

# 기동장비용 지향구조물의 진동 감소 상태선정 연구

유진호\*, 이동주<sup>+</sup>

(논문접수일 2007. 2. 27, 심사완료일 2007. 3. 26)

## A Study on Vibration Reduction Timing Selection in the Mobile Pointing System

Jin-ho Yoo\*, Dong-ju Lee<sup>+</sup>

### Abstract

In order to predict vibration trends occurred during vehicle drive, acceleration data was processed by using data processing algorithm with moving average and Hilbert transform. Specific mode constants of acceleration were obtained under various disturbance. Vehicle velocity, road condition, property of pointing structure were considered as factors which make change of vibration trend in vehicle dynamics. Results of signal processing were compared and analysed. Advanced performance of the timing selection algorithm from this study was verified by using simple equipment comparing with the deflection measurement laser system(Muzzle Reference System).

**Key Words** : Pointing Structure(지향 구조물), Hilbert Transform(힐버트 변환), Vibration Reduction(진동 감소)

## 1. 서론

차량에 장착된 정밀 표적지향 시스템에 있어서, 시스템 성능 향상의 추세에 따른 기동성 향상과 지향 구조물 길이의 증가는 외란 및 주행진동의 증가를 발생시켜 정밀지향을 어렵게 하고 있다. 이에 따라 정밀지향을 위하여 진동을 보상하기 위한 방안을 모색하려는 노력이 최근 국·내외에서 활발히 진행되고 있다.

지향 구조물의 진동을 보상하는 방법으로는 점탄성 물질을 입히거나 형상을 최적화하여 진동을 최소화 되도록 설

계하는 방법, 완충기를 설치하여 위치를 가변적으로 하여 진동을 최소화하는 방법 등 구조물의 형상을 변경 또는 추가 장치를 적용하는 방법이 있다. Fig. 1은 별도의 장착 기구물을 이용하여 진동을 감소시키는 실험적인 장치의 한 예이다.

지향구조물의 정밀지향을 위한 진동보상 및 회피기술 관련 연구동향을 살펴보면 적극적인 보상을 위한 기구적인 보상방안과 구조물 제어에 의한 연구가 있으며, 진동회피를 위한 방안으로 진동 감소순간 선정을 위한 거동예측 연구와 신호처리 알고리즘에 의한 진동감지 연구로 나눌 수 있다.

Bundy는 주행 시의 구조물 진동을 감소시키기 위하여 구

\* 국방과학연구소(ADD) (vineyoo@add.re.kr)

주소: 139-743 대전시 서구 둔산2동 912

+ 충남대 기계공학과

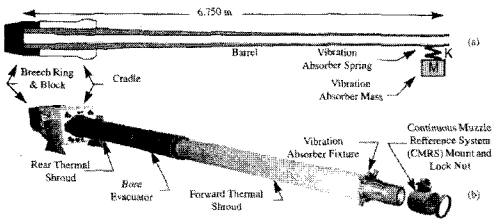


Fig. 1 Example of vibration reduction on pointing structure

조물 끝단에 진동 흡수장치를 적용하여 구조물 처짐 량과 지향오차를 감소시킬 수 있음을 보였고<sup>(1)</sup>, J.S. Bird는 지향 구조물의 진동 량을 측정하여 분류하였다<sup>(2)</sup>. 대부분의 연구는 모드시험의 진동분석을 통하여 저동특성을 연구하였으며, 정밀 측정 장치를 적용하여 순간을 제어하는데 관점을 두고 연구를 수행하였다. 그러나, 사출순간의 높은 충격량(10000G) 때문에 정밀 측정장치를 적용하기가 어렵고, 정밀 측정장치 장비자체의 질량으로 처짐이 발생하여 정밀도에 영향을 줄 수 있으며, 시간적 사출 분포가 일정치 않기 때문에 구현에 많은 어려움이 있다. 또한 이러한 장치의 영구적인 장착은 현장에서 지속적인 보정 문제를 야기시킨다. 이것과는 다른 방안으로 산업분야에서 절삭가공시의 공구 진동 감지 및 제어를 위하여, 신호처리 알고리즘을 이용한 연구가 수행되었으며<sup>(3,4)</sup>, 이러한 방법은 저동 특성을 경향으로 판단하여 적용하는 방법으로 정밀제어가 요구되지 않는다.

본 연구의 대상인 기동장비용 지향구조물은 주행 중에도 표적을 지향하기 위하여 안정화 기능이 적용되어 있으며, 이 성능은 시스템의 정확도 성능에 직접적인 영향을 미치므로 매우 중요하다. 그러나 이러한 기능에도 주행 중의 사출시스템 자체의 처짐 량은 보상되지 않는다. 이러한 오차는 사출시스템의 세장비(L/D)가 커질수록 정확도 성능의 영향이 커지게 된다. 따라서, 주행 중 해당 상태에서의 사출시스템의 처짐 량을 사출 제어에 적용함으로써 기존의 정확도를 크게 향상시킬 수 있다.

따라서 본 연구에서는 다른 물리적 특성을 갖는 여러 기동 장비에서 속도 및 노면외란 등의 운용조건 변화에도 직접적인 처짐 량의 측정 없이 외란 신호를 처리하여 지향구조물의 진동상태가 감소되는 시점을 규정하는 방법을 제안하고자 한다. 이를 위한 방안으로 구조적으로 간단한 적용을 위하여, 외란신호를 이용한 구조물 끝단에서의 처짐량과의 관계를 분석하고, 외란에 대한 포락신호를 이용한 신호처리알고

리즘을 적용하여 구조물 끝단에서의 상태를 판단하도록 하는 지향 상태 선정 방안을 제안하고자 한다.

## 2. 지향구조물의 진동

본 연구의 목적을 고려하여, 실제의 지향구조물을 한쪽 끝단은 고정 되어있고 다른 끝단은 자유단으로 설정되어있는 균일 공축 실린더로 가정하여 분석하는 것으로도 충분하다<sup>(5)</sup>. 이 경우에는 여러 분석학적 계산식을 이용하여 모드 형상과 진동수를 계산할 수 있다<sup>(6)</sup>. Fig. 2는 기동 지향구조물의 간단한 모델이다.

길이 L, 외경 do, 내경 di, 밀도 ρ, 탄성계수 E 인 균일 공축 실린더에 대한 4개의 모드 진동수는

$$\omega_i = \kappa A_i \quad (A_i : \text{modal factor}) \quad (1)$$

$$\kappa = \sqrt{\frac{EI}{\rho A L^4}}, \quad (A = \pi((do/2)^2 - (di/2)^2))$$

여기에서 E(탄성계수), I(관성모멘트), A(단면적), ρ(밀도)를 대입하면 각 modal frequency는

$$\omega_1 = \kappa A_1 = 13.2\text{Hz}$$

$$\omega_2 = \kappa A_2 = 43\text{Hz}$$

$$\omega_3 = \kappa A_3 = 89.5\text{Hz}$$

$\omega_4 = \kappa A_4 = 153\text{Hz}$  로서 단축의 경우( $\omega_1=22.8\text{Hz}$ ,  $\omega_2=74\text{Hz}$ ,  $\omega_3=155\text{Hz}$ ,  $\omega_4=263\text{Hz}$ )와 비교하면 상대적으로 진동의 주된 성분인 첫 번째 모드의 진동수가 지향으로부터 입력되는 외란 진동수에 가까워지는 효과를 나타내므로, 장축의 경우에 공진할 가능성이 커지게 된다.

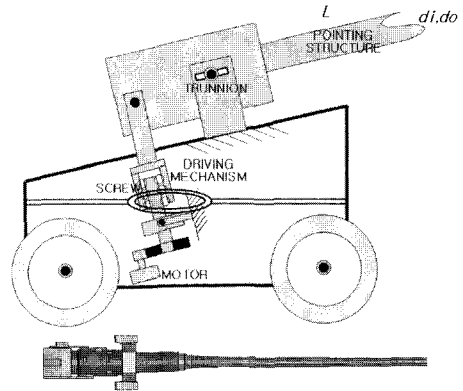


Fig. 2 Pointing structure on vehicle

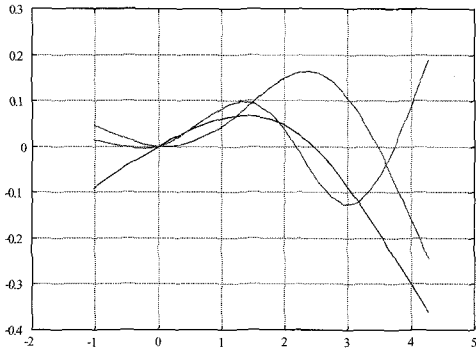


Fig. 3 Result of modal analysis

앞의 진동수에 해당되는 모드 형상( $V_i(x)$ )은 끝단에서의 경계조건에 의하여 결정되는 삼각함수와 하이퍼볼릭 함수의 조합으로 나타내진다.

$$V_i(x) = \sin\left(\frac{B_i x}{l}\right) + r_i \sinh\left(\frac{B_i x}{l}\right) \quad 0 \leq x \leq l \quad (2)$$

$$r_i = \frac{\sin(B_i)}{\sinh(B_i)}$$

모드 형상은 Fig. 3과 같다.

분석적인 방법으로 거동을 예측할 경우, 경계조건이 복잡하여 단순화 할 경우 해가 부정확해질 수 있으며, 정확한 모션 예측이 어렵고, 결정적으로 사출이 발생하는 순간의 변화 폭이 크므로 정확한 시점 선정에도 불구하고 시스템의 적용 효율성이 없어진다<sup>(7)</sup>. 따라서 차량의 상하 직선가속도를 측정하여 사출시스템 끝단의 처짐 량에 대한 진동 상태를 일정 정확도 내에서 추정할 수 있다면, 효과적인 대안이 될 수 있다. 본 논문에서는 외란에 의한 진동을 받는 실린더 구조물에서의 정밀지향을 위하여 구조물 끝단에서의 진동 량을 측정하고 경향 분석을 통하여 지향 시점에서의 상태를 선정하는 방안을 적용한다.

### 3. 신호처리

Fig. 4 (a)는 실험 장치로부터 입력되는 가속도신호를 보여준다. 외란신호의 한 예로 평지로부터 장애물 통과까지의 조건을 모두 보여주고 있다.

진동상태의 외란의 형태를 규정하는 대표치로 모드선도를 적용하며, 이를 위해서는 Hilbert 변환을 이용하여 포락선호를 구해야 한다.

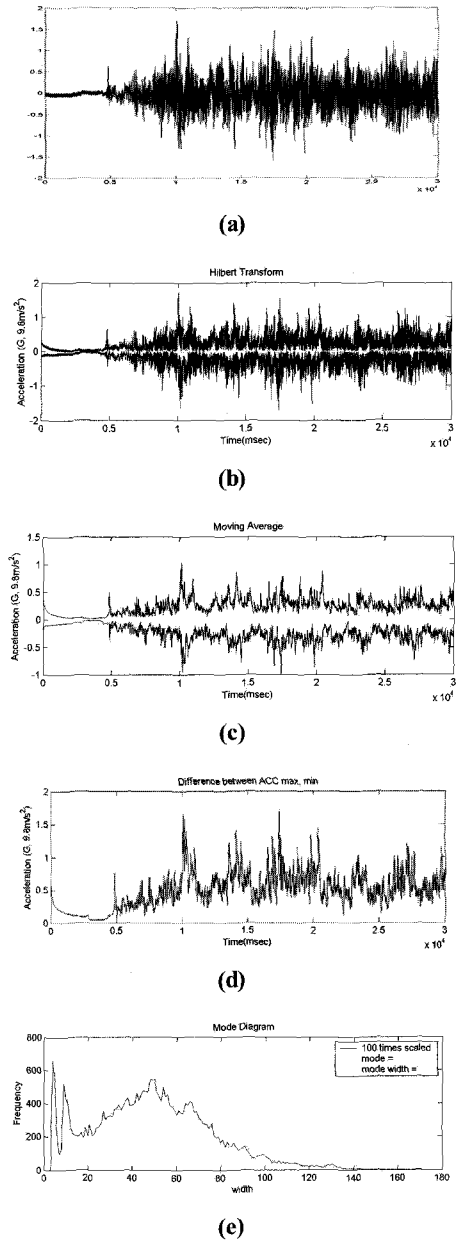


Fig. 4 Data processing procedure

실험 장치로부터 입력되는 신호는 이산신호이므로 식 (3)의 이산신호 Hilbert 변환에 의하여 계산된다<sup>(8)</sup>.

이산함수  $\hat{x}[n]$ 는 다음과 같이 콘볼루션 적분을 통해 구할 수 있다.

$$\tilde{x}[n] = \sum_{m=0}^{\infty} h[n-m]x[m] \quad (3)$$

그리고 포락을 의미하는  $A[n]$ 은

$$A[n] = \sqrt{x^2[n] + \tilde{x}^2[n]} \quad (4)$$

와 같이 출력 복소수의 크기함수로 정의할 수 있다. 이때 전달함수  $h(n)$ 은 다음과 같다.

$$\begin{cases} h[n] = \frac{I_0 \beta (1 - [(n - n_d)/n_d]^2)^{1/2}}{I_0(\beta)} \frac{2 \sin^2[\pi(n - n_d)/2]}{\pi(n - n_d)} & 0 \leq n \leq M \\ h[n] = 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

여기서  $I_0$ 는 영차베셀함수,  $M$ 은 Hilbert 변환차수이며,  $\beta$ ,  $n_d$ 는 상수이다.

포락신호를 구하기 위하여 이동평균을 이용해야 하며, 적용된 이동평균의 식은 다음과 같다.

$$y[i] = \frac{1}{2M+1} \sum_{k=-M}^M x[i-k]$$

$y[i]$ 는 특정시간의 고각 성분 신호  $x[i]$ 의 이동평균값이다. 이동평균을 이용하고 Hilbert 변환을 적용하여 Fig. 4의 (b)와 같은 포락신호를 얻을 수 있다. 그러나 고주파 잡음으로 신호의 경향을 분석하기에는 부적합하다. 따라서 이동평균을 한 번 더 구하여 Fig. 4의 (c)와 같이 필터링을 수행하였다. 이러한 절차는 장치에 적용하여 실시간으로 수행하였다.

진동상태를 판단하기 위해서는 기준 값이 필요하며, 이를 위하여 Fig. 4 (d)의 진폭을 구하고, 진폭의 재현 빈도수를 분포도로 나타내었다. Fig. 4 (e)의 모드선도에서 가장 빈도수가 많은 진동 폭을 모드(mode)라 하고, 진폭의 분산도를 나타내기 위하여 모드폭(mode width)를 산출하여, 두개의 특성치로써 진동상태를 판단하였다. 지향구조물이 기동상태에서 불규칙적 장애물에 의한 외란을 받을 경우, 외란에 의한 진동 폭과 변화폭이 커지므로 두 포락신호의 거리가 커져 모드와 모드 폭이 증가하게 된다. 모드는 단순한 외란의 크기로 나타내며, 모드 폭은 외란 변화의 규칙성을 나타낸다.

따라서 이 두개의 특성 값은 기동 지향구조물의 진동을 잘 묘사한다고 판단되며, 자체 운용에 의한 발생 신호와 차별되어 나타나기 때문에 진동상태 선정 기준 값으로 적용하는 것이 적합하다고 판단된다.

## 4. 실험

기동장비의 주요 진동 원인인 외란을 규정된 대표적인 조건에서 실험하기 위하여, 지향성능 시험을 위한 규정 노면을 이용하였으며<sup>(9)</sup>, 기동장비로는 세장비가 상대적으로 큰(55cal) 구조물과 작은(44cal) 구조물을 이용하였다. 이때 지향구동장치로부터의 진동영향을 포함하기 위하여 기동상태에서 시험하였다. 시험 중 구동장치의 작동범위 외에서 발생하는 진동을 배제하기 위하여 주행조건은 비교적 안정된 실제 운용범위 내로 국한하였다. 즉, 지향 방향이 범위를 벗어날 경우 한계점에서 오는 충격과 현상장치의 노면 충격흡수 범위 밖으로의 이탈을 방지하기 위하여 안전한 구동범위 내에서 운용하였다.

고각 성분 외란의 측정을 위하여 가속도계를 이용하였으며, 검증용 위한 진동 처짐량 측정을 위하여 별도 제작한 레이저를 이용한 구조물 끝단의 처짐각 측정 장치(MRS)를 이용하였다. 이 신호는 저주파 통과필터를 사용하였고, 1kHz로 샘플링 하였다. 일반적인 외란의 입력 주파수와 지향구조물의 고유진동수에 의한 대상영역은 30~100Hz 대역이므로 이 정도의 샘플링 주파수는 감지에 충분하다고 판단된다. Fig. 5는 장치 설치 결과와 대략적인 신호처리의 순서도이다. 각 시나리오는 10회 반복 수행하였다.

기동장비 지향구조물의 진동량을 실시간 측정하기 위하여 광학적인 기술기 측정방법을 이용하였다. 지향구조물의 기저부에 장착된 레이저 송신장치에서 발사된 레이저가 구조물 끝에 장착되어 있는 거울에 반사되어 되돌아오면 기저부의 수신 장치 내부 광센서에 도달하는 광점의 위치에 따라 전기신호를 출력하는 원리를 이용하는 것이다. 광센서는 수신평광계의 초점면에 평면 형태로 장착되는 PSD(Position

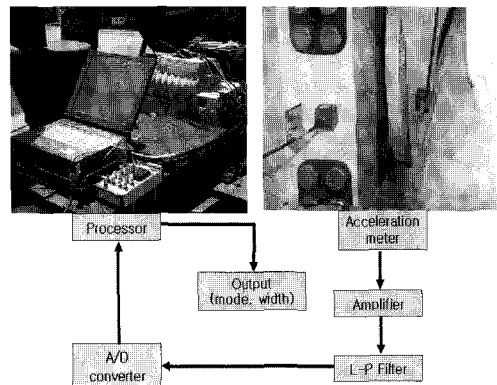


Fig. 5 Experiment equipment setting and signal processing procedure

**Table 1 Performance of deflection measurement system**

item	performance
resolution	0.01mil
accuracy	0.05mil
range	±5mil
bandwidth	1kHz over

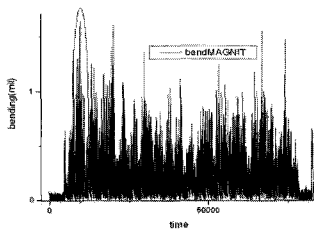
Sensitive Detector)를 사용한다.

본 시험에 적용하기 위하여, 지향 구조정밀도(0.15mil 이하)보다 정밀하고, 측정범위는 장비의 기동조건에서 최대 진동량 이상이 되어야 하며, 신호의 대역폭은 관심 있는 지향 구조물의 대역폭을 고려할 때 100Hz 이상이면 충분하다. 따라서 측정 장치는 0.05mil 이하의 정확도와 1KHz 이상의 대역폭을 갖고 상하/좌우 5mil(주행시험결과 기준) 범위까지 측정할 수 있도록 하였다. Table 1은 사용된 진동량 측정 장비의 성능 요약표이다.

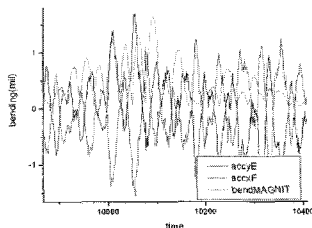
### 5. 실험결과 및 고찰

#### 5.1 지향구조물 진동 측정

실험의 타당성을 검증하기 위하여 가속도와 함께 진동 량을 측정하였다. Fig. 6 (a)는 측정된 결과이며, (b)는 장애물

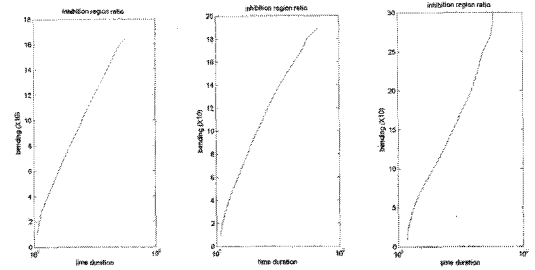


(a)



(b)

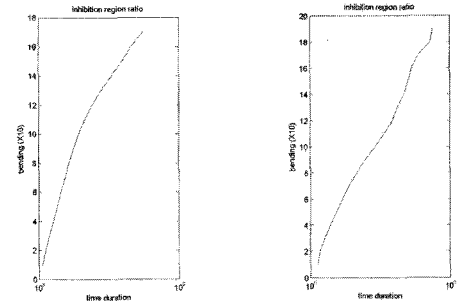
**Fig. 6 Deflection angle measurement result**



(a) 16km/h

(b) 24km/h

(c) 30km/h



(d) 16km/h

(e) 24km/h

**Fig. 7 Deflection angle distribution on driving time**

통과 순간에 가속도 값과 진동 값의 동시성 및 크기를 비교한 결과이다. 약 20msec의 지연효과가 관찰되었으며, 구조물의 세장비에 따라 차이가 발생한다.

Fig. 7은 시험 주행노면으로부터 발생하는 지향구조물의 진동량을 측정하여 전체 주행시간에 대하여 과도진동이 발생하는 정도를 분포로 나타낸 것이다. (a), (b), (c)는 장축 지향구조물의 경우이며 (d), (e)는 단축구조물의 경우이다. 속도가 증가함에 따라 진동제한폭 이상 발생하는 부분이 총 시간의 5.8%까지 점유시간이 증가하였다.

#### 5.2 신호처리 결과 및 고찰

Fig. 8은 평지기동과 장애물 통과시의 외란 가속도 신호의 모드선도를 구한 것이다. 진동감지 데이터의 수는 500개로 한정하였으며, 이는 500msec의 시간이 소요됨을 나타내며, 가속도와 굽힘 사이의 시간지연을 고려하면, 480msec 정도이다. 지향구조물의 운용상 이 정도의 지연은 큰 의미가 없다고 판단되며, 실시간 감지가 가능하다고 할 수 있다.

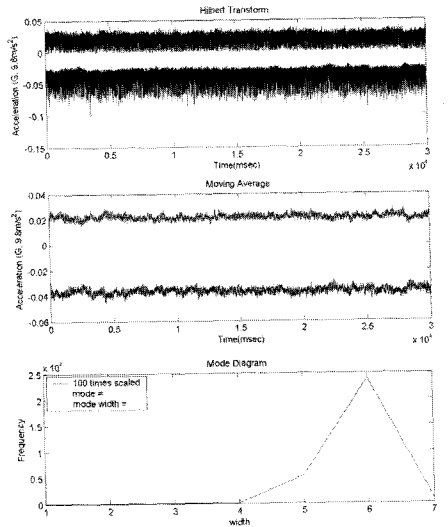
평지의 모드와 모드폭이 장애물 통과에 비하여 상당한 차이가 발생하는 것을 알 수 있다.

Fig. 9 (a)로부터 평지주행에서 장애물 통과로 이어지는

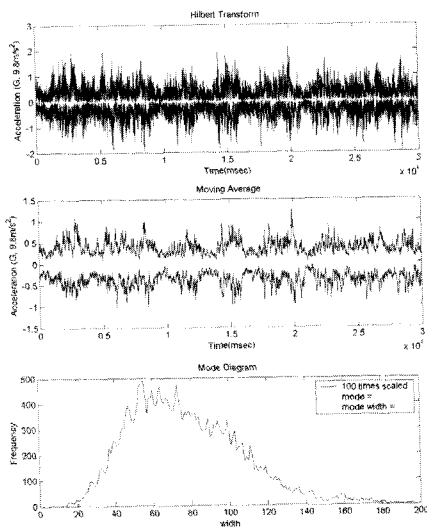
부분에서는 서로 다른 진동 패턴이 관찰되며, 낮은 진폭의 높은 빈도수 신호는 시간에 따라 감소한다. 따라서, 본 결과로부터 지형의 변화에 따른 감지도 가능하게 한다.

Fig. 9는 지향구조물의 길이변화에 대한 여러 가지 노면조건에서의 모드와 모드폭을 측정된 결과이다.

Table 2는 위의 결과에서 특성의 대표치인 모드와 모드폭을 표로 나타내었다. 노면은 I형으로 속도를 달리하였



(a) plain road condition

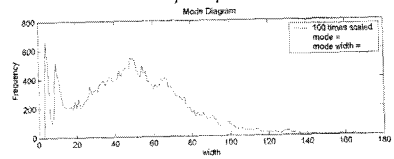


(b) obstacle pass condition

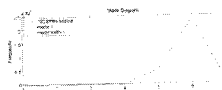
Fig. 8 Envelope signal and mode diagram

으며, 동일속도에서 다른 노면 형태에 대한 결과를 정리하였다.

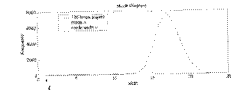
같은 구경장에 속도가 빨라지면 모드가 모드폭보다 커지며, 같은 속도에 구경장이 길어지면 모드폭이 모드보다 커진다. 이유는 구경장이 길어지면 진폭의 변화율이 진폭



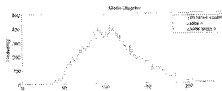
(a) 55cl, 16km/h, transient condition



(b) 55cl, 16km/h, plain



(c) 44cl, 16km/h, plain



(d) 55cl, 16km/h, type I



(e) 44cl, 16km/h, type I



(f) 55cl, 16km/h, type II



(g) 44cl, 16km/h, type II



(h) 55cl, 24km/h, type II



(i) 44cl, 24km/h, type II



(j) 55cl, 16km/h, type III



(k) 44cl, 16km/h, type III

Fig. 9 Mode diagram on the various driving condition

Table 2 Mode and mode width on speed change condition

	55cal	44cal
16km/h	55/0.77	50/0.36
24km/h	89/0.93	74/0.77

증가보다 더 빨리 증가하기 때문이다. 속도가 빨라지면 변화율 보다 전체적인 진동폭이 커진다. 따라서 긴 세장비에 서는 진동의 맥놀이 현상이 자주 발생한다고 판단할 수 있다.

Table 3은 각 노면에 대한 평균 모드와 모드 폭을 정리하였다.

노면에 대한 결과는 조건에 따라 큰 차이를 보였으며, 이는 입력 외란의 충격파형이 상이한 결과로 판단된다.

Fig. 10은 계측된 진동 변위량으로 지향 금지순간을 선정한 결과와 본 연구의 결과에 의하여 외란의 모드와 모드 폭을 이용하여 지향 금지순간을 선정한 결과의 비교그림이다. 변위량 방법의 경우 임계값 이상에서 지향금지를 수행하며, 그림에서는 사각 구간에서 임계값을 초과하였다. 그러나 순간적인 초과이며 다시 감소됨에 불구하고 다음 주요 진동주기 전까지는 금지를 수행한다. 그러나 본 연구의 결과에 의하여 진동의 변화가 커질 경우 금지순간을 선정하면 원 구간의 경우처럼 좀 더 정확한 지향 순간 선정이 가능하다.

위의 모든 결과자료에서 반복 수행 결과는 모드와 모드폭이 3% 이내로 거의 동일하게 산출되었다.

Table 3 Mode and mode width on the road condition

	55cal	44cal
Road type I	53/0.72	49/0.34
Road type II	107/1.03	86/0.66
Road type III	80/0.85	57/0.68

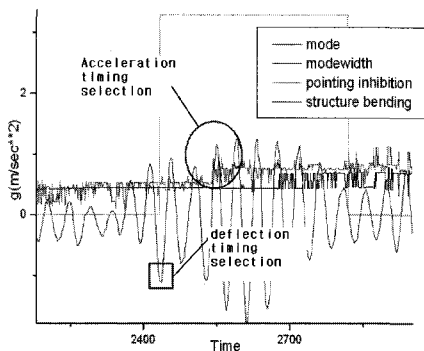


Fig. 10 Comparison of timing selection results

## 6. 결론

본 연구에서는 여러 기동장비에 적용하기 위하여 기동장비를 임의의 동특성을 갖는 시스템으로 가정하고, 지향성능에 영향을 주는 진동성분의 경향을 감지하는 방법에 대하여 제안하였다. 본 방법은 운용조건 변화 및 장비 특성에 대해서도 진동경향을 감지하여 감소상태 선정에 이용할 수 있는 방법으로서 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 본 연구에서 선정한 특징 값(모드, 모드폭)의 변화를 이용하여 실제 측정하려는 처짐 량의 과도변화 시점을 조사할 수 있다는 것을 확인하였다.
- (2) 본 연구에서 제안한 감소시간 선정방안을 적용하면 처짐 량 측정에 의한 방안보다 좀 더 정확한 지향순간 선정이 가능하다.
- (3) 지향구조물의 진동신호를 감지하기 위하여 고각 성분을 상대적으로 신뢰성 있는 신호로 사용하였으며, 이 신호는 주요 외란으로 지향구조물의 진동을 야기하는 주된 성분이다.
- (4) 진동경향의 실시간 감지를 위하여 포락신호를 계산하고 신호 처리하여 최종적인 모드선도를 적용하였다.
- (5) 모드선도로부터 다양한 노면으로부터의 외란, 운용상태 변화에 따른 가속도변화의 모드값을 사용한 지향성능향상의 가능성을 검증하였다.
- (6) 검증을 위하여 실시간 진동 량을 측정하였으며, 본 제안의 진동상태 선정결과와 비교하여, 기동시간내의 지향정밀도는 그대로 유지되었다.
- (7) 진동 경향분석에 따른 상태선정에 소요되는 시간은 약 480msec 정도였으며, 이는 운용상 충분한 시간이며, 필요에 따라 분석 정확도와 절충하여 적용할 수 있다.

## 참고 문헌

- (1) Bundy, M., Newill, J., Marcopoli, V., Michael, Ng. and Wells, C., 2000, "A methodology for characterizing barrel flexure due to Tank Motion," *ARL Report*, pp. 421~426.
- (2) Bird, J. S., 1990, "Measurement of Tank gun dynamics in support of a dynamic muzzle referencing system," *AD Report*, Defence Research Establishment Ottawa, pp. 634~681.

- (3) Youn, J. W., 2000, "A Study of Chatter Sensing using Cutting Force," *Transaction of KSMTE*, Vol. 9, No. 3, pp. 150~159.
- (4) Lee, S. Y., 2003, "Vibration Prediction using Neural Network," *Transaction of KSMTE*, Vol. 12, No. 5, pp. 1~7.
- (5) Schulz, H. and Hock, S., 1995, "Gun Dynamics," *Simatics*, pp. 35~338.
- (6) Harris, C. M. and Crede, C. E., 1961, *shock and vibration Handbook*, McGraw-Hill, New York.
- (7) Wilkerson, S. 1995, "Possible Effects of Gun Tube Straightness on Dispersion," *ARL Report*, June.
- (8) Oppenheim, A. V. and Schafer, R. W., 1989, *Discrete-time signal processing*, Prentice Hall inc.
- (9) Bornstein, J., Celmins, I., Plostins, P. and Schmidt, E. M., 1988, "Techniques for the Measurement of Tank Cannon Jump," *BRL Report*.