한국마린엔지니어링학회지 제31권, 제3호, pp. 401~409, 2007. 5 (ISSN 1226-9549)
Journal of the Korean Society of Marine Engineering

철강-현무암 복합재료 파이프의 역학적 거동에 관한 연구

김종도† · 왕지석* · 윤희종**

(원고접수일 : 2007년 3월 2일, 심사완료일 : 2007년 5월 21일)

A Study on the Mechanical Behaviour of Steel-basalt Composite Pipe

Jong-Do Kim† · Jee-Seok Wang* · Hee-Jong Yoon**

Abstract : Because of the various excellent characteristics of cast basalt materials, such as, anti-corrosion, anti-wearing, good hardness, high chemical stability, of which steel may not possess, the steel-basalt composite pipes are used in severe environments for compensating the defects of steel. However, without sufficient mechanical investigation prior to application, the basalt liners in steel-basalt composite pipes may be cracked and broken or the basalt liners are omitted from steel pipes in applications. In these cases, the merits of basalt materials may disappear and the basalt liners may not play their good roles as expected. Therefore, it is required that mechanical behavior of steel-basalt composite pipes and surrounding environments be fully examined before installation.

The limit of bending moment with which steel-basalt composite pipe may safely endure is calculated and the limit curvature of the composite pipe in the safe range is presented in this paper. The temperature distributions and the thermal stresses are also computed and the limit difference of temperatures between inner and outer side of composite pipe is given together.

Key words : Cast basalt material(주조 현무암 재료), Steel-basalt composit pipe(철강-현무암 복합 파이프), Basalt liner(현무암 라이너), Bending test(굽힘 시험), Mechanical behaviour(역학적 거동)

1. 서 론

주조된 정제 현무암의 내마모성, 내부식성, 높은 경도, 높은 화학적 안정성 등의 우수한 성질을 이용하여 가혹한 환경하에서 사용되는 철강재 파이프의 결점을 보완할 목적으로 철강-현무암 복합재료 파이프가 개발되어 산업현장에서 사용되고 있다[1]-[3]. 즉, 광석과 같이 거칠고 딱딱한 고형물질을 운송하는 파이프라인이나 부식의 염려가 있는 화공약품 또는 해수를 운송하는 파이프 계통에 철강재

† 교신저자(한국해양대학교 기관시스템공학부), E-mail:jdkim@hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4253
* 한국해양대학교
** 동도바잘트산업(주)

의 마모성이나 부식성을 보완할 목적으로 철강재 파이프 안에 운송되는 물질이 철강 재료에 접촉하지 못하도록 정제된 현무암을 주조해서 만든 현무암 파이프를 라이너로 끼워 넣고 철강 파이프와 현무암 파이프 사이를 모르타르(mortar)로 접착하여 만든 철강-현무암 복합재료 파이프가 많이 사용되고 있다[4]. Fig. 1은 그 한 예를 보이는 도면이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 정제된 현무암을 열로 녹여서 파이프로 주조하고 이것을 철강 파이프 안에 끼워 넣고 철강 파이프와 현무암 파이프 사이에 모르타르를 채워 넣어 그 양자를 접착시키는 구조이다. 여기서 모르타르는 철강 재료와 현무암을 접착시켜주는 역할만 하는 것이 아니라 두 재료의 급격한 기계적인 특성의 변화를 흡수하여 주는 완충재 역할도 한다.

철강-현무암 복합재료 파이프는 몇 가지 우수한 공학적인 특성을 가지고 있으나 철강 재료에 비하여 비교적 취약한 현무암을 포함하고 있어서 이 파이프에 과도한 외력이 가해진다든지 파이프 설치공간의 변형이 발생한다든지 하면 현무암 파이프에 균열이 갈 수 있고 심하면 깨어지기도 한다[5],[6]. 다시 말하면 철강재 파이프만 단독으로 사용할 때보다 훨씬 더 외력에 약하고 설치공간의 변형에 취약하다. 뿐만 아니라 파이프의 안과 밖의 온도차에도 민감하여 온도차가 크면 현무암 파이프가 깨어진다든지 심하면 철강재 파이프와 현무암 파이프가 박리되는 현상이 생기기도 한다. 이러한 결함이 발생하면 복합재료 파이프는 그 장점을 잃게 되고 철강재 파이프 안에 들어 있는 현무암 라이너는 중량만을 증가시키는 골칫거리로 둔갑하게 된다. 따라서 철강-현무암 복합재료 파이프가 제대로 그 장점을 유지하면서 쓰이려면 파이프를 시공하기 전에 충분한 역학적인 검토가 필요하다. 다시 말하면 이 복합재료 파이프로 시공할 때는 철강재 파이프만 가지고 시공할 때보다 훨씬 더 주도면밀한 검토가 이루어져야하고 그 역학적인 사용조건이 엄격하게 제한받는다는 것을 염두에 두어야 한다.

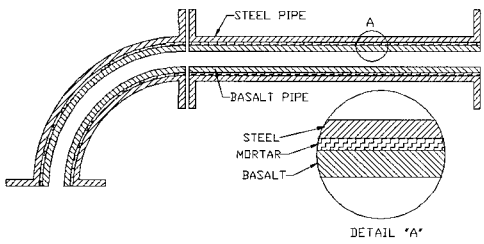

Fig. 1 Steel-basalt composite pipe

본 논문에서는 용융주조현무암(Fused Cast Basalt)의 기본적인 성질을 조사하였고 현무암 판을 제작하여 상온, 200℃, 300℃의 3가지 경우에 대한 3점 굽힘 시험을 실시하여 현무암의 기계적 성질을 구하였다. 또 철강-현무암 복합재료 파이프의 시제품을 제작하여 3점 굽힘 시험으로 굽힘 모멘트를 가하고 철강 파이프에 발생하는 응력을 스트레인 게이지로 측정하여 해석결과와 비교하였다. 복합재료 파이프가 외력에 의한 굽힘 모멘트를 받을 때의 거동을 분석하여 현무암이 파손되지 않기 위한 굽힘 모멘트와 파이프 곡률의 제한치를 제시하고 철강 재료와 현무암의 열팽창계수 차이에 기인하는 모르타르의 균열이나 박리가 일어나지 않도록 하기 위한 파이프 내외 온도차의 한계치를 구하였다. 또한 철강 파이프와 모르타르 및 현무암 파이프에 발생하는 열응력을 유한요소법으로 해석하여 나타내었다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

자연상태에 분포하고 있는 현무암 중에서 비교적 조직이 치밀하고 고르며 불순물이 적게 포함된 원석만을 골라야만 현무암 주물로 쓸 수 있다. Table 1은 현무암 주물로 쓸 수 있는 원석의 성분들을 나타낸다. 성분 중 산화규소(SiO_2)가 약 44~46%를 차지하고 알루미나(Al_2O_3)와 산화철(Fe_2O_3 및 FeO)이 각각 약 12 % 내외의 성분을 차지하고 있으며 기타 산화칼슘(CaO)과 산화마그네슘(MgO) 및 산화칼륨(K_2O) 등이 포함되어 있다. 이들은 다른 광석과 마찬가지로 혼합물의 형태로 광석 덩어리를 이루고 있다[7].

아래의 현무암 원석 성분표는 모든 원석이 다 같은 것이 아니고 생산되는 지방에 따라 약간의 차이

가 있을 수 있고 같은 지방의 현무암이라도 색깔과 무늬에 따라서 그 성분이 조금씩 다르다.

Table 2는 용융주조현무암의 기계적 성질을 나타낸다[8]. 현무암은 그 자체가 모스경도 8로 상당히 높은 경도를 가진 광석임을 알 수 있고 다른 취성재료와 같이 압축강도는 아주 높지만 인장강도는 매우 낮다는 것을 보이고 있다. 압축강도의 측정은 보통의 취성재료 압축시험편을 만들어 측정하나 인장강도의 측정은 금속재료와 같은 인장시험편을 만들 수 없으므로 3점 굽힘 시험편을 만들고 이 시험으로부터 인장강도를 얻는다. 현무암의 열팽창계수는 연강의 2/3 수준으로 온도변화에 대한 팽창과 수축의 차이가 있다. 따라서 연강과 현무암의 복합재료 파이프를 만들고 난 후에 온도변화가 있을 때 연강의 수축·팽창과 현무암의 수축·팽창의 차이를 흡수해주는 조치가 필요할 것이다.

현무암의 열전도계수는 연강의 1/20 정도로써 보온성이 상당히 좋다. 탄성계수는 연강의 1/2 정도이며 전기저항은 10GΩ으로 완전한 절연체라고 볼 수 있다. 현무암의 융점은 1200℃이나 현무암 주조시 주형에 용융액을 부을 때에 유동성이 좋아야 하므로 융점보다 훨씬 더 높은 온도로 가열하여야 할 것이다[9],[10]. 대략 1400℃ 정도로 가열 용해시켜야 주조가 잘 될 것으로 예상된다. 그런데 대부분의 전기로가 고주파로이고 현무암은 자성체가 아니므로 고주파로는 현무암을 가열할 수가 없고 따라서 녹이지 못한다. 그렇다면 전기저항에 의하여 열을 발생시키는 전기로를 사용하여야 하는데, 전기저항으로 1400℃이상에서 견딜 수 있는 열선이 흔치 않으므로 전기로를 사용하는 것은 문제가 있다. 그래서 생각할 수 있는 것이 가스로이다. 가스로는 에너지 비용도 비교적 적게 들고 높은 온도까지 비자성체인 현무암을 가열 할 수 있다. 다만 가스로는 온도 제어시스템이 전기로만큼 간단하지가 않다는 것을 염두에 두어야 할 것이다.

Table 1 Components of raw basalt ore

SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MgO	CaO	P.P.P
45.5%	1.1%	11.7%	5.6%	7.1%	10.1%	10.1%	8.8%

Table 2 Mechanical properties of fused cast basalt

Hardness	Mohs hardness 8
Compressive strength	300-450MPa
Bending strength	45MPa
Density	2900-3000kg/m^3
Coefficient of thermal expansion	8×10^{-6}/℃(0℃-100℃)
Coefficient of thermal expansion	9×10^{-6}/℃(100℃-400℃)
Coefficient of heat conductivity	1.9 - 2.2W/(m℃)
Elastic modulus	110MPa
Melting point	1200℃
Insulation resistance	10GΩ
Vicker's hardness (ISO409-1)	700-800HV

2.2 실험방법

현무암 주조품 및 철강-현무암 복합 재료 파이프의 기계적 성질을 알아보기 위하여 3점 굽힘 시험을 실시하여 하중에 대한 변위 및 굽힘응력을 측정하였다. 현무암 주조편의 3점 굽힘 시험편의 치수와 지점의 위치를 Fig. 2, 철강-현무암 복합 재료 파이프 및 3점 굽힘 시험 사진을 Fig. 3, 응력로제트(strain rosette)를 파이프 표면에 부착한 사진을 Fig. 4에 각각 나타낸다.

현무암 주조품의 3점 굽힘 시험온도는 상온, 200℃, 300℃의 3가지 온도에서 실시하였다. 시험편은 길이 200mm, 너비 100mm, 두께 18mm의 직육면체이고 지점의 간격은 130mm이었다. 이 그림

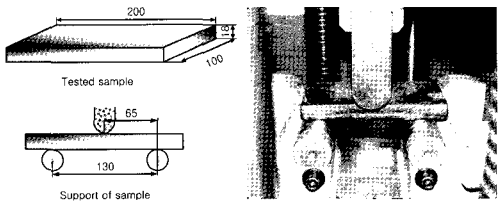

Fig. 2 Bending test of fused cast basalt

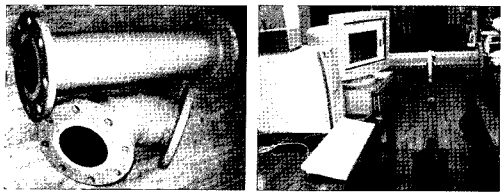

Fig. 3 Steel-basalt composite pipes and its bending test

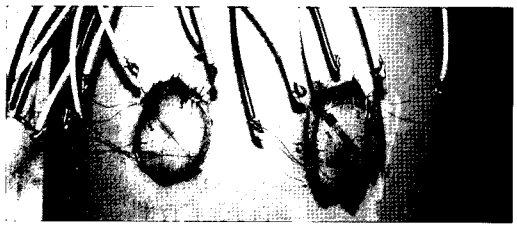

Fig. 4 Strain rosette on the steel-basalt composite pipe

과 같은 시험편을 만들어서 전기로 안에 넣고 소정의 온도로 가열한 다음 3점 굽힘 시험기에 걸어서 하중과 변위를 측정하였다. Fig. 2는 3점 굽힘 시험기에 시험편을 걸고 하중을 가하고 있는 모습을 나타낸다.

철강-현무암 복합재료 파이프의 제원은 철강파이프 외경 D_s=162mm, 내경 D_{si}=150mm, 철강파이프 두께 6mm, 현무암 파이프 외경 D_b=130mm, 내경 D_{bi}=90mm이고 현무암 파이프 두께가 20mm 이며 모르타르 두께는 10mm 이었다. 직선 파이프의 길이는 L=900mm이며 90° 엘보우도 같이 만들었다. 시험은 직선 파이프를 실험대 위에 수평으로 올려놓고 중앙에 추를 이용하여 하중을 걸어서 굽힘응력을 측정하였다. 응력 로제트를 Fig. 4와 같이 철강-현무암 복합재료 파이프의 표면에 붙이고 추를 이용하여 하중을 여러 가지로 증가시키면서 응력 로제트에서 검출되는 응력을 strain Amp.와 data logger를 거쳐서 컴퓨터에 입력하여 결과를 얻었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 3점 굽힘 시험

3.1.1 현무암 주조품

상온에서의 현무암 주조품의 3점 굽힘 시험결과를 Fig. 5에 나타낸다. 총 6개의 시험편을 시험하였는데 파단하중이 727kgf에서 911kgf로 보통의 세라믹 재료와 같이 편차가 약간 있었다. 이 하중을 응력으로 환산하면 42.9MPa에서 53.8MPa에 해당한다.

Fig. 6과 Fig. 7은 200℃ 및 300℃에서의 시험결과이다. 200℃의 온도에서는 총 6개의 시험편에 대하여 평가하였으며 파단하중이 495kgf에서 744kgf로 편차가 더욱 컸었다. 이 하중을 응력으로 환산하면 29.2MPa에서 43.9MPa에 해당한다.

그리고 300℃에서의 시험에서는 총 5개의 시험편을 시험하였으며 파단하중이 195kg에서 522kgf로 그 편차가 대단히 심하여 재현성이 없다고 볼 수 있었다. 참고로, 이 하중을 응력으로 환산하면 11.5MPa에서 30.8MPa에 해당한다.

3.1.2 복합재료 파이프

복합재료 파이프에 인가된 하중과 측정된 굽힘응력과의 관계를 Fig. 8에 나타낸다 . 이는 거의 선형

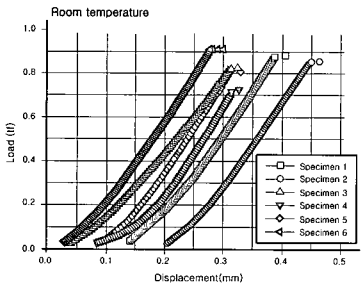

Fig. 5 Results of bending test at room temperature

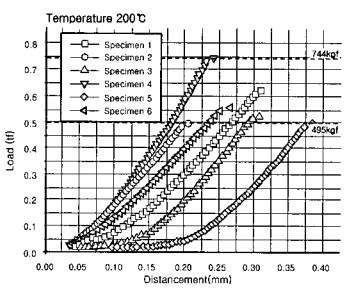

Fig. 6 Results of bending test at 200℃

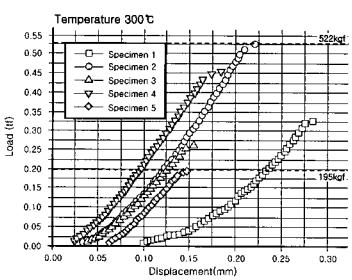

Fig. 7 Results of bending test at 300℃

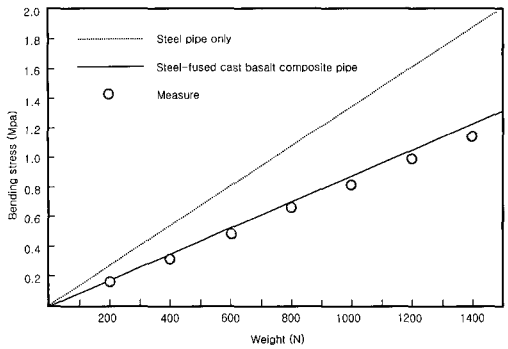

Fig. 8 Results of the Bending Test

적인 관계를 유지하고 있다는 것을 보여준다. 이 그림에서 점선은 같은 크기의 연강재 파이프인 경우 하중과 굽힘응력과의 관계를 계산으로 나타낸 것이고, 실선은 철강-현무암 복합재료 파이프의 경우 하중과 굽힘응력의 관계를 계산으로 나타낸 것이며 점은 실측치를 나타낸다. 실측치가 비교적 계산치에 근접하기는 하나 일반적으로 약간 작게 나오는 것은 모르타르의 영향 때문으로 추측된다.

3.2 굽힘 모멘트 측정

철강-현무암 복합재료 파이프가 산업현장에서 쓰일 때에 손상을 입지 않기 위해서는 어느 정도의 하중을 받을 수 있으며 어느 정도의 굽힘 모멘트를 받을 수 있는지 알아야 배관설계시 안전한 기준을 정할 수 있을 것이다.

Fig. 9은 이 복합재료 파이프가 굽힘 모멘트 M을 받을 때 임의의 수직단면에서 변형률의 상태를 나타낸다. 변형률의 크기는 중립면으로부터의 거리에 비례하고 중립면 아래에서는 인장, 위에서는 압축 변형이 일어난다. 지금 중립면의 곡률반경을 ρ라 하면 보의 굽힘 이론에 의하여 중립면의 곡률 1/ρ은 다음과 같이 된다.

$$\frac{1}{\rho}=\frac{M}{E_sI_s+E_mI_m+E_bI_b} \tag{1}$$

여기서 M은 굽힘 모멘트이고 E_s, E_m, E_b는 각각 연강, 모르타르, 현무암의 탄성계수이며 I_s, I_m, I_b는 각각 연강, 모르타르, 현무암의 단면2차 모멘트

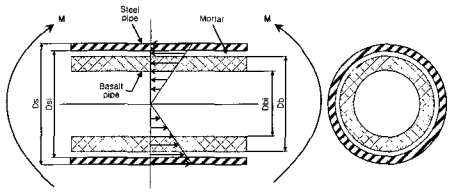

Fig. 9 Bending stress of steel-basalt composite pipe

로 연강 파이프의 외경과 내경을 각각 D_s, D_{si}, 현무암 파이프의 외경과 내경을 각각 D_b, D_{bi}라고 하면 다음과 같이 된다.

$$I_s=\frac{\pi(D_s^4-D_{si}^4)}{32}$$

$$I_m=\frac{\pi(D_{si}^4-D_b^4)}{32}$$

$$I_b=\frac{\pi(D_b^4-D_{bi}^4)}{32}$$

현무암은 연강에 비하여 취약하고 또한 보통의 취성재료와 같이 압축응력에는 강하고 인장응력에 약하므로 현무암 파이프에 발생하는 인장응력만 검토하면 될 것이다. 현무암 파이프에 발생하는 인장응력은 다음과 같이 된다.

$$\sigma_b=\frac{E_bMy}{E_sI_s+E_mI_m+E_bI_b} \tag{2}$$

여기서 y는 중립면으로부터의 거리이다. 현무암 파이프에 발생하는 최대인장응력 σ_{bmax}는 위의 식에 $y=D_b/2$를 대입하면 된다.

$$\sigma_{bmax}=\frac{E_bMD_b/2}{E_sI_s+E_mI_m+E_bI_b} \tag{3}$$

일반적으로 모르타르의 탄성계수 E_m은 연강이나 현무암에 비하여 아주 작으므로(연강의 1/10이하) 이것을 무시하면 현무암에 발생하는 최대인장응력은 다음과 같이 된다.

$$\sigma_{bmax}=\frac{E_bMD_b/2}{E_sI_s+E_bI_b} \tag{4}$$

이 값이 현무암의 인장강도 45MPa을 넘지 않아야 되므로 결국 이 복합재료 파이프에 가할 수 있는 굽

힘 모멘트 M은 다음과 같이 제한되어야 하고

$$M \le \frac{90(E_s I_s + E_b I_b)}{D_b E_b} (Nmm) \quad (5)$$

곡률반경 ρ는 다음 식 이상이어야 한다.

$$\rho \ge \frac{D_b E_b}{90} (mm) \quad (6)$$

예를 들면 시제품의 경우 D_s=162mm, D_{si}=150mm, D_b=130mm, D_{bi}=90mm이고 탄성계수는 E_s=200GPa, E_b=110GPa이므로 이 수치들을 위의 식들에 대입하여 계산하면 굽힘 모멘트 M은 37.5kNm이하 이어야 하고 곡률반경 ρ는 158.89m이상이어야 한다는 것을 알 수 있다.

3.3 사용온도 검토

다음으로 열팽창 수축에 의한 사용온도를 검토하여 보자. 앞에서도 언급하였듯이 현무암의 열팽창계수는 연강의 2/3 수준으로 연강과 현무암 사이에는 열팽창·수축의 차이가 있으므로 온도가 변화하면 연강과 현무암의 팽창·수축이 동일하지 않다. 따라서 온도 변화에 대한 연강과 현무암의 접착상태를 검토할 필요가 있다.

만약 온도가 내려가면 연강과 현무암이 다같이 수축하는데 이 때에는 연강 파이프 직경의 수축이 현무암 파이프 직경의 수축보다 크다. 그러면 연강 파이프에는 인장응력이 발생하고 모르타르와 현무암 파이프에는 압축응력이 발생한다. 연강은 인장에 강하고 모르타르와 현무암은 압축에 강하므로 이 때에는 전혀 문제가 생기지 않는다. 그런데 이와는 반대로 온도가 올라갈 때에는 연강 파이프 직경의 팽창이 현무암 파이프 직경의 팽창보다 크게 되므로 연강 파이프와 현무암 파이프 사이의 간격, 즉 모르타르의 두께가 커지게 되는데, 모르타르는 인장에 약하므로 온도의 증가가 어느 한도를 넘으면 접착을 유지할 수 없게 된다. 지금 이 온도증가 한도를 구하여 보고자 한다.

모르타르의 두께는 $t_m=(D_{si}-D_b)/2$인데 온도가 T만큼 증가하면 두께는 다음과 같이 된다.

$$t_m' = \frac{D_{si}(1+\alpha_s T) - D_b(1+\alpha_b T)}{2} \quad (7)$$

여기서 α_s, α_b는 각각 연강과 현무암의 열팽창계수이다. 모르타르의 탄성계수 E_m이 연강이나 현무암에 비하여 작으므로 모르타르의 두께방향 변형률은 다음과 같이 된다.

$$\varepsilon_{mr} = \frac{D_{si}\alpha_s - D_b\alpha_b}{D_{si} - D_b} T \quad (8)$$

따라서 모르타르의 두께방향 응력은 다음과 같이 된다.

$$\sigma_{mr} = E_m(\epsilon_{mr} - \alpha_m T) = E_m\left(\frac{D_{si}\alpha_s - D_b\alpha_b}{D_{si} - D_b} - \alpha_m\right) T \quad (9)$$

여기서 α_m은 모르타르의 열팽창계수이다. 이 식으로 계산된 응력이 모르타르의 인장강도 σ_{mf}를 넘지 않아야 한다. 따라서 온도증가 T는 다음 식으로 계산된 값으로 제한하여야 한다.

$$T \le \frac{\sigma_{mf}}{E_m} \frac{(D_{si} - D_b)}{D_{si}(\alpha_s - \alpha_m) - D_b(\alpha_b - \alpha_m)} \quad (10)$$

예를 들어 시제품인 경우에 대하여 D_{si}=150mm, D_b=130mm, $\alpha_s=12\times10^{-6}/℃$, $\alpha_b=8\times10^{-6}/℃$, $\alpha_m=9.5\times10^{-6}/℃$, E_m=20GPa, α_{mf}=30MPa을 위의 식에 대입하면 T≤52.63℃가 나온다. 따라서 상온(20℃)에서 이 복합재료 파이프를 제작하였다면 사용온도를 72.63℃이하로 제한하여야 한다는 것을 알 수 있다.

3.4 온도분포에 따른 열응력 및 인장응력

원통좌표계로 표시한 축대칭 물체의 정상상태 열전도 방정식을 세워서 이것을 풀고 Fig. 10(a)와 같이 내반경이 α, 외반경이 β인 실린더에 적용하여 보자. 이 실린더 내벽의 온도가 T_A, 외벽의 온도가 T_B일 때, 원통좌표계를 이 그림과 같이 정하고 온도분포 T(r)을 구하면 아래식과 같이 된다.

$$T(r) = \frac{1}{\ln(\frac{\beta}{\alpha})}\left(T_A \ln\frac{\beta}{r} + T_B \ln\frac{r}{\alpha}\right) \quad (11)$$

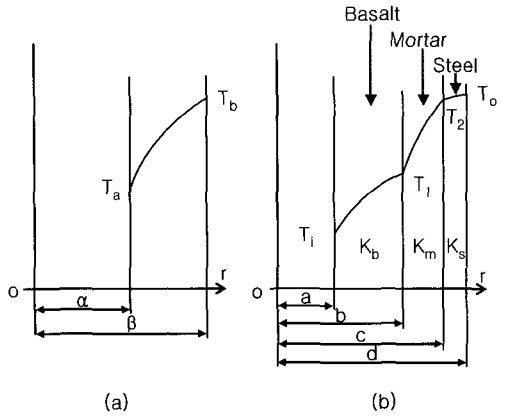

Fig. 10 Temperature distribution of cylinder wall in case of steady state heat conduction

이것을 미분하면 r에 관하여 r방향의 온도기울기를 구할 수 있다.

$$\frac{dT}{dr} = \frac{-T_A + T_B}{\ln\frac{\beta}{\alpha}} \frac{1}{r} \tag{12}$$

이들을 이용하면 Fig. 10(b)와 같이 철강-현무암 복합재료 파이프 내벽의 온도가 T_i, 외벽의 온도가 T_0로 정상상태의 열전도가 이루어질때의 온도분포를 구할 수 있다. k_b, k_m, k_s를 각각 현무암, 모르타르, 연강의 열전도계수라고 할 때, 현무암과 모르타르의 계면에서의 온도 T_1, 모르타르와 연강과의 계면에서의 온도 T_2를 구하여 보자. 두 물체의 경계면에서 좌측 물체의 열전도계수와 온도기울기의 곱과 우측 물체의 그것이 같다는 사실을 이용하면 T_1, T_2를 구할 수 있고 다음과 같이 된다.

$$T_1 = \frac{(\frac{k_s}{k_m}\ln\frac{c}{b} + \ln\frac{d}{c})T_i + (\frac{k_s}{k_b}\ln\frac{b}{a})T_o}{\ln\frac{d}{c} + \frac{k_s}{k_m}\ln\frac{c}{b} + \frac{k_s}{k_b}\ln\frac{b}{a}} \tag{13}$$

$$T_2 = (1 + \frac{k_b}{k_m}\frac{\ln\frac{c}{b}}{\ln\frac{b}{a}})T_1 - \frac{k_b}{k_m}\frac{\ln\frac{c}{b}}{\ln\frac{b}{a}}T_i \tag{14}$$

여기서 a, b는 각각 현무암 파이프의 내반경과 외반경으로 $a=D_{bi}/2$, $b=D_b/2$이고 c, d는 각각 연강파이프의 내반경과 외반경으로 $c=D_{si}/2$, $d=D_s/2$이다. 따라서 현무암 파이프에서의 온도분포는 식 (11)을 이용하여 구하면

$$T(r) = \frac{1}{\ln\frac{b}{a}}(T_i\ln\frac{b}{r} + T_1\ln\frac{r}{a}) \tag{15}$$

단, $a \le r \le b$

와 같이 되고 모르타르에서의 온도분포는

$$T(r) = \frac{1}{\ln\frac{c}{b}}(T_1\ln\frac{c}{r} + T_2\ln\frac{r}{b}) \tag{16}$$

단, $b \le r \le c$

와 같이 되며 연강파이프에서의 온도분포는 다음과 같이 된다.

$$T(r) = \frac{1}{\ln\frac{d}{c}}(T_2\ln\frac{d}{r} + T_o\ln\frac{r}{c}) \tag{17}$$

단, $c \le r \le d$

시제품을 예로 들어 계산을 하면 a=45mm, b=65mm, c=75mm, d=81mm, k_b=1.9W/(℃m), k_m=1.2W/(℃m), k_s=40W/(℃m)이고 내부의 온도가 5℃, 외부의 온도가 50℃라고 할 때에 계면에서의 온도 T_1과 T_2를 식 (13)과 식 (14)를 각각 이용하여 계산하면 T_1=32.67℃, T_2=49.73℃가 되고 온도분포를 그래프로 나타내면 Fig. 11과 같다.

복합재료 파이프의 온도 분포를 구하였던 이유는 이것을 이용하여 열응력을 구하고 현무암에서 제한치 이상의 인장응력이 발생하는가를 검토하기 위해서이다. 현무암과 모르타르 및 연강의 기계적 성질이 다 상이하므로 열응력의 계산식을 유도하기는 어렵고 유한요소법을 이용하는 수밖에 없다. Fig. 12는 본 시제품의 열응력 계산을 위한 유한요소 분할을 나타낸다. 반경방향으로는 2mm 간격, 축 방향으로는 4mm 간격으로 요소를 분할하였다. 복합재료 파이프의 내벽과 외벽의 온도는 전과같이 각각 5℃와 50℃의 정상상태에서의 열응력을 계산하였다.

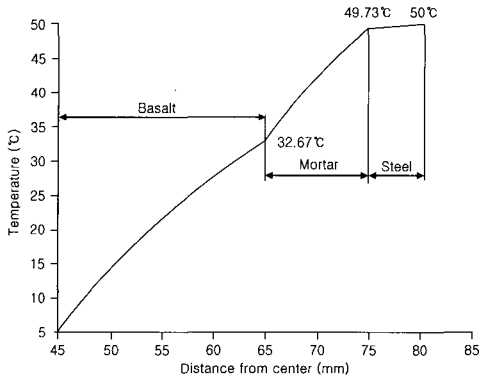

Fig. 11 Temperature distribution of steel-basalt composite pipe in case of steady state heat conduction

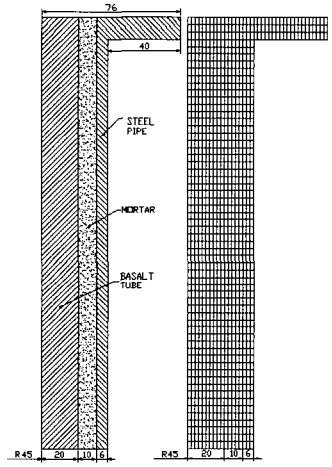

Fig. 12 Finite element mesh of steel-basalt composite pipe

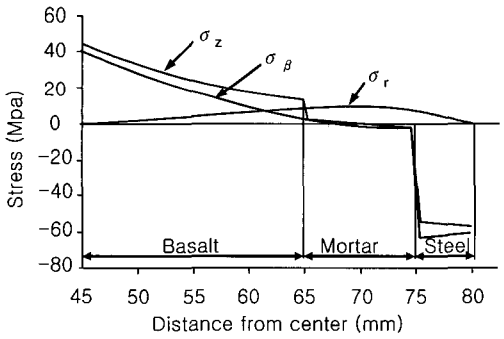

Fig. 13 Thermal stress distributions of steel-basalt composite pipe

열응력의 분포를 보면 축 방향(z방향)으로는 변화가 거의 없고 반경 방향(r방향)으로만 변화가 있었다. Fig. 13은 열응력의 분포를 나타낸다. 반경방향 응력 σ_r는 그 크기가 미미하여 무시하여도 좋을 듯 하다. 원주방향 응력 σ_θ를 보면 현무암 파이프의 내벽에서 현무암의 인장강도(45MPa)에 육박하는 응력이 발생한다는 것과 축 방향 응력 σ_z는 더 심각하다는 것을 알 수 있다. 현무암과 모르타르, 모르타르와 연강의 경계에서 응력의 분포가 급변하는 것은 탄성계수와 열팽창계수를 비롯한 두 물체의 기계적 성질이 매우 상이하기 때문이다. 이 계산을 토대로 하면 본 시제품의 경우 파이프 내벽의 온도가 외벽의 온도보다 45℃이상 낮으면 현무암 튜브가 깨어질 가능성이 있다는 것을 염두 해 두어야 할 것이다.

4. 결 론

철강재 고유의 장점인 인성(toughness)과 강도(strength)를 살리고, 철강재의 단점인 부식성과 마모성을 현무암의 장점인 내부식성과 내마모성이 대신하여 상호 보완작용을 하는 파이프로써 철강-현무암 복합재료 파이프가 개발되어 공업용으로 많이 사용되고 있는데 이의 역학적인 거동을 알면 설계와 시공에 많은 도움이 될 것이다. 이러한 관점에서 철강-현무암 복합재료 파이프의 거동을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 철강-현무암 복합재료 파이프에 가할 수 있는 굽힘 모멘트는 다음식으로 계산된 값 이하이어야 한다.

$$M \le \frac{90(E_s I_s + E_b I_b)}{D_b E_b} (Nmm)$$

(2) 철강-현무암 복합재료 파이프의 곡률반경은 다음식으로 계산된 값 이상이어야 한다.

$$\rho \ge \frac{D_b E_b}{90} (mm)$$

(3) 철강-현무암 복합재료 파이프의 사용온도는 제작당시의 온도보다 다음식으로 나타내는 온도증가를 초과하여서는 안된다.

$$T \le \frac{\sigma_{mf}}{E_m} \frac{(D_{si} - D_b)}{D_{si}(\alpha_s - \alpha_m) - D_b(\alpha_b - \alpha_m)}$$

철강-현무암 복합재료 파이프의 양산체제하에서 현무암 튜브의 두께, 모르타르의 두께, 연강 파이프의 두께와 직경, 내경과 외경, 플렌지의 크기, 볼트 구멍의 위치와 수, 엘보우의 곡률반경 등을 규격화 하여 일정하게 생산하면 호환성이 있으므로 상품성이 더 좋게 되어 사용범위가 더욱 넓어질 것이고, 이 파이프의 우수한 내마모성을 여러 산업에 이용하는 효과도 있을 것으로 기대된다. 예를 들면 시멘트나 곡물 또는 광석분말을 이송하는 파이프에 활용할 수 있을 것이다. 특히 이런 고형분말을 이송하는 파이프는 엘보우와 같은 곡각부분에서 마모가 심하므로 이런 개소에 이 파이프를 사용함으로써 현무암의 내마모성이 철강재 파이프를 보호하여 파이프가 마모되지 않으므로 수명이 엄청나게 증가하는 효과가 있을 것이며 이 파이프의 활용도를 극대화 할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] D.BAHL, J.A. ROBERTSans J.H. WEYMOUTH, "Basalt Glass-Ceramic", Journal of the Australian Ceramic Society Vol. 10, No.2, 1974. 8

[2] Hecken, WAlter, Grber, Alfons, "Pipe with internal coating as protection against chemical attacks at high working pressures", Patent Abstract of EURO, 1988.7

[3] 김동섭, "탈황설비 내 배관의 부식과 마모를 방지하는 용융주조 현무암 TUBE를 강관에 삽입하는 복합 PIPE", 한국기술거래소, pp. 23 ~ 29, 2003

[4] GREENBANK CAST BASALT ENG. CO. LTD. "Improvements in Pipe Bends or Elbows", UK Patent Application GB 2051281, 1981

[5] LUBOMIR KOPECKY & JAN VOLDAN, "The Cast Basalt Industry", Annals New York Academy of Science, *pp. 1086 ~ 1105, 2000*

[6] R.N. McNALLY & G.H. BEALL, "Crystallization of Fusion Cast Ceramics and Glass-ceramics", Journal of Materials Science, 14, pp. 2596~2604, 1979

[7] RNDr. LUBOMIR KOPECKY, CSc, "Crystallization and Properties of Basalt Castings and Natural Basalt from the SLAPANY Deposit", EUTIT, 2001

[8] EUTIT, "Cast Basalt Catalog Sheet", E-01, pp. 2, 2003

[9] LUBOMIR KOPECKY, "50 Years of Fused Basalt Production in STARA VODA", EUTIT, pp.37 ~ 57, 2001

[10] G.F. NEILSON, "Nucleation and crystallization in ZrO2-Nucleated glass ceramic system", Advanced in nucleation and crystallzation in glass, 1971 Vol. PT pp. 73-82.

저 자 소 개

김종도(金鍾道)

1963년 1월생, 1985년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1993~1997년 일본오사카대학 생산가공공학과 응용고온공학 코스(공학석사 및 공학박사), 2003년 1월~현재, 대한용접학회 고에너지연구위원회 위원장, 2004년 1월~한국레이저가공학회 운영이사, 1998년 3월~현재, 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수, 당학회 편집이사

왕지석(王之錫)

1946년 11월27일생, 1971년 한국해양대학교 기관학과 졸업, 1975년 동 대학원 석사과정 졸업(공학석사), 1979년 프랑스 낭뜨대학교 박사과정 졸업(공학박사) 1973~현재 한국해양대학교 기계정보공학부 교수

윤희종(尹熙鍾)

1961년 5월20일생, 1985년 한국해양대학교 항해학과 졸업, 2004년 동 대학원 석사과정 졸업(공학석사), 2006년 동 대학원 박사과정 입학, 1997~현재 동도BASALT산업(주) 전무이사