ゴム・プラスチック混練機の最近の進歩

井 上 公 雄*

1. は じ め に

ポリマーの加工には、混合、混練、造粒などの操作が加えられるが、その目的は、(1)ホモジナイジング、(2)ポリマーブレンド及びアロイ化、(3)繊維強化材、無機質充てん材の混合、(4)ポリマーの可塑化、溶融、(5)脱水、脱溶媒、脱モノマー、(6)化学反応など多様である。

(1)は重合反応後の不均質構造の解消(ゲルの消去、光学的性質の改善)であり、重合設備の大型化に伴い混練造粒設備も大型化し20～30 ton/h程度のものが登場している。(2)、(3)についてはポリマーの高付加価値、高機能化製品の開発と関連し、ポリマー加工業界に広く普及し、今後とも発展が期待される分野である。(5)、(6)については、混練機あるいは押出機をポリマーの精製から重合、グラフト化、架橋などの化学プロセス用機器として応用するものであり、最近その動向が注目をあびている。

ポリマーの混合・混練設備は表1のとおりバッチ式と連続式に分けられ、原料の種類、混練の目的に応じて適切な機械が使用されている¹⁾。ポリマーの混合・混練設備は強靱な固体あるいは高粘度の液体を加工するために、一般に高トルク・高馬力に耐える構造となっている。特に高せん断速度域あるいは高せん断力下で加工する設備を高せん断形混練機と称することとし、高せん断形混練機を中心に最近のポリマー混合・混練設備の動向について紹介する。

2. バッチ式混練機

バンバリーミキサーは1916年米国Farrel社のDr. Banburyによって発明され、従来のロールに比べて画期的に生産性向上が図れたといわれるが、ゴム工業では今日でも主としてバンバリータイプのミキサー(以下BMと略す)が使われてい

る。最近のBMは高速・高馬力化し、シール構造、材料の排出機構、ミキサーの冷却方式などに改良が加えられ、コンピュータ制御による混練物品質の安定化が図られている。

著者らは1970年後半以後に、ミキサーの内部における材料の挙動を調べるためにモデル試験の手法を開発し、BMロータの改良について(株)ブリヂストンと共同で研究を進めた。混練機の実産性向上、省エネルギー化、混練物品質の改良に努めてきた結果、従来のBMに比べて性能が改善された機械の開発に成功した。その後改良されたBM及びそのロータは、国内、外のゴム工業界に広く受け入れられている。

混練機の一部をガラス貼りにして内部の材料の挙動を直接観察する試みは、最近Akron大学などで活発に進められており^{2),3)}、混練機の解析及び改良に大きく貢献することが期待される。

2.1 ロータ形状の改良

BMのロータ形状(寸法)は混練性能を大きく支配することが予測されていたが、バッチ式混練機のロータ形状と混練性能の関連を調べた研究は少なかった。Guberら⁴⁾はロータの前進面とチャンバ内壁面の間のくさび状空間において材料に加わるせん断仕事を定量的に求めていたが、この考え方はBMの解析において参考になった。

* 株式会社神戸製鋼所機械・エンジニアリング事業本部 (〒651 神戸市中央区協浜町1-3-18) 産業機械本部第1技術部主任部員。工博。昭和35年、東京都立大学工学部工業化学科卒業。38年、(株)神戸製鋼所入社、高分子材料の成形加工、混練、再資源化技術開発に従事、現在に至る。
<趣味> ゴルフ

表1 ポリマーの混合・混練設備の分類

* ()内は(株)神戸製鋼所の商品名

図1 2次元モデル試験機

著者らはBMの内部における材料の挙動を観察し、ロータ形状、寸法及びミキサーの操作条件が混練物の温度、比エネルギー、添加剤の分散度及び混合度に及ぼす影響を定量的に把握するために、図1のような2次元モデル試験機を試作した⁵⁾。2次元モデル試験機によると、BMのロータ断面方向における材料の流れを観察するとともに、チップクリアランス、ランド幅、ロータ食込み角、チップ数などのロータ形状、寸法要因、及び

図2 2次元モデル試験による天然ゴムの素練り実験

*: 寄与率=6~10%の要因, **: 寄与率>10%の要因

ロータ回転数，混練時間，充てん率，機械の温度などの操作要因が，混練物の温度，比エネルギー，ゴムの粘度，カーボン分散度などに及ぼす影響を定量的に把握することができる。

図2は2次元モデル試験機により天然ゴムを混練した一例を示す。ゴムの素練り効果(ムーニー粘度の低下)には，ロータのチップクリアランス，翼数あるいはチップ数，ロータ回転数，混練時間が大きな影響を与えることが認められる。またカーボンマスターバッチの混練において，ゴム中のカーボンブラックの分散に対してもほぼ同様な実験結果が得られている。

ロータのチップを通過する際に混練物は最大せん断応力を受けることになり，チップクリアランス及びチップ数が混練度と密接に関連することは当然と思われる。

バッチ式混練機の性能は，微視的な分散(Dispersion)とバッチ内混合の均一性(Distribution)によって評価できる。バッチ内混合の均一性に及ぼすロータ形状及び操作条件の影響を調べるため，図3のような3次元モデル試験機を製作した⁶⁾。3次元モデル試験機は透明なプラスチック製のチャンバと鋼板を積層したロータで構成されている。実際のゴムによる混練はできないので，常温にて100°C以上の高温におけるゴムと類似した流動性を示す模擬材料(CMC水溶液)を使用し，バッチ内における材料の流れを観察するとともに，着色したプラスチックビーズを加えて混

合の進み方を調べた。

BMのロータには，互いに反対の方向によじれた長短1対の翼をもつ2翼ロータ(2Wロータ)と2対の翼をもつ4翼ロータ(4Wロータ)がある。2Wロータは材料が移動できる空間が広いいためバッチ内混合が進みやすいが，4Wロータは空間が少なくバッチ内混合が進みにくい。図4は4W

図4 バッチ内混合に及ぼす翼長比の影響

*4WA: 4翼標準タイプロータ，**4WH: 4翼旋回流タイプロータ

図3 3次元モデル試験機

図5 混練室内における材料の流れ

ロータについて短翼と長翼の軸方向の長さの比(翼長比)が、バッチ内混合に及ぼす影響を3次元モデル試験機により測定した例を示す。図から翼長比がバッチ内混合の速度及び最終的なバッチ内混合の均一性に大きな影響を及ぼしていることがわかる。すなわち翼長比が一定の値(0.5附近)を境にしてバッチ内混合の状態が大きく変化している。図5はバッチ内の材料の流れを模型的に示しているが、翼長比が0.5以上の領域では材料がロータの中央部に集まる状態となりバッチ内混合の均一性がわるくなり、翼長比が0.5以下の領域ではチャンバ内で旋回的な流れが促進され、バッチ内混合の均一性が改善されることがわかった。

2次元モデル試験と3次元モデル試験により得られた知見を総合することにより、微視的な分散とバッチ内混合の均一性の両面で優れたロータ形状及び寸法を求めることができる。このようなモデル試験の手法にて決めたロータをまず実験用ミキサーに適用し、期待どおりの性能が得られることを確認したうえで実機にスケールアップした。

表2は従来のロータ(2WA及び4WA)と、新しく開発したロータ(4WH)の性能を比較した例を示す。新形ロータは、素練りにおけるエネルギー効率が改善されるとともに、加硫薬品の混合の均一性が改善されることが確認された。4WHロータの場合にはバッチ内で均一な混練仕事が増えられるために、エネルギー効率も改善されたものと思われる。

4WHロータの性能はその後国内、外で広く認められ、当社が納入したBMの約20%は既に4WHロータ付で占めており、今後ともその比率

が増える見込みである。

2.2 混練機の高速度化

図2にもみられるとおりBMの操作条件の中では、ロータの回転数と練り時間は混練度に大きく影響する。BMにこれまでも高速、高馬力化によって生産性の向上が図られてきたが、プラスチック用の連続式混練機に比べるとなお低速であり、更に高速化することにより生産性が上がる可能性がある。しかし単純にロータの回転数を上げるだけではチップ部の発熱が激しくなるので、チップクリアランスを広げ局部発熱を減らすなどの対策が必要である。

BMはこれまで一般に2本のロータ間に10%程度の速度差が付けられているが、混練物に加わるせん断仕事の均一化からみると等速回転が望ましい。ロータを等速とした場合には、2本のロータの位相によって混練室への材料の食込み状態が変化することがある。

表3には16lの試験用ミキサーにて天然ゴム及び合成ゴムのマスターバッチを混練した例を示す。高速混練によって混練時間は大幅に短縮され、混練物の均一性も改善されるという興味ある結果が得られている。

2.3 ミキサーの制御

バッチ混練機は運転の仕方によって品質のパラツキを生じるおそれがあるが、あらかじめ良好な品質の混練物が得られる電力消費及び温度曲線を

表3 高速回転、同位相ロータによる生産性向上

混練対象	測定項目	4 WH, Mark II N=90 rpm (等速)	4 WH N=60 rpm (異速)
天然ゴム	ゴム温度 (°C)	182	185
素練り	比エネルギー (kWh/kg)	0.218	0.258
($\Delta ML=25$)	混練時間 (sec.)	132(0.48)	276(1.0)
	ラムシート時間 (sec.)	13	15.3
	粘度のばらつき (σ_{n-1})	1.3	3.8
SBR	ゴム温度 (°C)	175	182
カーボンマ スターバッチ	比エネルギー (kWh/kg)	0.134	0.146
	混練時間 (sec.)	101(0.69)	146(1.0)
($ML=70$)	ラムシート時間 (sec.)	42	64
	粘度のばらつき (σ_{n-1})	1.3	1.6

表2 ロータの性能比較

ロータの種類	エネルギー 効率* (素練り)	ゴムへの加硫 薬品の混合**		
		軟質 配合	中硬質 配合	硬質 配合
2翼標準タイプ (2WA)	1.0	1.0	1.0	—
4翼標準タイプ (4WA)	1.08	10.4	3.1	1.0
4翼旋回流タイプ (4WH)	1.25	0.75	0.5	0.9

*: 単位電力量当たりの天然ゴムのムーニー粘度低下量(2WAを1.0とした相対値)

**: レオメーターの f_{max} 値のばらつき(軟質及び中硬質配合については2WA 1.0とした相対値)

求めておき、この曲線を追従するようマイクロプロセッサにてミキサーを制御する Power Pattern Program Control 方式が開発されている⁷⁾。

そのほかにラムの昇降に電動機を使用するメカニカルフローティングウェイトは、通常のエアシリンダー方式に比べて省エネルギー効果がある⁷⁾。

バッチ式混練機から排出された混練物は、2本ロールあるいはカレンダーロール付の押出機でシート化し後工程に送られる。カレンダーロールを付けたローラーヘッド押出機には単軸押出機が一般に使われてきたが、最近スクリュエー長の短い2軸押出機をカレンダーロールと組合せた2軸ローラーヘッド押出機(TSR)が急速に普及している。

3. 連続式混練機

BMの優れた分散性能を踏襲した2軸連続式混練機“FCM”が1960年代にFarrel社で開発された。当初はゴムの連続加工を目標として開発されたようであるが、原料ゴムの性状面の制約からゴム加工への応用は進まず、当時急成長下にあったプラスチックの混練用として急速に石油化学業界に普及した。

連続式混練機の混練機構は、BMと同様にロータとチャンバ間のくさび状空間にて材料に強いせん断を加えることによっており、短時間にポリマーの可塑性・溶融、充てん材の練込み、分散が行えるので、機械サイズに比べて大きな処理能力を有する。ロータ回転数、絞りの開度、材料供給量、機械の冷却など混練機の実作要因が多いため、混練温度、比エネルギーの操作範囲が広く、かつ容易なことを特長としている⁸⁾。

BMロータの開発で成功したモデル試験の手法を応用し、新しい連続式混練機の開発を進めた⁹⁾。連続式混練機はポリオレフィンのホモジナイジングからエンジニアリングプラスチックのコンパウンディングまで幅広い用途に利用されている。連続式混練機の最近の動向について述べる。

3.1 連続式混練機の開発

連続式混練機の混練機構を調べるため、図2と類似した高速タイプの2次元モデル試験機を試作した。本試験は高速回転に耐えるようにロータの両端をベアリングで支持しており、ロータ形状及び操作要因が混練物の温度、比エネルギー、充てん材の分散度などに及ぼす影響を把握することができる⁹⁾。

図6 $(\Sigma\tau_r)(Q_s \cdot t_m/V_b)$ とカーボン分散度の関係

図6は低密度ポリエチレンにカーボンブラックを混合し、カーボン分散度(指数で表示。指数は小さい方が分散が良好)とロータ形状及び操作要因との関連を示す例である⁹⁾。図からカーボン分散度指数は、ロータ前進面とチャンバ内壁面の間のくさび状空間にて材料に作用するせん断応力の積分値 $(\Sigma\tau_r)$ 、チップクリアランスを通過する流量 (Q_s) と練り時間 (t_m) の積を材料の充てん量 (V_b) で除いた値(すなわちチップクリアランス通過回数)の関数であることを示している。すなわち、カーボン分散度は、ロータの回転によるせん断力とチップクリアランス通過回数の積に依存することがわかる。

図より一定のカーボン分散度指数以下に下げするために必要な $(\Sigma\tau_r \cdot Q_s \cdot t_m/V_b)$ 値が求められ、この値を満すのに十分な混練機を設計すれば、期待するカーボン分散の混練物が得られるはずである。図7はこのような手法を応用して開発した2段2軸形連続式混練機であり、予測どおりの分散性能を発揮することが確認された。最近では、材料の種類及び混練の目的に応じて適切な機種が選択できるように、4機種の連続式混練機をシリーズ化している¹⁾。

図7 2軸連続混練機(MIXTRON LCM 380)

3.2 ポリオレフィンの造粒

ポリエチレン、ポリプロピレンなどポリオレフィンは、気相重合法などの新しい重合プロセスの登場により設備が大型化し、混練造粒設備についても1基当りの能力が20 ton/h以上の大型機が利用されはじめています。このように大型化すると、従来の単軸押出機では押出能力が不足する。

ギャーポンプは、押出機に比べてポンプ効率が高いので、設備を小型化しかつ省エネルギー効果が期待できる。ポリオレフィンの大型混練造粒用として、1980年代年初期に南米で連続式混練機とギャーポンプを組合せた設備が稼働して以来、次第に海外でギャーポンプの採用が広がっていたが、最近では国内でもポリオレフィンの造粒にはほとんどギャーポンプが採用されている。

3.3 高充てん材の混練

ポリマーに多量の無機質充てん材を混合する試みは、第1次石油危機以後に省資源の狙いで盛んになったが、最近では無機質充てん材を混合し物性を改善したコンパウンドの製造が活発であり、自動車、家電、包装資材などに広く利用されている。

充てん材を多量に混合すると、粘度の増加、比熱の低下により発熱を伴いやすい。連続式混練機はかさ高い充てん材をポリマーに練込み、分散させ、また温度制御性に優れている特長を生かし、無機質充てん材を多量に混合したコンパウンド製造用として普及している。

連続式混練機と単軸ベント押出機を組合せパッケージ化した設備は、据付時間の短縮などの利点がある⁹⁾。

4. 混 練 押 出 機

混練機と押出機の機能を兼ね備えた混練押出機が、エンジニアリングプラスチックのコンパウンジグ用、ポリマーの脱気、乾燥用などに用いられ、その需要が拡大している。

混練押出機は、軸の数、かみ合度、回転方向によって各種タイプに分類できるが、材料の確実な送りによる滞留の防止、スクリュウ軸に偏荷重が加わらないなどの利点がある完全かみ合形同方向回転2軸機が主流を占めている。2軸混練押出機はスクリュウ、ニーディングディスク、ロータなどのセグメントを組合せることにより、無機質充てん材あるいは繊維強化材の混合、ポリマーから

の脱溶剤・脱気など混練の目的に応じて適切なスクリュウパターンが選択され、混練の成否はスクリュウパターンの選択によることが多い。バレルも分割方式が一般的であり、ブロック数の増減によってL/Dが変更できる。

最近では2軸混練押出機の中で、ポリマーを重合したり、グラフト化反応を行うなど、化学反応用として利用する用途(Reactive Processing)が注目を集めている。

4.1 2軸混練押出機の改良

2軸混練押出機の分散性能を改善するために、連続式混練機あるいはBMのロータと同じような断面形状をもつロータタイプのセグメントを組み込むことができる。完全かみ合形の場合には、スクリュウあるいはニーディングディスクの断面形状は、軸間距離、ねじの条数によって定まる。ロータタイプのセグメントは、完全かみ合形からはずれるが、ロータ前進面の食込角及びチップクリアランスを変更して、混練物がチップクリアランスを通過しやすくし、充てん材の練込み及び分散の改善を図ることができる。

混練押出機において混練物に加えられるせん断仕事は、材料の充満度によって変化する。スクリュウあるいはニーディングディスクのよじれ方向及びピッチの異なるセグメントを組合せることによって、充満度あるいは混練物の温度を制御するのが一般的であるが、機械の内部に可変の絞り機構を設けることができれば、運転中に自由に混練物の温度、エネルギーが調節でき、その都度スクリュウセグメントを組替える手間が省ける。混練押出機の絞り機構には、バレルあるいはスクリュウを軸方向に移動させるものなど各種のタイプがあるが、著者らはスクリュウ軸に対し上下方向に移動する絞り機構を開発し混練押出機にも適用している。

充てん材、添加剤の中には摩耗性、腐食性の強いものがあり、スクリュウあるいはバレルの耐食、耐摩耗処理が必要になる。溶射、溶接肉盛り、遠心 casting、メッキなどの各種ライニング法があるが、最近金属粉末をHIP(Hot Isostatic Pressing)によって被覆するライニング法が実用化されている。HIPによるとち密なライニング層が得られ、合金粉末にセラミック粉末を混合した複合化処理も可能であり、他の処理法に比べて耐久性が改善されたものが得られている。

図8 ポリマーアロイ製造試験装置(2軸連続混練機 NCM-60と2軸混練押出機 KTX-37の組み合わせによる)

4.2 Reactive Processing への応用

ポリマーアロイの製造に関連して、混練機あるいは混練押出機を化学反応に利用する試みが増えている。特に2軸混練押出機は高粘度材料の混合・攪拌、材料の確実な輸送、滞留時間の確保、原料の逐次添加、高度な脱気など化学反应用として利用するのに適している。

Reactive Processingの内容は、ポリマーの重合あるいは分解、ポリマーへのグラフト化反応など多様である。

図8は連続式混練機と2軸混練押出機を組合せ、特にポリマーアロイ製造用として開発した混練造粒試験設備である¹¹⁾。連続式混練機によって、例えば高融点、高ガラス転移点のエンジニアリングプラスチックを可塑化し、高速回転するロータの表面更新・混合作用によってグラフト化などの化学反応を促進させることができる。更に2軸混練押出機中でアロイ成分となる異種ポリマーを熔融・混合し、分散・脱気して一挙にポリマーアロイのペレットが製造できる。

5. おわりに

ゴム・プラスチック用の高せん断形混練機の開発を中心に最近の動向について述べた。パンバリーミキサーは既に70年余の歴史を有し、ゴム用ミキサーとしてほぼ完成されたものと考えていたが、ロータ形状、混練機操作条件などが混練に及ぼす影響を詳細に調べると、更に性能改善の余地があることがわかった。ここで紹介したBM用4WHロータあるいは2段2軸形連続式混練機の研究は約10年前に着手したものである。混練機械のようにポリマー加工の上流に位置する機械設備

は、一般に大型機が多く、下流の加工機械に及ぼす影響が大きいと、普及するまでに長い時間がかかる。しかし最近の省エネルギー化、高品質化へのニーズに応えられる設備として国内・外に広く受け入れられてきたBMについてはロータの高速回転あるいは等速回転による生産性及び品質の向上、コンピューター制御による品質安定化など性能改善に結びつく新しい技術の芽も生まれており、今後とも技術の完成と普及に努力していきたい。

ゴム混練の連続化も期待される技術であるが、材料の粉末化、粒状化が困難なこともあり、今日でもほとんど普及していない。

プラスチックについては連続プロセスが一般的であるが、最近ではプラスチックを単純に機械的に混合、混練するに止まらず化学反応を伴う複雑な用途に利用されるケースが増えている。脱水、脱溶媒、ラジカル重合あるいは縮合重合、架橋反応などの多様な用途に適した機械設備とするためには、従来の混合、分散に加えてせん断作用が拡散あるいは反応速度に及ぼす影響を把握する必要がある。

全く新しいポリマーを開発することは、経済的にもリスクを伴い、今後はポリマーブレンドあるいはアロイ化によるポリマーの改質及び新材料の開発が主流を占めると予想されている¹⁰⁾。ポリマーの混合・混練機械についても Reactive Processingを含む新しい用途に適した機械の開発が進むものと思われる。

(本文は1989年5月、日本ゴム協会年次大会の招待講演として発表したものをまとめたものである。)

参 考 文 献

- 1) 井上公雄：ポリファイル，25-11，29 (1988)
- 2) Min, K.: *Intern. Polymer Processing*, 1-4, 179 (1987)
- 3) Morikawa, A., Min, K., White, J. L.: *Intern. Polymer Processing*, 4-1, 23 (1989)
- 4) Guber, F. B.: *Sov. Rubber Technol.*, 25-9, 30 (1966)
- 5) 浅井俊博：神戸製鋼技報，38-2, 43 (1988)
- 6) Asai, T., Inoue, K., Fukui, T., Kuriyama, M.: *Intern Rubber Conference*, 1982, Paris
- 7) 萩原克信，浜田善弘，浅井俊博：神戸製鋼技報，38-2, 28 (1988)
- 8) 井上公雄：合成樹脂，34-1, 37 (1988)
- 9) 井上公雄，橋爪慎二，福井二志，浅井俊博：神戸製鋼技報，32-1, 77 (1982)
- 10) Utracki, L. A.: *Intern. Polymer Processing*, 2-2, 3 (1987)
- 11) 井上公雄：高分子，38-9, 900 (1989)