

터널에 진입하는 고속전철 주위의 3차원 점성유동과 압축파 특성에 관한 수치해석적 연구

신 창 훈^{*1}, 박 원 규^{*2}

Numerical study of Three-Dimensional Viscous Flow and Compression Wave Induced by the High Speed Train Entering into a Tunnel

C. H. Shin and W. G. Park

The three-dimensional unsteady compressible Full Navier-Stokes equation solver with sliding multi-block method has been applied to analyze three dimensional characteristics of the viscous flow field and compression wave around the high speed train which is entering into a tunnel. The numerical scheme of AF + ADI was used to efficiently solve Navier-Stokes equations in the curvilinear coordinate system. The vortex formation owing to the viscous interaction around the train was found and the generation of compression wave due to the blockage effects was observed ahead of the train in the form of plane wave. The three dimensional characteristics of the flow field compared to the analytic results were discussed in detail. The variation of pressure of tunnel wall surface and velocity profile of the train are identified as the train enters into a tunnel. The changes in aerodynamic forces and streamlines of each specific sections are also discussed.

Key Words: 고속전철, 압축성유동, 압축파, 점성상호작용, Sliding Multi Block, N-S 방정식

1. 서론

세계 각국에서 현재 운행하고 있거나 개발 중에 있는 차륜식 고속전철도 그 상용운행속도가 250 ~ 330km/h에 달하고 있고, 시험 최고속도 515.3km/h를 달성하였으며, 현재 상용운행을 위해 시험운행중인 일본의 자기부상식 고속전철(HSST)의 경우는 상용속도 400~550km/h, 향후 약 800km/h의 속도까지의 상용운행을 계획하고 있다.

이러한 초고속도로 운행되는 고속전철의 공력 설계와 운영의 문제는 기존의 지상운송체나 철도차량의 경우와는 크게 다르다. 특히 고속화에 따른 공기저항은 속도의 2승, 요구동력은 속도

의 3승에 비례하여 증가되는 것으로 알려져 있고, 공력소음은 속도의 6승에 비례하여, 시속 300km로 주행시 최대 소음원이 되고, 그 이상의 속도증가에 따라서는 기하급수적인 증가를 가져오는 것으로 알려져 있다. 더욱이 우리나라와 같이 산간지형이 차지하는 비율이 높아, 전체 선로에서 터널구간의 비율이 30%이상인 경우에는 이러한 고속의 터널통과에 따른 공력 특성 변화는 인체의 청각장애, 주변 환경문제, 주행 안정성, 쾌적성 등의 매우 심각한 공학적 문제를 유발시키는 것으로 알려져 있다.[1]

여러 선행 연구에서 이러한 문제는 모두 전철의 터널 진입에 따라 생성되어 전파되는 압축파와 직접적으로 관련이 있는 것으로 규명되었다. 이 압축파의 강도와 파면구배는 전철과 터널의 단면적 비, 전철의 주행속도, 전철의 형상 및 터널의 길이 등이 주요변수이며 궁극적으로는 최적의 전철 형상이나 터널의 단면적 비, 형상의

^{*1} 학생회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

^{*2} 정회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

결정이 공학적으로 가장 중요한 변수가 된다.

이러한 문제에 대하여 Maeda 등[2]은 실험적 방법을 통하여 전철의 형상과 압축파의 관계에 대한 특성 변수를 조사, 규명하였고, Tollmion, Ozawa[3] 등은 이러한 문제에 대하여 해석적 근사식을 제안, 그 결과도 비교적 정확한 것으로 알려져 있다. 그러나 이러한 해석적 방법은 면적비와 속도를 주변수로 한 압축성 효과에 절대적으로 의존하며, 실제 3차원적인 형상의 고속전철의 경우에 대한 적용에서는 압축파의 강도나 전파특성 등의 예측이 실제의 경우와 적지 않은 차이를 나타내고 있다고 알려지고 있다. 또한 전철이나 터널의 형상변화나 부가장치의 설치 등에 따른 복잡한 3차원적인 점성유동의 특성과 지면효과 등의 부가적인 문제에 대하여서는 고려될 수 없다는 큰 단점이 있다. 이에 Ogawa, Fujii 등[4][5]은 이러한 문제에 대하여 수치해석적 방법을 통하여 접근을 시도하였고, 이를 통하여 비교적 압축파의 해석 및 전철 주행의 공기역학적 특성은 잘 조사되었다. 그러나 이 또한 전철과 터널의 3차원적인 형상이나 상대운동에 따른 복잡한 점성유동의 양상과 터널 진입에 따른 특성 변화 및 이러한 유동특성이 압축파의 생성과 전파에 미치는 영향과 관계에 대한 조사나 규명은 다소 부족하였다.

본 연구에서는 실제 고속전철의 터널통과에 따른 3차원 유동장 및 압축파 거동 전반의 해석을 위하여 전산유체역학(CFD)기법을 도입하여 해석을 수행하고, 이를 통하여 전철과 터널 형상의 3차원성과 상대운동에 따른 전철 주위의 점성유동양상과 변화 특성을 비교적 자세히 조사하여 밝히고자 하며, 이에 기인된 압축파 강도 및 생성과 전파에 영향을 주는 인자를 연계, 조사하여 압축파 거동을 일차원적인 근사를 통하여 해석하는 해석적 방법이 실제 3차원 형상의 전철에 적용될 때 발생할 수 있는 문제점과 오차에 대한 공학적인 규명을 시도함으로써 더욱 정확한 예측이 가능한 해석적 근사식의 마련을 위한 공학적 기초를 제공하고자 한다. 아울러, 이러한 3차원 점성유동특성에 기인되어 변화되는 공기역학적 특성과 압축파의 생성과 전파에 따른 각 시점에서의 압력파의 변화와 와류군의 형성과 강화 등의 시각적 자료를 비교적

상세히 제시하고자 한다.

2. 수치 해석

2.1 지배방정식과 이산화방법

본 연구의 대상과 같이 고속전철이 터널을 고속으로 진입하여 통과하는 경우를 수치해석한 많은 선행연구에서는 Euler 방정식이나 Thin - Layer N-S 방정식을 지배방정식으로 선택하고 있다.[4] 그러나 이것은 항공기와 같은 비행 물체 등에서 보이는 초고속의 압축성유동의 해석의 경우나 매우 단순한 형상변화를 갖는 물체 혹은 상대운동이 수반되지 않은 경우에 적합한 것이다. 즉, 이러한 지배방정식을 기본으로 한 수치해석을 통하여서는 본 연구에서 관심을 두고 있는 전철과 터널의 3차원적 형상과 상대 운동에 따른 점성유동특성과 이에 따른 와류 영역의 존재나 변화나 이에 의한 압축파 특성의 변형 등을 접근한다는 것은 불가능하다. 따라서, 본 연구에서는 3차원 비정상 압축성 점성유동을 해석하기 위한 지배방정식으로 Full N-S 방정식을 선택하였고, 이를 축대칭 물체의 실험결과와 비교 검증하여, 해석의 부가조건 들을 결정하였으며, 코드의 신뢰성을 확보하여, 이를 실제의 경우와 같은 3차원적 형상의 전철 모델을 대상으로 수치해석을 수행하였다.

일반화 좌표계(t, ξ, η, ζ)에서의 레이놀즈 평균된 3차원 Full Navier-Stokes 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \bar{Q}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \xi}(\bar{E} - \bar{E}_v) + \frac{\partial}{\partial \eta}(\bar{F} - \bar{F}_v) + \frac{\partial}{\partial \zeta}(\bar{G} - \bar{G}_v) = 0 \quad (1)$$

여기서 β -formulation을 적용하면 위 식은 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{Q}}{\partial t} + \beta \left(\frac{\partial \bar{E}}{\partial \xi} + \frac{\partial \bar{F}}{\partial \eta} + \frac{\partial \bar{G}}{\partial \zeta} - \frac{\partial \bar{E}_v}{\partial \xi} - \frac{\partial \bar{F}_v}{\partial \eta} - \frac{\partial \bar{G}_v}{\partial \zeta} \right)^{n+1} \\ + (1-\beta) \left(\frac{\partial \bar{E}}{\partial \xi} + \frac{\partial \bar{F}}{\partial \eta} + \frac{\partial \bar{G}}{\partial \zeta} - \frac{\partial \bar{E}_v}{\partial \xi} - \frac{\partial \bar{F}_v}{\partial \eta} - \frac{\partial \bar{G}_v}{\partial \zeta} \right)^n = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

이 때, 만약 $\beta=0.5$ 이면 위 식은 2차 정확도의 Crank-Nicolson implicit scheme이 되고, $\beta=1$ 이면 일차 정확도의 Euler implicit scheme이 된다. 부가하여 비 선형 flux항들을 선형화기법

을 통하여 선형화 하면,

$$\begin{aligned} & \frac{\Delta \bar{Q}}{\Delta t} + \beta \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (A \Delta \bar{Q}) + \frac{\partial}{\partial \eta} (B \Delta \bar{Q}) + \frac{\partial}{\partial \zeta} (C \Delta \bar{Q}) \right. \\ & \left. - \frac{\partial}{\partial \xi} (A_v \Delta \bar{Q}) - \frac{\partial}{\partial \eta} (B_v \Delta \bar{Q}) - \frac{\partial}{\partial \zeta} (C_v \Delta \bar{Q}) \right] \\ & = - \left(\frac{\partial \bar{E}}{\partial \xi} + \frac{\partial \bar{F}}{\partial \eta} + \frac{\partial \bar{G}}{\partial \zeta} - \frac{\partial \bar{E}_v}{\partial \xi} - \frac{\partial \bar{F}_v}{\partial \eta} - \frac{\partial \bar{G}_v}{\partial \zeta} \right)^n \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 A에서 C와 A_v에서 C_v는 각각 대류항과 점성항의 Jacobian matrix 들이다. 위 식을 Approximate Factorization scheme을 적용하여 전개하면,

$$\begin{aligned} & \left\{ I + \beta \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (A) - \frac{\partial}{\partial \xi} (A_v) \right] \right\} \left\{ I + \beta \left[\frac{\partial}{\partial \eta} (B) - \frac{\partial}{\partial \eta} (B_v) \right] \right\} \\ & \left\{ I + \beta \left[\frac{\partial}{\partial \zeta} (C) - \frac{\partial}{\partial \zeta} (C_v) \right] \right\} \Delta \bar{Q} = RHS \\ & \equiv - \left(\frac{\partial \bar{E}}{\partial \xi} + \frac{\partial \bar{F}}{\partial \eta} + \frac{\partial \bar{G}}{\partial \zeta} - \frac{\partial \bar{E}_v}{\partial \xi} - \frac{\partial \bar{F}_v}{\partial \eta} - \frac{\partial \bar{G}_v}{\partial \zeta} \right)^n \end{aligned} \quad (4)$$

마지막으로 식(4)는 ADI scheme을 적용하여 다음과 같이 3단계로 순차적으로 해석될 수 있다.

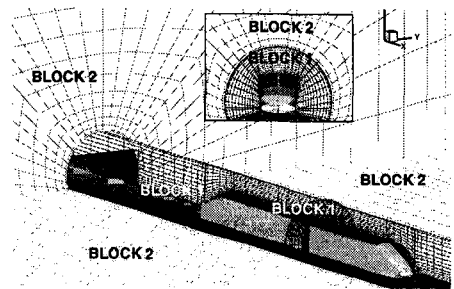
$$\begin{aligned} \text{step1 : } & \left\{ I + \beta \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (A - A_v) + D_{imp(\xi)} \right] \right\} \Delta \bar{Q}^* = RHS + D_{exp} \\ \text{step2 : } & \left\{ I + \beta \left[\frac{\partial}{\partial \eta} (B - B_v) + D_{imp(\eta)} \right] \right\} \Delta \bar{Q}^{**} = \Delta \bar{Q}^* \\ \text{step3 : } & \left\{ I + \beta \left[\frac{\partial}{\partial \zeta} (C - C_v) + D_{imp(\zeta)} \right] \right\} \Delta \bar{Q} = \Delta \bar{Q}^{**} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, 수치적 불안정성을 막기 위해 2차 정확도의 implicit 뎀핑항, D_{imp} 와 4차 정확도의 explicit 뎀핑항, D_{exp}를 추가하였다[6]. 각 방향으로, 행렬시스템의 대수해를 구하기 위해 삼각대각 행렬법(LU decomposition method)를 사용하였으며, 난류 유동의 해석을 위해 Baldwin-Lomax model[7]을 적용하였고, 이 때 전철과 지면 및 터널의 벽면에서 난류 경계층이 중첩되어, 불연속이 발생되어지는 문제를 해결하기 위하여 양쪽 경계면의 중간지점에서 연속이 이루어지도록 선형 보간을 수행하였다.

2.2 가정 및 경계조건

전철의 터널 진입에 따른 최대의 미기압파, 즉 최대폭발소음은 최초의 압축파에 의해 발생되는 것으로 알려져 있다.[8] 따라서 본 연구에서는 전철의 터널진입에 따라 최초 발생하는 압축파의 강도와 파면구배에 대한 해석에 중점을 두어, Fig.1 에 보여지는 것처럼 계산영역을 고속전철 주위영역과 터널의 입구역역으로만 구성하고, 터널출구역역은 계산에서 제외하였다.

초기조건으로는 전철이 초기에 정지하여 있다가 출발순간 갑자기 주행속도 300km/h(Mach 0.245)로 움직이기 시작하는 Impulsive-Start 조건으로 두었으며, 계산 대상의 Re수는 2.1x10⁷이다. 열차의 표면과 터널 등의 고체벽면에서의 속도는 No-slip 조건을 부가하였으며, 밀도와 에너지는 내부 격자 점으로부터 외삽하였다. 정지상태에 있는 터널영역과 터널 내부를 향해 진행되는 전철의 상대운동을 해석하기 위하여 슬라이딩 다중격자 기법[9]을 적용하였다.



전체 계산영역은 Fig.1 에 보여지는 것처럼들로 분리하였으며, 블록 번호 1은 전철과 주위 격자를 구성하며, 전철의 주행속도와 같은 속도로 좌측으로 움직여 들어간다. 블록 번호 2는 정지해 있는 터널영역의 격자를 구성하고 있다. 전철이 왼쪽으로 움직이기 시작하면서, 블록 1의 격자가 블록 2의 격자가 정지되어 있는 동안 좌측으로 움직여 들어가면서 전철의 이동을 묘사하게 된다.

2.3 슬라이딩 다중 격자 기법

전철이 움직여 감에 따라 블록 1과 2의 경계선 상에서의 격자점들은 어긋나게 되므로, 각 블록에서 계산되어진 물리량들은 경계면을 가로질러서 전달되어야 하고, 이를 위한 특별한 처리가 요구된다. 임의의 어느 한 η-단면의 블록 경계에서의 격자구성을 보여주는 도식도를 Fig. 2에 나타내었다. 블록 1의 경계값이 우선 변경되고, 노드 B에서의 유동 상태량을 갱신하기 위하여, 격자선 AB는 블록 2의 J=2 단면을 가로지르는 점C에 다다를 때까지 연장된다. 점 C의 물리적 상태량들은 J=2 평면상에서의 유동 정보들을 각각 Lagrangian polynomial fit 방법을 통하여 얻어낸다. 그리고 나서, 간단히 노드 A와

C의 값의 평균을 취함으로써 노드 B점의 상태량들은 갱신되어진다. 이러한 과정은 블록 1의 모든 $J=JMAX$ 평면상의 점, 즉 B, F, J 등 원으로 표시되어 있는 점들에 대하여 반복된다.

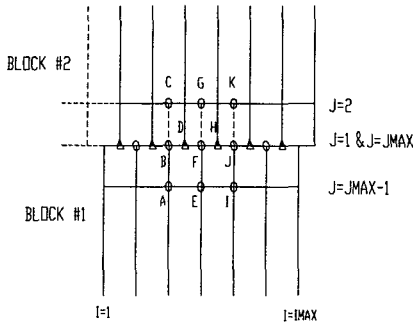


Fig.2 Sliding Multi Block 도식도

블록 2의 경계상의 점, 즉 D, H, ...의 삼각형으로 표시되는 점들의 상태량들은 블록 1의 $J=JMAX$ 의 경계에서의 값들을 이용하여 단순한 보간법을 사용하여 구할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 축 대칭 모델의 해석과 코드의 검증

일차원적인 형상 변화를 보여서 해석적 이론식과 근사한 결과를 보이는 축 대칭 모델에 대한 검토와 본 연구에서 개발, 사용된 수치해석 코드의 검증을 위하여 Maeda 등[2]에 의하여 실험적으로 해석된 마하 0.19의 속도로 폐쇄비 ($R_T=0.116$)의 터널로 진입하는 축대칭 전철을 대상으로 수치해석을 수행하였다. Fig.3은 터널 입구로부터 $x=6.8$ 진입된 위치의 터널벽면에서 Maeda 등에 의하여 측정된 압력값과 본 연구에서 사용된 코드를 통한 해석결과를 비교하였다. 전체영역에서 비교적 좋은 일치치를 보이고 있음을 알 수 있으며, 이 때 일반적으로 사용되고 있는 해석적 근사식 식(6)을 적용하여 산출한 압축과 최대강도는 680Pa로 실험값과 본 수치해석의 결과인 690Pa과 잘 일치되고 있음을 알 수 있다.[10] Fig. 4는 축대칭 전철의 전두부가 터널에 완전히 진입되었을 때 생성된 압력과의 분포를 도시한 것이다.

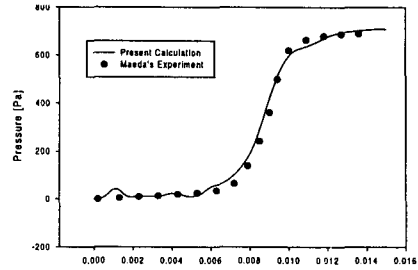


Fig.3 터널내부 압력 변화의 비교

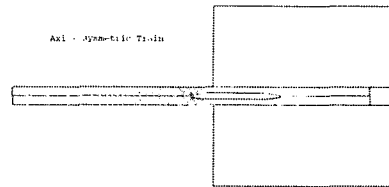


Fig.4 축 대칭 전철의 압축과 형성

$$p(t) = p^* \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \frac{Ut}{cd} \right) \quad (6)$$

$$\text{여기서, } p^* = \frac{1}{2} \rho U^2 \frac{1 - (1 - R_T)^2}{(1 - M)[M + (1 - R_T)^2]}$$

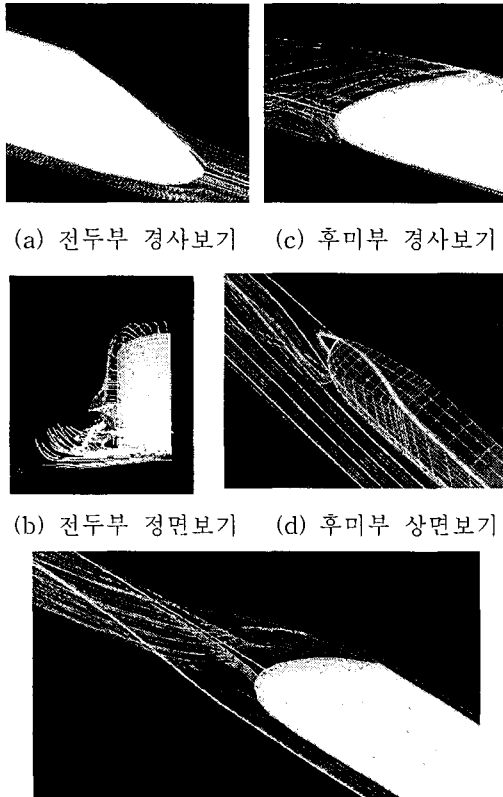
3.2 3차원 고속전철의 해석

3.2.1 유선 분포

Fig.5는 주행 중에 있는 고속전철 주위의 유선분포를 도시한 것이다. Fig.5(a)에서 전체적으로 유선은 전철 형상을 잘 따라 나타나고 있음을 볼 수 있다. Fig.5(b)에서, 전철의 전두부를 넘어서는 유선은 전두부 상부 경계면에서의 형상 변화에 따른 박리영역의 영향과 전두부 정점의 중심부에서 모서리를 따라서 넘어나가는 형상의 영향에 따른 성분이 복합되어, 전체적으로 중심에서 바깥쪽으로 흘러나가는 흐름이 형성되며, 이 점성 박리유동성분의 영향과 더불어 측면 경계의 형상을 따라 횡단면 방향으로 비틀리는 와류성분이 존재할 것을 추측할 수 있다.

후미부에서의 유선을 살펴보면, Fig.5(c)에서 보여지듯이 후미부의 경계의 변곡선을 지나면서 유동은 표면에서 떨어져 나가고 이 때 Fig.5(d)에서처럼 상면 표면 근처의 유동은 점성의 영향과 후미부의 정점근처에서 형성되는 싱크(sink) 영역의 영향에 따라 다시 안쪽으로 급격히 선회하여 측면, 하면을 빠져나오는 유동과 합류되면서

서 이 영역에 강한 와류군을 형성하고 있으며, 이것은 후미부 정점의 상하로 이어지고, 좌우로 대칭되는 형상으로 후미부에 일종의 스톨(Stall) 현상을 발생시키고 있다. 또한 이러한 전철의 상면과 측면, 하면에서 유출되는 유동은 Fig.5(e)에서처럼 전체적으로 각각이 조합되면서 후미부에 길고, 강한 횡단면 방향의 와류구조를 생성시키고 있고, 또한 이 와류군의 불규칙적인 섭동은 실제 전철의 주행이나 안정성의 측면에서 전철의 진동과 불안정성을 유발하여 심각한 문제가 될 것으로 생각된다.



(a) 전두부 경사보기 (c) 후미부 경사보기
(b) 전두부 정면보기 (d) 후미부 상면보기

(e) 후미부 후류영역 경사보기
Fig. 5 전철주위 유선분포

이러한 후미부에서 발생하는 강하고 뚜렷한 와류 성분과는 달리 전두부에서의 와류성분은 주류 유동의 속도에 비하여 상대적으로 그 강도가 낮아 현재의 물체고정 좌표계(Body Fixed Frame)를 기준으로 한 그림에서는 존재와 변화 특성을 파악하기가 힘들다. 따라서, 이러한 전두부 영역에서의 와류성분에 대한 조사를 위하여

유동변수를 관성 좌표계(Inertia Frame)로 변환하여, 유선을 재 생성하여 Fig.6에 도시하였다.



(a) 전두부 경사보기 (b) 전두부 정면보기

Fig. 6 관성좌표계 전두부 유선분포

Fig.6(a)에서 전두부 정점근처에서 모서리를 따라서 상면 끝단의 상면으로 이어져 형성되는 와류를 관찰할 수 있고, 이러한 와류는 Fig.6(b)에서처럼 전두부 모서리 근처영역에서 다수가 형성되어 전철의 측면 모서리를 따라서 진행하다가 전두부 끝단에서 상면의 박리영역에서 더욱 강한 와류를 형성하여 후류쪽으로 빠져나가는 양상을 나타내고 있음을 관찰할 수 있다. 이러한 전두부 영역에서 형성되는 와류는 전철의 주행에 있어서 저항을 증가시키는 역할을 할뿐만 아니라 압축파의 관점에서는 전두부 영역에 와류에 의한 저항영역을 형성하여 궁극적으로는 전두부 단면적의 증대에 상응하는 효과를 가지게 될 것으로 추측되며, 이에 따른 압축파 강도, 전파 등에 특성변화가 나타날 것으로 여겨진다.

또한 이러한 전두부 주위의 와류성분의 터널 진입에 따른 변화를 자세히 관찰하여 보기 위하여 다시 물체고정 좌표계(Body Fixed Frame)를 기준으로 터널 진입에 따른 전철 주요 위치에서의 각 횡단면 방향의 속도성분에 의한 유선을 Fig.7에 도시하였다. 터널로부터 비교적 멀리 떨어져, 개활지 유동으로 볼 수 있는 경우에 대한 각 단면의 유선 분포는 Fig.7(a)와 같다. 전철이 점점 터널에 접근하여, 터널의 입구에 도착한 시점인 Fig.7(b)까지는 피스톤 효과에 따른 주류 속도성분의 증가에 따라 오히려 단면방향 속도성분은 감소된다. 그러나 전철이 터널에 진입됨에 따라 입구를 지나는 전철 몸체와 터널벽면 및 지면간에는 점성 상호작용과 난류 경계층의 간섭에 의한 유동장의 변화가 발생되며, 이에 따라 터널을 진입해 들어온 전철몸체의 각 부분

에서는 횡단면 속도성분이 증가되어 더욱 강한 와류성분으로 나타나고 있음을 Fig.7(c)~(e)에서 볼 수 있다. 이것은 전철이 터널에 진입함에 따라 전철과 터널의 상대운동에 따른 점성, 난류 영향의 강화에 기인되어 와류나 유동의 비대칭성과 같은 3차원적인 유동특성이 더욱 강화되는 것을 나타내고 있다고 볼 수 있다. 반면에 후미부 횡단면 방향의 와류성분은 Fig.7(d), (e)와 같이 각 부분이 터널을 진입함에 따라 방사형이던 유선분포가 크게 위와 아래 유동이 연결되는 형태로 변화하고는 있으나 비교적 그 변화가 크지 않다. 이것은 터널을 통과해 나가는 동안 전철 후반부 이후에서의 주류 속도의 증가가 전반부에 비하여 크다는 점과 앞에서 언급된 바와 같이 전철형상 변화에 따른 영향에 의한 와류의 형성이나 3차원 유동특성이 후미부 이후의 영역에 지배적으로 나타나는 까닭으로 생각된다.

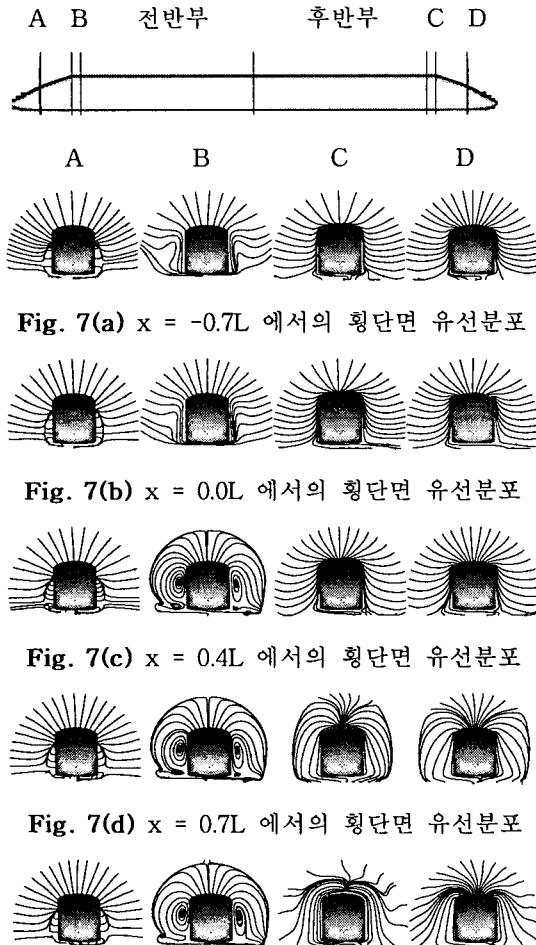


Fig. 7(a) $x = -0.7L$ 에서의 횡단면 유선분포

Fig. 7(b) $x = 0.0L$ 에서의 횡단면 유선분포

Fig. 7(c) $x = 0.4L$ 에서의 횡단면 유선분포

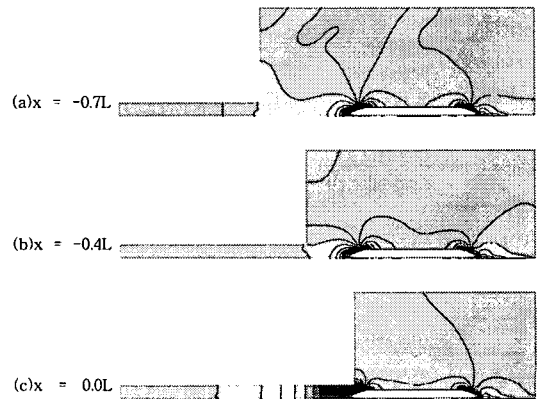
Fig. 7(d) $x = 0.7L$ 에서의 횡단면 유선분포

Fig. 7(e) $x = 1.0L$ 에서의 횡단면 유선분포

결과적으로, 전철과 터널의 3차원적 형상의 영향과 전철과 터널벽면, 지면과의 상대운동에 의해 발생하는 점성과 난류의 영향은 전철의 전반부 영역에는 횡단면 방향의 와류성분을 생성시키는 역할을 하고 터널내부로 진입에 따라 더욱 강화되고, 이러한 전두부 형상의 영향이 멀리 떨어져 비교적 약한 후반부에서는 후미부의 형상변화에 의한 유동박리에 기인된 와류성분이 지배적임을 알 수 있다. 또한 전두부 영역에서 형성되는 와류군은 전두부의 유동저항을 증가시킬 뿐만 아니라 압축과 강도와 전파 등의 압축과 특성에 영향을 줄 것으로 생각된다. 이것은 3차원 형상의 전철의 해석에 있어서 해석적 방법의 오차의 한 원인이 될 수 있을 것으로 생각되며, 선행된 수치해석의 결과가 점성유동의 영향을 상대적으로 낮게 평가하고 있음을 간접적으로 나타내고 있다고 볼 수 있다.

3.2.2 압력 분포

Fig.8은 터널진입에 따른 대칭면에서의 등압력선이다. 전철이 입구에 근접함에 따라 전면에서의 압력증가가 이미 나타남을 Fig.8(b)에서 볼 수 있다. 이러한 압력증가는 Fig.8(c)와 같이 전철이 터널내부로 진입되는 순간에 급격하게 증가되기 시작하여, 거의 평면과 형태의 압축과를 형성하고, 음속으로 전파한다. 이 때 전두부가 완전히 진입된 이후, 즉 단면적 비의 변화가 종료된 후에도 압력증가가 계속됨을 Fig.8(d)와 전철의 터널진입에 따른 각 시점에서의 압력분포를 나타낸 Fig.9에서 자세히 볼 수 있다.



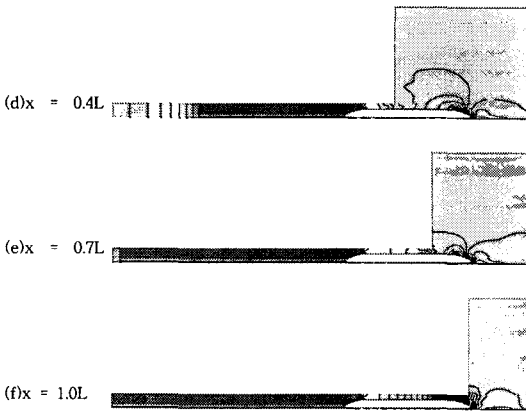


Fig. 8 진입에 따른 대칭면 압력분포 변화

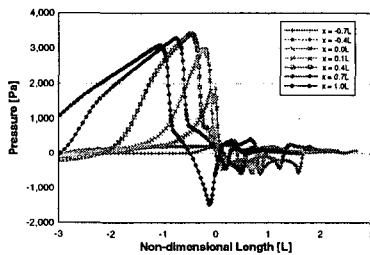


Fig. 9 진입에 따른 내부 압력변화

이 때 본 연구의 대상인 폐쇄비 $R_T=0.189$ 의 3차원 전철의 수치해석에 의하여 산출되는 압축파의 최대값은 약 3500Pa이고, 식(6)으로 정의되는 해석적 방법에 의하여 계산된 값은 약 2850Pa로 수치해석에 의한 결과가 약 20%정도 높은 값을 가지는 것으로 조사되었다. 이것은 Mashimo 등[10]이 3차원 형상의 실제 전철을 대상으로 한 실험에서도 전두부의 진입이후에도 터널내부 압력의 증가가 계속되고 있는 것과 압력파의 최대값이 식(6)의 해석적 방법에 의한 결과에 비하여 상당히 높은 값의 결과를 보이고 있다는 점과 일치한다. 이러한 점은 3.1절에서의 결과와 같이 축대칭 모델, 즉 일차원적인 단면적 변화를 보이는 경우에 해석적 방법과 수치해석의 결과가 비교적 잘 일치하는 것과는 대조적으로 실제 전철과 같이 3차원 형상의 대상으로 하는 경우에는 기존의 해석적 방법이나 일차원적인 연구에 의하여 산출된 결과와는 다소의 차이를 나타내고, 이러한 실제 3차원 형상의 전철의 압축파 생성과 전파 특성, 강도의 차이는 일차원적인 단면적 비에 의한 영향에 부가하여 앞에서 언급한 형상의 3차원적인 특성이나 상대운

동에 따른 점성과 난류유동의 영향을 받은 결과로 여겨지며, 이에 대한 추가적인 연구가 진행되어야 함을 보여주는 것으로 생각된다.

Fig.10은 전두부에서의 압력분포변화를 도시한 그림이다. 정점에서의 정체영역이나 전두부 상하면에서의 박리영역의 분포가 확연하다. 또한 전체적으로 전두부의 정점을 기준으로 상하 유동의 단면적 차이에 기인된 상하의 압력 값의 차이가 크게 나타남을 볼 수 있고, 이러한 비대칭성은 전철이 터널에 진입함에 따라 더욱 커짐을 알 수 있다. 특히 Fig.8과 같이 전철의 전방에서 어느 정도 떨어져 형성되는 평면과 형태의 압축파로 발전되기까지는 3차원적인 과도영역이 존재하고 있음을 볼 수 있고, 이 영향은 압축파 파면 형태 변화 등을 유발할 수 있을 것으로 생각된다. 이러한 점도 3차원 형상에 따른 또 하나의 현상으로 볼 수 있으며, 이러한 폐쇄 영역의 비대칭성에 따른 영향과 전철 하부와 지면에 의한 지면효과 등은 전철의 주행성이나 압축파의 형성과 전파특성에 영향을 미칠 것으로 생각되며, 전두부 하부 영역에 형성되는 강하고 넓은 고압영역의 처리는 많은 공학적인 관심이 기울여져야 할 부분인 것으로 생각된다.

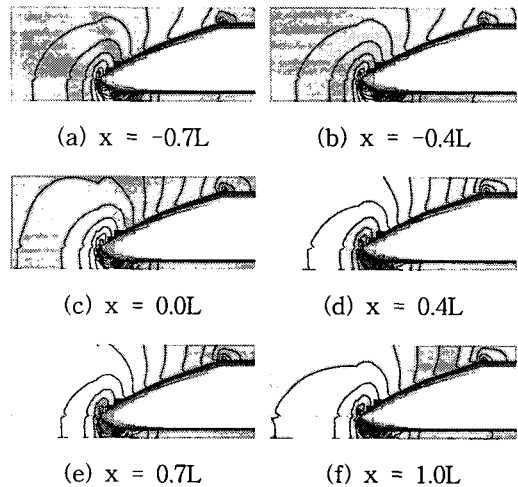


Fig. 10 진입에 따른 전두부 압력분포 변화

3.2.3 속도 변화

Fig.11은 터널진입에 따른 고속전철 주위의 속도분포 변화를 관찰하여 보기 위하여 전철의 각 횡단면에서의 최대 속도값을 도시하였다. 전

철이 터널에 접근하여 진입됨에 따른 피스톤 효과로 터널로 진입된 전철 주위의 유속이 급격히 증가되어 짐이 보여지고 있다. 본 연구에서 설정한 주행속도, Mach 0.245와 단면적비 0.189에 대하여서, 국부적이기는 하지만 전철의 진입에 따라 증가된 최대속도가 약 Mach 0.11로 전철과 상대속도 0.355(435km/h)에 달하여, 초기 전철주행속도의 약 45% 정도의 속도증가를 나타내고 있다. 이러한 급격한 속도증가는 고속전철주행의 안정성, 쾌적성 및 부착물의 설계 등에 있어서 고려되어야 할 중요한 인자로 여겨진다.

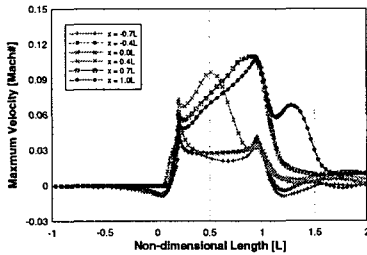


Fig.11 진입에 따른 최고 속도분포 변화

3.2.4 공기역학적 힘

Fig.12는 항력과 양력의 공기역학적 힘의 변화를 도시하고 있는데 항력은 x=0, 즉 전철이 터널입구에 도착하는 시점에서 가파르게 상승되고 있음을 볼 수 있다. 이러한 항력의 증가는 터널 입구에서 전철과 터널의 상호 영향에 따른 유사 피스톤 현상에 기인되며, 터널 내부로 진입된 이후에도 Fig.9와 Fig.10에서 보여지는 바와 같이 전철 전두부의 압력 증가에 따라 일정 기간동안 항력은 지속적으로 증가된다.

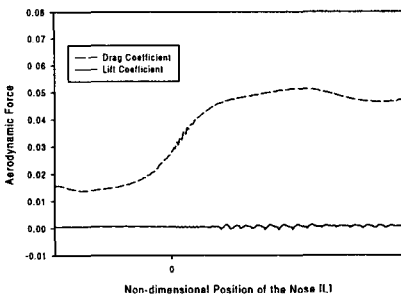


Fig.12 진입에 따른 공기역학적 힘의 변화

본 연구의 대상에 대한 총체적인 터널 진입에 따른 항력의 증가는 개활지에서의 항력에 비하여 약 3배가 넘는 것으로 나타났다. 양력은 전

철 전두부 및 후미부에서의 형상 변화에 따른 터널입구를 통과하는 시점에서 변화가 관찰되나 항력에 비하여서는 그 변동량이 상대적으로 작고, 진입에 따라서 진동의 경향이 증가하고 점진적으로 작은 양의 증가만이 보여진다.

4. 결론

3차원 비정상 압축성 Full Navier-Stokes 방식 해석 코드가 고속전철이 터널에 진입될 때 발생하는 3차원 형상에 따른 특성과 전철과 터널벽면의 상호 작용에 의한 점성유동특성 및 압축과 현상과의 영향에 대한 조사를 위하여 연구 개발되었다. 또한 정지되어 있는 터널영역과 주행하고 있는 전철간의 상대운동을 적절히 해석하기 위한 이동격자기법으로 슬라이딩 다중격자기법(Sliding Multi-Block Method)이 도입되어 성공적으로 적용되었다.

본 연구를 통하여 실제 3차원 형상의 고속전철의 주행과 터널통과의 경우, 전철과 터널의 3차원적인 형상에 따라 전철 주위의 유동은 와류의 형성이나 비대칭적인 유동양상과 같은 3차원적인 유동 특성을 나타내며, 특히 터널에 진입되어 터널벽면, 지면과의 상대운동을 하는 경우, 점성과 난류의 영향은 전철 측면의 횡단면 방향으로 와류현상을 생성시키고, 이것은 전철의 터널진입에 따라 더욱 강화되어지는 경향을 보임을 증명하였다. 또한 후미부 영역에서는 후미부의 3차원적인 형상과 박리현상에 따라 축 단면 방향으로 비교적 강한 와류성분이 후미부 정점을 향하여 수직과 좌우로 형성되며 이것이 후미부를 빠져나가면서 후류 영역에서 길고 넓게 분포한 와류를 형성하고 있음을 보였다.

이러한 점성과 난류의 영향에 기인된 3차원적인 복잡한 양상의 유동 현상과 와류군의 존재는 전철의 주행에 대한 저항으로 작용할 뿐만 아니라 전두부에서 발생하는 압축파의 강도를 강화시키는 역할을 하게 되어, 비교적 단순한 형상의 일차원적인 변화를 보이는 축-대칭 모델과 같은 대상에 대한 기존의 해석적 방법이 비교적 좋은 결과를 산출하는 것과는 대조적으로 실제 전철의 경우와 같은 3차원 형상에 대하여서는 비교적 큰 차이를 보이는 근본적인 원인이 될

같은 대상에 대한 기존의 해석적 방법이 비교적 좋은 결과를 산출하는 것과는 대조적으로 실제 전철의 경우와 같은 3차원 형상에 대하여서는 비교적 큰 차이를 보이는 근본적인 원인이 될 것으로 추측된다. 또한 전두부 형상의 3차원성에 기인된 비대칭적인 정체영역의 형성에 따른 3차원적인 폐쇄 효과와 벽면 경계층의 중첩, 지면효과 등에 따른 영향은 일차원적인 근사에 따른 해석적 방법에 의하여 산출되는 결과에 비하여 압축파의 강도의 상승이나 파면구배 변형의 다른 또 하나의 인자가 될 것으로 여겨진다. 따라서 이러한 실제적인 3차원 형상의 전철의 해석에서는 기존의 해석적 방법에서의 주된 고려 대상인 속도와 면적비 외에 이러한 인자들에 대한 추가적인 변수의 설정을 통한 고려가 반드시 요구될 것으로 생각된다. 부가적으로 유사-피스톤 효과에 의한 터널진입에 따른 국부 영역에서의 최대속도의 급격한 증대 및 항력과 양력 등의 공기역학적 힘의 터널진입에 따른 변화 추이 등을 비롯한 다양한 공학적, 현상학적인 정보들 동시에 제공하였다.

참고문헌

- [1] Kim, H. D., "Aerodynamics of high speed railway", KSME, (1996).
- [2] Maeda, T. et al., "Effect of shape of train nose on compression wave generated by train entering tunnel", International Conference on Speedup Technology, JSME PS3-8, (1993), pp.315~319.
- [3] Ozawa, S., "Studies of micro-pressure wave radiated from a tunnel exit", *RTRI Report*, No. 1121 (1979).
- [4] Ogawa, T. and Fujii, K., "Numerical investigation of three dimensional compressible flows induced by a train moving into a tunnel", *Computer & Fluids*, Vol. 26, No. 6, (1997), pp.565~585.
- [5] Park, W. G., Jung, Y. R. and Ha, S. D., "Numerical viscous flow analysis around a high speed train with crosswind effects", *AIAA Journal*, Vol. 36, No. 3, (1998), pp.477~479.
- [6] Jameson, A., Schmidt, W. and Turkel, E., "Numerical solutions of the Euler equation by finite volume methods using Runge-Kutta time stepping schemes", *AIAA 8th Conference*, June, (1983).
- [7] Baldwin, B. S. and Lomax, H., "Thin-layer approximation and algebraic model for separated turbulent flows", *AIAA 78-0257*, (1978), pp.79~257.
- [8] Maeda, T., "Micro-pressure wave radiating from tunnel portal and pressure variation due to train passage", *QR of RTRI* Vol. 37, No. 4, (1996), pp.199~203.
- [9] Shin, C. H. and Park, W. G., "Numerical flow field analysis of the high speed train entering into a tunnel", the 4th *KSME-JSME Fluid Engineering Conference*, (1998), pp.165~168.
- [10] Mashimo, S. et al., "Entry compression wave generated by a high-speed train entering a tunnel", *JSME B* 61-590, (1995), pp.3720~3727.