

A Desirability Function-Based Multi-Characteristic Robust Design Optimization Technique

Jong Pil Park · Jae Hun Jo · Yoon Eui Nahm[†]

Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University

호감도 함수 기반 다특성 강건설계 최적화 기법

박종필 · 조재훈 · 남윤의[†]

국립 한밭대학교 기계공학과

Taguchi method is one of the most popular approaches for design optimization such that performance characteristics become robust to uncontrollable noise variables. However, most previous Taguchi method applications have addressed a single-characteristic problem. Problems with multiple characteristics are more common in practice. The multi-criteria decision making(MCDM) problem is to select the optimal one among multiple alternatives by integrating a number of criteria that may conflict with each other. Representative MCDM methods include TOPSIS(Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution), GRA(Grey Relational Analysis), PCA(Principal Component Analysis), fuzzy logic system, and so on. Therefore, numerous approaches have been conducted to deal with the multi-characteristic design problem by combining original Taguchi method and MCDM methods. In the MCDM problem, multiple criteria generally have different measurement units, which means that there may be a large difference in the physical value of the criteria and ultimately makes it difficult to integrate the measurements for the criteria. Therefore, the normalization technique is usually utilized to convert different units of criteria into one identical unit. There are four normalization techniques commonly used in MCDM problems, including vector normalization, linear scale transformation(max-min, max, or sum). However, the normalization techniques have several shortcomings and do not adequately incorporate the practical matters. For example, if certain alternative has maximum value of data for certain criterion, this alternative is considered as the solution in original process. However, if the maximum value of data does not satisfy the required degree of fulfillment of designer or customer, the alternative may not be considered as the solution. To solve this problem, this paper employs the desirability function that has been proposed in our previous research. The desirability function uses upper limit and lower limit in normalization process. The threshold points for establishing upper or lower limits let us know what degree of fulfillment of designer or customer is. This paper proposes a new design optimization technique for multi-characteristic design problem by integrating the Taguchi method and our desirability functions. Finally, the proposed technique is able to obtain the optimal solution that is robust to multi-characteristic performances.

Keywords : Robust Design, Optimal Design, Taguchi Method, Multi-Criteria Decision Making(MCDM), Desirability Function

Received 4 November 2023; Finally Revised 23 November 2023;

Accepted 23 November 2023

[†] Corresponding Author : nahm@hanbat.ac.kr

1. 서론

다구찌 법(Taguchi Method)은 직교배열표(Orthogonal Array, OA)를 사용하여 설계안을 생성한 후 외부 환경 변화에도 성능 특성의 변동이 적은 설계변수(Design Variable)의 최적값을 찾아내는 방법으로 다양한 분야에서 널리 적용되어 왔다[12, 27]. 다구찌 법의 장점으로는 통계적 방법인 실험계획법(Design of Experiment, DOE)을 공학적 관점에서 적용하여 실험의 횟수를 획기적으로 단축하여 적은 시간과 비용을 들여 최적값을 찾을 수 있다는 것을 들 수 있다. 또한, 다구찌 법은 성능을 평가하는 척도로써 S/N비(Signal to Noise Ratio)를 도입하여 특성의 평균값과 사용 조건에 따라 달라지는 특성의 분산에 대한 정보를 동시에 반영하여 외부 잡음(Noise)에 대해서 강건한 설계(Roust Design)를 할 수 있게 해준다. 이러한 다구찌 법은 공학 설계를 포함하는 다양한 분야[7, 8, 28]에서 적용되어 왔으나, 일반적으로 단일특성(Single-Characteristic)에 대한 최적 해를 결정하는 방법을 제시한다. 하지만, 제품이나 공정 설계는 보통 서로 충돌하는 다특성(Multi-Characteristic) 성능들에 대해서 최적의 해를 찾는 다특성 문제에 해당한다. 따라서 다특성 문제의 강건설계 최적화(Robust Design Optimization)를 위한 다구찌 법의 필요성이 요구되어 왔다.

이와 같은 다특성 의사 결정(Multi-Characteristic Decision Making, MCDM) 문제에 대한 연구는 오래전부터 중요하게 인식되어 왔고 관련 연구들 또한 다양하게 진행되어 왔다. 대표적인 MCDM 방법들 중에는 Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution(TOPSIS)[15], Grey Relational Analysis(GRA)[13], Principal Component Analysis(PCA)[1] 등이 있다. 따라서, 이러한 방법들을 다구찌 법과 통합함으로써 다특성 강건설계 최적화를 위한 다양한 시도가 이루어져 왔다. 예를 들면, 다구찌 법과 TOPSIS를 통합한 연구[19, 21], GRA를 통합한 연구[20, 26], PCA를 통합한 연구[6, 22] 등이 있으며, 다구찌 법, GRA, PCA의 3가지 기법을 통합한 연구[11, 25] 등도 주목할 만하다.

다만, MCDM 문제들에서는 보통 성능 특성들이 다른 측정단위를 가지기 때문에 이를 동일한 단위로 변환하기 위해서 일반적으로 성능 특성치들에 대한 정규화 기법이 적용된다. Vector Normalization, Linear Scale Transformation(Max-Min, Max, Sum) 등 다양한 정규화 기법들이 제시되어 왔으나, 이러한 정규화 기법들은 모두 고객이나 설계자의 만족도를 반영하지 못한다. 예를 들어, 어떤 설계안이 특정 기준에서 최대값을 가진다면, 기존의 정규화 프로세스에서는 그 설계안이 설계해로 간주된다. 하지만, 그 설계안의 측정된 최대값이 고객이나 설계자의 요구되는 만족도를

충족시키지 못한다면, 실제로 그 설계안은 설계해로서 받아들여지지 않을 것이다[2, 3, 16]. 따라서, 위에서 언급한 다구찌 법과 MCDM 방법들을 통합하는 연구들은 다특성 결과값에 대한 종합 점수를 비교하여 최종 설계안을 결정할 뿐 설계자를 포함하는 의사결정자(Decision Maker)의 설계안에 대한 선호도나 만족도 정보를 반영하지는 못한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 설계안에 대한 선호도나 만족도의 정보를 호감도 함수(Desirability Function)[5]로 나타내고 다구찌 법과 통합하기 위한 연구들[14, 23]이 제시되어 왔으나, 이 또한 각각의 성능 특성들에 따라 달라지는 호감도 함수를 정의하기 위한 구체적이고 체계적인 방법을 제시하지는 못한다.

저자는 이전 연구[18]에서 벤치마킹 분석(Benchmarking Analysis)과 카노 분석(Kano Analysis)을 기반으로 하여 호감도 함수를 정의하기 위한 새로운 방법을 제시하였다. 벤치마킹 분석[4, 24]은 경쟁사와 자사 제품을 비교하여 기술 필요조건을 중요도를 결정하여 고객 만족도를 높이는 방법이고, 카노 모델(Kano Model)[10]은 제품의 성능 특성을 매력적(Attractive), 당연적(Must-be), 일원적(One-dimensional), 무관심(Indifferent) 품질속성(Quality Attribute, QA) 등으로 분류하고 각 품질속성들에 따라 고객 요구사항이 충족되었을 때의 만족도를 각각 다르게 나타내는 것이다. 따라서, 기존의 호감도에서는 설계자의 주관적 판단에 따라 임의로 설정되었던 임계점(Threshold Point)들을 벤치마킹 분석을 통해 객관적으로 설정하도록 하였고, 임계점들 사이에는 카노 분석에 따라 속성별로 다른 함수관계를 설정하도록 하여 다른 만족도가 평가되도록 하였다.

본 연구에서는 저자가 제안한 호감도 함수의 개념과 다구찌 법을 통합함으로써 다특성 강건설계 최적화를 수행하기 위한 새로운 설계 기법을 제안한다. 이를 위해 먼저 다구찌 법에서의 망대(Larger-The-Better, LTB), 망소(Smaller-The-Better, STB), 망목(Nominal-The-Best, NTB) 특성에 따라 만족도를 측정할 수 있도록, 기존의 호감도 함수를 포함하여 12가지의 호감도 함수를 새롭게 정의한다. 다음으로 강건 최적 설계해(Robust Optimal Design Solution)를 도출하기 위해, 성능특성별로 설정된 호감도 함수에 대한 설계안들의 만족도를 측정하고 만족도에 대한 S/N비를 산출하여 S/N비를 최대화하는 다구찌 법의 설계 최적화 프로세스를 제시한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 제2장에서는 본 연구에서 제안되는 호감도 함수 기반 다특성 강건설계 최적화 기법의 전체 프로세스를 제시한다. 제3장에서는 제안되는 설계 기법을 자동차 사이드 도어의 다특성 설계 최적화 문제에 적용함으로써 제안 기법의 유효성을 검증하고, 마지막으로 제4장에서는 결론을 제시한다.

2. 호감도 함수 기반 다특성 강건설계 최적화 기법

<Figure 1>은 본 연구에서 제안되는 다특성 강건설계 최적화 기법의 전체 프로세스를 나타낸다. 제안 기법은 크게 Desirability Function Design(DFD) 프로세스와 Taguchi Parameter Design(TPD) 프로세스로 구성된다. DFD 프로세스에서는 각각의 성능특성들에 대해 임계점(Threshold Points)을 설정하고 임계점 사이에서의 함수 유형을 결정함으로써 호감도 함수를 정의한다. 다음으로, TPD 프로세스에서는 S/N비가 최대화되도록 설계 변수의 수준을 선정하고, 직교배열표를 통해 설계안을 작성하며, 호감도 함수를 이용하여 산출된 만족도에 대한 S/N비를 계산하는 일련의 과정을 반복함으로써 강건 최적 설계해(Robust Optimal Design Solution)를 도출한다.

2.1 Desirability Function Design Process

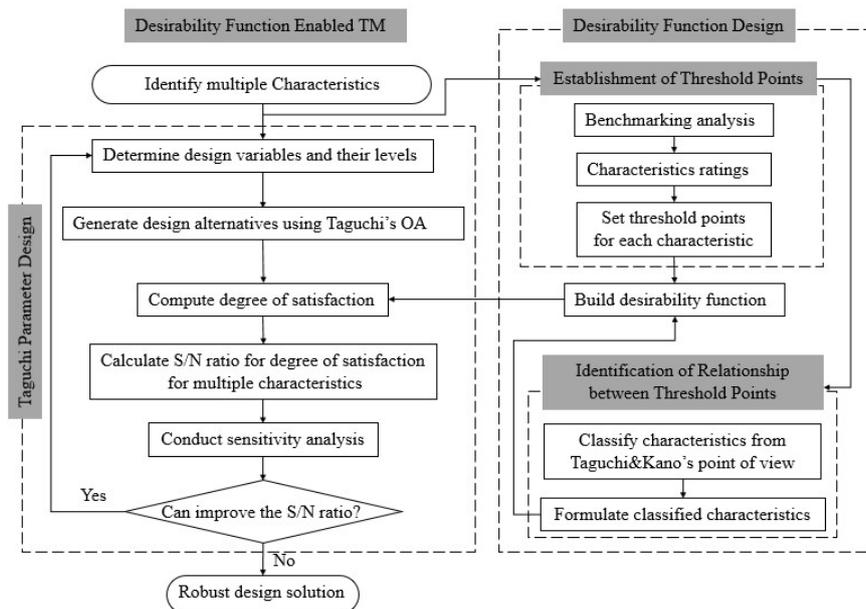
<Table 1>은 m 개의 성능특성 PC_m 에 대해서 n 개 경쟁사 제품 CP_n 에 대한 특성치 $y_{ij}(i=1, \dots, m, j=1, \dots, n)$ 를 나타낸다. <Table 1>의 벤치마킹 데이터는 <Figure 2>에 나타난 호감도 함수의 임계점을 설정하는데 사용된다. 특성치 y_{ij} 는 성능특성 PC_m 의 종류에 따라 달라진다. 예를 들어, y_{1j} 가 질량이면 단위는 $[kg]$ 이 되고 y_{2j} 가 응력이면 $[MPa]$ 이 된다. 임계점에는 상한(Upper Limit)과 하한(Lower Limit)이 있는데 임계점은 성능특성의 종류에 따라 단위가 달라진다. 식 (1)과 (2)는 각각 성능특성에 대한 상

한 \tilde{y}_{Uj} 과 하한 \tilde{y}_{Lj} 을 나타낸다. 상한은 경쟁사 제품 중 가장 큰 특성치로 설정하고, 하한은 경쟁사 제품 중에 가장 작은 특성치로 설정한다. 성능특성에 대한 설계자의 만족도는 특성치가 크면 클수록 높아질 수도 있고, 작으면 작을수록 높아질 수도 있으며, 특정값에 가까울수록 높아질 수도 있다. 따라서 다구찌 법의 관점으로부터 성능특성을 망대, 망소, 망목으로 분류한다. 따라서, 만약 성능이 망대 특성인 경우에는 특성치가 하한 이하의 값을 갖는 경우에는 만족도가 0이 되고, 상한 이상의 특성치를 갖는 경우에는 만족도가 1이 된다. 반대로 망소 특성인 경우에는 특성치가 하한 이하의 값을 갖게 되면 만족도가 1이 되고 상한 이상의 값을 갖게 되면 만족도가 0이 된다.

$$\tilde{y}_{Uj} = \max_{j=1, \dots, n} y_{ij} \quad (1)$$

$$\tilde{y}_{Lj} = \min_{j=1, \dots, n} y_{ij} \quad (2)$$

다음으로, 제품의 성능특성의 유형을 세부적으로 분류하고 분류된 유형별로 임계점 사이에서 서로 다른 함수관계를 규정한다. 카노 모델에서는 성능 특성이 같은 값을 가지더라도 그 종류에 따라 만족도가 달라질 수 있다는 것을 제시하고, 품질속성을 4가지 유형(A: Attractive, O: One-dimensional, M: Must-be, I: Indifferent) 등으로 분류하였는데, 이러한 관점으로부터 본 연구에서는 성능특성을 4가지 유형 (Type 1, Type 2, Type 3, Type 4)로 분류하여 임계점 사이에서 성능특성의 유형에 따라 같은 특성치를 갖더라도 서로 다른 만족도가 나타나도록 함수를 정의한다.



<Figure 1> The Proposed Desirability Function-Based Taguchi Method for Multicharacteristic Robust Design Optimization

<Table 1> Competitive Benchmarking Analysis Data of Performance Characteristics[18]

	PC_1	PC_2	...	PC_m
CP_1	y_{11}	y_{21}	...	y_{m1}
CP_2	y_{12}	y_{22}	...	y_{m2}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
CP_n	y_{1n}	y_{2n}	...	y_{mn}

<Figure 2>에 나타낸 바와 같이, 망대, 망소, 망목의 성능특성별로 4가지 유형의 호감도 함수가 정의된다. 예를 들어, 어떤 성능의 특성치가 하한과 상한 사이의 값을 나타낸다고 하면, 만족도는 Type 1 > Type 2 > Type 3 > Type 4의 순으로 높아지게 되고, 이것은 TPD 프로세스에서 더 높은 만족도를 갖는 설계안이 더 큰 S/N비가 산출되어 더 좋은 설계안으로 평가된다.

2.2 Taguchi Parameter Design Process

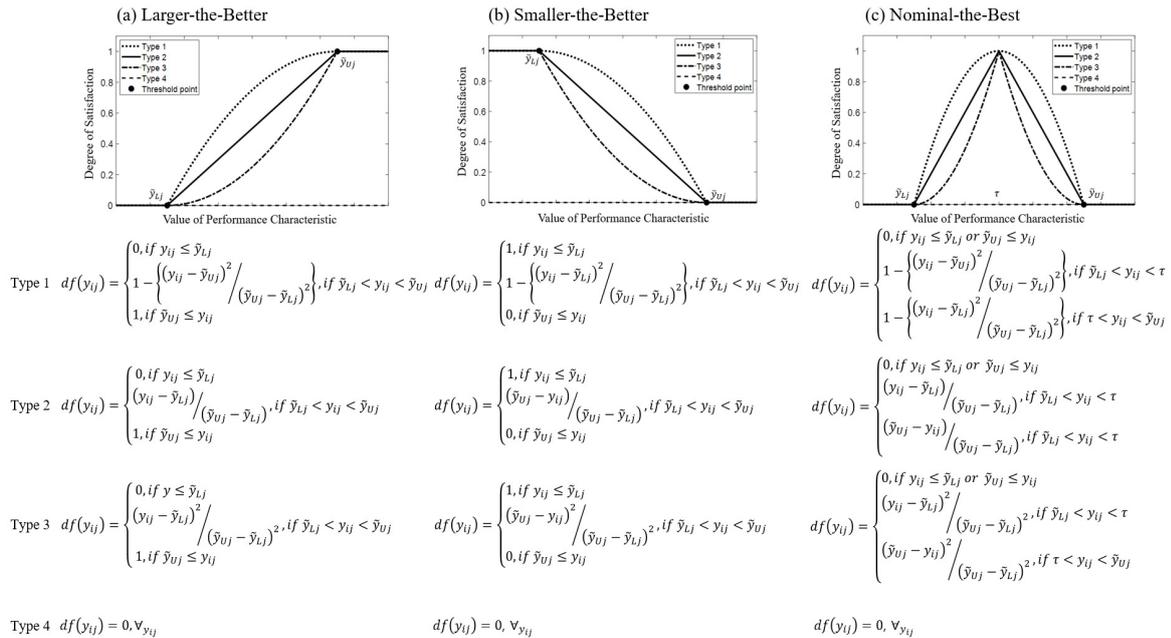
각 성능특성에 대한 호감도 함수가 정의되면, 다구찌의 파라미터 설계(Taguchi Parameter Design)를 수행함으로써 최적해를 도출한다. <Figure 1>에 나타낸 바와 같이, 먼저 성능특성들에 영향을 미치는 제어인자(Control Factor)로서 설계변수(Design Variable)를 선정하고 탐색하고자 하는 설계변수의 수준(Level)을 설정한다. 다음으로 직교배열표(OA)를 이용하여 설정된 설계변수의 수준을 조합함으로써

설계안(Design Alternatives)을 생성한다. 이러한 설계안에 대해 성능특성별로 특성치를 측정하고 호감도 함수(Desirability Function)를 이용하여 특성치에 대한 만족도(Degree of Satisfaction)를 계산한 후, 모든 성능특성들에 대한 만족도를 이용하여 S/N비를 계산한다. 설계자는 설계안들의 S/N비를 비교함으로써 설계안을 평가할 수 있다.

다구찌 법에서는 망소, 망대, 망목특성에 따라 다른 S/N비 계산식을 이용한다. 본 연구에서는 성능특성별로 정의된 호감도 함수에 대해 만족도를 측정하고, 이러한 만족도는 크면 클수록 좋기 때문에 망대특성의 S/N비 계산식을 이용할 수 있다[12]. 하지만 호감도 함수에 대한 출력 $df(y_{ij})$ 는 0과 1 사이의 값을 갖고 $df(y_{ij})=0$ 인 경우에는 $1/df(y_{ij})=\infty$ 가 되므로 기존의 망대특성의 S/N비 계산식을 사용할 수가 없다. 따라서 여기서는 저자가 이전 연구 [9]에서 제안한 식 (3)의 망대특성에 대한 수정된 S/N비 식을 사용하여 만족도에 대한 S/N비를 계산한다.

$$S/N = -10 \log \frac{1}{n} \left[\left(\frac{1}{df_1} \right)^2 + \left(\frac{1}{df_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{1}{df_n} \right)^2 \right] \quad (3)$$

마지막으로 설계변수의 S/N비에 대한 민감도 분석(Sensitivity Analysis)을 통해 S/N비를 더 향상시킬 수 있는 설계변수와 수준을 검토한다. 이와 같이, S/N비가 최대화 되도록 상기 프로세스를 반복함으로써 설계 최적화를 수행한다. 따라서, 본 연구에서 제안되는 설계 기법의 TPD 프로세스를 통해 얻어지는 최종 설계해는 모든 성능특성

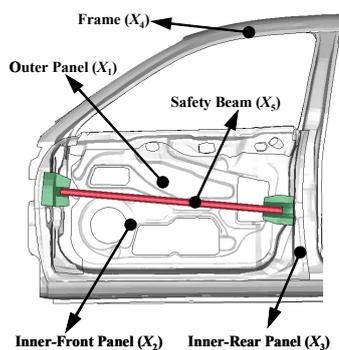


<Figure 2> Desirability Functions for Performance Characteristics: (a) Larger-The-Better (b) Smaller-the-Better (c) Nominal-The-best

들에 대한 전체 만족도가 높은 다특성 최적 설계해 (Multi-Characteristic Optimal Design Solution)이면서 동시에 성능특성들 사이의 만족도의 차이가 작은 강건 설계해 (Robust Design Solution)라는 것을 알 수 있다.

3. 사례 연구

본 연구에서 제안하는 설계 기법의 유효성을 검증하기 위해, 저자가 이전 연구[17]에서 제시한 환경문제를 고려한 자동차 사이드 도어 구조의 치수 최적화 문제를 검토한다. <Figure 3>에 나타낸 바와 같이, 도어 어셈블리 중에 도어 구조의 특성에 영향이 크다고 생각되는 5개 부품의 두께를 설계변수($X_1 \sim X_5$)로 선정하고, 설계변수의 수준은 참고문헌[17]에서 얻어진 설계해의 범위로부터 설정한다. 도어 구조에 요구되는 성능 특성으로는 덴트 저항성 (dent-resistance)(Y_1), 인장 강성(Y_2), 비틀림 강성(Y_3), 충돌 시 에너지 흡수량(Y_4), 코스트(Y_5), 질량(Y_6), 에너지 소비량(Y_7), CO2 배출량(Y_8)을 고려한다. 설계변수의 값에 따른 각 성능 특성치 계산을 위해서 참고문헌[17]에 제시된 응답곡면 모델(Response Surface Model)에 의한 근사식을 사용한다. 그리고 기술 관련 성능특성과 경제·환경 관련 성능특성의 중요도를 다르게 설정할 때의 설계변수의 최적값의 변화를 알아보기 위해 기술적 성능과 경제·환경적 성능을 동등하게 중요시한 경우(Case 1), 기술적 성능을 보다 중시한 경우(Case 2), 경제·환경적 성능을 보다 중시한 경우(Case 3)에 대해서 각각 설계변수의 최적값을 도출한다.



<Figure 3> Automotive Side Door Structure Design for Case Study[17]

3.1 Desirability Function Design Process

먼저, 요구되는 8개의 성능 특성들($Y_1 \sim Y_8$)에 대해 호감도 함수를 정의한다. 2.1절에서 언급한 바와 같이, 호감

도 함수를 정의하기 위해서는 성능 특성들을 유형별로 분류하고 임계점을 설정해야 한다. 먼저, 다구찌 법의 관점으로부터 성능 특성을 망대(LTB), 망소(STB), 망목(NTB) 중 하나의 유형(Taguchi Category)으로 분류한 후, 벤치마킹 분석을 통해 하한과 상한의 임계점을 설정한다. 본 연구에서는 참고문헌[17]의 8개의 성능 특성들에 대한 요구 선호도수(Performance Quantified Preference Number)로부터 <Table 2>와 같이 하한과 상한을 설정하였다. 예를 들어, 덴트 저항성 Y_1 은 망소 특성이므로 0.40[mm] 이상인 경우에는 요구 성능을 전혀 만족시키지 못한다는 것을 의미하고 0.21[mm] 이하를 나타내면 요구 성능을 100% 만족시킨다는 것을 의미한다.

<Table 2> Threshold Points for Desirability Functions of Required Performance Characteristics[17]

Performance Characteristics	Lower Limit(\tilde{y}_{Lj})	Upper Limit(\tilde{y}_{Uj})	Unit
Y_1	0.21	0.40	mm
Y_2	0.59	1.11	mm
Y_3	10.00	18.74	mm
Y_4	1,677	2,400	mm
Y_5	4,703	8,818	¥
Y_6	16	30	kg
Y_7	3,445	6,459	MJ
Y_8	234.4	439.5	kg

다음으로 카노 모델의 관점으로부터 동일한 성능 특성치에 대해서도 다른 만족도를 나타낼 수 있기 때문에 하한 임계점과 상한 임계점 사이의 특성치에 대해서 서로 다른 함수관계를 설정할 수 있도록 유형(Kano Category)을 정의한다. 예를 들어, <Figure 2>에 나타낸 바와 같이 임의의 성능 특성치(y_{ij})가 하한 임계점(\tilde{y}_{Lj})과 상한 임계점(\tilde{y}_{Uj}) 사이에 있을 경우, 그 특성치의 만족도는 Type 1 > Type 2 > Type 3 > Type 4의 순으로 산출된다. 본 연구에서는 <Table 3>에 나타낸 바와 같이 성능 특성 $Y_1 \sim Y_8$ 의 유형을 다르게 정의할 때의 결과에 미치는 영향을 살펴보기 위해 기술적 성능, 경제적 성능 및 환경적 성능의 중요도를 다르게 하는 다음의 3가지 케이스를 검토한다.

- Case 1은 기술적, 경제·환경적 성능 특성 모두를 동등하게 중요시한 경우로 기술적 특성에 해당하는 $Y_1 \sim Y_4$, 경제적 특성에 해당하는 $Y_5 \sim Y_6$, 환경적 특성에 해당하는 $Y_7 \sim Y_8$ 를 모두 동일하게 Type 2로 정의한다.
- Case 2는 기술적 성능 특성을 중요시한 경우로 기술적 특성에 해당하는 $Y_1 \sim Y_4$ 를 Type 1로 정의하고 경제·환경적 특성에 해당하는 $Y_5 \sim Y_8$ 를 Type 3으로

정의한다.

- Case 3은 경제·환경적 성능 특성을 중요시한 경우로 기술적 특성에 해당하는 $Y_1 \sim Y_4$ 를 Type 3으로 정의하고 경제·환경적 특성에 해당하는 $Y_5 \sim Y_8$ 을 Type 1로 정의한다.

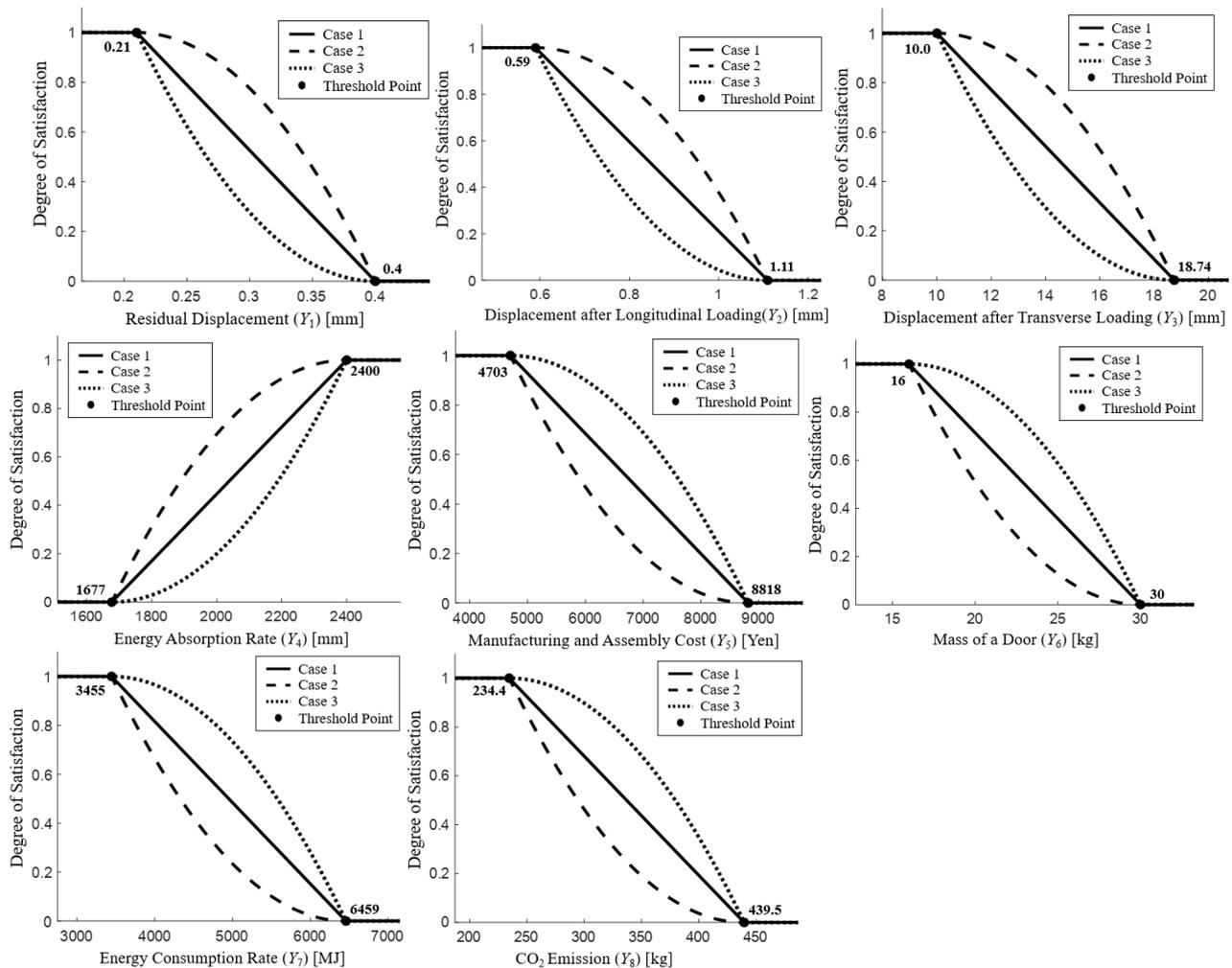
<Table 3> Classification of Performance Characteristics from Viewpoints of Taguchi Method and Kano Model

	Taguchi Category	Kano Category		
		Case 1	Case 2	Case 3
Y_1	STB	Type 2	Type 1	Type 3
Y_2	STB	Type 2	Type 1	Type 3
Y_3	STB	Type 2	Type 1	Type 3
Y_4	LTB	Type 2	Type 1	Type 3
Y_5	STB	Type 2	Type 3	Type 1
Y_6	STB	Type 2	Type 3	Type 1
Y_7	STB	Type 2	Type 3	Type 1
Y_8	STB	Type 2	Type 3	Type 1

이와 같이 8개의 성능 특성들에 대해 정의된 호감도 함수는 <Figure 4>와 같다.

3.2 Taguchi Parameter Design Process

성능 특성들에 대해 호감도 함수가 정의되면 다구찌법의 파라미터 설계 프로세스를 수행함으로써 강건 최적 설계해(Robust Optimal Design Solution)를 도출한다. 먼저, 제어인자(Control Factor)로서 <Table 4>와 같이 자동차 사이드 도어 구조의 성능 특성에 큰 영향을 미치는 5개 부품의 두께를 설계변수($X_1 \sim X_5$)로서 선정하였다. 또한, 설계변수의 수준은 참고문헌[17]에서 최종적으로 얻어진 설계해 집합을 토대로 3수준으로 설정하였다. 다음으로 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 직교배열표를 사용하여 <Table 5>와 같이 설계변수들의 수준을 조합함으로써 18개의 설계안을 생성하였다.



<Figure 4> Desirability Functions for Performance Characteristics of Case 1, Case 2 and Case 3

<Table 4> Levels of Design Parameters

Design Parameter	Level		
	1	2	3
Thickness of Outer Panel(X_1)[mm]	1.1	1.15	1.2
Thickness of Inner-Front Panel(X_2)[mm]	1.75	2.13	2.5
Thickness of Inner-Rear Panel(X_3)[mm]	0.6	0.85	1.1
Thickness of Frame(X_4)[mm]	1.8	2.4	3.0
Thickness of Safety Beam(X_5)[mm]	3.05	3.2	3.35

이렇게 생성된 설계안들의 성능 특성을 측정하기 위해 본 연구에서는 참고문헌[17]에서 제시한 설계변수의 성능 특성에 대한 근사식을 이용하여 18개의 설계안의 성능 특성을 계산하였다. 종래의 다구찌 법에서는 이러한 성능 특성을 이용하여 S/N비를 계산함으로써 설계안을 평가하지만, 본 연구에서 제안되는 기법에서는 이러한 성능 특성에 대한 만족도를 계산한 후 이러한 만족도를 이용하여 S/N비를 계산함으로써 설계 평가가 이루어진다. 예를 들어, <Table 6>은 Case 1의 성능 특성치에 대한 만족도와 이 만족도를

<Table 5> Design Alternatives using Orthogonal Array $L_{18}(2^1 \times 3^7)$

NO.	Thickness of Outer Panel(X_1)		Thickness of Inner-Front Panel(X_2)		Thickness of Inner-Rear Panel(X_3)		Thickness of Frame(X_4)		Thickness of Safety Beam(X_5)	
	Level	mm	Level	mm	Level	mm	Level	mm	Level	mm
1	1	1.10	1	1.75	1	0.60	1	1.80	1	3.05
2	2	1.15	2	2.13	2	0.85	2	2.40	2	3.20
3	3	1.20	3	2.50	3	1.10	3	3.00	3	3.35
4	1	1.10	1	1.75	2	0.85	2	2.40	3	3.35
5	2	1.15	2	2.13	3	1.10	3	3.00	1	3.05
6	3	1.20	3	2.50	1	0.60	1	1.80	2	3.20
7	1	1.10	2	2.13	1	0.60	3	3.00	2	3.20
8	2	1.15	3	2.50	2	0.85	1	1.80	3	3.35
9	3	1.20	1	1.75	3	1.10	2	2.40	1	3.05
10	1	1.10	3	2.50	3	1.10	2	2.40	2	3.20
11	2	1.15	1	1.75	1	0.60	3	3.00	3	3.35
12	3	1.20	2	2.13	2	0.85	1	1.80	1	3.05
13	1	1.10	2	2.13	3	1.10	1	1.80	3	3.35
14	2	1.15	3	2.50	1	0.60	2	2.40	1	3.05
15	3	1.20	1	1.75	2	0.85	3	3.00	2	3.20
16	1	1.10	3	2.50	2	0.85	3	3.00	1	3.05
17	2	1.15	1	1.75	3	1.10	1	1.80	2	3.20
18	3	1.20	2	2.13	1	0.60	2	2.40	3	3.35

<Table 6> S/N ratio for Degree of Satisfaction of Case 1

No.	Y_1 [mm]	Y_2 [mm]	Y_3 [mm]	Y_4 [mm]	Y_5 [¥]	Y_6 [kg]	Y_7 [MJ]	Y_8 [kg]	S/N Ratio(dB)
1	1.00	0.23	0.001	0.07	0.77	0.75	0.74	0.74	3.541
2	1.00	0.96	0.58	0.40	0.63	0.49	0.49	0.49	5.124
3	1.00	1.00	1.00	0.72	0.49	0.25	0.25	0.25	4.479
4	1.00	0.36	0.51	0.37	0.66	0.56	0.56	0.56	4.695
5	1.00	1.00	1.00	0.52	0.53	0.33	0.33	0.33	4.787
6	1.00	1.00	0.21	0.29	0.70	0.59	0.59	0.59	4.780
7	1.00	0.40	0.37	0.14	0.63	0.54	0.54	0.54	4.113
8	1.00	0.98	0.55	0.52	0.65	0.50	0.50	0.51	5.370
9	1.00	1.00	0.80	0.52	0.60	0.43	0.43	0.43	5.220
10	1.00	0.46	0.98	0.62	0.57	0.36	0.36	0.36	4.654
11	1.00	0.96	0.32	0.18	0.64	0.57	0.57	0.57	4.640
12	1.00	1.00	0.43	0.39	0.68	0.54	0.54	0.54	5.179
13	1.00	0.38	0.79	0.65	0.64	0.48	0.48	0.48	5.024
14	1.00	0.95	0.31	0.19	0.66	0.54	0.54	0.54	4.576
15	1.00	1.00	0.63	0.36	0.59	0.45	0.45	0.45	4.935
16	1.00	0.45	0.76	0.34	0.57	0.40	0.40	0.40	4.351
17	1.00	0.89	0.68	0.57	0.66	0.51	0.51	0.51	5.558
18	1.00	1.00	0.28	0.28	0.66	0.56	0.56	0.56	4.800

이용하여 식 (3)에 의해 계산된 S/N비를 나타낸다.

Case 1의 경우에는 17번 설계안이 가장 큰 S/N비(5.558)를 갖기 때문에 18개의 설계안 중에서 17번 설계안이 모든 성능 특성에 대해서 만족도의 편차가 작으면서도 가장 높은 만족도를 나타내는 설계안이라는 것을 알 수 있다. 다만, 직교배열표를 이용하여 생성된 18개의 설계안은 <Table 4>의 설계변수 수준들의 완전요인 배치법(Full Factorial Design)에 의한 모든 설계안들($3^5=243$ 개) 중의 일부에 해당하므로 17번 설계안이 234개의 설계안 중에 가장 만족도가 높은 설계 안이라고 단정 지을 수 없다. 이를 해결하기 위해 다구찌 법에서는 설계변수들의 S/N비에 대한 수준평균 분석(Level Average Analysis)을 통해 민감도 해석(Sensitivity Analysis)을 수행한다.

<Table 7>과 <Figure 5>는 Case 1, Case 2, Case 3의 설계변수들의 S/N비에 대한 수준평균 분석을 통한 민감도 해석 결과를 나타낸다. Case 1의 경우에 설계 변수 X_1 은 2수준(1.15[mm]), X_2 는 2수준(2.13[mm]), X_3 는 3수준(1.1[mm]), X_4 는 1수준(1.8[mm]), X_5 는 2수준(3.2[mm])일 때 S/N비가 가장 크다는 것을 알 수 있다. 각각의 Case에 대해 가장 큰 S/N비를 나타내는 설계변수의 수준을 정리하면 다음과 같다.

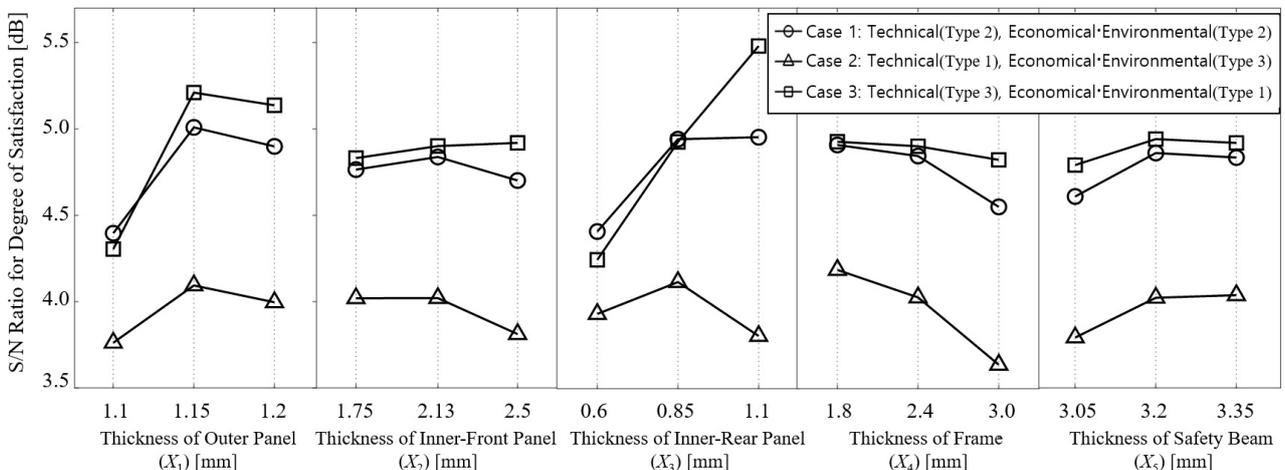
- Case 1 : $X_1(2), X_2(2), X_3(3), X_4(1), X_5(2)$

- Case 2 : $X_1(2), X_2(2), X_3(2), X_4(1), X_5(3)$
- Case 3 : $X_1(2), X_2(3), X_3(3), X_4(1), X_5(2)$

설계 변수 X_1 과 X_4 는 모든 Case에 있어서 각각 2수준과 1수준의 값이 최적해라는 것을 알 수 있다. 반면 X_2, X_3 및 X_5 는 기술적 성능을 중시한 Case 2와 경제·환경적 성능을 중시한 Case 3의 최적해가 서로 다르다는 것을 확인할 수 있다. 경제·환경적 성능을 중시한 Case 3에서 X_2 는 3수준에서 더 큰 S/N비를 나타내고 있어 경제·환경적 성능을 중시한 경우에는 X_2 의 값을 증가시키는 것이 유리하다는 것을 알 수 있다. 이와 비슷하게 X_3 도 3수준에서 더 큰 S/N비를 나타냄과 동시에 큰 기울기 변화(민감도)를 보이고 있어 경제·환경적 성능을 중시한다면 X_3 는 수준 3보다 크게 증가시키면 S/N비를 더 향상시킬 수 있다는 것을 알 수 있다. 한편 X_5 는 기술적 성능을 중시한 Case 2에서는 3수준, 경제·환경적 성능을 중시한 Case 3에서는 2수준일 때 가장 큰 S/N비를 나타내고 있어, 기술적 성능을 중시한다면 3수준보다 큰 값으로 변경하고 경제·환경적 성능을 중시한다면 2수준을 선택하는 것이 바람직하다. 이와 같이 본 연구에서 제안되는 설계 기법에서는 성능 특성들에 대한 호감도 함수를 정의할 때 하한 임계점과 상한 임계점 사이에서 어떠한 Type의 함수관계를 설정하는지에 따라 서로 다른 최적해가 도출될 수 있음을 확인할 수 있다.

<Table 7> Sensitivity Analysis for S/N Ratio of Case 1, Case 2 and Case 3

Level	Thickness of Inner-Rear Panel(X_1)			Thickness of Inner-Rear Panel(X_2)			Thickness of Inner-Rear Panel(X_3)			Thickness of Inner-Rear Panel(X_4)			Thickness of Inner-Rear Panel(X_5)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Case 1	4.39	5.01	4.90	4.76	4.84	4.70	4.41	4.94	4.95	4.91	4.84	4.55	4.61	4.86	4.83
Case 2	3.76	4.09	4.00	4.019	4.021	3.810	3.93	4.11	3.80	4.19	4.03	3.64	3.79	4.02	4.05
Case 3	4.30	5.21	5.14	4.83	4.90	4.92	4.24	4.93	5.48	4.93	4.90	4.82	4.79	4.94	4.92



<Figure 5> Main Effect Plot for S/N Ratio of Case 1, Case 2 and Case 3

4. 결 론

본 연구에서는 저자가 이전 연구에서 제안한 호감도 함수를 확장하여 다구찌 법과 통합함으로써 다특성 강건 설계 최적화를 위한 새로운 설계 기법을 제안한다. 본 설계 기법은 크게 호감도 함수 설계 프로세스와 다구찌 파라미터 설계 프로세스로 구성된다. 호감도 함수 설계 프로세스에서는 측정 단위가 다른 성능 특성치들을 호감도 함수를 이용하여 0과 1 사이의 만족도로서 성능 특성치를 정규화함으로써 다특성 설계 최적화(Multi-characteristic Design Optimization)를 가능하게 한다. 본 연구에서는 다구찌 법의 망대, 망소, 망목 특성의 성능들에 각각 적용할 수 있는 새로운 호감도 함수를 제시한다. 이러한 호감도 함수는 먼저 벤치마킹 분석을 통해 설계해로서 받아들여질 수 있는 기준이 되는 하한과 상한에 해당하는 임계점을 설정하고, 카노 모델의 관점으로부터 하한과 상한 사이에서 서로 다른 4가지 유형의 함수관계 중에 선택할 수 있도록 하여, 선택된 유형에 따라 같은 성능 특성치에 대해 다른 만족도가 산출될 수 있게 한다. 다음으로 다구찌 파라미터 설계에서는 직교배열표를 이용하여 설계안을 생성하고, 생성된 설계안에 대한 성능 특성치를 산출하여 만족도를 계산한 후, 이러한 만족도에 대한 S/N비를 계산하여 설계안을 평가하는 과정을 반복함으로써 강건 설계 최적화(Robust Design Optimization)를 수행한다.

따라서, 본 연구에서 제안되는 설계 기법은 복수의 성능 특성들에 대해서 만족도의 편차가 작으면서 전체 만족도가 높은 다특성 강건 최적 설계해(Multi-characteristic Robust Optimal Design Solution)를 도출할 수 있다. 마지막으로 본 설계 기법을 복수의 성능을 갖는 자동차 사이드 도어 설계 문제에 적용함으로써 제안되는 설계 기법의 유효성을 검증한다. 여기서는 기술적 성능과 경제·환경적 성능을 동등하게 중시한 경우(Case 1), 기술적 성능을 중시한 경우(Case 2), 경제·환경적 성능을 중시한 경우(Case 3)로 나누어 호감도 함수를 다르게 정의하고 이에 따라 다른 설계해가 도출될 수 있다는 것을 제시한다.

References

- [1] Abdi, H. and Williams, L.J., Principal component analysis, Computational Statistics, *Wiley Interdisciplinary Reviews*, 2010, Vol. 2, pp. 433-459.
- [2] Chakraborty, S. and Yeh, C.H., A simulation based comparative study of normalization procedures in multi-attribute decision making, Proceedings of Conference on Artificial Intelligence, *Knowledge Engineering and Data Bases*, 2007.
- [3] Chakraborty, S. and Yeh, C.H., A simulation comparison of normalization procedures for TOPSIS, *Proceedings of International Conference on Computers & Industrial Engineering*, 2009.
- [4] Cristiano, J.J., Liker, J.K., and White, C.C., Key factors in the successful application of quality function deployment(QFD), *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2001, Vol. 48, No. 1, pp. 81-95.
- [5] Derringer, G. and Suich, R., Simultaneous optimization of several response variables, *Journal of Quality Technology*, 1980, Vol. 12, pp. 214-219.
- [6] Fung, C.P. and Kang, P.C., Multi-response optimization in friction properties of PBT composites using Taguchi method and principle component analysis, *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, Vol. 170, pp. 602-610.
- [7] Ho, L.H., Feng, S.Y. and Yen, T.M., A new methodology for customer satisfaction analysis: Taguchi's signal-to-noise ratio approach, *Journal of Service Science and Management*, 2014, Vol. 7, pp. 235-244
- [8] Jeong, H.I., Lee, C.M., and Kim, D.H., Optimization of CFRP drilling conditions using the Taguchi method, *Transactions of the KSME A*, 2021, Vol. 45, No. 12, pp. 1077-1083.
- [9] Jo, J.H., Lee, J.H., Park, J.P., and Nahm, Y.E., A study on the customer-oriented design using desirability function and Taguchi method, *Journal of Korean Society of Industrial and Systems Engineering*, 2022, Vol. 45, No. 4, pp. 99-108.
- [10] Kano, N., Seraku, N., Takahashi, F., and Tsuji, S., Attractive quality and must-be quality, *Journal of the Japanese Society for Quality Control(Hinshitsu)*, 1984, Vol. 14, No. 2, pp. 39-48.
- [11] Kaushik, N. and Singhal, S., Hybrid combination of Taguchi-GRA-PCA for optimization of wear behavior in AA6063/SiCp matrix composite, *Production & Manufacturing Research*, 2018, Vol. 6, No. 1, pp. 171-189.
- [12] Kim, J.W., Engineering Design: Creative New Product Development Methodology, Munundang, 2013.
- [13] Kuo, Y., Yang, T. and Huang, G.W., The use of grey relational analysis in solving multiple attribute decision-making problems, *Computers & Industrial Engineering*, 2008, Vol. 55, pp. 80-93.
- [14] Kwon, Y.M., Robust design using desirability function in product-array, *Journal of the Chosun Natrual Science*, 2018, Vol. 11, No. 2, pp. 76-81.

- [15] Lai, Y.J., Liu, T.Y. and Hwang, C.L., TOPSIS for MODM, *European Journal of Operational Research*, 1994, Vol. 76, No. 11, pp. 486-500.
- [16] Lakshmi, T.M. and Venkatesan, V.P., A comparison of Various Normalization in Techniques for Order Performance by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), *International Journal of Computing Algorithm*, 2014, Vol. 3, No. 3, pp. 255-259.
- [17] Nahm, Y.E., Set-based multi-objective design optimization at the early phase of design (the third report): Application to environment-conscious automotive side-door assembly, *Journal of Korean Society of Industrial and Systems Engineering*, 2011, Vol. 34, No. 4, pp. 139-145.
- [18] Nahm, Y.E., A novel approach to prioritize customer requirements in QFD based on customer satisfaction function for customer-oriented product design, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2013, Vol. 27, pp. 3765-3777.
- [19] Najm, O., El-Hassan, H. and El-Dieb, A., Optimization of alkali-activated ladle slag composites mix design using Taguchi-based TOPSIS method, *Construction and Building Materials*, 2022, Vol. 327, p.126946.
- [20] Niu, B., Shi, M., Zhang, Z., Li, Y., Cao, Y., and Pan, S., Multi-objective optimization of supply air jet enhancing airflow uniformity in data center with Taguchi-based grey relational analysis, *Building and Environment*, 2022, Vol. 208, p.108606.
- [21] Sharma, A., Awasthi, A., Singh, T., Kumar, R., and Chauhan, R., Experimental investigation and optimization of potential parameters of discrete V down baffled solar thermal collector using hybrid Taguchi-TOPSIS method, *Applied Thermal Engineering*, 2022 Vol. 209, p.118250.
- [22] Singaravel, B., Selvaraj, T., and Jeyapaulc, R., Multi objective optimization in turning of EN25 steel using Taguchi Based utility concept coupled with principal component analysis, *Procedia Engineering*, 2014, Vol. 97, pp. 158-165.
- [23] Subrahmanyam, A.P.S.V.R., Rao, C.M., and Raju, B.N., Taguchi based desirability function analysis for the optimization of multiple performance characteristics, *International Journal of Modern Trends in Engineering & Research*, 2018, Vol. 5, No. 5, pp. 168-175.
- [24] van de Poel I.R., Methodological problems in QFD and directions for future development, *Research in Engineering Design*, 2007, Vol. 18, pp. 21-36.
- [25] Viswanathan, R., Ramesh, S., Maniraj, S., Subburam, V., Measurement and multi-response optimization of turning parameters for magnesium alloy using hybrid combination of Taguchi-GRA-PCA technique, *Measurement*, 2020, Vol. 159, p.107800.
- [26] Wu, L., Liu, J., Zhou, J., Zhang, Q., Song, Y., Du, S., and Tian, W., Evaluation of tar from the microwave co-pyrolysis of low-rank coal and corncob using orthogonal-test-based grey relational analysis(GRA), *Journal of Cleaner Production*, 2022, Vol. 337, p. 130362.
- [27] Yum, B.J., Kim, S.J., Seo, S.K., Byun, J.H., and Lee S.H., The Taguchi robust design method: current status and future directions, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineering*, 2013, Vol. 39, No. 5, pp. 325-341.
- [28] Youn, L.B. and Woo, L.H., Shape optimal design of an automotive pedal arm using the Taguchi method, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 2007, Vol. 24, No. 3, pp. 76-83.

ORCID

Jong Pil Park | <https://orcid.org/0000-0001-9138-2857>

Jae Hun Jo | <https://orcid.org/0000-0001-6411-9500>

Yoon Eui Nahm | <https://orcid.org/0000-0002-9020-6357>