

연식주퇴 시스템의 오류모드 제어기법에 관한 연구

A Study on Fault Mode Control of a Soft Recoil System

신철봉[†] · 배재성* · 황재혁** · 강국정***

Chul-Bong Shin, Jae-Sung Bae, Jai-Hyuk Hwang, and Kuk-Jeong Kang

Key Words : 연식주퇴, Soft Recoil, FOOB(Fire-Out-Of-Battery), FIB(Fire-In-Battery)

ABSTRACT

A soft-recoil system, which is a new technology, can dramatically reduce a recoil force. Due to the inaccurate explosion, various fault modes may happen. These fault modes can cause the serious damage of the recoil system and must be suppressed to avoid them. In the present study, the fault mode control method of the soft-recoil system is investigated. A hydraulic damper is working under normal mode and a MR damper is additionally working when the fault modes happen. In the design of the fault mode controller, the detection method of the fault mode is important as well as its suppression. The results of the simulation show that the soft-recoil system performs when the fault modes happen.

1. 서론

파괴력의 증가를 위한 대구경화 및 고폭탄화, 그리고 사거리 연장에 따라 증대된 화력의 다기능 무장포신을 경량화된 플랫폼에 탑재하기 위해서는 사격충격력의 크기를 기존에 비해 경감시킬 수 있는 새로운 개념의 주퇴제어기술 개발이 필요하며, 미국을 비롯한 선진 국가에서는 이에 대한 활발한 연구가 진행되고 있다.

기존의 주퇴 시스템은 Fig. 1의 기존주퇴장치 개념도와 같이 주퇴부가 발사위치(battery position)의 정지 상태에서 추진체가 점화되어 가스압력에 의해 포탄과 주퇴부(recoil part)를 상반된 방향으로 가속시킨다(FIB, Fire-In-Battery). 가속된 주퇴부는 주퇴 시스템에 의한 저항력으로 인해 그 속도가 0이 될 때까지 감속된다. 정지된 주퇴부(Recoil Part)는 복좌 시스템(Recuperator)에 저장된 에너지에 의해 원래의 사격위치로 복귀한다.

연식주퇴(soft recoil) 기법은 Fig. 1의 연식주퇴장치 개념도와 같이 주퇴 운동부가 전방으로 가속될 때 발생하는 운동량을 이용하여 주퇴력 및 주퇴거리를

감소시키는 주퇴제어기술이다.

연식주퇴 개념의 최초 적용은 1906년 프랑스의 "Schneider-Ducrest cannon 65 de Montagon Modele"로 알려져 있으며, 미국의 경우는 50년이 지난 후, Rock Island Arsenal에 의해서 M101 견인포에 연식주퇴개념이 처음 적용되었다. 1990년대에는 ER유체(Electro-Rheological Fluid)가 사용된 댐퍼를 적용한 연식주퇴장치의 시제품인 Viper가 RIA(Rook Island Arsenal)사에 의해 개발되었다.

본 연구에서는 기존의 주퇴기법 및 독립형 연식주퇴기법에 대한 동역학 모델을 수립하여 그 특성을 비교 고찰하였으며, 연식주퇴기법의 정상모드와 오류모드에 대한 동특성과 MR댐퍼를 이용한 오류모드의 제어기법에 대하여 고찰하였다.

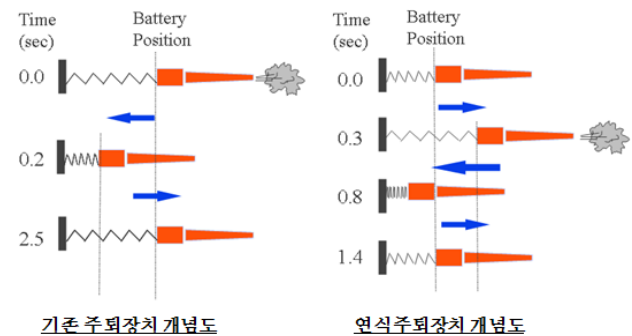


Fig. 1 Concept of Soft Recoil System

[†] 한국항공대학교 항공우주및기계공학부 대학원
^{*} 교신저자, 조교수, 한국항공대학교 항공우주및기계공학부
 E-mail : jsbae@kau.ac.kr
 Tel : (02) 300-0102, Fax : (02) 3158-4429
^{**} 교수, 한국항공대학교 항공우주및기계공학부
^{***} 선임연구원, 국방과학연구소

2. 연식주퇴기법의 수학적 모델링

2.1 운동방정식

연식주퇴에는 주퇴장치와 복좌장치가 결합된 종속형과 주퇴장치와 복좌장치가 분리된 독립형이 있는데 본 연구에서 사용된 모델은 독립형이다. 복좌기에는 공기챔버 방식과 스프링 방식이 있는데 여기서는 스프링 방식을 사용하였고, 처음에는 스프링이 압축되어 있어 주퇴부를 가속하는 작용을 한다. 주퇴방향을 양의방향으로 정의하였고 Latch된 위치를 영점으로 정의하였다. 운동 메커니즘은 아래와 같다. 처음 Latch된 위치에서 Latch를 풀면 스프링의 힘에 의해 주퇴부를 전방 가속시킨다. 일정한 속도에 도달 후 격발이 되면 주퇴부는 Breech Force에 의해 음의방향으로 주퇴 운동을 하게 된다. 주퇴 시 유압 챔퍼에 의해 Breech Force를 흡수하는 동시에 다음 가속을 위해 에너지를 스프링에 저장한다. 주퇴 종료 후 주퇴부는 다시 스프링의 힘에 의해 Latch 위치로 복귀한다. 이 메커니즘에 대한 운동방정식을 세우면 아래와 같다⁽¹⁾.

$$M_r \ddot{x} = B(t) + W_r \sin \theta - \frac{\rho A^3}{2a_e^2} \dot{x}^2 \times \text{sign}(\dot{x}) - k(x + x_1) + F_f \times \text{sign}(\dot{x}) \quad (1)$$

식(1)에서 $B(t)$ 는 Breech Force이고 W_r 는 주퇴부의 무게 이고 θ 는 포신의 기울기 이다. 본문에서는 기울기를 0으로 하였다. ρ 는 밀도를 나타내고 A 는 주퇴피스톤의 유효면적이며 a_e 는 등가오리피스의 유효면적이다. k 는 스프링 상수이고 x_1 은 초기상태에 압축된 스프링의 길이이며 F_f 는 마찰력이다.

본문에서는 비압축성 유동으로 해석하였다. 비압축성으로 할 때 단위시간당 유량 Q 는 식 (2)와 같다.

$$Q = A \dot{x} = c_o a_o v_o \quad (2)$$

식(2)에서 c_o 는 유량계수이다. 등가오리피스를 통과하는 유체의 압력손실 Δp 는 식 (3)과 같다.

$$\Delta p = \frac{\rho A^2 v_o^2}{2a_e^2} \quad (3)$$

여기서 v_o , a_o 는 각각 유체의 속도, 등가오리피스면

적이고 Δp 는 모든 오리피스가 형성하는 압력손실의 합이다. 즉,

$$\begin{aligned} \Delta p &= \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 + \dots + \Delta p_n \\ &= p_1 - p_2 + p_2 - p_3 + \dots + p_n - p_{n+1} \\ &= p_1 - p_{n+1} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, p_1 은 실린더내의 유압 p 와 동일하며 p_{n+1} 은 압력 p 를 받고 있는 주퇴피스톤의 반대방향의 유압으로 "0"이다. 그러므로 주퇴력은 식 (5)와 같게 된다.

$$F = \Delta p A = \frac{\rho A^3 v_o^2}{2a_e^2} \quad (5)$$

2.2 등가오리피스 유효면적

본 연구에서 사용된 오리피스는 주퇴 오리피스와 누유면적이 병렬로 연결된 방식이다. Fig. 2와 같이 2개의 오리피스가 병렬로 연결된 경우, 각 오리피스를 통과하는 유체의 압력손실 Δp 는 동일한 것으로 가정한다. 두 오리피스를 통과하는 총 유량 Q 는 식 (6)과 같다.

$$Q = Q_{leak} + Q_o \quad (6)$$

그러므로 등가오리피스를 통과하는 유량 Q 는 아래와 같다.

$$Q = (c_{leak} a_{leak} + c_o a_o) \sqrt{\frac{2\Delta p}{w}} \quad (7)$$

따라서, 등가오리피스 유효면적 a_e 는 식 (8)과 같다.

$$a_e = c_{leak} a_{leak} + c_o a_o \quad (8)$$

여기서, c_{leak} 는 누유면적의 유량계수이고 c_o 는 오리피스의 유량계수이며 a_{leak} 는 누유면적이고 a_o 는 등가오리피스의 면적이다.

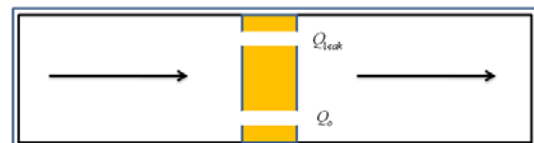


Fig. 2 Parallel Orifice

3. 연식주퇴 시뮬레이션

3.1 FIB와 FOOB의 비교

연식주퇴 시스템의 시뮬레이션을 수행하여 연식주퇴와 FIB, 정상모드와 오류모드를 비교함으로써 연식주퇴 시스템의 타당성과 오류모드의 위험성 및 오류모드를 제어할 추가 댐퍼의 필요성을 설명하였다(3),(4). Fig. 3는 시간에 따른 Breech Force, 속도, 변위와 주퇴력을 보여준다. Breech Force는 Fig. 3의 첫 번째와 같다. 주퇴운동부는 초기에 전방으로 가속된 후 Breech Force에 의해 속도가 양의 방향(주퇴방향)으로 최대가 되고, 주퇴과정에 속도가 줄어들어 정지된 후 원래의 위치(latch 위치)로 복귀한다. 변위는 전방가속 시 음의 방향(전방방향)으로 증가하다가 Breech Force에 의해 주퇴한 후, 최대 주퇴위치에서 다시 스프링 압력에 의해 원래의 위치로 복귀한다. 주퇴력의 변화는 속도 그래프와 비슷하지만 마찰력에 의해 수치가 급격히 변하는 부분이 있다.

Fig. 4은 FIB와 FOOB의 시뮬레이션 결과를 보여준다. FOOB의 속도, 주퇴 변위, 주퇴력이 FIB보다 현저하게 감소하는 것을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 연식주퇴기법은 기존 주퇴기법에 비해 현저한 주퇴력 감소가 가능함을 알 수 있다.

3.2 정상 모드와 오류모드 비교

시뮬레이션 결과로부터 FOOB의 경우 현저한 주퇴력의 감소가 가능함을 알 수 있었다. 그러나, 오류모드 일 경우 FOOB시스템의 성능도 분석하여야 한다.

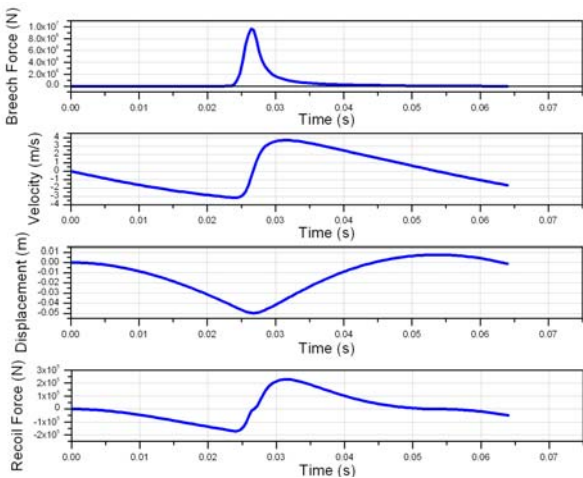


Fig. 3 Time Histories of Breech Force, Velocity, Displacement and Recoil Force

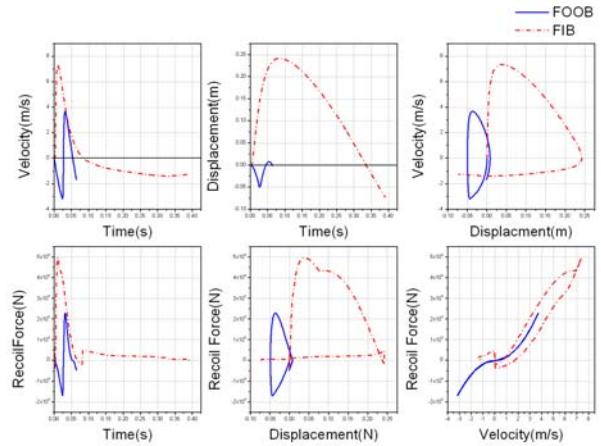


Fig. 4 FIB vs. FOOB

Fig. 5에서와 같이 오류모드에는 Prefire, Hang-fire, Misfire 등 모두 세 가지 경우가 있다. Prefire란 발사 위치에 도달하기 전에 사격이 되는 경우이고 Hang-fire란 발사 위치를 통과하고 사격이 되는 경우이고 Misfire이란 사격이 되지 않은 경우이다.

Fig. 6은 정상 모드와 Prefire 모드의 시뮬레이션 결과를 보여준다. Prefire의 경우 전방 운동량이 정상 모드보다 적고 Breech Force는 변하지 않으므로 주퇴거리와 주퇴력이 증가하게 되어 후방 Mount에 큰 충격을 줄 수 있다. Prefire 시 속도, 주퇴 변위, 주퇴력이 정상 모드 경우보다 현저하게 크다.

Fig. 7는 정상 모드와 Hang-fire 모드의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 이 경우는 발사 위치를 지나쳐 제어기가 오류모드로 인식하고 추가의 댐퍼가 작동하여 전방가속을 감소시키게 된다. 그러나, 속도가 감소되는 도중에 포가 발사되어 전방 운동량이 정상모드에 비해 작아지게 된다. 따라서, 주퇴부의 주퇴거리 및 주퇴력이 정상 모드 보다 현저하게 크게 된다.

Fig. 8은 정상 모드와 Misfire 모드를 비교한 그래프이다. 이 경우에는 사격이 되지 않으므로 Breech

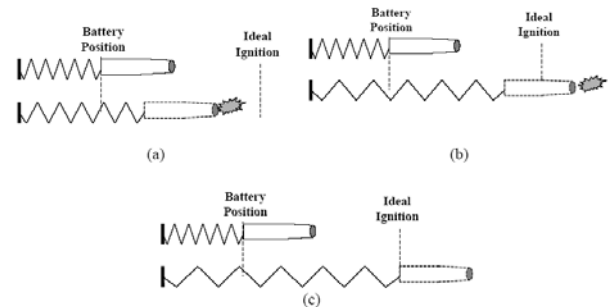


Fig. 5 Fault Mode (a) Prefire, (b) Hang Fire, (c) Misfire

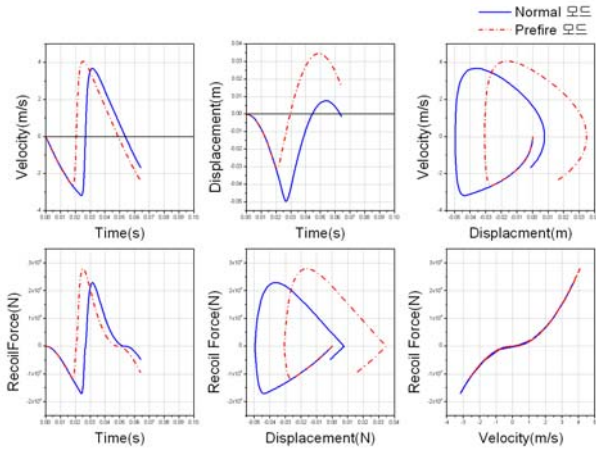


Fig. 6 Normal Mode vs. Prefire Mode

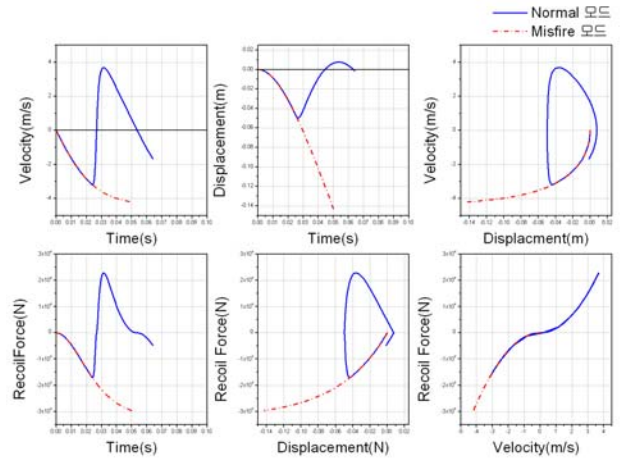


Fig. 8 Normal Mode vs. Misfire Mode

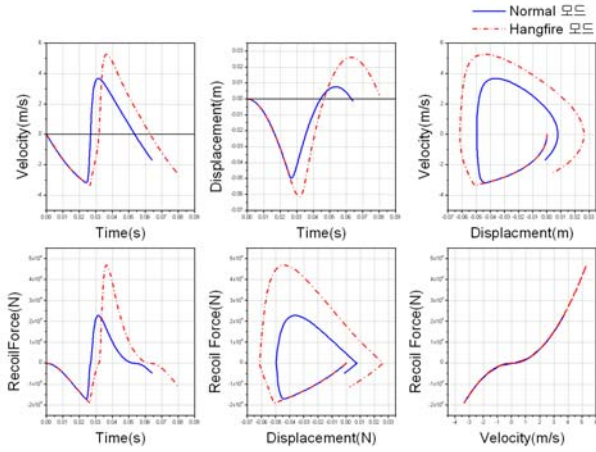


Fig. 7 Normal Mode vs. Hang Fire

Force가 발생하지 않아 스프링 힘에 의해 주퇴부가 전방 Mount에 충돌하여 큰 충격을 줄 수 있다. Misfire 시 주퇴 운동이 발생하지 않는다.

3.3 MR댐퍼를 이용한 오류모드 제어

오류모드의 시뮬레이션 결과로부터 유압댐퍼만 사용하는 FOOB 시스템은 정상 모드에서는 주퇴력을 감소시킬 수 있지만, 오류모드가 발생하는 경우, 오히려 주퇴력이 증가할 수 있다. 따라서, 오류모드 시 주퇴력 제어가 가능한 별도의 댐퍼가 필요하다. 본 연구에서는 이를 위해 MR 댐퍼를 사용하였다⁽⁵⁾. MR댐퍼의 운동 방정식은 식(9)와 같다.

$$F = \frac{12\eta A_p^2 L}{g^3 w} \times v + \frac{3\tau_y A_p l}{g} \text{sgn}(\dot{x}) \quad (9)$$

여기서 L , g , η , ω , v , A_p , τ_y , l 는 각각 길이, 유로의 크기, 유체의 점성, 깊이, 속도, 피스톤 헤드의 면적, 전단응력, 자기장 적용구간을 나타낸다.

Prefire시 같은 시간에 주퇴부의 전방가속 거리가 정상모드에 비해 작다. 그러므로 전방가속 거리가 정상모드의 주퇴거리와 비교하여 작아지기 시작하면 Prefire 모드로 인식한다. 또한 Prefire시 전방 운동량이 작아짐과 동시에 Breech Force는 변하지 않으므로 정상모드와 같은 전방가속 거리에서 주퇴부의 속도가 정상모드에 비해 크다. 같은 거리에서 속도가 같으면 주퇴 범위를 초과하지 않는다. 그러므로 같은 주퇴 거리에서 주퇴 속도가 정상모드의 속도보다 크면 MR댐퍼에 전류를 가하여 댐핑힘을 증가시켜 속도를 작게 함으로 오류모드를 제어한다. Fig. 9와 같이 Prefire 시 MR댐퍼에 전류를 가하지 않았을 때에는 저항력이 크게 증가하지 않지만 전류를 가하면 전기장에 의해 감쇠계수가 증가하므로 저항력이 증가하

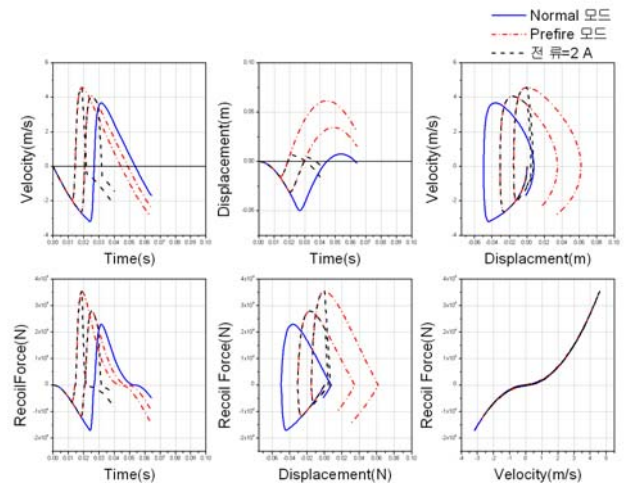


Fig. 9 Control Prefire Mode using MR Damper

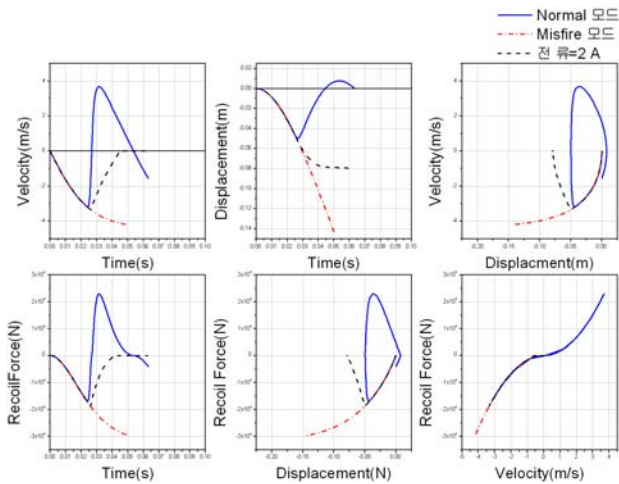


Fig. 10 Control Misfire Mode using MR Damper

게 된다. 전방가속 거리가 부동함에도 전체 주퇴거리는 정상모드 보다 작게 나오므로 제어 가능함을 알 수 있다.

Misfire시에는 전방 가속 거리가 정상모드의 경우보다 훨씬 크게 된다. 그러므로 전방가속 거리가 정상모드 경우의 최대 전방가속 거리보다 크면 MR댐퍼에 전류를 가하여 추가의 감쇠력을 가한다. Fig. 10과 같이 Misfire이 발생 시 MR댐퍼에 최대 전류를 가하여 속도가 영이 되도록 줄이므로 제어가 됨을 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 주퇴력 감소를 위한 독립형 연식주퇴 시스템의 동역학 모델을 수립하였다. 수립된 연식주퇴 시스템의 운동방정식으로부터 전방가속 및 주퇴운동을 시뮬레이션하였으며, 연식주퇴시스템의 주퇴력 및 주퇴거리가 일반 주퇴시스템보다 현저히 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나, 연식주퇴 시스템은 오류모드가 발생할 경우, 오히려 주퇴력이 기존의 주퇴 시스템보다 증가할 수 있다. 본 연구에서는 오류모드 제어방법에 대해 연구하였으며, 오류모드 발생 여부를 감지하는 방법을 제안하였다. 시뮬레이션을 통해 오류모드가 발생 하였을 때 두 가지의 오류모드에 대해 각각의 제어 알고리즘을 이용하여 주퇴력 및 주퇴거리의 증가를 감소시킬 수 있음을 보였다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 기초연구 연구비 지원

(ADD-07-05-02)에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 1996.10, 가변주퇴제어용 주퇴제어오리피스 설계
- (2) Harvey Garver, 2003, "Design And Firing Tests Of A Firing Out-Of-Battery Recoil Mechanism", Rock Island Arsenal.
- (3) Ronald Gast, Eric Kathe, Michael Gully, Robert Durocher, Kenneth Olsen, Steven Pigliavento, 2003, "Design, Testing, And Simulation Of An Experimental 105mm Fire Out-of-Battery(FOOB) Direct Fire Gun", US Army Armament Research, Development And Engineering Center.
- (4) E. Kathe, R. Gast, 2002, "A Fire-Out-Of-Battery Tank Gun: Theory And Simulation", US Army Armament Research, Development And Engineering Center.
- (5) Mehdi Ahmadian, Randall J. Appleton, and James A. Norris, 2003, "Designing Magneto-Rheological Dampers in a Fire Out-of-Battery Recoil System", IEEE Transactions On Magnetics, VOL. 39, NO.1, pp. 480~485.