

목재의 연소 특성(2)

Combustion Characteristics of Wood Chips

(연소형태와 연소특성)

(Flame Shape of Combustion and Ignition Delay)

김 춘 중*, 新井雅隆**, 강 경 구***

Chun-Jung Kim*, Masataka ARAI**, Kyung-Koo Kang***

<Abstract>

Combustion Characteristics of the wood chips(balsa chips) were experimental studied as fundamental investigation of the thermal recycle system of the urban dust. The urban dust contains plastics vegetable and lot of wood material. Then, a wood was chosen as an example of the component of urban dust. A small wood chip was burned in a electric furnace and mass reduction rate during volatile and combustion states were recorded by the micro-electric balance and the combustion flame shape took a photograph by video camera at the mass of wood chips and ambient temperature in the furance. Ignition delay took the minimum value when the mass of the test chip was 0.3g. When a mass of the test chip was smaller then 0.001g, combustion with flame did not burnt.

Key Words : *Urban Dust, Thermal Recycle, Ignition Delay, Volatile Combustion, Combustion with Flame.*

1. 서 론

사회가 발전함에 따라 생활에 필요한 제품이 대량 생산되고, 생산된 제품이 대량으로 소비됨에 따라 폐기물의 량도 대량으로 발생되고 그 종류도 다양화되고 있다.

이렇게 발생하는 폐기물의 처리도 심각한 사회 문제로 부각되고 있을 뿐만 아니라 환경에도

심각한 피해를 주고 있다.

지금까지 폐기물 처리는 대부분 매립하였으며, 그중 일부만을 소각처리 하였다. 폐기물의 매립은 매립장소가 부족 할뿐만 아니라, 추출물에 의한 토양 오염이 문제시되고 있다. 그리고 폐기물의 소각처리에 있어서는 폐기물을 소각할 때 발생하는 염화수소, 질소 산화물, 다이옥신류, 유황산화물 및 중금속 류 등의 2차 공해물

* 정회원 영남이공대학 기계과 교수 · 工博
영남대학교 기계공학과 졸업
705-037, 대구광역시 남구 대명7동 1737

** 日本群馬大學工學部機械システム工學科教授 · 工博
376-8515, 日本東北大學大學院卒業
日本國群馬縣桐生市天神町1-5-1

*** 정회원 구미기능대학 교학처장 부교수

Prof.,Dept. of Mechanics Eng. Yeungnam College of Science&Technology

1737, Taemyeung-dong,Nam-gu,Taegu,705-037,Korea

Prof.,Dept. Mech.,Sys., Eng.,Faculty of Engineering Gunma University

1-5-1 Tenjin Cho Kiryu Gunma 376-8515 Japan

Kumi Polytechnic College

112, Kongdan-dong, Kumi, 730-030, Korea

질이 발생되기도 하지만^{1),2)} 소각할 때 발생하는 열에너지를 이용함으로써 폐기물을 자원화 할 수 있을 뿐만 아니라 체적을 감소시킬 수 있어 처리도 간편하다. 하지만 폐기물은 여러 물질로 혼합되어 있기 때문에 연소효율 개선이나 연소 해석에 많은 어려움이 있다^{3),4)}. 따라서 폐기물의 한종류 한종류에 대한 착화특성, 연소형태, 질량감소율 및 연소속도와 같은 연소특성을 이해하여야 만이 연소 과정에서 생기는 배출물의 제어라든지 효과적인 에너지 회수가 가능할 것이다^{5)~9)}. 또한 폐기물 연소는 기체연소나 액체연소와는 다르게 유염연소 후 고체 분이 남아서 표면연소 하든지 또는 분위기 온도가 낮으면 다량의 발연(發煙)을 수반하는 표면반응을 일으킨 후 재(灰)가 남는 경우가 대부분이다. 제1보에서는 폐기물 중의 하나인 목재(연재목질인 Balsa재)의 질량 감소와 착화지연에 대하여 보고하였다¹⁰⁾.

본 연구는 소각로 내에서의 연소효율에 영향을 미치는 인자들 중에 로 내에 온도 및 시험편의 질량의 변화에 따른 연소화염의 형태 및 연소특성에 대하여 조사하였다.

이런 자료들에 의해 목재연료에 대한 연소특성을 이해하고, 소각로 설계에 기초자료로 제공한다.

2. 실험장치 및 실험방법

실험에 사용한 실험장치 및 실험방법을 제 1보에 상세히 설명하였다. 그리고 실험에 사용한 전기로 및 시료 대를 Fig.1에 나타내었다.

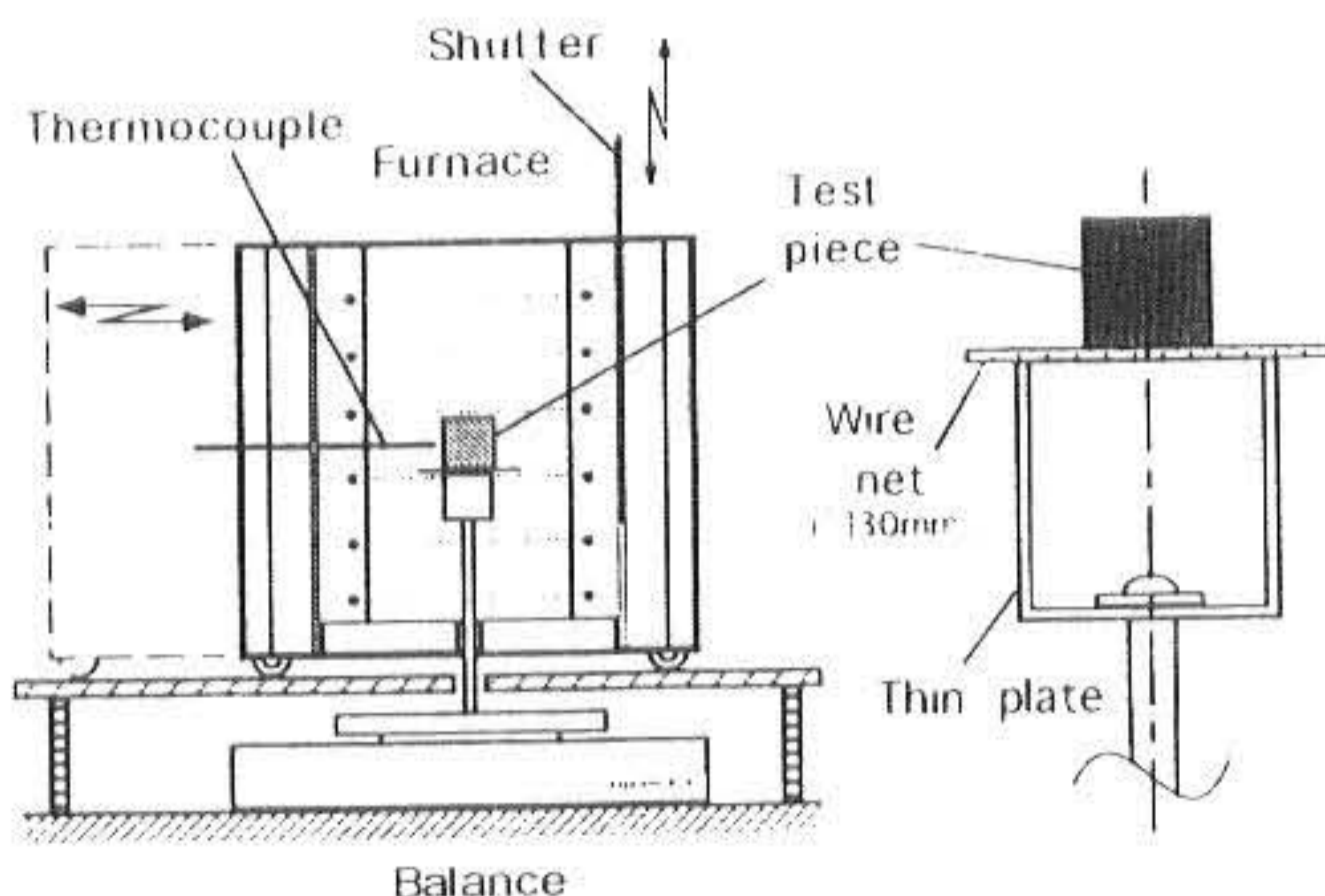


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

노는 Kanthal 발열체(640w × 2개)에 의해 가열되는 내경 100mm, 외경 250mm, 높이 250mm 이 원통형 전기로 이다. 로 내 온도는 CA 열전대로 측정하여, 자동제어장치에 의해 임의 온도로 설정이 가능하도록 하였다. 그리고 로 내 분위기 온도는 발열체 근방에 설치된 열전대의 지시 값과 로 내 중앙부에 설치된 열전대의 지시 값이 수도 내(數度內)에서 일치될 때 로 내 중앙부의 열전대 지시 값으로 설정한다.

시료 대는 Ⅱ형 스테인레스 판(stainless plate) 및 스테인레스 망(stainless net)으로 구성되어 있고, 이 모두는 전자저울 위에 설치되어 있다. 스테인레스 망위(stainless net)에 시험편을 올려놓고, 이 시료 대를 전기로 중앙부에 위치하도록 로(Furnace)를 이동하여 실험하였다. 연소에 의해 시험편의 질량변화는 시료 대와 함께 전자저울로 측정하고 기록계(Recorder)에 의해 기록하였다.

시험편의 연소과정을 관찰창(석영유리 50mm × 250mm)을 통하여 비디오 카메라로 촬영하여 화염의 형태, 착화지연시간, 유염 연소시간, 좌(char)연소 시간 등을 측정하여 연소특성을 해석하였다.

실험재료로 사용한 목재는 연질목재인 발-사재(Balsa 재)로, 한 변의 크기는 0.2mm부터 25mm정도까지의 입방체이고, 그 평균밀도는 0.21g/cm³이다. 또 로 내의 분위기 온도는 450℃에서 650℃까지 변화시켜 실험을 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 연소화염의 형태

시험대에 놓은 시험편을 로 내에 넣으면 로 내의 고온 공기에 의해 가열되어, 착화, 연소되어 그 질량이 감소되어간다.

Fig.2는 로 내의 분위기온도를 500℃, 시험편의 질량 0.005g 연소시켰을 경우 화염의 형태와 질량변화를 나타낸 것이다.

시험편을 로 내로 넣었지만 질량변화는 일정하게 감소하지 않고 다소 변화가 많다. 이것을 시험편의 질량이 적기 때문에 로내 고온 공기

에 의해 대류와 같은 것에 영향을 받았기 때문이다. 또한 유염연소는 관찰되지 않았다. 이것을 시험편의 질량이 적기 때문에 방출되는 휘발분의 절대량도 적고, 시험편의 주위에 가연혼합기가 형성되기 전에 확산되어서 로 내의 분위기 온도가 높아도 유염연소가 일어나지 않았다고 생각된다.

Fig.3는 분위기온도 500°C인 경우 0.1g의 시

아 수분과 열분해에 의해 생기는 휘발분이 방출되어도 ①의 직전에서 착화하고, 시험편은 적은 화염으로 휩 쌓인 후 화염은 순간적으로 크게 성장하고②, 그 후는 확산화염으로서 안정된다③. 그 안정 연소 기간은 시험편(Balsa재)의 열분해로 생기는 휘발분에 의한 유염연소가 끝날 때까지 계속된다. 그 후 휘발분에 의한 유염연소는 끝나고 탄화물에 의한 무염(無炎) 고체연소가 일어난다. 이 고체연소는 석탄의 착(char)연소와 같은 형태이므로 이것을 착(char)연소라 한다. 착(char)연소기간에서 시험편은 붉은색

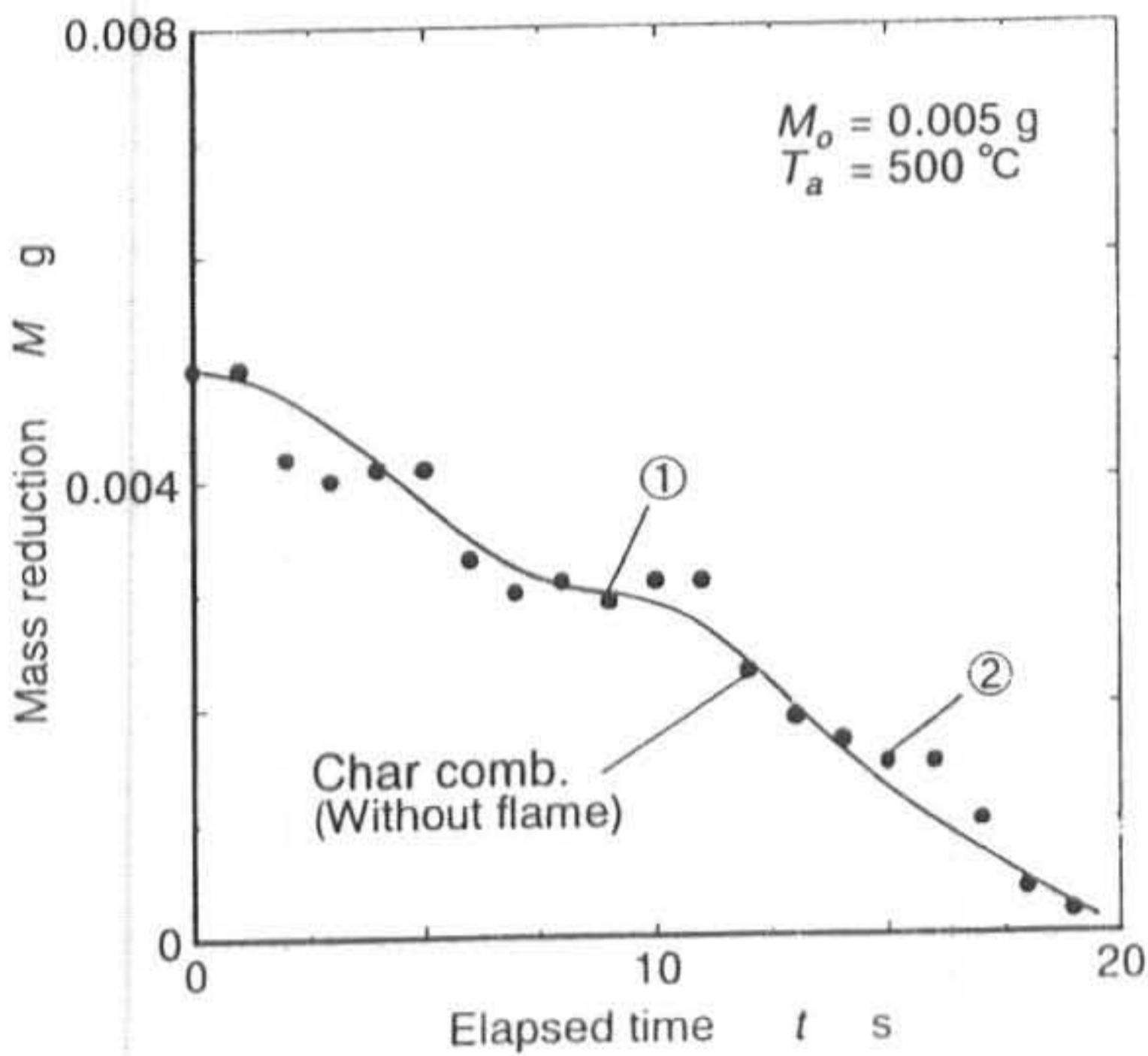
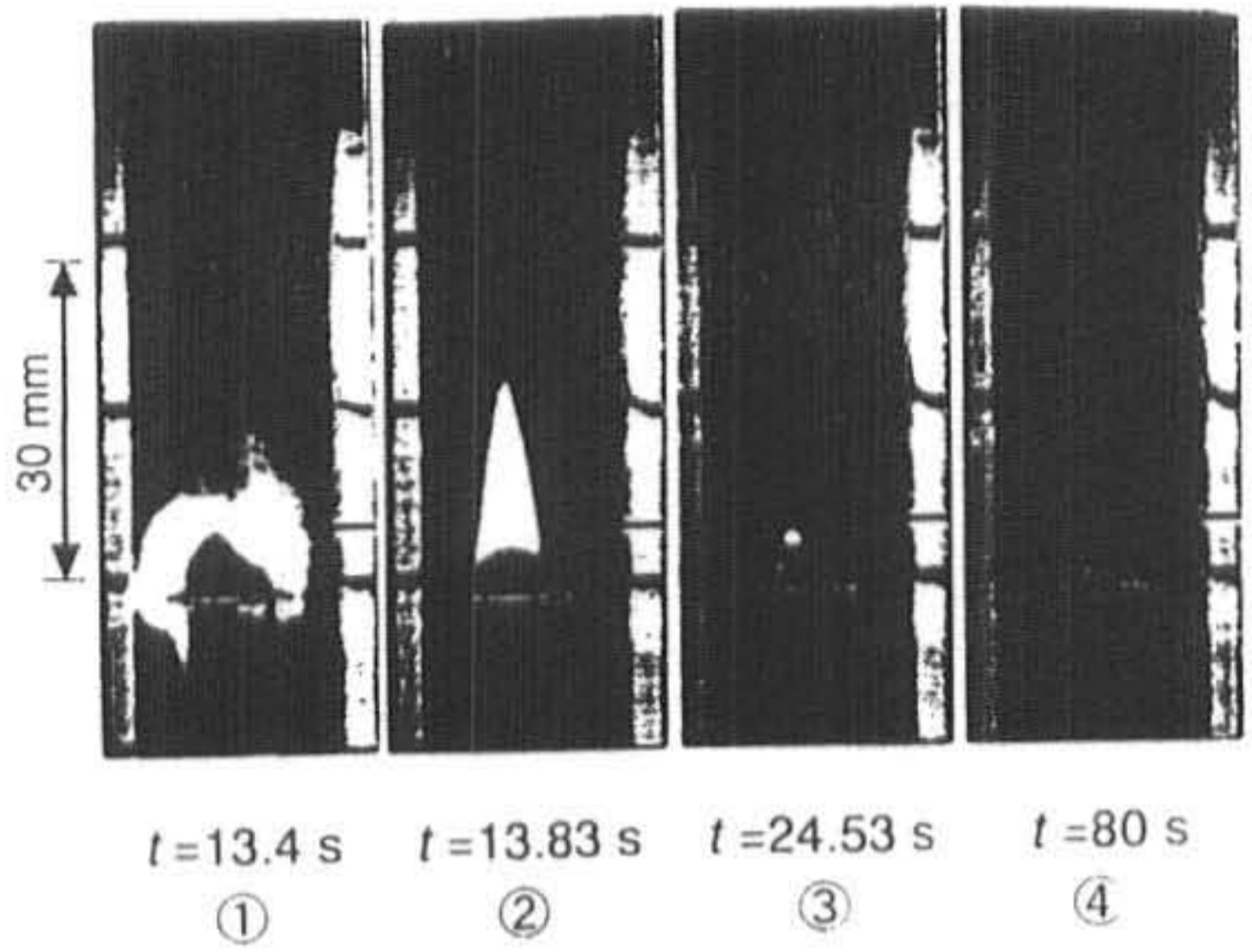
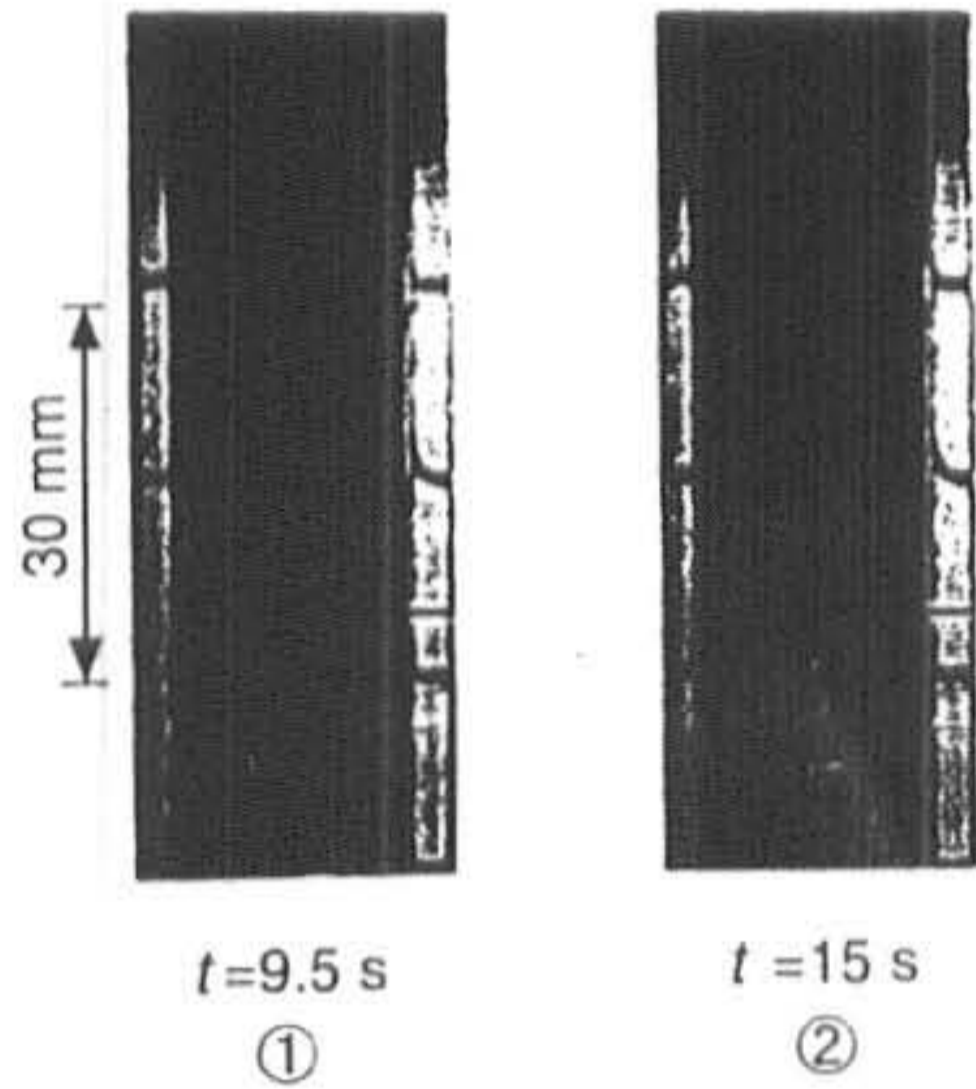


Fig.2 Combustion behavior and mass reduction rate

시험편을 연소시켰을 경우 화염의 형태와 질량 변화를 나타낸 것이다.

시험편을 로 내에 넣으면 처음에는 천천히 질량이 감소한다. 이 사이에 주위로부터 열을 받

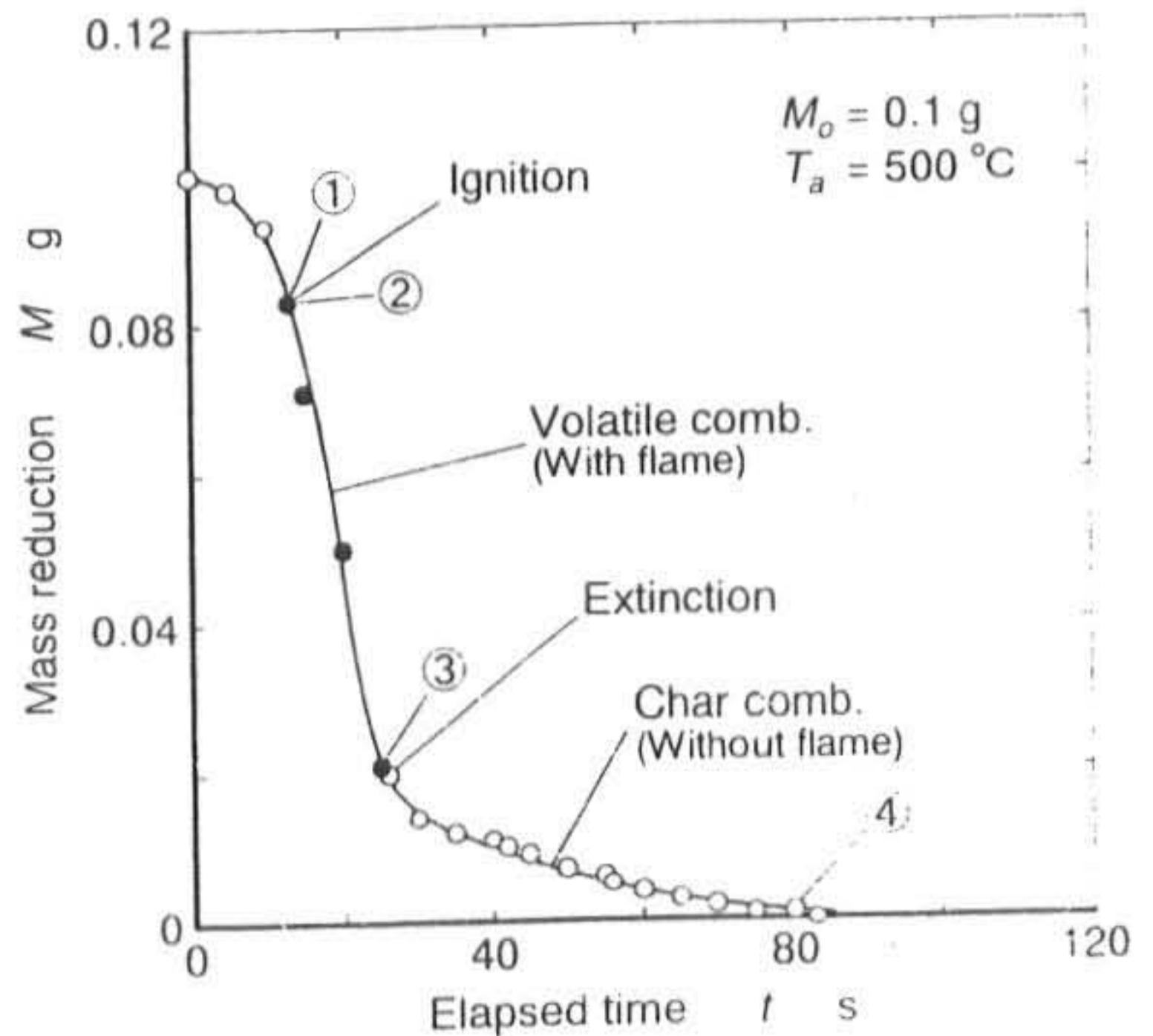


Fig.3 Flame shape and mass reduction rate

빛을 나타내고, 질량은 서서히 감소된다. 화(char)연소 말기에서는 시험편의 모양이 붕괴되고, 붉은 빛은 서서히 사라지며, 일부에서는 회색의 재(灰)가 관찰되었다. 연소 종료는 이 붉은빛이 사라지는 시점④이다. 그 후 질량의 감소는 극히 적어지고, 소량의 재(灰)가 남는다. Fig.4는 로 내의 분위기 온도 500°C 일 때 시험편의 질량 1.0g를 연소시켰을 경우 화염의 형태와 질량변화를 나타낸 것이다.

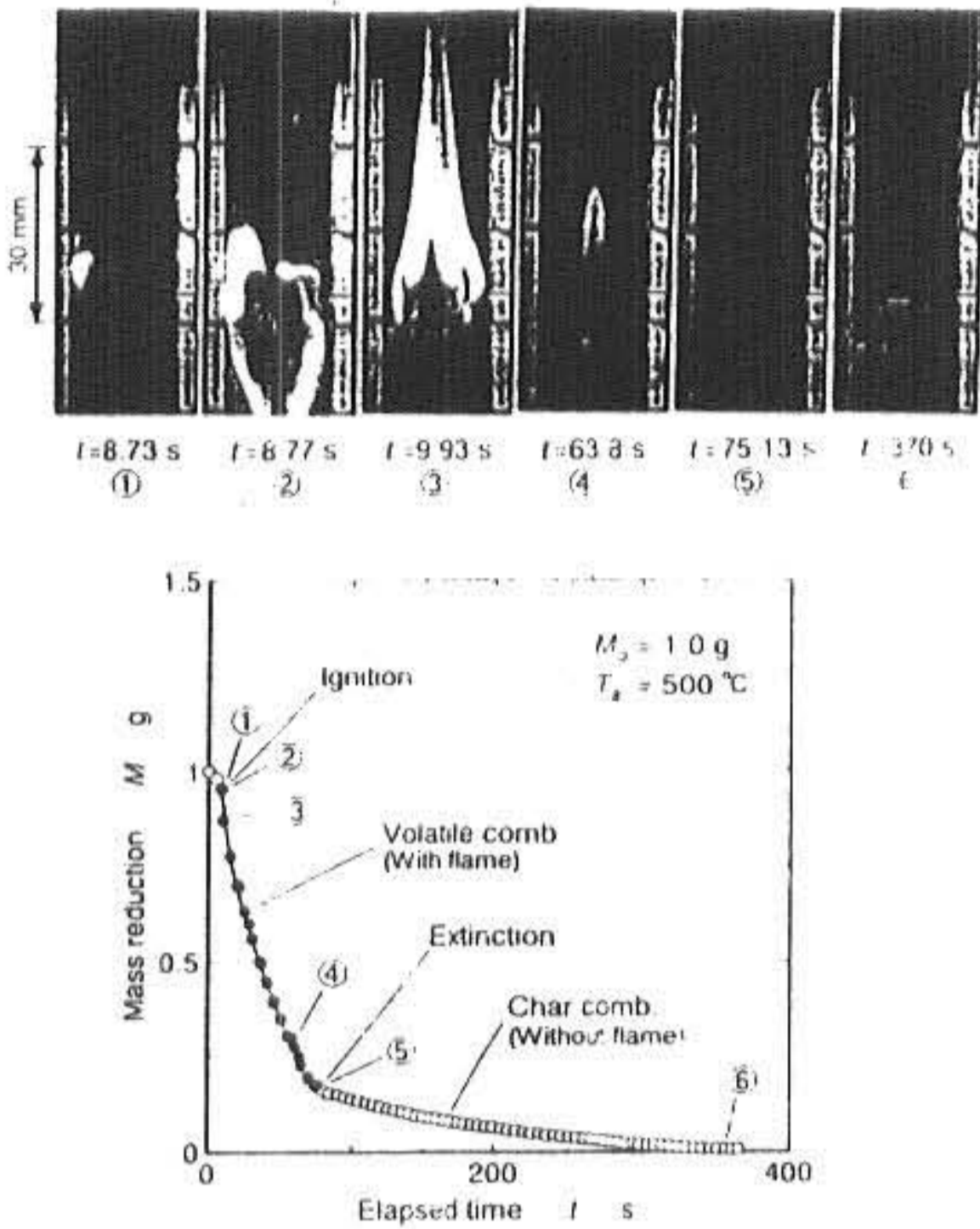


Fig.4 Flame shape and mass reduction rate

연소화염의 형태는 0.1g일 때 화염의 형태와 거의 같으나 화염 크기는 0.1g보다 크다. 이는 질량이 클수록 휘발분의 양이 많으므로 화염은 크고 격렬하다. 또한 유염연소에서 1.0g의 경우가 0.1g경우보다 질량 감소율이 급격히 감소한다. 그 이유는 시험편의 질량이 클수록 가연 휘발분의 방출량이 많으므로 유염연소가 급격히 일어나므로 질량도 급격한 감소가 일어나기 때문이다.

로 내 분위기 온도가 같아도 시험편의 크기가 변화하면 연소현상에 큰 차이가 나타난다. 시험편의 크기가 클수록 착화 지연 시간이라든가 유염연소 기간에 차이가 있다.

Fig.5는 로 내 분위기 온도 500°C 인 경우 시험편의 질량을 변화시켜 착화시 화염의 형태를

관찰한 것이다. 질량이 클수록 착화시 격렬한 화염이 형성된다. 이것은 앞에서 설명한 것 같이 질량이 클수록 가연 휘발분이 많이 방출되므로 격렬한 연소가 일어나기 때문인 것으로 생각된다.

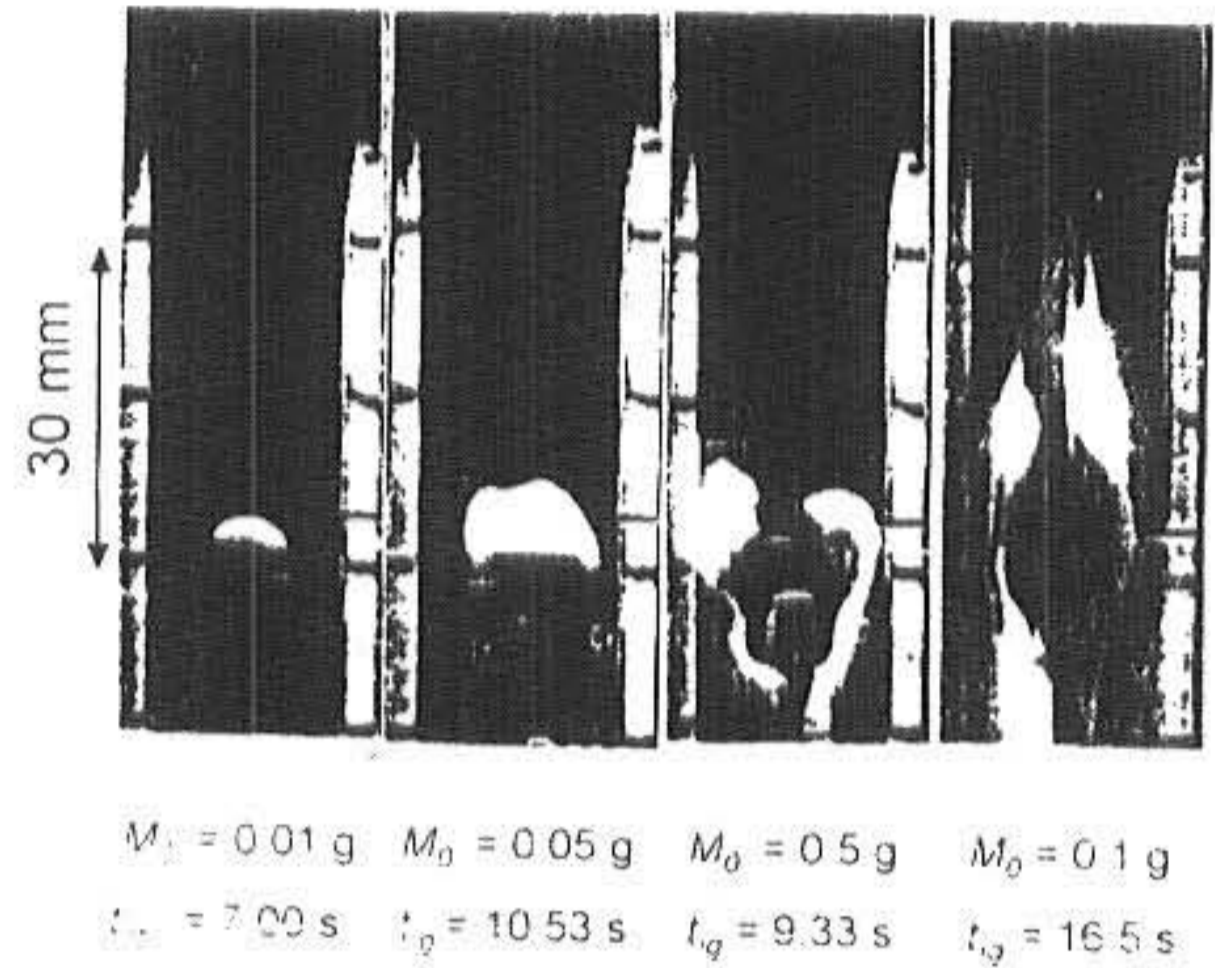


Fig.5 Flame shape of combustion (T_a = 500°C)

Fig.6은 로 내 분위기 온도 500°C인 경우에 있어서, 시험편의 초기질량을 0.002g에서부터 3.0g까지 변화시켜 조사한 연소특성과 질량감소율의 관계를 log-log 그래프에 나타낸 것이다.

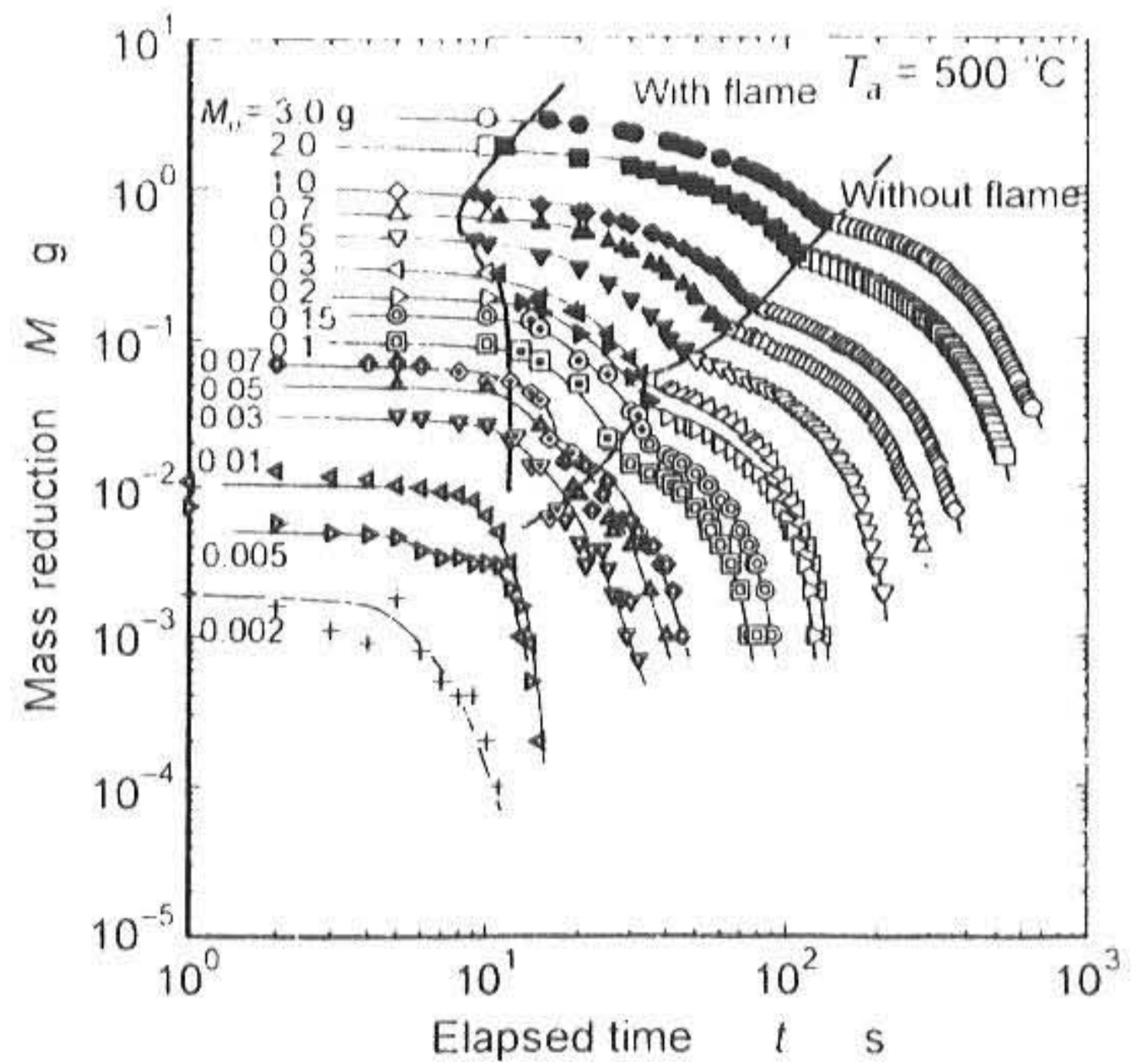


Fig.6 Volatile and char combustion characteristics of wood chips of various sizes

시험편의 질량이 클수록 유염연소기간은 길다. 유염연소의 시작 시각으로 나타나는 착화지연시간에 관해서는 초기 질량이 0.5g 정도의 경우에 가장 짧게 되고, 그 이상 질량이 크면 착화지연시간은 길다. 이것은 시험편이 크면 초기 온도 상승이 늦고 열분해 시작이 늦기 때문으로 해석된다. 그리고 초기질량이 0.5g보다 적은 경우에는 착화지연 시간은 약간 길다. 초기질량이 0.2g이하로 되면 착화지연시간은 질량에 관계없이 거의 일정하다.

그 이유는 시험편의 크기가 적고 온도상승 속도가 높기 때문에 기상(氣相)에서의 착화와 병행하여 표면에서 고체의 직접착화도 일어나는 것으로 예상되지만 금후 상세한 검토가 필요하다. 이 경우 유염연소 기간은 짧게되고, 또 질량 0.005g이하에서는 유염연소는 나타나지 않고 착(char) 연소만으로 질량이 감소된다.

이 결과로부터 열분해에서 가연기체를 방출하는 목재와 같은 고체의 덩어리를 연소시킬 경우에는 기상 착화가 고체 내부로부터의 휘발분의 방출과정과 시험편의 주위에 형성되는 혼합기의 발산 과정의 양자에 의존하고 있기 때문에 유염연소의 시작 시각이 가장 짧게되는 크기가 존재한다. 본 실험에 사용한 시험편(balsa재)에서는 시험편의 크기가 0.5g정도(□ 13mm 정도의 입방체)에서 유염연소 시작 시각이 가장 짧았다.

3.2 착화지연

일반적으로 휘발분을 함유한 고체연소는, 고체연료를 로 내에 넣은 후, 고체연료의 표면착화와 휘발분의 방출에 의한 기상착화(氣相着火)가 일어난다. 착화하면 고체연료의 표면온도가 급격하게 상승하여 휘발분의 방출속도가 증가하여 화염을 수반한 급격한 연소 반응이 일어난다.

휘발분의 방출에 의한 연소가 끝나면 붉은 빛을 갖는 화염은 없어지고 착(char)연소로 변화된다. 이와 같은 착화와 연소형태는 고체 연료의 연소물질이랑 시험편의 크기, 로 내의 분위기 온도 등 여러 가지 요인에 의하여 결정된다. 특히 시험편이 적을 경우에는 시험편의 내부에서의 온도상승 과정이, 휘발분의 방출과 시험

편의 표면온도, 방출된 휘발분의 성분과 그 확산과정, 가연혼합기로서의 온도조건 등에 영향을 주어, 표면착화와 기상착화의 원인이 되기도 하고, 유염연소의 유무 등 복잡한 현상이 일어난다.

여기서 폐기물 연소의 기초실험으로 목재(Balsa재) 시험편의 연소특성을 조사하기 위하여, 비교적 시험편이 큰 목편(木片)을 연소시켜 착화지연과 시험편의 크기와의 관계를 조사하였다. 로 내 분위기를 온도 500℃로 하고, 시험편의 초기질량을 0.03g부터 3.0g까지 변화시켰을 경우 착화지연 시간을 Fig.7에 나타내었다. 시험편이 클 경우 시험

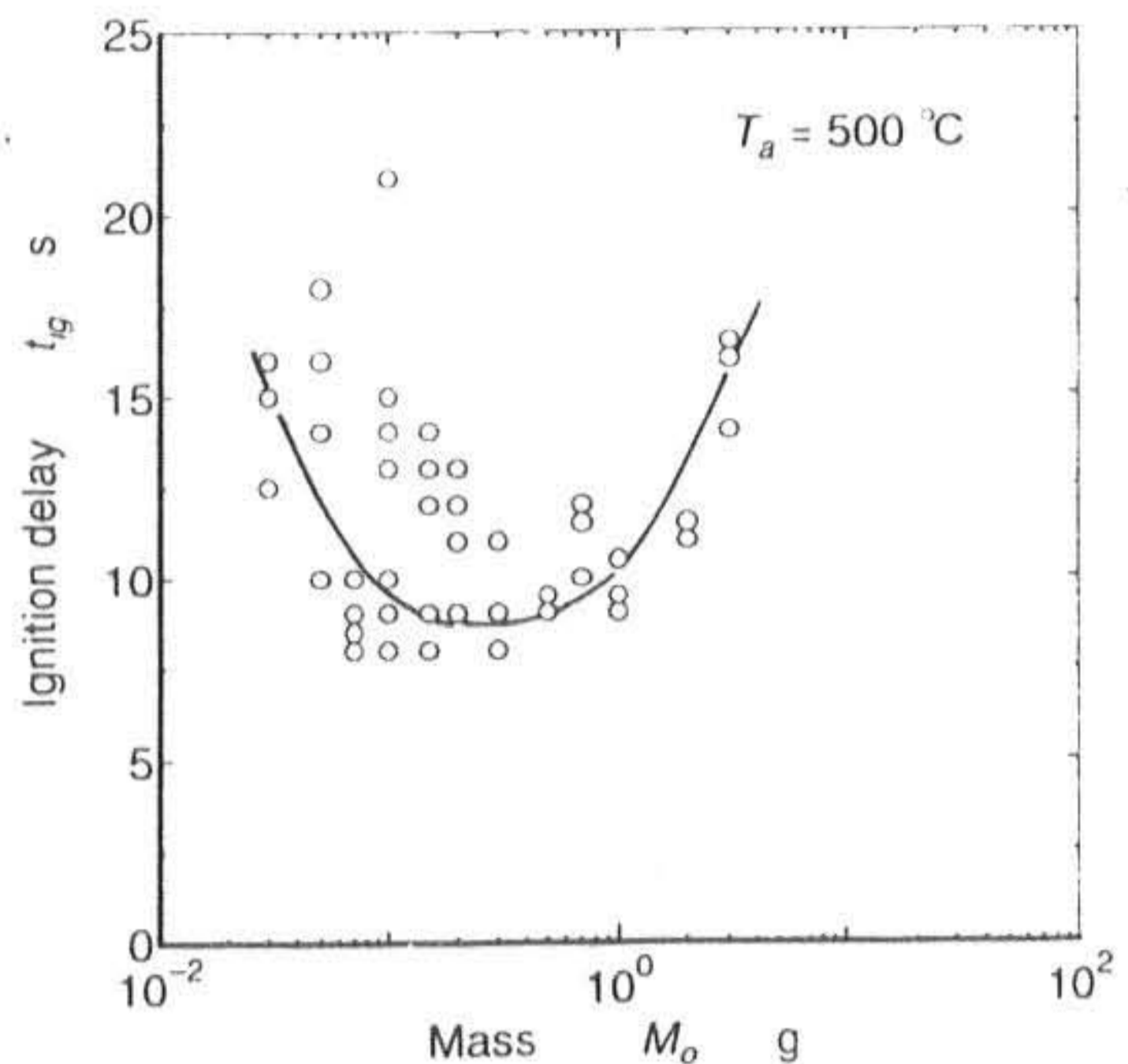


Fig.7 Ignition limit of wood chips

편의 가열 응답지연에 의해 휘발분의 방출이 늦고, 착화지연시간은 길게 된다. 뿐만 아니라 질량이 적을 경우에도 착화지연은 길게된다. 이는 질량이 적으면 단위시간당 방출되는 휘발분이 적고, 또 시험편이 적기 때문에 방출되는 휘발분이 확산되기 쉬워서, 연소반응을 일으킬수 있는 충분한 크기의 가연혼합 피가 형성되기 어렵기 때문인 것으로 생각된다. 이것은 신장(伸長)을 받은 연료 확산에 있어서의 착화한계 온도가 상승되는 확산화염의 착화에 대한 기초 연구 결과로도 설명할 수 있다.

이상의 실험으로 시험편이 적어 유염연소가 일

어나지 않는 경우를 포함한 목재(Balsa)의 착화는 3종류로 분류된다.

즉 처음부터 최(char)연소가 일어나는 시험편이 극히 적을 경우, 휘발분의 기상에서 확산되어 쉽게 착화가 일어나서 착화지연이 짧은 경우, 시험편의 가열응답지연에 의한 휘발 분의 방출 속도가 늦어서 착화지연이 긴 경우로 분류 할 수 있다.

3.3 유염 연소

유염연소 완료시점에서 시험편(Balsa재)의 초기질량에 대한 잔존 질량과의 비와 시험편의 크기와의 관계를 Fig.8에 나타내었다.

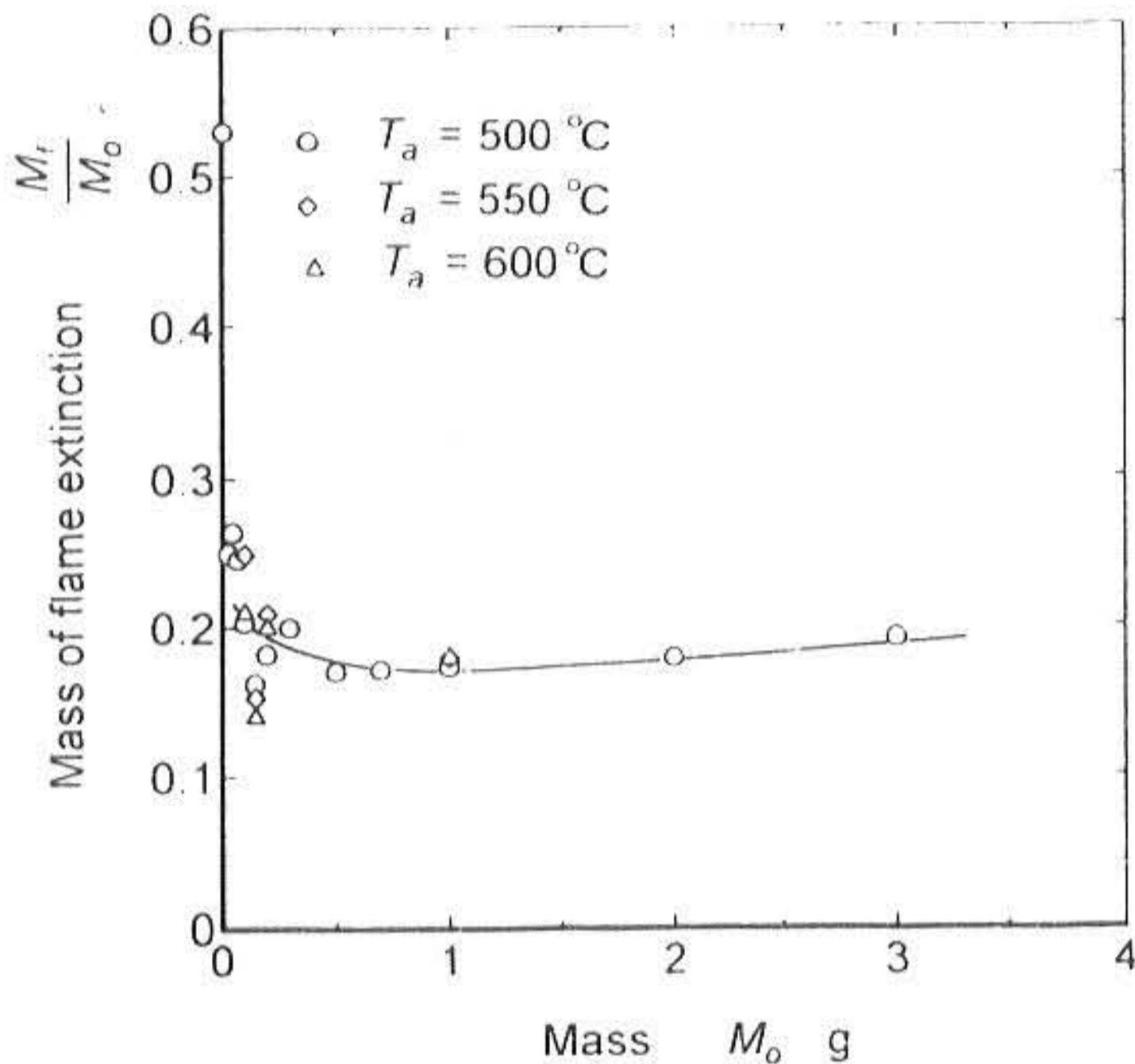


Fig.8 Residual mass of volatile combustion

유염연소 완료 시점에서 잔존 질량은 시험편의 크기에 비해 대단히 적다. 이는 시험편이 적을 수록 앞에서 설명한 착화지연이 길고, 또 유염연소 기간이 짧기 때문에 시험편이 큰것에 비하여 상대적으로 잔존질량이 많이 남았다. 그때의 잔존질량비는 목재(Balsa재)의 회분을 포함한 고체분의 질량비보다 약간 적게 된다. 이는 유염연소의 후기에 있어서 최(char)연소가 부분적으로 시작되고 있다는 것을 나타내고 있다. 또 시험편이 클 경우에서의 잔존질량 비도 약간 증가하는 경향이 있지만 이는 시험편이 크기 때문에 시험편 중심부로부터의 휘발분의 방

출이 종료하기 이전에 표면이 최(char)연소가 일어나서 시험편 표면에 고체 층을 통해서 확산되어 휘발분도 최(char)연소와 함께 표면으로 연소해 버리기 때문인 것으로 생각된다.

로 내의 분위기 온도가 500°C의 경우에 있어서 유염연소 완료시각 t_f 및 유염연소 유지시간 τ_f 와 시험편의 크기와의 관계를 Fig.9에 나타내었다. 여기서 t_f 와 τ_f 와 그림 9의 t_{ig} 사이에는

$$\tau_f = t_f - t_{ig} \quad (1)$$

의 관계가 성립된다. 시험편이 클수록 유염연소의 종료시간은 늦고, 유염연소 기간도 길게 된다. 유염연소의 종료시각을 기준으로

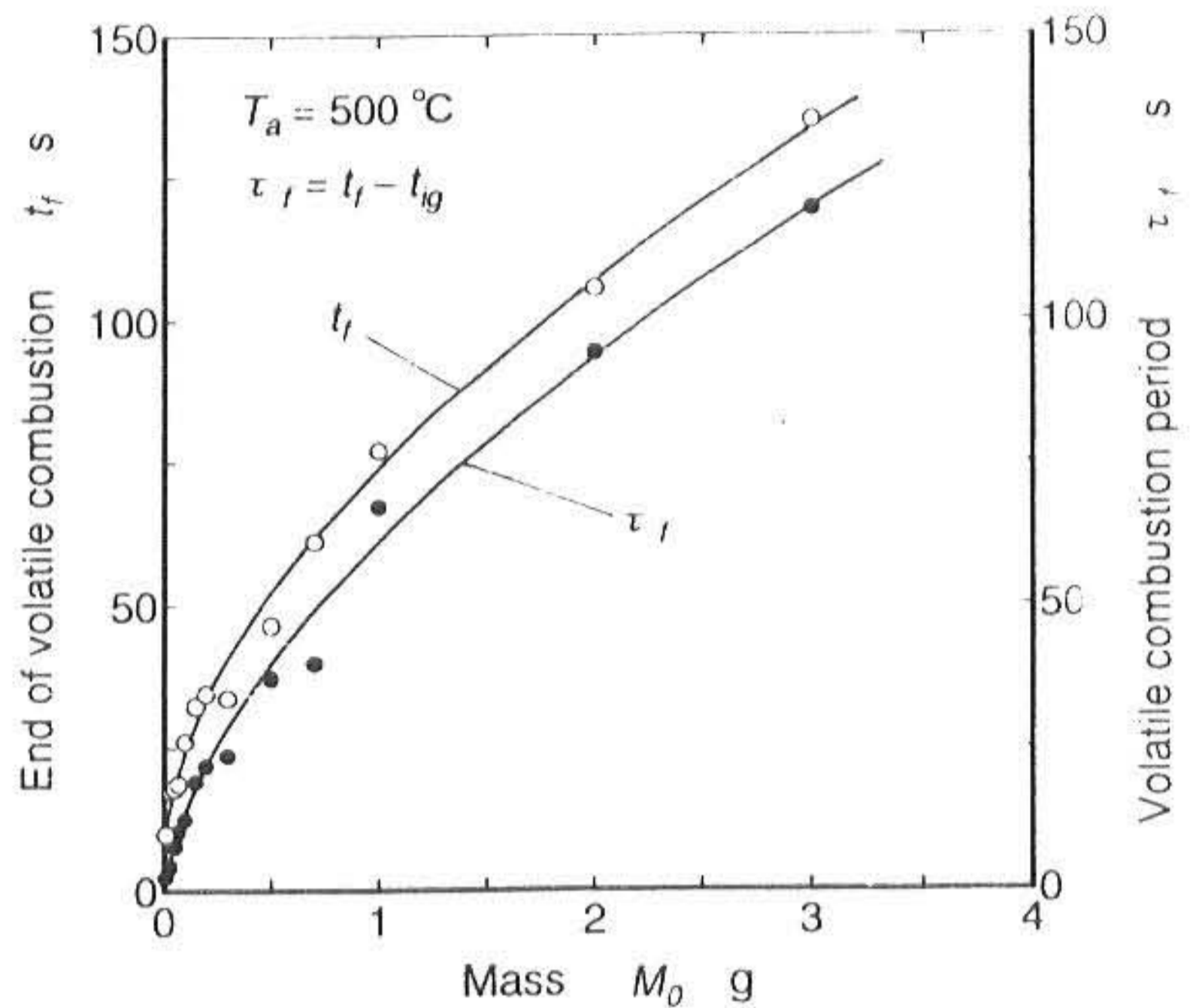


Fig.9 Flame extinction time and volatile combustion period

하여 분위기온도를 변화시킨 결과를 정리하면 Fig.10과 같이 되고, 결과를 초기질량의 0.5승이 된다. 이 결과를 로 내 분위기온도 T_a 을 °C로 표시한 그대로 실험식으로 해서 표시하면

$$t_f = \frac{38000}{T_a} M_o^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

으로 표시할 수 있다. 즉 실험한 범위에서 유염연소 완료시기 t_f (sec)는 시험편의 초기질량 M_o (g)의 평방근에 비례하고, 로 내 분위기온도 T_a (°C)에 반비례하는 것을 알 수 있다. 시험편이 적은 경우에는 측정값이 실험식으로 구한 값보다 약간 벗어나지만, 이

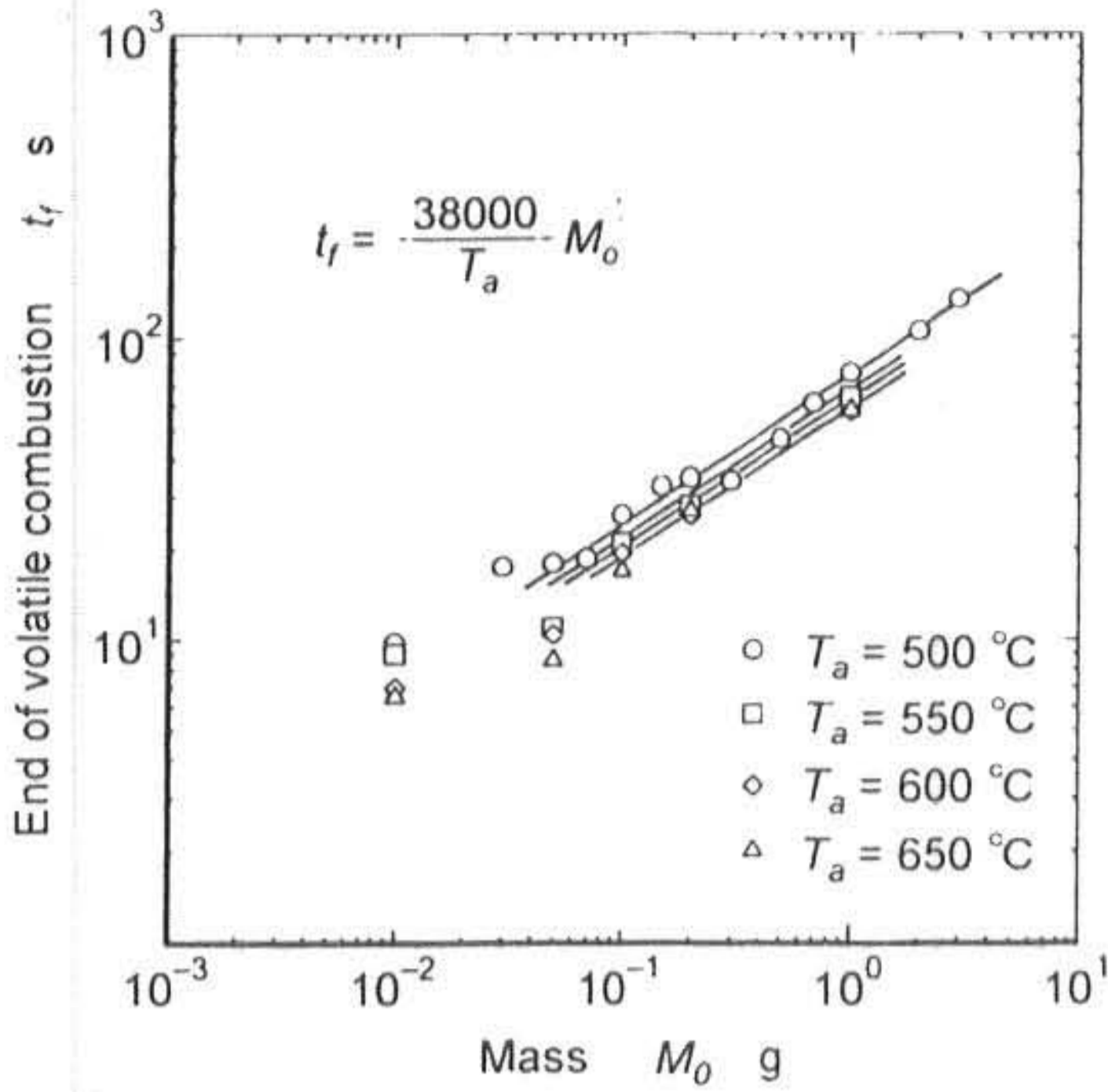


Fig.10 Flame extinction times at various mass and various ambient temperature

것은 시험편이 적게되고 착화지연기간이 증가하는 영역에서만 일어나는 일이다.

3.4 착(char)연소 종료 및 미 연소 분량

착(char)연소의 종료 때에 있어서 회분과 미연소 탄소성분이 시험편중에 남아있기 때문에, 엄밀한 착(char)연소 종료시간을 구하는 것은 어렵다. 그래서 여기서는 시험편의 초기질량 95%를 잃은 상태를 착(char)연소 종료로 정의하고, 시험편의 크기와 착(char)연소 종료시간과의 관계를 Fig.11에 나타내었다. 95% 연소로 구한 착(char)연소 종료 시간은 시험편의 초기질량에 대한 역 S자의 곡선이 되었다. 초기질량이 비교적 적은 범위에서는 착(char)연소 종료시간은 시험편의 질량이 클수록 증가하지만 2.0g 부근에서는 약간 완만하게 된다. 초기질량이 증가하면 착(char)연소 종료시간은 급격히 늦어지고, 여기서 실험한 실험 범위보다도 초기질량이 클 경우에는 95%까지 연소가 진행되지 않았다.

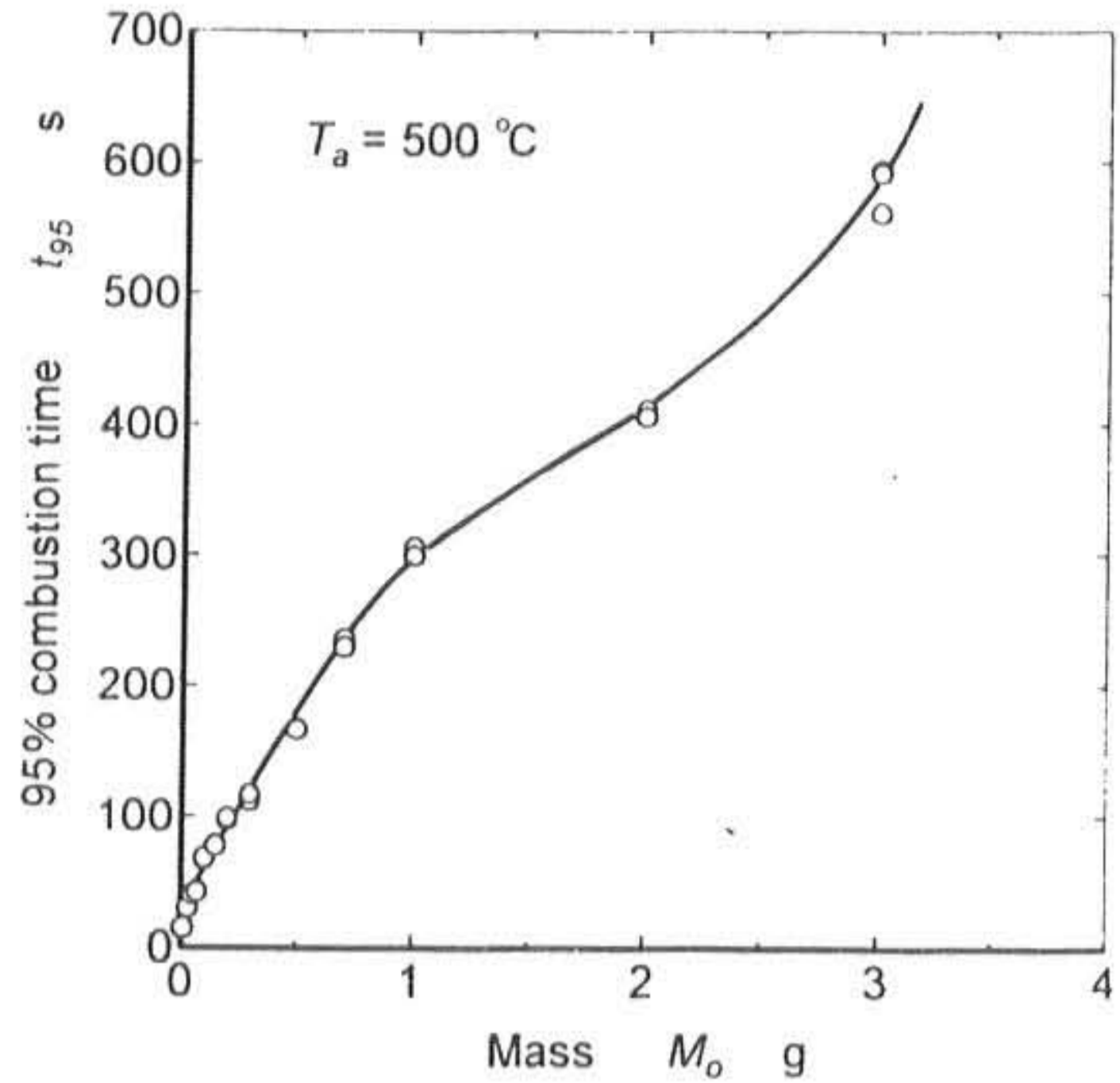


Fig.11 Burn-up time of 95% combustion

시험편은 설정한 온도로서 로내에 장시간 방치해 놓았을 경우 시험편의 잔존질량을 Fig.12에 나타내었다.

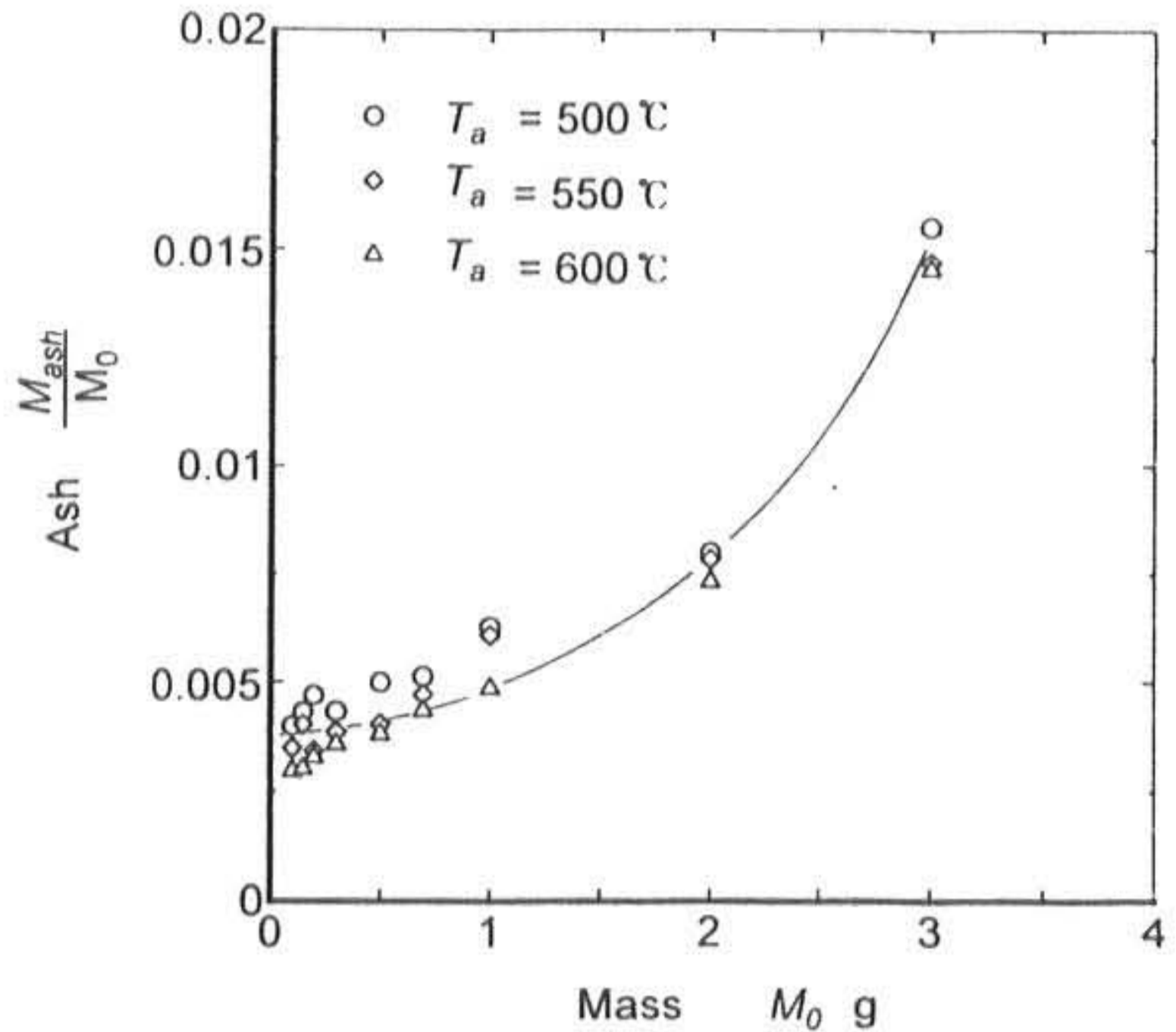


Fig 12. Residual ash after combustion

열중량분석에 의해 시험편(Balsa재)중에 함유된 회분은 1.2%이지만, 시험편이 적을 경우에는 가연성분의 연소가 완전히 이루어져서 잔존질량이 회분보다 적었다. 이것은 측정정도에도 문

제가 있지만 회분의 일부가 연소 중에 비산 된 것으로 생각된다. 한 편 시험편의 초기질량 3.0g인 경우에는 회분의 비 보다 많은 잔존 질량이 있다.

이것을 활(char)연소 종료 후에도 미연소 분이 남아 있다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

목재(Balsa재) 의 초기 질량과 로 내로 분위기 온도를 변화시켜서 연소실험을 하여, 착화 유무, 연소형태 및 연소특성 등을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 초기질량이 클수록 화염이 강도는 강하고, 유염 연소기간도 길다. 그러나 초기질량 0.01g보다 적으면 착화가 일어나지 않았다.
2. 초기질량이 0.5g 정도일 때 착화지연은 가장 짧게 된다.
3. 로 내 분위기 온도가 높으면 착화지연 시간과 활(char)연소기간에 상대적으로 짧다. 또 활(char)연소 시작시간은 초기 질량이 클수록 길게 된다.
4. 연소 종료후 시험편의 잔존질량은 시험편의 질량이 클수록 회분의 비보다 많은 질량이 남는다는 것을 알 수 있다.

참고문헌

- 1) 平山直道. 燃焼爐におけるダイオキシソ 對應技術の動向.日本エネルギー學會誌. 第76卷. 第10號. pp.926~946(1997)
- 2) 양원,신동훈,최진환, 최상민. 국내 도시쓰레기 소각로에서의 운전조건과 다이옥신 배출량과의 상관관계에 관한 연구. 대한기계학회논문집B권. 제22권. 제12호. pp.1755~1762 (1998)
- 3) Winter.F.W, Prah.H.E and Hofbauer.H. Temperatures in a Fuel Particle Burning in a Fluidized Bed. Combustion and Flame. Vol.108. pp.302~314(1997)
- 4) Kim,C.J, Ogiwara.G, Arai.M. Combustion Characteristics of Balsa Chips(1). J. Japan

Institute of Energy.Vol.77. No.10.pp.1019~1026 (1998)

- 5) Kashiwagi. T and Nambu. H. Global Kinetic constants for Thermal Oxidative Degration of a Cellulose Paper. Combustion and Flame. Vol.88, pp.345~363(1997)
- 6) Ishimi. T, Koyam. M, Hirayama. N and Higashimura.K.Combustion Characteristics in a Municipal Sold Waste Incinerator. Transaction of the JSME. Vol.60. No.573. pp.287~294(1994)
- 7) Asaieh.F.Y and Richards.G.N.The Effect of Preheating on Ignition Temperature of Wood Char. Combustion and Flame. Vol.80. pp.395~398(1989)
- 8) Fritsky.K. J, David. A. M and Micholas.P.C. Methodoldgy for Modeling the Devaltization of Analysis of Municipal Solid Waste Components. J. Air & Waste Management Association. Vol.44. pp.1116~1123(1994)
- 9) Robert.H. E. Ignition of Coal Particles. Combustion and Flame.Vol.77.pp.3~30(1989)
- 10) Kim. C. J, Kim. W. O, Arai. M and Ogiwara.G.Combustion Characteristic of Wood Materials. Proceeding of the KSME 1999 Spring Annual Meeting B. pp.755~760(1999)

(1999년 7월13일 접수, 1999년 10월10일 채택)