

◆ 특집 ◆ 철도차량의 주행안전성 평가 기법

철도차량 안전성을 위한 주행 차축의 비파괴 검사주기 평가

Evaluation of Non Destructive Inspection Interval for Running Safety of Railway Axle

권석진^{1,✉}, 이동형¹, 서정원¹, 김재철¹
Seok Jin Kwon^{1,✉}, Dong Hyung Lee¹, Jung Won Seo¹, and Jae Chul Kim¹

¹ 한국철도기술연구원 고속철도연구본부 (High-Speed Railroad Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute)
✉ Corresponding author: sjkwon@krri.re.kr, Tel: +82-31-460-5249

Manuscript received: 2014.7.22 / Revised: 2014.8.13 / Accepted: 2014.8.18

Usually, railway axles are designed for infinite life based on endurance limit of the material and the axle is not fractured immediately when a surface crack initiated. The railway axles have been inspected regularly by NDT such as ultrasonic testing, magnetic testing and eddy current testing and so on. Because the axle failure is profoundly influenced by the probability of missing a fatigue crack during an NDT inspection, it is necessary to evaluate the Non Destructive Interval of railway axle. In the present paper, the Non Destructive Interval of railway axle based on fracture mechanics and finite element analysis was investigated. It was shown that the Non Destructive Interval of railway axle can be evaluated using fracture mechanics approach and extended using NDT which a crack can detect clearly.

Key Words: Railway Axle (철도 차축), Non Destructive Inspection (비파괴 검사주기), Safety Evaluation (안전성 평가)

기호설명

a : crack length(mm)
N : Number of cycles(cycles)
 σ : Applied stress(MPa)
K : Stress Intensity Factor(MPa \sqrt{m})
 N_f : Fatigue Life cycle
C, F, m: Material constant

1. 서론

차축은 장기간 운행을 위해 설계된 안전한 철

도차량의 핵심 주행 장치이며 회전 굽힘 하중 작용 조건하에서 운행된다. 차축의 피로균열성장률의 계산은 주로 유한요소해석에 의한 응력상태, 응력 확대계수와 실험적으로 결정된 피로균열 성장속도에 의하여 계산될 수 있다. 변동하중을 받는 철도차량 차축은 외측 단부 근처에 탑재된 베어링을 통해 차축에 중량이 전달되며 주행하는 동안 회전 굽힘 하중으로 작용하게 된다.

차량운행 동안 추가적인 동하중이 궤도와와의 상호작용 (예를 들어 궤도틀림)으로 인하여 작용하게 된다. 더욱이, 차량이 곡선 주행시 차축의 비대칭적인 하중이 작용하게 되며 바깥쪽 곡선 선로에

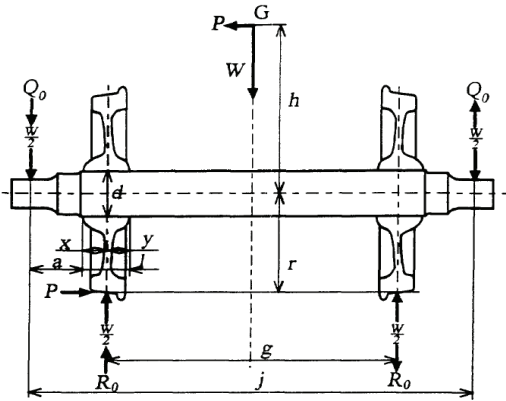


Fig. 1 Load conditions of railway axle in running

더 가까이 위치한 차축 부분은 정반대 차축 부분보다 더 높은 하중을 받게 된다.¹

Fig. 1은 차축에 작용하는 하중을 도식적으로 나타낸 것이다. 이 중 수직하중은 베어링 부위에 차체 및 대차의 하중과 적재물의 하중이 작용하며, 차륜에는 레일의 반력이 작용한다. 구동축의 경우에는 구동장치의 중량에 의한 하중과 토크가 작용한다.

본 연구에서는 철도차량의 핵심 주행장치인 차축의 주행 안전성을 위하여 파괴역학적 접근 방법에 근거한 검사주기 평가에 대하여 연구를 수행하였다.

2. 비파괴 검사주기 산정을 위한 파괴역학적 접근방법

2.1 파괴역학적 설계와 비파괴 검사

일반적으로 철도차축의 안전성은 육안검사를 포함한 정기적인 비파괴검사 NDT(Non-Destructive Test)에 의한 검사를 진행하고 있다. 현재 차축의 검사주기의 설정에 대하여 경험 이외에 파괴역학적 접근이 적절한 방법으로 도입되고 있다.

차축 안전성 평가시에, 안전계수의 결정은 검사 기간 동안 도달될 수 있는 검출의 확률에 의존하기 때문에 어려운 작업이다. 계산되는 이론적 검사 간격의 50%는 종종 실제로 선택되어 사용되기도 한다.²

현재 철도차축설계의 표준은 독일 공학자 교수인 Reuleaux에 의한 것이다. 1861년에 ‘The Constructor: A Hand-Book of Machine Design’을 근간으로 이후 계속적으로 차축 설계기준에 대하여 확대 발간하였다. 최근에 차축 설계지침을 통합하기

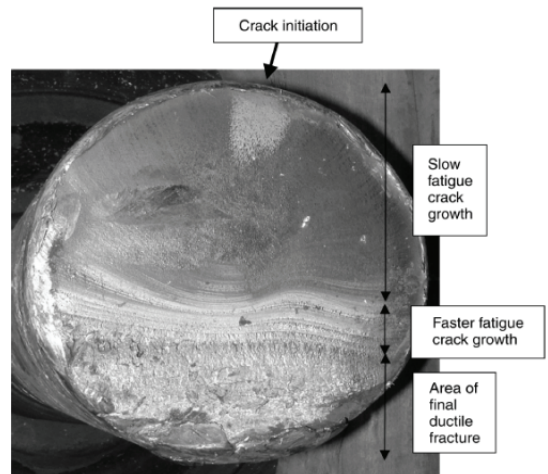


Fig. 2 Fracture surface of railway axle

시작했으며 유럽은 구동차축과 객차차축에 대하여 공통 표준규격인 EN13103(2001년)와 EN13104(2001년)으로 적용하여 관리하기 시작하였다.

철도차축의 피로 파괴 고장은 매우 드물게 발생한다. 영국에서 차축 고장은 연간 1~2회 발생하며 (30년 이상 평균치) 북아메리카에서도 차축의 고장이 계속적으로 나타나고 있다. 영국에서 수많은 레일 파손발생 수와 비교할 때 차축의 고장은 더 낮게 발생한다.³ Fig. 2는 파손된 차축의 표면을 나타낸 것이다. 그림에서 보여진 바와 같이 철도차축은 환봉형태에서 반타원 균열이 발생, 진전하여 임계균열길이에 다다르게 되면 파손되는 현상으로 나타난다.³

차축의 손상발생 통계에서 보고된바 같이 비록 차축이 매우 안전할지라도, 초음파 또는 MT(Magnetic Test)에 의한 비파괴 검사는 차축의 안전성을 위하여 필요하다. 검사주기를 결정하는 방법론은 차축에 발생된 균열이 파괴까지 진전하는 데에 소요되는 시간을 계산하는 것이다. 검사주기는 파괴까지 도달하기 전에 검사되어야 하며 가시화된 균열을 첫 번째 검사주기에서 검출하지 못했을 경우 다음 검사주기에서 검출될 수 있도록 산정되어야 한다.

때때로 검사자가 아주 적은 결함을 가진 차축의 결함을 검출하지 못할 수도 있으며 초음파 검사를 통과한 다수의 차축에서도 인적 오류에 의해 발생 결함의 판정을 간과할 수 있다. 이러한 인적 요소는 안전한 검사 주기를 결정할 때 고려하여야 한다. 게다가, 초음파 탐측자는 차축베어링의 덮개

가 제거된 후 사용되기 때문에 차축베어링의 재조립 실패 가능성과 베어링 하우징의 오염물질 유입에 따른 추가적 위험이 존재하게 된다. 차축 베어링의 고장은 매우 심각하고, 빈번히 차축 파손보다 더 발생한다.

초음파 결함 탐상의 장점은 검사 동안의 절차와 추가적 위험에 대처할 수 있기 때문에 많이 사용된다. 주요 윤축의 전반검사(overhaul)에서 시행하는 MT는 표면결함을 잘 검출할 수 있으나, 전반검사 기간에 차축을 교체하는 경우가 종종 발생한다.

차축의 교체비용은 MT를 수행하는 검수비용과 같을 수 있다. 차축 신뢰성은 매우 높고 변함이 없지만 발생한 소수의 파손에 대하여 안전성 측면에서 검토되어야 할 필요가 있다.

피로 설계는 재료 특성과 작용하중에 의존하며 어떻게 구조물이 작용하중에 응답하는 지와 어떻게 그러한 요소가 운영 동안 관리되는 지에 좌우된다. 만일 결함이 구조물 내에 존재하면 균열의 진전속도의 평가와 수명에 미치는 효과에 대하여 평가할 필요가 있다. 사용수명 동안 구조물에서 결함이 측정될 수 있고 검출될 수 있다는 가정하에 NDT 기술이 사용된다.

NDT의 어떤 기술도 100%의 검출 성공률을 가지고 있지 않고 균열 크기와 기하학적 구조에 따라 실제 검출확률(POD, probability of detection)이 좌우된다.^{4,5} NDT의 목적은 구조물에서의 결함을 검출하는 것이며 결함검출에 따라 결함의 크기와 형상으로 나타낼 수 있어야 한다. 모든 결함이나 균열을 효과적으로 검출할 수 있는 비파괴검사기술은 아직 없다. 작은 균열들은 검출되지 않을 수 있는 높은 확률을 가지고 있지만 그 균열들의 크기가 운영기간동안 점점 증가함에 따라 더 쉽게 검출할 수 있는 크기로 성장하게 된다.

따라서, 검사주기를 결정하기 위한 차축의 파괴역학적 해석에 필요한 입력치는 (a) 하중이력 (b) 균열길이 함수로서 K를 결정하기 위한 응력해석 (c) 재료 데이터(하한계 응력확대계수, 피로균열 진전 속도) (d) NDT의 검출 확률이다. 파괴역학적 방법에 의한 검사주기를 산출하기 위해서는 정기검사 기간내에 검출할 수 있도록 임계균열길이와 피로균열진전속도를 고려하여 결정하여야 한다.^{6,7}

2.2 차축의 검사주기

육안검사와는 별개로 차축은 1950년대 이후 UT와 MT의 비파괴검사 기술을 적용해왔다. 일반

의 신간선 차축은 정기적으로 30,000 km, 450,000 km, 900,000 km 마다 UT와 MT검사를 실시하고 있다. 정기검사 동안 차축은 대차에 조립된 채로 검사하며 대차 검사와 일반 검사 동안 차축은 대차와 차축으로부터 분리하여 검사한다. 모든 차축은 MT로 검사한다. 영국에서는 약 240,000 km에 해당하는 운영 200일 후마다 UT검사를 실시한다. 800 일 마다 검출능이 양호한 MT를 실시한다. 독일에서 MT검사는 UT에 의해 검출된 잠재적인 결함이 있을 때 보조적으로 사용된다.

윤축 및 대차 조립에 따른 시간과 비용문제로 인하여 정기적인 검사주기는 윤축의 전반검사 사이에 수행되는 문제점이 있지만 일반적으로 NDT는 정비기지(depot)에서 실시되기 때문에 차량 운영 손실로 인한 시간 및 비용이 증가하게 된다.

차축 피로균열의 경우 일반적으로 파괴 전에 상당한 크기로 진전하여 탈선사고가 발생할 수 있다. 차축은 NDT 측면에서 매우 작은 결함을 발견하는 것보다 충분히 정확성 있게 큰 균열을 검출하는 것이 더 중요하기 때문에 검사주기의 산정은 안전과 직결된 중요한 문제이다.

3. 수치해석 평가 및 실험

3.1 차축의 균열진전 평가 모델

앞 절에서 언급한 바와 같이 작용하중과 균열진전 데이터를 입력하여 검사주기를 평가하였다. 비파괴 검사주기 산정을 위한 차축의 피로균열진전 수치 시뮬레이션은 AFGROW 균열진전 프로그램을 이용하여 수행하였다.^{8,9}

평가모델은 Fig. 3(a)와 같은 환봉 차축에 반타원 균열이 발생 진전하는 모델을 사용하였으며 Fig. 3(b)와 같은 차륜과의 압입부에 발생하는 균열(fretting fatigue crack)을 대상으로 평가하였다. Fig. 3(a)에서 R은 차축반경, a는 균열 깊이, c는 균열길이를 나타낸다.

피로균열 진전속도에 대한 데이터는 국내에서 운용 중에 있는 차축(SFA60)에서 시편을 채취하여 CT시편으로 피로균열진전속도 실험(ASTM 647)을 실시한 데이터를 평가에 사용하였다.

3.2 피로균열진전 평가 파라미터

차축의 균열진전은 Paris 방정식을 기초로 아래의 식에 의해 평가하였다. 초기균열 길이는 2mm로 하였으며 작용하중은 유한요소해석을 통하여

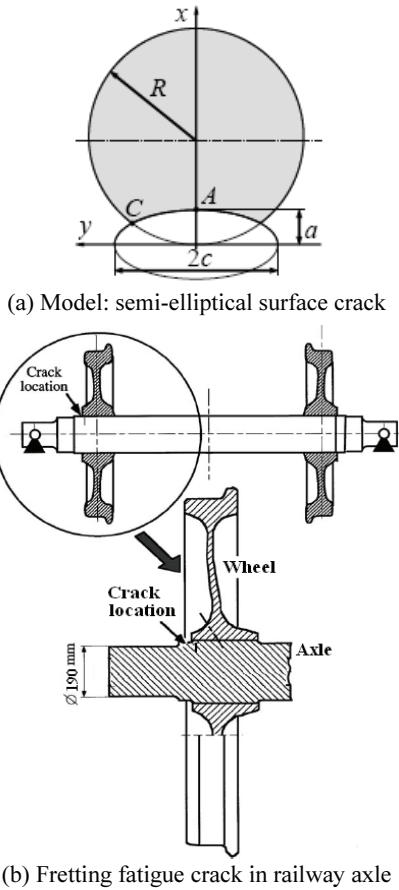


Fig. 3 Simulation model

Table 1 Characteristics of fracture mechanics

Temp [°C]	C [m/cycles]	m [1]	K _{IC} [MPa√m]	ΔK _{th} [MPa√m]	Yield Strength [MPa]	Tensile Strength [MPa]
-40	5.07E-13	3.73	59.41	-	-	-
R.T	1.05E-13	4.36	128.85	8.17	425	662
50	1.65E-13	4.26	120.51	-	-	-

산출된 값을 사용하였다. 최종 파단까지의 균열진전 수명을 다음 식(1)과 (2)로 평가하였다.¹⁰

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \tag{1}$$

$$N_f = \frac{2}{(2-m)CF^m \Delta \sigma^m \pi^2} \left(a_f^{\frac{2-m}{2}} - a_i^{\frac{2-m}{2}} \right) \tag{2}$$

차축의 피로균열진전 수명평가에 사용되는 조

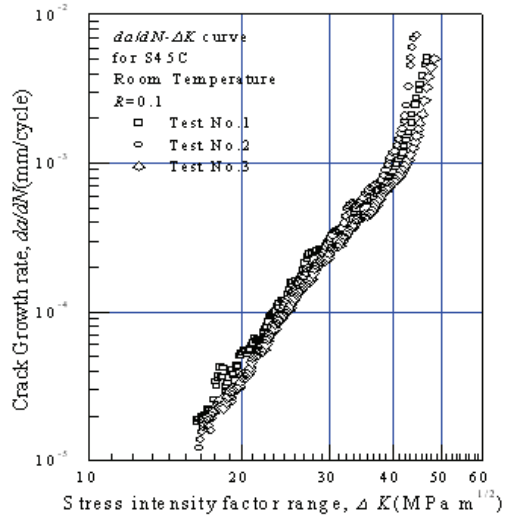


Fig. 4 Crack growth rate of railway axle at R.T

Table 2 Fracture mechanics parameters of railway axles

	C m/cycles	m	K _{IC} MPa√m	ΔK _{th} MPa√m	Yield Strength MPa	Tensile Strength MPa
①	2.00E-12	3.50	-	7.0	360	600
②	4.53E-10	2.09	-	-	370	600
③	2.29E-12	3.50	268.2	10.6	383	648
④	1.65E-11	3.00	81	-	573	736

①AFNOR XC38 ②A1N ③S38C ④25CrMo4

건을 Table 1에 나타내었다. 최종 파단까지의 균열진전은 파괴인성(K_{IC}) 한계치에 도달할 때까지 평가하였으며 사용온도에 따른 균열진전 수명의 영향도 평가하였다.

3.3 차축의 피로균열진전

Table 1과 Fig. 4에 균열이 발생하여 최종파단에 도달하기까지 균열진전 수명을 나타낸다. Fig. 4는 실온에서의 균열진전속도를 나타낸 것이며 각 3번의 시험결과(test1, test2, test3)를 나타낸 것이다.

실온(R.T), -40°C와 +50°C의 온도조건하에서 실험한 균열진전 파라미터를 이용하여 평가한 결과 저온시에는 연성파괴에서 취성파괴로 파괴양식이 변화됨에 따라 파괴인성의 저하와 함께 파단에 이르는 임계균열길이와 파단수명도 다른 사용온도 조건에 비하여 많이 감소되고 있는 것을 알 수 있다.

Table 2는 국외 차축의 균열진전 파라미터를 비교하여 나타낸 것이다.

4. 결과 및 고찰

4.1 차축 압입부의 응력해석

균열진전 해석에 필요한 작용하중은 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5는 차축 압입부에 대한 유한요소 해석의 모델과 작용하는 하중을 Von Mises 응력분포로 나타낸 그림으로서, 압입부 바깥쪽 보스부위에서 인장 및 압축시 최대를 나타낸다.

인장하중 작용시 최대응력은 146 MPa, 압축하중 작용시 464 MPa를 나타낸다. 여기에서 압축하중은 차축의 균열진전에 영향을 미치지 않으므로 인장하중만을 고려하여 균열진전해석에 사용하였다.

4.2 차축의 검사주기 산정

차축의 정기검사에서 최악의 시나리오는 검사 이전에 파손이 발생하는 것이다. 차축이 파손되기 전의 검사 주기에서 정확하게 검사가 수행되어져야 하며 균열크기 대 하중 사이클 또는 주행거리로부터 검사기간에서 균열깊이는 현장에서 사용되고 있는 비파괴검사 기술로 정확하고 신뢰성 있게 검출 가능하여야 한다.

Fig. 6은 차축표면에 2 mm 초기균열이 발생하여 진전하였을 경우, 파단까지 잔여수명을 나타낸 것이다. 여기에서 초기균열 2 mm로 산정한 이유는 현재 차축검사시 적용되고 있는 검사 시스템에서 검출할 수 있는 균열 크기이기 때문이다.

차축의 검사주기는 차륜(860 mm 직경)이 2×10^3 회 주행할 경우 5 km를 주행한 것으로 환산하여 계산하였다. 차축의 검사주기는 균열이 발생 진전하여 파단까지 도달하기 전 검출 가능한 균열 깊이에 따라 산정하였다. Fig. 6에서 알 수 있는 바와 같이 200,000 km의 검사주기를 가질 경우 6.5 mm의 균열 깊이를 검출할 수 있으면 좀 더 보수적으로 240,000 km 검사주기를 산정할 경우에도 5 mm의 균열 깊이를 검출할 수 있다.

이와 같은 균열깊이는 현재 사용되고 있는 UT 및 MT에서 검출 가능한 균열깊이이며 6 mm 이상의 균열깊이를 확실하게 검출할 수 있다면 차축의 파괴 역학적 해석방법에 따른 검사주기를 200,000 km로 연신할 수 있다. 부가적으로 3 mm 이상의 균열 깊이를 정확하게 검출할 수 있는 비파괴 신기술이 개발된다면 이와 같은 검사주기는 더 증가시킬 수 있다. 이와 같은 결과는 피로균열진전 시험 데이터와 환경 조건에 따라 다르게 나타날 수 있지만 실제 차축 제조과정 중 압축잔류

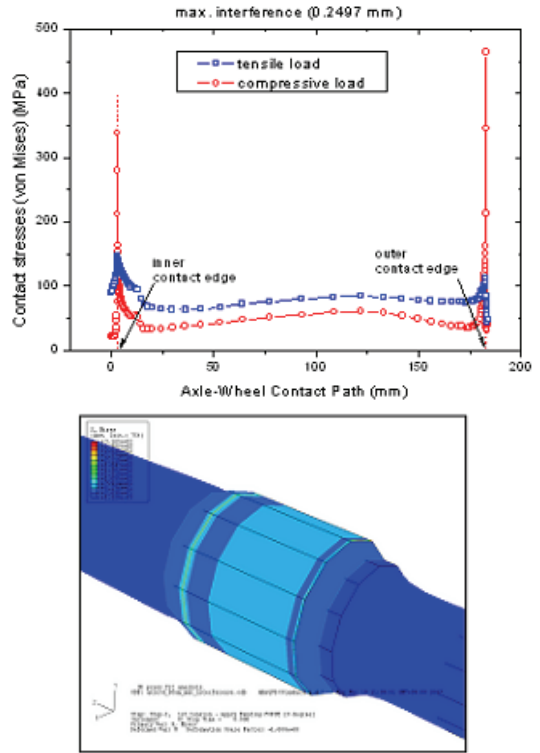


Fig. 5 (a) Applied stress in press-fit axle (b) FEM modeling and stress results

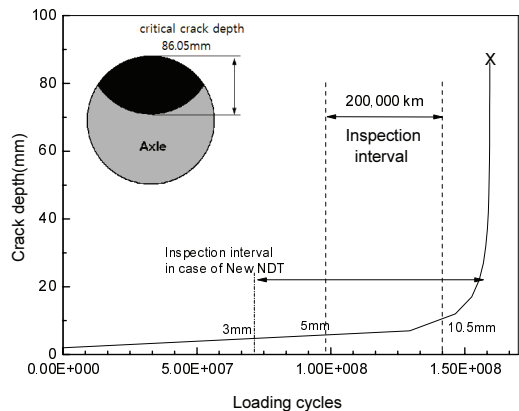


Fig. 6 NDI of railway axle based on fracture mechanics approach

응력이 존재할 경우에 균열진전은 더 더디게 진행될 수 있다. 또한, 베어링 발열에 의한 차축 파손 현상과 같이 설계조건 이외의 과대하중이 작용할 경우에는 손상진전이 급격하게 이루어질 수 있으므로 향후 이에 근거한 균열진전 평가가 필요하다.

5. 결론

파괴역학적 방법에 근거하여 차축의 피로균열 진전속도, 파괴인성과 유한요소해석에 의한 작용하중의 입력값으로 차축 압입부의 피로균열발생 수명과 그에 따른 검사주기를 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 저온 시에는 파괴인성의 저하와 함께 파단에 이르는 임계균열길이와 파단수명도 다른 사용 온도 조건에 비하여 많이 감소되고 있는 것을 알 수 있다.

(2) 실온에서의 차축의 임계균열깊이는 86 mm, 그에 따른 수명은 1.5910×10^8 (429,300 km)이며 -40℃의 사용 온도 조건하에서의 임계균열깊이는 43 mm. 균열진전 수명은 6.76×10^7 (182,520 km) 로 나타났다. 저온 조건하에는 실온 사용조건 보다 50% 감소되는 특성을 나타내고 있었다.

(3) 6 mm 이상의 균열깊이를 비파괴검사 기술로 확실하게 검출할 수 있다면 차축의 파괴 역학적 해석방법에 따른 검사주기를 200,000 km로 증가시킬 수 있다.

REFERENCES

- Ishizuka, H., "Probability of Improvement in Routine Inspection Work of Shinkansen Vehicle Axles," Quarterly Report of RTRI, Vol. 40, No. 2, pp. 70-73, 1999.
- Zerbst, U., Mädler, K., and Hintze, H., "Fracture Mechanics in Railway Applications- An Overview," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 72, No. 2, pp. 163-194, 2005.
- Zerbst, U., Beretta, S., Köhler, G., Lawton, A., Vormwald, M., et al., "Safe Life and Damage Tolerance Aspects of Railway Axles-A Review," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 98, pp. 214-271, 2013.
- Procedure, S. I. A., "Final Revision, EU-Project BE 95-1462," Brite-Euram Programme, 1999.
- Faraham, B., Bockrath, G., and Glassco, J., "Fatigue and Fracture Mechanics of High Risk Parts," Springer, 1997.
- Energy, B., "Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects," 6th Ed., Vol. 4, pp. 155-169, 2001.
- British Standard Institution, "BS 7910: 1999, Guide on Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures," 1999.
- Forman, R., Shivakumar, V., Mettu, S., and Newman, J., "Fatigue Crack Growth Computer Program NASGRO Version 3.0," Reference Manual, NASA JSC-22267B, 2000.
- Newman Jr, J. C., "A Crack-Closure Model for Predicting Fatigue Crack Growth under Aircraft Spectrum Loading," ASTM STP, Vol. 748, pp. 53-84, 1981.
- Newman Jr, J. C., "Fastran-II: A Fatigue Crack Growth Structural Analysis Program," NASA STI/Recon Technical Report N, Vol. 92, Paper No. 30964, 1992.