KIGAS Vol. 18, No. 2, pp 62~68, 2014
(Journal of the Korean Institute of Gas)
http://dx.doi.org/10.7842/kigas.2014.18.2.62

탄소 섬유 복합재료로 보수된 가스 배관의 구조 해석

박성호 · †김한상*
서울대학교 기계항공공학부, *가천대학교 기계공학과
(2014년 3월 21일 접수, 2014년 4월 28일 수정, 2014년 4월 28일 채택)

Structural Analysis of Gas Pipeline Repaired by Carbon Fiber Composite Materials

Sungho Park · †Hansang Kim
School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea
**Dept. of Mechanical Engineering, Gachon University, Seongnam, Gyeonggido 461-701, Korea*
(Received March 21, 2014; Revised April 28, 2014; Accepted April 28, 2014)

요 약

도시가스 배관의 현행 보수 방법으로는 육성 용접, 슬리브 용접 과 같은 용접을 이용한 방법 이외에 탄소 섬유나 유리 섬유 복합 재료를 사용한 보수 방법이 해외에서 사용되고 있다. 우리 나라의 경우도 도시가스 배관 안전관리의 중요성이 대두되면서 자체보수규정을 마련할 필요성이 있다. 해외의 사례로서 이미 연구가 상당부분 이루어진 용접에 의한 보수 방법이 아닌 비교적 새로운 보수 방법인 복합재로 보수 방법에 대한 연구가 필요한 시점이다. 본 논문에서는 복합재료 보수배관의 안정성 평가의 기본 단계로서 탄소 섬유 복합재료를 사용하여 보수한 가스 배관의 유한 요소법을 이용한 구조 해석을 수행하였고 결과에 대해 고찰해 보았다.

Abstract - Composite repair methods besides welding methods such as surfacing and sleeve welding have been used as repair of damaged gas pipelines in foreign countries. Importance of safety management of city gas pipelines have been emphasized recently and our own repair manuals and codes for repair of city gas pipelines are required. It is right time to conduct research on the composite repair methods since the composite repair was introduced rather recently compared to the welding repair methods which have been investigated for long time. In this study, as a starting point of safety assessment of gas pipeline repaird by composite materials, structural analysis of gas pipeline repaired by carbon fiber composite materials was conducted using finite element analysis(FEA) method and the results was discussed.

Key words : gas pipeline, repair, composites, carbon fibers

†Corresponding author:hskim70@gachon.ac.kr
Copyright ⓒ 2014 by The Korean Institute of Gas

Ⅰ. 서 론

일본, 미국 및 유럽 가스회사들은 가스배관 보수 절차로서 그라인딩, 육성용접, 슬리브덮개용접, 복합재료보수, 핫태핑, 클램프 등 다양한 방안에 대해 기술기준을 수립하고 손상발생시 사용적합성평가를 거쳐 손상배관 보수에 적용하고 있다[1,2].

국내의 경우는 도시가스 배관 보수절차가 표준화되어 있지 않아 공급 중단 후 교체하는 보수방법을 적용하고 있으며 공급 중에 잘못된 보수방법을 적용할 때 사고의 위험성이 있다. 따라서 보수절차의 표준화를 통해 가스 배관 건전성 관리의 유효성과 안전성을 확보할 필요가 있으며 이를 위한 다수의 연구가 필요한 시점이다.

또한, 보수 방법 중 가장 최근에 도입되었으며 가스 배관 보수에 적용시 시간과 비용의 절감을 가져올 수 있는 복합재료 보수 방법의 연구가 필요할 것으로 판단된다. 여러 보수 방법 중, 용접을 필요치 않는 보수 방법인 복합재료 보수 방법을 적용하면 시간과 비용을 줄일 수 있으며, 동시에 가스 공급을 차단하지 않고 보수가 가능하므로, 복합재료를 사용한 보수절차를 도입 혹은 개발하면 가스를 안정적으로 공급할 수 있다.

본 연구에서는 현재 해외에서 시행되고 있는 복합재료 보수방법의 분석 및 새로운 복합재료 보수방법의 개발을 위한 첫 단계로서 손상된 배관을 탄소 섬유 복합재료로 보수한 경우의 유한요소법을 이용한 구조해석을 수행하였다.

Ⅱ. 구조 해석 절차

본 연구에서는 손상 배관을 복합재료로 보수한 후 흙의 하중에 따른 보수배관의 발생 응력을 유한요수 구조 해석 전문 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 해석하고 분석하였다.

2.1. 해석 대상 선정

본 연구는 도시가스 배관의 보수에 주안점을 두고 있으나, 배관 규격 획득의 용이성을 위하여 해석의 대상이 되는 배관은 한국 가스공사의 대표적인 사용배관인 API 5L X65 을 선택하였다. 배관의 규격은 지름 D = 0.762 m (30 inch), 두께 t = 17.5 mm 이며, 사용 압력은 설계 압력인 8 MPa으로 설정하였다[3,4].

배관 외부에서 작용하는 토양 하중 계산을 위하여 건설교통부 제정 도로설계기준의 도로 포장의 표준단면을 차용하여 배관 매설지반을 정의하였다[5]. Table 1에 해석 대상 배관 및 지반의 물성 값을 정의하였으며, 지반 물성은 지반조사 데이터를 바탕으로 일반적으로 사용되는 값을 선정하였다[6].

도로교 설계기준[7]이 제안한 표준 도로단면을 고려 한 해석 도로 모델은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 맨 아래층부터 잔류토, 0.4 m의 노상, 0.2 m의 보조기층, 0.15 m의 기층과 0.15 m의 표층으로 구성되어 있다. 한국가스공사 가스 배관 매설기준[3]과 도로설계 기준을 비교하였을 때 Fig. 1의 해석모델에서

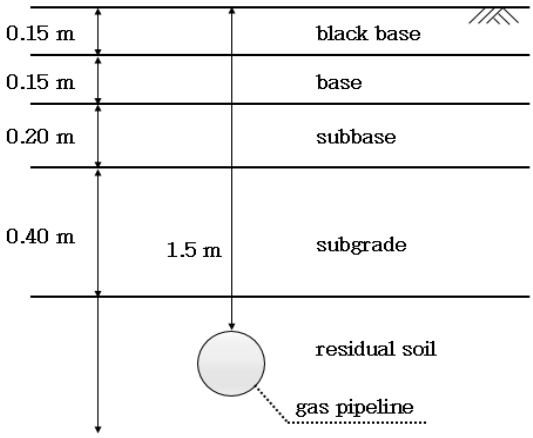


Fig. 1. Soil profile for analysis.

Table 1. Material property

	Black base	Base	Subbase	Subgrade	Residual soil
γ (tonf/m3)	2.3	2.3	2.2	2.0	1.8
E (MPa)	2.1×103	3×102	2×102	1.5×102	1.0×10
ν	0.3	0.4	0.4	0.4	0.35
C (KPa)	10	1	1	0	10
Φ (o)	35	35	35	40	30

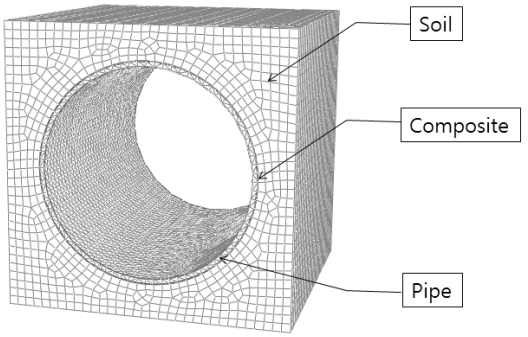


Fig. 2. FEA model.

배관은 잔류토(residual soil)에 매설되며, 배관의 매설심도는 단면의 지표인 표층으로부터의 깊이로 정의한다.

Fig. 2는 ABAQUS를 이용한 요한요소 해석 모델로 외부의 흙과 손상된 배관과 그것을 둘러싼 composite 보수층을 모델링해서 도시한 것이다.

2.2. 가스배관 하중 모형

사각기둥하중(prism load) 방법은 배관에 작용하는 하중이 배관위의 사각기둥 토양의 무게라는 가정에 기반을 두어 계산되며 다음과 같이 표현된다[8].

$$W_e = \gamma HD$$

W_e = 배관의 단위길이에 작용하는 토양하중
γ = 토양의 단위무게
H = 매설깊이
D = 배관외경

배관의 측면에 작용하는 토양 하중의 경우에는 토양이 비스듬히 흘러내리는 경사각을 고려하여 반영할 수 있도록 측면 하중을 가하였다. 토양의 전체 모델을 모델링 하는 대신에, Fig. 3의 경계조건을 활용하여 문제를 단순화 하였으며, 배관의 축방향 경계조건은 대칭 조건을 적용하여 길이 방향으로 길게 연결된 배관을 모사하였다.

2.3. 가스배관 손상 모델

가스 배관의 파손 혹은 부식의 형상 및 크기는 경우에 따라 매우 다양하게 나타난다. 가스배관에 발생하는 임의의 손상 부위에 대하여 응력 집중 및 영향을 살펴볼 수 있도록 손상 부위를 선정하고자 하였다. 배관의 크기에 비하여 너무 큰 손상부위의 경우에는 배관 수리가 아닌 교체가 필요한 경우에 해당

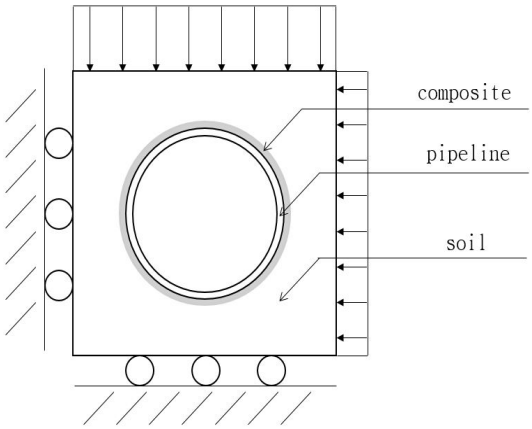


Fig. 3. Analysis model.

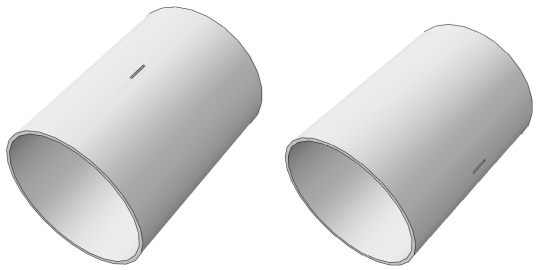


Fig. 4. V-notched pipe model (left: upper notch, right: side notch).

할 수 있다. 본 연구에서는 복합재료 수리 방법을 적용 시 배관의 내부 응력이 어떻게 변화하는지를 살피는데 목적이 있으므로, 손상 부위의 크기는 비교적 배관 크기에 비해 작게 선정하였다. 이에 따라 폭과 너비 10 mm의 V형 노치를 배관의 축 방향으로 100 mm 길이로 손상 부위를 모델링하였다(Fig. 4).

손상 부위의 위치에 따른 복합재료의 적층 방향 영향이 배관 수리에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. 또한 하중이 다양하게 분포되어 있으므로, 손상 부위의 위치에 대하여 응력 분포가 다를 것으로 예상할 수 있다. 따라서 손상 부위의 방향은 배관의 상단부와 측면부에 위치하도록 모델링하였다.

2.4. 복합재료 해석 모델

배관 보수에 사용할 복합재료는 일방향(unidirectional, UD) 탄소섬유 프리프레그(prepreg)로 선정하였다. 일방향 탄소섬유 프리프레그란 탄소섬유다발이 완전히 경화되지 않은 고분자 수지에 일방향으로 정렬되어 함침되어 있는 상태의 재료를 말한다.

이러한 0도 UD 프리프레그를 설계조건에 맞게 각기 다른 섬유방향을 가지도록 적층해서 열과 압력을 가하여 경화시키면 구조용 복합재로서 사용이 가능한 상태가 된다.

0도 UD로 제작한 복합재료의 특성상, 섬유의 정렬 방향에 따른 재료의 적층 각도에 대하여 물성이 확연하게 차이가 나타나며, 배관 보수 시 복합재료의 적층 방법에 따라서 손상 부위에 가해지는 응력이 달라진다. 해석에 사용한 프리프레그의 물성은 등방성(isotropy)이 아닌 섬유 방향에 따른 방향성(anisotropy)을 가지므로, 각 방향의 물성에 대하여 인장 시험을 통해서 측정한 값을 해석에 적용하였다(Table 2). 다만 G_{23}의 경우에는 실험을 통한 측정이 어렵기 때문에 일반적인 에폭시 계열의 물성을 추정하여 사용하였으며, 해석 결과에는 크게 영향을 미치지 않는다.

본 논문에서는 적층 방법을 Table 3과 같이 섬유의 방향에 따라 +45도와 -45도를 번갈아 가며 적층하는 방법, 0 도를 반복해서 적층하는 방법과 여러 각도를 조합하여 적층하는 Quasi-isotropic 적층 방법에 대하여 해석을 수행하였다.

Fig. 5은 섬유방향에 따른 적층 각도를 보여주는 모식도이다.

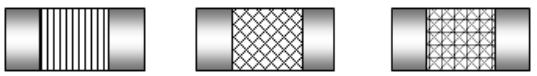
일반적인 배관 보수 방법의 경우에는 패치 혹은 슬리브와 배관 사이의 접합에 있어 용접 방식의 보수 방법을 사용하나, 복합재료와 금속 배관의 접착 방법은 크게 액상 형태의 접착제와 필름 형태의 접착제를 사용한다. 접착 부위의 강도 역시 복합재료 자체의 물성처럼 중요하게 고려해야 할 부분이다. 하지만 지층에 묻혀있는 배관의 하중 조건은 접착제와 복합재료, 금속 간의 전단 방향의 응력에 비해 수직 방향에서 가해지는 응력이 훨씬 지배적이다. 따라서 접착 부분의 파손은 고려대상에서 제외하였으며, 해석 모델에서는 접착 부분이 완전히 접하고 있는 것으로 구속하여 해석을 수행하였다.

Table 2. Properties of prepreg (unit: GPa)

E_1	E_2	v_{12}	G_{12}	G_{23}
83.6	7.1	0.32	4.7	2.0

Table 3. Laminated composite lay up

Lay up	+45/-45	0도 UD	Quasi-isotropic
적층 각도(deg.)	[±45]	[0]	[0/±45/90]



0도 ±45도 Quasi-isotropic

Fig. 5. Schematic diagrams of composite lay up.

Ⅲ. 구조 해석 결과

3.1. 배관 파손 부위의 응력 분포

두께 16 mm Quasi-isotropic lay up 복합재료로 보수한 경우의 해석 결과에서 배관의 파손 부위인 V자형 노치 근처에서 응력 분포를 살펴보았다. 노치의 모서리 부분에서 응력이 급격히 집중되는 현상을 관찰할 수 있으며(Fig. 6), 배관 단면상에서 두께가 가장 작은 노치의 안쪽 부분에서 가장 큰 내부 응력이 발생하였다(Fig. 7). 이 부분은 배관의 허용 응력을 고려 시 배관의 안정성에 문제가 될 수 있으므로, 복합재료를 씌운 배관 수리 방법을 적용하여 응력의 변화를 관찰하였다. 결과의 응력은 Von-Mises 등가 응력으로 표시되었으며, 본 해석의 조건상 토양 하중보다는 내부 압력의 영향이 크므로 주로 인장 응력이 작용 한다.

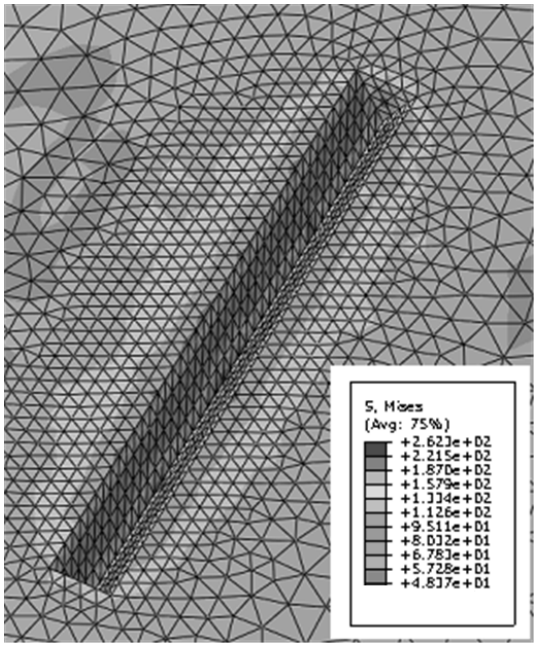


Fig. 6. Stress distribution around upper V-notch : t=16mm, Quasi-isotropic. (Top view)

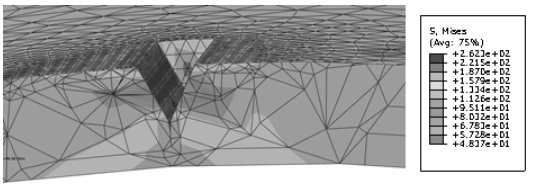


Fig. 7. Stress distribution around upper V-notch : t=16mm, Quasi-isotropic. (Cross-section view)

3.2. 적층 두께에 따른 영향

탄소섬유 프리프레그를 사용하여 복합재료를 적층 시 사용하는 프리프레그의 개수 혹은 자체 두께에 따라서 다양한 두께의 복합재료를 성형할 수 있다. 배관 수리의 경우에도 응력의 정도나 파손 부위의 정도에 따라서 적절한 두께의 복합재료를 이용하도록 한다. 본 논문에서 해석에 적용한 배관은 API 5L X65이며, 허용 응력은 313.6 MPa이다. 따라서 배관의 허용 응력을 넘지 않는 복합재료의 두께를 찾고, 두께의 증가에 따른 최대 응력의 변화 양상을 해석을 통해 살펴보았다.

복합재료의 두께에 따른 응력의 변화는 Quasi-isotropic 적층 방법에 대하여 살펴보았다.

복합재료의 두께를 각각 2 mm, 4 mm, 8 mm, 16 mm로 늘려가면서 해석을 수행하였으며 결과는 Fig. 8에 나타내었다. 2 mm 복합재료를 적용 시 약 300 MPa의 응력이 손상 부위 근처에서 발생하였으며, 두께를 최대 16 mm로 늘렸을 경우에는 약 260 MPa 까지 응력이 줄어들었다. 두께에 따른 최대 응력의 변화 양상은 두께가 증가함에 따라 선형적으로 감소함을 관찰하였다.

3.2. 적층 방향에 따른 영향

다음으로는 복합재료 적층 방법에 따라서 손상부위의 최대 응력 발생에 미치는 영향에 대하여 살펴보았다. 적층 방법은 앞에서 설명한 ±45도, 0도, Quasi-isotropic의 다양한 방법으로 적층하였다.

Fig. 8은 배관 축방향의 V 노치 중 노치가 배관 상단에 위치하는 경우에 3가지 적층 방법에 따른 최대 응력을 계산한 결과이다. 다양한 방향으로 적층하는 Quasi-isotropic 방법의 경우 범용 적으로 사용되는 적층 방법이며, 결과 역시 3가지 방법의 평균 정도의 최대 응력 값을 나타내었다. 손상 부위의 벌어지는 방향으로 하중을 많이 견딜 수 있는 0도 적층법의 경우가 가장 작은 내부 응력이 발생하였다. 또한 ±45도 반복 적층 법의 경우에도 상대적으로 0도 적층 방법의 경우보다 내부 응력 감소에 큰 역할

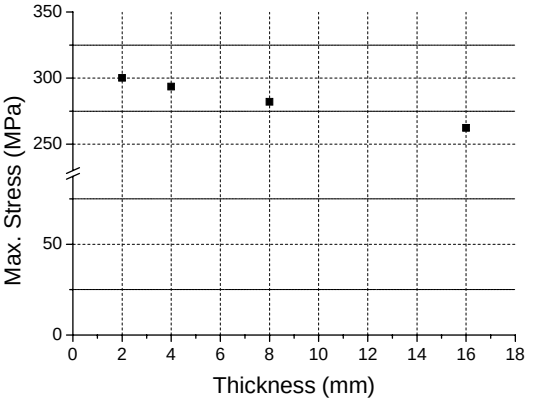


Fig. 8. composite thickness vs. Max. stress

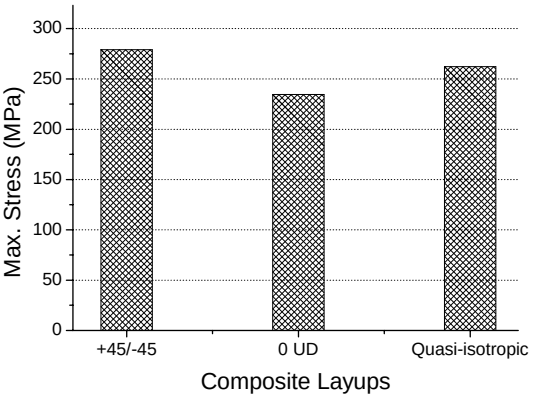


Fig. 9. Maximum stress of various composite layups : upper V-notched.

을 하지 못하였다.

Fig. 9은 배관의 측면에 발생한 V 노치에 대하여 4가지 적층 방법에 따른 최대 응력을 계산한 결과이다. Quasi-isotropic 방법의 경우 앞에서의 배관의 상단부에 발생한 V 노치 경우와 마찬가지로 평균 정도의 최대 내부 응력 값을 나타내었다. 다른 적층 방법에 대한 응력 결과 역시 상단부의 배관 손상의 경우와 비슷한 양상을 보였다. 손상 부위가 측면에 발생하는 경우에도 손상 부위의 벌어지는 방향으로 하중을 많이 견딜 수 있는 0도 적층법의 경우가 가장 작은 내부 응력이 발생하였으며, ±45도 적층법의 경우에는 3가지 방법 중 가장 높은 내부 응력이 발생하였다.

Fig. 10의 배관 측면 손상 해석 결과와 Fig. 9의 배관 상단부 손상 해석 결과에서 발생하는 응력의 크

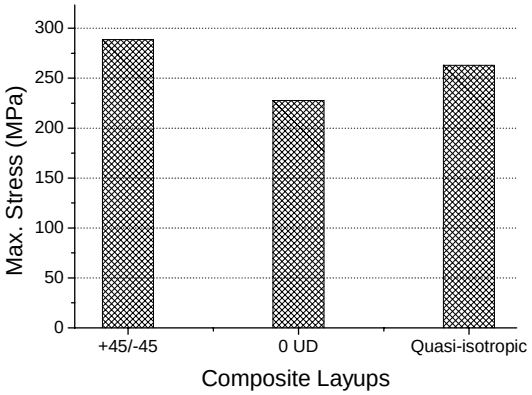


Fig. 10. Maximum stress of various composite layups : side V-notched.

기를 비교해 보면, ±45도 적층법의 경우에는 측면 손상의 경우가 조금 더 높은 내부 응력이 발생함을 알 수 있다. 0도와 Quasi-isotropic 적층법의 경우에는 배관 손상 부위에 관계없이 고른 응력 해석 결과를 나타낸다.

Ⅳ. 결 론

본 연구에서는 한국 가스공사의 주 사용배관인 APL 5L X65를 이용하여 결함이 생겼을 때 복합재료 보수 후 가스관의 응력, 변형 특성 평가를 위하여 수치해석을 수행하였다. 일련의 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

(1) 복합재료의 두께의 변화(2mm → 4mm → 8mm→ 16mm)에 따라 결함부에 집중되는 응력이 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 복합재료의 두께가 커질수록 손상부의 최대응력이 감소했으며 linear한 형태로 줄어드는 것으로 보여 진다. 결함부를 보수할 때 두께를 가급적 두껍게 시공하는 것이 배관 안정성에 기여할 수 있는 것으로 판단된다.

(2) 배관 상단 부분에 결함이 생겼을 때, 복합재료 적층각도를 변경(0도 UD, +45/-45, Quasi-isotropic)하여 해석하면 각각 응력도 다르게 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 결함부에 걸리는 최대응력은 0도 UD가 234.5 MPa로 그 다음은 Quasi-isotropic이 262.3 MPa, 그 다음은 +45/-45가 279.2 MPa로 최대로 나타난 것을 알 수 있었다. 이 때문에 복합재료의 결방향이 결함부분의 방향과 수직에 가까울수록 결함부에 생기는 최대응력을 낮출 수 있다고 판단된다.

(3) 배관의 측면 부분에 결함이 생겼을 때는 상단 부분에 생겼을 때보다 전반적으로 결함부에 걸리는 최대 응력이 높게 나온 것을 확인할 수 있었다. 여러 적층각도 조건에서 최대응력은 허용응력 313.6 MPa 이하의 수치이며[9], 재료의 항복 응력을 토대로 안정성을 평가해 볼 수 있다. 해석 결과 응력이 위치에 관계없이 안정적인 값을 보이는 0도 혹은 Quasi-isotropic 적층법으로 설계했을 때 더욱 안정적이라고 판단한다.

(4) 복합재료 보수에서 적층각을 달리하여 쌓는 것은 두께를 늘리는 것 보다 더 지배적인 효과를 얻을 수 있으며, 적층각을 바꿔서 쌓는 방법은 방향만 바꿔서 쌓는 것이므로 두께를 늘리는 것 보다 재료비가 들지 않으므로 경제적인 효과를 얻을 수 있다.

본 연구는 도시가스 배관의 안정성 평가를 위한 전초단계로서 기존에 비교적 많이 연구되어 온 용접 방식의 보수 방법이 아닌 복합재료 보수 방법의 안정성 평가를 위한 체계적인 구조 해석 모델링이 수행되었다는 것에 그 의미가 있다. 향후 후속 연구로서 보다 다양한 하중 조건 및 손상 종류에 대한 구조 해석 수행이 요구 된다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 산업통상자원부 에너지자원융합원천기술개발사업 (과제번호: 20132010500030) 연구비 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사를 드립니다.

REFERENCES

[1] Carl E. Jaske, Brian O. Hart, William A. Bruce, *Updated Pipeline Repair Manual Rev. 6, Final Report (Project Number R 2269-01R)*, Pipeline Research Council Interntional, Inc., (2006)

[2] W.S. Kim, “Repair methods of gas pipeline", Gas safety, 206, Korea gas safety corporation, (2008)

[3] Korea gas corporation, "Design standards for buried depth of gas pipeline", KOGAS, (2003)

[4] Korea gas corporation, “GSM-2101 standard for pipeline materials”, KOGAS, (1997)

[5] Korea road and transportation association, “Guide to road design”, KRTA, (2003)

[6] J.W. Seo, J.S. Choi, S.I. Kim, “A study on prediction of layer properties of asphalt concrete pavement under various vehicle speeds", KSCE,

22(4), 649-658, (2001)
[7] Korea Society of Civil Engineers, “Explanations of guide to road bridge design”, Kimoondang, (2008)
[8] I.W. Bang, H.S. Kim, W.S. Kim, Y.C. Yang, K.W. Oh, " Development of the computer program calculating the stress induced by various loads for buried natural gas pipeline (I)", *KIGAS*, 2(2), 18-25, (1998)
[9] J. Cho, B. Choi, W. Cho, J. Kim, S. Hong, S. Jeong, J. Kim, "Stress and Strain Distrubution of Gas Pipe According to Buried Depth", *KIGAS*, 17(5), 51-57, (2013)
[10] J.H. Won, M.K. Kim, H.K. Yoo, M.S. Kim, "Stress Distribution of Buried Gas Transportation Pipeline According to Vehicle Load Velocity", *KIGAS*, 12(1), 7-12, (2008)