

초정밀 가공기를 이용한 적외선 우주망원경용 렌즈의 절삭가공기술개발

양순철[#], 김건희^{**}, 김효식^{**}, 신현수^{**}, 홍권희^{**}, 유종신^{**}, 김동락^{**},
박수종^{***}, 남옥원^{***}

Ultra-precision Machining of Space Telescope IR Camera Lens

Sun-Choel Yang[#], Geon-Hee Kim^{**}, Hyo-Sik Kim^{**}, Hyun-Su Shin^{**}, Kweon-Hee Hong^{**},
Jong-Sin Yoo^{**}, Dong-Rak Kim^{**}, Soo-Jong Park^{***}, Uk-Won Nam^{***}

ABSTRACT

Machining technique for optical crystals with single point diamond turning tool is reported in this paper. The main factors influencing the machined surface quality are studied and regularities of machining process are drawn. Optical crystals have been known to more and more important applications in the field of modern optics. Ge is more brittle material of poor machinability. The traditional machining method is polishing which has many shortcomings such as low production efficiency, poor ability to be automatically controlled and edge effect of the workpiece. The purpose of our research is to find the optimum machining conditions for ductile cutting of Ge and apply the SPDTM technique to the manufacturing of ultra precision optical components of Ge. As a result, the surface roughness is the best when cutting speed is 180m/min, feed rate is 2mm/min, depth of cut is 0.5 μ m and nose radius of tool is 0.8mm.

Key Words : IR(Infrared), Brittle Materials(취성재료), SPDTM(단결정 다이아몬드 선반), Surface Roughness(표면거칠기)

1. 서 론

현대 광학분야에서 광학용 유리는 대부분 가공성이 좋지 않은 취성 재료들이므로 초정밀 가공분야에서는 이들 재료에서 어느 정도의 광학표면을 얻을 수 있는지가 중요한 문제로 되어왔다.

항공우주에 사용되는 위성 카메라는 생태계 변화나 환경오염 등의 일반적인 지구관측 뿐만 아니라 정밀한 지도제작 등에도 사용될 수 있는 고해상도 광학계이므로 미국 등의 선진국에서도 기술이전을 매우 기피하는 첨단 기술이다¹⁻³⁾. 그러나, 독자적인 위성영상의 자율적인 획득 및 관리를 위해서는 고해상도 위성카메라의 자체개발이 필수적이며 광학설계, 제작 및 평가기술의 확보가 절대적으로 필요하다

국가전략기술지도(NSTRM) 상의 중요 목표 중의 하나인 대형 적외선 우주 망원경을 성공시키기 위한

교신저자 : 한국기초과학지원연구원 초정밀가공팀
E-mail : md941057@kbsi.re.kr

** 한국기초과학지원연구원 연구장비개발부

*** 한국천문연구원

다양한 기술적 노력들이 전개되고 있다. 그 일환으로 한국천문연구원과 한국기초과학지원연구원은 정책협동 과제로 한국기계연구원, (주)아이쓰리시스템과 함께 우주용 적외선 냉각시스템을 개발하고 있다. 본문에서는 이렇게 개발중인 우주적외선 냉각시스템 시험모델 (Protomodel of Space Infrared Cryogenic System, PSICS)의 광학계로 사용되는 적외선 광학소자인 게르마늄 렌즈가공을 위한 초정밀 절삭에 관한 연구를 수행하였다.

따라서 본 연구에서는 초정밀절삭조건인 이송속도와 절삭속도에 따른 표면거칠기 특성을 파악하여 최적가공조건을 찾아 우주망원경의 적외선 열화상 카메라에 적용되는 비구면 렌즈의 형상정밀도 향상에 관한 연구를 수행하였다. 취성 재료의 초정밀 광학요소들을 제조하는데 다이아몬드 선삭 기술을 적용함으로써 수입의존도가 매우 큰 적외선 영역에 사용되는 렌즈의 국산화 및 수입 대체 효과가 기대된다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구에 사용된 초정밀 가공기는 RTH사의 Nanoform 600 다이아몬드 터닝머신(SPDTM)이다.

다이아몬드 터닝머신은 두 개의 유정압 안내면과 공작물을 고정시키는 공기정압 베어링 스피들로 구성되어 있다. 두 안내면은 각각 X축과 Z축으로 T 형태의 직교를 이루며 구동한다. X축의 중심부에 해당하는 안내면에 주축 스피들이 고정되어 회전하며, 안내면의 구동방향과 평행을 이루며 회전한다. Z축 구동안내면 위에는 공구대가 고정되어 다이아몬드 바이트를 설치할 수 있으며, 스피들 구동 방향과 수직 방향으로 구동한다⁴⁻⁶⁾.

안내면의 위치결정정도는 0.25 μ m/300mm, 분해능은 1.25nm의 성능을 가지고 있으며, 선삭의 경우 최대 \varnothing 600mm(125kg), 연삭의 경우 \varnothing 300mm까지 가공이 가능하다. Fig. 1은 초정밀 가공 시스템을 나타낸다.

초정밀 가공실은 온도 20 \pm 1 $^{\circ}$ C, 습도 30 \pm 5%, Clean Room class 10,000인 항온항습의 크린룸이며, 장비의 진동방지를 위한 독립지반구조로써 장비 하부는 3

Point Air Bag으로 지지된다.

표면 거칠기 측정 장비로는 비 접촉식 표면형상 측정기 WYKO사의 NT 2000을 사용하였다. 측정기의 측정범위는 최대 100mm \times 100mm이며, 측정범위로는 0.1nm~150 μ m이며, 분해능은 0.1nm이고 자동 포커싱 타입이다.

Fig. 2는 가공된 Ge의 표면 거칠기를 측정하는 모습이다.

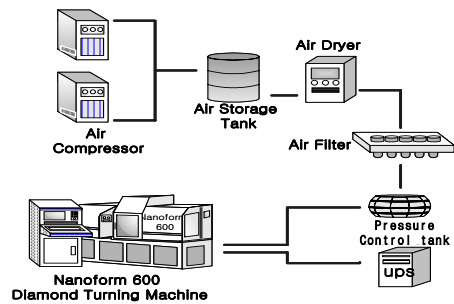


Fig. 1 The system of ultra-precision lathe



Fig. 2 Measurement of workpiece

Table 1 Experimental Condition

Item	Cutting condition
Workpiece	Ge
Rake angle ($^{\circ}$)	-5, -15, -25
Nose radius(mm)	0.8, 0.4
Cutting speed (m/min)	140, 160, 180, 200, 220, 240
Feed rate(mm/min)	1, 2, 4, 8, 12
Depth of cut(μ m)	0.1, 0.5, 1, 2, 4
Vacuum pressure(in.Hg)	-20
Cutting fluid	Air+EDM oil

2.2 실험방법

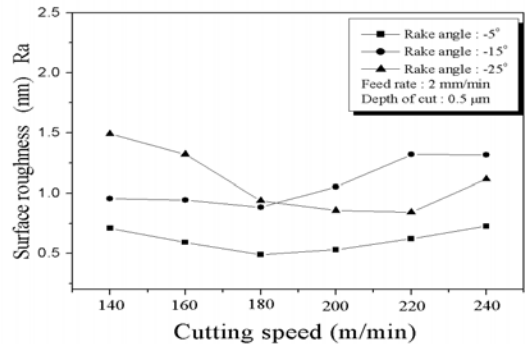
시작품 재료인 Ge의 초정밀 최적 가공조건을 찾기 위하여 $\varnothing 40$ mm, 두께 15 mm의 시편을 제작하여 주축 회전속도와 절삭깊이, 이송속도에 대하여 표면 거칠기를 측정하였다. 실험을 수행하기 전에 Ge를 주축의 진공척에 -20 in.Hg로 고정하여 회전시켰으며, 이때 사용되는 절삭유의 급유방식은 압축공기와 절삭유인 방진유를 혼합하여 분사하는 극미량(MQL)분사방식을 사용하였다. 또한 절삭 후 측정 방법은 시편의 $\varnothing 30$ mm되는 부분을 선정하여 시편의 네 포인트를 지정하여 항상 같은 위치에서 16번 반복측정하여 그 중 오차 범위가 큰 값을 제외하고 데이터의 평균을 내어 측정값을 얻었다. 본 실험을 통하여 Ge의 최적 초정밀 가공조건을 찾아내었다. Table 1에서 실험조건을 나타낸다.

3. 실험결과 및 고찰

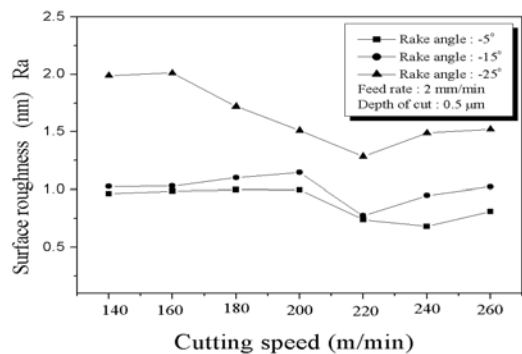
3.1 절삭속도 변화에 따른 표면 거칠기

Fig. 3은 절삭깊이 $0.5\mu\text{m}$, 이송속도 $2\text{mm}/\text{min}$ 에서 각각의 노우즈 반경 0.4mm 와 0.8mm 에 대한 절삭속도에 따른 표면 거칠기를 측정한 결과이다. Fig. 3(a)와 같이 절삭속도를 단계적으로 $140\sim 240\text{m}/\text{min}$ 까지 변화시켰으며, Fig. 3(b)에서는 필요에 따라 $260\text{m}/\text{min}$ 까지 변화시켰다. 그 결과 노우즈 반경 $R0.8\text{mm}$ 다이아몬드 바이트를 사용한 실험에서는 대체적으로 절삭속도가 $140\text{m}/\text{min}$ 에서부터 표면 거칠기가 양호해지며 $180\text{m}/\text{min}$ 이후에는 표면 거칠기가 악화 되는 것을 알 수 있다. 하지만 노우즈 반경 $R0.4\text{mm}$ 다이아몬드 바이트를 사용한 실험에서는 $240\text{m}/\text{min}$ 에서 가장 양호한 표면 거칠기를 얻을 수 있었다. 경사각(Rake angle)에 대한 표면 거칠기의 변화는 거의 같은 경향을 나타냈으며 경사각이 적을수록 보다 양호한 표면 거칠기 값을 얻을 수 있었다. 이는 경사각이 커질수록 공작물과 닳는 절삭면적이 커지므로 표면 거칠기가 좋지 않은 결과를 낳는 것으로 사료된다. 실험 결과로 Ge의 미소 절삭에서 절삭속도는 $140\text{m}/\text{min}$ 이상으로 공작물을 가공하는 것이 제품의 정밀도 향상에 도움을 주며, Fig. 4에서 보여 지듯이 노우즈 반경 $R0.8\text{mm}$, 절삭

속도 $180\text{m}/\text{min}$, 이송속도 $2\text{mm}/\text{min}$, 절삭깊이 $0.5\mu\text{m}$, 경사각 -5° 일 때 $Ra\ 0.49\text{nm}$ 로 가장 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 그래서 절삭공구의 선정에 있어서 가공물의 형상에 따라 적용 하는 것은 차이가 있었지만 노우즈 반경이 큰 공구를 선택해야 한다.



(a) Nose radius R0.8mm



(b) Nose radius R0.4mm

Fig. 3 Surface roughness versus of cutting speed

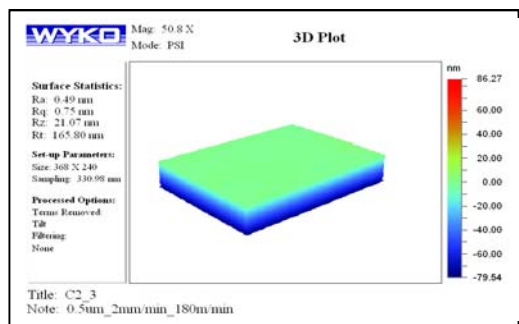


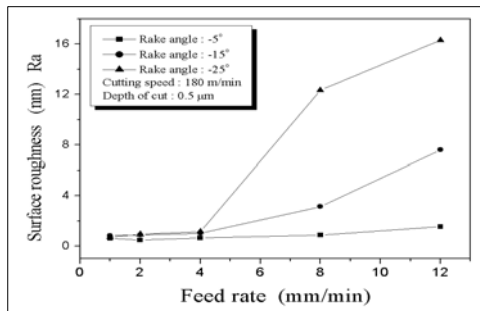
Fig. 4 Surface measurement of Ge sample

3.2 이송속도 변화에 따른 표면 거칠기

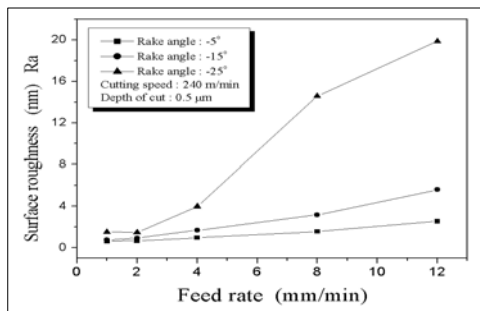
Fig. 5(a)는 노우즈 반경 R0.8mm, 절삭속도 180 m/min, 절삭깊이 0.5 μ m 에서, Fig. 5(b)는 노우즈 반경 R0.4mm, 절삭속도 240m/min, 절삭깊이 0.5 μ m에서 각각 이송속도에 따른 표면 거칠기를 측정된 결과이다.

이송속도가 증가하면서 표면 거칠기가 나빠지는 경향을 볼 수 있으며, 이러한 실험 결과는 이송방향의 표면 거칠기는 인선반경과 공작물의 1회전당 이송량의 관계에 의하여 기하학적으로 결정되는 이론적 표면 거칠기와 유사한 경향을 나타내고 있다. 가장 양호한 표면 거칠기를 나타내는 공구는 노우즈 반경 R 0.8mm의 공구이며, 실험결과는 일반적으로 노우즈 반경이 커짐에 따라 표면 거칠기는 양호하게 나타나는 이론적인 거칠기와 비슷한 경향의 측정결과를 나타내었다.

Ge의 경우, 2mm/min 정도의 이송속도로 가공을할 경우 양호한 표면 거칠기를 얻을 수 있다.



(a) Nose radius R0.8mm



(b) Nose radius R0.4mm

Fig. 5 Surface roughness versus feed rate

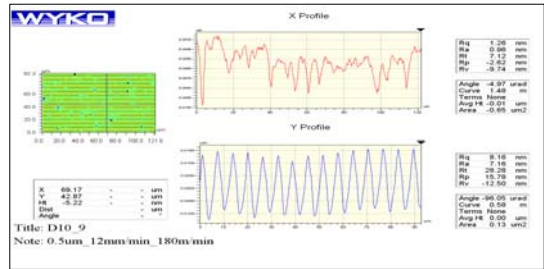


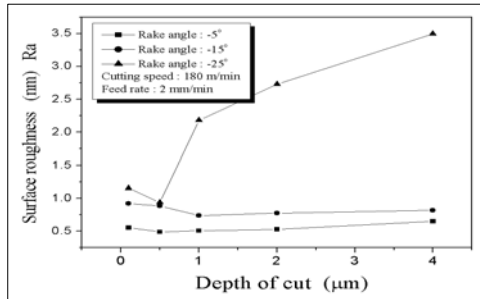
Fig. 6 2-dimensional shape of the surface roughness for machined surface of Ge

Fig. 6은 노우즈 반경 R 0.8mm, 이송속도 12mm/min, 절삭속도 180m/min, 절삭깊이 0.5 μ m의 절삭조건에서 실험한 2차원적인 형상을 보여주는 것으로 공구의 형상이 가공표면에 그대로 전사됨을 볼 수 있다.

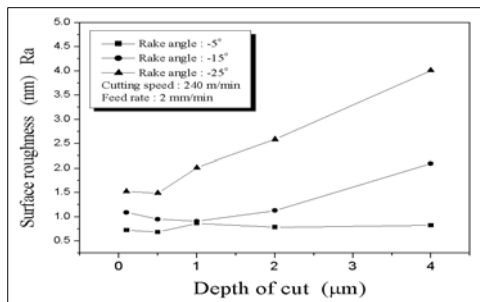
3.3 절삭깊이 변화에 따른 표면 거칠기

Fig. 7(a)는 노이즈 반경 R0.8mm, 절삭속도 180 m/min, 이송속도 2mm/min에서, Fig. 7(b)는 노이즈 반경 R0.4mm, 절삭속도 240m/min, 이송속도 2mm/min에서 각각의 절삭 깊이에 따른 표면 거칠기를 측정된 결과이다.

일반적인 절삭가공에 있어서 이론적 표면 거칠기 값은 절삭깊이에 영향을 받지 않는다. 그러나 실제 절삭깊이가 증가함에 따라 표면거칠기가 악화 되며 또한 미소절삭에서도 표면 거칠기가 떨어지는 경향을 볼 수 있다. 이러한 것은 절삭깊이가 아주 작은 경우의 칩 배출 과정은 주로 러빙(rubbing)이나 버닝(burning)같은 소성변형에 의해 원활하게 이루어지지 못하며, 소성 변형을 일으킨 표면에서는 큰 잔류 응력이 형성되어 표면의 질에 악영향을 끼치기 때문이다. 절삭날은 완전하게 날카롭지 못하므로 절삭날 날끝 부분을 확대하여 모델화하면 실린더형으로 가정할 수 있다. 이 때 실린더 부분에 작용하는 힘을 플로잉 힘(plowing force)이라고 한다. 일반적인 절삭가공에 있어서는 절삭 깊이가 절삭날 날끝 반경에 비하여 상당히 크기 때문에 플로잉 힘이 전체 절삭력에 미치는 영향은 거의 없어 무시할 수 있지만, 절삭 깊이가 감소할수록 플로잉 힘은 비례적으로 커져 무시될 수 없게 된다. 이러한 힘의 존재로 절삭깊이가 감소할수록 비절삭 에너지(specific cutting energy)가 증가하는 치



(a) Nose radius R0.8mm



(b) Nose radius R0.4mm

Fig. 7 Surface roughness versus depth of cut

수 효과가 나타난다. 초정밀가공에서는 이러한 치수 효과를 잘 보여준다.

이러한 결과로부터 미소 절삭시 표면 거칠기는 절삭 깊이의 증가와 관련이 있다고 할 수 있다.

3.4 우주망원경용 적외선 렌즈의 가공

우주적외선 냉각시스템 시험모델(PSICS)의 광학계로 사용되는 게르마늄 렌즈를 비구면으로 초정밀가공 하였다. 실험을 통하여 얻어진 최적절삭조건을 이용하여 외경 40mm, 두께 8mm, 곡률반경 131.75mm인 평볼록형상의 비구면 렌즈를 제작하였다.

Vacuum chuck의 진공압력에 의한 제품의 변형을 방지하기 위하여 특수한 지그의 설계 제작이 필요하였으며, 이에 일반적인 평판형상의 지그를 사용한 결과보다 양호한 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 8은 최적절삭조건으로 SPDTM을 이용하여 가공하는 사진을 보여주며, Fig. 9는 비구면형상측정기인 Form Talysurf Series 2를 이용하여 가공한 후 비구면 형상을 측정한 결과 표면 거칠기를 측정한 결과 Rt 0.5992μm를 얻었다.

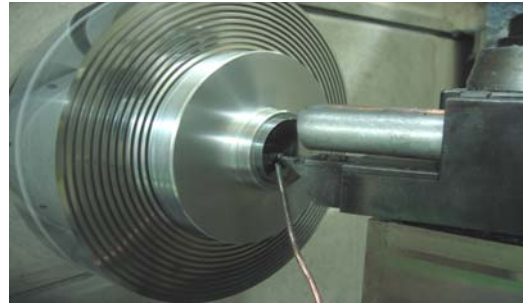


Fig. 8 Ge lens machining by SPDTM

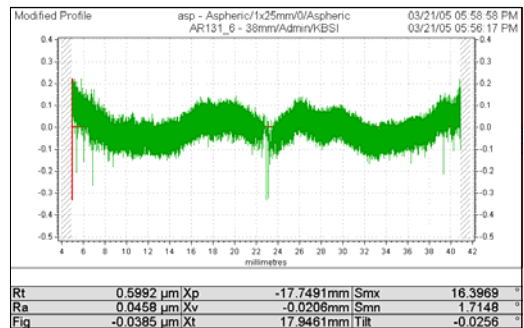


Fig. 9 Measurement of Ge surface after turning

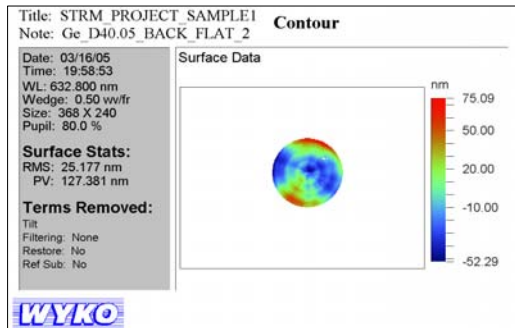


Fig. 10 Measurement of the Ge lens surface by WYKO 6000

Fig. 10는 Interferometer WYKO6000을 이용하여 직경 40mm 평면을 측정된 결과 P-V 0.127μm를 얻을 수 있었다. 요구되는 형상정밀도는 P-V 0.5μm이하로써 가공된 Ge 렌즈는 요구사양에 적합하게 제작되었으며, 향후 렌즈 적외선 광학계에 사용하기 위한 투과율 향상을 위한 표면코팅을 하고 제품의 형상 변형량 등을 측정하여 우주적외선 카메라용 렌즈가공기술을

확보하고자 한다. Fig. 11은 적외선용 망원경에 사용되는 Ge렌즈의 전 후면사진으로 (a)는 비구면 형상을 (b)는 평면형상의 초정밀가공 결과를 나타낸다.



(a) Aspheric surface (b) Plane surface

Fig. 11 Result of Ge lens machining by SPDTM

4. 결 론

적외선 우주망원경용 카메라 렌즈에 사용되는 적외선용 광학소자 Ge를 다이아몬드 공구로 초정밀가공시 노우즈 반경, 절삭속도, 이송속도, 및 절삭깊이에 따른 표면 거칠기를 측정하였으며, 이 결과를 이용하여 우주적외선 카메라 렌즈를 초정밀 가공 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. Ge의 소재 가공에 관한 초정밀 절삭특성을 통하여 Ge의 최적 가공조건은 노우즈 반경 R0.8mm, 절삭속도는 180m/min, 이송속도는 2mm/min, 절삭깊이는 0.5 μ m일 때 가장 양호한 표면 거칠기 Ra 0.49nm를 얻을 수 있었다.
2. 천연다이아몬드 공구의 노우즈 반경에 따른 표면 거칠기 평가에서는 공구의 노우즈 반경 R0.4mm보다 큰 R0.8mm에서 가장 양호한 표면 거칠기를 얻을 수 있었다.
3. 일정한 절삭조건 하에서 초정밀 가공 시 -25°와 -15°의 경사각에 비해 -5°의 경사각을 가진 다이아몬드 공구의 표면 거칠기가 양호하게 나타났다.
4. 실험에서 얻은 최적절삭조건을 이용하여 적외선카메라용 Ge렌즈의 비구면 형상가공결과 비구면 형상정밀도 Rt 0.5996 μ m와 P-V 0.127 μ m의 평면 형상정밀도를 얻을 수 있었다.

참고문헌

1. 이윤우, "고해상도 위성카메라 평가 기술," 측정표준, 제22권, 제2호, pp. 29-41, 1999.
2. 김정두, "천연 다이아몬드 인선형태에 의한 Al 합금의 경면절삭에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제14권, 제6호, pp. 1515-1522, 1990.
3. 이경호, 윤영식, 이상조, "다결정 다이아몬드 공구를 사용한 Al-Si합금의 선삭과정에서 절삭특성에 미치는 Si함량의 영향," 한국정밀공학회지, 제12권, 제6호, pp. 20-26, 1995.
4. Kim, G. H., Hong, K. H., Kim, S. S. and Won, J. H., "Nano-turning Technology Using Ultraprecision Machining System," Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 19, No. 1, January pp. 18-24, 2002.
5. Ko, J. B., Kim, G. H. and Won, J. H., "A Study on the cutting characteristics of non-ferrous metals using diamond turning machine," Trans. of KSMTE., Vol. 10, No. 5, pp. 124-129, 2001.
6. Ko, J. B., Kim, G. H., Hong, K. H. S. H. D. and W, J. H., "Nanometer Scale Ultra Precision Machining of Oxygen-free Copper," KOSTET REVIEW Vol. 6, No. 2, pp. 77-82, September 2001.