

論 文

## 항만하역장비용 직류전동기의 속도제어에 관한 연구

안 병 원\* · 박 중 순\*\*

### A Study on DC Motor Speed Control for Building a Port Cargo Handling Equipment

*B. Y Ahn · J. S. Park*

**Key Words** : Cargo Handling Equipment(하역장비), SCR 듀얼 컨버터(SCR Dual Converter), 직류전동기(DC Motor), 속도제어(Speed Control), 원칩마이크 로프로세서(One-chip Microprocessor), 점호회로(Gate Circuits), 제로크로싱(Zero Crossing)

#### Abstract

Recently the importance of the cargo handling equipments in a port has been increasing to get strong competition from other ports. Many ports are making efforts to modernize their cargo handling equipments. The kernel technology of such equipments is the speed control of DC motor which is used as an essential part of them.

In this paper, we discuss the speed control of a DC motor as a basic work for building cargo handling equipments in a port. DC Motors are still widely used in industrial fields, as driving power motor for electrical fields. DC drives, being easy to control, are widely used in many variable-speed and position control drive system. Traditional analog control circuits used in such applications have many disadvantages. Complex control schemes are difficult to implement with analog components. All these factor and invention of the microprocessor has made it possible to use digital control circuits, using microprocessing system. These digital circuits have been found to be reliable, flexible, and also immune to noise.

In this paper it presents the speed control of a SCR DC motor driver which using dual converter by 80c196kc microprocessor. We developed a thyristor power amplifier which does not cause damage thyristor because it is designed to prevent triggering the two SCRs in the same arm simultaneously. And it was analyzed voltage and currents wave at reactive load.

\* 정회원, 목포해양대학교 기관공학부 교수

\*\* 목포해양대학교 기관공학부 교수

## 1. 서 론

최근 국가 경제 경쟁력의 근간을 이루는 기간산업인 항만에 대한 관심과 투자가 증대되고 있는 것이 세계적인 추세이고 선진 외국항만에서는 항만의 경쟁력 우위를 확보하기 위하여 하역장비의 무인 자동화 등의 장비현대화에 박차를 가하고 있다. 특히 로텔담, 싱가포르의 경우에는 하역 장비의 자동화 및 무인화가 이루어져 양질의 저렴한 항만서비스가 가능한 상태이다.

국내에서는 기존의 노후화된 하역장비의 교체 등을 통하여 하역장비의 현대화를 이룩하고자 하나 고효율 하역시스템의 연구기반이 구축되어 있지 않아 하역장비의 핵심부분은 여전히 수입에 의존하고 있는 실정이다.

본 논문에서는 하역장비시스템에 관한 기초 연구로서 대부분의 하역장비에 채용되고 있고 핵심 기술이라 할 수 있는 직류전동기 속도제어를 연구의 목적으로 한다.

전동기는 전원에 따라 교류전동기와 직류전동기로 나눌 수 있는데 전자는 제어성능이 후자보다 떨어지는데 비해 유지보수가 유리하다. 그러나 후자는 속도 및 토크의 제어가 쉬운 장점을 갖고 있으므로 제어용에 아직도 많이 사용되고 있다.

직류전동기의 속도제어는 전동기를 이용한 기계적인 워드레오나드방식을 사용하였으나 전력소자와 IC기술 및 마이크로프로세서의 기술, 디지털신호의 취급 방법의 진보에 따라 정밀도가 높은 스테틱 워드레오나드 시스템을 이용한 디지털 제어방식으로 전환되어 가는 추세이다.

직류전동기의 속도제어는 주로 전기자전압법에 의해 제어되는데 공급전원의 변환을 위해서 파워 트랜지스터, GTO, MOSFET 등 자기소호능력을 가진 소자를 이용한 초평방식과 자기소호능력이 없는 SCR의 도통각을 제어하는 방식이 있다.

본 논문에서는 아날로그 방식보다 디지털 제어방식이 노이즈 문제뿐만 아니라, 제반 문제에서 유연성을 가지므로 디지털 방식으로 제어를 했고 [3,4], 마이크로프로세서는 원칩 마이크로프로세서인 80196kc[9]를 이용해서 사칙연산과 비례적분제

어로 속도를 제어하였다. 속도는 인크리멘탈 엔코더를 이용하였고, 정·역판별은 D플립플롭을 이용하였으며, 이들 신호를 이용하여 카운터로 속도를 측정하였다.

전력변환기는 대용량의 전동기제어에 적합한 SCR 듀얼 컨버터를 사용하였고, 4상한 제어가 가능하며, 전원전압의 반주기마다 공급전원의 방향을 바꿀 수 있는 장점을 갖고 있으며, 동일한 가격에서 트랜지스터에 비해 전압, 전류용량이 크고, 부피면에서도 소형이며 내잡음성이나 내피크전압에서도 강한 장점을 갖고 있다.

속도 검출은 100P/R 인크리멘탈 인코더의 2상 출력을 이용하여 74LS74를 이용하여 정역전을 판별하였고 속도는 엔코더의  $\frac{1}{2}$  펄스와 10MHz 오실레이터의 발진주파수의 논리곱을 취하여 카운터로 읽어 들이는 방식으로 측정하였다. 점호회로는 원 펄스나 펄스트레인을 이용하지 않고 SCR 광소자를 이용하여 설계하였고, 충분한 게이트 전류로 점호실패는 없었다.

시험 제작된 SCR컨버터의 출력을 직류전동기에 연결하여 구동 시험한 결과 1초에 10번 정도의 정·역전할 수 있는 성능과 속도 지령치에 잘 추종함을 알 수 있었다.

이 전력변환기는 항만현대화의 주요 장비인 컨테이너 크레인, 터미널 내의 무인이동로봇, 트랜스퍼 크레인 등의 시스템 개발에 널리 응용될 수 있을 것이다.

## 2. 하역장비용 서보모터 구성

컨테이너크레인, 트랜스퍼 크레인 등 항만 하역장비의 대부분은 직류 서보모터를 장착하고 있으며 이 서보모터의 속도제어가 무인화 및 기기 효율향상의 핵심기술이라 할 수 있다. 먼저 직류 서보모터를 장착하고 있는 하역장비인 컨테이너 크레인의 구조 및 연구사례를 소개하고 속도제어에 관련된 이론에 대하여 기술하고자 한다.

### (1) 컨테이너 크레인

컨테이너 크레인은 항만하역장비중에서 핵심이

되는 기계설비로 크레인의 궤도상을 이동(횡이동)하는 트로리(Trolley)  $m$ 과 트로리에 연결된 로프(Rope)의 상하운동에 의하여 선박용 컨테이너  $Mc$ 를 컨테이너선과 트레일러 사이로 이적시키는 작업을 한다. 이 크레인에 의한 하역작업의 고능률화를 꾀하기 위해서는 가능한 빠르고 정확하게 화물을 주어진 위치까지 운반하는 것이 필요하며 운전 자동화에 관한 요구도 강하다. 이 크레인의 자동제어는 최종적으로 Fig. 1과 같이 크레인에 부착되어 있는 두 개의 전동기 즉, 트로리 드라이브 전동기  $M1$ 과 로프의 상하운동을 주도하는 호이스트(Hoist) 드라이브 전동기  $M2$ 의 속도를 제어하는 것이다.

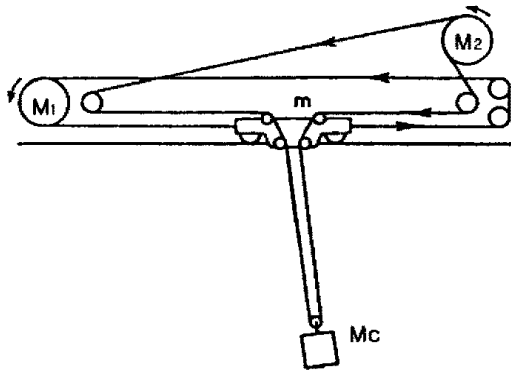


Fig. 1 Notation for a container crane.

컨테이너의 크레인의 운전은 현재에도 숙련자에 의존하고 있으나 그 제어계는 트로리의 횡이동 속도조작계(트로리계)와 컨테이너를 들어올리는 상하운동 속도조작계(로프계)로 나눌 수 있다. 오퍼레이터는 컨테이너의 위치, 흔들림 등을 보면서 트로리계 및 로프계의 목표속도 지령과 브레이크 지령을 조작한다. 이 트로리계 및 로프계의 구동제어는 ACR(Automatic Current Regulator: 전기자전류에 의한 토크제어)계를 내부에 장착한 AVR(Automatic Voltage Regulator: 속도제어)계에 의해 트로리 속도 및 로프의 감아 올리는 속도를 피드백하여 직류전동기를 제어하는 방식이 일반적이다.

또한 컨테이너 크레인 운전의 자동화를 위하여

최적제어를 이용한 연구가 제안되었고[1], 숙련자의 노하우를 언어적인 제어규칙으로 표현한 제어 방식인 퍼지 예견제어를 이용한 연구사례가 제안되었으나[2], 시스템화할 경우 궁극적인 제어 대상은 직류전동기의 속도제어이다.

그 외 대부분의 하역장비에도 직류전동기가 이용되고 있으므로 직류서보모터의 속도제어에 관한 연구는 하역장비 효율증대 및 자동화의 중핵이 되는 연구라 할 수 있다.

(2) 서보모터 모델링

Fig. 2는 직류전동기의 전기자 전압제어의 등가 회로[5,6]이다. Fig. 2에서  $e_a$ 는 전기자에 인가해주는 전압,  $i_a$ 는 전기자전류,  $R_a$ 는 전기자의 저항,  $L_a$ 는 인덕턴스를 각각 나타낸다. 계자에 가해지는 전압  $e_f$ 는 일정하게 하였고, 따라서 계자전류 및 공극자속  $\phi$ 은 일정하다고 가정할 때 이 회로에서 (1),(2),(3),(4)식과 같이 표현된다.

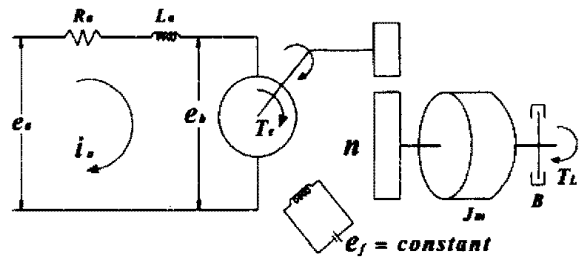


Fig. 2 Separately excited DC motor model.

$$e_a(t) - e_b(t) = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} \dots\dots\dots (1)$$

$$e_b = K \phi n \dots\dots\dots (2)$$

$$T_e = T_L + Bn + J_m \frac{dn}{dt} \dots\dots\dots (3)$$

$$T_m = K \phi i_a \dots\dots\dots (4)$$

(1),(2),(3),(4)식을 라플라스 변환하여 직류전동기의 단자전압  $e_a$ 와 속도  $n$ 의 관계식은

$$\frac{N(s)}{E_a(s)} = \frac{K\phi}{(K\phi)^2 + R_a B + sR_a B \tau_m} \dots\dots\dots (5)$$

$$= \frac{k_m}{1 + s\tau_{m1}}$$

단,  $\tau_m = \frac{I}{B}$  ,  $\tau_{m1} = \frac{R_a B \tau_m}{(K\phi)^2 + R_a B}$  ,

$k_m = \frac{K\phi}{(K\phi)^2 + R_a B}$  ,  $\tau_{m1} \ll \tau_m$  ,  $\tau_e \ll \tau_m$  이다.

계자 전류 일정에서 직류 전동기의 속도는

$$N = \frac{E_a - I_a R_a}{K\phi} \dots\dots\dots (6)$$

여기서 평균전압  $V_{dc}$ 를 입력전압  $E_a$ 에 인가하면 속도가 변해감을 알 수 있다.

또, 도통각을  $\gamma$ 라 할 때 실효출력전압은 다음과 같다.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_a^{a+\gamma} V_m^2 \sin^2 \omega t d(\omega t)}$$

$$= \sqrt{\frac{V_m}{2\pi} \left\{ \gamma + \frac{1}{2} \sin 2a - \frac{1}{2} \sin 2(a + \gamma) \right\}}$$

..... (7)

Fig. 2에서 RL이 직류전동기의 등가회로의 식 (1)(2)(3)(4)에서 전류  $i_a$ 를 구하면,

$$i_a = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \phi) - \left[ \frac{E_b}{V_m \cos \phi} - \left\{ \frac{E_b}{V_m \cos \phi} - \sin(\alpha - \phi) \right\} e^{\frac{(\alpha - \omega t)}{\tan \phi}} \right]$$

..... (8)

단,  $\alpha < \omega t < \alpha + \gamma$

출력전압은 전기자 임피던스  $Z$ 에 의한 전압강하와 역기전력을 합으로 다음과 같이 표시된다.

$$V_0 = i_a Z + E_b$$

$$= V_m \sin(\omega t - \phi) - Z \left[ \frac{E_b}{V_m \cos \phi} - \left\{ \frac{E_b}{V_m \cos \phi} - \sin(\alpha - \phi) \right\} e^{\frac{(\alpha - \omega t)}{\tan \phi}} \right] + E_b$$

..... (9)

### 3. 제어 시스템의 설계

#### (1) 시스템의 구성

제어 시스템의 구성에는 Fig. 3과 같이 80196 CPU를 사용하였고, CPU의 HSI인터럽트와 외부 인터럽트를 이용하여 영점에서부터 속도지령에 맞는 지연시간을 계산한 후 HSO의 출력을 이용하여 게이트 회로에 신호를 주고 이 게이트에 따라 SCR 듀얼컨버터의 암의 턴온 시간을 조종하여 직류전동기의 공급전압  $e_a$ 를 제어하여 속도를 제어하였다. 지령된 속도와 현재 속도를 비교하여 게이트의 온·오프 시간을 바꾸도록 구성하였다.

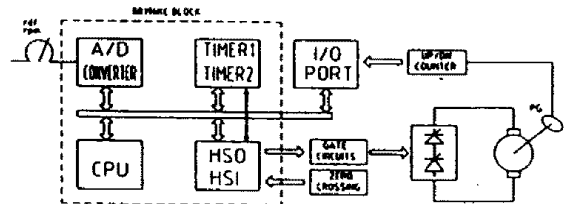


Fig. 3 Schematic diagram of control system

#### (2) SCR듀얼 컨버터

SCR듀얼 컨버터[8]는 Fig. 4와 같이 8개의 SCR과 스너버회로 점호회로로 구성되어있다. 8개의 SCR을 이용한 듀얼 컨버터이므로 4상한 운전이 가능하고 이론적으로는 1/60초에 정·역전을 할 수 있도록 되어있다.

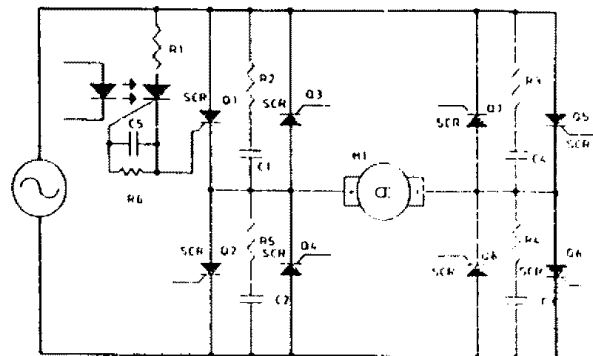


Fig. 4 Thyristor power amplifier circuits.

즉 60 Hz의 상용전원 반주기 동안 「+」 전압과

「-」 전압을 인가할 수 있으나 직류전동기의 시정수 관계로 실질적으로는 초당 5번 정도 진동하였다.

또 SCR이 전원과 단락을 막기 위하여 74LS00을 이용하여 논리적인 인터락회로와 소프트웨어적으로는 HSI와 외부인터럽트로 분리하여 동시에 게이트 턴 온되지 못하게 이중으로 인터락을 만들었으며 실험도중 단락된 경우는 없었다. 게이트회로는 TLP545을 SCR 오프 커플러를 사용하여 직류적으로 제어회로와 게이트 회로가 분리 되도록 하였고, 게이트 신호를 원펄스나 펄스트레인(pulse train)을 이용하지 않고 SCR 광소자를 이용하여 충분한 게이트 전류를 인가하였기 때문에 점호실패는 일어나지 않았다. 서지전압에 의한 SCR의 파손을 막기 위하여 스너버회로를 주 SCR과 병렬로 구성하였다.

(3) 제로크로싱(zero crossing)

교류를 직류로 변환하는 컨버터에서 영점을 찾는 것은 중요하다. 일반적으로 변압기를 사용하여 전압을 낮춘 후 비교기나 연산증폭기를 사용하여 영점을 찾지만 본 연구에서는 1MΩ의 높은 저항을 이용하여 Fig. 5와 같이 비교기를 이용하여 펄스신호를 얻고 가변저항 vr1을 이용하여 실제 영점보다 150μs 빨리 조정함으로써 HSO 출력 계산의 지연을 막을 수 있도록 하였다.

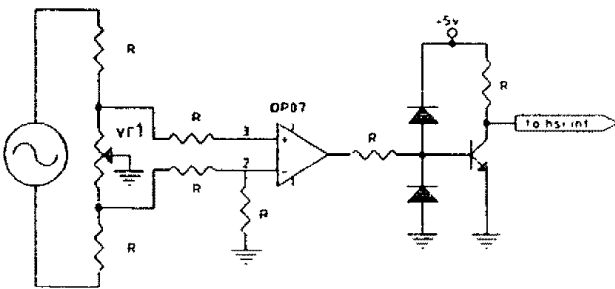


Fig. 5 Zero crossing circuits.

(4) 속도 검출

본 연구에서의 속도검출 방법은 로터리 엔코더를 사용하여 회전자의 속도를 디지털 값으로 특정하

는 방법으로 엔코더에서 나오는 펄스신호와 일정한 주파수 10MHz의 발진 주파수와 논리곱을 취하여 카운터에 입력하고 엔코더 하강신호에서 74LS123을 이용하여 74LS573을 이용하여 카운터 값을 래치한 후 카운터의 내용을 리셋하도록 하였다.

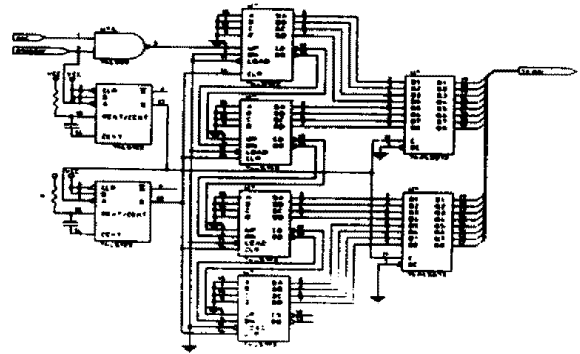


Fig. 6 Counter circuits for encoder.

회전수  $w_r$ 은 식(10)로 구하였다.

$$w_r = \frac{60}{P_{PR} \times T_n \times T_{osc} \times 2} \dots\dots\dots (10)$$

단, 여기서  $w_r$  회전수 RPM이고  
 $P_{PR}$  엔코더의 회전당 펄스수  
 $T_n$  엔코더 반펄스에 들어온 클럭수  
 $T_{osc}$  오실레이터의 주기이다.

본 논문에서는 회전당 100펄스 10MHz 오실레이터를 사용하였으며 1200RPM에서는  $T_n$ 이 2500이었다. 그래서 식(10)에서 회전수  $w_r$ 은

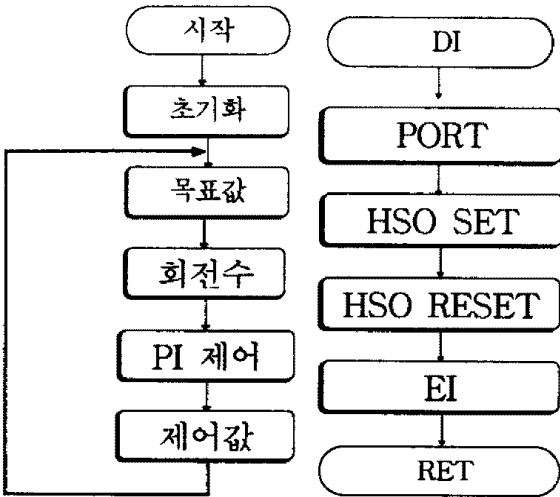
$$w_r = \frac{60}{100 \times 2500 \times 0.1 \times 10^{-6} \times 2} = 1200RPM$$

이 된다.

4. 소프트웨어의 구성

Fig. 7과 같이 제어프로그램은 크게 메인 프로그램과 인터럽트 프로그램으로 나눌 수 있다. 메인 프로그램에서는 A/D컨버터로 부테 목표치를 입력

하여 이 A/D변환 된 값을 식 xx를 회전수로 환산하여 레지스터에 격납하고, 인크리멘탈 엔코더에 의한 실제 회전수를 계측하여 비례적분기에서 제어출력을 계산하여 레지스터에 저장하는 프로그램을 반복한다.



(a) Main routine (b) Interrupt routine

Fig. 7 Flow chart.

인트럽트 서비스 루틴에서는 HSO 포트를 선택하여 사용하지 않는 포트는 H로 출력하도록 인터록을 걸고, 계산된 제어 출력 데이터를 HSO CAM FILE에 로딩하고 메인 프로그램으로 돌아오면 된다.

### 5. 실험 및 실험 결과 분석

Fig. 8은 실험 장치의 무부하 특성곡선을 나타내고 있다. 특성곡선에서 입력전압에 따라 회전수가 거의 선형성을 보이고 있다.

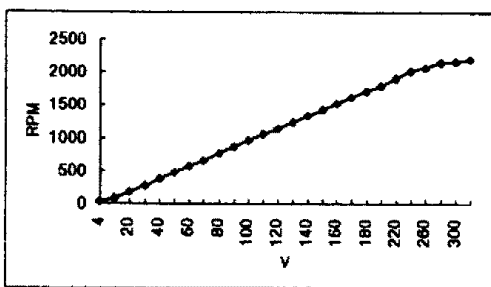


Fig. 8 No load characteristic curve.

Table 1은 본 실험장치의 분권 직류전동기의 파라미터를 나타내고 있다. 여기서 전기자저항과 전기자 인덕턴스는 측정값이고 역기전력과 토크 상수  $K\phi$ 는 수식(10)에 의한 계산값이다.

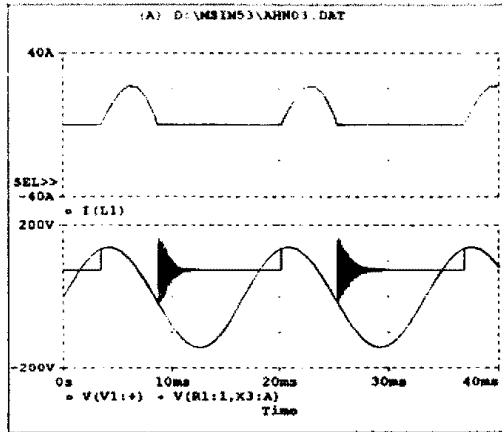
$$K\phi = \frac{V_{rated} - I_{rated} \times R_a}{N_{rated}} \dots\dots\dots(11)$$

Table 1 DC motor parameter

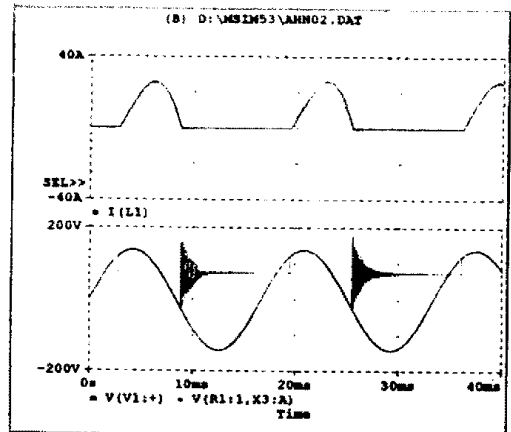
Item	Value
$R_a$ Armature resistance	3.4Ω
$L_a$ Armature inductance	58 mH
$K\phi$ Back emf and torque constant	0.093V/rad/s
Power	1Hp(0.75Kw)
voltage	180V
Ampere	5A
winding	Shunt
Field resistance	133.1Ω
Field current	0.68 A
Ins. class	B

Fig. 9는 SCR듀얼 컨버터의 Pspice 시뮬레이션 결과이다. 전압파에서 자연전류(natural commutation) 마지막에서 발진하고 있는 것은 SCR의 콘덴서 성분과 코일이 공진을 일으키는 것으로 생각되고 실제 실험에서도 공진이 일어나고 있다.

Fig. 10은 전압과 전류의 파형을 나타내고 있다. 실험에서 전압측정은 200KΩ과 2KΩ을 직렬로 연결하여 측정하였고, 전류는 비접촉식 센서로 측정하였다. Fig. 10(a)는 전원전압을 110V로 하여 점호각을 90°로 했을 경우의 파형이다. 원부분은 전동기의 역기전력에 의한 전압으로 약 80V임을 알 수 있다. Fig. 10(b)는 사용전원 110V로 40°에서 점호한 경우로 점호순간의 역기전력과 전원전압의 순시값이 같은 지점으로 실험에서 사용된 전동기에서는 점호각을 더 이상 앞당길 수 없었고, 광 SCR에 의한 점호회로에 의해서 점호 실패 없이 역기전력이

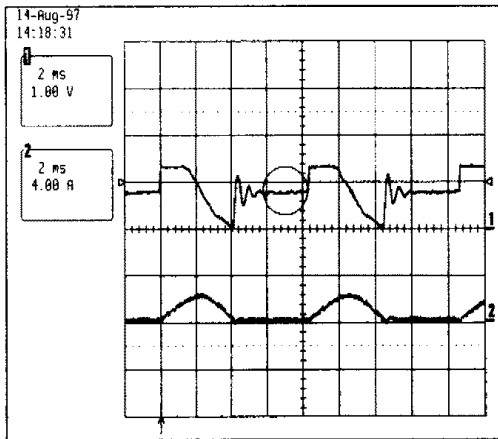


(b) At  $E_b=70[V]$ ,  $\alpha=75^\circ$

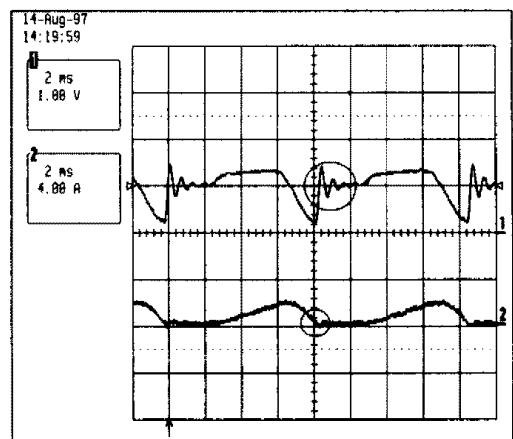


(a) At  $E_b=70[V]$ ,  $\alpha=60^\circ$

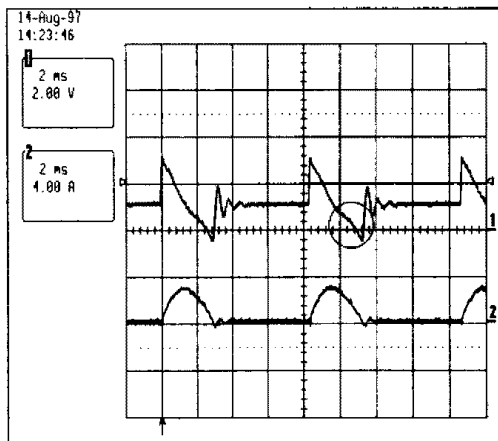
Fig. 9 Wave form of current & voltage by Pspice simulation.



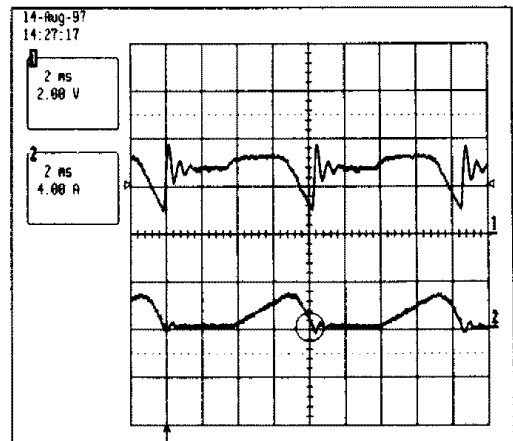
(a) 110V  $\alpha=90^\circ$



(b) 110V  $\alpha=40^\circ$



(c) 220V  $\alpha=90^\circ$



(d) 220V  $\alpha=40^\circ$

Fig. 10 Oscillodiagrams of voltage & current.

전원전압의 순시치 보다 높을 때 즉시 점호됨을 알 수 있다. 전압곡선의 원부분은 시뮬레이션 결과와 같이 공진하고 있음을 알 수 있고 공진 순간 전류도 SCR의 역방향으로 흐름을 알 수 있다.

Fig. 10(c)는 공급전원을 220V로 120°에서 점호하였을 때의 파형으로 원부분의 시작은 역기전력보다 전원전압이 낮아 자연전류(自然轉流)되기 시작하는 것이며 전류도 감소하며 전동기의 코일에 축적된 에너지를 방출하는 기간이며 Fig. 10(d)는 전원전압에 관계없이 점호가 가능한 점호각은 40°였다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 항만 하역장비의 자동제어에 핵심이 되는 기초연구로서 직류전동기의 속도제어에 관한 연구를 실시하였다.

속도제어시 정·역전이 가능한 SCR듀얼 컨버터를 구성하여 전동기 무부하시험을 하여 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 인터럽트와 마이크로프로세서의 HSO SFR를 이용하므로 실시간 제어가 가능하였다.
2. 광SCR포토 커플러를 이용한 점호회로로 전원과의 단락 방지뿐만 아니라 연속적인 신호로 인해 노이즈나 점호실패는 없었다.
3. 전동기의 회전수 지령이 0.7RPM까지 조절이 가능하였다.
4. 전압조정은 220V에서 스텝당 50mV 이하로 조절이 가능하였다.

본 연구결과는 컨테이너 크레인을 비롯하여 대부분 직류 전동기를 사용하고 있는 항만하역장비의 효율 증대 및 자동운전에 광범위하게 사용될 수 있을 것이다.

장래의 과제는 하역장비의 실용화를 위해 숙련자의 노하우를 수용할 수 있는 퍼지제어를 도입 및 실용적인 고효율 하역시스템의 구현이다.

## 참고문헌

1) Y. Sakawa and Y. Shindo, "Optimal Control

of Container Cranes", Automatica, Vol.18, No.3, p.257-266, 1982.

2) 安信誠二, "豫見 Fuzzy 制御方式によるコンテナ・クレーン自動運轉", 日本計測自動制御學會論文集, Vol.22, No.10, p.60-67, 1986.

3) PRADEEP K. NANDAM, AND PARESH C. SEN, "Analogue and Digital Speed Control of DC Drives Using Proportional-Integral and Integral-Proportional Control Techniques" IEEE TRANS. ON IND. ELECT. IE-34, NO.2, p.227-233 1987

4) J.B.PLANT,S.J.JORNA, AND Y.T.CHAN "Microprocessor Control of Position or Speed of an SCR DC Motor Drive" IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS AND CONTROL INSTRUMENTATION, VOL. IECI-27, NO.3, p.228-234, 1980

5) JACOB TAL, "Design and Analysis of Pulsewidth-Modulated Amplifiers for DC Servo Systems" IEEE TRANS. ON IND.ELECT. AND CONTROL INST. VOL. IECI-23, NO.1, p.47-55, 1976

6) TIMOTHY J. MALONEY AND FERNANDO L. ALVARADO "A Digital Method for DC Motor Speed Control" IEEE TRANS. ON IND. ELECT. AND CONTROL INST. VOL. IECI-23, NO.1, p.44-46, 1976

7) GI TAEK KIM, TAE WON CHUN, SEUNG KI SUL, AND MIN HO PARK, "Design of Single-Chip Microprocessor-Based Controller for Current Source Inverter-Fed Induction Motor Drive" IEEE TRANS. ON IND. ELECT. VOL. IE34, NO.3, p.331-338, 1987

8) PARESH C. SEN and MURRAY L. MacDONALD "Thyristorized DC Drives with Regenerative Braking and Speed Reversal" IEEE TRANS. ON IND.ELECT. AND CONTROL INST. VOL. IECI-25, NO.4, p.347-354, 1978

9) "16bit Embedded Controller Hand Book" Intel,1994