

A60 급 갑판 관통 관의 이산설계 근사최적화를 위한 대리모델과 유전자 알고리즘 응용

박우창* · 송창용**†

* 목포대학교 조선해양공학과 대학원생, ** 목포대학교 조선해양공학과 교수

Surrogate Models and Genetic Algorithm Application to Approximate Optimization of Discrete Design for A60 Class Deck Penetration Piece

Woo Chang Park* · Chang Yong Song**†

* Graduate student, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Mokpo National University, Jeonnam 58554, Korea

** Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Mokpo National University, Jeonnam 58554, Korea

요 약 : A60 급 갑판 관통 관은 선박과 해양플랜트에서 화재사고가 발생할 경우 화염의 확산을 방지하고 인명을 보호하기 위해 수평구조에 설치되는 방화장치이다. 본 연구에서는 다양한 대리모델과 다중 섬 유전자 알고리즘을 이용하여 A60 급 갑판 관통 관의 방화설계에 대한 이산변수 근사최적화를 수행하였다. A60 급 갑판 관통 관의 방화설계는 과도 열전달해석을 통해 평가하였다. 근사최적화에서 관통관의 길이, 지름, 재질, 그리고 단열체의 밀도는 이산설계변수로 적용하였고, 제한조건은 온도, 생산성 및 가격을 고려하였다. 대리모델 기반의 근사최적설계 문제는 제한조건을 만족하면서 A60 급 갑판 관통 관의 중량을 최소화할 수 있는 이산설계변수를 결정하도록 정식화하였다. 반응표면모델, 크리깅, 그리고 방사기저함수 신경망과 같은 다양한 대리모델이 근사최적화에 사용되었다. 근사최적화의 정확도를 검토하기 위해 최적해의 결과는 실제 계산 결과와 비교하였다. 근사최적화에 사용된 대리모델 중 방사기저함수 신경망 모델이 A60 급 갑판 관통 관의 방화설계에 대해 가장 정확한 최적설계 결과를 나타내었다.

핵심용어 : A60 급 갑판 관통 관, 다중 섬 유전자 알고리즘, 이산설계 근사최적화, 대리모델, 방사기저함수 신경망 모델

Abstract : The A60 class deck penetration piece is a fire-resistant system installed on a horizontal compartment to prevent flame spreading and protect lives in fire accidents in ships and offshore plants. This study deals with approximate optimization using discrete variables for the fire resistance design of an A60 class deck penetration piece using different surrogate models and a genetic algorithm. Transient heat transfer analysis was performed to evaluate the fire resistance design of the A60 class deck penetration piece. For the approximate optimization of the piece, the length, diameter, material type, and insulation density were applied to discrete design variables, and temperature, productivity, and cost constraints were considered. The approximate optimum design problem based on the surrogate models was formulated such that the discrete design variables were determined by minimizing the weight of the piece subjected to the constraints. The surrogate models used in the approximate optimization were the response surface model, Kriging model, and radial basis function-based neural network. The approximate optimization results were compared with the actual analysis results in terms of approximate accuracy. The radial basis function-based neural network showed the most accurate optimum design results for the fire resistance design of the A60 class deck penetration piece.

Key Words : A60 class deck penetration piece, Multi-island genetic algorithm, Approximate optimization of discrete design, Surrogate model, Radial basis function-based neural network model

* First Author : heavenly-sea@hanmail.net, 061-460-7471

† Corresponding Author : cysong@mokpo.ac.kr, 061-450-2732

1. 서론

선박이나 해양플랜트에서 화재사고가 발생하면 화염의 전파로 인해 대규모 손상과 인명피해로 이어질 수 있다. 이와 관련하여 국제해사기구(International maritime organization, IMO)는 선박의 주요 구획에 대한 방화설계 규정을 강화해 오고 있다. A60 급 방화장치는 설치되는 구획에서 60분간 화염의 전파를 방지할 수 있도록 해상안전규약(Safety of life at sea, SOLAS)에 따라 방화설계가 검증되어야 한다(IMO, 2010). A60 급 갑판 관통 판(A60 class deck penetration piece, A60 DPP)은 화재발생의 위험도가 높은 구획의 수평구조를 관통하여 제어 및 통신용 케이블이 설치되는 경우에 적용되는 방화장치이다. IMO는 화재시험절차(Fire Test Procedure, FTP)에 따라 A60 DPP의 방화성능을 검증하도록 규정하고 있다(MSC, 2010).

선박 및 해양플랜트에 대한 방화성능 연구가 제한적으로 수행되어왔다. Yu et al.(2000)은 오일붐(Oil boom)의 방화성능 검증을 위해 전기로와 수조시험을 이용하는 방법을 제안하였다. Lautenberger et al.(2006)은 화재시험 데이터를 기반으로 자동 최적화 기술을 개발하기 위해 전산유체역학 해석과 유전자알고리즘을 적용하였다. Grigonis et al.(2011)은 팽창성 화재 방지 코팅재의 방화시험을 통해 방화코팅 두께와 화재 노출 시간의 특성에 관한 연구를 수행하였다. Pyl et al.(2012)은 3차원 냉간 성형 박판 구조체에 대한 방화성능을 평가하기 위해 유한요소해석을 수행하였고, 실제 크기의 모형에 대한 화재시험을 통해 해석결과를 검증하였다. 팽창성 화재 방지 코팅재의 방화시험을 통해 방화코팅 두께와 화재 노출 시간의 특성에 관한 연구를 수행하였다. Choi et al.(2013)은 H-120 급 방화담퍼의 방화성능을 충족시키기 위해 블레이드와 코밍의 내화재 조건을 조정하여 방화성능시험을 수행하였다. Choi et al.(2014)은 FRP 선박용 재질에 대한 방화성능 검증을 위해 다양한 복합재료 생산조건을 고려한 방화시험을 수행하였다. Jang et al.(2014)은 H-120 급 방화담퍼의 방화설계에 대한 열해석을 수행하고, 방화설계 조건의 변화에 따른 방화시험을 수행하였다. Song and Kim(2020)은 열전달 해석과 방화시험을 이용해 선박의 수직구획에 적용되는 A0 급 격벽 관통 판의 방화설계를 평가하였다. 기존 연구사례의 검토로부터 A60 DPP와 같은 방화장치나 선박 및 해양플랜트용 방화장치에 대한 최적설계 연구는 수행된 사례가 거의 없었다. 따라서 본 연구에서는 다양한 대리모델과 유전자 알고리즘을 이용하여 A60 DPP 방화설계의 최적화 방법을 제시하고자 하였다.

본 연구에서는 이산설계 변수의 특성을 갖는 A60 DPP의 중량최소화를 위해 다중 섬 유전자 알고리즘(Multi-island genetic

algorithm, MIGA)을 이용한 대리모델 기반의 근사최적화를 수행하였다. A60 DPP의 방화성능의 평가를 위해 FTP 코드에 규정된 시편의 사양과 가열조건을 적용하여 유한요소법 기반의 과도 열전달해석을 수행하였다. 근사최적화에 사용될 대리모델은 실험계획법을 통해 생성되었으며, 유한요소모델과 과도 열전달해석 결과는 실험계획법과 연동하였다. 설계변수는 A60 DPP의 길이, 지름 및 재질, 그리고 단열재 밀도를 적용하였고, 실제 제작이 가능한 이산화된 설계 사양을 적용하였다. 목적함수는 중량을 적용하였고, 제한조건은 FTP 코드에 규정된 방화성능 온도, 생산성, 그리고 가격을 각각 고려하였다. 실험계획법의 실험행렬은 설계변수의 변동 수준으로 발생할 수 있는 목적함수와 제한조건을 모두 고려하기 위해 전인자설계법을 이용하여 구성하였다. 실험계획법 결과로부터 반응표면모델(Response surface model, RSM), 크리깅(Kriging), 그리고 방사기저함수 기반 신경망(Radial basis function based neural network, RBFN)과 같은 다양한 대리모델을 생성하였다. 대리모델별로 A60 DPP의 설계공간을 근사화할 수 있는 정확도를 분석하고, 근사최적화에 적용하여 수렴특성을 비교하였다. 근사최적화에서는 방화성능, 생산성 및 가격과 같은 다양한 제한조건을 만족하면서 A60 DPP의 중량을 최소화할 수 있는 이산 설계변수의 근사 최적해를 탐색하였다. 각각의 대리모델별로 산출된 근사 최적설계의 결과는 실제 계산된 제한조건 결과와 비교하여 정확도를 검토하였다. A60 DPP의 방화설계에 대해 RBFN 기반의 근사최적화 방법이 가장 높은 정확도로 최적해를 탐색할 수 있는 것으로 나타났다. 본 논문은 2장에서 A60 DPP의 설계사항 및 방화성능 평가 규정, 그리고 과도 열전달해석의 결과를 정리하였으며, 3장에서 실험계획법과 대리모델의 결과를 기술하였고, 4장에서 근사최적화에 관한 내용을 정리하였다. 마지막으로 결론 내용을 요약하였다.

2. A60 DPP의 방화성능

선박 및 해양플랜트에 설치되는 A60 DPP는 수평 구역의 화재 발생 시 기밀의 유지와 함께 갑판을 관통하여 설치되는 제어 및 통신용 케이블의 안전한 운용을 위해 사용되는 방화장치이다. 생산성과 품질향상을 위해 몸체 길이를 축소하고 내화 단열재를 적용한 A60 DPP가 새롭게 개발되었고, 2장에서는 이에 대한 방화성능을 평가하였다. 본 연구에서 검토한 A60 DPP의 설계 형상은 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에 나타난 것처럼 관통 판의 몸체(Body)는 길이 200 mm로 설계하였고, 튜브(Tube)의 지름은 $\varnothing 8$ 과 $\varnothing 12$ 로, 몸체의 지름은 $\varnothing 20$ 과 $\varnothing 25$ 로 각각 설계하였다. 단열재는 관통 판의 중심에서 한쪽으로 90 mm가 치우쳐 부착되도록 하였다. 관통

A60 급 갑판 관통 관의 이산설계 근사최적화를 위한 대리모델과 유전자 알고리즘 응용

관의 재료는 기계구조용 탄소강(S45C)과 오스테나이트계 스테인리스강(SUS316L)을 각각 적용하였다. 60분간 규정된 화염 가열조건에서 화염이 가해지는 면의 반대쪽에서 측정한 온도가 180℃ 이하가 되어야 A60 DPP의 방화설계의 적합성이 만족된다.

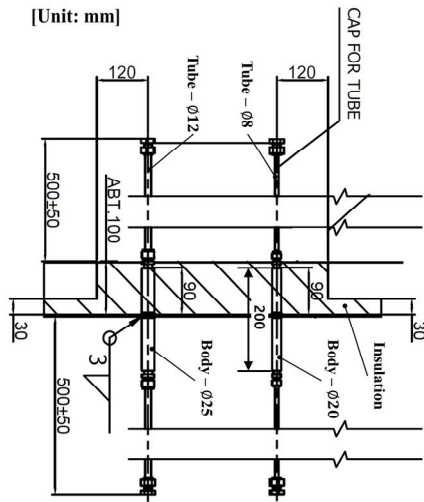


Fig. 1. Design specification of A60 DPP.

Fig 2에는 FTP 코드에 규정된 화재시험 전용 시편(Structure steel core)의 형상이 나타나 있다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 화재시험 전용 시편은 강재 구조물로 제작되어야 하고, 가로 2,440 mm, 세로 2,500 mm, 두께 4.5±0.5 mm의 평판에 600 mm 간격으로 65×65×6 mm의 L형 보강재가 배치되어야 한다. A60 DPP는 Fig. 2에 보인 시편의 L형 보강재 사이에 단열재와 같이 장착하여 화재시험을 통해 방화성능을 검증되어야 한다. A60 DPP와 단열재가 장착된 화재시험 전용 시편은 실제 선박과 해양플랜트의 설치 상태와 동일하게 평가될 수 있도록 화염이 가해지는 면에 단열재가 위치되어야 하고, 화염노(Furnace)에 수평으로 장착되어 60분간 940℃의 온도까지 가열되어야 한다(ISO, 1999).

과도 열전달해석(Transient heat transfer analysis)은 범용 유한요소법 소프트웨어인 ABAQUS/Implicit(Simulia, 2019)를 사용하여 수행하였다. Fig. 1의 A60 DPP의 설계 형상과 Fig. 2의 화재시험 전용 시편으로부터 생성된 과도 열전달해석 모델은 Fig. 3에 나타내었고, 해석모델의 상세사양은 Table 1에 정리하였다.

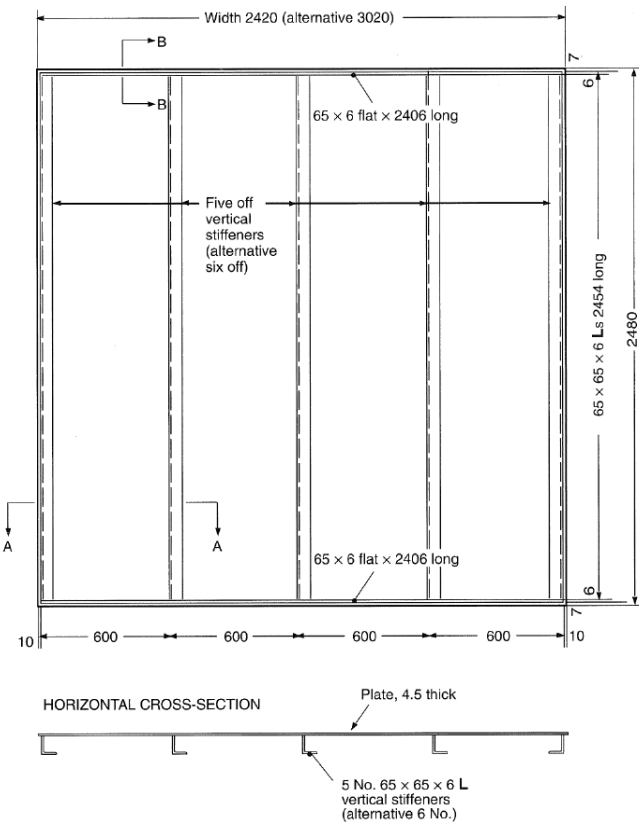


Fig. 2. Configuration of structure steel core (MSC, 2010).

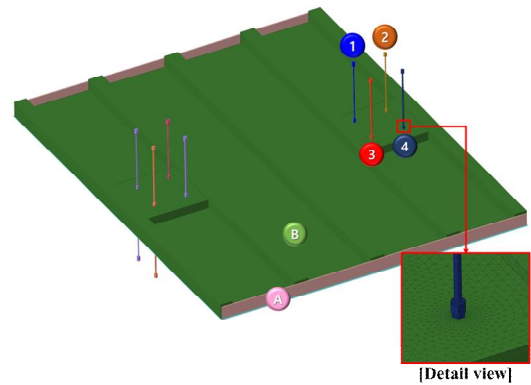


Fig. 3. Transient heat transfer analysis model.

Table 1. Detail specification of analysis model

No.	Part	Dimension [tube / body]	Material type
1	Penetration piece	Ø8 / Ø20	SUS316L
2	Penetration piece	Ø8 / Ø20	S45C
3	Penetration piece	Ø12 / Ø25	SUS316L
4	Penetration piece	Ø12 / Ø25	S45C
A	Structure steel core	-	SS400
B	Insulation	-	A60 class

과도 열전달해석에 적용된 유한요소모델은 1,352,236개의 요소와 323,738개의 절점으로 생성되었으며, 유한요소의 형태는 사면체 열전달 요소(DC3D4)를 적용하였다. 과도 열전

달해석을 위한 경계조건은 유한요소모델의 표면 절점 상에 대류경계조건을 적용하였으며, 화염노 내부와 외부에 대한 자연대류계수를 산정하여 경계조건을 구현하였다. 재료의 열전도와 비열 특성치는 과도 열전달해석의 정확도를 높이기 위해 기존의 연구결과를 참조하여 온도에 따른 특성치를 적용하였으며, Figs. 4~7에 나타내었다.

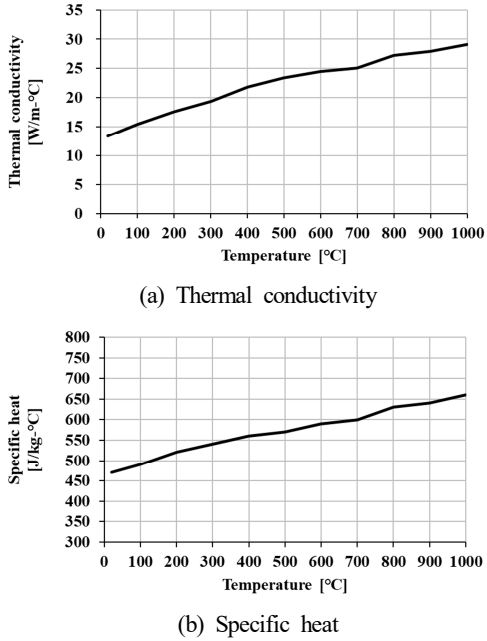


Fig. 4. Material properties of SUS316L (Piscopo et al., 2019).

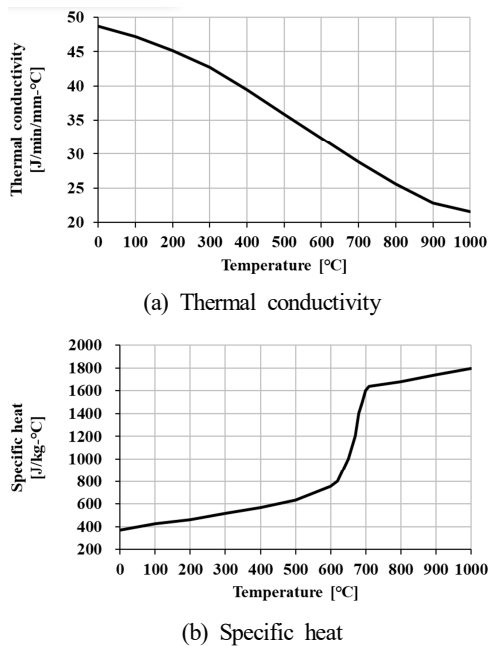


Fig. 5. Material properties of S45C (Magnabosco et al., 2006).

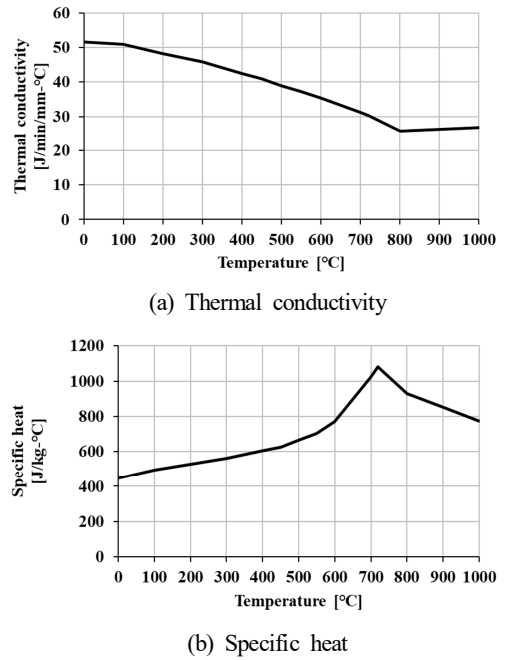


Fig. 6. Material properties of SS400 (Suman et al., 2016).

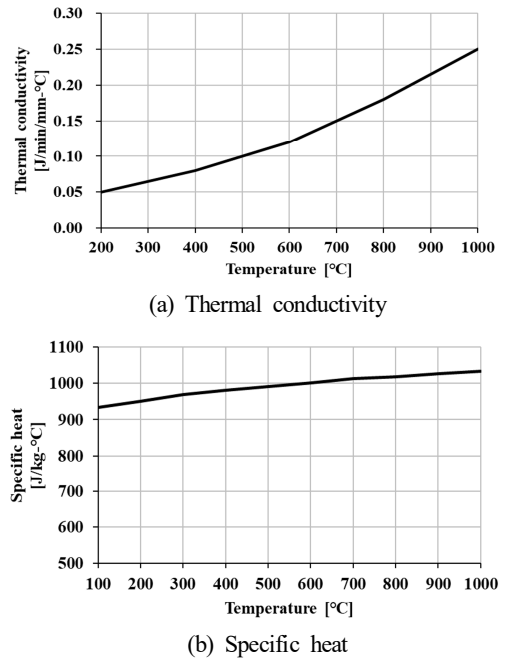


Fig. 7. Material properties of insulation (Ohmura et al., 2003).

과도 열전달해석의 입열조건은 Fig. 8에 나타난 것처럼 FTP 코드의 화염노 가열조건 규정과 동일하게 적용하였다. Fig. 8(a)에 보인 바와 같이 화염노에 A60 DPP가 장착된 시편은 단열재 부착면이 화염노 내부 방향에 수평으로 설치된다. 화염노의 내부 온도는 가열점(Flaming point)의 화염으로

Fig. 8(b)에 나타나 있는 화염노 제어 온도 곡선에 따라 60분간 940℃까지 가열된다. 화염노 제어 온도 곡선은 다음의 식으로 정의된다(MSC, 2010).

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

여기서 T 는 가열온도, t (minute)는 가열시간이다.

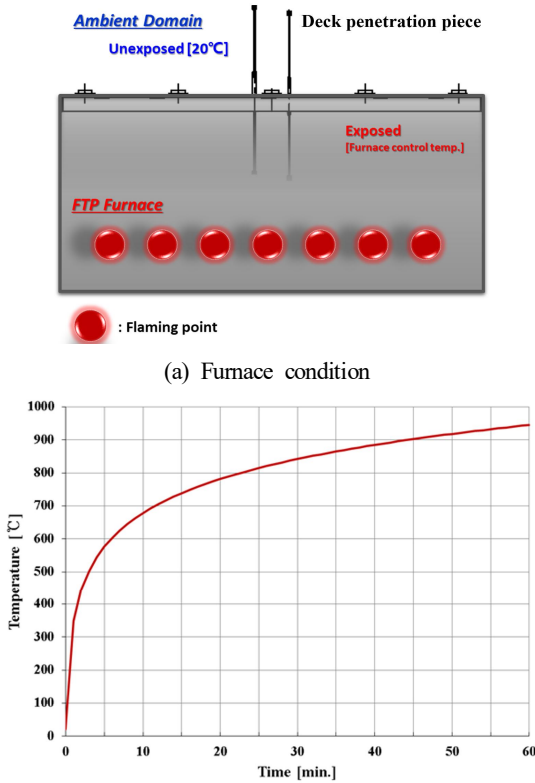


Fig. 8. Furnace flame condition.

온도측정은 화염노 외부면(Unexposed ambient domain)에서 A60 DPP의 몸체에서 최대온도를 측정하고, 온도가 180℃ 이하이면 FTP 코드의 규정을 만족한다.

FTP 코드에 규정된 화염노 가열조건은 폐쇄된 화염노 내부의 분위기 온도(Atmosphere temperature)를 높이는 방식이기 때문에 과도 열전달해석에서는 대류계수 h 의 산출식을 다음과 같이 적용하였다(Yunus and Afshin, 2012).

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

$$Nu = 0.27 R_{aL}^{1/4}$$

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

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

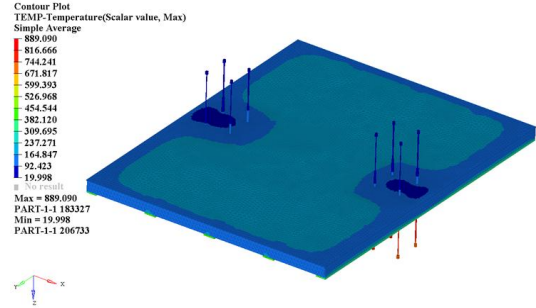


Fig. 9. Temperature distribution contour results.

화염노 외부면에서의 온도분포는 Fig. 9에 나타난 것처럼 20℃에서 195℃의 분포 결과를 나타내었고, A60 DPP가 장착된 부분의 온도분포가 높게 나타났다. 과도 열전달해석으로부터 60분의 가열시점에 화염노 외부면에서 A60 DPP 몸체의 측정된 온도결과는 Fig. 3과 Table 1의 번호 기준으로 1번에서 63.7℃, 2번에서 84.3℃, 3번에서 64.6℃, 그리고 4번에 88.1℃로 각각 측정되었으며, 모두 FTP 코드의 규정을 만족하였다.

3. 대리모델

근사최적화에 적용되는 대리모델은 주어진 설계공간에서 목적함수 및 제한조건의 응답특성을 최소 오차율로 예측하기 위해 생성되며 최적화해석 과정에 적용되어 수렴성과 수치계산 속도를 높이는 역할을 한다. 근사최적화에 적용될 대리모델의 생성을 위해 실험계획법이 사용되었으며, 유한요소모델과 과도 열전달해석 결과는 실험계획법과 연동하였다. 설계변수 및 변동수준은 A60 DPP의 몸체 길이와 튜브의 지름에 대해 3수준, A60 DPP의 재질은 2수준, 그리고 단열재 밀도는 3수준으로 설정하였으며, 상세내용은 Table 2에 정리하였다.

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)	∅6 ¹⁾	∅8	∅12
x_3 : Material type	S45C	SUS316L	-
x_4 : Insulation density(kg/m ³)	96	128	160

1) Diameter of body: ∅20

목적함수인 중량(f)은 시편을 제외한 A60 DPP 자체와 A60 DPP에 연결된 단열재의 무게를 고려하였다. 제한조건 중에서 온도(g_1)는 과도 열전달해석으로부터 측정된 결과를 적용하였으며, 생산성(g_2)은 A60 DPP의 길이, 지름 및 재질의 설계변수별로 가중 계수를 2.0, 1.0 및 0.5로 각각 적용하여 산출하였고, 가격(g_3)은 단위 중량 당 A60 DPP의 재질별 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.

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

Table 3의 A60 DPP에 대한 실험계획법 결과로부터 RSM, Kriging, 그리고 RBFN의 대리모델을 각각 생성하였고, 대리 모델별로 A60 DPP의 설계공간을 근사화할 수 있는 정확도를 검토하였다.

RSM은 최소자승방법 이용을 통한 이차다항식 형태의 회귀모델로 표현된다(Song and Lee, 2010).

$$g = A_0 + \sum_{i=1}^k A_i Z_i + \sum_{i=1}^k A_{ii} Z_i^2 + \sum_{i < j}^k A_{ij} Z_i Z_j + e \quad (3)$$

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

$$g = Z A_R + e \quad (4)$$

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

Kriging은 근사화할 실제 설계공간함수의 전역특성을 나타내는 전역모델과 실제 함수와 전역모델과의 편차에 해당하는 국부모델의 합으로 표현된다(Song and Lee, 2020).

$$\tilde{g}(x)_K = Z(x)^T A_K + E(x) \quad (5)$$

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

방사형 기저 함수 기반 신경망 모델인 RBFN은 산란된 다변량 데이터를 높은 정확도로 근사화하기 위해 개발되었다(Dyn, et al., 1986). RBFN은 응답함수를 근사화하기 위해 유클리드 거리를 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 모델이 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.

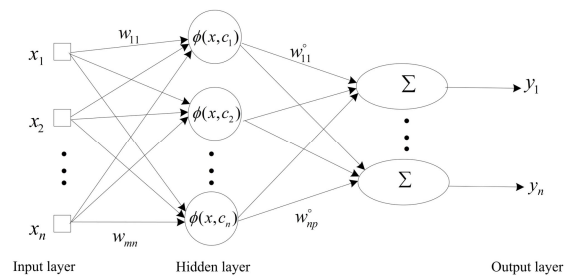


Fig. 10. Learning procedure of RBFN.

대리모델의 정확도는 식(9)와 같은 R^2 의 값으로 판별하였다.

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

여기서 t_i 는 실제 값, y_i 는 대리모델로부터 추정된 예측값, \bar{t}_i 는 실제 값의 평균치를 의미한다. R^2 의 값이 1.0인 경우 대리모델로부터 추정된 예측값이 전체 설계공간 상의 실제 값과 정확히 일치하는 것을 의미한다. 각각의 대리모델로부터 산출된 목적함수와 제한조건별 정확도 분석결과는 Table 4에 정리하여 나타내었다.

Table 4. Comparison of surrogate model accuracy

Surrogate models	R^2 value				
	f	g_1	g_2	g_3	Avg.
RSM	0.999	0.987	0.998	1.000	0.996
Kriging	0.978	0.947	0.955	0.976	0.964
RBFN	1.000	0.999	1.000	0.999	0.999

Table 4에 정리된 바와 같이 모든 대리모델의 목적함수와 제한조건에 대한 R^2 의 값이 평균 0.96 이상으로 매우 높은 정확도를 나타내었고, 근사최적화에 활용되어 수치계산의 효율성을 높일 수 있을 것으로 판단되었다. 대리모델 중 Kriging이 전반적으로 가장 낮은 정확도를 나타내었고, RSM과 RBFN의 R^2 평균 결과는 0.996과 0.999로 매우 높게 나타났다. 본 연구에서 적용한 전인자실험 방법 기반의 대리모델 중 RBFN이 가장 높은 정확도로 A60 DPP의 설계공간 탐색이 가능한 것으로 나타났다.

4. 이산설계 근사최적화

Table 2에 나타난 것처럼 이산설계 변수의 특성을 갖는 A60 DPP의 방화설계에 대해 중량감소 최적화를 위해 MIGA 방법을 이용한 대리모델 기반의 근사최적화를 수행하였다. 근사최적화를 위한 대리모델은 RSM, Kriging, 그리고 RBFN을 각각 적용하였다. 최적설계문제 정식화는 방화성능, 생산성 및 가격과 같은 다양한 제한조건을 모두 만족하면서 A60 DPP의 중량을 최소화할 수 있는 이산 설계변수를 결정하도록 구성하였다. 대리모델 특성에 따른 근사최적화 결과를

검토하고, 실제 제한조건의 계산 결과와 비교하여 A60 DPP의 최소 중량설계에 가장 적합한 근사최적화 방법을 고찰하였다. A60 DPP의 최적설계 정식화는 다음과 같다.

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

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(IEC, 2008)가 940℃에서 ±5임을 고려하여 FTP 코드의 규정 온도보다 10℃ 낮춘 170℃로 적용하였다. A60 DPP의 생산성과 가격 변동성의 영향도에 관한 기존 연구결과(Park et al., 2018)를 참조하여 생산성과 가격에 대한 비등가 제한조건의 하한치와 상한치는 실험계획법의 수준 변동에서 발생하는 최대값의 80% 수준을 각각 적용하였다. A60 DPP의 몸체 길이(x_1)와 지름(x_2)의 이산변수 변동범위는 실제 제작이 가능한 10mm와 $\varnothing 2$ 간격으로 설정하였다. A60 DPP의 재질(x_3)의 이산변수 변동범위는 방화장치에 사용 가능한 강재인 S45C와 SUS316L을 적용하였으며, 단열재의 밀도(x_4)는 방화장치용으로 실제 생산되고 있는 사양을 고려하였다.

이산설계변수의 최적해 탐색은 유전자 알고리즘과 같은 전역적 최적화 방법을 적용해야 하므로 본 연구에서는 MIGA 방법을 사용하였다. MIGA는 일반적인 유전자 알고리즘의 개체군을 섬(Island)이라고 불리는 부개체로 나누고, 선택(Selection), 교차(Crossover) 및 변이(Mutation)와 같은 진화과정이 각각의 섬에 대해서 수행되는 방법이다(Hu et al., 2014; Ma et al., 2018). 진화과정에서 섬에서 선택된 개체는 룰렛 선택(Roulette selection) 방법을 이용해 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 DPP의 이산설계변수 최적화에 적용된 MIGA의 수리적 탐색 파라미터는 Table 5에 정리하였다.

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

A60 DPP의 근사최적설계 정식화에 정의된 이산설계영역에서 RSM, Kriging, 그리고 RBFN의 대리모델을 각각 적용하여 근사최적해의 결과가 산출되었고, 실제 제한조건의 계산결과와 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 6. Comparison of approximate optimization

Content	Optimum	Objective	Approximate constraints	Actual constraints
RSM	$x_1=150\text{mm}$ $x_2=\varnothing 6$ $x_3=S45C$ $x_4=96\text{kg/m}^3$	0.64kg	$g_1=100.3^\circ\text{C}$ $g_2=12.6$ $g_3^1=4.3$	$g_1=99.9^\circ\text{C}$ $g_2=12.6$ $g_3=3.8$
Kriging	$x_1=150\text{mm}$ $x_2=\varnothing 6$ $x_3=S45C$ $x_4=96\text{kg/m}^3$	0.64kg	$g_1=100.6^\circ\text{C}$ $g_2=12.2$ $g_3=3.3$	$g_1=98.9^\circ\text{C}$ $g_2=12.0$ $g_3=3.9$
RBFN	$x_1=150\text{mm}$ $x_2=\varnothing 6$ $x_3=S45C$ $x_4=160\text{kg/m}^3$	0.67kg	$g_1=74.2^\circ\text{C}$ $g_2=12.6$ $g_3=3.8$	$g_1=74.2^\circ\text{C}$ $g_2=12.6$ $g_3=3.8$
Initial design	$x_1=200\text{mm}$ $x_2=\varnothing 8$ $x_3=S45C$ $x_4=128\text{kg/m}^3$	0.84kg	$g_1=84.3^\circ\text{C}$ $g_2=13.6$ $g_3=5.0$	-

1) Unit: $1000 \times \text{₩}$

Table 6에 나타난 것처럼, 모든 근사최적화 결과는 제한조건을 만족하면서 초기설계 대비 23% 이상의 중량감소 효과를 나타내었고, RBFN을 이용한 근사최적화 결과가 제한조건의 근사치와 실제 계산 결과가 정확히 일치하여 가장 높은 정확도를 보였다.

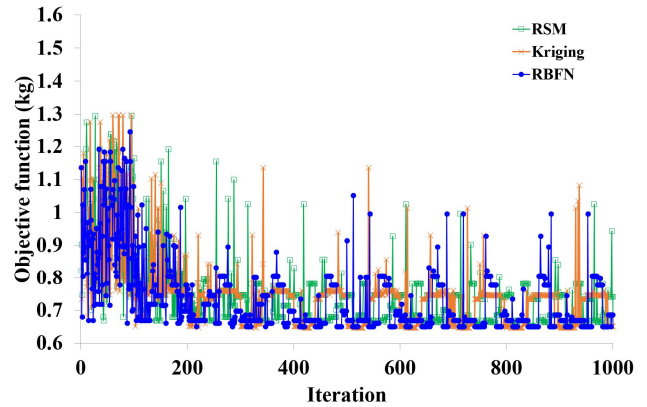


Fig. 11. Iteration history of objective function.

중량감소는 RSM과 Kriging을 적용한 경우 초기설계 대비 23.6%의 감소율을 나타내어 가장 높은 효과를 보였지만, 온도의 제한조건(g_1)과 가격 제한조건(g_3)의 정확도가 RBFN을 적용한 경우보다 낮게 나타났다. Table 6과 Fig. 11에 나타난 바와 같이 목적함수의 수렴결과나 특성은 모든 대리모델에서 유사한 경향성을 보였다. 최적설계해의 결과에서 RBFN을 적용한 경우 단열재의 밀도(x_4)가 다른 대리모델과 달리 좀 더 높은 사양으로 결정되었고, 나머지 설계변수에 대해서는 동일한 최적해로 결정되었다. 제한조건 결과에서 RSM을 적용한 경우 생산성(g_2)을 제외한 나머지 제한조건들은 상대적으로 낮은 정확도의 결과를 나타내었고, Kriging을 적용한 경우 모든 제한조건에서 상대적으로 정확도가 낮게 나타났다. 제한조건 결과의 정확도와 목적함수의 수렴결과로부터 A60 DPP의 이산설계변수에 대한 근사최적화에는 RBFN을 적용한 경우가 가장 효과적인 방법으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 이산설계 변수의 특성을 갖는 A60 DPP의 중량 최소설계를 위해 MIGA를 이용한 대리모델 기반의 근사최적화를 수행하였다. A60 DPP의 방화성능을 평가하기 위해 FTP 코드에 규정되어 있는 시편 사양과 온도조건을 적용하여 유한요소법 기반의 과도 열전달해석을 수행하였다. 과도 열전달해석으로부터 60분의 가열시점에 화염노외부면에서 A60 DPP 몸체의 측정된 온도결과는 FTP 코드의 규정인 180°C 이하의 조건을 만족하였다. 근사최적화에 사용될 대리모델을 생성하기 위해 실험계획법이 적용되었으며, 유한요소모델과 과도 열전달해석 결과는 실험계획법과 연동하였다. 설계변수는 A60 DPP의 길이, 지름 및 재질, 그리고 단열재 밀도를 설정하였고, 실제 생산이 가능한 이산화된 사양을 적용하였다. 목적함수는 중량을 적용하였고, 제한조건

은 FTP 코드에 규정된 방화성능 온도, 생산성, 그리고 가격을 각각 고려하였다. 실험계획법의 실험행렬은 설계변수의 변동 수준으로 발생할 수 있는 목적함수와 제한조건의 결과를 모두 고려하기 위해 총 54회의 전인자실험을 수행하였다. 실험계획법의 결과로부터 RSM, Kriging, 그리고 RBFN과 같은 다양한 대리모델을 생성하였다. 모든 대리모델의 목적함수와 제한조건에 대한 R^2 값이 평균 0.96 이상으로 매우 높은 정확도를 나타내었고, RBFN이 가장 높은 정확도로 A60 DPP의 설계공간 탐색이 가능한 것으로 나타났다. 근사최적화에서는 방화성능, 생산성 및 가격과 같은 다양한 제한조건을 만족하면서 A60 DPP의 중량을 최소화할 수 있는 이산설계변수의 근사 최적해를 탐색하였다. 본 연구에서 고려한 모든 대리모델 기반의 근사최적화 결과는 제한조건을 만족하면서 초기설계 대비 23% 이상의 중량감소 효과를 나타내었고, RBFN을 이용한 근사최적화 결과가 제한조건의 근사치와 실제 계산 결과를 비교했을 때 가장 높은 정확도를 나타내었다. 중량감소는 RSM과 Kriging을 적용한 경우에 높은 효과를 보였지만, 나머지 제한조건의 정확도가 RBFN을 적용한 경우보다 낮게 나타났다. 제한조건 결과의 정확도와 목적함수의 수렴결과로부터 A60 DPP의 이산설계변수에 대한 근사최적화에는 RBFN을 적용한 경우가 가장 효과적인 방법으로 나타났다. 저자들은 향후 신뢰성 기반 최적화 방법을 응용하여 방화설계와 방화시험 상의 불확실성을 고려할 수 있는 확률론적 설계기법에 대한 연구를 수행할 예정이다.

후 기

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

References

- [1] Choi, J. M., H. C. Um, and Y. H. Jin(2014), 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.
- [2] Choi, T. J., J. S. Kim, K. K. Choi, Y. S. Lim, and Y. T. Kim(2013), 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.
- [3] Dyn, N., D. Levin, and S. Rippa(1986), 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.
- [4] Grigonis, M., R. Maciulaitis, and D. Lipinskas(2011), Fire resistance tests of various fire protective coatings. *Materials Science*, Vol. 17, No. 1, pp. 93-98.
- [5] Hu, X., X. Chen, Y. Zhao, and W. Yao(2014), Optimization design of satellite separation system based on multi-island genetic algorithm, *Advanced Space Research*, Vol. 53, No. 1, pp. 870-876.
- [6] IEC(2008), International Electrotechnical Commission, IEC Statutes and Rules of Procedure - 751, UK.
- [7] IMO(2010), International Convention for the Safety of Life at Sea, SOLAS 1999/2000 Amendment, UK.
- [8] ISO(1999), Fire Resistance Tests - Elements of Building Construction, ISO 834-1, Switzerland.
- [9] Jang, C. J., N. S. Hur, and I. W. Kim(2014), 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.
- [10] Lautenberger, C., G. Rein, and C. Fernandez-Pello(2006), The application of a genetic algorithm to estimate material properties for fire modeling from bench-scale fire test data. *Fire Safety Journal*, Vol. 41, No. 3, 204-214.
- [11] Ma, F., L. Han, Y. Zhou, S. Chen, and Y. Pu(2018), Multi-island genetic algorithm and Kriging model-based design of vehicle product comprising multi-material, *IEEE Access*, Vol. 6, No. 1, pp. 53397-53408.
- [12] Magnabosco, I., P. Ferro, A. Tiziani, and F. Bonollo(2006), Induction heat treatment of a ISO C45 steel bar: experimental and numerical analysis. *Computational Materials Science*, Vol. 35, No. 2, pp. 98-106.
- [13] MSC(2010), Adoption of the International Code for Application of Fire Test Procedures - MSC.307(88), UK.
- [14] Ohmura, T., M. Tsuboi, and M. Onodera(2003), Specific heat measurement of high temperature thermal insulations by drop calorimeter method. *International Journal of Thermophysics*, Vol. 24, No. 2, pp. 559-575.
- [15] Park, W. C., C. Y. Song, and O. Na(2018), 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.

- [16] Piscopo, G., E. Atzeni, and A. Salmi(2019), 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.
- [17] Pyl, L., L. Schueremans, W. Dierckx, and I. Georgieva(2012), Fire safety analysis of a 3D frame structure based on a full-scale fire test. *Thin-walled Structures*, Vol. 61, No. 1, 204-212.
- [18] Simulia(2019), *Abaqus User Manual*, Simulia.
- [19] Song, C. Y. and Y. Kim(2020), 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.
- [20] Song, C. Y. and J. Lee(2010), 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.
- [21] Suman, S., P. Biswas, and P. Sridhar(2016), Numerical prediction of welding distortion in submerged arc welded butt and fillet joints. *International conference on Design and Manufacturing*, IITDM, Kanchipuram.
- [22] Yu, J. S., H. G. Sung, and J. H. Oh(2000), An experimental study on fire-resistant boom. *Journal of the Korean Society of Marine Environmental Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 25-32.
- [23] Yunus, A. C. and J. G. Afshin(2012), *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*, McGraw-Hill.

Received : 2021. 02. 18.

Revised : 2021. 03. 16.

Accepted : 2021. 04. 27.