

고속 가공기의 스피들 진동에 영향을 주는 요소 분석

최영호*(금오공대원), 윤두표((주)석화MET), 김광영(KIMM), 최병오(KIMM)

Analysis element in influenced spindle vibration
of high-speed processing machine

young-ho Choi*(KNUT), doo-pyo Yun(Sukwha Met Co, Ltd)
kwang-young Kim(KIMM), byung-oh Choi(KIMM)

ABSTRACT

In this paper, We have studied on the critical vibration limits of spindle unit for the high speed ball pen tip processing machine. The vibration of bearing can be measured by FFT, and the influence of vibration amplitude due to the Unbalance, bearing deflect, bite and timing belts tension are analyzed. So, the critical vibration limits of spindle is determined by the X, Z directional vibration of spindle Unit.

1. 서론

고속 절삭을 하는 가공기에서 진동의 발생은 생산 제품의 불량률 초래한다. 고속 가공기는 높은 회전정밀도가 요구되는 기계이며 장시간 운전에 의한 기계의 손상과 베어링부의 마모로 인한 이상 진동이 발생할 수 있으며, 이러한 이상진동으로 인하여 가공기의 수명이 단축되고 생산 제품의 불량률이 발생하게 된다. 고속 가공기계의 불량 발생 원인으로는 회전부품의 불평형, 베어링이나 커플링의 축정렬 불량, 축의 휨, 비틀림 진동, 기계적 느슨함, 공진, 베어

링의 불량 등을 들 수 있으며⁽¹⁾, 이상진동의 원인은 복합적인 요인에 의해 일어나는 경우가 많다.⁽²⁾ 고속 스피들 가공기의 경우는 회전 부품의 불평형과 축정렬 불량, 그리고 베어링의 마모가 주된 요인이라 할 수 있다. 각 요인에 따른 이상 진동 신호의 특징은 각기 다르기 때문에 FFT값을 통한 주파수 분석으로 그 이상 진동 신호를 규명할 수 있다. 따라서 주파수 분석을 통한 이상 진동의 원인을 규명하고 해결함으로써 기계의 수명 연장과 불량률을 낮출 수 있으며 생산성의 향상을 기할 수 있다. 본 연구는 고속 볼펜 팁 가공기의 스피들 베어링에서 진동을 측정하여 스피들 진동에 영향을 주는 요소를 규명하고 스피들 베어링의 교체주기를 판단하는 자료를 제공하고자 하는 기초 연구로써, 이상 진동 신호의 원인이라 할 수 있는 불평형, 베어링 마모, 가공공구의 영향, 타이밍 벨트의 장력에 의한 영향 등 스피들 진동에 영향을 주는 요소에 대한 진동신호를 측정 분석하여 작업현장에서의 스피들 진동 한계치를 정함으로써 고속 볼펜 팁 가공기의 성능향상과 제품의 불량방지, 생산성 향상과 원가절감을 도모할 수 있다.

2. 기초이론

2.1 회전체의 불평형

회전체 불평형은 가장 보편적으로 나타나는 진동 요인으로서 무게중심과 회전중심의 불일치에서 비롯된다. 불평형을 회전체에 편심되어 있는 질량으로 표현하여 식 (1)에서와 같이 힘이 회전체를 반경방향으로 작용하게 되므로 회전중심으로부터의 거리 r 에 따라 힘이 달라진다. 식 (2)는 그때 발생하는 주파수이다.

$$F = mr\omega^2 \quad (1)$$

$$f = \frac{n}{60} \quad (2)$$

이때 발생하는 진동 신호의 특징은 1X rpm에서 높은 진동이 발생하고 회전속도에 비례하여 진동의 증가함이 보이며 낮은 harmonics 위주의 진동이 발생한다.

2.2 축 정렬 불량⁽²⁾

축의 어긋남은 수명에 직접적인 영향을 주는 중요한 요인으로서 베어링에 주기적 변동을 주기 때문에 진동을 유발할 뿐만 아니라 불이나, 내, 외륜의 마모를 촉진한다. 축 정렬불량은 기계적 느슨함을 유발함으로써 조립 불량과 구조적 결함의 원인이 된다. 실제 가공기에서 오일리스베어링(oilless bearing)을 사용하기 때문에 각 어긋남(Angular Misalignment)이 중요한 원인이 된다. 진동신호의 특징은 1 and 2 xrpm에서 높은 진동이 발생하고 축방향으로 높은 진동이 나타나며, Half Harmonics, 여러 종류의 Harmonics 성분이 존재하고 방향에 따른 진동이 크기가 다르다.

2.3 베어링의 손상⁽¹⁾⁽²⁾

베어링의 손상은 기계에서 발생하는 일상적인 문제이며 자체 불량 이외에 회전체의 불평형, 축정렬 불량, 오일리스베어링 사용시 작동유의 혼입 등과 같이 기타 다른 문제에 종속적으로 손상된다. 진동신호의 특징은 베어링의 기하학적 위치와 축의 속도에 영향을 받으므로 특정 주파수에서 발생하며, 또한 고주파 영역에서 진동이 발생한다. 각 베어링 부위에서의 결함에 따른 주파수 성

분은 다음과 같다.

$$\text{외륜의 결함} : \frac{n}{2} \frac{N}{60} (1 - \frac{d}{D} \cos \theta) \quad (3)$$

$$\text{내륜의 결함} : \frac{n}{2} \frac{N}{60} (1 + \frac{d}{D} \cos \theta) \quad (4)$$

$$\text{회전요소의 결함} : \frac{D}{d} \frac{N}{60} (1 - (\frac{d}{D})^2 \cos^2 \theta) \quad (5)$$

$$\text{리테이너의 결함} : \frac{N}{120} (1 - \frac{d}{D} \cos \theta) \quad (6)$$

여기서, n 는 회전요소의 수, N 는 회전속도, d 는 회전요소의 직경, D 는 베어링의 피치직경, θ 는 회전요소의 접촉각을 나타낸다.

2.2 주파수 분석⁽³⁾

실제 회전체 대부분의 진동 신호는 동시에 일어나는 많은 주파수로 되어 있으므로 구성되는 주파수 성분과 어떤 주파수에서 진동이 발생하는가를 파악하는 것은 어렵다. 따라서, 진폭-주파수를 변환시켜 관찰하는 데 이처럼 진동 신호를 각각의 주파수 성분으로 분리하는 것을 주파수 분석이라 한다.

2.2.1 RMS 값(Root Mean Square Value)

RMS값은 시간에 대한 변화율을 고려하고, 진동의 파괴적 능력을 나타내는 에너지량과 직접 관련된 진폭을 표시하므로 진동크기의 표현에 많이 사용한다. 진동속도 대 시간의 측정기록으로부터 진동의 RMS값은 다음과 같이 계산할 수 있다.⁽⁵⁾

$$V_s = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt} \quad (7)$$

여기서 T 는 주기이고, V 는 진동속도이다.

2.2.2 FFT값(Fast Fourier Transfer Value)

푸리에 변환은 임의의 주기함수에 대해 이를 사인함수의 급수합으로 나타낸 것이다. 또한 시간영역신호를 주파수 영역으로 변환하여 그래프로 나타내는 것을 주파수 스펙트럼이라 한다. FFT분석은 그래프를 보면서 주파수 영역, 즉 저주파 영역과 고주파 영역으로 나누어서 진동신호의 분포를 볼 수 있으며, 또한 분석을 통한 고유주파수와 이상 주파수를 파악할 수 있다. 아래의 식은 Square Wave의 푸리에 급수식을 나타낸다.

$$f(t) = a_0 + a_1 \sin(\omega_0 t + \phi_1) + a_2 \sin(2\omega_0 t + \phi_2) + \dots + a_n \sin(n\omega_0 t + \phi_n) + \dots \quad (8)$$

여기서 $\omega_0 = 2\pi\Delta f$ 이고, Δf 는 주파수분해능이다. Table. 1은 각 이상 진동 요인별 주파수의 형태의 특징을 나타내고 있다.

Table. 1 Specification of error state at the spindle

이상상태	기준 주파수	진동 주파수	비고
불균형 진동	회전수	1X	위험속도 통과시 180회상지연
축이긋남	회전수	(1X), 2X, 3X	대부분 축간 어긋남과 각도어긋남이 동시에발생
조립불량 (떨거움)	회전수	1X, 2X, 3X	다른 진동요인과 결합되어 나타남
벨트의 마멸,신장	벨트 주파수	2X	벨트 주파수의 1X, 3X 등도 나타날 수 있음.
구동벨트 공진		벨트공진 주파수	공진주파수의 20% 내에서의 가변가능
공진		공진 주파수	
회전체의 마찰	회전수	0.5X	
구름베어링 결함	회전수 분회전수		내륜, 외륜, 롤링함, 리테이너 결함

3. 실험대상 및 방법

3.1 실험대상

측정에 사용되어진 고속 스피들 가공기는 한 기계에 독립한 여러 개의 소형 스피들이 부착되어 있고, 한 기계에서 여러 공정의 가공을 할 수 있는 시스템으로서 부착된 스피들은 18,000 rpm으로 회전한다. Fig. 1은 측정에 사용되어진 가공기를 나타낸다.

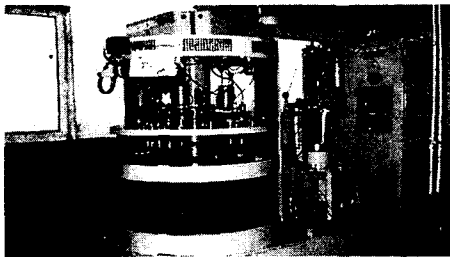


Fig. 1 Processing machine using hi-spped spindle

Fig. 2는 Fig. 1의 기계에서 스피들 부분의 자세한 그림으로 (a)는 측정에 사용되어진 전기 모터로서 스피들까지 타이밍벨트로 동력을 전달하며, 회전방향은 시계방향이다. (b)은 고속 스피들의 나타내며, 스피들을 받쳐주는 케이스의 아랫부분, 즉 스피들 하부 베어링에 가속도 센서를 붙여 측정하였다.

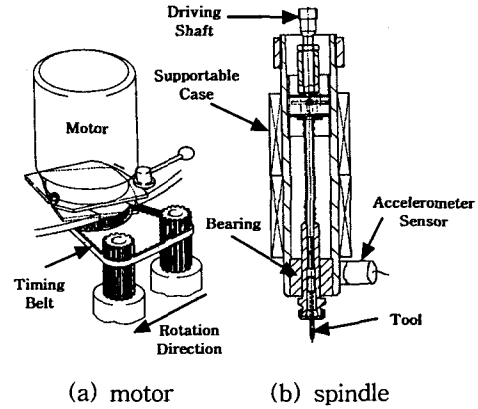


Fig. 2 Electric motor and spindle

Fig. 3은 측정과정을 나타낸 블록선도이다. Fig. 3에서 센서는 Piezoelectric Accelerometer sensor(PCB 356A08)를 사용하였으며, 증폭기(PCB 482A05), Data Acquisition Board(Data shuttle express), Notebook(Intel Pentium II) 등을 사용하였다. 데이터 획득은 Workbench 3.0 software를 사용하였다.



Fig. 3 Block diagram of measurement processing

3.2 측정방법

Fig. 4에서 보는 바와 같이 센서의 X축은 실제 스피들의 좌우진동이며, Y축은 회전방향 운동, Z축은 상하진동을 나타내며, 세 방향에 대해서 측정하였다.

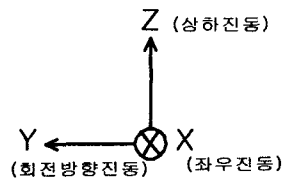


Fig. 4 Coordinate of sensor and practice 회전체 진동의 속도나 가속도는 동일한 점에서 회전기계의 비회전 부분에서 측정하는 것이 대부분이다. 본 측정에서 언밸런싱은 정상상태에서 임의적으로 축을 어긋나게 한 스피들과 정상적인 스피들의 진동을 비교하여 측정하였다.

타이밍 벨트의 장력은 장력이 완충된 신품의 벨트를 사용한 스피들과 장력이 이완된 사용품의 벨트를 사용한 스피들의 진동을 비교하여 측정하였다. 공구의 질량 불균형은 공구를 부착한 스피들과 부착하지 않은 스피들의 진동을 비교하여 측정하였다. 베어링 손상은 손상이 간 베어링을 부착한 스피들과 정상적인 베어링을 부착한 스피들의 진동을 비교 측정하였다. 각 측정은 Fig. 2에서와 같이 스피들 아랫부분에 센서를 부착하여 일정하게 측정하였다.

Table. 2는 측정시 일반적으로 참고하여야 할 측정방향을 나타내었다. (1)

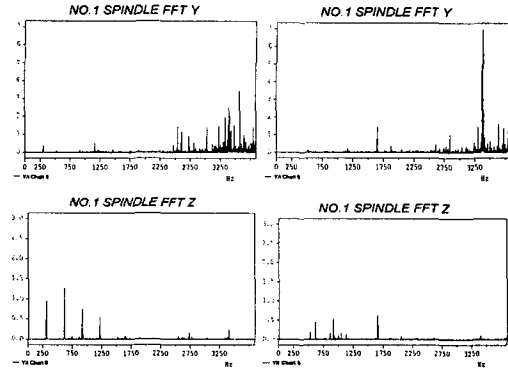
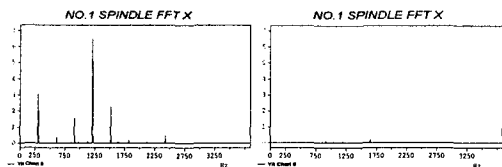
Table. 2 Measurement direction as error state

결함중상	진동 측정방향
Unbalance	반경(x축)
Misalignment	반경(x축) 및 축(Z축)
Bearing 손상	반경(x축)
헐거운 조립	반경(x축) 및 축(Z축)
Belt 결함	반경(x축)

4. 실험결과

4.1 Balance의 영향

Fig. 5는 고속 가공기 스피들에 있어서의 회전시 Balance의 영향을 파악한 것으로 주파수별 센서의 출력을 3축 방향에 대하여 나타낸 것이다. (a)의 경우는 언밸런싱 시에 발생한 것을 나타낸 것이며, (b)는 언밸런싱 문제 해결시 안정화 단계에 있는 경우를 나타낸 것이다. 이러한 측정은 회전체의 언밸런싱 문제가 주파수 이상 진동신호를 발생시킴을 나타낸다. 아래 그림에서 알 수 있는 바와 같이 각 축에 있어서의 (a)의 경우 각 주파수 구간대에 있어서 회전체의 불평형이 나타남을 보이고 있으나, (b)와 같이 안정된 상태에서는 측정하고자 하는 X축의 경우 지속적인 평형상태를 보이고 있음을 알 수 있다.

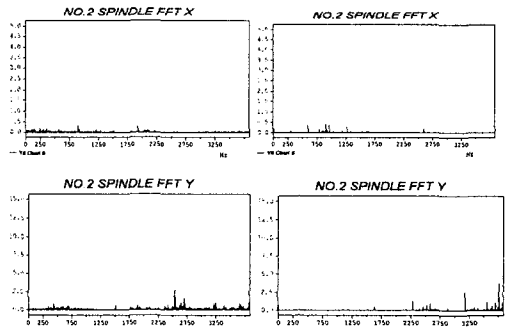


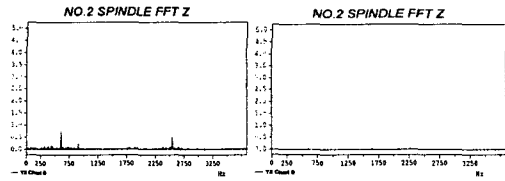
(a) Unbalance (b) Balance

Fig. 5 Effect of balance at axis of revolution

4.2 Bearing의 영향

Fig. 6은 고속 가공기 스피들에 있어서의 회전시 bearing의 영향을 파악한 것으로 주파수별 센서의 출력을 3축 방향에 대하여 나타낸 것이다. (a)의 경우는 bearing의 마모, 파손 등 불량요인으로 인한 구동시에 발생한 것을 나타낸 것이며, (b)는 bearing 교체 후 일정시간이 경과한 안정화 단계에 있는 경우를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 bearing의 진동에 영향을 미치는 X축의 경우 베어링 불량으로 인한 구동과 베어링 교체 후 미세 진동만이 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 상하 진동을 나타내는 Z축에 있어서도 베어링 교체 후의 경우 진동이 나타나지 않고 있음을 보인다. 그러나 회전 방향진동인 Y축의 경우 bearing의 회전 영향으로 인하여 다소의 진동이 발생하고 있음을 보이나, 그 영향은 크지 않음을 알 수 있다.

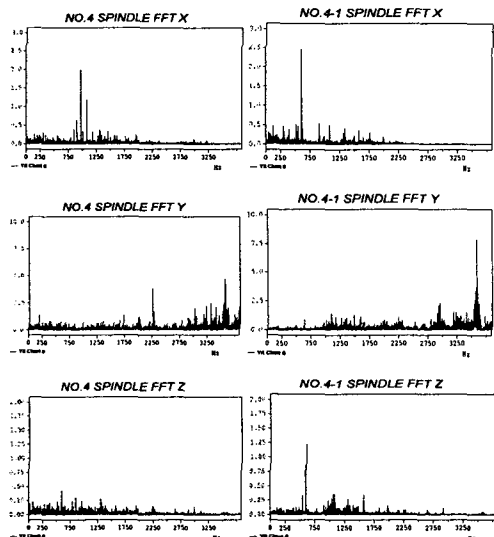




(a) Used bearing (b) Change bearing
Fig. 6 Effect of bearing at axis of revolution

4.3 공구의 영향

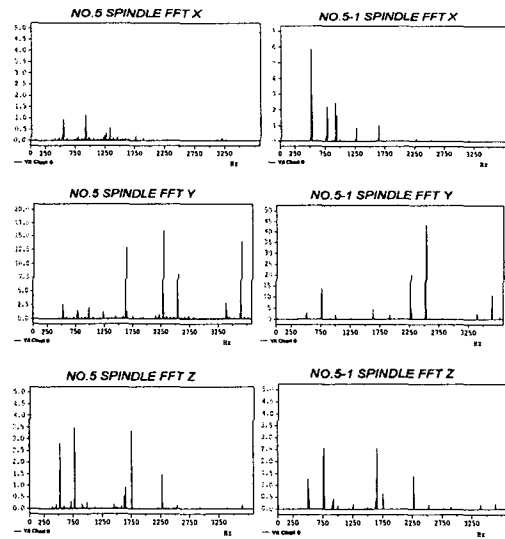
Fig. 7은 회전체에 있어서 부가되는 공구의 탈착과 부착에 따른 영향을 파악한 것으로 주파수별 센서의 출력을 3축 방향에 대하여 나타낸 것이다. (a)의 경우는 공구 부착시에 발생한 것을 나타낸 것이며, (b)는 탈착 후 안정화 단계에 있는 경우를 나타낸 것이다. 그림에서 (a), (b) 모두에 있어서 공구의 탈착과 부착에 따른 영향은 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있다. Fig. 5의 좌우진동과 복합적으로 연계되어 진동의 복합효과를 나타내고 있음을 보인다. 따라서 공구의 사용에 따른 질량 불균형과 회전체의 굽힘은 회전체의 좌우진동과 밀접한 연관이 있음을 알 수 있다.



(a)Used tool (b)Non tool
Fig. 7 Effect of tool at axis of revolution

4.4 타이밍 벨트의 영향

Fig. 8은 회전체에 있어서 timing belt의 영향을 파악한 것으로 주파수별 센서의 출력을 3축 방향에 대하여 나타낸 것이다. (a)의 경우는 타이밍 벨트의 장력 충분시에 발생한 것을 나타낸 것이며, (b)는 타이밍 벨트의 장력 이완시에 있는 경우를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 (a), (b) 모두에 있어서 동일 주파수대에서 진동의 발생을 알 수 있다. 특히 좌우진동을 표시하는 X축의 경우 진동의 발생은 점차 증가함을 보인다. 이러한 경향은 timing belt의 조립과 구동 시에 발생하는 clearance의 영향이라 판단되고, 장력이완으로 인한 진동의 증가로 판단된다. 또한 3축 모두 timing belt의 영향에서 자유롭지 못함을 보여주는 것이라 생각된다.



(a)New timing belt (b)Old timing belt
Fig. 8 Effect of timing belt at axis of revolution

4.4 각 원인별 RMS 값⁽⁴⁾⁽⁵⁾

Table. 3은 각 축에 있어서 영향을 미치는 인자들에 대한 결과를 RMS 값으로 정리하여 나타낸 것이다. 여기서 (x, y, z)와 (x', y', z')는 에러요소와 정상적인 것과의 값을 비교한 것으로 에러요소의 RMS값보다 정상적인 요

소의 RMS값이 작게 나타남을 보여주고 있다.

Table 3 The Root Mean Square value of result

Influence	coordinate					
	x(a)	x'(b)	y(a)	y'(b)	z(a)	z'(b)
Unbalance	2.66	1.77	3.74	5.07	2.07	1.33
Bearing	2.56	1.22	5.25	2.84	2.48	0.49
Tool	3.51	3.46	9.75	8.9	3.32	2.94
Timing belt	2.9	1.99	5.95	5.92	2.47	2.36

Fig. 9은 각 인자들에 대한 축에 미치는 영향을 RMS값으로 정리하여 나타낸 것으로 Table. 3의 결과를 인용한 것이다. 축의 파괴적 에너지를 나타내는 진폭의 크기는 회전체의 방향인 Y축에 가장 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 이는 회전시에 발생하는 Torque와 인자 중의 베어링의 문제가 그 원인이라 판단된다. 또한 회전기계에 있어서의 파괴 요인도 회전 운동에 의한 진동 발생이 절대적임을 알 수 있다. 이러한 경향은 Fig. 10에서도 베어링의 차이 값이 가장 큼을 확인할 수 있었다.

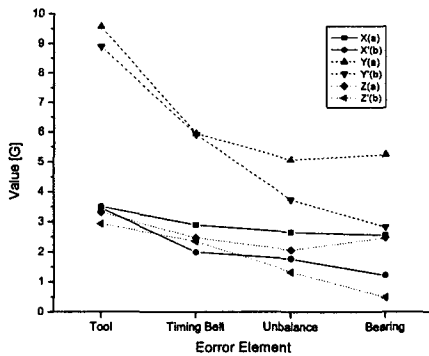


Fig. 9 RMS Value of Error Element

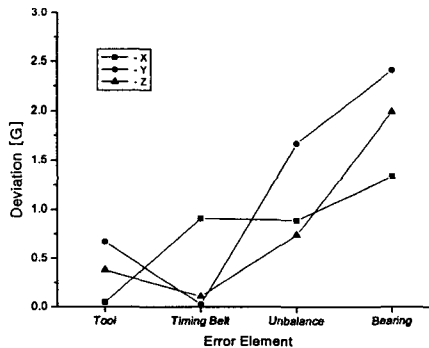


Fig. 10 RMS Value Deviation of Error Element

4. 결론

본 연구는 고속 가공기 스피들 진동에 영향을 주는 요소 측정 결과에 대해 다음과 같이 결론을 얻었다.

- (1) 스피들의 측정 결과 이상 진동의 FFT값은 X(좌우진동), Z(상하진동)축을 기준으로 한다. Y축(회전방향진동)은 FFT값에서 나타난 바와 같이 타이밍 벨트의 토크가 전달되며, 외부 요인적인 영향이 많아서 스피들 이상 진동 판단 기준에서 제외시키는 것이 좋다.
- (2) Unbalance, 베어링 문제, 공구의 불균형, Belt 결합 등의 측정에서 스피들 진동에 가장 큰 영향을 미치는 것은 베어링의 결합으로 나타났다.
- (3) 생산현장에서는 베어링부의 진동측정 결과만을 사용하여 표준값을 정하고, 스피들 및 제품의 이상유무를 판단하는 것이 좋다고 생각된다.

참고문헌

1. 김수태, 최영휴, “성능평가를 통한 기계수명 예측에 관한 연구” 창원대학교 산업기술연구소 연구보고서 pp. 1~8, 30~50 1997.
2. 양보석, “기계건강진단 사례 101” 중소기업 현장기술 pp. 94~98
3. “소음진동 측정기술-이론과 실제” 엠엔에스 테크놀로지 pp.55~84, pp.99~123
4. “Mechanical vibration of machines with operating speeds from 10 to 2000rev/s - Basis for specifying evaluation stands” ISO 2372
5. 한국 공업 규격 “회전속도 10~200rev/s로 회전되는 기계의 진동-진동평가 기준의 기본 사항” KS B 0142, 1991.