タイヤの成形加工

毛利 浩*

1. はじめに

乗用車用ラジアルタイヤは図1に示すような有機繊維、スチール、ゴムの複合体であり、その構造は車の荷重を支え、制駆動時の摩擦、コーナリング特性、操縦安定性、転がり抵抗等を最大に引き出すように設計されている。カーカス、レイヤー、フリッパーにはナイロン、ポリエステルをはじめとする有機繊維が使用され、ベルトにはプラスチックしたスチールコード、トレッドゴムには耐摩耗性、トラクションに優れたゴム、サイドゴムには屈曲疲労性の良いゴムを用いる。インナーライナーには空気を保持するために耐空気透過性の優れたブチルゴムを使用する。

タイヤはこのような複雑な構造をしているのでその成形加工はいくつかの工程があり、基本的にはゴムの混練り工程、押出工程、コード工程、裁断工程、ビード工程、成形、加硫、検査の8つの工程から成る。タイヤの製造工程の概要を図2に示す。混練り工程では原材料を混ぜ合わせ、押出工程では所定の形状に部材を押し出す。コード工程ではナイロン、ポリエステル、スチールなどのコードをすだれ状に織り、その上にゴムを圧着し、裁断工程でタイヤのサイズに合わせて一定の幅、角度に裁断する。ビード工程で

はビードワイヤをゴムで包んで押出、リングに巻き取り、ビードを成型する。

成形工程では準備された部材の貼り合わせ作業を行い、加硫工程で熱と圧力を加えプレスし、最終的にでき上がったタイヤ製品の検査を行う。本解説では製造工程のうち、特に問題となる

- (1) 混練り工程でのゴム中のカーボンの分散
 - (2) 押出工程でのゴムの粘度
 - (3) 成形工程でのゴムのタッキネス
 - (4) 加硫工程での加硫反応のコントロール
- に焦点を当て、以下概説する。

2. タイヤ製造のポイント

2.1 混練り時のゴム中のカーボン分散

タイヤ用のゴム配合は表1に代表されるように、フィラーとして多量のカーボンブラックを使用している。ゴム中のカーボンの分散状態が悪いと耐摩耗性低下、耐亀裂成長性低下などをもたらすので、できるだけ分散を良くする必要がある。したがって、生産性も考え、いかに迅速にカーボンをゴム中に均一に分散させるかが鍵である。ゴム中のカーボン分散を簡便に精度良く測定する方法が最近 Opti-grade 社¹⁾より提案されている。Coran²⁾によるとカーボンブラックの分散度 (DR ; Dispersion rating) は混練り時間 t と混練りスピード等の操作条件あるいはカーボンブラックのコロイダル特性で決まる定数 k の関数として(1)式のように与えられる。

$$DR = 10 - \exp[(a - kt)/1.4217] \quad (1)$$

ここで $DR = 10$ がカーボン分散の優れている状態であり、 DR の値が低くなるにつれカーボンブラックの分散状態が悪化していることを表す。良い分散と悪い分散の例を図3に示した。また、混練り時間とゴム分散度の関係を図4に示した。ストラクチャーの発達していないカーボン(N326)の方が分散しにくいことがわかる。短い時間でうまくカーボンを分散させるため、混練り機のサイズ、ロータ形状、クリアランス、練りボリューム (Fill Factor: FF)、温調、回転数などを調整する。混練り機のタイプには2つのロータが噛み合う Intermesh タイプと2つのロータの軌道が交わらない Tangential タイプの二種類がある。FF とは混練り機の全内容積に対するゴムの仕込み比であり、最適値が存在する。FF が小さ過ぎるとせん断がかからず、

図1 ラジアルタイヤの構造

* Mouri, Hiroshi
(株)ブリヂストンタイヤ材料設計第1部
東京都小平市小川東町 3-1-1 (〒187-8531)
2001. 3. 22 受理

■ゴム練り工程 MIXING PROCESS

■トレッド押出工程 TREAD EXTRUDING PROCESS

■コード工程 CORD MANUFACTURING PROCESS

■裁断工程 CUTTING PROCESS

■ビード工程 BEAD-MAKING PROCESS

■成型工程 BUILDING PROCESS

■加硫工程 VULCANIZING PROCESS

■検査工程 INSPECTION PROCESS

仕上げ・検査
Trim and perform appearance inspection and balance/uniformity check

図2 タイヤの製造工程

表 1 典型的な乗用車用タイヤ用トレッド配合

SBR 1712	96.25
BR 01	30
酸化亜鉛 #3	3
ステアリン酸	2
HAF ブラック(N 330)	85
軟化剤(油)	20
老化防止剤(6 PPD)	1.0
加硫促進剤(TBBS)	1.2
硫黄	1.5

(出典：JSR ハンドブック)

表 2 混練り機のロータ形状と Fill Factor⁵⁾

混練機的方式	ロータタイプ	最適 FF
Tangential	2 翼	0.72-0.74
	2 翼 E/S	0.74-0.78
	4 翼	0.74-0.76
	4 翼 E/S	0.76-0.80
Intermeshing	Original	0.56-0.60
	NR 2	0.61-0.65
	NR 5	0.67-0.71
	PES 3	0.63-0.66
	PES 5	0.68-0.72
	VIC	0.61-0.64
	KOBE	0.68-0.72
	CARTER	0.64-0.68

図 3 カーボン分散の悪い例(左)と良い例(右)

図 4 混練り時間とカーボン分散の関係¹⁾

FFが高過ぎると分散が進まない。表2に示すように最適FFは混練り機のロータ形状によって変化する。ロータ速度、ポリマーの分子量によっても最適FFは変化するので個別に設定して行く必要がある。

2.2 押出時のゴム粘度

押出時、ゴムの粘度が高いとバラス効果によりスウェルやシュリンクが大きくなり、寸度が安定せず、また、ゴムが発熱して押出中に加硫反応が起きてしまう(スコーチと呼ぶ)という問題が生じる。あまり粘度を下げ過ぎるとゴムの鎖切断によりゴムの物性が悪化するので混練り工程では押出できる適度な粘度を設定する必要がある。

この粘度を評価する上でポイントとなるのがゴムの流動特性である。ゴム、プラスチックの流動特性は非ニュートン流動であることはよく知られている。ゴムの場合、せん断応力(τ)と粘度(η)、せん断速度($\dot{\gamma}$)の関係はPower Lawに従い、(2)式で表される。

$$\tau = \eta \dot{\gamma}^n \quad (2)$$

しかし、実際にはカーボンの充填量が増えると降伏応力(τ_y)を示すようになり、(3)式で表されるように降伏応力以下では流動が起こらない。このような流体を非ビンガム流体と呼んでいる。図5に各種の流動特性を比較した。

$$\tau = \eta \dot{\gamma}^n + \tau_y \quad (3)$$

何故、充填ゴムには降伏応力が存在するかということについてはPayne³⁾がそのメカニズムを明らかにしている。すなわち、カーボンブラック同士の凝集力によりネットワークを形成し、構造粘性を生じるとしている。押出しの開始である熱入れ時はこの降伏応力をなるべく小さくする必要がある。特にフィラーにシリカを使用するとこの傾向が顕著なので、脂肪酸亜鉛などを添加し、シリカ粒子の表面を覆い、ネットワークを防止する。一方、押出機の出口近傍でのせん断速度の高い領域では、フィラーの影響よりもゴムの分子量や加工助剤の影響が強いので各種軟化剤を添加する。

2.3 成形時のタッキネス

前工程で準備したタイヤの各部材(図1)を成形で貼り合わせ作業する。成形するときに未加硫ゴム同士の接着(タッキネスという)が低いと貼り合わせがうまく行かず、

図 5 3種の代表的流動特性

後の工程での作業ができない。天然ゴムは一般にタックネ
スが低いので問題は少ないが、合成ゴムではタックネ
スのレベルを上げるのに樹脂を配合することが多い。タック
ネスについては Hamed⁴⁾ が興味深い研究をしている。一般に
ゴムのバルク物性（未加硫，加硫ゴムの弾性率，ロス）は
(4)式に示す WLF 式に従うことが知られているが，タッ
クネスも同様の挙動をする。

$$\log aT = -6.56(T - T_0)/(86.6 + T - T_0) \quad (4)$$

ここで aT は温度を周波数に換算する時のシフトファクターであり, T_0 は基準温度である. タツキネスはある周波数まではバルクの物性と同様, この温度・周波数換算に従うが, ある速度を越えると急激にタツキネスの低下する点がある (図 6).

これは貼り合わせ作業時の大切な点であり、思い切り引っ張ると簡単に剥がれ、何度でも位置が合うまで繰り返し貼り合わせを行うことができるが、もともと引っ張ると未加硫ゴムはなかなか剥がすことができない。

2.4 加硫反応について

成形工程で作られた未加硫の生タイヤは加硫工程でプレスに入れられ、最終のタイヤ形状にモールドイングすると同時に熱をかけ、加硫反応を行う。通常ゴムの加硫は表1に挙げたように硫黄加硫を基本とし、最短で加硫を行うため、加硫促進剤を使用して加硫反応を速めている。ところが加硫反応が短すぎると前工程で焦げ（スコーチ）が発生し、押出作業ができなくなるので最適な加硫速度を設定する必要がある。

促進剤にはさまざまな種類があり、超促進剤であるチウラム類から充分にスコーチに対する安全があり、加硫速度が早いチアゾール類、グアニジン類がある。典型的な促進剤のリストを表3に挙げた。チウラム類については、ニトロソアミンの問題から最近では置換基をメチルやエチルからフェニルに変えており、超促進剤としての能力は若干減っている。

前述した押出作業でスコーチしにくく、加硫を速くするには加硫反応の温度依存性を利用するのが便利である。加硫反応速度(K)は(5)式に示されるアレニウスの式に従うことが知られている。

$$K = A \exp(-E/RT) \quad (5)$$

ここで A は頻度因子, E は活性化エネルギー (J/mol), R は気体定数 (J/mol/°K), T は絶対温度 (°K) である。ここで活性化エネルギーの値が高くなるように促進剤を選べば, 比較的低温である押出工程では加硫が起らず, 比較的高温の加硫工程では, 迅速に加硫をすることができる。促進剤と硫黄の比を小さくすると一般に活性化エネルギーを高くすることができる。

ゴムは熱の不良導体であるため、トラック、バス、建設車両などの肉厚のタイヤを加硫する時は、中心が最適加硫になるまで圧力をかけておく必要がある。圧力をかける時間が足りないと、ゴムに泡が発生し、製品不良となる。ただし、タイヤの表面はその間加硫が進んで過加硫になるという問題がある。そのような場合は加硫温度を充分落として加硫をする必要がある。

3. ま と め

タイヤの製造には以上述べてきたような押えるべきポイントがあり、一筋縄にはいかず、長い経験と努力が必要である。しかし、設備は日進月歩を遂げており、自動化による品質向上、生産性向上がなされている。日本や欧米のように賃金の高い国々でタイヤの生産が続けられるのは、こうした自動化の努力によるところが大きい。

参考文献

- 1) Nilson, L. et al. : the 152nd ACS Rubber Division Meeting, No.102 (1997)
- 2) Coran, A.Y. and Donnet, J.B. : Rubber Chem.&Technol., **65**, 998 (1992)
- 3) Payne, A.R. and Whittaker, R.E : Rubber Chem. & Technol., **44**, 440 (1971)
- 4) Hamed, G.R. : Rubber Chem & Technol., **68**, 248 (1995)
- 5) Wood, P. : Tire Technology International, **20**, June (2000)