

# 다구찌기법을 이용한 에스컬레이터의 소음저감에 관한 연구

°권이석\*, 박선용\*, 김성대\*\*, 서장원\*\*, 김석관\*\*, 이종원\*\*\*

(A Study on the Noise Reduction of Escalator  
using Taguchi Method)

(Y. S. Kwon, S. R. Park, S. D. Kim, J. W. Seo, S. G. Kim, C. W. Lee)

## 1. 서론

최근에 은행, 호텔, 오피스텔과 같은 비교적 한산한 장소에서 서비스를 목적으로 에스컬레이터의 사용이 늘고 있다. 이러한 건물 내부의 주위 소음은 지하철역이나 백화점등에 비해 매우 낮기 때문에 에스컬레이터의 저소음이 요구된다.

에스컬레이터는 보수불량과 노화에 의해 소음이 증가되는 경향이 있다. 이러한 오차환경의 영향으로 설치할 당시의 에스컬레이터의 소음에 대한 성능특성(Characteristic response)이 일관되게 지속되지 못하고 산포하게 된다. 이러한 산포는 제조, 조립 및 설치 오차에 의해서 발생하며 오차의 허용치에 따라 품질과 생산성이 달라진다. 소음에 대한 설계인자의 공차를 작게 하면 소음에 대한 성능 특성의 변동이 작아져 소음이 낮아지나 생산성이 떨어지고 공차를 크게 하면 생산성은 향상되나 소음이 높아지게 된다. 따라서 이러한 산포에 영향을 받지 않고 일관성있는 성능특성을 갖기 위해서는 각 설계인자들의 소음에 대한 기여도를 규명하여야 한다. 그러나 설계인자의 소음에 대한 기여도를 정확하게 규명하는 것은 어려우며 소음에 대한 설계인자가 많기 때문에 각각에 대한 기여도를 규명하는 것은 많은 시간과 무수히 많은 실험이 요구된다<sup>[1], [2]</sup>.

다구찌기법은 성능특성이 주어지면 많은 설계인자의 경우에도 설계인자 각각의 기여도를 구하여 최적의 인자들과 수준을 규명할 수 있으며 잡음에 대한 강건성과 안정성을 평가, 확보할 수

있다<sup>[2]</sup>.

본 연구에서는 다구찌기법을 이용하여 소음원을 규명하고 생산성의 저하없이 사용자의 어떤 사용조건하에서도 일관된 저소음의 성능특성을 발휘할 수 있도록 소음에 대해 강건성과 안정성을 갖는 설계인자를 규명하였다. 설계인자의 소음에 대한 기여도를 파악하여 파라미터설계, 이동보도와 같은 다른 유형의 시스템에도 적용할 수 있는 범용성과 차세대 에스컬레이터에 대한 선행성을 확보하였다.

## 2. 다구찌기법(Taguchi Method)<sup>[1], [2], [3]</sup>

### 2.1 정의

기술개발, 제품설계, 공정설계, 공정관리를 최적화하는 공학적인 기법으로 사용자가 갖는 어떠한 환경에서도 제품의 기능이 제대로 발휘되도록 설계인자의 조건을 최적화하는 Engineering Tool이며 강건설계기법(Robust design method)이라고도 한다.

### 2.2 장점

고전적 실험계획법인 통계적 계획법과는 다르게 다구찌기법은 공학적 도구로 개발되어 현대 산업의 문제와 요구조건에 부합되는 응용력이 높은 기술들을 이용하기 때문에 이용이 쉽다.

다구찌기법과 기존의 일시일원실험법 그리고 통계적 실험계획법과 비교하였을 때 다음과 같은 장점이 있다.

- 1) 설계인자가 많아질 경우에도 많은 인자를 동시에 고려할 수 있다.
- 2) 실험이 쉽고 짧은 시간에 가능하며 경제적이다.
- 3) 연구단계에서 사용자의 사용환경에서의 재현성(Reproducibility)을 확보할 수 있다.

---

\* : LG산전 빌딩시스템연구소  
 \*\* : LG생산기술원  
 \*\*\* : 한국과학기술원 기계공학과

- 4) 교호작용(Interaction)이 있더라도 최적조건과 우수한 재현성을 확보할 수 있다.
- 5) 산포의 원인인 잡음원에 대한 허용차를 크게 하여 안정성 설계가 가능하다.
- 6) 유사한 제품, 부품의 범용성을 확보할 수 있다.
- 7) 미세 시스템(Micro System)과 차세대 시스템에 대해 선행성을 확보할 수 있다.

### 2.3 이론 및 구성

Fig. 1은 다구찌기법의 개략적인 순서도를 보여주고 있으며 크게 평가특성 결정, 인자 및 실험 Matrix 결정, 실험 및 분석 그리고 최적화 및 재현성 평가로 나눌 수 있다. 상세한 내용은 각 단계별로 다음과 같다.

#### 1) 평가특성 결정

최적화하려는 대상시스템의 특성을 가장 잘 나타낼 수 있는 측정치가 평가치이며 이 평가치를 결정하는 것이 실험의 목적을 달성하기 위한 가장 중요한 단계이다. 시스템의 특성치는 크게 망소, 망대와 망목특성을 갖는 정특성과 동특성의 형태로 표현할 수 있다.

#### 2) 인자 및 실험Matrix(직교배열표) 결정

인자는 제어인자(Control factor), 오차인자(Noise factor) 그리고 신호인자(Signal factor, 동특성인 경우에만 적용)가 있으며 실험에 참여하는 변수로서 제품의 성능에 영향을 주는 모든 변수를 의미한다. 제어인자는 성능특성을 안정되게 하기 위해 중심치를 설정해야 하는 것으로 설계 및 제어가 가능한 인자이고 오차인자는 시스템의 기능을 시간, 공간에 따라 산포가 생기게 하는 잡음으로 제어가 불가능한 인자이다. 이 중 오차인자는 잡음의 개념을 공학으로 명확히 다룬 것으로 다구찌기법의 특징이다. 제어인자는 실험목적 달성을 위한 관련된 모든 인자를 열거 및 분류 후 분석을 통하여 중요성 순서대로 선택된다. 수준은 주로 3수준 정도로 하며 S/N비에 따른 안정성 개선과 대폭적인 조정가능범위를 확보할 수 있도록 수준간의 간격은 불량이 발생하지 않는 범위내에서 크게 해준다. 오차인자의 수준은 주로 2수준으로 하며 여러 인자의 수준이 상승효과를 내어 최호조건이 되는 인자들의 수준을 1수준으로, 반대로 최악조건이 될 수 있는 인자들의 수준을 2수준으로 선정한다.

직교배열표(Orthogonal Array)는 두개의 인자간의 교호작용 효과를 검출하거나 기술적으로 없으리라고 생각되는 교호작용을 희생, 실험횟수를 줄

여서 실험계획을 간단히 짤 수 있도록 만들어 놓은 표이다. 수준수, 교호작용의 효과 그리고 실험에 참여하는 제어인자의 개수에 의해서 직교배열표를 선정한다. 2수준에서는 L8, L12, L16과 3수준에서는 L9, L18, L39 Matrix가 많이 쓰인다. 그 중에서 인자수에 비해 실험크기도 작고 두개 인자에 대한 교호작용의 파악이 가능하고 한 인자에 대해 6수준까지 세분 가능하며 재현성이 높은 L18(2<sup>7</sup> X 3<sup>7</sup>) Matrix를 가장 많이 사용한다.

#### 3) 실험 및 분석

실험순서는 결과나 분석에 무관하므로 작업이 어려운 인자는 직교표 앞쪽 열에 배치하여 작업회수를 줄여 실험을 진행한다. 측정은 동일하게 여러번 측정하여 기록한다.

분석은 시스템특성에 따라 다소 차이가 있다. 여기에서는 본 연구에서 적용한 망소특성에 대해서만 기술한다. 제일 먼저 각 제어인자의 수준에 대한 망소특성의 S/N비(Signal to noise ratio)  $\eta$ 를 구한다. 망소특성이란 평가치  $y$ 가 음의 값을 취하지 않고 작을 수록 좋은 특성이므로 분석을 위해서는 목표치 0으로부터 차이에 대한 제곱평균으로 분산  $\sigma^2$ 을 계산한 다음, S/N비를 평가특성으로 삼아 분석하며, 식(1)으로 표현된다.

$$\eta = -10 \log \sigma^2 \quad \text{----- (1)}$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum y_i^2 \quad \text{----- (2)}$$

여기서,  $\sigma^2$  는 분산,  $y$ 는 측정된 특성치이며  $n$ 은 실험횟수이다.  $10\log$ 를 취하는 것은 측정치의 가법성을 좋게하기 위한 것이며 음수를 취한 것은 분산(variance)이 작을수록 S/N비를 크게하기 위한 것이다. 최종적으로 망소특성의 S/N비는

$$\eta = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad \text{----- (3)}$$

이다.

각 제어인자가 성능특성에 대한 영향도와 잡음에 대한 강건성과 안정성을 기여율(Percent contribution)로 알 수 있으며 기여율  $\gamma$ 는 식(4)으로 표현된다.

$$\gamma = \frac{\eta_{\max} - \eta_{\min}}{N} \times 100(\%) \quad \text{----- (4)}$$

여기서,  $\eta_{\max}$ 와  $\eta_{\min}$ 은 각각 인자의 수준중 최대와 최소치의 S/N비이며  $N$ 은 수준수이다.

#### 4) 최적화 및 재현성 평가

분석을 통하여 얻은 인자 중 기여도가 큰 인자와 수준들을 선정하는 것을 최적화라 한다. 기존의 조건에 대해 최적화조건에서의 강건성과 안정성등의 개선효과를 추정한 것을 추정개선효과라 한다. 추정개선효과  $\lambda$ 는 식(5)으로 표현된다.

$$\lambda = \sum_{i=1}^m (\eta_{(opt)i} - \eta_{(nor)i}) \quad \text{----- (5)}$$

여기서,  $\eta_{(opt)}$ 과  $\eta_{(nor)}$ 은 각각 최적인자의 최적수준 S/N비와 최적인자의 기존수준 S/N비이며 m은 선정된 최적인자수이다.

최적화한 인자와 수준들을 설정하고 나머지 인자들은 기존의 조건으로 설정, 실험하여 검증개선효과(또는 검증개선S/N비)를 구한다. 최종적으로 추정개선효과와 검증개선효과의 차이를 통하여 재현성평가를 한다. 일반적으로 추정개선효과와 검증개선효과의 차이가 추정개선효과의 20%이내이면 재현성이 우수하다고 할 수 있다.

### 3. 에스컬레이터 소음저감에 적용

#### 3.1 적용 배경

Fig. 2는 에스컬레이터의 개략도를 보여주고 있다. 에스컬레이터는 많은 설계변수와 생산성을 이유로 설계단계에서 소음, 진동과 같은 품질을 위한 부품의 제조공차, 조립공차등을 체계적으로 고려하지 않아 설치초기부터 소음과 진동이 발생한다. 또한 생산성을 다소 희생하여 제조 및 조립공차를 작게 하더라도 설치후 보수불량, 노화등과 같은 잡음오차에 의한 산포로 품질이 저하된다. 특히 주로 발생하는 품질저하는 소음발생이며 모터나 감속기에서 발생하는 연속적인 소음보다는 체인이나 상하부 구동체에서 발생하는 단속적인 소음이 승차감에 많은 영향을 준다<sup>[4]</sup>. 단속음은 기어와 체인의 결합시 발생하는 따다닥하는 소음(이하 따다기음)과 스텝이 발판(Floor)에 진입하면서 발생하는 쿵쿵하는 소음(이하 쿵쿵음)이 있다. 따다기음과 쿵쿵음의 원인으로 많은 설계변수가 존재하기 때문에 일시일원실험법으로 규명하기에는 많은 시간과 경비가 소요되며 CAE해석방법의 적용도 사실상 불가능하다. 또한 두가지 방법을 적용하더라도 보수불량과 노화등과 같은 잡음오차에 의한 산포를 고려할 수 없다는 문제점이 있다.

#### 3.2 평가치 결정

에스컬레이터의 소음에 대해서 망소특성으로

정의하였고 따다기음과 쿵쿵음을 한번의 실험으로 동시에 평가할 수 있도록 관능평가로 각각의 평가치를 선정하였다. 무소음부터 발생 가능한 최고의 소음까지 5등급으로 나누어 두가지의 소음 각각에 대해 정량 평가하도록 정의하였다. 평가치는 정해진 측정자들에 의해서 평가, 기록하도록 하였다.

#### 3.3 인자 및 실험Matrix 결정

에스컬레이터의 설계, 제조, 설치 그리고 보수 전문가의 의견과 실험을 통하여 많은 인자들을 따다기음과 쿵쿵음에 영향을 주는 제어인자로 도출하였다. 분석을 통하여 최종적으로 8개의 인자를 제어인자로 선정하였다. Table 1은 선정된 인자, 수준 그리고 선정배경을 보여주고 있다. Fig. 3은 에스컬레이터에서의 제어인자와 그 위치를 보여주고 있다. 실험 조건상 제어인자의 수준을 변경하는 것을 오차로 보고 오차인자 적용을 생략하였다.

실험Matrix(직교배열표)는 L18(2<sup>3</sup>X3<sup>3</sup>) Matrix로 선정하였고 C와 E인자는 2수준만을 선정하였기 때문에 3수준은 더미법(Dummy treatment)을 이용하여 2수준으로 대체, 선정하였다.

#### 3.4 실험 및 분석

Fig. 4는 실험용 에스컬레이터를 보여주고 있다. 예비 실험을 통하여 실험오류 여부를 확인하고 윤활조건과 같은 실험조건이 변하는 것을 방지하기 위해 짧은 기간내에 동일 작업자가 일관성있게 수행하였다. 실험순서는 실험하기 쉬운 순서대로 진행하였다. 관능평가 측정시 평가자 5명이 두 종류의 소음의 등급을 정량적인 평가치로 기록하였다. 측정은 동일한 조건으로 반복측정하여 따다기음과 쿵쿵음 두 소음에 대해 각각 기록하였다. 실험조건상 오차인자를 적용하는 대신 동일조건으로 반복실험하여 평가치의 신뢰성을 향상시켰다.

식(3)과 식(4)로부터 망소특성에 대한 인자의 S/N비와 기여율을 구하여 분석을 하였다. Table 2는 각 인자의 수준별 S/N비와 기여율을 보여주고 있다. Fig. 5는 Table 2의 S/N비를 그래프분석으로 보여주고 있다. 그래프분석은 요인별 효과를 한눈에 볼 수 있도록 한 것이며 기여율이 클수록 인자의 수준간의 기울기가 크게 나타난다. Table 2와 Fig. 5를 통하여 C인자는 두 소음 모두에 대해 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 따다기음의 경우 E인자의 2수준이 따다기음을 매우 강건하게 저감시키는 설계변수임을 알 수 있다. 쿵쿵음의 경우는 H인자가 발생원인이고 1수준이 우수한 저감공

차임을 확인하였다.

Table 1 Control Factors

제어인자	수준			선정배경
	1	2	3	
A	기어 두께 (mm)	19	11	• 소음 방사 부분
B	레일 두께 (mm)	8	16	24 체인과 기어의 충돌위치 조정
C	기어 직진도 (mm)	0	5	• 시스템 불안정에 의한 영향 파악
D	버퍼 경도 (°)	60	80	90 기어와 체인의 완충역할
E	버퍼 형상	핀	밴드	•
F	가이드 높이 (mm)	-3	0	10 체인과 기어의 충돌 위치를
G	레일 높이 (mm)	-4	0	4 조절하는 역할
H	U레일 공차 (mm)	0	10	20 소음 방사 부분

Table 2 Signal/Noise Ratios(S/N) & Percent Contributions

제어인자	수준	따다기음		쿵쿵음	
		S/N비	기여율 (%)	S/N비	기여율 (%)
A	1	-31.37	7.9	-30.78	11.9
	2	-28.69		-35.08	
B	1	-28.84	1.4	-31.69	6.4
	2	-27.84		-33.99	
	3	-28.42		-29.94	
C	1	-33.83	17.7	-37.88	24.6
	2	-27.84		-31.95	
	3	-28.42		-28.98	
D	1	-29.23	11.1	-32.40	3.9
	2	-32.30		-33.82	
	3	-28.56		-32.58	
E	1	-32.53	21.7	-33.02	9.5
	2	-25.20		-34.61	
	3	-32.37		-31.17	
F	1	-33.02	17.6	-33.45	4.1
	2	-27.07		-31.98	
	3	-30.01		-33.37	
G	1	-31.53	12.0	-34.15	5.8
	2	-31.08		-32.06	
	3	-27.71		-32.59	
H	1	-31.31	10.7	-26.70	33.8
	2	-31.08		-33.18	
	3	-27.71		-38.92	

### 3.5 최적화와 재현성평가

Table 2와 Fig. 5에서 따다기음과 쿵쿵음 각각에 대해 기여율과 기울기가 큰 4개의 최적인자와 수준을 선정하였다. 식(5)을 이용하여 추정개선효과를 구하였고 선정된 최적인자들의 수준을 적용한 재현성실험으로 검증개선효과를 구하였다. Table 3은 선정된 최적인자와 수준, 추정개선효과와 검증개선효과 그리고 그 오차를 보여주고 있다. 결론적으로 최적의 설계변수와 공차조건을 적용하여 따다기음인 경우에 15%, 쿵쿵음인 경우에 13%로 20%이내의 오차의 갖는 우수한 재현성을 확인하였다. 그러나 C인자가 두가지 소음에 모두 큰 기여를 하였지만 에스컬레이터의 운영상 현실적으로 적용이 불가능한 인자이므로 적용에서 제외하였다. 따다기음의 경우 E인자의 2수준이 산포의 원인이 되는 잡음원에 대해 강건성과 안정성을 모두 갖는 설계인자임을 규명하였다. 쿵쿵음에 대해서 가장 큰 기여를 한 것은 H인자이고 최적조건은 1수준으로 현재 적용하는 공차수준이다. 그러나 현수준의 공차일 경우에 설치오차, 제조오차와 노화등과 같은 잡음인자들로 인한 산포로 쿵쿵음이 계속적으로 발생하였기 때문에 좀 더 강건한 설계변수가 요구되었다. 따라서 H인자 자체가 쿵쿵음의 원인임을 근거로, H인자가 잡음인자에 강건한 구조를 갖도록 H인자의 충돌계절을 규명하여 충돌 위치에 완충제(Damping material)를 적용하였다. 완충제를 적용하여 잡음오차에 매우 강건하게 쿵쿵음을 제거할 수 있었다. Fig. 6과 7은 각각 쿵쿵음 발생원인과 강건설계된 H인자의 구조를 보여주고 있다.

Table. 3 Reproducibility Estimation

중요인자	따다기음				쿵쿵음			
	E	C	F	G	H	C	A	E
수준	2	2	2	3	1	3	1	3
추정개선 효과(db)	16.9				8.9			
검증개선 효과(db)	14.4				7.7			
오차(db)	2.5				1.2			

### 3.6 검증 실험

이 단계는 두 소음에 대해 기여율이 큰 C인자를 제외한 상태에서도 재현성평가에서 얻어진 최적 수준을 만족하는가를 확인하기 위해 추가한 단계이다. 또한 쿵쿵음인 경우 도출된 최적인자의

최적수준을 적용하지 않고 새로이 추가한 설계변수가 내부공차와 같은 요인에 대해 강건한가를 평가하는데 목적을 두었다.

망소특성으로 정의하였고 평가특성은 따다기음과 쿵쿵음에 대해 음압(Sound pressure level)으로 정의하였다. 제어인자와 수준은 Table 4에서와 같이 정의하였다. 실험Matrix(직교배열표)는 L9(3<sup>4</sup>)로 하였고 Fig. 7에서와 같이 H인자 내면에 완충제를 결합한 조건에서 실험을 실시하였다. Fig. 8은 L9(3<sup>4</sup>)실험에서 구한 S/N비를 그래프분석으로 보여주고 있다. 따다기음인 경우 E인자가 기여율이 매우 크고 2수준이 최적의 수준임을 알 수 있다. 쿵쿵음의 경우 H인자 내측면에 완충제를 결합한 경우가 어떤 조건에서도 쿵쿵음이 발생하지 않았음을 알 수 있었다.

결론적으로 따다기음의 경우 E, F, G인자 순서대로, 쿵쿵음의 경우 H, A, E인자 순서대로 소음에 강건한 설계변수라 할 수 있다. 특히 쿵쿵음의 경우 내측면에 완충제를 부착하는 것이 강건성과 안정성을 갖는 설계변수라 할 수 있다.

Table 4 Control Factors of L9(3<sup>4</sup>)Matrix

제어인자	수준			선정배경
	1	2	3	
E 버퍼 형상	핀	밴드	·	따다기음의 강건 인자
F 가이드 높이 (mm)	-3	0	10	체인과 기어의 충돌 위치를
G 레일 높이 (mm)	-4	0	4	조절 하는 역할
H U레일 공차 (mm)	0	10	20	쿵쿵음 발생원인

#### 4. 결론

다구찌기법을 이용하여 소음에 대한 많은 설계 변수를 한번에 적용, 분석할 수 있었다. 다른 방법에 비해 실험을 짧은 시간에 쉽게 그리고 경제적으로 수행하였다. 연구단계에서 사용자의 사용 환경을 재현하여 추정개선효과가 15%이내 오차로 우수한 재현성을 확보하였다. 정확한 소음원을 규명하였고 생산성의 저하없이 공차, 보수불량과 노화화 같은 잡음원에 대해 일관된 저소음의 성능특성을 발휘할 수 있도록 소음에 대해 강건성과 안정성을 갖는 설계인자와 공차를 도출하였다. 최종적으로 따다기음인 경우 E인자의 2수준을, 쿵쿵음

인 경우 H인자의 내부에 완충제의 적용으로 결정하였다. 이 결과로 고질적으로 발생했던 따다기음과 쿵쿵음을 완벽하게 제거하였고 에스컬레이터 전체의 규격소음을 약 3dB 저감하였다. 체계적인 접근으로 각 설계인자들의 소음에 대한 기여도를 파악하여 파라미터설계가 가능하게 하였다. 또한 이동보도와 같은 다른 유형의 시스템에도 적용할 수 있는 범용성을 확보하였고 차세대 에스컬레이터에 대한 선행성을 확보하였다.

#### 참고문헌

- [1] 이종원, "Taguchi 방법에 의한 실험 계획," 자동 차공학지, Vol. 11, No. 6, 1989.
- [2] 박성근, 권호철, 지수운, 다구찌기법, 희문사, 1995.
- [3] M. S. Phadke, Quality Engineering Using Robust Design, Prentice-Hall, 1989.
- [4] 一柳 健, 原 威, 寺 西 勝 也, "エスカレーターにおける無騒音構造の研究とその成果," 日立評論, 第48卷, 第6號, pp704-709, 昭和41年.

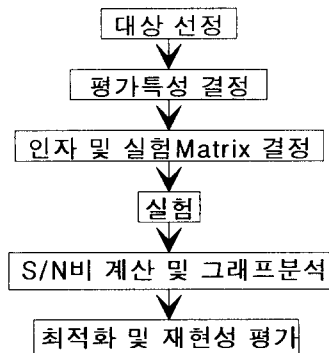


Fig. 1 Flow chart of Taguchi Method

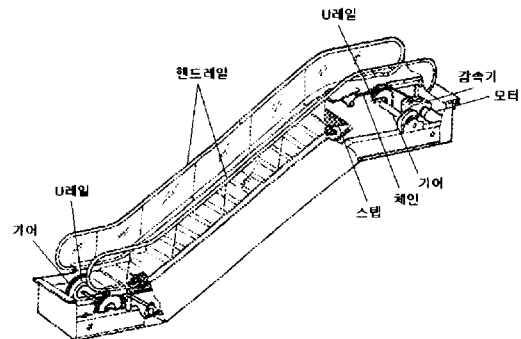


Fig. 2 Schematic drawing of Escalator

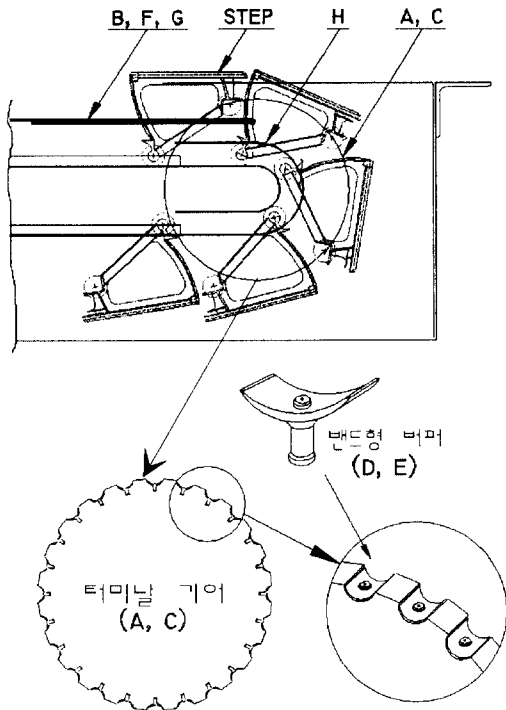


Fig. 3 Control factors



Fig. 4 Test Escalator

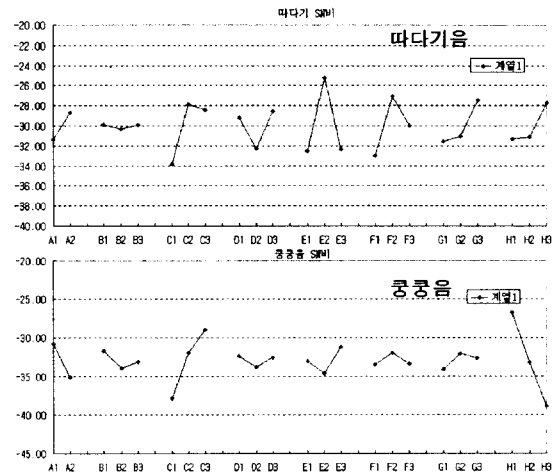


Fig. 5 Graph analysis of S/N Ratios

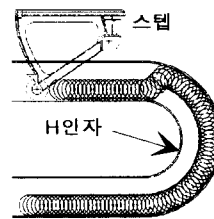


Fig. 6 Trace of step roller on the U-rail

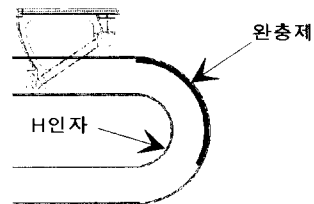


Fig. 7 Robust design of H factor

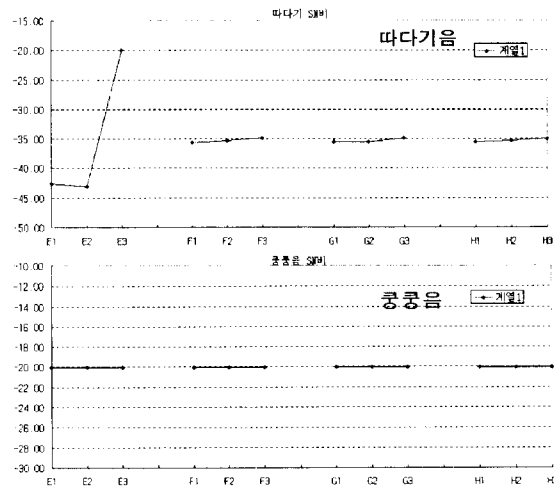


Fig. 8 Graph analysis of S/N Ratios(L9)