

대형 박용엔진의 동향과 앞으로의 전망

Development of Large Marine Engine and Its Prospects

전 호 중

H. J. Joen



- 1932년 11월 7일생
- 전임 한국박용기관학회 회장
- 한국해양대학교 명예교수

1. 디젤기관의 탄생

오늘날 선박용 주기관으로 사용되고 있는 디젤 기관은 20세기의 시작과 더불어 탄생하여 오늘날과 같은 전성시대를 구가하게 되었다. 20세기 전반은 증기기관이 주류를 이루고 연료로서 석탄의 사용이 특징이라면 20세기 후반은 디젤기관과 증유가 그 특징을 이루고 있다.

디젤기관은 Rudolf Diesel에 의하여 발명되었다. Rudolf Diesel은 1858년 3월 18일에 프랑스에서 탄생하고 독일에서 성장하였으며 München공과대학을 1878년에 졸업하고 1893년에 디젤기관에 관한 특허를 취득하고 있다. Diesel기관은 1894년에 Augdurg발동기 회사(후에 MAN으로 됨)에서 최초의 시작품이 만들어 졌으며 1897년에 상품화된 제1호기가 탄생하고 있다. 훗날 박용기관의 대표적 제작자가 된 Sulzer는 1893년에, B&W는 1898년에 제조권을 획득하고 있다.

1903년에 최초의 4행정 자기역전식 박용기관을

MAN이 제작하고 있으며 1905년에 Sulzer가 처음으로 2행정 자기역전식 박용기관을 만들었다. 그 후 박용 디젤기관은 출력과 크기를 점차 확대하여갔다. 그러나 대형선과 대부분의 상선에서는 계속해서 증기터빈이나 증기왕복동 기관을 채용하고 있었다.

세계 제2차 대전 종료후 전후의 경제 부흥과 더불어 선박의 수요량이 폭발적으로 늘어나면서 선박의 척수와 규모가 커지고 점진적으로 디젤기관의 채택이 늘고 특히 1952년 최초로 B&W가 배기터빈만에 의한 과급에 성공하면서 그 당시까지 1기당 8,000PS정도이던 기관 출력이 대폭적(약 30%)으로 늘어나고 특히 보일러용으로만 사용하던 C중유를 대형 디젤기관에 사용할 수 있게되면서 상선에 있어서 디젤기관이 절대 우위를 차지하게 되었다. 특히 1955년에 알칼리성 실린더유가 개발되면서 중유연소로 인한 실린더 라이너의 마모를 감소하는데 크게 공헌하면서 안심하고 값싼 중유를 사용할 수 있게되었다.

<표 1> RTA, MC, UEC기관의 개발변천

Year	Engine type					
	Sulzer		MAN B&W		UEC	
	Type	Pe(bar)	Type	Pe(bar)	Type	Pe(bar)
1981	RTA84	15.35				
	76					
	68					
	58					
	48					
38						
1982			(MK1) L-MC	15	UEC-HA	14.9
1984	RTA84M	16.6	(MK2) L-MC	16.2	UEC-L	15.7
	62					
52						
1985					UEC-LA	
1986	RTA72		(MK3) L-MC K90MC S80MC	16.2+ rev.up 17	UEC-LS	17
1987					UEC.LS II	17
1988	RTA84C	17.2	(MK3) K90MC.C	16.2		
1991	RTA84T (6% power -up/84C)	18	(MK5) L-MC	17		
			K90MC.C (MK6) S80MC	18		
1993	RTA82.U	18.2	(MK6) S90MC.T K90MC K90MC.C	18	UEC.LSC	17.1
	62.U 72.U					
1994	RTA96C	18.3	K98MC	18.2		
1995	RTA48T 58T	18.3				
1996	RTA68T	18.3	(MK7) S80MC S-MC.C	19	UEC.LS I	18.1
	84T.B					
	72U.B 62U.B					
	52U.B					
1997	RTA68A.B	19				
	58T.B					
	48T.B					
1998					UEC.LSE	19

그러나 디젤기관이 증기기관에 대하여 결정적 우위를 확보하게된 것은 1973년과 1978년에 걸친

<표 2> 대형 디젤기관의 제조실적의 변천

Year	MAN B&W		Sulzer		Mitsubishi UEC		Total KW
	KW	%	KW	%	KW	%	
1981	2,826,755	52.4	2,239,903	41.5	327,150	6.1	5,393,808
1982	3,281,119	52.4	2,360,821	37.7	620,688	9.9	6,262,629
1983	2,734,117	50.4	1,977,049	36.4	717,800	13.2	5,428,966
1984	2,744,963	49.4	2,298,350	41.4	514,420	9.3	5,557,733
1985	2,788,604	55.8	1,749,849	35.0	460,702	9.2	4,999,155
1986	2,849,614	52.8	2,176,136	40.3	369,158	6.8	5,394,908
1987	1,525,295	49.8	1,371,699	44.9	164,046	5.3	3,058,040
1988	1,689,988	52.8	1,212,560	37.9	298,360	9.3	3,200,908
1989	1,908,805	53.4	1,288,684	36.1	375,944	10.5	3,573,433
1990	3,146,091	62.9	1,242,678	34.9	610,885	12.2	4,999,654
1991	2,638,977	60.4	1,250,886	28.6	479,790	11.0	4,369,653
1992	2,756,669	56.8	1,602,909	33.0	494,336	12.2	4,853,336
1993	2,911,148	57.7	1,496,505	29.6	640,230	12.7	5,047,883
1994	2,858,433	53.8	1,826,847	34.4	628,854	11.8	5,314,134
1995	4,785,571	65.4	1,841,496	25.2	693,775	9.5	7,320,842
1996	5,208,250	63.6	2,248,327	27.5	734,008	8.9	8,188,585
1997	5,418,475	60.3	2,762,299	30.8	802,286	8.9	8,983,060

제1차 및 제2차 유류 파동이 직접적 계기가 되었으며 그때까지 일부 대형선에 채용되던 약간의 증기터빈마저 추방하게되고 디젤기관의 개발이 연료 소비량 절약으로 집중되면서 박용디젤기관은 획기적 발전을 거듭하게 된다.

다음에 20세기 후반에 집중적으로 이루어진 대형 박용디젤기관의 개발동향을 살펴보기로 한다.

2. 대형 박용 디젤기관의 개발변천

2.1 기관치수의 변천

제1차 및 제2차의 유류파동으로 촉발된 박용디젤기관의 개발경쟁은 1980년대에 들어오면서 더욱 격화되었고 새로운 기종을 개발할 때마다 출력을 높이고 호칭도 바꾸어 왔으나 1981년에 Sulzer가 RTA시리즈를, MAN B&W가 1982에 MC시리즈를 발표하면서 호칭이 고정되어 오늘에 이르고 있다. 표1에 일본의 Mitsubishi UEC기관을 포함하여 1981년 이후의 개발변천을 보인다.

또한 표2에 이들 기종을 포함하는 저속 박용디젤기관의 생산량과 점유율을 보인다. 이 표에서 1984년이전의 통계는 MAN과 B&W의 기종이 분리되어 있기 때문에 여기서는 양측을 합한 값을 취

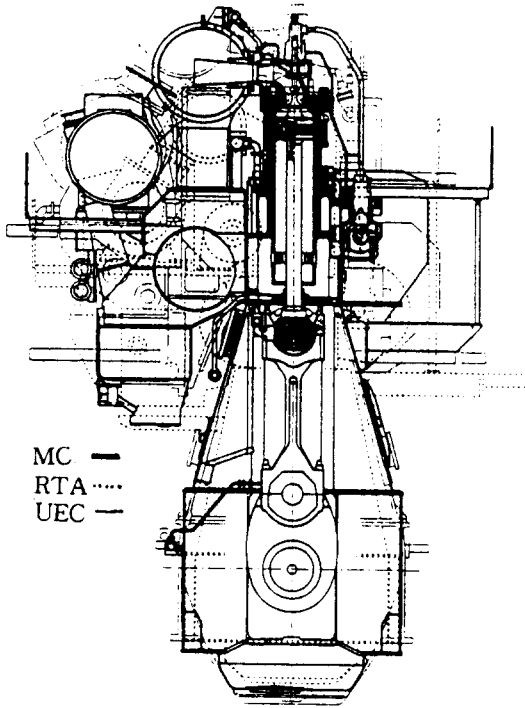


그림 1. RTA, MC, UEC엔진의 단면의 비교

하였다. 따라서 이 통계에는 표1에 보이는 기종의 의 것도 포함되어 있을 것이다.

1950년대만 하여도 Stork, Werkspoor, Götaverken, Fiat, Doxford 등 여러 제조회사가 각기 특색 있는 대형 박용기관을 제작하여왔으나 차례로 제조중단되고 유류과동직전에는 B&W, MAN, Sulzer, Mitsubishi 등 4개사만이 남게되었다. 그러나 두차례에 걸친 유류과동을 겪으면서 MAN이 루오프 소기를 택한 고유의 브랜드를 버리고 B&W와 합병하여 MAN B&W로 되고 Sulzer는 전통의 횡단소기를 버리고 단류소기를 채택하면서 잔류 3사 모두 단류소기로 통일되었다.

오늘날 박용디젤기관은 시류에 맞도록 최선의 노력을 다한 결과 역사적인 변혁과 진보를 이룩하여 대형 상선의 99%에서 추진기관으로 채택되고 있다. 그림1은 이들 3기종의 기관단면을 겹쳐 보인 것인데 거의 대동 소이하다. 이것은 각각의 설계개념이 최적점에 달하고 기술적으로도 높은 수준으로 수렴한 결과일 것이다. 따라서 금후에는

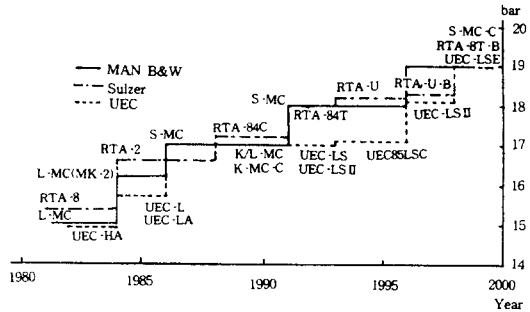


그림 2. 정미 평균유효압력의 변천

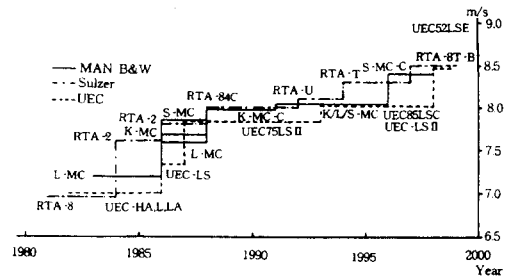


그림 3. 평균 피스톤 속도의 변천

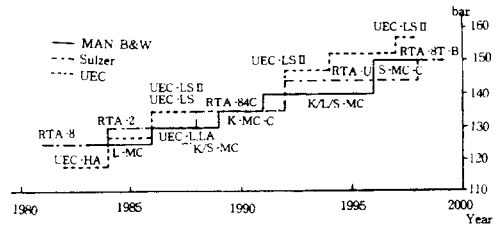


그림 4. 실린더내 최대폭발압력의 변천

지난 반세기와 같은 급격한 변화는 없을 것이며 연료소비율의 개선, 신뢰성의 향상, 가격경쟁력의 강화 및 배기가스 개선을 위한 끊임없는 노력은 지속될 것이다. 이들기관은처음15bar정도이던것이 3~4년 터울로 1bar씩 증가하여 현재는 대체로 19bar에 달하고 있다. 이러한 평균 유효압력의 변천을 보인 것이 그림2이다. 또한 피스톤 평균속도는 약7m/s이던것이현재는 약8.5m/s에 달하고 있으며 근래의 17년동안에 약 20%정도 상승하였다. 그림3에평균피스톤속도의 변천을 보인다. 일부 시험기관에서는 9m/s에 달하고 있다.

표. 3 RTA, MC, UEC기관의 해정대 통경비

Sulzer RTA		MAN B&W MC		Mitsubishi UEC	
RTA96C	2.60	K98MC-C	2.45	UEC37LA	2.38
RTA84C	2.86	K90MC	2.83	UEC60/52 /45LA	3.08 ~3.00
RTA-U	3.47	L-MC	3.24	UEC43/37LS II UEC60/52LS	3.11 ~3.67
RTA83T	3.75	S-MC	3.82	UEC85/75	3.70
58T	4.17	S-MC	4.00	/60/50LS II	~3.90
48T	4.17	S-MC-C		UEC52LSE	

최고 폭발압력은 125bar 정도이던 것이 현재는 150bar에 달하고 있으며 그림 4는 최대 폭발압력의 변천을 보이고 있다. 한편 시험기관에서는 180bar이 설정되고 있다.

또한 이들 3종류의 기관중 최소 및 최대구경과 출력범위를 보면 RTA시리즈는 380mm구경부터 960mm구경의 기관으로 구성되고 1,480~65,880KW(2,000~89,640bhp)범위에 이루고 있다. MC시리즈는 260mm구경부터 980mm구경의 기관으로 구성되고 1,100~68,640KW(1,500~93,360bhp)범위에 걸쳐 있다. UEC시리즈는 330mm구경부터 850mm구경의 기관으로 구성되고 2,300~46,780KW(3,080~63,600bhp)범위에 걸쳐 있다.

한편 행정대통경비(stroke bore ratio)는 표 3과 같이 2.5전후, 3.0전후, 3.5전후, 4.0전후로 나누어지고 최근의 경향으로서는 대형 고속컨테이너선 주기로서는 2.5전후, 살물 및 탱커선의 주기로서는 4.0전후가 선호되고 있다.

2.2 선박용저속 디젤기관 구조설계의 특징과 개발현황

앞서 설명한바와 같이 기관의 출력 증가는 상당히 빠른 속도로 이루어지고 있으며 새로운 기관은 70년, 80년대와는 달리 신뢰성 향상을 가장 중요한 과제로 하고 있다. 모든 부품에 대하여 최신의 해석수단과 시험 및 실적 등에 의하여 신뢰성을 검증하고 있는데 그 중에서도 가장 중요시되는 것이 연소실과 링/라이너 및 베어링 등의 습동부의 신뢰성 확보이다. 또한 배 전체의 경쟁력 향상의 관점에서 기관에 대한 신뢰성과 경제성의 요구는 매우

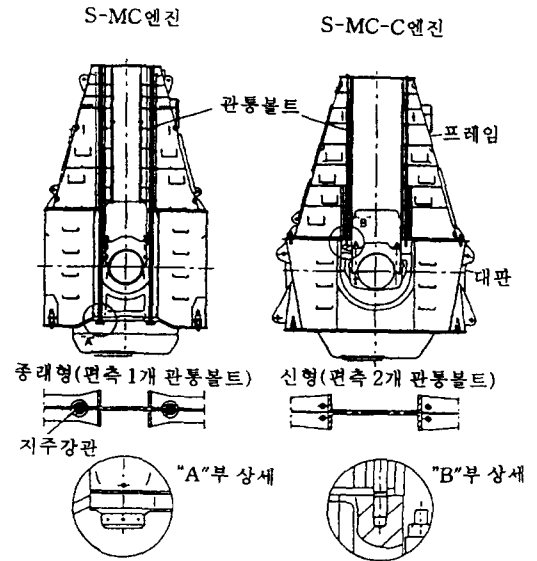


그림 5. 관통볼트의 배치

가혹하며 낮은 가격, 콤팩트한 구조, 유지보수의 간편화 등이 설계면에서 검토되고 있다.

최근에 개발된 RTA-8T-B기관이나 S-MC-C기관 및 UEC-LS II기관에서는 이러한 요구들을 만족하기 위하여 새로운 설계적 변화를 채택하고 있다. 다음에 이들 중 몇가지를 소개하고자 한다.

(1) 엔진의 기본구조 변화

대판, 프레임, 실린더블록으로 구성되는 주요구조부의 기본적인 설계는 앞서 지적한 바와 같이 RTA, MC, UEC의 어느 것이나 큰 차이는 없다. 부품의 개략적 크기도 같고 관통 볼트에 의하여 대판의 하부로부터 실린더 블록 상부까지 죄는 같은 구조이다.

S-MC-C기관에서는 이 주요 구조부에 새로운 설계가 채택되고 있다. 그림 5에 신구의 관통볼트의 구조를 비교하여 보인다.

S-MC-C기관에서는 대판상면으로부터 실린더 프레임상면까지를 죄는 구조로 바꾸고 더구나 종래 한쪽에 1개씩 사용하던 볼트를 가늘게 하여 2개로 하고 공간에 여유를 갖는 배치를 노리고 있다. 또한 대판을 죄는 일이 없어 메인 베어링부의 죄임에 의한 변형을 작게 하도록하고 있다. 이것은

최근 메인베어링에 발생하는 소손사고 대책의 일환으로도 생각된다.

MC기관과 RTA, UEC기관의 기본구조의 차이로서는 캠축구동방식의 차를 열거할 수 있을 것이다. MC기관에서는 체인구동이 옛날부터 답습되고 있으며 RTA와 UEC는 치차구동이다. 각각 이점을 강조하면서 오래동안 같은 설계를 고집하고 있다. MAN B&W 및 Sulzer기관 모두 시험기관에서 캠축이 없는 전자제어 기관을 개발하고 있으며 가까운 장래에 연료펌프, 배기밸브구동을 전자제어함으로써 캠축을 갖지않는엔진이 출현할 전망이다.

(2) 연소실

연소실은엔진의심장부이며신뢰성의면에서가장 중요한 부품으로 구성되고 있다. 피스톤, 실린더

라이너, 실린더 커버, 배기밸브로 구성되고있으며 각각의 부품의 냉각에 각 회사마다 여러가지 아이디어를 동원하고 있다. 각 기관형식의 대구경 기관 연소실의 구조와 공표된온도분포를 각각 RTA96C를 그림6에, UEC85LS II를그림7에, K90MC를 그림8에 보인다.

실린더 라이너, 실린더커버에 대하여서는 냉각수에 의한 보어쿨링(bore cooling)으로 비교적 냉각이 용이하나 피스톤에 대하여서는 내부 운동부품이기 때문에 시스템유에 의한 냉각방법을 채택하지 않을 수 없고 새로운 고안이 채택되고있는데 그 일례로서 MAN B&W기관의 예를 보인다. 이 신형 피스톤 크라운의 설계목적은 축화면의 온도저하에 있으며 열부하가 높은 대구경기관에 대하여 지금까지 실시하여 오던 내열합금의 덮어씌움

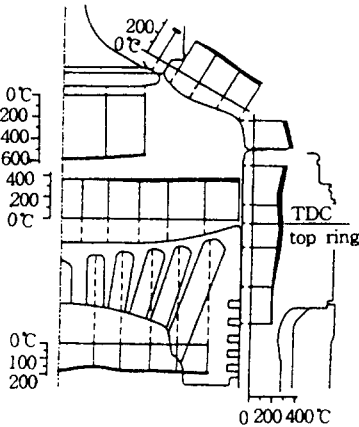


그림 6. 11RTA96C기관의 연소실구조와 온도분포

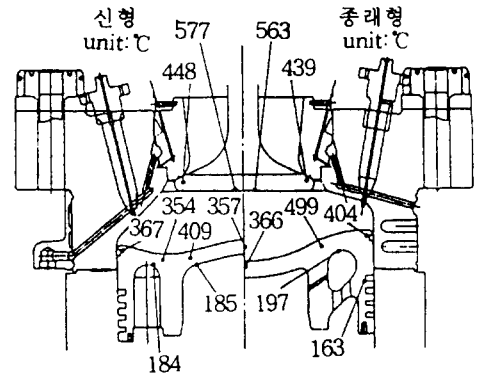


그림 8. K90MC기관의 연소실구조와 온도분포

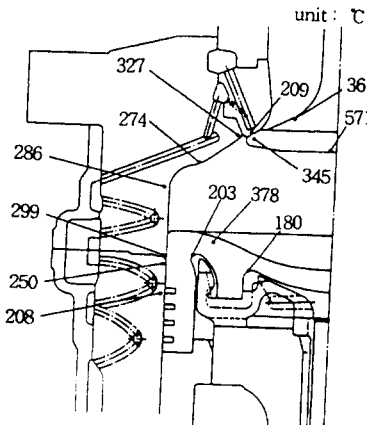


그림 7. 6UEC85LS II 기관의 연소실구조와 온도분포

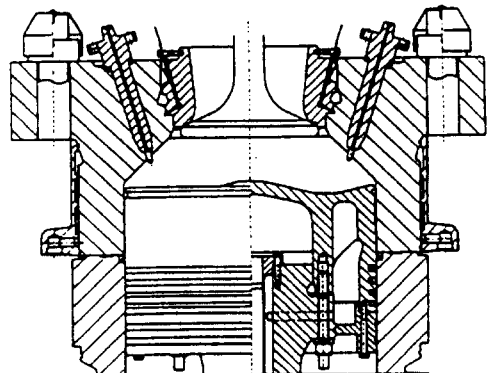


그림 9. 신형 피스톤 크라운

을 폐지하는데 있다. 그림9는 이러한 신형 피스톤 크라운을 보여주고 있다. 지금까지의 중앙부 오목형 크라운에 비하여 역형상으로 하여 중앙 돌출형상으로 바꾸고 측화면의 온도를 90℃가까이 낮추는데 성공하고 있다. 배기밸브 그자체는 현재 무냉각이고 내열강으로 대처하고 있다.

(3) 피스톤/라이너의 마모문제

피스톤 링과 실린더 라이너간의 스커핑이나 이상마모 등의 문제는 오늘날에도 매우 중요한 문제로서 각 기관제작사는 최대한의 노력을 기울여서 이 문제에 대처하고 있다.

이 문제에는 많은 영향인자가 있고 고출력화에 따라서 점차 각조건이 가혹하게되는 경향이 있으며 이들에 대응하기 위하여 설계가 재검토되고 개선되고 있다.

이미언급한바와 같이 피스톤의 냉각에는여러가지배려가 필요하며 피스톤 링의 온도를낮게하기 위하여 피스톤 링홈은 연소실로부터 멀리하고 있다. 피스톤 링의 구조는오랫동안 단순한 경사절단

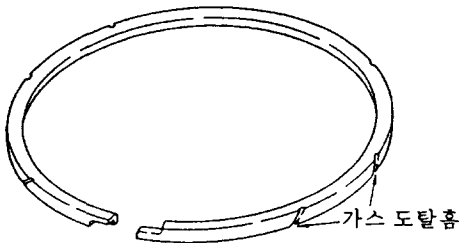


그림 10. CPR피스톤 링링

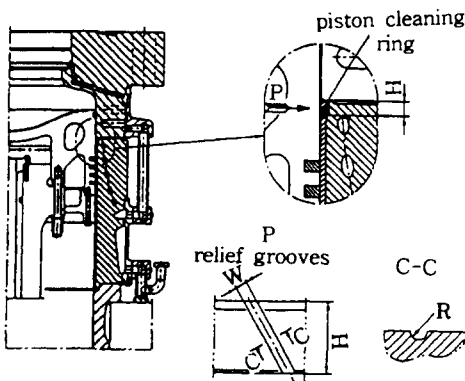


그림 11. PC링(piston cleaning ring)

절구를 채택하고있는데MAN B&W는 최근 그림 10과같은CPR(controlled pressure relief)링을 개발하여 대형기관에 채용하고 있다. 종래의 경사절구에 비하여 CPR에서는 링간의 압력변화가 완만하게된다고 한다.

또한 피스톤 크라운 측벽의 연소잔사물 퇴적이 습동면을 마찰함으로써 유막을 파괴하는것을 방지할 목적으로 PC(piston cleaning)링이 MAN B&W의 대형기관에 표준적으로 채택되고 있다. 이것은 그림11과 같으며 라이너 상부 내부에 설치되고 피스톤 상사점근방에서 측벽의 퇴적물을 제거하는 효과가 있다.

실린더 라이너는 보어쿠링으로 습동면의 온도가 황산 저온부식을 일으키지 않도록 최적의 분포를 얻을 수 있도록 회사마다 각별한 주의를 기울이고 있다. 또한 Sulzer 는 2단 실린더 주유방식을 채용하고 고부하 영역에서 유막분포의 개선을 꾀하고 있다. 초기길들이기조건개선책으로서라이너 습동면을 호닝가공 하고있으며 Sulzer는 바렐페이스(barrel face)형 링과 호닝형 라이너를 표준화하고 여기에 더하여 기계가공에 의한 경화층의 탈락방지를 꾀하는 대책도 세우고 있다. MAN B&W는테이퍼 페이스(taper face)형 링과 50% 호닝형 라이너를 채용하고 있다. 그림12에 바렐페이스형 링과 테이퍼 페이스형 링을 보인다.

종래 링, 라이너 모두 그의 양호한 습동특성 때문에 편상혹연주철제였다. 그러나 PV(압력×속도)치의 상승으로 내스커핑성과 내마모성이 우수한 재료가 요망되었다. 이에 대하여서 링 습동면에 초기 길들이기용으로서 MAN B&W는 알미 브론즈계, Sulzer는 모리브덴계의 용사가 채택되고 있다. 또한 내마모성 용사링으로서는 모리브덴에 탄화물, 또는 산화물을 함유하는것이 채택되기 시작

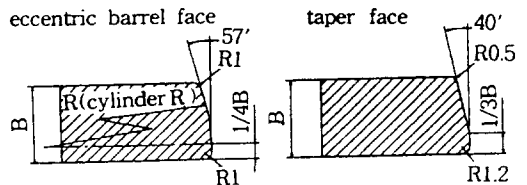


그림 12. 피스톤 링 외주 형상

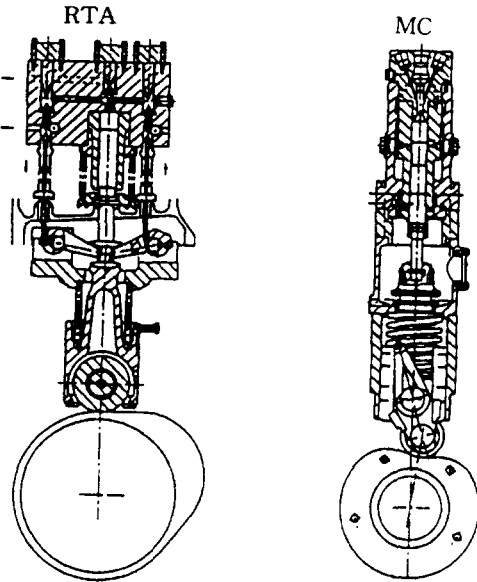


그림 13. 연료분사펌프

하고 있다. 현재 MAN B&W는 습동면에 내마모성 재료를 용사한 라이너를 실선에서 시험하고 있으며 금후 더욱 고출력화에 대응하려하고 있다.

실린더 윤활유는 C중유가 연료유로서 등장한 이래 점도등급 ASE50급의 고 알칼리가 유 (TBN70)가 표준적으로 채용되어왔다. 그러나 최근에 보다 고온 안정성과 극압성이 뛰어난 윤활유가 요망되고 있다. 실린더윤활유의 소비율은 선주의 운항경제상 중요한 요소이며 신중히 기준치가 정하여져야 할 것이다.

(4) 연료유 분사장치

연료유분사장치에서도 신뢰성 향상, 연료소비를 개선, 배기가스 공해의 개선 및 저출력에서의 연소개선을 위하여 여러가지 개량이 이루어져왔다. RTA기관에 있어서는 종래부터 연료분사시기의 조절이 비교적 용이한 밸브제어식 연료분사펌프가 사용되어 왔는데 MC기관에서는 단순한 보슈식 연료분사펌프가 사용되어왔다. 그림13에 양 방식을 비교하여 보인다. 양 방식 모두 가변 연료분사시기 조절장치(VIT)를 갖추고있는데 RTA기관에서는 연료의 질에 따른 분사시기도 조절가능하도록 하고있다.

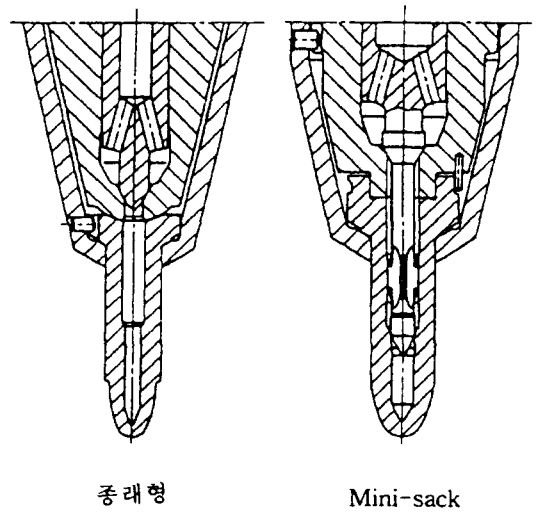


그림 14. 연료분사 밸브

연료분사밸브는 그림14에 보이는바와 같이MC 기관에서 종래형에 더하여 미니색애토마이저 (mini-sack atomizer)라 불리는것이 채용된 기관도 있다. 이 애토마이저는 색용적(sack volume)이 매우 작으므로통상의 애토마이저에비하여 연료의 후적(後滴, aft dripping)이 적고 매연의 감소, 특히 저부하시의 연소실의 청정성에 기여한다고 한다.

(5) 베어링

대형 저속 디젤기관의 주된 베어링에는 메인 베어링, 크로스헤드 베어링, 크랭크 핀베어링의 3종류가 있다. RTA, MC, UEC기관이 개발된 이후 종종 문제가 되어온 베어링은 메인 베어링이다. 그 이유는 메인베어링은 크랭크축 및 대판의 강성의 영향을 직접적으로 받고 또한 베어링을 기울게하는 하중이 작용하기 때문이다. 이 메인베어링의 손상에는 높은 유막압력과 유막두께 부족에 의한 백색합금의 피로파손에 의한 백색합금면이 박리하는 특징이 있다.

근년에 이루어진 탄성 유체 윤활이론을 적용하는 높은 정밀도의 베어링 특성 예측방법이 각 기관제작사에 의하여 개발되어 실용화하고 있다. 이것에 의하여 베어링을 강체로 보는 종래의 수법에 비하여 베어링 특유의 계산 정밀도는 비약적으로 향상하고 정성적인 평가뿐만아니라 정량적인 평가가

가능하게 되었다. 이러한 성과는 베어링의 최적설계나 고장대책에 현재 활용되고 있다. 드물게는 추진축계의 손상이 나타나는 경우도 있으며 선체변형을 고려한 적정한 축계배치를 취할 필요가 있다.

2.3 연료 소비율

연료소비율의 저감은 대형 저속기관이 오래동안 추구하여 왔든 과제이며 금후에도 개선이 예상되는데 경제적 정세(기름값이 싸다), 신뢰성 중시의 경향(Pmax를 낮게 누르고 있다), NOx배출의 문제 등이 개선의 정도를 더디게 하고 있다.

그림15에 연료소비율의 변천을 보인다.

1990년대초 과급기 제작사는 종래형보다 3~4%효율이높은소위 고효율 과급기, 예를들면VTR-4E/D, MET-SE, NA-S/T9 등을 등장시켰다. 이들의 높은 효율 덕분에 최대소기가 이루어지도록 기관을 튜닝하는 것이 가능하게 되었다. 즉, 실린더내의 소기효율이 더욱 개선되고 소기과정 종료후의 잔류가스량은 더욱 감소하게되었다. 그러나 실린더내의 소기효율은 오늘날 종래형의 과급기로서도 충분히 높은 수준에 있다. 따라서 표준설계의 기관에 고효율 과급기를 장착하면 연료소비율은 약 1g/kWh정도밖에 개선되지 않는데 비하여 배기가스온도는 25~30℃ 저하하는 결과로 된다. Sulzer기관에서는 최첨단의 고효율 과급기와 낮은 소기공(low scavenging air port)을 조합하여 피스톤 유효행정을 증가시키고 배기가스 온도를 약 12℃저하시킨 것만으로 약 3g/kWh의 연료소비율을 저감시킬 수 있다고 발표하고 있다. 이것은

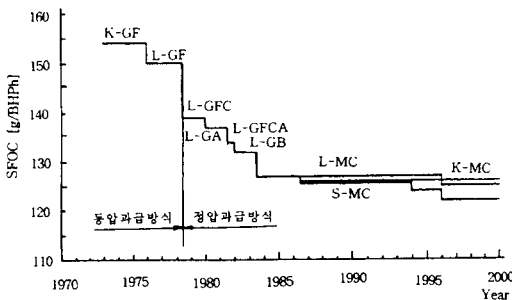


그림 15. 연료소비율의 변천(MAN B&W기관 실린더지름 800mm)

효과적인 피스톤 냉각과 보어쿠링방식의 연소실에 의하여 달성된 것으로서 냉각을 위하여 대량의 소기를 필요로 하지않게 되었기 때문이다. 한편 MAN B&W기관에서도 더 한층의 연료소비율 개선과 IMO의 NOx규제대책을 염두에 두고 높은 연료분사압력과 미니색 연료밸브의 채용 등으로 연료소비율의 저감을 꾀하고 있다.

3. 박용엔진의 배기가스 규제문제

1997년 9월 국제해사기구(IMO) 본부에서 개최된 모임에서 선박에 의한 대기오염방지에 관한 MARPOL조약 신부속서Ⅶ 및 이것에 관한 NOx Technical Code의 규제안이 채택되었다. 이 NOx의 규제는 출력130kW를 초과하는 박용기관으로서 2000년 1월1일이후에 건조되는 선박에 탑재하는 기관을 대상으로 하고 있다. 이들 선박용 디젤기관에서는 Technical Code의 기재내용에 따라 NOx농도 등의 계측과 규제치로서 이용되는 NOx배출율(specific NOx emission)의 산출을 행하여 주무관청의 승인을 얻을 필요가 있다.

유황산화물(SOx)에 대하여서는 그의 배출량이 연료중의 유황분에 대략 비례하므로 기관의 연소단계에서의 삭감은 불가능하고 필연적으로 저유황 연료유의 사용, 또는 배기가스 정화장치(배기가스의 탈황, 배기가스 세척 등)에 의존할 수밖에 없는데 지정된 해역(Balt해에서는 1.5%)이외에서는 연료중에 포함되는 유황분의 상한치가 4.5%로 규제되었으므로 실질적으로 이번의 규제 때문에 특별한 대책은 필요하지 않다. 한편 질소산화물(NOx)의 삭감은 규제치를 만족하기 위하여서 현 단계에서 대체로 약 30%의 삭감이 필요할 것으로 예상하고 있다.

여기서는 NOx의 삭감에 대하여 현재의 실상과 앞으로의 전망에 대하여 살펴본다.

NOx규제대상의 박용디젤기관의 개발에 있어서는 엔진으로부터 배출되는 NOx특성을 파악하기 위한 목적으로서 연소시험을 실시할 필요가 있다. 엔진의 NOx배출 수준은 연소에 관한 엔진 사양제원의 영향을 받을 뿐만아니라 엔진에 공급되는 공기에 포함되는 수분량 등의 영향도 받는다. 선박

표 4. NOx규제를 위한 Test Cycle

보조기관						
D2 Test Cycle	속도(%)	100	100	100	100	100
	출력(%)	100	75	50	25	10
	가중계수 WF(i)	0.05	0.25	0.3	0.3	0.1

정속도회전 주추진기					
E2 Test Cycle	속도(%)	100	100	100	100
	출력(%)	100	75	50	25
	가중계수 WF(i)	0.2	0.5	0.15	0.15

프로펠러법칙에 따르는 주추진기 및 보조기관					
E3 Test Cycle	속도(%)	100	91	80	63
	출력(%)	100	75	50	25
	가중계수 WF(i)	0.2	0.5	0.15	0.15

용 엔진의 출력규모는 비교적 크며 엔진시험실에서 항온, 항습의 상태를 유지하는 설비가 없는 경우도 많다. 이와같은 시험설비환경에서는 이들 엔진의 개발과정에 있어 연간을 통하여 공급공기의 흡입온도나 절대습도의 조건을 일정히 유지하면서 연소시험을 실시할 수 없다. 따라서 엔진으로부터 배출되는 NOx자료의 분석에는 엔진의 사양변경에 따른 NOx의 증감효과와 흡입공기의 대기조건 차이에 의한 NOx의 증감효과를 분리하는 것이 중요하다.

앞서 언급한 NOx규제안에는 엔진으로부터 배출되는 NOx농도가 주위 공기온도와 습도에 의하여 영향을 받는 것을 고려하여 NOx Technical Code중에 NOx변동인자의 영향을 고려한 NOx보정식이 주어져있다.

3.1 선박용 기관으로부터 배출되는 NOx의 규제에 관한 Technical Code

(1) NOx규제

선박용디젤기관으로부터 발생하는NOx의규제에 관한Technical Code는 우선NOx농도(ppm)를 계속하여 이 농도를 보정하고 동시에 배기가스의 질량 유량을 산출하며 Test Cycle에의한 NOx배출을(g/kWh)을구한다.이 NOx농도의보정단계에서 NOx 보정식이 이용된다. 표4에 Test Cycle을, 그

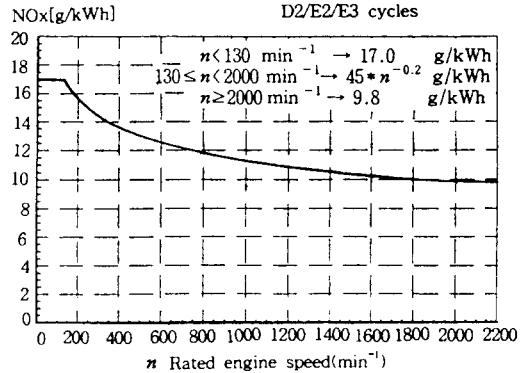


그림 16. NOx규제치

림16에 NOx규제치를 보인다.

(2) NOx보정식

Technical Code에서는 아래에 보이는 바와 같이 절대습도Ha(g/kg), 주변 공기온도Ta(K), 공기냉각기 출구 급기온도 Tsc(℃ 또는 K)의 3요소가 NOx 농도의 보정에 이용된다. 다음의 식은 공기냉각기 불이 디젤기관에 있어서의 보정식이다. K_{HDIES}는 NOx의 보정계수이다.

$$\begin{aligned} \text{보정NOx농도} &= K_{HDIES} \cdot \text{계측NOx농도} \\ (1/K_{HDIES}) &= 1 - 0.012 (Ha - 10.71) - 0.00275 \\ &\quad (Ta - 298) + 0.00285(Tsc - Tscref) \end{aligned}$$

여기서 10.71(g/kg), 298(K), Tscref(공기냉각기 불이의 경우 45℃)는 각각 보정요소의 참조치(reference value)이다.

3.2 대형 2행정 저속 디젤기관의 NOx 저감방법

NOx의 배출은 엔진의 연소기간이나 열효율과 깊은 관련이 있는데 대형 2행정 저속 디젤기관은 열효율이 높고 또한 회전속도가 느리므로 연소가스의 고온 체류기간이 길고 질소산화물의 배출이 다른 기관에 비하여 많다.

질소산화물의 삭감방법에는 연소단계에서 생성되는 NOx를 삭감하는 1차적방법(primary method)과 배기가스 정화장치로 행하는 2차적방법(secondary method)의 두 가지가 있다. 전자는 연소가스온도를 저하시키거나, 또는 연소가스가 고온으로 유지되는 시간을 단축하여 NOx생성을

표 5. 디젤기관의 NOx 삭감기술

NOx 삭감기술	방법 및 작용	NOx 저감율(%)	연비 증가율(%)	분 제 점
연료분사시기지연	연료분사시기지연하여연소 온도를 낮춘다	20	3	· 매연농도의 증가
급기 가습	급기의 절대습도를 높인다(급기고온화와 급기중 불분사로 급기중 수증기분압증가). 연소장의 열용량 증가로 연소온도를 낮춘다.	25	1~2	· 유황함유연료의 경우 황산부식 · 박용에서는 조수장치필요(70~80 gr/PS.hr)
물에말존연료	물과 기름의 에말존을 연료로 사용하여 불의 증발로 연소온도를 낮춘다.	40~50	0~1.5	· 디젤녹크의 발생 · 연료분사계의 내구성저하 · 유황함유연료의 경우 황산부식 · 박용에서는 조수장치가 필요(70~100gr/PS.hr)
연료물층상분사	동일 노즐로부터 연료→물→연료의 차례로 분사. 불의 증발로 연소온도를 낮춘다.	40~50	0~1.5	· 연료분사계 복잡 · 유황함유연료의 경우 황산부식 · 박용에서는 조수장치필요(70~100 gr/PS.hr)
실린더내 불분사	실린더내에 물을 분사. 불의 증발 및 연소장의 열용량 증가로 연소온도 낮춘다.	50~60	1~2	· 물분사장치, 분사시기조절장치필요. · 유황함유 연료의 경우 황산부식 · 박용에서는 조수장치필요(100~140 gr/PS.hr)
배기가스재순환	흡기에 배기가스의 일부를 혼합. 연소장의 열용량 증가로 연소온도를 낮춘다.	60	1.5	· 매연농도 증가 · 실린더 라이너, 피스톤링 마모증가 · 윤활유의 열화. 급기계의 부식, 오손
다구 연료분사	다수의 미세노즐로부터 연료를 분사. 분무내에로의 공기 도입 촉진으로 연소온도저하. 고온 체류기간단축	20~30	0~1.5	· 연료부사밸브가 많이 필요
SCR법	NH ₃ 를 환원제로 하고 촉매상에서 NOx를 선택적촉 환원한다.	90	0	· 환원제가 고가로 운항비가 높다. · 2행정 저속엔진은 배기온도가 낮으므로 대책이 필요하다.

억제하는 것으로서 연료분사시기 지연, 급기 가습, 물에말존연료의 사용, 연료와 물의 층상분사, 실린더내 물분사, 배기가스 재순환, 다구연료분사(multi-hole fuel injection) 등이 여기에 해당한다. 표5에 이들 NOx 삭감방법과 그의 효과를 비교하였다. 이들 대책중에서 가장 간단한 것으로 생각되는 연료분사시기 지연에서는 약20%의 NOx 삭감 효과가 기대되는 반면, 연료소비를 증가는 3%로 가장 크다. 한편 물에말존연료 사용이나 연료 물 층상분사, 또는 다구연료분사에서 최적화의 방법으로 연료소비를 증가를 일으키지 않고 상당량의 NOx 삭감이 가능하다. 각 기관제작사마다 당면한 IMO규제에 관하여서는 낮은 NOx 애토마이저(low NOx atomizer)의 채용이나 연료분사시기 지연의 채택 등으로 대응이 가능하다고 보고 있다.

또한 현재의 상태보다 60%이상의 삭감이 필요한 경우에는 물에말존연료의 사용이나 실린더내 물분사, 연료 물 층상분사 등의 채용으로 대응할 방침이지만 이러한 기술도 이미 개발이 완료된 상태이다. 배기가스재순환(EGR)은 NOx 삭감에 효과적임은 인정하고있으나 저질유를 사용하는 박용기관에서는 배기가스의 세척이나 세척수의 후처리문제, 또는 세척후의 배기가스에 의한 과급기나 공기냉각기의 부식 등의 문제 때문에 현시점에서는 실용이 어렵다고 보고 있다.

더 나아가 90%를 넘는 삭감요구에 대하여서는 각 회사마다 배기가스정화장치에 의한 후처리를 필요로 하고 있으며 암모니아나 요소를 환원제로 하는 SCR법(선택적촉환원법)의 실증시험이 끝났으며 이미 우리나라 상선의 일부에는 탑재가 되고

있다. 이 방법은 4사이클 중속디젤기관의 분야에서 거의 완성된 기술로서 육상발전설비에서 많은 실적이 있다. 다만, 대형 2행정저속디젤기관의 경우 과급기뒤에서의 배기가스온도가 523K(250℃) 전후로 매우 낮으며 촉매의 최적 반응온도의 부적합성, 틱새가 막히는 등의 문제로 인하여 SCR반응탑을 과급기의 앞에 설치하여야 하고 각 회사마다 과급기 앞에 배치한 콤팩트한 장치를 고안중이다.

4. 디젤기관의 앞으로의 전망

대형 저속 디젤기관의 박용주기관으로서의 적합성을 금후 더욱 높이기 위하여서는 시장의 수요와 요구품질에 맞는 엔진의 개발이 금후 더욱 중요하게 될 것이며 신뢰성의 향상, 가격의 낮춤, 배기대책 등을 동시에 만족하여야 할 것이다.

4.1 디젤기관에 대한 금후과제

(1) 환경에로의 대응

특히 배기가스의 NOx, SOx의 저감이 매우 중요하다. 여러 가지 수단이 이미 소개한바와같이 개발되고 시험되고있는데 대체로 열효율의 약간의 희생이 부득이한 실정이다.

(2) 신뢰성의 향상

하드웨어와 소프트웨어 양면의 컴퓨터기술의 발전과 동시에 여러 가지 센서, 센싱기술의 진보가 보다 고도의 진단 및 고장예측의 시스템, 더 나아가 이상상태에 대하여 자동적으로 대응하는 치료시스템이 개발될 것이다. 소위 지능화 엔진(intelligent engine)의 출현도 가까운 장래에 출현할 것으로 기대된다.

한편, 특수강 또는 세라믹스와 같은 재료, 윤활유 및 화학의 발전도 이들을 지원하게 될 것이다.

(3) 기관 무인화시스템

현재 부분적으로 실시되고있으나 보다 진일보한 무인화 시스템의 출현이 기대되며 그를 위하여서는 신뢰성의 보다 가일층의 향상이 전제로 된다.

(4) 새로운 개념의 선박에로의 대응

(가) 다기관 단일축 구동에 의한 전기추진

이 방법에 의하면 여러대에 의한 신뢰성의 증대, 전력공급의 자유도 향상, 기관배치의 자유도 향상, 무인화와 인공위성항법의 가능성, 전기기술의 진보와 이용이 예상된다.

(나) 신형 고속선

단일 선체(mono-hull), 쌍동(catamaran)형, 반잠수(SWATH)형, 공기쿠션(air cushion)형, 표면효과(surface effect)형, 수중익(hydrofoil)형 등의 신형 고속선이 발전할 것이므로 여기에 대응하는 기관의 개발이 예상된다.

(다) 잠수형 선박

마찰저항을극소화한기술이 개발되면 유망하다. 그리하여 CCDE(closed cycle diesel engine)의 개념이 매력적이다.

(5) 새로운 엔진분야의 대응

(가) 천연가스 연소 디젤기관

고압가스를 직접 분사하여 열효율이나 출력이 기름연소시와 같은 수준의 디젤기관이 개발되고있는데(다만, 천연가스는 착화성이 떨어지므로 착화를 돕기 위하여 기름을 일부 혼합 분사한다) 연료의 다양화및배기가스공해에 대하여 유리함으로 금후의 발전이 기대된다.

(나) 조약한 기름을 연소하는 디젤기관

아스팔트와 같은 초조약연료가 석유 대체 연료로서 고려될 수 있을 것이며 이미 저속 대형 디젤기관에서는 연소 가능함이 확인되고 있다. 그러나 이 문제는 금후 배기가스 공해 규제의 정도에 큰 영향을 받을 것이다.

(다) ADB시스템

디젤기관의 배기가스를 보일러로 인도하여 재연소시키면 보일러로서는 급기가열로 되고 배기가스중의 NOx는 환원되어 저장한다.

4.2 21세기의 박용기관

왕복동 디젤기관은 2차 대전이후 증기 왕복동 기관이 쇠퇴하면서 증기터빈과 가스터빈에 의한 세대교체가 논의된 적이 있었다. 무엇보다도 그의 왕복기구가 가스터빈이나 증기터빈과 같은 회전식기관에 비하여 기본적인 약점으로 되고 소음과

진동이 문제로 지적되었던 것이다. 그러나 그 후 이와 같은 왕복기구에 의하여 간헐적인 연소를 행함으로써 연소온도를 높이고 다른 기관의 추종을 허락하지 않는 높은 열효율을 유지할 수 있음이 밝혀지면서 살아남을 수 있었고 그 후 장족의 발전을 거듭하였다. 그러나 80년대에 들어와서 디젤기관의 배기가스공해의 규제가 강화되면서 또다시 그의 장래를 우려하는 사람이 많았으나 결국 이 문제도 열효율을 크게 악화시키지 않으면서도 용이하게 대처할 수 있음이 밝혀지면서 더 이상 디젤기관의 장래를 우려하는 목소리는 들을 수 없게 되었다.

좀더 멀리 21세기의 중반까지를 생각한다면 대형 저속 디젤기관에 관한 한 그다지 낙관적이지 아니라는 의견이 있다.

1970년대에 건조된 약300척의 VLCC(20만 중량톤이상의 대형 탱커)의 최초의 갱신시기는 2000년 전후로 예상되는데 그의 갱신은 현재 볼 수 있는 것처럼 2행정 저속 디젤기관을 주류로 하여 이루어 질 것이다. 실린더수를 줄여서 조금이라도 적화를 증가하게 될 것이다. 고속 컨테이너선의 경우 12실린더로 행정 통경비를 약간 작게 하여 70,000ps를 내는 것도 있어 기관의 길이는 22m정도로 된다. 기관실의 치수와 연료유의 적재를 생각하면 짐을 운반하는지 자신의 연료를 운반하는지 알 수 없다는 빈정거림도 듣게된다. 극동-구라파항로의 배에서 중량톤 1톤의 1/4은 연료유가 차지하게된다. 낮은 연료소비율을 위하여 노력하더라도 기름을 때는 한 고속, 대출력화하면 대량의 연료를 적재하여야 하고 본질적인 문제가 있게된다.

여기에 더하여 이미 살펴 본바와같이 IMO는 출력 130kW이상의 선박에 대하여 NOx, SOx등 대기 오염물질의 배출을 억제하기 시작하였다. 이러한 국제적 동향은 박용 주기관으로서의 디젤기관의 존립기반을 약화시킬수 있다. NOx, SOx 삭감을 위한 대책기술이 진가를 발휘하도록 하고자하면 경제성의 희생이 따르기 마련이다. VLCC의 다음 갱신시기에 해당하는 2030년경에는 차세대 박용추진시스템에 대하여 충분한 검토와 연구가 필요할 것이다. 2030년이후에도 저질유를 때는 디젤기관이 명맥을 유지하기에는 어려울 것으로 보는 견해가 있다. NOx, SOx에 더하여 CO₂까지 문제

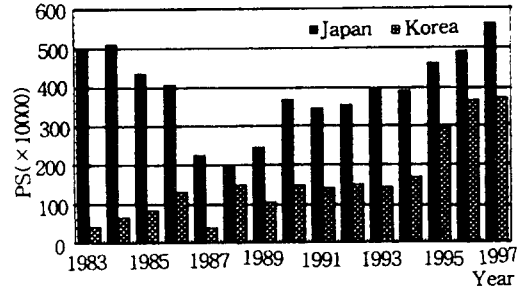


그림 17. 한국과 일본의 디젤기관 제조실적

로 삼겨된 지금에 와서 차세대 선박추진시스템을 진지하게 고려할 필요가 제시되고 있다.

연료로서 천연가스나 메타놀 또는 수소 등을 사용하는 것은 2030년에 가서도 연안항해용의 중소선박에 한정될 것이며 VLCC나 고속 컨테이너선 등에서는 역시 A중유를 연료로 하고 고효율의 콤파운드사이클기관(combined cycle engine)과 아울러 원자력추진선이 또다시 검토의 대상으로 될 가능성이 크다.

콤파운드 사이클기관으로서의 터보 콤파운드기관(turbo-compound engine)과 가스터빈-증기터빈 복합사이클 기관을 생각할 수 있다. 터보 콤파운드기관은 디젤기관의 배기로 가스터빈을 구동하는 것이고 과급과 동시에 터빈의 출력을 감속기를 거쳐서 주축의 구동력에 더한다. 가스터빈-증기터빈복합사이클은 가능한 한의 고온 가스터빈과 증기터빈을 조합하여 높은 효율의 기관시스템으로 한 것이다.

여하튼 앞으로 대형 디젤기관이 부디치게될 문제는 배기가스 공해등의 환경문제가 될 것임은 거의 필연적이며 환경보존에 적합하면서도 지금까지의 높은 열효율과 더욱 향상된 신뢰성 문제를 갖추는 것이 큰 과제로 남게되었다. 그림 17과 같이 우리나라의 선박용 디젤기관 제작 실적은 해를 거듭할수록 비약적으로 늘어나고 있으며 가장 앞서가고있는 일본을 맹렬한 기세로 추적하고 있다. 이것은 기본적으로 박용기관은 구라파에서 설계되고 한국이나 일본이 제작을 담당하는 양분화 현상을 띠고있어 설계자와 제작자의 협력, 의사 소통이 급후 더욱더 중요하게될 것이다.

5. 결 론

지금까지 대형 저속 디젤기관을 중심으로 그의 탄생으로부터 최근의 동향과 앞으로의 전망에 대하여 개략적으로 살펴보았다. 여기에 제시된 내용들은 대부분이 일본박용기관학회지와 내연기관(최근 발행중단 되었다)을 비롯하여 Motorship,

MER 등 외국의 정기간행물과 각사의 캐다로구를 참고로 하여 집필하였다. 특히 현재 존존하는 3개의 기관형식, 즉 Sulzer, MAN B&W, Mitsubishi UEC의 자료를 중점적으로 인용하였으며 혹시 잘못 인용된 점이 있더라도 저자의 착오임을 널리 이해하여 주시기 바란다.