

사각 단면을 갖는 철도차량 주위의 3차원 유동해석

Three-Dimensional Flow Analysis around Rolling Stock with Square Cross Section Using Low Re $k-\epsilon$

장용준[†]

Yong-Jun Jang

Abstract

Three-dimensional numerical study is performed for the flow analysis around the rolling stock with square cross section (Mugungwha train model). The height (H) of rolling stock is considered as the characteristic length and the total length of rolling stock is 4H which correspond to 1/2 unit of rolling stock. The gap between the surface and rolling stock is 0.17H which is average value. The relative velocity between the surface and rolling stock is assumed to be zero and $Re = 10,000$ based on the characteristic length. Low Re $k-\epsilon$ [15] is employed for the calculation of turbulence which resolve all the way to the solid surface (laminar sub-layer). Large flow separation occurred at the front head of train and a pair of vortex is generated on both top and side of rolling stock. The behavior of vortices on the top of the rolling stock is believed to affect the performance of the pantograph which should be intensively investigated. The difference between the high pressure in the front stagnation region of train and the low pressure in the rear separated region causes a large pressure drag. A large pair of vortex are generated in the rear of train and the size of vortex is increased more than the size of cross section of train.

Keywords : Numerical simulation(수치해석), Turbulence(난류), Flow Separation(유동박리)

1. 서론

철도 차량 주변의 열차풍 관련 실험[1]은 철도 선진국에서 오래전부터 수행되어 왔으나, 이와 관련하여 CFD를 이용한 수치 해석적인 연구는 상대적으로 빈약한 성향을 보여 왔다. 이에 대한 원인중 하나로 난류 유동장을 잘 해석할 수 있는 난류 모델의 등장이 계속하여 지연되어온 것이 하나의 원인이 될 수가 있고, 둘째로는 컴퓨터의 속도가 수치해석자들의 욕구를 만족 시키지 못하였기 때문이다. 그러나 최근에는 RSM 모델 [2,3,4,5] 및 비선형 난류 모델[6,7] 등이 많이 발전 되어 왔으며, 기존의 통계적 방법과는 다르게, 모델을 사용하지 않고(또는 국소적으로 사용)계산하는 방법(LES & DNS)들이 잘 발달이 되어 CFD를 이용한 수치 해석적 연구가 증가 하고 있다. 또한 슈퍼컴퓨터의 발전으로 기존에 컴퓨터의 성능이 부족하여 해석치 못 하였던 문제들도 도전가능하게 되었다.

철도 차량 주변의 열차풍에 대한 수치 해석적 연구와 관련하여, 먼저 국외에서는 Baker가 지상을 주행하는 물체 후미 부에서 발생하는 후류 및 와류에 관하여 실험적, 수치적 연구를 수행하였으며 다양한 모양의 물체를 사용하여 후류의 형태를 폭넓게 연구를 하였다[8]. 국내에서는 Hwang & Lee 가 마주 오는 두 열차가 터널에서 교행 시 열차풍의 형태에 관하여 수치적으로 연구를 하였다[9]. 허남진 등은 KTX 고속전철이 천안역사 통과 시 공기역학적 영향에 대하여 실험적 및 수치 해석적으로 연구를 수행하였다[10].

기존의 수치 해석적 연구가 철도 차량 주변의 공기역학적 움직임에 대하여 전체적인 유동 형태에 초점을 맞춘 반면, 본 연구에서는 철도 차량 주위의 열차풍 전반 및 국소 유동에 까지 연구의 폭을 확대하였다. 철도 차량의 외곽 모양을 어떻게 단순화 하는 문제도 중요한 관건이 되는데, 본 연구에서는 지난 연구[11]에서와 연구의 연속성을 갖기 위하여 무궁화호 절편형의 형태인 사각 육면체의 모형을 열차 모델로 선정하였다. 기존의 수치해석[10]이 상업용 Code를 이용하여 열차풍의 전체적인 특성을 파악하는데 주력한 반면 본

[†] 책임저자 : 회원, 한국철도기술연구원, 환경화재연구팀 선임연구원
E-mail : jangyj@krii.re.kr
TEL : (031)460-5355 FAX : (031)460-5319

연구에서는 Low Re $k-\epsilon$ 를 채용한 STREAM code[12,13]를 이용하여 열차풍의 상세한 구조를 밝혔다.

2. 유동 조건 및 수치해석

2.1 유동 조건

Fig. 1에서 보는 것처럼 열차풍 해석을 위해 사용된 모델은 무궁화호 절편형 모양인 사각 육면체이다. 열차 높이가 'H'이고, 열차 길이는 높이의 4배인 '4H'이다. 따라서 본 연구에서 사용된 열차의 길이는 1/2량 정도의 길이가 사용된 것이다. 열차와 바닥(surface)간의 간격(gap)은 실제 열차와 바닥간의 간격과 동일하게 설정하여 열차 높이의 약 17%를 사용하였다. 입구 유동의 진입 거리는 지상 자동차의 유동해석[14]의 경우에서 많이 사용하는 진입 거리 '8H'를 사용하였다. 열차 측면 방향으로의 거리는 열차로부터 발생하는 와류의 영향을 받지 않는 곳에서 경계 조건을 설정하는 것이 추천[14]되므로 '3H'로 설정하였다. 열차의 천정 방향 쪽으로는 열차 높이의 4배인 '4H'를 사용하였다.

경계조건으로는 입구에서는 자유 유동(Uniform flow : U_∞) 조건을 설정하였으며, 열차의 좌우 및 출구 쪽 방향에서는 Neumann 조건(zero gradient)을 각각 적용하였다. 열차의 하부에 있는 바닥조건을 위하여서는 고정 바닥 조건(solid : $U=0$)을 사용하였다.

또한 전체 유동을 정상 유동(steady state flow)으로 간주하였으므로, 열차의 중심선($Y=0$)을 중심으로 전체 유동이 대칭이 되는 까닭에 $Y=0$ 이상의 부분(반쪽 부분)만 유동 해석을 시도하였다. 철도차량 높이(H)를 특성 길이로 간주하였을 경우 해당되는 Reynolds number는 10,000이다.

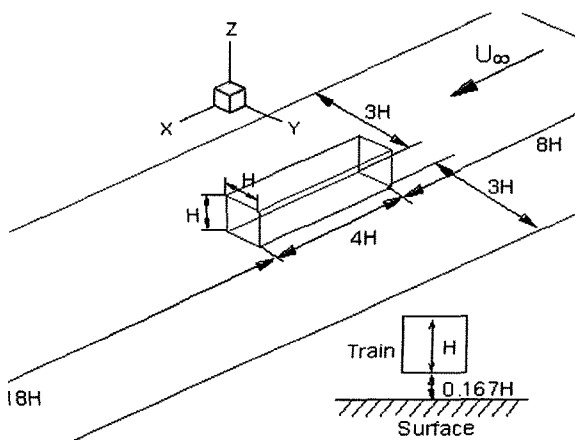


Fig. 1. 3차원 철도 차량 열차풍 해석을 위한 전체 구조

2.2 Grid generation

본 연구에서는 Fig. 2의 그리드 분포처럼 직교 좌표계를 사용하였으며 총 17개의 다중 블록(multi-block)을 사용하여 구성하였다. 사용된 그리드 총 수는 약 160만개 정도이다. 벽 근처에서 y^+ 값을

$$y^+ (= \frac{yu_\tau}{\nu}) \leq 1$$

로 유지하므로서 층류 저층(laminar sub-layer)에서도 직접적으로 계산을 시도하였다. Fig. 2.에서는 열차가 있는 부분만 확대하여 나타낸 부분이다.

2.3 지배방정식

3차원 철도 차량 주변의 열차풍은 강한 난류 성분을 동반하므로, 난류 성분을 해석하기 위하여 Launder & Sharma (1974)[15] Low Re $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 유동장을 해석하기 위한 관련 지배방정식은 참고문헌[6]에 상세히 기술되어 있으며, 중요 지배방정식을 요약하면; 난류에너지(k)의 수송방정식 ;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j}] + \rho(P - \epsilon - D)$$

난류에너지 소산 방정식 ;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}] + \rho(C_{\epsilon 1} f_1 P - C_{\epsilon 2} f_2 \epsilon) \frac{\epsilon}{k} + \rho(S_\epsilon + S_\epsilon)$$

와 같다. 여기서,

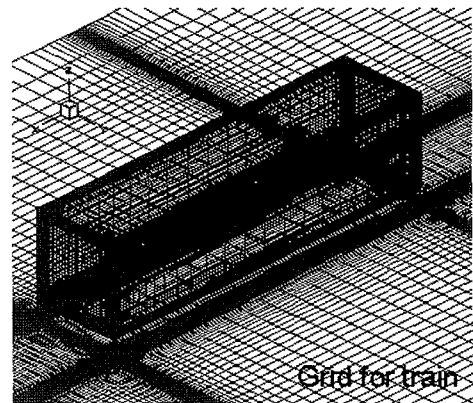


Fig. 2. 3차원 철도차량 주변의 그리드 분포

$$D = 2\nu \left(\frac{\partial k^{1/2}}{\partial x_i} \right)^2, \quad f_1 = 1, \quad f_2 = 1 - 0.3e^{-R_t^2}$$

$$S_l = 0, \quad S_\epsilon = 2\nu \nu_t \left(\frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_k} \right)^2$$

이며,

$$C_\mu = 0.09, \quad C_{\epsilon 1} = 1.44, \quad C_{\epsilon 2} = 1.92, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3$$

의 값을 취하였다. 댐핑 계수(damping factor)는 사용 모델에 따라 달라지는데, Launder & Sharma(1974)[15] 모델일 경우는

$$f_\mu = \exp\left[\frac{-3.4}{(1 + R_t/50)^2} \right]$$

를 사용하며, 여기서 난류 Reynolds 수(Turbulent Reynolds number) R_t 는 $R_t \equiv \frac{k^2}{\nu \epsilon}$ 의 값을 취하였다.

2.4 수치기법

본 연구에 사용된 RANS 계산은 비 직교 좌표계(non-orthogonal), 집중 격자계(collocated) 및 FVM을 사용한 ‘STREAM’ [12] code를 사용하여 수행되었다. 평균 유동과 난류 양의 대류(convection)는 QUICK scheme의 second-order TVD 근사법[13]을 사용하여 계산되었다. 질량 보전(mass conservation)을 위하여 압력을 수정하는 알고리즘을 채택하였다. 이러한 방법들을 이용하여 수송방정식과 압력 수정 방정식을 순차적으로 풀었으며, 해가 수렴할 때 까지 반복하여 계산하였다. 계산은 Sun 계열의 워크스테이션(CPU: AMD OPT848)에서 수행되었다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 철도 차량 주변의 유선의 분포를 나타낸 것으로, 유동이 진입하는 부분을 보면 유동의 흐트러짐이 전혀 없이 열차로 접근하고 있는 것을 볼 수 있다. 사각 단면을 갖는 열차 전두부에서 예상한 바와 같이 대규모의 유동 박리(separation) 현상이 발생하는 것을 볼 수가 있다. 이러한 유동 박리 현상은 열차 주행 저항을 일으키는 주원인 중 하나이다. 본 연구에서는 열차 상단 및 측면에서도 와류(vortex)들이 발생되고 있는 흥미로운 현상들이 발견된다. 특히 열차 상단부에 발생하는 와류 등은 판토품의 성능에 영향을 미치므로 좀 더 자세한 연구가 필요하다고 판단된다.

열차 후미부에서는 다시 대규모 유동 박리 현상이 발생하면서 압력장을 교란시켜 열차의 전진을 방해한다. 후미부에서 발생된 와류들은 대류(convection)에 의하여 하류로 흘러

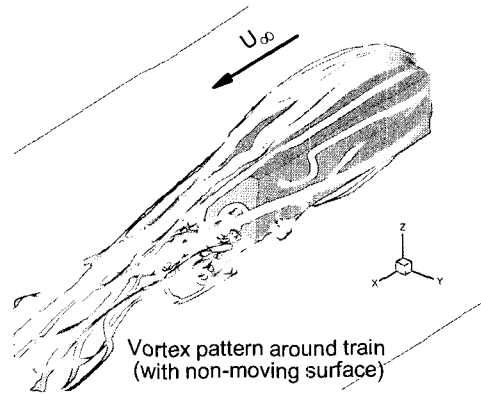
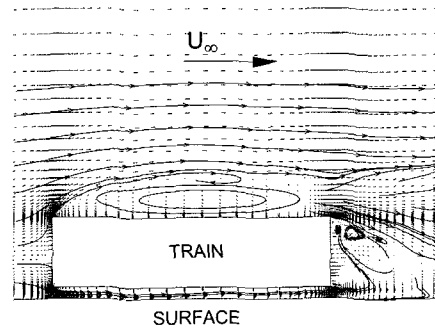


Fig. 3. 3차원 철도 차량 주변의 유선 분포



Streamline around train in the mid section (with non-moving surface)

Fig. 4. 3차원 철도 차량 중심(대칭)선에서의 유선 분포

가는 것을 볼 수 있다.

위에 기술한 내용을 더욱 뒷받침하는 것이 Fig. 4에 나타나 있다. 이 그림은 열차의 중심선(대칭선)을 따라 속도 벡터와 유선의 분포를 나타낸 것으로 자유 유동과 열차의 충돌로 인하여 생성되는 포물선 모양의 대규모 유동 박리가 분명히 관찰되며, Fig. 3과 잘 일치하는 결과이다.

Fig. 4에서 또 다른 중요한 점은 열차 전면부에서 발생한 유동 박리가 열차 상단 면 및 측면 벽에 다시 재 점착(reattachment) 되지 않는다는 것이다. 유동 재 점착의 효과를 보기 위해서는 본 연구에서처럼 열차 반량이 아니라 적어도 열차 한량 이상을 계산 영역에 포함 시켜야한다는 것을 발견하였다. 유동의 박리와 재 점착 현상은 열차풍 해석을 하는데 있어서 중요한 현상중 하나이다. 본 연구를 통하여 무궁화호 절편형의 경우 열차의 전면부에서 발생하는 유동 박리의 규모를 대략적으로나마 짐작할 수 있는 좋은 자료가 될 수 있다고 판단된다. 일반적으로 열차의 전면부에서 유동의 박리를 소규모로 제한하는 것이 열차의 공기역학적 효율에도 좋고, 선로구축물에 미치는 영향에 있어서도 매우 필요한 조건이 되고 있다.

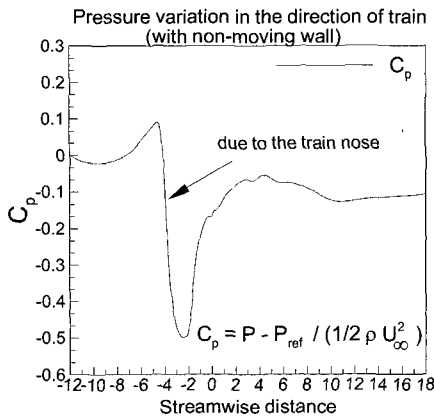


Fig. 5. 열차 통과시 압력변동

Fig. 5는 열차 통과시 압력 변동 분포를 나타내고 있다. 열차 전두부로 다가오는 자유 유동의 압력이 점차적으로 증가하다가 열차의 통과시점에서 급격히 증가하고 다시 바로 급격히 감소하는 현상을 볼 수가 있다. 이는 김동현 외[11]의 실험 결과와 일치하는 현상으로, 압력의 증가는 공기의 압축으로 인한 현상이고 이어서 발생하는 갑작스러운 압력 감소는 전두부를 지난 후에 유동의 경계층으로 인하여 유속이 갑자기 가속되는 부분이 발생하기 때문이다. 압력 감소가 발생된 이후 열차의 후류에서는 압력이 다시 곧 회복이 되는 것을 볼 수가 있다.

Fig. 3-5를 분석한 결과 차후에는 열차의 길이를 한량 이상으로 연장하여 열차풍 해석이 필요하고, 김동현 외[11]의 실험 결과와 비교하기 위해서도 이러한 시도가 필요하다.

Fig. 6-7에서는 철도 차량 표면의 압력 분포를 나타낸 것이다. 압력은 동압력(dynamic pressure = $\frac{1}{2}\rho U_\infty^2$)에 의하여 무차원화 된 압력 계수(Pressure coefficient) C_p

$$C_p = \frac{P - P_{ref}}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2}$$

로 나타내었다. 여기서 P_{ref} 는 자유 유동이 진입할 때의 압력 값이다. 따라서 C_p 는 자유 유동의 압력에 대한 상대적 압력 값을 나타낸다. Fig. 6의 그림을 보면 열차의 전두부 전면부에서 매우 높은 압력 분포를 나타내고 있다. 이는 진입하는 자유 유동이 열차의 전면부와 충돌하고 모든 동압력이 정압력으로 변환되어지기 때문이다. 유동 박리가 일어난 후 열차의 측면부에서는 반대로 매우 낮은 압력 분포를 보이고 있다. Fig. 6에서보면 열차 측면에서 유동의 박리 후 C_p 가 급격히 음의수로 되었다가 열차의 후미부에서는 다시 회복되는 것을 볼 수가 있다. 이는 박리되었던 유동이 열차의 후미부에서

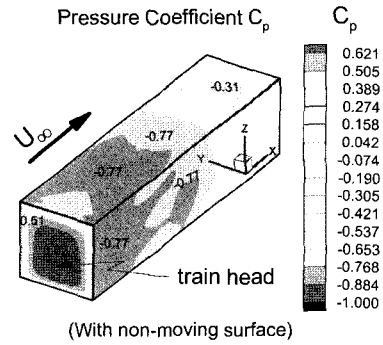


Fig. 6. 3차원 철도 차량 전두부에서의 압력 분포

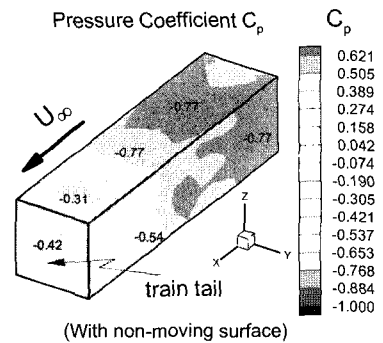


Fig. 7. 3차원 철도 차량 후미부에서의 압력 분포

다시 재 점착이 되려고 하기 때문에 그 부분에서 다시 압력이 재상승하고 있다. Fig. 7의 열차 후미부에서는 여전히 낮은 압력 분포를 보이고 있다. 열차 전면부와 후미부에서의 C_p 의 차이는 열차 총 주행저항 중 압력 저항에 해당한다. 열차의 설계 시 압력저항을 최소화 하도록 설계하여야 한다.

Fig. 8은 철도 차량 몸체 주위에서의 이차유동(와류)의 형태를 나타내고 있다. 와류의 형태를 포함한 위치는 $X=-3.0, -2.1, -0.91$ 이다. 참고로 $X=0.0$ 은 철도 차량 후미부의 끝과 일치한다. 자유 유동이 열차와 충돌 이후 유동이 박리가 되면서 열차의 상단 면에서는 하나의 와류쌍($X=-3.0$)이 생성되고 있다. 이 와류는 상단 면을 따라 더욱 발달을 하면서 두 개의 와류 쌍($X=-2.1$)으로 진화되고 후미부 상단 면에서는 다시 하나의 와류 쌍($X=-0.91$)으로 합쳐지면서 위치가 중심에서 좌우로 치우쳐 지는 것이 관찰된다. 한편 열차의 양 측면 벽에서는 측면 벽 길이(H)의 2/3정도가 되는 규모의 와류($X=-3.0$)가 열차의 전두부 근처에서 발생되는 것을 볼 수가 있다. 이는 열차의 측면 벽을 따라 발달이 되면서 열차의 후미부에서는 와류의 중심이 바닥으로 치우쳐지면서 더욱 큰 규모의 와류($X=-0.91$)가 형성이 되는 것이 보인다. 와류의 세기는 자유 유동의 세기의 약 10% 정도이다. 본 연구에서 보여준 와류의

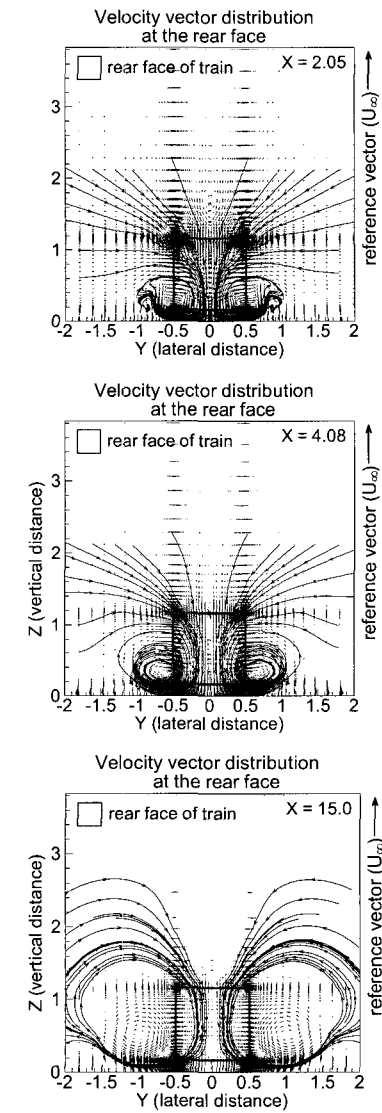
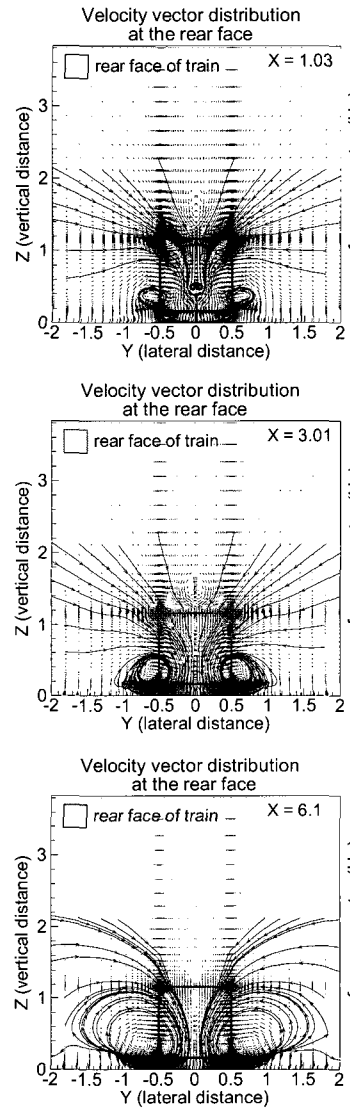
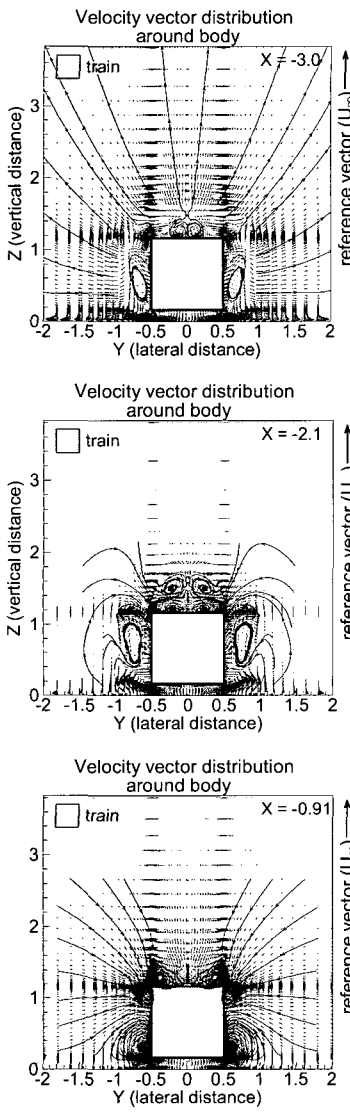
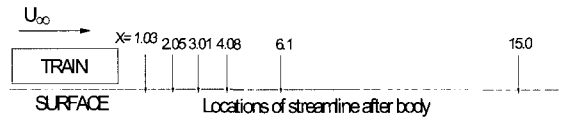
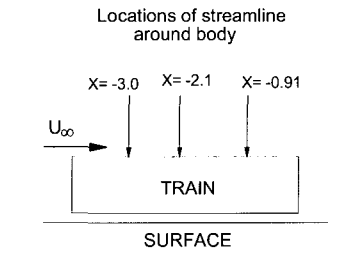


Fig. 8. 3차원 철도차량 몸체주위에서의 이차유동 형태

Fig. 9. 3차원 철도차량 후미부에서의 와류 형태

형태는 실험적으로 계측할 수 없는 철도 차량 주위에서의 와류의 형태를 이해하는데 큰 도움이 되는 것으로써 특히 판토그래프의 설계 및 선로구축물 설계시 도움이 될 자료이다.

Fig. 9는 철도 차량 후미부에서의 와류 및 후류의 형태를 나타내고 있다. 와류의 형태를 나타낸 위치는 Fig. 9에 나타낸

것 과 같다. 와류의 위치는 각각 X=1.03, 2.05, 3.01, 4.08, 6.1, 15.0 이며, Fig. 8의 철도 차량 주위의 와류의 형태로부터 연속된 현상이다. 우선 X=1.03의 위치에서 와류의 형태를 보면 Fig. 8의 X=-0.91에서의 와류의 형태가 철도 차량 뒤에서 유동의 기하학적 형태가 급격히 변하면서 와류의 형태도 조

정이 되고 있다. 차량의 상단 면에서 발달된 한 쌍의 와류 (Fig. 8)가 소멸되고 차량 하부 쪽의 와류와 합쳐지고 있는 것이 보인다. $X=2.05$ 에서는 이러한 현상이 가속화 되고 있으며, 차량의 하부 쪽에 있는 와류의 규모가 커지고 있다. $X=3.01$ 근처에서는 철도 차량 후미부에서의 대표적인 와류의 형태가 뚜렷이 보이기 시작한다. 차량의 하부에서 와류의 규모가 강하게 발달하고 있다. 유선의 분포는 차량의 중심선을 지나 고정 바닥에 충돌하고 양 방향으로 휘 감겨 올라가고 있다. $X=4.08$ 에서는 완전히 와류의 형태가 발달하였으며, 와류의 한쪽 부분의 크기가 철도 차량 단면적의 크기만큼 성장 된 것을 볼 수 있다. $X=6.1$ 이후로는 와류의 규모가 급격히 성장하여 철도 차량의 단면적 규모를 넘어서, 선로변 주변의 작업자에게 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. 철도 차량 높이의 15배가 되는 곳($X=15.0$)에서의 와류의 형태를 보면 하나의 와류가 철도 차량 단면적의 1.5배를 넘는 규모로 성장하였다. 오지택 외[11]의 보고서에 의하면 철도 차량이 지난 간 이후 30-35초 사이에 와류의 강도가 급격히 줄어드는 것이 보고되었다. 이는 본 연구에서의 수치해석 결과와 매우 잘 일치하고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 사각 단면을 갖는 철도 차량 주위에서 CFD 를 이용하여 3차원 유동해석을 수행하였다. 1/2량 규모의 철도 차량에 대하여 전두부와 후미부에서의 유동패턴 및 차량 표면에서의 압력 계수 등을 계산하였다.

사각 단면의 전두부에서는 유선형 전두부보다 대규모의 유동박리가 발생되었으며, 철도차량 상단 및 측면에서는 소규모의 와류들이 생성되었으며, 이러한 와류들은 기존의 연구에서는 보고가 되지 않은 것들이다. 수치해석을 통하여 철도 차량 표면에서 얻어진 압력계수(C_p)는 전두부에서는 매우 높은 값($C_p=0.63$)을 후미부에서는 낮은 값($C_p=-0.42$)을 보였으며, 이들의 차이가 크면 클수록 철도차량 주행저항이 높다는 것을 의미한다. 철도차량 통과 후 후미부에서 한 쌍의 와류가 생성이 되었으며 철도차량 높이의 약 5배 뒤에서는 와류의 크기가 철도차량 단면적 크기만큼 성장 되었다.

본 연구에서 무궁화호 절평형(사각단면)을 모델로 시뮬레이션을 수행한 이유는 고속전철 보다는 무궁화호에 대한 현장 실험 결과[11]가 많기 때문이며, 구형 모델에서의 STREAM code의 성능을 확인 후 유선형 모델에 대하여도 수치해석을 수행할 예정이다.

참고 문헌

- Gawthorpe, R.G. (1978), "Aerodynamics of trains in the open air", *Railway Engineering International*, May/June, pp.7-12.
- Chen, H. C., Jang, Y. J., and Han, J. C. (2000), "Computation of Heat Transfer in Rotating Two-Pass Square Channels by a Second-Moment Closure Model", *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol.43, No.9, pp.1603-1616.
- Jang, Y. J., Chen, H. C., and Han, J. C. (2001), "Computation of Flow and Heat Transfer in Two-Pass Channels with 60 deg Ribs", *ASME J. Heat Transfer*, Vol.123, No.3, pp.563-575.
- Jang, Y. J., Chen, H. C., and Han, J. C. (2001), "Flow and Heat Transfer in a Rotating Square Channel with 45 deg Angled Ribs by Reynolds Stress Turbulence Model", *ASME J. Turbomach.*, Vol.123, No.1, pp.124-132.
- Al-Qahtani, M. S., Jang, Y. J., Chen, H. C., and Han, J. C. (2002), "Prediction of Flow and Heat Transfer in Rotating Two-Pass Rectangular Channels with 45 deg Rib Turbulators", *ASME J. Turbomach.*, Vol.124, No.2, pp.242-250.
- Jang, Y.J., Leschziner, M.A., Abe, K. and Temmerman, L. (2002), "Investigation of anisotropy-resolving turbulence models by reference to highly-resolved LES data for separated flows", *Flow, Turbulence and Combustion*, Vol.69, pp.161-203.
- Abe, K., Jang, Y.J. and Leschziner, M.A. (2003), "An investigation of wall-anisotropy expressions and length-scale equations for non-linear eddy-viscosity models", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol.24, pp.181-198.
- Baker, C. J. (2001), "Flow and Dispersion in Ground Vehicle Wakes", *Journal of Fluids and Structures*, Vol.15, pp.1031-1060.
- Hwang, Jae-ho, Lee, Dong-Ho (2000), "Unsteady Aerodynamics Loads on High Speed Trains Passing by Each Other", *KSME International Journal*, Vol.14, No.8, pp.867-868.
- 허남건 외 (1995), "경부 고속전철 천안역사 풍압연구 보고서", 한국고속철도건설공단 보고서, 4월.
- 오지택 외 (2004), "선로구축물 시스템 핵심 기술 연구", 한국철도기술연구원, 12월.
- Lien, F.S., Leschziner, M.A. (1994a), "A general non-orthogonal collocated finite algorithm for turbulent flow at all speeds incorporating second-moment turbulence-transport closure, Part 1: Computational implementation", *Comput. Methods Appl. Mech. Engr.*, Vol.114, pp.123-148.
- Lien, F.S., Leschziner, M.A. (1994b), "Upstream monotonic interpolation for scalar transport with application to complex turbulent flows", *International Journal of Numerical Methods in Fluids*, Vol 19, pp.527-548.
- Jang, Y.J. and Leschziner, M.A. (2004), "An Investigation of Higher-Order Closures in The Computation of the Flow Around a Generic Car Body", *ECCOMAS 2004 Congress, Jyväskylä Paviljonki International Congress Centre and University of Jyväskylä, Finland*, 24-28 July.
- Launder, B.E. and Sharma. B.I. (1974), "Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc.", *Letters in Heat and Mass Transfer*, Vol.1, pp.131-138.