

# 외부부식에 의해 손상된 배관의 신뢰성평가

진 영 준

충주대학교 항공·기계설계학과  
(2005. 8. 2. 접수 / 2006. 3. 22. 채택)

## Reliability Estimation of Gas Pipelines Damaged by External Corrosion

Yeung-Jun Jin

Department of Aeronautical & Mechanical Design Engineering, Chungju National University

(Received August 2, 2005 / Accepted March 22, 2006)

**Abstract :** It is well known that pipelines have the highest capacity and are the safest and least environmentally disruptive form of transporting oil and gas. However, pipeline damage caused by both internal and external corrosion is a major concern threatening the reliability of oil and gas transportation and the soundness of the pipeline structure. In this study, we estimate the allowable damage by comparing the ASTM B31G code to a modified theory considering diverse detailed corrosive forms. The ASTM B31G code has been developed as the evaluation method for reliability and incident prevention of damaged pipelines based on the amount of loss due to corrosion and the yield strength of materials. Furthermore, we suggest a method for estimating the expected life span of used pipelines by utilizing the reliability method based on major variables such as the depth and length of damage and the corrosion rate affecting the life expectancy of the pipelines.

**Key Words :** pipeline structure, allowable damage, ASTM B31G code, reliability

### 1. 서 론

배관은 가장 안전하고, 높은 용량으로 최소한의 환경적 손상 형태로 가스 및 오일 수송이 가능한 것으로 평가를 받고 있지만, 여러 가지 요인들에 의해 손상된 배관들은 오일 및 가스 운송에 대한 신뢰성과 배관 구조물의 건전성 양쪽을 위협하는 문제<sup>1)</sup>로 나타나고 있다.

매설된 배관은 주로 내부에 작용하는 압력, 배관 주변의 토양이동 그리고 제조 과정에서 용접에 의한 잔류응력 등 여러 형태의 응력에 지배를 받고 있으며, 이와 같은 응력들의 원인으로 인하여 장시간 사용 후 배관에 나타나는 균열들의 특징은, Fig. 1에 나타난 바와 같이, 원주 방향 균열(circumferential crack)과 축 방향을 따라 발생하는 길이 방향 균열(longitudinal crack)로 나타나게 된다.

실제, 사용 중인 배관의 수명을 지배하는 많은 인자들 중에서 부식에 의한 영향이 많은 부분을 차지

하고 있으며, 부식에 의한 손상은 배관의 운송 능력과 안전도가 저하 되는 결과로 나타나고 있다. 현재 이와 관련된 대부분의 연구들은 배관용 재료에 대한 부식응력, 부식피로 등 부식손상 평가에 관련된 연구<sup>1,2)</sup>들이 주종을 이루고 있지만, 안전성 측면에서 균열이 존재하는 배관에 대해 잔존 수명을 예측하기에는 어려움이 따르고 있다.

따라서 본 연구에서는 정기적인 검사시 발견된

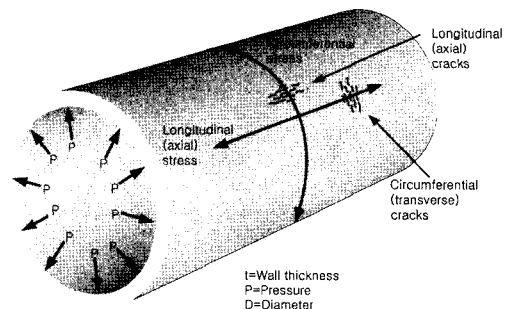


Fig. 1. Types of stress in pipeline.

X-65 배관용 재료의 손상 특성을 살펴보면, 확률론적 방법을 이용하여 손상된 배관의 잔존수명을 예측하여 보았다.

## 2. X-65 배관용 재료의 특성

본 연구에서는, 현재 국내, 외 지하 매설 배관으로 널리 이용되고 있는 API X-65 재료를 대상으로 하였으며, 이는 미국 석유회사(America Petroleum Institute, API)의 재료규격(5L)에 명시된 것으로, 인장실험 결과는 Fig. 2에 나타난 바와 같이, 항복강도와 인장강도는 각각 449.2, 576.9MPa으로, 화학적 성분과 기계적 특성은 Table 1과 2에 각각 나타내었다.

X-65 배관용 재료의 조직 특성을 관찰하기 위해 5% 나이탈(nital)용액을 사용하여 에칭(etching) 후 전자현미경으로 관찰한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. (a)에 나타난 기본적인 조직은 페라이트 특성을 띄고 있으나, 배관의두께 방향에 대한 조직을 나타내고 있는 (b)의 경우는, 제조 과정에서 롤링(rolling)에 의한 슬로우 쿨링(slow cooling)영향으로 밴드구조(band structure)가 형성되어 있는 것을 관찰 할 수 있다.

또한 두께 방향에 대한 재질 변화를 확인하기 위해, 마이크로 비커스 경도기를 사용하여 경도분포를 관찰하였으며, 실험 방법은 재료의 두께 방향을 따라

약 0.5mm씩 이동하면서 측정한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 배관의 두께 내, 외부의 경도치는 약 185 Hv인 것에 비해 중앙부는 최저로 약 172Hv 정도로 경도치가 감소함을 확인하였다. 경도치가 감소하는 영역은 배관 두께의 중앙부에서 폭이 약 6mm정도로 형성되어 있음을 파악할 수 있으며, 제조공정에 의해 배관 내, 외부의 단단한 조직과 중앙부의 소프트한 내부 조직을 가진 샌드위치 구조(sandwich structure)로 이루어지고 있다고 판단된다. Fig. 5에 도식화하여 나타내었으며, 이와 같은 구조는 조직들과의 결합력 저하와 더불어 재료 강도를 저하 시킬 수 있는 요인으로 사료된다.

## 3. X-65 배관의 손상 특성

손상된 배관의 정도 높은 수명예측을 위해서는 손상형태 즉, 손상길이와 깊이가 중요한 변수로 작용되므로 먼저 X-65 배관의 손상크기를 관찰하였다. 부식에 의해 손상된 배관은 표면에서 부식 군(corrosion colony)을 형성하고 있으며, 이와 같은 부식 군들의 크기는 배관 길이 방향으로 약 115mm 정도로 분포되어 있으며, Fig. 6에 관찰결과를 나타내었다.

Table 1. The chemical compositions of API X-65 pipeline(wt%)

Mn	C	P	Cr	Ni	Nb	Ti
1.42	0.11	0.027	0.024	0.037	0.071	0.034

Table 2. The mechanical properties of API X-65 pipeline

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Possion's ratio
449.2	576.9	26.6	0.3

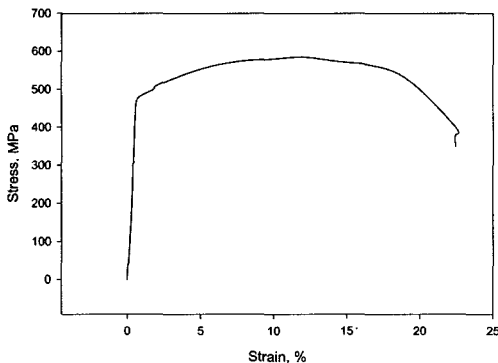
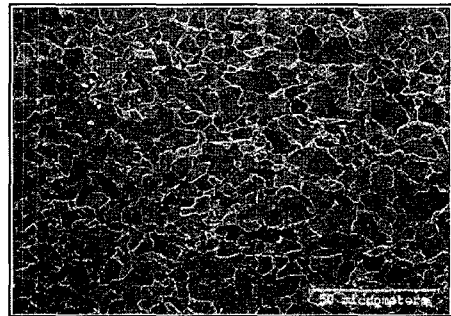
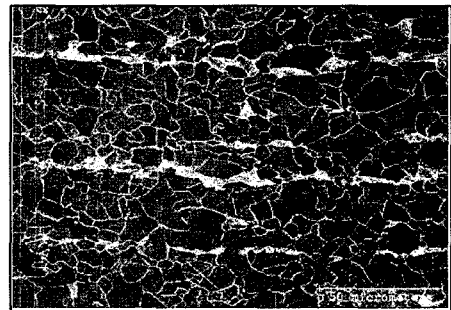


Fig. 2. Tensile curve of API X-65 pipeline.



(a) External surface



(b) Center of the pipe wall

Fig. 3. Microstructure of API X-65 steels.

또한 Fig. 7에서는 균열의 깊이를 측정하기 위해 Fig. 6의 테두리 영역에서 단면을 절취하여 측정 한 결과를 나타내었다. 배관의 표면균열은 깊이 방향으로 진전하면서 일정한 깊이에 도달하게 되면 굴절되는 현상들이 나타나고 있으며, 이와 같이 균열 굴절 진전현상은 내부에 작용하는 후프응력(hoop stress)과 배관 주변 환경과의 공조 작용에 의해 발생하는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 균열 깊이측정을 단순화하기 위해 전체 유효깊이(total effective depth)를 깊이방향 균열로 정하였으며, 균열의 크기는 약 0.5~2.2 mm 정도의 손상 깊이를 나타내고 있다.

#### 4. 신뢰성 평가

본 연구에서는 정기 검사시 검출된 손상 배관의 신뢰성 평가를 수행하고자, 내구성 평가를 위해 개발된 B31G 기준에 확률론적 방법을 적용하여 잔존 수명을 예측하였다.

##### 4.1. ASME B31G 코드

실 배관 파열 실험(burst test)의 데이터와 재료의

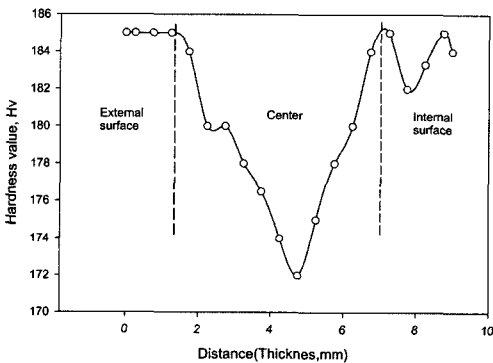


Fig. 4. Hardness distribution across wall thickness.

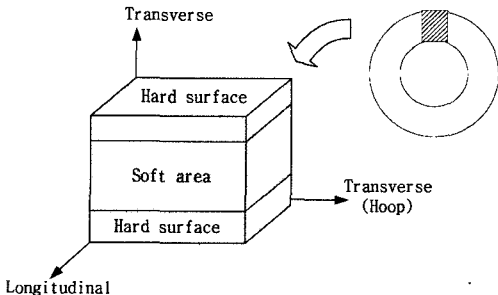


Fig. 5. Schematic of the sandwich structure.

항복강도에 기초를 둔 B31G는 다음 식과 같이 제안된다.

$$S = \bar{S} \left( \frac{1 - \frac{A}{A_0}}{1 - \left(\frac{A}{A_0}\right) M^{-1}} \right) \quad (1)$$

여기서, S = 파단시 후프응력, MPa

$\bar{S}$  = 유동응력, MPa

A = 부식에 의한 손실면적, mm<sup>2</sup>

A<sub>0</sub> = 최초의 단면적, mm<sup>2</sup>

M = 벌정계수 (Folias factor)

식 (1)에서 최대 후프응력은 재료의 항복 강도를 초과할 수 없으며, 또한 부식에 의해 손상된 배관의 면적을 단순화하기 위해, 금속 손실 면적(A)는 Fig. 8에 나타난 바와 같이 실제 부식형상을 포물선으로 유추하여 다음과 같이 표현된다.

$$S_f = 1.1SMYS \left( \frac{1 - \left(\frac{2}{3}\right)\left(\frac{d}{t}\right)}{1 - \left(\frac{2}{3}\right)\left(\frac{d}{t}\right) M^{-1}} \right) \quad (2)$$

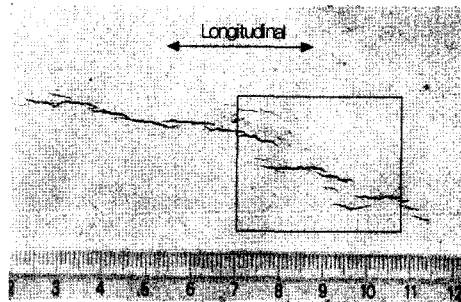


Fig. 6. Image of the longitudinal direction crack on pipe surface.

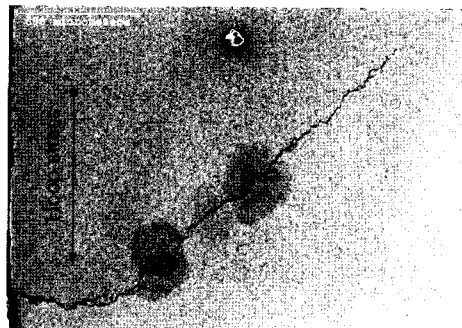


Fig. 7. Image of the depth direction on longitudinal direction.

부식 손상된 배관의 잔존 수명 예측을 위해서 별정계수(folias factor) M은 다음과 같이 가정된다.

$$M = \sqrt{1 + \frac{0.8L^2}{Dt}} \quad (3)$$

여기서, D = 배관의 직경, mm  
 t = 배관의 벽 두께, mm  
 L = 축방향의 손상길이, mm

$$M = \sqrt{1 + 0.8 \left(\frac{L}{D}\right)^2 \left(\frac{D}{t}\right)},$$

$$\sqrt{0.8 \left(\frac{L}{D}\right)^2 \left(\frac{D}{t}\right)} \leq 4 \text{인 경우}$$

$$M = \infty,$$

$$\sqrt{1 + 0.8 \left(\frac{L}{D}\right)^2 \left(\frac{D}{t}\right)} > 4 \text{인 경우} \quad (4)$$

그러나 Kiefner와 Vieth는 B31G 기준은 실제 부식손상형태를 포물선으로 단순하게 적용함에 따라 허용응력이 크게 나타나고 있으며, 이는 배관 설계시 더 큰 허용응력범위를 적용해야하는 과보호 설계에 대한 문제점을 지적하여, 손상형태를 구체화한 별정계수(M)를 다음과 같이 정의 하였다.

$$M = \sqrt{1 + 0.63 \left(\frac{L}{D}\right)^2 \left(\frac{D}{t}\right) - 0.0034 \left(\frac{L}{D}\right)^4 \left(\frac{D}{t}\right)^2}$$

$$\left(\frac{L}{D}\right)^2 \left(\frac{D}{t}\right) \leq 50 \text{인 경우}$$

$$M = 3.3 + 0.032 \left(\frac{L}{D}\right)^2 \left(\frac{D}{t}\right),$$

$$\left(\frac{L}{D}\right)^2 \left(\frac{D}{t}\right) > 50 \text{인 경우} \quad (5)$$

#### 4.2. 안전 지수(safety index)

손상된 배관의 잔존수명은 주변조건에 따라 불확실성을 가지는 변수 즉, 손상크기의 측정, 제조과정, 작동조건 등에 의해 지배를 받고 있으므로 기존의 평가 방법으로는 사용시간을 고려한 배관의 파손수명 평가에는 어려움이 따르고 있다.

따라서 확률론을 고려한 파손함수 Z는 배관의 파손압력(failure pressure) P<sub>f</sub>와 배관의 작용 압력(operating pressure) P<sub>o</sub> 사이에서 결정되며, 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z = P_f - P_o \quad (6)$$

여기서, Z < 0 : 파손, Z ≥ 0 : 안전

작용하중과 저항 파라메타가 정규 분포를 따른다고 가정<sup>6)</sup>하면, 평균값(mean value, μ), 표준편차(standard deviations, σ)과 변동계수(coefficients of variation, COV)는 아래 식과 같이 표현 할 수 있다.

$$\mu_z = \mu_p - \mu_o \quad (7)$$

$$\sigma_z^2 = \sigma_p^2 + \sigma_o^2 \quad (8)$$

파괴확률과 관계되는 부식 손상 PF<sub>defect</sub>는 다음 식으로부터 추정될 수 있으며

$$PF_{defect} = prob(Z \leq 0) = \phi(-\beta) \quad (9)$$

여기서, β는 안전 지수(safety index)<sup>7)</sup>를 나타내고 있으며, 안전지수는 Fig. 9에 나타난바와 같이 손상된 배관의 파손압력 편차로 정의되며, 변동계수와 안전지수는 다음과 같다.

$$COV = \frac{\sigma(z)}{\mu_z} \quad (10)$$

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma(z)} \quad (11)$$

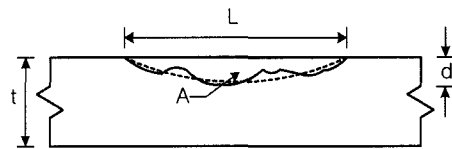


Fig. 8. Metal loss parameters for strength analysis.

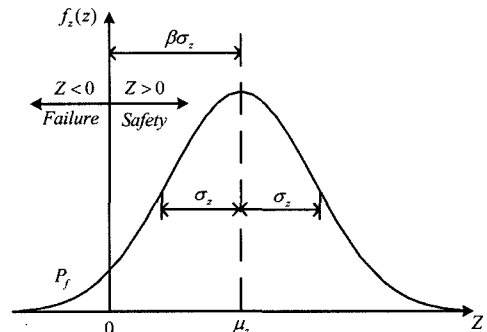


Fig. 9. Distribution of safety margin.

시간에 따른 손상 깊이와 길이 변화는 다음 형식으로 표현된다.

$$d(T) = d_0 + V_r(T - T_0)$$

$$L(T) = L_0 + V_a(T - T_0) \quad (12)$$

아울러 본 연구에서는 손상된 배관의 잔존 수명 평가를 위해 Table 3에 나타난 모델을 선정하였다. 먼저, 손상된 배관의 잔존 수명에 영향을 미치는 중요한 변수 즉, 손상깊이와 깊이에 대해 시간의 변화와 부식률을 고려하여 각각 수정된 식을 바탕으로 추정하였다.

손상깊이와 길이의 변동계수(COV)에 따른 안전지수의 거동을 Fig. 10과 Fig. 11에 각각 나타내었다. Fig. 10에서 T=15인 경우, 손상깊이는 변동계수 변화에 따라 안전지수가 3.7에서 1.9까지 감소하며, 또한 사용시간과 더불어 손상깊이의 증가로 인한 안전지수가 크게 감소됨을 확인할 수 있었다. 손상깊이의 변동계수를 나타내고 있는 Fig. 11에서는 T=15인 경우 안전지수는 3.5에서 2.7로 감소하지만, 손상깊이 보다는 덜 민감하게 감소하고 있다.

Fig. 12는 Fig. 10과 11에서 얻은 시간에 따른 안전지수의 변화를 ASTM B31G 코드와 수정된 식에 대해 비교하여 나타내었다. 동일한 조건의 배관에서 안전성을 살펴보면, 사용시간 T가 20년을 기준으로, 미만인 경우에는 B31G코드의 안전지수가 수정된 식보다 낮게 나타난다. 이는 B31G코드가 허용손상 범위를 더 크게 제시되어 안전성 측면에서 과보호된 것으로 나타나지만, 20년 이상인 경우는 사용시간이 길어질수록 수정된 이론이 오히려 과보호현상을 나타내며, 오히려 B31G 규범에서는 과보호되지 않은 것을 판단 수 있다.

Table 3. Data for the pipeline reliability analysis

Description	Distribution characteristic		
	Type	Mean	COV
Diameter, D	Normal	650mm	0.03
Thickness, t	Normal	9.88mm	0.05
Defect depth, $d_0$	Normal	2.2mm	0.10
Defect length, $L_0$	Normal	115mm	0.05
Pressure, $P_0$	Normal	7.5MPa	0.10
Yield strength	Log-Nor.	449.2MPa	0.07
Tensile strength	Normal	576.9MPa	0.07
Corrosion rate	Normal	0.10mm/yr	0.20

## 5. 결론

본 연구에서는 X-65 배관용 재료의 손상 분석과 잔존 수명을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) X-65 배관용 재료의 조직은 페라이트 특성을

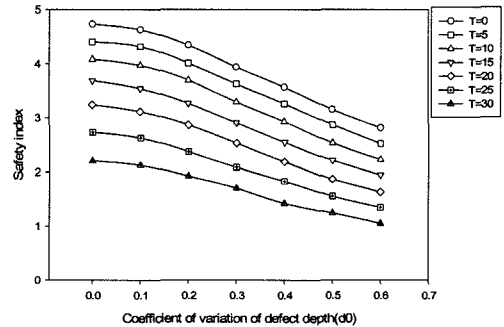


Fig. 10. Evaluation of pipeline failure with time for the defect depth.

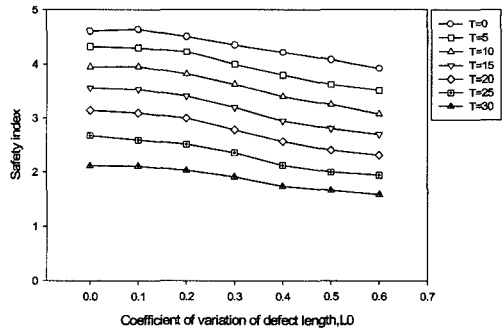


Fig. 11. Evaluation of pipeline failure with time for the defect length.

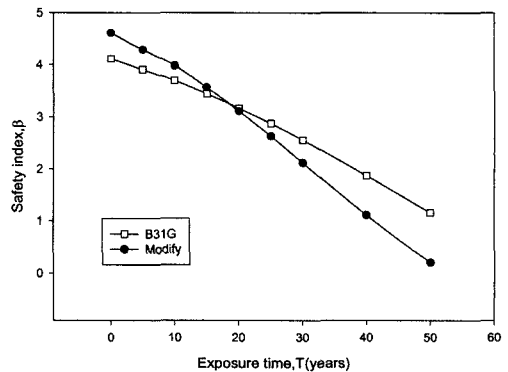


Fig. 12. Comparison of safety index between ASME B31G and Modified.

떨고 있으나, 배관 내, 외부의 단단한 조직과 중앙부의 소프트한 내부조직을 가진 샌드위치 구조로 형성되어 있으며, 이와같은 구조는 조직들과의 결합력·저하와 더불어 재료강도를 저하시킬 수 있는 요인으로 판단된다.

2) 배관의 손상정도는 길이와 깊이는 각각 약 115mm, 2.2mm 정도의 부식손상을 받고 있으며 특히, 표면균열은 깊이 방향으로 진전하면서 내부에 작용하는 후프응력과 배관 주변 환경과의 공조 작용에 의해 굴절되는 현상을 나타내고 있는 것으로 판단된다.

3) 손상된 배관의 파손압력 편차는  $T=15$ 를 기준으로 보면, 손상깊이는 변동계수 변화에 따라 안전지수가 3.7에서 1.9까지 감소하며, 손상깊이는 안전지수가 3.5에서 2.7로 감소한다. 따라서 파손압력은 손상깊이 보다는 깊이에 더 민감하게 나타나고 있다.

4) 손상허용 측면에서 비교한 결과, B31G 코드는 수정된 식 보다 더 많은 과보호를 하고 있으나, 사용시간이 길어지면서 오히려 수정된 식이 과보호 경향을 보이고 있으며, 또한 파손압력의 거동은 초기 손상 형태에 따라 지배를 받는 것으로 나타나고 있다.

**감사의 글 :** 본 연구는 2004학년 충주대학교의 학술연구조성비에 의하여 수행 되었습니다.

## 참고문헌

- 1) H. Russell, "Stress Corrosion Cracking/Materials Performance and Evaluation", Portland Or., pp. 363 ~ 383, 1992.
- 2) R. Denny and N. Brian, "Development of an Alternative Criterion for Residual Strength of Corrosion Defect in Moderate to High Toughness Pipe", Int. Pipe Conference, Vol. 2, pp. 781 ~ 792, 2000.
- 3) 이억섭, 김호중, "외부부식형상이 파이프라인의 파손예측에 미치는 영향", 대한기계학회 논문집, 제23권, 제11호, pp. 2096 ~ 2101, 1999.
- 4) Anon, ASTM B31G-1991, "Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines", ASTM B31 Code for Pressure Piping, The American Society for Mechanical Engineers, 1991.
- 5) F. Kiefner and H. Vieth, "New Method Corrects Criterion for Evaluating Corroded Pipe", Oil gas J., No. 6, pp. 56 ~ 59, 1990.
- 6) M. Ahammed and R. Melchers, "Reliability Estimation of Pressurized Pipelines Subject to Localized Corrosion Defects", Int. J. Pres. Ves. & Piping, Vol. 69, pp. 267 ~ 272, 1996.
- 7) R. Melchers, "Structural Reliability Analysis & Prediction", Ellis Horwood Chichester, pp. 36 ~ 44, 1987.