

## 鑛山操業水準最適化시스템

(株) 雙龍컴퓨터 盧 仲 鎬  
專 務 理 事

### 1. 서 언

한국적 경영환경에서 O·R 기법을 경영활동에 적용하는 데에는 O·R의 이론적 측면보다 실용화가 더욱 어려운 실정이다. 관리자들이 편견과 자기 경험의 노예 상태에서 직관적으로 의사결정을 한다던가, 이노베이션에 대한 거부 반응이 거세다던가, 시스템 의식이 미약하다던가, 데이터의 축적이 빈곤하다던가 하는 따위 등이 O·R의 실용화에 장애요인으로 작용된다. 이들은 쌍용양회공업주식회사에서 광산 조업활용에 적용하여 성공적으로 활용되고 있는 O·R의 모델을 간추린 것이다. 이 회사에서는 7년여에 걸쳐 MIS의 추진과정을 통해 관리자들이 컴퓨터시스템 마인드를 제고 시키고, 정보시스템을 설계하고,

정보시스템을 개발하고, 정보시스템을 활용하면서 데이터를 축적하여 O·R 기법을 실제에 적용하였다.

### 2. 시멘트 공장의 공정개요

광산에서 석회석을 채굴하여 20mm<sup>2</sup> 이하로 분쇄한 다음 원료분쇄 공정으로 보낸다. 원료분쇄 공정에서는 석회석을 그 품위와 제품의 종류에 따라 철광석, 점토, 모래 등과 같은 부원료를 적정한 비율로 섞어 분말상태로 분쇄하여 시멘트 원료를 만든다. 이 원료를 소성하면 크링카(Clinker)가 생성된다. 응결 지연제인 석고를 첨가하여 크링카를 분쇄하면 시멘트가 된다. 이 시멘트를 포장한 것이 「포장 시멘트」이고 무포장 상태로 출하되는 것이 「벌크 시멘트」이다.

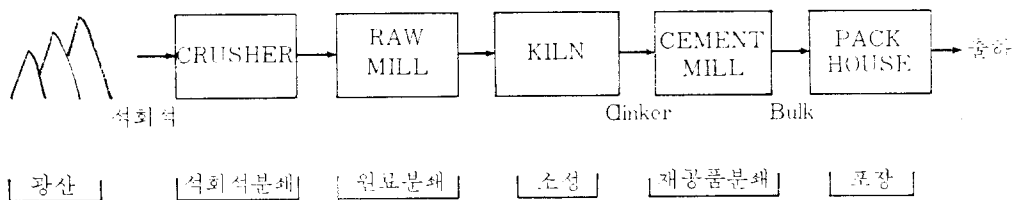


그림 1. 시멘트 제조 공정

### 3. 광산업무의 개요

#### 3.1 업무개요

① 석회석 매장 지점을 뚫어 Drill Powder를 채취, X-Ray로 분석하여 석회석 성분의 대표치를 채광 작업장별로 추정 한 후에,

② 원하는 수준(품질, 량)의 크링카 제품을 생산하기 위한 작업장별 급광계획을 수립하고,

③ 결정된 급광계획에 따라 중기(重機)의 가동계획을 수립하고 작업을 배치 한다.

#### 3.2 업무의 기능

광산업무의 기능은 시멘트 생산기능의 서브기

기 능	부 기 능	주 요 내 역	비 고
광산 금광 업무	채 광 계 획	주요 관리 방침 결정 —제품 목표 품질 —목표 생산량	
	품 질 관 리	Drill hole 별로 채취된 석회석 Powder Sample 을 X-Ray 분석기에 의한 분석 —작업장별 대표 품위 결정	
	채광 및 운광	채광 계획에 따른 ○석회석 금광 계획 수립 및 집행 ○채광용 장비의 운영 관리 —대형 착암기 가동 실적 분석 —석회석의 생산 및 운광 —작업장 관리 —채광 장비별 원가 분석	
	중 기 관 리	석회석의 적재 및 운광에 따른 중기의 가동 계획 수립 및 작업 배치 —중기 운영 관리 —중기 가동 현황 —중기 가동 실적(능력) 분석 —광산 장비별 원가 분석	

그림 2. 광산 업무기능의 주요 내용

능이며, 이 기능은 채광계획, 품질관리, 채광 및 운광, 중기관리 등으로 다시 분기된다. 이 기능들의 주요 내용을 요약한 표가 그림 2이다.

### 3.2 시스템의 구성

광산조업 시스템은 단독(Standalone)으로 가동되면서도 Total MIS와 연계되어 전 공장적 입장에서 조정되도록 제작되었다. 이 시스템은 광산조업 기능별로 구성된 4개의 서브시스템과 여러 서브시스템이 공용하는 Common Data Base와 광산조업 수준을 최적화하는 O-R 프로그램의 군단으로 되어 있다. 그 구성도를 개략화한 것이 그림 3이다.

## 4. 시스템 개발 배경

제품의 품질 수준을 높이고 제조원가를 절감하여 고객에 대한 상품의 성가를 향상시키는 문제를 해결하는 것은 기업이 당면한 제일의 과제요 경영활동의 「맥」이라 하겠다.

쌍용양회의 석회석 광산은 규모가 방대하고, 수 많은 작업장에서 채굴되는 석회석 성분의 품위는 서로 다르며, 그 생산활동에 영향을 미치는 변수들이 다양하기 때문에 원하는 품질의 시멘트를 생산하기 위한 주원료인 석회석을 경제적으로 생산하는데에는 어려움이 많다. 더우기 미래의 상황을 파악하고 그에 대처하는 활동도 필요하기 때문에 광산조업의 컴퓨터 시스템화가 필요하게 되었다.

본 시스템은 종래의 작업방법을 분석함으로써 밝혀진 문제점들과 요구사항들을 해결할 수 있도록 설계되고 개발되었다.

### 4.1 작업장별 석회석 운송량 결정상의 문제점

현업 실무자의 경험에 전적으로 의존하며, 이로 인해 어떠한 경우에는 목표품위 보다 높은 양질의 석회석을, 어떤 경우에는 목표품위 보다 낮은 저질의 석회석이 운광됨으로써 크링카 제품의 품질이 고르지 못하게 되고, 저질 석회석이 원료로 사용됨으로써 원하는 수준의 제품을

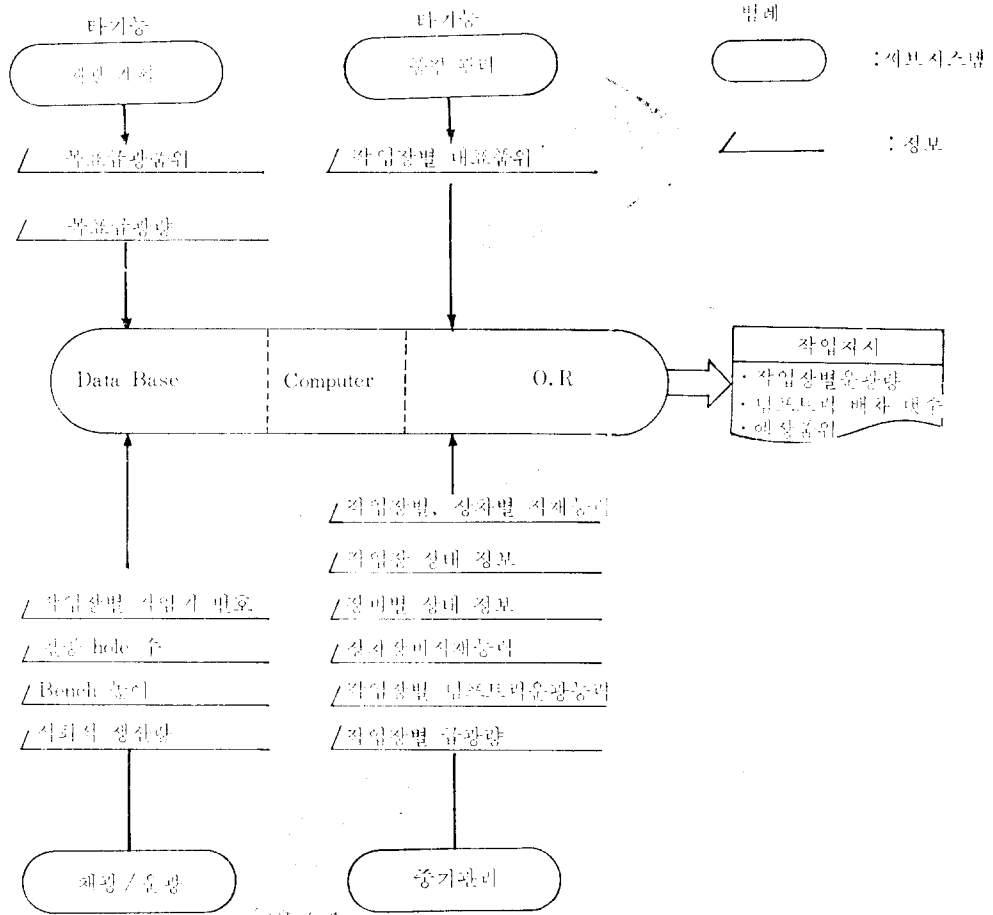


그림 3. 광산업무 시스템 구성도

생산하기 위해 불필요한 부원료를 첨가하게 됨으로 제품의 원가를 상승시키고 있다.

#### 4.2 작업장별 운송중기 배차의 비경제성

중기의 운송·적재 능력, 작업장 상태 등이 고려되지 않은 상태에서 작업장별 석회석 운송량이 먼저 결정되기 때문에 비경제적으로 중기가 배치 운영되고 있다.

### 5. 시스템의 목표

① 크링카가 제품에 절대적인 영향을 미치는 석회석 성분의 품위를 관리목표 수준에 맞게 유지하면서, 양질과 저질의 석회석을 적절히 배합

함으로써 편중된 막장의 개발을 억제하여 균형적인 발전을 도모하고,

② 석회석 생산활동에 직·간접적으로 영향을 끼치는 제반 변수인 생산활동, Crusher 분쇄능력, 제품품질, 운송·적재 중기 조건, 중기의 가동능력, 작업장 상태 등에 관한 사전계획을 시스템(기업) 전체 이익의 최적화 관점에서 원활히 조정함으로써 제품생산에 소요되는 직·간접비용을 최적규모로 절감시킨다.

### 6. 시스템 Flow

시스템의 흐름은 On-line으로 되어 있고 작업지시서는 Hard-copy로 인쇄돼 각 작업장으로

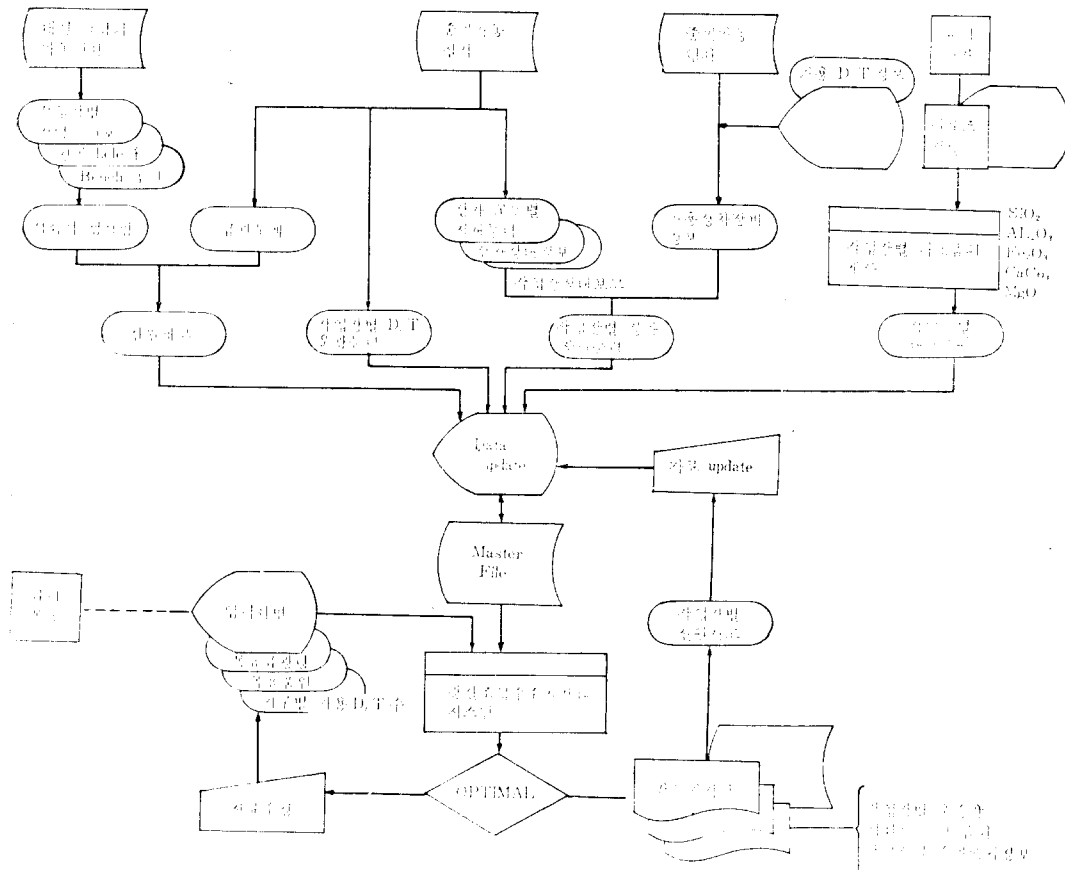


그림 4. 시스템 Flow

전달된 다음 작업결과를 Feed-back 하는 자료 메체로 사용된다. 그림 4가 시스템 Flow 이다.

### 7. 사용 O·R 기법

광산 조업수준 최적화 문제는 제한된 자원을 생산적 용도에 어떻게 합리적으로 배분할 것인가를 결정하는 적정화 문제와 관련되기 때문에 「적정화 문제의 해결」 기법을 사용하였다.

#### 7.1 작업장별 운송량 결정

석회석 성분의 관리목표수준, 계획생산량, Crusher 분쇄능력, 가용 중기수, 중기 운송·적재능력 및 작업장 상태를 감안한 작업장별 적정

운송량 결정에는 LP 모델을 이용했다.

#### 7.2 작업장별 덤프트럭의 적정 배치

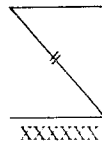


결정된 작업장별 운송량을 토대로 물량흐름의 경로를 조정하는 동시에 언제나 필요한 위치에 필요한 만큼의 차량이 배치되도록 함으로써 석회석 운반의 흐름을 효율화했다. 이에 이용된 모델은 IP(integer programming)이다.

### 8. Input/Output 예

입력은 Soft-Copy(Cathod ray tube 화면)로 되어있으며 출력은 Hard-Copy로 되어있다.

그 예가 그림 5와 그림 6이다.

광산 조업 수준 최적화 시스템		
(SCREEN A)	(복표화리용)	MANDATORY
1. 작업일자 : YY/MM/DD 2. 고대작업 : X 3. 작업시간 : HH.MM 4. 복표종위 1) AL2O3 : 99.99 - 99.99 2) MGO : 99.99 - 99.99 5. 복표당량 : 99999 Optional 6. 지수별 사용 D/T 수 1) 1 지수 : 99 2) 2 지수 : 99 3) 3 지수 : 99		

광산 산량 최적화 시스템		
(SCREEN B)	(운광량 제약용)	OPTIONAL
작업장별 XXXXXX	형태 X	배차비율 99
		
XXXXXX	X	99

형태 : L : LESS THEN & EQUAL  
 G : GREAT THEN & EQUAL  
 E : FIXED  
 \* : UNWORKING

그림 5. 입력 형식

### 9. O·R 모델의 해석

본시스템에서 이용한 O·R 모델의 해석을 예를 들어 설명하였다.

- ① 모든 자료는 가상 Data 임
- ② 작업장(및 Bench)의 수는 계산의 편의상 5개로 한정하였음.
- ③ 석회석의 주 관리성분 중 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO 만 취급하였음.
- ④ 모델의 단순화를 위해 현 광산 조업수준 최적화 시스템에서는 실제로 사용/고려한 항목 중에서 빠진 것이 있음.
- ⑤ 이 paper에서는 LP 모델에 의해 작업장별 운광량이 결정되는 과정만 설명되었으며, 작업장별 증기 적정 배차모델(integer programming)은 Manual에 의한 계산상의 난이로 인해 제외시켰음.

#### 9.1 LP 모델 형성 과정

석회석 생산자는 화학성분이 알려진 5개의 작업장으로 부터 2,000톤의 석회석을 최소 비용으로 운광하고자 한다. 이 때 작업장별 운송비용

### WORKING ORDER

DATE : 84. 3.30  
 SHIFT : 3 WORKING TIME : 6.0

WORK ZONE	INVENTORY QTY(REM.)	TRANSPORT QTY	TRANSPORTER 35 TON (TON/HR)	LIMESTONE GRADE QUALITY				
				AL203	MGO	SIO2	FE203	CAO
116S12	9000( 5940)	3060	5 (102)	1.23	2.43	0.00	0.00	0.00
119S11	8000( 5300)	2700	5 ( 90)	1.74	0.98	0.00	0.00	0.00
120S21	9000( 6720)	2280	4 ( 95)	0.98	3.60	0.00	0.00	0.00
1 ZIGU	26000(17960)	8040	14 ( 95)	1.33	2.27	0.00	0.00	0.00
243O01	4000( 2326)	1674	3 ( 93)	1.42	0.67	0.00	0.00	0.00
245O01	8000( 7448)	552	1 ( 92)	2.43	0.68	0.00	0.00	0.00
2 ZIGU	12000( 9774)	2226	4 ( 92)	1.67	0.67	0.00	0.00	0.00
328K13	5000( 2300)	2700	5 ( 90)	1.18	2.19	0.00	0.00	0.00
329K21	4000( 1180)	2820	5 ( 94)	1.79	1.98	0.00	0.00	0.00
330K11	7000( 5908)	1092	2 ( 91)	2.78	1.04	0.00	0.00	0.00
331K12	7000( 5452)	1548	3 ( 86)	1.12	2.38	0.00	0.00	0.00
3 ZIGU	23000(14840)	8160	15 ( 90)	1.59	2.00	0.00	0.00	0.00
TOTAL	61000(42574)	18426	33 ( 92)	1.49	1.96	0.00	0.00	0.00

그림 6. 출력 형식

(COST/TON)은 알려져 있으며, 이 2,000톤의 석회석에는 화학성분  $Al_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $SiO_2$ ,  $CaCO_3$  그리고  $Fe_2O_3$ 가 어느 정도 이상(혹은 이하)이 포함되어야 한다는 제약 조건을 내세우고 있다. 모델 형성에 필요한 모든 정보를 정리하면 표 1부터 표 5까지이다.

표 1. 2000톤의 석회석에 포함되어야 할 화학성분량

화 학 성 분	관 리 목 표	
	하 한 치	상 한 치
$Al_2O_3$	1.8	2.1
$MgO$	1.5	2.0

표 2. 작업장별 석회석 재고량

작 업 장 명	석회석 재고량	사용되어야 할 최소량
$X_{111}$	1,000톤	100
$X_{112}$	700ㄴ	
$X_{123}$	300ㄴ	
$X_{212}$	450	700
$X_{311}$	900ㄴ	

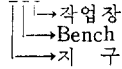
표 3. 작업장별 화학성분의 대표 품위

작 업 장 명	대 표 품 위	
	$Al_2O_3$	$MgO$
$X_{111}$	2.00	1.89
$X_{112}$	1.74	0.67
$X_{123}$	0.98	2.19
$X_{212}$	1.54	1.10
$X_{311}$	3.57	1.70

표 4. 운광·적재 장비 가용갯수 및 작업 능력

작업장명	Dump truck		상차장비(SHOVEL)	
	가용갯수	운광능력	가용갯수	적재능력
$X_{111}$	5	91T/H	2	1,900T/H
$X_{112}$		89ㄴ		ㄴ
$X_{123}$		87ㄴ	1	1,800ㄴ
$X_{212}$	2	92ㄴ	2	2,000ㄴ
$X_{311}$	3	82ㄴ	1	2,000ㄴ

주) 1.  $X_{ijk}$



- D/T는 지구별로 할당(광산의 균형적 발전을 위해 이 회사의 방침임)
- Shovel은 기동력이 없는 장비이기 때문에 Bench 별로 할당되어 해당 Bench 내에 속한 작업장을 이동하며 적재함.

표 5. 작업장별 운광 비용

작 업 장 명	운광 비용(1차 Crusher 까지)
$X_{111}$	1,200원(Cost per Ton)
$X_{112}$	890ㄴ
$X_{123}$	1,100ㄴ
$X_{212}$	950ㄴ
$X_{311}$	1,130ㄴ

이러한 상황에서 석회석 생산자는 5개의 작업장으로 부터 몇 톤씩 운광하는 것이 총 운광비용을 가장 적게하느냐가 문제이다.

9.1.1 결정 변수(Decision Variable) 결정

석회석 금광 최적화 문제에서 생산자의 목적은 가용자원을 사용하여 최대이익(최소 비용으로 석회석 운광)을 실현하는 것이며, 이 목적달성을 위해 5개의 작업장에서 몇 Ton씩 석회석을 운광할 것인가를 결정하는 문제이다. 따라서, 작업장별 운광량이 곧 결정변수가 된다.

$$X_{111}, X_{112}, X_{123}, X_{212}, X_{311} \geq 0$$

9.1.2 목적함수(Objective Function) 형성

생산자의 목적은 총운광비용을 극소화하는 데 있다. 총 운광비용은 결정된 작업장별 운광량에 다 작업장별 석회석 운광비용을 곱한 것의 합이 될 것이다.

목적함수  $OBJ = 1,200x_{111} + 890X_{112} + 1,100X_{123} + 950X_{212} + 1,130X_{311}$  를 극소화 하라.

9.1.3 제약조건(Constraints)의 형성

생산자의 목적은 작업 가능한 모든 작업장으로 부터 2,000톤의 석회석을 생산하는데 있다. 다시 말해서 생산하고자 하는 석회석의 총량은

2,000톤이 될 것이다.

$$X_{111} + X_{112} + X_{123} + X_{212} + X_{311} = 2,000$$

이 회사에서는 광산의 균형적인 발전을 위해 운광장비인 Dump truck 을 지구별로 고정 할당 하여 해당 지구내에서만 자유롭게 운광을 허용 하고 있다. 따라서, 주어진 시간내에 가용 D/T 가 운송할 수 있는 최대량 보다는 적게 각 지구 별 운광량이 결정되어야 할 것이다.

$$\begin{aligned} \text{1지구: } X_{111} + X_{112} + X_{123} &\leq 5 * 8 * \text{⑧} = 3,560 \\ &\quad \begin{array}{l} \uparrow \text{D/T의 평균 운광능력 (T/H)} \\ \downarrow \text{작업시간} \\ \downarrow \text{가용 D/T수} \end{array} \\ \text{2지구: } X_{212} &\leq 2 * 8 * 92 = 1,72 \\ \text{3지구: } X_{311} &\leq 3 * 8 * 82 = 1,968 \end{aligned}$$

그리고 적재 장비인 Shovel은 기동력이 있는 장비가 못되어 Bench 별로 할당/배치되어 해당 Bench 내의 장엄장들 사이에서만 자유롭게 작업이 가능하기 때문에 Bench 별로 다음과 같은 제약식이 필요하다.

$$X_{111} + X_{112} \leq \min \left( \begin{array}{l} \text{해당 Bench 상차장비} \\ \text{내 모든 작 (Shovel)} \\ \text{업장의 석회, 의 총 적} \\ \text{석 재고할 재 능력} \end{array} \right)$$

$$\begin{aligned} \text{즉, } X_{111} + X_{112} &\leq \min \\ &\quad (1,700, \frac{2 \times 8 \times 1,900}{\text{⑧}}) = 1,700 \\ &\quad \begin{array}{l} \uparrow \text{적재능력} \\ \downarrow \text{작업시간} \\ \downarrow \text{Shovel 댓수} \end{array} \end{aligned}$$

다음은 알루미늄나(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)를 생각해 보자. 생산자가 필요로 하는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 양은

$$2.0X_{111} + 1.74X_{112} + 0.98X_{123} + 1.54X_{212} + 3.57X_{311}$$

이 될 것이다.

이러한 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>에 대한 총 요구량은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 허용범위인 1.8~2.1을 벗어 날 수는 없다는 점에서 연유하게 된다. 이러한 제약조건을 아래와 같은 식으로 표시할 수 있다.

$$Al_2O_3 : 1.8 * 2,000 \leq 2.0X_{111} + 1.74X_{112}$$

$$\begin{aligned} &+ 0.98X_{123} + 1.54X_{212} \\ &+ 3.57X_{311} \\ &\leq 2.1 * 2,000 \end{aligned}$$

↳ 목표 생산량

이와같은 논리에 근거하여 MgO에 대한 제약 조건도 아래와 같이 형성할 수 있다.

$$\begin{aligned} MgO : 1.5 * 2,000 &\leq 1.89X_{111} + 0.67X_{112} \\ &+ 2.19X_{123} + 1.10X_{212} \\ &+ 1.70X_{311} \\ &\leq 2.0 * 2,000 \end{aligned}$$

### 9.1.4 결정변수의 Bounds 의 형성

위에서 형성된 제약조건으로서는 금광 문제에서 완전한 LP모형을 형성하였다고 볼 수 없다. 왜냐하면, 석회석의 재고량이 한정되어 있기 때문에 제약조건식에서 결정변수들이 해를 구하는데 제한을 받기 때문이다.

따라서, 생산자가 석회석 재고량을 사용하여 석회석을 운광함에 있어서 석회석의 한정된 재고량을 토대로 하고 있기 때문에 운광량에 관한 부차적인 제약조건이 성립될 수 있다. 예를들어 2,000톤의 석회석에 포함되는 “X<sub>111</sub>”은 1,000톤을 초과해서는 안된다. 즉,

$$0 \leq X_{111} \leq 1,000$$

이와같은 논리에 근거하여 결정변수의 Bounds는 다음과 같이 형성된다.

변 수 명	Lower bound	upper bound
X <sub>111</sub>	0	1,000
X <sub>112</sub>	100	700
X <sub>123</sub>	0	300
X <sub>212</sub>	450	700
X <sub>311</sub>	0	900

완전한 LP모형을 정리하면 다음과 같다.

목적함수 :

$$\begin{aligned} OBJ &= 1,200X_{111} + 890X_{112} + 1,100X_{123} \\ &+ 950X_{212} + 1,130X_{311} \end{aligned}$$

를 극소화 하라.

제약조건 :

$$X_{111} + X_{112} + X_{123} + X_{212} + X_{311} = 2,000$$

$$\begin{array}{lll}
 X_{111} + X_{112} + X_{123} & \leq 3,560 & 0 \leq X_{111} \leq 1,000 \\
 X_{111} + X_{112} & \leq 1,700 & 100 \leq X_{112} \leq 700 \\
 3,600 \leq 2.0X_{111} + 1.74X_{112} + 0.98X_{123} & & 0 \leq X_{123} \leq 300 \\
 \quad + 1.54X_{212} + 3.57X_{311} \leq 4,200 & & 450 \leq X_{212} \leq 700 \\
 3,000 \leq 1.89X_{111} + 0.67X_{112} + 2.19X_{123} & & 0 \leq X_{311} \leq 900 \\
 \quad + 1.10X_{212} + 1.70X_{311} \leq 4,000 & & 
 \end{array}$$

앞의 LP 모델을 Simplex Method 에 의해 풀면 최적해는 다음과 같다.

작업장명	최적해 (Ton)	대표품위		D/T 배차횟수 (35TON)
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	
X <sub>111</sub>	270.69	2.00	1.89	3회
X <sub>112</sub>	173.23	1.74	0.67	2회
X <sub>123</sub>	300.00	0.98	2.19	3회
X <sub>212</sub>	700.00	1.54	1.10	8회
X <sub>311</sub>	556.08	3.57	1.70	7회
계	2,000.00	2.1	1.5	

목적함수(OBJ) 값 : 2,102,372원



Basic Variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	RHS	Remarks		
	$X_{1,11}$	$X_{1,12}$	$X_{1,23}$	$X_{2,12}$	$X_{3,11}$	$x_5$	$x_8$	$x_{12}$	$x_{16}$	$\bar{x}_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$\bar{x}_6$	$x_7$	$x_9$	$x_{10}$	$x_{11}$	$\bar{x}_{13}$	$\bar{x}_{14}$	$\bar{x}_{15}$	$\bar{x}_{17}$	$x_{18}$				
Z	1200	890	1100	950	1130																			-9450M	Its iteration (initial feasible solution) Solution method: Big M method		
$\bar{x}_1$	4.89M	4.41M	5.17M	4.64M	6.27M	M		M	M	1														2,000			
$x_2$	1	1	1	1	1						1													3,560			
$x_3$	1	1	1	1	1							1												1,700			
$x_4$	2	1.74	0.98	1.54	3.57							1												4,200			
$\bar{x}_6$	2	1.74	0.98	1.54	3.57	-1																		3,600			
$x_7$	1.89	0.67	2.19	1.1	1.7										1									4,000			
$x_9$	1.89	0.67	2.19	1.1	1.7		-1									1								3,000			
$x_{10}$	1	1	1	1	1												1							1,000			
$x_{11}$	1	1	1	1	1													1						700			
$\bar{x}_{13}$	1	1	1	1	1			-1											1					100			
$\bar{x}_{14}$	1	1	1	1	1															1				300			
$x_{15}$	1	1	1	1	1																1			700			
$\bar{x}_{17}$	1	1	1	1	1																	1		450			
$x_{18}$	1	1	1	1	1																	1		900			
Z						M	M	M	M	M						0.81M		2.4M		3.2M						-2,102	last iteration (#4) (optimal solution)
$\bar{x}_1$						1.3	-0.1				1					-1.3	-4,260							372.09			
$x_2$						0.3	-0.1									-0.3	-0.4							1,63,236.75			
$x_3$						0.3	-0.1				1					-0.3	-0.4							1.6	75.15		
$x_4$						-0.5	1									0.5	0.8							1.6	553.5		
$x_{212}$						2.3	-0.6									-2.3	1.0							0.7	60.3		
$x_7$						-1.1	0.8									1.1	0.4							1.3	700		
$x_{111}$						-1.1	0.8									1.1	0.4							1.3	389.6		
$x_{10}$						0.3	-0.1									-0.3	-0.4							-1.4	270.7		
$x_{112}$																	1	-0.4						-1.4	100		
$\bar{x}_{13}$																									-0.1	173.2	
$x_{123}$																									776.2		
$x_{15}$						-3.1	0.8									3.0	1.0							1.0	300.0		
$\bar{x}_{17}$						-3.1	0.8									3.0	1.0							0.8	1,702.6		
$x_{311}$						1.0										1.0	1.0							0.8	543.2		
																								1	556.1		