Environmental comparative evaluation of Hollow sintered cam shaft and Lightweight Aluminum cam shaft using LCA

Moongu Lee, Jae-soo Jung, Song T. Lim, Shae K. Kim, Chang-ho Lim, Youn-haeng Cho

(Ecoeye.co., ltd (www.ecoeye.com), *Korea Institute of Industrial Technology, **Korea Testing Laboratory)

ABSTRACT

This study demonstrated environmental impacts caused by material impact and reduced weight, comparing the life cycle environmental impacts of hollowed sintered cam shaft and lightweight aluminium cam shaft studied through material development. It also demonstrated the relations between the environmental impact and the distance covered using the sensitivity analysis. The LCA result shows that the environmental impact of the lightweight aluminium cam shaft is much higher than the hollowed sintered cam shaft in the raw material gathering and manufacturing stage and less in the using and waste stage.

Key-words : Cam shaft, LCA(Life Cycle Assessment), Hollow sintered, Aluminium diecasting

요 약 문

본 연구에서는 자동차 엔진 부품 중 기존 중공소결 캡사포트와 소재개발에 의한 경량 알루미늄 캡사포트의 전과
정에 걸친 환경영향을 비교해 보면서 소재개발에 의한 환경영향과 사용단계에서의 경량화로 인한 환경영향을 구분해보았
다. 또한 사용단계에서의 자동차 운행거리에 따른 환경영향에 대한 민감도 분석을 통하여 부품 경량화에 의한 환경적
이득과 주행거리와의 연관관계에 대하여 규명해보았다. 경량 소결 캡사포트와 경량 알루미늄 캡사포트의 전과정 비교평가 결과
는 원료추출, 생산 및 생산단계에서는 새로운 소재 개발로 인한 환경부하가 기존의 제품에 대한 환경부하보다 현대적으로
나이가 낮지만 사용단계에서의 경량화와 페터너장에서의 재활용의 영향으로 오히려 생산단계에서의 환경영향을 많이 상쇄시켜
주는 결과를 얻어낼 수 있었다.

주제어: 캡사포트, 전과정평가, 중공소결, 알루미늄 다이캐스팅

1. 서 론

자동차산업에서는 사용단계에서의 연료소모량과 배기가스 배출량을 줄이기 위해 차체의 경량화를 통한
환경친화적 제품생산에 많은 노력을 기울이고 있고 있다. 그 중 자동차 부품의 핵심인 엔진의 소재 개선을 통
한 경량화를 유도하여 환경 친화적인 자동차 생산에 기여를 하고 있다. 본 연구에서는 현재 시판되고 있는
중공소결 캡사포트와 소재 개선을 통해 경량화된 경량
알루미늄 캡사포트의 전과정평가를 통한 환경영향을
비교 해 볼 목적으로 소재개선과 경량화로 인한 환경상의
영향을 정량적으로 비교, 평가하고자 한다.
2. 연구내용

2.1 개요

2.1.1 캠샤프트 일반

엔진 동력계의 주요 부분인 캠샤프트(Cam Shaft)는 반복적인 회전운동을 통해 흙바기밸브를 개폐시키는 역할을 하고, 터birthdate, 투사로드 등에서 순차적으로 동력을 주어 주기적인 정확한 타이밍으로 밸브를 개폐하도록 만들어져 있다. 특히, 자동차 엔진의 캠샤프트는 크랭크 캡배드의 회전력을 전달받아 연소실의 흡기 및 배기 밸브의 개폐시기를 조절하는 부분으로서 정밀한 고온 (-15~120°C) 영역에서 고화합(750 ~ 4,500 RPM), 회전 공통 범위 및 외부 마모 등의 악조건에서 사용되는 부품이다. 이러한 캠샤프트는 DOHC 엔진에는 흡기 및 배기의 전용 캠샤프트 각 1本씩을 사용하고, SOHC에겐은 흡배기 1본의 캠샤프트로 배기기 때문에 흡배기 밸브의 수명을 짧게 길어지게 되어있다. 또 최근에 탐급이 확대되고 있는 V형 엔진에 있어서는, SOHC가 2본, DOHC에서는 4본으로 되어 있다.

Figure 2. 캠샤프트

2.1.2 중공소결 캠샤프트

중공 내연기관에 사용되는 캠샤프트는 냉각지점(chilled cast iron)로 만들어져 있으나, 이와 같은 주철 캠샤프트는 엔진의 고성능화 및 경량화를 제한적으로 추구하고 있는 요구조건을 더 이상 만족시킬 수가 없게 되었다. 즉, 실제 캠샤프트는 철, 콜을 모두 동일 재료로 사용하여 일체형의 성형을 이루어져 있었으나, 이 경우의 소형법으로는 주철물질이 특수가 단조로 되어있는 것이다.

엔진의 고성능화 및 경량화의 일관으로 개발된 조립식 캠샤프트를 제조하는 방법 중, 중공 소결 캠샤프트는 분말 금속(POWDER METAL)을 이용하여 소결체 캠을 사용하는 조립식 캠샤프트이며 중공으로 되어 있고, 주자가이나 단조법으로서는 소결이 어려운 복 합 캠에도 적용할 수 있기 때문에 본편의 경량화가 실현 될 수 있는 기회 부품형상의 설계 자유로도 제조 선정의 자유도가 크고, 캠샤프트의 가공의 자유도가 설계가 가능한 특성을 갖고 있다. 또한, 상기 중공소결 캠샤프트 소결법 제조로 많이 사용되고 있는 PFC1, PFC2, PFC4 등은 크롬(Cr) 주재의 고경도 탄화물이 마이너스 기저조직 중에 균일하게 분산해, 고면저하에서도 내구력, 내마모에 뛰어난 결과를 보여주고 있다. 따라서, 이러한 중공소결 캠샤프트는 부자비가 저렴하고 환경친화적이며 성능이 강인화되어 품질을 높이고 비용 또한 절감할 수 있는 장점이 가지고 있다. 또한, 복합탄화물 형성으로 높은 내구성을 확보할 수 있으며 중공 타입(TYPE)이기 때문에 주철에 비하여 30%이상 경량화 할 수 있다는 장점이 있다.

2.1.3 경량 알루미늄 캠샤프트

경량 알루미늄 캠샤프트는 새로운 고성능 캠샤프트의 개발 요구에 부응하면서 중공소결 캠샤프트에 비해 더 경량화된 캠샤프트를 제공하고자 연구 개발된 것으로서, 중공 중공소결 캠샤프트에서 사프트부가 스릴류브로 제조된것을 변경하여 스릴류브에 비해 상대적으로 더 가벼운 알루미늄 합금이 사프트부를 이루는 것을 기술적 특성으로 하고 있다.

경량 알루미늄 캠샤프트의 제조 방법은 캠샤프트 캔퍼스들로 덜어 제작하고, 이렇게 덜어도 제작된 캔퍼스들을 금형 내에 인쇄 심한 후 알루미늄 주조공법을 통해 용접된 알루미늄 합금을 금형에 주입하여 캔퍼스들과 사프트부(지널부)를 일체로 성형한다. 여기서, 캔퍼스들과 사프트부가 금형 내에서 일체로 성형될 때, 캔퍼스들과 사프트부의 접합부위에서 접합강도를 늘려주기 위한 사프트부의 지널부다 더 크게 형성되어서 각각의 캔퍼스들을 축면에 접하는 보강리브 형태의 접합부가 성형되는 것을 특징으로 한다. 이때, 캔퍼스들은 분말 금속을 이용한 분말경 제조방식, 단조 성형되는 단조경 제조방식 중 어느 하나로 제조 가능하다, 분말경 방식으로 제조하는 것이 바람
적하다. 그리고, 상기 주요공법으로는 일반적인 중력주조공법, 일반적인 다이캐스트 공법, 슈즈스 캐스팅공법, 세미슬리드 캐스팅공법 중 어느 하나를 사용하는 것이 가능하나, 다이캐스트 공법을 사용하는 것이 바람직하다.

2.2 비교 시나리오 작성

중공소결 캐스프트와 경량 알루미늄 캐스프트의 환경성의 영향을 위하여 원료재취 단계에서부터 폐기 단계(cradle to grave)까지 시간 경계를 설정하여 본 연구를 진행하였다. 또한 본 연구는 중공소결 캐스프트 생산품의 R&D 차선에서 연구된 과제이고 경량 알루미늄 캐스프트는 같은 회사의 개발된 신 제품모델이다.

2.2.1 원료재취 및 원료생산 단계/캐스프트 생산단계

Table 1에서는 생산 전 단계 및 생산단계에서의 중공소결 캐스프트와 경량 알루미늄 캐스프트의 비교 조건들을 정리하였다. 생산 전 단계는 원료 재취 단계와 재취한 원료로 소재를 생산하는 단계를 포함하고 생산단계에서는 캐스프트를 생산하는 단계를 포함하고 있다.

중공 소결 캐스프트 생산공정은 소재제료로 캐스프트 형태를 형성한 후 steel 사프트와 캐스프트 조립하여 캐스프트에서 함께 소재를 한다. 소재공정에서 금속분말을 정량적으로 혼합, 섞어 1000°C의 소재로에서 가열하여 서로 단단히 밀착하여 고장(固結)하는 공정을 말한다. 그 후 절삭, 연삭과정을 거쳐 규정화된 중공 소결 캐스프트가 생산된다.

경량 알루미늄 캐스프트 생산공정은 캐스프트 및 알루미늄 다이캐스팅 공정으로 사프트를 생산한다. 여기서 grief과 사프트가 함께 소결되는 중공소결 캐스프트 생산공정은 단단한 채로 소결이 되면 사프트는 알루미늄 다이 캐스팅 공정을 통하여 만들어진다. 다이캐스팅 금형 안에서 소결공정과 사프트의 절삭이 이루어진다. 경량 알루미늄 캐스프트 생산공정은 중공 소결 캐스프트 생산공정과 비슷하여 알루미늄 다이캐스팅 공정이 추가되거나 캐스프트의 효용적인 소재로 인해 소결공정에서 사용되는 전력량을 감소시킬 수 있으며 단위

| 생산 전 단계 | 원료 재취 및 Steel shaft 생산, 소결재 생산 | 원료재취 및 Al 응고 생산, 소결재 창생 | 소결재 창생, 소결재 창생 |
| 생산단계 | 중공소결 반사 | 소결 반사 및 Al 다이캐스팅 |
| 제조중량 | 1.94kg(1EA) | 0.89kg(1EA) |

Figure 3. 중공소결 캐스프트와 경량알루미늄 캐스프트 생산공정도

2.2.1 사항 단계

사용단계의 시나리오를 만들기 위해서 차량 유지와 세차부분은 제외하고 차량의 운행만을 고려했다. 차량 운행 단계에서의 시나리오는 다음과 같다.

- 캐스프트의 사용수명은 140,000km 주행을 설정하였다.
- 중공소결 캐스프트가 사용되는 차량의 중량은 2,000kg이며, 연비는 10km/ℓ로 설정하였다.
- 경량 알루미늄 캐스프트가 사용되는 차량의 중량은 2058.1kg으로 가정하였고 연비는 중공소결 캐스프트 차량의 연비와 비슷하여 가정하였다.
- 차량 운행 시 배출되는 배출가스 데이터는 IDEMAT 2001의 디젤 차량 D/B를 사용하였다.
- 사용단계에서 소모되는 연료 소모량과 발생되는 배기 가스 배출량은 캐스프트의 중량을 향상 인자로 하여 할당하였다.
2.2.2 폐기 단계

폐기단계 사내리조에서는 폐차(dismantling) 부분을 데이터 부재로 인하여 고려하지 못했으며 캡사프트의 재활용(급속 재활용) 부분만을 고려하였다. 중공 소결 캡사프트는 고철로 재활용이 되고 회피효과 철근을 가정하였다. 경량 알루미늄 캡사프트는 캡 부분은 고철 재활용 공장에서 처리되고 알루미늄 캡사프트 부분은 알루미늄 스크랩 재활용 공장에서 처리되는 것으로 하였고 회피효과(avoid effect)는 알루미늄 잔$log$을 100% 대체할 수 있는 것으로 가정하였다.

2.3 전과정평가 수행

전과정평가는 ISO 문서 절차에 따라 수행하였다. 주요 내용은 Table 2에서 정리하였다. 시스템 경계는 Figure 2와 같다.

<table>
<thead>
<tr>
<th>가용</th>
<th>중공소결 캡사프트</th>
<th>경량 알루미늄 캡사프트</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>사양</td>
<td>엔진에서의 캡사프트의 가용</td>
<td>엔진에서의 캡사프트의 기능</td>
</tr>
<tr>
<td>단위</td>
<td>1EA(1.940kg)</td>
<td>1EA(0.964kg)</td>
</tr>
</tbody>
</table>

시스템

| 경계 | 원료재취부터 폐기단계 | 원료재취부터 폐기단계 |

Figure 4 중공소결 캡사프트와 경량 알루미늄 캡사프트의 시스템 경계

2.4 전과정 영향평가

본 연구에서는 산업 자체에서 개발한 한국형 환경영향평가지수 방법론을 사용하였으며, 전과정 단계별 영향을 비교하기 위해 가중치 적용한 환경영향평가 지수를 사용하였다. 전과정평가(LCA)를 분석하기 위해 LCA Software Sima Pro 5.1을 이용하였다.

2.4.1 원료재취 및 원료생산단계

원료재취 및 원료생산 단계에서는 소결재료와 사프트재료의 환경영향을 비교하였다. 두 캡사프트 모두 캡 부분의 소결재료는 경량화에 환경영향의 차이가 없었고 사프트 재료인 스타일 재질과 알루미늄 합금 재질의 환경영향은 Figure4와 같은 차이를 보였다. 경량 알루미늄 캡사프트의 주원재료인 알루미늄 잔$log$의 생산단계, 특히 알루미늄 원료재취 단계에서의 피하던 에너지 사용 배경에 중공소결 캡사프트의 주원재료인 알루미늄 생산단계에 비해 환경영향이 적은 것으로 나타났다. 이로 인해 원료재취 및 원료 생산단계의 결과는 중공소결 캡사프트(9.63E-04Pt.)보다 경량알루미늄 캡사프트(3.07E-03Pt.)의 환경영향이 증가한 것으로 나타났다. 원료재취 및 원료 생산단계에서의 결과를 분석하면 소재 개선으로 인한 환경영향은 200%이상 증가한 것으로 나타났다.

| 원료재취 및 원료 생산 단계
| 중공소결 캡사프트 경량 알루미늄 캡사프트 |

<table>
<thead>
<tr>
<th>Source</th>
<th>원료재취</th>
<th>사프트 재료</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>TOTAL</td>
<td>3.07E-03</td>
<td>2.09E-03</td>
</tr>
<tr>
<td>소결재료</td>
<td>1.79E-04</td>
<td>7.58E-04</td>
</tr>
</tbody>
</table>

Figure 5. 원료재취 및 원료생산단계에서의 환경영향평가 비교

캡사프트의 생산단계에서의 환경영향평가 결과는 Figure 5에서 나타났다. 경량 알루미늄 캡사프트 생산공정에서 소결공정의 단위 생산량 량 전략적사용량의 감소로 인해 전기부분의 환경영향은 감소.
(1.46E-04Pt. 감소)하였으나 알루미늄 다이카스텔 공정추가로 인한 환경향량(1.02E-04Pt.)이 증가하였다. 생산단계에서의 총 환경향량을 비교해보면 중공소결 캐스프트 생산공정의 환경향량은 3.77E-04Pt이며 경량 알루미늄 캐스프트 생산공정의 환경향량은 3.41E-04Pt로 전체 환경향량은 감소되었다.

2.4.3 폐기단계

폐기단계에서는 캐스프트의 분리 및 재활용은 데이터 부족으로 인해 제외하였다. 그러나 차량의 비철금속과 철금속의 분리 작업이 대부분 수작업으로 이루어지기 때문에 이에 대한 환경향량은 크지 않 것으로 판단된다. Figure 7은 폐기 단계에서의 환경향량을 비교해본 그래프이다. 중공소결 캐스프트의 재활용 단계는 캐스프트 전량을 고려로 재활용하여 철금을 생산하는 공정을 적용하였다. 고철 재활용 시 발생하는 환경부하와 회수효과로 설정해준 철금의 환경부하가 각기 때문에 종합적인 환경부하는 0Pt로 나왔다. 경량 알루미늄 캐스프트의 재활용 공정에서는 사프트 부분 알루미늄 스크랩 부분과 소형재 부분인 스크램스틱 부분으로 분리해서 재활용공정에 적용을 하였다. 이러한 분리를 위해서 과정공정을 거치게 되는데 본 연구에서 데이터 부족으로 인하여 과정공정에서의 영향 평가는 생략하였고 일반 고철 과제 경우와 비교해 본다면 사용하는 엔지니어의 압축력도 차이가 되므로 그 환경향량은 전체 환경향량에 비하여 적을 것으로 판단된다. 경량 알루미늄 캐스프트의 폐기단계에서의 환경부하는 재활용 후 생성되는 재활용 알루미늄 잔고 이 재활용로 만들어지는 알루미늄 잔고를 대체할 수 있기 때문에 회수효과(-2.63E-03Pt.)가 큰 것으로 나타났다.

2.4.4 전파장에서의 환경향량의 비교

중공소결 캐스프트와 경량 알루미늄 캐스프트의 전파장에 걸친 환경향량을 비교해 보자. 보기에 위해서 원료취득/생산 단계, 생산단계, 사용단계, 폐기단계의 결과들을 모두 합쳐 보았다. Figure 8은 각 단계별 환경향량을 보여주고 있고 Figure 9는 환경향량에 의한 기존의 환경향량이 감소한 부분을 보여주고 있다. 중공소결 캐스프트의 전파장에 걸친 환경향량은 6.21E-03Pt이고 경량 알루미늄 캐스프트의 전파장에 걸친 환경향량은 3.56E-03Pt이다. 소계개발을 통한 제품개발이 경량화로 인해 전파장에 걸친 환경향량이 약 43%정도 감소되고 있는 것을 보여주고 있다.
2.4.5 민감도 분석

앞서 언급한 컴퓨터의 원료체취 단계에서의 환경영향 이 중공소결 샤프트 원료체취 단계에서의 환경영향보다 월등히 높기 때문에 이들 사항단계에서 만화하는 과정

올 살펴보기 위하여, 자동차의 전파망에 걸친 영향평 가 가운데 폐기 전단계까지 자동차 수명에 따른 민감도 분석을 수행하여 보았다. 국내의 평균적인 자동차의 수명은 140,000km로 조사되었으며 본 연구에서는 이를 주행거리로 적용하였다. 본 연구에서는 주행거리에 따른 환경영향을 비교해보기 위해 Figure 10과 같은 중공소결 샤프트와 경량 알루미늄 샤프트의 주 행거리에 따른 환경영향 1차 함수 그래프를 그려보았 다. 경량 알루미늄 샤프트의 그래프와 중공소결 샤프트의 그래프 추세를 살펴보면 자동차 초기 사용단계에서는 원료재취 단계의 환경영향 부하로 인해 중공 소결 샤프트의 환경부하가 적은 것으로 나타났으나 주행거리가 증가함에 따라 점차 경량 알루미늄 샤프트의 환경부하가 적은 것으로 나타났다. 이는 사용단계에서의 경량화로 인한 원료감소와 배기가스 배출량 감소에 의한 것으로 자동차의 수명이 급격히 줄어들면 부품 경량화에 따른 환경부하 감소가 큰 것으로 조사되었다. 연구 결과에 따르면 그래프의 교차점인 120,000km 지점에서 경량화로 인한 환경영향이 약하 지는 점을 찾을 수 있었다. 이는 다시 말해서 최소한 120,000km 이상 주행을 해야 경량화에 따른 환경상 이익을 볼 수 있다는 것이다.

3. 결론

본 연구에서는 자동차 엔진 부품 중 샤프트의 경량화로 인해 전파망에 걸친 환경영향을 정량적으로 비
교재 보았다. 본 연구에서 제시되었던 중량 소결 캐나드 프트와 경량 알루미늄 캐나드 프트의 경우를 보면 원료제 취/생산 및 생산단계에서는 새로운 소재 개발로 인한 환경부하가 기존의 제품에 대한 환경부하보다 높게 나타났지만 사용단계에서의 경량화와 폐기단계에 서의 재활용의 영향으로 오히려 생산단계에서의 환경 영향을 많이 상쇄시켜주는 결과를 얻어 볼 수 있었다. 또한 사용단계에서의 자동차 수명에 따른 인감도 분석 에서 자동차의 수명이 길수록 부품 경량화에 따른 환경 저감효과가 큰 것으로 나타났다. 이는 국내 자동차 폐 차 주기가 평균 140,000km(7~8년) 정도 조사되었으 나 실제로는 수 년 자격차를 오래 탈수록 경량화에 대한 환경상 이득을 얻을 수 있는 것으로 조사되었다. 또한 이러한 연구결과로 인해 자동차 부품의 경량화와 폐기단계에서의 재활용을 높여주는 연구개발의 동인 을 가져와 줄 수 있는 계기가 되었으며, 자동차 부품 산업의 환경 친화적인 제품설계에 참고가 될 수 있는 계기가 되기를 기대한다.

사 사
□ □ 본 연구는 「자동차 부품산업의 중소기업형 동
합환경경영 및 첨단생산 시스템 구축 사업」의 일환
으로 진행된 연구 결과임.

참고문헌

1) Life Cycle Inventory for the Golf A4, George W.
Schweimer, Marcel Levin
2) 환경 전과정보리(LCA)의 이론과 지침, 이진호와 2권,
1998
3) 자동차 부품 산업의 중소기업형 통합환경경영 및 첨정
생산시스템 구축 (1차년도 중간보고서), 산업자원부,
2004
4) 다이나믹스 통계영역의 MLCA기법의 적용 및 평가
(최종 보고서), 산업자원부, 2003
5) 자동차 부품 및 반제품의 환경성분석 시스템 개발 및
기술적·환경적 활용 방안, 기술표준원, 2002
6) 자동차, 공업기술, 강기주, 2003