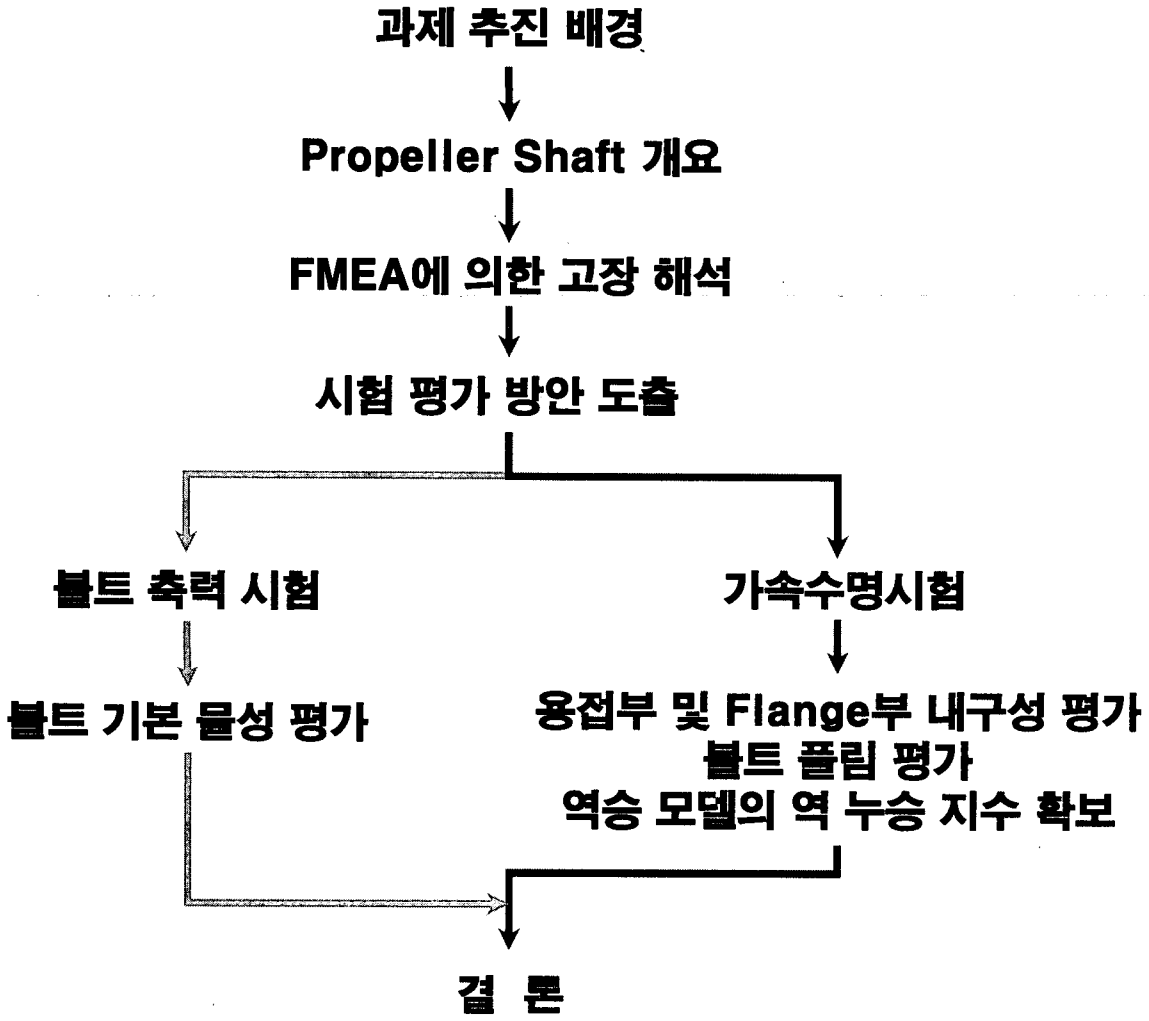
동력 전달용 Propeller Shaft의 신뢰성 평가

2005. 5. 26

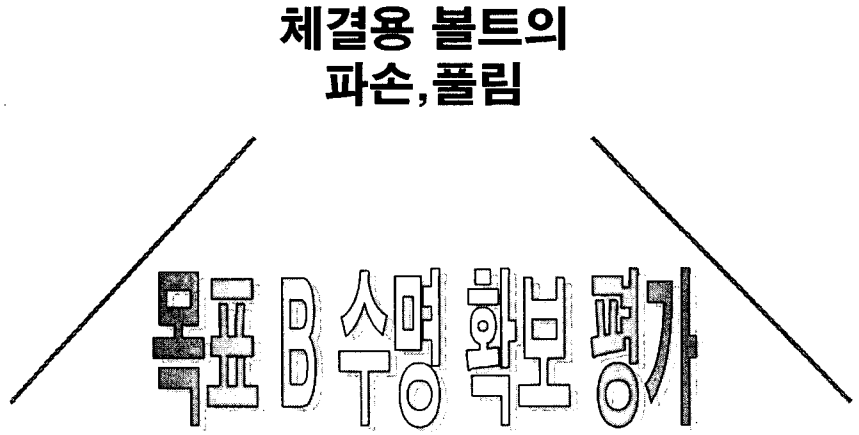
두산인프라코어(주) 신뢰성평가센터

발표 순서

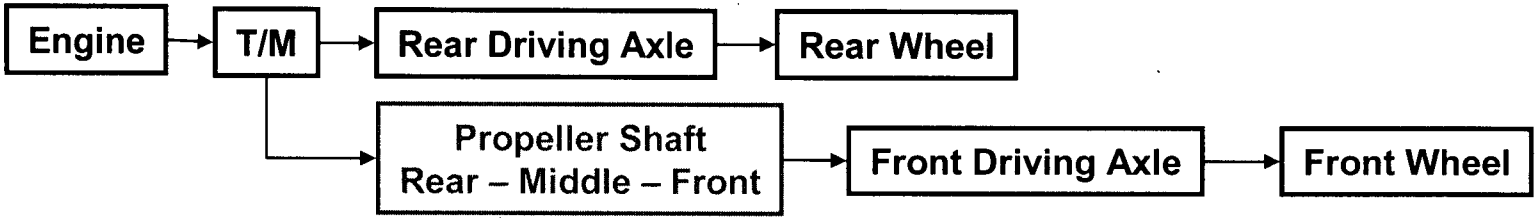

과제 추진 배경
Propeller Shaft 개요
FMEA에 의한 고장 해석
시험 평가 방안 도출
볼트 축력 시험
볼트 기본 물성 평가
가속수명시험
용접부 및 Flange부 내구성 평가
볼트 플림 평가
역승 모델의 역 누승 지수 확보
결 론

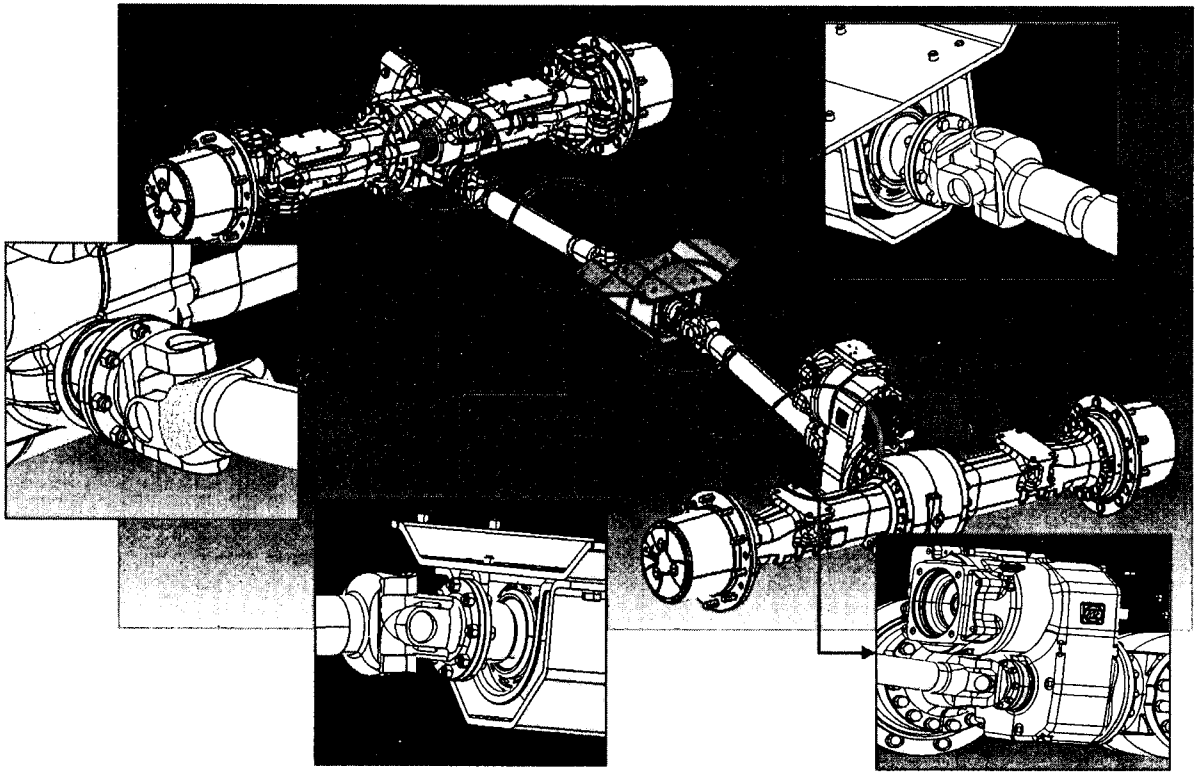
과제 추진 배경

Propeller Shaft 의 주 고장 부위인



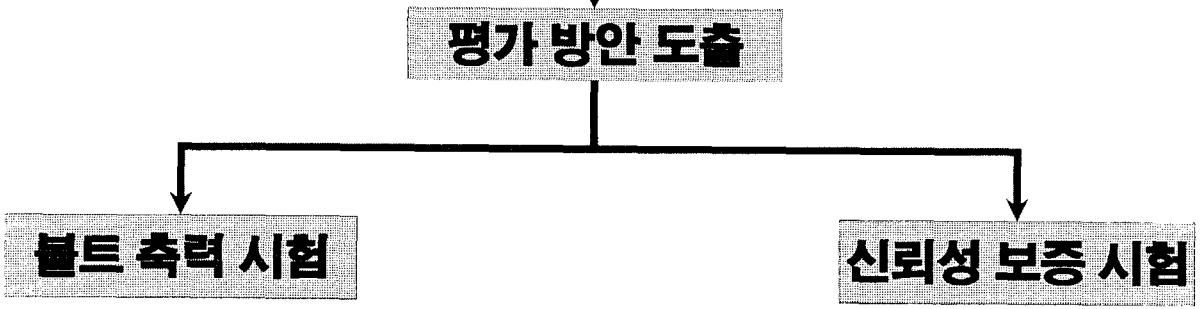
중장비 동력 전달 경로 및 평가부





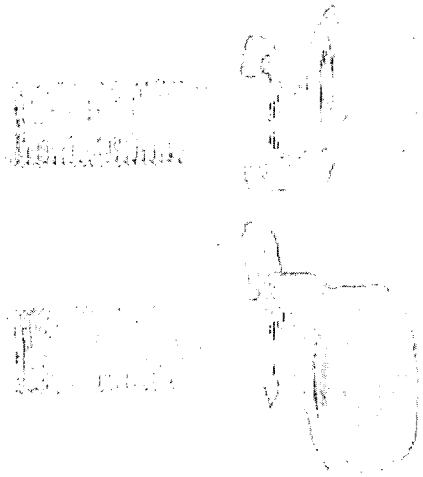
FMEA 평가 결과 요약

No	부품명	기능	잠재고장 모드	잠재고장 영향	심각도	잠재고장원인		발생도	현관리	검출도	RPN	Test
						Immediate	Root					
1	Bolt	Propeller Shaft 고정	풀림 균열	동력 전달 중지	8	풀림 파손	볼트 물성, 토르크	3	조임 토르크, 접착제 도포	5	120	볼트 축력 시험 비틀림 신뢰성 보증 시험
2	Tube & Yoke	Tube & Tube Yoke & Stub Shaft 연결	균열 파손	동일	8	균열 파손	용접 불량, 외부 진동, 토크	3	비파괴 검사	5	120	비틀림 신뢰성 보증 시험
3	Flange	TM & D/A 연결	균열 파손	동일	8	동일	외부 진동, 토크, 응력집중	2	해석 결과	5	80	비틀림 신뢰성 보증 시험



개선품 Propeller Shaft 의 양산 적용성 평가

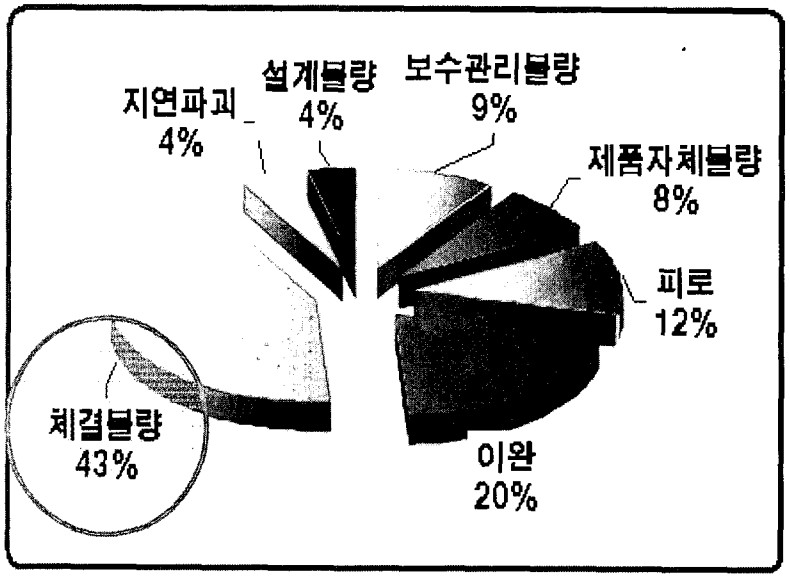
볼트 기본 물성 평가



볼트 하자 유형 및 발생 원인

■ 볼트 체결 하자 유형

→일본 나사연구협회 조사



■ 볼트 풀림 발생 주요 원인

▶부적절한 조임 토크

- 토크 기준 과소
- 조임 공구 불량
- 작업자 과실

▶체결 부품 불량

- 나사 치수 불량(볼트, 탭)

▶체결 조건의 부적합

- 체결 부품/방법/공구
- 체결 특성의 변화

볼트 체결 하자의 주 원인은 부적절한 축력에 기인함

볼트 체결 시 축력 – 토크 관계

■ 탄성역 체결시의 축력 – 토크 관계식

$$T = K \cdot F \cdot d$$

Where,

d : 볼트 호칭 지름
F : 축력
K: 토크 계수(자리면 및 나사 면의 마찰계수에 의존)

■ 마찰의 영향

$$W = W_D + W_F$$

Where,

W : 체결 시 행한 일(Work)
W_D : 볼트 및 피체결체의 변형 에너지
→ 볼트 축력 F에 비례
W_F : 마찰 손실 (자리면, 나사면)
→ W의 80~90%
→ 마찰(계수) 증가 시 손실 증가, K 증가
→ 동일 T 조건에서 F 감소

Propeller Shaft 체결용 볼트 사양

체결류	항목	양산품		개선품	
	위치	Front P/S		Rear P/S	
	체결부	D/A	M/S	M/S	T/M
Bolt	강도 등급	10.9			
	나사 호칭	M10 x 1.0			
	길이(mm)	30.0			
	적용 조임 토크(Kgf·m)	7.0			
	규정(DIN13) 조임 토크(Kgf·m)	7.8			
	표면처리	인산염	다크로	다크로	인산염
Nut	맞변폭(mm)	14.0		17.0	
	표면처리	아연	아연	인산염	인산염
최소 함복 축력(VDI 2230)		6 224.49 Kgf			
최소 인장 하중(KS B 0233)		6 846.94 kgf			

체결법 : 토크법

체결부 재질 : Rubber

볼트 축력 시험

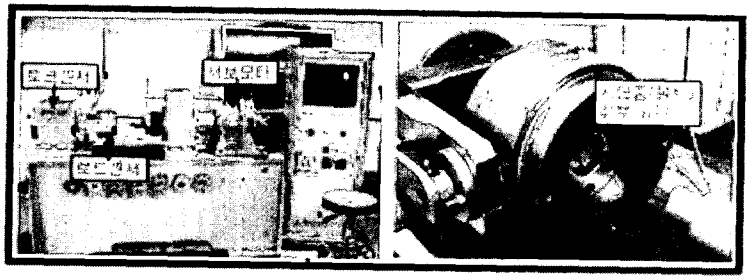
■ 볼트 축력 시험기 사양

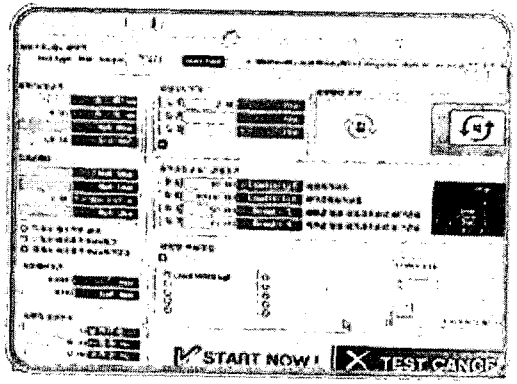
- 최대 축력 : 50 ton
- 최대 토크 : 200 kgf·m
- 최대 회전 속도 : 6.6 rpm

■ 시험 방법 : 토크 지정 시험

■ 시험 조건 :

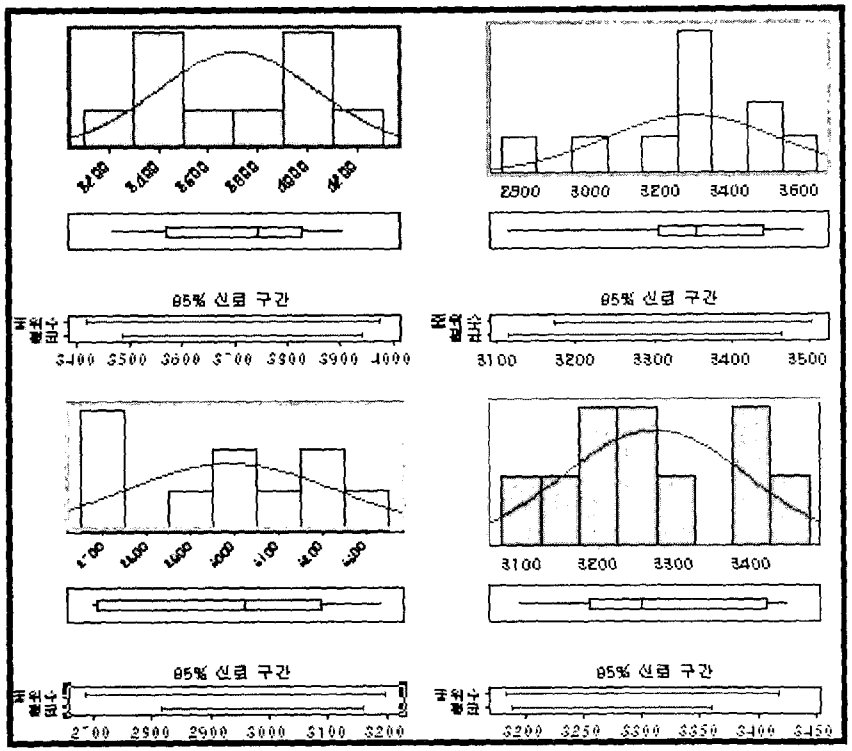
- 적용 토크 : 7 kgf·m
- 토크 속도 : 2 rpm
- 제한 하중 : 6 000 kgf
- 제한 각도 : 1 000 °





볼트 축력값 기술 통계량

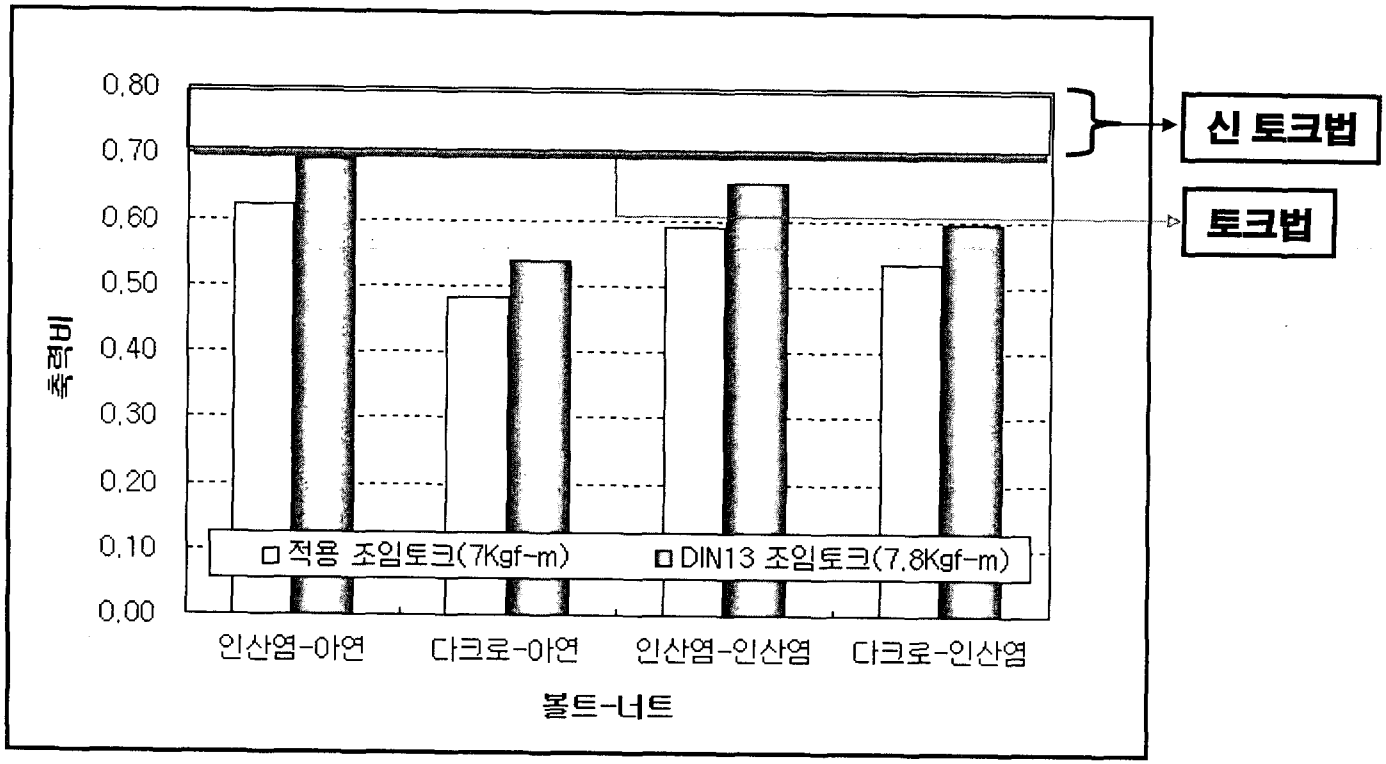
항 목	볼트 / 너트	인산염 / 아연	다크로 / 아연	인산염 / 인산염	다크로 / 인산염
A-제곱		0.42	0.39	0.44	0.35
P-값		0.254	0.31	0.228	0.386
평균		3712.8	2989	3290.6	3273.3
표준 편차		319	240.9	244.9	119.2
분산		101741.4	58027.9	59960.3	14213.2
왜도		-0.31474	-0.22874	-0.93642	0.25807
첨도		-1.49882	-1.38276	1.35883	-1.15543
N		10	10	10	10
최소값		3213.1	2676.1	2768.9	3096.7
제1 사분위수		3427.3	2687.2	3192.6	3187.6
중위수		3798.8	3022.5	3302.5	3255.7
제3 사분위수		3974.2	3196.2	3497.2	3417.9
최대값		4135.8	3334.6	3611.9	3444.2
평균의 95% 신뢰구간		3484.7~ 3941	2816.6~ 3161.3	3115.4~ 3465.7	3188~ 3358.6
중위수의 95% 신뢰구간		3416.6~ 3974.9	2686.4~ 3198.1	3174.9~ 3503.6	3183.9~ 3417.9
표준 편차의 95% 신뢰구간		219.4~ 582.3	165.7~ 439.8	168.4~ 447	82~ 217.6



평균 축력 크기 : 인산염-아연 > 인산염-인산염 > 다크로-인산염 > 다크로-아연

축력 분산 정도 : 다크로-인산염 > 인산염-아연 > 인산염-인산염 > 다크로-아연

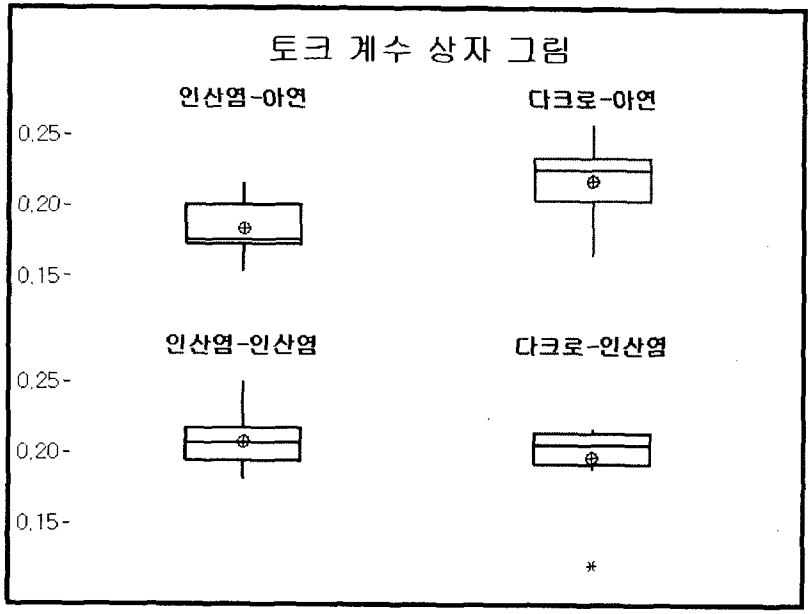
볼트 축력비 평가 결과

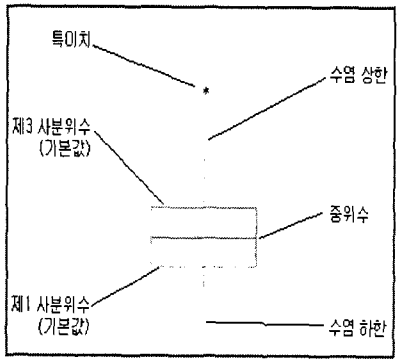


평균 축력비 : 인산염-아연 > 인산염-인산염 > 다크로-인산염 > 다크로-아연

62%　　59%　　54%　　48%

볼트 토크 계수 평가 결과





특이치: 직사각형의 1.5배 초과한 데이터

수염상한: 최대치

수염하한: 최소치

제1사분위수:1/4 하한의 값(25% 지점)

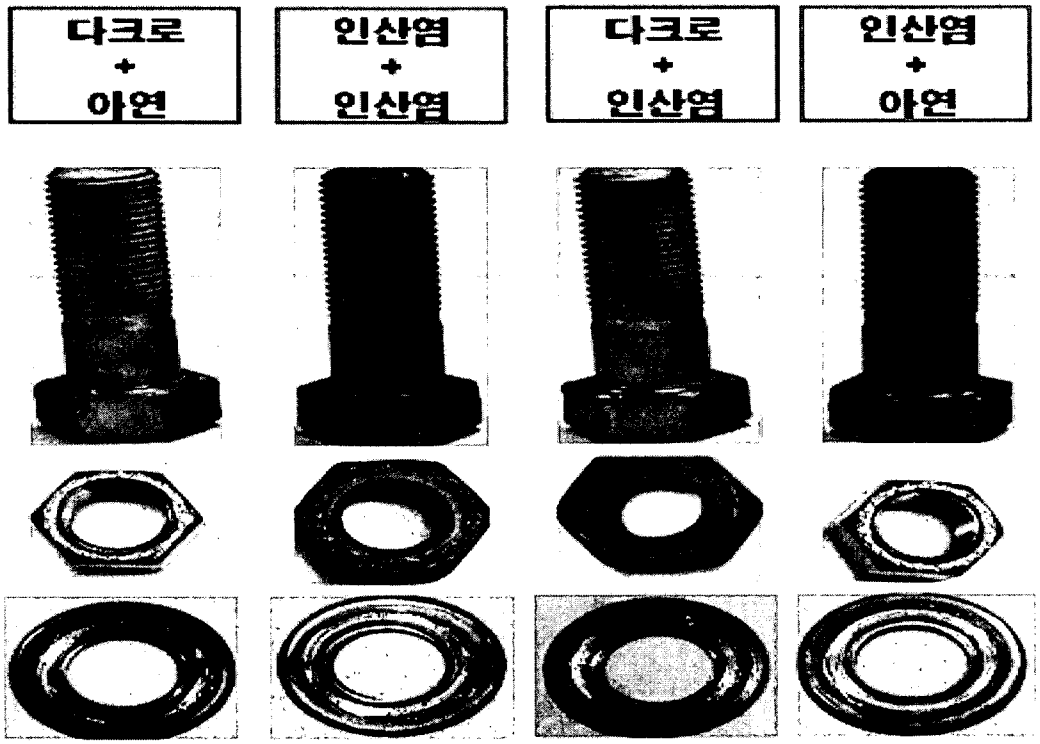
제3사분위수:1/4 상한의 값(75% 지점)

	인산염-아연	다크로-아연	인산염-인산염	다크로- 인산염
중위수	0.176	0.225	0.207	0.206
평균	0.184	0.218	0.208	0.197

평균 토크계수 : 다크로 - 아연 > 인산염-인산염 > 다크로-인산염 > 인산염 –아연

¼ 상한, 하한 기준 토크 산포 : 다크로 –인산염 > 인산염-인산염 > 인산염-아연 순

볼트 축력 시험 후 사진



마찰 계수 크기

볼트 물성 평가 결과

■ 맞변 폭 크기 증가와 인산염 피막 처리를 한 개선품은 양산품과 비교하여 축력의 산포는 상대적으로 적으나, 적정 축력의 확보에는 큰 영향이 없음

■ 토크 계수는 강재 볼트 및 피 체결물의 적정 토크 계수 범위로 평가됨

■ 실제 차량에서 피 체결물의 재질이 고무인 Middle P/S 와 체결되는 다크로 볼트와 인산염 너트(개선품)에서는 평가 결과 보다 마찰의 영향에 의한 토크 계수가 높기 때문에 볼트 풀림의 가능성이 큼

■ 개선품과 양산품 모두 볼트 축력 평가 결과 탄성역 체결에서 토크 체결법의 권장 축력 비(80 %)를 만족 못함

■ 개선품의 설계 변경 효과는 볼트의 기본 물성 평가 기준을 만족 하지 못함

용접부,Flange부 및 볼트의 신뢰성 평가

신뢰성 시험 설계

수 명 분 포	▶	Weibull
Failure Mode	▶	Crack, Bolt 절손 및 풀림
Failure Mechanism	▶	Fatigue
Main Stress	▶	Torque, Vibration
수명 평가 척도	▶	B10 Life

Duty Cycle

Field Usage Condition	I	II
TM Input Torque (kg-m)	54.9	
Gear	1st	2nd
Gear Ratio	4.868	1.196
Axle당 Input Torque (kg-m)	133.7	32.8
사용 시간 점유율 (%)	5	25
보증시간 (Hr)	10000	
사용시간 (Hr)	500	2 500
시간당 회수	600	360
총회수	300 000	900 000
Damage	1.28E+16	3.44E+13
등가 Torque (kg-m)	101.4	

$$\text{Torque (kgf·m)} = \frac{P \cdot Q}{200 \cdot \pi}$$

Driving Motor

>Q : Max. Displacement(107 cc)
>P : Pressure(350 Kgf/cm^2)

Transmission

> 1st Ratio Efficiency(0.95)
> 2nd Ratio Efficiency(0.97)

신뢰성 시험 조건

DOOSAN Infracore

가속 시험 조건 및 실사용조건

F & T Condi. ＼ T.R.			Torque Range (Kg·m)
Field Usage Condition			101.37
Test Condition	Case	I	133.69
		II	267.37
		III	382.49

가속 모델

> **Inverse Power Model (n=5)**

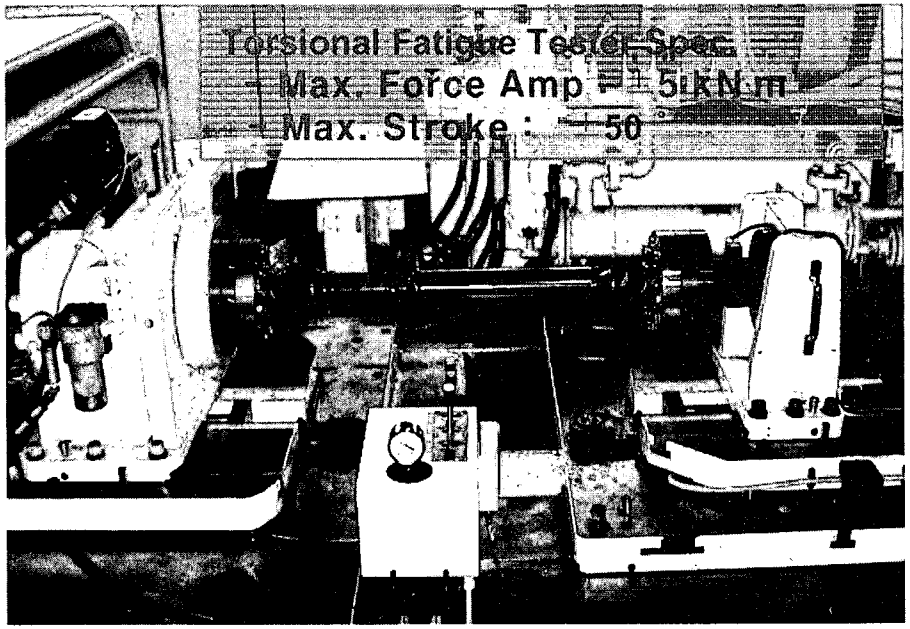
$$AF = \left(\frac{\tau_{(test)}}{\tau_{(field)}} \right)^{n}$$

시료수와 시험시간의 결정 Table

Case	I		II		III	
시료수 n	1	2	1	2	1	2
허용고장수 rf	0					
형상모수 β	3					
신뢰수준 P(%)	70					
보증 수명 Bx x(%)	10					
보증 Bx Life Bx (Cycle)	1,200,000					
사용율 적용 보증 수명 Bxur (Cycle)	1,200,000					
사용율 Ur(%)	100					
가속 계수 AF	4		128		765	
사용조건 시험거리 h (Cycle)	2 702 885	2 145 281	2 702 885	2 145 281	2 702 885	2 145 281
가속조건 시험거리 h (Cycle)	677 536	537 761	21 173	16 805	3 534	2 805
보증 시간(Hr) (기준: Frequency 5 Hz)	37.64	29.88	1.18	0.93	0.20	0.16

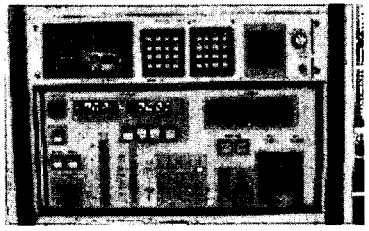
Estimated Test Time

신뢰성 시험 사진

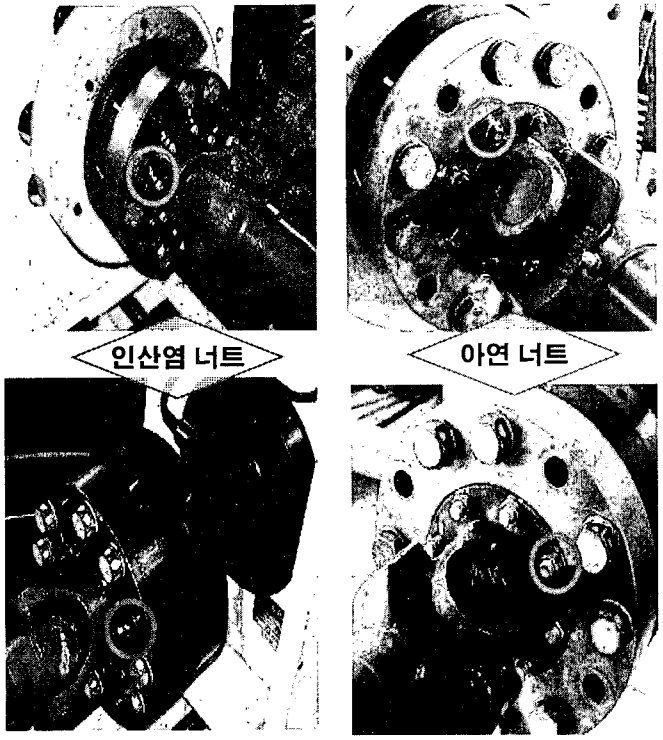


Test Condition :

- 하중 : Case I, II, III
- 파형 : Sine Wave
- 주파수 : 5 Hz



볼트 풀림 평가



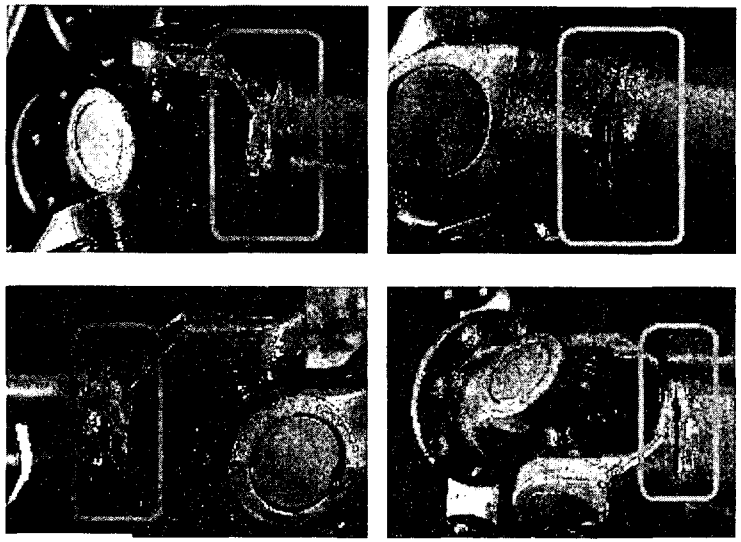
신뢰성 시험 결과

DOOSAN Infracore

내구 시험 결과

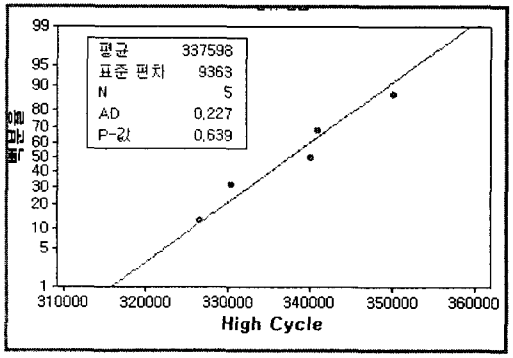
Case		I	II	III
Torque (kgf·m)		133.7	267.4	382.5
용접부 N_f (Cycle)	시료 1	No Crack	340 010	87 404
	시료 2	No Crack	326 500	74 109
	시료 3	No Crack	330 323	80 204
	시료 4	No Crack	350 127	79 434
	시료 5	No Crack	341 029	83 249
볼트 풀림	시료1,2,3,4,5	No Looseness		

파손부 사진

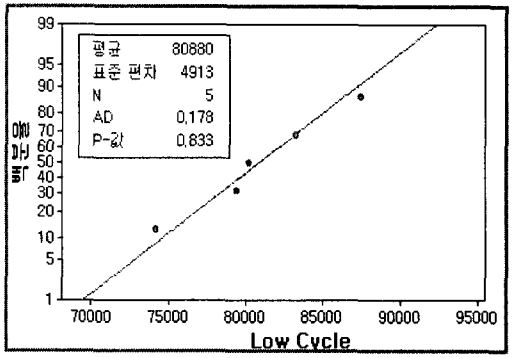


역승 모형의 재료 상수 도출

■ 정규성 검증



P=0.05 이하

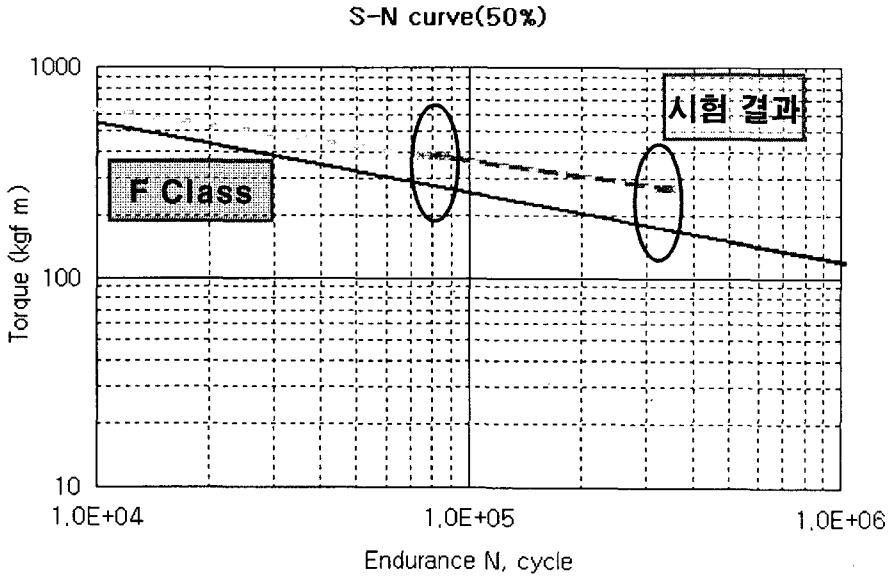


■ 역 누승 지수 결과

구분	평균	표준편차	n	비고
Low Cycle	80 880	4 913.48	3.99	BS7608(F) n=3.03
High Cycle	337 597.8	9 362.91		

F Class $S = 11\,468.0\,N^{-0.3305}$

시험 결과 $S = 6\,489.4\,N^{-0.2505}$



신뢰성 시험 시간 수정

Case	I		II		III	
시료수 n	1	2	1	2	1	2
허용고장수 rf	0					
형상모수 β	3					
신뢰수준 P(%)	70					
보증 수명 Bx x(%)	10					
보증 Bx Life Bx (Cycle)	1,200,000					
사용율 적용 보증 수명 Bxur (Cycle)	1,200,000					
사용율 Ur(%)	100					
가속 계수 AF	4		128		765	
사용조건 시험거리 h (Cycle)	2 702 885	2 145 281	2 702 885	2 145 281	2 702 885	2 145 281
가속조건 시험거리 h (Cycle)	677 536	537 761	21 173	16 805	3 534	2 805
보증 시간(Hr) (기준: Frequency 5 Hz)	37.64	29.88	1.18	0.93	0.20	0.16

역 누승 지수 5 → 3.99 적용

Case	I		II		III	
시료수 n	1	2	1	2	1	2
가속 계수 AF	3		48		203	
사용조건 시험거리 h (Cycle)	2 702 885	2 145 281	2 702 885	2 145 281	2 702 885	2 145 281
가속조건 시험거리 h (Cycle)	893 534	709 199	55 846	44 325	13 335	10 584
보증 시간(Hr) (기준: Frequency 5 Hz)	49.64	39.40	3.10	2.46	0.70	0.60

Tube & Yoke 용접부 및 Flange부 신뢰성 보증 시험 조건 만족

결 론

DOOSAN Infracore

볼트 기본 물성 평가

■ 프로펠라 샤프트의 체결부 볼트는 기본 물성을 확보하지 못함

■ 프로펠라 샤프트의 볼트 풀림에 대한 역승 모델 선도는
용접 및 플랜지부 보다 Slope가 완만한 것으로 평가됨

용접부 및 플렌지부 평가

■ 역승 모델을 이용한 가속수명시험을 통해 프로펠라 샤프트의
역 누승 지수는 3.99 로 평가됨

■ Tube & Yoke 맞대기 용접부 및 플랜지 곡률부는
신뢰성 보증 시험 조건을 만족함