

可燃性 廢棄物의 가스化에 關한 研究

鄭 竣 和

건국대학교 환경공학과

A Study on the Gasification of Combustible Waste

Jun Hwa Jung

Dept. of environmental engineering Kon-Kuk University

ABSTRACT

This study was investigated to the energy recovery by the pyrolysis of waste tyre. the pyrolysis of the waste tyre was made by using the pyrolysis chamber for the gasification and the combustion chamber for the combustion of the pyrolysis gas. In batch system, the amount of waste tyre was put 150kg in the pyrolysis chamber and the proper air flow rate for the stable production of the pyrolysis gas was $0.95\text{Nm}^3/\text{min}$. the production time of the pyrolysis gas was stable above 210minutes, and the stable production rate was above $3.8\text{Nm}^3/\text{min}$. The production temperature of pyrolysis gas was 170°C and combustion temperature of pyrolysis gas was $1,000^\circ\text{C}$. The combustible component of washing gas in pyrolysis gas of waste tyre was CO , CH_4 , C_2H_6 and C_3H_8 , and total amount was 22.7%. Heat value of condensed material was $9,804\text{Kcal}/\text{kg}$. The average concentration of air pollutants between cyclone and scrubber was CO 420.4ppm, SO_x 349.8ppm, NO_x 68.5ppm, HCl 24.4ppm and Dust $240.0\text{g}/\text{Nm}^3$, respectively.

I. 緒 論

産業革命 以後 發展을 持續해은 近代産業은 今世紀 後半에 이르러 集中化, 大型化 하여 大量生産, 大量消費의 技術體系를 이룩하였다. 그 結果 物質은 豊요하고 生活은 便利하게 되었으나 한편으로는 그 技術體系 自體의 메카니즘에 따라 發生한 莫大한 廢棄物은 人間生命에 危險을 줄 만큼 環境을 汚染시켰고, 또한 公害問題로 社會에 深刻한 問題를 發生시키는데 까지 이르렀다.¹⁾

특히 極小한 國土에 많은 人口가 살고 있고 많은 資源을 海外에서 輸入하여 高度의 經濟社會를 形成

하려는 우리나라의 實情에 있어서, 環境保全과 資源確報를 위해 廢棄物의 資源化, 再活用化는 매우 切實한 課題라 할 수 있으나 극히 一部分이 再利用되고 있고 大部分이 埋立處分 되고 있는 實情이다.^{2,3)}

1987년말 現在 우리나라의 總 産業廢棄物 排出量은 41,983톤/일로서, 莫大한 量이 排出되고 있으나 全體의 약 51%가 單純 埋立處理되고 있다.⁴⁾

그러나 埋立處理는 有機性 物質의 腐敗에 의한 2次 汚染의 發生, 適當한 埋立地 確保의 困難, 廢棄物의 多樣化에 따른 埋立地確保의 困難, 廢棄物의 多樣化에 따른 埋立地 利用의 困難, 地域住民의 反撥 등으로 거의 限界占에 到達하였고 廢棄物의 減

量化와 再資源化는 더욱 時急한 課題로 擡頭되고 있다.^{5,6)}

한편, 高發熱量을 가진 可燃性 廢棄物로 부터의 에너지 회수방법으로는 주로 燒却^{12~11)}과 熱分解方法^{12~17)} 등이 있으나 燃燒施設과 燃燒方法의 부적정, 防止施設의 불완전 등으로 大氣汚染을 가중시킬 뿐만아니라 廢棄物의 충분한 재 활용 효과를 보지 못하고 있으며 이들에 대한 精確한 現況조차 파악하지 못하고 있는 실정이다.¹⁸⁾

本 研究은 이러한 실정을 감안하여 高發熱 廢棄物인 廢타이어의 熱分解에 의한 가스화(gasification) 실험을 실시하여 에너지 회수 및 熱分解와 燃燒時에 발생하는 大氣汚染物質의 低減對策에 관하여 研究하였다.

II. 實驗方法

1. 實驗裝置

實驗裝置는 Fig. 1에 보인 바와 같이 크게 乾溜 가스生成裝置(以下 熱分解爐라 함. Pyrolysis chamber), 가스燃燒室(combustion chamber) 및 大氣汚染防止施設(cyclone과 wet scrubber)로 構成되어 있다.

熱分解爐는 높이 2,000mm, 直徑 1,000mm의 圓筒形이며 下部는 半圓筒形으로서 全表面에 걸쳐 90mm 두께의 水冷壁(water jacket)이 設置되었다. 附着된 裝置 및 測定裝置로는 2HP 送風機, 2개의 觀測孔,

2개의 試料採取孔, 1개의 壓力計 및 1개의 熱電對溫度計가 각각 設置되었다.

가스燃燒室은 內徑 576mm, 外徑 776mm이며 이중 圓筒形 水冷壁이 設置되었고, 附着된 裝置 및 測定 裝備로는 乾溜가스와 2차 空氣의 混合裝置, 豫熱버너, 2HP送風機, 1개의 熱電對溫度計 및 1개의 觀測孔, 3개의 試料採取孔이 設置되었다.

大氣汚染防止施設로는 접선유입식 싸이클론 1기와 wet scrubber 1기를 각각 設置하였다. 싸이클론은 外徑 340mm 높이 1,680mm이며, 호퍼내에 壓力計를 附着하여 機密點檢이 可能하도록 하였다.

Wet scrubber는 直徑 750mm, 높이 2,750mm의 圓筒形이며 spray tower와 packing tower 兼用으로 使用可能하게 하였고, 노즐은 각 段에 12개씩 設置하여 2段으로 하였다.

그리고 각 單位實驗裝置는 直徑 200mm의 圓形덕트로 連結되어 있으며 각각 1개의 分진採取孔, 2개의 가스採取孔, 1개의 熱電對溫度計를 設置하였고 싸이클론과 wet scrubber 사이에 3HP I.D.FAN을 設置하였다.

2. 對象廢棄物

· 廢타이어 : 市中에서 乘用車用이나 小型貨物車用으로 使用된 후 廢棄되는 廢타이어를 對象으로 하였다.

3. 實驗方法

實驗過程은 Fig. 2에 나타내었다. 實驗은 최초

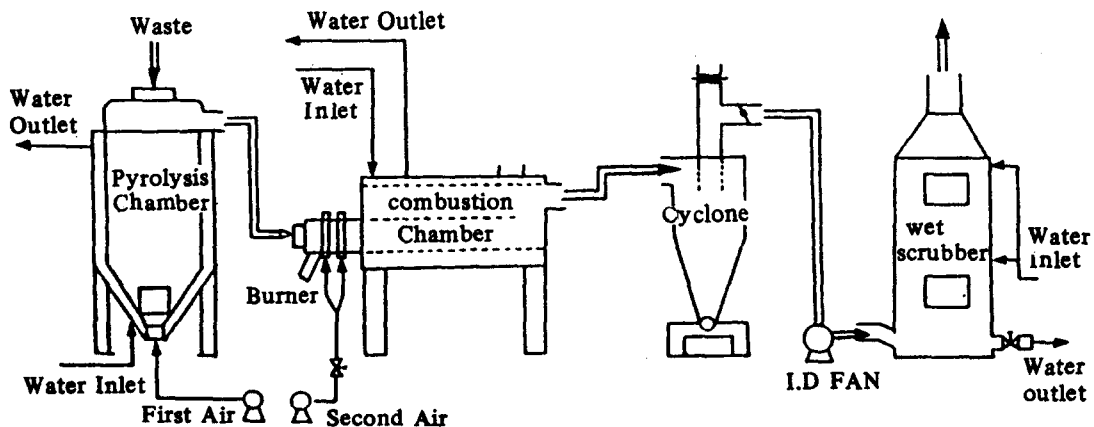


Fig. 1. The schematic diagram of pilot plant

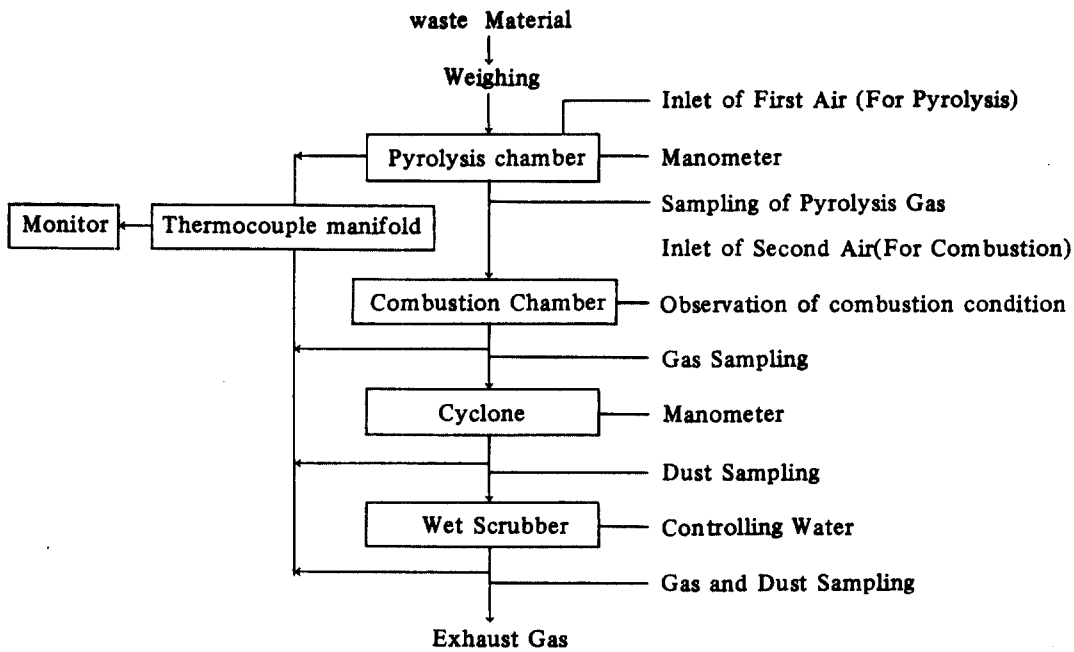


Fig. 2. Flow sheet of experimental process

廢棄物 110-150kg을 廢棄物 投入口를 통하여 無作爲 投入하고, 이어서 投入口를 完全히 密閉시킨다. 이 過程이 끝나면 가스 燃燒室의 前面에 附着되어 있는 豫熱버너를 點火하여 가스 燃燒室을 豫熱시키고, 豫熱이 充分히 되었을 때 熱分解爐를 稼動시킨다. 이때 1次 空氣와 2次 空氣의 送風量은 조절 밸브를 使用하여 調整하였다. 수차례의 反復 實驗을 통하여 適正 燃燒가 可能하다고 判斷될 때에 各 部門別 測定을 實施하였다.

乾溜가스는 凝縮오일과 水洗가스로 分離하여 포 집하였는데, 分離하는데 使用된 方法은 다음과 같다. 처음에 乾溜가스를 水冷凝縮機에 通過시켜 凝縮오일을 얻고, 이어 水冷凝縮機 通過한 가스는 水洗滌하여 테프론 에어백(Teflon Air Bag)으로 포 집하였다.

4. 分析方法

(1) 廢棄物의 性狀分析

元素分析 : Elemental Analyzer(美國 Perkin-Elmer 社製, Model 240C)로 C, H, N, O, S 및 Ash(at 950°C)를 分析

發熱量 : Automatic Bomb Calorimeter(美國 Parr

社製 Model 15-3)로 分析

(2) 가스分析 및 測定

- O₂ : Fyrite O₂ Analyzer(美國 Bacharach 社製)
- CO₂ : Fyrite CO₂ Analyzer(美國 Bacharach 社製)로 測定
- CO : 검지관법으로 測定
- NO_x : NO_x Analyzer(日本 Shimadzu社製, Model NOA-305)로 測定
- H₂S : 環境汚染公定試驗法(大氣分野)에 의한 吸光度法으로 分析
- HCl : 環境汚染公定試驗法(大氣分野)에 의한 티오시안산 제이수은법으로 分析
- SO_x : 環境汚染公定試驗法(大氣分野)에 의한 中和適正法으로 分析
- 粉塵濃度 : 環境汚染公定試驗法(大氣分野)에 의하여 Stack Sampler(韓國, 정엔지니어링社製, Model CE22US)로 測定

III. 結果 및 考察

1. 廢타이어의 性狀

廢타이어의 元素 조성 및 發熱量을 Table 1에 나

타내었다. 타이어의 炭素含量은 84.9%로 높게 나타났다. 黃含有量은 1.7%로 병커C유의 基準值인 1.6%水準으로서 黃酸化物에 의한 大氣汚染問題는 그리 크지 않을 것으로 思料된다. 發熱量은 9,526kcal/kg으로 병커C유의 發熱量이 10,000kcal/kg, 煉炭의 發熱量이 4,500kcal/kg인 것과 比較해 볼 때 상당히 높은 水準의 發熱量을 가지고 있음을 알 수 있다.

Table 1. Element component and heating value of waste tyre.

(unit: wt%)	
Item	Waste Tyre
C	84.9
H	7.8
N	0.2
O	1.5
S	1.7
Ash (at 950 °C)	4.4
Heat Value* (kcal/kg)	9526

*Measured by Bomb Calorimeter

2. 燃燒實驗

乾溜가스화 燒却爐를 사용한 廢타이어의 熱分解 및 燃燒實驗은 廢棄物을 熱分解爐에 1回 一括 投入하여 斷續式으로 實施하였으며, 이때 投入된 廢棄物量은 150kg으로 하였고, 考慮된 因子는 1次, 2次 空氣量, 乾溜가스 生成速度와 壓力, 乾溜가스 生成速度와 性狀, 가스燃燒室 溫度 및 排가스 性狀 등으로 하였으며 각 條件에 따라 充分한 豫備實驗을 實施하였다.

熱分解에 의한 乾溜가스의 生成量은 1次 空氣量과 熱分解爐의 溫度에 의해 左右되며 이때 1次 空氣量의 供給量에 따라 가스燃燒室의 燃燒狀態가 크게 變化한다. 1次 空氣量을 少量 供給하였을 境遇에는 乾溜가스 生成量의 減少로 가스燃燒室에서 燃燒가 困難하게 되며, 1次 空氣量이 過量 供給되었을 境遇에는 熱分解爐 內의 溫度와 乾溜가스 生成量이 急激하게 增加하여 가스燃燒室의 容量超過에 의한 適正 2次 空氣量의 供給困難으로 不完全 燃燒가 일어난다. 또한 熱分解爐 溫度도 1次 空氣量에 의해 左右되지만 水冷壁(Water jacket)으로도 調節

可能하고, 溫度의 高低에 의한 乾溜가스 生成量의 變化도 큰 것으로 나타났다.

熱分解爐의 爐內壓은 항상 負壓(negative pressure)으로서, 乾溜가스 生成狀態가 不安定할 境遇 그 變動幅은 상당히 크고, 安定化가 되었을 때는 一定한 水準의 爐內壓이 維持되므로, 熱分解爐의 爐內壓을 觀察함으로써 乾溜가스의 生成狀態를 間接적으로 判斷할 수 있을 것으로 思料된다.

熱分解爐에서 生成된 乾溜가스는 덕트를 통해 가스燃燒室로 供給되며, 처음에 補助豫熱버너와 少量의 2차 空氣로 乾溜가스를 燃燒시킨 다음, 이어 乾溜가스의 生成이 安定되고 가스燃燒室의 豫熱이 完了되면 補助버너 없이 自然燃燒된다.

(1) 乾溜가스의 生成 및 燃燒

廢타이어의 熱分解에 의한 乾溜가스의 生成 및 燃燒實驗은 1回 投入量을 150kg으로 하여 實施하였다. 廢타이어의 熱分解를 爲한 1次 空氣 및 乾溜가스의 燃燒를 위한 2次 空氣의 供給量과 乾溜가스 生成量의 經時變化는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 1次 空氣量 0.79~1.12m³/min의 供給으로 3.5~4.0m³/min의 乾溜가스가 生成되었으며, 1次 空氣量에 比較해 약 3.6~4.4배의 乾溜가스가 生成되었다.

熱分解爐의 稼動後 처음 30분 동안 1次 空氣의 供給에 比하여 乾溜가스량은 定常狀態 보다 다소 적게 生成되었는데, 이것을 熱分解가 充分히 이루어질 수 있을 만큼 熱分解爐의 溫度가 上昇되지 못한데에 起因하는 것으로 思料된다. 廢타이어를 熱分解하기 시작한 30분 以後 부터 210분간 乾溜가스

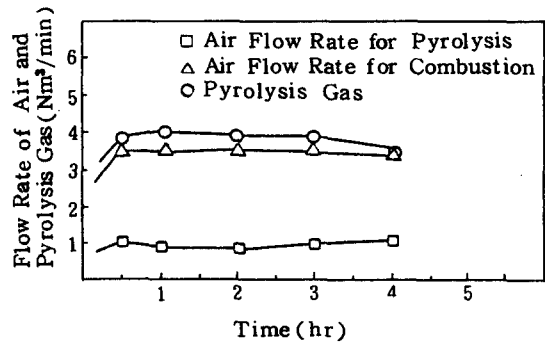


Fig. 3. Variation of the air flow rate for the pyrolysis and the combustion and of the pyrolysis gas produced (Waste Tyre)

Table 2. Experimental condition for pyrolysis of waste tyre.

Tyre (kg)	Pyrolysis Time (min)	Air(Nm ³ /min)		Pyrolysis Gas	Pyrolysis Gas
		1st	2nd	Rate (Nm ³ /min)	Amount (Nm ³ /kg)
150	210	0.95	3.6	3.8	5.3

는 안정하게 생성되었다. 210분 이후 1차 공기량의 증가와乾溜가스량의 감소는熱分解爐內에서廢타이어의部分的인直火燃燒가(1次 灰(Ash)處理)始作된 것으로推定되며, 따라서 150kg의廢타이어에 대한안정한乾溜가스發生時間은 210분인 것으로 思料된다. 또한 이 때에는 1차 공기량을增加시켜도乾溜가스량의增加는期待할 수 없는 것으로 나타났다.

한편, 2차 공기량은全體安정한燃燒時間 210분에 걸쳐 거의 3.6m³/min水準으로一定하게維持되었는데 이는乾溜가스의成分과發生량이 큰變動이 없기 때문에 思料된다.

가스燃燒室에서의燃燒温度和熱分解爐에서의乾溜가스의生成温度, 및壓力을 Fig. 4에 나타내었다.乾溜가스의生成温度는 다소 조금씩增加하는傾向이 있지만 대체로安정한燃燒時間 210분 동안 100-200℃로維持되었으며 1次 灰處理가始作되면서急激하게增加하여 300분에는 400℃附近까지上昇하였으나廢타이어가 거의完全히 타버리고 불씨만 남은狀態(2次 灰處理)가維持되면서温度가 다시減少하는 것으로 나타났다.

가스燃燒室內的乾溜가스燃燒温度는 처음에補助熱 burner에 의해 빠른速度로增加하여 약 1,000℃附近까지到達하였으며 이어稼動 20분後부터는乾溜가스의自然燃爐에 의하여 계속 1,000℃로維持되는 것으로 나타났다.

熱分解爐 爐內壓은熱分解爐의温度나 1차 공기량과는 다소相關성이 적은 것으로 나타났으며 다만乾溜가스가안정하게發生하여 가스燃燒室 및熱分解爐温度가一定하게維持되는 동안에는 -6.1~-7.7mmH₂O水準으로 큰變動이 없었다.

廢타이어의熱分解實驗結果乾溜가스生成狀態가良好하고 가스燃燒室의燃燒狀態가最適인實驗條件은 Table 2와 같다. 여기에서 보면廢타이어 150kg을一括投入하여熱分解하는境遇全體 300분의熱分解時間중安정한乾溜가스發生時間은全體의 70%인 210분이었고平均乾溜가스發生量

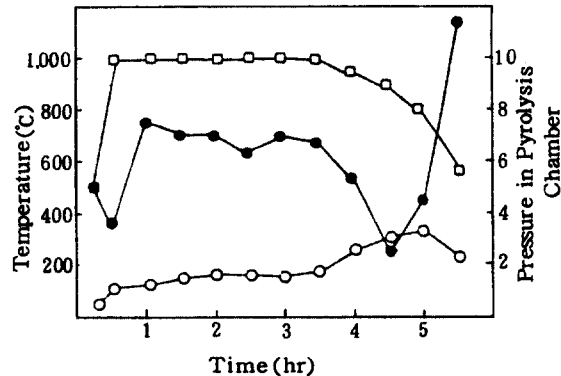


Fig. 4. Variation of pyrolysis temperature and pressure in pyrolysis chamber, and combustion temperature of pyrolysis gas (Waste Tyre)

- : Temp. in combustion chamber
- : pressure in pyrolysis chamber
- : Temp. in pyrolysis chamber

Table 3. Analytical results of washing gas.

Gas	(unit : %)					
	CO ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	N ₂
Waste Tyre	3.2	4.9	11.4	4.8	1.6	18.8

은 3.8m³/min이었다. 이때 1차 공기량은總供給空氣량의 21%가供給되었으며,廢타이어 1kg당乾溜가스發生量은 5.3Nm³/kg이었다.廢타이어의熱分解後 灰(Ash)發生量은總投入量 150kg중 18.8kg에 불과하여 87.5%가減量이 된 것으로 나타났다.

(2) 乾溜가스의性狀

각廢棄物의熱分解에 의하여生成된乾溜가스의分析은凝縮油(Condensed Material)과水洗가스(Washing gas)로 나누어 실시하였다.

각廢棄物로부터의乾溜가스중水洗가스의主要成分濃도는 Table 3과 같다. Table 3과 같이可燃性成分인 CO₂, CH₄, C₂H₄ 및 C₃H₈의 합량은 22.

Table 4. Elemental components of condensed material.

Waste	Heat * Value (kcal/kg)	Elemental Components (Wt %)					Ash (at 950°C)
		C	H	N	O	S	
Waste Tyre	9,804	84.6	10.4	0.4	1.6	1.2	0.6

*Bomb Calorimeter

7%이었다. 질소가스 함량은 18.8%로 나타났으며, 대부분이 1차 질소를 供給할 때에 공기중의 질소성분이 乾溜가스중에 함유된 것으로 思料된다.

凝縮오일에 대한 성분분석 결과는 Table 4에 나타내었다. 廢타이어로 부터 生成된 凝縮오일의 發熱量은 9.804kcal/kg이었고, 또한 탄소의 함유량이 매우 높았다.

凝縮오일 중 황함량은 1.2wt%로 벙커 C유의 허용함량 1.6wt%보다 다소 낮은 水準으로서 양질의 乾溜가스가 生成된다는 것을 알 수 있다.

그러나 재(Ash) 함유량은 벙커 C유의 基準值인 0.1wt% 보다 높은 水準인 0.6wt%로 나타났다.

凝縮오일의 물리적성질 분석결과는 Table 5에 나타낸 바와 같이 比重0.91, 重粘度 3.2 CST, 引火點 62°C이었다.

(3) 배가스 性狀

廢타이어의 熱分解로 生成된 乾溜가스의 연소배가스중 O₂와 CO₂의 경시변화를 Fig. 5에 나타내었다. O₂의 平均濃度는 4.0%이며 공기비로 환산하면 1.24로서 가스 연소실내에서 상당히 높은 水準의 완전연소가 이루어진 것으로 思料된다.

CO₂의 平均濃度는 13.8%이었다. 乾溜가스의 연소배가스 등 주요 大氣汚染物質 濃度를 Table 6에 나타내었다. 粉塵의 경우 싸이크론 前 덕트에서 測定을 하여야 하지만 덕트내 온도가 측정 한계 온도인 250°C를 훨씬 상회하여 測定이 불가능 하였다.

따라서 粉塵의 濃度는 싸이크론의 效率을 감안한다면 Table 6에 나타낸 測定值보다 다소 높을 것으로 판단되지만, 1차 공기량이 적을 경우 灰分의

Table 5. Physical characters of condensed material.

Item	Specific Gravity (at 20°C)	Kinematic Viscosity (at 50°C cSt)	Flash Point (°C)
Waste			
Waste Type	0.91	3.2	62

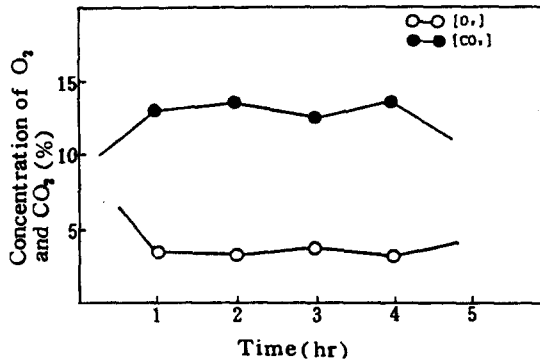


Fig. 5. Variation of the O₂ and CO₂ amount with the combustion of pyrolysis gas (Waste Tyre).

飛散이 현저하게 줄어들다는 것을 고려하면¹⁹⁾, 고농도의 粉塵量은 기대하기 어려운 것으로 思料된다.

大氣汚染物質의 스크러버 前 덕트내 濃度는 상당히 낮은 수준으로서 CO 420.4 ppm, SO_x 349.8 ppm, NO_x 68.5 ppm, HCl 24.4 ppm 및 粉塵 240.0 mg/Nm³이었다.

Table 6. Concentration of the pollutants with combustion of pyrolysis gas.

Pollutant	CO (ppm)	SO _x (ppm)	NO _x (ppm)	HCl (ppm)	Dust (mg/Nm ³)
Waste					
Waste Type	420.4	349.8	68.5	24.4	240.0

IV. 結 論

本 研究는 廢棄物의 에너지화 및 大氣汚染物質의 저감을 위하여 乾溜가스 생성장치, 가스연소실 및 大氣汚染 防止施設을 사용하여 高發熱量 廢棄物인 廢타이어를 대상으로 熱分解에 의한 가스와 실험 및 연소실험을 실시한 결과 다음과 같은 結論을 얻었다.

1) 廢타이어의 1회 投入量을 150kg으로 하여 1次 공기량을 0.95 Nm³/min으로 供給하였을 때 3.8 Nm³/min의 乾溜가스가 生成하였으며 1次공기에 대한 乾溜가스 생성비는 4.0이었고 安정한 乾溜가스 생성시간은 210분 이었다.

2) 安정한 乾溜가스 생성온도는 170°C이었고, 生成된 乾溜가스의 연소온도는 1,000°C이었다.

3) 廢타이어의 乾溜가스중 水洗가스에는 가연성 성분인 CO, CH₄, C₂H₆ 및 C₃H₈의 含量이 22.7%이었으며, 凝縮오일의 發熱量은 9,804 kcal/kg이었다.

4) 연소배가스중 O₂의 平均濃度는 4.0%로서 過剩空氣比는 1.24이었으며, 싸이크론과 스크러버 사이에서 측정 한 大氣汚染物質의 平均濃度는 CO 420.4 ppm, SO_x 349.8 ppm, NO_x 68.5 ppm, HCl 24.4 ppm, 粉塵 240.0 mg/m³이었다.

참 고 문 헌

1. 鄭南朝 : 우리나라의 固形廢棄物 現況 및 處理 方向, 國立環境研究院, 1986.
2. 黃善奎 : 産業體의 廢棄物 再活用과 問題點, 環境과 公害, 463~467, 1984.
3. 李亨植 : 廢棄物處理와 資源再活用, 環境과 公害, 455~462, 1984.

4. 韓國環境年監 : 環境廳, 1988.
5. 金政炫 : 각종 廢棄物의 處理技術, 環境과 公害, 588-593, 1980.
6. 李斗護外 1 : 固形廢棄物 管理論, 環境廳, 1984.
7. Walter R. Niessen : Combustion and Incineration Processes, Marcel Dekker, 82-102, 1978.
8. P.N. Cheremisinoff, A.C. Morresi : Energy from Solid Wasted, Marcel Dekker, 267-294, 1976.
9. 官崎實 : 本質系廢棄物의 燃燒と熱利用, 省エネルギー, 35-18, 13-18, 1983.
10. 濱中和平 : 廢プラスチック의 燃燒と熱利用, 省エネルギー, 35-11, 25-31, 1983
11. Richard A. Conway, Richard D. Ross : Handbook of Industrial waste Disposal, Litton Educational publishing Inc, 370-401, 1980
12. 光田憲一 : 廢タイヤ의 燃燒·熱分解と熱利用, 省エネルギー, 35-11, 40-44, 1983.
13. 出口鐵生 : 廢木材의 再資源化活用(가스化)について, PPM, 20-27, 1985.
14. 本多淳裕 : 熱分解ので燃料化, 省エネルギー, 38-7, 67-79, 1986.
15. 平山直道ち : 産業廢棄物燃燒 と熱利用의 現狀と課題, 省エネルギー 35-11, 2-12, 1983
16. 林松國宏 : ゴム·プラスチック廢棄物의 再資源化について, 日本ゴム協會誌, 47-9, 37-46, 1974.
17. 平田好顯 : ゴム廢棄物의 分解による有效利用, 日本ゴム協會誌, 46-2, 35-45, 1973.
18. 國立環境研究院 : 廢棄物의 再生燃料化 技術開發 및 環境汚染 防止對策에 關한 研究, 1987
19. 武藤 夫ち : 廢棄物의 處理技術, 工業調査會, 223-246, 1977.