

가솔린 엔진에서의 노킹 현상 해석

민 경 덕*

Investigation of the Knocking Phenomenon in SI Engines

Kyoungdoug Min*

Key Words: Knocking(노킹), Autoignition(자발화), Abnormal combustion(이상연소), Chemical kinetic modeling(화학 반응 모델링)

Abstract

Knock in SI engines causes physical damage to the piston and combustion chamber and lowers the thermal efficiency. The increase in compression ratio which can improve the thermal efficiency and engine performance has been limited by engine knock. So the need of making clear the knocking phenomenon has increased. This paper reviews the methods of knock detection, characterization and prediction of knock with the reduced chemical kinetic modeling.

1. 서 론

전기 점화기관에서의 열효율은 압축비에 비례하여 증가할 수 있으나, 말단가스의 자발화에 기인한 노킹의 발생에 의하여 제한되므로 그 증가에 한계가 있다 [1]. 또한 삼원촉매기의 효율 향상을 위해 가솔린 연료에서 납 성분이 제거되어 노킹 발생 가능성이 증가하였고 [2], 출력 향상을 위하여 점화 시기를 노킹이 발생하지 않도록 최대한 진각시키는 엔진 제

어기술과 관련하여 노킹 발생 메커니즘과 예측 기술에 대한 필요성이 증대되고 있다.

이러한 노킹의 발생 과정을 살펴보면, 압축 행정시 피스톤 운동에 의해 압축된 혼합기는 상사점(TDC)에 도달하기 전에 점화 플러그로 점화되는데, 말단가스는 피스톤운동에 의한 압축 뿐만 아니라 화염면에 의해서도 더욱 압축되며, 이는 상사점 이후에도 계속된다. 이러한 말단가스의 온도와 압력의 상승 때문에 정상적인 화염이 도달하기 전에 말단가스 부근에서 자발화가 발생하여 급격한 압력 상승을 가져온다. 이러한 자발화에 의한 노킹은 엔진의 출력 저하뿐만 아니라 엔진 부품에 심각한 손상을 발생시킨다 [3].

* 서울대학교 기계항공공학부

이러한 노킹 현상의 중요성 때문에 다양한 실험적 연구에서부터 화학 반응 메커니즘의 규명에 이르기까지 다각도의 접근 방법이 수행되고 있다. 특히 최근에는 컴퓨터 성능의 발달과 함께 3차원 모사(3D-simulation)에 의한 노킹 예측과 관련된 자발화 모델링에 대한 필요성이 증가하고 있기 때문에 화학 반응 모델링과 관련된 연구들도 활발하게 진행되고 있다[4~9].

먼저 노킹 현상에 대한 실험적인 연구로는 연소실 압력[11], 실린더 블록 혹은 헤드의 진동[12]이나 소음 등을 가속도 센서나 마이크로폰(microphone)을 이용하여 노킹의 발생을 감지하는 방법에 관한 연구와 광센서나 레이저[13], 고속 쉐리렌(Schlieren) 사진[14], 혹은 다수의 압력 센서[15] 및 이온 프로브[16] 등을 이용하여 노킹의 발생 위치와 관련된 연구 등이 수행되어 왔다. 한편 노킹 발생의 원인이 되는 자발화 현상에 대한 연구로서 정적 연소실[6]이나 shock tube[17,18], 급속압축기(RCM, Rapid Compression Machine)[19,20] 등에서 화학반응 메커니즘을 규명하려는 연구들도 수행되고 있다.

2. 노킹 현상

노킹 현상에 있어서 자발화는 Fig. 1 과 같이 말단가스 부근에서 다발적으로 발생하며 급격한 연소를 발생시켜 높은 압력 상승을 가져온다.

자발화는 급격한 발열반응을 통해 1000K 이상의 온도 상승을 일으키며, 특히 알칸계 연료는 말단가스의 압축 시작 단계에서 저온반응이 형성된다. 이러한 온도상승과 저온 반응과정으로 형성된 반응성이 좋은 중간체에 의하여 폭발적

인 자발화에 영향을 미친다. 강력한 노킹은 Fig. 2 과 같이 엔진 부품에 심각한 손상을 주며 높은 열플럭스와 강한 압력 및 온도에 의하여 부식되기도 한다.

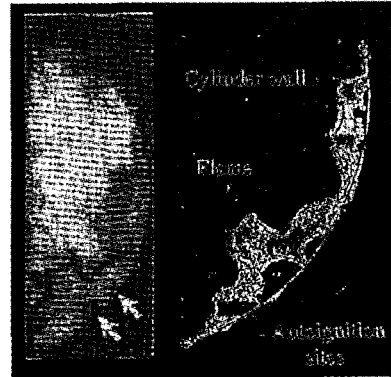


Fig. 1 Photograph of knocking.

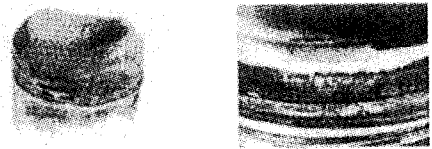


Fig. 2 Engine damage by knocking.

이때 노킹에 의한 압력파의 주파수는 실린더 내부를 원통형상으로 가정하고 진동 미분방정식을 이용하여 구할 수 있으며, 이는 연소실 직경, 연소시의 가스 온도, 비열비, 진동 모드의 종류 등에 따라 달라지는데 약 6~20 (kHz) 정도이다.

노킹과 같은 이상연소 발생에 영향을 주는 주요 인자로는 압축비, 연료특성, 흡기 온도 및 압력, 점화 시기 및 엔진 벽면으로의 열전달률 등을 들 수 있으며, 노킹 감지기(knocking detector)에 의한 판정과 이를 통하여 점화 시기의 조절 등을 통하여 능동적으로 노킹 발생을 억제시킬 수 있다.

3. 해석 방법

3.1. 실험적 방법

노킹의 발생 여부를 판정하는 가장 확실한 방법은 연소실 내부 압력을 측정하여, 노킹이 주로 발생하는 특정 위치(대략 ATDC $10^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 정도)의 신호만을 노크 윈도우(knock window)로 설정하여 노킹 특성 고주파 성분만을 대역필터링(bandpass filtering)한 신호의 진폭의 크기로 판단하는 것이다. 또한 Fig. 3 과 같이 이온 프로브를 헤드에 장착하여 노킹 발생 위치를 판정할 수 있고, Fig. 4 에 나타난 것과 같이 노크 발생 시점은 대역필터링된 측정된 연소실 압력이 25 kPa 이상이 되는 크랭크 각도로부터 결정될 수 있다.

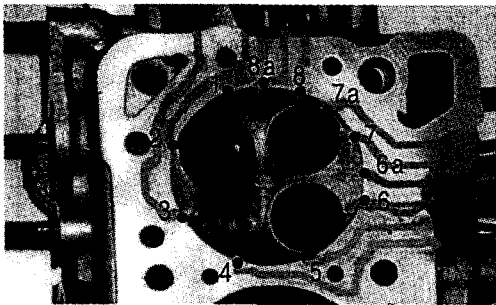


Fig. 3 Picture of ion probe installed head.

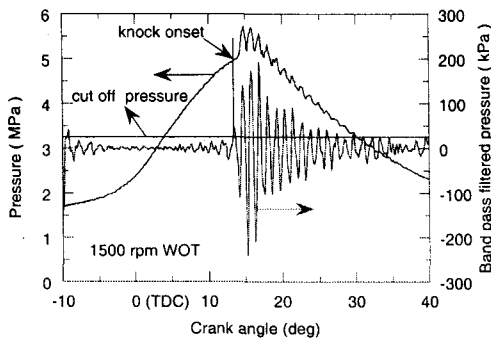


Fig. 4 Cylinder pressure and band pass filtered pressure at knocking cycle.

이와 같은 연소실내 압력을 이용하여

노크를 판정하는 것은 실린더별로 압력 센서나 이온 프로브 등을 장착하기 어렵고, 비용의 문제가 있으므로 실린더 블럭 또는 헤드의 진동신호 또는 진동 소음 등을 이용하여 노킹의 발생을 감지하는 방법이 주로 사용되고 있다. 이 방법은 계측장비의 장착이 용이하고 값이 저렴하면서도 판정률이 비교적 높다는 장점이 있다. 그러나, 압력과 이외의 밸브 소음이나 다른 기계적 진동 소음에 의한 영향을 받을 수 있기 때문에 이런 영향을 최소화할 수 있는 장착 위치의 선정이 대단히 중요하다.

또한 측정된 압력이나 진동 신호로부터 노킹의 강도를 정하는 방법은 신호 처리 방법에 따라 다양한데, 압력 신호를 이용하는 경우에 있어서는 압력 파형의 3차 미분의 최소값이나, 앞서 언급한 것처럼 노크 윈도우 영역 내에서 대역필터링된 압력 신호의 최대값, 또는 노크 윈도우 내의 값을 적분하는 등의 방법으로 노킹의 강도를 정한다. 그러나 노킹의 정량적인 판별 기준은 이러한 노킹 강도에 의한 정확한 판정 기준값이 엄밀하게 정해질 수 없다는 점 때문에 엔진을 개발하는 회사마다 조금씩 방법이나 값이 다른 것이 보통이다. 진동 신호 또는 진동 소음을 측정하는 방법 역시 압력파를 간접적으로 측정하는 방법 중의 하나이다.

노킹에 의한 압력파는 연소실 내부의 진동 모드에 따라 다양한 특성 주파수를 갖고 있기 때문에, 진동 센서로 측정된 신호의 주파수 및 강도로부터 노킹을 판정할 수 있으며, 최근에 웨이브릿 변환(wavelet transform)을 이용하는 연구가 주목받고 있다. 웨이브릿 변환은 1990년 이후 여러 분야에서 새로운 신호해석 기법으로 이용되고 있는 데, 시간에 따른

과도적 신호의 정보를 알 수 없는 기존의 FFT(fast Fourier transformation)에 비하여, 시간에 따른 주파수의 변화 양상을 확인할 수 있다는 장점을 지니고 있다. Fig. 5는 노킹 발생시 연소실 내부 압력 및 엔진 블록의 진동 신호를 동시에 측정하여, 압력파의 대역필터링으로 노킹의 발생을 판단하고, 엔진 블록의 진동 신호를 연속 웨이브릿 변환(continuous wavelet transform, CWT)으로 처리하여 노킹을 판정한 경우를 보여준다.

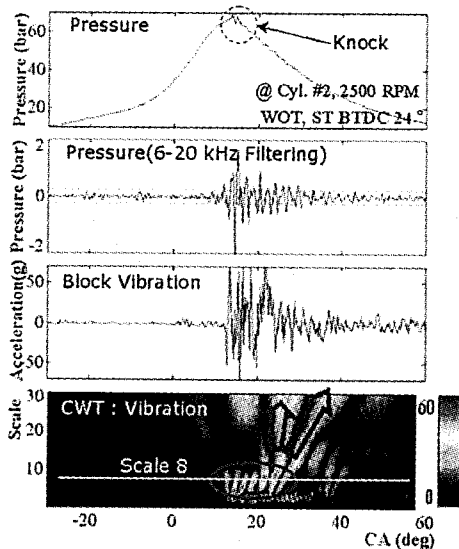


Fig. 5 Knock detection using the CWT (continuous wavelet transform)

3.2. 화학 반응 모델링

화학 반응 속도론에 의한 화학 반응 모델링은 연료의 산화에 참여하는 대부분의 화학반응식 및 화학종을 다루는 상세화학반응기구(detailed chemical reaction mechanism)[8]와 자발화 발생과 관련하여 중요한 반응식과 화학종만을 고려한 축소화학반응기구(reduced chemical reaction mechanism)[4~7,9]로 나눌 수 있다. 상세화학반응기구를 이용하는 경우 그 예측

결과가 정확하다는 것이 장점이지만 반응식 및 화학종이 수천, 수백종으로 실제 계산 시간 측면에서 비효율적이며 고탄소수 탄화수소 연료에 대한 검증화된 화학반응기구가 제한적이기 때문에 엔진 모사에 적용되기에는 한계가 있다. 반면에 축소화학반응기구는 실제 고려하는 반응식 및 화학종의 수가 적어 복잡한 3차원 모델의 계산에도 적용 가능하고, 적절한 반응계수 조정을 통하여 연료 성분 변화에 대한 고려가 가능하다는 장점이 있다.

상세화학반응기구에 대한 연구는 지난 20여 년간 Westbrook, Dryer, Warnatz 등에 의해 수행되어 왔으며 수천의 반응식을 포함하는 기구가 수립되었다. 이러한 모델은 간단한 연료[21]에서부터 점진적으로 발전하여 고탄화수소[22,23]로 확장되었으며 연료 구조의 변화에 따른 효과도 모델링[8]되고 있다. 이러한 기구는 shock tube, RCM 등과 같은 실험장치의 교정으로 유용하며 다차원 모델에도 적용이 가능하지만 계산상의 비효율적인 문제가 있다.

축소화학반응기구는 상세화학반응기구에서 상대적으로 반응에 영향이 적은 반응식을 제거하여 그 수를 감소시키는 방법이다. 이러한 축소화학반응기구에 의한 모델링 중 Shell 모델[4]이나 Griffiths 모델[9] 등과 같이 형식적인 화학종이나 화학반응을 고려한 모델은 간단하지만 연료나 운전조건에 따라 측정된 실험 결과로 모든 반응 계수의 조정이 필요하다는 단점이 있다. 또한 Shell 모델을 일반화된 성분의 기본반응의 형태로 수정, 보완한 Cox 모델[5]이 있으며 이를 확장한 Keck 모델[6,7]은 각각의 반응에서의 엔탈피 변화로부터 열발생을 계산하였고, 구형 연소실 실험으로 검증하였다.

Keck 모델의 가장 큰 특징은 이성질체 반응(isomeric reaction)인 $RO_2 = QOOH$ 의 반응계수를 조절하여 연료구조의 변화에 대한 고려가 가능하다는 점이다. 그러나 주로 저온반응기구만 포함되어 있기 때문에 고온 조건에서의 자발화를 모사하기에 한계가 있다.

3.3. 노킹 모델링

노킹 현상을 모델링 하는데 있어서 계산상의 효율성에 기인하여 축소화학반응기구를 이용하는데 대표적으로 Shell 모델과 Keck 모델이 있다.

먼저 Shell 모델[4]은 개시(initiation), 전파(propagation), 연쇄(chain branching) 및 종료(termination)반응 등 4단계를 가지고 총 8개의 반응식으로 구성되어 있으며 이들 반응식의 계수값들을 실험장치에서 측정된 점화 지연값으로부터 보정해 주어야 하지만[4], 실험변수가 많아 다양한 연료에 대하여 조정이 가능하기 때문에 자발화 모델링 연구에 많이 적용되고 있다[25~27].

또한 Keck 모델[24]은 19개의 반응식과 17개의 화학종으로 구성되어 있으며 자발화 발생 과정은 다음과 같다. $RH + O_2 = R + HO_2$ 반응은 저온인 600~700K에서의 중요한 개시반응으로 활성화 에너지가 매우 높기 때문에 전체 반응의 속도를 결정하며, 비교적 안정적인 H_2O_2 라디칼에 의하여 냉염(cool flame)이 형성된다. 그 후 지속적인 온도의 상승과 H_2O_2 라디칼의 농도 증가에 따라 $H_2O_2 + M = OH + OH + M$ 과 같은 반응에 의하여 OH 라디칼이 증가하게 되면서 자발화가 발생한다. 800~900K에서는 $R + O_2 = RO_2$ 반응과 $R + O_2 = Olefine + HO_2$ 반응이 서로 경쟁관계를 이루기 때문에 온도가 상승하여도 점화

지연이 오히려 길어지는 NTC(negative temperature coefficient)현상이 발생하게 된다. 900K 이상의 고온에서는 이러한 저온반응의 역할이 상대적으로 감소하기 때문에 냉염이 없이 자발화를 일으키게 된다. Keck 모델은 알칸계 연료의 이단 점화 현상을 모사할 수 있으며 연료의 성분 변화에 대한 영향을 이성질체 반응인 $RO_2 = ROOH$ 반응의 반응 계수의 조절로 가능하다는 장점이 있으나 주로 저온반응기구만을 다루었기 때문에 적절한 고온반응기구를 포함시키는 것이 필요하다.

위와 같은 축소화학반응기구를 연소모델 및 소염모델과 결합하여 Fig. 6 와 같이 3차원 노킹 현상을 모델링할 수 있다 [28].

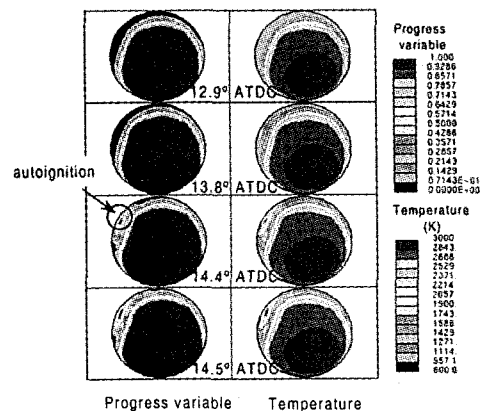


Fig. 6 Autoignition site at 1,550 rpm, WOT and BTDC 14° spark timing

4. 결론

가솔린엔진에서 역사적으로 끊임없이 요구되어 온 열효율 및 연비의 향상은 연소실 압축비의 증가로 귀결된다. 최근 수 십년간 압축비는 5:1에서 12:1까지 변화하는 발전을 가져왔으나 압축비의 증

가는 필연적으로 노킹을 발생시키며 피스톤 및 연소실에 심각한 손상을 유발한다. 이와같이 노킹은 엔진 성능 및 내구성과 밀접한 관계를 가지는 중요한 인자로서 발생 판단 및 강도 측정 등 실험적 연구에서부터 화학반응 속도론(chemical kinetics)에 의한 화학반응 메커니즘의 규명에 이르기까지 노킹 해석에 대한 다양한 접근 방법이 수행되고 있다.

참고문헌

- (1) Blunsdon, C.A. and Dent, J.C., "The Simulation of Autoignition and Knock in a Spark Ignition Engine with Disk Geometry", SAE paper 940524, 1994.
- (2) Schreiber, M. Sadat, S.A., and Poppe, C., "Spatial Structure in End-Gas Autoignition", SAE paper 932758, 1993.
- (3) Heywood, J.B., "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill, 1988.
- (4) Halstead, M.P., Kirsch, L.J., and Quinn C.P., "The Autoignition of Hydrocarbon Fuels at High Temperatures and Pressure-Fitting of a Mathematical Model", *Combust. and Flame*, Vol.30, pp.45~60, 1977.
- (5) Cox, R.A., and Cole, J.A., "Chemical Aspects of the Autoignition of Hydrocarbon-Air Mixture", *Combust. and Flame*, pp.109~123, 1985.
- (6) Keck, J.C., and Hu, H., "Explosion of Adiabatically Compressed Gases in a Constant Volume Bomb", 21st Symposium on Combustion, pp.521~529, 1986.
- (7) Hu, H., and Keck, J.C., "Autoignition of Adiabatically Compressed Combustible Gas Mixtures", SAE paper 872110, 1987.
- (8) Curran, H. J., Gaffuri, P., Pitz, W. J., and Westbrook, C. K. "A Comprehensive Modeling Study of n-Heptane Oxidation" *Combust. and Flame*, Vol.114, pp.149~177, 1998
- (9) Griffiths, J.F., "Reduced Kinetic Models and Their Application to Practical Combustion System", *Prog. energy Combust. Sci*, Vol.21, pp.25~107, 1995.
- (10) Chun, K.M., and Heywood, J.B., et al, "Predictions of Knock Occurrence in a Spark Ignition Engine", 22nd Symposium (International) on Combustion, pp.455~463, 1988.
- (11) Checkel, M.D., et al, "Computerized Knock Detection from Engine Pressure Records", SAE paper 860028, 1986
- (12) Chun, K.M., and Kim, K.W., "Measurement and Analysis of Knock in a SI Engine Using the Cylinder Pressure and Block Vibration Signals", SAE paper 940146, 1994.
- (13) Spicher, U., and Killmeier H.P., "Detection of Flame Propagation During Knocking Combustion by Optical Fiber Diagnostics", SAE paper 861532, 1986.
- (14) Spicher, U., Kroger, H., and Ganser, J., "Detonation of Knocking Combustion Using Simultaneously High Speed Schlieren Cinematography and Multi Optical Fiber Technique", SAE paper 912312, 1991.
- (15) Liiva, W.R., Valentine, J.N., Cobb, J.M., and Acker, W.P., "Use of

- Multiple Pressure Transducers to Find In-Cylinder Knock Location", SAE paper 922368, 1992.
- (16) Witze, P.O., "The Effect of Spark Location on Combustion in a Variable Swirl Engine", SAE Trans, Vol.91, p.165, 1982.
- (17) Ciezki, H.K. and Adomeit, G., "Shock-Tube Investigation of Self-Ignition of n-Heptane-Air Mixtures Under Engine Relevant Conditions", Combust. and Flame, Vol.93, pp.421~423, 1993.
- (18) Pfahl, U., Fieweger K. and Adomeit, G. "Self Ignition of Diesel Relevant Hydrocarbon-Air Mixture under Engine Conditions", 26th Symposium (International) on Combustion, pp.78 1~789, 1996.
- (19) Park, P., and Keck, J.C., "Rapid Compression Machine Measurements of Ignition Delays for Primary Reference Fuels", SAE paper 900027, 1990.
- (20) Ribaucour, M., Minetti, R., and Sochet, L.R., "Autoignition of n-Pentane and 1-Pentene: Experimental Data and Kinetic Modeling", 27th Symposium (International) on Combustion, pp.345~351, 1988.
- (21) Westbrook, C.K., and Dryer, F.L., "Chemical Kinetics and Modeling of Combustion Processes", 18th Symposium (International) on Combustion, p.749, 1981.
- (22) Westbrook, C.K., and Dryer, F.L., "Chemical Kinetics Modeling of Hydrocarbon Combustion", Prog. energy Combust. Sci, Vol.10, 1984.
- (23) Warnatz, J., "Chemistry of High Temperature Combustion of Alkanes up to Octane", 20th Symposium (International) on Combustion, p.845, 1984.
- (24) Cowart, J.S., Keck, J.C., and Heywood, J.B., "Engine Knock Predictions Using a Fully-detailed and a Reduced Chemical Kinetics Mechanism", 23rd Symposium (International) on Combustion, pp.105 5~1062, 1990.
- (25) Hatarajan, B, and Bracco, F.V., "On Multidimensional Modeling of Auto-Ignition in Spark-Ignition Engines", Combust. and Flame, Vol.57, p.179, 1984.
- (26) Schapertons, H., and Lee, W., "Multidimensional Modelling of Knocking Combustion in SI Engines", SAE paper 850502, 1985.
- (27) Sazhin, S.S., Sazhina, E.M., and Heikal, M.R., Marooney, C., "The Shell Autoignition Model: a New Mathematical Formulation", Combust. and Flame, Vol.117, pp.529~540, 1999.
- (28) 이용규, "전기 점화 기관에서 자발화 발생 위치의 예측", 공학 박사 학위 논문, 서울대학교, 1999.