

파랑 및 조류력에 의한 탄섬유강 말뚝에 부착된 페타이어의 구조거동

홍남식* · 이상화*

*동아대학교 토목·해양공학부

Structural Behavior of Worn Tire Attached to Carbon Fiber Steel Pile by Wave and Current Forces

NAM-SEEG HONG* AND SANG-HWA LEE*

*Division of Civil and Ocean Engineering, Donga University, Busan, Korea

KEY WORDS: Worn Tire 페타이어, Carbon Fiber Steel Pile 탄섬유강말뚝, Finite Element Method 유한요소법, Cord 코드, Carcass 고체층, Orthotropic 직교이방성, Linear 선형

ABSTRACT: The structural behavior of a worn tire, attached to carbon fiber steel pile by current and wave forces, has been investigated through the numerical method. The finite element model has been developed, by considering that the composite material of rubber and cord is orthotropic, the rubber is isotropic, and that all the material behaves as linear elastic. The pressure distribution by wave and current, around the worn tire, has been estimated through the adjustment for the concept of flow separation. Also, the structural behavior of the worn tire has been examined, by comparing the situation wherein the space between the pile is reinforced, and tire as elastic and isotropic material, with the one left empty. Through this comparison, it is determined that the space between pile and tire has to be filled with elastic and isotropic material, in order to avoid the failure by wave and current action.

1. 서 론

페타이어의 재활용은 여러 산업분야에서 보편화되고 있으나, 강도에 한계가 있어 구조물에 활용하기에는 무리가 있는 것으로 여겨져 왔다. 특히, 방파제, 잔교 등과 같이 조류나 파랑력을 받는 해양구조물에 활용하는 것은 강도의 한계, 거동의 불안정성 등으로 인하여 더욱 더 무리가 있을 것으로 판단된다. 그러나 페타이어 자체를 구조적으로 보강을 하여 적용한다면 적은 비용으로 파랑을 제어할 수 있는 구조물로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

보강방법으로 제시할 수 있는 방안 중에서 Fig.1에서 보듯이 페타이어를 강관파일에 삽입하는 것을 고려할 수 있다. 그러나, 강관파일은 염해에 취약하여 방식을 하여야 하며 현재 개발된 방식방법은 영구적이지 않을 뿐만 아니라 그 유지비용 또한 만만치 않다. 그러므로 강관파일 대신 인장 또는 휨강성이 일반 강관에 비해 클 뿐만 아니라 염해에 대한 저항성이 뛰어난 탄섬유강을 적용하는 것을 고려하고자 한다. 탄섬유강을 적용할 경우 인장강도가 일반강에 비해 현저히 커 소요단면의 두께를 줄일 수 있으며 필요에 따라 페타이어와 강관 사이의 공간에 추가적인 감쇄재료 등을 사용할 수 있어 조류나 파랑력에 의한 페타이어의 피로파괴를 줄일 수 있을 것으로 보인다.

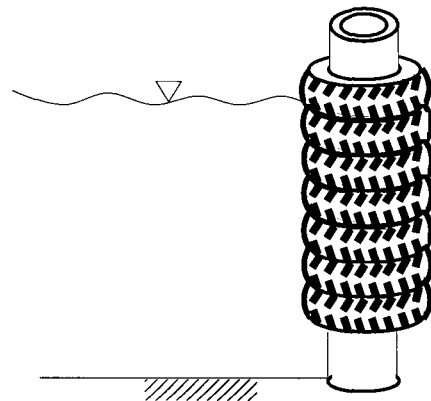


Fig. 1 Worn tire attached to carbon fiber steel pile

페타이어 부착 탄섬유강 말뚝의 장점에도 불구하고 조류나 파랑에 의해 타이어에 손상이 발생하는 경우 타이어를 교체해야 하는 문제가 발생할 수 있다. 그러므로, 조류나 파랑에 대한 타이어의 구조적 응답거동을 분석하여 타이어 손상 방지책을 마련할 수 있는 기본 자료로 활용하고, 설계 및 시공에 적합한 가이드라인을 제시할 필요가 있다.

타이어는 다른 구조물과는 달리 Fig.2, Fig.3에서 보듯이 형상이 매우 복잡하며 고무, 섬유코드(polyester cord), 철제코드(steel cord)로 구성된 복합체이다. 특히 매우 유연한 고무에 철제 및 섬유코드등과 같은 고강도의 재질이 복합되어 있다. 타이어의 해석을 위해 초기에는 많은 요소들을 단순화하여 간단한 해석모델을 설정하여 이론해석을 수행했으며(Purdy, 1963),

제1저자 홍남식 연락처: 부산광역시 사하구 하단2동 840

051-200-7794 hns0817@daunet.donga.ac.kr

Akasaka and Hirano(1972), Walter and Patel(1978)은 직교이방성(orthotropic)으로 가정하여 연구하였다. 이후에는 타이어의 해석에 유한요소법을 적용하여(Kage et al., 1977; DeEskinnazi et al., 1978; Prabhakaran, 1985) 괄목할 만한 성과를 보이고 있다. 이 후에 지금까지 재료의 비선형성(Gall et al., 1993), 동특성(Akasaka et al., 1992) 등에 관한 연구가 행해져 왔으나 지금까지의 해석은 공기압에 의한 타이어의 변형특성에 대하여 연구가 진행되어왔을 뿐 파랑이나 조류력과 같은 외력에 대한 타이어의 응답거동에 대한 연구가 행해지지 않았다.

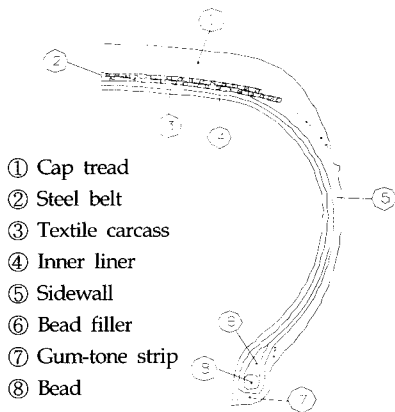


Fig. 2 Tire cross section

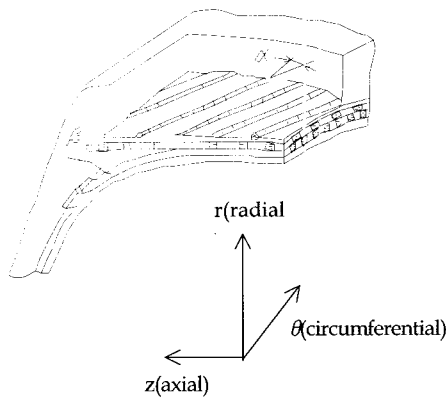


Fig. 3 Global coordinate system

그러므로, 본 연구의 목적은 탄섬유강 말뚝에 부착된 페타이어의 조류나 파랑에 의한 구조거동해석을 수치적 방법을 통하여 수행함으로써 그 거동특성을 분석하는 데 있다.

페타이어 코드와 고무의 복합재료는 직교이방성(orthotropic)으로, 고무는 등방성으로 취급하며 변형은 재료의 특성을 감안하여 선형(linear)으로 가정하여 유한요소모델을 수립하며, 탄섬유강의 축강성이나 휨강성이 타이어의 강성에 비해 현저히 크므로 탄섬유강의 거동이 타이어의 응력에 미치는 영향은 미미할 것이므로 부착된 타이어 자체를 모델링하고 탄섬유강과

타이어의 경계조건을 구속조건으로 조정한다. 파랑이나 조류에 의해 페타이어에 작용하는 외력은 페타이어의 표면이 매끈한 것으로 보고 원형관의 주위에 발생하는 압력분포를 적용하되 원형관의 직경이 상대적으로 작기 때문에 박리(flow seperation) 현상을 포함하여 압력분포를 조정하고 마모된 타이어의 상대 조도는 기존의 실험결과를 이용하여 흐름분리 지점에 반영하여 조정한다. 또한, 타이어와 강관 사이는 비워둔 경우와 탄성이 적은 감쇄재료를 채워둔 경우를 둘 다 고려하여 비교 해석한다.

2. 유한요소해석모델

본 논문에서는 타이어의 해석을 단순히 하기 위하여 코드와 고무의 복합재료는 직교이방성으로, 고무는 등방성(isotropic)으로 취급한다. 타이어의 원주방향의 저항체인 코드나 carcass고무층은 철심 등이 보강된 직교이방성 복합체로서 일부재료인 고무의 탄성계수가 극히 작아 양방향 거동 모두 어느 정도의 대변형까지는 선형탄성거동을 하며 항복점이 불분명하지 않아 0.2% offset법에 의한 항복점을 사용하고 탄성의 성질을 잃어버린 후 약간의 비선형거동을 보이다가 파단이 되는 특징을 가지며, 횡방향의 주 재료인 고무는 hard rubber로서 대체로 약간의 비선형성을 가지고 탄성변형을 보이다가 어느 정도의 변형 후에는 경화효과(hardening effect)가 나타나다 파단이 되는 특징을 가지고 있다. 그러므로, 변형은 이런 재료의 특성을 감안하여 선형으로 가정하여 유한요소모델을 수립한다. 응력과 변형율의 변환에 의해 극좌표계(r, z, θ)에 의한 구성행렬을 유도하였고 타이어 모델로 8절점 parabolic isoparametric요소를 사용한다.

또한, 탄섬유강의 축강성이나 휨강성이 타이어의 강성에 비해 현저히 크므로 탄섬유강의 거동이 타이어의 응력에 미치는 영향은 미미할 것이므로 부착된 타이어 자체를 모델링하고 탄섬유강과 타이어의 경계조건을 구속조건으로 조정한다.

2.1 Cord-rubber 복합체의 탄성계수

코드(cord)가 고무에 등간격으로 배치되어 있는 경우에 코드 방향의 종탄성계수 E1과 그에 수직인 방향의 종탄성계수 E2는 서로 다르고, 횡탄성계수 G12와 Poisson비 역시 방향에 따라 다르므로, cord-rubber복합구조체의 물성치들은 cord방향 및 그에 수직인 방향으로 다르게 복잡하게 취급하여야 한다. 그러나, 타이어를 구성하는 코드 및 고무의 특성을 살펴보면 종탄성계수는 코드가 고무에 비해 매우 크므로 코드방향의 종탄성계수에서는 고무의 종탄성계수를 무시하고, 코드와 직각된 방향의 종탄성계수에서는 코드의 체적비를 무시하여 간략히 하면 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 E_1 &= E_c V_c \\
 E_2 &= E_3 = 4E_{ru}/3 \\
 G_{12} &= G_{ru} \\
 \nu_{12} &= 0.5, \nu_{21} = \nu_{12}E_2/E_1
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서,

- E_c, E_{ru} = 코드와 고무의 탄성계수
- G_{ru} = 고무의 횡탄성계수
- V_c = 코드가 차지하는 체적비
- ν_{ij} = i 방향의 인장에 의한 j 방향의 Poisson비

Fig.3에서 보는바와 같이 타이어의 textile carcass 및 steel belt는 기준좌표축에 대해 코드방향이 임의의 경사를 이루므로 극좌표계(r, z, θ)로의 등가탄성계수를 구하기 위해 Fig.3에서 보듯이 코드방향이 원주방향과 이루는 각을 α , 반경방향과 이루는 각을 β 라 하고 복합구조체의 탄성계수 및 Poisson비를 경사진 각도 α, β 의 함수로 가정한 후, α, β 가 각각 0° 와 90° 일 때 반경방향, 축방향, 원주방향의 종탄성계수 E_r, E_z, E_θ 가 직교좌표계에서의 종탄성계수와 일치하게 된다는 3가지 조합조건 ($\alpha, \beta = 0^\circ, 90^\circ$; $\alpha, \beta = 90^\circ, 0^\circ$; $\alpha, \beta = 90^\circ, 90^\circ$)을 적용하여 극좌표계에서의 종탄성계수를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E_r &= E_2 + (E_1 - E_2)(1 - \cos\alpha)(1 - \sin\beta) \\ E_z &= E_2 + (E_1 - E_2)(1 - \cos\alpha)(1 - \cos\beta) \\ E_\theta &= E_2 + (E_1 - E_2)(1 - \sin\alpha) \end{aligned} \quad (2)$$

동일한 방법으로 극좌표계의 Poisson비 $\nu_{rz}, \nu_{\theta r}, \nu_{\theta z}$ 를 각각 α, β 로 표시하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \nu_{rz} &= \nu_{12}[1 - (1 - E_z/E_r)\sin\alpha \cos\beta] \\ \nu_{\theta r} &= \nu_{12}[1 - (1 - E_\theta/E_r)\sin\alpha \cos\beta] \\ \nu_{\theta z} &= \nu_{12}[1 - (1 - E_\theta/E_z)\sin\alpha (1 - \cos\beta)] \end{aligned} \quad (3)$$

2.2 고무층(carcass)의 구성행렬 [D]

축대칭인 경우의 미소체적 $dv=2\pi r dr dz$ 로 표시되며 강성행렬 K^* 는 $\int_V [B]^T [D] [B] 2\pi r dr dz$ 로서 [D]는 구성행렬, [B]는 변형행렬을 나타낸다. 고무층에서의 구성행렬[D]를 구하기 위해 직교이방성을 갖는 단층(lamina)의 주재료축(principal material axis)에 대한 일반적인 응력과 변형율의 관계식 $\{\sigma_p\} = [C] \{\epsilon_p\}$ 를 적용한다(Jones, 1975). 요소로 표시하면,

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{21} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

식(4)에서 $C_{ij}(i,j=1,6)$ 는 탄성계수 및 Poisson비의 함수(Jones, 1975)이며 탄성계수 및 Poisson비는 2.1절에서 유도된 값을 사용한다.

주재료 축에서의 응력과 변형율의 관계를 극좌표 계에서의 응력과 변형율의 관계로 전환하면 식(5)와 같다.

$$\{\sigma\} = [D] \{\epsilon\} \quad (5)$$

여기서,

$$\{\sigma\} = \{ \sigma_r \ \sigma_z \ \sigma_\theta \ \tau_{z\theta} \ \tau_{\theta r} \ \tau_{rz} \}^T, \{\epsilon\} = \{ \epsilon_r \ \epsilon_z \ \epsilon_\theta \ \gamma_{z\theta} \ \gamma_{\theta r} \ \gamma_{rz} \}^T$$

이고 구성행렬[D]는 $[D]=[T][C][R][T]^{-1}[R]^{-1}$ 로서 [T]는 극좌표에서의 응력, 변형율과 주재료 축에서의 응력, 변형율의 변환행렬(transformation matrix)이며 코드와 반지름 방향(r)과 이루는 각을 β (Fig. 3 참조)라 할때 다음 식과 같으며

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2\beta & \sin^2\beta & 0 & 0 & 0 & 2\sin\beta \cos\beta \\ \sin^2\beta & \cos^2\beta & 0 & 0 & 0 & -2\sin\beta \cos\beta \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\beta & -\sin\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin\beta & \cos\beta & 0 \\ -\sin\beta \cos\beta & \sin\beta \cos\beta & 0 & 0 & 0 & \cos^2\beta - \sin^2\beta \end{bmatrix} \quad (6)$$

[R]은 Reuter 매트릭스로서 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = [R] \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_{23}/2 \\ \gamma_{31}/2 \\ \gamma_{12}/2 \end{Bmatrix}, \quad [R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.3 벨트층의 구성행렬 [D]

벨트층에서 구성행렬[D]의 유도방법은 고무층에서 구성행렬[D]를 유도한 방법과 동일하다. 단지, 변형행렬[T]만 고무층의 경우와 다르다. 벨트층에서의 변형행렬[T]는 Fig. 3에서 보듯이 철제코드와 원주방향(θ)과 이루는 각을 α 라 할때 다음과 같다.

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2\alpha & \sin^2\alpha & 2\sin\alpha \cos\alpha & 0 & 0 \\ 0 & \sin^2\alpha & \cos^2\alpha & -2\sin\alpha \cos\alpha & 0 & 0 \\ 0 & -\sin\alpha \cos\alpha & \sin\alpha \cos\alpha & \cos^2\alpha - \sin^2\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (8)$$

2.4 고무의 구성행렬 [D]

고무를 등방성으로 취급하면 구성행렬 [D]는 다음과 같다.

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서 E는 고무의 탄성계수이고 ν 는 Poisson비이다.

3. 페타이어에 작용하는 파랑 및 조류력

페타이어에 작용하는 파랑 및 조류력을 구하기 위하여 직경이 파장에 비해 상대적으로 작은 실린더에 작용하는 파랑력 산정방법인 Morison 방정식의 유도과정(Dean, 1984)을 적용하여 페타이어의 원호주위에 작용하는 압력분포를 얻은 후 절점력으로 환산한다.

타이어의 면은 상당히 거칠어 조도(roughness)가 크나 페타이어의 경우 거친 면이 마모되어 매끈해진다고 보아 타이어의 원호 주위를 직경으로 하는 실린더로 본다. 실린더에 유속 $U(t)$ 로 접근해오는 흐름에 대한 속도포텐셜 ϕ 는 극좌표에서 아래와 같이 유도된다(Dean, 1984)

$$\phi(r, \theta) = U(t)r \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \cos\theta \quad (10)$$

여기서, a 는 실린더의 반경을 나타낸다.

Bernoulli 방정식을 적용하고 제곱항 이후를 무시하여 실린더 표면의 압력을 구하면 다음과 같다.

$$p(a, \theta) = \rho \frac{U^2(t)}{2} (1 - 4\sin^2\theta) + 2a \frac{dU}{dt} \quad (11)$$

식(11)에서 첫 번째항을 이상적인 흐름(ideal flow)에서는 실린더 주위에 대해 적분하면 압력분포의 대칭성으로 인해 수평 및 수직분력의 합이 0이 되나, 실제 흐름에서는 점성으로 인해 실린더 주변의 적당한 위치($\theta = \theta_s$)에서 박리 현상이 발생하므로 수평성분의 합이 항력(drag force)가 된다는 점에 착안하여 기존의 실험결과(Keulegan and Carpenter, 1958; Goldstein, 1938)로부터 박리 위치를 얻은 후 박리 위치까지는 식(11)의 압력분포에 far-field 압력을 합성하여 얻은 압력분포를 적용한다. 박리 위치 이후의 압력분포는 식(11)의 첫 번째항의 항력성분 대신 실린더 후면에 발생하는 wake에 의한 압력성분의 근사치(Sarpkaya, 1976)에 far-field 압력을 합성하여 얻은 압력분포를 사용한다. 여기에, 마모된 타이어의 상대조도의 영향을 반영한다면 실험결과를 참조하여 seperation 위치를 조정하면 된다.

4. 페타이어 모델링

본 논문에서 페타이어 거동해석을 위해 두 가지 형식의 페타이어를 모델링한다. 첫 번째 형식은 Fig. 4 (a), (b)에서 보는 바와 같이 페타이어와 탄섬유강 사이의 공간을 비워둔 것으로 타이어 모델로 8절점 parabolic isoparametric 요소를 사용하며, 컴퓨터 프로그램은 Hinton and Owen(1997)의 code에 축 대칭을 고려하여 본 연구에서 유도된 고무층, 벨트층, 및 고무의 구성행렬을 대체적용하므로 수정하여 사용한다. 타이어와 탄섬유강 사이의 경계조건은 Fig. 4 (c)-(e)에서 보듯이 페타이어의 상부와 하부에만 4위치($\theta = 0^\circ, 90^\circ, 270^\circ, 360^\circ$)는 완전구속된 것으로 보고 그 외는 수평방향으로만 구속하고 수직방향으로는 구속시키지 않는 로울러를 적용하며, 타이어의 중간부분에서는 수평, 수직방향 모두 구속하지 않는다(Fig.4 (d)). 두 번째 형식은 첫 번째 형식의 경우에 파랑이나 조류 등의 외력에 의해 타이어 중앙부분에서 발생할 수도 있는 과도한 변형을 줄이기 위해 타이어 중간부분 내부와 탄섬유강 사이의 빈 공간을 등방성 탄성재료로 보강하는 형식으로 Fig. 5 (a), (b)에서 보듯이

타이어의 상·하부 고무, 보강된 내부 탄성체와 탄섬유강과의 접촉면전체를 4개 지점($\theta = 0^\circ, 90^\circ, 270^\circ, 360^\circ$)은 완전구속된 것으로 보고 그 외는 수평방향으로만 구속하고 수직방향으로는 구속시키지 않는 로울러를 적용한다.

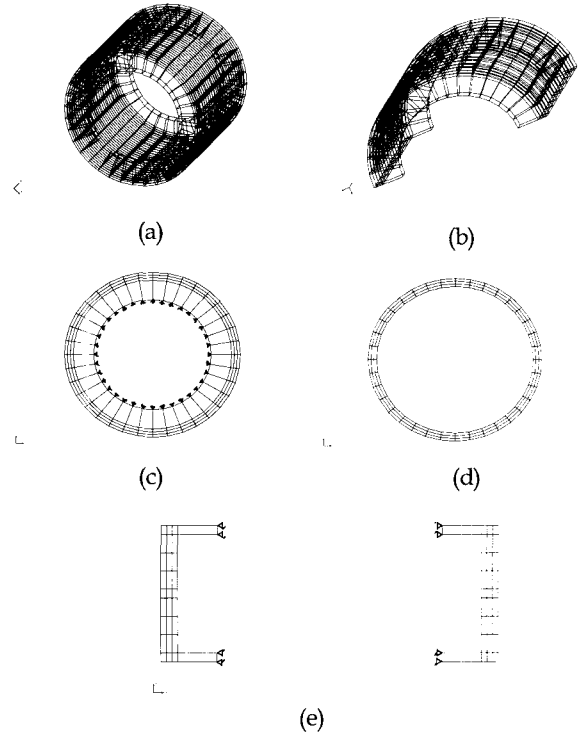


Fig. 4 Modelling diagram of worn tire(first case); (a) Global configuration (b) Half configuration, (c) Top and bottom plane section, (d) Middle part section, (f) Side view section

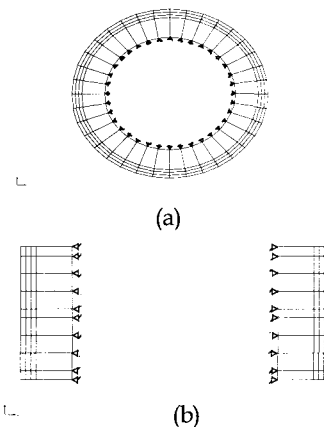


Fig. 5 Modelling diagram of worn tire(second case); (a) Plane section, (b) Side view section

5. 수치예제 및 결과분석

본 논문에서 거동해석을 위해 사용된 페타이어는 일반 승용

차용(외경=60cm, 내경=40cm, 폭=30cm, 저면 및 옆면두께=3cm 및 2cm)으로 고무의 재료상수(material constants)는 Table 1과 같으며, 고무층과 벨트층을 직교이방성으로 가정하여 식(1)로써 구한 값을 Table 2에 나타내었다. 두 번째 형식의 보강된 내부 탄성체로 무근 콘크리트를 사용하나 타이어에 발생하는 응력이 허용응력에 비해 현저히 적게 나올 경우 탄성계수가 작고 감쇄효과가 크며 경제적인 다른 재료로 대체될 수 있을 것으로 예상된다.

Table 1 Typical rubber properties

rubber	Young's modulus (kg/mm ²)	Poisson's ratio
cap tread	0.53	0.49
innerliner	0.47	0.49
sidewall	0.64	0.49
beadfiller	0.96	0.49

Table 2 Properties of body ply and belt ply

		body ply	belt ply
cord	material	polyester	steel
	construction	1500D/2	4×1×0.28mm
	ends / dm	75	71
	Young's modulus (kg/mm ²)	4.051×10 ²	7.388×10 ³
rubber	Young's modulus (kg/mm ²)	0.56	1.02
ply	thickness (mm)	1.0	1.25
	volume fraction	0.272	0.14
engineering constants	E ₁ (kg/mm ²)	0.110×10 ³	0.103×10 ⁴
	E ₂ (kg/mm ²)	0.748	1.360
	G ₁₂ (kg/mm ²)	0.187	0.34
	ν ₁₂	0.5	0.5

3장에서 서술한 방법에 따라 페타이어에 작용하는 파랑 및 조류력을 산정하였다. 첫 번째 형식의 경우 타이어와 탄섬유강 사이의 빈 공간에 해수가 반 정도 차오르고, 두 번째 형식의 경우 보강체와 탄섬유강 사이의 미세 틈에 해수가 침투되어 타이어 내부에 어느 정도 내압이 작용될 것으로 예상되나 본 연구에서는 무시한다. 수심 10m에 대해 파랑조건은 파고 3m, 주기 10sec를 조류는 0.8m/sec를 적용한다. Fig. 6은 페타이어 주위에 발생하는 외력을 나타낸 것으로 파랑 및 조류가 동일한 방향으로 작용하는 것으로 한다. 파랑에 의한 far-field 유속 및 타이어 주변의 가속도는 선형파 이론을 적용하여 수표면의 값을 적용하며 위상차(phase angle)은 타이어 주위에 작용하는 압력의 적분치(합)의 값이 최대일 때를 택한다. Fig. 6에서 보듯이 압력분포가 수직방향으로 대칭(180°에 대해)을 이루고 있으며 박리 현상도 나타난다.

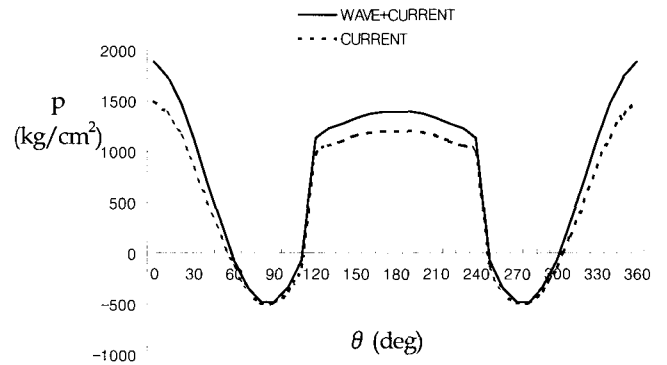


Fig. 6 Pressure distribution on worn tire perimeter

타이어 내부를 비워둔 경우와 탄성체로 보강된 경우에 대해 각각 파랑력과 파랑력 및 조류력을 합한 외력을 가하여 구조 거동을 해석하였다. 두 가지 경우의 하중조건에 대한 변형은 크기에는 차이가 있으나 형상에는 차이가 없었으므로 파랑 및 조류력을 합한 외력에 대한 거동을 보강전과 보강 후에 대해 Fig. 7~11에서 비교한다. Fig. 7은 탄성체로 보강전·후의 전체적인 변형형상을 Fig. 8은 타이어 중심부분을 포함하여 수직으로 절개한 단면의 변형형상 Fig. 9는 타이어 중심과 타이어 주변 사이의 중앙에서 수직으로 절개한 단면의 변형형상을 나타낸다. 또한 Fig. 10은 타이어의 상·하부 수평단면의 변형형상을 Fig.11은 중앙부 수평단면의 변형형상을 나타낸다. Fig. 7~11로 부터 보강전의 변형은 외력의 작용방향으로 과도하게 크게 나타나는 것을 알 수 있으며 Fig.8, 9에서 보듯이 타이어의 중앙부분으로 갈수록 증가(보강전 최대 3.02cm, 보강후 0.14cm)하는 양상을 나타낸다. Fig. 10, 11에서도 동일한 양상을 보이며 특히 Fig. 6의 압력분포에서 보듯이 θ=90° 전후에서 음(-)압이 작용하는 부분에서는 변형이 밖으로 튀어나오는(보강 전 최대 2.12cm, 보강후 0.10cm) 특징을 보인다. 즉, 원주방향의 응력이 크게 발생하는 형태로 최대 발생응력 또한 고무 및 cord의 항복인장응력(0.2% offset응력)의 2~3배를 초과한 것으로 나타난다. 그러나, 콘크리트로 보강한 경우 하중 작용방향의 변형이 상당히 줄고 형태도 Fig. 10, 11에서 보듯이 변형전의 형태에 가까워 원주방향의 응력이 줄어 최대응력이 고무, cord, 및 콘크리트 모두 항복치의 30% 이내로 줄어든다. 이는 보강 전에 타이어의 강성이 적어 하중방향으로의 변형이 과도하게 발생하던 것이 보강후 보강재의 강성으로 타이어의 고무

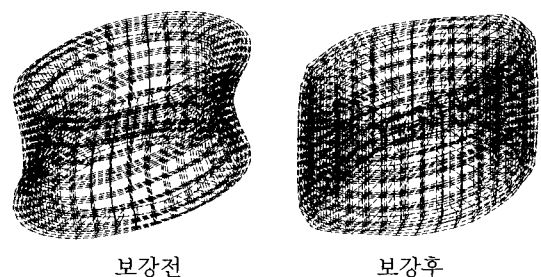


Fig. 7 Comparison of deformed shape for global view

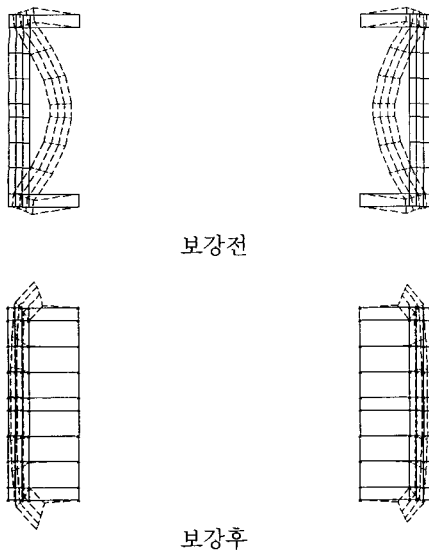


Fig. 8 Comparison of deformed shape at vertical cross section including center of tire

벨트층의 변형이 현저하게 줄어들어 원주방향의 발생응력 또한 현저히 줄어들기 때문인 것으로 보여진다. 하중방향의 직각방향(이하 단면의 수직방향이라 칭함)으로의 변형특성을 보면 Fig. 8에서 보듯이 완전 구속된 것으로본 4개 지점($\theta = 0^\circ, 90^\circ, 270^\circ, 360^\circ$)에서는 구속으로 인해 탄섬유강과의 경계에서 보강 전·후 모두 수직방향으로 변형이 발생하지 않으나, 그 이외의 지점에서는 Fig. 9에서 보듯이 탄섬유강과의 경계에서 보강 전·후 모두 수직방향으로 변형이 발생하나 무시할 정도로 작다. 경계 이외에서는 보강 전에 비해 보강후 수직방향의 변형이 약간 증가하는 양상을 보이는데 이는 보강재의 강성이 하중방향의 변형을 제어하기 때문에 강성이 상대적으로 적은 수직방향으로의 변형이 증가하는 것으로 보인다. 즉, 수직방향(수심방향)으로의 응력은 보강후가 보강 전에 비해 증가하나 고무의 탄성계수가 cord에 비해 현저히 작으므로 응력증가는 그리 크지 않은 것으로 나타난다(최대 15%).

이상의 결과로부터 페타이어는 보강 전에 원주방향으로의 응력이 항복응력의 2~3배를 초과하며, 콘크리트로 보강 후에는 고무, cord 및 콘크리트 모두 항복치의 30% 이내로 줄어든다. 수직방향의 응력은 보강 후가 보강 전에 비해 최대 15% 정도 증가하나 항복응력의 40% 정도에 불과하다. 그러므로, 페타이어를 탄섬유강 말뚝에 부착할 때는 말뚝과 페타이어의 빈 공간에 보강재를 채워두어야 할 것으로 보인다. 그러나, 강성이 큰 보강재를 사용하게 되면 경제성이 악화될 수 있으므로 이를 감안하여 본 연구에서 제시된 수치해석방법에 의해 응력을 산정하므로써 최적의 보강재를 선택할 수 있을 것으로 여겨진다.

향후, 파랑 및 조류환경에 따른 타이어의 규격, 보강재의 물성치, 실험결과로부터 얻은 흐름분리지점 등을 변수로 하여 영향인자 분석을 위한 연구가 필요할 것으로 여겨진다.

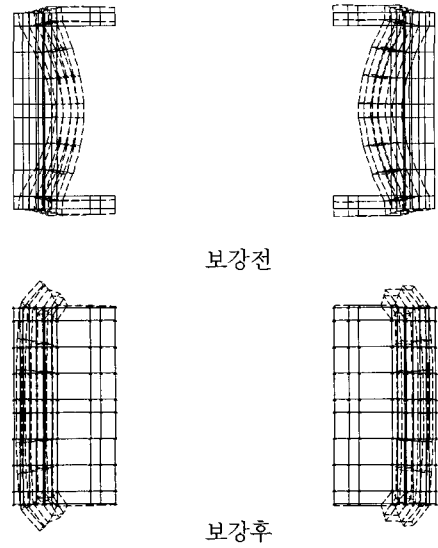


Fig. 9 Comparison of deformed shape at vertical cross section including the middle point between the center of tire and the perimeter of tire

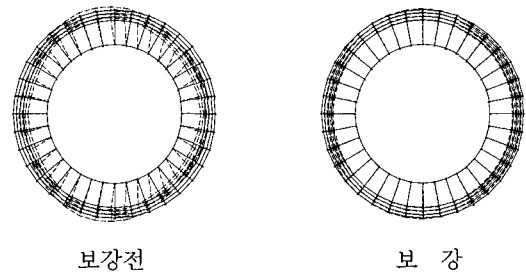


Fig. 10 Comparison of deformed shape for horizontal cross section at the top and bottom of tire

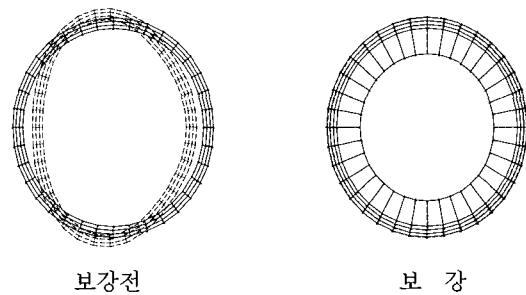


Fig. 11 Comparison of deformed shape for horizontal cross section at the center of tire

5. 결 론

본 논문에서는 탄섬유강 말뚝에 부착된 페타이어의 조류나 파랑에 의한 구조거동해석을 위해 페타이어의 코드와 고무의

복합재료는 직교이방성(orthotropic)으로, 고무는 등방성으로 취급하고 변형은 선형(linear)으로 가정하여 유한요소모델을 수립하였으며, 파랑이나 조류에 의해 페타이어에 작용하는 외력은 박리 현상을 포함하여 원형관의 주위에 발생하는 압력분포를 적용하였다. 또한, 타이어나 강관 사이는 비워둔 경우와 탄성이 적은 감쇄재료로 채워둔 경우를 둘 다 고려하여 비교 해석한다.

비교해석 결과, 페타이어는 보강 전에 원주방향으로의 응력 σ 항복응력의 2~3배를 초과하며, 콘크리트로 보강 후에는 고무, cord 및 콘크리트 모두 항복치의 30% 이내로 줄어들었으며, 수직방향의 응력은 보강 후가 보강 전에 비해 최대 15% 정도 증가하나 항복응력의 40% 정도에 불과함을 알 수 있었다. 그러므로, 페타이어를 탄섬유강 말뚝에 부착할 때는 말뚝과 페타이어의 빈 공간에 보강재를 채워두어야 할 것으로 보인다.

향후, 파랑 및 조류환경에 따른 타이어의 규격, 보강재의 물성치, 실험결과로부터 얻은 흐름분리지점 등을 변수로 하여 영향인자 분석을 위한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 2002년 특정기초연구(과제번호: R01-2002-000-00590-0) 지원으로 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Akasaka, T., Kabe, K., Koishi, M., and Kuwashima, M. (1992). "Analysis of the Periodic Contact Deformation of Tread Blocks", *The Science and Technology, TSTCA*, Vol 20, No 4.
- Akasaka, T. and Hirano, M. (1972). "Approximate Elastic Constants of Fiber Reinforced Rubber Sheet and its Composite Laminate", *J. of Composite Material and Structure*, Vol 1, No 2, pp 70-76.
- Dean, R.G. and Dalrymple, R.A. (1984). *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, Chap. 8, Prentice-Hall, New Jersey.
- DeEskinazi, J., Yang, T.Y. and Soedel, W. (1978). "Displacements and Stresses due to Contact of a Steel Belted Radial Tire with a Flat Surface", *J. of Tire Science and Technology*, Vol 6, No 1, pp 48-70.
- Goldstein, S. (1938). *Modern Developments in Fluid Dynamics*, Vol 2, Oxford University Press, London.
- Gall, R., Tkacik, P., and Andrews, M. (1993). "On the Incorporation of Frictional Nonlinear Effects in the Tire/Ground Contact Area", *The Science and Technology, TSTCA*, Vol 21, No 1.
- Jones, R.M. (1975). *Mechanics of Composite Materials*, McGraw-Hill, New York.
- Hinton, L and Owen, D. (1997). *Finite Element Programming 3rd Edition*, Academic Press, New York.
- Kage, H., Okamoto, K. and Tojawa, Y. (1977). "Stress Analysis of a Tire under Vertical Load by a Finite Element Method", *J. of Tire Science and Technology*, Vol 5, No 2, pp 102-118.
- Keulegan, G.H. and Carpenter, L.H. (1958). "Forces on Cylinders and Plates in an Oscillating Fluid", *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, Vol 60, No 5.
- Prabhakaran, R. (1985). "Iterative Graphics for the Analysis of Tire", *J. of Tire Science and Technology*, Vol 13, No 3, pp 127-146.
- Purdy, J.F. (1963). *Mathematics Underlying the Design of Pneumatic Tires*, Edwards Brothers Publishing Co., Ann Arbor, Michigan.
- Sarpkaya, T. (1976). *Vortex Shedding and Resistance in Harmonic Flow about Smooth and Rough Cylinders at High Reynolds Number*, Rep. NPS-59SL76021, U.S. Naval Postgraduate School, Feb.
- Walter, J.D. and Patel, H.P. (1978). "Approximate Expressions for the Elastic Constants of Cord-Rubber Laminates : Theory and Applications", *Journal of Rubber Chemical and Tech.*, Vol 51, No 3, pp 710-724.

2004년 3월 23일 원고 접수

2004년 4월 29일 최종 수정본 채택