

論 文

분사주조 성형체의 기공형성에 대한 기판재료의 영향

김 동 규

Effects of Substrate Materials on the Porosity Formation of Spary Cast Deposit

Dong-Gyu Kim

Abstract

The influence of substrate materials on the degree of basal porosity during spray casting process has been investigated. Different conditions of droplet spreading on the substrate were induced by varying the substrate material. Flat sections of cast iron and aluminum have been spray deposited via spray casting process onto an aluminum substrate, a low carbon steel substrate, and an alumina based refractory substrate. Results for cast iron and aluminum sprayed onto the aluminum substrate showed significant improvements in the surface condition and degree of basal porosity with evidence of substrate deformation that round pits ranging from 5 μ m to 20 μ m in diameter are distributed on the surface of aluminum substrate. The lowest level of porosity was developed in alumina based refractory material. Several mechanisms for porosity formation were discussed with droplet impact pressure and droplet spreading. Adopting a spray cutting mechanism for removing the periphery of spray cone, porosity level was remarkably decreased.

(Received October 22, 1993)

1. 서 론

분사주조법(spray castng)은 용융금속으로부터 판재 뿐만 아니라 튜브, 빌렛 등 다양한 형상의 제품을 중간제조공정 없이 직접 near net shape로 제조할 수 있고, 급랭응고에 의하여 편석의 감소, 조직의 미세화 등이 가능하여 복합재료 등 신기능재료를 제조할 수 있어 최근 이와 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다^{1~9)}.

Fig. 1에 분사주조공정의 개략도를 나타내었다. 분사조(spray chamber) 상부의 노내에서 용해가 이루어지며 용해도중 용탕의 산화를 방지하기 위하여 불활성가스를 공급한다. 50~150°C 정도 과열된 용융금속은 내화물 노즐을 통하여 분무영역에 공급되며, 이 용융금속의 흐름은 질소나 Ar과 같은 불활성가스에 의해 미세한 액적으로 쪼개진다. 분무영역에서 형성된 액적은 비

행도중 가스에 의한 열방출이 일어나며 가속되어 분무기로부터 0.3~1m 거리에 위치한 기판(substrate)에 충돌하여 두꺼운 성형체를 형성한다.

그러나 성형체(deposit)가 판재인 경우 폭방향의 두께 불균일성, 표면 및 가장자리의 기공(porosity), 성형(deposition)초기단계에 발생하는 scab 등^{10~17)}은 이 공정의 현장적용에 많은 장애가 되고 있다. 폭방향의 두께 불균일성은 분사 콘(spray cone)의 중심과 가장자리의 액적의 밀도차에 의해 발생하는 결함으로 밀도분포는 Gauss 분포를 따르는 것으로 알려져 있다^{16,18,19)}. 이 결함은 판재생산의 경우 가장 큰 문제점으로 되어 있으나 선형 분무기의 채택¹⁷⁾, 진동 분무기¹⁴⁾ 그리고 tertiary gas jet¹⁷⁾의 채택 등으로 다소 해결될 수 있다. 그러나 분사주조공정에서 가장 빈번하게 발생하는 기판과의 접촉면의 기공^{10~20)} 그리고 성형초기단계에서 형성되는 scab은 분사주

동아대학교 금속공학과(Dept. of Metallurgical Eng., Dong-A University)

조공정 중 가장 해결하기 어려운 결함으로서 후속압연공정을 요하게 하는 원인이다. 즉 공정의 추가가 필요할 뿐만 아니라 내부산화에 의한 기계적 성질의 저하²⁰⁾ 그리고 scab의 발달에 의한 중심부 크랙은 압연 후에도 제거되지 않는 등 분사주조공정의 현장적용성을 감소시키는 주요원인이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 분사주조공정 중 분사 콘의 모양변화와 기판재료의 변화 등이 성형체의 결함형성 및 현미경조직에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 실험방법

2.1 시편제작

본 연구에서는 Fig. 1에 나타난 장치를 사용하여 aluminum과 주철을 분무하였으며 각 재료의 조성은 다음과 같다. 주철의 조성은 3.92C, 2.37Si, 0.73Mn, 0.045P, 0.017S이며 Al은 공업용 순Al을 사용하였다.

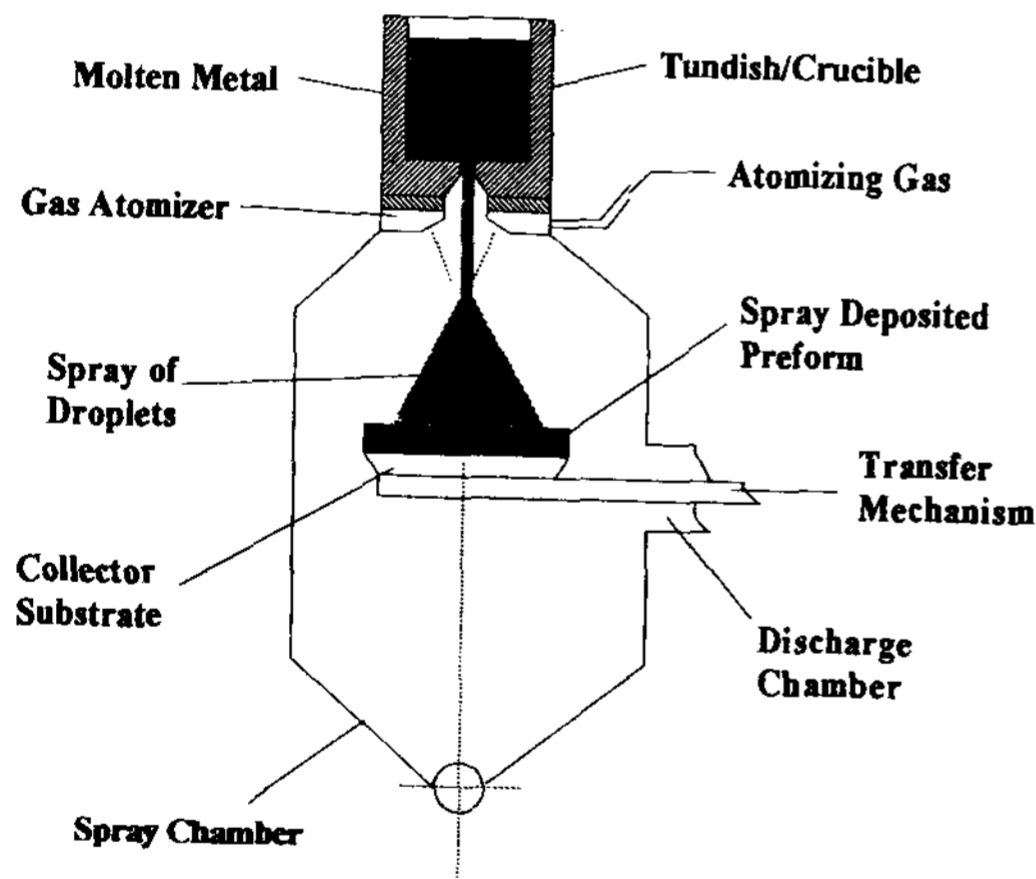


Fig. 1. Schematic of spray casting process.

분무가스는 질소가스를 사용하였으며 1차 분무기와 2차 분무기에 각각 다른 가스 공급원을 채택하였다. 1차 분무기에는 1개의 질소분배를 사용하였으나 2차 분무기에는 안정된 가스공급을 위하여 3개의 질소분배를 병렬로 연결하여 사용하였다.

한편 분무기 공정변수는 예비실험에서 얻은 최적분사조건인 용탕출구 직경 4mm, 돌출부의 길이 12mm, 1차와 2차 분무기 사이의 간격 8mm,

1차 분무기 가스압력 2.5~3kg/cm² 그리고 2차 분무기 가스압력 5~6kg/cm²를 채택하였다.

2.2 기판재료

본 연구에서는 Fig. 2에 나타난 것과 같은 3종류의 기판재료를 사용하였다. 6010알루미늄, 1080보통탄소강 그리고 알루미늄내화물재료를 가로, 세로 각각 125mm, 두께 25mm의 판재로 가공하여 같은 두께의 탄소강 위에 고정시켜 기판으로 사용하였다. 동일한 표면상태를 유지하기 위하여 기판의 표면을 800번 사포로 연마한 후 분사직전에 에틸알콜로 세척하였다.

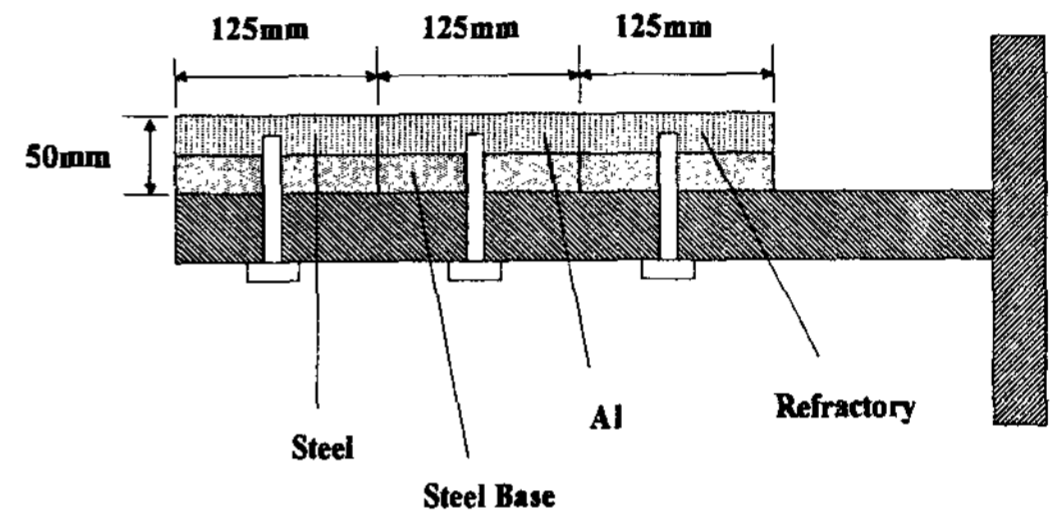


Fig. 2. Configuration of substrate with different materials.

2.3 Spray cutting 시험

분사 콘의 가장자리를 기계적으로 제거하기 위하여 본 연구에서는 Fig. 3에 나타난 방법을 채택하였다. 즉, 분사 콘의 크기를 60mm로 제한하여 분사하였다.

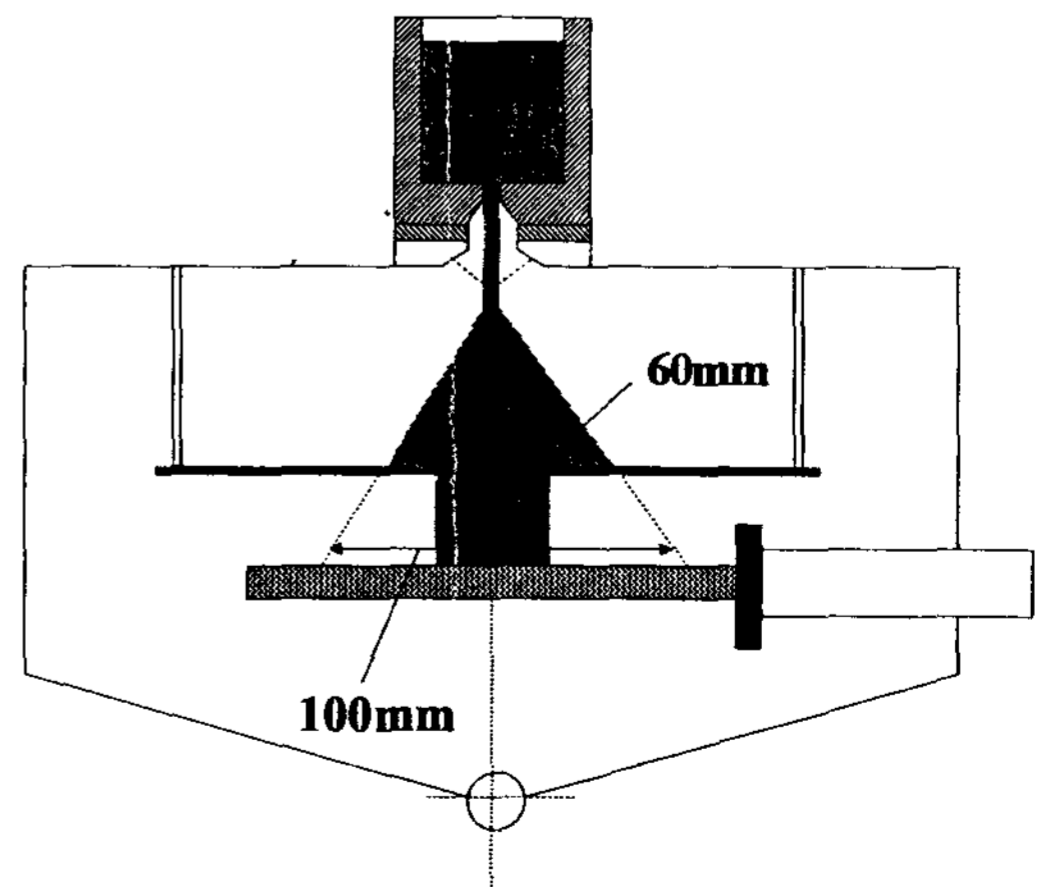


Fig. 3. Schematic of cutting-off the periphery of spray cone.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 기판재료에 따른 기공률의 변화

Fig. 4는 기판재료에 따른 주철성형체의 바닥면 기공률의 변화를 나타낸 사진으로 스트립의 바닥면, 즉 기판과의 접촉면 쪽을 촬영한 것이

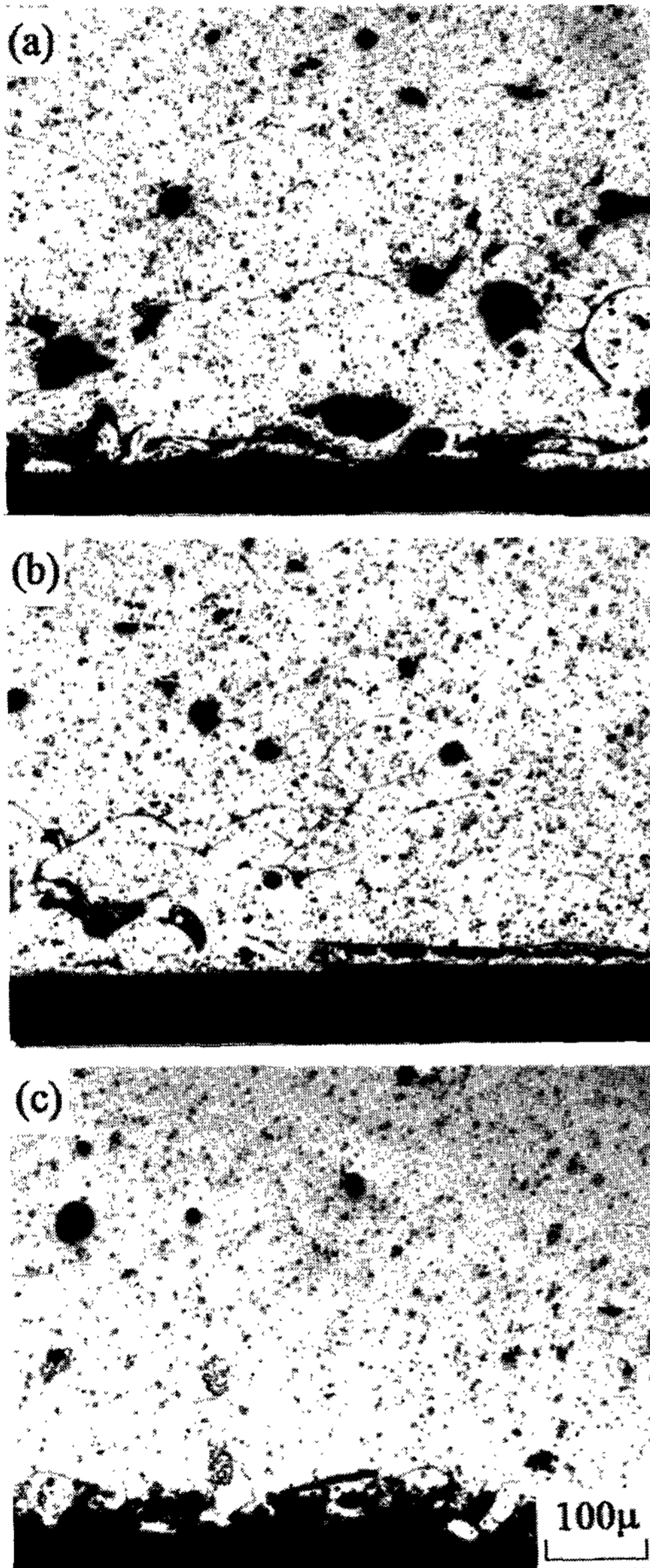


Fig. 4. Optical microstructure of as-sprayed cast iron deposit on the various substrate materials. (a) Steel substrate (b) Aluminum substrate (c) Alumina based refractory substrate

다. 사진에서 알 수 있듯이 불규칙한 형상의 기공이 존재하고 있으며, 사진상의 미세한 검은 점들은 정출흑연이다. 그리고 알루미늄 내화물 기판에 적층된 시료는 바닥면의 요철이 매우 심하며 나머지 시료에 비하여 기공의 형상도 둥근 형태에 가깝다. 바닥면 요철은 내화물기판의 강성이 낮음에 따라 액적의 충돌시 기판표면을 변형시킨 결과로 생각된다. 각 기판에 적층된 성형체의 기공면적률의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 강으로 된 기판을 채택한 경우 10%로 가장 기공의 면적률이 많으며, 알루미늄 기판의 경우는 기공의 면적률이 4%로서 강 기판에 비하여 약 60% 정도가 감소되었다. 가장 기공의 면적률이 낮은 경우는 알루미늄 내화물 기판으로서 약 2.5%의 면적률을 나타내었다.

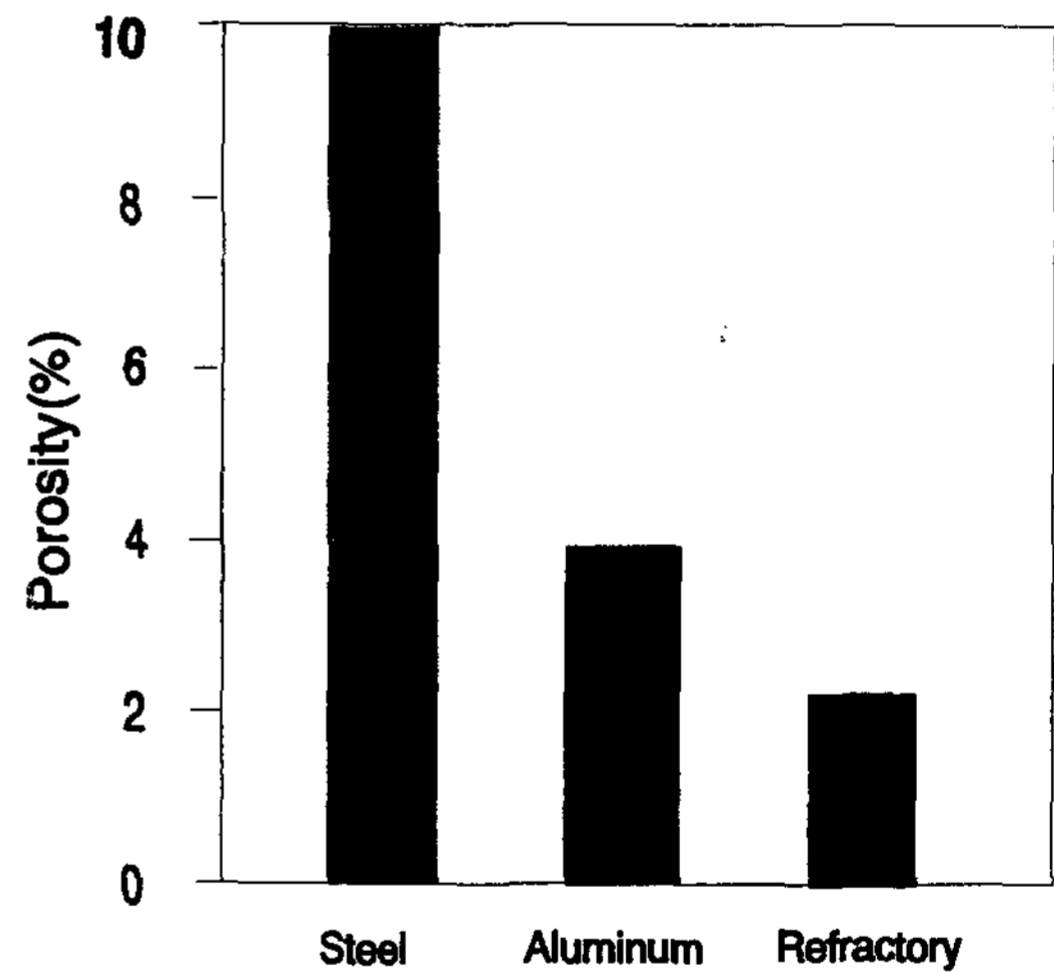


Fig. 5. Effect of substrate materials on the amount of porosity.

기공은 성형의 초기단계에 형성되는 결함으로 주로 성형체의 바닥면 즉, 기판과의 접촉면 쪽에 발생하며 일반적으로 바닥면으로부터 1~2mm 정도의 두께에 집중되어 있다^{11~20}). 이 기공의 발생원인으로 다음과 같은 요인을 생각할 수 있다^{2, 15, 20}). 즉 응고수축에 의한 스트립의 열응력, 기판을 통한 높은 열방출률, 분사 콘 가장자리의 낮은 액적밀도, 이들 기공형성에 관련된 요인들을 충분히 고려한 결과 다음과 같은 공정변수가 기공형성 정도에 큰 기여를 할 것으로 생각된다. 즉 기판재료의 물리적 성질, 분사 콘의 형태, 초

기분사 가스압력, 본 연구에서 기판재료에 따라 기공의 면적률이 변화하는 결과는 기판재료의 물리적 성질을 변화시켜 응고수축에 의한 열응력과 기판을 통한 열방출률을 제어한 결과로 판단되며 그 자세한 사항은 다음 항에서 고찰하고자 한다.

3.2 기공의 형성기구—알루미늄 기판의 역할에 대하여

분사된 액적이 기판과 충돌하여 성형체를 형성하는 성형(consolidation)단계는 결합을 형성하는 직접적인 단계로서, 액적과 기판의 충돌기구와 액적의 퍼짐으로 형성된 얇은 판(splat)의 열방출과정을 검토함으로써 다음과 같은 기공형성기구를 제안할 수 있다. Fingering, spalling, jetting 그리고 열응력에 의한 기공형성기구의 모식도를 Fig. 6에 나타내었다.

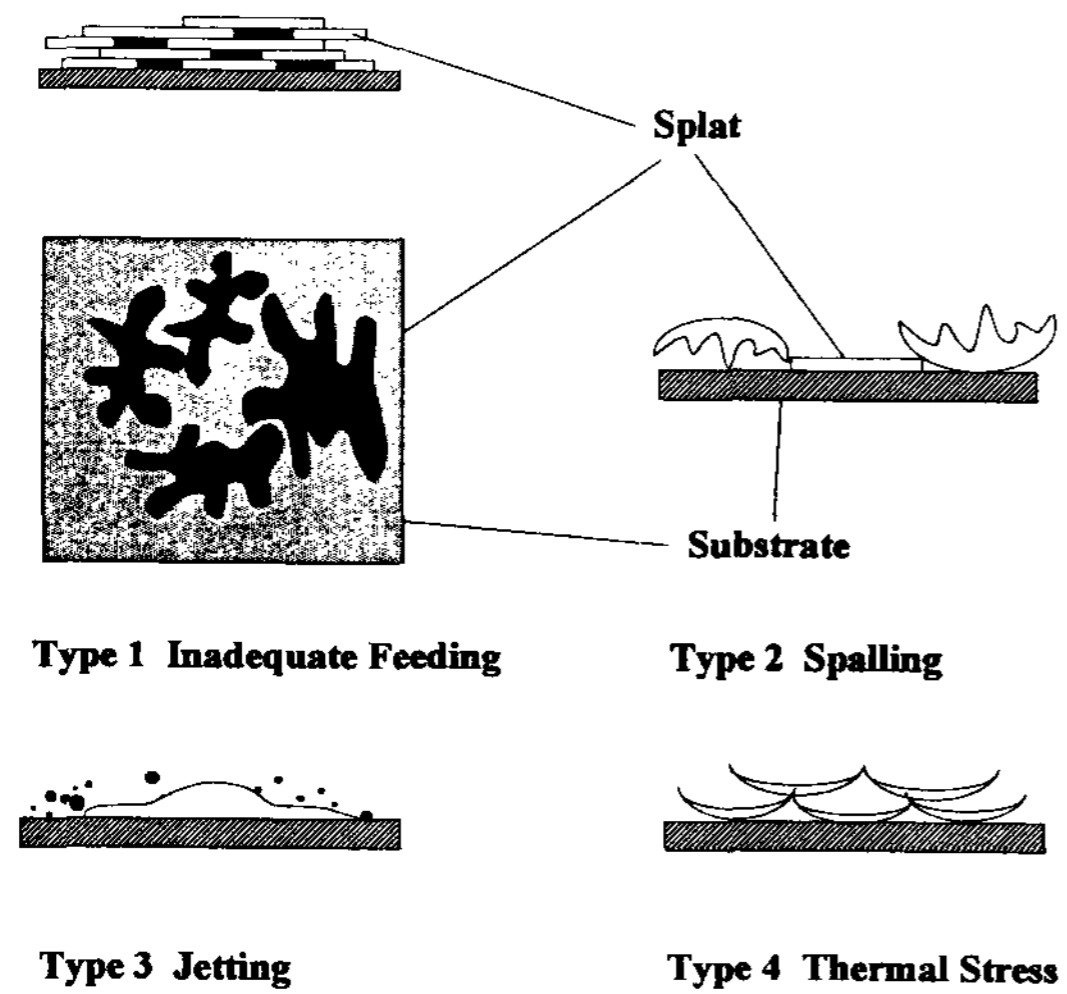


Fig. 6. Mechanism of porosity formation near the bottom of deposit.

액적이 기판에 충돌하여 형성된 얇은 판의 형태는 얇은 판의 가장자리가 매끈한 원판형이거나 가장자리에 요철이 심한 손가락 형태(fingering)를 나타낸다(Fig. 6 (a))^{20,22}. 따라서 fingering이 심하게 나타난 얇은 판의 경우는 기판 혹은 이미 응고된 얇은 판위에 액적의 얇은 판으로 덮이지 않은 부분이 존재하고 이 부분은 다음 액적이 직접 그 위에 채워지지 않는 한 완전히 액상으로 채워지기는 어려운 곳이다. 따라서 인근한 얇은 판의 fingering이 교차하는 곳 등은 불완전한 금

탕에 의한 기공의 발생이 예상된다. 알루미늄 기판위에 주철을 분사하였을 때, 충돌한 액적이 퍼져 형성된 전형적인 fingering과 이에 따라 기공이 형성되는 과정을 Fig. 7에 나타내었다. Garrity²²)는 유리기판 위의 금속의 fingering 현상에 대하여 다음과 같이 보고하였다. 금속액적이 기판위에 이미 존재하는 얇은 판위에 떨어진 경우에는 fingering이 심하지 않으며 금속액적이 유리와 이미 존재하는 얇은 판의 가장자리에 떨어져 양쪽으로 액적의 퍼짐이 발생한 경우에는 유리쪽에는 fingering이 심하였으나 얇은 판쪽은 fingering의 발생이 매우 적었다. 이 현상은 변형이 생길 수 있는 기판은 fingering 현상을 현저히 감소시킬 수 있음을 의미한다. 즉, 본 연구에서 채택한 알루미늄 기판은 액적의 충돌로써 변형이 가능한 재료로 판단되며 전술한 기공의 감소현상을 이해할 수 있다. 알루미늄 기판의 변형 가능성에 대해서는 후술한다.

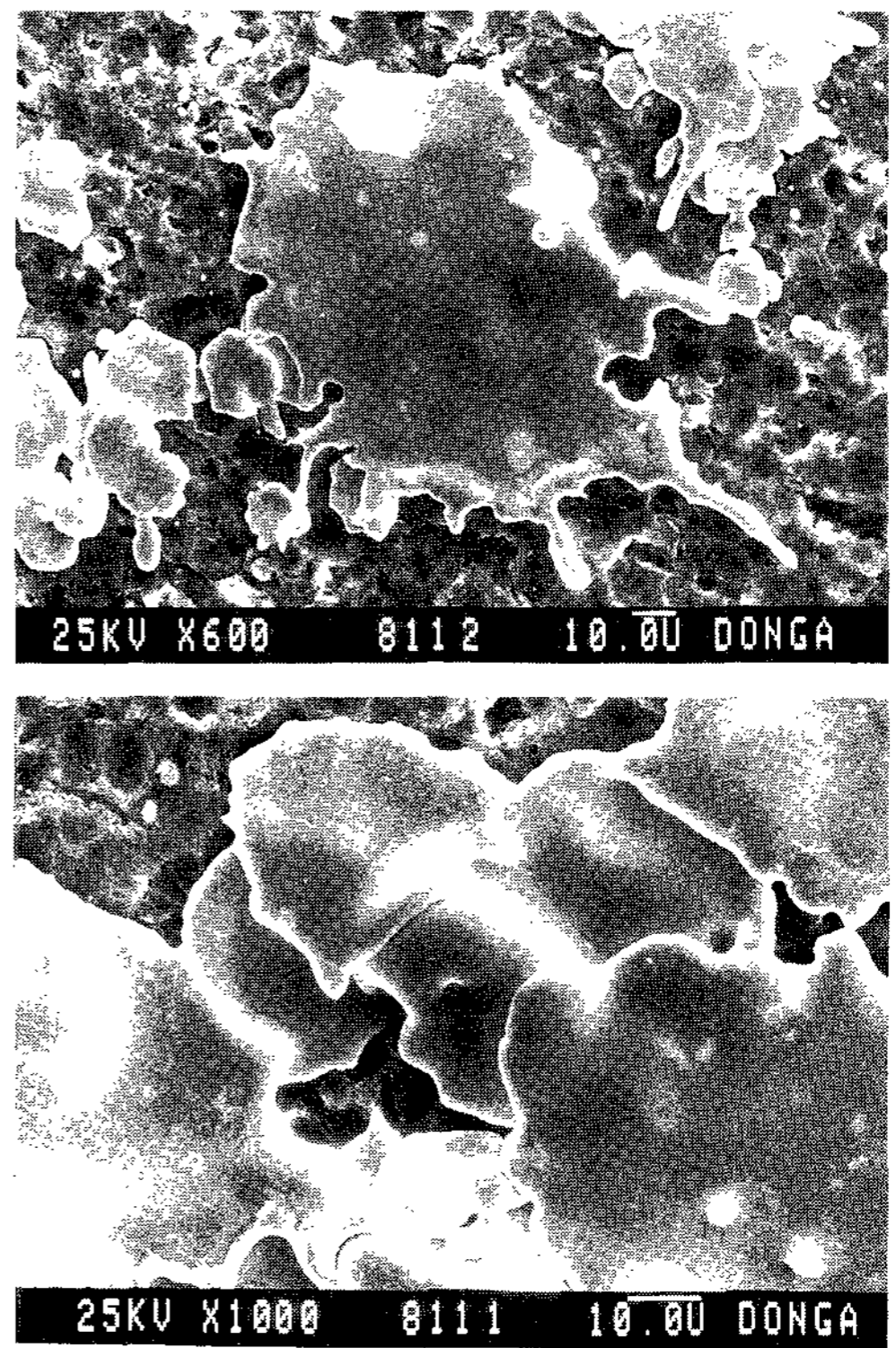


Fig. 7. Morphology of spreaded droplet upon impact on aluminum substrate.

일반적으로 분무기에서 형성된 액적은 기판에 도달하기까지의 비행도중 분사가스에 의한 열방출로 인하여 고상분율이 존재한다. 수지상정형태의 고상과 액상을 가진 액적은 기판과의 충돌시 관성에 의해 액상이 빠져 나옴에 따라 다공성 액적이 되며 이 수지상정만으로 구성된 액적은 액상의 공급이 어려워 기공으로 잔존한다. 또한 충돌시 파괴된 수지상정의 조각도 액적의 퍼짐을 방해하여 기공의 형성에 기여하는 것으로 생각할 수 있다(Fig. 6 (b)).

액적이 기판에 충돌할 때 기판에 가해지는 압력은 매우 크다^{23~25}. 실제, 물이나 Ni액적이 200m/sec의 속도로 기판에 충돌할 때 900, 7200MPa의 압력이 각각 기판에 작용한다. 이 압력은 알루미늄의 항복응력이 약 150MPa, 강 의 항복응력이 약 300MPa임을 고려할 때 매우 큰 압력이다. 따라서, 알루미늄합금 기판을 사용하였을 때 트윈, 슬립 심지어 국부적인 용해현상과 같은 변형이 발행하며 납의 경우에는 표면유동현상도 발생됨이 보고되고 있다^{26,27}. 본 연구에서 주철의 분사시 사용한 알루미늄 기판의 표면부 사진(Fig. 8)에서도 액적의 충돌시 형성된 직경이 5~20 μ m 크기의 둥근 pit이 관찰되었다. 이러한 사실은, 알루미늄과 같은 저강성, 저용점 금속을 기판으로 채택하였을 때 탄성 및 소성변형에 의해 충격에너지를 감소시킬 수 있음을 의미하며 전술하였던 fingering 현상도 저감시켜 기공의 발생량을 줄일 수 있는 것으로 판단된다.

Jenkins와 Booker²⁸)는 액적과 기판과의 충돌시 초기충돌 직후 액적의 측면방향으로 미세한 액적의 jetting 현상이 발생하는 것을 발견하였다(Fig. 6 (c)). Jetting은 충돌시 발생된 충격파가 액적의 표면에 도달하여 팽창함에 따라 나타나는 현상으로, 이 작은 입자들은 응고된(presolidified) 액적으로 작용하여 액적의 퍼짐을 방해함으로써 기공을 형성하게 한다. 알루미늄 기판의 채택으로 충격량을 감소시킬 수 있으므로 jetting 현상 역시 감소될 수 있을 것으로 판단된다.

용융액적이 기판위에 충돌하여 얇은 판을 형성하고, 응고가 진행되어 얇은 판의 온도가 감소하면 열수축에 의해 얇은 판과 기판 사이에 응력이 발생한다. 이 응력은 얇은 판을 기판계면에서 분

리시킬 수 있는 유일한 힘으로 식 (1)로 표현할 수 있다.

$$\sigma = E\alpha\Delta T \tag{1}$$

여기서 E는 탄성계수, α 는 열팽창계수, ΔT 는 온도변화이다.

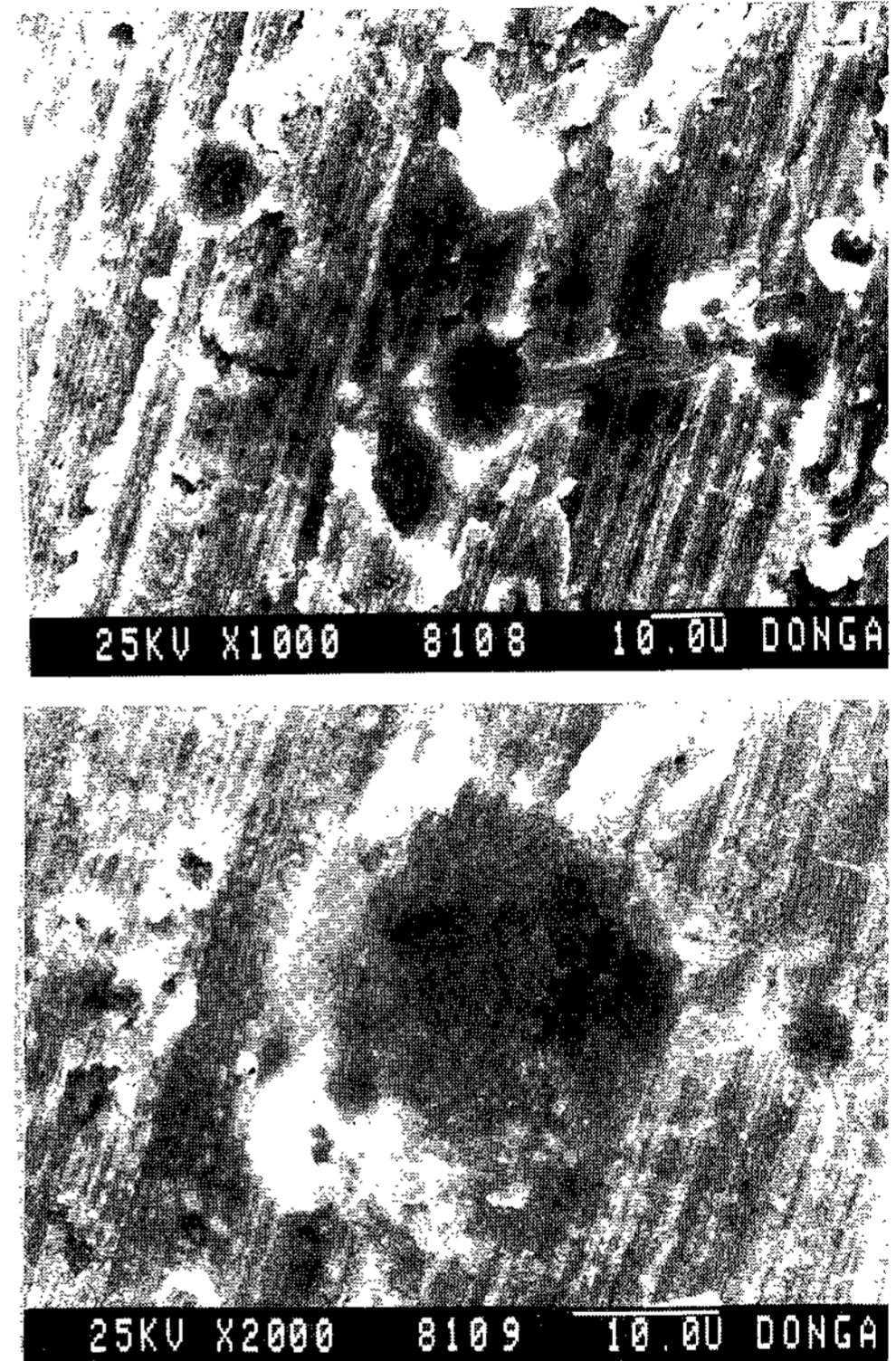


Fig. 8. SEM morphology of a typical impact damage 'pit' developed on the surface of aluminum substrate.

Maringer²⁹)는 철의 경우 위 식의 각 변수의 값을 가정하여 계산하여 결합력을 40MPa로 가정하였을 때 ΔT 값이 20 $^{\circ}$ C 정도에서도 결합력을 상회하는 응력이 발생됨을 보고하고 있다. 한편 Safai와 Herman³⁰)은 얇은 판 가장자리의 현미경조직을 조사하여, 열흐름의 방향이 기판으로 향하지 않고 얇은 판의 중심쪽인 반경방향임을 제시하고 있다. 즉 얇은 판 가장자리와 기판의 접촉이 나뉘는 의미를 의미한다. 이 오목한 형태의 얇은 판은 액적의 퍼짐을 방해할 뿐 아니라 기하학적으로 기공을 형성하기가 용이하다(Fig. 6 (d)). 또

한, Maringer²⁹⁾는 성형체나 기관재료의 용융점 근처에서는 열수축에 의한 응력이 완화되어 성형체/기관계면의 분리응력이 발생되지 않음을 실험적으로 증명하고 있다. 기관재료로 낮은 탄성계수, 낮은 용융점을 가진 재료를 채택함으로써 분리응력을 완화시킬 수 있을 것으로 판단되며, 알루미늄이나 납 등을 고려할 수 있다. 납은 고용점재료인 철계합금에는 부적절하며, 본 실험에서 채택한 알루미늄의 경우에는 주철을 분사주조하는 경우에도 기관재료로서 용융현상 없이 사용할 수 있었으며 전술하였듯이 기공률도 감소하였다.

3.3 내화물기관과 기공

Fig. 4에서도 관찰할 수 있었듯이 알루미늄 내화물을 기관재료로 채택하였을 때 강이나 알루미늄 기관재료에 비하여 가장 기공의 발생량이 적었다. 이는 알루미늄 내화물이 강이나 알루미늄에 비하여 보다 낮은 열전도도 값을 가지기 때문에 기관으로의 열방출량이 적고 기관의 변형이 용이함에 따른 결과로 판단된다.

충돌직전의 액적이 가지고 있는 총열량(H_{rem}) 즉 응고를 위해 성형후에 제거되어야 하는 총열량은 식 (2)로 주어진다.

$$H_{rem} = (C_p \Delta T_s + H_{fr}) - H_{gas} \quad (2)$$

여기서, C_p 는 열용량, ΔT_s 는 용탕의 과열정도이며 H_{fr} 은 응고구간 내의 열량이다. 한편 H_{gas} 는 비행도중에 가스에 의해 제거되는 열량을 의미한다. H_{rem} 은 성형후에 기관으로의 열방출(Q_s)과 분사가스에 의한 열방출(Q_g)에 의해 제거되어 완전한 응고에 도달한다. 그러나 응고초기 기관으로의 급격한 열방출은 얇은 판의 열응력을 증가시켜 성형체 하부의 기공률을 증가시킨다.^{10,14,20)} Mathur¹⁹⁾는 Fe-20wt.%Mn 성형체와 Cu기관계면의 열전달계수를 측정하여 성형의 초기단계에는 $10^5 W/m^2/K$ 에 달하며, 수초후에는 급격히 감소하여 $500 W/m^2/K$ 로 감소하는 것을 보고하고 있다.

기관을 통한 초기 열방출량을 줄이기 위한 방안으로는 기관의 예열과 내화물기관의 채택을 고려할 수 있다. 기관을 예열함으로써 식 (3)으로 주어지는 기관으로의 열방출량(Q_s)을 줄일 수

있으며,

$$Q_s = h_s(T_d - T_s) \quad (3)$$

여기서, h_s 는 성형체와 기관계면의 열전달계수, T_d 는 성형체 바닥면의 온도, T_s 는 기관표면의 온도이다.

기관의 팽창량을 감소시킴으로써 성형체/기관계면의 열응력을 감소시킬 수 있다. 한편, 본 연구에서는 알루미늄 내화물을 기관재료로 채택하여 기공률이 현저히 감소하는 결과를 얻었으나 열충격이나 금속입자가 내화물 표면내부로 침투함에 따라 사용횟수는 한번으로 제한되었다.

3.4 Spray cutting

전술한 성형체내의 결합형성기구는 결합형성 단계, 즉 액적이 기관에 충돌하여 성형체를 형성하는 성형단계의 독립공정변수에 대한 분석이다. 용탕의 공급, 분무 그리고 액적의 이동단계를 거친 충돌직전의 분사액적의 상태는, 각 단계의 공정변수들인 용탕 과열정도, 용탕의 유속, 가스의 유속, 가스의 종류, 가스의 압력 그리고 비행거리 등에 따라, 변화하는 것으로 보고되고 있다^{18,19)}. 이러한 공정변수들에 의해 결정되는 액적의 크기, 액적내의 고상분율(f_s), 분사 콘내의 밀도 분포 그리고 액적의 열량 등의 충돌직전의 분사액적의 상태는 다음 단계인 성형단계에서의 결합형성 정도에 큰 영향을 미친다^{18,22)}.

본 연구에서는 분사 콘의 형태를 변화시켜 분사 콘내의 밀도분포를 변화시키기 위하여 분사 콘의 가장자리를 Fig. 3에 나타난 방법으로 제거하였으며, 이 방법으로 알루미늄을 분사주조하여 제조한 성형체의 바닥면 단면사진을 Fig. 9에 나타내었다. 분사 콘 가장자리를 제거한 경우 약 3%의 기공면적률을 나타내었으며, 분사 콘의 가장자리를 제거하지 않고 분사한 경우에는 8%의 기공면적률을 나타내었다.

분사 콘의 가장자리는 중심에 비하여 액적의 밀도가 낮은 영역으로, 연속적으로 이동하는 기관은 항상 낮은 밀도구간을 먼저 통과하게 되므로 기공의 형성가능성이 높은 것으로 판단된다. 실제 기공이 집중되어 있는 부분의 두께는 분사축으로부터의 거리에 따라 증가한다¹⁹⁾. 즉, 분사 콘내의 액적의 밀도차이는 폭방향의 두께 불균일

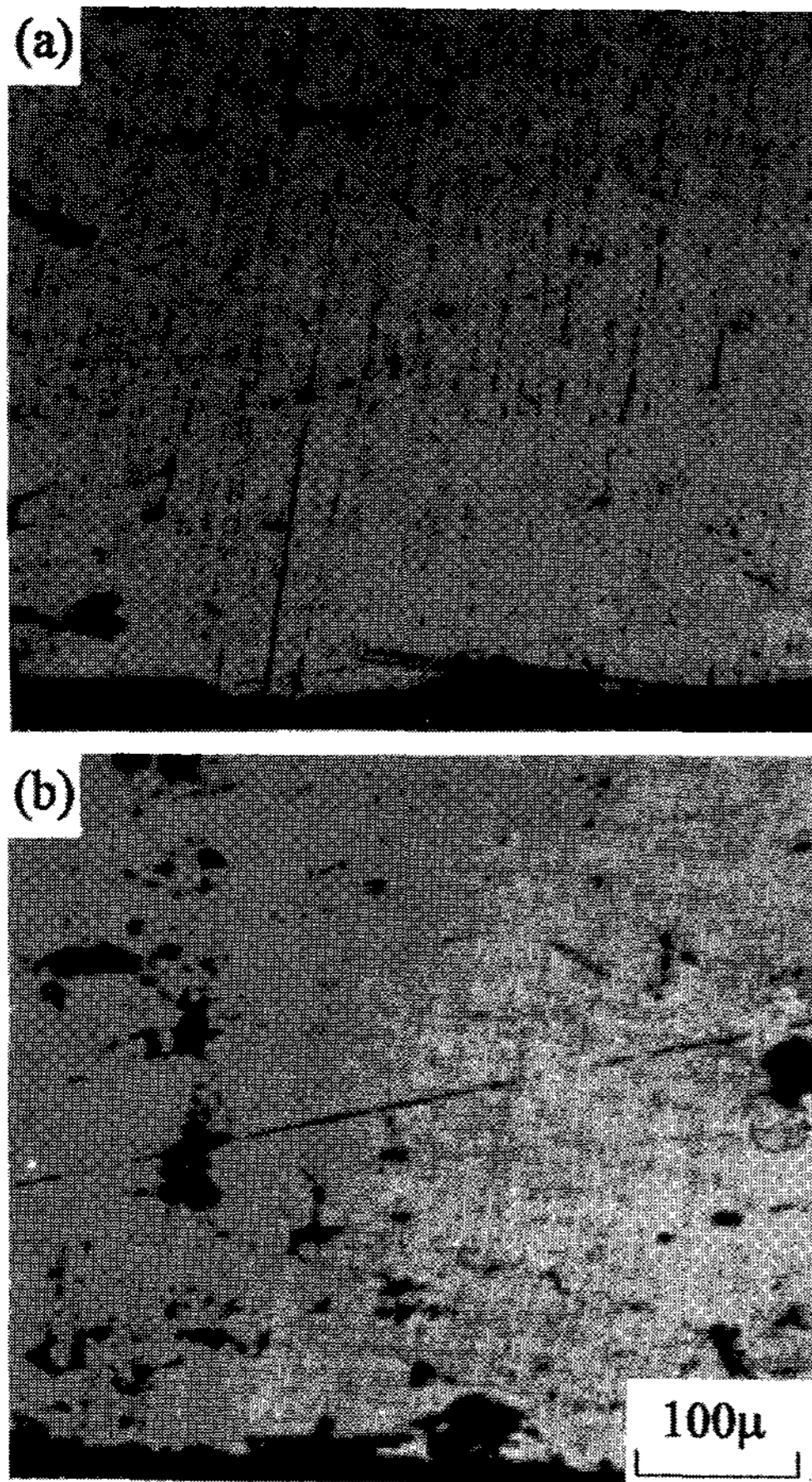


Fig. 9. Optical microstructure of as-sprayed aluminum deposit on aluminum substrate. (a) Spray cutting (b) Without spray cutting

성 외에 기공의 형성에도 기여함을 알 수 있다.

4. 결 론

분사주조공정에서 액적이 기관에 충돌하는 성형단계가 성형체의 결함형성에 미치는 영향을 검토하기 위하여 기관재료변화 그리고 분사 콘 형태변화를 시도하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 알루미늄을 기관재료로 채택한 경우에는 보통탄소강 기관에 비하여 성형체의 바닥면 기공면적율이 60% 정도 감소되었다. 이는 액적충돌시 알루미늄 기관이 변형되기 때문으로, 알루미늄 기관의 표면에는 5~20 μ m 직경의 둥근 pit이 존재하였다.

2) 기공 면적률이 가장 낮은 기관재료는 알루미늄 내화물이었으며, 이는 기관의 낮은 열전도도와 변형에 기인한다.

3) 액적충돌단계의 기공형성기구를 제안하였다. 즉, fingering, spalling, jetting, thermal stress.

4) 분사 콘 가장자리를 기계적으로 제거하면서 알루미늄 성형체를 분사주조하였을 때 성형체 바닥면의 기공이 60% 이상 감소하였다.

후 기

본 연구는 1991년도 교육부지원 한국학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구조성비에 의하여 수행된 것의 일부로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. S. Annavarapu, D. Apelian, A. Lawley : Metall. Trans., 21A (1990) 3237
2. B. P. Bewley, B. Cantor : Metall. Trans., 21B (1990) 899
3. P. S. Grant, B. Cantor : Cast Metals, 4 (1991) 140
4. 이희춘, 나형용, 오규환, 이호인, 김성균 : 대한금속학회지, 30 (1992) 1063
5. A. G. Leatham, W. Reichelt and O. H. Metelmann : Near Net Shape Manufacturing Processes, eds. Lee, P. W. and Ferguson, B. L., ASM International, Metals Park, OH, USA, (1988) 259
6. R. W. Evans, A. G. Leatham and R. G. Brooks : Power Metallurgy, 28 (1985) 13
7. D. Apelian, G. Gillen and A. G. Leatham : Processing of Structural Metals by Rapid Solidification, eds. Fross, F. H. and Savage, S. J., ASM International, Metals Park, OH, USA, (1987) 107
8. A. G. Leatham, A. J. W. Ogilvy, P. F. Chesney and O. H. Metelmann : Modern Developments in Powder Metallurgy, 19 (1988) 475
9. D. Apelian, A. Lawley, P. Mathur and X.

- Luo : Modern Developments in Powder Metallurgy, 19 (1988) 397
10. S. Annavarapu, A. Lawley and D. Apelian : Metall. Trans., 19A (1988) 3077
 11. E. J. Lavernia and N. J. Grant : Mat. Sci. Eng., 98 (1988) 381
 12. H. C. Fiedler, T. F. Sawyer and T. F. Kopp : Spray Forming—An Evaluation Using IN718, General Electric Technical Information Series, 86CRD113, May (1986)
 13. R. H. Bricknell : Metall. Trans., 17A (1986) 583
 14. K. Wunnenberg, R. Flender, W. Fix and R. Schneider : Proc. 4th Intl. Conf. on Continuous Casting, Brussels, 2 (1988) 728
 15. J. F. Farue, L. Ackermann : Modern Developments in Powder Metallurgy, 19 (1988) 425
 16. P. Mathur, D. Wei and D. Apelian : Modeling and Control of Casting and Welding Processes IV, eds. A. F. Giamei and G. G. Abbaschian, The Minerals, Metals and Materials Soc., Warrendale, PA, (1988) 275
 17. N. J. Grant : Casting of Near Net Shape Products, eds. Y. Sahai, J. E. Battles, R. S. Carbonara and C. E. Mobley, The Minerals, Metals and Materials Soc., Warrendale, PA, (1988) 203
 18. P. Marthur, D. Apelian and A. Lawley : Acta Metall., 37 (1989) 429
 19. P. C. Mathur : "Analysis of the Spray Deposition Process", Ph. D. Thesis, Drexel University, Philadelphia (1988)
 20. D. G. Kim, D. Apelian, P. Mathur, S. Annavarapu : Proc. of Int'l Conf. on SRNC, Pohang, Korea, (1990) 705
 21. R. W. Fox, A. T. McDonald : Introduction to Fluid Mechanics, Wiley, (1985) 175
 22. E. Garrity : "A Phenomenological Investigation of Droplet Spreading in Spray Deposition Processes", Ph. D. Thesis, Drexel University, Philadelphia (1989)
 23. W. F. Adler : The Mechanics of Liquid Impact, Treatise on Materials Science and Technology, Vol. 16, ed. C. M. Preece (1979)
 24. F. J. Heimann : J. Appl. Phys., 40 (1969) 5113
 25. J. E. Field et. al. : "Theoretical and Experimental Studies of Two Dimensional Liquid Impact", Proc. 5th Intl. Conf. on Erosion by Solid and Liquid Impact, eds. J. E. Field et. al, Paper(2), Cambridge : Cavendish Lab. (1979)
 26. J. H. Brunton and M. C. Rochester : Treatise on Materials Science and Technology, Vol. 16, ed. C. M. Preece, (1979) 185
 27. J. J. Gilman : Appl. Mech. Reviews, 21 (1968) 767
 28. D. C. Jenkins and J. D. Booker : The Impingement of Water Drops on a surface Moving at High Speeds, Aerodynamic Capture of Particles, ed. E. G. Richardson (1960)
 29. R. E. Maringer : Materials Science and Engineering, 98 (1988) 13
 30. S. Safai, H. Herman : Treatise on Materials Science and Technology, Vol. 20, ed. H. Herman, (1981) 183