

다중 섬 유전자 알고리즘 기반 A60 급 격벽 관통 관의 방화설계에 대한 이산변수 근사최적화

박우창*, 송창용*,#

*목포대학교 조선해양공학과

Approximate Optimization with Discrete Variables of Fire Resistance Design of A60 Class Bulkhead Penetration Piece Based on Multi-island Genetic Algorithm

Woo-Chang Park*, Chang Yong Song*,#

*Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Mokpo National University

(Received 18 February 2021; received in revised form 12 April 2021; accepted 13 April 2021)

ABSTRACT

A60 class bulkhead penetration piece is a fire resistance system installed on a bulkhead compartment to protect lives and to prevent flame diffusion in a fire accident on a ship and offshore plant. This study focuses on the approximate optimization of the fire resistance design of the A60 class bulkhead penetration piece using a multi-island genetic algorithm. Transient heat transfer analysis was performed to evaluate the fire resistance design of the A60 class bulkhead penetration piece. For approximate optimization, the bulkhead penetration piece length, diameter, material type, and insulation density were considered discrete design variables; moreover, temperature, cost, and productivity were considered constraint functions. The approximate optimum design problem based on the meta-model was formulated by determining the discrete design variables by minimizing the weight of the A60 class bulkhead penetration piece subject to the constraint functions. The meta-models used for the approximate optimization were the Kriging model, response surface method, and radial basis function-based neural network. The results from the approximate optimization were compared to the actual results of the analysis to determine approximate accuracy. We conclude that the radial basis function-based neural network among the meta-models used in the approximate optimization generates the most accurate optimum design results for the fire resistance design of the A60 class bulkhead penetration piece.

Key Words : A60 Class Bulkhead Penetration[piece(A60 급 격벽 관통 관), Multi-island Genetic Algorithm(다중 섬 유전자 알고리즘), Approximate Optimization(근사최적화), Meta-model(메타모델), Discrete Variable(이산변수)

1. 서 론

선박에서 화재가 발생하게 되면 화염의 확산으로 인해 대규모 구조손상과 인명피해 사고로 이어질 수 있다. 이와 관련하여 국제해사기구(International maritime organization, IMO)는 선박의 주요 구획에

Corresponding Author : cysong@mokpo.ac.kr

Tel: +82-61-450-2732, Fax: +82-61-452-7774

대한 방화 규정을 강화하고 있다. A60 급 방화장치의 경우 해당 장치가 설치되는 구획에 60분간 화염의 확산을 막을 수 있도록 해상안전규약(Safety of life at sea, SOLAS)에서 규정한 방화설계가 적용되어야 한다^[1]. A60 급 격벽 관통 관(A60 class bulkhead penetration piece, A60 BPP)은 화재발생의 위험도가 높은 구획의 수직구조를 관통하여 제어 혹은 통신용 케이블이 설치되는 경우에 적용되는 방화장치이다. IMO는 화재시험절차(Fire Test Procedure, FTP) 규정에 따라 A60 BPP의 방화성능을 검증하도록 요구하고 있다^[2].

선박과 해양플랜트에 관한 방화성능 평가 연구는 규정된 시간 동안 극한의 화염온도 조건을 고려해야 하기 때문에 일부 제한적으로 수행되어 오고 있다. Yu et al.^[3]은 오일분 재질의 방화성능 평가를 위한 전기로 시험과 수조시험 방법을 제안하였다. Choi et al.^[4]은 1100°C의 가열온도 조건을 120분간 지속해야 하는 H-120급 방화댐퍼의 방화성능을 만족시키기 위해 방화댐퍼 블레이드와 코팅 상의 내화재 조건을 조절하여 방화성능 시험을 수행하였다. Choi et al.^[5]은 FRP 선박의 방화성능 평가를 위해 다양한 복합재료 제작조건을 고려하여 방화시험을 수행하였다. Jang et al.^[6]은 열해석을 이용한 H-120급 방화댐퍼의 방화설계 사항에 대한 열해석을 수행하고, 방화설계 조건을 변화시키면서 방화시험을 수행하였다. Song and Kim^[7]은 열전달해석과 방화시험을 통해 선박의 수직구조에 적용되는 A0급 격벽 관통 관의 설계사항을 검증하였다. 이와 같이 A60 BPP와 같은 방화장치나 선박과 해양플랜트용 방화장치에 대한 최적설계 연구의 수행된 사례는 찾아보기 어렵다. 따라서 본 연구에서 메타모델과 유전자 알고리즘을 이용한 A60 BPP 방화설계의 최적화 방법을 제시하고자 하였다.

본 연구에서는 이산설계 변수의 특성을 갖는 A60 BPP의 최소중량설계를 위해 다중 섬 유전자 알고리즘(Multi-island genetic algorithm, MIGA)을 이용한 메타모델 기반의 근사최적화를 수행하였다. A60 BPP의 방화성능을 평가하기 위해 FTP 코드에 규정되어 있는 시험의 사양과 가열조건을 적용하여 유한요소법 기반의 과도 열전달해석을 수행하였다. 근사최적화에 사용될 메타모델을 생성하기 위해 실

험계획법이 적용되었으며, 유한요소모델과 과도 열전달해석 결과는 실험계획법과 연동하였다. 설계변수는 A60 BPP의 길이, 직경 및 재질, 그리고 단열재 밀도를 설정하고, 실제 생산이 가능한 이산화탄소 사양을 적용하였다. 목적함수는 중량을 적용하였고, 제한조건은 FTP 코드에 규정된 방화성능 온도, 생산성, 그리고 가격을 각각 고려하였다. 실험계획법의 실험행렬은 설계변수의 변동 수준으로 발생할 수 있는 모든 목적함수와 제한조건을 고려하기 위해 전인자설계법을 적용하여 생성하였다. 실험계획법의 결과로부터, 크리깅(Kriging), 반응표면법(Response surface method, RSM) 그리고 방사기저함수 기반 신경망(Radial basis function based neural network, RBFN)과 같은 다양한 메타모델을 생성하였다. 메타모델별로 A60 BPP의 설계공간을 근사화할 수 있는 정확도를 분석하고, 근사최적화에 적용하여 수렴특성을 비교하였다. 근사최적화에서는 방화성능, 생산성 및 제조비용과 같은 다양한 제한조건을 만족하면서 A60 BPP의 중량을 최소화할 수 있는 이산 설계변수의 근사 최적해를 탐색하였다. 각각의 메타모델 별로 산출된 근사 최적설계의 결과는 실제 제한조건을 비교하여 정확도를 검토하였다. 본 논문은 2장에서 A60 BPP의 설계사항 및 방화성능 평가 규정, 그리고 과도 열전달해석의 결과를 정리하였으며, 3장에서 실험계획법과 메타모델링의 결과를 기술하였고, 4장에서 근사최적화에 대한 내용을 정리하였다. 마지막으로 결론 내용을 요약하는 형태로 구성하였다.

2. A60 BPP의 방화성능

2.1 방화설계 및 성능평가 규정

선박과 해양플랜트에 적용되는 A60 BPP는 격벽 구역의 화재 발생 시 기밀의 유지와 함께 격벽을 관통하여 설치되는 제어와 통신용 케이블의 안전한 운용을 위해 사용되는 방화장치이다. 2장에서는 생산성과 품질향상을 위해 무게 길이를 축소하고 내화 단열재를 적용하여 새롭게 개발된 A60 BPP의 방화성능을 평가하였다. 본 연구에서 검토한 A60 BPP의 설계 형상은 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에

보인 바와 같이 관통 관의 몸체(Body)는 길이 200mm로 설계하고, Tube의 직경은 $\varnothing 8$ 과 $\varnothing 12$ 로, Body의 직경은 $\varnothing 20$ 과 $\varnothing 25$ 로 각각 설계하였다. 단열재는 관통 관의 중심에서 한쪽으로 90mm가 치우쳐 부착되도록 하였다.

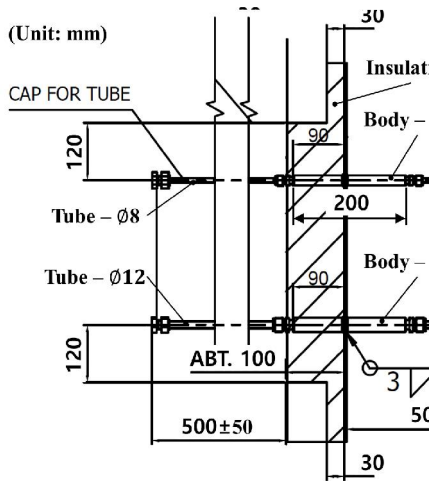


Fig. 1 Design specification of A60 BPP

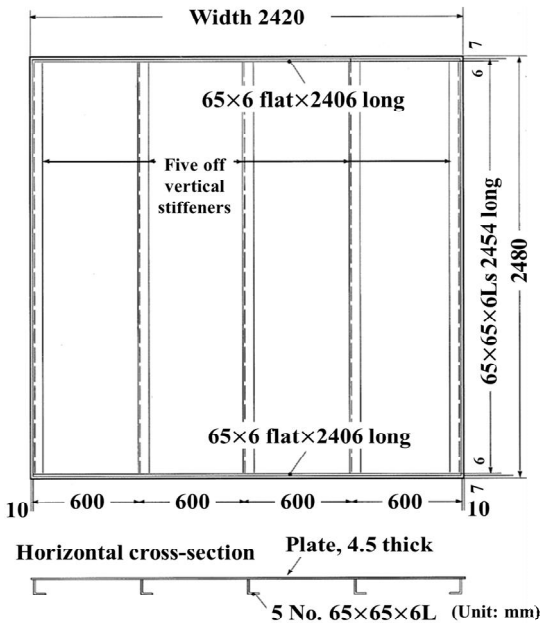


Fig. 2 Configuration of structure steel core^[2]

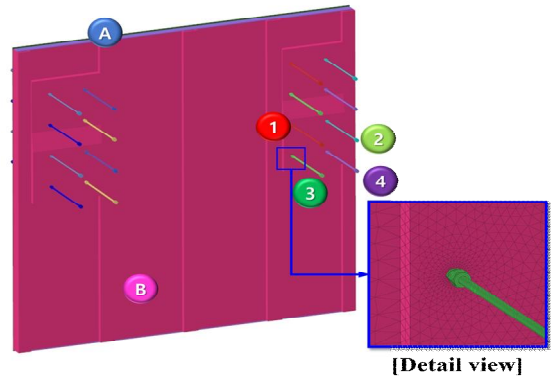


Fig. 3 Transient heat transfer analysis model

관통 관의 재질은 기계구조용 탄소강(S45C)과 오스테나이트계 스테인리스강(SUS316L)을 각각 적용하였다.

A60 BPP의 방화설계의 적합성이 검증되기 위해서 60분간 규정된 화염 가열조건에서 화염이 가해지는 면의 반대쪽에서 측정된 온도가 180°C 이하가 되도록 설계되어야 한다. Fig. 2에는 FTP 코드에 규정된 화재시험 전용 시편(Structure steel core)의 형상이 나타나 있다.

Fig. 2에 나타난 바와 같이 A60 BPP에 대한 화재시험 전용 시편은 강제 구조물로 제작해야 하고, 가로 2,440mm, 세로 2,500mm, 두께 $4.5 \pm 0.5\text{mm}$ 의 평판에 600mm 간격으로 $(65 \pm 5) \times (65 \pm 5) \times (6 \pm 1)\text{mm}$ 의 L형 보강재가 배치되어야 한다.

A60 BPP는 Fig. 2에 보인 시편의 L형 보강재 사이에 단열재와 같이 장착하여 화재시험을 통해 방화성능을 검증해야 한다. A60 BPP와 단열재가 장착된 화재시험 전용 시편은 실제 설치 상태와 동일하게 평가될 수 있도록 화염이 가해지는 반대면에 단열재가 위치되어야 하고, 화염노(Furnace)에 수직으로 장착되어 60분간 940°C 의 온도까지 가열된다.

2.2 과도 열전달해석

과도 열전달해석은 범용 유한요소법 소프트웨어인 ABAQUS/Implicit^[8]를 사용하여 수행하였다. Fig. 1의 A60 BPP의 설계 형상과 Fig. 2의 화재시

험 전용 시편을 토대로 생성한 과도 열전달해석 모델은 Fig. 3에 나타내었고, 해석모델의 상세사양은 Table 1에 정리하였다. 과도 열전달해석에 적용된 유한요소모델은 2,621,656개의 요소와 619,131개의 절점으로 생성되었으며, 유한요소의 형태는 사면체 열전달 요소를 적용하였다.

재질의 열전도와 비열 특성치는 과도 열전달해석의 정확도를 향상시키기 위해 기존의 연구결과^[9-12]를 참조하여 온도에 따른 특성치를 적용하였으며, Fig. 4~7에 나타내었다. 과도 열전달해석의 입열조건은 Fig. 8에 나타낸 것처럼 FTP 코드에 규정된 화염노 가열조건을 동일하게 적용하였다. Fig. 8(a)에 보인 바와 같이 화염노에 A60 BPP가 장착된 시편은 단열재 부착면이 화염노 내부의 반대 방향으로 놓이고 수직방향으로 설치된다.

Table 1 Detail specification of analysis model

No.	Part	Dimension [tube / body]	Material type
1	Penetration piece	∅8 / ∅20	SUS316L
2	Penetration piece	∅8 / ∅20	S45C
3	Penetration piece	∅12 / ∅25	SUS316L
4	Penetration piece	∅12 / ∅25	S45C
A	Structure steel core	-	SS400
B	Insulation	-	A60 class

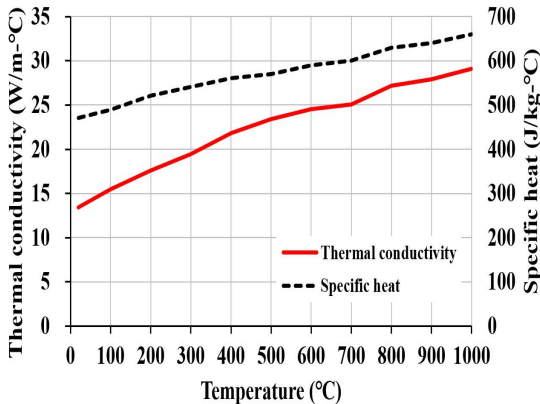


Fig. 4 Material properties of SUS316L

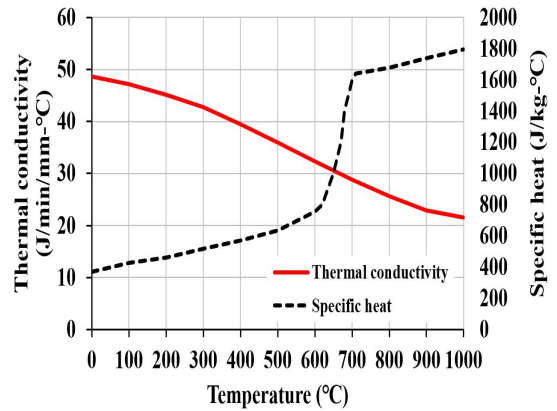


Fig. 5 Material properties of S45C

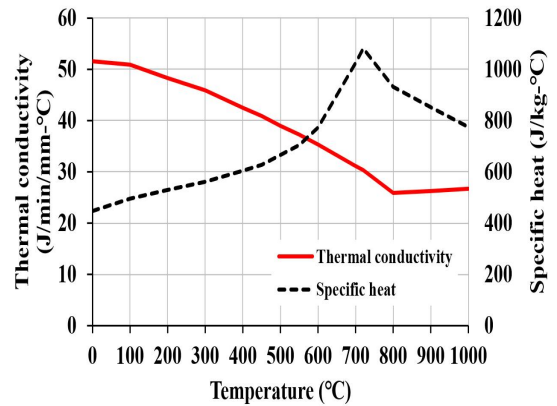


Fig. 6 Material properties of SS400

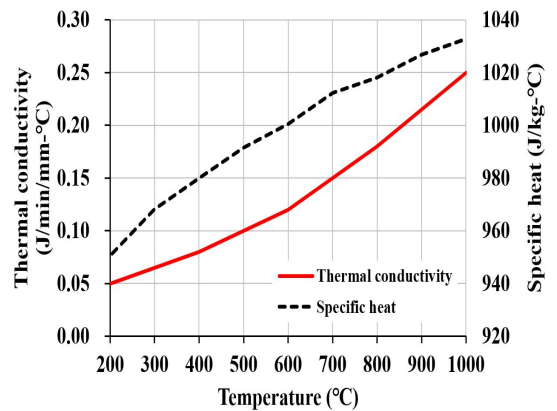
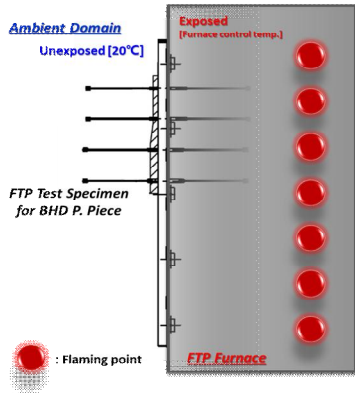
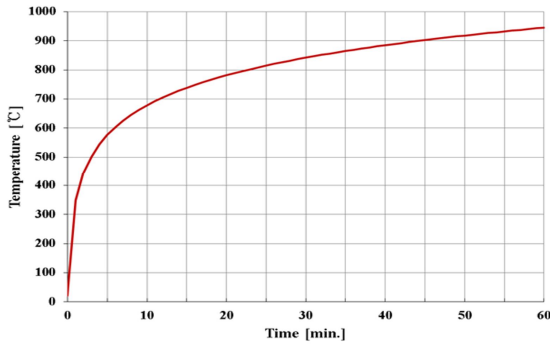


Fig. 7 Material properties of insulation



(a) Furnace condition



(b) Furnace control temperature

Fig. 8 Furnace flame condition

화염노의 내부 온도는 가열점(Flaming point)의 화염으로 Fig. 8(b)에 나타나 있는 화염노 제어 온도 곡선에 따라 60분간 940°C까지 가열된다. 화염노 제어 온도 곡선은 다음의 식으로 정의된다^[2].

$$T = 340 \log_{10}(8t + 1) + 20 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (1)$$

여기서 T 는 가열온도, t (분)는 가열시간이다. 온도측정은 화염노 외부면(Unexposed ambient domain)에서 A60 BPP의 몸체에서 최대온도를 측정하고, 온도 편차가 18 0°C 이하인 경우에 규정을 만족하는 것으로 판정한다. FTP 코드에 규정된 화염노 가열조건은 폐쇄된 화염노 내부의 분위기 온도(Atmosphere temperature)를 높이는 방식이기 때문에 과도 열전달해석에서는 다음과 같은 대류계수 h 의 산출식을 적용하였다^[13].

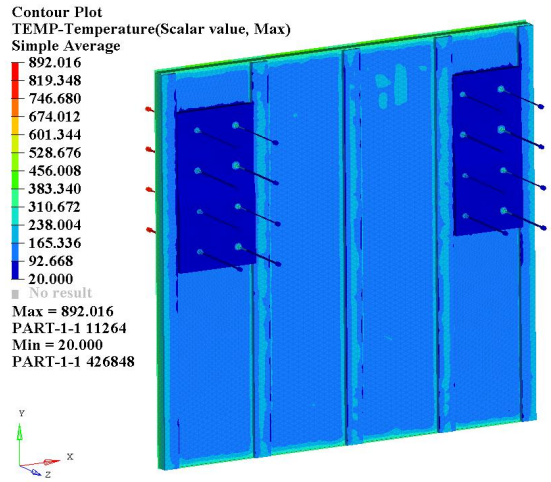


Fig. 9 Temperature distribution contour results

$$h = \frac{k}{L} Nu \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (2)$$

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 R_{aL}^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{1/6} \right]^{8/27}} \right\}^2$$

$$R_{aL} = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} Pr$$

여기서 Nu 는 Nusselt number, R_{aL} 는 Rayleigh number, Pr 은 Prandtl number, k 는 유체의 열전도도, L 는 기하학적 특성 길이, ν 는 유체의 동점성 계수, g 는 중력가속도, β 는 체적팽창계수, T_s 표면온도, 그리고, T_∞ 는 표면에서 멀리 떨어진 유체의 온도이다. 60분의 가열 시점에서 과도 열전달해석으로부터 화염노 외부면에서 측정된 온도분포 결과는 Fig. 9에 나타내었다.

화염노 외부면에서의 온도분포는 Fig. 9에 나타난 것처럼 20°C에서 313°C의 분포 결과를 나타내었다. 과도 열전달해석으로부터 60분의 가열시점에 화염노 외부면에서 A60 BPP 몸체의 측정된 온도결과는 Fig. 3과 Table 1의 번호 기준으로 1번에서 172.4°C, 2번에서 76.6°C, 3번에서 170.0°C, 그리고 4번에서 58.4°C로 각각 측정되었다. 따라서 본 연구에서 고려한 A60 BPP의 방화설계 사양은 FTP 코드의 규정을 만족하는 것으로 확인되었고, 해석적 방법을 이용하여 A60 BPP의 방화성능에 대해 메타모델 생성과 근사최적화를 수행하였다.

3. 메타모델링

근사최적화에 이용되는 메타모델은 주어진 설계범위에서 목적함수와 제한조건의 응답특성을 최소의 오차율로 예측하기 위해 생성되며 최적화해석 과정에 적용되어 수렴성과 수치계산속도를 향상시키는 역할을 한다. 근사최적화에 적용될 메타모델을 생성하기 위해 실험계획법이 적용되었으며, 유한요소모델과 과도 열전달해석 결과는 실험계획법과 연동하였다. 설계변수와 수준은 A60 BPP의 몸체 길이와 튜브의 직경에 대해 3수준, A60 BPP의 재질은 2수준, 그리고 단열재 밀도는 3수준으로 설정하였으며, 상세내용은 Table 2에 정리하였다. 목적함수인 중량(f)은 시편을 제외한 A60 BPP 자체와 A60 BPP에 연결된 단열재의 무게를 고려하였다. 제한조건 중 온도(g_1)는 과도 열전달해석으로부터 측정된 결과를 적용하였으며, 생산성(g_2)은 A60 BPP의 길이, 직경 및 재질의 설계변수 별로 가중 계수를 2.0, 1.0 및 0.5로 각각 적용하여 산출하였고, 가격(g_3)은 단위 중량당 A60 BPP의 재질 별 비용을 천원 단위로 고려하여 산출하였다.

Table 2의 설계변수의 변동 수준을 적용하여 총 54회의 전인자실험(Full factorial experiment)을 구성하였고, Table 3의 실험행렬에 설계변수의 변동에 따른 목적함수와 제한조건의 결과를 정리하였다.

메타모델링은 Table 3의 A60 BPP에 대한 실험계획법 결과로부터 Kriging^[14], RSM^[15] 그리고 RBFN^[16]의 메타모델을 각각 생성하였고, 메타모델 별로 A60 BPP의 설계공간을 근사화할 수 있는 정확도를 비교하였다.

Table 2 Design variables and their level

Design variable	Level 1	Level 2	Level 3
x_1 : Length of body(mm)	150	200	250
x_2 : Diameter of tube(mm)	$\varnothing 6^1$	$\varnothing 8$	$\varnothing 12$
x_3 : Material type	S45C	SUS316L	-
x_4 : Insulation density(kg/m ³)	96	128	160

1) Diameter of body: $\varnothing 20$

Table 3 Full factorial experiment results

Design variables				
Run	x_1 (mm)	x_2 (mm)	x_3	x_4 (kg/m ³)
1	150	6	S45C	96
2	150	6	S45C	128
3	150	6	S45C	160
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
52	250	12	SUS316L	96
53	250	12	SUS316L	128
54	250	12	SUS316L	160

Object function and constraints				
Run	f (kg)	g_1 (°C)	g_2	g_3 (1000×₩)
1	0.65	177.06	12.6	3.8
2	0.65	175.06	12.6	3.8
3	0.65	169.56	12.6	3.8
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
52	1.30	58.70	12	37
53	1.30	56.65	12	37
54	1.30	56.45	12	37

Kriging은 근사화할 실제 설계공간함수의 전역특성을 나타내는 전역모델과 실제 함수와 전역모델과의 편차(deviation)에 해당하는 국부모델의 합으로 표현된다^[14].

$$\tilde{g}(x)_K = Z(x)^T A_K + E(x) \quad (3)$$

여기서 A_K 는 미지의 계수벡터이고, $Z(x)$ 는 전역모델 벡터이며, $E(x)$ 는 설계 데이터들의 공간적인 상관관계로서 가우스 상관함수로 정의된다.

RSM은 최소자승방법 이용을 통한 이차다항식 형태의 회귀모델로 표현된다^[15].

$$g = A_0 + \sum_{i=1}^k A_i Z_i + \sum_{i=1}^k A_{ii} Z_i^2 + \sum_{i < j}^k A_{ij} Z_i Z_j + e \quad (4)$$

n 개의 실험 점으로부터 실제 응답벡터 g 와 k 개의 기저변수의 행렬 Z 가 주어진다면 g 와 Z 의 관계식은 다음과 같다.

$$g = Z A_R + e \quad (5)$$

랜덤오차 벡터 e 를 최소화한 후 RSM 근사계수 벡터 A_R 을 산출하기 위해 최소자승함수를 적용하여 근사계수를 구하면 회귀 메타모델을 생성할 수 있다.

방사형 기저 함수 기반 신경망 모델인 RBFN은 산란된 다변량 데이터를 높은 정확도로 근사화하기 위해 개발되었다^[6]. RBFN은 응답함수를 근사화하기 위해 유클리드 거리(Euclidean distance)를 이용하여 방사 대칭 함수의 선형조합을 사용한다. 신경망의 노드 집합 $x_1, \dots, x_n \in \Omega \subset R^n$ 이 주어지면 RBFN의 기저함수는 다음과 같이 정의된다.

$$g_j(x) = \phi(\|x - x_j\|) \in R, j = 1, \dots, n \quad (6)$$

여기서 ϕ 는 맥 스플라인 기저함수이고, 놈(Norm) $\|x - x_j\|$ 는 유클리드 거리이다. 유클리드 거리를 사용하면 신경망의 입력층 데이터가 균일 클러스터로 분류된다. 맥 스플라인 기저함수는 다음과 같이 정의된다.

$$\phi = r^c \quad (7)$$

여기서 c 는 양의 상수 값인 형상함수의 변수이다. 입력 데이터 $x_1, \dots, x_n \in \Omega \subset R^n$ 에 대해 근사화할 응답 데이터 $y_1, \dots, y_n \in \Omega \subset R^n$ 가 주어지면, Fig. 10과 같은 신경망 학습 과정을 거쳐 RBFN 메타모델이 식 (8)과 같이 정의된다.

$$\tilde{g}_{RBF}(x) = \sum_{j=1}^n \alpha_j g_j(x) + \alpha_{n+1} \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^n \alpha_j g_j(x) + \alpha_{n+1} = y_i, i = 1, \dots, n$$

여기서 α_j 는 미지의 근사계수이다.

메타모델의 정확도는 식 (9)과 같은 R^2 값으로 판별하였다.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (t_i - y_i)^2}{\sum (t_i - \bar{t}_i)^2} \quad (9)$$

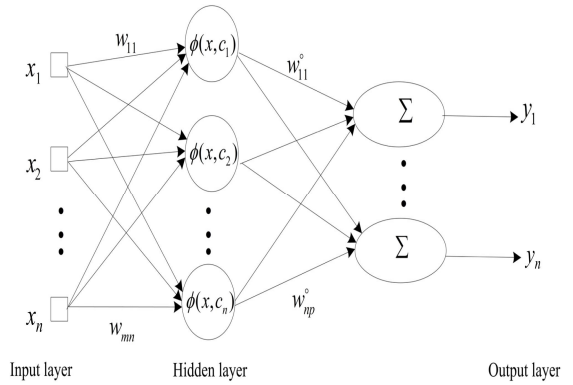


Fig. 10 Learning procedure of RBFN

Table 4 Comparison of meta-modeling results

meta-models	R^2 value				
	f	g_1	g_2	g_3	Avg.
Kriging	0.978	0.965	0.957	0.976	0.969
RSM	0.999	0.978	0.998	0.999	0.994
RBFN	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999

여기서 t_i 는 실제 값, y_i 는 메타모델로부터 추정된 예측 값, \bar{t}_i 는 실제 값의 평균치를 의미한다. R^2 값이 1.0인 경우 메타모델로부터 추정된 예측값이 전체 설계공간 상의 실제 값과 정확히 일치하는 것을 의미한다. 각각의 메타모델로부터 산출된 목적함수와 제한조건 별 정확도 분석결과 는 Table 4에 정리하여 나타내었다. Table 4에 정리된 바와 같이 모든 메타모델의 목적함수와 제한조건에 대한 R^2 이 평균 0.96 이상으로 매우 높은 정확도를 나타내었고, 근사 최적화에 활용되어 수치계산의 효율성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단되었다. 메타모델 중 Kriging이 전반적으로 가장 낮은 정확도를 나타내었고, RSM과 RBFN의 R^2 평균 결과는 0.994와 0.999로 매우 높게 나타났다. 본 연구의 적용한 전인자실험 방법 기반의 메타모델 중 RBFN이 가장 높은 정확도로 A60 BPP의 설계공간 탐색이 가능한 것으로 나타났다.

4. 근사최적설계

본 연구에서는 Table 2에 나타나 있는 바와 같이 이산설계 변수의 특성을 갖는 A60 BPP의 방화설계에 대해 중량감소 최적화를 위해 MIGA^[17, 18] 기법을 이용한 메타모델 기반의 근사최적화를 수행하였다. 근사최적화를 위한 메타모델은 Kriging, RSM 그리고 RBFN의 3가지 모델을 적용하였다. 최적설계문제 정식화는 방화성능, 생산성 및 가격과 같은 다양한 제한조건을 모두 만족하면서 A60 BPP의 중량을 최소화할 수 있는 이산 설계변수를 결정하도록 구성하였다. 메타모델 특성에 따른 근사최적화 결과를 검토하고, 실제 제한조건의 결과와 비교하여 A60 BPP의 최소 중량설계에 가장 적합한 근사최적화 방법을 고찰하였다. A60 BPP의 최적설계 정식화는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} \\ & f = f(x_1, x_2, x_3, x_4) \end{aligned} \quad (10)$$

Subject to

$$g_1(x_1, x_2, x_3, x_4) = \text{Temperature} \leq 170$$

$$g_2(x_1, x_2, x_3) = \text{Productivity} \geq 9.5$$

$$g_3(x_1, x_2, x_3, x_4) = \text{Cost} \leq 30$$

$$x_1 = 150; 160; 170; \dots; 230; 240; 250$$

$$x_2 = 6; 8; 10; 12$$

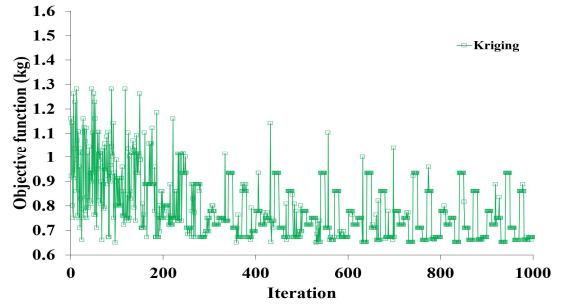
$$x_3 = S45C; SUS316L$$

$$x_4 = 96; 128; 160$$

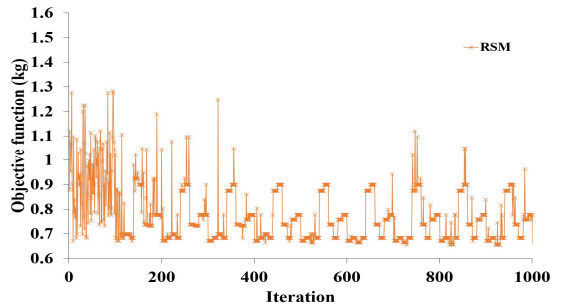
식 (10)에서 온도에 관한 비등가 제한조건의 상한치는 방화시험에 사용되는 온도센서의 정밀도에 대한 허용오차^[19]가 940°C에서 ±5임을 고려하여 FTP 코드의 규정온도보다 10°C 낮은 170°C로 적용하였다. A60 BPP의 생산성과 가격 변동의 영향도에 대한 기존 연구결과^[20]를 참조하여 생산성과 가격에 대한 비등가 제한조건의 하한치와 상한치는 실험계 획법의 수준 변동에서 발생하는 최대값의 80% 수준을 각각 적용하였다. A60 BPP의 몸체 길이(x_1)와 직경(x_2)의 이산변수 변동 범위는 실제 제작이 가능한 10mm와 $\varnothing 2$ 간격으로 설정하였다. A60 BPP의 재질(x_3)의 이산변수 변동 범위는 방화장치에 사용 가능한 강제인 S45C와 SUS316L을 적용하였으며, 단열재의 밀도(x_4)는 방화장치용으로 실제 생산되고 있는 사양을 고려하였다.

Table 5 MIGA parameters

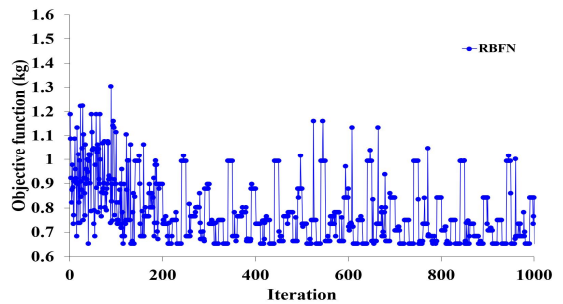
Parameter	Value
Sub-population size	10
# of islands	10
# of generations	10
Crossover rate	1.0
Mutation rate	0.01
Migration rate	0.01
Migration interval	5



(a) Kriging



(b) RSM



(c) RBFN

Fig. 11 Iteration history of objective function

이산설계변수의 최적해 탐색은 유전자 알고리즘과 같은 전역적 최적화 방법을 적용해야 하기 때문에 본 연구에서는 MIGA를 사용하였다. MIGA에서는 일반적인 유전자 알고리즘의 개체군이 섬(Island)이라고 불리는 부개체로 나누어지고, 선택(Selection), 교차(Crossover) 및 변이(Mutation)와 같은 유전과정이 각각의 섬에 대해 수행되어 진다^[18, 19]. 이 과정에서 섬에서 선택된 개체는 룰렛 선택(Roulette selection) 방법으로부터 주기적으로 다른 섬으로 이동하게 된다. MIGA에서 개체이동을 제어하는 주요 파라미터는 섬으로의 이동간격과 비율이다.

이동간격은 각각의 이동 사이에 세대수를 결정하고, 이동비율은 각각의 섬으로부터 이동되는 개체의 양을 결정한다. A60 BPP의 이산설계변수 최적화에 적용된 MIGA의 수리적 탐색 파라미터는 Table 5에 정리하였다.

A60 BPP의 근사최적설계 정식화 과정에서 정의된 이산설계영역에서 Kriging, RSM 그리고 RBFN의 메타모델을 각각 적용하여 근사최적해의 결과가 산출되었고, 실제 제한조건의 결과와 비교하여 정확도를 검토하였다. 최적화 결과는 Table 6에 최적설계해, 제한조건의 근사치 및 실제 계산결과, 그리고 목적함수인 중량감소에 대해 정리하였으며, 목적함수의 최적화 수렴결과는 Fig. 11에 도시하였다.

Table 6에 나타난 것처럼, 모든 근사최적화 결과는 제한조건을 만족하면서 초기설계 대비 23% 이상의 중량감소 효과를 나타내었고, RBFN을 이용한 근사최적화 결과가 제한조건의 근사치와 실제 계산결과가 정확히 일치하여 가장 높은 정확도를 보였다. 중량감소는 Kriging과 RSM을 적용한 경우 초기설계 대비 23.5%의 감소율을 나타내어 가장 높은 효과를 보였지만, 온도의 제한조건(g_1)의 정확도가 RBFN을 적용한 경우보다 낮게 나타났다. Table 6과 Fig. 11에 나타난 바와 같이 목적함수의 수렴결과나 특성은 모든 메타모델에서 유사한 것으로 나타났다. 최적설계해의 결과에서 RBFN을 적용한 경우 단열재의 밀도(x_4)가 다른 메타모델과 달리 좀 더 높은 사양으로 결정되었고, 나머지 설계변수에 대해서는 동일한 최적해로 결정되었다. 제한조건 결과에서 Kriging을 적용한 경우 온도를 제외한 나머지 제한조건들은 높은 정확도의 결과를 보였고, RSM을 적용한 경우 생산성(g_2)을 제외한 나머지 제한조건들은 상대적으로 낮은 정확도의 결과를 나타내었다. 제한조건 결과

Table 6 Comparison of approximate optimization

Content	Optimum	Objective	Approximate constraints	Actual constraints
Initial design	$x_1=200\text{mm}$ $x_2=\varnothing 8$ $x_3=S45C$ $x_4=128\text{kg/m}^3$	0.85kg	-	$g_1=172.4^\circ\text{C}$ $g_2=13.6$ $g_3=5.0$
Kriging	$x_1=150\text{mm}$ $x_2=\varnothing 6$ $x_3=S45C$ $x_4=128\text{kg/m}^3$	0.65kg (0.2kg ↓)	$g_1=169.1^\circ\text{C}$ $g_2=12.6$ $g_3^1=3.8$	$g_1=169.6^\circ\text{C}$ $g_2=12.6$ $g_3=3.8$
RSM	$x_1=150\text{mm}$ $x_2=\varnothing 6$ $x_3=S45C$ $x_4=128\text{kg/m}^3$	0.65kg (0.2kg ↓)	$g_1=168.2^\circ\text{C}$ $g_2=12.6$ $g_3=4.3$	$g_1=169.6^\circ\text{C}$ $g_2=12.6$ $g_3=3.8$
RBFN	$x_1=150\text{mm}$ $x_2=\varnothing 6$ $x_3=S45C$ $x_4=160\text{kg/m}^3$	0.67kg (0.18kg ↓)	$g_1=169.1^\circ\text{C}$ $g_2=12.6$ $g_3=3.9$	$g_1=169.1^\circ\text{C}$ $g_2=12.6$ $g_3=3.9$

1) Unit: 1000 × ₩

의 정확도와 목적함수의 수렴결과로부터 A60 BPP의 이산설계변수에 대한 근사최적화에는 RBFN을 적용한 경우가 가장 효과적인 방법으로 나타났다.

5. 결론

본 연구는 A60 BPP의 중량최소화를 위해 MIGA를 이용한 메타모델 기반의 이산설계 근사최적화를 수행하였다. A60 BPP의 방화성능 평가와 관련하여 FTP 코드에 따라 유한요소법 기반의 과도 열전달 해석을 수행하였다. 과도 열전달해석으로부터 60분의 가열시점에서 화염노 외부면에서 A60 BPP 몸체의 측정된 온도결과는 FTP 코드의 규정인 180°C 이하의 조건을 만족하는 것으로 나타났다. 근사최적화에 적용된 메타모델은 실험계획법으로부터 생성되었으며, 유한요소모델과 과도 열전달해석 결과는 실험계획법과 연동하였다. A60 BPP의 길이, 직경 및 재질, 그리고 단열재 밀도는 이산 설계변수로 적용하였고, 목적함수는 중량을 고려하였으며, FTP 코드에 규정된 방화성능 온도, 생산성 및 가격은 제한조건으로 각각 적용하였다. 총 54회의 전인자 실험을 통해 실험계획법을 수행하였으며, 실험계획

법의 결과로부터 Kriging, RSM 그리고 RBFN의 3가지 형태의 메타모델을 생성하였다. 모든 메타모델의 목적함수와 제한조건에 대한 R^2 값이 평균 0.96 이상으로 매우 높은 정확도를 나타내었고, RBFN이 가장 높은 정확도로 A60 BPP의 설계공간 탐색이 가능한 것으로 나타났다. 근사최적화를 통해 방화성능, 생산성 및 가격의 성능 제한조건을 만족하면서 A60 BPP의 중량을 최소화할 수 있는 이산 설계변수의 근사 최적해가 결정되었다. 본 연구에서 고려한 모든 메타모델 기반의 근사최적화 결과는 제한조건을 만족하면서 초기설계 대비 23% 이상의 중량감소 효과를 나타내었고, RBFN을 이용한 근사최적화 결과가 제한조건의 근사치와 실제 계산결과가 정확히 일치하여 가장 높은 정확도를 보였다. 중량감소는 Kriging과 RSM을 적용한 경우 가장 높은 효과를 보였지만, 온도의 제한조건의 정확도가 RBFN을 적용한 경우보다 낮게 나타났다. 제한조건 결과의 정확도와 목적함수의 수렴결과로부터 A60 BPP의 이산설계변수에 대한 근사최적화에는 RBFN을 적용한 경우가 가장 효과적인 방법으로 나타났다.

후 기

본 연구는 중소벤처기업부에서 지원하는 2020년도 산학연 Collabo R&D사업(No. S2910737)과 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 연구결과입니다.

REFERENCES

1. IMO, International Convention for the Safety of Life at Sea - SOLAS 1999/2000 Amendment, UK, 2010.
2. MSC, Adoption of the International Code for Application of Fire Test Procedures - MSC.307(88), UK, 2010.
3. Yu, J. S., Sung, H. G. and Oh, J. H., "An experimental study on fire-resistant boom," Journal of the Korean Society of Marine Environmental Engineering, Vol. 3, No. 2, pp. 25-32, 2000.
4. Choi, T. J., Kim, J. S., Choi, K. K., Lim, Y. S. and Kim, Y. T., "An experimental study on the fireproof of fire damper in accordance with insulation conditions on the coaming and blade," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 37, No. 4, pp. 431-437, 2013.
5. Choi, J. M., Um, H. C. and Jin, Y. H., "Comparison on the fire performance of additional insulation materials for improving the fire retardancy in engine-room of FRP vessel," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 38, No. 9, pp. 1150-1155, 2014.
6. Jang, C. J., Hur, N. S. and Kim, I. W., "Performance experiment of H-120 class fire damper for offshore," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 13, No. 2, pp. 131-136, 2014.
7. Song, C. Y. and Kim, Y., "Identification of fire resistance characteristics of bulkhead penetration pieces for A-0 class compartment," Journal of Advanced Marine Engineering and Technology, Vol. 44, No. 6, pp. 414-421, 2020.
8. Simulia, Abaqus User Manual. Simulia, 2019.
9. Piscopo, G., Atzeni, E. and Salmi, A., "A hybrid modeling of the physics-driven evolution of material addition and track generation in laser powder directed energy deposition," Materials, Vol. 12, No. 17, pp. 1-23, 2019.
10. Magnabosco, I., Ferro, P., Tiziani, A. and Bonollo, F., "Induction heat treatment of a ISO C45 steel bar: experimental and numerical analysis," Computational Materials Science, Vol. 35, No. 2, pp. 98-106, 2006.
11. Suman, S., Biswas, P. and Sridhar, P., "Numerical prediction of welding distortion in submerged arc welded butt and fillet joints," International conference on Design and Manufacturing, 2016.
12. Ohmura, T., Tsuboi, M. and Onodera, M., "Specific heat measurement of high temperature thermal insulations by drop calorimeter method,"

- International Journal of Thermophysics, Vol. 24, No. 2, pp. 559-575, 2003.
13. Yunus, A. C. and Afshin, J. G., Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications, McGraw-Hill, 2012.
 14. Song, C. Y. and Lee, D. J., "A comparative study on surrogate models and sensitivity analysis for structure design of automatic salt collector using orthogonal array experiment," Journal of Convergence for Information Technology, Vol. 10, No. 7, pp. 138-146, 2020.
 15. Song, C. Y. and Lee, J., "Comparative study of approximate optimization techniques in CAE-based structural design," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-A, Vol. 34, No. 11, pp. 1603-1611, 2010.
 16. Dyn, N., Levin, D. and Rippa, S., "Numerical procedures for surface fitting of scattered data by radial basis functions," SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing, Vol. 7, No. 2, pp. 639-659, 1986.
 17. Hu, X., Chen, X., Zhao, Y. and Yao, W., "Optimization design of satellite separation system based on multi-island genetic algorithm," Advanced Space Research, Vol. 53, pp. 870-876, 2014.
 18. Ma, F., Han, L., Zhou, Y., S., Chen and Pu, Y., "Multi-island genetic algorithm and Kriging model-based design of vehicle product comprising multi-material," IEEE Access, Vol. 6, pp. 53397-53408, 2018.
 19. International Electrotechnical Commission, IEC Statutes and Rules of Procedure - 751, 2008.
 20. Park, W. C., Song, C. Y. and Na, O., "Heat transfer characteristics of bulkhead penetration piece for A60 class compartment - I," Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 32, No.5, pp. 310-323, 2018.