



해저배관의 소성붕괴에 대한 기하학적 형상변화의 효과

*백종현 · 김우식

한국가스공사 연구개발원

(2009년 12월 28일 접수, 2010년 8월 28일 수정, 2010년 8월 30일 채택)

Effect of Geometry Variation on Plastic Collapse of Marine Pipeline

*Jong Hyun Baek · Woo Sik Kim

R&D Division, Korea Gas Corporation, Ansan 426-790, Korea

(Received 28. December. 2009, Revised 28. August. 2010, Accepted 28. August. 2010)

요 약

해저배관의 안전성 검토를 위하여 수압에 의한 소성붕괴 저항성을 평가하였다. 본 연구에서는 해저배관에 부가되는 주하중을 수압으로 설정하여 배관의 직경대 두께비와 ovality 변화가 배관의 소성붕괴 변화에 미치는 영향을 유한요소해석을 통하여 평가하였다. 내압은 외압에 의한 소성붕괴 저항성을 향상시켜 소성붕괴 발생 깊이를 증가시켰으며, 동일 ovality에서 local ovality를 갖는 배관은 global ovality 보다 더 깊은 붕괴 깊이를 나타내었으며, 소성붕괴 발생 깊이는 직경대 두께비의 증가 또는 ovality 증가에 따라 감소하였다.

Abstract - The marine pipelines laid in deep waters were evaluated to verify the resistance on the plastic collapse to heavy ambient external pressure due to hydrostatic pressure. In this study, the plastic collapse behavior of the marine pipe subjected to hydrostatic pressure was evaluated with the ovality and ratio of diameter to thickness in FE analyses. A parametric study was shown that the internal pressure increased the plastic collapse depth by increasing of the resistance to the plastic collapse. It was also shown that the collapse depth of the pipeline having a local ovality was deeper than that of the pipeline having a global ovality. Finally, the plastic collapse depth decreased when either the ratio of diameter to thickness or the ovality increased.

Key words : API 5L X65, FE-analyses, Marine pipelines, Ovality, Plastic collapse

1. 서 론

국내 천연가스 수송용 해저배관은 API X65 배관을 사용하여 영종도, 평택만 그리고 마산만 지역에 총 연장 24 km 길이가 수심 30 m의 해저에 2~3.5 m의 깊이로 매설되어 운영되고 있으며 국외에서는 북해, 지중해 및 멕시코만 등 다양한 지역에서 해저배관이 운영되고 있다.

특히 러시아-터키 구간에는 수심 2,200 m의 흑해를 통과하는 1,213 km 길이의 API X65 배관이 2005년에 건설되어 운영되고 있으며 오만-인도 구간에는 3,500 m 수심의 아랍해를 횡단하는 천연가스배관 건설이 API X70 배관을 사용하여 시공될

예정이다[1-3].

해저배관에 대한 국외 규격으로는 DNV OS F101, ISO 13623, API RP 1111, ASME B31.8, BSI 8010 및 CSZ 662 등이 있으며 국내에는 가스사업법 시행규칙, 도시가스 안전관리 통합고시와 항만 및 어항 설계 기준 등이 있다.

해저배관에 작용하는 주하중으로는 수압, 토압, 자중 및 재하하중, 부력 및 내압 등이 있으며 종하중으로는 풍압력, 파력, 수류력, 지진력, 투묘에 의한 충격하중, 온도변화에 영향 열응력, 부설시의 하중, 타공사에 의한 충격, 진동등이 있다[4].

해저배관의 경우 수심 증가에 의한 수압으로부터 발생하는 외압이 배관의 소성붕괴를 발생시키는 주하중으로 작용하며 이 경우 배관의 직경대 두께비 (D/t)와 ovality는 소성붕괴에 큰 영향을 미치며

*주저자:jhbaek@kogas.re.kr

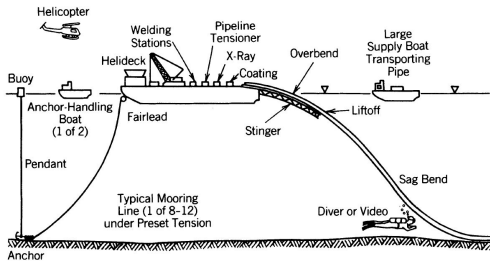


Fig. 1. Typical lay barge operation[4].

해저배관 설계 시 중요한 고려사항이다[5-9].

해저배관에서 ovality 변화는 Fig. 1의 배관 시공 시 부설선의 stinger와 해수면에서 발생하는 overbend 부위와 해저면의 sagbend 부위에서 발생하는 global ovality 경우가 있으며 배관 운송, 시공 또는 운영 중 외부 물체의 충격에 의한 국부적인 텐트 결함 발생에 의한 local ovality가 있다[10, 11].

본 연구에서는 해저배관에 부가되는 주하중을 수압으로 설정하여 배관의 직경대 두께비 변화와 ovality 변화가 배관의 소성붕괴 변화에 미치는 영향을 유한요소해석을 통하여 평가하였다.

II. 소성붕괴에 대한 유한요소해석

수압이 해저배관의 소성붕괴에 미치는 영향을 평가하기 위하여 ABAQUS Ver. 6.8 프로그램을 사용하여 3차원 탄소성 유한요소해석을 실시하였다[12].

유한요소해석에 평가된 배관은 국내에서 해저 배관으로 사용되는 외경 762 mm (30 in)와 914 mm (36 in) API 5L X65 배관을 기준으로 외경이 ± 6 인치 변화를 갖는 24 인치와 42 인치에 대해 평가하였으며 직경대 두께비는 19, 30, 42~44의 변수에 대하여 평가하였다.

Ovality 형상 변화는 외경 762 mm, 두께 17.5 mm ($D/t=43.54$)와 외경 914 mm, 두께 20.6 mm ($D/t=44.37$) 배관에 대하여 내압이 없는 경우와 8 MPa인 경우에 대하여 실시하였다. Ovality 평가는 배관의 길이방향 전체가 변형이 있는 경우(global ovality)와 국부적 변형이 있는 경우(local ovality)에 대하여 평가하였다.

배관에 대한 모델링은 쉘 요소 (S4R)를 사용하였으며, 배관의 기하학적 형상의 대칭성과 유한요소해석의 효율성을 위하여 대칭 모델을 사용하였다. 배관 길이는 5,000 mm로 설정하였으며 배관 길이방향으로는 50, 원주방향으로는 40 그리고 배관 두께 방향으로는 7등분하여 mesh를 분할하였다.

Fig. 2는 global ovality와 local ovality 배관에 대

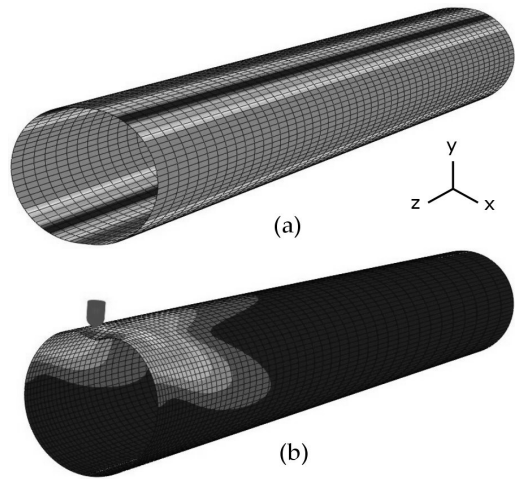


Fig. 2. General view of (a) global ovality pipe and (b) local ovality pipe for FE analyses.

한 모델링을 나타낸 것이다. Ovality 변화 방법은 배관 하단부를 고정시킨 후 global ovality 경우는 배관 상단부의 길이방향(z-방향) 전체를 목적깊이(y-방향)까지 변위이동 시킨후 y-방향의 변위이동을 자유상태로 설정하여 ovality를 변화시켰으며, local ovality 경우는 배관 좌측 상단부위에 직경 80 mm의 압입자를 위치시킨 후 목표깊이까지 압입자를 변위이동 후 배관 상단부 100 mm 높이로 압입자를 변위이동 시킨 후 ovality 변화를 형성하였다.

Local ovality 형성시 배관과 analytical rigid 요소로 모델링된 압입자 사이의 접촉현상을 구현하기 위하여 surface-surface 조건을 사용하였으며 압입자는 master surface로, 배관 표면부는 slave surface로 설정하였으며 0.3의 마찰계수를 사용하였다.

Ovality 변화가 발생된 배관의 ovality 평가는 식 (1)를 사용하여 산정하였다[13].

$$f = \frac{D_{max} - D_{min}}{D} \quad (1)$$

D =Nominal outside diameter.

D_{max} =Greatest measured outside diameter.

D_{min} =Smallest measured outside diameter.

API 5L[14]규격에 따르면 API 5L X65 배관의 최소규정항복강도는 448 MPa (65,000 psi) 그리고 최소규정인장강도는 530 MPa (77,000 psi)이다. 탄소성 유한요소해석 시 사용되는 인장물성을 획득하기 위하여 배관 길이방향으로 직경 6 mm의 봉상형

Table 1. Mechanical properties of API 5L X65.

Yield Strength	464 MPa
Engineering Tensile Strength	563 MPa
True Tensile Strength	629 MPa
True Fracture Strength	923 MPa
True Strain at Necking	0.11
True Fracture Strain	1.16
Elastic Modulus	210 GPa
Poisson's Ratio	0.3

인장시험편을 제작하여 인장특성을 파악하였으며 Table 1에 API 5L X65 배관 재료의 인장물성을 나타내었다.

해저배관에 작용하는 하중인 수압을 Riks option[12, 15]을 사용하여 배관 외부 표면에 균일하게 부가하였으며 식 (2)는 수심 깊이 변화에 따라 배관에 작용하는 수압(P_{ex})을 나타낸 것이다[4].

$$P_{ex} = V_w h \quad (2)$$

여기서,

V_w = density of sea water (1,026 kg/m³)

h = depth of sea water (m)

수압에 의한 ovality 변화 배관에서 발생하는 소성붕괴에 대한 유한요소해석 과정은 다음과 같다.

(1) S4R 셸요소를 사용하여 대칭 조건을 사용하여 배관을 모델링한다.

(2) 배관 내부를 내압이 없는 조건과 8 MPa를 부가시킨 경우에 대하여 배관 하단부를 변위와 회전에 대하여 고정시킨 후 global ovality와 local ovality를 배관에 형성시킨다.

(3) 배관 우측 끝 단면 중앙의 1개의 node는 변위와 회전에 대하여 고정시킨 후 그 이외의 부위는 소성붕괴가 발생하도록 변위와 회전에 대하여 자유상태로 경계조건을 설정한다.

(4) 수압을 배관 외부표면에 정수압으로 소성붕괴 발생시까지 부가한다.

III. 유한요소해석 결과

3.1. 규격 수식해와 비교

Global ovality 배관에 외압에 의해 발생된 소성붕괴압력을 DNV OS F101에서 제시된 붕괴압력 (P_c) 예측식 (3)과 비교하여 Fig. 3에 나타내었다[15].

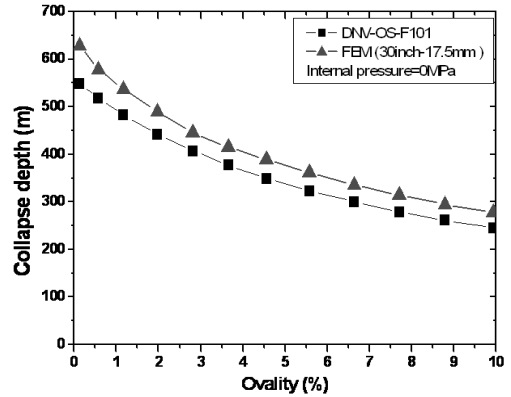


Fig. 3. Comparison between DNV code and FE-analyses.

$$(P_c - P_{el})(P_c^2 - P_p^2) = P_c P_{el} P_p f \frac{D}{t} \quad (3)$$

$$P_{el} = \frac{2E\left(\frac{t}{D}\right)^3}{1 - \nu^2} \quad (4)$$

$$P_p = f_y \alpha_{fab} \frac{2t}{D} \quad (5)$$

여기서,

P_c =Characteristic collapse pressure

P_{el} =Elastic collapse pressure

P_p =Plastic collapse pressure

f_y =Yield stress to be used in design

E =Young's Modulus

α_{fab} =Fabrication factor, (1, 0.93 or 0.85)

t =Nominal wall thickness of pipe

ν =Poisson's ratio

식 (3)으로부터 예측된 소성붕괴 압력은 수심 100 m당 1 MPa인 정수압인 관계를 이용하여 붕괴가 발생하는 수심으로 변환하여 Fig. 3~Fig. 7에 나타내었다[4].

DNV 예측식 (3)이 유한요소해석 결과에 비하여 더 낮은 붕괴 깊이를 예측하는 보수적인 결과를 나타낸 것은 유한요소해석에서는 인장시험으로부터 획득한 API X65 배관재료의 실제 항복강도인 464 MPa를 사용하였으나 DNV 예측식 (3)에서는 항복강도를 설계시 반영하는 448 MPa와 fabrication factor에 0.85를 적용 하였으므로 유한요소해석 결과에 비하여 낮은 붕괴압력 나타낸 것이다.

3.2. 직경대 두께비가 소성붕괴에 미치는 영향

Fig. 4는 내압이 없는 경우 global ovality를 갖는 외경 24, 30, 36 및 42인치 배관에 대하여 수압이 주하중으로 작용하는 경우 직경대 두께비와 ovality 변화에 의해 소성붕괴가 발생하는 해저 수심 변화를 나타낸 것이다.

각 배관 직경에서 직경대 두께비 변화에 따라 다른 ovality를 나타낸 것은 유한요소해석 중 각 배관에 대하여 동일 깊이로 변형 후 변위를 자유상태로 하면 변형 부위가 회복되는 탄성변형량의 차이로 다른 ovality를 나타낸 것이다.

동일 직경 배관에서 ovality가 증가함에 따라 소성 붕괴가 발생하는 수심은 감소하고 있으며 또한 직경대 두께비가 증가함에 따라라도 소성붕괴 발생 깊이는 감소하고 있었다.

직경대 두께비가 19인 경우에는 10% ovality까지는 선형적으로 붕괴 깊이가 감소하고 있었으며 직경대 두께비가 30과 42~44인 경우에는 ovality가 증가에 따라 붕괴가 발생하는 수심은 큰 변화를 나타내지 않고 있었다.

동일 ovality 조건에서 소성붕괴 발생 깊이는 직경대 두께비에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

Fig. 5는 내압이 없는 경우 직경대 두께비가 19, 30 및 42~44인 조건에 대하여 배관 직경과 ovality 변화에 따른 수압에 의한 소성붕괴 깊이 변화를 나타낸 것이다.

동일 직경대 두께비인 경우 배관 직경에 관계없이 소성붕괴 발생 깊이는 동일한 값을 나타내고 있었으며 ovality 증가에 따라 소성붕괴 발생 깊이는 감소하고 있었다. 소성붕괴 발생 깊이 감소율은 ovality 증가에 따라 감소하고 있었으며 직경대 두께비가 감소함에 따라 ovality 증가에 따른 소성붕괴 깊이 발생 변화율은 증가하고 있었다.

Fig. 6은 내압이 없는 경우와 8 MPa인 경우 직경대 두께비가 44를 갖는 외경 30인치와 36인치 배관에 대한 ovality 변화에 따른 소성붕괴 깊이 변화를 나타낸 것이다.

내압 유무에 관계없이 ovality 증가에 따라 소성붕괴 발생 깊이는 감소하고 있었다. 그러나 내압에 의해 발생된 원주응력은 배관 외부에서 부가되는 수압에 대한 저항성을 증가시켜 소성붕괴 발생 깊이를 증가시키고 있으며 8 MPa의 내압은 내압이 없는 경우에 비하여 소성붕괴가 발생하는 수심이 800 m 증가되었다.

배관 내압은 동일 ovality 조건에서 소성붕괴 발생 깊이를 증가시키는 역할을 한다.

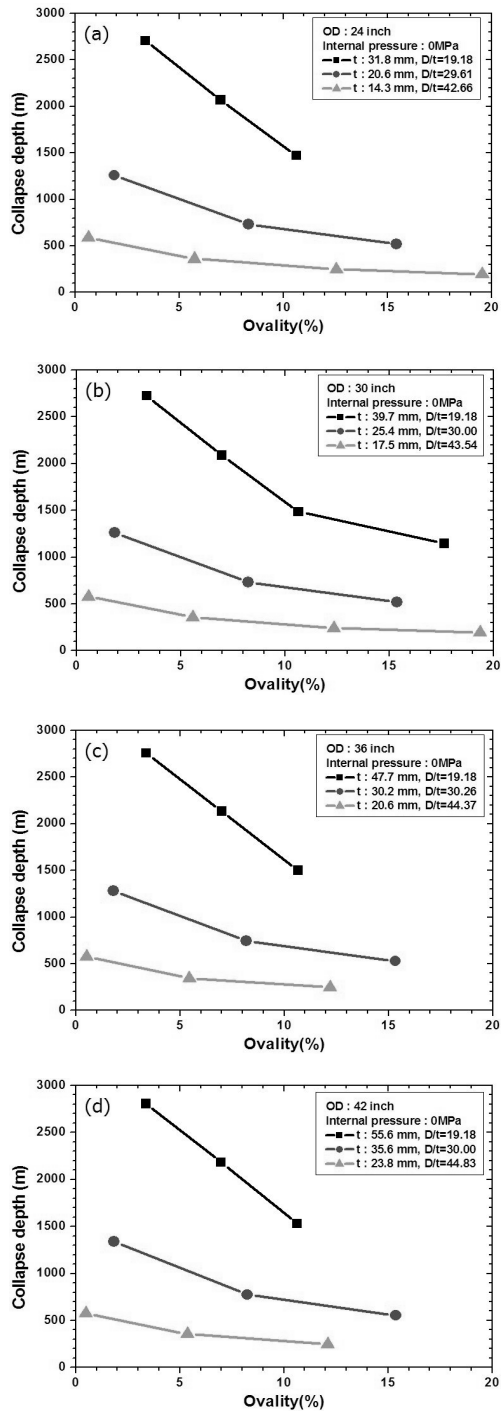


Fig. 4. Collapse depth with variation of D/t.

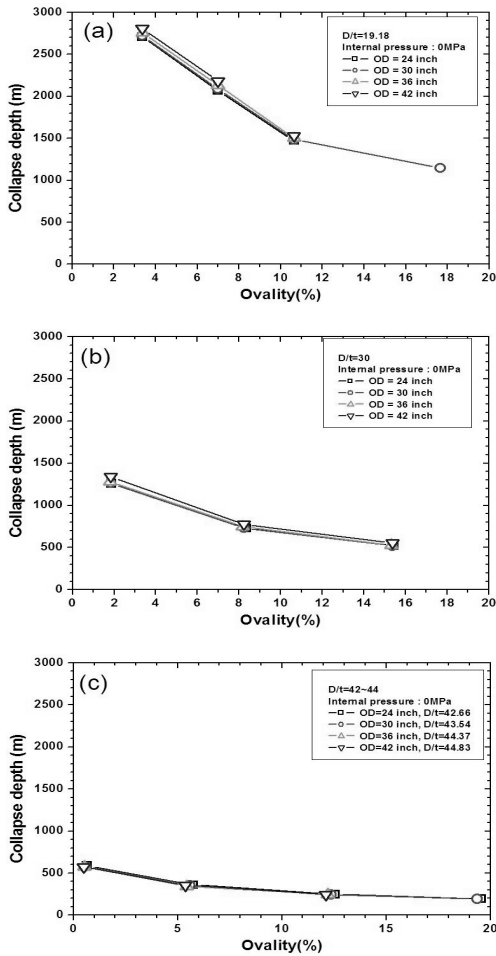


Fig. 5. Collapse depth with variation of pipe diameter.

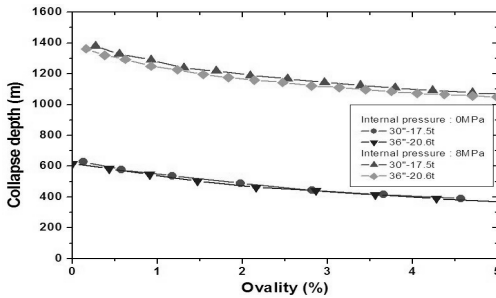


Fig. 6. Collapse depth with variation of internal pressure.

3.3 Ovality 형상이 소성붕괴에 미치는 영향

Fig. 7은 ovality 형상 변화가 소성붕괴 발생 깊이 변화에 미치는 영향을 평가하기 위하여 직경대 두께비가 44인 30인치와 36인치 배관에 대하여 global ovality와 local ovality를 형성시켜 내압 유무에 따른 붕괴 깊이를 평가 한 것이다.

Ovality 형상에 관계없이 내압 증가에 따라 소성 붕괴 발생 깊이는 증가하고 있으며 그 효과는 내압에 해당되는 수압을 발생시키는 수십만급 소성붕괴 발생 깊이는 증가하였다.

Ovality 형상에 따른 소성붕괴 발생 깊이는 내압 유무에 관계없이 global ovality를 갖는 배관이 local ovality에 비하여 낮은 소성붕괴 깊이를 나타내고 있었다. Local ovality의 경우는 ovality 증가에 따라 소성붕괴 발생 깊이 변화에 큰 차이를 나타내지 않으나 global ovality 배관의 경우는 ovality 증가에 따라 소성붕괴 발생 깊이는 포물선 형태로 감소하고 있었다.

DNV OS F101에 의하면 해저배관의 ovality에 대한 최대허용범위는 3%로 규정하고 있으며 ASME B31.8에 따르면 육상배관의 경우는 배관 내부검사 장비의 이동성을 고려하여 6%까지 허용하

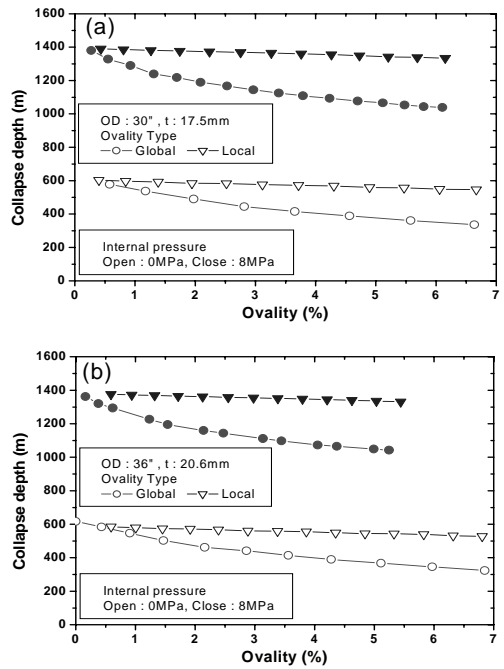


Fig. 7. Collapse depth with variation of ovality shape.

고 있다[13, 16]. 해저배관에 대한 규격에서 ovality 형상은 global ovality 형상에 대하여 규정한 것으로 local ovality가 형성된 해저배관의 경우는 육상배관에서 적용하는 6%의 허용범위를 적용하여도 3%의 global ovality를 갖는 해저배관의 붕괴 깊이 보다 더 깊은 붕괴 깊이를 나타내고 있으므로 해저배관에서 발생된 ovality는 그 형상에 따라 허용범위를 다르게 적용 할 필요가 있다.

V. 결론

해저배관에 대한 수압에 의한 소성붕괴 거동을 평가하기 위하여 배관의 직경대 두께비와 ovality를 평가 인자로 사용하여 유한요소해석을 실시하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1) 직경대 두께비와 ovality(%)가 동일하면 배관 직경에 관계없이 동일한 소성붕괴 깊이를 나타내었다.

2) 내압에 의해 발생한 원주응력은 배관 외부에서 부가되는 수압에 대한 저항성을 증가시켜 소성붕괴 발생 깊이를 증가시키었다.

3) Ovality(%)가 동일하면 global ovality 형상을 갖는 해저배관은 local ovality 배관에 비하여 더 낮은 붕괴 깊이를 나타내었다.

4) 직경대 두께비와 ovality(%)가 증가하면 소성붕괴 발생 깊이는 감소하였다.

참고문헌

- [1] Vladimir I R and Igor V M, "Interactive Computer Models Aid Deepwater Pipe Line Design", *Pipe Line & Gas Industry*, 2000, November, 55-58
- [2] J-lay Addition, "DP upgrade equips SSCV for ultra-deepwater pipe lay", *Pipe Line & Gas Industry*, 2000, November, 63-58
- [3] Colin M, "Ultra-deepwater development requires technological advances", *Pipe Line & Gas Industry*, 2000, November, 74-78
- [4] Ben C. Gerwick, *Construction of marine and offshore structures*, CRC Press LLC, (2000)
- [5] Bai Y., Igland R. and Moan T., "Tube collapse under combined external pressure, tension and bending", *Marine Structures*, 10, 389-410, (1997)
- [6] Park T.D. and Kyriakides S., "On the collapse of dented cylinders under external pressure", *International Journal of Mechanical Sciences*, 38, 557-578, (1996)
- [7] Park T.D. and Kyriakides S., "On the performance of integral buckle arrestors for offshore pipelines", *International Journal of Mechanical Sciences*, 39, 643~669, (1997)
- [8] Haagsma S C., "Collapse resistance of submarine lines studied", *Oil & Gas Journal*, 1981, Feb 2, 86-95
- [9] Huang X, Mihsein M, Kibble K and Hall R, "Collapse strength analysis of casing design using finite element method", *Int. J. Pressure Vessels and Piping*, 77, 359-367, (2000)
- [10] Andrew P, Martin T, Si H, Murray A and Stephen Booth, "Full-scale impact tests on pipelines", *Int. J. Impact Engineering*, 32, 1267-1283, (2006)
- [11] Macdonald K.A., Cosham A., Alexander C.R. , Hopkins P., "Assessing mechanical damage in offshore pipelines", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 14, 1667-1679, (2007)
- [12] ABAQUS version 6.8, ABAQUS Inc., Rhode Island, USA (2008)
- [13] DNV OS F101 "Submarine Pipeline System", (2007)
- [14] "Specification for Line Pipe", API 5L, 43th edition, (2004)
- [15] Riks E, "Progress in collapse Analysis", *Journal of Pressure Vessel Technology*, 109, 33-41, (1987)
- [16] ASME 31.8 "Gas Transmission and Distribution Piping System", (2004)