



KR0101213

KAERI/AR-573/2000

기술현황분석보고서

산소부화 소각기술

Oxygen Enriched Incineration

한국원자력연구소

**PLEASE BE AWARE THAT
ALL OF THE MISSING PAGES IN THIS DOCUMENT
WERE ORIGINALLY BLANK**

제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 "알파폐기물 소각/고화 기술개발" 과제의 산소부화소각
기술현황분석 보고서로 제출합니다.

2000 년 10 월 일

과 제 명 : 알파폐기물 소각/고화기술개발

주 저 자 : 김 정 국

공 저 자 : 양 희 철

박 근 일

김 준 형

요 약 문

산소부화연소기술은 최근 폐기물 소각에 많이 이용되고 있는 기술로, 이를 현재 개발중인 알파폐기물 소각공정에 적용하기 위하여 산소부화 소각기술에 대한 기술현황을 분석하였다. 기존의 공기를 사용하는 것에 비해 산소 또는 산소부화 공기를 이용할 경우 연소효율 및 소각처리용량 증가, 배기체 발생 감소 효과를 기대할 수 있다. 특히, 배기체 발생량은 4분의 1이하로 감소시킬 수 있어 배기체 처리설비의 축소 및 처리 효율성 제고 효과를 가져올 수 있을 것으로 분석되었다. 그러나 순 산소를 사용하는 경우 과열부 생성 및 질소산화물 발생 증가 문제도 예상되는 바, 이를 해결하기 위해 질소산화물을 적게 발생시키는 산소버너의 사용 및 배기체 일부를 연소실로 재순환하는 것이 필요하다.

SUMMARY

Oxygen enriched combustion technology has recently been used in waste incineration. To apply the oxygen enrichment on alpha-bearing waste incineration, which is being developed, a state-of-an-art review has been performed. The use of oxygen or oxygen-enriched air instead of air in incineration would result in increase of combustion efficiency and capacity, and reduction of off-gas product. Especially, the off-gas could be reduced below a quarter, which might reduce off-gas treatment facilities, and also increase an efficiency of off-gas treatment. However, the use of oxygen might also lead to local overheating and high nitrogen oxides (NOx) formation. To overcome these problems, an application of low NOx oxy-fuel burner and recycling of a part of off-gas to combustion chamber have been suggested.

CONTENTS

Ch. 1. Introduction	17
Ch. 2. Oxygen Enriched Incineration (OEI)	21
§ 1. Oxygen Enrichment	21
§ 2. Off-gas characteristics of OEI	34
§ 3. Advantages of OEI	42
§ 4. Oxygen production techniques	50
§ 5. Considerations in OEI	60
Ch. 3. Applications of oxygen enrichment in incineration	65
Ch. 4. Patents related to oxygen enrichment	89
§ 1. Foreign patents	89
§ 2. Domestic patents	99
§ 3. Patents related to oxygen burner	104
Ch. 5. Conclusion and proposal for application	113
§ 1. Conclusion	113
§ 2. Proposal for application	115
Ch. 6. References	117

목 차

제 1 장	서 론	17
제 2 장	산소부화소각기술	21
제 1 절	산소부화기술	21
1.	산소부화	21
2.	산소부화 효과	23
제 2 절	산소부화 소각배기체 특성	34
1.	배기체 발생량	34
2.	배기체 조성	34
3.	질소산화물	37
4.	일산화탄소	40
제 3 절	산소부화소각의 이점	42
1.	소각처리용량 증대	42
2.	소각성능 개선	42
3.	연료 절감	44
4.	분진의 동반배출 감소	46
5.	기타 이점	48
제 4 절	산소발생 기술	50
1.	심냉 분리법	50
2.	흡착 분리법	50
3.	막 분리법	52
4.	산소생산기술 비교 평가	55

제 5 절 산소부화 소각공정 고려사항	60
1. 산소 안전성	60
2. 폐기물 특성	60
3. 연소로 형태	60
4. 배출허용 NO _x 농도	61
5. 부분 과열	61
6. 배기체 중 산소과잉	61
제 3 장 산소부화 소각공정 예	65
1. 도시 및 산업쓰레기 소각공정	65
2. IT의 토양복원용 소각공정	68
3. 토양복원용 이동형 소각공정	72
4. 토양복원용 운송형 소각공정	72
5. ICI의 황산폐기물 소각처리공정	76
6. INEL의 공기제어형 소각공정	76
7. 도시쓰레기 소각공정	79
8. 슬러지 허리용 다단로상 소각공정	84
9. 촉 연소공정	86
10. Dupont의 원통형 사이클론 소각공정	86
11. 기타 산소부화 적용 공정	86
제 4 장 산소부화 소각공정 관련 특허	89
제 1 절 국외 특허	89
1. 가연성 물질 소각공정	89
2. 증기생성 소각로	89
3. 폐쇄형 소각공정	89
4. 폐쇄 순환형 연소/유리화 공정	92

5. 수직 원통형 소각공정	92
6. 무배출 소각공정	92
제 2 절 국내 특허	99
1. 산소부화 폐기물 소각공정	99
2. 쓰레기 소각 및 용해처리 공정	99
3. 산소 랜스를 구비한 다단로상 소각공정	99
4. 코오롱엔지니어링의 산소부화 소각공정	99
5. 산소부화 폐기물 소각	99
제 3 절 산소버너 관련 특허	104
1. 버너의 특성 및 동작원리	104
2. NO _x 발생량	106
제 5 장 결론 및 건의사항	113
제 1 절 결 론	113
제 2 절 건의사항	115
제 6 장 참고문헌	117

그림 목 차

그림	1. 산소농도에 따른 단열화염온도 변화	27
그림	2. 산화제 조성별 단열화염온도 변화	27
그림	3. 연소가스 온도를 1600K로 가정할 때 공기/연료(a) 및 산소/연료(b) 연소의 Sankey도	28
그림	4. 3가지의 다른 산화제와 양론적으로 연소할 경우 이용 가능한 열(%) 대 연소배출가스 온도 비교	28
그림	5. 산소부화율에 따른 화염속도의 변화	33
그림	6. 산소농도에 따른 연소가스량 변화	35
그림	7. 산소농도에 따른 연소가스 변화	36
그림	8. 산소농도에 따른 연소가스 조성 변화	38
그림	9. 프로판과 양론적으로 연소시킬 때 산소농도에 따른 NO의 부피(ppmv) 및 질량(lb NO/MMBtu)농도	39
그림	10. 프로판과 양론적으로 연소시킬 때 산소농도에 따른 전체 및 순 가열속도를 기준으로 NO의 평형농도	39
그림	11. 이용가능한 열 1 MMBtu를 얻기 위해 필요한 연료량 (기준 : 연소온도 1100℃, 6% 과잉산소)	45
그림	12. 산소/메탄 계에서 연료 절약	47
그림	13. 심냉분리 (Cryogenic air separation) 장치 공정도	51

그림 14. 압력 스윙흡착 (Pressure swing adsorption; PSA) 장치 공정도	54
그림 15. 분리막을 이용한 산소부화장치 공정도	56
그림 16. 산소부화기술을 적용한 도시쓰레기 소각공정	66
그림 17. 산소부화를 적용함으로 연소온도 및 처리용량 증가 (위)이론 (아래) 실험	67
그림 18. 산소농도에 따른 CO 발생량 변화	69
그림 19. 산소부화에 따른 NO _x 발생량 변화	69
그림 20. 산소부화에 따른 배기체 및 소각재 중 SO _x 의 농도	69
그림 21. 산소부화기술을 적용한 로타리킬른 소각공정(킬른 및 제2연소실에 각각 설치된 산소버너와 산소랜싱)	70
그림 22. Vesta 이동형 소각공정	73
그림 23. Williams 운송형 소각공정	75
그림 24. 산소부화기술을 적용한 Riley Test 소각공정	77
그림 25. 산소부화에 따른 일산화탄소 및 질소산화물의 발생량	82
그림 26. 산소부화기술을 이용하여 유해가스를 줄이는 소각 공정도	90
그림 27. 산소부화기술을 적용한 도시쓰레기 소각공정	91
그림 28. 폐쇄형 소각공정 개념도	93
그림 29. 폐쇄/순환개념을 도입한 산소부화 소각공정	94

그림 30. 수직원통형 산소부화 소각공정	95
그림 31. 산소부화기술을 적용한 무배출 소각공정도	97
그림 32. 산소부화기술을 적용한 무배출 소각공정의 연소실 구조 ..	98
그림 33. 산소랜스를 구비한 다단로상 소각로	100
그림 34. (주)코오링엔지니어링의 산소부화소각공정	101
그림 35. 산소부화기술을 이용한 1차 소각로	103
그림 36. Union Carbide사의 산소버너 단면도	105
그림 37. 연소가스 순환비에 따른 단열화염온도 변화	107
그림 38. 산소흡인버너와 일반 버너의 질소산화물 생성량 비교	109
그림 39. 산소농도에 따른 버너의 질소산화물 생성량 비교	111

표 목 차

표 1. 연료기체의 공기와 산소에서의 인화성 한계	25
표 2. 양론비 조건으로 연소할 경우 단열화염온도	25
표 3. 공기 또는 산소 하에서 가스 혼합물의 점화온도 비교	30
표 4. 공기 또는 산소 하에서 자연발화온도 비교	31
표 5. 공기 또는 산소 하에서 연소 시 화염속도 비교	31
표 6. 소각처리용량을 증대시키는 산소부화 효율성	43
표 7. 산소부화소각의 이득	49
표 8. 압력 스윙흡착법의 특징	53
표 9. 산소부화용 막 분리기술의 운전방식의 비교	57
표 10. 산소발생장치별 특징 비교	58
표 11. 소각시설 관련 배출허용기준	62
표 12. 미국 IT Corporation의 토양복원용 소각공정에 산소부화기술을 적용한 결과	71
표 13. Vesta 이동형 소각공정에 산소부화를 적용한 결과	74
표 14. 운송형 소각공정에 산소부화를 적용한 결과	74

표 15. 방사성폐기물 소각공정의 산소부화 소각실험 조건	78
표 16. 물질수지에서 계산된 공기 누설량	80
표 17. 방사성폐기물 소각공정의 산소부화 소각실험 결과	81
표 18. 소각운전시간을 고려한 소각용량	80
표 19. 산소부화소각 발생 소각재 분석 결과	83
표 20. 다단로상 소각로에 산소부화 적용 결과	85
표 21. Dupont CSI에 산소부화를 적용한 결과	87
표 22. 산소부화를 적용한 소각공정 및 주요 결과	88
표 23. 산소버너의 연료로 사용된 천연가스 특성	108
표 24. 일반 공기버너의 NO _x 생성량	108

제 1 장 서 론

1960년대 중반에 국제원자력위원회 (International Atomic Energy Agency; IAEA)에 의해 소각공정이 방사성 동위원소 (Radioisotope; RI) 폐기물 처리 및 처분기술의 하나로 그 효용성이 언급된 이래[1,2], 많은 기술개발을 거치면서 현재는 원자력 산업에서 발생하는 방사성폐기물 처리에 있어 중요한 기술 중의 하나가 되었다. 소각이 갖는 가장 큰 장점은 가연성 고체 폐기물의 대부분을 차지하는 유기 성분을 화학적으로 기체상태로 바꿈으로 높은 감중 (10:1 정도) 및 감용 (100:1 정도) 효과를 얻는 것이다. 폐기물은 열에 의한 화학반응을 통해 비반응성의 안정한 물질로 변하고 다음 관리단계 (예, 안정화, 수송, 저장, 처분)에 있어 더 용이하게 취급될 수 있다. 소각이 가지고 있는 다른 장점으로는 다양한 형태의 잡고체 폐기물, 유기성 폐기물, 젖은 고체 폐기물 및 소량의 수용성 액체 폐기물까지 처리할 수 있는 융통성을 들 수 있다.

그러나 소각이 오랜 시간동안 일반 도시 및 산업 폐기물 처리에도 활용되어 널리 검증되었음에도 불구하고 방사성폐기물을 소각 시에 사고에 의해 미세 분진 및 가스상 물질로 인해 오염을 더 확산시키는 결과를 가져올 수 있다. 따라서 방사성폐기물을 소각하는 경우 연소방식을 개선하려는 노력 못지 않게 소각 배기체를 처리하는 기술에 대해 많은 연구와 개발이 진행되어 왔다. 그 결과 방사성폐기물 소각시설에는 여러 종류의 배기체 처리장치가 설치되어 있으며 이로부터 배출되는 2차 폐기물인 폐액, 폐여과기와 운영 및 해체 폐기물을 고려하면 감용 효과가 상당히 줄어든다[3].

최근의 소각기술은 독성 및 유해 폐기물 처리뿐만 아니라 오염된 토양의 제염에도 이용되고 있다. 소각기술로 처리하는 대상 폐기물이 확대되어감에 따라 더 효율이 높은 연소기술의 개발이 필요하며 소각 후 외부로

배출되는 소각재 및 배기체의 관리가 더욱 강화되고 있다. 예로, 미국 EPA (Environmental Protection Agency)에서는 유해 성분이 포함된 폐기물을 소각할 때 DRE (Destruction and Removal Efficiency)가 유해유기성분 (Principal Organic Hazardous Components ; POHCs)을 함유한 폐기물에 대해 99.99%이상, 다이옥신이나 PCBs (Poly-Chlorinated Biphenyls)를 함유한 폐기물에 대해 99.9999%이상이 되도록 요구하고 있다.

기존의 소각기술 보다 더 개선되어 독성 및 유해 폐기물 처리에도 충분히 적용이 가능한 혁신적인 열처리기술 10가지가 미국 EPA에 의해 선정된 바 있으며[4] 그 중의 하나가 바로 “산소부화 소각기술 (酸素富化 燒却技術; Oxygen Enriched Incineration; OEI)”이다. 여기서 산소부화란 폐기물의 연소에 필요한 산소를 공기 중 산소의 구성비인 21% 이상으로 최고 100%의 순 산소까지 만든 것을 말한다. 산소부화를 이용한 연소는 금속 및 광물질 산업에서 연소효율을 증대시키기 위해 사용해왔던 기술인데 소각에의 적용은 유해성분을 보다 효율적으로 파괴하기 위한 필요성 때문에 최근에야 기술개발이 이루어지고 있다.

현재 기술개발이 진행되고 있는 대부분의 산소부화 소각기술은 기존의 소각시설의 공기주입설비를 산소 또는 산소부화공기 공급설비로 대체하거나 산소주입설비를 추가하는 방법으로 공기 보다 더 고농도의 산소분위에서 연소가 이루어지도록 한 것이다. 그 결과 연소온도가 상승하여 유해성분이 완전히 파괴되고 소각처리용량의 증대 및 보조연료의 절감을 얻을 수 있고, 또, 배기체 발생량이 적어지게 된다.

일반 도시 및 산업 폐기물의 경우와는 다르게 방사성폐기물은 소각 시 발생하는 모든 배기체가 잠재적인 확산 가능성을 가진 방사성 기체폐기물로 보고 처리해야 한다. 따라서 산소부화기술을 적용함으로써 배기체 발생량을 줄이는 것은 방사성폐기물 소각시설, 특히 보다 높은 수준의 알파 핵종 누설방지 (Alpha tight)가 필요한 알파폐기물 소각기술에 있어 매우 큰 장점이 될 것이다. 본 고에서는 국내외의 산소부화 소각기술의 연구개발

현황을 분석, 비교하여 현재 수행중인 알파폐기물 소각로 개념설계에 도움이 되고자 하였다.

제 2 장 산소부화 소각기술

제 1 절 산소부화기술

1. 산소부화 (Oxygen Enrichment)

가. 산소부화 원리

산소는 그 자체가 연소하지 않지만 연소속도를 크게 가속시키는 강한 산화제로 화학 반응성이 매우 크다. 대부분의 연소공정에서는 연소반응에 필요한 산소를 공기로 공급되는데 공기는 부피 기준으로 약 21%의 산소와 79%의 질소로 이루어져 있다.

연소반응에 있어 산소만 필요할 뿐 질소는 반응에 참여하지 않고 그대로 남아 있거나 주로 고온에서 질소산화물 (NOx) 생성에 기여한다. 연소반응이 진행될 때 발생하는 열의 상당량이 희석제인 비반응성 질소를 가열하는데 이용된다. 따라서 소각에 필요한 공기의 일부 또는 전부를 산소로 대체하면 산화제 및 연소 배출가스 중에 질소가 차지하는 부분이 줄어들게 되고, 그 결과 소각되는 단위 폐기물 당 산화제 및 연소 배출가스 양이 감소하고 연료-산화제 혼합물에 있어 산소의 농도가 증가되어 연소효율이 증대하게 된다.

나. 산소부화 방식

고온 열처리 공정에 산소를 주입하는 다양한 기술이 개발되어 적용되고 있으며, 원하는 산소부화 효과를 얻고 연소로의 성능을 개선하기 위해 적절한 주입방식이 선정되어야 한다.

연소로에 산소부화기술을 적용하는 방식은 주로 연소공정에 사용되는 산소의 양, 가스와 산소를 혼합하는 방법에 따라 달라지며 크게 다음 3가지 방식이 있다[5, 6, 7, 8, 9].

- 연소공기의 산소부화
- 산소 랜싱 (lancing) 주입
- 산소/연료 (oxy-fuel) 버너 이용

연소공기를 산소부화하는 방식은 일차 또는 이차 연소실에 위치한 버너에 공급되는 공기의 일부를 산소로 대체하거나 산소를 주입함으로써 연소공기가 산소부화되어 공급되도록 한 것이다. 산소 랜싱은 일차 또는 이차 연소실 내부의 연소가 일어나는 지점까지 랜싱파이프를 설치하고 이 파이프를 통해 직접 산소를 공급하는 방식이다. 산소/연료 버너를 이용하는 방식은 버너에 필요한 산화제로 공기 대신에 순 산소만을 사용하는 방식으로 이 경우 공기버너 대신에 산소 조건에서도 연소가 잘 되도록 제작된 산소버너를 사용해야 한다.

공기/연료 버너로 운전되는 연소로에서 하부로부터 주입되는 산소 랜싱은 대부분의 소각로, 특히 로타리킬른 소각로의 처리용량을 크게 증대시킬 수 있는 유용한 기술이다. 이 방식은 다른 방식의 산소부화에 비해 폐기물이 소각되는 화염부에만 산소부화시키고 나머지 대부분 화염부는 산소와 접하지 않게 되므로 화염온도를 낮게 유지할 수 있어 내화물질을 보호할 수 있는 장점이 있다.

이상의 3가지 산소부화 방식 중 산소/연료 버너를 사용하면 연소가스 부피가 가장 크게 감소하므로 소각처리용량을 2배까지 증대시킬 수 있다. 일반적으로 연소로에 높은 열 공급이 필요한 폐기물 특히, 저 발열량 폐기물이나 함수율이 높은 폐기물 (함수율 15~40%)을 연소시키는데 산소/연료 버너 방식의 산소부화가 유리하다. 반면에, 유기물 함량이 높은 폐기물 즉, 고 발열량 폐기물을 소각하는데 있어 연소공기의 산소부화나 산소 랜싱이 더 효과적이다. 산소부화기술을 적용하여 최상의 결과를 얻기 위해서는 앞서 언급한 3가지 산소부화 방식을 적절히 조합하여 적용하는 것이 바람직하다.

2. 산소부화 효과

가. 연소효율 증대

열역학 제2법칙에 의하면 공정으로 유입되는 열의 온도를 올리거나 빠져나가는 열의 온도를 낮추면 열에너지를 유용한 일로 전환하는 공정의 효율이 증가한다. 다른 말로 바꾸면 연소공정의 에너지원으로서 이용되는 화염온도가 가능한 높을수록 연소효율이 높음을 의미한다. 즉, 연료는 주어진 조건에서 도달이 가능한 최고의 온도가 되는 상태에서 연소시켜야 한다.

연소반응에 있어 최고 온도는 연료와 산화제 모두 회석성분이 없는 화학 양론비 조건에서 가장 많은 연소열을 발생하도록 반응시켜야 얻을 수 있다. 탄소계 화석연료를 연소시킬 때 약 3,000℃ 이상의 최고온도는 순수한 탄소 또는 탄화수소를 오직 산소만을 이용해 화학 양론비로 혼합하여 연소할 때만 가능하다. 연소온도는 연소반응의 발열이 적고, 연료 또는 산화제가 열을 발생하는데 참여하지 않는 비반응성 물질을 함유하고 있을 때 낮아지게 된다.

그러나 산소부화하면 연료와 산소간의 연소반응에 회석제로 존재하는 질소의 양이 감소하며, 그 결과 산소 및 연료의 분압이 높아지므로 반응 속도는 산소부화 정도에 따라 증가한다. 이렇게 연소반응 속도가 증가하면 연소 온도 및 효율이 증대하고 열 전달속도도 커지게 된다[5].

주어진 연료의 최종 연소생성물이 같다면 산화반응 시 생성되는 발열량은 어느 조건에서라도 - 연소가 공기 또는 산소 중에 일어나든지, 저온 또는 고온에서 일어나든지, 연소속도가 빠르든지 늦든지 - 항상 일정하다. 그러나 연소효율, 즉 이론적으로 얻을 수 있는 총 열량에 대해 실제로 이용 가능한 열량의 비는 연소가 일어나는 방법에 따라 크게 달라진다.

연소효율을 최대로 하기 위해서는 연소공정의 최종 생성물이 가능한 완전한 양론적 반응에 기초한 이론적인 조성과 가까워야 한다. 즉, 미연소

된 연료나 과잉의 산화제뿐만 아니라 부분 산화생성물 (예를 들면, CO)이 연소배출가스에 존재하지 않도록 하여야 한다. 이러한 조건은 적당한 연료와 산화제를 완전혼합하고 정확한 반응조건을 유지할 때만 가능하다 [10].

나. 인화성

연소반응에 공기를 대신하여 산소부화 기체를 사용하는 경우 산화제 내 산소농도가 증가함에 따라 연료에 대한 인화성 한계 범위가 증대된다. 연료-공기 혼합물의 하한 인화성 한계 (희박한계)는 산소부화율에 거의 영향을 받지 않는다. 이것은 희박한계 이상의 과잉산소는 질소처럼 열 흡입체 (heat sink)로 작용하기 때문이다. 반면에 상한 인화성 한계 (농후한계)는 표 1에 보인 것과 같이 산소부화에 따라 크게 확대된다. 예를 들어, 메탄 (CH_4)의 상한 인화성 한계는 공기를 사용할 경우 14%에서 순 산소의 경우 61%까지 증가한다.

버너와 관련지어 볼 때 인화성 한계가 확대되면 보통 화염안정성이 증가한다. 상한 한계값이 변화한다는 것은 연료가 농후한 혼합조건에서도 연료나 폐기물의 연소가 일어남을 의미한다.

다. 단열화염온도 (Adiabatic flame temperature)

단열화염온도란 단열용기에서 완전 연소되고 해리가 일어나지 않는 조건으로 연소반응이 일어날 때 도달할 수 있는 최고 온도를 말한다[11]. 공기를 산소부화하여 연소시키면 희석제인 질소를 연소온도까지 올리는데 필요한 열 손실이 작아지고 따라서 발생된 모든 열은 보다 적은 양의 연소가스에만 한정되므로 단열화염온도가 크게 증가한다. 저 농도 산소부화 영역에서는 1%의 산소농도 증가에 따라 약 50°C 정도의 화염온도 증가가 일어난다. 화염온도의 증가속도는 산소부화 정도에 따라 점차 감소하다가 고 농도 산소부화 영역에서는 사라진다.

표 1. 연료기체의 공기와 산소에서의 인화성 한계 비교

Fuel	Flammability Limits, vol %			
	Lower		Higher	
	Air	O ₂	Air	O ₂
수소, H ₂	4	4	74	94
일산화탄소, CO	12	16	75	94
암모니아, NH ₃	15	15	28	79
메탄, CH ₄	5	5	14	61
프로판, C ₃ H ₈	2	2	10	55

표 2. 양론비 조건으로 연소할 경우 단열화염온도

Fuel	Oxidizer	
	Air (K)	Oxygen (K)
Acetylene, C ₂ H ₂	2600	3410
Carbon monoxide, CO	2400	3220
Heptane, C ₇ H ₁₆	2290	3100
Hydrogen, H ₂	2400	3080
Methane, CH ₄	2210	3030
Methane, CH ₄ at 20 atm*	2300	3460

주) 나머지는 1 atm 압력 조건임

이러한 현상에는 2가지 주요 원인이 있는데, 첫째는 산소부화율이 1% 증가함에 따라 제거되는 질소의 양이 고 농도 산소부화 영역에 도달할수록 감소하고, 둘째는 고온에서 CO₂와 H₂O의 흡열 해리반응이 크게 증가하기 때문이다.

표 2에 몇 가지 가스상 연료에 대해 공기와 산소를 양론비 조건으로 하여 연소시킬 경우 도달하는 단열화염온도를 수록하였으며, 메탄 연소공정에 대한 산소농도의 함수로 나타낸 단열화염온도를 그림 1에 나타내었다 [12]. 이 그림으로부터 공기를 산화제로 사용한 연소계통은 순 산소를 사용하기 위해서는 계통을 수정하여야 하며 다시 설계할 필요도 있음을 알 수 있다.

메탄 화염에 대한 단열평형 화염온도를 양론비의 함수로 나타내면 그림 2와 같으며 최대화염온도는 양론적 조건에서 발생한다[12]. 화학양론 조건이 아닌 경우 산화제의 산소농도가 낮아지거나 높아짐에 따라 화염온도가 더 줄어들고 질소의 농도가 높아짐에 따라 질소에 의해 흡수되는 열이 많아지므로 총괄온도는 더 낮아지게 된다.

라. 이용 가능한 열 (Available heat)

연소반응에 있어 질소는 화염온도를 낮추는 것 외에 현열을 연도 외부로 옮겨 손실시키는 역할도 하므로 연소효율이 감소한다. 공기/연료 및 산소/연료 연소계통에 대해 전체 열량 중 배출기체와 함께 외부로 사라지는 열 및 이용 가능한 열의 분포를 보이는 Sankey도를 그림 3에 보였다. “이용 가능한 열”이란 연료로 유입되는 총괄 열량에서 배기체와 함께 배출되는 열량을 뺀 것으로 정의된다[13]. 그림 4에 연도로 배출되는 배기체의 온도에 대한 이용 가능한 열을 산소농도에 따라 나타내었다. 연소효율은 이용 가능한 열과 관련되므로 공기 중 연소가 최소 효율이 되고 순 산소 중 연소가 최고 효율이 된다. 산소농도를 단지 35%까지만 부화시켜 연소시킬 경우에도 일반 공기로 연소할 경우에 비해 이용 가능한 열이 크게 증가함을 알 수 있다.

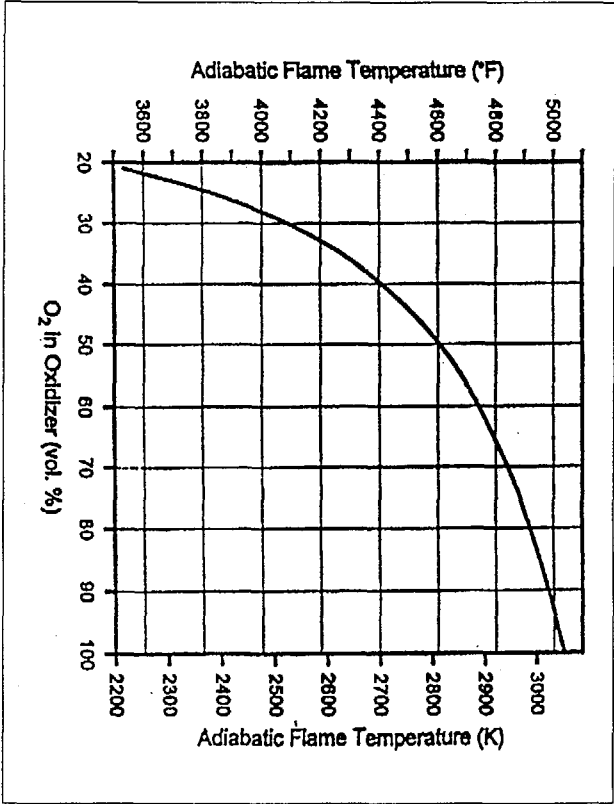


그림 1. 산소농도에 따른 단열화염온도 변화

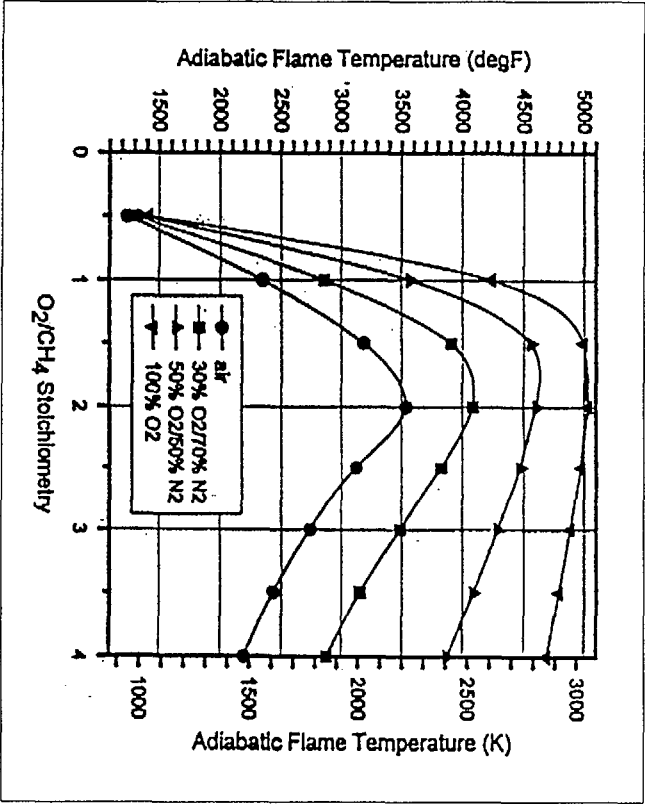


그림 2. 산화제 조성별 단열화염온도 변화

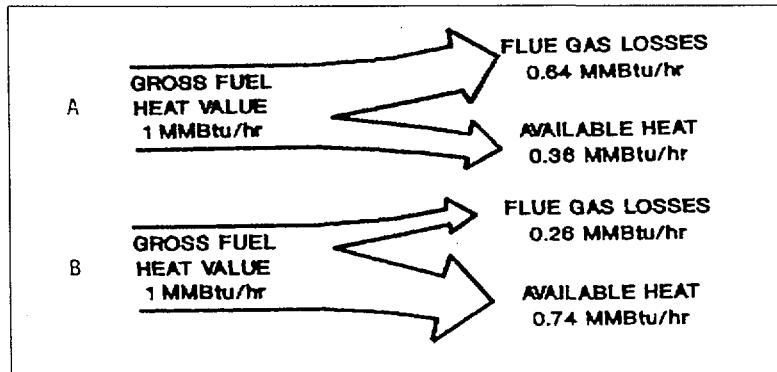


그림 3. 연소가스 온도를 1600K로 가정할 때 공기/연료(a) 및 산소/연료(b) 연소의 Sankey 도

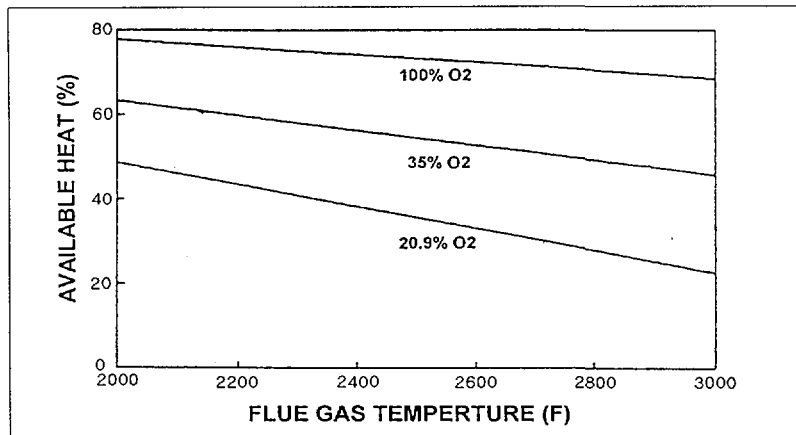


그림 4. 3가지의 다른 산화제와 양론적으로 연소할 경우 이용가능한 열(%) 대 연소배출가스 온도 비교

마. 연소속도

연소온도가 높으면 연소속도 역시 항상 높아진다. 반응속도가 절대 온도에 대해 지수함수이므로 공기를 대신하여 산소를 사용하면 많은 화학 공정들의 속도가 상당히 크게 증가한다. 산소로 인한 높은 연소 속도 및 온도 때문에 일어날 수 있는 문제점은 주로 연소로의 내화물 라이닝과 같은 재질과 관련된 것들이다.

바. 점화온도

공기 대신에 산소를 이용하는 경우 연료의 점화 온도는 표 3에서 보는 바와 같이 약 5 ~ 70°C 정도 낮아진다. 자연발화온도 역시 일반적으로 약간 낮아진다(표 4 참조). 낮아지는 정도는 연료에 따라 달라지나 대개 가스상 연료보다 액상 연료에 있어 더 뚜렷하다. 산소부화 공기로 연소하는 경우 점화온도가 낮아지는 정도는 산소의 농도가 작아짐에 따라 감소한다. 몇몇 연료의 경우 공기 중에서는 초기 점화가 어려우나 산소 또는 산소부화 공기 중에서는 잘 점화되는데, 그 대표적인 예가 암모니아(NH₃)이다.

사. 화염속도

화염이 전개되는 속도 (화염전면의 가스가 전개되는 빠르기를 산화제 혼합물을 통하여 전파되는 빠르기로 나눈 것, 때로 연소속도라 불리기도 함)는 공기가 산소부화됨에 따라 크게 증가한다.

공기 연소의 경우 가장 낮은 화염속도는 모든 종류의 연소에 있어 ~ 0.2 m/sec 정도이다. 수소를 산소와 양론비로 혼합하여 연소시키면 가장 높은 화염속도를 보인다(표 5 참조). 그러나 높은 화염속도에서는 난류 정도가 더 커지므로 가스상 연료가 산소 농후한 증기 구름상태에서 점화된다면 폭발로 전이할 가능성이 커지게 된다.

표 3. 공기 또는 산소 하에서 가스 혼합물의 점화온도 비교

Fuel	In Air (°C)	In Oxygen (°C)
Hydrogen, H ₂	572	560
Carbon monoxide, CO	609	588
Methane, CH ₄	632	556
Ethane, C ₂ H ₆	472	450
Ethylene, C ₂ H ₄	490	485
Acetylene, C ₂ H ₂	305	296
Propane, C ₃ H ₈	493	468
Butane, C ₄ H ₁₀	408	283

표 4. 공기 또는 산소 하에서 자연발화온도 비교

Gas	In Air (°C)	In Oxygen (°C)
Benzene, C ₆ H ₆	580	566
Carbon disulfide, CS ₂	120	107
Ethane, C ₂ H ₆	472	432
n-Pentane, C ₅ H ₁₂	290	258
Toluene, C ₆ H ₅ OH	552	516
Hydrogen Sulfide, HS ₂	292	229
Petrol, 92 octane	430	415
Diesel oil, 60 cetane	247	242

표 5. 공기 또는 산소 하에서 연소 시 화염속도 비교

Fuel	In Air (m/sec)	In Oxygen (m/sec)
Propane, C ₃ H ₈	0.46	3.9
Hydrogen, H ₂	3.3	11.7
Acetylene, C ₂ H ₂	1.7	11.1

연소공정에서 공기를 산소로 대체할 때 증가된 반응속도를 표 5에 몇몇 가스상 연료에 대해 연소속도를 비교하는 방법으로 정량화하였다. 또 산소부화율에 따른 화염속도의 변화를 그림 5에 보였다[12].

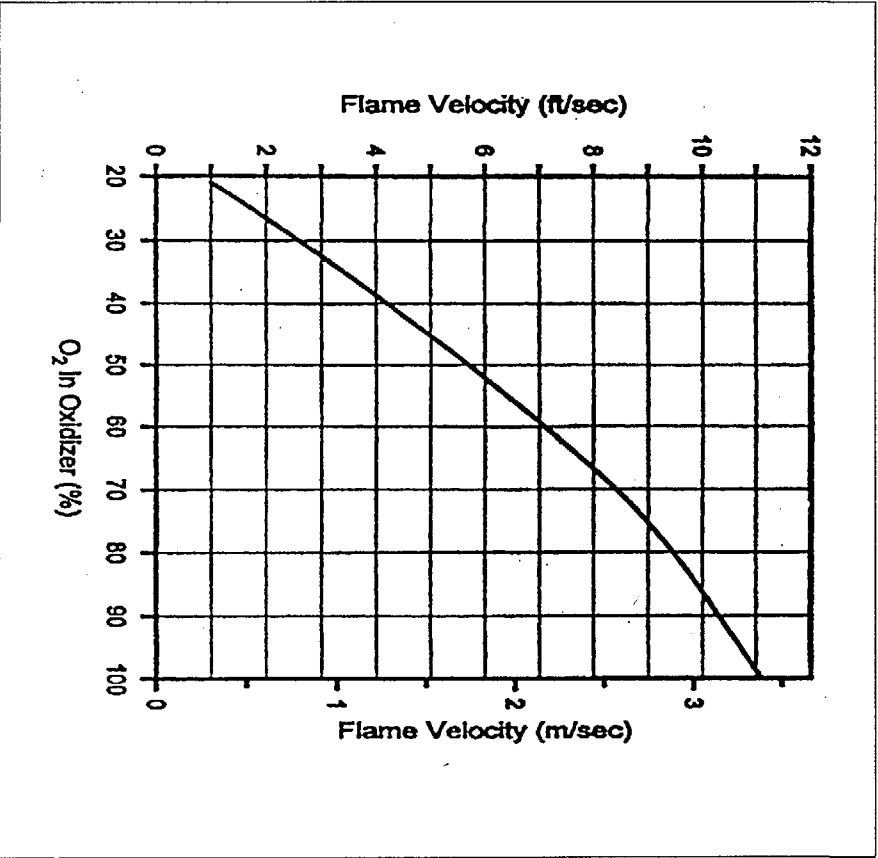


그림 5. 산소부화율에 따른 화염속도의 변화

제 2 절 산소부화 소각배기체 특성

1. 배기체 발생량[5, 6, 13, 14,]

산화제에서 질소가 줄어든 만큼 연소가스의 양도 줄어든다. 메탄과 프로판 연료에 대해 공기를 산소로 대체하여 연소할 경우 주어진 연소속도에서 공기를 사용할 경우에 비해 배기체 발생량은 70% 이상 감소되며, 이를 그림 6에 보였다. 또, 메탄을 연료로 사용하여 연소로 내의 온도가 동일하게 약 1,100℃로 유지시킬 때 연소 가스의 부피를 막대그래프로 표시하여 그림 7에 나타내었다[5]. 그림에서 알 수 있듯이 순 산소 중에서 메탄을 연소시키면 단지 1/10 정도의 연소가스 만을 발생하면서도 같은 정도의 이용 가능한 열을 발생시킬 수 있다. 이러한 연소가스의 감소는 소각시설에서 배기체 처리설비가 차지하는 규모나 비율을 감안한다면 상당히 중요한 사항이다. 특히, 방사성폐기물의 경우 배기체 처리 및 핵종 방출을 관리하는 설비는 전체 소각설비 건설비용의 상당히 많은 부분을 차지하고 있으므로 일반 도시 및 산업 폐기물의 경우에 비해 더욱 중요한 사항이다.

공기를 산소로 대체하여 연소가스의 양이 감소함으로 가스의 배출 유속은 거의 10 배정도 감소하는 이점도 있다. 따라서 소각로 내에서의 체류시간이 증가하게 되고 결국 DRE도 증가하게 된다. 가스 유속이 작으면 동반 이월되는 비산재도 적어져 입자상 물질의 배출도 감소하게 되므로 이들을 제거하는 설비도 크게 비용이 절감된다[13].

2. 배기체 조성

산소부화 소각 시 발생하는 배기체 특성은 공기 중에서 연소되는 경우 발생하는 배기체에 비해 그 조성이 다르다. 공기와 함께 연소되는 메탄의 배기체는 양론적으로 질소 71%, 이산화탄소 10%, 수분이 19%인 반면, 산소와 함께 연소되는 경우 이산화탄소가 1/3, 수분이 2/3 정도 발생할 뿐이

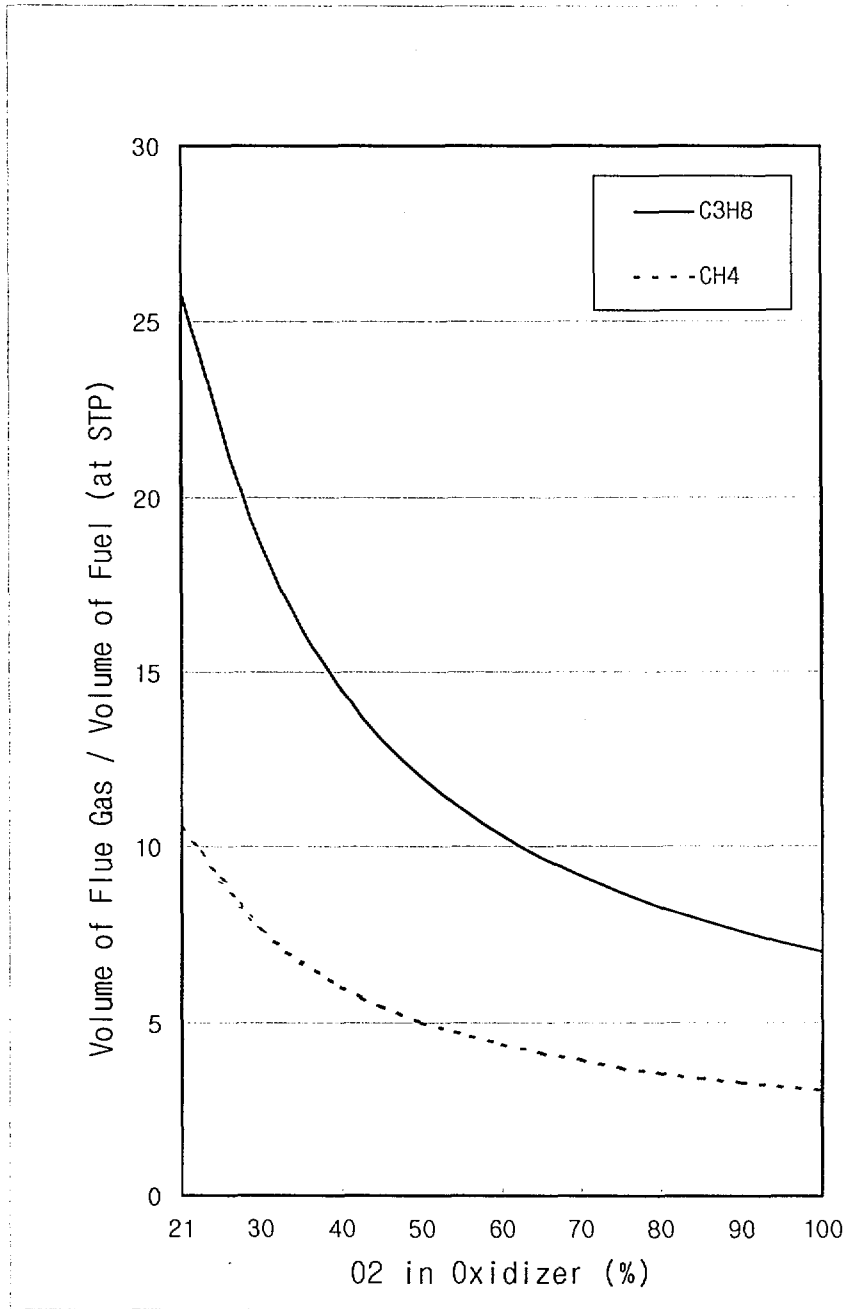


그림 6. 산소농도에 따른 연소가스량 변화

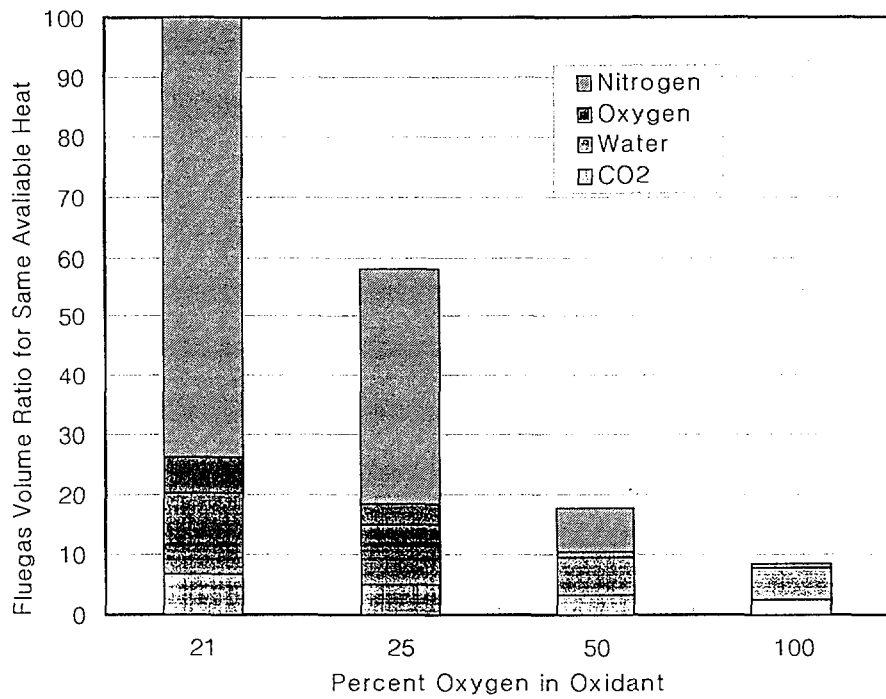


그림 7. 산소농도에 따른 연소가스 변화
 (기준 : 연소온도 1100°C, 6% 과잉산소)

다(그림 8 참조). 이러한 배기체 조성의 변화는 공기 중에 포함된 비반응성 물질인 질소가 감소함에 따라 나타나는 것으로 이산화탄소와 수분의 생성량은 동일하다.

산소와 함께 연소되는 경우 배기체에서 수분을 제거한다면 훨씬 더 적은 양의 이산화탄소만 남게 되고, 만약 이를 적절한 방법에 의해 포획하거나 반응시켜 제거한다면 이론적으로는 배기체의 발생이 없는 소각공정이 가능하다. 또, 대기오염 물질인 질소 및 황 산화물이 존재할 경우 질소에 의해 회석되는 공기 중의 연소에 비해 산소 중 연소 시에 더 높은 농도로 배출되므로 보다 더 쉽게 제거될 수 있다[5, 12].

3. 질소산화물[13]

폐기물 소각에 있어 높은 DRE를 얻으려면 연소온도 및 공기 과잉비를 더 높게 하고 체류시간을 더 길게 유지하여야 한다. 이러한 조건은 DRE를 크게 하는데 유리하지만 질소산화물 (NO_x) 생성도 증가시키게 된다.

단열화염온도를 계산하는데 이용된 모델을 연소 생성물의 평형조성을 구하는데 이용하여 그림 9와 같은 산소농도에 따른 산화질소 (NO)의 예상 발생량을 백만 분의 일 부피 (parts per million by volume; ppmv) 농도와 질량농도 (lb NO/MM Btu)로 나타내었다[13]. 일반적으로 NO_x 농도는 부피를 기준으로 나타내고 있으나, 여기서는 총 발생량이 보다 중요하므로 질량으로도 나타내었는데 이는 연소가스의 몰 유속에 따라 좌우된다. NO_x의 질량농도는 부피 농도에 비해 보다 낮은 산소농도에서 나타나는데 이는 공기를 산소로 대체할 때 몰 유속의 감소 때문이다.

높은 화염온도에서 존재하는 2가지의 경쟁적인 효과로 인해 NO_x 생성 속도는 질소농도가 낮아짐에 따라 포물선 형태를 보이고 있다. 즉, 산소농도가 증가함에 따라 단열화염온도는 증가하게 되고 따라서 NO_x 생성은 더 촉진되지만 NO_x 생성에 필요한 질소도 감소한다. 2가지 효과가 결합하여 NO_x 생성이 최대가 되는 곳은 약 60% 산소농도이다. 100% 산소농

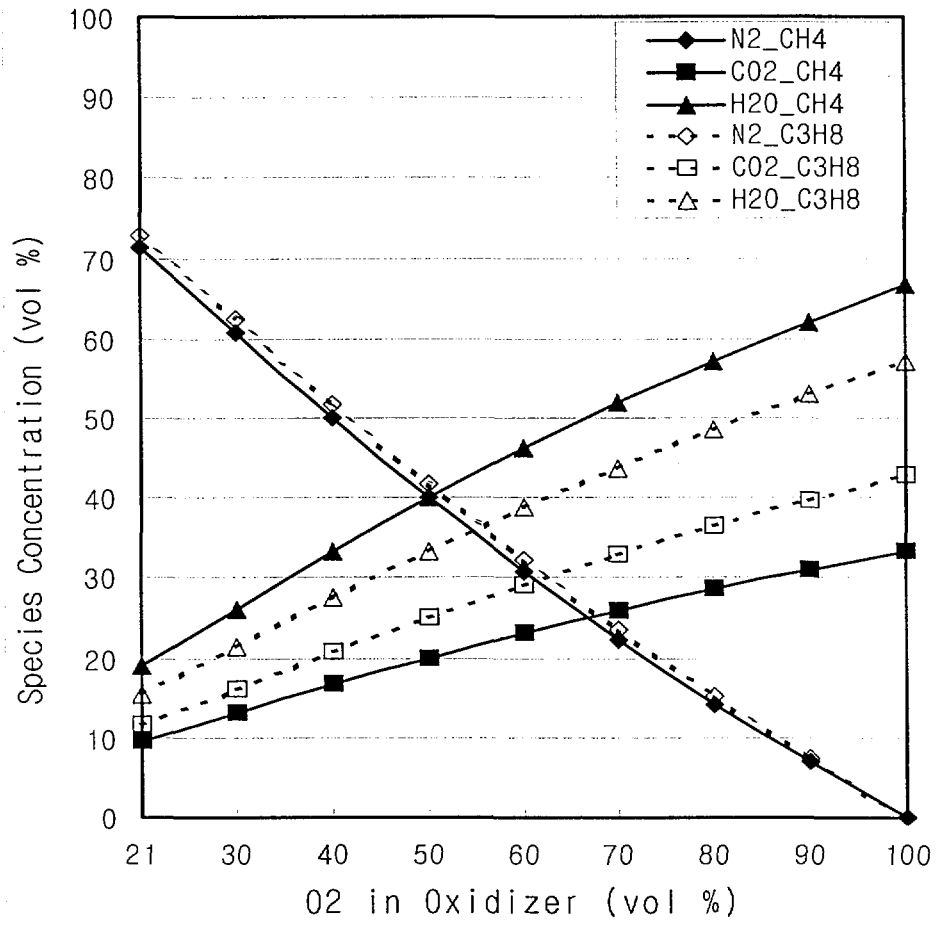


그림 8. 산소농도에 따른 연소가스 조성 변화

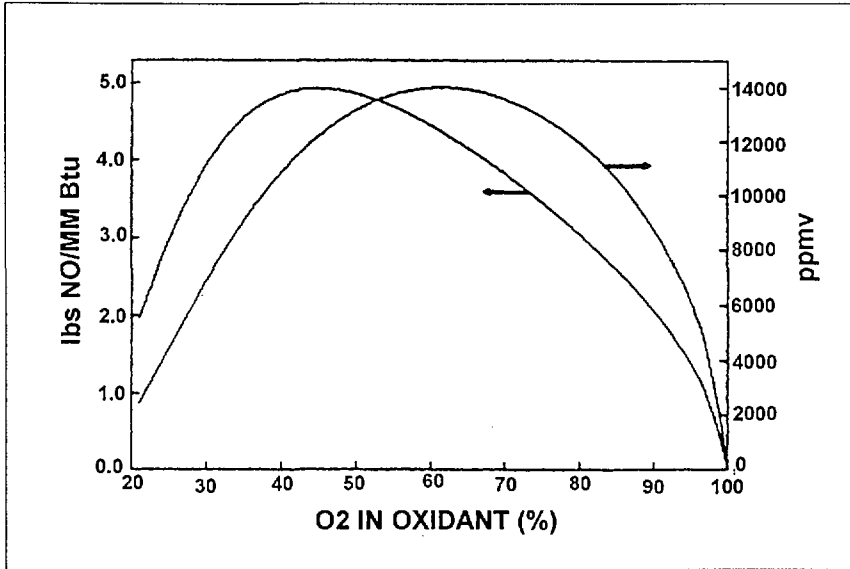


그림 9. 프로판과 양론적으로 연소시킬 때 산소농도에 따른 NO의 부피(ppmv) 및 질량(lb NO/MMBtu)농도

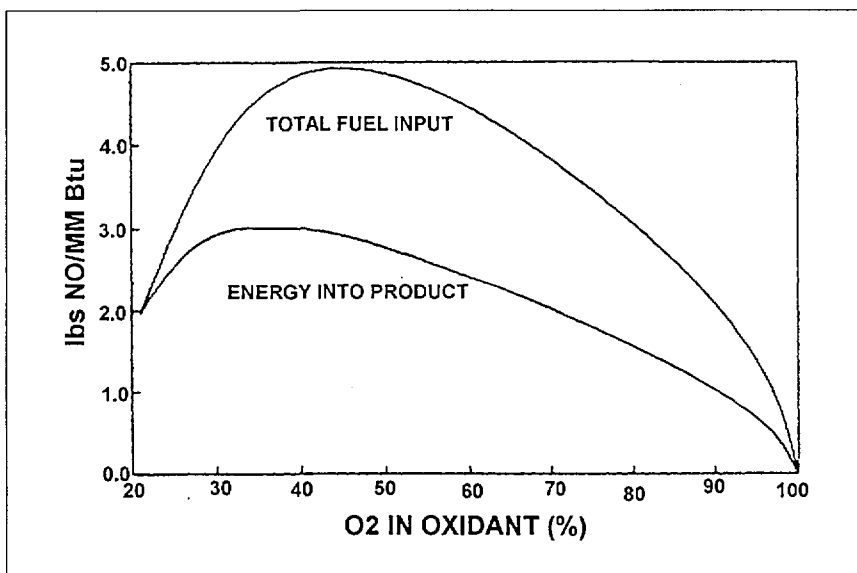


그림 10. 프로판과 양론적으로 연소시킬 때 산소농도에 따른 전체 및 순 가열속도를 기준으로 NO의 평형농도

도에서는 질소가 전혀 없으므로 이론적으로 질소산화물은 생성되지 않는다.

질소산화물을 정량화하는 더 나은 방법은 소각된 폐기물 단위 질량 당 NOx 생성량을 계산하는 것이다. 예를 들면, 유리산업에서와 같이 유리 톤 당 생성된 NOx의 kg 등으로 정할 수 있다. 여기서는 연소되는 단위 에너지 당 NOx의 생성량으로 하였으며 이는 직접 처리속도와 관련지을 수 있다. 그림 9에 표시된 질량농도 (lb NO/MM Btu) 곡선은 총괄 연소 속도를 기준으로 나타내었으며 여기에는 산소부화로 인한 연소효율 증가분은 포함되지 않았다. 이용 가능한 열의 효과 (생성물에 포함된 순 에너지를 포함하고 있는 수정된 질량농도를 그림 10에 처음 곡선 (계통에 포함된 총 에너지)과 함께 나타내었다[13]. 이론적으로 순 에너지 곡선은 산소부화가 70%를 넘는 조건에서 공기 중 연소에 비해 NOx를 더 적게 발생한다. 그러나 NOx가 생성되는 기구는 평형 공정은 아니고 속도론으로 유도되므로 실제 NOx 배출량은 평형농도 예측치 보다 훨씬 더 작아진다.

4. 일산화탄소

일산화탄소 (CO)는 폐기물 소각 시 많이 배출되는 오염물질로 현재의 일반적인 배기체처리설비에서는 저감시킬 수 없는 물질이다. 소각로에서 CO가 발생하는 주요 원인은 열분해로 생성된 가스상 물질의 불완전연소 때문이다. 이론적으로 CO농도 1%를 1 ppm까지 저감시키기 위해서 필요한 시간은 공기 과잉을 1.5의 경우 0.001초 정도로 짧은 편이므로 CO가 생성되는 원인으로 산소와 열분해 생성물의 불완전한 혼합이나 외부로부터 찬 공기의 유입으로 인한 연소로 벽의 급냉 때문인 것으로 보고되기도 한다[15].

이렇게 불완전한 연소에 의해 CO가 과도배출 (transient emissions)되는 것은 소각운전에 있어 중요한 실패운전의 하나이다. 보통 고열량의 폐기

물이 소각로에 투입될 때 특히, 로타리킬른 소각로에 간헐적으로 투입될 경우 때때로 소각로에 공급되는 산소량을 초과하는 불안정한 열분해 생성 가스가 방출되는 과도연소 현상이 발생한다. 이러한 순간적인 산소부족 조건은 불완전 연소 생성물 (products of incomplete combustion; PICs), 특히 CO 방출의 원인이 되는데, 이를 “순간방출 (puffs)”로 부르며 최근 불완전 연소의 정도를 나타내는 하나의 지표로 사용되고 있다[4, 5, 16].

산소부화된 상태에서 연소실의 산소 분압을 증가시키면 일시적인 산소 결핍 조건이 경감되는 효과가 있다[17]. 이러한 CO Puffs를 감소시키기 위해서는 단순히 산소부화된 상태로 유지시키는 것 보다 고급 제어기술과 연동된 산소농도 감지 및 동적 주입이 더 효율적이다[5]. 이러한 사실로부터 CO puffs 현상의 주요한 원인은 고온의 연소조건에서 폐기물이 열분해되어 생성된 가스와 산소의 불완전 혼합임을 알 수 있다.

제 3 절 산소부화소각의 이점

1. 소각처리용량 증대[4, 5, 7, 8, 18-20]

산소부화 공기를 이용함으로써 소각처리용량이 개선되는 정도는 각각의 소각방식이 갖고 있는 제한사항의 특성에 따라 좌우된다. 일반 소각공정에서 볼 수 있는 전형적인 제한사항을 표 6에 나타내었다[5]. 표에 나타낸 것 중 가장 일반적인 제한사항은 연료 및 공기 공급계통의 용량한계와 대기오염 물질의 제어장치를 포함한 배기체 취급계통의 용량제한이다. 공기를 산소부화하여 공급하면 같은 양의 연료를 주입할 경우에 비하여 산화제나 배기체의 부피가 크게 감소하므로 이러한 문제들은 매우 효율적으로 극복할 수 있으며, 특히 보조연료를 많이 필요로 하는 저 발열량 폐기물의 경우 그 이득은 상당히 크다.

중, 고 발열량 폐기물 (1,500~4,500 kcal/kg)을 산소부화하여 소각하면 보조연료를 덜 사용하거나 사용하지 않고 자체의 열용량만으로 유해 폐기물을 소각할 수 있다.

대부분의 고온로에서 열이 전달되는 주요 방식은 고온의 연소 생성물로부터 주위의 내화벽으로의 가스 복사와 발생된 열로의 재복사이다. 가스 복사의 강도는 가스의 온도와 CO₂, H₂O 및 검댕 (soot)의 함수일 뿐 아니라 복사되는 가스의 부피에 크게 영향을 받는다. 화염의 부피는 대개 전체 로에 비해 작은 부분이므로 복사가 지배적인 로의 처리용량을 개선시킬 수 있는 좋은 조건은 화염온도를 국지적으로 증가하는 것보다 전체를 균일하게 증대시킴으로 열전달이 일어나는 구역에서 평균적인 가스온도를 증가시키는 것이다. 산소부화로 얻을 수 있는 이득을 최대화하기 위해 이러한 원리를 따라서 적절히 적용하여야 한다.

2. 소각성능 개선[5, 18, 19]

산소부화를 통해 화염온도가 증가하면 산화속도가 개선되므로 높은

표 6. 소각처리용량을 증대시키는 산소부화 효율성

제한 사항	산소부화의 효율성
<p>열용량</p> <ul style="list-style-type: none"> - 공기 송풍기 - 연료 공급기 - 버너 - 소각로 통풍 - 대기오염 제어계통 - 연소가스 체류시간 <p>분진 동반이월</p> <p>기계적 고체처리용량</p> <p>열전달</p>	<p>효율적</p> <p>효율적</p> <p>영향 무</p> <p>조건에 따라 효율적</p>

DRE를 얻을 수 있는 현상은 아직 자세히 밝혀지진 않았다. 그러나, 1,100°C 이상의 고온에서의 연소반응은 매우 작은 반응 속도보다 산소와 생성물간의 물질전달 과정 (즉, 분무화, 증발 및 혼합)의 속도저하 때문에 크게 제한 받는다. 그러므로 높은 운동량과 알맞은 온도를 지닌 화염이 소각에 더 유리하며 실제로 공기를 사용하여 잘 운전되는 소각공정의 경우 약 1,000~1,200°C의 온도에서 매우 높은 DRE를 얻을 수 있다[5].

파이롯트 규모의 소각공정에서 소각성능은 운전모드의 잘못 (즉, 실패운전)으로 크게 저하되는데 중요한 실패운전의 하나는 화염이 꺼지는 것 (flame-out)이다. 이러한 실패운전은 화염안전성을 개선시켜 주는 산소부화를 통해 분명하게 개선될 수 있다.

액체폐기물을 소각하는 경우 분무 불량, 저온 연소 및 액체 증발의 지연 등이 중요한 실패운전으로 알려져 있다. 비록 폐기물의 분무가 대부분 버너계통의 설계에 따라 좌우되지만 산소부화로 화염 강도를 증가시키면 증발이 더 잘되어지고 따라서 폐기물의 소각효율이 증대된다.

3. 연료 절감[4, 5, 7, 8, 14, 18-20]

수용성 폐기물이나 오염된 토양 등과 같은 저 발열량 폐기물을 소각할 경우 상당히 많은 양의 보조연료가 필요하며, 이 때 연도 배출가스와 함께 외부로 배출되는 열 손실은 대개 소각에 있어 가장 큰 열 손실이 된다. 천연가스와 찬 공기로 운전되는 재래의 소각로의 경우 연료가 발생하는 열량의 약 50~70 %가 배기체의 현열로 손실된다.

연소용 공기를 산소로 대체하면 연도로 배출되는 가스에 포함된 질소가 감소된 것에 상응하여 현열 손실이 매우 작아진다. 연소로에 이용 가능한 열 1 MMBtu를 공급하는데 필요한 연료를 일반 공기, 산소부화 공기 및 산소에 대한 배출가스 온도의 함수로 그림 11에 나타내었다[5]. 여기서는 연료로 메탄을 사용하며 연소 후 배출가스 중 산소의 부피농도를 6%로 하였다. 연도배출 가스의 온도가 증가할수록 그 온도이상에서 일정량의

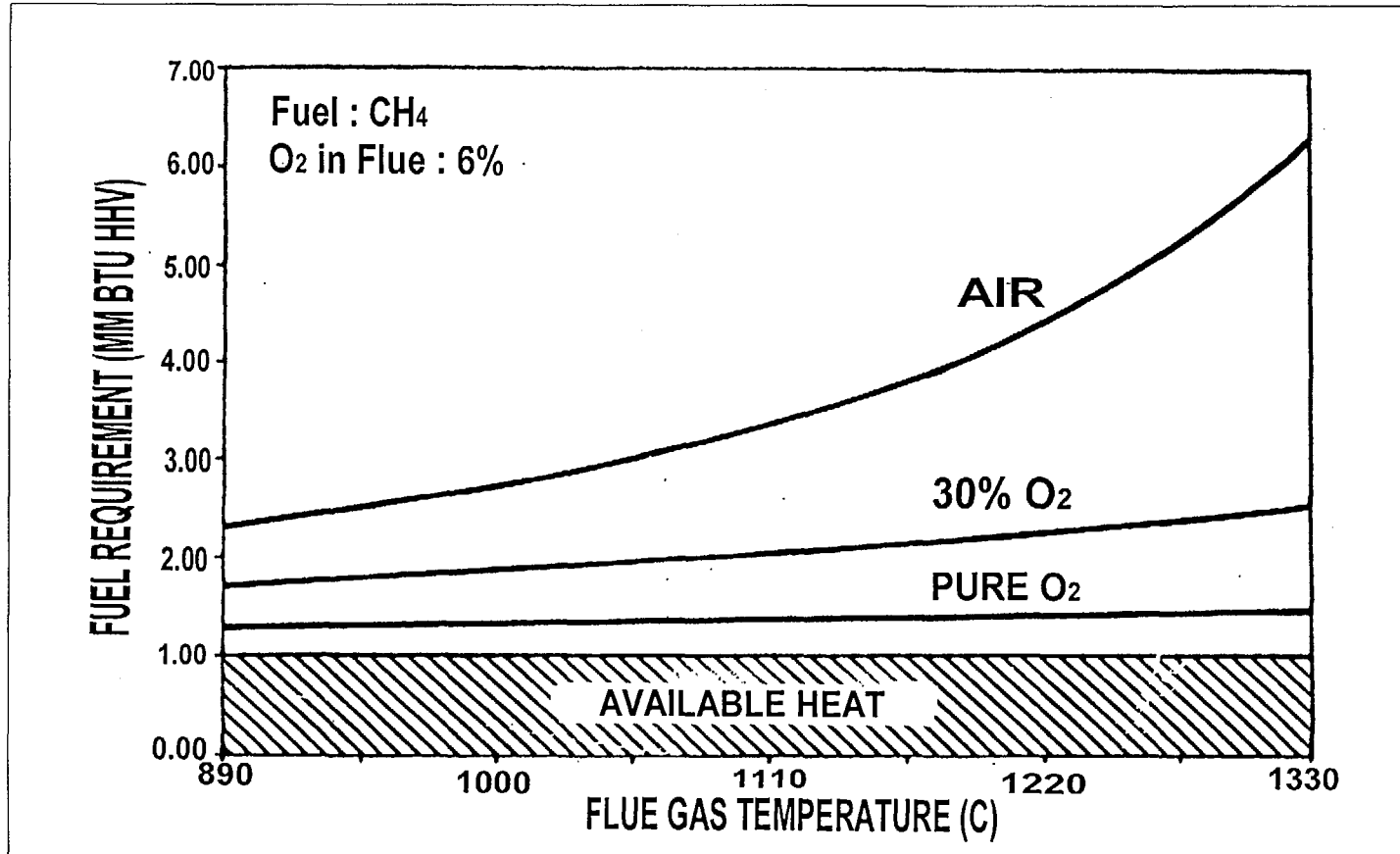


그림 11. 이용가능한 열 1 MMBtu를 얻기 위해 필요한 연료량

에너지를 공급하기 위해 연료가 더 많이 필요하게 되며, 이러한 차이는 산소의 함량이 작아질수록 더욱 커지게 된다. 예를 들면, 기준 온도가 1,000°C에서 1,330°C로 증가하면 이용 가능한 에너지 1 MMBtu를 얻기 위해 필요한 연료는 공기연소시의 경우 2.2에서 6.1 MMBtu로 증가하나, 산소연소의 경우 1.2에서 1.4 MMBtu로 증가할 뿐이다. 그 결과, 산소를 이용함으로써 얻어지는 연료절감은 연소실의 온도가 상승할수록 커지게 된다. 산소부화에 따른 산소 톤당 MMBtu 연료절감을 연도 배출가스의 온도 및 과잉산소농도의 함수로 나타내 그림 12에 보였다[5].

연도배출가스 내 산소과잉이 같이 증가할 때 공기/연료 계통의 연료효율은 산소/연료 계통에 비해 훨씬 빨리 저하한다. 결과적으로 공기를 산소로 대체함으로써 얻는 연료절감은 연도배출가스 내 산소과잉 정도가 높을수록 더 커지게 된다. 게다가 앞서 언급한 바와 같이 산소부화에 따라 소각처리용량의 증대까지 고려하면 연료절감은 더욱 커지게 된다.

4. 분진의 동반배출 감소[5, 6, 7, 8]

분진이 동반 배출되는 문제는 입자크기, 분진 특성 및 연소로 내에서 공기역학적 거동과 관련되어 있어 산소부화로 인해 분진의 동반배출이 감소되는 효과를 정확히 예측하기는 어렵다. 그러나 산소부화 공기를 사용하면 연소가스 발생량이 적어지고 따라서 연소로 내 가스의 공탑속도가 줄게 되어 결국 분진의 동반배출이 감소하게 된다. 이러한 동반배출 분진의 감소는 2차 연소실을 갖춘 일반적인 소각공정에서 일어나는 슬래그 (slag) 형성을 줄게 한다[6, 16]. 일단 슬래그가 생성되면 이를 제거하기 위해 소각시설 운영을 멈추어야 한다. 그러므로 산소부화 소각공정에서는 공기를 사용하는 일반적인 소각 보다 연속운전시간 (on-stream time)이 훨씬 더 길어진다.

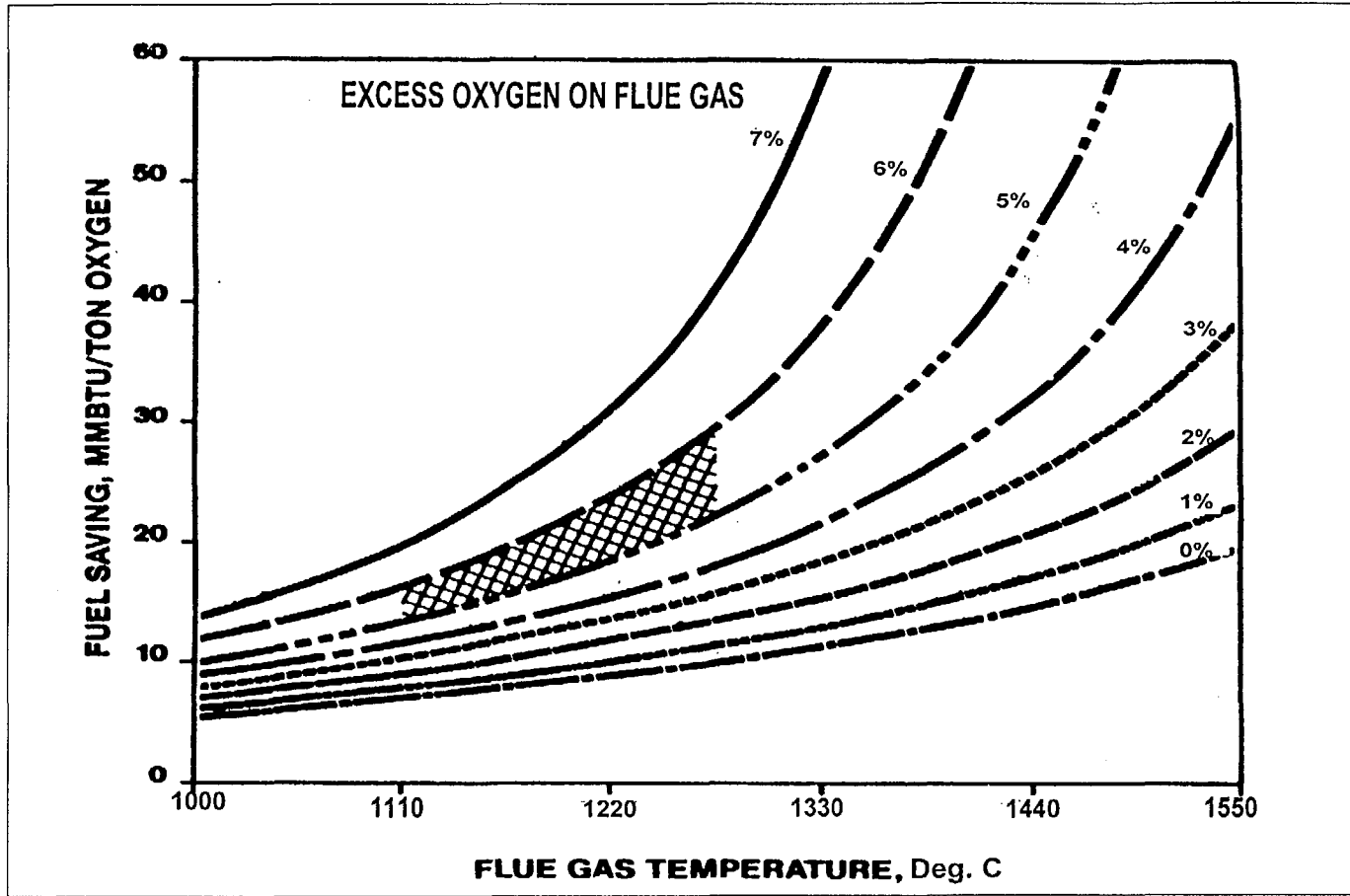


그림 12. 산소/메탄 계에서 연료 절약

5. 기타 이점[19, 20]

모든 연소공정은 실제 운전에서 다음과 같은 현실적인 제한사항을 안고 있다. 즉, 배기체 취급 용량, 보일러가 있는 경우 수증기 용량, 그리고 구조물 재질이 가지고 있는 온도 제한 등이 여기에 해당되며, 송풍기의 용량 때문에 연소로에 공급하는 연소공기의 양이 제한 받기도 한다. 산소 부화는 연소공기의 부피 유속을 변화하지 않고 계통에 더 많은 산소를 공급하는 방법이다. 이렇게 더 많은 산소공급이 가져오는 효과는 이미 언급한 바 있으며, 결국 이 효과는 폐기물 소각의 입장에서 표 7과 같은 경제적, 환경적인 이득으로 나타난다.

표 7. 산소부화소각의 이득

경제적 측면	환경적 측면
폐기물 처리용량 증대 열효율의 증가 수증기 생산 증대 송풍기 용량제한 해결 오염물질 처리설비 감소	소각재의 완전 연소화 탄화수소 감소 일산화탄소 감소 유연성 및 조절 능력 향상 저 발열량 폐기물 소각가능

제 4 절 산소발생 기술

산소를 상업적으로 생산하는 기술에는 온도 (Cryogenic separation), 흡착(Adsorption separation), 그리고 막 (Membrane separation)을 이용한 분리공정이 있으며, 이들 각각의 공정 중에서 널리 알려진 기술은 다음과 같다.

1. 심냉 분리법 (Cryogenic air separation)

온도차를 이용해 공기 중의 산소를 분리, 생산하는 기술로 대규모 (100~1,500 톤 산소/일)의 산소를 얻기에는 가장 경제적이며 현재 이용되고 있는 대부분의 산소가 이 기술로 생산되고 있다.

심냉 분리법에 의한 공기분리방법은 공기를 압축하여 정제한 후, 저온으로 냉각하고 증류과정을 거쳐 순수한 산소를 분리하는 계통으로 구성되어 있으며 그림 13에 공정도[12]를 나타내었다. 이 기술은 대량생산에 유리하며 고순도의 산소를 얻을 수 있고 제품을 액체로 얻을 수 있어 저장, 운반에 유리한 면이 있으나, 공기를 액화시켜야 하므로 장치의 규모가 크고 복잡하며 투자비가 많이 든다. 초저온을 유지하여야 하므로 제조원가에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 전력비이다. 전력비가 제조원가에서 차지하는 비율이 대형 가스플랜트의 경우 총 제조원가의 60%이상을 차지한다. 특히, 소형장치일수록 장치의 단열이, 대형장치에서는 공기압축기의 선정이 전체 에너지 효율을 높이기 위한 변수가 된다. 일반적으로 하루 사용량이 20톤 미만인 소규모 소비자에게는 산소기체를 압축한 경우에 비해 수송, 저장 비용이 더 적으므로 액체산소로 공급한다[14].

2. 흡착 분리법

흡착제를 이용하여 가스를 분리하는 방법으로는 압력 스윙흡착법 (Pressure swing adsorption; PSA), 온도 스윙흡착법 (Thermal swing

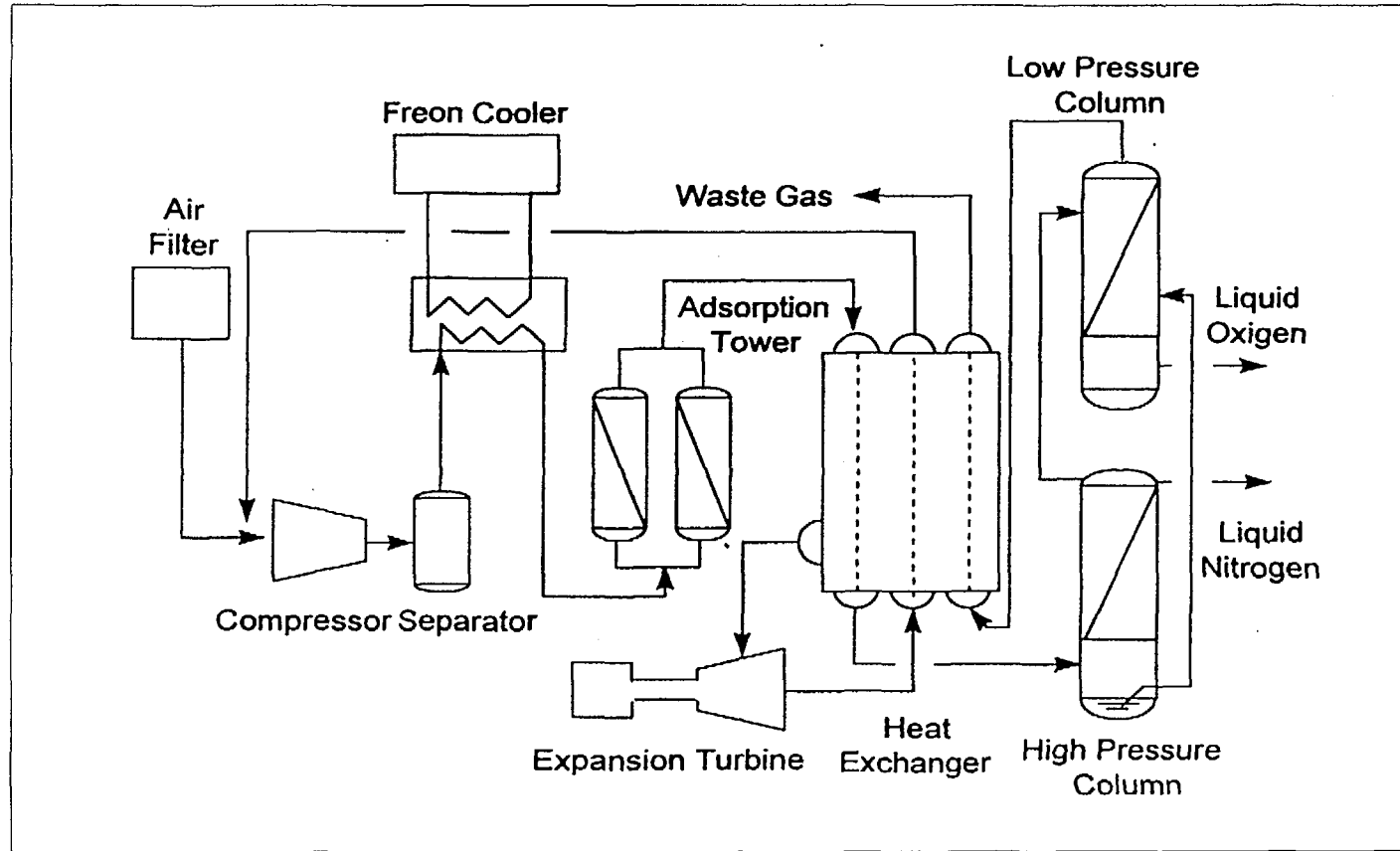


그림 13. 심냉분리 (Cryogenic air separation) 장치 공정도

adsorption; TSA), 그리고 진공 스윙흡착법 (Vacuum swing adsorption) 등의 분리 기술이 있으며 이들 중 PSA이 주로 사용된다. PSA는 흡착제와 가스성분간의 평형 흡착량 또는 흡착속도의 차이를 이용하며, 압력변동을 통해 흡착과 탈착을 반복하여 가스를 생산하는 기술로 다른 가스흡착법과 비교한 PSA법의 특징을 표 8에 나타내었다[20]. 공기분리에 사용되는 흡착제로는 제올라이트 분자체 (Zeolite molecular sieve; ZSM)와 탄소 분자체 (Carbon molecular sieve; CSM)가 주로 사용되며 ZSM이 CSM에 비해 더 높은 순도를 가진 산소를 생산할 수 있다. 그림 14에 PSA 공정 [12]를 나타내었다. 원료공기는 압축기에서 가압되고 공기여과기에서 먼지와 수분이 제거되어 밸브 1을 통하여 흡착탑 A로 도입된다. 탑 A에서 공기가 가압되면서 탑 내 흡착제에 질소와 이산화탄소가 흡착되고 나머지 산소와 아르곤은 밸브 3을 통하여 제품탱크로 유입된다. 한편, 산소의 일부는 밸브 4를 통하여 흡착탑 B의 퍼지용 산소로 쓰이게 된다. 흡착탑 A의 제올라이트가 한계까지 질소를 흡착한 시점에서 밸브 1, 3이 닫히고 동시에 밸브 2가 열려 탈착이 개시된다. 이때 질소와 이산화탄소, 흡착탑 하부에 남아 있는 공기가 방음기 (silencer)를 통해 외부로 배출되게 된다. 그리고 흡착탑 내부가 상압으로 돌아가기 전에 밸브 4가 다시 열리고 이번에는 흡착공정에 있는 흡착탑 B에 다음 공정을 위해 퍼지용 산소가 공급된다. 이러한 공정에는 2개의 흡착탑이 반복하여 운전되므로 밸브를 기준으로 할 때 8개의 공정이 연속적으로 진행되는 셈이다. 전체 공정시간은 ZSM을 사용하는 산소 PSA의 경우 밸브기준으로 1회 공정이 5~30초로, 한 사이클이 5분 이내에 완료되는 기종이 많고, CMS를 이용하는 PSA는 사이클시간이 더 단축된다.

3. 막 분리법

막에 의한 분리기술은 가장 최근에 개발된 산소 생산기술로 공기의 성분 중 한 성분 (보통 질소)에 비해 다른 성분 (보통 산소)을 선택적으로

표 8. 압력 스윙흡착법의 특징

<p>TSA와의 비교</p> <ul style="list-style-type: none">- 빠른 탈착, 큰 공간속도가 가능- 조작성 안정되고 장치의 자동화, 무인화, 소형화가 용이- 원료가스에 필요한 전처리를 실시하면 흡착제의 열화가 작음 <p>심냉 분리법과의 비교</p> <ul style="list-style-type: none">- 상온에서 조작성 가능- 장치가 간단하고 소규모의 장치도 가능 <p>막 분리법과의 비교</p> <ul style="list-style-type: none">- 고순도 제품을 얻을 수 있음 <p>가스 흡착법과의 비교</p> <ul style="list-style-type: none">- 용매의 증발이나 비말 동반의 문제가 없음- 안정된 접촉조작을 얻을 수 있음
<p>PSA의 단점</p> <ul style="list-style-type: none">- 제품회수율이 낮음- 가압 또는 진공이 필요함- 탈착성이 낮은 흡착계에서는 성능이 저하됨

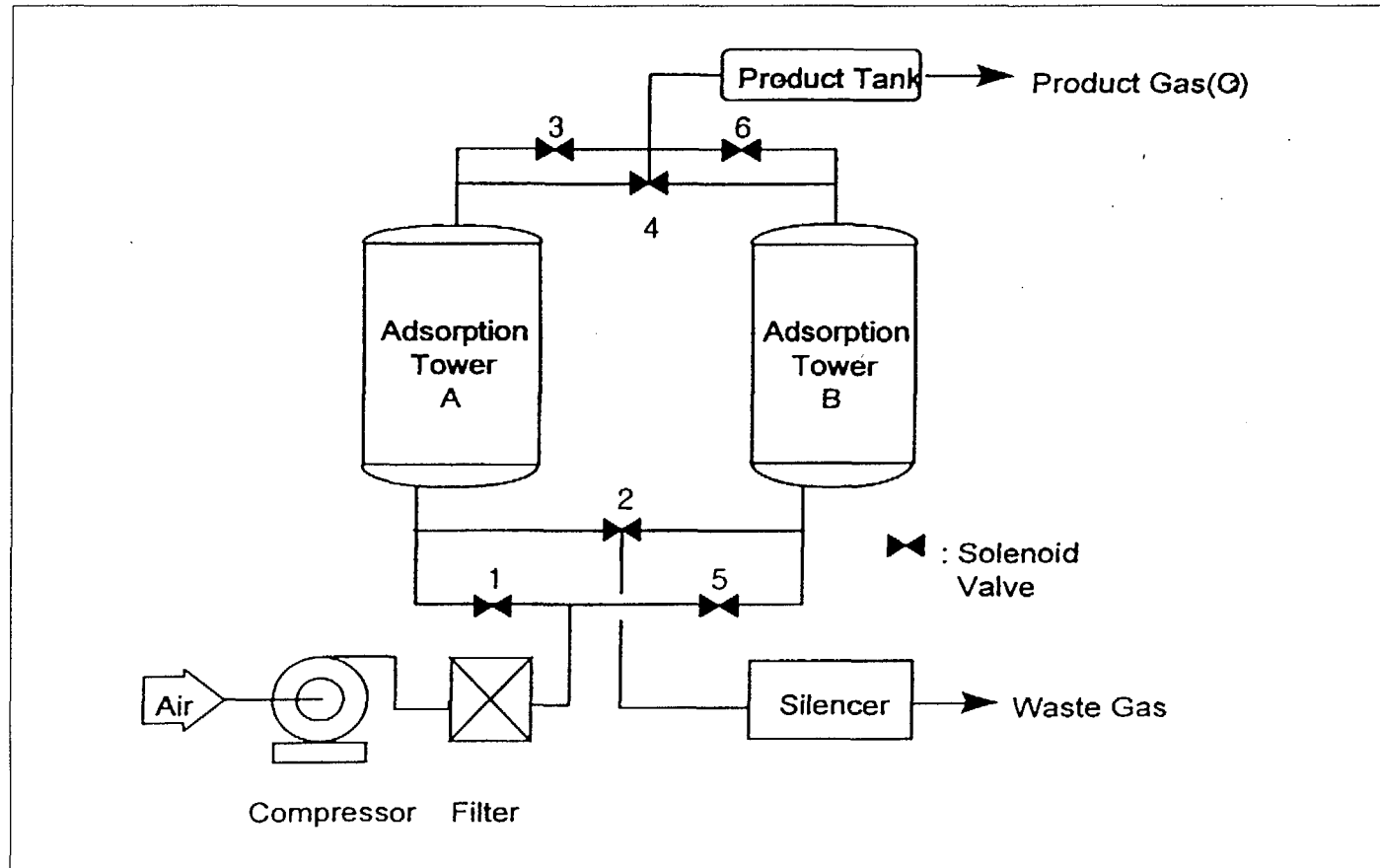


그림 14. 압력 스윙흡착 (Pressure swing adsorption; PSA) 장치 공정도

투과하는 막을 통과시켜 분리시키는 기술이다. 일반적으로 사용하는 막은 얇은 두께 (0.1이하에서 1 μm)의 고분자 필름으로 나선형으로 감겨진 중공사 형태나 평판형태로 배열되어 하나의 모듈이 된다. 구조에 따라 다공성 막과 비다공성 막으로 분류되며 기체분리에는 주로 비다공성 막이 사용된다. 다공성 막인 경우 기체투과가 기체분자와 막 세공크기에 의해 좌우되며, 비다공성 막의 경우는 막의 용해도와 확산도의 차이에 의해 이루어지고 분리원리는 공급측과 투과측의 농도차를 추진력으로 기체분자를 투과시키게 된다. 즉, 막에 의한 공기 분리는 그림 15의 (a)와 같이 막면에 가압된 공기가 접촉되면 용해도와 확산도가 좋은 산소는 질소의 일부와 함께 막을 통과하여 투과부로 이송되며 남은 질소는 배출부로 배출된다. 그러나 1개의 모듈로 목적하는 분리가 달성되지 않으면 그림 15의 (b)와 같이 복수의 모듈을 조합하여 정체로서 분리도를 높이는 방법이 사용되기도 한다[12].

막 분리장치의 구성요소는 막 모듈 외에 압축기, 공기여과기, 유량계, 압력계, 밸브 등으로 그 구조가 매우 간단하다. 장치의 성능은 막 성능의 우수성에 의해 좌우되고, 모듈의 운전방식에는 감압식과 가압식의 2가지 방법이 있으며 각각의 장단점을 표 9에 비교하였다[12].

4. 산소생산기술 비교 평가

산소부화 소각에 있어 가장 주된 비용은 산소부화 공기나 산소의 가격과 공급설비 비용이다. 이러한 비용은 1) 공기분리공정, 2) 전력비용, 3) 이용 설비용량, 4) 산소를 이용하는 방식, 그리고 5) 예비공급 요건 등과 같은 요인에 의해 좌우되며, 산소생산설비의 형태를 선정하기 위한 중요한 2가지 요인은 장치의 용량과 생산되는 산소의 순도이다. 앞서 언급한 산소발생 장치별 특징을 요약, 비교하여 표 10에 실었다[12]. 표에서와 같이 보통의 소각공정에 있어 산소 생산비용이 산소의 순도에 따라 큰 차이를 보이지 않는다면 전체적인 소각운전비용은 산소 이용이 최대일 경우 가장

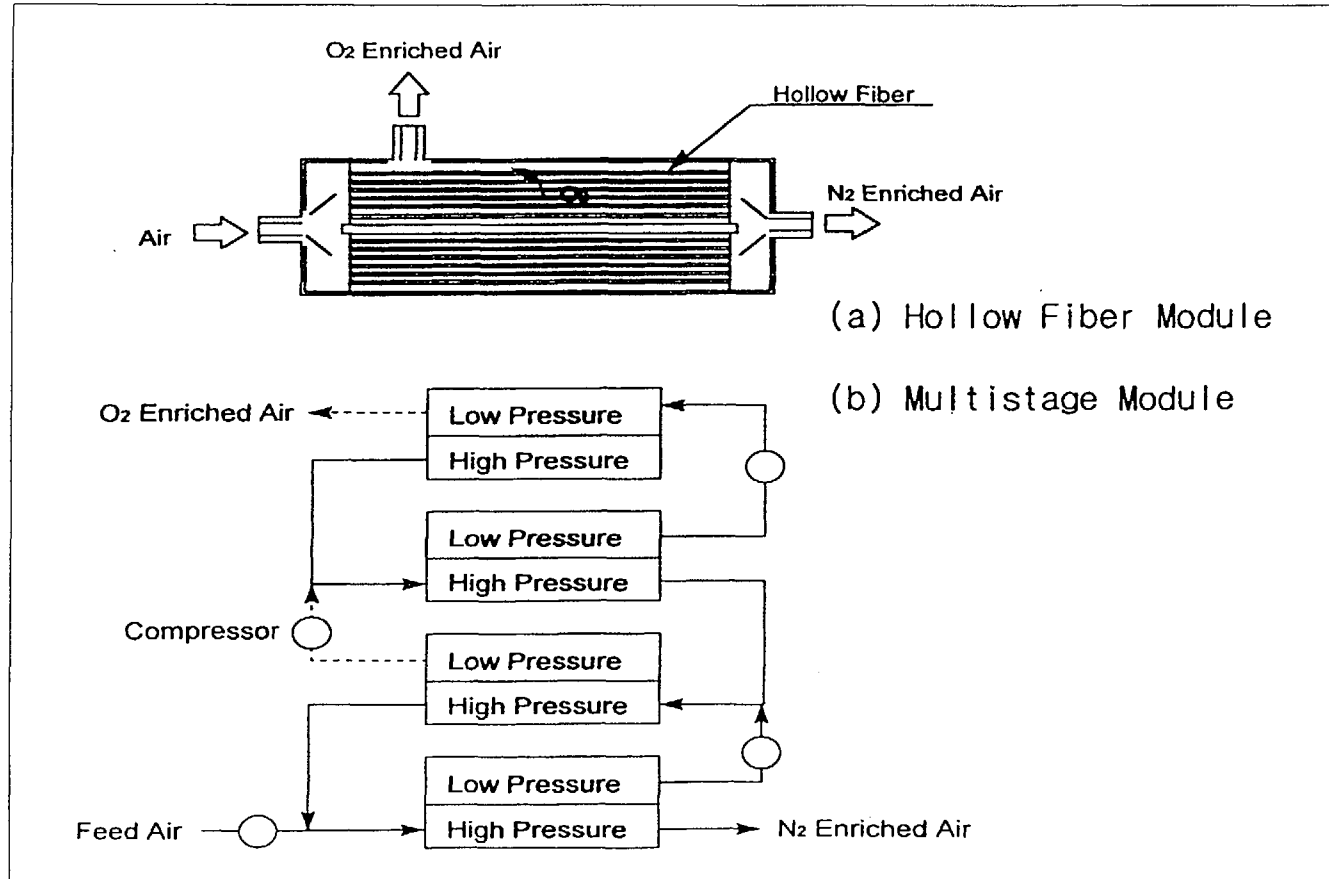


그림 15. 분리막을 이용한 산소분리장치 공정도

표 9. 산소부화용 막 분리기술의 운전방식의 비교

	감 압 식	가 압 식
특 장	운전동력이 적음 저압에서 작동 팬 이용 가능	운전동력이 큼 고압이 필요함 공압이나 공기압축기 이용
장단점	차압이 작음 모듈부하가 적음 모듈수명 연장	차압이 크고 투과량이 큼 산소/질소 각각 이용 가능 가압장치 필요
사용형태	평판형태가 유리	중공사막 형태가 유리

표 10. 산소발생장치별 특징 비교

구 분	심냉 분리법 (Cryogenic)	흡착법 (PSA, VSA)	막 분리법 (Membrane)	액체산소 (액체산소탱크)
분리원리	액화 시 비점 차이에 의한 증류방식	흡착제에 의한 특정기체의 흡, 탈착	막에 의한 선택투과	심냉 분리법에 의해 제조된 액체산소
산소순도	고순도 (99% 이상)	중순도 (90-95%)	저순도 (25-40%)	고순도 (99% 이상)
장치규모(톤/일)	대규모(50-2,500)	중소규모 (1-300)	소규모 (5 이하)	중규모 (70 이하)
소비전력 (kWh/NM ³) 30% O ₂ 기준	0.04 - 0.08	0.05 - 0.15	0.06 - 0.12	[190원/O ₂ NM ³] ¹⁾
제품형태	액체, 기체	기체	기체	기체
기타특징	대량생산가능 액체로 냉각가능 제품산소 : 건조	회분식 운전가능 가압상태 흡착제수명 : 10년 제품산소 : 건조	연속운전 가능 저압, 저순도 장치 및 운전 간단 제품산소 : 습윤	현장에 액체산소탱크를 설치하여 충전 후 사용

주 1) 한국산업가스 제공

크게 감소한다[22].

막 분리법에 의한 산소부화한 공기의 경우 산소의 순도를 최대 40%까지만 얻을 수 있어 이를 그대로 사용이 가능한 경우 즉, 기존 소각공정에 산소부화 설비를 추가 또는 변경함으로써 소각성능을 개선하는 경우에 주로 이용되기에 적합하나, 연소온도의 상승에도 불구하고 질소의 함량을 크게 줄여들지 않으므로 오히려 NO_x 생성량 증대를 가져올 수 있고 최근에 상용화되어 기술실증이 적은 편이다.

심냉 분리법은 대용량의 순 산소를 생산하기에는 가장 경제적이다. 산소 소요량이 50 톤/일 이상이면 같은 장소에 심냉 분리장치를 설치하고 파이프를 통해 산소를 공급하면 그 비용이 톤당 \$30에서 \$60정도이다.

고순도 (80~95%)의 산소를 중, 소량 사용할 경우 심냉 분리기술에 비해 PSA가 크게 유리한데, 이는 PSA의 단순성, 적은 시설비, 운전정지 조건을 감안한 높은 효율성 때문이다.

그러나 대부분의 일반적인 산소이용시설처럼 하루 사용량이 10 톤에서 40 톤 정도면 시설비 및 운전비가 너무 커지므로 액체산소를 구매하는 것이 가장 경제적이다. 특히, 방사성폐기물 같이 폐기물 발생량은 적은 반면 발열량이 큰 경우에는 산소 필요량이 적으므로 보다 경제적인 방법을 찾아야 한다. 일반적으로 산소 필요량이 20 톤/일 미만일 경우 가장 경제적인 산소공급방식은 액체산소탱크를 설치하여 액체산소를 공급받아 이를 기화시켜 사용하는 방법이다[19, 20]. 이 경우 산소발생 장치와의 거리에 따라 운반비용이 차이가 있으므로 가격에 약간의 변동이 있을 수 있으나 국내의 경우 133,000원/톤 정도이다.

제 5 절 산소부화 소각공정 고려사항 [5, 6, 7]

산소부화 소각설비를 잘 설계하기 위해서는 많은 고려사항을 잘 검토하여야 한다. 이러한 고려사항들 중 꼭 검토해야할 중요한 사항은 다음과 같다.

1. 산소 안전성

산소부화 분위기에서 반응성이 커지고 점화온도가 내려감으로 인해 중요하게 고려할 안전성 문제는 산소와 재질간의 양립성이다[5]. 공기 중에서는 점화가 되지 않는 많은 물질이 산소부화 분위기에서는 점화될 수 있다. 산소 분위기에서 금속, 밀봉 재질 및 윤활유의 특성을 평가하기 위한 광범위한 연구가 수행되었으며[23], 산소부화 조건에서는 화재 및 폭발 가능성도 더욱 커지므로 보다 많은 주의가 필요하다[24].

연소 안전성 관점에서 만약 연료와 산소부화 공기가 동시에 누설되면 운전 개시 전에 이미 연소실 내에 인화성 혼합물이 생성되었을 가능성이 크게 증대한다. 따라서 연소실 내에서 산소부화 공기가 축적되는 사고를 방지하도록 하는 것이 산소부화 연소계통의 중요한 설계 요건이 된다.

2. 폐기물 특성

산소부화로 얻을 수 있는 효율성을 최대로 하기 위해서는 소각 처리해야할 대상 폐기물의 특성 즉, 수분 함량, 발열량 및 질소 함량 등과 같은 물리, 화학적 특성을 잘 파악하고 있어야 한다.

3. 연소로 형태

연소실 내에서 폐기물의 흐름과 연소 중 발생하는 연소가스의 흐름이 연소로의 형태에 따라 향류, 병류 또는 이들의 혼합형태로 서로 다르다. 따라서 연소가 진행되면서 산소가 요구되는 특성을 고려하여 산소부화가

효율적으로 이루어지도록 하여야 한다.

4. 배출허용 NO_x농도

소각시설에서 배출되는 모든 대기오염물질에 대해 법으로 정한 배출허용농도 한계를 넘지 않아야 한다. 이러한 모든 대기오염물질 중 NO_x는 산소부화소각 시 화염온도의 상승으로 인해 발생 가능성이 크게 증가되므로 이에 대한 특별한 고려가 필요하다. 우리나라의 경우 소각시설에 대해 대기오염물질의 배출허용기준은 표 11과 같다.

5. 부분 과열

산소부화 공기나 산소/연료 버너를 사용한 산업로에서 자주 경험할 수 있는 문제는 높은 화염온도로 인한 부분 과열문제이다. 기존의 공기/연료 연소의 경우 공기를 산소부화시키는 일반적인 방법을 통해서 거의 비용이 들지 않고 산소부화가 가능하다. 그러나 내화물질 교체와 같은 추가적인 고려사항이 수반되지 않는 일반적인 부화기술은 화염온도의 과도한 상승 때문에 보통 산소농도가 5% 정도 증가시키는 수준 (산화제 중 산소농도가 26%)까지 제한되고 있다[5].

6. 배기체 중 산소과잉

외국의 많은 소각시설에서는 불완전 연소 생성물 (PICs)을 최소화하기 위해 후연소실에서도 이용될 수 있는 산소과잉이 어느 정도 (예, 배기체 중 산소농도가 6% 이상) 유지해야 한다고 규정되어 있다. 이러한 요건에 맞추기 위해서는 소각로는 연소실을 지나 후연소실을 빠져 나오기까지 산소가 충분하도록 공급하던지 직접 후연소실에 필요한 산소를 공급할 수 있도록 설계해야 한다.

표 11. 소각시설 관련 배출허용기준

1. 가스상 물질

오염물질	배출허용기준
암모니아	100 ppm 이하
일산화탄소	600(12) ppm 이하
염화수소	50(12) ppm 이하
염소	60(12) ppm 이하
황산화물 (SO ₂ 로서)	300(12) ppm 이하
질소산화물(NO ₂ 로서)	200 ppm 이하
이황화탄소	30 ppm 이하
포름알데히드	20 ppm 이하
황화수소	15 ppm 이하
불소화물 (F로서)	3 ppm 이하
시안화수소	10 ppm 이하
브롬화합물 (Br로서)	5 ppm 이하
벤젠화합물 (C ₆ H ₆)	50 ppm 이하
페놀화합물 (C ₆ H ₅ OH)	10 ppm 이하
수은화합물 (Hg로서), 비소화합물 (As로서)	5 mg/Sm ³ 이하
비소화합물 (As로서)	3 ppm 이하

표 11. 계속

2. 입자상 물질

오염물질		배출허용기준
먼지	배출가스량이 40,000m ³ /h 이상시설	80(12)mg/Sm ³ 이하
	배출가스량이 40,000m ³ /h 미만 시설	100(12)mg/Sm ³ 이하
카드뮴화합물(Cd 로서)		1.0mg/Sm ³ 이하
납화합물(Pb로서)		5mg/Sm ³ 이하
크롬화합물(Cr로서)		1.0mg/Sm ³ 이하
구리화합물(Cu로서)		10mg/Sm ³ 이하
니켈 및 그화합물		20mg/Sm ³ 이하
아연 화합물(Zn로서)		30mg/Sm ³ 이하
비산먼지		0.5mg/Sm ³ 이하
매연		링겔만비탁표 2도이하

비고:배출허용기준란의 ()는 표준산소농도(O₂의 백분율)를 말함.

표 11. 계속
3. 악취

측정방법	배출허용기준		
직접 관능법	악취도 2도이하		
공기회석	가. 배출구		
관능법	(1) 공업지역내의 사업장 : 회석배율 1,000이하		
	(2) 기타 지역내의 사업장 : 회석배율 500이하		
	나. 부지경계선		
	(1) 공업지역내의 사업장 : 회석배율 20이하		
	(2) 기타 지역내의 사업장 : 회석배율 15이하		
기기 분석법	악취물질	공업지역안 사업장	
		기타 지역안 사업장	
	암모니아	5 ppm 이하	2 ppm 이하
	메칠메르캡탄	0.01 ppm 이하	0.004 ppm 이하
	황화수소	0.2 ppm 이하	0.06 ppm 이하
	황화메틸	0.2 ppm 이하	0.05 ppm 이하
	이황화메틸	0.1 ppm 이하	0.03 ppm 이하
	트리메틸아민	0.07 ppm 이하	0.02 ppm 이하
	아세트알데히드	0.5 ppm 이하	0.1 ppm 이하
	스티렌	2 ppm 이하	0.8 ppm 이하

제 3 장 산소부화 소각공정 예

1. 도시 및 산업쓰레기 소각공정 [19, 20]

미국 Air Products 사는 도시쓰레기 (Municipal Solid Waste; MSW)를 6 톤/일 규모로 처리하는 소각공정에 산소부화기술을 적용하였다. 이 소각로는 왕복 화격자 스토커형 소각로 시작품으로 수증기나 전기를 생산하지 않는 대신 연소로 벽이 내화물질로 라이닝되고 물 재킷을 가지고 있어 소각로의 열보일러의 기능을 하고 있다. 연소용 화격자는 건조, 착화, 연소의 3구역으로 나누어져 있으며 산소는 일차 및 이차 연소실용 공기와 혼합되어 그림 16과 같이 공급된다. 착화 및 연소 구역의 산소부화 정도는 화염 상부 뿐 아니라 화염 하부에 대해서도 독립적으로 조절할 수 있어 산소부화의 효과를 선택적으로 평가할 수 있다. 배기체 중 산소농도를 일반적인 상업용 소각로에서와 같이 건조기준 8에서 13%로 하였으며, 연소용 공기는 화염 하부로 70%, 화염 상부로 30% 나누어 공급하였다.

가. 처리용량과 소각온도

산소부화가 소각처리용량과 온도에 미치는 효과를 그림 17에 나타내었다. 산소농도가 27%에서 MSW 처리량은 20% 증가하였으나 배기체의 유속은 변화가 없었다. 소각온도는 1,510에서 1,890^oF로 증가하였으며 이 정도의 증가는 대부분의 보일러의 운전허용 범위이내이다.

나. 배출물질

1) 일산화탄소

배기체 중 일산화탄소의 농도는 연소효율의 지표로 이용되고 있는데 그림 18에서 나타낸 것처럼 소각온도에 반비례하고 있다. 일산화탄소와 탄화수소의 배출농도는 화염상부의 연소공기를 산소부화하는 것이 가장 효율적이었다.

2) 질소산화물

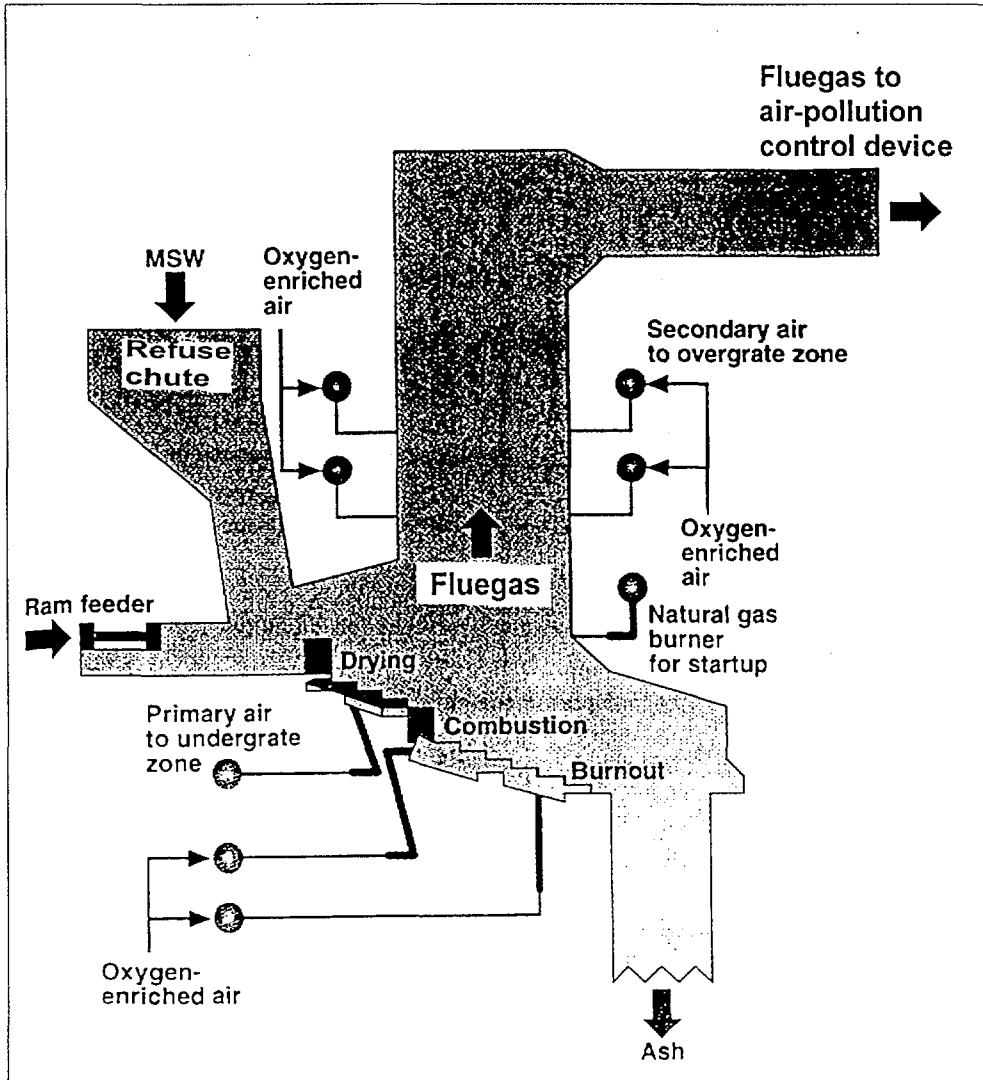


그림 16. 산소부화기술을 적용한 도시쓰레기 소각공정

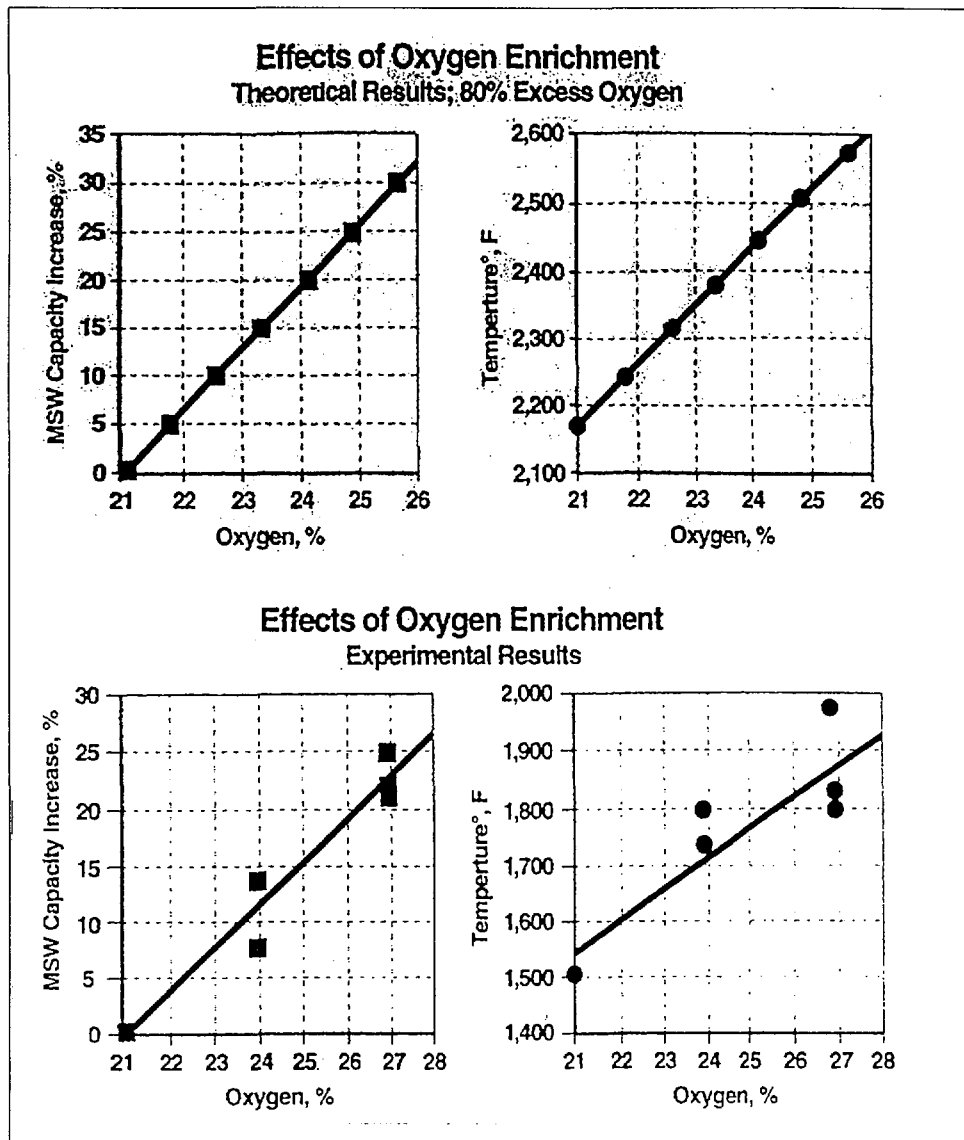


그림 17. 산소부화를 적용함으로 연소온도 및 처리용량 증가
(위)이론 (아래) 실험

그림 19에 산소부화가 질소산화물 생성에 미치는 효과를 보였다. 소각온도가 올라감에 따라 NOx의 농도는 증가하고 있으며 대기배출허용 기준 이내였다.

3) 황산화물

이산화황과 산소와의 관계는 그림 20에 보인 바와 같이 산소농도가 증가하면 SOx의 농도도 증가하였다. 이 것은 소각 바닥재 중에 잔존하는 황도 역시 줄어든 것으로 보아 산소부화로 인해 폐기물 중에 존재하는 황이 잘 연소되어 황산화물로 배출되었기 때문이다.

4) 소각재

비산재와 바닥재 시료를 분석하여 유기탄소, 염화물 및 황화물의 농도와 함께 미국 RCRA (Resource Conservation and Recovery Act)에 규정한 8가지 중금속 (As, Ba, Cd, Cr, Hg, Pb, Se, Ag)을 측정하였다. 산소부화를 함으로 황산화물이 줄어든 것을 제외하면 별로 변화가 없었으며, 탄소의 함량은 바닥재의 경우 1% 이하로, 비산재의 경우 2.5% 이하였다.

2. IT의 토양복원용 소각공정 [7, 8]

미국의 IT Corporation에서는 오염된 토양을 복원하는데 이용되는 운송형 (transportable) Hybrid Thermal Treatment System (HTTS) 소각공정을 개발하여 Louisiana의 Superfund 부지에서 운영 중이다. 이 소각공정은 로타리킬른에 이차 연소실 (Secondary Combustion Chamber; SCC)을 갖춘 계통으로 여기에 기술적, 경제적 분석을 통해 산소/연료 버너 이용과 산소 랜싱 방식으로 산소부화기술을 적용하였으며 이는 그림 21과 같다. 산소부화기술을 적용하여 사전 시험 및 시험운전 과정에서 얻은 결과는 표 12와 같다. 표에서 보는 바와 같이 성능기준을 만족하고 있으며, NOx 배출농도는 평균 97~99 ppmdv로 같은 용량의 타 운송형 소각공정의 경우 120 ppmdv에 비해 더 낮았다.

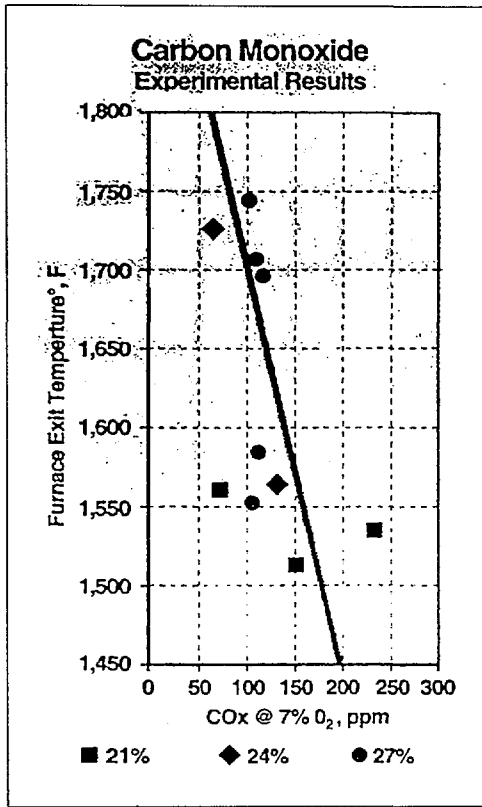


그림 18. 산소농도에 따른 CO 발생량 변화

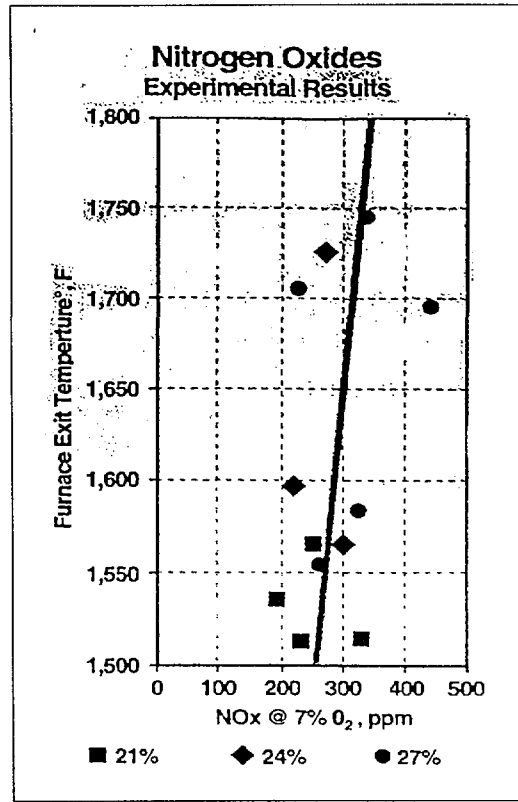


그림 19. 산소부화에 따른 NOx 발생량 변화

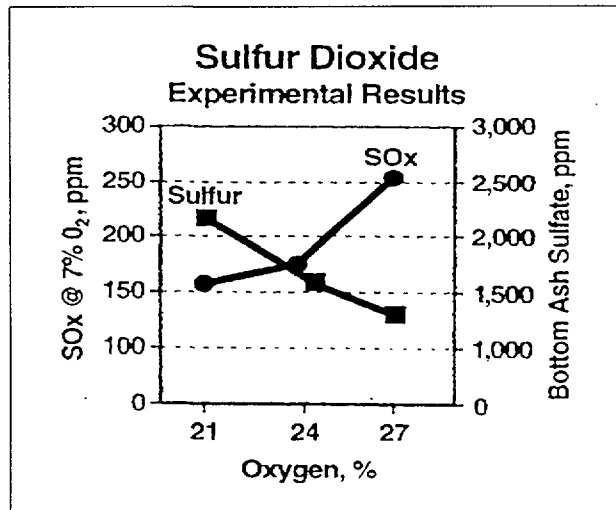


그림 20. 산소부화에 따른 배기체 및 소각재 중 SOx의 농도

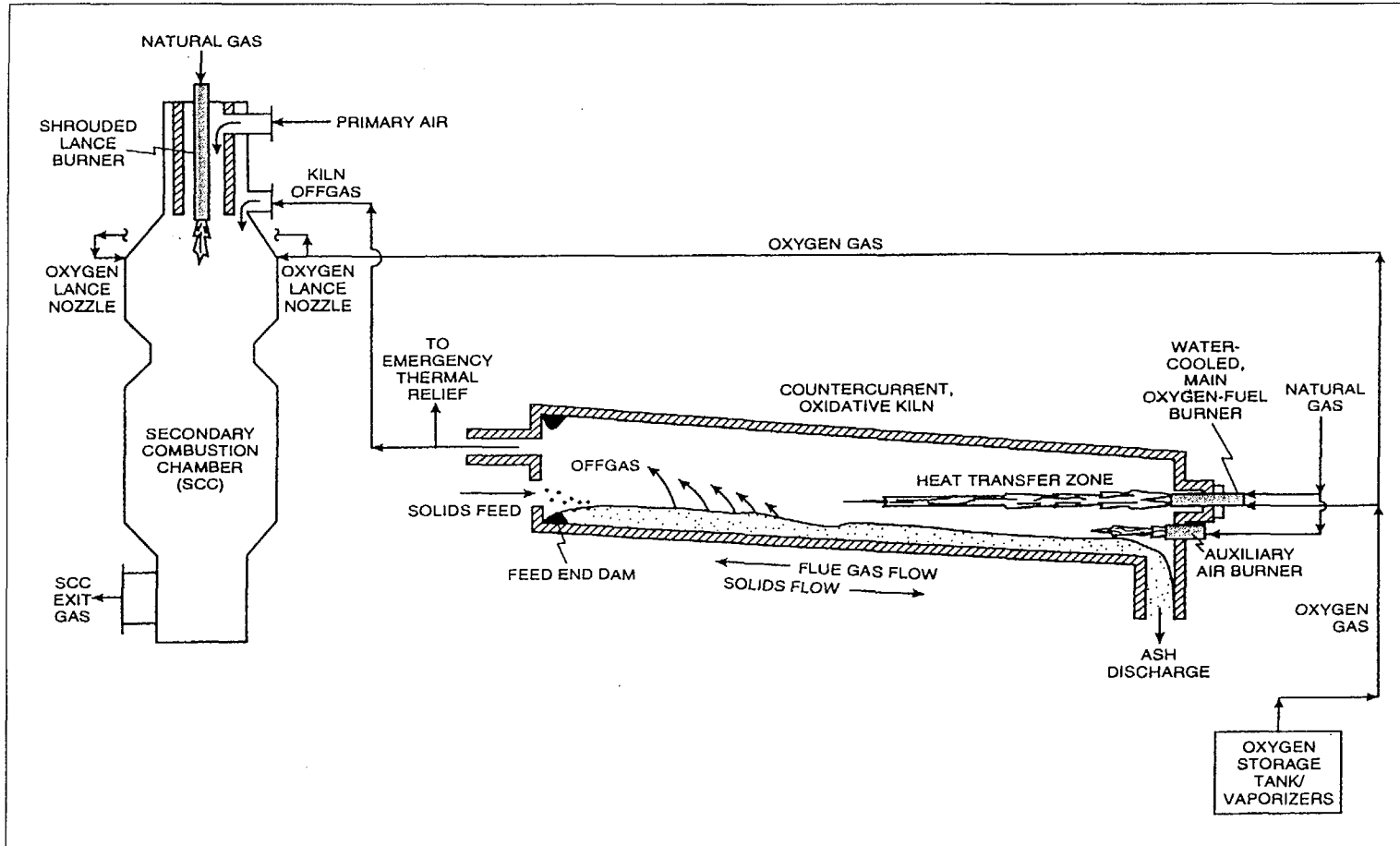


그림 21. 산소부화기술을 적용한 로타리킬른 소각공정 (킬른 및 제2연소실에 각각 설치된 산소버너와 산소랜싱)

표 12. 미국 IT Corporation의 토양복원용 소각공정에 산소부화기술을 적용한 결과

시험소각 성능기준	성능기준	실제 시험 결과	
		예비 실험	시험 소각
POHCs* 에 대한 DREs, %	Toluene: ≥99.99% Naphtalene: ≥99.99% Anthracene: ≥99.99%	99.9996% 99.997% 99.998%	99.9997% 99.997%
HCl 및 Cl ₂ 제거효율, % or kg/h	>99% or 1.8 kg/h (HCl & Cl ₂)	0.027 kg/h	99.998%
SO ₂ , kg/h	627 kg/h, per air monitoring plan	0.52	0.027 kg/h
입자물질 배출, mg/Nm ^{3**}	<90	20.2	0.04 (0.55 ppm)
CO 배출농도, ppmdv	<100	0	15.7
총 탄화수소 배출농도(as Propane), ppmdv [†]	<100	0	0.6
연도배출가스중 산소농도, %dry	>3.0	10.1 - 10.9	9.7
PCDD & PCDF, ng/dscm total (ng/dscm, TEQ [‡])	<30 total. standard	2.24 (0.05 TEQ)	1.99 (0.046 TEQ)
NOx 배출량 NOx as NO ₂ , ppmd or μg/m ³	16,000 ppmdv or 200 μg/m ³ maximum per calendar quarter	97 ppmdv	99 ppmdv

*POHC : principal organic hazardous constituents; designated POHCs are toluene, naphtalene, and anthracene

**mg/Nm³ : milligrams per normal cubic meter

† Corrected to 7% O₂ dry basic

‡ TEQ : Toxic Equivalent Quotient

3. 토양 복원용 이동형 소각공정 [13]

Vesta Technology의 이동형 (mobile) 소각공정은 고온의 로타리킬른형 소각로를 가지고 있으며 전형적인 형태는 그림 22와 같다. 이 소각공정은 미국의 RCRA와 TSCA (Toxic Substances Control Act)에서 정한 기준을 초과하는 PCPs와 PCBs, 다이옥신, 오일 슬러지, 그리고 다른 유해폐기물을 처리하도록 제작되어 토양복원에 활용되고 있는 공정이다.

배기체의 발생량을 줄임으로 1) 킬른 내 연소생성가스의 유속을 줄여 이차 연소실로 입자상 물질이 동반 이월되는 것을 줄이고, 2) 연소생성가스가 이차 연소실에서의 체류시간을 늘려주고자 연소에 필요한 공기 대신에 산소를 이용하였으며 그 결과는 표 13과 같다.

산소부화기술의 적용으로 순간적인 토양 처리량이 50% 증가하였고, 총괄적인 시간당 처리용량으로 환산하면 150%가 증가하였는데 이는 산소/연료 버너를 사용함으로 이차 연소실의 입자상 물질을 제거하기 위해 작업을 중지하는 시간이 없어졌기 때문이다. 또 다른 이득으로는 NO_x 배출량의 감소인데 시간당 NO_x 배출량으로는 52%가 감소한 것이고, 처리된 토양 단위 무게당 66%가 감소한 것이다.

4. 토양복원용 운송형 소각공정 [13]

Williams Environmental Services (WES)가 운영하고 있는 운송형 (Transportable) 소각공정은 토양처리 및 소각에 적용할 수 있는데 향류식 로타리킬른, 고온 사이클론, 이차 연소실, 냉각탑, 포대여과기, 배기팬, 산성기체 세정기 및 연도로 구성되었다(그림 23 참조). 이 소각공정은 New Jersey Department of Environmental Protection이 정한 입자상 물질 배출 기준 때문에 산소부화기술을 적용하였으며, 그 결과를 표 14에 실었다. 산소부화기술을 적용함으로 처리량은 23% 증가하였으며 기타 모든 배출 허용 및 재에 대한 기준을 만족하였다.

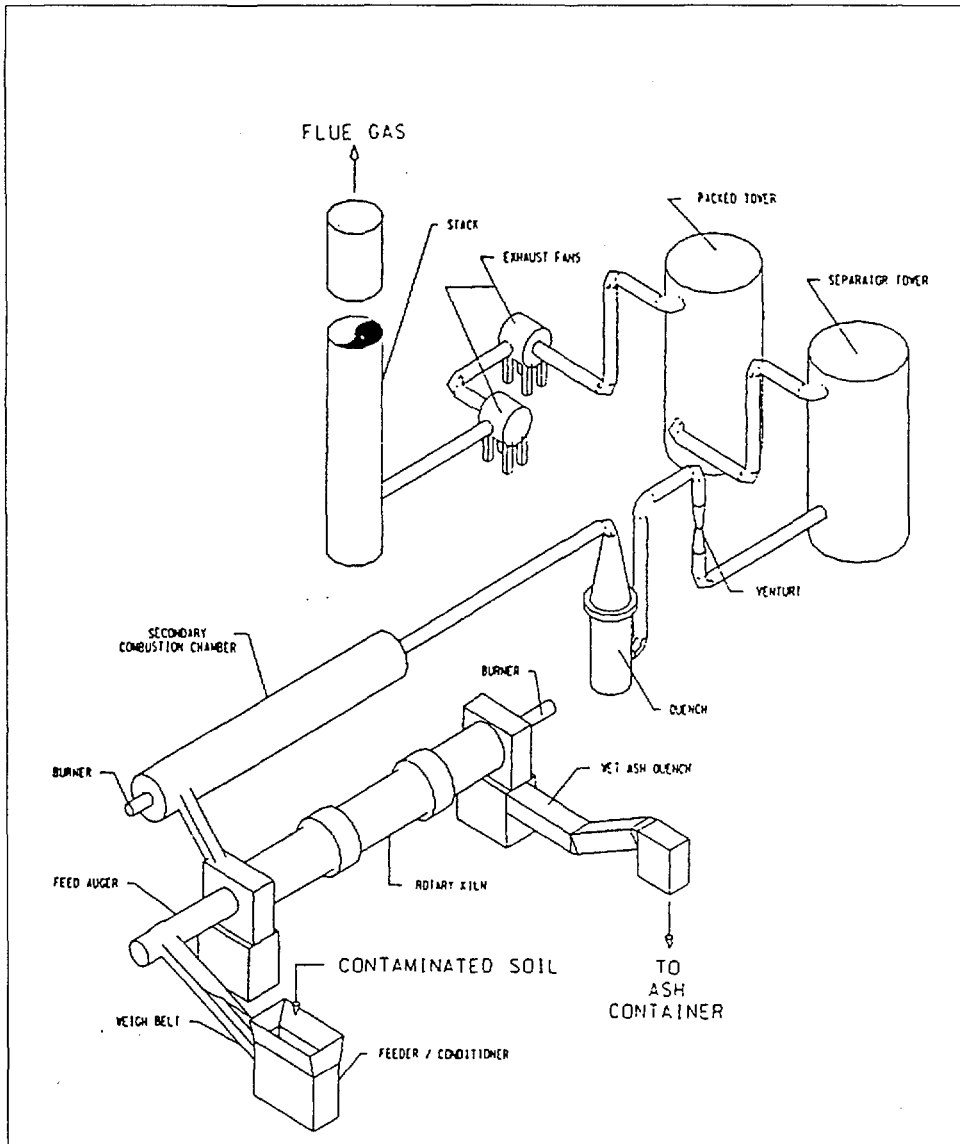


그림 22. Vesta 이동형 소각공정

표 13. Vesta 이동형 소각공정에 산소부화를 적용한 결과

인 자	공기/연료	산소/연료	증감(%)
폐기물 처리량 (kg/h)	1030	1500	+50
킬른 온도 (°C)	410	496	+20
2차연소실 온도 (°C)	1090	1100	+ 1
CO (ppmvd)	10	25	+150
NOx (ppmvd)	255	245	- 4
NOx as NO ₂ (kg/h)	2.0	0.95	-52
NOx as NO ₂ (kg/ton soil)	1.9	0.65	-66

표 14. 운송형 소각공정에 산소부화를 적용한 결과

인 자	공기/연료	산소/연료	증감(%)
폐기물 처리량 (ton/h)	13.8	16.8	+22
킬른 온도 (°C)	854	760	-11
2차연소실 온도 (°C)	932	1040	+11
CO (ppmvd)	40	<5	<-88
NOx (ppmvd)	58	120	+107
NOx as NO ₂ (kg/h)	3.88	4.54	+17
NOx as NO ₂ (kg/ton soil)	0.28	0.27	- 4
SO ₂ (ppmvd)	<10	<10	-
Particulates (g/dscm)	0.0286	0.0254	-11

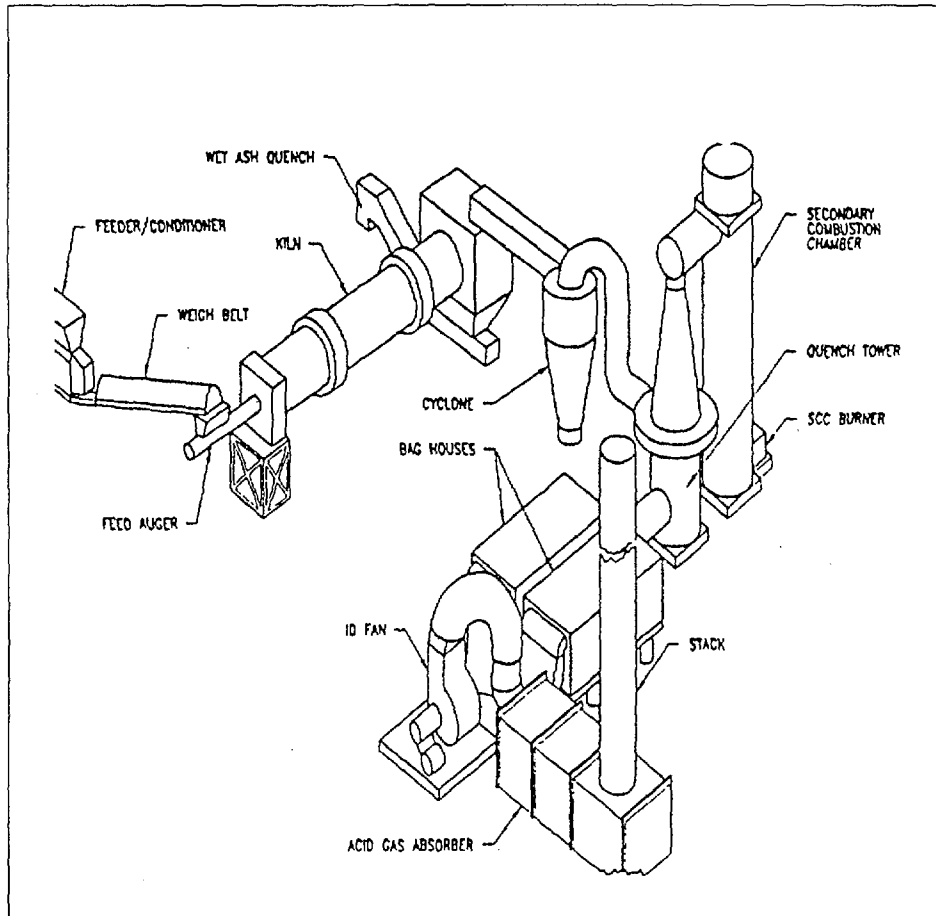


그림 23. Williams 수송형 소각공정

5. ICI의 황산폐기물 소각처리공정 [18]

ICI가 개발한 MMA (Methyl Methacrylate) 생산공정에서 발생하는 황산폐기물을 소각 처리하는 기술은 1992년 설치 당시에는 공기를 이용한 연소방식이었다. 이 공정을 프랑스의 AIR LIQUIDE에서 모델링 및 파이롯트 시험 운전 등을 통해 산소를 이용하는 SAROX (Sulphuric Acid Regeneration using OXYgen) 기술로 개선하였다. 이러한 산소부화기술의 적용으로 건설비용 40% 절약, 에너지 28% 절약, NOx 배출 20% 감소, SO₂ 30% 감소 및 CO₂ 배출 감소의 효과를 얻었다.

6. INEL의 공기제어형 소각공정 [25]

미국 Idaho National Engineering Laboratory (INEL)에서는 스토커형 화격자를 가진 열용량 880 kW의 시험소각로 (그림 24 참조)에 산소부화 기술을 적용하였다. 적용된 산소부화 계통은 액체산소 공급용기 및 기화기, 산소공급 제어 판넬, 연소 화격자로 공급되는 연소공기에 연결된 산소 확산장치 등으로 구성되었으며 기타 공기유입을 막기 위한 밀봉부분을 추가하였다. 소각대상 모의 폐기물은 플라스틱 시트가 60%, 휴지가 30%, 판지가 10%로 구성하여 25 x 25 x 41 cm의 마분지 박스에 담고 플라스틱 테이프로 봉하였으며 박스 하나 당 무게는 평균 4.6 kg이었다. 연소실험은 소각공정의 설비가 견딜 수 있는 최고온도조건을 기준으로 산소농도가 21, 28, 34 및 40%에서 수행하였다. 자세한 소각운전조건은 표 15와 같으며, 이러한 운전조건에서 각각의 실험소각 시마다 공기가 새어 들어온 양을 물질수지로부터 계산하여 표 16에 보였다.

가. 소각성능

산소부화 소각실험을 수행하면서 연소 화격자 하부로 주입되는 공기 중의 산소농도에 따라 화격자 위에 탄소와 수소가 축적되는 속도를 표 17에 실었다. 탄소가 축적되는 속도는 산소농도에 따라 선형적으로 감소

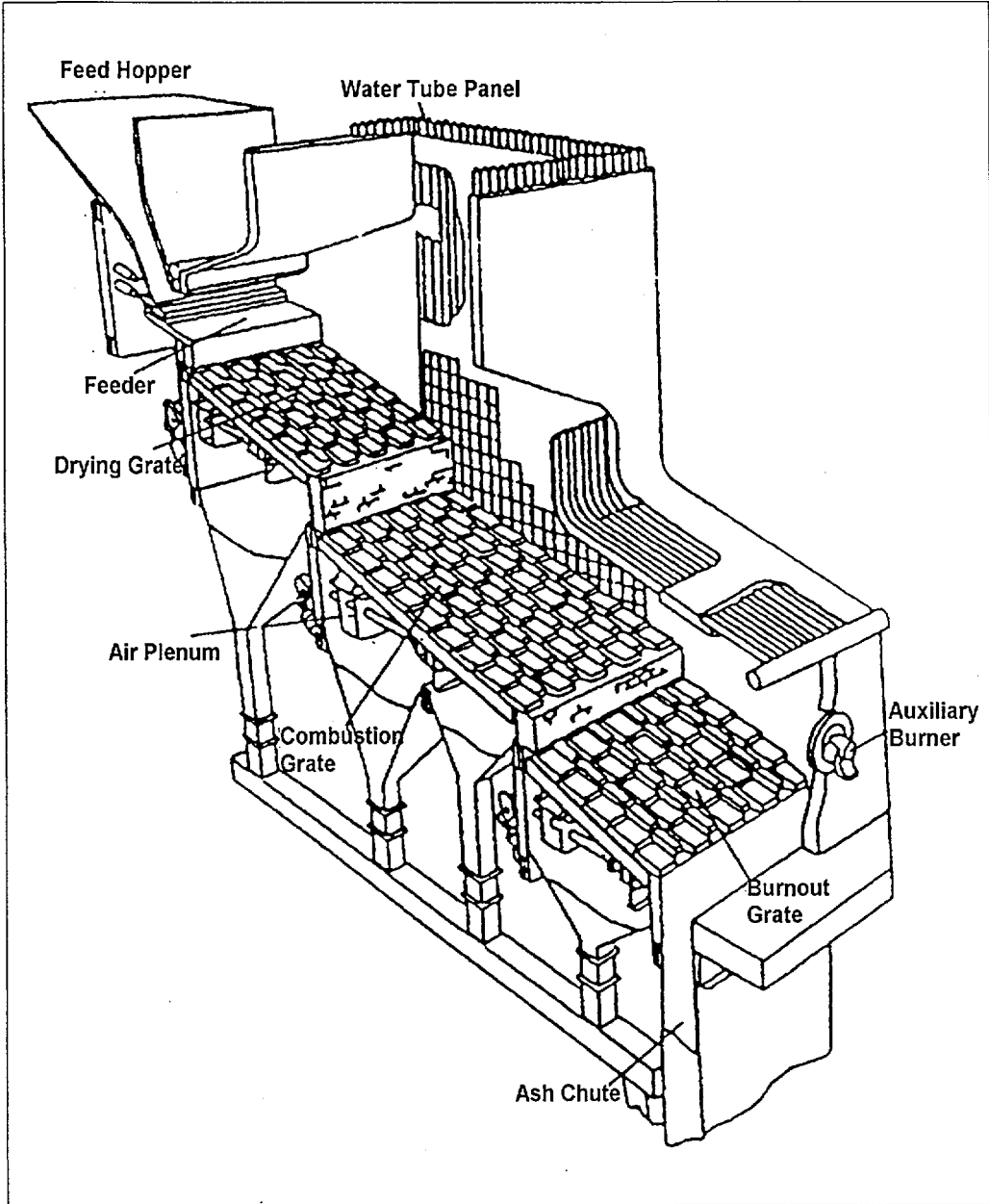


그림 24. 산소부화기술을 적용한 Riley Test 소각공정

표 15. 방사성 폐기물 소각공정의 산소부화 소각실험 조건

소각실험	산소농도 수준 (vol%-dry)	폐기물 공급속도 (kg/h)	총 하부주입 가스유속 (kg/h)	물 사용량 (L/h)	소각온도 (°C)
기본 소각	21	94	461	0	883
저 산소부화	28	94	449	0	849
중 산소부화	34	88	461	0	880
고 산소부화	40	86	468	18	866

하여 산소농도 40%에서는 공기소각 시에 비해 거의 60%가 감소하였으며, 수소 역시 산소농도가 34% 이상에서는 0까지 감소하였다. 폐기물 박스를 공급한 후 화격자 위에 축적되는 연료는 공기의 경우 4,300 MJ에서 산소농도가 40%에서는 1,300 MJ까지 떨어졌다. 이러한 결과로부터 계산해서 얻은 산소부화를 적용함으로 얻은 소각성능의 증가비율은 표 18과 같다.

나. 배출물질

산소부화가 일산화탄소와 질소산화물의 배출에 미치는 영향은 그림 25와 같다. 폐기물을 연속적으로 공급하면서 소각 운전을 한 경우에는 일산화탄소가 눈에 띄게 감소하는 것을 확인할 수 없었다. 산소농도가 28, 34%에서는 공기 소각에 비해 더 낮게 나왔으나 40%에서는 공기 소각의 경우와 비슷하게 발생하였다.

질소산화물의 생성량은 산소부화에 따라 증가하고 있었으나, 발생 농도를 산소 7%로 환산하면 99 ppm인데 이는 대형 도시쓰레기 소각로의 미국 배출허용기준인 180 ppm 이하였다.

다. 소각재

산소부화기술을 적용하여 소각 운전하면서 얻은 소각재를 분석한 결과는 표 19와 같다. 소각 운전을 하는 동안 화격자로 공급되는 가스의 유속을 일정하게 유지하면서 비산재를 측정된 결과 산소부화가 증가할수록 비산재의 발생량이 증가하고 있었다. 이는 표 16에서 볼 수 있듯이 누설, 유입되는 공기의 양이 증가하기 때문이다.

‘냉각된 재’란 소각운전 후 화격자 상부에 남은 잔재물을 물로 냉각시킨 재를 말하는데 산소농도가 34% 이상에서 모든 탄소가 완전히 연소되었다.

7. 도시 쓰레기 소각공정 [26, 27]

프랑스의 AIR LIQUIDE는 일반적인 스토커형 도시 쓰레기 소각로에 산소부화를 적용하여 소각로 운전 성능 및 환경 성능에 미치는 영향을 시험하였다. 주입기를 사용하여 일차 공기 공급관에 산소가 주입되게 하여

표 16. 물질수지에서 계산된 공기 누설량

산소농도 (%)	21	28	34	40
소각로내 압력 (mmH ₂ O)	-2.54	-3.56	-5.33	-7.87
공기누설량 (Nm ³ /h)	48.6 ^{a)}	78.7 ^{b)}	123.5 ^{b)}	172.5 ^{b)}

주) a : 소각로 압력으로부터 예측

b : 물질수지식으로부터 예측

표 18. 소각운전시간을 고려한 소각용량

산소농도 (%)	21	28	34	40
총 운전시간 (분)	466	414	383	330
소각용량 (kg/h)	47	53	57	66
소각성능 증대	0%	13%	22%	41%

표 17. 방사성 폐기물 소각공정의 산소부화 소각실험 결과

산소농도 (vol%-dry)	탄소 축적 (kg/h)	수소 축적 (kg/h)	연료 축적 (MJ)	탄소 연소율 (%)	수소 연소율 (%)
21	25.0	2.4	4300	60	77
28	20.0	1.0	3000	68	91
34	14.5	0.0	2000	75	100
40	10.0	0.0	1300	83	100

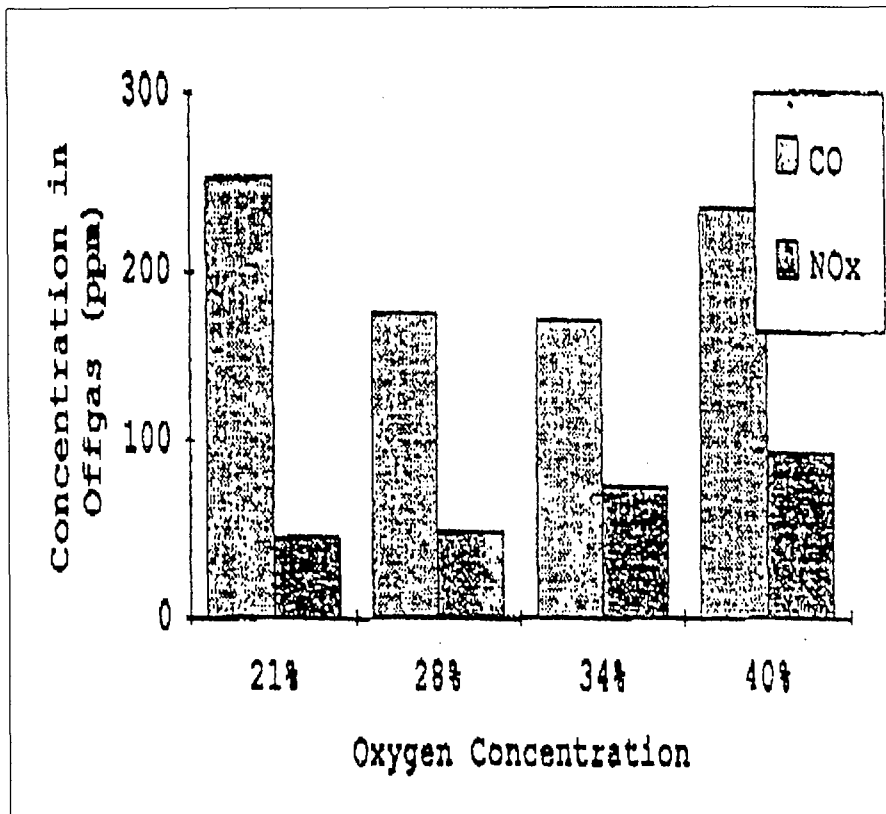


그림 25. 산소부화에 따른 일산화탄소 및 질소산화물의 발생량

표 19. 산소부화소각 발생 소각재 분석 결과

산소농도 (%)	21	28	34	40
비산재				
-무게 (kg)	0.54	0.54	0.72	0.86
-탄소 함량(%)	52	28	78	25
-재 함량 (%)	39	63	13	68
-LOI (%)	61	37	87	32
바닥재				
-무게 (kg)	10.87	12.23	9.97	6.80
-탄소 함량(%)	8.2	4.5	5.9	3.9
-재 함량 (%)	90	94	93	96
-LOI (%)	10	5.7	7.0	4.3
냉각된 재				
-탄소 함량(%)	34	35	1.2	0.50
-재 함량 (%)	59	61	98	99
-LOI (%)	41	39	1.7	0.65

공기와 함께 연소로에 공급하였으며 전체적인 산소농도는 23.8%이었다.

공기로 소각하는 경우에 비해 산소부화 소각 시 바닥재 중에 평균 탄소 함량이 40% 감소하였다. 배기체 중 CO의 농도는 산소부화 시 약 70% 감소하였으며, NO_x의 경우 눈에 띄게 감소하지 않았다. 다이옥신/퓨란의 평균 배출농도가 1/3이하로 줄었으며 소각용량은 약 10%정도 증가하였다.

산소부화가 소각 배기체 중 다이옥신과 퓨란의 농도에 미치는 영향을 알아보기 위한 모델 연구로부터[27] 소각로 내에서 다이옥신과 퓨란에 대해 연소 및 파괴 효율에 산소부화는 긍정적인 효과를 가지고 있으나, 일단 생성된 다이옥신이나 퓨란에 대해서는 거의 영향을 미치지 않을 것이라고 예측하였다.

8. 슬러지 처리용 다단로상 소각공정 [28]

미국에서 하수 슬러지 처리용으로 많이 활용되고 있는 다단로상 소각공정 (Multiple-hearth incineration process)에서는 슬러지에 포함된 다량의 수분을 증발시키기 위하여 많은 에너지가 필요하며, 발열량 또한 상당히 낮다. 이러한 슬러지 소각용 다단로상 연소로 제 5단에 6개의 산소 주입용 랜스를 설치하여 소각한 결과는 표 20과 같다.

산소를 주입함으로 슬러지 처리용량은 단기간의 제어운전 시 55%가, 장기간의 운전 시에는 30%이상이 증가하였다. 연료가스 소모량은 단기간 운전에서 35% 감소하였으며, 슬러지 처리량에 대한 연료 소비량은 장기 운전에서 10에서 24% 정도 감소하였다. 단기간 제어운전의 경우 산소를 주입함으로 슬러지 처리량에 대한 CO₂, THC 및 NO_x의 굴뚝 배출량은 감소하였으나, CO 배출량은 변화가 없었다. 입자상 물질도 산소부화 소각할 경우 감소하였으며, 중금속의 농도는 핵종에 따라 달랐으나 전반적으로 감소하였다. 산소부화를 적용하는 것에 대해 경제성을 평가한 결과 긍정적이었으며, 소각처리용량의 증대 및 연료소모량 감소를 고려하면 시간당 \$30~60 정도의 비용이 절감되었다.

표 20. 다단로상 소각로에 산소부화 적용 결과

항 목 및 단 위	공기 소각	산소 소각	변화(%)
굴뚝 유량 DSCFM ¹⁾	18038	17316	-4.0
슬러지 공급량 TPH ²⁾ dry	2.18	3.39	55.4
배기체 농도			
-O ₂ % vol	13.03	12.51	-4.0
-CO ₂ % vol	6.19	8.54	38.2
-THC ppmvw ³⁾ C ₃ H ₈	32.62	38.17	17
-NO _x ppmvd ⁴⁾	60.85	60.90	0.1
-CO ppmvd	1129	1767	56.6
발생량			
-CO ₂ lb/hr	7423	10174	37.1
-THC lb/hr C ₃ H ₈	3.98	4.63	16.2
-NO _x lb/hr NO ₂	7.59	7.53	-0.8
-CO lb/hr	85.66	133.04	55.3
건조 슬러지 톤당 발생량			
-CO ₂ lb/dry ton	3334	2999	-10.1
-THC lb C ₃ H ₈ /dry ton	1.77	1.36	-23.1
-NO _x lb NO ₂ /dry ton	3.44	2.22	-35.4
-CO lb/dry ton	38.51	39.28	2.0
입자 배출량			
-입자상물질 lb/hr	1.13	1.47	30.1
-입자상물질 lb/dry ton	0.515	0.432	-16.2
중금속 배출량			
-비소 lb/hr	5.63E-04	8.12E-04	44.2
-카드뮴 lb/hr	2.64E-03	2.57E-03	-2.9
-크롬 lb/hr	1.38E-03	1.28E-03	-7.7
-납 lb/hr	1.00E-02	1.02E-02	1.7
-수은 lb/hr	4.30E-03	1.05E-03	-143.5
-니켈 lb/hr	5.12E-04	9.57E-04	86.8
중금속 배출량 분률			
-비소 fraction	2.61E-02	2.37E-02	-9.2
-카드뮴 fraction	1.05E-01	6.24E-02	-40.4
-크롬 fraction	4.71E-03	2.87E-03	-39.0
-납 fraction	2.19E-02	1.44E-02	-34.5
-수은 fraction	4.63E-01	9.00E-01	94.3
-니켈 fraction	2.66E-03	3.16E-03	18.6
주) DSCFM : dry specific cubic feet per minute, THC : total hydrocarbon ppmvw(d) : parts per million volume wet (dry)			

9. 촉 연소공정 [29]

산소부화가 도시쓰레기의 열분해로 만들어진 촉의 연소 속도에 미치는 효과를 파악하기 위하여 $50\mu\text{m}$ 크기의 쓰레기 촉 입자에 대해 열천칭실험을 수행하였다. 실험 결과 촉의 연소 속도는 산소부화된 공기 중 산소의 농도제곱근에 비례하였으며, 연소기체 생성량 및 촉 1톤당 배기체 배출량이 크게 감소하였고 소각재중 독성 유기물질의 농도가 많은 염소 및 촉매 금속물질의 존재에도 불구하고 매우 낮았다.

10. Dupont의 원통형 사이클론 소각공정 [30]

Dupont의 LaPorte Plant Central Scrubbed Incinerator (CSI)는 1974년 이래 계속 가동되어 온 원통형 사이클론 소각공정으로 최근 EPA가 규정한 연소 MACT의 규정을 만족하지 못하므로 새로운 소각공정으로 대체할 예정이었다. 이 소각공정에 산소부화를 적용함으로써 표 21과 같이 MACT에서 정한 THC 및 CO에 대한 허용농도를 만족하게 되었다.

11. 기타 산소부화 적용공정 [31]

미국 Air Products and Chemicals사의 Niehoff 등[31]은 1998년 개최된 IT3 Conf.에서 그 동안 산소부화를 적용한 소각공정에 대해 소개하였는데 앞에서 언급한 것을 제외한 나머지를 요약, 정리하여 표 22에 실었다.

표 21. Dupont CSI에 산소부화를 적용한 결과

Oxygen Device	O2 Flow MSCFH	Stack O ₂ %	Stack CO ppm	Stack THC ppm
None	0	7.8	1970	2.12
Sparger	20	10.5	775	0.30
Sparger	40	13.2	535	0.25
None	0	7.8	1700	1.75
Lance	20	10.6	643	0.28
Lance	40	13.1	378	0.23
None	0	6.5	980	1.21
Both	10 lance 30 sparger	11.8	471	0.30
Both	20 lance 30 sparger	13.1	280	0.21

표 22. 산소부화를 적용한 소각공정 및 주요 결과

실험시기	시설명	시설용량 ton/day	주요 결과
1987	Harrisburg waste-to-energy facility	360	1) 증기 생산량 증대 2) 연료소비량 감소 3) 바닥재 질 개선 4) MSW와 고습도 슬러지 동시 소각 시 증기생산량 감소 없 이 조업가능
1994 - 1995	fire-roller grate incinerator	650	잔류물 중 탄소 함량이 30% 감소
1995	ram grate incinerator	76	바닥재 중 탄소 함유량이 70% 감소

제 4 장 산소부화 소각공정관련 특허

제 1 절 국외 특허

1. 가연성 물질 소각 공정 [32]

다이옥신이나 퓨란의 전구체를 가진 고상 및 액상 폐기물을 산소부화공기로 소각하면서 질소산화물의 생성을 작게 하고 다이옥신과 퓨란의 배출량을 줄이는 소각 공정이 독일의 Sorensen, L.E.에 의해서 제안되었다. 가스화실, 연소실, 입자 분리기, 냉각기 및 산소부화설비와 같은 단위공정을 다양하게 활용하여 유해가스의 배출량을 줄이는 기술이다(그림 26 참조). 여기에서는 산소농도 약 30~35%를 최적 산소농도로 제시하고 있다.

2. 증기생성 소각로 [33]

본 특허는 미국의 Air Products and Chemicals가 출원, 등록된 것으로 증기를 생산할 수 있는 도시쓰레기 소각로에 연소 및 온도 제어를 위해 산소부화 공정과 액체 냉각 공정을 동시에 적용함으로써 성능 향상을 가져오는 기술로 개략도는 그림 27과 같다. 산소부화는 롤러형 화격자에 공급되는 일차 및 이차 공기에 산소를 추가 공급함으로써 산소부화된 공기가 연소에 이용되도록 하였으며 연소로 내부가 과열되는 것을 막기 위해 액체를 이차 연소실 후단으로 주입하는 기술이다.

3. 폐쇄형 소각공정 [33, 34, 35]

굴뚝으로부터 대기오염물질을 연속적으로 배출하지 않는 폐쇄 루트형 소각공정으로 연소배출가스의 일부를 산소로 부화시켜 소각용으로 재순환하고 나머지는 세정탑에서 산성기체를 제거한 후 정화설비를 지나면서 오

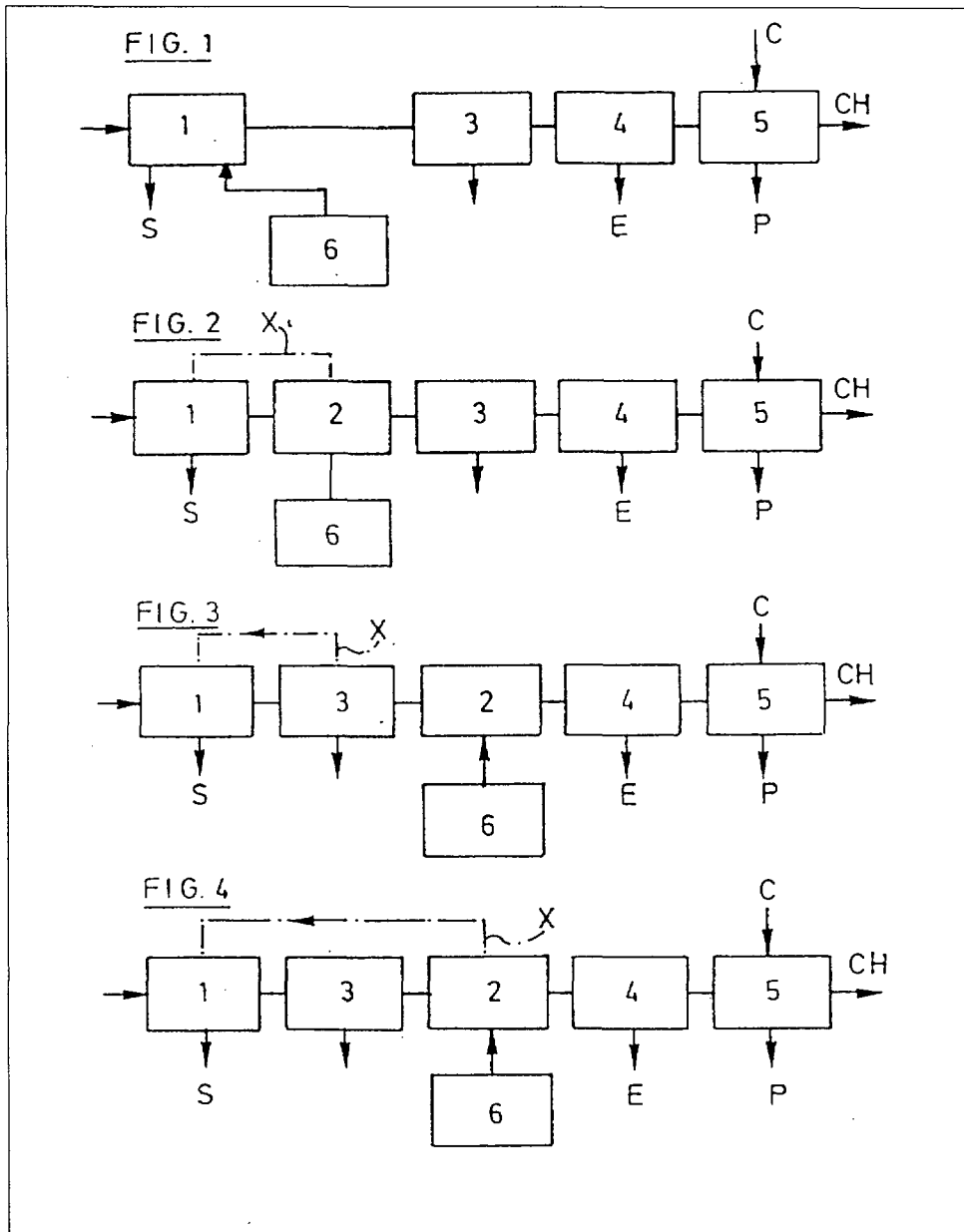


그림 26. 산소부화기술을 이용하여 유해가스를 줄이는 소각공정도

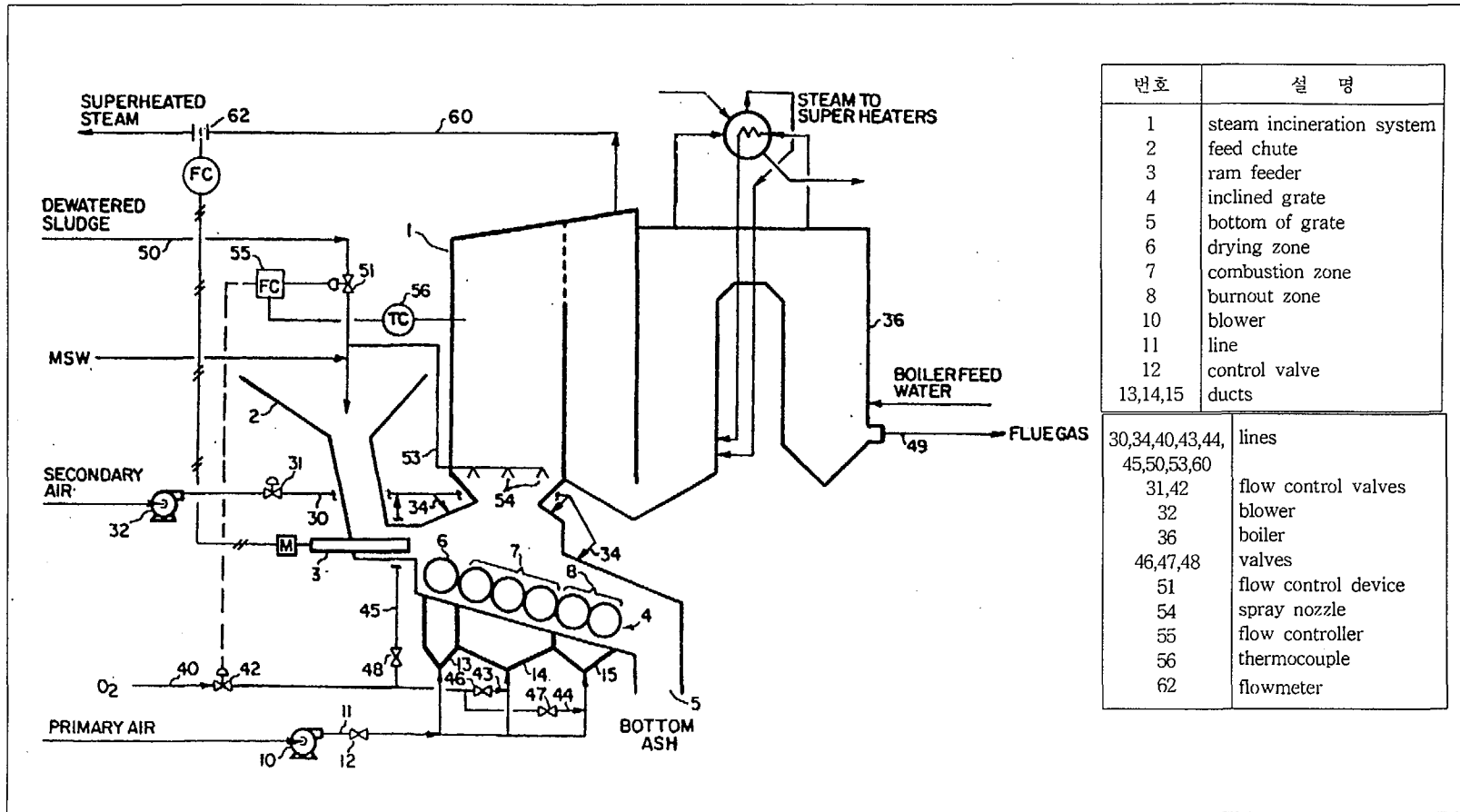


그림 27. 산소부화기술을 적용한 도시쓰레기 소각공정

염물질을 제거하는 공정으로 구성되었으며 공정도는 그림 28과 같다. 연소배출가스와 산소는 사이클론형태의 혼합기에서 혼합하며, 습식 세정기로 유입되는 배기체에 대한 재순환 배기체의 비는 1:1에서 1:3 정도이다.

4. 폐쇄 순환형 연소/유리화 공정 [36]

미국의 Bobcock and Wilcox사가 출원, 등록된 기술로 유해 폐기물을 소각하고 재를 유리화 하는데 이용될 수 있는 폐쇄 순환 연소공정이다. 소각실에는 순 산소, 유해폐기물 및 연료가 공급되고 슬래그 모드인 경우 이 곳에서 슬래그가 형성되고 슬래그는 따로 처리된다. 연소가스, 액체, 고체 및 재료 구성된 소각 생성물은 분진 수집기에서 분리되어 소각실로 재순환된다. 액상 폐액은 응축 열교환기로 배출하며, 분진을 여과한 후 CaO 자갈층에서 연소가스를 반응시켜 제거한 후 잔여 불활성 가스만 외부로 방출한다. 연소 후 배출가스는 소각실로 주입되는 산소로 재순환시켜 온도를 제어한다.

슬래깅 소각모드에 대해 CaO 자갈층을 응축 열교환기 전, 후에 위치시키는 2가지 방식 외에 비 슬래깅 소각모드를 포함하여 3가지 공정이 특허로 등록되었으며 비 슬래깅 소각공정을 그림 29에 보였다.

5. 수직 원통형 소각공정 [37]

수직으로 세워진 원통형 소각로의 상부로 폐기물을 공급하고 로의 하부로 산소부화공기를 공급하여 폐기물 연소와 동시에 유기물의 열분해에 의한 유용한 가스를 생성하는 공정 및 장치에 관한 특허이다. 무기물 성분은 로의 하부에서 약 1400~1600℃ 온도에서 유동성 물질로 만들어 배출하며 장치를 그림 30에 보였다.

6. 무배출 소각공정 [38]

소각처리 시 발생하는 모든 연소가스를 세정하여 제거한 후 잔여 기체

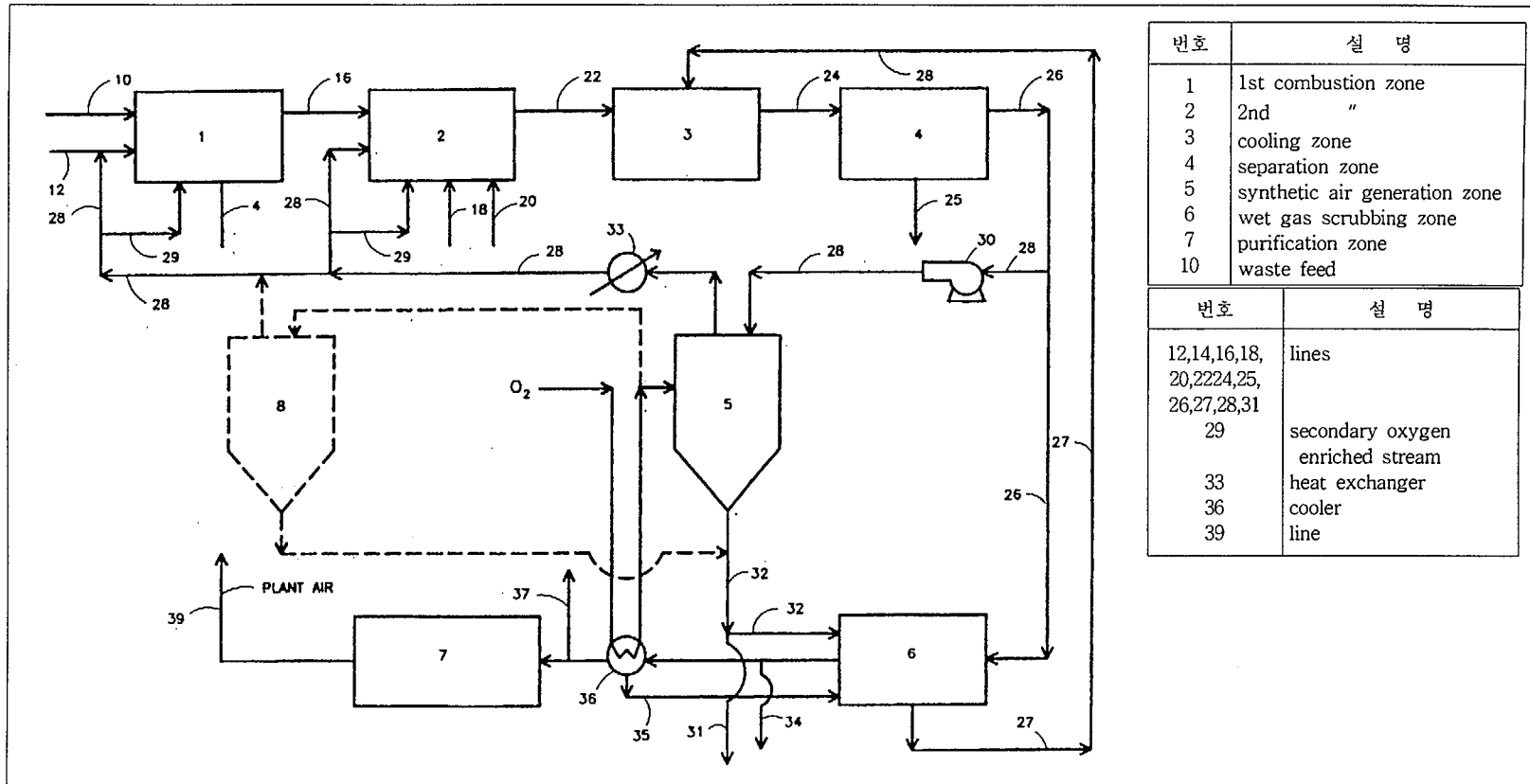


그림 28. 폐쇄형 소각공정 개념도

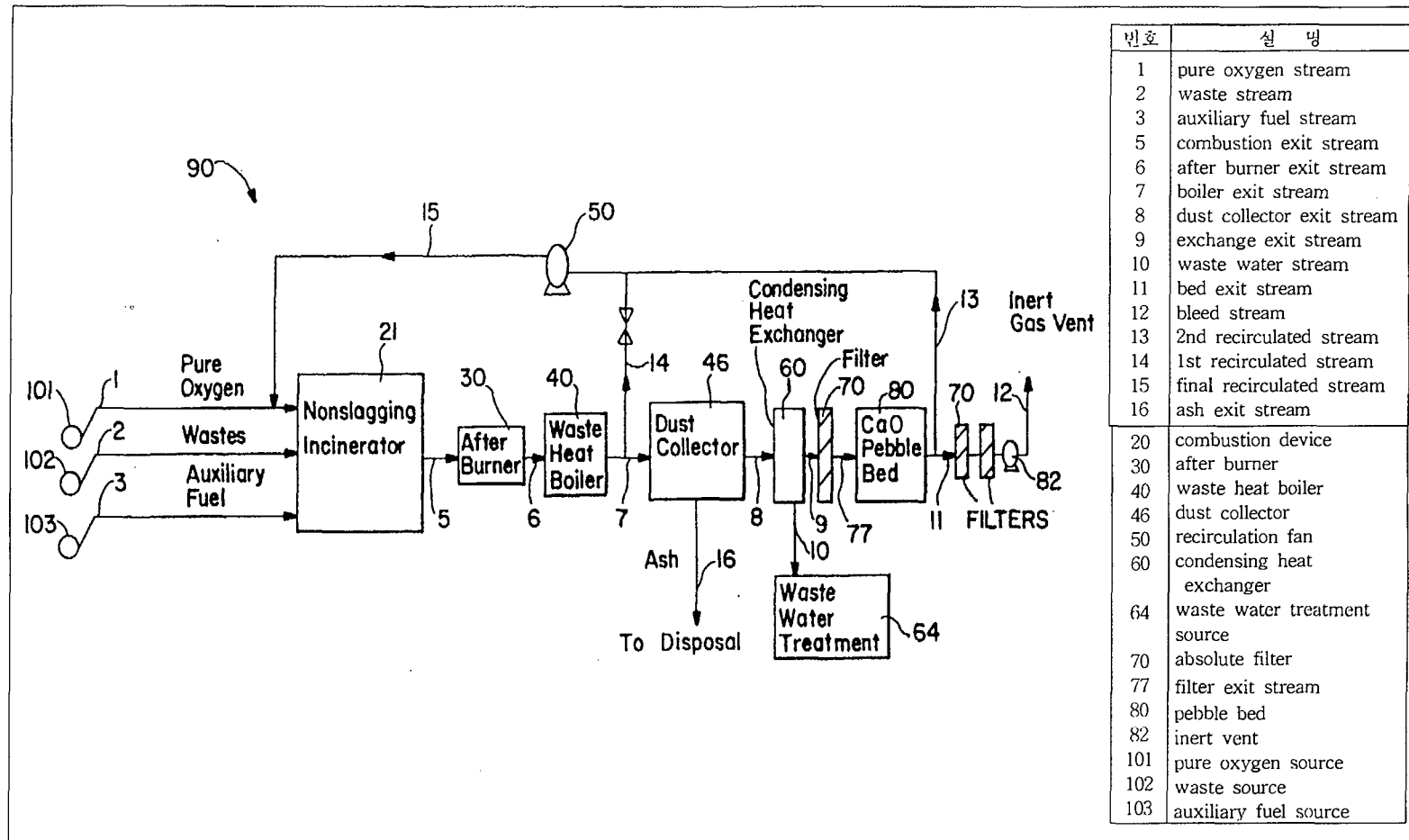


그림 29. 폐쇄/순환개념을 도입한 산소부화 소각공정

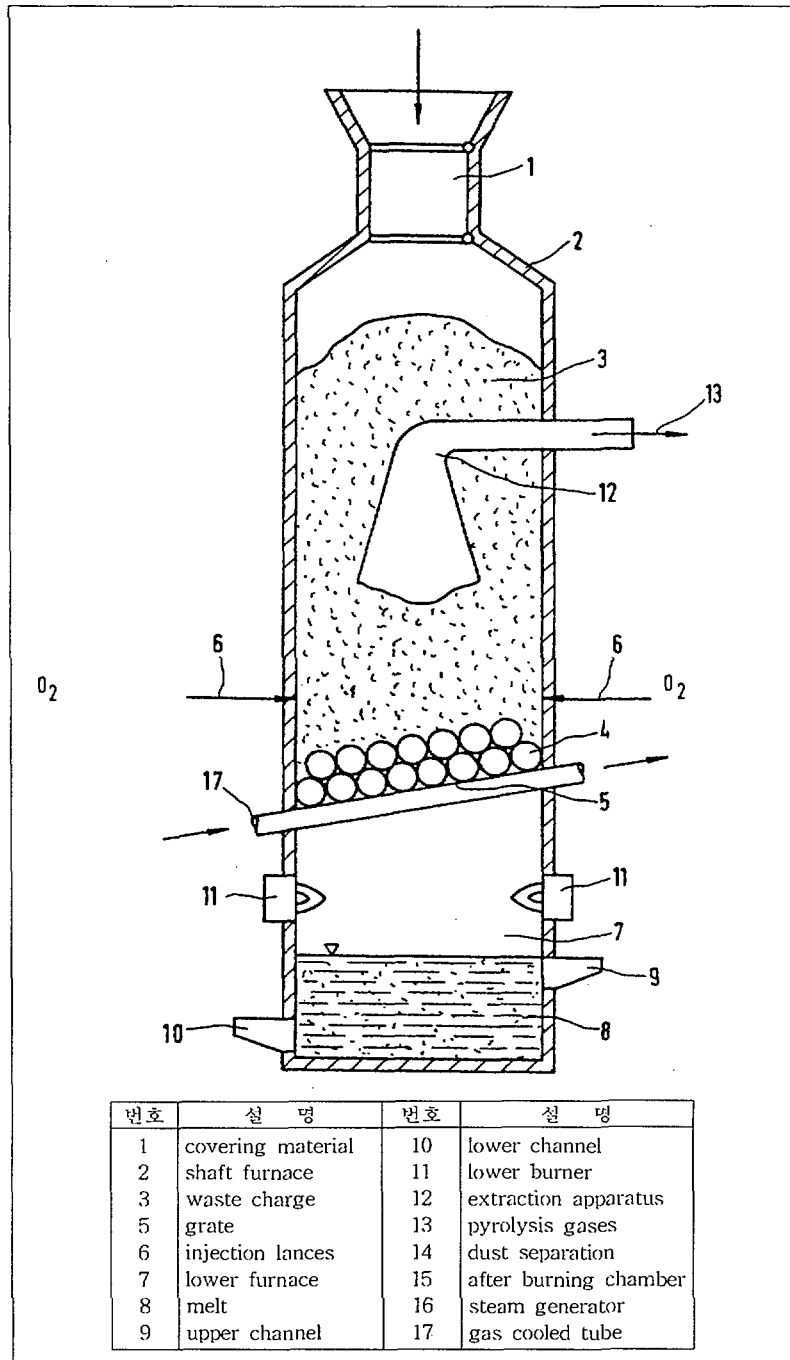
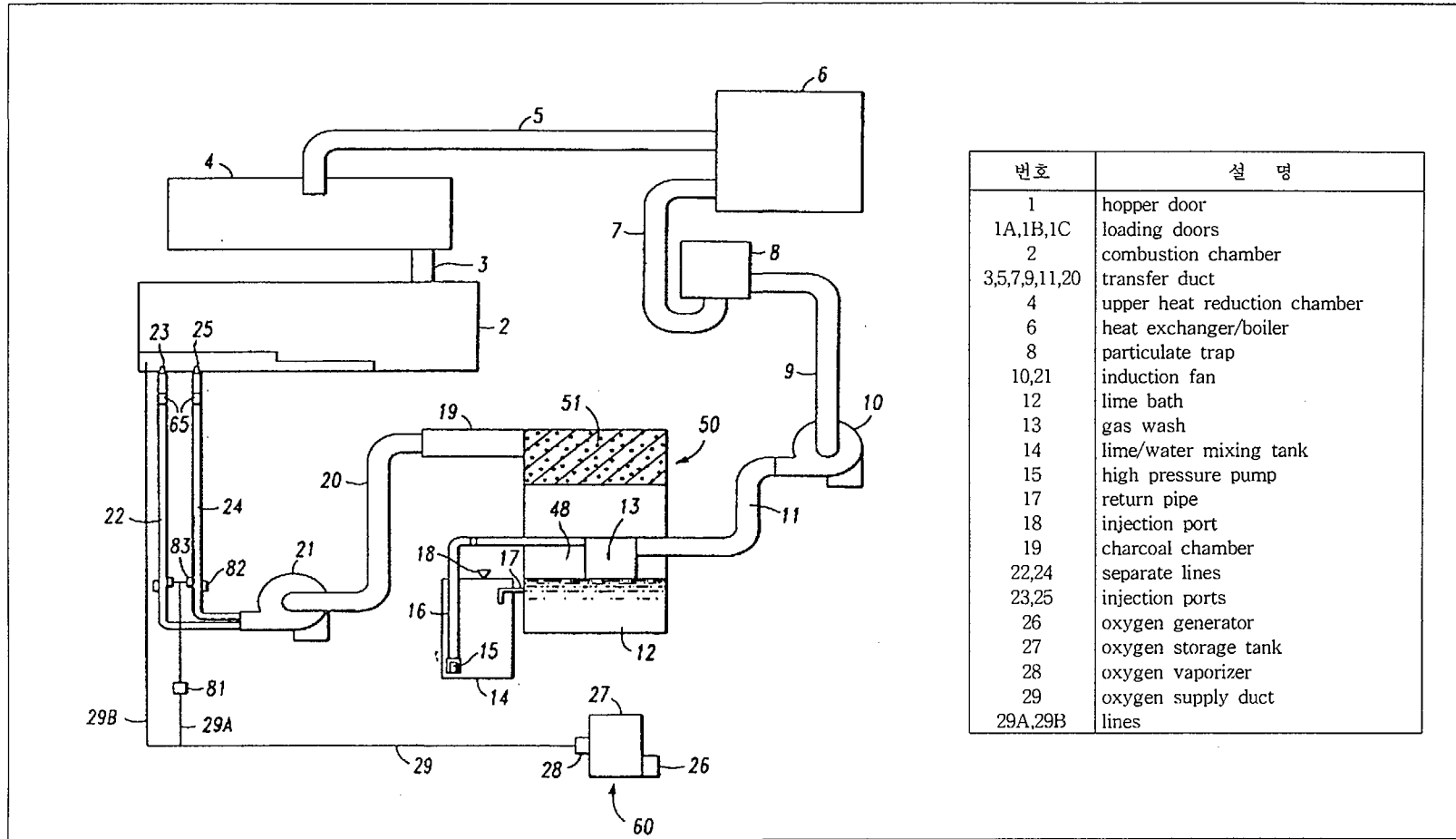


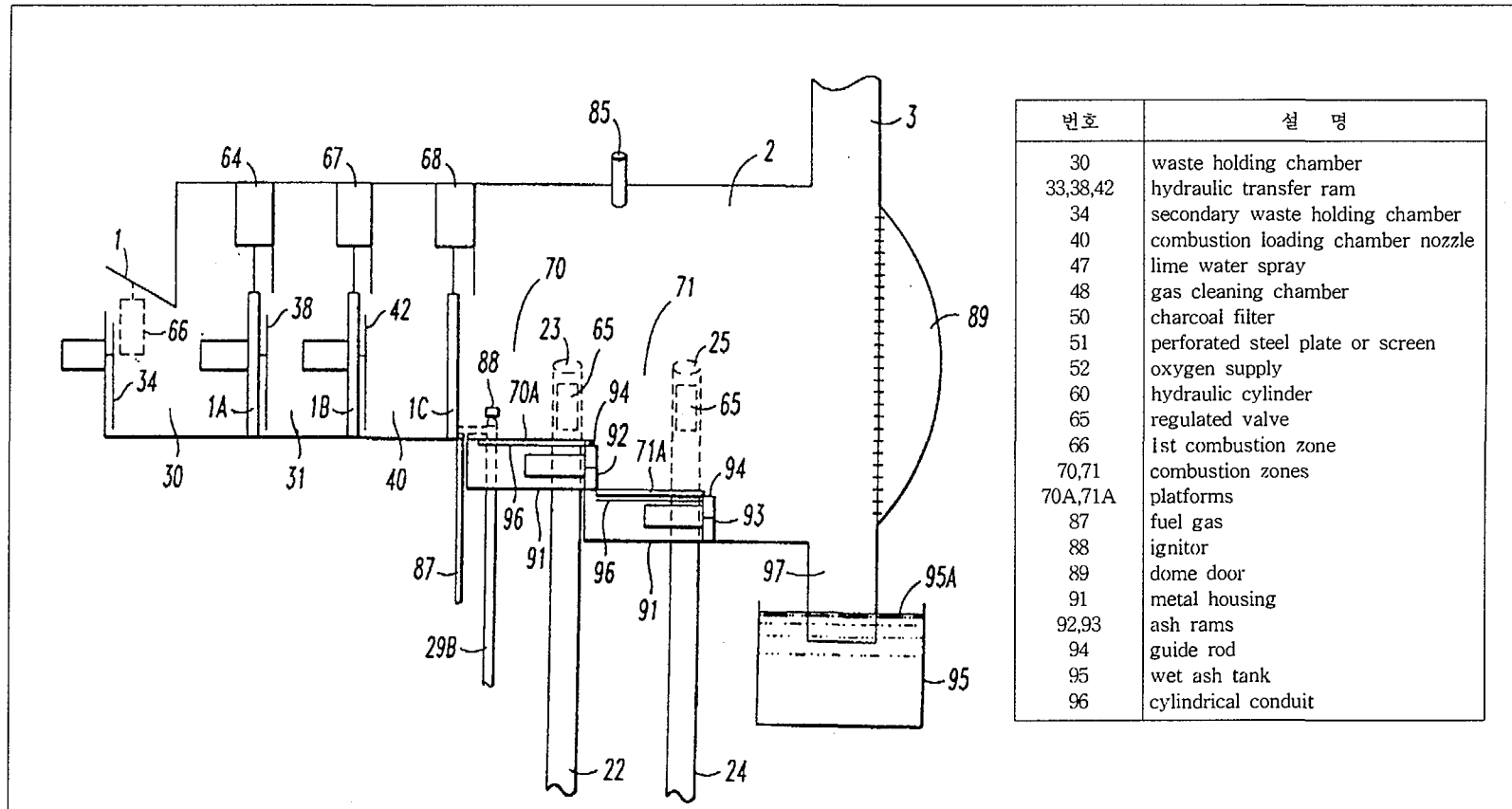
그림 30. 수직원통형 산소부화 소각공정

산소로 부화시켜 연소실로 재순환시킴으로 오염물질을 배출하지 않는 소각공정 및 장치에 관한 특허로 그림 31, 32에 공정도 및 연소실 구조를 보였다.



번호	설 명
1	hopper door
1A,1B,1C	loading doors
2	combustion chamber
3,5,7,9,11,20	transfer duct
4	upper heat reduction chamber
6	heat exchanger/boiler
8	particulate trap
10,21	induction fan
12	lime bath
13	gas wash
14	lime/water mixing tank
15	high pressure pump
17	return pipe
18	injection port
19	charcoal chamber
22,24	separate lines
23,25	injection ports
26	oxygen generator
27	oxygen storage tank
28	oxygen vaporizer
29	oxygen supply duct
29A,29B	lines

그림 31. 산소부화기술을 적용한 무배출 소각공정도



번호	설 명
30	waste holding chamber
33,38,42	hydraulic transfer ram
34	secondary waste holding chamber
40	combustion loading chamber nozzle
47	lime water spray
48	gas cleaning chamber
50	charcoal filter
51	perforated steel plate or screen
52	oxygen supply
60	hydraulic cylinder
65	regulated valve
66	1st combustion zone
70,71	combustion zones
70A,71A	platforms
87	fuel gas
88	ignitor
89	dome door
91	metal housing
92,93	ash rams
94	guide rod
95	wet ash tank
96	cylindrical conduit

그림 32. 산소부화기술을 적용한 무배출 소각공정의 연소실 구조

제 2 절 국내 특허

1. 산소부화 폐기물 소각 공정 [39]

공기를 산소/질소로 분리하는 기능을 지닌 실리콘 고분자막 (막 두께는 $4,000\text{\AA} \sim 1\mu\text{m}$)을 이용하여 산소량이 증대된 공기를 만든 후 이를 소각로에 송풍하여 폐기물의 연소작용을 완전 연소가 되도록 한 기술이다.

2. 쓰레기 소각 및 용해처리 공정 [40]

산소농도가 50% 이상인 산소부화공기를 산소버너에 공급하여 폐기물을 약 $800 \sim 1,200^\circ\text{C}$ 에서 소각하여 재료 만드는 작업을 행한 후 잔재물로 남은 소각재를 $1,600^\circ\text{C}$ 이상의 고온에서 용해하여 유리화하는 회전식 소각 기술이다. 산소버너와 연소실을 자유롭게 개폐 또는 회전할 수 있는 구조를 가지고 있는 것이 특징이다.

3. 산소 렌스를 구비한 다단로상 소각공정 [41]

미국 Praxair사가 한국에 특허를 출원, 등록된 기술로 제 3장의 6에 이미 기술한 것[28]과 동일한 기술이다. 주로 습윤 슬러지를 소각하는데 이용되고 있으며, 산소 렌스를 구비한 다단로상 소각로를 그림 33에 실었다.

4. 코오롱엔지니어링의 산소부화 소각공정 [42]

막분리법에 의해 산소농도가 22~40%인 산소부화공기를 생성시키고 이를 연소공기로 소각로에 공급함으로써 보다 안정적이고 경제적인 소각이 되도록 한 기술이다. 자세한 연구내용은 참고문헌 12에 잘 언급되어 있으며 그 공정도를 그림 34에 보였다.

5. 산소부화 폐기물 소각 [43]

순 산소에 연소 후 발생하는 순도 98%이상의 탄산가스 일부를 혼합하

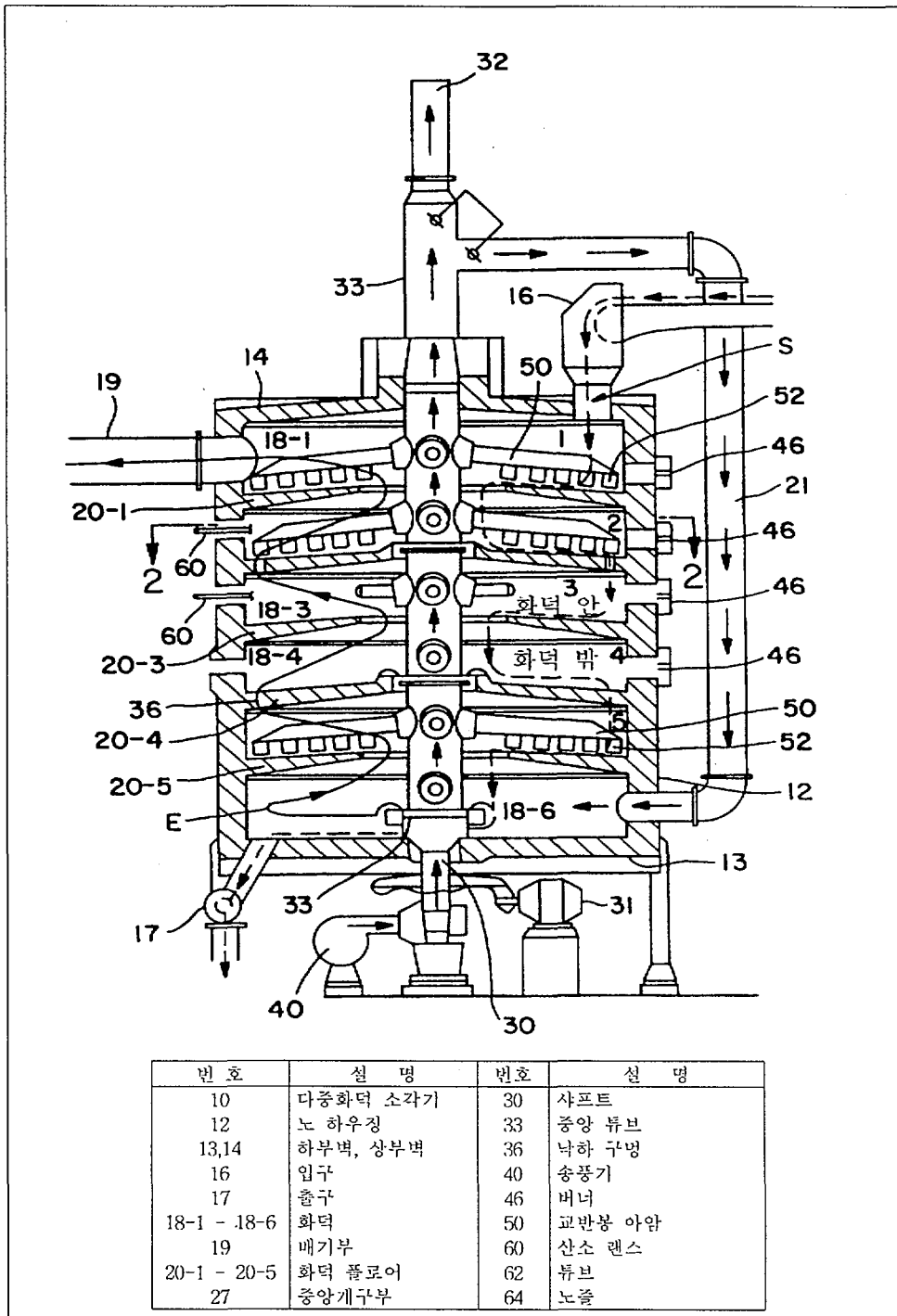


그림 33. 산소렌스를 구비한 다단로상 소각로

여 만든 산소농도 30~80%의 산소부화 기체를 사용하여 그림 35와 같은 일차 부분산화 소각로에서 폐기물을 열분해, 연소 및 용융하도록 고안한 기술이다. 연소 후 생성되는 기체는 정제과정을 거친 후 일부는 연소로로 순환하여 산소와 혼합하여 사용하고 나머지는 액체탄산이나 요소비료 등의 제조용 원료로 재활용하며 최종 잔류 탄산가스는 방출 또는 재활용하는 기술이다. 여러 가지 이론과 이상적인 연소반응 및 소각공정에 근거하여 고안한 기술로 실증 및 실용화가 필요하다.

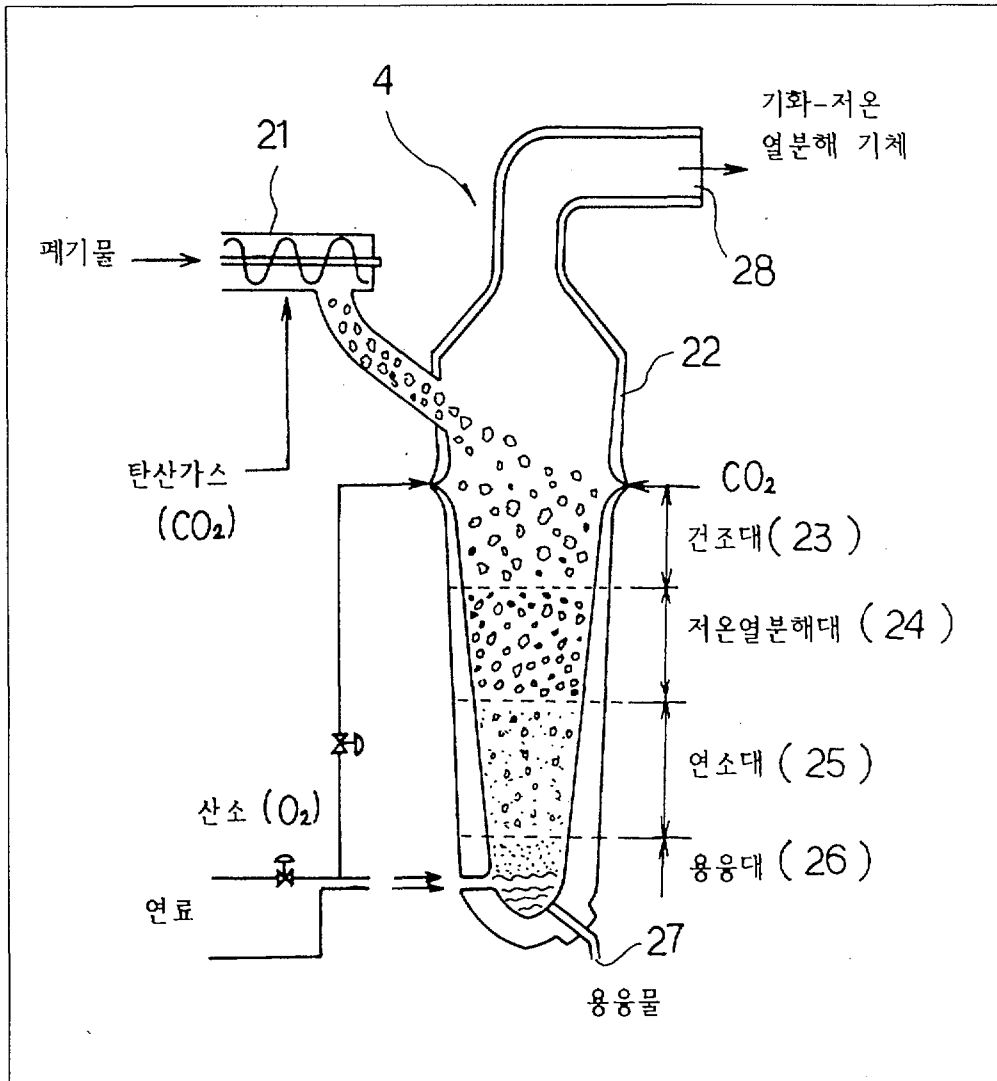


그림 35. 산소부화기술을 이용한 1차 소각로

제 3 절 산소버너 관련 특허

산소부화 연소는 반응에 필요한 산화제로 공기 대신에 순 산소나 산소 부화시킨 공기 또는 기체를 이용함으로써 1) 주어진 버너 용량에서 연소 속도를 최대로 증가시키고, 2) 연료 소비를 줄이며, 3) 대기 오염 물질의 배출을 줄이는 장점을 갖고 있다. 반면에, 화염온도가 너무 높아 내화재에 손상을 가져오는 화염 주위의 “과열부 (hot spots)” 문제와 질소산화물의 생성 증가라는 단점을 안고 있다. 특히, 후자의 경우 산화제로 순 산소를 사용하더라도 공업용으로 운전될 정도의 규모의 소각공정에서는 질소가 포함된 공기의 유입을 완전히 배제시키기 거의 불가능하므로 질소산화물의 배출량은 규제치 이상으로 배출된다. 그 외에도 버너로 유입되는 기체량이 줄어들어 연소로 내 기체 운동량 (gas momentum)이 작아지고 따라서 혼합 및 순환 속도가 감소하게 된다. 이로 인해 효율적인 열전달, 균일한 가열 및 부분적인 과열부 생성을 피하기 어렵게 된다.

최근 Union Carbide사는 순 산소를 사용하는 산소버너에 유입되는 산소 및 연료의 혼합을 제어함으로써 질소산화물의 생성을 매우 낮게 유지할 수 있는 저 NO_x발생 산소버너를 개발, 특허로 등록하였다[44-46].

1. 버너 특성 및 동작 원리

Union Carbide사에서 1983년도에 처음 특허를 신청한 저 NO_x발생 산소버너의 동작 원리는 그림 36과 같이 밀폐된 연소로에 위치한 산소버너 중심부의 연료 배출 노즐 주위에 보다 작은 직경을 가진 산소 배출용 노즐 여러 개를 설치하여 연료와 산소가 혼합되기 전에 고속의 흡인기류 (aspiration)를 발생시키게 한 것이다. 이렇게 고속의 흡인기류에 의해 연소생성가스가 산소 제트기류로 흡인, 혼합되어 공기를 사용하는 일반 버너에서 질소가 담당한 역할 즉, 가스 혼합 및 순환에 필요한 질량의 확보와 연소반응에서 희석제로서 화염온도를 낮추는 역할을 하게 된다. 실제로

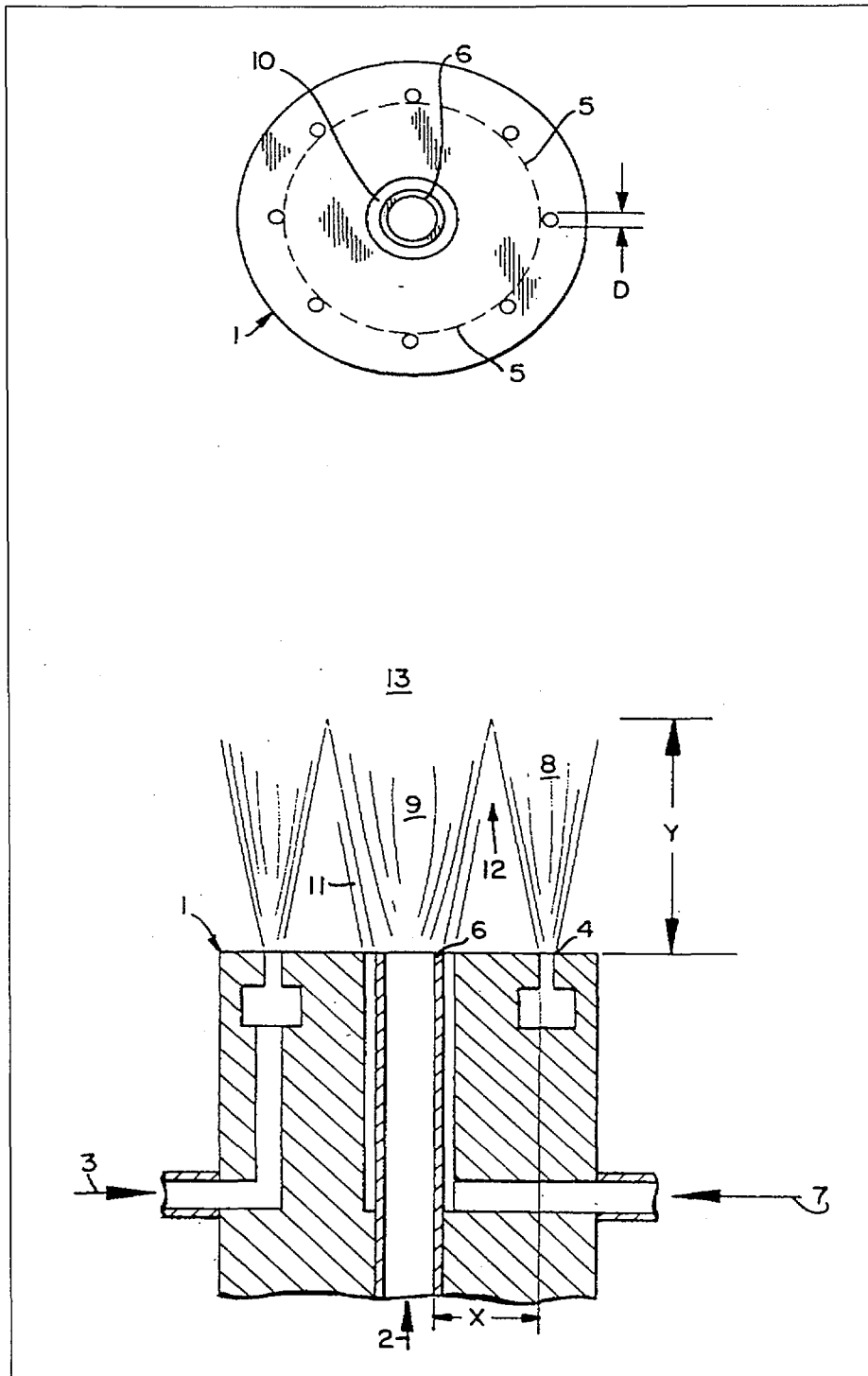


그림 36. Union Carbide사의 산소버너 단면도

연소로내의 화염온도는 산소농도와 연소생성가스가 재순환되는 비, R에 따라 그림 37과 같이 내려감을 알 수 있다. 여기서 R은

$$R = \frac{\text{연료와 혼합되기 전에 산소로 흡인되는 연소가스의 양}}{\text{산소와 연료를 합한 양}}$$

으로 정의된다.

산소 제트기류로 흡인되는 연소생성가스의 양은 로내의 효율적인 혼합과 기체의 순환에 충분하고 화염온도를 NO_x 생성이 최소가 되며 부분 과열이 발생하지 않도록 할 정도의 양이 되어야 한다.

공기/연료 버너계통의 경우 버너에서 산화제의 유속은 통상 15~30 m/s 정도이다. 순 산소를 산화제로 사용하여 공기/연료 버너계통에서와 동일한 모멘트를 얻으면서 연료를 50% 절약하기 위해서는 산소의 유속은 140~290 m/s 정도가 되어야 한다. 따라서 일반 공기/연료 계통 이상의 모멘트를 얻으려면 최소 150 m/s, 바람직하게는 240 m/s 이상이 되어야 한다. 이상적인 유속 범위는 140~300 m/s 이다.

2. NO_x 발생량

표 23과 같은 조성과 열량을 가진 천연가스를 버너 연료로 사용하여 본 특허 내용대로 제작한 '산소흡인버너 (oxygen aspiration burner)'와 일반 소용돌이 버너 (swirl burner)에 대해 질소산화물 생성량을 산소농도에 따라 비교하여 그림 38에 보였다.

표 24에 보통 소용돌이 버너를 이용하여 밀폐된 공간에서 산소부화 공기를 사용할 때 산소농도에 따라 NO_x의 생성량을 나타내었다. 공기를 산화제로 사용할 경우 일반 공기/연료 버너의 NO_x 발생량은 산소농도가 90%가 될 때까지 증가하고 있는데, 이는 화염온도의 증가가 질소산화물의 생성반응 및 평형을 증가시키기 때문이다. 산소농도가 90%이상 100% 구간에서는 질소산화물 생성에 필요한 질소의 농도가 적어지므로 NO_x 발생량 역시 감소한다. 공업용 연소로에서는 일반 공기버너에 순 산소를 산

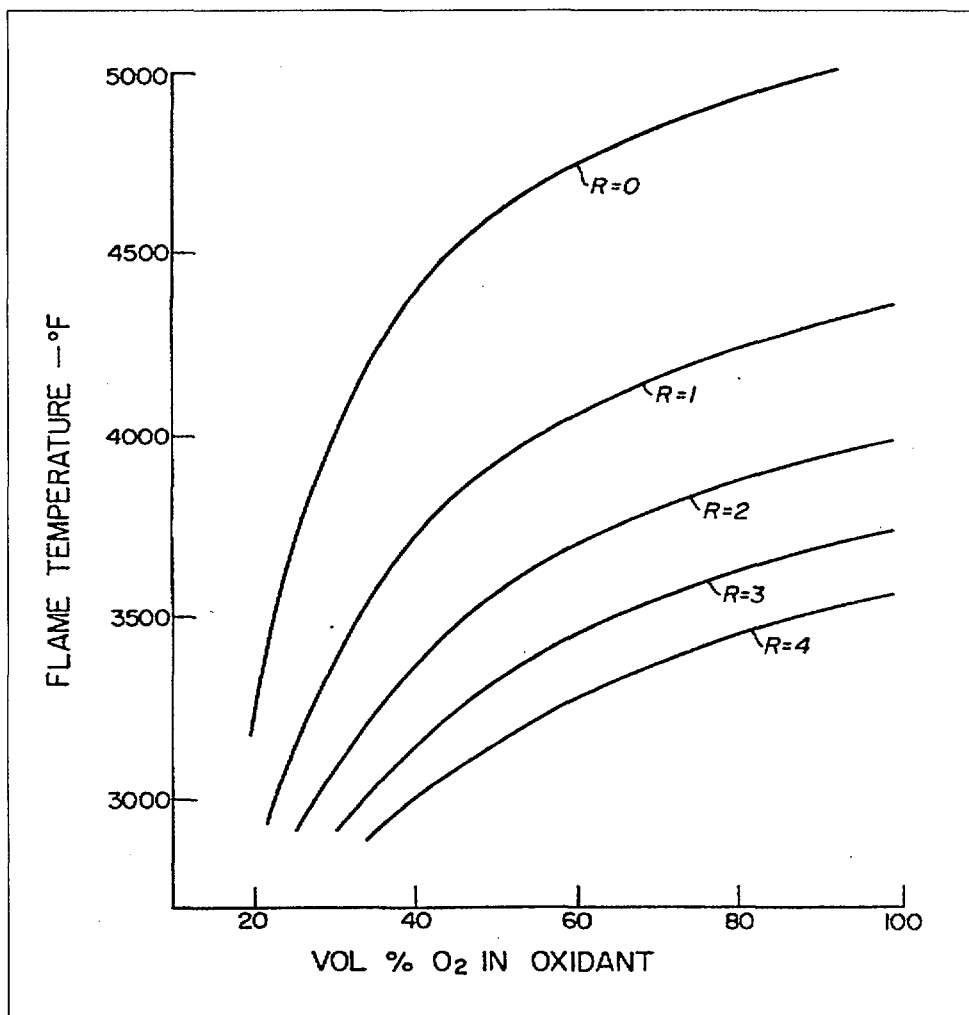


그림 37. 연소가스 순환비에 따른 단일화염온도 변화

표 23. 산소버너의 연료로 사용된 천연가스 특성

가스 조성		부피 %
CH ₄		96.0
C ₂ H ₆		1.6
N ₂		1.6
O ₂		0.3
C ₃ H ₈		0.3
C ₃ H ₆		0.1
i-C ₄ H ₈		0.1
열량	MMBtu (lb-mole)	BTU (ft ³ at 60°F)
(Gross)	0.383	1010
(Net)	0.346	910

표 24. 일반 공기버너의 NO_x 생성량

산화제중 산소의 부피%	연소생성가스중 질소산화물 Lbs/MMBtu
21	0.044
30	0.19
90	0.41
100	0.10

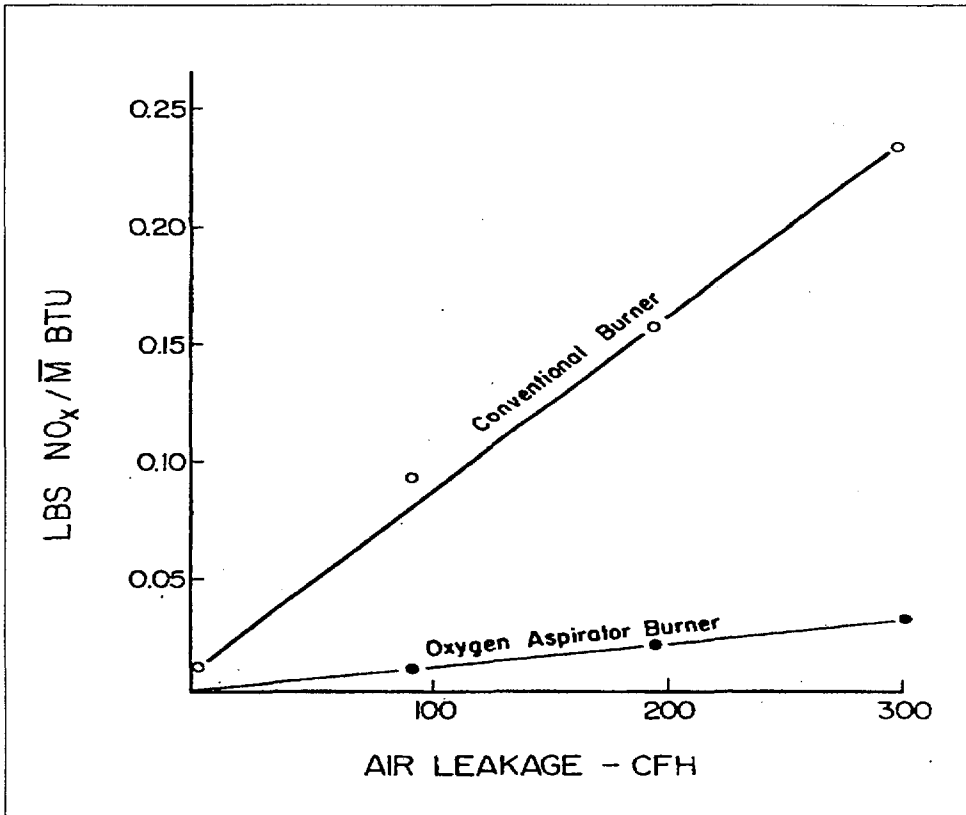


그림 38. 산소흡인버너와 일반 버너의 질소산화물 생성량 비교

화제로 사용할 경우 연소로 내로 유입되는 공기 때문에 밀폐된 상태에서 얻은 표 24의 산소농도 90%에서 발생하는 NO_x 발생량과 같은 정도로 많이 질소산화물이 생성된다. 이러한 예는 본 특허기술로 제조된 Linde A 버너를 포함한 4가지의 서로 다른 버너를 이용하여 산소농도를 변화시키면서 연소시킬 때 NO_x 발생량을 비교한 그림 39 [5, 47]에서도 알 수 있다.

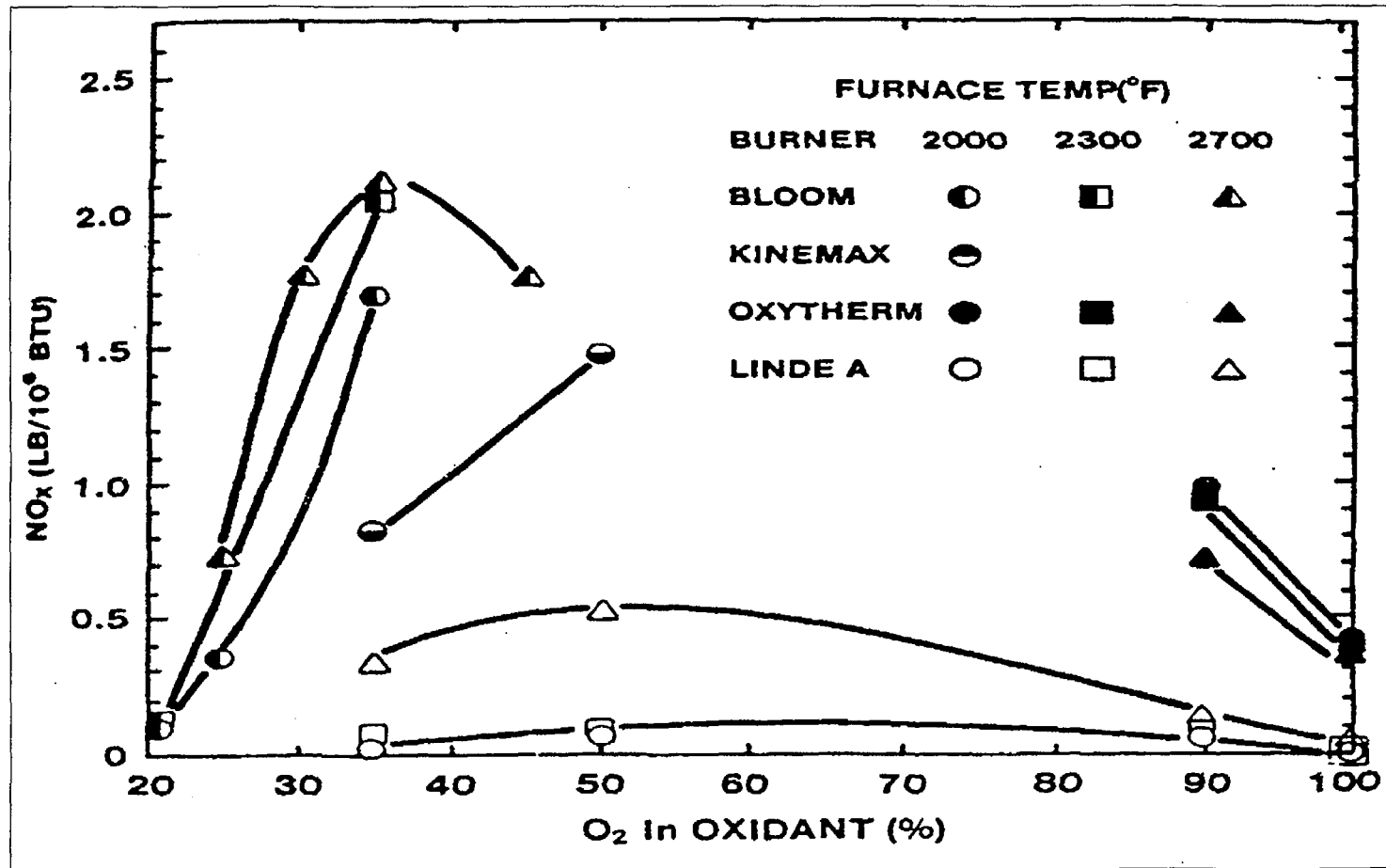


그림 39. 산소농도에 따른 버너의 질소산화물 생성량 비교

제 5 장 결론 및 건의사항

제 1 절 결 론

산소부화기술(酸素富化技術)에 의한 알파폐기물 소각 가능성을 파악하기 위한 자료 수집, 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 산소부화소각은 기존의 공기를 산화제로 사용한 소각에 비해 산소농도가 증가함에 따라 아래와 같은 긍정적인 효과가 발생한다.
 - 가. 소각온도의 상승으로 연소효율 증가 및 소각성능이 개선되어 유해 및 독성 폐기물 소각처리에도 적합하다.
 - 나. 비반응성 질소가 감소한 만큼 배기체 발생량이 감소함으로 분진의 동반이월이 감소하고 배기체 처리설비의 축소를 가져온다.
 - 다. 배기체 발생량의 감소로 배기체 중 대기오염물질의 순간농도는 높아지나 총괄 발생량은 감소하여 보다 효율적으로 배기체를 처리할 수 있다.
 - 라. 배기체와 함께 외부로 배출되는 열량이 적어 보조연료가 절감된다.

2. 순 산소를 이용하여 폐기물을 소각할 경우 아래와 같은 사항을 고려하여야 한다.
 - 가. 산소만을 사용하는 경우 화염온도가 너무 높아 직접 화염을 받는 부분의 과열, 용융되는 현상을 막기 위해 연소가스의 재순환이 필요하다.
 - 나. 질소산화물의 생성이 증가하는 것을 막기 위해 외부에서 유입되는 공기가 최소가 되도록 밀봉에 주의하며, 산소버너는 저 NO_x 발생 버너를 사용한다.

다. 연료의 인화성 한계가 넓어짐으로 인한 화재 및 폭발 가능성을 최소화 하기 위해 연소실내 산소의 축적이 없도록 설계한다.

이상과 같은 결과를 종합하면, 방사성폐기물을 소각함에 있어 산소부화 기술을 적용하면 배기체 발생량이 크게 감소하여 배기체 처리설비의 축소 및 효율성 제고가 가능하며, 따라서 핵종의 외부 유출 가능성이 크게 줄게 되므로 향후 알파폐기물 소각기술 개발에 적용할 경우 매우 유용한 기술로 판단된다.

제 2 절 건의사항

최근에 기술개발이 진행되고 있는 산소부화기술은 기존의 공기를 이용하는 소각공정이 안고 있는 문제점 즉, 폐기물에 함유된 유해 및 독성 성분의 불완전한 분해처리를 개선하는데 중점을 두고 이루어지고 있다. 이렇게 기존의 소각공정을 유지하면서 산소부화를 적용하기 위해서는 산소랜싱이나 연소공기의 일부를 산소로 대체하는 것과 같은 비교적 저 농도 산소조건에서만 가능한데, 이는 기존 소각공정의 구조물이나 내화물 등에 의해 제한되기 때문이다.

따라서 산소부화기술의 효과를 최대화하기 위해서는 고 농도 산소부화 영역에서도 소각계통에 손상이 없이 연소가 이루어지도록 구조물의 재질 선정부터 다시 설계되어야 한다. 이러한 고 농도 산소부화기술은 주로 국내의 특허에서 산소버너의 활용 및 배기체의 재순환 등의 개념으로 구체화되어 있으나, 아직 파이롯트 또는 실증규모로 제작되어 운전되지 않은 상태이다.

베타/감마 방사성폐기물 소각공정을 개발에 이어 알파핵종의 누출방지 기능이 우선적으로 요구되는 알파폐기물 소각기술을 개발하는 현 시점에서 배기체의 발생량을 크게 줄이는 산소부화소각기술의 적용은 매우 필요한 기술로 판단된다. 그러나 이 기술은 아직 연구개발의 초기단계이므로 연소공정의 개발 못지 않게 산소부화소각 배기체의 특성화, 소각공정의 온도특성, 구조물 재질선정, 안전성 평가 등과 같은 보다 체계적이고 광범위한 연구가 필요하다.

제 7 장 참고문헌

1. International Atomic Energy Agency, "The Management of Radioactive Wastes Produced by Radioisotope Users", Safety Series No. 12, Vienna (1965).
2. International Atomic Energy Agency, "The Management of Radioisotope Wastes Produced by Radioisotope Users", Safety Series No. 19, Vienna (1966).
3. International Atomic Energy Agency, "Treatment of Off-Gas from Radioactive Waste Incinerators", Technical Reports Series No. 302, Vienna (1989).
4. Lee, C.C. *et al.*, "Innovative Thermal Destruction Technologies", Pub. in CRC Handbook of Incineration of Hazardous Wastes, Chap. 7, pp.256-292 (1991).
5. Ho, M.-D., Ding, M.G., "The Use of Oxygen in Hazardous Waste Incineration; A State-of-The-Art Review", Proc. 3rd International Conf. on New Frontiers for Hazardous Waste Management, 10-13 Sep., 1989, Pittsburgh, USA, pp.285-305(1989).
6. Journal Article, "Oxygen Enrichment Enhances Performance of Hazardous Waste Incinerators and Cement Kiln", Hazardous Waste Consultant, vol. 13, No. 1, pp. 1.12- 1.19 (1995).
7. Acharya, P. and Schafer, L.L., "How to Select an Oxygen-Based Combustion System for Rotary Kiln-Based Hazardous Waste Incinerators", Proc. of the 1994 International Incineration Conf., Houston, Texas, USA, pp. 403-412 (1994).
8. Acharya, P. and Schafer, L.L., "Consider Oxygen-Based

- Combustion for Waste Incineration", Chemical Eng. Progress, March, pp. 55-62 (1995).
9. Niehoff, T., Dudill, R, and Baukal, C.E., "Oxygen Lancing to Improve Municipal Solid Waste Incineration", Proc. of the 1996 International Incineration Conf. on Incineration and Thermal Treatment Tech., Savannah, Georgia, USA, pp. 527-530 (1996).
 10. Bomelburg, H.J., "Efficiency Evaluation of Oxygen Enrichment in Energy Conversion Processes", PNL-4917, Pacific Northwest Laboratory, 1983.
 11. Weast, R.C., *et al.*, Handbook of Chemistry and Physics", 70th Ed., CRC Press (1989).
 12. "KAOS 소각로: 산소부화공기를 이용한 폐기물 소각로", 코오롱건설 주식회사 & 코오롱엔지니어링주식회사(1999).
 13. Baukal, C.E., Romano, F.J., and Moore, G.L., "Waste Incineration Performance Improvements with Oxygen-Enriched Combustion", Proc. of Fossil Fuel Combustion, Houston, TX, 26-30 Jan., 1992, American Society of Mechanical Engineers, pp. 1-6 (1992).
 14. Bakker, P., "New Enriched Air Fuel Combustion Technologies", Conf. 24th Annual CIM Hydrometallurgical Meeting and 33th Annual Conf. of Metallurgists of the Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum: Impurity Control and Disposal in Hydrometallurgical, Toronto, Aug. 21-25, 1994, pp.177-189 (1994).
 15. 기문봉 외, "폐기물 소각 처리기술 실무", 환경관리공단 (1993).
 16. Murzyn, P.J., Ho, M., and Romano, L. Jr. "Oxygen-Enhanced Hazardous Waste Incineration: A Detailed Discussion of the Technology and Economics", Conf. of Hazardous Materials

- Control/Superfund '91, Dec. 3-5 1991, Washington DC, USA, pp. 416-418 (1991).
17. Linak, W.P., *et al.*, "Rotary Kiln Incineration: The Effect of Oxygen Enrichment on Formation of Transient Puffs During Batch Introduction of Hazardous Wastes", Proc. 14th Annual Research Symposium on Land Disposal, Remedial Action, Incineration and Treatment Hazardous Waste, USEPA, Cincinnati, Ohio, USA, 1988.
 18. Beaudoin, P. *et al.*, "The Use of Pure Oxygen in Incineration Processes, Laboratory and Pilot-Scale Experiments, Modeling, and Industrial Applications", Proc. of the 1994 International Incineration Conf., Houston, Texas USA, pp. 419-423 (1994).
 19. Shahani, G.H., *et al.*, "Oxygen enrichment for waste combustion", Proc. of the 1994 International Incineration Conf., Houston, Texas US, pp. 425-429 (1994).
 20. Shahani, G.H., *et al.*, "Intensify Waste Combustion with Oxygen Enrichment", Chemical Eng. Progress, February, pp. 18-24 (1994).
 21. 眞田雄三, 鈴木基之, 藤元 薫 편, (박영태 역), "활성탄: 기초와 응용", 동화기술, pp. 185-196, 1992.
 22. Joshi, S.V., "Oxygen Enriched Air/Natural Gas Burner System Development; Annual Report July 1984-June 1985", GRI-85/0172, Gas Research Institute, Chicago, IL, USA (1985).
 23. Werly, B.L., "Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen Enriched Atmospheres", ASTM Special Technical Publication 812, (1982).
 24. Komamiya, K, "Fire and Explosion of Oxygen-Enriched Atmosphere", 安全工學, vol. 37, 122 (1998).

25. Stevenson, E.M., Batdorf, J.A., and Logan, J.A., "The Effect of Oxygen Enrichment on the Capacity, Emissions, and Ash Quality of a Controlled Air Incinerator", Proc. of the 1994 International Incineration Conf., Houston, Texas US, pp. 413-417 (1994).
26. Milosavljevic, I., *et al.*, "Combustion Improvements for the Environment in MSW Incineration", Proc. of the 1998 International Conf. on Incineration and Thermal Treatment Technologies, Salt Lake City, Utah, USA, pp.283-286 (1998).
27. Milosavljevic, I. and Pullumbi, P., "Dioxins and Furans in Incineration: Experimental and Modeling Study", Proc. of the 1999 International Conf. on Incineration and Thermal Treatment Technologies, Orlando, Florida, USA (1999).
28. Leger, C.B., "Oxygen Injection for Multiple Hearth Sludge Incinerators", Proc. of the 1998 International Conf. on Incineration and Thermal Treatment Technologies, Salt Lake City, Utah, USA, pp.537-544 (1998).
29. Henrich, E., Burkle, S., and Rumpel, S., "Waste Char Combustion in Oxygen Enriched Air", Proc. of the 1999 International Conf. on Incineration and Thermal Treatment Technologies, Orlando, Florida, USA (1999).
30. Robertson, R.R., *et al.*, "Oxygen Enrichment for MACT Compliance at Dupont Laporte Central Scrubbed Incinerator", Proc. of the 2000 International Conf. on Incineration and Thermal Treatment Technologies, Portland, Oregon, USA (2000).
31. Niehoff, T.B., Dudill, R., and Baukal, C.E., "Oxygen for Thermal Waste Processing", Proc. of the 1998 International Conf. on Incineration and Thermal Treatment Technologies, Salt Lake City,

- Utah, USA, pp.575-578 (1998).
32. Sorensen, L.E., "Process for the Incineration of Combustible Materials", US Patent No.4762074 (1988).
 33. Goff, S.P., *et al.*, "Solid Waste-to-Steam Incinerator Capacity Enhancement by Combined Oxygen Enrichment and Liquid Quench", US Patent No.5052310 (1991).
 33. Abboud, H.I., and Efferson, C.E., "Closed Loop Incineration Process", US Patent No.5179903 (1993).
 34. *ibid*, US Patent No.5402739 (1995).
 35. Abboud, H.I., "Fuel Gas from Incineration Process", US Patent No. 5450801 (1995).
 36. Downs, W., *et al.*, "Incineration of Hazardous Wastes Using Closed Cycle Combustion Ash Vitrification", US Patent No. 5309850 (1994).
 37. Gross, G., and Lichtmann, F., "Process and Apparatus for Waste Incineration", US Patent No. 5505145 (1996).
 38. Whaley, C.W., "Process and Apparatus for Ventless Combustion of Waste", US Patent No.5678498 (1997).
 39. 이형근, "공기의 산소분리공급에 의한 폐기물의 소각기술", 등록특허 제 0148509호 (1998).
 40. 니시야마 신로쿠, "쓰레기 소각 및 용해처리 방법과 그 방법에 사용하는 처리장치", 등록특허 제 0154364호 (1998).
 41. 프락스에어 테크놀로지, "산소 랜스를 구비한 다중 화덕 노와 그 작동 방법", 공개특허 제 1998-033121호 (1998).
 42. 코오롱 주식회사, "산소부화공기를 이용한 소각처리방법과 그 장치", 등록특허 제 10-0239180호 (1999).
 43. 송석목, "산소부화 폐기물 소각장치 및 소각방법", 공개특허 제

2000-0013513 \bar{x} (2000).

44. Anderson, J.E., "Oxygen Aspirator Birner and Process for Firing a Furnace", US Patent No. 4378205 (1983).
45. *ibid*, "Oxygen Aspirator Burner for Firing a Furnace", US Patent No. 4541796 (1985).
46. *ibid*, "Oxygen Jet Burner and Combustion Method", US Patent No. 4907961 (1990).
47. Kwan, Y. *et al.*, "Oxygen Enriched Combustion System Performance Study : Volume III - Burner Tests and Combustion Modeling", US DOE Report No. DOE/ID/12597-2, Energy and Environmental Research Corporation and Union Carbide Corporation Linde Division, (1988).

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드
KAERI/AR-573/2000			
제목 / 부제	산소부화 소각기술		
연구책임자 및 부서명 (AR,TR 등의 경우 주저자)	김 정 국 (핵화학연구팀/ 알파폐기물 소각.고화기술개발 분야)		
연구자 및 부서명	양희철, 박근일, 김준형 (핵화학연구팀/ 알파폐기물 소각.고화기술개발 분야)		
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소
페이지	122 p.	도표	있음(○), 없음()
참고사항			
비밀여부	공개(○), 대외비(), — 급비밀	보고서종류	기술현황분석보고서
연구위탁기관		계약번호	
초록 (15-20줄내외)	<p>산소부화연소기술은 최근 폐기물 소각에 많이 이용되고 있는 기술로, 이를 현재 개발중인 알파폐기물 소각공정에 적용하기 위하여 산소부화 소각기술에 대한 기술현황을 분석하였다. 기존의 공기를 사용하는 것에 비해 산소 또는 산소부화 공기를 이용할 경우 연소효율 및 소각처리용량 증가, 배기체 발생 감소 효과를 기대할 수 있다. 특히, 배기체 발생량은 4분의 1이하로 감소시킬 수 있어 배기체 처리설비의 축소 및 처리 효율성 제고 효과를 가져올 수 있을 것으로 분석되었다. 그러나 순 산소를 사용하는 경우 과열부 생성 및 질소산화물 발생 증가 문제도 예상되는 바, 이를 해결하기 위해 질소산화물을 적게 발생시키는 산소버너의 사용 및 배기체 일부를 연소실로 재순환하는 것이 필요하다.</p>		
주제명 키워드 (10단어내외)	산소부화, 소각, 방사성폐기물, 배기체, 질소산화물, 산소버너		

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET

Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.		INIS Subject Code	
KAERI/AR-573/2000							
Title / Subtitle		Oxygen Enrichment Incineration					
Project Manager and Department (or Main Author)		Jeong-Guk Kim (Nuclear Chem. Eng. Research Team)					
Researcher and Department		Hee-Chul Yang, Geun-Il Park, Joon-Hyung Kim (Nuclear Chem. Eng. Research Team)					
Publication Place	Taejon	Publisher	KAERI	Publication Date	2000		
Page	122 p.	Ill. & Tab.	Yes(O), No ()	Size	Cm.		
Note							
Classified	Open(O), Restricted(), ___ Class Document		Report Type	A-state-of-the-art			
Sponsoring Org.				Contract No.			
Abstract (15-20 Lines)		<p>Oxygen enriched combustion technology has recently been used in waste incineration. To apply the oxygen enrichment on alpha-bearing waste incineration, which is being developed, a state-of-an-art review has been performed. The use of oxygen or oxygen-enriched air instead of air in incineration would result in increase of combustion efficiency and capacity, and reduction of off-gas product. Especially, the off-gas could be reduced below a quarter, which might reduce off-gas treatment facilities, and also increase an efficiency of off-gas treatment. However, the use of oxygen might also lead to local overheating and high nitrogen oxides (NOx) formation. To overcome these problems, an application of low NOx oxy-fuel burner and recycling of a part of off-gas to combustion chamber have been suggested.</p>					
Subject Keywords (About 10 words)		Oxygen-enrichment, Incineration, Radwaste, Off-gas, Nitrogen oxides, Oxy-fuel burner					