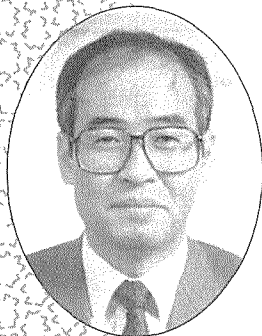


석유제품의 품질 (Ⅲ)



申世熙

〈중앙대 화공과 교수〉

비

행기는 인류의 생활을 비약적으로 발전시킨 문명의 이기중의 하나이다. 1940년에 출현한 피스톤 엔진을 사용한 전폭기는 근대전의 양상을 변혁하였으며, 1960년에 제트엔진을 사용하는 여객기의 출현에 의하여 국제화가 가속되는 기틀이 마련되었다. 이들 항공기에 사용되는 연료의 사용량은 원유소비량 중 점유율이 비교적 낮으나 매우 중요한 사용처이다.

1903년에 Wright 형제에 의하여 만들어진 90kg, 12마력 피스톤엔진이 최초의 성공적인 비행을 수행하였으나 이보다 2년전에 개발된 Charles Manly에 의한 57kg, 52마력 엔진은 우수하였으나 시험비행장치의 결함으로 인하여 이륙에 실패하였다. 그 후 항공기 엔진의 실용화는 프랑스에서 추진되어 1차 대전중 전투기에 사용되었다. 1927년에 개발된 Pratt & Whitney사의 425마력 Wasp 엔진은 20년후에는 28개의 실린더를 갖는 3500마력의 Wasp Major 엔진의 개발에 기여한 바가 크다. 그러나 이들 프로펠러 밑에 의하여 추진되는 항공기는 속도의 제한이 있기 때문에 이를 극복하기 위한 엔진의 개발이 불가피하게 되었으며, 1974년에 이르러 세계적으로 90% 이상의 비행시간은 jet 엔진에 의하게 되었다.

1920년대에는 피스톤엔진에서 배출되는 가스를 재 사용하여 흡입되는 공기를 압축하는 supercharger 장치 개발되었다. 이 장치는 희박한 산소로 인한 고공비행에서의 추진력 감소를 해소하게 되었고 피스톤엔진의 효율을 향상시켰다. 또한 고온의 엔진배출가스중의 에너지를 회수하는 turbine을 설치하여 흡입되는 공기를 압축하는 turbo-charger 형태 이 때에 실용화되었으며 이 장치의 개발은 jet 엔진의 개발에 기여한 바가 크다. 그러나 이들 프로펠러 밑에 의하여 추진되는 항공기는 속도의 제한이 있기 때문에 이를 극복하기 위한 jet 엔진의 개발이 불가피하게 되었으며 1974년에 이르러 세계적으로 90%이상의 비행시간은 jet 엔진에 의하게 되었다.

연속적인 연소에 의하여 추진력을 얻는 jet 엔진의

개념은 오래전부터 알려진 것이나 1930년 23세의 Frank Whittle이라는 영국공군의 조종사가 turbojet 엔진에 대한 특허를 출원하면서 jet시대가 시작되었다. Whittle이 설립한 회사는 천신만고 끝에 1939년 테스트엔진의 제작에 성공하였으나 실제로 turbojet 엔진에 의한 최초의 실험비행은 2차대전 발발 직전 1939년 8월에 독일에서 성공하였다. Whittle의 W-1 엔진은 1941년에 비행에 성공하였으며 2차 대전중 미국에 도입되어 급속한 발전을 이루게 되었다.

jet 엔진의 종류는 대별하여 가스터빈식, Ramjet식, 로켓식으로 구분된다. 가스터빈식은 연소배출가스로 터빈을 작동하여 흡입되는 공기를 압축하는 엔진이다. Ramjet는 터빈이 없는 가장 단순한 형태의 엔진으로서 초음속의 미사일에 주로 사용된다. 입구에서 초음속으로 흡입되는 공기가 관을 통과하면서 음속 이하로 감속되어 연료와 혼합하여 연소된다. 연소된 가스는 노즐을 통과하여 다시 초음속으로 배출되어 필요한 추진력을 얻게 된다. 로켓은 작동원리는 Ramjet와 유사하나 공기가 없는 곳에서 사용되기 때문에 연료와 고체 또는 액체산소원을 공급하여 연소를 시키는 것이다.

가스터빈식 엔진의 기본형인 turbojet는 입구에서 흡입되는 공기가 여러개의 압축기를 통과하면서 대기압에서 8-30기압, 260℃ 이상으로 가열되어 diffuser를 통과하여 연소실로 유입된다. 흡입공기의 25% 정도는 연료와 혼합되어 연소에 사용되고 나머지 공기는 연소실 벽으로 이동되어 벽면의 냉각에 이용된다. 연소실 배출가스는 1000-1500℃의 온도로 터빈으로 이동되는데 터빈의 재질은 이러한 고온에 견딜 수 있어야 한다. 연소실 배출가스는 터빈날개를 회전하여, 터빈과 동일한 회전축에 연결된 입구의 압축기들을 구동하게 된다. 터빈 출구가스는 아직도 고온, 고압상태이기 때문에 jet노즐을 통과하여 엔진 후미로 분사될 때 가스의 속도가 급격히 증가하여 강력한 추진력을 얻는다. 변형된 turbojet엔진에는 터빈뒤

에 연소장치(afterburner)를 추가로 장치하여 추진력을 증가시킨다.

실제의 항공기들은 위에서 설명한 turbojet 엔진을 기본으로 하여 연료의 경제성, 무게, 크기등을 고려하여 적절히 변형된 엔진들을 사용한다. 예를 들면 대형 프로펠러를 구동하는 헬리콥터에 사용되는 turboshaft형, 프로펠러가 장착된 turboprop형, 프로펠러보다 크기가 작은 fan이 설치된 turbofan형 등이 있다. 일반적으로 프로펠러의 크기가 작을수록 항공기의 속도는 증가한다. turboprop형은 프로펠러를 회전하는 터빈을 turbojet엔진에 더 부착한 것이다. turbofan은 일반 프로펠러의 10배의 회전속도를 갖는 소형 fan을 구동하여 일부의 공기는 turbojet과 같은 방법으로 연소실로 보내고 다량의 찬 공기는 직접 배출구로 보내는 효율적인 엔진이다. 이 엔진은 대형 여객기의 보편적인 순항속도 1000km/hr에서 연료의 경제성과 이륙시의 성능이 모두 우수하여 보잉 747, Douglas D-10, 300B Airbus등에 사용된다. 군사용 고기능 jet엔진은 turbojet, turbofan, ramjet의 우수한 점을 융합하여 설계된다.

jet비행기는 프로펠러 비행기에 비하여 추진력이 우수하며 고공에서 더 효과적이다. 프로펠러만에 의하여 추진되는 비행기는 속도가 720km/hr이상이 되면 프로펠러 날개 끝의 유속이 음속을 초과하면서 추진력이 급격히 줄어든다. 그러나 저속에서는 프로펠러에 의한 공기의 이동이 jet분사에 의한 이동보다 크기 때문에 프로펠러가 더 효율적인 추진방법이다. 고공에서는 공기가 희박하여 이동시킬 공기량이 줄어들기 때문에 프로펠러의 효율이 감소하게 되는 것이다. 따라서 이륙, 저공비행, 저속비행에서는 프러펠러가 더 유리하여 초창기의 turbojet에서 발전된 turbofan형의 jet엔진이 개발된 것이다. 피스톤을 사용하는 프로펠러 비행기는 구조가 매우 복잡하여 고장의 위험성이 상대적으로 높고 사용되는 개솔린 연료도 까다로운 품질이 요구되어 jet엔진으로 교체되

었으나 가격이 저렴한 잇점이 있어서 경비행기에는 지속적으로 사용될 것으로 예상된다.

피스톤엔진 항공기의 연료인 개솔린의 품질기준은 옥탄가, 열량, 휘발성, 저온 유동성, 부식성, 안정성 등이다. 옥탄가는 두개의 실린더를 사용한 표준엔진에서 측정되며 ASTM F-3와 F-4 방법이 보편화되어 있다. F-3 방법은 자동차의 Motor옥탄 측정법과 유사하여 일정 조건하에서 압축비를 증가하여 측정한다. 이는 순항시의 항공기 녹킹경향을 나타내는 지표가 된다. F-4 방법은 이륙시의 녹킹경향을 모사하기 위한 측정법으로서의 압축비를 고정하고 흡입압력과 공기/연료 혼합량을 변화하여 녹킹경향을 측정한다. F-4방법은 보다 경미한 조건하에서 측정이 수행되어 F-3 방법보다 측정되는 옥탄가가 높다. 예를 들면 항공용 115/145개솔린은 납을 함유할 때 F-3에 의한 옥탄가가 115 이상 F-4에 의한 옥탄가가 145 이상인 연료를 지칭한다. 이 연료는 대형 supercharge 엔진에서 사용된다.

항공기는 운항거리가 중요하기 때문에 연료 단위 무게당 열량을 품질기준으로 지정한다. 이소파라핀계 연료는 다른 종류의 탄화수소보다 열량이 높기 때문에 잇점이 있다. 따라서 정유공장에서 alkylation공정에 의하여 제조되는 이소파라핀계 연료는 항공용으로 적합하다. 반면에 이륙시의 성능을 향상시키기 위하여서는 열량은 적지만 아로매틱성분이 요구된다. 유분의 열량측정은 특수한 장치가 필요하기 때문에 비중과 Aniline Point를 측정하여 열량을 추정하는 방법을 사용할 수 있다. Aniline Point는 아닐린이라는 화학물질이 유분에 용해되는 온도로서 측정되며 비아로매틱계 탄화수소의 함량과 관련된 지수이다.

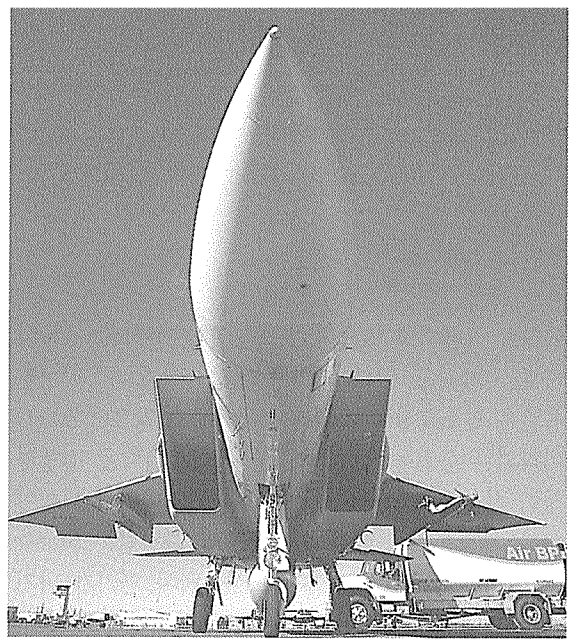
항공용 개솔린에서는 10%, 50%, 90% 비등점들의 최대치들을 명시하여 적절한 휘발성을 요구한다. 그러나 휘발성이 너무 높으면 자동차와 마찬가지로 카부레타 icing문제가 발생하므로 10%와 50%의 비등점의 합의 최소치를 지정하여 휘발성이 너무 높

은 것을 제한한다. 연료의 부식성은 등으로 제작된 시편을 사용하여 황에 의한 부식성을 측정한다. *alkylation* 공정에 의하여 제조된 개솔린의 경우에는 유분을 전부 증류시킨 후 잔류물에 대한 산도를 측정한다.

이는 *alkylation* 공정은 강한 산촉매에 의하여 수행되기 때문에 잔존하는 산을 측정하는 것이다. 항공유의 저온에서의 유동성은 8km 상공에서 대기온도가 -56℃정도까지 낮아질 수 있기 때문에 저온에서 왁스 결정체의 생성에 의한 유분의 어는점을 측정한다. 유기산화물인 *diisopropyl ether* 등의 화학물질은 옥탄가가 높기 때문에 항공기용 개솔린에 혼합하기도 하였다. 이러한 첨가제는 기름과는 달리 물과 혼합할 수 있기 때문에 물을 사용하여 이들의 양을 간접적으로 측정하는 *Water Reaction* 테스트를 사용하여 품질 관리의 기준으로 삼는다. 그리고 저장시 침전가능 물질의 양을 측정하기 위하여 도가니속에서 시료 유분을 산화하여 잔류량과 눈에 보이는 납을 측정한다. 항공기용 개솔린에는 산화방지제의 첨가가 허용되며 방지제를 첨가하면 산화잔류량이 감소하게 된다.

jet 엔진은 피스톤엔진에 비하여 연소현상이 단순하여 개발 초기에는 아무 연료나 사용할 수 있을 것으로 예상하였다. 그러나 *jet* 엔진은 고옥탄가의 연료를 필요로 하지는 않지만 그 연소장치에 부합하는 까다로운 연료규격이 요구된다.

한마디로 *jet* 연료는 공기와 완전히 연소하여 터빈 입구에서의 공기의 온도를 충분히 높일 수 있어야 한다. 이 목적을 위하여 연료는 탱크에서 일정량씩 노즐을 통하여 고속으로 흐르는 공기에 분무된다. 분무된 연료는 완전히 휘발되어 잔류물을 남기지 않고 연소가 완료되어야 한다. 또한 연료는 저온에서 유동이 가능하여야 하며, 경제성을 고려하여 열량이 높아야 한다. 이들 연료특성을 좀더 세분화하면 가스터빈식 *jet* 엔진에서 필요한 제품규격은 열안정성, 연소성, 열량, 연료의 분무성, 저온 유동성, 부식성, 취급과 저장



의 안정성 등이다.

연료탱크에서 이송된 *jet* 연료는 연료 자체의 예열 (*preheat*) 과 엔진유회유의 냉각을 위하여 설치된 열교환기를 통과하게 된다. 연소실로 유입되기 직전의 연료온도는 약 200℃정도이며 연료중의 침전물이 벽에 부착되어 열교환기의 성능을 저해하는 현상이 발생할 수 있다. 열에 의한 침전물이 생성여부를 연료의 열안정성이라고 부른다. 이와같은 침전물의 형성은 연료에 용해된 산소와 질소/황 등을 포함하는 물질과의 반응에 의한 것이며 열교환기의 벽면 금속이 산화반응의 촉매역할을 하는 것으로 추정된다. 열안정성은 *Jet Fuel Thermal Oxidation Test* 에 의하여 측정한다. 초음속 항공기용 연료에서는 이 측정을 316℃에서 수행하도록 규정하고 있다. 보편적으로 온도 150-200℃에서의 침전물 형성은 연료의 구성물질을 조절하거나 또는 수첨처리공정에 의하여 방지할 수 있다. 그러나 일반적으로 고온에서는 *jet* 연료의 열안정성이 악화되어 적절한 첨가제를 사용할 필요가 있을 수 있다.

jet 연료의 연소성과 연료의 구성성분 및 물성과의 관계를 규명하는 것은 초기의 *jet* 엔진 시대에 어려운 과제이었다. 노즐에서의 침전물 축적, 연소실 벽면의 검댕, 국부적인 과열현상등은 엔진설계에 그 원인이 있을 수 있으나 연료의 구성성분과 휘발성이 중요한 역할을 한다. 연료 구성성분중 아로매틱은 검댕형성의 주원인이기 때문에 아로매틱의 함량을 최고 25%

이하로 규제하고 있으며 초음속 항공기에서는 5% 이하로 규제하고 있다. 그리고 비등점이 290°C 이상인 유분은 연소특성상 *jet* 엔진에 적합하지 않으며 200°C 이상의 비등점을 갖는 유분중의 아로매틱은 검댕형성이 심하여 연료중의 그 함량은 5% 미만이 되어야 한다. 가정용 등유에서 연소특성의 측정법은 *Smoke Point* 인데 이 측정은 심지를 사용하여 연기가 나기 시작할 때의 불꽃길이를 표시된다. 아로매틱은 이 값이 낮아서 연소성이 파라핀에 비하여 나쁘다. *jet* 연료의 연소성도 *Smoke Point* 또는 이와 유사한 측정에 의하여 수행된다. 그러나 어떤 *jet* 연료에서는 *Smoke Point* 가 이상이 없음에도 불구하고 검댕형성과 국부적인 과열현상이 일어나는 것을 발견하였는데 이는 소량의 다핵 아로매틱(*Polynuclear Aromatics*) 성분 에 기인함이 판명되었다. 이들 아로매틱은 자외선 분광기에 의하여 그 함량이 측정될 수 있으며 그 상한선을 규제하고 있다. 따라서 *jet* 연료에서는 *Smoke Point* 에 의한 측정의 한계점을 극복하기 위하여 *Luminometer* 테스트를 보강하게 되었는데 이는 불꽃의 길이뿐만 아니라 강도까지 고려한 측정이다. 이 측정은 *jet* 연료의 연소성과의 관련이 밀접한 것이 확인되었다.

단위 무게당의 열량은 연료의 수소/탄소비가 높을수록 크다. 그러나 수소의 함량이 높은 연료는 비중이 낮아서 단위 부피당의 열량은 수소/탄소비가 높은 연료가 더 낮을 수도 있다. 연료값은 부피에 의하여 지불되기 때문에 경제적인 이유만을 고려하면 단위 부피당 열량이 높은 연료가 더 유리하지만 장거리용 또는 군사용 항공기에서는 단위 무게당 열량이 높은 열량이 높은 연료를 선호할 수도 있다.

초기의 *jet* 엔진들은 연료의 휘발성때문에 시동시에 연소가 중단되는 문제점이 있었으나 그 후 강력한 점화장치의 설치와 개량된 노즐을 사용한 연료방울의 미세 분무가 가능하여 등유와 같은 휘발성이 낮은 연료도 사용할 수 있게 되었다. 휘발성이 너무 높은

연료는 고공에서 대기압이 떨어지면서 휘발에 의한 연료의 손실이 문제가 된다. 따라서 연료의 증기압에 대한 상한선 규격이 존재한다. 여객기에 사용되는 *Jet A* 유는 등유 비등점 범위의 항공유이고 군용기에 사용되는 *Jet B* 유는 개솔린과 등유가 혼합된 비등점 범위의 항공유인데 개솔린이 함유되면 엔진 시동이 용이하고 연소가 중단될 경우에 재 점화가 용이하다.

연료의 휘발성과 취급의 안전성은 밀접한 관계가 있으며 이를 나타내는 것이 발화점(*flash point*)이다. 등유 비등점 범위와 *Jet A* 유는 발화점이 38°C 정도이며 개솔린이 함유된 *Jet B* 유의 발화점은 -7°C 정도이다. 연료유출에 의한 항공기 사고 가능성은 *Jet A* 가 *Jet B* 에 비하여 낮은 것이 판명되었다. 연료의 저온 유동성은 등유 비등점 범위의 *jet* 연료에서 문제가 될 수 있으며 *pour point* 를 기준으로 삼는다. *jet* 연료의 황화합물은 연소시 벽면에 침전물을 형성한다. 또한 황화합물에 의하여 발생하는 황 또는 황화수소는 연료펌프의 부식을 유발한다. 따라서 동으로 제작된 시편을 사용하여 부식성 검사를 수행하여 연료의 품질 기준으로 정한다. 연료의 청정성(*cleanliness*)은 *jet* 연료에서 매우 중요한 요소이다. 연료가 깨끗하지 않으면 비행기 벽면의 코팅제거, 부식, 전자장치 고장 등의 문제들을 유발할 수 있다. 깨끗한 연료를 항공기에 공급하는 것은 정유공장뿐만 아니라 연료운송, 급유 시스템과 모두 관련이 있다. 정유공장에서 연료가 오염될 가능성은 계면활성제로서 이는 원유에서 또는 공정설비를 세척할 때 잔류하여 연료에 미량 함유될 수 있다. 따라서 *jet* 연료에 대하여서 *Water Separometer* 테스트를 사용하여 계면활성제의 잔량을 측정한다. *jet* 연료에 대한 검 테스트는 높은 비등점 범위의 디젤유 성분이 포함된 경우에 필요한 측정이다. 그 밖에 심각하지는 않지만 흐르는 연료에 대한 정전기 발생을 방지 하기 위하여 정전기 방지제를 연료에 혼합하거나 또는 항공기 설계시 각종 대비책을 마련한다. ♣