

도시가스배관 부식결함 평가방안 개발

김철만[†], 김우식^{*}, 한상인^{**}, 최송천^{**}

Development of Corrosion Defect Assessment Method for City Gas Pipeline

Cheol-Man Kim, Woo-Sik Kim, Sang-In Han, Song-Chun Choi

Key Words: City Gas Pipeline(도기가스배관), Corrosion Defect(부식결함), Full Scale Burst Test(실배관 파열시험), Finite Element Analysis(유한요소해석), Remaining Strength(잔류강도)

Abstract

The length of city gas pipeline is increasing with expansion of natural gas transmission rapidly. A lot of the expense was paid for repair and maintenance with increasing of pipeline length and the cost of repair and maintenance by the corrosion was the highest. It is necessary to evaluate integrity in case of thickness reduction by corrosion. There are a lot of assessment criteria for corrosion defect in foreign countries but they are not suitable for application in the country directly.

In this work, we performed the burst test and the finite element analysis for city gas pipeline, KS D3507 and KS D3631 for city gas transmission, and developed the assessment method of corrosion defect, which is suitable for domestic condition.

1. 서론

천연가스공급이 전국적으로 확대됨에 따라 도시가스배관의 길이는 매년 급속히 증가하는 추세이며 2002년 말 기준으로 약 40,000km에 도달하였다. 이러한 도시가스배관은 매설 범위가 매우 광범위할 뿐만 아니라 주로 인구밀집지역에 설치되기 때문에 부식등에 의한 파손은 천연가스 누출로 인한 대형사고를 초래하여 상당한 재산적 손실 및 인명적 손실을 초래할 수 있다.

지하에 매설된 가스배관은 주위 환경의 영향으로 부식이 발생될 가능성이 항상 존재한다. 실제

국내외적으로 많은 배관 파손의 원인이 부식에 의한 두께 손실이라 밝혀지고 있으며 이를 해결하기 위하여 다양한 이론이 발표되어 연구되고 있다.^(1,2) 부식된 배관의 구조적 안전성을 정확히 파악하는 것은 유지보수 비용을 절감하고 안정적인 가스공급을 위하여 반드시 필요한 사항이다

부식된 가스배관의 안전도 평가는 이미 30년 전에 개발된 ASME B31G 방법을 사용하고 있다.⁽³⁾ 현재에도 이러한 분석과 실험과정은 유효하지만 안전도의 개념은 지난 30년간의 경험에 의해 재평가의 필요성이 제기되고 있다.

지금까지 많은 연구가 수행되어 부식배관 잔류강도 평가에 대한 기준이 발표되어 있지만 국내 도시가스배관에 직접 적용하기는 어려운 상황이다.⁽⁴⁾ 배관재질, 운용상태 및 주변환경이 각기 다른 상황에서 해외에서 개발된 기준을 도시가스배관에 그대로 적용하는 것은 무의미하기 때문이다. 국내에서 제작되어 사용되고 있는 도시가스

* 한국가스공사

** 한국가스안전공사

E-mail : cmkim@kogas.re.kr

TEL : (031)400-7507 FAX : (031)416-9014

배관에 대한 평가방안이 필요한 것이다.

따라서 본 연구에서는 현재 국내에서 사용되고 있는 도시가스용 중압배관에 대하여 기계적 특성을 평가하고, 부식결함을 가공한 실제크기 배관에 대하여 잔류강도 평가 및 유한요소해석을 수행하여 국내실정에 적합한 부식배관 평가 방안을 개발하고자 하였다.

2. 시험방법

2.1 재료

기계적 특성을 평가하기 위하여 현재 도시가스 수송용 KS D3507⁽⁵⁾과 KS D3631⁽⁶⁾ 규격의 배관을 사용하였다. 중압(9.9kg/cm²)이하에서 사용되는 탄소강관으로 본 연구에서는 300A 규격(내경 300mm, 두께 7mm)의 배관을 사용하였다. KS D3631 배관은 KS D3507 배관보다 화학성분에서 보다 엄격하게 규정하고 있다. 표 1에 두 배관에 대한 화학성분을 비교하여 나타내었다.

2.2 기계적 특성 평가

부식결함 배관의 잔류강도를 평가하기 위하여 기본 데이터로서 인장시험결과가 필요하다. 모재 길이방향에 대하여 KS B0801 규격에 따라 그림 1과 같이 표준 시험편을 2개씩 제작하여 인장시험을 수행하였다. INSTRON 8502 모델의 유압식 시험기를 사용하여 1mm/min의 속도로 시험을 수행하였다.

2.3 파열시험

부식에 의하여 두께가 감소한 도시가스배관의 잔류강도를 평가하기 위하여 실제크기 배관에 대한 정수압 파열시험을 수행하였다. 그림 2는 파열시험장치를 나타낸 것으로 변형률 및 압력 데이터를 컴퓨터로 처리하여 저장되도록 하였다. 물을 사용하여 가압을 하며 가압 속도는 5kgf/cm²/min으로 설정하였다. 배관 길이는 2m로서 양쪽을 캡으로 용접하여 밀봉시켰다.

Table 1 Chemical compositions of KS D3507 and KS D3631

	KS D3507		KS D3631	
	KS Spec.	This work	KS Spec.	This work
C	-	0.075	<0.30	0.083
Si	-	0.014	<0.35	0.01
Mn	-	0.558	<0.95	0.571
P	<0.040	0.011	<0.040	0.012
S	<0.004	0.007	<0.035	0.007
Fe	Bal.	Bal.	Bal.	Bal.

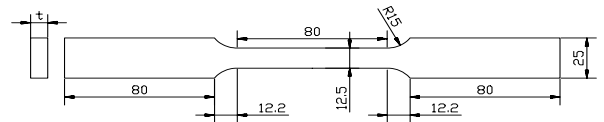


Fig. 1 Tensile specimen diagram



(a)



(b)

Fig. 2 Burst test system

(a) Data process (b) Pressurization device

표 2는 파열시험을 수행하기 위한 부식결함의 크기 및 종류를 나타내었고 그림 3은 기계가공 후의 부식결함(300L×50W×0.5d/t) 형상 및 2축 스트레인게이지 부착상태를 나타내었다. KS D3507 및 KS D3631 두 배관의 표면에 부식결함 폭과 깊이를 일정하게 하고 결함 길이만 변화시키면서 파열시험을 수행하였다. 2축 스트레인 게이지는 총 6개를 부착하였고 길이방향은 A, 원주방향은 H로 구분하였다.

Table 2 Defect size

	Defect Size		
	Depth(d)	Width(W)	Length(L)
KS D3507	0.5t	50mm	100mm
			200mm
			300mm
KS D3631	0.5t	50mm	100mm
			200mm
			300mm

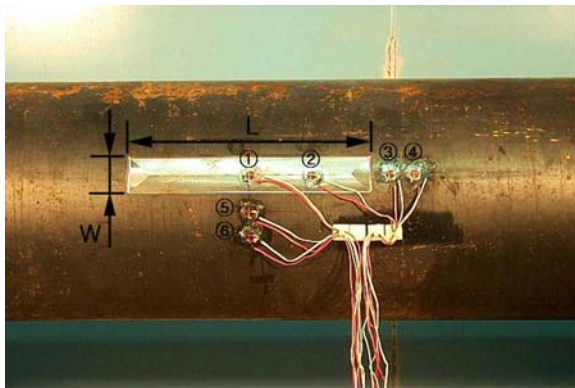


Fig. 3 The shape of machined corrosion defect(300×50×0.5t)

2.4 유한요소해석 및 부식결함 평가방안 개발

파열시험의 모사를 위해 시험 조건과 같은 형상의 부식부위를 유한요소모델로 구성하여 동일 조건을 적용하여 유한요소해석을 실시하였다. 모델링은 MSC Patran 9.0을 사용하였으며 유한요소 해석은 Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc.에서 구조 해석용으로 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS Version 5.8을 사용하였다.⁽⁷⁾

유한요소모델은 그림 4와 같이 배관의 형상과

하중의 대칭조건을 고려하여 1/4로 단순화하여 모델링하였다. 해석에 사용된 재료 물성치는 KS D3507과 KS D3631 두 배관의 진응력-진변형률 선도를 사용하였다.

유한요소 해석을 통하여 실제크기 배관 파열시험에 대한 결과를 검증하였으며 부식결함 크기를 다양하게 변화시켜 시험으로 수행하지 못한 경우에 대한 파열압력을 구하였다. 해석을 통하여 구한 파열압력을 종합하여 도시가스배관에 적합한 계산식을 도출하였고 사용자가 쉽게 사용하도록 프로그램화 하였다.

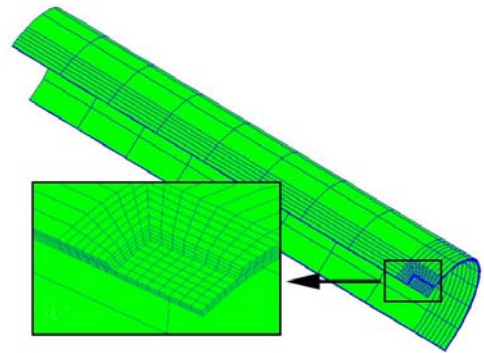


Fig. 4 Finite element mesh for corroded pipeline

3. 시험결과 및 고찰

인장시험결과는 유한요소 해석의 재료 물성치로서 그리고 부식배관 잔류강도를 평가하기 위한 기초 자료로서 활용된다. 표 3은 인장시험 결과를 나타낸 것으로 KS 규격에서 요구하는 수치보다 높게 평가되었다. KS D3507 배관의 인장 및 항복강도가 KS D3631 배관의 것보다 약간 높게 나타났고, 연신율은 상대적으로 낮게 나타났다.

표 4는 부식결함 크기에 따른 파열압력을 나타낸 것이다. 배관 종류에 따른 파열압력의 차이는 매우 작게 나타났다. 결함길이가 300mm일 때 110kgf/cm²로, 결함길이가 100mm일 때 140kgf/cm²이므로 파열압력이 평가되었다. 보통 9kgf/cm²의 중압에서 사용되는 것을 감안하여 볼 때, 300×50mm크기의 부식결함 배관이 부식으로 인하여 50%까지 두께가 감소할지라도 상당히 안전함을 알 수 있다.

Table 3 Mechanical properties of KS D3507 and KS D3631

	KS D3507		KS D3631	
	KS Spec.	This work	KS Spec.	This work
YS (MPa)	-	373	206 ≤	345
UTS (MPa)	294 ≤	436	334 ≤	416
Elong. (%)	25 ≤	27	25 ≤	34.4

Table 4 Burst pressure according to corrosion defect size

	Defect Size (L×W×d)	Burst Pressure (kgf/cm ²)
KS D3507	100×50×3.5	143.6
	200×50×3.5	123.7
	300×50×3.5	109.8
KS D3631	100×50×3.4	141.2
	200×50×3.7	118.8
	300×50×3.5	109.9

그림 5는 300×50×0.5t 크기의 부식결함을 가공한 KS D3631 배관에서, 그림 3의 ①~⑥ 위치에서의 압력변화에 따른 변형률 측정결과를 나타낸 것이다. 모든 위치에서 60kgf/cm²의 압력까지 거의 탄성적으로 변형하였고, 부식결함 내부(①, ② 위치)가 급격히 소성 변형되었다. 스트레인 게이지 ③ 위치에서의 길이방향 변형(S3A)만이 압축성분을 나타내었고 나머지는 인장성분을 나타내거나 아니면 거의 변형이 없었다.

그림 6은 KS D3631 도시가스배관을 대상으로 실시한 파열시험 결과와 유한요소 해석 결과를 상호 비교하여 나타내었다. 결함 깊이를 다양하게 변화시키면서 유한요소 해석한 결과를 함께 나타내었다. 해석한 결과들이 시험으로 구한 파열압력수치와 거의 비슷하거나 약간 낮게 나타났.

유한요소 해석결과를 종합하여 배관 및 부식부위 형상을 고려한 부식배관 잔류강도 평가식을

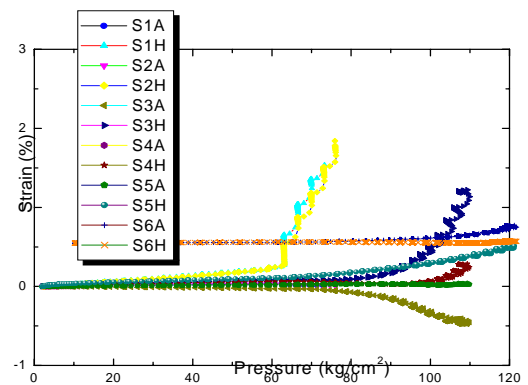
다음과 같이 제시하였다.

$$P_f = \frac{2t}{D_i} \sigma_u \left[A_2 \left(\frac{l}{\sqrt{Rt}} \right)^2 + A_1 \left(\frac{l}{\sqrt{Rt}} \right) + A_0 \right]$$

$$A_2 = 0.1163 \left(\frac{d}{t} \right)^2 - 0.1053 \left(\frac{d}{t} \right) + 0.0292$$

$$A_1 = -0.6913 \left(\frac{d}{t} \right)^2 + 0.4548 \left(\frac{d}{t} \right) - 0.1447$$

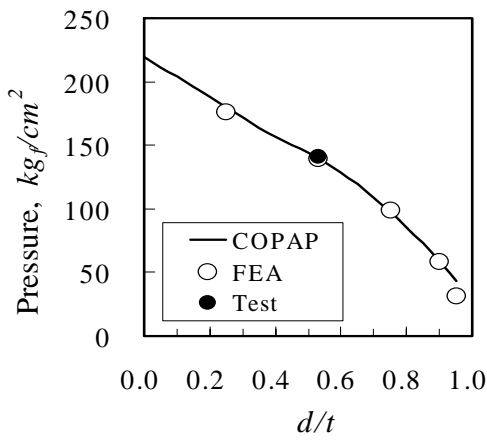
$$A_0 = 0.06 \left(\frac{d}{t} \right)^2 - 0.1035 \left(\frac{d}{t} \right) + 1.0$$

**Fig. 5** The strain variation according to pressure (KS D3631, defect size:300×50×0.5t)

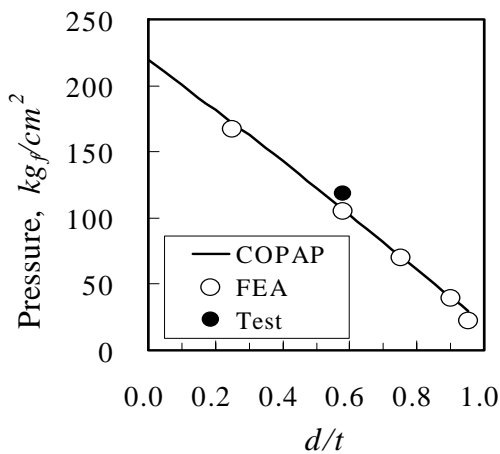
도시가스배관 잔류강도 평가식을 사용하여 다양한 부식결함이 존재할 때 사용자가 쉽게 안전성을 평가하기 위하여 프로그램으로 제작하였다. 그림 7은 도시가스배관의 잔류강도를 평가하기 위한 COPAP CITY(CORroded Pipeline Assessment Program for CITY gas pipelines) 프로그램의 초기 화면을 나타낸 것이다. 부식 결함이 있는 도시가스배관의 잔류강도를 평가하고 건전성을 판단하기 위한 목적으로 제작된 Windows 기반의 프로그램이다.

기존에 해외에서 개발된 각종 부식결함 잔류강도 평가 기준이 포함되어 있어 COPAP CITY 프로그램과 상호 비교하도록 하였다. 각 기준들은 다음과 같다.

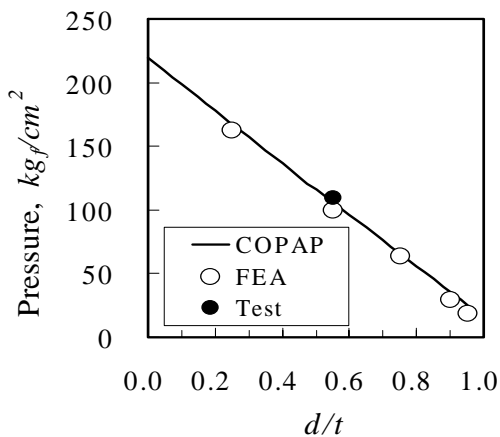
- o Classical Effective Area Methods
- o The ASME B31G Criterion
- o The RSTRENG 0.85 or Modified B31G Criterion
- o Chell Limit Load Analysis (global model)
- o Kanninen Shell Theory Criterion



(a) L=100mm



(b) L=200mm



(c) L=300mm

Fig. 6 Comparison of burst test and FEA of KS D3631 according to defect depth

- o Sims Pressure Vessel Criterion
- o Ritchie and Last Criterion
- o PRCI/Battelle PCORRC Plastic Collapse Criterion
- o BG Technology/Det Norske Veritas Level 1 Criterion

프로그램 구성은 크게 데이터 입력부, 잔류강도 계산, 해석 결과 출력의 세 부분으로 되어 있다. 그림 8은 KS D3631배관에 대하여 300×50×3.5mm 크기의 부식결함이 존재할 때, 잔류강도를 평가하기 위한 데이터 입력 화면을 나타낸 것이다. 배관 사양, 기계적 성질, 부식결함 치수 등을 입력하도록 되어 있다. 재료 물성치 및 배관에 대한 정보는 데이터베이스화하여 관리가 가능하게 되어 있다. 특히 부식결함 깊이가 일정하지 않을 경우 부식 깊이에 따라 사용자가 측정된 깊이를 입력하면 ASME B31G와 같이 결함 형상을 단순화하여 잔류강도를 계산하도록 하였다.



Fig. 7 Main window of COPAP CITY program



Fig. 8 Input data window



(a)

Method[kgt/cm ²]	Max. Safe Pressure	Burst Pressure
1. COPAP	81,078	101,347
2. Effective Area	0,000	0,000
3. ASME B31G	56,643	70,803
4. Modified B31G	80,958	101,197
5. Chell Limit Load Analys	70,004	87,505
6. Kanninen Shell Theory	64,700	80,875
7. Sims Pressure Vessel	65,428	81,785
8. Ritchie and Last	63,903	79,879
9. PRCI/Battelle PCORRC	73,383	91,728
10. BG/DNV Level 1	76,824	96,030
MAOP	113,635	113,635

(b)

Fig. 9 Result window of COPAP CITY program (KS D3631, 300×50×0.5t)

(a) View results (b) Summary of results

입력 자료를 바탕으로 계산한 잔류강도 결과를 그림 9에 나타내었다. Maximum Safe Pressure와 Burst Pressure에 대하여 기존 해외에서 개발된 부식 결함 평가 기준과 COPAP CITY 프로그램 해석결과를 막대그래프로 나타내었고, 각각의 수치는 "Summary of Result"를 선택하여 도표로 나타내도록 하였다.

KS D3631 배관에 300×50×3.5mm의 부식결함이 존재할 경우 COPAP CITY에 의한 계산결과 파열 압력이 101.3kg/cm²로 나타났다. 동일조건에서 시험한 파열압력이 109.9kg/cm²인 것과 비교하여 볼 때 COPAP CITY에 의한 결과가 약 8%정도 낮게 나타났다. 기존에 개발된 기준들보다 COPAP

CITY의 결과 값이 파열시험 수치에 가장 근접하여 가장 정확함을 알 수 있다. 기존의 기준들 중에서 Modified B31G 기준이 COPAP CITY와 가장 유사한 결과를 나타내었다.

4. 결론

도시가스 공급용 KS D3507과 KS D3631 두 배관에 대한 부식결함 부위 평가방안 개발 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 도시가스배관에 가장 적합한 부식결함 평가 방안을 개발하였고 사용자가 쉽게 사용할 수 있도록 프로그램으로 제작하였다.

- 도시가스배관의 부식부위 평가용 COPAP CITY 프로그램이 기존의 기준들과 비교하여 볼 때 가장 정확한 결과를 나타내었다.

참고문헌

- (1) B.A.Chouchaoui, "Evaluation the remaining strength of corroded pipelines", University of Waterloo, pp.1 ~ 27, 1993
- (2) "배관 결함평가 및 보수기술 확립", 2000, 한국가스공사 연구보고서, 00-KA-PI-수시-016-00
- (3) American Society of Mechanical Engineers, "ASME B31G-1991; Manual for determining the remaining strength of corroded pipeline", 1991
- (4) Denny R. Stephens and Robert B. Francini, Proceedings of ETCE/OMAE 2000 Joint Conference, " A review and evaluation of remaining strength criteria for corrosion defects in transmission pipelines", Feb.14-17, 2000, ETCE2000/OGPT-10255
- (5) KS D3507 "배관용 탄소 강관"
- (6) KS D3631 "연료 가스 배관용 탄소 강관"
- (7) ABAQUS, "ABAQUS user's manual", Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., 1999