

【 저자 : 小野京右 】

# Nano-meter Lebel의 회전정도를 지향하는 고회전 정도의 필요성과 현상 · 전망



번역자 : 이 성 수

(건국대학교 기계설계학과)

## 1. 서론

현재 기술혁신이 왕성한 IT 기술을 지탱하고 있는 정보기기는, CPU, 반도체 메모리, 외부기억장치 및 입출력 장치로 이루어진다. 이 외부기억장치의 핵심적 역할을 담당하고 있는 Hard Disk 장치(HDD)와 출력장치의 주력 기종인 레이저 프린터는 기록 매체와 기록 헤드와의 상호 운동에 의하여 정보 교환을 하고 있어서 회전 운동의 정도와 속도가 정보기기의 성능을 지배하고 있다. 정보기기는 정보의 단위인 비트 세포가 작으면 매체의 양이 적어지므로 비트 코스트가 저하하고, 또 기기로써의 편리성이 증가한다.

따라서 정보기기는 고밀도 · 고속 · 輕薄短小(경박단소)를 향하여 끊임없이 진화하여, 오늘날에는 휴대 전

화가 화상 정보도 처리할 수 있게 되었다. HDD, 레이저 프린터에서는 기록 매체에의 비트 세포 형성을 기록 매체와 기록 헤드와의 고속 · 고정도 상호 운동과 위치 결정에 의하여 수행하고 있어서, 가장 고속 · 정밀한 운동과 위치 결정 기술이 이용되고 있다. 또 이들의 정보기기에 이용되는 회전 부품은 최고정도의 가공기계 주축의 회전운동을 이용함으로써 생산되고 있다. 본 원고에서는 우선, 가장 고정도 회전이 요구되고 있는 HDD의 스핀들을 중심으로 고정도 · 고속 회전기술의 동향을 소개하고 향후를 전망한다. 또 고속회전이 요구되고 있는 레이저 스캐너 회전기술도 다룬다.

## 2. HDD에서의 고정도 회전기술의 동향

## 2.1 HDD의 기구기술과 성능 동향

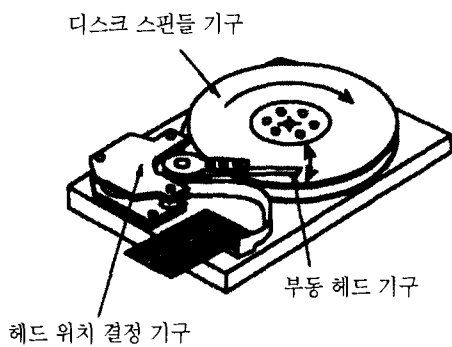
그림1(a)에 HDD의 기계적인 구조를 나타낸다. HDD는 기구적으로는 디스크 스펀들, 헤드 위치 결정 기구 및 부상 헤드 슬라이더 기구로 이루어진다. 디스크 스펀들은 외경이 95mm(3.5인치)(데스크탑 PC용, 서버용), 84mm(3인치)(서버용), 65mm(2.5인치)(Mobile, 노트 PC용) 등으로 두께 0.8mm 정도의 디스크를 1장에서 여러장 부착한 축이 두 군데에서 구름 베어링에 의하여 지지되어, 직결된 모터로 직접 구동된다. 디스크 스펀들의 회전속도는 용도에 따라 다르고, 현재 서버용이 10,000~15,000 rpm, 데스크탑용이 5,400~7,200 rpm, Mobile용이 4,200 rpm이다. 데이터는 동심원상으로 기록되어, 그 동심원은 트랙이라고 부른다. 그림 1(b)는 구름 베어링으로 지지된 디스크 스펀들의 단면도로 디스크 허브에 디스크 판이 적층 탑재된다. 3.5인치 디스크의 경우, 내경 5~6 mm, 외경 13~15 mm로 볼 수 7~10개의 단열 깊은 홈 베어링으로 지지되고 있어, 반경 방향의 베어링 강성은  $10^7 N/m$ 의 오더이다.

그림 2에 HDD 면기록 밀도의 연차 추이를 광 디스크 기억 장치, 반도체 메모리 DRAM과의 비교로 나

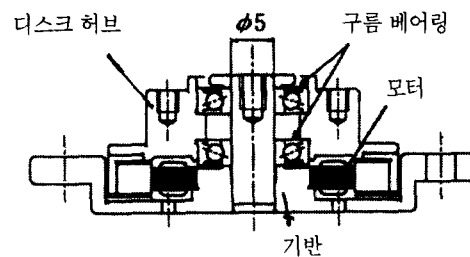
타낸다. HDD의 면기록 밀도는 1992년보다 연율 60%로 증가하고, 연율 40%의 DRAM을 밀어 제치고, 최근에는 연율 100%의 증가율을 나타내고 있어, 광 디스크를 점차 추월하고 있다. 현재, 실용기의 최고 기록 밀도는 약  $30 Gb/inch^2$ 으로 대략 트랙 밀도는  $50 kTPI$ (트랙/인치 : 1968개/mm, 트랙 피치  $0.5 \mu m$ ), 선 밀도는  $573 kBPI$ (비트/인치 : 22.6 kb/mm, 비트 간격 44nm)이다. 이미 실험레벨에서는 면 밀도  $50 Gb/inch^2$ 이 달성되어, 2003년에는  $100 Gb/inch^2$ 이 상품화할 것으로 예측하고 있다. 그러나 HDD는 반도체와 같이 제어된 환경 하에서 특수한 장치에 기록되는 것이 아니고, 또 광 디스크와 같이 트랙 위치 결정 제어에 비용이 들지 않고, 운동 기구의 외란 요인을 억제하여 고 밀도 기록을 실현하고 있는 것이 특징이고, 이 때문에 한계 추구적인 고정도 기구 설계가 이루어진다.

## 2.2 구름 베어링 지지 디스크 스펀들의 회전 정도

자기 디스크 스펀들에 요구되는 성능은 오직 회전정도이다. 서버용에서는 고속화가 더욱 중요하고, 고속·고정도 회전이 과제이다. 고속화하면 회전속도의



(a) 자기 디스크 기구의 구조



(b) 구름 베어링 스펀들의 구조

그림 1 자기 디스크 기록장치(HDD)와 스펀들의 구조

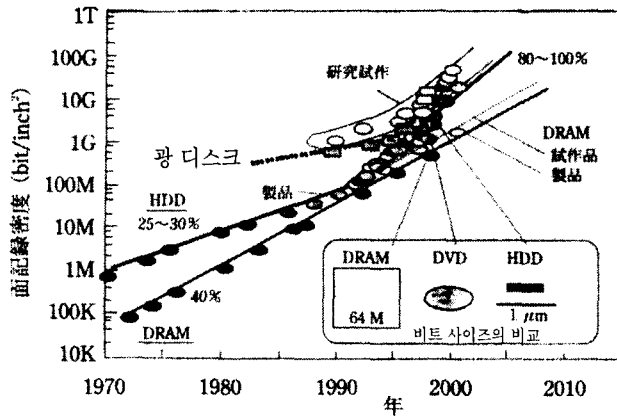


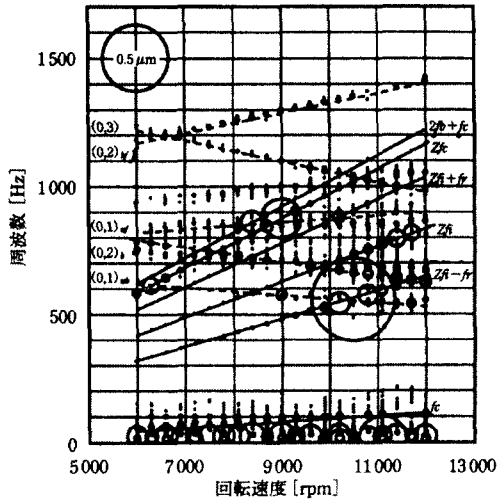
그림 2 HDD, 광 디스크, DRAM의 면 기록밀도의 연차 추이

제품에 비례하여 바람에 의한 흔들림인 디스크 진동 (플래터라고 부름)이 증대한다. 또 구름 베어링에 의한 비주기 진동(Non-Repeatable Run-Out : NRRO) 및 이것과 스핀들 계 고유 진동과의 공진이 문제가 된다. 그림 3은 서버용의 5장 디스크 스핀들 가장 윗면의 디스크 외주부 면의 진동과 반경 방향 진동의 캠벨도(가로축의 각 회전속도로 측정된 진동을 스펙트럼 해석하여, 각 성분의 주파수를 세로축에, 진폭을 왼쪽으로 나타낸다)이다. 원의 크기는 랜덤하게 나타나는 진동 진폭의 평균치이므로, 최대로 이것의 3배는 생긴다. 회전 속도에 비례하는 성분은 구름 베어링의 형상 오차에 기인하는고 진동이다. 한편, 회전 속도와 동시에 완만하게 감소하기도하고, 증가하기도 하는 성분은 디스크 스핀들의 고유 진동수로 팔호 안의 수( $i, j$ )는 노드 원 수  $i$ , 노드 직경 수  $j$ 를 나타낸다. 디스크 스핀들에는 디스크의 고유 진동수가 디스크의 자이로 효과에 의하여 회전속도와 더불어 증가하는 Forward 모드(f)와 Backward 모드(b)로 나눈다. 또 디스크의 (0,1)모우드 진동은 축·베어링 스프링강성과 연성되어, 축이 기우는 Locking 모드라고 부르는 여진을 받지만(언밸런스 모우드(u)라고

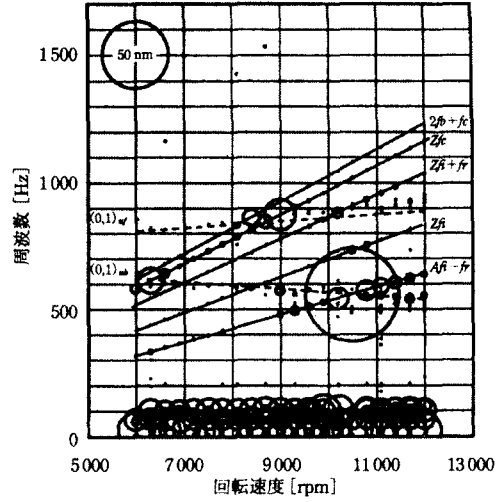
한다), 그 이외의 디스크 진동 모우드는 베어링과의 연성되지 않고(밴런스 모우드(b)라고 한다), 베어링에 의하여 여진되지도 않는다.

이들 디스크 스핀들의 고유진동수가 임의의 회전속도에서 나타나는 것은 주위의 공기류에 의하여 여진되기 때문으로 이것이 플래터이다. 나아가 회전속도에 비례적으로 증가하는 베어링 여진 진동 성분과 (0,1) Locking 모우드의 고유진동수가 교차한 점에서 공진 현상이 나타나고 있다. 100Hz 이하의 성분은 측정 시스템의 노이즈 성분이다. 이 그림에서 Locking 모우드는 디스크 반경 방향에도 크게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 또 스핀들 상부의 고정 플랜지 측면에서 측정된 디스크 반경 방향의 진동은 디스크 밸런스 모우드의 플래터 진동은 반드시 관측되지는 않지만 일반적으로 디스크의 굽힘 진동은 약 1/30이 헤드와 디스크의 변위가 원인이라는 것은 명확하다.

이들의 그림으로부터 운전속도에서는 우선 「공진이 생기지 않도록」 설계하는 것이 중요하다. 그러나 장치, 온도 등의 차이로 구름 베어링의 강성이 변화하므로 언제나 용이하지는 않다. 또, 「구름 베어링의 여진 성분을 작게 한다」, 「플래터를 억제한다」와 같은 것도



(a) 맨 위 디스크의 면 바깥 진동



(b) 디스크 클램프의 반경 방향 진동

그림 3 5장 하드디스크 장치의 면 바깥 방향과 반경 방향 진동의 측정 예

중요하다. 「플래터를 억제한다」에는 오래 전부터 디스크 외주와 주변 커버(슈라우드) 벽면과의 틈새를 작게 하는 것이 효과적이다. 저자는 고정벽면을 디스크 면에  $300\ \mu\text{m}$  이하의 아주 좁은 틈새로 접근시키면, 스퀴즈 공기막 감쇠 효과에 의하여 플래터가 억제된다. 그림 4에서는 그림 3의 진동 특성을 갖는 5장 디스크의 맨 위 디스크 면의 위쪽에 반경폭 20mm, 원주각 180도의 면적에서 틈새  $170\ \mu\text{m}$ 의 고정벽을 설정했을 때의 디스크 진동의 캠벨도이다. 이것으로부터 스퀴즈 공기막 감쇠는 디스크 플래터만이 아니고, 베어링 여진력에 의한 공진 진폭도 감쇠시키는 것을 알 수 있다. 그러나 구름 베어링에 의한 NRRO 성분은 작게하는 과제에 대해서는 노구찌 등은 12개 볼로 하면, 진폭  $1\ \mu\text{m}$ 의 원주 10차까지의 내외륜 레이스면의 물결침에 대하여 축 진동 진폭이 1nm 이하로 되는 것을 나타냈다.

일반적으로 기록 재생시의 위치 결정 정도는 트랙 폭의 10%이하가 필요하다. 따라서 트랙 피치  $0.6\ \mu\text{m}$

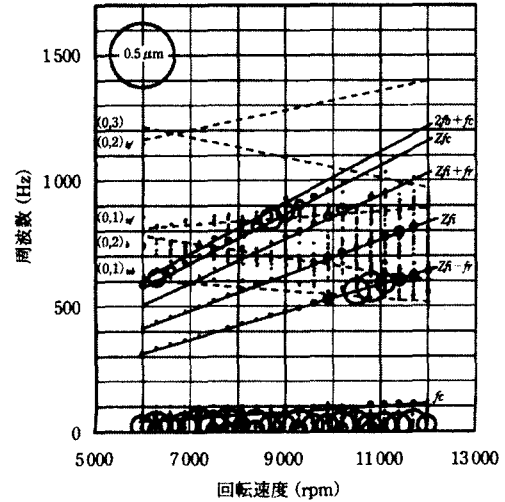


그림 4 스퀴즈면(원주각 180°, 반지름폭 20mm, 틈새  $170\ \mu\text{m}$ )을 부가하였을 때 맨 위 디스크의 면의 진동

이면, 추종할 수 없는 베어링 진동 성분을 20nm, 플래터 진동 성분을 20nm 정도로 억제하면 실현할 수 있다. 그러나 앞으로 당면 목표인 면밀도  $100\text{Gb}/\text{inch}^2$

에서는 120 *kTPI*(4.7 k 트랙/mm)에서 트랙 피치는 0.21  $\mu\text{m}$ 가 되어, 추종오차 20 nm이하가 필요하다. 이의 실현방법으로 우선 서보 대역을 현재의 670Hz에서 3배인 2kHz 정도로 올리면 현재의 20Gb/*inch*<sup>2</sup> 외란 레벨에서 거의 가능하다. 그래서 마이크로 액튜에이터를 탑재한 각종의 2단 서보 방식이 개발되고 있다. 2단 서보 방식을 채용하지 않으면 외란 레벨을 1/3로 저감시킬 필요가 있다. 2.5인치형에서는 유체 베어링의 채용에 의하여 이것은 가능하다고 한다. 3.5인치의 고속기에는 유체 베어링의 채용과 더불어 플래터 진동의 억제도 불가피하다고 예상되고 있다. 한편, 구름 베어링의 회전정도는 12개 볼로 현재 NRRO(6 $\sigma$ )=40nm 정도가 가능하다고 한다. 이 중에는 주파수가 회전속도의 약 반인 볼 보지기의 회전수 성분  $f_c$ 가 있고, 이 성분의 진폭은 비교적 크지만 주파수가 낮으므로 서보 기록 신호시의 문제가 해결되면, 재생시의  $f_c$  성분은 트랙 서보 제어에 의하여 충분히 억제할 수 있다. 단, 그리스도 외란 요인이 되므로 이것을 제거하기 위해서는 오일 윤활이 필요하고, 나아가 오일 윤활 시의 베어링 음향 수명을 확보하기 위하여 세라믹 볼 베어링이 필요하다고 한다. 볼 수가 많으면 공진의 가능성이 커지기 때문에 문제가 있었지만, 디스크 밀면과 기판과의 틈새를 150  $\mu\text{m}$  정도로 작게 하여 스

퀴즈 공기막 감소에 의하여 공진과 플래터를 억제하고, 오일 윤활의 12개 세라믹 볼 베어링에 의하여 NRRO를 작게 하면, NRRO의 총합을 20nm이하로 할 가능성이 있다.

### 2.3 유체 베어링 지지 스피들 기술

NRRO 성분을 10nm이하로 할 수 있는 베어링으로 현재 유동압 유체 베어링이 점차 채용되고 있다. 그림 5는 유동압 베어링 지지 스피들의 개략도로 오일 실 기능이 높은 형이다. 래디얼 베어링, 슬러스트 베어링 모두 헤링본 형의 베어링 면이 주류이다. 유동압 베어링은 NRRO 여진력의 발생이 없고, 비접촉이므로 베어링 소음이 없고, 또 감쇠 효과가 높으므로 외부 충격에도 강한 장점을 갖고 있다. 그러나 윤활유의 밀폐 신뢰성에 의문이 있어 저온 시의 마찰 토오크가 크고, 베어링 강성이 작은 결점이 있다. 유동압 베어링은 이미 고성능 프린터, 복사기의 레이저 스캐너 베어링, VTR용 베어링 등에 이용되고 있지만 HDD용 베어링에서는 5만 시간 이상의 회전 수명, 수만 회의 기동정지, 모든 베어링 자세에 견디는 것이 필요하여 사용조건이 엄격하다. 또 베어링 강성은 구름 베어링에 대하여 대개 한 자릿수 작다. 베어링 강성을 저하시키지 않고, 마찰 토오크를 작게 하기 위하여 점도

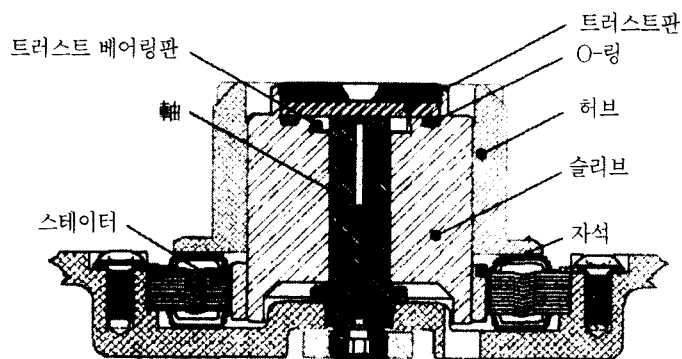


그림 5 오일 윤활 유체 베어링 스피들의 설계 예

가 작은 오일을 선택하여 베어링 틈새를 2  $\mu\text{m}$  전후로 작게 하고 있다. 헤링본 홈에서의 유막 파단과 버블의 발생도 문제로 유막 파단이 있으면 유체 베어링에서도 NRRO의 원인이 된다. 파단을 막기 위하여 홈각도 베어링 강성 최대값을 부여하여 최적 홈 각도보다 작게 한다. 발생한 버블에 대하여 리저버와 공기 빼기 기구를 설치할 설계법, 처음부터 공기를 뺀 오일을 베어링 틈새 내에 충전시키는 설계법 등이 이루어지고 있다. 윤활유의 실 기구로써 헤링본 홈의 펌핑 효과 이외에 회전에 의한 원심력 및 발유제와 표면장력을 이용하는 설계가 이루어지고 있다. 2.5인치형에서는 로우터가 가벼우므로 거의 실용적인 신뢰성이 얻어진다고 하지만, 3.5인치형에서는 아직 검토 단계에 있는 것 같다. 또 구름 베어링과 경쟁할 수 있는 저가격화도 과제이다.

### 3. 레이저 프린터 그 외의 정보기기에서 고속·고정도 회전 기구 기술의 동향

레이저 프린터, 디지털 복사기, 레이저 팩시밀리 등 레이저 기록 시스템을 이용한 전자 사진 방식의 기록 장치에서는 폴리곤 미러를 고속 회전시키는 기구를 이용한다. 속도적으로는 아직 느려서 10ppm 이하의 저속기가 1만 rpm이하, 10-20ppm의 중속기가 1-2만 rpm, 21ppm 이상의 고속기가 2-4만 rpm으로 되어 있다. 저속 스캐너에서는 구름 베어링과 오일 베어링이 이용되고, 중속에서는 주로 오일 베어링이, 고속에서는 오일 베어링과 공기 베어링이 이용된다.

레이저 스캐너 스핀들에서는 회전 정도는 광학적으로 보상하는 기구가 있으므로 특히 문제가 되지 않는다. 중요한 것은 고속성과 등속회전 성능과 평형 정도이다. 또 3만 rpm이상에서는 바람에 의한 손상으로 발열이 커지므로 바람에 의한 손상의 저감과 냉각이 중요하다. 회전 속도 변동은 주 주사 중이 후단의 도

트 위치 밀림이 되므로 속도 변동 0.01%이하가 요구되어 PLL(Phase Lock Loop)제어가 이용되고 있다. 평형 정도는 회전 속도가 높아짐에 따라 어려워진다. 3-4만 rpm의 고속기에서는 로우터 질량은 수십 그램으로, 1mg 정도의 평형 정도가 필요하다. 특히 폴리곤 미러를 축에 고정하는 클램프 법이 중요하여서 고속회전에 의한 원심력, 온도 상승에 의한 열변형으로 고정면이 밀려서 불평형이 생기지 않도록 한다. 칼라 프린터, 복사기의 고속화에의 요구는 높고, 따라서 스캐너 회전 속도가 5만 RPM 이사의 고속화가 점차 개발되고 있다. 평형과 진동·소음 억제, 바람에 의한 손상의 저감과 냉각, 회전 팽창 제어 등이 과제이다.

### 4. 가공기, 시험기 등에서 고정도 회전 기술의 동향

정밀선반·연삭기 등의 가공기에서 구름 베어링 지지 스핀들의 회전정도는 대략 0.2-0.3  $\mu\text{m}$  정도이다. 나아가 고정도가 요구되는 스핀들에는 정압 공기 베어링(에어) 스핀들이 사용된다. 그러나 베어링 강성이 작으므로 가공력이 작아야 한다. 공기 베어링은 주로 다공질 죄임형으로 스핀들의 NRRO는 40nm이하, 특히 관리되어야 하는 것에서는 10nm이하이다. HDD용 디스크 기판, 레이저 스캐너용 폴리곤 미러, 전자 사진식 감광 드럼 등은 에어 스핀들 가공기의 회전 정도에 영향을 받는다. 또 광 디스크의 원판 기록 장치, HDD 제조 라인에서의 측정기·시험기에는 에어 스핀들이 사용되고 있다.

HDD의 위치 결정용 서보신호는 현재 실제기계로 기록하고 있지만, 그 고정도화와 작업시간 단축이 중요한 과제이다. 유체 베어링의 성능과 채용 동향에도 의존하지만 100 Gb/inch<sup>2</sup> 이사의 서보 신호는 NRRO가 10nm이하의 에어 스핀들을 이용한 서보 트랙 라이터(STW)로 효율적으로 기록하는 방식도

검토되고 있다. 이 경우, 서보 신호 기록 후 디스크를 실제기계에 탑재할 때에 생기는 트랙의 편심과 변형이 문제가 된다. 트랙 중심을 일치시키는 조립법, 디스크를 변형시키지 않는 클램프 법, 회전동기 성분 억제법의 개발이 필요하다.

## 5. 결론

정보기기, 특히 HDD와 레이저 프린터의 성능은 회전 운동의 정도와 속도에 지배되고 있어서, 고정도·고속회전기술을 지배하는 사람이 이들 정보기기 기술을 지배한다. 고정도화의 최첨단을 가는 HDD에서는 100Gb/inch<sup>2</sup>의 면 기록 밀도를 목표로 회전정도 20nm의 디스크 스핀들을 개발하는 경쟁이 진행되고 있다. HDD에서 유체 베어링의 본격적인 채용, 세라

믹 볼 등에 의한 구름 베어링의 반격, 고속 폴리곤 스캐너의 오일 베어링과 공기 베어링의 경쟁 등, 지금, 고정도·고속 스핀들 기술이 흥미롭다.

《일본정밀공학회지, Vol.67, No.7, 2001》

본 특집기사는 건국대학교의 이성수 총무이사가 “일본정밀공학회지” 2001년 7월호 pp.1051~1054를 번역한 것으로 일본정밀공학회지의 연락처는 다음과 같다.

- 주소 : 東京都千代田區 九段北 1-5-9, 九段誠和 Building 2F
- 전화 : +81-3-5226-5191
- 팩스 : +81-3-5226-5192
- URL : <http://www.jspe.or.jp/>

## 경 제 리 뷰

### 우리나라 對중국 수출 일본 제치고 2위 부상

우리나라의 중국에 대한 수출이 對일본 수출 규모를 제치고 정부 무역통계상 미국에 이어 2위의 수출시장으로 부상중인 것으로 나타났다.

산업자원부에 따르면 올 들어 7월까지 중국에 대한 수출액은 106억 9,600만불로 지난해 같은 기간에 비해 4.7% 증가한 반면 일본의 경우 103억 7,600만불로 9.2% 감소했다.

상반기까지만 해도 중국 91억 6,200만불, 일본 91억 5,800만불로 거의 차이를 보이지 않은 채 전체 수출에서 차지하는 비중도 11.6%로 같았다.

하지만 7월 말에는 누계차이가 3억불 가량 벌어졌고 비중도 중국 11.9%, 일본 11.5%로 달라졌다. 물론 수출실적에 잡히지 않는 홍콩을 통한 對중 간접수출 규모를 감안할 경우 對중 수출량이 이미 일본을 추월했다는 게 일반적인 시각이지만, 이처럼 공식 무역통계상으로 순위가 뒤집힌 것은 처음인 것으로 알려졌다.

중국과 일본에 대한 연도별 수출규모를 보면 중국은 90년까지만 해도 10대 수출시장에도 끼지 못했으나 한·중 수교가 이뤄진 92

년에 26억 5,400만불을 기록, 91년에 비해 164.7%증가했다.

92년 당시 대일 수출규모는 115억 9,900만불로, 중국의 4배가 넘었다.

그러나 對중 수출은 95년에 91억 4,400만불, 96년 113억 7,700만불, 97년 135억 7,200만불, 98년 119억 4,400만불, 99년 136억 8,500만불, 지난해 184억 5,500만불 등으로 외환위기 직후만 빼면 계속 증가해 왔다.

반면 70년대 이후 부동의 2위 자리를 지켜온 일본의 경우 95년 170억 4,900만불, 96년 157억 6,700만불, 97년 147억 7,100만불, 98년 122억 3,800만불, 99년 158억 6,200만불 등에 이어 지난해에는 204억 6,600만불을 기록했다.

산업자원부 관계자는 “올해 對일 수출이 정보기술(IT)산업 침체의 직격탄을 맞으면서 중국에 2위 수출시장 자리를 내줄 가능성이 많다”면서 “중국의 세계무역기구(WTO)가입이나 베이징 올림픽 개최 등을 감안할 경우 앞으로도 중국이 미국에 이어 2위 자리를 지킬 가능성도 적지 않다”고 전망했다.