

사출성형 조건이 디스크의 복굴절에 미치는 영향

이호상[#], 박민규^{*}

Influence of Injection Molding Conditions on the Birefringence of Disks

Ho-Sang Lee[#], Min-Gyu Park^{*}

(Received 27 July 2010; received in revised form 27 September 2010; accepted 7 October 2010)

ABSTRACT

A computer code was developed to simulate all three stages of the injection molding process: filling, packing and cooling by finite element method. The constitutive equation used here was compressible Leonov model. The PVT relationship was assumed to follow the Tait equation. The flow-induced birefringence was related to the calculated flow stresses through the linear stress-optical law. Based on the simulation, the Taguchi method was used to investigate the influences of injection molding conditions on the birefringence of a center gate disk. In addition, the optimal processing conditions were selected to minimize the birefringence and the birefringence difference along the positions of the disk.

Key Words : Birefringence(복굴절), Viscoelasticity(점탄성), Injection Molding(사출성형), Mold(금형)

1. 서 론

광디스크의 광학적 특성은 저장 데이터의 고정밀, 고밀도에 큰 영향을 주고 있으며 사출성형 공정에서 발생하는 복굴절은 광학 성능을 좌우한다. 복굴절은 유동에 의한 부분과 열에 의한 부분으로 나눌 수 있다. 유동에 의한 복굴절은 캐비티의 충전과정 동안 발생하며 분자배향 체인을 생성하는 전단응력 및 법선응력의 결과이다. 그리고 열에 의한 복굴절

은 밀도와 수축의 불균형 변화와 유리 전이 온도를 통한 불균일 냉각에 의하여 발생한다.

유동에 의한 복굴절 해석을 위하여 많은 연구자들이 Leonov 모델을 적용하였다^[1-3]. Isayev와 Hieber^[1]는 평판 사이에서 Leonov 모델을 도입하여 충전과 냉각과정에서의 복굴절을 예측하였다. Kwon 등^[4,5]는 유한차분법을 사용한 수치해석 시스템을 개발하고, 디스크에 대한 복굴절의 분포를 연구하였다.

본 논문에서는 중앙게이트 방식 디스크의 사출성형 과정(충전, 보압 및 냉각)에 대하여 유한요소법을 사용한 수치해석 프로그램을 통하여 복굴절을 시뮬레이션 하였으며, 이때 사용한 구성방정식은 압축성 Leonov 모델^[6,7]이었다. PVT 관계는 Tait 방정식을 사용하였으며, 디스크의 유동에 의한 복굴절을 해석하고, 해석결과는 실험 결과와의 비교를 통해 검증

교신저자 : 충주대학교 항공기계설계학과
E-mail : lhs@cjnu.ac.kr

* 충주대학교 항공기계설계학과 산업대학원

되었다. 해석적인 방법에 기초하고 실험계획법을 적용하여 사출성형 공정조건이 복굴절에 미치는 영향을 연구하였으며, 복굴절을 최소화 시킬 수 있는 공정조건을 도출하였다.

2. 복굴절 해석

사출성형 공정해석에서 사용된 구성방정식은 Leonov 비선형 점탄성 모델이며, 이때 응력은 다음 식(1)과 같이 속도구배로 표현될 수 있다.

$$\underline{\sigma} = -P\underline{\delta} + \eta_0 s (\nabla \underline{v} + \nabla \underline{v}^T) + \sum_k \frac{\eta_k}{\theta_k} \underline{C}_k \quad (1)$$

여기서 P 는 압력, s 는 0~1 사이의 유변학적 물성치, 그리고 η_k 와 θ_k 는 각각 k^{th} 모드에서의 전단점도와 이완시간이다. 그리고 \underline{C}_k 는 Leonov 모델에서 k^{th} 모드에 대한 탄성 변형을 텐서이며, 다음의 식(2)로 표현될 수 있다.

$$\frac{D}{Dt} \underline{C}_k - \nabla \underline{v}^T \cdot \underline{C}_k - \underline{C}_k \cdot \nabla \underline{v} + \frac{1}{2\theta_k} (\underline{C}_k \cdot \underline{C}_k - \delta) = 0 \quad (2)$$

식(1)과 (2)로 표현된 구성방정식을 적용하고 연속 방정식, 운동량방정식, 그리고 에너지방정식을 풀기 위하여 제어체적에 기초한 유한요소법이 적용되었으며 선형 보간함수를 갖는 삼각형 요소가 사용되었다. 참고문헌^[8]에 자세히 언급되어 있는 바와 같이 유한요소 해석을 통하여 탄성 변형율텐서와 함께 1차 범선응력 차이($\sigma_{rr} - \sigma_{zz}$) 및 전단응력(τ_{rz})을 구할 수 있다.

결국 rz 평면에서 유동에 의한 복굴절은 다음 식(3)의 광응력 법칙을 사용하여 계산될 수 있다.

$$\Delta n = C_{\sigma}^{fl} \sqrt{(\sigma_{rr} - \sigma_{zz})^2 + 4\tau_{rz}^2} \quad (3)$$

여기서 C_{σ}^{fl} 은 수치 용융상태에서의 광응력 계수를 나타낸다.

유한요소 해석을 수행하고, 예측된 복굴절 결과는 Yoon^[9]의 실험결과와 비교되었다^[8]. 이때 사용된 수

지는 폴리스티렌(Styron 615 APR/DOW)이며, 적용 대상은 직경과 두께가 각각 10.16cm, 0.2cm인 디스크로서 게이트의 위치는 중앙게이트 방식으로 하였다. 공정조건은 수지온도 225°C, 금형온도 40°C, 그리고 유량은 23.8 cm³/s이었다. 디스크의 모델링에서는 Fig.1과 같이 대칭성을 고려하여 184개의 절점과 315개의 요소로 이루어진 1/4 디스크로 모델링하였다.

보압 15MPa을 작용하였을 경우 냉각이 종료된 이후 $r=1.79$ cm 지점에서 두께별 복굴절 분포에 대한 해석과 실험결과는 Fig.2에서 비교되고 있다. 해석 및 실험에서 나타난 첫 번째 피크는 보압에 의하여 발생한 것이며, 두 번째 피크는 1차 충전에 의하여 발생한 것이다. 피크값의 크기는 실험에 의한 측정결과와 비교적 잘 일치하고 있으며, 피크위치는 약 7%정도의 차이가 있음을 볼 수 있다. 그리고 해석결과에서 복굴절의 최소값이 실험결과와 차이를 보이는 것은 해석에서는 열에 의하여 발생하는 복굴절을 고려하지 않았기 때문으로 판단된다.

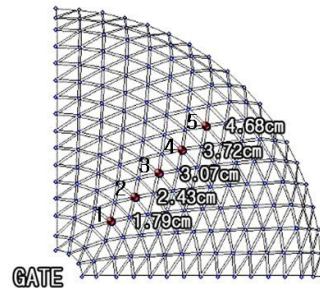


Fig. 1 The finite element mesh

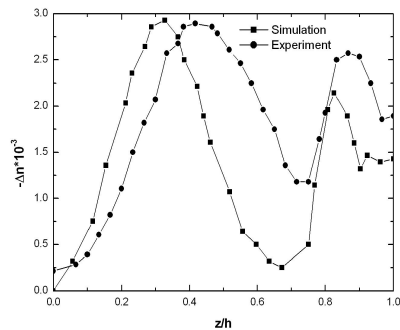


Fig. 2 Simulated and measured gapwise distribution of birefringence at the end of cooling

3. 실험계획법 적용

3.1 공정조건이 복굴절에 미치는 영향

복굴절은 광학부품에 있어서 각종 수차를 유발하고 광학품질을 좌우하는 중요한 요소이지만 실험적으로 정확한 측정이 어렵고, 많은 시간이 소요된다. 따라서 1차적으로 유한요소 해석 프로그램을 개발하여 복굴절을 예측하고, 위에서 기술한 바와 같이 실험결과와의 비교를 통해 해석 결과의 유용성을 검증하였다^[8]. 이러한 검증결과를 기초로 해석적인 방법을 적용하며, 복굴절을 최소화하고 균일화하기 위한 공정조건을 도출하기 위하여 실험계획법을 사용하였다.

성형조건과 복굴절의 관계 규명 및 최적화에 사용될 실험 방법은 실험횟수를 최소화하여 시간과 경제적 부담을 줄여야 하며, 실험에서 결정되는 성형조건이 잡음에 대하여 강건하여야 한다. 이러한 실험 요구 조건을 만족시키기 위한 대표적인 실험계획법으로 다구찌 방법을 사용하였다.

사용된 수치 및 적용대상은 위에서 해석결과 검증을 위한 것과 동일하며 최적의 공정조건과 비교하기 위한 기존의 공정조건으로는 참고문헌^[8]의 조건과 동일한 금형온도 40℃, 수지온도 225℃, 유량 5.95cm³/s, 보압시간 6초 그리고 보압크기는 15MPa 이었다.

복굴절 해석에 사용된 제어인자는 그 영향이 클 것으로 예상되는 금형온도, 수지온도, 유량, 보압시간, 보압크기 등 5가지 사출조건이며, 각 인자에 대하여 3수준을 사용하였다. 실험에 사용된 인자와 각각의 수준은 Table 1과 같다.

다구찌 방법의 L₁₈ 직교배열표에 따라 18번의 사출성형 시뮬레이션을 수행하고 복굴절의 크기를 계산하였으며 망소특성으로 간주하여 다음 식(4)에 따라 SN비를 계산하였다.

$$\eta_i = -10 \log_{10} \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 y_{ij}^2 \quad (4)$$

여기서 η_i 는 각 실험별 SN비 값이며 y_{ij} 는 각각의 i 번째 실험에 대하여 Fig.1에서 나타난 j 지점에서 계산한 평균 복굴절 값이다. 일반적으로 복굴절

의 크기는 게이트 위치에서 가까울수록 큰 값을 갖는다. 본 논문에서는 공정조건이 위치에 관계없이 전체적인 복굴절 크기에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 측정위치를 잡음인자로 처리하였으며, 이를 위하여 SN비 계산시 각 위치에서의 복굴절 크기를 평균하였다. SN비를 계산한 결과는 Table 2와 같다.

Table 1 Factors and levels used in experiments

factors	unit	level		
		1	2	3
A. Mold temp.	℃	40	50	60
B. Melt temp.	℃	205	225	245
C. Flow rate	cm ³ /s	4.95	5.95	6.95
D. Packing time	sec	5	6	7
E. Packing pres.	MPa	10	15	20

Table 2 SN ratio for birefringence

no	column no.									S/N (dB)	
	e	e	e	A	B	C	D	E	Bire.	Diff.	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	59.05	57.08	
2	1	1	2	2	2	2	2	2	61.64	58.17	
3	1	1	3	3	3	3	3	3	63.41	59.69	
4	1	2	1	1	2	2	3	3	61.24	57.70	
5	1	2	2	2	3	3	1	1	67.28	64.33	
6	1	2	3	3	1	1	2	2	58.85	56.60	
7	1	3	1	2	1	3	2	3	58.67	56.36	
8	1	3	2	3	2	1	3	1	62.62	59.07	
9	1	3	3	1	3	2	1	2	65.51	62.67	
10	2	1	1	3	3	2	2	1	65.38	61.88	
11	2	1	2	1	1	3	3	2	58.84	56.15	
12	2	1	3	2	2	1	1	3	62.29	59.33	
13	2	2	1	2	3	1	3	2	63.24	59.35	
14	2	2	2	3	1	2	1	3	59.47	57.04	
15	2	2	3	1	2	3	2	1	62.57	59.42	
16	2	3	1	3	2	3	1	2	64.09	61.21	
17	2	3	2	1	3	1	2	3	63.03	59.46	
18	2	3	3	2	1	2	3	1	59.59	57.41	

서로 다른 인자들이 복굴절에 영향을 주는 효과는 Table 1에서 나타낸 각 인자수준에 대해 SN비로부터 판단할 수 있다. 이 상대적 효과는 분산분석(ANOVA)을 통하여 잘 파악할 수 있으며, 이들 값들은 다양한 파들의 세기와 유사한 것으로, SN비를 변동시키는데 있어 인자사이의 상대적 중요성에 대한 척도가 된다. 복굴절 및 복굴절차이에 대한 인자수준별 평균을 도시하면 각각 Fig 3, Fig 4와 같다.

복굴절의 크기와, 복굴절 차이에 가장 영향을 많이 주는 공정조건은 수지온도(B)와 보압시간(D) 그리고 보압크기(E) 순서임을 알 수 있다. 수지온도가 높

을수록 캐비티 내에서 수지점도가 낮아지고 잔류응력 및 분자배향이 감소되어, 결과적으로 복굴절의 크기 및 균일도가 향상되는 것으로 판단된다. 또한 보압유지시간이 짧고 보압크기가 작을수록 복굴절을 감소시키고, 그 차이도 감소시킴을 알 수 있다.

결과적으로 최적의 인자수준 조건은 복굴절 최소화, 균일화의 경우 모두 $A_3B_3C_3D_1E_1$ 이 될 것이다. 기존공정조건은 $A_1B_2C_2D_2E_2$ 에 해당되므로 가법모델에 의한 추정으로 기존공정조건^[8] 및 최적조건에 대한 SN비는 각각 다음과 같이 계산된다.

$$\eta_{old} = m + (m_{A1} - m) + (m_{B2} - m) + (m_{C2} - m) + (m_{D2} - m) + (m_{E2} - m) \quad (5)$$

$$\eta_{opt} = m + (m_{A3} - m) + (m_{B3} - m) + (m_{C3} - m) + (m_{D1} - m) + (m_{E1} - m) \quad (6)$$

기존 공정조건^[8]에 비해 최적공정조건을 적용한 경우 복굴절의 크기는 4.145 dB, 그리고 복굴절 차이는 5.543 dB 향상됨을 알 수 있었다.

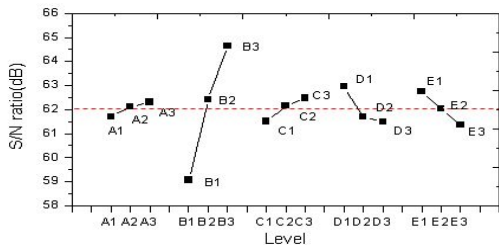


Fig. 3 SN ratio graph for birefringence

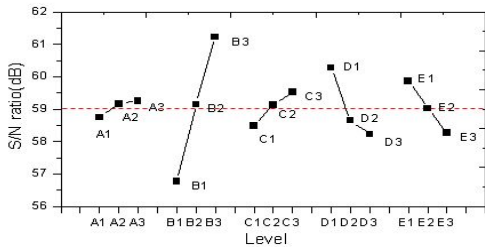


Fig. 4 SN ratio graph for birefringence difference

3.2 복굴절 분포

다구찌 방법을 적용하여 복굴절의 크기와 복굴절 차이를 최소화시키는 최적 공정조건인 $A_3B_3C_3D_1E_1$ 에 대하여 해석을 수행하였다. 충전과정에 대한 시

뮬레이션 결과 여러 반경위치에서 두께에 따른 복굴절 분포를 비교한 결과는 Fig. 5와 같다.

최적조건을 적용한 경우 기존조건^[8]에 비하여 복굴절의 크기가 약 1/2 정도로 크게 감소하였으며, 위치별 복굴절의 차이도 크게 감소함을 볼 수 있었다.

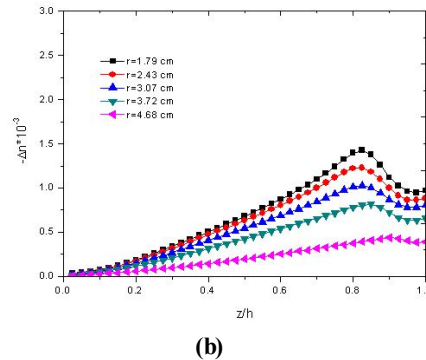
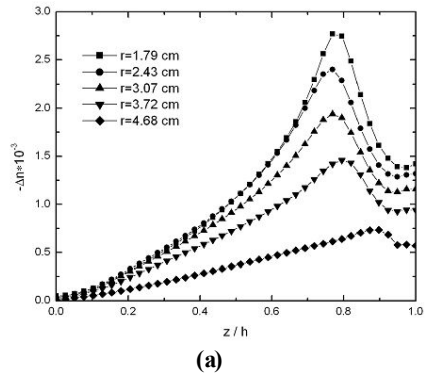


Fig. 5 Predicted gapwise distribution of birefringence at various radial position at the end of filling under (a) reference conditions^[8] and (b) optimized conditions

또한 흥미 있는 사실은 기존 조건의 경우 복굴절의 최대 지점이 $z/h \approx 0.7 \sim 0.8$ 인 반면 최적조건인 경우에는 $z/h \approx 0.8 \sim 0.85$ 사이에서 최대값이 존재함을 볼 수 있다. 그 이유는 최적 공정조건인 경우에는 기존조건에 비하여 사출온도와 금형온도가 높기 때문에 고화층 두께가 감소한데 기인한 것으로 판단된다.

충전과정을 포함한 보압과정까지의 여러 반경위치에서 두께에 따른 복굴절 분포를 비교한 결과는 Fig.6과 같다. 최적조건인 경우에는 기존조건^[8]에 비하여 첫 번째 발생하는 최대값이 약 40% 정도로 작고

위치별 복굴절 차이도 크게 감소된 것을 볼 수 있는데, 이는 사출온도 및 금형온도가 높다는 이유외에 보압유지 시간과 보압의 크기가 상대적으로 작아 추가적인 유동효과가 작게 나타나기 때문이다.

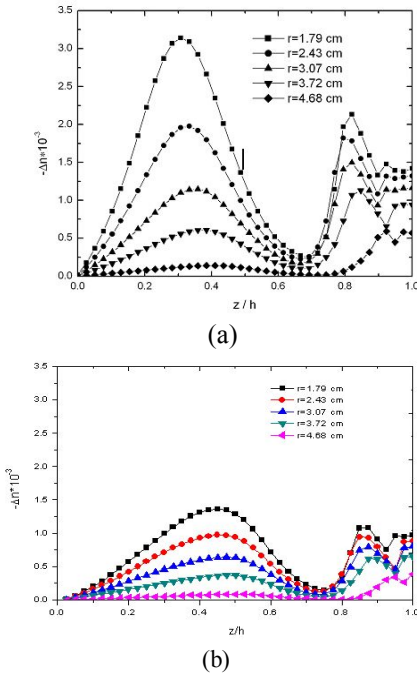


Fig. 6 Predicted gapwise distribution of birefringence at radial position at the end of packing under (a) reference conditions^[8] and (b) optimized conditions

보압이 없는 상태에서 냉각과정까지의 여러 반경 위치에서 두께에 따른 복굴절 분포를 비교한 그래프는 Fig.7과 같다. 충전과정 이후 냉각되면서 유동으로 인한 복굴절은 디스크의 중심부에서 분자배향의 빠른 이완 때문에 0 임을 알 수 있다.

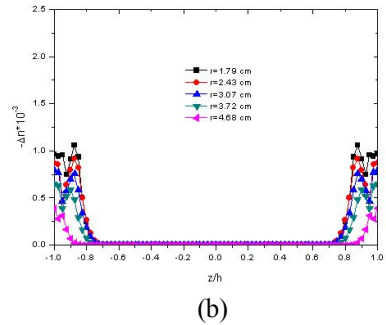
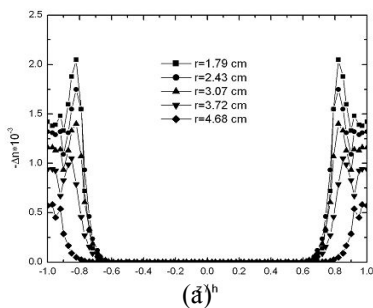


Fig. 7 Predicted gapwise distribution of birefringence at various radial position at the end of cooling with no packing under (a) reference conditions^[8] and (b) optimized conditions

특히 Fig.7에서 최적 조건의 경우 최대 복굴절은 기존조건에 비하여 1/2이하로 감소됨을 볼 수 있다. 그리고 게이트에서 멀어짐에 따라 최대값의 위치는 벽면쪽으로 이동하고 있음을 알 수 있다.

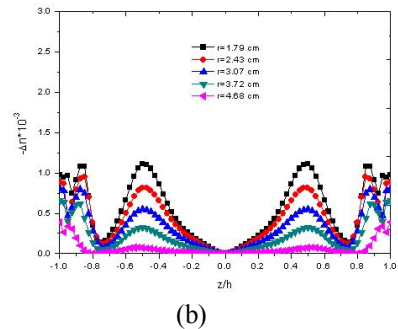
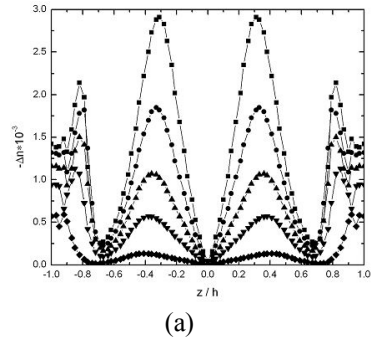


Fig. 8 Predicted gapwise distribution of birefringence at various radial position at the end of cooling with packing under (a) reference conditions^[8] and (b) optimized conditions

보압과정을 포함한 냉각과정까지의 여러 반경위치에서 두께에 따른 복굴절 분포를 비교한 그래프는 Fig.8과 같다. 최적조건을 적용한 경우 복굴절의 최대치는 기존조건에 비하여 1/3 정도로 크게 감소되고 있으며, 위치에 따른 복굴절 차이도 매우 작아 비교적 균일한 복굴절 분포를 보이고 있다. 특히 사출온도 증가, 보압시간 및 보압크기의 감소 영향으로 보압에 의해 발생하는 복굴절 크기와 1차 충전에 의하여 발생하는 크기가 거의 비슷한 값을 나타내고 있음을 볼 수 있다.

4. 결론

사출성형 광디스크에 대한 시뮬레이션을 통하여 복굴절을 계산하였다. 해석결과는 실험에 의한 측정결과와 비교적 잘 일치하였으며, 해석결과를 기초로 실험계획법을 적용하여 사출성형 조건이 복굴절에 미치는 영향을 관찰하고 복굴절의 최소화 및 균일도를 극대화 시킬 수 있는 최적의 사출성형 조건을 도출하였다. 디스크의 복굴절에 영향을 크게 주는 사출성형 조건은 수지온도, 보압시간, 보압크기의 순서임을 알 수 있었다. 실험계획법에 의하여 도출한 성형조건을 적용한 경우 기존조건에 비하여 보압에 의한 복굴절은 1/3, 1차 충전에 의한 복굴절은 1/2 정도 감소하였으며, 위치에 따른 복굴절 차이도 크게 감소하였다.

후기

이 논문은 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(한국연구재단-2010-0002938)

참고문헌

1. Isayev, A. I. and Hieber, C. A., "Toward a viscoelastic modeling of the injection molding of polymers," *Rheol. Acta*, Vol. 19, pp. 168-182, 1980.

2. Isayev, A. I., "Orientation Development in the Injection Molding of Amorphous Polymers," *Polym. Eng. Sci*, Vol. 23, pp. 271-284, 1983.

3. Wimbereger-Friedl R., "Assessment of orientation, stress and density distributions in injection-molded amorphous polymers by optical techniques," *Prog. Polym. Sci*, Vol. 20, pp. 369-401, 1995.

4. Kim, I. H., Park, S. J., Chung, S. T. and Kwon, T. H., "Numerical Modeling of Injection/Compression Molding for Center-Gated Disk Part 1: Injection Molding With Viscoelastic Compressible Fluid Model," *Polym. Eng. Sci*, Vol. 39, pp. 1930-1942, 1999.

5. Lee, Y. B., Kwon, T. H. and Yoon, K., "Numerical Prediction of Residual Stresses and Birefringence in Injection/Compression Molded Center-Gated Disk. Part 1: Basic Modeling and Results for Injection Molding," *Polym. Eng. Sci*, Vol. 42, pp. 2246-2272, 2002.

6. Shyu, G. D., "Birefringence and Residual Stresses in Molded Articles of Amorphous Polymers," Ph.D. Dissertation, The University of Akron, 1993.

7. Shyu, G. D. and Isayev, A. I., "Residual Stresses and Birefringence in Injection Molded Disks," *SPE ANTEC Tech Papers*, Vol. 41, pp. 2911-2917, 1995.

8. Shyu, G. D., Isayev, A. I. and Lee, H. S., "Numerical simulation of flow-induced birefringence in injection molded disk," *Korea-Australia Rheology J*, Vol. 15, pp. 159-166, 2003.

9. Yoon, K., "An Experimental Study on Precision Injection Molding of Center-gated Disks", *Korean J. of Rheol.* Vol. 7, pp. 19-27, 1995.