

AHP 기법을 이용한 10,000 TEU 이상 컨테이너선에 적용되는 선박평형수 처리장치 최적제품 선정에 관한 연구

이상원¹·김동준^{2,†}·서원철³
부경대학교 일반대학원 기술경영협동과정¹
부경대학교 조선해양시스템공학과²
부경대학교 시스템경영공학부³

An Application of AHP for the Selection of Optimum Product of BWTS for over 10,000 TEU Container Ship

Sang-Won Lee¹·Dong-Joon Kim^{2,†}·Won-Chul Seo³
Interdisciplinary Program of Management of Technology, The Graduate School, Pukyong National University¹
Department of Naval Architecture & Marine Systems Engineering²
Division of Systems Management and Engineering³

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The Ballast Water Treatment System was developed to prevent the unintended transport of unwanted organisms from one region to another as demanded by the IMO (International Maritime Organization). Although various types of BWTS in the world have been developed until now and applied to various ships, there has been no systematic basis for its selection and installation. Currently, the system selection and installation are as per ship owner's suggestion or by easy installation point of view by the shipyard. In order to organize, systemize and solve problems related to the selection and installation of BWTS, a definitive study has been performed to come up with the best alternative to derive value and criteria which were to be met for vessels which are to be equipped with BWTS. Multiple criteria were compared alongside each other during the course of this study. Accordingly an AHP (Analytic Hierarchy Process) analysis method for A, B and C companies were done for container ships with size 10,000 TEU and above. Equipment type for "A" company is "Filter, UV & TiO₂" combined type. For "B" company it is "Filter & UV" combined type. Finally for "C" company it is "Electrolysis" type. Henceforth, the results of this study aims to come up with the optimum way to select the best and the most suitable BWTS for a certain vessel.

Keywords : Ballast Water Treatment System(선박평형수 처리장치), Alternative(대안), Multiple criteria(다중기준), Analytic Hierarchy Process(계층분석기법), UV(Ultra Violet) type(자외선 타입), Electrolysis type(전기분해 타입)

1. 서론

선박의 평형수 살균처리를 담당하고 있는 선박평형수 처리장치(Ballast Water Treatment System, BWTS)는 활성물질의 사용 여부에 따라 IMO나 정부의 형식승인된 제품이 설치되어야 한다. 현재까지 승인된 제품은 UV(Ultra Violet) 타입, 전기분해 타입, 오존 타입 등이 50개 정도 개발되어있고, 또한 여러 업체 제품이 승인 제출 중이며, 새로운 장비를 개발 중인 업체도

헤아릴 수 없이 많다. 이런 이유로, 조선소의 입장에서는 선박의 건조 시에 선박평형수 처리장치를 선정함에 있어 어려움이 많다.

선박평형수 처리장치의 선정은 기술성, 경제성, 설치성, 안전성 등 설계단계부터, 설치 및 운영상에서 고려해야 할 요인이 매우 다양하다. 또한 일단 장비 선정 후에는 장비설치와 시운전을 하는 조선소와 선박을 운영하는 선주사에게 시간과 경제적으로 상당한 영향을 미친다. 그런데도 조선소에서는 선박평형수 처리장치 선정을 위한 효과적인 의사결정법이 개발되어 있지 못하며,

단지 기술적 분석 및 장비가격에 의한 일부 요인에 대해서만 고려하여 제품을 선정하고 있다.

선박평형수 처리장치의 선정을 위해서는 전체적인 평가요인에 대한 종합적인 분석방법이 필요하며, 다수 전문가들의 의견을 통합할 수 있는 의사결정 기법에 의해 최적의 장비가 선정되어야 한다.

선박의 최적 설계에 있어 의사결정 기법이 적용된 연구로는 Yang and Jang (1999)과 Kim, et al. (2009) 가 있다. Yang and Jang (1999)은 AHP(Analytic Hierarchy Process) 기법을 이용한 최적 구조 설계에서, 설계 과정의 기초가 되는 의사 결정에 설계자의 의사를 최대한 반영할 수 있는 방법을 제시하였다. 선택 문제를 정식화함으로써 결합한 선택 타협 문제를 동시에 푸는 최적화 방법의 가능성을 확인하고, 두 개 이상의 선택 문제와 타협문제가 결합한 경우에도 수학적 정식화를 통해 동시에 최적화할 수 있는 가능성을 보여 주었다. Kim, et al. (2009)은 제약 이론을 기반으로 한 최적제품조합 의사결정 지원 방법론 및 시스템에서 최적의 프로덕트믹스 전략을 수립하기 위한 의사결정 지원 방법론을 제안하였다.

점차 선종이 다양해지고, 장비의 설치 및 운영에 있어서 고려할 사항이 많아지고 있기 때문에, 다수의 업체 중에 최적의 장비를 선정하는 경우에, 전문가들의 의견을 취합하여 중요도를 산정하는 AHP 의사결정 기법은 좋은 예이다. 본 논문에서는 실제로 AHP를 통해 의사결정을 위한 평가항목별 중요도를 설정하고, 각 평가항목에 대해 각 안의 중요도를 평가하여 선박평형수 처리장치 제품선정의 우선순위를 도출하였으며, 앞으로도 세계적인 물동량의 증가로 건조가 지속할 것으로 예상되는 D조선소에서 대표적으로 건조하고 있는 10,000 TEU 이상 컨테이너선에 적용되는 선박평형수 처리장치를 대상으로 하였다.

선박평형수 처리장치업체를 선정하면서 계층화 의사결정법을 활용할 수 있도록 국내 8개 조선소의 선장배관 설계 전문가들의 모임인 선장배관 기술분과 위원회와 국내 3개 장비 업체의 기술 영업 담당자, D조선소 내의 선박평형수 처리장치를 담당하고 있는 설계전문가들과의 협의를 거쳐 평가요인을 도출하였고, 도면 및 장비 업체의 카탈로그 등을 통해서 각 업체 장비의 특징을 분석하였다. 설문은 분야별로, 설계부서와 현장의 선박 건조자, 선주와 시운전부서로 보내 분석함으로써, 전문화된 의사결정 모델을 구현하였다.

2. 선박평형수 처리장치의 최적제품 선정을 위한 관련 연구

2.1 최적제품 선정을 위한 AHP 기법

AHP는 1971년 Thomas. L. Satty에 의해서 제창된 것으로서, 불확실한 상황이나 다양한 평가 기준을 필요로 하는 곳에 쓰이는 의사결정 방법이다. 이 기법은 인간이 의사결정을 할 때 인간의

뇌가 단계적으로 또는 계층적 분석과정을 활용한다는 사실에 착안하여 개발되었으며, 모형을 이용하여 상대적 중요도 혹은 선호도를 체계적으로 비율척도(ratio scale) 화하여 정량적인 형태의 결과를 얻을 수 있다는 점에서 그 유용성을 인정받고 있다.

AHP를 사용하여 문제를 해결하기 위해서는 먼저 문제 요소를 최종목표, 평가 기준, 대안이라는 관계로 보고, 계층구조를 만든 후 최종목표에 대하여 평가 기준 간 쌍대비교(pairwise comparison) 해서 중요도를 구하고, 각 평가 기준에 대하여 대체안들 사이에 쌍대비교를 해 그 평가치를 구한다. 그 후 최종목표에 대해서 각 대체안의 종합 평가치를 계산한다. AHP는 그 평가과정에서 총괄적인 쌍대비교를 하는 것이 그 특징이며, 모델화하거나 정량화하기 힘들었던 문제들을 해결할 수 있게 되는 것이다 Kinoshita and Oya (2007).

AHP 기법을 적용한 분야도 매우 다양하며, Park, et al. (2012)은 신 교통수단의 대안 선정에서 AHP 분석을 수행한 바 있고, Kim (2011)은 철도 선로 간 노후도 평가에 있어 AHP 분석을 수행했다. 또한 Yang (2007)은 AHP를 활용하여 연구과제 선정방법 개선을 위한 연구를 수행하였으며 융합기술 분야에서는 Park and Lee (2011)는 에너지-IT 융합 유망산업 및 육성분야 우선순위 도출 시 핵심선정요인 분석을, Ku and Lim (2011)은 차세대 국방 분야 융합 IT 기술도출을 수행한 바 있다. 이처럼, AHP는 교통체계설계, 연구과제 선정방법, 융합기술 분야, 기업의 미래계획, 교육을 위한 시나리오 디자인, 입후보 선출과정 등의 분야에서 성공적으로 활용 되고 있다.

AHP는 본 논문의 연구방법론으로서 연구목적에 부합하고, 선박평형수 처리장치의 선정에서 중요평가 기준들의 특성을 반영시키는 데 적합하기 때문에 AHP 기법을 적용 하였다.

2.2 AHP 적용절차

일반적으로 AHP는 다음과 같은 단계로 구성된다 (Satty, 1980).

(단계 1) 문제를 정확히 정의하여 문제의 요구사항을 명확히 한다.

(단계 2) 문제와 관련된 모든 요소를 조망하여, 최고단계인 문제의 목표로부터 중간 수준의 평가항목 선정 및 배치를 거쳐 최하위 수준인 대안들의 비교까지를 포괄하는 계층구조를 구성한다.

(단계 3) 중간 수준에 있는 한 평가 항목을 기준으로 하여 하부 수준에 있는 종속 평가 항목들이 어느 정도 중요하기를 판단하기 위해 평가 항목 간의 쌍대비교를 해당 종속 평가 항목 전부에 대해 실시하여 상위수준에 있는 평가 항목에 대한 종속 평가 항목들의 상대적 중요도를 비교 행렬로 작성한다.

최종목표에 공헌하는 특성군에 대한 상대적 중요도를 AHP에 의해서 결정하는 과정을 살펴보자. x_1 의 중요도를 w_1 , x_n 의 중요도를 w_n 이라 할 때 특성 간의 쌍대비교 행렬 A는 식 (1),(2)와 같다.

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j} \quad A = (a_{ij}) \quad (1)$$

$$A = \begin{pmatrix} w_1 & w_1 & \dots & w_1 \\ w_1 & w_2 & & w_n \\ w_2 & w_2 & & w_2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_n & w_n & \dots & w_n \\ w_1 & w_2 & & w_n \end{pmatrix} \quad (2)$$

행렬 A에서 $\frac{w_i}{w_j}$ 는 j번째 열을 나타내는 요소의 중요도에 대한 i번째 행을 나타내는 요소의 중요도를 의미한다. a_{ij} 에서는 식 (3)의 관계가 성립한다.

$$a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}, \text{ 단 } a_{ij} \neq 0 \quad (3)$$

x_i 와 x_j 중요도가 같으면 $a_{ij} = 1$ 이다. 따라서 행렬 A는 식 (4)와 같은 역수행렬(reciprocal matrix) 형식을 취한다.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

a_{ij} 값은 인간의 주관적 평가로 정해진다. 인간의 주관적인 평가는 대상을 몇 단계 정도로 분류할 때 가장 효과적이기에 대해서는 논란의 여지가 많으나 $w_i > w_j$ 일 경우에 대해서 Satty는 경험적 결론으로 $\frac{w_i}{w_j}$ 를 9단계로 나누어 측정하였다 (Satty, 1980).

행렬 A에 중요도 벡터 W를 곱하면, $AW = \lambda W$ 가 되고, 이 식을 다시 $(A-\lambda)W=0$ 으로 변형하면 고유치 문제가 된다. 이것은 선형대수의 행렬과 이에 대응하는 고유치 및 고유벡터의 관계이다. 일반적으로 n차원 행렬 A에 대해서 n개의 고유치를 얻게 된다. 여기서, λ 는 A의 고유치이고, W는 A의 고유벡터이다.

(단계 4) 단계3에서 구한 비교행렬로부터 평가항목 간에 상대적 가중치를 구한 후에 응답의 일관성을 검토한다. 일관성은 식 (5)와 같이 일관성 지수(Consistency Index : CI)를 계산함으로써 측정할 수 있다.

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n - 1)} \quad (5)$$

여기서, λ_{max} 는 쌍대비교 행렬의 최대 고유치이고, n은 평가요소의 수이며, 일관성 비율(Consistency Ratio : CR)은 식 (6)과 같다. 일관성 비율은 그 값이 작을수록 일관성이 크다고 보며, 0.1(10%) 값보다 작은 경우는 응답자가 상당히 일관성 있게 쌍대비교를 수행한 것으로 판단할 수 있다.

$$CR = CI / RI \quad (6)$$

RI는 실험치이며 무작위 일관성 지수(random consistency index)를 말하며, 행렬의 크기에 따라 값이 비례하는 특징이 있다. 그러나 까다로운 판단 과제에서는 인간의 판단력에 한계가 있으므로 대체로 $CR > 0.1$ 이 되며, CR값이 너무 크면 판단자의 일관성이 나쁘다고 판단되어 가중치를 분석하기가 곤란하게 된다 (Satty, 1980).

3. 연구 방법론

3.1 의사결정의 절차

선박평형수 처리장치의 제품선택을 위한 체계는 5단계로 이루어지며 Fig. 1과 같다.

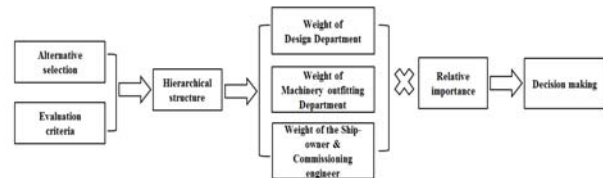


Fig. 1 Framework for the selection of optimum product of BWTS

- (1) 대안 설정과 평가 기준 작성
10,000 TEU 이상 컨테이너선에 적용된 대표적 선박평형수 처리장치 제품들의 대안 설정 및 평가 기준을 작성한다.
- (2) 계층도 작성
대안 설정과 평가 기준을 토대로 계층구조도를 작성한다.
- (3) 설계부서, 선박 건조자, 사용자(시운전/선주)의 설문을 통하여 분야별로 가중치를 산정한다.
- (4) 분야별 상대적 가중치 산정
설문조사의 객관성을 유지하기 위해서 CM(Construction Management), QM(Quality Management), EM(Engineering Management) 부서의 설문을 통해 얻은 분야별 상대적 가중치를 설계부서, 선박 건조자, 사용자(시운전/선주)에게 곁해준다.
- (5) 의사결정
분야별 상대적 가중치가 반영된 A, B, C 사의 중요도를 합산하여, 상대적인 가중치가 가장 높은 선박평형수 처리장치 제품을 최적으로 선정한다.

3.2 평가 대안의 설정

선박평형수 처리장치의 최적선정을 위한 평가 대안은 D사에서 건조하여 인도되었거나 건조 중인 10,000 TEU 이상 컨테이너선 중에 7개 선사의 49척 중에 41척에 적용된 대표적인 3개 업체의 제품을 선정하였다. A사는 스웨덴 업체이며 처리방식은 “Filter + UV + TiO2” 방식으로, 단일 선주에 의해 18,000 TEU 20척과 16,000 TEU 컨테이너선 3척의 실적이 있다. B사는 한국 업체이며 처리방식은 “UV + Filter” 방식으로 18,000 TEU 6척과 19,000 TEU 6척의 실적이 있다. C사는 한국 업체이며 처리방식은 “Electrolysis” 방식으로 10,000 TEU 6척의 실적이 있다.

대안의 설정에서 처리방식이 서로 다른 업체들을 선정함으로써, 최적처리 방식이 무엇인지를 알고자 하였으며, 이들 업체별 장비들의 제원 및 장단점을 Table 3과 같이 정리하여 대안을 만들었다.

3.3 평가 기준의 설정

평가 기준은 국내 대표적인 조선회사(8개)와 한국선급(KR) 및 한국조선해양플랜트협회로 구성된 선장배관 기술분과 위원회에서 선박평형수 처리장치의 배관 관련 설계담당 전문가들과의 협의를 거쳐 도출하였고, 도면 및 장비업체의 카탈로그 등을 통해서 각 업체 장비의 특징을 분석하였다. 평가 기준은 Table 1과 같이 기술성(technology), 경제성(cost effectiveness), 설치성(installability), 정비성(maintainability), 안전성(safety), 환경 친화성(environment friendly)의 6개 대분류 항목으로 나누었다. 기술성은 세부항목으로 처리능력, 설계적용 용의도, 운영상 편리성, 업체의 대응능력으로, 경제성은 구매비, 가동비, 감가상각비로, 설치성은 설치시간, 설치공간으로, 정비성은 부품조달, 정비용의도, 정비비용으로, 안전성은 장비의 안전도로, 환경 친화성은 장비의 환경 친화도로 체계적으로 구성하였다.

(1) 처리능력(performance of equipment) : 처리능력은 평형수 주수 및 배수 시 해수를 살균할 수 있는 능력 정도를 말하며, IMO는 최소 크기가 50 μ m 이상의 생존 개체수가 m^3 당 10개, 10 μ m 이상 50 μ m의 생존 개체 수가 ml당 10개로 제한하고 있다.

(2) 설계적용 용의도(simplicity of design) : 선박은 지상의 건물과는 달리, 안전구역과 위험구역으로 나누어져 있고 발리스트 탱크 위치에 따라 장비가 안전구역에 설치될 수도 있고 위험구역에 설치될 수도 있다. 평형수 처리장치는 협소한 공간 내에 장비를 배치하여야 하는 경우가 대부분이며, 업체에서 요구하고 있는 장비의 설계 지침에 따라 설계하여야 한다. 이에 따르지 않을 경우 장비의 성능을 발휘하기가 어려우므로, 설계자 측면에서는 장비 크기 및 개수가 작고 유닛화가 잘 되어야 설계가 쉬우며, 업체의 지침이 까다롭지 않아야 적용하기가 쉽다고 할 수 있다.

(3) 운영상 편리성(easiness of operation) : 평형수 처리장치는 화물의 적재 및 하역 시 사용되며, 작동 시에 예상치 못한 문

제의 발생으로 시간이 지체되는 경우는 화주의 입장에서는 경제적인 손해를 보게 된다. 운영 중에 그 지역의 해수 중에 남아 있는 불순물이 필터를 막는 문제, 해수의 염도가 낮아 장비의 성능을 발휘할 수 없는 문제, 램프의 파손문제, 작동 상의 편리한 정도 등 여러 가지가 고려되어야 한다.

Table 1 Summary of the criteria and subcriteria

Criteria	Subcriteria	Explanation of Subcriteria
1. Technology	1.1 Performance of equipment 1.2 Simplicity of design 1.3 Easiness of operation 1.4 Maker's reliability	- Sterilization level of the BWTS equipment - Equipment size, Number, Unit etc, Easy enough for design application. - The degree of operating time & convenience - Maker's experience and know how on their system
2. Cost effectiveness	2.1 Equipment price 2.2 Operating expenses 2.3 Depreciation cost	- Initial purchase price of equipment - Operating expenses of equipment - Depreciation cost of equipment according to the application year
3. Installability	3.1 Installation time 3.2 Installation space	- Installation time short degree of equipment - Free space of equipment installation (Compactness of equipment)
4. Maintainability	4.1 Availability of spare parts 4.2 Maintainability 4.3 Maintenance cost	- Ease of procurement degree from the maker - Easy enough for maintenance - The cost associated with part component
5. Safety	5.1 Safety degree of equipment	- Safety level of operation & keeping of equipment
6. Environment friendly	6.1 Degree of environment friendliness of equipment	- The degree of environmental friendliness about sea pollution & noise from equipment

(4) 업체의 대응능력(maker's reliability): 장비에 문제 발생 시

업체의 기술적인 해결능력을 말하는 것으로, 특히, 선박의 인도를 앞둔 시운전 중에 문제가 발생하여 해결이 안 되면 선박의 인도 지연으로 이어져 조선소에서는 선주에게 지체 보상금을 물 수도 있을 뿐만 아니라, 운항 중인 경우 화주의 입장에서는 시간의 지체로 인하여 경제적인 손해를 볼 수도 있다.

(5) 구매비(equipment price) : 평형수 처리장치의 최초 구매 시 드는 비용으로, 업체별 장비 가격이 다르며 10,000 TEU 선박의 경우 5-10억 원을 호가하고 있다.

(6) 가동비(operating expenses) : 평형수 처리장치를 가동하는데 드는 비용으로, 주로 장비의 작동에 필요한 전력소모가 해당한다. 장비가 지나치게 전력소모를 필요로 하는 경우에는 발전기의 용량이 증가하여야 하는 등 설계 측면, 경제적 측면에서 악영향을 미친다.

(7) 감가상각비(depreciation cost) : 평형수 처리장치의 수명과 적용연도에 따른 감가상각비이다.

(8) 설치시간(installation time) : 평형수 처리장치의 설치시간이 짧은 정도로서 제공하는 업체의 장비가 여러 개로 나누어져 있지 않고, 단순한 몇 개의 유닛으로 구성된 경우는 설치시간이 단축된다고 하겠다.

(9) 설치공간(installation space) : 평형수 처리장치의 장비 소형화로 인한 설치공간의 여유 정도로서 협소한 선박 내에 장비를

설치하기 위해서는 장비의 소형화가 될수록 이점이 있다.

(10) 부품조달(availability of spare parts) : 선박은 국제항해에 종사하기 때문에 세계 어느 곳에서나 부품을 조달받을 수 있는 서비스망이 중요하다.

(11) 정비 용의도(maintainability) : 정비성은 평형수 처리장치의 지속적인 사용으로 인해 고장이 나더라도 그 빈도가 적어야 하며, 또한 고장 부위에 대해서 빨리 복구되어야 하므로 설계단계부터 각 구성품의 배치상 위치 및 순서, 정비단계, 정비인력 및 시설, 정비공구와 장비 등이 면밀히 고려되어야 한다.

(12) 정비비용(maintenance cost) : 정비 시 부품과 부품 교체 등에 대한 관련 비용이다.

(13) 장비안전도(safety degree of equipment) : 평형수 처리장치의 작동 및 유지 시의 안전 정도이다. 평형수 처리장치는 대부분 전기가 공급되어야 하는 자외선, 전기분해, 오존 발생과 같은 기술을 수반하기 때문에 이들로부터의 안전이 중요한 요인이 되어야 한다.

(14) 장비 환경 친화도(degree of environment friendliness of equipment) : 평형수 처리장치의 주변 환경에 대한 영향 평가로 해수 오염, 소음 등과 관련한 환경의 친화성 정도이다. 처리 방식에 따라 해수에 잔류 독성 물질이 남아 있는 경우 평형수를 중화시켜서 배출하여야 한다.

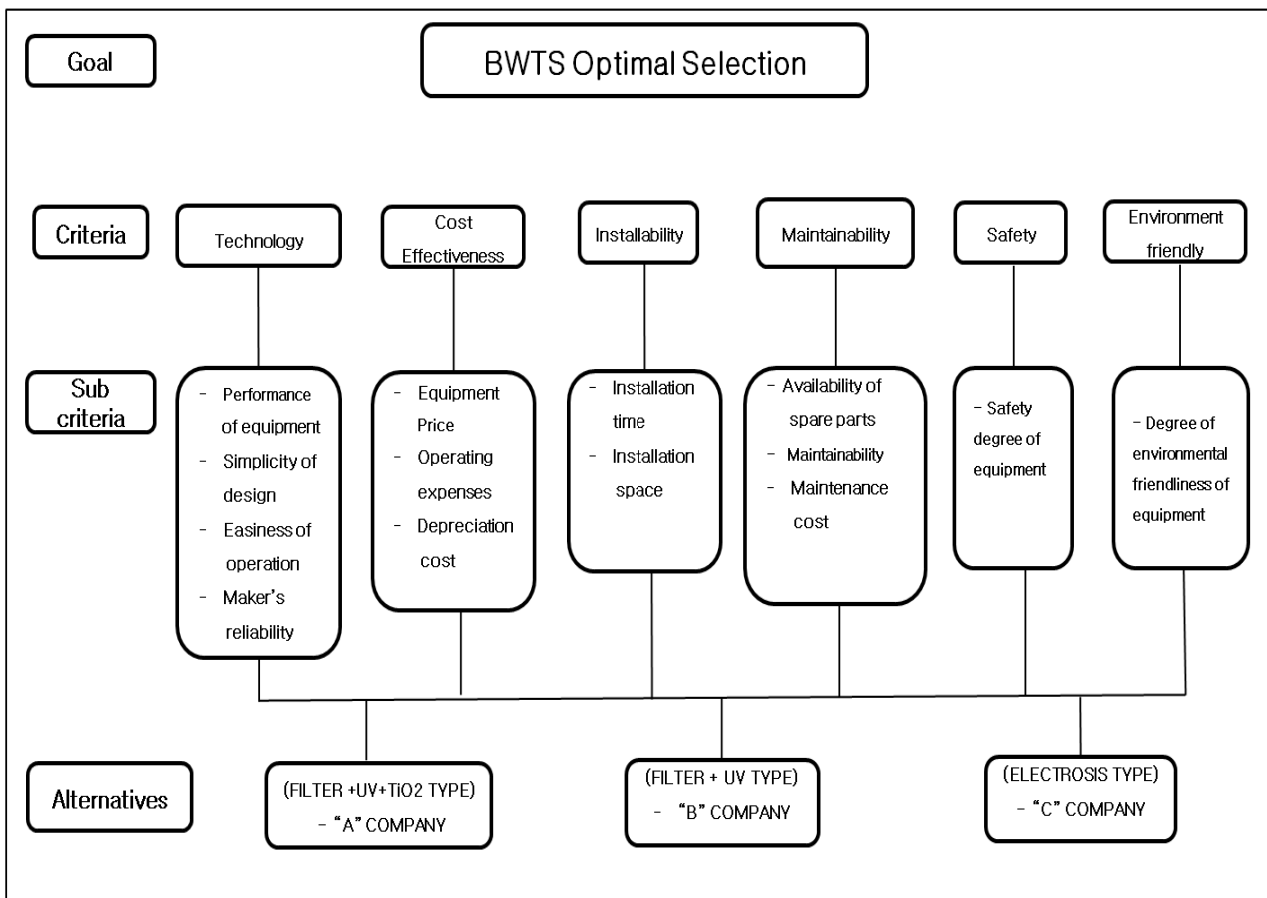


Fig. 2 BWTS Hierarchical structure for optimum selection

3.4 최적제품 선정의 계층구조도 작성

도출된 평가 대안 및 평가 기준을 기초로 하여 최적제품 선정을 위한 계층도는 Fig. 2와 같이 작성된다. 최상위 계층에는 의사결정 문제의 목표인 선박평형수 처리장치의 최종업체가 위치하게 되고, 계층2와 계층3에는 평가 기준이 위치하며, 최하위에는 평가대안이 위치하게 된다. 평가 기준(criteria) 6개에 대해서 15개 요소의 쌍대비교를, 하위평가 기준(subcriteria)인 기술성에 대해서는 6개, 경제성에 대해서는 3개, 설치성에 대해서는 1개, 정비성에 대해서는 3개를 쌍대비교 하였다. 하위평가 기준인 처리능력, 설계적용 용의도, 운용상 편리성, 업체의 대응능력, 가격, 가동비, 감가상각비, 작업시간, 작업공간, 부품조달, 정비용 의도, 정비비용, 장비안전도, 장비환경친화도 14개의 각각 항목에 대해서는 평가 대안(alternatives) 3개씩을 각각 비교하여 42개 요소에 대해서 쌍대비교를 하였다.

4. 설문결과의 분석

4.1 설문조사 수행

설문은 이메일을 통해서 조사하였으며, 신뢰성 있는 자료 확보를 위해서 선장배관 기술분과 내의 조선회사(8개)와 D조선소의 선박평형수 처리장치 설계담당자, 유럽의 대형 컨테이너선 선주 및 D조선소의 시운전담당자 및 현장의 장비설치 담당 현장관리자와 작업반장을 통해서 설문을 받았다. 설문에 응답한 전문가는 최소 경력이 5년 이상으로 선박평형수 처리장치를 직접 담당하고 있는 실무자를 선정하였으며, Table 2와 같이 총 접수 설문지 78건 중에 일관성 비율 값이 0.1 이하인 설문지 50건에 대해서 설문결과를 분석하였다.

Table 2 Number of questionnaire receipt

Assigned task	No. of questionnaire receipt	No. of questionnaire receipt (C.R. ≤ 0.1)
Hull piping design (BWTS piping & electrical designer)	35	20
Ship-owner and Commissioning Engineer (User of BWTS)	23	15
Dept. of Machinery Outfitting (In charge of the installation of BWTS)	20	15
Total	78	50

이를 위해 1차 설문 결과 일관성 비율이 0.1 이상으로 보이는 응답자에 대해서 AHP 방법에 대하여 재설문을 실시하였으며, 일

관성 비율이 재차 0.1 이상으로 응답한 항목이 나타나는 경우에는 분석대상에서 제외하였다.

AHP 설문은 일관성 유지가 중요한 인자이기 때문에, 설문을 시작하기 전에 충분한 설문의 취지 및 설문 요령에 대해서 이해를 시킨 후에 실시하였고, 설문지는 9점 척도로 구성되어 있으며, 그룹 평가자료의 종합방법으로는 기하평균을 이용하였다.

4.2 설계부서의 설문결과

Table 4와 5는 선박평형수 처리장치를 담당하는 선장배관설계와 전장설계 담당자를 대상으로 한 설문결과이다. 설계경력은 20년 이상이 (3명), 10~20년 미만(11명), 5~10년 미만(6명)으로, 총 20명의 설계평균 경력은 13년이다. 평가 기준에 대한 상대적 우선순위는 안전성(30.3%), 기술성(19.7%), 환경 친화성(19.3%), 설치성(12.6%), 정비성(9.5%), 경제성(8.5%) 순으로 나타났다. 안전성은 기술성 및 환경 친화성보다 10%나 중요도가 높게 나와 장비의 작동 및 유지 시의 안전 정도 즉, 자외선, 전기분해, 오존 발생과 같은 기술을 수반하기 때문에, 이들로부터의 생기는 안전이 중요한 요인으로 나왔다.

하위평가 기준의 경우, 장비의 안전도(30.3%), 장비의 환경친화도(19.3%), 설치공간(7.23%) 등의 순이었으며, 가장 순위가 낮은 것은 감가상각비(1.3%)이다. 업체의 상대적 우선순위는 B사(41.97%), C사(31.0%), A사(26.92%) 순이며, B사는 안전성에서 상대적으로 우수하다고 평가되었으며, A와 C사 보다 10% 이상으로 차이가 컸다.

4.3 선박 건조자의 설문결과

Table 6과 7은 선박평형수 처리장치를 담당하는 기계의장부(department of machinery outfitting)의 현장관리자와 작업반장을 대상으로 한 설문결과이다. 현장경력은 20년 이상(8명), 10~20년 미만(2명), 5~10년 미만(5명)으로, 총 15명의 평균 경력은 19.3년이다. 평가 기준에 대한 상대적 우선순위는 안전성(27.3%), 환경 친화성(27.0%), 설치성(15.7%), 정비성(13.5%), 경제성(8.6%), 기술성(8.0%) 순으로 나타났다. 안전성 및 환경 친화성이 중요도가 가장 높게 나왔고, 현장 부서의 특성상 설치성이 15.7%로 중요하게 나온 것으로 보인다.

하위평가 기준의 경우, 장비의 안전도(27.3%), 장비의 환경친화도(27.0%), 설치공간(9.73%) 등의 순이었으며, 가장 순위가 낮은 것은 설계적용 용의도(1.4%)이다. 업체의 상대적 우선순위는 B사(43.7%), C사(31.7%), A사(24.7%) 순이며, B사는 안전도 및 환경 친화도에서 상대적으로 우수하다고 평가되었고, A사보다 거의 20% 이상으로 차이가 매우 컸고, C사보다는 10% 이상으로 조사되었다.

4.4 사용자(시운전/선주)의 설문결과

Table 8과 9는 선박평형수 처리장치를 담당하는 사용자를 대상으로 한 설문결과이다. 업무경력은 20년 이상(6명), 10~20년

미만(3명), 5~10년 미만(6명)으로, 총 15명의 평균 경력은 18.9년이다. 평가 기준에 대한 상대적 우선순위는 안전성(24.6%), 환경 친화성(22.7%), 경제성(14.8%), 기술성(13.7%), 정비성(13.6%), 설치성(10.6%) 순으로 나타났다. 안전성 및 환경 친화성이 중요도가 가장 높게 나왔고, 사용자 특성상 경제성이 14.8%로 중요하게 나온 것으로 보인다.

하위평가 기준의 경우, 장비의 안전도(24.6%), 장비의 환경 친화도(22.7%), 가격(6.2%) 등의 순위였으며, 가장 순위가 낮은

것은 감가상각비(2.7%)이다. 업체의 상대적 우선순위는 B사(43.4%), A사(31.3%), C사(25.6%) 순이며, B사는 안전도 및 환경 친화도에 있어서 상대적으로 우수하다고 평가되었으며, C사보다 거의 20% 이상으로 차이가 매우 컸고, A사 보다는 10% 이상으로 조사 되었다. 설계부서나 선박 건조자의 의견에서는 A사가 3위였으나, 사용자의 설문결과에서 2위인 이유는 A사가 유럽 업체이며 설문에 참여한 유럽 선주에게 국내 업체보다 친숙한 이 유에서인 것으로 판단된다.

Table 3 Kind of BWTS maker & data

Maker(Country)	"A" COMPANY(Sweden)	"B" COMPANY(Korea)	"C" COMPANY(Korea)
Product	"a" Model	"b" Model	"c" Model
Method of Dealing	Filter+UV+TiO2	UV+Filter	Electrolysis
Operation Method	Ballasting + Deballasting	Ballasting + Deballasting	Ballasting
Main Components	1) Filter(40 μ m) 2) AOT Reactor (UV + Active material) 3) Lamp Drive Cabinet 4) CIP(CLEANING IN PLACE) Unit	1) Filter(50 μ m) 2) UV Unit 3) Power Supply Panel	1) Electro Chamber Unit 2) Power Distributor 3) Rectifier 4) Auto Neutral Unit 5) Flowmeter
Installation Location	Engine Room	Engine Room	Engine Room
Advantage	1) Environment friendly due to not using chemical substance. 2) Big capacity handling is possible.	1) Environment friendly due to not using chemical substance. 2) Big capacity handling is possible.	1) Electric power consumption is little. 2) Sterilizing power is good. 3) Pressure loss in piping is little.
Dis-advantage	1) There are fears of blockage from the filter 2) Periodic checks and needs a replacement of UV lamps. 3) Overall fail is inevitable due to filter & UV lamp unit problems. 4) Sea water cooling line for UV lamp warming is necessary unlike other maker. 5) A lot of electric power consumption.	1) There are fears of blockage from the filter 2) Periodic checks and needs a replacement of UV lamps. 3) Overall fail is inevitable due to filter & UV lamp unit problems.	1) TRO(Total Residual oxidant) to be neutralized during de-ballasting. 2) Processing is not possible in fresh water area and electric power consumption is much in the area with low salt content. 3) H2 gas detector is necessary.
Capacity(m^3/h)	1,000	1,000	1,000
Neutralization addition or not	No	No	Yes
Pressure Loss (Bar)	Approximately 0.8	Approximately 0.9	Approximately 0.2
Power Consumption(Kw)	Approximately 240	Approximately 120	Approximately 89
The Definition of a term	- AOT (Advanced Oxidation Technology) Reactor : UV light neutralizes organisms either directly or through damage to their DNA, while AOT creates free radicals that cause irreversible cell membrane damage. - UV : Ultra Violet - CIP(Cleaning In Place) : System circulates a biodegradable solution to prevent sea water scaling within the AOT unit.		- Electro Chamber Unit : ECS treats all of the incoming ballast water with in-situ generation of electric potential and oxidants from Electro-Chamber Unit(ECU). - Power Distributor : Supplies power to ECS components and monitors the state of power supply in real time. - Auto Neutralization Unit : Neutralizes TRO at discharge.

Table 4 Ranking of the BWTS criteria & subcriteria by the department of design

Criteria (Class 1)	Weight (Class 1)	Ranking	Subcriteria (Class 2)	Weight (Class 2)	Weight (Class1xClass2)	Ranking
Technology	0.197	2	Performance of equipment	0.259	0.051023	7
			Simplicity of design	0.265	0.052205	6
			Easiness of operation	0.198	0.039006	9
			Maker's reliability	0.279	0.054963	4
Cost effectiveness	0.085	6	Equipment price	0.498	0.04233	8
			Operating expenses	0.349	0.029665	12
			Depreciation cost	0.153	0.013005	14
Installability	0.126	4	Installation time	0.426	0.053676	5
			Installation space	0.574	0.072324	3
Maintainability	0.095	5	Availability of spare parts	0.303	0.028785	13
			Maintainability	0.373	0.035435	10
			Maintenance cost	0.323	0.030685	11
Safety	0.303	1	Safety degree of equipment	1.0	0.303	1
Environment friendly	0.193	3	Environment Friendly degree of equipment	1.0	0.193	2

Table 5 Total weight of alternatives by the department of design

Weight of alternatives			Total weight of alternatives (Class 1xClass 2xWeight of alternatives)		
"A" COMPANY	"B" COMPANY	"C" COMPANY	"A" COMPANY	"B" COMPANY	"C" COMPANY
0.232	0.287	0.481	0.011837336	0.014643601	0.024542063
0.178	0.482	0.34	0.00929249	0.02516281	0.0177497
0.159	0.386	0.455	0.006201954	0.015056316	0.01774773
0.235	0.438	0.327	0.012916305	0.024073794	0.017972901
0.224	0.365	0.411	0.00948192	0.01545045	0.01739763
0.184	0.319	0.497	0.00545836	0.009463135	0.014743505
0.235	0.361	0.404	0.003056175	0.004694805	0.00525402
0.21	0.474	0.316	0.01127196	0.025442424	0.016961616
0.175	0.412	0.413	0.0126567	0.029797488	0.029869812
0.227	0.373	0.399	0.006534195	0.010736805	0.011485215
0.224	0.344	0.432	0.00793744	0.01218964	0.01530792
0.189	0.332	0.479	0.005799465	0.01018742	0.014698115
0.367	0.424	0.209	0.111201	0.128472	0.063327
0.288	0.489	0.223	0.055584	0.094377	0.043039
			SUM = 0.2692293	SUM=0.419747688	SUM=0.310096227

Table 6 Ranking of the BWTS criteria & subcriteria by the department of machinery outfitting

Criteria (Class 1)	Weight (Class 1)	Ranking	Subcriteria (Class 2)	Weight (Class 2)	Weight (Class1xClass2)	Ranking
Technology	0.08	6	Performance of equipment	0.255	0.0204	12
			Simplicity of design	0.18	0.0144	14
			Easiness of operation	0.323	0.02584	9
			Maker's reliability	0.242	0.01936	13
Cost effectiveness	0.086	5	Equipment price	0.267	0.022962	10
			Operating expenses	0.466	0.040076	6
			Depreciation cost	0.267	0.022962	11
Installability	0.157	3	Installation time	0.38	0.05966	5
			Installation space	0.62	0.09734	3
Maintainability	0.135	4	Availability of spare parts	0.481	0.064935	4
			Maintainability	0.277	0.037395	7
			Maintenance cost	0.242	0.03267	8
Safety	0.273	1	Safety degree of equipment	1.0	0.273	1
Environment friendly	0.27	2	Environment Friendly degree of equipment	1.0	0.27	2

Table 7 Total weight of alternatives by the department of machinery outfitting

Weight of alternatives			Total weight of alternatives (Class 1xClass 2xWeight of alternatives)		
"A" COMPANY	"B" COMPANY	"C" COMPANY	"A" COMPANY	"B" COMPANY	"C" COMPANY
0.295	0.375	0.33	0.006018	0.00765	0.006732
0.231	0.422	0.346	0.0033264	0.0060768	0.0049824
0.213	0.351	0.436	0.00550392	0.00906984	0.01126624
0.143	0.468	0.389	0.00276848	0.00906048	0.00753104
0.287	0.356	0.357	0.006590094	0.008174472	0.008197434
0.257	0.206	0.537	0.010299532	0.008255656	0.021520812
0.282	0.367	0.351	0.006475284	0.008427054	0.008059662
0.17	0.386	0.445	0.0101422	0.02302876	0.0265487
0.241	0.34	0.419	0.02345894	0.0330956	0.04078546
0.184	0.427	0.389	0.01194804	0.027727245	0.025259715
0.184	0.371	0.444	0.00688068	0.013873545	0.01660338
0.231	0.326	0.443	0.00754677	0.01065042	0.01447281
0.262	0.525	0.214	0.071526	0.143325	0.058422
0.277	0.476	0.247	0.07479	0.12852	0.06669
			SUM =0.24727434	SUM =0.436934872	SUM =0.317071653

Table 8 Ranking of the BWTS criteria & subcriteria by the ship-owner and commissioning engineer

Criteria (Class 1)	Weight (Class 1)	Ranking	Subcriteria (Class 2)	Weight (Class 2)	Weight (Class1xClass2)	Ranking
Technology	0.137	4	Performance of equipment	0.221	0.030277	12
			Simplicity of design	0.203	0.027811	13
			Easiness of operation	0.315	0.043155	9
			Maker's reliability	0.264	0.036168	10
Cost effectiveness	0.148	3	Equipment price	0.419	0.062012	3
			Operating expenses	0.397	0.058756	4
			Depreciation cost	0.184	0.027232	14
Installability	0.106	6	Installation time	0.497	0.052682	7
			Installation space	0.503	0.053318	6
Maintainability	0.136	5	Availability of spare parts	0.372	0.050592	8
			Maintainability	0.233	0.031688	11
			Maintenance cost	0.395	0.05372	5
Safety	0.246	1	Safety degree of equipment	1.0	0.246	1
Environment friendly	0.227	2	Environment Friendly degree of equipment	1.0	0.227	2

Table 9 Total weight of alternatives by the ship-owner and commissioning engineer

Weight of alternatives			Total weight of alternatives (Class 1xClass 2xWeight of alternatives)		
"A" COMPANY	"B" COMPANY	"C" COMPANY	"A" COMPANY	"B" COMPANY	"C" COMPANY
0.296	0.423	0.281	0.008961992	0.012807171	0.008507837
0.249	0.449	0.303	0.006924939	0.012487139	0.008426733
0.256	0.467	0.277	0.01104768	0.020153385	0.011953935
0.323	0.428	0.25	0.011682264	0.015479904	0.009042
0.307	0.389	0.304	0.019037684	0.024122668	0.018851648
0.316	0.325	0.359	0.018566896	0.0190957	0.021093404
0.284	0.378	0.338	0.007733888	0.010293696	0.009204416
0.284	0.475	0.241	0.014961688	0.02502395	0.012696362
0.296	0.378	0.326	0.015782128	0.020154204	0.017381668
0.278	0.385	0.337	0.014064576	0.01947792	0.017049504
0.346	0.409	0.245	0.010964048	0.012960392	0.00776356
0.316	0.467	0.277	0.01697552	0.02508724	0.01488044
0.353	0.429	0.218	0.086838	0.105534	0.053628
0.306	0.492	0.202	0.069462	0.111684	0.045854
			SUM=0.313003303	SUM=0.434361369	SUM=0.256333507

4.5 종합 우선순위

설계, 선박 건조자, 사용자의 설문에 대해서 공정성을 기하기 위해서 현재 20,000 TEU 이상의 세계 최대의 컨테이너 선박을 건조하고 있는 D조선소 내의 CM, QM, EM 부서의 실제 컨테이너선의 선박평형수 처리장치 담당 현장관리자에게 설계, 선박 건조자, 사용자 중 누구의 설문에 대한 결과가 상대적으로 중요한지를 조사하였다. 설문은 이메일로 보내 접수된 총 20부 설문 중

에서 CR 이 0.1 보다 작은 값 15명의 것을 채택하였고, 설문에 응한 응답자의 근무 년 수는 30년 이상이 5명, 20-30년이 2명, 10-20년이 7명, 10년 미만인 1명이었으며, 평균 경력은 21.1년이다. 설계부서의 가중치는 40.5%, 선박 건조자는 10.2%, 사용자는 49.3%로써 사용자의 의견이 가장 중요한 것으로 조사되었다. 대안들에 대한 가중치는 Table 10과 같고 가중치를 곱한 최종 결과는 Table 11과 같다. 가중치를 곱한 결과에 따르면 종합 우선순위는 B사, A사, C사 제품 순이다.

Table 10 Weight of assigned task and total weight of alternatives

Assigned task	Weight of assigned task	Ranking of assigned task	Total weight of "A" Company	Total weight of "B" Company	Total weight of "C" Company
Department of design (BWTS piping & electrical designer)	0.405	2	0.270	0.420	0.310
Dept. of Machinery Outfitting (In charge of the installation of BWTS)	0.102	3	0.247	0.436	0.317
Ship-owner and Commissioning Engineer(User of BWTS)	0.493	1	0.313	0.434	0.256

Table 11 Total weight of alternatives considering the weight of assigned task

Assigned task	Weight of assigned task x "A" Company total weight	Weight of assigned task x "B" Company total weight	Weight of assigned task x "C" Company total weight
Department of design (BWTS piping & electrical designer)	0.10935	0.1701	0.12555
Dept. of Machinery Outfitting (In charge of the installation of BWTS)	0.025194	0.044472	0.032334
Ship-owner and Commissioning Engineer (User of BWTS)	0.154309	0.213962	0.126208
Total	0.288853	0.428534	0.284092
Ranking	2	1	3

5. 결론

AHP 기법은 기존의 기술적 분석 및 장비 가격 등 일부 요인에 대해서만 고려하여 최적 제품을 선정하던 방식과는 달리 전체적인 평가 기준을 고려하여 최적 제품을 선정함으로써 이해관계자에게 객관적인 자료로 이용될 수 있으며, 계층구조도 내의 평가 기준 우선순위는 향후 다른 선종의 평형수 처리장치의 대안 선정에 위한 의사결정의 기준이 될 수 있다.

10,000 TEU 이상 컨테이너선에 적용되는 선박평형수 처리장치의 최적제품 평가 기준에서 설문의 중요도가 가장 크다고 조사된 사용자 설문결과 우선순위는 안전성, 환경 친화성, 경제성, 기술성, 정비성, 설치성의 순으로 조사되었다.

가중치를 곱한 종합 순위 결과는 B사가 0.428로 2위와 3위보다 0.14가 더 크며 2위와 3위는 0.28 정도로 거의 같은 결과를 얻었다. 따라서 10,000 TEU 이상 컨테이너선 선박평형수 처리장치의 최적제품으로는 B사의 "Filter & UV Combined type", A사의 "Filter, UV & TiO2 Combined type", C사의 "Electrolysis Type" 순이다.

앞으로 초대형 유조선인 VLCC(Very Large Crude Carrier)에 적용되는 선박평형수 처리장치 최적제품 선정에도 본 연구의 모델이 필요하다고 생각된다. 초대형 유조선의 경우에는 평형수 처리장치의 처리능력이 3,000 m³/h로 10,000 TEU 컨테이너선의 처리능력 1,000 m³/h보다 3배나 크며, 장비의 설치위치도 위험구역(dangerous area)과 안전구역(safety area)으로 나누어져 설

치되고, 장비 가격도 처리방식에 따라서 차이가 크기 때문에 최적제품의 선정결과가 달라질 수 있다고 생각한다.

References

Kim, I.I. Han, S.H. & Kwon, M.C., 2009. Decision Supporting Methodology and System Based on Theory of Constraints for Optimal Product Portfolio Strategy in Shipbuilding Industry. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 46(3), pp.362-371.

Kim, S.H., 2011. Deterioration Evaluation of Railway Line Segments Using Analytic Hierarchy Process. *Journal of the Korean Society for Railway*, 14(6) pp.569-574.

Kinoshita, E. & Oya, T., 2007. *Senryakuteki Ishi Kettei Shuho Ahp*. Chung Ram Publisher, Korea.

Ku, B.T. & Lim, M.H., 2011. The Analysis on ARMY defense-IT Convergence Technologies by the Analytic Hierarchy Process. *2011 Symposium of the Korean Institute of Industrial Engineers*, Song-Do, Republic of Korea, 26-27 May 2011.

Park, J.H. & Lee, B.G., 2011. Analyzing Critical Priority Factors for Deriving Future Industries and Promotion Fields of Energy-IT Convergence. *Journal of the Korean Society for internet information*, 12(3), pp.139-149.

Park, S.J. Kim K.T. Lee D.J. & Jang, S.G., 2012. The Selection of Advanced transportation mode using the Analytic Hierarchy Process. *2012 Symposium of the Korean Institute of Industrial Engineers*, Kyoung-Ju, Republic of Korea, 10-11 May 2012.

Satty, T.L., 1980. *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill: NewYork.

Yang, Y.S. Kim, K.H. & Ruy, W.S., 1994. Discrete Optimum Design of Ship Structures by Genetic Algorithm. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 31(4), pp.147-156.

Yang J.M., 2007. *A study on new selection process of research process using AHP(Analytic Hierarchy Process)*. Report No. Policy Research-2007-007-Academic Research. Deajeon: National Research Foundation of Korea.

Yang, Y.S., Jang. B.S.,1999. Optimum Structural Design Using AHP Technique. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 36(1), pp.82-89.

