

중공소결 및 경량 알루미늄 캠샤프트의 전과정에 대한 환경성 비교

이문구, 정재수, 임송택, *김세광, **임창호, **조연행

((주)에코아이, *한국생산기술 연구원, **산업기술시험원)

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 캠샤프트와 소재개발에 의해 연구된 경량 알루미늄 캠샤프트의 전과정에 걸친 환경영향을 비교해 봄으로써 소재개발에 의한 환경영향과 사용단계에서의 경량화로 인한 환경영향을 규명해보았다. 또한 사용단계에서의 자동차 운행거리에 따른 환경영향에 대한 민감도 분석을 통하여 부품 경량화로 인한 환경적인 이득과 주행거리와의 연관관계에 대하여 규명해보았다. 중량 소결 캠샤프트와 경량 알루미늄 캠샤프트의 전과정 비교평가 결과는 원료채취/생산 및 생산단계에서는 새로운 소재 개발로 인한 환경부하가 기존의 제품에 대한 환경부하보다 월등히 높게 나타났지만 사용단계에서의 경량화와 폐기단계에서의 재활용의 영향으로 오히려 생산단계에서의 환경영향을 많이 상쇄시켜 주는 결과를 얻어 낼 수 있었다.

주제어 : 캠샤프트, 전과정평가, 중공소결, 알루미늄 다이캐스팅

1. 서 론

자동차업체에서는 사용단계에서의 연료소모량과 배기가스 배출량을 줄이기 위해 차체의 경량화를 통한 환경친화적 제품생산에 많은 노력을 기울이고 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 캠샤프트와 소재 개선을 통해 경량화된 경량 알루미늄 캠샤프트의 전과정평가를 통한 환경영향을 비교 해 봄으로써 소재개선과 경량화로 인한 환경상의 영향을 정량적으로 비교, 평가하고자 한다.

2. 연구내용

2.1 개요

2.1.1 캠샤프트 일반

엔진 동력계의 주요 부품인 캠샤프트(Cam Shaft)는 반복적인 회전운동을 통해 흡/배기밸브를 개폐시키는 로커암, 타펫, 푸시로드 등에 순차적으로 동력을 주어 주기적인 정확한 타이밍으로 밸브를 개폐하도록 만들어져 있다. 특히, 자동차 엔진의 캠샤프트는 크랭크샤프트의 회전력을 전달받아 연소실의 흡기 및 배기 밸브의 개폐시기를 조절하는 부품으로서 저온 및 고온(-15~120℃)영역에서 고회전(750 ~ 4,500 RPM), 회전 굽힘 피로 및 윤활 마모 등의 악조건에서 사용되는 부품이다. 이러한 캠샤프트는 DOHC 엔진에는 흡기와 배기의 전용 캠샤프트 각 1본씩을 사용하고, SOHC에서는 흡배기를 1본의 캠샤프트로 행해지기 때문에 흡배기 밸브의 수만큼 캠이 구비되어져 있다. 또 최근에 탑재가 확대되고 있는 V 형 엔진에 있어서는, SOHC가 2본, DOHC에서는 4본으로 되어있다.



Figure 2. 캠샤프트

2.1.2 중공소결 캠샤프트

종래 내연기관에 사용되는 캠샤프트는 칠드주철(chilled cast iron)로 만들어져 왔으나, 이와 같은 주철재 캠샤프트는 엔진의 고성능화 및 경량화를 계속적으로 추구하고 있는 요구조건을 더 이상 만족시킬 수가 없게 되었다. 즉, 종래 캠샤프트는 캠, 축을 모두 동일 재료로 사용하여 일체형의 봉형을 이루어져 있었으며, 이 경우의 소형법으로는 주철주물이 특수강 단조로 되어있는 것이다.

엔진의 고성능화 및 경량화의 일환으로 개발된 조립식 공법에 의한 캠샤프트를 제조하는 방법 중, 중공

소결 캠샤프트는 분말 금속(POWDER METAL)을 이용하여 소결재 캠을 사용하는 조립식 캠샤프트이며 중공으로 되어 있고, 주조법이나 단조법으로서는 소형이 어려운 폭이 좁은 캠에도 적용할 수 있기 때문에 큰폭의 경량화가 실현 될 수 있는 것 외에 부품형상의 설계 자유도나 재료 선정의 자유도가 크고, 캠과 캠사이의 간격을 자유로이 설계가 가능한 특징을 갖고 있다. 또한, 상기 중공소결 캠샤프트 소결재 재료 많이 사용되고 있는 PFC1, PFC2, PFC4 등은 크롬(Cr) 주체의 고경도 탄화물이 베이나이트 기지조직 중에 균일하게 분산해, 고면압하에서 내피칭, 내마모에 뛰어난 결과를 보여주고 있다. 따라서, 이러한 중공소결 캠샤프트는 투자비가 저렴하고 환경친화적이며 공정이 간소화되어 불량률을 줄이고 비용 또한 절감할 수 있는 장점을 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, 종래 중공소결 캠샤프트에서 샤프트부가 스틸튜브로 제조되던 것을 변경하여 스틸튜브에 비해 상대적으로 더 가벼운 알루미늄 합금이 샤프트부를 이루는 것을 기술적 특징으로 하고 있다.

경량 알루미늄 캠샤프트의 제조 방법은 캠부가 캠 피어스들로 별도 제작하고, 이렇게 별도로 제작된 캠 피어스들을 금형 내에 인서트 삽입한 후 알루미늄 주조공법을 통해 용융된 알루미늄 합금을 금형에 주입하여 캠피어스들과 샤프트부(저널부)를 일체로 성형한다. 여기서, 캠피어스들과 샤프트부가 금형 내에서 일체로 성형될 때, 캠피어스들과 샤프트부의 접합부위에서 접합강도를 높여주기 위한 샤프트부의 직경보다 더 크게 형성되면서 각각의 캠피어스들 측면에 접하는 보강리브 형태의 접합부가 성형되는 것을 특징으로 한다. 이때, 캠피어스들은 분말 금속을 이용한 분말캠 제조방식, 단조 성형되는 단조캠 제조방식 중 어느 하나로 제조 가능하나, 분말캠 방식으로 제조하는 것이 바람

직하다. 그리고, 상기 주조공법으로는 일반적인 중력주조공법, 일반적인 다이캐스팅 공법, 스퀴즈 캐스팅공법, 세미솔리드 캐스팅공법 중 어느 하나를 사용하는 것이 가능하나, 다이캐스팅 공법을 사용하는 것이 바람직하다.

2.2 비교 시나리오 작성

중공소결 캠샤프트와 경량 알루미늄 캠샤프트의 환경상의 영향을 위하여 원료채취 단계에서부터 폐기 단계(cradle to grave)까지 시스템 경계를 설정하여 본 연구를 진행하였다. 또한 본 연구는 중공소결 캠샤프트 생산업체의 R&D 차원에서 연구된 과제이고 경량 알루미늄 캠샤프트는 같은 회사의 개량된 신 제품모델이다.

2.2.1 원료채취 및 원료생산 단계/캠샤프트 생산단계

Table 1에서는 생산 전 단계 및 생산단계에서의 중공소결 캠샤프트와 경량 알루미늄 캠샤프트의 비교 조건들을 정리하였다. 생산 전 단계는 원료 채취 단계와 채취 한 원료로 소재를 생산하는 단계를 포함하고 생산 단계에서는 캠샤프트를 생산하는 단계를 포함하고 있다.

중공 소결 캠샤프트 생산공정은 소결재료로 캠을 성형한 후 steel 샤프트와 캠을 조립하여 소결로에서 함께 소결을 한다. 소결공정에서는 금속분말을 정량적으로 혼합, 성형하여 1000℃의 소결로에서 가열하여 서로 단단히 밀착하여 고결(固結)하는 공정을 말한다. 그 후 절삭, 연삭과정을 거쳐 규격화된 중공 소결 캠 샤프트가 생산된다.

경량 알루미늄 캠샤프트 생산공정은 캠을 소결하고 알루미늄 다이캐스팅 공정으로 샤프트를 생산한다. 여기서는 캠과 샤프트가 함께 소결되는 중공소결 캠샤프트 생산공정과 달리 캠만이 따로 소결이 되면 샤프트는 알루미늄 다이 캐스팅 공정을 통하여 만들어지며 다이캐스팅 금형 안에서 소결캠과 샤프트의 접촉이 이루어진다. 경량 알루미늄 캠샤프트 생산공정은 중공 소결 캠샤프트 생산공정과 비교하여 알루미늄 다이캐스팅 공정이 추가되나 캠의 효율적인 소결로 인해 소결로에서 사용되는 전력량을 절감시킬 수 있으며 단위

시간 당 생산량의 증가를 도모할 수 있을 것으로 판단된다. Figure 2는 중공소결 캠샤프트와 경량 알루미늄 캠샤프트의 생산공정도이다.

Table 1. 원료채취 및 생산단계에서의 비교 시나리오

	중공소결 캠샤프트	경량 알루미늄 캠샤프트
생산 전 단계	원료 채취 및 Steel shaft 생산, 소결재 생산	원료채취 및 Al 잉곳 생산, 소결재료 생산
생산단계	중공소결 방식	소결 방식 + Al 다이캐스팅
제품중량	1.94kg(1EA)	0.984kg(1EA)



Figure 3. 중공소결 캠샤프트와 경량알루미늄 캠샤프트 생산공정도

2.2.1 사용단계

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

- 캠샤프트의 사용수명은 140,000km 주행을 설정하였다.
- 중공소결 캠샤프트가 사용되는 차량의 중량은 2,060kg이며, 연비는 10km/l 로 설정하였다.
- 경량 알루미늄 캠샤프트가 사용되는 차량의 중량은 2058.1kg으로 가정하였고 연비는 중공소결 캠샤프트 차량의 연비와 비례하여 가정하였다.
- 차량 운행 시 배출되는 배출가스 데이터는 IDEMAT 2001의 디젤 차량 D/B를 사용하였다.
- 사용단계에서 소모되는 연료 소모량과 발생하는 배기가스 배출량은 캠샤프트의 중량을 할당 인자로 하여 할당하였다.

2.2.2 폐기 단계

폐기단계 시나리오에서는 폐차(dismantling)부분을 데이터 부재로 인하여 고려하지 못했으며 캠샤프트의 재활용(금속 재활용) 부분만을 고려하였다. 중공 소결 캠샤프트는 고철로 재활용이 되고 회피효과로 철근을 가정하였다. 경량 알루미늄 캠샤프트는 캠 부분은 고철 재활용 공정에서 처리되고 알루미늄 샤프트 부분은 알루미늄 스크랩 재활용 공정에서 처리되는 것으로 하였고 회피효과(avoid effect)는 알루미늄 잉곳을 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 2. 전과정평가의 주요내용

	중공소결 캠샤프트	경량 알루미늄 캠샤프트
기능	엔진에서의 캠샤프트의 기능	엔진에서의 캠샤프트의 기능
기능 단위	중공소결 캠샤프트 1EA(1.940kg)	경량 알루미늄 캠샤프트 1EA(0.984kg)
시스템 경계	원료채취부터 폐기단계	원료채취부터 폐기단계

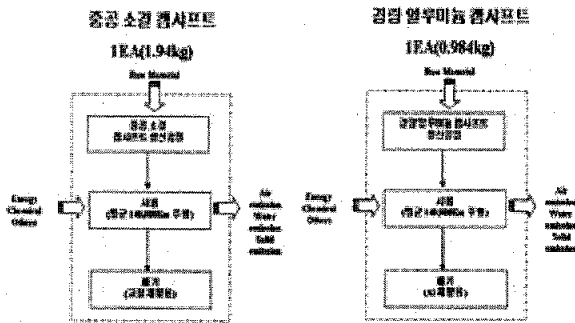


Figure. 4 중공소결 캠샤프트와 경량 알루미늄 캠샤프트의 시스템 경계

2.4 전과정 영향평가

본 연구에서는 산업 자원부에서 개발한 한국형 환

경영향평가지수 방법론을 사용하였으며, 전과정 단계별 영향을 비교하기 위해 가중치를 적용한 환경영향평가 지수를 사용하였다. 전과정평가(LCA)를 분석하기 위해 LCA Software Sima Pro 5.1을 이용하였다.

2.4.1 원료채취 및 원료생산단계

원료채취 및 원료생산 단계에서는 소결재료와 샤프트재료의 환경영향을 비교하였다. 두 캠샤프트 모두 캠 부분의 소결재료는 같기 때문에 환경영향의 차이는 없었고 샤프트 재료인 스틸 재질과 알루미늄 합금 재질의 환경영향은 Figure 4와 같은 차이를 보였다. 경량 알루미늄 캠샤프트의 주원자재인 알루미늄 잉곳의 생산단계, 특히 알루미늄 원료채취 단계에서의 과도한 에너지 사용 때문에 중공소결 캠샤프트의 주원료인 주철에 비해 환경영향이 월등히 큰 것으로 나타났다. 이로 인해 원료채취 및 원료 생산단계의 결과는 중공소결 캠샤프트(9.63E-04Pt.)보다 경량알루미늄 캠샤프트(3.07E-03Pt.)의 환경영향이 증가한 것으로 나타났다. 원료채취 및 원료 생산단계에서만 결과를 본다면 소재 개선으로 인한 환경영향은 200%이상 증가한 것으로 나타났다.

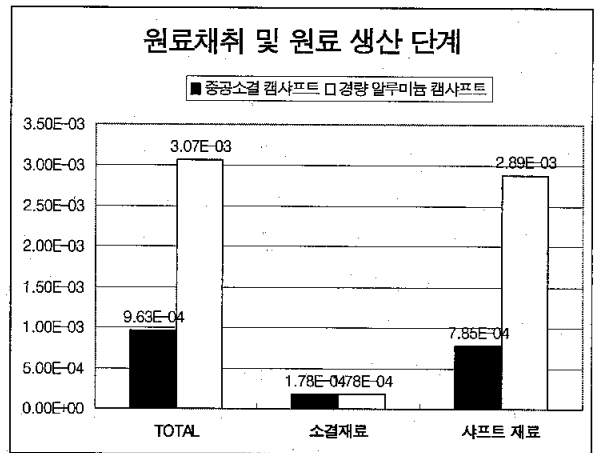


Figure 5. 원료채취 및 원료생산단계에서의 환경영향평가 비교

캠샤프트의 생산단계에서의 환경영향평가 결과는 Figure 5에서 나타내었다. 경량 알루미늄 캠샤프트 생산공정에서 소결공정의 단위 생산량 당 전력사용량의 감소로 인해 전기부분의 환경영향은 감소

(1.46E-04Pt. 감소)하였으나 알루미늄 다이캐스팅 공정 추가에 의한 환경영향(1.02E-04Pt.)이 증가하였다. 생산단계에서의 총 환경영향을 비교해보면 중공소결 캐사프트 생산공정의 환경영향은 3.77E-04Pt.이며 경량 알루미늄 캐사프트 생산공정의 환경영향은 3.41E-04Pt.로 전체 환경영향은 저감 되었다.

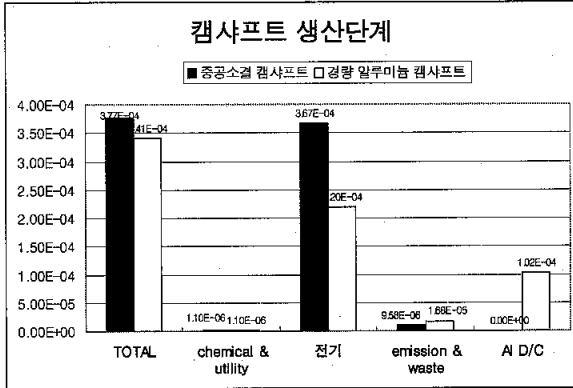


Figure 6. 생산단계에서의 환경영향결과 비교

2.4.2 사용단계

국내 평균 폐차연수는 99년도 건설교통부 자료에 의하면 140,000km(7~8년)이었으며 이를 사용단계에 적용하였다.

Figure 6에서는 사용단계에서의 중공소결 캐사프트와 경량알루미늄 캐사프트의 환경영향 결과를 나타내었다. 차량 경량화에 따른 연료 소모량의 감소와 배출가스 감소로 인해 경량 알루미늄 캐사프트의 환경영향이 2.4E-03Pt. 감소하였다.

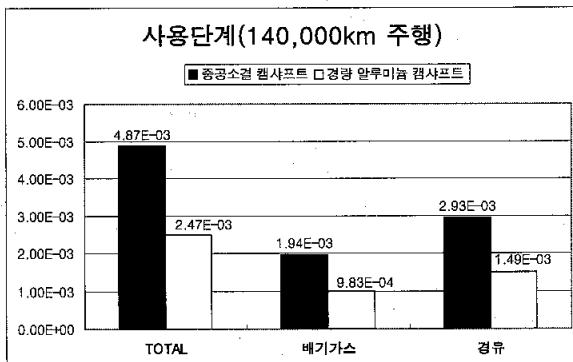


Figure 7. 사용단계에서의 환경영향 결과 비교

2.4.3 폐기단계

폐기단계에서는 캐사프트의 분리 및 파쇄공정은 데이터 부재로 인해 제외시켰다. 그러나 차량의 비철금속과 철금속의 분리 작업이 대부분 수작업으로 이루어지기 때문에 이에 대한 환경영향은 크지 않을 것으로 판단된다. Figure 7은 폐기 단계에서의 환경영향을 비교해본 그래프이다. 중공소결 캐사프트의 재활용 단계는 캐사프트 전량을 고철로 재활용하여 철근을 생산하는 공정을 적용하였다. 고철 재활용 시 발생하는 환경부하와 회피효과로 설정해준 철근의 환경부하가 같기 때문에 종합적인 환경부하는 0Pt.로 나왔다. 경량 알루미늄 캐사프트의 재활용 공정에서는 샤프트 부분인 알루미늄 스크랩 부분과 소결캠 부분인 스틸 스크랩 부분으로 분리해서 재활용공정에 적용을 하였다. 이러한 분해를 위해서 파쇄공정을 거치게 되는데 본 연구에서 데이터 부재로 인하여 파쇄공정에서의 영향 평가는 생략하였고 일반 고철 파쇄 경우와 비교해 본다면 사용되는 에너지의 양이 중량비로 할당이 되므로 그 환경영향은 전체 환경영향에 비하여 적을 것으로 판단된다. 경량 알루미늄 캐사프트의 폐기단계에서의 환경부하는 재활용 후 생산되는 재활용 알루미늄 잉곳이 원료채취로 만들어지는 알루미늄 잉곳을 대체할 수 있기 때문에 회피효과(-2.63E-03Pt.)가 큰 것으로 나타났다.

2.4.4 전과정에에서의 환경영향의 비교

중공소결 캐사프트와 경량 알루미늄 캐사프트의 전과정에 걸친 환경영향을 비교해 보기 위해서 원료채취/생산 단계, 생산단계, 사용단계, 폐기단계의 결과들을 모두 합쳐 보았다. Figure 8은 각 단계별 환경영향을 보여주고 있고 Figure 9는 회피효과에 의해 기존의 환경영향이 감소한 부분을 보여주고 있다. 중공소결 캐사프트의 전과정에 걸친 환경영향은 6.21E-03Pt.이고 경량 알루미늄 캐사프트의 전과정에 걸친 환경영향은 3.56E-03Pt.이다. 소재개선을 통한 제품개발이 경량화로 인해 전과정에 걸친 환경영향이 약 43%정도 감소되고 있는 것을 보여주고 있다.

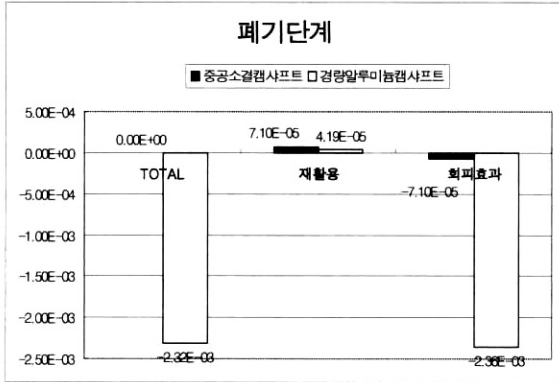


Figure 8. 폐기단계에서의 환경영향 결과 비교

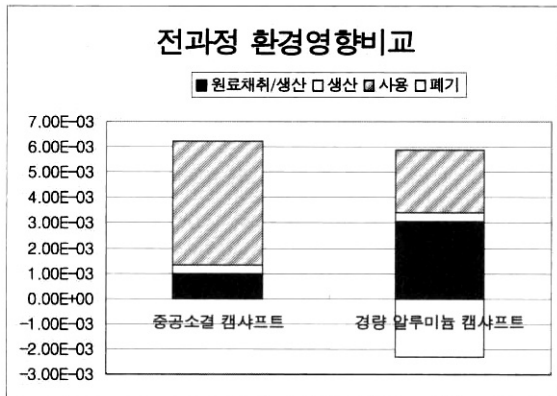


Figure 9. 전과정 환경영향평가 비교

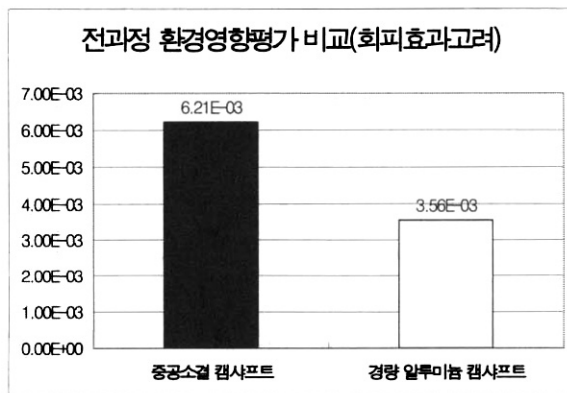


Figure 10. 전과정 환경영향평가 비교(회피효과고려)

2.4.5 민감도 분석

알루미늄 캠샤프트의 원료채취단계에서의 환경영향이 중공소결 샤프트 원료채취단계에서의 환경영향보다 월등히 높기 때문에 이를 사용단계에서 만회하는 과정

을 살펴보기 위하여, 자동차의 전과정에 걸친 영향평가가 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 캠샤프트와 경량 알루미늄 캠샤프트의 주행거리에 따른 환경영향 1차 함수 그래프를 그려보았다. 경량 알루미늄 캠샤프트의 그래프와 중공소결 캠샤프트의 그래프 추세를 살펴보면 자동차 초기 사용단계에서는 원료채취 단계의 환경영향 부하로 인해 중공소결 캠샤프트의 환경부하가 적은 것으로 나타났으나 주행거리가 증가함에 따라 점차 경량 알루미늄 캠샤프트의 환경부하가 적은 것으로 나타났다. 이는 사용단계에서의 경량화로 인한 연료감소와 배기가스 배출량 감소에 의한 것이고 자동차의 수명이 길어질수록 부품 경량화에 따른 환경부하 저감효과가 큰 것으로 조사되었다. 연구 결과에 따르면 그래프의 교차점인 120,000km 지점에서 경량화로 인한 환경영향이 같아지는 점을 찾을 수 있었다. 이는 다시 말해서 최소한 120,000km 이상 주행을 해야 경량화에 따른 환경상 이익을 볼수 있다는 것이다.

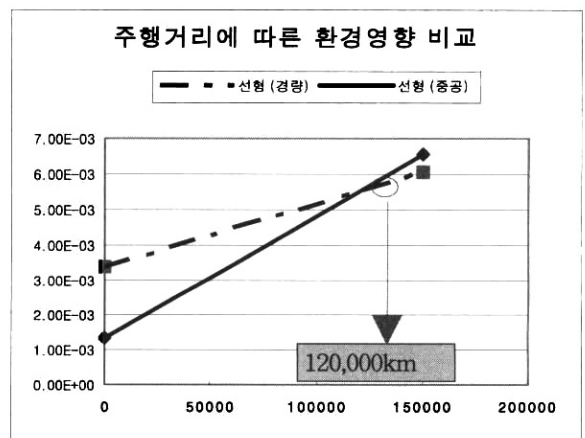


Figure 10. 주행거리에 따른 환경영향 비교

3. 결론

본 연구에서는 자동차 엔진 부품 중 캠샤프트의 경량화로 인해 전과정에 걸친 환경영향을 정량적으로 비

교해 보였다. 본 연구에서 제시되었던 중량 소결 캐사프트의 경량 알루미늄 캐사프트의 경우를 보면 원료채취/생산 및 생산단계에서는 새로운 소재 개발로 인한 환경부하가 기존의 제품에 대한 환경부하보다 월등히 높게 나타났지만 사용단계에서의 경량화와 폐기단계에서의 재활용의 영향으로 오히려 생산단계에서의 환경영향을 많이 상쇄시켜주는 결과를 얻어 낼 수 있었다. 또한 사용단계에서의 자동차 수명에 따른 민감도 분석에서 자동차의 수명이 길수록 부품경량화에 따른 환경저감효과가 큰 것으로 나타났다. 이는 국내 자동차 폐차 주기가 평균 140,000km(7~8년) 정도 조사되었으나 실제로는 좀 더 자동차를 오래 탈수록 경량화에 대한 환경상 이득을 얻을 수 있는 것으로 조사되었다. 또한 이러한 연구결과로 인해 자동차 부품의 경량화와 폐기단계에서의 재활용율을 높여주는 연구개발의 동인을 가져다 줄 수 있는 계기가 되었으며, 자동차 부품산업의 환경 친화적인 제품설계에 참고가 될 수 있는 계기가 되기를 기대한다.

사 사

□□ 본 연구는 「자동차 부품산업의 중소기업형 통합환경경영 및 청정생산 시스템 구축 사업」의 일환으로 진행된 연구 결과임.

참고문헌

- 1) Life Cycle Inventory for the Golf A4, George W. Schweimer, Marcel Levin
- 2) 환경 전과정평가(LCA)의 이론과 지침, 이진모외 2명, 1998
- 3) 자동차 부품 산업의 중소기업형 통합환경경영 및 청정생산시스템 구축 (1차년도 중간보고서), 산업자원부, 2004
- 4) 다이캐스팅 공정에서의 MLCA기법의 적용 및 평가 (최종 보고서), 산업자원부, 2003
- 5) 자동차 부품 및 반제품의 환경성개선 시스템 개발 및 기술이전 확산 방안, 기술 표준원, 2002
- 6) 자동차. 공업기술, 강기주, 2003