

|||||||  
**論 文**  
 |||||

실험계획법에 의한 승강기용 구동부 주조품의 다이캐스팅  
 탕구방안 최적화

정원제 · 윤형표\* · 홍순국\* · 박익민

Optimal Gating System Design of Escalator Step Die Casting  
 Part by Using Taguchi Method

Won Je Jeong, Hyung Pyo Yoon\*, Sun Kuk Hong\* and Ik Min Park

Abstract

In this study, a design of experiment, Taguchi method, was applied to optimize gating system design of escalator step die casting parts. Six shape factors which affect filling sequence of melt are adopted and divided into two levels respectively. Initial feeding differences of melt which were calculated by using S/N(signal-to-noise) ratio in each condition were demonstrated with the simulation of Flow-3D software program. Variations of S/N ratio according to shape factors were obtained and the optimal condition of gating system could also be obtained. It could be found that width of gate, contact angle of gate, thickness of runner are more effective factors on the filling sequence of melt than the others in this case of escalator step die casting parts. It showed that the economical gating system and sound filling sequence of melt were obtained by using Taguchi method.

(Received February 22, 2000)

1. 서 론

최근 주조품의 건전성이나 성능향상을 위하여 용탕이 주형 공간내에 충전되는 과정이나 주형내에 응고되는 과정에서 일어나는 제반 물리적 현상을 수치해석을 통하여 예측하기 위한 연구가 주조 및 금형기술 분야를 중심으로 활발히 진행되고 있으며 특히, 지속적인 외부하중의 영향을 받는 수송용 기계부품분야를 중심으로 주조시 발생하는 외부결함뿐 아니라 성형기술의 중요성이 절실히 대두되고 있다. 수치해석을 적용한 기존의 주조해석 분야의 연구는 대상부품에 대하여 주조방안의 기존원칙에 따라 탕구, 탕도 등을 1차적으로 배열하고 수립된 주조 방안에 대하여 3차원 모델링후 주조시 용탕의 유동해석, 열전달 해석 등을 통해 기포, 수축등 결함의 발생 가능성이 있는 부위를 추출하고 적절한 탕도, 탕구의 변형을 통하여 2차 주조방안을 얻는 반복적인 과정을 통해 주조방안상의 오류를 수정하

여 해석상 주조 결함의 발생을 줄이는 방법으로 최적화를 시도하고 있다[1-5].

하지만 다이캐스팅의 경우 시행착오와 같은 반복적인 방법으로는 용탕거동에 영향을 미치는 탕구의 폭, 두께, 탕구접속각도, 오버플로우의 위치 및 두께와 같은 여러 인자들을 변수로 설정하여 한두번의 해석으로 각각의 변수들이 공정에 미치는 영향을 수치화시키는 힘들다. 따라서 신뢰성을 확보하면서 고려하고자 하는 공정변수들이 다이캐스팅공정에 미치는 영향과 각 공정변수들의 최적의 조건을 최소한의 해석만으로 도출해내기 위하여 적은 실험횟수로도 전체의 효과를 알 수 있게끔 설계변수들을 최적화할 수 있는 실험계획법 (design of experiment)의 일종인 다구찌방법[6]을 적용하였다. 이 방법은 다구찌에 의해서 정의된 유효에너지(원하는 결과)와 유해에너지(원하지 않는 결과)의 비를 나타내는 S/N비(signal-to-noise-ratio)를 이용하여 실험에 필요한 설계 변수들과 그들의 수준을 정의하고

부산대학교 금속공학과(Dept. of Metallurgical Engineering, Pusan National University)  
 \*(주)LG생산기술원(LG Production Engineering Research Center)

설계 변수와 그 수준에 알맞은 직교 배열을 선택하여 이 배열의 순서에 따라 실험을 실시한 후에 얻어진 결과들을 가지고 각각의 인자들이 전체 결과에 어떤 영향을 얼마만큼 미치는지를 결정하고 이를 이용하여 인자들이 가질 수 있는 최적 조건을 결정하게 된다.

본 연구에서는 열유동 해석 프로그램인 Flow-3D에 다구찌가 제시한 실험계획법을 적용하여 승강기용 구동부 구조품의 다이캐스팅 공정의 충전 양상에 미치는 변수들의 영향을 검토하여, 실험계획법 적용에 따른 영향을 기존의 방법과 비교 검토하였다.

## 2. 해석 및 실험방법

### 2.1 해석 프로세스 및 경계조건

전체 해석 프로세스는 I-DEAS를 이용한 구조부의 제품 및 탕구방안, 냉각 시스템에 대한 3차원 형상 모델링과 수치해석을 위한 기본 단위셀로 나누는 격자생성 그리고 열 및 유체거동과 열전달 계산을 위한 해석 과정, 최종 해석결과의 분석을 위한 후처리과정으로 나누어 진행하였으며 Table 1에서 주입용탕의 열, 유동, 응고해석을 위한 전처리(pre-process)과정에서 각 재질 간 해석의 경계조건으로 사용될 용탕의 열물성치 조건을 나타내었다[8-9].

### 2.2 모델링 및 격자생성

에스컬레이터용 계단구조물 다이캐스팅 제품은 Fig. 1에서와 같이 riser부와 cleat부, 연결bridge와 rib로 구성되어 있으며 용탕의 열 및 유동 해석과 열전달 해석을 위한 격자(grid)생성을 위하여 3차원 설계 프로그램인 I-DEAS와 열유체 해석 전용의 Flow-3D를 이용하였다. 여기서 생성되는 격자는 제품의 특성상 복잡한 곡면의 형상과 금형내 실유체영역의 거동 그리고 열전달 면적등을 정확하게 표현하기 위하여 FAVOR (Fraction of Area and Volume Ratio)법을 적용하여 Fig. 2와 같이 탕구방안과 단일체적으로 모델링 하였으며 금형의 초기 온도분포는 사이클 해석결과중 3사이

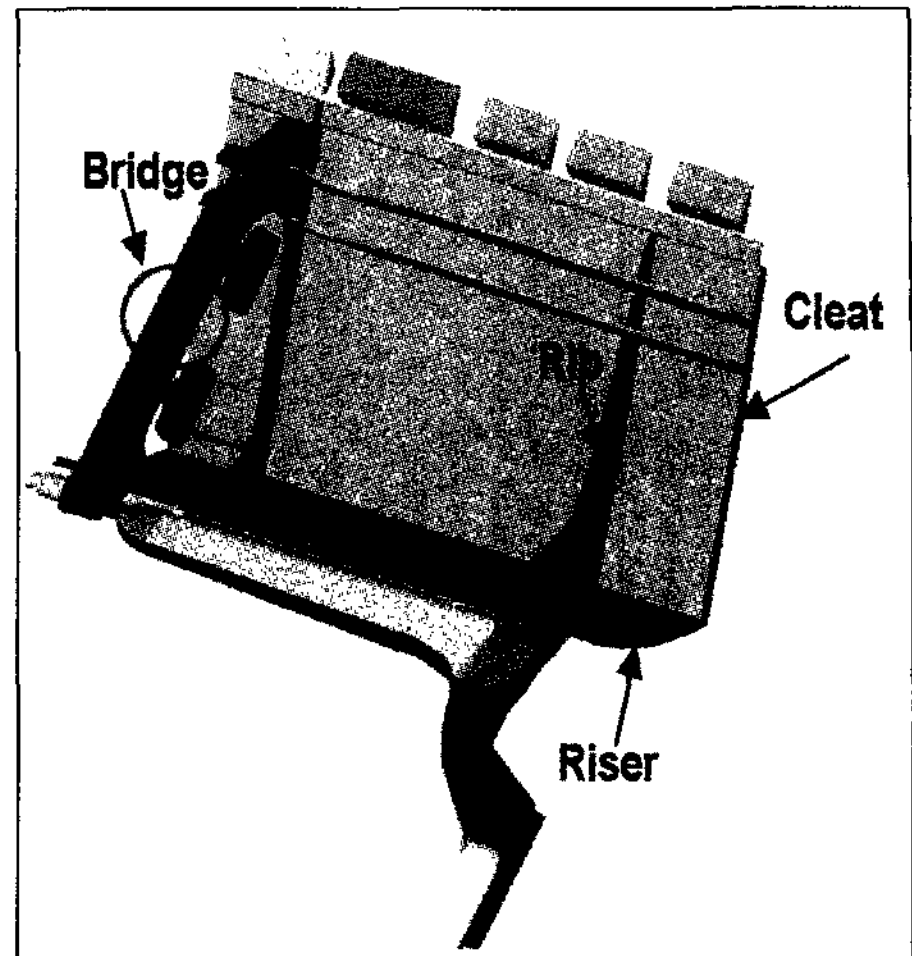


Fig. 1. Solid modeling of a escalator step structure

Table 2. Initial and calculation conditions

Number of mesh	Inlet velocity	Filling time	Cross section of inlet
650,000	Low velocity: 0.42 m/sec High velocity: 5.02 m/sec	0.3 sec	1225 mm <sup>2</sup>

클후 온도분포를 용탕과 접한 금형표면의 경계 조건으로 설정하였으며 초기 경계 조건은 Table 2에서와 같이 구성되어 있다.

난류 모델은 표준  $k-\epsilon$  모델을 사용하였으며 탕구의 중심부를 기준으로 형상과 다른 경계 조건들이 대칭이므로 중심에서의 열전달량과 좌우간 유체압력 및 속도는 '0'이고 좌우 캐비티간 유동과 열전달 양상은 동일하다는 가정하에 대칭모델(symmetric model)만을 해석 대상으로 설정하였다. Fig. 2에서 우측 끝단부가 대칭면을 나타내고 있다.

### 2.3 S/N비의 정의

최적화를 위해서는 목적 함수를 정확하게 정의하는 것이 중요하다. 에스컬레이터용 계단구조물 다이캐스팅에서의 관심 사항은 성형불량을 줄이기 위한 균일한 용탕충전으로서 탕구를 통해 용탕이 riser와 cleat를 균

Table 1. Thermal properties used in the calculation

	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Specific heat (cal/g.°C)	Heat conductivity (cal/cm.sec.°C)	Latent heat (cal/g)	Liquidus temp. (°C)	Solidus temp. (°C)	Initial temp. (°C)
Mold (SKD61)	7.86	0.156	0.071	.	.	.	220
Material (ALDC8S)	2.68	0.2064	0.370	94	582	574	660
Cooling water	2.3	0.23	0.02	.	.	.20	

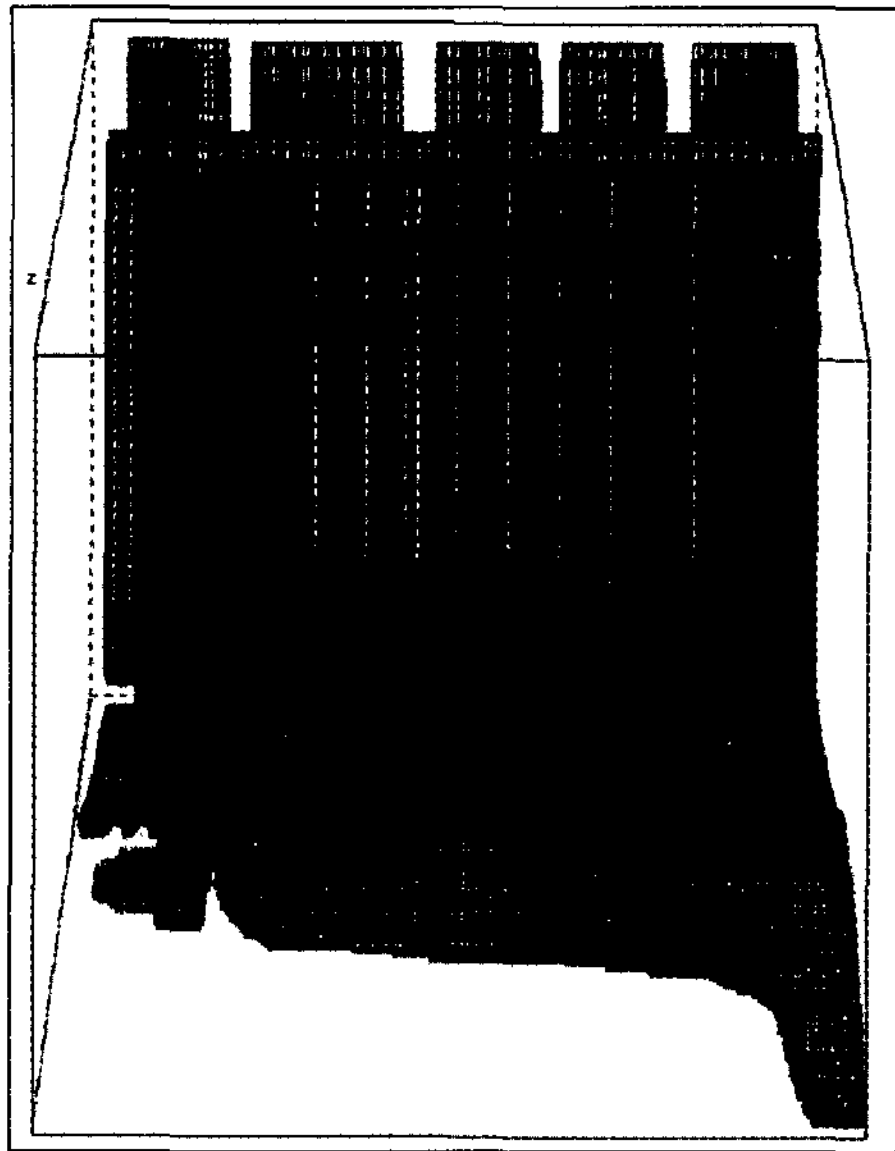


Fig. 2. Three dimensional mesh diagram of a escalator step structure.

일하게 충전하도록 함으로서 용탕의 역류와 난류발생을 최소화 하는 것이다. 따라서 제품부에 충전되는 용탕의 충전거리 차이와 온도차가 적을수록 좋다. 본 연구에서는 용탕의 균일한 충전과 재료를 최소화하기 위한 스크랩(scrap)량을 최소로 하기 위해 특성치를 금형내 주입용탕의 최대, 최소간 충전거리 차이로 선정함으로서 최적조건을 찾고자 한다. 다구찌가 제시한 S/N비(signal-to-noise ratio)는 특성치가 적을수록 좋다는 특성을 가지고 있으므로 망소특성을 채택하면 다음과 같다.

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

여기서,  $\eta$ 는 다구찌가 제시한 S/N비를 나타내고, 단위는 데시벨(dB)이다.  $n$ 은 실험의 반복수이고,  $y_i$ 는 특

성치이다. 식(1)을 보면, 상용 로그 앞에 음의 부호(-)가 존재함으로  $y_i$ 가 감소하면  $\eta$ 값은 증가하는 특성을 보이는데 이것은 계산된 금형내 주입용탕의 최대, 최소간 충전거리의 차이가 작을수록 S/N비는 증가함을 나타낸다.

### 2.4 설계 변수와 수준의 정의

승강기용 구동부 구조품의 경우 주조시 riser부로 주입된 용탕이 rib부를 통해 cleat상단까지 우선 충전되어 역류함으로서 용탕의 역류와 공기 및 개재물의 혼입에 따른 탕경(cold shut)불량이 심하게 나타나며 bridge부의 미성형에 의해 하중 작용시 파단되는 취약점으로 작용되고 있으며 외관불량뿐 아니라 성형품의 가공시 기포에 의한 내부불량까지 국부적으로 나타나게 된다. 따라서 구조불량의 최소화를 위하여 현재의 성형작업조건을 기준으로하여 용탕 거동에 가장 큰 영향을 미치는 탕구방안 형상인자를 실험대상으로 선정하였다. 채택된 각 설계 변수들을 살펴보면, 먼저 탕구(gate)폭(A)는 주입용탕의 최종충전부 형성에 가장 큰 영향을 주므로 설계변수로 선정하였고, 탕구의 두께(B)는 용탕의 충전시간 및 응고온도에 영향을 미치며 탕구 형상인자중 중앙분리(C)는 제품 중심부 우선충전 및 용탕의 압력분포에 영향을 미치므로 설계 변수로 택하였다. 또 탕구접속각도(D)는 금형표면의 국부적 열충격에 의한 소착불량에 영향을 미치며, 오버플로우(overflow)위치(E)는 기포 및 개재물에 의한 성형불량에 영향을 미치므로 설계 변수로 택하였다. 그리고 탕도(runner)두께(F)는 용탕의 응고온도 및 충전속도에 영향을 미치므로 설계변수로 선정하였다[10]. 각 설계 변수가 가질 수 있는 수준의 정의는 현실성이 있는 수준을 정의하기 위해서 먼저 1차로 해석을 하여 택하였고, 수준은 2수준으로 정하였다. 수준의 정의는 보통 설계 값을 기준으로 택하였다[4]. 여러 가지 설계 변수들중 제어할 수 있는 인자들과 이들의 수준을 적절히 설정

Table 3. Control factors used in the simulation

Experimental factors	Width of gate (A)	Thickness of gate (B)	Shape of gate (C)	Contact angle of gate (D)	Location of overflow (E)	Thickenss of runner (F)
Unit	mm	mm	.	Degree( °)	.	mm
Level 1	0.8L	2.6	Gate separator (No)	15	Up:10 Side:Bridge4	32.5
Level 2	0.7L	2.3	Gate separator (Yes)	10	Up:10, Side:Bridge2, Cleat2	30
Present level	0.7L	3.0	Gate separator (No)	15	Up:10,	35

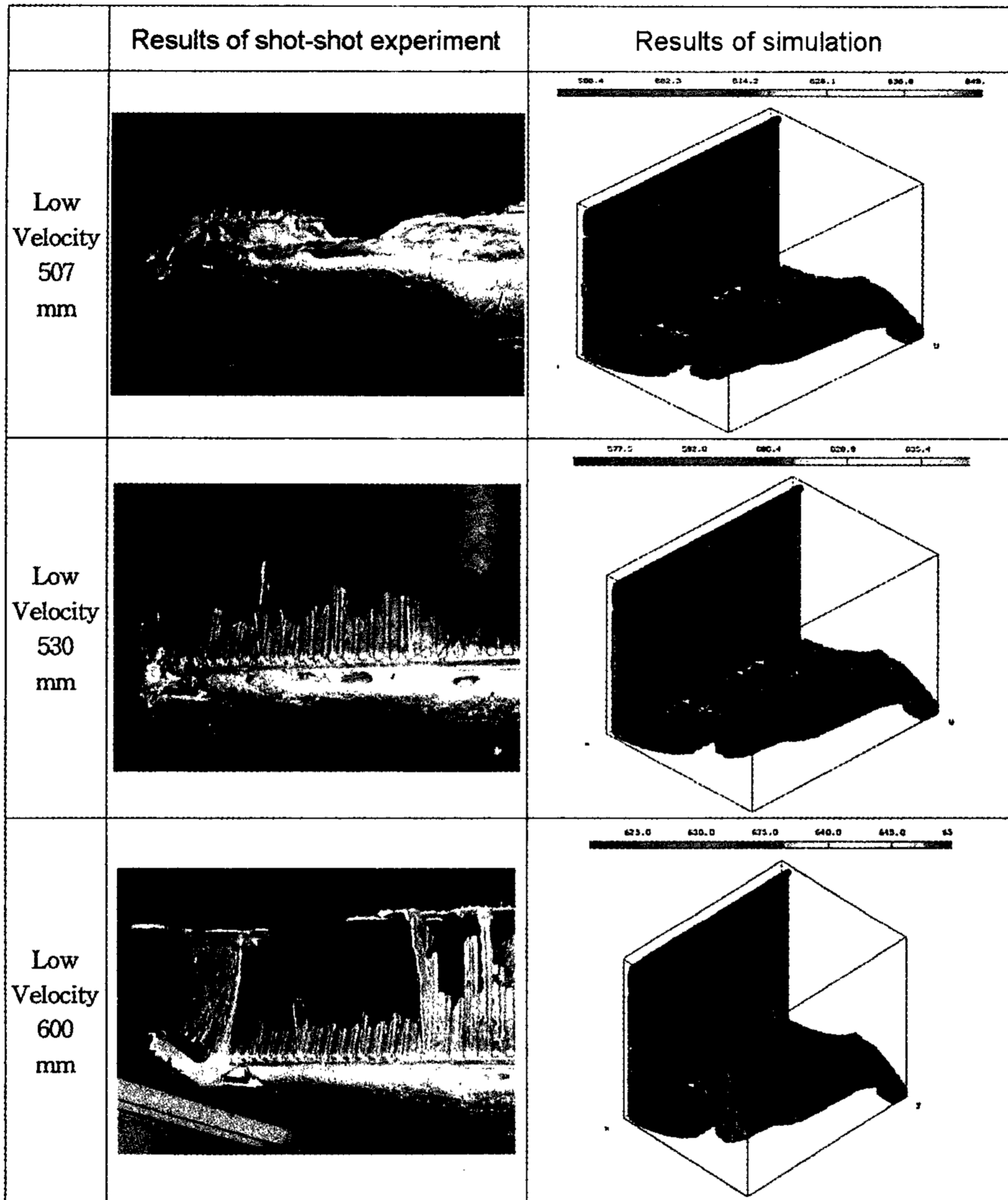


Fig. 3. Shot-shot experiments and results of initial filling simulation at each condition.

하여 정리하면 Table 3과 같다. Table 3내의 “Present level”는 각 제어 인자들의 기준 수준, 즉 현재 설계값을 나타내고 있다.

### 3. 해석결과의 신뢰성 검증

해석결과의 신뢰성을 검증하기 위하여 현재의 모델을 대상으로한 용탕의 Shot-Shot 실험을 통해 실험과 Flow-3D를 통한 해석 결과의 비교검증 작업을 수행하였으며 Fig. 3과 같이 실제의 용탕거동과 유동해석 결과가 유사한 양상을 나타냄으로서 현재의 모델에 대한

용탕의 열유동 해석결과는 충분히 신뢰성이 있음을 확인하였다.

Shot-Shot 실험 : 주입용탕의 충전형태를 해석결과와 비교하기 위한 방법으로 슬리브(sleeve)내 제어가능한 저속구간 거리를 503 mm, 530 mm, 600 mm로 성형후 샘플을 채취하였으며 동일한 조건에서의 유동해석 결과와 비교검증을 실시하였으며 Fig. 3과 같다.

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 직교배열표의 작성 및 해석결과

앞에서 정의한 설계 변수들과 수준을 모두 평가하기 위해서 전조합실험법을 사용하면[7],  $2^6=64$ 번의 해석이 필요하다, 직교 배열표를 이용하면 12번의 수치 해석만 수행하면 된다. Table 3의 설계 변수와 수준에서 직교 배열표를 사용하게 되면 현재의 설계 변수는 6개이고 수준은 2수준이므로 실험의 순서는 Table 4과 같이 12가지가 결정된다. 이와 같은 순서로 수치 해석을 수행하면 각 설계변수들이 용탕의 유동특성에 미치는 영향을 평가할 수 있다. Fig. 4, 5에서 12가지 방법 각각의 해석결과를 보여주고 있다

4.2 인자의 평균치 분석과 최적조건 선정

실험은 동일한 조건에서도 오차 발생률이 높기 때문에 반복 실험을 수행함으로써 여러 개의 측정치를 얻지만, 수치 해석은 실험적 오차를 발생하지 않으므로 한 번의 계산값을 얻으면 된다. 따라서 식(1)의 S/N비에서 실험의 반복수는  $n=1$ 이 된다. Table 4에서의 조건을 가지고 한 해석의 결과 각각의 특성치를 구할 수

있고 이를 식(1)의 S/N비에 대입하여 그 결과를 정리하면 Table 5와 같다. 여기서, 특성치는 용탕의 금형내 최대, 최소간 충전거리 차이를 나타낸 것이다.

Table 4. Orders of simulation obtained by using Taguchi method

Experiment number	A	B	C	D	E	F	Feeding length difference ( $\times 3\text{cm}$ )
case 1	1	1	1	1	1	1	3.38
case 2	1	1	1	1	1	2	3.12
case 3	1	1	2	2	2	1	3.39
case 4	1	2	1	2	2	1	3.45
case 5	1	2	2	1	2	2	3.85
case 6	1	2	2	2	1	2	1.78
case 7	2	1	2	2	1	1	3.95
case 8	2	1	2	1	2	2	4.13
case 9	2	1	1	2	2	2	2.63
case 10	2	2	2	1	1	1	4.18
case 11	2	2	1	2	1	2	3.91
case 12	2	2	1	1	2	1	3.52

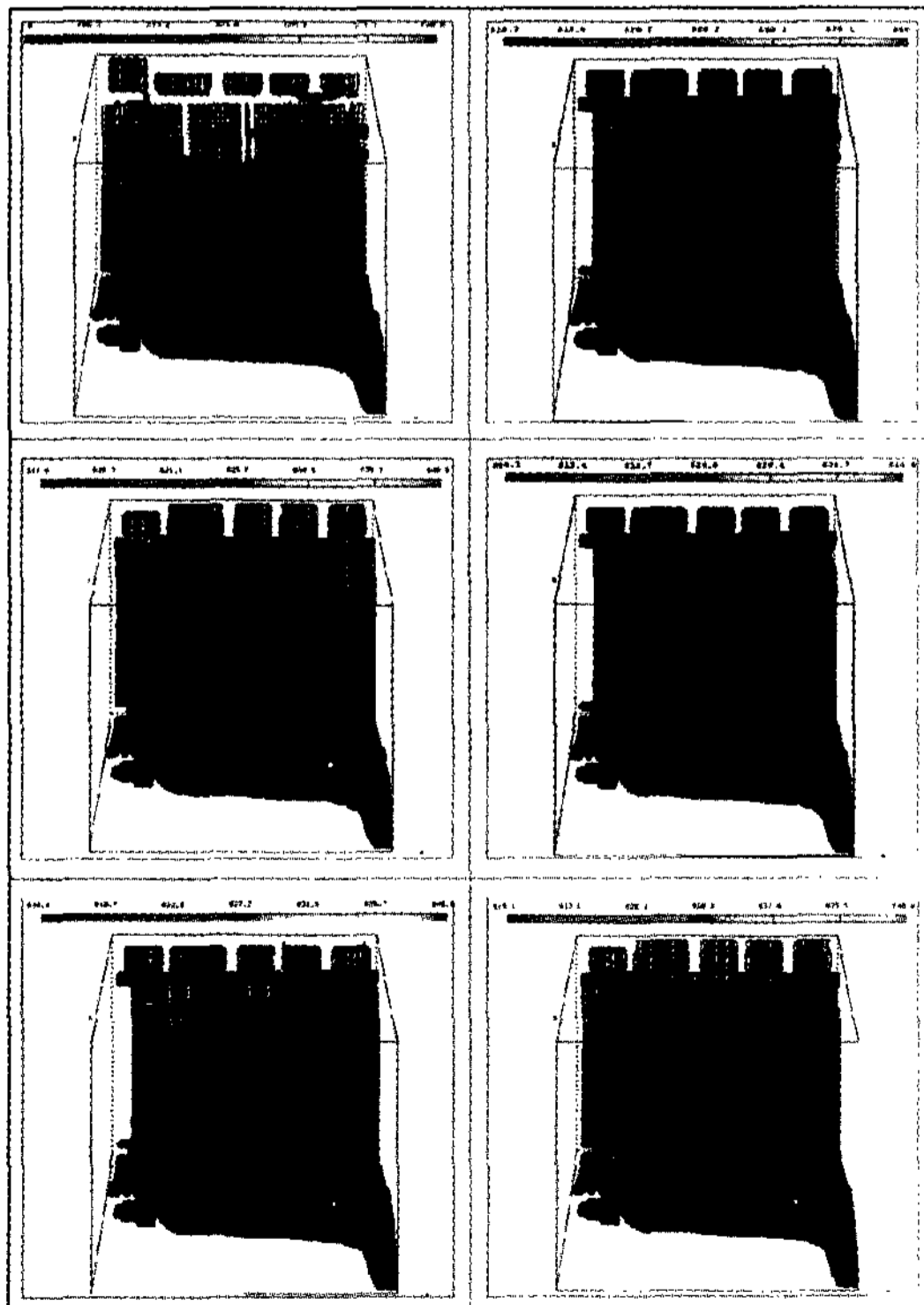


Fig. 4. Filling aspects of the escalator step structure with (a) case 1, (b) case 2, (c) case 3, (d) case 4, (e) case 5 and (f) case 6.

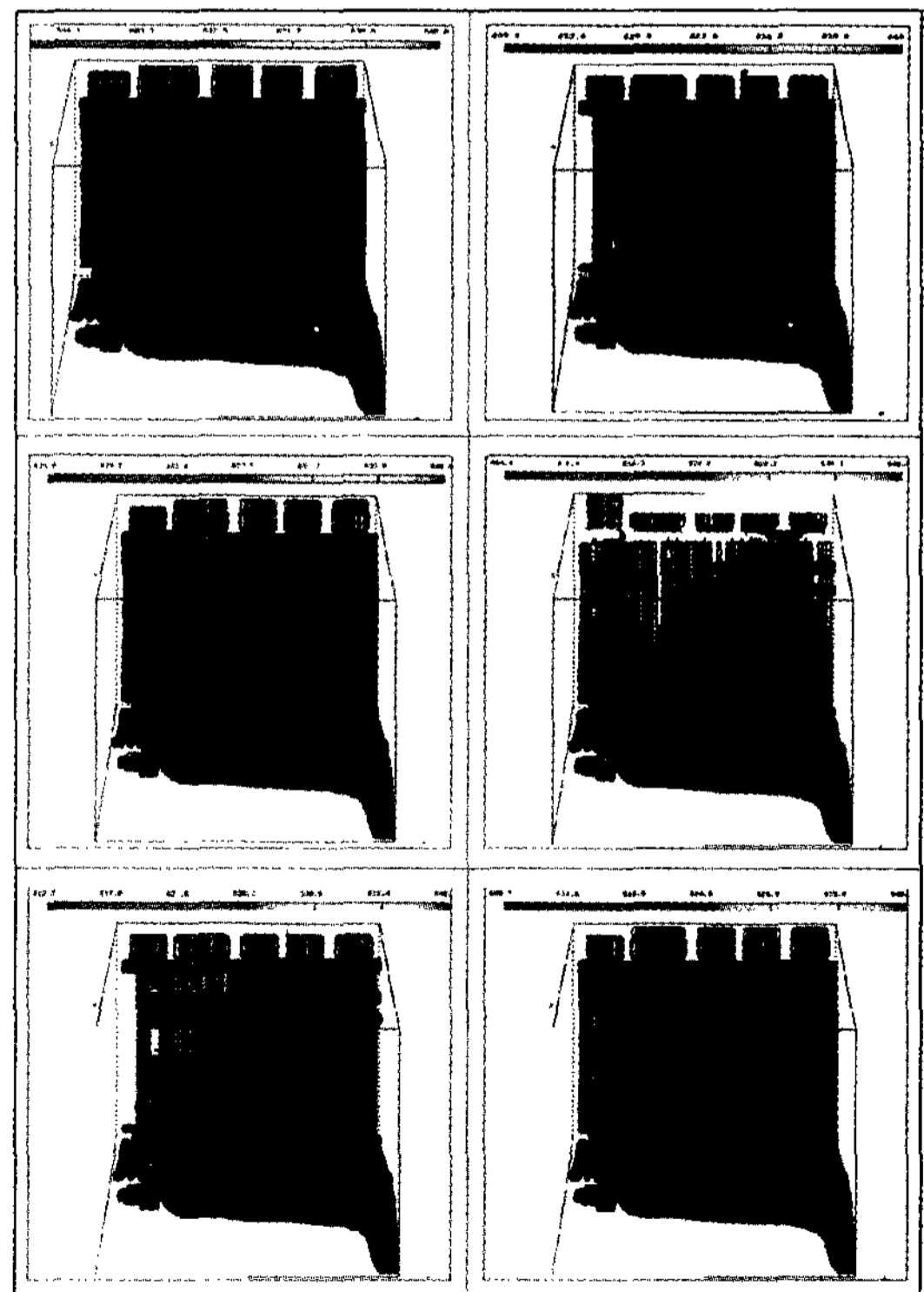


Fig. 5. Filling aspects of the escalator step structure with (a) case 7, (b) case 8, (c) case 9, (d) case 10, (e) case 11 and (f) case 12.

Table 5. Characteristic values and S/N ratios

Experiment number	Feeding length difference (× 3cm)	S/N (dB)
1	3.38	-10.578
2	3.12	-9.883
3	3.39	-10.604
4	3.45	-10.756
5	3.85	-11.709
6	1.78	-5.008
7	3.95	-11.932
8	4.13	-12.319
9	2.63	-8.399
10	4.18	-12.424
11	3.91	-11.844
12	3.43	-10.715

민감도 분석(sensitivity analysis)을 위해서는 S/N비를 기초로 하여 동일한 제어 인자의 수준에 대한 평균 S/N비는 제어 인자의 수준이 적용된 조합 순번의 S/N비를 모두 뽑아서 산술 평균함으로써 얻을 수 있고 정리하면 Table 6와 같다.

Table 6의 수치를 알기 쉽게 보기 위해서 그래프로 그리면 Fig. 6과 같다. Fig. 6에서 보면 S/N비에 민감

한 설계 변수는 A(탕구폭), D(탕구접속각도), F(탕도두께)이고, S/N비에 민감하지 않는 설계변수는 B(탕구두께), C(중앙분리), E(오버플로우위치)임을 알수있다.

이로부터 S/N비를 크게 하는 방향으로 하는 각 설계 변수에 대한 최적 조건의 인자를 구해보면  $A_1D_2F_2$ 이다. Fig. 6에서보면 B, C, E 인자는 S/N비의 변동이 적다. 따라서 현재의 수준을 유지하는 것이 좋으나, S/N비에 대한 변동이 적고 앞의 목적함수 정의에서 균일 충전 및 스크랩량최소화를 설정하였으므로 스크랩량을 줄일 수 있는  $B_2C_1E_1$ 수준을 최적값으로 정하였다. 따라서 최적 설계값을 구해보면 다음과 같다.

최적설계 :  $A_1B_2C_1D_2E_1F_2$

위에서 결정한 최적 설계에 대한 타당성을 조사하기 위하여 현재 설계와 최적 설계의 조건에 대해서 수치 해석을 수행하였다. 그 결과를 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. 해석결과 현재 설계는 용탕의 feeding거리차가  $9.28(\times 3\text{ cm})$  이었고, 최적 설계에 대한 결과는  $1.68(\times 3\text{ cm})$ 임을 알 수 있었다. 그리고 이러한 최적 설계에 대한 결과는 Table 5에서 보인 12가지의 조건들보다도 feeding거리차가 적으므로 그 타당성이 인정

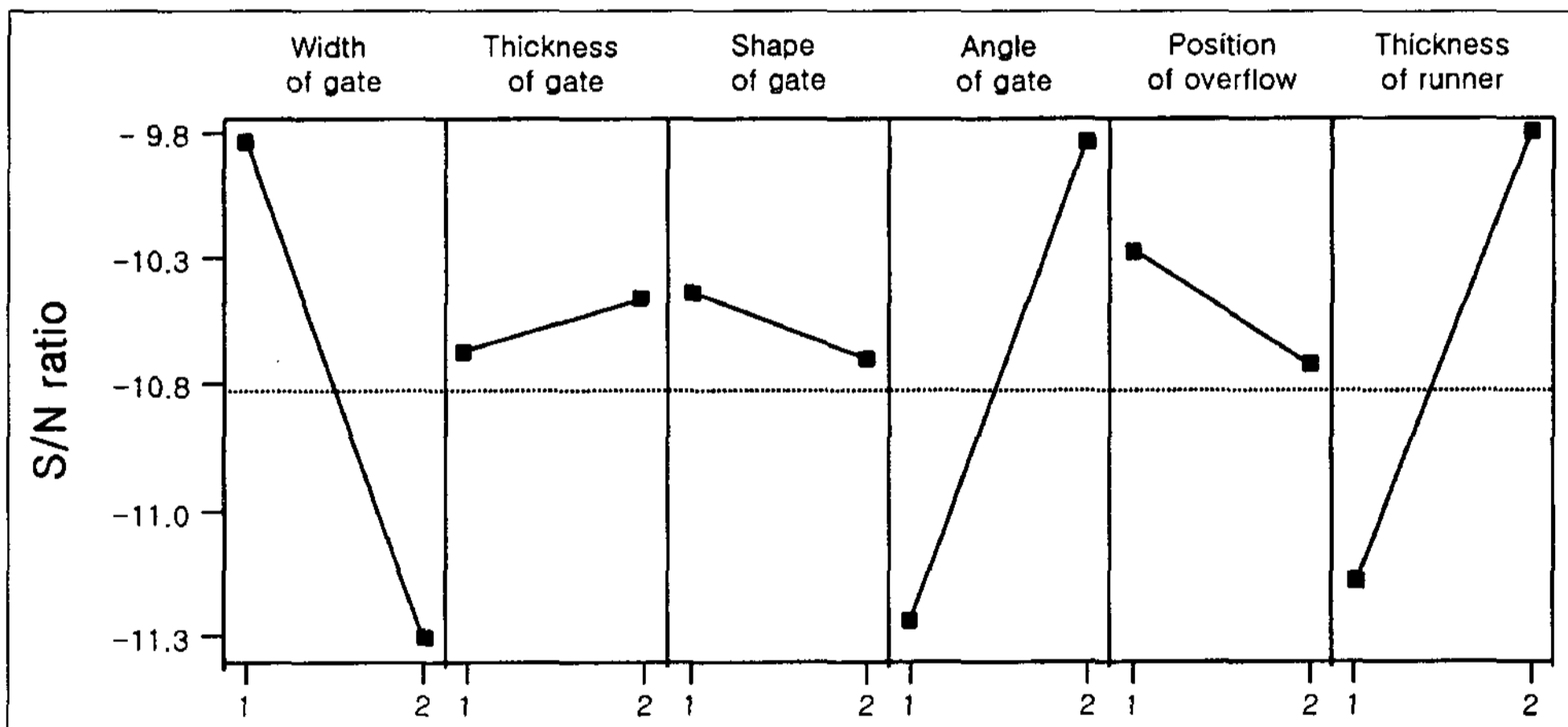


Fig. 6. Variation of S/N ratio according to control factors.

Table 6. Feeding length differences obtained by using simulation

Feeding length difference (× 3cm)	A	B	C	D	E	F
Level 1	-9.757	-10.619	-10.363	-11.271	-10.278	-11.168
Level 2	-11.272	-10.409	-10.666	-9.757	-10.750	-9.860
R (Gain)	1.515	-.0210	0.303	1.514	0.472	1.308
Effectivity	28%	4%	6%	28%	9%	25%



Table 7. Comparison with current and optimal design

	Current	Optimal	Difference(%)
Feeding length difference	9.28 (×3cm)	1.68 (×3cm)	84.3
Mass	8.65 (kg)	7.6 (kg)	12.1

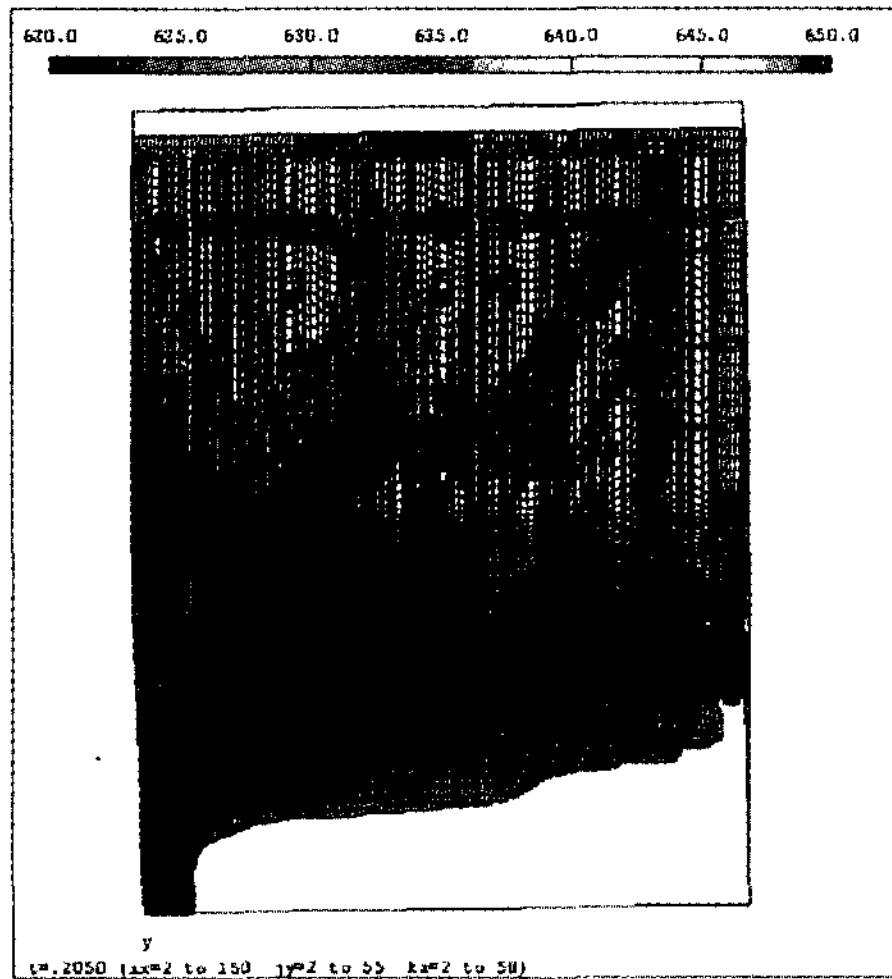


Fig. 7. Filling aspects of the escalator step structure with conventional method.

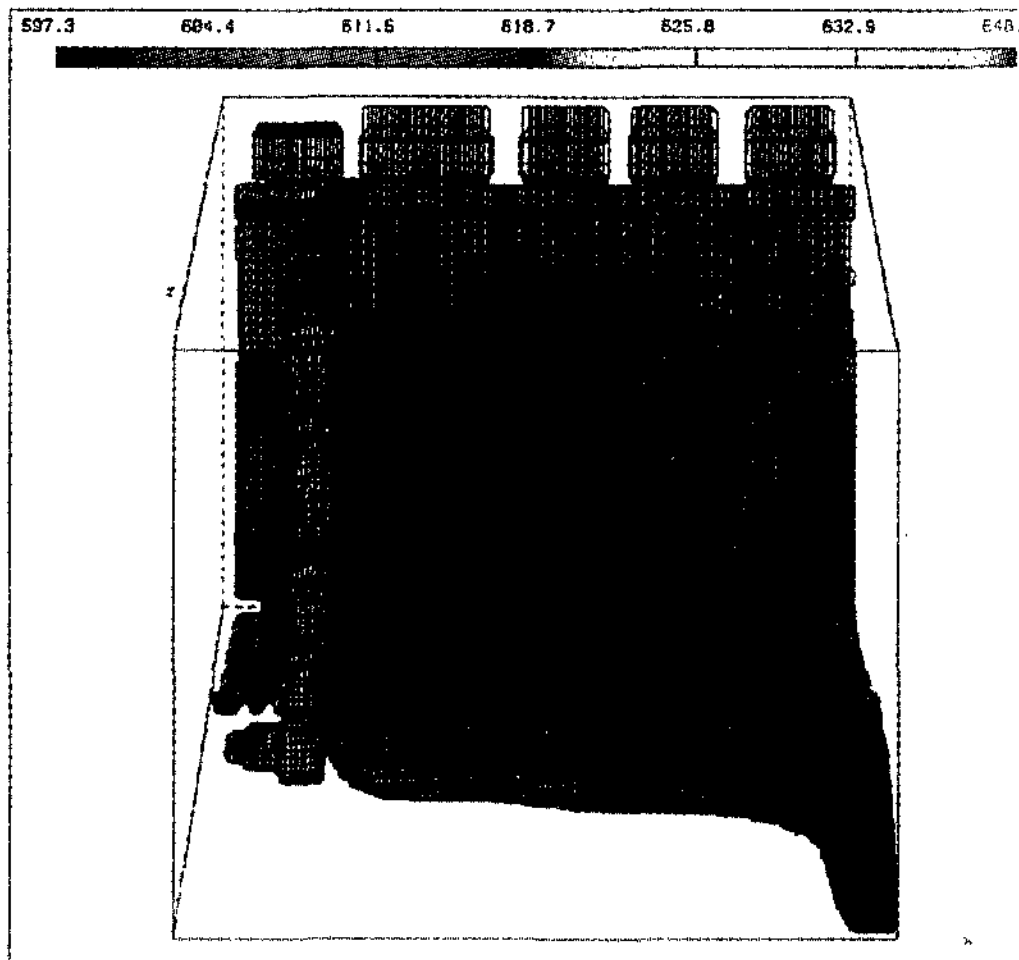


Fig. 8. Filling aspects of the escalator step structure with Taguchi method.

된다. Table 7에서는 최적 설계와 현재 설계값에서 결과 비교를 보여주고 있으며 feeding거리차는 84.3% 감소하였고, 스크랩질량은 12.1% 줄어들었음을 알 수 있

었다.

### 5. 결 론

범용 열 유동 프로그램인 Flow-3d를 이용하여 승강기용 구동부 구조품의 다이캐스팅 공정에서의 탕구방안 최적화를 수행하면서 다구찌의 실험계획법을 적용한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 구조방안 초기단계에서 다구찌방법과 같은 실험계획법을 적용함으로써 열 유동 프로그램의 재현성과 신뢰성을 높일 수 있었고, 구조결함 발생문제를 사전에 예측하고 개발기간을 크게 단축할 수 있음을 확인하였다.

2) 승강기용 구동부 구조품의 용탕 충전거동에서 설계변수로 택한 6개의 인자중 탕구폭과 탕구접속각도, 탕도두께가 주요 영향인자로 작용하였으며 탕구두께와 오버플로우 위치 및 중앙분리인자는 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있었다.

3) 다구찌의 실험계획법으로 구한 탕구방안결과 기존의 탕구방안보다 용탕의 급탕거리차는 84.3%감소하였고, 스크랩(scrap)질량은 12.1% 감소하여 균일 충진을 통한 구조결함의 최소화 및 경제적인 탕구방안 설계가 가능함을 확인하였다.

### 참 고 문 헌

- [1] Y. C. Lee, J. K. Choi and C. P. Hong : Jujo, 17 No. 6 552 (1997)
- [2] C. P. Hong : Jujo, 15 No, 1 5 (1995)
- [3] Bar-Cohen, A. and Rohsenow, W. M., ASME J. of Heat Transfer, Vol. 106, 116 (1984)
- [4] Netrakanti, M. N. and Huang, C. L. D., J. Heat Transfer, Vol. 107, 966 (1985)
- [5] Ullman, A. and Kalman, H., Int. J. of Heat and Mass Trans., Vol. 32, No. 6, 1105 (1989)
- [6] Y. S. Keun, S. S. Park, J. W. Park, Y. S. Choi and S. Y. Choi : J. of KSME, Vol. 21 No. 6 951 (1997)
- [7] J. W. Lee : J. of KSAE, Vol. 11, No. 6 (1989)
- [8] R. W. Lewis and P. M. Tobert, Vol. 44, 61, (1987)
- [9] H. C. Huang and R. W. Lewis, 6th International Conference for Numerical Methods in Thermal Problems, Swansea, U. K., I-DEAS ESC User's Guide, Ohio, U.S.A (1989)
- [10] H. P. Yoon and I. M. Park, Proc. of '98 KOREAN-GERMAN Technomart for Automotive Technologies', 117 (1998) Pusan, Korea