技術篇

二重露出 Speckle 干涉計를 利用한 타이어 變形測定에 관한 硏究

三陽타이어(株) 硏究所
安 鍾 律·朴 炳 九

1. 序 論

타이어는 內部에 空氣가 들어있어 車輛의 荷重을 支持하고 道路로부터 오는 振動을 吸收하여 搭乘者와 車輛을 보호한다. 타이어의 Sidewall은 가장 많은 屈伸을 받으면서 가장 큰 變形을 받는 部位이다. 따라서 타이어 Sidewall의 變形狀態를 정확히 안다는 것은 타이어 設計者에 있어서 매우 중요한 과제로 되어 왔다. 정확한 타이어 變形을 測定하기 위한 方法으로는 Grid method, Photoelastic method, Mercury Gauge method 등이 사용되어 왔다.

本硏究 報告書는 지금까지 거의 다루어 지지 않은 Laser speckle 現象을 이용하여 10.00R20 16P·R Radial 타이어의 表面變形의 解析을 試圖하였다.

타이어 負荷機構로는 自體開發한 荷重裝置를 이용하였고, 內部空氣壓은 120 psi를 적용하였다.

2. 二重露出 Speckle 干涉計 理論

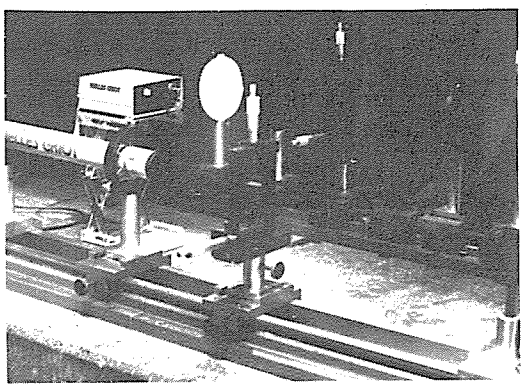
Speckle이란 干涉性이 強한 빛을 어떤 反射面에 비추었을 때 생기는 밝고 어두운 斑點의 무질서한 配列이다. 이러한 Speckle 무늬의 形成方式에 따라 레이저 Speckle과 白色光 Speckle로 구분할 수 있다. 레이저 Speckle은 레이저 光束을 光學的으로 거친 表面에 비출 때 表面에서 反射된 빛이 서로 干涉하여 빛의 強度分布가 空間的으로 불규칙하게 變化하여 생긴 斑點 무늬를 말한다. 白色光 Speckle은 物體表面에 斑點을 무질서하게 配列시켜 이용한다.

物體表面의 變形率은 각 Speckle 무늬를 이용한 二重露出 Speckle 干涉計에 의해 구해진다. 二重露出 干涉計는 初期 荷重時에 형성된 Speckle 무늬가 荷重이 增加함에 따라서 移動하는데, 移動前後의 Speckle 무늬를 한 필름에 겹쳐 記錄한 뒤, 이 필름을 光學的 影像處理를 하면 Speckle무늬가 이동한 變位를 구할 수 있다. 二重露出한 필름을 그림 1의 光學 테이블에 장치하고 필름의 한 點에 레이저 光束을 비추면 필름에 記錄된 Speckle무늬에 의해 透過되는 레이저 光束의 振幅이 變調된다. 이 變調된 透過光束은 렌즈에 의하여 Fourier 變換이 되어 렌즈의 뒷쪽 焦平面에 있는 字幕에 레이저 光束을 변조시킨 Speckle 무늬의 空間周波数 分布를 보여준다. 字幕에서의 빛의 強度分布는 그림 2와 같은 Young의 干涉 무늬로 변조된 Speckle의 空間周波数 分布로 나타난다. 따라서 字幕에 생긴 Young의 干涉 무늬의 方向(φ)과 間隔(d)을 測定하면 다음 式에 의해서 變位 δ를 求할 수 있다.

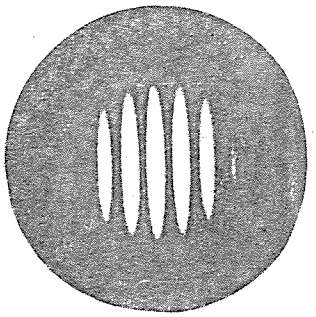
$$\delta = \frac{\lambda L}{d} \qquad (1)$$

여기에서 λ는 使用한 光源의 波長이고 L은 필름에서 字幕까지의 距離이다.

測定한 Speckle 무늬의 變位로부터 다음 關



〔그림 1〕 Optical processing table



〔그림 2〕 干 涉 무 늬

係式에 의하여 物體表面의 變形率과 應力狀態를 求할 수 있다. 즉, 타이어 表面上의 한 點의 變形前後의 位置變化 (u, v)와 測定値 (δ, φ)와의 關係는 다음과 같다.

$$u=\delta \sin \varphi$$
$$v=\delta \cos \varphi \tag{2}$$

이때 法線變形率 ε 와 剪斷變形率 γ 는 極座標系에서

$$\varepsilon_{rr}=\frac{\partial u}{\partial r}$$
$$\varepsilon_{\theta\theta}=\frac{1}{r}\frac{\partial v}{\partial \theta}+\frac{u}{r} \tag{3}$$
$$\gamma_{r\theta}=\frac{1}{r}\frac{\partial u}{\partial \theta}+\frac{\partial v}{\partial r}-\frac{v}{r}$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 u, v 는 각각 動徑方向과 接線方向의 變位이다.

이렇게 求한 變形率로부터 應力의 각 成分은 應力의 平衡方程式을 이용하여 다음 式으로 表示할 수 있다.

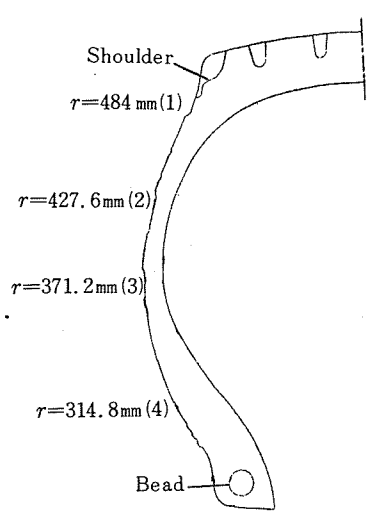
$$\frac{\partial}{\partial r}\sigma_{rr}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial \theta}\tau_{\theta r}+\frac{\sigma_{rr}-\sigma_{\theta\theta}}{r}=0$$
$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial \theta}\sigma_{\theta\theta}+\frac{2}{r}\tau_{r\theta}+\frac{\partial}{\partial r}\tau_{r\theta}=0 \tag{4}$$

變形率과 應力의 각 成分들은 解析的인 計算보다는 数値計算을 하여 구할 수 있다.

3. 타이어 表面變形率의 測定

(1) 레이저 Speckle을 利用한 타이어 表面變形解析

本實驗에서는 三陽타이어(株) 製品인 10.00R 20 16P.R Radial 타이어 Sidewall의 表面變形率을 측정하였다. 그림 3은 使用한 타이어의 斷面圖이다. 그림 4의 光學 테이블 system 을 사용하여 타이어 Sidewall 表面에 레이저 Speckle 무늬를 形成시켰다. 그리고 荷重裝置를 이용하여 타이어에 負荷를 加하였다. 負荷 전후의



〔그림 3〕 타 이 어 斷 面 圖

두 차례에 걸쳐 필름을 露出시켜 Speckle 무늬를 겹쳐 記錄한 뒤 現像하였다. 現像된 필름을 앞의 二重露出 Speckle 干涉計理論에서 說明한 순서에 따라서 타이어 Sidewall 表面의 變位를 求하고 이로부터 變形率을 求하였다.

① 타이어에 加해주는 荷重變化量의 調整

荷重을 增加시켜 가면서 移動하기 전후의 Speckle 무늬를 한 필름에 겹쳐서 記錄하는데 타이어에 加할 適正한 荷重變化量은 레이저 Speckle의 平均斑點 크기, 寫眞機의 倍率, 變形素材의 彈性特性 등에 따라 變化한다. 적정한 荷重變化量은 一般的으로 荷重에 의해 유발되어 필름에 기록된 變位가 Speckle의 平均斑點 크기보다는 커야 하고 變形이 너무 심해 Speckle 무늬의 모양이 歪曲되지 않을 만큼 작아야 하는데, 測定하고자 하는 量이 바로 變位이므로 試行錯誤의 과정을 거쳐서 實驗的으로 定할 수밖에 없다. 段階別로 나누어 Speckle 무늬를 記錄한 후에 필요한 Fringe를 얻을 수 있는 荷重變化量을 定하였다.

② 寫眞 필름의 露出條件調整

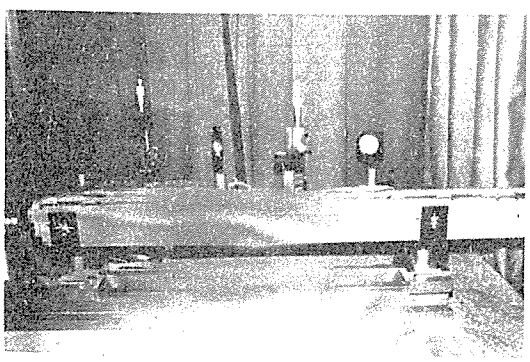
필름에 Speckle 무늬를 담기 전에 露出條件을 定하기 위해 露出時間을 變化시켜 가며 필름에 記錄되는 Speckle 무늬의 선명도를 調査하였다.

③ 變位의 測定

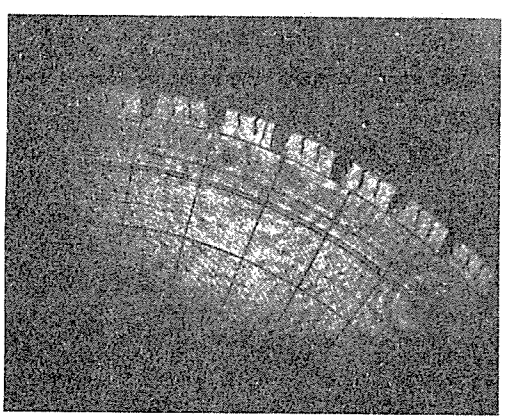
적정한 荷重變化量과 露出時間을 定한 후에 Speckle 무늬를 필름에 二重露出하여 變位를 記錄하였다. 變位가 기록된 필름을 現像한 후에 그림 1의 裝置에 장치하여 앞에서 說明한 方法대로 하여 變位를 읽는다. 그림 5는 타이어 表面의 Speckle 무늬를 二重露出하여 기록한 寫眞이고, 그림 6은 二重露出한 필름의 임의의 한 點에서의 Young의 干涉 무늬이다. 變位測定은 干涉 무늬의 方向과 間隔을 測定하여 式 (1)로부터 求하고 式 (2)를 利用하여 타이어 表面에서의 變位를 求하였다.

④ 變形率의 計算

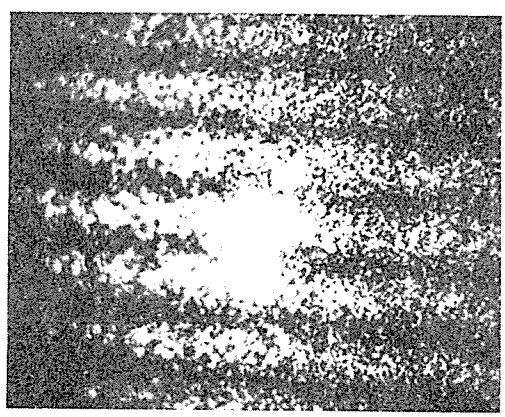
타이어 Sidewall 表面에 그려진 각 그물눈의 位置에서 變位를 求하였다. 이렇게 求한 變位로부터 變形率 Tensor ε_{rr}, $\varepsilon_{\theta\theta}$, $\gamma_{r\theta}$을 式 (3)으로부터 求하였다.



〔그림 4〕 光 學 테 이 블



〔그림 5〕 레이저 Speckle의 二重露出寫眞



〔그림 6〕 레이저 Speckle의 Young 干涉 무늬

(2) 白色光 Speckle을 利用한 타이어 表面 變形解析

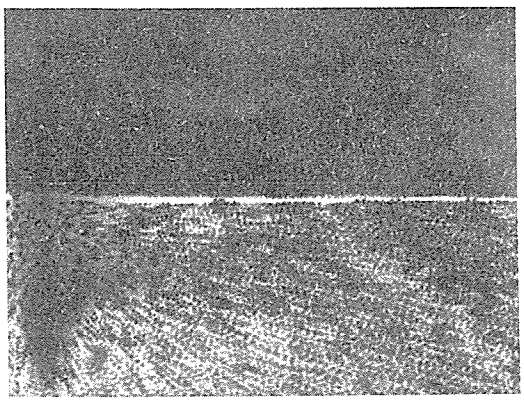
白色光 Speckle은 斑點을 人爲的으로 配列시킨 것이다. 白色光 Speckle은 레이저 Speckle의 경우보다 裝置가 간편하고 振動에 대한 安定性이 있다.

① 모델 実験

타이어 Sidewall 表面의 變形分布에 對하여 알아보기 전에, 우선적으로 直四角形 고무板의 모델을 통하여 白色光 Speckle을 形成시키기 위한 條件과 고무 表面의 應力을 解析할 수 있는 可能性을 조사하였다. 그림 7은 이 모형에 荷重을 加하면서 二重露出한 寫眞이고, 그림 8은 二重露出한 필름의 세 點에서의 干涉 무늬이다.

② 타이어의 變形解析

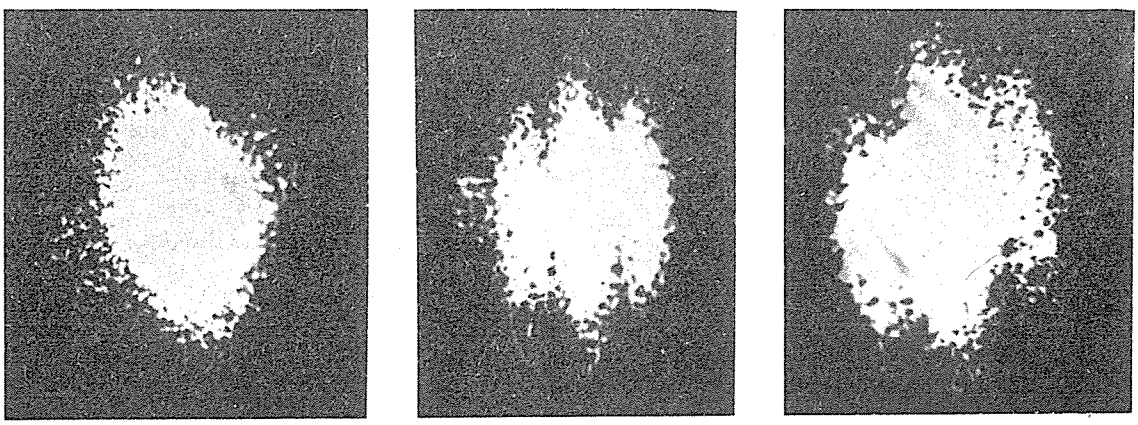
타이어 Sidewall 表面에 白色光 Speckle 무늬를 準備한 다음에 寫眞필름의 적정한 露出條件과 타이어에 加해질 적정한 荷重量을 조사하였다. Speckle 무늬를 필름에 담기 위하여 必要한 條件들이 결정된 다음에는 레이저 Speckle의 경우와 같은 順序로 하여 Speckle무늬를 필름에 記録하고 干涉 무늬의 方向과 크기를 測定하였다. 그림 9는 필름에 記録된 白色光 Speckle 무늬의 寫眞이고, 그림 10은 타이어 Sidewall 表面의 임의의 한 點에서의 干涉 무늬이다.



〔그림 7〕 모델의 二重露出 寫眞

4. 実験結果

타이어 Sidewall 表面의 變形率을 레이저 Speckle과 白色光 Speckle을 利用하여 測定하였다. 變形率을 測定한 그물눈의 위치는 動徑方向으로는 中心軸에서 타이어의 中心으로부터 r=314.8, 371.2, 427.6, 484(㎜)이고 接線方向으로는 接地面의 中心에서 40°까지 3.75°씩 분할하였다. 白色光 Speckle을 이용하여 測定한 變形率의 分布는 그림 11과 같다.



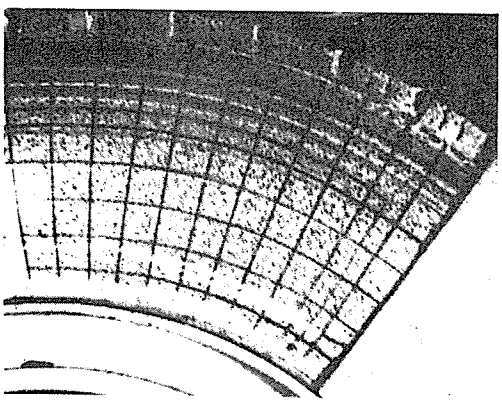
(a) (b) (c)

〔그림 8〕 모델의 세 點에서의 干涉 무늬

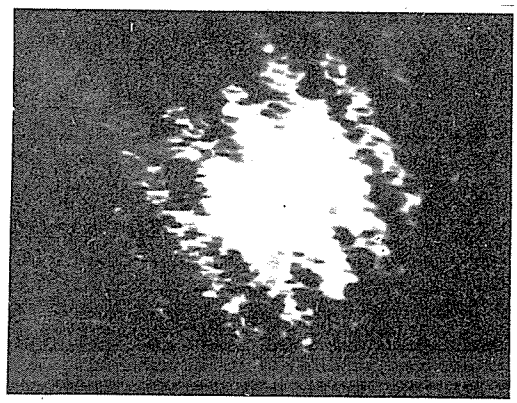
變形率의 分布를 接線方向으로 Scanning 하면서 본 全體的인 趨勢는 一定荷重變化量 이하에서는 각 位置에 따라서 變形率의 變化가 크고 급격한 反面에 그 이상의 荷重에서는 變化가 작고 완만한 分布를 보인다.

(1) 타이어 Sidewall 表面의 接線方向에서 Radial strain

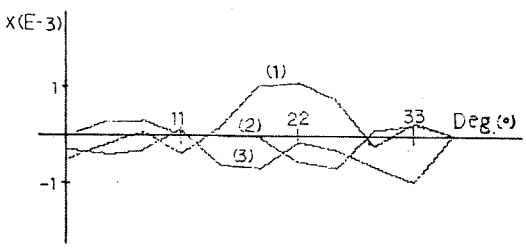
타이어의 Sidewall 表面을 接線方向으로 Scanning할 때 Radial strain의 分布는 각 荷重量



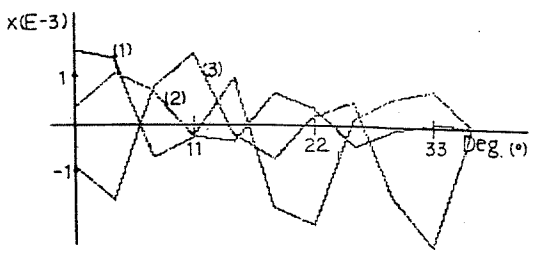
〔그림 9〕 二重露出한 白色光 Speckle 무늬



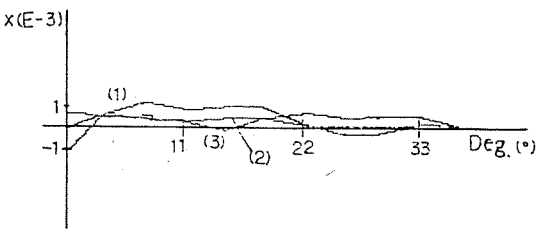
〔그림 10〕 白色光 Speckle에 의한 干涉 무늬



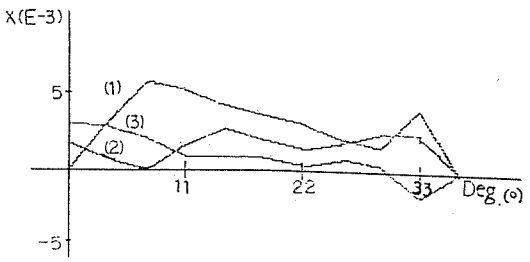
〔그림 11-a 1〕 타이어 Sidewall 表面의 接線方向에서 Radial strain (0～25kg)



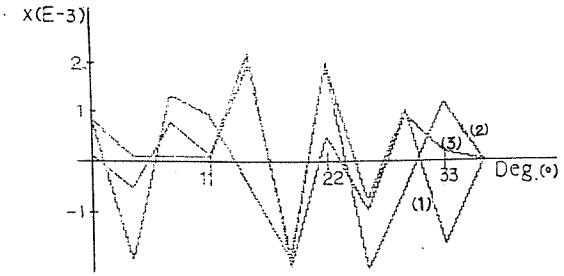
〔그림 11-a 2〕 타이어 Sidewall 表面의 接線方向에서 Radial strain (500～550kg)



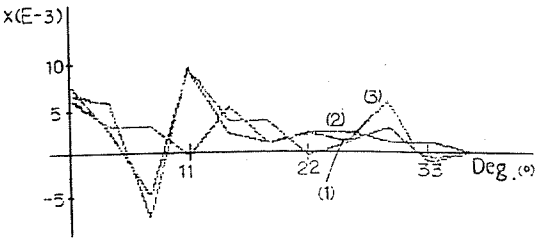
〔그림 11-a 3〕 타이어 Sidewall 表面의 接線方向에서 Radial strain (1, 500～1, 600kg)



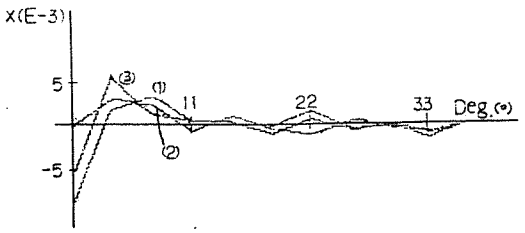
〔그림 11-a 4〕 타이어 Sidewall 表面의 接線方向에서 Radial strain (2, 450～2, 600kg)



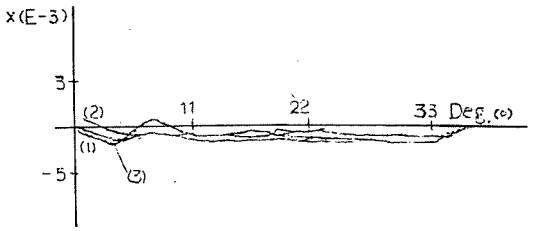
〔그림 11-b 1〕 타이어 Sidewall 表面의 接線方向에서 Phi strain (0 ~25kg)



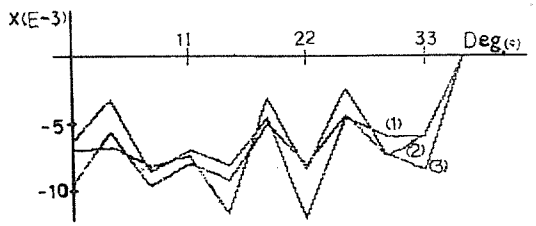
〔그림 11-b 2〕 타이어 Sidewall 表面의 接線方向에서 Phi strain (500~550kg)



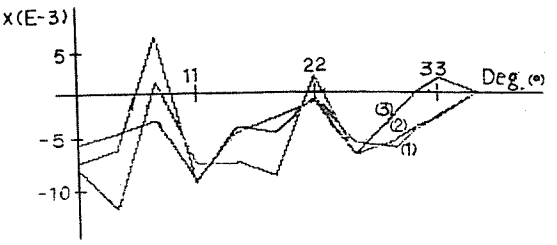
〔그림 11-b 3〕 타이어 Sidewall 表面의 接線方向에서 Phi strain (1, 500~1, 600kg)



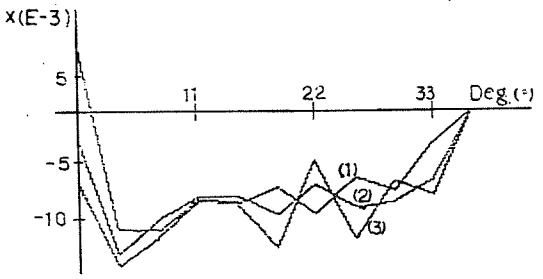
〔그림 11-b 4〕 타이어 Sidewall 表面의 接線方向에서 Phi strain (2, 450~2, 600kg)



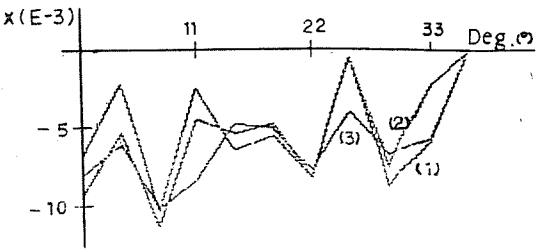
〔그림 11-c 1〕 타이어 Sidewall 表面의 接線方向에서 Shear strain (0 ~25kg)



〔그림 11-c 2〕 타이어 Sidewall 表面의 接線方向에서 Shear strain (500~550kg)



〔그림 11-c 3〕 타이어 Sidewall 表面의 接線方向에서 Shear strain (1, 500~1, 600kg)



〔그림 11-c 4〕 타이어 Sidewall 表面의 接線方向에서 Shear strain (2, 450~2, 600kg)

에 따라서 그림 11-a에 表示된 바와 같다. 荷重量이 0～500kg일 때에는 變化가 심하나 荷重量이 500～3000kg 사이에 있을 때에는 變形率의 分布의 變化가 심하지 않음을 알 수 있다.

(2) 타이어 Sidewall 表面의 接線方向에서 Phi strain

타이어 Sidewall 表面을 接線方向으로 Scanning하면서 살펴본 Phi strain의 分布는 그림 11-b와 같다. 이 分布를 살펴보면 荷重을 加하기 시작하였을 때 變化가 급격한 分布를 나타내고, 荷重이 점점 增加함에 따라서 Phi strain의 分布의 변화가 점점 減少하여 가며 완만하여진다. 標準荷重 부근에서는 Phi strain의 變化가 接地部에서 조금 나타나다가 거의 一定한 값을 나타낸다.

(3) 타이어 Sidewall 表面의 接線方向에서 Shear strain

Shear strain의 分布를 接線方向으로 Scanning한 것이 그림 11-c 이다. Shear strain의 分布는 荷重을 加하기 시작할 때 모두 음의 값만을 가지나, 500kg 부근의 荷重에서는 10°와 20° 그리고 30° 부근에서 양의 값을 가진다. 또 荷重이 그 이상으로 增加하게 되면 다시 음의 값만을 가지게 된다.

5. 結　論

二重露出 Speckle 干涉計를 이용하여 타이어 Sidewall表面의 變形率의 分布를 測定할 수 있었다. Radial strain과 Phi strain의 變化量은 0～500kg의 하중대에서 變化가 심하고 定格荷重인 3000kg에 가까운 荷重에서는 安定된 狀態를 보이고 있다. Shear strain의 경우도 荷重이 높은 곳에서보다 500kg 정도의 荷重에서 더 크다. 따라서 荷重에 따른 타이어 安定度의 問題는 타이어 壽命의 문제와 聯關지어 追後 계속 硏究해볼 흥미있는 과제라고 생각된다. 本實驗을 推進하면서 애로사항이 있다면 微細한 變位를 測定하기 때문에 處理하여야 할 데이타가 너무 尨大하다는 事實이다. 그러나 이러한 점은 相對的으로 큰 變形을 解決할 수 있는 다른 變形解析機構를 보완하여 使用하면 解決될 수 있는 問題이다.

參 考 文 獻

1. J. C. Dainty, et al., Laser speckle and related Phenomena, Springer-Verlag New York. (1976)
2. Joseph W. Goodman, Introduction to Fourier Optics, McGraw-Hill. (1968)
3. M. Francon, Laser Speckle and Applications in Optics Academic Press, New York. (1979)
4. Felix Zandman, et al., Photoelastic Coatings, The Iowa State University Press. (1977)
5. Vincent J. Parks, "The Grid Method", Experimental Mechanics 27N. (1969)

본 논문은 과학기술처에서 시행한 특정 연구개발 사업의 연구 결과임.

☆　☆　☆