

시멘트 산업에서 대체연료 사용시 환경상의 혜택

Environmental Benefits of Using Alternative Fuels in Cement Production

라이프 사이클 접근

A LIFE-CYCLE APPROACH

한국양회공업협회

[原著] CEMBUREAU

시멘트 생산에서 대체연료를 사용하는 환경상의 혜택

한국어판을 발간하면서

최초의 인류가 나무에서 내려와 동굴 등에 거주하기 시작하면서, 고대 인류들은 석회 등의 천연 시멘트 재료를 사용하여 왔습니다. 특히, 산업혁명 이후 공장 및 교통망 건설 등에 대량의 시멘트가 필요해지면서 1824년 포틀랜드 시멘트가 발명되기에 이르렀고, 이후 과학기술의 발전에 따라 눈부신 발전을 거듭해 오늘에 이르게 되었습니다. 우리나라의 시멘트 산업은 1919년 평양의 승호리 공장이 세워지면서 시작되었다고 할 수 있지만, 한국전쟁 등으로 모두 파괴되어, 실제로는 1960년대부터 시작되었다고 해도 과언은 아닐 것 입니다.

국내 시멘트 산업의 발전단계를 크게 3단계로 나누어 보고 싶습니다. 첫번째 단계는 1960~70년대로 시멘트가 각종 산업과 교통망 건설은 물론, 시멘트를 수출하여 외화를 벌던 10대 기간산업으로서 국내산업발전의 원동력이 되었던 때 입니다. 두번째 단계는 1980~90년대로 수많은 아파트와 SOC건설에 혁혁한 기여를 한 때 입니다. 세번째 단계는 2000년대로, 인류의 산업발전의 부작용으로 태어난 환경오염문제를 해결하는데 있어서, 최선의 대안으로서의 시멘트 산업입니다.

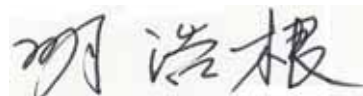
즉, 재활용될 수 있음에도 매립되거나 소각처리되어 왔던 폐기물들을 시멘트의 원료 및 연료로 유효하게 재활용하는 것으로, 지구온난화 가스의 대폭적인 삭감과 더불어 천연자원의 보존, 매립장 수명의 연명, 소각로 건설비의 절감, 중금속 등의 인체 유해 물질들의 안전처리 등 우리 사회의 환경보전에 획기적인 역할을 하게 될 것입니다.

본 자료는 1970년대부터 환경보존에 노력하여 온 유럽의 시멘트협회(CEMBUREAU)에서 만든 것이지만 우리에게 시사하는 바가 많은 것 같아 동협회의 양해를 얻어 한국어로 번역하게 된 것입니다. 폐기물이 소각 또는 매립되거나 아니면 물질로 재활용되는 것에 비하여 시멘트 공장에서 재활용될 때 얻을 수 있는 환경적인 편익 또는 혜택을 LCA(전생애평가)라는 도구를 활용하여 객관적이고 과학적으로 비교해 놓은 자료입니다.

본 자료가 국민 여러 분들, 정책입안 관계자, 시멘트산업의 모든 이해관계자 등 많은 분들에게 공유되어, 우리의 소중한 환경을 한번 더 생각할 수 있는 계기가 되기를 기대해 봅니다. 끝으로 우리 시멘트업계는 앞으로 시멘트 산업이 더욱더 환경친화적인 산업으로 거듭나도록 배전의 노력을 기울일 것을 약속 드립니다. 감사합니다.

2004. 10. 10

한국양회공업협회 회장 명호근



시멘트 생산에서 대체연료를 사용하는 환경상의 혜택

CEMBUREAU

유럽 시멘트협회

CEMBUREAU-the European Cement Association, based in Brussels, is the representative organisation for the cement industry in Europe. Its Full Members are the national cement industry associations and cement companies of the European Union and the European Economic Area countries plus Switzerland and Turkey. Associate Members include the national cement associations of Czech Republic, Hungary, Poland and Slovak Republic and the sole cement company in Estonia.

The Association acts as spokesman for the cement sector towards the European Union institutions and other authorities, and communicates the industry's views on all issues and policy developments likely to have an effect on the cement market in the technical, environmental, energy and promotion areas. Permanent dialogue is maintained with the European and international authorities and with other International Associations as appropriate.

Serviced by a multi-national staff in Brussels, Standing Committees and issue-related Project Groups, established as required, enable CEMBUREAU to keep abreast of all developments affecting the cement industry.

CEMBUREAU also plays a significant role in the world-wide promotion of cement and concrete in co-operation with member associations, and the ready-mix and precast concrete industries. The Association regularly co-hosts conferences on specific issues aimed at improving the image of concrete and promoting the use of cement and concrete products.

Since its foundation in 1947, CEMBUREAU has developed into the major centre for the dissemination of technical data, statistics and general information on the cement industry world-wide. Its publications serve as the principal source of information on the cement industry throughout the world. It is the editor of the "World Cement Directory" providing data on cement companies and works based in some 150 countries.

브뤼셀에 본거지를 둔 유럽 시멘트협회는, 유럽에서 시멘트산업을 위해 구성된 대표적인 조직이다. 정회원은 유럽 연합 및 스위스, 터키를 포함한 유럽 경제지역국의 국가별 시멘트협회 및 시멘트회사들이다. 준회원으로는 체코, 헝가리, 폴란드 및 슬로바키아의 시멘트협회들과 에스토니아의 유일한 시멘트회사가 있다.

협회는 유럽 연합 및 관련기관에 대하여 시멘트부문의 대변인 역할을 하며, 기술, 환경, 에너지 및 판매촉진 부문에 있어서 시멘트 시장에 영향을 미치는 모든 문제 및 정책개발에 관한 시멘트산업의 견해를 전달하며, 유럽과 관련 국제기구 및 협회등과 지속적인 대화채널을 가동하고 있다.

브뤼셀의 다국적 스탭들에 의해 구성되는 상임위원회 및 필요에 따른 사안별 프로젝트 그룹들의 활동을 통하여, 유럽 시멘트협회는 시멘트 산업에 영향을 미치는 모든 사안에 대응할 수 있도록 하고 있다.

또한, 유럽 시멘트협회는 멤버 협회, 그리고 레미콘 및 프리캐스트산업과 협력하여 시멘트와 콘크리트가 세계적으로 판매가 촉진되도록 하는데 중요한 역할을 하고 있다. 시멘트협회는 주기적으로 콘크리트의 이미지 개선과 시멘트 및 콘크리트 제품의 사용 촉진을 목표로 한 특정 문제에 관한 회의를 공동으로 주최하고 있다.

유럽 시멘트협회는 1947년 발족된 이래 주요 기술적 데이터, 통계 및 세계 시멘트 산업에 대한 일반적인 정보의 보급 센터로서 발전하여 왔다. 그 출판물들은 세계 시멘트산업에 대한 주요 정보자료로서 활용되고 있으며, "World Cement Directory"의 편집자로서 약 150개국에 이르는 시멘트 회사 및 공장들에 대한 데이터를 제공하고 있다.

Rue d.Arlon 55 - B-1040 Brussels . Tel.: + 32 2 234 10 11 - Fax: + 32 2 230 47 20
E-mail: secretariat@cembureau.be . <http://www.cembureau.be>

1. 머리말.....	7
2. CO ₂ 배출 감소 및 안정화.....	10
3. 처리 대 시멘트 킬른에서의 회수.....	17
4. 재활용 대 시멘트 킬른에서의 회수.....	28
5. 시멘트 킬른에 의해 제공되는 환경상 이점의 요약.....	33

1. INTRODUCTION

1.

1.1 PREAMBLE.

1.1

The principle of sustainable development has been accepted as a central policy objective of the European Union. The European cement industry, through CEMBUREAU, has engaged in proactive and positive debate with decision makers on how the industry can best put these principles into practice.

지속 가능 개발이란 원칙은, 유럽연합의 핵심적인 정책 목표로서 받아들여져 왔다. 유럽 시멘트협회를 통하여 유럽 시멘트 산업은, 이 원칙을 시멘트 산업에 어떻게 적용할 지에 대하여 의사 결정자들과 혁신적이며 긍정적으로 토론에 참여하여 왔다.

Hitherto, decision making in the environmental arena has tended to be on a piecemeal basis whereby each industrial sector's resource needs, energy requirements and environmental impacts of each pollutant were considered individually.

이제까지 환경분야의 의사결정은 개별적으로 고려된 각 산업분야별 자원의 필요량과 에너지 요건 및 각 오염물질에 대한 환경영향 등과 같은 단편적인 원칙에 의해 이루어지는 경향이 있었다. 유럽 시멘트협회는 이러한 접근방법으로는 총체적인 환경개선을 위한 기회를 극대화하는데 실패하는 것은 물론이며, 정책들간의 비용 및 이점을 최적화하기 위한 적절한 틀도 얻지 못할 것이라고 생각하였다.

CEMBUREAU believes this approach fails to maximise opportunities for general environmental improvements, nor does it provide an adequate framework for the optimisation of the costs and benefits of policy options.

In its place, CEMBUREAU advocates a holistic, integrated view of industrial activity and the environment. Using this broader concept, the present report explores one facet of sustainable development: namely, how the European cement industry can contribute towards the implementation of the Community Strategy for Waste Management by substituting conventional fossil fuels with alternative and suitable waste materials. Using a life cycle approach, the report demonstrates the overall environmental benefits that fuel substitution can deliver when the cement industry participates as a legitimate player within the Community's waste management infrastructure.

대신에, 유럽시멘트협회는 산업활동과 환경에 대한 포괄적이며 통합적인 시각을 주장하고 있다. 이 광의의 개념을 이용하여, 본 보고서에서는 지속 가능한 개발의 일면을 탐색하고 있다. 다시 말해서, 유럽의 시멘트산업이 기존의 화석 연료를 대체가 가능한 적절한 폐기물로 대체함으로써 폐기물관리를 위한 유럽 공동체 전략을 실현하는데 어떻게 공헌할 수 있을 것인지에 대한 것이다. LCA(라이프 사이클) 방식을 이용한 본 보고서는, 시멘트산업이 유럽 공동체의 폐기물관리 구조에 정당한 참가자로서 참여할 때 연료 대체가 가져올 수 있는 총괄적인 환경적 이점을 설명하고 있다.

시멘트 생산에서 대체연료를 사용하는 환경상의 혜택

The use of waste in European cement kilns saves fossil fuels equivalent to 2.5 million tonnes of coal per year.

1.2 POLICY BACKGROUND.

The cornerstone of current European policy in the environmental arena is the Treaty on European Union, signed in February 1992 at Maastricht and ratified in 1993. The key issues of relevance to the cement industry arising from the Treaty are as follows:

- (1) Sustainable growth in Europe, respecting the environment, is established as a principal objective of the European Union.
- (2) Integration of environmental imperatives into other areas of policy is seen as another key requirement.
- (3) Flexibility in decision making is promoted, with decisions being taken at Community level if objectives cannot be appropriately met at Member State level.

The European cement industry fully endorses these goals and, through CEMBUREAU, is actively engaged in assessing the contribution it can make towards achieving these goals.

With respect to waste management, in 1997 the European Commission published a review of the Community Strategy for Waste Management originally established in 1989. The review endorses the concept of sustainable development and the principles of the waste management hierarchy, namely:

유럽은 시멘트 킬른에서 폐기물을 이용하여 연간 석탄 250만톤에 이르는 화석연료를 절감하고 있다.

1.2

환경부문에서 현재 유럽 정책의 기초는 1992년 마스트리히트(Maastricht)에서 조인되고 1993년에 비준된 유럽 연합에 관한 조약이다. 이 조약에서 제시한 시멘트 산업과 관련된 중요한 문제는 다음과 같다.

- (1) 환경측면에서 유럽의 지속 가능한 발전을 유럽 연합의 주요 목표로 설정한다.
- (2) 환경적으로 요구되는 원칙을 다른 분야의 정책에 통합하는 것을 또 다른 핵심적인 요건으로 한다.
- (3) 각 회원국의 수준에서 목표를 적절하게 수용할 수 없으면, 유럽 공동체 수준에서 의사결정이 이루어 지도록 의사결정에 있어서 탄력성을 증진한다.

유럽 시멘트산업은 상기의 목표들에 전적으로 동의하고, 유럽 시멘트협회를 통하여, 또 그러한 목표들을 실천하면서 발생된 공헌을 평가하는데 적극적으로 참여한다.

폐기물 관리와 관련하여, 1997년에 유럽 공동체는 1989년에 제정된 “폐기물 관리를 위한 유럽 공동체 전략”에 대한 검토서를 출판하였다. 그 검토서는 지속 가능한 발전의 개념과 다음과 같은 폐기물관리 체계의 원칙을 지지하고 있다.

- prevention of waste;
- recovery of waste (including material recycling and energy recovery);
- safe disposal of waste;
- application of the proximity principle and self-sufficiency in waste management outlets.

CEMBUREAU concurs with the principles embodied in the waste management hierarchy, which rightly places waste prevention and recovery/reuse in a preeminent position relative to ultimate disposal.

CEMBUREAU believes that every opportunity should be explored to prevent and minimise waste generation and to maximise its recovery and reuse.

The utilisation of wastes in the cement industry, principally as alternative fuels but also as supplementary raw materials, is compatible with the general principles of waste management at both European Union and national levels, and with existing EU and national policies on energy efficiency, climate change and waste management. There are two reasons why the use of such materials is considered by the industry to be fully compatible with the principles of sustainable development:

- (1) In terms of the *cement manufacturing process*, the use of alternative fuels and raw materials has the potential to reduce emissions to the environment relative to the use of conventional fossil fuels, and conserves non-renewable resources.
- (2) In terms of the *waste management system*, cement kilns offer a safe alternative to conventional disposal of waste in dedicated waste incinerators or in landfills, again resulting in overall benefits by reducing environmental burdens and reducing the need for dedicated treatment capacity.

- 폐기물의 예방
- 폐기물의 회수(물질의 재활용 및 에너지 회수 포함)
- 폐기물의 안전한 처리
- 폐기물 관리출구에서 근접성 원칙과 자급자족 적용

유럽 시멘트협회는, 폐기물 관리 체계 내에 폐기물의 예방 및 재활용/재사용을 적극적인 처리에 있어서 상위의 위치에 올바르게 배치한 원칙에 동의한다. 유럽 시멘트협회는 어떤 경우라도 폐기물 발생을 방지하고 최소화하며, 또한 폐기물의 회수/재사용을 최대화하기 위해 노력해야 한다고 믿고 있다.

시멘트 산업에서 주로 대체연료 또는 보조원료로서 이용되는 폐기물의 사용은, 유럽연합과 국가 수준에서 모두 폐기물관리의 일반적인 원칙에 부합되며, 또한 에너지 효율, 기후변화 및 폐기물 관리에 대한 기존 유럽 연합 및 국가별 정책에도 부합되는 것이다. 이들 폐기물들의 사용이 산업계로부터 지속 가능한 개발의 원칙에 완전히 부합되는 것으로 받아들여지는 데는 2가지 이유가 있다:

- (1) 시멘트 생산 공정에 있어서, 대체연료와 원료의 사용은 종래의 화석연료 사용에 의한 환경오염물질의 배출을 감소하고, 재생 불가능한 자원을 보존할 가능성을 가지고 있다.
- (2) 폐기물 관리시스템에 있어서, 시멘트 킬른은, 공용 소각로에서의 소각이나, 매립에 의한 기존 처리방법에 대하여 안전한 대안을 제시하고 있으며, 또한 환경부하를 경감하고 공용 처리설비의 수요를 경감하여 전체적인 이익을 가져온다.

시멘트 생산에서 대체연료를 사용하는 환경상의 혜택

These two aspects of waste management are interlinked. They are best examined by the technique known as Life Cycle Assessment (LCA). An LCA describes the impact on the environment during the stages a product goes through from the time the raw materials are obtained until the final disposal of the product.

1.3 THIS REPORT

In this report LCA techniques are used to examine two related topics:

- (1) The production of cement by the use of two different types of fuel: coal, and nonfossil fuels made from waste.
- (2) The management of waste by two different routes: utilisation in cement kilns, and disposal or reuse by other operations.

The environmental benefits of utilising waste materials in cement kilns is examined under three headings:

- climate change and carbon dioxide reductions;

- disposal versus recovery in cement kilns;
- recycling versus recovery in cement kilns.

Information under the last two headings is based on studies carried out by TNO (The Netherlands) and the Fraunhofer Institute (Germany).

2. CARBON DIOXIDE REDUCTION AND STABILISATION

2.1 ISSUES

이와 같은 폐기물 관리의 두 가지 측면은 상호 연결되어 있다. 폐기물 관리 방법은 라이프 사이클 평가(LCA)로 알려진 기법에 의하여 가장 잘 평가된다. LCA는, 원료가 얻어진 때부터 제품의 최종폐기에 이르기까지, 각 단계별로 환경에 미치는 영향을 설명한다.

1.3

본 보고서에서, LCA 기법을 사용하여, 2 가지 관련 토픽을 검토하였다.

- (1) 2가지 다른 종류의 연료의 사용에 의한 시멘트 생산: 석탄과 폐기물로 만든 비화석 연료.
- (2) 2가지 다른 경로로 폐기물의 처리: 시멘트 킬른에서의 이용 및 다른 처리 시설에서의 처리 또는 재사용.

시멘트 킬른에서 폐기물의 이용시 환경적 이점을 다음 3가지 측면에서 검토하였다.

- 기후변화 및 CO₂ 감소
- 처분 대 시멘트 킬른에서의 회수
- 재활용 대 시멘트 킬른에서의 회수

마지막 2가지 측면은, TNO(네델란드)와 프라운 호퍼 연구소(독일)에서 행해진 연구에 기초를 두었다.

2. CO₂

2.1

The European cement industry is already recognized as being highly energy efficient, and additionally there is little scope for technological changes which will reduce emissions of carbon dioxide from the production process. However, the industry has demonstrated that the substitution of conventional fossil fuels with alternative fuels based on waste can make an important contribution to sustainable development through the reduction of the global burden of greenhouse gases such as carbon dioxide.

The manufacture of cement is an energy intensive operation, and the cost of energy represents a significant part of the total production costs. On an EU wide basis, cement production totals approximately 170 million tonnes per year. With an average energy consumption equivalent to the combustion of 120 kg of coal per tonne of cement, this level of production utilises the equivalent of 20 million tonnes of coal. During the manufacture of cement, CO₂ is generated from three sources:

- combustion of fuel in the kiln, to maintain the required kiln temperature;
- decarbonation of limestone within the kiln;
- use of electricity in installations such as grinding mills.

유럽시멘트 산업은 이미 에너지 효율이 높다고 알려져 있으며, 추가적으로 생산공정에서 CO₂ 배출을 감소하기 위한 기술적 발전의 여지는 거의 없다. 그러나, 시멘트산업은, 폐기물 대체 연료로서 기존 화석연료를 대체함으로써, CO₂와 같은 온실 가스의 세계적인 부하를 경감하여 지속 가능한 발전에 크게 공헌할 수 있다는 것을 실증하였다.

시멘트 생산은 에너지 집약적이며, 또한 에너지 코스트는 총생산원가 중에서 큰 비중을 차지하고 있다. 유럽 연합 기준으로, 시멘트 생산량은 연간 약 170백만톤이다. 평균 에너지 소비는 시멘트 톤당 석탄 환산으로 120 kg이며, 석탄 환산 연간 약 2천만톤을 시멘트 생산에 이용한다. 시멘트 생산시 CO₂ 는 다음 세 가지 요인으로 발생된다.

- 킬른 온도를 일정하게 유지하기 위한 연료의 연소;
- 킬른 내에서 석회석의 탈탄산;
- 분쇄설비와 같은 설비에서의 전력 사용.

시멘트 생산에서 대체연료를 사용하는 환경상의 혜택

A total of 0.83 tonne of CO₂ is emitted per tonne of finished product (80% clinker), and is made up as follows:

- CO₂ from decarbonation is 0.45 tonne per tonne of cement;
- CO₂ from the combustion of coal is 0.28 tonne per tonne of cement;
- electricity produced in coal fired power plants to operate on-site installations contribute a further 0.1 tonne of CO₂ per tonne of cement.

Of the three sources, the decarbonation of limestone generates the greater proportion (60%) of the CO₂ emissions liberated from the kiln. It should be noted that these three sources of emissions are essentially independent of each other.

There are three main strategies by which the cement industry may contribute to a reduction in CO₂ emissions:

- (1) Improve the energy efficiency of cement manufacture;
- (2) Substitute fossil fuels used in cement kilns by fuels derived from waste;
- (3) Modify the composition of cement by using cement constituents which require less energy to produce than cement clinker.

Each strategy is discussed below.

시멘트 톤당(클링커 80% 사용기준) 총 0.83톤의 CO₂가 발생되며, 이는 다음과 같이 구성된다.

- 탈탄산으로부터의 CO₂ : 0.45톤/시멘트 톤당
- 석탄연소로부터의 CO₂ : 0.28톤/시멘트 톤당
- 현장 설비를 운전하기 위해 화력발전소에서 생산된 전력 : CO₂ 0.1톤 이상/시멘트 톤당

3가지 발생원 중, 석회석 탈탄산은 킬른으로부터 배출된 CO₂의 가장 큰 비율 [60%]을 차지한다. 이러한 3가지 배출원은 본질적으로 상호 독립적인 것에 주목하여야 한다.

시멘트산업이 CO₂배출 삭감에 기여할 수 있는 3가지 주요 전략이 있다:

- (1) 시멘트 제조공정의 에너지 효율 향상
- (2) 폐기물로 만들어진 연료로 시멘트 킬른에서 사용되는 화석연료의 대체
- (3) 시멘트 클링커보다 생산 에너지가 덜 소요되는 시멘트 대체물질을 사용한 시멘트 조성물의 변경.

각 전략을 다음에서 논의한다.

2.2 STRATEGY 1: IMPROVING THE EFFICIENCY OF CEMENT KILNS 2.2 1:

Dealing first with Strategy 1, emissions of CO₂ from cement kilns are closely linked with process and energy efficiency. Over the past four decades, the European cement industry has adopted a policy of continuous improvement in plant, equipment and operation. For example, less efficient kilns are being replaced by more fuel-efficient preheater and precalciner kilns and ball mills for cement grinding have been replaced by more efficient grinding systems. Presently, 78% of Europe's cement production is from dry process kilns, 16% is from semi-dry or semi-wet kilns, and only 6% is from wet process kilns mainly in geographical areas with wet raw materials.

These and other energy efficiency measures adopted within the industry have resulted in significant reductions in fuel use, and hence of CO₂ emissions. The industry will continue along the same lines to further improve energy efficiency. There is, however, now limited scope for further improvements in energy efficiency, although the ongoing programme of modernisation will continue to result in lower CO₂ emissions per tonne of cement produced.

전략 1을 첫번째로 다루면, 시멘트 킬른에서 CO₂의 배출은 공정과 에너지 효율성에 밀접하게 연결되어 있다. 과거 40년 이상, 유럽 시멘트 산업은 플랜트, 설비 및 운전에서 지속적인 개선대책을 추진하여 왔다. 예를 들면, 덜 효율적인 킬른을 보다 열효율이 좋은 예열기 및 예비 가스로 킬른으로 대체하고 있으며, 시멘트 분쇄용 볼밀을 보다 효율이 좋은 분쇄 시스템으로 대체하여 왔다. 현재, 유럽의 시멘트 생산의 78%는 건식 킬른이고, 16%는 반건식 킬른 또는 반습식 킬른이며, 6% 정도만이 주로 지리적 위치 때문에 습식 킬른으로 되어 있다.

시멘트산업에서 추진하여 왔던 여러 가지 에너지 효율 대책들을 통해 연료 사용량과 CO₂ 배출량을 현저하게 축소하는 결과를 가져 왔다. 시멘트 산업은 이와 같은 방향으로 에너지 효율을 더욱 높여 나갈 것이다. 에너지 효율 향상은 지금 제한된 범위에 있지만 현대화를 진행 중인 프로그램을 통하여, 시멘트 톤당 CO₂ 배출량을 낮추기 위한 노력은 앞으로도 계속될 것이다.

2.3 STRATEGY 2: USE OF ALTERNATIVE FUELS 2.3 2:

This leads directly to Strategy 2, and the use of alternative fuels in cement kilns. This practice has a wider benefit than merely reducing CO₂ emissions at the point of cement production. The global CO₂ emissions are reduced, but the reductions occur in other industry sectors than the cement industry. To analyse the benefits of the use of alternative fuels in cement kilns, we have applied LCA techniques to two scenarios:

- (1) *Scenario 1*: Waste is combusted in a dedicated incinerator, with energy recovery, and the power generated is fed into the national electricity grid system. The cement kiln operates with a conventional fossil fuel, coal.
- (2) *Scenario 2*: Waste is transferred to the cement kiln, displacing an amount of coal in proportion to its heat content. Since the incinerator is no longer operational, the electricity it originally produced is now generated by a coal fired power station.

For each scenario, we have calculated the burden of CO₂ to atmosphere, and then compared the two scenarios for the net effect on CO₂ emissions. The calculations are presented in *Annex A*.

The net CO₂ burden of the two scenarios is obtained by subtracting the total burden of *Scenario 2* from the burden of *Scenario 1*. The benefit (reduction) in CO₂ emissions from burning waste in cement kilns as opposed to dedicated incinerators is summarised in *Table 1* and *Table 2*.

Table 1. Summary of CO₂ emissions from burning 1 tonne of waste in a dedicated incinerator with energy recovery or in a cement kiln, discounting the baseload operation of the power plant.

표 1. 발전소의 최소 소요 전력을 제외한, 에너지 회수형 공용 소각로 또는 시멘트 킬른에서 폐기

전략 2는 시멘트 킬른에서 대체연료의 사용이다. 이는 시멘트 생산시 단순히 CO₂ 배출량이 감소된다는 것 이상의 많은 이점을 갖고 있다., 전체적으로 CO₂ 배출이 감소되지만 시멘트 산업 보다는 다른 산업부문에서 감소가 발생된다. 시멘트 킬른에서 대체연료의 사용에 대한 이점을 분석하기 위하여 2가지 시나리오에 대하여 LCA기법을 적용하였다:

- (1) 시나리오 1: 공용 소각로에서 폐기물을 연소하여, 에너지 회수, 그리고 발전된 전력을 국가 전기 공급 시스템에 공급한다. 시멘트 킬른은 기존의 화석연료, 석탄으로 운전한다.
- (2) 시나리오 2: 폐기물을 시멘트 킬른에서 연소하고, 폐기물의 열용량만큼을 석탄량으로 치환한다. 소각로를 더 이상 운영하지 않기 때문에, 본래 소각로에서 생산되었던 전기는 석탄화력 발전소에서 발전한다.

각 시나리오에 대하여, 우리는 대기에 대한 CO₂ 부하를 계산하였으며, 그리고 나서 CO₂ 배출에 대한 2가지 시나리오의 순수 영향을 비교하였다. 계산 결과를 부록 A에 나타내었다. 2가지 시나리오에 대한 순수 CO₂ 부하는 시나리오 1의 총부하에서 시나리오 2의 총부하를 빼서 계산한다. 공용 소각로와 비교하여, 시멘트 킬른에서 폐기물 연소시의 CO₂ 배출 상의 이점(감소)을 표 1과 표2에 요약한다.

물 1톤 연소시 CO₂ 배출 요약

Activity 대안	Biofuel (16 GJ/t) 바이오 연료	Solvent Waste (26 GJ/t) 폐 용매
Incineration in dedicated incinerator 공용 소각로에서 소각	3,379 kg CO ₂	4,429 kg CO ₂
Combustion in cement kiln, displacing coal 시멘트 킬른에서 연소로 석탄 대체	2,778 kg CO ₂	3,462 kg CO ₂
Net benefit due to combustion in cement kiln 시멘트 킬른에서 연소시 순 이점	601 kg CO ₂ /t waste	967 kg CO ₂ /t waste

The above analysis covers operating practice observed by many incinerators in the EU: namely, the recovery of energy alongside the waste destruction process. However, there remain some incinerators which have no heat or energy recovery facilities. In this case, the power plant is effectively decoupled from each of the scenarios. The net reduction in CO₂ emissions when waste is combusted in the cement kiln is greater, as shown in *Table 2*.

상기 분석은, 유럽의 많은 소각로에서 측정된 운전 실적을 적용하였다: 주로 폐기물 처분에 따라 에너지회수가 이루어지고 있으나 열이나 에너지 회수 설비를 갖지 않은 소각로도 몇 개 있었다. 이 경우 발전소의 영향을 각각의 시나리오에서 효과적으로 분리하였다. 표 2에 나타낸 바와 같이 폐기물이 시멘트 킬른에서 연소될 경우 순수 CO₂ 배출 감소는 더욱 크다.

Table 2. Summary of CO₂ emissions from burning 1 tonne of waste in a dedicated incinerator without energy recovery or in a cement kiln

표 2. 비에너지 회수형 공용 소각로 또는 시멘트 킬른에서 폐기물 1톤 연소시 CO₂ 배출 요약

Activity 대안	Biofuel (16 GJ/t) 바이오 연료	Solvent Waste (26 GJ/t) 폐 용매
Incineration in dedicated incinerator 공용 소각로에서 소각	3,379 kg CO ₂	4,429 kg CO ₂
Combustion in cement kiln, displacing coal 시멘트 킬른에서 연소로 석탄 대체	1,760 kg CO ₂	1,820 kg CO ₂
Net benefit due to combustion in cement kiln 시멘트 킬른에서 연소시 순 이점	1,619 kg CO ₂ /t waste	2,609 kg CO ₂ /t waste

By burning waste in a cement kiln and substituting for coal, a nonrenewable resource, savings are made through resource conservation and associated CO₂ emissions. The cement kiln also makes more efficient use of the intrinsic energy of the waste material. Specialist waste incinerators are very inefficient converters of the heat content of wastes, whereas a cement kiln approaches 100% efficiency. A net decrease in the quantity of CO₂ released, relative to a scenario in which waste is combusted in a dedicated incinerator, reduces the environmental impact of the greenhouse effect during the combustion of wastes.

2.4 STRATEGY 3: SUBSTITUTION OF RAW MATERIALS

The use of materials such as pulverised fly ash or slag to replace raw materials such as clay in cement kilns has the potential to reduce CO₂ emissions at the point of cement production, as these products use less energy than clay.

A much more efficient way of using industrial by-products and natural materials is to mix these with cement clinker and grind both materials to a cement. Such cement consequently consists of cement constituents other than ground clinker. The additional cement constituents often provide additional beneficial properties to the cement. The modification of the cement composition by the usage of additional cement constituents results in considerable reductions in CO₂ emissions as not only fuel related CO₂ is reduced but also the process related CO₂ (decarbonation).

시멘트 킬른에서 폐기물을 연소하여 석탄 및 재생 불가능한 자원을 대체함으로써, 자원이 보존되고 이와 관련된 CO₂ 배출량이 감소된다. 또한, 시멘트 킬른은 폐기물이 가지고 있는 고유한 에너지를 더욱 효율적으로 이용할 수 있다. 특수한 폐기물 소각로조차 폐기물의 열량을 효율적으로 활용하지 못하지만, 반면에 시멘트 킬른은 100% 가까운 효율을 보여준다. 폐기물을 공용 소각로에서 연소하는 시나리오와 비교하여, 배출된 CO₂ 량의 순수한 감소는, 폐기물 연소시 온실효과와 같은 환경 영향을 감소시켜 준다.

2.4 3 :

시멘트 킬른에서 점토질 원료 대용으로 석탄회 또는 슬래그 같은 물질을 이용하면, 점토보다 에너지를 적게 사용하기 때문에, 시멘트 생산 관점에서 CO₂ 배출을 감소시킬 잠재력을 가지고 있다.

산업부산물 및 천연 물질을 보다 효율적으로 사용하는 방법은 이들을 시멘트 클링커와 섞어서 함께 분쇄하여 시멘트를 만드는 것이다. 결과적으로 이러한 시멘트는 분쇄된 클링커와는 다른 시멘트 조성을 가지게 된다. 이들 부산물이 포함된 시멘트 조성물은 종종 시멘트 특성에 추가적인 이점을 부여한다. 부산물의 이용에 의한 시멘트 조성의 변경은, 연료와 관련된 CO₂를 감소시킬 뿐만 아니라, 공정과 관련된 CO₂(탈탄산)를 감소시켜 상당한 량의 CO₂ 배출을 감소시킨다.

2.5 CONCLUSIONS

The analyses demonstrate the clear benefits the cement industry can provide in CO₂ reduction through integrating cement kilns within an overall waste management strategy, either through the use of alternative fuels, or through the use of materials such as industrial by-products as additional cement constituents.

3. DISPOSAL VERSUS RECOVERY IN CEMENT KILNS

3.1 INTRODUCTION

LCA techniques have been used to compare the environmental effects of processing the following wastes in a cement kiln as opposed to destruction in dedicated waste incinerators specially designed for each waste type:

- spent solvents (in a rotary kiln incinerator);

- spent solvents (in a rotary kiln incinerator);
- filter cake (in a rotary kiln incinerator);
- paint residues (in a rotary kiln incinerator);
- sewage sludge (in a fluidised bed incinerator).

The project was commissioned by the Dutch Government as part of their analysis of the Dutch National Hazardous Waste Management Plan 1997 - 2007, and was undertaken on their behalf by the Netherlands Organisation for Applied Scientific Research (TNO)¹.

2.5

분석결과, 전체 폐기물관리 전략 내에 시멘트 킬른을 통합시킴으로서 시멘트산업이 대체연료의 사용과 산업부산물과 같은 것을 시멘트 조성물로서의 활용을 통하여 CO₂감소에 기여할 수 있다는 이점을 명백하게 입증하였다.

3.

3.1

다음 폐기물을 각 폐기물 종류별로 특별하게 설계된 공용 소각로에서 처분하는 것에 대응하여, 시멘트 킬른에서 처리하는 경우의 환경 영향을 비교하기 위하여 LCA 기법을 사용하였다.

- 폐 용매 (로타리 킬른 소각로)
- 여과 고형물 (로타리 킬른 소각로)
- 페인트 잔류물 (로타리 킬른 소각로)
- 하수 슬러지 (유동층 소각로)

프로젝트는 네델란드 정부의 “국가 폐기물 관리계획(National Hazardous Waste Management Plan 1997-2007)”의 일환으로 계획되고, 네델란드 응용과학 연구소(Netherlands Organization for Applied Scientific Research, TNO)에 의하여 수행되었다.

¹ • Tukker A (1996). LCAs for Waste: The Dutch National Waste Management Plan 1997-2007. Paper presented at the 4th Symposium for Case Studies, SETAC Europe, Brussels, December 1996.

• Keevalkink J A and Hesselink W F M (1996). Waste Processing in a Wet Cement Kiln and a Specialised Combustion Plant. Report No. TNO-MEP-R 96/082, TNO Institute of Environmental Sciences, Energy Research and Process Innovation, Apeldoorn, Netherlands.

Two methods of allocation were constructed. The first method treated the cement kiln and dedicated waste incinerators as isolated units, and apportioned emissions and their environmental effects solely to the function of waste processing.

In other words, upstream and downstream operations such as coal mining and transportation (in the case of the cement kiln) and electricity generation (in the case of the dedicated incinerator) were not considered, nor were the avoided burdens resulting from fuel substitution in the cement kiln. Further, the wider implications of fuel substitution could not be assessed.

The alternative method of system enlargement was therefore agreed with the Dutch authorities and applied to the LCA. Conceptually, this method is identical to that described in *Section 2* for the assessment of CO₂ emissions during the burning of waste, and illustrated in *Figures 1A* and *2A* in *Annex A*.

In system enlargement, the additional upstream activity of fossil fuel procurement and the downstream activity of electricity generation are considered in conjunction with the incinerator and the cement kiln operations. The latter is offset with the burden associated with the generation of electricity as a result of the waste being transferred from the incinerator to the kiln, while the incinerator system is offset with the burden of procuring fossil fuel for the cement kiln. The results of the LCA, as applied to the specific case of a cement kiln in Belgium, are discussed below.

3.2 SYSTEM DEFINITION

The basis of the LCA was one tonne of waste, either

2가지 할당 방법으로 설계되었다. 첫 번째 방법은, 시멘트 킬른과 공용 폐기물 소각로를 분리된 단위로서 다루었고, 폐기물 처리 기능에 대하여 단독으로 배출 및 환경에 미치는 영향을 배분하였다.

다시 말해서, 석탄 채광 및 수송과 같은 상위 및 후위 공정(시멘트 킬른의 경우)과 전력 생산(공용 소각로의 경우)은 고려하지 않았으며, 또한 시멘트 킬른에서 연료대체에 의해 삭감된 환경부하도 고려하지 않았다. 따라서 연료대체와 관련된 많은 것들은 평가 될 수 없었다.

따라서, 시스템을 확대하는 대안을 네델란드 정부 당국의 동의를 얻어 LCA를 적용하였다. 개념적으로 이 방법은, 폐기물의 연소시 CO₂ 배출 평가에 관해 2절에 설명된 것과 부록 A의 그림 1 A 및 2 A에서 예시된 것과 일치한다.

확대된 시스템에서는, 소각로 및 시멘트 킬른 운전과 함께 추가적으로 상위의 화석연료 조달 활동과 하위의 전력생산 활동이 고려되었다. 후자(시멘트 킬른)가 폐기물이 소각로에서 킬른으로 전환됨에 따라 초래된 만큼의 전력생산과 관련된 부하가 차감되는 반면에, 소각로 시스템은 시멘트 킬른용 화석연료 조달에 대한 부하가 차감되었다. 아래에 기술된 내용은 벨기에의 특정 시멘트 킬른에 적용된 LCA의 결과들이다.

3.2

공용 소각로에서 소각하거나, 시멘트 킬른에서

incinerated in a dedicated incinerator, or combusted in a cement kiln as a substitute for conventional fuels, in the present case coal (90%) and crude (10%). The inputs and outputs to the two systems are summarised in *Table 3*.

석탄(90%)과 원유(10%)인 기존 연료를 대체하여 연소시키든 LCA는 폐기물 1톤을 기준으로 하였다. 2가지 시스템에 대한 입력 및 출력을 표 3에 요약하였다.

Table 3. Summary of inputs and outputs to the cement kiln and dedicated incinerators

표 3. 시멘트 킬른과 공용 소각로에 대한 입력과 출력 요약

	Dedicated Incinerators	Cement Kiln
Input Materials	<ul style="list-style-type: none"> • Spent solvents • Filter cake • Paint residues • Sewage sludge 	<ul style="list-style-type: none"> • Spent solvents • Filter cake • Paint residues • Sewage sludge
Input Utilities	<ul style="list-style-type: none"> • Electricity • Lime • Sodium hydroxide • Ammonia 	<ul style="list-style-type: none"> • Electricity at the kiln • Electricity for waste processing • Transport to kiln
Airborne Emissions	<ul style="list-style-type: none"> • Acid gases • Metals • CO₂ • CO • Dioxins • Hydrocarbons 	<ul style="list-style-type: none"> • Acid gases • Metals • CO₂ • CO • Dioxins • Hydrocarbons
Waterborne Releases	<ul style="list-style-type: none"> • Metals in effluent 	None (no liquid effluent)
Solid Wastes	<ul style="list-style-type: none"> • Solid residue • Fly ash • Bottom ash 	None (recycled within kiln)
Avoided Products	<ul style="list-style-type: none"> • Steam • Electricity 	<ul style="list-style-type: none"> • Input coal • Input crude • Input raw material

The system definitions were based on data obtained on actual, operating incinerators in the Netherlands and a wet cement kiln in Belgium. In the incinerator systems, the flue gas is cleaned in a wet scrubber, resulting in a release of liquid effluent from the plant. Additionally, in the case of the fluidised bed incinerator for sewage sludge, an SNCR deNO_x system was installed, necessitating an input of ammonia.

시스템 정의는, 네델란드 내의 소각로와 벨기에 내의 습식 시멘트 킬른에서 실제로 운전하여 얻어진 데이터에 근거했다. 소각로 시스템에서는 배출가스가 습식 스크러머에서 세정됨에 따라 플랜트로부터 폐수가 배출된다. 또한, 하수 슬러지용 유동층 소각로의 경우에는, 탈질(SNCR deNO_x) 시스템이 설치되어 있어, 암모니아의 투입이 필요하다.

시멘트 생산에서 대체연료를 사용하는 환경상의 혜택

Solid residues requiring disposal included fly ash, filter sludge and bottom ash. In the case of the cement kiln, there was neither a release of liquid effluent nor a release of solid residue, since cement kiln dust was recycled back into the kiln, a practice that is standard in the industry.

3.3 ENVIRONMENTAL IMPACTS

In an LCA, the environmental impacts resulting from the releases to air, water and land from the incinerator systems or the cement kiln are grouped into categories. Each chemical released can contribute to one or more impact categories and conversely an impact category can contain contributions from a number of releases - for example, a release of sulphur dioxide can contribute both to acidification and to human toxicity, while the latter impact category can contain contributions from emissions of acid gases, metals, dioxins, and hydrocarbons. The LCA study focused on the following impact categories:

(1) Depletion of mineral raw materials (DRM):

For the incinerator systems, depletion of raw material results from the use of utilities such as lime.

The DRM score can be positive (i.e. the resource is procured and used) or negative (i.e. avoided, when considering net emissions within the overall waste management option).

처리가 요구되는 고체의 잔류물은 플라이 애쉬, 여과 슬러지 및 바닥재를 포함하고 있었다. 시멘트 킬른의 경우에는, 시멘트 킬른 분진이 킬른으로 다시 재투입되기 때문에 (시멘트산업에서 실행되고 있는 표준), 배출수도 고체 잔류물의 배출도 없었다.

3.3

LCA에서, 소각로 시스템이나 시멘트 킬른이 대기 및 물 과 토양에 대한 배출로 인한 환경영향은 몇 가지 범주로 그룹화 된다. 배출된 각 화학 물질은 하나 이상의 영향 범주에 기여할 수가 있으며, 반대로, 하나의 영향 범주는 많은 배출물의 기여를 포함할 수가 있다. 예를 들면, 이산화황의 배출은 산성화와 인간 독성 양쪽 모두에 기여할 수 있는 반면에, 후자(인간 독성)의 영향 범주는 산성 가스, 금속, 다이옥신 및 탄화수소의 배출에서의 기여를 포함할 수 있다. 본 LCA 평가는 다음 영향 범주에 초점을 두었다.

(1) 광물 자원의 고갈(DRM)

소각로 시스템에 있어서, 원료의 고갈은 석회와 같은 유틸리티의 사용에 기인한다. DRM 값은 양수이거나(즉, 자원이 조달되고 사용된다.) 또는 음수일 수 있다. (즉 전체적인 폐기물 관리 옵션 내에서 순수한 배출을 고려할 때, 삭감되었다.).

(2) Depletion of fossil energy carriers (EDP):
This burden relates to the energy input for waste handling and utility input for flue gas cleaning. Again, the net EDP score relative to two different options for waste management can be both positive or negative.

(3) Global warming potential(GWP):
This impact arises from emissions of CO₂ during combustion, and from emissions of methane from biodegradable waste deposited in landfills. Avoiding the generation of energy or avoiding the use of fossil fuels in the cement kiln can result in a significant net avoided GWP score.

(4) Depletion of the ozone layer (ODP):
This impact arises from emissions of volatile hydrocarbons, and is relatively small in magnitude compared to other impacts.

(5) Human Toxicity (HT):
This impact category arises from emissions of acid gases, CO, hydrocarbons, dioxins, metals, etc.

(6) Aquatic Ecotoxicity (AT): For the incinerator systems, AT results from releases of effluent containing heavy metals. For the fossil fuels, AT arises from effluents generated during the mining or refining processes.

(7) Photochemical Ozone Creation Potential (POCP):
This impact is caused by releases of hydrocarbons to atmosphere, and can arise at any stage of the life cycle.

(2) 화석 에너지원의 고갈(EDP)
이 부하는 폐기물의 취급을 위한 에너지 투입과 배기 가스 세정을 위한 유틸리티 투입에 관계가 있다. 또, 폐기물 관리에 대한 2가지 다른 옵션에 관계가 있는 순 EDP 값은, 양쪽 모두 양수 또는 음수일 수 있다.

(3) 지구온난화 잠재성(GWP)
이 영향은 연소시 CO₂의 배출 및 매립된 생물 분해성 폐기물의 메탄 배출로부터 발생된다. 시멘트 킬른에서의 에너지 발전 삭감 또는 화석 연료의 사용 삭감은, 중요한 순수 삭감 GWP 값일 수도 있다.

(4) 오존층 파괴(ODP)
이 영향은 휘발성 탄화수소의 배출로부터 발생하며, 다른 영향과 비교해 중요성에 있어 상대적으로 작다.

(5) 인간 독성(HT)
이 영향 부문은, 산성 가스의 배출, CO, 탄화수소, 다이옥신, 금속 등에서 발생한다.

(6) 수계 생태독성(AT)
소각로 시스템에 있어서, AT는 중금속을 포함하고 있는 폐수의 배출에 기인한다. 화석연료에 있어서, AT는 채광 또는 정제 프로세스 중에 발생된 폐수로부터 발생한다.

(7) 광산화물 생성 잠재성(POCP)
이 영향은 대기에 탄화수소의 배출에 기인하며, 라이프·사이클의 어느 단계에서도 발생할 수가 있다.

시멘트 생산에서 대체연료를 사용하는 환경상의 혜택

(8) Nutrification (NP):

Nutrification results from the addition of nutrients to a soil or water system, causing an increase in biomass.

Any nutrient can have this effect, but nitrogen and phosphorus are the most crucial species.

(9) Acidification (AP):

This impact is caused by deposition of acid gases such as sulphur and nitrogen oxides onto water bodies.

(10) Solid waste generation:

Depending on the type of solid waste, the environmental impacts will be different. The LCA differentiated between the following waste types: *nonhazardous waste (NW)* arising from mining and other similar activities; *hazardous waste (HW)* comprising bottom ash, fly ash and filter sludge, and *radioactive waste (RW)* comprising the waste produced by the proportion of the national electricity system generated by nuclear power (6%).

Each impact category was scored for each of the waste management options. The individual scores were weighted by the “Distance to Target” method relative to the impact created by GWP, and then totalled to obtain a composite score.

(8) 부영양화(NP)

부영양화는, 바이오 매스 증가의 원인이 되는 토양이나 수계에 대한 영양물질의 추가에 기인하며, 어떤 영양물질이라도 이 효과가 있을 수 있으나, 질소와 인이 가장 중대한 물질이다.

(9) 산성화(AP)

이 영향은 물에 유황과 질소 산화물과 같은 산성 가스의 침전에 의해 일어난다.

(10) 고체 폐기물 발생

고체 폐기물의 종류에 따라, 환경상의 영향은 다를 것이다. LCA는 다음 폐기물의 종류에 따라 구별했다: 채광 및 다른 유사한 활동에서 발생하는 *위험하지 않은 폐기물(NW)*; 바닥재, 플라이 애쉬 및 여과 슬러지를 포함한 *유해 폐기물(HW)*, 및 원자력 발전(6%)에 의하여 발생되는 폐기물로 구성된 *방사성 폐기물(RW)*.

각 영향 범주는 각각의 폐기물처리방법에 대해 채점을 하였다. 개별 점수는 GWP에 의해 만들어진 영향에 따라 「목표에 대한 거리」 방법에 의해 가중되고 나서, 합성 점수를 얻기 위하여 합산하였다.

The results of the LCA are presented in *Table 4* and in *Figure 1*. In *Table 4*, the environmental burden scores associated with burning waste in the incinerator system (adding the burdens associated with burning fossil fuel in the cement kiln) and the scores associated with burning waste in cement kilns (adding the burdens associated with generating additional heat and electricity) have been summed to provide an overall sub-score for resource depletion and releases to air and water, and an overall sub-score for waste production. These scores are then added to provide a total score for each waste management option, the assumption having been made that the impact categories are all of equal importance.

LCA 결과는 표4 및 그림 1에 나타난다. 표 4에서, 소각로 시스템(시멘트 킬른에서 화석연료의 연소와 관련한 부하를 추가)에서 폐기물 연소와 관련한 환경 부하 값 및 시멘트 킬른에서 폐기물의 연소와 관련한 점수(부가적인 열 및 전기의 발생과 관련한 부하를 추가)는 자원 고갈 및 대기과 물로의 배출에 대한 전체 부문별 점수와 폐기물 발생에 대한 전체 부문별 점수가 나타나도록 합산되었다. 그리고 각 영향 범주들이 모두 동일한 중요성을 가진다고 가정하여 각각의 폐기물처리방법에 대한 총점을 구하기 위해 이들 점수가 더해졌다.

Table 4. LCA scores for waste management options

표 4. 폐기물 관리 옵션을 위한 LCA 점수

Waste	Incinerators			Cement Kiln			Net Benefit to Cement Kiln
	Resources/ Air/Water	Solid Waste	Total Score	Resources/ Air/Water	Solid Waste	Total Score	
Spent solvent	154	24	178	116	44	160	-18
Filter cake	44	500	544	43	11	54	-490
Paint residues	91	362	453	71	26	97	-356
Sewage sludge	59	80	139	53	20	73	-66

The higher the score the greater the potential environmental impact of a particular waste management option. Therefore a net environmental benefit relative to the cement kiln operation is represented by a negative net score, while a net environmental disbenefit will be represented by a positive net score. The table shows that regardless of the type of waste, there is a net benefit to the cement kiln option, in terms of all the impact categories considered (i.e. resource conservation, releases to air, releases to water and the production of solid waste).

점수가 높을수록, 특정한 폐기물처리방법의 잠재적 환경상의 영향은 커진다. 따라서, 시멘트 킬른 운전과 관련된 순수한 환경상의 이점이 음수의 순 점수로 표현되는 반면에, 순수한 환경상의 불리 점은 양수의 순 점수로 표현될 것이다.

표 4는, 폐기물의 종류에 관계없이, 모든 영향 범주들이 고려되었다는 점(즉 자원 보존, 대기와 물에 대한 배출, 고체 폐기물의 발생)에서 시멘트 킬른 처리방법에 순 이점이 있다는 것을 보여주는 것이다.

The impact category of solid waste is perhaps the most significant net benefit accrued to the cement kiln disposal option. Whereas in the case of combustion in dedicated incinerators solid waste disposal fly ash, filter sludge, etc. is a major consideration within the overall life cycle, and involves landfilling and its associated impacts of leachate generation and health effects, the cement kiln option does not generate liquid or solid waste. The small score assigned to solid waste impacts relates to the waste associated with the generation of the additional electricity and heat needed to replace the power produced by the incinerator.

TNO has also developed a “standardised environmental profile” for each disposal option. In this method of presentation, scores for the base case environmental burdens are calculated when one tonne of waste is combusted in an incinerator, and when one tonne of waste is combusted in a cement kiln. From each base case the scores for the avoided environmental burdens are subtracted.

In the case of waste combustion in incinerators, the avoided burdens relate to external electricity and heat production. In the case of combustion in a cement kiln, the avoided burdens relate to the savings in fossil fuel and raw material use at the kiln. A net decrease in emissions is represented by negative scores for the impact categories, whereas a net addition to environmental burdens is represented by positive scores. Net scores for individual impact categories are shown in *Figure 1* for each waste type. The summation of individual scores into a single overall score for each waste management option is presented in *Table 5*.

아마도 고체 폐기물의 영향 범주가 시멘트 킬른 처리방법에서 얻어지는 가장 중요한 순 이점일 것이다. 공용 소각로에서 고체 폐기물을 연소하는 경우, 플라이 애쉬, 여과 슬러지 등은 전체 라이프 사이클 내에서 고려해야 할 주요 대상이고, 매립과 매립에 수반된 침출물 생성 및 인체 영향들에 대한 영향을 포함하고 있는 반면에, 시멘트 킬른에서의 처리는 액상 또는 고상 폐기물이 발생하지 않는다. 고상 폐기물의 영향에 할당된 작은 점수는, 소각로에서 생산되는 전력을 대체하는데 필요한 추가적인 전기와 열의 생산에 따라 발생하는 폐기물과 관련된 것이다.

또한, TNO는 각 처리방법에 대하여 「표준화된 환경 프로파일」을 개발하였다. 제시된 이 방법에서, 폐기물 1톤이 소각로에서 연소될 때와 폐기물 1톤이 시멘트 킬른에서 연소될 때 기초적인 환경부하 점수가 계산된다. 각 기초적인 경우에서, 삭감된 환경부하의 점수를 뺀다.

소각로에서 폐기물을 연소하는 경우, 삭감된 부하는 외부의 발전과 열 생산과 관련이 있다. 시멘트 킬른에서 연소하는 경우, 킬른에서 사용되는 화석연료와 천연원료의 절감과 관련이 있다. 배출물의 순 감소는 영향 부문이 음수 값으로 나타나는 반면에, 환경 부하에 대한 순 추가는 양수 값으로 나타난다. 각 영향 부문에 대한 순 점수를 각 폐기물 종류로 그림 1에 나타내었다. 각 폐기물 처리방법별로, 개별 점수를 하나의 전체 점수로 합계한 것을 표 5에 나타낸다.

Table 5. Net scores and environmental profiles for waste management options

표 5. 폐기물 처리방법별 순 점수와 환경 프로파일

Waste	Incinerators			Cement Kiln		
	Resources/ Air/Water	Solid Waste	Total Score	Resources/ Air/Water	Solid Waste	Total Score
Spent solvent	-5	-20	-25	-42	-1	-26
Filter cake	7	487	494	7	-1	6
Paint residues	2	330	332	-19	-0.2	-19.2
Sewage sludge	5	60	55	-9	-1	-10

Referring to Figure 1 and to Table 5, the LCA can be summarized as follows:

(1) Spent Solvents:

Figure 1a and Table 5 indicate that there are higher scores for the dedicated incinerator option in relation to resource depletion and to environmental burdens to air, water. There is a higher score for the solid waste category for the cement kiln option due to the burdens associated with the use of fossil and other fuels in external energy generation. However, the net effect is marginally in favor of the cement kiln option.

(2) Filter Cake:

Figure 1b indicates higher individual scores for impacts of human toxicity and acidification potential for the cement kiln option, associated with greater emissions of sulphur dioxide and nitrogen dioxide. However, these are counterbalanced by higher scores for other impact categories for the incinerator option, such that the net effect for resource depletion and releases to air and water is neutral. However, there is a large net benefit associated with the solid waste impacts associated with the cement kiln option, which leads to a substantial overall improvement in environmental performance when waste is transferred from an incinerator to a cement kiln.

그림 과 표5와 관련하여, LCA는 다음과 같이 요약된다.

(1) 폐 용매(Spent Solvent)

그림 1a와 표 5은 자원고갈과 대기 및 수질에 대한 환경 부하와 관련하여 공용소각로 처리방법의 점수가 더 높다는 것을 보여준다. 외부에 너지 생산시 사용되는 화석 및 기타 연료와 관련된 환경부하 때문에 시멘트 킬른은 고체 폐기물 부문에서 높은 점수를 나타낸다. 그러나 순 효과는 시멘트 킬른 처리방법의 경우가 아주 조금 더 좋다.

(2) 여과 고형물(Filter Cake)

그림1b은, 황산화물 과 질소산화물 배출이 많은 시멘트 킬른처리방법이 인간 독성 및 산성화 잠재성 영향에 대한 점수가 높다는 것을 나타낸다. 그렇지만, 이는 소각로 처리방법에서 높은 점수의 다른 영향 범주에 의한 효과로 인해 상쇄되는데, 이는 자원 고갈과 공기 및 물에 대한 배출에 대한 순수 영향이 중간이기 때문이다. 그러나, 시멘트 킬른 처리방법의 고체 폐기물과 관련한 대규모 순수 이점이 있는데, 이는 폐기물이 소각로에서 시멘트 킬른으로 전환될 때 환경 성과에 있어서 전체적으로 실질적인 개선을 유도하기 때문이다.

(3) Paint Residues:

The cement kiln option outperforms the dedicated incinerator options in all impact categories, save for solid waste impacts associated with external generation of electricity and power. The most significant environmental improvement results from the lack of solid waste associated with incinerator option.

(4) Sewage Sludge:

As with the disposal of filter cake, the cement kiln option scores less well on impact categories associated with the greater discharges of sulphur dioxide and nitrogen oxides, but this is more than offset by the environmental improvements obtained in other impact categories, and particularly with solid waste generation and disposal.

Irrespective of the type of waste, the cement kiln option consistently demonstrated a significant overall improvement in environmental performance and hence a positive effect on the environment.

(3) 페인트 잔류물(Paint Residues)

시멘트 킬른 처리방법은, 외부 발전과 관련한 고체 폐기물의 영향을 제외하면, 모든 영향 부문에 있어서 공용 소각로 처리방법보다 성능이 앞선다. 가장 현저한 환경상의 개선은, 소각로 처리방법과 관련된 고체 폐기물의 감소에 기인한다.

(4) 하수 슬러지(Sewage Sludge)

여과 고형물의 처분으로, 시멘트 킬른 처리방법이 더 많은 이산화황 및 질소 산화물 배출과 관련한 영향 부문에서 좋지 않은 점수를 얻었으나, 이것은 다른 영향 부문 특히 고체 폐기물의 생성 및 처리에서 얻어진 환경상의 개선에 의해 상쇄하고도 남는다.

폐기물의 종류에 관계없이, 시멘트 킬른 처리방법은, 일관되게 환경 성과에 있어서 전반적으로 현저한 개선과 나아가 환경에 대한 긍정적인 영향을 실증했다.

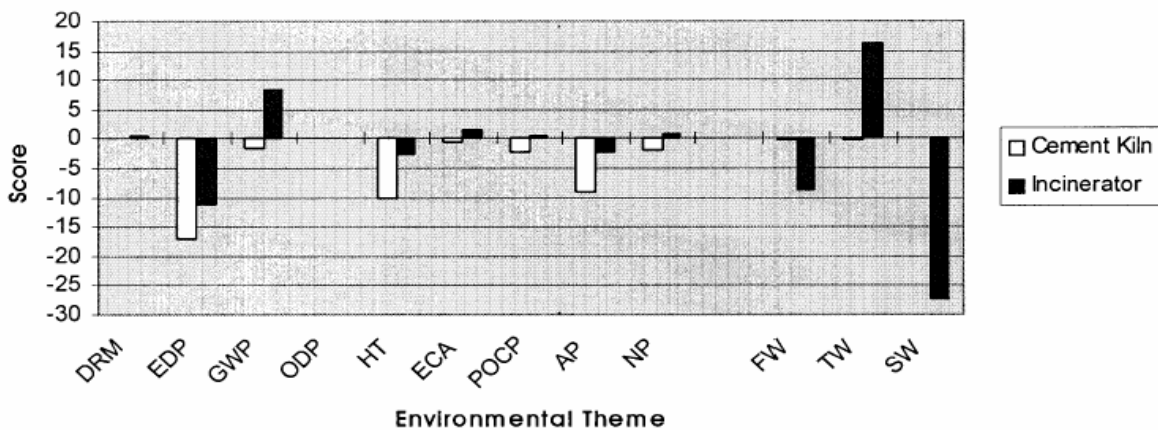


Figure 1a: Impacts of Processing Spent Solvents in Cement Kilns and in Specialized Waste Incinerators

그림 1a: 시멘트 킬른 및 특수 폐기물 소각로에서 폐 용매 처리 영향

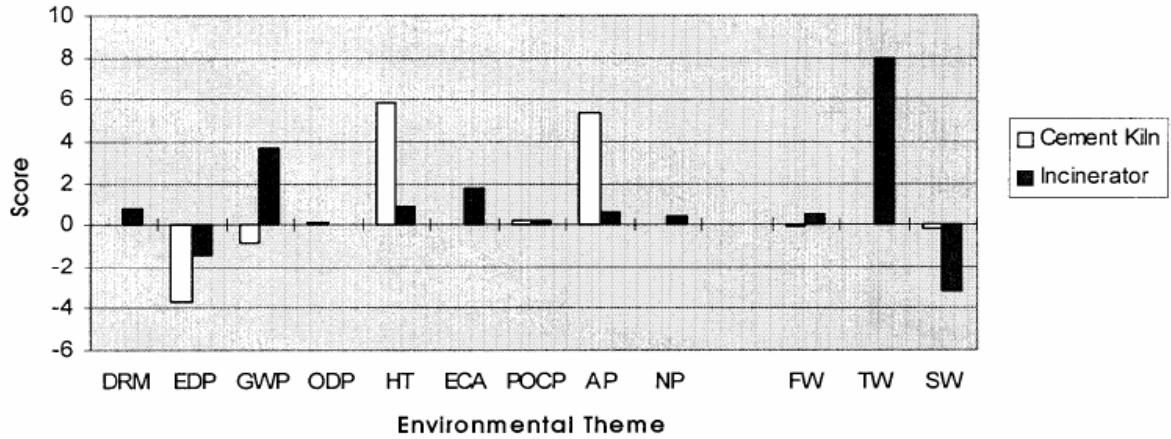


Figure 1b: Impacts of Processing Filter Cake in Cement Kilns and in Specialized Waste Incinerators

그림 1b: 시멘트 킬른 및 특수 폐기물 소각로에서 여과 고형물 처리 영향

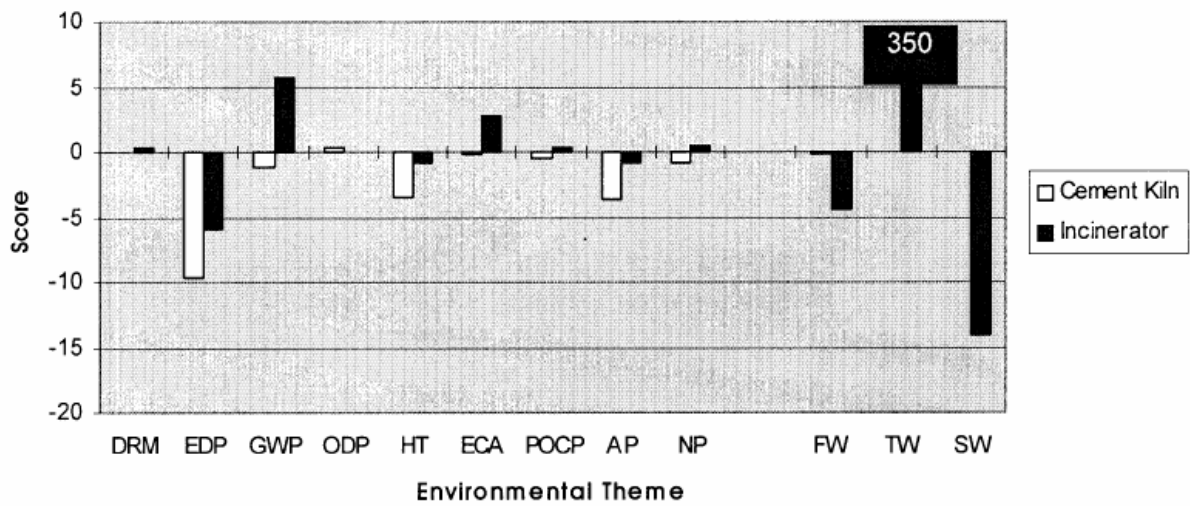


Figure 1c: Impacts of Processing Paint Residue in Cement Kilns and in Specialized Waste Incinerators

그림 1c: 시멘트 킬른 및 특수 폐기물 소각로에서 페인트 잔류물 처리 영향

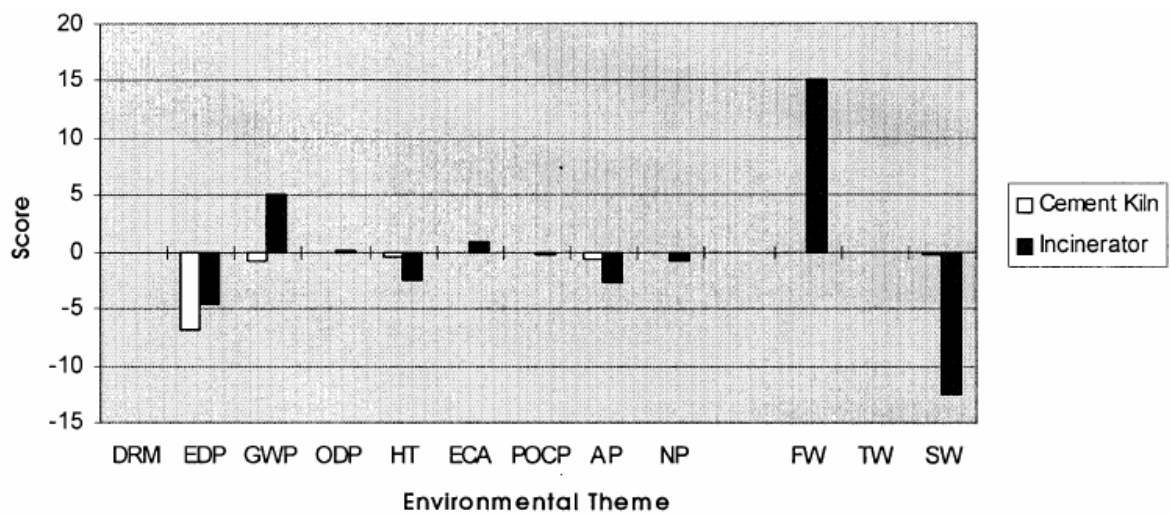


Figure 1d: Impacts of Processing Sewage Sludge in Cement Kilns and in Specialized Waste Incinerators

그림 1d: 시멘트 킬른 및 특수 폐기물 소각로에서 하수 슬러지 처리 영향

4. RECYCLING VERSUS RECOVERY IN CEMENT KILNS

4.

4.1 INTRODUCTION

4.1

As stated in *Section 1*, the European cement industry firmly supports the principle of the waste management hierarchy, and the need firstly to conserve non-renewable resources, and secondly to recover, reuse and recycle materials to their fullest potential. In this regard the cement industry can play a valuable role in maximising the utilisation of latent energy within a waste material, providing an environmentally beneficial alternative to materials recycling.

1절에서 언급한 바와 같이, 유럽의 시멘트 산업은, 폐기물 관리 계층의 원칙, 즉 첫째로 재생 불가능한 자원의 보존, 둘째로 가장 충분히 가능성 있는 재료들을 회수하고, 재이용, 재활용 하라는 요구를 강력하게 지지한다. 이 관점에서, 시멘트 산업은 재활용에 대하여 환경적으로 유익한 대안을 제공하면서, 폐기물 내에 잠재하고 있는 에너지를 최대한 이용하는데 있어 가치있는 역할을 할 수 있다.

Two examples illustrate this theme:

이 주제를 2가지 사례로 설명한다.

- the recycling of waste plastics versus the utilisation of waste plastic in cement kilns as a heat source;
- the recycling of waste oils versus the utilisation of waste oils in cement kilns as a heat source.

- 폐 플라스틱의 재활용 대 열원으로서 시멘트 킬른에서 폐 플라스틱의 이용
- 폐유의 재활용 대 열원으로서 시멘트 킬른에서 폐유의 이용

Since each activity (i.e. recycling and use in a cement kiln) has associated upstream and downstream implications in terms of energy use, resource requirements and avoided burdens, LCA is again used to define and analyse the two systems.

각 활동(즉, 재활용과 시멘트 킬른에서의 이용)은 에너지 이용, 자원 요건, 환경부하감소란 관점에서 상위와 하위개념이 서로 연결되어 있기 때문에, 2개의 시스템을 정의하고 분석하기 위해서 다시 LCA를 이용하였다.

4.2 RECYCLING VERSUS UTILISATION OF WASTE PLASTICS

4.2 폐 플라스틱의 재활용 대 이용

The Fraunhofer Institute² has analysed the environmental performance of the following activities with respect to emissions of CO₂, energy use, and the generation of hazardous waste:

프라운호퍼 연구소는 CO₂, 에너지 이용 및 유해 폐기물 발생과 관련하여 다음 활동에 대한 환경적 성과를 분석하였다:

² Life Cycle Analysis of Recycling and Recovery of Households Plastics Waste Packaging. Fraunhofer Institute,

- utilisation of 1 kg of waste plastics in cement kilns, displacing an equivalent amount of fossil fuel in thermal units. This results in avoided emissions relating to the mining, handling, transportation and use of coal at the kiln;
- incineration of 1 kg of waste plastics in an incinerator, along with other municipal solid waste. Fossil fuel is now used in the cement kiln, in the absence of a supplementary fuel;
- recovery by conversion of 1 kg of waste plastic into gaseous and liquid synthesis products using processes such as hydrogenation.

As the base case, it was assumed that 1 kg of waste plastics was landfilled along with other municipal solid waste. This is still the predominant route of disposal for unsorted municipal solid waste within the EU. The environmental impacts of the waste management options relative to landfilling were assessed for a range of impact categories, including global warming potential, nutrification, acidification potential, solid waste generation, etc. A selection of environmental burdens are displayed in *Figure 2* and can be summarised as follows:

(1) CO₂ Generation:

The use of waste plastics in cement kilns as a substitute fuel results in the largest net reduction in CO₂ generation of the three management options, relative to landfilling. For waste incineration, the offset from avoiding external energy generation is insufficient to counterbalance the avoided burden through not having to mine, transport and use coal at

- 열량 단위로 등가인 양의 화석연료를 대체하기 위하여, 시멘트 킬른에서, 폐 플라스틱 1 kg 이용. 이것은, 석탄의 채광, 취급, 수송 및 킬른에서의 이용과 관계된 환경부하감소로 나타난다;
- 다른 도시 고체 폐기물과 함께 소각로에서 폐 플라스틱 1 kg 소각. 화석연료는 지금 보조 연료가 없는 상태로 시멘트 킬른에서 사용된다;
- 수소화 처리와 같은 공정을 이용하여 폐 플라스틱 1 kg을 가스와 액체의 합성 제품으로 전환하여 회수.

기초적인 경우로서, 폐 플라스틱 1 kg이 다른 도시 고체 폐기물과 함께 매립되었다고 가정하였다. EU에서는 이것이 여전히 선별 되지 않은 도시 고체 폐기물에 대한 지배적인 처리 방법이다. 매립과 관련된 폐기물 처리방법에 대한 환경 영향은, 지구 온난화 잠재성, 부영양화, 산성화 잠재성, 고체 폐기물 발생 등을 포함한 영향 범주에 대해서 평가되었다. 환경 부하의 선택을, 그림 2에 나타냈으며, 다음과 같이 요약할 수가 있다:

(1) CO₂ 생성:

폐 플라스틱을 시멘트 킬른에서 대체 연료로서 사용하는 것이 매립과 비교한 3가지 처리방법 중에서 가장 커다란 CO₂ 순수 삭감 결과를 얻었다. 폐기물 소각의 경우, 외부의 에너지 생성을 삭감하는 것으로는 석탄의 채굴 및 수송, 시멘트 킬른에서 석탄을 사용하지 않아서 삭감된 부하를 상쇄하는 것이 불충분하였으며, 수소화

Munich, 1996 . Verwertung von Kunststoffabfällen aus Verkaufsverpackungen in der Zementindustrie. Fraunhofer Institute, Munich, 1997

시멘트 생산에서 대체연료를 사용하는 환경상의 혜택

the cement kiln. Hydrogenation and conversion of waste to plastic goods itself is an activity that uses energy, resulting in a small net saving in CO₂ generation.

(2) Energy Recovery:

Apart from waste incineration, which is a relatively inefficient converter of latent energy, the other management options offer comparable benefits in energy utilisation relative to landfill.

(3) Hazardous Waste Production:

The cement kiln, hydrogenation and conversion options do not produce hazardous waste, since any waste products are recyclable. However, waste incineration will produce 0.03 kg of hazardous waste per kg of plastics, in the form of fly ash and bottom ash. This waste will require disposal, generally by landfilling.

Overall, the cement kiln option outperforms the remaining options, maximizing the beneficial use of waste plastics relative to conventional incineration or conversion into chemical goods.

및 폐플라스틱을 다른 제품으로 전환하는 것은 에너지를 이용하는 활동으로서 CO₂ 발생을 조금만 삭감하는 결과를 가져 왔다.

(2) 에너지 회수:

비효율적인 잠재 에너지 변환 방법인 폐기물 소각과는 별도로, 다른 처리방법은, 매립에 비해 에너지 활용에 있어서 비교 가능한 이점을 제시하였다.

(3) 유해 폐기물 발생:

시멘트 킬른과 수소화 처리 및 물질전환 처리는, 어떤 폐플라스틱도 활용이 가능하기 때문에 유해 폐기물을 발생하지 않는다. 그렇지만, 폐기물 소각은, 플라이 애쉬 및 바닥재의 형태로 플라스틱 1 kg 당 0.03 kg 의 유해 폐기물을 발생시키게 되며, 이 폐기물은, 일반적으로 매립에 의한 처리가 필요할 것이다.

전체적으로 시멘트 킬른 처리방법은 다른 처리 방법에 비하여 성능이 월등하며, 또한 기존의 소각 또는 화학 제품으로 전환하는 방법에 비해 폐플라스틱의 유의한 사용을 극대화할 수 있다.

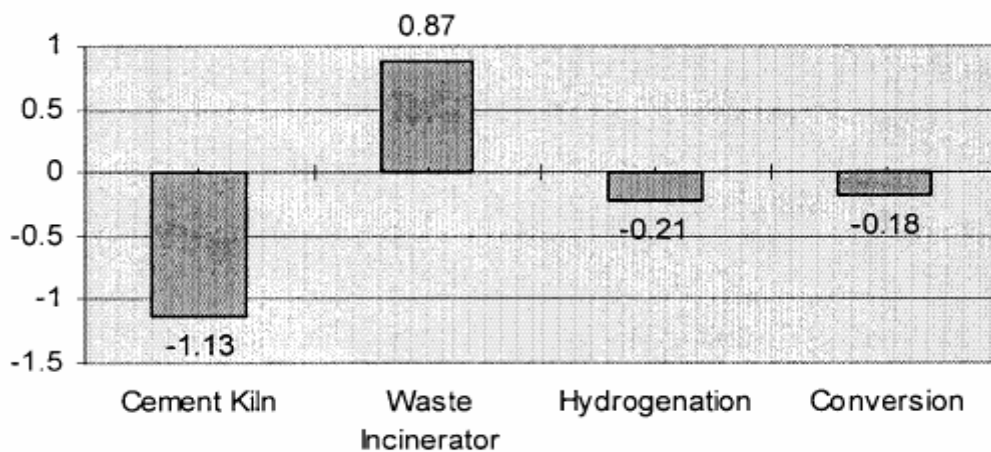


Figure 2a: Change in the Potential Environmental Impact in kg CO₂/kg Plastics

그림 2a: 잠재적 환경 영향의 변화(kg CO₂/kg 플라스틱)

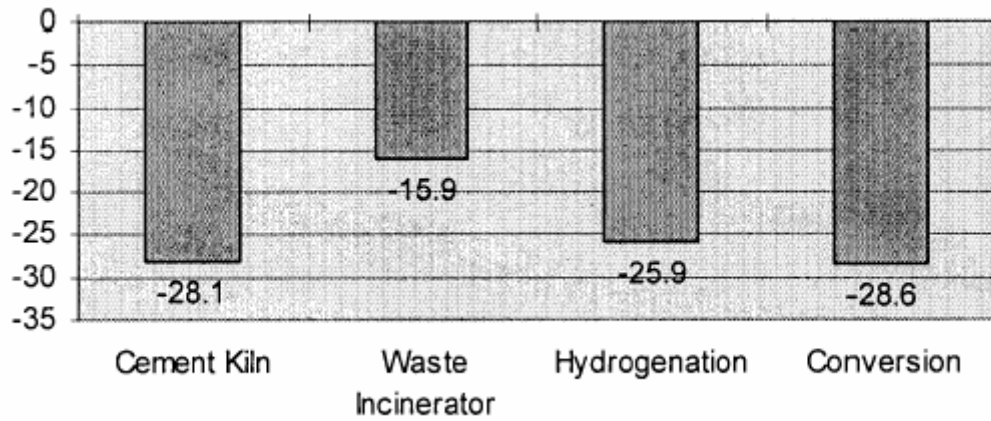


Figure 2b: Saving as a Result of Utilization of the Energy Content Recoverable from Resources in MJ/kg Plastics

그림 2b: 자원으로 부터 회수 가능한 에너지 용량을 이용한 결과로서의 삭감(MJ/kg Plastics)

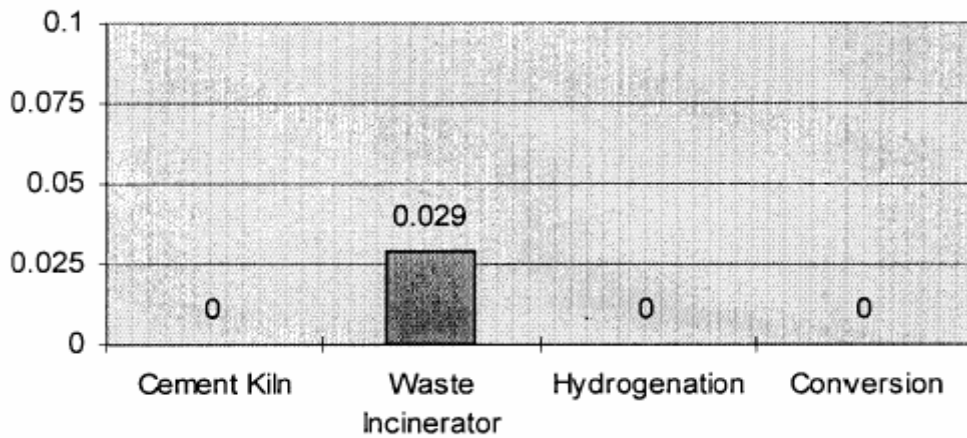


Figure 2c: Change in the Amount of Hazardous Waste Produced in kg/kg Plastics

그림 2c: 발생된 유해 폐기물의 양 변화(kg/kg Plastics)

4.3 Recycling Versus Utilization of Waste Oils

4.3

Another example of the overall benefits that cement kilns can bring to the environment is that of the management of waste oils. Two routes were assessed by the Fraunhofer Institute using the technique of LCA:

시멘트 킬른이 환경에 가져올 수 있는 전체적인 이점의 또 다른 예는 폐유의 처리이다. 프라운호퍼 연구소는 LCA의 기법을 이용해 2가지 방법을 평가하였다:

시멘트 생산에서 대체연료를 사용하는 환경상의 혜택

- | | |
|--|--|
| (1) The use of waste oils in cement kilns, displacing a conventional fossil fuel such as coal. | (1) 석탄과 같은 기존의 화석 연료를 대체하여 시멘트 킬른에서 폐유를 사용 |
| (2) The reprocessing of waste oil into lubricating oil products. | (2) 폐유를 윤활유 제품으로 가공처리 |

In the case of management route(1), the use of waste oil in cement kilns will necessitate the processing of crude oil into virgin lubrication oil products to replace the products that would have been made from the recycling process. Therefore the environmental burdens associated with crude oil processing were added to the environmental burdens resulting from the use of waste oils in cement kilns.

처리방법(1)에서, 시멘트 킬른에서 폐유의 사용은 재활용공정에서 만들어져 왔던 제품을 대체하기 위해서, 원유를 순수한 윤활유 제품으로 가공하는 것이 필요할 것이다. 따라서, 원유 가공과 관련된 환경 부하가 시멘트 킬른에서 폐유 사용에 따라 발생하는 환경 부하로 추가되었다.

Conversely for management route(2) the reprocessing of waste oils into lubricating oil products would mean the continuation of fossil fuel procurement and use at the cement kiln. Therefore the environmental burdens associated with coal extraction, processing and use in cement kilns were added to the environmental burdens resulting from reprocessing operations. The LCA results for CO₂ emissions and energy use are displayed in Table 6.

반대로 처리방법(2)에 대해서는, 폐유를 윤활유 제품으로 가공하는 것은, 시멘트 킬른에서 계속하여 화석 연료를 조달하여 사용하는 것을 의미할 것이다. 따라서, 석탄 추출, 처리 및 시멘트 킬른에서 석탄 사용에 관련된 환경 부하가 재처리 공정에서 발생하는 환경 부하에 추가되었다. CO₂ 배출 및 에너지 사용에 대한 LCA 결과를 표 6에 나타내었다.

Table 6. Environmental burdens associated with the management of waste oils

표 6. 폐유 관리와 관련된 환경 부하

Activity	CO ₂ Emitted (kg/t waste oil)	Energy Used (MJ/t waste oil)
Reprocessing of Waste Oil		
• Mining & transport of coal	551	4,300
• Waste oil refining	149	2,115
• Coal in cement plants	4,023	462
• TOTAL	4,732	6,877
Waste Oil in Cement Kilns		
• Crude oil procurement	124	1,434
• Crude oil refining	246	2,676
• Waste oil in cement kilns	2,536	17
• TOTAL	2,905	4,121

As with the utilisation of waste plastics in cement kilns, the use of waste oils as supplementary fuel outperforms the alternative waste management option of reprocessing. Emissions of CO₂ and overall energy utilisation are approximately 60% lower for the cement kiln option than when the waste oil is reprocessed into lubricating oil products.

5. SUMMARY OF ENVIRONMENTAL BENEFITS PROVIDED BY CEMENT KILNS

Controlled processing of waste with energy recovery and material recovery within a cement kiln represents an attractive waste management option. With an excess of 300 cement plants spread throughout the European Union, the industry is particularly well placed to respond to Society's needs in this regard. Waste materials which the industry has utilised as alternative fuels include used tyres, rubber, paper waste, waste oils, sewage sludge, plastics and spent solvent. In all cases these waste materials would either have been landfilled or combusted in dedicated incinerators. Their use in cement kilns replaces fossil fuels:

- maximises the recovery of energy while ensuring their safe disposal;
- produces overall environmental benefits by reducing releases to air, water and land;
- prevents resource depletion of valuable non-renewable fossil fuels;
- obviates the need to build dedicated incineration facilities.

시멘트 킬른에서 폐 플라스틱의 이용과 마찬가지로, 보조 연료로서의 폐유 사용이 가공처리하는 다른 폐기물 처리방법보다 성능이 월등하다. CO₂ 배출 및 전체적인 에너지 활용도에서 시멘트 킬른에서의 처리가 폐유를 윤활유 제품으로 가공처리하는 경우보다 대략 60% 정도 낮다.

5.

시멘트 킬른에서 에너지 및 물질을 회수하는 폐기물 처리 공정은, 매력적인 폐기물 처리방법의 하나임을 보여 준다. 300개 이상의 시멘트·플랜트가 유럽 연합 전역에 퍼져 있음으로서 시멘트산업은 이런 관점에서 사회적 요구에 잘 대응할 수 있도록 퍼져 있다. 시멘트 산업이 대체 연료로서 이용하고 있는 폐기물에는 폐타이어, 고무, 휴지, 폐유, 하수 오니, 플라스틱 및 폐 용매가 있다. 모든 경우에 이들 폐기물은 매립되거나, 소각로에서 소각 되었을 것이다. 그러나 시멘트 킬른에서 이들 폐기물의 이용은 화석 연료를 대체한다:

- 폐기물의 안전한 처리를 확보하는 동시에 에너지 회수를 극대화한다.
- 공기, 물 및 토양 대한 배출을 감소기킴으로서 전체적인 환경상 혜택을 가져 온다.
- 가치 있는 재생 불가능한 화석연료의 자원 소모를 방지한다;
- 공용 소각 설비의 건설 필요성을 제거한다.

시멘트 생산에서 대체연료를 사용하는 환경상의 혜택

The important contribution that the cement industry can make to a nation's waste management infrastructure has been explicitly recognised by several European governments. The practice of employing alternative fuels in cement plants does not hinder the establishment of a sound waste management industry. This practice can co-exist alongside a vigorous and thriving materials recovery and recycling and incineration industry, without distorting the essential principles of the EU's waste management hierarchy.

To this end the cement industry continues to contribute to the furtherance of sustainable development in Europe.

시멘트 산업이 국가의 폐기물 관리 기반을 구축하는데 중요한 공헌을 할 수 있다는 것을, 유럽의 몇몇 정부는 명시적으로 인식하여 왔다. 시멘트 플랜트에서 대체 연료를 활용하는 행위들이 건전한 폐기물 처리 산업의 체제를 방해하지 않는다. 이런 행위들은 EU의 폐기물 관리 체계의 기본 원칙을 왜곡하지 않고, 활발하고 번영하는 자원 회수 및 재활용, 소각 산업과 공존할 수 있다.

이런 목적을 위해서, 시멘트 산업은, 유럽에서 지속 가능한 개발의 촉진에 지속적으로 기여할 것이다.

폐기물 연소시 CO₂ 배출

A1. 서론

이 노트를 기록한 목적은 공용 소각로에서 보다는 시멘트 킬른에서 폐자원을 소각할 때 CO₂ 발생에 대한 시나리오를 개발하는 것이다. 정확한 배출을 추정하기보다 직접적으로 순 배출의 배출로 평가된 값을 계산 하려 하였다. 두 가지 시나리오를 들 수 있다. 첫번째 시나리오에서는, 공용 소각로와 발전소에서 소각하는 폐기물을 국가 발전소 망에 넣는다는 것이다. 시멘트 킬른은 화석연료(석탄)로 운전한다. 이 시스템에서 배출된 CO₂는 다음과 같이 구성된다.

- 시멘트 킬른에서 사용한 석탄의 채광과 수송으로 발생한 CO₂
- 시멘트 킬른에서 석탄 연소로 발생한 CO₂
- 공용 소각로에서 폐기물 소각으로 발생한 CO₂

위의 것에 추가적으로 발전소로부터의 CO₂ 배출이 있다. 이때 발전소는 외부의 하위흐름에서 국가 발전망 내로 전기가 추가되기 때문에 감소된 부하로 운전된다. 단순히 시나리오 1, 2 사이의 순수한 차이를 시험하기 위한 목적이라면 이들 배출은 계산할 필요가 없다.

Scenario 2에서, 폐기물은 이제 시멘트 킬른에서 처리되며, 폐기물의 열용량에 비례하는 만큼의 석탄을 대체하게 된다. 소각로가 더 이상 운영되지 않으므로, 전기도 생산되지 않는다. 국가 발전망에 모든 전기를 공급하기 위해서, 발전소는 소각로에서 그전에 생산했던 양과 같은 전력을 추가로 생산해야만 한다. 대부분의 EU 회원국에서, 이 한계 전력은 석탄의 연소를 통해 생산된다. 이 시스템으로부터의 CO₂의 배출은 다음과 같이 구성된다.

- 발전소에서 사용한 석탄의 채광과 수송에서 발생한 CO₂
- 발전소에서 연소한 석탄으로 부터 발생한 CO₂
- 시멘트 킬른에서 폐기물 소각으로 발생한 CO₂

시나리오는 다음에 자세히 설명한다.

A2. 가정

가정과 그들의 출처에 대한 요약은 표 A1에 나타냈다. 가정들은 다음에서 더 자세하게 검토된다. 표 A1 입력데이터와 다른 정보의 요약

	열용량	CO ₂ 배출	공장 설계	비고
바이오 연료	16 GJ/t	110 kg/t	-	(a)
용매	26 GJ/t	70 kg/t	-	(b)
석탄	26 GJ/t	93 kg/t	-	(a)
석탄 채광		24.3 kg/MWh	-	(c)
석탄 수송		0.045kg/km/t	-	(c)
소각효과	-	-	23%	(d)
발전효과	-	-	37%	(c)

주:

- (a) Nystro KLE(1993). Incineration waste and the greenhouse effect. ISWA Times, 1993/4 Yearbook, 바이오연료 는 나무(112kg/GJ)와 국내 폐기물(108kg/GJ)에 의한 배출계수의 평균값이다.
- (b) 탄소함량을 석탄인 경우 75인 것에 비해 55% 기준으로 배출계수를 추정하였다.
- (c) European Commission, DGXII, Science, Research and development, JOULE(1995a), Externalities of Fuel Cycles 'ExternE' Project
- (d) Wallis M K and Watson A (1994), MSW Incineration: A critical assessment, Energy World, pp14-16, December 1994.

A2.1 연료와 폐기물 형태

시멘트 킬른과 발전소에서 사용되는 기존의 화석 연료인 석탄의 열량은 26GJ/t이며, CO₂ 배출계수는 93 kg/GJ으로 가정하였다.

그리고 두 가지의 대표적인 폐기물을 하수 슬러지, RDF(Refuse derived fuel) 등의 폐기물로 만든 바이오 연료와 화학 폐기물에서 발생된 폐용매로 가정하였다. 바이오 연료는 열량이 16GJ/t(특정 RDF)이라고 가정하고, 또 시멘트 킬른에 공급되는 보조액상연료의 전형적인 규격으로서 폐용매의 열량은 26GJ/t으로 가정하였다. 바이오 연료의 CO₂ 배출계수는 110kg CO₂ /GJ을 채택하였는데, 생활 폐기물(108kg CO₂ /GJ)과 목재 폐기물(112kg CO₂ /GJ)의 중간이다. 폐용매의 CO₂ 배출계수는 석탄의 탄소함량이 75인 것에 비해 낮은 저 탄소함량인 55%로 가정한 70kg CO₂ /GJ으로 하였다.

A2.2 석탄 대체

시멘트 킬른에서 폐기물을 연소할 경우, 대체되는 석탄의 양은 폐기물의 열용량에 비례한다. 그러므로 바이오 연료 1톤은 석탄 0.62톤을 대체하며, 폐용매 1톤은 석탄 1톤을 대체한다. 시멘트 톤당 4GJ을 소비한다고 가정하면 바이오 연료 1톤이면 시멘트 4톤을 생산할 수 있고, 폐용매 1톤은 6.5톤의 시멘트를 생산 할 수 있다.

시나리오 2에 의하면 공용 소각로의 폐쇄로 인해 국가 전력망에서 감소된 전력을 공급하기 위하여는 발전소에서 추가적인 석탄이 필요하다. 소각로의 전환효율이 23%, 발전소의 전환효율이 37%이며, 열량 GJ 당 280kWh의 전환계수를 가정하면, 바이오 연료 1톤은 소각로에서 발전소의 석탄 0.39톤에 해당하는 1,030kWh의 전기에너지를 생산하며, 폐용매 1톤은 소각로에서 발전소의 석탄 0.63톤에 해당하는 1,674kWh의 전기에너지를 생산하게 된다.

A2.3 석탄의 채광 및 수송

석탄의 채광과 수송 중에 CO₂가 배출된다. 사용된 배출계수는 채광에서 24.3kgCO₂/MWh이고, 철도 수송시 0.045kg/km/t이다. 광산에서 시멘트 킬른이나 발전소까지 석탄 수송은 약 300km로 가정하였다.

시멘트 생산에서 대체연료를 사용하는 환경상의 혜택

A3 시나리오 1: 소각로에서 폐기물 연소

A3.1 시나리오 1의 설정

시나리오 1은 다음과 같이 가정하였다.

- 폐기물 1톤을 소각로에서 연소한다.
- 시멘트 킬른은 기존의 석탄을 사용한다.
- 소각로에서 생산된 전기는 발전소에서 생산된 전기량을 차감하여 그량 만큼 발전소를 줄어든 부하에서 운영할 수 있게 한다.

두개의 상황을 정의한다.

- 시나리오1(a): 바이오 연료를 소각로에서 연소한다.
- 시나리오1(b): 폐 용매를 소각로에서 연소한다.

대기에 대한 CO₂부하는 다음과 같이 구성된다.

- (A) 석탄 채광 및 수송 중에 발생하는 CO₂
- (B) 시멘트 킬른에서 석탄 연소 시에 발생하는 CO₂
- (C) 소각로에서 폐기물 연소 시에 발생하는 CO₂
- (D) 소각로가 직결되어 있을 때 발전소에서 발생하는 CO₂

전체 CO₂의 부하는 다음과 같다

A+B+C+D

(D)로 정의된 CO₂는 계산에 넣지 않는다.

A3.2 석탄의 채광과 수송 시에 발생하는 CO₂

배출계수가 석탄 채광에서 24.3kgCO₂/MWh이고, 철도로 시멘트 킬른까지 약 300km 수송 시 0.045kg/km/t일 때, CO₂의 부하는 다음과 같다.

- 시나리오 1(a): 0.62톤의 석탄을 채광할 때 110kg, 0.62톤 수송시 9kg 총 119 kg의 CO₂를 배출한다.
- 시나리오 1(b): 1톤 석탄을 채광할 때 177kg, 1톤 수송시 13.7kg 총 191kg의 CO₂를 배출한다.

A3.3 시멘트 킬른에서 석탄 연소시 발생하는 CO₂

배출 계수를 93kg CO₂/GJ 일 때 CO₂ 부하는 다음과 같다.

- 시나리오 1(a): 석탄 0.62톤 연소시 CO₂ 1,500kg이다.
- 시나리오 1(b): 석탄 1톤 연소시 CO₂ 2,148kg이다.

A3.4 소각로에서 폐기물 연소시 발생하는 CO₂

배출계수를 바이오 연료 110kg CO₂/GJ, 폐용매 70kg CO₂/GJ 일 때 CO₂ 부하는 다음과 같다.

- 시나리오 1(a): 바이오 연료 1톤 연소시 CO₂ 1,760kg이다.
- 시나리오 1(b): 폐용매 1톤 연소시 CO₂ 1,820kg이다.

A3.5 총 부하

시나리오 1에서 CO₂부하는 (A+B+C+D)kg 이다.

- 시나리오 1(a): 119+1500+1760+D=(3379+D)kg
- 시나리오 1(b): 191+2418+1820+D=(4429+D)kg

A4 시나리오 2 시멘트 킬른에서 폐기물 연소

A4.1 시나리오 2의 설정

시나리오 2은 다음과 같이 추정한다.

- 시멘트 킬른에서 폐기물 연소는 석탄을 대체한다.
- 소각로는 작동하지 않고, 동일 양의 전기를 발전소에서 석탄을 사용하여 생산한다.

두가지 상황을 정의한다.

- 시나리오 2(a): 시멘트 킬른에서 바이오 연료를 사용한다.
- 시나리오 2(b): 시멘트 킬른에서 폐 용매를 사용한다.

대기에 대한 CO₂부하는 다음과 같이 구성된다.

- (D) 발전소 가동에서 배출되는 CO₂는 시나리오 1과 같다.
- (E) 발전소에서 추가 사용하는 석탄에 의한 CO₂
- (F) 추가 사용 석탄의 채광과 수송으로 발생하는 CO₂
- (G) 시멘트 킬른에서 연소하는 폐기물로 인한 CO₂

시나리오 2에 대한 총 CO₂는 다음과 같다.

D+E+F+G

A4.2 발전소에서 추가 사용하는 석탄에 의한 추가 CO₂(E)

- 시나리오 2(a): 바이오 연료는 1,030kWh의 전기에너지를 사용하고, 이는 발전소의 석탄 사용량 0.39톤에 해당하며, 발전소에서 943kg의 추가 CO₂부하가 된다.
- 시나리오 2(b): 폐용매는 1,674kWh의 전기에너지를 사용하고, 이는 발전소의 석탄 사용량 0.63

시멘트 생산에서 대체연료를 사용하는 환경상의 혜택

톤에 해당하며, 발전소에서 1,523kg의 추가 CO₂부하가 된다.

A4.3 발전소에서 추가 사용하는 석탄에 의한 추가 CO₂(F)

- 시나리오 2(a)에서 바이오 연료 1톤은 석탄 0.39톤에 해당하며, CO₂ 배출은 채광시 69kg, 수송시 5.3kg, Total 75kg이다.
- 시나리오 2(b)에서 폐 용매 1톤은 석탄 0.63톤에 해당하며, CO₂ 배출은 채광시 110kg, 수송시 9kg, Total 119kg이다.

A4.4 시멘트 킬른에서 폐기물을 연소할 때 CO₂ 배출

이 배출량은 소각로에서 폐기물 연소 중에 배출하는 CO₂의 배출량과 같다.

- 시나리오 2(a): 1톤 바이오 연료 연소에 의한 CO₂ 배출 부하는 시멘트 킬른에서 1,760kg이다.
- 시나리오 2(b): 1톤 폐용매 연소에 의한 CO₂ 배출 부하는 시멘트 킬른에서 1,820kg이다.

A4.5 총 부하

시나리오 2의 총 부하는 (D+E+F+G)kg

- 시나리오 2(a): $D+943+75+1760=(2778+D)$ kg
- 시나리오 2(b): $D+1523+119+1820=(3462+D)$ kg

A5. 순수 CO₂ 부하

두 시나리오의 은 시나리오 1과 시나리오 2의 차이로 계산한다.

두 시나리오의 순수한 CO₂부하는 시나리오1과 시나리오 2의 총 CO₂부하의 차이로부터 얻는다. 시멘트 킬른에서 폐기물 처리시 소각로에 대한 CO₂ 배출의 감소는 표 2에 요약하였다.

표 A5 공용 소각로 또는 시멘트 킬른에서 폐기물 1톤당에서 CO₂ 배출 요약

	바이오 연료(16 GJ/t)	폐 용매 (26 GJ/t)
공용 소각로에서 소각	3379+D kgCO ₂	4429+D kgCO ₂
시멘트 킬른에서 연소	2778+D kgCO ₂	3462+D kgCO ₂
시멘트 킬른에서 연소에 의한 순 이점	601kgCO ₂ /t 폐기물	967kgCO ₂ /t 폐기물

A6. 시멘트 킬른에서 폐기물 소각의 장점

그러므로, 시멘트 킬른에서 폐기물 소각의 장점은 다음과 같다.

- (1) 폐기물의 유연탄 대체, 안전한 취급 및/ 또는 처리가 필요한 원하지 않는 물질인 폐기물을 재 생 불가능한 자원인 석탄으로 대체함으로써 자원보존과 CO₂ 배출과 관련된 절약이 발생된다.
- (2) 폐기물이 갖는 본질적 에너지의 효율적 이용. 시멘트 킬른에서는 100%의 효율을 내고 있는

반면에, 특수 폐기물 소각로에서는 폐기물의 열량 활용이 매우 비효율적이다.

- (3) 환경적으로 안전한 기존의 열 플랜트에서 소각 가능한 폐기물에 대한 연소 능력을 제공함으로써 특수한 공용 소각로의 건설 필요성을 제거한다.
- (4) 공용 소각로에서 폐기물이 소각되는 시나리오와 관련하여 CO₂ 배출량의 순 감소로 인해 폐기물의 연소시 발생하는 온실 효과에 대한 환경 영향을 감소시킨다.



- ▶ 주 소 : 서울특별시 강남구 역삼동 837-26 (삼일프라자 16층)
- ▶ 대표전화 : [총무팀/기술팀] 538-8230 [기획팀] 538-8235
- ▶ FAX : 538-8229, 538-1720

본 자료의 무단 전재 또는 복제 행위는 저작권법 제98조에 의거하여 처벌 받게 됩니다.