

# 수치 해석적 방법을 통한 Bowl Liner의 마모에 관한 연구

정 영 덕

〈성신양회 (주)단양공장〉

## I. 서 론

#8 C/M과 #5 R/M의 Bowl liner 마모량은 기계 가동 여부에 중요한 영향을 미치는 요인중의 하나이며, trouble 발생시 보수기간이 길고 투입되는 인원 및 장비가 많은 바 연구할 가치가 있다고 판단되었다. 또한 매 운휴시마다 Bowl liner의 마모량을 check하는것은 시간 및 인력의 낭비뿐만 아니라 생산 및 운전시간에 많은 영향을 미치고 있어 직접 측정하는 것은 비효율적이라 판단되어 새로운 방법을 모색하던 끝에 운전시간 및 생산량만으로도 Bowl liner의 마모량을 계산할수 있는 새로운 방법의 도입을 고려하게 되었다. 따라서 본 연구를 심도있게 다룰 경우 측정시 투입되는 인원 및 운휴 시간의 감소로 mill가동을 최대로 할수 있어 생산성 향상에 기여 하리라 본다.

그러므로 본 연구의 주된 목적은 그동안 측정한마모의 data를 근거로 운전시간 및 생산량에 따른 마모량을 역으로 계산하여 직접 mill내부에서 측정하지 않더라도 현재의 마모량을 알수 있어 Bowl liner의 교환 시기 및 교환용 Bowl liner의 입고 시기등을 결정할 수 있어 불필요하게 발생될 비용의 절감 및 인력의 낭비를 미연에 방지하여 원가 절감에 기여할 수 있으리라 사료된다.

## II. 본 론

### 1) 의의

Bowl liner의 과도한 마모나 파손은 곧 Bowl의 파손을 초래할 우려가 있기 때문에 항상 관찰되고 점검되어야 할 중요한 부품이다. 그럼에도 불구하고 우리의 실정은 수치 측정이 불가능하고 운휴시 마모량 측정을 하더라도 정확한 측정이 되지 않는 등 불합리한 요인이 잔재해 있다. 또한, 측정 결과치를 신뢰할 수 있을 만큼의 다점측정이 곤란하고, 비록 실측을 한다 하더라도 최대 마모량의 위치나 값을 찾지 못하는 것이 현재의 실정이다. 그 원인으로는 첫째, Bowl과 Bowl liner사이의 공간이 협소하여 정확한 측정이 어렵다. 둘째, Bowl liner에 잔존해 있는 원료 등으로 인하여 최대 마모 위치를 찾을 수가 없다. 셋째, 정확한 측정을 위하여 mill을 공회전 시키고 깨끗하게 청소를 하여야 하나 인원의 부족 및 운전조건의 미비로 인하여 일이 제대로 추진되지 못하고 있다는 점이다.

### 2) C/M & R/M 용량 및 Liner 사양

	#8 C/M(VR-9)	#5 R/M(VR-6)
Power(KW)	3,800(10P)	1,500(10P)
생산량(t/h)	150	160
rpm	27.5	33
Bowl 직경(mm)	4,648	3,300
Tyre직경(mm)	2,340	
수량(EA)	12	
재질	Hi-Cr Cast Iron	
경도(HS)	90이상	
수명(hr)	8,000	
단가(천원/EA)	9,158	6,138

따라서, 이미 교환한 Bowl liner의 최대 마모량 및 마모의 경향을 측정한 후 그 data를 근거로 mill운전 시간 및 생산량을 통하여 Bowl liner의 최대 마모량의 값을 구함으로써 mill보수 유지에 기여토록 하고자 하였다.

3) 관련 이론

통계조사나 물리, 화학 및 공학문제에 대하여 실험이나 측정으로부터 얻어지는 값들은 일반적으로 오차를 내포하고 있다. 이와같이 오차를 내포하게 되는 원인으로는 측정시 포함되는 인적, 물적 영향 및 무작위 오차에 기인된다.

이러한 경우 측정값에 적합한 함수를 결정해야 할 필요성이 있다. 따라서 현재 측정치의 오차를 최소화 하고 앞으로 나타날 경향이나 임의 시점에 대한 값들을 예측 하기 위하여 하나의 실험식을 구해야 하는데 이러한 실험식을 구하기 위한 방법으로는 "Least square method"가 보편적이다. 따라서 본 연구에서도 이 방법을 이용하여 근사 함수를 구하였다. 이는 다른 방법(Chebyshev 다항식, Taylor 급수 등)에 비하여 구하고자 하는 함수의 전산화가 쉽고 값의 정도가 높으며, 일반 PC적용이 간단하기 때문이다.

① 최소 자승법 (Least square method)

최소자승법의 원리를 이용하여 측정한 data로부터 임의 차수의 다항식을 구할 수 있다. 차수가 N인 다항식은,

$$g(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (1-1)$$

각각의 data 와 식 (1-1)의 다항식으로 계산된 값의 편차는,

$$r_i = y_i - g(x_i), \quad i = 1, 2, \dots, L \quad (1-2)$$

위 식에서 L은 data 수이다. 모든 점에 대한 편차 제곱의 합 R 은,

$$R = \sum_{i=1}^L (r_i)^2 \quad (1-3)$$

다항식의 모든 계수에 대하여 R의 편미분 값을 취

하여 다음과 같이 영(Zero)으로 놓으면, R값을 최소화 할 수 있다.

$$\partial R / \partial a_n = 0, \quad n=0,1,2, \dots, N \quad (1-4)$$

식 (1-4)에 따라 식을 구하여 정리하면,

$$\begin{matrix} L & \sum x_i & \sum x_i^2 & \dots & \sum x_i^N & a_0 & \sum y_i \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \dots & \sum x_i^{N+1} & a_1 & = \sum x_i y_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum x_i^N & \sum x_i^{N+1} & \sum x_i^{N+2} & \dots & \sum x_i^{2N} & a_n & \sum x_i^N y_i \end{matrix} \quad (1-5)$$

계수  $a_n$  은 식(1-5)로 부터 가우스 소거법 (Gaussian Elimination)을 이용하여 값을 구하였다.

② Gauss 소거법

일반적으로 소거법으로는 Gauss 소거법, Gauss Jordan 소거법 등이 일반화되어 사용되고 있으나 Gauss소거법이 가장 많이 사용되고 있다. 그 원인으로는 연산 횟수가 짧아 PC적용이 용이하며, 다른 소거법에 비하여 결과치의 신뢰도가 높기 때문이다.

임의의 N개의 방정식과 미지수로 이루어진 다음의 식이 유일한 해를 갖는다고 하면,

$$\begin{matrix} a_{1,1} X_1 + a_{1,2} X_2 + a_{1,3} X_3 + \dots + a_{1,n} X_n = y_1 \\ a_{2,1} X_1 + a_{2,2} X_2 + a_{2,3} X_3 + \dots + a_{2,n} X_n = y_2 \end{matrix} \quad (1-6)$$

$$a_{n,1} X_1 + a_{n,2} X_2 + a_{n,3} X_3 + \dots + a_{n,n} X_n = y_n$$

이를 행렬을 이용하여 나타내면,

$$A = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} & \dots & a_{1,n} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} & \dots & a_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{n,1} & a_{n,2} & a_{n,3} & \dots & a_{n,n} \end{bmatrix} \quad (1-7)$$

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} \quad (1-8)$$

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (1-9)$$

와 같다. 이 때  $x_i$  는 미지수이며,  $y_i$  는 0이 아닌계수이다. A와 y의 행렬을

$$A/y = \begin{matrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} & \dots & a_{1,n} & y_1 \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} & \dots & a_{2,n} & y_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n,1} & a_{n,2} & a_{n,3} & \dots & a_{n,n} & y_n \end{matrix} \quad (1-10)$$

와 같이 구성하면  $Ax=y$  인 행렬관계식의 계수만 남는다. 이 행렬식을 다음과 같은 연산을 통하여 행렬에 영향을 미치지 않고 A/y 행렬을 수정 계산할 수 있다.

- 임의의 두 열 또는 행을 교환할 수 있다.
- 임의의 열 또는 행에 0이 아닌 상수를 곱하거나 나눌 수 있다.
- 0이 아닌 상수로 곱한 열을 다른 열에 가감할 수 있다.

위의 연산을 행하여도 유일해에는 영향을 미치지 않으며 이를 통하여 계수 행렬을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$x_N = y_N^{(N-1)} / a_{N,N}^{(N-1)}$$

$$x_{N-1} = [y_N^{(N-2)} - a_{N-1,N}^{(N-1)} x_N] / a_{N-1,N}^{(N-2)} \quad (1-11)$$

$$x_1 = [y_1 - \sum_{j=2}^N a_{1,j} x_j] / a_{1,1}$$

로 x도 미지수 값을 구할 수 있으며, 이와 같은 방법을 Gauss Elimination 이라고 한다.

(Gauss 소거법 알고리즘)

TO LINER SYSTEM OF  $Ax = y$

GIVEN n,A,B

FOR i = 1,2,3, ..., N-1

FOR K=i+1, ..., n

SET :  $m_{ki} = a_{ki} / a_{ii}$

FOR j = i+1, ..., n

SET :  $a_{ki} = a_{kj} - m_{ki} * a_{ij}$

SET :  $b_k = b_k - m_{ki} * a_i$

SET :  $x_n = b_n / a_{nn}$

FOR i = i-1, i-2, ..., 1

SET : SUM =  $b_i$

FOR J = i+1, ..., n

SET : SUM = SUM -  $a_{ij} x_j$

SET :  $x_i = \text{SUM} / a_{ii}$

#### 4) 측정 결과

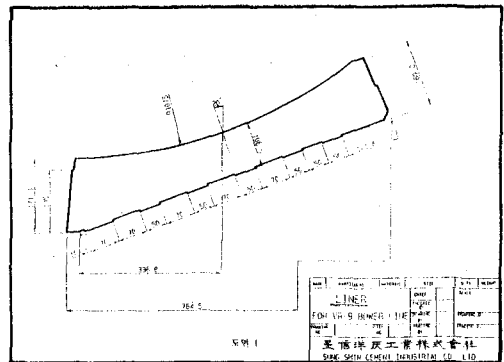
##### ① #8 C/M bowl liner 마모량 측정data 및 도면

- 사용 기간 : 1993. 5. 10 ~ 1994. 3. 18
- 총운전시간 : 8,038h 30min
- 총 생산량 : 1,201,110 Ton

단위: mm

위치 NO	0#	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	MAX	비고
1	0	59	87	85	56	15	3	0.5	0.2	91	8'C/M
2	0	53	81	78	48	13	4.5	2.5	1	82	"
3	0	44	66	59	28	6.5	1.5	0	0	68	"
4	0	44	69	62	40	11	2.4	0	0	69	"
5	0	47	70	69	48	11	2.5	0	0	72	"
6	0	35	57	55	33	8	2	0.2	0	60	"
7	0	44	65	60	40	11	1.5	0	0	65	"
8	0	41	68	71	41	10	2.3	0.4	0	71	"
9	0	50	73	70	41	10.5	2.2	0	0	73	"
10	0	52	82	83	57	11	2.2	0.2	0	83	"
11	0	58	79	81	62	16	3	0.2	0	81	"
12	0	54	79	75	45	10	2.5	0.2	0	80	"

\* 위 기간동안 사용한 Bowl liner의 마모량을 측정.



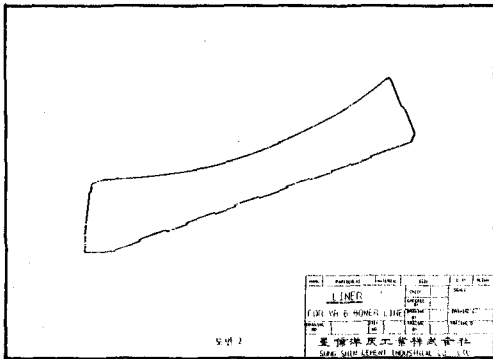
##### ② #5 R/M bowl liner 마모량 측정data 및 도면

- 사용 기간 : 1992. 2. ~ 1994. 2.
- 총운전시간 : 6,585 h 27min

• 총 생산량 : 1,036,236 Ton

위치 NO	0# 20	1# 115	2# 200	3# 285	4# 370	5# 445	6# 540	7# 625	8# 710	MAX	비고
1	0	2	13	24	39	50	47	30	9	0	5°C/M
2	0	2	8	15	30	42	38	20	4	0	"
3	0	2	6	15	25	36	33	20	5	0	"
4	0	2	15	28	41	49	42	25	6	0	"
5	0	2	11	21	35	42	35	19	4	0	"
6	0	2	12	23	35	43	38	20	4	0	"
7	0	2	9	19	31	38	35	21	4	0	"
8	0	2	8	16	28	39	36	21	5	0	"
9	0	2	15	30	47	51	41	20	4	0	"
10	0	2	9	18	30	34	30	16	2	0	"
11	0	2	14	26	41	48	45	29	8	0	"
12	0	2	9	18	31	41	36	20	4	0	"

\* 위 기간동안 사용한 Bowl liner의 마모량을 측정.



5) 이론적 해석 결과

① #8 C/M bowl liner 마모경향 (5차) 및 마모량(2차) 함수식

0	-22.40051	0	-5.147769E-05
1	.2995383	1	9.983368E-03
2	6.230624E-03	2	1.694395E-07
3	-3.58324E-05		
4	6.244015E-08		
5	-3.537669E-11		

② #5 R/M bowl liner 마모경향 (5차) 및 마모량 (1차) 함수식

0	1.849074	0	-4.745274E-06
1	-1.1033208	1	7.744288E-03
2	8.596264E-04		
3	8.750021E-07		
4	-5.995997E-09		
5	4.7165E-12		

6) 해 석

앞에서 이미 측정된 data값과 computer에 의한 계산한 값과의 오차 범위는 3% 이내의 미소한 차이를 나타내고 있으며, 이 범위의 오차는 공학에서 일반적으로 통념화되어 있는 오차범위인 5%에도 크게 미치지 않으므로 상당히 정확한 계산임이 입증되었다. 특히 현재 사용중인 bowl liner의 마모량의 값과 계산에 의하여 구한 값과의 차 또한 3%이내의 오차만을 포함하고 있다. 따라서 본 논문에서 사용한 "Least square method 법"을 이용한 "Curve fitting" program은 매우 적합한 선택이라고 사료된다.

〈그림 1〉은 #8 C/M bowl liner의 마모 경향을 측정된 값이며 #5 R/M에 대해서도 같은 방법으로 〈그림 2〉에 나타냈다. 이는 측정된 값과 program 계산에 의하여 구한 값을 그래프로 나타낸 것이다.

〈그림 3〉은 #8 C/M bowl liner의 마모량을 시간(일) 별로 나타낸 그래프로써 결과치의 차이가 없음을 알 수 있다.

다음 〈그림 4〉에 나타낸 그래프는 #5 R/M bowl liner의 마모량을 나타낸 것이다.

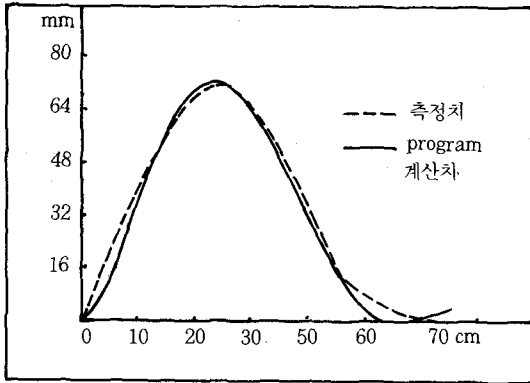
III. 결 론

Gauss 소거법에 의한 함수의 근사 계산 (Curve/Fitting)으로 부터 다음과 같은 차수의 함수를 구하였다.

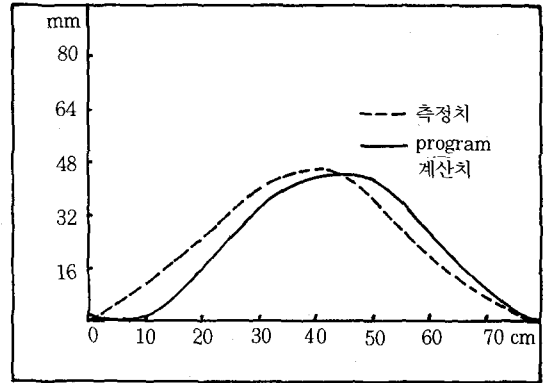
$$Y1 = A1 + B1X + C1X^2 + D1X^3 + E1X^4 + F1X^5 \quad (1-12)$$

$$Y2 = A2 + B2X + C2X^2 \quad (1-13)$$

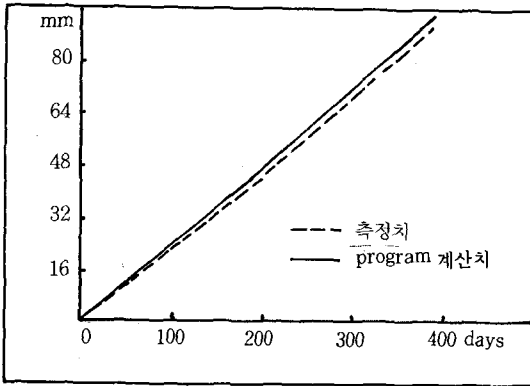
여기서 A, B, ..., F는 함수의 상수로써 수치해석 프로그램에 의하여 결정되어지며, 여기서 함수식(1-12,13)의 차수를 2, 5차로 결정한 것은 bowl liner의



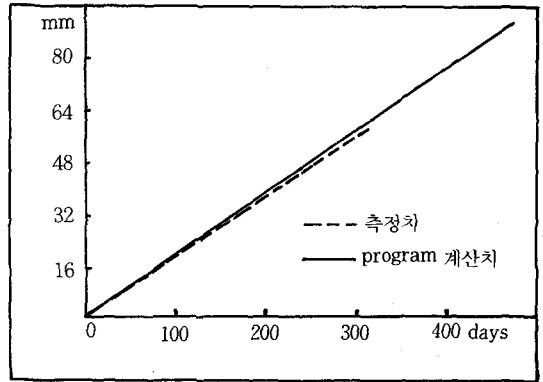
〈그림. 1〉 #8 C/M Bowl liner 마모경향



〈그림. 2〉 #5 R/M Bowl liner 마모경향



〈그림. 3〉 #8 C/M Bowl liner 마모량



〈그림. 4〉 #5 R/M Bowl liner 마모량

마모특성이 고려된 최적의 함수이기 때문이다.

따라서 program에 의하여 계산되어진 마모량에 대한 결과 값으로 부터 다음과 같은 결론을 얻을수 있다.

- ① Mill 운전 시간이나 생산량을 안다면 Bowl liner의 마모량을 알 수 있다.
- ② Bowl liner의 취약 부위 및 최대 마모량의 위치를 알 수 있다.
- ③ Bowl liner의 마모량 및 취약 부위를 결정 할 수 있으므로 대책 및 보수 자재의 관리나 수급을 계획 적으로 할 수 있다.
- ④ 측정이나 점검에 드는 인건비를 절감 할 수 있어 원가절감에 기여하리라 본다.

〈참 고 문 헌〉

1. 수치해석 (보문당, 백태현, 정학기 공저, pp86~91, pp125~133.)
2. 수치해석 (정익사, 박재년 저, pp79~85, pp232~253.)
3. Numerical Methods (Hall int' inc., John H. Mathews 저 PP 135 ~ 146, PP 160~162, PP 214~263.)
4. 도면(01 RM 01 - 0005) 5# R/M Bowl liner Segment
5. 도면 (01 FM 01-0003 ) 8# C/M Bowl liner Segment