大 韓 造 船 學 會 論 文 集
第 36 卷 第 4 號 1999年 11月
Journal of the Society of
Naval Architects of Korea
Vol. 36, No. 4, November 1999

부식효과를 고려한 선체구조 검사계획안의 최적화

김성찬*, 윤장호*, 藤本由紀夫**

Optimization for Inspection Planning of Ship Structures Considering Corrosion Effects

by

Sung-Chan Kim*, Jang-Ho Yoon* and Yukio Fujimoto**

요 약

선체구조는 많은 수의 구조부재로 이루어져 있으며, 구조물의 안전성을 확보하기 위해 모든 부위의 검사를 위해서는 경제적, 사회적인 많은 비용이 필요하므로, 검사시기 및 검사방법의 최적화는 선체구조의 안전성확보 및 경제적 관점에서 매우 중요한 부분이 되고 있다.

선체구조 손상중 많은 부분이 균열이며 이러한 미세한 균열이 성장하여 대규모 파괴로 진전되기 전에 검사를 통하여 균열을 검출하고 수리하는 과정을 Markov 연쇄모델에 의해 이상화 시켰으며, 검사 계획안의 최적화는 유전적 알고리즘을 통하여 구현하였다.

특히 선박은 부식환경하에서 운항하므로 부식에 의한 선체구조부재의 치수가 감소하기 때문에 응력이 변하고 균열진전의 확률적인 특성 또한 변한다. 정상 Markov 연쇄모델로서는 이러한 부식에 의한 영향을 고려할수 없기 때문에 비정상 Markov 연쇄모델에 의해 부식의 영향을 고려하였다.

여러개의 부재군에 대한 검사 계획안의 최적화에 대하여 수치계산을 실시하여 그 특성을 비교하였고, 부식영향하의 부재군에 대하여 검사기간중에 발생되는 고정비용의 정도에 따른 경제성 분석 및 목표 파괴확률의 정도에 따른 검사계획의 차이를 살펴보았다. 수치계산 예를 통하여 전체비용을 줄이기 위해서는 피로수명이 짧은 부재군에 대한 피로수명을 향상시키는 방안이 가장 효율적임을 알 수 있다.

발 표 : 1999년도 대한조선학회 춘계연구발표회 ('99. 4. 22)
접수일자 : 1999년 4월 7일, 재접수일자: 1999년 8월 19일
* 정회원, 삼성중공업 거제조선소 구조연구파트
** 일본 히로시마대학 선박공학과

Abstract

Inspection becomes to be important in the safety of structure and economical viewpoint, because structural damage accompanies lots of economical cost and social problems. Especially ship structure is composed of a lot of members and it is impossible to inspect all members continuously. The purpose of this paper is to get optimal inspection plan containing inspection time and method.

Crack is one of major modes on the structural failure and can lead to collapse of structure. In this paper, the deteriorating process, which contains inspection to detect the crack before the propagation to large crack, is idealized as Markov chain model. Genetic algorithm is also used to accomplish the optimization of inspection plan. Especially, the probabilistic characteristics of cracks are changed, because ship is operating in corrosive environments and the scantling of structural members is reduced due to corrosion. Non-stationary Markov chain model is used to represent the process of corrosion in structural members.

In this paper, the charateristics of indivisual inspection plan are compared by numerical examples for the change of corrosion rate, the cost due to scheduled system down and target failure probability. From the numerical example, it can be seen that the improvement of fatigue life for the members with short fatigue life is the most effective way in order to reduce total maintenance cost.

1. 서 론

선박을 비롯한 구조물의 손상은 구조의 기능 정지로 인한 경제적인 손실을 유발할 뿐 아니라 환경 오염 및 사회적인 문제를 일으키기 때문에 구조물의 안전성을 유지하는 것이 중요한 문제로 대두되었다. 특히 사회적으로 중요한 구조물의 경우, 구조물의 안전성 유지 및 경제적 관점에서의 최적화를 달성하는 상반된 개념을 만족시키기 위해 검사의 중요성 또한 간과할 수 없다. 선체구조의 경우 정기 및 부정기 검사를 통하여 안전성을 유지하고 있으나 충분한 안전성 확보 및 경제적인 관점에서 최적이라고 보기는 어렵다. 선체구조는 많은 수의 구조부재로 이루어져 있으며, 모든 부위의 검사를 위해서는 운항정지 및 많은 경제적인 손실을 감수해야 하기 때문에 검사시기 및 검사방법의 최적화는 선체구조의 안전성확보 및 경제적 관점에서 매우 중요한 부분이 되고 있다.

본 논문에서는 선박구조의 안전성을 확보하는 수단으로 검사를 선택하였고, 그 검사시기와 검사방법의 최적화에 목적을 두었다. 검사의 최적화를 위한 방법론으로는 비용의 최소화를 목적함수로 하는 경우[1]와 안전성을 목적함수로 하는 경우[2,3] 및 안전성을 구속조건으로 한 검사비용의 최소화를 목적함수로 하는 경우[4]가 있다. 본 논문에서는 최적화를 위한 목적함수를 안전성을 구속조건으로 한 검사비용의 최소화로 택하였다.

선체구조 손상의 많은 부분이 균열이며, 이러한 미세한 균열이 성장하여 대규모 파괴로 진전하기 전에 검사를 통하여 균열을 검출하고 수리하는 과정을 Markov 연쇄모델에 의해 이상화 시켰으며, 검사 계획안의 최적화는 유전적 알고리즘을 통하여 구현하였다. Kim등[5]은 유전적 알고리즘을 선체구조 부재의 검사에 적용하여 최적화를 위한 효율적인 파라미터를 결정하였다. 특히 선박은 부식환경하에서 운항하므로 부식에 의한 선체구조부재의 치수가 감소하기 때문에 응력이 변하고 균열진전의 확률적인 특성 또한 변한다. 정상 Markov 연쇄모델[6-8]로서는 이러한 부식에 의한 영향을 고려할 수 없기 때문에 비정상 Markov 연쇄모델[6,9]에 의해 부식의 영향을 고

려하였다.

여러개의 부재군에 대한 검사 계획안의 최적화에 대하여 수치계산을 실시하여 그 특성을 비교하였고, 부식영향하의 부재군에 대하여 검사기간중에 발생되는 고정비용의 정도에 따른 경제성 분석 및 목표 파괴확률의 정도에 따른 검사계획의 차이를 살펴보았다.

2. 부식영향을 받는 구조의 검사계획의 최적화

2.1 부식의 선체응력에의 영향

해수환경 하에서 운항하는 선박의 경우 부식의 위험이 있으며, 설계시 부식여유를 두고 부재치수를 결정한다. 유조선 및 산적화물선에서의 부식에 대한 조사[10]에 의하면 20년간의 부식량은 평균적으로 1-6 mm 정도이며 부위별로 부식속도가 다르고 통계적으로는 부식속도가 Weibull 분포를 따르고 있음을 알 수 있다. 도장 및 방식기구가 열악한 경우 그 수준은 매우 심각한 경우도 보고되고 있으며 초기 설계치수의 30%이상이 부식된 경우도 보고되고 있다[11]. 부식에는 여러 가지 형태가 존재하는데, 일반부식 (general corrosion)은 좌굴이나 최종강도에서 고려되고 있으며, 국부부식(localized corrosion) 또는 침식(pitting corrosion)은 응력집중 및 피로균열문제에서 많이 고려되고 있다. 본 연구에서는 일반부식을 대상으로 하였으며 그 효과로는 부재치수가 감소함에 따라 응력레벨이 상승하고 그로 인해 초기 균열발생시기 및 균열전파속도가 빨라져 균열전파형태가 변경된다. 본 논문에서는 부식에 의한 응력상승 및 균열발생시기의 조기화만을 통계적으로 고려하였고, 균열전파의 형태는 변하지 않는다고 가정하였다. 응력 변화에 따른 피로수명 변화는 다음과 같은 관계가 있다.

선체구조에서 응력의 장기분포는 통상 이계수 Weibull 분포를 따른다고 알려져 있고, 피로수명은 다음과 같은 S-N 곡선으로 표현된다.

$$f(S)=\frac{\alpha}{\beta}\left(\frac{S}{\beta}\right)^{\alpha-1}\exp\left\{-\left(\frac{S}{\beta}\right)^{\alpha}\right\} \quad (1)$$

$$S=CN^{-\frac{1}{m}} \quad (2)$$

(1)식에서 S는 응력이고 α는 형상계수이고 β는 척도계수이다. 또한 (2)식에서 N은 응력의 반복 횟수이며 C 및 m은 실험상수이다. (2)식과 Miner의 법칙을 이용하면 응력비과 피로 수명비와의 관계를 (3)식과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{N_1}{N_2}=\left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{-m} \quad (3)$$

여기서 N_1과 N_2는 각각 응력 S_1 과 S_2에 대한 피로수명을 의미한다. 응력비와 피로수명사이에 식(3)과 같이 반비례 관계가 있음을 알 수 있고, 통상 노치응력집중계수가 3에서 4인 경우 m=5 정도가 됨을 알 수 있다 [12]. 본 논문에서는 식(3)이 부식에 따른 두께와 응력이 면내응력의 경우 선형적으로 반비례하는 관계식과 식(3)을 이용하여 수명을 구하였다.

2.2 검사계획의 최적화 기법

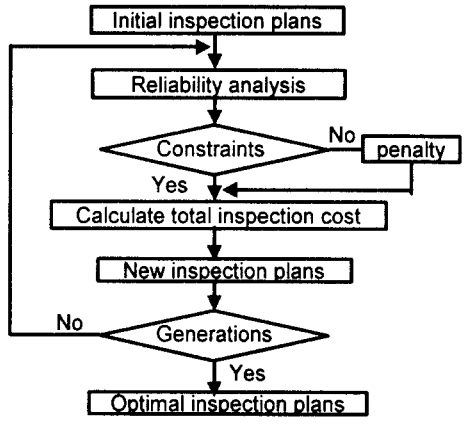

Fig.1 Flow chart for the optimization of the inspection plan by genetic algorithm

부식효과를 고려한 구조물 검사의 최적화는 Fig.1과 같은 과정으로 구하였다. 최적화 과정은 유전적 알고리즘을 이용하여 구하였고, 각 개체에 대한 적응도 함수는 파괴확률을 조건부로 한 검사비 및 운항정지에 따른 서비스 손실을 포함시킨 총비용으로 택하였다. 즉 초기 검사계획안을 무작위로 선택하여 선택된 검사계획안에 대한 파괴확률을 구한 후 제한조건을 만족하는 계획안에 대해서는 총비용의 역수를 적응도 함수값으로 사용하고, 제한조건을 만족하지 못하는 경우 벌칙으로 매우 과다한 비용을 강제로 부여하여 다음 세대에서는 선택될 확률이 매우 낮게 하였다. 이러한 과정을 유전적 알고리즘의 순서에 의해 반복 수행하였고, 이때 사용된 비용의 목적함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

Object function :

$$C_T = \sum_{i=1}^{n} \{C_{ISI}(i) + C_{SWS}(i)\} \tag{4}$$

여기서 C_T는 총비용이며, C_{ISI} 는 순수하게 검사에 사용된 비용이며, C_{SWS}는 검사로 인해 발생하는 고정비용이다. C_{ISI}는 검사의 횟수 및 방법에 따라 변동하는 비용이며, C_{SWS}는 검사 발생에 따라 발생하기 때문에 개개의 부재검사에 반드시 비례하지 않으며 전 부재군의 검사횟수에 비례하여 증가한다.

매우 긴 전체 유전자의 특성 및 각 부재의 유전적 장점을 충분히 살리기 위해 고안된 특차전형법(Special elite selection method)을 채택하였고 [5], 각 부재 당 2 비트의 염색체 길이를 배정하였다. 각 염색체의 특징으로는 '00' 이 검사가 없고, '01'은 보통검사, '10'은 표본검사 그리고 '11'은 정밀검사를 나타낸다. 각 검사의 특징은 2.3.2절에 기술되어 있다. 기본적인 검사간격은 1년을 기준으로 택하였고, 검사가 없는 염색체의 고려로 수년간의 간격도 나타낼 수 있으나, 1년 미만의 검사간격은 현실에 맞지 않아 고려하지 않았다.

2.3 비정상 Markov 연쇄 모델

2.3.1 천이행렬 및 상태벡터

파괴확률은 피로신뢰성 계산 시 많이 채택하고 있는 Markov 연쇄모델을 사용하여 구하였다. 초기 상태벡터와 천이행렬의 관계에 의해 임의의 시간이 흐른 후의 상태를 구하는 방법으로 부식 및 마모현상을 고려하는 경우 시간에 따라 천이행렬이 변하게 된다. 비정상 Markov 연쇄모델을 사용하여 시간의 변화에 따른 천이행렬의 변화를 고려할 수 있으며 다음과 같은 과정으로 표현할 수 있다.

시간 t=0에서 초기상태 확률 벡터를 A(0)라 하면

$$A(0) = \{a_1(0), a_2(0), a_3(0), \ldots\ldots a_M(0)\} \tag{5}$$

로 표시할 수 있다. 여기서 $a_1, a_2, \ldots\ldots a_M$ 은 균열길이 상태가 $1, 2, 3\ldots, M$ 일때의 파괴확률이다. n회 천이 후 상태벡터 A(n)은 다음과 같다.

$$A(n) = A(0)\Pi_{i=1}^{n} P_i \tag{6}$$

i 번째 상태에서 천이행렬 P_i 는 다음과 같다.

$$P_i = \begin{bmatrix} p_1 & q_1 & 0 & .. & .. & .. & 0 \\ 0 & p_2 & q_2 & .. & .. & .. & 0 \\ .. & .. & .. & .. & .. & .. & .. \\ .. & .. & .. & p_b & q_b & .. & .. \\ .. & .. & .. & .. & .. & .. & .. \\ .. & .. & .. & .. & .. & p_{M-1} & q_{M-1} \\ .. & .. & .. & .. & .. & .. & 1 \end{bmatrix} \tag{7}$$

여기에서 p_b는 균열상태가 b-state에 잔류할 확률이며, q_b는 (b+1)-state로 전이할 확률이다. p_b, q_b 의 계산은 평균균열 진전곡선에서 두 균열상태에 소요되는 시간의 차의 역수로 구할수 있다 [13]. 천이행렬에서 부식의 영향을 고려하는 경우, 시간에 따라 균열곡선이 변경되고 변경된 곡선에서 p_b, q_b 가 결정이 된다. 즉 부식이 진행되

면 판의 두께가 감소하고 그에 따라 응력이 증가한다. 증가된 응력에 따라 피로수명이 (3)식과 같이 감소하고 감소된 균열진전곡선에서 천이확률을 구한다. 통상 단일응력의 시편에 대한 피로시험에서는 포물선형의 균열진전곡선이 보여지고 있으나, 복잡한 선박구조물의 균열진전 양상은 균열이 진전함에 따라 응력이 재분배되고, 균열형상이 변하기 때문에 실 선박 구조물의 경우 일차함수에 근접하는 양상을 보인다. 따라서 사용된 균열진전곡선은 1차함수로 가정하였다.

검사에 의해 균열이 발견된 경우, 완전히 보수되는 보수완전 모델이 가정되었고 보수 후부터 다음 검사까지 사용된다. 차기 검사시의 상태 벡터 A_{BI} 는

$$A_{BI}(t+1) = A_{AI}(t) \times P_k \tag{8}$$

여기서 k는 다음 검사까지의 천이횟수이고, A_{AI}는 보수후의 상태벡터이다. 파괴확률 P_F는 다음과 같다.

$$P_F = \{a_M(t+1) - a_M(t)\} \tag{9}$$

2.3.2 검사방법에 따른 POD의 차이

검사에 의한 균열검출능력은 POD(Probability of crack detection)로 나타내고 있다. 선박구조에 대한 평균적인 POD 곡선을 참고문헌[13]에서 상세히 설명하고 있다. 본 논문에서는 보통검사, 표본검사 및 상세검사를 사용하였다.

보통검사는 육안으로 2-5m 정도의 거리에서 검사를 수행하는 경우이고, 상세검사는 매우 근접한 거리에서 부재를 상세히 검사하는 경우로 POD 곡선은 Fig.2 에서 보여주고 있다.

$$(POD)_1 = \frac{\exp\{-6.18+1.45\log(a-20)\}}{1+\exp\{-6.18+1.45\log(a-20)\}}, \tag{10}$$

$$(POD)_2 = \frac{\exp\{-5.18+0.86\log(a-100)\}}{1+\exp\{-5.18+0.86\log(a-100)\}}. \tag{11}$$

여기서 $(POD)_1$와 $(POD)_2$는 각각 상세검사시와 보통검사시의 곡선식이며, a는 균열길이

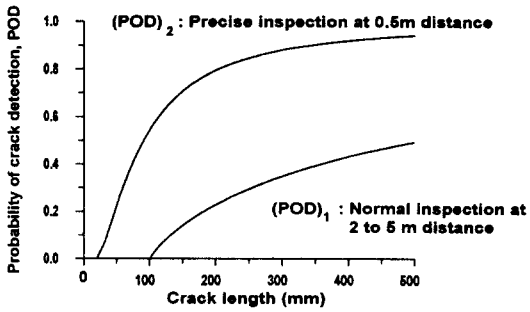

Fig.2 POD curves for both normal and precise inspections

를 말한다. $(POD)_1$의 경우 균열길이가 20mm 이하인 경우 거의 검출이 안됨을 알 수 있고, $(POD)_2$인 경우는 100mm 이하에서 거의 검출할 수 없음을 알 수 있다.

표본검사는 표본추출율(Sampling ratio)만큼 표본을 추출해 상세검사를 수행하고 표본중에 균열이 존재하면 나머지 부재에 대해 상세검사를 수행하며, 표본중에 균열이 존재하지 않으면 검사를 종료하는 방법이며, 표본검사에 대한 균열검출확률 (POD)c 는 다음식으로 구한다[13]

$$(POD)_c = r\times(POD)_1 + (1-r) \times\{1-(1-Q_1)^m\}\times(POD)_1 \tag{12}$$

여기에서 r은 표본추출율이며, Q_1은 상세검사시의 균열검출율이다. Q_1은 다음 식으로 표현된다.

$$Q_1 = \int_{a_0}^{a_{cr}} (POD)_1 \times f_a(a)\,da \tag{13}$$

여기서 $f_a(a)$는 Markov 연쇄모델에서 균열의 상태벡터를 의미하고, a_0 와 a_{cr}은 각각 초기균열 및 한계균열길이를 뜻한다.

3. 수치계산 예

부식의 영향을 받는 구조물의 최적 검사계획을 수립하기 위한 과정의 계산 예로서 Table 1과 같

은 부재를 가정하여 선택하였다. 각 부재군의 개수는 100개로 가정하였고, 표본검사인 경우 샘플의 개수는 20%를 택한다고 가정하였다. 부재군 A 및 B인 경우는 피로수명이 비교적 짧은 경우이고, 부재군 C 와 D는 피로수명이 비교적 긴 부재들이다. 통상 선박부재에서 피로수명이 짧은 부재는 검사하기 곤란한 부재의 경우가 많으며 검사시 비용이 많이들기 때문에 부재군 A와 B 의 경우에 검사비가 많이 드는 것으로 가정하였다. 이러한 네가지 부재군들에 대한 효과적인 검사계획안을 부식량의 정도, 고정비의 레벨 및 목표파괴확률과 같은 인자들의 변화에 따라 도출해 보았다.

Table 1 Fatigue properties and cost for numerical examples

Member	N_{CI}	N_{CP}	n_M	r_s	C_1	C_2	C_3	C_4
A	4	16	100	20%	1	5	15	10
B	8	16	100	20%	1	5	15	
C	10	20	100	20%	1	2	5	
D	10	20	100	20%	1	2	5	

N_{CI} : Crack initiation life (year)
N_{CP} : Crack propagation life (year)
n_M : Number of members
r_s : Sampling rate (%)
C_1 : Normal inspection cost
C_2 : Sampling inspection cost
C_3 : Precise inspection cost
C_4 : Cost due to scheduled system down

3.1 부식량의 변화에 따른 검사계획

배의 일생인 20년 동안 부식되는 정도가 초기 설계시 치수의 5%, 10%, 15%, 20% 그리고 부식이 생기지 않는 경우를 대상으로 수치 계산을 수행하였다. 부식양은 균열생성과 균열진전과정에서 동일한 비율로 진행한다고 가정하였다. 사용된 유전적 알고리즘에 관련된 파라미터는 Table 2와 같고, Fig.3에서 각 경우에 대한 세대수의 증가에 따른 해의 수렴성을 보여주고 있다.

Table 2 Details of parameters for genetic algorithm

Parameter	Value
Population size	50
Probability of crossover (Pc)	0.6
Probability of mutation (Pm)	0.01
Target failure probability ($\triangle P_{f,Target}$)	0.001

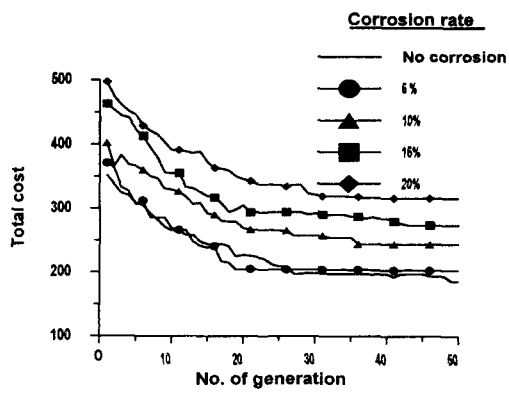

Fig.3 Total cost versus number of generation

세대수가 50 정도이면 만족할 만한 결과를 주고 있음을 알 수 있다. 부식정도에 따른 검사계획안은 Table 3에서 보여주고 있다. Table 3에서 O는 검사가 없는 경우, N은 보통검사, S는 표본검사 그리고 P는 정밀검사이다. Fig. 4는 부식량의 변화에 대한 순수검사비, 고정비 및 총비용을 보여주고 있는데, 부식량의 증가에 따라 순수 검사비는 증가하나 고정비는 거의 일정함을 알수 있다. 이는 검사횟수는 거의 변동이 없고 검사의 레벨이 높아짐을 의미한다. 따라서 총비용을 줄이기 위해서는 순수 검사비를 줄이기 위한 노력, 즉 부식정도를 제어할 수 있는 노력이 필요함을 알수 있다. 10% 정도의 부식이 있는 경우 부식이 없는 경우에 비해 총비용은 30% 정도 증가하며, 순수구조 검사비는 거의 2배정도로 증가함을 알수 있다.

Fig.5 에서는 각 부재군에 대한 순수 검사비의

Table 3 Inspection plans for the example structure by varying the corrosion rate

Cor rate (%)	Mem	Inspection timing (year) and quality				C_{ISI}	C_{SWS}	C_T
		5	10	15	20			
0	A	OOOOO	ONSNN	SNNNN	NNNNO	21	130	186
	B	OOOOO	OONNN	SSSON	NNNNO	22		
	C	OOOOO	OOOOO	SSNOO	SOSOO	9		
	D	OOOOO	OOOOO	OOOSO	ONONO	4		
5	A	OOOOO	ONSSS	NNSNN	NNNNO	29	130	203
	B	OOOOO	OONNS	SNSNN	SNNNO	28		
	C	OOOOO	OOOOS	OSONN	NSNNO	11		
	D	OOOOO	OOOOO	OOOSS	OONOO	5		
10	A	OOOOO	SNNSS	SNSNN	NNNNO	34	140	244
	B	OOOOO	NOSSO	SNSSS	SSNSO	48		
	C	OOOOO	OONNO	SSSOS	SSONO	15		
	D	OOOOO	OOOOO	OOSON	SNONO	7		
15	A	OOOON	OSSSS	SNPNS	NNNOO	51	140	274
	B	OOOOO	OSOSS	NSSSS	PNNNO	54		
	C	OOOOO	OONNN	SSSNS	SSSNO	19		
	D	OOOOO	OOOSO	OOSOS	SNONO	10		
20	A	OOOOO	NSSSS	PNPNS	NNOOO	60	140	316
	B	OOOOO	OSNSS	SSPSP	NPNNO	79		
	C	OOOOO	OOOSN	SSNSS	PPNSO	25		
	D	OOOOO	OOOOO	SOSSS	OSNNO	12		

N: Normal inspection, S: Sampling inspection,
P: Precise inspection, O: No inspection

정도를 부식량에 따라 비교하고 있다. 피로수명이 비교적 짧은 부재군에서는 부식량의 증가에 검사비는 대폭 증가하고 있으나, 피로수명이 비교적 긴 부재군에서는 검사비의 증가가 매우 둔화되고 있음을 알수 있다. 따라서 전체 비용을 줄이기 위해서는 피로수명이 짧은 부재군에 대한 피로수명을 향상시키는 방안이 효과적임을 알 수 있다. Fig.6는 검사효과를 고려하였을 때의 누적파괴확률을 각 부재군에 대해서 나타낸 것이다.

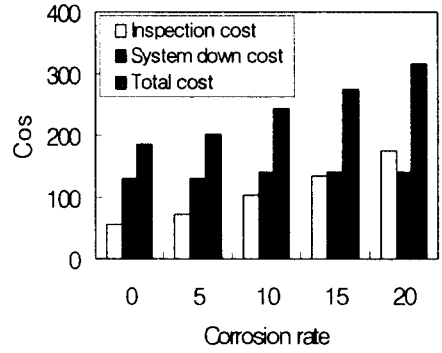

Fig.4 Histogram of costs against the corrosion rate

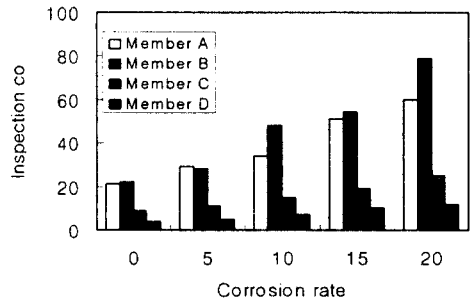

Fig.5 Histogram of inspection costs against the corrosion for individual members

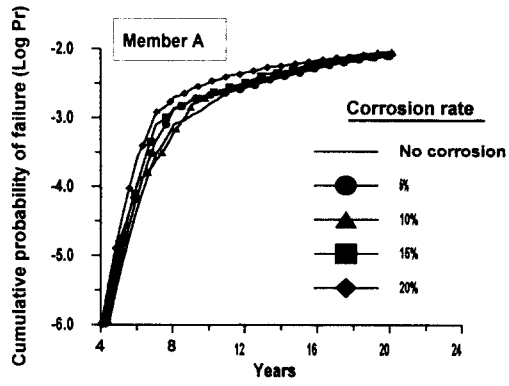

Fig.6(a) Cumulative probability of failure with increase in the age of member A

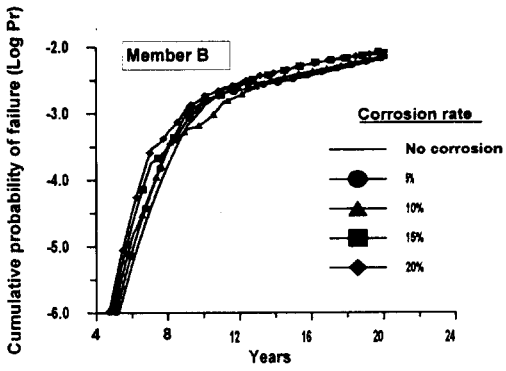

Fig. 6(b) Cumulative probability of failure with increase in the age of member B

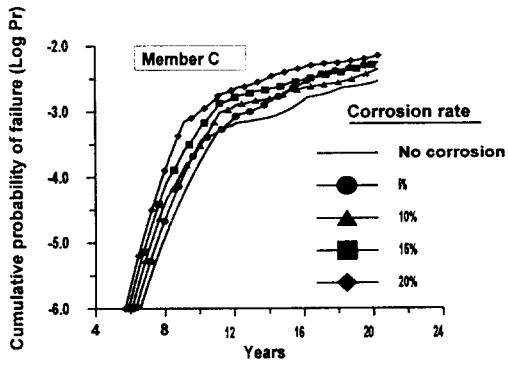

Fig. 6(c) Cumulative probability of failure with increase in the age of member C

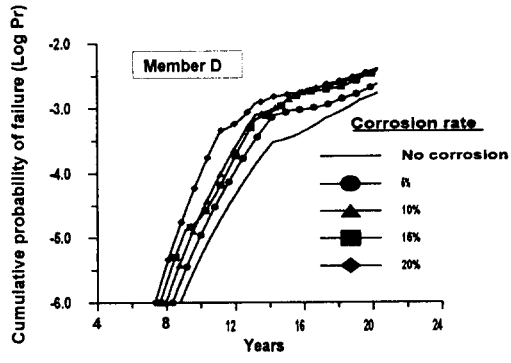

Fig. 6(d) Cumulative probability of failure with increase in the age of member D

3.2 검사로 인한 고정비의 변화에 따른 검사계획

총비용은 식(4)와 같이 순수검사비 및 고정비로 이루어져 있다. 고정비는 운항정지에 따라 발생하는 각종 부대비용들이며 사회경제적인 수준에 따라 많은 차이를 보인다. 본 계산에서는 1회 검사시에 발생하는 경비를 상대적으로 1, 4, 10, 20 그리고 50 인 경우에 대하여 수행하였다. 대상부재는 3.1에서 사용한 부재군이며 부식비율이 5%인 경우이다.

Table 4에서는 검사로 인한 고정비 변화에 따른 최적 검사계획안의 예를 보여주고 있다.

Table 4 Inspection plans for the example structure by varying the system down cost

C_4	Mem	Inspection timing (year) and quality				C_{ISI}	C_{SWS}	C_T
		5	10	15	20			
1	A	OOOOO	SSNNN	SNSNS	NNNNO	34	14	93
	B	OOOOO	ONONS	NSNNS	SNNNO	28		
	C	OOOOO	ONOOO	SONSS	NONNO	11		
	D	OOOOO	OOOOO	NOONS	OONNO	6		
4	A	OOOOO	ONSSS	NNSNN	NNNNO	29	52	125
	B	OOOOO	ONONS	NSNSS	NNNNO	28		
	C	OOOOO	OOONO	NSOSS	NONNO	11		
	D	OOOOO	OOOOO	OOOSS	OONOO	5		
10	A	OOOOO	ONSSS	NNSNN	NNNNO	29	140	203
	B	OOOOO	OONNS	SNSNN	SNNNO	28		
	C	OOOOO	OOOOS	OSONN	NSNNO	11		
	D	OOOOO	OOOOO	OOOSS	OONOO	5		
20	A	OOOOO	ONSNS	SNNNN	NNNNO	25	260	329
	B	OOOOO	OONNS	NSNNS	NSNNO	28		
	C	OOOOO	OOONO	NSOSO	SSNOO	11		
	D	OOOOO	OOOOO	OOOSO	SOONO	5		
50	A	OOOOO	ONSSS	NNNSN	NNNNO	29	650	723
	B	OOOOO	ONONS	SNNSN	SNNNO	28		
	C	OOOOO	OOOOS	OSOSO	SONNO	10		
	D	OOOOO	OOOOO	OSOOS	OONNO	6		

Fig.7은 고정비의 단가가 증가할수록 고정비가 차지하는 비율 및 총경비가 증가하고, 순수 검사비는 크게 변하지 않음을 알수 있다. 이 결과로부터 신뢰성을 만족하는 범위내에서 최적검사안을 도출해 주고 있음을 알 수 있다.

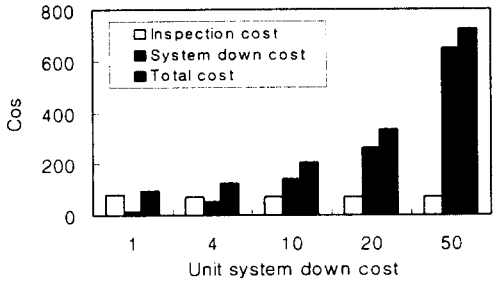

Fig.7 Various costs versus system down cost

3.3 목표파괴확률에 따른 검사계획

목표파괴확률은 사회가 고도화 될수록 엄격해지고 그 수준이 낮아지고 있다. 따라서 시대와 사회적 배경에 따라 목표파괴확률은 변할수 있기에 0.001, 0.005, 0.0001 의 세 가지 경우에 대하여 계산을 수행하였다. 대상부재는 3.1에서 사용한 부재군이며 부식비율이 5%인 경우이다. 목표파괴확률이 낮을수록 순수검사비는 급증하고 있으며 고정비는 약간 증가하고 있음을 Fig.8에서 알 수 있다. 따라서 낮은 목표파괴확률에서 총 비용을 줄이기 위해서는 고정비보다는 피로수명이 짧은 부재에 대한 검사비를 줄이려는 것이 효과적임을 알 수 있다.

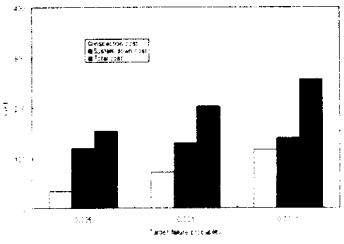

Fig.8 Various costs versus target probability of failure

4. 결 론

부식의 영향을 받는 구조부재의 피로파괴에 대한 검사계획의 최적화를 수행하였다. 부식정도 및 검사로 인해 발생하는 고정비의 영향과 목표 파괴확률에 대한 검사계획의 영향을 수치계산을 통하여 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 부식환경하의 부재에 대한 피로노화 과정은 비정상 Markov 연쇄모델로 재현할수 있으며, 비정상 Markov 연쇄모델에 의해 파괴확률을 구할 수 있다.

2) 피로수명이 비교적 짧은 부재군에서는 부식량이 증가함에 따라 검사비는 대폭 증가하고 있으나, 피로수명이 비교적 긴 부재군에서는 검사비의 증가가 매우 둔화되고 있음을 알수 있다. 따라서 전체 비용을 줄이기 위해서는 피로수명이 짧은 부재군에 대한 피로수명을 향상시키는 방안이 효과적임을 알 수 있다.

3) 고정비의 단가가 증가할수록 고정비가 차지하는 비율 및 총경비가 증가하고 순수 검사비는 크게 변하지 않음을 알 수 있다.

4) 목표파괴확률이 낮을수록 순수검사비는 급증하고 있으며 고정비는 약간 증가하고 있다. 따라서 낮은 목표파괴확률에서 총 비용을 줄이기 위해서는 고정비보다는 피로수명이 짧은 부재에 대한 검사비를 줄이려는 것이 효과적임을 알 수 있다.

참 고 문 헌

[1] Fujimoto, Y., Sweilem, S.A.M. and Iwata, M., "Inspection Planning for Deteriorating Structures Based on Sequential Cost Minimization Method", J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.170, pp.755-768, 1991

[2] Itagaki, H., Asada, H. and Itoh, S.,

"Assurance of Continued Safe Operation for Aging Structure", J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.151, pp.269-277, 1982 (in Japanese)

[3] Fujita, M., Schall, G. and Rackwits, R., "Adaptive Reliability-Based Inspection Strategies for Structures Subject to Fatigue", Proc. of 5th ICOSSAR, ASCE Publications, Vol. 2, pp.1619-1626, 1989

[4] Fujimoto, Y., "A Study on the Inspection Planning for Deteriorating Structures - Stable Inspection Planning Method Taking into Account of Inevitable Uncertainties", J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.173, pp.367-375, 1993 (in Japanese)

[5] Fujimoto, Y., Kim, S.C. and Hamada, K., "Inspection Planning of Fatigue Deteriorating Structures Using Genetic Algorithm", J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.182, pp.729-739, 1998

[6] Bogdanoff, J.L. and Kozin, F., "Probabilistic Models of Cumulative Damage", John Wiley & Sons, Inc., new York, 1985

[7] 윤장호, 양영순, "Markov Chain Model을 이용한 구조물의 피로신뢰성 해석에 관한 연구", 대한조선학회 논문집, Vol 28 No.2, pp.228-240, 1991

[8] 윤장호, 양영순, "Markov Chain Model의 추이확률 행렬의 추정 및 피로신뢰성해석에의 응용", 한국항공우주학회지, Vol 19 No.4, pp.81-93, 1991

[9] Fujimoto Y, , "Reliability Assessment of Deteriorating Structure by Markov Chain Model", J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.166, pp303-314, 1989 (in Japanese).

[10] 백점기, 양수홍, 김성규, "부식을 고려한 선각거더의 최종강도 신뢰성", 대한조선학회 논문집, Vol.33, No.2, pp96-110, 1996

[11] Emi, H., Arima, T. and Umini, M., "A Study on Developing a Rational Corrosion Protection System of Hull Structures", ClassNK Technical Bulletin, Vol.12, Nippon Kaiji Kyokai, pp65-79, 1994

[12] Yagi, J and Tomita, Y., "Fatigue Strength of Ship Structural Members", J. of the Kansai Society of Naval Architects, Vol 165, 1977, (inJapanese)

[13] Kim, S.C., Fujimoto, Y and Shintaku, E., "Sensitivity Analysis on Fatigue Reliability and Inspection of Ship Structural Members", J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.181, pp.367-375, 1998