Bull. Korean Soc. Fish. Tech. 35(1), 1999 韓國漁業技術學會誌, 35(1), 1999

船尾管 密封裝置 시일 링의 斷面形狀에 관한 硏究

南 廷 吉
韓國海洋大學校
(1998년 10월 29일 접수)

A study on the cross-section profile of the seal ring in the stern tube sealing system

Jeong-Gil Nam
Korea Maritime University
(Received October 29, 1998)

Abstract

In this paper, the mechanical movement of lip seal-ring which plays the most important function in stern-tube sealing system and the possibility of leakage caused by pressure fluctuation are studied by theory and experiment. By the finite element method for axial symmetry object which receives the torsional bending load, the displacement and stress analysis of the seal-rings are executed for products of several representative manufacturers of seal-rings, and also the possibility of crack occurance are checked by theoretical analysis. A sample seal-ring is designed and manufactured using the program of displacement and stress analysis developed in this study and made an experimantal apparatus to test the sampling seal-ring. The sampling seal-ring functioned excellently, but it had its durability and this problem may be solved by using the Viton instead of NBR.

Key Words : Finite Element Method (유한요소법), Pressure Fluctuation (압력 파동), Axial Symmetry (축대칭), Lip Seal-Ring (립 시일 링)

서 론

축계 밀봉장치에 관한 연구는 일찌기 선박을 건조하기 시작하면서부터 이루어져 왔다. 처음에는 스트럿트 베어링과 선미관 베어링으로써 물 윤활식 베어링재료의 대표적인 것으로는 "리그넘바이티"가 있으며, 이외에 합성수지를 층상으로 겹친 훼놀수지, 내유성특수고무가 사용되었으며, 이들에 대한 연구가 활발히 이루어져 왔다. 여기서, 프로펠러축 선미관부 지지베어링으로써 "리그넘바이티"라는 특수 목재를 사용하는 경우에 선미관 시일문제는 기관실로 해수가 침입하는 것을 막기만 하면 되었으므로 매우 단순하였다.

그러나 1960년대에 들어오면서 "리그넘바이티"의 자원고갈과 최근 선박의 대형화, 고속화 및 고출력화에 따라 선미관에 대한 설계조건이 복잡하게 되었고, 선미관 본체의 강성 확보 등을 위하여, 유 윤활식 선미관 베어링을 일반적으로 사용

하게 되었다. 그러나 유 윤활식 선미관 베어링 밀봉장치의 문제는 해상오염 방지와 경제성 향상을 위한 해수로의 윤활유 누설방지 및 베어링에로의 해수 유입, 즉 밀봉 메카니즘, 시일의 재질, 배관 등이 있으며 이들에 대한 연구는 60년대 말부터 70년대 중반까지는 서독을 중심으로 유럽에서 이루어져 왔고, 주로 기구학적 연구와 재료개발에 치중하였다.

70년대 중반부터 80년대에는 일본에서 조선 관련 공공단체의 지원으로 각 공·사립 연구기관에서 역학적, 재료역학적 측면에서 이 문제가 집중적으로 다루어져 왔다. 그러나 아직도 이들 문제에 대한 이론적 연구 및 실험은 미미한 실정이며 주로 선진 외국 제작회사의 폐쇄된 기술로써 시행 착오에 의한 제품의 신뢰성 향상에 주력하고 있다. 또한 현재 우리나라의 경우 이들 부품을 전적으로 외국으로 부터의 수입품에 의존하고 있을 뿐만아니라 일부 중소기업에서 개발을 시도하고 있으나 제품의 특성, 이론 해석을 위한 전문가 확보, 연구설비 등의 문제로 어려움이 많은 실정이다.

근래에 건조되고 있는 중·대형선의 거의 모든 배에 Lip형식의 선미관 시일 장치가 채용되고 있다. 이 시일 장치의 성능에 큰 영향을 미치는 것으로는 시일 링(Seal ring)사이의 압력변동과 시일 링의 단면 형상 및 재질이라 할 수 있다. 본 고에서는 국산화를 위한 초보 단계로써 시일 링의 내구성과 성능에 큰 영향을 미치는 시일 링의 단면 형상에 관하여 연구하고자, 유한요소법을 이용하여 각부의 응력을 해석함으로써 피로크랙의 가능성 여부와 관통균열 여부를 판단 할 수 있는 근거자료를 제시하도록 하였다. 또한 시일 링의 응력해석 프로그램을 개발하여 각 제작회사로부터 수집한 각기 다른 시일 형상을 이론 계산상에 의하여 비교 검토 할 수 있게 되었고, 이들의 취약부분을 발견함으로써 국내에서 개발 할수 있는 최적의 시일 형상을 설계 할 수 있도록 하고자 한다.

축대칭문제의 유한요소법 정식화

유한요소법에 의한 연속체의 해석에서 요소내 임의 점의 변위 {u}는 절점변위 {q}로 표시할 수 있다.

$$\{u\}=[N]\{q\} \tag{1}$$

여기서, [N]는 형상함수(Shape function)로 이루어진 행렬이다. 변위{u}를 x, y, z로 각각 미분하면 변형율 $\{\varepsilon\}$을 구할 수 있으므로 결국 변형율 $\{\varepsilon\}$은 다음과 같이 절점변위{q}로 나타낼 수 있다.

$$\{u\}=[B]\{q\} \tag{2}$$

여기서, [B]는 요소의 기하적인 형태와 형상함수에 따라 결정되는 행열이다.

한편, 축대칭 문제에 있어서는 원통 좌표계(r－θ－z)를 사용함으로써 2차원 문제로 취급할 수가 있다. 축대칭이므로 θ방향의 힘과 변위가 영이고 따라서 θ방향의 전단응력 $\tau_r\theta$, $\tau_z\theta$와 전단변형율 $\gamma_r\theta$, $\gamma_z\theta$가 영 이다. 그러므로, 응력성분은 $\{\sigma T\}=[\sigma_r\ \sigma\theta\ \sigma_z\ \tau_{rz}]$이고, 변형율 성분은$\{\varepsilon^T\}=[\varepsilon_r\ \varepsilon\theta\ \varepsilon_z\ \gamma_{rz}]$이다. 지금 r방향 변위를 u, z방향 변위를 w라 하면 변위-변형율 관계식은 다음과 같다.

$$\varepsilon_r=\frac{\partial u}{r},\ \varepsilon_z=\frac{\partial w}{z},\ \varepsilon_q=\frac{u}{r},$$
$$\gamma_{rz}=\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial r} \tag{3}$$

그리고 응력－변형율 관계식을 행렬식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix}\varepsilon_r\\ \varepsilon\theta\\ \varepsilon_z\\ \gamma_{rz}\end{Bmatrix}=\frac{1}{E}\begin{bmatrix}1 & -\nu & -\nu & 0\\ -\nu & 1 & -\nu & 0\\ -\nu & -\nu & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu)\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\varepsilon_r\\ \sigma\theta\\ \sigma_z\\ \tau_{rz}\end{Bmatrix} \tag{4}$$

단, $N_i=\frac{1}{\Delta 2}(a_i+b_ir+c_iz),\ i=1,2,3$

(4)식을 Material flexibility matrix [D]로 나타내면 다음과 같다.

$$\{\varepsilon\}=[D]\{\sigma\} \tag{5}$$

(5)식을 이용해서 다음과 같이 재료의 강성행렬(Material stiffness matrix) [C]로 나타낼수 있다.

$$\{\sigma\}=[D]^{-1}\{\varepsilon\}=[C]\{\varepsilon\} \tag{6}$$

(6)식의 $[C]$를 행렬식으로 나타내면 다음과 같다.

$$[C]=[D]^{-1}=\frac{E}{(1+\nu)+(1-2\nu)}\begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \tag{7}$$

또한, 요소 내의 임의점(r,z)의 변위 u,w를 선형 형상 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$\binom{u}{w}=\begin{bmatrix} N1 & 0 & N2 & 0 & N3 & 0 \\ 0 & N1 & 0 & N2 & 0 & N3 \end{bmatrix}\begin{pmatrix} u1 \\ w1 \\ u2 \\ w2 \\ u3 \\ w3 \end{pmatrix} \tag{8}$$

단, $N_i=\frac{1}{2\triangle}(a_i+b_i r+c_i z),\ i=1,2,3$

(3)식과 (8)식을 이용해서 (2)식의 형태로 행렬식을 나타내면 다음과 같이(9)식으로 된다.

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon\theta \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{rz} \end{pmatrix}=\frac{1}{2\Delta}\begin{bmatrix} b_1 & 0 & b_2 & 0 & b_3 & 0 \\ \frac{a_1}{r}+b_1+\frac{c_1 z_0}{r} & 0 & \frac{a_2}{r}+b_2+\frac{c_2 z_0}{r} & 0 & \frac{a_3}{r}+b_3+\frac{c_3 z_0}{r} & 0 \\ 0 & c_1 & 0 & c_2 & 0 & c_3 \\ c_1 & b_1 & c_2 & b_2 & c_3 & b_3 \end{bmatrix}\begin{pmatrix} u1 \\ w1 \\ u2 \\ w2 \\ u3 \\ w3 \end{pmatrix} \tag{9}$$

단, $a_1=r_2z_3-r_3z_2,\ a_2=r_3z_1-r_1z_3,$
$a_3=r_1z_2-r_2z_1,\ b_1=z_2-z_3,$
$b_2=z_3-z_1,\ b_3=z_1-z_2,$
$c_1=r_3-r_2,\ c_2=r_1-r_3,\ c_3=r_2-r_1$ 이다.

한편, 요소에 작용하는 절점력 {F}, 표면력 {T}, 물체력 {X}와 요소의 응력 $\{\sigma\}$와의 관계는 가상일의 원리에 의하여 다음과 같이 된다.

$$\{F\}+\int_s[N]^T\{T\}dS+\int_v[N]^T\{X\}dV$$
$$=\int_v[B]^T\{\sigma\}dV \tag{10}$$

(10)식은 (2)식과 (5)식의 관계에서 $\{\sigma\}=[C]\{\varepsilon\}=[C][B]\{q\}$ 이므로, 다음 식과 같이 요소강성행렬 (Element stiffness matrix) [K]로 나타낼 수가 있다.

$$[K]\{q\}=\{L\} \tag{11}$$

여기서 $[K]=\int_v[B]^T[C][B]dV$ 이고,
$\{L\}=\{F\}+\int_s[N]^T\{T\}dS+\int_v[N]^T\{X\}dV$인 요소 하중벡터 이다.

여기서 Matrix $[B]$에 r, z가 포함되는 성분이 있기 때문에, 이 적분은 간단하지 않으므로 근사적으로 요소 중심 (r_c,z_c)의 값을 피적분함수에 대입하면 피적분함수가 상수로 된다.

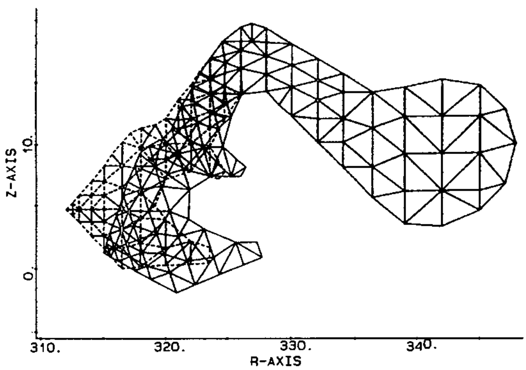
따라서, $r_c=(r_1+r_2+r_3)/3$,
$z_c=(z_1+z_2+z_3)/3$ 이기 때문에 요소의 강성행렬은 $[K]=\int_v[B_c]^T[C][B_c]dV$으로 고쳐 쓸수 있고,

$dV=2\pi r_c dA=2\pi r_c drdz$ 이므로, 최종적으로 다음과 같은 요소 강성행렬이 구해진다.

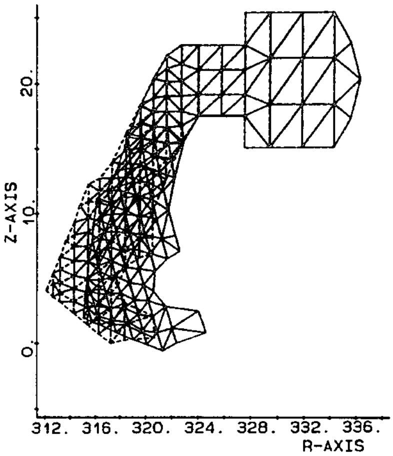
$$[K]=2\pi[B_c]^T[C][B_c]r_c\int_A dA$$
$$=2\Delta\pi r_C[Bc]^T[C][Bc]$$

각 시일제작회사의 제품에 대한 계산예

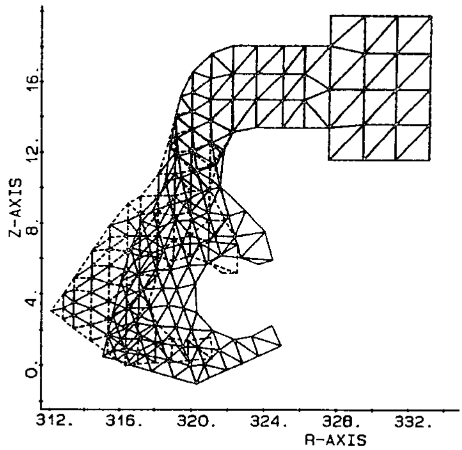
1) A사 형상



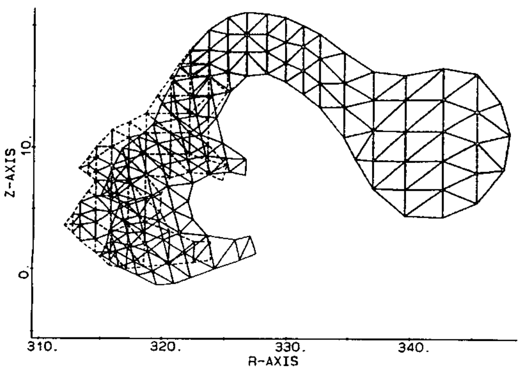
2) B사 형상



3) C사 형상



2중 립 형상에 대한 고찰



결　론

본 연구에서 명확하게 된 점을 요약하면 다음과 같다.

1) FEM을 이용한 시일 링의 변형을 해석한 결과, 다른 문헌을 참고한 실험 결과와 비교적 잘 일치함을 보여 줌으로써, 금후의 시일 링 변형문제에 이 수법을 이용하는 것이 가능하게 되었다.

2) 시일 단면형상에서 가장 취약한 부분이 시일 접촉부로써 본 연구에서 제시한 2중 립의 형상을 유한요소법으로 계산한 결과 립 선단에 걸리는 하중이 반감되므로, 발열량과 마모량이 적어져서 내구성이 향상될 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Y.Milyashita,et al.(1976) : " Study on Stern Tube Sealing System(1st Report ; Deformation behavior in Static Condition of Sealing Ring)" ,Journal of the M.E.S.J11(3).
2. 전효중 · 김의간(1990) : "축계밀봉장치설계 전산화연구", 태화출판사.
3. K.H.Huebner(1975) : "The Finite Element Method for Engineers", Jon Wiley & Sons, Inc.
4. 三好俊郎(1978) : "有限要素法入門", 培風館.
5. I.M.Smith,(1982) : "Programing the Finite Element Method", John Wily & Sons Ltd.
6. 임상전 외2명(1985) : "유한요소법입문", 동명사.