

# 재하속도에 따른 용접강관의 모멘트 응답특성에 관한 해석적 연구

## An Analytical Study on Moment Response of Welded Steel Pipe for Loading Rate

장 경 호\*  
Chang, Kyong-ho

장 갑 철\*\*  
Jang, Gab-chul

### 요 약

재하속도에 따른 용접강관의 모멘트-곡률 거동특성에 관한 해석적 연구를 수행하였다. 3차원 열역학해석을 통하여 용접이음부의 잔류응력을 산출하였다. 그리고 동적소성모델이 적용된 탄소성 유한요소해석 프로그램을 이용하여 잔류응력을 고려한 용접강관(Welded pipe)의 동적해석을 수행하였다. 그리고 용접이음부가 없는 일반강관(Seamless pipe)에 대한 동적거동과의 비교를 통하여 해석을 수행하여 용접강관의 해석력과해석결과는 용접강관의 모멘트가 일반강관의 모멘트에 비해 낮은 응답을 보였으나 재하속도가 증가함에 따라 모멘트 응답의 차이는 점차 감소하는 경향을 보였다.

### Abstract

This article aims to analytically research for influence of residual stresses on bending moment responses against welded steel pipes subjected to quasi-static or dynamic loadings. The residual stresses of the welded steel pipe are computed by three-dimensional welding simulation. The bending moment responses of the welded and seamless steel pipes are determined by using three-dimensional dynamic elastoplastic FE analysis as a function of loading rate. It is seen from analytical results that the welded steel pipe shows lower moment response comparing to the seamless steel pipe, and moment difference between seamless and welded steel pipes tends to decrease as loading rate increases.

**키워드 :** 용접강관, 용접이음부, 잔류응력, 동적해석, 재하속도

**Keywords :** Welded steel pipe, Weld joint, Residual stress, Dynamic analysis, Loading rate

## 1. 서 론

최근, 해양구조물(Offshore Structure) 및 강관 트러스 교량 등과 같이 강관을 구조용 부재로 사용하는 구조물이 점차 증가하고 있다. 강관부재는 원형단면의 기하학적 특성으로 인하여 상대적으로 내구성이 높고 경량화가 가능하며 투시성이 양호하여

미관설계에도 유리하다. 인장강도 600MPa급 고강도강관이 실용화되는 등, 강관 이용기술이 빠르게 발전하고 있으며 다양한 영역으로 사용이 확대되고 있는 추세이다<sup>1-3)</sup>.

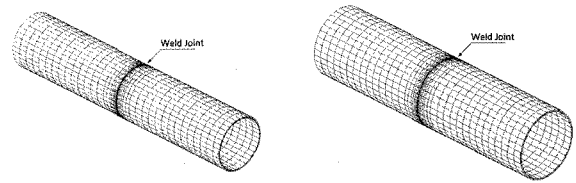
구조용부재로 사용되는 대부분의 강관들은 용접을 통하여 대상구조물 연결된다. 그리고 용접이음부에는 필연적으로 잔류응력 및 변형이 발생한다. 잔류응력은 용접시 온도차에 의해 국부적으로 발생하는 내부응력으로 대상구조물의 거동 및 성능에 영향을 미친다. 그리고 피로 및 취성파괴를 유발하고 대

\* 정회원·중앙대학교 사회기반 시스템 공학부, 공학박사

\*\* 교신저자·정회원·현대건설, 토목환경사업본부, 과장, 공학박사  
E-mail : gabchul.jang@hdec.co.kr

상구조물인 강관의 내하력을 저하시킨다. 그러므로 강관을 구조용부재로 사용하기 위해서는 용접이음부의 영향을 고려한 안전성평가 및 설계가 이루어져야 한다. 즉, 용접이음부의 잔류응력을 정확히 분석하고 용접잔류응력이 강관의 응답특성 및 역학적 거동에 미치는 영향에 대한 정량적·정성적 검토가 이루어져야 한다. 특히, 최근 빈번히 발생하는 지진으로 인하여 강관을 주로 사용하는 해양 및 트러스 구조물의 내진성능 및 설계에 대한 관심이 높아지고 있다. 강관구조물들의 내진성능을 정확히 예측하기 위해서는 지진과 같은 동적하중 작용시에 용접이음부의 영향을 고려한 강관부재의 거동특성에 관한 연구가 필요하다. 일반적으로 동적변형중인 강재는 일반적으로 정적변형 상태와 다른 역학적 응답 및 거동 특성을 보인다. 이는 구조용강재의 역학적 특성 및 응력-변형률 관계가 변형률 속도(Strain Rate)에 의존하여 변하기 때문이다<sup>4-8)</sup>. 재하속도에 따른 용접강관의 거동을 예측하기 위해서는 용접잔류응력이 대상강관의 정·동적거동에 미치는 영향에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 동적 유한요소해석프로그램을 이용하여 용접이음부의 잔류응력이 동적하중을 받는 강관의 휨모멘트 응답에 미치는 영향에 대해 파악하였다. 3차원 비정상 열전도 해석 및 3차원 열탄소성 해석을 수행하여 강관 용접이음부의 잔류응력 분포를 계산하였다. 용접해석에서는 온도에 따른 강재의 물리정수 및 기계적 제성질을 각각 고려하였다. 해석된 잔류응력을 고려한 용접강관의 동적 구조해석을 수행하였다. 재하속도>Loading Rate)을 변수로 하였으며 동적변형중 강재의 응력-변형률 응답특성을 일반화한 동적소성모델(Visco-plastic constitutive model)을 고려한 구조해석을 수행하였다. 그리고 잔류응력을 고려하지 않은 강관의 동적해석 결과를 용접강관의 해석결과와 비교하였다. 동적해석 비교결과를 통하여 용접이음부의 잔류응력이 동적변형중인 강관의 휨모멘트 거동에 미치는 영향에 대해 파악하였다.



(a) φ318.5×6.4

(b) φ406.4×9.5

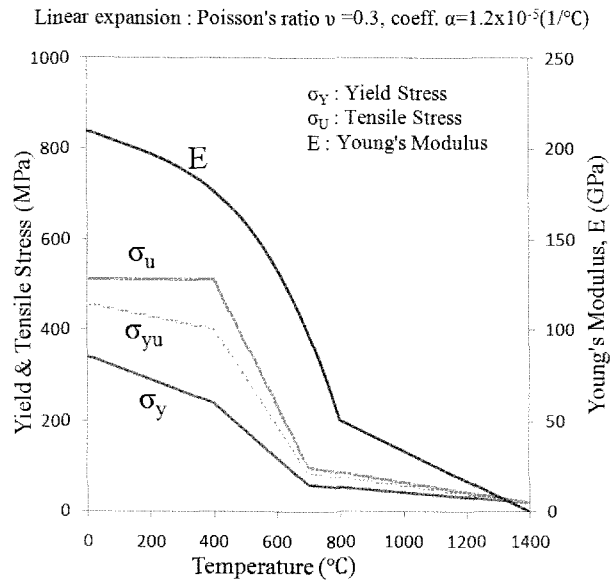
〈그림 1〉 용접강관 형상 및 유한요소 모델링

## 2. 용접잔류응력

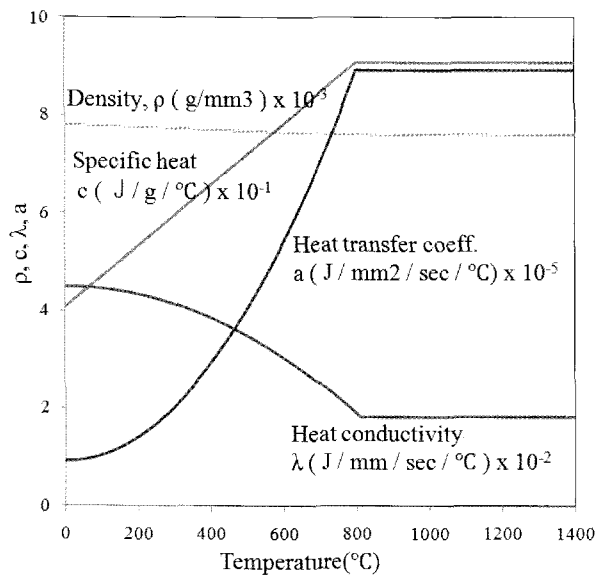
### 2.1 강관모델 및 용접조건

본 연구에서는 용접해석을 통하여 강관 용접이음부의 잔류응력 분포를 파악하였다. 두 개의 일반구조용 탄소강관을 대상으로 연구를 수행하였다. 강관부재는 일반적으로 사용되는 318.5mm(외경)×6.4mm(두께)인 φ 318.5×6.4 강관과 406.45mm(외경)×9.5mm(두께)인 φ 406.4×9.5 강관을 연구대상으로 하였다. (KS D 3780). 〈그림 1〉은 φ 318.5×6.4과 φ 406.4×9.5 강관들의 형상과 유한요소 모델링을 보이고 있다. 강관부재들의 길이는 동일하게 1,600mm로 적용하였다. 〈그림 1〉에 보인바와 같이 800mm 단일 강관부재들이 용접을 통하여 길이 1,600mm 용접강관으로 접합됨을 가정하였다.

강관 용접이음부의 잔류응력은 3차원 비정상 열전도 해석 및 3차원 열탄소성 해석을 통하여 계산하였다. 3차원 비정상 열전도해석을 수행하여 온도이력을 계산한 후, 계산된 온도이력에 기초한 3차원 열탄소성 해석을 수행하여 이음부의 잔류응력을 계산하였다. 용접해석에서는 강관재료인 SKT490강재의 기계적 성질 및 물리정수의 온도 의존성을 〈그림 2〉에 보인바와 같이 고려하였다<sup>9)</sup>. 강관이음부 용접접합에는 2패스 그루부 완전용입용접(Complete Joint Penetration groove weld, CJP) 공정을 가정하였으며, 용접조건은 〈표 1〉에 나타내었다.



(a) 물리정수

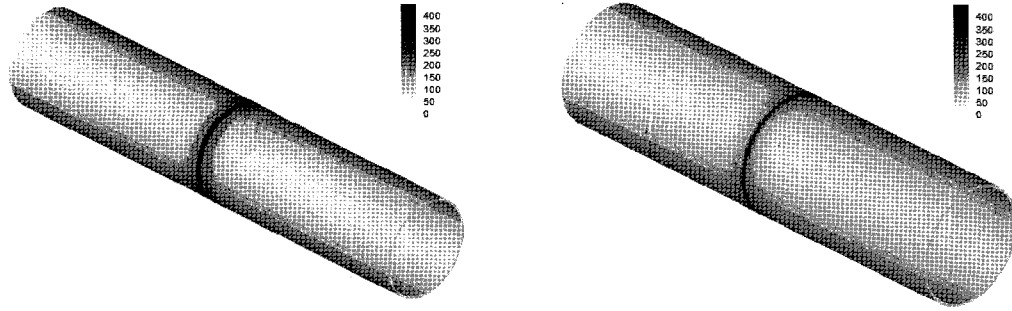


(b) 기계적 제성질

〈그림 2〉 STK490강재의 온도에 따른 재료정수

〈표 1〉 용접조건

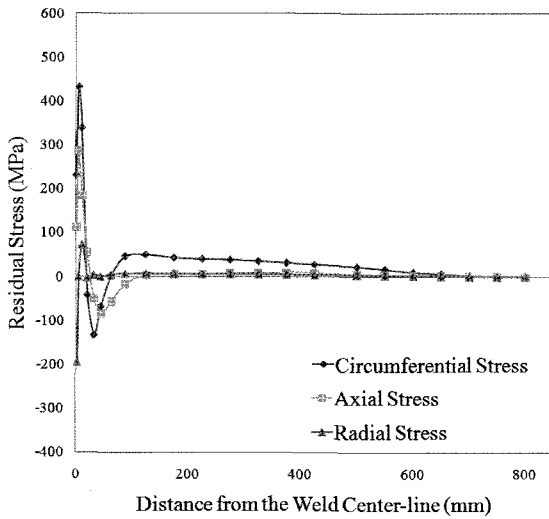
전압	전류	속도	열효율
30V	240A	6 mm/sec	0.85



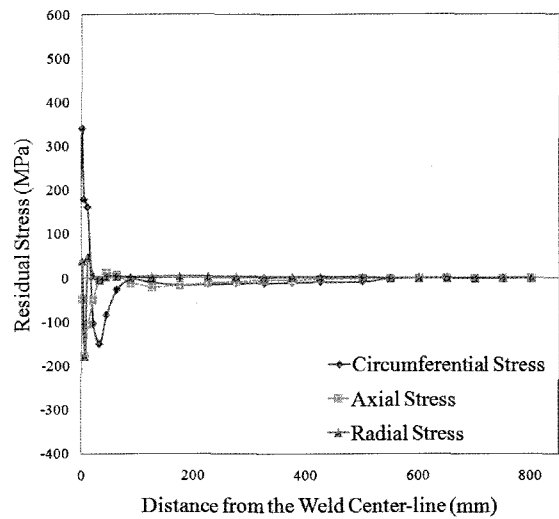
(a) φ318.5×6.4

(b) φ406.4×9.5

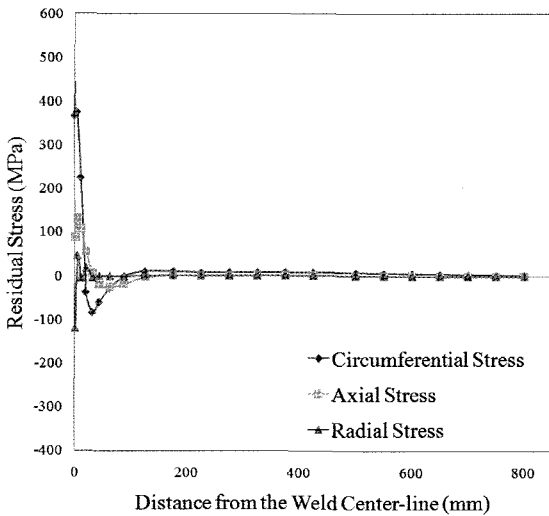
〈그림 3〉 용접완료시 잔류응력 분포도(유효응력)



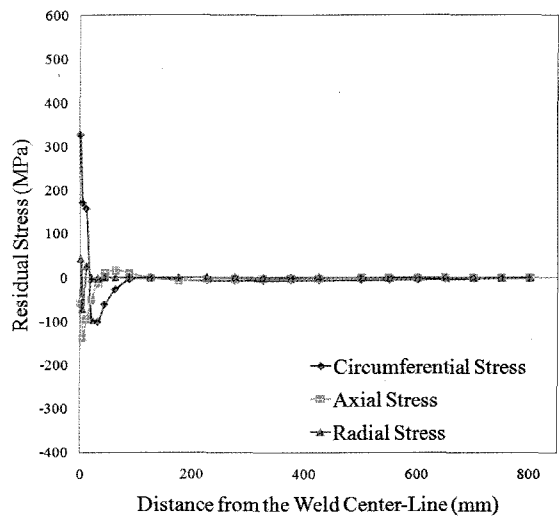
(a) 강관내측 잔류응력(φ318.5×6.4)



(b) 강관외측 잔류응력(φ318.5×6.4)



(c) 강관내측 잔류응력(φ406.4×9.5)



(d) 강관외부 잔류응력(φ406.4×9.5)

〈그림 4〉 용접강관 내·외측 잔류응력 분포

## 2.2 잔류응력 분포

잔류응력 해석결과는 <그림 3>과 4에 나타내었다. <그림3(a), (b)>는 용접완료시  $\phi$  318.5×6.4와  $\phi$  406.4×9.5강관의 잔류응력 중 유효응력분포도(Effective Stress Contour)를 보이고 있다.  $\phi$  318.5×6.4강관의 경우에는 용접이음부에 400MPa 이상의 잔류응력이 집중되어 있으며, 용접이음부에서 멀어질수록 잔류응력이 급격히 감소하여 낮은 잔류응력 분포를 보이고 있다.  $\phi$  406.4×9.5강관도 동일하게 용접이음부 부근에서 400MPa 이상의 높은 잔류응력이 분포하고 있으며, 용접이음부에서 멀어질수록 낮은 잔류응력이 분포하고 있다.

강관부재 용접이음부의 잔류응력 분포특성을 파악하기 위해 <그림 4>와 같이 용접이음부 우측의 내측요소 및 외측요소의 잔류응력을 용접선(Weld Center-line) 거리에 따라 나타내었다. <그림 4(a)>는  $\phi$  318.5×6.4 용접강관 내측요소의 잔류응력 분포를 나타내고 있다. 원주방향응력(Circumferential Stress)과 축방향응력(Axial Stress)은 용접 이음부에서 445MPa 및 293MPa의 인장응력이 발생하였으며, 용접이음부에서 멀어지면서 압축응력이 발생하였다. 이에 비해 두께방향응력(Radial Stress)은 이음부에서 인장응력이 발생되나, 상대적으로 매우 작은 값을 보이고 있다. <그림 4(b)>는  $\phi$  318.5×6.4 용접강관 외측의 잔류응력 분포를 보이고 있다. 원주방향응력과 두께방향응력의 내측과 유사한 분포경향을 보이고 있다. 원주방향에서는 348MPa의 인장응력이 발생하였다. 그러나 축방향응력은 강관 내측 분포경향과 달리 183MPa의 압축응력이 발생하였다. 원주방향 잔류응력은 주로 열이력(Thermal History)의 영향을 받아 용접이음부 내·외 측에서 인장응력이 지배하지만, 축방향 잔류응력은 두께방향으로 발생한 Shrinkage의 영향으로 내측에서는 인장응력이 외측에서는 압축응력이 발생한 것으로 판단된다.

<그림4(c), (d)>는  $\phi$  406.4×9.5 용접강관의 내측 및 외측요소의 잔류응력 분포를 나타내고 있다.  $\phi$  318.5×6.4 용접강관의 유사한 정성적 잔류응력 분포 특성을 보이고 있다. 내측 원주방향응력은 421MPa의

인장응력이 발생하였으며, 내측 축방향응력은 173MPa의 인장응력이 발생하였다. 외측잔류응력의 경우, 원주방향성분은 327MPa의 인장응력이 발생하였으며 축방향응력은 163MPa의 압축응력이 발생하였다.  $\phi$  318.5×6.4 용접강관과 동일한 생성메커니즘으로 원주방향 및 축방향 잔류응력이 생성되었으며 두께 방향은 상대적으로 낮은 잔류응력이 발생하였다.

## 3. 재하속도에 따른 강관의 정동적 거동

본 장에서는 동적소성모델이 적용된 유한요소해석 프로그램을 이용하여 재하속도에 따른 용접강관의 구조해석을 수행하였다. 동적변형상태에서의 응력-변형률 관계를 정식화한 동적소성모델을 이용하여 재하속도에 따른 강관의 모멘트 응답거동을 예측하였다.

### 3.1 동적소성모델

강관부재의 동적거동을 예측하기 위해서는 동적소성모델이 적용된 유한요소해석이 필요하다. 동적소성모델은 동적변형중인 구조용강재의 응력-변형률 관계를 변형률 속도(Strain Rate)와 온도(Temperature)의 함수로 표현한 재료모델로 본 연구에서는 저자에 의해 제안된 동적소성모델을 적용하였다. 제안된 동적소성모델에는 변형률 속도 증가로 인한 경화현상(Hardening Effect)과 동적변형중 발생하는 열로 인한 연화현상(Thermal Softening)을 포함하고 있다.

동적 변형중인 강재의 유동응력(Flow Stress)를 계산하는 동적소성모델은 식(1)과 같다<sup>10)</sup>.

$$\bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T) = f(\bar{\epsilon}) \cdot g(\dot{\bar{\epsilon}}) \cdot h(T) \quad (1)$$

여기서,  $\bar{\sigma}$ 는 상당응력,  $\dot{\bar{\epsilon}}$ 는 변형률 속도,  $T$ 는 온도를 나타낸다.

$f(\bar{\epsilon})$ 는 정적상태(Quasi-static condition)에서의 소성모델로 대상강재의 재료실험을 통하여 다음과 같이 제안하였다. 실험결과와 비교하여 그 정도 및

타당성을 검증받았다.

$$E_i^p = E_m^p + \beta_i \cdot \ln \left( 1 + \frac{x}{a_i} \right) \quad (2)$$

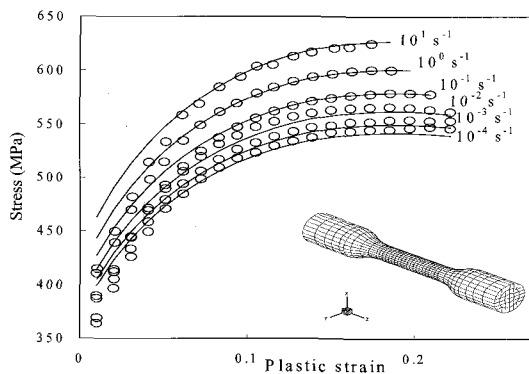
식(2)에서  $a_i$ 와  $\beta_i$ 는 강재의 인장실험에 의해 계산되어지는 재료상수이며,  $E_m^p$ 와  $E_i^p$ 는 초기변형률 경화계수 및 소성계수이다. 식(2)에서  $g(\dot{\epsilon})$ 는 변형률 속도 증가에 따른 경화현상을 구현하기 위한 변형률속도 모델이다. 본 연구에서는 동적 실험결과에 기초하여 다음식과 같이 제안하였다.

$$g(\dot{\epsilon}) = c_1 \ln \left( \frac{\dot{\epsilon}_i}{\dot{\epsilon}_0} \right) \cdot \left\{ c_2 + \ln \left( \frac{\dot{\epsilon}_i}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right\} + 1 \quad (3)$$

여기서,  $\dot{\epsilon}_i$  = i-step에서의 변형률 속도를 나타내며  $\dot{\epsilon}_0$ 는 기준 변형률속도로 본 연구에서는  $10^{-4} s^{-1}$ 로 산정하였다. 여기서,  $s^{-1}$ 는 변형률속도를 나타낸다. 그리고  $c_1, c_2$ 는 재료상수로 동적하중 실험결과에서 계산된다.  $h(T)$ 는 동적 변형시 발생한 열로 인한 강재의 연화현상을 정식화한 온도모델로 본 연구에서는 John-Cook 모델을 인용하여 다음 식과 같이 표현하였다<sup>11)</sup>.

$$h(T) = \left\{ 1 - \left( \frac{T_i - T_{room}}{T_{ref} - T_{room}} \right)^m \right\} \quad (4)$$

여기서,  $T_{room}$ 은 실온으로 20°C로 산정하였다.  $T_{ref}$ 는 기준온도로 800°C 이후 강성이 매우 낮아지는 기준 실험결과에 기초하여  $T_{ref}$ 를 800°C로 산정하였다<sup>11)</sup>.

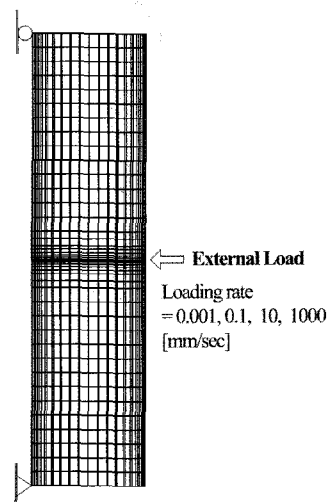


〈그림 5〉 변형률 속도에 따른 실험 및 해석결과의 비교

정식화된 동적소성모델은 유한변위이론에 기초한 3차원 탄소성 유한요소해석 프로그램에 적용하였다. 〈그림 5〉는 본 연구에 사용된 동적구조해석 프로그램 검증을 위해 인장강도 490MPa강재 해석과 실험을 비교한 결과이다<sup>13)</sup>. 동적실험은 환형시편을 이용하였으며, 실험시편 및 해석모델의 형상은 〈그림 5〉에 보이고 있다. 〈그림 5〉에 보이는 바와 같이 변형률속도에 따른 실험-해석 비교결과, 초기변형률(0.05이하)에서는 미소한 차이가 발생하지만 이후, 응력-변형률 곡선에서는 실험데이터대비 해석곡선이 약 95% 이상 일치하고 있음을 알 수 있다. 즉, 본 연구에 사용된 동적해석프로그램은 SKT490강재가 사용된 구조물의 정·동적 거동을 정도있게 예측할 수 있음을 알 수 있다.

### 3.2 해석조건

〈그림 6〉은 해석모델의 하중 및 경계조건을 보이고 있다. 강관모델의 형상 및 치수는 용접해석의 모델과 동일하다. 3점 휨해석을 수행하기 위해 강관 양단부 중앙지점에 단순지지조건을 적용하였으며, 강관 중앙지점에 정·동적하중을 제하여 3점 휨조건(Three-point Bending Condition)을 구현하였다. 정·동적하중은 변형속도에 기초하여 0.001, 0.1, 10, 1000 mm/sec로 각각 제하였다.



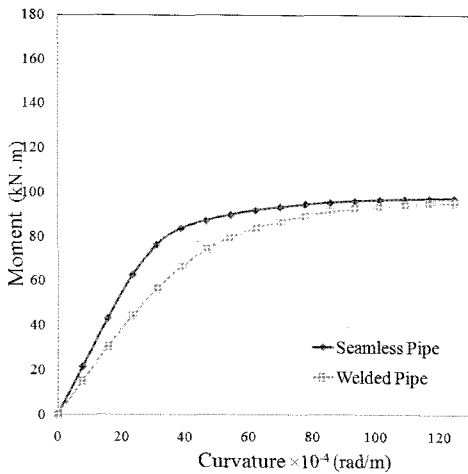
〈그림 6〉 하중조건 및 경계조건

### 3.3 해석결과 및 고찰

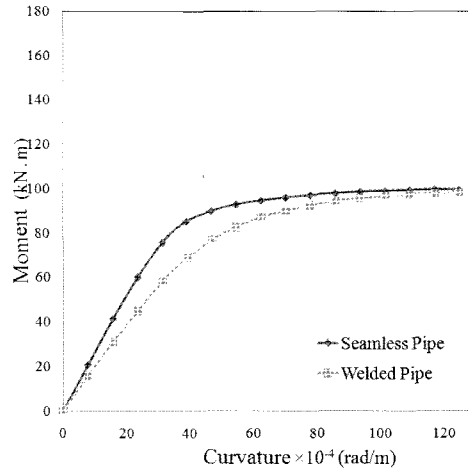
〈그림 7〉은 재하속도에 따른  $\phi 318.5 \times 6.4$  일반강관(Seamless Pipe) 및 용접강관(Welded Pipe)의 저항모멘트(Resistance Moment)를 파악하기위해 모멘트-곡률 응답곡선을 비교하고 있다. 모든 해석결과에서 용접강관이 일반강관에 비해 낮은 수준의 휨강성(Rotational Stiffness) 및 모멘트(Moment) 분포를 보이고 있다. 이러한 정성적 휨모멘트-곡률 분포경향은 모든 재하속도에서 동일하게 나타나고 있다. 그리고 곡률이 증가함에 따라 용접강관과 일반강관의 모멘트 차이가 점점 증가하여 항복점(Yield Point) 부근에서 최대차이를 보이고 있다. 항복점

이후, 용접이음부의 영향에 의한 모멘트 차이는 점차 감소하였다. 〈그림 8〉은  $\phi 406.4 \times 9.5$ 강관의 모멘트-곡률 응답곡선을 보이고 있다.  $\phi 406.4 \times 9.5$ 강관도  $\phi 318.5 \times 6.4$ 강관과 유사한 모멘트-곡률 응답 거동을 보이고 있다. 모든 재하속도에서 일반강관의 휨강성 및 모멘트가 용접강관의 모멘트에 비해 높은 수준을 나타내었으며, 항복점 부근에서 모멘트 최대 차이가 발생하였다. 〈그림 9〉는  $\phi 318.5 \times 6.4$ 강관과  $\phi 406.4 \times 9.5$ 강관의 용접이음부의 영향으로 인한 용접강관과 일반강관의 모멘트 최대차이를 재하속도에 따라 나타내고 있다.

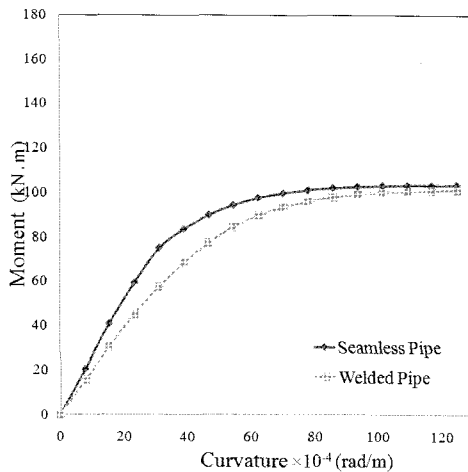
$\phi 318.5 \times 6.4$ 강관의 경우, 0.0001mm/sec 재하속



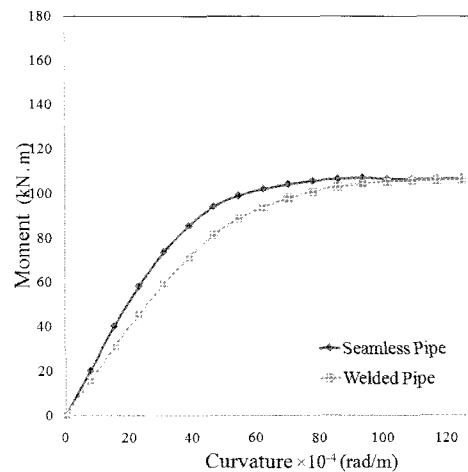
(a) Loading rate = 0.001 mm/sec



(b) Loading rate = 0.1 mm/sec



(c) Loading rate = 10 mm/sec



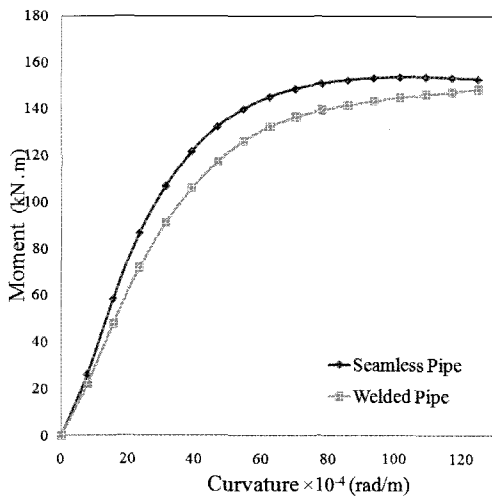
(d) Loading rate = 1000 mm/sec

〈그림 7〉 정·동적 재하속도에 따른  $\phi 318.5 \times 6.4$ 강관의 모멘트-곡률 곡선비교

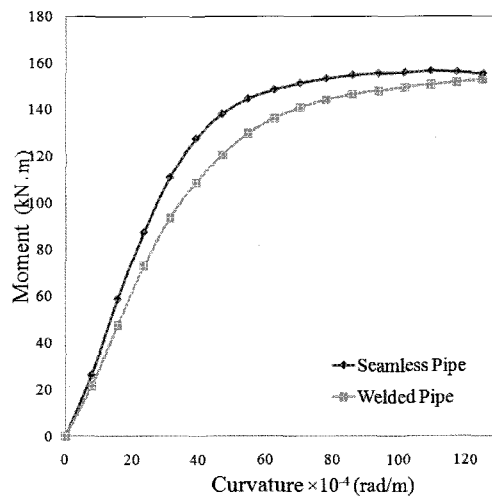
도에서 14kN·m의 모멘트 최대차이가 발생하였으며 재하속도가 증가함에 따라 최대차이는 점차 감소하여 1000mm/sec 재하속도에서는 약 8kN·m의 모멘트 차이가 발생하였다.  $\phi$  406.4×9.5강관도 재하속도가 증가함에 따라 모멘트 최대차이가 16kN·m에서 9kN·m로 점차 감소하는 경향을 보이고 있다.

정·동적 해석결과를 통하여 용접이음부를 가진 강관은 일반강관에 비해 잔류응력의 영향으로 상대적으로 낮은 모멘트 응답특성을 보이고 있으며 항복점 부근에서 최대 모멘트차이가 발생함을 알 수 있

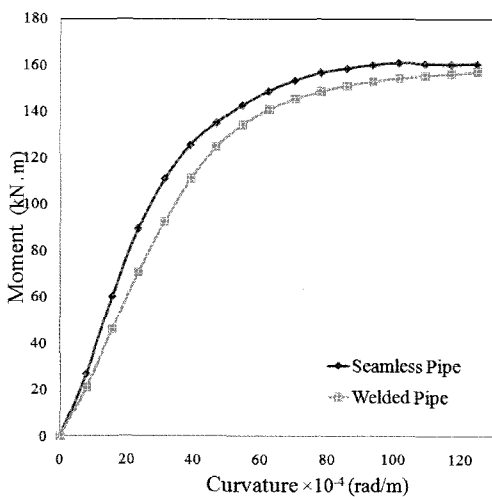
었다. 그리고 이후, 곡률이 증가함에 따라 용접이음부의 잔류응력에 의한 모멘트차이는 점차 감소하는 경향을 보였다. 이와 같은 모멘트 분포특성은 잔류응력의 자가평형(self-equilibrating)특성으로 인하여 하중이 증가함에 따라 용접이음부의 잔류응력이 대상구조물의 모멘트 응답에 미치는 영향이 점차 감소한 것으로 판단된다. 또한, 재하속도가 증가함에 따라 일반강관과 용접강관의 모멘트 최대차이가 점차 감소하는 경향을 보이고 있으며, 변형속도가 점차 동적상태로 증가함에 따라 용접이음부의 잔류응



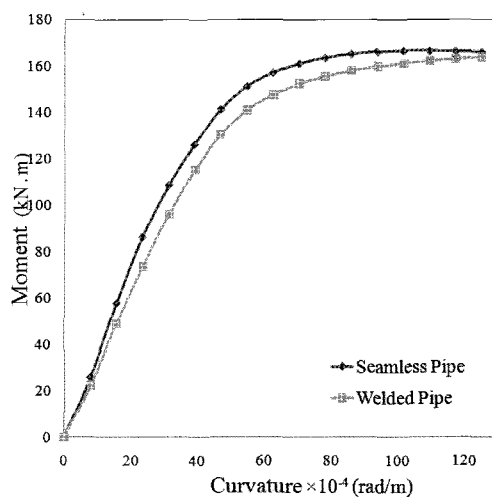
(a) Loading rate = 0.001 mm/sec



(b) Loading rate = 0.1 mm/sec



(c) Loading rate = 10 mm/sec

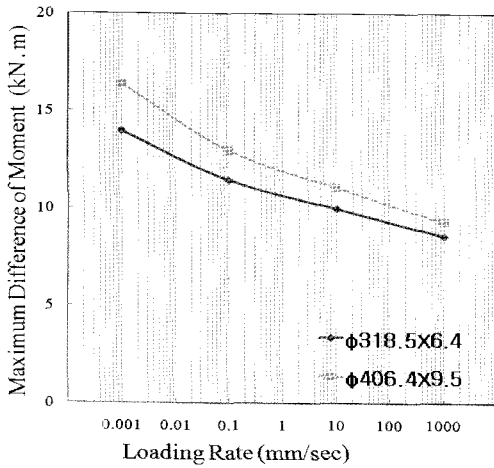


(d) Loading rate = 1000 mm/sec

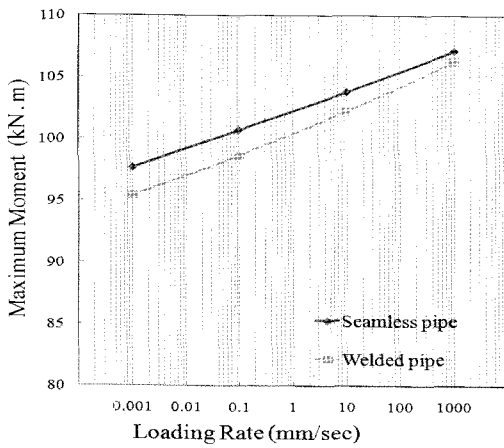
〈그림 8〉 정·동적 재하속도에 따른  $\phi$ 406.4×9.5강관의 모멘트-곡률 곡선비교



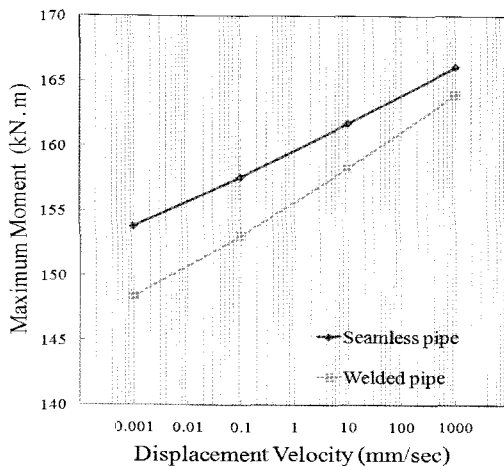
력이 용접강관의 모멘트 응답에 미치는 영향이 감소한 것으로 판단된다.



〈그림 9〉 재하속도에 따른 일반-용접강관 모멘트 최대차이



(a) φ318.5×6.4



(b) φ406.4×9.5

〈그림 10〉 재하속도에 따른 강관 최대모멘트변화

용접이음부로 인한 정동적 하중을 받는 강관의 최대모멘트 변화를 정량적으로 검토하기 위해, 〈그림 10〉에 보인바와 같이 일반-용접 강관의 최대모멘트를 비교하였다. 〈그림10(a)〉에 보인바와 같이 φ318.5×6.4 강관의 경우에는 재하속도가 증가함에 따라 최대모멘트 응답이 거의 선형적으로 증가하였다. 일반강관 및 용접강관의 최대모멘트 모두 재하속도 대수(log)값에 비례하여 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 용접강관은 일반강관에 비해 낮은 수준의 최대모멘트 응답을 보이고 있으며, 0.001mm/sec 변형속도에서 95kN·m의 최대모멘트가 1000mm/sec 변형속도에서는 106kN·m의 최대모멘트가 발생하였다. 그리고 용접강관과 일반강관의 최대모멘트 차이는 변형속도가 증가함에 따라 거의 선형적으로 감소하는 경향을 보이고 있으며 1000mm/sec 변형속도에서는 약 1kN·m의 최대모멘트 차이가 발생하였다.

〈그림 10(b)〉에 보인바와 같이 φ406.4×9.5강관의 변형속도에 따른 최대모멘트는 φ318.5×6.4와 유사한 거동을 보이고 있다. 변형속도가 증가함에 따라 일반강관 및 용접강관의 최대모멘트는 선형적으로 증가하였다. 용접강관의 최대모멘트가 일반강관의 모멘트에 비해 잔류응력의 영향으로 인하여 낮은 값을 보이고 있다. 용접강관은 0.001mm/sec 변형속도에서 148kN·m의 최대모멘트가 1000mm/sec 변형속도에서는 164kN·m의 최대모멘트가 선형적으로 증가하며 발생하였다. 그리고 φ318.5×6.4 강관과 동일하게 용접강관과 일반강관의 최대모멘트 차이는 변형속도가 증가함에 따라 선형적으로 감소하였으며 1000mm/sec 변형속도에서는 약 2kN·m의 최대모멘트 차이가 발생하였다.

재하속도에 따른 용접 및 일반강관의 최대모멘트 변화를 해석한 결과, 변형속도가 증가함에 따라 최대모멘트 응답은 선형적으로 증가하였다. 이와 같은 최대모멘트 거동특성은 SKT490강재의 변형률속도에 의존한 경화현상으로 판단된다. 그리고 용접 및 일반강관의 최대모멘트 차이는 재하속도가 증가할수

록 점차 선형적으로 감소하는 경향을 보였다. 이와 같은 최대모멘트 차이 감소현상은 재하속도, 즉 변형속도가 증가함에 따라 용접강관의 거동은 용접이음부의 잔류응력이 대상강관의 거동에 미치는 영향보다 변형률 속도의 의존한 경화현상이 더 의존하는 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 용접이음부의 잔류응력이 동적하중을 받는 강관의 휨모멘트 응답에 미치는 영향에 대해 파악하기 위하여 동적 유한요소해석프로그램을 이용한 구조해석을 수행하였다. 3차원 용접해석을 통하여 용접강관들의 잔류응력을 해석하였다. 그리고 동적소성모델을 고려한 3차원 유한요소해석을 통하여 용접강관 및 일반강관의 모멘트-곡률 거동을 비교하여 용접강관 동적거동을 파악하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) STK490 용접강관 용접해석결과, 강관의 원주방향 잔류응력은 용접이음부 부근에서 약 400MPa 이상의 높은 인장응력이 발생하였다. 그리고 축방향 잔류응력은 용접 Shrinkage의 영향으로 용접이음부 내측에서는 인장응력이 이음부 외측에서는 압축응력이 서로 상반되게 발생하였다. 두께방향 잔류응력은 상대적으로 미소한 수준이었다.
- 2) 재하속도에 따른 동적해석결과, 재하속도가 증가함에 따라 용접 및 일반강관의 모멘트응답도 증가하였다. 변형률 속도의존 경화효과(strain-rate hardening)가 용접 및 일반강관의 동적 거동에 영향을 미친 것으로 판단되며, 용접강관의 모멘트는 잔류응력의 영향으로 일반강관의 모멘트 보다 낮은 수준을 나타내었다.
- 3) 잔류응력 영향에 의한 용접-일반강관 최대모멘트 차이는 재하속도가 증가함에 따라 점차

감소하였다. 이와 같은 모멘트 응답특성은 용접강관의 동적변형 메커니즘이 잔류응력보다는 변형률속도에 좀 더 의존하고 있음을 보이고 있다.

#### 참고문헌

1. 이은택, 심형주, 김종원, 김진호, 김철환 (2007), 600MPa급 고강도 원형강관 부재의 성능평가, 한국강구조학회 학술발표대회, 647-652.
2. 하문근, 배준홍, 김병우 (2003), 다양한 Needs에 대응한 해양구조물의 건조 및 기술개발, 한국강구조학회지 기술기사, pp.40-54
3. 한종욱, 황재성, 김진국, 박영석 (2007), STKT590 강관 버팀보의 연결부 성능개선에 관한 실험적 연구, 2007 대한토목학회 정기학술대회, 3874-3880
4. Krafft, J. M. and Sullivan, A. M. (1963), Effects of speed and temperature on crack toughness and yield strength in mild steel, Trans. ASM, Vol. 56, 160-175.
5. Rosenfield, A. R. and Hahn, G. T. (1966), Numerical description of the ambient low-temperature and high-strain rate flow and fracture behavior of plain carbon steel, Trans. ASM, Vol. 59, 962-980.
6. Stepanov, G. V. (2002), Strength of metals at high strain rates, Probl. Prochn., No. 3, 7-14.
7. Stepanov, G. V. and Zubov, V. (2000), Dynamic compression of high-strength steel and a titanium alloy at high rates, Nuak. Visti, No. 6, 75-80.
8. Stepanov, G. V. and Zubov, V. (2000), Dynamic hardness of high-strength steel and a titanium alloy", J. Phys. IV, France, 10, 647-651.
9. Kim Y. C., Chang K. (1999), Prediction of welding out-of-plane deformation by 3D-FEM analysis and its accuracy, The 76th

- JSME Fall Annual Meeting Vol.I, 295~296.
10. John, G. R. and Cook, W. H. (1985),  
Fracture characteristics of three metals  
subjected to various strains, strain rates,  
temperatures, and pressures", Eng. Fract.  
Mech., Vol. 21, 31-48.
  11. Kim Y. C., Chang K. H, Horikawa K. (1998),  
Production mechanism of out-of-plane  
deformation in fillet welding, Transaction of  
JWRI Vol.27 No.2, 107~113.
  12. 장갑철, 장경호 (2006), 강부재의 대변형 예측을  
위한 3차원 탄소성 유한변위해석의 정식화에 대  
한 비교연구, 한국공간구조학회지 6(4), 53-61.
  13. 장갑철, 장경호 (2006), 재하속도에 따른 SM490  
강재 원형강기둥의 이력거동 특성 대한토목학회  
논문집, 제26권 6A호, 935-941.

(접 수 일 자 : 2011년02월22일)

(심사완료일자 : 2011년09월14일)

(게재확정일자 : 2011년10월31일)