

天然ガス PCCI 機関およびデュアルフェュエル機関の燃焼改善に関する研究

姜 正鎬 (KANG, Jeongho)

本論文では、石油代替燃料としてその利用が広がりつつある天然ガスを燃料とするレシプロ機関の高効率・低公害化を目指して、天然ガス予混合圧縮着火 (PCCI) 機関については出力の拡大や排出物質の低減、また天然ガスデュアルフェュエル機関についてはパイロット噴射条件や燃焼室形状の選択による燃焼改善・制御方針について研究を行った。

天然ガスは、従来の石油系燃料と比べ、地球温暖化ガスである CO₂ や、NO_x, SO_x, PM などの有害排気物質の排出が少なく、インフラや普及において最も有利であるため、熱機関の石油代替燃料として有望視されている。現在、実用化されている天然ガスレシプロ機関は火花点火方式が主流であるが、この方式は混合気の希薄化や高圧縮比に制限があるため熱効率の向上に限界がある。そこで、本論文では高効率および低排出物質を両立し得る天然ガスレシプロ機関の燃焼方式として注目されている天然ガス PCCI 機関およびデュアルフェュエル機関に関する研究を行うこととした。天然ガス PCCI 機関においては、運転範囲を決める要因の解明、および燃焼室形状の変更による未燃物質の排出源の検討、デュアルフェュエル機関については、パイロット噴射条件の選択による燃焼改善、燃焼室形状とパイロット噴射条件の組み合わせによる排気改善、などを研究の方針とした。

第 2 章では、天然ガス予混合圧縮自着火 (PCCI) 機関は、NO_x や PM の排出が少なく高い熱効率を得られる可能性を持つが、運転可能な出力が低く狭い範囲に限られる問題があり、その理由を検討した。PCCI 機関における運転範囲を決める要因を明らかにすることを目的として、まず、単気筒試験機関を用いて圧縮比および吸気圧力を変更させて実験を行った。その結果、圧縮比を増加させると運転可能な最低吸気温度を下げるができるが、最大圧力上昇率の限界により制限される最大燃料投入量は、圧縮比による変化が小さく、着火時期が上死点に近づくにつれ、最大圧力上昇率が急激に増加し、運転限界を迎えることがわかった。また、運転限界においては圧縮比によらず着火時期が上死点付近となり、筒内温度、最大圧力上昇率および最大熱発生率がほぼ等しくなる。吸気圧力を上昇させたときは必要な吸気温度を下げ出力の範囲を拡大することができたが、運転限界の条件では同様な現象がみられる。このことから、運転

限界の吸気温度においては、燃料量が少ないうちは上死点以降で着火が始まるが、燃料量の増加に伴い着火が進角し急激燃焼となることがわかる。この現象について化学動力学計算による均一混合気の着火過程の計算の結果、上死点付近の温度がほぼ一致する条件では着火時期および圧力上昇率が一致し、着火には上死点付近の温度が大きく影響することがわかった。さらに、一段総括着火遅れ式を組み込んだサイクルシミュレーションを用いた着火時期の計算により、燃料量の増加に従う燃焼効率や燃焼期間の変化による残留ガスの高温化により、着火時期が進角することがわかった。

第3章では、天然ガス PCCI 機関のもう一つの問題点である未燃炭化水素 (HC) や一酸化炭素 (CO) など未燃物質の排出について、その排出源を見出す目的で、単気筒試験機関を用いて行った実験の結果を検討した。ここでは、火花点火機関で未燃物質の排出に関連が深いとされるトップランドクレビスや上死点隙間、燃焼室くぼみ口径などを、様々な燃焼室形状のピストンを用意することによって変化させた。その結果、燃焼室くぼみの口径、または上死点隙間を小さくすると、HC の排出が増え CO の排出が減る。一方、トップランドクレビスの容積を小さくすると CO には変化がなく、HC の排出が減る。これらのことから、HC の排出には、燃焼室内の隙間部分の影響が強く、一方、CO の排出は燃焼室空間の混合気の燃焼が主に寄与すると推定した。

第4章では、高熱効率化をねらい希薄な天然ガス予混合気を用いるデュアル燃料機関において問題となる未燃物質の排出を改善する方法について検討した。燃焼改善には、パイロット軽油の噴射制御が重要と考え、コモンレール式高圧噴射装置を備えた単気筒試験機関を用いてパイロット軽油の噴射時期、噴射量、分割噴射などの噴射条件を変化させて実験を行い、噴射条件の選択による燃焼改善の可能性について検討した。その結果、単段パイロット噴射においては、噴射時期を進角させると、軽油噴霧の希薄化および軽油蒸気の筒内への拡散が進行するため、軽油噴霧による予混合的燃焼（初期燃焼）が緩和され、天然ガス混合気の燃焼（主燃焼）が促進されること、また、主燃焼は未燃物質の発生と密接な関係があり、主燃焼を活発化させることが未燃物質の低減に有効であることがわかった。しかし、単段噴射では、NO_x 排出量をごく低く抑えようとして早い噴射時期を選ぶと未燃物質の排出が増加した。そこで、パイロット噴射を二段に分ける二段噴射の可能性を調べた。二段パイロット噴射を用いる場合は、早い一段目パイロット噴射により軽油蒸気を供給し、二段目パイロット噴射により着火時期を決めることにより、単段パイロット噴射と比べ、NO_x と未燃物質の排出が大幅に低減し、NO_x と HC のトレードオフを改善でき

る。特に、一段目の噴射量を大きくすることでその効果が大きくなることがわかった。

第 5 章では、第 4 章につづき、噴射条件に加えて、燃焼室形状の選択による燃焼改善の可能性を調べた。第 4 章から、パイロット噴霧により軽油蒸気を天然ガス予混合気内に適度に分布させることは、予混合気の燃焼を促進して未燃物質の低減に役立つことが分かった。この結果にもとづいて、空気流動を支配する燃焼室形状の影響が強いと考え、パイロット軽油の噴射条件との組み合わせを求める方針について検討した。コモンレール式高圧噴射装置を備えた天然ガスデュアルフェュエル機関において、単段および二段パイロット噴射の噴射時期ならびに噴射量配分を変更しながら、燃焼室形状の変化が機関性能・排気に与える影響を調べた。その結果、単段パイロット噴射においては、くぼみ口径が大きく噴射時期が早くなるほど主燃焼の最大熱発生率が高くなり、CO と HC は抑えられた。これは、燃焼室くぼみ口径の拡大により筒内流動が弱くなるため、早い噴射時期でも軽油噴霧の過剰な希薄化が抑制される結果と考えられる。一段目パイロット噴射時期を早い時期に固定し比較的二段目の噴射量を多くした二段パイロット噴射においては、くぼみ口径の大きい燃焼室ほど未燃物質の排出が低くなり、早い二段目パイロット噴射時期を選択することで未燃物質を悪化させず NOx を低くできる。しかし、一段目噴射量を多く、二段目噴射量を少なくするにつれ、くぼみ口径の影響が弱くなるのが見られた。

以上のように本論文は、天然ガスレシプロ機関の高効率および低エミッション化を目的として、PCCI 燃焼方式においては最大出力が制限される理由および未燃物質の排出源について検討した。また、デュアルフェュエル方式ではパイロット噴射の制御を用いて高効率、低排出物質となる燃焼制御の方針を得ることができた。この研究から得られた知見は、今後天然ガスレシプロ機関の高効率化のために寄与できると考える。