

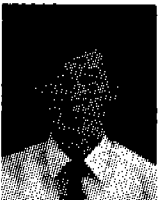
노킹과 엔진손상

Knock and Engine Damage

전 광 민, 이 중 화
K. M. Chun, J. H. Lee



전 광 민
• 1955년 6월생
• 스파크 점화 기관 노킹 엔진 사이클 시뮬레이션
• 정회원, 연세대학교



이 중 화
• 1959년 3월생
• 스파크 점화 기관 연소
• 정회원, 서울대학교

는 연소실벽의 뜨거운 지점에서 연소가 시작 되는 것이다.

이와 달리 이 글에서 설명하려는 노킹은 스파크 플러그 반대편(end-gas region)에 있던 연료-공기 혼합체가 스파크 점화 후 화염이 전파되는 과정에서 압축되다가 미처 화염이 도달하기 전에 한 지점 또는 여러 지점(exothermic centers)에서 연료 공기가 자연 발화하여 발생하는 것이다. 이 자연발화 현상은 연료와 공기가 chain branching mechanism에 의해 급격히 반응하여 발생한다. 이 현상이 발생한 직후 그 지점에서의 압력과 온도가 급속히 증가하고 이에 따라 end-gas region에 있던 미연소연료와 공기가 순식간에 반응하여 정상상태에 비해 약 5내지 25배 정도 빠르게 에너지를 방출한다.

1. 노킹의 발생

스파크 점화 기관에서 정상적으로 연소가 일어나는 경우에는 스파크 점화에 의해 시작된 화염이 전파되어 피스톤 및 실린더 벽에 도착하여 연소과정이 끝나게 된다. 이런 정상적인 연소가 아닌 경우를 비정상연소라 할 때 이는 크게 표면 점화(surface ignition)와 노킹(knock, detonation)으로 나누어지며 두 현상 모두 엔진에 손상을 줄 수 있는 바람직하지 못한 현상이다. 표면점화는 스파크 플러그에서의 점화 이전에 일어날 수도 있고(pre-ignition) 스파크 플러그에서의 점화 후에 일어날 수도 있는데(postignition) 배기밸브 또

2. 노킹 발생 이후의 압력파

end-gas region에 있던 연료 공기 혼합체가 자연 발화하면 이 지점의 압력이 급속히 증가하여 다른 부분의 압력보다 높게 되고 연소실내의 압력이 균일하지 않게 된다. 이에 의해 압력파가 발생하여 연소실 내부를 왕복하게 된다. 압력파의 이동 속도는 심한 노킹의 경우 초음속이며 연소실내를 왕복 운동하는

층에 점차 속도가 감소한다. 이 압력파는 연소실 벽면에 형성되어 있던 경계층을 파괴하여 고온의 연소 가스가 벽면에 직접 접촉하도록 만들어 벽면으로의 열전달을 급속히 증가시킨다. 노킹이 일어 나면 배기가스의 온도가 감소하는데 이는 열전달 손실의 증가로 인한 것이다. 그러나 압력파가 어떤 mechanism으로 경계층을 파손하는지는 정확히 알려져 있지 않고 최근에 이에 대한 연구 결과가 Maly, König 등에 의해 발표되고 있다.²²⁾ 이들의 연구에 의하면 end-gas의 exothermic centers에서 자연 발화가 일어나고 이 자연 발화가 급격한 경우에는 열방출이 급속하여 주위로 매우 강한 reacting shock wave가 발생하며 이 wave들이 엔진 손상의 원인이 된다고 한다.

3. 노킹 발생과 엔진 손상 부위

노킹이 발생하면 실린더 내 평균 가스 압력과 온도가 높아진다. 또한 연소 가스가 직접 벽면에 접촉하게 되면서 가스 접촉면의 온도가 증가하게 된다. 이와 같은 표면온도의 증가에 따라 재료가 취약하게 되고 여기에 높은 가스 압력이 응력을 증가시켜 여러 엔진 부품에 손상을 가져 오게 된다. 또한 이러한 평균 가스압력과 온도 증가 영향과 함께 shock wave에 의한 영향이 중요함이 밝혀지고 있다.¹²⁾ shock wave가 반사하는 벽면에 국부적으로 높은 온도와 압력이 발생하며 이에 따라 벽면에 큰 온도 구배로 인한 열응력과 높은 압력에 의한 기계적 응력이 발생한다. 심한 노킹의 경우에는 수 분내에 엔진 failure가 온다고 알려져 있다.

주요 손상 부위는 피스톤 표면, 실린더 가스킷, 피스톤 top land, 피스톤 링, 헤드 표면, 배기 밸브, 스파크 플러그 등이다. 주로 스파크 플러그 반대편의 연소실 가장자리 및 피스톤 top land 부근에 손상이 많이 생기는 것으로 알려져 있고³⁾ 일부 연구에 의하면 그 반대편에도 손상이 생기는 것으로 보고되어 있다.⁴⁾ 이들 손상은 end-gas 부근의 기하학적

현상과 밀접한 관계가 있다.¹¹⁾

실제 엔진 시험에서 발생한 부위와 그 손상 정도는 다음과 같다. 실린더 헤드의 경우 스파크 플러그 반대편의 연소실 벽면이 erosion되어 떨어져 나가는 현상이 발생될 수 있는데 이러한 손상부위의 미세조직을 관찰해 보면 압력파의 급격한 변동에 의해 나타나는 cavitation erosion 현상과 유사한 모양을 보인다. 이러한 현상은 '노킹에 의한 압력파의 발생 → 벽면의 quench zone의 파괴 → 고온가스의 접촉에 의한 벽면 온도 상승 → 압력 파에 의한 erosion 발생'의 mechanism으로 발생되는 것으로 생각된다. 그러나, 상대적으로 연소실 벽면보다 온도가 높은 피스톤 등이 먼저 손상되어 failure에 이르는 경우가 많으므로 연소실 벽면이 심하게 손상되는 현상을 관찰하기는 쉽지않다.

스파크 플러그는 end gas의 자발화에 의한 손상보다는 pre-ignition에 의한 것이 대부분이다. 스파크에 의한 정상적인 점화 이전에 고온의 점화 플러그 부분 등에서 혼합기의 산화반응이 진행되어 pre-ignition에 이르게 되면 스파크 플러그의 온도가 급격히 상승되고 수회 혹은 수십회의 사이클만에 전극이 녹아 떨어져 나가게 된다(사진 1). 이와 동시에 과도한 실린더 압력에 의하여 siamese 부분으로 연소가스가 누출되어 헤드 가스킷의 failure를 발생시키기도 한다. 또한 점화플러그의 손상에 따라 실화가 발생되고 연료에 의한 유막파괴 → piston scuffing으로 진행되

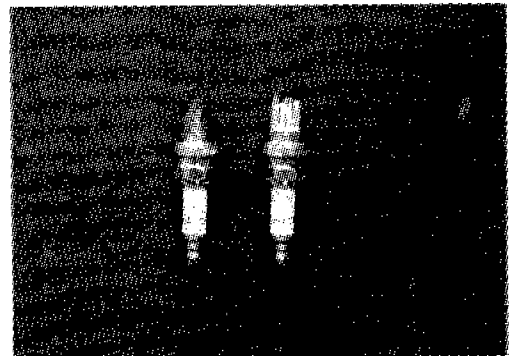


사진 1. pre-ignition에 의한 점화플러그의 손상

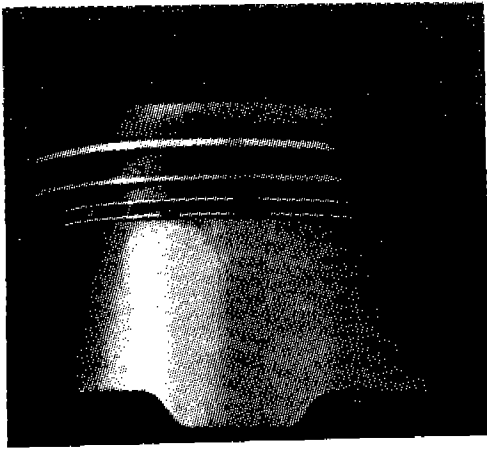
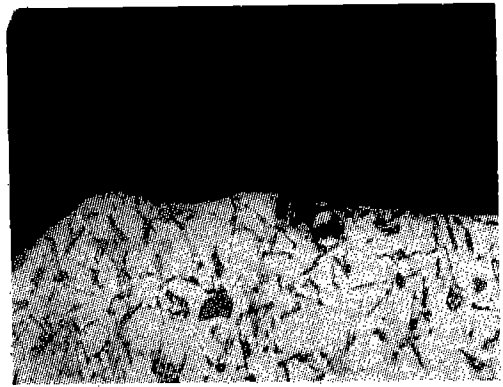
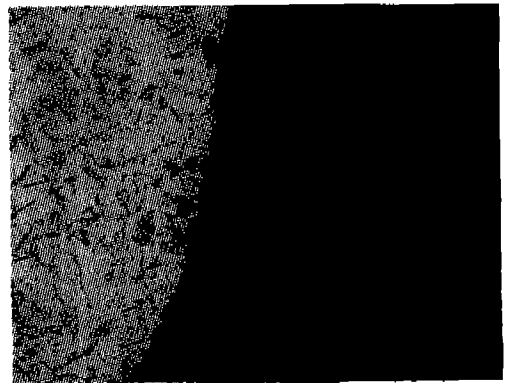


사진 2. piston top land부위의 손상



(a) crown 부위



(b) top land 부위

사진 3. piston crown 및 top land 손상부위의 조직사진(×400)

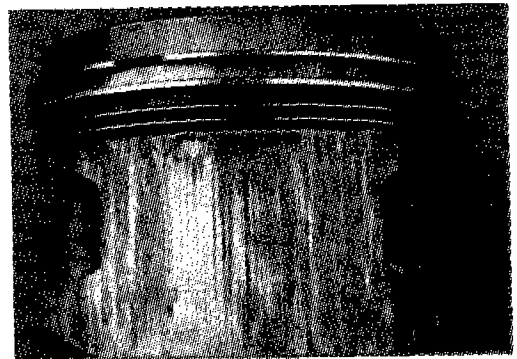


사진 4. piston scuffing

르게 된다(사진 4). 사진 5는 노킹발생에 따른 과도한 압력이 piston ring에 작용하여 2nd land 부위가 떨어져 나간 현상을 보여 준다.⁵⁾ 이러한 극단적인 파손현상이 쉽게 발생하는 것은 아니지만, 피스톤의 경량화를 위

기도 한다. 혼합기의 자발화 반응은 연료에 따라 특성이 다르고, 또 플러그 전극의 재질에 따라 촉진될 수도 있으므로 스파크 플러그 선정시 유의하여야 한다. 일례로 메탄올 연료는 가솔린 연료에 비해 상대적으로 pre-ignition이 일어나기 쉬우며 백금 전극의 경우 산화반응의 촉매로 작용되어 그 정도가 더욱 심해질 수 있다.

피스톤은 노킹에 의한 손상의 빈도 및 중요도 관점에서 볼 때 가장 중요한 위치를 차지한다. 주로 crown, top land 및 2nd land 등이 손상되는데 사진 2~사진 5에서 그 대표적인 예를 볼 수 있다. 사진 2는 800 시간 내구 후의 피스톤 사진인데, 스파크 플러그 반대편 위치의 top land 부위에 erosion에 의한 melting 흔적이 발생된 것을 볼 수 있다. 이러한 노킹에 의한 손상부위의 금속조직을 관찰해 보면 표면 근처의 금속조직이 열에 의해 침식되어 있으며 심부조직에는 변화가 없다는 것을 알 수 있다(사진 3). 이는 표면도금 등의 처리가 노킹에 의한 열해침식에 도움을 줄 수 있다는 짐을 간접적으로 시사한다고 할 수 있다. 또한 이 현상이 계속되거나 심해지는 경우 crown 부위 및 top land 부위의 침식이 발생되고 피스톤이 파열되어 윤활막의 파괴→piston ring scuffing 및 piston scuffing을 일으켜 failure에 이

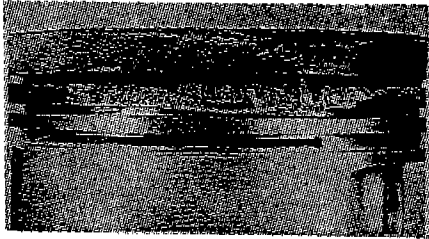


사진 5. piston 2nd land 부위의 손상

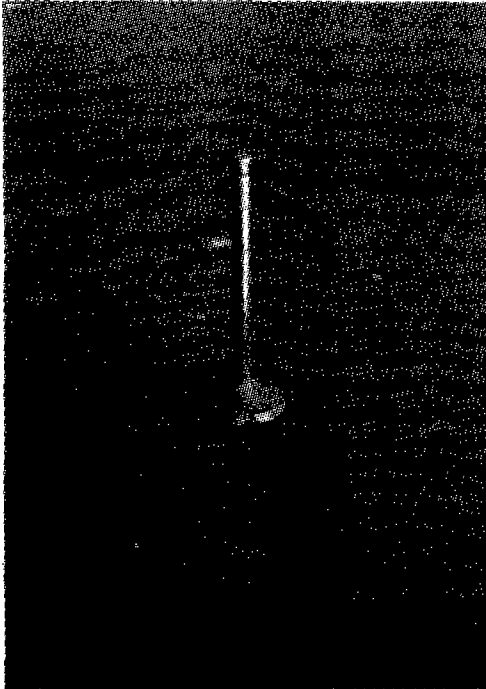


사진 6. 배기 밸브의 손상

한 land 부위 축소 등 최적화 설계시 간과할 수 없는 현상이라 생각된다.

그 밖에도 노킹은 배기밸브의 guttering 현상 - 고온의 가스가 배기밸브와 seat 사이에 관통되어 밸브가 녹아 떨어져 나가는 현상 - 의 한 원인으로도 작용될 수 있으며, 사진 6은 이러한 현상에 의해 일부가 녹아 떨어져 나간 부분을 보여주고 있다.

4. 엔진 손상 방지책

노킹으로 인한 엔진 손상을 방지하는 방법으로는 노킹이 일어나도 이를 견다도록 하는 방법과 노킹 자체를 방지하는 방법이 있다.

전자의 방법은 피스톤 표면 등의 손상을 많이 받는 부분들을 steel 또는 nickel 등의 고온에 강한 금속으로 도금하는 방법이다.

후자인 노킹을 방지하는 방법에는 실린더 내의 압력과 온도가 과도하게 높아지지 않도록 하거나 자연발화가 일어나기 전에 연소가 끝나도록 하는 방법이 있다. 이에선 엔진의 압력비를 낮추거나 스파크 플러그 위치를 연소실 중심부에 가깝도록 하여 화염 전과거리를 짧게 하는 방법, 또 스파크 점화 시기를 늦추는 방법 등이 있다. 또 냉각수 온도나 유동 등을 조절하여 end-gas 영역의 가스 온도를 낮추는 방법도 있다. 또한 연료의 옥탄가를 높혀 노킹 저항성을 높힐 수도 있다.

최근 생산되는 차종 중 일부는 실린더 블럭의 진동이나 소음 등을 측정하여 노킹이 일어났다고 판단될 때 스파크 점화 시기를 늦추어 노킹을 방지하고 엔진이 최적 상태에서 운전되도록 하고 있다.⁶⁾

후 기

이 글에 실린 엔진 손상 부품 자료를 제공하여준 현대자동차 마복리 연구소 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. R. R. Maly, R. Klein, N. Peters and G. König, "Theoretical and Experimental Investigation of Knock Induced Surface Destruction", SAE 900025, 1990.
2. G. König, R. R. Maly, D. Bradley, A.K.C. Lau and C.G.W. Sheppard, "Role of Exothermic Centres on Knock Initiation and Knock Damage", SAE 902136, 1990.
3. W. Lee and H.J. Schaefer, "Analysis of Local Pressures, Surface Temperatures and Engine Damages under knock Conditions", SAE 830 508, 1983.
4. U. Spicher and H.P. Kollmeier, "Detection of Flame Propagation During Knocking Com-

- bustion by Optical Fiber Diagnostics”, SAE 861532, 1986.
5. Seiichi Okumura et. al, “The Latest Survey of a Number of Typical Damage Piston and Remedies”, Internal Combustion Engine, Vol, 30, No.375 PP.29-41, 1991. 1
 6. H. Decker and H. U. Gruber, “Knock Control of Gasoline Engine—A Comparison of Solutions and Tendencies, with Special Reference to Future Europe Emission Legislation”, SAE 850298, 1985