

우리나라 소실모형주조기술의 발전과정과 과제

한국생산기술연구원 신소재개발본부 이경환

1. 서 언

우리나라의 경제가 성장하게 됨에 따라 80년대 후반부터 주물산업은 3D산업의 대표로 인식되어 젊은 사람들은 기피하는 대표적 업종이 되었다. 숙련기술을 가진 주물공장 종업원의 평균연령이 점점 고령화되어 가고 후처리 등 작업환경이 나쁜 공정은 소사장제로 처리하지 않으면 안 되게 되었다. 또한 환경분야에 대한 인식이 커져감에 따라 폐주물사에 대한 규제가 점점 까다로워지고 얼마 전 부터는 국내 규사자원의 고갈과 중국의 규사수출금지조치로 주물사의 가격이 급등하게 됨에 따라 주물사의 사용을 줄이고 폐주물사의 발생을 억제할 수 있는 방법을 찾아야 하는 상황에 이르게 되었다.

우리나라에는 1980년대 초에 소실모형주조법이 도입되었으나 도입 당시는 이러한 환경이나 3D 문제의 해결보다는 대형 이형관의 제조시 증자의 제작은 매우 번거로운 공정일 뿐만 아니라 sand/metal 비가 커서 모래의 비용도 만만치 않기 때문에 원가절감 차원에서 도입되었다. 그러나 이제는 환경문제, 기능인력의 부족 및 젊은 인력의 주물현장기피 문제, 원가절감 등에 대한 total solution의 차원에서 기존의 주물생산방법의 보완 또는 대체하는 새로운 기술을 생각해야 할 때가 되었으며 이러한 요청에 부합하는 주조기술이 소실모형주조기술이다.

2. 우리나라의 소실모형주조기술 도입 연혁

우리나라에서 소실모형주조법을 가장 먼저 실시한 업체는 포항 소재의 대원사(현 동국산업)로 알려져 있다. 대원사는 1980년대 초에 일본으로부터 소실모형주조법을 도입하여 이형관류를 생산하고자 하였다. 동 업체는 증자의 제작이나 주형의 제작이 필요 없어 주물사의 관리로부터 자유로운 점 및 분할선이 없고 압탕을 극소화할 수 있기 때문에 주물의 후처리가 지극히 단순해진다는 점과 여타의 프로세스에 비해 공정이 간단하고 설비비가 저렴하다는 점에 착안하여 즉시 대량 생산라인을 시설하고 양산에 돌입하였는데 적극적으로 생산할 때에는 월 2000톤 이상의 이형관을 생산하였다고 한다. 그러나 대량 생산은 대량의 불량으로 이어져 수년 후 이 설비는 철거되고 말았다.

대원사에서 한국최초의 소실모형주조법의 양산화 적용은 비록 실패로 끝났지만 이것이 의미하는 바는 실로 크다고 할 수 있다. 철계주물의 양산화 기술로는 대원사가 세계 최초였기 때문이다. 대원사의 시작을 계기로 동국산업의 한 계열 회사에서도 주강제 컨테이너 코너 캐스팅의 제작에 소실모형주조법을 적용하고자 하였으나 곧 포기하였다.

1988년 민주화 이후 인건비가 상승하자 소실모형주조법에 대한 관심이 다시 한 번 고조되어 미진금속, LG전자 등이 소실모형주조법을 적용하고자 하였다. 그러나 이들은 과거 대원사의 진철을 밟지 않기 위해 조심스럽게 접근하였고 규모도 실험실 규모로부터 시작하였다. 미진금속은 미국에서 기본적 시설을 도입하였고 LG전자의 경우 이탈리아에서 도입하여 상당기간 기초연구를 하였지만 미진금속의 경우는 회사의 사정으로 얼마 지나지 않아 연구를 중단하였고 LG전자의 경우 자동차용 부품에 적용하는 것을 목표로 알루미늄제 intake manifold의 시제품까지 개발하였으나 주물변형으로 인한 가공불량률이 높아 개발을 중단하였다. 또한 기아자동차를 비롯한 자동차 회사에서도 자동차 부품에의 적용을 위해 한동안 기초연구를 하였으나 더 이상의 진행은 없었고 그 이후 중견기업중심의 소실모형주조기술 적용

시험은 막을 내리게 되었다.

오늘날 활용되고 있는 소실모형주조법이 정착되게 된 것은 국내시장에 필요한 이형관이나 맨홀, 밸브류를 공급하기 위해 과거 대원사에서 근무한 소실모형주조법의 실패 경험이 있는 주조기술자들을 중심으로 소실모형주조 전업의 공장들이 설립하기 시작하면서 부터가 아닌가 생각된다. 현재 전업 또는 겸업의 중소규모 공장 7~8개 사가 가동 중에 있고 연간 약 10,000톤 정도를 생산하고 있지만 거의 전부 밸브, 맨홀, 이형관류의 범주를 벗어나지 못하고 있다.

한편 비철분야의 경우도 일찍부터 알루미늄 제품이나 동합금 제품에 대해 적용시험을 해보았거나 하고 있는 업체도 있었지만 아직 뚜렷한 실적이 보이지 하고 있는 실정이다.

위의 밸브, 이형관, 맨홀 등을 생산하는 업체들은 이제 어느 정도 안정된 생산기술을 보유하고 있지만 적용제품을 보면 도입초기의 기술수준에서 획기적으로 벗어나지는 못하고 있다고 볼 수 있다. 왜냐하면 대원사가 4반세기전에 생산했던 제품도 밸브, 이형관류였기 때문이다. 소실모형주조법의 보급이 이처럼 저조했던 것은 주물전용의 모형재료나 소실모형주조법 전용의 도형제 등 부자재의 수준이 레벨업 되어 있지 않은 상태에서 소실모형주조법의 간편성에만 착안하여 주물업체가 주조기술 중심으로 기술개발을 시도한 결과 도달한 한계가 여기까지가 아닌가 생각된다. 그러나 소실모형주조법에서 핵심공정인자는 주조작업보다는 부자재의 물성이나 장비의 성능과 관계되는 경우가 많고 이것들은 주물기술자들의 힘만으로는 해결하기 어려운 부분이기 때문이다. 또 한 가지 간과할 수 없었던 사항은 선협자의 실패 경험이 이후 시작하는 사람들에게 공유되기 힘들었던 점이다. 사실, 소실모형주조기술은 외견상 매우 간단한 기술로 보이고 설비도 매우 단순하기 때문에 누구나 쉽게 시작할 수 있다. 그러나 양산에 들어갔을 때 발생하는 불량은 공정의 성패를 좌우하는 치명적인 것들이 많았지만 이것을 합리적으로 관리할 공정인자를 용이하게 도출하기에는 설비나 공정이 너무 좁은 시각으로 구성된 것들이었다. 지금까지 기술의 정착에 실패한 대부분의 경우는 이 단계에서 벽에 봉착했기 때문이 아니었던가 생각된다. 실패의 경험을 공유할 수 있었더라면 시간과 비용과 노력을 절약할 수 있었고 기술도 지금보다 발전했을 것이라는 아쉬움이 남는 부분이다. 지금부터라도 자신의 발전을 위해서라도 관심있는 분들의 공동노력이 요망되는 부분이라 하겠다.

3. 우리나라 소실모형주조기술에 대한 검토

3.1. 모형성형장비

모형성형장비는 밸브와 같은 규격형 제품이나 자동차 부품 등과 같이 대량생산이 예상되는 부품, 이형관용 원통부와 같이 간단한 절단, 접합에 의해 다양한 형상의 제품의 조립이 가능한 기본 형상의 경우는 Fig. 1과 같은 2축, 5축 등 다축전용성형기가 이용하여 성형하고 있다. 그러나 이러한 제품들은

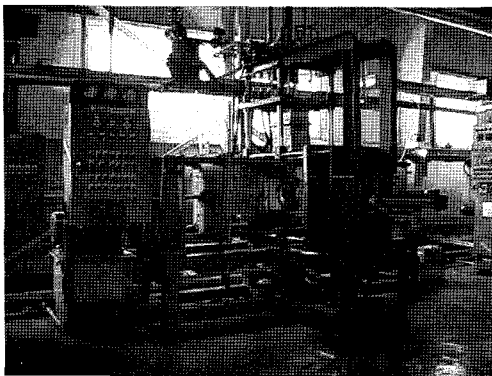


Fig. 1. 5축 전용성형기의 예.

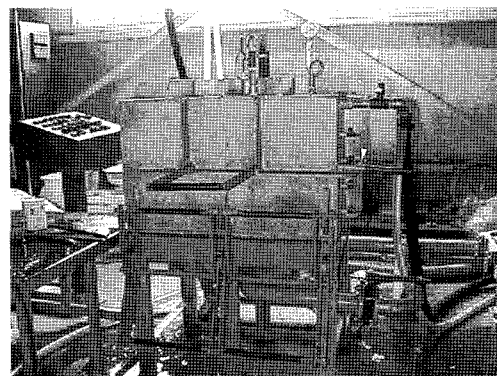


Fig. 2. 수동식 성형기의 예.

금형의 교체에 시간이 많이 소요되므로 소량생산품의 경우 현장에서는 Fig. 2와 같은 수동식 성형기나 이를 응용한 다양한 형태의 장치들이 활용되고 있다.

3.2. 모형성형용 금형

자동차 부품 등 형상, 치수의 조건이 엄밀한 제품의 경우는 NC 가공에 의해 금형을 제작하지만 통상은 목형을 만든 다음 생형조형법 등으로 알루미늄 금형을 주조하여 수작업으로 Fig. 3과 같은 금형을 제작하여 사용하고 있다. 밸브, 맨홀, 이형관 등 형상이 일정한 제품들은 대부분이 이러한 방법을 사용하고 있다. 소실모형주조기술에서 제품의 주조불량에 미치는 모형 품질의 중요성을 감안하면 vent의 크기, 위치 등에 대한 합리적 판단자료는 대단히 중요하다. 그러나 이와 같은 제작방법은 자료보다는 주로 시행착오적 방법으로 금형을 완성해 감에 따라 실제에는 생각보다 많은 시간과 노력이 필요하고 항상 일정 수준의 품질을 유지하기 어렵기 때문에 새로운 제품에 소실모형주조법을 적용하고자 할 경우 먼저 금형의 설계단계에서 발포 bead의 원만한 충전여부 및 최적 금형두께 등을 simulation해 보고 제작에 들어가는 기계가공법을 이용한 금형가공을 적극 검토해 보아야 할 것이다.

3.3. 조형장비

한국의 소실모형주조공장에서 사용하고 있는 진동 테이블은 Fig. 4와 같이 진동모터를 테이블의 하부중앙 또는 양쪽 측면에 붙인 형태를 주로 사용되고 있다. 그러나 양산시에 발생하는 불량 중 변형, 소착 등은 모래의 불균일 충전과 관련이 있음을 감안할 때 주형공간에 모래를 균일하게 충전시킬 수 있는 과학적인 진동 제어 기술이 요구되고 있다. 우리 연구실에서 국내 소실모형주조업체가 사용하고 있는 진동테이블의 진동양상을 조사한 적이 있는데 대표적 예는 Fig. 5와 같다. Fig. 5-a)에서 보는 바와 같은 양상은 양쪽 모터의 회전속도의 차이에 기인하는 진동의 맥놀이 현상(고조파도 포함되어 있다)이 보이는 경우이고 5-b)와 같이 맥놀리와 진동테이블의 공진현상이 복합되어 매우 복잡한 형태의 진동을 보이는 경우도 있었다. 5-c)와 같이 테이블에서 50~60Hz의 정확한 형태의 진동이 제대로 구현되는 테이블은 드물었다. 더욱이 충전시 플라스크를 테이블에 정확히 고정하지 않은 상태에서 진동을 가할 경우 모래의 정확한 충전을 기대하는 것은 불가능하다.

3.4. 플라스크

대부분의 소실모형주조업체에서 사용하고 있는 플라스크의 크기는 1.2m × 1.2m × 1m 정도의 것이거나 이보다 더 큰 것들이다. 진동테이블과 마찬가지로 플라스크의 크기, 구조, 강성은 플라스크 내의 모래에 가해지는 진동에 중대한 영향을 미친다. 플라스크가 진동테이블에 고착되어 있고 진동테이블이 정확한 진동을 구현하더라도 플라스크의 강성이 부족할 경우 플라스크 자체의 고유진동은 모래에

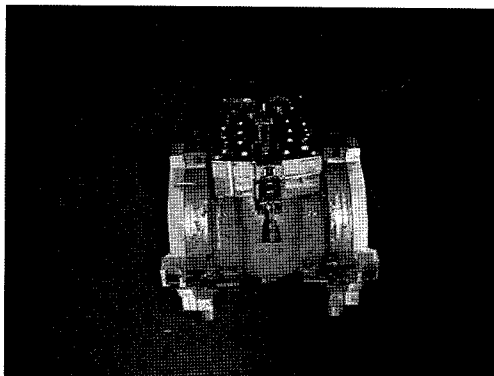


Fig. 3. 수동성형기용 EPS 모형성형용 금형의 예.

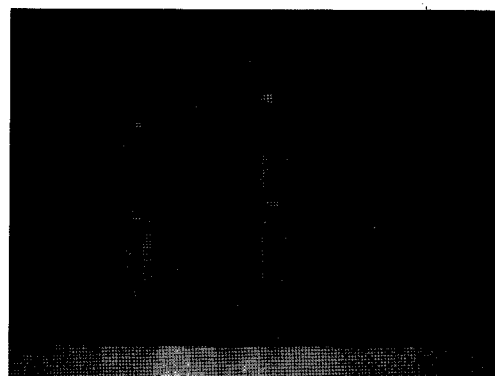


Fig. 4. 소실모형주조용 진동테이블의 예.

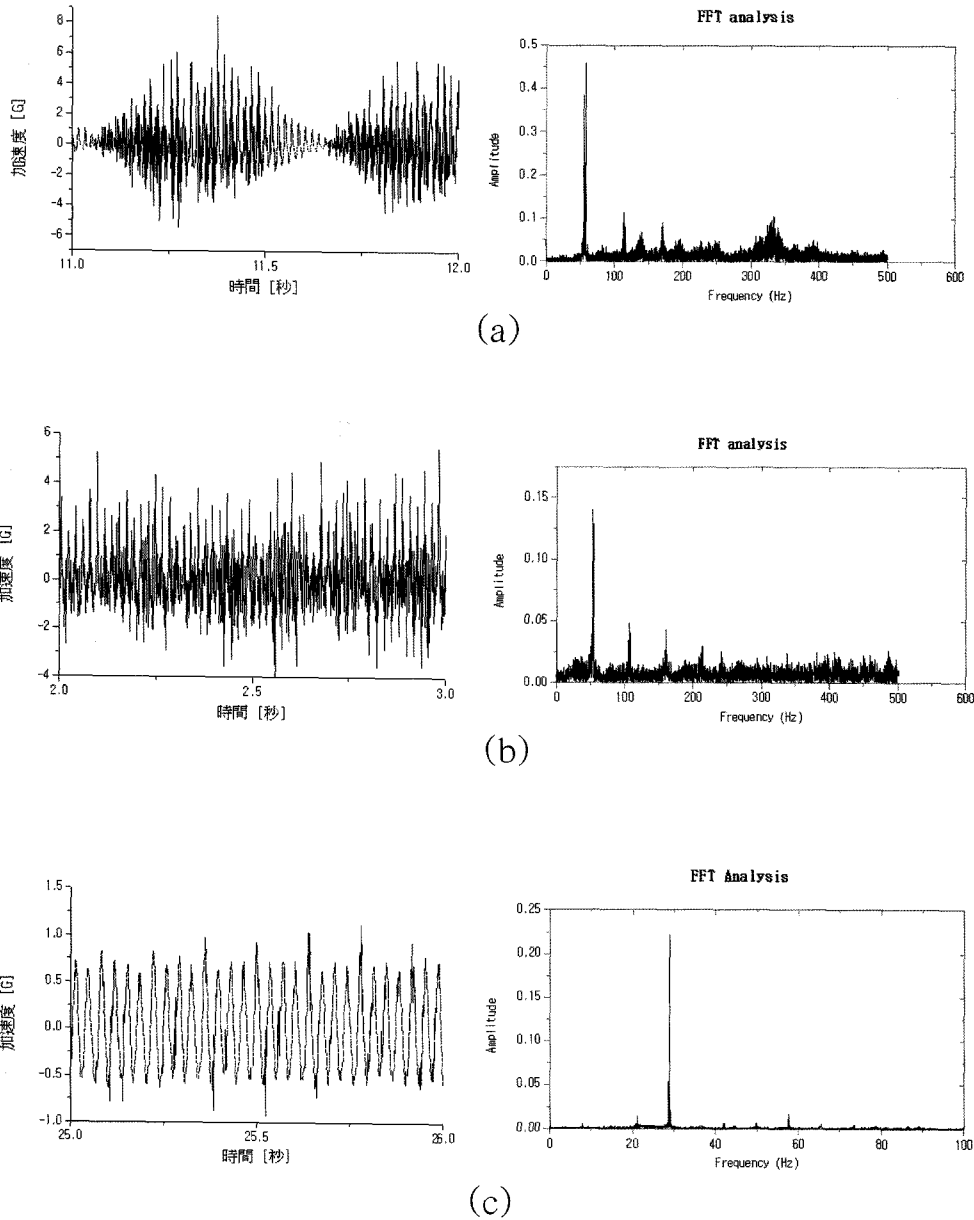


Fig. 5. 국내 소실모형주조용 테이블의 진동 모드에의 예.
 a) 두 조의 진동모터를 사용할 때 속도차이로 인해 발생하는 맥놀이, b) 위의 조건에 진동테이블의 고유주파수로 인한 공진현상이 복합된 결과, c) 정상적으로 진동하는 테이블의 진동 모드

가해지는 진동의 형태를 크게 왜곡시킬 수 있다. Fig. 6에 전산모사한 플라스크의 진동모양을 보이고 있다. 진동테이블과 플라스크의 고유주파수가 동작주파수 이상이 되도록 강성구조를 설계해야 할 필요가 있으며 이는 플라스크의 크기가 클수록 그 처리가 까다로워진다.

3.5. 감압설비

대부분의 업체가 수봉식 진공펌프를 사용하며 일반적으로 중간에 Surge tank를 장착하고 있다 주입 시 초기감압도는 0.5~0.6기압 정도를 유지하지만 주입 중 감압도의 변화는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 천차만별하다. 특히 연속주탕의 경우 첫 플라스크와 마지막 플라스크의 감압도의 차이가 매우 큼을

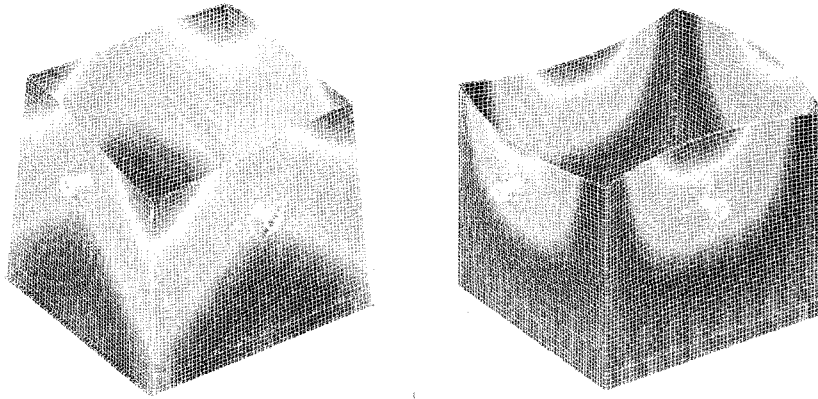


Fig. 6. 플라스크 진동의 전산모사 예.

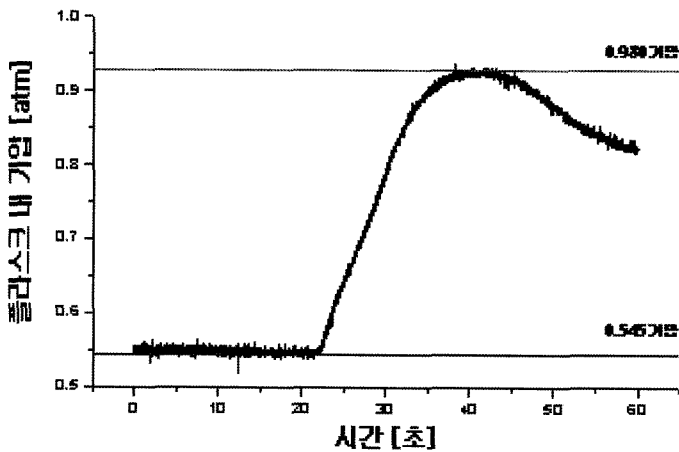


Fig. 7. 용탕주입시 플라스크 내 압력변화의 예.

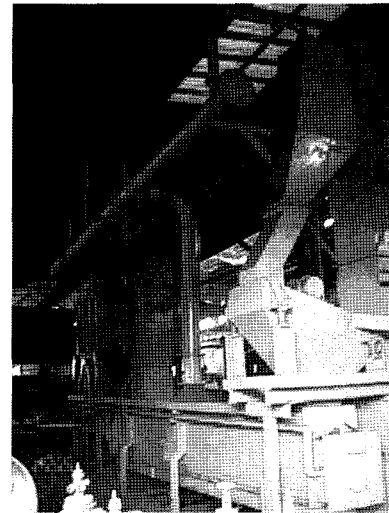


Fig. 8. 사냉각장치의 예.

감안할 때 이러한 설비에서 도형제의 통기도를 관리하는 것은 무의미 할 것이다.

3.6. 주형운반

생형이나 Furan 라인 등 주 생산시스템 이외에 별도의 시험생산 또는 소량생산용으로 소실모형주조법을 이용하고 있는 경우는 조형장에서 조형하여 용탕을 주탕한 다음 크레인을 이용하여 Flask를 운반하고 모래를 호퍼에 쏟는 방식을 채택하고 있는데 이 방법은 간단하지만 생각보다 생산성이 높은 방법이다. 전업공장에서는 물론 유압이나 공압으로 주형상자를 운송하고 롤오버 타입이나 그 밖의 적당한 방법을 이용하여 모래를 쏟아 붓고 있다.

3.7. 사처리 장치

호퍼에 쏟아 부어진 모래는 바켓 엘리베이터에 의해 Fig. 8과 같은 수평식 사냉각 장치에 투입되어 냉각과 함께 미분의 집진작업도 이루어진 다음 모래저장상자로 운반된다. 이렇게 처리된 모래에는 기화, 소실된 모형재료가 모래입자의 표면에 응축된 채 남아 있는데 이것은 소실모형주조공장 악취의 한 원인이 될 뿐만 아니라 모래의 마찰계수를 증가시켜 모래의 충전성을 나쁘게 하는 요인이 되고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 한 방법으로서 탈사 직후 모래가 뜨거울 때 자열을 이용하여 배소처리하는 작업이 필요한데 국내에서는 아직 이러한 작업을 하는 주조공장은 없다. 집진에는 150 m³/min 용

량의 집진기가 주로 많이 사용되고 있다.

3.8. 부자재

국내에 공급되고 있는 EPS Bead는 소실모형주조용으로는 사용량이 너무 적어 메이커에서는 대량생산되고 있는 건축용 Bead를 소실모형주조용으로 조제하기 때문에 난염제인 Br처리가 되어 있다고 한다. 소실모형주조법에서 이것은 잔사결함의 원인이 될 수 있다.

도형제는 일부 군소 업체에서 제작하여 판매하고 있으나 전문성이 결여되어 있고 대부분의 업체가 자가제작하고 있어 물성이 다양하며 전체적으로 통기성이 낮은 편이다.

주물사의 입도지수는 표 1과 같으며 AFS GFN 40~60으로 다양하며 입도분포의 형태도 넓은 편이다.

4. 주물불량

4.1. 소착

소실모형주조공장에서 가장 흔히 볼 수 있는 결함이 Fig. 9와 같은 소착결함이다. 이것은 일반 사형주형에서 발생하는 소착과는 달리 수작업에 의해 어느 정도 제거가 가능한 결함이지만 굉장히 많은 노력이 필요하므로 소실모형주조기술이 성력화 기술이란 말을 무색케 하는 것이다.

이를 방지하기 위해 일반적으로 행하는 방법은 도형제를 두껍게 칠하거나 덧칠하는 방법을 택하고 있는데 이는 지나친 감압과 연결되어 2차 결함을 유발시키고 있다. 최선의 방법은 최적의 방법으로 모래를 충전하여 감압에 의한 용탕 누설을 최대로 억제하는 것이 방법이다.

4.2. 주물변형

주물의 변형요인으로는 두 가지를 거론할 수 있다. 첫째는 건조시 도형제의 수축에 의한 변형이다. 소실모형주조용 도형제는 건조시 수축이 적어야 하고 모형에 도포했을 때 도형층 상하부의 두께차가 없어야 한다. 그렇지 못할 경우 약한 스티로폼 모형은 도형제의 건조수축에 의해 변형이 발생하는 수가 있다. 두 번째는 모래의 무게와 지나친 진동에 의해 모래 충전시 변형하게 된다. 이를 피하기 위해서는 적당한 치구를 사용하고 플라스크의 공진억제 및 최적의 진동조건을 구현할 필요가 있다.

4.3. 수압불량

이형관, 밸브 등에 대한 수압시험에서 Fig. 10과 같은 수압누설을 흔히 보게 된다. 이와 같은 누수부의 조직을 관찰해 보면 도형제의 혼입에 의한 것임을 알 수 있다. 이들의 혼입경로는 탕구나 탕도로 사용되는 스티로폼 모형에 기인한 것으로 보인다. 일반적으로 EPS모형은 금형을 사용하여 성형하므로 표

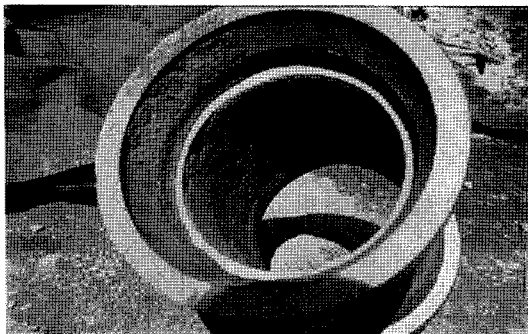


Fig. 9. 소실모형주조법에서 발생하는 전형적인 소착결함의 예.

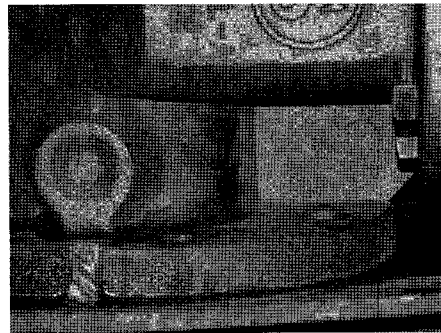


Fig. 10. 소실모형주조품의 수압누설의 예.

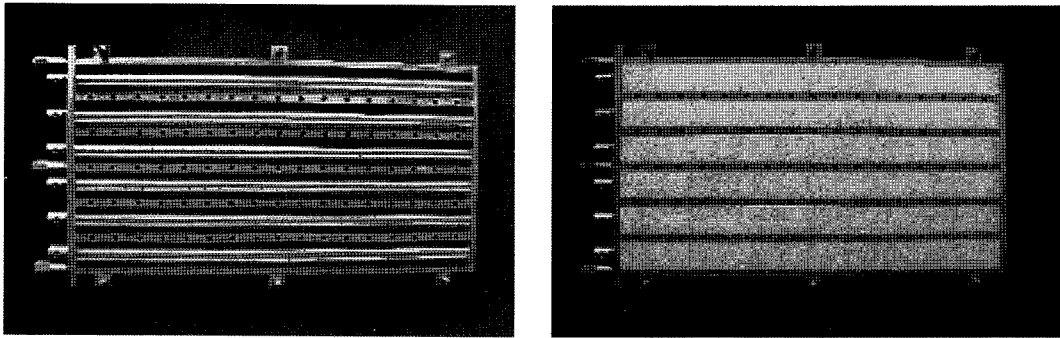


Fig. 11. 도형제 침투방지를 위한 탱구탕도 성형법의 예.

면이 치밀하지만 탱구나 탱도로 사용되는 스티로폼은 일반 성형용 판재를 절단한 것을 주로 사용하고 있다. 이것들은 성형된 블록을 절단하여 제작한 것인데 블록의 내부가 충분히 용착되지 못하는 경우가 종종 있다. 이런 부분을 탱구나 탱도로 사용하게 되면 도형제를 도포할 때 도형제가 비드입자 사이로 침투하여 주입시 용탕에 휩쓸려 들어간 것으로 보인다. 이러한 문제를 방지하기 위해 일부 공장에서는 탱구나 탱도는 도형하지 않고 사용하는 경우조차도 있는데 우리 연구팀에서는 도형제의 침투를 방지하기 위해 Fig. 11과 같이 탱구, 탱도표면의 용착을 최대화시키는 탱구, 탱도성형법을 제안한 바 있다.

4.4. 주형분락

주조방안이 적절치 못하거나 감압이 지나치게 낮을 경우 주형분락이 발생한다. 따라서 주조방안을 최적화하고 감압도를 증가(일반적으로 $-500 \sim -400$ mmHg) 시킬 필요가 있다.

5. 향후 전망

소실모형주조법은 폐주물사문제, 기능인력부족문제, 환경문제 등에 대해 능동적으로 대처할 수 있는 주물산업의 대표적 탈3D화 기술의 하나이다. 원리도 지극히 간단하여 자동화도 용이하다. 그러나 모형용 EPS Bead, 도형제 등 관련 부자재의 성능이 소실모형주조용으로서 충분하지 않으면 실용적 방법으로 자리잡기 힘든 방법이다. 주조장비의 경우도 진동이나 감압이 주조방법을 최적화 할 수 있는 기능적 특성이 고려되어야 제 성능을 발휘할 수 있다.

우리나라에서는 지난 20여 년간 많은 수의 주물업체가 소실모형주조법의 자체개발을 시도해 왔지만 그 결과는 그렇게 성공적이지 못했다. 이것은 관련 전문 원부자재나 장비의 개발을 유도할 수 없었고 이것은 다시 순환적으로 이 기술의 발전을 저해하는 결과가 되었다.

우리나라의 소실모형주조기술은 주변국들과 비교할 때 구미, 일본 등 선진국은 물론 이웃 중국에 비해서도 우위에 있지 못하다. 그러나 서두에 언급한 것처럼 우리나라 주물업계는 세계최초로 소실모형주조법에 의한 주철주물의 양산화를 시도한 적이 있으므로 문제점을 직시하고 이에 대한 적극적 대처 방안을 수립한다면 단시간 내에 성공적 결과를 도출할 수 있는 충분한 역량이 된다고 생각된다. 또한 국내규사자원의 부족 및 중국의 주물사수출금지, 인력문제, 환경문제 등을 생각한다면 하루 빨리 이에 대안이 되는 기술의 구체화가 시급한 실정이다.

소실모형주조법은 일반 주형법과는 달리 스티로폼 모형을 다루는 공정이 필요한 만큼 경제적인 주조법으로 자리를 잡기 위해서는 형상을 설계할 때 미리 소실모형주조법의 장점(소실모형주조비 < 2기존 일반 주조비+가공비)을 활용할 수 있는 설계가 되어야 한다. 이를 위해서는 주물사용자 또는 설계자가 과감히 설계변경할 수 있도록 소실모형주조법의 장점을 이해시킴과 설계를 위한 data base의 축적이 필요하다. 또한 주조품의 양부에 가장 큰 영향을 미치는 인자가 EPS모형이고 이의 성형 및 금형제작이

납기의 병목공정이므로 금형 및 주조과정의 시행착오를 줄이기 위해서는 금형설계시 simulation을 통한 최적화가 가능한 data base의 축적도 필요하다. 이를 위해서는 소실모형주조법을 활용하고 있거나 이에 대해 관심이 있는 주물업체, 도형제 등 원부자재를 생산할 수 있는 주물부자재업체, 주조설비업체 등을 중심으로 컨소시움을 결성하여 컨소시움이 기초기술의 개발, 보급 및 정보교류를 담당하고 주물업체는 개별 제품기술을 개발을 개발하고 관계 자료는 컨소시움으로 피드백하게 한다. 또한 학회활동 등을 통하여 소실모형주조업체에 관심을 가지는 업체수를 늘림으로써 국내의 원부자재 업체의 시장참여를 유도하여 국산화된 양질의 소실모형원부자재 및 장비를 공급하게 한다. 또한 국내 연구기관 등을 활용하여 해외의 유관기관과 협력하여 세미나 등을 개최함으로써 소실모형주조법에 대한 주물수요자의 관심을 유발함으로써 소실모형주조법이 적합한 제품의 창출을 확대하여 소실모형주조기술의 활용기반을 조성하도록 한다.

Mordern Casting에 의하면 미국이 소실모형주조법의 성숙기에 접어들 경우 전체 주철 생산량의 약 20%를 이 방법으로 생산할 것으로 예측하고 있다. 이러한 접근법으로 볼 때 한국은 현재 주물생산량이 150만 톤에서 횡보상태에 있으므로 이를 기준으로 해도 현재의 30배 정도까지는 성장할 가능성이 있다. 따라서 관련업체가 적극적으로 협력한다면 빠른 시간 내에 청정주조기술의 현실화를 기대할 수 있을 것이다.