



## CO<sub>2</sub> 배관의 연속연성파괴 분석

정효태 · <sup>†</sup>최병학 · 김우식\* · 백종현\*

강릉원주대학교 신소재금속공학과, \*한국가스공사 연구개발원  
(2014년 4월 21일 접수, 2014년 6월 5일 수정, 2014년 6월 5일 채택)

### Analysis on Dynamic Ductile Fracture of Transportation Pipeline for Carbon Dioxide Capture and Storage System

Hyo-Tae Jeong · <sup>†</sup>Byung-Hak Choe · Woo-Sik Kim\* · Jong-Hyeon Baek\*

Dept. of Advanced Metal & Materials Engineering, Gangneung-Wonju National University, Gangneung 210-702, Korea

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

(Received April 21, 2014; Revised June 5, 2014; Accepted June 5, 2014)

#### 요 약

이산화탄소 포집 및 저장 시스템(CCS, Carbon dioxide Capture and Storage system)의 수송배관에 대한 연속연성파괴(DDF, Dynamic Ductile Fracture)를 연구하기 위하여 Battelle Two Curve법(BTCM)으로 CCS수송배관의 연속연성파괴거동을 해석하여 천연가스 수송배관의 연속연성파괴거동과 비교하였다. 또한, CO<sub>2</sub> 배관에서의 배관두께 및 사용온도에 따른 연속연성파괴 민감도를 분석함으로써 연속연성파괴에 대한 사용기준을 해석하였다. 우리나라 기후조건에 따른 CO<sub>2</sub>배관두께와 수송압력 사용기준을 분석하였으며, 상온의 경우에는 기존의 천연가스용 배관을 CO<sub>2</sub>배관으로 사용하기 위해서는 배관두께가 7mm이상이어야 하고 수송압력은 54bar이하이어야 함을 해석하였다.

**Abstract** - Dynamic ductile fracture (DDF) has been studied in the transportation pipeline for the carbon dioxide capture and storage(CCS) system. DDF behavior of CCS transportation pipeline has been analyzed using Battelle Two Curve Method (BTCM) and compared with the DDF behavior of natural gas pipeline. The operating safety criteria against the DDF has been investigated based on the sensitivity analyses of the pipe thickness and the operating temperature for the CO<sub>2</sub> pipeline. The DDF criteria can be applied to confirm the operating safety of the CO<sub>2</sub> pipeline. If the commercial natural gas pipeline were used at room temperature as a CO<sub>2</sub> pipeline, the thickness of pipe should be at least 7mm and the pressure should be less than 54bar for the CO<sub>2</sub> pipeline system.

**Key words** : Dynamic Ductile Fracture, CCS, Carbon Dioxide, Battelle Two Curve Method

<sup>†</sup>Corresponding author:cbh@gwnu.ac.kr

Copyright © 2014 by The Korean Institute of Gas

## I. 서론

CCS (Carbon Dioxide Capture and Storage)란 화력발전 및 석유·화학 플랜트로부터 배출되는 이산화탄소를 포집하고 저장하는 시스템을 일컫는다. 또한 CCS 수송배관이란 포집된 이산화탄소를 저장장소까지 이송하는 배관이다. 그런데 아직까지 CO<sub>2</sub> 수송의 전용 배관은 없으며, 현재 사용 중인 가스배관을 이것에 적용하려는 시도가 미국 등 기술선진국에서 시도되고 있다. 그러나 이 경우 10기압 미만의 저압인 100%의 고순도 CO<sub>2</sub>가 적용되므로 현실적인 고압과 불순물을 포함한 CO<sub>2</sub> 분위기를 고려하지는 못하는 상황이다[1,2].

연속연성파괴(Dynamic Ductile Fracture, 이하 DDF)란 사용압력이 존재하는 배관이 경우에 따라서는 수 km에 이르는 상당히 긴 구간에 걸쳐 파열이 연속으로 진행되는 파단을 일컫는다. DDF는 사용 내부압력(p)이 배관 파열에 의해 감소되는 압력감소 속도(V<sub>p</sub>)와 배관파열진전속도(V<sub>f</sub>)의 상대적인 속도 차이에 의해 발생되는 데, 압력감소속도(V<sub>p</sub>)가 파열진전속도(V<sub>f</sub>)보다 적은 경우(V<sub>p</sub> < V<sub>f</sub>), 배관파열진행 선단의 내부압력의 감소가 충분하지 않으므로 배관의 파열은 리크시작 위치로부터 양방향으로 발생된다. 파열은 두 속도가 같아지는 시점인 V<sub>p</sub> = V<sub>f</sub> 까지 계속되다가 멈추는데, 이때 파단형태는 연성파단이 다[3,4].

DDF가 보고된 것은 1970년대로 당시 가스배관 파열이 수백m에 이르는 대형 사고를 동반 하였다. Fig. 1은 DDF 사고 사례를 보여주는 것이다[3]. 이에 따라 영국, 미국, 캐나다, 일본 등 기술선진국에서는 DDF를 방지할 코드를 마련하였고, 지금은 DDF 기본코드와 재질 설계기준이 마련되어 선진 개발국에서는 이를 공동사용 중이다[5-9].

배출가스를 포함하는 CO<sub>2</sub> 배관은 천연가스 배관에 비해 부식 위험성이 크다. 따라서 CO<sub>2</sub> 배관은 부식 피트 리크에 의한 DDF 설계코드가 적용되어야 한다. 지금까지 CO<sub>2</sub> 배관의 DDF 관련 연구는 거의



Fig. 1. Photos showing a dynamic ductile fracture[3].

없다. 본 연구에서는 가스배관에 적용된 DDF 코드를 기준으로 CCS 배관 DDF를 파악하고자 하였다. 가까운 미래에 CO<sub>2</sub> 배관은 중요한 플랜트 산업으로 자리할 것이다. 본 연구를 통하여 가스배관 재질을 이용하는 CO<sub>2</sub> 배관의 DDF 방지 설계기술이 확보될 수 있고, 이것의 건전한 사용을 꾀할 수 있다.

## II. 실험방법

CO<sub>2</sub> 배관의 DDF 관계식은 배관파열진전속도와 압력감소속도의 계산결과를 비교하여 이루어지는데, 배관파열진전속도는 가스배관 재질 사용을 기본으로 하고, 압력감소속도는 배관내부 사용가스인 이산화탄소의 물성을 기본으로 한다.

DDF 기준 관계식에 포함되는 재질특성 값은 항복강도(유동응력), 탄성계수 및 충격흡수 에너지(Charpy V-notched energy 이하 CVN)이다. 또한 가스배관 반경 및 배관 두께, 가스 배관 사용조건인 사용압력과 사용가스에서의 음속 및 배관이 문힌 상태에 대한 backfill 계수가 적용된다.

본 연구에서는 X65 및 X70 Grade의 가스 배관에 대한 DDF를 파악하고자 하여, X65 및 X70 배관의 각 항복강도, 탄성계수와 CVN 및 각 배관의 직경과 두께가 변수로 대입된다. 그런데 두 종류 가스배관에 있어서 현장에 설치된 모든 조건을 망라하여 DDF 판정을 마련하는데, 여기에는 배관의 용접부/모재, 배관방향 (Long, 45도, Trans), 사용온도 (20°C ~ -40°C), 용접 종류 (자동 및 수동), 연간밴드(인장, 압축, 미변형) 조건에서 얻어지는 CVN 값이 주요변수로 적용된다. 본 연구에서 DDF 관계식은 Excel 코드로 작성되었으며, 입력 값은 Excel data로 입력된다.

## III. 이론적 배경

Battelle Two-Curve Method(BTCM)란 가스 배관의 파단속도(Fracture velocity, V<sub>f</sub>)와 사용가스 압력의 감압속도(Decompression Velocity, V<sub>p</sub>)를 비교하여, DDF 유무를 판정하는 기준식이다. 즉 가스 사용압력(p)에서 V<sub>f</sub>>V<sub>p</sub>인 경우 균열 침단은 항상 동일한 응력상태이며 연속적인 파단이 야기된다[1,2]. 그러므로, V<sub>f</sub>=V<sub>p</sub>를 이루는 지점이 배관이 가져야 하는 최소의 재질인성이 된다. 이러한 인성 값은 충격에너지(CVN) 또는 DWTT(Drop weight Tearing test) 값으로 정해진다.

Fig. 2를 살펴보면 어느 지점의 배관 내부압력(P<sub>a</sub>)에 대해서 배관파열진전속도(V<sub>f</sub>) 및 압력감소속도(V<sub>p</sub>)가 각각 구해질 수 있음을 알 수 있다. (즉, y축 (P<sub>a</sub>) 한

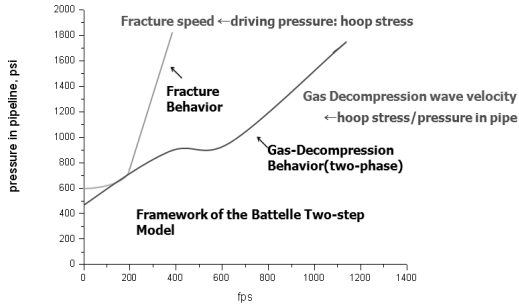


Fig. 2. A schematic diagram showing the fracture behavior and gas decompression behavior in Battelle's two curve method[4].

지점에서 수평으로 선을 그으면  $V_f$  및  $V_p$  곡선과 만나는 점을 구할 수 있다.) 이때  $V_p < V_f$  라면, 파열속도가 압력감소속도보다 크기 때문에 균열은 계속 진전하게 된다. 따라서  $V_p \leq V_f$  관계식을 기준으로 하여 DDF를 판정하는 것이다. 이것을 BCTM (Battelle Two Curve Method)이라고 한다[4].

Battelle Two-Curve Method (BTCM)의 배관 파단속도( $V_f$ )와 가스감압속도( $V_p$ )는 다음 두 식으로 규정된다. 아래 식(1)에서 파열진전속도( $V_f$ )는 배관 재질에 관련한다. 여기에 포함된 변수의 영향성을 평가하면 다음과 같다.

- ①  $C_B$  (backfill constant)가 클수록  $V_f$  증가: 이것은 배관을 덮은 모양이 무거울수록  $V_f$ 가 증가하는 것을 의미한다.
- ②  $\sigma_f$ (flow stress)가 클수록  $V_f$  증가: 이것은 배관 재질의 항복강도가 클수록  $V_f$ 가 증가하는 것을 의미한다.
- ③ CVP (charpy energy)가 클수록  $V_f$  감소: 이것은 배관 재질의 인성이 클수록  $V_f$ 가 감소하는 것을 의미한다.
- ④  $\sigma_d$  (decompressed hoop stress,  $P_d \cdot R_m/t$ )가 클수록  $V_f$  증가: 이것은 배관 형상에서 배관 반지름이 클수록 또한 배관두께가 작을수록  $V_f$ 가 증가하는 것을 의미한다.

또한 아래 식 (3)에서 압력감소속도( $V_p$ )는 이산화탄소 물성에 관련한다. 여기에 포함된 변수의 영향성을 평가하면 다음과 같다.

- ①  $V_a$ (CO<sub>2</sub> 내에서 음속)가 클수록  $V_p$  증가: 이것은 CO<sub>2</sub> 내의 음속이 증가할수록 가스 확산 방출이 크며  $V_p$ 가 증가하는 것을 의미한다.
- ②  $\gamma$ (CO<sub>2</sub>의 비열비)의  $V_p$  영향성: 이것은 가스의 비열이  $V_p$ 에 영향을 주는 것을 의미한다.

- ③  $P_i$ (가스사용압력)가 클수록  $V_p$  감소: 이것은 가스 사용압력이 크면  $V_p$ 가 감소하는 것을 의미한다.

$$V_f = \left[ \frac{C_B \sigma_f}{\sqrt{CVP\sigma}} \right] \left[ \frac{\sigma_d}{\sigma_a} - 1 \right]^{1/6} \quad (1)$$

where

$V_f$  = fracture speed, m/s

$C_B$  = backfill constant (2.76 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 ( $\sigma_d = P_d R_m / t$ ), MPa

$\sigma_a$  = arrest stress, MPa

$P_d$  = decompressed pressure, MPa

$R_m$  = mean pipe radius, mm

$t$  = pipe or tube thickness, mm

with

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

and

$E$  = elastic modulus, MPa.

$$P_d = P_i \left[ \frac{2}{\gamma+1} + \left( \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \right) \frac{V}{V_a} \right]^{\frac{2\gamma}{\gamma-1}} \quad (3)$$

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.

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

DDF의 기준은 이와 같은 식(1)의  $V_f$ 와 식(3)의  $V_p$ 를 비교함으로써 구해진다. 즉  $V_p < V_f$ 이면 연속 파단조건이며,  $V_p > V_f$ 이면 파단정지조건을 의미하

는 것이다. 그런데  $V_f$ 와  $V_p$ 는 모두 가스누출에 의한 압력감소 한 시점의 압력인  $P_d$ (decompressed pressure)로 구해진다.  $P_d$ 는  $V_p$ 에 직접 입력되지만  $V_f$ 에는 후프응력으로 환산되어 입력된다. ( $\sigma_d = P_d \cdot R_m/t$ ).

#### IV. 결과 및 고찰

##### 4.1. CO<sub>2</sub> 배관에 대한 기존 CH<sub>4</sub> 가스배관 적용성 평가

여기에서는 CO<sub>2</sub> 배관을 기존의 가스배관을 사용한다고 가정하였을 때 DDF의 발생을 계산하고자 한다. 먼저 파열진전속도( $V_f$ ) 계산에 입력되는 배관 재질상수 값은 아래와 같으며, 분위기에 따른 차이는 없다고 가정하였다.

- 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  $CVN = 3.949 \text{ MJ/m}^2$
- ④  $\sigma_a = 92.88$  ( $E : 200\text{GPa}$ ,  $R_m = 762$ ,  $T = 17.5\text{mm}$ )

$$\textcircled{5} P_a = \sigma_a \times \frac{t}{R_m} = 2.1333$$

또한 CO<sub>2</sub> 가스를 기준으로 하여 가스압력 감소속도 ( $V_p$ ) 계산에 입력되는 가스상수는 아래와 같다.

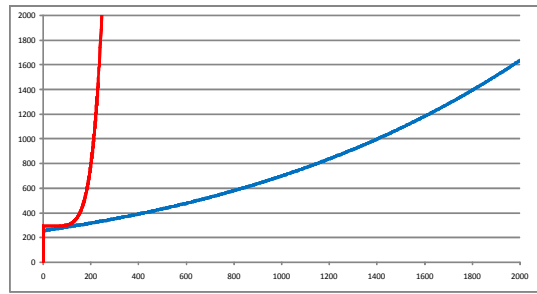
- 사용압력 = 70 bar
- 초기음속 = 395.8m/s (20℃)
- $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = 3.395$  (20℃)

이와 같이 구해진 가스 압력감소속도( $V_p$ )와 배관 파열진전속도( $V_f$ )를 비교하면 Fig. 3과 같다. 그림은 반지름이 381mm, 두께가 15.9mm인 X70 등급 가스배관에 사용되는 기존 천연가스(CH<sub>4</sub>)와 가상 적용의 CO<sub>2</sub>를 비교한 것인데, 가스 사용조건은 모두 70기압, 20℃이다.

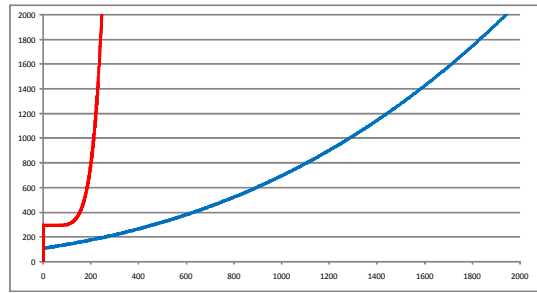
그림에서 메탄가스는  $V_p \approx V_f$  로 DDF 경계조건이지만, CO<sub>2</sub> 가스는  $V_p > V_f$ 로 DDF가 발생하지 않은 것이 확인된다. 즉 같은 배관 및 사용조건에서 이산화탄소는 메탄보다 DDF에 안정적인 사용을 할 수 있는 것을 알 수 있다.

##### 4.2. 배관두께 민감도

CO<sub>2</sub> 배관으로 반지름 381mm인 X70 등급 가스배관을 사용한다고 했을 때, 배관두께가 어느 정도까지 얇아도 DDF에 안정한지 평가하여 보았다. Fig. 4는 배관 두께를 8mm로 가정하였을 때 70기압, 20℃에서 CH<sub>4</sub>와 CO<sub>2</sub>에 대한 계산결과이다.

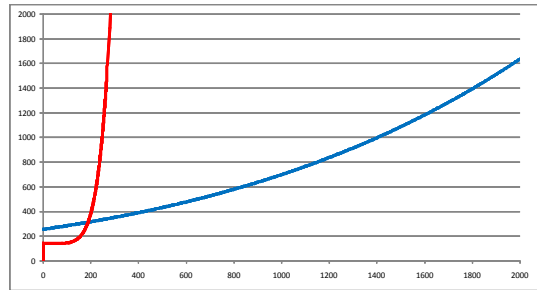


(a) CH<sub>4</sub>

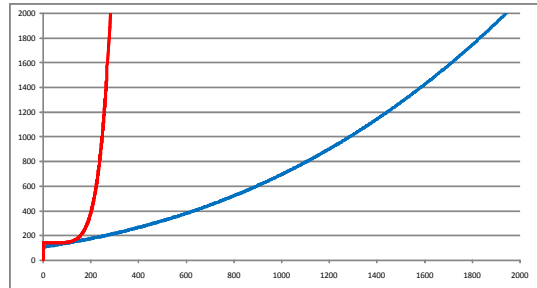


(b) CO<sub>2</sub>

Fig. 3. DDF Criteria of (a) CH<sub>4</sub> and (b) CO<sub>2</sub> at 70bar and 20℃ with 15.9mm thick X70 pipe.



(a) CH<sub>4</sub>



(b) CO<sub>2</sub>

Fig. 4. DDF Criteria of (a) CH<sub>4</sub> and (b) CO<sub>2</sub> at 70bar and 20℃ with 8mm thick X70 pipe.

Fig. 4(a)에서 CH<sub>4</sub>의 경우는 배관두께 8mm에 대해  $V_p < V_f$  영역이 존재하여 DDF가 초래되는 것을 알 수 있는데, Fig. 4(b)의 CO<sub>2</sub> 사용조건에서는  $V_p \geq V_f$  결과로 DDF가 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

### 4.3. 사용온도 민감도

CO<sub>2</sub> 수송라인에 X70 등급의 기존 가스배관을 사용함을 가정하는 경우, 사용온도의 민감도를 평가하였다. 여기에서 배관 형상은 반지름 381mm, 두께 11.1mm 가정하였는데, 이것은 기존 배관의 제조 규격 중 하나로 20℃, 70기압의 CO<sub>2</sub> 사용조건에서는 DDF가 발생하지 않는 배관 규격이다. 표 1은 CO<sub>2</sub>가 적용된 X70 배관의 DDF 계산을 위한 사용온도별 물성이다.

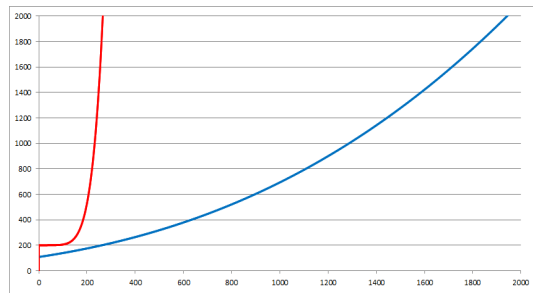
Fig. 5는 CO<sub>2</sub> 배관으로 반지름 381mm, 두께 11.1mm 인 기존의 X70 배관을 사용하였을 때 사용온도가 각각 20℃, 0℃, -20℃, -40℃인 경우에 대해 DDF를 판정한 것이다. 그림에서 X70 배관은 0℃ 까지 DDF 위험성이 없지만 -20℃ 이하 온도에서 DDF 발생 가능성이 있는 것을 알 수 있다. 단 아래 결과는 모든 온도와 압력의 계산 조건에서 CO<sub>2</sub>가 기체 상태임을 가정한 것이다.

### 4.4. 우리나라 배관 사용조건(온도, 압력)에서의 DDF 저항 배관두께 기준 설정

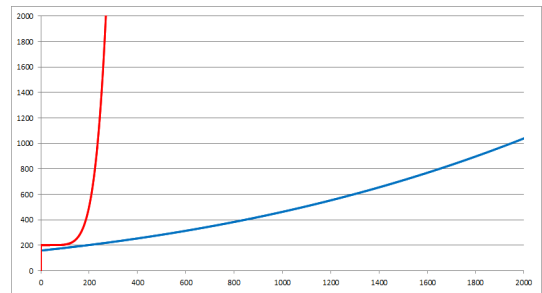
앞 절까지는 CO<sub>2</sub>배관을 CH<sub>4</sub>배관과 비교하기 위하여 CH<sub>4</sub>배관사용조건과 동일하게 하여 비교하였으나, CO<sub>2</sub>는 CH<sub>4</sub> 배관 사용조건 온도와 압력에서는 액체 상태로 존재하므로, CO<sub>2</sub>는 20℃에서 70bar의 압력을 사용할 수 없다. 그러므로 CO<sub>2</sub>배관 사용조건으로는 CO<sub>2</sub> 상태도상에서 주어진 사용 온도에서 CO<sub>2</sub>가 기체 상태로 존재하는 압력조건을 각 온도의 최대압력에서 약 1~2기압정도 낮은 압력으로

Table 1. Physical properties of CO<sub>2</sub> and X70 depending on temperatures

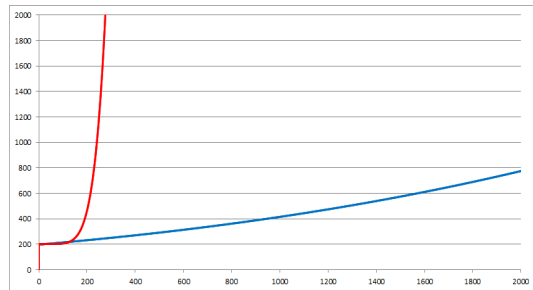
Temp.	Sound speed	Specific heat ratio	Charpy impact energy
20℃	395.8	3.395	387.3
0℃	599.4	2.470	376.3
-20℃	756.6	2.0192	357.5
-40℃	898.5	2.036	365.1



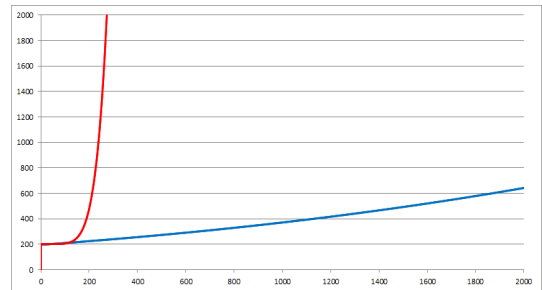
(a) 20℃



(b) 0℃

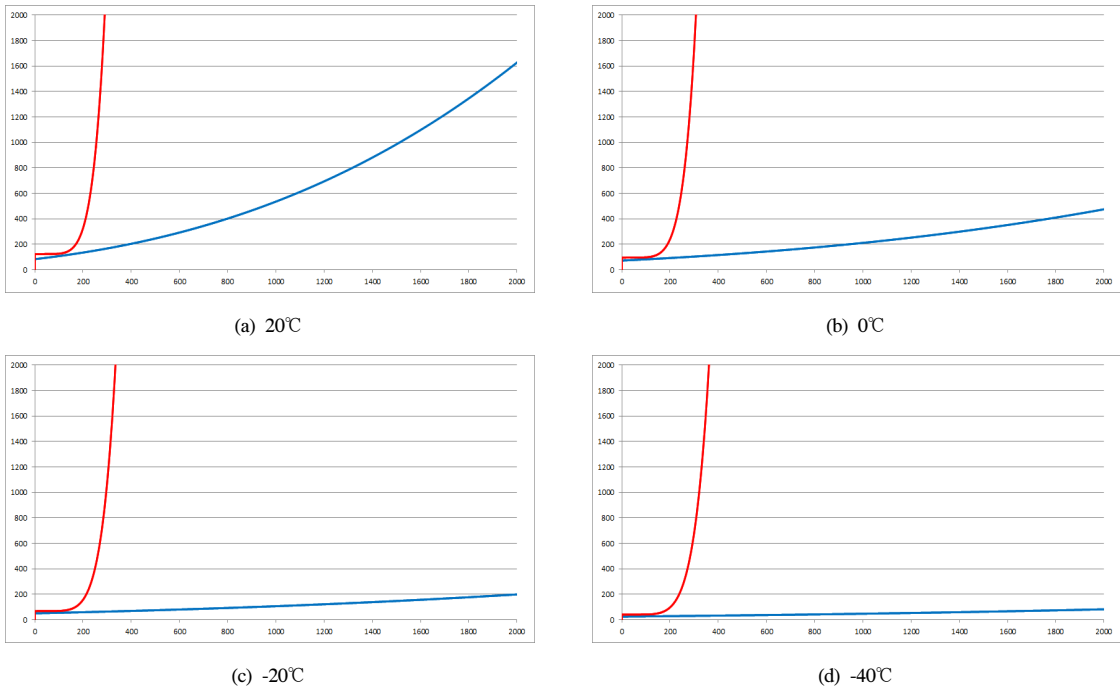


(c) -20℃



(d) -40℃

Fig. 5. DDF Criteria of CO<sub>2</sub> at 70bar and (a) 20℃, (b) 0℃, (c) -20℃ and (d) -40℃ with 11.1mm thick X70 pipe.



**Fig. 6.** DDF Criteria of CO<sub>2</sub> at (a) 20°C/54bar, (b) 0°C/32bar, (c) -20°C/18bar and (d) -40°C/9bar with X70 pipe of 381mm radius.

**Table 2.** Physical properties of CO<sub>2</sub> and X70 depending on temperatures

Temp.	Pressure (bar)	Sound speed	Charpy impact energy	Minimum Thickness
20°C	54	395.8	387.3	7.0 mm
0°C	32	599.4	376.3	5.5 mm
-20°C	18	756.6	357.5	4.0 mm
-40°C	9	898.5	365.1	2.5 mm

결정하였으며, 이 사용조건은 각 온도에서 (20°C, 54기압), (0°C, 32기압), (-20°C, 18기압), (-40°C, 9기압)이다. 즉, 우리나라 정도의 기후조건에서 CO<sub>2</sub>를 가스로 수송하기 위해서는 최저 -40°C를 기준으로 9기압 사용압력을 설정해야 한다. 이들 조건에서 DDF 발생에 대한 저항의 한계 최저 배관두께를 계산하면 Table 2와 같으며, DDF 판정곡선은 Fig. 6 같다.

Table 2에는 CO<sub>2</sub> 배관의 각 온도와 압력의 사용조건에 대한 배관의 최저 두께를 나타내었다. 즉

CO<sub>2</sub> 수송을 20°C에서 한다면, 54기압까지 압력을 사용할 수 있으며 이러한 사용조건으로 하는 경우 배관 최저 두께는 7.0mm이다. 그러나, 우리나라 기후의 -40°C 최저 온도를 감안한다면 이 온도에서 기체상태 CO<sub>2</sub>가 유지되는 9기압 이하로 사용압력이 정해져야 하고, 이때 배관두께는 2.5mm 정도면 DDF 저항에 적합한 것으로 판단된다.

## V. DDF 기준의 적용

최근 러시아와 시베리아로부터 우리나라까지 가스배관 연결 사업이 추진되고 있다. 한랭지에 건설되는 가스배관의 CVN 값은 낮아서 DDF 가능성이 크며 이에 대한 대책이 중요하다. 또한 해저가스배관은 해양플랜트 산업의 중심기술로 떠오르고 있다. 이때 해저 사용조건에서의 DDF 판정은 설계에 있어 주요변수로 반드시 고려되어야 할 사항이다.

또한 수소가 관련되는 가스배관에서 DDF의 가능성은 훨씬 커진다. 이것은 배관재질이 수소 취성 현상과 관련하여 파괴 인성 값의 저하로 이어지기 때문이다. 미량의 수소도 DDF 가능성을 높일 수 있으며 이와 같은 수소관련 배관에 DDF판정은 매우 중

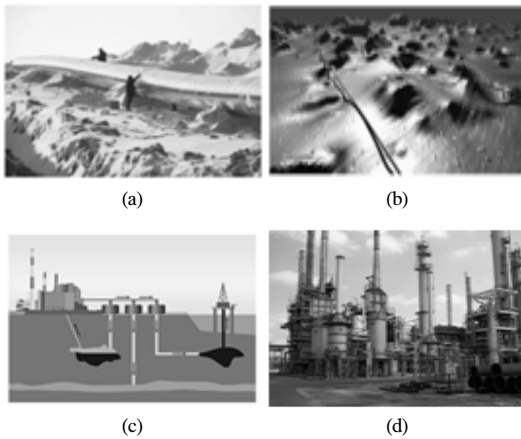


Fig. 7. Gas pipelines at (a) cold area, (b) under sea area, (c) CCS and (d) SNG system.

요한 요소이므로 이것은 설계기준으로 마련되고 관리되어야 할 사항이다.

Fig. 7은 이와 같이 DDF 가 설계기준으로 채택되어야 할 가스배관을 보여주는 것이다. 여기에는 한랭지 가스배관, 해저 가스배관, CO<sub>2</sub> 배관 및 SNG 가스배관이 속한다. 즉 차세대 모든 플랜트 산업에서 가스·유체 수송라인 배관에 대한 DDF 판정과 설계기준 마련은 필수적인 것으로 판단된다.

## VI. 결론

본 연구에서는 기체상태의 CO<sub>2</sub> 수송배관의 DDF 판정기준을 BCTM (Battelle Two Curve Method)식으로 평가하였으며 이에 대한 주요 결과는 다음과 같다.

1. 기존 천연가스 배관인 X70 등급(반지름 381mm, 두께 15.9mm)을 기체상태의 CO<sub>2</sub> 배관으로 사용한 경우, DDF 안정성 확보는 충분한 것으로 해석된다.
2. 기체상태의 CO<sub>2</sub> 배관으로 기존 X70등급의 가스배관을 사용할 경우, 상온의 DDF 안정성 확보를 위한 배관두께는 7mm 이상 그리고 수송압력은 54bar 이하인 것으로 평가된다.
3. 우리나라 기후조건에서 CO<sub>2</sub> 기체 상태를 고려하면 가스배관 사용조건은 (-40℃, 9기압)으로 한정되고, 이때 X70등급(381mm 반지름)의 DDF 저항확보가 가능한 최소 배관두께는 2.5mm로 계산된다

## 감사의 글

본 연구는 한국가스공사 2010년 대학협력과제 지원 연구와 2011년도 강릉원주대학교 장기해의 파견 연구 지원에 의하여 수행되었습니다.

## REFERENCES

- [1] T.Harmelen, A.Horssen, M. Jozwicka, "air pollution impacts from carbon capture and storage (ccs)", EEA Technical report, 14 (2011)
- [2] S.T. McCoy, E.S. Rubin, "An engineering-economic model of pipeline transport of CO<sub>2</sub> with application to carbon capture and storage", Greenhouse Gas Control, 2, 2 (2008)
- [3] W.A. Maxey, "Fracture Initiation, Propagation and Arrest", Paper J Proceedings of Houston, Texas, AGA(1974)
- [4] W.A. maxey, F.F. Kiefner, and R.J. Eiber, "Ductile Fracture Arrest in Gas Pipelines", NG-18 Report 100, Texas, AGA(1976)
- [5] G. Wilkowski, D. Rudland, H Xu, and N. Sandercon, "Effect of Grade on Ductile Fracture Arrest Criteria for Gas Pipelines", Proc. Of International Pipeline Conference (2006)
- [6] G.D. Fearnough and D.G. Jones, "Toughness specification for shear fracture arrest in pipelines", International conference on analytical and experimental fracture mechanics (1980)
- [7] G.H. Vogt et al, "EPRG Report on toughness for crack arrest in gas pipelines", 3R International, 22, 98 (1983)
- [8] F. Bonomo, "A survey and tentative revision of the ductile fracture arrest criterion in pipelines for gas transmission", International conference on analytical and experimental fracture mechanics, Rome (1980)
- [9] 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, 70, 11 (1997)