

Permeable FW-H 방법을 이용한 원형 실린더 주변의 난류유동소음해석

최원석* · 홍석윤**† · 송지훈*** · 권현웅**** · 정철민*****

*, ** 서울대학교 조선해양공학과, *** 전남대학교 조선해양공학전공,
**** 거제대학교 조선해양공학과, ***** 국방과학연구소 국방해양기술센터Turbulent-Induced Noise around a Circular Cylinder
using Permeable FW-H Method

Woen-Sug Choi* · Suk-Yoon Hong**† · Jee-Hun Song*** · Hyun-Wung Kwon**** · Chul-Min Jung*****

*, ** Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

*** Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chonnam National University, Yeosu 550-749, Korea

**** Department of Shipbuilding and Marine Engineering, Koje College, Koje 656-701, Korea

***** Advanced Naval Technology Center, NSRDI, Agency for Defense Development, Jinhae 645-600, Korea

요 약 : 난류유동에 의한 소음은 계산비용의 관점에서 음향 유사법을 이용하여 전산유체 기법과 결합해 다양한 해석모델이 연구되고 있다. FW-H 음향상사법을 이용한 유동소음해석의 연구가 활발히 이루어지고 있으나, 기존 문헌들의 결과에서는 계산비용의 관점에서 난류유동에 의한 소음성분을 생략하고 있다. 그러나, 최근의 연구에서 유동소음특성에 있어 난류소음의 중요성이 밝혀진바 있다. 본 논문에서는 RANS 난류모델과 투과성 경계면을 이용한 Permeable FW-H 음향상사법을 이용한 난류유동소음해석에 대해 연구하였다. 2D 실린더에 대하여 직접적으로 변동압력을 추출하는 직접법과 난류성분을 고려하지 않은 FW-H 상사법, 또 난류소음의 성분을 포함하는 Permeable FW-H 방법의 경우를 비교하였다. Permeable FW-H 방법을 통해 일반적으로 적용되는 FW-H 방법에서 해석 불가능한 난류에 의한 소음의 영향을 기존의 FW-H 방법과 동일한 계산비용으로 예측할 수 있었고, 적절한 투과성 경계면 설정을 통해 높은 정확도의 해석이 가능했다. Permeable FW-H 방법을 통한 난류유동해석 절차를 확립하였으며, 그 유용성을 확인했다.

핵심용어 : 난류유동소음, 음향상사법, 원형실린더, FW-H 방법, Permeable FW-H 방법

Abstract : Varieties of research on turbulent-induced noise is conducted with combinations of acoustic analogy methods and computational fluid dynamic methods to analyze efficiently and accurately. Application of FW-H acoustic analogy without turbulent noise is the most popular method due to its calculation cost. In this paper, turbulent-induced noise is predicted using RANS turbulence model and permeable FW-H method. For simplicity, noise from 2D cylinder is examined using three different methods, direct method of RANS, FW-H method without turbulent noise and permeable FW-H method which can take into account of turbulent-induced noise. Turbulent noise was well predicted using permeable FW-H method with same computational cost of original FW-H method. Also, ability of permeable FW-H method to predict highly accurate turbulent-induced noise by applying adequate permeable surface is presented. The procedure to predict turbulent-induced noise using permeable FW-H is established and its usability is shown.

Key Words : Turbulent-Induced Noise, Circular Cylinder, Acoustic Analogy, FW-H Method, Permeable FW-H Method

1. 서 론

수중에서 운동하는 물체의 경우 주위 유동에 의해 소음이 발생하게 된다. 이러한 유동소음을 예측하는 방법으로는 Kirchhoff Formula를 이용하는 방법과 음향상사법이 있다(Wang

et al., 2006). 음향상사법은 kirchhoff 방법에 비해 소음성분을 물리적인 의미로 분리할 수 있는 장점이 있으며, 유동소음을 크게 두계, 하중, 난류소음으로 구분한다(Ffowcs Willans and Hawkings, 1969). 이때 난류소음의 경우 관심영역이 원거리장인 방사소음에 있어 해석에 요구되는 계산비용의 관점 및 미미한 영향을 이유로 관심대상에서 제외되고 있는 실정이다. 그러나, 근거리장의 자체소음의 관점에서는 난류유동

* First Author : kickflipin@snu.ac.kr, 02-880-7331

† Corresponding Author : syh@snu.ac.kr, 02-880-8757

소음의 영향도 무시할 수 없으며, 선체 하부의 소나뎀의 경우 정확한 유동소음의 해석이 이루어지지 않는다면 자체적인 소음의 신호와 수신신호를 구분하지 못하여 소나의 성능에 영향을 미치게 된다(Wang et al., 2006). 또한, 최근의 연구에서 원거리 방사소음의 관점에서, 전체적인 소음특성을 결정하는데 있어, 난류소음의 영향이 중요함을 확인한 바 있다(Ianiello et al., 2014). 위와 같은 선박의 수중소음의 대응 기술 육성은 미래해사안전 중점추진과제로도 선정된 바 있다(Kim et al., 2014).

정확한 난류유동의 소음예측을 위해서는 난류유동해석의 수치기법으로 어떠한 모델링 가정도 적용되지 않은 DNS(Direct Numerical Simulation)을 통해 직접적으로 변동압력을 추출해내는 방법이 있으나, 계산비용의 관점에서 불가능에 가깝다(Singer and Lockard, 2003; Inoue and Hatakeyama, 2002). 따라서 근사적 전산유체 기법과 Lighthill에 의해 제안된 유속변동, 엔트로피변동과 점성응력을 소음원으로 하는 음향상사법을 결합해 다양한 해석모델이 연구되고 있다(Wang et al., 2006). 일반적으로 유동소음해석에 Lighthill의 상사법(Lighthill, 1952)을 기초로 임의 속도로 이동하는 물체경계면을 고려한 FW-H(Ffowcs Williams and Hawkins) 상사법(Ffowcs Williams and Hawkins, 1969)에서 계산비용이 큰 난류소음항을 무시하고 있다(Ansys, 2009).

본 연구에서는 유동장의 해석기법으로 DNS나 LES(Large Eddy Simulation)보다 계산비용이 작은 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes)기법과 음향장의 해석기법으로 투과성 경계면을 이용한 Permeable FW-H 방법을 이용하여 난류유동소음 해석을 수행하였다. 2차원 원형 실린더에 대하여 높은 정확도에 반해 계측점 위치가 제한되는 직접적인 변동압력 추출법과 난류성분을 무시하여 낮은 계산비용으로 유동소음을 해석하는 기존의 FW-H 상사법, 기존의 FW-H 방법과 동일한 계산비용으로 난류소음의 영향을 포함하는 Permeable FW-H 방법의 비교를 수행하였다. Permeable FW-H 방법의 난류유동소음 해석에 대한 효율성, 유용성을 확인하고자 한다. 또한, 적절한 투과성 경계면의 설정을 통해 Permeable FW-H 방법이 정확한 난류유동소음을 해석의 가능함을 확인토록 한다.

2. 배경이론

Lighthill이 제시한 음향상사법은 소음원을 질량보존의 방정식과 모멘트 방정식에서부터 아래와 같은 식으로 표현하였다(Lighthill, 1952).

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - \nabla^2 \rho' = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (1)$$

$$T_{ij} = \rho v_i v_j + p_{ij} - c^2 \rho' \delta_{ij} \quad (2)$$

여기서, c 는 소리의 속도(m/s), ρ' 는 음향성분에 해당하는 밀도(kg/m^3), T_{ij} 는 Lighthill 응력, v_i 는 유동의 속도(m/s), $v_i v_j$ 는 레이놀즈 응력, p_{ij} 는 표면압력이다.

Lighthill의 음향상사법은 Curle에 의해 정지한 강체의 경계조건을 고려한 상사식으로 발전되었고(Curle, 1995), Ffowcs Williams, Hawkins는 임의의 운동하는 강체의 경계조건을 고려할 수 있는 상사식을 아래와 같이 제시하였다(Ffowcs Williams & Hawkins, 1969).

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \rho' = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(P_{ij} \delta(f) \frac{\partial f}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial t} (\rho_0 v_i \delta(f) \frac{\partial f}{\partial x_i}) \quad (3)$$

여기서, f 는 움직이는 물체의 표면을 $f(x, t) = 0$ 으로 하여 표현하는 함수로, $f < 0$ 일때는 물체내부를, $f > 0$ 일때는 물체의 외부를 나타낸다. 첫 번째 항은 유동장 내에 존재하는 비정상성(unsteadiness)에 의한 사극자(quadrupole)를 레이놀즈 응력으로 표현된 난류 소음원이다. 두 번째 항은 경계층의 팽창(dilatation of boundaries)에 의한 단극자(monopole)의 형태를 가지는 하중 소음원이며 마지막으로 세 번째 항은 물체의 표면에서 발생하는 응력변동(fluctuating stress)에 의한 쌍극자(dipole)의 두께 소음원에 해당한다.

FW-H의 상사식은 Farassat's formulation에 의해 아래와 같은 적분식의 형태로 표현가능하다(Farassat, 2007).

$$4\pi p_{Thickness} = \int_{f=0} \left[\frac{\rho_0 \dot{v}_n}{r(1-M_r)^2} + \frac{\rho_0 v_n \hat{r}_i \dot{M}_i}{r(1-M_r)^3} \right] dS + \int_{f=0} \left[\frac{\rho_0 c v_n (M_r - M^2)}{r^3 (1-M_r)^3} \right] dS \quad (4)$$

$$4\pi p_{Loading} = \int_{f=0} \left[\frac{\dot{p} \cos \theta}{cr(1-M_r)^2} + \frac{\hat{r}_i \dot{M}_i p \cos \theta}{cr(1-M_r)^3} \right] dS + \int_{f=0} \left[\frac{p \cos \theta}{r^2 (1-M_r)} + \frac{(M_r - M^2) p \cos \theta}{r^2 (1-M_r)^3} \right] dS \quad (5)$$

$$4\pi p_{Quadrupole} = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int_V \left[\frac{T_{ij}}{r|1-M_r|} \right] dV \quad (6)$$

이때, $1 - M_r$ 은 도플러 인자, $r = |x - y|$ 이며, y 는 유동

내의 지점이다. 위 식의 적분은 모두 지연시간(retarded time) $t_{ret} = t - r/c$ 에서 계산된다.

사극자로 표현되는 난류소음향의 경우, 체적적분식의 형태로 나타나며, 적분공간의 설정뿐만 아니라, 레이놀즈 응력의 계산 또한 어렵다(Farassat and Brentner, 1988). Permeable FW-H 방법은 기존의 FW-H식에서 물체와 외부를 구분하는 함수 f 를 정의하는 유동의 법선속도(v_n)와 물체의 법선속도(u_n)가 같다는 가정($u_n = v_n$)을 변형하여 f 를 물체의 표면이 아닌 가상의 투과성 경계면으로 설정함으로써 난류소음향의 계산을 회피할 수 있다. 투과성 경계면(Inner-Cell)에서 하중소음과 두께소음을 계산하면 그 내부에 난류에 기인하는 난류소음의 영향이 포함되게 된다(Wang et al., 2006, Farassat, 2007). 또한, 본 연구에서는 RANS법을 이용한 직접적인 변동압력 추출법과 음향상사법을 비교하였다. 직접추출법의 경우 높은 차수의 수치해석 기법을 이용해 변동압력을 계산함으로써 정확한 난류유동소음 값을 얻을 수 있다. 그러나, 해석격자 외부의 계측점에서는 해석이 불가능하고, 평균유동압력이 일정함을 가정하고 있어서 사용이 제한적이다(Ianicillo et al., 2014).

3. 2차원 원형실린더 해석

2차원 원형 실린더 모델에 대하여 유동소음 해석을 Fig. 1과 같은 절차로 수행하였다. 상용프로그램인 Ansys FLUENT v14.5를 이용하여 난류의 영향을 제외한 FW-H 방법의 유동소음해석과 Inner-Cell 경계조건 설정을 통한 Permeable FW-H 방법의 소음해석을 수행하였다(Ansys, 2009).

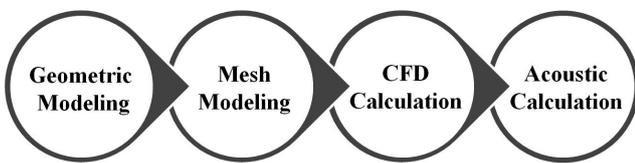


Fig. 1. Flow chart of hydrodynamic noise calculation.

3.1 격자생성

직경(D)이 20 mm인 원통을 해석하기 위해 길이방향으로 46D, 높이방향으로 30D의 총 218,268개의 정렬된 4각형 격자를 Fig. 2와 같이 작성하였으며, 실린더 후류에 발생하는 와류와 직접법에서 추출하는 유동변화의 계측점(실린더 표면에서부터 유입류에 수직하는 방향으로 10 mm, 30 mm, 50 mm, 70 mm, 100 mm, 총 5지점)을 포함하도록 하였다. Fig. 3은 해석 대상의 표면에서 첫 격자의 크기를 나타내는 지표로 사용되는 값인 Dimensionless Wall Distance($y^+ = u^* \cdot y/\nu$)이다.

y^+ 가 1보다 작도록 경계층 내의 격자를 충분히 조밀하게 하여 정밀한 해석이 가능하도록 하였다. 또한, 유입류 경계를 반구의 형태로 하여, 전체적인 격자계가 C-H형태가 되도록 하였다. C-H형태를 통해 실린더 근처의 정확도를 높이면서 외각 격자의 비틀림(Skewness)도 향상시킬 수 있었다.

Permeable FW-H 방법의 적분면으로 투과성 경계면 조건을 가지는 Inner-Cell(Fig. 2)을 실린더 근처에서 경계층과 후류에 발생하는 와류발산(Vortex Shedding)을 3~4개 정도 포함하도록 설정하였다.

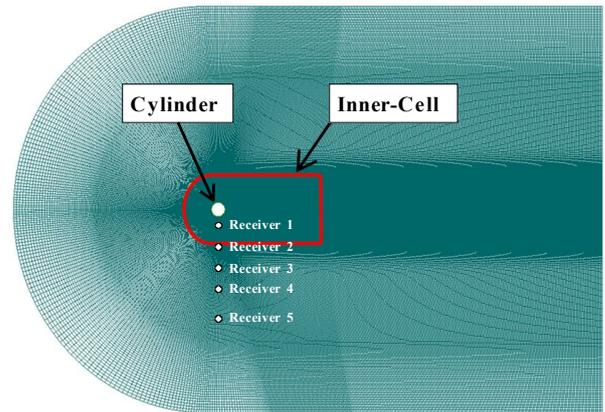


Fig. 2. Structured mesh for 2D CFD simulations with permeable surface(Inner-Cell), 218,168 volume cells.

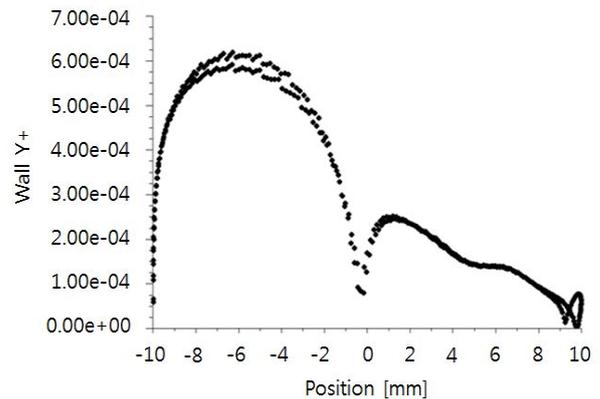


Fig. 3. Y^+ around the cylinder.

3.2 난류유동해석

정확한 소음해석을 위해서는 소음원이 되는 유동의 작은 압력변화를 계산하기위해 높은 차수의 수치해석 기법을 이용하여야 한다. 아래 Table 1은 2차원 원형 실린더의 유동해석을 위한 주요 수치해석법의 설정 값이다. 해석결과의 비교분석을 위해 참고문헌(Park, 2012)과 동일한 조건인 30 m/s ($Re=4 \times 10^4$)와 40 m/s($Re=5.4 \times 10^4$) 공기중에 놓인 경우를 해석하였다.

Table 1. Solver settings for the CFD simulations

| | |
|---------------------------|----------------------------------|
| Flow Solver | Ansys FLUENT v14.5 |
| Solver Type | Pressure based Solver |
| Time Solver | Transient, Second Order Implicit |
| Turbulence Model | $k-w$ SST |
| Scheme | SIMPLE |
| Gradient | Green-Gauss Node-based |
| Pressure | Body Force Weighted |
| Momentum | Third order MUSCL |
| Turbulent Kinetic Energy | Third order MUSCL |
| Specific Dissipation Rate | Third order MUSCL |

Table 2. Comparison of Strouhal number

| $k-w$ SST | Strouhal No. (S_t) |
|-----------------------------|------------------------|
| Experiment (Park, 2012) | 0.195 |
| Experiment (Norberg, 2003) | 0.190 |
| Simulations (Park, 2012) | 0.198 |
| Simulations (Orselli, 2009) | 0.247 |
| Result | 0.222 |

Fig. 4는 실린더 주변의 동압력(Dynamic Pressure) 해석결과이며, Fig. 5는 실린더의 표면을 적분해 계산한 시간 변화에 따른 양력계수의 해석결과이다. Table 2에서는 2차원 실린더의 유동해석의 타당성을 확인하기 위해 양력계수의 진동수로부터 스트로울수를 계산하여 참고논문(Park, 2012, Orselli et al., 2009)과 비교해 보았다. 해석결과 0.222의 스트로울수를 얻어낼 수 있었고, 이는 Orselli(Orselli et al., 2009)의 해석결과와 Park(Park, 2012)의 해석결과와 범위 내에 있음을 확인했다.

또한, 실린더 표면에서의 압력계수를 Fig. 6에 나타내었다. Orselli(Orselli et al., 2009)의 압력계수와 비교해 볼 때, 올바른 유동해석이 이루어졌음을 확인할 수 있다.

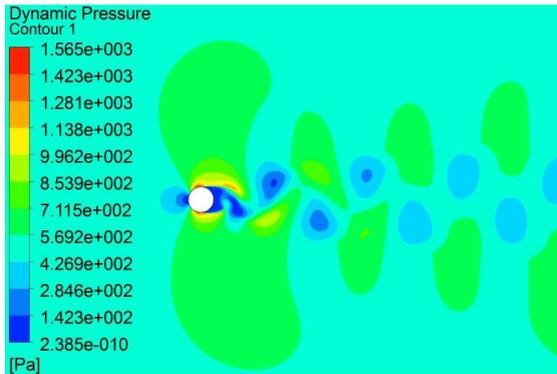


Fig. 4. Dynamic pressure around the cylinder.

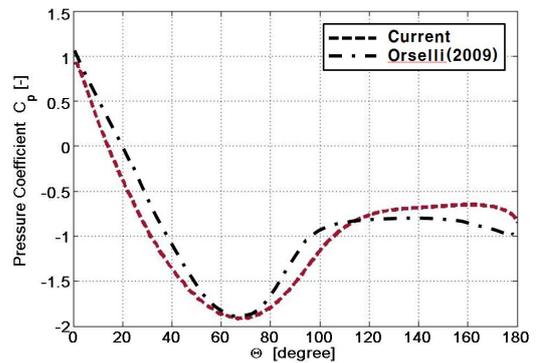


Fig. 6. Pressure coefficient on the cylinder surface.

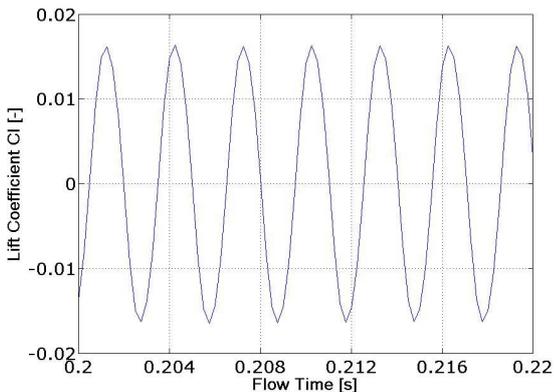


Fig. 5. Lift coefficient of cylinder.

3.3 공기중의 난류유동소음해석

먼저 유속의 변화에 따른 음향해석의 결과를 비교하였다. Fig. 7은 실린더에서 발생하는 소음해석의 결과이다. 유속이 빨라짐에 따라 전체적인 소음 스펙트럼이 고주파수로 이동, 크기도 더 커지는 현상을 확인할 수 있다. 이는 Hong(Hong and Choi, 1998)의 실험결과와 동일한 경향을 보여주고 있으며, 음향해석의 결과 또한 올바르게 해석되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 해석방법에 따른 소음해석 값의 비교를 나타내었다. 직접 유동의 변동압력을 추출해내는 직접법(Direct), 사극자 형태로 나타나는 난류에 의한 유동소음을 제외한 FW-H 상사법(FW-H w/o Quad.)과 투과성 경계면 Inner-Cell 표면에서 FW-H 상사법을 적용한 Permeable FW-H 방법을 비교하였다. 직접법과 난류성분을 제외한 FW-H 방법의 차이는 난류유동에 의한 소음에 해당하며, 약 10 dB ref 20 μ Pa 정도의 크기를 보인다. Inner-Cell 내부에 위치한 계측점 1과 계측점 2를 제외한 나머지 계측점에서 Permeable FW-H 방법의 경우 직접법의 해석 값에 일치하는 결과를 보이고 있다.

사극자항을 제외한 FW-H 방법의 경우 난류에 의한 유동

소음을 제외한 해석 방법임을 고려할 때, Permeable FW-H 방법이 난류의 영향에 의한 유동소음을 올바르게 포함해 계산하고 있으며 Permeable FW-H 방법을 이용한 난류유동소음해석의 절차를 확립, 그 유용성을 확인하였다.

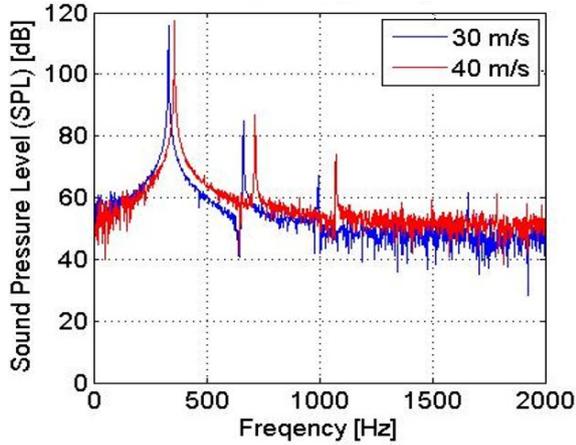


Fig. 7. Sound pressure level at different flow velocities.

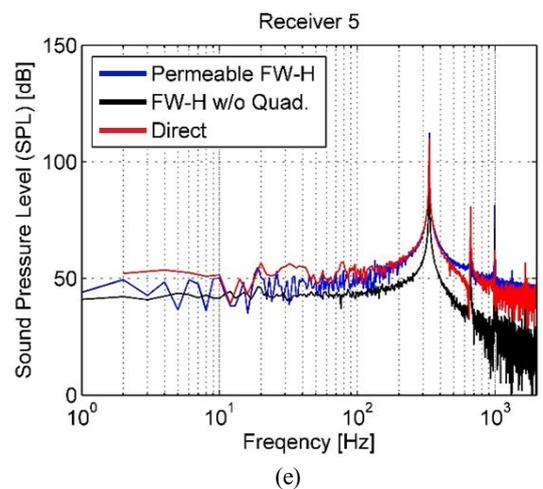
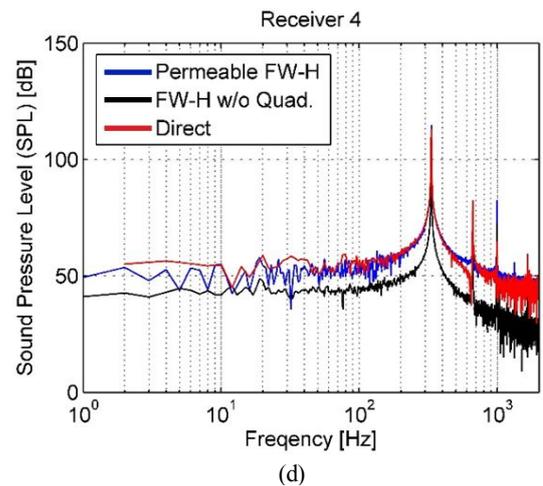
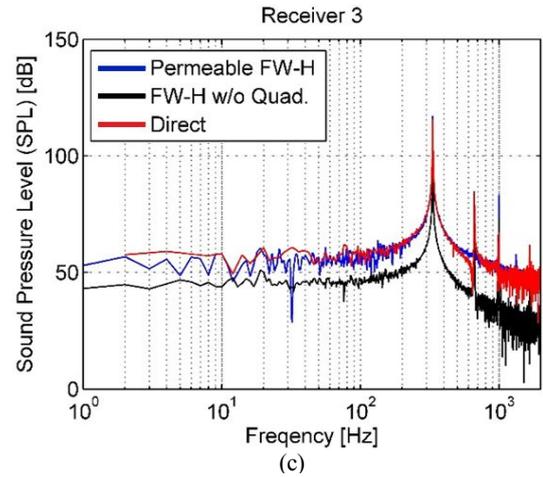
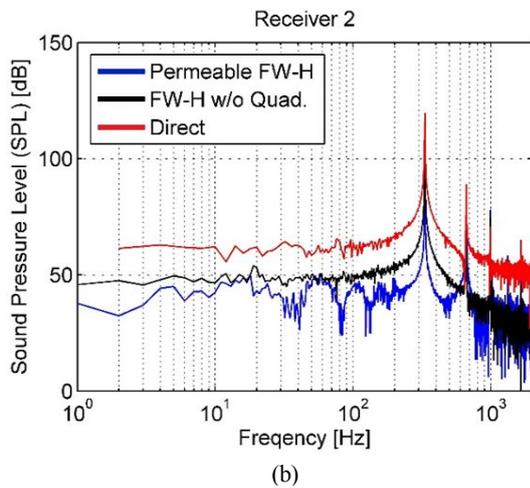
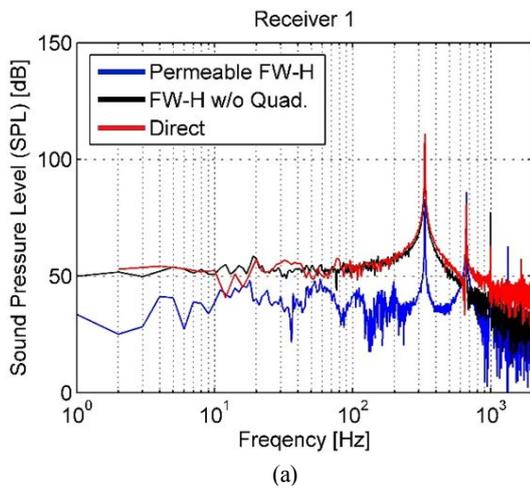


Fig. 8. Comparison of sound pressure level spectrum obtained from different methods at 30 m/s($Re=4 \times 10^4$), (a): Receiver 1 (10 mm), (b): Receiver 2 (30 mm), (c): Receiver 3 (50 mm), (d): Receiver 4 (70 mm), (e): Receiver 5 (100 mm).

3.4 수중에서의 난류유동소음해석

Fig. 9는 동일한 절차로 공기중에서 수중으로 동일 격자에서 매질을 변환, 10 m/s($Re=1.6 \times 10^5$)의 유입속도에서 해석한 결과이다. 공기중에서의 해석결과와 비교해 수중에서는 난류유동에 의한 소음의 영향이 약 20 dB ref 10 μ Pa 정도로 나타났으며, 200 Hz 이상의 주파수 대역에서는 사극자향이 소음을 상쇄시켜 줄이는 것을 확인할 수 있다.

Permeable FW-H 방법의 해석결과는 난류 항을 제외한 FW-H 방법의 결과와 비교해 난류유동에 의한 소음의 영향을 포함하고 있어 직접법에 더 가까운 결과를 나타낸다. 공기중에서와 동일하게 Permeable FW-H 방법을 이용한 난류유동해석의 절차의 유용성을 보여주고 있다.

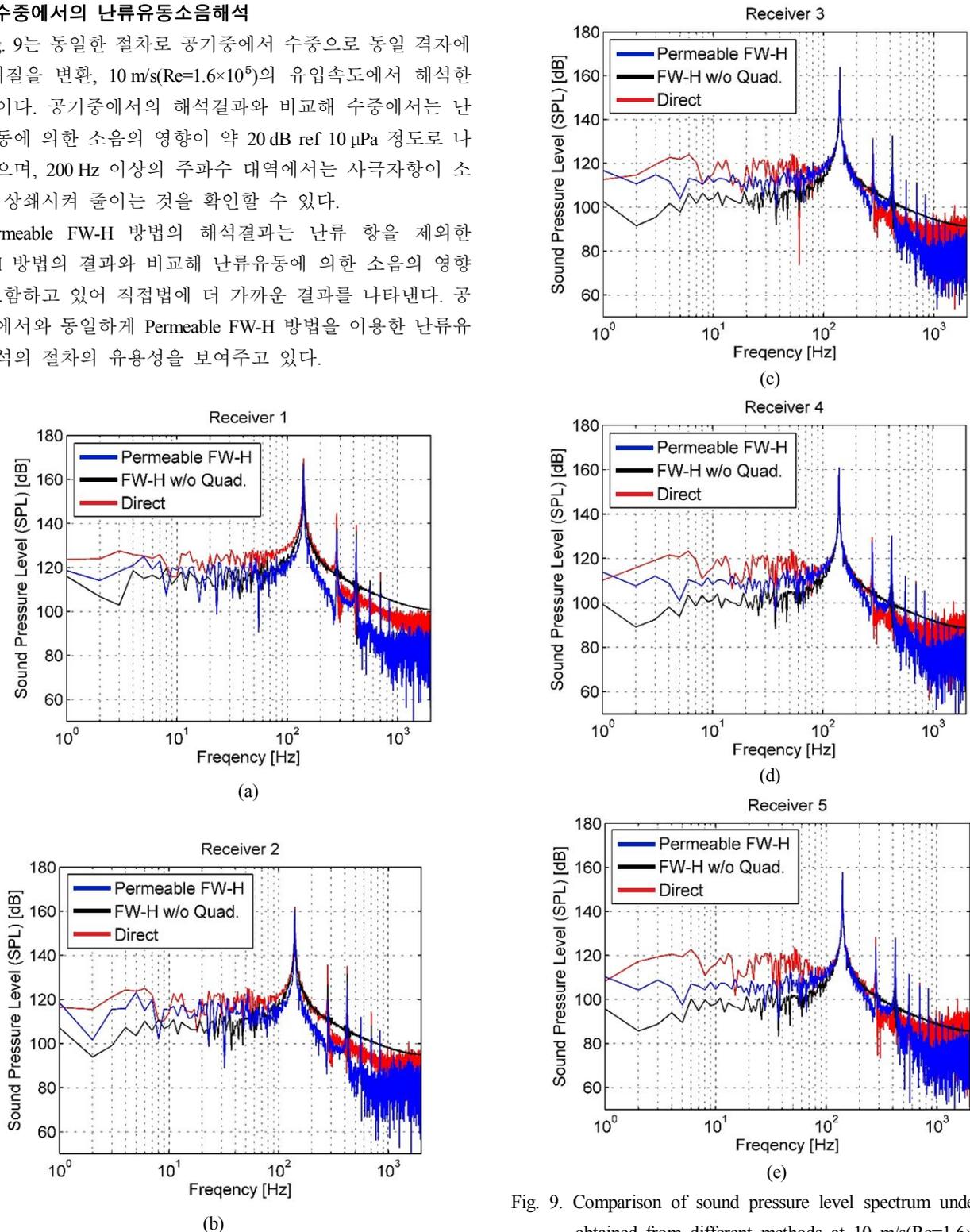


Fig. 9. Comparison of sound pressure level spectrum underwater obtained from different methods at 10 m/s($Re=1.6 \times 10^5$), (a): Receiver 1 (10 mm), (b): Receiver 2 (30 mm), (c): Receiver 3 (50 mm), (d): Receiver 4 (70 mm), (e): Receiver 5 (100 mm).

3.5 투과성 경계면의 특징

Permeable FW-H 방법의 경우 공기중과 수중 모두 Inner-Cell 내부에 비해 외부에서 정확한 해석결과를 나타내는 특징을 보이고 있다. 따라서 Inner-Cell의 내외부를 반전설정하여 수행해 보았다. 수중에 있어서, Fig. 10과 같은 난류유동 소음해석 결과를 얻을 수 있었다. Inner-Cell 내부 근접장에 위치하는 계측점 1과 계측점 2에서 직접법에 난류유동소음의 영향을 포함하는 Permeable FW-H 방법이 일치하는 매우 정확한 해석결과를 보여주었으며 외부에서는 만족스럽지 못한 값을 나타냈다. 즉, Permeable FW-H 방법을 적용시키는데 있어 해석 상황에 따라 Inner-Cell의 적절한 설정을 통해 정확도 높은 난류유동소음해석이 가능함을 확인했다. 이때, Inner-Cell 자체의 크기뿐만 아니라, 와류 발산(Vortex Shedding)에 의한 후류방향 길이설정, Inner-Cell 내외부 설정 등을 고려해야 한다.

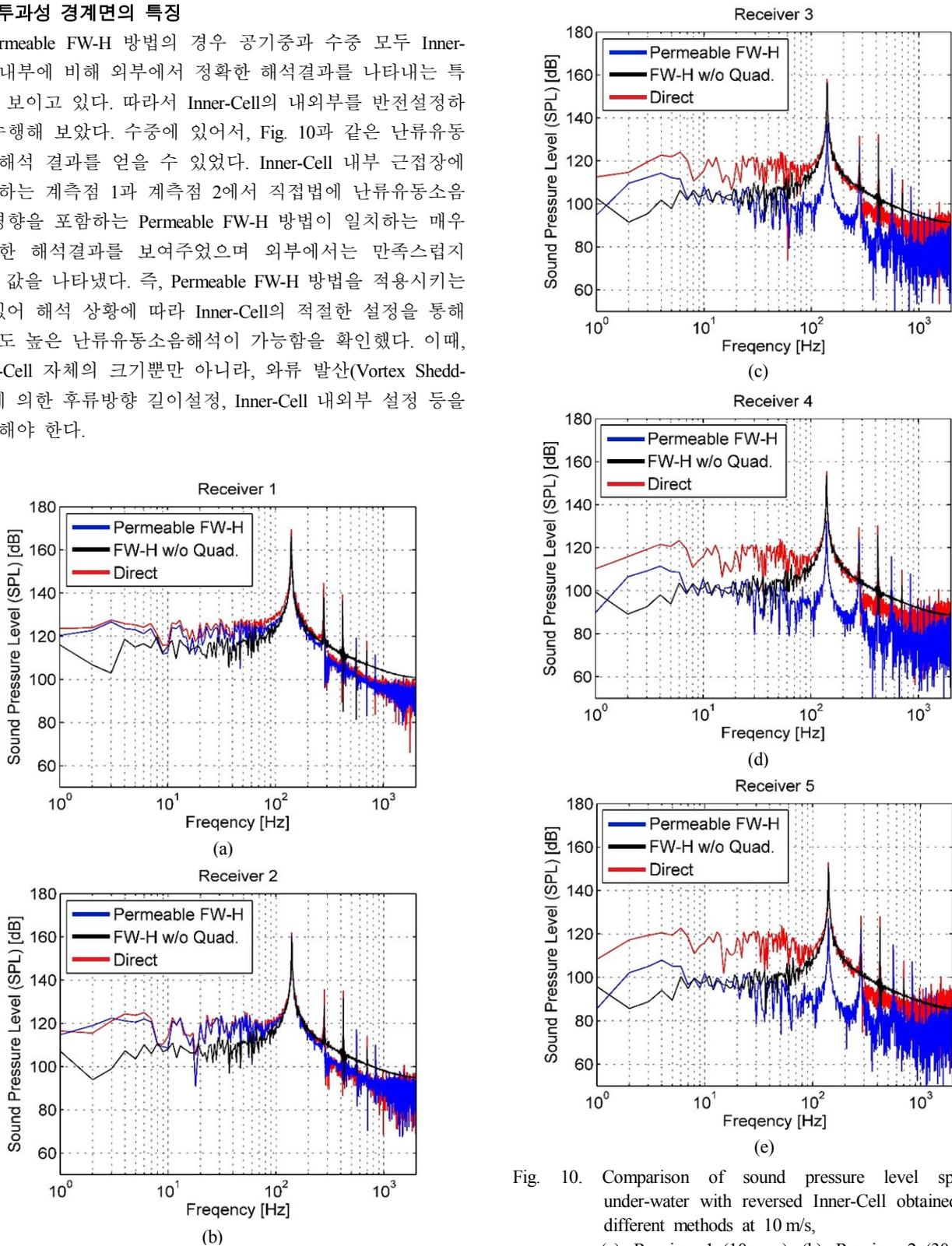


Fig. 10. Comparison of sound pressure level spectrum under-water with reversed Inner-Cell obtained from different methods at 10 m/s, (a): Receiver 1 (10 mm), (b): Receiver 2 (30 mm), (c): Receiver 3 (50 mm), (d): Receiver 4 (70 mm), (e): Receiver 5 (100 mm).

4. 결론

본 연구에서는 2차원 원형 실린더에 대해 다양한 유동소음해석 방법의 결과를 비교분석함으로써 난류유동소음의 영향을 확인했다. 공기중과 수중에서 직접법, 난류소음의 성분인 사육자항을 제외한 FW-H 방법, 투과성 경계면의 설정을 통해 난류소음의 영향을 포함해 계산하는 Permeable FW-H 방법을 이용해 각각 유동소음을 수행하였다.

직접법을 이용해 공기중에 놓인 실린더에 대해 유속의 변화에 따른 난류유동소음을 계산하였고, 주어진 계측점 위치에서 실험값과 비교해 경향이 일치하였다. 직접법과 난류소음향의 계산을 제외한 FW-H 방법으로 도출된 결과의 차이를 통해 난류소음의 크기를 확인할 수 있었다. 기존의 FW-H 방법과 비교해 계산비용에 차이가 없고 난류소음향의 영향을 포함하는 Permeable FW-H 방법을 이용한 결과의 경우, 직접법과 일치하는 결과를 확인하였다. 동일한 해석방법을 수중의 실린더에 적용한 해석결과 또한 직접법에 Permeable FW-H 방법이 더 근접한 값을 나타내며 난류유동소음의 영향을 고려할 수 있었다. 투과성 경계면의 특성을 고려한 내외부의 반진설정을 통해 내부 근접장에서 높은 정확도의 해석이 가능했다. 즉, Permeable FW-H 방법을 이용함으로써 난류유동소음해석이 가능했고 그 절차를 확립했으며 그 유용성을 확인하였다.

향후에는 Inner-Cell 자체의 크기뿐만 아니라, 와류 발산(Vortex Shedding)에 의한 후류방향 길이설정, Inner-Cell 내외부 설정 등의 투과성 경계면에 대한 연구 및 날개단면이나 소나뿔과 같은 복잡한 형상에 대한 연구가 필요하며, 이를 통해 현재 난류유동소음해석 절차의 일반화가 가능할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 차세대함정첨단함형 특화연구실의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Ansys(2009), Ansys Fluent 12.0 Theory Guide Chapter 14. Aerodynamically Generated Noise, pp. 421-432.
- [2] Curle, N.(1955), The influence of solid boundaries upon aerodynamic sound, Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Science, Vol. 505, pp. 505-514.
- [3] Farassat, F.(2007), Derivation of Formulations 1 and 1A of Farassat, NASA/TM-2007-214853.
- [4] Farassat, F. and K. S. Brentner(1988), Supersonic Quadrupole Noise Theory for High-speed Helicopter Rotors, Journal of Sound and Vibration, Vol. 218, No. 3, pp. 481-500.
- [5] Ffowcs Williams, J. E. and D. L. Hawkings(1969), Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion, Philosophical Transactions of the Royal Society of London A, Vol. 264, No. 1151, pp. 321-342.
- [6] Hong, H. B. and J. S. Choi(1998), Experimental Study on the Vortex-Shedding Sound from a Yawed Circular Cylinder, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 103, No. 5, pp. 1937-38.
- [7] Ianiello, S., R. Muscari and A. Di Mascio(2014), Ship underwater noise assessment by the acoustic analogy, part II: hydroacoustic analysis of a ship scaled model, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 3, No. 1, pp. 52-74.
- [8] Inoue, O. and N. Hatakeyama(2002), Sound generation by a two-dimensional circular cylinder in a uniform flow, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 471, pp. 285-314.
- [9] Kim, H. Y., M. C. Jo, S. Y. Kim., H. C. Lee, G. W. Lee and D. G. Yeo(2014), A study on the Selection Method of the Focused Promotion Subject for Future R&D of Maritime Safety, Proceedings of the Korean Society of Marine Environment and Safety, 2014.6, pp. 309-312.
- [10] Lighthill, M. J.(1952), On Sound Generated Aerodynamically, I: General Theory, Proceedings of the Royal Society, A221, pp. 564-587.
- [11] Norberg, C.(2003), Fluctuating Lift on a Circular Cylinder: Review and New Measurements, Journal of Fluids and Structures, Vol. 17, No. 1, pp. 57-96.
- [12] Orselli, R. M., J. R. Meneghini and F. Saltra(2009), Two and Three-dimensional Simulation of Sound Generated by Flow Around a Circular Cylinder, American Institute of Aeronautics and Astronautics 2009-3270.
- [13] Park, I. C.(2012), 2-dimensional simulation of flow-induced noise around circular cylinder, Theses and Dissertations, Chungnam University.
- [14] Singer, B. A. and D. P. Lockard(2003), Hybrid Acoustic Predictions, Computers and mathematics with Applications, Vol. 46, pp. 647-669.
- [15] Wang, M., J. B. Freund and S. K. Lele(2006), Computational Prediction of Flow-Generated Sound, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 38, pp. 483-512.

Received : 2014. 09. 26.

Revised : 2014. 11. 03. (1st)

2014. 11. 17. (2nd)

Accepted : 2014. 12. 26.