



연료가스 배관용 탄소강관의 잔존강도에 대한 연구

임상식 · 김지선 · [†]류영돈 · 이진한

안전연구실, 한국가스안전공사

(2016년 9월 29일 접수, 2016년 10월 24일 수정, 2016년 10월 25일 채택)

A Study on the Residual Strength of the Carbon Steel pipe using in Fuel Gas

Sang-Sik Yim · Ji-sun Kim · [†]Young-don Ryu · Jin-Han Lee

Safety Research Division, Korea Gas Safety Corporation

(Received September 29, 2016; Revised October 24, 2016; Accepted October 25, 2016)

요약

국내에서는 연료 가스 배관용 탄소강관으로 KSD 3631의 기준을 따르도록 되어있으며, 탄소강관이 지하에 매설되는 경우 부식을 방지하기 위해 강관에 합성수지로 피복을 한다. 피복은 부식 방지 조치를 하는 것으로 압축된 연료가스를 이송하는데 필요한 강도는 원관인 탄소강관이 그 역할을 수행한다. 따라서 탄소강관에 결함이 발생하였을 때, 그 결함에 따른 강도를 평가하는 것이 중요한데 국내에는 잔존강도를 평가하기 위한 방법이 부족하다. 결국 국외 기준인 DNV RP F101 또는 ASME B31G의 기준에 따라 잔존강도를 평가하는데, 그 결과가 국내 배관에 적용 타당성이 있는지 검증이 부족하며, 85% 이상의 결함에 대해서는 예측 할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 KSD 3631의 배관을 이용하여 인위적 결함을 가공하여 잔존강도를 평가하기 위한 실험을 수행하였다. 그 결과 폭에 따라서 일정한 잔존강도의 차이를 보이며, 국내 연료 가스용 배관에는 DNV RP F101이 적합하다는 결론을 도출하였다. 본 연구의 결과는 결함 깊이가 큰 경우에 대한 결과와 타당한 국외 기준을 파악하기 위한 결과를 포함하고 있어, 배관의 잔존강도를 이용한 위험성 평가 등에 유용하게 활용될 것으로 기대한다.

Abstract - The standard(KSD 3631) should be obey for using fuel gas pipe in Korea and a carbon steel pipe is coated with synthetic resin for protecting the corrosion. The coating is just performed for anti-corrosion, and actual strength of pipe is given by the carbon steel pipe when the fuel gas is transported. When the flaws are occurred in the steel pipe, the estimation method which is used for residual strength is necessary. But the suitable method is not exist for applying the fuel gas pipe. Eventually, the residual strength is estimated by overseas regulation such as ASME B31G or DNV RP F101. But the method based on the relative regulations are not sufficiently valid and it can not estimate the 85% over even. Therefore, the test was performed for validation with pipe specimen. The specimen was made with artificial flaw. The test results showed the certain differences according to flaw depth and DNV RP F101 is suitable to estimate the residual strength in Korea. The results in this paper contain in case of the severe flaw depth and suitable mode for Korea, so the result can be expected as valuable and widely used in various field.

Key words : Residual strength, Carbon steel pipe, corrosion flaw

[†]Corresponding author: rydon@kgs.or.kr

Copyright © 2016 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

연료가스용 탄소강관은 피복강관(PLP)이 주로 사용되는데 피복강관의 원관(inner pipe)은 탄소강관이 사용된다. 피복은 일반적으로 폴리에틸렌(PE) 등의 합성수지를 이용하는데, 이는 강도보강(strength enhance)의 측면보다 부식을 방지하기 위한 방식조치를 위한 조치이다.[1]

즉, 연료가스용 탄소강관은 내부에 흐르는 압축성 가스에 의해 배관이 파손되지 않도록 강도를 책임지는 역할을 한다. 하지만 탄소강관은 토양에 매설될 경우 부식에서 자유롭지 못하며, 이는 기계적 강도의 저하를 가져오게 된다. [2, 3]

강관에 합성수지로 피복을 함에도 불구하고, 부식이 발생하는 경우는 제조 시 피복 결함, 시공시 부주의에 의한 피복결함, 타 공사(굴착공사)에 의한 피복결함 등이 있으며, 이 외에도 다양한 피복 손상 요인이 있다.

피복이 손상되면 부식이 진행되는데, 토양의 성격에 따라 달라진다. 토양의 환경이 부식성이 클 경우(다량의 화학적 부식 성분 함유 및 수분 함량) 궁극적으로는 국부부식이 발생하여 기계적 강도를 저하시키고, 이는 연료가스가 흐르는 배관의 파손 등 심각한 안전상의 문제를 초래할 수 있다.

따라서 부식 진행에 따른 기계적 강도의 저하를 정량적으로 산출하여 잔존강도를 평가하는 모델의 필요성이 대두되었고, 현재 다양한 연구 및 평가 모델을 통해 잔존강도를 평가 할 수 방법들이 제시되고 있다.

Fig 1 은 ASME, DNV 등 해외 기준에서 잔존강도 평가를 위해 면적용량법(area capacity method)을 사용하고 있다. 면적용량법의 특징은 부식에 의한 손실깊이와 손실깊이만을 독립변수로 취급하는 것에 있다. 부식에 의해 손상이 발생하면, 부식 환경에 따라 전면부식 또는 국부부식이 발생하는데, 면적용량법에서는 변수로 손실깊이와 손실깊이만을 두고 있으므로, 국부부식에 적용하는 방법이다.

또한 기계적으로 취약한 것이 국부부식이며, 이는



Fig. 1. A schematic of area capacity method

손상 폭이 매우 좁기 때문이다. 손상 폭이 적으면, 부식의 성장속도와는 별개로 성장 깊이가 깊어져 응력집중 등의 문제를 야기하므로, 국부부식에 있어 기계적 강도 저하의 평가방법으로 사용된다.

하지만 해외 기준에서는 손실깊이가 원래 두께의 80% 초과(ASME) 또는 85%이상(DNV)에 대해서는 예측 할 수 있는 방법을 도출하지 못하고 있으며, 배관의 부식 결함으로 인한 파손사고는 손실깊이가 깊은 경우(80% 이상)에 주로 발생된다. [4]

따라서 본 연구에서는 각 기준을 비교하고, 손상 깊이가 80% 이상인 경우를 가정하여 실험 시편을 제작하였으며, 이를 토대로 국내 실정에 적합한 잔존강도 평가 방법에 대한 내용을 서술하고자 한다.

본 연구의 결과는 국부부식에 의한 탄소강관의 잔존강도 평가를 위해 국내에 도시가스 배관으로 사용되는 KS D 3631(연료 가스 배관용 탄소강관)의 재질에 인위적 흠을 가공하여, 수압파열시험을 수행한 것으로 추후 위험성 평가 등 다양한 분야에서 유용하게 활용될 것으로 기대한다.

II. 기준비교

배관의 잔존강도 평가에 있어 가장 유용하게 사용되는 것이 ASME B31(manual for determining the remaining strength of corroded pipelines)과 DNV-RP-F101(Recommended practice, corroded pipelines)이다. [5]

Table 1 은 각 기준들에서 제시한 잔존강도 식을 나타낸 것이다. 상기 식에서 P_F 는 파열압력(MPa), t 는 배관의 두께(mm), Y_s 는 항복강도(MPa), Y_u 는 인장강도(MPa), D 는 배관 외경(mm), d 는 손실깊이(mm), L 은 손실길이(mm)를 나타낸다.

flow stress(유동응력)은 배관내부의 가스 유동에 의해 발생하는 난류 유동에 의한 전압(total pressure)과 재료의 강도와와의 관계를 실험을 통해 나타낸 것으로 각 기준에서 채택하고 있는 형태는 다양하다.

KS B 3631에서는 호칭지름 80~600A까지 규정하고 있는데, 일반도시가스 사업자가 가스공급을 위해 사용하는 호칭지름의 규격은 일반적으로 200~300A이다.

Fig 2 는 Table 1 에 제시된 잔존강도 평가 수식을 이용해 손실 깊이가 5~95%까지 5%단위로 표현한 그래프이다. Fig 2의 손실깊이가 200mm인 경우에 대한 결과이다.

결함 길이가 길어지면 파열압력이 감소하는 결과를 보여주며, 각 기준에 의해 나타나는 파열에 대한 경향은 기울기와 값에 있어 상당한 차이를 갖는다.

Table. 1. residual strength model

Analysis model	Failure pressure equation
ASME B31G (original)	$P_F = \frac{2t Y_s}{D} \left[\frac{1 - \frac{2}{3} \left(\frac{d}{t} \right)}{1 - \frac{2}{3} \left(\frac{d}{t} \right) / M} \right]$ for $z \leq 20$ $P_F = \frac{2t Y_s}{D} \left(1 - \frac{d}{t} \right)$ for $z > 20$
	Bulging factor
	$M = 1 + 0.8 \left(\frac{L^2}{Dt} \right)^{\frac{1}{2}}$
ASME B31G (modified)	$P_F = \frac{2t Y_s}{D} \left[\frac{1 - 0.85 \left(\frac{d}{t} \right)}{1 - 0.85 \left(\frac{d}{t} \right) / M} \right]$
	Bulging factor
	$M = (1 + 0.6275z - 0.003375z^2)^{\frac{1}{2}}$ for $z \leq 50$ $M = 0.032z + 3.3$ for $z > 50$
DNV RP F101	$P_F = \frac{2t Y_u}{(D-t)} \frac{\left(1 - \frac{d}{t} \right)}{\left[1 - \left(\frac{d}{t} \right) / M \right]}$
	Bulging factor
	$M = \left[1 + 0.31 \left(\frac{L}{\sqrt{Dt}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$

Table. 2. dimension of outer diameter and thickness

호칭 지름	바깥 지름 mm	바깥지름 허용차 %	두께 mm
200	216.3	±1	5.85
300	318.5	±1	7.00

DNV는 감소 경향이 상당히 급격해 손실 깊이가 깊지 않을 때는 과도하게 높은 파열압력을 예측하며, 손실깊이 증가에 따라 ASME 기준에 비해 낮은 파열압력을 예측 하고 있다.

Fig 2의 b는 호칭지름 300A에 관한 잔존강도를 나타낸 것이다.

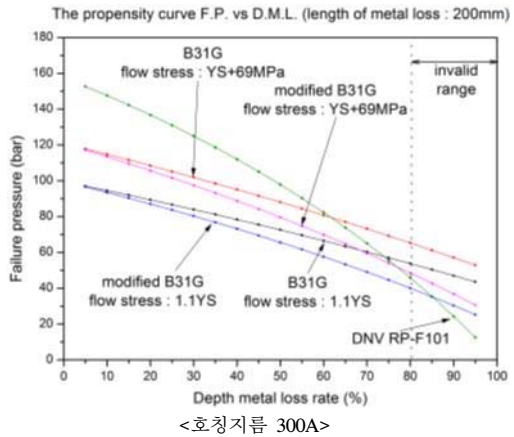
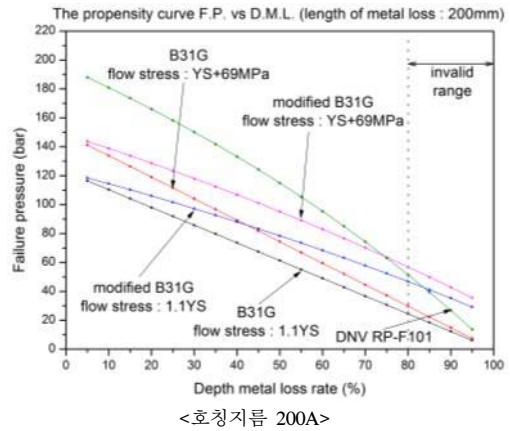


Fig. 2. A propensity of failure pressure(200mm loss)

파열압력의 예측 결과가 200A에 비해 낮은 것으로 나타나는데 이는 구조 및 치수의 특징에서 기인한다. 압력을 받는 배관의 직경이 증가할수록 곡률도 증가하고 이는 강도(구조적 저항력) 저하를 동반한다. 따라서 직경에 따른 세부 수치 기준이 필요한데 KS D 3631에는 Table 2와 같이 직경과 두께에 대해 세부 수치 기준을 명시하고 있다.

III. 실험시편 및 시험방법

본 실험에서는 국내 연료가스용 배관으로 주로 사용되는 200A 및 300A배관(호칭지름 기준)에 대해 실험하는 것으로, 실제 거동유체는 압축성 유체이나 압축성 유체로 파열시험을 수행하는 것은 위험성이 너무 커 수압을 이용한 방법을 채택하였으며, KS D 3631에 명시된 배관의 주요 사양을 요약하면 다음과 같다.

Table 3. chemical composition of pipe materials

종류 기호	화학 성분 (%)				
	C	Si	Mn	P	S
SPPG	0.30 이하	0.35 이하	0.95 이하	0.040 이하	0.035 이하

Table 4. mechanical properties of pipe materials

인장시험 물성치			
인장강도 N/mm ²	항복강도 N/mm ²	연신율(세로) %	연신율(가로) %
334	206	30 이상	25 이상

Table 3 은 KS D 3631에 명시된 배관 재료의 화학성분에 관한 것으로 탄소강(구조용 탄소강)과 유사한 성격을 지니나, 압축성 유체의 특징을 고려하여 화학성분에 엄격한 제한을 두었다.

Table 4 는 동 규격에 명시된 배관 재료의 기계적 물성치를 나타낸다. 탄소강의 특성상 항복강도와 인장강도의 차이가 있으며, 연신율은 압축가스를 이송함에 있어 안전성을 담보하는 중요한 물성중의 하나이다. 하지만 잔존강도의 평가에 있어서 사용되지는 않으며, 각 기준에 특정 수치 이상인 재료를 사용하도록 법적으로 규제하고 있다.

파열시험은 가압 유체에 따라 공압(pneumatic)과 유압(hydraulic)으로 나뉘며, 공압은 압축성 유체를 이용한다는 점, 유압은 비압축성 유체를 이용한다는 점에서 차이가 있다.

비압축성 유체를 이용하여 수행하는 파열시험은 일반적으로 수압을 이용하는데, 수압시험은 수조식 시험과 비 수조식 시험방법으로 나눌 수 있다. 수조식 시험은 가압에 따른 체적팽창량 및 영구변형률을 측정할 수 있으나, 시험 시편을 수조에 완전히 잠기도록 하고 있어 시편이 큰 경우에는 적합하지 않다. 따라서 본 연구에서 채택한 방법은 비수조식 수압파열 시험이다.

Fig. 3.는 본 실험에서 사용한 비수조식 수압시험의 개략도를 나타낸 것이다. 공압 수조식 시험법을 적용하는 것이 실증에 가까우나, 본 연구의 본질은 잔존강도를 평가하는 것으로, 수압 비수조식 시험을 적용하는 것은 시편 내부 압력과 가압부 후단의 압력이 동일하다는 것을 가정할 수 있다는 장점과 실험의 안전성 그리고 정압력에 의한 순수 파열 강도를 측정할 수 있다는 장점이 있다.

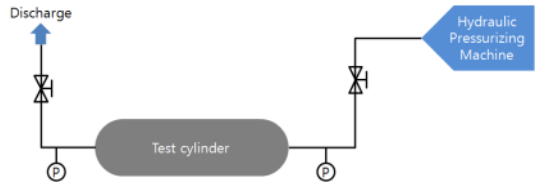


Fig. 3. A schematic of fracture test

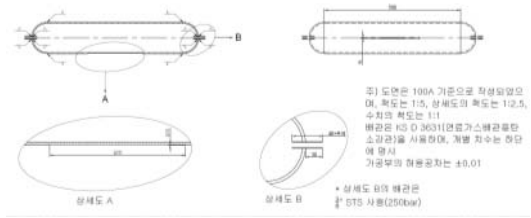


Fig. 4. specifications of pipe specimen

시편 내부압력이 측정 위치와 동일함을 가정하고, 정압력에 의해 파열됨을 확신해야 함은 잔존강도의 평가에 있어서 매우 중요한 요소이다. 잔존강도의 평가에 있어 사용되는 변수는 구조 및 치수와 물성이며, 이를 토대로 파열 압력을 예측하는 것이기 때문이다.

Fig 4 는 잔존강도를 위해 제작한 시편의 사양이다. 서론에서 언급한바와 같이 연료 가스용으로 사용되는 KS D 3631에서 사용되는 재료의 배관을 사용하여 양쪽 끝은 돔캡(dome cap)을 이용하여 실효된 것과 같이 제작하였으며, 돔캡의 중앙에는 센서 및 가압라인 설치를 위한 나사산(1/4" PF male)을 용접하여 접합하였다.

배관시편의 길이(돔캡 제외)는 500mm이며, 배관의 길이방향의 중심에서 인위적 흠(부식에 의한 흠으로 가정)을 가공하였으며, 흠은 길이 1종(200mm)와 폭 2종(3mm, 5mm) 및 깊이 4종(80~95%까지 5%단위)으로 제작하였다.

Fig 5 는 실험 시편을 고정하기 위한 시편과 거치대(Fig 4의 a)와 전체적인 시스템(Fig 4의 b)을 나타내고 있다. 시험용 시편은 길이방향 기준 지면에 수직하도록 거치대에 고정하였다. 수압시험을 위해서는 시편 내부에 압축성 유체(공기 등)가 유입되어서는 안되기 때문이다. 압축성 유체가 수압시험 시편 내부로 유입 될 경우 가압이 제대로 이뤄지지 않으며, 정확한 압력 또한 측정이 불가능하다.

가압장치로는 전동식 수압가압기와 수동식 수압가압기를 병렬로 연결하여 사용하였으며, 전동식 수

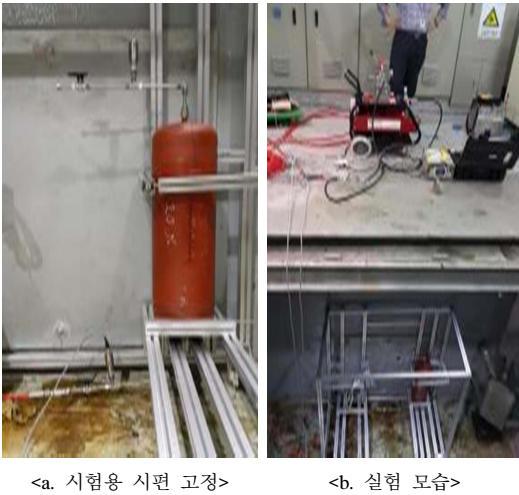


Fig. 5. pipe specimen and experimental system

압가압기는 1barG까지 가압하여 내부 압축성 유체를 제거하는 역할을 하며, 수동식 수압가압기는 정적 상태(static state)를 가정하기 위해 사용되었다. 수동식 수압가압기는 1회 왕복(1 stroke)에 3cc의 물을 강제로 주입하여 가압한다.

압력센서는 wika(germany)의 P-30모델을 사용하였으며, 0~250barG까지 ±0.05%의 정밀도를 가지고 있다. 더불어 측정 값의 신뢰도 향상을 위해 한국산업기술시험원에 검교정을 의뢰(성적서 번호 : 16-046509-01-2)하여 신뢰성을 추가적으로 검증하였다.

IV. 실험결과

결함 깊이, 길이, 폭에 따른 실험을 16회에 걸쳐 수행하였으며, 실험결과를 ASME와 DNV와 비교하여 분석하였다.

Fig 6은 파열이 발생한 부분(a)과 파열부를 확대(b)한 모습을 나타낸 것이다. 파열시편 모두 동일한 양상으로 파열되었으며, 가장 얇은 부분에서 파열되었다.

Fig 7은 200A 배관으로 파열시험한 결과를 ASME 및 DNV 기준과 비교한 그래프이다. 사각형 및 원형 모양은 ASME B31G의 origin 기준을 적용한 것이며, 삼각형과 하삼각형 모양은 ASME B31G의 modified 기준을 적용한 것이다. 마름모 모양은 DNV 기준을 적용한 것이며, 좌삼각형이 결함 폭이 3mm인 실험 결과를 나타낸 것이며, 우삼각형이 결함 폭이 5mm인 실험 결과를 나타낸다.

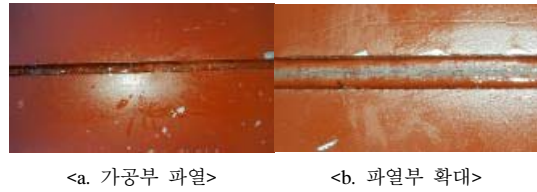


Fig. 6. failure in artificial flaw

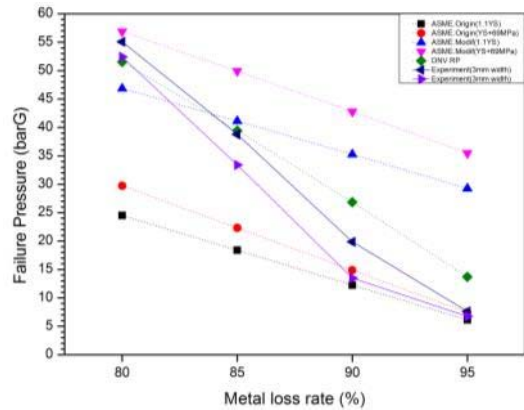


Fig. 7. Propensity of failure pressure of 200A pipe

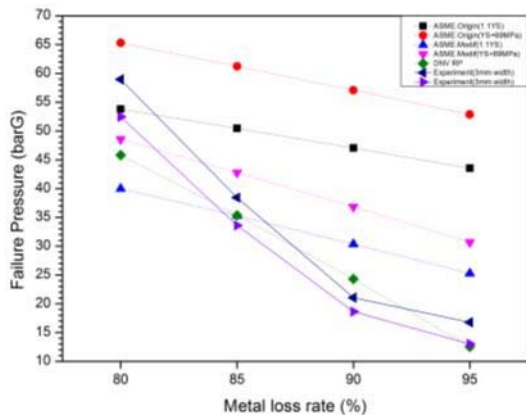


Fig. 8. Propensity of failure pressure of 300A pipe

파열압력의 감소 경향측면에서는 DNV RP F101과 가장 유사하며, 결함깊이에 따른 파열압력의 수치 값에 있어서도 DNV가 비교적 정확한 값을 제시하고 있다.

다만 결함깊이가 매우 깊어지는 경우(90% 이상)

에는 값을 과도하게 예측하고 있으며, 결함 폭이 증가하는 경우에는 높은 값을 예측하고 있다.

Fig 8은 300A 배관으로 파열시험한 결과를 ASME 및 DNV 기준과 비교한 그래프이다. 사각형 및 원형 모양은 ASME B31G의 origin 기준을 적용한 것이며, 상삼각형과 하삼각형 모양은 ASME B31G의 modified 기준을 적용한 것이다. 마름모 모양은 DNV 기준을 적용한 것이며, 좌삼각형이 결함 폭이 3mm인 실험 결과를 나타낸 것이며, 우삼각형이 결함 폭이 5mm인 실험 결과를 나타낸다.

결함 깊이에 따른 파열압력 경향은 200A 배관과 마찬가지로 DNV RP F101과 거의 일치하는 결과를 보이고 있다. 수치적으로는 편차가 존재하는데 결함 깊이가 80%일 때 가장 큰 편차를 보이며, 결함 폭에 따라서는 200A와 같은 경향을 갖는다.

200A 및 300A의 실험결과와 기준을 비교한 결과 DNV RP F101이 제시하는 방법이 본 실험 결과와 가장 유사한 경향을 갖는다.

이는 ASME와 DNV에서 사용하는 기계 강도 물성차이 및 bulging factor의 차이로 볼 수 있다.

ASME에서는 파열압력의 기준을 항복강도로 삼고 있으며, DNV에서는 인장강도(극한강도)를 파열압력의 기준으로 삼고 있다. 국내에서 연료가스용으로 사용되는 탄소강관은 연강의 특성이 강하므로 항복강도로는 파열압력을 산출하는 것이 적당하지 않다는 결론을 지을 수 있다.

V. 결론

본 연구에서는 국내에 연료 가스용 배관으로 사용되는 KS D 3631를 토대로 인위적 결함을 통해 잔존강도를 평가하기 위한 실험을 수행하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- ① 손실 깊이가 깊어지는 경우(80% 이상)에 손실 폭이 3mm 일 때, DNV RP F101이 실험과 가장 유사한 경향과 값을 나타냄
- ② 폭이 증가하는 경우 잔존강도는 일정하게 감소하는데, 3mm와 5mm는 약 3~5barG의 차이를 보임
- ③ 300A 배관은 95% 손실 깊이에서도 10barG 이상의 파열압력을 갖지만, 200A 배관은 10barG 미만

의 파열 압력을 갖음

위의 결과에서 알 수 있듯이 국내 연료가스용 탄소강관의 잔존강도의 평가에 있어, 실험결과와 비교하면 DNV RP F101이 가장 적합하며, 이는 연강의 특성과 bulging factor에 기인한 것이다. 또한 결함 폭에 대해서도 특정한 차이를 보인다. 추후 연구에서는 결함 폭에 대한 가중치를 적용하는 방법에 대한 논의가 이뤄져야 할 것이며, 본 연구의 결과는 향후 국내 가스 배관의 잔존강도 평가 방법의 확립에 있어 중요한 기초자료가 될 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(과제번호 20132010500030)에서 도출된 내용이며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] Kim, J. J., Seo, M. S., and Kim, D. K., "A Study on Development of Cathodic Protection on Underground Pipeline Measuring System", *KIGAS*, 18(5), 66-71, (2014)
- [2] Bae, C. H., Kim, J. H., Woo, H. M., and Hong, H. S., "Development of Residual Tensile Strength Prediction Model for Metallic Water Pipes", *KGES*, 9(3), 17-28, (2008)
- [3] Bae, C. H., Kim, J. H., Kim, J. H., and Hong, S. H., "Assessment of External and Internal Corrosion Growth Rate for Metallic Water Pipes", *KGES*, 9(1), 17-25, (2008)
- [4] Kim, Y. S., Lee, T. K., Nam, J. S., Park K. Y., and Kim, K. Y., "A Study on the Residual Mechanical Properties of Fiber Reinforced Concrete with High Temperature and Load", *KCI*, 23(3), 321-330, (2011)
- [5] Kim, K. I., Yeom, Y. J., Kim, Y. P., Kim W. S., and Oh, K. H., "Stress Analysis of Arctic Thaw Settlement with Gas Pipeline using Finite Element Method", *KIGAS*, 18(5), 78-84, (2014)