

레일과 車輪接觸에 관한 理論

李 鍾 得
建設安全技術士
工學博士
鐵道專門大學 教授

目 次

1. 序 論
2. 彈性轉壓接觸 理論의 歷史
 - 2.1 Cater 理論
 - 2.2 no Slip/Liner 理論
 - 2.3 Strip 理論
 - 2.4 Kalker의 理論
3. 레일/車輪의 通用例
4. 結 論

1. 序 論

鐵道 軌道의 主材料인 레일의 Shelling의 하 나라고 생각되는 代表的인 것은 轉壓接觸疲勞 龜裂의 發生 및 전과의 直接的인 要因이라고 생각되며 레일과 車輪사이에서 發生하는 접촉 응력과 그 應力에 의한 塑性變形을 理論的으로 檢討하는 것이라고 생각된다.

여기서, 그 成果를 근거로 레일과 車輪에 있어서 彈性 轉壓接觸理論의 發展과 現像에 대해

記述하고자 한다.

轉壓接觸理論의 原點으로는 역시 1882年 하 인리헬스가 發表한 「彈性體의 接觸에 관하여」 라는 題目의 論文이 있다.

이것이 헬스의 接觸橢圓이라는 有名한 그의 接觸理論이다.

그가 베를린 大學에서 助教時節 두枚의 렌스를 接觸시켰을때 彈性變形이 빛의 간섭으로 어떠한 影響을 주지않나 하는 의문으로부터 出發해서, 소위 헬스의 接觸應力分布를 구하게 되었다. 그리하여 技術的으로 重要한 課題에 대한 研究成果를 期待하게 되었다.

그것이 鐵道에 있어서는 베어링産業 發展에 수반하여 이 課題와 對面하였으나 19世紀初까지 기다리지 않으면 안되었다.

헬스의 理論은 接觸面에서 마찰이 없는 完全 彈性體의 접촉에 限定되어 있는 것으로 Coa-lomb摩擦을 가정한 摩擦係數 $\mu=0$ 의 轉壓接觸을 表現하게 되었다.

以後에 轉壓接觸理論의 發達は 이 헬스理論의 制約을 어떻게 제거하는가에 있었다. 結局, 接觸

表面의 摩擦은 完全彈性體가 아닌 塑性變形을 포함한 實際的 問題를 어떻게 헬스理論으로 發展시킬 것인가 하는 것이었다.

여기서 塑性變形的 問題를 제외한 레일과 車輪의 接觸문제에 관한 理論을 紹介하고자 한다.

2. 彈性 轉壓接觸理論의 歷史

이 理論의 發展에 공헌이 많은 우수한 理論中 Cater의 理論, 노슬립/리니어理論, Strip理論 및 Kalker理論 등이 있다.

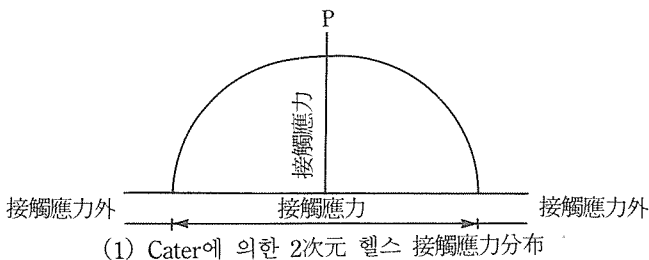
2.1 Cater 理論

連續體의 轉壓接觸理論은 거의 같은 시기(1926年 및 1937年)에 전혀 다른 Cater(英國)와 프롬(獨逸)에 의해 先驗的인 研究가 이루어졌다.

Cater는 레일을 彈性半無限空間, 車輪을 彈性 실린더(圓筒)로 모델化하고, 境界條件을 設定한 後 실린더도 半無限空間으로 假定하여 이 2次元半無限空間 問題를 풀었다. 여기에 대해 Fromm, H는 두개의 彈性 실린더의 轉壓問題를 半無限空間의 假定을 設定, 2次元彈性問題로 풀이했다.

여기에 Cater의 成果를 그림1에 소개한다.

그림 1의 (1)은



次元 接觸應力 分布이다.

그림1의 (2)는, 接觸領域의 車輪의 進入側에서 車輪과 레일의 轉壓方向의 乘直變形(縱變形)이 같아짐과 동시에 一定해지는 것을 粘着條件으로 해서 구한 接線應力 分布로 粘着領域, 마찬가지로 車輪이 빠져나가는 例에 있어서 接觸應力이 變形을 一定하게 유지하는 것은 불충분하므로 限界接線應力 ($f = \mu p$, 여기서 f : 接線應力, p : 接觸應力, μ : 摩擦係數)으로 滑動을 표시하고 있다.(활동領域)

이때 이 理論은 스핀을 考慮하지 않는다.

2.2 no Slip/Liner 理論

여기서는 주로 Johnson의 理論을 紹介하고자 한다. 처음으로 노슬립/리니어란 무엇을 의미하는가 說明하면, 接觸力에 比較하여, 接線力이 매우 작은 경우, 接觸領域을 全部 粘着領域으로 假定하는 것이다. 이것을 노슬립이라 하며, 이 假定과 接線力이 활동하는 例(레일과 車輪 각각의 接點移動速度의 差와 그것의 平均速度의 比, 결국 轉壓方向에 관해서 이야기 하면 車輪速度와 車輪의 周速度의 差와 그 平均 速度의 比)의 一次式으로 나타낼 수가 있다. 그래서 이른바 線形(Liner) 關係가 된다. 그래서 그는 平面과 彈性求에 의한 圓接觸으로 假定하여, 스핀과 轉壓方向 및 같은 直角方向 接觸力 轉壓에 대한 效果를 檢討하여 스핀 혹은 接線力에 의해 發

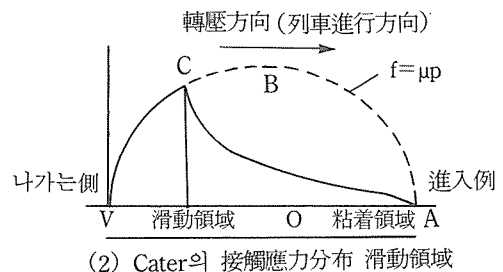


그림 1 Cater의 理論

헬스의 3次元接觸應力分布의 原點에 가깝게 應力分布을 等價길의 概念을 導入해서 求한 2

生하는 接線應力을 提案했다. 그 理論에 따르면 接觸圓의 車輪 進入例에 있는 한 點에서 노슬립

조건을 滿足하며, 其他 接觸領域의 境界에서 接線應力이 無限大로 發散된다. 그 後에 Kalker는 接線應力을 多項式을 利用하여 近似적으로, 接線力과 滑動率의 線形關係, 係數를 求했다. 그것이 Kalker의 크리프 係數라고 부르는 것이다.

2.3 Strip 理論

Johnson은 스스로 노스립/리니어理論을 더욱 發展시켜, 스펀을 제거한 轉壓方向 및 같은 直角方向에 接線力이 作用하여 보다 一般的인 接觸領域에 滑動領域과 粘着領域의 兩方向이 存在하는(部分滑動) 경우의 接線應力分布를 提案했다. 그러나 이 理論은 그림2의 斜線部에 있어서 接觸領域의 車輪의 進入側條件, 다시말하면 進入側에 粘着領域이 있고 빠져나가는側에 滑動領域이 있는 것과 같은 조건을 滿足시키지 않는다는 것이다. 그러나 그 後, 이 問題는 Haines

D. J. Ollerton E.가 처음으로 Strip 理論에 의해 大部分 풀었다. 이 理論을 考察하는 方法을 그림 3에, 하나의 例를 그림4에 표시했다. 그림 3에 보여준 것과 같이 이 理論은 接觸領域에 轉壓 直角方向에 微小幅을 取하여 轉壓方向에 그 斷面을 取한 部分(이것을 Strip이라 함)에 2次元 理論을 適用하여, 그것을 轉壓直角方向으로 擴張한 것이다.

이 理論은 Holling 그리고 Kalker에 의해 더욱 發展을 보았으나, 接觸領域의 모양이 轉壓 直角方向에 가늘고 긴 形상이 되므로 正確한 解가 求해지지 않으므로 스펀을 考慮할 수도 없다.

2.4 Kalker의 理論

여기서는 Kalker의 簡易化理論과 嚴密理論을 紹介하고자 한다.

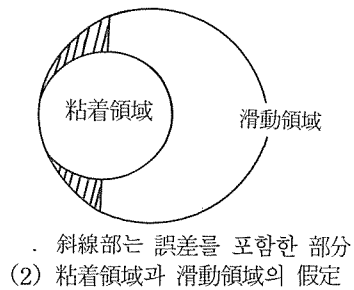
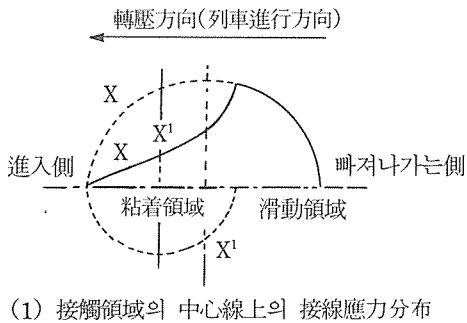
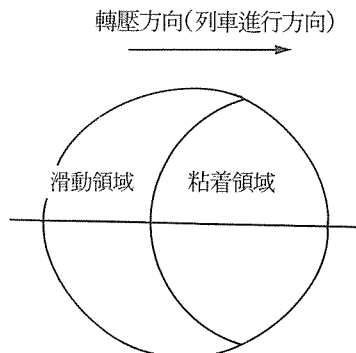
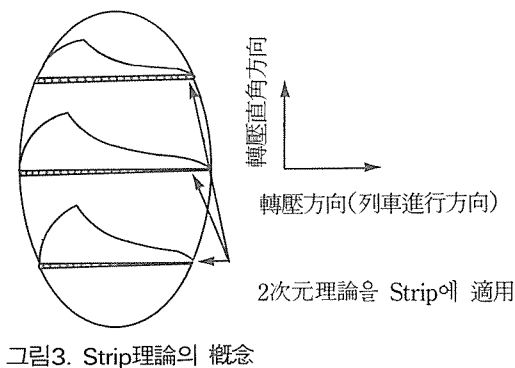


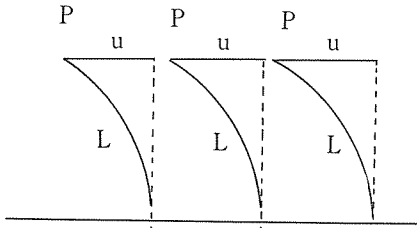
그림2. 3次元 轉壓接觸의 接觸領域(Johnson)



(1) Kalker의 簡易化 理論

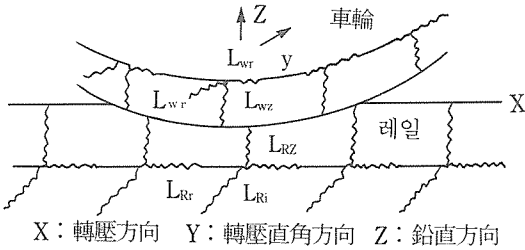
이 理論은 彈性體를 堅固한 地盤에 結合시킨

變位 u 는 그點에 作用하는 힘 P 에만 의존한다



L : 現實狀態와 모델의 틀림을 조정하는 파라메타

그림 5. 簡易化 理論의 概念



X : 轉壓方向 Y : 轉壓直角方向 Z : 鉛直方向

그림 6 : 簡易化理論의 레일과 車輪모델

얇은 層으로 생각하여, 그表面의 어느 한點의 變位는 같은點에 作用하는 힘이 영향을 준다는 가정에 기초를 둔것이다. 그림5는 이것을 고찰하는 방법이며, 그림6에 레일/車輪 Model을 보여주고 있다.

이 理論의 특징은, 理論이 비교적 간단해서 계산속도가 빠르고 車輪連動등의 解析應力에 적당하다. 또한 조건에 따라 最大 15% 정도의 오차가 發生한다. 그림7에서 이 理論에 의한 여

轉壓方向(列車進行方向)

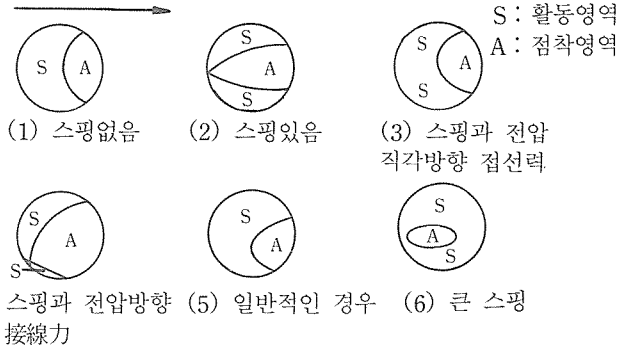
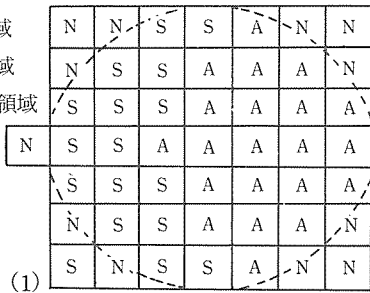
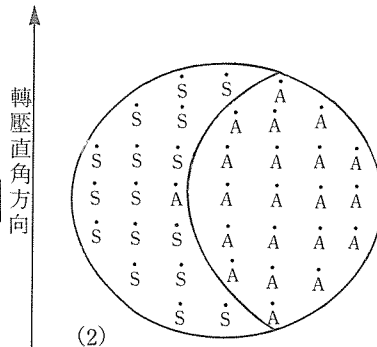


그림 7. 簡易化理論에 의한 接觸領域

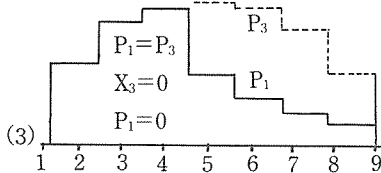
S : 滑動領域
A : 粘着領域
N : 非接觸領域



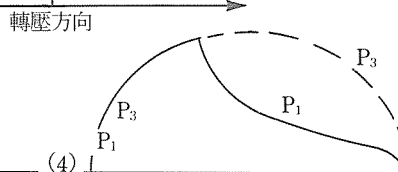
(1)



(2)



(3)



(4)

(1) 有限要素法(CONTACT)에 의한 接觸領域分割

(2) (1)을 이미지화한 接觸領域 (3) 接觸領域 中心線上的 接觸應力分布

(4) (3)을 이미지화한 接觸應力分布

그림 8. 嚴密理論에 의한 브레이크作用時의 接觸應力

러가지 조건 아래서 粘着과 滑動領域을 보여준다.

(2) Kalker의 嚴密理論

이 理論은 假想일의 原理로부터 最少 포텐셜 에너지의 原理를 유도하여, 그것을 接觸力學에 적용시켜 變分法을 利用, 數值解析(有限要素法 : 프로그램名 “Contact”)한 것이다.

이 理論에 의하면 3次元彈性 轉壓 接觸의 大部分의 問題를 嚴密하게 해석할 수가 있었다.

그림 8, 9에서 計算例를 볼 수 있다.

(2) 接觸領域의 滑動領域과 粘着領域

이 그림에 의하면 3次元彈性 轉壓接觸의 接觸領域에 있어서 粘着領域과 滑動領域의 모양을 보여주며 더한층 轉壓의 經時變化를 理解할 수가 있다.

3. 레일/車輪의 適用例

여기서는 Johnson의 노스립理論을 利用하여, 日本 新幹線의 경우에 적용 計算한 例를 紹介

하고자 한다.

前述할 것과 같이 노스립理論은 車輪이 빠져나가는 側에서 接線應力이 無限大로 發散하므로 Johnson의 提案을 따르면 그림10과 같은 處理를 했다. 또한, 新幹線의 圓錐車輪과 60kg레일의 接觸領域을 橢圓接觸에 相當하는 圓接觸으로 假定했다. 이때, 兩接觸領域에 있어 헬스의 最大 接觸應力이 같아지는 條件으로 圓接觸의 領域을 求했다. 더한층 레일의 敷設角(1/40)과 車輪의 踏面勾配 (1/40)에 의한 接觸面에 作用하는 輪重의 轉壓直角方向의 成分에 의해 發生하는 滑

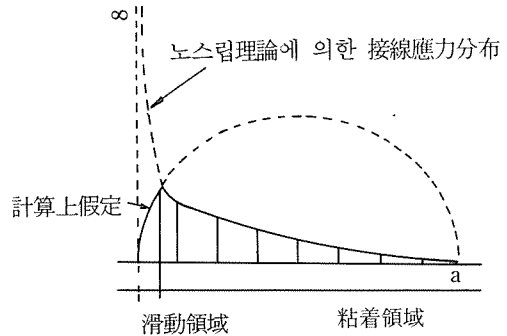
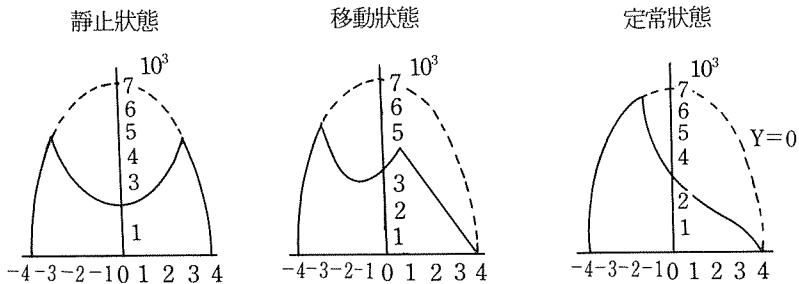
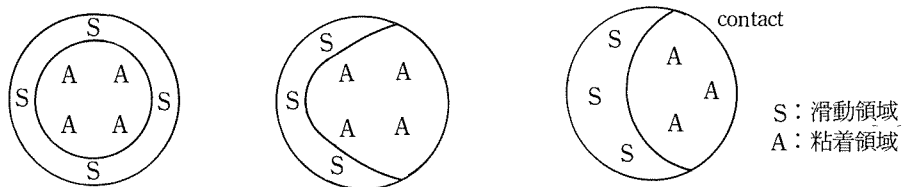


그림 10. 노스립理論의 特異點處理



(1) 接觸領域 中心線上的 接線應力分布



(2) 接觸領域의 滑動領域과 粘着領域

그림 9. 轉壓開始부터 定着狀態까지의 推移

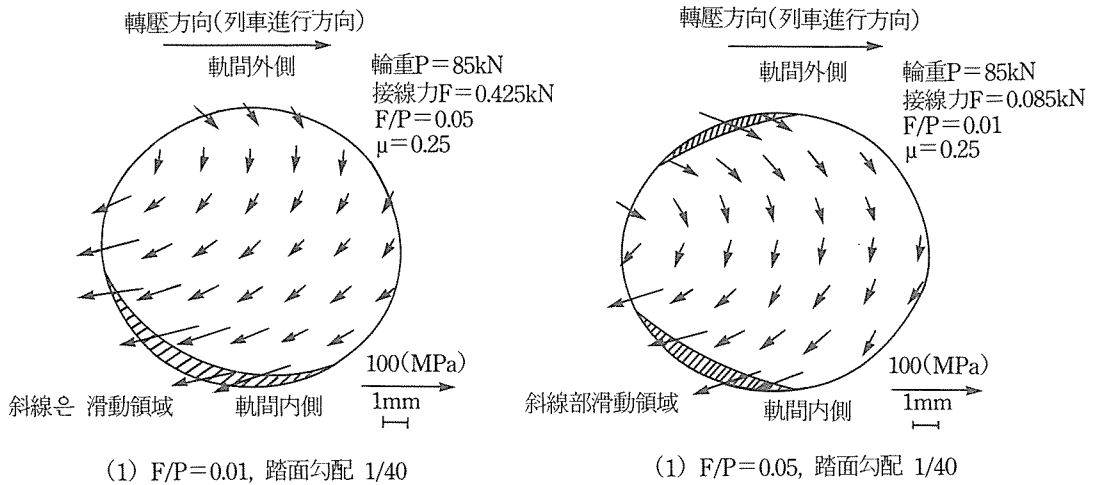


그림 11. 圓接觸을 假定한 接線應力(新幹線)

動率과 車輪의 踏面勾配에 의한 스펀에 의해 생기는 滑動率이 해소되며, 최후 車輪이 레일위를 직진하는 경우에 관한 計算을 했다. 求한 接線應力分布를 그림11에 나타냈다.

이 그림에서, 轉壓方向과 逆向하는 接線力이 作用하고 있는(마지막 車輪의 加速狀態) 것과 같이, 接線應力의 方向이 그것과 逆方向으로 표시된 것도 있다. 이것으로부터, 計算例에서 보는 것과 같이 接線力이 작은 경우에는 스펀의 影響이 커지는 것으로 판명되었다.

4. 結論

레일과 車輪의 接觸面에는, 輪重이라고 부르는 鉛直力과 車輪의 加速 또는 減速에 의해 생기는 點着力이라고 부르는 接線力과, 한층더 車輪踏面勾配에 의해 생기는 差動滑動이라 부르는 스펀이 作用한다. 여기서는 이 外力에 의해서 發生하는 接觸面 및 接觸面下의 應力을 正確하게 알아내기 위해 실행해온 研究成果를 紹介했다.

레일 및 車輪과 같은 線形의 彈性材料에 Coulomb 摩擦을 假定한 Kalker의 嚴密理論에 의해, 現在 局面 Flange接觸이 없이 거의 轉壓接觸의 接觸應力을 求할 수가 있다. Flange 接觸에 관

해서도, 이 理論의 適用이 可能하다고 생각되어 지고 있다. 따라서 Kalker理論의 레일과 車輪사이의 경우 適用이 크게 期待된다. 現在 연구에 몰두하고 있다. 한층 Kalker의 簡易化理論을 嚴密理論보다 粘度는 조금 떨어지나 計算速度가 빠르므로, 車輪運動의 動的解析등에 많이 利用되고 있다.

參考文獻

- 1) Johnson, K. L.(1958) : The effect of a tangential contact force upon the rolling motion of a elastic sphere on a plane. Trans. ASME, Journal of Applied Mechanics 25, 339.
- 2) Kalker J. J.(1967) : On the rolling contact of two elastic bodies in the presence of elrg friction. Doctoral Dissertation. Technical University Delft
- 3) Kalker J. J.(1991) : Wheel-rail rolling contact theory. proc. of third Int. Conf. on contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel systems. Cambridge U.K. July 1990.

