

Spark Knock에 관한 연구방향 Prospects of Research on Spark-Knock

이 성 열*, 오 영 일**
Songyol Lee, Young-El Oh

1. 머리말

스파크 점화기관의 노크에 관한 연구는 1882년 Dugald Clerk 경이 노크현상을 관찰했다는 최초의 보고가 있는 후, 체계적인 실험적 연구가 H. R. Ricardo의 스승인 캠브리지 대학의 Bertram Hopkinson 교수에 의하여 시작되어 현재까지 약 100년의 역사를 가지고 있다.

이 기간 동안 노크현상에 관한 실험적 연구가 Lewis, Elbe, Taylor, Steigerwald, Kirsch 등과 같은 연소분야에서 잘 알려져 있는 학자들에 의하여 수행되었다.

따라서 기관의 각종 변수들이 노크에 미치는 영향에 관한 실험적 자료는 매우 방대하다.

그럼에도 불구하고, 아직 일반적으로 받아들여지는 노크에 관한 이론이 확립되어 있지 못하다.

다만, 지난 40년동안 제안된 여러 이론들 중에 보편적으로 받아들여지고 있는 이론으로서 자발화이론 (Autoignition Theory)과 폭발이론 (Detonation Theory)이 있다.

그러나 이 두 이론도 노크현상을 설명하는 데는 한계가 있으며, 서로 양립하고 있다.

따라서 저자는 현상학적 관점에서 자발화이론과 폭발이론에서의 문제점을 도출하고, 앞

으로의 노크에 관한 연구과제 및 연구방향을 제시하고자 한다.

2. 노크현상

기관에서의 노크 발생 유무는 노크가 일어날 때 나타나는 특징적인 현상을 인간의 청각, 압력변환기 (Pressure Transducer), 혹은 이온푸르브 (Ionization Probe) 등을 이용하여 감지할 수 있다.

또한, 노크가 발생할 때의 특징적인 현상을 분석함으로써 노킹 사이클에서의 연소상태를 예측할 수 있다.

노크가 일어나면 연소실에는 약 2~10 KHZ 정도의 가스진동이 있기 때문에 정상운전때의 기관음보다 날카로운 금속성 음이 난다. 따라서 인간의 청각에 의하여 노크를 감지할 수 있으며, 현재까지도 노크를 감지하는 데 인간의 청각을 이용하고 있다.

노크가 일어날 때 가스진동이 일어나는 것은 연소실 내에 국부적으로 고압부 (High-Pressure Region)가 발생하여, 고압부의 가스가 주위의 가스와 압력평형을 이루는 과정에서 나타나는 현상이다.

따라서 압력변환기를 이용하여 노킹사이클의 압력경과 곡선을 채취해 보면 Fig.1의 A

*정회원, 성균관대학교 공대 기계공학과

**정회원, 대림공업전문대학 기계과

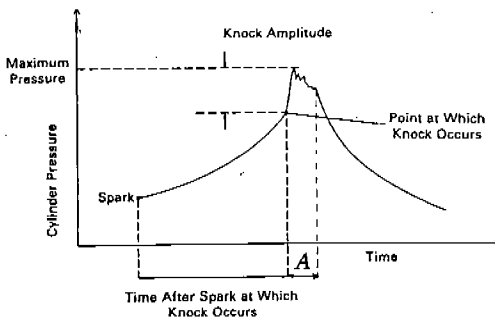


Fig.1 Characterization of Knocking Combustion from Pressure-Time Diagram

부분과 같은 급격한 압력상승과 압력진동 (Pressure Fluctuations)이 나타난다.

이와 같은 압력진동은 연소실 내에 발생된 고압부와 저압부로부터 각각 충격파(Shock Wave)와 팽창파(Expansion Wave)가 발생되어 이 파들이 연소실 내에서 왕복운동을 하면서 반복적으로 압력변환기 주위를 지나가기 때문에 나타나는 현상이다.

또한, 충격파가 기연가스부를 지나가면 기연가스는 급격한 온도상승을 하여 활성화 에너지(Activation Energy)가 비교적 높은 이온화 반응(Ionization)을 활발히 하므로, 이온화 강도(Ionization Intensity)가 증가한다. 따라서 노크가 일어나면 정상운전 때보다 이온 퍼프에서 검출되는 이온전류(Ionization Current)가 수 배에 달하게 된다.

Fig. 1에서 A 부분의 압력진동기간 및 압력진동의 최대진폭은 노크에 의한 엔진구조물의 손상 정도 및 정상운전 가능여부를 판가름하게 된다.

압력진동의 최대진폭은 최초로 압력변환기를 지나가는 충격파의 강도에 비례하는데, 충격파의 강도는 충격파의 에너지 원(Energy Source)이 되는 고압부의 분자 병진운동에너지(Translational Kinetic Energy) 밀도와 고압부 주위의 에너지 밀도비에 비례하며, 진동기간은 고압부의 총분자 병진운동에너지 양에 비례한다.

따라서 노크강도를 나타내는 압력진동의 최대진폭 및 노크지속 기간을 나타내는 압력진

동기간은 고압부의 에너지 상태에 의존한다.

이와 같이 노크발생의 원인이 되는 고압부의 형성은 연소 후반에 잔류한 혼합가스가 매우 빠른 속도로 연소되기 때문이다.

스파크 점화기관에서 노크발생시 고압부가 형성되는 영역을 말단가스 영역(End-Gas Zone)이라 칭하고 있다.

말단가스에서의 연소과정은 연소속도에 따라 정압연소과정과 정적단열연소과정 사이에 있을 것이다. 연소속도가 클수록 말단가스에서의 연소과정이 정적단열과정에 접근하여 말단가스의 분자 병진운동에너지 밀도와 기연가스쪽의 에너지 밀도의 차가 증가한다.

따라서 말단가스 영역으로부터 충격파가 발생될 수 있을 정도로 말단가스 영역이 주위보다 압력이 훨씬 높기 위해서는 말단가스에서의 연소속도가 음속에 달하여야 한다. 왜냐하면, 연소에 따른 압력평형 속도는 음속과 같기 때문이다. 즉, 말단가스에서의 연소속도가 기연가스에서의 음속보다 크면 말단가스는 거의 정적단열연소를 하게 되며, 따라서 말단가스 영역의 압력은 주위압력과 불연속적으로 상승하게 된다.

결론적으로, 스파크 노크는 말단가스가 음속 정도의 속도로 연소함으로써 말단가스 영역이 충격파를 발생시킬 수 있을 정도의 고압부가 된 후, 이 고압부가 주위와 압력평형을 이루는 과정에서 나타나는 현상이다.

따라서 노크현상을 설명하기 위해서는 말단가스의 연소속도가 음속에 달하게 되는 조건이 어떻게 형성되는가를 설명할 수 있는 노크이론이 확립되어야 한다.

3. 노크이론

지난 100년동안 노크에 관한 연구가 여러 학자들에 의하여 진행되었지만, 아직 노크현상을 만족스럽게 설명할 수 있는 이론이 확립되어 있지 못하다. 다만, 노크발생은 말단가스가 대단히 빠른속도로 타서 고압부를 형성하기 때문이라는 견해가 보편적으로 받아들여지고 있을 뿐이다.

현재까지 제안된 노크이론들은 말단가스가 어떠한 과정에 의하여, 노크를 발생시킬 수 있을 정도의 빠른 속도로 타게 되는 가를 설명하는 데 집중하고 있다.

이들 이론들 중 대표적인 이론이 자발화이론과 폭발이론이다.

3.1 폭발이론

폭발이론은 연소실 내에 정상화염(Spark Ignited Flame)이 전파하는 동안 정상화염 전면에 충격파가 발생되어 이 충격파가 초음속으로 잔류미연가스를 점화시키거나, 혹은 정상화염 자체가 Detonation 속도로 가속되어 잔류미연가스를 열점화한다는 이론이다.

폭발이론은 기구(Mechanism) 자체에 의문점이 있다.

우선, 정상화염 전면에 충격파가 발생될 수 있는 가에 대해서는 상당한 의문점이 있다.

Long Tube에서의 Detonation^{1,2)}과 같이 기관의 연소실에서 정상화염 전면에 충격파가 발생되어, 이 파가 혼합기를 점화하기에는 기관 연소실에서의 화염전파 거리가 너무 짧다.

그리고 정상화염이 전파과정중 Detonation 속도로 가속되어 잔류미연가스를 연소시킴으로써 노크가 일어난다는 설명도 의문점이 있다.

일반적으로 연소실에서의 최고 화염속도는

약 100~200m/s 정도이다. 현재까지 보고된 최대 화염속도는 Curry³⁾가 측정한 약 400 m/s 인데, 이와 같은 속도로 말단가스가 연소된다 하더라도 기연가스부에서의 음속은 약 900m/s 이므로, 말단가스 영역이 정적단열연소를 하여 충격파를 발생시킬 수 있을 정도의 고압부가 된다는 것은 희박한 일이다.

그러나 최근 Maly⁴⁾는 열점화 이론과 기연가스에서의 입자속도를 고려하여 노크가 일어나게 되는 화염속도에 관한 이론식을 유도하였으며, 이 이론식으로부터 평상의 운전조건에서의 말단가스 온도인 900k 에서 노크가 일어날 수 있는 화염속도가 약 300 m/s 정도임을 보였다. 또한, 스파크 점화기관에서의 노크는 말단가스에서 자발화에 의한 것 보다 정상화염 속도가 노킹연소영역으로 가속됨으로써 일어날 확률이 훨씬 크다고 주장하고 있다. Fig.2는 Maly가 폭발이론의 근거로 제시한 Knocking Cycle 에서의 화염전파 사진이다. 1.4 ms 와 1.6 ms 사이에서 화염전면이 급격히 가속됨을 볼 수 있다.

그러나 이와같은 주장에도 불구하고, 연료의 구조 및 크기 등이 노크에 미치는 영향을 폭발이론으로 설명하기에는 한계를 갖고 있으며, 특히 노크발생을 억제하기 위하여 연료에 첨가하는 TEL(Tetraethyl Lead) 등은 De-

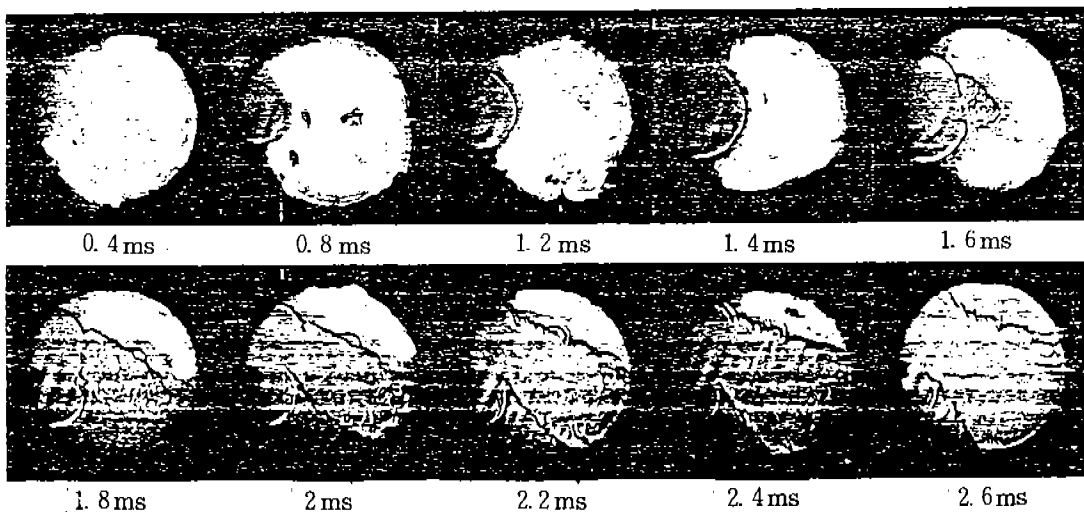


Fig.2 Series of Schlieren Praphs Showing Flame Propagation in a H2-Air Mixture (Refer to Maly)⁴⁾

tonation에 거의 영향을 주지 않기 때문에 반노크제 (Antiknock Agent)가 노크에 미치는 영향을 폭발이론으로 설명하기에는 더욱 한계를 갖는다.

따라서, 많은 학자들은 노크현상을 규명하는데 폭발이론 보다 자발화이론을 더 선호하고 있다.

3.2 자발화이론

자발화이론은 정상화염이 전파하는 동안 말단가스가 화염전파 및 피스톤 운동에 의하여 고온 고압상태로 압축됨으로써 말단가스가 자발화하여 노크가 일어난다는 이론이다.

자발화이론은 노크변수와 노크와의 관계를 정성적으로는 잘 설명하고 있지만, 정량적으로는 다소 의문점이 있다.

자발화이론이 정량적으로 증명되기 위해서는 기관이 노크조건에 있을 때, 정상화염이 말단가스 영역에 도달되는 시간보다 말단가스가 열폭발 (Thermal Explosion)을 하여 고압부를 형성하는 시간이 빠르다는 것이 증명되어야 할 것이다.

Nakagawa 등⁵⁾은 Shadowgraph를 이용한 노킹사이클 연소 연구에서 노크가 일어날 때 말단가스 영역이 미연가스 상태에서 녹킹연소영역 (Knocking Regime)으로 변하는 시간이 약 $33 \mu\text{s}$ 정도라고 보고하고 있다.

Fig. 3은 Nakagawa가 녹킹사이클에서 연소 과정을 찍은 사진이다. 사진들간의 시간 간격은 $33 \mu\text{s}$ 인데, 크랭크 각 18.83과 19.07

사이에서 자발화가 일어나고 있음을 볼 수 있다.

그런데, 일반 스파크 점화기관의 말단가스 압력 및 온도 조건에서 Paraffin계 연료의 점화지연기간 (Ignition Lag)은 ms Order이다.

Fig.4은 Rapid Compression Method로 이론공기연료비에서 N-Heptane의 점화지연기간을 Steigerwald 등이 측정한 값이다.

기관의 압축비가 8 정도이면, 압축끝의 혼합기 온도 및 압력은 약 650 k, 15atm 정도가 되는데, 이와 같은 조건에서 N-Heptane의 점화지연기간을 Fig.4에서 구하면 약 30~40ms 정도가 된다. Kirsch^{7,8)}가 측정한 ISO-Octane의 점화지연기간은 18 atm, 686 k에서 약 5ms가 된다. 따라서 연료가 자발화하는데 필요한 점화지연기간과 노킹사이클에서 말단가스가 미연가스 상태에서 녹킹연소영역으로 변하는 기간 사이에는 Order상 큰 차이가 있다.

이상과 같이 자발화이론으로 노크발생을 정량적으로 설명하는데는 한계를 갖고 있다. 다만, 연료의 점화지연기간을 측정하는데 사용하는 Rapid Compression Machine의 연소실내 물리적 조건과 실제기관의 연소실내 조건이 같은가에 대해서는 의문이 있다.

점화지연기간은 압력, 온도 및 혼합기조성 (Composition)에 따라 변할 뿐만 아니라 연소실 형상 및 재질 등에도 영향을 받는다.

일반적으로 점화지연기간 τ 는 연료가 연쇄가 지폭발 (Chain Branching Explosion)을 하는

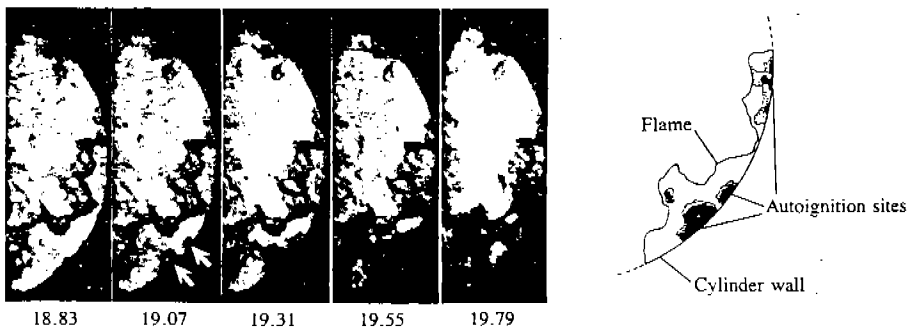


Fig.3 Five Shadowgraph Photograph of Knocking Combustion Cycle Identifying Location of Autoignition Sites (Arrows), (Refer to Nakagawa)⁵⁾

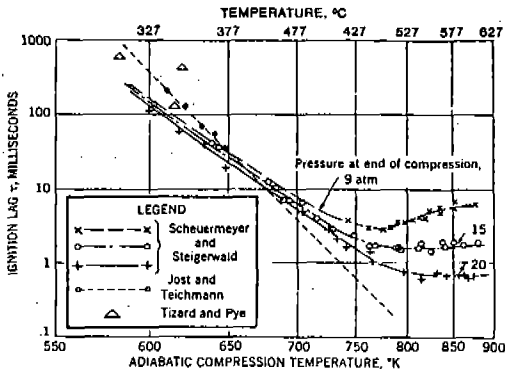


Fig.4 Ignition Lags for Stoichiometric Mixture of n-Heptane and Air Determined by Rapid-Compression Method (Refer to Steigerwald)⁶⁾

데 요하는 기간 τ_1 과 연쇄까지 폭발로부터 열폭발 (Thermal Explosion) 이 일어나는 데까지의 기간 τ_2 로 나눌 수 있다. 그런데 τ_1 은 온도에 대하여 (1)식과 같은 함수관계를 갖고 있으며, τ_2 는 (2)식과 같은 함수관계를 갖고 있다.

$$\tau_1 = C1 \cdot P^{-a1} \cdot \exp(B1/T) \dots\dots\dots (1)$$

$$\tau_2 = C2 \cdot P^{-a2} \cdot \exp(-B2/T) \dots\dots (2)$$

(C1, C2, a1, a2, B1, B2 > 0)

(1) 및 (2)식에서 알 수 있듯이 τ_1 은 온도 상승에 따라 감소하고, τ_2 는 증가한다. 그리고 (1) 및 (2)식 우변에서 압력에 대한 지수 a는 탄화수소계 연료에서 a2가 a1보다 크다. 즉, 압력증가에 따라 τ_1 및 τ_2 는 모두 감소하지만, 감소율은 τ_1 보다 τ_2 가 더 크다. Fig.4에서의 종좌표는 τ_1 과 τ_2 의 합 τ 를 나타내는데, τ 는 온도가 730 K 정도까지는 직선적으로 감소하며, 압력에 대해서는 별 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 730 K 이상에서는 τ 값이 온도에 거의 영향을 받지 않으며, 압력증가에 따라 급격히 감소함을 볼 수 있다. 즉, 고온상태에서는 τ_2 기간이 점화지연기간 τ 을 지배하며, 압력증가에 따라 점화지연기간이 급격히 감소한다.

이상과 같은 점화지연기간에 관한 고찰로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

자발화이론이 옳다는 것이 입증되기 위해서는 연소과정 후반에 말단가스가 연소실내 평균압력보다 훨씬 높은 압력상태에서 상당기간 노출되어 있다는 것이 입증되어야 한다.

따라서 자발화이론을 기초로 노크현상을 규명하기 위해서는 연소과정중 말단가스의 압력, 온도 및 혼합기 각 성분의 농도 (Concentration) 를 시간에 따라 예측할 수 있는 이론이 필요하다.

4. 맺음 말

현재 노크를 설명하는 이론들 중에 비교적 타당성이 있는 이론은 폭발이론과 자발화이론이다.

폭발이론은 기구 자체에 의문점이 있으며, 연료의 구조, 연료의 크기 및 반노크제와 노크와의 관계 설명에서 자발화이론에 비해 약하다.

그러나 최근 폭발이론을 근거로 노크를 해석하여 좋은 결과가 나오고 있다. 특히, 자발화이론에 비해 설명이 약한 TEL에 관해서도, 폭발이론에서는 TEL이 화염대의 예열층 (Preheat Zone)에서 Chain Reaction을 억제하여 예열층의 두께를 증가시킴으로써 화염속도를 감소시켜 노크를 억제한다는 주장이 나오고 있다.

자발화이론은 노크와 노크변수 사이의 관계를 정성적으로 잘 설명하고 있으나, 정량적으로는 다소 의문점이 있다. 즉, 말단가스의 열역학적 상태에서 구한 점화지연기간과 실제기관에서 노크가 발생되는데 요구되는 시간 사이에는 Order상 큰 차이가 있다.

따라서 아직 어느 이론이 옳은가에 대해서 확신이 없다.

노크에 관한 실험적 연구에서 어느 이론에 근거를 두는가에 따라 실험항목, 실험조건 및 실험범위가 달라질 것이다.

따라서 노크에 관한 연구가 좀 더 체계적으로 진행되기 위해서는 이들 두 이론중 어느 이론이 옳은가에 관한 판단이 선행되어야 할 것이다.

이상과 같은 견해에서 다음과 같은

- 1) 연소에 따른 Pressure wave 거동
- 2) 연소에 따른 말단가스의 압력, 온도 및 연료와 산화자(Oxidants)의 농도 경과
- 3) 연소에 따른 미연가스(Unburned gas)의 온도 및 압력구배

에 관한 연구가 선행되어 이들 연구를 토대로 폭발이론과 자발화이론에 대한 좀더 상세한 검토가 필요하다고 생각한다.

참 고 문 헌

1. E.S. Oran et al.; A Study of Detonation Structure : The Formation of Unreacted Gas Pockets, 19th Symp. (INT.) on Combustion, pp. 573-582, 1982.
2. I. Glassman; Combustion, Academic Press, pp. 197-237, 1987.
3. S. Curry; "Effect of Antiknocks on Flame Propagation in a Spark Ignition Engine," 9th Symp. (INT.) on Combustion pp. 1056-1068, 1963.
4. R. Maly and G. Ziegler; Thermal Combustion Modeling-Theoretical and Experimental Investigation of the Knocking Process, SAE Paper no. 820759, 1982.
5. Nakagawa Y., Takagi Y., et al.; Laser Shadowgraphic Analysis of Knocking in S. I. Engine SAE Paper No. 845001, 1984.
6. Lewis, Von Elbe; Combustion, Flames and Explosions of Gases, Academic Press, p. 163, 1961.
7. Kirsch L.J. and Quinn C.P.; A Fundamentally Based Model of Knock in the Gasoline Engine, 16th Symp. (INT.) on Combustion, pp. 233-242, 1975.
8. L.J. Kirsch and S.L. Hirst; The Application of a Hydrocarbon Autoignition Model in Simulating Knock and Other Engine Combustion Phenomena, Combustion Modeling in Reciprocating Engines, pp. 193-229, 1980.