 일부는 터널 외부에 미기압파 형태인 충격성 소음으로 방사된다. 또한 같은 방식으로 열차 후미부의 터널 진입으로 팽창파가 형성된다. 따라서 열차가 터널을 진행하는 동안 터널 내부에는 압축파와 팽창파의 상호 교란으로 복잡한 압력 변화를 수반하는

비정상 유동장이 형성된다. 이러한 터널 내부의 급격한 압력 변화는 열차 내부의 승객에게 귀울림과 같은 청각적 불쾌감을 줄 수 있으므로, 이에 대한 대책으로 적절한 여압시스템을 구비하여야 한다. 효과적인 여압시스템 구축을 위해서는 열차와 터널의 상대적 위치에 따른 터널 내부의 압력 분포에 대한 정확한 정보가 필요하다. 또한 반복적인 압력 변화는 터널과 열차 표면, 구동 시스템에 구조적인 하중을 가할 수 있고, 터널 출구에서 외부로 방사되는 미기압파는 환경공해를 유발하기 때문에 이에 대한 정확한 해석과 실험이 필요하다.

국내 자체의 기술로 제작된 G7 시제차량의 터널 진입 시 발생하는 비정상 유동장에 대한 해석은, 기존에는 서울대 김태윤[1]이 수행한 것과 같이 열차와 터널

1 한국철도기술연구원, 선임연구원, 회원
2 서울대학교 기계항공공학부 대학원, 회원
3 서울대학교 기계항공공학부 교수, 회원
4 항공대학교 항공우주 및 기계공학부 교수, 비회원

의 상대적인 속도, 열차 세장비, 열차와 터널 단면적 비등을 일치시키는 마하수 상사만을 고려한 것이고, 열차와 터널의 상대적인 점성 효과를 고려하는 레이놀즈 수 상사(Reynolds Similarity)를 할 수 없었기 때문에 실제 유동장의 패턴과 약간의 차이를 보이고 있다.

요즘에는 전산유체역학의 발달로 많은 어려움이 동반되었던 실험적인 방법을 탈피하여 열차-터널간 상호작용에 대한 수치적인 유동장 해석이 가능하게 되었다. 1993년 Maeda 등[2]은 압축성 축대칭 Euler 방정식을 사용하여 첫 번째 압력파의 파두의 형태를 실험치와 비교적 일치하는 해석 결과를 얻어냈으며, 압력 구배를 최소화하기 위해서는 열차 전두부 길이와 단면적 변화율을 고려하여야 한다고 주장하였다. 또한 Ogawa와 Fujii[3]는 3차원 Navier-Stokes 방정식과 FSA(Fortified Solution Algorithm)를 이용하여 열차 터널 진입 문제를 수치적으로 모사 하였으며, 열차의 초기 위치가 압축파 파두(wave front)에 영향을 미친다고 하였다. 황재호[4]는 Chimera, Multi-block 등의 영역분할기법을 이용하여 터널 내부에서의 열차 교행을 3차원 Euler 방정식을 사용하여 해석하였으며, 3차원 Navier-Stokes 방정식을 사용하여 고속 열차의 표면 유선 및 압력 분포를 해석하였다.[5]

그러나, 전산유체역학이 발달하였다 하더라도, 열차-터널 상호작용을 해석하기 위해서는 복잡한 영역 기법이 적용되어야 하며, 터널 길이가 증가함에 따라 급격히 증가하는 계산 시간 문제를 해결해야 한다. 따라서 기존의 대부분 연구는 열차 주위나 터널 입구 혹은 출구 등의 부분적인 영역에서만 수치해석을 수행하였으며, 전 영역을 해석하는 경우에는 터널 길이가 1 km이하의 경우에 한정되었다.

실제 G7 시제차량의 시험 구간에는 몇 개의 짧은 터널을 제외하고는 대부분 1 km 근방이며, 운주 터널의 경우에는 4 km의 긴 터널이기 때문에 기존의 수치해석 방법을 이용해서는 해석이 불가능하다. 그리하여 본 연구에서는 권혁빈[6]이 제안한 혼합차원기법을 적용하여 시험 구간에 대하여 해석을 수행하였다. 혼합차원기법이란, 수치 해의 정확성을 보장하며, 최소한의 공간 가정을 통하여 열차 근방은 축대칭으로 해석하고, 열차의 원방 터널 영역은 1차원으로 해석하는 기법을 의미한다.

본 연구의 목표는 현재 시험 운행 중인 G7 시제차

량이 시험구간 터널을 통과할 때 발생하는 터널 내부의 비정상 유동장을 해석하여, G7 고속 열차의 시험 계획 수립에 중요한 자료로 활용하여, 시험 기기 선택, 장비의 설치 위치 등의 결정을 지원하는 것이다. 또한 열차 내부의 압력 구배를 감소시켜 승객의 쾌적한 승차 환경을 위한 여압시스템 구축 및 보완에 자료를 제공하는 것이다. 이러한 복잡한 터널 내부의 물리적 유동 현상을 이해하기 위한 비정상 유동장의 정확한 해석은 터널 내부의 압력 변화와 미기압과 감소를 위한 대책을 마련하는 데에 유용한 정보를 제공할 것이다.

2. 본 론

(1) 지배방정식 및 수치 기법

본 연구에서는 식 1과 같이 일반 곡면 좌표계에서 유도된 축대칭 압축성 Euler 방정식을 사용하였다. \hat{Q} 는 보존량 벡터, \hat{F} , \hat{G} 는 플럭스 벡터, \hat{H} 는 소스항을 의미한다. 공간 변수들은 터널 직경으로 무차원화하였으며, 나머지 변수들은 자유류 값들로 무차원화하였다. 대류항의 플럭스는 Roe의 FDS를, 공간정확도를 높이기 위해서 Koren의 limiter를 도입한 MUSCL 기법을 사용하였고 시간적분법은 AF-ADI를 사용하였다.[5][6][7]

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

열차의 초기 조건은 열차가 터널에 진입하기 전에 발생할 수도 있는 수치적인 압축파를 피하기 위해서 권혁빈[7]이 제안한 완만한 출발(Smooth start) 기법을 사용하였다. 이 방법은 열차를 정지상태에서 서서히 주행속도까지 가속시키는 것으로서 수치적 파동을 완전히 제거할 수 있을 뿐 아니라 속도 변화가 완만하고, 짧은 거리에서도 출발이 가능하므로 계산 시간을 크게 감소시킬 수 있다. 수치 해석의 경계 조건은 터널 벽면에서의 유동 속도는 열차의 상대적 운동에 의해 결정되며, 벽면에서의 압력은 벽면에 수직인 운동량 방정식을 통하여 구할 수 있다. 또한 원방 경계조건은 자유흐름 조건과 유동의 방향에 따라 Riemann

불변량의 외압을 통하여 속도, 압력 및 밀도를 구하였고, 무반사 조건을 부여하였다.

(2) 혼합차원기법

열차-터널 상호작용의 문제에서는 터널 입/출구와 열차 근방 영역을 제외하면 터널 내부 유동장은 1차원 특성을 갖는다. 즉, 터널 축 방향(열차 진행 방향)의 유동 특성이 지배적이고, 터널 횡 방향 유동 특성은 무시할 수 있다. 이와 같이 유동장 특성에 따라 물리적인 공간 차원을 적절히 가정하여 유동장을 계산함으로써 계산 시간과 계산 용량을 줄이는 방법을 혼합차원기법이라 한다.

혼합차원기법의 가정을 검증하기 위해, Fig. 1과 같이 단일차원기법을 적용하여 축대칭으로 해석한 결과, 열차 전두부와 후미부로부터 열차 지름의 0.8배 이상 떨어진 영역에서의 터널 횡방향 속도 성분(\bar{V}_r)은 거의 0의 값을 가지며, 이 영역을 제외한 영역은 1차원 유동으로 가정하여 해석할 수 있다.[6]

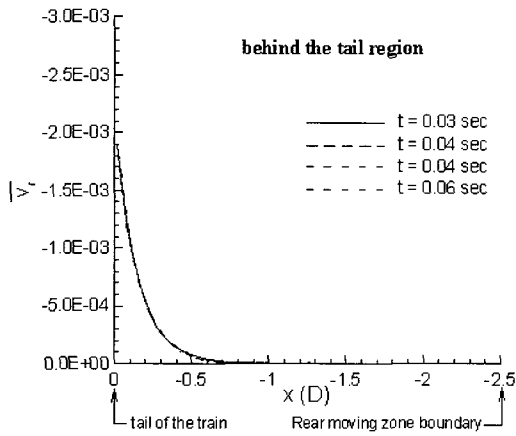


Fig. 1 Distribution of radial velocity around the train

따라서 Fig. 2와 같이 열차 근방의 유동장은 축대칭 Euler 방정식을 이용하여 해석하고, 이외의 유동장은 1차원 Euler 방정식을 이용하여 해석하였다.[6]

Fig. 3은 혼합차원 기법이 적용된 경우와 단일 영역으로 계산하였을 때의 계산 시간의 차이를 나타낸 그림이다. 터널 길이가 1 km 이하의 경우에는 혼합차

원기법을 적용해도 계산 시간에 큰 이득이 없으나, 1 km 이상의 경우에는, 축대칭으로 해석했을 경우에는 계산시간이 기하학적으로 증가하나, 혼합차원을 적용한 경우에는 산술적으로 증가하기 때문에 매우 큰 계산 시간의 이득을 얻을 수 있다. 특히 경부 고속전철의 구간 중에는 터널이 약 80개 존재하고, 1 km 이상의 긴 터널이 다수 존재한다. 또한 G7 차량의 시험 구간에도 운주 터널(4,020 m), 문곡 터널(3,000 m), 비룡 터널(2,910 m)의 경우에는 혼합차원기법을 적용한 수치 해석 기법이 매우 효과적임을 알 수 있다.

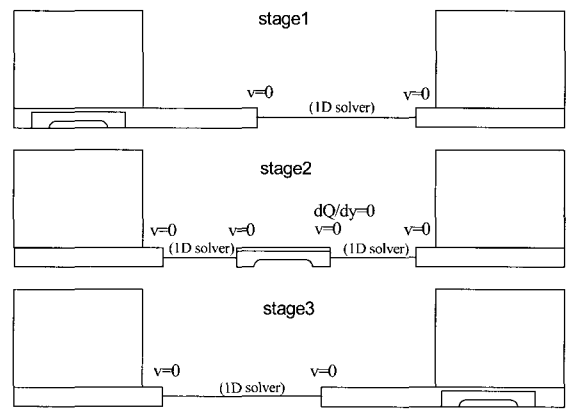


Fig. 2 Schematics of hybrid dimension method

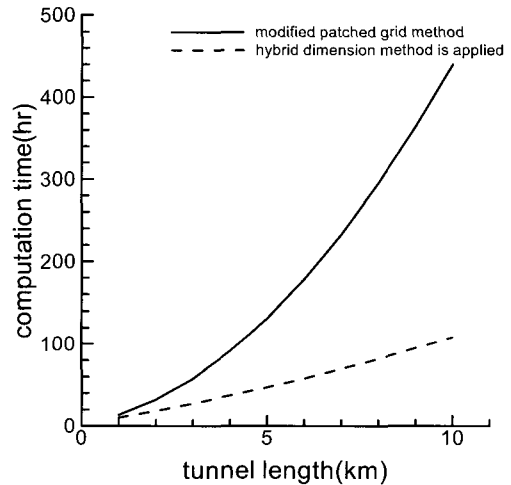


Fig. 3 Comparison of computational efficiency relative to tunnel length

(4) 계산 조건

경부고속전철 구간 중 현재 시제차 주행 시험이 이루어지고 있는 구간에는 Table 1과 같이 총 13개의 터널이 존재한다. 본 연구에서는 시제차 주행 시험 구간에 해당하는 터널을 시험 운행 속도 80, 130, 200, 300, 350 km/h에 대하여 해석을 수행하였다. 또한 열차 길이는 G7 시제차 길이인 7량 기준 140 m이며, 경부선 터널 단면적 107 m², G7 열차 단면적 8.5 m²를 이용하여 열차/터널 단면적 비를 계산하였다. 열차의 전두부가 터널 출구에 도착하면 계산을 종료하도록 하였다.

Table 1 Specification of the Test Tunnel

터널명	터널 길이(m)	터널명	터널 길이(m)
용화	1,800	상봉1	337
휴대	720	상봉2	730
고등	1,460	궁현	950
운주	4,020	비룡	2,910
노장1	850	문곡	3,000
노장2	200	시목	390
심중	920		

(5) 결과 및 토의

Fig. 4와 Fig. 5는 터널 길이 850 m인 노장 1 터널에 대해서 터널 입구로부터 20 m, 400 m, 800 m 떨어진 지점에서의 시간에 따른 압력 변화와 열차 진행에 따른 압력파 패턴을 의미하는 X-t 선도의 그래프이다.

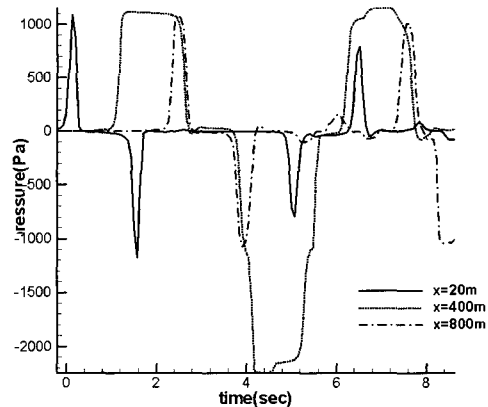


Fig. 4 Pressure variation at 20, 400, 800m from entrance of Nojang tunnel(850 m) at train velocity = 350 km/h

Fig. 4를 보면 터널 내부 특정지점에서의 압력 변화의 양상이 서로 다른 것을 알 수 있는데, 이러한 차이는 Fig. 5의 X-t 선도를 통해 그 원인을 유추할 수 있다. 측정 지점이 입구로부터 멀수록 압축파가 늦게 도달하는 것을 확인할 수 있으며, 점성을 고려하지 않은 압축파의 크기는 약 1,000 Pa 정도임을 확인할 수 있다. 점성에 의한 소산을 고려하지 않았기 때문에 압축파의 크기는 터널 출구를 향해 진행해도 거의 일정함을 확인할 수 있다. 터널입구로부터 20 m, 800 m 떨어진 지점에서의 압력 패턴은 열차 진입에 의한 압력 상승에 이어, 열차 통과에 의한 압력 하강이 발생하기 때문에 완전한 압축파의 형상을 확인할 수 없다. 그에 비하여 400 m 지점에서는 열차 전두부 진입에 의한 압축파와 후미부에 의한 팽창파의 완벽한 형태를 확인할 수 있다. Fig. 3과 같이 열차의 터널 진출입시에는 터널 내부에 매우 복잡한 압력 변화가 수반되므로, 유동장의 정확한 해석을 위해서는 X-t 선도가 반드시 필요하다. 20 m 지점의 첫 번째 압축파는 터널 출구에서 일부는 충격성 소음형태로 외부로 방사되고, 나머지는 터널 안쪽으로 반사되어 팽창파의 형태로 4.5 초 부근에서 다시 측정된다.

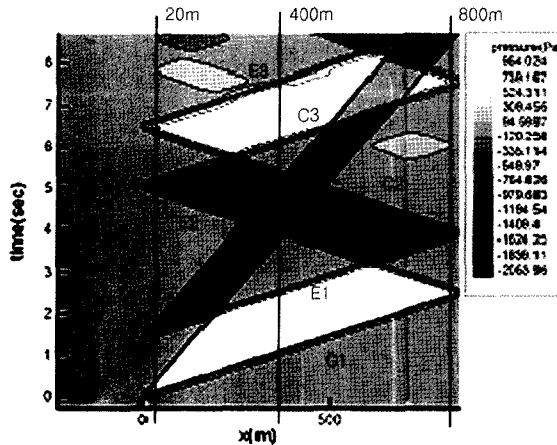


Fig. 5 X-t Diagram of Nojang tunnel(850 m) at train velocity = 350 km/h

400 m 떨어진 지점에서는 진입 압축파의 영향으로 압력이 상승하지만, 압력 하강은 열차 후미부의 터널 진입에 따른 팽창파에 의하여 발생한다. 이는 팽창파의 전파속도가 열차 속도보다 훨씬 빠른 음속에 가깝기 때문이다. 그리고 이 지점에서는 4.5 초 정도에 매우 큰 부의 영역이 존재하는 것을 볼 수 있는데, 이는 터널 출구 반사 팽창파가 터널 내를 주행 중이던 열차와 만나면서 열차 주변의 음압 영역과 중첩되면서 발생하는 현상이다. 다음으로 터널 출구에 가까운 800 m 지점에서는 압축파가 도달한 이후 바로 출구에서 반사되는 팽창파의 영향으로 압력이 상승하다가 하강하고, 열차가 터널을 빠져나갈 시점에 열차통과로 인한 압력 강하 현상이 나타난다.

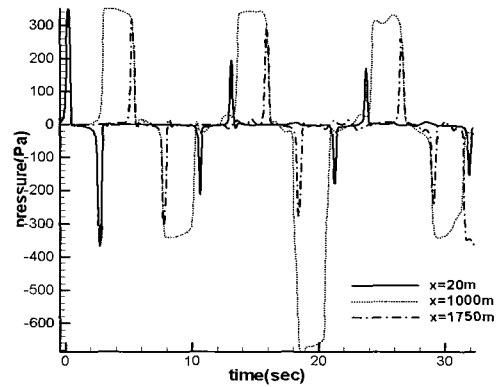


Fig. 6 Pressure variation at 20, 1000, 1750m from entrance of Yonghwa tunnel(1800 m) at train velocity = 200 km/h

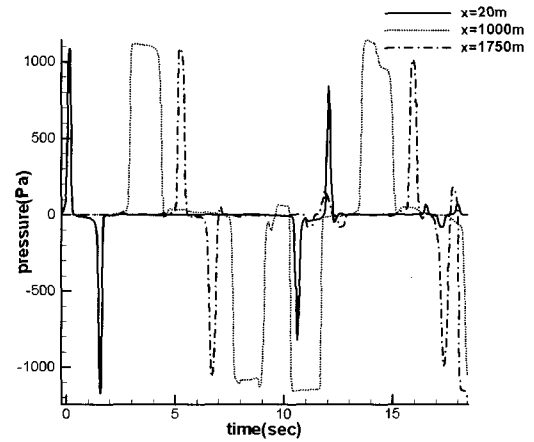


Fig. 7 Pressure variation at 20, 1000, 1750m from entrance of Yonghwa tunnel(1800 m) at train velocity = 350 km/h

Fig. 6과 Fig. 7은 터널 길이 1,800 m인 용화 터널에서의 터널 입구로부터 20 m, 1,000 m, 1,750 m 떨어진 지점에서 각각 열차 속도 200, 350 km/h일 때의 터널 내부 압력 변화를 나타낸 그래프이다. 열차 속도에 따라 열차 진입에 따른 압축파의 크기가 달라지며, 압축파와 열차의 상대적 위치가 달라지기 때문에 서로 다른 유동장을 형성하게 된다. 즉, 200 km/h로 터널을 통과할 경우, 350 km/h로 통과할 때보다

압력 교란의 크기는 작지만, 교란의 영향을 받는 시간은 길어진다. 또한 열차 속도 차이로 Fig. 6에서 확인할 수 있듯이 1,000 m 지점에서 팽창파가 도달하는 시점에 열차의 진행으로 발생하는 음압장의 증첩으로 압축파 2배정도 크기의 부의 압력장이 형성된다.

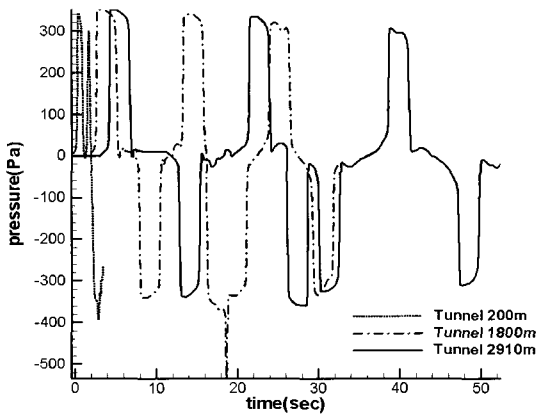


Fig. 8 Pressure variation at center of the tunnel(Nojang2, Yonghwa, Birong) at train velocity = 200 km/h

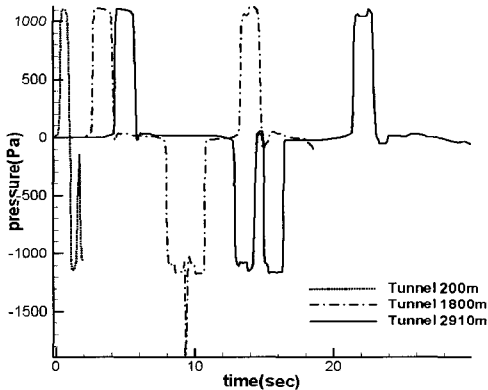


Fig. 9 Pressure variation at center of the tunnel(Nojang2, Yonghwa, Biryong) at train velocity = 350 km/h

Fig. 8과 Fig. 9는 터널 중심에서 측정된 터널 길이, 열차 속도에 따른 터널 내부 압력 변화를 의미한다.

터널의 길이가 길수록, 열차의 속도가 낮을수록 열차가 터널을 통과하는 시간이 길어지므로 압력 교란을 받는 횟수가 증가하는 것을 알 수 있다. 노장 2터널과 같이 200 m의 짧은 터널의 경우는 터널 출구에서 팽창파로 반사되기 이전에 열차가 터널을 빠져나가는 것을 확인할 수 있다.

이와 같이 측정 위치, 열차 속도, 터널 길이에 따라 형성되는 최대, 최저 압력의 크기, 위치를 용화 터널의 경우에 대하여 Table 2에 정리하였다.

Table 2 The Position of the Maximum, Minimum Pressure variation for the train velocity at Yonghwa tunnel

터널 명칭 및 길이	열차 속도 (km/h)	최대 압력 (Pa)	최대압력 형성위치 (m)	최저 압력 (Pa)	최저압력 형성위치 (m)
용화 터널 1,800m	80	58.24	28	-84.25	263
	130	153.99	627	-287.59	355
	200	355.89	1162	-699.75	511
	300	830.31	1030	-1630.05	712
	350	1145.56	991	-2266.66	809

열차 속도가 증가함에 따라 최대, 최저 압력의 크기도 증가하며, 형성 위치도 속도에 관련되어 변화하고 있다. Table 2에 표시한 최대, 최소 압력 지점은 점성 효과에 의한 압력 변화와 열차와 공기의 상대적 속도에 의한 동압은 고려하지 않은 것이다. 열차의 표면 압력을 고려할 때에는 일반적으로 열차 전두부 정체 영역에 고압부가, 열차의 어깨 부분의 팽창 영역에 저압부가 형성된다고 알려져 있다.[4]

3. 결 론

본 연구에서는 G7 시제차량이 터널에 진입하였을 때 형성되는 터널 내부의 비정상 유동장 해석을 위하여 시험 구간 내 13 개의 터널에 대하여 혼합차원기법을 적용한 축대칭 압축성 방정식을 이용하여 수치 해석을 수행하였다.

고속 열차의 터널 통과 시에는 열차 진입에 의한 압축파와 팽창파의 상호 교란이 발생하며, 이러한 비정상 압력장은 열차 속도, 열차 길이, 터널 길이, 측

정 위치, 열차/터널 단면적 비등에 영향을 받으므로 이런 변수를 모두 고려하여 해석을 수행하여야 한다.

본 연구결과는 G7 차량의 여압시스템 구축 및 보완에 기본 자료로 사용될 수 있고, 현재 진행중인 G7 시제차량의 실험 결과에 대한 검증, 보완 및 계측장비의 선택 및 설치 위치 등을 결정하는데 활용이 가능할 것이다.

또한 터널 내부의 압력변화 저감 대책인 터널 후드, 통풍구, 경사 갱구 등에 대한 연구가 지속적으로 수행될 예정이다.

후 기

본 연구 결과는 “서울대 BK 21 사업”과 “고속전철 자갈 비산 방지 기술개발 사업” 연구 결과의 일부분임을 밝히며, 당 해당기관에 감사의 말씀을 전합니다.

참 고 문 헌

1. 김태윤, 황재호, 이동호, “고속 열차의 터널 진입 시 발생하는 압력파의 실험적 연구”, 춘계항공우주학회대회, pp. 96-99, 2001.
2. Maeda, T., Matsumara, T., Iida, M., Nakatani, K. and 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, JSME, Vol. 2, pp. 315-319, 1993.
3. Ogawa, T. and Fujii, K., "Numerical Investigation of Three-dimensional Compressible Flows induced by a Train moving into a Tunnel", Computer and Fluids Vol. 26, No. 6, pp. 565-585, 1997.
4. 황재호, 이동호, “교행하는 고속전철 주위의 비정상 공기력에 대한 수치적 연구”, 춘계기계학회논문집 B, pp. 599-604, 2000
5. 고속 전철 기반기술 개발사업 - 공력 설계 및 해석 기술 개발, 2단계 1, 2, 3 차년도 보고서.
6. Hyeok-bin Kwon, Tae-yoon Kim, Dong-ho Lee, Moon-sang Kim, "Numerical Simulation of Unsteady Compressible Flows Induced by a High-speed Train Passing through a Tunnel", Journal of Rail and Rapid Transit, Accepted.
7. 권혁빈, 김태윤, 이동호, 김문상, “혼합차원기법을 이용한 고속열차의 터널 통과 시 발생하는 비정상 압축성 유동장의 수치 해석”, 한국항공우주학회지 30권 6호, pp. 78-83, 2002.