

◆특집◆ Eco-Machining

환경 친화적인 절삭가공 기술

이종항*, 이상조**

Environment-friendly Cutting Process Technology

Jong Hang Lee*, Sang Jo Lee**

Key Words : Environmental problem (환경문제), Cutting fluid (절삭유), Cutting process (절삭가공), Dry cutting (드라이가공), Semi-dry cutting (세미드라이가공), Minimum quantity lubrication (극미량 절삭유), Cold air (냉풍), Tool wear (공구마모)

1. 서론

에코머시닝(Eco-Machining)이란 환경에 부담을 주지 않는 환경대응 가공기술을 말한다. 이러한 에코머시닝기술은 1990년 초반 독일 등 유럽에서 절삭유 처리기술이 연구되면서 시작되었고, 일본에서는 1996년 냉풍을 이용한 가공기술이 개발되면서 점차 활성화되어, 최근에는 이와 관련된 상품들이 전시회에 출품되기 시작하였다.

1999년 7월 일본에서는 “특정화학물질 배출량 파악 등 관리개선 촉진에 관한 법률”이 시행되면서 기업에서는 절삭유 문제가 현실적으로 인식되어 학술적인 연구차원에서 상품개발차원으로 활성화되었다. 또한, 최근에는 절삭유에 극압 첨가제를 포함시키지 못하도록 JIS 규격을 개정하기도 하였다.

절삭유는 비산 또는 누설에 의해서 작업환경을 악화시키며, 장기간 사용시 부패 및 세균번식에 의한 악취, 작업자의 피부질환 등을 유발시킨

다. 기존의 절삭유는 윤활성능을 높이기 위해 염소, 유황, 인이라는 극압 첨가제가 포함되어 있다. 이 극압 첨가제는 인체에 해로운 유독성 물질이며, 특히 염소화합물을 소각하면 발암성 유해물질인 다이옥신이 발생⁽¹⁾된다는 보고도 있다. 또한 절삭유에 부착된 칩이나 폐기물 등이 소각되거나 가공 중 절삭열에 의해서도 다이옥신이 발생될 수 있기 때문에 환경에 끼치는 영향은 매우 크다.

한편, 보전에 관한 국제규격인 ISO 14000에서 작업환경에 대한 규제가 강화됨에 따라 절삭유 처리비용 및 설비 유지관리 비용이 증가하고 있다. 이러한 절삭유 관련비용은 Fig. 1과 같이 총 생산비용의 7~17%가 되며, 공구 비용에 비해 4배 이상인다는 통계도 발표⁽²⁾되어 있다.

에코머시닝 기술은 크게 나누어 드라이 가공(Dry Cutting), 세미드라이 가공(Semi-Dry Cutting)으로 나눌 수 있다. 드라이 가공은 절삭유를 사용하지 않는 순수한 건삭가공으로서 주로 코팅공구가 이용된다. 세미드라이 가공은 -30℃의 냉각된 공기를 이용하는 냉풍가공(Cold Air Cutting)과 환경친화적인 식물성 오일을 미스트(Mist)로 만들어 아주 적은 미량을 적용하는 가공법이다.

여기에서는 이러한 환경 친화적인 절삭가공 공정기술과 이와 관련된 공작기계 및 보조장치들에 대하여 살펴보기로 한다.

* 한국산업기술대학교 기계공학과

Tel. 031-496-8203, Fax. 031-496-8219, Email ljh@kpu.ac.kr

** 연세대학교 기계공학과

Tel. 02-2123-2818, Fax. 02-364-6769

정밀기계가공과 특수가공에 관심을 두고 연구활동 중이다.

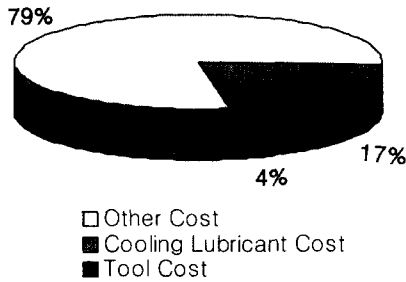


Fig. 1 Lubricant cost exemplified by central facility

2. 환경 친화적인 가공공정 기술

2.1 드라이 가공기술

드라이가공에서는 절삭유나 미스트 상태의 절삭유를 사용하지 않기 때문에 절삭유 사용목적을 정확히 파악하여 대체시킬 수 있는 방법이 필요하다.

- 칩 청소기능 : 절삭후 공구주위 및 테이블상에 남은 칩을 제거하기 위해 절삭유가 사용된다.
- 냉각기능 : 전단면 및 공구와 공작물의 마찰면에서 발생하는 절삭열을 제거하기 위해 절삭유가 사용된다.
- 윤활기능 : 가공중 공작물과 절삭날 사이의 마찰을 감소시키거나, 알루미늄 가공에서 볼 수 있듯이 칩이 공구에 용착되는 것을 방지하기 위해 사용된다.
- 기타기능 : 안정된 공작물 표면의 성상(표면 품질, Surface Integrity)이나 가공精度를 향상시키기 위해 사용된다.

이러한 절삭유 기능을 대체하기 위해서는 다음과 같은 방법들이 이용된다. 칩 제거를 위해서는 어느 정도의 압축공기나 기타 보조기구들이 필요하며, 가공열의 냉각과 윤활을 위해서는 내열성과 윤활성이 우수한 코팅재료가 필요하다.

드라이가공을 위한, 코팅막의 특성은 경도나 내열특성, 그리고 실용적인 적용을 위해서는 밀착특성이 중요⁽³⁾하다. 이러한 특성들을 개량시킨 것이 고속에서 드라이가공을 보다 효과적으로 적용이 가능한 TiAlN 코팅⁽⁴⁾이며, 그 이외에도 윤활능력을 향상시킨 코팅기술도 개발되고 있다.

TiAlN 코팅은 고온에서 내산화성이 있고 열전

도도가 낮아 절삭날의 열응력을 감소시킬 수 있는 특성을 지닌 것으로 알려져 있다.

Fig. 2는 TiCN 코팅공구와 TiAlN 코팅공구의 마모량을 비교⁽⁵⁾한 것이다. 이 실험에 이용된 절삭 조건은 다음과 같다.

- 공 구 : 직경 10mm 3날 초경 엔드밀
- 공 작 물 : DIN 1.2344(AISI H13) HRC45
- 절삭속도 : 550m/min
- 이송속도 : 0.083mm/tooth
- 절삭깊이 : Axial=10mm, Radial=1mm

그림과 같이 TiCN 코팅에 비해 TiAlN 코팅공구가 3배의 효과가 있음을 볼 수 있다. TiCN 코팅은 6.5m를 가공하면 플랭크 마모량이 0.06mm이었으나 TiAlN 코팅은 19m를 가공하여도 플랭크 마모량이 0.05mm이었으므로 TiAlN 코팅은 순수한 드라이가공에도 적용될 수 있음을 보여 준다.

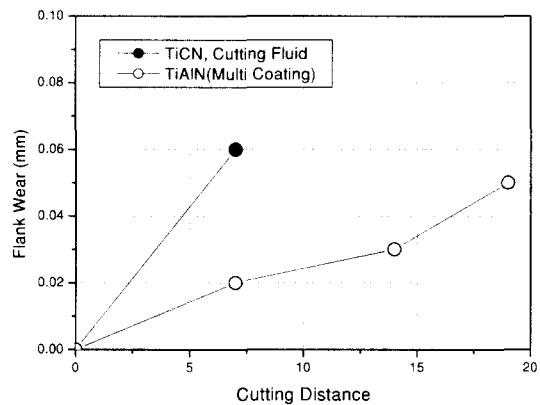


Fig. 2 Comparison of tool wear between TiCN and TiAlN coating in endmilling

2.2 세미 드라이 가공기술

2.2.1 냉풍 가공 기술

냉풍에 의한 절삭가공은 일본의 요꼬가와 교수가 개발한 것으로서 약 -20℃~-30℃ 사이의 냉각된 압축공기를 절삭부위에 공급하여 절삭열을 제거하는 기술이다.

냉풍 발생장치는 다른 방식에 비해 경제성과 냉풍공급의 안정성을 갖춘 냉동사이클방식(Fig. 3)이 주로 이용된다.

컴프레서에서 생성된 압축공기를 미스트 세퍼

레이터로 미립자를 제거하고 에어드라이어로 노점을 충분히 떨어뜨린다. 이것을 공기냉각장치로 냉각시켜 노즐을 통해 공급하여 사용한다.

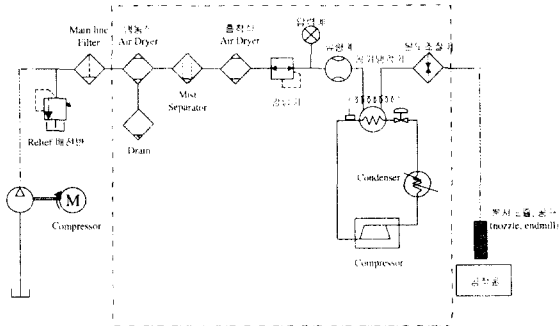


Fig. 3 Cooling-air-machining system⁽⁶⁾

여기서 반드시 고려되어야 할 사항은 여름철이면 다량의 습기가 주위공기에 포함되어 있기 때문에 냉각장치내의 열교환기용 파이프가 결빙되어 안정적인 냉풍공급이 불가능하므로 습기를 제거할 수 있는 에어드라이어의 설치⁽⁷⁾가 반드시 필요하다.

냉풍 선삭가공에 대한 사례는 다음과 같다. Fig. 4와 같은 실험장치로 선삭가공할 경우 다음과 같은 가공조건에 의해서 공구 마모량을 비교⁽⁸⁾해 본 것이 Fig. 5이다.

- 공작물 SM45C
- 사용공구 CNMG120404 KC850
- 이송속도 0.2mm/rev, 절삭깊이 : 1.0mm
- 절삭거리 11km
- 사용노즐 직경 6mm 절삭유 공급용 노즐
- 냉각방법 압축공기 : 20℃, 냉풍 : -30℃
- 절삭유 : 수용성

Fig. 5와 같이 11km의 절삭거리에 대해 절삭유를 사용한 가공이 가장 안정적이었으며, 그 다음에는 냉풍가공, 압축공기에 의한 가공, 순수 드라이가공 순서로 공구마모(플랭크 부위의 노치마모)가 크다. 드라이가공에 비해 냉풍가공의 공구마모량이 약 37%가 적은 것은 냉풍에 의해 절삭날의 온도가 낮아졌기 때문임을 알 수 있어 냉풍가공의 적용 가능성을 확인할 수 있다.



(a) Cold cutting test



(b) Nozzle setup

Fig. 4 Photo. of experimental test rig

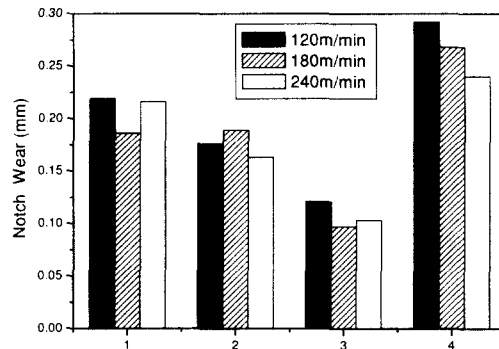


Fig. 5 Comparison of notch wear in turning (1:compressed air,2:cold air,3:cutting fluid,4:dry)

냉풍가공이 절삭유를 사용한 가공보다 공구마모가 큰 것은 칩과 공구 사이의 윤활성이 떨어지기 때문이므로 윤활성이 우수한 미량의 절삭유를 추가시키면 가공특성이 개선될 수 있음을 예상할 수 있다.

한편, 공작물의 표면 거칠기⁽⁸⁾도 그다지 큰 차

이가 없으므로 공구마모 성능만 해결된다면 냉풍 가공의 실용화에는 큰 문제가 없을 것으로 생각된다.

윤활효과보다 냉각효과가 필요한 연삭가공에서는 냉풍가공의 적용효과⁽⁹⁾가 우수하다. 그러므로 고속절삭, 난삭재 및 고경도 재료의 가공에서는 냉풍가공이나 이와 유사한 가공방식인 액체질소가스에 의한 가공이 유리할 것으로 예상된다. 특히, 액체질소가스는 냉각능력이 우수하기 때문에 재료 제거량이 많은 절삭가공에서는 공구마모 저감효과가 기존의 절삭유를 사용한 가공에 비해 2배 이상 된다는 보고⁽¹⁰⁾도 있다.

2.2.2 극미량 절삭유 공급에 의한 가공 기술

극미량 절삭유(Minimum Quantity Lubrication, MQL)에 의한 가공은 1994년경 독일에서 개발된 기술로서, 절삭점을 직접 냉각시키기보다는 이차적으로 발생하는 공구와 칩 사이의 마찰열을 감소시키고 표면 거칠기를 향상시킬 목적으로 개발된 것이다.

Fig. 6은 극미량 절삭유에 의한 엔드밀 가공 사례로서 동일한 공구마모량(여유면마모폭:0.1mm)을 기준으로 비수용성 절삭유와 MQL에 의한 가공 효과를 비교⁽¹¹⁾한 것이다.

- 공작물 : SUS304
- 사용공구 : 직경 6mm 3날 TiAlN 초경 엔드밀
- 이송속도 : 0.03mm/tooth
- 절삭깊이 : Radial=0.6mm, Axial=9.0mm
- 가공방식 : Down-cut
- 냉각매체 : 비수용성 절삭유, 식물유

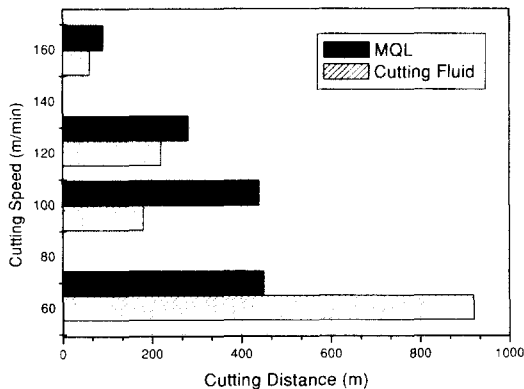


Fig. 6 Comparison of cutting performance in endmilling for stainless steel

Fig. 6에서 절삭속도 60m/min에서는 절삭유를 사용하는 경우가 효과적이었으나 100m/min 이상의 절삭속도에서는 MQL을 사용하는 것이 보다 효과적임을 볼 수 있어, 고속가공에서는 절삭유를 MQL로 대체 할 수 있음을 알 수 있다.

공구수명이나 가공면의 표면품위를 개선시키기 위해 냉풍과 MQL을 함께 사용되는 사례⁽¹²⁾가 많다. 오쿠무라는 드릴가공시 냉풍과 MQL을 동시에 적용한 가공이 순수 드라이가공에 비해 약 10배, 냉풍만을 사용한 가공에 비해서 약 2배의 공구수명 증가효과가 있음을 보여 주었다.

3. 환경 친화적인 공작기계 및 관련장치

최근 상기의 연구성과들이 활발히 상품화되고 있다. 가장 대표적인 사례가 Fig. 7과 같은 MQL 공급장치⁽¹³⁾와 이 장치와 특수 칩 제거장치가 부착된 머시닝센터이다.

MQL 공급장치는 식물성 절삭유를 공급하는 본체보다는 미스트를 발생시키고 적정량을 공급해주는 노즐이 중요하다.

MQL 공급장치는 일반 머시닝센터에서도 직접 응용될 수 있으나 환경 친화형 머시닝센터에 비해서는 사용하기가 곤란한 점도 있다.

예를 들면, 깊은 구멍을 가공할 경우 칩 배출을 위해서 고압의 절삭유가 사용된다. 그러나 Fig. 7과 같은 장치로는 깊은 구멍까지 MQL을 공급하기가 곤란하여 Fig. 8과 같은 특수 기구가 장착된 스펀들⁽¹³⁾이 필요하다.

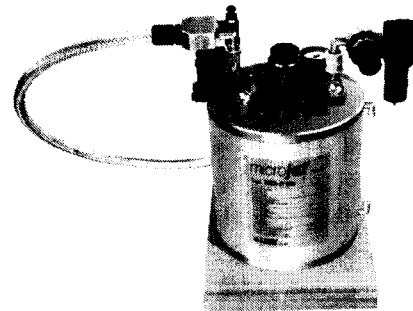


Fig. 7 MQL supply equipment

이러한 장치들은 공구에 있는 오일 구멍을 통

해 고압의 절삭유를 공급하는 스피들과 유사한 구조를 가지고 있으나, 다른 점은 고속 회전시 미스트 입자들이 원심력에 의해 내부 구멍의 벽면에 부딪쳐 미스트를 가공부위까지 공급하기가 곤란하다는 단점이 있어, 이를 해결한 것이 Fig. 8과 같은 내부 미스트 발생기구이다.



내부 분무 장치

Fig. 8 Spindle with internal mist generating mechanism

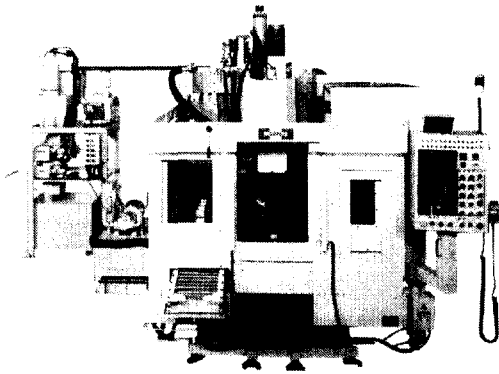


Fig. 9 Environment-friendly machining center (HORKOS)

Fig. 9는 Fig. 8과 같은 내부 분무장치가 있는 스피들을 탑재시키고 가공된 칩을 배출시킬 수 있는 진공 흡입장치가 구비된 머시닝센터⁽¹³⁾이다.

환경 친화적인 기계가공을 위해서 반드시 고려되어야 할 것이 칩 처리기술이다. 일반적으로 가공자동화에서도 이러한 칩 처리는 항상 문제가 되어 왔으나 환경 친화적인 기계가공에서도 중대한 문제를 발생시킨다. 그 이유는 순수한 드라이가공만으로는 가공부에 누적되는 칩을 제거하기가 불가능하여 각종 트러블을 일으키기 때문이다.

이러한 점을 고려하여 개발된 것이 중력에 의해서 베드 아래로 칩을 낙하시켜 처리하는 기술과 특수기구에 의해 칩을 강제로 제거시키는 기술이다.

Fig. 10은 기존의 공작기계 구조를 변형시켜 칩 처리가 용이하도록 설계된 구조이며, Fig. 11은 공구 주위에 진공홀더를 설치하여 칩을 흡입 배출시키는 기구⁽¹³⁾이다.

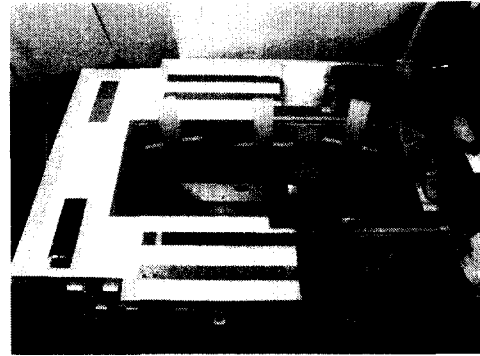


Fig. 10 Gravitational chip removal mechanism

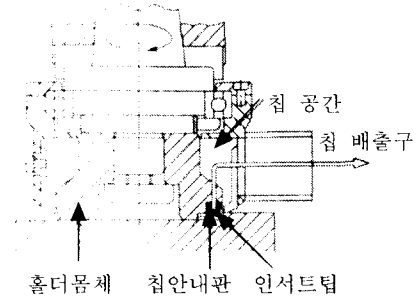


Fig. 11 New chip disposal mechanism

4. 향후 연구개발 분야

에코머시닝에서 향후 개선되어야 할 문제점들이 다수 있으나 가장 중요한 것은 실용적인 가공 기술이어야 한다는 점이다.

에코머시닝기술은 환경부하가 적어야 하고 능률성도 기존의 기술에 비해 손색이 없어야 하며, 공구마모, 표면 거칠기 등 가공성능도 기존의 가공기술보다 저하되면 안된다. 이를 위해 해결되어야 할 구체적인 과제⁽¹⁴⁾는 다음과 같다.

- 공구 분야 : 드라이가공용 공구, 환경대응 공구의 개발

- 절삭유 분야 : 절삭가공, 연삭가공 등 용도에 따른 환경 친화적인 합성유, 식물유 및 첨가제의 개발

- 절삭유 공급 분야 : 가공조건에 적합한 극미량 절삭유의 공급 방법, 최적 가공조건의 연구

- 절삭날과 칩 사이의 계면현상 연구 분야 : 각종 절삭유의 공구, 공작물, 칩과의 계면현상 파악, 특히, 기름(油), 지방산, 물(水) 등의 혼재 형태에 따른 경계 윤활 기구의 규명

- 냉풍가공, 공구냉각가공에서 냉각효과 연구 분야 : 냉풍가공, 공구냉각가공에서의 절삭기구 규명

- 절삭 성능시험 분야 : 미세구멍, 탭, 엔드밀, 연삭 등의 가공법과 강, 주철, 알루미늄, 경합금, 난삭재 등 각종 공작물 종류에 따른 가공 데이터 베이스 구축, 종합적인 평가방법 확립, 알루미늄 가공시의 용착현상, 깊은 구멍가공, 보링, 난삭재 가공, 칩 처리문제 등과 관련된 에코머시닝 기술의 확립

상기에 언급된 과제 이외에도 냉풍가공에서는 노즐에서 발생되는 소음문제, 노즐 끝단의 결빙문제가 있으며, MQL가공에서는 냉각능력을 제고시키기 위한 냉풍과의 동시적용 방법들에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

특히, 냉풍가공이든 MQL가공이든 가공부위까지 냉각매체의 공급이 곤란한 사례가 많기 때문에 절삭유를 반드시 사용해야 되는 경우도 많다. 따라서 환경 친화적인 절삭유의 개발도 필요하다는 점을 간과해서는 않된다.

5. 결론

환경 친화적인 가공기술은 환경규제가 심한 유럽 등 선진국에서 활발히 연구 개발되고 있으며, 특히 일본은 공작기계 관련기술의 경쟁력을 유지하기 위하여 이 분야에 대한 연구 개발이 상당히 진척되어 있다.

우리 나라의 경우는 환경에 대한 규제가 선진국보다 약하기 때문에 이에 대한 관심이 적은 것으로 보인다. 그러나 향후 세계적인 추세가 환경규제를 보다 강화시키면서 글로벌한 생산체계를 추구하고 있으므로 환경성과 경제성이 함께 고려된 기술개발에 보다 적극적인 관심이 필요하다.

참고문헌

1. 富田 進, "切削油劑による環境問題," 機械技術, 第47卷, 第12號, pp. 76-79, 1999.
2. F. Klocke, G. Eisenblatter, "Dry cutting," *Keynote papers, Annals of CIRP*, Vol. 46, No. 2, pp. 519-526, 1997.
3. 安岡 學, "切削工器具用コーティング膜の進歩," 精密工學會誌, Vol. 66, No. 4, pp. 527-530, 2000.
4. 김종성, "극한 절삭조건에 적합한 새로운 다층 TiAlN 코팅," 한국정밀공학회, 춘계학술대회 논문집, pp. 783-791, 2000.
5. 김종성, "금속 절삭공구에 대한 PVD코팅 기술," 기계기술, pp. 104-115, 1999년 2월.
6. 이종항 외, 저공해 가공공정 기술개발(1차년도 연구보고서), 산업자원부, 2000.
7. 이종항 외, "냉각공기에 의한 환경 친화적인 절삭가공기술," 한국정밀공학회지, 제18권 제6호, pp. 114-120, 2001.
8. 이종항 외, 저공해 가공공정 기술개발(2차년도 연구보고서), 산업자원부, 2001.
9. 이석우, 최현중, 정해도, "WA 슛들을 이용한 원통 연삭시 압축냉각공기와 연삭유의 냉각효과에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제17권 제10호 pp. 155-161, 2000.
10. Zbigniew, Z., George, H., Xiaoguang, Z., "Dry Machining of Metals with Liquid Nitrogen," SME, Technical Paper, MR 99-252, 1999.
11. 今泉英明, "エンドミルの高速ドライ切削," OSG Technical Report, pp. 11-15, 2000.
12. 奥村成史, 横川和彦, 清水茂夫, 横川宗彦, "環境負荷低減のための切削油劑を用いない冷風ドリル加工に関する研究," 精密工學會誌, Vol. 66, No. 5, pp. 719-724, 2000.
13. 이종항, "환경 친화적인 절삭가공 기술," 한국 산업기술대학교, 산업·기술, pp. 48-53, 2000년 12월.
14. 松原十三生, "最近のエコマシニング技術," 精密工學會 秋季大會 學術講演會 講演論文集, pp. 183, 2000.