

光彈性效果를 利用한 타이어 應力解析에 관한 研究

(株) 錦湖 타이어事業部 研究所

安鍾律·金南鎔

1. 序 論

(1) 타이어 應力解析法 概觀

타이어의 應力과 變形의 測定은 構造材料의 效率의使用, 走行性能向上 및 타이어코드의 疲勞現象과 관련된 타이어 構造設計의 改善方向을 제시할 수 있기 때문에 타이어 研究에 매우 중요한 課題라 할 수 있다.

그러나, 空氣壓 타이어는 그 構造가 매우 복잡하여, 각 構成成分(cord, rubber, steel) 및 타이어 各部位에서의 應力分布狀態를 理論적으로 규명하기에는 불충분하였다. 따라서 지금까지 여러가지 實驗的인 方法으로 타이어 應力을 解析하고자 수많은 노력을 기울여 왔으며, 이들 實驗方法은 Point method 및 Whole field method의 두가지로 크게 大別될 수 있다.

Point method는 그 代表的인 例가 Strain gauge를 사용하는 것으로서 局所部位의 變形을 測定하여 應力狀態를 밝혀내는 方法으로, 전체적인 應力分布를 解析하기에는 불편하다. 이에 반해 Whole field method는 많은 점에서 一時에 데이터를 추출할 수 있어서 應力勾配나 應力集中의 양상을 신속히 알아 볼 수 있다. Whole field method에는 Surface grid method, Photoelastic method, Moire method, Holographic method 등 여러가지가 있으나, 本 研究에서는 Photoelastic method를 이용하여 타이어 應力分布를 해석하였다.

(2) 光彈性效果를 이용한 應力分析

光學的 等方性物質로 이루어진 物體에 外部로부터 Stress가 作用하면 物體의 表面과 内部에 應力勾配가 생기고, 따라서 物體가 光學的 複屈折現象을 일으키는데, 유발된 複屈折現象의 정도는 應力の 크기에 比例한다. 物體가 複屈折現象을 보이면 物體를 透過(透過型)하거나, 物體로부터 反射(反射型)된 빛의 偏光狀態를 變化시키므로, Stress를 받는 物體에 偏光된 빛을 비추어 주어 이로부터 反射 혹은 透過된 빛의 偏光狀態의 變化를 測定함으로써 物體에 생긴 應力分布를 測定할 수 있다. 따라서 光彈性을 이용한 應力測定法은 위에서 說明한 反射型和 透過型の 두가지로 크게 나눌 수 있다. 反射型 光彈性測定法은 모델을 따로 준비할 필요가 없고 타이어에 皮膜을 그대로 적용할 수 있는 長點이 있다.

따라서 本 論文에서는 反射型 光彈性測定法을 이용하였다.

2. 光 彈 性 理 論

(1) 光彈性效果와 Maxwell-Lame 方程式

보통 상태에서 光學的으로 等方性인 透明材料에 外力을 加하면 内部에 유발된 應力 때문에 非等方性材料로 變化하여 複屈折特性을 지니게 된다. 이 複屈折性은 應力이 存在하는 동안은 나

타나지만 外力이 사라져 應力이 소멸되면 거의 순간적으로 除去된다. 이를 이용하면 物體가 應力을 받는 狀態에서 物體의 光學의 性質을 測定함으로써 應力分布를 解析해 낼 수 있다.

① 彈性光學法則

光彈性效果를 보여주는 媒質 속의 主應力을 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 라 하고 각 主應力方向으로 偏光된 빛의 屈折率을 n_1, n_2, n_3 , 그리고 無應力狀態 媒質의 屈折率을 n_0 라 하면 主應力과 屈折率 主值 사이에는 다음 관계가 成立한다.

$$\begin{aligned} n_1 - n_0 &= C_1 \sigma_1 + C_2 (\sigma_2 + \sigma_3) \\ n_2 - n_0 &= C_1 \sigma_2 + C_2 (\sigma_3 + \sigma_1) \\ n_3 - n_0 &= C_1 \sigma_3 + C_2 (\sigma_1 + \sigma_2) \end{aligned}$$

平面應力狀態가 유지되는 경우는 $\sigma_3 = 0$, 따라서 다음의 彈性光學法則이 얻어진다.

$$n_1 - n_2 = (C_1 - C_2) (\sigma_1 - \sigma_2) \equiv C (\sigma_1 - \sigma_2) \dots (1)$$

② 平面應力狀態가 전개된 平板을 通過한 빛의 位相遲延

두께가 h 인 光彈性媒質에 平面應力이 전개되었을 때, 여기에 線形偏光된 빛이 通過하면 각 光軸方向으로 偏光된 빛에 대한 媒質의 屈折率差異에 의해 相對的 位相遲延이 發生하며, 이 두 偏光成分의 位相差 δ 는 다음과 같다.

$$\delta = h(n_1 - n_2) \frac{2\pi}{\lambda} \dots (2)$$

이상의 結果로부터 透過光의 特性은 平板의 複屈折性과 入射光의 偏光方向에 따라 變化함을 알 수 있다. 式 (1)과 (2)로부터 $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} h \cdot C \times (\sigma_1 - \sigma_2)$ 이므로 두 偏光成分의 位相差를 알면 主應力差異 ($\sigma_1 - \sigma_2$)를 求할 수 있다. 이 式을 一般의 式으로 다음과 같이 고쳐 쓴다.

$$\sigma_1 - \sigma_2 = N \cdot \frac{f}{h} \dots (3)$$

여기서 $N = \frac{\delta}{2\pi}$ 는 fringe order 라 하고, $f = \frac{\lambda}{C}$ 는 material fringe value 이다.

따라서 $\sigma_1 - \sigma_2$ 는 다음 節에서 소개될 isochromatics 로 測定하고 剪斷差分法에 의하여 主應力을 分離해 낸 다음 isoclinics에 의해 主應力의 方向이 決定되므로, 임의의 점에서 Mohr's circle을 構成할 수 있어서, 物體表面의

모든 점에서 應力解析이 가능하게 된다.

(2) Isoclinics

平面應力狀態의 光彈性皮膜에서 主應力方向을 求하기 위해서는 入射光의 偏光方向의 變化에 대한 透過光의 偏光方向의 變化를 調査하면 된다.

서로 偏光軸이 直交하는 두 偏光板 사이에 光彈性 모형이 놓인 경우 analyzer를 通過한 빛의 強度는 다음 式으로 주어진다.

$$I = I_0 \sin^2 2\alpha \cdot \sin^2 \left(\frac{\delta}{2} \right) \cdot \cos^2 \omega t \dots (4)$$

$\sin^2 2\alpha = 0$ 인 경우는 $\alpha = 0$ 이거나 $\alpha = 90^\circ$ 인 경우이고, 이는 入射光의 偏光方向이 應力의 主軸과 일치함을 뜻한다. 따라서 이 因子에 의해 지배되어 어둡게 나타나는 點들의 軌跡은 主應力方向이 偏光板의 軸方向에 平行한 點들의 軌跡이다. 이 線들을 isoclinics라 한다.

$\sin^2 \left(\frac{\delta}{2} \right) = 0$ 인 경우는 $\delta = 2n\pi$ 즉, 位相差가 整数倍임을 뜻한다. 그런데 式 (2)에서 볼 수 있듯이 δ 는 빛의 波長에 따라 變化하므로 白色光을 光源으로 사용하면 색채무늬로 나타나게 되어 isoclinics와 구분된다. 따라서 이를 isochromatics라 부르며, 線形偏光狀態에서는 isoclinics와 isochromatics가 겹쳐서 나타나는데, isochromatics만을 分離해 보기 위해서는 circular polariscope를 사용한다.

(3) Isochromatics

圓形 polariscope에서 analyzer를 통해 나오는 빛의 強度는 다음 式으로 주어진다.

$$I = I_0 \sin^2 \left(\frac{\delta}{2} \right) \dots (5)$$

여기서 δ 는 式 (2)의 位相差이다. 따라서 $\delta = 2n\pi$ 인 경우에는 빛의 強度가 弱해져서 어두운 띠로 나타난다. 光源으로 白色光을 쓰는 경우에는 式 (2)에서 볼 수 있는 바와 같이 빛의 波長에 따라 δ 값이 달라지므로 $\delta = 2n\pi$ 를 만족하는 波長에 해당하는 色의 補色이 analyzer를 통해 보인다. 따라서 두 主應力의 차이가 一定

한 값을 가지는 點들의 軌跡이 一定한 색채를 띤 曲線으로 나타나므로 이를 isochromatics라 한다.

3. 實驗裝置 및 方法

(1) 實驗 裝置

① 타이어 荷重裝置 및 光彈性 偏光器

타이어에 加하는 荷重量을 調整하여 타이어의 應力狀態를 바뀌어주는 裝置가 타이어 荷重裝置이다. 본 裝置는 1kg 단위까지 測定할 수 있는 load cell을 사용하였으며, 20톤까지 負荷할 수 있도록 設計·製作되었다. 또 몸체부의 振動은 當社 開發製品인 Fuso 前輪用 air spring을 사용하여 振動을 完全히 흡수하였다.

光彈性 偏光器는 光彈性皮膜에 의하여 isoclinics 및 isochromatics를 測定하는 장치이다. 이것은 두 개의 直交偏光板과 quarter-wave plate 및 光源으로 構成된다. quarter-wave plate 方向을 90° 回轉시키면 線形偏光狀態를 圓形偏光狀態로 바꿀 수 있다. 그림 1은 타이어 荷重裝置 및 光彈性 偏光器의 모습이다.

② 模型 實驗 裝置

光彈性皮膜의 calibration에는 보통 외팔보 荷重裝置가 사용되지만 變形이 매우 큰 고무에 사용되는 光彈性皮膜은 應力光學係數가 작으므로 금속으로 된 外팔보 荷重裝置의 사용이 불가

능하여 引張型의 荷重裝置를 개발하여 이 문제를 해결하였다. 또 이 장치를 利用하여 材料의 Poisson's ratio를 測定하고, 고무 圓板 모델의 荷重裝置도 겸하도록 設計되었다. 그림 2는 模型 實驗 裝置이다.

(2) 實驗 方法

① 皮膜 製造

本實驗에서는 Photolastic 社의 PL-2를 皮膜 材料로 사용하였으며, 반사막을 겸한 피막접착제로는 PC-6를 사용하였다. PL-2의 材料特性은 modulus가 2000이고 maximum elongation이 50% 이었다. K factor는 22°C에서 0.02이다. 完成된 皮膜의 Poisson's ratio는 0.42로서 고무의 Poisson's ratio와 매우 類似하였다.

皮膜製造 단계는 秤量-예열-혼합-鑄造-본뜨기-접착 등의 6段階順序를 거쳐서 제조하였다. 이때 가장 重要한 문제는 각 製造段階別 temperature control이었다.

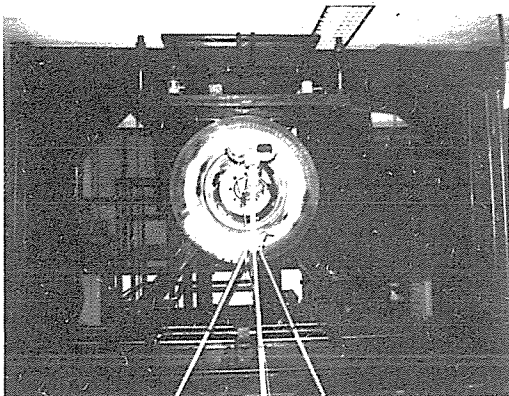
② 皮膜 Calibration

① 變形率과 fringe order

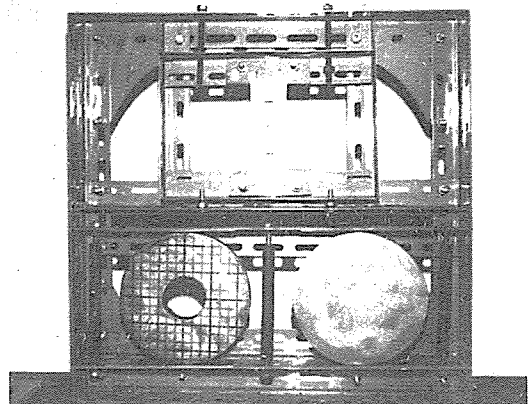
反射型皮膜에서 變形率과 fringe order와의 관계는 다음 式과 같다.

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \frac{N\lambda}{2tK} N \cdot f$$

여기서 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 는 主變形率, N 는 fringe order,



[그림 1] 타이어 荷重裝置 및 光彈性偏光器



[그림 2] 模型 實驗 裝置

K 는 應力光學係數, f 는 fringe 하나 當 光 彈性皮膜의 fringe value 이다.

㉠ Calibration 試片製作 및 測定

이미 製作한 光彈性皮膜에서 一部를 1"×10" 크기로 채취하여 引張型 荷重裝置를 利用하여 시험하였으며, 測定結果는 full fringe order 1에 대해 strain은 17,811/1,000,000 이었다.

㉡ 타이어 適用試驗

本實驗에 使用된 타이어는 Steel belt로 補強된 all steel radial 構造의 三陽타이어 10.00 R 20이다. 適用荷重은 T.R.A. 規定荷重 3,000kg 이었으며, 空氣壓도 T.R.A. 規定空氣壓 120 psi로 充填하였다.

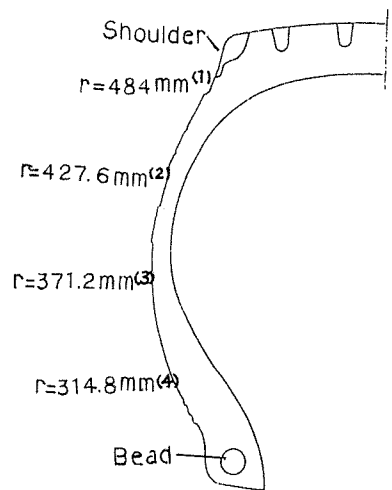
매끄럽게 다듬질한 타이어 sidewall에 光 彈性皮膜을 부착하고, 타이어를 規定荷重까지 負荷한 狀態에서, polariscope의 analyzer 및 $\lambda/4$ -plate를 操作하면서 isoclinics 및 isochromatics를 觀察·攝影하였다.

그림 3은 Polariscope를 線形偏光狀態에 놓고 主應力의 方向을 체크한 isoclinics이며, 그림 4는 isoclinics를 제거한 圓形偏光狀態에서 測定한 isochromatics이다.

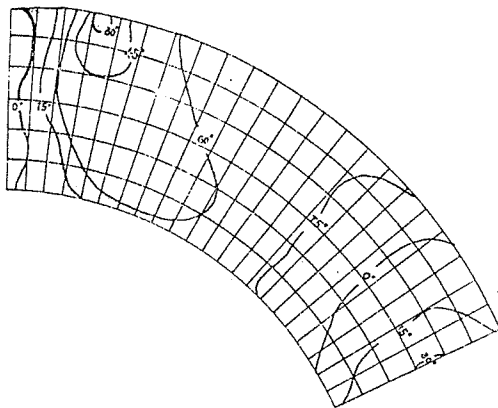
Isoclinics에 의해서 sidewall의 각 grid에서 主應力의 方向을 決定하고, 또 Isochromatics에 의해서 각 grid에서 主應力의 差를 결정하여, Shear difference method에 의해 主應力

을 分離하였으며, 數值積分方法에 의해 각 grid에서 phi-stress, radial stress 및 shear stress를 求하였다.

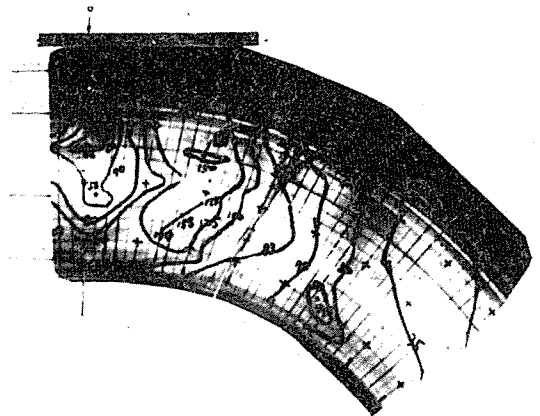
그림 5는 本實驗에 使用한 타이어의 斷面圖이며, 그림에서 半徑(r)는 grid point가 지나가는 位置를 表示한다.



(그림 5) 타이어 斷面圖



(그림 3) Isoclinics



(그림 4) Isochromatics

4. 結果 및 考察

(1) 타이어 圓周 및 Radial 方向에서의 Phi-stress

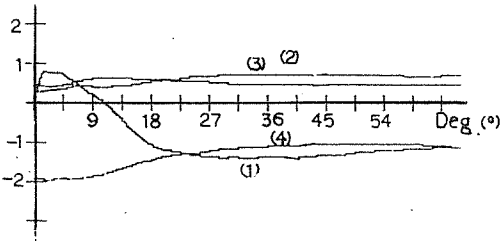
타이어 sidewall 상에서 圓周方向의 grid 의 位置는 $r=484, 427.6, 371.2, 314.8(\text{mm})$ 로 잡고, Radial 方向의 grid 의 위치는 接地點을 中心으로 0° 에서 67.5° 까지 4.5° 간격으로 等分하여 각각의 grid point에서 Radial 및 圓周方向으로의 phi-stress가 그림 6 및 그림 7에 타점되어 있다.

그림 6의 圓周方向 phi-stress를 살펴보면 $r=484\text{mm}$ 의 位置에서는 0.38 에서 시작하여 $\theta=1.5^\circ$ 에서 0.80 까지 增加한 후 角度가 增加함에 따라 계속 減少하여 11° 부근에서 壓縮狀態로 바뀌어 完만한 曲線을 그린다. $r=427.6\text{mm}$ 및 $r=371.2\text{mm}$ 에서는 거의 完만한 引張狀態가 유지되며, $r=314.8\text{mm}$ 에서는 壓縮狀態에서 完만한 減少를 보이고 있다.

그림 7은 Radial 方向의 phi-stress를 $\theta = 0^\circ, 21^\circ, 43^\circ, 63^\circ$ 에서 scanning한 그림이다. 일반적으로 maximum section 부근에서 引張·壓縮이 급격히 變化함을 알 수 있다. shoulder와 bead部에서는 壓縮應力狀態임을 알 수 있다.

(2) 타이어 圓周 및 Radial 方向에서의 Radial stress

타이어의 圓周 및 Radial 方向으로 scanning한 sidewall 表面의 Radial stress는 그림 8 및 그림 9에 나타난 바와 같다.



[그림 6] 타이어 圓周方向으로의 Phi-stress

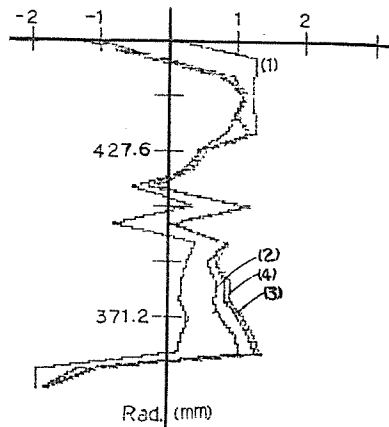
그림 8을 살펴보면 $r=314.8\text{mm}$ 일 때 $\theta = 0^\circ$ 에서 應力은 -0.98 에서부터 급격히 減少하여 1.5° 에서 -2.9 가 되어 最大壓縮應力을 받고 있다. 따라서 軸壓縮을 받고 있는 Radial타이어는 接地面 中心部에서 最大壓縮應力을 받고있으며, 이 壓縮의 영향은 θ 가 增加함에 따라 서서히 減少하고 있음을 알 수 있다. 따라서 Radial 方向의 壓縮應力은 타이어 接地面 中心部에서, 그리고 shoulder部보다 bead部에서 더 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

다음 Radial 方向에서의 Radial stress를 살펴보면, 그림 9에서 $r=484\text{mm}$ 즉, shoulder에 가까운 쪽에서는 引張에서 bead部 쪽으로 감에 따라 서서히 壓縮應力으로 變하여 감을 알 수 있다.

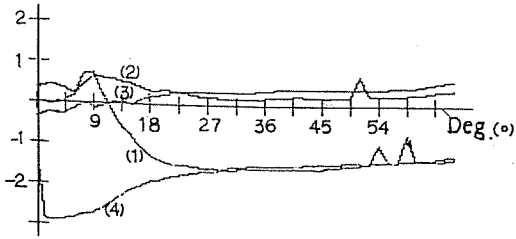
(3) 타이어 圓周 및 Radial 方向에서의 Shear stress

그림 10 및 그림 11은 타이어의 圓周 및 Radial 方向으로 scanning한 타이어 sidewall 表面의 shear stress를 나타낸 것이다.

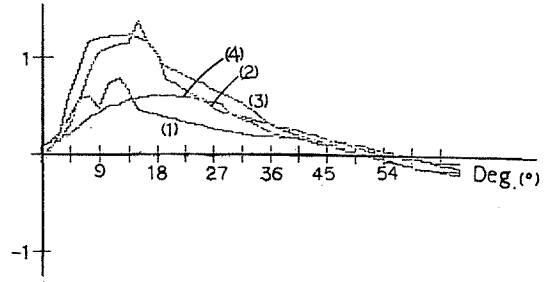
圓周方向에서의 剪斷應力은 그림 10에서 보는 바와 같이 最大剪斷應力은 maximum section 幅部에 위치함을 알 수 있다. 특히 $\theta=9^\circ\sim 20^\circ$ 부근에서 剪斷應力의 最大值가 存在함을 알 수 있다.



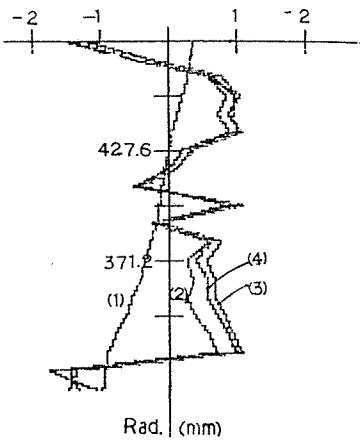
[그림 7] 타이어 Radial 方向으로의 Phi-stress



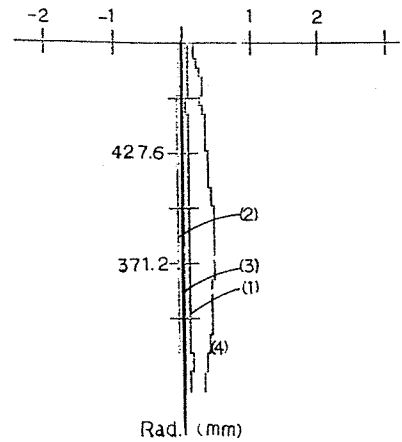
[그림 8] 타이어 圓周方向으로의 Radial stress



[그림 10] 타이어 圓周方向으로의 剪斷應力



[그림 9] 타이어 Radial 方向으로의 Radial stress



[그림 11] 타이어 Radial 方向으로의 剪斷應力

5. 結 論

光彈性效果를 利用하여 타이어 sidewall의 表面應力狀態를 解析하였다.

Phi-stress는 타이어의 圓周方向으로 $r=484\text{mm}$, $\theta=1.5^\circ$ 부근에서 最大가 되어 꾸준히 減少해 가고, $r=314.8\text{mm}$ 에서는 完만하게 增加한다. Radial 方向으로는 $r=314.8\text{mm}$ 에서 最大의 (-) 應力이 作用하였다. 따라서 bead 部에 가까운 部分의 設計에 유의할 必要가 있다.

Circumferential 方向에서 Radial stress는 中心部에서 그리고 shoulder 部보다 bead 部에서 더 큰 壓縮應力의 影響을 받고 있으며, Radial 方向의 Radial stress는 $r=427.6\text{mm}$, 371.2mm , 314.8mm 에서는 거의 同一한 양상이나, $r=484\text{mm}$ 에서는 引張(+)에서 壓縮(-)으로 서서히 增加하였다.

圓周方向에서의 Shear stress는 $\theta=9^\circ\sim 20^\circ$, $r=371.2\text{mm}$ 에서 最大剪斷應力이 存在하였다.

參 考 文 獻

1. Albrecht Kuske, George Robertson; Photoelastic stress Analysis, John Wiley & Sons, Inc. (1974)
2. Felix Zandmann, et al.; Photoelastic coatings, The Iowa State Univ. Press. (1977)
3. C. L. Chow and C. W. Woo; "The Effect of Inflation pressure and vehicle Loading on the sidewall of a Radial Tire", Experimental mechanics, pp. 379 ~385.

본 논문은 과학기술처에서 시행한 특정 연구개발사업의 연구 결과임.