

◆특집◆ 위치결정 기술

Linear Motor를 이용한 위치결정 기술

은인웅*

Positioning Technology by Linear Motor

In Ung Eun*

Key Words : Machine tool (공작기계), Feed mechanism (이송기구), Linear motor (선형모터), Positioning accuracy (위치결정 정확도)

1. 서론

이송계로써 Linear motor (선형모터)는 1990 년대에 들어와서 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 독일과 일본의 몇몇 공작기계회사는 Machining center 나 Grinding machine 의 이송장치로 Linear motor 를 적용하여 이미 판매하고 있다.

Linear motor 는 모터의 기본이 되는 Primary part (회전모터의 Stator 에 해당)와 Secondary part (회전모터의 Rotor 에 해당) 사이에서 일어나는 유도기전력에 의해 모터자체가 직선운동을 한다. Linear motor 를 공작기계에 적용할 경우 기존의 회전모터의 회전운동을 직선운동으로 변화시키는 기구 (예를 들면 Ball screw 기구)가 생략되기 때문에 고속 직선운동이 가능하고 관성모멘트가 낮아져 높은 위치제어 및 가속능력을 가진다. 즉 Linear motor 를 공작기계의 이송장치로 사용할 경우 공구를 교환하기 위한 그리고 가공위치나 기준점으로 이동시키는 비절삭 시간을 많이 줄일 수 있어 생산성을 향상시킬 수 있다. 고정된 Secondary part 를 길게 하면 Primary part 의 무한대의 직선운동이

가능하다. 또한 구동장치의 마찰에 의한 마모가 없어 수명이 반영구적이며, Backlash 가 없고 부품 수가 줄어들어 Montage 가 간단하다.

Advantages	Disadvantages
<ul style="list-style-type: none"> ⓐ High control performance ⓑ higher K_v-factor, smaller tracking error ⓒ good positioning accuracy at high velocities ⓓ High translational speeds possible ⓔ High acceleration possible ⓕ inversely proportional to moving mass ⓖ Unlimited travel possible ⓗ Omission of transfer elements ⓓ no wear ⓙ no backlash ⓚ fewer component ⓛ easy assembling ⓜ long life time 	<ul style="list-style-type: none"> ⓐ High magnetic attraction between primary and secondary part ⓑ Force transmission impossible ⓒ High power loss ⓓ Great heat development within the machine structure ⓔ Difficulties with chip removal

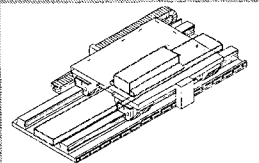


Fig. 1 Advantages and disadvantages of linear motor

반면 Linear motor 의 약점은 Primary part 와 Secondary part 사이의 높은 Magnetic attraction, 모터 Force 의 변환이 어렵고, 철 가공시의 Chip 처리 문제, 회전모터에 비해서 낮은 효율과 그로 인해서 모터에서 발생하는 높은 열문제이다. Fig.1 에 Linear motor 의 공작기계에 적용 시 장·약점을 종합하여 나타내었다.

* 창원대학교 BK 사업단 Mechatronics 공학부
 Tel. 055-279-8041, Fax. 055-267-5142
 Email inungeun@sarim.changwon.ac.kr
 공작기계의 구조해석 및 성능검사 그리고 Linear motor 의 성능 향상과 공작기계에 적용을 위한 연구를 하고 있음.

공작기계의 이송기구로써 Linear motor 가 보유한 위의 많은 장점 중 위치제어 능력은 모터의 적용 시 기계구조, 부품, 제어장치의 주변기기 그리고 측정장치 등 여러 부문에서 요구사항이 충족되어질 때 가능하다. 다음에서는 전반적인 요구사항과 함께, 특히 Linear motor 의 위치제어에 직접적인 영향을 주는 Controller, Measuring system 그리고 열문제의 기술동향에 대해서 부연한다.

2. Linear motor 의 공작기계에서의 적용

2.1 Linear motor 의 공작기계에서의 적용 시 요구되는 점

Fig. 2 에는 Linear motor 의 공작기계에서 적용 시 요구되는 내용을 종합하여 보여주고 있다. 먼저 Slide (Machine table)는 Primary part 와 Secondary part 사이의 높은 Magnetic attraction 에 의한 굽힘변형을 저하하기 위해 높은 굽힘 강성과 함께 모터의 가속능력을 위해 경량화한 구조를 가져야 한다. 기계적인 Frame 의 고유진동수는 Linear motor 제어 시스템의 고유진동수보다 높아야 저주파에서의 공진을 방지할 수 있다. 측정장치는 0,1 μm 이하의 가급적 높은 분해능이 있는 시스템이 요구되며, 고속직선 운동하는 Machine table 에 부착될 때 진동이나 열변형이 없게 설치하여야 한다.

Linear motor 는 공작기계의 가공중심부에 위치하기에 모터에서 발생된 열을 밖으로 방출하기 위해 일반적으로 강제수냉방식이 사용되고, 열원인 모터로부터 주변 기계구조물로의 열흐름을 저하시키기 위해 단열재를 사용한다. 만약 Linear motor 가 Box-in-box 구조나 Table 이 서로 교차하는 구조물에 사용되면 각각의 Linear motor 가 다른 모터의 운동특성에 영향을 주지 않도록 설계해야 한다. Linear motor 가 수직 축에 사용되는 경우에는 전원이 끊길 때의 낙하방지와 장시간 정지 시 모터가 Machine table 의 자중에 의해 과열되는 것을 방지하기 위해 Counterweight 를 부착해야 한다. 기계적 조작이나 제어장치의 실수에 의해 야기되는 사고에 대비해서 Damper 나 유압시스템에 의한 Brake 장치가 반드시 필요하다. 더 나아가 작동 중에 높은 Magnetic attraction 을 받아들이고 Linear motor 로 하여금 고속직선운동을 가능하게 하기 위해 마찰

계수가 낮은 Ball 이나 Roller linear guidance 를 필요로 한다. 끝으로 Linear motor 의 위치제어 정밀도를 최대한으로 활용할 수 있는 길은 성능이 뛰어난 Digital controller 에 의해서만 가능하다. Digital controller 는 Sampling time 이 0,5 μs 보다 작고 Force, 위치, 속도, 가속도, 전류를 Linear motor 의 기계가공 중 특성변화에 따라 Adaptive control 할 수 있어야 한다.

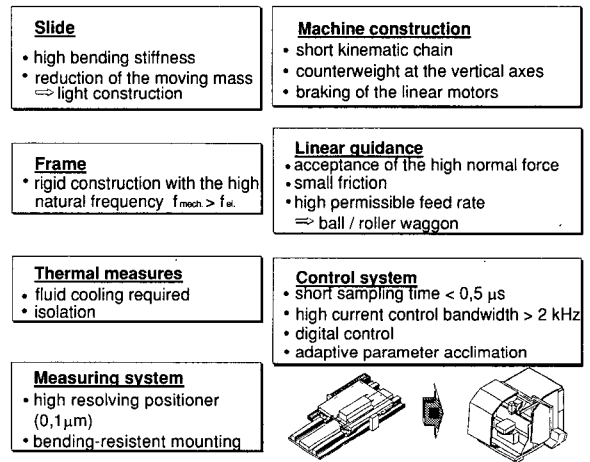


Fig. 2 Demands on the machine concept with the application of linear motors

2.2 Linear motor 를 위한 Controller

Fig. 3 은 Linear motor 에 사용되는 Digital controller 의 기본적인 개념을 보여주고 있다. Controller 는 Circle time 과 함께 제어기술상의 소모를 줄여야 한다. 종래의 회전 Servo motor 의 Controller 가 Linear motor 에 적용되었을 때 가지는 동특성과 제어특성의 한계성 때문에 최근에는 Linear motor 만의 위치제어를 위한 Digital controller 가 개발되고 있다.

Controller 는 작동 중 동일한 속도의 Circle time 을 가져야 하며, 제어하는 이송축의 수에 관계없이 높은 정밀도와 속도를 유지하여야 한다. 더 나아가 Linear motor 에 적용되는 가공 중 작용하는 절삭력을 흡수할 수 있는 충분한 정·동강성을 가져야 한다.

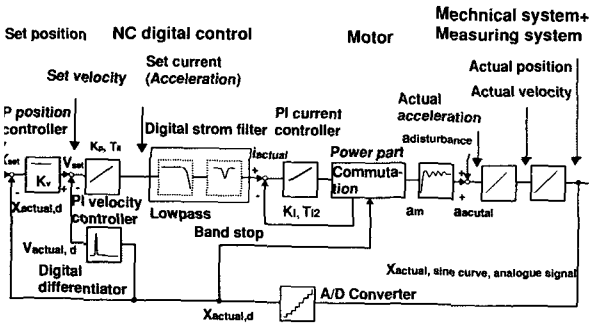


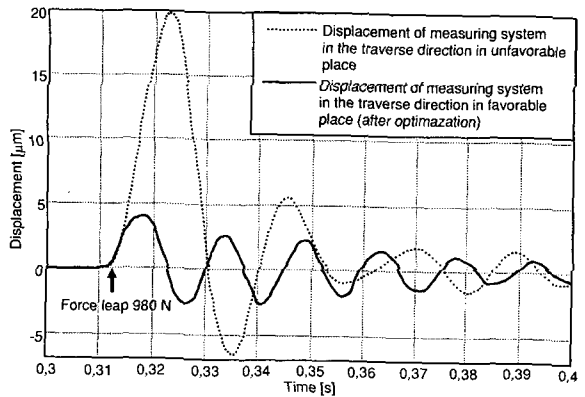
Fig. 3 Control concepts for linear motor

2.3 Measuring system

Linear motor 가 공작기계의 이송장치로 사용되어지기까지 Measuring system 은 CNC-Controller 와 함께 결정적인 역할을 하였으며, 지난 몇 년 사이 Linear motor 에 적용하기 위한 분해능이 높고 긴 직선운동에 필요한 Linear scale 이 활발하게 개발되었다. 최근에 판매되는 Linear measuring system 은 길이는 30 m 에 이르고 300 m/min 의 속도, 20 G 이상의 가속도에서 측정오차한계 $\pm 0.4 \mu\text{m}$ 의 Linear scale 도 개발되었다. Linear motor 에 적용되는 Measuring system 의 신호는 Primary part 의 위치를 파악할 뿐만 아니라, 속도와 더불어 모터전류의 계산을 위해서도 필요하다. 따라서 Measuring system 은 모터의 고속·고가속도에서 위치를 감지할 수 있고, 이송방향으로 높은 기계적인 강도가 있어야 한다. Synchronous linear motor 에 사용되는 측정장치는 Absolute linear scale 을 사용하던지, Incremental linear scale 을 사용할 경우에는 Hall sensor 나 모터제어기에 의하여 전원을 켤 때 자극의 위치를 파악해야만 한다. 더 나아가 Linear scale 을 Linear motor 의 이송장치에 부착할 때 진동과 열 영향으로부터 보호되어야 한다.

Fig. 4 는 Measuring sensor 의 부착 위치에 따른 Linear motor 의 이송방향에 있어서 변위량을 보여주고 있다. 위치제어 정밀도에 영향을 미치는 Measuring system 은 부착되어 있는 Machine table 의 온도와 진동에 의해서 직접적으로 영향을 받는다. Fig. 4 가 보여 주는 바와 같이 Measuring system 이 Machine table 측면 중앙에 위치하고 있을 때, 약 980 N 의 절삭력에 의해 이송방향으로 약 $20 \mu\text{m}$

의 변위량을 가진다. Machine table 과 Linear scale 사이에 진동 절연을 하고 또 Modal analysis 해석 결과에 따라 굽힘과 비틀림이 비교적 적은 위치로 Linear scale 을 옮겼을 때의 변위량은 약 $4 \mu\text{m}$ 로 줄어들었다. Linear scale 을 Linear motor 에 부착할 때 고속이나 고정도의 위치제어를 필요로 하는 System 은 경우에 따라서는 보조장치나 진동절연 기구에 의해 Linear scale 이나 Linear sensor 를 부착해야 한다.



Linear motor	Controller	
$F_N=2950 \text{ N}$	Before optimization	After optimization
$F_{Max}=6500 \text{ N}$	$K_V=200 \text{ 1/s}$	$K_V=220 \text{ 1/s}$
$K_F=133 \text{ N/A}$	$K_P=29 \text{ Amin/m}$	$K_P=67 \text{ Amin/m}$
$m=860 \text{ kg}$	$T_P=10 \text{ ms}$	$T_P=3 \text{ ms}$

Fig. 4 Displacement of measuring system in the traverse direction before and after optimization

2.4 열특성의 최적화

Fig. 5 는 열특성을 개선하고 최적화 시킨 Synchronous linear motor 이다. 열특성을 최적화하기 위한 사용된 방법은 Thermo-Sandwich-Construction 이다. 이 방법은 권선이 들어있는 Primary part 의 철심에 수관을 직접 설치한 Integrated cooler 와 External cooler 의 이중 강제 수 냉각회로로 구성되어 있다. 두 Cooler 사이에는 열전도계수가 낮은 단열재가 있어 Primary part 에서 Machine table 로의 열흐름을 저하시킨다. Linear motor 의 주열원인 Primary part 는 Integrated cooler 에 의해 그리고 Machine table 은 External cooler 에 의해 냉각된다.

그 외에도 Primary part 에서 열대류나 열복사에 의해서 주변기기가 가열되는 것을 방지하기 위해서 Primary part 사면에 Aluminum 재질의 Conducting sheet 가 있고 그 선단은 External cooler 에 연결되어 Primary part 에서 공기로 방출된 열은 External cooler 에 의해 밖으로 방출된다.

Linear motor 를 정밀공작기계에 적용하기 위해서는 주열원인 Primary part 뿐만 아니라 Secondary part 도 열특성의 향상이 필요하다. Synchronous linear motor 에서 Secondary part 는 주열원이 아니나 Primary part 밑면으로부터 방출된 열이 작은 Air gap 을 통하여 Secondary part 에 연결된 Machine bed 로 전달된다. 따라서 Secondary part 는 Linear motor 가 동작기계에 적용될 때 Thermal bridge 역할을 한다. Secondary part 를 최적화하기 위한 방법으로는 Plate cooler 대신에 Cooling pipe 를 이용하면 Secondary part 가 긴 경우에 Plate cooler 를 서로 연결할 필요가 없고, 조립이 간편할 뿐 아니라 Secondary part 와 Machine bed 를 냉각할 수 있다.



Fig. 5 Synchronous linear motor with Thermo-Sandwich-Construction (Photo: Krauss Maffei)

Fig. 6 은 Thermo-Sandwich-Construction 를 이용해서 열특성을 최적화한 Synchronous linear motor 에서 온도를 측정한 결과이다. 이 Linear motor 의 기계적·전기적인 사양은 Continuous force 2950 N, Maximum force 6500 N, Continuous velocity 는 101 m/min, Maximum velocity 211 m/min, 정격전류는

22.2 A, Force constant 는 133 N/A 이고 정격전류 하에서 최대 Power loss 는 2650 W 이다. 온도측정에 사용된 Sensor 는 Platin (PT100) 저항온도계 이다.

온도측정 시 Linear motor 는 Load cell 에 의해서 2950 N 의 힘으로 가압 되어지고 이로 상응하는 Power loss 는 2650 W 이다. Integrated cooler 와 External cooler 에 유입되는 수량은 5 l/min 이고 Secondary part 의 Cooling pipe 에 유입되는 유량은 0-7 l/min 으로 변화하며 세 Cooler 에 유입되는 물의 온도는 동일하게 17.3 °C 이다. Linear motor 가 약 10 시간 작동했을 때의 Machine table 상에서의 온도상승을 보면 주위의 온도나 Secondary part 의 수량에 관계없이 0.5 °C 이하로 제한된다. 또한 Machine table 상의 측정된 좌·우·중앙 각 부의 온도차가 거의 없이 균일하고, 전원이 없는 상태와 작동중의 Machine table 의 온도차도 거의 없다.

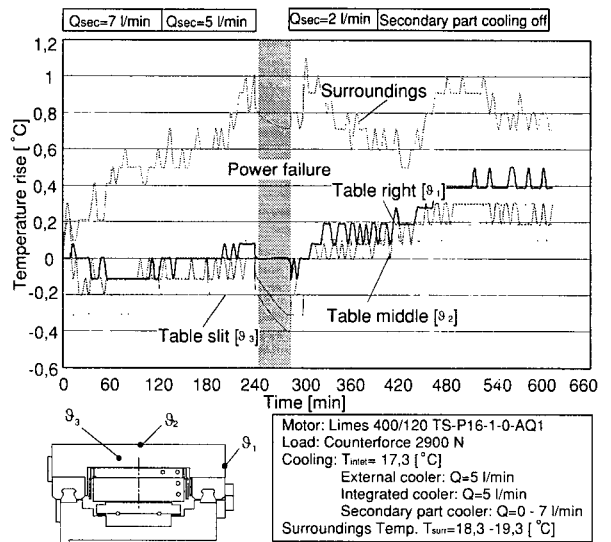


Fig. 6 Measured temperature at the machine structure with the thermal optimized synchronous linear motor

이 열측정에 사용된 Linear motor 의 Primary part 의 길이는 약 700 mm 이고 모터철심의 이송방향으로의 열팽창계수는 $\epsilon=12 [10^{-6}K^{-1}]$ 이기에 온도상승 0.5°C 에 따른 이송방향으로의 열변형량은 4 μm 에 불과하다. 따라서 본 Thermo-Sandwich-Construction 을 이용한 Linear motor 는 Cooler 의 수

량이나 유입온도를 제어할 필요가 없으며 Machine table 의 온도상승이 1°C 이내가 되어 온도 보정할 필요가 없다. 본 Thermo-Sandwich-Construction 은 Force 가 더 높거나 또한 낮은 Linear motor 에도 적용되며 동일하게 향상된 열특성을 가짐이 Linear motor 생산자에 의해 증명되었다. 그러나 Linear motor 열문제의 궁극적인 해결은 효율이 높은 모터, 즉 열손실을 최소화하는 모터를 개발하는 것이다. 이를 위해 Linear motor 의 전기, 제어특성의 향상을 위한 연구개발이 진행되어야 한다.

3. Linear motor 의 적용분야

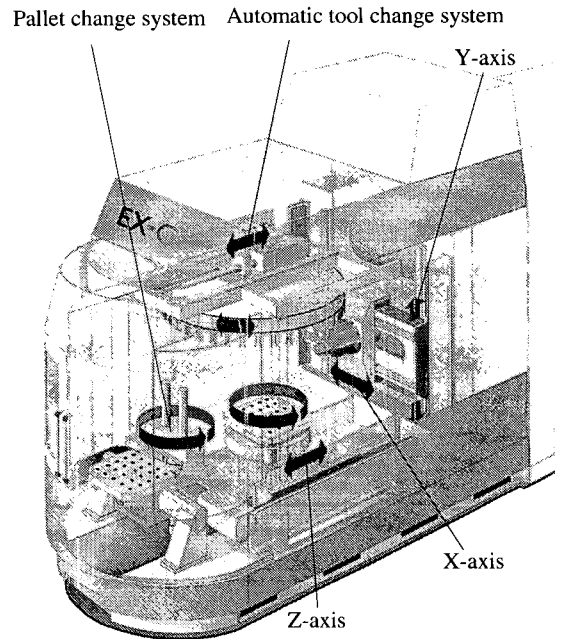
현재의 Linear motor 가 가진 기술적인 장점과 가능성을 기준으로 볼 때 생산시스템 분야에서 기존의 이송기구와 기술개발과 응용에 있어서 강한 경쟁이 예상된다. 이런 분야들은 주로 기존의 이송기구가 위치제어 정확성, 강성, 속도, 가속능력에서 소비자의 요구를 충족하지 못하는 곳이다. Table 1 에는 오늘날의 기술수준으로 본 Linear motor 의 적용 가능분야와 요구되어지는 제 특성을 종합하여 보여주고 있다.

Table 1 Important properties of linear motors for different application

Application of linear motor	Accuracy	Control dynamic	Speed	Acceleration
Industrial robot			•	•
Laser machining center		•	•	•
Textile machine			•	•
Erosion machine	•	•		
Measuring machine	•			
Machining center	•	•	•	•
Out-of-round machining center	•	•		•
Handling device			•	•

Fig. 7 은 Linear motor 를 이용한 고속 Machining center 의 한 예이다. x-, y-, z-, 3 축이 모두 Linear motor 에 의해 구동되고 최고 속도는 120 m/min 그리고 가속능력은 1.5 G 에 이른다. 세 축

의 위치제어 정확도 (Positioning accuracy)는 +/- 0,007 mm 그리고 반복정밀도 (Repeat accuracy)는 +/- 0.003 mm 로써 유사한 Machining space 나 이송 길이를 가진 Ball screw 기구에 비해서 상대적으로 훨씬 높은 위치제어 정밀도를 보이고 있다.



Technical data

- (Linear motor in all feed systems)- Max. acceleration: 1,5 g (all axes)
- Dimension of machining space: x, y, z: 630, 630, 710 (mm)
 - Max. feed rate: 120 m/min (all axes)
 - Positioning accuracy: +/- 0,007 mm (all axes)
 - Repeating accuracy: +/- 0,003 mm (all axes)

Fig. 7 High speed machining center "XHC 241" with linear motor (Photo: Ex-Cell-O)

이와 같은 Linear motor 를 이송장치로 한 고속 Machining center 는 기존의 이송기구를 사용한 공작기계에 비해서 비절삭시간에 소요되는 Span-to-span time 그리고 기준점 및 절삭가공 위치로의 이동시간을 대폭 줄일 수 있어 생산성을 향상시킨다. Linear motor 를 이용한 고속 Machining center 는 현재 자동차의 Cylinder block, Cylinder head, Pump 나 Gear box 가공 등 Aluminum 이나 주철제품 가공에 많이 사용되고 있으며, 미래에는 항공기 부

품등과 같은 대형제품의 일련가공에서 사용의 빈도가 높아질 것으로 예상된다.

4. 결론

Linear motor 는 기존의 대표적인 공작기계 이송장치인 Ball screw 기구에 비해 높은 속도와 가속이 가능하고, 특히 고속에서 높은 위치제어능력을 보유하고 있다. Linear motor 가 가진 높은 위치제어 능력은 모든 주변기기 특히 Digital controller 와 Measuring system 에 의존하고 더 나아가 Linear motor 가 가진 열특성의 향상에 의해서만 가능하다.

현재는 낮은 Sampling time 과 함께 고속에서 높은 위치제어능력을 가진 Linear motor 전용의 Digital controller 가 개발되었고, 분해능이 높은 Measuring system 과 함께, 고속·고가속도 운동 시의 Linear motor 의 제어특성을 향상시키고 있다. Measuring system 도 Linear motor 전용의 Linear scale 이 개발 판매되고 있으며, 긴 이송거리와 함께 고속·고가속운동 시의 Linear motor 의 측정오차가 nm 범위에서 유지되도록 하고 있다. Thermo-Sandwich-Construction 을 가진 Linear motor 는 Machine table 의 온도상승이 1°C 이하가 되어 냉각 System 의 제어가 불필요하고 온도보정이 필요 없다.

Linear motor 를 장착한 Machining center 의 위치 제어 정밀도, 반복정밀도는 수 μm 에 머물러 기존의 이송장치에 비해서 훨씬 높다. Linear motor 는 앞으로 고속·고가속 그리고 높은 위치제어정밀도가 요구되는 직선운동장치 특히 생산공작기에 많이 사용될 전망이다.

참고문헌

1. Weck, M., Werkzeugmaschinen Fertigungssystem Band 3.2, VDI-Verlag, 1995.
2. N. N., Anorad, Information sheet, 1998.
3. N. N., Krauss Maffei, Information sheet, 1999.
4. Eun, I-U., "Optimierung des thermischen Verhaltens von elektrischen linearmotoren fuer den Einsatz in Werkzeugmaschinen," Dissertation, RWTH Aachen, 1999.
5. N. N., LAF050-121 Linearmotoren, Indramat, 1998.
6. N. N., "Lineare Direktantriebe fuer schnelle

Maschinen," Workshop dokument, Laboratory for Machine Tools and Manufacturing Engineering (WZL), RWTH Aachen, 1999.

7. Eversheim, W., Klocke, F., Pfeifer, T., Weck, M., "Wettberbsfaktor Produktionstechnik," AWK Aachner Werkzeugmaschinen-Kolloquium, 1999.
8. Eversheim, W., Klocke, F., Pfeifer, T., Weck, M., "Wettberbsfaktor Produktionstechnik," AWK Aachner Werkzeugmaschinen-Kolloquium, 1996.
9. N. N., "Linearmotoren fuer Servoantriebe in Werkzeugmaschinen," Infotag ZN Stuttgart, Siemens, 1997.
10. N. N., Information of the Firma Heidenhein, <http://www.heidenhein.com>, 2000.11.5.
11. N. N., Information of the Firma Ex-Cell-O, <http://www.ex-cell-o.de>, 2000.11.5.