

송전선의 항력저감 및 소음에 관한 수치 연구

⁰윤 태석*, 이 수갑**

Numerical Study for Drag and Noise Reduction of Electrical Cable

T. S. Yoon and S. Lee

Abstract

To develop the code of predicting flow-field and aeroacoustic noise by a electrical cable, a combined CFD-acoustic analogy approach is selected. The two-dimensional, unsteady, incompressible Reynolds-Averaged Navier-Stokes solver with a $k-\omega$, $k-\omega$ SST turbulence modeling is used to calculate the near-field around electrical cable. Near-field results are then coupled with two-dimensional Curle's integral formulation based upon Lighthill's acoustic analogy with an assumption of acoustic compactness. To validate this code, numerical results are compared with experimental data for a circular cylinder. The simulation shows an overprediction on acoustic amplitudes, but overallly speaking, the spectrum pattern of sound pressure agrees well with experiment in an acceptable amount of error. In addition, various cross sections of a cable were selected and compared with each other in terms of drag and radiated noise.

1. 서론

전력수송을 담당하는 송전선의 항력저감 설계는 폭풍에 의한 송전선의 단락 및 송전탑의 붕괴사고를 미연에 예방함으로써 정전 사고 및 그에 대한 발생비용을 줄일 수 있다. 따라서 공기역학적 측면에도 그 중요성을 무시할 수 없다. 또한 근래에 들어와서 쾌적한 생활에 커다란 장애요소인 소음 공해의 심각성이 더욱 부각되고 있는 실정이다. 특히 소음 공해의 피해로 인해 국제적으로 이러한 소음 발생원에 대한 소음 수준의 규제를 강화하고 있으며, 소음을 감소시키려는 연구도 매우 활발히 진행되고 있는 실정이다. 소음 발생의 원인으로는 물체가 진동해서 생기는 경우가 가장 많으며, 이밖에도 송전선에 빠른 속도의 바람이 부딪힐 경우

발생하는 소리와 같이 물체 주위의 유동에 의해 소음이 발생하는 공력소음이 있다. 환경소음이 공해로서 인식이 증대되고 있는 현 시점에서 이러한 전선에 의해서 발생한 공력소음은 민가의 안정적인 생활에 심각한 영향을 미칠 수도 있다. 따라서 송전선의 공기역학적인 분석과 함께 공력소음에 대한 연구가 필요하게 된다.

본 과제에서는 저소음/저항력을 갖는 송전선의 수치연구와 전산코드의 개발을 최종 연구목표로 두고 이에 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 송전선의 유동장 해석을 위해 비압축성 비정상 Navier-Stokes 방정식을 사용하였으며 유동장 해석결과를 소음 방정식의 입력치로 송전선 원방에서의 공력소음을 예측하였다. 개발된 전산코드의 검증을 위해 원형단면을 갖는 실린더의 실험결과와 비교하였으며 여러 가지 단면형상을 갖는 송전선에 대한 수치해석도 수행하였다.

* 서울대학교 공력소음 및 소음제어 연구실

** 서울대학교 기계항공공학부

2. 본론

2.1 송전선 주위의 유동장 해석

송전선의 유동장을 해석하기 위한 지배방정식(governing equation)은 2차원 비압축성 비정상 Navier-Stokes 방정식으로 아래와 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right\} \quad (2)$$

비압축성 Navier-Stokes 방정식은 (1)과 (2)에서 알 수 있듯이 연속 방정식과 운동량 방정식이 완전히 분리되어 있다. 따라서 운동량 방정식에서 source 항으로 나타나는 압력장을 구하는데 주의가 요구된다. 압력장을 구하는 방법으로서 본 연구에서는 pseudo-compressibility를 사용하는데 압력의 pseudo-time 차분항이 연속방정식 뿐만 아니라 운동량 방정식에도 더해지게 되고 pseudo-time에서 divergence-free 해가 구해질 때까지 반복 계산을 수행한 후에 physical time에서 전진을 하게 된다.[1,2] 공간 이산화 방법으로 유한 체적법(finite volume method)과 풍상 차분법을 이용하였다. 본 연구에서는 비점성 플럭스 계산에는 3차의 정확도를 갖는 풍상차분법을 사용하였고 점성 플럭스 계산에는 2차의 중심차분법을 이용하였다.

시간적분법은 대개 외재적 방법과 내재적 방법으로 나뉘어 지는데 본 연구에서는 내재적기법을 사용하였다. 내재적 형태의 방정식을 푸는 방법으로는 LU-SGS(Lower Upper-Symmetric Gauss Siedel)기법을 사용하여 수치해석하였다.

벽면 경계조건으로는 점성인 경우에는 점착 조건(no-slip condition)을 사용하였다. 원방 경계조건은 경제적인 계산을 위해 제한되므로 여기서는 무한 원방 조건을 그대로 쓸 수 없고 유입 유출류의 판정에 따라 특성 방정식 방법에 기초하고 외재적으로 적용된다. 점성계산으로써는 층류, 그리고 난류일 경우에는 2-equation 모델인 $k-\omega$,

$k-\omega$ SST(Shear Stress Transport) 난류모델링을 사용하였다.[3,4]

2.2 소음해석

송전선같은 물체 주위를 흐르는 공기에 의한 소음은 크게 물체표면에서 발생하는 이극자(dipole)성분과 그 물체 주위를 둘러싸고 있는 유체응력의 섭동(fluctuation)으로 발생하는 사극자(quadrupole)성분으로 나눌 수가 있다. 이러한 소음은 물체 표면에서 성장한 경계층의 박리로 인한 주기적인 와류발산(vortex shedding)과 관련이 있으므로 송전선 주위를 흐르는 유동장에 의해서 발생한다. 따라서 송전선 주위의 유동장을 정확히 해석하고 예측하는 것이 소음을 보다 정확히 해석하는 데 필수적인 요건이 된다.

송전선에서 발생하는 공력소음의 메커니즘은 다음과 같다. 송전선 주위를 흐르는 유동에 의해 송전선 표면에 경계층이 생성되고 이 경계층이 발달하면서 송전선 표면에서 박리하며 vortex를 생성하게 되고 이 vortex가 shedding하게 된다. 이 때 송전선 표면에서 압력 요동(pressure fluctuation)과 점성 마찰에 의한 이극자(dipole)성분의 소음이 발생하게 되고 후류의 교란 영역에서 사극자(quadrupole)특성의 소음이 발생하게 된다. 일정한 속도를 갖는 유동장에 놓여 있는 고체 표면(solid boundary)에 의해 생성되는 소음은 아래와 같은 FW-H 방정식부터 Curle's equation을 유도하여 계산할 수 있다.[5,6]

$$4\pi c_0^2 \rho'(\mathbf{x}, t) = \frac{\partial}{\partial t} \int \int \left[\frac{\rho_0 V_n}{r|1-M_r|} \right]_r dS(\eta) - \frac{\partial}{\partial x_r} \int \int \left[\frac{\rho_0 n_j}{r|1-M_r|} \right]_r dS(\eta) + \frac{\partial}{\partial x_r \partial x_j} \int \int \left[\frac{T_{ij}}{r|1-M_r|} \right]_r dV(\eta) \quad (3)$$

$$r = t - \frac{|\mathbf{x} - \mathbf{y}|}{c} = t - \frac{r}{c} \quad (4)$$

여기서 r 는 sound generating time을 말하며 t 는 sound receiving time, \mathbf{y} 는 음원(sound source)의 좌표계, \mathbf{x} 는 source의 좌표계, c 는 음속을 의미한다. 또 r 은 음원에서 관찰자까지의 거리를 뜻한다. 여기서

$\frac{\partial V_n}{\partial t} = \mathbf{a} = \mathbf{M} = \mathbf{V} = 0$, $\eta = \mathbf{y}$ 이라 놓으면 아래 식(5)와 같이 된다.

$$4\pi\dot{p}'(x, t) = -\frac{\partial}{\partial x_i} \int_S \left[\frac{p_{ij} n_j}{r} \right]_c dS(y) + \frac{\partial}{\partial x_i \partial x_j} \int_V \left[\frac{T_{ij}}{r} \right]_c dV(y) \quad (5)$$

위 식에서 알 수 있듯이 송전선 주위를 흐르는 유동장에 의한 소음은 물체 표면 위의 압력의 변화에 의한 이극(dipole) 음원항과 물체 주위의 유체 응력(fluid stress)에 의한 사중극(quadrupole) 음원항으로 구분된다.

음원에서 관찰자까지의 거리가 충분히 멀리 떨어져 있고 소음원 영역이 단위소음 파장보다 작다면 소음원 영역은 음향학적으로 compact한 것으로 간주할 수 있으며 지연시간에 대한 \bar{y} 의 적분을 용이하게 계산할 수 있다. 음향학적 현상은 본질적으로 3차원이지만 3차원의 식을 무한 스펙에 대해 적분하게 되면 2차원 음향학식과 유사한 결과를 얻어낼 수 있다.[7]

$$\dot{p}'(x, t) = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{c_0} \frac{x_i}{|x|} \int_0^\infty \dot{D}_i(t') d\xi + \frac{1}{2\pi} \frac{1}{c_0^2} \frac{x_i x_j}{|x|^2} \int_0^\infty \dot{Q}_{ij}(t') d\xi \quad (6)$$

여기서 $t' = t - \frac{|x|}{c_0} \cosh \xi$ 이다.

3. 계산결과

3.1 코드의 검증

그림1은 원형단면을 갖는 송전선 주위의 유동장을 풀기 위한 계산격자를 나타낸 그림이다. 와류 포착능력을 향상시키기 위해서 후류부근으로 격자를 밀집시켰다. 먼저 실린더의 지름이 20mm이고 레이놀즈수(Reynolds number) 5400에 대해서 수치계산을 수행하였다. 그림2와 그림3은 시간에 따른 양력계수 및 항력계수를 나타낸 그림이다.

층류(laminar)계산과 더불어 2-equation 난류 모델링인 $k-\omega$ 그리고 $k-\omega$ SST modeling에 의한 결과를 같이 포함하였다. 양력계수는 스트로울수($St = fD/U$)에 따라서 주기적인 형상을 띠고 있다. 스트로울수가 각각 층류계산시에는 0.2, $k-\omega$ 난류모델링에서는 0.192, $k-\omega$ SST 모델링에서는 0.194값을 가지고 있는데 이러한 레이놀즈수 범위에서 0.19-0.20에 해당하는 스트로울수는 실험값과

매우 근접한 값을 갖고 있다.[8] 층류, 난류 계산에 따라서 변동양력계수(fluctuating lift coefficient)의 진폭이 많은 차이를 보이고 있다. 이는 후류에서의 와류 포착능력에 따른 결과라고 할 수 있다. 강한 역압력 구배가 나타나는 지역에서 효율이 좋은 $k-\omega$ SST 모델링이 가장 작은 진폭변화를 보이고 있다.

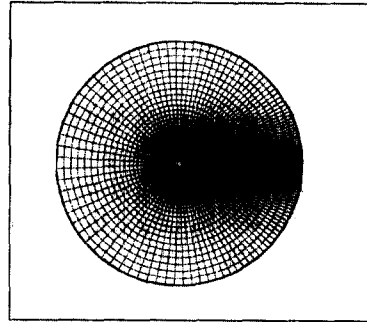


그림1 Grid system for computation

그리고 앞서 언급한 Curle 방정식으로 원방(far-field)의 소음을 예측하였다. 그림4는 소음의 지향성(directionality pattern)을 나타낸 그림으로서 유동의 90도 방향으로 소음이 전파되고 있음을 알 수 있다. 이중극 성향이 강하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그림 5에서 원방의 소음의 스펙트럼 계산결과를 실험결과와 비교하여 보았다.[9] 소음의 측정지점은 실린더 축과 흐름에 수직한 방향으로 실린더 축으로부터 50cm만큼 떨어진 곳이며 음압은 기준음압 $20 \mu Pa$ 를 사용하여 음압레벨(dB)로 환산되었다.

첫 번째 하모닉(harmonic)에서 음압레벨이 실험값이 93dB, $k-\omega$ SST 모델링에 의한 예측결과는 102dB로서 약 10%정도 과도 예측하고 있다. 이는 Curle equation이 2차원 무한 실린더로 가정하여 소음을 예측하기 때문에 나타나는 오차이며 와류 발산(vortex shedding) 자체가 2차원이 아닌 3차원이기 때문이다.[10,11] 한편 소음의 기본주파수 및 다른 하모닉(harmonic)들은 수치해석 결과가 비교적 잘 모사하고 있음을 확인할 수 있다.

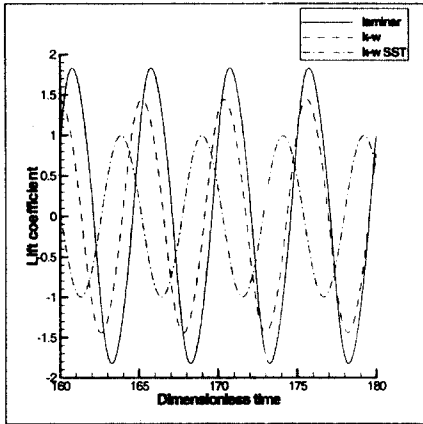


그림 2 Lift coefficient for Reynolds number of 54000

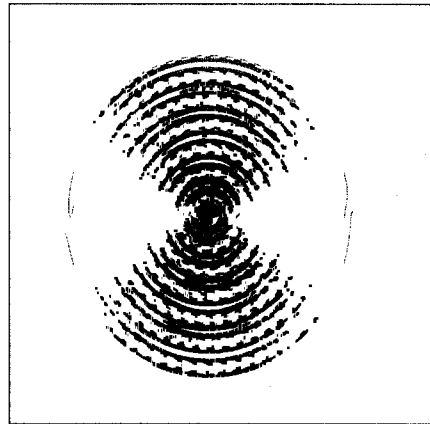


그림 4 Sound directivity pattern of circular cylinder

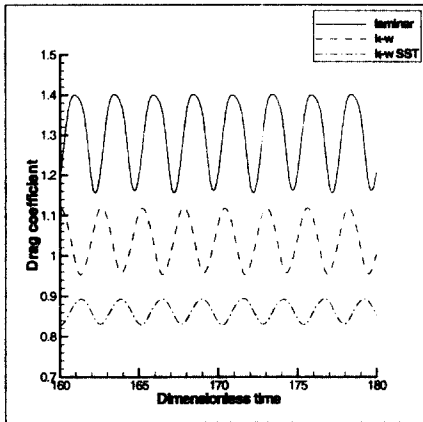


그림 3 Drag coefficient for Reynolds number of 54000

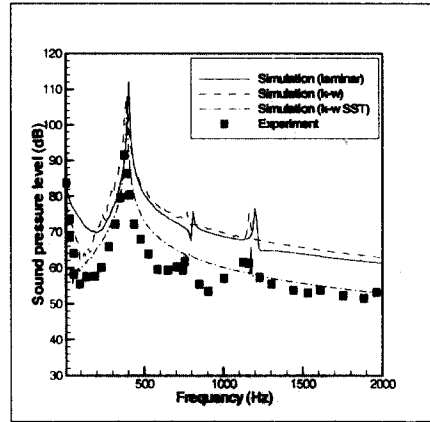


그림 5 Sound pressure level at Reynolds number of 54000

3.2 단면 형상에 따른 항력 및 소음

송전선의 직경을 5cm로 하고 유속이 20m/s일 때(Reynold수 66000에 해당)일 때 원형 단면과 타원형 단면형상에서의 항력변화를 살펴보았다. 타원형 단면은 원형단면에 비해 단면적이 20%정도 큰 경우로서 난류모델링은 $k-\omega$ SST모형을 사용하였다. 실제적으로 단면형상이 유선형이면(극단적인 경우 비행기 날개 단면 형상) 항력과 소음이 많이 감소하게 된다. 그러나 기술적, 경제적인 제약으로 송전선의 단면형상을 유선형으로 변화시키는 것은 매우 어려움이 따르므로 원형형상과 유동흐름방향으로 길이를 변화시킨 타원형 형상을 해석모델로 삼았다.

그림 6에서 각각 단면형상에 따른 양력 및 항력계수를 나타내었는데 타원형의 단면형상이 평균항력(mean drag)이 원형 단면의 경우보다 작게 나타나고 있다. 한편 스트롤수는 원형단면의 경우 0.198, 타원형 단면의 경우 0.206이다. 변동 양력도 타원형 단면이 작게 나타났다. 그림7은 이러한 유동장해석 결과를 토대로 원방에서의 소음의 스펙트럼 계산결과를 나타내었다. 타원형 단면의 기본주파수에서 피크치가 90dB이며 원형 단면일 경우에는 93dB로 약 3dB정도의 차이가 있다. 따라서 타원형 단면이 비교적 저소음, 저항력 단면형상임을 알 수 있다.

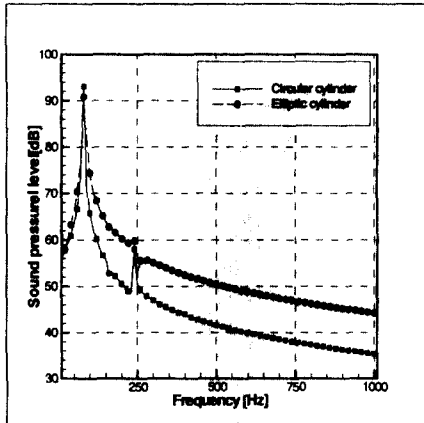


그림 6 Sound pressure level for circular and elliptic cylinder

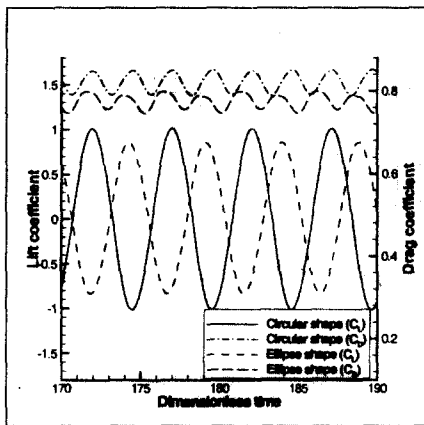


그림 7 Lift and drag coefficient for circular and elliptic cylinder

4. 결론

본 연구에서는 저항력/저소음을 갖는 송전선 수치연구와 전산코드의 개발을 위해서 비정상 비압축성 Navier-Stokes 코드를 개발하였다. 아울러 음향상사기법을 이용한 Curle 방정식을 이용하여 원방에서 소음을 예측하는 코드도 개발하였다. 개발된 코드의 검증 을 위해서 원형단면을 갖는 실린더에서의 실험결과와 비교하였다. 검증결과 기본주파수에서 원방소음의 최대값은 과도 예측하였다. 이는 와류발산자체가 본질적으로 2차원현상이 아닌 3차원 현상이며 또 2차원 무한실린더에서 계산한 소음예측결과는 무한실린더만큼 음향학적 신호를 적분하기 때문이다. 그

러나 스펙트럼 패턴은 비교적 잘 일치하고 있음을 확인하였다. 그리고 여러 가지 단면 형상을 갖는 송전선의 경우에도 수치해석을 하였는데 원형보다는 타원형에 가까운 단면이 비교적 저항력 저소음을 갖는 형상이라고 할 수 있다.

후기

본 논문은 한국전력공사의 전력기술 기초연구 지원사업 연구과제(98-지정-10)로 수행된 것이며 후원에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Honam, Ok, "Development of an incompressible Navier-Stokes Solver and Its application to the Calculation of Separated Flows," Department of Aeronautics and Astronautics, University of Washington.
2. Stuart E. Rogers, Dochan Kwak and Cetin Kiris, "Steady and Unsteady Solutions of the Incompressible Navier-Stokes Equations," AIAA J. Vol. 29, No. 4, 1991
3. F. R. Menter, "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Application," AIAA J. Vol. 32, No. 8, 1994
4. D. C. Wilcox, "Turbulence modeling for CFD," DCW Industries, Inc., 1993.
5. M. J. Lighthill, "On sound generated aerodynamically; I. General theory," Proc. Roy. Soc. London Ser. A. 211, 564-587, 1952.
6. Curle, N., "The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound," Proc. Roy. Soc. London Ser. A. 213, 505-514.
7. Mitchell, B. E., Lele, S. K. & Moin, P., "Direct computation of the sound from a compressible co-rotating vortex pair," Journal of Fluid Mechanics, 1995.
8. Blake, W. K., "Mechanics of Flow-induced Sound and Vibration: Volume I," Academic Press, 1986.
9. 홍 훈빈, 최 종수, "원형실린더에서 와류 발생 소음에 대한 실험적 연구," 항공우주공학회 추계학술대회 논문집, 1997.
10. Alemdaroglu, N., Rebillat, J. C., and Geothals, R., "An aeroacoustic Coherence Function Method Applied to Circular cylinder flows," Journal of Sound and Vibration, Vol. 69, No. 3, 1980, pp 427-439.