

‘98추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

KALIMER 집합체덕트의 휨 분석

Analysis of the Assembly Duct Bowing in the KALIMER

이병운, 남 철, 백승길, 황 완
한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

고속로심의 집합체 덕트에서는 매우 높은 운전 온도와 높은 중성자속으로 인하여 열기계적변형뿐만 아니라, 조사 크리프 및 팽윤이 일어난다. 따라서 집합체 덕트 설계 시에는 재료 및 기하학적 변형으로 인한 덕트의 휨이 고려되어야만 한다. 본 연구에서는 덕트 휨에 큰 영향을 미치는 주요 변수들을 고려하였으며, 덕트재료로 사용되는 316 SS와 HT9강의 재료특성을 모델링하였다. 또한 중성자 및 온도 분포에 따른 영향, 지지점인 load pad의 위치 및 간격에 따른 영향을 NUBOW 2D 코드를 사용하여 분석하였다.

Abstract

In the assembly duct of LMFBR core, irradiation creep and swelling as well as thermal-mechanical deformation are occurred due to high operating temperature and high neutron flux. So the bowing of assembly duct by the deformation of material and the geometric deflection must be considered in the design of the assembly duct. This study considers main parameters influencing the bowing of the assembly duct, and the characteristics of 316 SS and HT9 used as duct material are modelled. The effects of the distribution of neutron flux and temperature, and the location of load pad, and the clearance between load pad are analyzed using NUBOW 2D code.

1. 서론

NUBOW 2D는 크리프 및 팽윤에 의한 휨을 계산하는 2 dimensional 코드로서, 3 dimensional 해석을 위한 중간단계로 사용하므로 변수간의 관계 및 범위 연구에 매

우 유용한 코드이다.

NUBOW 2D는 ① 온도분포에 의한 열적 휨 계산 ② 크릴 및 팽윤에 의한 변형을 계산 ③ 플루언스와 하중, 냉각재압력에 의한 덕트 bulging (덕트간 간격) 계산 ④ 상호반응하는 힘, 덕트간의 변위 계산 ⑤ 굽힘 모멘트에 의한 응력 계산 ⑥ 응력, 온도, 중성자속 등을 이용, 새로운 크릴 및 팽윤 계산 ⑦ 위의 계산을 반복, 시간 경과에 따른 결과를 해석한다.

집합체 덕트의 휨에 큰 영향을 미치는 변수는 크게 중성자 및 온도의 분포와 구배, 집합체 덕트의 재료 및 설계 특성, 지지점의 위치, 간격 및 강성도도로 나눌 수 있다. 이에 따라 이들 변수중 덕트재료로서 316 SS와 HT9강의 재료특성을 모델링하여, 중성자와 온도 분포에 따른 영향, 지지점인 load pad의 위치 및 간격에 따른 영향을 분석하기 위하여 NUBOW 2D inelastic 코드를 사용, KALIMER 집합체 덕트의 휨을 분석하였다.

2. 덕트 분포 및 구조 분할

NUBOW 2D는 2차원적 코드로서 반경방향 row에 대해서만 분석을 할 수 있다. 따라서 현재 분석에서는 KALIMER 노심에 포함될 수 있는 여러 가지 종류의 집합체 덕트를 가정하여 분석하였으며 그 분포는 아래와 같다.

row	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	USS	연료	연료	제어	연료	GEM	블랭킷	반사	차폐	차폐	차폐

덕트는 축방향으로 21개의 노드로 분할하였으며, 노심영역이외에서는 크릴 및 팽윤에 의한 영향이 거의 없다고 판단하여 세분하여 분할하지 않았다. 덕트간(혹은 지지점간) 접촉은 노우즈피스 하단, 노우즈피스 상단, 노심 중앙, ACLP(Above-core Load Pad), 취급소켓(TLP)에서 일어난다고 가정하였다. 덕트 벽 두께는 3.7mm (단 GEM의 경우 5.3mm)이며, 부분적으로 두꺼운 벽 및 육각형이 아닌 모양에 대해서도 육각형의 얇은 벽 두께를 가졌다고 가정하여 계산하였다.

3. 온도 및 중성자속 분포

가. 온도분포

덕트의 축방향 온도 (T) 및 덕트내에서의 반경방향 온도차(DT)를 노심근처의 온도 분포를 파악하기 용이하도록 데이터를 입력하였다. T 값의 범위는 386℃(전 출력시 입구온도)에서 578℃이며, 덕트 출구온도는 구동핵연료집합체가 최고 578℃, 블랭킷집합체가 최고 508℃, USS가 최고 393℃, 제어집합체가 최고 397℃로 가정하였다. 덕트내에서의 온도차 (DT)와 관련하여, 각 덕트 중앙에서 덕트 표면까지의 온도차는 주변 6개 모두가 연료집합체일 경우 그 차이가 작고, 한쪽은 블랑킷집합체이고 한쪽은 연료집합체일 경우 그 차이가 크다. 따라서 최고 60℃, 최하 10℃(18°F)를 고려, DT값을 입력하였다. T, DT값에 따른 크릴 및 팽윤의 영향이 매우

크므로 여러 가지 온도분포에 대해 덕트의 휨을 분석하였다.

나. 중성자속 분포

축방향의 중성자속 분포 및 반경방향 분포를 노심 중앙의 최대 플럭스에 대해 정규화(normalization)시켰으며, 중성자속분포는 포물선분포를 가진다고 가정하였다.

4. HT9강의 크립 관계식

NUBOW 2D에서는 20% cold worked 316 stainless steel 에 대한 크립 및 팽윤 관계식을 사용하여 덕트의 휨을 분석하고 있으나, KALIMER 노심에서는 HT9강을 사용한다. 따라서 HT9의 중성자 조사 및 열적 크립특성을 다음과 같이 모델링하고, 이를 NUBOW 2D 코드에 설치하여, HT9강의 중성자 조사 및 열적 크립에 의한 변형율을 분석하였다.

$$\epsilon = [-2.9 + 9.5 \times 10^{-3} \times (T - 273)] \times 10^{-26} \phi t \sigma_e^{1.3} + 1.743 \times 10^{18} \left[\frac{\sigma_e}{E(T)} \right]^{2.3} \exp\left(-\frac{36739}{T}\right) t$$

ϕ : 고속중성자속 (n/cm²s)

T : 온도 (K)

σ_e : 등가응력 (MPa)

E(T) : 탄성계수 (MPa)

5. 결과 및 고찰

실제 노심에서는 육각방향으로의 휨 모양을 고려하여야 하지만, NUBOW 2D코드는 복잡한 휨 모양을 계산하기에 앞서 덕트의 휨에 미칠 수 있는 변수 및 변수들의 범위를 파악하는 데 유용한 코드이다. 따라서 본 연구에서는 덕트의 휨에 미치는 변수 및 변수간의 영향을 세분하여 분석하였다.

HT9강을 사용하였을 시 ACLP의 위치가 노심상단에서 100mm위에 위치하며, ACLP간의 간격이 1mm인 경우, 350일 지난후의 덕트의 휨 모양은 그림 1과 같으며, 덕트의 bulging 모양은 그림 2와 같다. HT9강을 사용했을 시에는 핵연료집합체에 대한 온도차가 반경 방향으로 일으키는 덕트의 열적 휨 영향이 매우 크다는 것을 알 수 있으며, 핵연료 및 블랭킷 영역사이에서는 상대적으로 높은 온도 및 중성자속분포 차로 인하여 최대의 비탄성 휨이 일어난다.

HT9강을 사용하였을 시 덕트간 온도차이가 60℃이하일 경우 크립이 거의 일어나지 않았으며 덕트의 휨 모양이 BOL시와 별 변화가 없으나, 온도차가 60℃를 초과하는 경우, 크립에 의한 휨모양의 영향이 매우 커지게 된다. 두 번째 row에서 약 9mm로 가장 휨이 크게 일어나고 있으며, BOL에 비해 EOL시 약 1mm정도의 휨이 감소하는 경향을 보인다.

그러나 60℃를 초과하는 경우 load pad의 위치를 상향 조정하면, 크립에 의한 휨 영향을 줄일 수 있다. 즉 DT가 61℃이상일 경우 크립에 의한 영향으로 덕트의 휨

이 1mm이상 감소하는 경우 load pad 위치를 100mm 상향시켰을 경우 1mm 이내로 줄어드는 경향을 보인다. 또한 ACLP의 위치가 현재의 위치보다 100mm 위에 있을 경우, 덕트의 크릴에 의한 영향이 거의 없었다.

덕트 dilation 으로 인한 덕트간 간격(clearance)의 변화는 그림 2와 같다. 덕트간의 접촉이 일어날 수 있지만 어느 정도 이상의 dilation은 덕트사이의 상호작용하는 힘에 의해 저지된다. 그러나 61°C이상의 경우에는 크릴의 영향이 매우 크므로 노심영역에서의 덕트 지름은 6mm 이상 늘어나며 결과적으로 덕트간 심한 접촉이 있게 된다. 이 경우에도 load pad의 위치를 조정하면 크릴에 의한 영향을 줄일 수 있었다. 단 온도차가 적은 경우에는 크릴의 영향으로 힘이 감소되는 결과를 유도하기 위해서 오히려 load pad의 위치를 낮추어야 한다.

316 SS는 온도에 의한 영향도 매우 크게 받지만, 크릴에 의한 영향을 많이 받아 초기의 휨 모양이 매우 많이 변하고 있다. 또한 현재의 분석과 같이 덕트간 온도차가 심한 경우에는 316 SS를 사용하면 휨 모양이 매우 불규칙해지며 불안정하였으며 그 결과는 그림 3과 같다. 즉 350일 후 두 번째 row의 휨변위는 약 13mm이며, 최소로 휘는 덕트는 11번째 row까지 11mm로 이었으며, HT9과 같이 일정한 경향으로 휨이 감소하는 것이 아니라 휨이 증가추세에 있다가 감소하는 경향을 보이기도 한다.

그림 1은 현재 ACLP 및 상단 취급소켓간의 1mm의 간격을 두었을 때의 계산 결과이다. 그러나 그림 4는 ACLP 및 상단 취급소켓간의 간격이 없이 장전을 했을 경우의 결과로서, BOL시의 휨은 상단취급소켓에서 최대 11번째 row의 11.57mm의 휨을 가지게 되나, 350일후에는 오히려 12mm이상 휨이 증가하게 된다. 또한 상단에서 덕트간 서로 작용하는 힘에 의해 휨이 저지되는 사이, 노심영역에서의 휨이 크게 늘어나게 된다.

HT9강의 경우, 2번째 row인 구동연료집합체 덕트의 상단 취급소켓부분에 있어서 온도차에 대한 ACLP 위치 및 간극과의 관계는 그림 5, 6과 같이 나타난다. 그림 5, 6은 취급소켓 부분만에 대한 휨 변위이며, 전체적인 모양과는 다소 차이가 날 수 있다. 즉 온도차가 60°C인 경우 ACLP의 위치가 노심 상단에서 100mm 위이며, ACLP간의 간격이 없을 경우, 상단취급 소켓의 변위는 변하지 않으나, 노심중앙에서의 덕트 지름증가는 8mm이상을 넘을 정도로 크게 나타나게 된다.

6. 결론

고속로심에서는 임의의 집합체 주변이 같은 구동연료일 경우 DT가 낮으나, 한쪽이 블랭킷이고 다른 쪽이 구동연료인 경우 DT가 매우 크다.

316 SS는 HT9보다 크릴이 크게 일어나나 휨 모양이 불규칙한 것으로 나타났다. 상단 취급소켓에서 최대 휨 변위가 HT9이 9mm의 휨 변위를 갖는 조건에서 13mm로 나타났으며, HT9과는 달리 휨 발생의 경향 및 크기가 복잡하게 나타났다.

HT9강의 경우, 집합체 덕트내 반경방향 온도차가 덕트의 휨에 매우 큰 영향을 주며, 온도차가 60°C이하에서는 크릴 현상이 거의 일어나지 않았다. 60°C를 초과하면 크릴에 의한 휨 영향이 크게 증가하여 상단 취급소켓에서 최대 9mm까지 일어

난다.

따라서, 316SS보다 월등히 우수한 노내 성능을 보인 HT9이 KALIMER 집합체 덕트 재료로 적합한 것으로 나타났다.

60°C 초과시에 load pad 위치 및 load pad간의 간격은 크랴에 큰 영향을 주며, 61°C에서 load pad를 노심상단에서 100mm 상향 위치시켰을 경우 휨이 최대 1mm 이상 줄어들으나, 100mm이상으로 위치를 조정했을 시에는 휨에 대한 영향이 없었다. 따라서 load pad에 대한 민감도 분석이 요구된다. 또한 load pad의 간격이 줄어들 경우 덕트의 휨은 크게 줄어들지만, 덕트의 bulging으로 인한 노심영역에서의 덕트 간 접촉이 심하게 일어난다.

온도차에 따라 휨을 최소화할 수 있는 ACLP의 위치가 다르게 나타나므로, KALIMER 노심설계 결과가 나오면, 노심의 온도 및 중성자 분포에 따라 case study를 하여 ACLP에 대한 평균적인 최적 위치를 선정하기 위한 상세분석이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력중장기 연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) B.K.Cha, G.A. McLennan etc, NUBOW-2D Inelastic : A FORTRAN Program for Static Two Dimensional Structural Analysis of Bowed Reactor Cores, including Effects of Irradiation Creep and Swelling, ANL-CT-77-34, June 1974
- 2) C.Nam et al, "Statistical Failure Analysis of Metallic U-10Zr/HT9 Fast Reactor Fuel Pin by Considering the Weibull Distribution and Cumulative Damage Fraction", Annals of Nuclear Energy, vol 25, No.17, 1998
- 3) 액체금속로노심설계기술개발과제, "연료집합체관련데이터"1998.6.20

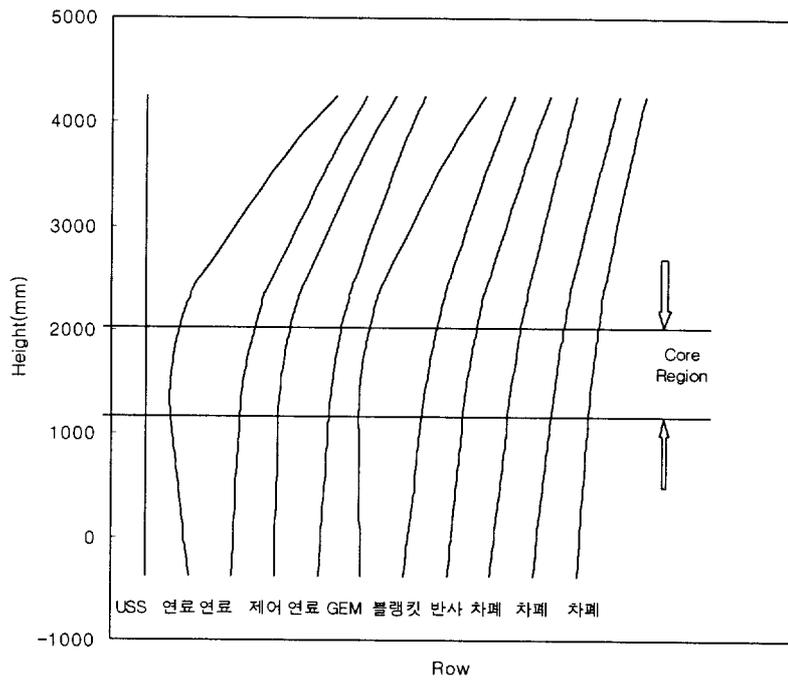


Fig. 1 Core Configuration at 350 Days (HT9)

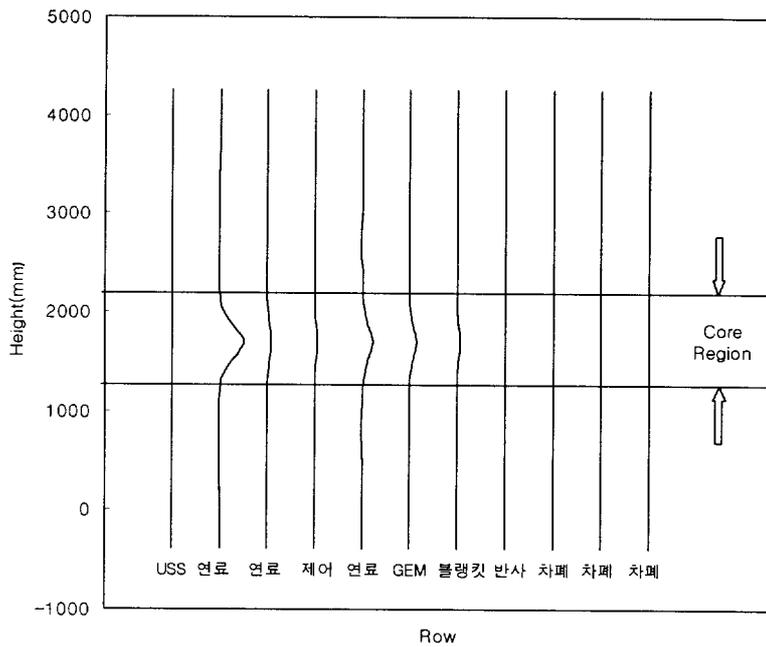


Fig. 2 Duct Dilatation at 350 Days (HT9)

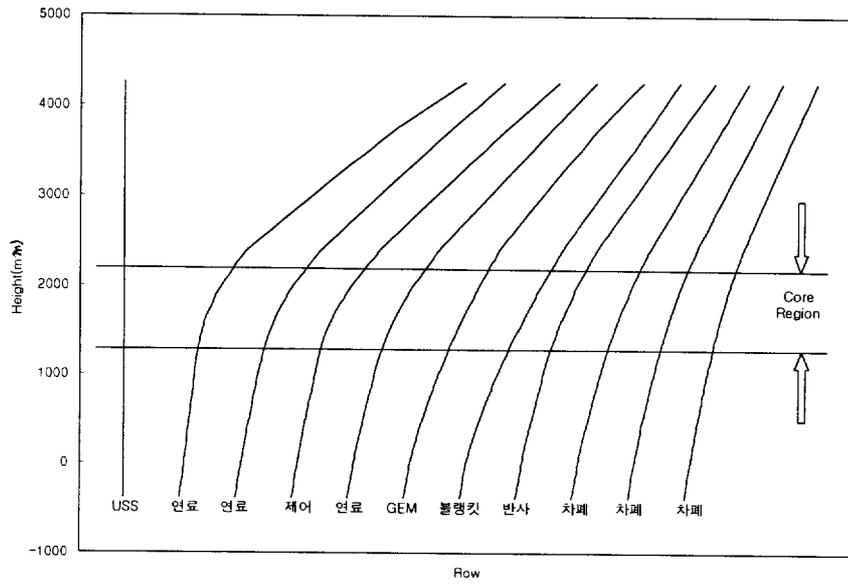


Fig. 3 Core Configuration at 350 Days (316 SS)

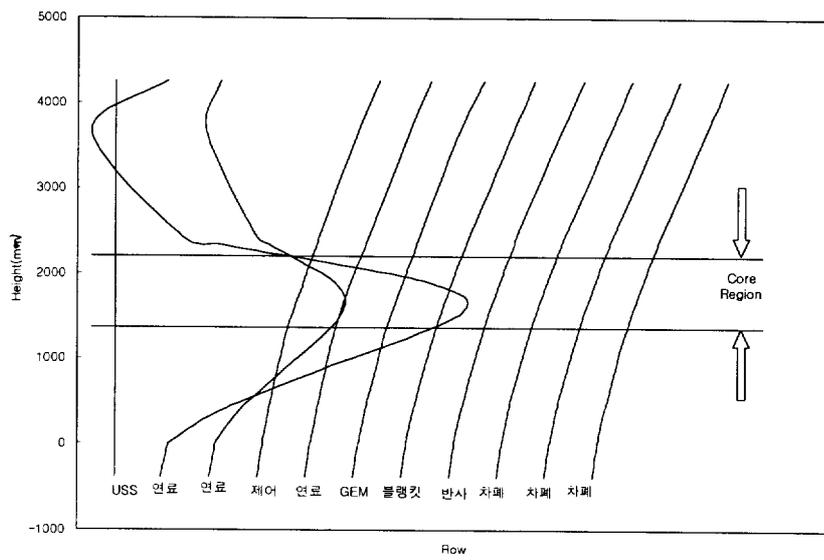


Fig. 4 Core Configuration at 350 Days (HT9, No Clearance)

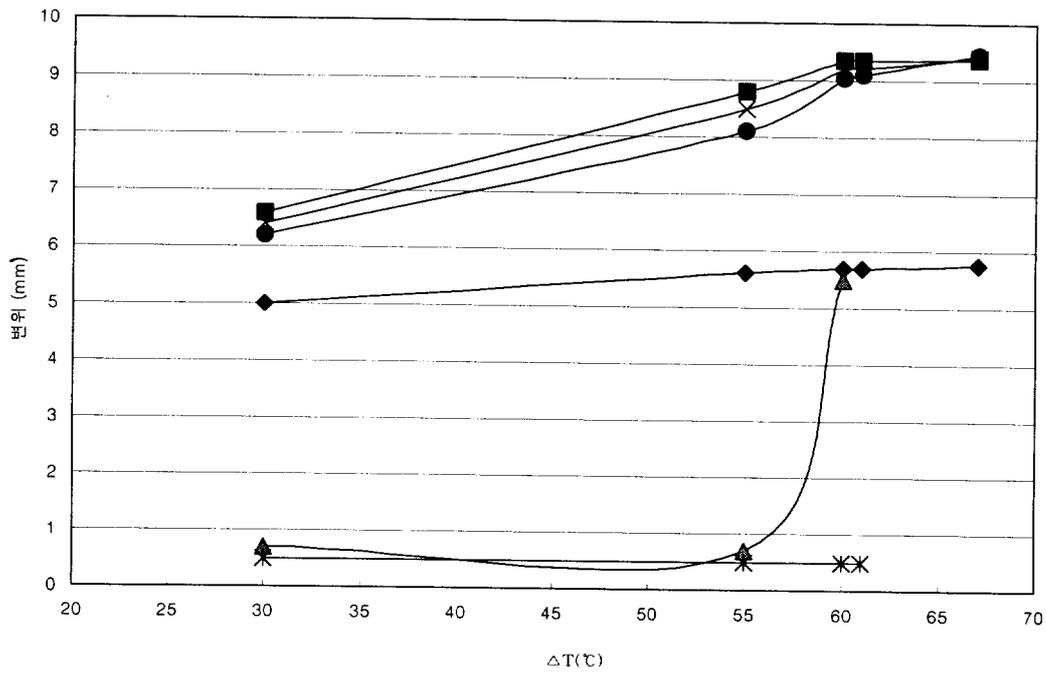


Fig. 5 상단소켓 휨 변위 (BOL)

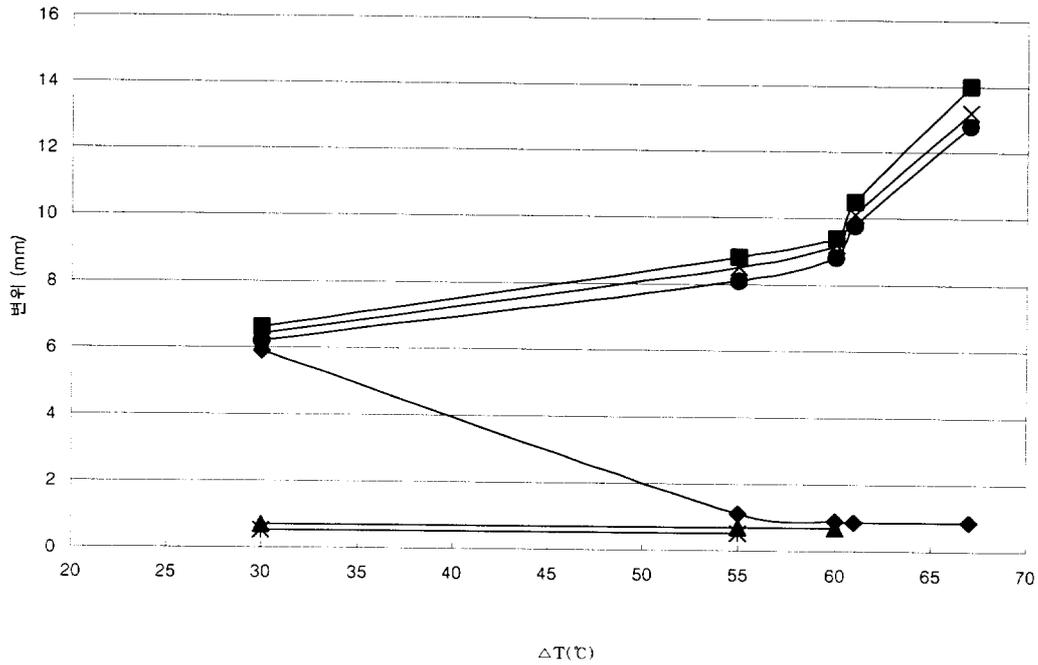


Fig. 6 상단소켓 휨 변위 (350일후)

- <범례>
- ◆ : ① ACLP 위치 : 노심상단으로부터 10mm ② ACLP 간격 : 0mm
 - : ① ACLP 위치 : 노심상단으로부터 10mm ② ACLP 간격 : 1mm
 - ▲ : ① ACLP 위치 : 노심상단으로부터 100mm ② ACLP 간격 : 0mm
 - × : ① ACLP 위치 : 노심상단으로부터 100mm ② ACLP 간격 : 1mm
 - * : ① ACLP 위치 : 노심상단으로부터 200mm ② ACLP 간격 : 0mm
 - : ① ACLP 위치 : 노심상단으로부터 200mm ② ACLP 간격 : 0mm