

Wankel 엔진의 에이펙스 시일 파손과 엔진 이상폭발과의 관계

The Relationship between Apex Seal Breakage and Engine Detonation in a Wankel Engine

金 勝 秀*
S. S. Kim

Abstract

One of the most probable reason of the apex seal damage in IR-2500 industrial Wankel (rotary) engine was believed to be the engine detonation. Both analytical and experimental studies were made with a view to find out engine detonation pressure.

The stagnation detonation pressure p_{03}' was estimated based on the data from IR-2500 engine detonation tests, such as engine firing pressure, state of fresh charge at BDC and polytropic compression exponent. The estimated stagnation detonation pressure for the natural gas fueled IR-2500 engine was in excess of 3,700 psia.

With natural gas liquid added to the natural gas the octane value of the fuel was lowered, thus, making the engine more prone to detonate. The estimated detonation pressure for the case with the mixed fuel was about 3,400 psia which was sufficiently high to break the apex seal.

The subsequent engine lab tests performed on two identical engines with sole difference in the apex seal thickness between the two engines proved that the engine knock, in fact, was the villain of the apex seal failure.

기 호

p_3^* : 그림 3 (b)에서 보여주는 이상폭발 사이클의 최대 연소 압력, psia

p_{03}' : 이상폭발 압력파를 뒤따르는 유동장의 정체압력, psia

k : 비열비

M_2'' : 이상폭발 압력파의 마하수

T_2'' : 이상폭발 사이클의 단열 단말 가스 온도, deg R

ΔH : 등온 등압에서 단위질량의 연료-공기 혼합물의 발열량, Btu/lb

c_p : 정압 비열

T_1 : 하사점에서의 가스 온도, deg R

p_1 : 하사점에서의 가스 압력, psia

I. 서 론

산업용 압축기의 원동기나 기타 용도에 쓰이기 위한 Wankel 엔진이 미국의 Ingersoll-Rand

사에서 산업용으로 개발된 적이 있었다 (Ingersoll-Rand사의 Model No. IR-2500 및 IR-5000). 저자는 1980년 초에 자연흡기식 Wankel 엔진의 과급을 통한 동력 증대 사업계획에 설계담당 엔지니어로 참여하게 되었다. 이미 자연흡기식 Wankel 엔진은 80여대 정도 일반회사에 판매되었는데 여러가지 이유로 다수의 엔진이 고장을 일으켜서 제조 판매회사인 I-R사에 상당한 경제적 부담을 가져다 주고 있었다. 이 고장의 원인 중 약 1/3 이상을 점유하는 것은 에이펙스 시일의 파손 때문이어서 문제의 심각성을 나타내고 있었으나 그 원인을 정확히 규명할 수 없어 다수의 이에 관련된 엔지니어들이 이 프로젝트에 참여하게 되었다. 본 논문에서 설명하고 있듯이 저자는 이의 원인을 이상폭발에 의한 것으로 보고 이상폭발 연소과정을 압축성 유동역학의 1차원 연소모델에 적용하여 이의 압력을 계산하여 본 결과 과연 이 압력부하가 시일을 파손하기에 충분히 크다는 것을 발견하게 되었다.

에이펙스 시일의 파손이 엔진 이상폭발 때문이라고 결론 지워진 것은 예상 밖이었다. 그 이유는 이상폭발이 없도록 엔진이 설계됐을 뿐 아니라 시제품이 출하되기 전 1년여간에 걸친 실험실에서의 시험운전에서도 이상폭발이 전혀 감지되지 않았기 때문이었다. 이 엔진은 단기통 혹은 2기통 엔진으로 제작 판매되었으며 단기통 엔진의 배제 체적은 2,500 cu. in. 로 정격 동력은 1,000 rpm에서 550마력이었다. 압축비는 9.0이고 연료는 천연가스로 이는 파라핀 계열의 연료 중 옥탄가가 가장 높은 것은 잘 알려진 사실이다. 그러나 이 엔진은 산업현장에서 실험실에서 보다 훨씬 거칠게 다루어졌다. 그중 대표적인 예로 들 수 있는 것은 엔진에 정격치보다 훨씬 높은 과부하를 걸거나 장소에 따라 천연가스보다 옥탄가가 현저히 낮은 천연가스 액체연료가 기체연료와 섞이어서 과다 주입되었는데 이로 인하여 이상폭발이 심하게 일어나게 된 것으로 분석된다.

이러한 분석 결과를 실험실에서 재연기 위하여 실험실에서 엔진에 과부하를 걸거나 액체연료를 주입하여 인위적으로 심한 이상폭발을 일

으키면서 운전하였을 때 과연 현장에서 본 것과 유사한 손상이 에이펙스 시일에 일어나는 것을 볼 수 있었다. 이런 관찰로서 이상폭발이 시일 파손의 가장 큰 원인의 하나라는 것 과이 시일은 이상폭발에 의한 압력부하를 충분히 견딜 수 있도록 수정되어야 한다는 결론에 도달하게 되었다.

에이펙스 시일은 큰 몸체와 삼각형에 가까운 모양의 조그마한 조각의 두 부분으로 되어 있으며 재질은 구상 주철이며 치수는 길이, 폭 및 두께가 각각 12 in, 1 in 및 3/16 in로 그 개략적인 모양은 그림 1 과 같다. 현장에서 고장난 엔진으로부터 흔히 볼 수 있는 시일 파손의 유형들을 한개의 시일 큰 몸체 부분에 모두 열거한 것이 그림 2 에 표시되어 있다. 이중 가장 흔히 관찰되는 파손 부분은 에이펙스 시일의 큰 몸체 부분의 뾰족한 곳이다.

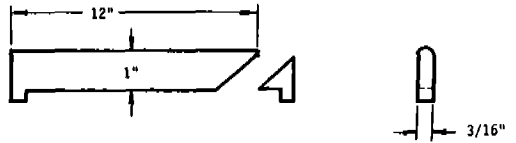


Fig. 1. Shape and dimension of the apex seal (Material: nodular cast iron)

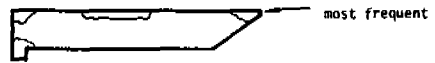


Fig. 2. Apex seal breakage pattern

설계를 변경함으로써 시일 파손문제를 풀기 위한 포괄적인 노력의 하나로서 이상 폭발을 하는 엔진에서의 최고압력 수준을 계산하여 보기로 하였다. 이로부터 우리는

1. 엔진 이상폭발로부터 발생하는 고압이 시일을 파손할 만큼 높다는 것을 확인하고, 나아가서
 2. 새로이 설계된 에이펙스 시일이 엔진 이상폭발에 과연 견딜 수 있는가를 관찰하며, 이로부터
 3. 설계 향상의 기초자료로 이용하기 위한 압력부하의 한계점을 설정하기 위함이었다.
- 이상폭발 압력을 계산하기 위하여 현장의 것과 동일한 엔진을 실험실에서 운전하였는데 이

는 이상폭발 운전조건하에서의 엔진 테이타를 얻기 위한 것이었다. 이 논문은 이상폭발 압력계산, 엔진 측정치 및 이상폭발 실험의 결과를 포함하고 있다.

II. 이상폭발 압력의 계산방법

이상폭발이 일어나고 있는 엔진에서 이 압력파 뒤를 따르는 유동장에서의 정체 압력 p_{03}' 는 식(1)⁽¹⁾에서 보여주고 있듯이 정상 일차원 이상폭발 과정으로 간주될 수 있다. p_{03}' 는 이상폭발이 일어나기 시작하는 임계 연소 압력 p_3^* (그림 3)와 미연 단말가스(unburned end gas)의 이상폭발과 속도인 M_2'' 의 함수로 표시된다.

$$\frac{p_{03}'}{p_3^*} = \frac{1+kM_2''^2}{k+1} \left[1 + \frac{k-1}{2} \left(\frac{M_2''^2-1}{1+kM_2''^2} \right)^2 \right]^{\frac{k}{k-1}} \dots\dots\dots(1)$$

여기서 M_2'' 는 이상폭발과의 속도를 마하수로 나타낸 것이고 k는 연료-공기 혼합기체의 비열비이다.

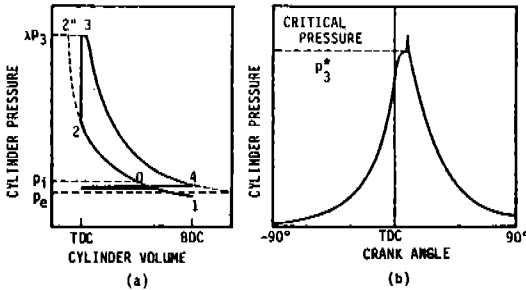


Fig. 3. A engine cylinder pressure diagrams
(a) Pressure-volume diagram
(b) Pressure-time trace for a detonating cycle

이상폭발과 속도 M_2'' 는 임계 단말가스 온도 $T_2''^*$ 와 미연연료-공기 혼합가스의 발열량 ΔH 의 함수로 다음 식과 같이 표시되며 이 관계는 Chapman과 Jouguet의 법칙이라고 알려져 있다.

$$\frac{\Delta H}{c_p T_2''^*} = \frac{(1-M_2''^2)^2}{2(k+1)M_2''^2} \dots\dots\dots(2)$$

여기서 c_p 는 가스의 정압비열이다.

식(1)과 식(2)에서 p_{03}' 를 계산하기 위해서 p_3^* 와 $T_2''^*$ 가 알려져야 한다. 위 변수에 붙인 별첨자 “*”는 이상폭발이 일어나기 시작하는 임계치임을 뜻한다.

이미 행하여진 연구에⁽²⁾ 의하여 주어진 엔진에서 이상폭발의 한계는 단말가스의 임계압력 p_3^* 와 임계 단열압축 온도 $T_2''^*$ 의 함수로 표시될 수 있다는 것이 발견되었다. 예를 들면, 그림 4는 직경이 16" 및 17"에 행정이 22"인 천연가스 엔진의 이상폭발 압력 한계는 p_3^* 와 $T_2''^*$ 와의 상관관계로 표시된다는 것을 보여주고 있다. 이는 단말가스의 온도와 압력이 한계선을 초과할 때에 엔진은 이상폭발을 일으키게 된다는 것을 뜻한다.⁽³⁾

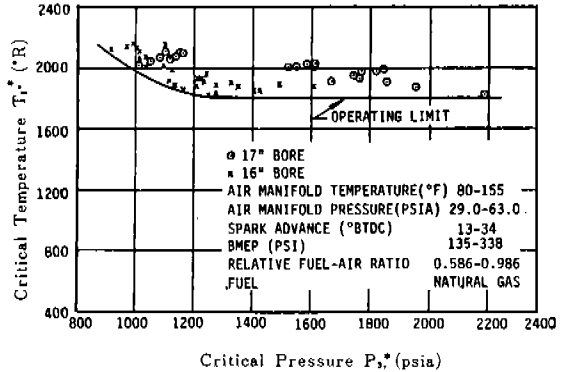


Fig. 4. A detonation limit characteristics for a 16-and 17-in. bore x 22-in. stroke natural gas engine

p_3^* 와 $T_2''^*$ 의 열역학적 상태는 그림 3에 나타나 있다. 그림 3 (a)에서 보여주는 엔진 사이클의 p-V선도는 점 2"에서의 단열 단말가스 상태를 설명하여 주고 있다. 그림 3 (b)는 이상폭발이 막 일어나기 시작할때의 엔진 사이클에 대한 전형적인 압력-시간선도이다. 이 경우의 최대 연소압력은 이상폭발 정체압력이 아니고 임계 연소압력인 p_3^* 를 뜻한다.

임계 단말가스 온도인 $T_2''^*$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$T_2''^* = T_1 \left(\frac{p_3^*}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \dots\dots\dots(3)$$

여기서 T_1 과 p_1 은 각각 엔진 하사절에서의 새 혼합 가스온도와 압력이다. 식(1)로부터 식(3)까지

세개의 수식에 대해 미지수는 T_2^* , M_2^* 및 p_{03}' 로 모두 셋이 되므로 이들을 모두 연결해서 구할 수 있고 다른 것들은 모두 이미 알려진 것이거나 엔진 실험으로 구할 수 있는 것들이다.

III. IR-2500엔진의 이상폭발 정체 압력계산

이상폭발 한계 특성(p_3^* 대 T_2^*)이 IR-2500엔진에 대하여 조사된 바가 없기 때문에 이를 알기 위해서 엔진을 이상폭발이 일어나는 상태에서 운전해서 공기 및 연료의 유량 혹은 p_3^* 를 질 수 있는 압력-시간 선도 등의 엔진 데이터를 실험적으로 구하여야 했다. 이렇게 측정된 자료로부터 p_1 및 T_1 은 이상기체 법칙을 이용해서 또 압축 지수 (compression exponent)는 압력-시간 선도로부터 구할 수 있다. ΔH 는 공기-연료 혼합가스의 단위질량당 발열량이다.

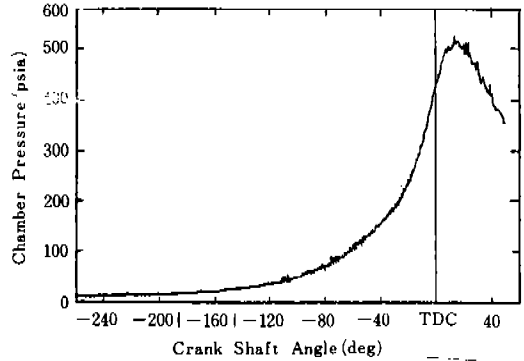


Fig. 5. Pressure-time curve for a IR-2500 engine detonation pressure test (Run # : 2052)

Ingersoll-Rand사는 6개의 각각 다른 이상폭발 조건하에서 자료를 수집하기 위하여 IR-2500엔진에 대한 이상폭발 실험을 완료하였다. 각 실험의 자료정비에 사용된 6개의 압력-시간 선도중 한 예를 그림 5에 나타낸다. 이런 실험자

Table 1. IR-2500 Engine Detonation Data and Calculated Results.

(Lower heating value of fuel: 924.7 Btu/scf, Compression Ratio: 9.0, S. G. of fuel: 0.5763, Stoichiometric air-fuel ratio: 16.72/1.)

Run #	2048	2049	2050	2051	2052	2053
Date	9/3/80	9/3/80	9/4/80	9/4/80	9/4/80	9/5/80
Engine Speed(RPM)	1001	995	997	999	984	999
Engine BMEP(psi)	87.9	103.6	103.6	103.7	87.1	87.1
Manifold Depression(in. Hg)	2.1	1.95	2.3	2.18	1.9	3.7
Spark Advance(*BTDC)	55/65	25/35	31/41	35/45	42.5/52.5	25/35
BSFC(BTU/BHP-HR)	8021	8037	8051	8050	8032	7416+10
ϕ	4.1	.55	.55	.55	3.95	2.0
A/F ² Ratio	20.4 : 1	17.2 : 1	17.2 : 1	17.2 : 1	20.2 : 1	18.3 : 1
Air Flow(#/min)	71.53	70.79	71.05	71.25	69.08	≈64.0
Horsepower	555.5	650.7	652.0	653.9	541.0	549.3
Exhaust Temp.(°F)	1255	1450	1450	1430	1295	1425
Inlet Manifold Temp.(°F)	90	99	91	92	114.5	88
Jacket Water Temp. In(°F)	169	169	167	168	169	170.2
Jacket Water Temp. Out(°F)	175	175.5	174	175	174	176
Lube Oil Temp. In(°F)	162	161	160	160.5	159	159
Lube Oil Temp. Out(°F)	210	211.5	211.5	214	208.6	205.5
Barometer (in. Hg)	29.2	29.18	29.27	29.25	29.20	29.12
Detonation Level	Occasional Mild	Faint	Occasional Mild	Limit	Occasional Mild	Occasional Faint-Mild
Compression Exponent, n	1.385	1.372	1.401	1.387	1.349	1.339
Pressure at BDC, p_1 (psia)	13.04	13.01	12.84	12.39	13.22	11.86
Temperature at BDC, T_1 (°R)	685	681	671	646	707	687
Crit Firing Press, p_3^* (psia)	532	480	548	530	494	397
Crit End-Gas Temp, T_2^* (°R)	1976	1941	1960	1890	1988	1874
Stag Detonation Press, p_{03}' (psia)	3952	4176	4723	4715	3688	3373

료들은 정리되어 T_2^* 와 이상폭발 정제압력 p_{3s}^* 가 구하여졌다. 6 개의 엔진 실험자료와 계산 결과들은 표 1 과 같다.

천연가스 연료로 행한 첫 다섯개의 실험은 평균 이상폭발 압이 4,200 psi 인데 반해 #2053 은 3,400 psi 정도로 나타났다. 실험 #2053 에서는 천연가스에다가 10 gal/hr 의 천연가스 액체연료를 추가로 주입함으로써 이 혼합연료의 옥탄가가 낮추어졌고 이로서 이상폭발의 한계점이 낮아지는 결과로 나타났다고 믿어진다. 이 천연가스 액체란 천연가스와 함께 따라다니는 소량의 액체연료로서 옥탄가가 유정에서 직접 얻는 가솔린과 유사하다고 생각된다. 유정에서 직접 뽑아내는 가솔린보다 옥탄가가 훨씬 낮은 것은 잘려진 사실이다. 계산된 이상폭발 압력중 가장 낮은 3,400 psi 의 압력도 현장이나 실험실에서 관찰되는 에이펙스 시일의 뾰족한 부분을 파손하는데 충분한 것으로 나타났다.⁽⁴⁾

첫 다섯실험의 이상폭발 압력은 대략 3,700 psi 에서 4,700 psi 사이에 있다. 이상폭발 정제압력이 이렇게 일정하지 않은 것은 사이클 간의 화염전파 속도, 에이펙스 시일을 통한 가스누출 (blow-by) 및 곡소 열전달 등의 차이에 의한 것이라 본다. 그림 6 은 6 개의 이상폭발 실험을 기

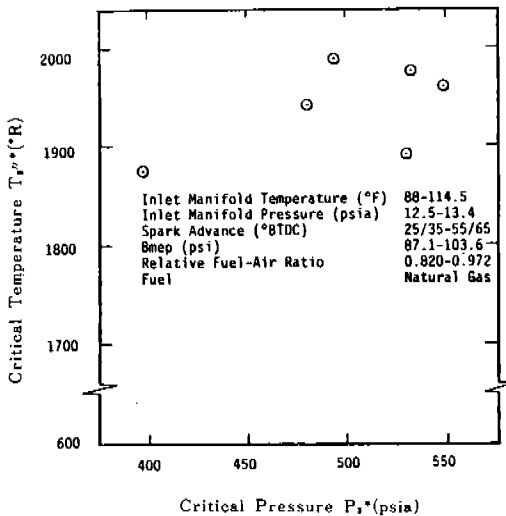


Fig. 6. Detonation limit for IR-2500 Natural Gas Engine

초로 해서 얻은 IR-2500엔진의 이상폭발 압력 한계 특성을 보여주고 있다. 이 그림으로부터 우리는 $p_{3s}^* = 400 \sim 550$ psia에 걸쳐 IR-2500 엔진의 최소 안전 이상폭발 한계점으로 T_2^* 는 약 1800 R 이하로 잡으면 안전할 것이라는 것을 알수 있다. $p_{3s}^* > 550$ psia에 대해서는 IR-2500의 $T_2^* - p_{3s}^*$ 이상폭발 한계 특성을 알 수 없는데 이는 당시에 압축기를 이용하거나 터보차저를 엔진에 장착하여 얻을 수 있는 높은 흡기다기관 압력하에서 엔진 이상폭발 실험을 행할 수 없었기 때문이다.

IV. 고 찰

그림 7 은 IR-2500 엔진의 로우터와 트로코이드 하우스 사이에 설치되어 있는 에이펙스 시일을 보여주고 있다. 압력 부하에 의하여 에이펙스 시일에 가장 큰 인장응력이 발생 되는 것은 시일이 로우터에서 돌출된 부분을 외팔보로 간주하였을 때이다. 나아가서 시일에서 가장 파손되기 쉬운 곳은 그림 2 에서 보여주는 몇군데 중 에서 큰 시일의 뾰족한 부분이다. 이미 계산된 이상폭발 정제압력중 가장 낮은 수치에 대하여 이 뾰족한 부분에서 일어날 수 있는 최대 인장응력이 계산되었는데 이는 구상 주철의 항복응력보다 높았다. 이런 수치 결과로 IR-2500 엔진에서의 시일 파손의 주원인은 엔진의 이상폭발 일 것이라는 것을 쉽게 이해할 수 있다.

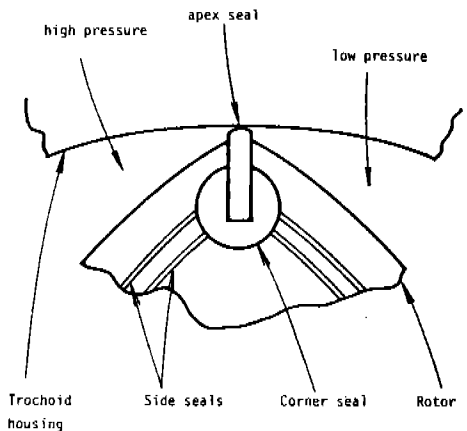


Fig. 7. Typical view of a installed apex seal in the rotary engine.

위에서 맺은 결론을 확인하기 위하여 추가적으로 엔진 실험 계획이 세워졌는데 이 실험을 수행하기 위하여 현장에서 사용되는 것과 거의 비슷한 한 IR-2500 엔진이 이용되었다. 이 엔진에서 한가지 다른 점이 있다면 이는 보통것보다 두께가 두배가 되는 에이팩스 시일이 설치되었다는 것이다. 외팔보 봉의 강도는 봉 두께의 3승에 비례한다는 것은 잘 알려진 사실이다. 이 새로운 시일은 위에서와 같이 계산되었을 때에 IR-2500 엔진의 실험 자료에서 밝혀진 이상폭발 하중에 대해 안전하다고 추정되었다. 물론 시일의 강도를 증가시키기 위해 시일의 치수를 변경시키는 대신 재질을 구상 주철보다 강한 것으로 선택하는 방도가 있을 수 있다. 그러기 위해서는 트로코이드 하우스의 내면과 새로 선정되는 재질간의 마모 성질이 우수한 것을 시일의 재료로 선택하여야 하는데 이를 위해서는 여러 후보 재질을 선택하여 장시간의 엔진 마모실험을 하여야 한다. 가능한 한 단시간 내에 시일 파손의 원인을 규명하는 것이 당시의 가장 큰 당면 과제였으므로 시일의 두께를 2배로 택하는 방안이 채택되었던 것이다.

아주 극심한 이상폭발을 일으키게 하기 위하여 점화진각을 정상 운전시의 25°/35°bTDC(이 엔진은 연소실 양쪽에 점화 프러그가 1개씩 모두 2개가 설치되어 있어서 25°/35°는 이들 각각의 점화진각을 말하며 이들간의 점화간격은 표 1에서 보는바와 같이 항상 10°로 유지되었음) 보다 전진시키거나 혹은 하중을 많이 가하면서 또는 양자를 병행하여 적용하면서 운전되었는데 이런 조건하에서 채택식 시일은 약 반시간이 못되어 부러져 나가는 것이 통상적이었다. 그러나 이 새 엔진은 이런 심한 이상폭발하에 계속 이상없이 운전되다가 약 8시간이 되면서 역시 운전이 중지되었다.

정지 원인을 파악하기 위하여 엔진이 분해되었는데 발견된 것은 이상폭발하는 고온의 가스 때문에 시일 스프링이 축늘어져 있는 것이었고 에이팩스 시일에는 하중의 손상이 없었다는 것이었다. 그러므로 우리는 또 한번 더 시일 파손의 주 원인은 엔진 이상폭발이었으며 당시에 쓰

이고 있던 에이팩스 시일은 심하게 이상폭발하는 운전조건에 충분히 견딜 수 없게 설계되었다는 것을 실험적으로 확인하였다.

V. 결 론

1. 입계 화염압력 p_{s^*} 와 입계 단말 가스온도 T_{s^*} 로 대표되는 IR-2500 엔진의 이상폭발 한계는 천연가스에 천연가스 액체를 주입함으로써 낮아지는 현상을 보여주었다. 이런 현상은 천연가스에 이의 액체연료의 주입이 이 혼합연료의 전반적인 옥탄가를 낮추어 주어 엔진 이상폭발이 쉽게 일어나는 결과로 되었다.
2. IR-2500 엔진으로 행한 실험을 기초로 계산된 이상폭발 정체 압력 p_{0s^*} 는 천연가스만의 연료인 경우 3,700에서 4,700 psia 사이였고 천연가스 액체가 약간 섞인 연료(10 gal/hr)의 경우 3,400 psia로 다소 낮아졌다. 이런 압력수준은 현장에서 관찰된 것과 같이 에이팩스 시일을 파괴하는데 충분히 높은 것이라고 판단되었다.
3. 시일의 두께를 두배로 증가시킨 엔진을 극심한 이상폭발하에 장시간 운전하였을때 시일은 손상을 받지 아니하였다. 이 결과로 에이팩스 시일 파손의 원인은 엔진의 이상폭발이라는 것과 적절히 설계된 에이팩스 시일은 엔진 이상폭발을 충분히 견디어 나갈 수 있다는 것을 시사하여 주었다. 자연흡기식 IR-2500 엔진의 경우 최대 연소 압력을 약 6,000 psi로 보고 에이팩스 시일이나 기타 엔진 연소실 부품을 설계한다면 설령 엔진 이상폭발이 발생하더라도 충분히 견디어 나갈 것이다.
4. IR-2500엔진의 최대 안전 T_{s^*} 는 $400 < p_{s^*} < 550$ psia에서 약 1,850 R이었다. 이런 숫자는 왕복동 엔진의 것과 비교하여 볼때 대단히 작은 것으로서 이는 흡입과정에 있는 연소실로 높은 열전달이 일어나고 있다는 것을 시사해 주고 있다. 이 열전달은 연소실 벽면으로부터의 대류나 복사에 의한 것 이외에 고온 고압으로 압축 팽창과정에 있는 앞의 연소실로부터 이 뒤를 따르며 흡입과정에 있는 연소

실로 심각한 가스 누출(gas blow-by)이 있다는 것을 시사해 주고 있다.

참 고 문 헌

1. A. H. Shapiro, "The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow," The Ronald Press, Vol. 1(1953), pp. 206-211.
2. T. N. Chen and R. N. Alford, "Combustion Characteristics of Large Gas Engines," ASME Publication 71-DGP-6 (1971)
3. C. K. Powell, R. N. Alford, T. N. Chen and V. Kevorkian, "A Thermodynamic Analysis for Detonation-Free Engine Performance," Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Power, Vol. 92, Series A, No. 3(1970), pp. 231-239.
4. R. Frick and J. Schwartz, "Apex Seal Design for the Wankel Rotary Engine," IRRI TN-488(1980).