

QFD와 FMEA를 이용한 품질평가에 관한 연구

박창규
전주비전대학교 조선힬양과

A Study on the Quality Assessment Using QFD & FMEA

Chang-Kyu Park

Dept. of Ship & Ocean, VISION University, College of Jeonju

요 약 최근 제품이나 시스템의 품질은 고객만족을 의미하기에 점점 더 중요하게 인식되고 있다. 이러한 품질의 한 특성으로 인식되는 성능은 주어진 기능을 얼마나 잘 수행하는가를 의미하는 것으로 고객만족에 가장 접근하는 특성이다. 그러나 선박과 같은 대형 구조물을 다루는 공학자에게 있어서 안전성은 사고 시에 발생하는 파괴나 인명피해 등과 밀접하게 관계되어 있기 때문에 그 중요성이 더욱 크게 인식되고 있다. 본 연구에서는 구조물에서 중요하게 인식되는 성능과 안전성을 고려하여, 품질기능 전개(QFD)를 이용하여 성능을 분석하고 파괴모드(Failure Mode) 및 영향 분석(FMEA)을 이용하여 안전성을 분석함으로써 고객의 요구사항에 기반을 둔 품질 분석방법을 제시하였다. 또한 이를 살물선(Bulk Carrier)의 화물창구(Hatchway)에 적용하여 화물창구 시스템의 품질향상을 위한 성능과 안전성 측면에서 중요한 부재를 파악하였고, 성능과 안전성 측면에서 개별적으로 파악된 중요 부재 및 부품들 중에는 공통적으로 파악된 것들이 존재하는데, 이들은 성능과 안전성을 동시에 향상시킬 수 있는 부재 및 부품들이므로 설계자는 설계 시 이러한 부재나 부품에 더 많은 관심을 갖고 개선함으로써 제품 및 시스템의 품질을 향상시킬 수 있는 결과를 나타내었다.

Abstract Recently, the quality of a product or system has becoming increasingly important as it means customer satisfaction. The function, which is recognized as a nature of this quality, means how it functions well so it is the closest to the customer satisfaction. On the other hand, it is becoming more important as safety is closely related to destruction or human injury from accidents for engineers who handle large-scaled structures, such as ships. This study analyzed the function using quality function development (QFD) and considering the function and safety, which are being recognized as important in the structure. In addition, the safety and the quality analysis method based on the customers' needs was analyzed using failure mode and influence analysis (FMEA). In addition, the supplementary materials that are important in terms of the aspect of safety and function for the quality enhancement of a hatchway system were determined by applying a bulk carrier and hatchway. As a result, there are commonly understood items in important supplementary materials and parts, which are determined individually in terms of function and safety, because they can enhance both the function and safety simultaneously. This study shows that designers can improve the quality of products and systems by enhancing these supplementary materials and parts with greater interest.

Keywords : Failure Mode, FMEA, Hatchway System, Quality Assessment, QFD

1. 서론

19세기 산업혁명 이후, 생산성 위주로 발전하기 시작한 산업은 20세기 중반에 이르러 품질(quality)이란 개념

이 도입되면서[1] 품질중심으로 발전하기 시작하여, 21세기에는 고객중심으로 까지 변화하고 있다. 이러한 품질은 초기에는 설계규격에 대한 적합성(conformance with specification)을 내세우는 생산자 중심이었으나, 설

*Corresponding Author : Chang-Kyu Park(VISION University, College of Jeonju)

Tel: +82-63-220-4095 email: ckpark@jvision.ac.kr

Received October 20, 2017

Revised November 2, 2017

Accepted November 3, 2017

Published November 30, 2017

계급적이 고객중심으로 그 방향이 바뀌게 되었다. 고객 중심의 품질이란 고객만족(customer satisfaction)을 뜻하며[2] 이는 고객이 원하는 것을 기대 이상으로 충족시킴으로써 고객의 재 구매율을 높이고 제품에 대한 선호도가 지속되도록 하는 것을 뜻한다.

고객만족의 관점은 품질의 개념에서도 찾아볼 수 있는데 ISO 8402 품질사전과 ISO 9000 시리즈에서는 “품질은 명시적 혹은 묵시적인 고객욕구를 만족시키는 제품이나 서비스 특성의 총 집합이다” 라고 정의하였다.

이와 같은 고객만족 관점의 품질개념은 오늘날에 이르러서 더욱 광역화되고 구체화되어 품질특성(quality characteristic)으로 표현되고 있다. 예를 들어, Kivenko[1]는 품질을 8가지 특성들로 분류하여 성능(performance), 유용성(availability), 작동 가능성(operability), 신뢰성(reliability), 유지보수성(maintainability), 내구성(durability), 비용(cost) 및 안전성(safety)을 통해서 품질을 분석하고 평가할 수 있다고 주장하고 있으며, Garvin[2]은 제품의 품질은 성능(performance), 특징(features), 신뢰성(reliability), 적합성(conformance), 내구성(durability), 서비스 가능성(serviceability), 심미성(aesthetics) 및 인지도(perceived quality)의 8가지 속성에 의해 평가될 수 있다고 주장하고 있다. 이러한 특성들은 제품의 품질을 분석하고 평가할 수 있는 기준이며, 이들 중에서도 성능은 제품/시스템이 갖는 기본적인 특성으로서 제품이 갖추어야 하는 기능을 얼마나 잘 수행하는가를 나타낸다. 따라서 고객이 요구하는 높은 성능은 바로 품질의 정의에서 다루는 고객만족에 가장 접근하는 것이라 할 수 있다.

선박과 같은 거대한 구조물의 경우, 성능이 중요한 특성이며, 사고 시에 미치는 영향을 고려하여 안전성을 중요하게 고려되어야 하며, 인명피해 등과 밀접하게 관계되어 있기 때문에 중요한 특성으로 인식되고 있다. 이러한 이유로 흔히 설계에 있어서 성능은 지향적 요구조건(objective requirement)의 성격이 강한 것으로, 안전성은 강제적 요구조건(mandatory requirement)으로 평가된다.

따라서 본 연구에서는 구조물의 품질특성들 중에서 성능과 안전성을 주요 요소로 파악하고 이를 고객의 요구사항에 맞춰 분석하는 방법을 제시하며, 이를 살물선의 화물창구에 적용해 봄으로써 그 활용 가능성을 알아보고자 한다.

2. Performance-Safety Analysis Model

제품/시스템의 품질을 평가하는데 있어서 품질을 성능과 안전성으로 구분하고, 이를 동시에 분석하는 Performance- Safety Analysis Model(PSAM)을 제시하고자하며 PSAM의 흐름을 Fig. 1에 나타내었다.

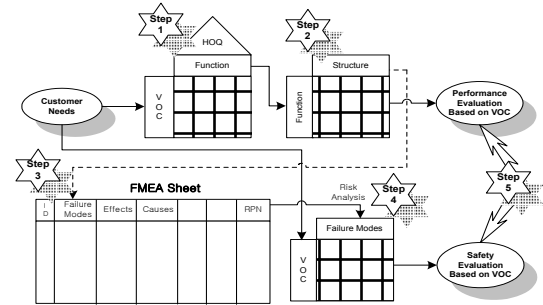


Fig. 1. The abstract flow of PSAM

PSAM은 기본적으로 두 가지 도구로 구성되어 있다. 품질기능전개(QFD: Quality Function Deployment)[3,4,5]와 파괴모드 및 영향 분석(FMEA: Failure Modes and Effects Analysis)[6,7,8,9]이 바로 그것인데, QFD는 전형적인 품질분석도구로 알려져 있으며 FMEA는 위험도(risk)를 분석하기 위해 사용되는 도구이다.

PSAM은 크게 다섯 단계로 나누어지는데 1단계: 고객 요구사항과 기능의 관계행렬, 2단계: 기능과 구조의 관계행렬, 3단계: FMEA 수행, 4단계: 고객 요구사항과 파괴모드의 관계행렬, 5단계: 성능과 안전성 평가가 바로 그것이며, 1단계와 2단계, 그리고 4는 QFD와 관련되어 있으며 3단계 및 4단계는 FMEA와 밀접한 관계가 있다.

우선 고객을 정의하고 이들로부터 요구사항을 파악하고, 동시에 분석하려는 대상의 기능을 파악한다. 1단계는 이 두 가지를 받아들여 이들의 관계성을 파악하고, 이로부터 고객의 요구사항들을 만족시키기 위한 중요한 기능들이 무엇인지를 파악하는 단계이다.

고객의 요구사항에 입각한 중요한 기능들이 파악되었다면, 이는 제품/시스템을 구성하는 구조(서브 시스템, 부재 및 부품)들과 함께 2단계에 입력된다. 여기에서는 중요한 기능들을 수행하기 위한 구조 내지는 부품들이 무엇인지를 파악하는 것이 목적이며, 이 결과는 분석대상의 품질 중 성능과 밀접하게 관계된 것으로 평가될 수

있다.

3단계는 앞에서 파악된 구조를 중심으로 이들의 파괴 모드를 알아내어 FMEA를 수행하는 단계이다. 각 파괴 모드의 영향(effect) 및 원인(cause)을 파악하고 이를 정량화 하여 위험도 우선순위 수(R.P.N.: Risk Priority Number)를 계산한다. 이 R.P.N.은 FMEA에서 위험도를 평가하는 기준으로 사용된다.

하지만 R.P.N.에 기준을 둔 위험도 평가는 공학자의 판단만이 고려된 것이다. 따라서 고객의 요구사항이 포함된다면 좀 더 고객의 입장에서 안전성 검사가 가능하다고 판단되어, 4단계가 추가된다. 즉 고객의 요구사항과 파괴모드간의 관계를 파악하여 요구사항에 가장 크게 위배되는 파괴모드를 알아낼 수 있어, FMEA에서 계산된 R.P.N.을 고려함으로써 공학자와 고객의 목소리를 함께 반영할 수 있게 된다.

마지막 단계는 1단계 및 2단계의 결과를 이용하여 대상의 성능(performance)을 분석하고 이와 밀접하게 관련된 구조/부재를 파악하는 일과 3단계 및 4단계에서의 위험도(risk) 분석을 이용하여 대상의 안전성(safety)을 분석하고 이와 밀접하게 연관된 구조/부재를 파악하는 단계이다. 이 단계에서는 두 가지 특성에 의해서 공통적으로 나타나는 구조/부재들을 파악함으로써 공학자나 설계자가 이들에 대하여 특별한 관심을 갖고 우선적으로 개선해야 할 부재를 합리적으로 제안할 수 있는 단계가 된다.

3. 화물창구에의 적용

위에서 제시한 분석 방법을 살물선의 화물창구(hatchway)에 적용하여 그 활용가능성을 알아본다. 화물창구의 형식은 여러 가지가 있으나 그 중에서 대형 살물선에 설치되어 선박의 폭 방향으로 덮개가 나뉘어 열리는 side rolling 형식을 그 대상으로 정하였다.

3.1 고객 요구사항과 기능간의 관계행렬

본 연구에서는 고객을 해치커버를 직접 조작하는 오퍼레이터로 정의하였고 이들의 요구사항은 모두 9가지로 나타났으며[10,11] 각 요구사항의 중요도를 1에서 10 사이의 수치로 분석하면 다음의 Table 1과 같다[12].

Table 1. Importance of customer requirements

Customer Requirements	Import. Rating
1. Strong enough to endure external forces	4
2. Easy to cargo handling	4
3. Good reliability of control	8
4. Good reliability of sub-systems & components	6
5. Perfect prevention of water ingress to cargo hold	10
6. Proper protection of cargo	8
7. Safe to operator or crew	10
8. Proper cargo monitoring system	6
9. User friendly operating system	6

화물창구의 기본적인 역할은 Table 2와 같이 화물을 싣고 내리는 통로, 화물 보호 및 선박의 구조 강도에 기여하는 역할 등이 있으며 이를 바탕으로 17가지의 기능이 파악되었다.

고객 요구사항과 기능이 파악되면 Fig. 2와 같이 첫번째 행렬이 작성되며 고객 요구사항과 기능간의 관계 파악은 요구사항이 기준이 되어 '요구사항을 만족시키기 위한 기능은 무엇인가?' 라는 물음을 바탕으로 수행한다. 요구사항과 기능의 관계를 정량적으로 표현하기 위해서 세 가지 부호를 사용한다. 즉, ◎, ○ 그리고 △를 부호로 사용하는데, 각각은 9점, 3점, 1점을 나타낸다. 세 단계의 격차가 6점과 2점으로 다른 이유는 높은 점수에서의 차이가 더 중요함을 나타내기 위함이다[3].

"Perfect prevention of water ingress to hold" 라는 요구사항을 예로 들어보자. 모두 다섯 가지의 기능들과 관계가 있는데 이들 중에서 "Provide cover" 및 "Fasten closed hatch cover"와 "Provide watertightness" 및 "Drain water and impurities"의 차이를 알아보자. 전자의 두 기능, "덮개를 제공한다"와 "단단한 덮개를 단단하게 고정한다"는 해수가 화물창에 들어오지 못하게 하는 부수적 방재 차원의 방안인데 비하여, 후자의 두 기능, "방수가 되도록 한다"와 "들어온 물과 불순물들을 배출시킨다"는 물이 화물창에 들어서는 것을 확실하게 방지하는데 있어서, 더욱 뛰어난 방안임이 틀림없다. 따라서 전자에 3점을, 후자에 9점을 부여하여 그 차이를 두었다. 행렬의 아래 부분에 나타난 score는 각각의 기능이 고객의 요구조건을 어느 정도 만족시키고 있는가를 의미하는 기능의 중요성을 나타내는 수치이다. 이는 기능과 고객 요구사항의 정량적인 관계 및 요구사항의 중요도를 사용하여 계산하는 것으로 각각의 기능들이 100% 제 기능을 다 수행한다는 가정에서 구한 값들이다. 한 예로, 주요기

능 "Enable cargo handling"의 하위 네번째로 나타난 "Move hatch cover"의 score를 구해보도록 한다. 이 기능은 세 가지 고객의 요구조건과 관련된 것으로 파악되었으며 "Easy to cargo handling"과는 강한 관계(◎),

"Good reliability of sub-system & component"와는 보통 관계(○) 그리고 "Safe to operator or crew"와는 약한 관계(△)가 있음을 나타낸다. 행렬의 왼쪽에 나타난 요구 사항의 중요도는 각각 4점, 6점, 10점을 보여준다. 강한

Table 2. Satisfying rating & check lists of functions

Functions		Check Lists	Satisfying Rating
Enable cargo handling	Provide entrance	Coaming size, Stowage room size	0.8
	Generate power	Power capacity, Cover weight	1.0
	Transmit power	Transmit type	0.7
	Move hatch cover	Velocity, Moving time	0.9
	Provide controls	Accuracy, ease	0.6
	Stow hatch cover	Stowage room size	0.8
	Fasten opened hatch cover	Fixing method(stopper)	0.9
Protect cargo	Provide cover	Cover type	1.0
	Fasten closed hatch cover	Cleat type, (required time)	1.0
	Provide watertightness	Packing related, material	0.8
	Drain water & impurities	Drainage type (single, double)	0.9
	Ventilate cargo hold	Ventilator type (manual, automatic)	0.8
	Provide enough cover strength	Plate thickness, longi/girder size	0.9
Contribute ship strength or safety	Contribute longitudinal strength	Coaming length, Longi length	0.8
	Contribute transverse strength	Coaming breadth, Girder length	0.8
	Keep transverse stability of ship	Cover type, dimension, weight	0.7
	Provide attachment to ship	Coaming welding condition	0.8

		Function of Hatchway																
		Enable cargo handling							Protect cargo					Contribute ship strength or safety				
		Provide entrance	Generate power	Transmit power	Move hatch cover	Provide controls	Stow hatch cover	Fasten opened hatch cover	Provide cover	Fasten closed hatch cover	Provide watertightness	Drain water and impurities	Ventilate cargo hold	Provide enough cover strength	Contribute longitudinal strength	Contribute transverse strength	Keep transverse stability of ship	Provide attachment to ship
Satisfaction Rating		0.8	1.0	0.7	0.9	0.6	0.8	0.9	1.0	1.0	0.8	0.9	0.8	0.9	0.8	0.8	0.7	0.8
Customer Requirement	Strong enough to endure external force						△		△					◎	○	○	○	◎
	Easy to cargo handling	◎	△	○	◎	○	◎	◎										
	Good reliability of control				◎													
	Good reliability of sub-system & component		○	○	○	△		○	○	○	○							
	Perfect prevention of water ingress to hold							○	○	◎	◎		○					
	Proper protection of cargo							○	○	◎	◎	◎	○	○	○	○	○	○
	Safe to operator or crew				△		△	○		○					◎	◎	◎	○
	Proper cargo monitoring system																	
	User friendly operating system					◎												
	Importance Score $\Sigma = 1580, M = 92.94$		36	22	30	64	144	46	88	54	106	180	180	72	90	126	126	126
Percentage Importance Score (%)		2.278	1.392	1.899	4.051	9.114	2.911	5.57	3.418	6.709	11.39	11.39	4.557	5.696	7.975	7.975	7.975	5.696
		27.215							43.165					29.620				
Satisfaction Score $\Sigma = 1959, M = 115.2$		45	22	43	71	240	58	98	54	106	225	200	90	100	158	158	180	113
Percentage Satisfaction Score (%)		2.3	1.1	2.2	3.6	12	2.9	5	2.8	5.4	11	10	4.6	5.1	8	8	9.2	5.7

Fig. 2. VOC-Function Relation Matrix

관계(◎)는 9점, 보통 관계(○)는 3점, 약한 관계(△)는 1점을 나타내므로 "Move hatch cover"라는 기능의 Score는 $(9 \times 4) + (3 \times 6) + (1 \times 10) = 64$ 가 된다.

이렇게 구한 이상적인 모델의 score는 본 연구에서 다루려는 side rolling 종류의 화물창구의 고객요구사항에 기반한 기능만족 정도를 분석하는데 중요하게 사용될 수 있다.

side rolling 화물창구에 대한 score를 구하기 위해서 우선적으로 해야 할 일은 각 기능의 실제 만족정도이다. 즉, 대상으로 삼고있는 side rolling의 경우에는 모든 기능들이 100% 만족된다고 볼 수 없는 일이다. 따라서 위 Fig. 2에서도 보여지는 각각의 기능에 대한 만족정도 (satisfying rating)를 구해서 이에 대한 score(satisfying score)를 구해야 한다. 우선 각 기능들의 만족도는 0부터 1까지의 값을 취할 수 있다. 앞에서 구한 score와의 비교를 위해 최대값을 1로 정규화 한 것이며, 각 기능에 대한 만족도와 이를 결정하기 위한 고려사항은 Table 2와 같다.

각 기능의 satisfying score는 score에 각 기능에 해당하는 satisfying rating을 곱하면 구할 수 있다. 위에서 예로 든 "Move hatch cover"라는 기능에 대하여 satisfying score를 구해보면 score가 64점이고 satisfying rating이 0.9이므로 $64 \times 0.9 = 57.6$ 점이 된다. 위의 Fig. 2에는 이렇게 구한 각 기능의 satisfying score가 나타나 있다. satisfying score가 높은 기능들이 side rolling 형식의 화물창구에서는 고객의 요구사항을 만족하면서 훌륭하게 수행되는 중요한 기능임은 두말할 나위가 없다. 이 과정에서 파악된 각 기능들의 중요도는 다음 단계에서 입력 값으로 사용된다.

3.2 기능과 구조간의 관계행렬

화물창구 시스템은 크게 5가지 서브 시스템으로 구성 된다고 볼 수 있다. 우선 창구의 덮개 역할을 하는 hatch cover와 창구의 입구 역할을 담당 하는 hatch coaming이 있으며 hatch cover를 움직이는데 필요한 actuating/operating 시스템, 화물창의 수밀을 위한 security arrangement가 있다. 덧붙여 여기에 포함되지 못한 다른 부재들을 묶어서 miscellaneous fittings라는 서브 시스템을 추가하였다. 이러한 서브 시스템 하위에는 이를 구성하는 부재나 부품이 존재하는데 이러한 전체적인 구조는 Fig. 3과 같다.

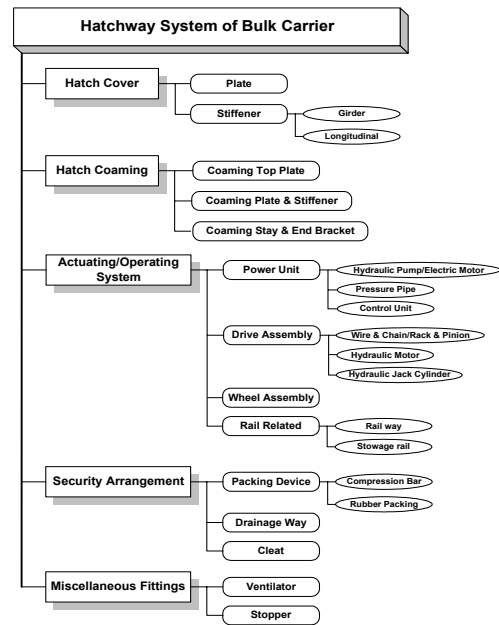


Fig. 3. Hatchway system of bulk carrier

전체적인 구조가 파악되었다면 기능과 구조간의 관계 행렬이 작성된다. Fig. 4는 완성된 관계행렬을 보여준다. 이 단계는 중요하게 파악된 기능을 담당하는 부재나 부품을 파악한다.

우선 기능과 구조간의 관계는 기능 중심으로 이루어지며, 한 예로 "Provide watertightness" 기능은 네 가지 부재와 관련이 있다. 우선 hatch cover와 hatch coaming의 상대적인 움직임을 제어함으로써 둘 사이에 틈새가 발생하지 않도록 하는 "cleat"가 있으며 수밀을 더욱 확고히 하는 "rubber packing" 및 "compression bar" 그리고 이를 통과해 들어온 해수를 밖으로 내보내는 "drainage way" 등이 있다. 이들의 정량적인 관계성은 첫번째 행렬(Fig. 2)에서 사용된 바 있는 ◎, ○, 및 △를 사용하며, 앞의 "Provide watertightness" 기능과 관계된 "rubber packing"과 "compression bar"는 수밀을 담당하는 주요 부재이기에 강한 관계(◎;9점)가 있으며, "cleat"와 "drainage way"의 경우 각각 hatch cover와 coaming의 상대적 움직임을 막고 침범한 해수를 밖으로 배출시킴으로써 수밀의 역할에 한몫을 하지만 그 역할은 전자에 비해 다소 작기 때문에 이들은 주어진 기능과 보통 관계(○;3점)의 관계성이 있다고 볼 수 있다.

행렬의 아래에 나타난 score는 첫번째 행렬(Fig. 2)의 그것과 같은 방법으로 계산되며 여기서 각 기능의 중요

		STRUCTURE OF HATCH WAY																			
		Hatch cover		Hatch coaming			Actuating/operating system					Security arrangement			Misc. fittings						
		Plate	Longitudinal stiffener	Gilder	Coaming plate	Coaming stay	Coaming top plate	Hydraulic pump	Pressure pipe	Control unit	Wheel assembly	Driving assembly	Rail way	Stowage rail	Rubber packing	Compression bar	Chest	Drainage way	Ventilator	Stopper	
FUNCTION OF HATCH WAY	Enable cargo handling	Provide entrance	2.3																		
		Generate power	1.1																		
		Transmit power	2.2																		
		Move hatch cover	3.6																		
		Provide controls	12.3																		
		Stow hatch cover	2.9																		
	Protect cargoes	Fasten opened hatch cover	5.0																		
		Provide cover	2.8																		
		Fasten closed hatch cover	5.4																		
		Provide watertightness	11.5																		
		Drain water and impurities	10.2																		
		Ventilate cargo hold	4.6																		
	Contribute ship strength or safety	Provide enough cover strength	5.1																		
		Contribute longitudinal strength	8.0																		
		Contribute transverse strength	8.0																		
		Keep transverse stability of ship	9.2																		
		Provide attachment to ship	5.7																		
	Importance Score $\Sigma = 1507.5, M = 79.3$		119	118	118	183	52	66	17	20	130	33	33	33	29	103	103	111	126	41	72
	Percentage Importance Score (%)		7.9	7.8	7.8	12	3.4	4.4	1.1	1.3	8.6	2.2	2.2	2.2	1.9	6.9	6.9	7.3	8.4	2.7	4.8
			23.591		19.925			19.489					29.443			7.552					

Fig. 4. Function-structure relation matrix

도는 첫번째 행렬에서 파악된 각 기능의 satisfying score 의 백분율이다. 이러한 score를 기준으로 하여 높은 점수를 받은 구조가 중요한 것으로 선택될 수 있다.

3.3 FMEA의 수행

화물창구의 파괴모드를 밝혀내고 위험도를 분석하기 위해서 FMEA를 수행해야 한다. 본 연구에서는 그 대상이 구조물이며 이를 개선하기 위한 목적이 강하므로 Design FMEA(DFMEA)에 해당하며, 전체 시스템인 화물창구를 5가지 서브 시스템으로 나누고 이 범위에서 발생할 수 있는 파괴모드를 파악하는 방법을 사용하였기 때문에 Top-down 방식이라 할 수 있다.

전체 파괴모드는 43가지가 파악되었으며 이의 결과, 원인 및 발견 방법에 대한 정량적인 평가는 다음의 Table 3, Table 4, Table 5를 기준으로 수행된다. 파괴모드, 결과, 원인 및 발견 방법에 대한 내용과 이들의 정량적 평가에 대한 예시는 Appendix를 참고하도록 한다.

Table 3. Severity rating scales

Description	Definition	Rating
Catastrophic	- Loss of the ship and/or fatalities	10
Major	- Significant damage to cargo - Major degradation of the ship strength - Major increase in the operational duties of the crew	7
Minor	- Minor damage to cargo - Minor degradation of the ship strength (local damage to the structure) - Increase in the operational duties of the crew	4
Insignificant	- Failure which can be readily compensated by the crew - No significant harm to people, property and the environment	1

Table 4. Occurrence rating scales

Description	Definition	Rating
Frequent	- Likely to happen yearly or more frequently	10
Reasonably Probable	- Likely to happen during the life of a bulk carrier	7
Remote	- Unlikely but not unknown to happen during the life of a bulk carrier	4
Extremely Remote	- Only likely to happen in exceptional circumstances	1

Table 5. Detection rating scales

Description	Definition	Rating
Absolutely Uncertain	- The defect is not detectable or no inspection done	10
Low	- Detected by periodical inspection by class	7
Moderate	- Detected by occasional check by crew - Detected whenever defect occurs, but not right away	4
Almost Certain	- The defect is detectable as soon as it occurs - Observer is always ready to detect	1

FMEA에서는 위험도를 평가하기 위한 잣대로 R.P.N.을 사용한다. 이는 영향력(severity)과 발생빈도(occurrence) 그리고 발견능력(detection)의 곱으로 계산되는데 높은 수치일수록 위험도가 높음을 의미한다. 각각의 파괴모드에 대한 R.P.N.의 예는 Appendix의 FMEA Worksheet를 참고한다.

결과에서 얻은 R.P.N. 수치를 계산된 빈도에 따라 구분해 보면 Table 6과 같으며 명암처리를 한 부분은 R.P.N. 수치에 따라 중요하게 여겨지는 파괴모드 ID를 나타낸다.

Table 6. R.P.N. & Its Occurrence number

R.P.N.	10	16	28	40	112	160	196	280
Occurr. Num.	1	2	8	1	20	1	8	2
ID	1.16	1.3 1.12	1.13 2.3 3.1 3.3 3.4 4.3 4.5 5.4	2.9	1.4 1.5 1.6 1.7 1.8 1.9 1.10 1.15 2.4 2.7 2.8 2.12 3.2 4.1 4.2 4.4 4.6 4.7 5.1 5.2	2.10	1.1 1.2 2.1 2.2 2.5 2.6 2.11 5.3	1.11 1.14

3.4 고객 요구사항과 파괴모드의 관계행렬

이미 언급했듯이 FMEA의 R.P.N.을 이용한 위험도 분석은 단순히 공학자의 견해만이 다루어진 것이다. 안전성은 품질의 한 특성을 차지하는 만큼 고객의 목소리도 포함해야만 한다. 따라서 본 단계를 거쳐 고객의 목소리와 공학자의 전문적 견해를 동시에 포함하도록 한다. 파악된 파괴모드가 많음으로 인해 본 단계는 파괴모드를 중심으로 이루어진다. 즉, 각 파괴모드를 하나하나의 요구사항과 비교하면서 파괴모드가 발생할 경우 위배되는 요구사항을 찾아 이를 파괴모드와 관계짓는다. Fig. 5는

완성된 관계행렬을 보여준다.

Fig. 5에서 고객의 요구사항을 나타내는 번호는 Table 1을, 파괴모드를 나타내는 ID는 FMEA Worksheet를 참고하도록 한다. 이들의 관계를 파악하는데 ‘어떤 파괴모드가 발생하여 해수가 침범하는 결과가 나타난다면, 이는 요구사항 "Perfect prevention of water ingress to cargo hold"와 "Proper protection of cargo"에 관련된다 등의 기준을 마련하면 쉽게 수행할 수 있다. 정량화 하는데 있어서도 파괴모드의 영향력을 기준으로 하여 'Catastrophic'은 강한 관계(◎;9점)라는 식의 기준을 세워 수행한다.

Fig. 5에서 score는 고객의 목소리만을 반영한 것으로 둘 간의 정량적 관계성과 요구사항의 중요도만으로 계산된다. 중요한 것은 R.P.N. score인데 이는 score에 R.P.N. scale을 곱하여 계산하는 것으로 고객과 공학자의 견해가 포함된 개념이다. 따라서 위험도는 R.P.N. score를 기준으로 평가하도록 한다. R.P.N.과 score 그리고 R.P.N. score에 의해 파악된 중요한 파괴모드는 Table 7과 같다.

3.5 화물창구의 품질평가

본 연구에서 제시한 방법을 화물창구에 적용한 과정과 그 결과를 앞에서 언급하였다. QFD를 이용하여 성능(performance)을 분석하였으며, FMEA를 이용하여 위험도(risk)를 분석하였다. 그러면 이 결과를 이용하여 성능과 안전성에 중요한 부재들을 알아보도록 한다.

우선 QFD를 통해 분석된 성능과 관련된 주요 부재를 파악한다. 고객의 요구사항에서 출발하여 기능을 거쳐 화물창구의 구조까지 전개된 두번째 행렬(Fig. 4 참조)을 이용하면 쉽게 알 수 있다. Fig. 4를 보면 8가지 부재가 파악되었는데 hatch cover의 plate와 longi. 및 girder 그리고 hatch coaming의 plate, rubber packing 및 compression bar, 또 cleat와 drainage way가 바로 그것이다.

그 다음으로 FMEA를 이용하여 안전성과 관련된 주요 부재를 파악하도록 하자. R.P.N. scale을 이용하여 파악된 중요한 파괴모드를 고려하여 이런 파괴모드가 발생하는 부재를 밝혀낼 수 있다. Fig. 5의 고객 요구사항과 파괴모드간의 관계행렬이나 Table 7을 보면 관련 파괴모드를 알 수 있으며, 이들과 관련된 부재를 파악하는 것은 FMEA Worksheet를 이용하면 된다. 파괴모드 ID 1.1, 1.6, 1.13은 hatch cover의 plate와 관계되고 ID 1.14는 hatch cover의 longi.와 girder, ID 1.15는 hatch cover의 cross joint와 관련되어 있다. 파괴모드 ID 2.1, 2.2,

2.5는 hatch coaming의 plate, ID 2.11은 hatch coaming의 stay, ID 2.12는 hatch coaming의 top plate와 관련이 있으며 ID 3.2는 pressure pipe, ID 4.1과 4.2는 rubber

packing과 compression bar, ID 4.4와 4.7은 cleat와 관련되어 있다. Ventilator는 파괴모드 ID 5.1과 5.2와 관련된 부재이다.

Failure Mode I.D.	Import. Ratings	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	1.10	1.11	1.12	1.13	1.14	1.15	1.16	
R.P.N.		196	196	16	112	112	112	112	112	112	112	280	16	28	280	112	10	
R.P.N. SCALE		0.7	0.7	0.06	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	1	0.06	0.1	1	0.4	0.04	
VOC	1	4	○	○	△	○	◎	○					○	◎		△	◎	
	2	4																
	3	8	○		△	○	△	◎	○			△		◎	△	△		
	4	6	△	△			△			○	○	△	○			○	○	
	5	10												◎		○	◎	
	6	8												◎		△	◎	
	7	10									△		△				◎	
	8	6						○										
	9	6																
SCORE(Σ= 2966)		42	18	12	36	18	126	36	18	18	24	18	46	270	26	68	288	
%		1.42	0.61	0.4	1.21	0.61	4.25	1.21	0.61	0.61	0.81	0.61	1.55	9.1	0.88	2.29	9.71	
RPN Score(1000.4)		29.4	12.6	0.69	14.4	7.2	50.4	14.4	7.2	7.2	9.6	18	2.63	27	26	27.2	10.3	
%		2.94	1.26	0.07	1.44	0.72	5.04	1.44	0.72	0.72	0.96	1.8	0.26	2.7	2.6	2.72	1.03	

◎	9
○	3
△	1

Failure Mode I.D.	Import. Ratings	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	2.10	2.11	2.12
R.P.N.		196	196	28	112	196	196	112	112	40	160	196	112
R.P.N. SCALE		0.7	0.7	0.1	0.4	0.7	0.7	0.4	0.4	0.14	0.57	0.7	0.4
VOC	1	4	○	○	△	○	◎				○	◎	○
	2	4											
	3	8	○	○	○	○	◎			△	△		◎
	4	6	△	△				○	○	△	△	○	△
	5	10								△		◎	
	6	8										○	
	7	10							△	△		△	△
	8	6											
	9	6											
SCORE(Σ= 2966)		42	42	28	36	108	18	18	24	34	30	166	100
%		1.42	1.42	0.94	1.21	3.64	0.61	0.61	0.81	1.15	1.01	5.6	3.37
RPN Score(1000.4)		29.4	29.4	2.8	14.4	75.6	12.6	7.2	9.6	4.86	17.1	116	40
%		2.94	2.94	0.28	1.44	7.56	1.26	0.72	0.96	0.49	1.71	11.6	4

Failure Mode I.D.	Import. Ratings	3.1	3.2	3.3	3.4	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	5.1	5.2	5.3	5.4
R.P.N.		28	112	28	28	112	112	28	112	28	112	112	112	112	196	28
R.P.N. SCALE		0.1	0.4	0.1	0.1	0.4	0.4	0.1	0.4	0.1	0.4	0.4	0.4	0.4	0.7	0.1
VOC	1	4		○	○	△				◎	◎				○	○
	2	4	○	○	○											
	3	8	◎	△	○	○										○
	4	6	△	○	○		◎		○							○
	5	10					◎	◎	◎	○		○	◎	◎	○	
	6	8					○	○	○	△		△	○	○		
	7	10		△												
	8	6														
	9	6									○	○	○	○		○
SCORE(Σ= 2966)		90	60	66	40	168	114	132	74	54	56	132	132	66	18	54
%		3.03	2.02	2.23	1.35	5.66	3.84	4.45	2.49	1.82	1.89	4.45	4.45	2.23	0.61	1.82
RPN Score(1000.4)		9	24	6.6	4	67.2	45.6	13.2	29.6	5.4	22.4	52.8	52.8	26.4	12.6	5.4
%		0.9	2.4	0.66	0.4	6.72	4.56	1.32	2.96	0.54	2.24	5.28	5.28	2.64	1.26	0.54

Fig. 5. VOC-failure mode relation matrix

Table 7. Comparison before with after introducing R.P.N.

ID.	Failure Modes	RPN	Score		RPN Score	
1.1	Excessive Deflection of Hatch Cover	196	42	1.416%	29.4	2.939%
1.2	Excessive Deflection of Hatch Cover	196	18	0.607	12.6	1.259
1.6	Excessive Deflection of Hatch Cover for Ballast Holds	112	126	4.248	50.4	5.038
1.11	Wearing-out of Coating/Painting at Hatch Cover	280	18	0.607	18	1.799
1.13	Global Tearing-out of Hatch Cover	28	270	9.103	27	2.699
1.14	Detachment of Stiffener from Plate	280	26	0.877	26	2.599
1.15	Damage to Cross-Joint between Panels	112	68	2.293	27.2	2.719
1.16	Loss of Hatch Cover	10	288	9.71	10.29	1.028
2.1	Excessive Deflection of Hatch Coaming	196	42	1.416	29.4	2.939
2.2	Excessive Deflection of Hatch Coaming	196	42	1.416	29.4	2.939
2.5	Excessive Deflection of Hatch Coaming	196	108	3.641	75.6	7.557
2.6	Wearing-out of Coating/Painting at Hatch Coaming Plate	196	18	0.607	12.6	1.259
2.10	Wearing-out of Coating/Painting at Hatch Coaming Stay	160	30	1.011	17.14	1.714
2.11	Tearing-out from Deck Plate	196	166	5.597	116.2	11.62
2.12	Damage to Top Face Bar of Hatch Coaming	112	100	3.372	40	3.998
3.1	Failure in Power Supply	28	90	3.034	9	0.9
3.2	Damage to Pressure Pipes	112	60	2.023	24	2.399
4.1	Loosening of Packing	112	168	5.664	67.2	6.717
4.2	Loosening of Packing	112	114	3.844	45.6	4.558
4.3	Defect of Drainage Channel	28	132	4.45	13.2	1.319
4.4	Damage of Cleat during Passage	112	74	2.495	29.6	2.959
4.7	Neglect of Closing or Cleating Access Hatch & Opening	112	132	4.45	52.8	5.278
5.1	Ventilator is Open Prior to Rough Weather	112	132	4.45	52.8	5.278
5.2	Damage of Ventilator or Sounding Pipe	112	66	2.225	26.4	2.639
5.3	Wearing-out of Ventilator	196	18	0.607	12.6	1.259

Table 8. Comparison of critical structures

	Related Structure	Common Structure
Performance	Cover plate, Longi. & Girder, Coaming plate, Rubber packing & Compression bar, Cleat, Drainage way	Cover plate, Longi. & Girder, Coaming plate, Rubber packing & Compression bar, Cleat
Safety (R.P.N)	Cover plate, Longi. & Girder, Cover cross joint, Coaming plate & stay & top face, Pressure pipe, Rubber packing & Compression bar, Cleat, Ventilator	

성능과 안전성 관점에서 파악된 부재들을 정리하면 다음의 Table 8과 같으며 두 방법에 공통적으로 나타난 부재로는 cover plate, longi. & girder, coaming plate, rubber packing & compression bar, cleat 가 있으며 Table 8에서 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 제품/시스템의 품질을 성능과 안전성으로 나누어 각각을 QFD와 FMEA를 이용하여 분석하는 방법을 제시하였으며, 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. FMEA를 통해 파악된 파괴모드를 공학자의 견해 뿐만 아니라 고객의 목소리까지 반영하여 평가하였으며, 살물선의 화물창구 적용 예제에서 PSAM의 최종 결과는 성능과 안전성 측면에서 중요하게 다루어야 하는 부재/부품을 파악하였다.
2. 성능과 안전성 측면에서 개별적으로 파악된 중요 부재/부품들 중에는 공통적으로 파악된 것들이 존재하는데, 이들은 성능과 안전성을 동시에 향상시킬 수 있는 부재/부품들이므로 설계자는 설계 시 이러한 부재나 부품에 더 많은 관심을 갖고 개선함으로써 제품/시스템의 품질을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

References

[1] K. Kivenko, Quality Control For Management, Prentice-Hall, Inc., 1984.
 [2] D. A. Garvin, What Does Product Quality Really Mean, Sloan Management Review, pp. 25-43, 1984.
 [3] M. Larry Shillito, Advanced QFD: Linking Technology to Market and Company Needs, John Wiley & Sons

- Inc., 1994.
- [4] M. Martin & K. Ishii, Quality Function Deployment, ME 217: Product Definition, 1997.
- [5] J. K. Yoo, S. Choi, "A Study on the Quality Function Deployment for TQM Structure", Proceedings of the Korea Academy-Industrial Cooperation Society Spring Conference, pp. 233-236, 2003.
- [6] Paul Palady, Failure Modes and Effects Analysis, PT Publications Inc., 1995.
- [7] Robin E. McDermott & Raymond J. Mikulak & Michael R. Beauregard, The Basics of FMEA, Resource Engineering Inc., 1996.
- [8] J. H. Park, "Maintenance Method of Mail Sorting Machine Based on FMEA", J. of the Korea Academy-Industrial Cooperation Society, vol. 11, no. 5, pp. 1601-1607, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2010.11.5.1601>
- [9] Y. W. Lee, I. G. Kwon, "A Study on the Applicability of FMEA and it's Results for Hand Grenade in Government Quality Assurance Planning", J. of the Korea Academy-Industrial Cooperation Society, vol. 17, no. 2, pp. 252-258, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.2.252>
- [10] The Nautical Institute, Improving Ship Operational Design, The Nautical Institute, 1998.
- [11] Norman J. McCormick, Reliability and Risk Analysis, Academic Press Inc. pp. 398-402., 1981.
- [12] IACS, HAZard IDentification(HAZID) on the Watertight Integrity of the Fore End of Bulk Carriers, 1999.

박 창 규(Chang-Kyu Park)

[정회원]



- 2007년 8월 : 서울대학교 조선해양 공학과(공학박사)
- 2007년 9월 ~ 2008년 8월 : 서울대학교 해양시스템공학연구소 선임연구원
- 2008년 11월 ~ 2009년 2월 : LG전자 선임연구원
- 2009년 3월 ~ 현재 : 전주비전대학교 조선해양과 교수

<관심분야>

구조설계, 다분야통합최적설계(MDO), CAD/CAE