

< 논문 >

임베디드 웹서버를 이용한 Synthetic Jet Actuator의 풍동실험장치 개발

정 규 홍*

(2004년 7월 21일 접수, 2005년 3월 15일 심사완료)

A Development of Wind Tunnel Test System for Synthetic Jet Actuator with Embedded Web Server

Gyuhong Jung

Key Words: Embedded Web Server(임베디드 웹서버), TCP/IP, Synthetic Jet Actuator, Stall(실속)

Abstract

As the internet communication is prevalent in recent years, it becomes quite possible to monitor and control some mechanical plants from the remote place through the TCP/IP communication. Such a concept is expected to be applied to many industrial systems for easy maintenance and trouble shooting as well as various kinds of expensive test equipments for sharing. Synthetic jet actuator(SJA) is a kind of high-lifting device to prevent flow separation at high angle of attack and its use for flow control has received a great amount of attention. In this research, remote control and data monitoring system for SJA wind tunnel test is implemented by TCP/IP communication with DSP as a embedded web server. From the tests performed with embedded server, it showed the possibility of reliable remote control system design utilizing the internet communication.

1. 서 론

근래에 이르러 초고속 통신망을 이용한 인터넷의 보급이 확산되면서 인터넷 통신은 전자메일과 파일교환을 비롯한 기본적인 통신분야에서 뿐만 아니라 전자상거래, 금융, 인터넷 방송 등 거의 모든 일상생활과 관련된 많은 응용분야에서 기술 개발이 급속도로 진전되고 있다.

이에 비하여 기계분야에서는 인터넷 통신기술을 활용하는 연구와 이를 상용화된 제품에 접목하여 기능을 확장하는 연구개발이 아직까지는 보편화되어 있지 않지만 점차적으로 많은 기계설비가 디지털 제어기에 의하여 자동화됨에 따라 인터넷 통신을 이용한 기계장치의 운용, 고장진단, 설계변경 등에 대한 필요성과 요구가 증대되고

이 분야에 대한 연구도 활발해질 것으로 예상된다. 예를 들면, 자동차 회사에서 자동차 엔진 및 자동변속기를 제어하는 프로그램에 새로운 기능을 추가하여 갱신하는 경우에 각 소비자는 기존의 자동차에 변경된 프로그램을 인터넷을 통하여 획득한 후 교체하여 보다 향상된 성능을 기대할 수 있을 것이다. 또한 수십 개의 마이크로 컨트롤러에 의하여 제어되는 자동차의 현재 상태 및 이상유무와 관련된 정보를 무선 인터넷을 통하여 정비회사에서 관리하고 필요한 정비사항을 사용자에게 통보하여 고장을 미리 예방할 수 있다면 보다 편리하고 안전한 자동차의 운행이 가능할 것이다. 원격통신을 이용한 기계의 이상진단은 이미 일부 대형기계에 모뎀장치를 이용하여 구현되어 있으며 점차적으로 통신속도, 보안, 안정성이 우수한 인터넷 통신으로 기계장치에 대한 원격진단 시스템의 설계가 변경된 것이다. 뿐만 아니라 인터넷을 이용한 원격통신은 향후에 일반 가정생활에 응용되어 각종 계량기의 원격 검침기능과 더불어 방법 및 화재감시 기능 등으로 발전

* 회원, 대전대학교 컴퓨터응용기계설계공학과

E-mail : ghjung@daejin.ac.kr

TEL : (031)539-1974 FAX : (031)539-1970

할 것으로 예상된다. 기계분야에서 인터넷 통신이 유용하게 이용될 수 있는 또 다른 경우는 고가의 실험설비를 원격으로 공유하는 것이다. 대학이나 연구소에서 보유하고 있는 대규모의 풍동 실험장치는 매우 고가이나 많은 경우에 있어서 풍동실험의 특성상 다른 실험장치에 비하여 연중 가동률이 높지 않은 실정이다. 따라서 인터넷 통신을 이용하여 풍동실험을 제어하고 이로부터 획득된 실험데이터를 받을 수 있다면 마치 소프트웨어를 공유하듯이 필요한 고가의 실험장치를 공동으로 사용할 수 있게 되며 이와 같은 응용은 다양한 실험 및 기계장치를 원격으로 공유하는데 적용될 수 있을 것이다.⁽¹⁾

Synthetic jet actuator(SJA)는 실속(stall)이 발생되지 않는 최대 받음각(angle of attack)을 증가시키기 위한 고 양력장치(high-lifting device)이다. 본 연구에서는 SJA의 성능을 평가하기 위하여 SJA가 내장된 에어포일(airfoil)의 풍동실험에서 필요한 성능실험장치를 구성하였고 인터넷 통신을 이용하여 원격으로 제반 실험장치를 실시간으로 제어하고 성능분석에 필요한 데이터를 획득할 수 있는 시스템을 구현하였으며 이를 통하여 풍동실험의 원격제어에 인터넷 통신의 응용 및 적용가능성을 확인하였다.

2. Synthetic Jet Actuator(SJA)

비행기 날개에 작용하는 힘은 Fig. 1에 도시된 바와 같이 양력(lift), 항력(drag), 모멘트로 특징지어지며 공기속도(U_{∞})와 받음각의 함수로 나타내어진다. 양력은 받음각이 증가할수록 선형적으로 증가하다가 기류가 날개표면에서 분리되는 박리(separation)현상이 발생하면 급속하게 감소하는 특성을 갖는다. Fig. 2는 높은 받음각에서 유체 점성에 의하여 에어포일의 뒷전(trailing edge)에서 기류가 분리되는 현상을 나타낸다. 이를 실속(stall) 받음각이라 하며 최근에는 항공기의 성능 향상을 위해서 날개 주변의 기류를 제어하여 실속 받음각을 증가시키는 다양한 장치에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.⁽²⁻⁴⁾

Fig. 3은 본 실험의 대상인 SJA의 작동원리를 나타낸다. 에어포일에 내장된 다수의 피스톤은 직류모터에 의하여 왕복운동을 하면서 낮은 운동량을 갖는 경계층의 기류를 흡입하여 슬롯을 통

해 날개표면의 접선방향으로 분출시키는 작용을 한다. 이와 같이 슬롯에서 분출되는 고속기류는 경계층의 유체를 혼합시켜 에어포일의 뒷전에서 발생하는 기류의 박리를 방지함으로써 실속 받음각을 증대시키는 효과를 나타낸다. 에어포일에 내장된 피스톤의 흡입, 방출작용으로 에어포일 표면을 흐르는 기류에 에너지를 가하는 SJA는 모두 6개의 피스톤으로 구성되며 한 쌍의 피스톤이 120°간격으로 배치되어 순차적으로 흡입과 분출 작용을 하도록 설계되었다. 이와 같은 방식의 SJA는 탱크에 저장된 압축공기를 공압 솔레노이드 밸브를 이용하여 앞전에 단속적으로 분사하는 펄스 제트방식에 비하여 구조가 간단하고 설계비용이 낮으며 압전소자(piezoelectric actuator)를 사용하는 방식보다 기류제어에 필요한 큰 에너지를 발생시킬 수 있는 장점이 있다.^(5,6)

본 연구에서는 SJA에 내장된 직류모터 속도와 분출 슬롯의 폭을 변화시키면서 받음각에 따른 에어포일의 양력을 측정하는 풍동실험을 실시하였으며 이에 필요한 전용실험장치를 개발하였다.

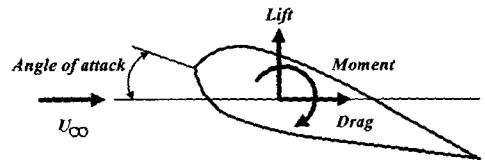


Fig. 1 Aerodynamic force and moment

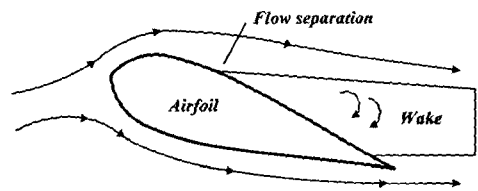


Fig. 2 Separated flow

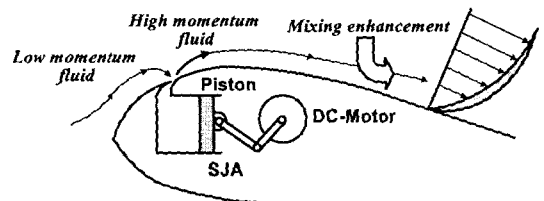


Fig. 3 Operation principle of SJA

3. 실험장치의 구성 및 설계

3.1 실험개요

SJA가 실속이 발생하는 받음각에 미치는 영향을 살펴보기 위해서 받음각을 변화시키면서 양력을 측정하는 풍동실험을 실시하였다. SJA는 피스톤의 왕복운동을 발생시키는 내장된 직류모터와 분출 슬롯의 폭을 조절할 수 있도록 편심되어 회전하는 스텝퍼 모터로 구성되며 에어포일의 받음각은 감속기가 장착된 서보모터와 링크로 연결되어 모터회전에 의하여 변화되도록 설계되었다. SJA에 대하여 사전에 실시된 실험을 통하여 분출되는 공기 유속은 30Hz의 모터속도에서 20m/s, 70Hz에서는 40m/s이고 모터속도에 따라 선형적으로 증가함을 확인하였다. 또한 스텝퍼 모터(1.8°/펄스)가 초기상태에서 슬롯 폭은 1.22mm이고 최대 13펄스(23.4°)를 인가하였을 때에는 0.13mm로 측정되었으나 슬롯 폭이 너무 작은 경우에는 SJA의 효과가 미약하여 0.55mm-1.22mm의 구간에 대하여 실험을 실시하였다.

실험에 사용된 에어포일은 420mm의 시위길이(chord length)를 갖는 NACA0015이며 20m/s의 풍속조건에서 실험하였다. Fig. 4는 SJA가 내장된 에어포일 실험장치의 도식적인 구조를 나타내며 Fig. 5는 풍동 내에 설치된 실제 모습이다. 풍동 실험에서 에어포일에 발생하는 양력은 날개 주위에 Fig. 6과 같이 설치된 32개의 압력 탭의 압력을 32채널의 압력 스케너를 이용하여 측정한 후 적분하여 양력계수(lift coefficient)로 나타내었다.

SJA 성능실험은 SJA 모터속도와 분출 슬롯의 폭으로 주어지는 설정된 작동조건 하에서 받음각이 일정한 정적상태와 동적으로 변화되는 경우에 대하여 실시하였으며 이를 위하여 제어되는 변수와 수집되는 데이터는 다음과 같다.

(1) 제어변수

- a. SJA 모터속도(30Hz ~ 70Hz)
- b. 분출 슬롯의 폭(0.55mm ~ 1.22mm)
- c. 받음각 서보모터 회전각, 구동주파수 및 파형(-5° ~ +30°, 0Hz ~ 1.0Hz, 스텝, 정현파, 램프)

(2) 수집데이터

- a. SJA 모터 기준속도, 제어속도, PWM 듀티율
- b. 스텝퍼 모터 회전펄스
- c. 받음각 모터의 기준각, 제어각, PWM 듀티율
- d. 32채널 압력데이터

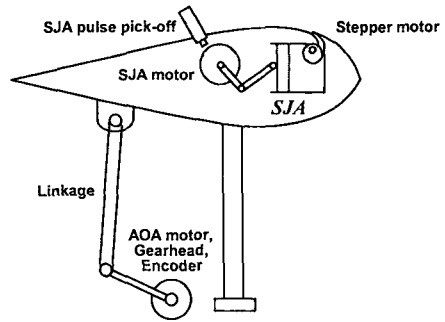


Fig. 4 Airfoil setup in wind tunnel

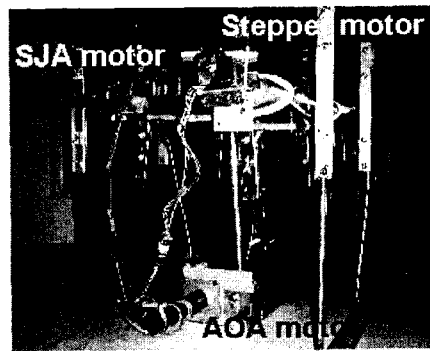


Fig. 5 NACA0015 airfoil

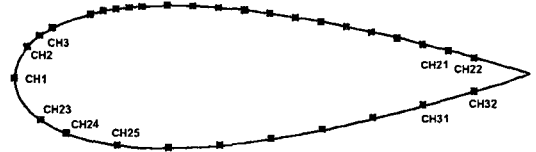


Fig. 6 Location of pressure tapping

3.2 SJA 실험장치 하드웨어설계

SJA 실험장치의 제어시스템 설계에는 TI社의 TMS320C31 DSP와 마이크로칩社의 PIC16F877이 사용되었다. 전자는 링크연결을 통하여 에어포일의 받음각을 조절하는 구동모터의 회전각 제어와 날개주변의 압력 데이터를 수집하고 후자는 SJA 모터의 속도제어와 스텝퍼 모터를 구동하는 기능을 갖는다. 두 프로세서에서 작동에 필요한 데이터는 직렬통신을 통하여 공유할 수 있도록 하였으며 실험조건을 지정하고 측정된 결과를 수집하여 저장하는 기능을 갖는 PC와의 통신에는 인터넷 프로토콜인 TCP/IP를 이용하였다. SJA 성능실험에서 요구되는 모든 실시간 제어와 데이터 수집 기능은 두 개의 디지털 프로세서에서 구현된

다. 각 프로세서와 설계된 주변회로의 세부적인 기능은 다음과 같다.

(1) TMS320C31 DSP

- a. 40MHz 클럭으로 20MIPS의 연산속도
- b. PC와 TCP/IP통신, PIC16F877과 직렬통신
- c. 8253 타이머/카운터에서 발생하는 PWM신호를 이용하여 받음각 서보모터의 회전각제어
- d. 32채널 압력 신호의 순차적인 A/D 변환

(2) PIC16F877

- a. 11.0592MHz클럭을 갖는 8비트 프로세서
- b. SJA 모터의 회전수에 비례하여 출력되는 구형파 신호로부터 속도를 연산하고 내장된 주변장치에서 발생하는 PWM신호로 SJA 모터구동
- c. 스테퍼 모터구동

(3) 주변회로

- a. SJA 모터 구동회로: 단방향 구동
- b. SJA 속도신호 처리회로: 정현파의 속도센서 신호를 구형파의 TTL 출력신호로 변환
- c. 스테퍼 모터 구동회로
- d. 받음각 서보모터 구동회로: 양방향 구동
- e. RTL8019AS: Network Interface Controller(NIC)
- f. 8251 USART: RS232C 직렬통신
- g. HCTL2020: 엔코더 디코더/카운터 인터페이스
- h. 8253 타이머/카운터: PWM신호 발생
- i. AD7874: 12비트 A/D 변환기
- k. LCD: 각 프로세서의 내부정보 표시기능

Fig. 7은 본 연구에서 설계/제작된 SJA 실험장치의 제어시스템을 나타내고 Fig. 8은 하드웨어 구성과 신호연결상태를 보여주는 블록선도이다.

3.3 SJA 실험장치 소프트웨어설계

전술된 바와 같이 구성된 제어장치를 대상으로 SJA의 성능평가실험에서 요구되는 작동사양을 구현하기 위하여 모터 제어, 데이터 수집 및 통신 작업을 수행하는 운영 프로그램을 설계하였으며 각 프로세서에서 담당하는 기능을 요약하면 다음과 같다.

(1) TMS320C31 DSP

에어포일은 서보모터와 링크로 연결되어 구동

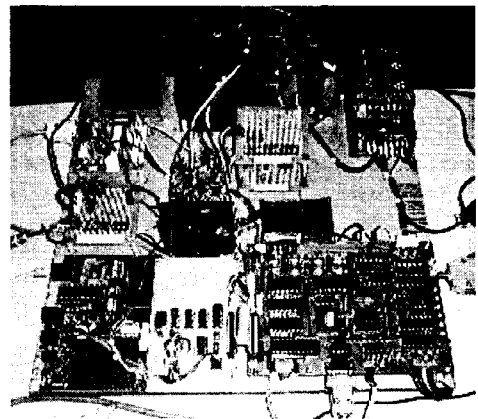


Fig. 7 SJA control system

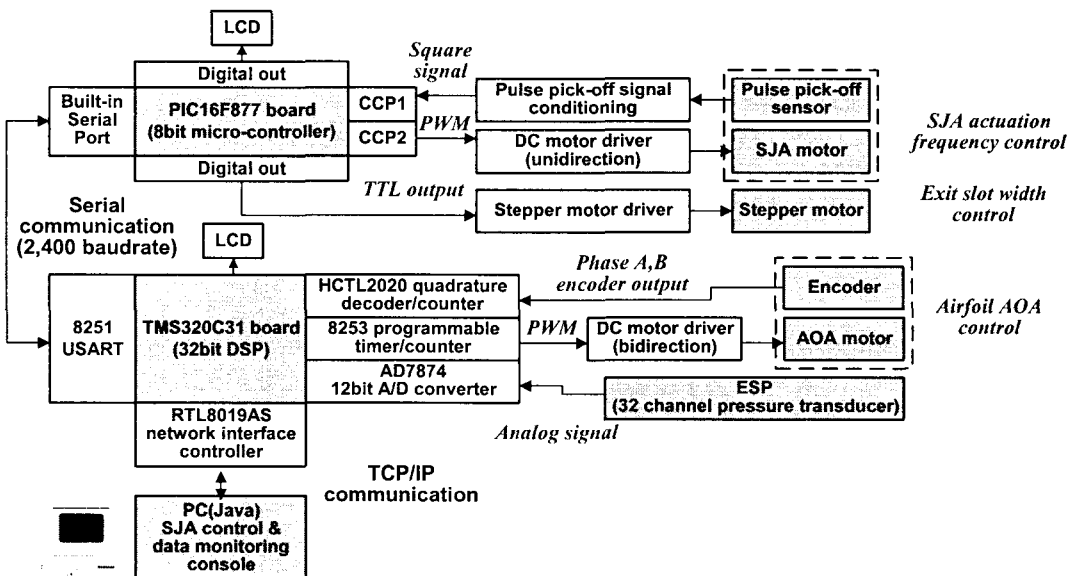


Fig. 8 Block diagram representation of SJA control system

되므로 경사계(inclinometer)로 측정된 받음각과 서보모터의 회전각 데이터로부터 미리 구해진 기구학적 관계식을 연산하여 500Hz의 샘플링 주파수로 받음각 서보모터의 회전각을 비례적분제어하고 10ms 주기로 32채널의 압력신호를 순차적으로 A/D변환한다. DSP 운영 프로그램에는 NIC를 직접 인터페이스하여 PC(클라이언트)와 TCP/IP통신으로 실험 작동조건과 관련된 지령과 수집된 데이터를 송수신할 수 있는 서버기능이 설계되어 있으며 ping을 통하여 네트워크 상에서 DSP의 접속상태를 확인할 수 있도록 ARP(Address Resolution Protocol)도 구현하였다.

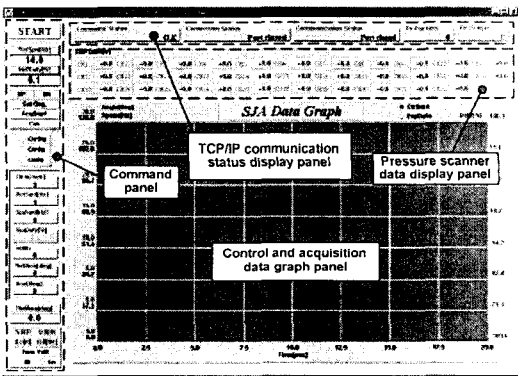


Fig. 9 SJA control and data monitoring console

기본적으로 TCP/IP 프로토콜은 실시간 통신이 아니기 때문에 PC에서 수신되는 모든 데이터는 기준입력을 나타내고 실시간 모터제어는 DSP에서 수행되도록 설계하여 통신이 단절되어도 제어 시스템은 안정된 상태를 유지할 수 있도록 하였다. DSP서버에서 PC로 보내지는 데이터는 온라인과 오프라인 데이터로 구분되는데 온라인 데이터는 PC에서 DSP 서버로 데이터를 요청하는 0.2sec의 주기마다 0.1sec 주기로 기록된 제어상태의 데이터이며 오프라인 데이터는 10ms 주기로 기록된 데이터이다. 이는 DSP에서 32채널의 압력 데이터를 램에 저장하는데 제한된 용량으로 인하여 5초동안만 10ms 주기로 데이터를 저장한 후 오프라인으로 PC에 전송하도록 설계하였다.

(2) PIC16F877

DSP로부터 0.1sec 주기로 기준입력신호를 수신받아 SJA 모터의 속도를 10ms 샘플링 주기로 제어한다. 모터구동은 측정된 속도를 피드백하여 비례적분제어로 페루프 제어하거나 수신된 기준 PWM 듀티율을 구동회로에 인가하는 개루프 제어 중에서 선택될 수 있다. 연산되는 속도의 분해능은 1rpm이하이며 11.06KHz의 반송주파수와 0.4%의 분해능을 갖는 PWM 신호로 SJA 모터를 구동한다. 또한, 분출 슬롯의 폭을 조절하기 위하

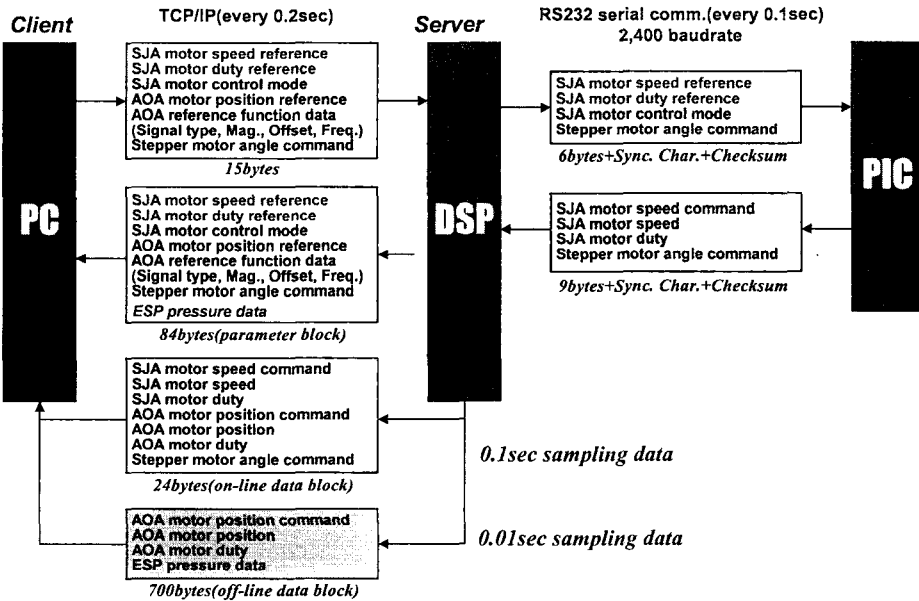


Fig. 10 Block diagram representation of SJA control system

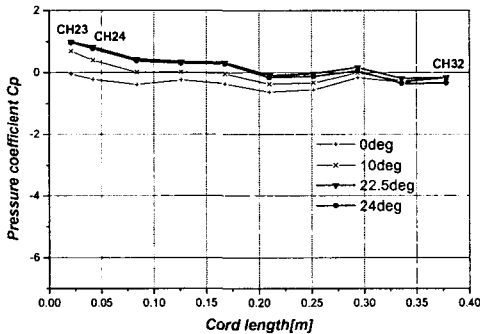
여 스테퍼 모터를 구동하는 기능도 설계되었다.

(3) PC

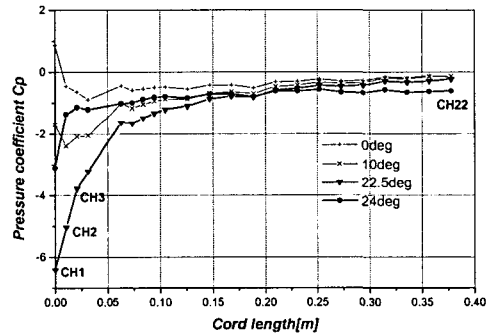
PC에서 수행되는 클라이언트 프로그램은 Java 로 작성하였으며 SJA 실험장치를 관장하는 DSP 서버에 대하여 실험조건과 관련된 지령을 전달하고 수집된 데이터를 요청하는 기능을 갖는다. Fig. 9는 PC에서 수행되는 SJA 실험장치 제어프로그램의 화면을 나타내며 SJA 모터 및 스테퍼 모터의 작동과 받음각을 정적/동적으로 구동하기 위한 지령판, TCP/IP 통신상태와 32채널의 압력을 나타내는 표시부, 그리고 SJA 모터속도와 받음각의 제어상태를 그래프로 나타내는 창으로 구성된다. Fig. 10은 전체 시스템에서 송수신되는 데이터의 흐름을 나타내는 블록선도이다.

4. 실험결과 및 분석

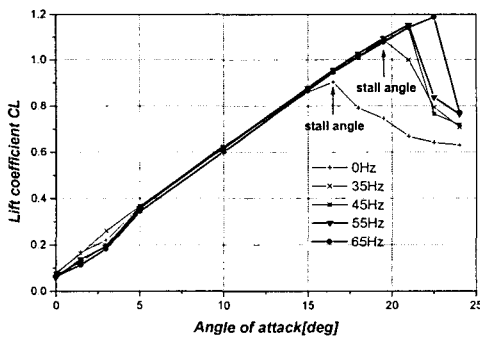
4.1 정특성 실험



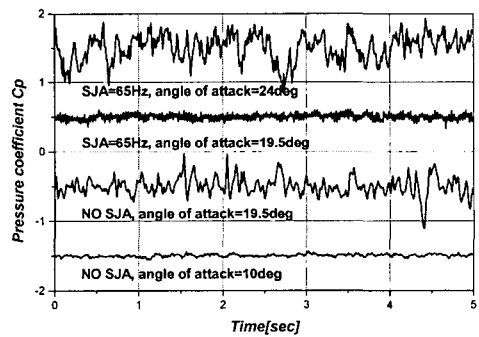
(a) Lower surface pressure distribution



(b) Upper surface pressure distribution



(c) Effect of SJA, lift coefficient vs. angle of attack



(d) Separation effect on the CH3 pressure

Fig. 11 Static experimental result

SJA 정특성 실험에서는 에어포일의 받음각이 변화되지 않는 정상상태에서 SJA 모터의 구동주파수를 변화시키면서 측정된 압력으로부터 계산되는 양력계수로부터 실속이 발생하는 받음각의 변화를 살펴보았다.

Fig. 11(a), (b)는 SJA가 65Hz로 구동되는 작동 조건에서 받음각에 따른 압력분포의 변화를 나타낸다. 여기서 압력계수 C_p 는 압력스캐너에서 측정된 압력을 정규화하기 위하여 풍속에 의한 동압(dynamic pressure)으로 나눈 값으로 정의된다. 받음각이 증가할수록 날개 하부의 압력은 지속적으로 증가하지만 상부의 압력계수는 음의 값으로 증가하다가 24°의 받음각에서 기류박리로 실속이 발생하면 급격하게 압력계수가 상승하게 됨을 알 수 있다. Fig. 11(c)는 받음각 변화에 대한 양력계수를 나타낸다. 여기서 양력계수란 측정된 날개 주위의 압력분포로부터 일차원적인 적분을 수행하여 Fig. 1에 나타난 수직방향으로의 성분을 동

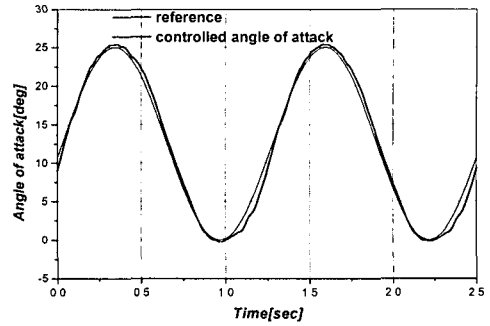
압으로 정규화 값이다. SJA가 작동하지 않는 경우에는 실속이 16° 부근에서 발생하지만 SJA가 작동됨에 따라 실속 발생각이 증가하게 됨을 알 수 있다. 실속 발생각은 SJA의 모터속도가 증가할수록 커지며 65Hz에서 22.5° 를 나타내었다. Fig. 11(d)는 앞전(leading edge)에서 3번째 설치된 압력탭의 측정신호를 보여주며 비교를 위하여 각 경우에 대하여 일정한 크기의 오프셋을 더하여 하나의 그림에 나타내었다. 낮은 받음각에서는 날개표면에서의 흐름이 층류를 유지하므로 압력의 맥동이 낮으나 받음각이 커지면 기류박리가 발생하면서 난류로 변화되어 맥동압력이 크게 된다. 실속이 발생하는 받음각에서도 SJA를 작동시키면 기류를 다시 날개표면에 부착시켜 층류를 유지하게 됨으로써 맥동압력이 작아지게 되므로 SJA가 실속 받음각에 미치는 영향을 확인할 수 있다.

4.2 동특성 실험

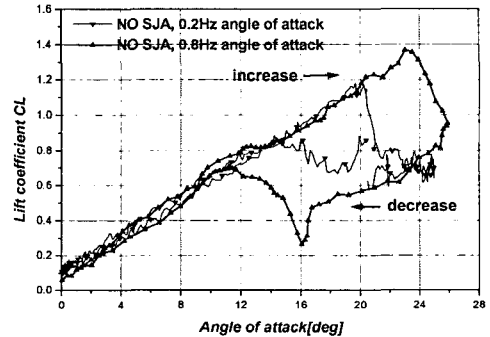
SJA 동특성 실험에서는 에어포일의 받음각이 설정된 파형의 주파수로 운동하도록 받음각 구동모터를 제어하면서 측정된 날개표면의 압력분포로부터 양력계수를 계산하여 SJA가 실속 받음각에 미치는 영향을 살펴보았다. 본 연구에서는 직류모터를 제어하여 에어포일의 받음각을 동적으로 변화시키는 가진기(exciter) 기능을 DSP 웹 서버에 설계하였으며 이를 이용하여 받음각의 운동주파수를 변화시키면 SJA의 성능을 실험하였다. Fig. 12(a)는 받음각을 0.8Hz의 정현파로 구동하는 경우에 대한 제어성능을 나타낸다. 받음각의 속도가 변화되는 순간에 기준입력신호와 실제 에어포일의 받음각 사이에는 제어 오차가 다소 발생하지만 Fig. 12에서 나타난 바와 같이 SJA의 성능을 평가하는 양력계수는 에어포일을 동적으로 구동할 때 측정된 받음각에 대해서 연산하므로 이러한 받음각의 제어오차는 실험결과에 큰 영향을 미치지 않는다.

Fig. 12(b)는 SJA가 작동되지 않는 상태에서 0.2Hz와 0.8Hz의 정현파 함수로 받음각을 변화시켰을 때 나타나는 양력계수의 변화를 보여준다. 에어포일의 받음각이 증가하는 상태에서는 정상 상태보다 더 큰 받음각에서 실속이 발생하며 감소하는 경우에는 더 작은 받음각에서 날개표면의 층류가 복원되므로 기류의 박리 발생과 재 부착에는 동적인 시간지연이 존재함을 알 수 있었다.

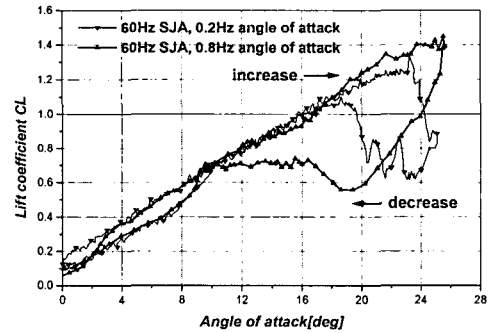
Fig. 12(c)는 Fig. 12(b)와 동일한 실험조건에서



(a) Angle of attack motor control performance



(b) Lift coefficient variation without SJA



(c) Lift coefficient variation with 60Hz SJA

Fig. 12 Dynamic experimental result

SJA를 작동시켰을 때의 실험결과이다. SJA가 작동하면 양력계수가 급격히 감소하는 받음각이 증가하며 받음각이 감소할 때 실속이 발생된 상태에서 기류가 날개표면에 재 부착되는 받음각이 크므로 SJA는 에어포일이 동적으로 변화되는 상

태에서도 실속 받음각을 크게 하여 양력을 상승 시키는데 효과적임을 확인하였다.

5. 결 론

SJA는 높은 받음각을 갖는 비행기 날개에서 발생하는 기류박리에 의한 실속을 지연시키는 고 양력장치이며 본 연구에서는 풍동실험을 통한 SJA의 성능평가를 인터넷 통신을 이용하여 원격으로 수행할 수 있도록 전용 실험장치를 설계하였다. 서버의 기능을 구현한 DSP에서는 실험에서 요구되는 실시간 제어 및 데이터 수집을 담당하고 Java로 작성한 PC 프로그램은 클라이언트 기능으로 TCP/IP 통신을 이용하여 SJA의 작동지령과 수집된 압력분포 데이터를 저장할 수 있도록 설계하였다. 개발된 실험장치를 이용하여 SJA의 성능평가실험을 수행한 결과 SJA가 실속 받음각을 증가시키는데 효과적임을 확인하였다. 본 연구에서 구현된 DSP 서버의 통신기능은 동일한 게이트웨이를 갖는 LAN상에서 정상적으로 동작하였고 액세스 포인트(access point)와 무선 랜카드(wireless LAN card)를 활용한 무선통신에서도 작동됨을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Gyuhong Jung, 2003, "Design of DC-Motor Speed Control System with Embedded Server," *Proceedings of KSME 2003 spring*, 03F272.
- (2) Ari Glerzer and Michael Amitay, 2002, Synthetic Jets, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 34, pp. 503~529.
- (3) John Magill, Matthew Bachmann, Greg Rixon, 2001, "Dynamic Stall Control Using a Model-based Observer," *AIAA paper 2001-0251*, pp. 1~12.
- (4) Greenblatt, D. and Wygnanski, I., 1997, "Dynamic Stall Control by Oscillatory Forcing," *AIAA paper 98-0676*, pp. 1~12.
- (5) Gilarranz, J.L., L.W. Traub and O.K. Rediniotis, 2002, "Characterization of a Compact, High-Power Synthetic Jet Actuator for Flow Separation Control," *AIAA paper 2002-0127*, pp. 1~28.
- (6) Lance W. Traub, Adam C. Miller, Ukpai I. Ukpai, Othon K. Rediniotis, Gyuhong Jeong, Kiwhan Kim, 2003, "Reconfigurable Synthetic Jet Actuation and Closed-Loop Flow Control," *AIAA Paper 2003-0217*, pp. 1~42.