하이브리드 자동차 엔진용 터보-제너레이터의 기술 및 응용

Technology and Application of Turbo — Generator for the Engine of Hybrid Automobile

조수용 · 오군섭
Soo-Yong CHO and Koon-Sup OH

조수용/한국기계연구원/1958년생/기계공학을 전공하였으며, 터보기계의 개발 및 전산유체역학 분야에 관심을 가지고 있다.

오군섭/한국기계연구원/1945년생/유체기계를 전공하였으며, 터보기계 및 연소기계에 관심을 가지고 있다.

1. 머 리 말

터보-제너레이터는 소형 가스터빈과 10만 rpm 정도의 고속 회전에서 전류를 발생하는 발전기를 함께 일컫는 것으로서, 이것이 가지고 있는 많은 장점들로 인하여 활용범위가 점차 확대되고 있는 실정이며, 최근 자동차 배기가스로 인한 환경문제의 심각성이 점증됨에 따라 하이브리드 자동차용 엔진으로 개발되어지고 있으며, 방위용 탱크의 보조동력 시스템으로도 채택되어 전력의 생산과 냉난방 및 화학전의 발생시 청정공기의 공급 장치로 활용되어지고 있다. 뿐만 아니라 소형 선박의 동력 시스템으로 채택되어 입출항시에는 축전지의 전력만으로 운항하여 항구에서의 공해문제를 해결하며, 해상에서는 저공해 동력원으로 활용되고 있다. 그 외에 병원 및 호텔과 같은 저공해 지역에서의 비상용 동력 시스템으로 활용되어지며, 컴퓨터와 같은 고급전류를 필요로 하는 곳에서는 비상이동 발전기로도 활용이 가능하다. 이 글에서는 터보-제너레이터의 활용에 따라 기계기술 및 산업에 영향이 가장 큰 하이브리드 자동차용 동력 시스템으로 사용되는 경우에 관하여 기술하고자 한다. 따라서 하이브리드 자동차용 엔진으로의 적용에 따른 장단점, 시스템의 구성, 개발 현황 및 터보-제너레이터의 주요 부품의 기술적인 요인 등에 관하여 기술한다.

2. 적용

2.1 추진 배경

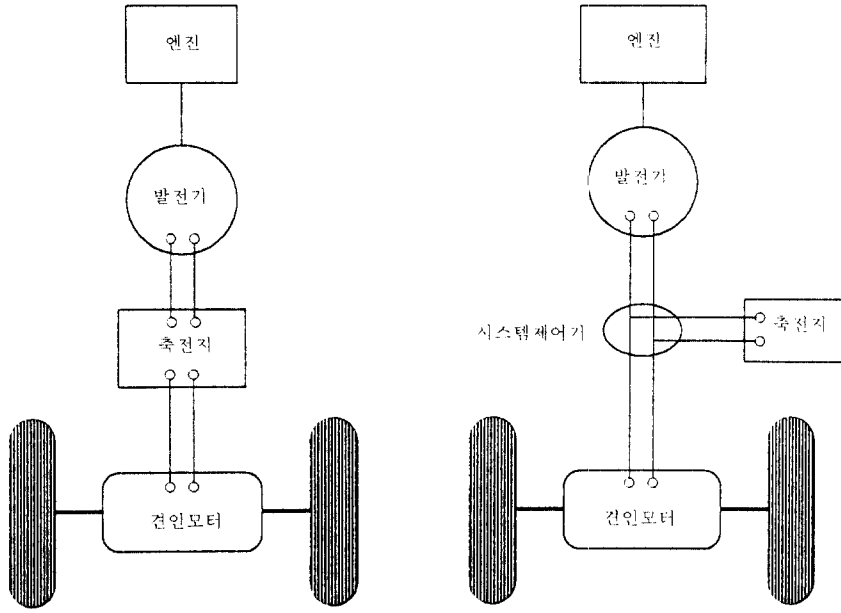
세계적인 관심사인 환경문제는 그린 라운드(GR)가 말해주듯이 환경문제의 심각성에 따라 대기 공해의 감소를 위하여 현재 운행중인 자동차의 배기가스를 최소한으로 줄이

기 위하여 세계 각국은 한층 강화된 배기가스 규제 법안을 운용하고 있으며 이에 대한 규제는 매년 강화되고 있는 실정이다. 더구나 캘리포니아주는 대기정화법(clean air act)을 제정하여 1998년부터 35,000대 이상을 판매하는 자동차 메이커에 대하여 2%의 무공해 자동차를 의무적으로 판매하도록 규제해 놓았으며 2001년과 2003년에는 5%와 10%씩 판매량을 증가하도록 규정하여 놓았다. 이러한 법안은 워싱턴 D.C를 포함한 14개주(state)도 시행할 움직임을 보이고 있다. 이에 따라 세계 각국의 자동차 메이커들은 환경규제의 벽을 넘기 위하여 무공해 자동차의 개발에 대한 연구를 지속적으로 수행하여 왔으며, 태양열 자동차나 전기 자동차의 새로운 모델들을 계속 개발하고 있다. 하지만 태양열 자동차를 상용화 하기에는 기술적인 면에서 상당한 연구를 필요로 하며, 전기 자동차의 경우는 초기의 성능에 비하여 상당히 향상된 모델들이 발표되고 있으나 아직까지도 전기 자동차의 실용화에는 거리가 있다.[1] 그 중 가장 큰 어려움이 주행거리의 문제점으로서 현재 사용중인 왕복기관 자동차에 비하여 상당한 차이가 있다. 주행거리의 증가를 위하여 구동 모터의 용량을 적게 하면 주행 성능의 저하를 가져오고, 배터리를 많이 적재할 경우에는 차량의 중량을 증가시켜 성능 저하의 요인이 된다. 뿐만 아니라 난방이나 에어컨의 작동을 위하여 추가 동력이 필요한 경우에는 주행거리는 더욱 더 짧아지게 된다. 주행거리 외에도 전기 자동차의 실용화를 저해하는 요인으로는 장시간 충전하여야 하는 문제점이 있으며, 많은 배터리의 사용에 따른 차량가격의 상승과 중량 증가에 의한 성능의 저하 등이 있다. 환경적인 관점에서 보면 전기 자동차의 에너지원인 전기의 생산을 위한 발전소에서 유발하는 원초적인 공해문제를 배제하지 않을 수 없으며, 또한 폐배터리의 공해문제도 염두에 두어야 한다. 이러한 무공해 자동차의 문제점이 발생됨에 따라 자동차 메이커는 기술적으로 실용화가 가능하고, 필요에 따라서 무공해 자동차나 저공해 자동차로 사용 가능한 하이브리드 자동차의 개발에 박차를 가하고 있다.

2.2 시스템 구성

하이브리드 자동차는 전기 자동차의 단점을 해소하고 왕복기관 자동차의 주행 성능을 혼합한 것으로서 동력원, 동력 저장 장치(축전지, 플라이휠) 및 견인 모터 등의 상호 결합방식에 따라 아주 다양한 방식[2]으로 구성될 수 있다. 터보-제너레이터는 부분 부하시 운전상태에 차이가 발생하므로 하이브리드 자동차의 시스템 구성은 간단히 직렬방식과 병렬방식으로 분류된다. 그림 1은 터보-제너레이터에 의한 하이브리드 자동차의 시스템 구성을 보여준다.

직렬방식은 그림 1(a)와 같은 구성을 유지하며 견인 모터의 제어는 축전지의 동력만을 이용한다. 직렬방식의 장점은 터보-제너레이터가 최적 효율점에서만 운행이 가능하므로 터보-제너레이터의 이용 효율이 높다. 또한 터보-제너레이터가 일정한 회전속도에서 작동되므로 배기가스의 청정도가 높고, 시스템의 구성이 간단하다. 반면 에너지 변환을 두 번하게 되므로 시스템의 효율이 떨어질 수 있으므로 고속 동기 제어 발전기와 자속 밀도가 높은 모터를 사용하여 이러한 문제점을 해결하고 있다. 그림 1(b)의 병렬방식은 시스템 제어기에서 발전기의 출력을 축전지 충전 및 견인모터를 동시에 제어하도록 구성된다. 병렬방식은 에너지 변환이 적으므로 시스템의 효율이 높으며 연료소비가 적은 장점이 있으나, 부하 변동에 따라서 터보-제너레이터의 회전 속도가 조금씩 변하게 되므로 최적 효율점 밖에서 작동하게 된다. 이럴 경



(a) 직렬 방식 (b) 병렬 방식

그림 1 터보-제너레이터에 의한 하이브리드 자동차의 시스템 구성

우 배기가스의 청정도가 낮고 시스템의 구성이 복잡한 단점이 있다. 결국 시스템 설계자에 따라 시스템의 전체효율과 배기가스의 청정도 중 어느 것을 선택하느냐에 따라 시스템의 구성이 달라질 것이다.

터보-제너레이터를 이용한 하이브리드 자동차의 출발은 전기 자동차의 무공해 장점을 최대한 반영한 것으로서 도심지나 저공해 지역 통과시에는 무공해 자동차가 된다. 이때 터보-제너레이터의 운전은 중단하고 축전지나 플라이휠의 동력만으로 운행을 한다. 부하를 많이 필요로 하거나 고속도 주행시에는 터보-제너레이터를 작동하여 배터리를 충전하거나, 견인모터에 동력을 전달하여 저공해 자동차로서 운행되도록 한다. 이럴 경우 가스터빈이 최적 효율점이나 그 근처에서 작동되도록 하여 배기가스의 청정도를 높이고 왕복기관 자동차의 주행성능 장점도 동시에 갖도록 설계된다.

2.3 개발 현황

자동차에 의한 환경문제의 심각성을 먼저 파악한 유럽은 하이브리드 자동차의 개발을 미국에 비하여 한단계 앞서 수행하였다. 최초의 하이브리드 자동차는 '87년 폭스바겐이 골프 디젤차에 견인 모터를 부착한 것이다. 이때 사용된 엔진은 왕복기관이었다. 국내에서도 그동안 축적된 자동차 기술을 이용하여 최근에 각 자동차 메이커가 개발한 하이브리드 자동차를 선보였다. 국내는 모두 소형 왕복기관을 동력원으로 채택하였다. 표 1은 국내에서 개발된 하이브리드 자동차의 사양이다.

터보-제너레이터에 의한 하이브리드 자동차의 개발은 터보 기계 기술이 발달된 외국 선진 메이커에서 추진하고 있다. 가스터빈의

표 1 국내 자동차 메이커가 개발한 하이브리드 자동차의 사양

메 이 커	현 대	대 우	기 아
모 델	FGV-I		KEV-4
가솔린 엔진	800 cc	617 cc	800 cc
축 전 지	니켈메탈 수소전지	밀폐형 납축전지	밀폐형 납축전지
최 고 시 속	152 Km	118 Km	180 Km
1회 충전 후 주행거리	197 Km	99 Km/500 Km	188 Km
특 징	뒷유리면 태양 전지 : 공기 정화기용	회생 제동 시스템 장착	지붕에 태양 전지 : 에어컨, 히터 가동용

기술은 방위용 탱크 및 우주, 항공용으로 이미 활용되었으므로 신뢰성이 높을 뿐만 아니라, 비출력이 높아서 하이브리드 자동차 개발시 공간 확보의 어려움을 해소할 수 있는 등의 여러가지의 장점으로 터보-제너레이터를 동력원으로 하는 하이브리드 자동차의 개발에 박차를 가하고 있다. 표 2는 터보-제너레이터와 왕복기관을 하이브리드 자동차의 동력원으로 사용할 경우의 장단점을 보여준다.

미국의 경우는 항공우주산업을 통하여 얻어진 가스터빈에 관한 풍부한 기술을 바탕으로 개발중인 하이브리드 자동차의 동력원은 왕복기관에서 터보-제너레이터로 변경하고 있는 추세이다. '94년 크라이슬러에서 선보였던 하이브리드 자동차 페트리어트(patriot)[3,4]는 액화천연가스를 연료로 사용하는 소형 가스터빈과 AFS사에서 개발한 플라이휠을 채택하였다. 연료저감을 위하여 감속시에 역으로 전기모터를 발전기로 사용하여 에너지를 재생하는 특징을 가지고 있다. 페트리어트는 최고 500마력의 출력과 최고속도 320 km인 경주용 자동차이다. 가스터빈의 사용으로 연료 소비율이 일반 경주용 자동차에 비하여 30% 이상 절감되었으며, 배기가스의 청정도를 상당히 높였다.

크라이슬러의 경주용 자동차에 대응하여 일반 승용차급의 하이브리드 자동차 개발은 포드와 프랑스의 르노가 소형 가스터빈 전문업체인 미국의 얼라이드-시그널(Allied-Signal) 사와 함께 50 kW급의 하이브리드 승용차를 개발[5]하고 있다.

이 밖에도 하이브리드 자동차용 엔진으로 사용될 터보-제너레이터의 개발을 미국에서 활발히 진행중이다. 윌리암스[6](William International Inc.)에서 승용차용으로 20~40 kW과 소형 트럭용으로 50~75 kW급을 개발중 이며, 캡스톤(Capstone)[7,8] 사에서는 승용차용으로 24 kW급을 개발하여 성능시험중이다.

유럽의 경우는 볼보[9]에서 '90년대 초부터 터보-제너레이터를 이용한 하이브리드 자동차 ECC(environmental concept car)의 개발을 시작하였다. 승용차용으로 개발된 ECC는 현재 시험 운행중이다. 출력은 38 kW급으로서 도심지의 주행시는 무공해 운전을 하고 고속 주행시에는 초저공해 운행을 할 수가 있다. 표 3은 현재 개발중인 하이브리드 자동차용 터보-제너레이터의 사양을 비교하여 놓았다.

일본[10]의 경우는 소형 가스터빈을 자동차의 엔진으로 사용할 수 있도록 '90년대 초부터 개발을 수행하고 있으며, 열효율의 향상을 위하여 터빈 재질을 세라믹으로 하는 연구를 수행하고 있다. 가스터빈의 출력은 100 kW급으로서 압축비는 4~6이며, 축회전속도는 11만 rpm이다. 연소기는 예증발 예혼합식의 캔형식을 채용하였다. 왕복기관 대체용으로 개발되고 있으므로 가스터빈의 축은 연속변속기에 연결된다.

표 2 하이브리드 자동차의 동력원으로 터보-제너레이터와 왕복기관의 채택시 장단점

	터보-제너레이터	왕 복 기 관
장 점	○유지 보수가 간단 - 사용하는 부품수가 적다. - 에어 포일 베어링의 사용으로 무급유 ○높은 비출력 - 중량과 부피가 적다. ○다양한 연료의 사용 ○초저공해 및 무공해 운행 ○저소음화 - 소음발생 주파수가 단순하므로 역주파수 장치에 의해 저소음화 ○회전운동만 있으므로 저진동 ○기술적 개선 요인이 풍부 - 재생 사이클에 의한 효율 증가 - 터빈 재질의 개선에 따른 터빈입구 온도의 상승에 의한 효율 증가 ○고속회전에 의한 발전기의 고효율	○신뢰성이 높다. (국내 입장에서만) - 국내에서는 왕복기관의 설계 및 제작 경험이 풍부한 반면 터보기계 기술이 미약하므로 왕복기관에 대한 신뢰성이 높다.
단 점	○신뢰성에 문제가 있을 수도 있음 - 고속회전으로 인한 실링문제 - 고속발전기 기술이 미약 - 터보기계의 설계 및 제작 경험이 적다.	○단위 중량당 출력이 적다 - 전체의 중량 및 부피가 증가하므로 장착을 위한 공간확보의 어려움 ○유지보수가 어렵다. ○저회전수에 의한 발전기의 저효율 ○소음 및 왕복 운동에 의한 진동문제 ○기술적인 한계
기 타	○내열 재료에 의한 가격 상승 요인 ○기술적 파급효과가 크다. - 방위용 탱크 및 선박, 항공, 우주용 보조 동력장치로 활용가능 - 고급전류의 비상발전기	○많은 부품수에 의한 가격 상승 요인 - 적은 댓수의 생산시에는 가격이 상승 ○많은 부품수로 산업적 파급 효과

표 3 하이브리드 자동차용 동력원으로 개발중인 터보-제너레이터의 사양

주 관 기 관	크라이슬러(미국)	볼보(스웨덴)	캡스톤(미국)
모 델	패트리어트	ECC	
가스터빈 발전량	375 kW	38 kW	24 kW
연 료	LNG	디젤, 가솔린	가솔린, 프로판
압 축 기	2단, 원심형	1단, 원심형	1단, 원심형
회전속도(rpm)	50,000, 100,000	90,000	96,000
압 축 비	15 : 1	3.1~3.5 : 1	3 : 1
연 소 기		예증발 예혼합	촉매 연소기
터 빈	2단, Radial	1단, Radial	1단, Radial
특 징	2단 스풀 터빈, 회생 제동 시스템	레큐퍼레이터 장착	레큐퍼레이터 장착

3. 기술적인 특징

터보-제너레이터의 저공해, 높은 비출력, 고효율, 신뢰성 등의 여러 장점으로 항공기, 선박, 방위용 탱크 등에서 활용되고 있으나, 많은 수량을 필요로 하는 자동차용으로 활용되기 위해서는 생산단가가 저렴하도록 설계 및 제작되어야 한다. 다음은 자동차용으로 개발되고 있는 터보-제너레이터의 각 구성품들의 기술적인 특징 및 과제에 관하여 언급한다.

3.1 연소기

가스터빈은 연속점화방식으로 스파크 점화방식의 왕복기관에 비하여 연소시간이 길며, 외부적으로 연소의 제어가 가능하므로 배기가스의 청정도 면에서 상당히 유리하다. 희박예혼합방식에 의하여 공기와 연료의 혼합비를 조절함으로써 CO나 HC의 발생량을 상당히 줄이게 된다. 고온 연소에서 생성되는 NOx의 발생은 물이나 스팀을 분사하여 연소온도를 제어함으로써 상당히 억제하게 된다. 하지만 기존의 연소기에서는 화염의 최고온도가 2,000℃ 이상이므로 NOx의 발생을 완전히 제어할 수가 없게 된다. 초저공해의 실현을 위해서는 촉매에 의한 연소를 채택한다. 그림 2는 하이브리드 자동차용 터보-제너레이터의 촉매 연소기의 내부 구조도를 보여준다.

촉매의 앞부분은 열저항체로 되어 있으므로 초기에만 전기에 의하여 촉매를 가열한다. 이후 연료와 공기는 촉매와 반응하여 열을 발생하므로 일반 연소 방식과는 달리 화

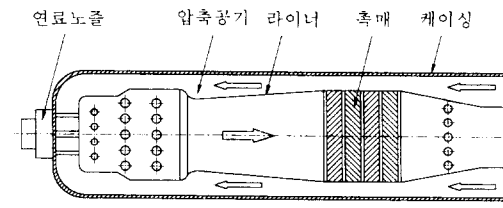


그림 2 터보-제너레이터의 촉매연소기 구조

표 4 터보-제너레이터와 왕복기관에서 발생하는 배기가스와 규제치

	NOx [g/mi]	CO [g/mi]	HC [g/mi]	비 고
50 kW	0.016	0.010	0.018	천연가스
24 kW	0.0060	0.0039	0.033	천연가스, 130 kWh/mi, 1066℃
12 kW	0.0057	0.0040	0.0033	천연가스, 130 kWh/mi, 1066℃
9 kW	0.0061	0.0044	0.0033	천연가스, 130 kWh/mi, 1066℃
25 kW	0.009	0.026	0.032	가솔린, 240 kWh/mi, 1150℃ ~1260℃
24 kW	0.0034	-	-	프로판, 130 kWh/mi, 850℃
Cal. Davis	0.333	2.417	0.204	왕복기관에 의한 하이브리드 자동차
ULEV	0.2	1.7	0.04	캘리포니아 규제치
Power Plant	0.0066	0.0094	0.0003	2010년 L.A에 설치될 발전플랜트 규제치

염이 형성되지 않는다. 그러므로 촉매 연소기에서는 연소온도를 900℃ 이하까지 조절이 가능하므로 일반 연소기에서처럼 발생된 NOx를 제거하는 것이 아니라, 원천적으로 NOx의 발생을 억제하는 것이다. 하지만 연소온도를 저하시키면 전체효율의 저하를 가져오므로 연소온도에 따른 배기가스 성분과 효율을 총체적으로 검토하여 연소온도를 설정하여야 한다. 표 4는 연소온도에 따른 배기가스 성분을 나타낸 것이다. 배기가스는 작동조건 및 연료 등에 의하여 상당히 좌우되므로 정확한 비교는 어렵지만, 기존의 자료를 기준으로 왕복기관에 의한 하이브리드 자동차의 배기가스[11]와 비교할 때 터보-제너레이터의 배기가스 청정도가 상당히 높은 것임을 알 수 있다. 또한 캘리포니아의 ULEV(ultra low emission vehicle) 규정은 터보-제너레이터의 사용으로 전혀 문제가 없음을 알 수 있다. 뿐만 아니라 발전 플랜트의 공해 규제치와 비교하면 전기자동차에 전력을 공급하는 발전소의 원초적인 공해보다 촉매 연소기에 의한 공해가 오히려 적으므로 터보-제너레이터를 이용한 하이브리드 자동차가 공해측면에서 더욱 더 유리하다는 것을 알 수 있다.

가스터빈은 다양한 연료를 사용할 수 있으므로 가솔린 이외에도 천연가스, 부탄, 프로판, 에탄올, 가소홀, 디젤유, 석탄가스 등의 사용이 가능하다. 연료의 변경에 따라 연소기에 특별한 변경없이 사용 가능한 장점이 있다. 메탄올을 사용할 경우에는 보다 큰 기화기를 필요하며, 천연가스의 경우에는 반응도가 낮으므로 연소시간을 늘이기 위하여 긴 촉매를 사용하여야 한다. 디젤유나 항공기유는 기화가 쉽게 되도록 하여야 하며, 오염물질이 촉매에 나쁜 영향을 주지 않도록 필터를 설치하여야 한다.

3.2 레큐퍼레이터

터보-제너레이터의 열효율을 향상시키기 위한 손쉬운 방법이 압축비의 증가와 터빈 입구의 온도증가이다. 압축비의 증가를 위해서는 여러 단(stage)의 압축기를 설치하여야 하므로 터보-제너레이터의 큰 장점인 비출력이 낮아지게 되어 부피 및 중량이 증가한다. 반면 터빈 입구 온도를 상승시키게 되면 터

빈이 고온에서 작동되어야 하므로 터빈 브레이드의 재질을 고온 내열 재료에서 세라믹과 같은 특수한 재질로 변경하여야 한다. 그러므로 하이브리드 자동차의 엔진으로 적용되는 터보-제너레이터의 가격 상승을 초래하게 된다. 뿐만 아니라 온도의 상승과 더불어 NOx의 증가를 초래하므로 하이브리드 자동차의 장점인 배기가스의 청정도가 낮아지게 된다. 하이브리드 자동차용으로는 터빈 입구의 온도를 상승시켜 열효율을 향상시키는 대신, 터빈 출구에서 배출되는 배기온도를 이용하여 연소기로 들어가는 압축공기의 온도를 상승시킴으로써 열효율을 향상시킨다. 그림 3은 터빈의 입구온도와 압축비의 변화에 따라 열효율을 나타내고 있다. 점선은 단순 사이클의 결과이며 실선은 레큐퍼레이터를 장착한 재생 사이클의 결과이다. TIT는 터빈 입구 온도를 나타낸다.

그림에서 보는 바와 같이 단순 사이클에서의 터빈 입구온도의 증가에 의한 열효율의 향상보다는 레큐퍼레이터의 장착에 의한 열효율의 향상이 상당히 효과적임을 알 수 있다. 하지만 레큐퍼레이터의 장착으로 비출력이 떨어지는 단점이 있다. 터보-제너레이터의 비출력은 레큐퍼레이터의 효율에 반비례하므로 적절한 레큐퍼레이터의 선정으로 이러한 단점을 최소화 할 수 있다. 표 5는 터빈 입구 온도가 816℃인 경우에 레큐퍼레이터의 효율에 따라 터보-제너레이터의 열효율과 중량의 증가를 나타내고있다.

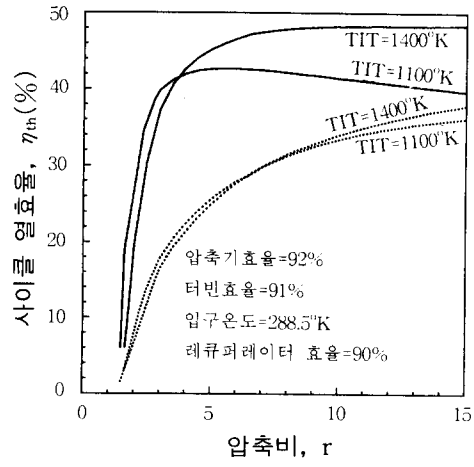


그림 3 가스터빈의 단순 사이클과 재생 사이클의 열효율

레큐퍼레이터의 효율증가에 따라 당연히 터보-제너레이터의 효율이 증가되지만 레큐퍼레이터의 효율이 90% 이상에서는 터보-제너레이터의 열효율 향상에 비하여 중량이 급격히 증가하므로 터보-제너레이터의 큰 장점인 비출력이 떨어지게 되므로 적절한 레큐퍼레이터를 선정하여야 한다.

자동차 설계시 엔진의 장착은 자동차 내의 공간확보, 손쉬운 유지보수, 장착성 등을 고려하여 설계하여야 한다. 하이브리드 자동차용으로 장착될 터보-제너레이터는 레큐퍼레이터의 적절한 배치에 따라 설계자의 요구조

표 5 열교환기의 효율에 따른 터보-제너레이터의 효율 및 중량의 변화[7]

레큐퍼레이터 효율(%)	0	80	85	90	95
터보-제너레이터 효율(%)	14	28	30	32	35
터보-제너레이터 중량(Kg)	16	30	36	45	84

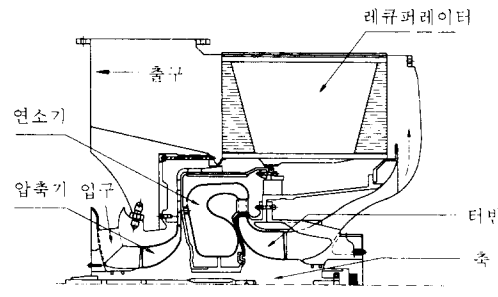


그림 4 터빈 외부에 장착된 레큐퍼레이터

건을 만족할 수 있는 설계의 유연성(flexibility)이 높은 장점이 있다. 그림 4는 레큐퍼레이터가 터빈의 외곽에 장착된 형태를 보여준다. 이러한 경우에는 길이방향으로의 여유공간확보가 가능하며, 반면 레큐퍼레이터를 터빈 뒷부분에 장착하는 경우는 터보-제너레이터의 외부 공간 확보가 가능하다.

3.3 고속 발전기

수만 rpm에서 작동하는 고속발전기에 요구되는 하이브리드 자동차용으로 소형 가스터빈과 발전기를 하나의 동력 시스템으로 활용하기 위하여서는 별도의 감속기가 없이 고속 회전에서 발전하여야 발전기의 효율이 높다. 뿐만 아니라 부피도 적어지며, 감속기에 의한 에너지 변환이 없으므로 시스템의 효율이 상승하게 된다. 이에 대한 연구는 터보-제너레이터 개발과 함께 활발히 이루어지고 있다. 이미 선진 업체에서는 15만 rpm에서의 실험결과[6]도 발표하고 있다. 그림 5는 터보-제너레이터용 발전기의 단면을 보여준다.

그림에서 보는 바와 같이 회전자는 고속회전으로 인한 원심력을 견디기 위하여 슬리브에 의하여 취부되었다. 또한 영구 자석 재료로 가장 많이 사용되는 Nd-Fe-B 대신에 고온에 잘견디는 Sm-Co를 사용하였음을 알 수 있다. 이 발전기는 터보-제너레이터의 초기 운전시에 시동모터로 변환할 수 있도록 설계된다.

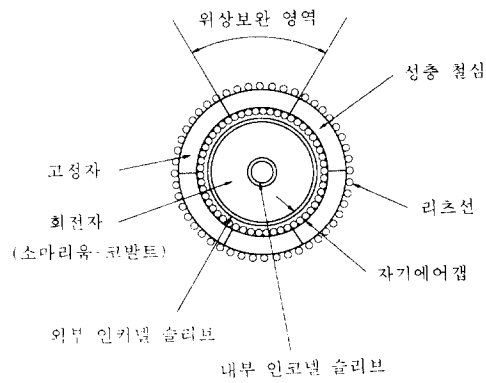


그림 5 고속발전기의 단면

크라이슬러의 페트리어트나 얼라이드-시그널에서 개발한 터보-제너레이터는 고속발전기를 압축기와 터빈 사이에 설치하여 강제냉각을 하고 있으나, 볼보의 ECC, 윌리암스, 캡스톤에서 개발한 터보-재너레이터는 발전기를 압축기 앞에 설치하여 흡입되는 찬 공기에 의하여 자연 냉각되도록 설계하였다.

고속발전기 설계시 고려하여야 할 사항으로는 기기가 소형이므로 충분히 열발산이 이루어지도록 설계하여야 한다. 재질은 고온에 강한 것을 선택하도록 하며, 고효율에 의하여 열의 발생이 적도록 한다. 고속으로 회전하므로 원심력에 견딜 수 있도록 설계하여야 하며, 구조를 간단히 하여 기계적 응력에 견딜 수 있도록 하여야 한다.

3.4 에어 포일 베어링

에어 포일 베어링은 '70년대 초 미국에서 항공기 내부를 냉각하기 위한 목적으로, 또한 극저온 공정에 사용되는 터보 압축기나 터보 익스팬더에서 별도의 윤활시스템을 이용하지 않고 작동유체나 기체를 이용하여 시스템을 지지하기 위하여 개발되었다. 일반적으로 작동 유체만의 동적 특성에 의한 시스템 지지 능력은 매우 작다. 에어 포일 베어링에서는 베어링 하우징에 일정한 두께의 포일을 사용, 작동 유체의 동특성에 포일의 지지 강성을 결합하므로 베어링의 지지능력을 향상시켰다. 시스템의 속도가 높아질수록 작동 유체의 동압력이 상승하므로 별도의 압력공급장치가 없어도 시스템에 따라 최고 15만 rpm까지 사용이 가능하다. 그림 6는 에어 포일 베어링을 보여주고 있으며, 각 포일은

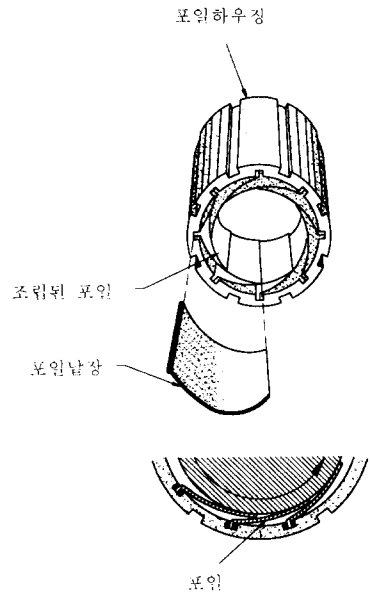


그림 6 에어 포일 베어링 구조

사용 용도에 따라 다소 차이가 있으나 약 0.15 mm의 두께를 가지며 원호의 형상을 가지고 있다.

3.5 압축기 및 터빈

압축기와 터빈은 소형에 적합한 원심형으로 일반 승용차급으로는 단단(single-stage)으로 간단한 구조를 갖도록 설계함으로써 적은 부피와 적은 중량를 유지하도록 설계된다. 크라이슬러의 페트리어트는 경주용 자동차로 사용하기 위하여 고출력이 필요하므로 2단의 압축기와 터빈을 구성하였으나, 승용차급으로 개발되는 터보-제너레이터는 단단으로 충분하다. 압축기와 터빈은 최적 효율점에서 작동되도록 공력학적인 설계과정[12]과 구조적인 해석을 통하여 최종 설계되어진다.

4. 맺음말

가스터빈에 대한 연구는 선진국에서 우주항공의 기술경쟁과 함께 활발히 진행되어져 왔을 뿐만 아니라, 이들의 핵심기술은 방위산업으로 활용되어지기에 국가적인 지원하에 연구가 수행되어져 왔다. 그러므로 이것에 관한 기술은 해외로의 유출이 원천 봉쇄되어졌다. 하지만 이들의 기술이 발전용 및 운송용 등의 일반산업에 점차적으로 활용됨에 따라, 이에 대한 연구가 국내에서도 활발히 진행되고 있다. 특히 국내의 실정으로는 엄청난 투자비가 들어가는 대형 시스템보다는 개발의 위험도가 적은 터보-제너레이터의 개발이 시기 적절한 프로그램이라 하겠다. 현재 세계적인 환경규제 추세와 2000년대 세계 5위의 자동차 생산국으로서 해외 선진국과의 기술경쟁에서 뒤지지 않기 위해서는 이러한 연구를 수행하여야 한다.

터보-제너레이터의 개발은 기술적인 파급효과가 상당히 크므로 첨단기술의 자립화를 앞당기게 된다. 또한 차세대 방위용 탱크의 보조동력장치로도 활용되므로 방위 산업의 첨단화와 자립화에도 파급효과가 크다. 뿐만 아니라 선박 및 우주항공산업에서도 그 파급효과가 크다. 그외에도 요소 기술의 개발에 따라 에어 포일 베어링의 개발과 고속 발전기를 개발함에 따라 이들이 기계부품산업에 미치는 영향도 적지 않다. 현재 국내의 연구 수준이나 경험으로 미루어 볼 때 이러한 연구의 완성은 그다지 어려운 일이 아니므로 이에 대한 연구를 적극 수행하여야 한다고 판단된다.

참고문헌

(1) Cordi, I., 1994, "What is today's Status of Electric cars ? ," *Prognos*, February, pp. 1~28.

(2) Kalberlah, A., 1991, "Hybrid Drive Systems for Cars," *Automotive Engineering*,

Vol. 99, No. 7, pp. 17~19.

(3) Broke, L., 1994, "Patriot Game," *Automotive Industries*, No. 2, pp. 114~174.

(4) Scott, W. B., 1995, "Satellite Control Concepts Bolster Civil, Defense Systems," *Aviation Week and Space Technology*, March, 6, pp. 42~43.

(5) Weinstein, C., 1995, "Turbo-Generators," Allied Signal Aerospace Engine, pp. 1~35.

(6) Williams, G. G., 1995, "Proprietary Information," William International Inc, pp. 1~71.

(7) Mackay, R., 1993, "Hybrid Vehicle Gas Turbines," *SAE Papers* 930044.

(8) Mackay, R., 1994, "Development of a 24 kW Gas Turbine-Driven Generator Set for Hybrid Vehicles," *SAE Papers* 94051.

(9) Valenti, M., 1994, "Hybrid Car Promises High Performance and Low Emissions," *Mechanical Engineering*, Vol. 7, pp. 46~49.

(10) Ishiwata, S., Matsushita, T. and Ito, T., 1994, "Current Status of Automotive Ceramic Gas Turbine R&D Project," 自動車研究, Vol. 14, No. 6, pp. 1~10.

(11) Duoba, M., Quong, S., LeBlanc, N. and Lasen, R., 1995, "Testing Hybrid Electric Vehicle Emission and Fuel Economy at the 1994 DOE/SAE Hybrid Electric Vehicle Challenge," *SAE Papers* 950177.

(12) Cohen, H., Rogers, G. F. C. and Saravanamuttoo, H. I. H., 1987, "Gas Turbine Theory," 3rd Edition, Longman Scientific and Technica.