

---

# DSP를 이용한 직접 구동방식의 터보 압축기용 통합 제어기 개발

권정혁 · 변지섭 · 최중경\* · 류한성\*

## The Development of DSP Based Multi Controller for Direct Drive Method Turbo Compressor

Jeong-hyeck Kwon · Ji-seob Beyon · Jung-keying Choi\* · Hang-seong Ryu\*

### 요 약

터보 압축기는 구조적으로 임펠러를 고속회전 시켜야 한다. 범용전동기에 높은 기어비를 가진 기어박스를 이용하여 구현하였는데, 이는 관성 모멘트, 마찰손 및 압축기의 크기를 증가시켰다. 최근에 터보 압축기의 연구는 초고속 동기전동기를 장착하여 기어박스를 제거하여 크기와 마찰손을 최소화하는 방향으로 진행되고 있다. 본 연구에서는 150마력 70,000rpm 직접 구동방식의 터보 압축기를 개발하기 위하여 초고속 동기전동기용 인버터제어기, 공압제어기 및 MMI 기능을 통합한 단일 DSP에 근거한 통합제어기를 구현하였다. 이는 하드웨어적인 부분만 아니라 소프트웨어적인 측면에서도 통합 작업이 필요하였다. 이러한 소프트웨어 및 하드웨어 통합을 통하여 하드웨어적으로는 제어 시스템을 간략화 되었으며, 소프트웨어적으로는 동일한 개발환경에서 각 종 제어기가 구현되고 통합되었다. 이를 개발 및 제작하여 150마력 70,000rpm 직접 구동방식의 터보 압축기에 적용하였다.

### ABSTRACT

Turbo compressor needs high speed rotation of impeller in structure, high rated gearbox and conventional induction motor. This mechanical system increased the moment of inertia and mechanical friction loss. Resently the study of turbo compressor applied super high speed motor and drive, removing gearbox made its size small and mechanical friction loss minimum. In this study we tried to develope variable super high speed motor controller, compressor controller and MMI controller under one DSP based systems for 150Hp, 70,000rpm direct drive Turbo compressor. It have to do unification of each controller's hardware and software. The result of study is applied to a 150Hp direct turbo compressor and makes it goods.

### 1. 서 론

터보압축기는 그 구조상 고압의 압축공기와 높은 공력효율을 위해서 임펠러의 고속회전을 필요로 한다. 직접구동방식의 터보압축기는 초고속 전동기와

이를 구동하는 인버터 시스템의 적용으로 고속 회전을 구현하기 위한 증속용 기어박스를 제거할 수 있어 시스템이 간단 및 소형화되고, 인버터의 적용으로 부하에 적극적으로 대응하여 출력을 조절 할 수 있으므로 효율 또한 증가시킬 수 있다. 이러한 이유

---

\*삼성테크윈파워시스템연구소 전기전자 LAB

\*창원대학교 전자공학과 산업전자제어연구실

로 이와 유사한 연구가 최근에 활발히 이루어지고 있다.[1~2]

이를 개발하기 위해서는 초고속 전동기 구동시스템 구현 기술, 이를 제어하기 위한 고속 구동용 인버터, 공압 제어기 및 고속 회전용 임펠러 설계, 제작 기술이 필수적이다. 제어기 측면에서 보면 공압 제어기술과 고속구동용 인버터 제어기술이 주요 핵심기술 중의 하나이다.

본 논문에서는 2장에서 공압 제어기를 구현하기 위한 개발 과정에서 실험으로 얻어진 터보 압축기의 공력 특성을 서술하였고, 이러한 데이터에 근거한 압축기와 전체 제어시스템의 모델링, 그리고 실제 구현에 대해서 논하고, 3장에서는 시뮬레이션 및 실험 파형을 나타내었다. 마지막으로 4장에서는 이에 관한 결론을 내리고자 한다.

## II. 본 론

직접 구동방식 70,000rpm, 150마력 터보 압축기의 전체 하드웨어 구성을 간략히 표현하면 그림1과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 1단에서 흡입된 공기는 1단 압축기를 통과하면서 압축된 뒤 냉각기를 통하여 냉각되고, 2단 압축기로 흡입된 공기는 다시 압축되어 원하는 압력을 생성하게 된다. 이렇게 압축된 공기는 시스템에 공급되기 전 다시 한번 냉각을 하게되는데 이는 압축된 공기를 사용자가 사용하기 적절한 온도로 낮추어 주기 위함이다. 이렇게 생

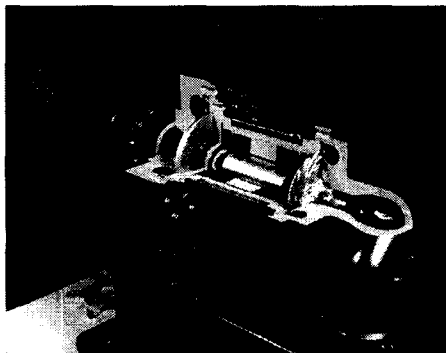


그림 1. 직접구동방식 터보 압축기 구성도  
Fig 1. Direct Drive turbo compressor

성된 공기는 사용자측으로 공급되기 직전 BOV 밸브(토출 밸브)를 지나게 되는데 이는 터보 압축기 특성상 정해진 압력에서 안정적으로 동작하기 위해서는 최소 유량을 확보하여야 하기 때문이다. 본 장에서는 실험을 통해 확보된 압축기의 특성과 이를 이용한 압축기의 모델링, 제어기 구현 및 초고속 전동기 구동 시스템에 관하여 언급 하고자 한다.

### 2.1 압축기 특성표 및 모델링

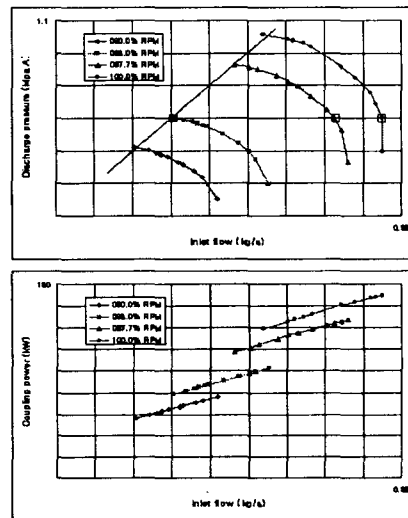


그림 2. MC 150 압축기 특성곡선  
Fig 2. MC 150 Compressor performance Map

압축기 구성품 시험을 통하여 그림 2와 같은 압축기 특성표를 획득 할 수 있었다. 압축기의 특성표는 대기조건 해수면에서의 1기압 상온 35도를 기준으로 한다. 식1과 식2를 이용하여 속도와 유량을 보정 하였다. [3]

$$N_{cor} = \frac{N_{Real}}{\sqrt{T_{Inlet} / 308.15}} \quad (1)$$

$$Q_{cor} = Q \frac{\sqrt{T_{Inlet} / 308.15}}{P_{Inlet} / 1.033} \quad (2)$$

압축기는 회전 속도와 토출 유량이 주어지면 해당 압축기 특성표를 이용하여 토출 압력, 압축기에 필요한 파워를 출력하는 모델로 설정하였다. 산업용

터보 압축기의 용도는 사용자 측에 일정한 압력의 압축 공기를 공급하는 것이 목적이므로 사용자 측에서 필요로 하는 압력은 일정하나 각 시간별 혹은 상황별로 사용하는 유량이 변화하여 해당 압축기의 토출 압력과 필요로 파워가 변화한다고 가정하였다. Matlab의 Simulink를 이용하여 모델링하였으며, 실험에 의한 획득된 터보압축기 MAP은 S Function을 이용하여 구현하였다.[4]

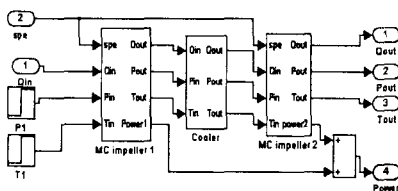


그림 3. MC 150 압축기 모델링  
Fig 3. MC 150 Turbo compressor Modeling

2.2 공압 제어기 구현 및 모델링

일정한 압력의 압축 공기를 사용자에게 공급하기 위하여 두 가지 제어 모드가 구현되었다.

- 첫째 : SPEED 제어 모드
- 둘째 : BOV 제어 모드

그림 4에서 보는 바와 같이 압축기가 동작점 A에서 작동하고 있을 시 유량이 Q1에서 Q2로 증가하면 압축기의 동작점은 B로 이동하나 압축기의 회전속도를 94.8%rpm으로 증가시키면 압축기의 동작점은 C로 이동하게 되고 공급압력은 Pset을 유지할 수 있다. 유량변화에 따른 압력변화를 압축기의 회전속도를 가변하여 설정압력으로 유지시켜주는 모드가 속도제어모드이다.[5]

압축기가 동작점 A에서 가동되고 있을 때 Q1에서 Q3로 감소되었다면 속도를 그대로 유지하고 있으면 압축기의 특성표에 data가 없는 불안전영역으로 들어가게 된다. 이를 막기 위해 압축기의 회전속도를 떨어뜨리면 압축기의 동작점이 D로 이동하고 출구압력이 P3로 떨어져서 사용자가 원하는 압력 Pset을 형성할 수 없게 된다. BOV(토출밸브)는 압축기의 사용자 측과 병렬로 연결되어 있는데 사용자 측의 유량이 Q3라면 사용자가 필요로 하는 압력인 Pset을 발생하기 위한 압축기의 최소회전속도를 유

지하면서 이때 압축기가 안전하게 운영되기 위한 유량인 Q1을 확보하기 위해 BOV 밸브를 통하여 압축된 공기를 ΔQ(Q1-Q3)를 대기중에 버림으로써 압축기의 동작점을 A로 설정하여 사용자에게 필요로 하는 압축공기를 공급하는 방식이다. 제어모드가 BOV제어 모드이다.

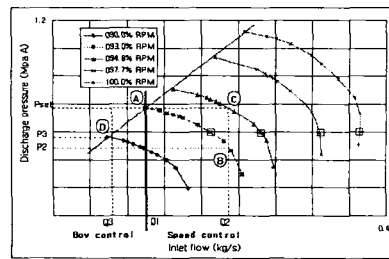


그림 4. 압축기 제어 방식  
Fig 4. Compressor control method

그림 5는 SPEED 제어모드의 제어기 구성과 모델링이다. SPEED 모드에서는 BOV가 완전히 닫힌 상태에서 압력제어를 실시하게 된다. 공압 제어기, 속도제어기,전류제어기는 모두 디지털 PI 제어기이다. 전류제어기 부분은 영구자석형 동기전동기를 사용하여 벡터제어로 구현되었으나 DC 전동기에 근거하여 간략히 모델링 하였다. 진동기 제어주기(30kHz)와 응답성이 공압 제어기 제어주기(40Hz)에 비해 월등히 빠름으로 그림5와 같이 간략화 하였다. 회전체 기계방정식은 식3과 같다.

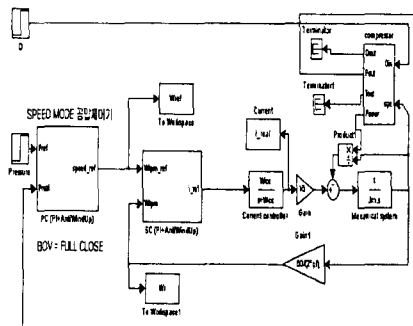


그림 5. 속도 모드 공압제어기 모델링  
Fig 5. Speed Control Mode System modeling

$$J\frac{dw}{dt} + Bw + T_L = T_e \quad (3)$$

여기서 부하는 공력과워이다. 초고속 구동 시스템은 표면부착형 영구자석 동기전동기로 벡터제어기법을 이용하여 전동기의 제어를 구현하였다.[7]

### 2.3 DSP를 이용한 통합 제어기 구현

각 구성품 개발 후 제품 개발시 사용자를 위한 인터페이스 및 각 제어기간의 통합작업이 필요하였다. 이는 하드웨어 뿐 만 아니라 소프트웨어적인 측면에서도 통합작업이 필요하였다. 하나의 DSP에 의해 동작되는 통합 컨트롤보드를 개발하였다. 각 제어기는 DSP, RAM, ROM, AD, DA는 공유하고 하부 I/O 인터페이스는 FPGA로 구현하여 회로를 간략화하고 각각의 전용 기능은 I/O 단계에서 별도로 구성되었다. 통합컨트롤 보드에는 디지털 I/O와 인버터 기능을 위한 전류, 전압 센서 인터페이스, PWM 발생부 및 공압제어를 위한 압력, 온도, 진동 센서 인터페이스, 아날로그 입출력, MMI와 원격모니터링을 위한 시리얼통신 기능이 탑재되었다.

소프트웨어적인 측면에서는 고속 DSP(TMS320VC33)의 적용으로 단일 CPU하에서 시분할하여 초고속 전동기의 전류제어 및 센서리스, 속도제어, 공압제어, MMI 및 원격모니터링 알고리즘을 구현한다. TMS320VC33은 TI사에서 개발된 32BIT 부동 소수점 연산 DSP로 32BIT 부동소수점 연산자와 부동소수점 곱셈기를 내장하고 있다. 연산속도는 150MFLOPS (Million Floating-Point Operations Per Second)와 75MIPS(Million Instruction Per Second)에 달한다. 실제 적용에서는 DSP의 연산능력의 약 80%를 사용하고 있다. 개발초기 TI사에서 나오는 전동기 제어 전용 DSP인 TMS320C24x로 전류제어기를 구현하여 시험하였으나 많은 장점에도 불구하고 본 연구에서는 연산속도가 느려 고속 전류제어에 적당하지 않았다. 통합제어기의 장점으로는 하드웨어의 간략화, 원가절감 및 성능향상이다. 단일보드에서 할당된 메모리에서 해당 지령을 읽어오면 되므로 상,하위 제어기에서 비교적 자유롭게 필요 데이터를 모두 사용할 수 있으므로 각 제어기의 완성도를 높일 수 있었다. 그림 6은 본 연구를 위해 개발된 통합컨트롤 보드의 실물사진이다.

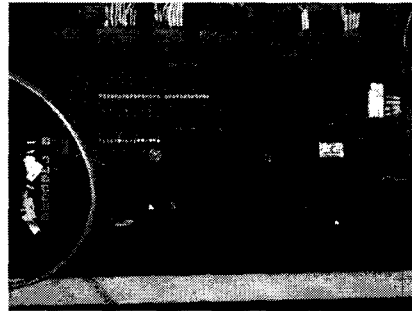


그림 6. 통합컨트롤 보드

Fig 6. Control board for Multi-Control

통합컨트롤 보드의 경우 화면 표시장치는 사용자의 편의성을 극대화하고 단일 DSP의 부담을 줄이기 위해 터치스크린을 사용하였다. 시리얼 통신을 통해 주어진 프로토콜에 맞추어 각 종 제어기 데이터 전송, 데이터입력, 고장이력관리 기능 및 특수조작 기능을 구현하였다. 또한 485 시리얼 통신을 통하여 원격지에서도 운전상황을 PC로 모니터링 할 수 있도록 구현하였다

### III. 시험결과

시뮬레이션 프로그램을 이용하여 압축기 작동환경 변화에 따른 제어 성능 및 다양한 조건하에서 시뮬레이션이 수행되었는데, 그림 7은 공압제어기의 고정 GAIN에서 입구 온도 변화(35.15~50deg)에 대한 제어 로직 운영 패턴을 보여주는 시뮬레이션 결과이다. 그림에서 200초에서 300초 사이에서는 흡입 공기의 온도증가로 보정속도는 일정하게 유지되는 반면 압축기의 실제 속도는 증가하는 경향을 확인할 수 있다.

그림 8~10은 압축기 현장 설치 후 기동 중 MMI를 통하여 획득된 DATA를 도식하였다. 그림 8는 압축기 기동 후 400초 이후에 BOV 밸브는 완전히 닫히고 압축기의 회전속도를 제어하여 출구 압력을 7.0bar를 일정하게 제어하고 있다. 그림 9는 출구 압력을 7.6bar 설정하고 운전하는 경우 BOV 모드에서 SPEED 모드로 전환되어 토출압력을 제어하고 있다. 그림 10은 압축기 기동 후 BOV 모드로 제어

되고 있는 경우로 350초 이후에 압축기의 회전속도를 일정하게 유지하면서 BOV 밸브의 열고 닫힘을 조절하여 출구 압력을 7.0bar를 일정하게 제어하고 있다. 그림 11은 출구 압력을 7.6bar 설정하고 운전하는 경우로 BOV 모드에서 BOV의 열고 닫힘에 의해 토출 압력을 토출압력을 제어하고 있다. 이러한 제어의 결과로 터보압축기 운전영역 안에서는 정상상태오차 0.2bar 이내에서 제어되었다.

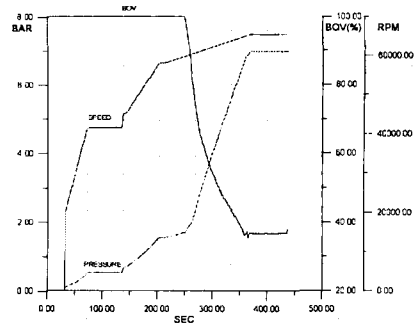


그림 10. 압축기 BOV 모드 모니터링 DATA  
Fig 10. Compressor BOV mode monitoring data

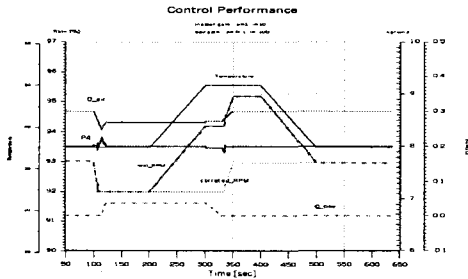


그림 7. 시뮬레이션 결과  
Fig 7. Simulation Result

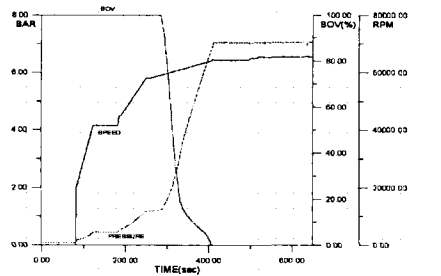


그림 8. 압축기 Speed 모드 모니터링 DATA  
Fig 8. Compressor Speed mode monitoring data

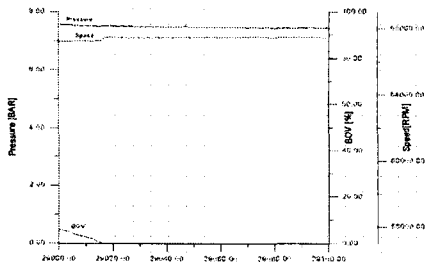


그림 9. 7.6 bar 설정시 압축기 Speed 모드 제어  
Fig 9. 7.6 bar Setting Speed Mode Control

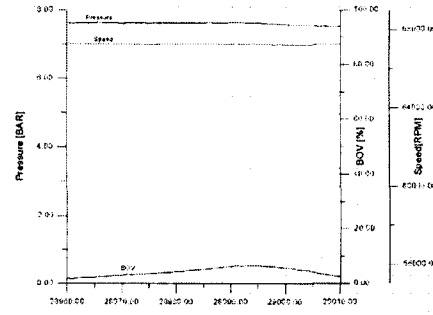


그림 11. 7.6 bar 설정시 압축기 BOV 모드 제어  
Fig 11. 7.6 bar Setting BOV Mode Control

#### IV. 결론

세계 최초로 직접구동방식의 70,000rpm, 150마력 터보압축기 제어시스템을 구현하기 위하여 하드웨어적으로는 인버터 제어기와 공압 제어기능을 통합한 통합컨트롤 보드 및 고속 전동기용 인버터를 개발하였고, 소프트웨어적으로는 초고속전동기용 센서리스 벡터제어기, 2중 모드의 공압제어기 및 MMI 제어기를 시분할법을 이용하여 단일 DSP하에서 구현하였다. 최근에 개발된 고속연산용 DSP인 TMS320VC33와 EPLD의 도입으로 이러한 통합작업이 가능하였다. 또한 개발 및 시험에 앞서 제어기의 응답성과 하드웨어 설계의 타당성을 확인하고자 MATLAB/SIMULINK를 이용하여 모델링하였다. 이러한 연구의 결과로 개발된 제어기를 직접구동방식 70,000

rpm, 150마력 터보압축기에 적용할 수 있었다. 추후 과제로는 공압제어기 모델링시 BOV의 히스테리시스 및 응답 지연을 보완하여야 하겠으며, 압축기 시스템의 과도상태 모델링등 압축기 모델링에 더 많은 연구가 필요하다.

### 참고문헌

- [1] High Speed Motor Driver for Industrial Applications, Movhoub Mekhiche, James L. Kirtley, Mary Tolikas,
- [2] Novel High Speed Induction Motor for a Commercial Centrifugal Compressor, Wen L Soong, Gerald B Kliman, Roger N Jonson, Raymond A White, Joseph E Miller, IEEE, ISA, VOL 36, 2000.
- [3] Design of radial Turbomachines, A. Whitfield, N.C. Baines, Longman 1990, 31p.
- [4] Using Simulink, MathWorks.
- [5] Control of Centrifugal Compressors, Ralph L. Moore, Instrument Society of American, 1989, Unit 5.
- [6] Implementation and Experimental Investigation of Sensorless Control schemes for PMSM in Super High Variable Speed Operation, Longya Xu, Chagjiang Wang, IEEE/ISA 1998.
- [7] Implementation of Sensorless Vector Control for Super-High Speed PMSM of Turbo-Compressor Bon-Ho Bae, Seung-Ki Sul, Jeong-Hyeck Kwon, Jong-Sub Shin, IEEE/ISA Cicago Annual Meetig, 2001.

### 저자소개



권정혁(Jeong-hyeck Kwon)  
 영남대 전자공학과 공학사  
 창원대 전자공학과 공학석사  
 동대학원 박사과정수료  
 現 (주)삼성테크윈 파워시스템연구소  
 ※ 관심분야: 모터 드라이버&자동제어



변지섭(Ji-seob Byeon)  
 창원대 전자공학과 공학사  
 동대학원 공학사  
 現 (주)삼성테크윈 파워시스템연구소  
 ※ 관심분야: 모터드라이버&control



최중경(Jung-keying Choi)  
 고려대 전기공학과 공학사  
 고려대 전기공학과 석사  
 고려대 대학원 공학박사  
 現 창원대학교 전자공학과 교수  
 ※ 관심분야: 서보기기, 자동동조제어,  
 $\mu$ p응용, 영상제어



류한성(Han-seong Ryu)  
 경상대 전자재료공학과 공학사  
 경상대 대학원 공학석사  
 창원대 대학원 전자공학과 박사수료  
 ※ 관심분야: 영상처리, 영상 하드웨어  
 시스템, 위성통신