

## 스파크 점화 엔진에서 초기화염 발달의 가시화

엄인용<sup>†</sup>

### Visualization of Initial Flame Development in an SI Engine

Inyong Ohm

**Abstract.** Initial flame development and propagation were visualized under different fuel injection timings to relate the initial flame development to the engine stability in a port injection SI engine. Experiments were performed in an optical single cylinder engine modified from a production engine and images were captured through the quartz window mounted in the piston by an intensified CCD camera. Stratification state was controlled by varying injection timing. Under each injection condition, the flame images were captured at the pre-set crank angles. These were averaged and processed to characterize the flame. The flame stability was estimated by the weighted average of flame area, luminosity, and standard deviation of flame area. Results show that stratification state according to injection timing did not affect on the direction of flame propagation. The flame development and the initial flame stability are strongly dependent on the stratified conditions and the initial flame stability governs the engine stability and lean misfire limit.

**Key Words :** Initial Flame(초기화염), Stratification(성층화), Engine Stability(엔진 안정성), Lean Misfire Limit(희박연소한계)

## 1. 서 론

왕복동 엔진 내에서 발생하는 각종 유동 및 연소 현상 특히 압축이 진행되는 과정 중에 발생하는 연소 과정에는 수많은 난류 유동과 화염의 상호작용이 개입 하므로 그 해석이 매우 어렵고 엔진 자체의 비정상적 특징으로 인해 컴퓨터 등을 이용한 해석적 방법으로 현상을 규명하는데도 많은 난점이 있다. 따라서 현재 까지 현상의 해석에는 압력 측정 등을 이용한 실험적 방법이 주로 사용되고 있으며 최근 계측 기술의 발달로 엔진 내부의 광학적 접근이 활발히 시도되고 있다.

광학적 접근 방법에 의해 유동 현상에 대한 규명은 어느 정도 이루어진 상태이나 실물 엔진의 연소 현상에 대한 접근은 아직 직접 화염 가시화 등과 같은 초보적 수준에 머물고 있고 이의 구체적인 정량적 데이터 해석은 전무한 상태이다.

특히 가솔린엔진에서는 흡입 유동특성과 분사시기의 조합에 의한 연료의 분포 상태 변화 즉 성층화 상태에 따라 엔진의 성능이 다르고<sup>(1-5)</sup> 이와 별도로 안정된 운전 조건에서도 통상 3%정도의 사이클 변동이 발생하고 있다.<sup>(6)</sup> 이러한 변동은 모두 연소의 변동에 기인하는 것이며 특히 초기 화염의 변동성과 밀접한 관련을 지니고 있다.<sup>(6,7)</sup> 때문에 이러한 엔진 성능의 변화에 따라 초기 화염의 발생·전파과정을 이해하는 것은 엔진 성능과 화염 전파의 연관성을 이해하는데 매우 중요하다.

따라서 본 연구에서는 엔진의 분사시기를 달리하여 서로 다른 성층화 상태를 유도하고 이에 따른 화염의 발생과 그 초기 전파과정을 가시화한 결과를 엔진의 성능 실험 결과와 정량적으로 비교하기 위하여 ICCD 카메라로 획득한 화염의 직접 화상을 대상으로 새로운 정량적 해석을 시도하였다.

이를 위해 수집과 분류를 통해 확보된 화염 영상을 이용하여 이 영상에서 구체적 데이터를 추출하는 과정을 거쳐 영상 데이터를 모두 해석 가능한 수치 데

<sup>†</sup>서울산업대학교 기계공학과  
E-mail : iyohm@sut.ac.kr

이터로 전환하고, 하나의 조건에 대해 계측한 화염 데이터의 변동성을 제거하기 위해 이를 평균하고, 동시에 계측 도중 발생한 교란을 제거하였다. 상기 방법으로 얻어진 수치적 데이터를 기반으로 화염 전파의 안정성, 전파 거리, 화염의 면적, 진행 방향 등을 계산하여 화염 전파 특성을 추출하여 이 특성과 실물 엔진에서 측정한 엔진 성능 데이터를 상호 비교하였다.

## 2. 실험장치 및 화상 데이터 처리 방법

### 2.1 엔진 실험 장치

본 연구에 사용한 엔진은 현재 상용으로 생산되는 1.5L DOHC 가솔린 엔진을 개조한 연구용 단기통 엔진이며, 이 엔진을 직류 엔진 동력계(DC dynamometer)에 연결하여 속도와 부하를 제어하면서 분사시기 변경에 따른 엔진 성능 특성을 조사하였다. 이어 화염의 가시화 실험을 위한 장치는 실물엔진에서 관측이 불가능한 실린더 내부를 용이하게 관측할 수 있게 가시화 변환기(visualization conversion kit : 일차 피스톤, 연장 투명 피스톤, 연장 블록으로 구성)를 사용하였고 실제 엔진의 실험에 사용한 헤드를 개조하지 않고 그대로 장착하였다. 이렇게 구성된 가시화 엔진의 연장 투명 피스톤 아래에 반사경을 45°의 각도로 장착시켜 실린더 내부를 관측할 수 있게 하였다.

실험을 위해 먼저 엔진의 냉각수와 윤활유의 온도를 실물 엔진의 작동 조건이 되도록 가열한다. 엔진이 충분히 가열되면 엔진을 강제 구동하여 설정된 속도(본 실험에서는 1500 RPM)에 이르게 하고 연료를 분사하고 점화시킨다(점화 시기 35°CA). 엔진이 안정될 때까지 충분히 구동을 한 후 ICCD 카메라(Intensified CCD, Stanford Computer Optics社의 4 Quick 05A)로 화염의 사진을 얻는다. 하나의 분사시기에 대한 실험이 끝나면 분사시기를 변경하여 실험한다. 아래의 Table 1은 엔진 제원을 나타내며 Figure 1은 화염 가

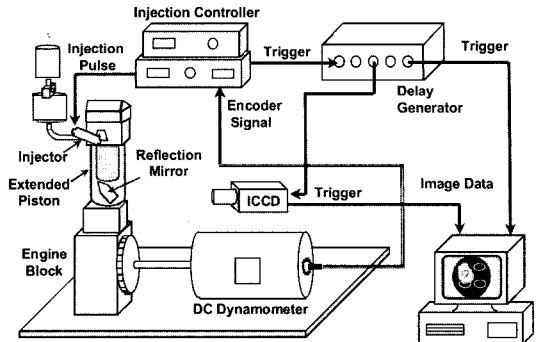


Fig. 1. Schematics of Visualization System.

시화 장치의 개략도를 나타낸다.

가시화 실험은 연료의 분사시기를 흡입 TDC(top dead center)를 기준으로 0° CA(crank angle)부터 360°까지 10°~40° 간격으로 변화시키면서 직접 화염을 촬영하였다. 여기서 분사시기는 연료분사 종점을 의미한다.

조건에 따라 점화 후 5°, 7°, 10°, 15°, 20° CA에서 각각 10개의 화염 화상을 얻었으며 화염과 점화초기의 플라즈마를 구별하기 위해 5° CA에서는 연료분사를 하지 않은 상태에서도 화상을 얻었다. 점화 후 20° CA 정도에서는 실린더 내로 들어온 연료의 질량 연소율이 5% 미만으로 알려져 있고, 통상 질량 연소율로 10%까지 초기 화염으로 간주하므로 점화 후 20° CA는 충분히 초기 화염으로 간주할 수 있다.<sup>(8)</sup>

획득된 화상은 절대치를 비교, 분석하기 위해 화염의 가시화를 위하여 별도의 광원이나 첨가제 등을 사용하지 않고 암막으로 외부의 빛을 차단한 상태에서 화염의 자발광을 직접 데이터로 획득하였고, ICCD 카메라의 노출시간과 증폭비(gain)도 각각 100 μsec와 700으로 고정하였다.

이상과 같이 각 엔진의 운전 조건에 따라 총 900개의 직접 화염 화상을 수집하였고 이를 바탕으로 90개의 처리된 화염 화상과 15가지 화염 전파의 경우에 대해 비교하였다.

### 2.2 화상 데이터 처리

획득된 화상은 수치화를 하기 위해 먼저 평균되었다. ICCD를 통해 얻어진 화상은 단색광으로 8 bit 이미지이므로 ASCII 코드를 읽어 화소별로 0-255까지 수치로 재배치된다. 위에서 언급한 바와 같이 첨가제 등을 사용하지 않고 외부의 빛을 암막을 통하여 차단하였기 때문에 화염이외에 다른 잡음은 거의 얻어지

Table 1. Specification of Engine

Number of Cylinder	1
Number of Valve	In. 2 Ex. 2
Valve Timing(IVO/IVC, EVO/EVC)	5/35 43/5
Combustion Chamber	Pent Roof
Bore	75.5 mm
Stroke	83.5 mm
Maximum Valve Lift	7.8 mm

지 않았지만 미세한 접음도 제거하기 위해 동일 조건에서 얻은 화염이 존재하지 않을 때의 화상(바탕화상)을 미리 읽는다. 이어 상기 실험 조건에서 얻어진 화염의 화상을 읽어, 화염 화상 데이터에서 바탕화상에서 읽은 값을 화소별로 뺀다. 10 개의 화상을 위와 같은 과정을 거쳐 모두 읽은 후에는 각 수치로 변환된 화소별로 평균을 구한다. 평균을 구하는 과정에서 화염의 표준 편차와 면적을 구하고 이를 수치화 한다.

평균된 화소별의 수치는 다시 화소를 표현할 수 있는 ASCII 코드로 전환되어 평균 화염으로 하나의 화상을 만든다. 화상을 만들 때 화염의 면적, 강도가 고려된 기준 화염면적 그리고 중첩된 화염면적 등을 계산하고 각각에 대해 표준편차를 구하였다. 이러한 데이터를 처리하는 과정을 Figure 2에 나타내었다.

위의 과정과 같이 각 개별 화상을 더하고 평균하여 화염 면적을 계산하는 것과 별개로 화염의 전파 형태와 방향을 결정하기 위하여 화염의 강도를 고려하지 않고 각 화소 별로 화염이 존재하는 경우와 그렇지 않은 경우를 구별하여 화염의 전파 범위를 구하였다. 이 때도 화상을 얻은 각 크랭크 앵글 별로 얻은 10장의 사진을 평균하여 그 평균 화상으로부터 전파 범위를 구하였으며 이 때는 경계 값을 적용하여 경계 값 이상일 때만 화염이 존재하는 것으로 판단하였다. 경계 값은 최소한 5개의 화상 이상에서 화염이 존재하는 경우로 하였다. 이 과정을 그림으로 나타내면 Figure 3과 같다

### 3. 실험 결과 및 검토

#### 3.1 엔진 성능 특성

Figure 4는 본 연구의 이전에 화염가시화 실험과 마

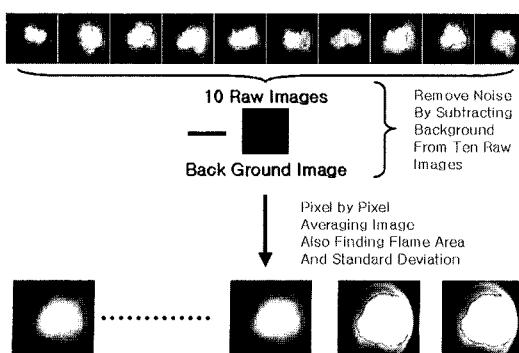


Fig. 2. Raw Image Processing Procedure.

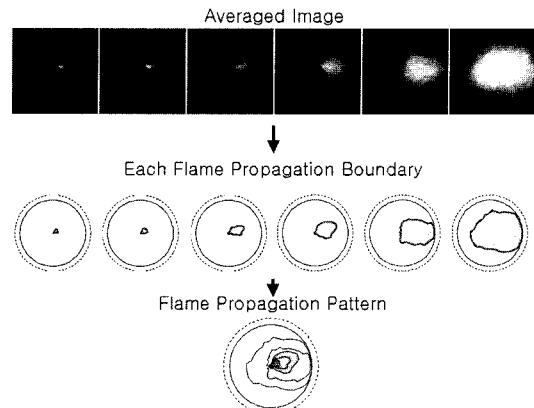


Fig. 3. Finding Propagation Pattern Procedure.

찬가지로 엔진의 분사시기를 달리하며 희박연소한계(LML, lean misfire limit)를 조사한 결과를 나타낸 것이다. 잘 알려진 바와 같이 희박연소한계는 연소실 내의 성층화 상태와 직접 연관되며 점화 플러그 주변의 공연비가 농후하게 성층화가 이루어질수록 희박 연소는 증가하고 엔진의 안정성 즉 평균 유효압력의 변동 계수(IMEP COV)는 줄어든다. 따라서 이 희박 연소한계와 화염 전파 특성을 비교함으로써 양자의 연관성을 유추할 수 있다.<sup>(5)</sup>

앞서 언급한 바와 같이 엔진의 흡입 밸브 개폐 시기는 BTDC(before top dead center) 5° CA에서 ABDC(after bottom dead center) 35° CA 즉 ATDC(after TDC) 215이고 분사시기가 분사 종점이며 이 조건에서 통상 분사 기간이 크랭크 각으로 50° CA 정도임을 고려하면 그림에 나타난 난 바와 같이 흡입 행정 중에 연료를 분사하는 경우 엔진의 안정성이 매우 저

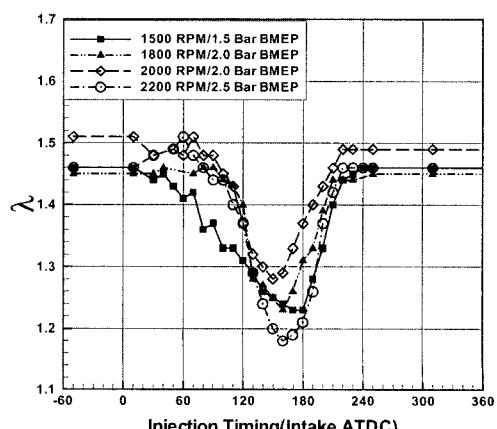


Fig. 4. LML as a function of injection timing.

하됨을 알 수 있다. 가스 연료인 천연가스를 사용한 경우에도 동일한 경향을 보여주는 것으로 보고 되었는데<sup>(3)</sup> 분사시기에 따른 엔진 성능의 변화는 연료의 상이나 증발 등에 관계된 현상이라기보다는 실린더 내 내부 유동의 변화에 따른 결과라는 것을 쉽게 유추할 수 있다.

### 3.2 화염 전파 영상

Figure 5는 와류가 없을 때 공연비를 16.5( $\lambda=1.14$ )로 하고 분사종료점이 흡입 ATDC 150° CA 때 화염을 가시화한 결과이다. 사진의 첫 줄은 10장의 화상을 얻어 평균한 것이고 평균한 화상을 0~255 까지 재배치 한 것이 그 아래의 사진들이며 마지막 줄은 10장의 사진을 모두 중첩하여 합성한 것이다. 중첩사진은 여러 화염이 전파하는 모든 궤적을 표시한 것이 된다. 가솔린 엔진에서 흡입 유동과 연료거동에도 사이클 변화가 있지만 화염의 경우 엔진 작동 중에 발생하는 모든 변동이 반영되어 나타나기 때문에 엔진에서 일어나는 변동 중 가장 심한 것이 된다. 따라서 단순평균도 중요하지만 화염이 도달하는 모든 궤적을 파악하는 것도 사이클 변동을 이해하는데 매우 중요하다. 사진에서 보듯이 평균화염 면적과 중첩화염 면적은 상당한 차이가 나며 양자의 비교로써 화염 전파의 변동을 파악할 수 있다.

Figure 6은 같은 조건에서 분사시기만 360° CA로 변경하였을 때의 사진이다. 사진에 나타난 바와 같이 분사시기를 달리해도 화염전파의 형태는 변하지 않는다. 모든 분사시기에 대해 조사한 결과 분사시기는 화염의 진행방향이나 형태에 전혀 영향을 주지 않는 것

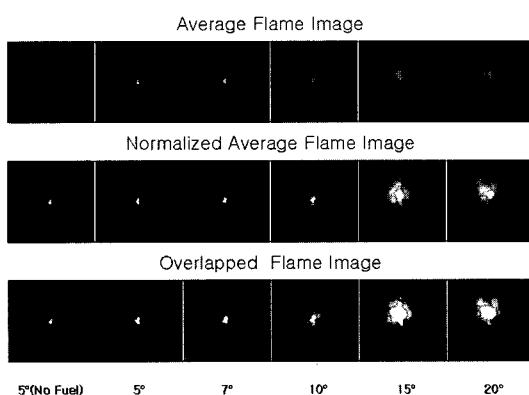


Fig. 5. Flame Propagation at ATDC 150 CA Injection Timing.

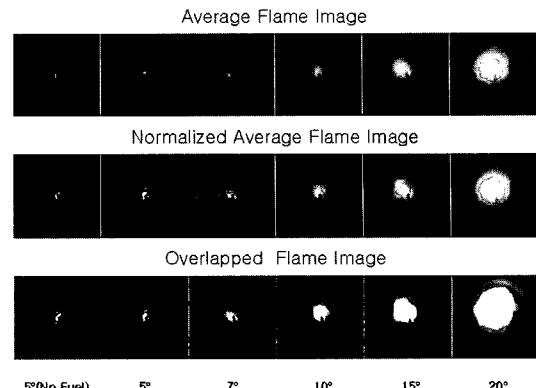


Fig. 6. Flame Propagation at ATDC 360 CA Injection Timing.

으로 나타났다.

두 화염의 발달은 아주 극명한 차이를 보여주고 있는데 360° CA 분사의 경우 화염이 어느 정도 자라고 있는 형태가 보여지나 150° CA 분사의 경우는 거의 화염이 자라지 못하고 있음을 알 수 있다. 즉 엔진 안정성이 저하된 상태는 초기 화염의 발달이 충분치 못한 상태임을 알 수 있다.

사진에 나타난 바와 같이 분사시기를 달리해도 화염전파의 형태는 변하지 않는다. 모든 분사시기에 대해 조사한 결과 분사시기는 화염의 진행방향이나 형태에 전혀 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 이는 화염 전파의 형태나 방향이 주로 유동에 의해 지배되기 때문인 것으로 판단된다.

### 3.3 화염의 전파 양상

Figure 7에 분사시기에 따른 화염의 전파 형태를 나타내었다. 그림에서 실선의 원은 가시화 창을 통한 관측 범위이고 점선의 원은 실제 엔진의 실린더 직경을 나타낸다. 등고선은 점화 후 5°, 7°, 10°, 15°, 20° CA에서 각각 화염의 전파 범위를 나타내고 있다. 화염의 전파 방향은 그림에서 위쪽 방향으로 전파되는데 이 방향은 흡기 밸브 쪽에서 배기 밸브 쪽으로 화염이 진행되는 것을 의미한다.

화염 전파가 흡기에서 배기로 가는 이유는 흡기 포트를 통과한 흡입 유동이 실린더 내에서 큰 규모의 텁불 유동을 생성하기 때문인 것으로 판단되며 따라서 화염은 이 유동 방향으로 진행되는 것을 나타내고 있다.

또한 분사시기에 관계없이 화염 진행 방향은 모두

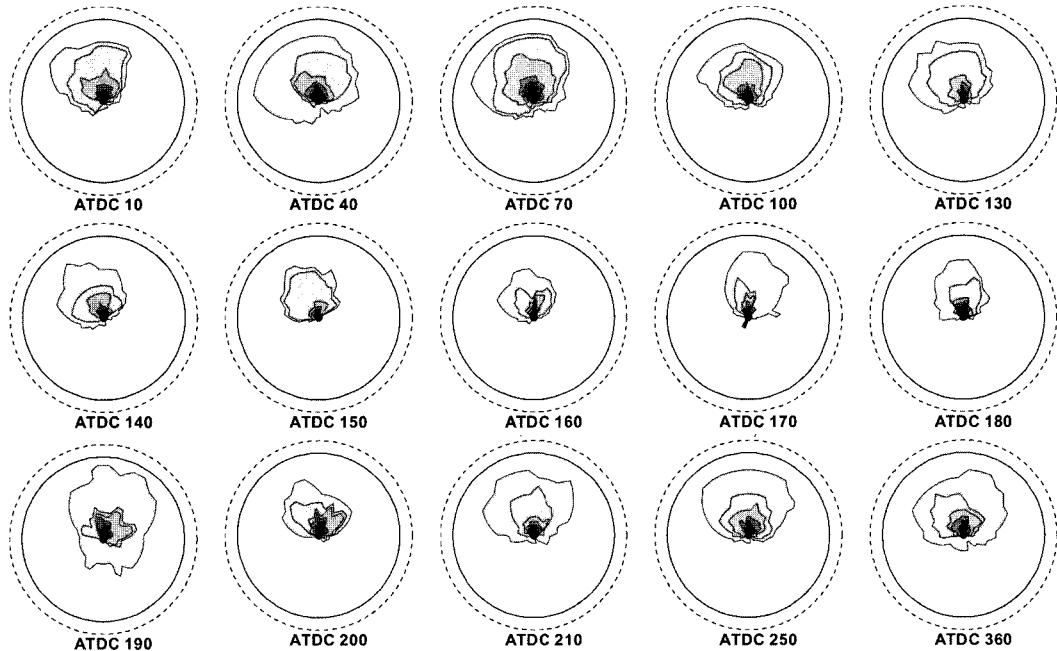


Fig. 7. Flame Propagation Pattern according to Injection Timing.

일정하게 나타나는 것으로 미루어 보아 화염의 방향은 유동에 의해 결정되며 화염의 성장 속도만이 분사시기에 따른 성층화의 영향을 받는 것으로 판단된다.

화염 전파의 경로를 좀더 명확히 보기 위해 점화원 근처를 중심으로 화염의 경로를 표시한 것이 Figure 8이다.

그림의 백색 점은 화염 이미지의 강도를 고려한 화염의 중심점을 나타내며 백색 선은 화상을 얻은 시기에 따라 화염의 중심점을 연결한 선이다. 그림에서 볼 수 있듯이 대체적인 전파의 방향은 일치하고 있으나 엔진 시험에서 희박 연소 한계가 낮게 관측된 분

사시기 100~200° CA 사이의 전파 방향과 화염의 중심점이 다른 분사시기에 비해 매우 불규칙하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

통상적으로 사이클 변동을 고려하면 연속된 300 사이클 정도의 데이터가 요구되는데 10개의 평균으로 변동에 대한 데이터의 제시는 불가능하지만 전파 방향과 중심점이 불규칙하게 나타난다는 것은 그 만큼 변동이 심하다는 의미로도 해석할 수 있다.

### 3.4 화염의 전파 면적과 안정성

Figure 9는 전체 분사기간에 걸쳐 얻은 화상을 처리하여 각각 단순평균면적(화염의 유무만 판단)과 각종 평균 면적(화염의 유무와 화염의 강도를 동시에 고려), 화염의 중첩면적(중첩된 화염의 유무만 판단) 그리고 중첩 가중 화염면적(중첩된 화염의 강도를 고려)을 그래프로 나타낸 것이다. 그림에 나타나 있듯이 희박 연소한계의 경향과 잘 일치하는 것은 화염의 가중 평균인 것으로 나타났다. 희박연소가 불리한 점화시기에서 단순화염 면적만 높게 나타나는 경우가 있는데 이를 가중 평균하면 거의 사라지는 것을 볼 수 있고 따라서 이때의 화염은 강도는 크지 않은 채 넓게 퍼지기만 했음을 알 수 있다. 중첩된 화염의 면적은 희박연소가 불리한 부근에서 평균면적과 비교하여 상

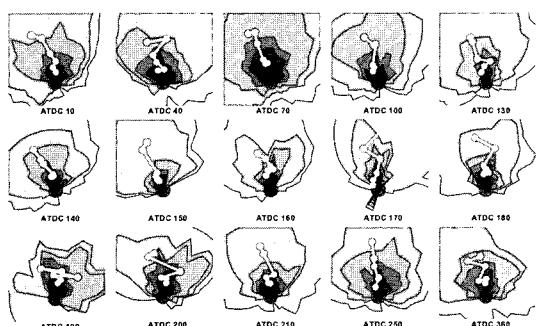


Fig. 8. Center and Path of Flame.

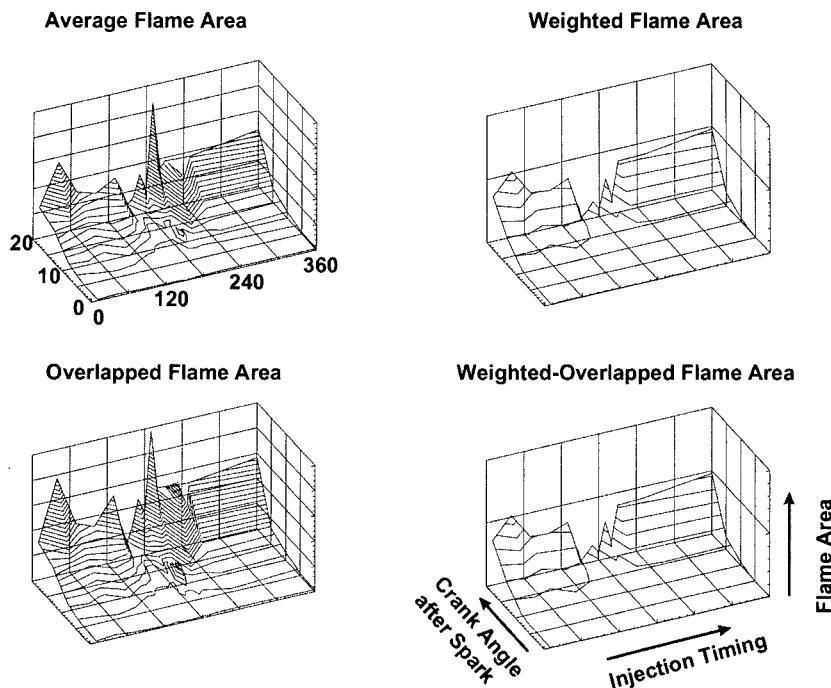


Fig. 9. Flame Area according to Injection Timing.

대적으로 큰 값을 보이고 있는데 이는 이 때의 화염이 매우 불안하여 진행방향이나 진행의 형태가 상대적으로 일정하지 않다는 것을 보여주고 있다. 특히 초기화염 부근의 중첩 면적이 평균 면적에 비해 크게 나타나고 있음을 알 수 있는데 이는 곧 엔진이 안정되게 운전되기 위해서는 초기화염의 안정성이 매우 중요하다는 것을 나타낸다고 할 수 있다.

희박연소 한계의 변화와 가장 잘 일치하는 가중 평균 면적을 보면 희박 연소가 불리한 부근에서는 특히 초기화염의 발달이 매우 미미한 것을 나타내고 있는데 이도 역시 초기화염의 중요성을 보여주고 있다고 할 수 있다.

Figure 10은 이러한 면적에 대해 각각 표준편차를 구한 것이다. 여기서도 대체로 초기화염의 편차가 크게 나타나고 있음을 볼 수 있는데 이는 초기화염은 원천적으로 불안하다는 것을 반영하고 있다. 희박 연소가 불리하지 않은 부근에서는 대체로 화염이 자라면서 안정되는 경향을 보여주고 있는데 비해 희박연소가 불리한 구간에서는 오히려 화염전파가 진행될수록 불안이 가중되고 있음을 알 수 있다. 엔진의 안정성이 떨어지는 분사시기에 연료 분사를 행한 경우 초기

화염의 생성도 불안하고 이어서 계속 안정되자 못한 상태로 화염이 발달해 나감을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

실물 엔진의 화염 전파를 관찰할 수 있는 화염 가시화 엔진을 제작하여 스파크 점화 엔진의 화염전파를 가시화하고 화염 영상의 데이터를 처리하여 화염의 면적, 면적 표준 편차, 진행 형태 및 방향에 대한 구체적 수치화된 데이터를 얻어 이를 엔진 성능과 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 엔진의 희박 연소 한계 즉 안정성과 화염의 면적은 대체로 일치하는 경향을 보여 준다.
2. 화염의 면적 중 화염의 강도를 고려한 가중 화염 면적은 엔진의 안정성과 매우 잘 일치한다.
3. 가중 화염 면적의 표준 편차도 엔진 안정성과 매우 밀접한 관련을 가지고 있고 이것이 작을수록 엔진이 안정적으로 운전된다.
4. 엔진의 안정성은 초기화염의 발달과 매우 밀접하게 관련되어 있어 안정되고 강한 초기화염이 생성될수록 엔진의 안정성은 증대된다.

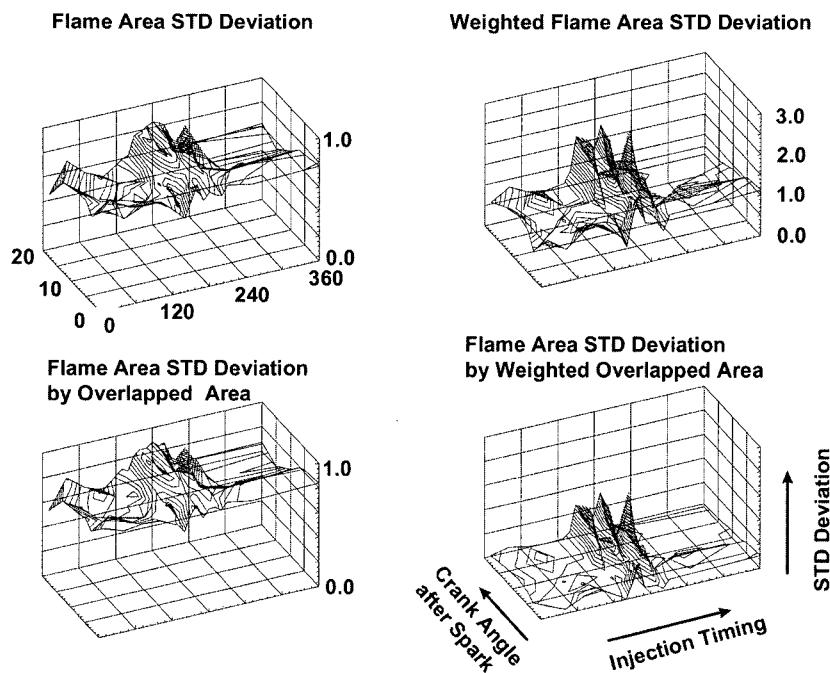


Fig. 10. Standard Deviation of Flame Area according to Injection Timing.

## 참고문헌

- 1) A. A. Quader, 1982, "The Axially-Stratified-Charge Engine", SAE 820131.
- 2) In-Young Ohm, Hee-Seok Ahn, Woo-Jik Lee, Woo-Tae Kim, Sim-Soo Park, and Dae-Un Lee, 1994 "Development of HMC Axially Stratified Lean Combustion Engine", SAE Paper 930879, 1993 SAE Transaction; 103(3); pp.1298-1311.
- 3) I. Y. Ohm, K. S. Jeong, and I. S. Jeung, 1998, "Effects of Injection Timing on the Lean Misfire Limit in an SI Engine", 1997 SAE Transaction; 106(3);42-55.
- 4) I. Y. Ohm, Y.S. Cho, 2001, "Mechanism of Axial Stratification and its Effect in an SI Engine", 2000

SAE Transaction - Journal of Fuel & Lubricants.

- 5) In-Yong Ohm, and Chan Jun Park, 2002, "Experimental Study on Axial Stratification Process and its Effects (1)", KSME International Journal Vol. 16, No. 11;1457-1469.
- 6) John B. Heywood, 1988, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill, New York. p.420.
- 7) G.T. Kalghatgi, 1987, "Spark Ignition, Early Flame Development and Cyclic Variation in IC Engines", SAE Paper 870163
- 8) John B. Heywood, 1988, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill, New York. pp.482-390.