

반응용 성형에서의 다구찌 방법과 신경망을 이용한 자동차 알루미늄 피스톤의 최적 재가열 과정에 대한 연구

윤재민*, 김영호, 박준홍, 최재찬(부산대 기계공학부)

A Study on Optimum Reheating Process of Automotive Aluminum Piston using Neural Network and the Taguchi Method in Semi-Solid forming

J. M. Yoon, Y. H. Kim, J. H. Park, J. C. Choi(School of Mech. Eng. PNU)

ABSTRACT

As the manufacturing processes of automotive engine piston, gravity die-casting, squeeze casting, hot forging and powder forging process are generally used for the various specifications. As the semi-solid forming(SSF) is compared with conventional casting such as gravity die-casting and squeeze casting for the characteristics of its process, the product without inner defects such as gas porosity and segregation can be obtained and its microstructure is globular grain. In SSF process, the materials are heated up to the temperature between the solvus and liquidus line at which the materials exists in the form of liquid-solid mixture. In this time, Discussion is given about reheating process of row material and results are presented regarding accurate temperature and process variables controlling for right solid fractions.

Key Words : Semi-solid(반응용), reheating process(재가열 과정), Solid Fraction(고상률), Microstructure(미세조직), Globularization(구상화), Neural Network(신경망), Taguchi Method(다구찌 방법)

1. 서론

자동차 알루미늄 피스톤의 대부분은 중력주조로 생산되고 있는데 이 방식은 제품의 내부에 기공을 포함하거나 금형 비용의 증가 및 제품간의 불규칙한 치수 등으로 기계적 성질이 떨어진다. 그러나 반응용 성형은 내부결함, 기계적 성질, 치수제어, 최종 부품가격에 있어서 다이캐스팅이나 주조, 스퀴즈캐스팅에 능가하는 성질을 가지는데 본 연구에서는 반응용 단조 피스톤의 제조에서 가장 중요한 공정중에 하나인 소재의 재가열 과정에 대해서 연구하였다.

반응용 가공은 Flemings⁽¹⁾에 의해 처음 제안된 후, 반응용 가공법의 실용화를 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 반응용 단조의 경우, 제조되어진 빌렛으로 단조를 하기 위해서는 이미 제조된 원소재를 재가열하는 과정을 거쳐야 하는데 이때 재가열 과정은 빌렛을 반응용 상태로 만들뿐만 아니라 재가열을 통하여 구상화가 잘 된 조직을 얻을 수 있으므로 반응용재료의 성형공정에서 대단히 중요하다.

그러나 재가열 과정에서 영향을 주는 재가열 공정변수들과 고상율 간의 정확한 관계식의 도출은 공정변수의 특성에 따라 복잡하게 영향을 끼치므로 현실적으로 모든 공정변수의 영향을 고려함은 거의 불가능하다. 따라서 이전의 실험⁽²⁾들은 여러 가지 재가열 공정변수들의 관계를 고려하지 않은 채, 해당 온도에서 도출한 고상율을 일관적으로 적용시킴으로써 정확한 고상율 변화에 대한 관심은 간과되어 왔다. 본 연구에서는 유도가열코일의 길이, 코일설계 등은 최적으로 조정되었다는 가정 하에서 재가열 공정의 다양한 공정변수를 조정하여 재가열 시편의 고상율에 끼칠 수 있는 영향에 대하여 분석하고, 해당 온도에서 원하는 고상율을 얻을 수 있는 최적 재가열 조건을 검토해 보겠다

2. 실험

2.1 시험편 및 실험과정

본 실험에서 사용된 반응용 재료는 프랑스

PECHINEY에서 전자기 교반(Electro-magnetic stirring)에 의해 제조되어진 A356 재료이고 출력 50KW 유도도로(60Hz 주파수)를 이용하여 유도가열 실험을 하였다. Table 1에 성분 분석기를 이용하여 구한 조성을 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of A356

	Al	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Fe	others
A356	rem	6.5~7.5	0.2	0.1	0.17~0.25	0.1	0.2	0.15

Table 2 Range of reheating process variables

Input Variables	Processing value		
	Min.	Med.	Max.
Reheating Time(RT ₁ , X1, min)	5	6	7
Reheating Time(RT ₂ , X2, min)	4	5	6
Reheating Time(RT ₃ , X3, min)	4	5	6
Reheating Temperature (RTemp ₁ , X4, °C)	417	427	437
Reheating Temperature (RTemp ₂ , X5, °C)	537	547	557
Reheating Holding Time (RHT, X6, min)	2	7	12
Induction Heating Power (Q, X7, KW)	3	4	5
Material Size(X8, mm)	ψ 76 × 70	ψ 60 × 70	ψ 76 × 100

본 실험에 이용된 공정변수와 그것의 범위를 Table 2에 나타내었고, Fig 1(a)는 재가열 온도와 시간에 대한 공정변수의 적용을 나타내었다. 일반적으로 고상률과 온도관계는 Al-Si 평형상태도로부터 유도한 식⁽³⁾이나 Scheil의 방정식^(4,5)을 이용해서 계산하고, 각 알루미늄 합금의 온도에 따른 고상율을 예측하게 되는데 반응용 단조에서의 빌렛의 고상률이 60~70%에서 단조하는 것이 가장 양호한 제품⁽⁶⁾을 얻을 수 있으므로 65%고상율에 해당하는 온도인 566.1°C까지 시편을 재가열하여 급속 담금질하였다.

2.2 실험계획법

일반적으로 성형품의 품질에 영향을 주는 인자들의 영향을 정확히 고려하면 각 인자들의 공정범위를 최소 값부터 최대 값까지 연속적으로 변화시키면서 모의실험이나 실제 실험 데이터를 확보해야 하나 시간소요나 비용측면에서 비효율적이다. 한편 입력인자를 몇 개의 수준을 정의하여 실험을 수행한다해도 (수준수)^(인자수) 만큼, 즉 본 연구에서는 입력인자 8개에 3수준이면 6561개의 실험이 수행되어야 하므로 시간이나 실험비용 등이 문제가 되고 또한 인자들간의 교호작용이 있는 경우에는 이에

대한 고려가 불가하므로 이러한 단점을 보완하기 위해 다구찌의 실험계획법에 의한 직교배열표를 이용함이 유리하다. Table 3은 여러 가지 공정변수를 직교배열표에 적용한 표이다. 실험에 의해 고상율 65%에 근접한 조건은 실험13번인 것을 알 수 있다.

Table 3 Orthogonal array of various reheating process variables

No	Order	variables								avg.
		x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	
1	16	0	0	0	0	0	0	0	0	76.57
2	21	0	0	0	0	1	1	1	1	76.03
3	2	0	0	0	0	2	2	2	2	73.13
4	11	0	1	1	1	0	0	0	1	83.13
5	24	0	1	1	1	1	1	1	2	73.43
6	7	0	1	1	1	2	2	2	0	66.27
7	12	0	2	2	2	0	0	0	2	74.53
8	19	0	2	2	2	1	1	1	0	79.87
9	8	0	2	2	2	2	2	2	1	69.93
10	1	1	0	1	2	0	1	2	0	85.37
11	27	1	0	1	2	1	2	0	1	75.00
12	18	1	0	1	2	2	0	1	2	79.57
13	14	1	1	2	0	0	1	2	1	65.10
14	20	1	1	2	0	1	2	0	2	78.50
15	26	1	1	2	0	2	0	1	0	65.53
16	4	1	2	0	1	0	1	2	2	61.37
17	6	1	2	0	1	1	2	0	0	86.30
18	17	1	2	0	1	2	0	1	1	77.00
19	22	2	0	2	1	0	2	1	0	67.00
20	10	2	0	2	1	1	0	2	1	81.20
21	3	2	0	2	1	2	1	0	2	78.80
22	9	2	1	0	2	0	2	1	1	80.13
23	23	2	1	0	2	1	0	2	2	78.60
24	5	2	1	0	2	2	1	0	0	76.30
25	25	2	2	1	0	0	2	1	2	64.30
26	13	2	2	1	0	1	0	2	0	71.37
27	15	2	2	1	0	2	1	0	1	82.50

이러한 직교배열표는 일부실험법(Partial Factorial Experiments)을 수행하여 실험횟수를 줄이면서도 모든 인자의 영향을 포함하고, 하나의 인자효과를 볼 때 다른 인자의 영향에 치우침이 없고 또한 분산분석표의 작성이 쉽다는 장점들을 지니고 있다. 따라서 신경회로망의 학습을 준비하기 위한 실험 조건은 8인자 3수준의 실험조건을 포함할 수 있는 직교배열표를 이용하며 채택된 실험계획법은 교호작용이 없는 13개 인자에 대해 3 수준까지 시험이 가능한 $L_{27}(3^{13})$ 직교배열표이다. 본 연구에서 고려하는 독립인자는 재가열 시간(X1, X2, X3), 재가열 온도(X4, X5), 재가열 유지시간(X6), 고주파 유도 가열로 출력(X7), 재료시편 사이즈(X8)의 8개 이므로 위의 직교배열표는 본 연구의 목적에 충분히 부합한다. 공정조건인 각 입력인자의 수준은 Table 3에서 보여주는 실제 입력인자의 최소값, 중간값 및 최대 값을 변환하여 0, 1, 2의

3수준으로 하였으며 고상율의 분석은 영상분석기를 이용하여 측정하였다.

3. 이론과 해석

2.1 다구찌 방법과 신경망

최적 재가열 조건을 분석하기 위해서 최근 제품 및 공정의 설계 또는 개선 및 제품의 향상을 위한 획기적인 방법으로 다구찌방법을 이용하였다. 다구찌는 제품 및 공정의 설계단계에서 실험의 측정데이터가 수반하는 오차를 이용한 품질의 정도⁽⁷⁾로서 S/N비(signal to noise)라는 개념을 도입하여 생산공정에 적용하였는데 S/N비는 설계자의 목적에 따라 정특성과 동특성으로 나누어진다.

Table 4 statistic of factor level of solid fraction average(y1)

factor	level sum			level average		
	0	1	2	0	1	2
X1	317.2	352.7	319.1	35.0	39.2	35.5
X2	363.7	303.7	319.5	40.4	33.8	35.5
X3	290.1	352.0	344.9	32.2	39.1	38.3
X4	299.6	319.8	367.6	33.3	35.5	40.8
X5	309.6	355.9	321.5	34.4	39.5	35.7
X6	288.7	329.0	369.3	32.1	36.6	41.0
X7	341.7	335.3	309.9	38.0	37.3	34.4
X8	340.2	320.7	326.0	37.8	35.6	36.2

Table 5 analysis of variance of solid fraction average(y1)

factor	S	ϕ	V	F ₀
X1	3.56	2	1.78	0.03
X2	48.51	2	24.26	0.43
X3	39.38	2	19.69	0.35
X4	119.15	2	59.58	1.06
X5	108.99	2	54.50	1.00
X6	41.99	2	21.00	0.37
X7	222.39	2	111.20	2.00
X8	43.09	2	21.55	0.38
e	561.85	10	56.19	
T	1188.91	26		

본 연구에서는 정특성의 망목특성(nomianlis best;NB)을 이용하였으며 사용된 신경회로망은 입력층, 은닉층 및 출력층의 다층 퍼셉트론(Multilayer Perceptron)으로 구성되며 Rumelhart McCelland⁽⁸⁾에 의해 제안된 역전파(Backpropagation) 학습 알고리즘을 이용하여 목표 출력값과 신경회로망에 의한 출력 값의 차이를 최소화하도록 각 층간의 연결강도

와 임계값을 조정하여 원하는 신경회로망을 구성한다.

2.2 해석

Table 4는 고상율 평균(y1)에 대한 인자수준별 통계를 나타낸 표이고, Table 5은 고상율 평균(y1)의 분산분석표를 나타내었다. 아래의 분산분석표에서 F₀값이 1이상인 경우에는 약간의 유의성이 있다고 보기로 한다면 X4, X5, X7가 유의하다고 볼 수 있다. Table 4을 참고하면 y1값이 65%에 가까운 것이 최적이므로 인자들의 최적조건은 X4X5X7이다. 여기서 실험적인 편의성을 고려한다면 각 공정변수들의 조합은 X1X2X3X4X5X6X7X8, 같은 최적조건이 도출이 가능하다. 위에서 직교배열표를 활용한 다구찌방법을 이용하여 많은 입력변수 중에 X4X5X7가 유효인자인 것을 알았으므로 이들 인자들에 대해 신경망(neural network)을 이용하여 실험가능한 모든 인자들의 효과를 탐색하였다. 신경망 프로그램 실행결과 실험조건들 중에서는 X4X5X7가 원하는 고상율에 가장 가까웠으며

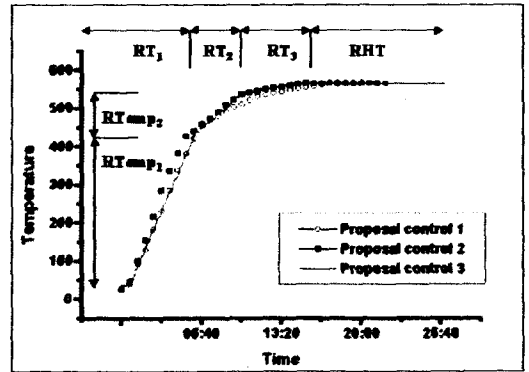


Fig. 1(a) Proposal temperature control

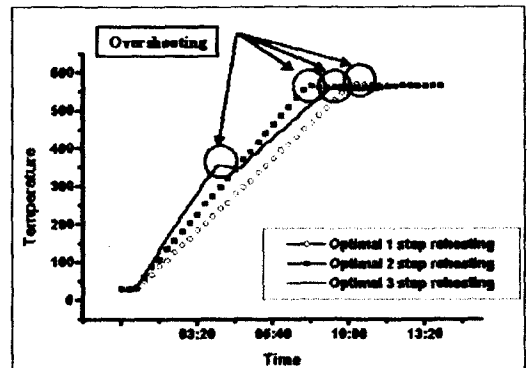


Fig. 1(b) Optimal 1, 2, 3 step reheating

이 결과는 앞의 다구찌 방법에 의한 분석결과와 동일함을 증명하였다. Fig 1(a)는 본 연구에서 제안한 시간의 경과에 따른 단계별 가열 절차를 나타낸 그림이고 Fig 2(b)는 기존의 최적화된 계단가열을 나타낸 것으로 본 연구에서 제안한 가열 방법이 계단가열에서 단계가 변할 때 발생하는 온도의 급격한 상승(overshooting)을 예방할 수 있다. Fig. 2은 Table 2의 실험조건중 시편의 고상율분포 사진의 예를 나타낸 것으로 Fig. 2(a)는 실험조건중 최적의 상태인 실험 13번에서 65.1%의 고상율 분포를 나타내는 시편의 사진이고 Fig. 2(b)는 실험 17번에서 고상율분포가 86.3%인 사진으로서 눈으로 관찰하기에도 확연하게 고상율 분포의 차이를 느낄 수 있다.

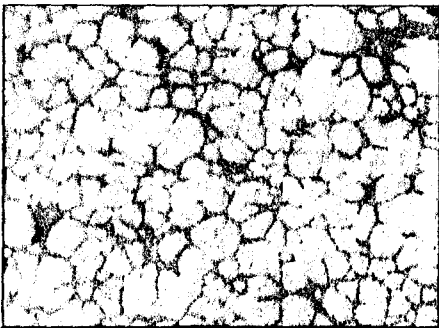


Fig. 2(a) Microstructure of inspection No 13, in reheating process of semi-solid aluminum alloy

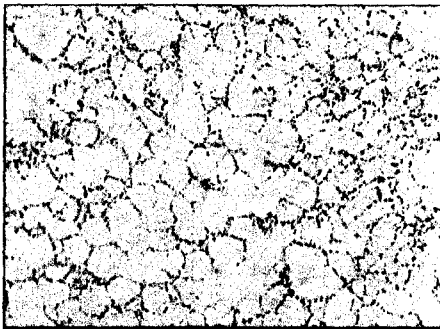


Fig. 2(b) Microstructure of inspection No 17, in reheating process of semi-solid aluminum alloy

4. 결론

최적의 재가열 조건을 얻기 위해서 재가열 시간, 재가열 유지시간, 재가열 온도, 출력 등이 고상율에 미치는 영향을 분석한 결과 재가열 단계별 온도 (RTemp1, RTemp2)와 출력(X7)이 고상율에 미치는 영향이 가장 크다는 사실을 알 수 있었으며 일반적인

로 고상율 65%로 예측되는 566℃에서 고상율이 일정하게 유지되는 것이 아니라 다양한 재가열 공정 변수에 따라 고상율이 다양하게 변화된다는 것을 알 수 있었다. 그리고 실험에 의하여 최적의 재가열 조건을 찾을 수 있었으며 다구찌분석과 신경망의 결과와 잘 일치함을 확인 했다. 또한 본 연구에서는 기존의 계단 가열 과정의 문제점인 급격한 온도상승(overshooting)을 막는 가열방법을 제시하였으며 제안된 방법으로 온도가 갑자기 상승하여 고상율이 급격히 변하는 것을 막을 수 있었다.

후기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

참고문헌

1. D.B.Spencer, R.Meharabian and M.C.Flemings, "Rheological Behavior of Sn-15%Pb in the Crystallization Range," Met. Trans., Vol. 3, pp. 1925-1932, 1972
2. C.G.Kang, S.S.Kang, H.K.jung, "Influence of Process Parameters on The Defects in Thixoforming of Cast and Wrought Aluminum Alloys," Proceeding of the 6th ICTP, Advanced Technology of Plasticity, vol. III, pp.1701-1706, 1999
3. Ohnaka, I., "Introduction to Heat and Solidification Analysis by Computer," In Japanese, Marusen Press, pp. 196-199, 1985.
4. M.C.Flemings, "Solidification Processing," McGraw-Hill Book Company, New York, pp. 31-36, 1974.
5. 木内學, 杉山 雄, "半熔融·半凝固金屬の固相率の測定法-1," 第42回 塑性加功聯合講演會, 日本塑性加功學會, pp. 647-650, 1991.
6. M.P.Kenny, J.A.Courtois, R.D.Evans, G.M.Farrior, C.P.Kyonka, A.A.Couch, K.P.Young, "SemiSolid Metal Casting and Forming," Metal Handbook 9th Ed., Vol. 15, pp.327-338, 1988
7. Ross, P. J., "Taguchi Techniques for Quality Engineering: Loss Function, Orthogonal Experiments, Parameter and Tolerance Design," McGraw-Hill, Inc. 1990
8. Fausett, L., "Fundamentals of Neural Networks," Prentice Hall, pp.289-304, 1994.