

MOSS형 LNG탱크의 설계법에 관한 연구

김종호* · 길병래*

A Study on the Design Procedure of MOSS Type LNG Tank

Jong-Ho, Kim, Byung-Lae, Kil**

< 목 차 >

Abstracts

- | | |
|-------------|----------------------|
| 1. 서론 | 3.2 피로파괴해석 |
| 2. 구조해석 | 4. 관통피로균열을 통한 누설량 계산 |
| 3. 파괴역학적 해석 | 5. 결 론 |
| 3.1 피로수명해석 | 참고문헌 |

Keywords : Liquefied Natural Gas(액화천연가스), Modelling(모델링), FEM(유한요소법), Leak Before Break(파단 전 누설), Fatigue Fracture(피로파괴), Long Term Distribution(장기분포), Load Spectra(하중 빈도분포), Fatigue Crack Propagation Rate(피로균열전파속도), Brittle Fracture(취성파괴)

Abstracts

This paper deals with the design procedure of MOSS type LNG tank classified as an independent type B LNG tank system on the basis of the stress analysis by 3 dimension FEM and the fatigue and fracture mechanic analyses of the tank system. The 3 dimension modelling contains the tank system together its support and fixture taking into account proper combinations of the internal and external pressures, dynamic loads due to the motion of the ship, the thermal and sloshing loads, the loads corresponding to ship deflection, etc. The fatigue and fracture mechanic analyses of the tank system contain the computer simulations of the cumulative effect and the crack propagation rate using long

*한국해양대학교 해사대학

term distribution calculation of dynamic fatigue load based on the operating life of the ship (normally taken to correspond to 10^8 wave encounters) in order to determine the suitability of the tank system.

1. 서 론

오늘날 날로 심각해지는 대기오염에 대한 대책의 일환으로 깨끗한 에너지인 액화천연가스 (Liquefied Natural Gas, 이하 LNG)에 대한 수요는 점차 증가되고 있다.

LNG는 대기압상태에서 -162°C 의 온도를 가지고 있으므로 이 화물의 운반설비 또는 저장설비에 누설이 발생하면 설비의 취성파괴로 인한 엄청난 피해를 초래할 위험성이 있다. 따라서 이러한 LNG를 운반하는 선박 또는 저장설비의 설계 및 건조시에는 정적하중, 파랑에 의한 동적하중, 지진, 태풍 등을 고려하는 고도의 설계기술과 공정관리가 요구되고 있다.

특히 LNG를 산지에서 수요지까지 대량으로 운반하는 주 운반수단의 하나인 LNG운반선은 지금까지 건조척수가 그다지 많지 않기 때문에 안전성을 확보하면서 동시에 경제적 운항을 하기 위해서는 고도의 설계기술과 건조기술 및 운항기술이 요구되는 분야이다.

현재 LNG운반선의 화물격납설비(이하 LNG탱크)는 그 형태, 운송화물의 온도, 설계증기압력, 화물탱크와 선체와의 지지구조 등에 따라 분류되고 있으며 지난 수 십년간 건조 실적은 MOSS형 탱크와 멤브레인형 탱크가 대부분을 차지하고 있다.

LNG탱크의 설계단계에서 MOSS형 LNG탱크와 멤브레인형 LNG탱크는 그 구조, 방열방식, 탱크용 재료 등에서 서로 차이가 있지만 보다 근본적인 차이는 LNG탱크의 누설에 대비한 2차 방벽^{1),2)}의 유무라고 할 수 있다. 2차 방벽은 1차 방벽에 해당하는 LNG탱크를 감싸는 또 하나의 탱크이며 관습상 2차 방벽으로 통용되고 있다. 멤브레인형 LNG탱크에서는 2차 방벽을 설치하고 있는 반면에 MOSS형 LNG탱크에서는 탱크의 하부에 Drip pan 또는 부분 2차 방벽으로 통용되는 약 20m^3 용량의 상자를 설치하고 이것을 2차 방벽의 대체 구조로 설계하고 있다.

이와 같이 MOSS형 LNG탱크에서는 부분2차 방벽을 설치하는 대신에 설계단계에서 엄격한 구조해석과 피로균열전파해석을 파괴역학적으로 수행하도록 규정하고 있다. 이러한 설계개념은 종래 항공기, 원자로 등에 주로 적용되어 왔던 것으로서 손상허용설계(Damage Tolerance Design)³⁾ 및 파단전 누설(Leak Before Break)⁴⁾의 개념을 LNG탱크의 설계에 반영한 것이라고 할 수 있다.

이상의 배경에서 LNG탱크의 파괴안전성을 설계단계에서 확보하기 위해서 필요한 요소 설계기술인 LNG탱크의 3차원 구조해석, 피로파괴해석, 관통균열의 개구량 해석 등을 중심으로 MOSS형 LNG탱크의 설계법에 대하여 기술하고자 한다.

2. 구조해석

설계의 첫단계는 선박의 예상 설계수명동안 가해지는 내압, 외압, 동하중, 열하중, 슬로싱하중 등을 조합한 구조해석이다. 구조해석의 범위는 선체구조, 탱크 및 탱크 지지구조를 포함하며 탱크전체에

대해서는 축대칭 3차원 유한요소법(FEM)으로 해석하고, 각 부재의 결합부 및 응력집중부에 대해서는 2차원 또는 3차원 유한요소 해석을 한다. 또 탱크 및 지지구조에 대한 응력해석 시에는 선체와 탱크와의 상호반반력을 고려하여야 한다. 구조해석에 사용하는 컴퓨터 프로그램은 Nastran, Ansis 등이 널리 사용되고 있으며 이를 통하여 계산된 응력값은 피로파괴해석 시에 사용된다.

3. 파괴역학적 해석

MOSS형 LNG탱크는 설계단계에서 LNG탱크와 선체구조에 대한 상세한 구조해석과 아래 사항에 대한 파괴역학적 해석을 통하여 LNG탱크의 안전성을 보장할 수 있는 있으므로 2차 방벽대신에 부분 2차 방벽만을 설치하는 것이 가능하다.

또 이와 같은 설계개념을 도식화하면 Fig. 1과 같다.

1) 탱크의 제작당시 비파괴검사를 통하여 발견되지 못한 결함은 탱크의 예상 설계수명동안 탱크 벽을 관통하는 균열로 성장하지 않는다.

2) 탱크 벽을 관통하는 균열이 발생하더라도 이 관통균열은 대형 취성파괴의 형태로 성장하지 않는다. 또 이 관통균열을 통하여 누설되는 LNG의 량은 가스검지기가 조기에 검지할 수 있는 충분한 량이다.

3) 관통균열을 통하여 15일 동안 누설되는 LNG의 량은 부분 2차 방벽의 용량 보다 적다. 따라서 선박은 누설되는 LNG를 부분 2차방벽에 안전하게 저장 하면서 수리시까지 항해할 수 있다.

3.1 피로수명해석

선박의 예상 설계수명동안 반복적으로 작용하는 변동응력에 의한 피로수명을 Miner의 선형누적 손상계수(Linear Cumulative Damage Factor, Cw)를 사용하여 평가하며 이 값은 0.5이하로 되어야 한다. $Cw = \sum ni/Ni$ 를 구하는 데에 사용하는 Ni (S-N곡선에서 각 응력레벨에서의 파단까지의 반복회수)는 사용재료에 대한 응력비(Stress Ratio, $R = \min./\max.$)를 고려하여 피로시험과 해석을 통하여 결정한다. 하중빈도분포(S_i 와 ni)는 선박의 예상 설계수명을 기준으로 파도와 조우빈도를 10^8 회로 하는 장기 빈도분포를 계산한 아래 식(1)과 (2)를 사용한다.

$$S_i = (17 - 2 \cdot i) S_{max} / 16 \quad (1)$$

$$n_i = 0.9 \times 10^i \quad (2)$$

단, $i = 1, 2, 3, \dots, 8$

S_{max} : 하중의 최대기대치에 의하여 발생하는 응력

3.2 피로파괴해석

탱크의 제작당시 비파괴검사를 통하여 발견되지 못한 표면결함이 예상 설계수명동안 탱크 벽을 관통하는 피로균열로 성장할 때의 피로균열 전파속도(da/dN , 부가응력의 회수에 대한 피로균열의 성장 길이)는 응력비 R과 균열전파하한계범위(ΔK_{th})를 고려하여 $da/dN = C(\Delta K^m - \Delta K_{th}^m)$ 과 같은

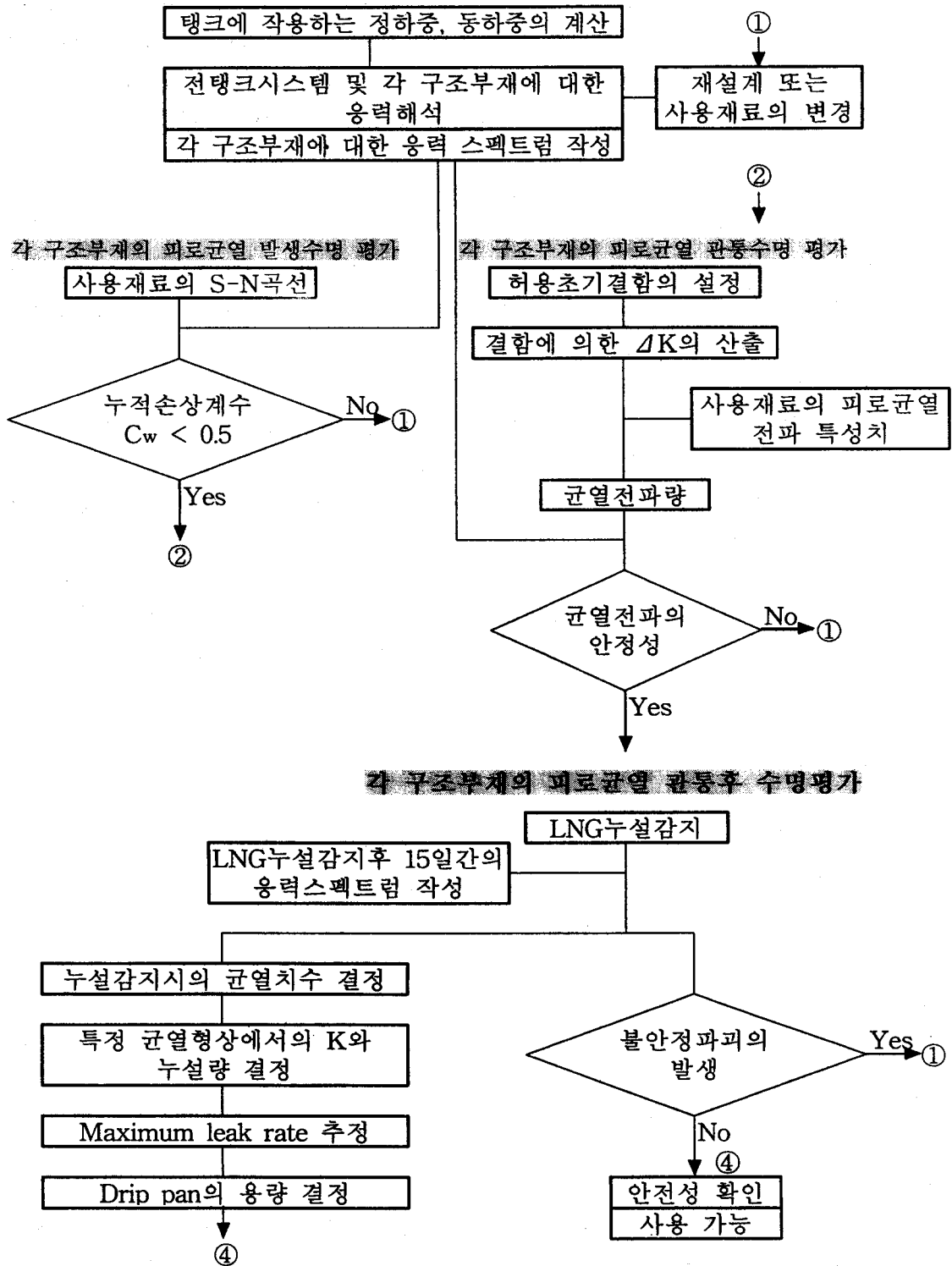


Fig. 1 The design procedure of tank system

형태의 모델을 개발하여 사용한다. 또 응력집중이 존재하는 표면결함의 응력확대계수범위(ΔK)는 Newman-Raju^{5)~7)}와 H.L.J. Pang⁸⁾이 제안한 응력확대계수식을 수정하여 사용한다. 이상을 통하여 얻어진 결과를 이용하여 초기 표면결함이 예상 설계 수명 동안 탱크 벽을 관통하는 피로균열로 성장하는지의 여부를 컴퓨터 시뮬레이션을 의하여 확인한다.

4. 관통피로균열을 통한 누설량 계산

탱크 표면에 존재하던 초기결함이 Fig. 2와 같이 탱크 벽을 관통하는 피로균열로 성장했을 때 이 관통균열의 개구변위(Crack Opening Displacement, COD, δ)^{9)~13)}는 Fig. 3과 같은 COD 모델을 사용하여 평가한다. 즉 멤브레인응력과 굽힘응력을 함께 고려하여 관통균열의 발생측과 관통측의 COD는 아래 식(3)과 식(4)를 사용하여 계산한다.

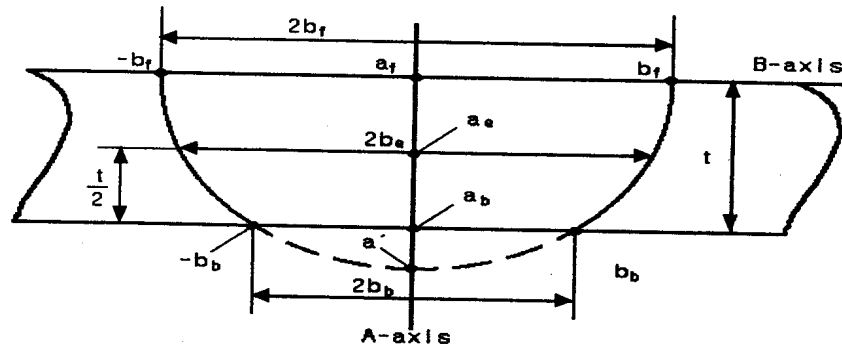


Fig. 2 Model for a through crack

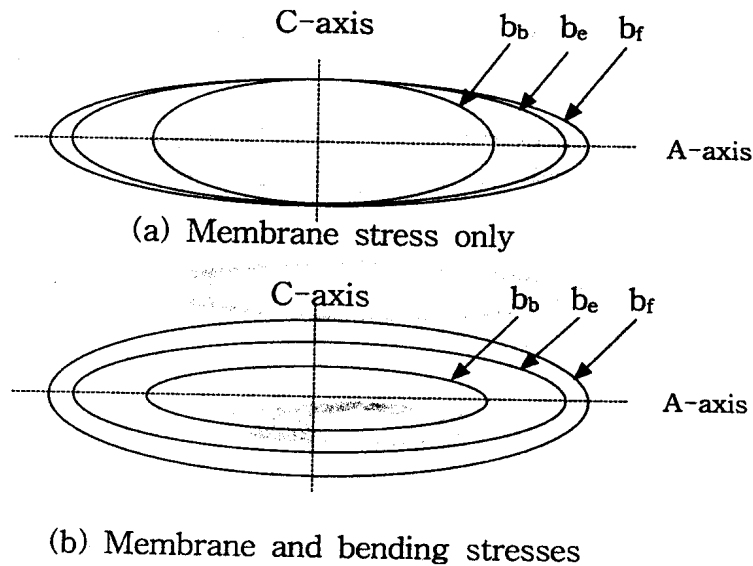


Fig. 3 COD Model of a through crack

$$\delta_f = \delta_e = \delta_b, \text{ 멤브레인 응력 } S_m > 0, \text{ 굽힘 응력 } S_b = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\delta_f}{(S_{eq})_f} = \frac{\delta_e}{(S_{eq})_e} = \frac{\delta_b}{(S_{eq})_b}, \text{ 멤브레인 응력 } S_m > 0, \text{ 굽힘 응력 } S_b \neq 0 \quad (4)$$

단, $\delta_f, \delta_e, \delta_b$ 는 균열의 개구변위 (Crack Opening Displacement)

Fig. 4(a)~(c)는 125,000m³ MOSS형 LNG탱크의 남반부를 구성하는 두께 40 mm 탱크 벽에 관통 균열이 발생하는 경우 시간의 경과에 따라 관통균열의 균열길이, 개구면적이 변화하는 것을 시뮬레이션하고 그 결과를 정리한 것이다. 이때 탱크 벽에는 멤브레인응력 $4.0 \pm 3.63 \text{ kg/mm}^2$, 굽힘응력

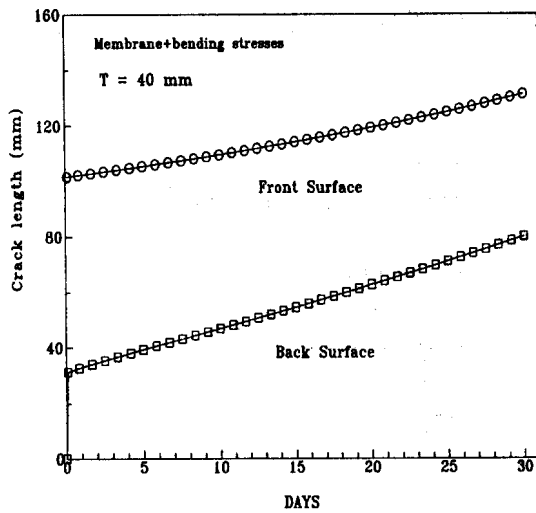


Fig. 4 (a) Crack length on front and back surfaces

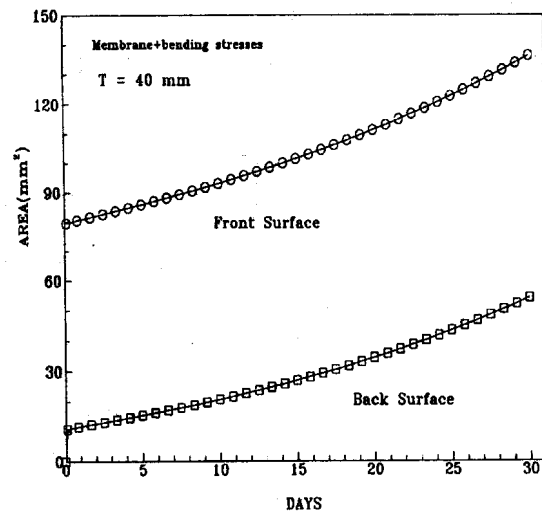


Fig. 4 (b) Crack opening area in front and back surfaces

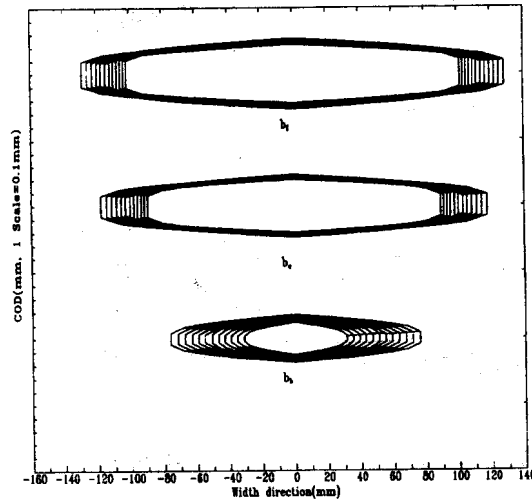


Fig. 4 (c) Crack opening displacement of through cracks

$2.0 \pm 3.0 \text{ kg/mm}^2$ 이 함께 작용하였다. Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)는 피로균열의 발생측인 탱크의 바깥쪽(b_r)과 탱크의 안쪽(b_b)의 균열길이와 개구면적을 선박의 항해 일수에 따라 나타낸 것이다. 특히 Fig. 4(c)는 탱크의 바깥쪽(b_r), 안쪽(b_b), 탱크벽의 가운데(be)에서 관통균열의 개구변위와 길이를 시뮬레이션 한 것으로 관통균열을 통하여 누설되는 LNG의 량을 계산하는 데에 직접적으로 이용된다.

관통균열을 통하여 누설되는 LNG의 량은 아래의 식(5)를 사용하여 계산하고 15일 동안 누설되는 LNG의 량은 부분 2차 방벽의 용량보다 적은 것을 보증하여야 한다.

$$Q = a_L \cdot A \sqrt{2g \left(h + \frac{P_1 - P_2}{\gamma} \right)} \quad (5)$$

단, Q : LNG누설량, L : 유량계수, A : 개구단면적, γ : 액비중, P₁, P₂ : 내압 및 외압, h : 액의 높이

5. 결 론

지난 몇 년간 국내 조선소는 다수의 LNG선박을 건조하였으나 핵심 기술 중의 하나인 3차원 구조 해석, 피로강도 해석 및 피로균열 전파해석 등에 대한 설계기술은 초보적인 단계에 있는 것으로 평가되고 있다. 본 연구에서는 MOSS형 LNG탱크를 대상으로 설계단계에서 핵심기술에 해당하는 부분에 대한 설계기법을 포괄적으로 고찰하였다.

본 연구를 통하여 개발된 탱크설계의 흐름도, 평균응력의 변화를 고려한 균열 발생수명 평가법, 여러 하중 조건에서 초기 결함의 크기에 따른 탱크 벽의 관통형상, 관통균열의 전파거동을 시뮬레이션 하는 기법 등은 설계단계에서 유용하게 이용될 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

- 1) (사)한국선급 : 선급 및 강선규칙 제 7편 5장 액화가스산적운반선, (사)한국선급(1993), pp.41~42
- 2) IMO : Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk, IMO(1975)
- 3) Air Force Aeronautical System Division : Airplane Damage Tolernace Requirements, MIL - A - 83444, Air Force Aeronautical System Division(1974)
- 4) 失川元基 : 破壊力學-理論·解析から工學的應用まで, 培風館(1988), pp.140~175
- 5) J.C.Newman, L.S.Raju : Analysis of surface cracks in finite plates under tension or bending loads, NASA Technical Paper 1578(1979), pp.10~13
- 6) J.C.Newman, L.S.Raju : An Empirical Stress Intensity Factor Equation for the Surface Crack, Engineering Fracture Mechanics(1981), Vol. 15, No.1 - 2, pp.185~192
- 7) J.C.Newman, L.S.Raju : Stress Intensity Factor Equations for Cracks in Three - Dimensional Finite Bodies, American Society for Testing and Materials(1983), pp.249~250
- 8) H.L.J.Pang : A Review of Stress Intensity Factors for Semi - elliptical Surface Crack in Plate and Fillet Welded Joint, The Welding Institute(1990), pp.5~13
- 9) 藤住 外 4名 : 表面龜裂貫通舉動 -第1報 引張荷重を受ける場合, 日本機械學會論文集(1986), 제52권 제483호, pp.2463~2468
- 10) J.R.Rice, : Elastic - Plastic Analysis of Growing Cracks, ASTM STP 700, American Society for Testing and

Materials(1980), pp. 189 - 221

- 11) H.A.Ernest : Material and Instability Beyond J - Controlled Crack Growth, ASTM STP 803, American Society for Testing and Materials(1983), pp.191~213
- 12) E1152 - 87 : Standard Test Method for Determining J - R Curves. American Society for Testing and Materials(1987)
- 13) E 813 - 87 : Standard Test Method for J_{Ic} , a Measure of Fracture Toughness, American Society for Testing and Materials(1987)