과급기의 기능 및 구조

한국어선협회 전북지부
기관검사원 채 영 진

1. 과급의 역사

디젤 기관의 출력은, 그 단위시간당의 연료 분사량과 그 기관의 열효율에 따라 결정된다. 그러나, 연료를 완전히 연소시키고, 이것을 유효하게 기계적인 일로 바꾸기 위해서는 연료의 양에 상응한 일정한 공기량이 실린더에 보내져야 한다. 따라서 실린더 안에 들어가는 공기를 처음부터 압축해서 그 밀도를 증가시키면 그만큼 연료를 연소시킬 수가 있어 기관의 출력은 증가된다. 즉 이것이 과급(Super charging)인 것이다.

이와 같은 생각은 1886년 Otto에 의해 4사이클기관을 발명한 이래 많이 실험되어 왔다.

1901년 Dugald Clark가 2사이클기관에 처음으로, 과급 실험을 한 뒤에, 구주에서는 Junkers, Sulzer 등이 연구하였다.

1911년경 스위스의 Alfred Büchi는 디젤기관의 배기가 그에 함유된 에너지의 이용에 주력하여, 기관의 배기가스를 가스터빈에 유도하고, 이를 회전시켜 그 증력에 의해 블로워의 임펠러를 돌려서 공기를 압축시키고, 이 공기를 실린더에 보내어, 배기터빈방식의 과급실험을 처음으로 하였다. Alfred Büchi는 최초, 각 실린더로부터의 배기가스를 배기복스에 모으고, 이것을 터빈에 유입시키는 방식을 실험하였다. 이 결과는 초기 계획보다 불량하였다. 그 원인은 배기가스의 압력파 간섭으로 각 실린더의 배기에 방해가 되기 때문이었다. 이것을 개량하기 위하여 Alfred Büchi는 실린더에서 터빈에 이르는 배기관을, 실린더의 폭발순서에 따라 여러개로 나눔으로써 배기의 압력파로부터의 간섭을 피하고, 유효하게 배기를 이용하는 방식을 생각해냈다. 이로 인하여 1926년에 기관출력을 30～40% 증가시키는데 성공하였다.

이 과급방식을 Büchi식 혹은 동압방식으로 부르고 있다.

그후 스위스의 Brown Boveri Co.에서 Büchi 방식에 의한 과급기를 제작하게 되었다.

한편, 가소린기관에서 자동차와 항공기의 출력을 증가시킬 목적으로 1907년경 블로어 임펠러(Blower Impeller)를 기관의 크랭크축에 의해 치차로 증속구동시켜 과급을 하였다. 즉 기관구동방식이 실현되고, 나아가서 배기터빈으로 발전되어 왔다.

디젤기관용 과급기는 우리나라에 최근 들어 왔으나, 당시 과급기에 필요한 양질의 내열재료, 베어링 등에 충분한 성능을 지닌게 없었다. 이것들은 젯트기관용 가스터빈의 발달에 따라, 신뢰성과 경제적 과급기가 완성되고, 기관 그 자체의 성능과 더불어 급속하게 이용하게 되었다.

디젤기관용 과급기로서는 처음에 4사이클 기관의 300～1,000 HP의 범위의 것이 이용되었다. 2사이클기관의 과급에 대하여도 기관구동에 의한 과급과 더불어, 배기터빈 과급의 이용에 있어서는 1940년경부터 연구해와서, 과급기관과 과급의 배기방식의 개량으로 급진적으로 발전하여서 단류식 배기방식으로, 2사이클기관에 배기터빈

과급기만에 의한 과급, 소위 Full turbo가 B&W 사에서 1951 년에 처음으로 실현하였다.

오늘날, 과급에 의해 이룬 2 사이클기관의 출력은 1 기로서 30,000 HP 이상에 이르고 있다. 종래 과급기를 부착시키지 않았던 200 Hp 이하의 기관에 대해서도, 레이디얼 터빈을 사용한 소형, 고속의 과급기의 완성으로 과급화가 진행되고 있다.

1937 년 독일의 Nüll 박사는 최초의 레이디얼 터빈을 사용한 과급기를 시작으로, 그 뒤 SCHWITZER, CUMMINS, AI-RESEARCH, DE-LAVAL 등의 회사로 하여금 주로, 미국에서 차량용, 건설기계용으로 소형과급기가 대량생산하게 되었다.

아울러, 과급의 효율도 점차 높아져서 4 사이클기관에서, 실용으로 평균유효압력이 18～20 kg/cm^2에 이르고, 또 터보과급과 기계구동과급을 포함한 복합기관(Compound engine)도 출현하게 되었다.

이들 기관에 붙이는 과급기도 구조적으로나 유체적인 성능에 있어서도, 개선되었을 뿐 아니라, 그 형식의 표준화에 의해 전문제작자로 하여금 양질의 것이 공급되고 있는 실정이다.

2. 과급의 개념

일반적으로 디젤기관은 전부하의 경우에 소정의 연유량(燃油量)이 연소하는데 충분한 공기량을 흡수할 수 있는 구조로 되어 있다. 그보다 많은 연유량을 공급해도 피스톤이 흡입할 공기량에는 변화가 없으므로, 연료에 대한 공기량이 부족하여 완전연소가 곤란해지고, 한편 배기온도가 높아져서 배기가스가 흑색이 되어 나오게 된다.

즉, 최소의 공기량은 연소분사량의 14～17배를 필요로 한다. 이것은 공기과잉율 1.1～1.3배에 상당한 것이다. 그 이하가 되면 위에서와 같이, 불완전연소의 상태가 된다.

기관의 회전수를 일정하게 한 경우, 기관에 흡입된 공기량은 부하의 변동에 불구하고, 거의 일정하다고 생각해도 좋다. 한편, 연소분사량은 부하에 비례하여 증가하여, 열량과 공기의 공급량과의 비율이 위의 제한치에 가까워 진다. 이것은 기관의 출력한계를 결정하는 한가지 큰 요소가 되는 것이다.

과급기는 터빈과 블로어로써 이루어지고, 기관의 배기가스의 힘으로 구동된다. 즉, 실린더 내의 공기의 밀도는 무과급의 경우보다 증가하고, 이에 합당한 연료분사량을 증가시킬 수가 있다.

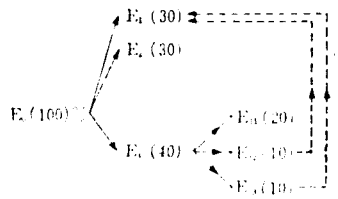
그리고, 블로어 출구쪽에 공기냉각기를 두면, 블로어로 압축되어 온도가 높아진 공기는 냉각기에 의해 거의 대기온도까지 냉각된다. 이것은 공기밀도를 다시 증가시키는 결과가 되어, 일정용적에 흡입되는 공기의 중량을 증가케 되므로, 기관의 충전효율이 증가하게 되어 다시 과급의 효과를 높이는 것이 된다.

3. 배기에너지의 이용

디젤기관에 분사되는 연료의 이론연소열량을 100 이라 할 때, 이것이 어떻게 나누어지는 것인가는 그림 1 에 나타낸다.

일반적으로, 배기가스에 함유되는 열량 E_3 는 전열량 E_0 의 40 %에 상당하다. E_3 가운데 E_{31} 은 저열원에의 방열열량으로, 열역학상 회수불가능한 부분이다. 나머지의 배기온도가 대기온도까지 내리지 못하는 손실 E_{32} 와 실린더내의 압력을 대기압까지 낮출 수 없기 때문에 일어나는 손실 E_{33} 은 터빈에 의해 그 일부분을 회수할 수가 있다.

실린더 안의 피스톤의 행정은 그 에너지를 이



E_0 : 연료의 발열량
E_1 : 외부에의 유효한 일
E_2 : 냉각수, 축수, 복사
E_3 : 배기가스에 함유된 열량
E_{31} : 저열원에의 방열량
E_{32} : 배기가스가 대기온도까지 내려가지 않기 때문에 일어나는 손실
E_{33} : 시린더내의 압력과 대기압까지 내려가지 않기 때문에 일어나는 손실

그림 1. 무과급기관의 열평형

용하기 위해서는 실린더 안의 가스가 대기압까지 팽창하는데 충분한 길이를 지니는 것이 이상이지만, 여기에는 무한대의 피스톤 행정을 필요로 한다.

실제의 기관에서 행정은 실린더 지름의 1.0～2.5배의 길이이고, 피스톤이 하사점에 이르러도, 실린더 안의 압력은 대기압까지 팽창하지 못하고, 2～3 *kg/*eng를 유지하고 있다. 따라서, 하사점 가까이에서, 배기관이 열리면, 고온의 압력가스는 배기관 안에 급격히 팽창, 배출된다. 이것을 블로다운 에너지(Blow down energy)라고 부른다.

배기관 내의 가스는 그 말단에 있는 터빈 노즐로써 줄려지고, 다시 속도가 증가되어, 터빈 블레이드에 의해 회전 구동한다. 이와 같은 축에 블로어가 있어 대기의 공기를 흡입압축하여 기관에 보내어진다. 이것은 배기가스의 에너지의 일부가 압축공기의 모습으로 기관에 회수케 된다. 즉 그림 1의 E_{32}, E_{33}의 일부분(점선)이 여기에 해당된다.

이 양은 연료발열량의 7～10%에 이른다. 이와 같이, 과급에 의하여 기관의 출력을 증가시킬 뿐 아니라, 버려진 열량을 회수하여 기관의 열효율을 향상시킬 수가 있다.

그림 2는 실제의 과급기관에 있어, 연료의 에너지가 어떻게 이용되는지를 나타내는 열평형의 예를 나타낸다.

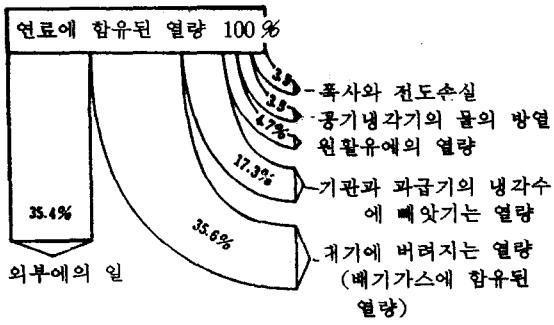


그림 2. 과급기관의 열평형의 예

4. 압력용적선도상의 배기에너지

배기에 함유된 에너지의 일부가 터빈에 의해 회수되지만 이것을 그림 3에 기관의 이상적인 사바테 사이클의 압력용적선도(P-V 선도)를 보기로 한다. 폭발행정의 하사점 5에서 배기변이 열리면, 실린더 안의 압력을 가진 가스는 배기변을 통해서 배기관 안에 팽창분출한다.

이것은 피스톤의 행정이 실린더 안의 잔류가스를 대기압 Pa까지 완전히 팽창시킬 수가 없기 때문에, 대기중에 버려야 할 에너지에 상당한 것이다. 이것이 터빈에 이용가능한 부분인 것이다. 이 양은 면적 5-6-6′-7-8-9-6″-5로 나타낸다.

그런데 실제는 실린더에서 배출되는 가스는 배기변과 그것에 연결되는 통로의 조립에 의해 용적 V_E의 배기관안에서 5→6까지 팽창하고, 이어서 터빈 노즐의 조립으로 6→7의 대기압까지 팽창한다. 따라서 블로 다운(Blow-down) 에너지는 배기관안에 급격히 팽창하여 전부 손실이 되었을 경우는 그 내부에너지를 증가시켜, 그 온도를 6에서 6′으로 높인다. 따라서 배기에너지는 면적 A(5-6-6″-5)와 터빈에 의하여 유효하게 이용가능한 면적 B(6-6″-7-8-9-6)로 나누어 생각할 필요가 있다.

그림 4에 나타내는 배기관의 용적 V_E가 작은 경우는 최초 팽창부분은 동압으로 이용되고, 전체로 터빈에 이용될 수 있는 에너지는 커진다.

그림 3(A+B에 상당)의 경우, 배기관에의 팽창손실은 적어져서 6은 6′에 가까워 진다. 이와 같은 블로 다운(Blow-down) 에너지가 터빈에서 이용되는 방식을 블로 다운 터빈 (Blow down turbine) 혹은 동압터빈(Pulse turbine)이라 한다.

이에 대하여 배기관의 용적 V_E를 크게 하면, 가스는 일정한 압력을 가진 배기관내의 압력 P_t까지 일단 팽창되지만, 이 에너지는 동압으로써, 터빈에 이용치 않고, 가스는 팽창할 때의 손실로 되어, 그 내부에너지를 증가시키고, 온도가 올라가고, 그 체적을 팽창시킬 뿐이다. 즉 6에서 6′로 변화한다. 따라서, 터빈에 이용할 수 있는 에너지는 면적 B로 나타내어 진다. 용적 V_E가 큰 경우는, 그 압력은 거의 일정하여 터빈은 일정한 가스압력으로 동작된다. 일정압력하에서 구동되는 터빈을 정압터빈(Constant pressure turbine)이라 한다.

실제에는 엄밀한 동압터빈도, 정압터빈도 존재치 않고 양자를 합친 혼류식 터빈(Mixed flow

turbine)이 된다. 그러나, 그 이용에 있어 블로 다운을 주로 이용하는 목적으로 배기관의 용량을 작게 하고 배기간섭을 피할 목적으로 각 실린더에서 배기관을 나누어, 이를 터빈에 유도하여 과급을 하는 방식을 일반적으로 동압과급방식(Pulse system)이라 한다. 이에 대하여 배기관의 용량을 크게 하여, 각 실린더로부터의 배기관을 모두 큰 용량을 지닌 배기복스에 유도하고, 그 복스의 압력을 거의 일정하게 유지하여, 이를 터빈에 유도해서 과급을 하는 방식을 정압과급방식(Constant pressure system)이라 한다.

동압방식과 정압방식의 비교를 일반적으로, 4사이클 기관에서는 고속디젤기관의 특수한 것을 제외하고는 대부분이 Büchi 방식에 의한 동압방식이며, 2사이클기관에서는 과급방식에 의하여 양자가 같이 이용된다.

여기서 注意할 것은 그림 3의 A와 B는 이론상 이용할 수 있는 에너지이고, 실제는 이것이 블로어의 출력으로 바꾸어지는 경우는 터빈과 블로어의 효율이 고려되어야 한다.

동압방식과 정압방식의 비교

구분 \ 형식	동 압 방 식	정 압 방 식
블로 다운의 배기 에너지 이용	우 수 하 다	거 의 없 다
고과급에 대하여	평균유효압력이 높으면 정압이 차지하는 에너지가 적어져서 불리	고과급이 될수록 유리
터빈 효율	터빈 노즐에의 부분유입으로 정압식보다 크게 떨어진다.	터빈 노즐에의 전용유입으로 효율이 좋다.
터빈의 크기	일반적으로 커진다.	동압방식보다 소형이다.
과급기의 대수	실린더 수에 따라 2～4대 필요	1대로도 가능하고, 대수는 적어진다.
배 관	정압방식보다 복잡	간 단

5. 과급기관의 특징

이상의 과급기관의 장점을 종합하면 다음과 같이 경제적으로 이익이 많다.

– 기관중량의 3～4%의 과급기를 장비함으로써, 기관의 출력을 50～100% 증가시킬 수 있고, 기관의 마력당 중량을 줄일 수가 있다.

– 기관을 소형 경량으로 만들 수가 있어 제작비, 제작기간, 거치시간 및 면적, 보수비가 절약된다.

– 윤활유의 소비량은 무과급의 경우와 거의 비슷하지만 기관의 마력당 윤활유 소비량은 매우 개선된다.

– 기관의 효율이 향상되고, 배기가스의 에너지를 회수하게 되면 연료소비율은 무과급의 것과 비교하여 2～10% 향상됨이 기대된다.

– 과급기는 운전중, 특별히 조작을 필요로 하지 않고, 기관이 전진운전이나 역전에 대하여도 관계없이 부하에 따라 회전하고, 과급을 얻을 수가 있다.

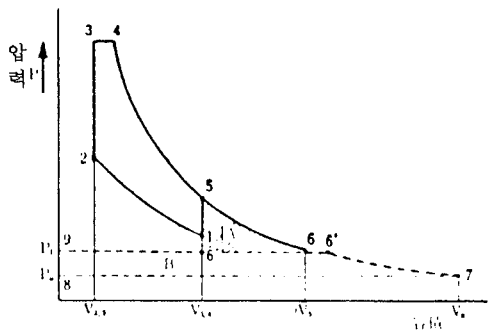


그림 3. P-V 선도상의 터빈에 이용되는 에너지

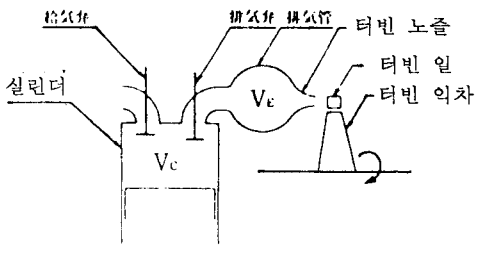


그림 4. 실린더에서 터빈 까지의 관(管)계