

研究論文

大韓熔接學會誌
 第10卷 第3號 1992年 9月
 Journal of the Korean
 Welding Society
 Vol. 10. No. 3, Sep., 1992

수도용 대형 강관 용접부의 응력분포에 미치는 각장(leg of fillet)의 영향

김성도* · 배강열** · 나석주**

Effect of leg of fillet on stress distribution in weldments of large steel water pipes

S. D. Kim*, K. Y. Bae**, S. J. Na**

Key Words : Steel water pipe(수도용 강관), Weldment design(용접부 설계), Maximum stress(최대 응력), Equivalent stress(상당 응력), Leg of fillet(각장)

Abstract

Large steel water pipes are joined prevalently by bell end method and welded at inside and outside of lapped parts. According to the Korean Standard(KS) for fabrication of water pipes, the weldments are designed to have the length of leg which is same as or larger than the thickness of the pipe. It is recently pointed out that the standard size of weldments is too large, which results in an excessive consumption of material and labor.

In this study, several cases of weldments having different sizes were investigated to reduce the length of leg to the effective size. For each case, the analysis of stresses was carried out to evaluate the safety of the welded pipes by using a package program, ANSYS, under the consideration of the loading condition of water pipes which includes the soil pressure on the pipe, the load over the road, and the temperature change of the pipe.

The results of this study revealed that the weldment which has the length of leg of the size over $0.7 \times$ thickness of the pipe could provide a stress level below the yield strength. Especially when the length of leg is 85% of the wall thickness, the maximum equivalent stress is only slightly higher than that of the leg of fillet of the size of $1.0 \times$ pipe thickness.

* 정회원, 현대정공주식회사

** 정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

1. 서 론

땅속에 매설되는 상수도관은 토압과 지상의 하중체 그리고 온도변화에 의한 열팽창 및 수축 등으로 인한 하중을 충분히 지탱할 수 있도록 설계되어야 한다. 또한 상수도관은 단관들의 용접이음으로써 제작되기 때문에 용접부에서도 충분한 강도를 갖도록 해야 한다. 그런데 용접부의 강도를 얻고자 무조건 용접부를 크게 하는 것은 과도한 작업량과 자재소모 때문에 매우 비경제적이 될 수 있다. 현재 국내 상수도관의 제작에서는 용접부 각장을 모재 두께와 같게 설정하고 있으나 국외의 경우에 비하여 지나치게 큰 것으로 지적되어 개선책이 요구되는 실정이다.

본 연구에서는 용접부의 각장이 두께에 비해 100%, 85%, 70%의 크기를 갖는 경우에 실제 상수도관이 겪게 되는 하중상황과 경계조건을 고려하여 응력해석을 수행하였다. 또한 외국의 사례를 가상하여 관의 외측 용접부의 각장이 두께의 20%의 크기를 갖는 경우에 대해서도 응력해석을 실시하여 이러한 설계의 타당성을 조사하고자 하였다. 상수도관 용접부의 응력계산시 토압, 지상의 하중 및 관내부에 작용하는 수압 등을 고려하였으며, 상수도관의 여러 가지 온도변화를 선정하여 각 경우에 대한 응력분포를 제시하였다. 응력해석을 위하여 구조해석용 프로그램 패키지로서 널리 보급되어 있는 ANSYS를 사용하였다¹⁾.

2. 응력해석의 수식화

상수도관이 작동중에 받는 하중은 토압, 지상의 하중, 그리고 자체의 온도변화에 의한 열하중 등으로 나눌 수 있다. 이를 고려하여 응력해석을 하기 위한 유효요소방정식의 유도과정은 다음의 과정으로 나타낼 수 있다²⁾.

우선 온도변화에 의한 변형율이 존재하면 응력(σ)과 변형율(ϵ)과의 관계는 (1)의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\{\sigma\} = [D] (\{\epsilon\} - \{\epsilon^h\}) \dots\dots\dots (1)$$

여기서 열변형율은 선팽창계수와 온도변화율의 곱으로서, $\epsilon^h = \alpha \cdot \Delta T$ 로 나타낼 수 있고, D는 응력과 변

형율과의 관계를 나타내는 매트릭스(matrix)이다.

물체 외부의 하중에 의한 일의 가상적 변화와 내부의 변형에너지의 가상적 변화가 동일하다고 가정하면, 내부에너지 변화 δU 는 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\delta U = \int_{vol} \{\delta \epsilon\}^T \{\sigma\} d(vol) \dots\dots\dots (2)$$

(1) 식을 (2)식에 대입하여 정리하면 (3)식과 같다.

$$\delta U = \int_{vol} (\{\delta \epsilon\}^T [D] \{\epsilon\} - \{\delta \epsilon\}^T [D] \{\epsilon^h\}) d(vol) \dots\dots\dots (3)$$

변위(u)와 변형율 (ϵ)의 관계는 (4)식과 같으므로

$$\{\epsilon\} = [B] \{u\} \dots\dots\dots (4)$$

이를 (3)식에 대입하여 (5)식을 얻을 수 있다. 여기서 B는 변위와 변형율 관계를 나타내는 매트릭스이다.

$$\delta U = \{\delta u\}^T \int_{vol} [B]^T [D] [B] d(vol) \{u\} - \{\delta u\}^T \int_{vol} [B]^T [D] \{\epsilon^h\} d(vol) \dots\dots\dots (5)$$

외부하중으로 압력이 존재하는 경우, 이에 따른 에너지의 변화 (δV)를 (6)식으로 나타낼 수 있다.

$$\delta V = \int_{area_p} \{\delta \omega\}^T \{p\} d(area_p) \dots\dots\dots (6)$$

여기서 {p}는 압력 벡타이고, $area_p$ 는 압력이 작용하는 면적이다. 또한 임의 위치에서 변위 벡타{ ω }는 (7)식으로 나타낼 수 있다.

$$\{\omega\} = [A] \{u\} \dots\dots\dots (7)$$

여기서 [A]는 형상함수이다. 따라서 외부일의 변화를 (8)식으로 나타낼 수 있다.

$$\delta V = \{\delta u\}^T \int_{area_p} [A]^T \{p\} d(area_p) \dots\dots\dots (8)$$

가상일의 원리를 이용하여 (2)식과 (8)식을 등치하면 (9)식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & \{\delta u\}^T \int_{vol} [B]^T [D] [B] d(vol) \{u\} \\ & - \{\delta u\}^T \int_{vol} [B]^T [D] \{\epsilon^{th}\} d(vol) \\ & = \{\delta u\}^T \int_{area_p} [A]^T \{p\} d(area_p) \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

여기서 $\{\delta u\}$ 는 가상의 변위이므로 소거하고 정리하여 (10)식과 같은 유한요소 방정식을 얻을 수 있는데 이 식은 한 요소에 관한 평형방정식을 의미한다.

$$[K_e] \{u\} - \{F_e^{th}\} = \{F_e^{pr}\} \dots\dots\dots (10)$$

여기서 요소 강성 매트릭스 $[K_e]$

$$= \int_{vol} [B]^T [D] [B] d(vol) \text{이고,}$$

요소 열 벡터 $\{F_e^{th}\}$

$$= \int_{vol} [B]^T [D] \{\epsilon^{th}\} d(vol) \text{이며,}$$

요소 압력 벡터 $\{F_e^{pr}\}$

$$= \int_{area_p} [A]^T \{p\} d(area_p) \text{이다.}$$

위의 (10)식을 이용하여 상수도관이 작동중에 받는 제반 하중에 의한 변위와 응력을 구할 수 있다.

3. 해석 방법

3.1. 해석영역

송수관이 좌우대칭이므로 Fig. 1과 같이 관의 한쪽 반만을 해석영역으로 취하였으며, 이때 길이 방향으로는 용접부를 중심으로 전체길이가 1m가 되도록 취하였다. 이것은 사용된 프로그램의 용량에 의해 요소의 수에 제약이 있었기 때문인데, 각장의 크기와 상수도관의 온도변화가 응력분포에 미치는 영향을 조사하기 위한 본 연구의 성격상 결정적인 장애 요인은 되지 않을 것으로 판단된다. 송수관은 벨엔드 방법(bell end method)으로 결합된 후 관의 내부와 외부 양쪽을 필렛(fillet) 용접하여 제작되므로³⁾, 해석 영역의 설정에서는 관과 벨엔드 용접부의 형상을 고려하였고, 3차원 요소 (3-dim. isoparametric solid element)로써 분할하였다. 필렛 용접부는 모재와 동일한

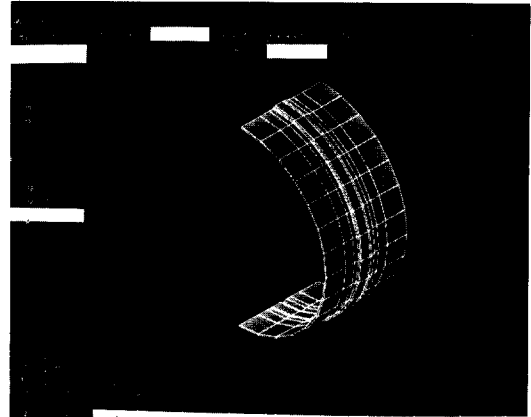


Fig. 1 Solution domain

물리적, 기계적 성질을 갖는다고 가정하여 모재의 일부로 취하였다.

3.2. 경계조건

Figure 2와 같이 관의 상하 단면에서는 좌우가 서로 대칭이므로 대칭경계 조건을, 그리고 길이방향으로는 송수관이 계속 연결되므로 양쪽 끝부분에서 역시 대칭인 경계조건을 갖는다고 가정하였다. 그리고 관의 아랫면에서는 고정되어 변위가 없다고 가정하였는데 이것은 실제 현장시공시 용접작업이 완료된 후 송수관이 내려앉음을 방지하기 위해 되메우기작업을 하는데 이때 충분한 지지력이 생기도록 흙을 다져 주기 때문에 타당하다고 여겨진다.

경계조건으로 고려된 송수관의 내외면에 가해지는 하중들을 정리해 보면, 관의 외부표면의 윗부분에서는

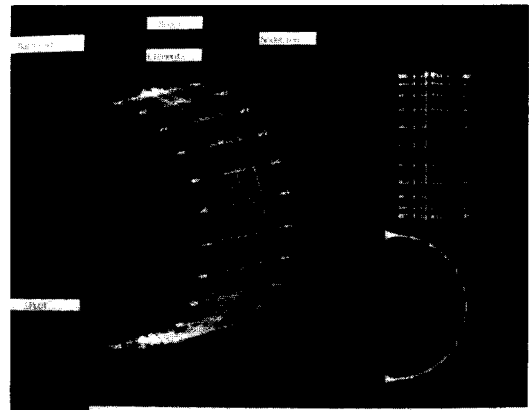


Fig. 2 Boundary conditions

토압과 지상의 하중에 의한 힘이 작용하고 있으며, 관내부에서는 송수과정에서 발생하는 송수압이 작용한다. 또한 송수관과 물의 자중도 작용하기 때문에 동시에 고려되었다. 관의 밑부분에서는 이러한 하중 하에서 발생할 수 있는 반력이 고려되었는데, 이때 반력은 힘의 평형조건식으로 부터 얻을 수 있다. 온도변화에 의한 해석영역의 팽창과 수축을 고려하기 위해 선팽창계수 $70 \times 10^{-7} [m/m^{\circ}C]$ 을 취하였다. 송수관 모재 및 용접재의 특성은 동일하며 온도변화에 따른 제반 특성치의 변화는 없다고 가정하였다. 송수관에 작용하는 힘들을 좀 더 상세히 고찰해 보면 다음과 같다.

3.2.1. 토압(P_e)

Figure 3과 같이 수도관 위를 덮고 있는 흙에 의한 압력 즉 토압은 다음과 같이 나타낼 수 있다⁴⁾.

$$P_e = \gamma_e \cdot h \dots\dots\dots (11)$$

여기서, γ_e 는 흙의 비중량으로서 본 연구에서는 16.5 [KN/m³]으로 채택하였다⁴⁾.

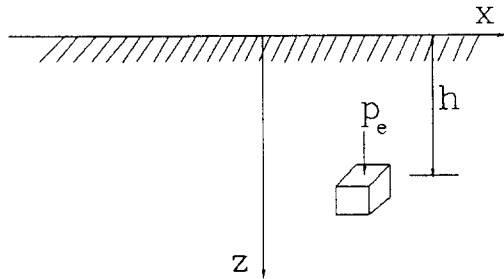


Fig. 3. Effect of earth pressure

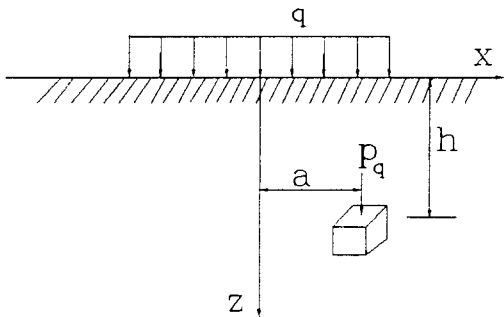


Fig. 4 Effect of uniform load

3.2.2. 균일 분포하중(q)에 의한 압력(p_q)

Figure 4와 같이 길이 10m이며, 하중이 20ton인 물체가 지상에서 정지하고 있다면 균일분포하중 $q = 20\text{ton}/10\text{m} = 2[\text{ton}/\text{m}]$ 이다. 이러한 균일 분포하중에 의해 송수관의 표면에 가해지는 압력은 다음과 같이 나타낼 수 있다⁴⁾.

$$p_q = \frac{2qh^3}{\pi(a^2+h^2)^2} \dots\dots\dots (12)$$

3.2.3. 송수관 내부에서의 수압(P_w)

송수관의 용접이 끝난 후에는 용접부의 수밀성을 확인하기 위해 관내에 송수하여 관로의 수압시험을 하는데 이때 일반적으로 사용하는 시험수압은 5kg/cm² ($\approx 500000 \text{ Pa}$)이므로 본 연구에서도 이를 참조하여 Fig. 5에서와 같이 송수관 내부에서의 수압으로서 고려하였다⁵⁾.

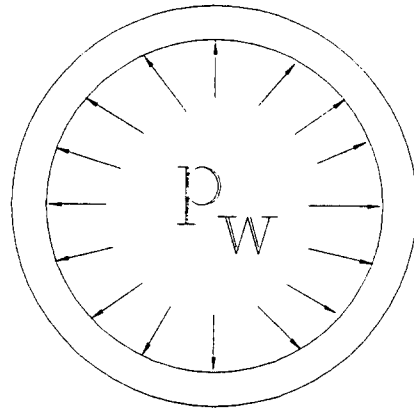


Fig. 5 Effect of internal water pressure

3.2.4. 반력(P_r)

반력의 분포를 Fig. 6과 같이 가정하였는데, 이때 반력의 크기는 앞에서 언급한 토압, 지상의 하중 그리고 자중에 의한 힘의 합력과의 평형을 고려하여 다음과 같이 계산하였다.

최소 반력은 다음과 같이 얻을 수 있다⁴⁾.

$$P_{r \text{ min}} = K(P_e + P_q) \dots\dots\dots (13)$$

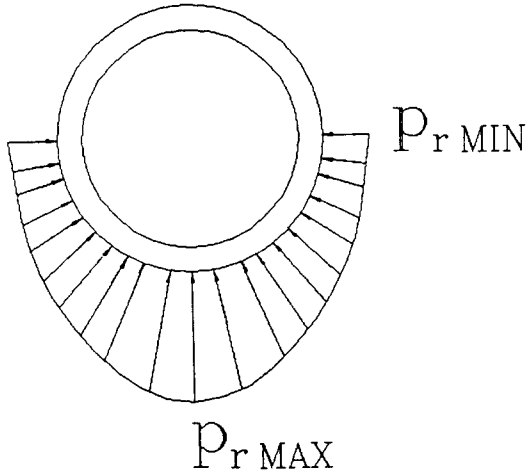


Fig. 6 Distribution of reaction pressure

여기서, 사질토의 경우 $K=1-\sin \phi$, $\phi \cong 30^\circ \sim 38^\circ$ 로 알려져 있는데⁴⁾, 본 연구에서는 $\phi = 30^\circ$ 로 선정하였다.

힘의 평형관계에서 관에 작용하는 압력과 반력의 관계는 (14)식과 같다.

$$\int P_r dA = (P_e + P_q) R L \dots\dots\dots (14)$$

여기서 dA 는 반력이 작용하는 면적, R 은 관의 반경, L 은 관의 길이이다. 반력분포는 그 분포가 선형적이라고 가정하면 임의 깊이 r 에서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_r = (P_{r \text{ min}} - P_{r \text{ max}})r/R + P_{r \text{ max}} \dots\dots\dots (15)$$

(15)식을 (14)식에 대입하면 (16)식의 관계를 얻을 수 있다.

$$(P_{r \text{ min}} + P_{r \text{ max}})R \cdot L/2 = (P_e + P_q)R \cdot L \dots\dots (16)$$

(16)식에서 최대 반력을 구하면 (17)식과 같이 나타난다.

$$P_{r \text{ max}} = 3(P_e + P_q) / 2 \dots\dots\dots (17)$$

따라서 (15)식에서 임의의 위치 r 에서의 반력을 구할 수 있다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 송수관 내외면 용접부에서의 용착

Table. 1 Effects of leg of fillet and temperature on maximum equivalent stress of steel water pipe weld

Pipe temp.	Inside	100 %	Inside	85 %	Inside	70 %
	Outside		Outside		Outside	
20℃	100 %	201	85 %	207	70 %	226
	20 %	228	20 %	230	20 %	239
0℃	100 %	212	85 %	220	70 %	243
	20 %	242	20 %	263	20 %	277
-2.2℃	100 %	214	85 %	222	70 %	246
	20 %	244	20 %	271	20 %	285
-5.0℃	100 %	216	85 %	225	70 %	249
	20 %	251	20 %	282	20 %	297
-10.0℃	100 %	221	85 %	231	70 %	256
	20 %	267	20 %	303	20 %	318
-20.0℃	100 %	231	85 %	243	70 %	271
	20 %	301	20 %	349	20 %	366

량의 변화와 송수관에서의 온도변화에 따른 관내부에서의 응력분포를 수치해석하여 여기서 얻은 결과로부터 용접부에서의 용착량을 허용범위내에서 최대한 줄임으로써 용접공정을 단축시키고 그 결과 생산성 향상을 도모하고자 하였다. 따라서 해석을 위해 관의 내면과 외면에서의 용착량과 온도변화를 해석변수로서 취하였으며, 이때 하중의 크기는 앞에서 언급한 상수값을 취하였다. 용착량을 구분하기 위해 본 연구에서는 각장비를 정의하였는데, 여기서 각장비란 용접재료의 두께에 대한 각장의 비로서, 각장비 85%라고 하면 재료의 두께를 100으로 할 때 각장이 85인 경우를 의미한다.

관의 내면과 외면에서의 각장비가 각각 100% - 100%, 85% - 85%, 70% - 70%인 경우와 100% - 20%, 85% - 20%, 70% - 20%인 경우로 분리하여 해석하였으며, 온도변화는 상온을 20°C로 간주하고 이때 송수관의 온도변화를 각각 20, 0, -2.2, -5, -10, -20°C로 하였을 경우 그 영향을 관찰하였다.

먼저 Table 1은 각 경우에 대해서 계산된 최대 상당응력의 크기를 나타낸 것으로서 이 값들로부터 Fig. 7, 8과 9를 도시하였다. 한편 최대 상당응력은 모두 용접부 지단(weld root)에서 발생하였다. 여기서 최

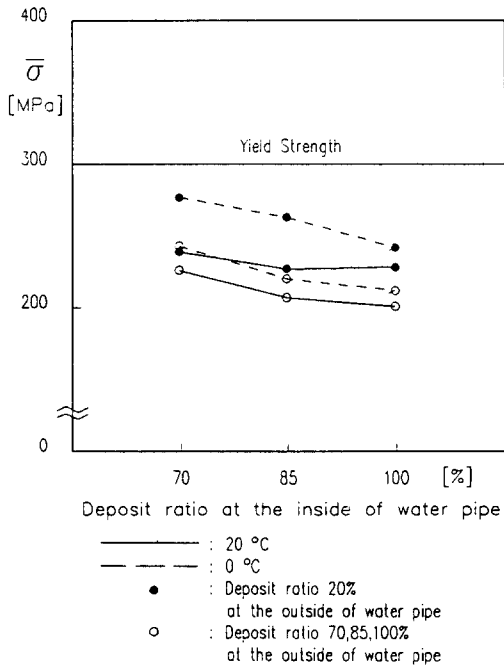


Fig. 7 Effect of leg of fillet and pipe temperature on maximum equivalent stress

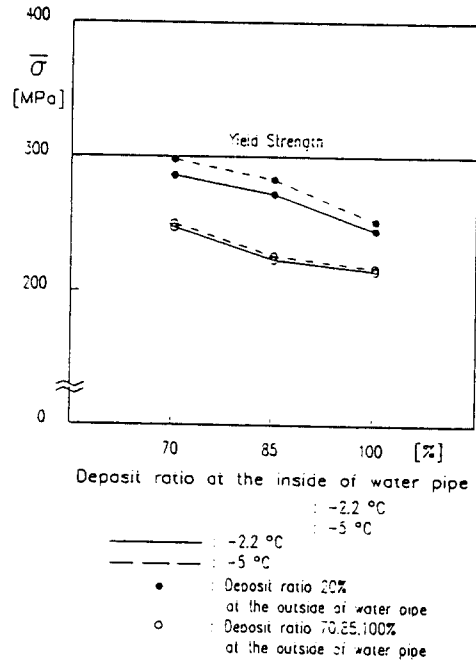


Fig. 8 Effect of leg of fillet and pipe temperature on maximum equivalent stress

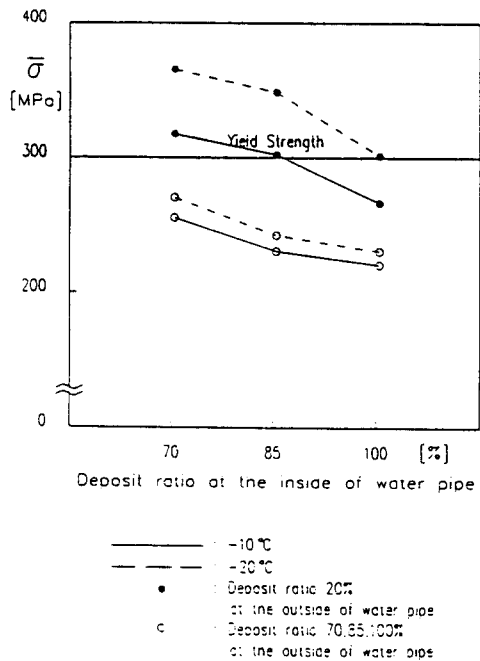


Fig. 9 Effect of leg of fillet and pipe temperature on maximum equivalent stress

대상당응력이란 Von Mises의 항복조건식, 즉

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_2 \dots\dots (18)$$

에서의 상당응력(Equivalent Stress) σ 의 최대치를 의미한다. 그림들로부터 용착량의 감소에 따른 최대 상당응력의 증가가 명확하며 특히 송수관에서의 온도감소가 심하게 일어난 경우인 Fig. 9에서는 그 경향이 더욱 뚜렷함을 볼 수 있다. 그리고, 온도변화에 의한 영향도 상온으로부터 온도 감소가 커짐에 따라 즉 Fig. 7로부터 Fig. 9에 이를 수록 응력이 증가함을 알 수 있으며, 특히 송수관 외부에서의 각장비가 20%인 경우에는 그 영향이 더욱 두드러지게 나타남을 볼 수 있다.

Figure 7은 송수관의 온도가 상온과 동일한 20°C와 0°C의 경우인데 용착량의 변화에 따른 상당응력의 변화가 그다지 크지 않으며 또한 그 값도 200-250 MPa로서 연강의 일반적인 항복강도(300Mpa)에 미치지 않고 있다. 그러나, 송수관의 온도가 각각 -2.2, -5°C와 -10, -20°C의 경우에는 Fig. 8과 Fig. 9에서 나타난 바와 같이 온도가 낮아짐에 따라 용착량의 감소에 따른 최대상당응력의 변화가 점점 급격해 짐을 볼 수 있다. 특히 Fig. 9에서 송수관온도가 -10°C이하로 떨어진 상태에서도 송수관 외면에서의 각장비가 70% 이상이 되면 최대 상당응력치가 재료의 항복강도에는 이르지 못하고 있으나, 파이프 외면의 각장비가 20%가 되면 용접부 강도가 재료의 항복강도를 넘게 됨을 알 수 있다. 실제로는 땅속에 매립된 송수관의 온도가 -10°C이하로 강하하는 경우는 없을 것으로 생각되며, 이러한 점에서 볼 때 최저 송수관 온도로서 가정하기에 적합한 -2.2°C의 경우에도 용착량이 감소함에 따라 상당응력이 다소 큰 폭으로 증가하고 있으며 그 값은 20°C의 경우보다 상당히 크게 나타남을 알 수 있다, Fig. 8. 이 온도에서도 관의 내외부에서의 각장비가 각각 70%와 20%로 용착량이 감소하면 상당응력치가 재료의 항복강도에 거의 접근하고 있음을 알 수 있다. Figure 7, 8, 9에서 특히 주목할 만한 사실은 각장비를 85% - 85%로 선정된 경우에는 완만한 응력증가로 현재 시행중인 각장비 100% - 100%의 경우와 유사한 응력 크기를 나타내나, 70% - 70%의 경우는 85% - 85%에 비해서 비교적 급격한 응력상승을 나타낸 것이다. 이것은 각장비 70%의 경우 관성모멘트의 감소가 각장비 85%의 경우보다 더 급격하기 때문이라고 사료된다.

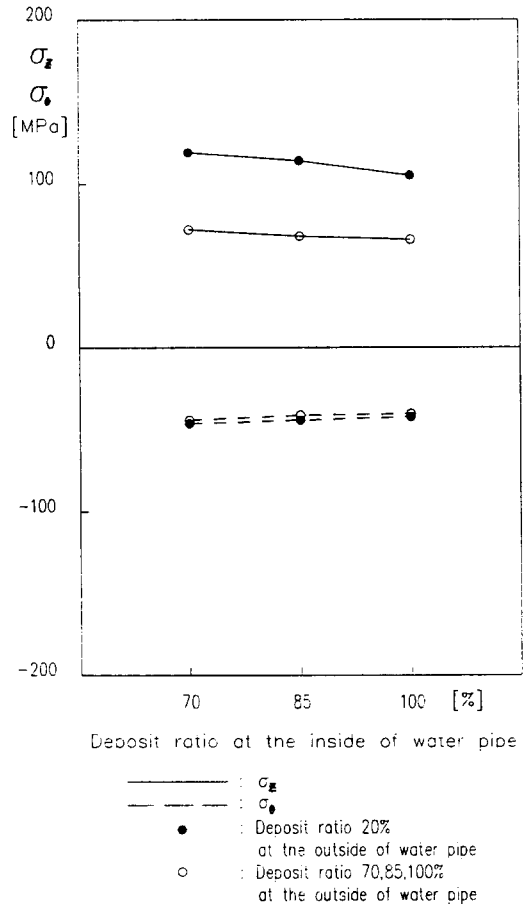
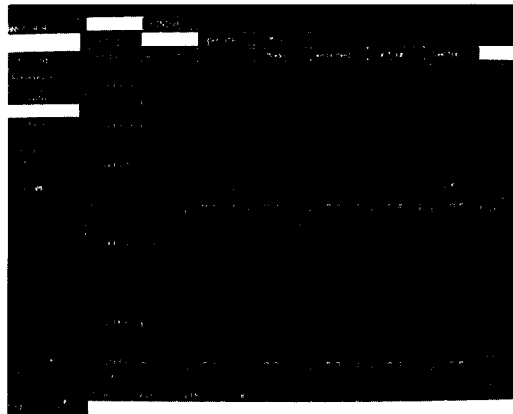


Fig. 10 Effect of pipe temperature on maximum stresses (pipe temperature : -2.2°C)

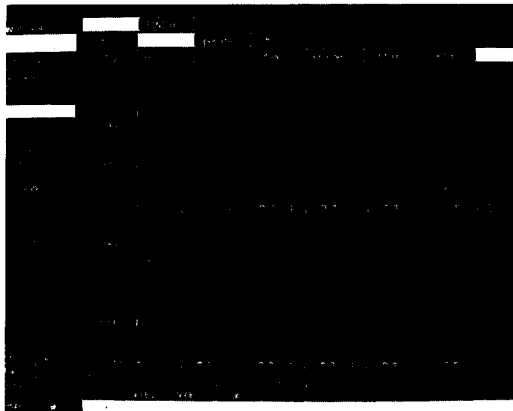
Figure 10의 결과는 본 연구에서의 해석결과와 미국 송수관 협회(AWWA)의 해석결과를 비교하기 위한 것인데, 송수관에 미치는 하중은 고려하지 않고 단지 대기온도의 변화로 인한 영향만을 고려한 경우이다. 즉, 상온 20°C(68°F)로부터 40°F 만큼의 온도강하가 일어난 경우로서, 대기온도 28°F(-2.2°C)에서의 응력상태이다. 먼저, 그림으로부터 내외부용접부의 각장비가 70% - 70%와 70% - 20%인 두가지 경우에 있어서 길이방향의 최대응력치 σ_2 가 각각 72MPa과 119MPa임을 알 수 있다. AWWA의 결과에서는, 관외부에서는 용접하지 않고 단지 관내부용접부에서의 각장비를 70%로 할 경우 용접부에서의 허용최대응력치를 15000Psi(105MPa)로 계산하였는데⁶⁾, 이들 두 결과를 비교한다면 비록 관외부용접부에서 서로 상

이한 점은 있으나 최대응력치에 있어서는 많은 일치를 보이고 있다. 따라서 온도변화만이 유일한 외부 하중인 경우, 즉 상수도관이 지상에 설치된 경우에는 내부 각장은 70%, 외부 각장은 20%로 하여도 안전한 용접부를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

Figure 11에서는 수도관 길이 방향에 대한 응력분포의 해석결과를 그림으로써 나타내었는데, 응력이 가장 많이 걸리는 위치, 즉 아랫쪽 대칭면의 용접부로부터 수도관의 길이에 따른 수직응력 $SY(\sigma_y)$ 와 상당응력 $SIGE(\sigma_x)$ 의 변화를 보여 준다. 계산에서 적용된 상수관 온도는 -2.2°C 의 경우로서 용착량이 감소할수록 용접부 부근에서의 응력집중현상이 두드러짐을 알 수 있으며, 그림에 나타난 응력변화의 불연속점은 용착금속과 모재의 연결부가 매끄럽지 못하기



(a) 100% of pipe thickness



(b) 70% of pipe thickness

Fig. 11 Stress distribution in longitudinal direction for various legs of fillet(pipe temperature : -2.2°C)

때문에 나타난 현상으로 여겨진다. 용착량이 감소할수록 최대상당응력도 조금씩 증가함을 알 수 있으나 전체적으로 보아 재료의 항복응력치에는 미치지 못함을 볼 수 있다.

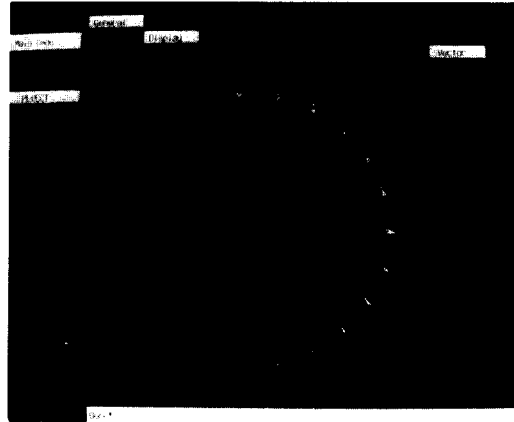


Fig. 12 Typical deformation of water pipes

Figure 12는 수도관의 변형 모양을 나타내고 있는데, 특히 수도관의 각 위치에서의 변형을 vector로써 잘 보여 주고 있으며, 이때 변형이 가장 심한 곳은 대칭면의 윗부분으로서 용접부 설계에 따라 변형량은 약 8~11mm정도를 나타내었다.

5. 결 론

상수도관 용접부의 응력해석결과 용접부에서의 응력분포는 송수관의 내외부 용접부에서의 각장비가 70% 이상이면 송수관온도에 의한 영향을 거의 받지 않았으며, 최대상당응력치도 200~250MPa 정도로서 재료의 항복강도에 미치지 못하였다. 그러나, 관외부에서의 각장비가 20% 정도로 감소하면 송수관온도의 변화에 의한 영향이 크게 나타났다. 특히 송수관온도가 -10°C 이하로 떨어진 상태에서는 불안정한 상태가 될 것으로 사료되며, 송수관온도가 -5°C 이상이 되어도 비록 관외부에서의 각장비가 20%로 감소한 경우에는 최대 상당응력이 재료의 항복응력에 근접하는 것으로 나타났다.

실제로는 땅속에 매립된 송수관의 온도가 -10°C 이하로 강하하는 경우는 없을 것으로 생각되며 대략 -1°C 에서 -2°C 정도까지는 떨어 질 수 있다고 본다. 이러한 점에서 상수도관 용접부의 용착량이 감소함에

따라 상당응력이 다소 증가하고 있으나, 내외부의 각장비를 70%~70%로 감소시켜도 최대 상당응력치는 200~250MPa로서 수도관 재료의 항복응력에는 미치지 못하고 있다. 특히 내외부의 각장비를 85%~85%로 감소시킬 경우는 현재 시행중인 100%~100% 경우와 유사한 최대 상당응력분포를 나타내 안전하면서도 각장을 축소할 수 있는 설계로 판단되었다.

후 기

본 연구의 수행을 위하여 지원해 주신 서울시 상수도 본부 시설부의 김진배 부장과 문영출 기사외 관계자 여러분께 감사를 드린다.

참 고 문 헌

- 1) Verification Manual, Engineering Analysis System (ANSYS), SWANSON ANALYSIS SYSTEMS, 1990.
- 2) Theoretical Manual, Engineering Analysis System (ANSYS), SWANSON ANALYSIS SYSTEMS, 1990.
- 3) 배강열, 나석주 : 수도용 대형 강관의 용접부 설계 개선에 관한 연구, 대한용접학회지, 제9권 4호, 1991.
- 4) 박성재 : 토질 역학, 샤론 출판사, 1987.
- 5) 도수관 송·배수관 부설공사 시방서, 서울특별시, 1990.
- 6) Steel Pipe-A Guide for Design and Installation, AWWA, 2nd ed., 1983.