

■■■■■■■■■■
論 文
 ■■■■■■■■■■

발포금속 제조를 위한 석고주형의 특성

김기영*† · 백남익

Properties of Plaster Mold for Open Cell Aluminum Foam

Ki-Young Kim*† and Nam-Ik Paik

Abstract

There are many methods to produce metal foams, which can be classified into three groups according to the state of the starting metal i.e. liquid or powder or solid. Three types of defects such as cell closing, cell deformation or breakdown and cell misrun are thought to be occurred when we make the open cell aluminum foams by precision casting. Filling ability of the mold slurry between preform is related with cell closing, mold collapsibility is related with cell deformation or breakdown, mold temperature and pouring pressure are related with cell misrun. These factors can be evaluated by measuring slurry fluidity, burnout strength and permeability of the mold. Properties of the plaster mold were evaluated to find optimum mold conditions for high quality open cell aluminum foam in this study. Permeability was almost zero independent of burnout conditions, however, crack initiation was found on the surface of all specimens one or two minutes after taking out from the furnace. Crack has grown and disappeared with time. This crack may facilitate the mold filling when molten metal is poured, because of the improved mold permeability. It was considered that crack initiation and disappearance was closely related with temperature difference between the surface and inner part. Knocking-out the mold is a difficult problem due to the small cell size, because continuous mesh structure of the metal foam is not strong. It is not easy to remove molding material after pouring. We can expect that water quenching can facilitate the knocking-out the mold after solidification without damaging cell structures. Collapsed particles after water quenching became bigger with the increase in time. (Received July 13, 2001)

Keywords : Open cell aluminum foam, plaster mold, slurry fluidity, burmoat strength, permeability

1. 서 론

발포금속은 저밀도, 고비강성, 우수한 충격흡수능력, 유체투과성, 음향흡수능과 낮은 열전도도 및 뛰어난 전기절연성 등의 특성 때문에 최근 새로운 공업재료로 부상하여 세계 각국에서 활발하게 연구개발이 진행되고 있으며, 경량구조재, 소음재, 댐퍼, 휠터, 전극재, 열교환기 등으로 그 용도가 확대되고 있다.[1-3]

발포금속의 재질 및 제조방법은 매우 다양한데, 제조 시작 단계에서 어떠한 상태의 금속을 사용하는가에 따라서 크게 세 가지로 분류할 수 있다. 즉 액상 금속을 사용하는 주조법, 분말금속을 사용하는 분말야금법, 고체금속을 사용하여 발포금속을 제조하는 금속중착법

으로 분류된다. 이를 좀 더 세분하면 9개의 방법으로 분류되고 있는데, 현재 이 중에서 5가지 프로세스의 상업화 생산이 이루어지고 있다.[1]

발포금속은 형태 상으로는 유체 통과가 가능한 개포형(Open Cell)과 불가능한 폐포형(Closed Cell)의 두가지로 나누어지는데, 개포형 발포금속의 유력한 제조방법 중의 하나가 정밀주조법이다. 정밀주조법은 모형으로 폴리우레탄 폼을 사용하고, 주형재료로는 내화도가 있는 재료를 사용하여 주형을 제작한 후, 이를 소성하여 폴리우레탄 폼을 제거하면 그 자리가 바로 주형공간이 되는데, 이 곳에 원하는 금속을 용해, 주입하고 나서 주형을 제거하면 발포금속을 얻게 되는 방법이다.[5]

발포알루미늄을 정밀주조법으로 제조할 때 주형재료

선문대학교(Sunmoon University)

*한국기술교육대학교(Korea University of Technology and Education)

†E-mail : simha@kut.ac.kr

로 널리 사용되는 것이 석고인데, 개포형 발포금속의 경우는 셀의 크기가 작고(10 PPI~30 PPI, Pores Per Inch) 셀 벽의 두께가 0.2~0.5 mm 정도로 매우 얇으므로 석고 주형을 이용한 정밀주조법으로 발포알루미늄의 제조 할 때에는 셀 눈막힘, 셀의 변형, 셀 미충전 등의 결함이 발생하기 쉽다.[6] 이러한 결함에 영향을 미치는 특성으로는 셀 눈막힘의 경우는 주형 제조 시 주형슬러리의 충전능력, 셀 변형의 경우에는 주형재료의 붕괴성, 셀 미충전의 경우에는 주형온도 및 주입압력 등을 들 수 있다.

본 연구에서는 상기한 석고 슬러리의 충전능력, 주형재료의 붕괴성, 주입압력과 밀접한 관련이 있는 석고주형재료의 슬러리 유동도, 소성 후의 강도 및 통기도 등을 측정하여 개포형 발포알루미늄 제조를 위한 석고주형의 특성을 평가하고자 한다.

2. 실험방법

주형재료는 주입금속의 종류에 따라서 달라지는데, 알루미늄합금의 경우는 석고가 일반적으로 사용된다. 본 연구에서는 국내에서 시판되고 있는 주형용 석고(A사 제품)를 사용하였다. 석고주형의 강도 및 통기도 측정을 위한 시료의 직경은 50 mm, 높이는 50 mm이고, 석고 슬러리 제조를 위한 물 첨가량은 석고 중량의 38~42%로, 물의 온도는 30°C로 하였다.

강도 및 통기도용 시편은 제조 후 실온에서 24시간 이상 방치 후 소성하였는데, 소성온도는 500°C~900°C로, 소성 시의 가열속도는 100°C/hr~250°C/hr로 하였으며, 가열 유지시간은 1 hr~3 hr로 하여 소성하였다. 소성이 끝난 시료는 공냉하거나 수냉하였다.

통기도는 주형용 통기도 시험기(Georg Fischer사 제)를, 강도는 만능 주형강도측정기(Georg Fischer사 제)를 사용하여 측정하였다.

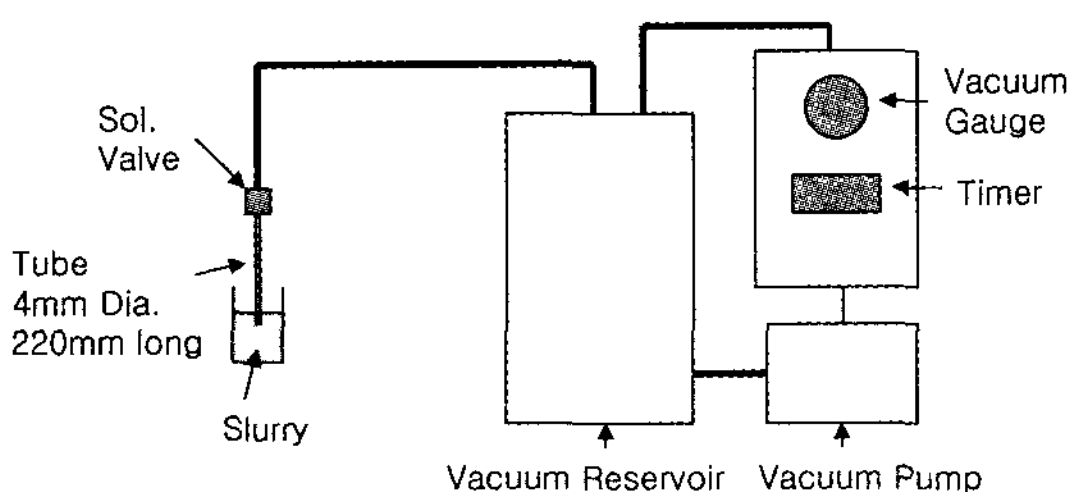


Fig. 1. Schematic diagram of slurry fluidity tester.

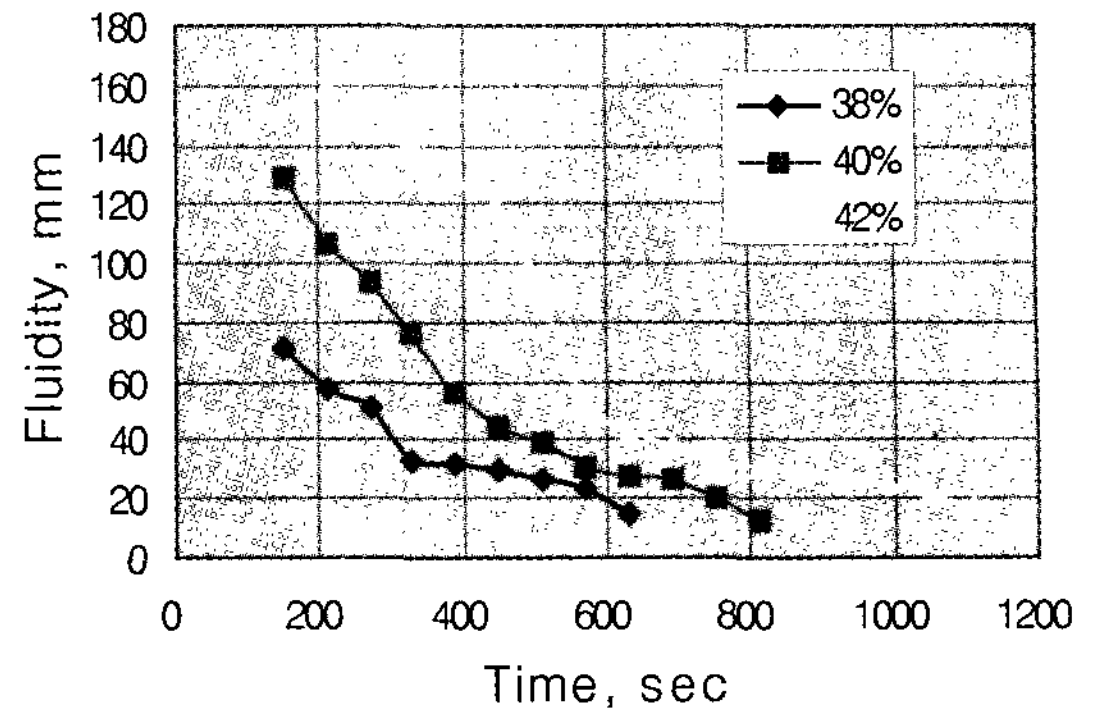


Fig. 2. Change of slurry fluidity with water added.

석고 슬러리의 유동도는 금속용탕의 유동도 측정을 위하여 고안된 그림 1과 같은 MIT식 방법을 사용하여 측정하였다.[7] 슬러리 흡인을 위하여 내경 4 mm, 길이 220 mm의 플라스틱 관을 사용하였고, 슬러리 혼련 후 일정시간 간격 마다 흡인 후 관속으로 흡인된 거리를 측정하여 유동도로 하였다. 이 때 흡인 압력은 660 torr, 흡인 시간은 1초로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 슬러리 유동도

그림 2는 석고 슬러리의 물 첨가량에 따른 유동도 측정 결과이다. 물 첨가량은 석고 중량의 38, 40, 42%로 하였는데, 슬러리 혼련 후 시간의 경과에 따라서 유동도는 감소하며, 어느 시간 후에는 급격히 유동도가 감소함을 알 수 있다. 물 첨가량이 38%의 경우는 약 250초 부근, 40% 경우는 380초 부근, 42% 경우는 450초 부근에서 급격히 유동도가 감소하는데, 이 시간이 경과하면 슬러리의 유동도가 낮아져서 주형 충전성이 나빠지므로 이 시간 이내에 석고 슬러리는 주형에 주입되어야 함을 의미한다. 또한 실제 작업 시에는 슬러리 혼련 중에 기포가 다량 발생하므로 슬러리 중의 기포를 제거하여야 하는데, 혼련 후 시간이 지나면서 슬러리의 유동성이 떨어지면, 즉 점도가 증가하면 탈포도 어려워지므로 그림 2의 결과보다는 빠른 시간 내에 슬러리의 주입이 완료되어야 한다.

3.2 소성 후의 강도

그림 3은 가열속도가 100, 150, 200, 250°C/hr인 경우 소성온도와 소성 후의 강도와의 관계를 나타낸

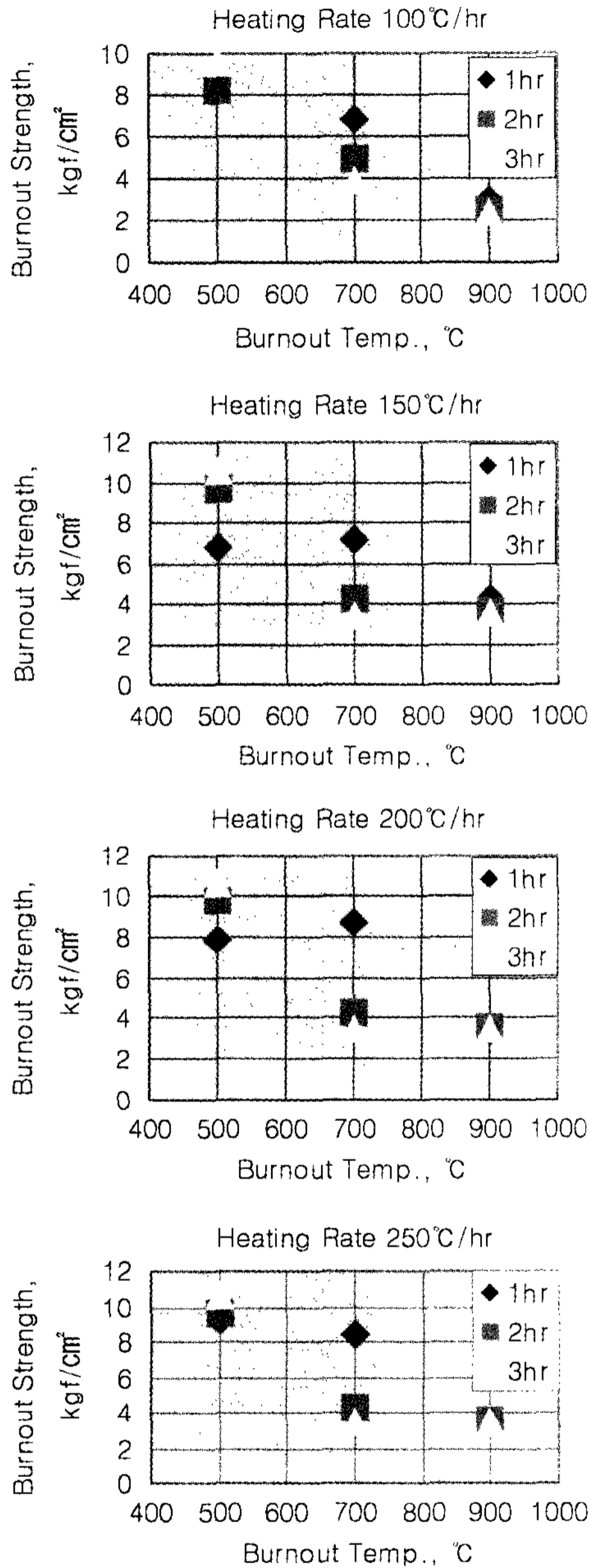


Fig. 3. Relationship between burnout temperature and burnout strength with heating rate.

것이다. 모든 가열속도의 조건에서 소성 후의 강도는 소성온도가 높을수록 감소하고 있으나, 가열유지시간의 영향은 뚜렷하지 않게 나타나고 있다. 소성온도가 500°C 인 경우의 소성 후의 강도는 7~12 kgf/cm², 700°C인 경우는 3~9 kgf/cm², 900°C인 경우는 2~4 kgf/cm²의 범위에 있다.

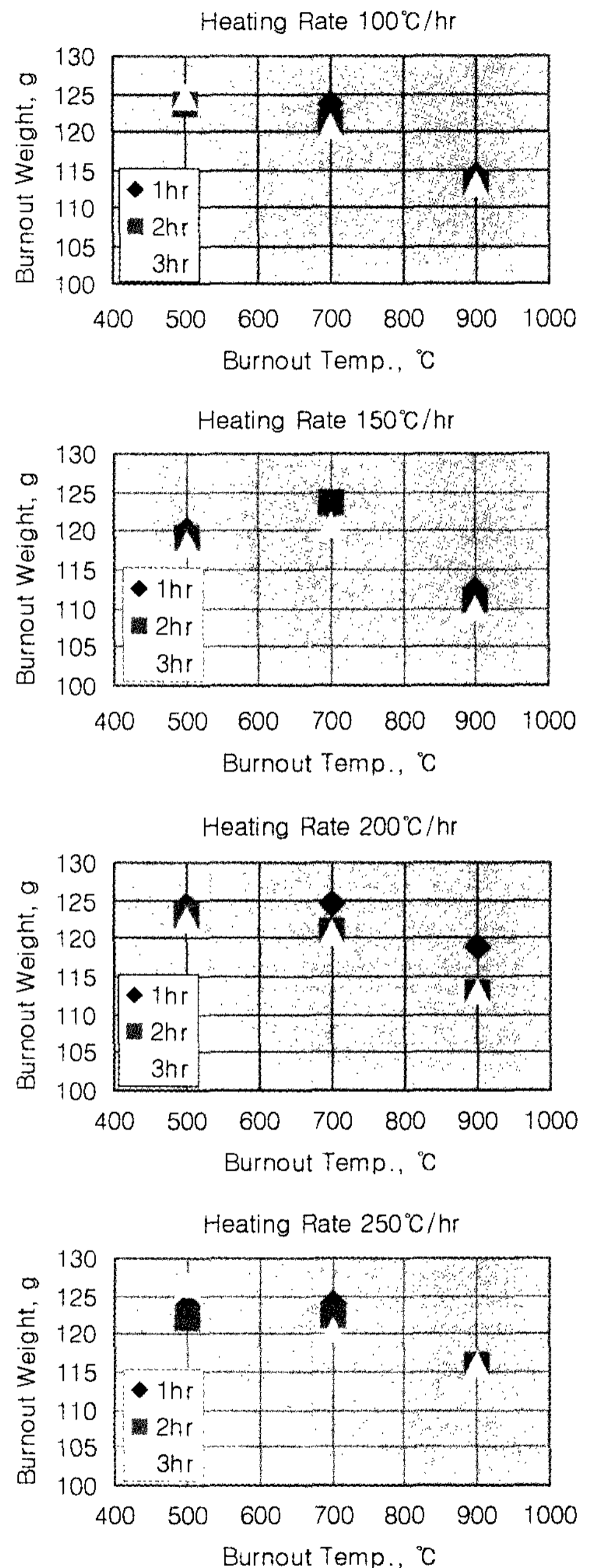


Fig. 4. Relationship between burnout temperature and burnout weight with heating rate.

그림 4는 가열속도가 100, 150, 200, 250°C/hr인 경우 소성온도와 소성 후의 시편의 중량과의 관계를 나타낸 것이다. 모든 가열속도의 조건에서 소성 후의 중량은 소성온도가 높을수록 감소하고 있으나, 가열유

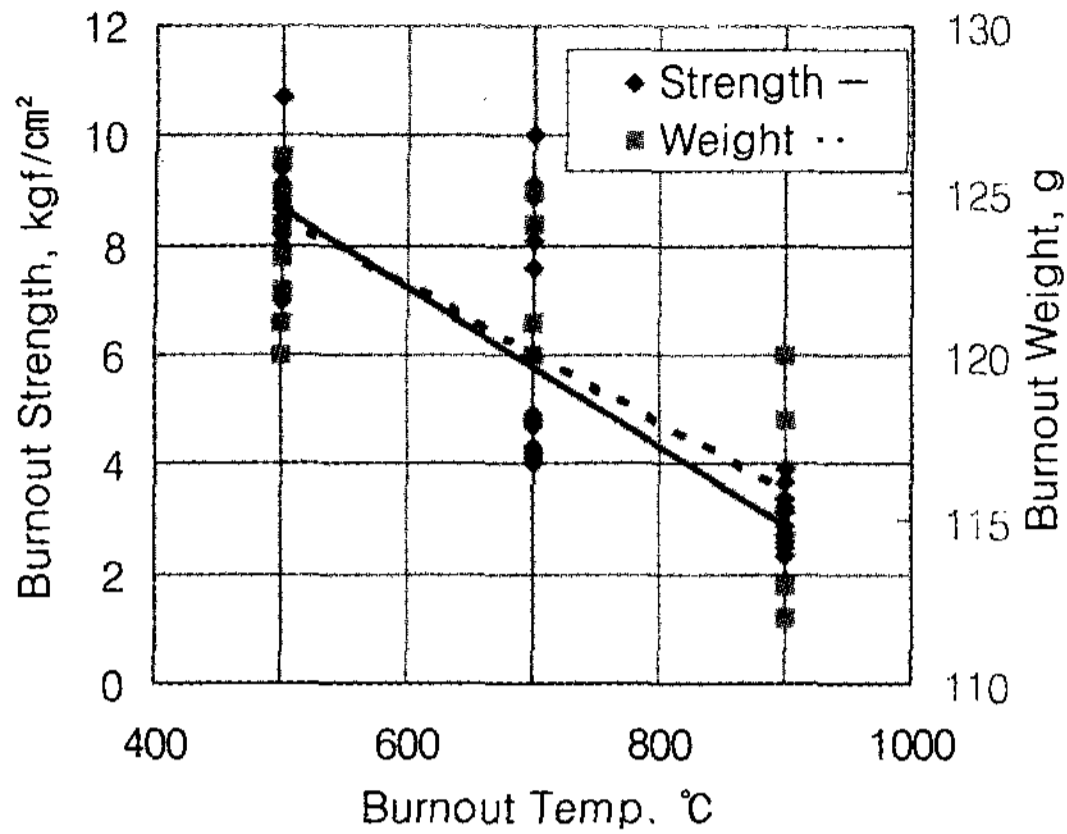


Fig. 5. Relationship among burnout temperature, burnout strength and burnout weight (heating rate: 200°C/hr).

지시간의 영향은 뚜렷하지 않게 나타나고 있다. 소성 온도가 500°C인 경우의 소성 후의 중량은 118~125 g, 700°C인 경우는 120~125 g, 900°C인 경우는 110~115 g의 범위에 있다.

그림 5는 가열속도가 200°C/hr인 경우 소성온도에 따른 소성 후의 강도 및 중량과의 관계를 나타낸 것으로 소성 후의 강도 및 중량 모두 소성온도가 높을수록 감소하고 있는 것으로부터 양자 사이에 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

그림 6은 소성 가열 시에 가열속도의 영향을 알아보기 위하여 석고주형 시료의 내부에 0.2 mm 직경의 CA열전대를 삽입하여 주형 가열 시의 위치에 따른 온도변화를 측정된 결과이다. 열전대는 표면에서 1 mm, 표면에서 12 mm, 그리고 시료 중심부에 설치하여 온도를 기록하였다. 그림 6은 소성온도 700°C, 가열속도 150°C/hr인 경우의 측정 예인데, 표면이 목표온도에 도달한 후 30분 이내에 중심부도 목표온도에 도달하여 시료 내외부가 균일하게 가열됨을 확인할 수 있었다. 이 조건 외의 본 연구의 모든 소성온도, 가열속도의 조건에서도 역시 30분 이내에 중심부가 목표 온도에 도달하였다. 따라서 그림 3과 그림 4에서 소성 후의 강도 및 중량에 미치는 가열유지시간의 영향은 뚜렷하지 않게 나타났는데, 이는 가열유지시간이 1시간 이상이 되면 시편 내외부가 균일한 온도로 유지되기 때문으로 보인다.

소성 후의 강도 및 중량 모두 소성온도가 높을수록 감소하고 있는 이유는 다음과 같이 설명할 수 있다. 석고 주형의 주원료인 석고는 결합수를 가진 형태 두

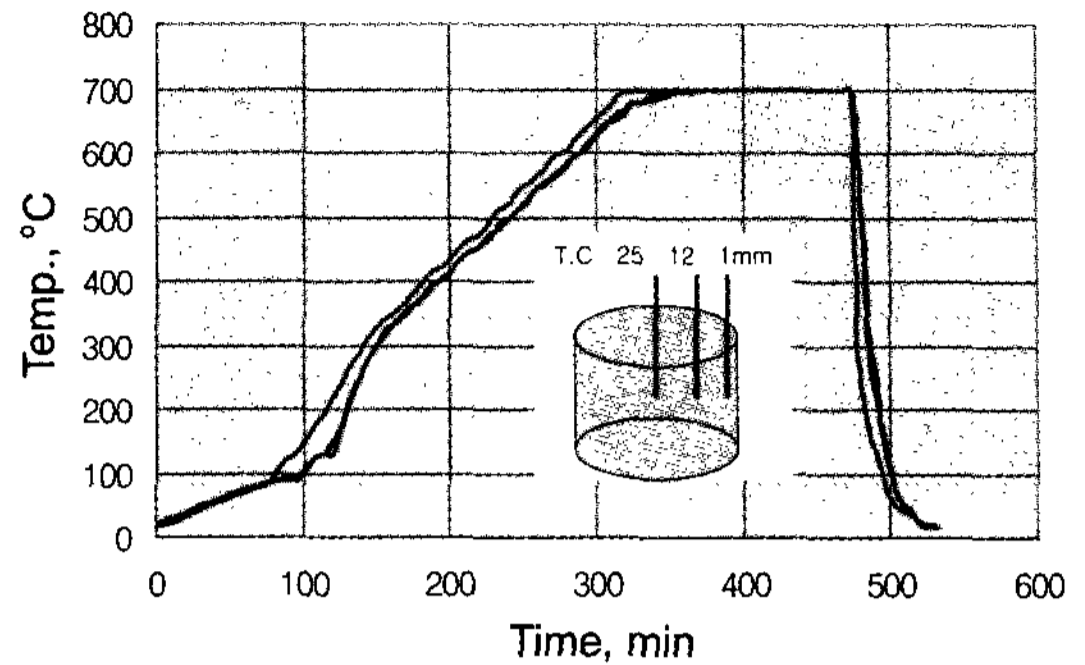


Fig. 6. Temperature change with location in the specimen during heating and cooling.

가지와 결합수가 없는 형태의 세가지로 존재한다[8]. 주형용석고의 시판되는 형태는 반수석고(Hemihydrate, Plaster of Paris)이고, 여기에 슬러리 제조를 위하여 물을 첨가하면 이수석고(Dihydrate, Gypsum)가 되어 경화하는데, 이는 침상의 결정질석고가 서로 물을 잡고 있으므로 경화하게 되는 것이다. 이것을 가열하게 되면 다시 물이 증발하면서 무수석고(Anhydrous Calcium Sulfate)가 된다. 이 때 가열로 인하여 물이 제거되면서 침상의 결정질 석고의 결합력이 약화되면서 주형의 강도는 저하하게 된다. 또한 중량도 물의 첨가 및 제거에 따라서 변화하게 되는데, 이는 반수석고에서 무수석고가 될 때까지의 화학식에서 분자량을 계산해 보면 소성온도가 높을수록 중량이 감소함을 알 수 있다. 슬러리 제조를 위한 이론적인 물 첨가량은 의 식에서 분자량을 계산해보면 석고 중량의 약 19%가 된다. 그러나 실제로는 유동성 및 가사시간의 확보를 위하여 이보다 많은 물을 첨가하고 있다.

그림 7은 강도 시험 후의 석고 시편 파면의 SEM사진을 나타낸 것이다. 상온에서 24시간 방치한 시료의 조직을 보면 침상의 이수석고가 많은 것을 볼 수 있으나, 소성온도가 높아질수록 침상 이수석고가 미세해지며, 양도 감소함을 알 수 있는데, 그림 3에서 소성온도가 높을수록 주형강도가 감소하는 것은 이 때문으로 보인다.

그림 8은 소성온도에 따른 석고 주형의 X선 회절 패턴으로 상온에서는 이수석고의 존재가 뚜렷하나, 소성온도가 높아질수록 이수석고의 피크가 감소하며, 무수석고의 피크가 뚜렷해짐을 확인할 수 있다.

그림 9는 소성 후 석고 시편을 로에서 꺼내고 나서

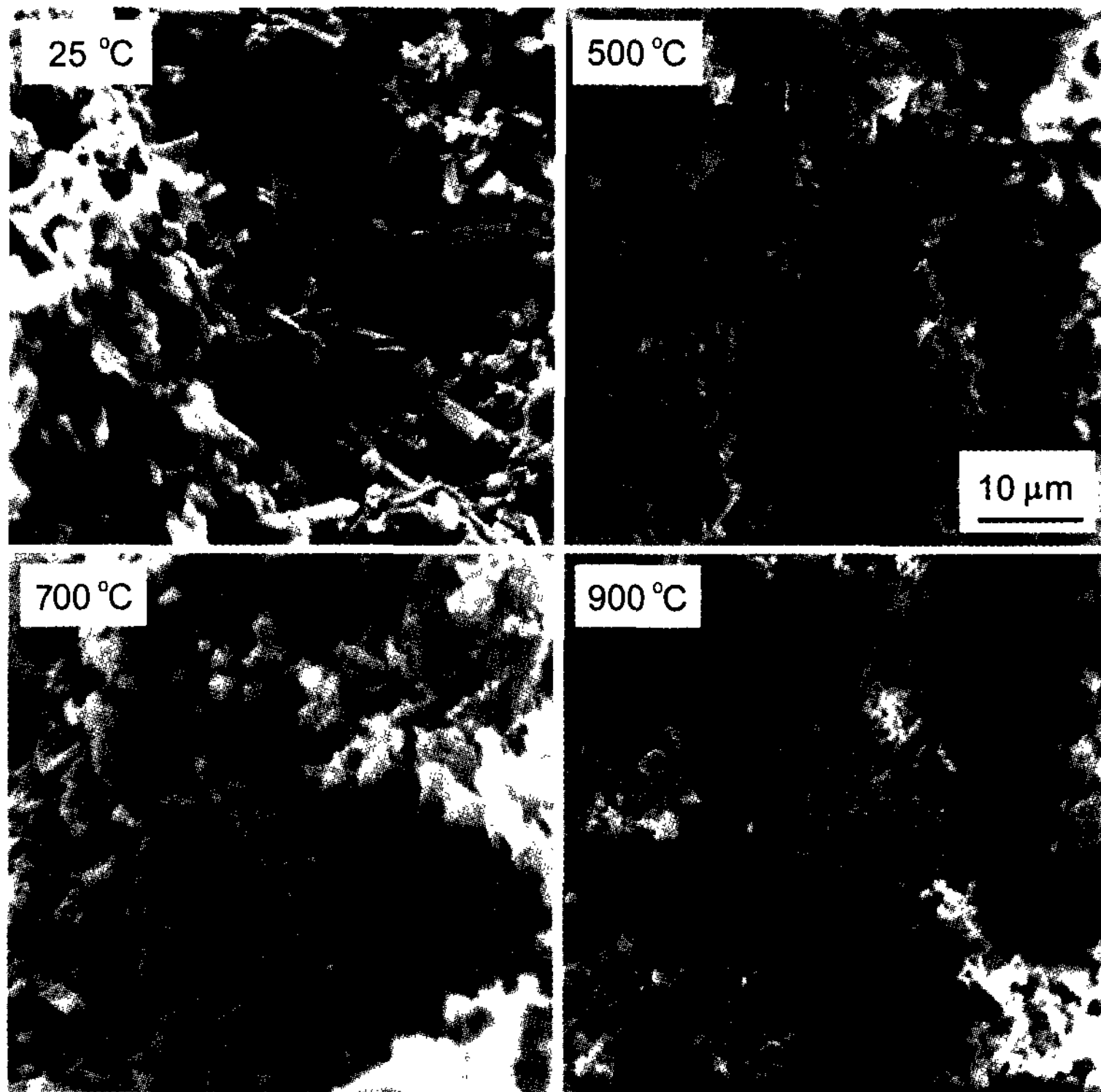


Fig. 7. SEM fractography of specimens with drying temperature of 25, 500, 700 and 900°C.

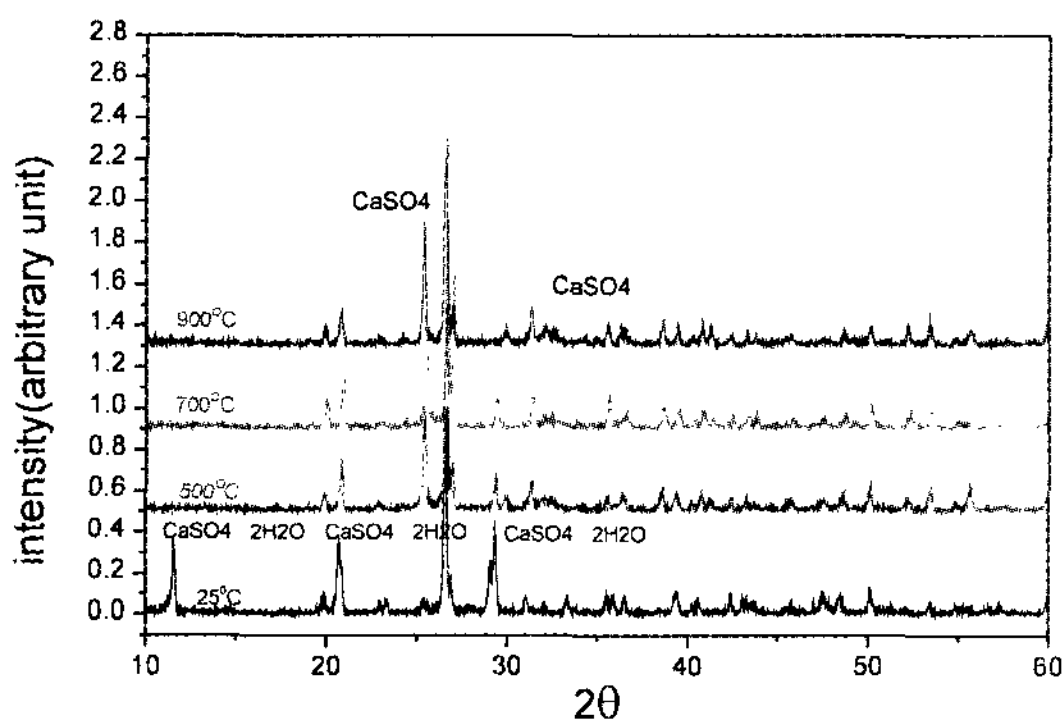


Fig. 8. XRD pattern of specimens with drying temperature of 25, 500, 700 and 900°C.

일정시간이 경과한 후 수냉한 결과이다. 꺼내자마자 수냉한 시료는 붕괴된 주형 입자가 매우 미세하나, 꺼낸 후 경과시간이 길어질수록 붕괴된 입자의 크기는 커지고 있음을 알 수 있다. 서론에서 언급한 바와 같이 개포형 발포금속의 셀은 작고, 또한 셀 벽이 얇아서 강도가 약하므로, 주입하고 나서 주형 해체 시에 무리한

힘을 가하게 되면 셀이 변형되어버리는 단점이 있다. 특히 셀 크기가 30 PPI의 경우는 셀의 크기도 매우 작으므로 미세한 셀 사이의 주형재를 제거하기가 곤란해진다. 따라서 실제 제조 시에 주입완료 후 적당한 시간에 주형을 수냉하는 것이 셀 변형이 없이 주형재를 용이하게 제거할 수 있는 방안의 하나가 될 수 있음을 의미한다.

3.3 통기도

소성 후의 석고 주형의 통기도는 소성시간, 소성온도에 관계없이 거의 영을 나타내었다. 그러나 주형의 통기도는 중력주조, 가압주조 또는 흡인주조법을 이용하여 주조할 때 주형의 충전성에 영향을 미친다는 것이 일반적으로 알려져 있다. 주조법을 이용하여 발포금속을 제조할 때에는 로스트와스법과 같이 패턴의 제거를 위하여 주형을 소성하게 되고 또한 주형이 고온인 상태에서 용탕을 주입하게 되는데, 소성으로 인하여 주형에 균열이 발생하면 어느 정도 통기성이 확보되어 주형 충전에 도움이 될 것으로 기대할 수 있다.

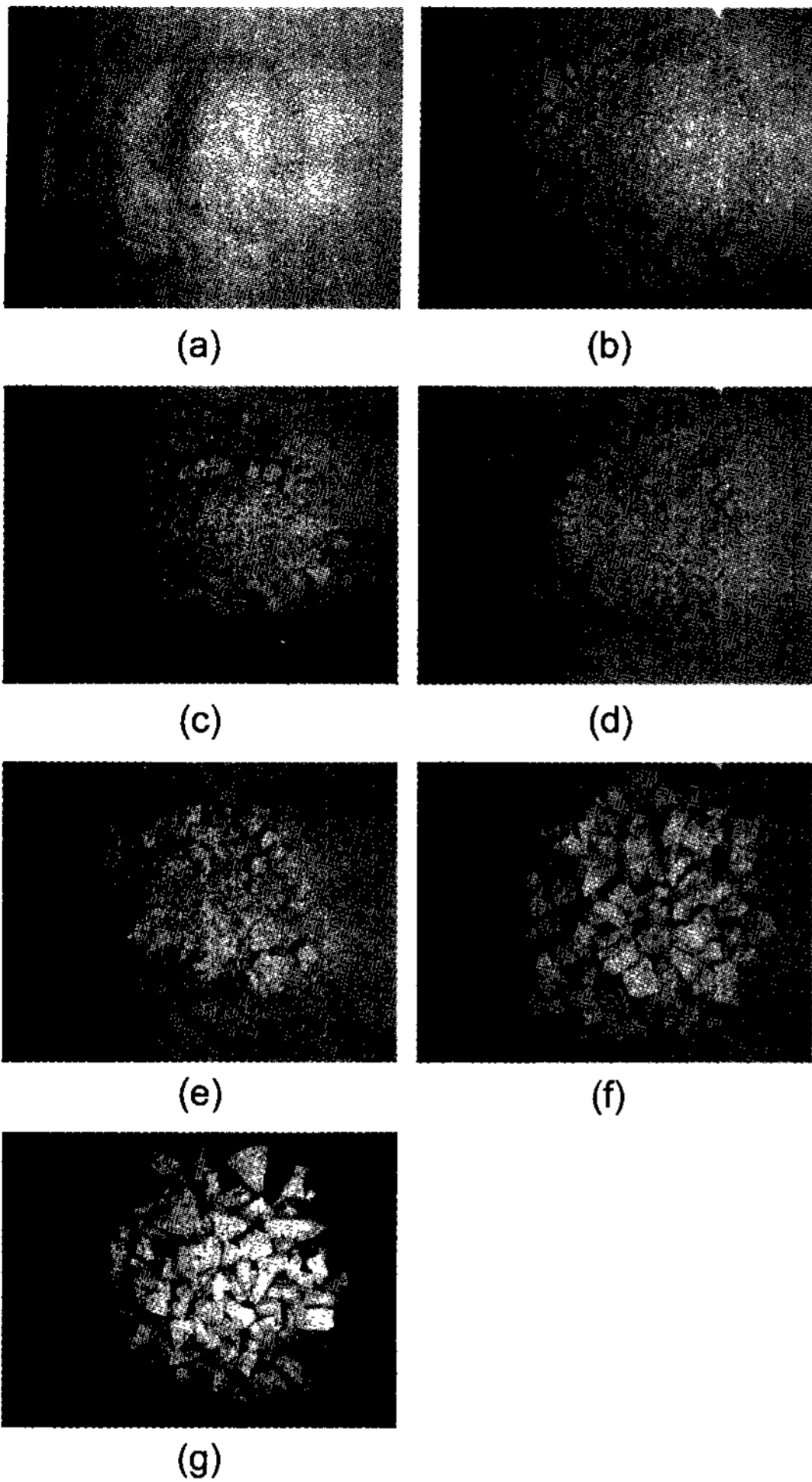


Fig. 9. Collapsed shape of the plaster mold by water quenching with elapsed time after taking out from the furnace. (a) 10 seconds (b) 180 seconds (c) 270 seconds (d) 300 seconds (e) 450 seconds (f) 670 seconds (g) 920 seconds.

따라서 실제로는 상온통기도 보다는 고온통기도가 중요하므로 이러한 고온에서의 통기도 측정을 위한 별도의 장치의 개발이 요구된다.

그림 10은 소성 후 공냉 시의 석고 시편의 상부를 관찰한 결과이다. 로에서 꺼낸 후 30초까지는 아무 변화가 없으나, 40초 이상이 되면 미세한 크랙이 발생하기 시작하여 시간이 지나면서 성장하고 있음을 알 수 있다. 450초가 지나면 크랙이 가장 커지고, 이 시간 이후에는 점차 크랙의 크기가 감소하여 약 1000초 이후에 크랙이 사라짐을 볼 수 있다. 그림 10은 소성 온도가 700°C에서 3시간 유지한 후의 시편을 관찰한

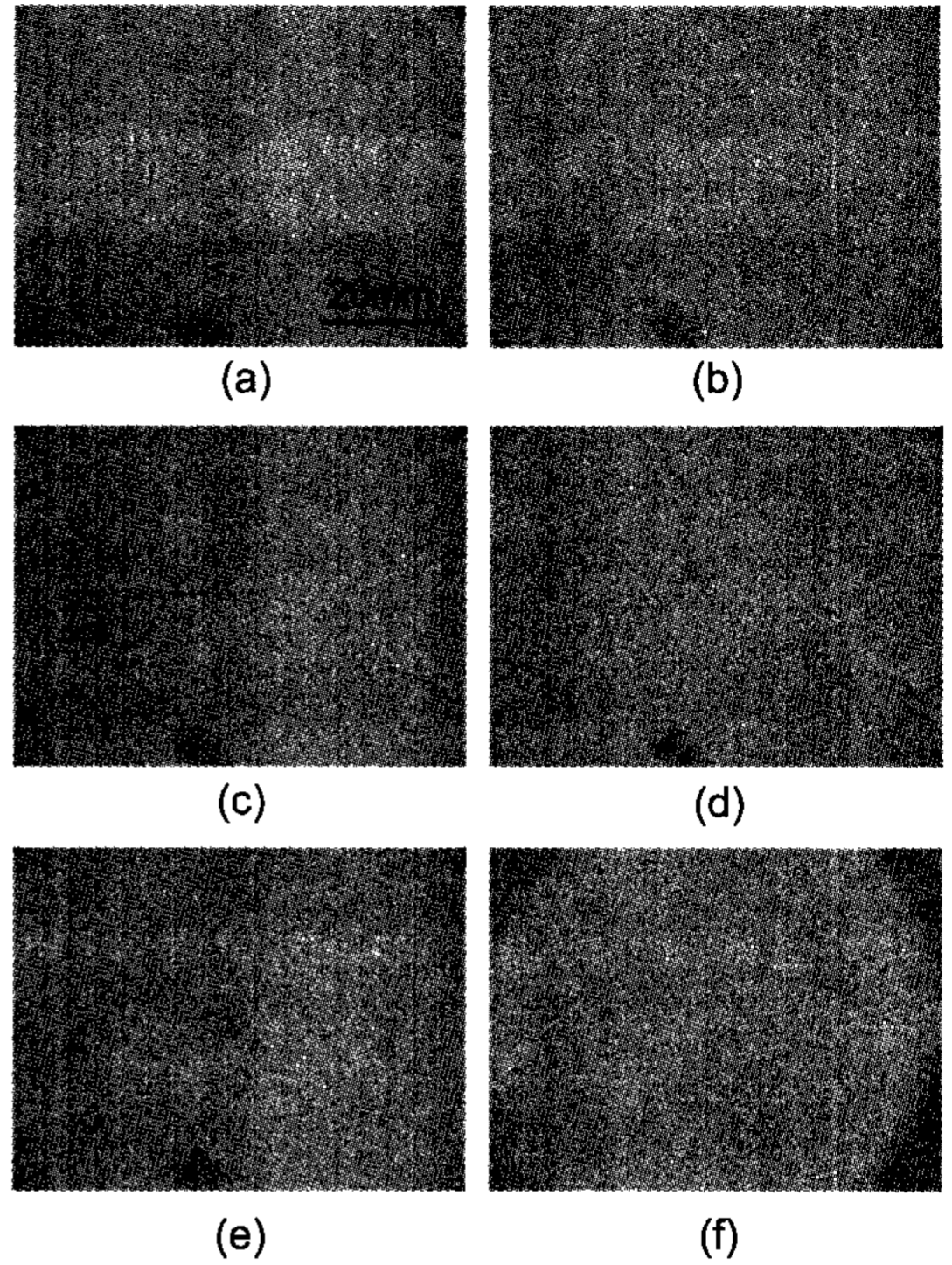


Fig. 10. Crack initiation, growth and disappearance with elapsed time after taking out from the furnace on the upper surface of the test piece. (a) 30 seconds (b) 60 seconds (c) 450 seconds (d) 840 seconds (e) 1200 seconds.

것인데, 발생시간은 약간 다르지만 모든 소성온도 조건의 시료에서 이러한 현상은 관찰되었다.

그림 11은 상기한 크랙의 발생원인을 파악하기 위하여 석고주형 시료의 내부에 0.2 mm 직경의 CA열전대를 삽입하여 주형 냉각 시의 위치에 따른 온도변화를 측정된 결과이다. 열전대는 표면에서 1 mm, 표면에서 12 mm, 그리고 시료 중심부에 설치하여 온도를 기록하였다. 그림에서 표면의 냉각속도는 매우 빠르나, 12 mm 및 중심부의 온도는 냉각속도가 빠르지 않음을 알 수 있다.

그림 12는 소성온도 700°C에서 3시간 유지 후 공냉 시의 위치별 온도차의 변화를 측정된 결과이다. 온도차는 위치에 관계없이 시간의 경과에 따라서 최대치를 나타내었다가 감소하고 있음을 알 수 있다. 12 mm와 중심부의 온도차는 크지 않으나, 표면부와 중심부의 온도차는 최대 200°C정도를 나타내고 있으며, 최대치의 시간은 이 경우 350~400초 사이이다. 그림 12의

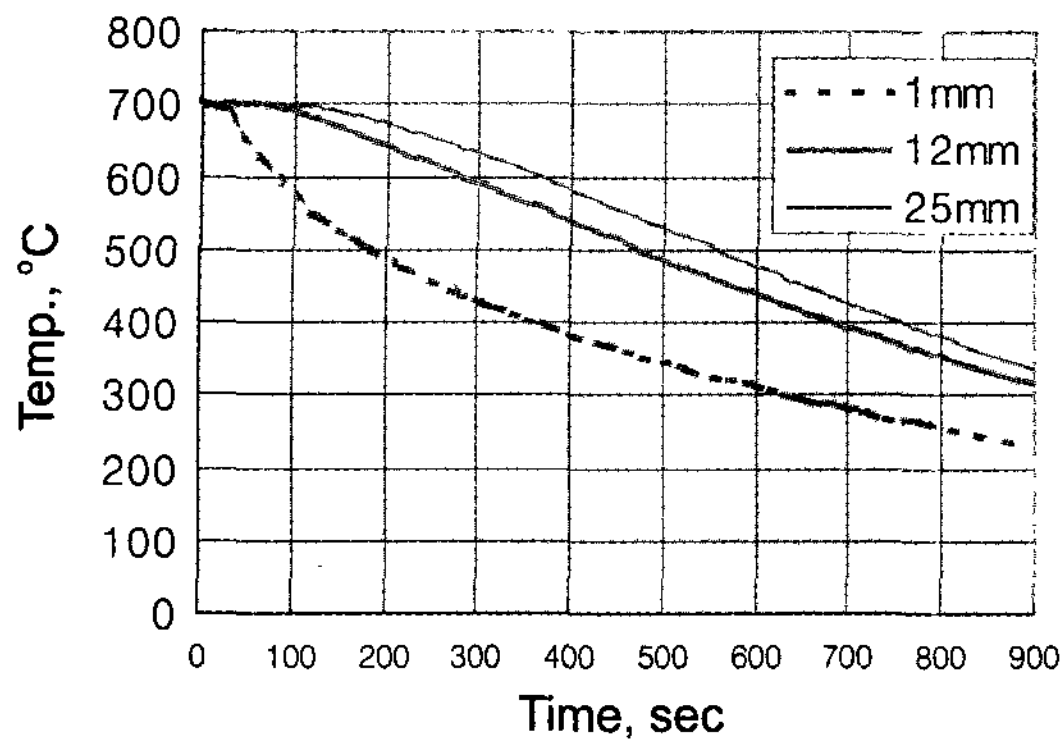


Fig. 11. Cooling curves with location in the specimen.

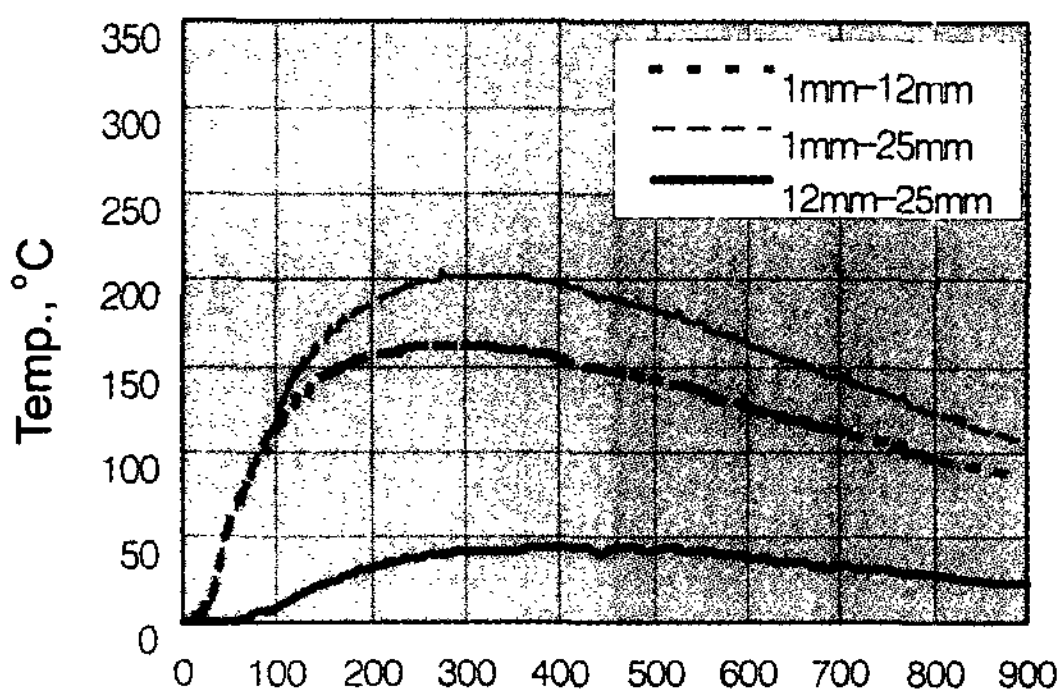


Fig. 12. Temperature differences in the specimen.

시간을 그림 10의 크랙 발생 시간과 비교하여 보면 대체로 일치하고 있는데, 이로부터 크랙의 생성 및 소멸의 원인은 주형 내외부의 온도차에 기인함을 확인할 수 있다.

4. 결 론

정밀주조법으로 발포알루미늄의 제조 시에 발생하기 쉬운 셀 눈막힘, 셀의 변형, 셀 미충진 등의 결함에 영향을 미치는 석고주형재료의 슬러리 유동도, 소성 후의 강도 및 통기도 등을 측정된 결과 다음의 결론을 얻었다.

1) 소성 후의 강도는 소성온도가 높을수록 감소하였

는데, 가열속도 및 유지시간의 조건에 따라서 3~12 kgf/cm²의 강도를 나타내었으며, 소성 후의 강도와 소성 후의 주형의 중량과는 비례관계에 있었다.

2) 소성 후 시편을 수냉하면 시편이 용이하게 붕괴되었으며, 로에서 꺼낸 후의 경과시간이 길수록 붕괴된 입자의 크기는 커졌는데, 이로부터 주입완료 후 적당한 시간에 주형을 통째로 수냉하면 셀 변형이 없이 주형재를 용이하게 제거할 수 있을 것으로 기대된다.

3) 석고주형의 통기도는 소성 후에도 거의 없는 상태이나, 소성 후 공냉 시에 주형 표면에 발생하는 크랙으로 인하여 용탕의 고온 주입 시에 어느 정도의 통기성이 확보될 것으로 보인다.

4) 이러한 크랙의 발생 및 소멸시간은 소성 후 공냉 시의 시료 내외부의 온도차의 시간변화와 대략적으로 일치하고 있는 것으로부터 크랙의 생성 및 소멸의 원인은 주형 내외부의 온도차에 기인함을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 2000년도 산업자원부 스피노프과제의 일부로 수행되었으며, 연구비지원과 연구 수행에 도움을 주신 한국생산기술연구원의 김학영님과 부성덕, 김가희 두사람께도 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] G. J. Davis and S. Zhen: J. of Materials Science (1983), 1899.
- [2] Ashby et al : Metal Foams, Butterworth & Heinemann (2000).
- [3] J. Banhart and J. Baumeister: Porous and Cellular Materials for Structural Applications (1998), 121
- [4] C. Korner and R. F. Singer: Metal Matrix Composites and Metallic Foams (1999), 3
- [5] I. Wagner, C. Hintz and P. R. Sahn: Metal Matrix Composites and Metallic Foams (1999), 40
- [6] K. Y. Kim: Reports of the 138th JFS Meeting (2001.5).
- [7] M. C. Flemings, E. Niyama and H. F. Taylor: AFS Transactions (1961), 625
- [8] ASM: ASM Handbook Vol. 15, 242.