

## 코크스 제조를 위한 원료탄 배합설계 최적화

김 학 령

포항종합제철주식회사 원료연구실

## An Optimization of the Coal Blending Plan for Cokemaking

Hark Ryeoung Kim

*Pohang Iron and Steel Comany,  
Raw Material and Fuel Labiliy, Pohang 680, Korea*

### 요 약

높은 강도의 코크스 제조를 위한 원료석탄배합계획에 대한 최적화를 원료탄배합이론과 선형계획법의 적용에 의하여 달성하였다. 최적화에 있어서 공장설비의 특성에 의하여 제약조건의 수를 제한해야 하였기 때문에 제약조건에 대한 적절한 선정이 필요하였다. 본연구에 의한 최적화방법은 공장실험결과에 의하여 매우 효과적인 것으로 판명되었다.

### ABSTRACT

The Coal Blending Plan for metallurgical cokemaking was optimized with the application of linear programming due to G.B. Dantzig. In this case, it was necessary to take discrimination in the selection of the number of the Constraints imposed upon the system, because the number of independent variables of the optimal solution should be restricted by the characteristics of the plant facility. It was found that the optimization method was highly efficient after a series of in-plant experiments.

### 1. 서 론

제철산업에 있어서 산화철인 광석으로 부터 최초의 금속철을 제조하는 공정으로서 고로제선법이 현재로서는 가장 경제적이며 동력으로서 원자력이 도입될 때까지는 계속 발전할 것이라는 전망이다. 고로는 기술적으로는 가능한한 대용량

일수록 경제적이므로 현재는 연간 천만톤 정도의 철광석과 수백만톤의 코크스를 사용하여 수백만톤의 선철생산이 가능한 규모로 발전하고 있다. 철광석은 지각중에 다량으로 포함된 광물이지만 동력자원으로서 코크스의 원료인 석탄은 비교적 제한된 자원이므로 고로제선원료비용의 반이상을 코크스가 차지하고 있다. 고로제선법에 있어서 코크스의 역할은 셋으로 대별할 수 있다. 첫

째로 고로의 고온을 유지하기 위한 열원으로서 둘째는 철광석을 환원하여 금속철로 만들기 위한 환원성 기체 발생원으로서 셋째는 철광석과 코크스를 고로에 교호로 장입하므로써 하강하는 광석층과 상승하는 고온의 환원성기류간의 물질 이동 및 열교환을 용이하게 하는 기류분배역할을 담당하는 충전으로서의 역할이다. 열원 및 환원성기체발생원으로서의 역할은 어떠한 연료로서도 대체할 수 있으나 이동성 충전층의 역할은 고도상부의 광석층의 하강과 고온에서의 화학반응하에서 형태를 유지할 수 있는 물리화학적 안정성이 요구되므로 고정탄소가 주성분인 코크스만이 현재로서는 고로조업에 적당한 연료로 알려져 있다. 고로가 점차 대형화함에 따라서 코크스의 품질 또한 높은 강도인 것이 요구되고 있으므로 보다 높은 강도의 코크스 제조기술이 필요하게 되었다. 야금용 코크스는 고강도가 특징으로서 코크스제조용 석탄으로부터 제조되어 왔으나 코크스제조용석탄인 강점결탄은 자원면에서 제한된 지역에서 생산되고 물량으로서도 공급부족인 실정이므로 일반적인 석탄보다 가격이 비싸고 강점결탄으로 제조된 코크스는 고가일 수밖에 없었다. 한편 산업이 발전하면서 철강재의 수요가 증가하고 고로가 대형화함에 따라서 보다 높은 강도의 코크스가 보다 다량으로 필요한 실정이므로 강점결탄이 아닌 석탄으로 높은 강도의 코크스를 제조하고자 하는 노력이 있었으며 현재도 많은 연구가 진행되고 있다.<sup>1~5)</sup> 이러한 연구중에서 코크스제조용 원료석탄 즉 원료탄의 배합에 의하여 다양한 원료탄 특성의 상호 보완에 의하여 강도 높은 코크스를 제조하는 기본 원리인 코크스제조를 위한 원료탄배합이론을 최초로 실용적으로 확립한 것은 미국의 N. Schapiro에 의하여 이루어 졌다.<sup>1)</sup> 이후에 원료탄 배합이론은 보다 확장되었고 원료탄 배합이론에 따라서 다양한 원료탄으로부터 높은 강도의 코크스 제조를 하기 위한 원료탄의 배합비를 결정하는 원료탄 배합설계방법이 각국에서 필요에 따라 독자적으로 사용되고 있다. 원료탄자원국에서는 간단한 방법을 사용하고 자원빈국에서는 다소 복잡하다. 한국, 일본 등 가장 어려운 환경

이므로 가장 복잡한 방법이 사용된다.<sup>2~4)</sup> 따라서 원료탄배합설계를 할 때는 배합설계규칙에 따라서 시행착오법을 사용하여 가능한한 작은 비용으로써 높은 강도의 코크스제조를 하기 위한 다양한 원료탄의 배합비를 결정하려고 하므로 많은 시간과 노력이 필요하였으며 또한 최적설계에 가까운 준최적설계에 만족한 실정이었다. 본 연구는 코크스제조를 위한 원료탄배합설계를 선행계획법에 의하여 최적화하고 전자계산기로 처리하므로써 업무를 간소화한 과정에 관한 것이다.

## 2. 원료탄배합설계

원료탄배합설계는 원료탄배합이론에 따라서 대형고로에 사용하기에 충분히 높은 강도의 코크스를 최저의 가격으로 생산할 할 수 있는 다양한 원료탄의 배합비율을 결정하는 과정이다. 즉 다양한 원료탄을 배합하여 높은 강도의 코크스를 제조할 수 있는 원료탄의 배합비를 여러가지 만들어 보고 이 중에서 가장 최저의 배합가격을 가지는 배합비의 배합원료탄 즉 배합탄으로 코크스를 제조하게 된다. 여기서 높은 강도의 코크스를 제조할 수 있는 원료탄의 배합비의 집합을 판정할 수 있도록 체계화한 것이 원료탄배합 이론이다.<sup>1~5)</sup> 원료탄배합이론의 기본적 개념은 석탄의 조직분석(coal petrography)에 근거를 둔 것으로 단일 탄종으로 높은 강도의 코크스를 제조할 수 있는 강점결탄의 조직은 보강재(Aggregate) 성분과 결합재(Binder) 성분이 적절한 비율로 구성되어 있으며 단일탄종으로 높은 강도의 코크스를 제조할 수 없는 약점결탄의 경우에는 보강재 또는 결합재성분의 어느 한 쪽이 과다하거나 과소하며 이러한 약점 결탄을 배합하여 보강재성분과 결합재성분을 강점 결탄과 같은 적절한 비율로 만들었을 때 강점 결탄을 소량배합하거나 전혀 사용하지 않아도 높은 강도의 코크스를 제조할 수 있다는 것이며 실험결과도 대체로 기본개념의 타당성을 입증하였다. Schapiro는 이 사실을 체계화하여 강도지수(Strength Index)와 조직균형지수(Composition Balance Index)

의 개념을 도입하여 석탄의 조직분석결과와 제조된 코크스강도와와의 관계를 광범위한 실험으로써 정립하였다.<sup>1)</sup> 석탄의 조직분석은 현미경으로 석탄조직의 반사율측정에 의하여 실시하며 강도지수는 특정조직성분의 상대적강도를 나타내며 조직 균형지수는 석탄조직중에서 보강재성분에 속하는 것과 결합제성분에 속하는 것의 적정비율을 나타낸다. Schapiro의 이론은 미국석탄에 대해서는 잘 적용이 되었으나 다른 나라의 석탄에 대해서는 보정이 필요하며 자원의 다변화라는 점에서 각국의 자원사정에 따라서 배합이론을 보완할 필요가 발생하였다.<sup>2~4)</sup> 현재 높은 강도의 코크스를 제조하기 위하여 원료탄 배합설계를 할 때 필요한 원료탄의 코크성을 판정하기 위하여 사용되는 원료탄의 코크화특성들은 가장 광범위하게 적용되는 것으로서 팽창도(Dilatation) 유동도(Fluidity), 고온강도(Hot Strength), 조직균형지수(CBI), 강도지수(SI), 회분(Ash), 휘발분(Volatile matter)이며, 이들 특성치는 원료탄 생산자가 국제공인기관자료를 원료탄사용자에게 보내며 원료탄사용자도 또한 자체시험설비로 지속적으로 측정하면서 원료탄품위서를 작성하여 원료탄배합 설계자료로 사용한다. 원료탄 품위서의 일부분을 예로들면 Table 1과 같다. 여기서 Coal 1에서 Coal 5까지는 미국산저

휘발분 및 고휘발분 점결탄으로서 대체적으로 비슷한 특성을 보인다. 그러나 Coal 23과 같은 경우에는 현저한 다른 특성을 보인다. 따라서 광범위한 탄종에 대해서 배합설계를 할 때는 다수의 원료탄 코크화자료가 필요한 것을 알 수 있다. 또한 설계된 배합비로 배합된 배합탄은 관소시험에 의하여 코크스로 제조한 후 만족한 결과를 보이던 대량생산인 실제 조업에 적용된다. 관소시험이라 하는 것은 20t 정도의 철관에 시험용 배합탄 또는 단일 탄종을 봉입하고 실제 조업중인 코크스로에 장입하여 수천톤의 다른 코크스 생산과 함께 회수하여 강도시험을 실시하여 강도를 측정하는 것이다. 관소시험을 하는 이유는 소규모 코크스 제조시험로(20kg 급)에서 제조된 코크스와 대규모 실제조업코크스로에서 제조된 코크스와의 강도측정치의 일치성이 불량하기 때문이다. 여기서 코크스의 강도라고 하는 것은 코크스형태의 불규칙성에 의하여 재료역학적 정의가 무의미하며 SI 단위로 표시하는 방법이 아직 알려져 있지 않고 코크스의 사용목적인 고로조업시에 코크스가 낙하 및 마모하는 과정의 모사실험장치를 사용하므로써 각국의 공업규격에 규정되어 있다. 한국 및 일본은 Drum Index (Japanese Tumbler Test에 의한  $DI_{15}^{50}$ ; JIS K 2151—1977)를 사용하고 미국은 ASTM Coke

Table 1. An example of the list of coking properties of Coals

Characteristics Instrument Standard	Dilatation	Hot Strength	Fluidity	Strength Index	Composition Balance	Ash	Volatile
	Audibert Arnu Dilatometer	I Tester	Gieseler Pla- stometer	Optical Microscope		Chemical Analysis	
	ISO349-1975	Japanese	ASTM.D- 2639-74	ASTM		ASTM	
Coal Brand							
Coal 01	58	48	2.2	7.2	1.5	4.2	18
Coal 02	73	50	2.2	6.7	2.3	6.9	18
Coal 03	286	56	4.2	3.6	0.7	6.9	29
Coal 04	258	53	4.2	3.5	0.6	6.6	30
Coal 05	231	50	4.2	3.2	0.8	6.7	35
Coal 23	0	0	0	10	6.0	0.5	10

(Apr. 1979)

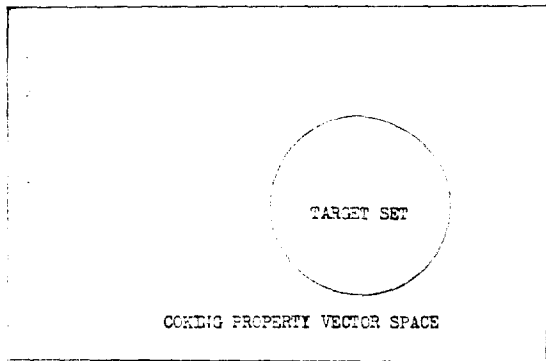


Fig. 1. The Concept of the Coking Property Vector Space.

Stability와 Hardness를 독일은 Micum Test에 의한 Festigkeit와 Abrasion을 사용한다.<sup>2~4)</sup>

### 3. 선형 계획

코크스제조를 위한 원료탄배합설계의 최적화를 위하여 선형계획법을 적용하였다. 선형계획법은 목적함수 및 제약조건이 선형관계식들로 표시될 때 제약조건하에서 목적함수를 최대 또는 최소화하는 독립변수의 해를 구하는 방법으로 알려져 있다.<sup>6,7)</sup> 원료탄배합설계를 최적화할 때 선형계획법의 적용타당성은 배합설계의 취지에 의하여 높은 강도의 코크스제조를 보장하는 배합원료탄의 코크화 특성과 배합에 사용되는 원료탄의 코크화 특성간에 선형관계가 있음을 밝히면 충분하다. 원료탄의 특성중에서 팽창도는 Dilatometer에 의하여 측정되며 이 장치는 원료탄이 건류중에 팽창 및 수축하며 코크화하는 과정의 모사실험장치이다. 팽창계수의 정의에 의하여 배합탄과 배합되는 원료탄들간에 선형관계가 성립한다. 원료탄의 유동도는 건류중에 석탄입자상호간에 응착과정을 표시하는 것으로서 Plastometer에 의하여 측정되고 배합탄의 배합비에 따라 선형성이 보장되도록 제작되었다. 조직균형지수와 강도지수는 정의에 의하여, 회분과 휘발분은 물질수지에 의하여 선형성이 보장된다. 실제로 이들 특성치는 다년간의 실측에 의하여 선형관계가 있음이 입증되었다. 이들 특성은 단

위질량의 원료탄에 대하여 측정되므로 배합탄과 원료탄들의 코크화특성은 특정배합탄 또는 특정 원료탄에 대응하여 코크화특성치의 조합이 대응하고 코크화특성 vector 공간을 형성한다고 할 수 있다. 이때 배합비의 합은 1이다. 높은 강도의 코크스제조를 보장하는 코크화특성치조합들의 집합은 바로 코크화 특성 vector 공간에서의 표적(Target set)이며 이 개념은 Fig. 1에 표시하였다. 대형고로조업에 충분한 높은 코크스강도는 각국에 따라 다르며 한국은 일본 보다도 높은  $DI_{15}^{150}$  83.0이다. 코크스강도와 코크화특성치들간에 수치로 표시되는 간단한 관계식은 아직 알려지지 않았고 대체적인 경향을 표시할 수 있을 뿐이다. 따라서 다년간의 조업경험에 의해서 Target Set가 결정되고 이 Target Set의 경계와 배합비의 합이 1이라는 조건이 코크스제조를 위한 원료탄 배합설계 최적화를 선형계획법으로 해결할 때의 제약조건이며 Simplex의 경계가 된다. 본 연구에 있어서 제약조건의 수는 코크화특성치에 의한 12개와 배합비의 합이 1이라는 조건을 합한 13개이나 선형계획에 의한 해를 구해 본 결과 Table 2와 같은 Target Set의 성질과 배합비의 합이 1이라는 9개의 제약조건을 만족시키면 충분하고 다른 4개의 제약조건에 대해서는 현재 사용하고 있는 석탄들에 대해서 충분한 여유가 있음을 발견하였다. 본 연구에 있어서는 유한한 코크스제조공정설비가 연속적으로 가동되는 경우이므로 일시에 공급가능한 원료탄종의 수는 11개 이하이어야 했으므로 제약조건이 12개 이상이 될 경우에는 선형계획에 있어서 Simplex법의 적용이 어려울 때도 있다. 왜냐하면 Simplex법의 성질에 의하여 최적해의 독립변수인 원료탄종의 수가 12개 이상이 나타날 수도 있기 때문이다.<sup>9,7)</sup>

### 4. 실험 결과

선형계획법에 의하여 최적화된 원료탄배합비의 예를 Table 3에 표시하였다. Case 1은 원료탄의 특성치에 대한 제약조건하에서의 최적배합이며 Case 2와 Case 3은 특정원료탄 배합비의

Table 2. The Properties of the Target Set

Characteristics	Dilatation	Hot Strength	Fluidity	Strength Index	Composition Balance	Ash	Volatile
Subject to	L & U	L	L	L	U	U	U

L : Lower Bound, U : Upper Bound

Table 3. Some examples of the linear Programming Result

	Case 1		Case 2		Case 3	
	Brand	Blending ratio	Brand	Blending ratio	Brand	Blending ratio
	Coal 02	0.03	Coal 05	0.11	Coal 01	0.05
	Coal 09	0.70	Coal 08	0.28	Coal 05	0.26
	Coal 11	0.21	Coal 11	0.04	Coal 08	0.40
	Coal 13	0.06	Coal 13	0.39	Coal 15	0.11
		1.00	Coal 14	0.01	Coal 16	0.18
			Coal 15	0.17		1.00
				1.00		
Cost(W/Ton)	28.290		30.017		30.531	

(Apr. 1979)

Table 4. Strength of the coke made according to the result of the linear Programming

	Case 1	Case 2	Case 3
Strength	85.5	86.2	84.6
DI <sub>15</sub> <sup>150</sup>		85.8	83.9
		85.0	84.7
		84.6	84.2
		83.0	82.9
		84.5	83.2
		85.7	84.2
		86.0	
Mean	85.5	85.1	84.0

상을 제약했을 경우이다. 각각의 배합비에 따라서 관소시험을 하여 제조한 코크스의 강도 측정 결과를 Table 4에 표시하였다.

## 5. 검 토

최적설계에 의하여 결정된 배합탄으로써 대형

고로조업용으로 충분히 높은 강도의 코크스를 제조할 수 있으며 (Table 4) 원료탄의 코크화 특성치만을 고려할 때 (Table 3. Case 1) 불과 몇 종류의 원료탄으로 충분하고 배합탄의 가격이 최소이며 최적화를 얹은 통상의 배합탄 가격보다 10% 전도 낮았다. 이때 원료탄의 불량때문에 연간 100 억원 정도의 원가절감가능성을 보였다. (Apr. 1979) 그러나 특정탄종(Coal 09)의 점유율이 과대하여 자원적인 면에서 수백만톤의 물량을 단일탄광에서 구입하는 것은 실현성이 없었다. 특정탄종들의 과대 점유율을 제한하기 위하여 배합비 상한을 제약했을 경우 (Table 3. Case 2, Case 3)는 배합원료탄종이 증가하고 배합탄 가격 역시 증가하였고 원가절감 가능성은 5% 정도이었다. 또한 비싸고 코크화특성이 우수한 미국탄을 거의 사용하지 않아도 대형고로용으로 충분히 높은 강도의 코크스 제조가 가능한 것을 알 수 있었다. 한편 수입종의 원료탄을 대상으로 코크화특성에 의한 제약조건외에 자원수급면에서 재고량사정을 고려하면서 최적배합설계를 하기 위해서는 앞서 말한 바와 같이 Sim

plex 법에 의한 문제해결에 곤란점이 발생할 수도 있으므로 최적해에 나타나는 독립변수를 제한할 수 있는 최적화기법이 요구된다고 하겠다.

## 6. 결 론

본 연구에 의하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 선형계획법에 의하여 코크스 제조를 위한 원료탄 배합설계최적화가 가능한 것을 실험에 의하여 입증하였다.

(2) 실험결과에 의하여 비싸고 코크화특성이 우수한 미국탄을 사용하지 않아도 대형고로용으로 충분히 높은 강도의 코크스를 제조할 수 있음을 알았다.

(3) 최적화결과로 종래보다 최대로 10 % 정도 원가절감가능성이 있음을 알았다.

(4) 배합설계의 전자계산기처리로 업무의 간소화와 비상시에 신속한 방침설정이 가능하다.

(5) 최적해에 나타나는 독립변수의 수에 제한이 있을 때 선형계획문제에 대한 Simplex 법의 적용한계를 발견하였다.

## Reference

1. Schapiro, N., R.J. Gray and G.R.Eusner Blast Furnace, Coke Oven and Raw Materials, Proceedings of AIME 20, (1961), 89~112.
2. Miura, Y., Nenryo Kyokai-Shi (J. of the Fuel Society of Japan), 58, 11 (1979), 902~914.
3. Zimmerman, R., Evaluating and Testing the Coking Properties of Coal, Miller Freeman Publication, Inc., San Francisco (1979).
4. Nishi, T., Nenry. Kyokai-Shi(J. of the Fuel Society of Japan), 58, 11 (1979), 926~939.
5. Davis, A., "the Reflectance of Coal" Chap. 2, in Analytical Methods for Coal and Coal Products, Volume 1, Clarence Karr, Jr. ed., Academic Press(1978)
6. Gass, S.I., Linear Programming, McGraw Hill Co. (1969)
7. Pierre, D.A., Optimization theory with Applications, John Wiley Inc., (1969).