

Fig. 1. Turbine casting (47 tons).

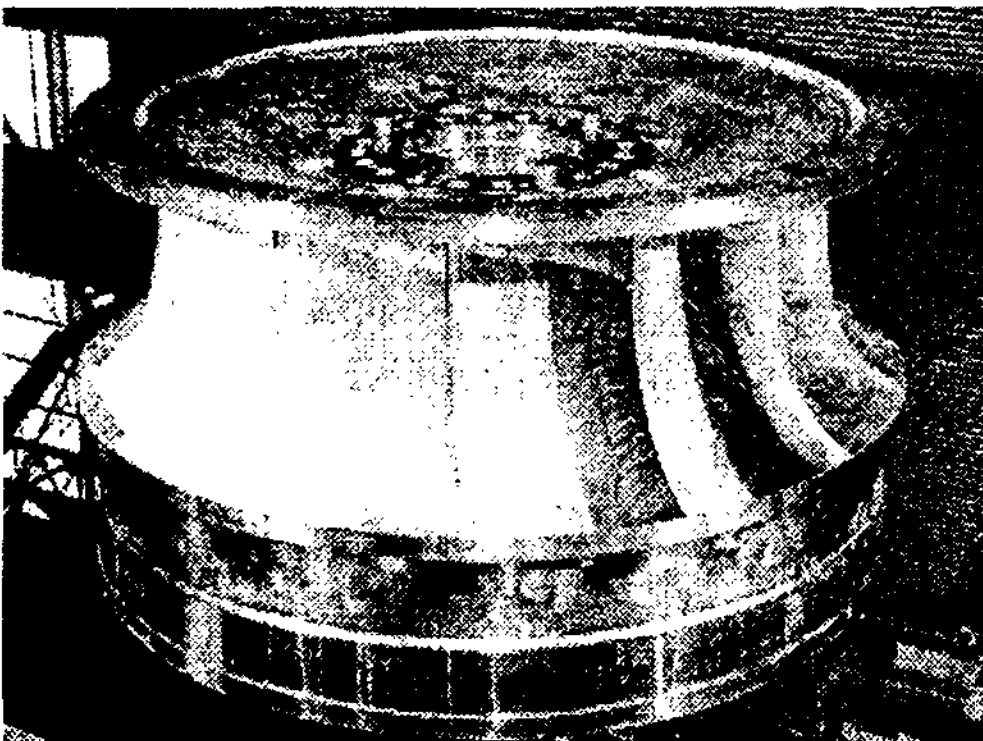


Fig. 2. Turbine runner (140 tons).

것들을 통계적으로 검토한 내용과 그 결과에 대해서 제조계획·관리에 반영한 내용에 대해서 보고하고자 한다.

### 2. 실험 방법

실제 제품공정에서의 표면결함의 감소를 위해 여러 가지 대책과 평가를 공장실험을 통하여 정량화함으로써 표면결함 특유의 발생요인을 추정하고, 그것들을 공장의 고유기술로써 축적시키는 방법을 채택하였다. 결함에 대한 평가는 결함제거흔적의 체적을 이용하여 제품각부의 유사형상부의 데이터를 정리하여 통계적으로 평가함으로써 데이터수의 증가와 데이터 수집기간을 단축하였다. 통계처리는 열간균열, 주물사용착결함의 해석에는 언어데이터를 정량화 할 필요성으로부터 수량화해석을 하고, 치수결함해석에는 복수의 정량적요인과 상관관계를 구하지 않으면 안되었기 때문에 중회귀

분석을 하였다. 양자의 해석방법은 다른 방법이어서 자세한 분석방법에 대해서는 복잡성을 피하기 위하여 각 해석결과를 합쳐서 각각의 결함에 대해서 정리하였다. 또한 이와같은 분석을 통하여 얻어진 결과는 공장의 고유기술로 축적해가는 시스템을 구축하고 운용한 방법이나 결과에 대해서는 고찰에서 언급하였다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 열간균열결함

##### 3.1.1 해석방법

열간균열결함은 응고시 응고층의 수축에 상응한 용강의 보급이 이루어지지 않고 덴드라이트간격이 수축방향에 직각인 면에서 판상에 가까운 연속된 공간이 되어 생성된다. 그러므로 그 생성요인은 응고층의 형성속도, 고액공존층의 온도구배, 응고중 성분변화(편석)에 따른 고상선온도의 변화 및 주형의 온도상승을 동반한 주형의 팽창에 의하여 발생하는 응고층에의 인장응력 부여 등 여러 요인들이 관계한다. 실제제품의 제조에 있어서는 제품의 형상에 의하여 이러한 요인들이 결함발생에 미치는 영향을 감소시키기 위하여 사형에 신축성을 부여하거나, 탕도가 주물의 수축저항을 증대하지 않게 탕구방안을 고려하거나, 코너부에 리브(rib)를 설치하여 수축저항을 크게 하는 등 여러가지 현장적 대책을 적용하여 열간균열의 발생을 방지하는 노력이 이루어지고 있다.

결함발생부위로는 그 방지대책을 확립하지 않았던 turbin casing의 수평계수면 뒷쪽(Fig. 3에서 외주 2중선의 안쪽의 거의 전주(全周)에 해당되는 부위 Fig. 1에서 화살표로 표시한 부위)을 선정하여 그 부위의 열간균열결함 제거흔적 체적을 특성치로 사용하였다. 대형주강품의 경우에는 방지대책의 적용으로부터 평가에 이르기까지는 1점의 데이터를 얻는데 약 반년정도 걸리기 때문에 한개의 제품에 복수의 대책을 적용하는 방법을 채택하였다. 대책의 조합은 순차효과가 있다고 생각되는 대책을 채택하였기 때문에 결과적으로는 각각의 제품에 대하여 다른 조합이 적용되게 되었다. 또한 제품의 형상도 몇가지의 형태로 분류하여 요인의 하나로써 평가했다.

이와같이 해서 제품형상의 형태와 각 결함방지대책을 언어정보에 의한(예를들면 사형내에 판상신축재 삽입이라는 대책을 K로 하는 등) 각각의 요인으로서 취

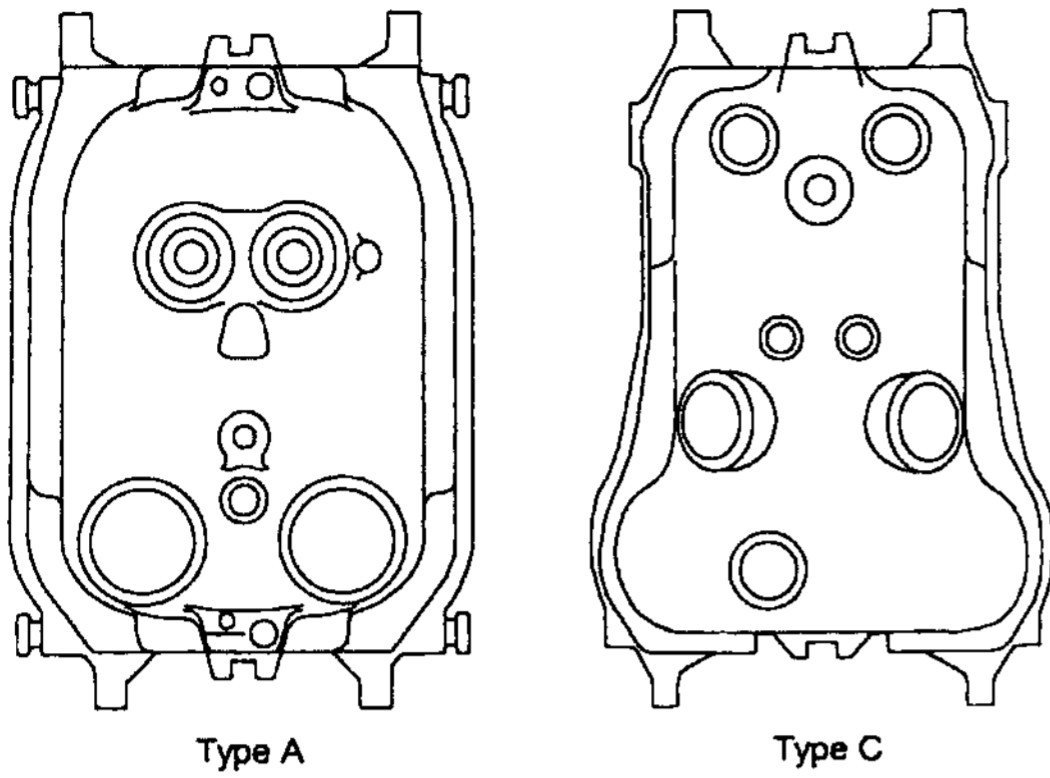


Fig. 3. Type example of Turbine Shells.

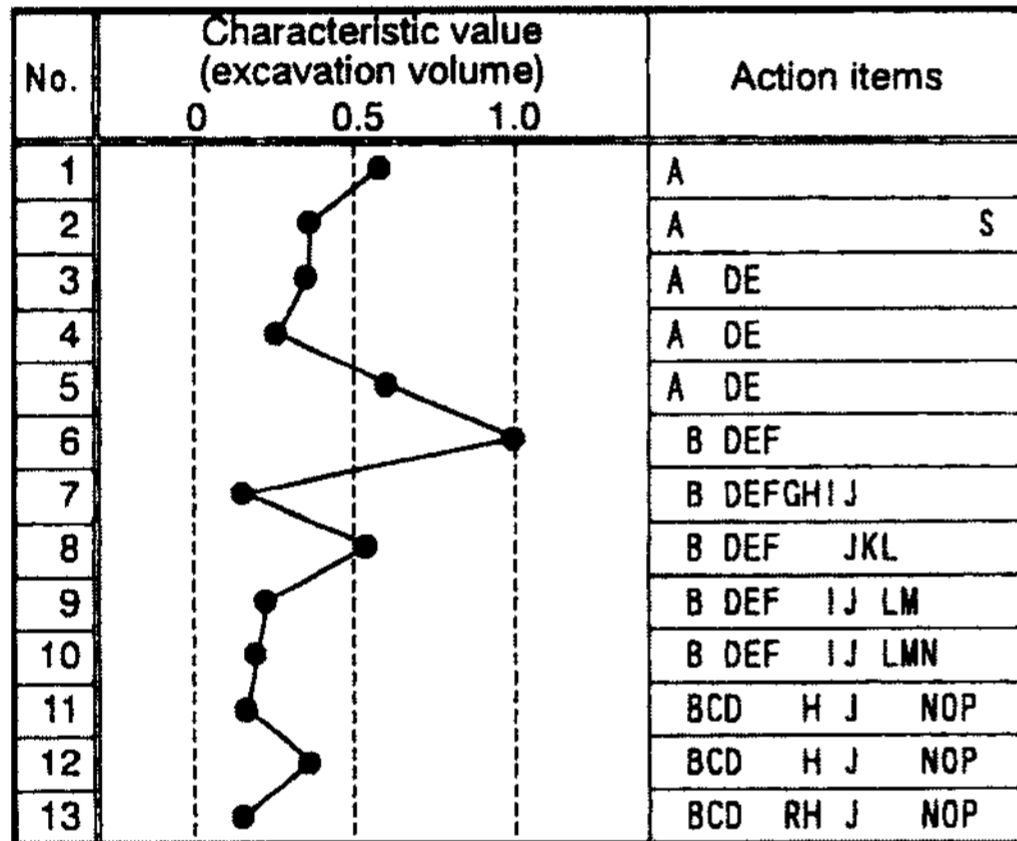


Fig. 4. Characteristic value against action items for each turbine shells.

급하여, 특성치와의 조합으로 수량화 I 형태의 통계해석을 하였다. 특성치로서의 각제품(No. 1~13)마다의 결함제거 흔적체적지수의 추이절개선 그래프와 요인으로서의 각 제품마다에 적용된 형상, 대책등 모든 데이터 (Figure중 A~P로 표기한 기호)의 관계예를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4로부터 각각의 대책이 결함감소에 효과가 있었는지의 여부를 추정, 고려하는 것은 곤란하다는 것을 알수 있다. Fig. 4의 내용을 수량화해석하기 위한 데이터로 만들기 위해 각 요인을 제품형상, S(황) 함유량, 주입온도, 주형종류 및 결함방지대책으로 구분하여 Fig. 5에 나타낸 것처럼 정리해서 수량화 I 형태의 계산을 하였다. 수량화해석으로 이러한 모든 요인들이 특성치로서의 결함제거 흔적체적으로써 어떤 값

Number	Name	Excavation volume	Type					S		PT		Mold			Actions																						
			1	2	3	4	5	H	M	L	h	m	l	a	b	c	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O						
7-001	AA	1.26	1					1	1			1	1	1	1	1							1														
7-002	AB	0.92		1					1	1		1	1	1	1	1	1	1						1						1	1			1	1		
7-003	AC	2.43			1	1				1				1		1	1	1	1																	1	1

S contents (mass %): H: 0.009~0.010, M: 0.006~0.008, L: ≤0.005  
 Pouring Temperature: PT (° K): h: ≥1,853, m: 1,838~1,853, l: <1,838

Fig. 5. Input data for quantification analysis.

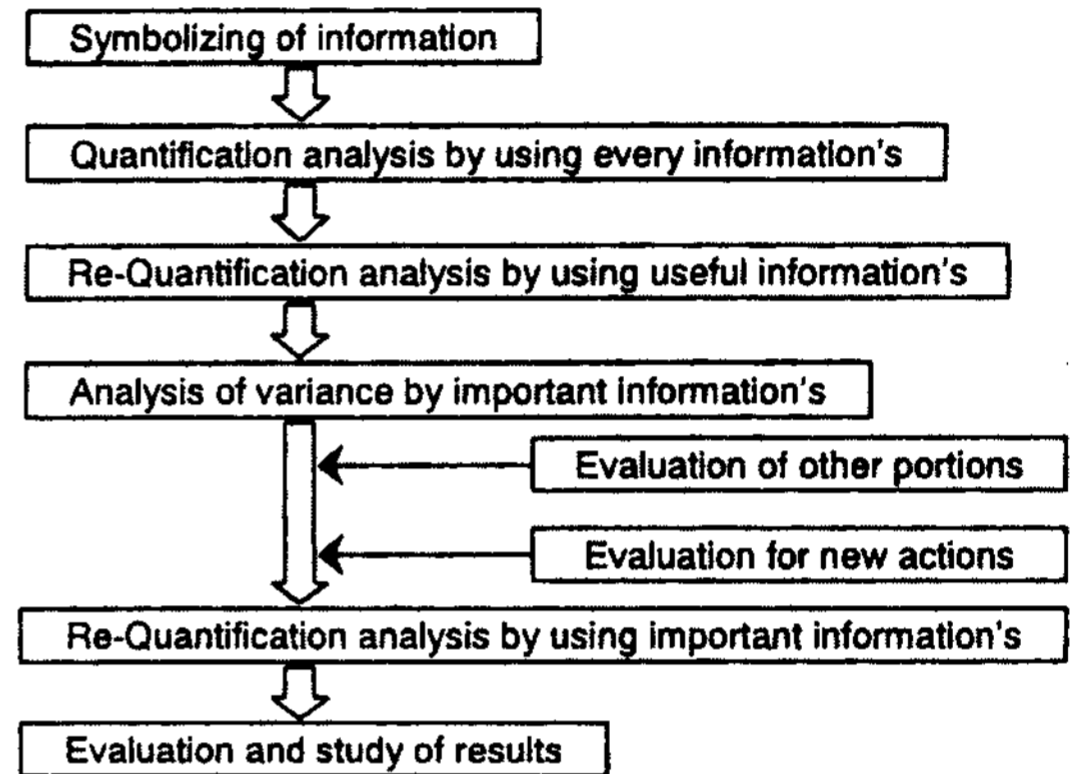


Fig. 6. Analysis flow.

이 될 것인가가 계산되기 때문에 그 값의 대소에 의해 각 요인(대책)의 결함발생 방지대책효과를 정량적으로 평가할 수 있게 된다. 계산결과 타당성을 확인하기 위해 수량화해석에 의한 효과가 있다고 판정된 요인에서 적용수가 많은 것 들을 정리하여 분산분석을 하여 그 요인의 의의를 확인하였다. 이와같은 해석순서를 Fig. 6에 나타내었는데 분산분석에 의한 해석결과로부터도 요인의 유의성(의의)을 통계적으로 확인 할 수 있었다.

3.1.2 해석결과

수량화 I 형태에 의한 각 요인의 계산결과를 Fig. 7에, 또한 특성치의 계산결과와 실적치를 함께 Fig. 8에 각각 지수화하여 나타내었다. Fig. 7은 수량화 I에 의한 계산결과 얻어진 수치를 요인별로 봉그래프로 나타낸 것으로 각 요인에 부여된 결함발생량의 수치에 대하여 각 분류별로 평균치를 구하여 각 요인의 수치평균치로부터의 차를, 평균치를 0으로하고, 전체차중에서 최대치를 1로하여 봉그래프로 나타낸 것이다. 봉그래프의 값이 양(+)인 것은 결함발생량으로써 계산된 값이 크고, 부(-)인 것은 값이 작은 것을 의미한다. 그러

므로 Fig. 7로부터의 차가 큰 요인(+값이 큰 것)은 결함발생방지효과가 적고, 차가 작은 요인(-값이 큰 것)은 결함발생방지효과가 큰 것이라고 생각할 수 있다.

Fig. 8은 수량화해석으로 얻어진 수식으로써 실적치를 어느 정도 설명하고 있는가를 파악하기 위한 그래프로, 횡축(x축)에 각 제품을 1~45까지의 번호로 나타내고, 종축(y축)에 각 제품별 결함제거 흔적체적의 실적치와 계산치를 지수로 나타낸 것으로서, 각 제품에서의 실적치와 계산치의 차이의 대소와 전체적인 경향에서 볼 때 계산치와 실적치가 아주 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 계산에 의한 기여율(분석정도를 나타내는 지표로써 상관계수의 2승이 됨)도 67.4%로 수량화 해석으로써는 아주 좋은 값을 나타내고 있다고 생각할 수 있어서 계산결과는 신뢰성이 높다고 평가할 수 있다. (기여율 67.4%는 개념적으로는 실적치의 약 80%를 해석함으로써 얻어진 계산식으로 설명할 수 있음을 나타냄) 이러한 결과들을 정리하기 위하여 각 대책의 구체적인 내용의 예를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9의 첫번째는 주형의 신축성을 향상할 목적으로 해당하는 부위의 주형중에 신축재로 판상발포스티로폼(SM: DIR 50~150 mm의 10~15 mm 두께의 것)을 삽입한 예이고, 두 번째는 제품의 수축저항, 코너부의 hot spot 감소를 위해 탕도의 위치를 변화시킨

를 나타내는 지표로써 상관계수의 2승이 됨)도 67.4%로 수량화 해석으로써는 아주 좋은 값을 나타내고 있다고 생각할 수 있어서 계산결과는 신뢰성이 높다고 평가할 수 있다. (기여율 67.4%는 개념적으로는 실적치의 약 80%를 해석함으로써 얻어진 계산식으로 설명할 수 있음을 나타냄) 이러한 결과들을 정리하기 위하여 각 대책의 구체적인 내용의 예를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9의 첫번째는 주형의 신축성을 향상할 목적으로 해당하는 부위의 주형중에 신축재로 판상발포스티로폼(SM: DIR 50~150 mm의 10~15 mm 두께의 것)을 삽입한 예이고, 두 번째는 제품의 수축저항, 코너부의 hot spot 감소를 위해 탕도의 위치를 변화시킨

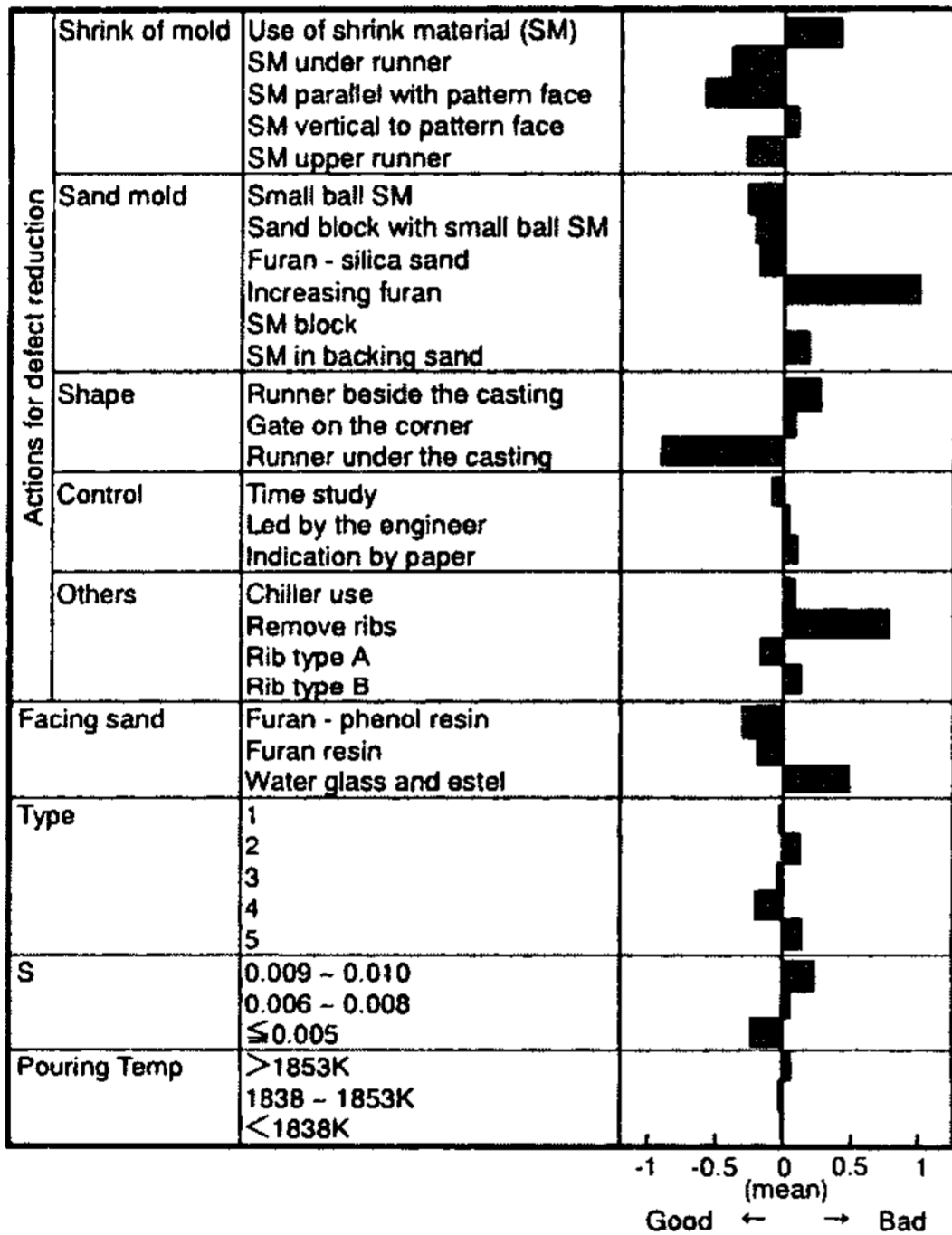


Fig. 7. Results of quantification analysis (Hot tear).

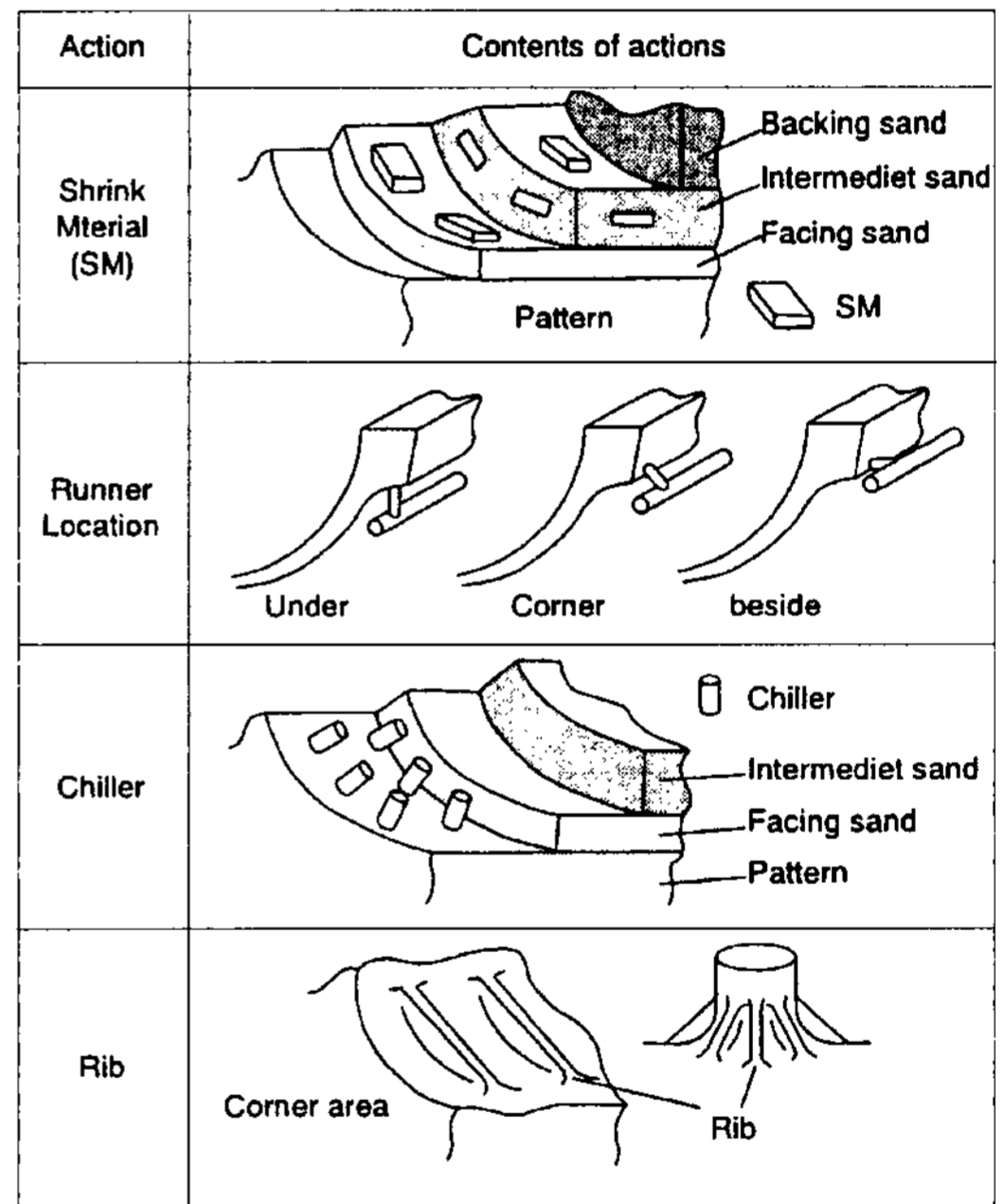


Fig. 9. Contents of each actions.

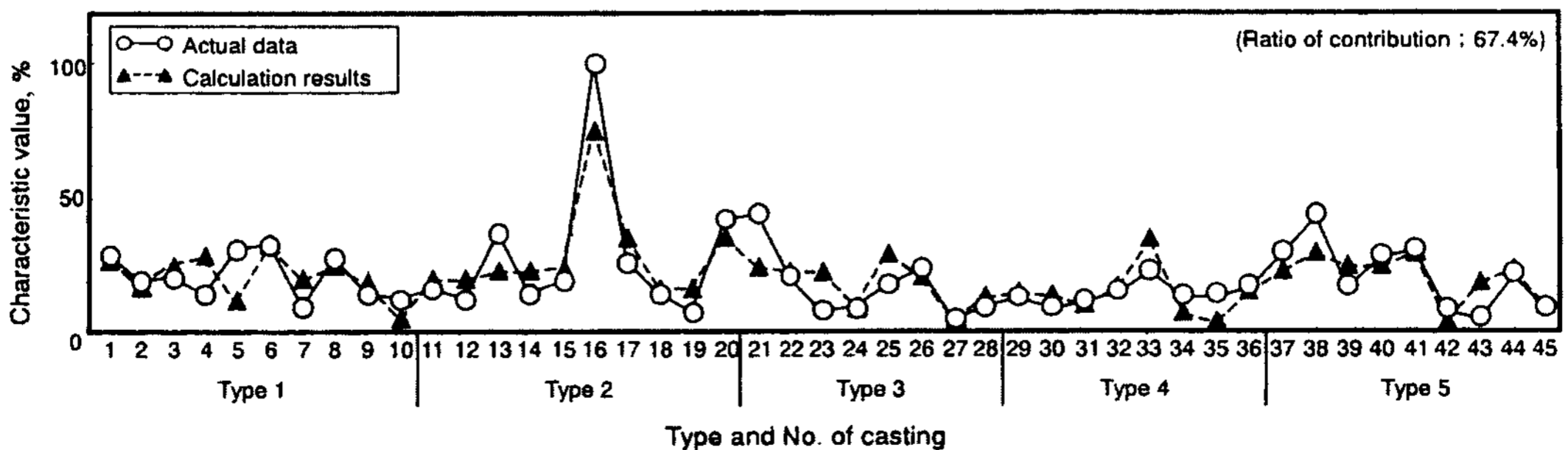


Fig. 8. Calculation results by quantification analysis and data.

예를 나타낸 것이고, 세 번째는 코너부의 주형냉각능 향상을 위해 냉금을 이용한 예이며, 네 번째는 제품수축시의 코너부의 응력완화를 위해 rib를 설치한 예를 각각 나타내었다. 이들 그림으로부터 Fig. 7에 나타낸 각 대책에 대한 평가는 결함발생대책을 기술적으로 고려한 경우의 정성적 경향으로부터도 모순이 없다고 추측되었다. Fig. 7의 결과로부터 각 대책의 효과를 점수평가하여, 열간균열결함의 발생요인에 대한 정성적 요인구분을 횡축에, 실제의 대책내용을 종축으로 하여 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10으로부터 해당제품에서의 열간균열의 발생요인으로써 다음과 같은 정보를 얻을수 있었다.

- 1) 주형내에 삽입하는 신축재는 그 사용방법에 따라서는 효과를 얻을수 있다.
- 2) 사형의 강도가 결함발생량에 영향을 준다.(강도가 크면 결함발생량이 많다)
- 3) 주형수축을 저해하는 형상은 결함발생을 증가시킨다.
- 4) 냉각핀은 결함발생방지 효과가 있다.
- 5) 대책의 시행관리방법(현장입회 등)은 별로 효과에는 영향을 미치지 않는다.
- 6) 유황의 양은 소량의 차이라도 결함발생량에 영향을 미친다

### 3.2 주물사용착결함

#### 3.2.1 해석방법

주물사용착결함에 대해서도 3.1.1항에서 언급한 것과 같은 방법으로 수량화 I 형태의 계산을 하여 해석을 하

Root cause Action items	Pouring Temp.		Chemical Composition		Shrink ability			Mold material			Control method		Solidification	
	P	S	Total	Local	Shape	A	B	C	Control method	Cooling	Stress			
Pouring temp.	X													
S contents		◎												
P contents		X												
Type					○								○	
Resin									○					
Application of SM				◎	◎				◎					
Block with SM				◎					◎					
Location of runner	X			○	◎									
Rib					○							○	△	
Facing sand									○					
Chiller												△		
Control method										○				
Variance				○	○				○					
	0	0	3	10	3	9	4	8		4		3	3	

X : No influence (0 point)  
 △ : Little influence (1 point)  
 ○ : Some influence (2 point)  
 ◎ : Much influence (3 point)

Fig. 10. Matrix analysis of the results.

였다.[14] 상세한 해석순서에 대해서는 3.1.1항과 같으므로 여기에서 그 설명은 생략한다.

#### 3.2.2 해석결과

수량화 형태에 의한 각 요인의 계산결과를 Fig. 11에, 특성치의 계산결과와 실적치를 Fig. 12에 열간균열 결함의 경우와 동일하게 정리하여 나타내었다. Fig. 12로부터 명확히 알수 있는 것처럼 기여율도 71.5%로 높아서, 계산결과와 신뢰성은 높다고 평가할 수 있으며, Fig. 11의 각 요인의 계산결과와, 별도로 실시한 물모델 시험결과[15]등으로부터 주물사용착 결함발생요인으로서 다음과 같은 정보를 얻을수 있었다.

- 1) 사형의 종류(골재, 점결제)는 결함발생에 영향을 미친다.
- 2) 사형강도의 대소는 결함발생량에 영향을 준다.
- 3) 주형의 세척정도의 용이성(형상,凹凸)은 결함발생량에 영향을 준다.
- 4) 주형내 탕흐름 조건은 결함의 발생위치에 영향을 준다.

#### 3.2.3 치수결함

수력발전소에서 사용되는 수차(runner)는 대형이며 후막으로 복잡한 형상을 가지고 있으며 동시에 3차원 곡면의 좌표점에 대한 치수공차가 엄격하여 치수관리에 많은 고유기술을 필요로 하는 제품이다. 그래서 변형을 조사하여 그 요인을 추출하여 치수결함에 대한 방안을 정리하기 위한 대상제품으로 선택하여 해석을 하였다.

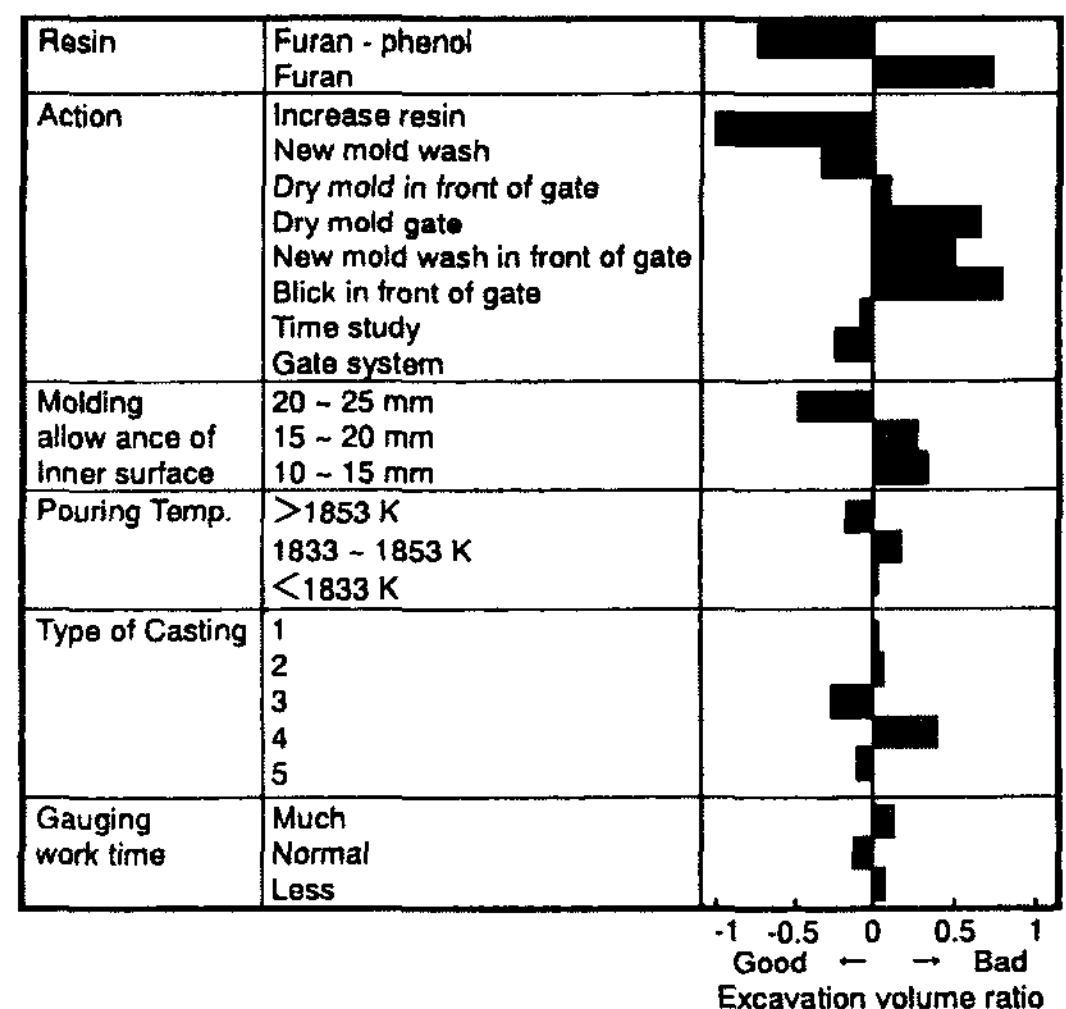


Fig. 11. Results of quantification analysis (Sand inclusion).

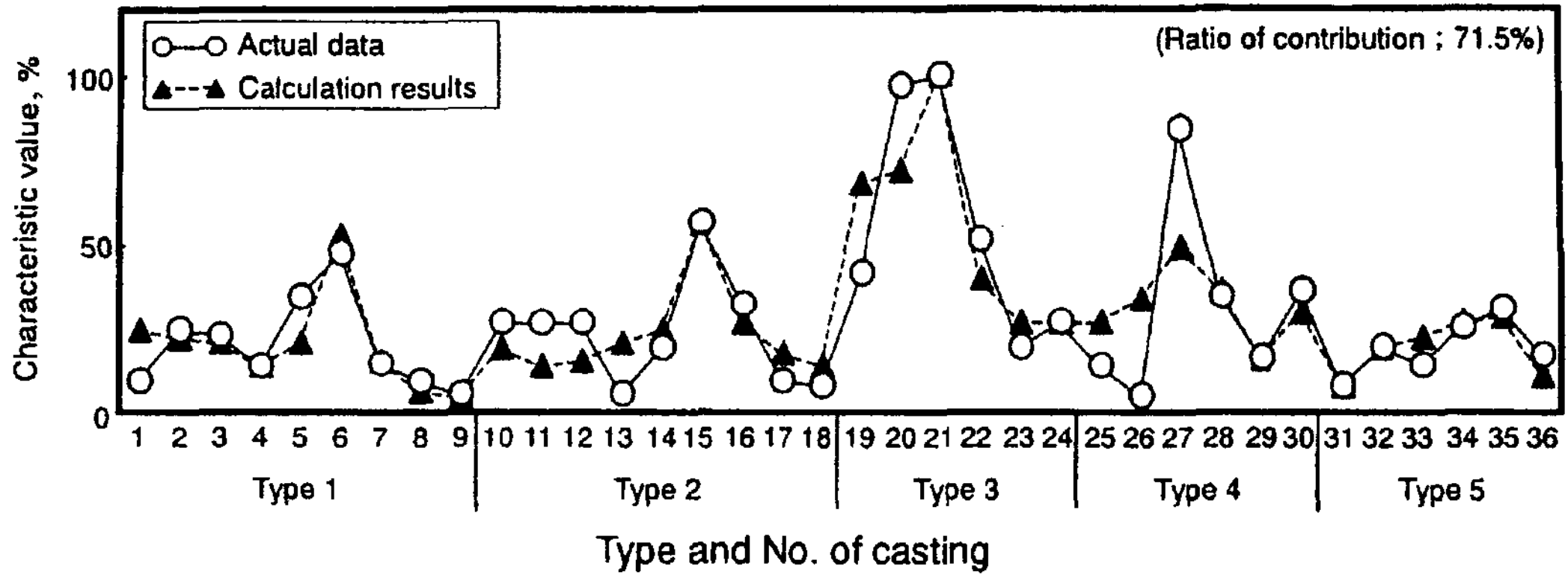


Fig. 12. Calculation results by quantification analysis and actual data.

3.2.4 해석방법

runner의 형상에 착목하여 치수특성치를 수축률로 하여 Fig. 13에 나타낸 것처럼 부위별로 A~E로 나누고, 제조과정에 있어서 변형요인과의 상관관계를 구했다. 변형요인으로서는 주입에서부터 열처리종료까지의 공정에서의 열이력에 관한 인자를 중심으로 다루어, 변형량과 각 요인과의 상관관계는 중회귀분석에 의해 구하고, 변형경향을 일정하게 하는 목적관수에 중회귀식을 대입함으로써 각 요인의 최적치를 구했다. 해석순서를 Fig. 14에, 사용한 목적관수를 (1)식으로 나타내었다. 식 (1)은 Fig. 13에 나타낸 각 특성치의 부위로부터 알수 있듯이 제품의 상하방향의 변형경향이 제품의 내외부에서, 직경방향의 변형경향이 제품의 상하부에서 각각 일정하게 되는 것을 목적으로 하는 의미에서 설정하였다.

$$(Y_A - Y_B) + (Y_C - Y_E) = Z, \quad Z = \text{Min} \quad (1)$$

3.2.5 해석결과

A~E에서의 특성치를 수축률로 하여  $Y_A \sim Y_E$ 로 하고 중회귀분석에 의해 얻어진 결과를 Table 1에 나타내었다. 횡축에는 취급한 요인을  $X_1 \sim X_{17}$ 로 하여 각각의 특성치에서의 중회귀분석에서 유의하다고 판정된 요인을 화살표로 나타내었다. Table 1의 화살표에서 위쪽으로 향하는 것은 그 요인의 수치가 증가할 때에 수축률을 증가시키는 경향을 의미하고, 화살표가 아래쪽으로 향하는 것은 감소시키는 경향을 의미한다. Table 1로부터 확실히 알 수 있듯이 같은 요인에서도 제품 각 부위의 변형에 미치는 영향은 다르다는 것을 알 수 있다.

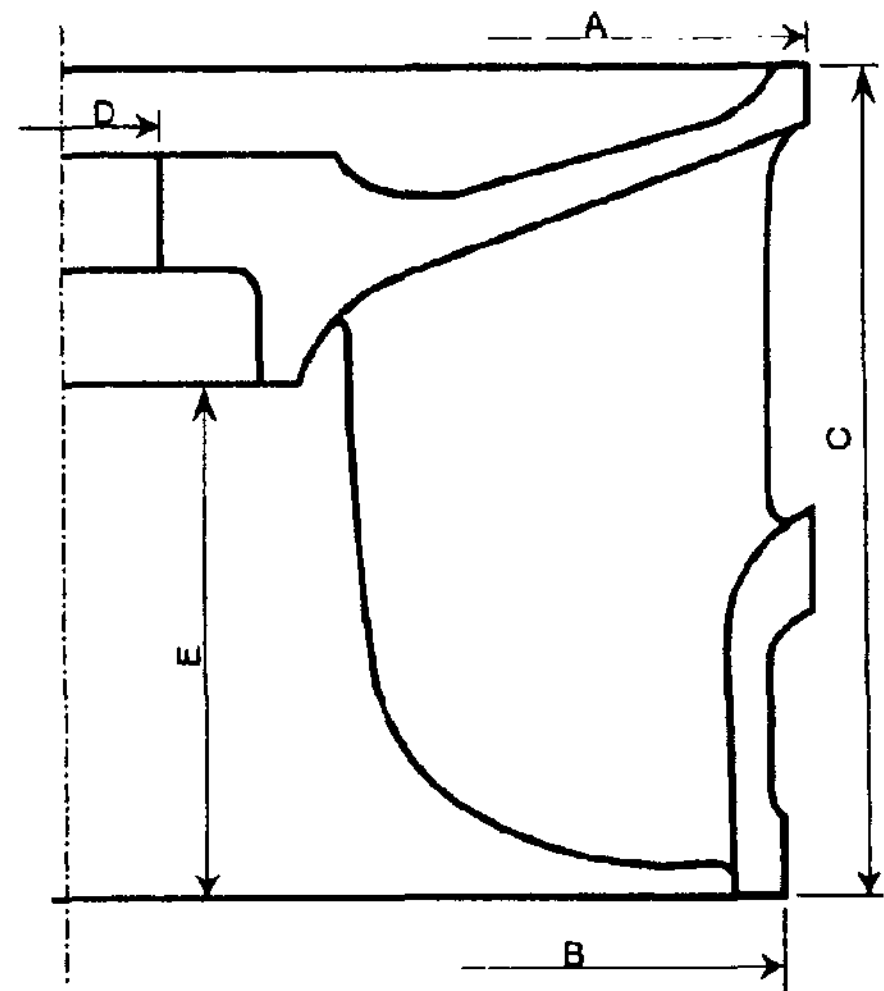


Fig. 13. Portion of characteristic value.

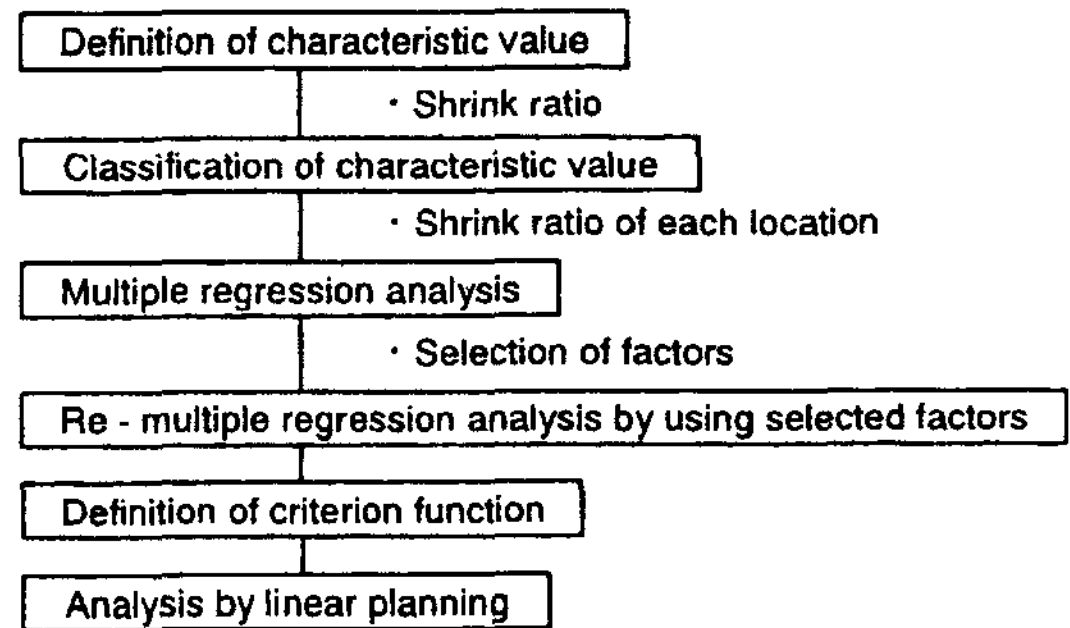


Fig. 14. Analysis flow for deformation.

Table 1로부터 각 특성치에 영향을 미치는 (유의한) 요인(Table 1 최하단에 ○표시를 붙인 요인)을 전부 사

Table 1. Results of multiple regression analysis

Characteristic value	factor																	Ratio of contribution (%)
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>13</sub>	X <sub>14</sub>	X <sub>15</sub>	X <sub>16</sub>	X <sub>17</sub>	
Y <sub>A</sub>	↑				↑								↑	↑	↓			
Y <sub>B</sub>	↑									↑		↑	↑					
Y <sub>C</sub>						↓		↑	↑									↓
Y <sub>D</sub>			↓															
Y <sub>E</sub>	↑																	↑
Total effect	○		○		○	○		○	○	○		○	○	○	○			○

Note : 1. Vacant column means non effective (deleted by automatic factor selection method) factor

2. ↑ (↓): significant factor and its direction

↑ (↓): non-significant factor but effective factor

○: Common factor

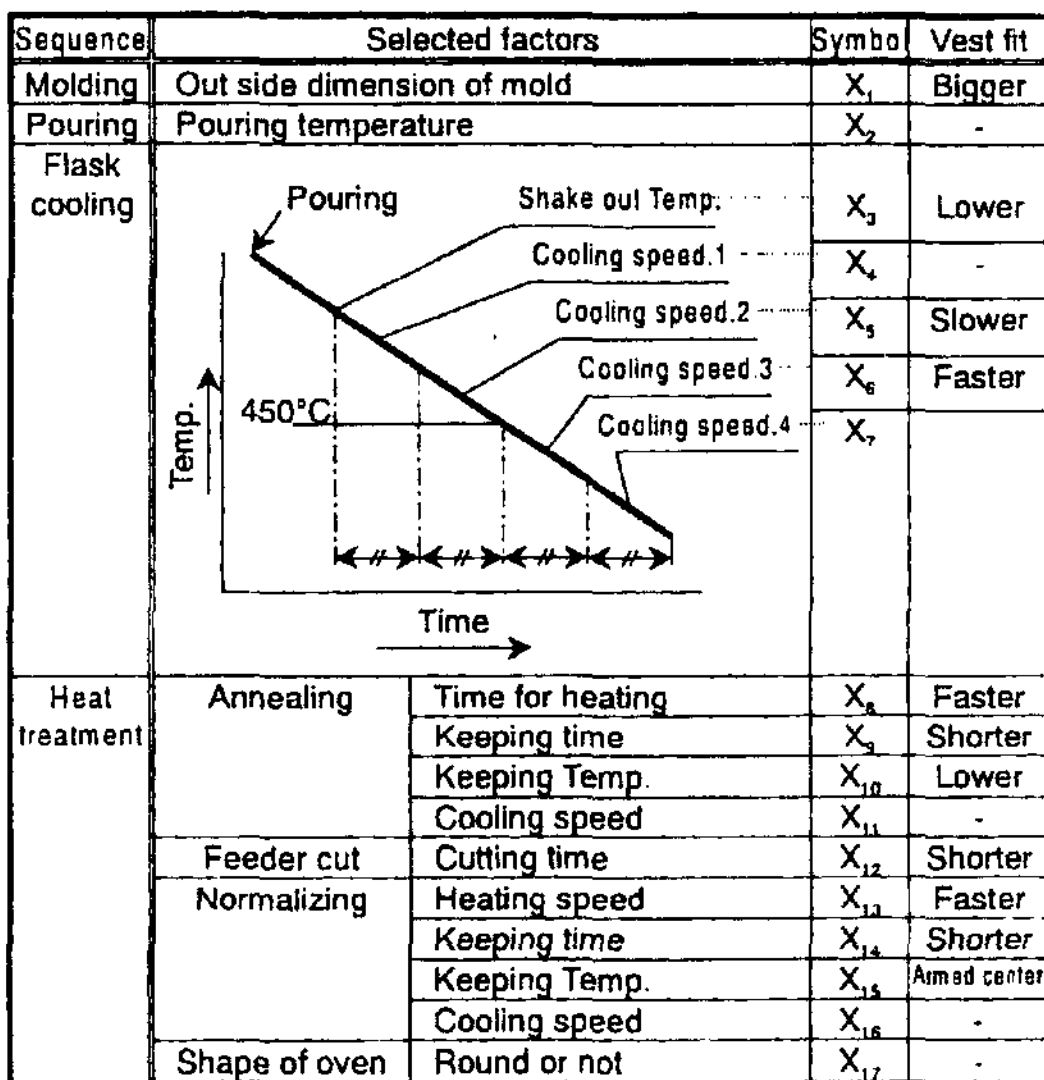


Fig. 15. Factors and results of analysis.

용한 중회귀식을 구하고, 그 식을 (1)식에 대입하여 얻은 각 요인의 최적치를 정리한 결과를 Fig. 15에 나타내었다.

Fig. 15는 종축좌단에 취급한 요인을 포함하는 제조공정을, 중앙부에 취급한 구체적 요인과 그 기호를, 우단에는 얻어진 결과로부터 각 요인의 관리목표를 각각 나타내었다. 그림으로부터 알 수 있듯이 주입후의 서냉관리와 열처리에서의 유지시간을 관리할 필요가 있음을 알수 있다.[16] 얻어진 결과에서 shake out(진정) 온도를 낮게하고, 서냉중의 탄소성영역을 천천히 냉각시키는 것이 좋다는 것은 냉각중의 제품내 온도차를 작게함으로써 잔류응력을 경감시키는 것을 의미한다. 또한 고온에서의 유지시간을 짧게 하는 것은 제품자중

에 의한 좌굴변형을 작게 하는 것을 의미하는 것으로 생각할 수 있으며, 이러한 요인을 재료강도관리와는 별개로 관리하는 것이 변형방지에는 필요하다는 것을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 치수결함 방지대책으로써 다음과 같은 항목이 유효함이 확인되었다.

- 1) 주입후의 냉각중에 잔류응력을 경감시키는 서냉방법
- 2) 열처리중의 제품의 좌굴변형을 경감시키는 열처리 방법

#### 4. 고 찰

각 결함발생원인의 해석결과는 결함발생의 모든 원인을 망라한 결과는 아니지만 여러 가지의 방지대책을 현장적으로 입안하고 평가하기 위한 기본적 고려사항의 하나라고 생각되었다. 그 후 결함발생의 특성치로서 결함제거적체적을 이용하여 각각의 제품에 적용한 각종 대책을 평가하는 방식을 표준화하여 지속적으로 주조결함 저감활동을 전개하였다. 또한 제조착수 전에 주조방안 검토회의를 개최하여 전회 유사품에 대한 세밀한 평가를 하는 방식을 표준화 및 일상화함으로써 각 주조결함 발생원인 및 대책에 대한 방안을 조직 전체의 것으로 하였다. 그 결과 조직전체에서 개선활동이 추진되어 주조결함 발생량을 감소시킬수 있음과 동시에 작업원도 포함된 기술 및 기능의 전승이 가능하게 되고, 교육과 모랄 향상에도 기여하고 있다. 현재의 품질개선활동에 대한 경향은 Fig. 16에 나타낸 것처럼 스태프내부의 문제부터 작업자도 포함된 활동으로 까지 연속해서 이어가는 시스템으로써 형성되고 있다.[17]

Fig. 17에 나타낸 최근의 용접보수율의 추이를 보면 알 수 있듯이, 평성5년(1969년)이후 품질이 안정되어

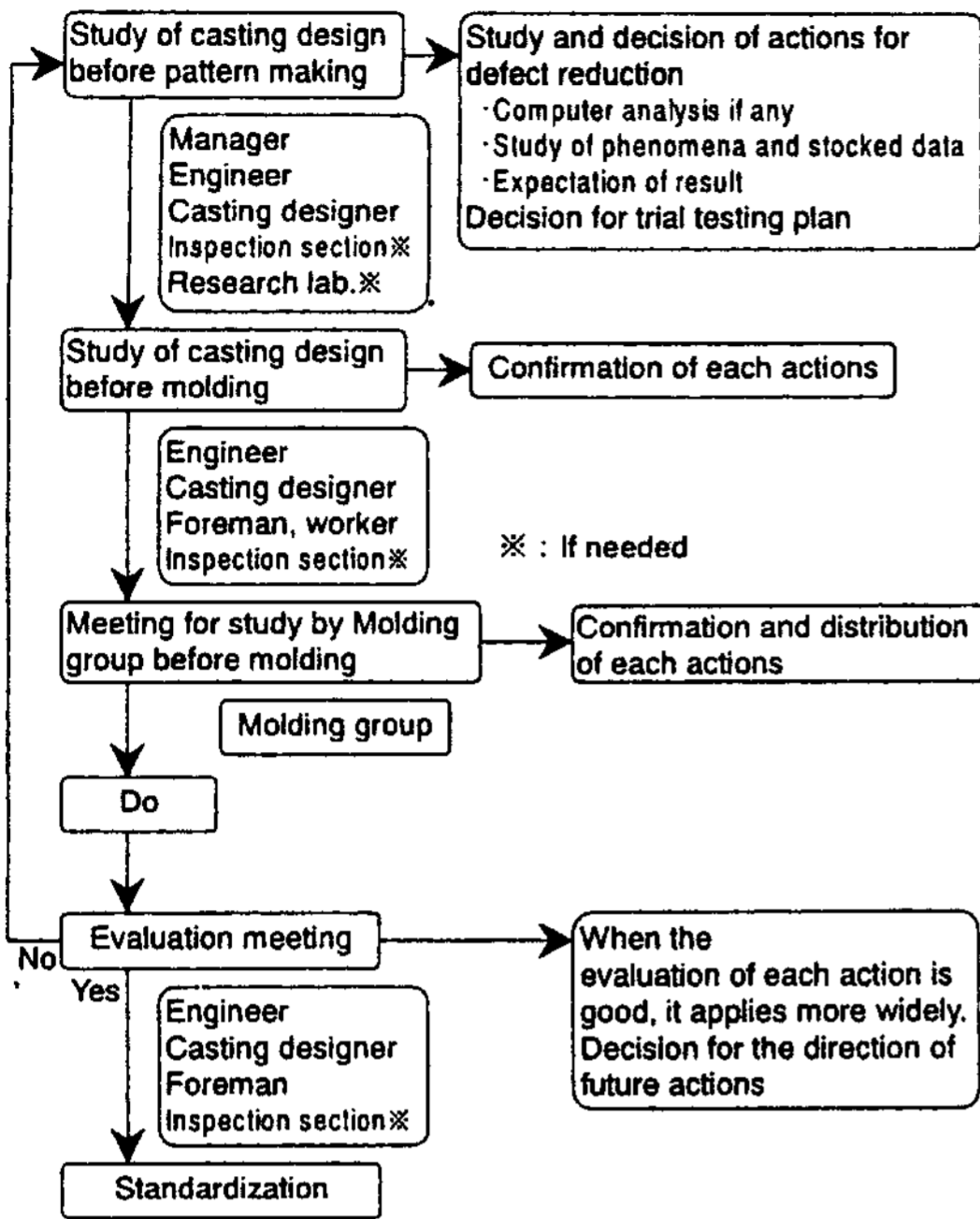


Fig. 16. Flow of KAIZEN activity.

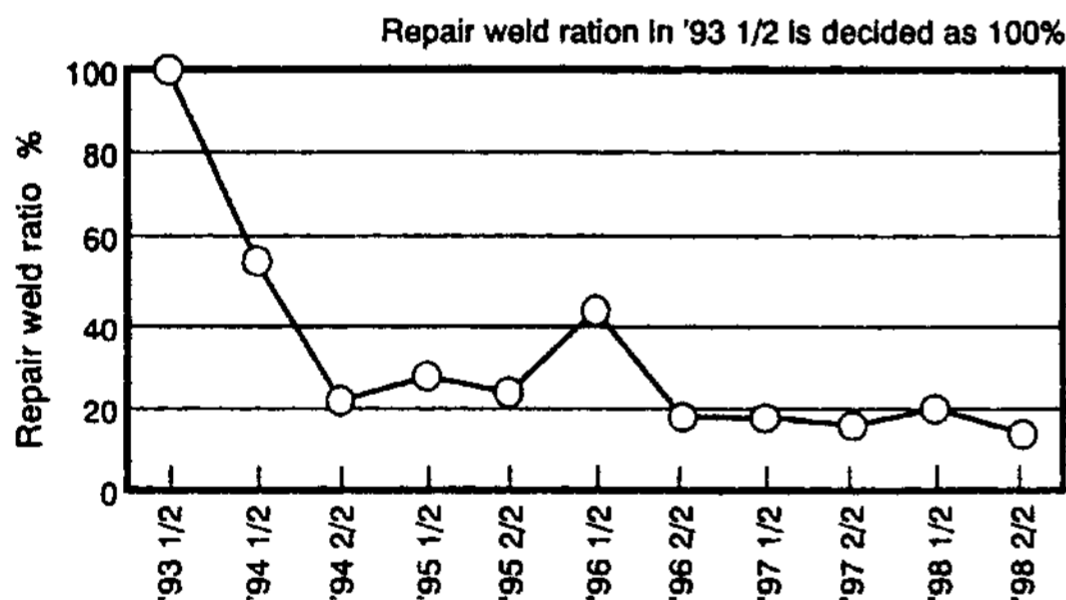


Fig. 17. Transition of repair weld ratio.

오고 있고, 용접보수율은 평성5년의 20% 이하까지 개선되어 오고 있음을 알수 있다.

또한 이러한 활동은 고객설계부문과의 품질개선,[18] 신제품개발[19,20]에도 이어져 조직의 활성화에 기여할 수가 있었다.

### 5. 결 론

대형주강품제조기술로서 표면결함의 감소를 중심으로 언급한 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 단품수주품에 있어서도 제품형상, 부위, 해석방법

을 연구함으로써 각각의 결함방지 대책의 평가를 정량적으로 할 수 있었다.

(2) 구조결함감소활동을 중심으로 품질개선활동을 조직적으로 전개함으로써 용접보수율을 감소시킬 수 있었다.

주강품의 제조는 보다 짧은 기간, 보다 적은 비용이 요구되기 때문에 이러한 개선활동을 더욱 정진시켜 보다 더 많은 데이터를 축적해 갈 필요가 있다. 또한 그 결과를 컴퓨터시뮬레이션기술, CAD, CAM을 이용한 CAE로 계속해서 가는 것과 함께 사용자수요(User Needs)의 기대에 부응하는 제조기술 개발에의 노력이 더 한층 필요하다.

### 참 고 문 헌

- [1] GIFA '99と鑄州鑄物工場視察報告書 : (社)日本鑄物工業會, (社)日本強靱鑄鐵協會, 全國銑鐵鑄物工業連合會 (1999).
- [2] 田中一彦, 內山光夫 : JACT NEWS3 (2001) 25.
- [3] 平成12年度鑄鋼品の欠陥の原因究明と對策に關する調査報告書 : 日本鑄鍛鋼會, (社)素形材センター (2001).
- [4] 大島俊彦 : 技術講習會テキスト(社)日本鑄物協會 (1981. 5. 19) p.57.
- [5] 金光正信, 播谷慶二郎 : 技術講習會テキスト(社)日本鑄物協會 (1985. 10. 18) p.11, p.63.
- [6] 例えは鑄造方策定ルールの見直しとコンピュータ利用關する研究 : (社)日本鑄物工業會 (1998. 6).
- [7] 鑄鋼の表面欠陥對策に關する研究 : (社)日本鑄物協會 (1980).
- [8] 鑄鋼の補修低減に關する研究 : (社)日本鑄物協會 (1980).
- [9] 鑄鋼の表面性狀の高品質化に關する研究 : (社)日本鑄物協會 (1988. 11) pp. 7-131.
- [10] 鑄鋼品の表面欠陥とその欠陥對策の實例 : (社)日本鑄物協會 (1993.5).
- [11] 堤信久 : 鑄物 61 (1989) 852.
- [12] 近藤展啓, 細田清彦 : 鑄物 61 (1989) 861.
- [13] 律村治, 土原峰雄, 宮本剛汎, 小林啓二, 日本鑄物協會第105回講演概要集 (1984) 97.
- [14] 律村治, 宮本剛汎, 小林啓二, 土原峰雄, 日本鑄物協會第106回講演概要集 (1984) 76.
- [15] 津村治, 小林啓二 : 日本鑄物協會第90回講演概要集 (1976) 46.
- [16] 津村治, 吉本一夫, 宮本剛汎 : 日本鑄物協會第108回講演概要集 (1985) 81.
- [17] 吉本一夫 : 鑄鋼と鍛鋼512 (1999) 9.
- [18] 宮本剛汎, 津村治 : 設計工學29 (1994) 455.
- [19] 仲野美佐雄, 宮本剛汎, 山畔茂, 山田政之 : 鑄造工學 68 (1996) 1119.
- [20] 岩淵義孝, 津村治, 山畔茂, 山田政之, 角田英治, 藤原敏洋 : 火力原子力發電 42 (1991) 3, 344.