

## 가스배관의 재질등급 및 충격에너지에 따른 연속연성파괴 거동분석

정효태 · <sup>†</sup>최병학 · 이영진 · 이정화 · 홍기용\* · 백종현\*\* · 김우식\*\*

강릉원주대학교 신소재금속과, \*한국해양과학기술원 선박해양플랜트연구소 해양플랜트연구부,

\*\*한국가스공사 연구개발원

(2012년 7월 19일 투고, 2012년 8월 30일 수정, 2012년 10월 20일 채택)

## Dynamic Ductile Fracture Analysis of Natural Gas Pipelines on the Basis of Material Grade and Charpy V-Notch Impact Energy

Hyo-Tae Jeong · <sup>†</sup>Byung-Hak Choe · Young-Jin Lee · Jeong-Hwa Lee

Key-Yong Hong\* · Jong-Hyeon Baek\*\* · Woo-Sik Kim\*\*

Department of Metal & Materials Engineering, Kangnung National University, Kangnung,  
210-702, KOREA

\*Ocean Plant Research Division, Maritime and Ocean Engineering Research Institute,  
Korea Institute of Ocean Science & Technology, Daejeon, 305-343, Korea

\*\*Korea Gas R&D Division, Anshan, 638-1, KOREA

(Received July 19, 2012; Revised August 30, 2012; Accepted October 20, 2012)

### 요약

가스배관 종류 및 사용 환경에 따른 거시적 파괴거동 평가해석을 위하여 1) 가스배관의 특성 및 환경에 따른 파괴거동 변화의 컴퓨터해석과 2) Battelle Two-Curve Method를 이용한 연속연성파괴거동 평가해석을 수행하였다. 새로운 사용환경의 가스 및 오일의 배관계획이 진행되면서, 개선된 성능, 신뢰성, 그리고 경제성을 위한 재료가 요구되고 있다. 여기서 제시되는 연속연성파괴 해석은 높은 배관압력, 큰 배관직경과 같은 배관 특성의 변화와 천연 가스 및 같이 다양한 성분을 함유하는 가스, 수소가스, 액화 이산화탄소 등과 같이 다양한 수송매체의 변화를 수용하기 위한 배관시스템에서 고려하여야 할 중요한 기술요소이다.

**Abstract** - To analyze the macroscopic fracture behavior as functions of the gas pipeline grade and the working environment, following analyses have been accomplished. Computer analysis of changes in fracture behaviors according to the working conditions of pipelines and Analysis of dynamic ductile fracture behaviors using the Battelle Two Curve Method. Recently, an economic and reliable pipe materials with improved performance has been needed for the severe pipeline working condition and new transporting materials. As the grade of pipe materials became higher, the possibility of dynamic ductile fracture could be increased. Therefore, the understanding of the technology to control and arrest the dynamic ductile fracture is important.

**Key words** : dynamic ductile fracture

<sup>†</sup>교신저자:cbh@gwnu.ac.kr

## I. 서론

연속연성파괴 (Dynamic Ductile Fracture, DDF)란 가스배관과 같이 배관 내부 사용압력 (p)이 존재하는 경우, 배관 파열 시 내부압력 (P)의 감소속도 ( $V_p$ )와 파열진전속도( $V_f$ ) 관계에 의해 파열이 연속진전되는 형태를 일컫는다. 즉 DDF는 Fig. 1에서 보여지는 가스배관의 파손사례와 같이  $V_f > V_p$ 인 경우에 배관 파열위치로부터 양방향으로  $V_f = V_p$ 일 때까지 파열이 진전하는 파괴 형태이며, 거의 음속의 속도로 진전하는 연성파단 이다[1,2].

DDF가 보고 된 것은 1970년대인데 가스 배관 파열이 길이방향으로 수십m에서 수백m 범위에 이르는 대형사고를 동반하였다. 이에 따라 영국, 미국, 캐나다, 일본 등 가스배관기술 선진국에서는 DDF를 방지할 코드 마련을 위해 공동연구를 수행하였고, 결국 DDF 기준 코드식 과 재질 설계 기준이 마련되어 공동사용 중이다[3~7].

본 연구에서는 이미 기술선진국에서는 가스 배관 등 압력 배관에 중요한 설계기준으로 사용 되고 있지만, 국내에서는 기술 연구가 거의 이루어지지 않은 DDF를 소개하고 국내 가스배관 재질등급 및 물성을 대입하여 DDF 발생 가능성을 파악하고자 한다.

DDF는 앞서 밝힌 바와 같이 압력 감소속 도( $V_p$ )와 파열진전속도( $V_f$ )의 관계로 결정되는데, 여기에는 재질등급의 항복강도, 탄성계수가 관 련되고 충격에너지 값(Charpy V-Notched) 및 DWTT값 (Drop Weight Tearing Test)이 적용된다. 또한 가스 종류에 따른 음속 값이 주어지며 이 러한 물성에 의해 DDF를 방지하는 배관두께, 배관직경 및 가스 사용압력이 결정되는 것이다[5,6].

DDF는 현재 지상 천연가스배관 설계에 유효하게 사용되는 설계 기준이며, 앞으로는 C CS(CO<sub>2</sub> Captured System) 및 해저가스배관 등 설계에도 적용되어야 하는 중요 기준이 될 것 이다. DDF의 사고는 그 범위가 수 km에 이를 수 있기에(Fig. 1), 국내 가스배관 설계기준에는 아직 적용되어 있지 않지만 곧



Fig. 1. Case of DDF accidents [1].

반드시 적용시키고 운용해야 할 매우 중대한 설계코드 인 것으로 판단된다.

## II. 실험방법

연속연성파괴(Dynamic Ductile Fracture, 이하 DDF) 기준 관계식에 포함되는 재질 특성값은 항복강도(유동응력), 탄성계수 및 충격흡수 에너지(Charpy V-notch impact energy 이하 CVN)이다. 또한 가스배관 반경 및 두께의 직경과 가스 배관 사용조건인 사용압력과 사용가스에서의 음속 및 배관이 문힌 모양의 backfill계수가 적용된다.

본 연구에서는 X65 및 X70 Grade의 가스 배관에 대한 DDF를 파악하고자 한다. X65 및 X70배관의 각 항복강도, 탄성계수와 CVN 및 각 배관의 직경이 변수로 대입된다. 그런데 두 종류 가스배관에 있어서 현장에 설치 된 모든 조건을 망라하여 DDF관정을 마련하는 데, 여기에는 배관의 용접부/모재, 배관방향 (Long, 45도, Trans), 사용온도(-120℃ ~40℃), 용접 종류 (자동 및 수동), 연간밴드(인장, 압축, 미 변형) 조건에서 얻어지는 CVN값이 주요변수로 적용 된다.

## III. 이론적 배경

Battelle Two-Curve Method(TCM)란 가스 배관의 파단속도(Fracture velocity,  $V_f$ )와 사용가스 압력의 감압속도(Decompression Velocity,  $V_p$ )를 비교하여, DDF 유무를 판정하는 기준식이다.

즉 가스 사용 압력(p)에서  $V_f > V_p$ 인 경우 균열 첨단은 항상 동일한 응력상태이며 연속 적인 파단이 야기된다[1,2]. Fig. 2의 DDF에서와 같이  $V_f = V_p$ 를 이루는 지점이 배관이 가져야 하는 최소의 재질인성이 된다. 이러한 인성 값은 충격에너지(CVN) 또는 DWTT(Drop weight Tearing test)값으로 정해진다.

## IV. 결과 및 고찰

Battelle Two-Curve Method(TCM)의 배관 파단속도( $V_f$ )와 가스감압속도( $V_p$ )는 다음 두 식 으로 규정된다.

$$\Rightarrow V_f = \left[ \frac{C_B \sigma_f}{\sqrt{CVN}} \right] \left[ \frac{\sigma_d}{\sigma_a} - 1 \right]^{1/8} \dots (1)$$

Where

$V_f$  = fracture speed, m/s

$C_B$  = backfill constant backfill constant (2.76

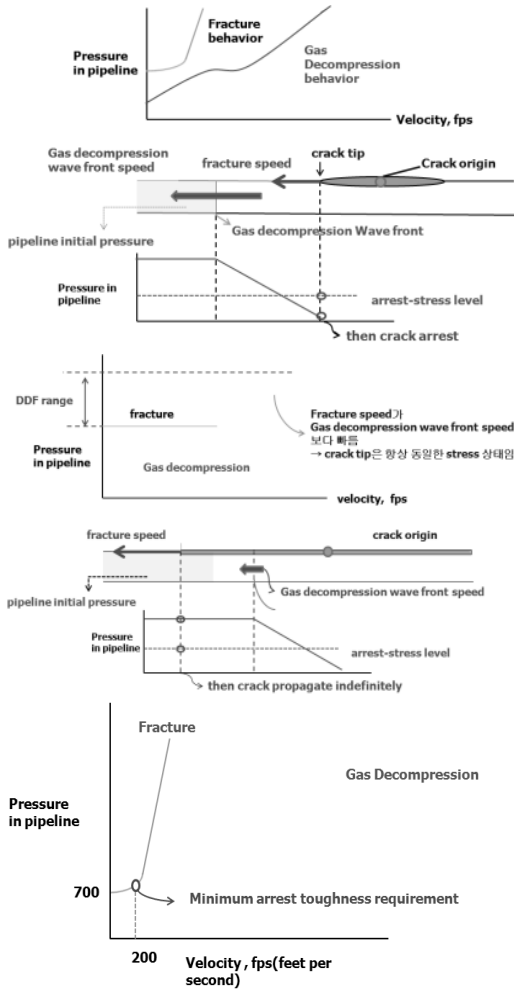


Fig. 2. Mechanism of DDF Criteria for gas pipelines

for no Backfill, 2.00 for soil backfilled and 1.71 for water backfilled pipe)

- $\sigma_f$  = flow stress, MPa
- CVP = Charpy V-notch upper-shelf energy for a 2/3 Thickness specimen, J
- $\sigma_d$  = decompressed hoop stress ( $P_d R_m / t$ ), MPa
- $\sigma_a$  = arrest stress, MPa
- $P_d$  = decompressed pressure, MPa
- $R_m$  = mean pipe radius, mm
- $t$  = pipe or tube thickness, mm

with

$$\sigma_a = \left[ \frac{2\sigma_f}{3.333\pi} \right] \arccos \left\{ \exp \left[ \frac{18.75 \times CVP \times E \times \pi}{24\sigma_f^2 (R_m t)^{0.6}} \right] \right\} \quad (2)$$

and

$E$  = elastic modulus, MPa.

$$P_d = \sigma_a \times \frac{t}{R_m}$$

$$\Rightarrow P_d = P_i \left[ \frac{2}{\gamma + 1} + \left( \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right) \frac{V_p}{V_a} \right]$$

Where

$P_d$  is a given decompressed pressure level, in ksi or MPa

$P_i$  is the initial line pressure prior to rupture, in ksi or MPa

$V$  is the pressure wave velocity (propagation velocity for a given decompressed pressure level), in feet per second or meters per second.

$V_a$  is the acoustic velocity in the gas at its initial pressure and temperature, in feet per second or meters per second.

and

$\gamma$  is the initial specific heat ratio of the gas.

가령 X65가스배관 직관부 모재의 길이방향 20℃ 물성치를 도입한 DDF판정은 다음과 같이 구해진다.

#### 4.1. 배관파단속도(Vf)

- ①  $C_B = 2.0$ (at soil)
- ②  $\sigma_f = \sigma_{ys} + 10\text{ksi} = 65\text{ksi} + 10\text{ksi} = 517.5\text{MPa}$
- ③  $CVN = 394.9 \text{ J/m}^2 = 3.949 \text{ MJ/m}^2$
- ④  $\sigma_a = 92.88$  ( $E:200\text{GPa}$ ,  $R_m=762$ ,  $T=17.5\text{mm}$ )
- ⑤  $P_d = \sigma_a \times \frac{t}{R_m} = 2.1333$

#### 4.2. 가스감압속도(Vp) 및 가스감압압력(Pd)

- ① 사용압력 = 70bar
- ② 초기음속 = 433m/sec ( $\text{CH}_4$ 가스의 20℃ 기준)
- ③  $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = 1.57$  ( $\text{CH}_4$ 가스의 20℃ 기준)

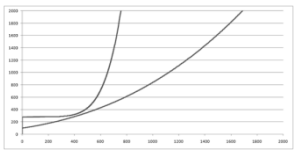
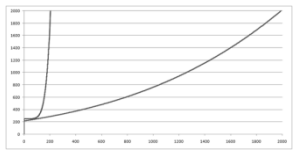
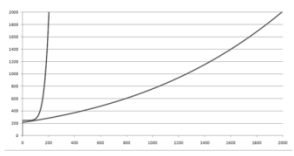
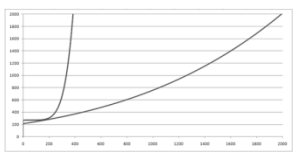
이 값들을 대입하여 얻어지는 TCM의 Two-Curves

는 다음과 같으며 특정 배관재질 및 사용가스압력 (초기부터 감압조건까지)에서는  $V_f < V_p$ 이므로 DDF는 발생하지 않는 것으로 판정 할 수 있다.

본 연구에서는 이와 같은 DDF판정을 현재 우리나라 대구경 가스배관의 모든 재질조건 및 사용조건에서 수행하였다(Table 1). 적용된 재질등급은 X65 및 X70이며 두 배관의 모재와 용접부를 분류하여 기본적으로 40°C~120°C 온도 구간의 CVN값을 주요 대입 인자로 DDF기준 곡선을 그린 것이다. 이 때 온도에 따른 인장곡선의 차이는 거의 없는 것으로 간주하여 항복강도 및 탄성계수는 일정한 재질 물성 값을 대입하였다.

또한 각 배관은 다시 길이방향(Long), 45도 방향 및 원주방향(Trans)로 구분되며 배관의 열간가공 문제를 고려하기 위하여 열간 가공시 인장구간(Extrados), 압축구간(intrados) 및 미변형 구간(Newtral)을 구분하여 DDF기준을 구하였다. 이와 같이하여 그려진 DDF 기준은 약 200여개 그래프이며 현재 우리나라 가스배관 어떤 조건에서도 DDF 발생우려는 없는 것으로 판정 된다. (DDF 기준이 되는 아래 모든 곡선의 X축은 속도이며, Y축은 압력에 해당한다.)

**Table. 1.** DDF Criteria for X65 and X70 at seam, long, intrados and auto-weld

배관종류	Vf & Vp 그래프	DDF판정
X65 SEAM 용접부 (-60°C)		×
X65 직관 Long (-20°C)		×
X70 열간밴드 INTRADOS (-20°C)		×
X70 모재 자동용접 (E91T1-GM) SC-91P (-20°C)		×

### 4.3. 배관 직경 (두께 및 외경)에 대한 DDF민감도 분석

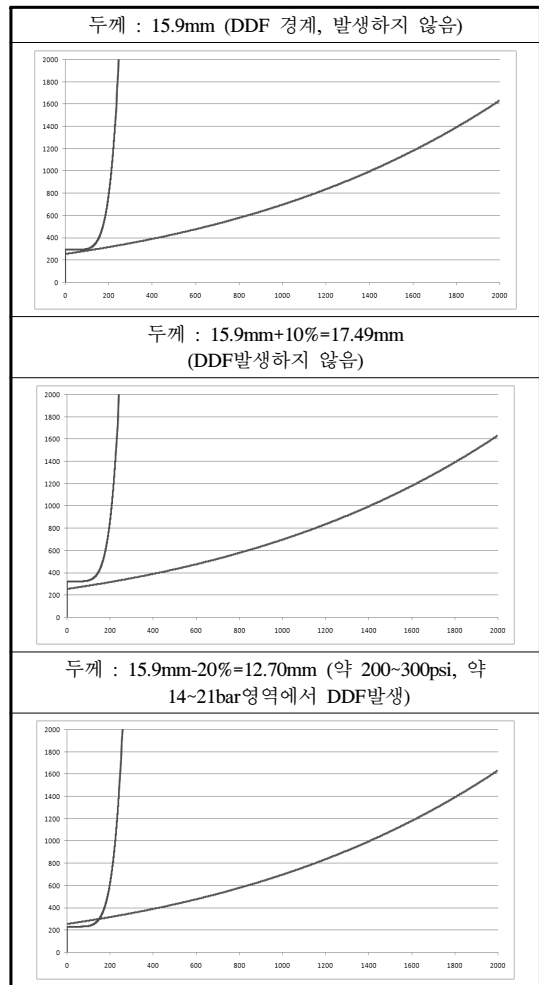
가스배관에 대한 DDF판정은 앞에 언급한 바와 같이 재질, 사용압력, 모재/용접부, 사용 온도 및 배관 직경에 대하여 고려되었다.

여기에서는 다른 요소는 생략하고 배관 직경 인 배관 두께 및 외경에 대하여 DDF민감도를 구하였다.

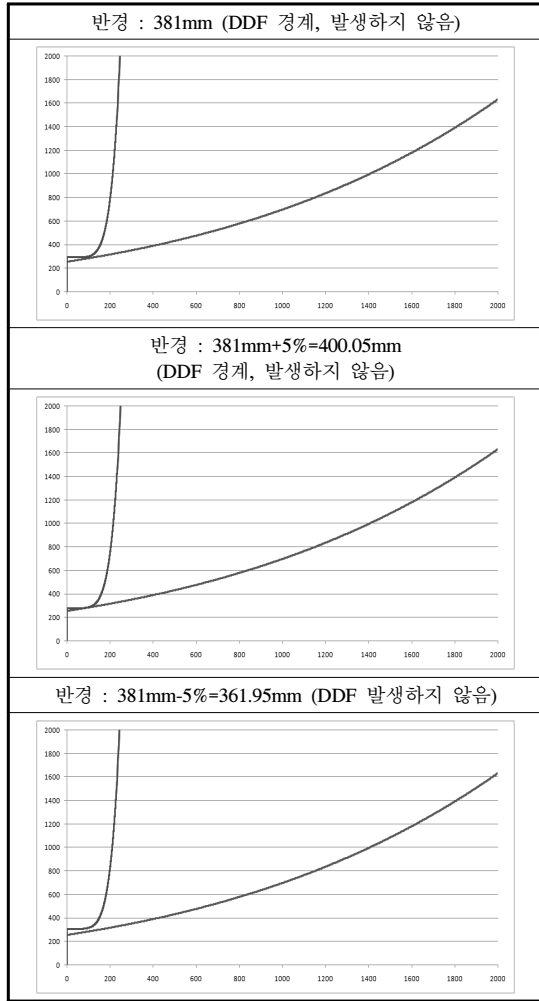
#### (1) 배관두께의 민감도

배관 두께에 대한 DDF 민감도는 “대” 등급 수준으로, 두께가 두꺼울수록 DDF는 발생하지 않는다 (Table 2).

**Table. 2.** DDF Criteria for pipe thickness at gas pipe lines



**Table. 3.** DDF Criteria for pipe diameter (radius) of gas pipelines



- X70의 직관부 모재 길이 방향(X70-직관\_모재\_Long) 기본 두께는 15.9mm임.
- 이것에 부식 두께 감소 효과를 고려하여 ±10%를 민감도 값으로 입력함.

- (2) 배관 외경(반경) 민감도
- 배관 외경에 대한 DDF 민감도는 “중” 등급 수준으로 외경이 작을수록 DDF는 발생하지 않는다(Table 3).
- X70의 직관부 모재 길이 방향 (X70-직관\_모재\_Long) 기본 반경은 381mm임.
  - 이것에 외경 팽창/수축 효과를 고려하여 ±10%를 민감도 값으로 입력함.
  - 배관 반경의 경우 ±5% 팽창 및 수축효과를 민감도 값으로 반영함.

**4.4. 배관 작용요소에 대한 DDF 민감도 종합 분석**

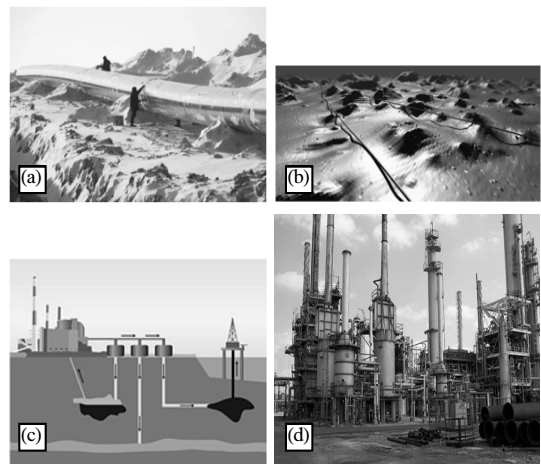
다음에는 가스배관 및 사용조건/환경 등 작용요소에 대한 DDF민감도를 종합적으로 분석한 결과를 표4로 제시한다. Table 4에서 DDF는 배관두께와 가스배관 사용압력 및 배관의 유동응력에 대하여 비교적 민감도가 큰 것으로 정리된다.

**V. DDF기준의 활용방안**

최근 러시아와 시베리아로부터 우리나라 까지 가스배관 연결사업이 추진되고 있다. 한랭지에 건설되는 가스배관의 CVN값은 낮아서 DDF가능성이 크며 이에 대한 대책이 중요하다. 또한 해저가스배관은

**Table. 4.** DDF results for various conditions of gas pipelines

	배관 두께	배관 외경	배관 압력	수송 가스 습속	수송 가스 비열비	배관 유동 응력	배관 탄성 계수	배관 충격 에너지	배관 backfill
민감도	대	중	대	소	중	대	소	소	소
상관 관계	얇을 수록	클수록	높을 수록	빠를 수록	클수록	클수록	클수록	클수록	클수록
DDF	파괴 전파	파괴 전파	파괴 전파	파괴 저지	파괴 저지	파괴 저지	파괴 전파	파괴 저지	파괴 전파



**Fig. 3.** Gas pipelines at (a) cold area, (b) under sea area and for (c) CCS, (d) SNG system.

해양플랜트 산업의 중심기술로 떠오르고 있다. 이때 해서 사용조건에서의 DDF판정은 설계에 있어 주요 변수로 반드시 고려되어야 할 사항이다.

이외에 CCS(CO<sub>2</sub> Captured System)에서 포집된 이산화탄소의 운송은 CCS산업자체의 경제 적 효율성의 관건이 된다. CCS배관에서도 DDF는 설계기준으로 채택되고 관리되어야 할 것이다(Fig. 3).

수소가 관련되는 가스배관에서 DDF의 가 능성은 훨씬 커진다. 이것은 배관재질이 수소 취성 현상과 관련하여 파괴 인성 값의 저하로 이어지기 때문이다. 미량의 수소도 DDF가능성 을 높일 수 있으며 이와 같은 수소관련 배관에 DDF판정은 매우 중요한 요소이므로 이것은 설계기준으로 마련되고 관리되어야 할 사항이다.

## VI. 결 론

1. 연속연성파괴거동(Dynamic ductile fracture behavior)을 해석하고, 파괴저지인성값(arrest toughness)을 예측하는 Battelle Two Curve Model (BTCM)을 해석하는 계산을 수행하여, 파괴의 저지 및 전과거동을 해석하였다.

2. 국내에서 사용되는 가스배관의 물성들을 활용하여 연속연성파괴의 가능성을 검토하였으며, 국내 배관의 사용조건에서는 연속연성파괴 가능성이 낮게 검토되었다.

3. 다양한 사용환경의 변화에 따른 연속연 성 파괴거동의 민감도를 분석하였다.

4. 배관 두께, 외경, 압력, 수송가스 특징, 배관재질특성, 배관환경 등의 영향을 분석, DDF 제어기준의 기반을 마련하였다.

## 후 기

본 연구는 강릉원주대학교 기성희 학술 연구비와 국토해양부의 “진동수주형 파력발전 실용화기술 개발” 연구사업 및 한국표준과학연구원의 연학 연계 과제 지원 프로그램으로 수행 되었습니다.

## 참고문헌

- [1] W.A. Maxey, “Fracture Initiation, Propagation and Arrest”, Paper J Proceedings of Houston, Texas (1974)
- [2] W.A. maxey, F.F. Kiefner, and R.J. Eiber, “Ductile Fracture Arrest in Gas Pipelines”, A.G.A , vol 3, p 34, (1974)
- [3] G. Wilkowski, D. Rudland, H Xu, and N. Sandercon, “ Effect of Grade on Ductile Fracture Arrest Criteria for Gas Pipelines”, IPC, vol 3, p 369-384 (2006)
- [4] G.D. Fearnough and D.G. Jones, “Toughness specification for shear fracture arrest in pipelines”, Analytical and experimental fracture mechanics, p 527-538 (1980)
- [5] G.H. Vogt et al, “EPRG Report on toughness for crack arrest in gas pipelines”, 3R International, 22, 98 (1983)
- [6] F. Bonomo, “A survey and tentative revision of the ductile fracture arrest criterion in pipelines for gas transmission”, Analytical and experimental fracture mechanics, Rome (1980)
- [7] P.E. O’donoghue, M.F. Kanninen, C.P. Leung, G. Demofonti, S. Venzi, “The development and validation of a dynamic fracture propagation model for gas transmission pipelines”, Int. J. Pres. Ves. & Piping, vol.70, p 11-25 (1997)