



Received: 2025/08/27
Revised: 2025/09/07
Accepted: 2025/09/28
Published: 2025/09/30

***Corresponding Author:**

San Hee Kang

Dept. of Light Weight Torpedo System Development,
LIG Nex1
333 Pangyo-ro, Bundang-gu, Seongnam-si,
Gyeonggi-do, 13488, Republic of Korea
Tel: +82-31-8038-0103
Fax: +82-31-5179-7086
E-mail: sanhee.kang@lignex1.com

해상상태에 따른 수상 플랫폼의 속도 및 자세 정합 기반 전달정렬 성능 분석

Analysis of Transfer Alignment Based on Velocity and Attitude Matching for Surface Vehicles Under Various Sea States

강산희^{1*}, 박석준², 정주원¹, 유태석³

¹LIG넥스원 경어뢰-II 체계개발단 2팀 선임연구원

²LIG넥스원 경어뢰-II 체계개발단 2팀 수석연구원

³LIG넥스원 경어뢰-II 체계개발단 2팀 팀장

San Hee Kang^{1*}, Seok Joon Park², Ju Won Jung¹, Tae Suk Yoo³

¹Research engineer, Dept. of Light Weight Torpedo System Development, LIG Nex1

²Chief research engineer, Dept. of Light Weight Torpedo System Development, LIG Nex1

³Team leader, Dept. of Light Weight Torpedo System Development, LIG Nex1

Abstract

본 논문에서는 속도 및 자세 정합 과정에서 발생할 수 있는 다양한 오차 요인을 고려하여 전달정렬 필터를 설계하고 시뮬레이션과 실험을 통해 정렬 성능을 분석한다. 정렬 성능은 필터설계에 좌우될 뿐만 아니라 플랫폼의 동적특성에 많은 영향을 받기 때문에 WMO(World Meteorological Organization) 해상상태 등급을 기반으로 다양한 환경에서 전달정렬 성능을 분석한다.

In this paper, we designed a transfer alignment filter that accounts for various error sources that can arise during speed and attitude matching, and we analyzed the alignment performance through simulation and experiment. The alignment performance is influenced not only by the filter design, but also by the dynamic characteristics of the vehicle. Therefore, we analyzed the transfer alignment performance under various conditions using the WMO(World Meteorological Organization) sea state code.

Keywords

관성항법장치(Inertial Navigation System), 전달정렬(Transfer Alignment), 지렛대효과(Leverage effect), 비정렬각(Misalignment angle), 시간지연(Time delay), 확장칼만필터(Extended Kalman Filter)

Acknowledgement

이 논문은 2022년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. KRIT-CT-22-049, 수중자율 무인체를 활용한 잠수함 모의표적 기술).

1. 서론

관성항법장치(inertial navigation system, INS)는 관성측정장치(inertial measurement unit, IMU)가 측정하는 가속도와 각속도 정보를 바탕으로 외부의 별도 신호 없이 상대 위치, 속도, 자세 등 항법해를 자체적으로 계산할 수 있다. 항법해는 초기값에 대한 상대값을 계산하기 때문에 초기값을 획득하는 정렬을 수행하며 이는 INS 성능에 큰 영향을 미친다[1,2].

초기 정렬을 위한 대표적인 방법 중 하나는 고정밀 MINS(master INS)에서 계산된 정보를 상대적으로 저정밀 SINS(slave INS)로 전달하여 정렬을 수행하는 전달정렬 기법이다. 전달정렬은 주로 확장칼만필터(extended Kalman filter, EKF)와 같은 되먹임 필터를 이용해 MINS 정보를 정합하여 SINS를 정렬한다. 전달정렬 과정에서 시스템 목적에 따라 속도, 자세, 가속도, 각속도 등의 MINS 정보가 활용될 수 있다[3,4].

전달정렬의 성능에는 여러 오차 요인의 영향이 미칠 수 있다. 지렛대 효과(leverage effect), 비정렬각(misalignment angle), 유연성 효과, 시간지연(time delay) 등 오차 요소가 정렬 성능에 큰 영향을 미치기 때문에 이러한 오차를 정밀하게 보상하는 것이 필수적이다[5-7]. 본 논문에서는 속도 및 자세 정합 과정에서 발생할 수 있는 지렛대 효과, 비정렬각, 시간지연 오차 요소를 고려하여 전달정렬 알고리즘을 설계하였다.

또한 정렬 성능은 구현된 전달정렬 필터의 설계에 좌우될 뿐만 아니라 플랫폼의 기동과 동적특성에 많은 영향을 받는다[8]. 수상 플랫폼의 경우 파도와 같은 환경요인으로 인해 모함의 동적특성이 다양하게 변화하므로 다양한 해상 조건에서 정렬 성능을 분석할 필요가 있다. 본 논문에서는 국제표준인 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO) 해상상태 등급(Sea State Code)을 활용하여 다양한 해상환경에서 정렬 성능을 분석하였다. 이를 위해 시뮬레이션을 통해 해상상태별 정렬 성능을 분석하고, 시간지연 오차 보상 여부가 정렬에 미치는 영향을 분석하였다. 마지막으로 임베디드 시스템을 기반으로 전달정렬에 대한 실시간 운용을 확인하기 위하여 실험을 수행하였다.

2. 속도 및 자세 정합 기반 전달정렬

본 논문에서는 SINS 초기 정렬을 위해 MINS 속도 및 자세 정보를 정합하는 구조로 설계하였다. 정렬 과정에서 발생할 수 있는 대표적인 오차 요인인 지렛대 효과를 보상하였으며 속도 및 자세 정합을 통해 비정렬각, 시간지연을 추정하고 보상하도록 정렬 알고리즘을 구성하였다. 여기서 상태변수는 자세 오차, 속도 오차, IMU 바이어스, 비정렬각, 시간지연이며 오차는 확장칼만필터를 기반으로 추정된다.

2.1 지렛대 효과

지렛대 효과는 SINS가 MINS가 서로 다른 위치에 장착된 상태에서 두 센서 간의 상대 거리 차이로 인하여 회전운동 시 서로 다른 속도가 발생함으로써 나타난다. 이를 보상하기 위해서는 두 INS 간의 상대 위치 벡터 L 을 기반으로 MINS 속도 측정치를 보상하는

과정이 필요하다. 지렛대 효과를 고려한 MINS 속도 v_m^n 와 SINS 속도 v_s^n 관계식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} v_m^n &= v_s^n - \frac{dL}{dt} \Big|_n \\ &= v_s^n + [w_{in}^n \times] C_S^n L - C_S^n [w_{ib}^b \times] L \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, w_{in}^n 는 항법좌표계에서 표현된 지구 자전 각속도와 transport rate의 합, w_{ib}^b 는 자이로스코프 측정값, C_S^n 는 항법좌표계에서 나타난 SINS 자세이다. $[w \times]$ 는 왜대칭행렬(skew-symmetric matrix)을 나타낸다.

2.2 비정렬각(유연성 효과)

비정렬각은 MINS, SINS 간의 자세 차이로 정의된다. MINS와 SINS 간의 자세 차이는 동체의 유연성으로 인한 자세의 변형과 MINS, SINS의 장착 오차로 인하여 발생할 수 있다. 비정렬각은 필터의 상태변수로 포함되어 동체가 일정한 기동을 수행할 때 속도 및 자세 정합 기법을 통해 추정할 수 있다.

2.3 시간지연

시간지연 오차는 MINS에서 측정된 정보가 SINS로 전달되는 과정에서 나타나는 지연으로 인하여 두 장치 간의 시각 동기화가 되지 않았을 때 발생한다. 특히 동체가 빠르게 회전하거나 속도 변화가 클 때 시간지연이 포함된 부정확한 정보로 인하여 큰 추정 오차가 발생할 수 있다.

k 시점에서 SINS 측정치 정합에 사용된 MINS의 측정치는 그 이전인 $k - \delta t_d$ 시점에 측정된 값이다. 이때, $k - \delta t_d$ 는 SINS에서 측정치 정합이 이루어지는 k 와 이전 측정치 정합인 $k-1$ 사이 시점이다. 따라서 MINS 측정 시점과 측정치 정합 시점 사이에 δt_d 만큼의 시간지연이 발생한다. 시간지연을 고려한 MINS, SINS 속도 관계식은 다음과 같다.

$$v_{s,k+\alpha} = v_{s,k} \frac{dt - \delta t_d}{dt} + v_{s,k-1} \frac{\delta t_d}{dt} \quad (2)$$

2.4 속도 및 자세 정합 기반 전달정렬 측정방정식

앞서 서술한 지렛대 효과, 비정렬각, 시간지연 오차

를 모두 고려하여 설계된 전달정렬 구조도를 Fig. 1에 제시하였다. 최종적으로 필터의 속도 측정방정식과 자세 측정방정식은 각각 식 (3), 식 (5)와 같다.

$$z_v = v_S^n + [w_{in}^n \times] C_S^n L - C_S^n [w_{ib}^b \times] L + \frac{v_{s,k-1} - v_{s,k}}{dt} \delta t_d - v_M^n \quad (3)$$

$$A = \left(C_S^n C_M^S C_M^{nT} - eye(3) \right) - \left(C_S^n C_M^S C_M^{nT} - eye(3) \right)^T / 2 \quad (4)$$

$$z_{DCM} = [-A(2,3); A(1,3); -A(1,2)] + C_S^n w_{nb}^n \delta t_d \quad (5)$$

여기서, z_v, z_{DCM} 은 각각 필터의 측정치로 사용되는 속도 오차, 자세 오차이다. C_M^S 는 동체의 유연성에 의해 변형되는 자세 오차와 장착 오차를 포함하는 비정렬각이다. C_M^n 은 항법좌표계에서 표현된 MINS 자세, w_{nb}^n 은 항법좌표계와 동체좌표계 사이 각속도를 나타낸다.

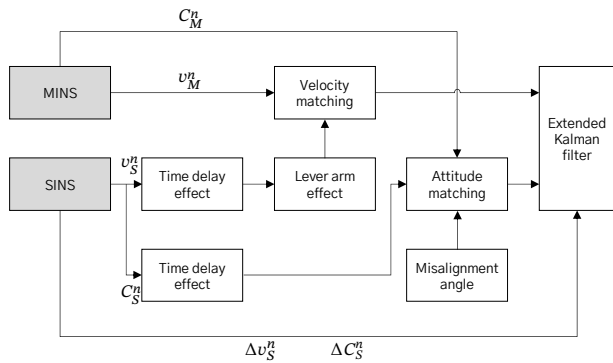


Fig. 1. Structure of transfer alignment filter

3. 시뮬레이션 분석 결과

다양한 해상상태에서 전달정렬 성능을 분석하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 해상상태는 WMO에서 정의한 해상상태 등급을 기반으로 하였다. 해상등급은 정적 상태에서 거친 상태까지 다양한 시나리오를 숫자(0~9)로 나타낸다. 등급이 높을수록 파고가 커져 동체의 운동성이 증가한다. 해상상태 등급별 파도 높이를 바탕으로 모함의 움직임을 모사하였으며 이는 식 (6)에 나타나 있다.

$$Seawave = asin(2\pi ft) \quad (6)$$

여기서, a, f 는 각각 파도의 파고와 주기를 의미하며, 주기는 0.1 Hz로 가정하였다. 해상상태 등급에 기반하여 정리된 파도 모델은 Table 1과 같으며, 시뮬레이션 조건은 Table 2과 같다. 초기 heading 오차는 2도로 설정하고 시간지연은 시뮬레이션별로 5 ms - 10 ms의 무작위 값으로 설정하였다. 전체 시뮬레이션 시간은 60초이며, 해상상태 1등급부터 6등급까지 각각 20회씩 몬테카를로 반복을 수행하였다.

Table 1. Definition of sea wave

Grade	Height (m)	Frequency (Hz)	Characteristics
1	0.01	0.1	Calm(rippled)
2	0.1	0.1	Smooth(wavelets)
3	0.5	0.1	Slight
4	1.25	0.1	Moderate
5	2.5	0.1	Rough
6	4	0.1	Very rough

Table 2. Simulation condition

Parameters	Unit	Value
Monte #	times	20
Misalignment error	deg	2
Navigation update rate	Hz	100
Filter update rate	Hz	1
Time delay	ms	5-10 (random)
Simulation time	min	1

Fig. 2는 시간지연 보상을 하지 않았을 때 해상상태 등급별 heading 정렬 오차를, Fig. 3는 시간지연 보상을 적용한 경우의 결과를 보여준다. 시간지연 보상을 적용하지 않았을 때 해상상태가 3등급인 경우 비교적 양호한 성능을 보였으나, 해상상태가 거칠어질수록 정렬 오차가 급격히 증가하였다. 특히 4~6등급에서는 요 각 추정오차가 2 mil 이상으로 커지고 추정값의 진동이 심해지는 양상이 나타났다. 반면 시간지연 보상을 적용하면 높은 해상상태 등급에서도 안정적으로 요(yaw) 비정렬각을 추정하며, 빠른 수렴 성능을 보였다. Fig. 4는 해상상태별 시간지연 보상 여부에 따른 성능 차이를 비교한 결과로 등급이 높을수록 시간지연 보상의 효과가 두드러짐을 확인할 수 있다.

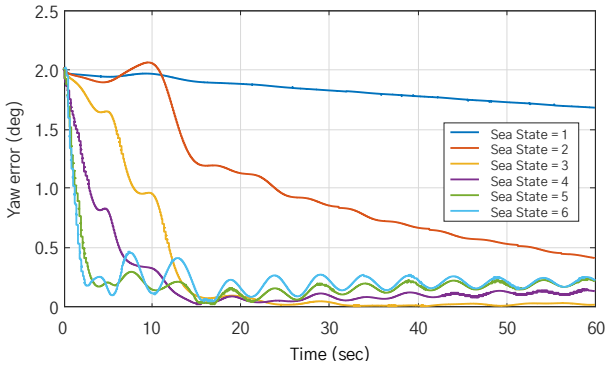


Fig. 2. Yaw alignment error without time delay compensation

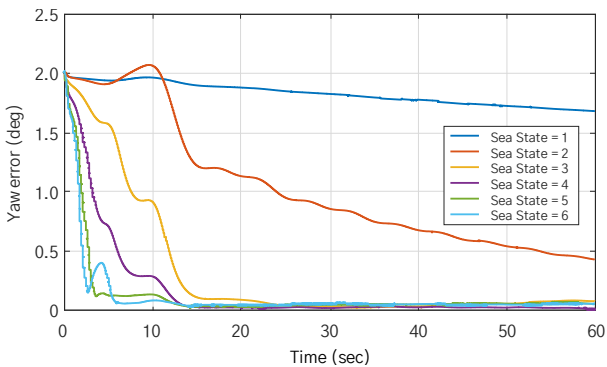
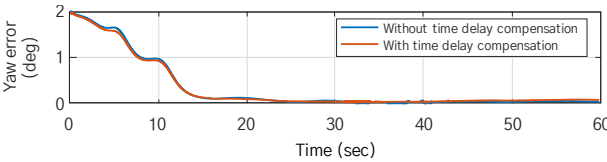
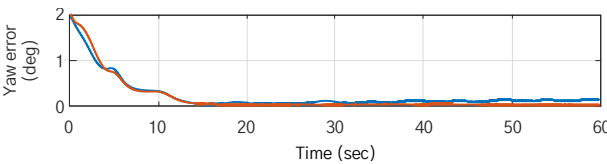


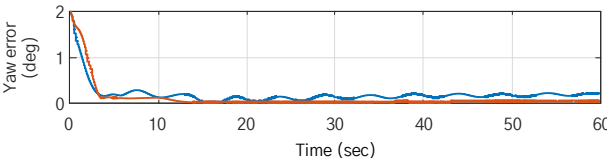
Fig. 3. Heading alignment error with time delay compensation



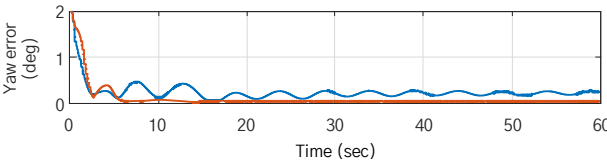
(a) Sea State = 3



(b) Sea State = 4



(c) Sea State = 5



(d) Sea State = 6

Fig. 4. Yaw alignment result depending on time delay compensation for various sea states

해상상태 등급에 따른 비정렬각 추정 성능은 Fig. 3에서 확인할 수 있다. 등급 0~2에서는 요 비정렬각에 대한 가관측성이 부족해 필터가 수렴하지 못하였다. 등급 3 이상에서는 파도로 인한 기동의 영향으로 약 30초 이내에 heading 오차가 2 mil 이하로 수렴하였다. 낮은 해상상태 등급에서의 부족한 가관측성은 가속 및 회전운동과 같은 기동으로 극복이 가능하며 이러한 해상상태에서 동체의 기동이 필요함을 시사한다.

4. 실험 분석 결과

실제 센서를 활용하여 해상상태와 유사한 환경에서 속도 및 자세 정렬 성능을 분석하는 실험을 수행하였다. 실험에서는 MINS로 고정밀 INS를, SINS로는 MEMS 기반 IMU를 사용하였다. 두 INS를 각각 서로 다른 위치에 2도의 heading 오차가 발생하도록 장착하였으며, 임베디드 시스템을 기반으로 실시간 정렬 성능을 확인하기 위하여 Fig. 5와 같이 실험을 구성하였다.

실험은 정지상태와 회전상태 두 가지 조건에서 각각 1분간 수행하였으며 정지실험은 5회, 회전실험은 10회 반복하였다. 회전실험은 롤 각에 반복적인 회전을 가하는 방식으로 수행하였다. SINS의 항법 데이터는 400 Hz로 측정되었고, MINS의 항법값은 10 Hz 주기로 필터에 전달되어 측정치로 사용되었다.

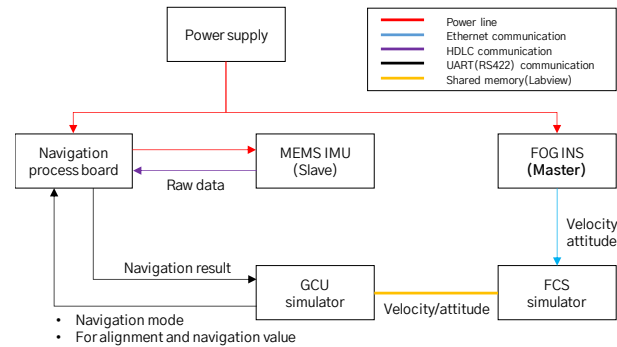


Fig. 5. Structural diagram of the experiment setup for real-time alignment with misalignment angle

정지 및 회전상태에서의 요 각 추정 오차는 Fig. 6와 같다. 정지상태에서 요 각 오차는 1.90°이며, 이는 요 비정렬각에 대한 가관측성이 부족해 비정렬각을 추정하지 못한 결과이다. 반면 회전상태에서는 요 각 정렬 오차가 0.15°로 수렴되었다. 회전시험에서 롤각

회전에 대한 실험 별 최대 진폭값은 0.45° 에서 1.18° 까지 다양하였다. 그중 3가지 경우에 대해 분석하였으며 3번의 회전시험에 대한 롤 각과 진폭값에 따른 요 각 추정 오차는 각각 Fig. 7, Fig. 8에 제시하였다. Case 1, Case 2, Case 3은 각각 0.45° , 0.78° , 1.18° 의 최대 진폭값이 가해졌으며, 진폭값이 클수록 수렴 시간이 단축되는 경향을 보였다. 이를 통해 회전운동이 필터의 가관측성을 높여 빠르고 정확한 정렬을 가능하게 함을 실증적으로 입증하였다.

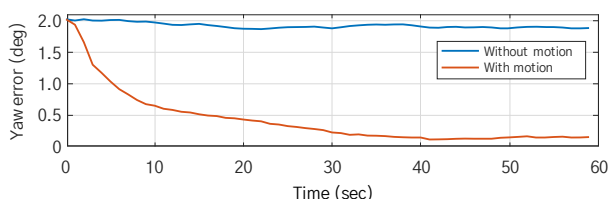
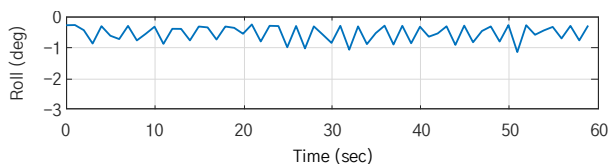
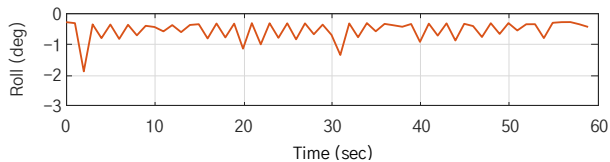


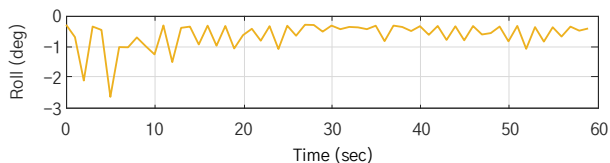
Fig. 6. Yaw alignment result in stationary and rotating conditions



(a) Case 1 (0.45°)



(b) Case 2 (0.78°)



(c) Case 3 (1.18°)

Fig. 7. Roll angle in rotating conditions

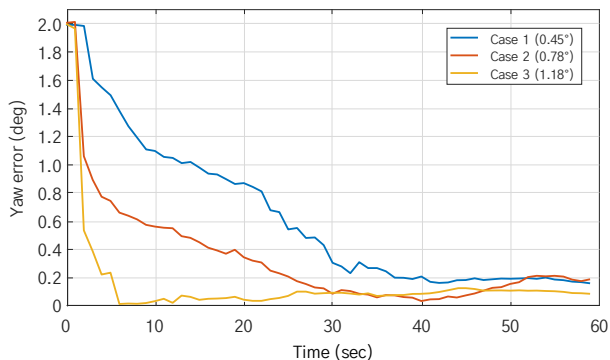


Fig. 8. Yaw alignment result at different amplitude

5. 결론

본 논문에서는 국제표준인 WMO 해상상태 등급을 기반으로 다양한 해상상태에서 속도 및 자세 정합 기반 전달정렬 필터의 성능을 분석하였다. 전달정렬 필터는 지렛대 효과, 비정렬각, 시간지연 오차를 고려하여 설계되었다. 해상상태 등급이 2 이하인 정적인 환경에서는 필터의 가관측성의 한계로 인하여 요 비정렬각 추정이 어렵거나 많은 시간이 소요되는 것을 확인하였다. 해상상태가 3등급 이상인 환경에서는 충분히 정렬이 가능하며, 해상상태가 거칠수록 수렴 시간이 단축되는 경향을 보였다. 특히 시간지연 보상이 적용된 필터는 파도가 높은 환경에서도 안정적인 성능을 유지하였다. 해상등급이 높아질수록 모함의 운동량이 커지며 이에 따른 시간지연 보상효과가 뚜렷하게 나타남을 확인하였다.

참고문헌

- [1] Titterton, David, and John L. Weston. Strapdown Inertial Navigation Technology. Vol. 17. IET, 2004.
- [2] Kim, Kwangjin, and Chan Gook Park. "A New Initial Alignment Algorithm for Strapdown Inertial Navigation System Using Sensor Output." IFAC Proceedings Volumes 41.2 (2008): 13034–13039.
- [3] Lim, You-Chol, Ki-Won Song, and Joon Lyou. "Velocity and DCM Partial Matching Methods for Ship Flexure Compensation of Transfer Alignment." Journal of Institute of Control, Robotics and Systems 7.4 (2001): 369–373.
- [4] Choi, Lammi, et al. "Compensation for Flexure Error of Fixed-wing Aircraft Through Acceleration Matching-based Transfer Alignment." Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences 51.3 (2023): 175–182.
- [5] Lim, You-Chol, Gi-Won Song, and Joon Lyou. "Measurement time-delay error compensation for transfer alignment." Journal of Institute of Control, Robotics and Systems 7.11 (2001): 953–957.
- [6] Joon, Lyou, and Lim You-Chol. "Transfer Alignment Considering Measurement Time Delay and Ship Body Flexure." Journal of Mechanical Science and Technology 23.1 (2009): 195–203.
- [7] Yang, Cheol-Kwan, and Duk-Sun Shim. "Observability Analysis of a Lever Arm Error for Velocity Matching in Transfer Alignment." Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers 50.1 (2013): 276–284.
- [8] 양철관, et al. "선박의 운항 조건 및 정합방법에 대한 전달정렬의 특성분석 (Performance of Transfer Alignment at Sea)." 대한전자공학회 학술대회 (1997): 177–180.