

제 5장 동특성의 파라미터 설계

개 요

- 파라미터 설계란?

산포를 최소화하고 동시에 비용을 절감시킬 수 있기 때문에 제품 성능과 품질 향상을 위한 중요한 해결 방법 중 하나

- 실제 사례를 검토해 가며 동특성(dynamic characteristics)을 선정한 프로젝트의 파라미터 설계 과정의 단계들에 초점을 맞추어 각 단계를 살펴본다. 특히 다음 절차에 대해 체계적으로 습득한다.

- 동특성 로버스트 설계의 형식화
- 노이즈 인자 전략
- 제어 인자들을 위한 직교표 사용
- 동특성 로버스트 설계의 분석

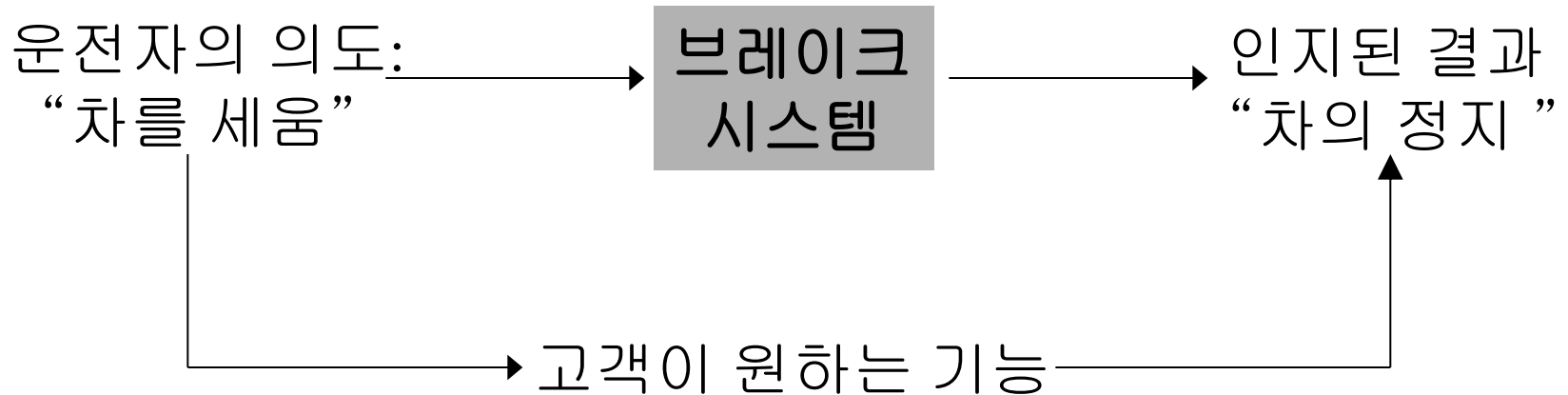
목 적

- 동특성을 사용한 로버스트 설계 연구의 형식화와 분석
- 파라미터 설계의 8-단계를 동특성 프로젝트에 적용
- 다음에 나열한 파라미터 설계 과정의 완성
 - 동특성 S/N 비 계산
 - 반응표 작성
 - 2- 단계 최적화 적용
 - 추정
 - 확인 실험의 결과 해석

제품 기술 사례 : 자동차 브레이크

1 단계. 프로젝트의 범위 결정

- 시스템이 아주 클 때에는 보통 한 개의 하부시스템에서 로바스트 설계를 수행하는 것이 효과적
- 브레이크 시스템 중에서 결정적인 하부 시스템
패드/로타 (**Pad/Rotor**) 하부시스템에 중점
(상당한 에너지 전환)



(그림 1) 브레이크 시스템

2 단계. 이상 기능 규명 - 무엇을 측정할까?

- 이 하부 시스템에서의 에너지 전환 :
 - 브레이크 line 이 압력을 caliper 에 보낸다.
 - 압력이 패드를 로타 쪽으로 밀어 낸다.
 - 패드가 마찰을 일으킨다.
 - 마찰이 열을 발생시켜 방산(dissipate)한다.
 - 마찰이 braking torque를 발생시킨다.

입력신호 :
 $M = \text{Line 압력}$



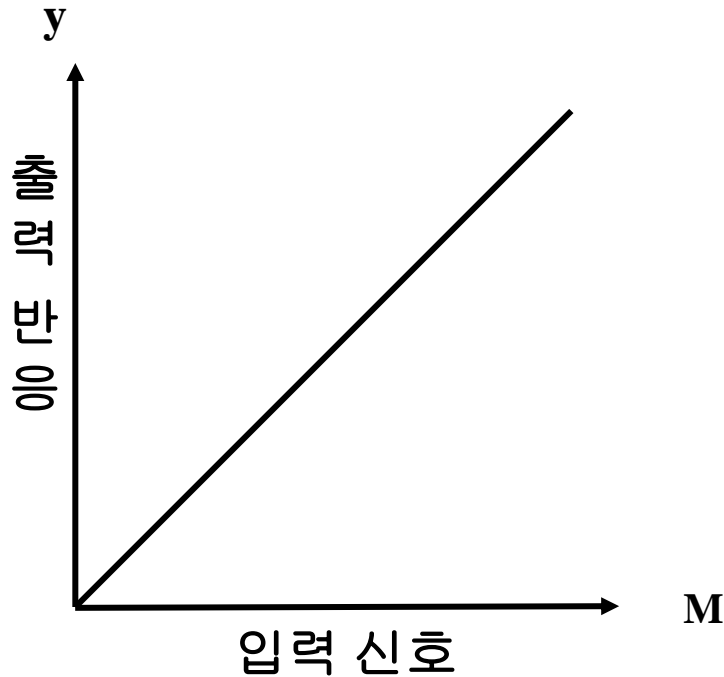
Caliper
Pad
Rotor

출력 반응 :
 $y = \text{Braking Torque}$



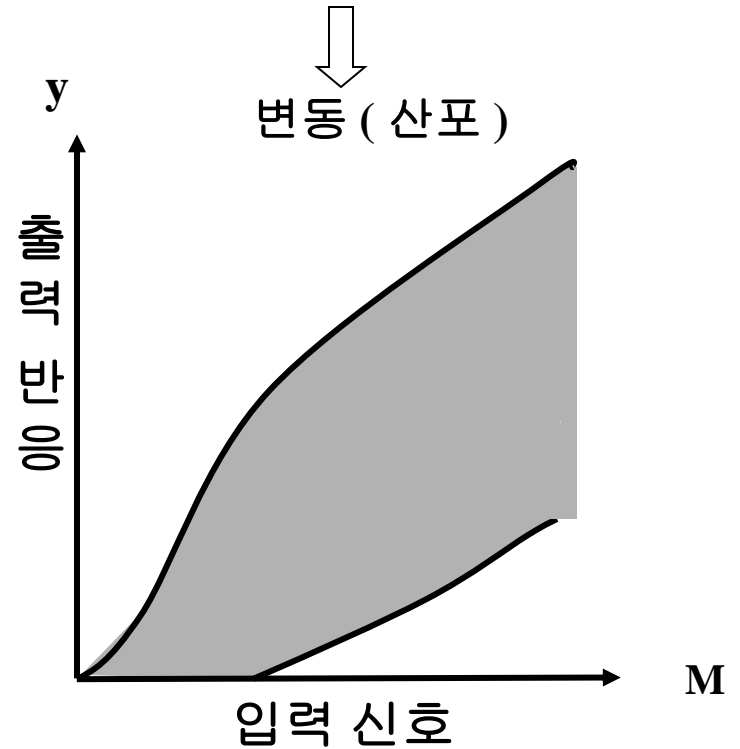
이상 기능

$$y = \beta M$$



현실

$$y = \beta M + f \text{ (노이즈 인자들)}$$



(그림 2) 이상 기능과 현실

3 단계. 신호와 노이즈 전략의 개발

- 신호인자와 수준

- 실험의 범위와 이상 기능을 결정
- 신호와 노이즈들을 실험에서 어떻게 변화 시킬 지를 결정
(신호 인자의 수준들을 현재 제품과 미래제품 전체의 사용 조건을 포함시킴)

- 브레이크 사례에서 선택한 신호 수준들:

M = 브레이크 Line 압력 (Kg/mm²)

M₁ = 0.008 M₂ = 0.016 M₃ = 0.032 M₄ = 0.064

• 노이즈 인자들과 수준들

패드/로타 하부 시스템의 노이즈 인자들

환 경

패드 온도
Wheels/Tires

주행 기록
염화 칼슘/부스러기

습기
기타

열화/마모

패드 마모

로타 마모

기타

제조 산포

로타 Runout
Lot 간의 산포

로타 평면 조도
기타

조립 산포

- 몇 개의 중요한 노이즈 인자들을 조합해서 N_1 , N_2 두 노이즈 조건으로 만든다.

N_1 = 반응이 작게 되려는 경향이 있는 노이즈 조건

N_2 = 반응이 크게 되려는 경향이 있는 노이즈 조건

- 노이즈 인자들은 2 수준으로 조합 된다.

N_1 = 60 F°/ 습함 / 80% 마모된 패드

N_2 = 360 F°/ 건조함 / 10 % 마모된 패드

- 이 노이즈 인자 (N)는 사용, 환경, 열화의 노이즈 조건을 대표
- 이 노이즈 (N)에 대해 가장 로버스트 한 설계는 모든 다른 노이즈들에 대해서도 가장 로버스트 할 것임.

- 또 다른 중요한 노이즈 인자 :

발생한 torque 는 차가 제동 중 변하지 않아야 한다.

- 로타 runout 과 온도 차이 (로타나 패드 내) 로 인해 차가 제동 중에 torque 가 변화
이 현상으로 인해 또 다른 노이즈 인자 (Q) 를 고려

Q : 차가 제동 중의 torque

Q_1 = 차가 제동 중의 최대 torque

Q_2 = 차가 제동 중의 최소 torque

- 신호와 노이즈 수준의 16개 조합을 채울 torque 를 측정해서 기록

	M_1	M_2	M_3	M_4
N_1Q_1				
N_1Q_2				
N_2Q_1				
N_2Q_2				

(그림 3) 데이터 매트릭스

4 단계. 제어 인자와 수준 결정

- 브레인스토밍을 통해서 패드와 로타의 설계 파라미터들 중에서 제어 인자들과 수준을 결정

제어 인자	수준 - 1	수준-2	수준-3
A : 패드 재료	Type-1	Type-2	
B : 패드 모양	4	5	6
C : 패드 곡선 모양	Type-1	Type-2	Type-3
D : 패드 첨가물	Low	Medium	High
E : 로타 재료	Gray	Cast	Steel
F : 패드 Taper	Low	Medium	High
G : Tapering 두께	Low	Medium	High
H : 로타 구조	Type-1	Type-2	Type-3

(그림 4) 제어 인자와 수준

		A B C D E F G H 1 2 3 4 5 6 7 8								M ₁ : 0.008				M ₂ : 0.016				M ₃ : 0.032				M ₄ : 0.064				
										N ₁		N ₂		N ₁		N ₂		N ₁		N ₂		N ₁		N ₂		
		Q ₁	Q ₂	Q ₁	Q ₂	Q ₁	Q ₂	Q ₁	Q ₂	Q ₁	Q ₂	Q ₁	Q ₂	Q ₁	Q ₂	Q ₁	Q ₂	Q ₁	Q ₂							
1		1	1	1	1	1	1	1																		
2		1	1	2	2	2	2	2																		
3		1	1	3	3	3	3	3																		
4		1	2	1	1	2	2	3	3																	
5		1	2	2	2	3	3	1	1																	
6		1	2	3	3	1	1	2	2																	
7		1	3	1	2	1	3	2	3																	
8		1	3	2	3	2	1	3	1																	
9		1	3	3	1	3	2	1	2																	
10		2	1	1	3	3	2	2	1																	
11		2	1	2	1	1	3	3	2																	
12		2	1	3	2	2	1	1	3																	
13		2	2	1	2	3	1	3	2																	
14		2	2	2	3	1	2	1	3																	
15		2	2	3	1	2	3	2	1																	
16		2	3	1	3	2	3	1	2																	
17		2	3	2	1	3	1	2	3																	
18		2	3	3	2	1	2	3	1																	

(그림 5) 실험 배치

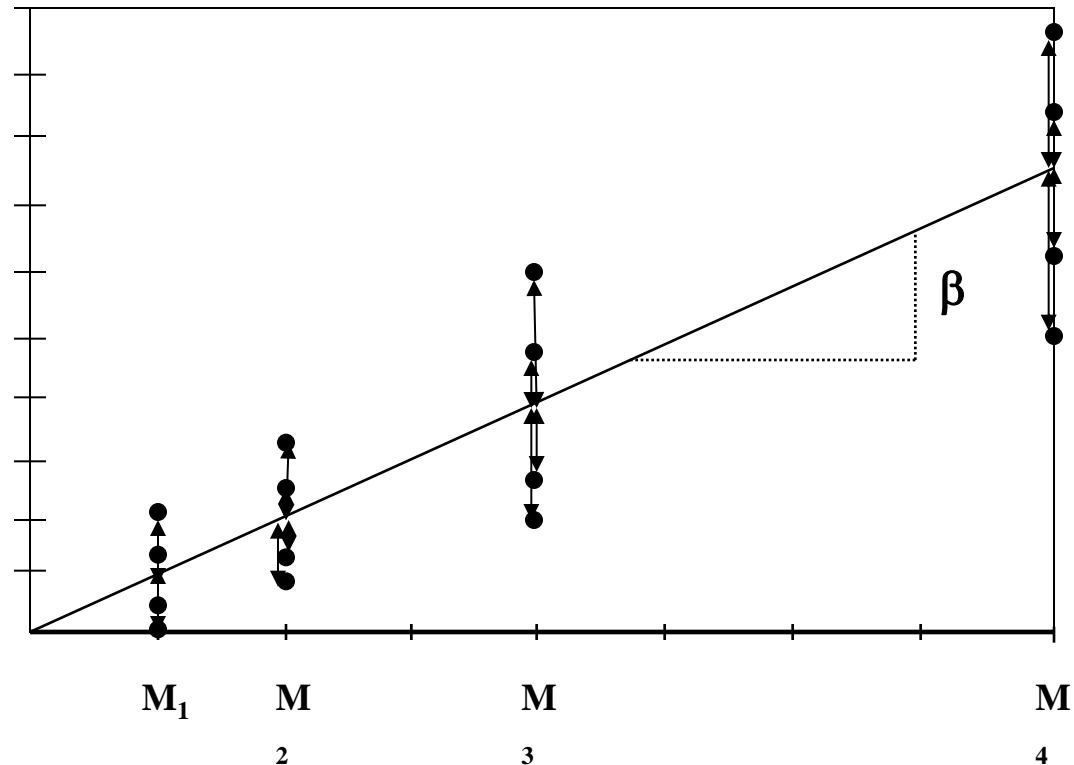
5 단계. 실험 수행 및 데이터 수집

	A B C D E F G H 1 2 3 4 5 6 7 8	M ₁ : 0.008				M ₂ : 0.016				M ₃ : 0.032				M ₄ : 0.064			
		N ₁		N ₂		N ₁		N ₂		N ₁		N ₂		N ₁		N ₂	
		Q ₁	Q ₂	Q ₁	Q ₂	Q ₁	Q ₂	Q ₁	Q ₂	Q ₁	Q ₂	Q ₁	Q ₂	Q ₁	Q ₂	Q ₁	Q ₂
1	1 1 1 1 1 1 1 1	4.8	0.9	5.8	0.8	8.5	6.5	11.5	6.8	20.4	13.2	25.0	16.2	36.9	32.7	43.5	34.5
2	1 1 2 2 2 2 2 2	4.5	2.5	5.7	3.2	12.5	9.6	13.0	10.0	23.5	20.3	25.1	21.4	42.0	36.0	43.2	36.1
3	1 1 3 3 3 3 3 3	5.9	5.2	6.8	5.9	10.6	9.3	11.4	10.2	23.5	22.0	24.3	22.5	42.9	40.3	43.8	40.6
4	1 2 1 1 2 2 3 3	4.5	2.1	5.7	3.0	12.1	8.9	14.3	10.5	22.1	16.9	24.2	20.0	41.0	34.0	42.4	37.6
5	1 2 2 2 3 3 1 1	6.5	2.1	7.8	3.2	12.3	6.9	13.2	8.6	23.3	17.2	24.3	18.3	44.3	36.9	48.9	37.2
6	1 2 3 3 1 1 2 2	5.0	4.2	5.8	4.3	11.5	9.4	12.3	9.9	20.8	16.8	21.0	18.5	43.0	40.2	43.1	41.0
7	1 3 1 2 1 3 2 3	5.2	4.0	5.6	4.5	11.8	9.1	12.3	10.1	21.2	17.5	20.0	18.3	40.3	36.2	42.2	38.2
8	1 3 2 3 2 1 3 1	2.4	0.0	4.3	2.8	6.7	4.0	7.2	3.6	16.3	11.1	18.3	12.3	30.1	27.8	34.3	30.6
9	1 3 3 1 3 2 1 2	6.3	4.8	7.8	6.1	12.1	9.3	13.5	11.9	24.4	19.6	26.3	22.3	48.5	40.3	50.2	44.0
10	2 1 1 3 3 2 2 1	2.1	0.0	2.9	0.0	4.9	0.0	7.4	4.2	18.3	9.5	17.7	10.8	32.0	26.3	35.3	28.1
11	2 1 2 1 1 3 3 2	4.9	1.2	7.6	1.8	11.3	6.5	15.3	6.8	23.4	15.0	25.1	17.2	40.1	33.2	50.5	35.5
12	2 1 3 2 2 1 1 3	5.1	4.4	6.4	4.4	10.1	7.8	11.2	8.5	21.7	18.7	22.1	20.1	43.1	41.2	44.4	41.5
13	2 2 1 2 3 1 3 2	2.1	0.0	5.4	0.6	6.7	1.2	7.3	2.3	13.4	9.4	16.4	11.1	38.9	27.9	43.3	31.1
14	2 2 2 3 1 2 1 3	5.9	5.0	6.8	5.2	13.3	12.0	14.2	13.3	24.9	23.1	26.3	25.4	47.9	46.3	49.7	47.2
15	2 2 3 1 2 3 2 1	3.2	0.0	3.9	1.8	8.7	3.2	9.6	5.1	13.2	7.9	19.5	11.1	38.2	32.1	42.5	33.0
16	2 3 1 3 2 3 1 2	4.1	2.7	5.9	4.4	12.3	8.7	13.7	9.2	24.3	18.9	25.5	20.2	44.3	39.0	47.7	42.4
17	2 3 2 1 3 1 2 3	2.3	0.8	3.2	2.1	10.2	8.0	12.5	8.8	21.6	16.5	23.6	20.4	38.8	32.4	41.1	36.6
18	2 3 3 2 1 2 3 1	1.2	0.0	5.1	1.2	7.8	2.3	13.0	5.0	20.3	11.1	21.2	12.4	40.1	31.6	45.1	32.0

(그림 6) 실험 데이터

6 단계. 데이터 분석 실행

- S/N 비와 감도 계산
 - L18 직교표의 매 실험마다 16개의 측정치를 갖고 S/N 비와 감도 (β) 를 계산



(그림 7) S/N 비와 감도

$$\begin{aligned}
 \mathbf{S/N} &\longrightarrow \frac{\mathbf{Useful\ output}}{\mathbf{Harmful\ output}} \\
 &\longrightarrow \frac{\mathbf{Linear\ relationship\ between\ M\ and\ y}}{\mathbf{Variability\ around\ the\ linear\ relationship}} \\
 &\longrightarrow \frac{\beta^2}{\sigma^2}
 \end{aligned}$$

β = best - fit 선의 기울기
 → 감도 (예 : 브레이크 시스템의)
 → 효율 (예 : 엔진의)

- 동특성 S/N비

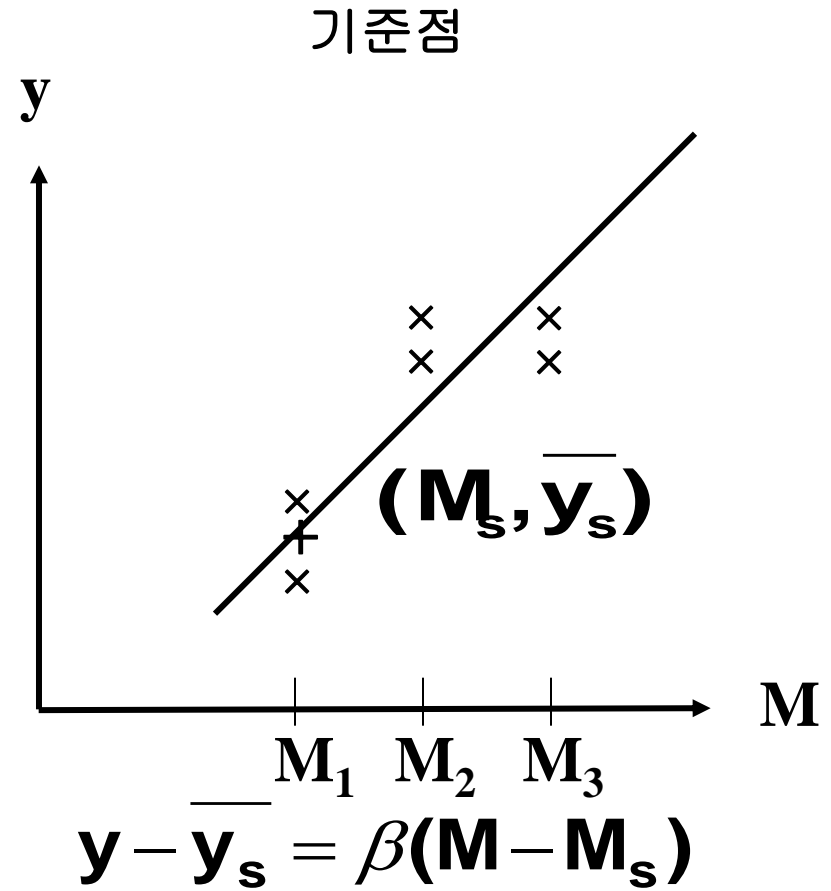
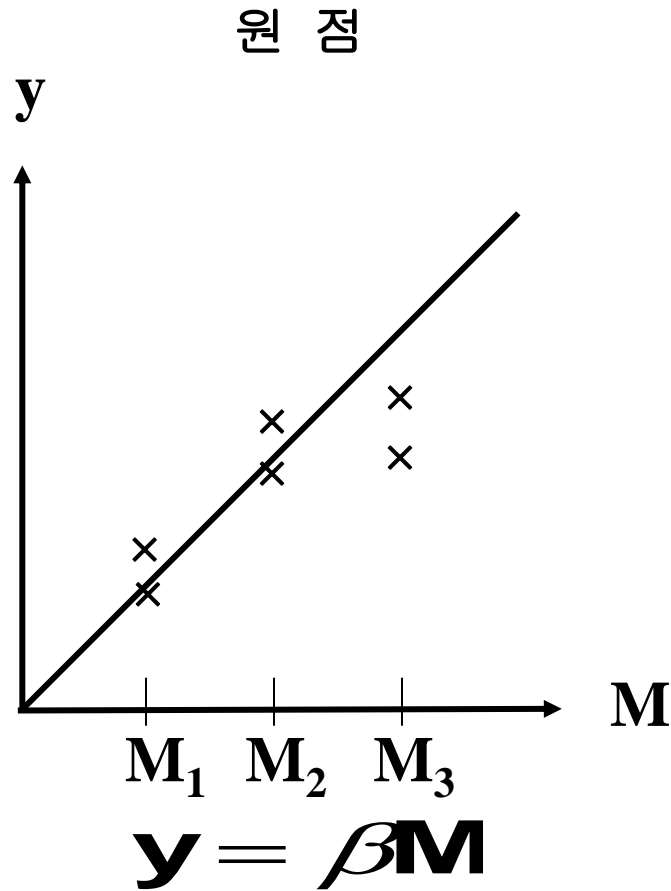
- 동특성 출력 분석에는 두 종류의 S/N비

- 원점 (**Zero point**) 비례식

- 기준점 (**Reference point**) 비례식

- 비례식에서의 이상 기능은 원점(0,0) 을 통과
- 이상 기능이 원점을 지나지 않으면 가법성과 재현성이 있는 결과가 나타나지 못할 수가 있다.

- 이상 기능이 원점을 통과할 때 원점 비례식과 기준점 비례식 둘 다 사용
- S/N비들은 β 효과와 σ 효과 간의 관계를 평가
- β 는 기준점을 통과하는 **best-fit** 선의 기울기
(원점 비례식의 경우에는 기준점이 원점)
- 응용범위가 원점에서 떨어져 있을 때에는 (원점에서 떨어진)
응용 범위 안에 기준점을 두는 것이 현실적이고 **best-fit**선은
이 기준점을 통과



- 브레이크 시스템에서는 원점 주위의 응용이 중요하기 때문에 원점 비례식 S/N 비가 분석에 사용

(그림 8) 원점과 기준점

● 원점 비례식

- 원점 비례식은 **best-fit** 선이 원점을 통과
- 18개의 실험에서 매 실험마다 16개의 데이터 점들

	$M_1=0.008$	$M_2=0.016$	$M_3=0.032$	$M_4=0.064$
N_1Q_1	y_{11}	y_{12}	y_{13}	y_{14}
N_1Q_2	y_{21}	y_{22}	y_{23}	y_{24}
N_2Q_1	y_{31}	y_{32}	y_{33}	y_{34}
N_2Q_2	y_{41}	y_{42}	y_{43}	y_{44}

(그림 9) 데이터 매트릭스

- 각 노이즈 조건에 대한 선형식

$$\mathbf{L}_1 = \mathbf{M}_1\mathbf{y}_{11} + \mathbf{M}_2\mathbf{y}_{12} + \mathbf{M}_3\mathbf{y}_{13} + \mathbf{M}_4\mathbf{y}_{14}$$

$$\mathbf{L}_2 = \mathbf{M}_1\mathbf{y}_{21} + \mathbf{M}_2\mathbf{y}_{22} + \mathbf{M}_3\mathbf{y}_{23} + \mathbf{M}_4\mathbf{y}_{24}$$

$$\mathbf{L}_3 = \mathbf{M}_1\mathbf{y}_{31} + \mathbf{M}_2\mathbf{y}_{32} + \mathbf{M}_3\mathbf{y}_{33} + \mathbf{M}_4\mathbf{y}_{34}$$

$$\mathbf{L}_4 = \mathbf{M}_1\mathbf{y}_{41} + \mathbf{M}_2\mathbf{y}_{42} + \mathbf{M}_3\mathbf{y}_{43} + \mathbf{M}_4\mathbf{y}_{44}$$

- 입력(신호 인자 수준들) 제공의 합

$$\mathbf{r} = \mathbf{M}_1^2 + \mathbf{M}_2^2 + \mathbf{M}_3^2 + \mathbf{M}_4^2$$

- 총 (모든 데이터 점들의) 제공의 합

$$S_T = \sum_{i=1}^{r_0} \sum_{j=1}^k y_{ij}^2 \quad \left[\begin{array}{l} r_0 = \text{선형식의 숫자} \\ k = \text{신호 인자 수준의 숫자} \end{array} \right]$$

- S_T 는 다음의 구성 요소로 분해

$$S_T = S_\beta + S_{\beta \times N} + S_e$$

- 원점 best-fit 선의 기울기로 인한 제공의 합 (즉 β 효과)

$$S_\beta = \frac{(\mathbf{L}_1 + \mathbf{L}_2 + \mathbf{L}_3 + \mathbf{L}_4)^2}{\mathbf{r} \times \mathbf{r}_0}$$

- 노이즈 수준간 기울기 차이로 인한 제곱의 합 (즉 노이즈 효과)

$$S_{B \times N} = \frac{L_1^2 + L_2^2 + L_3^2 + L_4^2}{r} - S_B$$

- best-fit 선 주위에 있는 변동으로 인한 제곱의 합(즉 lack of fit)

$$S_e = S_T - (S_B + S_{B \times N})$$

- 노이즈와 lack-of-fit으로 인한 평균제곱

$$V_N = \frac{S_{B \times N} + S_e}{r_0 \times k - 1}$$

- lack-of-fit으로 인한 평균제곱

$$V_e = \frac{S_e}{r_0 \times (k - 1)}$$

- dB로 표시한 **S/N** 비와 **β** 는

$$\mathbf{S} / \mathbf{N} = \eta_{\text{dB}} = 10 \times \log \frac{\frac{1}{r \times r_0} (S_{\beta} - V_e)}{V_N}$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{r \times r_0} (S_{\beta} - V_e)}$$

- L_{18} 의 1번 실험 데이터를 사용한 계산 예

	$M_1=0.008$	$M_2=0.016$	$M_3=0.032$	$M_4=0.064$
N_1Q_1	4.8	8.5	20.4	36.9
N_1Q_2	0.9	6.5	13.2	32.7
N_2Q_1	5.8	11.5	25.0	43.5
N_2Q_2	0.8	6.8	16.2	34.5

- 선형식

$$L_1 = 0.008(4.8) + 0.016(8.5) + 0.032(20.4) + 0.064(36.9) = 3.1888$$

$$L_2 = 0.008(0.9) + 0.016(6.5) + 0.032(13.2) + 0.064(32.7) = 2.6264$$

$$L_3 = 0.008(5.8) + 0.016(11.5) + 0.032(25.0) + 0.064(43.5) = 3.8144$$

$$L_4 = 0.008(0.8) + 0.016(6.8) + 0.032(16.2) + 0.064(34.5) = 2.8416$$

- 입력의 제곱의 합

$$r = 0.008^2 + 0.016^2 + 0.032^2 + 0.064^2 = 0.00544$$

- 총제곱의 합과 그 분해

$$S_T = 4.8^2 + 0.9^2 + 5.8^2 + 0.8^2 + 8.5^2 + \cdots + 34.5^2 = 7342.36 \quad (f = 16)$$

$$S_B = \frac{(3.1888 + 2.6264 + 3.8144 + 2.8416)^2}{4 \times 0.00544} = 7147.5565 \quad (f = 1)$$

$$S_{B \times N} = \frac{3.1888^2 + 2.6264^2 + 3.8144^2 + 2.8416^2}{0.00544} - S_B = 148.5391 \quad (f = 3)$$

$$S_e = 7342.36 - (7147.5565 + 148.5391) = 46.2644 \quad (f = 12)$$

- 분산 (평균 제곱)

$$V_N = \frac{148.5391 + 46.2644}{15} = 12.9869$$

$$V_e = \frac{46.2644}{12} = 3.8544$$

- S / N 비와 β

$$S / N = \eta_{dB} = 10 \times \log \frac{\frac{1}{4 \times 0.00544} (7147.5565 - 3.8554)}{12.9869}$$

$$= 44.03 \text{ dB}$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{4 \times 0.00544} (7147.5565 - 3.8554)}$$

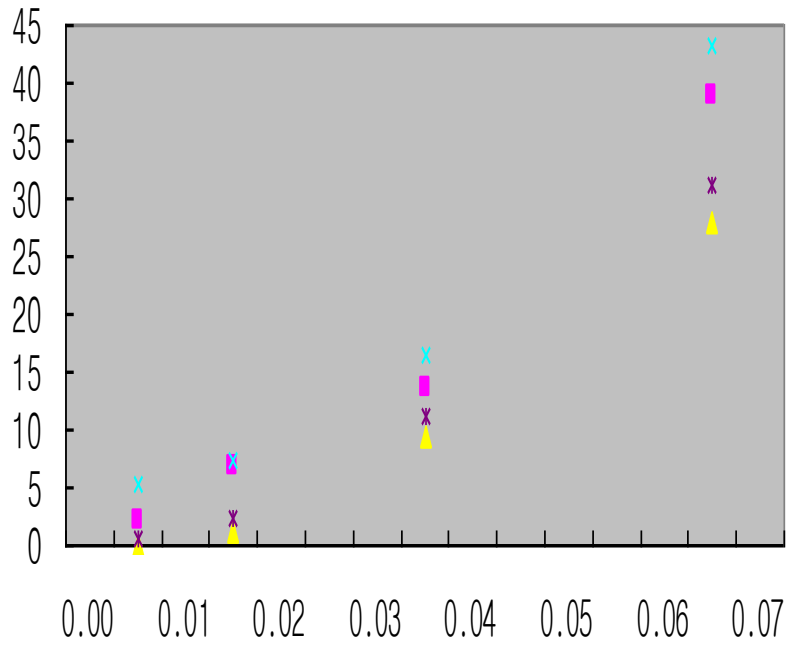
$$= 572.97$$

<다음 표를 완성하십시오>

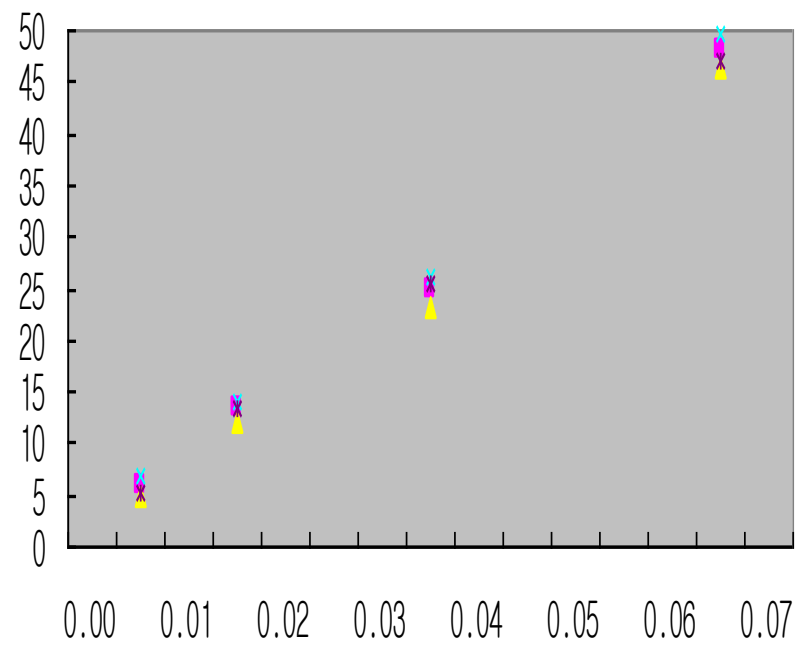
	A 1	B 2	C 3	D 4	E 5	F 6	G 7	H 8	S / N 비	β
1	1	1	1	1	1	1	1	1	44.03	573.12
2	1	1	2	2	2	2	2	2	47.41	634.44
3	1	1	3	3	3	3	3	3	53.21	667.94
4	1	2	1	1	2	2	3	3	46.91	617.53
5	1	2	2	2	3	3	1	1	45.28	651.61
6	1	2	3	3	1	1	2	2	52.45	644.22
7	1	3	1	2	1	3	2	3	51.35	613.64
8	1	3	2	3	2	1	3	1	44.96	465.77
9	1	3	3	1	3	2	1	2	48.88	718.01
10	2	1	1	3	3	2	2	1	41.55	454.70
11	2	1	2	1	1	3	3	2	42.44	622.24
12	2	1	3	2	2	1	1	3	53.29	657.16
13	2	2	1	2	3	1	3	2	39.04	489.81
14	2	2	2	3	1	2	1	3	55.34	755.91
15	2	2	3	1	2	3	2	1	41.45	527.68
16	2	3	1	3	2	3	1	2	48.45	679.30
17	2	3	2	1	3	1	2	3	46.30	590.81
18	2	3	3	2	1	2	3	1	41.23	556.65

(그림 10) S / N 비와 감도

Result of No.13



Result of No.14



(그림 11) 데이터 타점

- 반응표 완성 및 해석 : S/N 비와 감도에 대한 반응표
(망목 특성 분석과 유사점이 많은 것에 유의)

반응표 S / N 비 $\bar{T} = 46.92$ <다음 표를 완성하십시오>

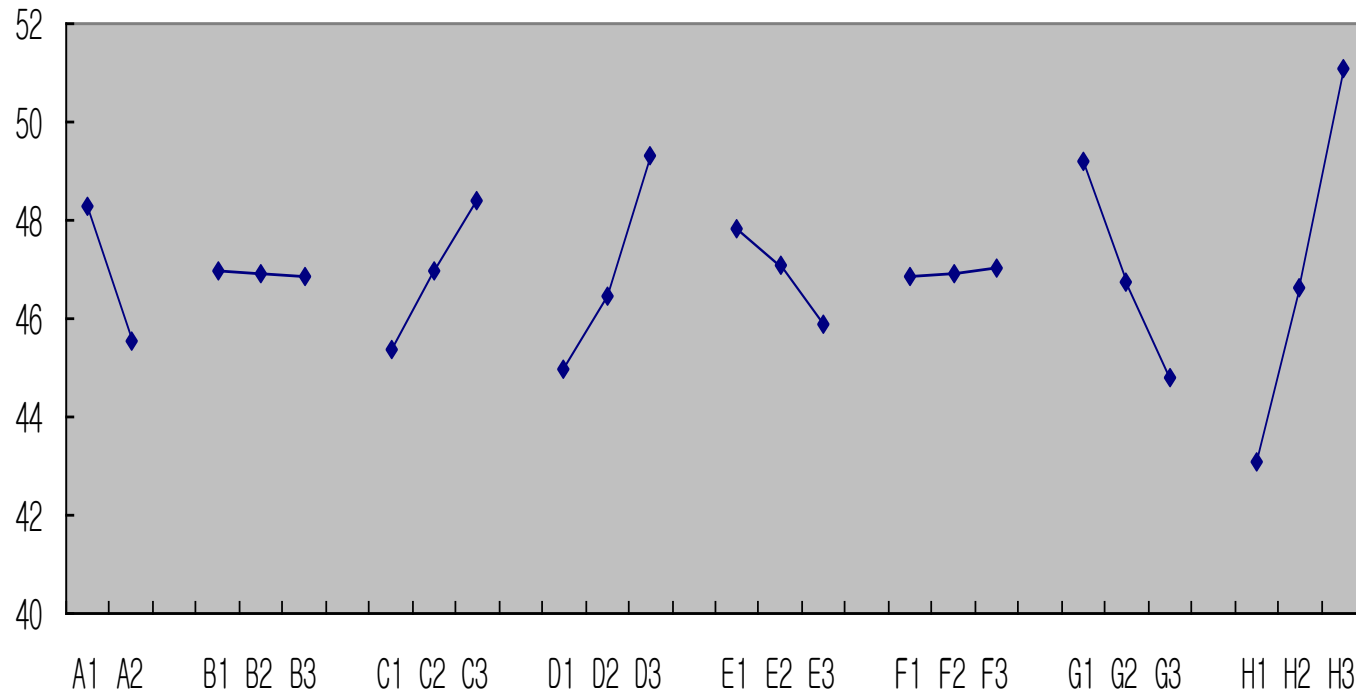
수준	A	B	C	D	E	F	G	H
1	48.28	46.99		45.00	47.81	46.84	49.21	43.08
2	45.56	46.91		46.43	47.08	46.89	46.75	46.61
3		46.86		49.33	45.87	47.03	44.80	51.07
Δ	2.71	0.13	3.04	4.33	1.94	0.19	4.42	7.98
순위	5	8	4	3	6	7	2	1

반응표 β $\bar{T} = 607.4$ <다음 표를 완성하십시오>

수준	A	B	C	D	E	F	G	H
1	620.6		573.7	608.1	627.5	572.5	672.5	538.0
2	594.1		620.0	602.9	596.8	622.7	577.4	633.7
3			628.4	611.2	597.8	626.9	572.3	650.4
Δ	26.5	15.3	54.8	8.3	30.7	54.4	100.2	112.5
순위	6	7	3	8	5	4	2	1

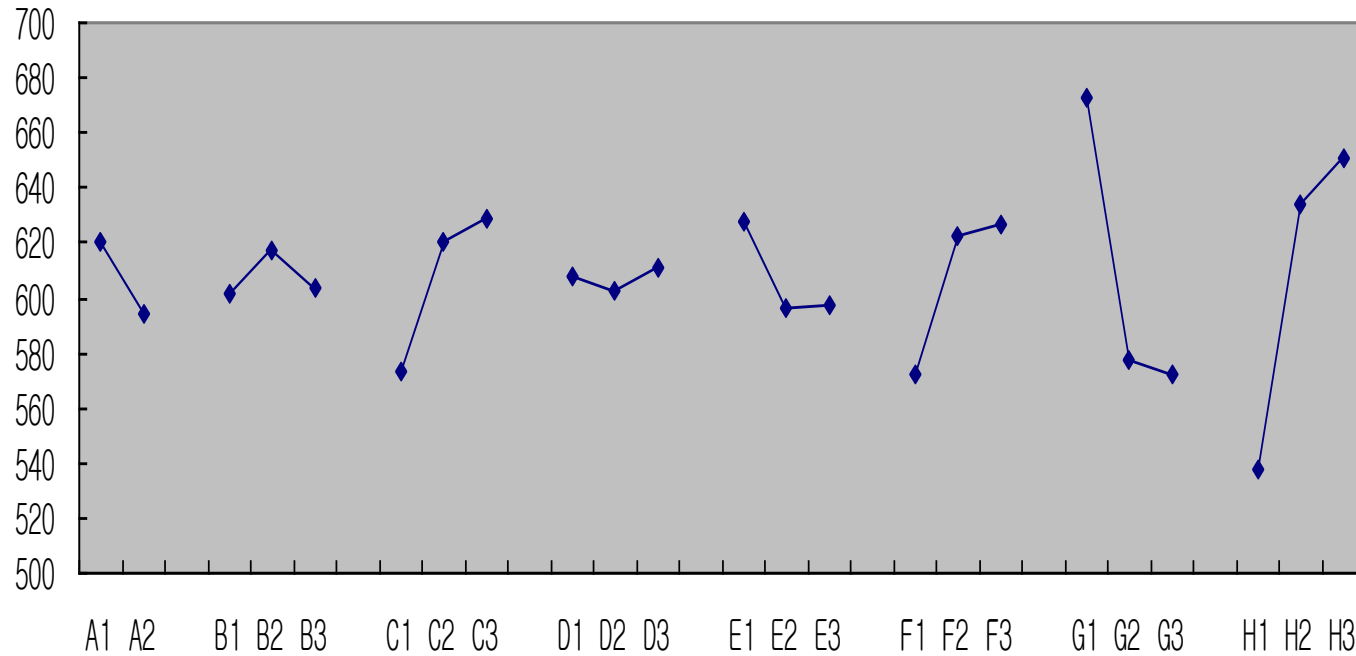
(그림 12) 반응표

S/N 반응 그래프



(그림 13.1) S/N 비 반응 그래프

반응 그래프



(그림 13.2) B 반응 그래프

• 2-단계 최적화 실행

: 두 반응표에서 각 제어인자가 S/N 비와 감도에 미치는 영향을 파악

2-단계 최적화를 적용

1 - 단계 : 기능의 산포를 줄인다. (S/N 비를 최대화한다)

2 - 단계 : 원하는 수준으로 감도를 조정한다.

: 높은 효율을 위해서 더 큰 감도가 바람직하다.
(비용, 크기, 무게 감소)

최적화는 :

1 - 단계 : S/N 비의 최대화

A _ B _ C _ D _ E _ F _ G _ H _

2 - 단계 : 감도 조정 (원하는 기울기)

A _ B _ C _ D _ E _ F _ G _ H _

- 추 정 : 최적 조합 설계와 초기 설계 아래서의 S/N 비와 감도의 추정치 계산

추정치

- S/N 비

$$\begin{aligned}
 \hat{\eta}_{\text{최적}} &= \bar{T} + (\bar{A}_1 - \bar{T}) + (\bar{C}_3 - \bar{T}) + (\bar{D}_3 - \bar{T}) + (\bar{E}_1 - \bar{T}) + (\bar{G}_1 - \bar{T}) + (\bar{H}_3 - \bar{T}) \\
 &= \bar{A}_1 + \bar{C}_3 + \bar{D}_3 + \bar{E}_1 + \bar{G}_1 + \bar{H}_3 - 5\bar{T} \\
 &= 48.28 + 48.42 + 49.33 + 47.81 + 49.21 + 51.07 - (5 \times 46.92) \\
 &= 59.52(dB)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \hat{\eta}_{\text{초기}} &= \bar{T} + (\bar{A}_1 - \bar{T}) + (\bar{C}_2 - \bar{T}) + (\bar{D}_2 - \bar{T}) + (\bar{E}_2 - \bar{T}) + (\bar{G}_2 - \bar{T}) + (\bar{H}_2 - \bar{T}) \\
 &= 47.51(dB)
 \end{aligned}$$

· 감 도 β

$$\begin{aligned}
 \hat{\beta}_{\text{최적}} &= \bar{T} + (\bar{A}_1 - \bar{T}) + (\bar{C}_3 - \bar{T}) + (\bar{D}_3 - \bar{T}) + (\bar{E}_1 - \bar{T}) + (\bar{G}_1 - \bar{T}) + (\bar{H}_3 - \bar{T}) \\
 &= \bar{A}_1 + \bar{C}_3 + \bar{D}_3 + \bar{E}_1 + \bar{G}_1 + \bar{H}_3 - 5\bar{T} \\
 &= 620.6 + 628.4 + 611.2 + 627.5 + 672.5 + 650.4 - (5 \times 607.4) \\
 &= 773.6
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \hat{\beta}_{\text{초기}} &= \bar{T} + (\bar{A}_1 - \bar{T}) + (\bar{C}_2 - \bar{T}) + (\bar{E}_2 - \bar{T}) + (\bar{F}_2 - \bar{T}) + (\bar{G}_2 - \bar{T}) + (\bar{H}_2 - \bar{T}) \\
 &= 607.4 + 13.2 + 12.6 - 10.6 + 15.3 - 30.0 + 26.3 \\
 &= 634.2
 \end{aligned}$$

추정치 요약

추 정	S / N 비	β
초기 설계	47.51	634.52
최적 설계	59.52	773.6
이 득	12.01	139.08

7 단계. 확인 실험 실행

브레이크 하부 시스템 로바스트 설계

		M_1	M_2	M_3	M_4	S / N 비	β
		0.008	0.016	0.032	0.064		
초기설계	N_1Q_1	4.8	11.1	23.1	42.0	47.56	634.7
	N_1Q_2	1.2	8.6	18.1	36.0		
	N_2Q_1	5.7	13.0	25.1	43.2		
	N_2Q_2	4.4	11.8	21.4	37.6		
		M_1	M_2	M_3	M_4	S / N 비	β
		0.008	0.016	0.032	0.064		
최적설계	N_1Q_1	5.3	12.2	24.6	49.3	57.37	757.9
	N_1Q_2	4.6	10.1	23.1	47.1		
	N_2Q_1	5.8	13.2	25.0	50.1		
	N_2Q_2	5.4	11.9	24.3	48.2		
						9.81	19.4%

	추 정		확 인	
	S / N 비	β	S / N 비	β
초기설계	47.51	634.52	47.56	634.7
최적설계	59.52	773.6	57.37	757.9
이 득	12.01	139.08	9.81	123.2

(그림 14) 확인 실험 결과

8 단계. 결과를 이해하고 문서화 함

공정 기술 사례 : Nissan 자동차의 NC Machining 기술

1 단계. 프로젝트 범위 결정

- 내구성 있는 자동차 트랜스미션의 생산을 위해
- 기존방식
 - 10시간 열처리하는 강철 침탄(carburization) 공정
- 도입방식
 - 단지 1 분간의 고주파로 열처리하는 공정
 - 단점 :
 - 고경도 강철 사용
⇒ 기존 강철에 비해 30단위 (Rockwell C-scale) 나 경도가 높은 강철
 - 치차 소음 발생
 - 일관성 있는 절삭 가공 목표 치수 달성 곤란
 - 절삭 가공 시 치수 산포 문제 발생

- ◆ 프로젝트 범위 : NC 절삭 가공의 로버스트니스 향상
- ◆ Nissan의 목표 : NC 절삭 가공 기술의 최적화
 - 경도가 더 큰 강철을 사용하면서
 - 트랜스미션 치차를 프로그램한 치수대로 생산할 수 있는 능력을 보유하면서
 - 시스템에 비용 증가를 주지 않는 것

2단계. 이상 기능 규명 - 무엇을 측정

- 이상 기능 : “ 전사성 (transformability)” 사용

입력 신호 :

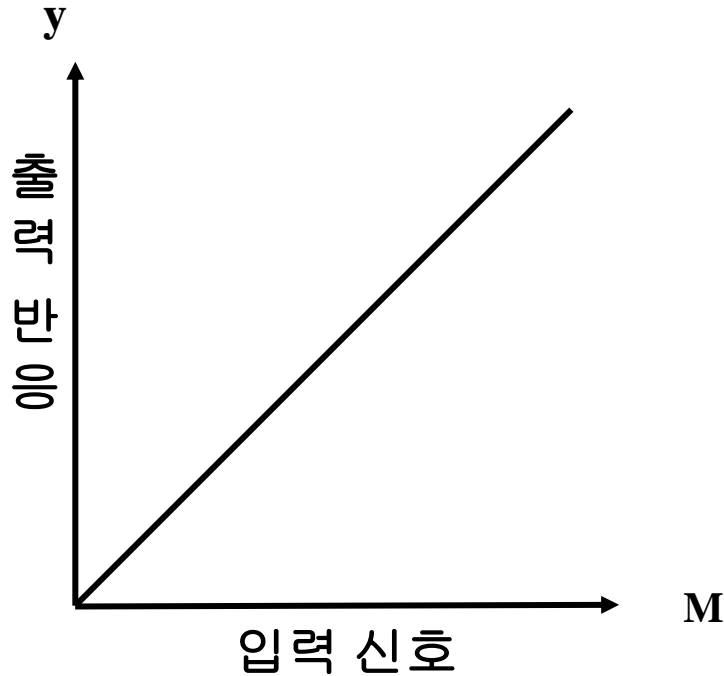
M = 프로그램 치수

출력 반응 :

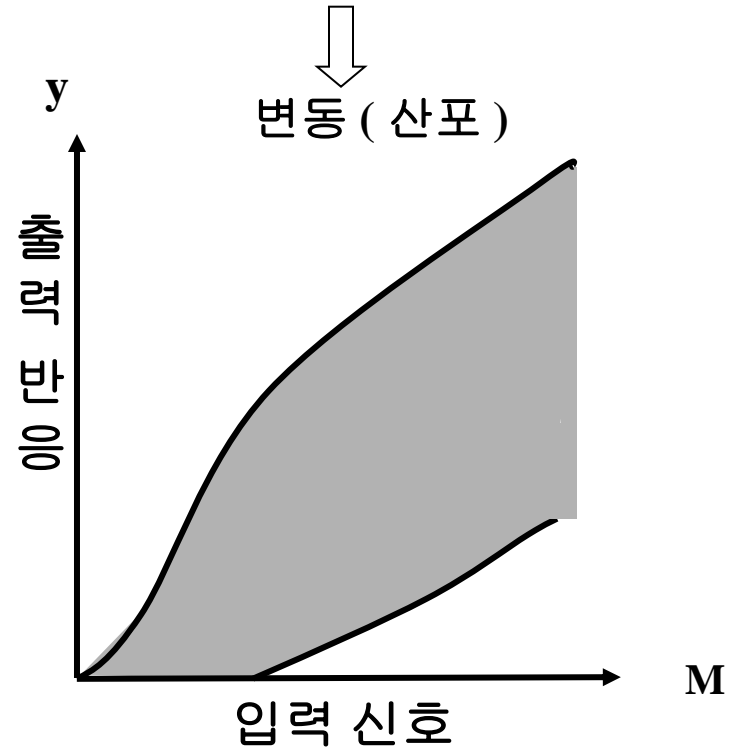
y = 제품 치수

• 이상 기능 : $y = \beta M$

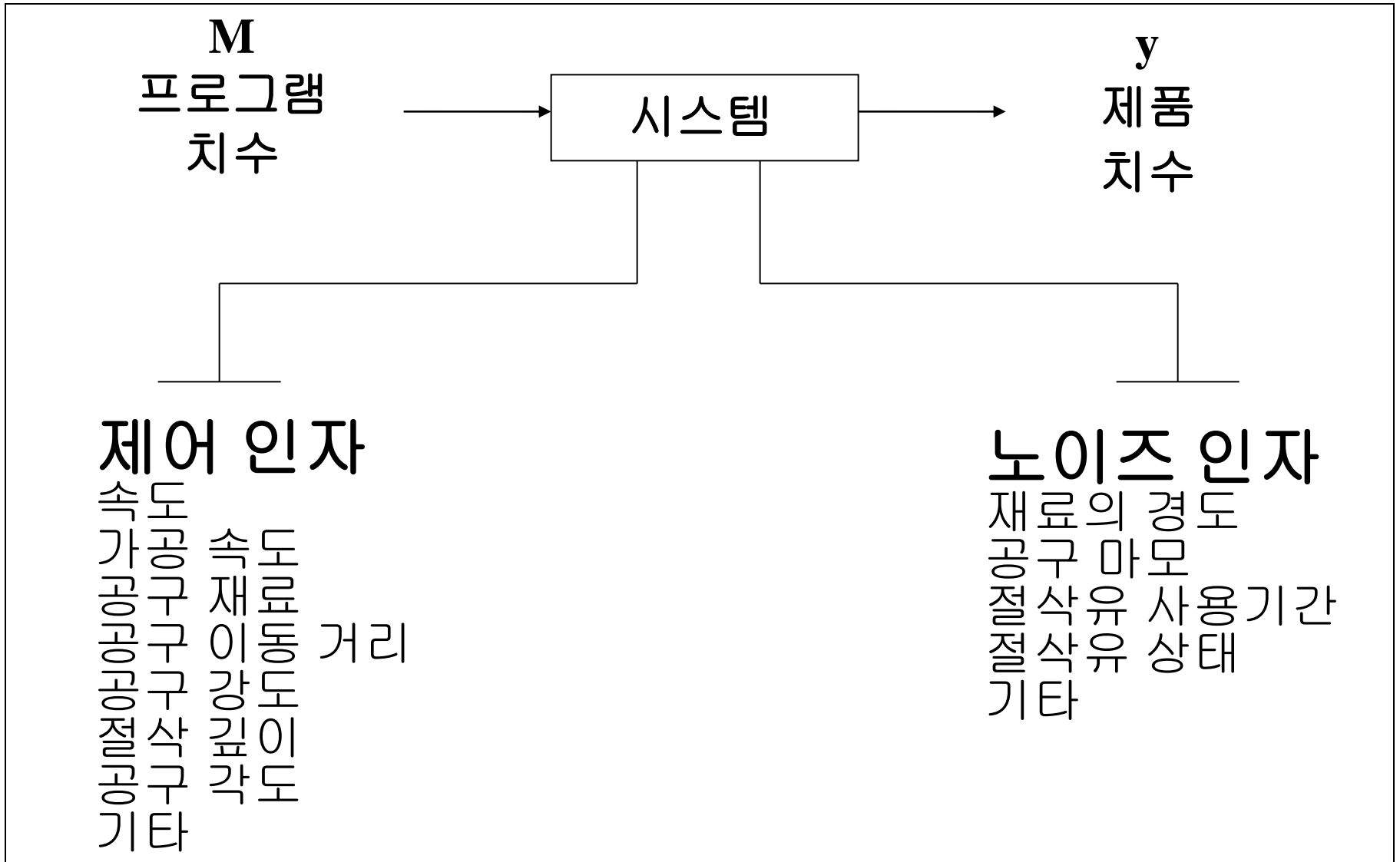
이상 기능
 $y = \beta M$



현실
 $y = \beta M + f$ (노이즈 인자들)



(그림 15) 이상 기능과 현실



(그림 16) NC 절삭 가공 공학 시스템

3 단계. 신호와 노이즈 전략 개발

- 신호 인자와 수준

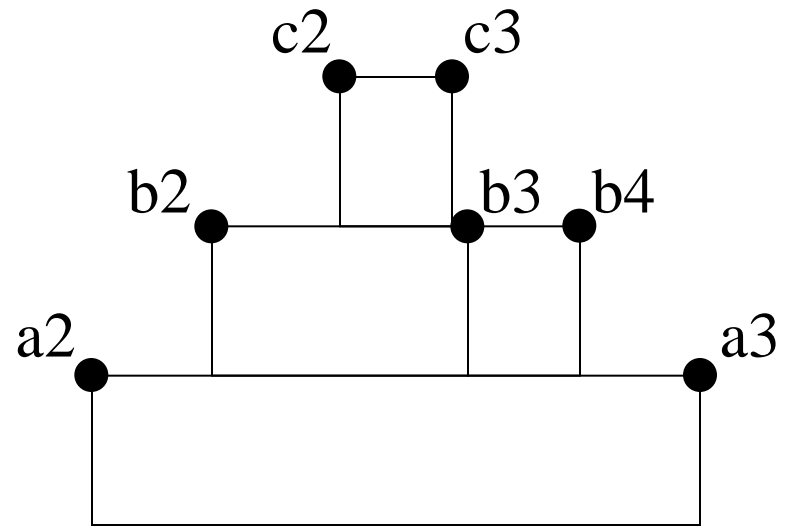
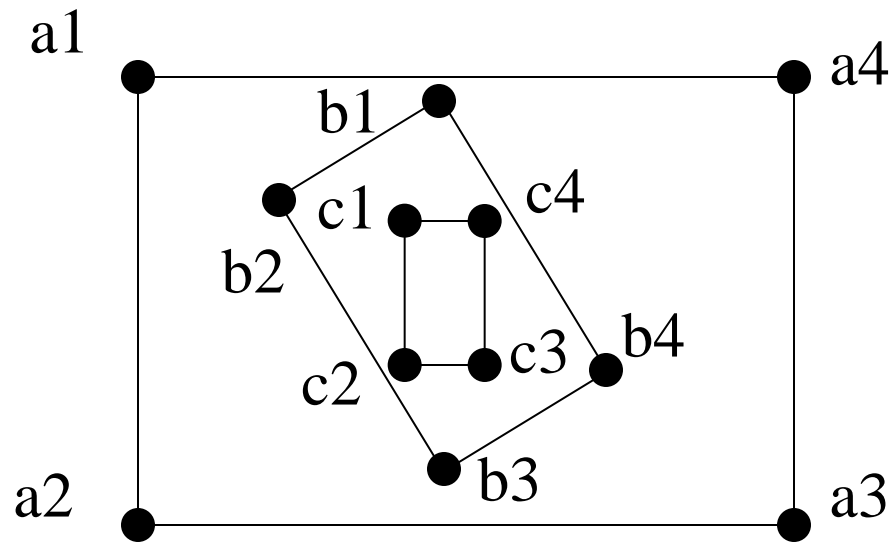
- 신호수준 : 현재 및 미래 제품 그룹의 사용 조건
모두 포함

- 실제 치차가 아닌 시편(test piece) 설계

- **Nissan의 전략**

연구결과 응용 : 현재의 치차 및 미래 개발 제품

⇒ 기술 개발



(그림 17) NC 절삭 가공을 위한 시편

신호 인자와 수준

M =프로그램 치수(mm)

(a1, a2,, c4 중 어느 두 점간의 거리)

M_1 =a1 에서 a2

M_2 =a1 에서 a3

M_3 =a1 에서 a4

M_4 =a1 에서 b1

M_5 =a1 에서 b2

⋮ ⋮

⋮ ⋮

M_{66} =c3 에서 c4

(그림 18) 결정한 신호 인자와 수준

• 노이즈 인자와 수준(절삭가공)

환경

절삭유 상태

재료 lot

기타

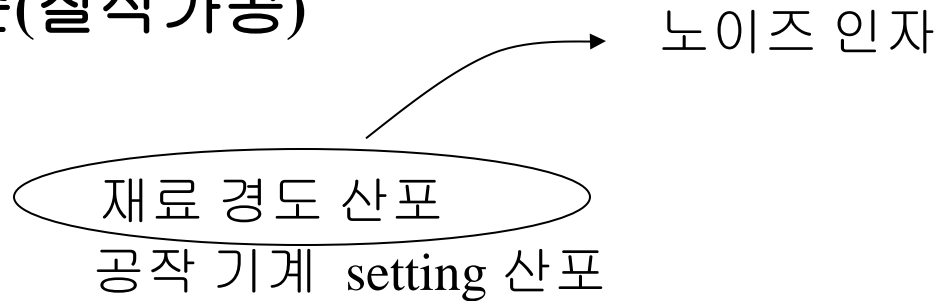
열화/마모

공구 마모

기타

제조 산포

Machining center의 제조 산포



: 재료가 연할 수록 더 많이 절삭 가공 될 것이고 강할 수록 덜 깎일 것이다.

- 노이즈 인자 : N = 재료 경도

N_1 =경도 사양 내에서 연한 재료 = 32Hc

N_2 =경도 사양 내에서 강한 재료 = 38Hc

- N 에 대해 가장 로버스트한 설계
⇒ 다른 모든 노이즈에 대해서도 가장 로버스트한 설계
- 경도 산포 불량 ⇒ micron 단위 표면 조도 불량
- 이 노이즈 인자에 대해 가장 로버스트한 설계
⇒ 좋은 평면 조도
- Nissan 은 아주 작은 양의 절삭유 사용
⇒ 노이즈 인자 N 이외에 더 적극적인 노이즈 통합 전략

132개 (66×2)의 신호와 노이즈 수준 조합의 제품치수를 측정 기록

	M_1	M_2	M_3	M_4	M_{65}	M_{66}
N_1						
N_1						

(그림 19) 데이터 매트릭스

4 단계. 제어 인자와 수준 결정

제어 인자	수준-1	수준-2	수준-3
A: 공구 이송 방향	위로	아래로	
B: 이송 속도(m/min)	저속	표준	고속
C: 재료 속도(m/min)	저속	표준	고속
D: 공구 재료	연함	표준	강함
E: 공구 강도	낮음	표준	높음
F: 공구 각도-1	작음	표준	큼
G: 공구 각도-2	작음	표준	높음
H: 절삭 깊이(mm)	낮음	표준	큼

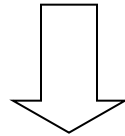
(그림 20) 제어 인자와 수준

L ₁₈	A	B	C	D	E	F	G	H	M ₁		M ₂		...	M ₆₆									
	1	2	3	4	5	6	7	8	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	...	N ₁	N ₂								
1									•	•	•	•	...	•	•								
2																	출력 반응						
:																							
.																							
:																							
18																	출력 반응						
:																							
.																							
:																							

(그림 21) 실험 배치

5 단계. 실험 수행 및 데이터 수집

L_{18} 에 정해진 18개 실험



매 실험 당 2개(연한것, 강한 것)

CMM (Coordinate Measurement Machine) 으로

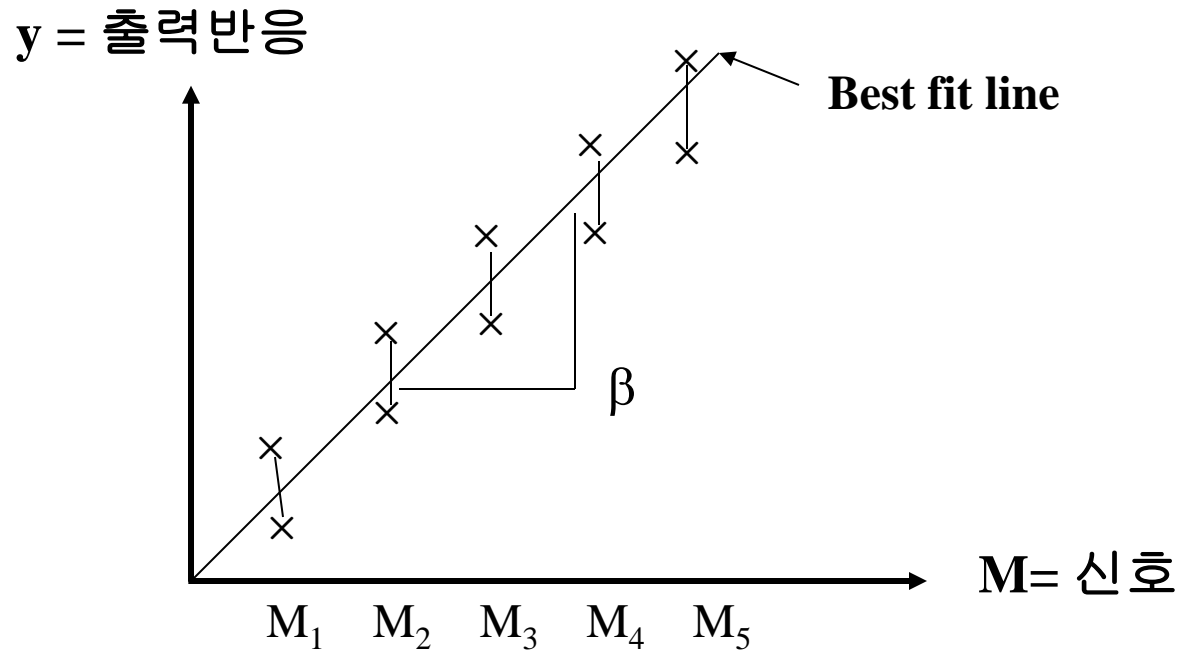
12좌표 측정

$M_1 \sim M_{66}$ 치수 계산(총 132개)

6 단계. 데이터 분석 실행

- S/N 비와 감도 계산

: L_{18} 직교표의 각 실험 당 132개의 데이터를 측정해
S/N 비와 감도를 계산



(그림 22) S/N 비와 β

$$\begin{aligned}
 S/N &\longrightarrow \frac{\text{Useful output}}{\text{Harmful output}} \\
 &\longrightarrow \frac{\text{Linear relationship between } M \text{ and } y}{\text{Variability around the linear relationship}} \\
 &\longrightarrow \frac{\beta^2}{\sigma^2}
 \end{aligned}$$

β = best - fit 선의 기울기
 \longrightarrow 감도 (예 : 브레이크 시스템의)
 \longrightarrow 효율 (예 : 엔진의)

	A	B	C	D	E	F	G	H	S / N 비	β
	1	2	3	4	5	6	7	8		
1	1	1	1	1	1	1	1	1	31.41	0.99975
2	1	1	2	2	2	2	2	2	39.70	1.00067
3	1	1	3	3	3	3	3	3	39.68	1.00032
4	1	2	1	1	2	2	3	3	9.25	1.00844
5	1	2	2	2	3	3	1	1	44.56	0.99999
6	1	2	3	3	1	1	2	2	42.02	1.00023
7	1	3	1	2	1	3	2	3	33.75	1.00066
8	1	3	2	3	2	1	3	1	44.59	1.00003
9	1	3	3	1	3	2	1	2	19.18	1.00131
10	2	1	1	3	3	2	2	1	42.80	1.00013
11	2	1	2	1	1	3	3	2	30.55	1.00167
12	2	1	3	2	2	1	1	3	26.41	1.00191
13	2	2	1	2	3	1	3	2	25.86	1.00171
14	2	2	2	3	1	2	1	3	35.24	1.00064
15	2	2	3	1	2	3	2	1	42.52	1.00025
16	2	3	1	3	2	3	1	2	41.01	0.99990
17	2	3	2	1	3	1	2	3	2.63	1.02095
18	2	3	3	2	1	2	3	1	39.30	1.00029
	평 균								32.80	1.00216

(그림 23) 계산한 S/N 비와 감도

- 반응표 완성 및 해석

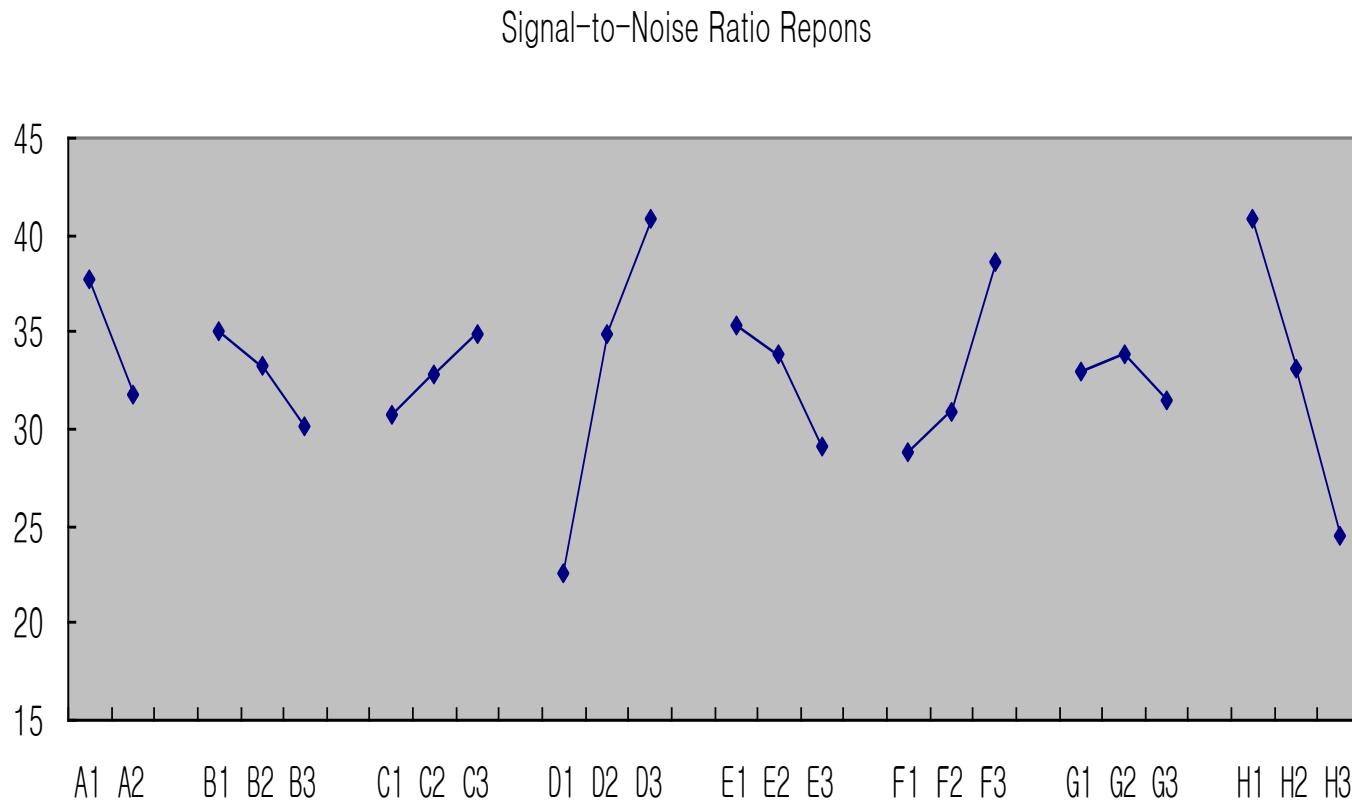
반응표 S / N 비 $\bar{T} = 32.80$

수준	A	B	C	D	E	F	G	H
1	33.79	35.09	30.68	22.59	35.38	28.82	32.97	40.86
2	31.81	33.24	32.88	34.93	33.91	30.91	33.90	33.05
3		30.08	34.85	40.89	29.12	38.68	31.54	24.49
Δ	1.98	5.02	4.17	18.30	6.26	9.86	2.36	16.37
순위	8	5	6	1	4	3	7	2

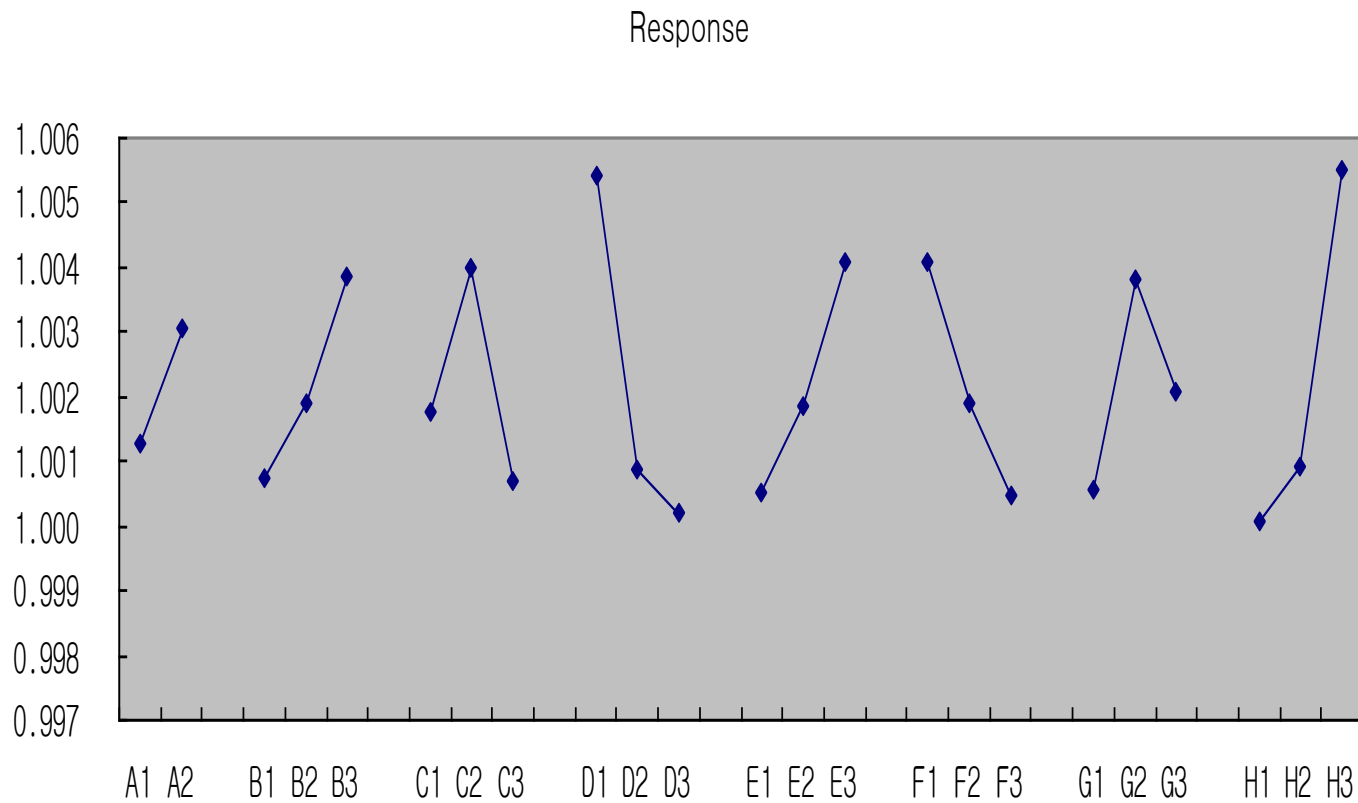
반응표 β $\bar{T} = 1.00216$

수준	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1.00127	1.00074	1.00176	1.00540	1.00054	1.00410	1.00058	1.00007
2	1.00305	1.00188	1.00399	1.00087	1.00187	1.00191	1.00381	1.00091
3		1.00386	1.00072	1.00021	1.00407	1.00046	1.00208	1.00549
Δ	0.00178	0.00312	0.00327	0.00519	0.00353	0.00363	0.00323	0.00542
순위	8	7	5	2	4	3	6	1

(그림 24) 반응표



(그림 25.1) S/N비 반응 그래프



(그림 25.2) 감도 반응 그래프

• 2-단계 최적화 실행

두 반응표는 각 제어인자가 S/N 비와 감도에 어떤 영향을 주는지를 보여 준다.

2-단계 최적화

- 1 - 단계 : 기능의 산포를 줄인다. (S/N 비를 최대화한다)
2 - 단계 : 원하는 수준으로 감도 (β)를 조정한다.

이번 사례에서는 결국 감도를 1.0000으로 조정
(실제에서는 최적 조합에서의 감도를 관찰한 후 조정을 실행)

최적화는 :

1 - 단계 : S/N 비의 최대화

$A_1 \quad B_1 \quad C_3 \quad D_3 \quad E_1 \quad F_3 \quad G_2 \quad H_1$

2 - 단계 : 감도 (β) 조정

입력 프로그램에 상수를 곱해서 조정

초기 설계:

$A_1 \quad B_2 \quad C_2 \quad D_2 \quad E_2 \quad F_2 \quad G_2 \quad H_2$

• S/N 비와 감도의 추정치 계산

$$\begin{aligned}\hat{\eta}_{\text{최적}} &= \bar{A}_1 + \bar{B}_1 + \bar{C}_3 + \bar{D}_3 + \bar{E}_1 + \bar{F}_3 + \bar{G}_2 + \bar{H}_1 - 7\bar{T} \\ &= 33.79 + 35.09 + 34.85 + 40.89 + 35.38 + 38.68 + 33.90 + 40.86 - (7 \times 32.80) \\ &= 63.82(dB)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\hat{\beta}_{\text{최적}} &= \bar{A}_1 + \bar{B}_1 + \bar{C}_3 + \bar{D}_3 + \bar{E}_1 + \bar{F}_3 + \bar{G}_2 + \bar{H}_1 - 7\bar{T} \\ &= 1.00127 + 1.00074 + 1.00072 + 1.00021 + 1.00054 + 1.00046 + \\ &\quad 1.00381 + 1.00007 - (7 \times 1.00216) \\ &= 0.99271\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\hat{\eta}_{\text{초기}} &= \bar{A}_1 + \bar{B}_2 + \bar{C}_2 + \bar{D}_2 + \bar{E}_2 + \bar{F}_2 + \bar{G}_2 + \bar{H}_2 - 7\bar{T} \\ &= 31.79 + 33.24 + 32.88 + 34.93 + 33.91 + 30.91 + 33.90 + 33.05 - (7 \times 32.80) \\ &= 36.99(dB)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\hat{\beta}_{\text{초기}} &= \bar{A}_1 + \bar{B}_2 + \bar{C}_2 + \bar{D}_2 + \bar{E}_2 + \bar{F}_2 + \bar{G}_2 + \bar{H}_2 - 7\bar{T} \\ &= 1.00127 + 1.00188 + 1.00399 + 1.00087 + 1.00187 + 1.00191 + \\ &\quad 1.00381 + 1.00091 - (7 \times 1.00216) \\ &= 1.00140\end{aligned}$$

7 단계. 확인 실험 실행

확인 실험 결과:

	추정		확인	
	S/N 비	β	S/N 비	β
초기 설계	36.99	1.0014	34.71	0.9992
최적 설계	63.82	0.9927	54.09	0.9939
이득(dB)	26.83		19.38	

- 19.38dB 이득은 산포 범위를 다음과 같이 줄이는 것과 같다.

$$0.5^{\frac{19.38}{6}} = 0.107 = 10.7\%$$

- 2단계 최적화 : 감도 조정

$$y = \beta M$$

Minitab의 활용이 가능한가?

$$M = y/\beta = y/0.9939 = 1.0061y$$

요 약

- 26.83dB 이득이 추정되어서 19.38dB이 확인되었다. 완전하지는 않지만 매우 좋은 재현성을 보여 주고 있고 실험의 성공을 확인해 준다.
- 이 연구 결과로 시편 절삭 가공에 있어 가공된 치수의 표준편차를 10%로 줄였다.
- 이 연구 결과는 이 machining center에서 생산하는 다른 제품에도 응용할 수 있었다.
- 로버스트 기술을 개발하는데 시편을 사용하는 것은 효과적인 방법이다. 이런 종류의 연구는 특정한 제품에 대한 문제 해결과는 달리 기술 개발이라고 한다.