

# 자동차 주조공정의 폐 주물사 재생기술 개발

허기수 홍성준 배유진 조경래 \*소이섭  
현대자동차(주) \* (주) 우리

## Development of Waste Sand Recycling Technology in the Automotive Casting Process

Kisoo Heo, Sungjoon Hong, Yujin Bae, Kyungrae Cho, Iesub So  
Hyundai & Kia Motors, \*Woori

### Abstract

In the automotive industry, the need of casting process is continuously increased. The end of life casting sand from the casting process is currently recycled for the copper smelting flux and cement manufacturing process, but this kind of recycling is not appropriate both environmentally and economically since waste sand has high concentration of  $\text{SiO}_2$ . In this study, waste casting sand recycling technology was developed through continuous heating furnace and surface treatment process, and environmental assessment using by Life Cycle Assessment was performed to compare current system and new recycling system.

### 요약문

자동차 산업에서, 주조공정의 수요가 지속적으로 증가하고 있다. 주조공정에서 발생한 폐주물사는 일반적으로 동제련 flux와 시멘트 제조 공정에 재사용 되어왔다. 그러나 폐주물사에는 고순도의  $\text{SiO}_2$ 가 농축되어 있기 때문에 이러한 형태의 재활용은 환경적으로나 경제적으로 적절하지 못하다. 본 연구에서는 열처리 노(爐)와 표면처리공정을 통한 폐주물사의 재활용기술을 개발하였고, 기존 재활용 시스템과의 환경성 비교 LCA를 수행하였다.

### 1. 서론

주조란 주조용 금속재료를 노(爐)내에 장입하여 가열 용해한 쇳물을 주형 속으로 주입 응고시켜 일정한 형태의 제품을 만드는 과정이다. 이렇게 얻어진 제품을 주조품 또는 주물이라 한다. 주물을 만들 때 사용하는 원,부자재와 조업 조건 등은 주물의 품질에 큰

영향을 미치게 되므로 이들을 정확하게 관리하는 것이 중요하다. 자동차 산업에 사용되는 기초 소재인 주물의 수요는 증가하고 있으며, 주물의 생산에는 주형이 필요하고 대부분의 주형이 사형에 의해 제조된다. 사형은 주물사에 점결제를 첨가하여 주형을 만든다. 주형은 1회만 사용하고 폐 주물사 형태로 배출되어 폐기물 처리된다. 이렇게

배출된 폐주물사는 복토용, 시멘트 공장의 규사원료, 동 제련공장 Flux 등에 한정되어 사용되고 있다. 국내에서는 이미 양질의 주물사가 생산되지 않아 호주, 베트남 등에서 수입하고 있어 원거리 운송비 부담증가, 주요 주물사 수출국인 중국의 모래 수출 금지로 인한 신사구입비 상승 및 환경규제 강화 등으로 경영여건이 악화되고 있다.

현대/기아 자동차는 상기와 같은 문제를 해결하고자 재생기술 확보, 원가절감 및 자원절약 할 수 있는 기술을 개발하여 생산현장에 적용 추진 중에 있다. 각 공장에서 발생하는 폐 주물사는 1년에 약 154,000톤이다. 현재 처리 방법으로는 동제련 Flux용으로 약 69%, 시멘트공장/ 블록 공장에서 약 26% 재활용하고 있으며, 5%는 매립되고 있다. 자동차 주물용 모래는 SiO<sub>2</sub> 순도가 높은 자원임에도 불구하고 폐기되어 자원 낭비가 크다. 따라서 선진국에서는 오래 전부터 폐 주물사를 재생하여 생산공정에 사용 중에 있으나 우리나라에서는 재사용이 극히 드물다.

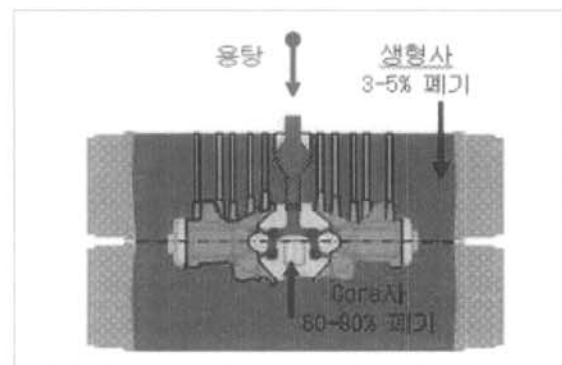
본 연구에서는 자동차 공정에서 발생하는 폐 주물사를 유동상식 열처리 노(爐)에서 1차 유기물 제거 및 2차 표면처리 한 후 신사와 적정하게 혼합하여 공정에 사용하는 기술개발을 수행하였다.

## 2. 본론

### 2.1 폐 주물사 발생과정

주물사는 소재 주조시 내,외부 형상을 이루고 용탕 주입, 응고시까지 그 원형을 잃지 않고 유지시키는 재료로써 현대/기아 자동차에서는 주철주조 및 알루미늄 주조공장에서 사용 후 폐기해왔다.

그림1은 자동차 주철 주조공정의 폐 주물사 발생원과 비율을 나타낸 것이다. 그림1에서 보는 바와 같이 생형사의 조성은 모래 + Bentonite + Sea Coal + 물로 구성되어 있고 3~5%가 폐기물로 발생되며, 나머지는 공정중에서 재사용된다. Core사는 모래 + 레진으로 구성되어 있고 80~90%가 폐기물로 처리되고 나머지는 생형사로 유입되어 재사용된다.



[그림.1] 주철주조공정 폐 주물사 발생과정

표1은 현대/기아자동차 폐 주물사 발생 및 처리 현황으로 울산공장에서 발생하는 양이 154,000톤/년 中 106,500톤/년으로 69%를 차지하고 있다.

[표1] 폐 주물사 발생 및 처리 현황

구분	발생량	처리량(톤/년)		
		재활용	매립	계
울산	106,500	106,380	120	106,500
아산	3,500	3,500	-	3,500
전주	17,000	15,000	2,000	17,000
화성	3,000	3,000	-	3,000
광주	24,000	18,000	6,000	24,000
합계	154,000	145,880	8,120	154,000

### 2.2 폐 주물사 재생처리 원리

주조공정에서 발생된 폐 주물사는 회수,

저장한 후 재생처리업체로 운반, 물리적처리(자석분리, 파쇄, 스크린 등), 열처리(유동상 배소로, 700℃), 표면처리(마광처리, 12회), 신사와 혼합(Blending, 신사혼합)공정을 거쳐 재생사로 사용한다.

열처리 공정의 원리는 공기를 이용하여 폐 주물사를 부상하면서 700℃로 표면의 유기물을 연소시킨다. 이때 재생로의 온도가 700℃ 보다 높거나 낮으면 폐 주물사의 표면에 부착되어 있는 유기물의 잔존량이 증가하므로 재생온도를 적절하게 유지해야 한다. 표면처리는 폐 주물사의 표면에 잔존하고 있는 유기물을 원심력에 의한 마찰을 이용하여 제거하는데 마광 횟수가 증가하면 재생사의 미립화로 인하여 제품 불량 발생한다.

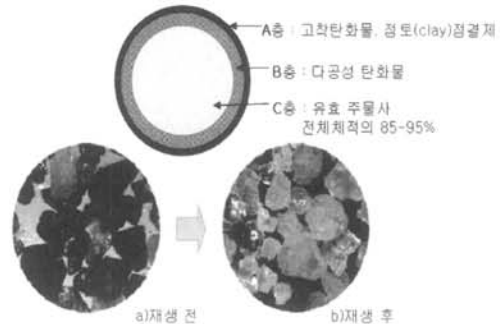


[그림2] 폐 주물사 재생처리 공정도

그림3은 폐 주물사 입자의 표면에 부착되어 있는 유기물을 나타낸 것으로 A층은 고착탄화물과 점토 점결제이고, B층은 다공성 탄화물, C층은 유기물 제거 후의 유효 주물사 체적이다. 폐 주물사의 발생공정에 따라 전체 체적의 85~95%가 유효 주물사이다. 주철 주조 공정에서 발생하는 폐 주물사는 85%이하 이고, 경합금 주조공정에서 발생하는 폐 주물사는 모래 표면에 Resin만 부착되어 있어 유효 체적이 95% 전후로 높다.

a)는 주철 주조공정에서 발생한 폐

주물사이고 b)는 열처리 및 표면 처리하여 재생 완료된 재생 주물사이다.



[그림3] 주철주조공정의 폐 주물사 유기물 부착 및 재생 전후 비교

### 2.3 재생사 품질 Test

표2는 중국사, 재생사, 혼합사의 물리적 특성을 비교하였다. 중국사는 울산공장에서 사용하고 있는 주물사, 재생사는 100% 재생사이고, 혼합사는 재생사 75%와 국내 건조사 25%를 혼합하여 실험한 결과이다. 재생사는 pH와 산소비량이 Spec을 벗어나고 있으며, 혼합사는 Spec을 만족한다. 주물제품 제조 Pilot Test는 당사의 Spec을 만족하는 혼합사로 수행 예정이다.

[표2] 주철 주조공정 신사와 재생사/혼합사의 물리적 특성 비교

구분	물리적 특성					
	입도	입형	pH	산소비량	LOI	수분
Spec	58-64	원형, 둔각형	4~7	15cc/g	1.0 %	0.2 %
중국사	61.7	↑	6.9	7.4	0.9	0.08
재생사	62.6	↑	8.2	19.4	0.3	0.19
혼합사	58.0	↑	6.9	7.0	0.3	0.06

표3은 주철 주조공정 신사, 재생사, 혼합사의 인장강도를 비교한 결과로서 당사의 실험

기준에 의거하여 Core 제품을 만들어 즉시, 30분 경과, 60분 경과한 후 인장강도를 측정하였다. 중국사의 강도는 74에서 105로 증가하였고, 재생사는 107에서 140으로 증가, 혼합사는 149에서 159로 증가하였다. 혼합사의 강도가 즉시 강도와 60분 경과한 강도에서 가장 높았으며, 기존 제품인 중국사 대비 40~50% 향상된 결과를 나타내고 있다.

[표3] 주철주조공정 신사와 재생사/혼합사의 인장강도 비교

구분	인장강도(PSI)			비고
	즉시	30분	60분	
Spec	-	-	-	Resin 투입 : 1.8%
중국사	74	94	105	
재생사	107	123	140	
혼합사	149	155	159	

그림4는 재생사 및 재생사로 제조한 승용디젤 실린더 블록용 Core 일부분과 제품으로 a)는 주철 주조공정의 폐주물사, b)는 열처리(유동상식700℃) 후 재생사 c)는 표면처리(마광 12회 실시)한 재생사이다. d)는 재생사로 만든 승용디젤 실린더 블록용 Core 일부분 이고 e)는 실린더 블록 제품이다.



[그림4] 재생사 및 재생사로 제조한 제품

## 2.4 재생사 Pilot Test 결과

가)대상공장 및 공정 : 울산 주철 주조공장 승용디젤 실린더 블록 제조 공정

나)재생사 비율(혼합사)

: 재생사(75%) + 국내 건조사(25%)

다)시험일자 : 2007.08.30 ~ 10.12

라)방법 : 주철주조 4공장 공정에 직접 투입하여 제품생산 후 품질 평가

그림5는 재생사를 이용한 주조제품 제조공정을 나타내는 그림으로, 제조공정을 살펴보면 다음과 같다 .

- 재생사 : 주철 주조공장에서 발생된 폐주물사를 열처리 + 표면 처리한 후 당사의 Spec에 맞게 혼합하여 사용한다.
- Core 제조 : Crank Case, Cylinder Block은 Cold Box 공법으로 제조하고 Water Jacket, Oil Return 부분은 RCS 공법(Resin이 Coating된 모래를 200~300℃ 가열된 금형에 취입하여 제조) 으로 제조하여 로봇으로 Setting한다.
- 용탕주입 : 프레스공장, 차체공장에서 발생된 스크랩, 회수고철을 전기용해로에서 용해하여 용탕을 자동 주입기를 이용하여 주입한다.
- 제품추출/ 냉각 : 외형을 구성하고 있는 주물사와 제품을 분리하여 사람이 취급 가능한 온도까지 냉각시킨다.
- 탈사 및 사상 : 제품 외형에 고착되어 있는 주물사 및 Crank Case내부의 건조사를 Shot Blast를 이용하여 제거한다. 수동사상 및 제품 품질확인(외형 등)을 한다.
- 도장 및 출고 : 분체 도료를 도장하고 출고한다.



[그림5] 재생사를 이용한 주조제품 제조과정

표4는 상기 그림5와 같은 공정의 순서에 의한 제품을 만드는 방법으로 실험한 결과를 나타낸 것이다. 총 5차 실험실시한 결과 1차와 2차에 불량품 각1개 발생하였다. 원인으로는 모래와 용탕이 결합되어 제품의 외관(표면) 불량으로 나타났다. 재생사 입도와 생산공정 조건을 변경하여 문제를 해결하였다. 불량 원인을 제거한 3 ~ 5차 실험에서는 불량률이 더 이상 발생하지 않았다.

[표4] 재생사(혼합사)를 이용한 Pilot Test 결과

구분	샘플 수량	결과			비고
		정상	불량	계	
1 차	6	5	1	6	소착
2 차	6	5	1	6	소착
3 차	6	6	0	6	
4 차	6	6	0	6	
5 차	6	6	0	6	
계	30	28	0	30	

## 2.5 경제성 평가

표5에서 보는 바와 같이 주철 4공장을 기준으로 2.4억(폐기물처리비, 신사구입비와 재생비용, 물류비용 등을 평가하여 나타나는 절감금액) 이고 전 공장 적용시 15.4억이 절감되는 것으로 나타났다.

[표5] 재생처리에 따른 원가절감

<단위: 톤>

구분	신사 구입량	비용(원/톤)		원가절감 (억/년)
		신사	재생사	
주철4공장	24,000	75,000	65,000	2.4
전 공장	154,000	75,000	65,000	15.4

## 2.6 환경성 평가

신사와 재생 주물사의 환경성을 비교하기 위해 비교 LCA를 수행하였다.

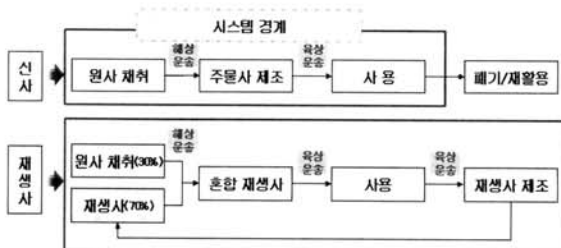
### 2.6.1 LCA 범위

#### 2.6.1.1 기능 및 기능단위

비교 LCA 대상인 주물사의 기능은 자동차용 주물 제품을 제조하기 위한 품질 요건을 만족하는 주물용 모래이며, 그 기능단위는 1톤으로 설정 하였다.

#### 2.6.1.2 시스템 경계

신사의 경우, 베트남 지역에서 모래가 채취되어 화물선을 이용하여 경기도 평택항에 입항되고 추가 공정을 통하여 주물사로 제조된 후 울산으로 육상 수송된다. 주조 공정을 거친 후의 모래는 외부 위탁업체에 의해 수거되어 재활용 혹은 매립된다. 재생사는 주조 공정 후의 모래를 수거하여 재생공정을 거친 후, 주조 품질 확보를 위해 재생사 75%에 신사 25%가 혼합되어 재생 주물사로서 주물 공정에 공급 된다. 그림6은 신사 및 재생사의 시스템 경계를 나타내었다.



[그림6] 신사/재생사 시스템 경계

## 2.6.2 전과정 목록 분석

### 2.6.2.1 주물사 제조 및 수송 데이터

신사 및 재생사 데이터는 경기도 평택에 위치한 (주)우리의 2006년 한해 동안의 평균 공정 데이터를 직접 수집하여 이용하였다. 원부자재 및 수송DB는 유럽 상용 DB를 이용하였고, 전기의 경우 국내 DB를 이용하였다. 수송의 경우, 신사의 해상운송은 6,000톤 급 화물선을 통해 경기도 평택에서 약 3,500 km 떨어진 베트남으로부터 공급되며, 제조된 주물사의 공급 및 재생의 경우 20톤 급 화물트럭을 이용하여 울산으로 이동된다.

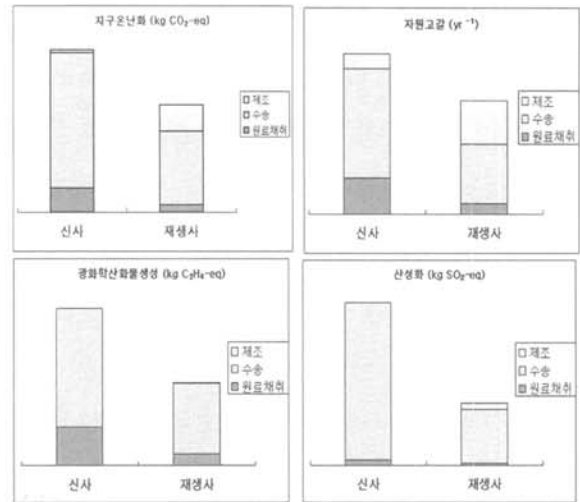
### 2.6.2.2 사용 및 폐기 시나리오

주물사의 사용에 따른 환경부하는 없으며 신사 폐기의 경우 cut off 하였다. 현재 폐주물사의 가장 많은 부분은 위탁업체를 통해 시멘트 원료의 일부로 사용되고 있으며, 시멘트 원료로써 이용하기 위한 수송 및 재처리에 연료와 에너지가 투입되고 있다. 시멘트 원료로써 재활용되는 환경친화적인 역할과 이를 위해 투입되는 연료 및 에너지에 의한 환경 악영향에 대한 평가를 위해 관련 데이터 수집을 시도 하였으나 영세한 위탁업체 구조상 신뢰성 있는 신뢰성 있는 데이터의 확보가 어려우며, 위탁업체에 지불되고 있는 처리 비용과 수송 및 재처리시 투입되는 에너지의 양을 산술적으로 고려한 결과 폐주물사의 시멘트 원료로써의 재활용에 따른 환경영향이 미미하다고 판단되어 cut off 하였다

### 2.6.3 전과정 영향 평가

신사 및 재생사의 환경영향은 총 4개, 즉 지구온난화, 자원고갈, 광화학산화물생성 및

산성화로서 비교 평가 되었다. 그림7에서 보는 바와 같이 재생사가 모든 환경영향에서 최대 62% (산성화)에서 최소 30% (자원 고갈)에 걸쳐 환경영향이 적은 것으로 나타났다.



[그림7] 전과정 영향평가 결과

영향평가 모델은 기존의 유럽 지역에서 사용되는 CML, IPCC, Nordic 가이드라인을 이용하였다.

### 2.6.4 해석

신사와 재생사의 전과정 평가 결과, 모든 영역에서 재생사의 환경부하가 신사에 비해 월등히 작은 것으로 나타났다. 신사와 재생사 모두 수송단계가 차지하는 비중이 가장 컸으며 (90~50%), 특히 신사 해상수송의 경우 신사와 재생사의 환경부하 차이를 결정짓는 가장 큰 원인이 되고 있음을 알 수 있었다. 재생사의 경우 재생에 투입되는 에너지의 양이 신사 제조에 투입되는 에너지의 양에 비해 약 15배 이상 증가 하지만, 신사의 해상 운송에 따른 환경부하 차이로 인해 최종적으로 재생사의 환경성이 신사에 비해 월등히 우수한 것으로 평가 되었다.

### 3. 결론

본 연구는 생산공장에서 발생하는 폐 주물사의 재생처리 기술 개발로 원가절감, 주물사의 원활한 수급, 자원절약 등을 위하여 추진하였다. 재생처리 기술을 적용한 재생 주물사를 울산공장 소재공장의 공정과 동일한 조건으로 한 Pilot Test결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 재생사의 품질은 중국사, 재생사, 혼합사의 물리적 특성을 비교하였다. 인장강도는 혼합사(신사 25% 혼합) > 재생사 > 중국사 순이었으며, 100% 재생사는 pH와 산소비량이 현대자동차 울산공장 주물사 Spec을 벗어났고, 중국사와 혼합사(신사 25% 혼합)는 Spec을 만족함으로 소재공정에 사용할 수 있는 주물사는 신사와 재생사를 최적의 조건으로 혼합하여 사용하여야 될 것으로 판단된다

(2) 재생사(신사 25% 혼합)를 이용하여 울산 주철주조공정(실린더블록 생산) 라인과 동일한 조건으로 제품생산을 총 5차 실험 실시한 결과 1차와 2차에 모래와 용탕이 결합되어 제품의 외관(표면)불량인 소착이 발생 하였으나, 재생사 입도와 생산공정 조건을 변경하여 문제를 해결하였다. 불량 원인을 제거한 후 실시한 3 ~ 5차 실험에서는 불량이 더 이상 발생하지 않았다.

(3) 신사 사용, 폐기물처리비, 재생비용과 물류비용 등을 비교하여 경제성 평가한 결과 주철주조 4공장 적용시 2.4억 이상, 현대 / 기아차 공장 적용시에는 15억 이상의 원가 절감 효과가 예상된다.

(4) 신사와 재생 주물사의 환경성을 비교하기 위하여 LCA를 총 4개 분야에 수행한 결과를 살펴보면, 지구온난화, 자원고갈, 광화학 산화물생성 및 산성화로써 비교 평가한 결과 재생사가 지구온난화에서 33%, 자원고갈에서 30%, 광화학 산화물생성에서 47%, 산성화에서 62% 이상 환경영향이 적은 것으로 나타났다. 재생사는 재생에 투입되는 에너지 비용이 신사 제조에 투입되는 비용보다 15배 이상 증가하지만 운송에 따른 환경부하로 인해 재생사의 환경성이 신사에 비해 월등히 우수한 것으로 평가되었다.

(5) Pilot test는 품질문제를 해결하였지만 생산공정 적용을 위해서는 재생사의 수급, 품질평가, 원가 등의 재검토가 필요하다.

### Reference

1. Foundry sand recycling in the troughs of blast furaces. Ricardo Magnani Andrade, Sergio Cava, Sidiney Nascimento Silva 등
2. Waste characterization and recycle in an aluminum foundry. S. Fiore, M. C. Zanetti, B. Ruffino
3. 鑄物廢砂 再生處理用 小型流動焙燒爐의 開發. 松川安次
4. 주철주조기술 교본. 현대자동차 소재학교
5. ISO 14040 series, 1997-2000
6. EUCAR Project R3: Life Cycle Anaysis Data and Methodologies, Phase 2, Final report Sept. 1998
7. 홍성준 et al., 자동차 재제조 부품에 대한 환경성 평가, 전과정평가 학회지 제8권1호, p81