

# 구조 및 축 진동을 고려한 중속 디젤엔진의 착화순서 최적화 Firing Order Optimization of Medium Speed Diesel Engine Considering Structure and Shaft Vibration

정 건화† · 이 수목\* · 김 원현\*\*

Kun-Hwa Jung, Soo-Mok Lee, Won-Hyun Kim

**Key Words** : Firing order, Structure vibration, Shaft vibration, Excitation force, diesel generator set

## Abstract

The determination of firing order is very significant procedure in initial stage of design for medium speed diesel engine. Generally, the selection of firing order has been accomplished in view of minimum excitation forces condition.

In this paper, all possible firing orders under the given number of cylinder were considered to decide the optimum. Meanwhile torsional vibration characteristics using the phase vector sum method and minimum excitation force concept were applied. From these results, some superior cases were selected. And then, the torsional vibration response analysis and the resonance characteristics of engine structure were investigated for the final decision.

## 1. 서론

선박, 자동차를 비롯한 각종 운송기계 및 산업 현장에서 널리 사용되고 있는 디젤엔진의 크랭크 축 설계는 이 후 이루어 지는 다른 모든 요소 설계의 중심이며, 시작이 된다. 그 중에서도 실린더 간 착화 순서 즉, 크랭크 스로우 간 배치 각도를 결정하는 일은 엔진 출력 성능과 직접적으로 연관되며, 진동특성에 영향을 미치는 기진력의 크기와 양상을 좌우하게 된다.

엔진의 기본설계 단계에서 착화순서가 중요하게 고려되는 주된 이유를 요약해 보면 다음과 같다.

- 1) 불균일 단면의 크랭크 축에서 발생하는 관성력과 모멘트 성분의 적절한 힘·모멘트 평형 만족
- 2) 주요 운전구간에서 발생 가능한 기진력 성분에 의한 진동특성 검토
- 3) 실린더 내 연소 폭발압과 크랭크기구운동에 의한 관성력이 베어링에 가하는 부하영향 최소화

기존 최적 착화순서의 결정은 엔진 기진력 최소화만을 주된 목적으로 결정<sup>(1)</sup>되었으나, 본 논문에서는 구조진동에 영향을 주는 기진력과 더불어 축 진동 응답에 대한 고려를 통해 대상 모델에 대한 최적의 착화순서를 도출 하고자 하였다.

## 2. 엔진 기진력과 착화순서

### 2.1 착화순서 최적화 단계

실린더 연소 폭발압과 크랭크 기구에 의해 발생하는 엔진 기진력은 수직, 수평의 외부력(external forces)과 외부력 모멘트(external moments), guide force moments 등의 형태로 발현되며, 크랭크 축의 기본 치수 및 실린더 개수가 정해진 초기 설계 단계에서 조합 가능한 모든 착화순서에 대해 기진력 검토를 하게 된다.

기존 당사에서 엔진 기진력 계산을 위해 사용하고 있는 자체 프로그램을 보완하여 작성된 착화순서 결정 프로그램에서는 내부에 각종 엔진 기진력 뿐 아니라 이후 3장에서 언급될 축 진동해석 결과를 이용한 PVS(phase vector sum) 고려를 통해 여러 방면으로 유리한 착화순서를 결정하였다.

아울러, 착화순서 변경에 따른 기진력 비교 방식에 식 (1)에서와 같이 기진력의 종류 및 차수(주파수)별 가중치를 실제 기진력에 부여함으로써 설계 대상모델의 진동특성을 사전 반영하였다.

$$M_{EVAL} = M_{EQ} \times W_{MODE} \tag{1}$$

$M_{EVAL}$  : 평가의 편이를 위해 각 차수의 기진력에 가중치를 적용시킨 후 합산한 기진력

$M_{EQ}$  : 계산을 통해 얻는 차수별 엔진 기진력

$W_{MODE}$  : 기진력의 형태와 주파수에 따른 가중치

다음의 Figure 1 에서 착화순서 최적화 과정을 간략히 보여주고 있으며, 모든 가능한 착화순서에 대한 기진력 최소화 및 초기 축 진동응답 고려를

† 책임저자; 현대중공업㈜ 선박해양연구소

E-mail : oceanpia@hhi.co.kr

Tel : (052) 230-7404, Fax : (052) 200-5495

\* 현대중공업㈜ 선박해양연구소

\*\* 현대중공업㈜ 선박해양연구소

통해 그 중 우수한 소수의 경우를 선별하게 된다. 이후, 최종적으로 선택된 착화순서 간 기진특성 재검토 및 운전 구간 내 축 진동 양상을 해석을 통해 검증하여 최적의 조건을 설계에 반영한다.

다 기통 엔진의 경우에는 실린더 수에 따라 고려해야 할 착화순서의 수가 무수히 많아지게 되는데, 일일이 그 크기를 비교하는 대신 기진력 및 축 진동의 목적함수로 표현된 특정 값을 비교할 경우 소요시간을 상당 부분 단축할 수 있게 된다.

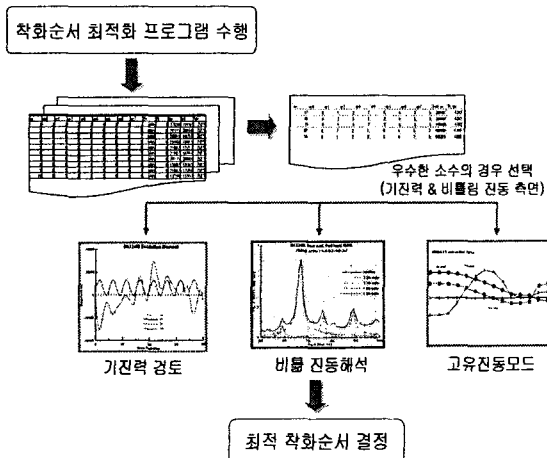


Figure 1 착화순서 최적화 과정

2.2 대상모델

대상 모델은 8 개의 실린더를 갖는 4 행정 in-line type 엔진으로 작은 선박의 주기관 혹은 교류발전기를 장착한 발전기세트로 사용되며, 주요 운전속도는 720 rpm 이다. Figure 2 에서 엔진의 한 실린더 내 폭발압력을 나타냈으며, 기진력 계산 및 축 진동해석의 주요한 입력자료로 사용되었다.

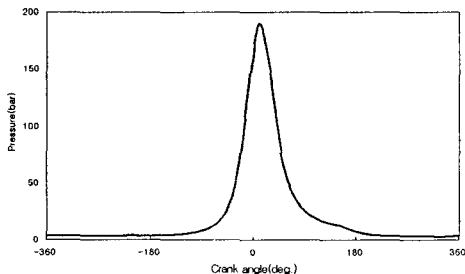


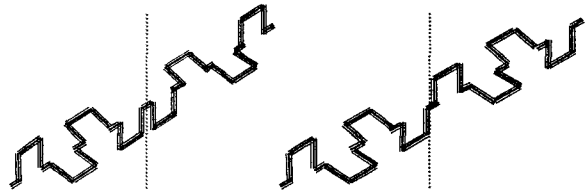
Figure 2 실린더 폭발압력

2.3 착화순서에 따른 기진력 비교

일반적으로 한 실린더(크랭크 기구) 내에서 발생하는 힘은 실린더 폭발압과 피스톤, 콘넥팅로드,

크랭크 스톱의 왕복 및 회전 기구운동에 의한 관성력에 의해 나타나며, 관성력은 다시 왕복질량 및 회전질량에 의한 불평형력으로 분류할 수 있다. 회전질량에 의한 힘의 불균형은 일차적으로 크랭크 웹 하단에 적절한 평형추를 부착함으로써 평형을 유지시키게 되지만, 크랭크 기구의 왕복운동에 의해 발생하는 불평형력 및 실린더 간 공간적인 분포에 의해 발생하는 모멘트 성분은 여전히 존재하게 되며 착화순서 최적화를 통해 기진력을 최소화 시킬 수 있게 된다.

4 행정 디젤엔진의 경우 한 연소 사이클 당 크랭크 축이 2 회전(720°)을 하게 되며, 8 개 실린더가 균일한 착화 각 구성을 갖기 위해서는 각각의 크랭크 스톱 간 90°의 위상지연을 갖도록 한다. 물론, 경우에 따라 최적 크랭크 스톱 각을 얻기 위해 균일한 위상지연 각도에서 다시 미세하게 각을 조절하는 방법<sup>(2)</sup>이 있지만 일반적으로 짝수개의 실린더를 갖는 크랭크 축의 경우, 불평형 힘에 의해 발생하는 모멘트 성분을 최소화 하기 위해서는 기본적으로 크랭크 축 방향의 직각 단면에 대해(전체 길이의 중심위치) 대칭의 형태를 갖도록 하는 것이 필요하다<sup>(3)</sup>. 아래의 Figure 3 에서와 같이 크랭크 스톱이 대칭인 경우의 착화순서 배열과 비 대칭 경우의 비교를 통해 기진력 변화를 관찰해 보았다.



(a) 대칭 (b) 비대칭  
Figure 3 크랭크 스톱 각 배치 형태

위의 두 가지 조건에 대한 기진력 비교 결과를 Figure 4 에서 보여주고 있으며, 대칭인 경우 외부력 모멘트( $M_v$ ,  $M_h$ )성분이 나타나지 않아 기진력 측면에서 절대적으로 유리함을 알 수 있다.

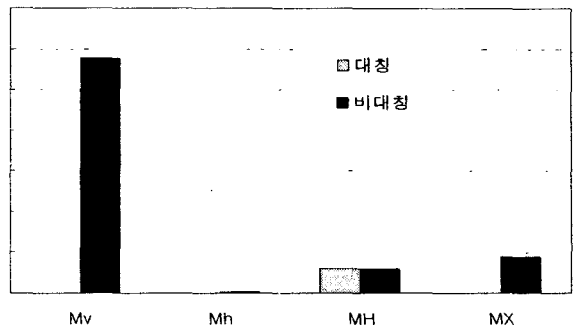


Figure 4 착화순서 간 기진력 비교

엔진 기진력 중 각 실린더 별 모멘트의 시간적인 합으로 나타나는 H 형 guide force moment 성분의 경우 전체 실린더의 개수가 정해지면 일정 실린더 차수 성분으로 발현되며, 착화순서 변경에 의한 기진력 차이가 발생하지 않는다. 하지만, X 형 모멘트의 경우 착화순서에 따른 차수 별 기진력의 크기가 서로 다르게 나타나며 구조 진동측면에 영향을 주게 된다.

2.4 구조진동에 미치는 영향

엔진 기진력 중 guide force moment 성분은 엔진의 구조적 변형을 통해서만 외부에 전달될 수 있으며 엔진을 포함한 전체 발전기세트의 구조진동을 유발하므로, 일정 속도에서 운전되는 발전기세트는 사전 설계단계에서 특정 차수(혹은 주파수)의 기진력과 구조 공진의 영향 검토가 가능하다. 물론 엔진, 발전기 및 연결 베이스프레임의 구조형태나 중량, 마운트 조건 등이 설계 초기단계에서 결정되지 않은 상태지만 유사 발전기세트의 진동양상을 토대로 한다면 어느 정도의 범위 내에서 사전 예측이 가능하며, 최종적인 착화순서 결정에도 그 내용을 고려할 수 있게 된다.

일반적으로 전체 발전기세트의 6 자유도 운동과 관련된 강체 모드는 5 ~ 20 Hz의 주파수 대역에 있으며, 지지 마운트의 배치 및 설계에 따라 어느 정도 공진회피가 자유롭다. 하지만, 주로 20 ~ 50 Hz 주파수 대역에 나타나는 굽힘, 비틀 형태의 탄성 모드의 경우에는 그 방법이 수월하지 않기 때문에 차수 성분 별 기진력 검토에 신중을 기할 필요가 있다. 따라서, 구조 진동모드와 기진력 차수 성분과의 조우관계를 우선적으로 검토하고 해당 기진력이 없거나 최소화되는 유리한 경우를 선택하게 된다.

이전 장에서 언급되었던 착화순서 최적화 과정을 대상 엔진모델에 대해 수행하고, 결과로 얻은 5 가지 우수한 착화순서 모델을 Table 1에 언급하였으며, X 형 guide force moment 기진력 중 구조진동에 영향을 주는 일부 차수 성분을 Figure 5에서 비교하고 있다. Case 1의 경우 다른 것에 비해 상대적으로 고차 기진력이 작아 유리한 반면 0.5 차 기진력이 커져 부담이 될 수 있다. 다만 발전기세트 운전속도를 감안 한다면 0.5 차 기진력 성분은 구조 강체 모드와 공진 가능성이 크기 때문에 마운트 설계 여부에 따라 공진 회피가 용이하여 선택의 경우로 고려해 볼 수 있다.

Table 1 기진력 특성이 우수한 착화순서의 경우

Case	착화순서
1	1-3-5-7-8-6-4-2
2	1-4-6-2-8-5-3-7
3	1-3-5-2-8-6-4-7
4	1-4-7-3-8-5-2-6
5	1-4-3-2-8-5-6-7

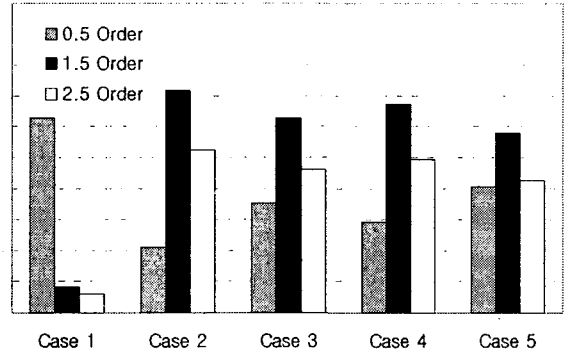


Figure 5 구조진동 측면의 기진력 비교

3. 축 진동에 대한 고려

3.1 P.V.S을 이용한 축 모드 고려

최적의 착화순서를 결정함에 있어 기진력 최소화 측면과 축 진동 특성 검토를 분리하여 검토하였으나, 대상 모델에 적합한 착화순서를 결정하기 위해서는 축 진동 특히 비틀 진동 응답에 의한 영향도 사전 병행하여 고려하는 것이 중요하므로, 축 진동특성 검토를 위해 진동 모드벡터를 이용한 방법(phase vector sum method)<sup>(4)</sup>을 적용하였다.

식 (2)에서와 같이 m 번째 크랭크 스로우의 비틀 진동크기와 1 번 실린더에 대한 비틀 진동크기와의 상대비교를 축 진동해석을 통해 얻은 모드벡터로 표현하고, 식 (3)를 통해 전체 축계에 걸리는 기진토크의 합력을 구하였다.

$$\Delta_m = \frac{\theta_m}{\theta_1} \tag{2}$$

$$T = |T_n| AR \sum \bar{\Delta}_v \tag{3}$$

T : 전체 크랭크 축에 걸리는 기진토크 합력

|T<sub>n</sub>| : 크랭크 핀 접선압의 n 차 성분력

A : 피스톤 면적, R : 크랭크 스로우 반경

∑  $\bar{\Delta}_v$  : 엔진 전체의 진동벡터 합

이후 식 (4)로 표현된 전체 크랭크 축에 걸리는 토크 일의 총합을 착화순서 결정 프로그램에 적용하여 우수한 착화순서를 도출하는데 최종적으로 이용하게 된다.

$$U = \pi \sum (T^{(m)} \theta_m \sin \varepsilon_m) \quad (4)$$

$T^{(m)}$  : m 번째 실린더의 주기적인 토크 피크 응답

$\theta_m$  : 진동크기 [rad]

$\varepsilon_m$  :  $\theta_m$  의 위상지연

### 3.2 비틀림 진동 해석

캠 구동 부를 포함한 크랭크 축, 커플링, 플라이 휠, 발전기 로터를 모두 포함한 축계 비틀림 진동 해석 모델을 구성하고, 고유진동 해석을 통해 Figure 6 과 같은 모드 형상을 얻었다. 운전구간 내 대상 발전기세트의 주된 비틀림 진동 응답은 2<sup>nd</sup> 모드와 연관되어 나타났으며, 플라이 휠의 설계특성이 축계 전체의 응답양상에 매우 민감하게 작용하였다. 또한 유연 커플링 이후의 발전기 로터는 전체 응답특성에 거의 기여하지 못하고 있다.

최적화 과정을 통해 선별된 우수 착화순서에 대해 부하조건 별 진동 응답 해석을 수행하고 그 결과를 착화순서 결정에 반영하였다.

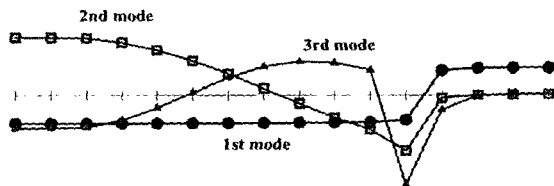


Figure 6 축계의 고유진동모드 형상

### 3.3 착화순서에 따른 축 진동 응답 특성

조합 가능한 모든 착화순서에 대한 기진력 검토를 수행하여, 선정된 5 가지의 경우들에 대해 주요 운전구간 내 축 진동 특성을 살펴보았다. 이미 착화순서 결정 프로그램 내에서 기진력과 축 진동을 병행 고려하여 선택된 경우들인 만큼 그 특성은 유사 하지만, 최종적인 축 진동 응답 해석 통해 그 크기 및 양상을 재 평가하고 최적의 착화순서 모델을 선택하게 된다. 아래의 Figure 7에서는 기진력의 특성만으로는 우열을 판단하기가 어려운 두 가지의 경우에 대한 비틀림 변동토크 비교를 보

여주고 있는데, Case 1 의 경우 기진 4.5 차 성분과의 공진 피크가 상대적으로 크게 나타나고 있는 반면, Case 2 의 경우 대상 발전기세트의 주 운전 속도인 720 rpm 부근에서 5.5 차 성분에 대한 특성이 상대적으로 우수하여 최적의 경우로 도출하였다.

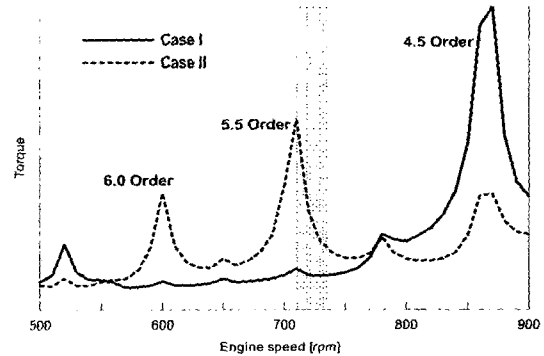


Figure 7 착화순서 간 비틀림 토크 비교

## 4. 결론

대상 엔진모델의 정해진 실린더 수로 조합 가능한 모든 착화순서 경우에 대해 최소 기진력 조건과 구조 진동 특성의 사전 예측 및 축 진동 응답 특성까지를 고려한 최적의 착화순서를 결정하고 설계에 반영하였다. 내용을 통해 기진력의 최소화 뿐만 아니라 축 진동 응답에 영향 검토도 병행하여 진행하는 것이 최적 착화순서의 결정에 중요한 요소임을 파악하였다.

### 참고문헌

- (1) Per Ronnedal and Hans Boje Nielsen, 2003, "Firing Order Selection in Relation to Vibration aspects.", Proceedings of 2003 spring technical conference of the ASME International combustion engine design.
- (2) 박정근, 정의봉, 서영수, 2002, "디젤엔진에서 기진력 감소를 위한 크랭크 각의 최적설계", 한국소음진동공학회논문집, 제 12 권, 제 2 호, pp. 108 ~115.
- (3) Charles Fayette Taylor, 1968, "The internal-combustion engine in theory and practice", The M.I.T press.
- (4) E. J. NESTORIDES, 1958, "A handbook on torsional vibration", The syndics of Cambridge University press.