

### 3축 NC 가공을 위한 CL Z-map 모델링 방법의 비교연구 Comparative study of CL Z-map modeling for 3-axis NC machining

박정환\*, 정연찬, 최병규

영남대학교 기계공학부, (주)큐빅테크 연구소, 한국과학기술원 산업공학과

#### Abstract

Gouge-free tool-path generation is an important issue in mold & die machining and researches on cutter interference avoidance can be found in many articles. One of the various methods is construction of tool-offset surface or cutter-location (CL) surface on which the cutter-center point (CL-point) locates. Provided that the CL surface is represented in a suitable form, cutter-interference avoidance can be performed without the burden of computing CL data for every cutter-contact (CC) point. In the paper, various methods of constructing a CL surface in the z-map form are presented, where z-map is a special form of discrete nonparametric representation in which the height values at grid points on the xy-plane are stored as a 2D array  $z[i,j]$ .

#### 1. 서론

일반적으로 금형 형상부 (part-surface)는 수십~수천개의 자유곡면 (sculptured-surface)으로 구성된 복합곡면 (compound surface)으로 모델링하고 있다<sup>(1)</sup>. 대부분의 CAD 시스템은 NURBS (Non Uniform Rational B-Spline) 등의 매개변수형 (parametric) 곡면 모델을 기반으로 한다.

가공대상 곡면 모델이 만들어지면, 공정계획을 거쳐 NC 가공을 위한 가공데이터 즉 CL (cutter-location: 공구기준점) 데이터를 생성한다. 이때 자유곡면 가공경로는 크게 두 가지로 구분할 수 있는데, 매개변수형 곡면의 등경곡선 (iso-parametric curve)을 따라 공구가 움직이는 매개변수 (parametric) 방식과 xy 평면상에서 정의된 직선을 따라 공구가 이동하는 카테지안 (Cartesian) 방식으로 구분할 수 있다<sup>(2)</sup>.

Cartesian 방식은 다시 CC-Cartesian 및 CL-Cartesian으로 구분할 수 있다<sup>(2)</sup>. 전자의 경우 가공대상 곡면을 수직평면으로 절단하여 얻어진 개별 CC (cutter-contact: 공구 접촉점) 데이터에 대해 공구간섭을 제거하는 방식을 사용하며<sup>(3,4)</sup>, 후자의 경우는 공구기준점이 놓이는 공구움셋 곡면 즉, 공구기준면 (CL-surface)<sup>(1,5,6)</sup>을 계산하여 이를 수직평면으로 절단하여 공구경로를 생성하게 된다.

자유곡면의 CL 곡면은 삼각형 등의 다면체 (facet)<sup>(3,4)</sup> 또는 z-map<sup>(1,7,8)</sup> 등 비매개변수형 곡면모델을 이용하는 것이 일반적이다. 특히 z-map 모델의 경우 데이터 구조의 단순함으로 인해 움셋탕이 단순하고 CL 곡면 구축후 Cartesian 공구경로 계산 (즉, 수직평면과의 교선 계산)이 간단하다는 장점을 가진다<sup>(7,9)</sup>. 아울러 CL 곡면 계산 과정에서 발생할수 있는 특이성 (singularity)<sup>(10)</sup> 문제를 비교적 간단하게 해결할 수 있는 장점도 가지고 있다. 공구경로 생성 이외에도 다양한 분야에의 적용을 찾아볼수 있다<sup>(11)</sup>.

본 논문에서는 z-map 모델로 CL 곡면을 표현함에 있어서 적용할 수 있는 몇 가지 방법에 대한 비교연구

를 다루고자 한다. 실제 z-map 자체의 표현오차 (representation error)에 대해서는 고려하지 않기로 한다. 2절에서는 CL 곡면 정의 및 특이성 문제를 살펴보고, 3절에서 z-map 모델을 이용한 기존의 CL 곡면 생성방식 (3.1절), 매개변수형 곡면모델을 이용하여 기존의 방식을 개선할 수 있는 보완된 방식 (3.2 및 3.3절)에 관하여 비교·분석 하고자 한다.

#### 2. CL 곡면의 정의 및 특이성 문제

##### 2.1 공구기준점과 CL 곡면

일반적으로 매개변수형 곡면 모델은 식(1)과 같은 벡터함수로 표현되며, 매개변수 영역 ( $u,v$ )에서 3차원 공간 ( $x,y,z$ )로의 정칙사상 (regular-mapping)이다.

$$\mathbf{r}(u,v) = [x(u,v), y(u,v), z(u,v)] \quad (1)$$

본 논문에서, 곡면  $\mathbf{r}(u,v)$ 상의 임의의 공구접촉점에 대한 공구기준점 (CL-point)은 Fig. 1과 같이 정의한다 (일반적으로는  $-a$  만큼 이동한 위치가 된다).

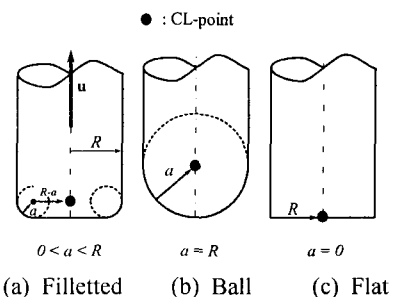


Fig. 1 CL-point definition for typical cutter-types

Fig. 1의 공구에 대한 공구기준점의 수학적 표현은 식 (2)와 같다<sup>(6)</sup>.

$$\mathbf{r}^o(u,v) = \mathbf{r}(u,v) + a\mathbf{N} + \frac{(R - a)(\mathbf{N} - \lambda \mathbf{u})}{(1 - \lambda^2)^{1/2}} \quad (2)$$

여기서,  $\lambda = \mathbf{N} \cdot \mathbf{u}$ ,

$\mathbf{N}$ : unit normal vector at  $(u,v)$ ,

$\mathbf{u} = (0,0,1)$ : cutter axis,

$R$ : cutter radius (half the diameter),

$a$ : nose radius (ball if  $a=R$ , flat if  $a=0$ ).

여기서 CL 곡면은 곡면  $\mathbf{r}(u,v)$ 에 공구를 접촉한 상태로 공구를 이동하였을 때 공구기준점의 궤적<sup>(6)</sup>, 또는 곡면  $\mathbf{r}(u,v)$ 상에 Fig. 1에서 정의한 공구기준점을 놓고 공구를 이동하였을 때 얻어지는 공구포락면 (tool envelope surface)<sup>(1)</sup>이라 할수 있다 (Fig. 2). 일단 정확한 CL 곡면이 얻어지면 공구경로 생성시 필요한 공구기준점은 CL 곡면위에 놓이게 된다.

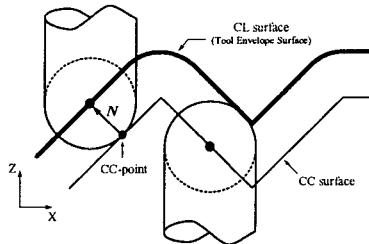


Fig. 2 CL-surface for ball-ended cutter

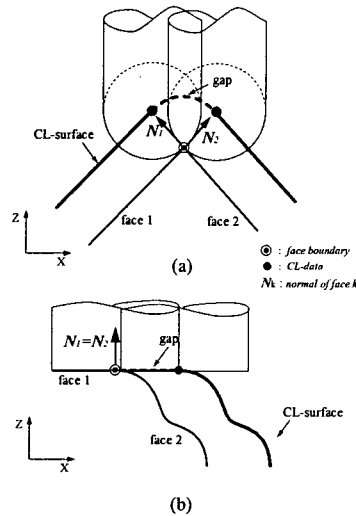


Fig. 3 Singularities in construction of CL-surface

### 2.2 특이성 문제

식 (2)는 CL 곡면의 수학적인 표현이라 할수 있으며,  $\mathbf{r}^o(u,v)$  또한 벡터함수로서  $(u,v) \rightarrow (x,y,z)$ 의 정칙사상이다. 그러나 공구간섭이 없는 CL 곡면을 구축함에 있어서는 특이성 (singularity) 문제를 고려해야 하는 경우가 발생한다. 본 논문에서 '특이성'이란  $\mathbf{r}(u,v)$ 상의 단일 공구접촉점에 대해 단일 공구기준점이 형성되지 않는 경우를 의미하며, 이는 식 (2)로 정의되는 CL 곡면상에서 '틈' (gap)으로 나타난다 (Fig. 3).

따라서 공구간섭이 없는 CL 데이터를 생성하기 위해서는 CL 곡면상에 필연적으로 나타날 수 있는 틈에 대한 별도의 처리가 있어야 한다. 다면체 모델의 경

우에는 별도의 단위 다면체 (예: 단위 삼각형)들로 이러한 틈을 처리해야겠지만, z-map의 경우에는 계산방식 및 데이터 구조 특징상 이런 고려를 할 필요가 없거나 간단한 처리가 가능하다.

특히 곡면  $\mathbf{r}(u,v)$ 의 곡률반경 < 공구반경일 경우 발생하는 '꼬임' 현상에 대해서도 적절한 조치가 필요한데, z-map의 경우 동일한  $(x,y)$ 에 대해 항상 최대 높이값 ( $z$ )을 취하도록 함으로써 별도의 조치는 필요없다.

### 3. CL z-map 구축

본 논문에서 다루는 CL z-map 생성은 3가지 방식으로 구분하며, 일반적인 매개변수형 곡면  $\mathbf{r}(u,v)$ 를 입력으로, (i) z-map, (ii) CC-곡선, (iii) Facet 모델을 각각 CL 곡면을 생성하기 위한 '기준모델' (reference model)로 고려한다.

#### 3.1 Z-map 역오프셋 방식

이 방식은 기존의 문헌에서 이미 나타난 방식으로써, 형상부 기준곡면 z-map (즉 CC z-map)이 주어질 때 CL z-map을 생성하는 방식이다. 이 방식은 CC z-map의 모든 격자점에 공구 기준점을 놓아 가면서 공구 역형상에 의해 형성되는 공구포락면으로 주위 격자점 높이값을 갱신하는 역오프셋 방식 (inverse offset method)<sup>(5,6)</sup>이다 (Fig. 4). 이때 CC z-map은 최소한 각 격자점에서는 정확한 곡면 높이값을 가지고 있는 기준모델 (master-model)로 생각할 수 있다.

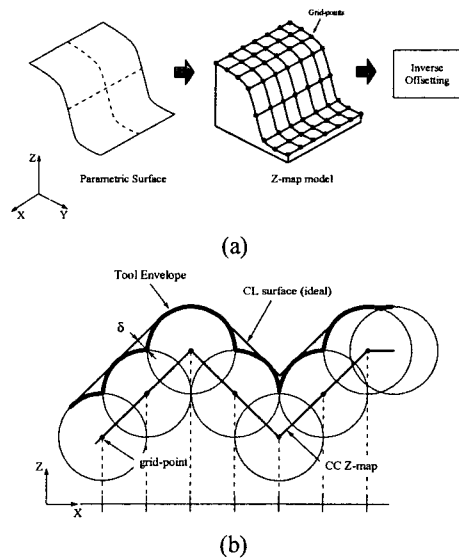


Fig. 4 Inverse offset method (ball-end milling)

이 방식은 계산시간 (computation-time) 및 계산 강건성 (robustness) 측면의 장점 이외에도, 특이성 문제를 별도로 고려할 필요가 없다. 그러나 정삭이나 간삭 등 정밀가공에 적용할 경우 격자간격을 매우 촘촘하게 주어야 하므로 계산시간이 오래 걸리고 메모리가 많이 소요되는 단점을 가지고 있다. 또한 각 격자점에서 공구 역형상을 놓고 주위 격자점 높이 값을 추출하게 되므로, 격자간격( $\gamma$ )에 대한 공구 직경( $D$ )의 비( $D/\gamma$ )가 작을 경우에는 이상적인 공구포락면과의 오차 (Fig. 4-(b): $\delta$ )가 커지는 단점을 가진다.

#### 3.2 CC-곡선 역모의가공 방식

3.1절의 방식이 z-map을 '기준모델'로 삼는데 반해, 본 방식은 매개변수형 곡면에서 추출한 CC-곡선을 기준모델로 활용한다. 즉 매개변수형 곡면에서 추출한 등경곡선 (iso-parametric curve) 및 곡면 경계곡선 (boundary edge curve)을 공구기준점으로 삼아 역모의 가공 (inverse cutting simulation)<sup>(5,12)</sup>을 적용하여 CL 곡면을 생성한다 (Fig. 5).

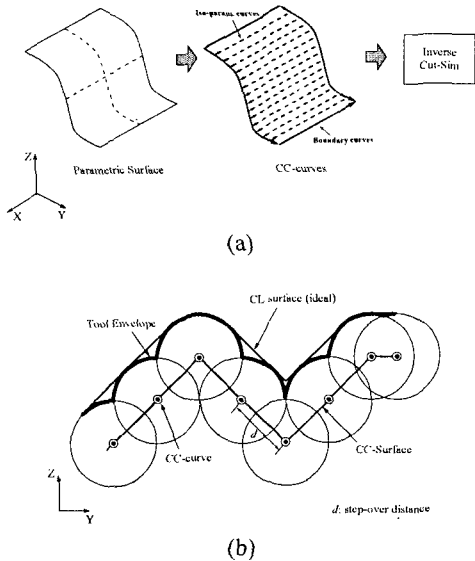


Fig. 5 Inverse cutting-simulation (ball-end milling)

여기서 등경곡선은 점열곡선으로 변환하여 역모의 가공을 적용하도록 하며, 이때 점간 거리 (step-length)는 주어진 가공정밀도 (machining tolerance)를 고려하여 계산하도록 한다. 내부 등경곡선간의 경로간격 (step-over distance)에 대해서도 동일한 계산을 적용하여 가공정밀도를 만족하도록 한다. 2절의 특이성 문제는 모든 곡면의 경계곡선 (face edges)으로 역모의가공을 수행함으로써 쉽게 해결할 수 있다.

앞서의 방식이 z-map의 격자점 정보만을 활용하는데 반해, 곡면 경계곡선 및 내부의 등경곡선을 활용함으로써 '역음셋방식'에 비해 정밀도가 향상된 공구포락면을 생성할 수 있다.

본 방식은 일반적으로 z-map 기준 역음셋 방식에 비해 많은 계산시간이 소요된다. 이는 z-map 기준 역음셋 방식의 경우 격자점 정보만을 고려할뿐더러 모든 격자점은 xy-평면상에서 규칙적인 간격을 가지므로 별도의 최적화 기법으로 각 격자점에 대한 높이 값 계산영역을 최소화함으로써 계산시간을 단축할 수 있는 반면<sup>(13)</sup>, 본 방식은 각 등경곡선 (점열 데이터)에 대해 역모의가공을 수행함으로써 계산량이 증가할뿐더러 계산영역의 최적화 효과가 상대적으로 적기 때문인 것으로 사료된다.

그러나 등경곡선간 간격 (step-over distance)으로 인하여 CL 곡면상에 커슁 (cusp) 형상이 존재할 수 있으며, 이를 보완하기 위하여 uv-영역에서 직교하는 등경곡선에 대해 역모의가공을 수행할 경우 계산시간의 증가가 필연적인 문제이다.

### 3.3 음셋 다면체 방식

본 방식은 매개변수형 곡면을 삼각형 다면체 (facet) 모델로 변환하고 이로부터 공구에 대한 음셋 다면체 모델을 만든 후 이 모델로부터 CL z-map의

각 격자점 높이 값을 계산한다. 아울러 각 곡면의 경계곡선에 대해서는 3.2절의 역모의가공을 적용함으로써 특이성 문제를 해결하도록 한다 (Fig. 6).

이때 Step 2에서 생성하는 음셋 다면체 모델 (삼각형)은 삼각형의 각 꼭지점에 저장된 곡면 법선벡터 정보 및 공구정보로부터 식 (2)를 이용하여 계산한다<sup>(6)</sup>. 앞서의 두 방식은 정밀도 및 계산시간 측면에서 각각 단점을 가지는 반면, 음셋 다면체 방식은 z-map 역음셋방식 (3.1절)의 정밀도 문제를 보완하면서 CC-curve 역모의가공 방식 (3.2절)에 비해 계산시간을 단축하는 장점을 가진다고 사료된다. 예를 들어 반경이 100mm 인 상반구에 대해 10mm 볼 음셋을 적용하였을 때, 본 방식의 최대 오차는 z-map 역음셋방식 (격자간격=1mm)에 비해 대략 1/10 미만임을 확인할 수 있었다.

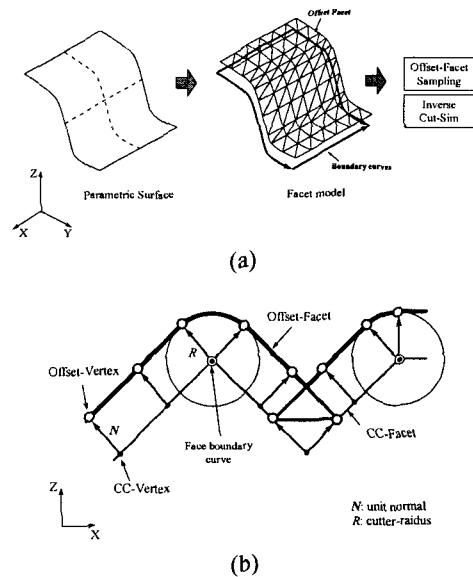


Fig. 6 Offset-facet sampling & inverse cut-sim

## 4. 요약 및 적용 예

### 4.1 요약

3.1~3.3절에서 설명한 각 방식은 Fig. 7와 같이 정리할 수 있으며, 상대적인 계산시간 및 정밀도 특성은 Table 1과 같이 정리할 수 있다.

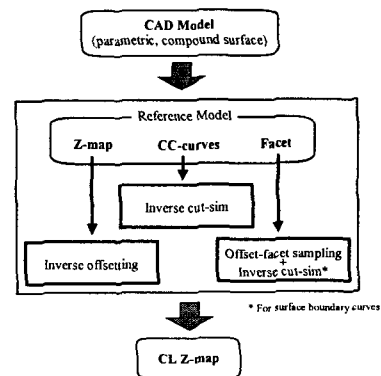


Fig. 7 Summary of the three methods

Table 1 Comparison of described methods

	§ 3.1	§ 3.2	§ 3.3
Computation time	1**	3	2
Accuracy	3	2	1
Major factors	$\gamma, R$	$\epsilon, R$	$\epsilon, R$

\*  $\gamma$  = z-map grid-interval,  $\epsilon$  = machining tolerance,  $R$  = cutter radius

\*\* rank

Z-map 기준 역읍셋 방식은 형상 z-map의 격자간격 ( $\gamma$ ) 및 공구반경 ( $R$ )이 계산시간에 영향을 미치는 요소가 되며, 대체로 각 요소의 제공에 비례/반비례 관계를 가진다. 또한 정밀도는 격자간격과 반비례한다고 볼 수 있다. 나머지 두 방식은 가공오차 ( $\epsilon$ ) 및 공구반경이 계산시간에 영향을 주는 요소이며, 정밀도는  $\epsilon$  에 비례한다고 볼 수 있겠다.

또한 첫 번째 및 두 번째 방식은 알고리즘 특성상 CL 곡면에 커브형상이 필연적으로 나타나게 되며, 세 번째 방식은 상대적으로 이러한 문제를 피할수 있는 장점을 가진다고 할 수 있다. 따라서 전체적인 CL 곡면의 부드러움이 중요하다고 볼때에는 세 번째 방식이 바람직한 것으로 사료된다.

#### 4.2 적용 예

Fig. 8-a는 자동차 연료탱크의 금형 형상곡면 모델이다. 전체 곡면의 개수는 1880개이고, xy-영역의 크기는 1190x890mm이다. 이 형상곡면에 대한 CC z-map (Fig. 8-b)의 격자간격은 0.8mm로 주었다 (격자 개수는 1489x1113).

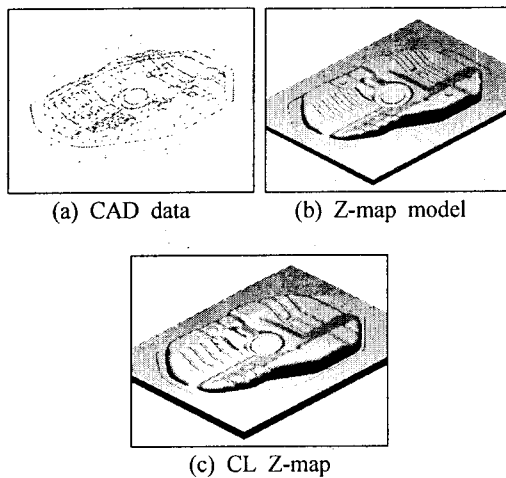


Fig. 8 Car fuel-tank model

이 예에 대해 직경 10 ( $R=5$ mm) 블엔드밀 공구의 CL z-map 생성시 (Fig. 8-c), z-map 역읍셋 방식은 10초, 읍셋다면체 방식 (가공오차  $\epsilon = 0.005$ mm)은 355초가 소요되었다. 또한 직경 20 ( $R=10$ mm) 블엔드밀에 대해서는 각각 15초, 450초가 소요되었다.

#### 5. 결론 및 논의

본 연구에서는 CL 곡면을 z-map으로 표현함에 있어서 몇 가지 방법론에 관하여 살펴보았다. 각 방식은 적용분야에 따라 적절하게 활용이 가능할 것으로 사료된다. 또한 z-map (CC z-map, CL z-map) 자체의 표현오차를 줄이는 방법으로는 EZ-map, Core Z-map

따위의 별도 보완 모델<sup>(14)</sup>의 사용이 가능하다.

정밀도, 계산시간을 고려할 때 금형의 황/중삭 가공경로 생성에는 기존의 z-map 역읍셋 방식을 사용할 수 있으며, 정삭 또는 잔삭 가공에 대해서는 읍셋다면체 방식이 가장 적합한 것으로 사료된다. 현재 이 두가지 방식을 사용하는 상업용 CAM 시스템<sup>(15)</sup>에서는 전자의 경우 일반 z-map 또는 EZ-map을, 후자의 경우에는 EZ-map을 채용함으로써 정/잔삭 가공경로의 정밀도 향상을 꾀하고 있다. 또한 미국 크라이슬러 자동차 회사의 스티로폼 모형 (pattern) 제작공정에서는 전자의 z-map 역읍셋방식으로 가공 데이터를 생성하고 있다<sup>(13)</sup>.

#### 참고문헌

1. 박정환, 김보현, 최병규, "가상측정을 통한 펜슬곡선 추출," 한국 CAD/CAM 학회 논문집, Vol. 2, No. 4, pp.253-266, 1997.
2. 최병규 외, CAD/CAM 시스템과 CNC 절삭가공, 회중당, 1999.
3. Hwang, J.S., "Interference-free Tool-path Generation in the NC Machining of Parametric Compound Surfaces," Computer-Aided Design, Vol. 24, No. 12, pp.667-676, 1992.
4. Lee, S.X. and Jerard, R.B., "5-axis Machining of Sculptured Surfaces with a Flat-end Cutter," Computer-Aided Design, Vol. 26, No. 3, pp.165-178, 1994.
5. Choi, B. K., Surface Modeling for CAD/ CAM. Elsevier, Elsevier, 1991.
6. Choi, B.K. and Jerard, R.B., Sculptured Surface Machining, Kluwer Academic Publishers, 1999.
7. Takeuchi, Y. Sakamoto, M. Abe, Y. and Orita, R., "Development of a Personal CAD/ CAM System for Mold Manufacture Based on Solid Modeling Techniques," Annals of the CIRP, Vol. 40, pp.455-458, 1989.
8. Saito, T. and Takahashi, T., "NC Machining with G-buffer Method," Computer Graphics, Vol. 25 No. 4, pp.207-216, 1991.
9. Choi, B.K., Chung, Y.C., Park, J.W. and Kim, D.H., "Unified CAM-system Architecture for Die and Mould Machining," Computer-Aided Design, Vol. 26 No. 3, pp.235-243, 1994.
10. do Carmo, M., Differential geometry of curves and surfaces, Prentice-Hall, 1976.
11. Choi, B.K., Chung, Y.C. and Park, J.W., "Application and Extension of Z-map Model," Proc. of the Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, Seoul, pp.221-234, Aug. 1995.
12. 정연찬, 금형가공용 통합 CAM 시스템을 위한 가공데이터의 모의가공과 검증에 관한 연구, 박사학위논문, 한국과학기술원, 1996.
13. 박정환, "자동차 프레스금형의 스티로폼-패턴 가공을 위한 전용 CAM 시스템 개발," 한국 CAD/CAM 학회 논문집, Vol.3, No.4, pp.223-235, 1998.
14. 박정환, 정연찬, 최병규, "Z-map 모델을 이용한 정밀형상 모델링," 한국정밀공학회지, Vol. 15, No. 11, pp.180-188, 1998.
15. Z-Master Reference Manual, Cubic Tech, Korea, 1992.