



외압하에서 해저배관의 소성붕괴에 대한 두께 불균일 효과

†백종현 · 김영표 · 김우식

한국가스공사 연구개발원

(2011년 9월 30일 접수, 2011년 12월 23일 수정, 2011년 12월 23일 채택)

Effect of Thickness Eccentricity on Plastic Collapse of Subsea Pipeline under External Pressure

†Jong-Hyun Baek · Young-Pyo Kim · Woo-Sik Kim

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

(Received September 30, 2011; Revised December 23, 2011; Accepted December 23, 2011)

요 약

원주 방향의 두께가 불균일한 해저배관에 대한 건전성을 검토하기 위하여 수압에 의한 소성붕괴 저항성을 평가하였다. 본 연구에서는 해저배관에 부가되는 주하중을 수압으로 설정하여 4, 8, 12 및 16%의 두께편차율을 갖는 API 5L X65와 API 5L X80 배관의 소성붕괴압력 변화에 미치는 영향을 유한요소해석을 통하여 평가하였다. 두께 편차율이 증가하면 소성붕괴압력이 감소하며 두께편차율이 동일하면 직경대 두께비가 증가함에 따라 소성붕괴 압력은 감소한다.

Abstract - The objective of this study was to investigate the effect of the thickness eccentricity on the collapse pressure of a subsea pipeline subjected to external pressure. The collapse behavior of the subsea pipeline containing initial imperfection was evaluated using elastic-plastic finite element (FE) analyses. API 5L X65 and API 5L X80 Pipelines with the thickness eccentricity values between 4~16% were adopted to investigate the plastic collapse under hydrostatic pressure. A parametric study was shown that the plastic collapse pressure decreased when either the thickness eccentricity or the ratio of diameter to thickness increased.

Key words : API 5L X65, API 5L X80, plastic collapse pressure, subsea pipeline, thickness eccentricity

1. 서 론

천연가스에 대한 수요 증가를 충족시키기 위하여 천연가스 탐사와 채굴 위치가 점차로 한랭지역 또는 심해저로 이동하고 있다. 천연가스 개발이 극한지역으로 이동함에 따라 외부환경 변화에 대응 가능한 고인성 천연가스 수송용 배관 개발이 요구되며 또한 외부하중에 대한 지지 능력을 유지할 수 있는 배관 설계, 제조 및 시공기술 개발이 필요하다.

북해, 지중해 및 멕시코만 등에서 운영되고 있는

해저배관은 DNV OS F101, ISO 13623, API RP 1111, ASME B31.8, BS 8010, API 5L 및 CSA Z662 규격에 의거 설계, 시공 및 운영되고 있다. 현재 건설된 최대수심의 해저배관은 러시아-터키 구간에 설치된 2,200m의 흑해를 통과하는 배관으로 직경 24인치, 두께 31.8mm의 API X65 배관이 774km의 해저구간에서 25MPa의 압력으로 운영되고 있다[1-3].

최근 1단계 공사가 완료된 Nord Stream 해저배관은 러시아의 Vyborg에서 최대 수심 210m의 발틱해를 통과하여 독일의 Greifswald로 연결된 길이 1,220km의 배관이다. DNV OS F101 규격에 의거 내경 1,153mm, 두께 26.8~41mm 사양을 가진 API X70 배관으로 22 MPa의 내압으로 매년 55 bcm (Billion Cubic Meters)의

†주저자:jhbaek@kogas.or.kr

천연가스를 2012년부터 향후 50년간 유럽지역에 공급 될 예정이다[4].

육상배관의 경우 내압에 의해 배관 내벽에 작용하는 원주응력이 배관 건전성 평가시 1차 고려사항이나, 해저배관의 경우 수심 증가에 의한 수압으로부터 발생하는 외압이 배관의 소성붕괴를 발생시키는 주하중으로 작용한다. 외압에 의해 해저배관의 소성붕괴를 지배하는 인자로는 배관의 항복강도, 탄성계수, 잔류응력, 배관 직경대 두께비, Ovality 및 두께 불균일성 등이 있다[5-9].

항복강도와 탄성계수는 재료의 물성으로 제조공정에 의해 큰 변화를 나타내지 않으나 그 값의 증가는 탄성붕괴 또는 소성붕괴강도를 증가시킨다. 잔류응력은 제조공정 또는 배관운영 중 국부적인 손상으로 배관에 생성되나 항복강도 이하의 잔류응력은 배관의 소성붕괴에 큰 영향을 주지 않는 것으로 발표되었다[8].

배관 직경대 두께비는 외압에 의한 배관의 탄소성붕괴시 큰 영향을 미치는 인자이며 그 값이 증가함에 따라 붕괴압력은 감소한다. Ovality는 식 (1)을 사용하여 평가하며 Ovality가 증가함에 따라 외압에 의한 해저배관의 소성붕괴 압력은 감소한다[5-9].

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

D =Nominal outside diameter.

D_{max} =Greatest measured outside diameter.

D_{min} =Smallest measured outside diameter.

배관제조 공법으로는 판재를 용접공정에 의해 배관으로 제작되는 ERW 배관, Spiral 배관 및 UOE 배관 등이 있으며 용접 공정이 없는 Seamless 배관이 있다. 판재를 이용한 배관 제조공정에서는 원자재 판재의 두께 균일성으로 인하여 균일한 두께의 배관이 가공 된다[1,8,10].

Seamless 배관은 봉상의 Billet을 원재료로 사용하여 Plug Mill, Mandrel Mill 및 Pilger Mill 공법을 이용하여 제작된다. Seamless 배관은 봉상형 Billet의 불균일 가열 등에 따른 제작공정 특성으로 인하여 배관 원주방향의 두께가 불균일하게 제작되는 되는 사례가 발생 한다[1,8].

본 연구에서는 원주방향으로 두께가 불균일한 해저배관에 대하여 수압 변화에 대한 해저배관의 하중 지지능력을 평가하여 두께 불균일성이 배관의 소성붕괴거동에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 해저배관에 부가되는 주하중을 수압으로 설정하여 배관의 두께편차율과 직경대 두께비를 변수로 설정하여

해저배관의 변형거동을 유한요소법으로 해석하여 소성붕괴거동을 고찰하고자 한다.

II. 해저배관 두께에 대한 규격

천연가스 수송용 해저배관에 대한 두께편차 허용범위는 DNV OS F101과 API 5L에 규정되어 있으며 Table 1에 Seamless 배관과 용접배관에 대한 허용두께편차를 나타내었다[11,12].

Fig. 1은 DNV OS F101과 API 5L에서 규정한 배관 허용두께에 대한 두께 편차율을 식 (2)를 사용하여 나타낸 것이다.

$$\beta = \left| \frac{t_{nom} - (t_{min}, t_{max})}{t_{nom}} \right| \times 100 \quad (2)$$

t_{nom} = Nominal wall thickness

t_{max} = Greatest measured wall thickness

t_{min} = Smallest measured wall thickness

배관 제작공정에 따라서는 High Frequency Wel-

Table 1. Tolerance for wall thickness in DNV and API

Type	Wall thickness (mm)	Tolerances
SMLS	$t < 4.0$	+0.6mm-0.5mm
	$4.0 \leq t < 10.0$	+0.15t-0.125t
	$10.0 \leq t < 25.0$	$\pm 0.125t$
	$t \geq 25.0$	+0.1t or +3.7mm* -0.1t or -3.0mm*
HFW, EBW, LBW, MWP	$t \leq 6.0$	$\pm 0.4mm$
	$6.0 < t \leq 15.0$	$\pm 0.7mm$
	$t > 15.0$	$\pm 1.0mm$
SAW	$t \leq 6.0$	$\pm 0.5mm$
	$6.0 < t \leq 10.0$	$\pm 0.7mm$
	$10.0 < t \leq 20.0$	$\pm 1.0mm$
	$t > 20.0$	+1.5mm-1.0mm

* : whichever is greater

SMLS:Seamless, HFW:High Frequency Welding, EBW:Electron Beam Welding, LBW:Laser Beam Welding, MWP:Multiple Welding Process, SAW:Submerged Arc Welding

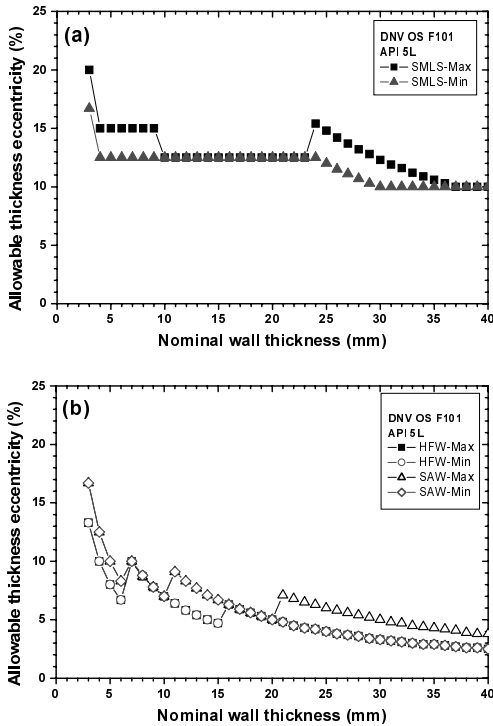


Fig. 1. Allowable thickness eccentricity for (a) SMLS and (b) Welded pipe in DNV and API.

ding, Electron Beam Welding, Laser Beam Welding 및 Multiple Welding Process 공정이 Seamless와 Submerged Arc Welding 공정에 비하여 더 낮은 허용두께편차율을 규정하고 있으며 Seamless 배관 제작 공정이 가장 높은 허용두께편차율을 나타내고 있다.

Fig. 1(a)에서 두께 25mm, Fig. 1(b)에서 두께 10mm 및 20mm 부근에서 허용두께편차율의 변동이 관찰된 것은 두께 구간별로 허용두께범위가 다르기 때문이다.

Seamless 배관의 경우 10~24mm 구간을 제외하면 최대두께에 대한 허용두께편차율을 더 크게 허용하며 High Frequency Welding 배관의 경우 최대두께와 최소 두께에 대한 허용두께편차율은 동일하며 Submerged Arc Welding 배관의 경우 21mm 이상 두께에서 최대두께에 대한 허용두께편차율을 더 크게 허용하고 있다

III. 소성붕괴에 대한 유한요소해석

원주방향 두께 편차를 갖는 해저배관이 수압에 의한 소성붕괴에 미치는 영향을 평가하기 위하여 ABAQUS

Table 2. Parameters for thickness eccentricity used in FE analyses

	D/t	t _{nom} (mm)	Thickness eccentricity (%)			
			4	8	12	16
			t _{nom} - (t _{max} or t _{min})			
OD=18" (457mm)	7.5	60.93	2.44	1.22	0.61	0.30
	15	30.47	4.87	2.44	1.22	0.61
	30	15.23	7.31	3.66	1.83	0.91
	60	7.62	9.75	4.87	2.44	1.22
OD=36" (914mm)	7.5	121.87	4.87	2.44	1.22	0.61
	15	60.93	9.75	4.87	2.44	1.22
	30	30.47	14.62	7.31	3.66	1.83
	60	15.23	19.50	9.75	4.87	2.44

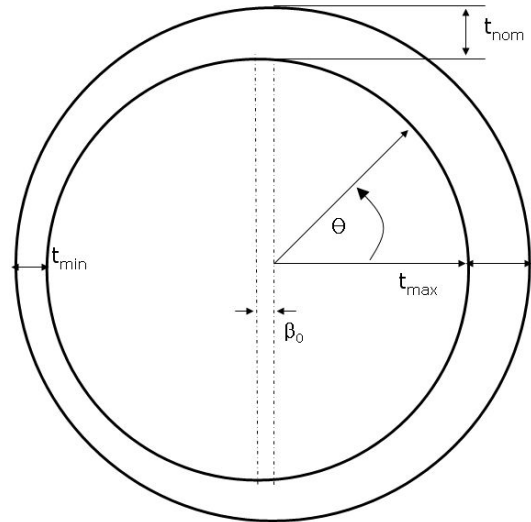


Fig. 2. Cross-sectional view of pipe for FE analysis.

Ver. 6.10 프로그램을 사용하여 2차원 탄소성 유한요소 해석을 실시하였다[13].

유한요소해석에 평가된 배관은 API 5L X65와 API 5L X80 배관이며 외경이 18, 24, 30 및 36 인치에 대하여 직경대 두께비는 7.5, 15, 30 및, 60의 변수에 대하여 평가하였다. 두께편차율은 배관 표준두께에 4, 8, 12 및 16%의 차이를 갖도록 Fig. 2와 같이 배관을 모델링 하였으며 Table 2에는 외경 18인치와 36인치 배관에 대한 형상조건을 나타내었다.

두께 불균일 배관의 원주방향 위치 변화에 따른

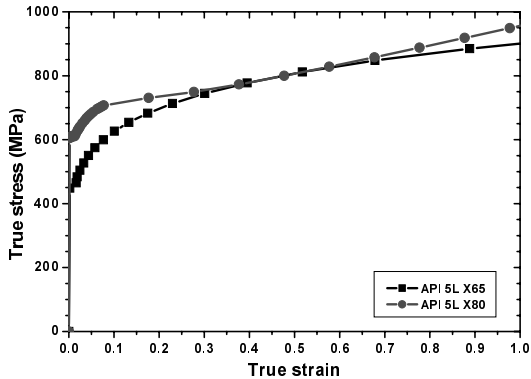


Fig. 3. True tensile stress-strain curves for API 5L X65 pipe and API 5L X80 pipe.

두께 분포는 식 (3)에 따라 최대두께와 최소두께를 나타내었다.

$$t(\theta) = t_{nom} \left\{ 1 + \frac{\beta}{100} \cos(\theta) \right\} \quad (3)$$

θ = Angle from the greatest measured wall thickness

β = Thickness eccentricity calculated from Eq. (2)

배관의 경우 배관 길이방향으로는 두께가 동일하므로 유한요소해석의 효율성을 위하여 CPE4R 요소를 사용하였다.

API 5L 규격에 따르면 API 5L X65 배관의 최소규정항복강도(SMYS)는 448MPa (65,000psi) 그리고 최소규정인장강도(SMTS)는 530MPa (77,000psi)이며 API 5L X80 배관의 최소규정항복강도는 555MPa (80,000psi) 그리고 최소규정인장강도는 675MPa (97,900psi)이다 [12].

탄소성 유한요소해석 시 사용되는 인장물성을 획득하기 위하여 배관 길이방향으로 직경 6mm의 봉상형 인장시험편을 ASTM E8M 규격에 의거 제작하여 인장특성을 파악하였으며 Fig. 3에 API 5L X65와 API 5L X80 배관 재료의 진응력-진변형을 인장곡선을 나타내었다.

수압에 의한 두께불균일 배관에서 발생하는 소성붕괴에 대한 유한요소해석 과정은 다음과 같다.

- (1) CPE4R 요소를 사용하여 두께 불균일 배관을 2차원으로 모델링한다.
- (2) Fig. 2의 배관 우측 끝 단면 t_{max} 의 1개의 node는 변위와 회전에 대하여 고정 시키며 그 이외의 부위는 수압에 의해 소성붕괴가 발생하도록 변위

와 회전에 대하여 자유상태로 경계조건을 설정한다.

- (3) ABAQUS 프로그램의 Step에서 Riks option을 사용하여 수압을 배관 외부표면에 정수압으로 소성붕괴 발생지점 까지 부가하며 최고압력이 발생하는 지점을 소성붕괴압력으로 설정한다[14].

IV. 유한요소해석 결과

Fig. 4와 Fig. 5는 내압이 없는 조건에 대하여 외경 18, 24, 30, 및 36인치 API X65와 API X80 배관에 대하여 수압이 주하중으로 작용하는 경우 직경대 두께비와 두께편차를 변화에 의해 소성붕괴가 발생하는 붕괴압력 변화를 나타낸 것이다.

동일 직경 배관에서 두께편차가 증가함에 따라 소성붕괴가 발생하는 압력은 감소하고 있으며 또한 직경대 두께비가 큰 경우 소성붕괴압력은 감소하고 있었다. 직경대 두께비가 증가함에 따라 배관의 강성(stiffness)이 감소하여 외부하중에 대한 지지능력 감소로 소성붕괴압력은 감소된 것으로 판단된다.

직경대 두께비가 감소함에 따라 두께편차율 증가에 따른 소성붕괴압력 감소율이 더 크게 증가하고 있으므로 직경대 두께비가 작은 경우에 두께편차율에 더 민감한 것으로 평가되었다. 동일 두께편차율 조건에서 소성붕괴압력은 직경대 두께비에 큰 영향을 받는 것으로 평가되었다.

동일 직경대 두께비인 경우 배관 직경에 관계없이 소성붕괴압력은 동일한 값을 나타내고 있었으며 두께편차율 증가에 따라 소성붕괴압력은 감소하고 있었다. 직경대 두께비가 큰 경우 두께편차율 증가에 따른 소성붕괴압력 변화율은 감소하고 있었다.

직경대 두께비가 작은 경우 두께편차율이 증가함에 따라 소성붕괴가 발생하는 압력은 감소하고 있으나, 직경대 두께비가 증가함에 따라 두께편차율이 증가함에 따른 소성붕괴압력 변화는 큰 변화가 없었다.

API X65와 API X80 배관에서 동일 두께편차율을 가질 경우 직경대 두께비가 7.5에서 60으로 증가함에 따라 수압에 의한 소성붕괴압력은 89% 감소되었으며, 동일 직경대 두께비에서는 두께편차율이 4%에서 16%로 증가됨에 따라 소성붕괴압력은 9~14%의 감소를 나타내고 있었다.

해저배관의 경우 수압에 의해 소성붕괴가 발생하는 압력은 직경대 두께비에 크게 의존하나 DNV OS F101과 API 5L 규격에서 허용하는 범위내에서의 두께편차율에서는 소성붕괴압력은 큰 변화를 나타내지 않았다.

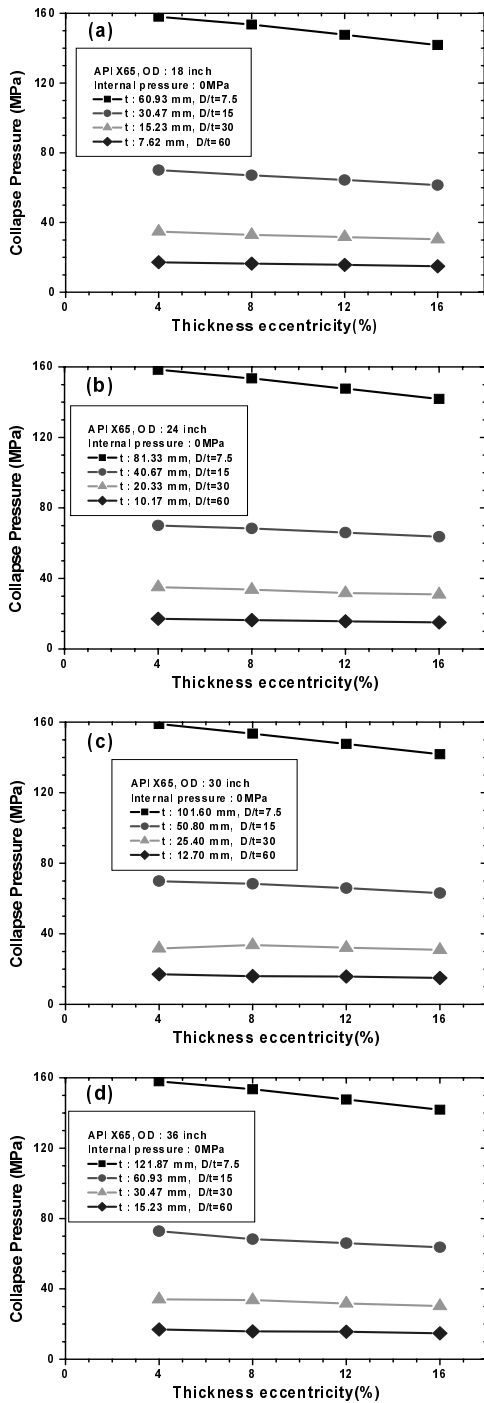


Fig. 4. Collapse pressure for API X65 pipe with variation of D/t.

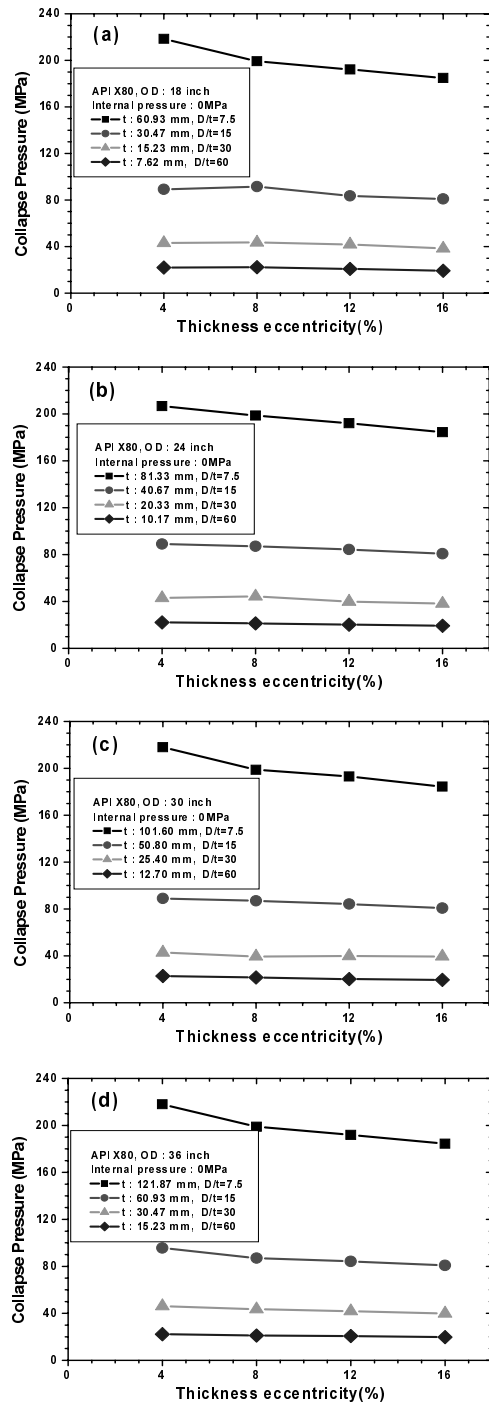


Fig. 5. Collapse pressure for API X80 pipe with variation of D/t.

동일 직경대 두께비에서 API X65에 비하여 API X80 배관의 소성붕괴압력이 증가하였는데 소성붕괴는 재료의 항복강도와 인장강도에 비례하며 인장 실험에서 평가된 API X80 배관의 항복강도는 604MPa이며 API X65는 464MPa로서 두 배관의 항복강도비는 1.3이며 128 종류의 유한요소해석결과로부터 평가된 두 배관의 소성붕괴압력비는 1.17~1.46 분석되었다.

V. 결론

배관의 원주방향으로 불균일한 두께를 갖는 해저 배관 대하여 수압에 의한 소성붕괴압력 변화 거동을 평가하기 위하여 두께편차율과 직경대 두께비를 변수로 사용하여 유한요소해석을 실시하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 두께편차율 또는 직경대 두께비가 증가하면 소성붕괴압력은 감소한다.
- (2) 두께편차율과 직경대 두께비가 동일하면 배관 직경에 관계없이 동일한 소성붕괴압력을 나타내며 항복강도가 증가함에 따라 소성붕괴압력은 증가한다.
- (3) 해저배관의 경우 수압에 의한 소성붕괴는 직경대 두께비에 의해 큰 영향을 받는다.

참고문헌

[1] Kyriakides, S., Corona, E., "Mechanics of Offshore Pipelines", 1st ed., Elsevier, Oxford, (2007)
 [2] Vladimir, I. R., Igor V M, "Interactive Computer Models Aid Deepwater Pipe Line Design", *Pipe Line & Gas Industry*, November, 55-58, (2000)
 [3] Colin M, "Ultra-deepwater development requires te-

chnological advances", *Pipe Line & Gas Industry*, November, 74-78, (2000)
 [4] www.nord-stream.com/en/project
 [5] Bai Y., Iglan R., Moan T., "Tube collapse under combined external pressure, tension and bending", *Marine Structures*, **10**, 389-410, (1997)
 [6] Park T.D., Kyriakides S., "On the collapse of dented cylinders under external pressure", *International Journal of Mechanical Sciences*, **38**, 557-578, (1996)
 [7] Huang, X., Mihsein, M., Kibble, K., Hall, R., "Collapse strength analysis of casing design using finite element method", *Int. J. Pressure Vessels and Piping*, **77**, 359-367, (2000)
 [8] Abeele, F., Bar, J., Jakani, S., "Buckling and Unstable Collapse of Seamless Pipes and Tubes", *Proceedings of the 8th International Pipeline Conference*, IPC2010-31189, (2010)
 [9] 백종현, 김우식, "해저배관의 소성붕괴에 대한 기하학적 현상변화의 효과", *KIGAS*, **14**(4), 45-50, (2010)
 [10] Herynk, M.D., Kyriakides, S., Onoufriou, A., Yun, H.D., "Effects of the UOE/UOC manufacturing process on pipe collapse pressure". *Int. J. Mechanical Sciences*, **49**, 533-553, (2007)
 [11] DNV OS F101, "Submarine Pipeline System", (2007)
 [12] API 5L, "Specification for Line Pipe", 44th edition, (2007)
 [13] ABAQUS version 6.10, ABAQUS Inc., Rhode Island, USA (2010)
 [14] Riks, E., "Progress in collapse Analysis", *Journal of Pressure Vessel Technology*, **109**, 33-41, (1987)