

제품 전과정평가와 탄소발자국 산출을 통한 타이어 산업에서의 제품 환경전략 수립

곽인호, 박지형, 이영설, 설소영, *강경규, *김종윤, *신호현, *장선미, *양승룡, *이상신
(주)에스오알지 지속가능전략연구소, *㈜한국타이어

Environmental Strategy for Sustainability of Tire Industry Using Life Cycle Assessment and Carbon Footprint

In Ho Kwak, Ji Hyoung Park, Young Seol Lee, So Yeong Seol, *Kyung Kyu Kang,
*Jong Yune Kim, *Ho Hyun Sin, *Sun Mi Jang, *Seong Ryong Yang, *Sang Shin Lee
Research Center of Sustainable Strategy, YESSorg Co., Ltd
*HANKOOK TIRE CO., LTD

Received: 13 August 2012 / Accepted: 19 September 2012

Abstract

As the importance of environmental strategy is gaining weight, a number of tire manufacturers are quantifying the environmental aspect of a product in order to reduce the environmental impact of the product and devise an environmental strategy for the product. In this study, the environmental impact of Passenger Car Radial(PCR) tire and Truck Bus Radial(TBR) tire was quantified using Life Cycle Assessment(LCA) and Carbon Footprint which are the two of the main methods for assessing environmental impact. Life cycle in the LCA was divided into 6 categories: raw material extraction and production phase, transportation phase, product manufacturing phase, distribution phase, use phase, disposal and recycle phase. As a result, it was found that the use phase had the highest environmental impact, and the tread showed especially high environmental impact among all parts. This study suggests a direction for environmental strategy for a product in each phases of the LCA method by analyzing case studies and utilizing the LCA and Carbon Footprint assessment done by major tire manufacturers.

기업의 지속가능전략 수립 시 환경적 전략 수립의 중요성이 강조됨에 따라 여러 타이어 제조업체에서는 타이어 제조 시 환경영향요인 저감, 제품환경전략 수립을 위해 제품의 환경성을 정량적으로 평가하고 있다. 본 연구는 대표적인 환경성 평가 tool인 LCA(Life Cycle Assessment)와 Carbon Footprint 기법을 이용해 승용차용 타이어(PCR)과 트럭 버스용 타이어(TBR) 제품에 대한 환경영향을 정량적으로 분석하였다. Life cycle은 원료 취득 및 생산 단계, 원부자재 수송 단계, 제품 제조 단계, 제품 유통단계, 사용단계, 폐기 및 재활용 단계의 6단계로 설정해 LCA를 수행하였다. 분석 결과 타이어는 사용단계에서 가장 많은 환경영향이 발생하며, 구성부품 중에서는 tread에서 가장 환경 영향이 높은 것으로 분석되었다. 사례 분석을 통해 분석된 결과와 주요 타이어 제조사들의 LCA 및 탄소배출량 산정 수행 사례를 활용해 life cycle 각 단계별로 제품환경전략 수립의 방향성을 제시하였다.

1. 서론

최근 예측할 수 없을 만큼 빠르게 변화하는 불확실한 시장 환경이 도래하고 기후변화, 제품 안정성 및 동반성장 등의 사회적 화두는 기업에게 새로운 역할을 요구하고 있다. 또한 사회 전반적인 측면에서 환경에 대한 고려가 급속도로 이루어지고 있는 가운데 기업의 전략적인 의사결정도 기존의 기술적, 경제적인 측면에서 더 나아가 환경적인 측면을 포함하지 않을 수 없게 되었다. 이에 따라 제품 생산을 통해 이윤을 추구하는 대부분의 기업들은 경제적 가치를 넘어 사회적, 환경적 가치를 창출하기 위한 여러 전략을 수립해 지속가능 발전을 도모하고 있다.

특히, 일반 소비자의 환경친화적인 제품을 구입하고 사용하려는 욕구가 증가하면서 기업은 환경친화적인 제품을 소비자에게 공급하려 노력하고 있다. 그러나 동일한 제품 중에서 어느 제품이 환경에 미치는 영향이 적은 제품인지를 파악하거나, 동일 용도의 대체 제품 중에 어떤 제품이 환경친화적인지를 결정하고 판단하는 것은 매우 어려운 일이다. 동일 기능의 제품이라도 사용하는 원료, 생산 방법, 운송 수단, 사용 방법 및 폐기 방법에 따라 서로 다른 환경영향이 발생하므로 제품의 환경성을 파악할 때는 제품의 전과정에서 발생하는 환경영향을 총체적으로 평가하여야 한다. 결국, 특정한 제품이나 서비스의 전과정에서 발생하는 환경영향과 자원 및 에너지소비량을 객관적으로 파악할 수 있는 도구가 필요하며, 이러한 요구에 가장 유용하게 이용될 수 있는 LCA기법이 널리 이용되게 되었다.

타이어는 자동차의 연비를 좌우하는 중요한 요소 중 하나로, 회전저항이 작으면서 내마모성, 제동력 등 품질도 뛰어난 친환경 타이어를 개발하기 위해 타이어 제조업체들이 역량을 집중하고 있다. 특히 EU에서 2012년 11월부터 '에너지 효율 타이어 라벨링 제도'가 의무 시행되고, 우리나라에서도 2012년 12월부터 타이어 에너지 소비 효율 등급제도가 시행에 따라 타이어의 환경성을 평가하고 제품환경전략을 수립하는데 주요 타이어제조업체들이 많은 노력을 기울이고 있다.

기업의 지속가능한 전략 수립을 위한 환경성 평가 도구로 LCA와 탄소발자국이 주로 활용되고 있으며, 타이어를 생산하는 대부분의 기업에서 이를 활용해 제품환경전략을 수립하고 있다. 본 연구에서는 LCA 기법과 탄소배출량 산정 기법을 적용해 한국에서 생산되는 타이어 중 PCR 및 TBR 제품에 대해 환경성 평가를 수행하였고, 결과 해석 및 수행사례 검토를 통해 제품환경전략 수립 방향성을 제시하였다.

2. 분석방법

2.1 전과정평가(LCA, Life Cycle Assessment)

LCA는 환경영향평가(Environmental Impact Assessment), 위험성 평가(Risk Assessment), 그리고 비용편익분석(Cost Benefit Analysis) 등과 함께 대표적인 의사결정 지원도구 중의 하나로 원료 취득에서부터 제품 생산, 운송, 사용 및 폐기까지의 제품의 전과정에서 환경에 미치는 영향을 평가하는 방법이다. 즉, 어떤 제품, 공정, 활동과 관련된 환경적 부담을 사용된 물질 및 에너지 그리고 환경에 배출된 오염물질들의 규명을 통하여 정량화하고, (이러한 에너지, 물질의 사용과 환경배출의 영향을 평가하여) 환경 개선을 위한 기회를 찾아 평가하는 일련의 과정을 의미한다.

LCA의 궁극적인 목표는 각종 환경 문제에 직면하고 있는 기업체 및 행정 기관, 소비자들의 입장에서 환경적으로 건전하고 지속 가능한 발전을 실현하기 위하여 제품, 재료 등의 원료·자원의

획득, 제조 공정, 유통, 소비 활동, 폐기로 인한 자원 및 에너지 소비 그리고 환경오염부하를 최소화하고 이에 따른 환경개선방안을 모색하는데 있다.

LCA는 Fig. 1에 나타낸 것과 같이, ISO 14040시리즈에서 규정하고 있는 목적 및 범위 설정 (Goal Definition and Scope), 목록분석(Inventory Analysis), 영향평가(Impact Assessment), 결과 해석(Interpretation)의 4단계와 보고(Reporting) 및 검토(Critical Review)로 구성된다.[1, 2]

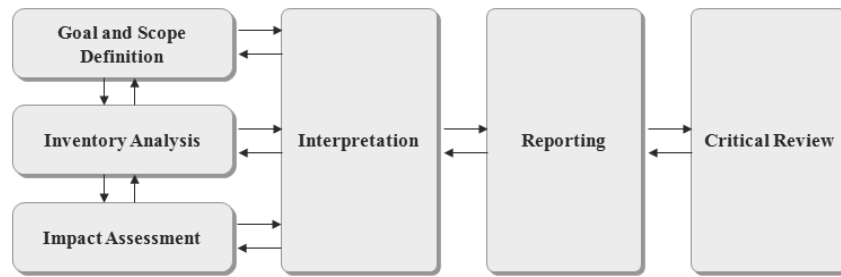


Fig. 1. LCA framework based on the ISO 14040.

2.2 탄소발자국(Carbon Footprint)

탄소발자국은 Fig. 2에 나타낸 것과 같이, 제품의 life cycle 전과정에 걸쳐 배출원(직접, 간접 포함)을 통해 배출되는 온실가스의 총량을 CO₂-e로 표현한 것으로[3] 전과정에서 활동량 데이터를 수집한 다음 수집한 활동량 데이터에 해당하는 탄소배출계수를 수집해 각각의 활동량 데이터에 해당하는 탄소배출계수를 곱하여 계산된다. 유럽, 일본 등 주요 국가에서는 제품의 탄소배출량을 정량적으로 평가해서 라벨링 제도로 운영하고 있으며, 한국에서는 탄소성적표지라는 라벨링 제도를 운영하고 있으며, 타이어제품 중에서는 현재 1개 제품이 인증을 받아 공표되고 있다.[4]

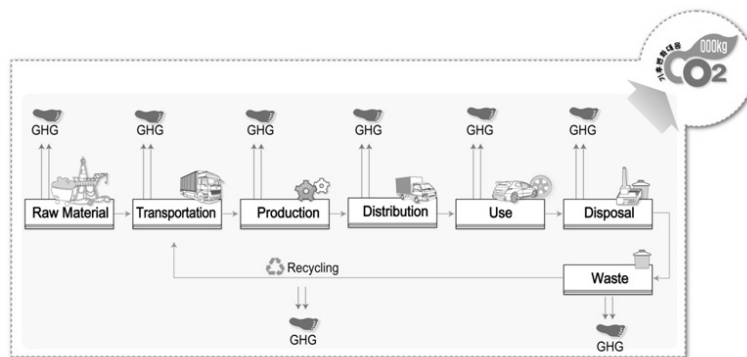




Fig. 2. The concept of Carbon Footprint.

3. 타이어 제품에 대한 LCA

3.1 목적 및 범위 설정

본 연구에서 LCA 수행목적은 Table 1.에 나타난 것과 같이, 타이어제품 전과정에 걸친 총체적 환경부하를 규명하고, 환경영향요인 저감 방안 도출 및 제품환경전략 수립을 통해 지속가능경영지표의 장기적 활용 방안 수립을 위함이며, 대상 제품은 승용차용 타이어(PCR)와 트럭 버스용 타이어(TBR)이다. 또한, 기능단위는 교체주기를 고려하여 각각 주행거리 40,000 km(사용 기간 3년), 200,000 km(사용 기간 2년)를 갖는 한국타이어에서 제조되는 타이어 제품 1개이며, 수행 범위는 Fig. 3.과 같다.

Table 1. Purpose, target product, scope and functional unit of LCA

Purpose	Designing a long-term application method of sustainability index - Devising an environmental strategy for a product - Planning of reducing the environmental impact in the manufacture of tires - Carbon Footprint Labeling	
Target Product	PCR-H430(215/60R/16H)	TBR-AH25(11R 22.5 16P)
		
Scope	Raw material extraction and production → transportation → product manufacturing → distribution → use → disposal and recycle	
Function Definition	1) Supporting and maintaining the load of a vehicle 2) Relieving various impacts against road surface 3) Maintaining the movement of a vehicle by conveying motive power, braking power and steering power of the vehicle to the road surface 4) Turning and maintaining the direction of a vehicle	
Functional Unit	One tire product with a mileage of 40,000 km(3 years)	One tire product with a mileage of 200,000 km(2 years)

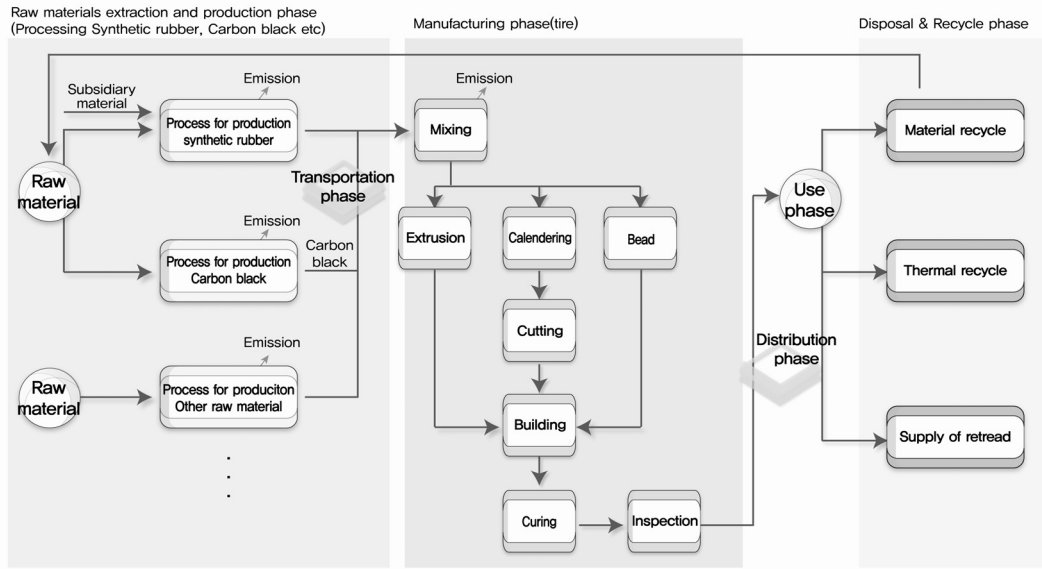


Fig. 3. Scope of the LCA of a tire.

3.2 목록분석

3.2.1 원료 취득 단계

원료 취득 단계에서 목록분석은 대상 제품이 생산되는 공정으로 공급되는 협력업체로부터 실제 자료를 조사하여 이용하는 것과 기존의 구축된 LCI DB를 동시에 이용하였다. 대상 제품의 시방서와 제품 생산 정보를 활용해 투입물질을 Table 2와 같이 정량화하고, 각 원재료에 부합하는 국가 LCI DB 및 국외 DB가 있는 경우, 해당 DB와의 부합성을 검토 후 적용하고 부합하는 LCI DB가 존재하지 않는 경우, 협력업체 조사를 통해 목록분석을 수행하였다.

Table 2. Input item and amount in the raw material extraction and production phase of PCR and TBR(per 1 product)

Input item	Unit	PCR		TBR	
		Quantity	Ratio(%)	Quantity	Ratio(%)
Synthetic rubber	kg	2.75	26.96	6.28	10.77
Carbon black	kg	2.24	21.95	13.91	23.84
Natural rubber	kg	2.08	20.35	20.23	34.67
Steel cord	kg	0.69	6.74	8.44	14.46
Silica	kg	0.52	5.09	0.04	0.08
Textile	kg	0.42	4.11	0.05	0.09
Bead	kg	0.37	3.64	3.44	5.89
Process Oil	kg	0.35	3.44	0.29	0.49
Zinc oxide	kg	0.21	2.04	1.35	2.31
Sulfur	kg	0.13	1.25	0.86	1.47
Stearic Acid	kg	0.07	0.69	0.42	0.73
Others(chemicals)	kg	0.38	3.75	3.04	5.22
Total	kg	10.21	100.00	58.3602	100.00

3.2.2 수송 단계

원부자재 수송은 대상 타이어제품의 원부자재를 납품하는 국내의 협력업체에서 대상 제품 생산 공장으로서의 수송을 고려했으며, 해상수송, 육로수송을 포함해 1년간 원부자재의 수송량과 표준거리 및 연료소비량을 이용해 톤키로법을 통해 산정하였고, 그 이하 재운송과 상하차 과정은 포함하지 않았다.

3.2.3 제품 제조 단계

협력업체에서 입고된 원재료를 이용해 타이어를 제조하고 제품 출하까지의 모든 제조공정 및 유틸리티와 환경설비를 포함해서 자료를 수집하고 제조 공정을 Fig. 4와 같이 총 7개의 단계로 구분해 제품 제조 단계 목록분석을 수행하였다.

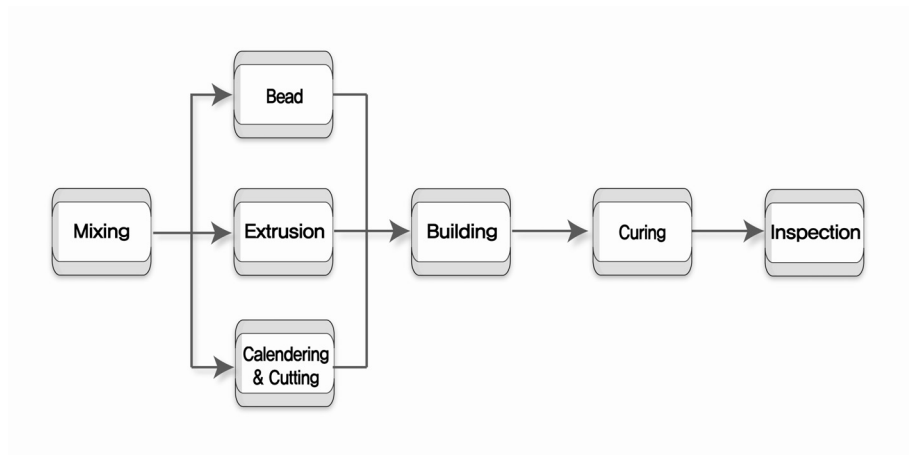


Fig. 4. Tire production process.

3.2.4 제품 유통 단계

대상 제품의 유통은 Fig. 5에 나타난 것과 같이, 크게 내수용과 수출용으로 구분하고 내수용의 경우, 공장에서 물류센터를 거쳐 대리점까지 가는 시나리오와 공장에서 물류센터를 거치지 않고 대리점으로 운송되는 시나리오로 구분하여 수행하였다. 수출용의 경우, 물류센터를 거쳐 해외 수송을 위한 부산항까지의 육로 수송과 부산항에서 선박을 통해 호주, 동남아 등지의 외항으로의 수송까지 포함하여 고려하였다. 원부자재 수송과 동일하게 그 이하 재운송과 상하차 과정은 포함하지 않았고, TBR 제품은 2011년 기준 수출량은 없기 때문에 내수용 시나리오만 고려하였다.

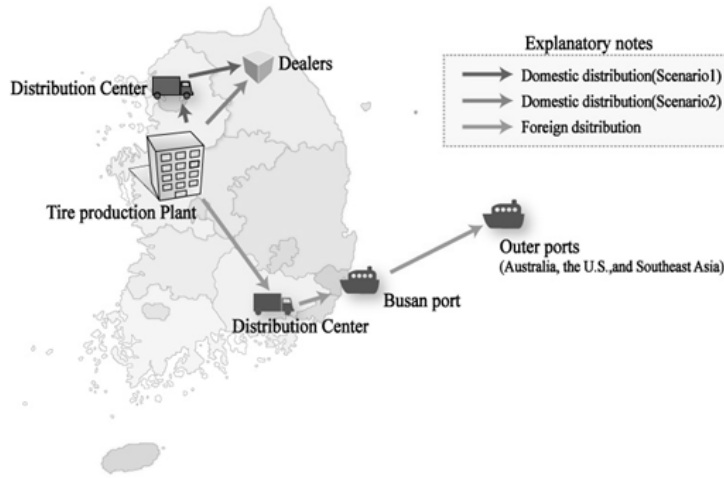


Fig. 5. Scope of distribution phase.

3.2.5 사용 단계

사용 단계는 기수행된 Michelin 타이어 LCA 수행 결과[5]와 ETRMA(European Tyre & Rubber Manufacturers' Association) 수행 결과[6]를 참고하여 Fig. 6.에 나타낸 것과 같이, 타이어 회전저항(RR, Rolling Resistance)에 따른 연료소비량과 주행 중 tread의 마모(tread debris)에 의한 2가지 요소를 고려하였다.

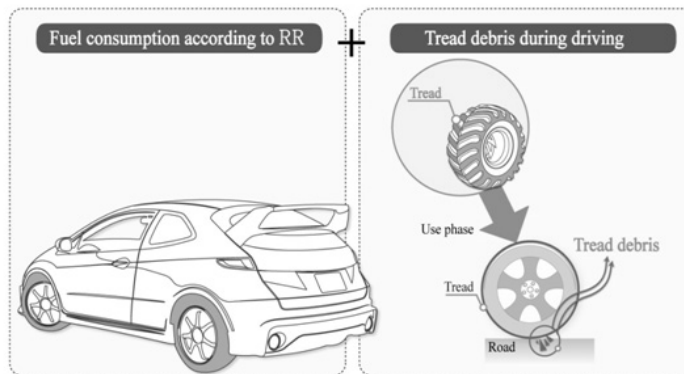


Fig. 6. Scope of use phase.

회전저항이란 연비효율에 관련된 타이어 성능으로 볼이나 타이어와 같은 둥근 물체가 평평한 평면에서 일정한 속도로 직선 운동하는 동안 발생하는 저항을 의미한다. 이 저항은 주로 물체의 변형, 표면의 변형, 또는 두 가지 모두의 변형에 의해 발생하며, 타이어의 에너지소비효율 등급을 결정하는 데 큰 역할을 하고 있다. 본 연구에서 PCR의 연료소비량은 Table 차량 주행 중 소비되는 연료소비량 중 타이어의 회전저항에 의한 연료소비량에 20%[7, 8]를 적용하고, 회전저항 감소에 따른 연료 소비 감소량에 대한 값은 Michelin 타이어에서 제공한 값[5]을 활용해 추정하였고, 사용 연료원은 해당 차종의 주 연료원인 휘발유로 산정하였다. TBR은 대상제품이 버스에만 사용되는

타이어로, 경유를 연료원으로 하는 차량의 공인연비와 회전저항에 따른 연료소비율을 이용해 연료 소비량을 산정하였다. 그 결과, PCR제품의 연료소비량은 40,000 km 주행 시 95.343 L의 휘발유를 소비하고, TBR 제품의 연료소비량은 200,000 km 주행 시 673.401 L의 경유를 소비하는 것으로 나타났다.

Table 3. Calculation of fuel-efficiency of tire according to rolling resistance

Category	Items	Official fuel efficiency (km/L)	Fuel	Total fuel consumption of vehicle(L)	Increase rate of fuel efficiency (%)	Fuel consumption per tire(L/km)	Total fuel consumption by tire(L)
PCR	Existing product	17.500 ^{a)}	Gasoline	2,286 ^{b)}	-	0.003 ^{c)}	114.286
	H430	18.100 ^{d)}		2,210 ^{b)}	3.315	0.002 ^{e)}	95.343
TBR	AH25	9.900 ^{f)}	Diesel	20,202 ^{g)}	-	0.003 ^{c)}	673.401

^{a)} Official fuel efficiency of Avante MD, official fuel efficiency issued by KEMCO[9]

^{b)} Mileage of 40,000 km

^{c)} 20% fuel efficiency according to rolling resistance applied[7, 8]

^{d)} If get certified 1st grade of a grading scheme for energy-efficiency of tires in South Korea, HANKOOK TIRE official blog[10]

^{e)} Estimated by using official fuel efficiency and increased rate of fuel efficiency[5]

^{f)} Official fuel efficiency of bus(more than 12,000 cc)[11]

^{g)} Mileage of 200,000 km

Tread의 마모는 PCR의 경우, 평균 tread 마모율과 주행거리의 곱을 이용해 산정했으며, TBR은 실측값을 이용하였다. 그 결과 Table 4.와 같이, 각각 1.20 kg, 11.84 kg으로 산정되었다.

Table 4. Calculation of tread debris during driving

Items	Tread wear(g/km)	Mileage(km)	Tread debris(kg)	Tread weight(kg/EA)	Tire wear rate(%)
PCR	0.03 ^{a)}	40,000	1.20	3.61	33.24
TBR	-	200,000	11.84 ^{b)}	16.27	72.79

^{a)} Source: PRé Consultant's 'Life Cycle Assessment of an Average European Car Tyre'(2001)[6]

^{b)} Vehicle test result

3.2.6 폐기 및 재활용 단계

타이어는 EPR(Extended Producer Responsibility) 대상 제품으로 폐타이어가 발생되면 Fig.7.과 같은 형태로 수거되어 재활용된다. 대한타이어공업협회(KOTMA, Korea Tire Manufacturers Association)에서 전국에 폐타이어 회수 처리업체를 지정하여 폐타이어를 수집 운반해 폐타이어 회수 처리업체를 통하여 수집한 폐타이어를 재활용업체에 공급토록 하고 있어[12], 직접적인 매립은 없다.



Fig. 7. Waste tire collection process in South Korea.

본 연구에서는 연구 대상 타이어의 폐기 및 재활용 단계의 수행 범위를 Table 5.에 나타낸 대한타이어공업협회에서 제공하는 폐타이어 재활용 현황 중 재활용 구성비를 적용해 폐타이어가 발생되어 수집 운반되는 과정은 제외하고 폐기 및 재활용 형태를 물질 재활용, 열에너지 재활용, 재생타이어 원단 공급의 3가지 형태로 구분하였다. 또한, 발생한 폐타이어는 전체 타이어 중량에서 tread 마모에 따른 중량 감소가 일어나므로 마모된 부분을 제외하고 전량 수집되는 것으로 가정하였고, 대상 제품이 수출되어 판매된 후 발생한 폐타이어는 국내 폐타이어 처리 비율을 동일하게 적용했으며, PCR과 TBR은 모두 동일한 비율로 처리되는 것으로 가정하였다.

Table 5. Disposal and recycle status of end-of-life tires in South Korea(2010)[12]

Category			2009		2010	
			Weight(ton)	Ratio	Weight(ton)	Ratio
KOTMA	Material recycling	Rubber powder	61,811	21.0%	59,105	18.8%
		Rope	6,113	2.1%	5,104	1.6%
		Subtotal	67,924	23.1%	64,209	20.4%
	Thermal recycling	Cement kiln	113,611	38.7%	101,643	32.3%
		TDF(Tire Derived Fuel)	34,885	11.9%	68,946	21.9%
		Pyrolysis burning	3,656	1.2%	2,105	0.7%
		Subtotal	152,152	51.8%	172,694	54.9%
	Original form reuse	Landfill	3,485	1.2%	-	0.0%
		Export	-	0.0%	-	0.0%
		Subtotal	3,485	1.2%	-	0.0%
Total			223,561	76.1%	236,903	75.3%
Third party	Retread		17,192	5.8%	22,419	7.1%
	Export(mounted on a used car)		32,732	11.1%	31,602	10.0%
	Total		49,924	17.0%	54,021	17.2%
Recycle total			273,485	93.0%	290,924	92.4%
Others			20,445	7.0%	23,780	7.6%
End-of-lifes-tire generation			293,930	100.0%	314,704	100.0%

연구 대상 제품별 페타이어 발생량은 대상 제품중량에 tread 마모량을 고려해 마모된 중량을 제외하고 Table 6.과 같이 페타이어 발생량을 산정하였다.

Table 6. End-of-lifes-tire generation in target tire product

Items	Tire weight(kg/EA) ^{a)}	Tread debris(kg/EA) ^{b)}	End-of-lifes-tire generation(kg/EA)
PCR	10.21	1.20	9.01
TBR	58.36	11.84	46.52

a) Refer to Table 1.

b) Refer to Table 4.

또한, 재자원화 형태별 이용 중량은 Table 5.에 나타난 대한타이어공업협회 통계자료 중 수출량과 미수거된 양을 제외하고 재활용되는 양의 비율을 적용하고, 기타(수거체계에 의해 파악되지 않은 페타이어 발생량)은 물질 재활용, 열에너지 재활용, 재생타이어 원단 공급의 비율로 할당하여 최종 폐기 및 재활용 단계 비율은 Table 7.과 같이 산정하였다.

Table 7. Disposal and recycle weight of end-of-life tires in target tire product

Items	Recycle Ratio(%)	PCR(kg/EA)	TBR(kg/EA)
Material recycling	24.76	2.23	11.52
Thermal recycling	66.59	6.00	30.98
Supply to retread	8.65	0.78	4.02
Total	100.00	9.01	46.52

(1) 물질 재활용(Material recycling)

페타이어 물질 재활용은 회수된 타이어를 절단하거나 파쇄하는 과정을 거쳐 고무분말 또는 빗줄 형태로 가공하여 이용하는 것을 말하며, 그 중 약 92% 정도를 차지하는 고무 분말은 다시 재가공되어 보도블럭, 자전거도로 등의 토목공사용 재료로 대부분 이용되고, 절단된 형태의 빗줄 역시 대부분 토목공사 형태로 이용된다. 따라서 본 연구에서는 발생된 페타이어를 고무 분말 등의 형태로 가공하여 토목공사에 이용하는 것을 고려하였다.

고무분말과 빗줄 형태로의 가공품은 타이어 구성성분 중 고무만을 이용하게 되며, 목록분석에 이용된 세부 자료는 기존 수행 사례(Michelin[5]과 ETRMA[6])와 동일하게 1 kg 페타이어 가공 시 합성고무 1 kg 생산을 회피하고, 분말 제조 시 투입되는 에너지를 368 kJ 사용하는 것으로 가정하였다. 또한, 고무를 절단하거나 파쇄하는데 사용되는 기계는 에너지원으로 전력을 대부분 이용하기 때문에 투입 에너지는 전량 전력으로 취급하였다.

(2) 열에너지 재활용(Thermal recycling)

발생된 페타이어의 대부분은 열에너지 생산에 투입되며, 이용 형태는 시멘트 킬른용 공급, 고품 연료제품 제조(TDF), 건류소각을 통한 열에너지 회수로 구분할 수 있다. EPA(Environmental Protection Agency)에서 발간한 보고서에 따르면[13], 1 kg의 페타이어를 이용해 열에너지 생산

시 평균 36 MJ의 열에너지가 생산되는 것으로 보고되고 있다. 본 연구에서는 EPA에서 조사해서 발표한 페타이어 이용 열에너지 생산 시 환경영향물질 DB를 이용해 목록분석을 수행하였다.

(3) 재생타이어 원단 공급(Supply to retread)

페타이어로 발생된 타이어 중 마모된 tread를 교체하는 것으로 정의되는 재생타이어 원단 공급은 수거된 페타이어 중 마모된 tread를 연구 대상 제품의 tread로 교체하는 것으로 계산하였다.

3.2.7 전과정 목록분석

전과정 목록분석은 각 단계별 투입물질, 유틸리티 사용량 등의 자료에 LCI DB를 연결해 수행되었고, 사용된 LCI DB는 지식경제부와 환경부에서 구축한 국가 LCI DB와 Ecoinvent v2.2 LCI DB를 활용하였다.

3.3 영향평가

3.3.1 영향평가(LCIA, Life Cycle Impact Assessment) 방법

영향평가 방법으로는 특성화까지는 CML2004 방법론을 이용했으며[14], 정규화와 가중화 팩터는 지식경제부에서 개발해 사용되고 있는 범용 S/W인 PASS 4.1.1에 수록된 팩터를 이용하였다. 고려된 영향범주는 Table 8.에 나타난 것과 같이 6개의 영향범주에 대한 영향평가를 수행하였다.

Table 8. Impact Category and Equivalency unit

Impact Category	Equivalency unit
ADP(Abiotic Depletion Potential)	kg antimony eq./kg
AP(Acidification Potential)	kg SO ₂ eq./kg
EP(Eutrophication Potential)	kg PO ₄ ³⁻ -eq./kg
GWP(Global Warming Potential)	kg CO ₂ -eq./kg
ODP(Ozone layer Depletion Potential)	kg CFC-11-eq./kg.
POCP(Photochemical oxidation Potential)	kg C ₂ H ₄ -eq./kg

3.3.2 분류화 및 특성화 결과

분류화는 전과정 목록분석 단계에서 작성된 전과정 목록분석표를 이용해 투입물 및 산출물의 항목에 대하여 각각의 영향범주에 해당하는 물질로 분류하는 단계로 본 연구에서는 3.3.1에서 전술한 바와 같이 6대 영향범주별로 분류화를 수행하고, CML 2004에서 제시한 특성화 factor를 이용해 Table 9.에 나타내었다.

Table 9. Result of classification & characterization in LCIA(PCR & TBR)

Item	Impact category	unit	Raw material extraction	Transportation	Product manufacturing	Distribution	Use		Disposal and recycle
							Fuel consumption	Tread debris	
PCR	ADP	kg antimony eq.	1.6.E-01	1.8.E-05	1.7.E-02	1.2.E-02	1.6.E+00	2.7.E-02	-4.6E-02
	AP	kg SO ₂ eq.	5.3.E-01	2.3.E-06	9.5.E-02	2.1.E-03	1.3.E-02	9.3.E-02	3.8E-02
	EP	kg PO ₄ ³⁻ eq.	1.4.E-01	2.7.E-07	3.6.E-03	1.8.E-04	7.6.E-04	7.3.E-03	3.2E-03
	GWP	kg CO ₂ eq.	2.4.E+01	3.1.E-04	6.9.E+00	1.8.E-01	2.1.E+02	4.2.E+00	-3.6.E+00
	ODP	kg CFC-11 eq.	1.5.E-05	1.0.E-09	4.9.E-07	4.6.E-07	1.8.E-08	2.2.E-06	-5.6E-07
	POCP	kg C ₂ H ₄ eq.	1.2.E-01	5.9.E-06	6.6.E-02	2.7.E-03	6.0.E-04	2.2.E-02	1.7E-03
TBR	ADP	kg antimony eq.	5.5.E-01	3.4.E-05	6.4.E-02	1.8.E-02	1.4.E+01	8.6.E-02	-3.0.E-01
	AP	kg SO ₂ eq.	3.1.E+00	4.3.E-06	3.4.E-01	2.2.E-03	1.7.E+00	1.4.E+00	3.5.E-01
	EP	kg PO ₄ ³⁻ eq.	3.7.E-01	5.0.E-07	1.4.E-02	2.6.E-04	2.0.E-01	1.3.E-01	3.4.E-02
	GWP	kg CO ₂ eq.	1.1.E+02	5.8.E-04	2.8.E+01	2.9.E-01	2.0.E+03	3.1.E+01	-2.3.E+01
	ODP	kg CFC-11 eq.	7.4.E-05	1.9.E-09	1.7.E-06	9.6.E-07	7.3.E-04	1.9.E-05	-3.9.E-06
	POCP	kg C ₂ H ₄ eq.	6.3.E-01	1.1.E-05	2.3.E-01	5.7.E-03	4.3.E+00	2.1.E-01	4.9.E-03

3.3.3 정규화 결과

정규화 단계는 특성화 단계를 통해 산출된 투입 및 산출물의 특성화 결과값의 상대 비교를 위해 정규화 factor를 이용하여 단위를 무차원으로 만드는 작업으로 특성화 결과값에 Table 10.에 나타난 정규화 factor를 이용해 PCR 및 TBR 제품에 대한 정규화를 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 8.과 같다.

Table 10. Noramlization factor

Impact Category	Noramalization factor	unit
ADP	24.9	kg antimony eq./person-yr
AP	39.8	kg SO ₂ eq./person-yr
EP	13.1	kg PO ₄ ³⁻ eq./person-yr
GWP	5,530	kg CO ₂ eq./person-yr
ODP	0.0407	kg CFC-11 eq./person-yr
POCP	10.3	kg C ₂ H ₄ eq./person-yr

Source: PASS 4.1.1

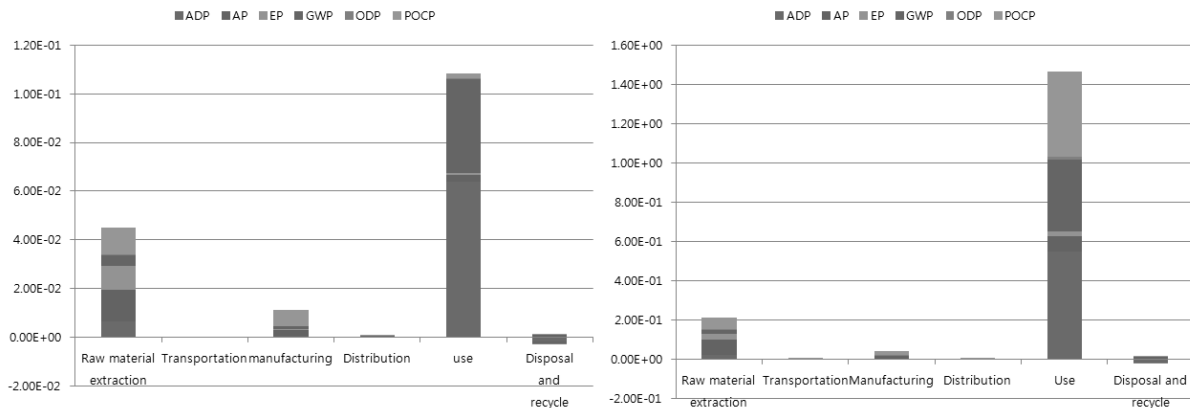


Fig. 8. Result of Noramlization in LCIA PCR(left) and TBR(right) in each phase.

3.4 결과해석

영향평가 결과는 세부 환경영향 분석과 향후 제품환경전략과 연계하기 위하여 Fig. 9에 나타낸 것과 같이, life cycle 단계별, 제조 공정별, 구성부품별, 주요 원자재별로 구분하여 가중화 결과를 활용해 분석하였다.

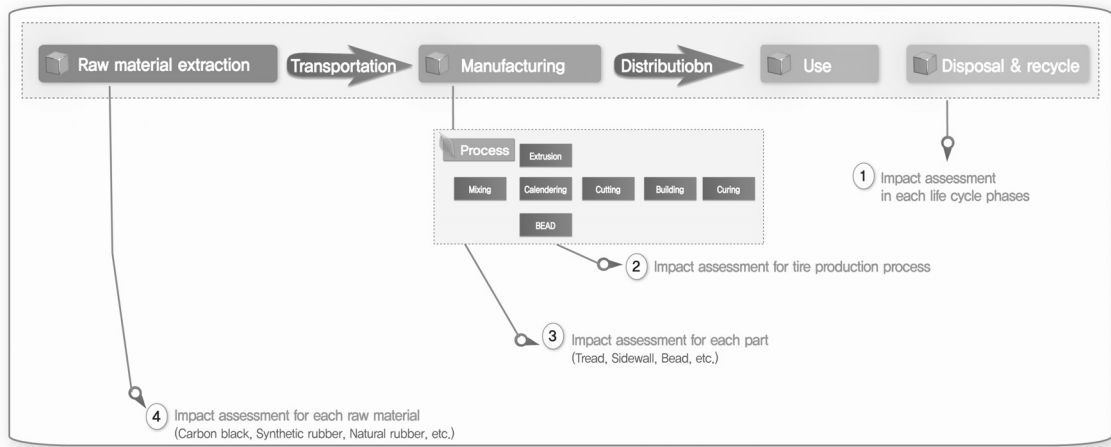


Fig. 9. The framework of result of Life Cycle Assessment interpretation.

3.4.1 Life cycle 단계별 영향평가 결과

PCR 제품과 TBR 제품의 전과정 영향평가 결과는 Fig. 10과 같고, PCR, TBR 모두 사용단계에서 각각 84%, 93%로 가장 높은 환경영향을 나타냈다. 사용 단계에서의 환경영향은 회전저항에 의한 연료소비에 따른 영향이 각각 PCR 97%, TBR 98%, tread 마모에 의한 영향이 각각 PCR 3%, TBR 2%의 비율을 차지해 회전저항 감소에 따른 제품환경전략 수립이 요구된다.

영향범주별로 기여도 분석 결과, PCR과 TBR 모두 원료 취득 단계 및 사용 단계에서 자원고갈 및 지구온난화 영향이 가장 높았으며, 수송 및 유통 단계에서는 자원고갈영향이 가장 높은 결과를 나타냈다.

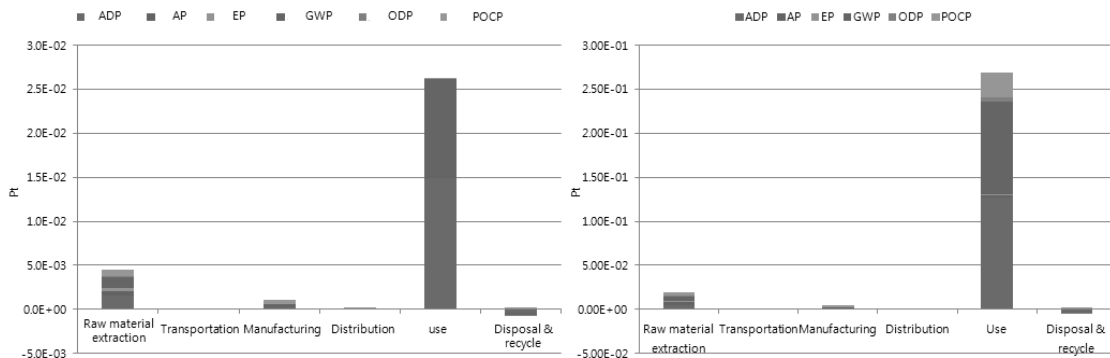


Fig. 10. Result of Life Cycle Assessment of PCR(left) and TBR(right) in each phase.

3.4.2 제조공정별 영향평가 결과

타이어 제조공정별 영향평가 결과는 Fig. 11.과 같고, PCR 제품과 TBR 제품 모두 전력과 스팀이 많이 투입되는 가류 공정에서 환경영향이 가장 높게 나타나 가류공정에서의 환경영향을 줄이기 위해 스팀 생산 시 투입되는 연료를 친환경 연료로 변경하거나 폐열회수 확대와 같은 전략 수립이 요구된다.

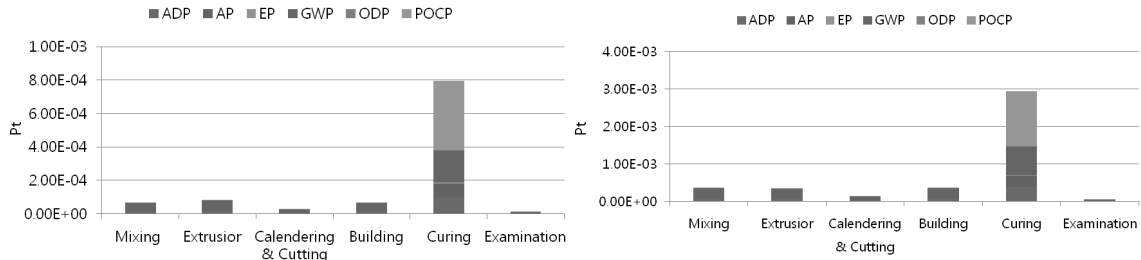


Fig. 11. Result of impact assessment of PCR(left) and TBR(right) in each tire production process.

3.4.3 구성부품(반제품)별 영향평가 결과

타이어를 구성하는 부품별 영향평가 결과는 Fig. 12.와 같고, PCR 제품과 TBR 제품 모두 tread에서 환경영향이 가장 높게 나타났으며, ADP, GWP, POCP의 환경영향이 가장 높게 나타났다

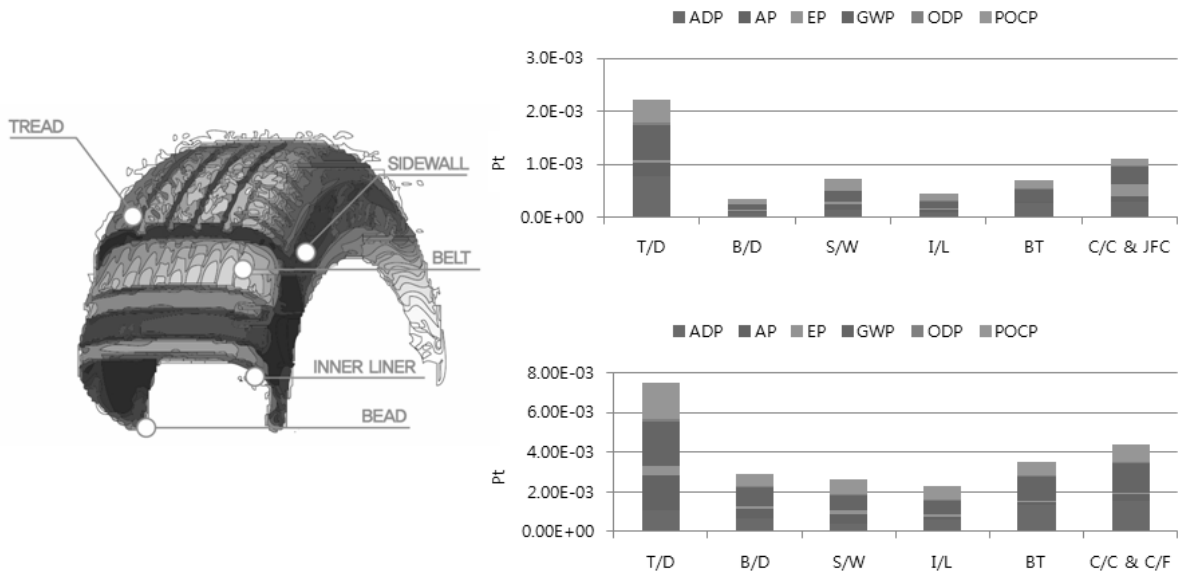


Fig. 12. Result of impact assessment of semi-manufactured parts of PCR(top) and TBR(bottom).

Fig. 12.에 나타난 환경영향은 구성부품의 중량과 구성 원재료에 따라 영향을 받을 수 있어 부품별 단위 중량 대비 환경영향을 비교해 Table 11.에 나타내었다. 그 결과 PCR은 텍스타일 코드의 재질 중 폴리에스터와 나일론에 의해 C/C & JFC의 환경영향이 크게 나타났으며, TBR은 모든 부품의 단위 중량당 환경영향이 비슷한 결과를 보였다.

Table 11. Environmental impact/weight of semi-manufactured parts of PCR and TBR

Item	Semi-manufactured parts	Weight ratio(%)	Environmental impact ratio(%)	Environmental impact/Weight(pt/g)
PCR	Tread(T/D)	36	40	0.61
	Bead(B/D)	8	6	0.42
	Sidewall(S/W)	15	13	0.48
	Inner liner(I/L)	10	8	0.45
	Belt(BT)	16	13	0.43
	Carcass(C/C) & JFC	15	20	0.74
	Total	100	100	0.54
TBR	Tread(T/D)	30	32	0.46
	Bead(B/D)	13	13	0.40
	Sidewall(S/W)	11	11	0.45
	Inner liner(I/L)	12	10	0.35
	Belt(BT)	15	15	0.42
	Carcass(C/C) & C/F	20	19	0.41
	Total	100	100	0.42

3.4.4 주요 원재료 투입 및 유틸리티 사용에 따른 영향평가 결과

타이어 제조 시 투입되는 주요 원재료 투입 및 유틸리티 사용에 따른 영향평가 결과는 Fig. 13. 과 같고, 투입량 대비 환경영향 비율은 Table 12.와 같다. 그 결과 PCR 제품은 합성고무의 환경영향이 가장 높게 나타났으며, TBR 제품은 스테아린산의 환경영향이 가장 높게 나타났다. 따라서 합성고무의 사용량 감소 및 친환경 자재로의 변경을 통한 환경전략이 요구되며, 투입량 대비 환경영향이 매우 높은 스테아린산의 경우 대체재의 개발 검토가 필요하다.

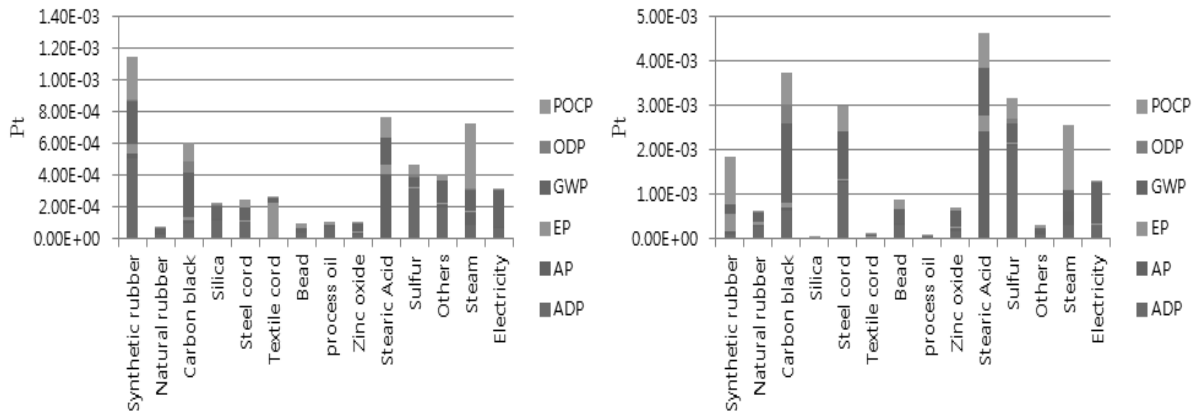


Fig. 13. Result of impact assessment of PCR(left) and TBR(right) in each raw material and utility.

Table 12. Environmental impact/weight of PCR and TBR in each raw material

Raw material	PCR			TBR		
	Weight ratio(%)	Environmental impact ratio(%)	Environmental impact/Weight (pt/g)	Weight ratio(%)	Environmental impact ratio(%)	Environmental impact/Weight (pt/g)
Synthetic rubber	27.0	25.6	0.42	23.5	9.6	0.29
Natural rubber	20.3	1.4	0.03	21.0	3.2	0.03
Carbon black	21.9	13.5	0.27	19.0	19.7	0.27
Silica	5.1	4.8	0.42	9.4	0.1	0.42
Steel cord	6.7	5.4	0.35	7.0	15.7	0.35
Textile cord	4.1	5.8	0.62	4.2	0.4	1.56
Bead	3.6	2.1	0.26	3.9	4.6	0.26
Process oil	3.4	2.3	0.30	3.9	0.4	0.30
Zinc oxide	2.0	2.4	0.50	1.9	3.6	0.50
Stearic acid	0.7	17.1	11.00	0.9	24.4	11.00
Sulfur	1.2	10.5	3.62	1.2	16.6	3.62
Others (chemicals)	3.7	9.1	1.07	4.2	1.6	0.10
Total	100.0	100.0	0.44	100.0	100.0	0.33

4. 타이어 제품에 대한 탄소발자국 산출

4.1 기본 분석 조건

타이어는 생산재로 국내 탄소성적표지 대응 시 제품 제조단계까지만 고려하여 탄소발자국을 산정하게끔 되어 있으나 본 연구에서는 LCA 수행범위와 동일하게 life cycle을 적용하였고, CO₂ 뿐만 아니라 Non-CO₂ 도 고려해 탄소배출량을 산정해 CO₂-e로 환산하여 표현하였다. 또한, 전술한 바와 같이, LCA 수행 시 전과정목록분석표 작성단계에서 산정된 탄소배출량의 결과를 활용하였다.

4.2 Life cycle 단계별 탄소발자국 산출 결과

PCR과 TBR의 life cycle 단계별 탄소발자국 산출 결과는 Table 13.에 나타낸 것과 같이, 각각 241.67 kgCO₂-e/개, 2,133.48 kgCO₂-e/개로 나타났고, 사용단계의 탄소배출량이 각각 89%, 95%를 차지해 배출량 비중이 가장 높았으며, 원료취득 및 생산, 제품 제조, 유통 단계 순으로 탄소배출량이 높게 나타났다. 각 단계별 탄소배출량 산정 결과 TBR 제품이 PCR 제품에 비해 약 8.73 배 높게 나타났고, 원료 취득 및 생산 단계에서는 약 4.46배, 제품 제조 단계에서는 약 3.97배, 유통단계에서는 약 1.61배, 그리고 사용단계에서는 약 9.34배 높게 나타났다.

Table 13. Calculation result of carbon emissions in each life cycle phase

(unit: kgCO₂-e/개)

Items	Raw material extraction & production	Transportation	Product manufacturing	Distribution	Use	Disposal & recycle	Total
PCR	24.02	<0.00	6.94	0.18	214.17	-3.65	241.67
TBR	107.05	<0.00	32.00	0.29	2,017.18	-23.04	2,133.48

5. 결론

LCA 및 탄소배출량 분석 결과 타이어는 사용단계에서 가장 많은 환경영향이 발생하며, 타이어 제조과정 중에서는 정련 공정에서 가장 환경 영향이 높은 것으로 분석되었다.

영향평가 사례 분석을 통해 분석된 결과와 주요 타이어 제조사들의 LCA 및 탄소배출량 산정 수행 사례를 활용해 life cycle 각 단계별로 다음과 같은 제품 환경 전략을 수립할 수 있다.

원료 취득 및 제품제조 단계는 전체 life cycle 중 약 14% 정도 차지하기 때문에 원자재 공급 업체 선정 시 가까운 지역에 위치한 업체를 선정함과 동시에 타이어 품질에 영향을 주지 않는 범위에서 친환경 원자재료의 변화를 꾀할 수 있다. Continental tire[15]와 Michelin tire[5]의 경우, LCA와 탄소배출량 분석 결과를 활용해 원부자재 변경(대부분 카본블랙의 실리카 대체)에 대한 환경영향 인자를 분석하고 있다. 또한, 제조과정 중 사용되는 에너지를 청정에너지로 전환하고, 공정폐기물 감소와 폐기물 재활용량 증가를 위한 전략을 수립하고 있다.

사용단계는 전체 life cycle 중 약 82 ~ 92%를 차지하기 때문에 가장 많은 제품환경전략이 수립된다. 대부분의 타이어 제조업체에서는 친환경 타이어 생산에 주력하면서 사용단계에서의 환경영향을 줄이기 위한 여러 전략들을 수립하고 있다. 특히, 회전저항(RR) 감소에 따른 연비 향상, 내구성 개선 및 소음 감소 등을 통해 타이어 사용 시 환경에 미치는 영향 최소화를 위한 여러 전략들이 수립되고 있다.

본 연구에서는 한국에서 생산되는 타이어 제품 2종에 대해 LCA와 탄소발자국을 산출하였고, 타이어 산업에서의 제품환경전략 수립 방향성을 일부 제시하였다. 하지만, 아직까지는 가정 사항이 많이 있고, 차량의 운행 상태, 운전자의 운전 습관 등에 따라 타이어의 수명과 주행 중 연료소비량 등이 결정되는 상황에서 LCA와 탄소배출량 평가를 통해 도출된 제품환경전략이 완벽하다고 이야기하기에는 무리가 있다. 하지만, 원부자재 변경, 회전저항 감소, 에너지 효율성 제고 등의 제품환경전략 수립 시 기존 대비 전략 도출에 따른 정량적인 환경성 평가의 근거자료로 LCA와 탄소배출량 산정 틀을 활용하게 되면, 향후 제품환경전략 수립에 많은 도움이 될 것이다.

Reference

- [1] International Organization for Standardization(ISO), ISO14040, in Environmental management -Life cycle assessment - Principles and framework 2006:Geneve.(2006).
- [2] International Organization for Standardization(ISO), ISO14044, in Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. 2006: Geneve.(2006).
- [3] Wright, L., Kemp, S., Williams, I. Carbon footprinting: towards a universally accepted definition. Carbon Management, 2(1), pp. 61-72.(2001).
- [4] 한국환경산업기술원 탄소성적표지(<http://www.edp.or.kr/carbon/main/main.asp>)
- [5] Austin Cobert, Environmental Comparison of Michelin Tweel™ and Pneumatic Tire Using Life Cycle Analysis, In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master's of Science in the School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology.(2009)
- [6] PRé Consultants, B., Life cycle assessment of an average European car tyre. Commissioned by The European Car Tyre Manufacturers, BLIC. Third party report.(2001).
- [7] Transportation Research Board(TRB), Tires and passenger vehicle fuel economy: informing consumers, improving performance, Special report 286, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC(2006).
- [8] Environmental Protection Agency(EPA), Emission Facts: Greenhouse Gas Emissions from a Typical Passenger Vehicle, Washington, DC.(2005).
- [9] 에너지관리공단 수송에너지(http://bpm.kemco.or.kr/transport/cl/cl_105.asp)
- [10] 한국타이어 공식블로그(<http://blog.naver.com/happydriving>)
- [11] 현대기아차 홈페이지(<http://www.hyundai.com/kr/index.do>)
- [12] 대한타이어공업협회, 폐타이어 회수현황 및 재활용현황(<http://www.kotma.or.kr/>)
- [13] Reisman, J., Air emissions from scrap tire combustion(1997).
- [14] Institute of Environmental Sciences - Leiden University (CML), Leiden, The Netherlands (<http://cml.leiden.edu/research/industrialecology/researchprojects/finished/new-dutch-lca-guide>)
- [15] Continental AG, Life Cycle Assessment of a Car Tire.(1999).