

ENGINE 개발시 발생하는 파손사례 고찰 및 방지대책에 관하여

Failure Analysis of Engine Components in the Development of New Engine

정 승 철* 김 영 우**
S. C. Jeoung, Y. W. Kim

1. 서 론

자동차 ENGINE 개발 과정은 초기 개념 설계 → 상세 설계 → 시제품 제작 → 조립 → 내구 및 성능, 기타 평가 시험 → 실차 평가 시험 → 최종 양산의 여러가지 단계를 거쳐서 이루어진다.

이러한 개발 과정중 특히 내구 및 성능, 실차 평가 시험을 거치면서 초기 설계시 예측하지 못했던 파손 사고들이 발생하게 되며, 그 원인 또한 다양하다.

특히 최근들어 고성능, 고출력의 ENGINE 을 최적 설계 개념에 의하여 이룩하려는 노력이 진행되고 있는 바, 그에 따른 파손 사고의 발생 가능성은 더욱 높아지고 있다.

파손 유발의 원인으로는

- 설계시의 문제점(구조적 문제 & 부적절한 재질 및 열처리 선택 등)
- 가공 및 PROCESSING의 문제점(열처리 PROCESS 및 소재 결함 등)
- 시험 및 환경의 문제점
- 기타 문제점 등

이상과 같이 다양하며, 미리 예측하기 매우 어려운 변수가 존재한다.

그러나, 효율적으로 최적의 ENGINE 을 개발하기 위해선 개발 과정중 발생된 파손사고

의 해석 및 대책에 대한 노력이 매우 중요하며, 또한 활발히 수행되고 있다.

따라서, 본고에서는 실제로 ENGINE 개발 과정에서 발생되었던 파손 사례를 소개하고 고찰하여 봄으로써 파손의 해석 및 방지대책 마련에 도움을 주고자함을 목적으로 한다.

2. 파손 사례 고찰

2.1 Flywheel BOLT 파손 사고(사례 I)

1) 파손 개요

2.4L MPI ENGINE(DOHC)의 내구 시험 중 5,500 RPM/WOT 조건에서 Flywheel과 Crankshaft를 체결하는 BOLT 6개와 Dowel Pin이 파손되는 사고가 발생하였다(Fig.1 참조).

Flywheel BOLT와 Crankshaft의 재질 SPEC.은 Table 1과 같다.

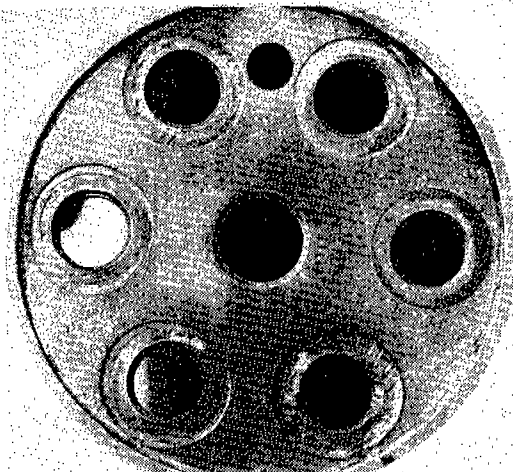
2) 파손 분석

Table 1 Flywheel BOLT와 Crankshaft의 재질 SPEC.

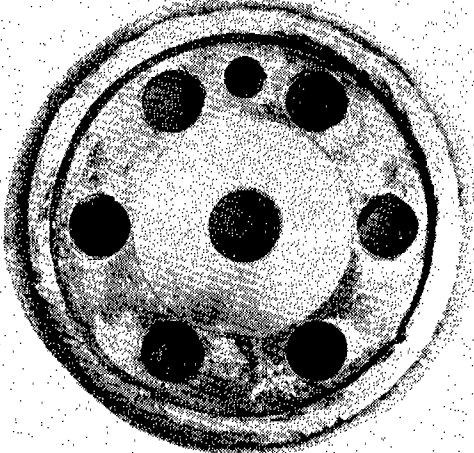
	재 질	열 처 리	경 도	유 격
Flywheel BOLT	SCM435	담금질 및 뜨임	심부 HRC 35/40	11T
Crankshaft	S43C	↑	표면 HB 248/285 심부 HB 201/285	
Cr/sh Flange 부	↑	고주파열처리	표면 Hv 550/780	깊이 1/2**

* 현대자동차㈜ 마북리연구소 마북연구부 대리

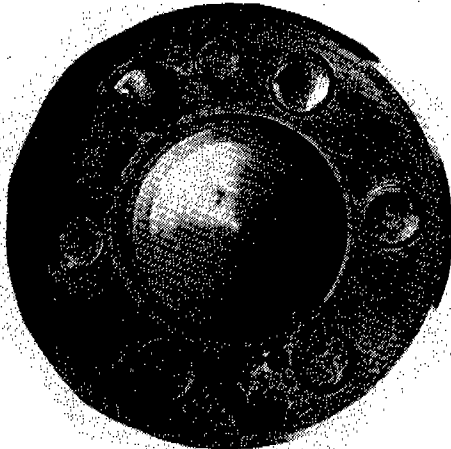
** 정회원, 현대자동차㈜ 마북리연구소 마북연구부 책임연구원



Flywheel 상면 (Bolting 면)



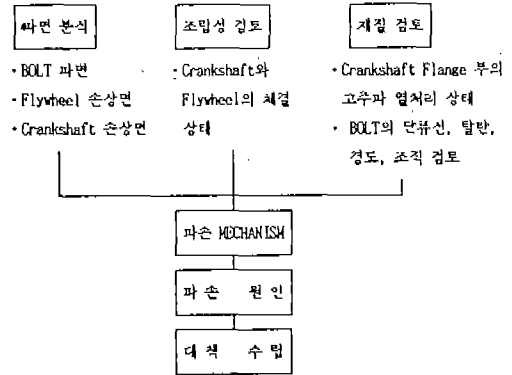
Flywheel 하면 (Crankshaft 접촉면)



Crankshaft Flange 부(파손면)

Fig.1 Flywheel과 Crankshaft의 손상 부위

파손 분석은 다음의 3가지 측면에서 검토하였다.



A. 파면 분석

○ 파면 분석은 Flywheel과 Crankshaft 손상면 및 BOLT의 파단면을 저배율 현미경과 전자 현미경(SEM) 검사를 통하여 파괴 순서, 양상, 파괴시 STRESS 상태 등을 조사하였으며, 검토 결과는 Table 2와 같다.

○ 파손 순서는 NO.2 BOLT HEAD부→NO. 2 BOLT 및 Dowel Pin→NO.1 BOLT→NO. 5 BOLT→NO.4 BOLT→NO.3 BOLT→NO. 6 BOLT 순으로 추정된다.

추정 방법은 BOLT의 Flywheel 상면에 대한 압흔 자국을 확인시, BOLT의 파손때 발생하는 Sliding에 의한 Oval 형태의 압흔 자국이 클수록 늦게 파단된 것이며, 이것으로 상기 순서를 확인하였다.

○ 파괴의 방향은 파괴시 발생하는 파면상의 Dimple(파면의 한 형태) 방향(SEM으로 확인)으로 Torsional Stress의 방향을 확인하여, 파괴시 ENGINE의 상태(가속 또는 감속 상태)를 확인하였다.

B. 조립성 검토

○ Flywheel BOLT와 Crankshaft 나사 체결 상태

Flywheel BOLT와 Crankshaft 나사 체결 상태는 Table 3과 같으며, NO.2 BOLT가 가장 풀려있고, NO.3 BOLT가 가장 조여진 상태이다.

Table 2 Flywheel BOLT. 파단면 및 Flywheel 손상면 검토 결과

파손 순서 (추경)	BOLT 파단면 관찰		Flywheel 上面의 BOLT 11개 좌우측 기준			비 고
	상파면(HEAD쪽)	하파면(Cr/sh쪽)	MAX.	MIN.	△L	
NO.2 B/T HEAD파면			-	-	-	HEAD의 한쪽에서 Tensile Type STRESS 발생 파괴
NO.2 B/T 파면			21.5	21.5	0	가속時 Torsional STRESS에 의한 파괴
Dowel Pin 파면			-	-	-	Impact Type 파괴 계질적으로 취약 (S15C)
NO.1 B/T 파면			22.25	21.6	0.65	가속時 Torsional STRESS 파괴 NO.2 B/T 파면과 同一 형태
NO.5 B/T 파면			23.05	21.9	1.05	가속時 Torsional STRESS 파괴
NO.4 B/T 파면			23.15	21.85	1.30	가속 및 가속時 Torsional STRESS 파괴
NO.3 B/T 파면			23.50	22.20	1.30	NO.3,4 B/T 사이 Welding 흔적 ↑
NO.6 B/T 파면			21.90	21.60	0.30	가속時 최장직 으로 파괴 가장 심한 파괴 양상

※: 단위 (mm)
 → : 파괴 방향 → : 나사 방향
 <<<<<< : Dimple의 방향 (파괴 방향과 同一)

Table 3 Flywheel BOLT의 나사 체결 깊이 비교

	No.1 B/T	No.2 B/T	No.3 B/T	No.4 B/T	No.5 B/T	No.6 B/T
JH(mm)*	12.05	11.10	12.90	12.80	12.35	12.15
깊이 비교	No.3 > No.4 > No.5 > No.6 > No.1 > No.2					

Table 4 Cr/sh Flange부와 Flywheel의 Cr/sh 체부경 사이의 체결공사**

	SPEC.	측정값	비 고
Flywheel의 Cr/sh 체부경	φ80 ^{+0.010} _{-0.010}	80.010	Zero 공차로 조립시
Cr/sh의 Flange 부경	φ80 _{-0.022}	80.010	조립불량 가능성 없음

* ΔH Crankshaft에 BOLTING된 길이(mm)
 ** Crankshaft Flange부와 Flywheel의 체결 상태

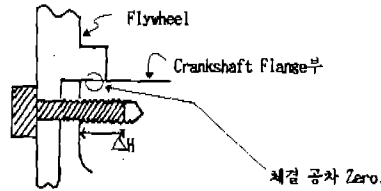
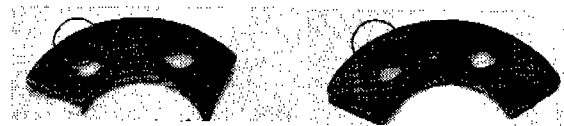


Fig.2 ΔH 및 Crankshaft Flange부와 Flywheel의 체결 상태 표시



고주파 인치리 불량품 (비손품) 고주파 인치리 양품 (비교품)

Fig.3 Crankshaft Flange부 고주파 열처리 상태 비교

○ Crankshaft Flange부와 Flywheel의 Crankshaft 체부경 사이의 체결 공차
 Cr/sh Flange부와 Flywheel의 Cr/sh 체부경 사이의 체결 공차는 Zero로써 조립 불량의 발생 가능성이 매우 컸다(Table 4 참조).

C. 재질 검토

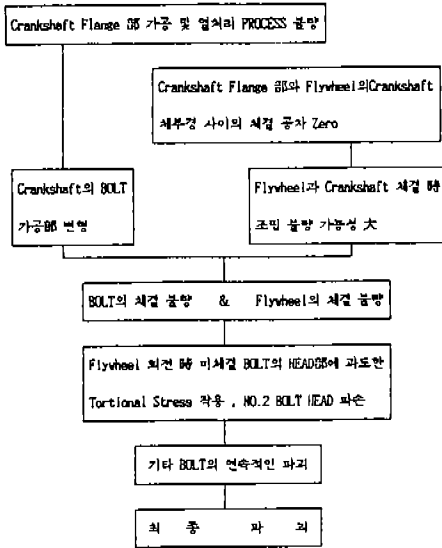
○ Crankshaft Flange부 고주파 열처리 상태
 Crankshaft Flange부 고주파 열처리 상태는 표면 경도는 SPEC. Hv 550/780을 만족하지만, 경화 깊이는 SPEC. 1/2mm를 초과하여 2.2/6mm였으며, 특히 BOLT HOLE 부근이 5mm로써 과도한 깊이를 보였다(Fig.3 참조).

상기 결과는 가공 및 고주파 열처리 PROCESS 불량으로 고주파 열처리시 미리 가공된 BOLT HOLE 부의 영향으로 전류 밀도의 차이가 발생하여 BOLT HOLE부에 대한 과

도한 열영향으로 BOLT HOLE 부의 변형을 유발시킴으로써 BOLT 체결시 조립 불량률을 유발시켰다.

○ BOLT의 탈탄 및 단류선, 조직 검토 결과, 탈탄은 발생하였으나 SPEC.을 만족하였으며 기타 사항 역시 모두 재질 SPEC.을 만족하였다.

D. 파괴 MECHANISM



3) 결 론

○ 파손의 원인은 Crankshaft Flange 부 가공 및 열처리 PROCESS 불량과 Crankshaft Flange 부와 Flywheel의 Crankshaft 체부경 사이의 체결 공차 Zero에 의한 조립 불량이었다.

○ 대책으로는

- Crankshaft 가공 PROCESS 개선
 - 현행 : Crankshaft의 Flywheel BOLT HOLE부 가공후 Flange 부 고주파 열처리 실시
 - 개선 : Crankshaft의 Flange 부 고주파 열처리 실시후 Flywheel BOLT HOLE 부 가공
- Crankshaft Flange 부와 Flywheel의 체결성 향상 방안 검토
 - 체결 공차 맞게 가공
 - Crankshaft Flange부의 Chamfer 가공량 늘리는 방안 검토

2.2 Exhaust Manifold의 Crack 발생(사례II)

1) 파손 개요

○ 2.0L MPI ENGINE(DOHC)의 내구 시험 중 구상 흑연 주철제 Exhaust Manifold에 Crack이 발생하는 파손 사고가 2차에 걸쳐서 발생하였다.

- 1차 파손 : 내구 50시간 경과 후 발생 (Fig.4 참조)

- 2차 파손 : 내구 80시간 경과 후 발생 / 1차 파손 후 교체품 (Fig.5 참조)

1차 파손은 배기구 NO.1 및 NO.2의 배기 GAS가 모이는 지점으로, Cooling Pan의 바람과 맞닿는 곳의 반대편 (HOT SPOT)에서 발생하여 Flange 부분까지 성장하였다.

2차 파손은 1차와 동일한 부분에서 발생하였으며 극심한 표면 주름이 GAS 흐름 방향에 수직하게 형성되어 있었다.

○ 파손된 부품의 화학성분은 Table 5와 같으며 SPEC.을 만족하였다.

○ 경도값은 내구 시험 전에는 Hv 269로서 SPEC.을 만족하였지만 내구 시험 후에는 Hv 116/177 정도로서 경도 저하 현상을 나타내었다.

○ 기조직은 내구 시험전 BULL'S EYE 조직(Pearlite + Ferrite)이 내구 시험후 대부분 Ferrite조직으로 변태되었으며 상기 경도 저하의 한 원인이 되었다.

○ Exhaust Manifold 파손의 전반적인 파손 상태를 요약하면 다음과 같다.

- 극심한 산화 Scale(약 1.210 μm)이 외부 및 내부에 형성됨.
- 외부 산화 Scale은 주름 모양을 형성하여 선택적으로 내부로 성장하여 Crack 형성 및 전파됨 (Fig.6 참조).
- 기조직은 내구 후 열영향에 의하여 분해됨.

Table 5 파손된 Exhaust Manifold의 화학성분 (Wt %)

	C	Si	Mn	P	S	비 고
1차 파손 품	3.50	2.55	0.20	0.012	0.008	기타 합금
2차 파손 품	3.26	2.48	0.20	0.012	0.009	원소 첨가

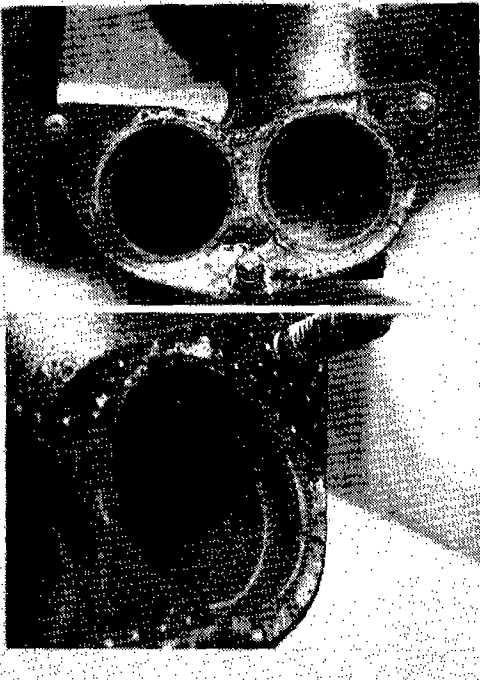


Fig.4 1차 파손 Exhaust Manifold의 형상

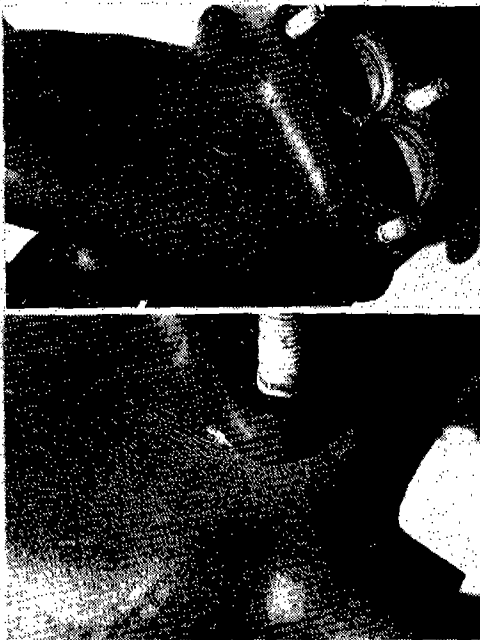


Fig.5 2차 파손 Exhaust Manifold의 형상

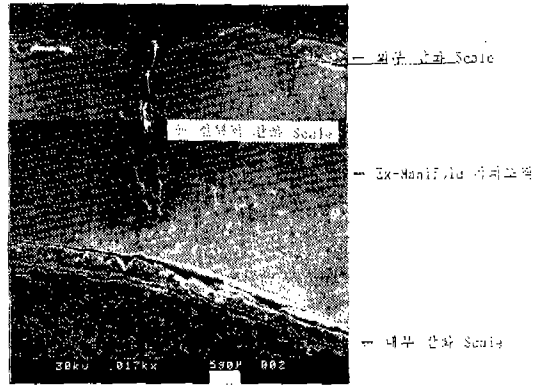
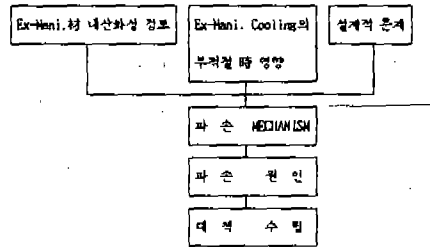


Fig.6 선택적 산화에 의한 Exhaust Manifold의 파손 상황(SEM)

2) 파손 분석

파손 분석은 다음의 3가지 측면에서 검토하였다.



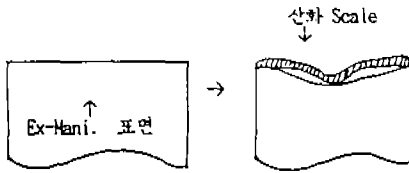
A. Ex-Mani.재 내산화성 검토

○재료의 내산화성 문제는 산화 Scale을 가능한 억제하는 방법과 형성하되 균일하고, 치밀하게 기지 조직과 결합하여 진전을 방지하는 방법에 의하여 얻어질 수 있으며, 다음의 4가지 항목을 만족시켜 최적의 내산화 특성을 얻을 수 있다.

- 산화 Scale 자체의 Stability
- 산화 Scale과 기지 조직과의 Adherence
- 산화 Scale 전체의 Coverage
- 산화 Scale의 Growth Rate

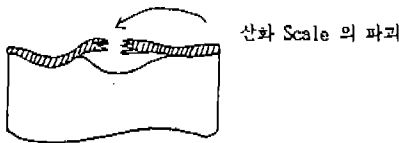
○상기 항목을 고려시 Ex-Mani. 파손을 다음과 같이 설명할 수 있다.

STAGE I : 표면에 산화 Scale 형성 및 기지 조직의 고온 상변태로 인한 제적 팽창 결과 표면 주름 현상 발생



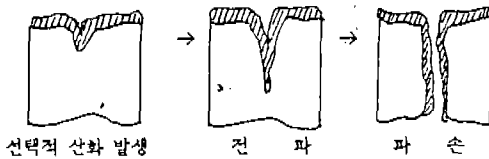
(산화 Scale의 Adherence 부족 현상)

STAGE II : 고온 팽창 및 냉각 수축에 의한 산화 Scale의 파괴



(산화 Scale의 Stability 부적절 및 Coverage 파괴 현상)

STAGE III : 파괴된 산화 Scale에서 선택적 산화 발생 → 전파 → 파손



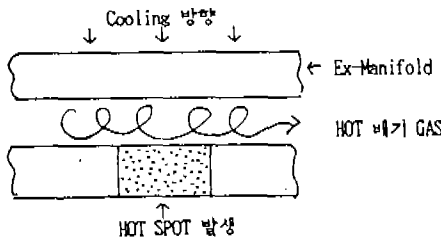
○결론적으로 재료의 내산화성이 부족할 경우 과도한 산화층의 형성, 파괴 및 선택적인 성장을 통하여 파손을 유발시킬 가능성이 크다.

B. Ex-Mani. Cooling 부적절시의 영향

○Ex-Mani.의 내구 시험시 불균일한 냉각은 외부의 국부적인 곳에 HOT SPOT(비 Cooling에 의하여 국부적으로 가열된 영역)을 형성시켜 파손을 유발 또는 촉진시킬 수 있으며 다음과 같이 설명할 수 있다.

STAGE I :

Ex-Mani.의 어느 한 부분에 Cooling 부족에 의한 HOT SPOT 발생

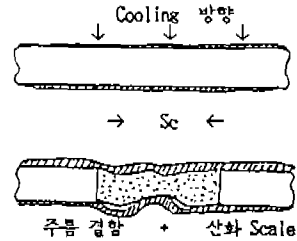


STAGE II :

고온의 HOT SPOT부에서 $L \propto \Delta T$ 만큼 더 팽창한다(L : HOT SPOT부의 길이, α : 선팽창계수, ΔT : 온도차).

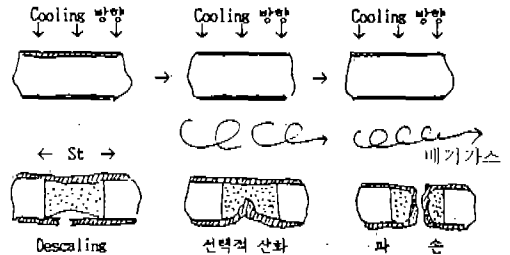
이때 팽창의 일부는 Creep 변형하여 주름 형상을 유발시키고 나머지는 Compressive Stress를 발생시킨다.

표면부의 산화는 동시에 진행된다.



STAGE III :

냉각시 HOT SPOT부에 Residual Tensile Stress가 발생되며 [$St = E \alpha \Delta T / (1 - \mu)$]이 Stress에 의하여 Descaling → 선택적 산화 유발 → Crack 전파 및 파손 발생 가능성이 크다.



○표면 파손을 유발시키는 Residual Stress는 다음 항목에 의존한다.

- Thermal Conductivity (HOT SPOT부와 그의 지역과의 온도차 ΔT 에 비해)
- Thermal Expansion Coefficient (α)
- Creep Strength
- Elastic Modulus (E) & Poisson's Ratio (μ)
- Ductility 또는 반복되는 미량의 소성 변형의 흡수 능력

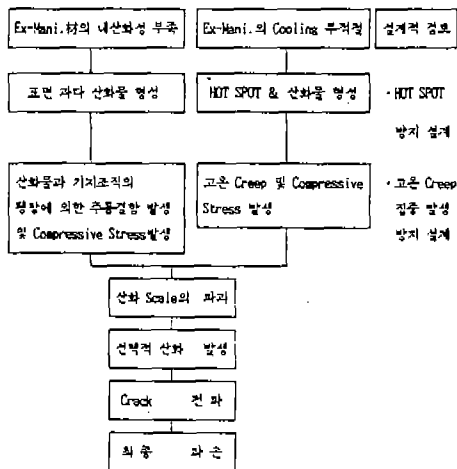
결국, HOT SPOT이 형성되면 동일재에서 ΔT 에 의하여 Residual Tensile Stress(St

$=E\alpha \Delta T / (1-\mu)$ 가 발생하여 파손 유발 가능성이 크므로 효과적인 냉각 방법이 요구된다.

C. 설계적 문제

○설계상의 검토점은 Cooling 문제에서 언급한 바와 같은 HOT SPOT의 발생 방지를 위하여 원활한 배기 GAS의 흐름을 이룩할 수 있는 설계와, 고온 Creep 변형량이 특정 부위에 편중되지 않는 최적 설계 검토가 요구된다.

D. 파손 MECHANISM



3) 대책

ENGINE의 개발 과정상 Cooling 및 Ex-Mani.의 재설계는 불가능하였으므로 재료의 내산화성을 보강시키기로 하였다.

재질 측면에서의 보강을 위해 기지조직을 Ferrite화하여 고온에서 Pearlite 변태에 따른 문제점들을 제거하였으며, 내열성 향상을 위하여 Si 함량을 보강시킨 재질을 Ex-Mani. 재로 선택하였다.

본 재질을 시험 상태에서 산화 실험한 결과 산화 Scale의 생성 두께가 900°C 100HRs 실험의 경우 약 1/5 정도로 감소하였다.

Table 6 Ex-Mani.재의 산화 실험 결과

	변경前 Ex-Mani. 材	변경後 Ex-Mani. 材
900°C / 50 HRs	720 μm	155 μm
900°C / 100 HRs	1,090 μm	214 μm

4) 확인 시험

재질 변경후 내구 시험중 162시간 경과 후 에 파손 사고가 재발생하였다(Fig. 7 & Fig. 8 참조).

본 파손은 NO. 2 배기구의 Flange 부근에서 발생하였는데, 이것은 기존의 파손과는 다른 위치에서 발생한 것으로써 표면 산화 Scale의 주름결함도 발생하지 않았다.

조직 조사 결과 Fig. 9에서와 같이 Ferrite 기지조직을 갖는 양호한 상태였으며, 산화 Scale의 양상도 Fig. 10 및 Table 7과 같이 양호하였다.

Table 7 Ex-Mani. 내구 파손 품의 산화 Scale 비교

구 분	재 질	시험시간	산화Scale 두께	비 고
2 차 파손 변경前		80 HRs	496/636 μm	선택산화 발생有
3 차 파손 변경後		162 HRs	199/234 μm	선택산화 발생無

조사 결과 변경후 Ex-Mani. 재는 내산화성은 양호하였으나 Flange 부근에서 발생한 Crack의 경우 표면 직하에서 생성된 주조결함에 의한 것으로 판명되었다(Fig. 11 & Fig. 12 참조).

5) 결론

○ 1차 및 2차 파손의 원인은 Ex-Mani. 재의 내산화성 부족 및 Cooling 부적절에 의한

NO. 4 NO. 3 NO. 2 NO. 1
Failure 부

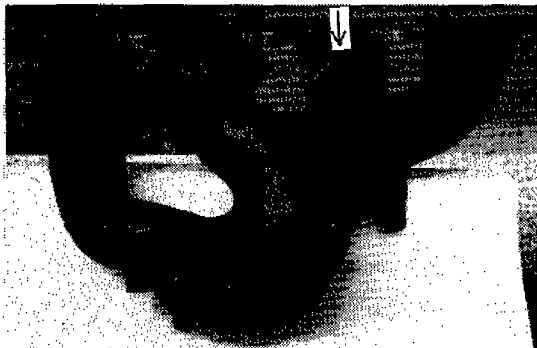


Fig. 7 재질 변경후 파손된 Exhaust Manifold의 파손 부위-I

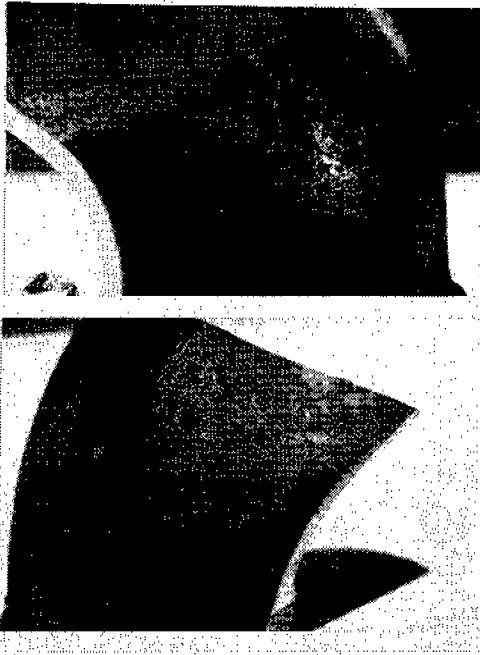


Fig.8 재질 변경 후 파손된 Exhaust Manifold의 파손 부위 -II

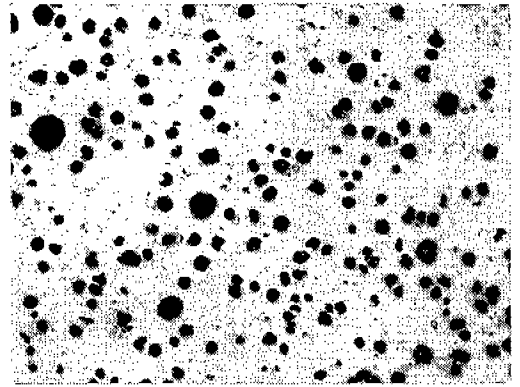


Fig.9 재질 변경 후 Exhaust Manifold의 기지조직 (Ferrite + Graphite)

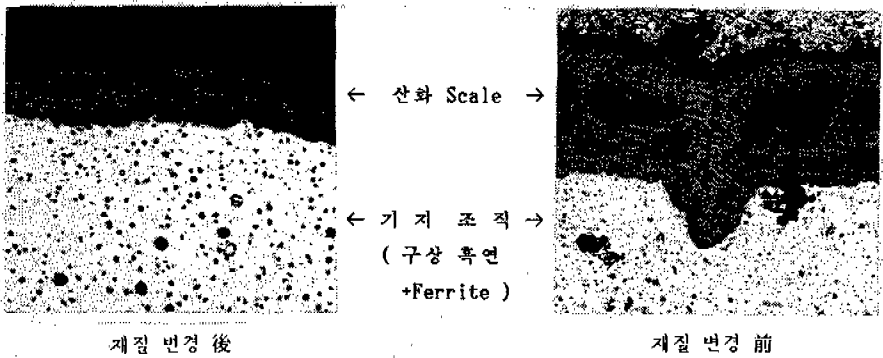


Fig.10 재질 변경 전, 후의 산화 Scale 비교

선택적 산화의 발생에 따른 파손 사고였다 (Ex-Mani. 재 변경전).

○ Ex-Mani. 재 변경 후 파손의 원인은 주조 결함에 의한 Crack 발생에 따른 파손 사고였다.

○ 대책으로는

- Ex-Mani. 재의 내열 및 내산화성 향상을 위하여 기지조직의 변화와 Si 함량을 조절한 재질 변경

- 구조 방안의 개선을 통하여 Ex-Mani.의 파손 사고를 방지할 수 있었다.

3. 결 어

새로운 ENGINE을 개발하는 과정에서는 이상의 두가지 파손 사례 이외에도 많은 파손이

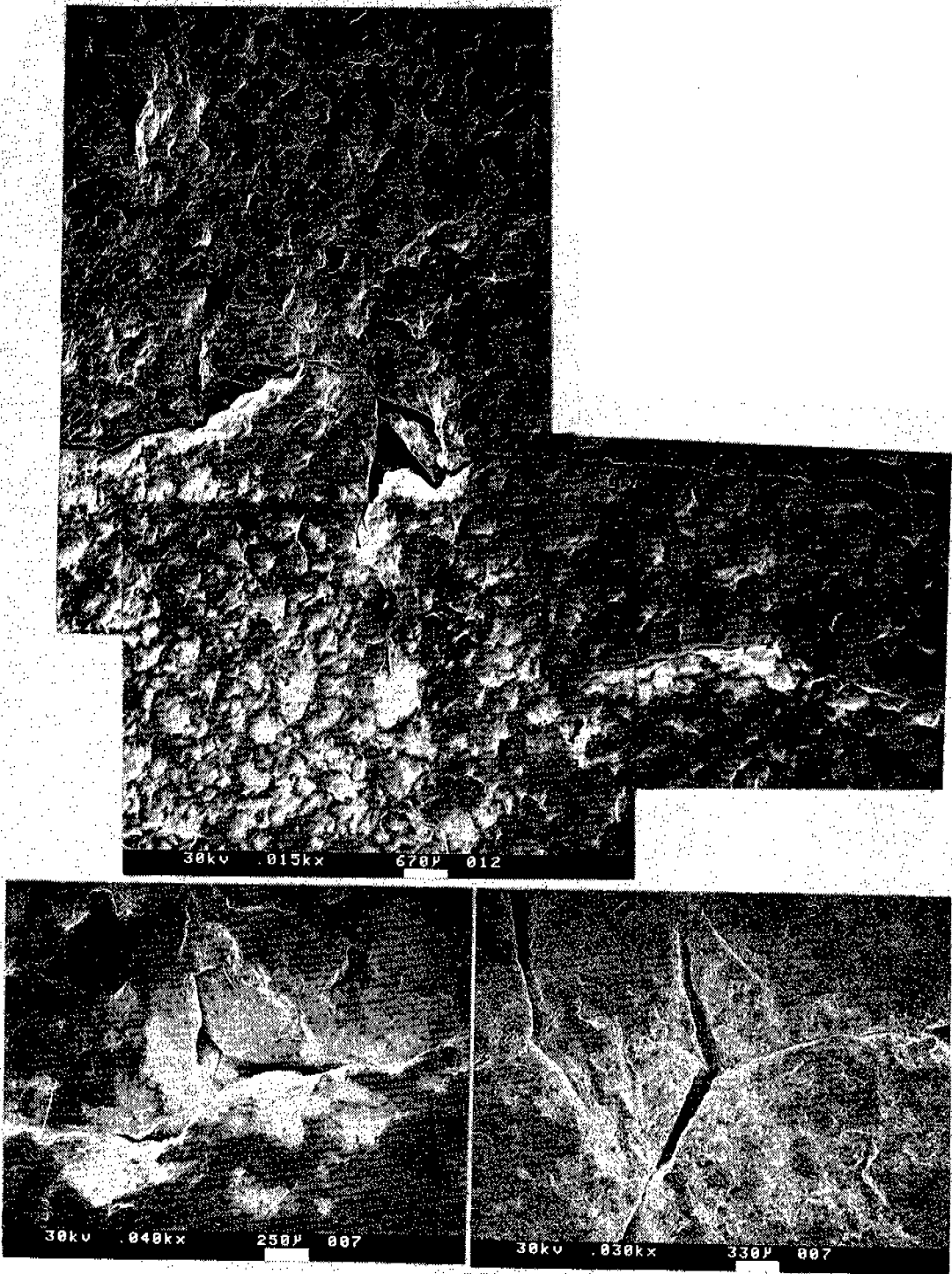
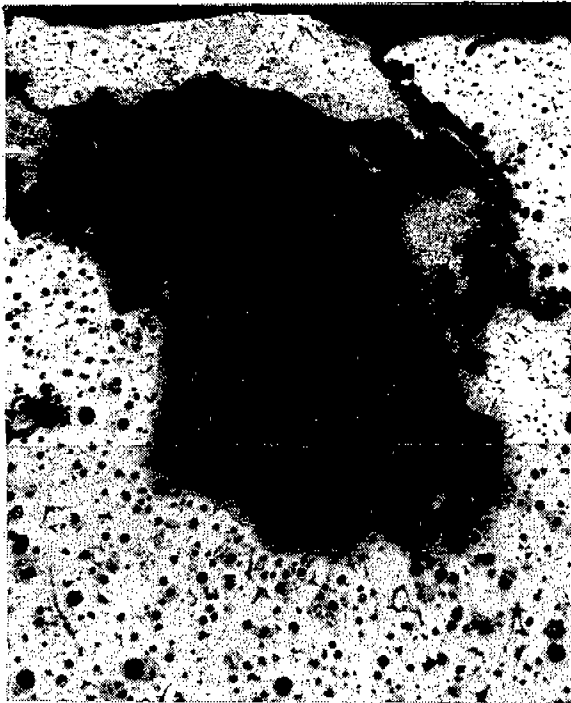
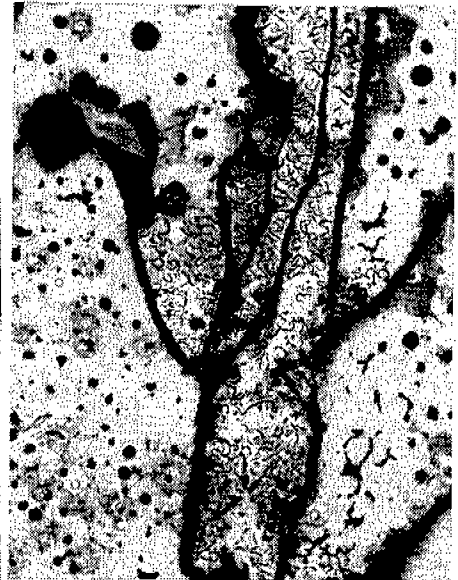


Fig.11 재질 변경후 Exhaust Manifold의 주조 결합-I(SEM)



이물질 존재



미구상화 흑연 존재

Fig.12 재질 변경후 Exhaust Manifold의 구조 결함-Ⅱ

발생하고 있는데 기타 예로써

- 소재 불량(비금속 개재물-예 : Valve Spring)
- 열처리 불량(표면 경화 처리시 정도 및 경화 깊이 부족, 탈탄 또는 탄화물 형성 등-예 : Transmission의 Gera류)
- 설계 불량(Valve Bounce-예 : Exhaust Valve)
- 부적절한 소재 선택(열전달 및 Wear 문제-예 : Ex/Valve Seat)
- 이물질의 혼입 및 윤활 부족(예 : Metal Bearing)
- 기타 시험중의 Miss Operation

등이 있으며, 각 파손 사례를 정리 대별하면 다음과 같다.

- 설계의 문제점
 - 부적절한 재질 및 열처리의 선정
 - 날카로운 모서리 또는 비정상적인 Stress 원

- 예측하지 못한 작동 조건
- 부정확한 Stress & Thermal 해석 등
- 가공 및 Processing의 문제점(소재 포함)
 - 부적절한 열처리
 - 주조 및 단조 결함
 - 비금속 개재물 존재
 - 부적절한 가공 및 조립(순서)
- 시험 및 환경의 문제점
 - Over Load
 - Fatigue
 - Wear
 - Oxidation
 - Corrosion

따라서 파손 사고가 발생시 파손의 1차적 원인을 면밀히 조사하고 그에 대한 정확한 대책을 마련함으로써 효율적으로 새로운 ENGINE를 개발하는데 기여할 수 있을 것이다.