

연료전지 Z-소스 능동전력필터의 병렬운전 시스템

엄준현*, 정영국**, 임영철*
 *전남대 전기공학과, **대불대 컴퓨터정보공학부

A Parallel Operation System of the Z-Source Active Power Filter with Fuel Cells System

*J.H. Oum, **Y.G. Jung and *Y.C. Lim
 *Chonnam National University, **Daebul University

Abstract - This paper proposes a parallel operation system of the Z-source active power filter using one fuel cells(FC) system. The proposed system is composed of two Z-source inverters operating in parallel only one PEM(Polymer Electrolyte Membrane)FC system. Also, as the control algorithm of the active power filter, a single phase P-Q theory and PI control are adopted. The effectiveness of the proposed system is verified by the PSIM simulation in the steady state and the transient state.

40-60%로 다른 발전 방식에 비하여 높은 편이다. 연료로는 천연가스, 메탄올, 석탄가스등 다양하며, 배기가스 중 NOx, SOx 및 분진이 거의 없고, CO2 발생량은 매우 적다. 또한 회전부위가 없어 소음이 없으며, 다른 발전 방식과 같은 다량의 냉각수가 불필요하며, 사용자 부근에 배치하기 때문에 송배전시의 설비 및 전력손실이 적다. 따라서 최근에 분산발전(Distribution Generation)용 전원으로 각광 받고 있다.

1. 서론

최근 분산발전용 연료전지 전원(Fuel Cells System : FC)[1]은 그 원리의 특성상 깨끗하고 효율적이며, 신뢰성이 높아 청정 대체 전력 원으로 관심이 집중되고 있다. 이 FC는 2차 전지 탱크와 달리, 연료가 공급되는 한 전력을 계속 발전하여 공급할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 FC는 순간적인 부하의 변동에 빠르게 응답하지 못하므로 2차 전지탱크나 슈퍼 캐패시터(Supercapacitor)등과 같은 전기 에너지 저장장치와 함께 사용하여야 순간적인 부하변동에 대응할 수 있다[2-4].

일반적으로 FC 시스템으로부터 필요한 전력을 얻기 위해서는 여러 단의 비 절연 형 또는 절연 형 부스트 컨버터를 사용하여 FC 출력전압을 승압시키고 있다. 최근에 연구된 Z-소스 인버터[5,6]는 독특한 스위칭 패턴의 제어에 의해 출력전압을 승압하기 때문에 추가적인 부스트 컨버터를 필요치 않아서 저전압-대전류의 전기적 특성을 갖는 FC 시스템에 매우 적합하다.

본 연구에서는 V-소스 또는 I-소스에 의해 d.c.보상전원을 확보하는 종전의 능동전력필터[7,8] 대신에 1개의 FC를 d.c.전원에 대하여 병렬 운전하는 Z-소스 능동전력필터 시스템[9]을 제안하였다. FC는 부하에 따라 저전압 대 전류의 변동이 큰 특성을 가지고 있다. 따라서 한 개의 FC에 2대의 능동전력필터가 병렬로 운전하게 되면 1대의 능동전력필터가 단독으로 운전하는 것 보다 보상전류 분담에 있어서 매우 유리하다. 능동전력필터의 d.c.전원으로서 FC는 낮은 반응온도를 갖고 있으며 가정용, 자동차용, 이동용 전원에 적합하며 현재 실용화 및 상용화가 빠르게 진행되고 있는 PEM(Polymer Electrolyte Membrane)[6]을 사용하였다. 본 연구의 타당성은 정상상태 및 과도상태의 PSIM 시뮬레이션에 의하여 검토하였다.

2. 연료전지의 특성

FC는 2차 전지(Battery)와는 달리 연료의 산화에 의하여 생기는 화학 에너지를 직접 전기 에너지로 변환시키는 일종의 발전장치이다. 일반적으로 FC는 발전 효율이

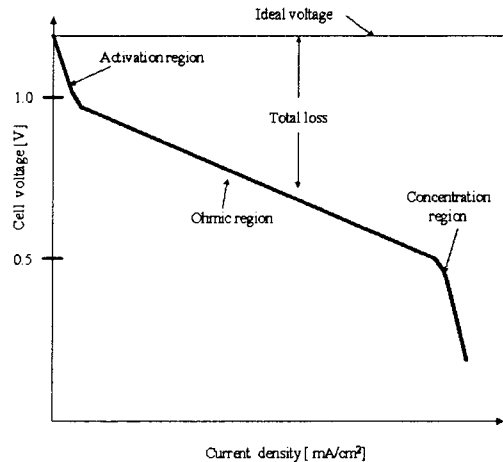


그림 1 PEMFC의 V-I곡선
 Fig.1 V-I curve of the PEMFC

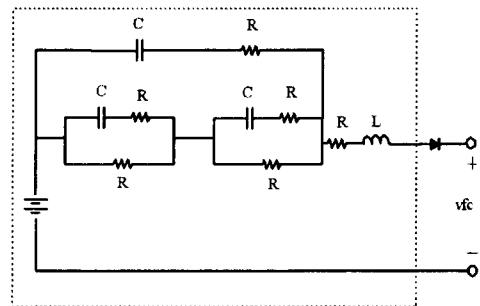


그림 2 PEM 연료전지의 등가회로
 Fig.2 Equivalent circuit of the PEM fuel cell

그림 1은 본 연구에서 Z-소스 인버터의 d.c.전원으로 사용한 고분자 전해질 연료전지(PEMFC)의 1 cell에 대한 전압-전류(V-I)특성을 나타내고 있다. FC가 100°C 이하에서 작동되는 경우, FC의 OCV(Open Circuit Voltage)

는 약 1.2V정도이다. 그러나 실제로 FC가 작동되면, 이론치 보다는 전압강하가 더 일어남을 알 수 있다. 그림 1을 살펴보면 FC는 초기에 빠른 전압강하를 보이며, 전류밀도가 증가됨에 따라 전압이 선형적으로 강하되며, 높은 전류밀도에서는 매우 급격한 전압강하가 일어난다.

PEMFC는 AvistaLab SR-12(500W)을 모델로 하였으며, 등가회로는 그림 2와 같다. SR-12(500W)는 무부하 전압 $v_{cell}=40.6v$, 정격전압 $v_{base}=28.9v$, 정격전류 $i_{base}=17.3A$ 의 규격을 갖고 있다. PEMFC는 출력전압이 일반적으로 48v이지만, 부하의 조건에 따라서 42v-60v로 출력전압이 변동하며 또한 시동 시간이 수초에서 수 십초로 매우 느린 시동 시간을 갖고 있다.

3. 제안된 시스템

그림 3은 본 연구에서 제안된 1개의 FC와 병렬로 연결된 Z-소스 능동전력필터 시스템을 나타내고 있다. 전원전압 v_s 와 비선형 부하전류 i_L 로부터 비선형 부하의 왜형 및 역률저하 성분(고조파 및 기본과 무효전류)을 검출하고 이를 보상하기 위한 기준신호 i_c^* 를 연산한다. 이 i_c^* 에 상응하는 실제 보상신호 i_{c1} 과 i_{c2} 를 인버터#1과 인버터#2가 각각 균등 분담하여, 전원 측으로 주입하면 전원 측의 왜형성분은 감소하고 역률은 향상하게 된다. 제안된 시스템은 오직 1대의 FC에 여러 대의 인버터를 모듈로 연결 가능하며, 특히 부하에 따라 크게 변동하는 FC의 단자전압과 전류의 특성을 고려할 수 있다. 즉 단자전압의 변동은 Z-소스 인버터의 Z-소스 네트워크와 스위칭 상태로 조절하며, 대 전류의 특성은 병렬 운전에 의하여 해결할 수 있다.

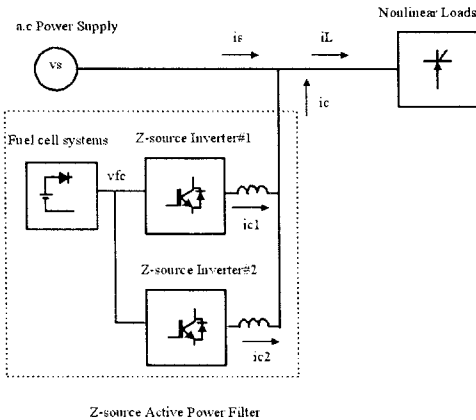


그림 3 제안된 시스템
Fig.3 The proposed system

단상의 비선형 부하에 인가되고 있는 순시전압 v_s 과 순시전류 i_L 는 (1)과 (2)로 표현 가능하다.

$$v_s = \sqrt{2} E \sin \theta \quad (1)$$

$$i_L = \sum \sqrt{2} I_m \sin(m\theta - \phi_n) \quad (2)$$

$$= i_p + i_q + i_h = i_f + i_h \quad (3)$$

여기서 i_p , i_q , i_f , i_h 는 각각 유효전류, 기본과 무효전류, 기본과 전류 그리고 고조파 전류 성분이다.

단상으로부터 2상을 구하기 위해서 (1)과 (2)를 각각 90° 지연시킨 성분을 생각할 수 있고, 따라서 (4)와 (5)와 같은 α - β 정좌표에서의 2상 성분이 구해진다.

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e(\theta) \\ e(\theta - 90^\circ) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2} E \sin \theta \\ -\sqrt{2} E \cos \theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i(\theta) \\ i(\theta - 90^\circ) \end{bmatrix} \quad (5)$$

순시유효전력 p 과 순시무효전력 q 는 3상 시스템과 같은 형태로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_a & e_\beta \\ -e_\beta & e_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{q} \end{bmatrix} \quad (6)$$

p 와 q 는 저역통과필터(LPF)를 거치게 되면 \bar{p} (p 의 d.c 성분)와 \bar{q} (q 의 d.c 성분)가 구해지며, PLL(Phase Locked Loop)에 의해 전원전압과 동기된 $\sin \theta$ 와 90° 위상차가 나는 $\cos \theta$ 로부터 순시유효전류는 다음으로 구할 수 있다.

$$i_p = \bar{p} \sin \theta \quad (7)$$

이상의 순시유효전류로부터 보상기준치 i_c^* 는 다음과 같이 얻어진다.

$$i_c^* = i_L - i_p \quad (8)$$

그림 4는 제안된 시스템의 제어 블록선도를 나타내고 있다.

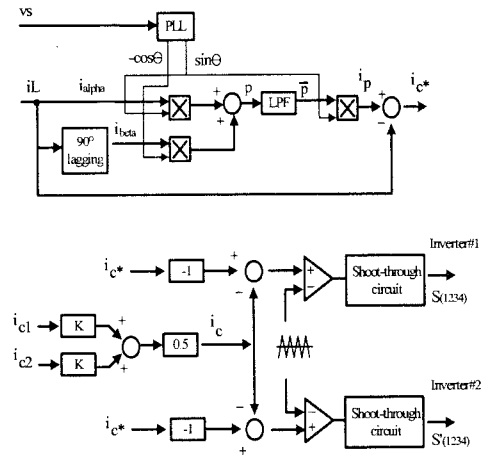


그림 4 제안된 시스템의 제어 알고리즘
Fig.4 The control algorithm of the proposed system

4. 시스템 구성

그림 5는 본 연구에서 제안된 1개의 FC로 병렬 운전하는 Z-소스 능동전력필터의 하드웨어를 나타내고 있다. 그림 5에서 보는 바와 같이 Z-소스 인버터의 d.c단은 스택 무부하 개방전압이 40.6v인 연료전지가 연결되어 있다. PWM변조는 $f_s=5.4kHz$ 캐리어 비교방식이며, 변조지수 $M=0.645$, shoot-through 시간은 $T_o=40\mu s$ 이며 따라서 shoot-through 듀티비는 0.216으로 설정하였다. 비선형 부하로는 전압형 다이오드 정류기를 사용하였다. 표 1에 는 본 연구의 시스템 파라미터를 나타내었다.

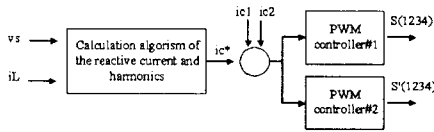
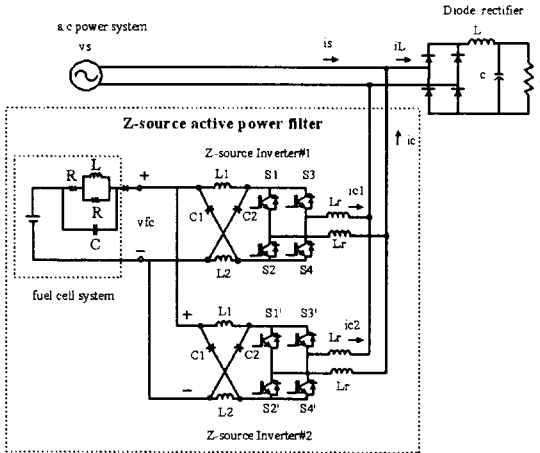


그림 5 제안된 시스템
Fig.5 The proposed system

표 1 시스템 파라미터
Table 1 System Parameters

vs(a.c)	311v(peak)/60Hz
iL	70A(peak)
vc1(d.c)	405v
fsw	5.4kHz, SPWM, M=0.645
shoot-through duty ratio	0.216
Z-source inverter	L1=L2=160uH C1=C2=1000uF
Lr	3mH

5. 결과 및 고찰

그림 6은 1개의 FC전원과 병렬운전 하는 Z-소스 능동 전력필터가 동작할 때, 각각의 인버터가 발생하는 보상 전류를 나타내고 있다. 전체 보상전류 $i_c=50A$ 에 대하여 인버터#1과 인버터#2는 각각 $i_{c1}=i_{c2}=25A$ 만을 부담하여도 됨을 보여준다. 인버터가 모듈로 병렬 운전되기 때문에 우선 유지보수가 용이하고, 부하용량이 증가되는 경우에는 시스템의 중단 없이 증가분의 인버터 모듈만 추가하면 된다. 만약 병렬운전이 없이 인버터#1만이 존재하는 경우, 인버터#1은 보상전류 $i_c=i_{c1}=50A$ 를 모두 부담하여야 하며, 이는 인버터 스위칭 소자의 용량 증가와 비용 증가를 유발하는 원인이 된다.

그림 7은 보상전류가 $50A \rightarrow 25A \rightarrow 50A$ 의 변화하는 과도상태에 대한 인버터#1, 인버터#2가 부담하는 보상전류 i_{c1} 과 i_{c2} 를 나타낸 것이다. 과도상태에서도 양호한 보상전류 분담이 이루어짐을 알 수 있다.

그림 8은 제안된 시스템이 동작하는 경우, 정상상태에 성의 비선형 부하전류 i_L , 보상전류 i_c 그리고 전원전류 i_s 를 각각 나타내고 있다. 그림 4와 (8)에 의하여 연산된 보상기준 전류를 제안된 시스템이 잘 추종하고 있음을 알 수 있으며, 이로 인해서 전원전류 i_s 는 40A(peak)의 정현파를 유지하고 있다.

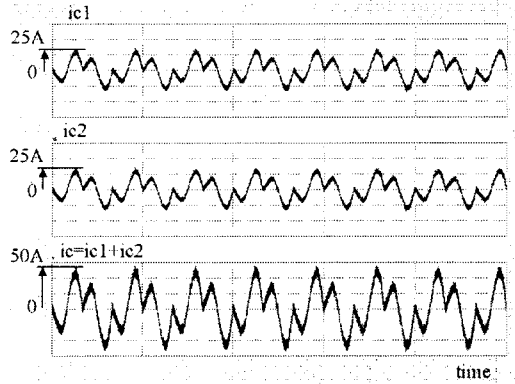


그림 6 정상상태에서의 보상전류 파형
Fig.6 Compensating current in steady state

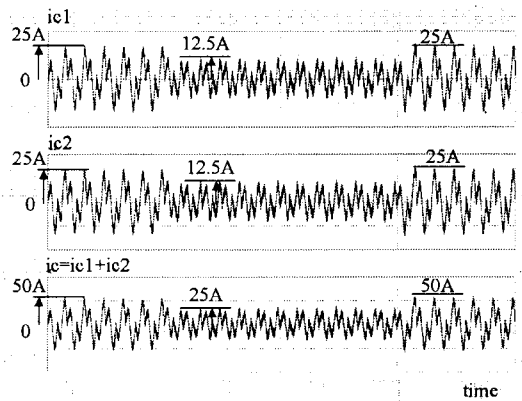


그림 7 과도상태에서의 보상전류 파형
Fig.7 Compensating current in transient state

그림 9는 그림 8로 나타낸 i_L , i_c 그리고 i_s 에 대한 고조파 스펙트럼 분석 결과이다. i_L 을 살펴보면, 유효 성분과 기본파 무효성분의 합인 60Hz 기본파 성분을 비롯하여 여러 고조파 성분들이 존재하고 있다. 그러나 i_s 스펙트럼에는 기본파 60Hz 성분 중 무효성분이 감소되었으며, 또한 기타 고조파 성분들도 매우 저감됨을 알 수 있다.

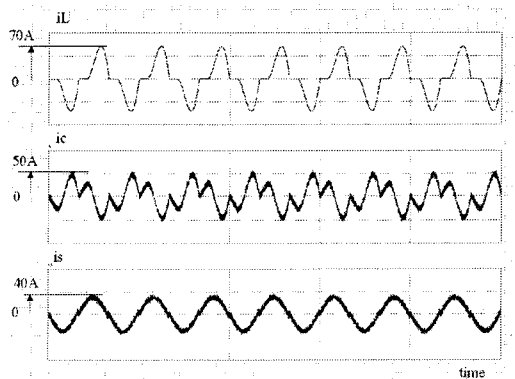


그림 8 정상상태에서의 보상성능
Fig.8 Compensation performance in steady state

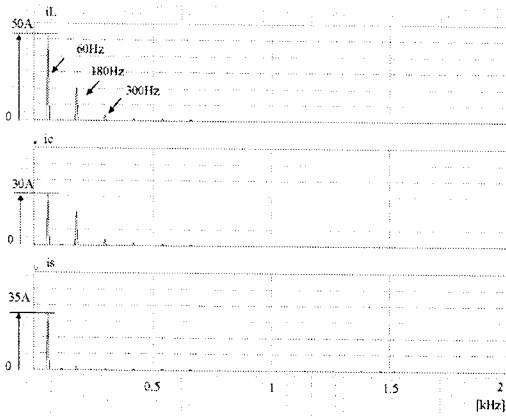


그림 9 정상상태의 고조파 스펙트럼
Fig.9 The harmonic spectra in steady state

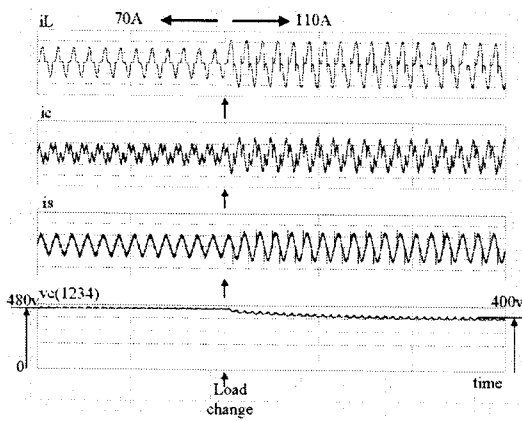


그림 10 과도상태의 보상특성(1)
Fig.10 Compensation characteristics in the transient state(1)

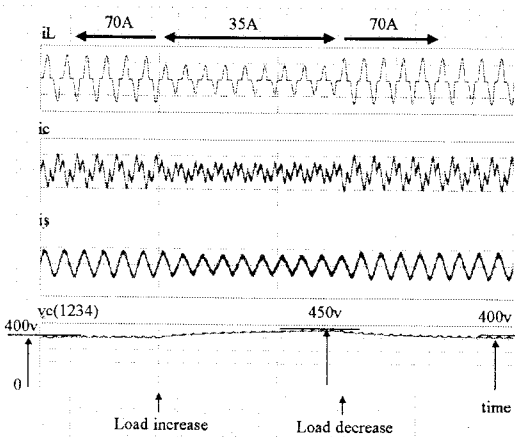


그림 11 과도상태의 보상특성(2)
Fig.11 Compensation characteristics in the transient state(2)

그림 10은 비선형 부하 전류가 70A에서 110A로 급증하는 과도상태에서의 제안된 시스템의 보상성능을 나타내고 있다. 이 경우 보상은 양호하게 이루어지고 있으며, Z-소스 인버터의 d.c전압은 480V에서 400V로 감소됨을

알 수 있다. FC는 부하에 대한 의존성이 매우 크기 때문에 시동시 또는 매우 큰 부하변동이 발생하는 경우에는 슈퍼 커패시터나 저 전력의 2차 전지 뱅크와 같은 보조 에너지 저장장치와 연동하여야 안정되게 출력전압을 조정할 수 있다.

그림 11은 부하전류가 70A→35A→70A의 순서로 감소 및 증가 되는 경우의 과도상태에서의 보상특성을 나타낸 것이다. 이와 같이 매우 급변하는 과도상태에서도 제안된 시스템에 의하여 전원전류 is는 정현파를 잘 유지할 수 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 1개의 연료전지(FC)로 병렬 운전하는 Z-소스 능동전력필터 시스템을 제안하였다. Z-소스 인버터에 의하여 보상전류를 발생하기 때문에, 저전압-대전류 특성을 갖는 FC의 d.c전압을 부스트 시킬 별도의 여러 단의 전력변환기가 필요하지 않아 고효율의 능동전력필터 시스템의 구현이 가능하다. 1개의 FC에 인버터가 병렬 운전하기 때문에 스위칭 소자의 정격이 낮아도 되며 부하 증가시 증가분의 인버터 모듈만을 추가하면 되기 때문에 유지 보수 면에서도 유리하다. 제안된 시스템을 전압형 다이오드 정류부하에 적용해본 결과, 각각의 인버터 모듈은 전체 보상전류를 균등하게 분담함을 알 수 있었고, 보상성능 역시 양호하였다.

FC를 능동전력필터의 d.c전원으로 사용하기 때문에 전압하향 부분이 없어도 되며, 정전 등 교류전원에 사고가 발생하는 경우에 있어서, FC와 2차 전지뱅크를 연동하여 비선형 부하에 연속적으로 유효전력을 공급할 수 있는 UPS기능에 대한 연구가 기대 된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 '전남대 고품질 전기 전자 부품 및 시스템 연구센터'의 연구비 지원으로 연구된 결과의 일부임.

[참 고 문 헌]

- [1] P.J.H. Wingelaar, J.L. Duarte and M.A.M. Hendrix, "Dynamic Characteristics of PEM Fuel Cells", in Conf. Rec., IEEE PESC'05, 2005, pp.1635-1641.
- [2] 최세완, "대체에너지 산업에서의 전력전자기술", 전력전자학회지 제8권 제4호, 2003년 8월
- [3] 김효성, "전원환경과 전력품질 특집", 전력전자학회지 제10권 제6호, 2005년 12월
- [4] "Fuel Cell Seminar-Special Session on Fuel Cell Power Conditioning and International Future Energy challenge", (Miami Florida), 2003
- [5] Fang Zheng Peng, "Z-Source Inverter", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol.39, No.2, pp.504-510, 2003.
- [6] Jin-Woo Jung, Min Dai, and Ali Keyhani, "Modeling and Control of a Fuel Cell Based Z-Source Converter," in Conf. Rec., IEEE APEC'05, 2005, pp.1112-1118.
- [7] Y.G. Jung, W.Y. Kim, Y.C. Lim, S.H. Yang and F. Harashima, "The Algorithm of Expanded Current Synchronous Detection for Active Power Filters Considering Three-Phase Unbalanced Power System", IEEE Trans. Ind. Electron., vol.50, no.5, pp.1000-1006, 2003.
- [8] Y. G. Jung, Y. C. Lim and S. H. Yang, "Single-Phase Active Power Filter based on Three-Dimensional Current Coordinates", IEE Proc. Electr. Power Appl., vol.147, no.6, November, pp.572-578, 2000.
- [9] 김기진, 정영국, 임영철, "Z-source 능동전력필터", 대한전기학회 전기기기 및 에너지 변환 시스템 부문회 추계 학술대회 논문집, 2005, pp.189-191.