

2014



Office



Research



Farmin



International

지속가능한 수자원이용을 위한 물발자국 산정 및 적용(최종) 물발자국 산정 및 활용 매뉴얼

Water footprint estimation and application for
sustainable water resources use(final)

Water Footprint Estimation and Application Manual



농림축산식품부



한국농어촌공사

제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 매뉴얼은 “지속가능한 수자원이용을 위한 물발자국 산정 및 적용” 과제의 성과물로 물발자국의 산정 및 활용의 표준화와 물발자국 개념의 보급을 위해 작성하였으며 최종 활용서로 제출합니다.

2014년 12월

주관연구기관명 : 한국농어촌공사 농어촌연구원

연구책임자 : 신 안 국

연구 원 : 김 영 득

김 광 용

이 성 희

공동연구기관명 : 서울대학교 산학협력단

연구책임자 : 최 진 용

연구 원 : 이 상 현

위촉연구원 : 노 재 동

목 차

제1장 물발자국(Water Footprint) 산정 매뉴얼	1
1. 농작물의 물발자국 산정	3
2. 축산물의 물발자국 산정	15
3. 산업연관분석에 의한 물발자국 DB 산정	24
제2장 물발자국(Water Footprint) 활용 매뉴얼	29
1. 서문	31
2. 개요	33
3. 적용범위	36
4. 용어정의	37
5. 원칙	40
6. 수원	42
7. 제품 전과정 물발자국평가 방법론적 기본 구조	45
8. 제품 전과정 물발자국 계산	47
8.1. 물발자국 평가의 목적	47
8.2. 물발자국 평가의 범위	49
8.3. 기능단위	50
8.4. 시스템 경계	53
8.5. 데이터 수집	61
8.6. 데이터 품질	69
8.7. 데이터 검증 및 계산	72
9. 제품의 물발자국 선언	77
【참고문헌】	79

표 목차

(표 1) 하나 이상의 기능을 수행하는 제품의 예	51
(표 2) 제품별 기능단위의 예	51
(표 3) 제품군내 세부제품의 예	52
(표 4) 전과정 단계별 지역적경계의 예	55
(표 5) 누적질량 기여도에 따른 수집대상 결정방법(예시)	60
(표 6) 데이터 품질 평가표	71
(표 7) 데이터 수집 및 물질수지 검증의 예	73
(표 8) 각 투입물별 물발자국 계산 결과(예시)	78

그림 목차

<그림 1> 국가 물발자국 산정 흐름도	4
<그림 2> 산업연관표를 이용한 DB 산정 절차	24
<그림 3> 물발자국 개념 및 수원의 구분	43
<그림 4> 제품별 시스템 경계 설정의 예	58
<그림 5> 설문지 양식 PART A 예	66
<그림 6> 설문지 양식 PART B 예	66
<그림 7> 제품의 폐기 단계 시나리오	76



I. 물발자국(Water Footprint)

산정 매뉴얼

1

농작물의 물발자국 산정

- 물발자국(Water Footprint)이란 단위 제품 및 단위 서비스 생산 전과정(Life cycle) 동안 직·간접적으로 사용되는 물의 총량을 뜻하며, 가상수로부터 발생되었기 때문에 농작물의 물발자국을 산정하기 위해서는 먼저 가상수량을 이해할 필요가 있다.
- 가상수량 (VWC, virtual water content)은 작물 1 톤을 생산하기 위하여 사용된 물의 양 (m^3/ton)으로서 작물 필요수량과 생산량을 활용하여 산정된다.
- 물발자국은 최초 생산품이 최종 생산품까지 가공되는 전 과정을 포함하지만 농작물의 경우 대부분 1차 생산품을 직접 사용하기 때문에 직접수 사용량을 물발자국으로 적용한다.
- 농작물의 물발자국은 크게 4단계의 절차로 산정한다.
 - 1단계 : 작물 증발산량을 기반으로 필요수량을 산정
 - 2단계 : 필요수량과 재배면적을 적용하여 작물별 물사용량을 산정
(물사용량은 유효수량과 관개수량을 구분)
 - 3단계 : 작물별 물사용량과 생산량을 적용하여 물발자국을 산정
용수 공급원에 따라 유효수량 → 녹색 물발자국
관개수량 → 청색 물발자국
 - 4단계 : 지역별 물발자국 산정 결과와 지역별 생산량 가중치를 적용하여 대표적인 국가 물발자국을 산정
- 지역별 물발자국 산정
작물별 필요수량 산정(mm) → 물 사용량 산정 (m^3) (필요수량 × 재배면적) →
단위 생산량 당 필요수량 (물 사용량 / 생산량) = 물발자국 (m^3/ton)

■ 국가 물발자국 산정

지역별 물발자국을 생산량 가중 평균하여 국가 물발자국을 산정

지역별 물발자국 산정 → 생산량 가중치 산정 → 국가 물발자국 산정



<그림 1> 국가 물발자국 산정 흐름도

① 기준작물 증발산량 산정

- 과거 30년 기상자료 적용 (기온, 강수, 습도, 일조시간 등)
- FAO Penman-Monteith 이용
- 일 단위 기준작물 증발산량 산정

② 대상작물의 증발산량 산정

- 기준작물 증발산량과 작물계수를 곱하여 대상작물의 증발산량 산정
- 논벼의 작물계수 : Yoo et al., 2006의 연구 결과
- 밭작물의 작물계수 : FAO, 1998

③ 논벼의 필요수량 산정

- 일별 담수심법을 적용하여 필요수량 산정
- 일별 담수심의 변화를 고려하여 일별 필요수량을 산정
- 최대, 최소 담수심, 침투량, 유효수량을 고려

④ 밭작물의 필요수량 산정

- 밭작물의 경우 충분한 용수가 공급된다는 가정하에 작물이 실제로 소비하는 증발산량을 필요수량으로 간주
- 작물별 생육시기와 증발산량을 고려하여 필요수량을 산정
- 영농 기초자료 (영농시기, 생육기간 등) : 농촌진흥청 품목별 관리매뉴얼(농촌진흥청, 2009)

작물 증발산량 산정 방법

- 작물 필요수량은 증발산량을 기준으로 산정된다. 먼저 기준작물 증발산량을 산정하고 작물계수를 적용하여 해당 작물의 증발산량을 산정하게 된다.
- 이때 증발산량을 산정하는 방법을 결정하는 것이 중요하다. 본 연구에서 적용한 FAO Penman-Monteith 공식은 1965년에 제안된 Penman 공식을 보완한 것으로 공기동역학 조건에 작물 종류에 따른 기공저항 (stomatal resistance)을 포함하여 수정한 것이다. 이를 통하여 산정된 기준작물 증발산량에 작물의 생육시기별 작물계수를 적용하여 최종적으로 대상작물의 증발산량을 산정하게 된다.
- 작물계수는 논벼의 경우 Yoo et al.(2006)에 의해 우리나라에 적합하도록 연구된 작물계수를 적용하였고, 밭작물의 경우 Chapagain and Hoekstra (2004)의 연구에서도 사용하고 있는 FAO에서 제공하는 작물계수를 적용하였다. 본 연구에서는 전국의 69개 측후소의 평균기온, 평균풍속, 평균습도 및 일조시간을 이용하여 기준작물증발산량을 아래 식을 활용하여 계산하였다.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

$$ET_c = K_c \times ET_0$$

※여기서, ET_c 는 작물증발산량 (mm/day), K_c 는 작물계수 ET_0 는 기준작물증발산량 (mm/day), Δ 는 증기압 곡선의 기울기 (kPa/°C), R_n 는 순일사량 (MJ/m²day), G 는 토양 열 유속 밀도 (MJ/m²day), γ 는 건습계 상수 (kPa/°C), T 는 2 m 높이에서 일평균기온 (°C), u_2 는 2 m 높이에서 풍속 (m/s), e_s 는 포화 증기압(kPa), e_a 는 실제증기압 (kPa)이다.

- 전국 단위의 증발산량을 산정하기 위하여 69개 측후소의 평균기온, 평균풍속, 평균습도 및 일조시간을 이용하여 기준작물증발산량을 계산하였고, 작물증발산량의 경우 지역 또는 기상 조건에 따라 차이가 발생하기 때문에 티센망 (thiessen network)을 이용하여 각 시도별 작물증발산량을 추정하였다.

논벼의 필요수량 산정

- 우리나라의 경우 논벼지역의 대부분은 담수재배를 실시하고 있는데 담수재배의 경우 논벼의 필요수량은 작물 증발산량과 침투량, 강수량에 따른 일별 담수심의 변화 등을 동시에 고려한 물수지 분석을 통하여 산정된다. 이때 침투량은 재배토양의 토성 등의 영향을 받는데 우리나라의 논 토양은 대부분 상대적으로 침투량이 적은 토양이므로 약 4-6 mm/day으로 설정하였다(Jang et al., 2007).
- 작물필요수량 중 녹색 물발자국을 의미하는 유효수량은 담수심내에서만 활용되는 강우량으로 설정하였다. 이때 5mm이하의 강우량은 무효강우로 간주하였고, 유효수량은 최대담수심을 초과하지 않도록 설정하여 일별 담수심에 따른 유효수량을 산정하였다. 이와 같은 방법은 담수심에 의해 이양재배를 실시하는 우리나라에서 보다 적합한 방법으로 판단된다.
- 최종적으로 작물필요수량은 담수심과 일별 증발산량, 유효수량의 변화를 고려한 일별 물수지법을 적용하여 산정하였다. 이양재배는 작물의 생장에 따른 시기별로 용수수요량이 달라지게 되며 이를 시기별로 살펴보면 묘대기, 이앙기, 본답기 등이 있다. 묘대기는 못자리에서 묘를 키우는 과정으로 못자리 용수량이 필요하며, 이앙기는 못자리에서 본답으로 옮겨 심는 과정으로 이양용수량이 사용된다. 시기별 용수량을 지역별로 적용한 방법은 아래와 같다.

1) 묘대정지~순수묘대기

- 적은양의 못자리 용수량 및 증발산량은 고려하지 않음

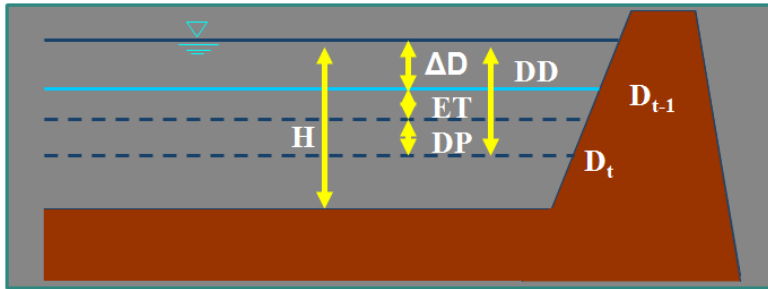
2) 이앙기 (중부지역: 5월 21일-5월 31일 / 남부지역: 6월 1일-6월 10일)

- 증발산량 고려는 없고 이양용수량의 공급량만 적용함
- 이양용수량은 140mm로 산정하고 유효수량을 적용함.

3) 본답기 (중부지역: 6월 1일-9월 30일 / 남부지역: 6월 11일-10월 10일)

- 증발산량, 침투량, 유효수량을 고려한 관계용수량을 산정함

논벼의 필요수량 산정



ET:증발산량, RO:지표유출, DP:침투량, DD:필요수량

강우량 $P = ET + RO + DP + \Delta D$
 유효우량 $Pe = P - RO = ET + DP + \Delta D \dots\dots(1)$
 $= ET + DP + \Delta D$
 $= ET + DP + H - D_{t-1} \dots\dots(2)$

감수심 $D_t = D_{t-1} - ET_t - DP_t$
 필요수량 $DD = H - D_t$
 $= H + ET_t + DP_t - D_{t-1} = Pe$
 if $DD \leq P, Pe = DD$
 if $DD > P, Pe = P$
 H : height of turnout bottom from paddy surface (changeable level for growth stages)

일별 담수심 변화에 따른 필요수량 산정 모식도

밭작물의 필요수량 산정

- 본 연구에서는 FAO Penman-Monteith법과 FAO에서 제공하는 작물계수를 사용하여 작물증발산량에 의한 필요수량을 산정하였고, 이때 토양수분에 의한 증산계수는 고려하지 않고 순수하게 작물에 의해서만 증발산량이 발생하는 것으로 설정하였다.

작물 필요수량 산정 방법 및 인자

구 분	논 벼	밭 작 물
작물 필요수량		
증발산량 산정 방법	FAO Penman-Monteith	FAO Penman-Monteith
작물계수	Yoo 등 (2008)의 연구결과	FAO 보고서
이양용수량	140 mm	-
최대담수심	70 mm	-
침투량	4.0-6.0 mm/day	-
필요수량 산정 방법	담수심에 의한 일별 물수지법	작물증발산량에 의한 필요수량 산정

STEP 2

물 사용량 산정

1 물 사용량 산정

- 물 사용량은 앞 단계에서 산정된 필요수량과 작물별 재배면적을 적용하여 산정
- 작물 통계자료 (생산량, 재배면적 등)는 농림축산식품부 통계연보를 활용하여 적용

물 사용량 산정 세부사항

- 필요수량은 단위면적 당 물 사용량의 개념이기 때문에 해당 작물의 재배면적을 적용하여 m^2 단위의 물 사용량을 산정하고 이를 물발자국에 적용한다. 본 연구에서는 농업통계연보를 활용하여 대상작물들의 재배면적을 적용하였고, 밭작물의 경우 시설재배와 노지재배 면적을 구분하여 적용하였다. 이는 노지재배는 인위적인 관개를 수행하지 않고, 시설재배는 100% 관개에 의존하기 때문에 재배면적을 구분하여 유효수량과 관개수량을 산정하였다.

물발자국에서 유효수량 및 관개수량 적용 방법

유효수량 및 관개수량

유효수량 산정 방법	일별 담수심 변화에 따른 유효수량 변화 적용	활용 가능한 전 유효수량 적용
유효수량 활용 여부	녹색 물발자국으로 활용	녹색 물발자국으로 활용
관개수량	관개수량 = 필요수량 - 유효수량	노지재배 : 관개수량 = 유효수량 시설재배 : 관개수량 = 필요수량

STEP 3**지역별 물발자국 산정****① 지역별 물발자국 산정**

- 물 사용량을 생산량으로 나누어 물발자국을 산정
- 지역마다 필요수량과 물 사용량이 다르기 때문에 지역별 물발자국을 산정
- 작물 통계자료 (생산량, 재배면적 등)는 농림축산식품부 통계연보를 활용하여 적용

② 녹색 및 청색 물발자국 산정

- 녹색 물발자국 : 물 사용량 중 강우에 의해 공급되는 수량
- 청색 물발자국 : 물 사용량 중 관개에 의해 공급되는 수량

물발자국 컴퍼넌트 정의**물발자국 컴포넌트****물발자국**

청색 물발자국	필요수량에서 유효우량을 제외한 관개수량	시설재배지에서 공급되는 관개수량
녹색 물발자국	담수심에 따라 활용되는 유효우량	노지재배지에서 활용되는 유효우량
회색 물발자국	단위 면적 당 배출부하량	-

논벼의 물발자국 산정

- 앞서 산정된 물 사용량(m^3)과 생산량(ton)을 적용하여 작물별 물발자국(m^3/ton)을 산정하였다. 이때 물발자국은 용수 공급원에 따라 녹색과 청색 물발자국을 구분된다.
- 논벼 및 밭작물에 대한 물발자국 산정할 때 작물 증발산량에 따른 필요수량 산정 방법은 가상수량 산정 방법과 동일하지만, 공급되는 필요수량을 유효수량과 관개수량을 구분하여 녹색과 청색 물발자국으로 구분하는 점에서 차이가 있다.
- 녹색 및 청색 물발자국
 - 논벼의 물수지를 통하여 산정된 작물 필요수량을 기반으로 녹색 및 청색 물발자국을 각각 산정한다. 녹색 물발자국을 의미하는 유효수량은 담수심내에서만 활용되는 강우량을 의미하므로 최대 담수심을 초과하지 않는 범위에서 일별 담수심에 따라 설정되고, 5mm 이하의 강우량은 무효강우로 간주하였다.
 - 청색 물발자국은 인위적으로 공급하는 관개수량을 의미하기 때문에 본 연구에서는 일별 담수심 및 증발산량의 변화, 유효수량의 공급가능량을 적용하여 일별 관개수량을 산정하고 총 작물 생육 기간동안의 관개수량을 합산하여 청색 물발자국으로 적용하였다. 이때 물발자국은 작물에 의해 소비되는 개념을 의미하기 때문에 이양용수량 등에 의해 작물 생육이후 토양에 잔존하는 수분량은 물발자국에서 제외하였다.

논벼의 물발자국 산정

- 회색 물발자국

- 회색 물발자국은 작물 생산을 위하여 비료를 투입하는 과정에서 강우 등으로 인하여 하천이나 지하수로 배출되는 질소 또는 인 등의 영양물질을 배출기준농도에 적합하도록 회색에 필요한 양을 의미하는데, 일반적으로 아래 식과 같이 계산될 수 있다 (Hoekstra et al., 2011).

$$WF_{grey} = \frac{(\alpha \times AR) / (C_{max} - C_{nat})}{Y}$$

※여기서, WF_{grey} 는 회색 물발자국, AR 은 단위 면적 당 비료 투입량 (kg/ha), α 는 비료 투입량 중 배출 비율, C_{max} 는 배출기준농도 (kg/m³), C_{nat} 는 자연 상태에서의 농도 (kg/m³), Y 은 단위면적당 생산량 (ton/ha)이다.

- 회색 작물필요수량을 산정하기 위하여 국내에서 이루어진 논에서의 T-N 및 T-P의 오염 배출부하량 관련 연구 결과를 조사하였고 평균 T-N 및 T-P의 배출부하량은 각각 12.90 kg/ha과 1.01 kg/ha이다. 한편 T-N과 T-P의 환경부 배출허용기준농도는 각각 40 ppm과 4 ppm이다. 따라서 T-N과 T-P를 회색하기 위하여 필요한 회색 작물필요수량은 각각 32.3 mm와 25.3 mm인데, 이 중 더 큰 값을 사용해야 하므로, 본 연구에서는 회색 작물필요수량은 32.3 mm를 추정하였다.

밭작물의 물발자국 산정

- 밭작물의 물발자국 역시 작물별 필요수량에 재배면적과 생산량을 적용하여 물발자국을 산정한다. 이때 밭작물은 노지재배와 시설재배로 구분하여 녹색과 청색 물발자국을 산정하였다. 시설재배지는 관개시설을 통하여 필요수량이 공급되고, 노지재배의 경우 유효수량을 통하여 필요수량이 공급되기 때문에 노지재배의 물 사용량은 녹색 물발자국으로 설정하고 시설 재배지의 물 사용량은 청색 물발자국으로 설정하였다.
- 밭작물의 회색 물발자국은 시설재배지 및 노지재배지의 비료 사용에 따른 오염물질 유출에 대한 보다 상세한 연구 결과가 필요하기에 본 연구에서는 고려하지 않았으며 시설재배지의 경우 작물의 필요수량만을 공급하기 때문에 비료성분의 외부 유출이 상당히 적을 것으로 예상된다.

STEP 4

국가 물발자국 산정

① 국가 물발자국 산정

- 물발자국은 단위 생산량당 작물의 소비수량으로서 작물필요수량에 의한 물 사용량과 생산량을 활용하여 산정
- 물발자국은 시기와 지역에 따라 달라질 수 있음
- 최근 10년(2001-2010)의 지역별 물발자국을 산정하고 그 기간의 생산량을 가중평균하여 작물별 국가 물발자국을 산정

농산물 가공품의 물발자국 산정

- 1차, 2차 가공되는 농산물에 대한 가상수량은 원작물의 가상수량과 가공을 위해 필요로 하는 가공수량을 합산하여 산정된다. 예를 들어 논벼로부터 탈곡을 거쳐서 1차 농산품인 현미를 가공하고, 추가 가공을 통하여 백미와 쌀가루가 생산된다. 이때 1차, 2차 가공품은 원 작물의 가상수량과 가공시 필요로 하는 물의 양을 합산하여 산정된다. 이와 같은 가공품의 가상수량을 산정할 때 Chapagain and Hoekstra (2004)는 원 작물의 가상수량을 기초로 하여 가공품의 가격과 생산부분에 따라 차별적으로 산정할 것을 제시하였고 이는 아래 수식과 같다.
- 즉, 원 작물에서 가공되는 제품의 생산비율과 원작물 대비 가공품의 가격비율 적용하여 물리적인 부분과 경제적인 부분을 동시에 고려한 가공품의 가상수량을 산정하고자 하였다. 그러나 대부분의 농작물은 원작물을 직접 소비하는 형태이기 때문에 원작물의 물발자국이 주로 이용된다.

$$pf[p] = \frac{W_p[p]}{W[c]}, \quad vf[p] = \frac{v[p] \times pf[p]}{\sum (v[p] \times pf[p])}$$

$$VWC[p] = (VWC[c] + PWR[c]) \times \frac{vf[p]}{pf[p]}$$

※여기서, pf(product fraction)와 vf(value fraction)는 생산품 p(product)의 생산비율과 가격차이를 의미하고, PWR(processing water requirement)는 1차 제품을 생산하기 위하여 원 작물 (c, crop)의 가공시 필요한 물의 양을 의미한다.

2

축산물의 물발자국 산정

- 축산물의 물발자국은 3가지 종류로 구분된다.

1) 직접수

- 음용수 : 가축이 마시는 물
- 세척수 : 축사 청소 등에 쓰이는 물

2) 간접수

- 사료작물에 대한 가상수

$$WF[a] = VWC_{feed}[a] + VWC_{drink}[a] + VWC_{serv}[a]$$

※여기서, $WF[a]$: 축산물 물발자국

$VWC_{feed}, VWC_{drink}, VWC_{serv}$: 각각 사료가상수, 음용수, 세척수

- 축산물의 물발자국은 가축이 소비하는 사료에 대한 가상수를 포함한다.
- 수자원장기종합계획에서는 축산용수를 산정할 때 일본의 연구결과를 활용하여 축산 두수 당 음용수와 세척수를 합산한 원단위 값을 적용하고 있다. 그러나 축산물의 물발자국은 가축이 소비하는 사료 작물에 대한 가상수 이용 부분을 포함하고 있으며, 가축두수를 축산물 생산량으로 전환하여 가상수 사용량을 제시하는 차이가 있다. 이와 같은 물발자국은 축산물 생산량을 기준으로 제시되기 때문에 식량정책과 연계하기가 용이하다.

- 축산물의 물발자국은 크게 3단계의 절차로 산정한다.

① 음용 및 세척수에 의한 직접수 산정

- 축종별 일일 음용 및 세척수의 국외 자료 수집
- 축종별 사육시기의 국내 자료 수집

② 사료 소비에 의한 간접수 산정

- 축종별 배합사료 및 조사료 소비량 조사
- 사료작물 물발자국과 소비량에 따른 간접수 산정

③ 직·간접수에 의한 축산물의 물발자국 산정

- 직·간접수는 가축두수 당 물 사용량이므로 단위생산량 당 물 사용량으로 전환 필요
- 축종별 지육량을 적용하여 직·간접수를 축산물 1ton 당 물 사용량(m^3)으로 전환
- 직·간접수에 의한 단위 중량 당 물사용량을 합산하여 축산물의 물발자국 산정

STEP 1

음용 및 세척수에 의한 물발자국(직접수)

① 음용수 산정

- 가축별 총 사육기간(평균) 산정
- 가축별 일별 음용수량 조사
- 총 사육기간과 일별 음용수량을 통해 총 음용수량 산정

② 세척수 산정

- 가축별 총 사육기간(평균) 산정
- 가축별 일별 세척수량 조사
- 총 사육기간과 일별 세척수량을 통해 총 세척수량 산정

③ 음용 및 세척수에 의한 직접수 물발자국 산정

- 생육기간과 일단위 음용수와 세척수는 가축두수를 기준으로 산정된 결과임
- 육류 생산량 기준의 물발자국으로 전환하기 위해서는 가축별 도체량을 조사하고 음용 및 세척수를 도체량으로 나누어 직접수 물발자국을 산정함

음용 및 세척수에 의한 물발자국(직접수) 산정 세부사항

- 축산물의 물발자국 산정시 가축이 사육되는 기간동안 소비되는 음용수와 세척수가 직접적으로 포함된다. 이를 위하여 가축별 총 사육기간과 일별 음용수의 자료가 필요하다. 아직 국내에서는 음용수와 세척수에 대한 자료가 부족한 실정이며, 수자원장기종합계획 수립시에도 축산용수의 음용수와 세척수 부분은 타 연구자료의 원단위를 사용하고 있다. 본 연구에서는 국내 및 국외의 조사자료를 활용하여 음용수와 세척수의 물발자국을 산정하고자 하였다. 먼저 국내 기관의 자료를 통하여 가축별 평균 사육기간을 조사하였고, 가축별 일단위 음용수 및 세척수량은 국외의 연구자료를 활용하였다. 생육기간과 일단위 음용수와 세척수는 가축두수를 기준으로 산정된 결과이기 때문에 육류 생산량 기준의 물발자국으로 전환하기 위해서는 가축별 도체량을 적용할 필요가 있다. 본 연구에서는 국내 기관의 도체량 조사 자료를 활용하여 각 가축의 지육 1톤 당 사용된 음용수와 세척수를 산정하였다.

$$VWC_{drink}[a] = \frac{\int_{birth}^{slaughter} q_d[a] dt}{W_a[a]}$$

$$VWC_{serv}[a] = \frac{\int_{birth}^{slaughter} q_{serv}[a] dt}{W[a]}$$

※여기서, q_d : Daily drinking water requirement,

q_{serv} : Daily service water requirement,

$W[a]$: Live weight of the animal a at the end of its lifetime

음용 및 세척수에 의한 물발자국(직접수) 산정 세부사항

- 축산물의 물발자국을 산정을 위해서는 다양한 기초자료가 활용된다. 본 연구에서는 국내에서 주로 생산되는 한우, 돼지, 닭의 물발자국을 산정하고자 하였고, 먼저 직접수인 음용수와 세척수를 산정하기 위하여 축종별 사육기간과 일 단위 직접수 소비량 자료를 조사하였다. 일 단위 직접수 소비량은 국내 연구결과가 부족하여 국외 연구결과를 활용하였다. 이 때 가축 사육방식은 국내에서 주로 적용하는 축사형태로 설정하였다. 한우 (비육우)의 경우 매일 38 liter의 음용수가 사용되고, 세척수로는 약 11 liter가 사용되는 것으로 조사되었고, 돼지의 경우 직접수로서 총 64 liter를 사용하고, 닭의 경우 약 0.27 liter를 사용하는 것으로 나타났다 (Chapagain and Hoekstra, 2003).

Water from drinking and servicing

Kind of animal (Farming system: Industrial)	Water from drinking		Water from servicing	
	Clave	Adult	Clave	Adult
Beef cattle				
Age (month)	5	36	5	36
Daily consumption (l/day/animal)	5.0	38.0	2.0	11.0
Swine				
Age (month)	0.5	10	0.5	10
Daily consumption (l/day/animal)	1.8	14.0	5.0	50.0
Broiler chicken				
Age (week)	-	10	-	10
Daily consumption (l/day/bird)	0.02	0.18	0.01	0.09

Sources: Chapagain and Hoekstra (2003)

① 간접수 산정

- 가축별 총 사육기간(평균) 산정
- 사육기간 동안의 배합사료 및 조사료 소비량 조사
- 농작물 물발자국 산정과정을 통해 사료작물의 물발자국 적용
- 가축별 지육량으로 나누어 1톤당 사료소비에 의한 가상수(간접수) 산정

사료 소비에 의한 물발자국(간접수) 산정 세부사항

- 축산물의 물발자국 중 간접수에 해당하는 물발자국은 가축이 사육기간 동안 총 소비한 사료에 의한 가상수 소비량을 의미한다. 사육기간 동안의 배합사료 및 조사료 소비량과 각 사료작물의 물발자국을 적용하여 사료작물을 공급하기 위하여 소비된 간접수를 산정하게 된다. 산정된 간접수를 지육량으로 나누어주면 축종별 1톤당 사료 소비에 의한 가상수 소비량을 산정할 수 있다. 본 연구에서는 국내 배합사료 업체들의 배합비율을 조사하여 적용하였고, 축종별 사양 관리에 의한 일별 사료 급여량을 조사하여 적용하였다. 사육기간 및 도체량을 음용수와 세척수 산정시 활용한 자료를 동일하게 적용하였다.

$$VWC_{feed}[a] = \frac{\int_{birth}^{slaughter} \left\{ \sum_{c=1}^{n_c} WF[c] \times C[a, c] \right\} dt}{W[a]}$$

※여기서, $WF[c]$: Water footprint of crop c,

$C[a, c]$: Quantity of crop c in the daily feed composition of animal a,

$W[a]$: Live weight of the animal a at the end of its lifetime

사료 소비에 의한 물발자국(간접수) 산정 세부사항

- 축산물 물발자국의 대부분을 차지하는 간접수는 사료작물 생산을 위한 가상수 사용량을 의미하기 때문에 사육 기간과 사료 급여에 대한 사양관리는 국내자료인 전라남도 녹색축산육성기금 조례 시행규칙의 별표(5)를 참조하였다. 특히 한우(비육우)는 배합사료와 조사료를 동시에 공급하는 것으로 나타났고, 돼지와 닭은 배합사료만을 공급하는 것으로 조사되었다. 또한 물발자국의 간접수에서는 배합사료에 포함되는 옥수수, 콩 등의 사료작물의 배합비가 중요한 기초자료로서 적용된다. 그러나 배합사료에 포함되는 사료작물의 배합비율은 국내 기관의 연구결과가 부족하여 3개의 사료 업체의 자료를 조사하여 평균값을 활용하였고, 배합비율은 모든 축종에 동일하게 적용하였다. 사료작물 중 옥수수, 밀, 쌀, 두류의 물발자국 자료는 Yoo et al. (2014b)의 국내 작물의 물발자국 산정결과를 적용하였고, 기타 작물 및 조사료의 물발자국은 Mekonnen, and Hoekstra (2010)와 Hoekstra and Hung (2002)의 연구결과를 적용하였다.

Breeding period and amount of feed

Kind of animal (Farming system: Industrial)	Breeding period			
	First	Second	Third	Total
Beef cattle				
Age (month)	3-12	13-22	23-26	27
Supply of formula feed (kg/day)	3	10	10	23
Supply of forage (Dry hay) (kg/day)	5	2	1	8
Swine				
Age (week)	0-6	7-15	16-26	27
Supply of formula feed (kg/day)	0.75	1.80	2.65	5.20
Broiler chicken				
Age (week)	0-2	3-4	4-6	7
Supply of formula feed (kg/day)	20.5	85.0	180.7	84.5

Sources: 전라남도 녹색축산육성기금 조례 시행규칙의 별표(5)

사료 소비에 의한 물발자국(간접수) 산정 세부사항

Water footprint of feed crops

Feed crops	mixing ratio (%)	Water footprint (m ³ /ton)
Maize	36.0	1,039.7
Wheat	17.0	1,060.2
Rice straw	1.9	1,060.6
Formula feed	14.2	2,796.0
Palm&Rapeseed residues	9.1	876.0 ¹
Others (Molasses etc.)	9.5	182.0 ¹
Forage (Dry hay)	-	494 ²

¹Mekonnen and Hoekstra (2010)

²Hoekstra and Hung (2002)

축산물의 물발자국 산정

- 직접수 및 간접수 조사 자료는 가축두수가 기준이기 때문에 물발자국 산정을 위해서는 생산량 단위로 전환시킬 필요가 있다. 즉, 가축두수 당 물 사용량(m^3/animal)을 축종별 지육량(ton/animal)으로 나누면 물발자국(m^3/ton)이 산정된다.
- 이를 위하여 축종별 도체시 지육량을 조사하였다. 한우 (비육우)의 경우 축산물품질평가원의 식육포장처리업체 5개소 조사결과('09-'10.3) 및 '12.7-8월 유통실태조사 결과의 지육량 자료를 적용하였고, 돼지의 경우 축산물품질평가원의 2004년 국립축산과학원 자료를 기초로 최근 출하평균체중 (114 kg)을 감안하여 보정한 값을 적용하였다. 닭의 경우 축산물품질평가원의 2005년도 현장연구 보고서 자료를 활용하였다.

Live weight of animal at slaughter and carcass

Beef cattle ¹		Swine ²		Broiler chicken ³	
Live weight	dressed carcass	Live weight	dressed carcass	Live weight	dressed carcass
702	435.2	114	87.8	2.452	1.742

Sources: 축산유통종합정보센터 (<http://www.ekapepia.com>)

¹축산물품질평가원, 식육포장처리업체 5개소 조사결과('09~'10.3) 및 '12.7~8월 유통실태조사 결과 감안

²축산물품질평가원, 2004년 국립축산과학원 자료를 기초로 최근 출하평균체중(114kg)을 감안하여 보정한 값

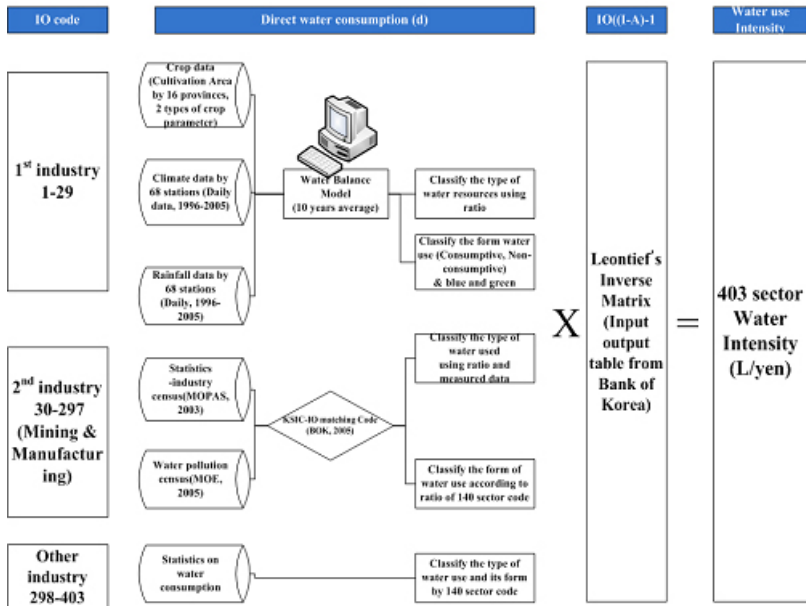
³축산물품질평가원, 2005년도 현장연구보고서: 닭도체 각 호수별 등급별 부위별 수율조사

3

산업연관분석에 의한 물발자국 DB 산정

- 산업연관표를 활용한 물발자국 인벤토리 데이터베이스 구축 절차는 다음과 같다.

- ① 산업 전체 분야별 직접수 사용량 산정
- ② 산정결과와 산업연관분석표상의 산업분류 기준이 상이하므로 한국산업분류기준코드(KSIC)에 맞게 용수 할당
- ③ 한국은행에서 제공하는 투입계수, 레온티프 역행렬, 산업코드별 국내총생산량(GDP)자료를 이용해서 총 물사용량과 사용량 원단위 계산
- ④ 산정된 총사용량 혹은 총 물사용강도에서 직접수를 차감하여 간접수 산정



<그림 2> 산업연관표를 이용한 DB 산정 절차

분야별 직접수 사용량 산정

- 주요 농축산물에 대한 직접수는 앞 절에서 기술한 바와 같이 산정된 물발자국 값으로 적용한다.
- 작물이외에 육림용수량은 목재생산 산림면적에 단위소비수량인 640 mm를 곱하여 산정한다. 여기서 산림면적은 생산에 기여하는 1.46 백만 ha만을 적용하였는데 이는 전체 산림 면적중 경제림이 2.92 백만 ha이고, 이중 목재생산과 관련된 면적은 50%로 추정하였다(원현규 등, 2011).

$$WU_{forest} = Ae \times ETc \times 10$$

※여기서, WUforest : 목재생산 물사용량,

Ae : 목재용 산림면적(1.46 백만 ha, 경제림의 50%로 가정)

- 수산양식 용수량은 국내 물사용량 통계가 없으므로 양식방식별 면적과 물사용 계수를 이용하여 추정하는 방법을 제안하고 있으므로 다음과 같이 용수량을 추정하였다(Lovelac, 2009).

내수면 양식 물사용량 추정

Class	Total	Watershed cage	Waterway	Recirculation	Pond	Other
Water use (mill m³)	5,597.9	1.3	5,367.0	137	37.5	55.1
Blue	229.6	-	-	137	37.5	55.1
Green	5,368.3	1.3	5,367.0	-	-	-
Surface	5,578.4	1.3	5,367.0	137	18	55.1
Groundwater	19.5	-	-	-	19.5 ³⁾	-
Area(1,000m²)¹⁾	11,428.8	130.8	3,577.0	307	2,277.0	3,347.0
Basic unit (m³/m², m)²⁾		10.0m (5-15m)	1,500.0 (1,000-3,000)	54.2	16.5 (1.8-54.2)	16.5 (1.8-54.2)

1) : 환경부 (2005). 2005 전국오염원조사 보고서, p. 78

2) : 권오상, 류덕희, 박상미, 박해경, 안우정, 2001. 수산물양식시설 배출수 수질기준 설정방안, 국립환경연구원 p46.

3) : 건설교통부 (2006). 2006 지하수 통계연보

분야별 직접수 사용량 산정

- 공업용수량은 2003년 산업총조사자료 (통계청, 2004) 와 2005년 전국 오염원 조사 자료 (환경부, 2006)를 활용하였으며, 수집된 자료는 용수 원별 사용용도별로 구분되어 있으며 이중 보일러수와 제품용수를 소비수로 분류하고 나머지는 이용수로 분류하였다. 공업용수중 평균 소비수량은 8.5%로 추정되었다. 생활용수량은 전체 용수량중 FAO (2009) 기준에 따라 10%만을 소비수로 간주하고 나머지는 이용수로 분류하였다. 제조업을 포함한 공업용수는 2,600 MCM, 생활용수는 7,600 MCM을 할당하였다.

총 물사용 강도

- 물사용강도 (Water use intensity), 즉 물발자국 인벤토리는 단위 재화/서비스를 생산하는데 필요한 용수량으로 나타내기 위해 국내총생산량으로 나누어 물사용강도를 산정하였다.

$$E = d \times (I-A)^{-1}$$

※ 여기서, E : 총물사용강도(㎥/백만원), d : 직접수 사용량 (㎥),
I : 단위행렬, (I-A)⁻¹ : 레온티프행렬, A : 투입계수

간접수

- 간접수란 “제품생산과정에서 숨겨 있는 물로 공급망에서 소비되거나 이용되는 물을 의미한다”.
- 소비수(Consumptive water)는 작물에 의해 이용되는 증발산량, 산업공정에서 제품에 포함된 원료수, 사용된 후 타유역으로 배출되는 물을 의미한다.
- 나머지는 이용수(Non-consumptive, 혹은 비소비수)로 분류하여 산정하였다 (Hoekstra et al., 2011). 아래 식은 물사용 형태별 관계식을 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} TWU &= WU_{con} + WU_{non-consumptive} \\ &= WU_d + WU_{ind} \end{aligned}$$

※ 여기서, TWU : Total water use, WUcon : Consumptive water use,
WUnon-con : Non-consumptive water use,
WUd : Direct water use,
WUind : Indirect water use

※ 상세 내용은 김영득 외 (2013) 논문을 참조하시기 바랍니다.



II. 물발자국(Water Footprint)

활용 매뉴얼

인간의 활동은 매우 다양하고 인류는 지속적으로 진화하고 있다. 그러는 가운데서 인간은 엄청난 양의 물을 사용하고 환경을 오염을 시킨다. 물은 인간의 활동에서 가장 필수적인 자연자원으로 최근 지속가능한 사회를 위해 물에 대한 이슈와 관리가 전 지구적인 논쟁의 핵심 관심으로 대두되고 있다. 지구에는 통틀어 약 14억km³의 물이 있다고 한다. 그러나 그 중 97.5%가 바닷물이거나 염분이 섞인 물이며, 나머지가 바로 식수나 관개 농업용수로 이용할 수 있는 민물인데, 그나마 대부분이 얼음이나 빙하의 형태이거나 지하수로 저장되어 있어 순환하지 않는다. 결국 그 2.5%의 민물 중에서 0.27%만이 호수나 강에 있는 액체상태의 물로서 인간이나 지구상의 다른 생물들이 이용할 수 있는 것이다.

사용 가능한 양, 즉 먹을 수 있는 물의 전체 양은 오랜 세월동안 일정하게 유지되어 왔으며, 오늘날의 그 양은 2000년 전과 비교해 크게 다르지 않다. 하지만 나날이 늘어나는 인구와 산업의 발달로 사용할 수 있는 물이 갈수록 줄어들어 수자원 확보는 세계 각국의 중요한 정책과제가 되어가고 있다. 많은 전문가들은 인구의 지속적인 증가와 이윤추구를 위한 인간의 무분별한 환경파괴로 물 문제가 더욱 심각해지고, 21세기는 ‘물 위기’의 시대가 될 것이라고 경고하고 있다. 또한 국가 안보의 측면에서 수자원 확보의 필요성이 대두되고 있으며, 수자원의 폐쇄적인 특성으로 인해 국가 간의 교류가 힘들고 특히 인간의 생명과 직결되어 있어 양보하기도 힘든 것이 수자원임을 강조하고 있다.

이러한 유한자원인 물의 지속적인 수요 및 사용증가와 많은 지역에서 물 희소성의 증가 그리고 수질의 저하로 물 사용 및 오염은 특정 국가나 지역이 아닌 전 세계의 관심이 되어버렸다.

지역, 국가 그리고 지구적인 수준에서 개선된 물관리를 위해 물 관련 영향에 대한 폭넓은 이해가 요구됨에 따라 국제적으로 일관되게 사용될 수 있는 적절한 평가기술의 구축이 필요하다.

이를 위해 개발되어야 할 기술 중에 하나가 물발자국평가(Water Footprint Assessment)이다. 물발자국을 평가하고 보고하기 위한 요구가 증가하고 있으며, 이에 대한 다양한 방법들이 존재하나, 현재의 이러한 방법들은 다소 상이하게 적용되고 있다. 그러므로 물발자국을 평가하고 보고하는데 있어 일관성 확보가 요구된다. 이러한 측면에서 물발자국에 대한 방법론 개발 및 이의 적용을 위한 다양한 매뉴얼 등의 연구가 매우 필요한 시점이라 할 수 있다.

- 이 매뉴얼은 제품의 물발자국 산정에 필요한 보다 자세한 수행절차 및 수행방법에 대한 내용을 규정하고 있으며, 수행자가 이 매뉴얼을 활용하여 보다 용이하게 물발자국을 산정할 수 있도록 하는 것을 목적으로 하고 있다.
- 이 매뉴얼은 인간 활동이나 특정 제품이 물 부족 및 오염 문제에 어떻게 연관돼 있는지를 분석하고, 인간 활동 및 제품이 물발자국 관점에서 어떻게 더 지속적으로 개선될 수 있는지를 분석하고 올바른 방향을 제시하고자 하는 것이다.
- 물발자국은 생산·소비·무역 등의 활동이 물의 직접적 또는 간접적인 이용에 어떻게 관계되어 있는지를 수량적으로 나타낼 수 있다.

물발자국평가(Water Footprint Assessment)란 단위 제품 및 서비스의 생산 전과정(Life cycle) 동안 직·간접적으로 사용되는 물의 총량을 뜻하는 말로, 우리가 일상생활에서 사용하는 제품을 생산·사용하는데 얼마나 많은 양의 물이 필요한지를 나타내는 지표이다. 여기서 전과정이란 제품 생산을 위한 원료물질의 취득부터 제품제조, 사용 그리고 폐기까지의 과정을 말한다. 물발자국평가는 물과 관련한 잠재적인 환경영향의 크기를 평가하고, 프로세스와 조직뿐 아니라 다양한 전과정 단계에서 제품의 잠재적인 환경영향과 물 저감의 기회를 식별하여 물과 관련된 전략적인 리스크 관리와 물 효율성과 물 관리의 최적화를 용이하게 할 수 있다.

물발자국평가는 오래전부터 미국 및 유럽 등의 전문연구기관을 중심으로 연구가 진행되어 왔으며, EU는 2013년 4월에 녹색제품 단일시장화 계획을 발표하고, 향후 수입제품에 대한 물발자국 등의 환경정보를 요구하기로 하였다. 또한, 프랑스 등의 일부 국가에서는 이를 기반으로 시범 사업을 진행 중에 있으며, 향후 법제화되어 정식제도로 운영될 예정이다. 이외에도 선진국을 중심으로 물발자국과 관련한 민간 인증제도가 운영 중이며, 우리나라 일부기업이 물발자국 해외 민간인증을 획득한 사례가 보고되고 있다. 이러한 국제동향에 따라 국제표준화기구인 ISO는 2014년에 물발자국 국제표준인 ISO 16046(Environmental management -water footprint -Principles, requirements and guidelines)을 제정·공표하였으며, 조만간에 ISO 14064를 기반으로 한 물발자국 인증이 각 국가에 확산될 것으로 예상하고 있다.

ISO 14046은 제품, 프로세스 혹은 조직의 물발자국을 평가하고 보고하기 위한 수행기준과 절차를 정한 표준으로 제품 등에 대한 물발자국의 투명성, 일관성, 재현성 그리고 신뢰성 있는 정보를 제공하는데 기업을 포함한 조직, 정부 그리고 기타 많은 이해관계자에게 도움이 될 것이다. 물발자국 국제표준인 ISO 14064는 물과 관련한 잠재적인 환경영향을 평가하기 위해 전과정평가(Life Cycle Assessment, ISO 14044)기법을 활용하고 있다.

이미 잘 알고 있듯이 ISO는 국제 온실가스 문제의 해결을 위해 제품 탄소발자국(Carbon Footprint) 국제표준인 ISO 14067을 제정하였는데, 동 표준 역시 전과정평가기법을 기본적으로 활용하고 있다. 따라서 물발자국 산정과 평가를 위해서는 ISO 14064와 ISO 14044의 국제표준을 기본으로 하고, 또한 국내외 유사한 물발자국 인증프로그램의 운영기준을 참조하는 것이 바람직할 것이다.

이 매뉴얼은 제품 생산 전과정에서의 직·간접적인 물 소비량을 정량적으로 산정하는 절차와 요건을 규정하고 있다. 여기에서 규정하지 않는 요건은 ISO 14046의 요건을 따르는 것으로 하였다. 물발자국은 제품뿐만 아니라 공정 혹은 조직단위를 대상으로 할 수 있으나, 현재까지 선행 연구 등은 주로 제품을 주 대상으로 하고 있다. 또한, 전과정평가 기법도 제품을 주요 대상으로 하고 있어 이 매뉴얼의 주된 적용대상을 우선 제품으로 한정하였다. 여기서 제품이란 생산재(BtB, Business to Business) 제품과 소비재(BtC, Business to Consumer) 제품을 모두 포함한다.

이 매뉴얼을 통해 산정된 물발자국 정보는 동일 기능을 수행하는 제품들 사이에 비교 가능해야 하므로 신뢰성 있는 정보를 제공하는 것이 중요하다. 다만 비교의 신뢰성을 유지할 수 있는 범위 내에서 제품 전과정 단계 중 물 사용량에 대한 기여도가 낮은 데이터는 수집 범위에서 제외할 수 있도록 한다.

이 매뉴얼은 인간 활동에 의한 직접 및 간접 물소비량인 물발자국 정보를 산정하는 것이 주된 목적이기 때문에 이를 종합적으로 반영할 수 있는 평가방법을 제시하고자 하였다. 다만, 이 매뉴얼은 물발자국 산정에 대한 일반요건과 절차를 규정한 만큼 사용단계에서 물을 소비하는 제품에 대한 제품별 특화된 산정방법을 제시하지는 못했다. 제품별 사용과정에서의 물 소비량을 산정하기 위해서는 이 매뉴얼이 제시한 요건과 절차를 반영하여 추가적으로 개발해야 할 것이다. 또한, 전과정평가는 제품에 대한 목록분석 후에 영향평가(Impact assessment)를 실시하는 것이 일반적이나, 현재

물발자국에 대한 영향범주나 특성화 및 정규화 인자 등이 개발되어 있지 않아 물발자국평가에서는 영향평가를 제외하고 목록분석까지만을 고려하는 것이 바람직할 것이다.

- 이 매뉴얼은 한국농어촌공사 농어촌연구원에서 개발한 물발자국 데이터베이스(DB, DataBase)를 활용하여 제품 전과정에서 소비되는 직접 및 간접적인 물 소비량을 산정하기 위한 기술적인 내용을 포함하고 있다.
- 농어촌연구원에서 개발한 물발자국 DB는 산업연관표와 통계자료에 근거하여 각 물질의 원료물질 취득부터 제조까지의 물발자국에 대한 정보를 포함하고 있다. 따라서 폐기단계에 대한 물발자국 DB는 포함하고 있지 않으며, 데이터 계산을 위해서는 다른 문헌에서 제시한 폐기단계 물발자국 DB를 활용하여야 한다.
- 데이터 수집 범위 제외 기준은 물발자국 산정목적에 따라 정의되어야 하지만, 통상적으로 누적질량기여도 99%와 95%를 제외 기준으로 많이 사용하고 있다.
- 이 매뉴얼은 물발자국 산정에 필요한 일반적인 요건을 포함하고 있으며, 제품 사용단계에서 물발자국 산정을 위해서는 별도의 사용시나리오를 정하여 적용하여야 할 것이다.

3

적용범위(Scope)

이 매뉴얼은 제품(서비스 포함)만을 대상으로 하였으며, 제품의 범위는 농수축산물 및 임산물, 내구재 및 비내구재, 생산재, 서비스 등의 모두를 포함하고 있다. 다만, 범위 내의 제품 중에서 의료기기 및 의약품은 이 매뉴얼의 적용범위에서 제외하며 소비자에 대한 혼돈을 야기할 수 있는 제품도 적용대상에서 제외할 수 있다. 이 매뉴얼은 전과정평가에 근거한 제품의 물발자국평가와 관련한 요건과 요건에 대한 지침을 제공한다.

- 이 매뉴얼은 제품 또는 서비스를 대상으로 하여 물발자국 산정에 필요한 일반적인 요건과 요건의 실행을 위한 지침을 포함하고 있으며, 기업들이 자사 제품에 대한 물발자국평가를 통해 제품에 대한 물사용 등의 정보를 구매자 또는 이해관계자에게 제공토록 하는 것에 초점을 두고 개발하였다.
- 또한 이 매뉴얼은 향후 국내에서 물발자국 인증제도가 시행될 수 있는 경우를 고려하여, 현재 시행중인 탄소발자국(탄소성적표지 인증) 인증제도를 벤치마킹하여 개발하였다.

- 4.1 “**물발자국**”이란 물에 관련한 잠재적인 환경영향을 정량화한 계량수 단으로 제품의 전과정에서 사용하는 수자원의 양을 계량한 후 리터(L) 단위로 표현된다.
- 4.2 “**전과정**”이란 원료물질 채취부터 최종 처리에 이르는 제품 시스템의 연속적이고 상호 연관된 단계들을 말한다.
- 4.3 “**제품**”이란 모든 물품이나 서비스를 말한다.
- 4.4 “**생산재**”란 중간제품이라고도 하며 다른 제품을 생산할 목적으로 사용되는 재화를 말한다.
- 4.5 “**소비재**”란 인간의 경제활동 영위를 위하여 일상생활에서 소비하는 재화로 내구재와 비내구재를 포함한다.
- 4.6 “**물 사용량**”이란 제품의 전과정에 걸친 각종 수자원의 투입량을 의미한다.
- 4.7 “**내구재**”란 내구성을 가지고 장기사용에 견딜 수 있는 재화를 말한다. 내구재는 ‘에너지 사용 내구재’와 ‘에너지 비사용 내구재’를 포함하며 폐기단계를 포함한다.
- 4.8 “**비내구재**”란 농축산물 및 임산물, 식료품, 화장지 등과 같이 장기사용을 목적으로 하지 않는 재화를 말한다.
- 4.9 “**제품 시스템**”이란 하나 또는 그 이상의 정의된 기능을 수행하는 물질 또는 에너지로 연결된 공정의 집합체를 말한다.
- 4.10 “**원료물질**”이란 제품을 생산하는데 사용되는 1차, 2차 물질(재활용된 물질을 포함)을 말한다. 단, 조립제품의 경우 조립품이나 부품도 원료물질에 포함한다.
- 4.11 “**공정**”이란 투입물을 산출물로 변형시키는 일련의 상호 연관되거나 상호 작용하는 활동을 말한다.
- 4.12 “**시스템 경계**”란 어떤 공정 또는 물질이 제품 시스템의 일부라는 것을 상술하는 일련의 기준을 말한다.

- 4.13 “수원(水原)”이란 제품의 전과정에 투입된 수자원의 기원을 의미하며, 담수, 염수, 지표수, 해수, 지하수, 화석수 그리고 기타 제조수로 구분된다.
- 4.14 “용수”란 생활용수, 공업용수, 농업용수 등 수원에서 채취한 수자원을 산업계의 용도에 따라서 가공한 수자원을 의미한다.
- 4.15 “기능단위”란 기준흐름(reference flow)으로 사용하기 위한 제품 시스템의 성능을 말한다.
- 4.16 “사업장”이란 제품을 생산하는 설비와 공장, 사무공간을 말한다.
- 4.17 “에너지 사용 제품”란 냉장고, 세탁기 등과 같이 사용단계에서 에너지를 사용하는 소비재를 말한다.
- 4.18 “물 사용 제품”이란 샴푸, 세정제 등과 같이 제품의 주기능이 물의 사용과 밀접하게 연관되어 있으며, 동시에 제품의 설계방식에 따라서 사용단계의 물 사용량에 큰 영향을 주는 내구재 및 비내구재를 의미한다.
- 4.19 “물 및 에너지 사용 제품”이란 세탁기, 식기세척기 등과 같이 “물 사용 제품”가운데 사용단계에서 에너지를 사용하는 내구재를 의미한다.
- 4.20 “투입물”이란 제품 시스템으로 들어가는 제품 또는 물질, 에너지 흐름을 말한다.
- 4.21 “산출물”이란 제품 시스템에서 나가는 제품 또는 물질, 에너지 흐름을 말한다.
- 4.22 “보조물질”이란 제품에 포함되지 않으나 제품 생산을 위해 공정으로 투입되는 투입물을 말한다.
- 4.23 “현장(1차) 데이터”란 사업장에서 측정 또는 계산을 통하여 직접 수집·관리되는 데이터를 말한다. 현장 데이터는 사업장에서의 원료 및 보조물질, 에너지 및 연료, 유틸리티 등의 투입과 사업장에서 발생하는 배출물과 폐기물을 포함한다.
- 4.24 “부산물”이란 같은 제품 시스템에서 나온 둘 이상의 제품을 말한다.
- 4.25 “폐기물”이란 소유자가 폐기하기를 원하는 물질 또는 물건을 말한다. 재활용, 매립 및 소각에 따른 폐기물을 모두 포함한다.

4.26 “배출물”이란 대기, 수계 및 토양으로 나가는 환경배출물을 말한다.

4.27 “자본재”란 제품 전과정에서 사용된 기계, 장비, 건물과 같은 재화를 말한다.

4.28 “일반(2차) 데이터”란 현장 데이터를 제외한 해당 국가공인 전과정 목록분석(LCI, Life Cycle Inventory Analysis) 데이터와 해당 업계 평균 전과정 목록분석 데이터, 기타 전과정 목록데이터를 말한다.

4.29 “할당”이란 한 제품 시스템과 하나 이상의 다른 제품 시스템 사이에서 하나의 공정 또는 하나의 제품 시스템의 투입물과 산출물의 흐름을 배분하는 과정을 말한다.

4.30 “회석수”란 폐수의 오염농도 및 수량에 근거하여 원래의 수원 수준으로 환원시키기 위해 필요한 자연수(빗물)의 수량이다.

- 이 매뉴얼에서 적용되는 용어는 국내 탄소성적표지 작성지침(2014)과 환경성적표지 개선방안에 대한 연구보고서(2011) 및 ISO 14064를 인용·참고하였다.

5.1 전과정 관점(Life cycle perspective) 제품의 물발자국평가는 제품 전과정(원료 취득에서 최종 처리까지)을 고려한다. 체계적인 검토와 관점을 바탕으로 전과정단계들 혹은 개별적 공정들 간의 잠재적인 환경부담이 전가되는 것을 확인함으로써 이를 피할 수 있다.

5.2 관련성(Relevance) 데이터와 방법은 물발자국평가에 적절하도록 선택되어야 한다. 즉, 의사 결정시 유용하게 사용될 수 있도록 적절한 방법 및 데이터를 선택하여 사용하여야 한다.

5.3 완전성(Completeness) 물발자국에 중요한 기여를 하는 모든 데이터는 목록에 포함되어야 한다. 즉, 물발자국 산정시 중요한 영향을 미치는 모든 데이터는 시스템 경계 내에 포함되어야 한다.

5.4 일관성(Consistency) 가정, 방법 그리고 데이터는 목적과 범위정의에 부합한 결론에 도달하기 위해 전체 물발자국평가에 걸쳐 같은 방식으로 적용되어야 한다. 또한, 서로 다른 제품에 대한 물발자국 비교가 가능하도록 사용된 가정, 방법 및 데이터는 일관되게 적용되어야 한다.

5.5 투명성(Transparency) 합리적인 의사결정이 가능하도록 물발자국 산정시 사용한 방법 및 데이터가 충분히 공개되어야 한다.

5.6 국제표준과의 부합(Harmonization with international standard) 이 매뉴얼에서 사용된 방법은 국제표준에서 제시하는 요건에 위배되지 않아야 한다.

5.7 환경적 초점(Environmental focus) 물발자국평가는 제품, 공정 혹은 조직의 물과 관련된 잠재적인 환경영향을 평가하여야 한다. 경제적 혹은 사회적 영향은 일반적으로 물발자국평가 범위에 속하지 않는다. 보다 광범위하고 보완의 평가를 위하여 다른 도구를 병행할 수 있다.

5.8 상대적 접근방법과 기능단위(Relative approach and functional unit) 물발자국평가는 기능단위와 또는 이러한 기능단위와 상대적으로 비교된 결과와 관련되어야 한다.

5.9 반복적 접근(Iterative approach) 물발자국평가는 반복 기법이다. 물발자국평가의 개별 단계는 다른 단계의 결과를 이용해야 한다. 단계 내와 단계간의 반복적 접근은 연구 및 보고 결과의 포괄성과 일관성에 기여한다.

5.10 정확성(Completeness) 오차와 불확실도는 실행 가능한 한 감소되어야 한다.

- 이 매뉴얼에서 적용한 원칙은 ISO 14064에서 언급하고 있는 12가지 원칙 중 일반적인 내용을 제외하고 중요하다고 판단되는 항목만을 취사·선택하였다.
- ISO 14064에서는 언급하고 있으나, 이 매뉴얼에서 언급하지 않은 사항은 국제표준에서 제시하는 요건을 따르도록 하기 위해 ‘국제기준과의 부합’ 항목을 추가하였다.
- ISO 14064에는 언급되어 있으나 이 매뉴얼에서 언급하지 않은 원칙으로는 과학적 접근방법 중시(Priority of scientific approach), 지역적 측면(Geographical aspects and resolutions), 포괄성(Comprehensiveness)이다.

6.1 담수(Fresh water) 용해성물질의 농도가 낮은 물

비고 1. 담수는 전형적으로 1,000mg/l 이하의 용해성물질을 포함하며 음용수 생산을 위해 사용되는 취수 및 정수처리를 위해 적합한 물

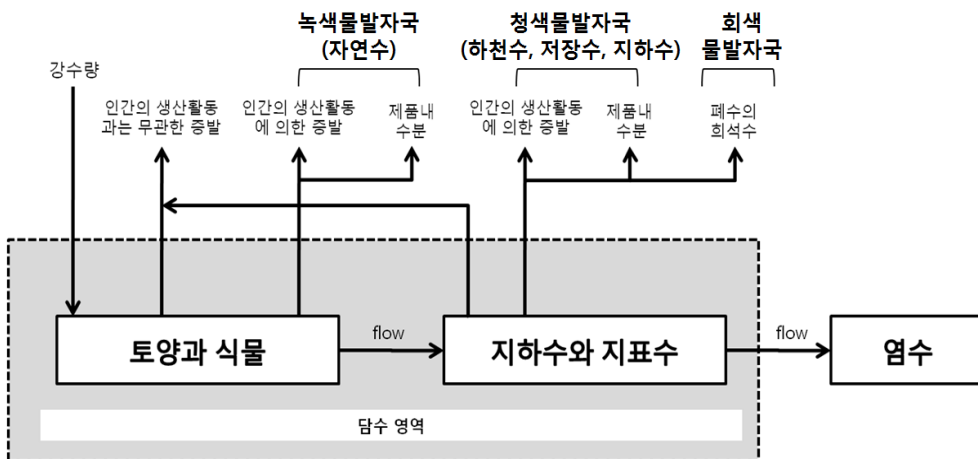
6.2 염수(Blackish water) 농도에 있어 해수보다 적은 용해성 물질을 포함하는 물로서 일반적으로 도시, 생활, 관개 목적을 위해 사용되는 물 보다는 더 높은 용해성물질을 가는 물

비고 1. 염수는 총 용해성물질의 농도는 1,000mg/l부터 3,000mg/l에 이른다.

6.3 지표수(Surface water) 지표면 위를 흐르거나 강과 호수에 저장된 물로 해수를 제외한 물**6.4 지하수(Ground water)** 지하에 저장되어 있거나 추출될 수 있는 물(하천수, 저장수와 같은 지표수와 달리 지하의 수로를 따라 흐르거나 고여 있는 물)**6.5 해수(Sea water)** 바다 혹은 대양의 물**6.6 화석수(Fossil water)** 인간의 시간기준에 자연적인 충전속도가 매우 느린 지하수(아주 오랜 기간 동안 암반의 침식 및 퇴적현상이 반복하여 생성된 물로서 지하수와는 달리 강수량에 의해 재보충되지 않으며, 재생불가능한 물)

- 물발자국은 제품이나 서비스의 전과정에서 직·간접적으로 소모되는 물의 양을 산정하기 위한 방법론으로, 1960년대 런던대학 토니 앨런 교수가 발표한 가상수(virtual water)로부터 출발하고 있다.
- 가상수는 농산물을 비롯한 재화를 생산함에 있어 실제 완성품이 만들어질 때까지 소모되는 물의 양을 말하며, 국가간의 제품 수출·수입시 그 제품의 생산으로 인해 소모된 가상수까지 수출·수입된다는 개념이다.

- 물발자국은 “하나의 제품이나 서비스 전과정에 이용되는 물 사용량으로서, 제품이나 서비스를 생산하는데 필요로 하는 원재료인 ‘직접수’ 사용량과 생산·유통·사용·폐기의 전과정 각 단계에서 투입되는 제품이나 서비스를 생산하는데 필요로 하는 ‘간접수’ 사용량을 합산한 값”으로 정의할 수 있다.
- 담수의 소모형태는 크게 증발과 유수의 개념으로 구분할 수 있으며, 인간의 생산활동과 관련하여 3가지 형태의 물발자국이 존재하며, 수원과의 관계를 ‘<그림 3> 물발자국 개념 및 수원의 구분’에 나타내었다.



<그림 3> 물발자국 개념 및 수원의 구분

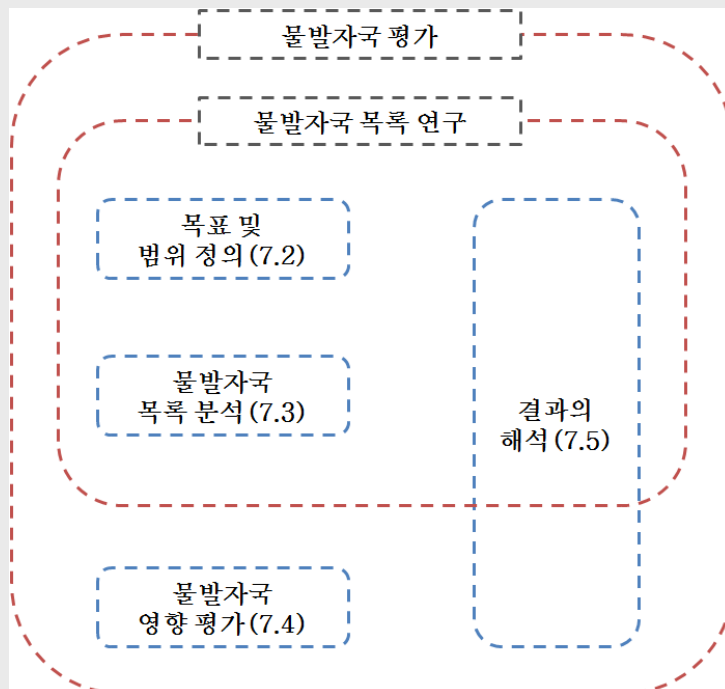
- 녹색 물발자국(green water footprint)은 제품 생산과정 동안 자연 상태에서 공급되어 사용되는 강수량, 즉 토양 표면이나 식물이 일시적으로 머금고 있는 물(흐르지 않는 물)을 의미한다.
- 농업부분에서는 작물이 성장하면서 토양으로부터 증발된 물의 양과 작물이 머금고 있는 물의 양을 의미한다.

- 청색 물발자국(blue water footprint)은 제품 생산과정 동안 사용되는 지표수 또는 지하수 소비량을 의미하며, 인간활동을 통해 담수(지표수나 지하수)가 소비되는 양을 평가하는 지표이다.
 - 농업부분에서는 작물 생육기간동안 관개시스템으로부터 인위적으로 공급되는 관계수량을 의미한다.
- 회색 물발자국(grey water footprint)은 인간활동에 따른 수질오염 정도를 나타내는 것으로, 오염되어 높아진 수원의 오염농도를 희석을 통해 해당 수원의 오염물 최대 허용농도(수질 허용기준) 수준까지 낮추는데 필요한 담수의 양을 의미한다.
 - 오염물질은 폐기물, 비료, 살충제와 같은 형태로 직접적으로 토양에 투입될 수도 있으며, 이것이 지하수로 흘러 들어가거나 지표수의 흐름에 포함돼 오염이 발생하게 된다. 이 경우 오염부하는 지하수·지표수에 도달하는 총 오염물질의 양으로 표현할 수 있다.

7.1 일반 요구사항

7.1.1 물발자국평가는 제품의 물과 관련된 잠재적인 환경영향을 다룬다. 물발자국평가는 그림과 같이 전과정평가의 4단계를 포함해야 한다.

- a) 목적과 범위 정의
- b) 물발자국 목록분석
- c) 물발자국 영향평가
- d) 결과 해석



- 물발자국은 전과정평가기법에 기초하여 제품 전과정에 걸친 물과 관련한 환경영향을 평가하는 것으로, 기본적으로 모든 원칙과 실행 프로세스는 전과정평가 국제표준인 ISO 14044을 준용한다.
- 따라서, 물발자국평가는 상기의 그림과 같은 프로세스로 수행을 하여야 할 것이나, 물발자국 영향평가는 영향범주와 범주내의 지표 그리고 특성화인자 값들이 아직 개발되어 있지 않아 이를 바로 적용하는 데는 무리가 있을 수 있다. 현재 국내에서 운영 중인 탄소성적표지제도도 이러한 이유로 목록분석까지만 실시하여 그 결과 값을 공개하고 있다. 따라서, 물발자국평가에서도 이와 동일하게 적용하는 것이 타당하다고 할 수 있다.

8

제품 전과정 물발자국 계산

8.1

물발자국 평가의 목적

8.1.1 물발자국평가의 목적을 정의할 때 다음의 항목을 명확하게 서술해야 한다.

- 의도된 적용
- 연구를 수행하는 이유
- 대상 청중(즉, 연구의 결과가 보고될 사람)
- 연구가 독립형평가 혹은 전과정평가의 한 부분인지 여부
- 연구가 비교주장을 의도하였다면 전과정평가의 부분인지 여부

- 물발자국평가를 수행하든 혹은 물발자국 목록분석만을 수행하든 연구의 목적이 연구수행에 앞서서 반드시 결정되어야 한다. 일반적으로 전과정에 걸친 물발자국목록분석과 영향평가는 특정한 의사사항에 대한 답을 주기 위해 수행된다.
- 물발자국평가는 특성상 시스템 혹은 공정 사이에 비교를 위해 주로 이용된다. 예를 들어 회사는 새로운 공정이나 신제품 형태의 제품 포장을 위해 자금을 조성하고 투자를 해야 하는지의 여부를 결정해야 한다. 어떤 대안들이 유용한지를 결정하는 것은 물발자국평가의 목적이 무엇으로 설정되어야 하는가를 결정하는 데 도움을 줄 수 있을 것이다. 다음의 예들은 물발자국평가의 목적이 어떻게 결정되어야 하는지를 보여 준다.

사례 1) A기업은 현재 신제품 개발에 있다. 이 기업은 자사의 제품을 판매하기에 앞서 기존에 시장에서 판매되고 있는 다른 경쟁 제품들과 비교하기 위하여 자사의 신제품이 물과 관련한 환경에 미치는 부정적인 측면을 규명하려 하였다. 환경에 부정적인 측면

이 규명될 경우 A기업은 이들에 대한 개선방안을 강구하고 이미 시장에서 판매되고 있는 제품들과 비교하여 자사의 신제품이 환경적으로 대등하거나 우수하다는 것을 증명한 후 시장에 판매하기를 원하고 있다. 이의 달성을 위해 A기업은 물발자국평가를 수행하기로 결정하였는데 이때 이 연구의 목적은 ‘보다 물과 관련하여 친환경적인 제품을 시장에 공급하기 위해 물발자국평가를 수행하여 경쟁제품과 신제품의 환경성을 비교하는 것’으로 설정할 수 있을 것이다.

사례 2) 한 환경단체가 동일한 기능을 수행하는 가정용품 A와 비교해서 B라는 제품이 물과 관련한 환경에 많은 영향을 미치고 있다는 판단하에 소비자가 B제품을 구매하는 것을 막기 위한 캠페인을 벌일 것을 고려하고 있다. 이를 위한 객관적이고 과학적인 증거를 보유하기 위해 이 단체는 물발자국평가를 수행하기로 결정하였다. 이 경우에 연구의 목적은 ‘대중에게 보다 친환경적인 제품의 정보를 제공하기 위한 물발자국평가의 수행으로 설정할 수 있을 것이다.

- 이 매뉴얼은 적용범위에서 기술하였듯이 제품에 대한 물사용량의 정보를 구매자 및 이해관계자에게 제공하거나 향후 국내에서 물발자국 인증제도가 시행될 경우 인증을 목적으로 하여 개발되었다.

8.2.1 물발자국평가의 범위는 물발자국평가 목적과 일치해야 한다.

연구범위를 정의할 때 다음의 사항들을 고려하고 관련 사항에서 주어진 요구사항 및 지침을 고려하면서 명확하게 기술해야 한다.

- a) 연구대상 시스템, 타당하다면 시스템 경계와 조직 경계
- b) 기능단위
- c) 시간적이고 지역적 범위
- d) 데이터 수집 및 데이터 품질 요구사항
- e) 제외기준
- f) 할당 절차

- 물발자국평가에서 범위는 대상제품, 기능단위, 목록분석 수행방법 및 가정 등과 같은 물발자국평가를 수행하기 위한 전반적인 범위를 말하여, 초기단계에서 이러한 범위를 명확하게 결정해야 한다.
- 같은 기능을 가진 두 가지 이상의 제품들을 서로 비교하여 물과 관련한 제품의 환경적 측면을 파악하는 비교주장(Comparative Assertion)시에는 대체 제품의 선정이 물발자국평가의 결과에 직접적인 영향을 미칠 수 있으므로 대체 제품은 매우 신중하게 선정해야 한다.
- 비교 대상시스템은 반드시 동등한 기능 및 기능단위, 시스템 경계, 데이터의 품질 및 수행방법론 등을 가져야 한다.
- 이 매뉴얼에 따라 물발자국평가를 수행할 경우 상기의 모든 요구사항을 고려하여 적용 및 수행하여야 할 것이다.

8.3.1 제품에 대한 물발자국의 계산시 일반적으로 시장에서 판매되는 단위 제품(제품 1대 또는 1개 등)을 기준으로 한다. 단, 서비스와 같이 제품의 유형이 명확하지 않은 경우에는 1일 또는 1회 서비스 등의 단위를 기준으로 한다.

8.3.2 시장에 출시되는 제품의 생산 공정이 동일하지만 주문자의 요구에 따라 제품의 판매형태 및 크기가 달라지는 경우에는 제품 1kg 또는 1ton 등의 단위를 기준으로 한다.

8.3.3 기능단위가 불분명하거나 소비자의 이해를 돕기 위하여 필요한 경우 해당제품에 대하여 별도의 기능단위를 설정하거나 부가 정보(수명, 보조 성능 등)를 제공하여야 한다.

- 기능단위의 일차적인 목적은 투입물과 산출물이 정규화(normalized)될 수 있는 기준(산술적 관점에서의 기준)을 제공하는 것이다. 따라서 기능단위는 반드시 명확하게 정의되어야 하며 측정 가능해야 한다.
- 기능단위가 정의되면 그 기능을 수행하는 데 필요한 양의 제품이 반드시 정량화되어야 하며, 시스템 간의 비교는 반드시 각자의 기준흐름으로 충족되는 동일한 기능단위로 정량화된 동일 기능에 근거하여 이루어져야 한다.
- 모든 제품은 특정한 기능을 가지고 있다. 포장재는 제품의 유통 혹은 저장 중에 발생할 수 있는 외부 혹은 내부의 화학적 또는 물리적 충격으로부터 제품을 보호하는 기본적인 기능을 가지고 있으며, 자동차는 사람 혹은 화물을 A지점에서 B지점까지 이동시키는 기능을 가지고 있다. 제품에 따라서는 하나이상의 기능을 수행하는 경우도 있으며 그 대표적인 예는 다음과 같다.

(표 1) 하나 이상의 기능을 수행하는 제품의 예

제품	기능 1	기능 2
열병합 발전소 비디오 기능이 포함된 TV 항공서비스	스팀 생산 영상 수신 사람 운송	전력 생산 영상 재생 화물 운송

- 기능단위는 제품의 기능을 정량적으로 나타내는 단위이고, 물발자국평가에서의 모든 계산의 기본이므로 물발자국평가 수행목적과 일치해야 한다. 기능단위의 예는 다음과 같다.

(표 2) 제품별 기능단위의 예

제품	기능단위
냉장고	① 15°C의 1L 물로 4°C로 냉각
포장재	① 350ml의 우유를 담을 수 있는 유리병 ② 29인치 TV를 포장할 수 있는 EPS ③ 500g의 감자 스낵을 포장할 수 있는 PE 백
농산물	① 1톤의 빵을 만들 수 있는 밀 ② 1kg의 단백질이 포함된 밀
페인트	① 1m ² 의 벽을 10년 동안 부식으로부터 보호할 수 있는 페인트
에너지	① 시간당 125°C 스팀 1톤을 생산할 수 있는 에너지

- 이 매뉴얼에서는 물발자국 산정시 기능단위를 일반적으로 시장에서 판매되는 제품단위로 기준으로 정의하였다. ‘단위제품’이라 함은 제품군이 아닌 세부 제품을 의미하는 것으로 반드시 아래와 같이 판매제품명으로 구분되어야 한다.

(표 3) 제품군내 세부제품의 예

구분	제품군	세부제품명
비내구재	음료 제품	옥수수 수염차 500ml 옥수수 수염차 350ml 옥수수 수염차 1L
	두부 제품	부침용 두부 340g 찌개용 두부 340g
	식용류 제품	콩기름 0.9L 콩기름 1.8L
생산재	반도체 메모리 제품	2GB DDR3 SDRAM 4GB LPDDR2 SDRAM
에너지 내구재	냉장고 제품	전기냉장고 RF903GTPEXR 전기냉장고 RF903GTPGXA

- 식음료의 경우 제품의 특성상 보편적으로 용량에 대해 “L” 또는 “mL”로 표기하나 경우에 따라서 낱개 또는 묶음으로 판매되는 경우가 있으므로 제품의 용량과 판매단위를 명확하게 정의해야 한다.
 - 예로 “탄산음료 1병”이 아니라 “탄산음료 1.5L 1병”으로 표기하는 것이 바람직
- 시장에서 출시되는 제품 단위가 명확하긴 하나, 이벤트 또는 기획 상품용 판매단위(예로, 대형마트의 1+1행사)의 경우 물발자국 산정을 위한 기능단위로 설정하는 것은 적절하지 않다.
- 서비스의 경우 수송, 우편, 호텔 서비스 등을 예로 들 수 있으며, 항공 서비스의 경우 기능단위를 “서울-일본(왕복)노선·인” 또는 “인·km 서울-일본 운행” 기준으로 선정할 수 있다.
- 기능단위가 불분명하거나 소비자의 이해를 돕기 위하여 필요한 경우 해당제품에 대하여 별도의 기능단위를 설정할 경우 정보의 왜곡 가능성 검토가 필수적이며, 필요시 전문가 의견 수렴이 필요하다.

8.4.1 제품의 가치사슬과 연계된 모든 공정과 활동을 포함하여야 한다. 만일, 특정 공정이나 활동이 누락된 경우에는 그 타당성을 입증하여야 하고 누락된 내용을 명확히 보고서에 기록하여야 한다.

8.4.2 시스템 경계는 제품제조전단계, 제조단계, 사용단계 및 폐기단계로 구분한다. 다만 제품의 특성에 따라 사용단계와 폐기단계는 제외될 수 있다.

- 제품제조전단계는 지구에서 자원을 채취한 후에 제품제조 사업장으로 들어오는 원료를 생산하는 단계까지를 포함한다.
- 제조단계는 연구대상 제품의 제조공정을 포함한다.
- 사용단계는 수명을 가진 제품의 서비스 활동기간을 포함한다. 즉, 에너지 사용 제품, 물 사용 제품 또는 물과 에너지를 모두 사용하는 제품의 경우에 제품별 에너지, 물 또는 에너지와 물 모두에 대한 사용 시나리오를 고려해야 한다.
- 폐기단계는 제품이 수명을 다한 후 재활용, 소각 또는 매립 등을 통해 처리되는 활동을 포함한다.

8.4.3 정의된 시스템 경계 내의 모든 공정 또는 활동에 포함된 투입물과 산출물 데이터를 포함하여야 한다. 그러나 연구의 신뢰도를 떨어트리거나 비교 가능성을 훼손시키지 않는 범위 내에서 일부 데이터를 수집대상에서 제외하는 기준을 설정할 수 있다. 이 경우 원료와 보조물질을 통합한 누적질량 기여도 95% 이상을 포함하여야 한다.

- 시스템 경계는 물발자국평가에 반드시 포함되어야 하는 단위공정들을 정의하는 것이다. 시스템 경계의 선택은 연구의 목적에 부합해야 하며, 시스템 경계를 수립하는 데 사용된 기준은 반드시 명확하게 설명되어야 한다. 물발자국평가를 위한 시스템 경계는 명

확하게 문서화되고 물발자국이 특정 제품을 위해 결정된 것인지 명시해야 한다. 반드시 물발자국평가에 어떤 단위공정들이 포함되어야 하는지 또한 이러한 단위공정들을 어느 정도로 상세하게 연구할지에 대해 결정하여야 한다.

- 물발자국 목록분석에 포함된 단위공정은 명확하게 확인되어야 한다. 또한 어떤 투입물과 산출물이 포함되어야 하는지에 대해 반드시 결정해야 하며, 물발자국 목록분석의 상세수준을 반드시 명확하게 서술해야 한다.
- 전과정 단계, 공정 또는 투입물 및 산출물들의 제외(Cut-off)는 전체 연구결과에 큰 변화를 일으키지 않는 경우에 한해서만 허용되고, 제외에 대한 결정은 반드시 명확하게 기록해야 하며, 이러한 이유와 예상결과를 반드시 설명해야 한다. 또한 어떤 투입물과 산출물이 포함되어야 하는지에 대해 반드시 결정해야 하며, 물발자국평가의 상세 수준을 반드시 명확하게 서술해야 한다.
- 이상적으로 제품 시스템은 그 경계에서 투입물과 산출물이 기본 흐름과 제품흐름이 되도록 모델화되어야 한다. 즉, 어떤 투입물 생산 단위공정(또는 산출물 투입 단위공정)이 연구 대상 제품 시스템 내에 포함되어야 하는가를 규명하는 것이다.
- 시스템 경계 설정 시 다음 사항들을 고려해야 한다.
 - 자연계와 기술계의 경계 : 자연계란 인간의 경제적 활동이 없는 계인 반면 기술계는 인간의 경제적 활동이 있는 계이다. 자연계에서 기술계로의 흐름을 기본흐름(Element Flow)이라 정의하고, 비기본흐름(Non-Elementary Flow)은 기술계 내의 흐름을 말한다. 일례로, 매립지의 경우 자연계와 기술계의 경계설정이 애매할 수 있는데 일반적인 경우 폐기물을 매립지에 매립한 후에도

일정기간 동안 경제적 활동이 지속적으로 발생된다. 이럴 경우에는 연구목적과 범위에 따라 자연계와 기술계의 경계를 설정하여야 한다.

- 시간적 경계 : 시간적 경계는 데이터를 수집할 공정의 기술적 수준으로 최신기술 또는 2년 내지 3년 전의 기술에 따른 데이터의 시간적 경계를 말한다.
- 지역적 경계 : 일반적으로 연구하고자 하는 제품의 모든 공정이 한 지역에서 일어나는 경우는 극히 드물다. 예를 들면, 원유는 중동지역에서 채취되며, 이 원유의 정제 및 플라스틱 혹은 연료의 생산 그리고 제품생산은 국내에서 일어난다. 또한 제품소비 및 폐기는 해외에서 발생하는 경우가 많다. 이럴 경우 각 지역에 따라 지역적 특성이 다르므로 공간적인 경계 설정이 필요하다.

(표 4) 전과정 단계별 지역적경계의 예

전과정	지역적 경계	지역적 경계에 따른 고려사항
원유채취	중동	그 지역특성에 맞는 전력 데이터 및 운송에 관한 데이터 사용
PE bag 생산	국내	국내 전력데이터/운송 데이터/ 폐기 데이터 사용
사용	국내	
폐기	국내	

- 기술계내에서의 경계 : 기술계 내에서의 경계설정이란 연구하고자 하는 시스템내에서의 생산단계, 유통단계, 사용단계 및 사용 후 단계(재활용, 폐기) 등의 경계 및 타 제품시스템과의 경계를 결정하는 것이다. 타 시스템과의 경계는 주로 재활용되는 물질이나 에너지가 다른 제품시스템에서 사용되는 재활용시스템에서 발생된다.

- 물발자국 산정을 위한 제품 시스템경계는 관련 데이터 수집 범위를 지정하는 단계로, 크게 ①제품제조전단계, ②제조단계, ③사용단계, ④폐기단계로 구분한다.
 - 각 단계별 운송 시 소모되는 에너지를 생산할 때 사용하는 물발자국 양이 산정되어야 하나, 이 매뉴얼에서는 전체 영향에서 차지하는 비중이 작을 것으로 판단하여 운송에 따른 물발자국은 고려하지 않는 것으로 하였다.
 - 제품제조전단계는 원료물질의 채취 및 제조, 그리고 협력업체의 제품 제조공정을 포함해야 한다. 협력업체는 가능한 경우 대상제품을 생산하는 제조공정으로 들어오는 원료 혹은 부품의 원료가 되는 2차 혹은 3차이상의 모든 협력업체를 시스템 경계내에 포함해야 한다. 다만, 이러한 경우 데이터 수집범위가 넓어 엄청난 시간과 비용이 소요될 수 있으므로 연구목적에 따라 협력업체의 데이터 수집범위를 정해야 할 것이다. 참고로 국내에서 시행하는 탄소성적표지에서는 제조전단계의 시스템 경계는 원료물질의 채취 및 제조와 1차 협력업체의 생산제품 제조공정만을 포함시키고 있다.
 - 제품제조단계에서는 제품과 관련한 모든 공정을 포함시켜야 한다. 가령, 냉장 및 냉동 보관 제품에 대하여는 매장에서의 제품의 보관도 포함을 시키고 제품 제조공정 중 기업의 사정에 따라 일부 공정을 외부에 위탁한 경우 이를 포함시키는 것이 바람직 하겠다.
 - 사용단계는 주로 에너지나 물을 사용하는 제품들이 해당되는데, 이러한 제품들은 사용기간 및 사용방법, 사용량 등의 사용시나리오를 설정하여 사용단계가 시스템 경계내에 포함되도록 해야 할

것이다. 이 매뉴얼은 물발자국 산정에 필요한 일반적인 요건을 포함하고 있으며, 제품 사용단계에서 물발자국 산정이 필요할 경우 제품별로 별도의 사용시나리오를 설정해야 한다. 이 매뉴얼에 서는 사용단계에 대한 시나리오를 별도로 제공하지 않았다. 세탁기의 경우 1회 세탁시 물, 전력 및 세제 사용량, 연간 사용횟수, 세탁기의 제품 수명 등에 대해 정의된 사용단계 시나리오의 작성성이 선행되어야 사용단계에서의 물 사용량의 계산이 가능하다.

(사용시나리오 예 1) 가정용 세탁기의 사용단계에서의 물사용량 산정을 위한 사용시나리오

- 가정용 세탁기의 연간 사용횟수는 ○○○회, 수명은 ○년으로 가정
- 총 물 사용량 : 표준 프로그램 1회 동작 시 물 사용량(L) X ○○○회 X ○년

(사용시나리오 예 2) 가정용 비데의 사용단계에서의 물사용량 산정을 위한 사용시나리오

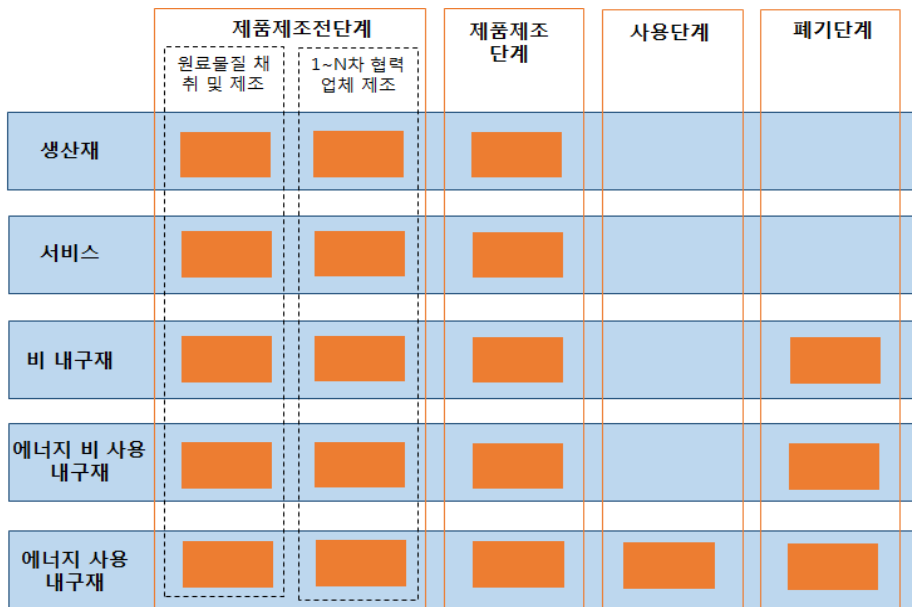
- 가정용 비데 연간 사용횟수는 ○○○회, 수명은 ○년으로 가정
- 총 물 사용량 : 표준 프로그램 1회 동작 시 물 사용량(L) X ○○○회 X ○년

(사용시나리오 예 3) 가정용 가습기 사용단계에서의 물사용량 산정을 위한 사용시나리오

- 가정용 가습기 연간사용 일수는 ○○○일, 1일 사용시간 ○시간, 수명은 ○년
- 총 물 사용량 : 1시간 동작 시 물 사용량(L) X ○시간/일 X ○○○일 X ○년

- 시스템 경계에 폐기단계를 포함시키기 위해서는 제품 구성 재질별 폐기 시나리오를 설정해야 하는데 환경부에서 고시한 제품 및 포장재별 재활용의무율과 폐기물 통계자료 등을 활용하면 될 것이다. 일반적으로 제품의 폐기는 재활용, 소각, 매립으로 처리되는데 각 폐기공정에 따른 물사용량 등 물과 관련한 환경영향을 파악해야 한다.

- 제품별 시스템 경계설정의 예는 다음과 같다.
 - 생산재와 서비스의 경우 제품제조전단계와 제품제조단계를 포함
 - 비내구재의 경우 제품제조전단계와 제품제조단계, 폐기단계를 포함
 - 에너지 비사용 내구재의 경우 제품제조전단계와 제품제조단계를 포함
 - 에너지 사용 내구재의 경우 제품제조전단계와 제품제조단계, 사용단계, 폐기 모두를 포함



<그림 4> 제품별 시스템 경계 설정의 예

- 평가에 어떤 투입물이 포함되어야 하는지를 결정하기 위해서 물 발자국평가 수행 시에 질량, 에너지, 환경적 중요성과 같은 여러 초기포함기준들이 사용된다. 질량에만 기초하여 초기 투입물 파악이 이루어지면 중요한 투입물이 그 연구에서 누락되는 결과를 낳

을 수 있다. 따라서 에너지 및 환경적 중요성 관련성이 이 과정에서 기준으로 함께 사용되어야 한다.

- 질량 질량을 기준으로 사용할 때, 모델화될 제품 시스템의 투입물 질량의 일정 비율 이상 누적으로 기여하는 모든 투입물을 연구에 포함해야 한다.
- 에너지 기준으로 에너지를 사용할 경우 적절한 결정으로서 유사하게 제품 시스템의 에너지투입물의 정해진 백분율 이상으로 누적으로 기여하는 투입물을 연구에 포함해야 한다.
- 환경적 중요성 환경적 중요성 기준에 대한 결정은 환경적 관련성으로 인해 특별히 선택된 제품 시스템 내 개별 데이터의 산정된 양에 대해 추가적으로 정의된 양보다 크게 기여하는 투입물을 포함하도록 해야 한다.
- 하지만, 물발자국평가에서는 통상 질량을 기준으로 데이터 수집대상의 제외기준을 적용하는 것이 일반적이므로 이 매뉴얼에서는 질량만을 제외기준을 정하였다.
- 제품 유형에 따른 시스템 경계 내에서 누적질량을 기준으로 상위 95% 이외의 배출량 기여도가 미미한 원료·보조물질에 대한 현장 데이터 수집 및 제외 여부를 확정하였다.
- ‘제품 제조 사업장’으로 투입된 모든 ‘원료물질과 보조물질’의 총량 대비 누적질량기여도 상위 95%에 해당하는 ‘원료물질과 보조물질’을 데이터 수집 대상으로 고려할 수 있다.
- 누적질량기여도 산정시 공정수, 유틸리티, 에너지 등 제품 질량에 직·간접적인 영향을 미치지 않는 경우 제외(단, 화학공정 등의 보조물질은 포함)할 수 있다.

- 탄소발자국(탄소성적표지) 계산시 포장재는 제품과 별개로 포장재 자체의 누적질량 기여도를 평가하나, 데이터 수집 및 계산의 편의를 위해 제품에 포함하여 계산하는 것이 바람직하다.
- 누적질량기여도 95%에 다른 현장 데이터 수집 대상을 결정하는 방법에 대한 예시를 아래 (표 5)에 나타내었다.

(표 5) 누적질량 기여도에 따른 수집대상 결정방법(예시)

구성 물질	제품 1		제품 2		제품 3	
	중량	누적중량 비율	중량	누적중량 비율	중량	누적중량 비율
주원료 A	60g	60%	45.1g	45.1%	50.0g	50.0%
주원료 B	22g	82%	35.0g	80.1%	45.1g	95.1%
주원료 C	12g	94%	14.9g	95.0%	2.5g	97.6%
보조원료 a	4g	98%	3.2g	98.2%	1.4g	99.0%
보조원료 b	2g	100%	1.8g	100%	1.0g	100%
수집대상	주원료 A, B, C 보조원료 a		주원료 A, B, C		주원료 A, B	

8.5.1 시스템 경계에 포함된 모든 가치사슬의 공정 또는 활동에 대하여 현장 데이터를 수집하는 것을 원칙으로 한다. 만일 현장 데이터가 수집되지 못하는 경우에는 그 사유를 명확히 제시하여야 한다.

- 현장 데이터는 시간적, 계절적 편차를 줄이기 위해 1년 누적 데이터를 원칙으로 하며, 시간적 편차가 없다는 것이 입증 가능한 경우 월별 또는 일별 데이터를 수집할 수 있다.
- 데이터 수집기간 중에 폭발 또는 화재와 같은 비정상 운영상태가 발생한 경우 이에 따른 영향이 미치는 기간 동안의 데이터는 수집하지 않아야 한다.

8.5.2 데이터 수집은 다음의 항목을 포함한 데이터 수집 양식을 활용하여야 하며, 이렇게 작성된 데이터 수집양식은 보고서에 수록하여야 한다.

- 데이터 작성자 및 보고서 작성자의 인적사항
- 해당 제품 제조공정에 대한 공정도 및 공정 설명자료
- 제품 사진
- 제조 사업장의 주소
- 현장 데이터의 목록과 그 투입량 및 배출량
- 수집 데이터의 출처 및 산출방법
- 단위 및 전환인자
- 데이터 수집기간

8.5.3 수집 데이터에는 다음을 포함하여야 한다.

- 연간 제품 생산량 또는 생산대수, 필요시 부산물의 생산량
- 원자재 및 부자재 사용량
- 수원별 물 사용량
- 연료 및 에너지, 유틸리티 사용량
- 공정 폐기물 및 대기 배출물 발생량
- 폐수 발생량
- 생산수율

8.5.4 다음의 데이터는 수집하지 않을 수 있다.

- 자본재 설비 및 건물의 건축과 운영(청소, 취사 및 음용 등에 사용되는 수자원, 조명, 냉난방 등), 제품 생산과 직접 연관이 없는 소모품(작업복, 장갑, 윤활유 등)
- 종업원의 위락시설 및 식당, 출퇴근용 차량 운행

8.5.5 일반 데이터는 다음의 순서에 따라 데이터를 수집한다. 다만 2순위 이하의 데이터를 수집하는 경우에는 그 이유를 명확히 보고서에 기록하여야 한다.

- 1순위 : 현장 데이터 수집
- 2순위 : 해당 국가 공인 데이터(농어촌연구원, 환경부, 산업통상자원부 등)
- 3순위 : 국제 공인 데이터(Eco-Invent DB 등)
- 4순위 : 해당 분야 공인 데이터(국제철강협회 등)

- 수집해야 할 데이터는 크게 투입물과 산출물이 있다. 투입물로는 제품원료물질 혹은 물과 같은 유틸리티 그리고 에너지가 있으며, 산출물로는 제품을 포함하여 부산물과 오염물질이 있다. 물발자국 산정 시 결과에 가장 영향을 미치는 중요한 인자 중의 하나는 사용된 데이터의 값이다.
- 수집되어야 할 다른 데이터 사이에서 물과 관련된 다음의 데이터는 데이터 수집을 위해 고려되어야 한다.
 - 사용된 물의 양(취수와 배출을 포함)
 - 사용된 물자원의 유형(취수와 배출수체를 포함)
 - 만약, 진행되고 있는 연구 목적과 범위에 관련한다면 배수, 하천 유량, 지하수 유량 혹은 토지 이용변화로부터 발생한 물의 증발, 토지관리 활동, 다른 형태의 물 차단에서의 변화

- 만약 물사용이 발생한다면 그 지역의 관련 환경 조건 지표를 결정하기 위해 필요한 물사용 장소(취수, 물 배출 혹은 수질에 대한 영향을 포함)
- 만약 관련한다면, 물 흐름, 취수 그리고 배출에서의 계절적 변화 혹은 수질에서의 변화
- 만약 관련한다면, 물 사용의 시기와 물저장 공간의 길이를 포함한 물사용의 시간적 측면
- 만약, 어떤 이러한 사항들이 고려되었으나 포함되지 않았다면 제외된 이유에 대한 근거를 문서화하여야 한다. 데이터의 수집, 타당성 확인, 분석, 통합화와 보고에서 사용된 가정은 문서화되어야 한다.
 - 수질에 영향을 미치는 대기, 수계 그리고 토양으로의 배출
- 수집해야 할 데이터는 시스템 경계내의 단위공정들로 연계된 생산 지역으로부터 수집되거나 다른 출처로부터 얻거나 계산될 수 있다. 수집 데이터의 품질요건은 측정치, 계산치, 추정치로 구분되며 측정치에 따른 데이터 수집을 기본 원칙으로 함
 - 단, 측정치에 대한 데이터 수집이 불가능한 경우, 계산치 및 추정치를 사용하되 “가정 및 제한” 사항에 그에 대한 근거를 명확히 설명해야 한다.
 - “측정치”란 제품별로 관리되는 데이터 중 객관적 분배기준에 따라 분배한 데이터. “계산치”란 공장별로 측정된 데이터 중 객관적인 분배기준에 따라 제품별로 분배한 데이터. “추정치”란 공장별로 관리되는 데이터 중 주관적인 분배기준에 따라 제품별로 분배한 데이터.

- 데이터는 현장(1차)데이터 수집을 원칙으로 하여야 한다. 만약 현장데이터 수집이 가능하지 않은 경우 일반데이터(2순위~4순위)를 사용할 수 있다. 다만 중요한 공정들을 위해 일반데이터를 사용하는 이유를 정당화하고 문서화해야 할 것이다.
- 제조공정의 수집할 데이터는 정상상태의 현장데이터이어야 하므로 가능한 최근 3년 이내에서 양산 안정화가 이루어진 이후 시점의 1년간의 누적평균데이터를 수집하는 것이 바람직하다.
 - 데이터 연한에 대한 국제적인 기준은 없으나 일반적으로 최근 3년 이내의 데이터의 사용을 권장하고 있다.
 - 1년간의 데이터를 수집하는 이유는 계절에 따른 생산공정상의 변화를 고려하기 위한 것으로 데이터 품질지표의 완전성과 대표성을 반영한 것임. 일반적으로 탄소발자국이나 전과정평가(LCA)에서도 1년 누적평균데이터를 적용하고 있다.
 - 만약, 1년 미만의 데이터를 수집할 경우 그 사유를 제시하고, 데이터의 대표성이 입증되는 유사제품의 최신 1년 누적평균데이터를 분석하여 1년 데이터로 보정하는 것이 바람직하다.
 - 다만, 1년 동안 생산조건이 동일하다는 것이 입증될 경우 3개월 이상의 데이터만 수집해도 물발자국 결과 산출이 가능할 수 있다.
- 제조공정으로 들어오는 제조전단계의 원료 혹은 부품을 생산하는 다수의 협력업체가 존재하는 경우 모든 협력업체의 현장데이터를 수집하는 것이 원칙이지만 데이터 수집에 따른 시간과 비용을 고려하고, 협력업체간의 생산공정의 유사성과 데이터의 대표성이 입증된다면 제품제조공정에서 해당 협력업체 생산제품의

누적 구매량이 최소한 50%이상을 포함하는 협력업체의 데이터를 수집하는 것을 적용할 수 있다.

- 제조전단계의 데이터 수집범위를 1차 협력업체로 목표를 설정한 경우, 1차 협력업체 생산제품 제조사업장에서 사용된 누적 질량기여도 상위 95%에 해당하는 원료물질 및 보조물질은 상위흐름의 현장데이터를 수집하는 것이 바람직하나 이의 적용이 어려운 경우 일반데이터를 적용할 수 있다. 이 경우 반드시 일반데이터 사용 우선순위 원칙을 적용해야 할 것이다.
- 폐기단계를 포함하는 제품은 해당 제품 폐기물과 제품과 함께 출하되는 포장재 폐기물에 대하여 각각 누적질량 기여도 95%에 해당하는 것에 대하여 구성재질별로 재활용과 소각, 매립에 대한 하위흐름 데이터를 수집해야 한다.
- 데이터 수집은 업체의 규모 및 현황에 따라 다를 수 있으나 다음의 정보에 대해 수집하는 것이 일반적이다.
 - 에너지 및 연료원인 전력 및 화석연료는 사용량을 증명할 수 있는 명세서에 근거하되, 스팀의 경우 에너지원이 다양하므로 해당 에너지원에 대한 사용량을 입증하는 것이 필수이다.
- 데이터 수집시에 공정의 특성, 소요되는 원·부자재 및 에너지, 생산되는 제품 및 부산물, 배출되는 대기·수질 오염물질 및 기타 환경부하 등에 대한 정보를 기입할 수 있는 ‘데이터 설문서’를 사용함. 데이터 설문서는 <그림 5>와 <그림 6>에 나타낸 것처럼 기본적으로 2개 부분으로 나눌 수 있다.
 - 첫 번째 부분(PART A)에는 설문지 기입자 및 공정담당자의 인적사항, 공정 파라미터 개요 등을 기술
 - 두 번째 부분(PART B)에는 단위공정별로 정량적인 파라미터

- 두 번째 부분의 PART B 양식에 나타낸 각각에 대한 설명은 다음과 같다.
 - 공정명 : 대표 단위공정명을 기입(예, 종합공정)
 - 구분 : 투입물에는 주흐름(mainflow), 재활용, 원료물질, 에너지, 유틸리티, 화학물질, 기타 등을, 산출물에는 제품, 부산물, 대기 오염물질, 수질 오염물질, 폐기물 등을 기술
 - 파라미터 번호(No) : 설문지의 경로(Path) 항목과 연결하여 공정 내의 순환 및 재활용 흐름을 파악하는데 중요하게 사용
 - 파라미터 명(name) : 제품명을 기입하며, 만일 회사의 기밀유지를 위해 공개가 어려운 경우 제품명이 아닌 관용명(용도)을 기입하게 된다. (예, Kpc-1은 첨가제로, Brine은 냉매로 기입). 이 때 구분이 주흐름인 경우 파라미터명도 주흐름으로 표시
 - 경로(Path) : 파라미터의 출처와 경로를 기입
 - 외부흐름 : 투입경로(투입물), 배출경로(산출물) 기입(예, 개시제(외부), 폐촉매(위탁처리), 폐수 등)
 - 내부흐름 : 공정내 순환흐름으로 물질, 냉각수, 공정수, 스팀 등이 포함
 - 사용량 및 특징(Usage/Spec.) : 해당 파라미터의 용도와 특징을 기입(예, 이형제, 열안정제, 색조제, pH 조절제, 열교환용 등)
 - 데이터 출처(Data source) : 데이터 품질평가를 위한 기초자료로 데이터 출처 기입(예, 연보, 원단위표, 환경영향 평가자료, 구매장부 등)
 - 데이터 관리수준(Data control) : 데이터의 관리수준을 나타낸 것으로 개별관리 또는 통합관리로 기입. 개별관리는 단위공정별 할

당이 없이 처리된 데이터(원·부자재 사용량 등)를, 통합관리는 단위공정별 할당에 의해 처리된 데이터(전기, 압축질소, 압축공기 등)를 의미

- 사용량(Amount/yr) : 연간 사용량 또는 배출량에 대한 수치 기입
- 단위(Unit) : 해당단위를 기입하며, 질량은 kg으로, 전력은 kWh로 스팀 등 에너지는 MJ로 표시하는 것이 일반적이며, 사용량의 단위가 맞지 않을 경우 해당 단위를 기입하고, 비고(Comment)란에 환산계수를 추가로 기입

8.6.1 연구결과의 신뢰성을 높이기 위하여 수집하는 데이터는 다음의 데이터 품질기준을 고려하여야 한다.

- 시간적 범위 : 시간적으로 최신의 데이터를 사용하여야 한다.
- 지역적 범위 : 제조공정과 동일하거나 유사한 지역의 데이터를 사용하여야 한다.
- 기술적 범위 : 데이터 수집시 사용된 기술은 연구대상 제품의 기술과 동일하여야 한다.
- 일관성 : 데이터의 수집 및 계산시 사용한 절차와 방법이 이 매뉴얼에 따라 일관되게 작성되어야 한다.
- 완전성 : 사전에 정의한 시스템 경계 내의 모든 데이터를 수집하여야 한다.

8.6.2 제품 가치사슬의 모든 공정 및 활동과 연계된 데이터에 대한 품질평가를 수행할 경우 이를 보고서에 명확히 기록하여야 한다.

- 데이터는 다음과 같은 3가지 특성들이 있다.
 - 시간적 범위는 데이터의 연한과 수집시간의 최소길이를 의미하며, 가능한 최신의 데이터를 사용
 - 지역적 범위 : 단위공정에 대해 수집할 데이터의 지역적 범위로 지역 특성에 맞는 데이터의 사용
 - 기술적 범위 : 현 기술수준에 맞는 데이터의 사용
- 상기 데이터의 특징 외에도 데이터의 품질수준을 평가하는 지표로 다음과 같은 사항들이 있다.
 - 정밀성(Precision) : 데이터 값의 분포 정도 혹은 변화도의 척도이다, 각 단위공정에서 사용되는 데이터 값의 정밀도는 평균 및 표

준편차로 나타낼 수 있으며, 이러한 정밀도로 데이터의 불확실성을 평가할 수 있다.

- 완전성(Completeness) : 단위 공정에서 수집할 데이터의 숫자 대 실제 수집한 데이터 숫자의 비율을 나타낸다. 정밀성과 마찬가지로 완전성은 데이터의 불확실성을 평가할 수 있다.
- 대표성(Representativeness) : 사용된 데이터가 해당 공정을 어느 정도 반영하는지를 나타내는 척도이다. 대표성은 완전성과 비슷하나 제품의 지역적, 시간적 및 기술적 측면에 초점을 두고 있다.
- 일관성(Consistency) : 방법론을 연구의 과정에서 얼마나 일관성 있게 적용하였는가를 나타내는 척도이다.
- 재현성(Reproducibility) : 연구방법 및 데이터의 값 등에 관한 자료를 사용하여 독립적 관계에 있는 연구자가 전과정 물발자국평가의 결과를 재현할 수 있는지를 나타내는 척도이다.
- 데이터 품질평가는 Pedigree method 방법을 사용하여 평가할 수 있다. Pedigree 방법에 적용할 수 있는 품질평가표를 아래 (표 6)에 나타내었으며, 값이 낮을수록 데이터의 품질은 좋다.
- 예로 A제품 제조공정에서 최근 3년 이내의 60%가 동일기술인 해당공정의 실제 전력 사용량 값을 90% 이상 데이터를 수집해서 지침에 따라 계산했다고 했을 경우 30(1,1,3,2,2)로 표시되며 데이터품질지표는 1.8(평균값)이다.

(표 6) 데이터 품질 평가표

점수	시간적 대표성	지역적 대표성	기술적 대표성	일관성	완전성
1	모든 데이터가 최근 3년 이내	모든 데이터가 해당지역 데이터	모든 데이터가 동일기술 데이터	모든 데이터의 출처·계산방식이 지침에 따름	연구대상의 모든 데이터가 수집됨
2	70% 이상 데이터가 최근 3년 이내	70% 이상해당 지역 데이터	70% 이상동일 기술 데이터	90% 이상 데이터의 출처·계산방식이 지침에 따름	연구대상의 90% 이상 데이터가 수집됨
3	50% 이상 데이터가 최근 3년 이내	50% 이상해당 지역 데이터	50% 이상동일 기술 데이터	70% 이상 데이터의 출처·계산방식이 지침에 따름	연구대상의 70% 이상 데이터가 수집됨
4	30% 이상 데이터가 최근 3년 이내	30% 이상해당 지역 데이터	30% 이상동일 기술 데이터	50% 이상 데이터의 출처·계산방식이 지침에 따름	연구대상의 50% 이상 데이터가 수집됨
5	30% 미만 데이터가 최근 3년 이내	30% 미만해당 지역 데이터	30% 미만동일 기술 데이터	50% 미만 데이터의 출처·계산방식이 지침에 따름	연구대상의 50% 미만 데이터가 수집됨

- 데이터 품질 요구조건은 반복적 속성(iterative nature)이 있어, 물발자국 산정 초기 정의된 품질요건에 맞게 데이터 수집이 수행되어야 하며, 만족하지 못할 경우 데이터 품질요건을 재정의하여 추가 데이터 조사를 수행해야 한다.
 - 그래도 데이터 품질요건을 만족하지 못할 경우에는 데이터 품질요건의 재정의 및 데이터 조사 수행을 반복해서 수행해야 한다.
 - 누락한 데이터의 처리는 반드시 문서화되어야 한다. 만약, 가정이 되어야 한다면, 명확하게 그러한 이유를 명시하고 가정을 위한 근거를 기술해야 한다.

8.7.1 수집한 데이터의 신뢰성 검증을 위하여 물질수지 검증을 수행하고 그 결과를 보고서에 기록하여야 한다. 다만, 물을 원료로 사용하는 제품은 물질수지 이외에 물수지(water balance)를 별도로 검증하여야 한다.

8.7.2 제품별로 관리되는 데이터가 아닌 사업장별로 관리되는 데이터를 수집한 경우에는 이를 제품 단위로 환산하는 과정을 명확히 기록하여야 한다.

8.7.3 데이터 계산시 필요할 경우 다음의 할당 원칙을 적용하여야 한다.

- 공정 중 다수의 제품이 생산되는 경우 공정의 분할 또는 확장을 통해 가급적 할당을 피한다. 만일 할당이 불가피 한 경우에는 제품 무게, 제품가치에 의한 할당을 순서대로 실시한다.
- 재활용 물질을 재활용업체로 보내는 업체는 재활용업체까지의 수송에 의한 물발자국 관련 정보를 포함한다. 반면 재활용 원료를 사용하는 업체는 재활용공정에서의 환경부하를 포함한다.

8.7.4 방류되는 폐수에 대해서는 방류수 수질기준까지 복원시키는데 필요한 희석수량을 별도로 산정한다. 만일 방류수의 수질오염 지표 값이 법적기준보다 낮을 경우에는 별도의 희석수는 없는 것으로 가정한다.

8.7.5 폐기되는 제품에 대한 재활용률 산정 및 소각, 매립 등의 비율을 산정하는 것은 국가의 상황을 반영하여야 하며, 재활용률 산정을 위한 규정은 국제표준 또는 이에 준하는 출처에 따라야 한다. 또한 폐기 시나리오 적용 및 관련 표준의 적용에 관해서는 명확히 보고서에 기록하여야 한다.

8.7.6 모든 데이터는 기능단위를 기준으로 환산하여야 한다.

- 데이터 설문서에 의해 수집된 데이터는 데이터 검증이란 단계를 걸쳐서 기능단위에 적합하게 계산해야 하며, 물질 수지나 에너지 수지가 틀릴 경우에는 다시 데이터를 수집해야 한다.
 - 데이터 검증의 방법으로는 ‘전문가 검토’, ‘물질 및 에너지 수지 검토’, ‘기존 데이터와 비교’가 있다.
 - 데이터 검증 시 기본적으로 단위공정별 그리고 전체적으로 물질 수지를 검토하며 필요시 에너지 수지에 대한 검증도 동시에 수행해야 한다. 이를 통해 투입물의 합과 산출물의 합이 같은지를 체크해야 한다.
 - 물질수지의 예는 다음과 같다. 음료제품을 생산하는 공정에 대해 원료물질로 상수와 유틸리티로 세척수를 사용하고, 제품으로 음료수와 수계배출물로 폐수 데이터가 수집되었다. 데이터 검증 시 투입물의 총량은 910kg이며, 산출물의 총량은 800kg으로 상호간의 물질수지가 맞지 않음을 확인하였다. 현장 담당자가 투입물의 세척수 일부가 대기 중으로 증발되는 것을 데이터 수집 시 제외한 것을 확인하였을 때, 증발된 세척수를 산출물의 대기배출물로 100kg을 포함시켜 물질수지를 맞추어야 할 것이다.

(표 7) 데이터 수집 및 물질수지 검증의 예

구분	분류	항목명	용도 및 사용처	투입량	단위	데이터품질
투입물	원료물질	반제품	원료	100	kg	계산치
		상수	희석용	300	kg	계산치
	보조물질	소금	용수 제조	10	kg	실측치
	유틸리티	세척수	필터세척	500	kg	실측치
산출물	제품	소주	완제품	410	kg	실측치
	수계배출물	폐수		400	kg	실측치

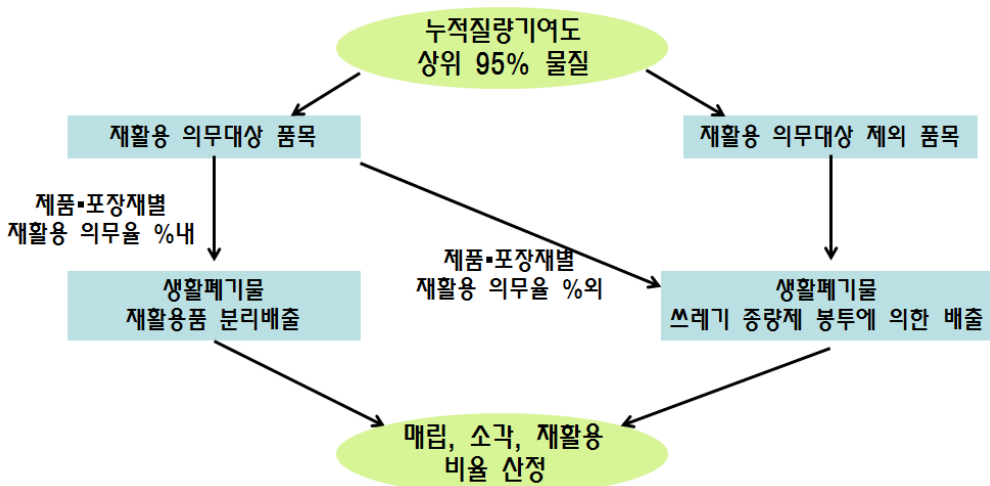
- 전과정평가기법을 활용한 물발자국 혹은 탄소발자국평가에서의 할당은 공정과 운송 혹은 타 제품시스템에 의해 야기된 환경부하를 어떤 비율로 분배하는가를 결정하는 것이다. 할당은 다중투입/산출공정(Multi-Input/Output Process) 또는 열린고리재활용시스템 등에서 발생한다.
 - 다중산출공정은 두 가지 이상의 제품 혹은 부산물이 생산되는 공정(열병합발전소 등)으로 데이터 산출시 이 경우 투입물과 산출물 간에 물리적 또는 경제적 가치 관계에 따라 공정에서 발생하는 환경부하 값을 제품에 분배하는 할당(allocation)이 필요하다.
 - 다중투입공정은 두 가지 이상의 투입물이 투입되어 환경부하로 변하는 공정으로 소각장 혹은 폐수처리장이 포함된다.
 - 열린고리재활용시스템은 물질이나 에너지가 사스 시스템 경계를 넘어 재활용되어 다른 제품시스템에서 다시 사용되는 재활용시스템을 말한다.
- ISO 14046에서는 시스템 경계를 확장하거나 공정을 세분화해 할당 문제를 가능한 최소화 하도록 권고하고 있으며, 일반사항을 다음의 3가지 사항을 언급하고 있다.
 - 할당 절차는 명확한 설명과 기술을 문서화해야 하며, 이에 따라 투입·산출물을 다양한 제품에 할당해야 한다.
 - 단위공정으로 할당된 투입·산출물의 합은 할당 전에 단위공정으로 투입된 투입·산출물의 합과 동일해야 한다.
 - 다양한 대안 할당 절차가 적용될 수 있을 때마다, 선택된 접근법에 대한 민감도 분석을 수행해 결과 값을 예증해야 한다.
- ISO 14046에서의 할당절차는 다른 제품시스템과 공유하는 공정을

반드시 규명해야 하고, 아래에 제시된 순차적 단계에 따라 다루어야 한다고 언급하고 있다.

- Step 1 : 가능한 한 할당되는 단위 공정을 두 개 또는 그 이상의 하위 공정으로 분리하고 이들 하위 공정과 관련된 투입물과 산출물 데이터를 수집하는 방법, 또는 부산물과 관련된 추가적 기능을 포함하도록 제품시스템을 확장하여 할당을 피할 것
- Step 2 : 할당을 피할 수 없는 경우, 시스템의 투입물과 산출물은 근본적인 물리적인 관계를 반영하는 방식으로 그것의 다른 제품들 또는 기능들 사이에 할당되어야 함
- Step3 : 할당의 근거로서 물리적 관계만을 수립하거나 사용할 수 없는 경우에, 그들 간의 다른 관계를 반영하는 방식으로 제품 및 기능들 사이에서 투입물이 할당되어야 함
- 일반적인 다중투입/산출공정에서의 할당방법의 경우의 할당인자는 물리 및 화학적 특성 즉, 중량, 부피, 에너지, 면적이 적용되며 이와 함께 가격이나 이윤 같은 경제적 가치에 의한 할당인자가 고려될 수 있다.
 - 탄소발자국(탄소성적표지)에서는 제품과 부산물간의 환경부하의 할당은 통상 중량비를 적용하고 있으며, 열병합발전과 같이 제품과 부산물이 모두 에너지량을 물리적 단위로 사용하는 경우에는 할당기준을 에너지량으로 적용한다.
 - 또한 사업장 외부 폐수처리장으로 폐수를 위탁해서 처리할 때 폐수의 양보다는 폐수량과 농도를 곱한 오염물질의 양에 따라 투입되는 화학약품 등의 양이 달라지기 때문에 이 경우에는 할당기준은 폐수량이 아닌 폐수에 포함된 오염물질의 양을 적용한다. 단, 일반적으로 오염물질의 양을 측정할 수 있는 표준화된 방법이 없

는 경우엔 폐수처리장에서 각 폐수별로 부과하는 폐수처리비용을 할당기준으로 적용하기도 한다.

- 물발자국평가에서 탄소발자국의 경우와 같은 할당기준을 적용하는 것이 바람직할 것이다.
- 탄소발자국(탄소성적표지)에서는 사용후 폐기되는 물질에 대해서 ‘재활용 의무대상’ 품목과 ‘재활용 의무대상 제외 품목’으로 구분하여 매립, 소각, 재활용 비율을 이론적으로 산정하고 있음
 - 물발자국 산정의 대상이 되는 제품이 실제로 폐기될 때의 재활용, 소각, 매립량을 각각 파악 가능할 경우는 실제 조사된 값을 사용하는 것이 바람직하나, 데이터 조사가 불가능할 경우는 상기 방법을 따르는 것을 권장한다.
 - 폐기단계 시나리오에 따라 재활용, 소각 및 매립 되는 양을 조사하기 위해서는 환경부의 “전국 폐기물 발생 및 처리현황”의 재질별 처리비율을 참조한다.



<그림 7> 제품의 폐기 단계 시나리오

9.1 제품 물발자국의 선언은 해당 제품이 이 매뉴얼의 요건과 절차에 따라 물발자국을 산정하였음을 의미한다.

9.2 물발자국 선언은 제품의 기능단위를 기준으로 다음과 같이 선언한다.

제품명	합계	제조전단계	제조단계	사용단계	폐기단계
물발자국(L)					

9.3 제품에 대한 물발자국을 선언할 때 이해 관계자의 이해를 돕기 위하여 부가정보를 제공할 수 있다. 아울러 가능하다면 물발자국 산출결과의 저감을 위해 감축계획을 함께 선언한다.

- 물발자국 정보는 기능단위 기준으로 계산된 총 값과 각 단계별 결과 값을 매뉴얼에 제시한 양식에 각각 제시해야 한다.
- 각 투입물에 따른 물발자국 계산 결과를 제공하는 것은 계산된 물발자국의 결과값을 보다 상세히 파악하는데 도움이 된다.
 - 투입물별 물발자국 계산 결과 값, 전체 물발자국 대비 각 투입물의 물발자국 소요 비율, 직접수 및 간접수 비율 등을 제시할 수 있다.

(표 8) 각 투입물별 물발자국 계산 결과(예시)

구분	물질명	사용량 (A)	물발자국 DB (B)	물발자국 (A*B)
제조 전단계	LLDPE	1.07E-03 kg	521.573 L/kg	5.58E-01 L
	PE	2.72E-04 kg	522.573 L/kg	1.42E-01 L
	PET	2.27E-04 kg	2,189.132 L/kg	4.97E-01 L
	용제	8.85E-05 kg	320 L/kg	2.84E-02 L
	전력	1.43E-06 kWh	632.032 L/kWh	9.05E-04 L
	LNG	1.75E-04 kg	5.973 L/kg	1.04E-03 L
	원맥	9.70E-01 kg	997.392 L/kg	9.68E+01 L
제품 제조단계	용수	6.89E-03 kg	1.000 L/kg	6.89E-03 L
	PE(필름)	8.79E-01 kg	522.573 L/kg	8.79E-01 L
	전력	5.61E-03 kWh	632.032 L/kWh	5.61E-03 L
	종이	2.90E-03 kg	980.944 L/kg	2.84E+00 L
	PE(랩)	1.56E-05 kg	522.573 L/kg	8.13E-03 L
	PE(번들)	2.00E-04 kg	522.573 L/kg	1.05E-01 L
총 물발자국 계산 값				101.85 L

참 고 문 헌

<참 고 문 헌>

- 건설교통부, 2006, 2006 지하수 통계연보
- 건설교통부, 2006, 수자원장기 종합계획 (2006~2020): 제4편 물이용종합계획, pp. 219-386
- 권오상, 류덕희, 박상미, 박혜경, 안우정, 2001. 수산물양식시설 배출수 수질기준 설정방안, 국립환경연구원 p46.
- 김영득, 이상현, 이성희, 2013. 산업연관분석을 활용한 물발자국 인벤토리 개발. 한국수자원학회논문집, 46, 401-412.
- 농촌진흥청, 2009, 품목별 관리메뉴얼, <http://www.rda.go.kr/jsp/rda/index.jsp>, Accessed 2009. 04. 07.
- 원현규, 김영환, 장광민, 김철민, 이경학, 2011, 경제림육성단지 관리방안과 장기경영계획 모델. 국립산림과학원, pp. 59-62.
- 유승환, 최진용, 김태곤, 임정빈, 전창후, 2009, 한국의 농산물 가상수 산정. 한국수자원학회논문집 42 (11): 911~920
- 통계청, 2004, 2003 산업총조사 보고서.
- 한국은행, 2008, 2005년 산업연관표.
- 한국환경산업기술원, 2011, 환경성적표지 개선방안 연구
- 한국환경산업기술원, 2014, 탄소성적표지인증제도 인증작성지침
- 환경부, 2005, 2005 전국 오염원조사 보고서.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998, Crop Evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. FAO.
- Chapagain, A.K. and A.Y. Hoekstra, 2003, Virtual water flows between nations in relation to trade in livestock and livestock products, Value of Water Research Report Series No. 13, UNESCO-IHE.
- Chapagain, A.K. and A.Y. Hoekstra, 2004, Water footprints of nations, Value of Water Research Report Series No. 16, UNESCO-IHE.
- ISO 14044, Environmental Management-Life cycle assessment -

- Critical Review processes and reviewer competencies - Additional requirement and guidelines to ISO 14044
- ISO 14046, Environmental Management-Water footprint- Principles, requirements and guidelines
- Jang, M.W., J.Y. Choi, and J.J. Lee, 2007, A spatial reasoning approach to estimating paddy rice water demand in Hwanghaenam-do, North Korea. *Agricultural Water Management* Vol. 89, 185-198 pp.
- Mekonnen, M.M. and A.Y. Hoekstra, 2010, The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products, *Value of Water Research Report Series No. 47*, UNESCO-IHE.
- Yoo, S.H., J.Y. Choi, and M.W. Jang, 2006, Estimation of paddy rice crop coefficients for FAO Penman-Monteith and modified Penman method. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 48(1) 13-23 pp.

연구 참여자

목 차	소속	참여자
1장 물발자국 산정 매뉴얼	농어촌연구원	신안국 김영득 이성희
	서울대학교 산학협력단	최진용 이상현
2장 물발자국 활용 매뉴얼	농어촌연구원	신안국 김영득 김광용
	(주) 엔스타알랜씨	노재동

주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부로부터 연구비를 지원받아 한국농어촌공사 농어촌연구원에서 수행한 연구보고서입니다.
2. 이 보고서의 내용은 연구원의 공식견해와 반드시 일치하는 것은 아닙니다.

■ 발 행 처

연구과제명 : 지속가능한 수자원이용을 위한 물발자국 산정 및 적용(최종) - 물발자국 산정 및 활용 매뉴얼	
발 행 일	2014. 12
발 행 인	박 정 환
발 행 처	한국농어촌공사 농어촌연구원
주 소	경기도 안산시 상록구 사동 해안로 391번지 전 화 031 - 400 - 1700 FAX 031 - 409 - 6055
■ 이 책의 내용을 무단 전재하거나 복사하면 법에 저촉됩니다. 단, 이 책의 출처를 명시하면 인용이 가능합니다.	