

조선분야에서의 설계공리의 응용

송유석**, 양영순*, 장범선**

Application of Design Axiom to Marine Design Problems

by

Y. S. Song**, Y. S. Yang* and B. S. Jang**

요 약

설계공리는 독립공리와 정보공리로 이루어졌는데, 독립공리를 이용하면 개념설계 단계에서 기능과 구조의 관계를 고려하여 설계의 기본적인 개요를 잡는데 유용하며, 구조가 결정이 된 후에 기능요구를 잘 만족시키기 위한 설계변수들의 결정과정에서, 설계의 정보량을 최소화하는 입장에서 정보공리를 이용함으로써 설계 시에 설계공리의 적용이 가능하리라 본다.

본 연구에서는 조선분야의 설계문제에 설계공리를 적용하여 봄으로써 설계공리의 응용 가능성을 고찰하였다. Thruster의 개념설계 예제에서는 독립공리를 사용하여 기능요구와 설계변수의 분석이 어떻게 이루어지는가를 보였고, 주기관 선정 예제에서는 대안들을 선택하는 방법으로 정보공리가 효과적으로 이용될 수 있음을 보였다. 또 설계변수의 선택과 변경량이 중요한 상사설계에서도 바지선의 예를 통하여 설계공리가 유용하게 쓰일 수 있음을 보였다. 그러나 초기에 제한조건과 기능요구를 모두 파악하기 어려워 점진적이며 반복적인 설계과정을 거치는 선박과 같은 대형 구조물인 경우에는 설계공리의 적용에 한계가 있음도 파악하였다.

Abstract

Design Axiom proposed by N. P. Suh consists of Independence Axiom & Information Axiom. Based on the Independence Axiom, it is very useful specially for early design stage such as conceptual design to generate the design alternatives by considering both functions and structures of product. Since the Information Axiom shows that the design solution should have a least information to be the best one among the many alternatives, this axiom can be used for the best selection purpose during the preliminary design stage.

접수일자 : 1999년 2월 24일, 재접수일자 : 1999년 5월 7일

*정회원, 서울대학교 조선해양공학과

**학생회원, 서울대학교 조선해양공학과

In this paper, the possibility of Design Axiom in marine design application is checked by carrying out three examples of marine design. In the conceptual design of thruster, it is proven to use the Independence Axiom very effective by relating directly functional requirements with design parameters, one by one. In main engine selection example, Information Axiom is used to select best solution among alternatives by choosing the one having the minimum information quantity. For similarity based design in which the selection of changing design variables and the amount of those are important, it is proved that design axiom applied to Barge design case would be very effective and useful.

As functional requirements and constrains were not clarified in early design stage, design axiom shows some difficulty for larger system design like ship which is basically carried out by an incremental and iterative process.

1. 서론

설계는 오랜 경험과 많은 지식이 요구되는 관계로 예로부터 초보자가 하기엔 상당히 부담스러운 작업이며 현장에서 오랜 숙련을 통해야 할 수 있는 작업으로 인식되어 오고 있다. 물론 좋은 설계를 하는데 있어서 주어진 분야의 많은 경험과 노하우는 상당히 중요한 변수임은 사실이나, 이러한 설계과정을 단순히 경험적인 요소로 파악하기보다는 좀 더 체계적인 설계방법론을 확립함으로써 설계초보자가 좀 더 효율적으로 설계문제에 접근해 갈 수 있도록 해 보자는 취지에서 최근 설계방법론의 연구가 많이 시도되고 있다. 이러한 방법론 중의 하나인 설계공리는 설계에도 과학과 마찬가지로 기본이 되는 원리가 존재한다고 믿는 이론으로 공학분야에서 유용하게 사용되고 있다 [1][2][3].

본 연구에서는 Thruster의 개념설계 문제와 주기관의 선정문제 및 바지선 설계에 설계공리를 적용하여 봄으로써 조선분야에서의 응용 가능성을 확인하였다.

2. 설계공리에 대한 고찰[1][4]

설계에 대한 정의 및 이론에 대한 설명을 위해 설계대상을 기능적인 영역과 물리적인 영역으로 구분하고 이들 영역간의 사상과정을 통해 의사결

정이 진행된다. 기능적인 영역을 구체화시키기 위해서 기능요구를 우선 정의하고 이 기능요구에 대응되는 물리적인 영역 내에 있는 설계변수를 Fig.1 에서와 같이 Zig-Zag 식으로 1:1 대응시켜 구현한다.

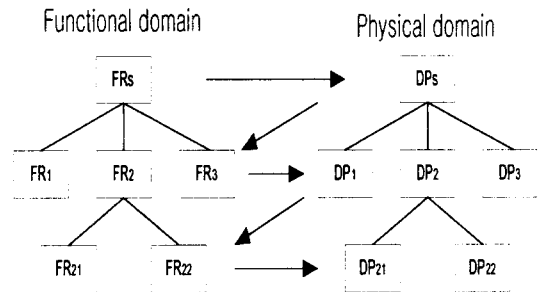


Fig.1 The design process in the hierarchical structure

설계공리에서 제시하는 기본공리는 다음과 같은 두 가지가 있다.

제 1 공리 : 독립공리

기능요구를 구축할 때에는 기능을 각각 독립적으로 구축한다.

제 2 공리 : 정보공리

설계대상이 가지고 있는 정보량을 최소화한다.

독립공리의 의미를 수도꼭지 예를 통하여 알아 보자. 기능요구는 가장 중요한 기능인 온도 조절

과 유량 조절이며, 설계변수는 온도와 유량 조절을 위한 부품으로 파악된다. 전통적인 형태의 수도꼭지는 Fig. 2와 같이 온도와 유량이 동시에 조절되는 구조였으나 현재에는 온도와 유량을 독립적으로 조절할 수 있는 Fig. 3과 같은 구조를 사용하여 기능요구의 독립성을 살리고 있다.

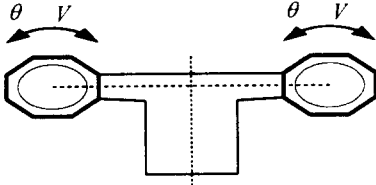


Fig.2 Old water mixing tab

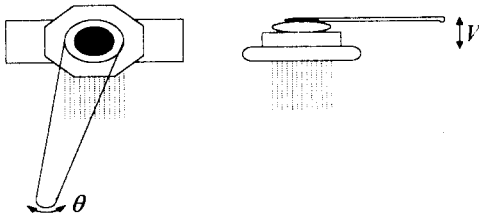


Fig.3 New water mixing tab

정보공리는 설계의 우수성을 정량적으로 표현하는 방법으로 다음과 같은 정의가 사용된다.

$$I_i = \log\left(\frac{\text{system range}}{\text{common range}}\right), I_{total} = \min \sum_{i=1}^n I_i$$

정보량을 공차(tolerance)의 개념으로 생각하면, 설계영역은 설계자가 정의하는 설계변수에 관련된 공차로 정의되며, 시스템 영역은 주어진 공차를 만족하는 제조시스템의 능력으로 표현한다. 이 두 영역이 중첩되어 생성되는 영역은 공통 영역으로 표현된다. 정보량으로 사용할 수 있는 요소는 제품의 가격, 중량 등과 같이 정량적으로 평가될 수 있는 것들이며[3], 이 들의 관계를 나타내면 Fig. 4와 같다.

실제 적용을 위해서는 시스템 영역의 확률분포를 알기 어려우므로 Fig. 5와 같은 균일분포로 가정한다.

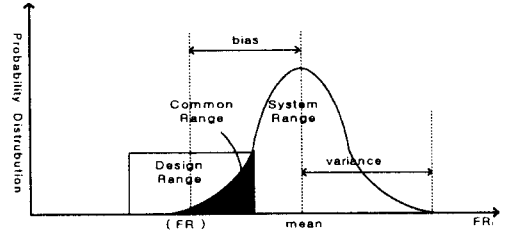


Fig.4 The relationship among design range, the common range, the system range and probability distribution

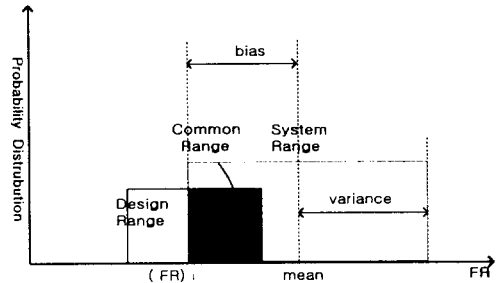


Fig.5 The idealization of the system range and probability distribution

3. 설계공리의 적용

3.1 Thruster 의 개념설계

수중에서 추력을 내어 자동 위치제어를 하기 위해 고안된 장치로 참고문헌[5]의 예제에 독립공리를 적용하여, 기능요구와 설계변수의 계층구조를 결정하였다. thruster의 기능요구와 이를 이루기 위한 설계변수의 관계는 다음과 같다.

개념설계 단계에서는 제품이 가져야 하는 기능요구 파악, 기능요구들을 달성하기 위한 설계변수 파악, 기능요구와 설계변수의 관계 파악이 매우 중요하다. 다른 설계방법론에서도 위의 내용을 파악하지만 설계공리에서는 기능요구와 설계변수의 관계를 1:1로 파악하여, 기능요구 달성의 용이함과 간단함을 추구하는 점에서 다른 방법에 비해 우수하다고 할 수 있다. 기능요구와 설계변수를 1:1로 파악하는 문제점을 해결하기 위해 설계변수를 그룹화 하여 독립공리를 적용하는 연구가 수행된 바도 있다[2]. 개념설계 단계에서 기능요구

와 설계변수의 관계를 독립공리를 이용하면 효율적인 설계방법론이 되리라 생각된다.

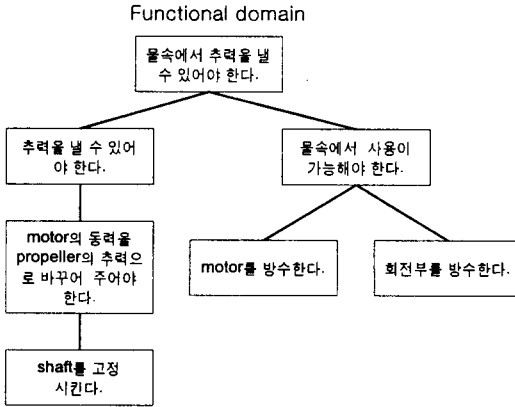


Fig.6 The functional requirements

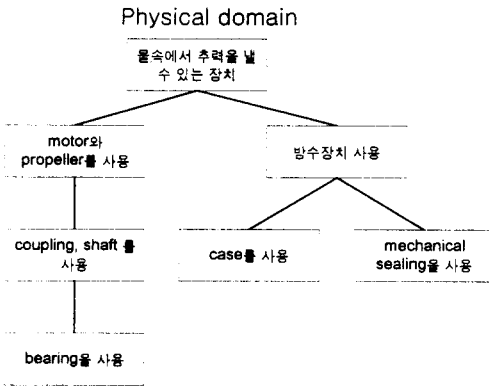


Fig.7 The design variables

3.2 주기관 선정

제품이 가져야 하는 기능에 중점을 두어 하나의 설계대안을 선택하는 방법인 정보공리를 적용하여 적합한 엔진을 선택하여 보았다. 대상이 되는 선박의 주요치수는 Table 1과 같다.

Table 1 The principal dimension and requirements

길이 (m)	181.00
폭 (m)	32.00
깊이 (m)	16.50
흘수 (m)	10.70
재화중량 (ton)	46,500
선속 (Kts)	14.5

선박의 주요치수를 위와 같이 결정한 후에, 저항 마력 추정을 하여 선박이 원하는 속도를 내기 위해서 필요한 마력은 10,000 BHP × 120 rpm 이라고 가정한다. 엔진을 결정한 후에는 주기관의 중량이 처음에 가정한 값과 차이를 비교하여 선박의 주요치수와 저항 마력 추정을 다시 하여 수렴하도록 결정해야 한다. 그리고 또 엔진과 프로펠러의 관계를 생각하여 적합한 프로펠러의 회전수와 특성치들을 결정해야 한다.

Table 2 The engine characteristics in about 10,000 BHP and 120 rpm

	마력 (BHP)	공간 (mm)	중량 (tons)	SFOC (g/BHPH)
8S42MC	7560-11160	7232	175	124-128
7S46MC-C	8400-12495	6710	199	124-128
7L50MC	6090-12670	8295	249	118-127
6S50MC	5580-11640	7520	231	117-126
6S50MC-C	6180-12870	6969	212	117-126

주기관을 선정하는 작업은 간단하지가 않고 배의 주요치수, 배치, 프로펠러 등 모든 부분에 영향을 미치는 복잡한 과정이다. 따라서 실제 선박 설계에서는 이러한 모든 사항을 고려하기 위해서 점진적이고 반복적인 설계의 과정을 거치게 된다. 그러나 여기에서는 문제를 이상화 시켜서 하나의 주기관을 선택해야 하는 단계마다에서 어떠한 주기관을 선택할 것인지에 대한 결정을 내릴 수 있는 방법을 정보공리의 입장에서 제시해 보았다. 대상이 되는 주기관은 Table 2와 같으며, MAN B&W사의 카탈로그를 참조[6]하였다.

① 마력

설계영역은 필요 마력의 60-110% 인 6000-11000 BHP 이다. 8S42MC의 엔진을 예로 들면 Fig. 8과 같다.

② 공간

범위 값이 아니라 일정한 값으로 정해져 있기 때문에 설계영역과 시스템영역을 정하는 데 어려움이 있으므로 만족도 함수라는 개념을 도입한다 [4]. 엔진이 차지하는 공간이 4000-5000 mm

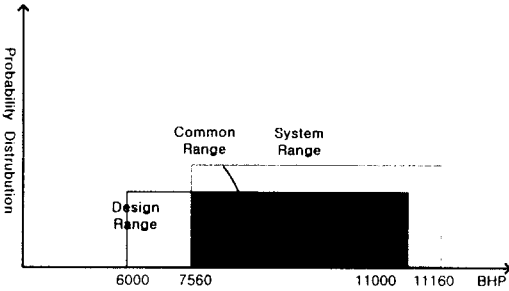


Fig. 8 BHP of main engine

이면 설계자는 완전히 만족을 하고, 공간이 10000 - 11000 mm 이면 완전히 불만족스럽다고 가정을 한다. 이 범위 안에서 만족도 함수 값은 0에서 1까지 선형적으로 변하고 설계자는 만족도 함수 값이 0.5 이상이 되기를 원한다고 가정을 한다. 8S42MC의 엔진을 예로 들어 살펴보면 Fig. 9와 같다.

따라서 길이가 7232 mm 의 경우에는 만족범위는 0.46-0.64 이다. Fig. 9 를 이용하여 시스템영역과 설계영역을 표시하면 Fig. 10과 같다.

중량과 SFOC도 마력과 공간의 경우와 마찬가지로 나타내어 정보량을 계산한다[7]. 계산 결과는 Table 3과 같으며, 총정보량이 최소인 6S50MC-C가 최적의 결과로 확인되었다.

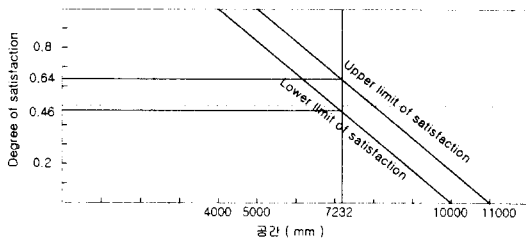


Fig. 9 Space of main engine

3.3 바지선의 설계

1) 상사설계와 설계공리

선박과 같은 규모가 큰 대형산업인 경우에는 설계초기에 요구조건과 제한조건을 모두 파악하기가 어려워 최적화 방법들이 잘 쓰이지 않고 있으며,

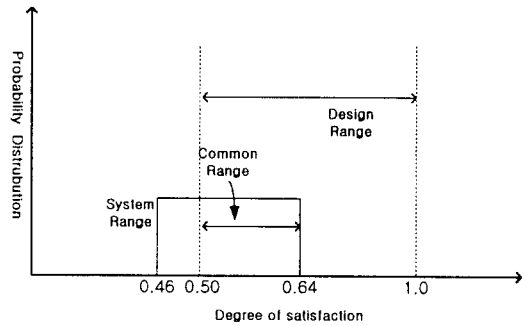


Fig. 10 Degree of satisfaction for space

Table 3 The result of applying information axiom in main engines

	마력	공간	중량	SFOC	Total Inf.
8S42MC	0.066	0.363	0	2.000	2.423
7S46MC-C	0.655	0	0	2.000	2.655
7L50MC	0.422	∞	∞	0.363	∞
6S50MC	0	1.000	1.415	0.167	2.585
6S50MC-C	0.473	0	0.280	0.167	0.923

기준선을 이용하여 변경된 요구조건과 제한조건에 맞도록 수정을 하는 상사설계를 많이 이용하고 있다. 상사설계는 위험을 피하면서 해를 안전하게 얻을 수 있는 방법이라고 할 수 있다. 상사설계에서는 어떠한 변수를 어느 정도 변경시켜야 하는지를 파악하는 것이 중요하다. 설계공리를 상사설계 분야에 이용하면, 기능요구와 설계변수의 관계를 분석하여 변경된 요구사항이나 제한조건을 만족시키기 위하여 어느 변수를 우선적으로 변경시켜야 하는지가 파악가능 하다.

2) 바지선의 형태

대상이 되는 바지선의 형태는 Fig. 11과 같으며 500톤의 청수와 500톤의 증류수를 실어 나르도록 화물창을 이등분하는 격벽이 설치되어 있다 [8].

3) 기능요구와 설계변수의 파악

바지선이 가져야 하는 기능요구는 적재성, 강도, 경제성의 3가지로 파악을 하였다. 안정성은

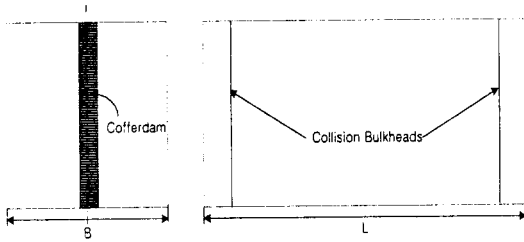


Fig.11 Configuration of the barge

크게 문제가 되지 않기 때문에 기능요구로 포함을 하지 않고, 제한조건으로 처리하여 만족하도록 하였다. 이러한 기능요구와 설계변수와의 관계는 다음과 같이 수학적으로 정식화가 가능하다.

$$Dwt \equiv \rho_w LBT - 2t(2DB + 1.9DL + LB)\rho_s$$

$$Z = \{ (2D^2t/3) + (t^3B/3D) + tDB \}$$

$$Lwt = 2t(2DB + 1.9DL + LB)\rho_s$$

기능요구와 설계변수와의 관계를 설계방정식의 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} Dwt \\ Z \\ Steel\ weight \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X & X & X & X \\ O & X & X & O & X \\ X & X & X & O & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} L \\ B \\ D \\ T \\ t \end{Bmatrix}$$

설계공리에서 요구하는 대로 기능요구와 설계변수의 개수를 같게 해야 한다. 상사설계에서는 어떠한 변수를 우선적으로 변경시켜야 하는 지를 알아내어야 하므로 설계변수의 숫자를 줄여 기능요구와 설계변수의 개수를 같게 해야 한다.

실선의 경우에도 경험식이 존재하기 때문에 위와 같은 설계방정식을 구축할 수 있다고 본다. 변경설계에서 Z_{req} 는 크게 변화하지 않으므로 상수로 가정한다.

4) 초기점의 선택

초기 시작점이 의미가 있어야 변경설계의 결과도 의미가 있으므로 최적화를 이용하여 초기점을 결정하였다. 목적함수와 제한조건은 다음과 같다.

▶ 목적함수

$$Steel\ weight = 2t(2DB + 1.9DL + LB)\rho_s$$

▶ 제한조건

$$Dwt \geq 1000\ ton, GM \geq 0.3\ m, \frac{D}{T} \geq 1.2$$

$$2.0 \leq \frac{Z}{Z_{req}} \leq 3.0, 5 \leq \frac{L}{B} \leq 7.5$$

Table 4 The initial point to design a barge using axiom

L(m)	B(m)	D(m)	T(m)	t(m)	Dwt (ton)	$\frac{Z}{Z_{req}}$	Steel weight (ton)
41.94	7.54	4.09	3.37	0.005	1007.3	2.056	58.4

5) 변경된 요구조건과 제한조건

Dwt를 200톤을 늘려야 하고, 기준선이 강도 요구조건인 $\frac{Z}{Z_{req}} > 2.0$ 을 만족하지만 운항 상에서 강도에 문제가 생겨서 새로운 배는 강도를 0.1 정도 더 늘려야 한다.

$$Dwt \geq 1200\ ton, GM \geq 0.3\ m, \frac{D}{T} \geq 1.1$$

$$2.156 \leq \frac{Z}{Z_{req}} \leq 3.0, 5 \leq \frac{L}{B} \leq 7.5$$

6) 적합한 변수집합 선택

기능요구와 설계변수의 수를 같게 하기 위해서 5개의 설계변수 중에서 3개의 설계변수를 선택하는데, 각각의 기능에 영향력이 어느 정도 크면서 설계행렬의 독립성을 크게 하는 설계변수를 선택한다. 설계행렬의 독립성을 평가하는 방법은 Reangularity(R)와 Semangularity(S)를 사용한다[1]. 비연성이면 R 과 S 값이 1이며, 연성이 많이 나타날수록 값이 작아진다.

독립성이 가장 큰 위의 두 가지 경우를 선택하여 설계방정식을 나타내면 다음과 같다. 비연성화 형태의 설계방정식이 나타나므로 설계방정식의 형태를 보고 steel weight에 영향을 적게 미치면서 변경된 요구조건을 만족시키기 위한 변경될 설계변수의 변경계획을 세울 수 있다.

Table 5 Reangularity and Semangularuty of each design parameters

	설계변수	R	S
1	{ D, L, T }	0.662909	0.635616
2	{ t, L, T }	0.592733	0.489905
3	{ D, L, B }	0.413658	0.463339
4	{ D, t, L }	0.299802	0.466766
⋮	⋮	⋮	⋮
60	{ L, D, t }	0.299802	0.000000

$$\textcircled{1} \begin{Bmatrix} Z \\ \text{Steel weight} \\ \text{Dwt} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.417 & 0.0 & 0.0 \\ 0.174 & 0.309 & 0.0 \\ 0.010 & 0.306 & 0.333 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} D \\ L \\ T \end{Bmatrix}$$

$$\textcircled{2} \begin{Bmatrix} Z \\ \text{Steel weight} \\ \text{Dwt} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.333 & 0.0 & 0.0 \\ 0.333 & 0.309 & 0.0 \\ 0.018 & 0.306 & 0.333 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} t \\ L \\ T \end{Bmatrix}$$

7) 최적화와의 결과 비교

Table 6을 보면 ①의 결과와 최적화의 결과는 거의 유사함을 알 수 있다. 설계공리를 이용한 ①의 방법이 weight에서는 뒤지나 계산시간과 같은 효율성은 더 우수하다. 따라서 변경설계를 할 때에 초기기준이 되는 선택이 우수한 선택이라면 설계공리를 이용하여 효율적이면서 우수한 결과를 얻어낼 수 있다.

설계자가 ①을 대안으로 선택할 수 있지만 만약에 ①과 ②의 steel weight의 차이가 무시 가능

Table 6 The specifications using axiom and optimization tool

	기준선	① {D,L,T}	② {t,L,T}	최적화 {L,B,D,T,t}
L	41.94	43.34	45.17	42.03
B	7.54	7.54	7.54	7.77
D	4.09	4.25	4.09	4.28
T _i	3.37	3.86	3.72	3.89
t	0.0050	0.0050	0.0053	0.0050
Dwt	1007.3	1200.3	1200.1	1209.4
Z/Zreq	2.056	2.159	2.180	2.233
Steel weight	58.4	61.45	66.27	60.99

하다면 정보공리를 이용하여 다시 평가를 하여 적합한 대안을 선택해야 한다. 정보공리에서는 독립공리를 사용했을 때, 고려하지 못했던 요인들, 예를 들면 steel weight와 같이 가격에 영향을 미치는 용접길이와 같은 인자를 추가하여 대안들을 다시 평가해 볼 수 있으며, 또 설계자가 중요하다고 여기는 기준을 도입하여 평가를 할 수 있다.

새로운 판단 기준으로 steel weight와 용접길이를 포함한 가격과 상사성을 고려하였다. 설계선은 기준선과 상사성을 많이 가질수록 기준선의 자료를 많이 이용할 수 있기 때문에 설계자가 중요하다고 여겨서 새로 추가한 기준이다.

1) 가격의 정보량

$$C_{ref} = \text{Steel weight} \times c_1$$

$$C = \text{Steel weight} \times c_1 + \text{Weld length} \times c_2$$

$$Inf_{cost} = \frac{C}{C_{ref}}$$

2) 상사성의 정보량

$$\text{Similarity} = \left(\frac{L_b}{B_b} - \frac{L_c}{B_c}\right)^2 + \left(\frac{L_b}{D_b} - \frac{L_c}{D_c}\right)^2 + \left(\frac{B_b}{D_b} - \frac{B_c}{D_c}\right)^2$$

L_b: 기준선, L_c: 설계선

독립공리를 적용하여 얻은 설계변수들의 집합 중에서 어느 것을 선택하는 것이 좋은지를 정보공리를 이용하여 평가하여 보았다. 이 경우에는 독립공리를 적용한 경우와 마찬가지로 ①의 경우가 더 우수하다는 것을 알 수 있다.

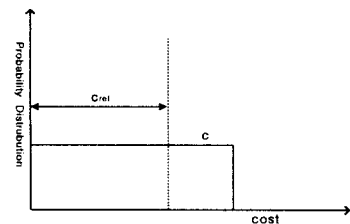


Fig.12 The information of cost

Table 7 The result of applying information axiom after applying independence axiom

	Inf_{cost}	$Inf_{similarity}$	Inf_{total}
① {D, L, T}	2.144	0.097	2.241
② {t, L, T}	2.279	0.807	3.086

4. 결론

Thruster의 개념설계에서는 기능요구와 설계 변수의 관계가 독립공리를 이용하여 되도록 1:1 대응이 되도록 하는 것이 설계에 유용함을 확인하였다. 주기관 예에서는 문제를 이상화 시켜서 하나의 주기관을 선택해야 하는 단계마다에서 어떠한 주기관을 선택할 것인지에 대한 결정을 내릴 수 있도록 하는 방법을 정보공리의 입장에서 제시해 보았다. 대안들이 여러 개가 있을 때 하나의 대안을 효과적으로 선택하는 방법으로 정보공리가 효율적으로 사용될 수 있음을 보였다.

바지선의 예제에서는 이미 구조가 결정이 된 상태이기 때문에 독립공리를 이용하여 기능들을 독립적으로 구축하기도 어렵거니와 또 독립적으로 기능요구들을 구축하기보다는 정보공리를 이용한 최적화가 더 의미가 있다. 그러나 일반 선박의 설계가 대부분 상사설계로 이루어진다고 보면 설계공리의 독립공리를 이용할 수 있다. 상사설계에서는 어떠한 변수를 얼마만큼 변화를 시켜야 하는지가 가장 중요한 문제인데 설계공리를 이용하여 이 문제에 대한 해결 방안을 제시하여 상사설계라는 제한된 범위에서는 설계공리가 유용하게 쓰일 수 있음을 보였다.

설계공리는 독립공리를 이용하여 개념설계 단계에서 기능과 구조의 관계를 생각하여 설계의 기본적인 개요를 잡고, 구조가 결정이 된 후에 기능요구를 잘 만족시키기 위한 설계변수들의 결정을 정보공리의 정보량을 최소화하는 입장에서 최적화 기법을 도입하는 것이 설계공리의 유용성을 가장 잘 나타낼 수 있다고 하겠다.

향후 연구과제로서는 설계공리에서 고려하기 어려운 반복적이며 점진적인 설계의 과정을 거치는

실제 선박에의 적용에 대한 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 1998년도 서울대 발전기금의 후원으로 해양시스템 공학 연구소의 연구비 지원에 의해 수행되었다. 차체에 연구비 지원에 감사드린다.

참 고 문 헌

- [1] Suh, N.P., The principles of Design, Oxford University Press, New York, 1990.
- [2] 도성희, 설계공리를 응용한 TV 유리벌브의 제조를 고려한 설계방법 개발, 1997.
- [3] Suh, N.P., "Development of the Science Base for the Manufacturing Field Through the Axiomatic Approach", Journal of Robotics and Computer Integrated Engineering, Vol.1, No.3, pp.397-415, 1984.
- [4] Suh, N.P., Axiomatic Design : Advances and Applications (will be published).
- [5] 조형준, 기능-구조-거동 관점에서의 설계과정에 대한 연구, 서울대학교 조선해양공학과 석사논문, 1999
- [6] <http://www.mandw.dk>.
- [7] 송유석, 설계공리를 이용한 Barge 설계방법, 서울대학교 조선해양공학과 석사논문, 1999
- [8] Smith, W.F., Kamal, S. and Mistree, F., "The influence of Hierachy Decision on Ship Design", Marine Technology, Vol24, No.2, April 1987, pp.131-142.