

미기압과 저감을 위한 고속전철 전두부형상의 최적화설계

Nose Shape Optimization of the High-speed Train to Reduce the Micro-pressure Wave

권혁빈*
Kwon, Hyeok-Bin

이관중**
Yee, Kwan-Jung

이동호***
Lee, Dong-Ho

ABSTRACT

The tunnel booming noise generated by a train moving into a tunnel has been one of the most serious constraints in the development of the high-speed trains. It is well known that the nose shape of the train has the significant influence on the intensity of the booming noise. In this study, the nose shape has been optimized by using the response surface methodology and the axi-symmetric compressible Euler equations. The parametric studies are also performed with respect to the slenderness ratio, the blockage ratio and the train speed to investigate their sensitivities to the optimization results. The results show that it is possible to define more general design space by introducing the Hicks-Henne shape functions, resulting in the more effective nose shape than that of Maeda. The mechanism and the aspects of the train-tunnel interaction were also investigated from the results of the parametric study.

1. 서론

열차가 터널에 진입하게 되면 공기의 압축성 효과로 인하여 압축파가 발생하게 되며 터널 내부를 음속으로 진행하다가 터널출구에서 일부는 팽창파로 반사되며 일부는 미기압파(Micro-pressure wave)로 방사된다. 미기압파는 터널 출구 주변에서 심각한 환경소음문제를 야기하는 충격성 소음(Booming noise)의 원인이므로 발생메커니즘과 저감책이 오래전부터 연구되었다.

일반적으로 미기압파의 크기는 압축파의 파두구베에 비례한다고 알려져 있다. 그리고, 압축파의 파두구베, 즉 최대압력변화율은 열차의 속도, 열차-터널 단면적비, 전두부의 세장비, 전두부의 단면적분포 등에 의해 결정된다. 즉, 열차의 속도가 작을수록, 열차-터널 단면적비가 클수록, 전두부의 세장비가 클수록 미기압파의 크기가 작아진다. 그러나, 열차의 속도를 낮추면 그만큼 운행시간이 늘어나고, 감속에 의한 에너지 효율의 감소가 예상되며, 열차-터널 단면적비를 증가시키기 위해 터널 단면적을 크게 하면 높은 터널건설비용이 소요된다. 따라서, 적절한 전두부 길이를 선택하여 단면적분포를 최적화시키는 것은 미기압파 저감설계에서 가장 효율적인 대안이 될 수 있다.

* 정회원, 서울대학교 항공우주공학과 대학원

** 서울대학교 정밀기계설계공동연구소 연구원

*** 정회원, 서울대학교 기계항공공학부 교수

미기압과를 저감시키는 또 다른 방법으로서 터널 후드(hood)[1], 수갱(air shaft), 수막(water curtain)[2] 그리고 최근에는 acoustic chamber[3]등 다양한 미기압과 저감시설의 개발을 통하여 열차-터널 상호작용을 근원적으로 저감시키는 연구도 활발히 이루어지고 있다. 이러한 차량 및 터널의 최적화설계는 동일한 설계기준을 만족시키는 조건에서 터널 통과 시 열차의 최고속도를 높여줄 뿐만 아니라, 터널 건설에 소요되는 막대한 비용을 절감하는 데 크게 기여할 수 있을 것이다.

Maeda[4] 등은 전두부형상을 축대칭으로 모델링한 뒤, 미기압과를 최소화하는 전두부 면적분포에 대해 연구를 수행한 바 있다. 그의 연구에 따르면, 타원형, 포물형, 콘형 등 세 가지 기본적인 축대칭 전두부형상에 대해 2차원 Euler방정식으로 해석을 수행한 결과, 단면적변화율이 일정한 포물형 전두부가 가장 작은 최대압력변화율을 가진다는 것을 밝혀냈다. 그리고, 포물형 전두부를 기본형상으로 하여 Rosenbrock's direct search method라는 최적설계기법을 적용한 결과 포물형 전두부에 비해 약 10%의 미기압과 저감효과를 가지는 최적화된 전두부형상을 설계했다.

본 연구에서는 일반화된 전두부 형상정의방법을 도입하여 보다 효과적인 최적화설계를 수행하였고, 열차속도, 열차-터널 단면적비, 전두부 세장비 등을 바꾸어가며 최적화설계를 수행하여 최적화된 형상과의 관계를 조사하였다. 해석에 사용된 지배방정식은 비정상 축대칭 Euler 방정식이며 비정상 유동장에 적합하도록 이동격자계를 도입하였고 격자간의 유동정보교환을 위해서는 Patched grid 기법이 적용되었다. 최적화 과정에서 설계점을 선택하고 목적함수와 경계조건의 수치적 모델을 구성하기 위해서 반응면기법(Response Surface Methodology)이 사용되었다.

2. 수치해법

2.1 지배방정식 및 수치해법

수치해석에 적용된 지배방정식은 아래에 나타난 일반화된 곡선 좌표계(generalized curvilinear coordinate)로 변환한 축대칭 비정상 압축성 Euler 방정식이다.

$$\frac{1}{J} \frac{\partial Q}{\partial \tau} + \frac{\partial E}{\partial \xi} + \frac{\partial F}{\partial \eta} + H = 0 \quad (1)$$

위의 방정식을 차분화하여 해를 구하는 과정에서는 풍상차분법(upwind scheme)을 이용한 유한 체적법(Finite Volume Method)을 이용하였으며, 수치해석기법으로는 Roe의 플럭스차이 분할기법(FDS:Flux Difference Splitting)과 Van Leer의 플럭스벡터 분할기법(FVS:Flux Vector Splitting)을 이용하였다. 공간 정확도를 높이기 위해 물리 변수를 외삽하는 MUSCL기법을 사용하였으며, Koren differential limiter를 도입하였다. 시간 적분에는 Euler 후방 차분의 내재적 방법을 사용하였으며, 시간간격은 동일시간간격(constant time stepping)을 사용하였으며, 행렬 처리에는 AF-ADI 기법을 도입하였다.

2.2 초기조건 및 경계조건

비주기적인 비정상 문제는 비물리적 수치적 교란이 발생하지 않도록 적절한 초기조건을 부여하여야 한다. 열차의 터널진입문제의 경우 일반적으로 열차를 터널 입구로부터 아주 먼 거리에서 출발시켜 급작스런 출발로 인해 발생하는 수치적인 압축과가 해에 영향을 미치지 않도록 하는 급작스런 출발(Impulsive start)[5]이 주로 사용되고 있으나, 본 연구에서는 권혁민[6]이 제안한 완만한 출발(Smooth start)조건을 사용하였다. 이 방법은 속도의 2차 미분치까지 연속하는 조건을 만족시키는 5차 다항방정식을 이용하여 열차를 정지상태에서 주행속도까지 가속시키는 방법으로, 유동의

불연속성이 나타나지 않으므로 수치적 파동을 완전히 제거시킬 수 있을 뿐 아니라 급작스런 출발 조건보다 훨씬 짧은 거리에서 출발이 가능하므로 계산용량과 시간을 줄일 수 있다.

각 영역의 외부경계는 각각의 물리적 성질에 따라 벽면에 해당하는 터널 내부와 입/출구벽면 및 고속전철 표면은 미끄럼 경계조건을 주었고, 나머지 원방에 해당하는 경계는 유동의 방향에 따라 Riemann 불변량에 근거한 특성형태의 경계조건을 부여하거나, 무반사조건을 사용하였다.

2.3 영역분할기법

열차가 터널에 진출입하는 것과 같이 물체간의 상대적인 운동이 있는 경우 단일화된 격자의 형성이 힘들다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 정렬격자계를 이용한 영역분할기법 (zonal method)을 이용하였다. 그리고, 영역 간의 유동정보의 교환을 위해서는 직선의 상대적 운동을 하는 물체에 대해서 겹쳐지는 블록들 간의 격자경계면에서 빠르고 정확하게 유동정보를 전달할 수 있는 가상경계면을 이용한 Patched 격자기법[7]을 이용하였다. Fig. 1에서 보여지듯이 계산영역은 열차 주위를 둘러싼 이동격자계와 터널의 입구, 출구, 내부에 형성된 직사각 격자계 등 네 개의 부영역으로 분할되었으며 가상경계면을 이용한 Patched 격자기법은 zone1과 zone2간의 유동정보교환에 이용되었다.

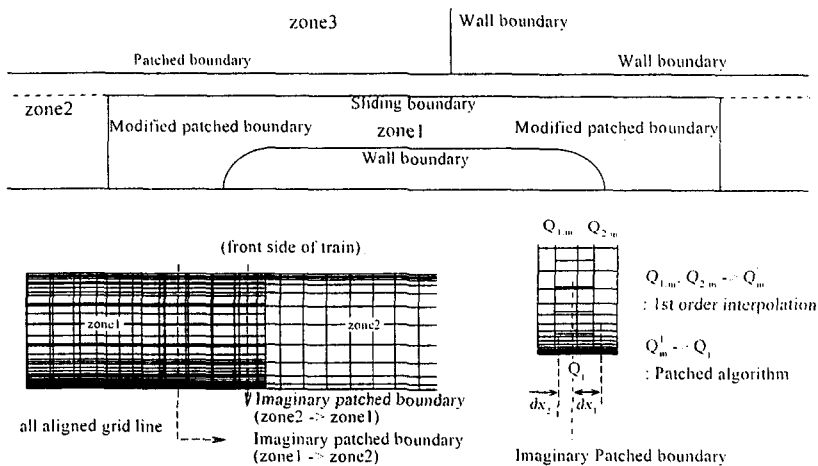


Fig. 1 가상경계면을 이용한 Patched 격자기법

3. 최적설계기법

3.1 반응면 기법(Response Surface Methodology)

반응면기법은 실험계획법(DOE)의 일종으로서 설계변수에 대한 반응면을 구성한 뒤 모델링된 반응면 상에서 수행된 해석값을 분석하여 최적값을 찾는 방법이다. 본 연구에서는 2차 다항식을 이용하여 반응을 모델링하였으며, 이에 대한 자세한 설명은 Ref 8, 9에 있다.

3.2 형상함수를 이용한 형상정의

보다 일반적인 설계공간을 얻기 위해 항공기 익형설계에서 널리 쓰이는 Hicks-Henne 형상함수 (shape function)를 도입하였다. Hicks-Henne 형상함수는 아래와 같이 표현된다.

$$Y = Y_{base} + \sum_{i=1}^n W_i F_i \quad (4)$$

여기서 Y_{base} 는 기본형상(Baseline)을 의미하며 F_i , W_i 는 각각 형상함수와 이에 대한 가중치를 의미한다. 아래 Fig. 2에서는 설계에 사용된 형상함수가 나타나 있다.

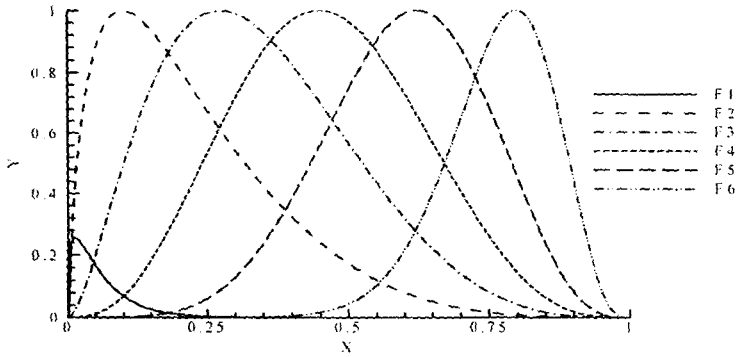


Fig. 2 형상함수의 분포

4. 결과

4.1 해석코드의 검증

해석코드를 검증하고 설계의 초기형상(Baseline)을 정하기 위하여 포물형, 타원형, 원형의 세 가지 전두부 형상에 대해 터널에 진입하는 과정을 수치해석하였다. 해석조건은 전두부세장비, $a/b = 5$, 열차-터널 단면적비, $R = 0.116$, 열차의 속도, $V = 225 \text{ km/h}$ 이며 같은 조건에서 수행된 Maeda[4]의 실험치와 비교하여 아래 Fig. 3에 나타내었다.

그림에서 보여지는 바와 같이 최대압력상승값은 전두부의 형상에 영향을 받지 않으나, 이를 시간에 대해 미분한 값, 즉 최대압력변화율은 포물형 전두부에서 가장 작게 나타난 것을 알 수 있다. 또한, 본 연구의 수치해석 결과는 Maeda의 실험치와 잘 일치함을 알 수 있다.

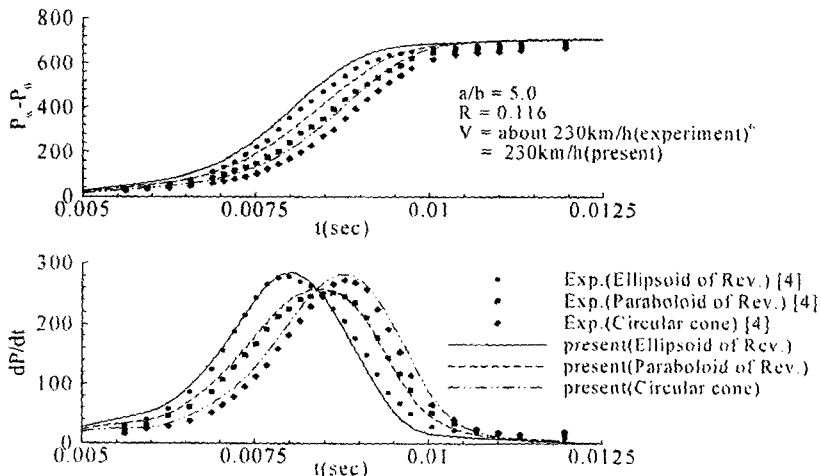


Fig. 3 압축파의 형상(Present, Meada's results)

4.3 Maeda의 설계결과와의 비교

아래 Fig. 4는 Maeda의 최적 단면적분포와 본 연구의 최적설계결과를 나타내었다. Maeda 형상에 비해 본 연구의 결과는 앞쪽이 더 두껍고 50%이후 지점에서 더 얇은 형상을 나타내

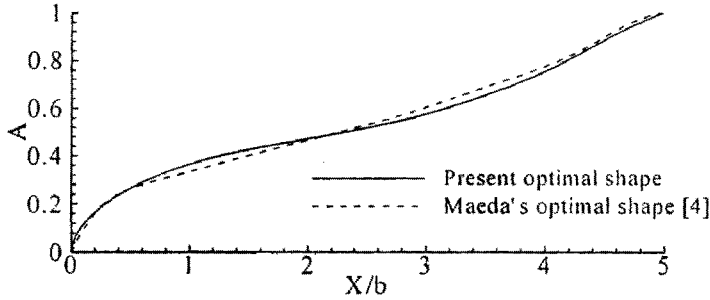


Fig. 4 미기압과를 최소화하는 전두부 형상 (Present, Meada's results)

Fig. 5에서는 Fig. 4에 나타난 초기형상(Baseline)과 최적형상이 터널에 진입할 때 발생하는 압축파의 형상을 보여주고 있다. 시간은 열차의 전두부가 터널 입구에 진입하는 시점을 0으로 하였으며, 무차원화된 값으로 표현하였다. 시간(t)과 압력(p), 압력변화율 ($\frac{dp}{dt}$)의 무차원화에 사용된 관계식은 다음과 같다.

$$t^* = \frac{t}{d/V}, \quad p^* = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2} \rho_0 V^2}, \quad \left(\frac{dp}{dt}\right)^* = \frac{dp}{dt} \left/ \left(\frac{\rho V^3}{2d}\right)\right. \quad (5)$$

d : 터널의 반지름, V : 열차의 속도, p : 압력, p_0 : 대기압, ρ_0 : 대기밀도

Fig. 5에 나타난 바와 같이 본 연구를 통해 설계된 형상이 Maeda의 최적형상에 비해 최대압력변화율, $\left(\frac{dp}{dt}\right)^*_{\max}$ 를 약 10 %정도 작게 발생시키는 것으로 나타났다. 이것은 Maeda의 설계에서는 2개의 설계변수를 사용했으나 본 연구에서는 형상함수의 중첩을 통해서 6개의 설계를 사용하여 설계공간이 더 커지기 때문에 보다 효율적인 설계가 이루어졌음을 말해준다.

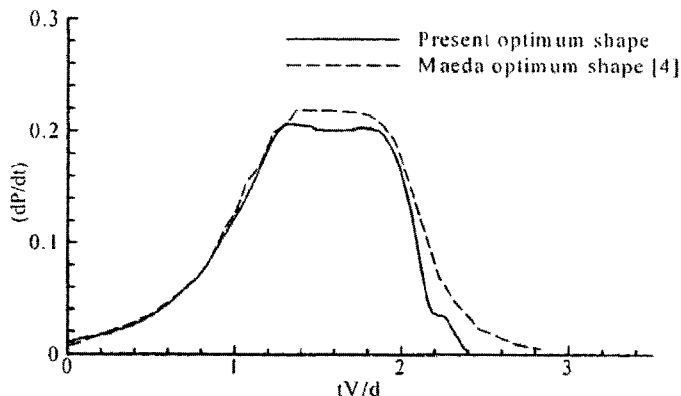


Fig. 5 압축파 파두의 압력변화율 (Present, Meada's results)

4.4 유동조건에 따른 최적화설계의 결과

Table 1에는 열차의 속도, 열차-터널 단면적비, 전두부의 세장비등을 달리하며 수행한 최적설계의 결과를 나타내었다. 각각의 설계조건에 대해 총 50번의 계산이 수행되어 반응면을 구성하였다.

초기형상(Baseline)인 포물형 전두부에 비해 최적설계된 전두부 형상은 대략 16%~18%이상의 높은 성능향상을 가져왔다. 다만, 전두부 세장비가 3인 Case04와 2인 Case05의 경우에는

$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max}^*$ 의 감소율이 각각 9.6%와 2.4%에 불과했다.

Table 1 설계조건과 미기압과 저감 최적설계결과

	Train speed (km/h)	a/b	R	$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max}^*$			Reduction(%)
				Optimized Results		Baseline	
				calculated	predicted		
Case01	225	5	0.116	0.203	0.210	0.248	18.0
Case02	300	5	0.116	0.209	0.213	0.251	16.8
Case03	350	5	0.116	0.212	0.216	0.255	16.9
Case04	225	3	0.116	0.291	0.292	0.322	9.6
Case05	225	2	0.116	0.367	0.367	0.376	2.4
Case05	225	5	0.2	0.330	0.336	0.393	16.1
Case05	225	5	0.3	0.497	0.497	0.574	16.6
Case06	350	2	0.3	0.970	0.984	1.164	16.7

아래 Fig. 6~8에는 각각의 파라메타의 변화에 따른 최적화된 전두부 형상과 압력과 파두 등을 나타내었다. 먼저, Fig. 6에서는 속도, V (=225 km/h, 300 km/h, 350 km/h)에 따른 변화가 나타나 있는데, 모든 경우에 대하여 전두부형상이 거의 동일하게 나타났다. 이것은 열차속도가 바뀌어도 최적화 형상은 거의 변화가 없다는 것을 의미한다. 최적화된 전두부는 앞쪽의 20%부분에서 단면적이 크게 증가하며 뒤쪽에서는 단면적의 증가율이 작음을 알 수 있는데, 이러한 결과는 다른 설계조건에서도 공통적으로 나타난다.

Fig. 7에서는 세장비, a/b (=5, 3, 2)에 따른 변화가 나타나 있는데, 세장비가 줄어들수록 최적설계의 효과가 점점 떨어져서 $a/b = 2$ 인 경우 최적화 설계로 인한 미기압과의 저감효과가 불과 2.4%에 머무르는 것으로 나타났다. 따라서, 전두부 최적화설계는 항상 의미를 갖는 것이 아니라, 최소한 a/b 가 2 이상인 전두부에 대해서 효과를 가지며, a/b 가 증가할수록 설계의 효과가 커진다고 결론지을 수 있다.

Fig. 8에서는 열차-터널 단면적비, R (=0.116, 0.2, 0.3)에 대한 설계결과가 나타나 있다. 이 결과를 통해 단면적비는 미기압과의 강도에 가장 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있으며 최적화설계를 통해 얻는 효과도 가장 크다는 것을 알 수 있다. 특히, 높은 단면적비에 대해서 최적화설계의 잇점은 더욱 두드러지는데, 열차의 단면적이 일정하다고 가정할 경우 단면적비 0.3에서의 최적설계효과는 단면적비 0.116에서의 효과보다 네 배정도 더 큰 것으로 나타났다.

Fig. 9에는 3차년도 한국형 고속철도차량의 전두부 단면적분포를 동일한 세장비의 포물형, 타원형 전두부와 함께 나타내었다. 한국형 차량의 전두부는 최대단면적에 도달하는 지점이 약 14 m로서 세장비가 약 8.3에 해당하지만, 전방 70% 지점에서 이미 최대단면적의 90%에 도달해버리므로 타원형 전두부보다 더 불리한 형상을 나타내고 있다. 그러나, 세장비가 3인 타원형 전두부와 비교해볼 때에는 현재의 전두부가 최적화된 형상에 더 가까움을 알 수 있다.

동력차의 외형은 내부장치의 탑재공간확보나 제작성의 고려사항 때문에 전두부의 형상을 자유로이 바꿀 수 없다. 그러므로, 현재 개발중인 한국형 고속철도차량의 전두부는 이러한 공간확보나

제작성의 문제를 고려할 때, 실질적인 세장비는 약 3정도로 줄어들게 되며 이러한 조건하에서 미기압과를 효율적으로 저감시키는 효율적인 설계를 이루어냈다는 것을 알 수 있다.

그러나, 터널 단면적이 107 m^2 인 경우선에서는 열차-터널 단면적비, R 이 0.083에 불과해 근원적으로 미기압과가 작게 발생하도록 설계되었지만, 이보다 단면적이 좁은 터널, 예를 들어 호남선의 터널을 통과하게 될 경우 전두부의 최적설계를 통해 미기압과를 저감시키는 노력이 필요하다.

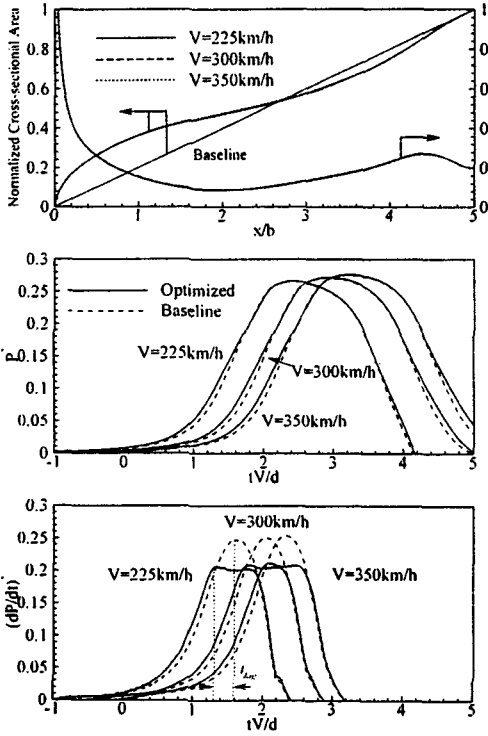


Fig. 6 열차속도에 따른 최적화설계 결과

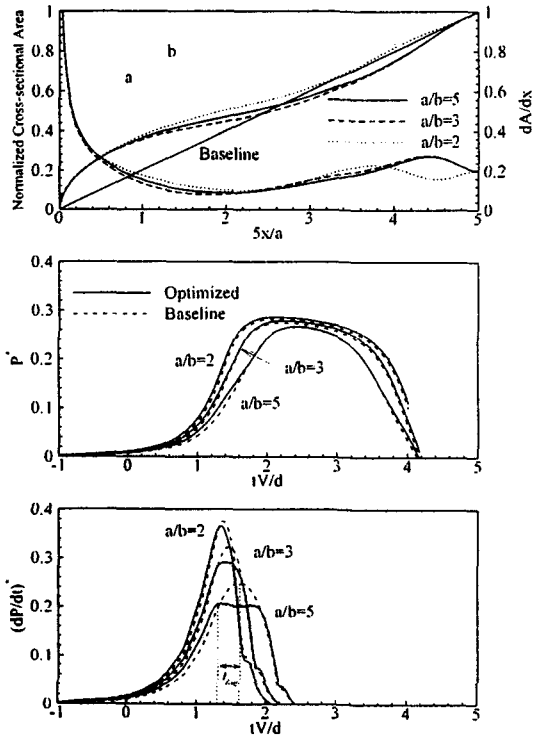


Fig. 7 전두부 세장비에 따른 최적화설계 결과

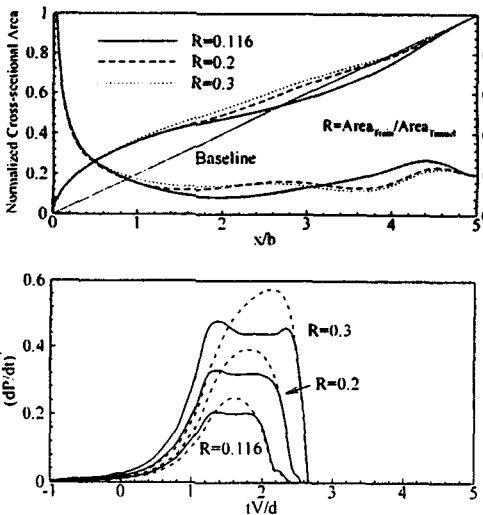


Fig. 8 열차-터널 면적비에 따른 최적화설계 결과

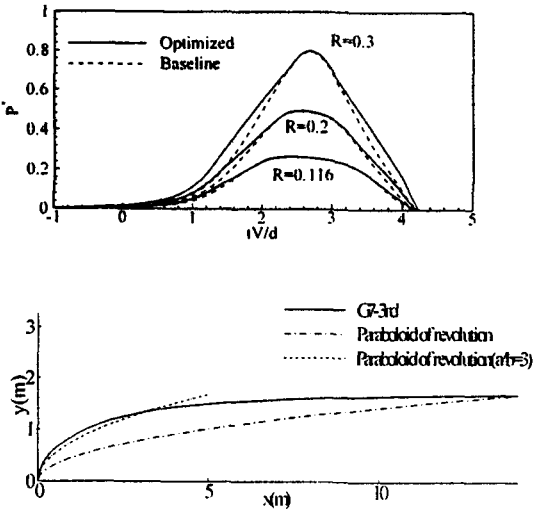


Fig. 9 한국형 고속전철 차량의 단면적 분포

5. 결론

본 연구에서는 터널 출구에서의 미기압파를 최소화하기 위하여 열차 전두부의 단면적분포를 수적으로 최적화하였다. 최적화설계의 결과를 분석해볼 때 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1. 최적화된 형상들은 모두 전방 20% 지점에서 급격히 단면적이 증가하며, 이후에는 완만하게 증가하다가 다시 50%지점 이후부터 빠르게 증가하는 단면적 분포를 보였다.
2. 최적화된 전두부형상은 속도에는 거의 무관한 것으로 보여지며, 세장비가 2보다 작을 경우에는 미기압과 저감효과가 거의 없기 때문에 큰 의미가 없다. 열차-터널 단면적비가 클 경우 미기압파의 크기가 커지는 반면에 최적설계의 효과도 커지기 때문에 좁은 터널에서 전두부 형상최적화를 통한 미기압과 저감설계는 큰 효과를 나타낼 것으로 기대된다.
3. 현재 개발중인 한국형 고속전철의 전두부는 동력차의 내장재 공간확보와 제작성 등의 문제를 고려할 때 경부선 터널에서 좋은 미기압과 저감성능을 나타내었다.
4. 호남선과 같이 터널 단면적이 좁은 구간에서 고속철도차량이 운행되기 위해서는 내장재의 소형화와 제작성의 향상을 통해 보다 자유로운 전두부 설계가 이루어져야 하며 이러한 조건에서 전두부 최적설계가 이루어질 경우 경부선보다 약 20%정도 좁은 터널에서도 동일한 미기압과 성능을 나타내는 전두부를 설계할 수 있을 것으로 기대된다.

후기

본 연구는 G7 고속전철기술개발사업의 일환인 「고속전철 공력설계 및 해석기술 개발」에 관한 연구결과 중 일부임을 밝힙니다. 또한, 과제수행을 일부 지원한 BK21 Project 에도 감사드립니다.

참고문헌

- [1] S. Ozawa, T. Maeda, T. Matsumura, K. Uchida, H. Kajiyama and K. Tanemoto, "Countermeasures to Reduce Micro-pressure Waves Radiation from Exits of Shinkansen Tunnels" *Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels*, pp. 253-266, 1991
- [2] S. Raghunathan, H. D. Kim, T. Setoguchi, "Impulse noise and its control" *Progress in aerospace sciences*, Vol. 34, No. 1/2, pp. 1-44, 1998
- [3] T. Aoki and A. E. Vardy, "Passive Alleviation of Micro-pressure Waves from Tunnel Portals" *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 220, No.5, pp.921-940, 1999
- [4] M. Iida, T. Matsumura, K. Nakatani, T. Fukuda, and T. Maeda, "Effective Nose Shape for Reducing Tunnel Soinc Boom" *QR of RTRI*, Vol. 38, No. 4, pp.206-211, 1997
- [5] Ogawa, T., Fujii, K., Numerical Simulation of Compression Flows Induced by a Train Moving into a Tunnel, *Computational Fluid Dynamics Journal* Vol.3 No.1 (1997), p.63-82.
- [6] 권혁빈, 이동호, "터널에 진입하는 고속전철의 수치해석을 위한 초기조건 연구" 96년 항공우주학회추계학술대회 논문집, 1996년
- [7] 권혁빈, 이동호, "고속전철의 터널진입 해석을 위한 가상경계면을 이용한 Patched 격자기법의 연구" 98년 항공우주학회추계학술대회 논문집, 1998년
- [8] R. H. Myers and D. C. Montgomery, *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, John Wiley & Sons, 1995
- [9] A. A. Guinta, *Aircraft Multidisciplinary Design Optimization Using Design of Experimental Theory and Response Surface Modeling Methods*, Ph. D. Dissertation, Department of Aerospace Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, 1997