

■■■■■■■■■■
 論 文
 ■■■■■■■■■■

알루미늄합금 중력금형주조용 셸중자 가스발생량의 정량적 예측

김기영 · 이민수*

Quantitative Prediction of Gas Evolved by Shell Core in Permanent Mold Casting of Aluminum Alloy

Ki-Young Kim and Min-Soo Yi*

Abstract

Shell sand is widely used to make a complex shape castings due to its good collapsibility. When molten metal is poured into the mold, various gases are generated by the thermal decomposition of binder in the shell core. Casting defects such as blow hole and blister come from these gases. If it is possible to predict the evolution of gas quantitatively, it may provide effective solutions for minimizing the casting defects. To examine the gas evolution by shell core quantitatively, casting experiment and calculation were carried out. Gas pressure and gas volume evolved by shell core were measured in the experiment, and temperature distribution in the shell core was obtained by heat transfer analysis. From the result above, prediction on the gas volume evolved during pouring was tried. As forming pressure of the shell core increased and forming temperature decreased, the gas evolution increased. There was a close relationship between the calculated gas volume evolved and the measured one.

(Received July 20, 1998)

1. 서 론

내기밀성이 요구되는 복잡형상의 알루미늄 합금제 부품의 제조방법으로서 중력금형주조에 의한 방법이 생산코스트 면에서 가장 유리하나, 이를 금형주조하기 위해서는 내부 형상의 성형을 위하여 셸중자의 사용이 불가피하다. 셸중자공법은 성형성, 탈사성 면에 있어서는 뛰어난 프로세스이나[1-2], 고온의 알루미늄 용탕이 중자와 접촉할 때 수지의 열분해에 의한 가스발생이 필연적이며, 이의 배출이 원활하지 못할 때에는 주물 내부에 기공 등으로 남게 되어 주조품의 내기밀성에 직접 영향을 미친다. 따라서 주조 시 고온의 알루미늄 용탕이 셸중자와의 접촉으로 발생하는 가스 발생은 최소화되어야하며, 이의 정량적인 측정 은 알루미늄합금의 금형주조품의 품질 관리를 위해서도 매우 중요하다.

주형본체로 셸주형을 이용한 경우의 가스발생거동 및 측정에 관한 보고는 있으나[3-6], 중력금형주조에서 셸중자를 사용한 경우의 가스발생 측정에 관한 보

고는 거의 없다.

본 연구에서는 셸중자의 성형압력, 성형온도 등 셸중자의 성형조건을 달리한 중자를 제작하고 용탕주입 시 발생하는 가스량의 측정을 위한 금형을 고안한 후 셸중자를 이 금형에 삽입하여 용탕 주입 시의 가스 발생량을 측정하고, 이의 정량적인 예측을 시도하였다.

2. 실험방법

2.1 실 주조시의 가스량의 측정

Fig. 1은 실험방법 및 계산과정의 개략도이며, 실험 변수는 Table 1과 같다. 가스발생과정을 정량적으로 측정하고, 이 결과를 토대로 발생가스량을 예측하기 위하여 주조 실험과 계산에 의한 방법을 수행하였다.

Fig. 2는 셸중자에서 발생하는 가스량을 측정하기 위한 장치와 셸중자의 형상 및 치수이다. 금형은 주철제이며, 세로로 2분할하였다. 가스는 가벼워서 주로 상방향으로 이동하므로 가스압력의 측정은 셸중자의 상부에서 하였다. 발생가스압력은 70°C의 온도와 100

한국기술교육대학교 금속재료공학과(Korea University of Technology and Education)

*한국생산기술연구원 생산기반기술센터(Korea Institute of Industrial Technology)

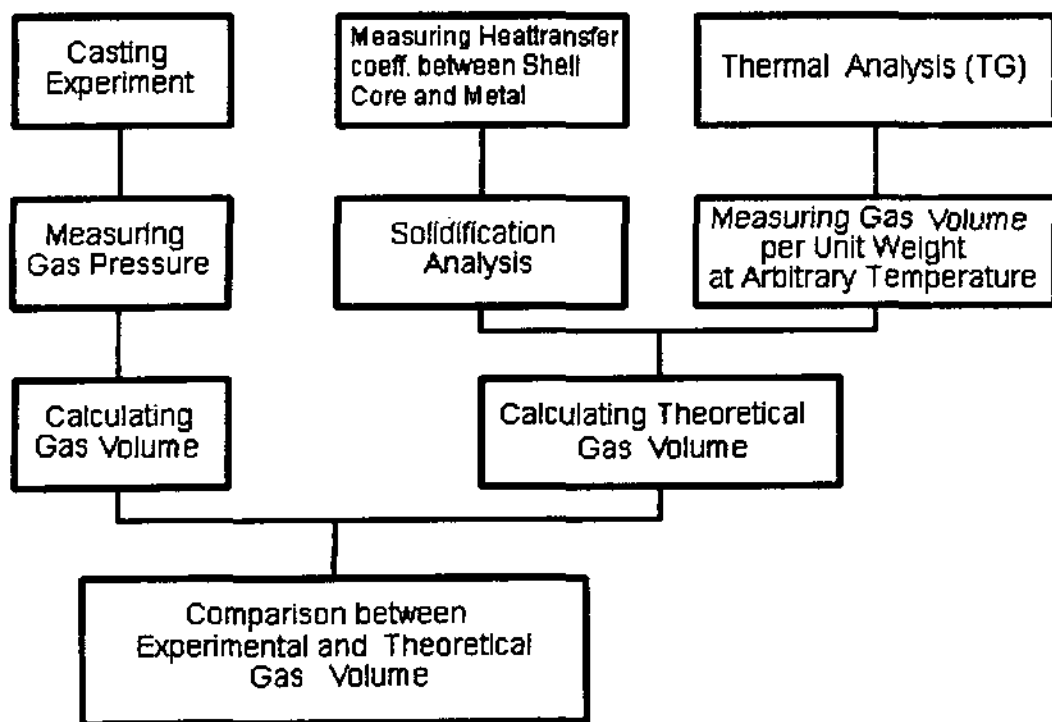


Fig. 1. Experimental Procedure.

torr의 압력까지 직선성이 보장되는 확산형반도체 압 프내장형 압력계를 사용하여 측정하였고, 압력계 주위의 온도는 CA 열전대로 측정하였다. 측정된 데이터는 A/D변환기를 통하여 P/C로 전송하여 처리하였다.

사용한 합금은 KS-AC2B(Al-3%Cu-5%Si-0.5%Mg)이고, 셀중자의 조성 및 입도분포는 Table 2와 같다. 셀중자는 페놀레진이 1.8 중량% 함유된 것을 사용하였다. 셀중자의 성형은 Table 1에서와 같이 성형압력을 2, 3, 4 kg/cm²로, 성형온도는 250, 300, 350°C로 변화시켰고, 성형시간은 60s, 셀중자의 두께는 5 mm로 일정하게 하였다. 용탕주입온도와 금형온도는 각각

730, 180°C로 하였다.

측정된 가스압력은 다음 식을 이용하여 가스량으로 환산하였다.

$$Y = 0.1804X + 2.4173$$

여기서 Y, X는 각각 가스체적 (cc)과 압력 (mm H₂O)을 나타낸다. 이 식은 1 g당 이론적으로 224 ml의 가스를 발생시키는 KHCO₃를 George Fisher사제의 가스량 측정기를 이용하여 얻은 것이며, KHCO₃를 100°C에서 30분간 건조시킨 후 0.05 g, 0.1 g, 0.15 g을 동파이프에 채워 넣고 연소시켜 압력-체적 곡선을 구한 결과이다. KHCO₃ 0.05 g, 0.1 g, 0.15 g은 각각 11.2 ml, 22.4 ml, 33.6 ml의 가스를 발생시키는 양이다.

2.2 해석을 통한 가스량의 계산

2.2.1 단위 가스량 측정

일반적으로 발생가스량은 주물사 시료 1~2 g을 850°C로 가열된 석영도가니 속에 장입하고 질소분위기에서 가열하여 밀폐된 상태에서 가스를 발생시켜 이를 압력기록장치로 보내어 발생가스압을 측정한 후 KHCO₃로 얻은 가스압-체적의 보정곡선을 이용하여 발생가스체적을 구한다. 그러나 본 연구에서는 용탕과 셀중자가 접촉하였을 때 셀중자의 온도분포로부터

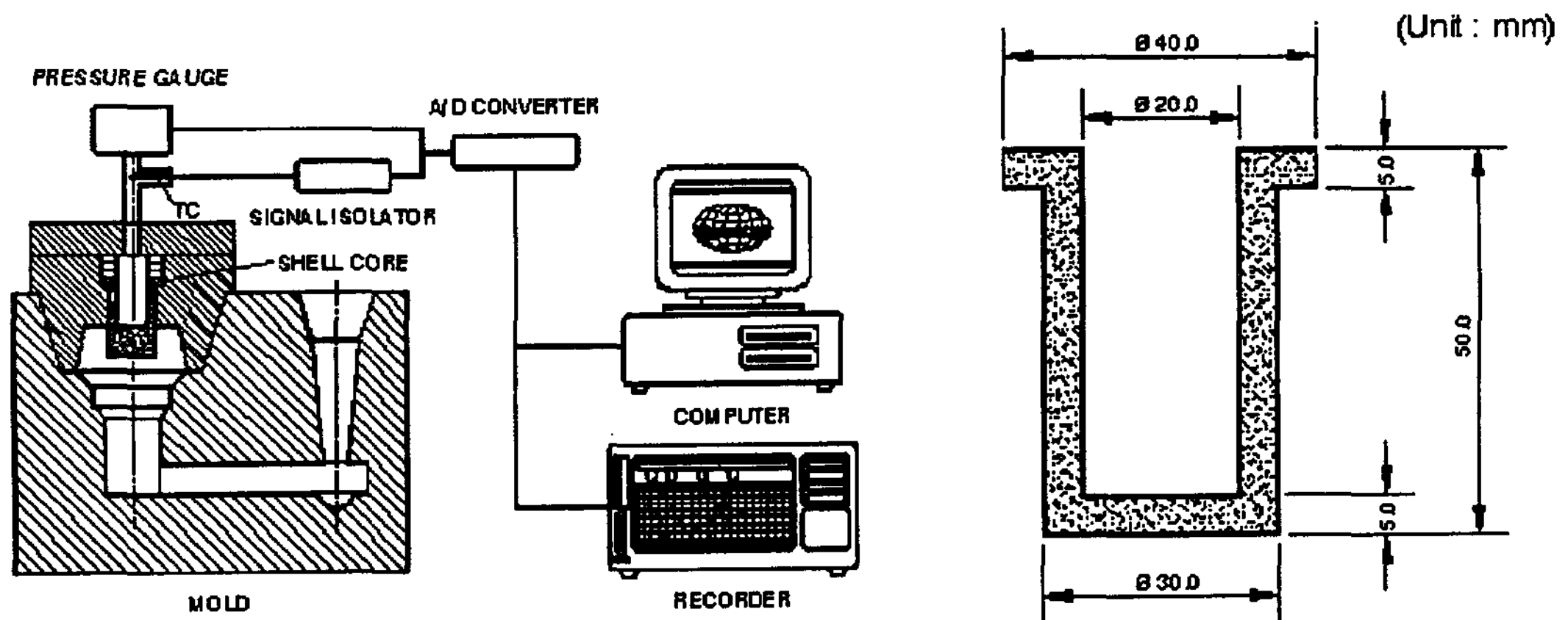


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus and dimension of shell core.

Table 1. Experimental variables

Variables	Thickness of Shell Core (mm)	Shell Core Forming Temperature (°C)	Shell Core Forming Pressure (kgf/cm ²)
Casting	5	200, 250 and 300	2, 3 and 4
Unit Gas Volume	-	200, 250 and 300	-
Solidification Analysis	5	-	2, 3 and 4

Table 2. Chemical composition and resin content of coated sand

Chemical Composition of Sand (%)					Resin
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	1.8
93.40	4.53	0.75	0.42	0.33	

Table 3. Data for thermal analysis [8]

Thermal Properties	Unit	Casting	Mold	Shell Core
Thermal Conductivity	cal/cm ² ·°C·s	0.26	0.07	0.00135
Density	g/cm ³	2.78	7.0	1.73
Specific Heat	cal/g·°C	0.23	0.2	0.2
Latent Heat	cal/g	93.0	-	-
Liquidus Temp.	°C	615	-	-
Solidus Temp.	°C	520	-	-
Initial Temp.	°C	700	170	25
Heat Transfer Coeff.	cal/cm ² ·°C·s	Mold-Air: 0.001 Mold-Casting: 0.03 Mold-Shell Core: 0.003 Casting-Air: 0.002 Casting- Shell Core: 0.0084~0.0108		

발생가스량을 구하기 위한 기초데이터로 임의의 온도에서 발생하는 가스량이 필요하므로, 열중량분석을 하여 점결제의 열분해 온도구간을 파악한 후 이 구간에서 온도를 변화시켜 각 온도에서의 가스량(단위 가스량이라 한다)을 측정하였다. George Fisher사제의 가스량 측정기를 이용하여 측정하였으며, 측정시간은 5분이었다. 측정시료는 성형온도를 달리한 쉘중자 표

면에서 약 1g을 채취하였으며, 측정된 각 온도별로 단위가스량을 선형회귀분석하여 임의의 온도에서의 단위가스량으로 하였다.

2.2.2 쉘중자의 온도분포

용탕주입 후 응고완료 시의 쉘중자의 온도분포를 구하기 위하여 3차원 응고해석을 실시하였다. 응고해석에 이용한 물성치는 Table 3과 같다. 각 물성치는 온도에 의한 변화를 고려하지 않았으며, 주물과 쉘중자 간의 열전달계수는 1차원적인 열유동이 일어나도록 제작한 주형에서 주물에 1개, 쉘중자에 3개의 열전대를 설치하여 온도를 측정하고 Sugiyama 등의 방법[7]으로 구한 값을 해석에 이용하였다. 이때 성형온도를 200°C로 일정하게 하고, 성형압력을 2, 3, 4 kg/cm²로 변화시켜 만든 쉘중자를 사용하였으며, 성형압력에 따른 주물과 쉘중자 간의 열전달계수는 각각 0.0084, 0.0098, 0.0108 cal/(cm²·°C·s)로 성형압력이 증가할수록 주물과 쉘중자 간의 열전달계수는 증가하였다.

대상모델은 75×60×75(337,500개)의 비등간격으로 분할하였는데, Fig. 3은 해석을 위한 요소분할도에서 금형을 제외한 주물과 쉘중자 부분만을 나타낸 것이다. 프로그램은 한국생산기술연구원에서 개발한 3차원 응고해석 소프트웨어인 AutoCAST를 이용하였고, 계산소요시간은 한 경우 당 P/C(586 Pentium)로 약 40분이었다. 해석시간은 주입 후 5초가 경과한 시점까지 하였다. 여기서 5초는 실 주조실험에서 가스가 발생하는 시간을 충분히 고려하여 결정한 값이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 실 주조에서의 가스량 측정

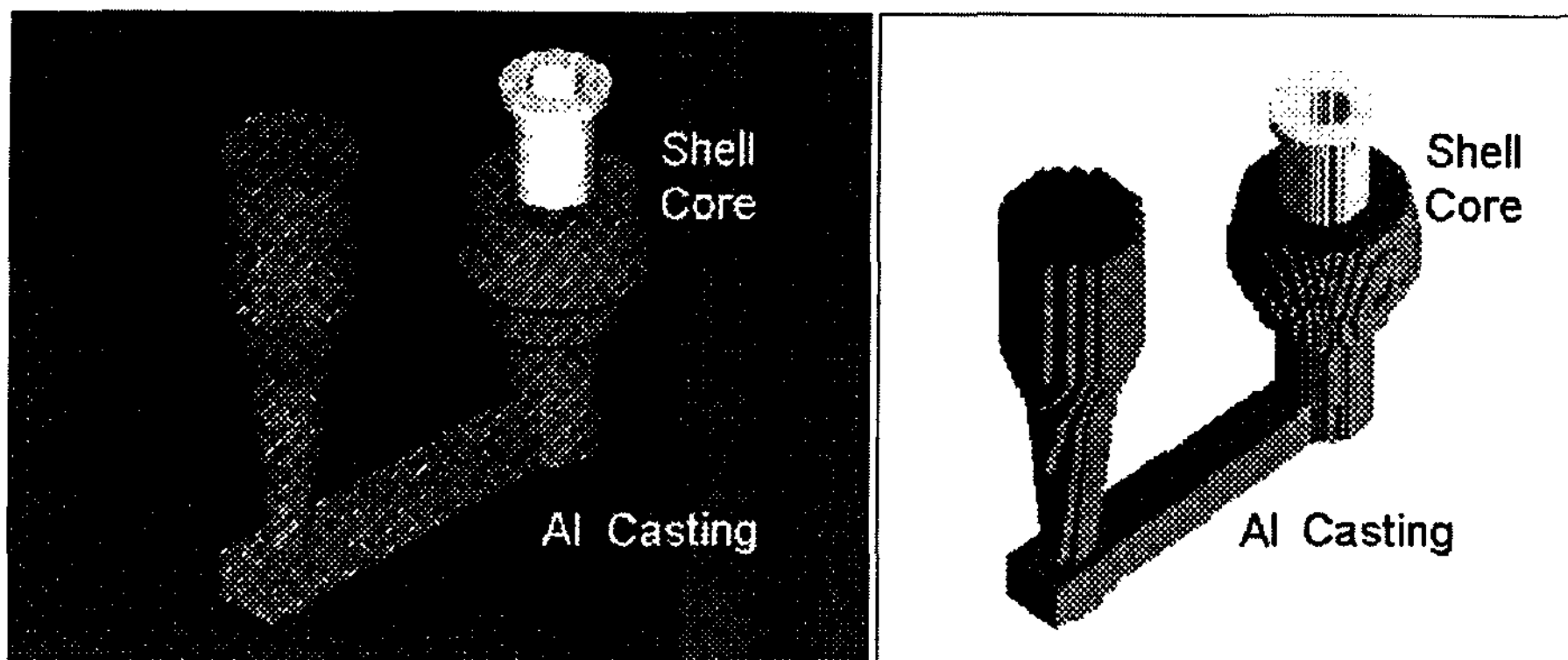


Fig. 3. Solid modelling and meshes of a test casting for solidification analysis.

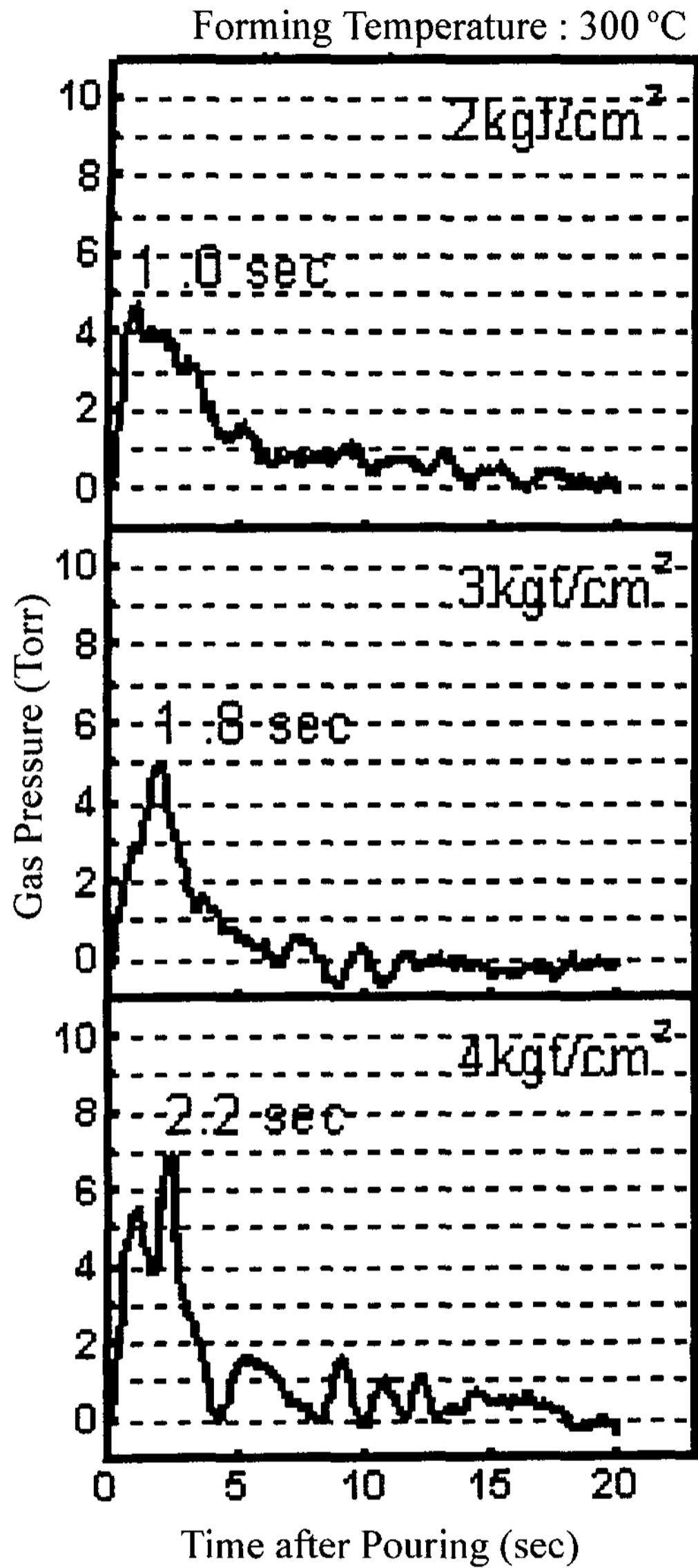


Fig. 4. Variation of gas pressure evolved after pouring with shell core forming pressure (shell core forming temp.: 300°C).

Fig. 4는 셀중자 성형온도 300°C에서 성형압력에 따른 발생가스압력의 시간변화를, Fig. 5는 셀중자 성형압력 4 kg/cm²에서 성형온도에 따른 발생가스압력의 시간변화를 나타낸 것이다. Fig. 6은 성형압력과 성형온도 별로 발생하는 최대 가스압력을 정리하여 나타낸 것이다. 성형압력과 성형온도에 관계없이 모든 경우에 용탕 주입 초기에 가스발생이 급격히 일어나서 최대치를 나타낸 후 빠르게 감소하는 경향을 나타내

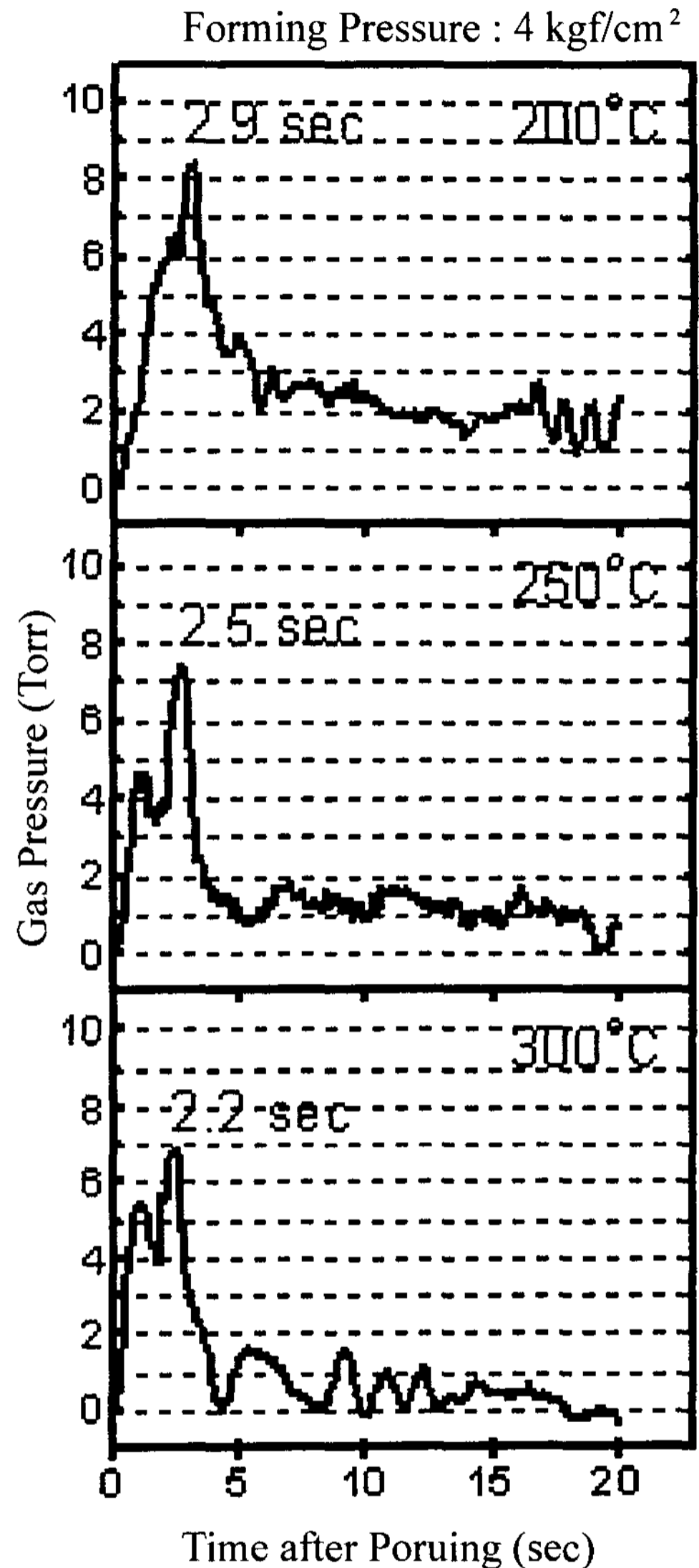


Fig. 5. Variation of gas pressure evolved after pouring with shell core forming temperature (shell core forming pressure: 4 kg/cm²).

고 있다. 동일 성형온도에서는 셀성형압력이 증가할수록 발생가스압력은 증가하고 있고, 최대압력이 나타나는 시간은 늦어지고 있다. 동일 성형압력에서는 성형온도가 높을수록 발생가스압력은 감소하고, 최대압력이 나타나는 시간은 빨라지고 있다.

성형압력이 높아지면 셀중자의 밀도가 증가하여 용탕과의 접촉시 셀중자의 분해온도 이상으로 상승하는 부분이 많아지므로 발생가스압력은 높아지게 된다. 또한 성형압력이 높을수록 최대압력이 나타나는 시간

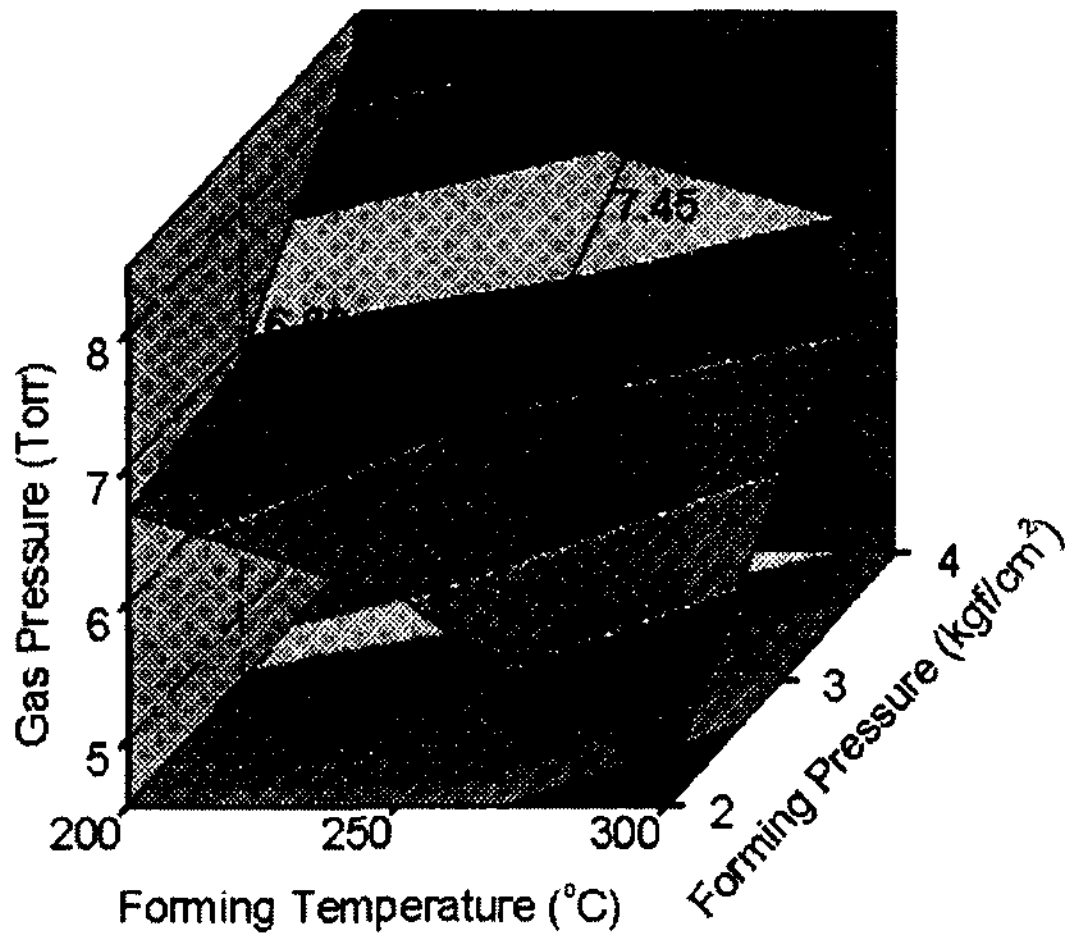


Fig. 6. Relationship between shell core forming temperature and gas pressure evolved after pouring with shell core forming pressure.

Table 4. Permeabilities with shell core forming pressure and temperature

Forming Temperature (°C)	200	250	300
Forming Pressure (kgf/cm ²)			
2	82	86	95
3	80	84	88
4	75	82	84

이 늦어지는 것은 성형압력이 높을수록 쉘중자의 밀도가 증가하여 그만큼 통기도가 낮아지기 때문으로 보인다. Table 4는 성형온도별, 압력별로 통기도를 측정된 결과인데, 성형온도가 높을수록 성형압력이 낮을수록 통기도가 증가함을 알 수 있다.

성형온도가 높을수록 발생가스압력은 감소하고, 최대 압력이 나타나는 시간은 빨라지고 있는 이유도 쉘수지 분해온도와 통기도로 설명할 수 있다. 즉 성형온도가 높으면 쉘중자 제작시 일부가 타버리므로 그만큼 용탕 주입시 분해되는 수지량이 감소하므로 발생가스압은 작아지게 된다. 최대압력이 나타나는 시간이 빨라지는 것은 성형온도가 높을수록 통기도가 높아지기 때문으로 보인다.

3.2 계산 가스량

3.2.1 단위가스량

Fig. 7은 본 실험에 사용한 쉘사의 열중량분석결과이다. 쉘사의 점결제는 160°C 부근에서 분해가 시작되

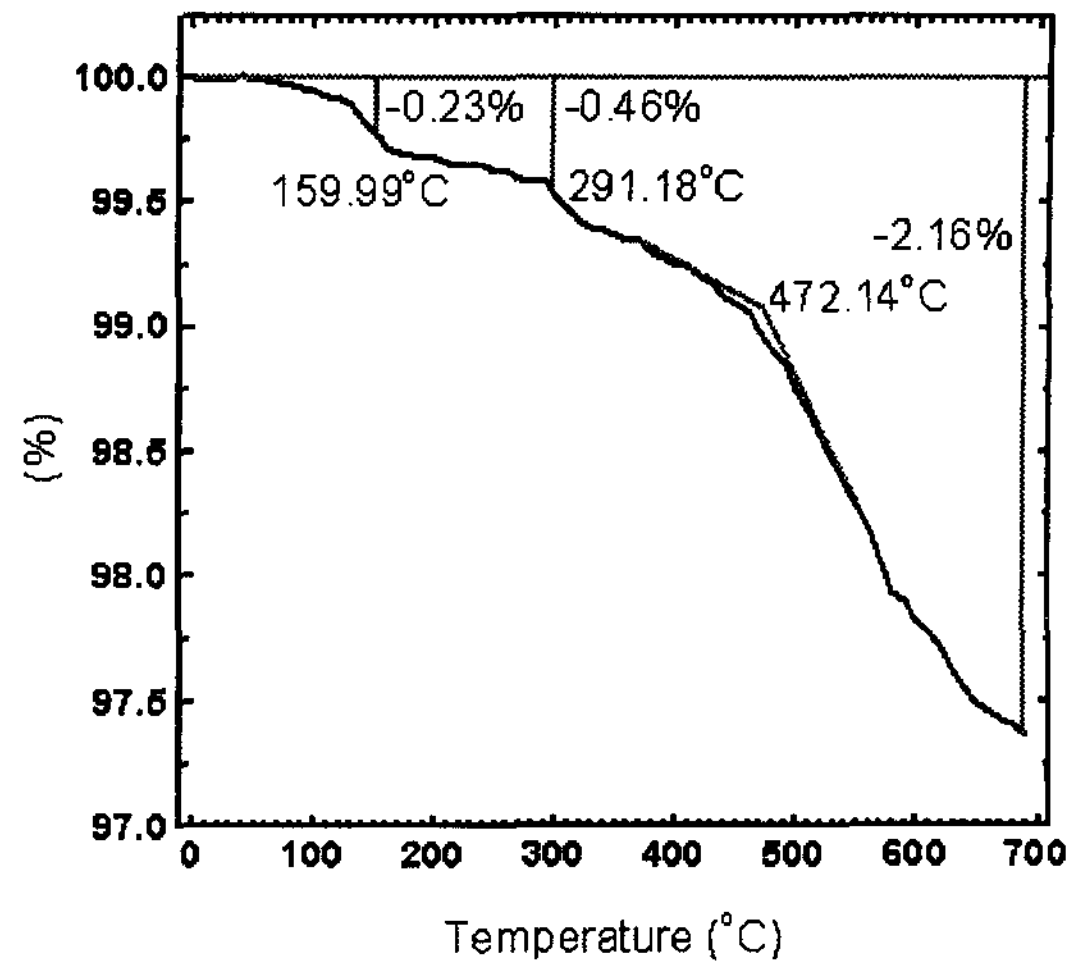


Fig. 7. Thermogravimetric analysis curve of the shell sand (heating rate: 10°C/sec).

어 472°C까지 진행되다가 이후는 더 빨리 분해가 일어나고 있다. 이 결과를 토대로 단위가스량은 200~500°C의 범위에서 25°C 간격으로 설정하여 측정하였다.

Fig. 8은 단위가스량 측정 결과이다. 쉘중자 성형온도가 높을수록 단위가스량은 감소하였는데, 이는 성형온도가 높을수록 쉘사의 점결제가 성형단계에서 소실량이 많기 때문이다. 그리고 열중량 분석결과에서도 예측 가능하듯이 측정온도가 높을수록 단위가스량은 증가하고 있다. 쉘중자의 온도분포를 알면 Fig. 8의 결과를 이용하여 발생가스량을 계산할 수 있다.

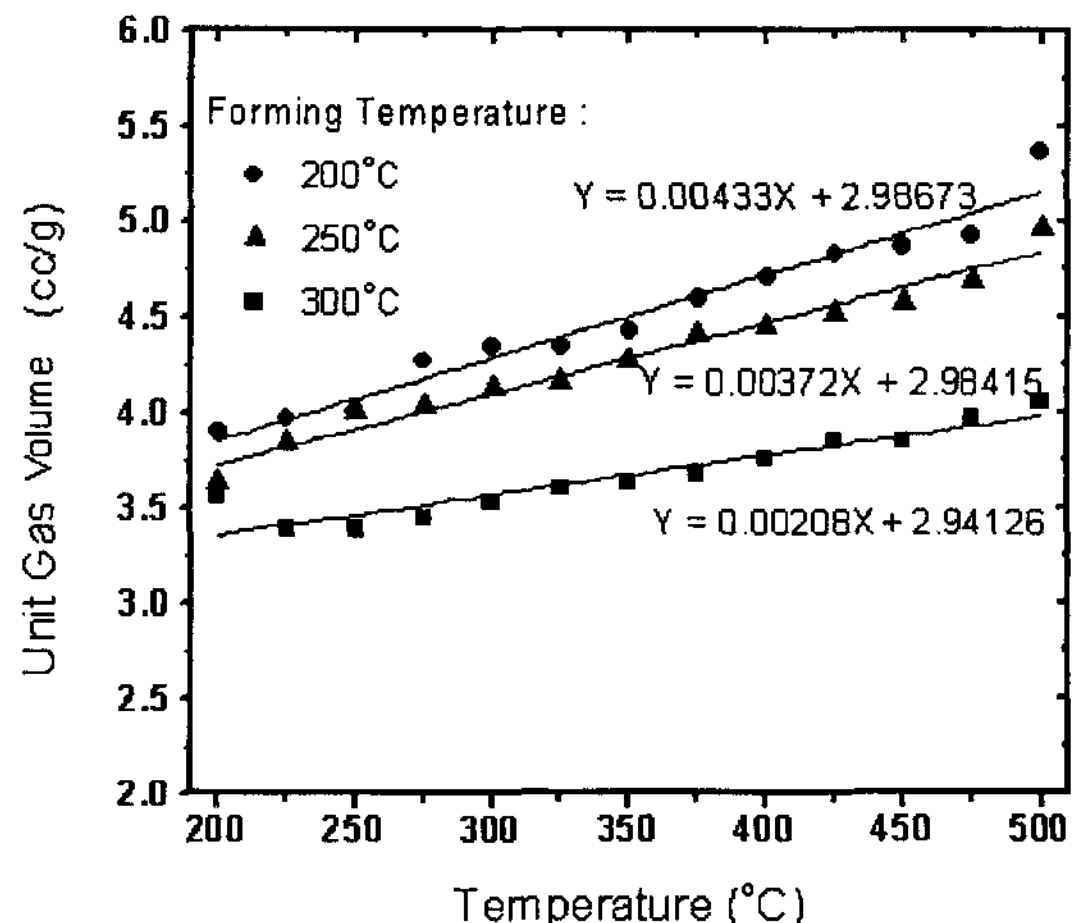


Fig. 8. Relationship between temperature of the shell sand and unit gas volume with shell core forming temperature.

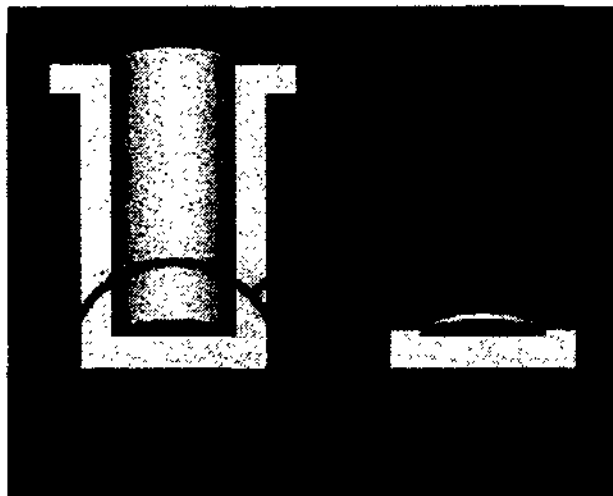
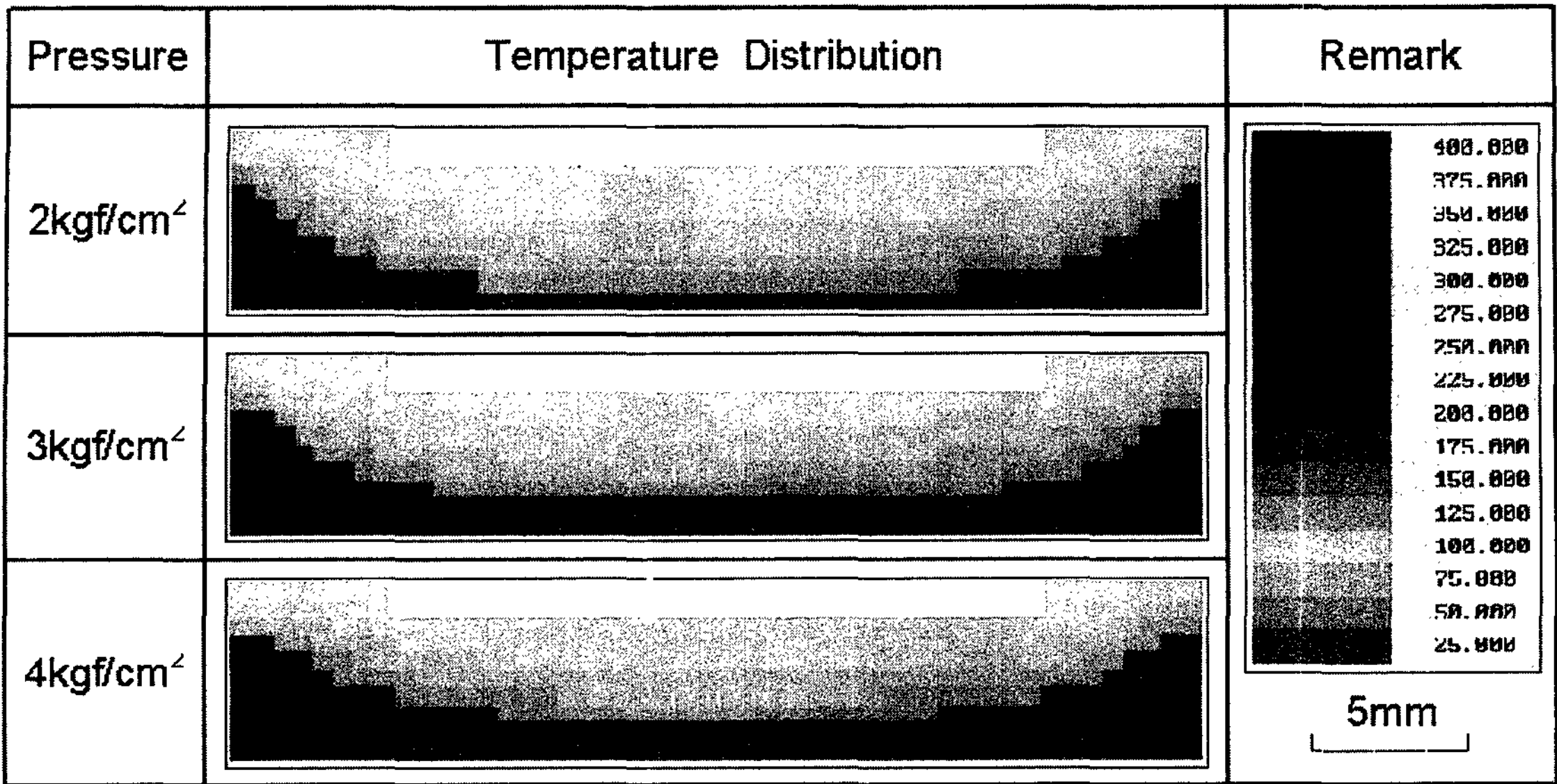


Fig. 9. Calculated temperature distribution in the shell core.

3.2.2 셸중자의 온도분포

Fig. 9는 셸중자 성형 압력에 따른 셸중자 내의 온도분포 해석 결과 중 Fig. 9의 아래 그림부분의 온도분포를 나타낸 것이다. 성형압력이 높을수록 셸중자 수지의 분해온도를 넘는 구역이 넓어짐을 알 수 있다.

해석결과로부터 셸중자 수지분해온도 이상의 온도를 갖는 요소의 중량을 계산하여 온도 구간별로 표시한 것이 Table 5이다. Table 5의 결과를 Fig. 8의 온도

Table 5. Calculated shell core weight over resin decomposition temperature with shell core forming pressure (unit: g)

Forming Pressure (kgf/cm ²)	Shell Core Temperature after Pouring (°C)									
	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375
2	0.60	0.80	0.64	0.41	0.32	0.21	0.20	0.07	0.01	-
3	0.82	0.54	0.81	0.56	0.37	0.32	0.22	0.11	0.08	-
4	0.72	0.63	0.81	0.66	0.42	0.39	0.18	0.20	0.08	-

-가스량 관계를 이용하여 적산하면 용탕 주입 후 셸중자에서 발생하는 가스량을 계산할 수 있다.

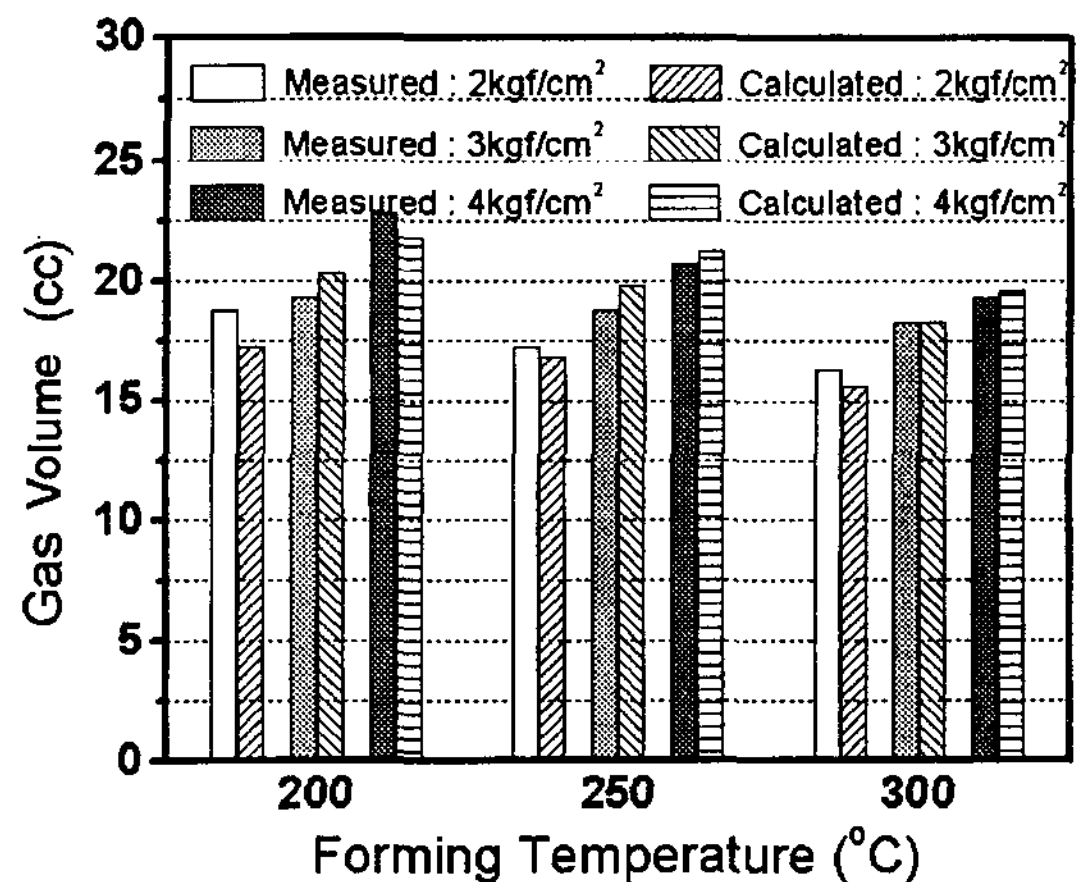


Fig. 10. Comparison between measured and calculated gas volume with shell core forming temperature and pressure.

3.3 가스량의 측정치와 계산치의 비교

Table 5의 결과와 Fig. 8의 온도-가스량 관계로부터 용탕 주입 후 쉘중자에서 발생하는 가스량을 계산하여 실 구조실험에서의 결과와 비교하면 Fig. 10과 같다. 측정결과와 계산결과를 보면 쉘중자의 성형압력이 증가할수록 성형온도가 낮을수록 발생가스량이 증가하는 경향은 일치하며, 계산치와 실측치의 차이는 약 5% 정도 있으나 본 연구에서의 발생가스량 예측방법은 유효함을 알 수 있다.

이상의 결과를 이용하면 통상의 응고해석프로그램에서 쉘중자의 온도분포를 얻으면 쉘중자 수지 분해온도 이상의 요소의 중량을 온도구역별로 구할 수 있다. 이를 온도-가스량 관계식과 연결시키는 모듈을 작성하여 주 프로그램에 삽입하여 금형주조시의 응고해석을 하면 동시에 쉘중자로부터의 가스발생량도 계산되므로 구조불량감소에 유익한 정보를 얻을 수 있다.

구조설계 시에는 쉘중자와 용탕과의 접촉면적이 넓으면 그 만큼 가스발생량은 증가하게 되므로 쉘중자의 형상 및 용탕과의 접촉면적 등을 고려하여 쉘중자의 성형조건을 선택하는 것이 바람직하다. 가스결합이 자주 발생하는 주물에서는 쉘중자의 성형 및 강도상의 문제가 없다면 쉘중자의 성형압력은 낮추고 성형온도는 높이면 가스결합의 경감을 기대할 수 있다.

4. 결 론

중력금형 주조 시에 성형압력, 성형온도 등 쉘중자의 성형조건을 달리한 중자를 사용하여 용탕주입시

발생되는 가스량을 측정하고, 또한 이의 정량적인 예측을 시도한 결과 다음의 결론을 얻었다.

(1) 성형압력과 성형온도에 관계없이 용탕 주입 초기에 가스발생이 급격히 일어나서 최대치를 나타낸 후 빠르게 감소하는 경향을 나타낸다.

(2) 쉘중자의 성형압력이 증가할수록 발생가스압력은 증가하고 최대압력이 나타나는 시간은 늦어지며, 성형온도가 높을수록 발생가스압력은 감소하고 최대압력이 나타나는 시간은 빨라진다.

(3) 통상의 응고해석프로그램에서 금형주조 시에 쉘중자의 온도분포를 구한 후 쉘중자 수지 분해온도 이상의 요소의 중량을 온도구역별로 구하고, 이를 실험적으로 구한 온도-가스량 관계식과 연결시켜 얻은 쉘중자의 발생가스량의 계산치는 실측치와 잘 일치하였고, 이로부터 본 연구에서의 발생가스량 예측방법은 유효함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] J. L. Jorstad, Aluminum Casting Technology, 2nd edition, AFS (1993) 223.
- [2] K. Kobayashi, Imono, 32(1960) 159.
- [3] C. Locke, AFS Transactions, 80(1972) 91.
- [4] R. A. Worman and J. R. Nieman, AFS Transactions, 81(1973) 170.
- [5] N. Komatsu *et al.*, Imono, 47 (1975) 156.
- [6] Y. Yamamoto *et al.*, Imono, 61 (1989) 888.
- [7] M. Sugiyama *et al.*, Imono, 46 (1974) 820.
- [8] 일본주물협회, The Collected Examples of Computer Simulation (1990).