

**산업차량용 동력전달 축의  
고장분석 및 신뢰성향상**

2005. 5. 26

두산인프라코어(주) 신뢰성평가센터  
책임연구원 오창선

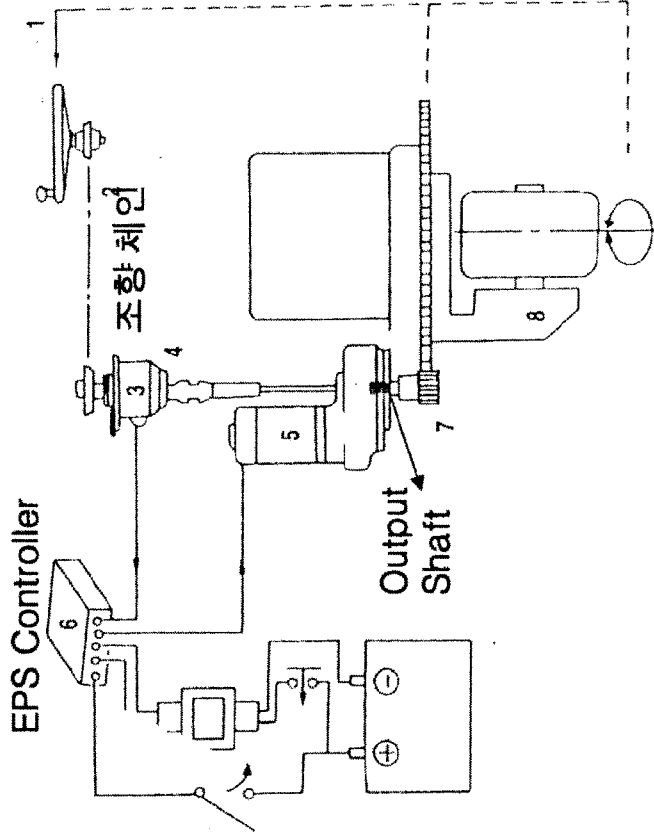
# 목차



- Failure History
- Failure Analysis
- Endurance Evaluation
  - Field Data Acquisition
  - Test Mode Design
  - RIG Test
  - Design Modification
  - Design Freeze
  - Production & Delivery
  - Field Failure Monitoring
- Conclusion

# EPS Output Shaft

- Electrical Power Steering
  - 조향 휠(1)에 가해지는 조작 토크를 센서(3)에 의해 감지해서 전동 모터(5)를 구동
- Output Shaft
  - 전동 모터의 회전운동을 트랜스퍼(8) 케이스의 조향기어(7)에 전달



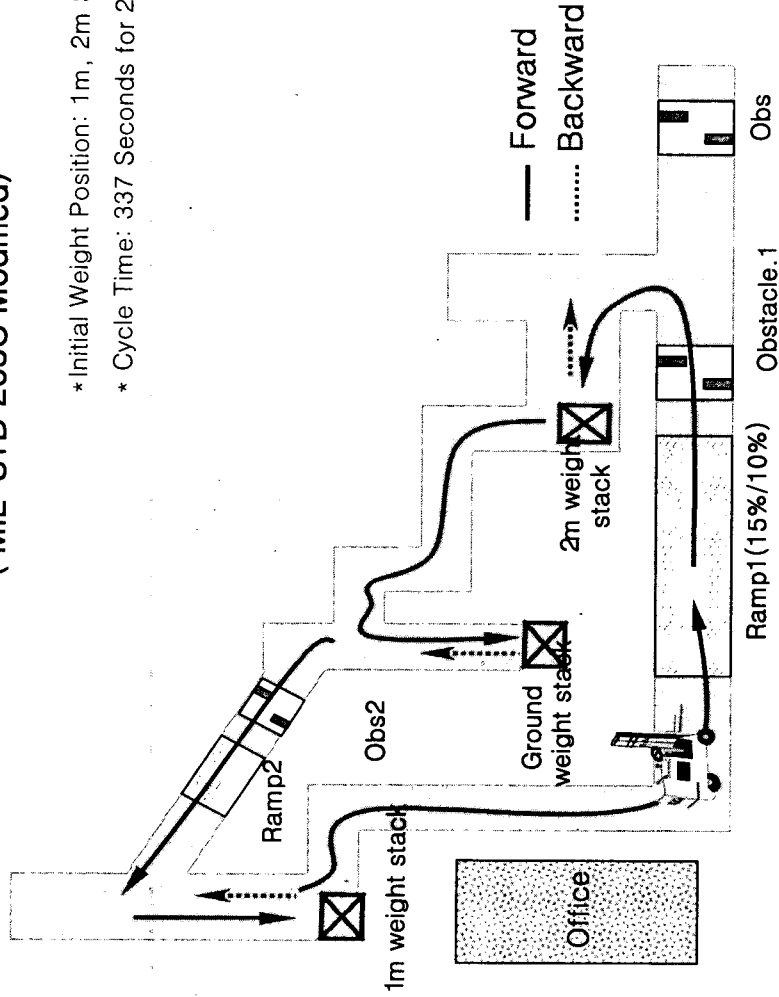
- 국산화 개발된 EPS Output Shaft가 PAT시험 100 시간 후 절손

# Test Course for Product Acceptance Test



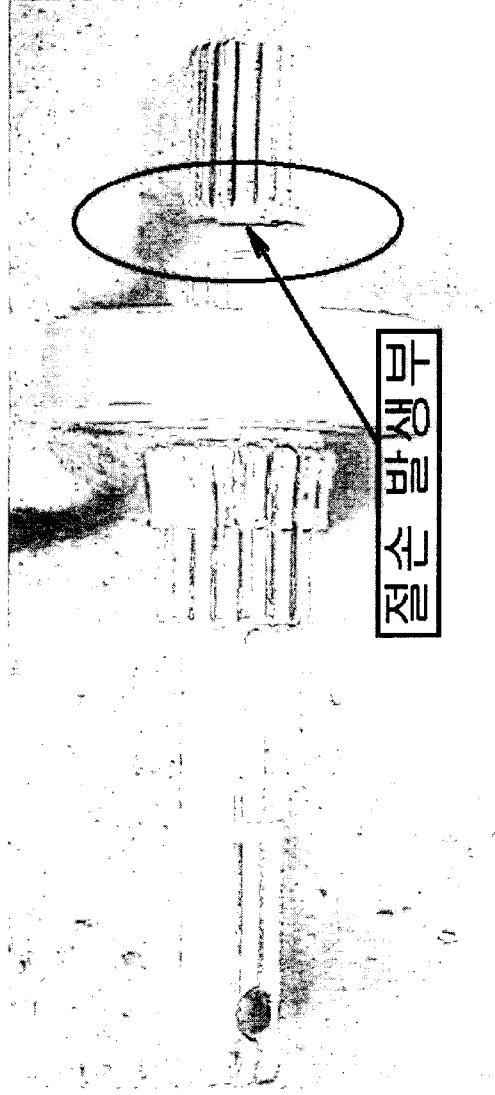
## DHI WORK CYCLE - PAT COURSE ( MIL-STD 268C Modified)

- \* Initial Weight Position: 1m, 2m Stack.
- \* Cycle Time: 337 Seconds for 2 Circuits



# Failure Analysis

- 절손양상

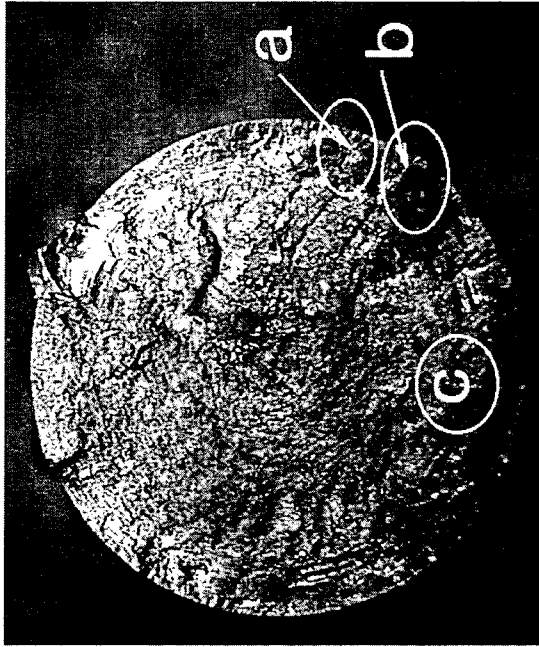


- 형상적으로 취약한 출력축의 최소 단면적부
- 스플라인 연결 사이의 비틀림 응력이 작용하는 위치

# Failure Analysis



- 파면분석



- 원통레를 따라서 약 1mm 정도의 길이방향 피로균열이 발생
- 나머지 잔여부 일시에 연성파괴

# Failure Analysis



## • Output Shaft 재질 및 열처리 사양

구분	재질 사양	열처리 사양			
		열처리	표면경도(HRC)	경화깊이(mm)	내부경도(HRC)
양산품(외자품)	SCr420	침탄소입	59.7	0.7	32.5
개발품(하자품)	SCM440	가스질화	63±1	-	25±1

- 부적합한 열처리사양 및 spec.

## • Output Shaft 품질

구분	재질	열처리			
		열처리	표면경도(HRC)	경화깊이(mm)	내부경도(HRC)
개발품(하자품)	SM45C	가스질화	22.0(HV455)	질화층깊이:0.7	18

- 이종소재 적용에 따른 강도 저하

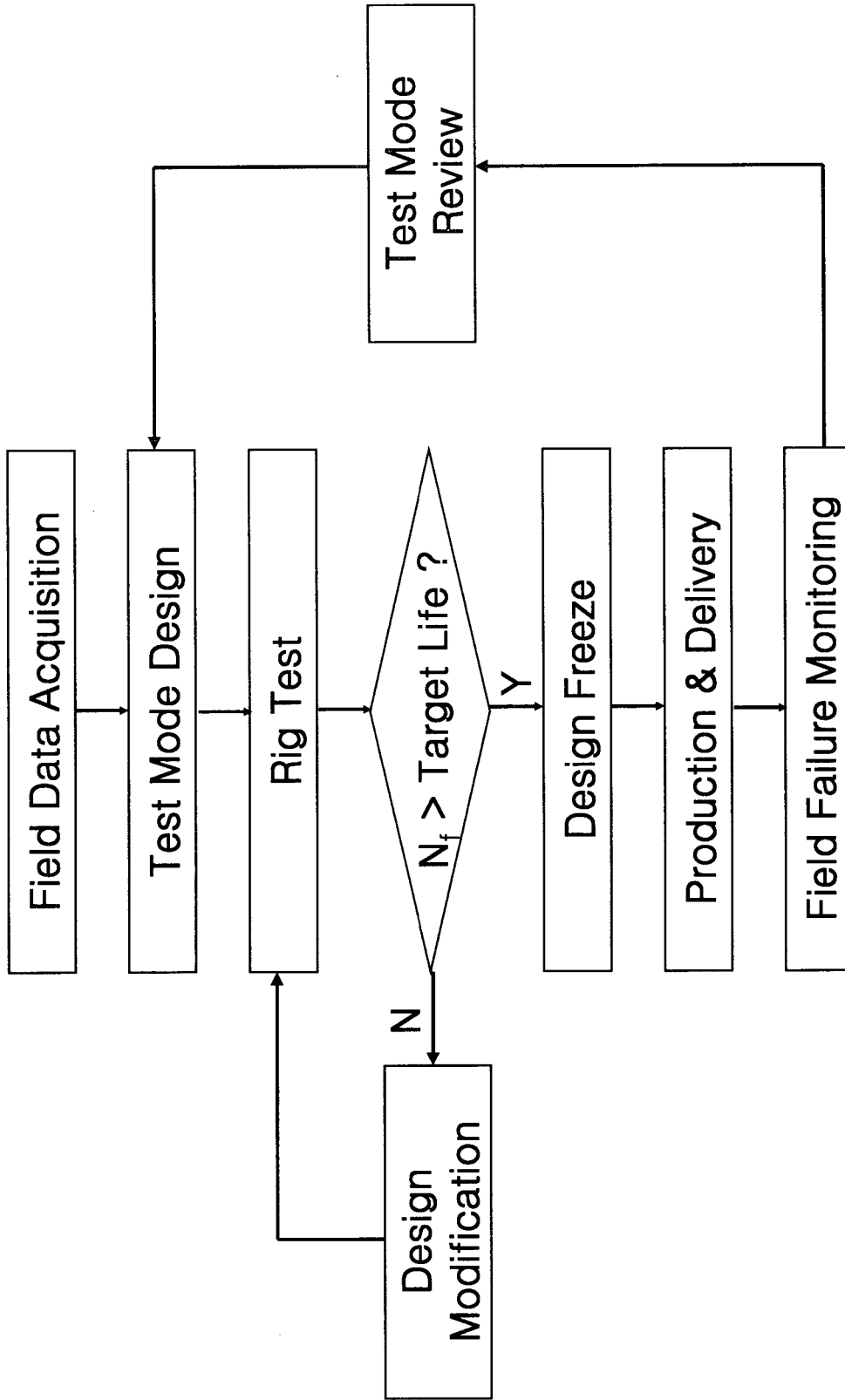
# Failure Analysis



- 결론
  - Output Shaft의 사용조건에 부적합한 열처리사양 및 Spec. 적용
  - 이종소재 적용에 따른 강도 저하
  - 비틀림 응력이 작용하는 스플라인 사이의 형상적으로 취약한 목부에 서 내구수명 부족으로 절손
  
- 대책
  - 새로운 열처리사양 및 Spec. 설정
  - 내구시험으로 검증



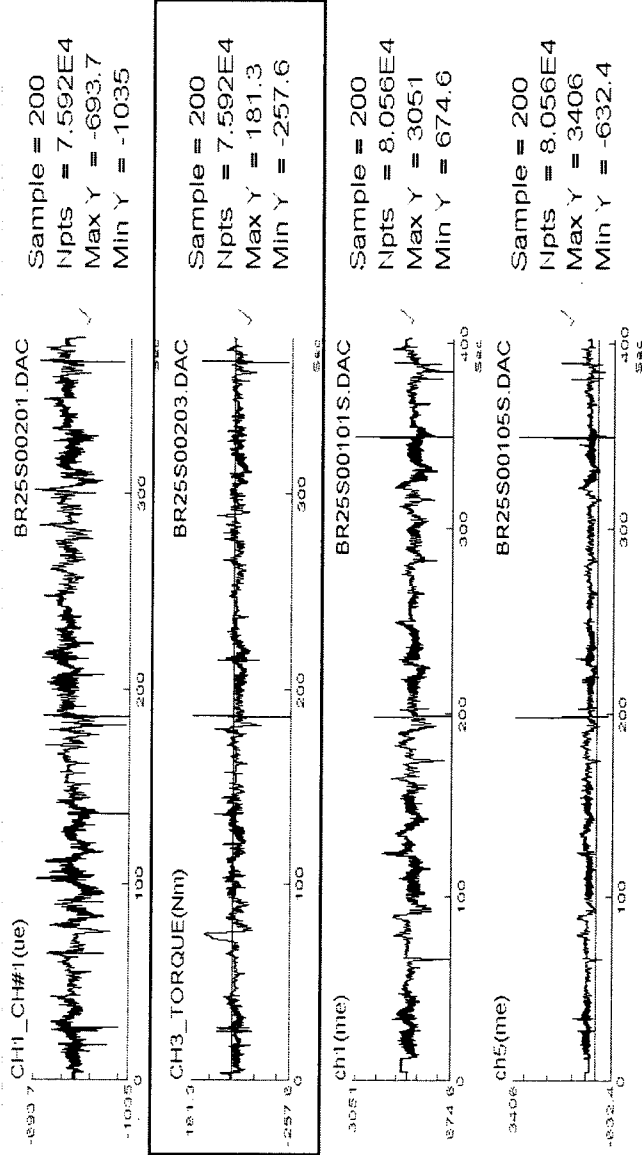
# 내구성평가 FLOW



# Field Data Acquisition



- 실차 작용 토크 측정
  - 절손부에 스트레인 게이지 4개 부착
  - 조향 및 운행 시 토크 변화를 측정



# Field Data Acquisition



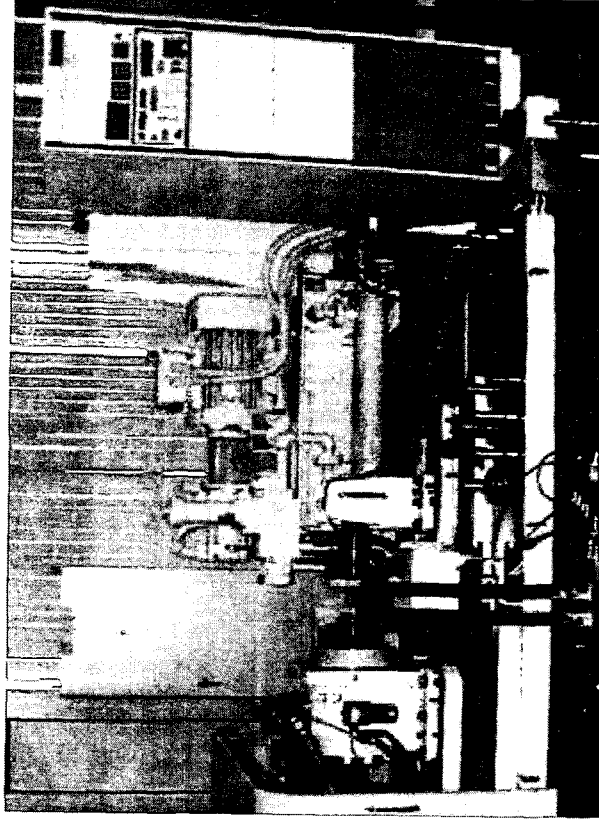
- 정지상태 조향
  - 좌/우로 최대 조향시 스톱퍼에 충돌될 때 높은 Peak 값을 나타냄
    - ☞ 가혹조건
- PAT 주행
  - 최대 조향각까지 조향하는 경우가 많지 않으며, 조향 스피드도 높지 않은 편임 ☞ 통상조건
- 요철 통과
  - 타이어로부터 전달되는 지면에서의 충격에 의하여 조향 휠이 좌우로 요동을 일으키거나 Output Shaft에 전달되는 토크는 작음
- 급역회전
  - 빈도는 많지 않지만 운전자의 조작에 따라서는 높은 토크 발생

모드	정지중 조향	PAT 주행	요철 통과		급역회전	
			X	O	X	O
부하 여부	-	-	X	O	X	O
리치 상태	In	-	Out	In	Out	In
최대 토크 (kgf·m)	79.3 (76.5)	29.2 (27.0)	10.4	12.6	64.1	69.8

# Test Mode Design



- 비틀림 파단 토크 측정 시험
  - 제어 모드 : 토크 제어
  - 토크 증가 속도 : 2 kgf·m/sec
- 비틀림 내구시험
  - 제어 모드 : 토크 제어
  - 토크 진폭 : 76.5 kgf·m
  - 주파수 : 1 Hz
  - 파형 : Sine Wave



500 kgf·m 비틀림 내구시험기

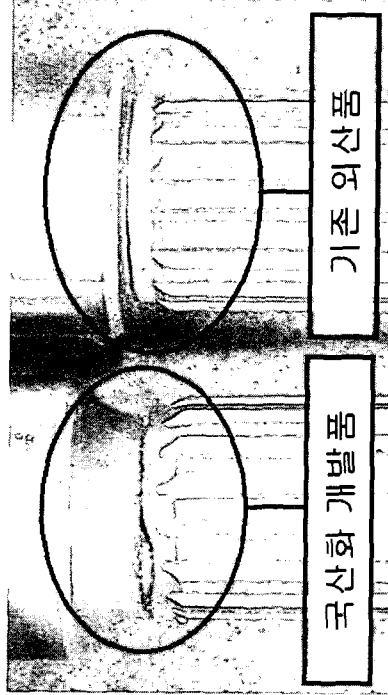
## • 시험품별 파단 토크

제조사	기존 외산품	M사					D사	
		초도	1차	2차	3차	초도	1차	2차
		파단 토크 (Tf, kgf·m)	130.4	137.8	124.5	130.1	93.4	111.7
기존품 대비 파단 토크비(%)	100	106	95	100	72	86	106	
파단 비틀림응력 (tf, kgf/mm <sup>2</sup> )	185.9	157.1	142	148.4	106.5	127.4	157.1	
기존품 대비 파단 비틀림응력비(%)	100	85	76	80	57	69	85	

- 비틀림 응력  $\tau = \frac{16T}{\pi d^3}$
- 응력집중계수 고려

기존 외산품	1.5 이상
국산화 개발품	1.2

- 개발품의 경우 재질(열처리)적으로 부족할 면을 형상 개선으로 보완



# Test & Design Modification



## • 시험품별 정적 안전율

제조사	기존 외산품	M사			D사			
		초도	1차	2차	3차	초도	1차	2차
파단 토크 (Tf, kgf·m)	130.4	85.7	137.8	124.5	130.1	93.4	111.7	137.8
통상조건에서의 안전율	4.83	3.17	5.1	4.61	4.82	3.46	4.14	5.1
가혹조건에서의 안전율	1.7	1.12	1.8	1.63	1.7	1.22	1.46	1.8

- 통상조건 : PAT 주행(27.0 kgf·m)
- 가혹조건 : 정지상태 조향(76.5 kgf·m)
- 외산품은 10여년간 사용으로 충격토크에 대한 안전율을 검증됨

## • 시험품별 내구시험 파단 사이클

제조사	기존 외산품	M사			D사	
		1차	2차	3차	1차	2차
파단 사이클 (±76.5kgf·m)	6,868	26,814	1,694	40,804	525	15,977
외산품 대비 수명비 (%)	100	390	25	594	8	233

- 개발품의 내구수명이 외산품 보다 대폭 향상된 원인
  - ☞ 목부 형상 개선
- M사 2차 시료와 D사 1차 시료의 내구수명 저하 원인
  - ☞ 열처리와 가공 품질 저하

# Test & Design Modification



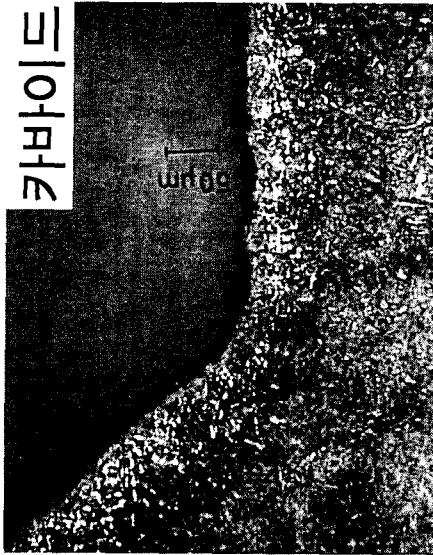
## • 시험품별 소재 및 열처리 품질

제조사	기존 외산품	M사					
		초도	1차	2차	3차	초도	D사
재질	SCr420	SCM435	SCM415	SCM415	SCM415	SCM415	SCM415
열처리	침탄	가스질화	침탄	침탄	침탄	침탄	침탄
표면경도 (HRC)	59.7	34.7 (HV686)	59.6	55	58.3	46.9	53.6
경화깊이 (mm)	0.7	(0.6)	1.3	0.7	1.1	0	0.3
내부경도 (HB)	306	249	269	260	266	260	306
비고			카바이드 석출	카바이드, 페라이트 다량 석출	카바이드 석출	경화 및 목부형상 불량	경화불량
							318
							60
							1.4



# Test & Design Modification

- 열처리품질 문제 개선



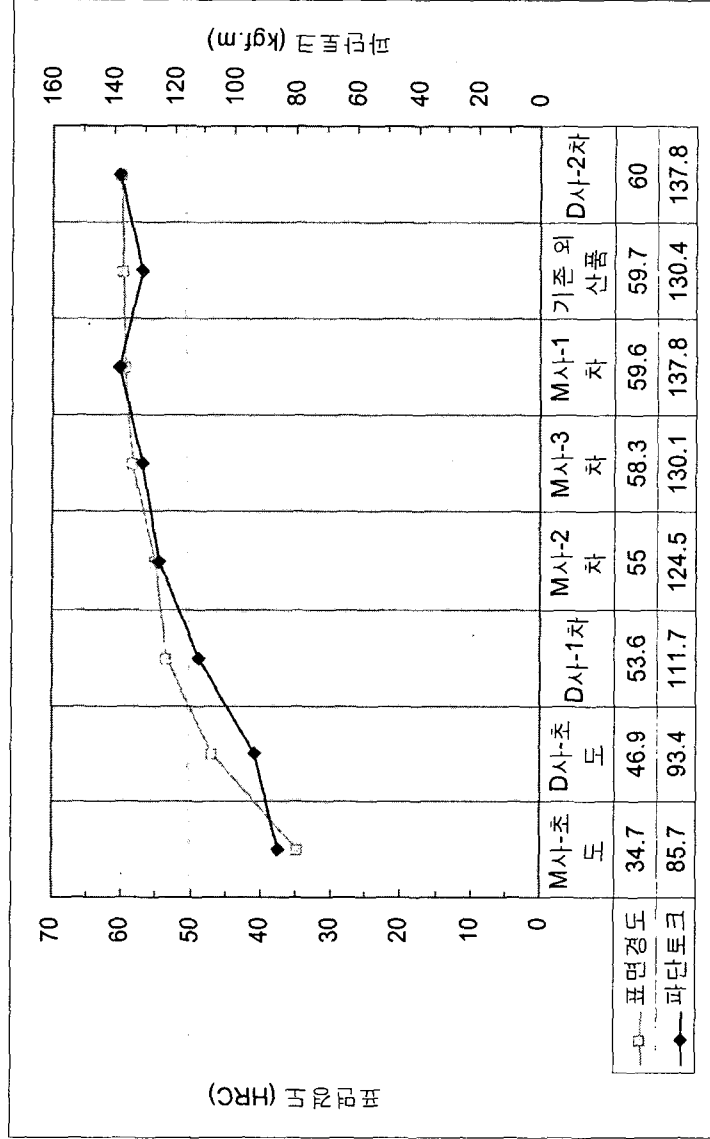
- 목부 형상 개선



# Design Freeze



## • 파단 토크와 표면 경도의 관계

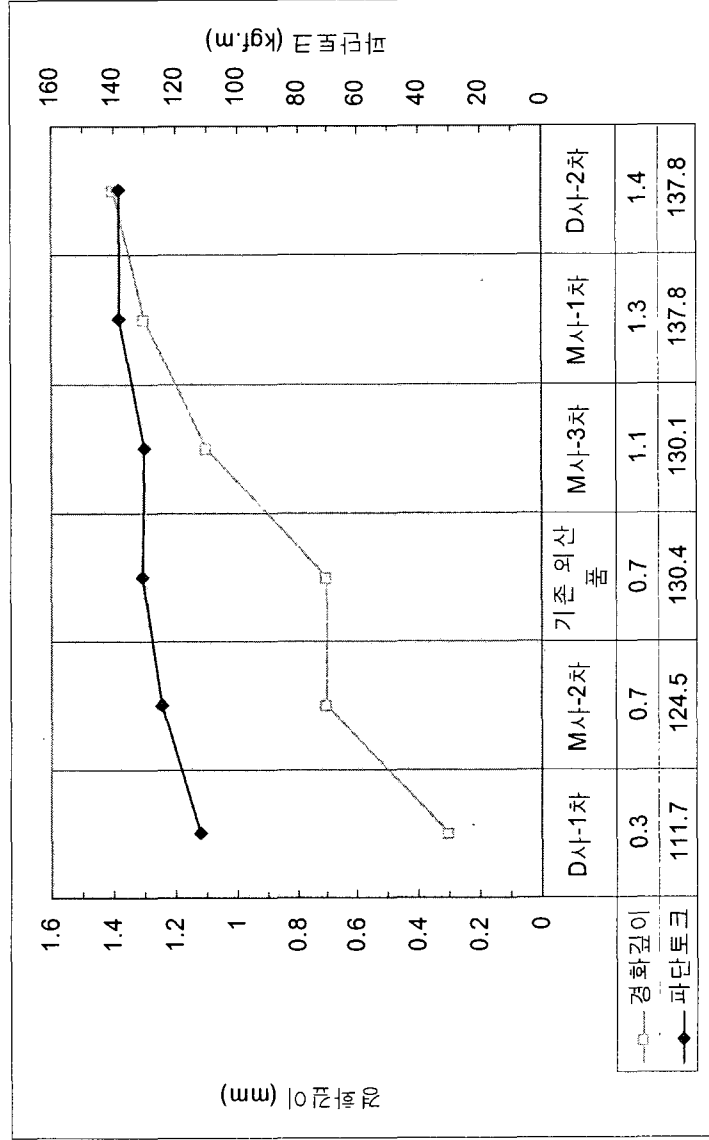


- 파단 토크는 표면 경도 증가에 따라 향상되는 경향을 나타냄
- 피로한도(ksi) ≒ 0.5X인장강도(<200 ksi) ≒ 0.5X경도(BHN<400)

# Design Freeze

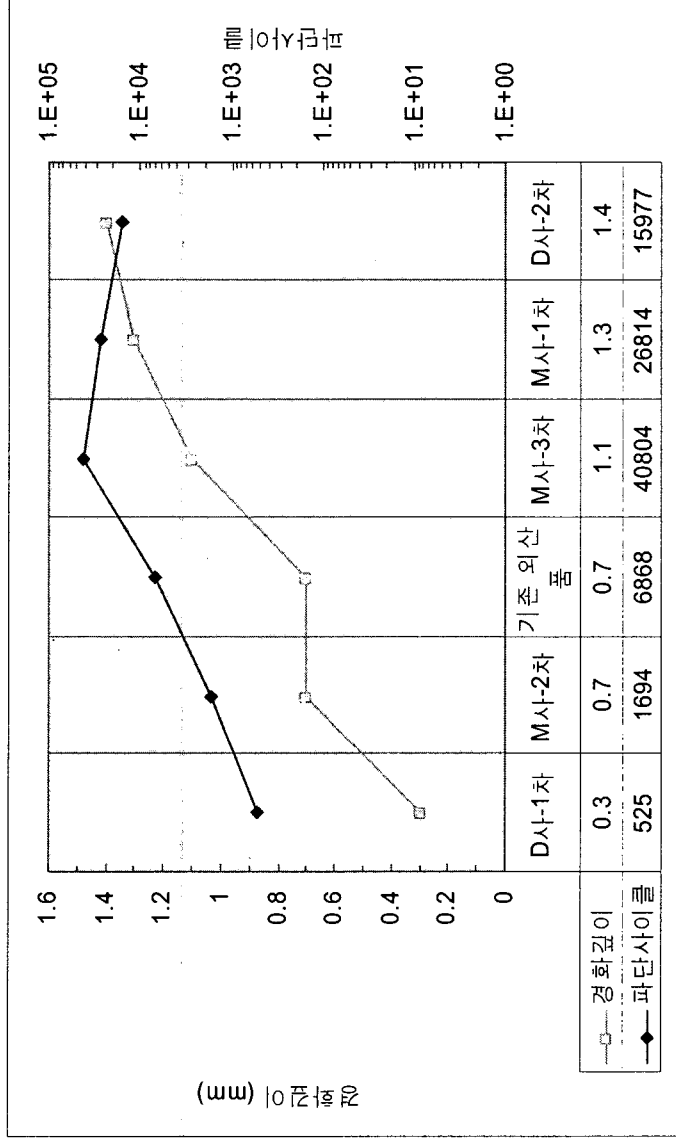


- 파단 토크와 경화 깊이의 관계



- 경화 깊이의 차이에 비해서 파단 토크의 증가 정도는 크지 않음

## • 파단 사이클과 경화 깊이의 관계

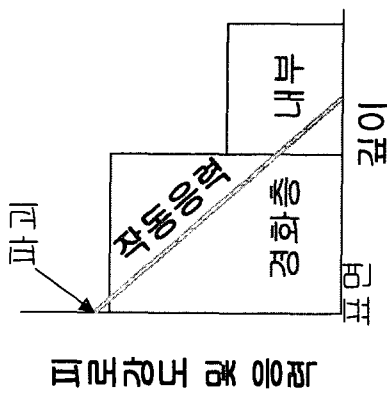


— 경화 깊이가 증가할수록 파단 사이클이 커지다가 일정 수준에 도달하면 감소하는 경향 → 과도한 경화깊이는 내구수명을 저하시킴

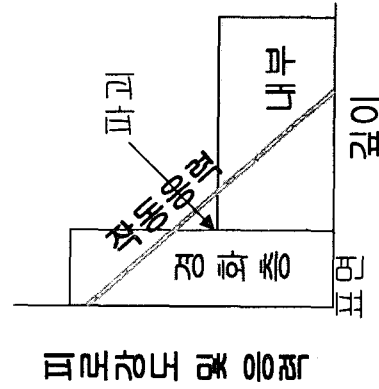
# Design Freeze



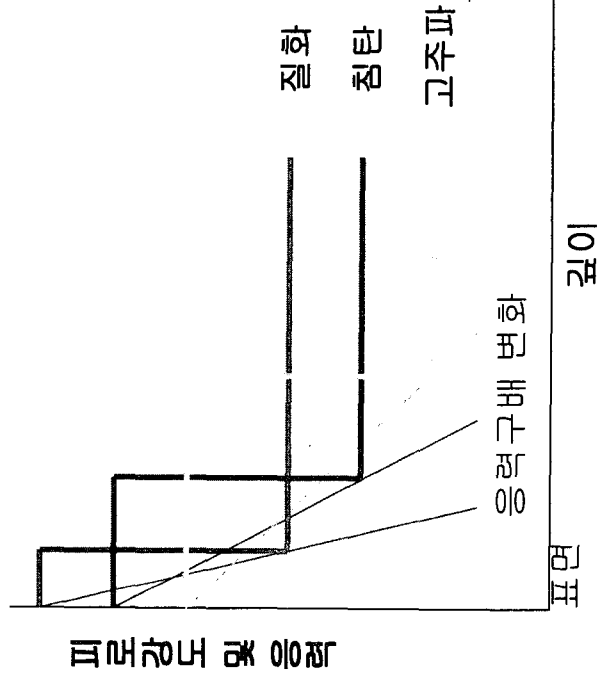
- 강제의 표면경화 종류에 따른 응력분포와 작동응력 (외력+잔류응력)의 관계



(깊은 경화층)



(얇은 경화층)



항목	고주파경화	침탄경화	질화
표면경도(HV)	500	700	1000
경화깊이(mm)	1~10	0.2~3	0.01~1
내부경도(HV)	250	300	350

## • EPS Output Shaft 가공 및 열처리 사양 결정

구분	Spec.	비고
재질	SCM415	
열처리사양	침탄 경화	
표면경도(HRC)	58~62	측정위치 -출력축 스플라인 기준
경화깊이(mm)	0.8~1.2	
경화부 결정입도	No.6 이상	
경화부 조직	마르텐사이트 (카바이드 석출량 5%이하)	경화깊이 측정 -치저부 90° 방향
내부경도(HB)	260 이상	
가공	R5	단차가 없을 것

# Production & Delivery



- 양산업체 선정
  - 최초 M사(K 열처리업체) 결정
  - 코스트 문제로 H사(D 열처리업체)로 변경

## • 시작품 평가 결과

구분	외산품 (개발목표)	기존 개발품	업체 변경품					
			1차	2차	3차	4차	5차	
파단 토크	T <sub>f</sub> (kgf·m)	130.4	130.1	129.3	122.4	123.2	124	143.1
	외산 대비	1.00	1.00	0.99	0.94	0.95	0.95	1.10
파단 사이클	N <sub>f</sub> (Cycle)	6,868	40,804	4,516	5,262	4,762	3,182	17,062
	외산 대비	1.00	5.94	0.66	0.77	0.69	0.46	2.48

- 1~3차 시작품 : R부 가공 품질 불량
- 2~4차 시작품 : 경화깊이 미달

## Conclusion



- Failure Analysis
  - 비틀림 응력이 작용하는 스플라인 사이의 형상적으로 취약한 목부에서 내구수명 부족으로 절손
  - 부적합한 열처리사양 및 Spec. 적용
  
- 내구성평가 Flow
  - Field Data(실차 작동 토크) 획득 및 시험조건(통상조건/가혹조건) 수립
  - 개발 목표(외산품 물성) 대비 국산품의 파단 토크와 파단 사이클 비교 및 개선
  - 시험결과 해석 및 품질 분석을 통한 제질/열처리/가공 최적사양 결정
  - 생산 및 Field Failure Monitoring
  
- 기존 외산품 보다 우수한 내구성을 갖는 국산품 개발