

군집행동 알고리즘을 이용한 판넬구조물의 방사소음저감에 관한 연구

A Study on Acoustic Radiation Reduction of a Vibrating Panel by Using Particle Swarm Optimization Algorithm

전진영*

Jin-Young Jeon

(2009년 3월 4일 접수 ; 2009년 4월 27일 심사완료)

Key Words : Particle Swarm Optimization Algorithm(군집행동 알고리즘), Finite Element Method(유한요소법), Boundary Element Method(경계요소법), Sound Power Level(음향파워레벨), Noise(소음)

ABSTRACT

In this paper, the author proposes a new method for acoustic radiation optimum design to minimize noise from a vibrating panel-like structure using a collaborative population-based search method called the particle swarm optimization algorithm(PSOA). The PSOA is a parallel evolutionary computation technique initially developed by Kennedy and Eberhart. The acoustic radiation optimization method based on the PSOA consists of two processes. In the first process, the acoustic radiation analysis by an integrated p-version FEM/BEM, which was developed by using MATLAB, is performed to evaluate the exterior acoustic radiation field of the panel. The second process is to search the optimum design variables: 1) Shape of Bezier curves and 2) Shape and position of ribs, to minimize noise from the panel using the PSOA. The optimization method based on the PSOA is compared to that based on the steady state genetic algorithm(SSGA) in order to verify the effectiveness and validity of the optimal solution by PSOA. Finally, it is shown that the optimal designs of the panel obtained by using the PSOA can achieve effective reductions in radiated sound power.

1. 서론

구조물에서 방사되는 소음을 저감하기 위한 구조음향 저감기술은 여러 산업분야에서 주요한 연구분야가 되고 있다.

최근에는 저비용 고성능 컴퓨터의 보급과 더불어, 설계초기단계에서 구조음향 최적설계를 통하여 진동소음 저감을 목적으로 한 구조음향 최적설계 방법이 중요한 기술분야로써 인식되고 있다.

일반적으로 진동구조물에서 방사되는 음향방사소

음을 최적설계하기 위한 종래 연구로서는 크게 두 가지 방식이 널리 효율적으로 이용되어 왔다. 예를 들면, 구배(勾配) 방식에 근거하여 비선형 계획문제를 다룬 준-뉴턴법(quasi-Newton method), 축차(逐次) 2차 계획법(sequential quadratic programming) 등이 있으며, 자연계 현상을 모방하여 수학적으로 모델링한 유전자 알고리즘(genetic algorithm)⁽¹⁾, 모의 풀림(simulated annealing)⁽²⁾ 알고리즘 등 여러 방법이 구조음향 최적화 문제에 지금껏 주로 연구되어 왔다.

일반적으로 구조음향 최적화 문제와 같이 비선형성이 강한 문제에는 GA, SA와 같은 알고리즘이 유효하게 응용될 수 있다⁽³⁾. 이런 알고리즘이 널리 사용되는 이유는 최적화 문제에서 목적함수와 설계변

* 교신저자; 정회원, 삼성전자 프린팅(사) 선행개발그룹
E-mail : jinyoungls.jeon@samsung.com
Tel : (031)200-4096, Fax : (031)200-5016

수 사이의 명확한 수학적 관계 또는 최적해를 탐색하기 위해 특성의 초기치 설정 범위 및 목적함수에 대한 구배계산 등이 필요하지 않기 때문이다.

이 연구에서는 조류나 어류 등의 군집행동 방식의 자연계현상을 공학적으로 모델링한 새로운 개념의 알고리즘인 군집행동 알고리즘⁽⁴⁾(particle swarm optimization algorithm)을 응용하여 판넬구조물에서 방사되는 방사소음을 최소화하기 위한 목적으로 구조음향 최적설계 방법을 제시하였다.

PSOA법은 Kennedy & Eberhart에 의해 처음 고안 되었으며, 병렬 연산장치의 정적업무할당을 위한 최적문제⁽⁵⁾, 정적 부하 시 형상최적설계문제⁽⁶⁾, 단순 트러스 구조물의 위상최적설계 등 여러 분야에서 응용되어 연구가 수행되었다. 하지만, GA, SA 등과 같이 많은 분야에서 응용연구가 진행된 것과는 달리, PSOA법은 아직 특정분야에 대해서만 몇몇 연구결과 보고가 있으며, 구조음향 최적화 분야에 대해서는 연구결과가 거의 없는 수준이다.

따라서, 이 논문에서는 판넬구조물에서 방사되는 음향방사음을 최소화하기 위한 목적으로 Bezier curve형상 및 rib 형상·위치를 설계변수로 설정하여 PSOA법을 기반으로 한 구조음향 최적설계 문제를 수행하였다.

PSOA법을 이용한 구조음향 최적화 방법은 대상 구조물의 구조음향해석과 최적설계변수를 찾는 최적탐색방법 등 2단계로 구성되어 있다. 1단계에서는 대상물인 판넬구조물의 주변을 둘러싸고 있는 전달 매질이 공기와 같이 밀도가 낮은 경우, 약연성문제(weakly coupled problem)로 가정하여 구조계에서 음향계로의 영향만을 고려하여⁽⁷⁾ MATLAB에 의해 개발된 p-version FEM/BEM를 이용한 구조음향해석을 수행하였다. 2단계에서는 PSOA법을 기반으로 하여 판넬구조물에서 방사되는 방사음을 최소화하기 위하여, 최적 설계변수를 탐색하는 구조음향 최적화 문제를 수행하였다.

또한, 이 연구에서는 PSOA법을 기초로 한 구조음향 최적설계 방법의 유효성 및 타당성을 검증하기 위해서 유전자 알고리즘(steady state genetic algorithm)에 의해 수행된 최적설계 방법의 결과와 비교하는 연구를 수행하였다.

2. FEM/BEM을 이용한 구조음향해석

이 절에서는 MATLAB에 의해 개발된 4절점 Shell 요소의 유한요소모델을 이용한 판넬구조물의 동적특성을 구하기 위해 구조진동해석이 수행되었다.

Fig. 1과 같은 판넬구조물의 다자유도 유한요소모델의 운동방정식은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$[M]\{\ddot{w}\} + [C]\{\dot{w}\} + [K]\{w\} = \{F\} \tag{1}$$

여기서, [M], [C], [K]는 구조물의 질량행렬, 감쇠행렬, 강성행렬을 의미하며, {w}는 변위벡터이고, {F}는 구조물에 부가된 가진력벡터를 나타낸다. 감쇠행렬 [C]는 비례점성계로 가정한다.

판넬구조물의 구조진동에 의한 방사소음의 해석은 음향전달매질이 물과 같이 밀도가 높은 경우에는 구조체와 유체의 연성현상이 강한 완전 구조음향 연성문제(fully coupled fluid-structure interaction problem)라 하여 구조-음향계 사이의 양방향 연성현상을 고려해야 한다⁽⁸⁾.

하지만, 이 연구에서는 매질이 공기와 같이 밀도

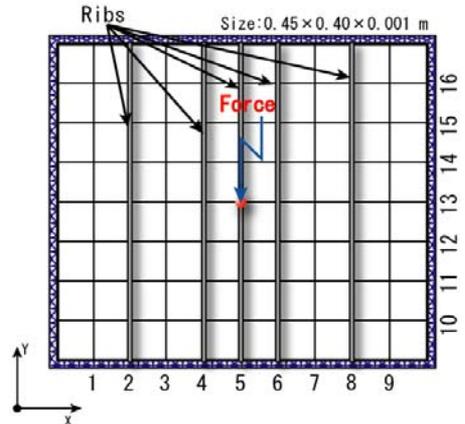


Fig. 1 FE model and positioning of rib attachment

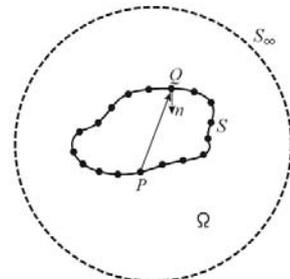


Fig. 2 Exterior problem

가 낮은 경우로 가정하여, 판넬구조물과 유체의 연성현상을 무시할 수 있는 약연성문제로 가정하여 구조계에서 음향계로의 한 방향 영향만을 고려하였다. 따라서, 식 (1)의 유한요소모델을 이용하여 구한 판넬구조물의 방사표면에서의 진동속도를 경계요소법(boundary element method)을 이용한 경계요소모델의 경계조건으로 부여하여 방사음장해석을 독립적으로 해석하였다⁽⁹⁾.

BEM은 Fig. 2에 보이는 것과 같이 무한히 큰 외부음향장 (S_∞)을 갖는 판넬구조물의 경계표면 (S)을 통하여 방사되는 외부음장 (Ω)에 관해 헬름홀츠(Helmholtz) 적분방정식을 수치계산하는 문제이며, 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C(P)p(P) = - \int_S [j\rho\omega \tilde{v}_n(Q)\Psi(Q,P) + p(Q)\frac{\partial\Psi}{\partial n}(Q,P)] dS(Q) \quad (2)$$

여기서, C(P)는 입체각(solid angle), p, \tilde{v}_n, n 는 각각 경계표면에서의 표면음압, 법선속도와 법선벡터(외부음장에서 멀어지는 방향)이며, Q, P는 각각 필드점(field point)과 소스점(source point)을 의미하며, ρ 는 매질밀도, ω 는 각진동수, Ψ 는 자유음장 Green함수이며, $j = \sqrt{-1}$ 를 의미한다.

식 (2)를 이용하여 경계절점 \hat{n} 에서의 표면음압벡터 $\{p_{\hat{n}}\}$ 가 구해지면, 식 (3)에 의해서 음장영역내 임의의 절점 \hat{m} 에서의 음압벡터 $\{\hat{p}_{\hat{m}}\}$ 을 구할 수 있다.

$$\{\hat{p}_{\hat{m}}\} = \sum_{i=1}^N [G_{\hat{m}\hat{n}i}]\{\tilde{v}_{ni}\} - \sum_{i=1}^N [H_{\hat{m}\hat{n}i}]\{p_{\hat{n}i}\} \quad (3)$$

여기서, $[H_{\hat{m}\hat{n}i}], [G_{\hat{m}\hat{n}i}]$ 은 시스템 계수행렬(global

complex frequency dependent system matrices)이며, N은 요소(element)수를 의미한다. 또한 음장영역내부에서의 수음점(observation point)은 Fig. 3에서 보이는 것과 같이 판넬구조물에서 $r=1.0$ m 떨어진 반구표면에 13점을 사용하였다.

음향과워레벨(sound power level, PWL)은 BEM에 의해서 얻어진 외부음장내의 수음점 \hat{m} 개의 음압의 합을 이용하여 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$W(\omega) = 10 \log_{10}(W_o(\omega)/W_{ref}) [dB]$$

$$W_o(\omega) = \frac{2\pi r^2}{\rho c'} \sum_{\hat{m}=1}^{13} \frac{\hat{p}_{\hat{m}}^2(\omega)}{13} \quad (4)$$

여기서, W_{ref} 은 기준 음향과워(10^{-12} [W])을 의미하며, $2\pi r^2$ 는 반구표면적, c' 는 공기 매질내에서의 음속을 나타낸다.

3. PSOA을 이용한 구조음향 최적설계

이 절에서는 구조음향 최적설계를 위한 최적화방법으로서 생물의 군집행동 과정을 수학적으로 모델링한 군집행동 알고리즘(particle swarm optimization algorithm)을 이용하여 판넬구조물의 구조음향 최적화 방법을 제시하였다.

PSOA법은 컴퓨터의 메모리 및 처리속도와 같은 기본적인 수학적 연산자로 구성되어 있으며, 두개의 단순한 수학적 수식으로 나타낼 수 있다.

즉, 새들의 군집행동을 수학적으로 표현하면, 개개의 특성을 갖는 개체(particle: 새나 조류와 같이 군집을 이루는 개개의 구성원)가 군집을 이루어 형성된 개체군(particle swarm: q개의 개체들로 구성된 군집 또는 무리)의 수를 q라 할 때, PS(particle swarm)의 위치 x^d 는 다음과 같은 식에 의해 갱신되며,

$$x_{k+1}^d = x_k^d + v_{k+1}^d \quad (5)$$

여기서, $\{d\} = \{1, 2, \dots, q\}$ 이며, 속도 v^d 는 식 (6)에 의해 갱신할 수 있다.

$$v_{k+1}^d = v_k^d + c_1 r_1 (p_k^d - x_k^d) + c_2 r_2 (p_k^g - x_k^d) \quad (6)$$

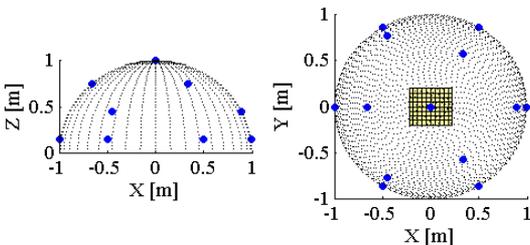


Fig. 3 Observation points

여기서, k 는 이동공간의 반복횟수(time), r_1, r_2 은 $[0,1]$ 범위의 확률변수 ($r_1 = r_2$), c_1, c_2 는 개발자에 의해 정해지며 개체가 수행 가능한 최대 스텝 폭 (step size)을 조절 가능하게 하는 가속도 계수(acceleration coefficients)이며, p_k^d 는 우량개체 위치 (the best ever position: k 번째의 최적탐색 과정에서 목적함수를 최소로 하는 개체위치 x_k^d 중에서 최우량 개체위치), p_k^g 는 최우량 개체위치(the global best ever position: k 번째까지의 최적화 과정중에서 목적함수를 최소로 하는 모든 개체위치 중에서 가장 양호한 최우량 개체위치)를 나타낸다.

이와 같은 PSOA개념을 적용하여 모든 개체들은 빠른 속도로 현재의 위치에서 보다 나은 우량의 위치로 갱신해 가며, 결국 최적의 위치를 찾아가게 된다. Eberhart는 식 (6)에 관성 가중계수 λ 를 부여하여 새로운 속도의 개념을 다음 식과 같이 제안했다.

$$v_{k+1}^d = \lambda v_k^d + c_1 r_1 (p_k^d - x_k^d) + c_2 r_2 (p_k^g - x_k^d) \quad (7)$$

여기서, λ 는 $0.8 < \lambda < 1.4$ 이며, k 번째의 개체들의 속도를 조절하기 위해 이용된다. 높은 관성 가중계수는 보다 넓고 새로운 위치(global exploration)를 찾아가도록 촉진하는 역할을 하며, 반면에 낮은 관성 가중계수는 현재의 탐색지역에서 보다 자세히 탐색해 가도록 해주는 경향이 있다.

즉, 적절한 관성가중치와 가속도계수는 광역(global) 및 국부(local) 탐색 능력을 갖게 해주며, 평균적으로 최적해(optimal solution)를 보다 짧은 탐색 반복횟수 내에 찾아가도록 도와준다. 식 (7)은 개체의 경험적 우량위치와 주변개체의 우량위치 등을 참고하여 도달된 현재위치 및 이전단계의 속도 정보를 갖는 개체에 새로운 속도정보를 부여하기 위해 사용되었다. 결국, PS의 개체는 식 (5)에 의해 새로운 위치로 이동하게 된다.

PSOA법을 이용한 구조음향 최적설계 문제는 기체구조물에서 방사되는 음향파위를 최소로 하는 최적형상을 탐색하는 문제이다. 최적해를 찾기 위해 사용되는 평가함수로는 식 (8)과 같이 저주파수 대역인 0~300 Hz를 관심주파수 영역으로 설정하고, 이 대역 내에서 적분한 총 음향파위의 평균값으로 설정하였다.

$$\Lambda = \frac{1}{N_f} \sum_{i=1}^{N_f} W(\omega(i)) \quad (8)$$

Minimize Λ

여기서, N_f 는 관심주파수의 최대값이며, Λ 는 관심주파수 영역내에서 방사되는 총 음향파위 평균을 의미한다.

PSOA법을 이용한 최적화문제에서 설계변수의 제약조건은 다음과 같이 나타내며

$$z(s) \leq z(s) \leq \bar{z}(s) \quad (s = 1 \sim n) \quad (9)$$

여기서, $z(s)$ 는 하한치 $z(s)$ 와 상한치 $\bar{z}(s)$ 를 나타내는 설계변수이며, s 는 설계변수의 개수를 의미한다.

이 연구에서 설정한 최적화문제의 설계변수로서 Bezier곡선에서의 제어점 높이/폭 및 rib의 높이/두께 위치 등으로 설정하였다.

4. 수치해석 결과

4.1 해석대상 및 초기조건

이 연구에서는 2단계로 구성된 통합 p-FEM/BEM을 이용한 구조음향해석과 PSOA법을 기반으로 하여 구조음향 최적화 모델의 신뢰성 및 효율성을 검증하기 위해서 완전고정의 판넬구조물을 대상으로 SSGA에 의한 형상 최적화 결과와 비교하는 연구를 수행하였다.

Fig. 1과 같이 판넬구조물은 0.45×0.4 m의 크기에 두께 0.001 m를 갖는 완전고정되어 있는 단순 판넬 구조물이다. 판넬구조물은 공기와의 상호작용이 무시될 정도로 주위의 매질밀도가 낮기 때문에 유한요소모델에 의해 구한 판넬구조물의 진동성분만이 음장해석을 위한 음향모델의 경계조건으로 사용하였다. 가진조건은 판넬구조물의 정중앙에 1 N의 힘이 가해지고 물성치는 Table 1과 같다.

Fig. 1과 같이 유한요소모델을 위해 x 방향으로 10개의 line으로 분할하고 y방향으로는 8개의 line으로 분할하여, 총 요소수는 80개이며 절점수는 90개로 요소분할하였다.

구조음향 최적화문제의 관심주파수 영역은 저주파수 대역인 0~300 Hz로 정하며, 관심주파수 영역 내에서 발생되는 고유진동수는 Fig. 4에 보이는 것

과 같이, FEM에 의해서 총 10차의 모드가 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 이들 모드중에서 주로 음향방사에 기여하는 모드는 1차, 5차, 6차, 10차이며, 총 4개 모드만이 음향방사에 기여하는 것을 BEM에 의한 음향해석을 통해서 확인 할 수 있었다. 나머지 모드는 서로 상쇄되어 음향방사에 기여하지 않는 고유진동수이다.

이와 같은 주요 음향방사 모드를 저감 또는 최소화시키기 위해서, 다음 절에서는 PSOA법을 기반으로 한 Bezier curve, rib attachment 등의 형상 구조

Table 1 Component values for the panel

Properties	Values
Young's modulus	73 GPa
Poisson ratio	0.34
Density	2690 kg/m ³
Density of air	1.2 kg/m ³
Sound velocity in air	343 m/s

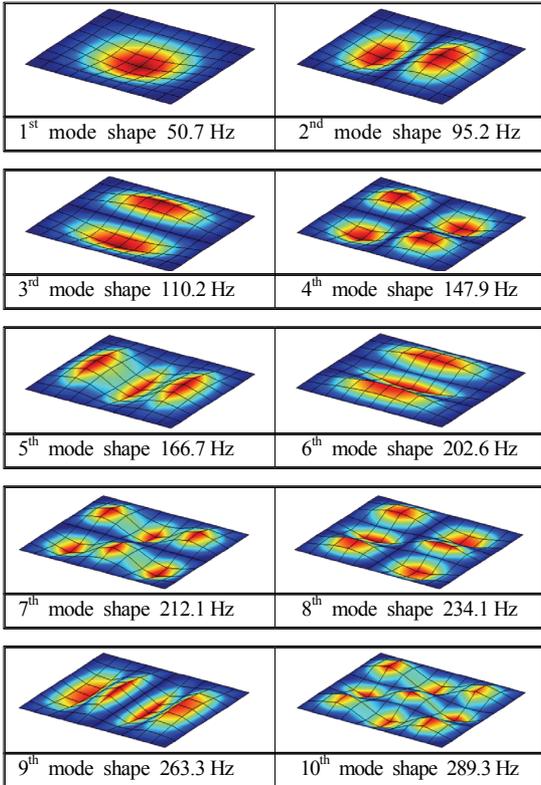


Fig. 4 Mode shapes of the original panel

음향 최적화 결과에 대해서 논한다. 또한, PSOA법에 의해 얻어진 결과의 유효성 및 신뢰성을 검증하기 위해 SSGA법에 의해 얻어진 결과와 비교 검증하였다.

4.2 Bezier 곡선을 이용한 구조음향 최적설계

이 절에서는 판넬구조물에 Bezier 곡선 형상을 적용하여 관심주파수 영역내에서 발생하는 음향방사소음을 최소화하기 위해 PSOA법을 기반으로 한 구조음향 최적설계를 수행하였다. 또한, PSOA법에 의해 얻어진 최적해의 타당성을 검증하기 위해 SSGA법에 의한 최적설계를 병행하였으며 그 결과에 대해 비교 검토하였다.

Fig. 5에서 보이는 것과 같이 x방향에 대해서 8차의 Bezier 곡선을 정의하였다.

n차의 Bezier 곡선 R(t)는 n+1개의 제어점 P_i를 가지며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R(t) = \sum_{i=0}^n B_i^n(t) P_i \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (10)$$

여기서, B_iⁿ(t)는 Bernstein함수이며,

$$B_i^n(t) = \frac{n!}{(n-i)! i!} t^i (1-t)^{n-i} \quad (11)$$

와 같이 정의한다.

Fig. 5와 같이 두 개의 끝점은 고정하고, 나머지 7개의 제어점을 x, z 좌표 각각의 값을 설계변수로 정하였다. 제어점의 제약조건으로는 x좌표에 대해 전체길이 (0.45 m)의 1/5이내에서 변동 가능하도록 설정하고, z좌표에 관해서는 최대 z̄ = +1cm, 최소 z̄ = -1cm로 설정하였다.

평가함수는 식 (8)과 같이 관심주파수 영역내에서 방사되는 총 음향파위의 평균값이 최소가 되도록 설정하였다.

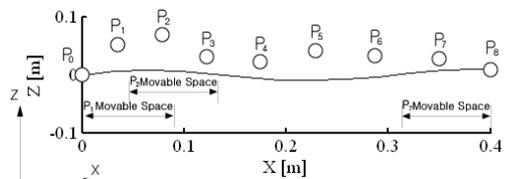


Fig. 5 Bezier curve with 9 control points

이 연구에서 제안한 PSOA법을 이용한 구조음향 최적화 설계방법의 유효성 및 실효성을 검증하기 위해서 SSGA법에 의한 구조음향 최적설계에 사용

되는 파라미터의 값은 가능한 동일 조건으로 다음과 같이 설정하였다.

(A) PSOA법

- Size of the particle : 200
- Inertia weight λ : 0.95
- Acceleration coefficients (c_1, c_2) : 1.0
- Maximum Iteration number : 300

(B) SSGA법

- Population : 200
- Crossover probability : 0.77
- Mutation probability : 0.0077
- Maximum number of generation : 300

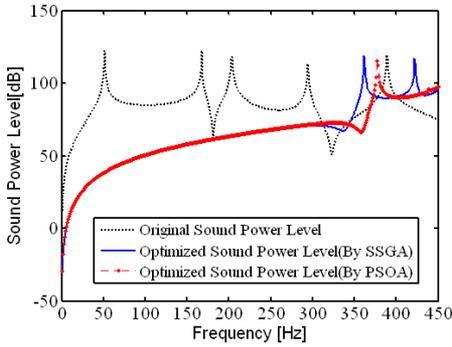


Fig. 6 Comparison of the PWL for original and optimized panel by using optimum design of Bezier curve

Fig. 6은 상기 두 방법에 의해 얻어진 음향파위레벨의 특성을 비교·검토하기 위해 나타낸 그림이다. PSOA법에 의해 얻어진 음향파위의 고유진동수 변화를 보면 SSGA법에 의한 결과에 비해서, 전체적으로 음향고유진동수 성분이 약간 높은 영역에서 1차 음향모드가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이 결과를 통해서 PSOA법에 의한 최적형상이 좀 더 강건한 구조임을 알 수 있다.

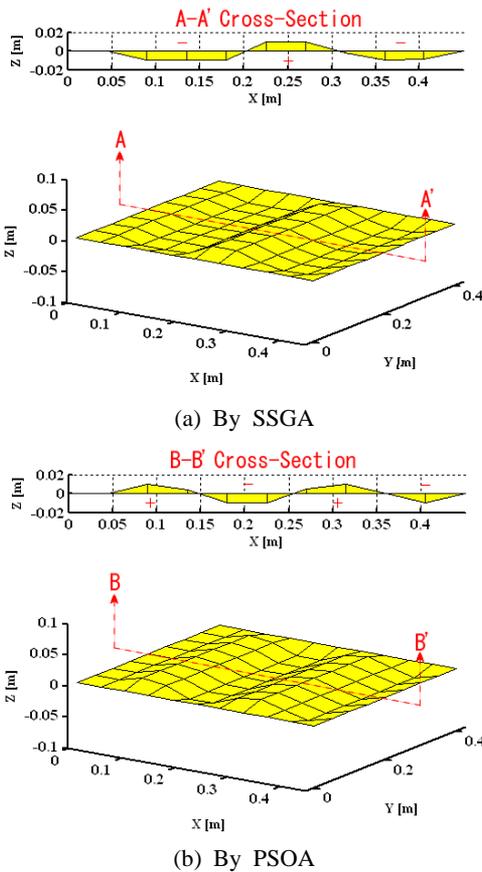


Fig. 7 Optimized geometry of Bezier curve design by using SSGA and PSOA

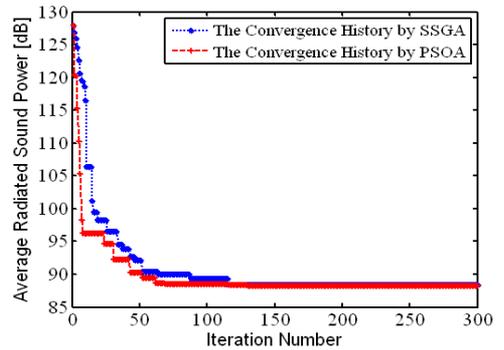


Fig. 8 Comparison of the convergence history for Bezier curve design by using SSGA and PSOA

Table 2 Comparison of PWL for Bezier curve design by using SSGA & PSOA

	0~300 Hz	0~450 Hz
Original PWL	127.95 dB	128.93 dB
Optimized PWL(by SSGA)	88.33 dB	123.29 dB
Optimized PWL(by PSOA)	88.23 dB	118.78 dB

또한, Fig. 7에서는 상기 두 방법에 의해 얻어진 최적의 Bezier 곡선 및 단면형상을 보이고 있다. 두 방법에 의해 얻어진 최적의 Bezier 곡선의 단면형상을 비교·검토하여 보면, SSGA법에 의해 얻어진 단면형상은 $\langle -;+;- \rangle$ 주기의 Bezier 곡선형상을 하고 있는 반면에, PSOA법에 의해 얻어진 단면형상은 $\langle +;-;+ \rangle$ 주기의 Bezier 곡선형상을 하고 있는 비대칭구조의 Bezier 곡선형상을 하고 있다.

관심주파수 영역인 0~300 Hz 내에서 발생하는 음향파위레벨을 비교하여 보면, Table 2와 같이 300 Hz까지는 두 방법 모두 거의 같은 수준의 음향방사 에너지를 방사하지만, 450 Hz 범위까지 확대해서 비교하면, PSOA법에 의한 결과가 보다 양호한 결과임을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 두 개의 알고리즘을 이용하여 수행된 판넬구조물의 구조음향 최적화문제에서 최적해를 탐색하여 가는 수렴과정을 비교한 그림이다. Fig. 8에서 보이는 것과 같이, PSOA법에 의한 구조음향 최적화 방법은 탐색초기부터 SSGA법에 비해 수렴속도가 약간 빠르며, 최적해에 점진적으로 수렴해 가면서 60회 이후부터는 SSGA법에 의해 탐색된 준-최적해(semi-optimal solution)에 비해서 보다 우량의 해를 탐색하는 능력을 보이고 있다. 또한, 2가지 최적화 방법 모두 반복 탐색계산 50회 이후에도 미세하게 파라미터를 조정하여 가며, 지속적으로 최적해를 탐색해 가는 과정을 보이고 있다. 하지만, SSGA법에 의한 탐색과정을 보면 반복계산 120회 부근에서 준-최적해를 탐색한 후로는 더 이상 수렴하는 경향이 없이 최적화 계산을 종료하였다.

4.3 Rib 배치를 이용한 구조음향 최적설계

이 절에서는 판넬구조물에서 방사되는 구조음향 방사음을 최소화 하기 위해 rib형상 및 배치 최적화 문제에 대해 PSOA법을 이용한 최적설계를 수행하였다. 또한, rib형상배치에 관한 최적화 문제는 앞절과 마찬가지로 PSOA법에 의해 얻어진

최적해의 유효성을 검증하기 위해 SSGA법의 의한 구조음향 최적설계의 결과와 비교 검토하는 연구를 수행하였다.

Rib형상배치에 관한 최적화문제의 설정은 Fig. 1에서 보이는 것과 같이 SSGA법을 이용한 최적설계 문제에서는 x-y 방향의 분할 line에 대하여 각각 번

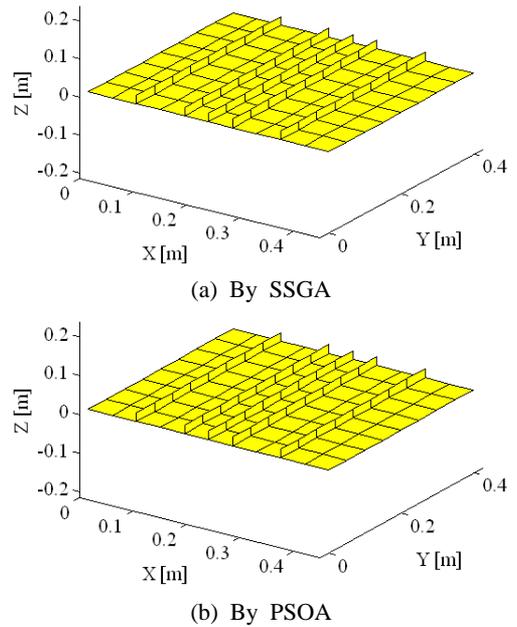


Fig. 9 Optimized geometry of rib attachment design by using SSGA and PSOA

호를 부여하며, 1개의 라인당 1 Bit의 값을 할당하였다. 분할라인에 rib가 존재하면 [1], 존재하지 않으면 [0]을 할당한다. 또한, rib의 높이 및 두께를 설계변수에 포함하여 각각 3 Bit, 2 Bit의 개체를 할당하였다. 즉, 1개체군의 개체수는 rib를 배치하기 위한 라인수 16 Bit와 rib의 높이 및 두께의 Bit를 포함하여 총 21 Bit가 된다.

PSOA법을 이용한 최적설계 문제에서는 SSGA법과 같은 방식으로 x-y방향의 분할 line에 대하여 각각 번호를 부여하며, 총 16개의 라인에 대해서 각각 하나의 개체를 할당하였다. 분할라인은 개체의 존재유무에 따라서 할당여부가 결정된다. 한편, rib의 높이 및 두께에 대해서는 2개의 개체를 할당하여 식 (9)와 같이 설계변수 범위내에서 변동 가능하도록 설정하였다.

제약조건에 관해서는 rib의 총 중량이 판넬 중량의 40% 이내가 되도록 설정하였으며, rib배치 위치는 최대 5개소로 제한하였다. 최대 rib높이에 대해서는 판넬길이 (0.45 m)의 5% 이내가 되도록 설정하였다. 또한, 최대 rib의 두께는 판넬구조물의 두 (1 mm)로 하고, 최소값을 그 두께의 40% 이내가 되도록 범위를 설정하였다.

Rib형상을 이용하여 얻어진 최적형상을 보면 Fig. 9와 같으며, SSGA법과 PSOA법에 의한 결과가 모두 동일하게 최적 rib의 설계변수에 관해서 높이·두께 모두 제약조건인 최대치인 (22.5 mm), 두께는 (1 mm)의 형상을 확인할 수 있다.

또한, rib최적배치 결과에 관해서도 마찬가지로, Fig. 9에서 보이는 것 같이 SSGA법에 의한 최적배치 위치와 PSOA법에 의한 최적배치 위치는 동일한 배치구조(2번, 4번, 5번, 6번, 8번 line)를 갖는 최적형상의 결과를 보이고 있다. 이는 주로 음향방사모

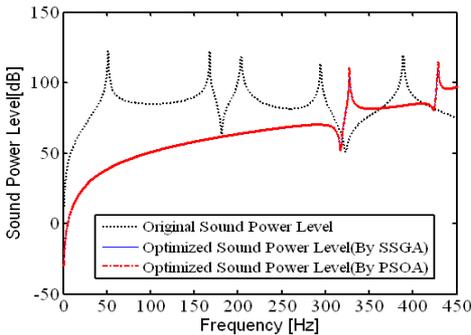


Fig. 10 Comparison of the PWL for original and optimized panel by using optimum design of rib attachment

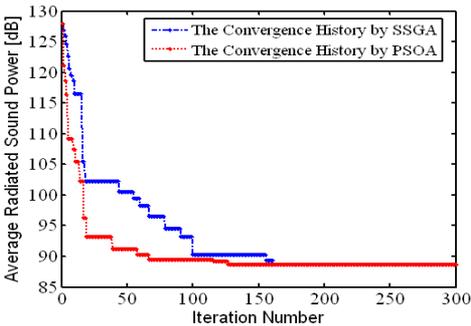


Fig. 11 Comparison of the convergence history for rib attachment design by using SSGA and PSOA

Table 3 Comparison of PWL for rib attachment design by using SSGA & PSOA

	0~300 Hz	0~450 Hz
Original PWL	127.95 dB	128.93 dB
Optimized PWL(by SSGA)	88.63 dB	117.27 dB
Optimized PWL(by PSOA)	88.63 dB	117.27 dB

드(well-radiating modes) 1차, 5차, 6차, 10차를 우선적으로 최대한 회피·저감할 목적으로 두 최적화 방법 모두 동일한 rib최적 배치 및 형상으로 얻어진 것으로 보인다.

음향과위레벨 결과를 보면, Fig. 10에서 나타내는 것과 같이 최적화 계산후의 1차 고유진동수는 두 방법 모두 동일하게 관심주파수 영역 밖으로 크게 이동된 것을 확인할 수 있다. 관심주파수 0~300 Hz 영역 내에서 발생하는 음향과위레벨도 마찬가지로 Table 3에서 보이는 것과 같이 동일하게 최적화 계산 전후 대비 크게 개선된 것을 확인할 수 있다.

하지만, 두 최적화 알고리즘을 이용하여 수행된 판넬구조물의 구조음향 최적화 문제에서 최적해를 탐색하여 가는 수렴과정을 비교하면, Fig. 11에서 보이는 것과 같이, PSOA법에 의한 구조음향 최적화 방법은 탐색초기부터 SSGA법에 비해 수렴속도가 좀 더 빠르게 최적해에 점진적으로 수렴해 가면서 70회 이후부터는 미세하게 파라미터를 조정해 가며, 120회 부근에서는 최우량의 해에 도달하는 수렴과정을 보이고 있다. 반면, SSGA법에 의한 구조음향 최적화 방법은 100회 부근까지 지속적으로 우량의 해를 반복 탐색하는 수렴과정을 보이면서 160회 부근에서 최적해에 도달하는 수렴속도를 보면 PSOA법에 비해서 탐색능력이 조금 떨어지는 것을 확인할 수 있다.

5. 결 론

이 논문에서는 어류 또는 조류의 군집행동에 대한 자연계 현상을 모방하여 공학적으로 새롭게 모델링 한 군집행동 알고리즘(particle swarm optimization algorithm)를 이용한 구조음향 최적화 방법을 제안하였다. 또한, PSOA법을 기반으로 한 구조음향 최적화 방법의 유효성 및 타당성을 검증하기 위해서, 기존의 구조음향 최적화 문제와 같이 비선형문제에 널리 유효하게 응용되고 있는 유전자 알고리즘(steady state genetic algorithm)을 이용한 구조음향 최적설계와 비교 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 판넬구조물에서 발생하는 음향방사음을 최소화하기 위한 목적으로 p-version FEM/BEM과 PSOA법 등 2단계로 구성된 구조음향 최적화 모델을 제

시하였으며, 관심주파수 0~300 Hz 영역 내에서 음향방사에 주로 기여하는 모드는 1차, 5차, 6차, 10차의 총 4개의 모드임을 확인할 수 있었다.

(2) Bezier 곡선을 이용한 구조음향 최적설계 문제에서는 상기 두 방법 모두 관심주파수 0~300 Hz 영역 내에서는 거의 동일 수준의 양호한 구조음향 저감설계의 결과를 보였다. 하지만, PSOA법에 의한 구조음향 최적화 방법은 탐색초기부터 SSGA법에 비해 수렴속도가 약간 빠르며, 최적해에 점진적으로 수렴해 가면서 60회 이후부터는 SSGA법에 의해 탐색된 준-최적해에 비해서 보다 최우량 위치에 도달하는 수렴능력을 확인 할 수 있었다.

(3) Rib형상을 이용한 구조음향 최적설계 결과를 보면, 상기 두 방법 모두 1차 고유진동수가 크게 이동되었으며, 음향과위레벨도 크게 감소하였다. 두 방법에 의해 얻어진 최적형상을 비교하면, rib의 최적 배치위치 및 형상(rib매수, 두께, 높이, 중량 등)에 대해서도 동일한 결과를 보이고 있다. 하지만, 두 방법에 의한 구조음향 최적해를 탐색하는 수렴 과정을 보면, PSOA법에 의한 구조음향 최적화 방법은 탐색초기부터 SSGA법에 비해 수렴속도가 약간 빠르며, 최적해에 지속적이며 점진적으로 수렴해 가면서 최우량 위치에 도달하는 수렴능력은 PSOA법에 의한 최적화 방법이 좀 더 빠르게 도달하는 것으로 확인되었다.

참 고 문 헌

- (1) Mitchell, M., 1998, "An Introduction to Genetic Algorithms," MIT London.
- (2) Constans, E. W., Belegundu, A. D. and Koopmann,

G. H., 1998, "Design Approach for Minimizing Sound Power from Vibrating Shell Structures," AIAA Journal, Vol. 36, No. 2, pp. 134~139.

(3) Kaneda, S. and Yu, Q., 2002, "Optimization Approach for Reducing Sound Power from a Vibrating Plate by Its Curvature Design," JSME Int. J. Series C, Vol. 45, No. 1, pp. 87~98.

(4) Kennedy, J. and Eberhart, R., 1996, "Particle Swarm Optimization," Proc. IEEE Int. Conf. On Neural Networks, pp. 1942~1948.

(5) Salman, A., Ahmad, I. and Al-Madani, S., 2002, "Particle Swarm Optimization for Task Assignment Problem," Microprocessors and Microsystems, Vol. 26, pp. 363~371.

(6) Fourie, P. C. and Groenwold, A. A., 2002, "The Particle Swarm Optimization Algorithm in Size and Shape Optimization," Struct. Multidisc Optim., Vol. 23, pp. 259~267.

(7) Kim, D. H., Hong, C. S., Jeong, W. B. and Park, J. G., 2008, "Radiated Noise Analysis of Marine Diesel Engine from Structural Vibration," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 1, pp. 26~34.

(8) Hong, C. S. and Shin, K. K., 1996, "Application of General Purpose Package for Fluid-structure Interaction Problem," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 7, No. 4, pp. 571~578.

(9) LMS/SYSNOISE 5.6, "User Manual ATV-Application," pp. 150~152.