

축계비틀림진동 프로그램 TRATOVI

김 태 언/선박검사기술협회 연구개발부

1. 개 요

축계비틀림진동프로그램은 디젤기관을 장착하는 선박의 추진축계 및 발전기를 구동하는 추진장치의 비틀림진동에 관한 고유진동수의 계산 및 부가응력을 계산하여 축계의 안전성 검토를 목적으로 한다. 본회는 이번에 기존 에너지법으로 계산되던 비틀림진동프로그램 『TOVI』 대신에 전달매트릭스 법으로 계산이 되는 『TRATOVI』(한국해양대학교, 전효중교수)를 구입하였다.

『TRATOVI』는 직렬 엔진이나 V형 엔진을 한대 또는 한대이상 장비한 직렬단순축계나 분지축계의 비틀림 자유진동 및 강제감쇠비틀림진동을 계산하는 전산 프로그램으로서 주로 PC용으로 개발된 것이다.

자유진동 계산은 축계의 고유진동수와 그들의 비진폭을 계산할 수 있으며 강제감쇠진동은 강제진동의 진폭과 비틀림 토크 및 그로 인한 응력을 계산할 수 있다.

계산 자료의 입력과 그의 교정은 강제진동의 계산과정에서 상호 연계하여 내부에서 이루어진다.

계산에 있어서는 다음과 같은 사항들이 고려되었다.

- 엔진의 기진력으로서 가스폭발압력과 왕복부분의 관성력(한대 이상의 엔진을 탑재할 경우에는 이들간의 위상각을 고려

한다)

- 프로펠러 기진력(가스 폭발압력에 의한 기진력 토크와 프로펠러 기진력 토크와의 위상차를 고려할 수 있다)
- 감속치차
- 탄성커플링
- 진동댐퍼
- 발전기
- 프로펠러
- PTO

또한 계산의 대상이 되는 것은

- 고유진동수와 그들의 비진폭
- 공진차수와 공진 회전수
- 자유진동의 벡터합
- 강제 감쇠진동
- 단일 차수의 진동토크와 그들의 합성치
- 단일 차수 비틀림 진동 진폭과 그들의 합성치
- 단일 차수의 비틀림 진동 응력과 그들의 합성치
- 탄성 커플링과 진동 댐퍼의 소산에너지
- 중요 선급의 진동 응력 제한치의 제시와 진동계산 결과와의 대비
- 중요 선급의 진동토크 및 진폭 제한치의 제시와 진동 결과와의 대비
- 탄성 커플링과 댐퍼의 비선형 특성의 고려 계산 결과를 내부에 저장하여 필요에 따라 표나 그림으로 표시하도록 한다.

2. 전산 프로그램의 일반적 사항

2.1 계산에 필요한 HARDWARE와 SOFTWARE

계산기	PENTIUM PRO-III 이상
속도와 기억용량	300MHz, 2.0 휴 HDD 이상
운용 SOFTWARE	계산 지원용 SOFTWARE : Power Fortran 그래픽용 SOFTWARE : Origin

2.2 프로그램을 운용하기 전에 준비할 사항

프로그램을 운용하기 전에 다음 사항을 유의하여야 한다.

FORTAN 언어에 익숙하지 않은 사람은 먼저 FORTAN 언어의 운용과 입력자료의 입력방법에 대한 기초적 지식과 훈련이 필요하다. 왜냐하면 본 「TRATOVI」 프로그램은 FORTAN 언어로 쓰여져 있기 때문이다.

특히 계산자료의 올바른 입력은 올바른 계산 결과를 얻는데 결정적 영향을 미치기 때문에 이에 대한 훈련이 필수적이다. 계산자료의 입력은 PC에 직접 입력하는 것이 편리하고 시간도 절약되나 훈련이 되기까지는 오류를 일으켜서 오히려 시간의 낭비를 초래할 수 있으므로 코딩 시트에 일단 기록한 다음 이것에 의하여 입력하는 것이 오히려 편리하고 오류를 방지하는데 도움이 된다.

2.3 사용단위

사용단위는 다음과 같이 원칙적으로 SI 단위를 사용한다. 다만, 지금까지는 공학단위를 사용하여 왔으며 과거에 이용하던 많은 자료들이 아직도 공학단위로 표시되는 경우가 많으므로 이것의 SI 단위로의 변환에 유의하였으나 일부는 공학 단위를 사용하되 프로그램 내에서 변환 계산을 한 경우도 있으므로 주의

를 요한다.

길이	MM	질량모멘트	KG.M ²
질량	KG	감쇠	N/(RAD/SEC)
각도	degree, radian(MRAD)	비틀림 스프링 상수	NM/RAD
압력	BAR, PASCAL(N/MM ²)	응력	N/MM ²
힘	N	강도	N/MM ²
토크	N.M, KN.M, MN.M	동력손실	kW
출력	BHP, PS, kW		

3. TRATOVI로 계산할 수 있는 SYSTEM(SAMPLE)

- 3.1 직렬형 5시린더 3행정 디젤엔진에 의하여 고정피치 프로펠러 구동하는 단 순축계
- 3.2 V형 12시린더 4행정 디젤엔진에 의하여 감속장치를 거쳐 가변피치를 구동하는 축계로서 슬리브 스프링형 댐퍼 1개, 탄성커플링을 갖는 경우
- 3.3 V형 16시린더 4행정 디젤엔진에 의하여 감속장치를 거쳐 가변피치를 구동하는 축계로서 크랭크축 선단으로 펌프를 구동하며 탄성커플링 1개, 점성 댐퍼를 갖는 경우
- 3.4 직렬형 5시린더 2행정 디젤엔진에 고정피치 프로펠러를 구동하고 1개의 점성댐퍼를 갖는 축계로서 1개의 PTO 분지계를 갖추고 있으며 분지계에는 3개의 탄성커플링이 설치되어 있는 경우
- 3.5 직렬형 실린더 2행정 디젤엔진에 의하여 고정피치 프로펠러를 구동하고 1개의 점성댐퍼를 갖는 축계로서 1개의 PTO 분지계를 갖추고 있으며 분지계에는 3개의 탄성커플링이 설치되어 있는 경우
- 3.6 직렬형 8실린더 디젤엔진 2대를 감속 장치로 가변피치 프로펠러를 구동하는 축계로서 각 엔진은 1개의 PTO 분지계를 갖추고 각각 1대의 발전기 구동.

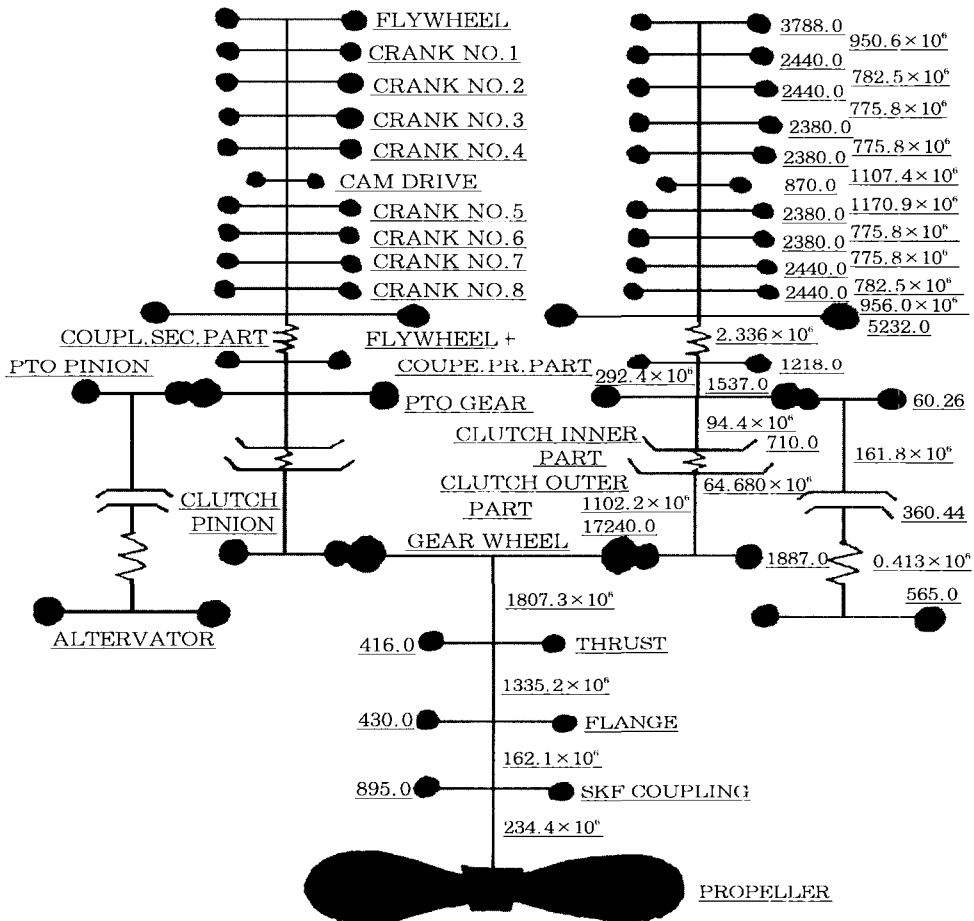
각 PTO와 엔진은 1개의 탄성커플링을 갖춤

3.7 직렬형 6실린더 4행정 디젤엔진에 의하여 감속장치를 거쳐 고정피치 프로펠러를 구동하는 축계로서 크랭크축계

에는 비선형 탄성커플링과 점성댐퍼가 설치되어 있는 경우

3.8 직렬형 6실린더 4행정 디젤엔진에 의하여 직결 구동되는 교류발전기 장치의 경우

4. 계산 예(2기 1축)



ENGINE TYPE	2-STROKE CYCLE DIESEL ENGINE HITACHI B&W 8L55GFCA
OUTPUT AT MCR	10500PS×155RPM
CYLINDER BORE	550mm
STROKE	1380mm
NO. OF CYLINDER	8
MEAN EFFECTIVE PRESSURE	15BAR

- (1) 주기 : HITACHI B&W 8L55GFCA 2대
- (2) 축계 : 주기 2대 + 감속장치 1대 + 클러치 2개 + PTO 2개 + 프로펠러(총질점45개)
- (3) 탄성커플링 : PTO 분지계에 각 1개 (PNE-UMAFLEX KAD 320)→계 2개 주기에 각 1개 → 계 2개 총계 4개
- (4) 탄성축 : 각 감속치차에 탄성축 (QUILL SHAFT) (LOHMANN + STOLTERFOHT, KUG490) 1개 → 계 2개
- (5) 진동댐퍼 : 없음
- (6) 분지계 : 3개
- (7) 계산내용

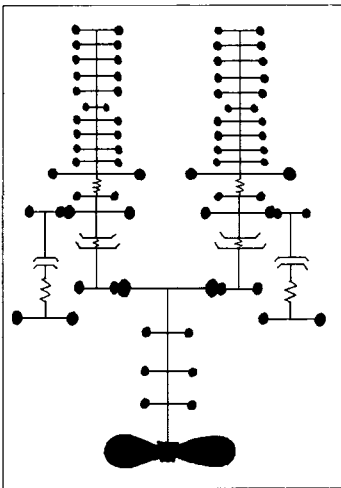
본 시스템에 대하여서는 6가지 운전 모드를 생각할 수 있으며 이들의 각각에 대하여 착화 실패시의 운전을 고려하여야 한다. 또한, 가변피치 프로펠러를 장착하고 있으므로 피치 최대시와 피치 0에 대한 진동계산이 필요하다. 위의 계산에 더하여 엔진이 2대이므로 엔진의 기진력 위상차이에 대한 검토가 필요하다. 따라서, 위에서 열거한 모든 계산을

을 행할 경우 수십 종류의 계산이 필요하게 된다. 본 계산에서는 6가지 운전 모드와 그들에 대한 착화 실패시의 계산만을 보인다. 프로펠러 피치는 피치 최대에 대한 계산만을 행하며 피치 0시의 계산은 피치 0에 대한 프로펠러 관성질량 모멘트가 불명하므로 생략한다. 또한 엔진간의 기진력 위상차이에 대한 계산은 실제로 0°, 90°, 180°에 대하여 계산을 수행하여 비교하여 본 결과 위상차가 0°일 경우와 그렇지 않을 경우의 차이가 별로 없었기 때문에 여기에는 계산 결과를 제시하지 않는다.

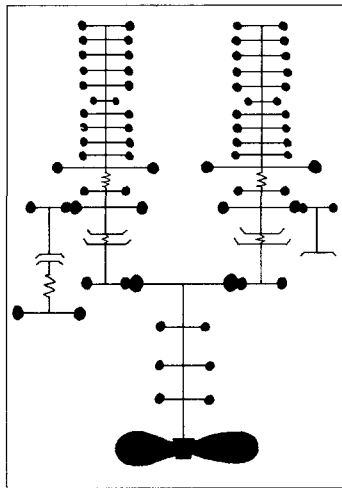
(8) 운전모드의 종류

배의 속도조절은 가변피치 프로펠러에 의한다. 엔진 회전속도는 일정히 유지되며 따라서 부하상태의 변속도 진동계산은 실제보다 크거나 같게 된다.

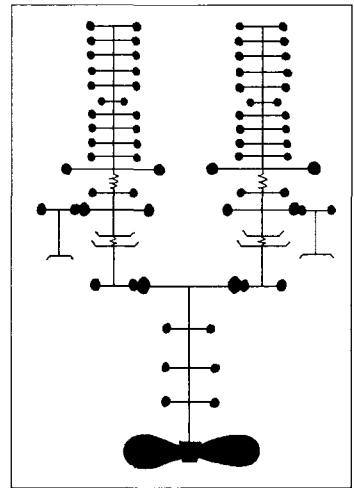
- 1) 제1운전 모드 : 엔진 2대 + PTO 발전기 2대 + 프로펠러
- 2) 제2운전 모드 : 엔진 2대 + PTO 발전기 1대 + 프로펠러
- 3) 제3운전 모드 : 엔진 2대 + 프로펠러
- 4) 제4운전 모드 : 엔진 1대 + PTO 발전기 1대 + 프로펠러



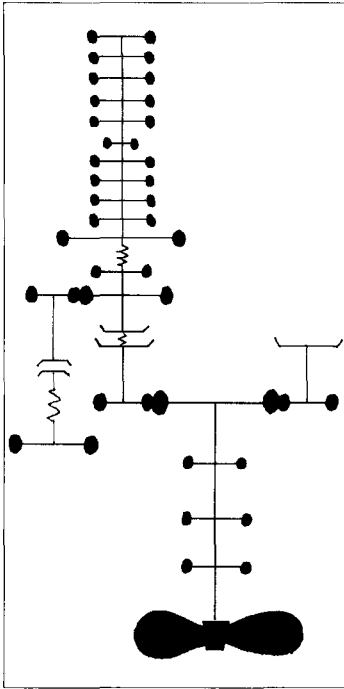
제1운전 모드



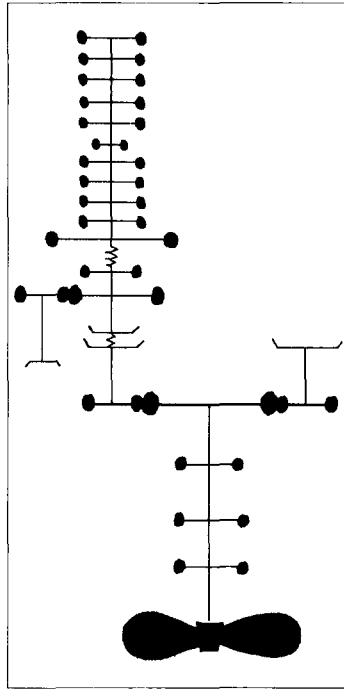
제2운전 모드



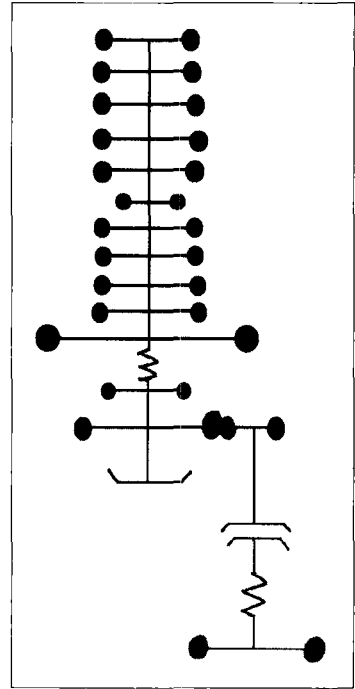
제3운전 모드



제4운전 모드



제5운전 모드



제6운전 모드

- 5) 제5운전 모드 : 엔진 1대 + 프로펠러
- 6) 제6운전 모드 : 엔진 1대 + PTO 발

서는 다룬다.

각 운전모드에 대하여 모두 계산하면, 분량이 너무 많아 제3운전모드에 관해서만 본문에

4.1 제3운전 모드

4.1.1 정상착화시의 강제진동 계산

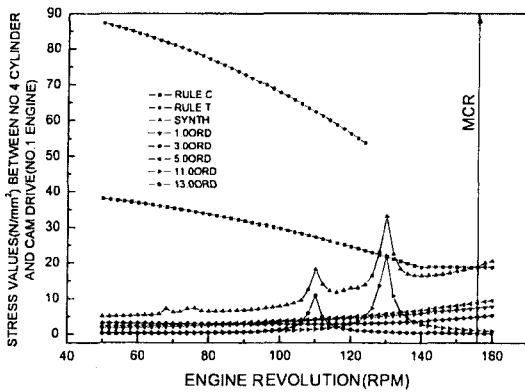


FIG1. STRESS OF CRANKSHAFT (NO. 1 ENGINE)

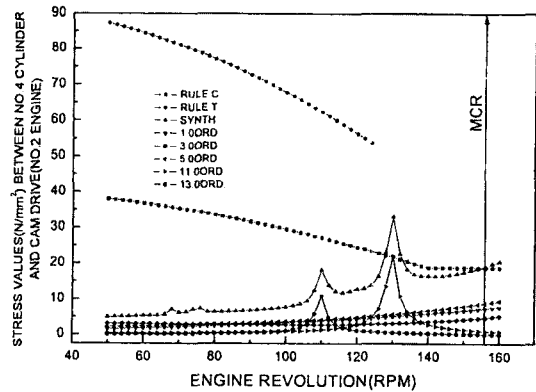


FIG2. STRESS OF CRANKSHAFT (NO. 2 ENGINE)

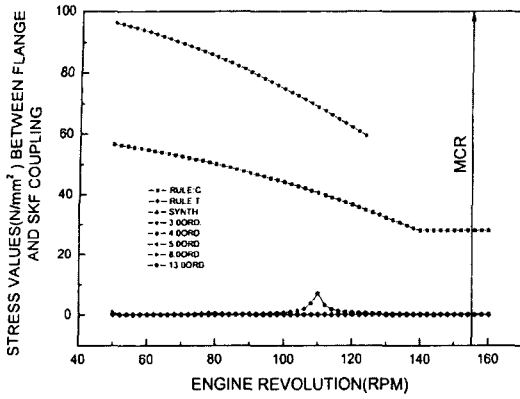


FIG3. STRESS OF INTERMEDIATE SHAFT

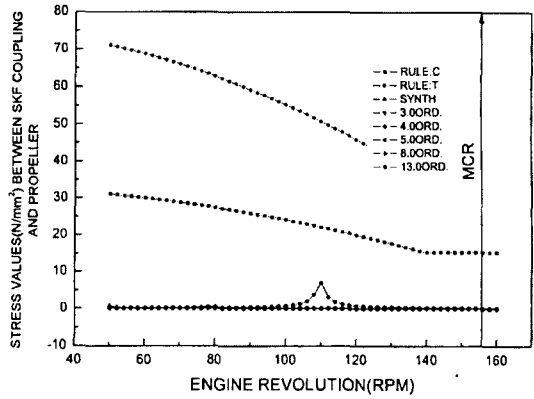


FIG4. STRESS OF PROPELLER SHAFT

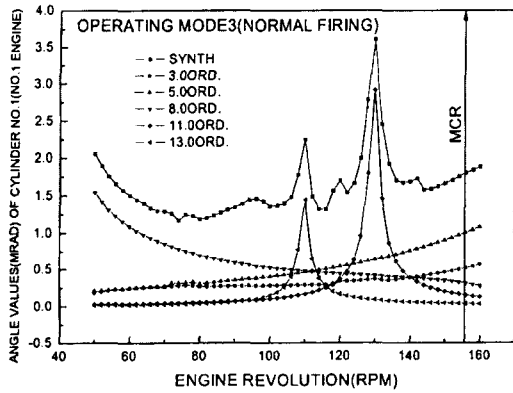


FIG5. TORSIONAL AMPLITUDE OF CRANKSHAFT FORE-END (NO. 1 ENGINE)

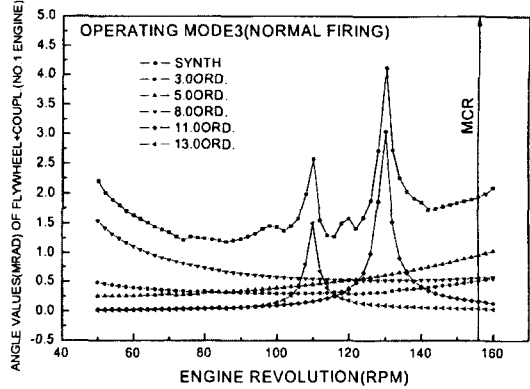


FIG6. TORSIONAL AMPLITUDE OF FLEXIBLE COUPLING (NO. 1 ENGINE)

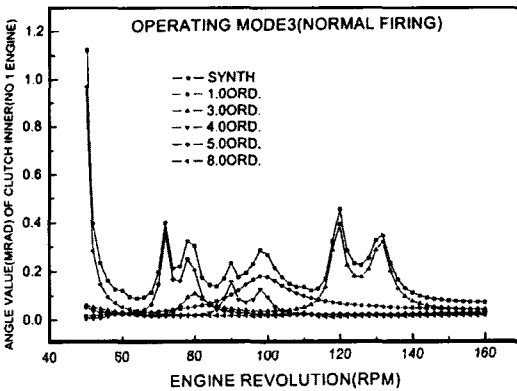


FIG7. TORSIONAL AMPLITUDE OF CLUTCH INNER (NO. 1 ENGINE)

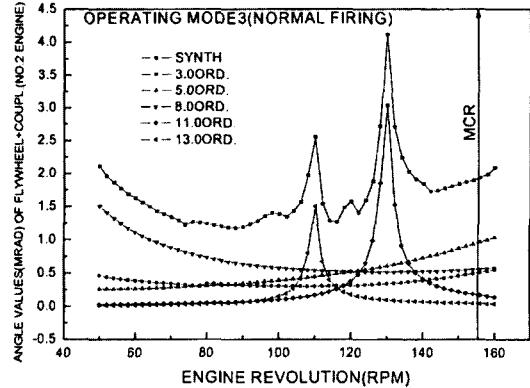


FIG8. TORSIONAL AMPLITUDE OF FLEXIBLE COUPLING (NO. 2 ENGINE)

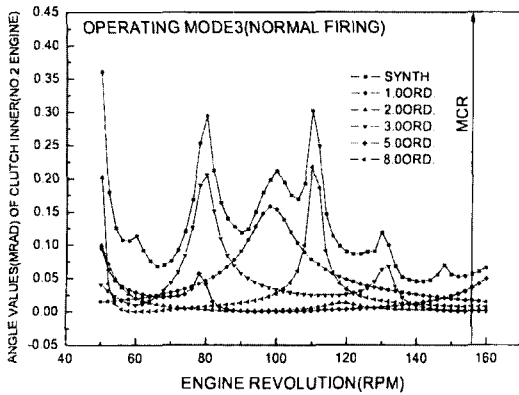


FIG9. TORSIONAL AMPLITUDE OF CLUTCH INNER(NO.2 ENGINE)

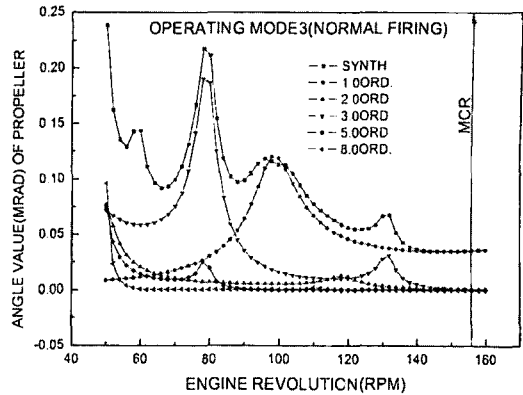


FIG10. TORSIONAL AMPLITUDE OF PROPELLER

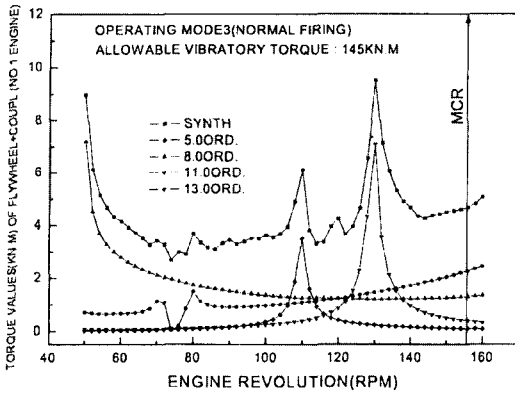


FIG11. VIBRATORY TORQUE OF FLEXIBLE COUPLING(NO.1 ENGINE)

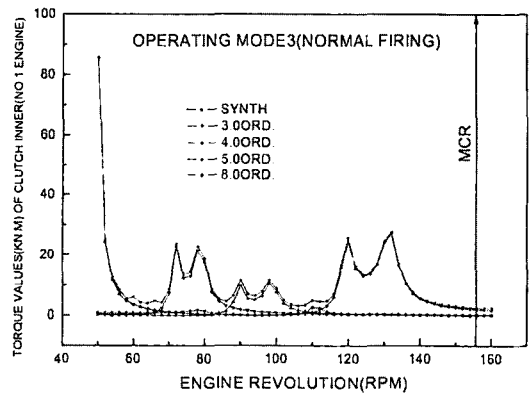


FIG12. VIBRATORY TORQUE OF CLUTCH INNER(NO.1 ENGINE)

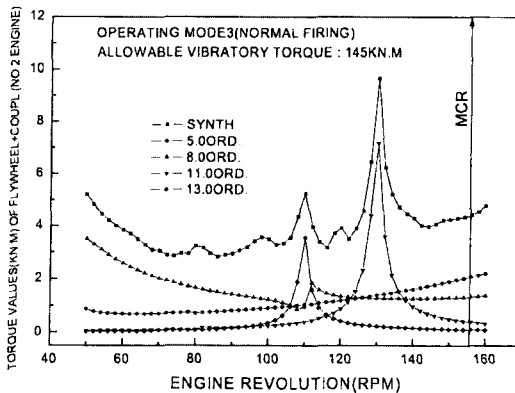


FIG13. VIBRATORY TORQUE OF FLEXIBLE COUPLING(NO.2 ENGINE)

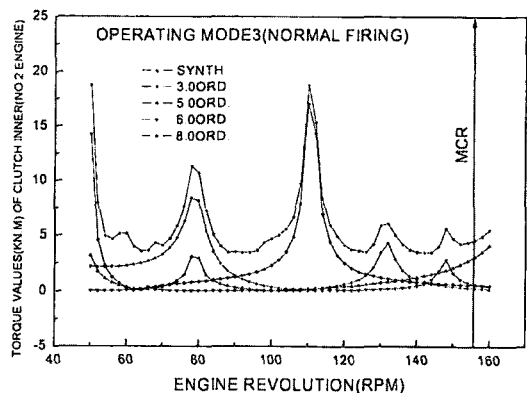


FIG14. VIBRATORY TORQUE OF CLUTCH INNER(NO.2 ENGINE)

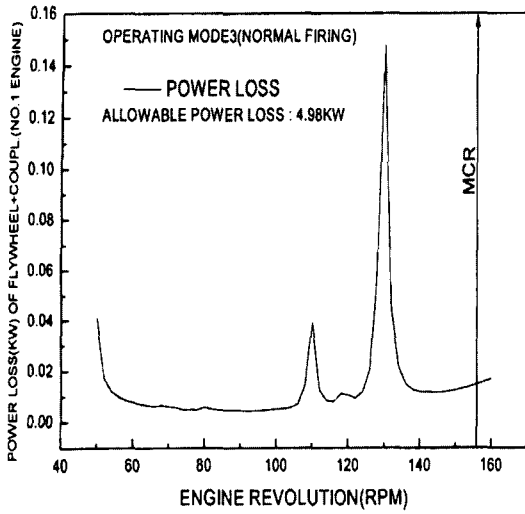


FIG15. POWER LOSS OF FLEXIBLE COUPLING(NO. 1 ENGINE)

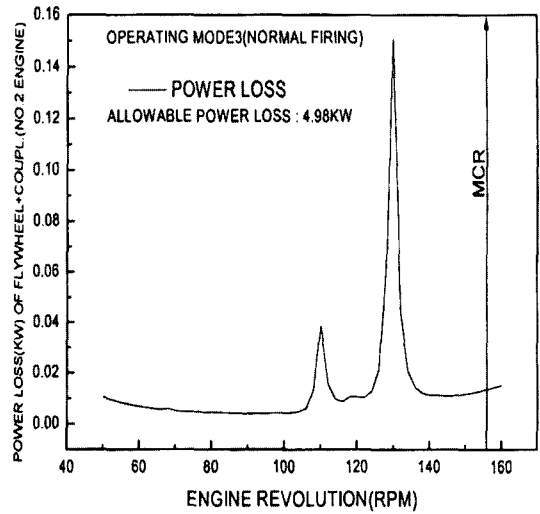


FIG16. POWER LOSS OF FLEXIBLE COUPLING(NO. 2 ENGINE)

○ 계산결과의 평가

- 전체적으로 크랭크축의 응력이 130 RPM에서 연속사용 제한치를 초과하는

것을 제외하고 문제로 되는 것은 없다.

4. 1. 2 착화실패시의 강제진동 계산

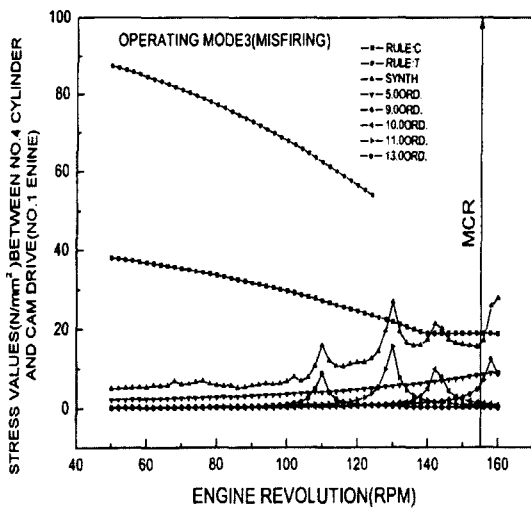


FIG17. STRESS OF CRANKSHAFT (NO. 1 ENGINE)

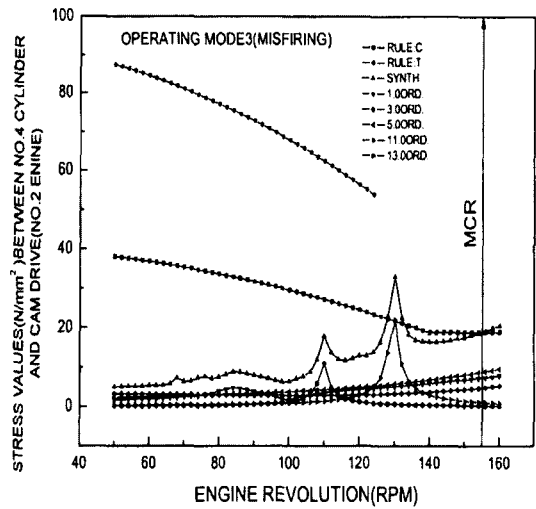


FIG18. STRESS OF CRANKSHAFT (NO. 2 ENGINE)

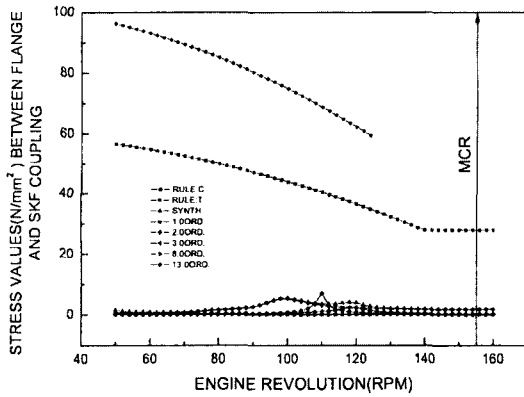


FIG19. STRESS OF INTERMEDIATE SHAFT

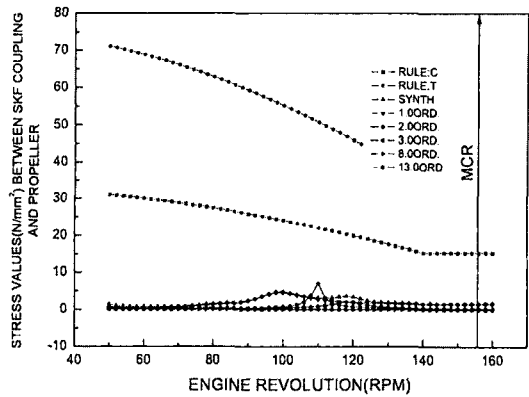


FIG20. STRESS OF PROPELLER SHAFT

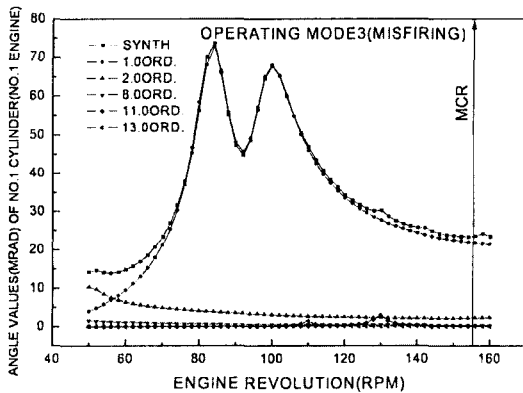


FIG21. TORSIONAL AMPLITUDE OF CRANKSHAFT FORE-END(NO. 1 ENGINE)

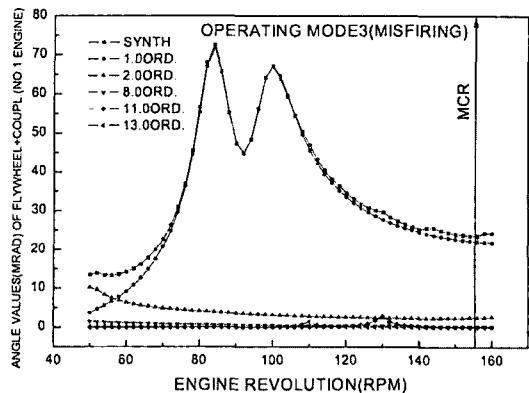


FIG22. TORSIONAL AMPLITUDE OF FLEXIBLE COUPLING(NO. 1 ENGINE)

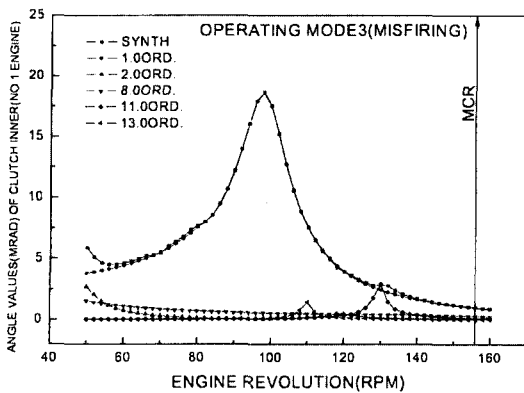


FIG23. TORSIONAL AMPLITUDE OF CLUTCH INNER(NO. 1 ENGINE)

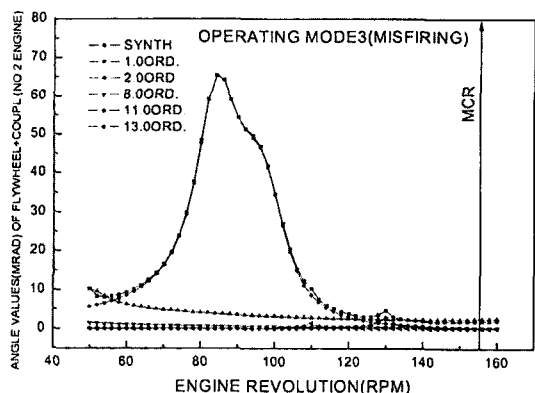


FIG24. TORSIONAL AMPLITUDE OF FLEXIBLE COUPLING(NO. 2 ENGINE)

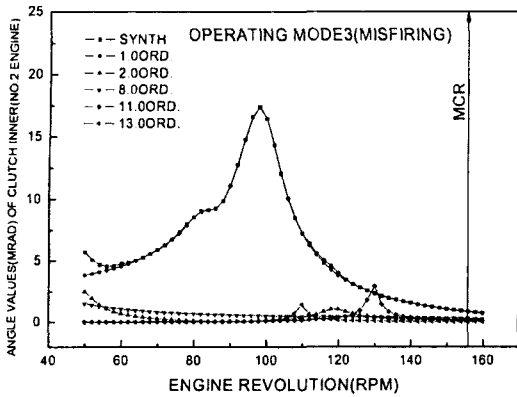


FIG25. TORSIONAL AMPLITUDE OF CLUTCH INNER(NO. 2 ENGINE)

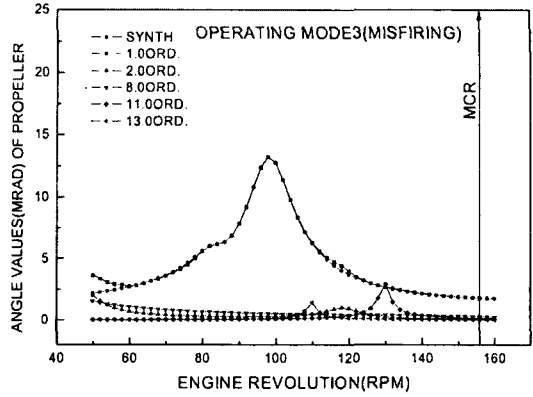


FIG26. TORSIONAL AMPLITUDE OF PROPELLER

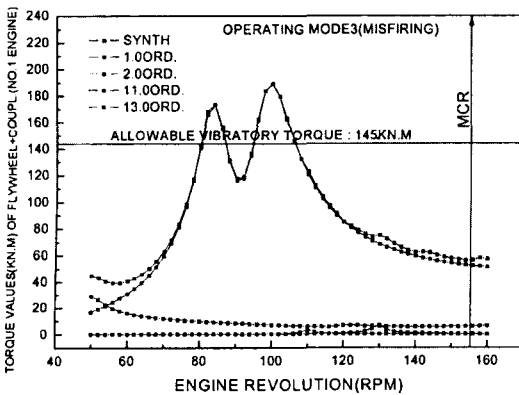


FIG27. VIBRATORY TORQUE OF FLEXIBLE COUPLING(NO. 1 ENGINE)

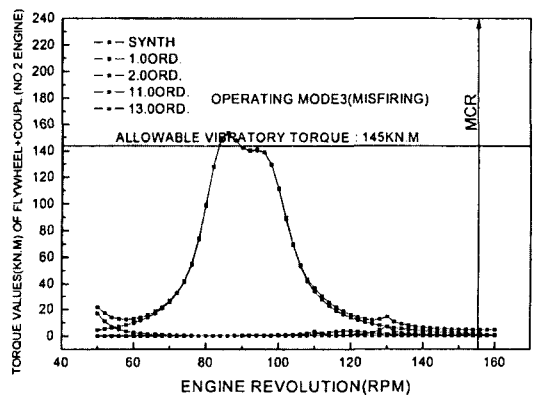


FIG28. VIBRATORY TORQUE OF FLEXIBLE COUPLING(NO. 2 ENGINE)

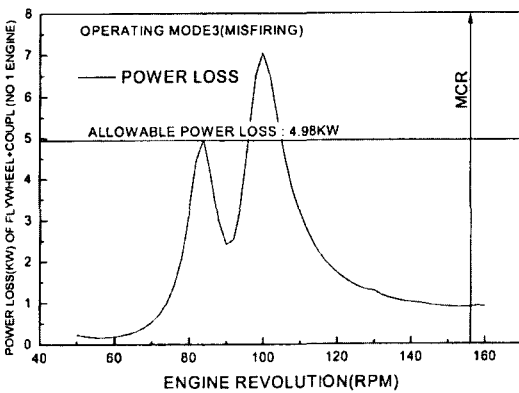


FIG29. POWER LOSS OF FLEXIBLE COUPLING(NO. 1 ENGINE)

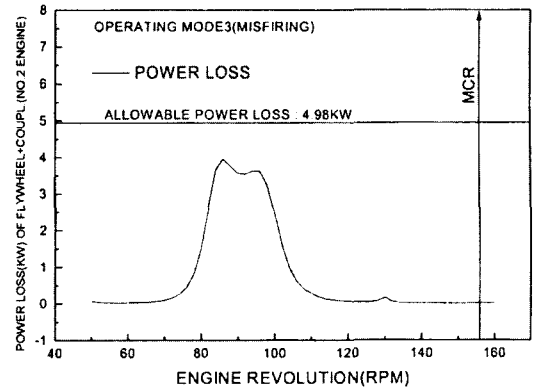


FIG30. POWER LOSS OF FLEXIBLE COUPLING(NO. 2 ENGINE)

○ 계산결과의 평가

- 이상의 계산 결과에 의하면 진동 응력은 크랭크축의 경우 착화실패가 발생하는 크랭크축에서는 최대 비틀림응력이 감소하고 착화실패가 발생하지 않는 축은 변화지 않는다. 다만, 130RPM 부근에서 연속 사용 제한치를 초과하게 된다. 탄성커플링의 진동토크와 손실마력(열부하)은 정상 착화시에 비하여 착화 실패시에 크게 증대하며 NO.1 엔진의 탄성커플링의 진동토크와 손실마력(열부하)은 제한치를 초과하고 있다.

4. 1. 3 계산결과의 총 평가

- 1) 크랭크축의 응력치는 130rpm에서 합성응력이 연속사용 한계치를 초과하는데 이것은 11차의 진동응력에 의한 것이다. 착화 실패축의 크랭크축 응력이 약 19% 감소하고 정상착화하는 엔진축은 거의 변화가 없다. 중간축과 프로펠러의 응력은 제1운전모드의 경우와 대동소이하며 착화 실패시에도 최대치는 $6N/mm^2$ 미만이다.
- 2) 각부의 진동진폭은 정상 착화시에 비하여 착화 실패시에 5~67배까지 증가한다.

- 3) 진동토크, 열부하는 정상 착화시에 비하여 착화 실패시에는 각각 4~19배, 4~45배 정도 증대하며 특히 착화 실패하는 엔진축 탄성커플링의 진동토크는 허용한계치(145KN.M)를 크게 초과(계산치 189.02KN.M)하고 있으며 동력손실(열부하)도 허용한계치(4.9KW)를 상당히 초과(계산치 7.052KW)하고 있다.

5. 결 언

본 프로그램을 구입하고 활용할 수 있게 됨으로써 본회에서는 다음과 같은 효과를 얻었다.

- 축계비틀림진동계산 용역 및 축계설계시 활용
- 선박기관기준관련 축계비틀림진동계산서 검토시 활용
- 정도가 보다 높은 프로그램 활용으로 축계의 안전성 확보 및 해난사고 방지
- 2000년도 어업인 건의사항이었던 “주기관 고마력 대체시 진동에 의한 피해방지 기술” 확보
- 검사원 직무 교육활용으로 검사원 자질 향상 제고
- 검사원 직무 교육시 실습교육 활용