

# 이축 압출기에 의한 분말고무 연속 혼합 공정(I)

- 경제성 평가 -

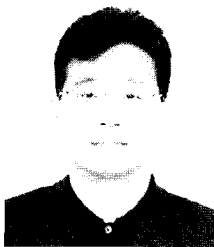
방대석 · 계형산 · 조을룡 · 신경철

## 1. 서 론

최근에 유명 타이어 제조회사들은 실제적으로 단순화되고 또한 비용 측면에서 좀 더 효과적인 타이어 제조공정을 추구하여왔다.<sup>1,4</sup> 이러한 제조 공정들은, 우리가 알거나 이미 논문으로 발표되었더라도, 오늘날의 비연속적으로 수 년 동안 거의 바뀌지 않은 상태로 작업하는 공정으로부터 외면되어 왔지만 점점 소규모화되고, 유연성이 있어서 또한 점차 연속적인 생산 공정으로 전이(transition)하여 간다.

오늘날의 타이어 생산 기술에서 고무의 혼합은 베일(bale)형 고무와 펠릿화된(pelletized) 충전제의 혼합을 기본으로 한다. 이 충전제들은 먼저 고무

매트릭스(matrix)내에 혼입되고 점차 분산되어 고무 물성에 중요한 역할을 한다. 이러한 목적으로 사용되는 혼합 설비는 밀폐용 혼합기와 롤 등으로 지금까지 최적화 상태로 공정 기술과 원료가 적절히 조화되어 사용되어져 왔다. 그러나 오늘날 높은 생산성을 목표로 하는 이런 확실한 혼합 기술은 새롭고 유연성 있는 타이어 성형기의 소개와 개발에 따라 더욱 많은 요구 사항에 처해져서 계속되는 의문점을 야기시켰다. 이미 수 년 동안 신 연속식 혼합 공정으로서 혼합 압출기(Mixtruder)의 소개와 개발이 토론되어져 왔다.<sup>5-7</sup> 신 타이어 성형 공정의 관점에서는 이런 신 혼합 공정들이 이상적 반제품 공급 수단일 것이고 또는 기술적인 측면이나 비용 측면에서도 적절한 것이다.<sup>15-16</sup> 연



방대석

1987 연세대학교 화학공학과 학사  
1989 The Univ. of Detroit, Chemical Engineering MS  
1996 The Univ. of Akron, Polymer Engineering Ph.D.  
2003~ Georgia Institute of Technology  
2004 (Visiting Scholar)  
1996~ 금오공과대학교, 고분자공학전공, 현재 부교수



조을룡

1980 경북대학교 고분자공학과 학사  
1983 경북대학교 고분자공학과 석사  
1992 The Univ. of Akron, Polymer Science Ph.D.  
1983~ 금호석유화학(주) 전임연구원  
1997 한국기술교육대학교  
현재 응용화학공학과 교수



계형산

1985 성균관대학교 화학공학과 학사  
1987 성균관대학교 화학공학과 석사  
1995 The Univ. of Akron, Polymer Engineering Ph.D.  
1995~ 삼양 그룹 중앙연구소  
1997 선임연구원  
1997~ 목원대학교 디자인소재학과  
현재 부교수



신경철

1980 인하대학교 화학공학과 학사  
1989 The Univ. of Akron, Polymer Engineering MS  
1993 The Univ. of Akron, Polymer Engineering Ph.D.  
1980~ 한국타이어(주) 중앙연구소  
2003 책임연구원  
2004~ 국립충주대학교 고분자공학과  
현재 겸임교수

속 혼합 공정, 이는 플라스틱 산업에서 수십 년 동안 최신 기술로서 적용되고 있지만 한 가지 요구 사항으로서 자유 유동형 원료를 연속적으로 이용한다는 것이다. 대부분의 고무 화합물 배합제, 특히 충전제, 활성제 등은 자유 유동형으로서 혼합 압출기 내로 투입 가능하다. 그러나 가장 투입하기 어려운 것은 바로 고무이다. 이미 알려진 바로서 배일(bale) 형태로 원산지로부터 공급이 되고 있기 때문이다. 따라서 고무를 자유 유동형인 분말 또는 입자 형태로 제조하는 것은 점착성 때문에 쉬운 작업은 아니다.

이러한 이유로서 원칙적으로 가능한 두 가지 방법을 제시하면, 첫째는 배일 고무를 적절한 기술을 이용하여 입자화할 수 있다. 즉 크기를 줄여서 작은 입자로 만들어 혼합 압출기에 이용할 수 있게 한다. 이러한 제조 공정은 배일 고무의 크기를 줄이기 위해서 온도를 낮추어야 하기 때문에 많은 에너지 투입이 불가피하다. 일단 입자 형태로서 가능하여지면 유기 또는 무기 분말을 도포하여 다시 붙지 않도록 하여야 한다. 그러나 이런 과정의 소비자가 갖는 장점은 원하는 형태를 시장에서 많은 공급자로부터 자유롭게 주문할 수 있다. 둘째는 일괄형 분말 고무/충전제<sup>8,9</sup>의 제조이다. 이 경우는 고무와 충전제가 서로 다른 공정에 의해서 배합되어서 함께 가공되고 자유-흐름형(free-flowing form)으로 유지되는 것이다. 일괄형 고무/충전제내의 충전제는 고무의 점착성을 낮추고 장기간 안정성을 유지한다. 배일 고무 입자형(bale rubber granulation)과 비교하면 원재료로서의 고무와 충전제는 제조 공정에서는 각각 독립된 재료이지만 제조 공정을 거치면서 함께 가공되어진다. 따라서 많은 공정이 제거될 수 있다. 또 다른 장점은 고무모체(matrix)내 이미 충전제가 존재하기 때문에 혼합공정에서 충전제의 별도 혼입시간이 불필요하다. 추가로 실란과 충전제와의 필요한 반응이 요구되는 실리카 충전 제품에서는 이미 제조회사에 의해서 그 효과를 입증하였고 에탄올 방출 또한 피할 수 있었다. 일체형 자유 흐름 고무/충전제는 현재 상업적으로 가능하며, E-SBR/silica/

silane,<sup>11</sup> NR/carbon black,<sup>9</sup> E-SBR/carbon black,<sup>8</sup> 기상 EPDM<sup>5,10</sup> 등을 기본으로 하는 분말 고무 시스템이 고무 소비자를 위하여 개발 중에 있다. 이런 제품의 일반적인 단점은 시장으로 충분한 수량과 다양한 종류의 제품 공급이 어렵다는 것이다. 연속 혼합 공정의 개발과 관련하여 지난 수년간 많은 연구가 수행되었고 논문 발표가 있었다.<sup>12-14</sup> 최근 유명 타이어 제조회사<sup>15-16</sup>들이 공장 내의 연속식 혼합 공정의 도입하려하거나 이 프로젝트를 수행하려 함으로서 미래의 고무 산업 제조 공정의 새로운 트렌드가 무엇인지를 보여줄 것이다. 본 총설에서는 연속식 혼합 공정의 경제성에 대한 의구심을 논하고 현재의 기술과 향후 미래의 기술을 기초로 하여 신축되는 승용차용 타이어 공장을 기본 모델로서 비교하겠다.

## 2. 접근 방법(Approach)

공정 비용과 관련된 figure들은 2000년 Paderborn 대학의 Limper 교수에 의해서 Degussa AG의 도움을 받아서 행하여진 연구에서 얻어진 자료이다. 이 연구는 Hannover에 위치한 DIK(Deutsches Institut for Kautschuktechnologie)에서 얻은 연속식 혼합 공정에 관한 연구 결과이다. 원료 고무 가격은 포함되어 있지 않고 따라서 자유-흐름형(free-flowing form) 분말 고무의 선택이나 필요한 배일 고무의 분말화에 따른 변화 등은 포함시키지 않았다.

이 연구는 finished compound(가교제를 포함한 고무배합)를 연산 66,000 ton 생산 능력을 가진 표준 승용차용 타이어 공장에 대해서 compound 단가를 결정하기 위해서 시작되었으며 결과적으로 compound kg당 단가를 계산하였다. 또한 투자비, 인력과 에너지 비용도 포함되었다.

혼합 압출기를 갖춘 완벽한 compound 공장에 대한 공정 비용도 재래식과 비교되었다. 두 가지 크기가 다른 압출기를 이용하여 finished compound 생산 능력을 연산 60,000 ton으로 가정한다. 또한 compound의 중간 저장소를 연속식 혼합 공

정에 적용 한다. 이 경우에는 finished compound가 혼합 압출기를 거친 후 직접 압출기 또는 칼렌더(calender)를 사용하여 반제품으로 제조됨을 가정한다. 이런 시스템은 정상적으로 고무 산업체에서 가능하기 때문에 비용 산출에는 포함시키지 않았다.

이 논문의 마지막 부분에서는 타이어 산업에서 주요 compound로서 tread compound와 base compound에 대한 미래 가공 방법 대비 재래식 방법의 공정 비용 비교를 포함했다.

### 3. 현 승용차용 타이어 공장에서 생산되는 컴파운드(compound) 비용

#### 3.1 혼합실 설비

타이어 공장의 혼합실은 총 5개의 배부 혼합기 라인으로 구성되어 있다. 각 라인은 원재료를 운반하는 컨베이어 설비와 무게를 측정하는 측정 설비와 관련된 혼합기 이후의 설비로서 구성되고 다운스트림(downstream) 설비로서 압출기, 한 쌍의 롤과 뱃찌 오프 머신(batch-off machine)으로 구성되어 있다. 5개의 혼합기 라인 중에서 3개의 라인은 Non-productive compound(가류제를 첨가하지 않은 compound)를 제조하고, 나머지 2개의 라인은 가류제를 혼입한 finished compound를 제조한다. 특히 실리카(silica) compound를 생산하기 위해서는 intermeshing 밀폐식 혼합기로 구성되고 나머지 4개의 혼합기(GK255N)는 tangential 밀폐식 혼합기로 구성한다. 충전제의 보관은 총 6개의 사이로(silo)가 가능하고, 그 중 1개의 silo는 silica granule의 저장용이다. 배일 고무와 소량 케미칼(chemical)은 적절한 저장실에서 보관한다. 후에 소량 배합제 계량 시스템 설치도 가능하다. 각 혼합 단계 이후 다음 혼합 스텝을 위한 혼합물은 중간 저장소에서 저장된다. 이런 목적으로 Non-productive compound와 final compound 저장소가 각각 갖추어져 있다. 각 뱃찌(batch)의 품질 관리는 컴파운드(compound)의 밀도와 점탄성(점도)을 측정하므로 행해지고 니더 혼합기(Kneader mixer)에서 행하여진다. 좀 더 정밀한 검사는 별도의 고무 실험실에서 가능하다.

#### 3.2 생산량과 제조 시간

Table 1은 두 개의 밀폐식 혼합기에 의해서 분류된 컴파운딩 라인(compounding line)의 생산 시간을 보여준다. 모든 비 가동 시간을 제외하면 이 기간은 각각 7000 hrs/yr(GK255N)과 7400 hrs/yr(GK320E)이다. Table 2는 Non-productive compound와 final compound의 혼합기 라인별 생산성을 보여준다. silica가 포함된 컴파운드(compound)는 특성상 혼합 시간이 길어지기 때문에 컴파운드 라인

Table 1. Production time of the internal mixer line.

	GK 255 N		GK 320 E	
	Weeks/ year	Hours/ week	Hours/ year	Hours/ year
Full production	46	168	7728	7728
Red.production	5	156	7780	780
No production	1	0	0	0
Max.working time			8508	8508
Standstill, 8%			680	680
Normal work, time			7828	7828
Equipment preparat.			782	391
Production time			7046	7437

Table 2. Output of the mixing lines.

	unit	GK 255 N*	GK 320 E*	GK 255 N**
Voulume	L	255	320	255
Fill factor	%	0.7	0.65	0.7
Volume used	L	179	208	179
Density	g/cm <sup>3</sup>	1.2	1.2	1.2
Batch weight	kg	215	250	215
Feeding, discharge	sec	80	80	60
Mixing time	sec	100	175	100
Mean mix. Cycle	sec	180	255	160
Batch / h		20	14	22
Output / line	kg/h	4300	3500	4700
Number of lines		2	1	2
Total output / h	kg/h	8600	3500	9400
Total output / a	t/a	60500	26000	66000

\* non-productive stage \*\* final stage

(compound line)별 carbon black용 밀폐식 혼합기와 silica용 밀폐식 혼합기를 각각 분류하였다. 결과로서 공장에서는 대략 66,000 tons/year의 finished compound를 생산한다. 현 생산 공정에 의하면 이 정도의 생산량은 여러 개의 혼합 단계를 거쳐서 실행되어야 하기 때문에 설치된 컴파운드(compound) 능력이 152,000 tons/year정도는 finished compound를 생산하기 위해서는 필요한 양이다.

### 3.3 투자비용

투자비는 Table 3와 Table 4에서 보인다. 실제적으로 완벽한 신축 혼합실 건축 비용을 목록화 하였다. Table 3에서는 건물, 전원 공급 설비 및 원재료와 컴파운드(compound) 저장실을 포함하여 Non-productive compound용 3개 밀폐식 혼합기 라인의 건축비용을 포함한 것을 보여준다. Table 4에서는 finished compound의 비용을 보여준다. 여

기에서도 건물, 전원 공급 설비, 컴파운드(compound)의 저장실과 실험실을 포함시켰다. 감가상각은 약 10년과 25년으로 하였다. 정리하면, 총 투자비는 약 5,000,000불정도로 예측된다.

### 3.4 생산직 종업원

생산직 종업원 수는 인사 관리상 non-productive stage (가류제를 투입하지 않는 혼합 공정, Table 5)와 final stage (가류제를 투입하는 혼합 공정, Table 6) 별로 분류되어 분석하였다. Table 5에서는 carbon black mixing line과 silica mixing line으로 다시 분류하였다. 공장은 4교대로 운영된다. 생산직 종업원을 숙련공 생산직과 비숙련공 생산직으로 세분하였다. 숙련공 생산직은 연봉이 48,000불이고 비숙련공 생산직의 연봉은 35,800불로 책정했다. 휴일, 병가 그리고 교육과 같은 비정규 업무 시간은 연 작업시간의 9%로 간주하였다. 이러

Table 3. Investment costs for the non-productive compounding lines.

	Number	Lifetime	GK 255 N		GK 320 E	
			Costs	Depreciation	Costs	Depreciation
CB silo	5	25	230,000	9,200		
Si silo	1	25			46,000	1,800
Storeroom ("bales, chemicals)		25	570,000	22,800	285,000	11,400
Convey. weigh. feed. equip.	3	10	1,580,000	158,000	790,000	79,000
Weigh. minor chemicals	1	10	160,000	16,000	80,000	8,000
Feeding bales	3	10	140,000	14,000	70,000	7,000
GK 255 N	2	25	1,670,000	66,800		
GK 320 E	1	25			1,045,000	41,800
Rotor pair, SPC	3	10	770,000	77,000	385,000	38,500
Extruder, roller die	3	25	1,660,000	64,000	800,000	80,000
Batch-off, SPC	3	10	940,000	94,000	470,000	47,000
Rheometer, density	3	10	255,000	25,500	128,000	12,800
Storeroom compounds		25	750,000	30,000	375,000	15,000
Internal transportation		10	70,000	7,000	70,000	7,000
Building		25	720,000	28,800	360,000	14,400
Ventilation		25	100,000	4,000	50,000	2,000
Elevator, crane		25	190,000	7,600	190,000	7,600
Power station		25	760,000	30,400	380,000	15,200
Maintenance equipment		10	20,000	2,000	10,000	1,000
Total costs			10,585,000	657,100	5,534,000	389,500

**Table 4. Investment costs for the final compounding lines.**

	GK 255 N			
	Number	Lifetime	Costs	Depreciation
Weigh. minor chemicals	1	10	240,000	24,000
GK 255 N	2	25	1,670,000	66,800
Rotor pair, SPC	2	10	604,000	60,400
Mills	4	25	1,825,000	73,000
Batch-off, SPC	2	10	940,000	94,000
Rheometer, density	2	10	255,000	25,000
Storeroom final comp.		25	710,000	28,400
Internal transportation		10	70,000	7,000
Building		25	660,000	26,400
Ventilation		10	100,000	10,000
Lab		25	27,000	1,100
Lab equipment		10	770,000	77,000
Power station		25	760,000	30,400
Maintenance		10	20,000	2,000
<b>Total costs</b>			<b>8,651,000</b>	<b>525,500</b>

**Table 5. Employees for the non-productive compounding lines.**

	Shifts	GK 255 N		GK 320 E	
		Empl./shift	Empl-oyees	Empl./shift	Empl-oyees
Storage, raw materials	2	2	4	1	2
Weigh. chemicals	4	1	4	0.5	2
Bale handling	4	1	4	0.5	2
Int. mixer	4	2	8	1	4
Extruder	4	1	4	1	4
Batch-off	4	2	8	1	4
Transportation	4	2	8	1	4
Maintenance*	1	2	2	2	2
Jumper	4	1	4	1	4
Relieve person	4	1	4	1	4
Shift manager*	4	1	4	1	4
<b>Employees</b>			<b>54</b>		<b>36</b>
<b>Tot.Empl.9% more</b>			<b>59</b>		<b>39</b>

\*skilled workers

**Table 6. Employees for the final compounding lines.**

	GK 255 N		
	Shifts	Empl./shift	Employees
Weigh. chemicals	4	1	4
Int. mixer	4	2	8
Mills	4	2	8
Batch-off	4	1	4
Int. transportation	4	2	8
Jumper	4	1	4
Relieve person	4	1	4
Maintenance*	1	2	2
Quality control*	4	1	4
Shift manager*	4	1	4
<b>Employees</b>			<b>50</b>
<b>Tot.Empl.9% more</b>			<b>55</b>

\*skilled workers

**Table 7. Energy costs.**

Int. mixer	Number	Capacity, t/a	Costs/kg, USD	Energy costs, USD
GK 255 N*	2	60,500	0.0105	635,000
GK 320 E*	1	26,000	0.0105	273,000
GK 255 N**	2	66,000	0.0105	693,000
		<b>152,500</b>		<b>1,601,000</b>

\* non-productive compounding lines

\*\* final compounding lines

한 요소로 인하여 원래 요구된 총 생산직 종업원 수는 다소 증가되었고, 요약하면 약 152,000 tons/yr의 rubber compound를 생산하기 위해, 66,000 ton/year의 finished compound를 생산하기 위해 필요한 생산직 종업원 수는 약 153명으로 계산되었다.

### 3.5 에너지 비용

에너지 비용을 계산하기 위해서 컴파운드(compound) 단위 kg당 약 150 kJ의 에너지 소비가 예상되고, 각 혼합 스텝(step)에 적용시키면 finished compound의 단위 kg당 총 소비 에너지는 위에 언급된 숫자를 스텝 수로 곱하면 얻어진다. 혼합실의 총 에너지 소비는 생산된 컴파운드(compound)

양과 관련이 있고, 컴파운드(compound) 단위 kg당 0.0105불의 에너지 단가는 약 1 kJ(kW/hr)당 0.07 불에 해당한다. 따라서 rubber compound 152,000 톤의 생산을 위해서는 총 에너지 비용은 1,601,000 불이 지출된다.

### 3.6 총 컴파운드 비용

Table 8은 세부 항목의 모든 비용, 즉 투자비, 인건비, 에너지비 등을 총망라하여 미리 보여준다. 이것들로부터 컴파운드(compound)의 단위 kg 당 비용은 각각의 경우에서의 생산 능력과 연관하여 여러 개의 혼합 라인(Non-productive용 밀폐형 혼합기, final용 밀폐형 혼합기, carbon black 혼합, silica 혼합)에 대해서 결정되었다. 예상대로 silica compound의 컴파운드 원가는 carbon black compound보다 혼합 시간이 길고 혼합 능력의 감소로 인하여 높게 나타난다. 같은 경향으로 finished compound가 Non-productive compound에 비하여 낮게 나타난다. 이는 짧은 혼합 시간에 의해서 이 라인(line)에서는 시간 당 또는 일 년 간 Non-productive compound에 비하여 더 많은 양의 컴파운드(compound)가 생산된다. 일반적으로 rubber compound는 타이어 제조 산업에서는 여러 혼합 스텝(step)으로 생산되고 대개는 2 step에서 4 step 사이에 있고 특별한 경우에는 더 많다.

Table 8. Total compounding costs of a car tire plant.

	Unit	GK 255 N*	GK 320 E*	GK 255 N**
Number		2	1	2
Employees		59	39	55
Investment	USD	10,585,000	5,534,000	8,651,000
Salary	USD	2,177,000	1,439,000	2,008,000
Depreciation	USD	657,000	389,000	525,500
Energy	USD	635,000	273,000	693,000
Costs/a	USD/a	3,469,000	2,101,000	3,226,500
Capacity	kg	60,500,000	26,000,000	66,000,000
Costs	USD/kg	0.057	0.081	0.049

\* non-productive compounding lines

\*\* final compounding lines

## 4. 연속식 혼합 공정에서 생산되는 컴파운드(compound) 비용

### 4.1 혼합실 설비

Rubber compound를 생산하는 오늘날의 재래식 생산 기술 대신에 연속식 혼합 압출기를 사용하는 혼합실 설비 비용 산출은 재래식 생산 기술을 이용하는 타이어 공장의 동일 생산량을 기초로 하여 작성하였다. 연속식 혼합 공정은 single stage이기 때문에 rubber compound 생산 능력은 단지 finish-compounding으로 적용되어 60,000 tons/year이고 이것은 예상 생산 능력이 연산 152,000톤 능력에서 연산 60,000톤 능력으로 줄어들 수 있다. 따라서 공장의 또 다른 부분 즉, 변전소의 규모 등을 저 능력으로 설계할 수 있다. 계산을 위해서 전 공정의 비용 평가는 스크류(screw)의 직경이 130 mm인 이축 압출기를 기본으로 수행하였다. 요구 생산 능력인 연산 60,000 톤을 제조하기 위해서는 필요한 설비는 총 4대이다.(Table 9) 이것으로부터 비슷한 계산을 행하였는데 조금 낮은 생산 능력의 이축 압출기로 평가한 후 더 큰 압출기의 것과 비교하였다.(Table 12) 연속식 혼합 공정의 운영 형태에 대하여 두 가지 선택권이 있다. 첫 번째 경우는 혼합 공정 후 중간 저장소에 저장되고 원하는 경우에는 인출하여 반제품으로 제조되는 경우이다. 이 경우 compound는 이미 가교제를 포함하고 있는 상태이다. 촉진제와 유황은 단축 압출기에서 투입될 수도 있도록 기술적으로 추천된다. 만약 혼합 압출기내에서 혼합 온도가 높으면 스크치(scorch)가 발생한다.

Table 9. Production time and throughput of a mixing extruder.

	Unit	TSE 130	TSE 90
Throughput	t/h	2-2.5	1.0
Number		4	8
Standstill	%	8	8
Equipment Preparation	%	10	10
Production time	h/a	7,044	7,044
Approx. capacity	to/a	60,000	60,000

#### 4.2 제조 시간과 생산량

Table 9에서 제조 시간과 생산량은 두 개의 이축 압출기인 TSE 130과 TSE 90에 의해서 결정되었다. 압출기 회사의 조언과 최근의 scale-up 시험 결과에 의하면 규모가 큰 압출기인 TSE 130인 경우에는 시간 당 2~2.5 ton, 규모가 작은 압출기인 TSE 90인 경우에는 시간 당 1 ton 정도의 생산량이 현실에 가깝다고 밝혔다. 경험 부족으로 설비 고장 시간과 규격 교체 시간은 밀폐식 혼합기의 경우와 같은 비율로 하였다. 더욱 정확한 수치는 초기 생산 공장의 가동시 결정될 수 있다. 그러나 전후 사정에 의해서 반드시 지적해야 하는 것은 사용된 스크류(screw)는 self-cleaning형, 즉 압출기 사용 후 barrel내에 잔존물이 남지 않아야 한다. 왜냐하면 연속해서 다른 종류의 컴파운드(compound)가 생산되어야 한다. 정리하면 압출 라인 가동 시간은 연 7000시간이고 요즈음 기술을 이용한 제조시간과 견줄 만하다.

#### 4.3 투자비용

Table 10은 4개의 압출 라인(TSE 130)으로 구성된 혼합실의 투자 비용을 요약하였고 연산 60,000 ton의 finished compound 생산 능력을 보여준다. 재래식 혼합 방식과 비교하여 non-productive compound와 finished compound간의 차이는 보이지 않지만 carbon black compound와 silica compound간의 차이는 보인다고 지적한다. 이런 결과는 사용된 분말형 고무의 질과 조성과 관련되며 compound 조성과는 무관하다. 예를 들면 백색 분말형 고무 내에서의 silica는 완전한 실란(silanized) 처리 조건에서 존재한다는 사실이 확실한 공정 단순화로 이끌어 진다는 것이다. 이것과는 반대로 실란 반응이 압출기내에서 발생하는 compounding 공정은 carbon black compound 공정보다는 훨씬 복잡하다고 예상하고 있고 이 경우에는 공정 구조가 동일할 수도 있고 그렇지 않을 수도 있다.

원료 저장 탱크인 경우 분말형 고무를 사용하는 연속식 혼합 공정인 경우 저장고 수가 두 배가 되어 12개가 필요하다. 이는 사용될 분말형 고무 종

Table 10. Investment costs for a continuously working compounding line (with storage step).

	TSE 130(4 lines)			
	Num-ber	Life-time	Costs	Depre-ciation
PR silos	12	25	550,000	22,000
Storeroom raw materials		25	390,000	15,600
Convey. weigh. feed.	4	10	1,583,000	158,300
Weigh. small chemicals	1	10	240,000	24,000
Dosage systems	12	10	1,533,000	15,300
TSE 130, SPC	4	10	4,670,000	467,000
Batch-off, SPC	4	10	1,870,000	187,000
Rheometer, density	2	10	255,000	25,500
Storeroom final compounds		25	710,000	28,400
Int. transportation		10	70,000	7,000
Building		25	480,000	19,200
Ventilation		25	100,000	4,000
Elevator, crane		25	190,000	7,600
Lab		25	18,000	700
Lab equipment		10	770,000	77,000
Power station		25	510,000	20,400
Maintenance		10	50,000	5,000
Total costs			13,989,000	1,084,000

류의 수가 충전제 종류보다 많을 경우를 고려한 것이다. 한편, 특히 원료 고무 저장과 혼합기 내로 공급되는 배일 고무 투입과 같이 배일 고무 처리가 없어지기 때문에 절감 효과가 있다. 이것과 비슷한 맞교환은 원료 고무 운반 장비, 계량 장비, 투입 장비에서 나타난다. 용량이 큰 저장 탱크로부터 단위 계량 장치를 통하여 압출기로 분말형 고무의 투입이 거의 불가능할 것이다. 재래식 공정에서 충전제의 처리는 혼합기 상단에 설치된 일일 보조 탱크를 분말형 고무에 적용할 수 있을 것이다. 계량 시스템에도 효과적일 것이다. 이것은 연속식 혼합기에 적용 가능하다는 뜻이다. 각 압출 라인에 대해서 3개의 단위 계량 장치가 고려되었고 재래식 계량 장치는 제거될 수 있다.

Finished compound의 연산 60,000 ton의 능력을

가진 4개의 압출 라인에 5개의 재래식 혼합기에서 연산 152,000 ton의 compound의 총 생산 능력과 같다. 이는 finished compound로서는 연산 66,000 ton으로서 4개의 압출 라인에서 생산되는 능력과 견줄 만하다. 혼합기와 압출기에서의 생산 능력 차이는 감가상각이다. 혼합기의 감가상각은 25년이지만 압출기인 경우는 주목할 만하게 짧은 10년으로 예상된다.

상당히 절감이 될 것이라고 예상되는 두 가지는 혼합 공정 건물과 변전소이다. 압출 라인에 필요한 공간은 재래식인 혼합기인 경우보다는 상당히 적다. Compound의 생산량이 적어짐에 따라 변전소의 규모도 적어지고 또한 에너지 사용도 줄어든다.

위에서 언급된 모든 가정을 고려하면 약 14,000,000불의 투자총액과 매년 약 1,000,000불의 초기 감가상각비용이 원하는 공정(4 TSE 130 lines)과 compound의 저장 처리 제거로 얻을 수 있다.(Table 10)

#### 4.4 생산직 종업원과 에너지 비용

Table 11은 생산직 종업원의 분류를 나타내고 있다. 밀폐형 혼합기인 경우와 대비해서 숙련공

Table 11. Employees for the continuous compounding process.

	TSE 130(4 lines)		
	Shifts	Empl./shift	Employees
Storage, raw materials	4	1	4
Weigh. chemicals	4	1	4
TSE 130*	4	2	8
Batch off	4	2	8
Int. transportation	4	1	4
jumper	4	1	4
Relieve person	4	1	4
Maintenance*	4	1	4
Quality control*	4	1	4
Shift manager*	4	1	4
Employees			48
Tot. empl. 9% more			52

\*skilled workers

종업원은 압출기 운전을 위해서 고용된다. 연산 60,000 ton의 컴파운드를 연속 혼합 공정을 이용하여 생산하면 오직 52명의 생산직 종업원만이 필요하다. 에너지 비용을 결정하기 위해서 총 270 kJ의 에너지 소모 또는 가격으로 환산하면 컴파운드 kg당 0.019불이 소요될 것으로 예상된다. 종합적으로 1,140,000불이 지출된다.

#### 4.5 연속식 혼합 공정을 이용한 혼합실에서 생산되는 총 컴파운드(compound) 비용

Table 12에서는 혼합 압출기가 설치된 혼합실에 관련된 모든 비용을 보여준다. 컴파운드(compound)는 일단 중간 저장 창고에 보관하고 차후에 가공하도록 한다. 따라서 연속적으로 가공되는 것이 아니라 중간 저장소를 보관되고 생산 계획에 따라 다음 공정에서 가공되어지도록 한다. 이 경우 컴파운드(compound) kg당 비용은 규모가 큰 압출기 라인(TSE 130)을 가동하였을 경우 0.07불이고 4개의 규모가 작은 압출기 TSE90을 가동하였을 경우는 0.092불이다. 이처럼 컴파운드(compound) 비용이 변하는 원인은 생산량을 같게 하기 위해서 압출기 대수의 두 배의 증가, 원료 공급 장치, 배치 오프 머신(Batch-off machine) 등을 추가하였기 때문이다. 또한 작업 인원도 증원될 것이다. Table 13은 연속 작업 방식 공장에서의 컴파운드(compound) 비용의 분류를 보여주고 이는 중간 저장소를 거치지 않고 컴파운드(compound)가

Table 12. Costs using continuous compounding processes. (with one storage step)

	Unit	TSE 130	TSE 90
Number		4	8
Employees		52	72
Investment	USD	13,989,000	17,385,000
Salary	USD	1,976,000	2,805,000
Depreciation	USD	1,084,000	1,566,000
Energy	USD	1,140,000	1,140,000
Cost/a	USD/a	4,200,000	5,511,000
Capacity	kg/a	60,000,000	60,000,000
Cost/kg	USD/kg	0.07	0.092



**Table 13. Costs using continuous compounding processes.** (without storage step)

	Unit	TSE 130	TSE 90
Number		4	8
Employees		40	52
Investment	USD	11,402,000	15,089,000
Salary	USD	1,546,400	2,089,000
Depreciation	USD	861,600	1,348,000
Energy	USD	1,140,000	1,140,000
Cost/a	USD/a	3,548,000	4,577,000
Capacity	kg/a	60,000,000	60,000,000
Cost/kg	USD/kg	0.059	0.076

직접 반제품으로 제조되는 경우이다. 눈에 띄게 컴파운드(compound) 비용이 낮아지는데 이는 배치 오프 머신(Batch-off machine)와 중간 저장소의 제거의 원인이 있다. 이런 공장을 운영하는 작업자도 물론 줄어든다. 이런 선택에서는 기대한바대로 적은 용량의 압출기보다는 규모가 큰 압출기를 사용할수록 컴파운드(compound) 비용은 낮아진다.

## 5. 회분식(재래식)과 연속식 혼합 공정 간의 비용 비교

### 5.1 보관 창고를 갖춘 연속 혼합 공정 대 평균 혼합 stage를 근거로 한 재래식 공정

비용 Table 14는 현재 승용차용 타이어 공장에서 발생하는 컴파운드(compound) 비용 대비 연속형 컴파운드 압출기를 사용하였을 때 타이어 제조업체에서 자연 발생하는 비용과 비교한 결과를 보여준다. 이 계산의 근거는 두 가지 압출기, TSE130과 TSE90을 기준으로 산출하였다. 컴파운드는 배치 오프 머신(Batch-off machine)을 거친 후 냉각되어 반제품으로 가공되기 전까지는 finished compound 저장 창고 내의 중간 저장소에 일시 보관된다. 현재 타이어 공장 내의 compound 혼합 step 수는 평균 2.3 step이고 혼합실을 통과한 후에는 연산 총 66,000 tons 정도의 finished compound를 얻을 수 있다. 혼합 step 수까지 고려하면 연산

**Table 14. Conventional versus continuous mixing of a car tire plant with a storage step.**

	Unit	Int.mixer	TSE 130	TSE 90
Lines		5	4	8
Capacity final compound	t/a	66,000	60,000	60,000
Employees		153	52	72
Investment	USD	24,770,000	13,989,000	17,385,000
Salary	USD	5,624,000	1,976,000	2,805,000
Depreciation	USD	1,571,500	1,084,000	1,566,000
Energy	USD	1,601,000	1,140,000	1,140,000
Costs/a	USD	8,796,000	4,200,000	5,511,000
Average mis. stages		2.3	1	1
Costs / kg final compound	USD	0.133	0.07	0.092

150,000 ton정도의 compound가 생산된다. 그러나 연속식 혼합 공정에 의하면 모든 compound는 단 stage로 생산된다. 따라서 요구된 finished compound의 생산을 위해서 연산 약 66,000 ton에 해당되는 압출기 혼합 능력은 전에 언급한 생산량과 일치하도록 공급되어야 한다. 두 가지 가공 방법을 비교하면 현재 회분식 공정에 대한 생산 종업원의 수 및 주목할 만하게 높은 총 투자 비용을 주목해야 한다. 이렇게 발생하는 차이에 대한 원인을 분석하여 보면 상당히 많은 생산량(150,000 tons/year), 공장 내의 늘어나는 compound 이동과 저장, 많은 양의 원료 처리에 드는 비용 등이다. 이와는 대조적으로 감가상각 기간의 차이의 발생은 상대적으로 짧은 이유가 기존의 밀폐식 혼합기에 비해 혼합 압출기의 수명이 주목할 만하게 짧다는 것이다. 에너지 소비에 관하여 연속식 혼합 공정의 에너지 비용은 기존 방식에 비하여 약 30% 정도 절감이 가능하다. 만약 규모가 큰 압출기에서 작은 압출기로 생산이 전환되었을 때 압출기 수가 증가하기 때문에 작업자 수와 투자비 및 감가상각비가 늘어날 것이다. 그러나 compound 생산에 대한 유연성은 증가할 것이다. 정리하면 현재 혼합 시스템에서 연속식 혼합 시스템으로 변환하면 finished compound의 kg당 비용은 TSE

130 압출기를 사용할 때는 45% 정도 감소하고 TSE 90 압출기를 사용하면 30% 정도 저렴해진다.

### 5.2 보관 창고가 필요 없는 연속 혼합 공정 대 평균 혼합 stage를 근거로 재래식 공정 비용

Table 15에서는 기존의 생산 방식과 신 생산 방식인 연속 혼합 공정에 생산하는 compound의 생산 비용의 비교를 보여준다. 이 분석에서는 혼합 공정 이후에 compound의 냉각과 중간 보관이 없는 조건이다. 이 결과로 추가 절감이 발생하여 작업자 및 투자비(뱃치 오프 시스템(Batch-off system)과 finished compound의 저장실)를 절약한다. 따라서 5~10%의 추가 절감이 이루어진다.

Table 15. Conventional versus continuous mixing of a car tire plant without storage step.

	Unit	Int.mixer	TSE 130	TSE 90
Lines		5	4	8
Capacity final compound	t/a	66,000	60,000	60,000
Employees		153	40	52
Investment	USD	24,770,000	11,402,000	15,089,000
Salary	USD	5,624,000	1,546,400	2,809,000
Depreciation	USD	1,571,500	861,600	1,348,000
Energy	USD	1,601,000	1,140,000	1,140,000
Costs/a	USD	8,796,000	3,548,000	4,577,000
Average mis. stages		2.3	1	1
Costs / kg final compound	USD	0.133	0.059	0.076

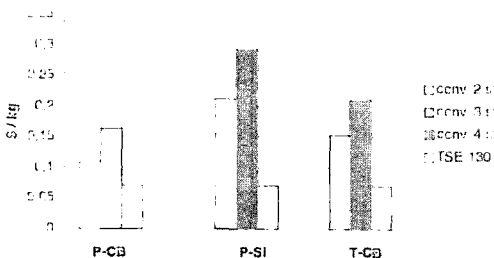


Figure 1. Mixing costs of different tread compounds(today and continuously mixed with storage)

### 5.3 재래식 혼합 공정과 연속식 혼합 공정을 근거로 한 tread compound 생산성

앞서 비교한 결과들은 승용차용 타이어 공장의 평균 혼합 stage 수를 근거로 하여 계산하였지만 다른 혼합 공정 방식에 의해 생산된 compound 용도에 대한 비용을 비교하였다. Figure 1은 재래식 혼합 방식의 혼합 stage 수를 고려하여 여러 tread compound의 compound 비용을 분류하였다. 여기서 연속식 혼합 방식에 의한 비용도 동시에 비교되었다. 이 과정에서 연속식 혼합 공정의 비용은 compound type, 즉 사용된 고무와 충전제 등과는 상대적으로 무관하다는 가정하였다. Tread compound는 보통 2~4 stage로 혼합되고 사용된 충전제와 고무 종류에 따라 다를 수 있다. silica compound인 경우에는 각각 혼합 stage의 혼합 시간이 부분적으로 길어질 수 있다. compound 비용을 계산함에 있어서 이런 조건들이 고려되어졌다. 예를 들면 silica compound인 경우에는 반드시 silica 생산 line으로 결정되어야만 compound 비용으로 결정되었고 carbon black이 함유된 compound인 경우에는 고무의 종류와 관계없이 두 개의 Carbon black 니더(kneader) 혼합기에서 확인된 자료만이 사용되었다. Finish-compound 비용 산출인 경우, compound type별 구별을 주지 않았다. 연속식 혼합 공정의 비용에 대해서는 TSE 130 라인에 대한 자료를 이용하였다. 이 공정에서는 한 개의 compound 중간 저장을 포함하였다. 기대하였듯이 연속식 혼합 공정에서의 compound 비용 절감이 혼합 stage 수와 혼합 stage당 혼합 시간에 따라 매우 유효하다고 밝혀졌다. 따라서 silica가 포함된 승용차용 tread compound와 truck tread compound (NR/carbon black)인 경우에 그 효과가 제일 크다.

### 5.4 회분식 혼합 공정과 연속식 혼합 공정을 근거로 한 base compound 생산성

Figure 2에 의하면 base compound에 관하여 비교하였다. 계산 조건은 연속식 혼합 공정을 근거로 하는 반제품을 제조하기 위해서 중간 저장 과정 없이 TSE 90 압출기를 직접 사용한 것이다. 이는

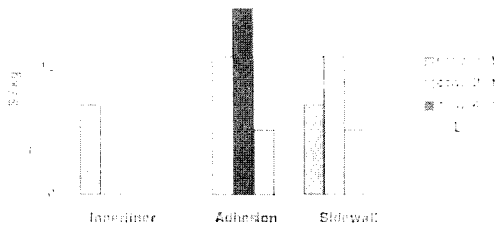


Figure 2. Mixing costs of different base compounds(today and continuously mixed without storage)

타이어 공장의 belt compound 수요에 해당하는 생산량을 알맞은 압출기로 구성된 생산 라인으로 설치할 수 있을 것으로 판단될 수 있다. Final compound인 tread compound와는 대조적으로 base compound는 공장 내에서 표준화되어야 한다는 사실은 사용 compound 개수를 한 개 또는 두 개 정도로 줄일 수 있다는 가능으로 이어진다. 한 종류의 compound는 적절한 크기의 압출 라인에서 생산되어 즉시 압출 다이(die)를 통하여 또는 칼렌더(calender)를 이용하여 반제품을 제조된다. 이로써 압출 공정에서의 compound 교체 회수는 상당히 줄어들 수 있다.

## 6. 결 론

오늘날의 재래식 혼합 공정과 연속식 혼합 공정 간의 노동력, 투자, 에너지와 관련된 비용들을 비교하면 모든 경우에서 마지막으로 언급했던 공정이 고무 산업의 제조 공정에서 주목할 만한 비용 절감을 이끌었다. 연속 혼합 공정에 대한 그림들은 현재 개발되는 연구를 반영할 수 있다. 여기서 연구된 공정들이 고무 산업의 혼합실에 점차 소개될 때 확실하게 최적화는 기대될 것이다. 이와는 별도로 가장 높은 비용 절감은 인건비와 투자비 합계에서 얻어지고, 반면에 감가상각과 에너지 절감 비용은 다소 낮다. 또한 compound 측면에서는 혼합 step수가 가장 많고 혼합 시간이 가장 긴 compound에 대해서 가장 큰 절감 효과를 기대한다. 이러한 compound로서는 silica compound와

NR/carbon black compound이다.

냉각 stage와 저장 step이 없는 단 stage, 연속 혼합 공정은 고무 산업에서 가장 낮은 공정 비용으로 생산 가능하지만 온라인(on-line) 품질 관리와 같은 문제점이 발견되곤 하지만 설비 설치 후 개선 가능하다.

경험 부족으로 인하여 연속 공정 비용 결정에는 종업원, 투자, 에너지와 관련된 숫자를 참고할 수 있다. 추가 비용 절감은 낮은 폐기물 발생률, बै치(batch)간의 낮은 품질 변동, 낮은 먼지 발생 등에서 가능성이 있지만 현재 정량적으로 결정이 불투명하다. 재래식 공정과 연속식 공정의 경제성 비교는 비용 계산에서의 존재하는 결점에도 불구하고 새로운 잠재 기술을 보여준다.

## 참 고 문 헌

1. *Neue Reifen Zeitung*, 12/99 and 01/00. (1995).
2. *European Rubber Journal*, May (1996).
3. *Neue Reifen Zeitung* 01/00, EJU Rubber Trends, 2nd quarter (1997).
4. *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, 22, 11, (2000).
5. E. T. Italiaander, *Gummi. Fasern. Kunststoffe*, 50, 456 (2002).
6. U. Gork, K. H. Nordsiek, *Kautschuk Gummi Kunststoffe*, 51, 200 (1998).
7. U. Gork, H. Lauer, *Gummi. Fasern. Kunststoffe*, 53, 261 (2002).
8. U. Gork, M. Schmitt, A. Amash, M. Bogun, *Kautschuk Gummi Kunststoffe*, 55, 23 (2002).
9. M. Schmitt, U. Gork, *K-Zeitung*, 08, 02 (2001).
10. A. U. Paeglis, E. T. Italiaander, *Gummi. Fasern. Kunststoffe*, 55, 286 (2002).
11. U. Gork M. Schmitt, *Kautschuk Gummi Kunststoffe*, 55, 239 (2002).
12. R. Uphus, O. Skibba, R. H. Schuster, U. Gork, *Kautschuk Gummi Kunststoffe*, 53, 793 (2000).
13. A. Amash, M. Bogun, U. Gork, R. H. Schuster, *Rubber World*, June, p.19 (2002).
14. A. Amash, M. Bogun, U. Gork, R. H. Schuster, *Kautschuk Gummi Kunststoffe*, 55, 367 (2002).
15. D. Shaw, *European Rubber Journal*, July/August, p.30 (2002).