

Research Paper

DOI: <https://doi.org/10.6108/KSPE.2023.27.1.017>

데이터베이스를 사용한 Star 그레인 설계 방법

오석환^a · 노태성^a · 이형진^{a,*}

Design Method of Star Grain using Database

Seok-Hwan Oh^a · Tae-Seong Roh^a · Hyoung Jin Lee^{a,*}^aDepartment of Aerospace Engineering, Inha University, Korea^{*}Corresponding author. E-mail: hyoungjin.lee@inha.ac.kr

ABSTRACT

The star-shaped propellant grain can be used for designing burning surface areas with various profiles and are easy to manufacture, so it can be usefully applied to actual solid rocket motors. However, since there are many design-related configuration variables and slivers at the end of combustion, it is difficult to achieve an optimal design using a general optimization technique. In this study, the new method for designing star grains using a database was proposed to increase usability and success rate of optimization design. In the proposed method, a solution that satisfies the requirements is obtained after defining the performance variables, constructing the database. By applying the proposed method, the design of star grains with various profiles of the burning surface area was performed, and the validity of the design method was confirmed.

초 록

Star 형상을 갖는 추진제 그레인은 다양한 면적 선도가 가능하고, 제작이 용이하여 실제 고체 추진제 로켓에 유용하게 적용될 수 있다. 그러나, 설계와 관련한 형상 변수가 많고 연소 말기 슬리버가 존재하므로, 해석 비용이 저렴한 일반적인 단일 최적화 기법으로는 최적 설계가 성공하기 어렵다. 본 연구에서는 활용성과 설계 성공률을 높이기 위해 데이터베이스를 사용하여 star 그레인을 설계하는 기법을 제안하였다. 제안된 방법에서는 성능 변수를 정의하고, 데이터베이스를 구축한 후 요구조건을 만족하는 해를 탐색한다. 제안된 방법을 적용하여 다양한 종류의 연소 면적 선도를 갖는 star 그레인의 설계를 수행하고, 설계 방법의 타당성을 검증하였다.

Key Words: Solid Rocket Motor(고체 로켓 모터), Grain Configuration Design(그레인 형상 설계), Database(데이터베이스)

1. 서 론

으로 연소된 추진제의 길이(web burned)에 따른 연소 표면적 선도(burning surface area profile)가 요구 조건을 만족하는 것이다. 고체 로켓 모터에서 연소 표면적은 추력과 밀접하게 관련되기 때문이다. 임무에 따라 다양한 면적 선도가 요구되며, 그레인 설계는 요구되는 면적 선도를 생성하기 위해 형상 변수의 조합을 확보하는 과정이다[1,2]. 그레인의 형상은 매우 다양하며, 그중 Finocyl 형상은 다양한 면적 선도를 생성할 수 있어 널리 적용된다[1-6]. 하지만 이 형상은 설계하기 어렵고 비교적 제작성이 낮아 대량생산에는 적합하지 않다. 반면, Star 형상은 점진형, 중립형, 저감형 등 다양한 면적 선도를 생성할 수 있고, 제작성이 높은 장점을 갖는다[7-11]. 하지만, 요구 면적선도를 정확히 만족하는 star 그레인의 형상 최적 설계는 형상 변수가 면적 선도에 미치는 영향이 복잡하고, 연소 중단에 장려 추진제인 슬리버가 존재하여 해석 비용이 저렴한 단일 최적화 기법으로는 실패하기 쉽다[7,12]. 또한, 설계자는 적절한 재설계 방법을 알기 어려워 많은 경험과 시간이 요구된다. 기존 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 그레인 설계에 적합한 고성능 최적화 기법을 개발하고 있다.

최적화 기법은 결정론적 접근법과 추계론적 접근법으로 구분할 수 있다[11-14]. 그레인 설계 문제는 복수의 설계 변수와 다양한 지역해를 가지고 있다. 하지만 결정론적 접근법은 전역 탐색 능력이 부족하고, 추계론적 접근법은 낮은 수렴 성능 때문에 최적 설계에 실패할 가능성이 있다. 초기 연구에서는 단일 최적화 기법을 사용하여 그레인 최적 설계를 수행하였으나, 각각의 단점으로 인하여 성공률이 낮았다[8,15]. 이 문제를 해결하기 위해 두 가지 최적화 기법을 연동한 하이브리드 최적화 기법이 연구되었다[12,16]. 하지만, 요구 조건마다 적절한 탐색 조건을 설정할 필요가 있어 보편성과 유연성이 부족한 단점이 보고되고 있다. 최근 연구에서는 하이퍼 휴리스틱 최적화 기법을 이용한 범용 최적 설계 방법이 개발되었다[17,18]. 이 방법은 보유한 최적화 기법을 전부 사용하고, 가장 좋은 결과를 선정하

여 목표를 달성할 때까지 재설계를 반복한다. 이러한 방식은 탐색 성능이 뛰어나지만, 많은 해석 비용을 필요하기 때문에 산업 현장에서는 사용하기 어렵다. 따라서 실용성과 최적화 성공률이 높은 새로운 설계 방법을 개발할 필요가 있다.

Star 그레인 최적 설계가 어려운 원인은 최적화 문제를 생성하고, 최적해를 탐색하는 과정이 적절한지 판단하기 어렵기 때문이다. 일반적으로, 그레인 설계 최적화는 목표 면적 선도와 설계된 면적 선도의 차이가 가장 작은 형상 변수를 탐색하는 문제이다. 하지만 적절한 목표 면적 선도, 요구 조건 적용 방법 등 설계자의 경험에 의존하는 요소가 많아 설계를 성공하기 전에는 최적화 문제가 적절한지 알 수 없다. 최적화 기법 또한 최적 설계를 어렵게 하는 원인이다. 최적 설계를 실패한 경우, 최적화 기법의 탐색 능력이 부족한지 최적화 문제가 부적절하게 생성되었는지를 구분하기 어렵다. 이와 같이 설계 실패 원인이 다양하고, 주요 원인을 파악하기 어렵기 때문에 최적 설계 자체가 어려운 작업이다.

이에 본 연구에서는 데이터베이스를 사용한 그레인 설계 방법을 개발하였다. 이 방법은 대량의 데이터를 생성하고, 이 중 요구 조건을 만족하는 데이터를 탐색한다. 이 방법은 최적화 문제 및 최적화 기법을 고려할 필요가 없기 때문에 설계 과정을 명확하게 확인할 수 있다. 제시한 방법을 사용하기 위해서는 충분한 양의 데이터를 확보하여야 한다. 그레인 설계 분야는 수십 년 동안 기업 및 연구소에서 진행되어 왔으며, 방대한 양의 데이터가 존재할 수 있고, 특정 그레인의 경우 기하학적 방법으로 데이터를 어렵지 않게 확보할 수 있어 해당 방법이 적용 가능할 것으로 판단하였다. 본 연구에서는 새롭게 제안한 설계 방법의 유용성을 확인하기 위해 다양한 면적 선도 유형을 만족하는 star 그레인 설계를 수행하였다. 데이터베이스에 저장할 성능 변수를 정의하고, 그레인 형상을 무작위로 생성한 후 성능 변수를 확보하였다. 확보된 데이터를 활용하여 요구 조건을 만족하는 형상 설계를 수행하고, 설계 기법의 타당성을 확인하였다.

2. 중립형 그레인 설계 데이터

2.1 Star 그레인 형상 변수

Star 그레인의 형상은 Fig. 1과 같으며, Table 1에 정리된 형상 변수의 조합으로 정의할 수 있다[19]. 조합의 면적 선도는 그레인 burn-back 해석으로 확보할 수 있다. 본 연구에서는 그레인의 형상을 기하학적으로 해석하여 필요한 정보를 확보하는 수치적 방법을 사용하여 burn-back 해석을 수행하였다[21,22]. 이 방법은 선행 연구를 통해 면적 계산식이 공개되어 있고, 면적 선도를 계산하는 시간이 매우 짧아 데이터베이스 확보에 적절한 방법이다[19].

2.2 Star 그레인 성능 변수

Star 그레인을 설계하기 위해서는 면적 선도를 정량적으로 정의한 성능 변수가 필요하다. 본 연구에서는 다양한 면적 선도 유형을 고려할 수 있도록 성능 변수를 Fig. 2, 3과 같이 정의하였다. Fig. 2는 중립형 면적 선도를 정의하기 위해

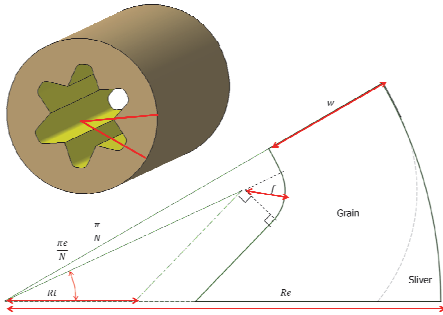


Fig. 1 Star grain configuration.

Table 1. Configuration variables.

Symbol	Configuration Variable
N	Number of star branches
R_e	External radius
R_i	Internal radius
w	Web thickness
f	Fillet radius
e	Angle coefficient

필요한 성능 변수이다. 면적 선도가 얼마나 중립형 형상인지를 정량적으로 계산하기 위해 운용 구간의 표준 편차를 Eq. 1과 같이 정의하였다. 여기서 A 는 설계된 그레인의 연소 면적이고, A_m 는 운용 구간의 평균 면적이다. 이 외에도 운용 구간의 연소 길이(web burned)와 연소가 종료되는 연소 길이를 성능 변수로 정의하였다. 운용 구간의 연소 길이는 시스템이 운용되는 시간을 결정하는 중요한 변수이고, 슬리버 구간이 짧을수록 추진체의 무게가 줄어들어 시스템 성능이 향상된다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\left(\frac{A_1 - A_m}{A_m}\right)^2 + \left(\frac{A_2 - A_m}{A_m}\right)^2 + \dots + \left(\frac{A_n - A_m}{A_m}\right)^2}{n}} \quad (1)$$

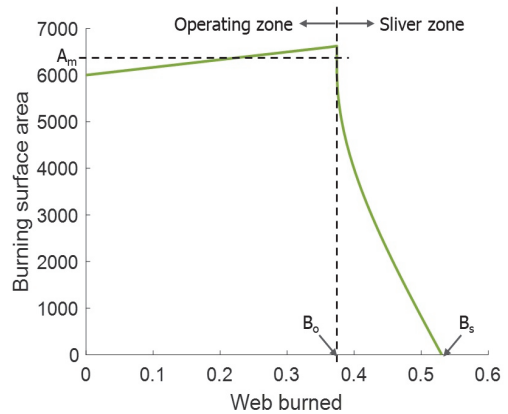


Fig. 2 Performance variables of mean area profile.

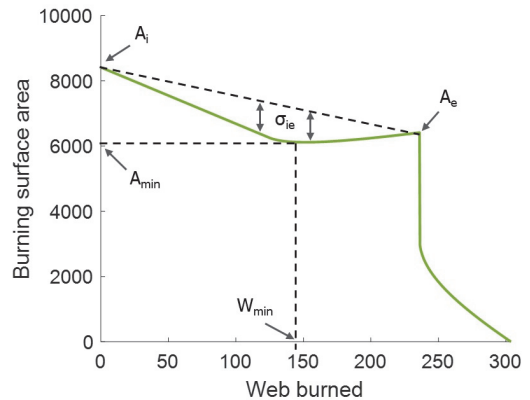


Fig. 3 Performance variables of various area profiles.

Fig. 3은 점진형, 저감형 및 저감-점진형 (Regressive-Progressive, RP)형 그래인을 설계하기 위해 정의한 성능 변수이다. 점진형과 저감형은 운용 구간의 시작 면적과 마지막 면적, 그리고 두 면적을 연결한 직선을 기준으로 계산된 표준 편차가 필요하다. RP형은 운용 구간의 시작 면적과 마지막 면적이 유사하고, 최소 면적이 운용 구간의 중간에 위치하는 조건과 관련한 정보를 정의하였다. 본 연구에서 정의한 성능 변수를 Table 2에 정리하였다.

2.3 데이터 정의

데이터베이스는 그래인 형상 변수 및 성능 변수를 포함한다. Table 3은 데이터 하나가 저장하고 있는 정보이다. 데이터에 고유 번호를 부여하여 식별 가능하도록 설정하였고, 구축 과정에서 발생하는 비물리적 그래인 형상을 제외할 수 있도록 정보를 저장하였다. 랜덤 변수 생성 기능을 사용하여 형상 변수를 생성하고, burn-back 해석을 수행하여 성능 변수 정보를 확보하였다. 데이터를 생성하는 과정에서 많은 시간과 메모리가 필요하기 때문에 생성되는 정보의 수를 줄일 필요가 있다. 본 연구에서는 다양한 크기의 체계에 활용할 수 있도록 외부 반지름을 1,000으로 고정하고, 다른 변수들을 외부 반지름으로 나누어 무차원화 하였으며, 추진계 길이는 1로 고정하였다. Table 4는 형상 변수의 생성 범위이다.

Table 2. Performance variables.

Symbol	Configuration Variable
W_o	web burned of operating zone
W_s	web burned of burn end
A_m	Mean area of operating zone
σ_m	Standard deviation based on mean area
A_i	Initial area of operating zone
A_e	Final area of operating zone
σ_{ie}	Standard deviation based on area slope
A_{min}	Minimum area of operating zone
W_{min}	web burned of minimum area

3. 데이터베이스를 사용한 그래인 설계

3.1 요구 조건 설정

다양한 면적 선도 유형의 설계 요구 조건을 설정하였다. 본 연구에서는 새로 개발한 설계 방법이 효과적인지 확인하기 위해 다양한 목표 면적 선도를 설정하고, 이를 구현할 수 있는 형상 변수를 설계하였다. 요구 조건은 유형별로 정의에 사용된 변수를 다르게 하여 3가지 case의 목표를 설정, 총 12개의 요구 조건을 Table 5와 같

Table 3. Data definition.

1	Data number
2	N
3	R_e
4	R_i
5	w
6	f
7	e
8	Implementable configuration
9	W_o
10	W_s
11	A_m
12	σ_m
13	A_i
14	A_e
15	σ_{ie}
16	A_{min}
17	W_{min}

Table 4. Data generation range.

Symbol	Range
N	4 - 8
R_e	1,000 (constant)
R_i	100 - 500
w	100 - 500
f	1 - 100
e	0.05 - 0.95

이 설정하였다. 본 연구의 목표는 Table 5를 만족하는 그래인 형상을 설계하는 것이다.

3.2 데이터베이스 구축

Star 그래인의 형상 변수와 성능 변수를 포함한 데이터를 생성하였다. 적절한 데이터의 양을 확보하기 위해 1,000만 개의 그래인 형상을 생성하고, 해석 결과를 저장하였다. 데이터를 생성하는 과정은 다음과 같다. 우선, 랜덤 변수 생성 기능으로 형상 변수를 생성한다. 생성된 형상 변수는 물리적으로 구현 가능한 형상인지 확인할 필요가 있다. 예를 들어, 내부 형상이 외부 반지름보다 큰 형상은 물리적으로 불가능하다. 따라서 burn-back 해석을 수행할 필요가 없다. 이와 같이 구현 불가능한 형상 변수들의 조합은 데이터베이스를 구축하는 과정에서 식별될 수 있도록 하였다. 이 밖에도 효율적으로 데이터베이스를 구축하기 위해 데이터 생성 과정을 병렬화하

였다. 각 데이터 생성 과정은 독립적으로 진행되기 때문에 병렬화가 가능하다. 본 연구에서는 2.4 GHz 98코어 연산장치를 사용하여 병렬 계산하였고, 모든 데이터를 확보하기까지 약 12시간이 소요되었다.

3.3 면적 유형별 데이터 분류

데이터베이스를 사용하여 그래인 설계를 수행하였다. Fig. 4는 최적의 그래인 형상을 탐색하는 과정이다. 첫 번째 과정은 데이터베이스에서 구현 가능한 그래인 형상이 저장된 데이터를 확보하는 것이다. 두 번째 과정은 확보한 데이터에서 설계하고자 하는 면적 선도의 유형 조건을 만족하는 데이터를 분류한다. 세 번째 과정은 분류된 데이터에서 요구 조건을 만족하는 데이터를 확보한다. 이 과정에서 다수의 데이터가 발견될 수 있다. 따라서 하나의 데이터를 결정할 수 있도록 최적화하는 네 번째 과정이 필요하다. 만약 동일한 면적 선도 유형의 새로운 그래인을 설계한다면, 세 번째 과정부터 시작함으로써 시간을 절약할 수 있다. 본 연구에서는 중립형, 저감형, 점진형 및 RP형 그래인 설계를 수행하기 위해 각각의 유형을 정의하고, 두 번째 단계까지

Table 5. Design requirements.

Neutral	Objective ($\pm 2.5\%$)		
	Case 1	Case 2	Case 3
A_m	6690	6430	6880
W_o	276	334	300
Progressive	Objective ($\pm 2.5\%$)		
	Case 4	Case 5	Case 6
A_i	4371	5400	6100
A_e	6305	6350	6654
W_o	412	340	282
Regressive	Objective ($\pm 2.5\%$)		
	Case 7	Case 8	Case 9
A_i	8687	7755	7212
A_e	8165	7101	6840
W_o	201	287	345
Regressive-Progressive (RP)	Objective ($\pm 2.5\%$)		
	Case 10	Case 11	Case 12
A_i	6465	6311	6112
A_{min}	5550	5317	5177
W_o	366	412	468

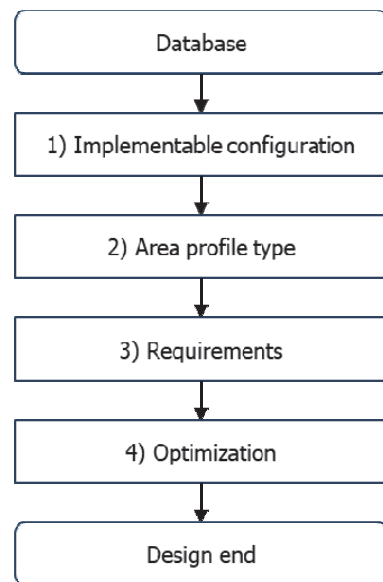


Fig. 4 Design process using database.

진행하여 Table 6과 같이 유형별로 데이터를 분류하였다. 분류된 데이터는 점진형 선도가 가장 많이, RP형 선도가 가장 적게 생성되었다. Table 6에서 정의한 수치는 데이터베이스를 분석하여 설정하였다.

분류된 데이터를 분석하면 유용한 설계 정보를 확보할 수 있다. 예를 들어, 중립형 그래인의 설계 가능한 평균 면적 또는 운용 구간의 Web burned의 범위는 Fig. 5와 같이 데이터의 분포를 분석하여 확인할 수 있다. 데이터를 분석하면, 평균 면적이 6,243 이하인 중립형 형상은 설계할 수 없으며, 평균 면적과 운용 구간의 합이 일정 이상 증가할 수 없는 한계가 존재한다. 따라서 요구 조건이 적절한지 바로 확인할 수 있다. Fig. 6은 case 8의 요구 조건을 만족하는 데이터를 분석한 결과이다. 표준 편차는 시작 면적과 마지막 면적을 연결한 직선을 기준으로 계산하였고, 대부분의 표준 편차가 0.5 이상임을 확인할 수 있다. 충분한 데이터량을 확보하기 위해 본 연구의 저감형 면적 선도 조건은 Table 5와 같이 표준 편차 1.0 이하인 경우로 정의하였다.

3.4 중립형 그래인 설계

중립형 면적 선도로 분류된 데이터를 활용하여 세 번째 설계 과정을 진행하였다. 중립형 면적 선도는 평균 면적과 운용 구간의 web burned로 정의할 수 있으며, Fig. 7과 같이 세 번째 설계 과정에서 정의를 만족하는 데이터를 확보하였다. 설계는 case 1부터 순서대로 진행하였다. Case 1의 요구 조건을 만족하는 데이터를 확보한 결과,

2,526개의 데이터를 확보하였다. 요구 조건을 만족하는 복수의 데이터를 확보한 경우, 최적의 형상 하나를 선정할 수 있는 조건을 정의하고 이를

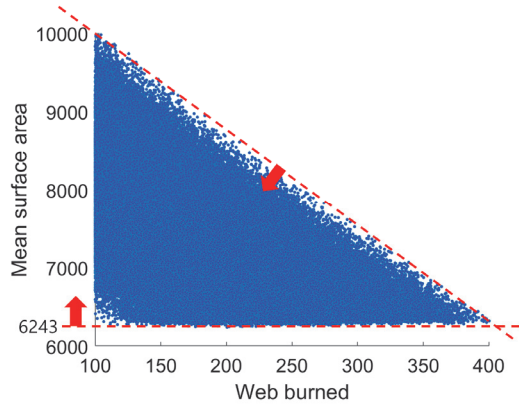


Fig. 5 Feasible design condition.

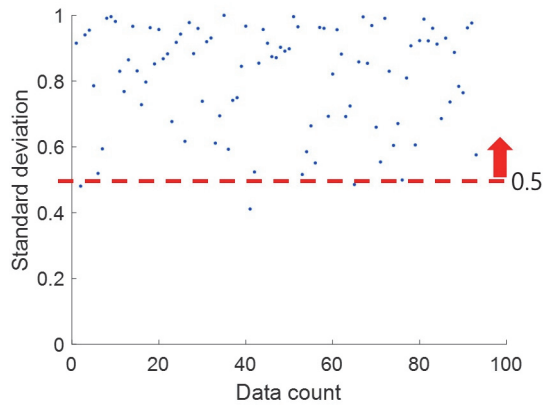


Fig. 6 Case 8 data analysis.

Table 6. Results of type classification.

Type	Definition	Count
neutral	$\sigma_m < 0.5$	275,095
progressive	$A_e > A_i, \sigma_{ie} < 1.0$	1,261,635
regressive	$A_e < A_i, \sigma_{ie} < 1.0$	214,942
RP	$\frac{ A_e - A_i }{A_i} < 0.05$ $\frac{ W_{min} - 0.5W_o }{W_o} < 0.05$	40,757

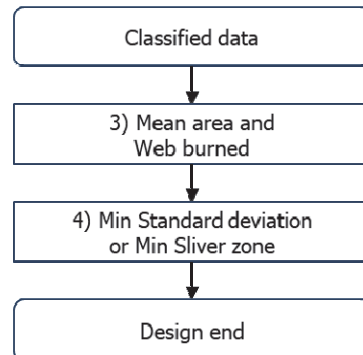


Fig. 7 Neutral grain design process.

설계에 적용하는 네 번째 과정이 진행된다. star 그레인의 경우, 표준 편차와 슬리버 구간 조건이 이에 해당하며 각각 적용한 설계를 수행하였다.

네 번째 설계 과정은 특정 변수가 가장 작은 데이터를 탐색하여 최적화된 하나의 데이터를 선정한다. Fig. 8은 최소 표준 편차 또는 최소 슬리버 구간을 적용한 최적 설계 결과이다. Table 7은 설계된 형상 변수 및 성능 결과이다. 표준 편차는 데이터베이스에 저장되어 있고, 최소 슬리버 구간은 운용 구간과 연소가 종료되는 Web burned 차이를 계산하여 확인할 수 있다. 요구 조건은 초록색, 최소 표준 편차를 만족하는 그레인은 파란색, 최소 슬리버 구간을 만족하는 그레인은 붉은색 선도로 나타내었다. 설계 결과를 분석하면, 최소 표준 편차를 적용한 그레인

설계는 요구 조건을 만족하면서 면적이 일정한 선도를 설계하였다. 최소 슬리버 구간을 적용한 설계 결과는 초록색 선도와는 약간의 차이가 있으나, 요구 조건을 만족하였으며 슬리버 구간을 크게 줄이는데 성공하였다. 두 설계 결과를 비교하면, 최소 슬리버 구간을 적용한 그레인이 보다 적은 추진제량을 사용하여 요구 조건을 만족할 수 있기 때문에 적절한 최적 설계 조건이라고 판단하였다.

제안한 설계 방법의 성능을 확인하기 위해 case 2, 3의 요구 조건을 만족하는 그레인을 설계하였다. Fig. 9는 요구 조건을 만족하고, 슬리버 구간이 가장 작은 설계 결과이고, Table 8은 설계된 형상 변수 및 성능 결과이다. 설계 결과, 요구 조건을 만족하는 그레인 설계를 성공적으로

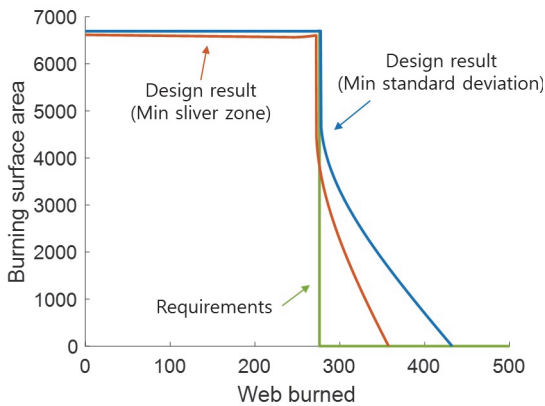


Fig. 8 Area profiles of case 1.

Table 7. Design results of case 1.

	Min σ_m	Min $W_o - W_o$
N	5	8
R_e	1000	1000
R_i	118.9	433.8
w	277.3	272.1
f	66.0	1.5
e	0.716	0.697
σ_m	0.0076	0.1823
A_m	6694.3	6590.3
W_o	277.0	272.1

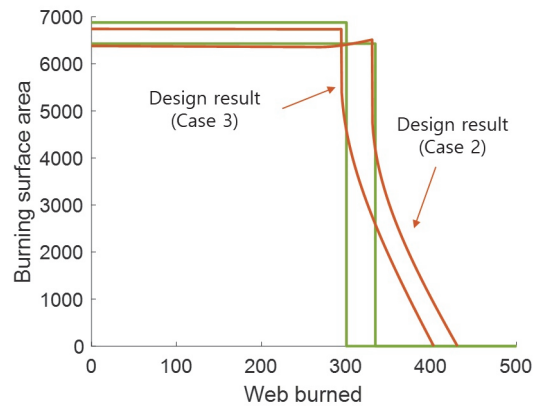


Fig. 9 Area profiles of neutral grains.

Table 8. Design results of neutral grains.

	Case 2	Case 3
N	7	8
R_e	1000	1000
R_i	309.1	365.7
w	330.2	293.9
f	6.7	1.8
e	0.767	0.84
σ_m	0.353	0.023
A_m	6378	6738
W_o	330.2	293.9

로 수행하였다. 이를 통해 본 연구에서 제안한 설계 방법은 중립형 그레인 설계에 적합한 방법임을 확인하였다.

3.5 다양한 면적 선도 유형의 그레인 설계

데이터베이스에 저장된 성능 변수를 사용하여 다양한 면적 선도 유형에 적용할 수 있다. 이를 검증하기 위해 점진형, 저감형 및 RP형 그레인을 설계하였다.

점진형 그레인은 운용 구간의 시작 면적과 마지막 면적, 그리고 web burned로 정의할 수 있다. 표준 편차는 시작 면적과 마지막 면적을 연결한 직선을 기준으로 계산하였다. Fig. 10은 case별 각각의 그레인 설계 결과이다. 설계된 그레인의 면적 선도가 요구 조건에 근접한 형상임을 확인할 수 있다. Table 9는 case별 형상 및 설계 변수로, 설계된 그레인이 모든 요구 조건을 만족하였다.

저감형 그레인은 점진형 그레인과 동일한 성능 변수를 사용하여 분류할 수 있으며, 시작 면적이 마지막 면적보다 크다. Fig. 11은 설계된 그레인의 면적 선도이고, Table 10은 case별 형상 및 설계 변수이다. 설계된 모든 그레인은 요구 조건을 만족하였다.

마지막으로, RP형 그레인 설계를 시도하였다. Table 6의 정의를 적용하면, 운용 구간의 마지막 면적 조건은 초기 면적이 결정하고, 최소 면적이 생성되는 web burned는 운용 구간의 web burned가 결정한다. Fig. 12와 Table 11은 데이

Table 9. Design results of progressive grains.

	Case 4	Case 5	Case 6
N	7	8	8
R_e	1000	1,000	1,000
R_i	475.7	480.8	476.1
w	402.8	331.9	281.7
f	2.683	2.177	4.276
e	0.452	0.600	0.650
σ_{ie}	0.992	0.815	0.228
A_i	4,302	5325	6,060
A_e	6,297	6359	6,488
W_o	402.8	331.9	281.7

Table 10. Design results of regressive grains.

	Case 7	Case 8	Case 9
N	7	7	6
R_e	1,000	1,000	1,000
R_i	246.6	238.2	113.9
w	203.5	281.9	339.5
f	5.314	3.884	9.820
e	0.895	0.877	0.888
σ_{ie}	0.995	0.880	0.607
A_i	8,540	7,581	7,063
A_e	8,224	7,207	6,797
W_o	203.5	281.9	339.5

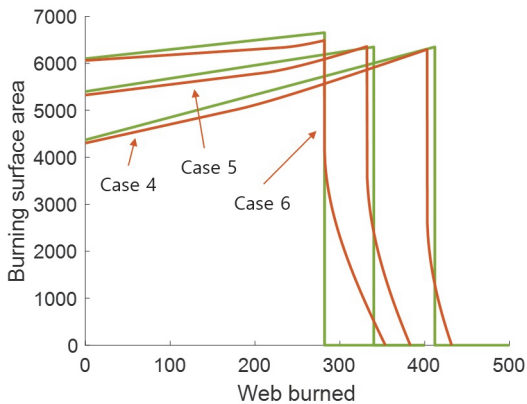


Fig. 10 Area profiles of progressive grains.

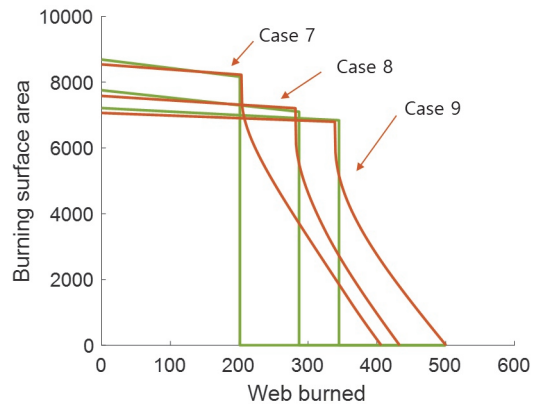


Fig. 11 Area profiles of regressive grains.

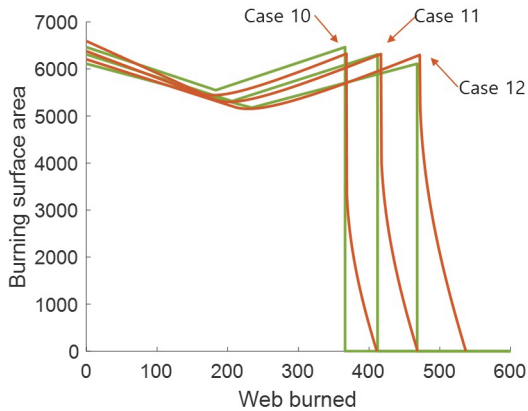


Fig. 12 Area profiles of RP grains.

터베이스를 사용한 설계 결과이다. 요구 조건인 초기 면적, 최소 면적 및 운용 구간의 web burned를 만족하였고, 운용 구간의 마지막 면적과 최소 면적이 생성되는 web burned 또한 RP형 그레인의 정의를 만족하였다. 이를 통해 데이터베이스를 사용한 설계가 효과적인 방법임을 검증하였다.

4. 결 론

데이터베이스를 사용한 Star 그레인의 최적 설계 방법을 개발하였다. 기존의 설계는 최적화 기법을 사용하여 목표를 고려한 설계를 수행하였으나, 사용하기 어렵거나 정확도가 부족하여 실패하는 등 실용성이 부족한 방법을 사용하였다. 본 연구에서는 설계 조건을 고려한 변수들을 정의하고, 데이터를 생성하여 데이터베이스를 확보하였다. 확보한 데이터베이스에서 유용한 데이터를 분류하고, 각 조건에 적합한 데이터를 탐색하여 최적 형상을 설계하였다.

본 연구를 통해 데이터베이스의 유용성을 확인하였다. 이 방법은 데이터 분포를 분석하여 설계 가능한 조건을 미리 확인할 수 있고, 데이터 탐색 속도가 빠르기 때문에 그레인 설계에 적합하다. 향후 연구에서는 다양한 그레인 형상을 고려하고, 제작성 등 보다 다양한 조건을 적용한 연구를 수행할 계획이다.

Table 11. Design results of RP grains.

	Case 10	Case 11	Case 12
N	8	8	8
R_e	1,000	1,000	1,000
R_i	337.2	263.5	173.4
w	367.9	416.7	471.6
f	2.044	2.515	1.782
e	0.590	0.720	0.906
A_i	6,594	6,379	6,206
A_e	6,326	6,318	6,299
A_{min}	5,443	5,300	5,153
W_o	367.9	416.7	471.6
W_{min}	179.9	201.3	228.9

References

- Mesgari, S., Bazazzadeh, M. and Mostofizadeh, A., "Finocyl grain design using the genetic algorithm in combination with adaptive basis function construction," *International Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 2019, No. 1, pp. 1-12, 2019.
- Jack, D., Robert, G., Thomas, B. and Otis, R., "Preliminary design and test of high altitude two-stage rockets in New Zealand," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 128, No. 1, pp. 1-16, 2022.
- Kamran, A., Guozhu, L., Rafique, A.F. and Zeeshan, Q., " ± 3 -Sigma based design optimization of 3D Finocyl grain," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 26, No. 1, pp. 29-37, 2013.
- Tangermann, E., Wegh, N., Klein, M., Weiland, S. and Weiland, S., "Simulation of Ariane 5 Solid Rocket Booster Deformation by Internal Ballistics," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 37, No. 5, pp. 1-12, 2020.
- Park, C.W., Roh, T.S., Lee, H.J. and Jung,

- E.H., "Analysis of Burn-back Tendency on the Finocyl Grain," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 25, No. 2, pp. 55-65, 2021.
6. Yoo, J.S., Kan, D., Roh, T.S. and Lee, H.J., "A Study on the Optimum Design of Finocyl Grain Using Genetic Algorithm," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 26, No. 3, pp. 22-31, 2022.
 7. Acik, S., "Internal Ballistic Design Optimization of a Solid Rocket Motor," Master Dissertation, Mechanical Engineering Department, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2010.
 8. Kamran, A., Guozhu, L., Rafique, A.F., Naz, S. and Zeeshan, Q., "Star grain optimization using genetic algorithm," *The 51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, AIAA, Orlando, U.S.A., AIAA 2010-3084, April 2010.
 9. Rafique, A.F., Zeeshan, Q., Kamran, A. and Guozhu, L., "A new paradigm for star grain design and Optimization," *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, Vol. 87, No. 5, pp. 476-482, 2015.
 10. Ciucci, A. and Jenkins, R.M., "Analysis of Ignition and Flame Spreading in Solid Rocket Motor Star Slots," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 11, No. 6, pp. 1371-1373, 1996
 11. Greatrix, D.R., "Internal Ballistic Model for Spinning Star-Grain Motors," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 12, No. 3, pp. 612-614, 1996.
 12. Oh, S.H., Kim, Y.C., Cha, S.W. and Roh, T.S., "Study of Hybrid Optimization Technique for Grain Optimum Design," *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 18, No. 4, pp. 780-787, 2017.
 13. Segovia-Hernández, J.G., Hernández, S. and Bonilla-Petriciolet, A., "Reactive distillation: A review of optimal design using deterministic and stochastic techniques," *Chemical Engineering and Processing*, Vol. 97, pp. 134-143, 2015.
 14. Shim, P.Y. and Manoochehri, S., "A hybrid deterministic/stochastic optimization approach for the shape configuration design of structures," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 17, No. 2, pp. 113-129, 2015.
 15. Nisar, K. and Guozhu, L., "A new approach for design and optimization of SRM wagon wheel grain," *Asian Joint Conference on Propulsion and Power*, Korean Society of Propulsion Engineers, Gyeongju, Korea, pp. 247-254, March 2008.
 16. Raza, M.A. and Liang, W., "Design and Optimization of 3D Wagon Wheel Grain for Dual Thrust Solid Rocket Motors," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, Vol. 38, No. 1, pp. 67-74, 2013.
 17. Mahjub, A., Mazlan, N.M., Abdullah, M.Z. and Azam, Q., "Design Optimization of Solid Rocket Propulsion: A Survey of Recent Advancements," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 57, No. 1, pp. 3-11, 2020.
 18. Kamran, A. and Liang, G., "An Integrated Approach for Optimization of Solid Rocket Motor," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 17, No. 1, pp. 50-64, 2012.
 19. Hartfield, R., Jenkins, R., Burkhalter, J. and Foster, W., "A Review of Analytical Methods for Solid Rocket Motor Grain ms," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, No. 5, pp. 1623-1632, 2012.