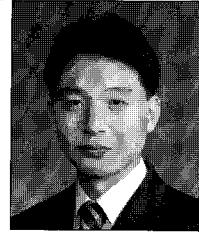


에너지 파이프라인의 변형률 능력 평가

Evaluation of Strain Capacity of Energy Pipeline



조우연*

*(재)포항산업과학연구원 강구조연구소 토목연구본부 책임연구원

1. 서론

전 세계적인 에너지 수요가 증가함에 따라 기존에는 경제성의 문제로 고려하지 않았던 원유나 천연가스 매장지역, 예를 들면 극지방이나 심해저 지역과 같은 곳의 채굴환경이 경제적 타당성을 갖게 되었다. 이로 인해 채굴, 생산된 에너지를 소비지역까지 운송해야 하는 거리가 길어지게 되었으며, 장거리 이송에 효율적인 파이프라인의 길이 및 수요가 증가하게 되었다. 파이프라인의 길이 증가는 파이프라인 가설에 필요한 자재비와 가설비용의 증가로 이어지게 된다. 이에 ExxonMobil, Shell, BP 등의 세계적 주요 에너지 공급사는 포스코, 신일본제철(NSC) 등과 같은 세계 주요 철강사와 공동으로 파이프라인 가설비를 줄일 수 있는 방법에 대한 연구를 지속적으로 해오고 있다.

본 기사에서는 최근 대두되고 있는 변형률기반설계법의 필요성과 개념을 간단히 소개하고, 이 설계법을 적용하기 위한 파이프의 변형성능을 평가하는 방법을 시험적 방법과 수치적 방법의 측면에서 고찰하도록 한다.

1.1 파이프라인의 변형률기반설계법(Strain-Based Design)

에너지 수송환경의 변화 중 특히, 지진대역, 산사태 다발

지역, 동결융해 지역 등에서는 대규모의 지반변형이 발생할 수 있다. 이러한 지형의 대규모 지반거동과 높은 온도와 압력은 파이프라인 길이방향의 소성 변형을 발생시켜 허용응력한계에 해당하는 변형률을 초과하게 된다. 여기에 산업계에서 일반적으로 사용하는 허용응력설계기준을 적용하게 되면 상당한 비용이 추가 될 수 밖에 없다. 변형률기반설계는 제한된 양의 소성변형률을 허용함으로써 경제적인 설계를 가능케 한다. 이는 하중이 변위제어형태를 나타내고 최종 변형률이 제한적일 때 더욱 적합한 설계방법이다.

일반적으로 파이프라인은 허용응력설계법(Allowable Stress Design)을 사용한다. 허용응력설계법은 기준최소항복응력(Specific Minimum Yield Stress, SMYS)의 일정비율로 파이프라인 응력을 제한하는 방법이다. 즉 파이프의 후프(hoop)방향으로는 기준최소항복응력의 72%까지 허용하고, 후프방향과 길이방향의 조합하중에는 90%까지 허용하는 방식이다. 예를 들면 API-X65를 기준으로 할 때, 이 강재의 기준최소항복응력은 449MPa(65ksi)이므로 내압에 의한 한계를 파이프 벽체 응력을 323MPa까지 허용하며, 조합하중의 경우는 404MPa까지 허용하는 것이다. 그러나 조합응력의 기준은 길이방향응력을 제한하는 의도로 도입된 것이다. 이 기준은 매설되어 완전 구속조건으로 휨이 발생할 여지가 없을 경우의 기준으로 지진이나 지반 침하 등의 지반이 이동하는 조건에서는 적합하지 않고 그 기준을 만족시키기

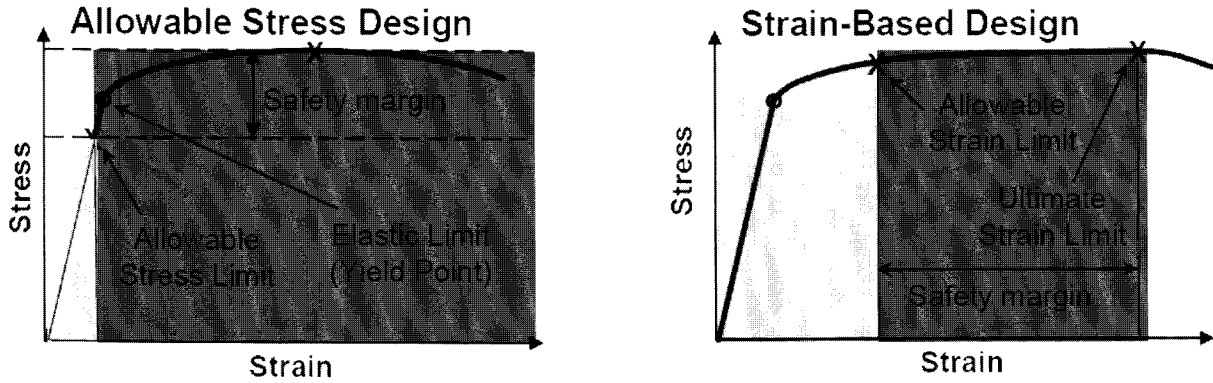


그림 1 파이프라인의 변형률기반설계와 허용응력설계 개념(Kan, Weir et al. 2008)

도 매우 어렵다. 또한, 허용응력설계법은 하중제어조건(Load-Controlled Condition)과 변위제어조건(Displacement-Controlled Condition)에 대한 구분이 없고, 안정파괴(Stable Failure)와 불안정파괴(Unstable Failure)에 대한 구분이 없다. 이러한 허용응력설계법의 한계를 인식하면서 점점 더 많은 산업표준(Industry Standard)에 변형률설계기준을 반영하고 있다.(DNV 2000) 변형률기반설계법은 한계상태설계법(Limit State Design)의 적용형태의 하나로 설계외력이 변위제어조건으로 지배되는 경우 파이프라인의 길이방향에 대한 적용한계를 응력대신 변형률(Longitudinal Strain)을 기준으로 하는 방법이다. 그림 1에 나타난 바와 같이 내압에서 발생하는 후프방향 응력은 허용응력설계법을 적용할 때 파이프라인 길이 방향으로는 변형률기반설계법을 적용하여 시스템을 효율적으로 설계할 수 있도록 한다. 이로 인해 앞서 언급된 지진대와 동결해 지역과 같은 대규모 지반변형을 유발하는 도전적인 환경조건에서는 변형률기반설계법이 허용응력설계법의 대안으로 인정받고 있다. 허용응력설계법과 변형률기반설계법이 서로 상반되는 개념의 설계법이 아니라, 공존하는 설계방법이므로 설계의 핵심은 변형률기반설계와 허용응력설계의 안전성(safety & reliability)이 동일한 수준으로 유지되는 것을 목표로 한다.

1.2 변형률기반설계용 파이프의 요구성능

그림 2에는 파이프라인설계의 변형률 요구 및 능력수준의 개념이 나타나 있다. 기본적으로는 허용응력설계법에서 응력의 항을 변형률의 항으로 변환시킨 것과 같다. 우선 필요한 파이프라인 노선과 요구되는 파이프라인 수송용량을 정한다. 다음은 그림 2의 좌측에 나타나 있듯이 설계에 필요한 변형률 요구수준(Strain Demand)를 결정하고, 우측에 나타난 주어진 파이프의 변형률 능력(Strain Capacity)와 비교하여 요구수준 이상으로 설계하게 된다. 여기서 파이프

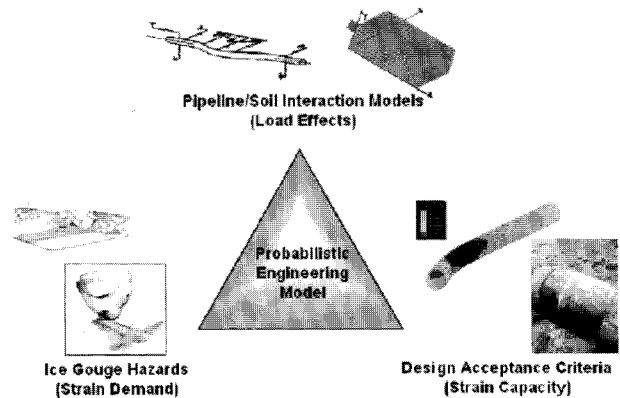


그림 2 파이프라인설계의 변형률 요구 및 능력수준의 개념 (Kenny, Barrett et al. 2007)

라인은 풍압력, 파력, 수류력, 지진력, 토압, 수압, 자중, 부력, 내압 및 충격하중 등의 다양한 외부조건에 대해 확률적인 안전성 검토를 실시하고 최종설계를 완성하면 가설작업에 들어가게 된다. 완공뒤에는 변형률 수준에 대한 모니터링을 통해 파이프라인 운용 중의 안전성을 확보하는 것으로 파이프라인의 라이프사이클이 완성된다.

변형률 요구수준을 결정하는 작업은 극지공학, 지반공학 및 해양공학 등의 분야에서 다양한 연구활동과 이를 바탕으로 한 설계수준에 대한 검토가 진행 중이다. 또한, 설계의 입력값으로서 그림 2의 우측에 표시된 파이프의 변형률 능력수준을 결정하는 작업은 매우 중요하며, 앞으로 보다 상세하게 설명할 부분이다. 우선 파이프라인의 변형률 능력은 압축변형률 능력과 인장변형률 능력으로 나눌 수 있다. 압축변형률 능력은 한계압축변형률(Critical Compressive Strain)로 표현되며, 파이프가 휨이나 압축력을 받을 경우 좌굴이 발생하기 까지의 변형률 수준을 지칭한다. 인장변형률 능력은 파이프의 원주방향용접(Girth Welding)부에서 평가하게 되는데, 이는 용접부에서 발생할 수 있는 결함에 의해 파괴되기 전까지의 변형률을 일컫게 된다.

2. 파이프 성능평가 방법

파이프의 변형률 성능 평가방법은 시험적 방법과 수치적 방법으로 나눌 수 있다. 우선 기본적으로 파이프 생산업체가 주요 에너지사에 파이프를 공급하기 위해서는 성능에 대한 시험평가서가 있어야 한다. 일반적으로 평가서에는 시편을 통한 인장성능시험 및 충격인성시험 등에 의해 평가되는 여러 항목에 대해 기준을 만족하는 지에 내용을 담게 된다. 그러나 때로는 시편을 통한 평가가 아닌 실제 파이프에 대한 성능을 요구하기도 한다.

파이프의 변형률 성능을 평가하기 위한 대표적인 시험적 방법을 살펴보면, 그림 3에는 파이프에 대한 조합하중 시험 방법을 나타내고 있다. 파이프가 가설되는 현장은 압축, 인장, 휨 및 내압 등이 개별적으로 작용하는 것이 아니라, 다양한 하중이 조합되어 파이프에 영향을 주게 된다. 기본적으로 파이프는 내압에 견뎌야 하며, 이를 위해 그림 3의 시험에서는 파이프 상하에 위치한 수압밸브를 통해 파이프 벽체에 기준최소항복응력의 80%에 해당하는 압력을 가할 수 있는 시스템으로 구성되어 있다. 파이프의 중앙축에는 축방향력을 통해 파이프에 축방향 압축응력 및 인장응력을 도입할 수 있으며, 힘가력용 지그와 연결된 액추에이터를 통해 힘을 가할 수 있어, 현장에서 발생 가능한 다양한 하중 조건을 재현할 수 있다. 변형률기반설계를 위해서는 휨이 발생할 경우 압축부에서 나타나는 압축변형률의 크기에 초점이 맞춰진다. 액추에이터를 변위제어로 조절하면 대상 파이프에는 압축부에 좌굴을 발생시킨다. 좌굴이 발생되면 더 이상 하중증가 없이 파이프는 변형하게 되는데, 이 때의 변형



그림 3 파이프의 조합하중 시험(조우연, 윤태양 등 2007)

률이 한계압축변형률이 된다. 한계압축변형률은 압축부의 변형률 능력으로 산정되어 설계에 반영된다. 한계압축변형률은 기본적으로 파이프의 기하학적 특징인 직경대 두께비의 영향을 받으나, 재료적인 특성에도 큰 영향을 받게 된다.

그림 4에는 스파이럴(Spiral) 파이프의 휨변형시험을 나타내고 있다. 에너지 수송에 사용되는 파이프는 크게 두가지 방법으로 제조가 된다. 첫번째는 후판이라 불리는 강판을 길이방향으로 롤링이나, 절곡으로 원형을 만들어 길이방향용접(Seam Welding)하는 파이프가 있으며, 두번째는 코일형태로 말린 강판을 비스듬하게 나선형으로 용접하는 스파이럴 파이프이다. 스파이럴 파이프는 용접하는 각도를 조절해서 파이프의 직경을 조절할 수 있어 큰 직경의 파이프를 제조할 수 있다. 큰 직경의 파이프의 휨성능을 시험하기 위해서는 그림 4와 같은 4점 휨시험을 사용하며 각 지점부에는 국부좌굴을 방지하기 위한 보강장치가 설치된다. 순수 휨모멘트가 발생하는 중앙부에서는 압축력에 의한 좌굴을 유도할 수 있으며 그림 3에 의한 방법과 유사하게 한계압축변형률을 측정할 수 있다.

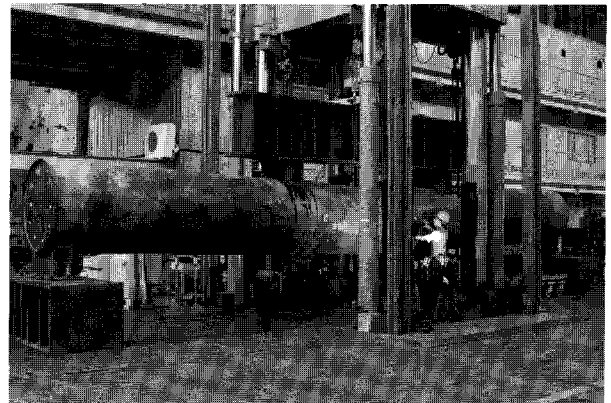


그림 4 스파이럴 파이프의 휨변형 시험
(조우연, 윤태양 등 2007)

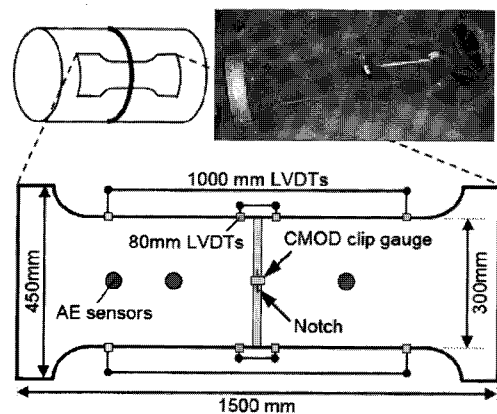


그림 5 CWP(Curved Wide Plate) 시험
(Fairchild, Crawford et al. 2008)

그림 5에는 CWP(Curved Wide Plate) 시험을 나타내고 있다. CWP시험은 파이프라인의 인장변형률 능력을 평가하기 위한 방법으로 용접부에서 발생할 수 있는 결함을 반영한 시험이다. CWP시험은 곡률을 그대로 유지하게 되어 균열발생부의 잔류응력을 유지할 수 있으므로 응력의 교란없이 파이프 상태를 평가할 수 있는 장점이 있다. CWP 시험을 위해서는 거쓰용접(Girth Welding)된 파이프에서 중앙부에 용접부가 위치하도록 그림 5와 같은 곡률있는 시편을 떼어낸다. 시편의 안쪽 거쓰용접부의 중앙부에 0.2mm 폭의 미세균열을 인공적으로 발생시켜 결함을 모사한 후 양단부에서 인장력을 도입한다. 인장력이 가해지면 중앙부 균열에서는 파괴가 발생하게 되고, CMOD(Crack Mouth Opening Displacement)를 측정해서 CTOD(Crack Tip Opening Displacement)를 산정하게 되며, 이를 통해 파이프의 인장변형률 성능을 평가하게 된다.

3. 압축 변형률 능력 수치해석 및 평가

시험적 방법은 물리적 현상에 대한 정확한 고찰은 가능하나 경제적, 시간적인 제약으로 인해 제한적인 연구만이 가능하다. 따라서, 시험적 방법을 바탕으로 변형성능에 대한 수치적 고찰이 필요하다. 본 절에서는 한계압축변형률을 해석하는 방법의 기본 절차와 이와 더불어 고려되어야 하는 초기부정 및 재료의 비선형성에 대해 소개한다.

3.1 한계압축변형률 해석

그림 6은 파이프거동을 수치해석적으로 고찰하기 위한 고려사항을 도식적으로 나타낸 것이다. 수치모형은 좌굴에 의한 한계압축변형률을 평가하기 위해서는 재료의 비선형 거동과 기하적 효과를 반영해야 한다.

그림 7은 앞서 설명되었던 조합하중에 의한 파이프 거동

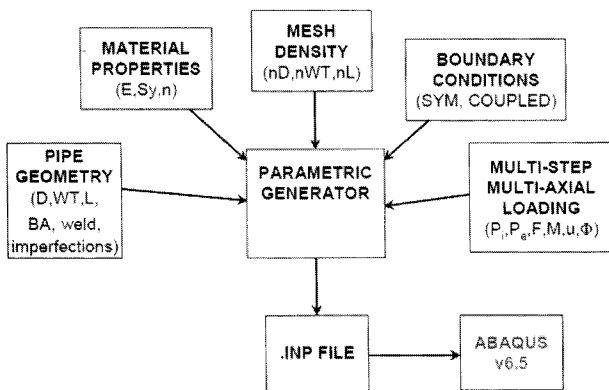


그림 6 파이프거동 수치해석 고려사항 (Wolodko and DeGeer 2006)

을 수치적으로 평가하는 과정을 나타내고 있다. 그림 7의 수치해석은 기본적으로 시험적 방법을 재현하기 위한 과정이다. 우선 파이프의 기본제원을 모형화하고 실제 시험조건과 동일한 조건을 만들기 위해 경계조건에 해당하는 상하단부 힌지를 형성하고 액추에이터 하중에 해당하는 힘지그의 끝을 가력하게 된다. 파이프부분에는 기본적으로 ABAQUS S4R 요소를 사용하고 재료모형은 일반적인 소성모델인 Isotropic Hardening인 Von Mises 모형을 사용할 수 있다. 재료의 응력-변형률 관계는 시험적으로 평가된 자료와 식 (1)에 나타난 Ramberg-Osgood 관계를 매칭하여 사용한다.

$$\epsilon = \frac{\sigma_c}{E} + \left[0.005 - \frac{\sigma_y}{E} \right] \left[\frac{\sigma_c}{\sigma_y} \right]^n \quad (1)$$

여기서 ϵ 은 변형률, E 는 탄성계수, σ_y 는 기준최소항복응력, σ_c 는 엔지니어링 응력, n 은 가공경화지수를 나타낸다. 식 (1)은 탄성계수, 기준최소항복응력 및 가공경화지수 3개의 변수로 간단하게 파이프의 응력-변형률 관계를 표현할 수 있으므로 수치해석적 방법에 많이 사용된다.

그림 8은 스파이럴 파이프의 휨변형 해석을 모형화하고 있다. 스파이럴 파이프의 경우는 용접부가 나선모양으로 위치하고 있으므로 이를 반영한 모형이 필요하다. 용접부는 일반적으로 파이프 모재 보다 항복응력값이 크게 나타나며, 용접부와 모재의 경계부인 열영향부(Heat Affected

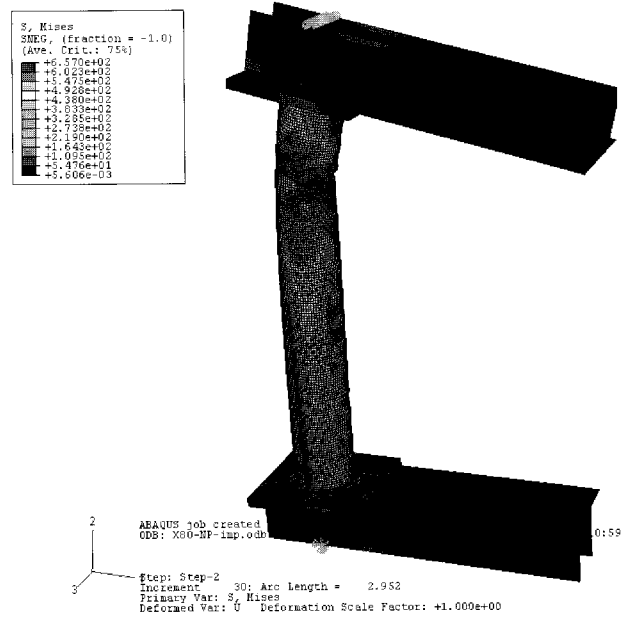


그림 7 파이프 조합하중 해석 (조우연, 윤태양 등 2007)

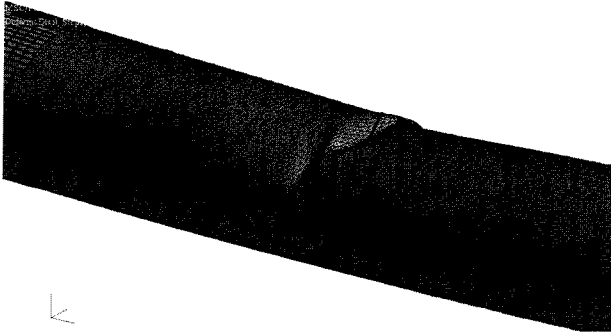


그림 8 스파이럴 파이프의 휨변형 해석 (조우연, 윤태양 등 2007)

Zone, HAZ)의 경우는 모재와 용접부 보다 항복응력이 낮으나 범위가 작기 때문에 무시할 수 있다.

3.2 기하학적 초기부정 및 코팅 영향

파이프는 제조과정에서 초기부정(Initial Imperfection)을 내포하게 된다. 초기부정은 크게 3가지로 구분되는데, 첫번째 초기부정은 그림 9에 나타난 바와 같은 길이방향의 굴곡을 설명하는 블리스터이다. 파이프 제조과정에서 완전한 직선을 이루지 못하게 되며, 이는 비정형성을 나타낸다. 따라서 일반적으로는 블리스터의 최대진폭과 블리스터의 파

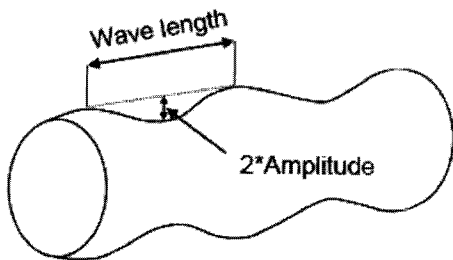


그림 9 파이프의 길이방향 블리스터(Sato, Mikami et al, 2008)

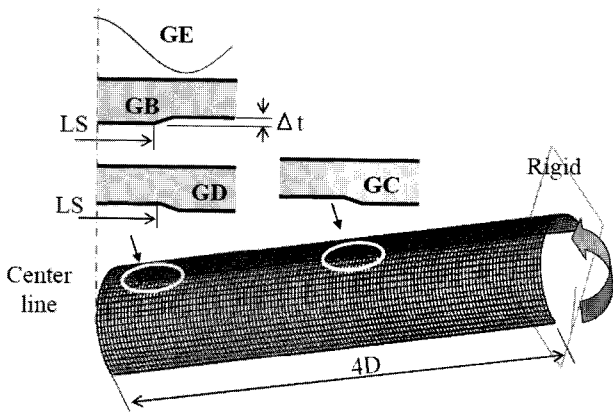


그림 10 파이프의 두께에 대한 초기부정 (Tsuru, Shinohara et al, 2005)

장을 함수로 표현하여 수치모형에 반영한다. 두번째 초기부정으로 그림 10은 파이프의 두께에 대한 초기부정을 나타내고 있다. 길이방향 또는 원주방향으로 발생할 수 있는 두께의 편차를 해석적으로 반영한다. 세번째는 파이프 형상에 대한 초기부정으로 완전한 원이 아니라 난형(Ovality)에 의한 초기부정이다.

판재에서 파이프로 제작된 모든 파이프는 부식에 대한 내구성을 갖도록 코팅의 과정을 거친다. 이 과정에서 파이프에 가해지는 열은 파이프의 물성에 변화를 일으키게 되며, 그림 11에는 내부식용 코팅에 의해 발생하는 Strain Aging의 효과가 서로 다른 영향을 주는 재료의 응력-변형률 곡선을 나타내고 있다. 불연속(Discontinuous)이라 표현된 흑색의 응력-변형률 곡선은 일반적인 파이프 재료에서 나타날 수 있는 모습이다. 반면 연속(Continuous)으로 표현된 적색 곡선은 Strain Aging 효과가 나타나지 않도록 조정된 강재의 응력-변형률 곡선이다. 내부식용 코팅에는 약

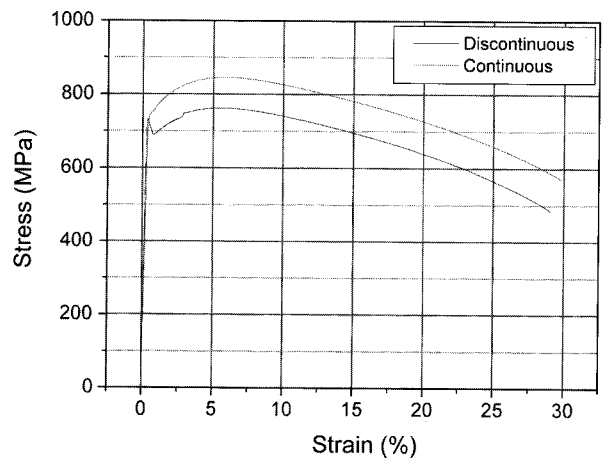


그림 11 코팅된 파이프의 응력-변형률 곡선 (Cho, Seo et al, 2009)

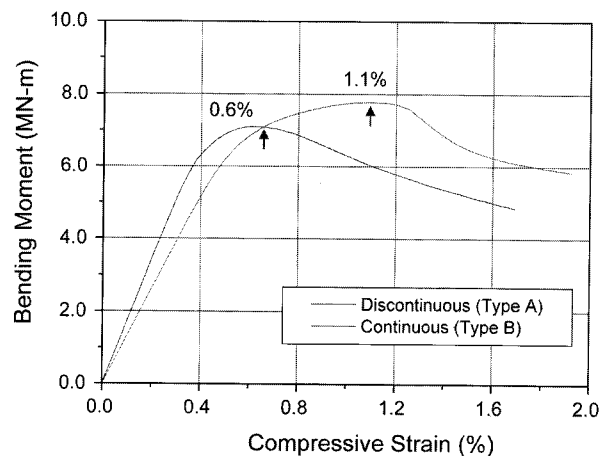


그림 12 수치해석적 한계압축변형률 평가

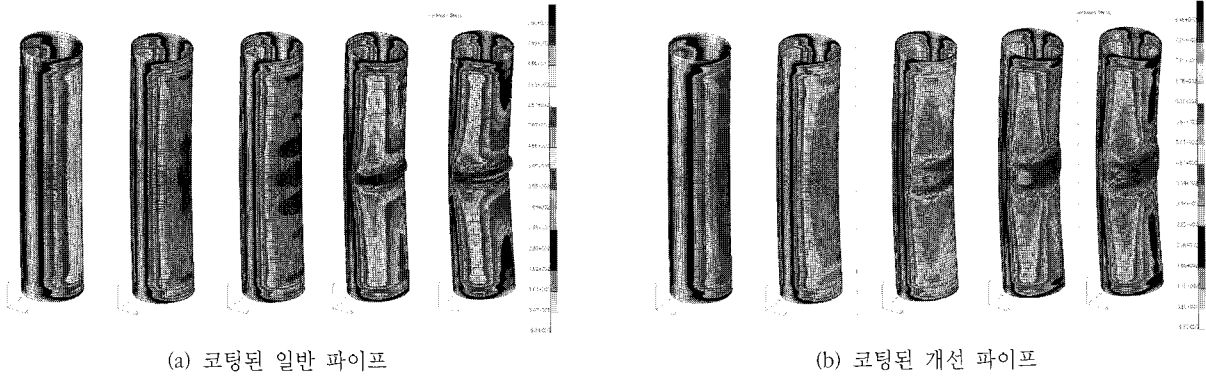


그림 13 Strain Aging 개선 전,후의 파이프 변형 특성(Cho, Seo et al, 2009)

250°C의 온도로 5분 내외의 열화과정을 거치게 되는데 이는 파이프 강재의 내부 조직 변화를 일으켜 항복응력 이후 갑작스런 응력감소와 같은 비선형 거동을 나타내게 된다. 그림 12에는 이러한 응력-변형률 관계의 차이를 반영한 해석결과를 나타내고 있다. 최대 휨모멘트의 값은 두 경우 거의 동일하지만, 변형률의 측면에서는 일반적인 파이프가 압축변형률이 약 0.6%에서 좌굴이 발생하고 Strain Aging이 개선된 파이프에서는 약 1.1%에서 좌굴이 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 압축변형률 능력이 2배 증가하는 결과로 변형률기반설계에서는 이러한 거동을 보이는 재료가 필요하다는 것을 알 수 있다. 그림 13에는 각각의 파이프에 대한 단계별 응력 및 변형을 나타내고 있다. 그림 13(a)에서 볼 수 있듯이 일반 파이프에서는 응력과 변형이 국부적으로 집중이 되면서 좌굴이 발생하지만, 그림 13(b)의 경우는 응력과 변형이 비교적 넓은 범위로 분산되면서 큰 변형률을 유도하는 것을 알 수 있다.

3.3 재료의 이방성

그림 14는 파이프강재의 압축 및 인장거동의 이방성 (Anisotropy)을 나타내고 있다. 좌측으로 표현된 압축부의 응력-변형률 곡선의 절댓값이 우측의 인장 응력-변형률 곡선보다 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 일반적인 파이프 해석에서는 압축과 인장거동이 동일하다는 가정하에 해석을 실시하고 있으나, 시험적 방법에 따르면 두 방향에는 이방성이 존재한다. 파이프라인이 휨에 의한 영향권에 놓일 경우 압축부와 인장부가 나뉘게 되는데 일반적으로 인장부가 항복에 도달하기 전에 압축부의 좌굴에 의해 파괴가 발생하지만, 지반침하나 산사태와 같은 현상에서는 인장과 휨이 동시에 발생하게 되어 인장부와 압축부가 동시에 항복에 도달하는 상황이 가능하다 이에 대한 평가를 위해서는 재료의 압축, 인장 이방성에 대한 고려가 필요하다.

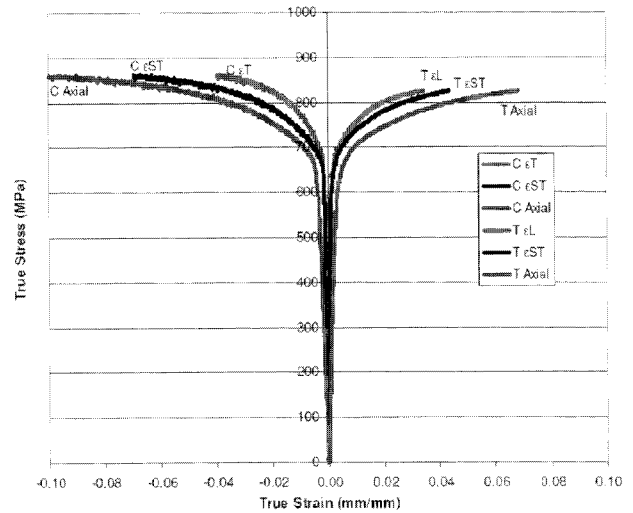
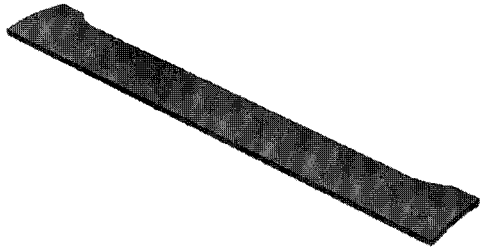


그림 14 압축 및 인장거동의 이방성 (Treinen, Luecke et al, 2008)

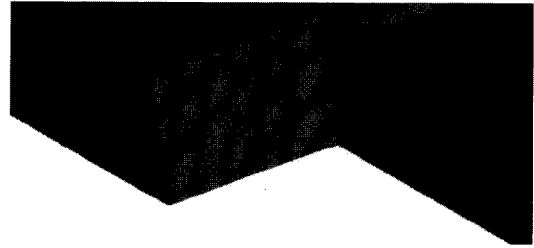
4. 인장 변형률 능력 수치해석 및 평가

압축변형성능에 대한 평가와는 달리 인장변형성능에 대한 평가는 국부적으로 매우 정밀한 작업이 이루어진다. 기본적으로 파괴역학적 개념으로 접근하게 되는데, 균열의 진전보다는 진전이 이루어지기 전까지의 거동에 관심을 둔다.

그림 15는 CWP 시험의 수치모형을 나타내고 있다. 그림 15(a)에서는 CWP 시험의 절반 모형을 15(b)에서는 중앙 거스름접부와 초기 인공균열에 대한 모형을 나타내고 있다. 압축 변형률 능력평가와는 달리 파이프 모재와 다른 용접부의 물성변화와 열영향부에 대한 변화 반영해야 한다. 그림 16은 CWP 시험에 의한 파괴 단면을 나타내고 있는데, 초기 균열 팁의 벌어지면서 연성파괴를 나타내는 면이 Ductile tearing으로 표현되는 면이다. 그림 16에 나타난 바와 같이 관심이 되는 대상은 균열의 진전이 아닌 연성파괴 모드에서의 균열 팁의 벌어지는 각도 또는 변위이다.



(a) CWP 1/2 모형



(b) CWP 중앙 거스용접부 초기균열 모형

그림 15 CWP 시험 수치해석 모형(Duan, Wang et al. 2008)

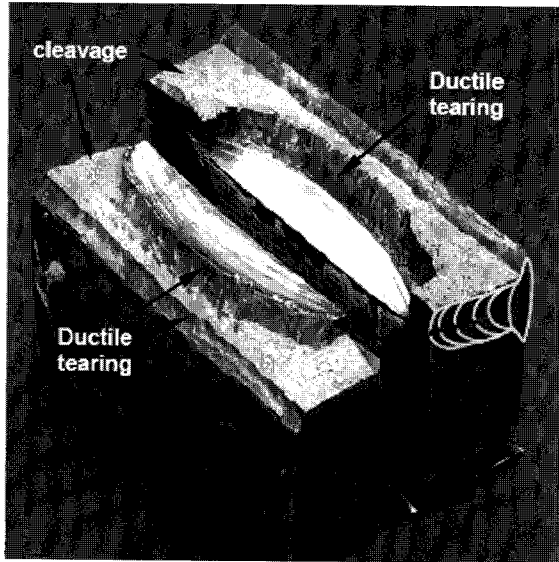


그림 16 CWP 시험에 의한 파괴 단면

5. 결 론

본 기사에서는 파이프라인의 변형률 능력을 평가하는 방법에 대해 소개하였다. 극한 환경에서의 파이프라인의 설계 대안으로 떠오른 변형률기반설계를 적용하기 위해 파이프의 변형률 능력을 정확하게 아는 것은 매우 중요하다. 변형률을 평가하는 기법으로 시험적 방법과 수치적 방법을 살펴보면, 실제 파이프가 갖는 초기부정과 비선형 거동 해석의 필요성을 검토하였다. 파이프의 수요처인 주요 에너지사들은 이러한 변형률 능력에 대한 정확한 데이터를 바탕으로 설계에 반영하고 있으며, 공급사인 철강사들과의 지속적인 연구개발을 바탕으로 고변형성능을 갖는 파이프라인 개발을 지속하고 있다.

참 고 문 헌

1. 조우연, 윤태양 등, 변형률기반설계용 X80급 라인파이프

의 휨변형 성능연구, 2007

2. Cho, W. Y., D.-H. Seo, et al. Compressive Strain Limit of Aged API-X100 Linepipe. The 28th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Hawaii, 2009

3. DNV, Offshore Standard DNV-OS-F101. Submarine Pipeline Systems, 2000

4. Duan, D.-M., Y.-Y. Wang, et al. Modeling and CMOD Mapping of Surface-Cracked Wide Plates. The 7th IPC, Calgary, 2008

5. Fairchild, D. P., M. D. Crawford, et al. Girth Welds for Strain-Based Design Pipelines. The 18th International Offshore and Polar Engineering Conference, Vancouver, 2008

6. Kan, W. C., M. Weir, et al. Strain-Based Pipelines: Design Consideration Overview. The 18th International Offshore and Polar Engineering Conference, Vancouver, 2008

7. Kenny, S., J. Barrett, et al. Integrating Geohazard Demand and Structural Capacity Modelling within a Probabilistic Design. The 7th International Offshore and Polar Engineering Conference, Lisbon, 2007

8. Sato, T., Y. Mikami, et al. Parametric Study on the Effect of Geometric Imperfections on the Bending Capacity of High-Strength Linepipes. The 7th IPC, Calgary, 2008

9. Treinen, J. M., W. E. Luecke, et al. Anisotropic Behavior of X100 Pipeline Steel. The 18th International Offshore and Polar Engineering Conference, Vancouver, 2008

10. Tsuru, E., H. Shinohara, et al. Strain Capacity of Line Pipe with Yield Point Elongation. The 15th International Offshore and Polar Engineering Conference, Seoul, 2005

11. Wolodko, J. and D. DeGeer, Critical Local Buckling Conditions for Deepwater Pipelines. The 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Hamburg, 2006

[담당 : 윤영철, 편집위원]