

## 오토엔진의 공간적 화염전파와 “Flame Quenching”

### Räumliche Flammenausbreitung und “Flame Quenching”

#### Bei Ottomotorischer Verbrennung

F. Pischinger, U. Spicher

許京姬\*譯

Kyung Hee Huh

XX FISITA (1984. 5. 6~11, Wien)에서 發表된 약140편의 論文 중에서 主題의 論文(NO. 845000, 獨逸語)을 골라 紹介하는 것은 종래의 측정기술로는 2次元의인 것에 局限되었으나, 本論文은 光傳導섬유기술(Lichtleit-fasertechnik)을 사용하여 새로 개발된 측정방법으로 화염면의 공간적(3次元)인 전파과정과 quench zone의 출현을 조사하고 있어, 새로운 측정방법의 하나로 생각하여 紹介하는 바입니다.

#### 요 약

공간적 화염전파에 대한 실험적인 파악을 통하여 오토엔진에서의 연소과정과 진행을 위한 깊은 통찰을 할 수 있다. 그것을 통하여 매우 희박한 공기-연료 혼합기의 경우 실린더에서 직접 消炎과정을 확인할 수도 있고 hydrocarbon의 불완전 연소와 나타나는 quenching zone간의 관계를 조사할 수도 있다. 光傳導섬유기술(Lichtleit-fasertechnik)을 사용하여 새로 개발된 측정방법을 이용하여 단기동 오토엔진에서 화염면의 공간적인 전파과정과 매우 희박한 공기 연료 혼합기에서의 quench zone의 출현을 조사하였다.

측정결과들은 공기연료 혼합기가 희박해 질수록 화염전파 과정이 점점 느려지는 것을 보여준다. 아주 높은 공기 과잉율을 갖는 엔진 운전에서는 화염속도와 연소속도가 매우 급하게 감소

한다. 그리하여 화염면은 팽창 단계에서 상대적으로 증가하는 피스톤속도 때문에 더 이상 피스톤을 따를 수가 없으며 그로 인해 직접 피스톤 상부에 소염대가 형성된다. 그에 의해 배기가스에서의 hydrocarbon 방출의 급격한 증가와 효율이 급격히 감소하는 엔진 운전과 관련이 지어진다.

#### 서 론

환경보호와 에너지자원 부족은 증가추세에 있으며 이들이 내연기관 개발에 영향을 미치고 있다. 개발을 할때는 연소진행의 최적화, 즉 연소실에서의 화염전파가 특히 의미가 있다. 공간적인 화염에 대한 실험적인 파악과 그것을 통한 결과인 연소진행에 대한 지식들은, 엔진의 운전변수와 구조 변수들이 효율 개선과 유해물질 경감면에 관계되는 영향들을 더 잘 평가할 수 있다.

공간적인 화염전파 측정기술의 이해를 위해서 지금까지 알려진 측정방법인 이온 전류 probe, 고속 사진술과 schlieren 촬영은 적당하지가 않다. 왜냐하면 이들은 근본적으로 단지 화염면의 이차원적 파악만을 가능하게 하기 때문이다. 그리하여 화염측정을 위해 opto-electronic 구성요소와 결합한 광전도 섬유기술을 도입하였다. 이 측정방법은 이미 널리 알려진 다른 측정방법들과는 달리 엔진 연소실내부의 공간적 화염 전파

에 대한 역추론(逆推論)을 가능케 한다.

오토엔진에서의 운전상태는 본질적으로 공기 과잉율을 통해서 결정된다. 혼합기의 희박화에 따라서 연료소비와 배기가스 질에 관련된 개선을 할 수 있다. 요즈음 유용한 희박화 경계는 공기 과잉율로 볼때 약 1.3 정도이다. 더 높은 공기 과잉율 영역으로의 변화는 엔진 효율의 뚜렷한 저하와 또 배기 가스에 용납될 수 없는 정도의 불연소된 hydrocarbon 물질의 증가를 야기한다. 지배적 원인으로서는 그때 아직 미연가스인 新氣의 존재에도 불구하고 화염의 소멸때문이라고 본다. 좀더 자세한 이 과정에 대한 통찰을 위해 아주 높은 공기 과잉율을 갖는 운전 조건들에서 조사하였다.

### 측정방법

엔진 연소때 화염은 전자파를 방사한다. 이 전자파는 도입된 측정방법에 의해 공간적 화염전파의 파악과 평가를 위해 유용하게 되어 연소실 벽과 고전도체 (high conductor) 안에 있는 여러 군데의 관찰 위치(optic probe)들을 지나 lightelectric receiver (photomultiplier)에 보내진다. 이 receiver는 입사되는 화염의 전자파에 대한 반작용으로 그에 상응하는 전기적인 outlet-signal과 반응한다. 연소실벽에 광학탐지기(optic probe)의 신중한 공간적 배치와 lightelectric receiver

의 outlet-signal에 대한 적합한 평가는 이 측정방법과 함께 공간적이며 시간적인 화염면의 전파에 대한 역추론을 얻게한다. 그림 1은 공간적 화염전파의 파악을 위한 전체적인 측정배치를 보여준다. photomultiplier의 outlet-signal들은 먼저 임피던스 변환기와의 소음이 없고 지속적인 처리를 위해 정돈한 후, 이어서 digital화 한다.

실험대상으로는 연소실 내부로의 접근이 용이한 Klöckner-Humboldt-Deutz AG 회사의 공냉식 단기통 4행정 디젤엔진을 사용하였다. 이 엔진은 오토엔진 연소에서의 화염전파에 대한 실험을 위해 그에 적합하게 변경하였고, 또 압축비  $\epsilon = 8.5$ 와 suction pipe-injection을 갖는 4행정 오토엔진으로 개조하였다. engine의 행정 체적은  $V_H = 1595\text{cm}^3$ 이며 실린더 지름은  $D = 125\text{mm}$ 이고 피스톤 행정은  $S = 130\text{mm}$ 이다. 연소실은 원판형으로 설계되었다. 화염전파는 실린더 벽에 있는 240개의 측정위치를 지나며 총괄적으로 관찰된다.

240개의 digital 측정 signal들의 저장은 2단계에 의해 이루어진다. 이 signal들은 먼저 측정시각  $t_1$ 때에 reservoir elements (중간 저장소)에 저장된다. 240개의 저장요소의 내용들은 2개의 측정시간인  $t_1$ 에서  $t_{n+1}$ 까지의 시간간격에서 control-electronics의 도움으로 두번째의 32 kByte 크기의 주저장소로 옮겨진다. engine 회전수  $n = 2500\text{rpm}$ 에서 크랭크각  $2^\circ$ 의 증계주파수에 도

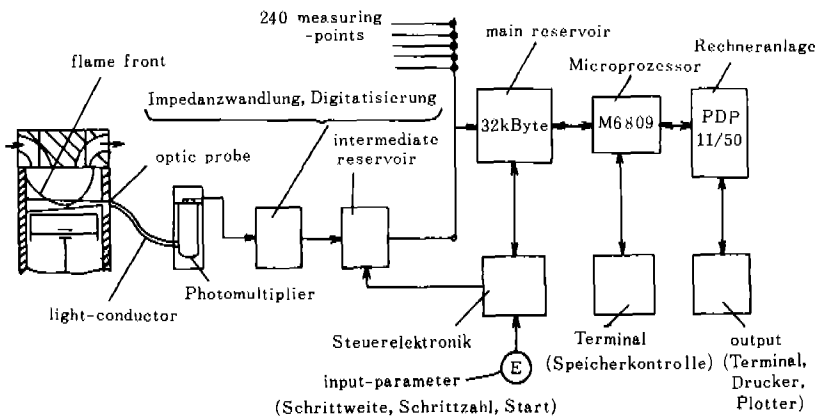


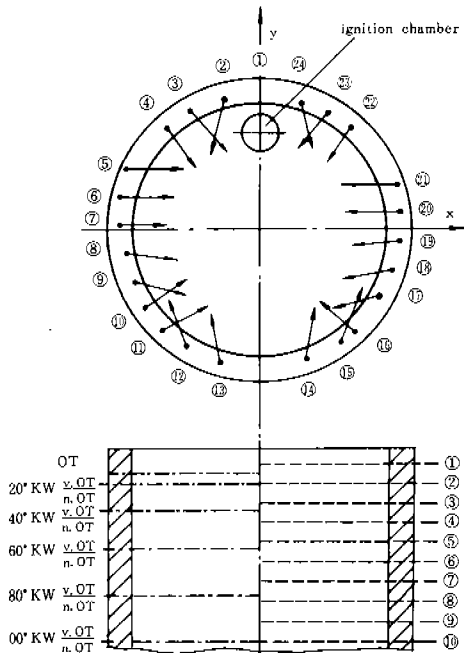
그림 1. 공간적 화염 전파의 파악을 위한 측정 배치도

달하는 것은 가능하다. 수행된 실험에서 화염전파의 관찰을 위해 두 측정시간간의 간격을 2°의 crank angle로 선택하였다.

microprocessor (M6809)가 집합 저장소의 관리 및 주저장소와 전산기 PDP 11/50간의 연결과 측정치들의 전달을 위해 사용되었다. 측정 통제를 위해서 측정 결과들을 화면 단말기상에서 명백한 matrix form으로 표현하는 것이 가능하다. 적합한 정돈과 저장후에 그 파악된 시각적인 화면 signal은 전산기 PDP 11/50에서 계산 프로그램에 의해 산출된다. 그때 매 측정시각에 대한 화염의 윤곽들이 연산 방식에 의해 구해지며 그리고 각 측정단면상에서 매 15개의 표면 점들을 통하여  $x-y-z$  좌표에 표기된다. 화염 윤곽들로부터 시간에 좌우되는 화염면 속도와 적분을 통해 시간에 관계하는 변환된 연소가스의 체적(화염체적)이 확인된다.

그림 2는 실린더 벽에서의 optic probe들의 분포를 나타낸다. 그때에 분포는 연소실 전체가 완전히 파악되도록 이루어져 있다.

이 240개의 optic probe들은 10개의 측정단면



(여기서 KW은 crank angle, OT는 Top Center 그리고 v.와 n.는 각각 전과 후를 뜻함)

그림 2. 실린더 벽에서의 Optic probe들의 분포

으로 나뉘어 안배되어 있는데, 매 측정단면상 24개의 측정위치가 나타나 있다. 아래쪽 그림에선 각 측정단면에 대한 크랭크각의 배치들을 준다. 실린더 벽 안의 optic probe들은 직경이 1mm이며 공간각도가 약 8°인 관찰창을 갖는 조리개들로 작용한다. 따라서 연소실안에서 하나의 비교적 작은 원뿔모양의 체적요소가 매 측정위치상에서 관찰된다. 따라서 그것을 통하여 측정위치와 연소실안의 관찰된 체적요소의 극부처 위치에 대한 하나의 적절한 배치가 주어진다. 이것이 화염 윤곽의 정확한 확인을 위해 필요한 것이다.

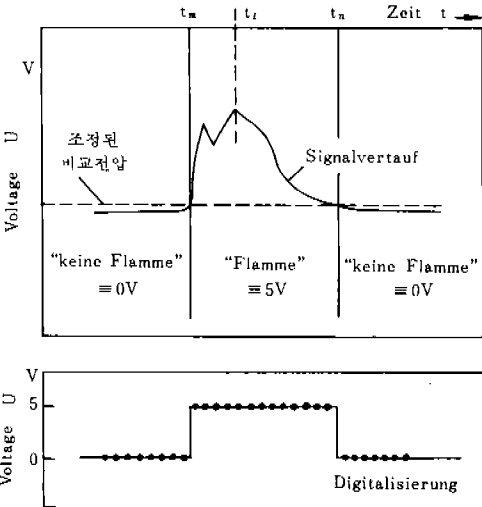
예비 실험에서 공기연료 혼합기의 점화는, 특히 매우 희박한 연료공기 혼합기에 대한 조사에 관련하여 분배, 균일한 착화를 위하여 별도의 점화실 분사장치를 갖는 분리된 점화실에서 이루어지는 것이 매우 유리하다는 것을 보여주었다. 그래서 혼합물은 그런 분리된 점화실에서, 화염면이 그곳으로 부터 출발하여 전체 연소실에 걸쳐 주방향으로 전파되어 나갈 수 있도록 점화되었다. 점화실 체적은 약 7cm³이다. 이것은 압축 체적의 약 3%에 해당된다. 점화실과 주연소실간의 통로는 직선적으로 설계되었다.

화염에서 방사되는 광선의 강도 및 photomultiplier의 그에 상당하는 전압 signal의 높이는 시간적으로 분배 일정하지 않다. 그외에 signal의 변화들은 주기적인 에너지 변환변동의 지배를 받으며 그리고 최대 전압값들은 연소실 벽에 있는 optic probe들의 더럽힘에 따라 감소된다. 측정 위치에 대한 화염도착 시각들의 명확한 표현을 위해 비교전압(vergleichsspannung)이 조정된다. 그림 3은 측정할 때 어떻게 비교전압의 nominal value(sollwert)가 조정되며 또 어떻게 측정위치에 대한 화염도착 시각이 정의되는지를 보여준다.

만약 한 측정시각에 대해 각 signal 전압들이 조정된 비교전압보다 작으면 digital화한 레벨의 outlet voltage들은 "0V"(화염이 존재하지 않음)이며, 반대로 더 크면 outlet voltage들은 "5V"(화염이 존재)에 달한다. 비교전압의 nominal value는 "화염 존재"라는 정보가 측정위치에 처음으로 나타나는 시각  $t_{m,i}$ 이, 근사적으로 관찰되

는 voltage signal 변화의 첫번째 급상승과 일치하도록 그렇게 조정한다. digital화된 특정 signal 이 그림 3의 아랫부분에 표현되어 있다. 측정에서 optic probe의 더럽힘이 화염 도착시간에 관계하여 측정의 질에 거의 영향을 주지 않는다는 것이 확인되었다.

이런 종류의 새로운 측정방법에 대한 개발은, 다루고자 하는 문제에 대한 적합성 여부에 대한 검토를 요구한다. 때문에 파악된 값들은 실제로 이미 잘 알려지고 또 실증된 측정방법에 의한 결과들과 비교하는 것이 필요하다. 계산매개 변수로서 측정된 실린더 압력 변화가 주어지는 열역학적 model 계산들이 지금까지의 연구들에서 연소경과의 조사를 위해 적합함이 증명되었다. 마찬가지로 그와 동시에 그 모델계산을 위한 압력 변화대신 측정된 화염운파으로부터 적분을 통해 구한 시간에 대한 화염체적이 연소경과의 조사를 위해 제시되어도 된다. 그러므로 화염측정과 지압선도의 비교를 행하는 것과, 정확도 및 측정오차를 고려한 화염측정에 대한 검토를 행하는 것이 가능하다. 때문에 화염측정과 병행하여 각 연소사이클에 대한 압력 변화들이 기록되어야 한다.



$t_i$  - 연소 진행중의 임의의 시각  
 $t_m$  - 측정위치에 화염이 도착하는 시각  
 $t_n$  - 화염이 소멸되는 시각

그림 3. Nominal valve 조정과 측정위치에 대한 화염도착 시각

그림 4는 비교 크기들로서 Benzin 운전의 경우, 공기 과잉을  $\lambda = 1.49$ 인 연소 사이클에서 크랭크각도  $\alpha$ 에 대한 압력변화와 화염체적 변화를 보여준다. 이 측정때 회전수는  $n = 1100 \text{rpm}$  이었고, 점화시각은 하사점후 크랭크 각도  $\alpha_{ZZP} = 140^\circ$  로 맞추었다. 흡입관 부압은 delivery grade 로  $\lambda_L = 0.45$ 로 주어지게끔 조정하였다.

측정된 실린더 압력변화와 이로부터 계산한 화염체적변화가 실선인 곡선으로 표현되어 있다. 타점의 원 또는 파선의 곡선들은 측정된 화염체적과 그로부터 계산하여 구한 압력값들을 표기한 것이다.

연소 사이클의 전체를 통해 볼때, 압력변화를 위해서나 시간적인 화염체적의 변화에 대한 것이나 측정과 계산의 일치가 잘 나타나 있다. 이것은 또 서로 거의 편차가 없는 평균 유효압력  $P_{min}$ 에 대한 결과에서도 증명된다. 화염 측정에서 계산된 평균유효 압력은 측정된 평균유효 압

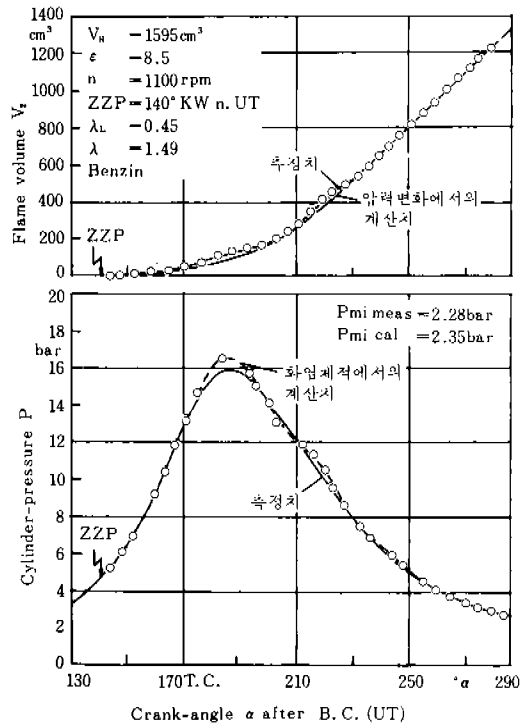


그림 4. 지압선도와 화염측정으로부터 구한 화염체적  $V_f$ 와 실린더압력  $P$ 의 비교 (Benzin은 英語로는 gasoline 임, 또한, ZZZP는 점화시각을 말함.)

력보다 단지 3% 정도만 클 뿐이다. 수행된 화염전파에 대한 조사에서 행하여진 비교 측정들과 비교 계산들이 모든 운전 조건에서 화염측정과 지압선도로 부터의 결과가 비슷하게 양호한 일치에 도달할 수 있음을 보여 주었다. 이것은 engine 연소실에서 공간적인 화염전파에 대한 파악을 위해 사용한 측정방법이 적합하다는 것을 뜻한다.

측정 결과

그림 5는 공기 과잉율이 각각  $\lambda=1.2$ 와  $\lambda=1.59$ 인 2개의 운전 조건들에 대한 3개의 다른 시각에서 확인된 공간적인 화염 윤곽들을 보여 준다. 그 화염측정은 기관회전수  $n=1100$  rpm에서 수행되었다. 점화시각은 두 운전 조건들에서 모두 최적의 성능을 고려하여 조정되었고, delivery grade가  $\lambda_L=0.45$ 가 되도록 선택하였다.

하사점을 기준으로 하며(하사점에서 크랭크각  $0^\circ$ ) 크랭크각  $170^\circ$ 와  $210^\circ$ 가 되는 시각에서의 화염윤곽들로부터 공기 과잉율이  $\lambda=1.59$ 인 매우 희박한 운전 조건의 화염은, 공기 과잉율  $\lambda=1.12$ 인 농후한 운전 조건의 경우보다 상당히 쉰 천히 전파됨을 알 수 있다. 하사점후 크랭크각이  $250^\circ$ 인 시각에 대하여 실린더의 6개 측정단면이 관찰된다. 공기 과잉율  $\lambda=1.12$ 인 운전 조건에서 거의 전 연소실이 화염면으로 관통되는 반면에 공기 과잉율이  $\lambda=1.59$ 인 운전 조건에선 6번째 측정단면에서 피스톤 바로 상부에 화염면으로 싸여지지 않은 부분(quench zone)이 보인다. 연소실의 윗부분에서는 농후한 운전 조건 일때와 마찬가지로 화염면이 실린더 벽까지 전파되어 있다.

연소과정에서 이런 소염대(quench zone)의 출현이 어떠한 영향을 주는가에 대한 문제는 열역학 모델 계산을 통해 설명된다. 이를 위해선 2영역 연소모델이 사용된다. 미연가스와 기연가스 영역에서 서로 독립적인 시간에 대한 질량변화에 대한 설명을 위하여 “연소 함수”(Brenn-funktion)가 인용된다.

$$X_B = \frac{m_2(\alpha)}{m_g} = 1 - \frac{m_1(\alpha)}{m_g}$$

“연소함수”  $X_B$ 와 마찬가지로 연소실체적  $V_{BR}$ 에 대한 측정된 화염체적  $V_2$ 의 비를 체적비(Volumenquotient)  $V_Q$ 로 정의한다.

$$V_Q(\alpha) = \frac{V_2(\alpha)}{V_{BR}(\alpha)}$$

( $X_B$  및  $V_Q$ 는 질량연소율 및 체적연소율로 해석된다. ...역자)

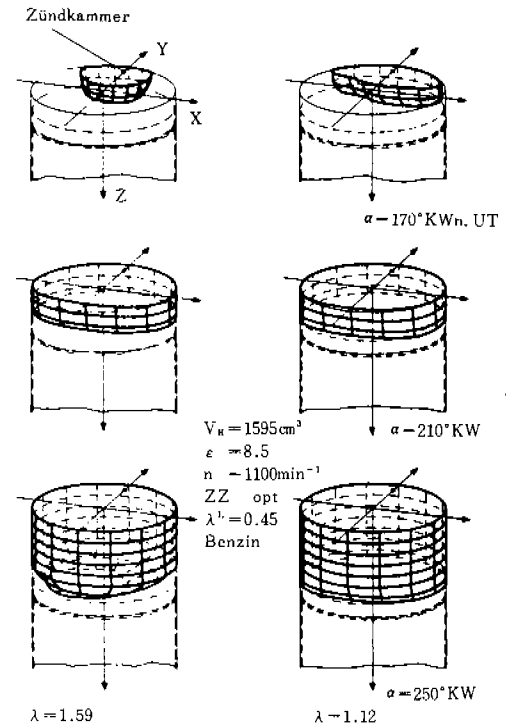


그림 5. 공간적인 화염 윤곽

그림 6은 체적비의 변화와 그림 5에서 설명된 연소사이클들에 대한 연소함수론 보여 준다.

체적비 변화의 경과로 보아 화염전파 과정은 매우 크게 공기 과잉율에 좌우됨을 나타내고 있다. 공기 과잉율  $\lambda=1.12$ 인 연소사이클에서 체적비가, 하사점후 크랭크각  $\alpha=240^\circ$ 인 시각부터는 거의 변화가 없지만, 아무튼 최후값인  $V_Q=0.99$ 까지 증가하나, 공기 과잉율이  $\lambda=1.59$ 인 연소사이클에선 이 시각부터 오히려 체적비가 감소됨을 확인할 수 있다. 이것은 바로 이 시각부터 quench zone이 출현한 때문이다. 이때 화염체적은 연소실 체적 증가보다 덜 증가된다. 연

소함수의 변화가 보여주는 것 같이 지속적인 화염전파를 확인할 수 있음에도 불구하고 하사점 후 크랭크각  $\alpha=240^\circ$ 인 시작부터는 단지 아주 작은 에너지 변환만 생길뿐이다. 본질적으로 두 연소단계는 두 연소사이클 모두에서 이 시작까지로 종결된다. 공기 과잉율이  $\lambda=1.12$ 인 연소사이클에서 연소함수의 최종값은  $X_{Bmax}=0.99$ 이며 공기 과잉율  $\lambda=1.59$ 인 연소사이클에서는 최종 연소 함수값은  $X_{Bmax}=0.92$ 이다.

수행된 실험은 특히 공기 과잉율이 1.4보다 큰 경우의 연소사이클에서는 다소의 차이는 있으나 화염면이 통과하지 않는 quench zone이 나타나 는 것을 보여주었다. 그리고 이때 그림 5 중 하사점 후 크랭크각  $250^\circ$ 인 경우처럼 화염이 통과할 때 quench zone이 연소실의 한면 또는 여러 면에서 형성되거나 또는 화염면이 연소실 단면 전체에 걸쳐서 더 이상 피스톤을 따르지 못함을 설명할 수 있다.

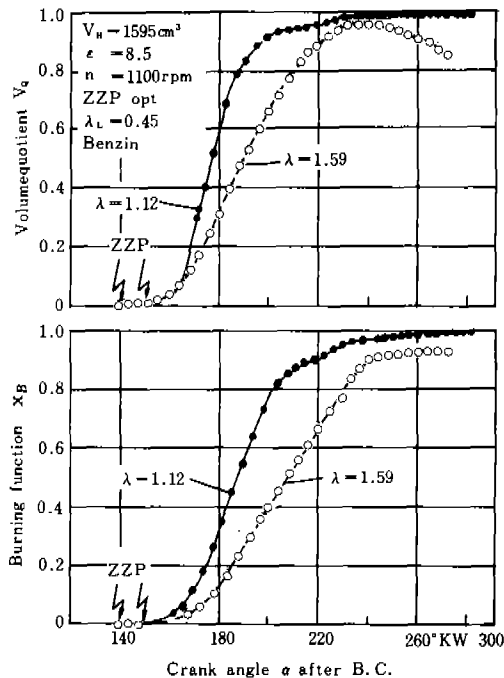


그림 6. 체적비율과 연소함수

그림 7에서는 3개의  $\lambda > 1.45$ 인 공기 과잉율에 대해 각 연소사이클들의 quench zone에 대한 예들을 나타낸다. 여기서 화염운곽은 2차원의

형태로  $y-z$ 좌표계에 표현되어 있다. 화염 그림들을 보면 quench zone이 뚜렷이 나타나 있는데, 특히 공기 과잉율이 증가할수록 이 소염대가 차지하는 체적비율(미연의 체적부분)  $V_R$ 가 급히 증가함을 알 수 있다. 크랭크각  $280^\circ$ 는 3연소사이클에서 모두 거의 연소과정의 끝에 해당한다. 가장 큰 소염영역들은 냉공기가 흘러 들어 오는 쪽의 연소실 벽면이며, 이 벽면 온도는 반대쪽 벽면 온도보다 더 낮다. 이것은 또한 공기 과잉율이 높을 때 출현하는 quench zone들은 연소실 벽면 온도에도 영향을 받는다는 것을 의미한다.

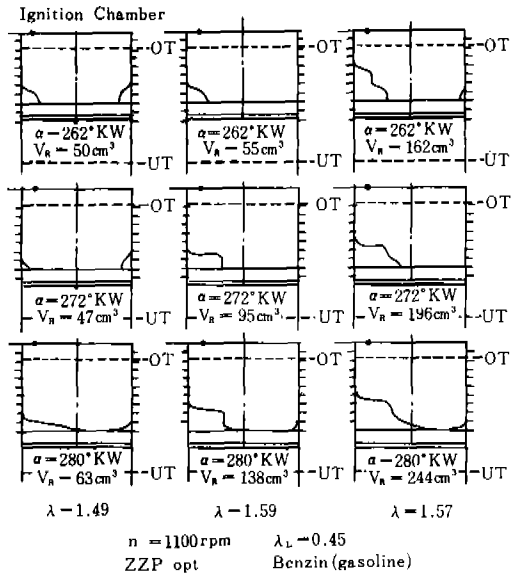


그림 7. 불완전연소에서 화염운곽

quench zone이 어떻게 hydrocarbon emission에 영향을 주는가 하는 것을 파악하기 위하여 quench zone에서의 hydrocarbon 농도를 근사적으로 다음과 같은 관계식을 이용하여 계산하였다.

$$\psi_{HC} = \frac{\sigma_{C, BR} \cdot V_R \cdot P}{R_i \cdot T_i \cdot m_g \cdot \sum_{i=1}^{K_1} \sigma_{i_1}}$$

- $\psi_{HC}$  ; 탄화수소 농도의 질량분율
- $\sigma_{C, BR}$  ; 연료중 carbon성분의 specific quantity
- $V_R$  ; quench zone의 체적
- $P$  ; cylinder 압력
- $m_g$  ; 총부하 질량

- $R_i$  ; 신기 혼합물의 기체상수
- $T_i$  ; 신기 혼합물의 온도
- $\sigma_{in}$  ; 신기 혼합물 내의 성분  $i$ 의 specific quantity

그리고 이때 quench zone 안에는 공기, 연료, 그리고 이전 사이클의 잔류 가스로 구성된 신기 혼합물이 존재한다고 가정한다. 이렇게 계산된 탄화수소 농도들은 누적치로 측정된 hydrocarbon emission과 우선 비교함으로써 접근시킬 수 있다. 그러면 quench zone과 hydrocarbon emission 간의 상호관계 및 경우에 따라선 연소과정이 지난 후에 나타날 수도 있는 후반응에 대한 해명에 관한 진술들을 가능하게 하고 있다.

그림 8은 공기과잉을 변화에 따른 미연의 hydrocarbon으로서  $C_2H_6$ 에 관하여 계산된 hydrocarbon 농도와, 측정된 hydrocarbon emission들을 비교하였다.

그림에서 보는바와 같이 계산된 hydrocarbon 농도들을 측정된 hydrocarbon 농도와 비교할 때 높은 공기 과잉율에서는 더 농도가 크고 낮은 공기 과잉율에선 더 농도가 낮게 된다. 이것은 낮은 공기 과잉율에서는 벽근처 영역(wall quenching)의 영향이 경시될 수 있는데 비하여, 높은 공기 과잉율에선 나타나는 quench zone의 영향이 강하게 나타나는 것을 암시하는 것 같다.

흡입과정에서 생성되는 흡입 유동속도의 증가는 엔진 연소실에서의 더욱 빠른 연소 과정으로 인도한다. 흡입관의 흡입 유동방향과 통상의 흡기 공급량보다 증가시켰을 때 화염전파에 어떻게

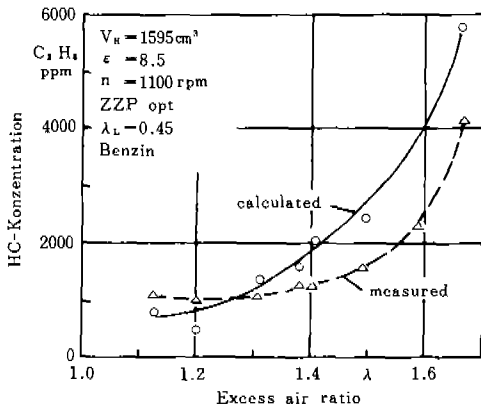


그림 8. 공기 과잉율에 대한 Hydrocarbon 농도

영향을 주는가를 잡기위해 흡입관 부하 및 shrouded valve를 이용하여 흡입흐름을 조정하였다. 그림 9는 valve disc 위에 2개의 조사하고자 하는 shroud 위치를 갖는 흡입 밸브의 안배를 도시적으로 표시한 것인데, 이때 shroud의 위치는 위치 1에서는 좌선회의 유도 흐름, 그리고 위치 2에서는 우선회의 유도흐름이 생성될 수 있도록 선택하였다. cylinder head의 흡입관을 shroud valve 없이는 단지 아주 약한 좌선회의 swirl이 발생하도록 고안되었다 (swirl수  $D=0.5$ , 임펠러 풍력계로 측정).

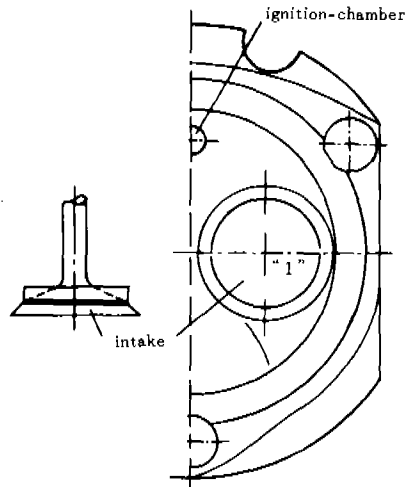


그림 9. 선택된 shroud position을 갖는 valve 안배의 도시적 표현

그림 10에서는 첫번째 측정단면에서 확인되는 화염 모양들이 두개의 선택된 shroud 배치 및 shrouded valve가 없는 통상의 장치에 대하여 4개의 각기 다른 크랭크 각도에 있어서의 화염을  $x-y$  좌표계에 2차원적으로 나타내었다.

shrouded valve가 없는 engine 운전의 경우, 크랭크 각도  $\alpha=170^\circ$ 에서의 화염면으로부터 연소 진행에 따라 좌선회의 경향이 감소하기는 하지만 아주 약한 좌회전을 확인할 수 있다. 크랭크 각  $\alpha=186^\circ$ 의 시각부터는 벌써 하나의 균일한 화염면의 전파를 볼 수 있다.

shrouded valve를 이용한 결과로부터 shroud 위치 "2"에서(그림 9 참조) 기대한대로 하나의 우회전이 나타나는 동안에 부하유동의 좌회

전을 통해 화염면도 그에 상응하는 좌선회를 형성함을 알 수 있다. 화염면의 관측에서 파악된 cylinder 단면상의 화염면의 면적부분들은 공기 과잉율  $\lambda=1.6$ 에 비해  $\lambda=1.45$ 에서 더 빠른 화염면 전파를 통한 공기 과잉율의 영향을 보여주고 있다. 그외에도 확인될 수 있는 것은 더 높은 swirl을 갖는 유도된 부하유동을 통해 주연 소단계에서의 에너지 발생이 명백하게 가속된다는 것이다. 수행된 측정들은 더 나아가서 연소의 진행중 측정다면 하부의 화염전파 과정에 주는 영향으로는 유도된 부하유동의 영향이 점점 감소된다는 것을 보여준다.

파악된 공간적인 화염면 윤곽들로부터 평균화염면 속도를 구할 수 있다. 그를 위해 화염면의 각 contour-point들에 대한 화염속도들은 2개의 시간적으로 연속적인 측정시각으로부터 계산할 수 있다. 그리고 이어서 이들 화염면 속도들의 평균값 계산으로부터 평균화염속도  $W_f$ 를 구할 수 있다.

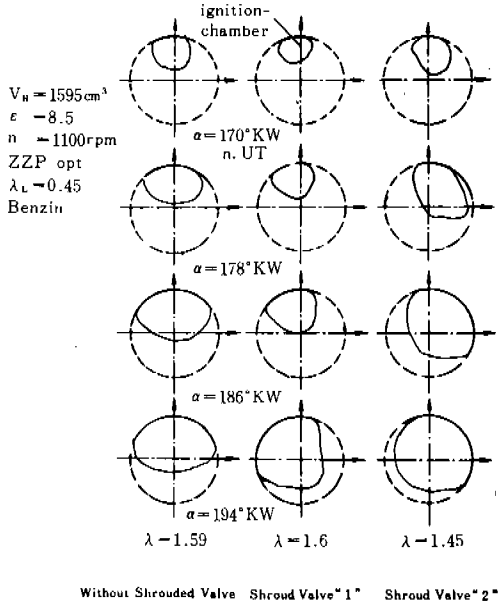


그림10. Flame propagation with and without swirl

그림 11은 공기 과잉율이  $\lambda=1.3$ 일때 각각 swirl이 있을때와 없는 경우 Benzin 운전과 methanol

운전에 대한 평균화염속도 변화를 보여준다. swirl을 생성하기 위해서 shroud 배치는 부하유동에 대해서 하나의 좌선회가 형성되도록 정하였다. 엔진 회전수는 이 측정에서 다시금  $n=1100rpm$ 로 하였고 점화시각도 최적의 성능을 고려하여 조정하였다. 또한 delivery grade는  $\lambda_L=0.42$ 로 하였다.

그림에서 보는 바와 같이 4개의 모든 운전조건에서 화염속도는 처음에는 급격하게 증가하다가 이어서 현저하게 감소한다. 왜냐하면 화염 전파과정이 연소실 벽들 때문에 늦추어지기 때문이다. 그후 속도는 다시금 화염이 사라질 때까지 약간 증가한다. 이들 전형적인 형태의 화염속도 변화는 실질적으로 거의 모든 수행된 측정들에서 확인되었다. 그림에서 보는바와 같이 화염속도의 최대값은 swirl 유동이 없는 엔진 운전보다 swirl을 갖는 엔진 운전에서 눈에 띄이게 높게 나타난다. swirl 유동이 없는 Benzin 운전에서는 다른 것과는 달리 최대 화염속도가 상사 점후에 생긴다. 또한 그림에서 확인할 수 있는 것은 methanol을 사용한 엔진운전인 경우의 화염면은 Benzin 운전보다 훨씬 빠르게 전파한다.

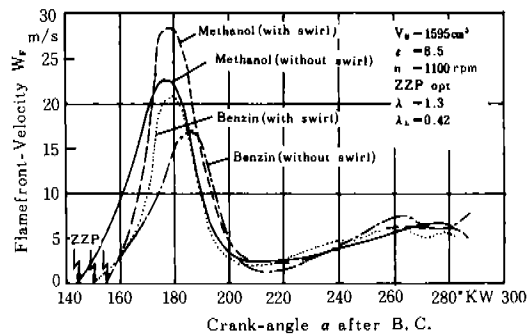


그림11. Crank angle에 대한 화염속도

연소속도에 대한 진술을 얻기 위해 화염측정과 병행하여 엔진연소실에서의 유동측정도 하였다. 유동측정들을 위해서는 Laser-Doppler-Anemometrie를 이용하였는데 Achen공대의 공업열역학 연구실에서 K. F. Knoche 교수의 지도아래 수행하였다. 그리하여 연소가 일어나고 있는 엔진운전에서 연소실내의 유동측정을 하는데 성공



하였다. 그림12는 공기 과잉율에 영향 받는 측정위치 P에서의 접선방향의 화염속도 및 유동속도를 보여준다. 측정장치의 위치는 그림의 원편 아래에 나타나 있는 것으로 알아볼 수 있다. cylinder head에서 측정장소까지의 간격은 13mm이다. 이 측정들에서 흡입유동은 다시금 shrouded valve(SV)의 영향을 받게 하였다. 매 운전점에 대해 각각의 대표적인 연소사이클들로부터 측정장소에서의 접선방향의 화염속도를 구하였다. 측정들은 회전수  $n=1100\text{rpm}$ 에서 행하여졌다. delivery grade  $\lambda_L=0.42$ 이었으며 점화시키는 다시금 최대성능을 고려해서 조정하였다. 화염측정들은 화염이 상사점에 도달하기 전  $10^\circ \sim 12^\circ$ 사이의 크랭크각 영역에서 측정장소를 지나 감을 보여준다. 이 크랭크각 영역에서 tangential flowvelocity ( $W_{CT}$ )는 약  $10 \sim 13\text{m/s}$ 에 달한다. 그림에서 보는바와 같이 유동속도는 생각했던대로 공기 과잉율과는 무관하다.

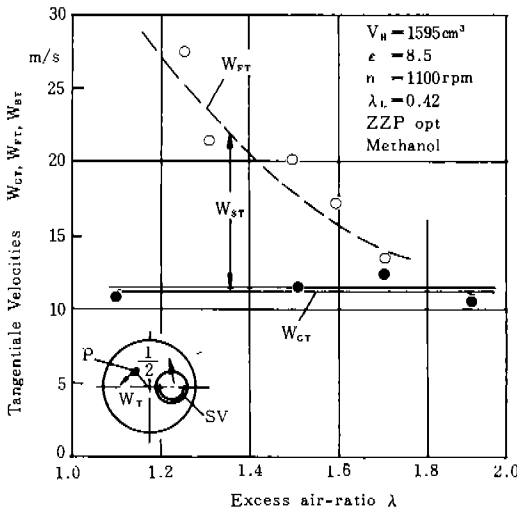


그림12. 공기 과잉율에 대한 화염속도, 유동속도 그리고 연소속도의 변화 (상사점전의 크랭크각  $10^\circ \sim 12^\circ$ )

화염속도의 접선분속도  $W_{FR}$ 는 파선으로 표시된다. 여기에서 보면 화염속도는 공기 과잉율에 따라 매우 큰 영향을 받는다. 유동속도와 화염속도에 대한 지식을 통하여 연소속도  $W_{SR}$ 를 결

정하는 것이 가능한데, 여기서  $W_{SR}$ 는 연소속도의 접선분속도로 표시된다. 이로써, 연소과정에 대한 평가를 위하여 가장 중요한 크기들 중 하나가 구해진다. 속도 변화들로부터 알 수 있는 것은 연소속도가 화염속도처럼 공기 과잉율이 증가할수록 감소하며 끝에 가서는 0이 된다는 것이다. 여기서 0이라는 값은 더 이상 연소가 일어나지 않는다는 것이다.

### 결론

새로 개발된 측정방법에 의해 조사된 공간적인 화염전파와 달성된 결과들과 얻은 지식들은 오토엔진에서 연소가 일어나는 동안의 깊은 통찰을 가능케 한다. 효율개선과 유해물질 감소와 관련하여 오토엔진을 계속 개발하거나 선정할 때 측정방법은 중요한 보조 수단으로 이용될 수 있다. 조사된 것중 중요한 결과들을 요약하면 다음과 같다.

- 새로이 개발된 측정방법은 공간적인 화염전파에 대한 과잉을 위해 적절하다.
- 연료·공기 혼합물의 희박화는 화염전파 진행을 지연시킨다.
- 높은 공기 과잉율을 갖는 엔진 운전에서는 팽창단계에서 피스톤 상부에 불연소된 혼합물을 갖는 quench zone이 형성된다.
- 불완전한 연소의 화염전파는 급격한 hydrocarbon emission을 초래한다.
- 유도된 부하유동은 화염면의 윤곽을 변형시킨다. 화염전파 진행은 증가된 부하유동을 통하여 가속된다.
- 엔진 연소실에서의 유동측정을 통하여 연소속도를 구하는 것이 가능하다.

### 참고문헌

1. Pischinger, F., Knoche, K. F., Spicher, U. ; Kohlenwasserstoff-Emission I Arbeitsfortschrittbericht über das Vorhaben 231/299 Entstehung von Kohlenwasserstoffen durch "flame quenching" bei Verbrennungsmotoren

Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e. V. Heft R 426 (1983)

2. Spicher, U.; Untersuchungen über die räumliche Ausbreitung und das Erlöschen der Flamme bei der ottomotorischen Verbrennung Dissertation RWTH Aachen, 1982
3. Kleinschmidt, W.; Untersuchung des Arbeitsprozesses und der NO-, NO<sub>2</sub>- und CO-

Bildung in Ottomotoren Dissertation RWTH Aachen, 1974

4. Pischinger, F., Schaffrath, M.; Untersuchung des Arbeitsprozesses von methanol- und wasserstoffbetriebenen Ottomotoren Forschungsbericht der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e. V. Frankfurt, Heft 192, 1978