

技術資料

# 금형주조에서 컴퓨터 Simulation에 의한 냉각수라인 설계

최 정 길\*

## The Design of Cooling Channel in the Metal Mold Casting Using Computer Simulation

J. K. Choi\*

### 1. 서 론

금형주조에서 냉각수 라인 설계의 목적은 수축 결함발생의 방지, 금형수명의 연장, 작업시간의 단축에 의한 생산성향상, 냉각속도조절에 의한 기계적성질의 향상등을 들 수 있다.

금형주조에서의 냉각수 라인 설계를 위한 냉각수의 위치, 냉각수량의 계산등이 매우 복잡하며 실제 현장에서는 대부분 Trial & Error에 의한 방법에 의존하고 있으나 시행착오에 의한 Cost 손실이 높다. 본고에서는 직접차분법 (DFDM)에 의한 응고해석을 응용하여 반복주조작업에서의 응고 및 열적변화 과정을 Simulation하는 예를 소개하였다. 즉 용탕을 주입한 후 응고된 주물을 금형내에서 취출할 때까지의 과정과 금형내의 Cavity가 주조금속대신 공기로 채워져 있는 과정으로 구별하여 사이클에 따른 반복과정을 연속적으로 해석할 수 있다.

이러한 과학적인 계산방법에 의해 반복주조과정에서의 금형 및 주물의 응고와 열적 변화를 정확히 예측, 제어함으로써 불량감소, 생산성향상등의 효과를 얻을 수 있다. 여기서는 당연구원에서 개발한 금형주조의 응고해석 및 냉각수라인설계용 소프트웨어를 T"자 주물에 적용한 예를 중심으로 하여 냉각수라인 적용에 의한 수축결함 제어, 금형온도분포제어, 기계적 성질제어등을 컴퓨터 해석 결과와 주조시험 결과를 비교하면서 설명하고자 한다.

### 2. 주물의 응고해석 및 금형열전달 해석에 따른 냉각수라인의 설계

본고에서 사용된 수치해석 방법인 직접차분법

은 주물의 응고해석을 위해 널리 이용되는 방법으로써 여기서는 그자세한 알고리즘은 생략하기로 한다. 그림 1에 Cyclic casting에서의 응고 및 열전달 계산 프로그램의 flow chart를 나타냈으며 그림 2에는 주조시험결과와의 비교검토를 위한 접근방법의 flow chart를 나타내었다.

표1과 표2에는 각각 주조시험 조건 및 컴퓨터 해석을 위한 입력데이터를 나타내었다.

그림 3에 T자 주물의 치수, 형상과 냉각수라인의 위치등을 나타냈다.

recycle에 따른 T형 주물의 응고해석 및 금형의 열전달 해석을 위한 3차원 요소분할 모델을 그

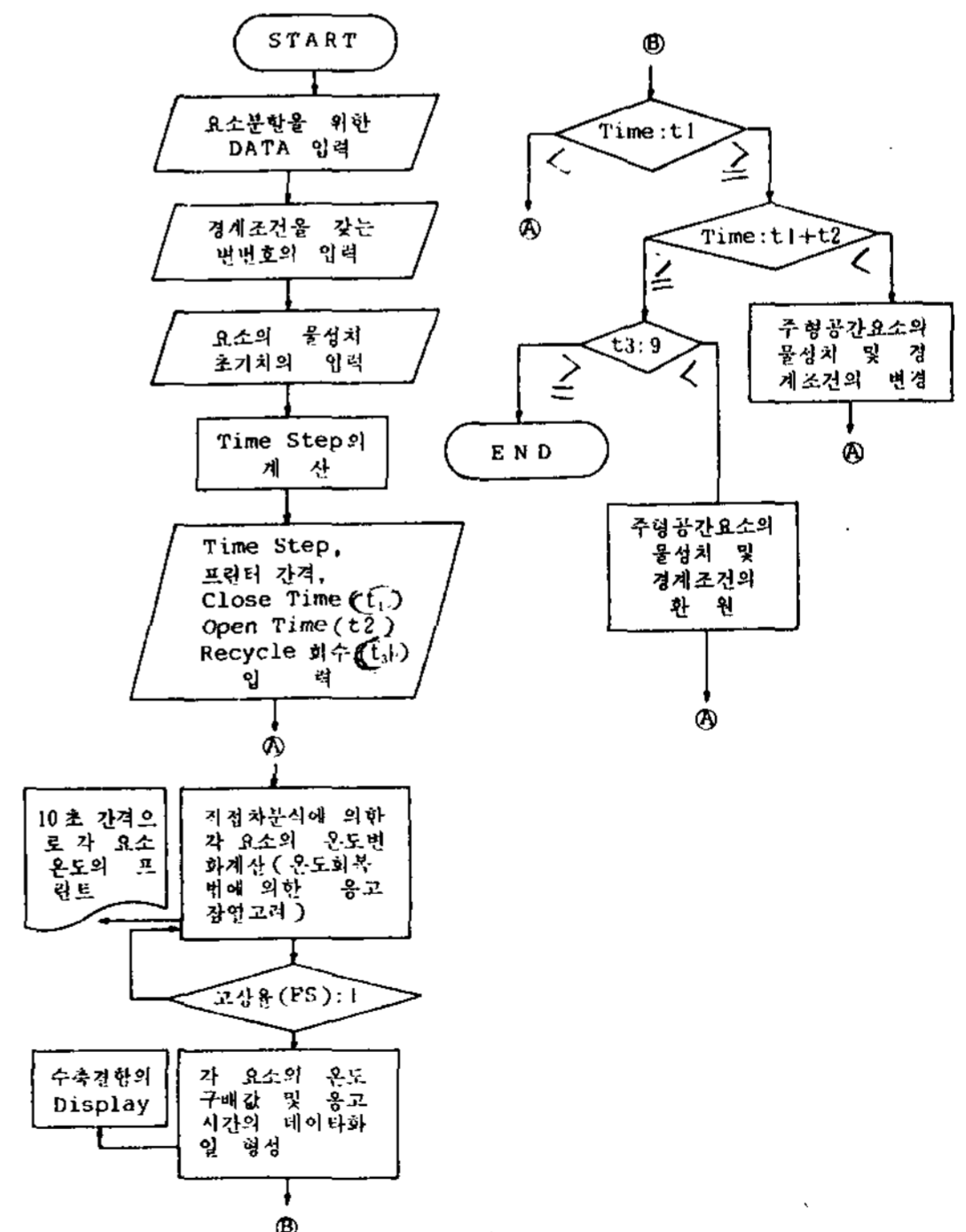


그림 1. 냉각수설계 프로그래밍의 Flow Chart

\* 생산기술연구원 생산기반기술센터 주조기술실

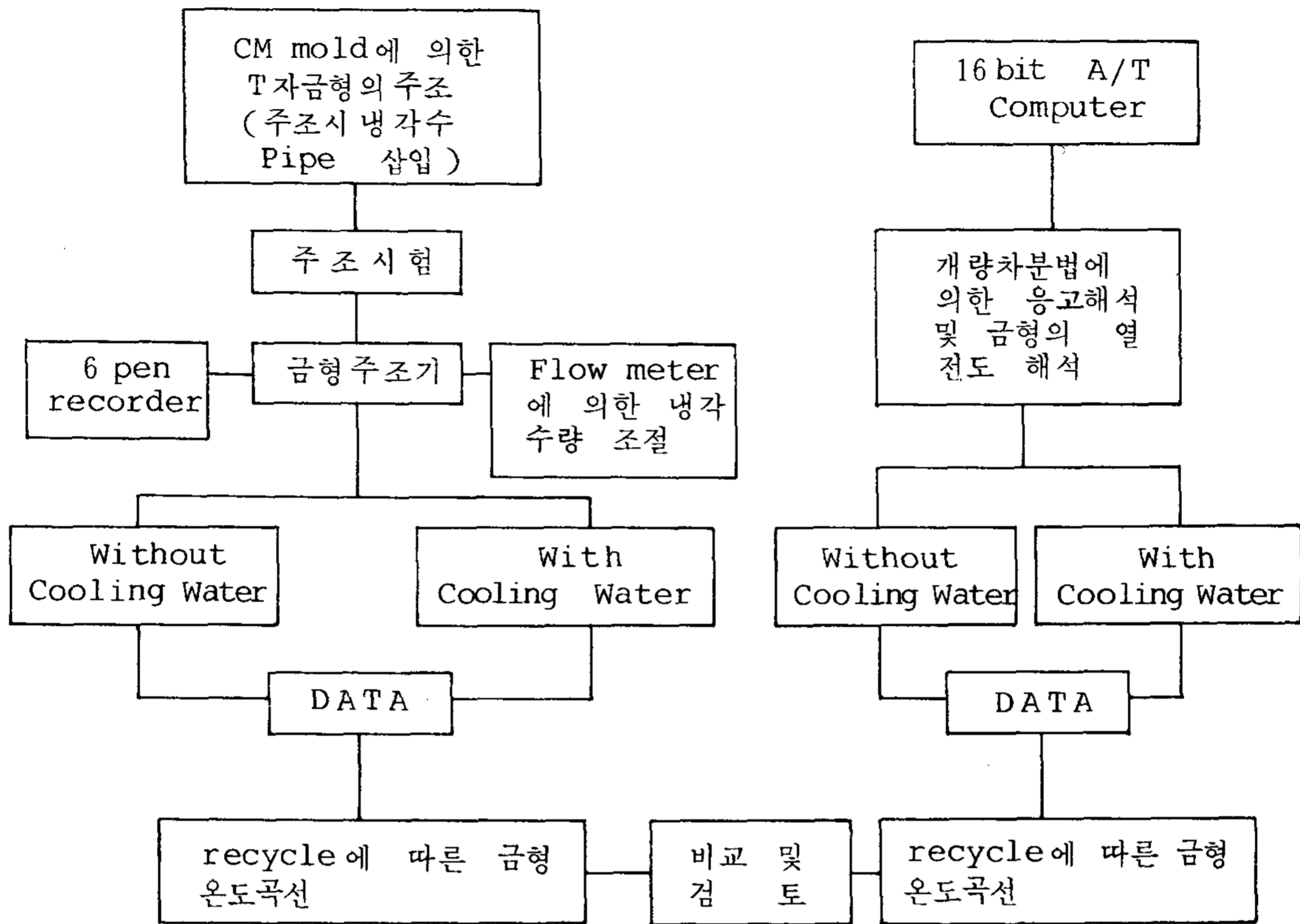


그림 2. 실험방법의 Flow Chart

표 1. 주조시험조건

recycle 실험 조건
○ 금형의 합형시간 - 180초
○ 금형의 이형시간 - 90초
○ Pour to pour time - 270초
○ recycle수 - 9회
○ 냉각수 Pipe 직경 - 7mm $\phi$
○ 냉각수 유속 - 3.2 $\ell$ /min

주조 실험 조건
○ 금형 : 아공정회주철(GC 30) C ; 3.2% Si ; 2.7%, Mn ; 0.8%
○ 도형재 : Graphite + 물유리
○ 도형두께 : 0.15mm
○ 용융금속 : Al-Si합금(Ac4c) Si ; 7%, Mg ; 0.3%
○ 용탕주입온도 : 740 $^{\circ}$ C
○ 금형예열온도 : 200 $^{\circ}$ C

림 4에 나타냈다.

사이클에 따른 금형의 평균온도는 초기잠정상태에서부터 준정상상태에 이르기까지 상승한다. 초기잠정상태가 경과한 후 금형온도는 그림 5에 나타낸 것처럼 각 주조사이클에서 준정상상태의 값 주위에서 변동한다.

준정상상태의 단계에서 이러한 사이클에 따른 양상이 실제생산조건에 부합된다. 이 기간에서의 모델링이 매우 중요하며 초기잠정상태 보다 더 실제에 가깝다고 할 수 있다. 평균주형온도가 정상상태치에 도달하기 위해서는 여러 사이클이 경과하여야 한다. 준정상상태에서 평균 주형온도를 제어하는 것은 생산성을 향상시키고 수축결함의 방지와 주형수명을 연장시키기 위해서 중요하다.

그림 6은 냉각수를 흘리지 않았을 경우에 대하여 주조사이클 1-8까지의 응고시간 등고선을 나타내고 있다. 이 그림으로부터 응고시간 등고선의 폐쇄된 구역이 사이클에 따라 압탕의 중심부로부터 주물의 중심부까지 이동하고 있음을 볼 수 있

표 2. 냉각수 설계를 위한 입력데이터

물성치 재료	밀 도 ( $g/cm^3$ )	비 열 (Cal/gr.°C)	열전도도 (Cal/cm s.°C)	응고잠열 (Cal/gr)	액상선온도 (°C)
Ac4c	2.69	0.32	0.34	118	620
금 형	7.0	0.14	0.08	-	-
물성치 재료	고상선온도 (°C)	초기온도 (°C)	주위온도 (°C)	열전달계수 (Cal/cm <sup>2</sup> S.°C)	냉각수온 (°C)
Ac4c	577	740	-	Ac4c-금형 0.03	
금 형	-	200	20	금형-대기 0.004 금형-냉각수 1.0	입구 : 23 출구 : 30

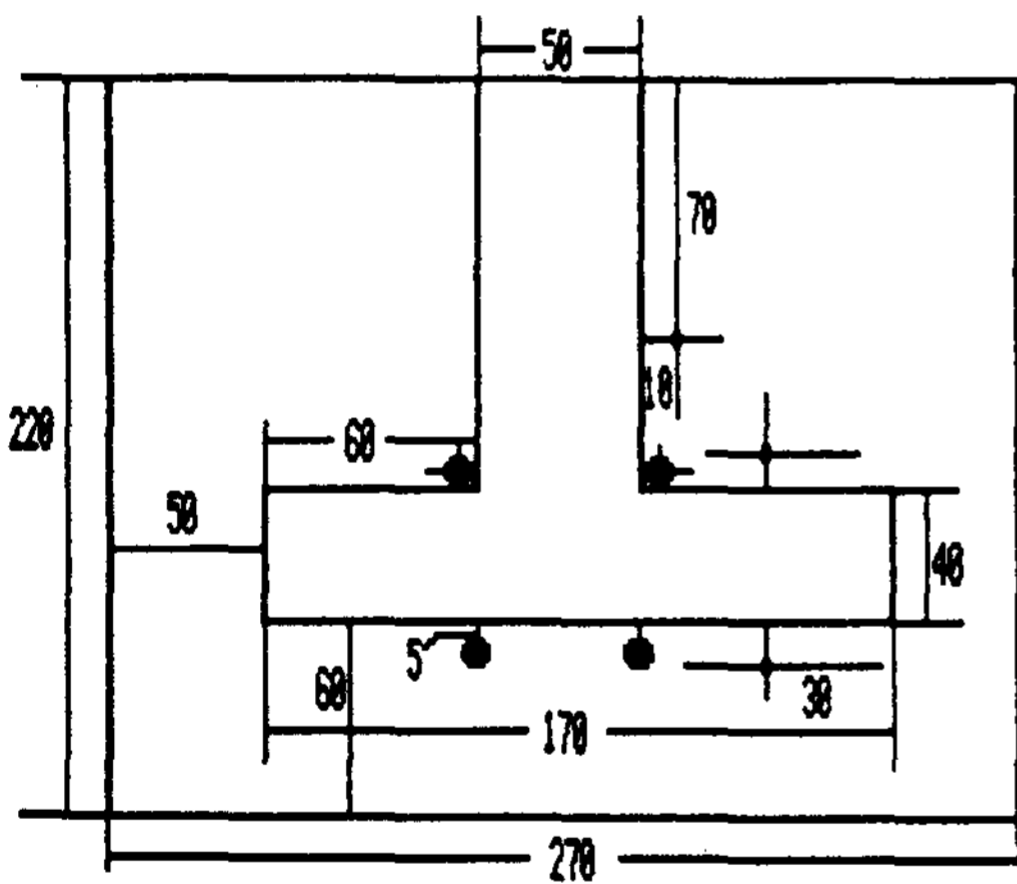


그림 3. T자 주물의 치수와 형상

다.

그림 7은 온도구배 등고선을 나타낸다. 온도구배값  $5^{\circ}C/cm$ 에 의해 폐쇄된 루프의 크기는 사이클에 따라 증가하며 그 중심부는 주물쪽으로 이동하고 있다.

그림 8은 주조시험의 결과이며 주물표면상에 싱크타입으로 발생한 수축결함이 사이클에 따라 넓게 퍼져 나가고 있다. 이 그림들 (그림 6, 7, 8,)로 부터 응고시간과 온도구배의 예측파라미터를 조화하여 사용함으로써 주물의 수축공의 발생을 효과적으로 예측할 수 있다.

그림 9는 냉각수를 흘렸을 경우에 대하여 주조 사이클 1-7까지의 응고시간 등고선을 나타내고 있다. 이 그림으로부터 응고시간 등고선이 사이클에 따라 변하지 않음을 알 수 있다.

그림 10은 온도구배등고선을 나타낸다. 온도구배등고선은 사이클에 따라 변하지 않고 있다.

그림 11은 주조시험의 결과이며 주물표면상에 싱크타입으로 발생한 수축결함이 사이클에 따라 변하지 않고 있다.

이 경우에 있어 응고양상과 수축결함은 사이클에 따라 영향받지 않음을 알 수 있다.

금형의 한 지점에서 실측된 온도곡선과 계산에 의해 얻어진 금형의 준정상상태에서의 금형온도를 비교하여 그림 12에 나타내었다.

냉각수를 흘리지 않았을 경우 7~8주조사이클이 진행되고 나서 각지점에서의 금형온도가 준정상상태에 도달함을 나타내고 있으며 이때의 실측된 금형온도와 계산된 금형온도는 거의 일치된 값을 나타내주고 있다. 냉각수를 흘렸을 경우 주조 사이클의 초기부터 준정상상태에 도달함을 나타내고 있으며 이때의 금형온도는 실측치와 계산치가 잘 일치됨을 나타내주고 있다.

그림 13은 일정 싸이클에서 용탕 주입후 냉각 과정에서의 금형의 한지점에서의 냉각곡선을 나타내고 있다.

냉각수를 흘리지 않았을 경우에 금형온도의 실측치와 계산치가 잘 일치되고 있으며 냉각수를 흘

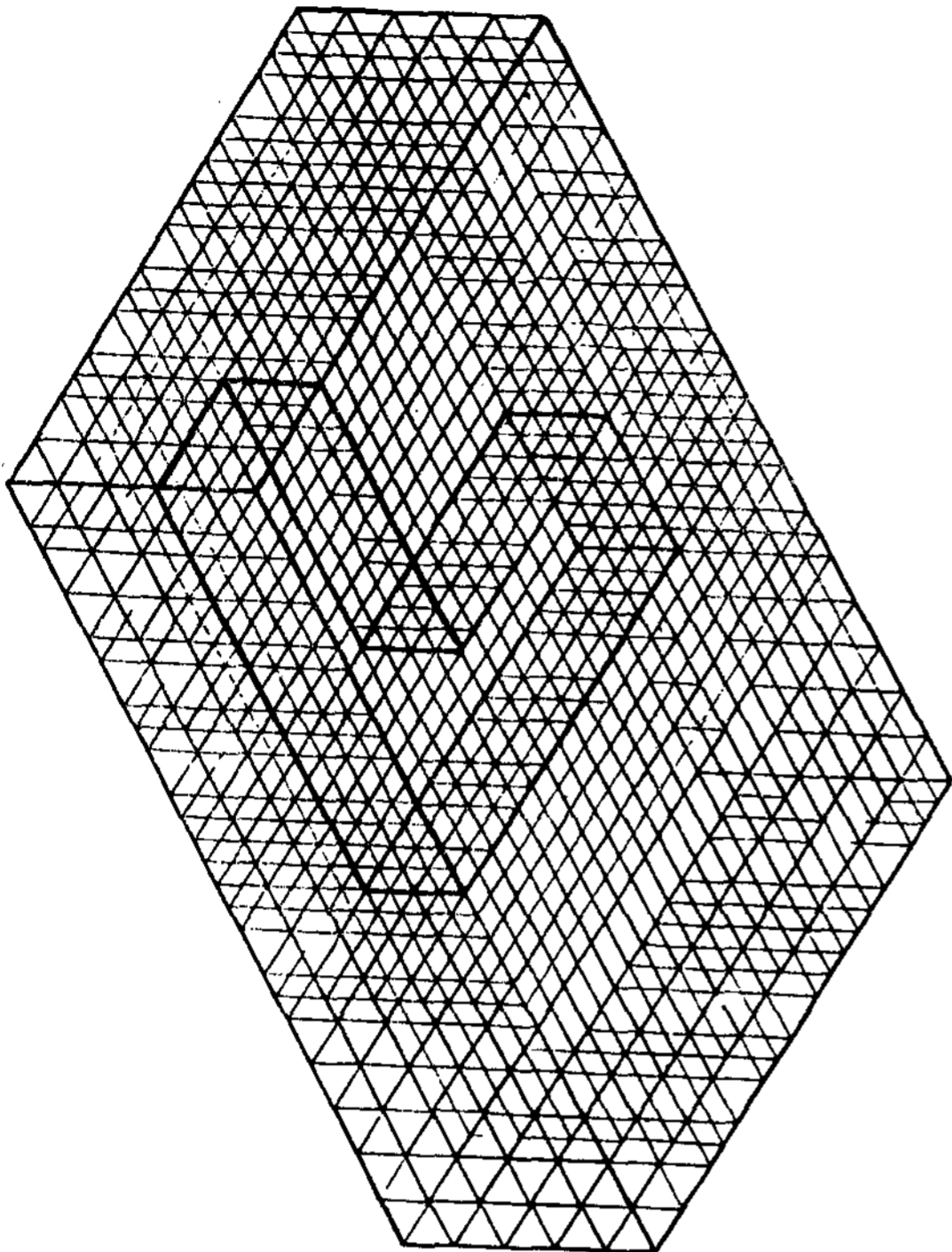


그림 4. T형 주물 및 금형의 요소분할도

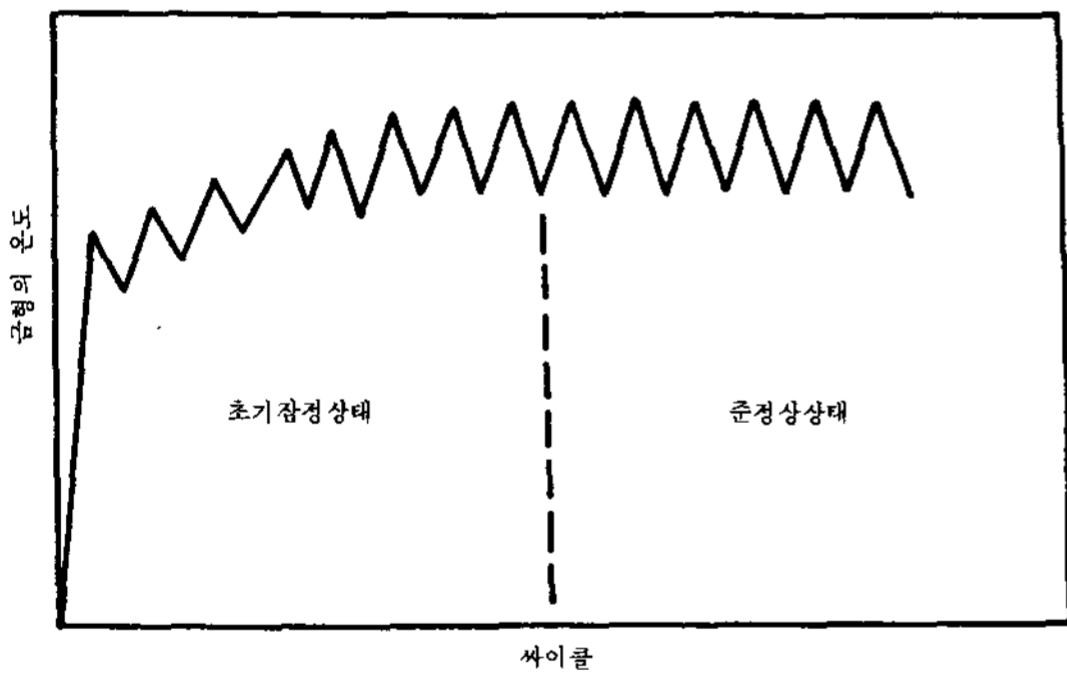
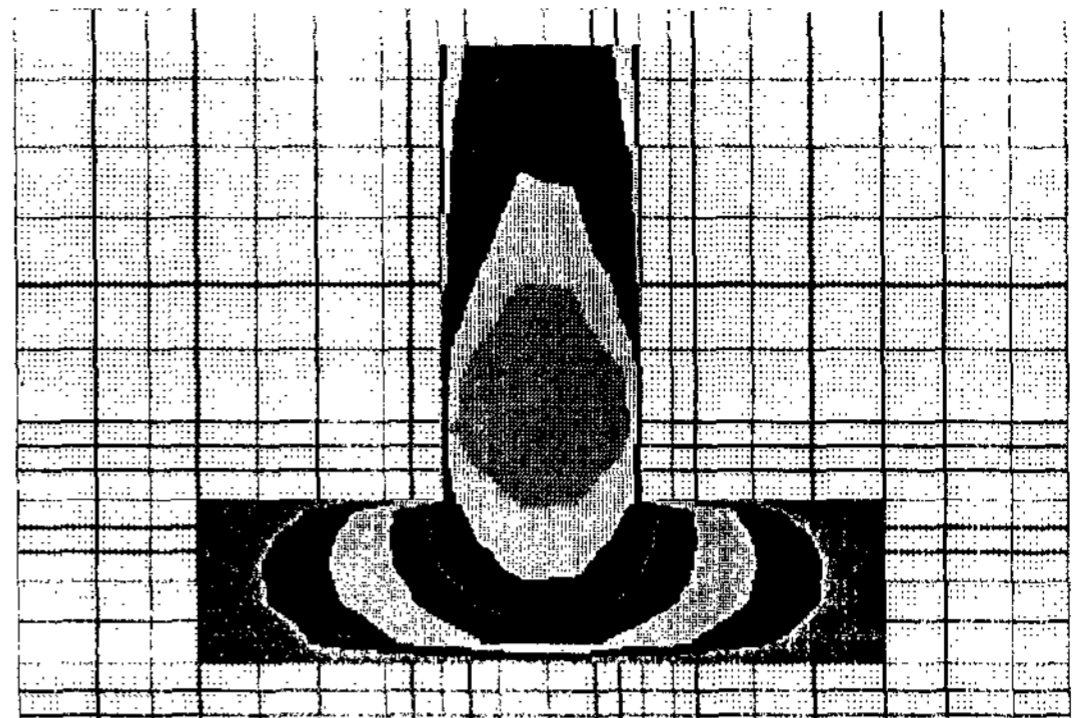
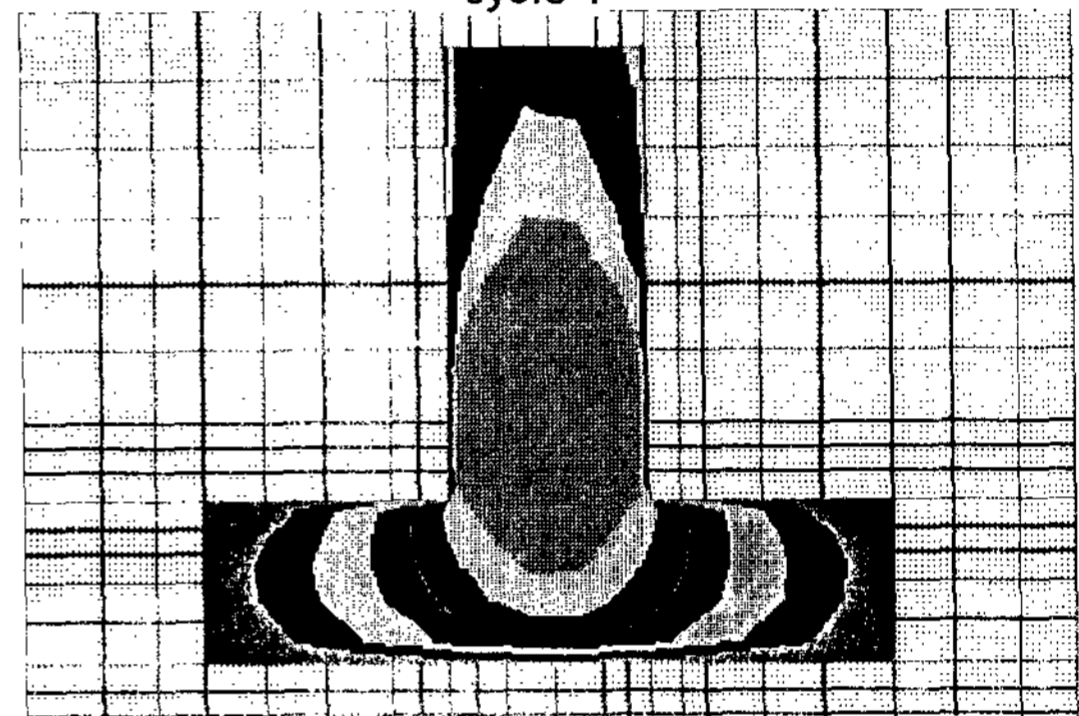


그림 5. 반복주조에 따른 금형의 비정상 및 준정상 상태

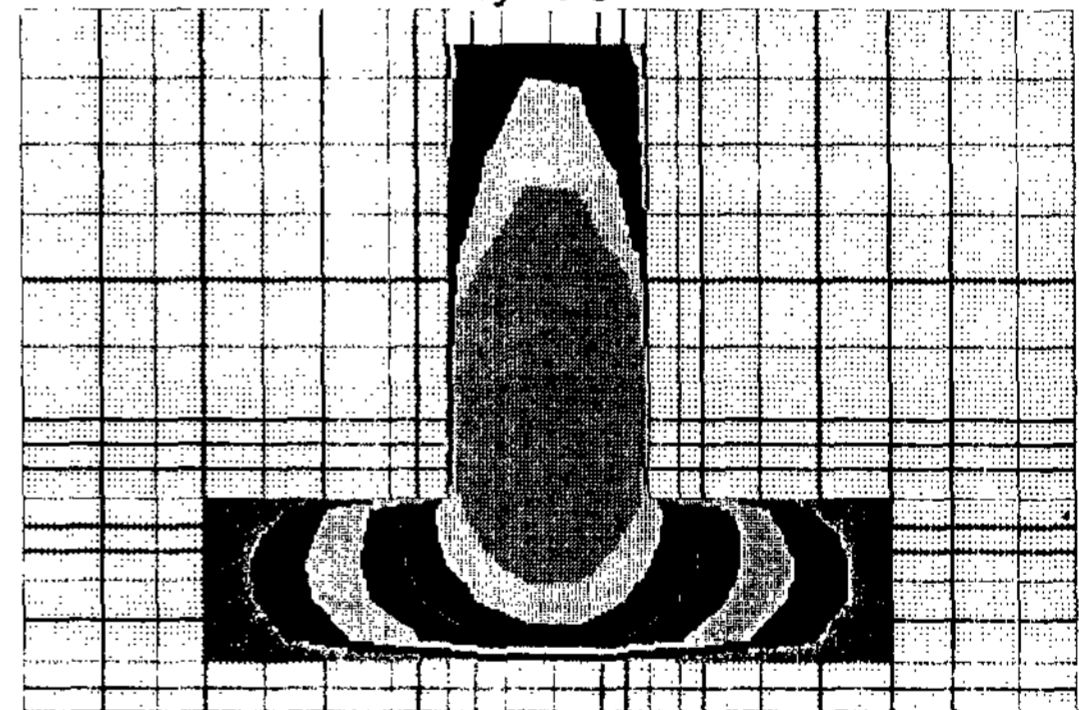
Time
20
40
60
80
100
120
140



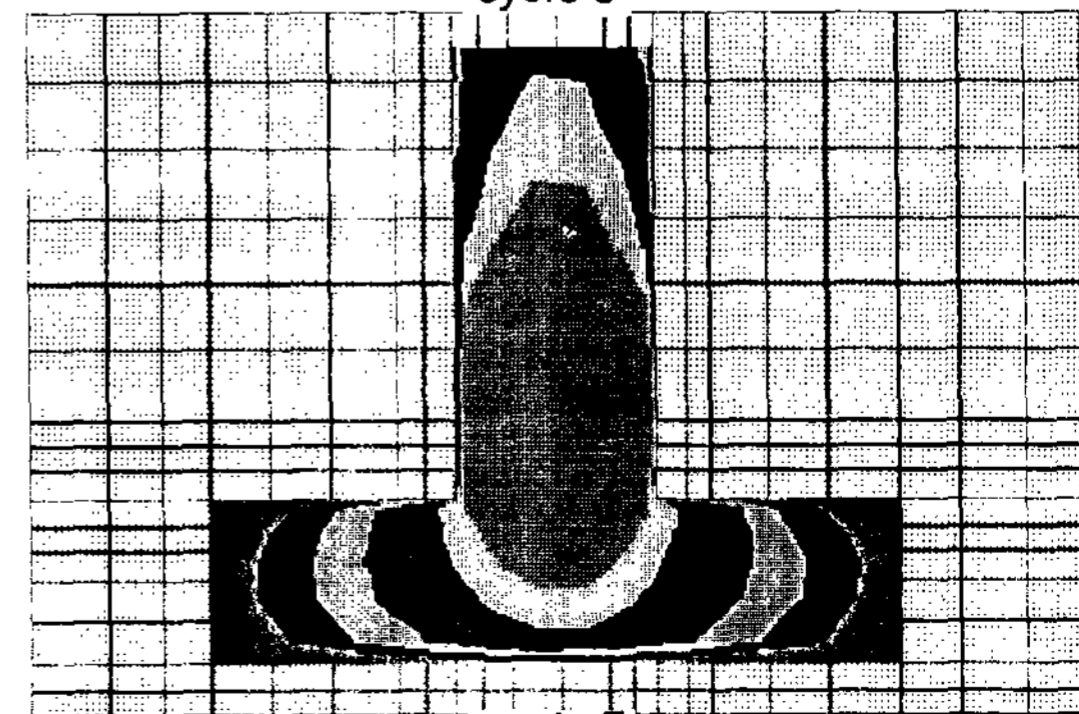
cycle 1



cycle 3

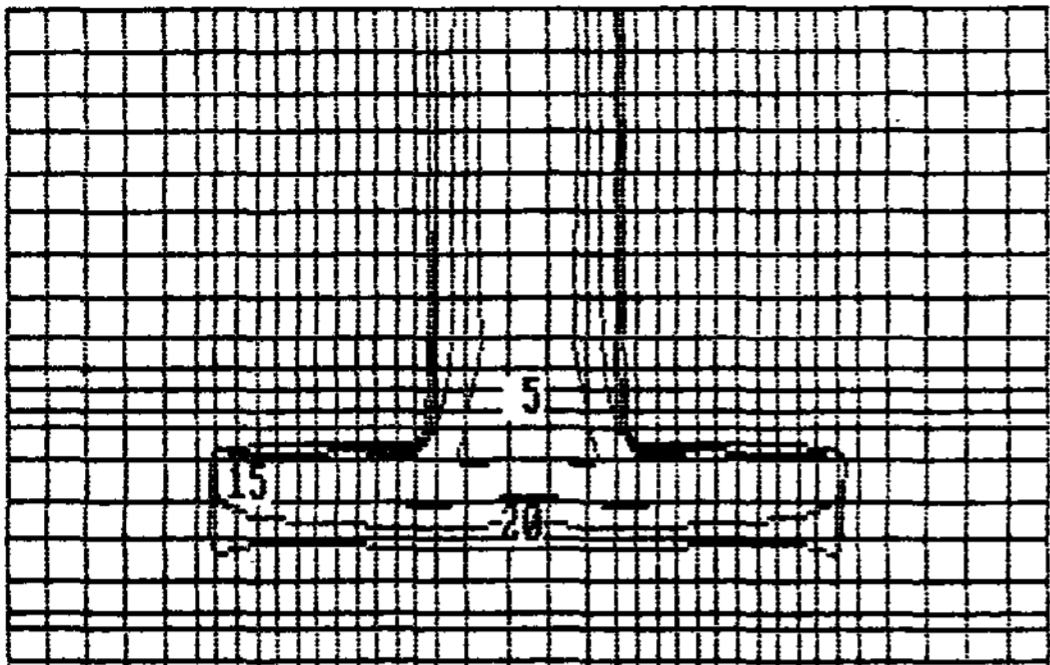


cycle 5

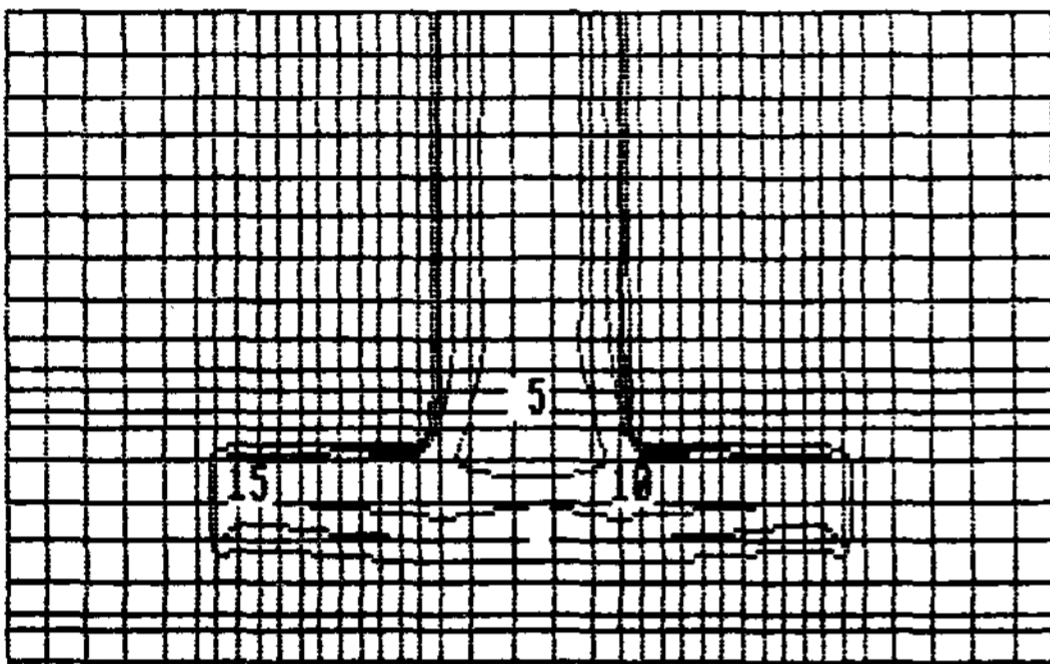


cycle 7

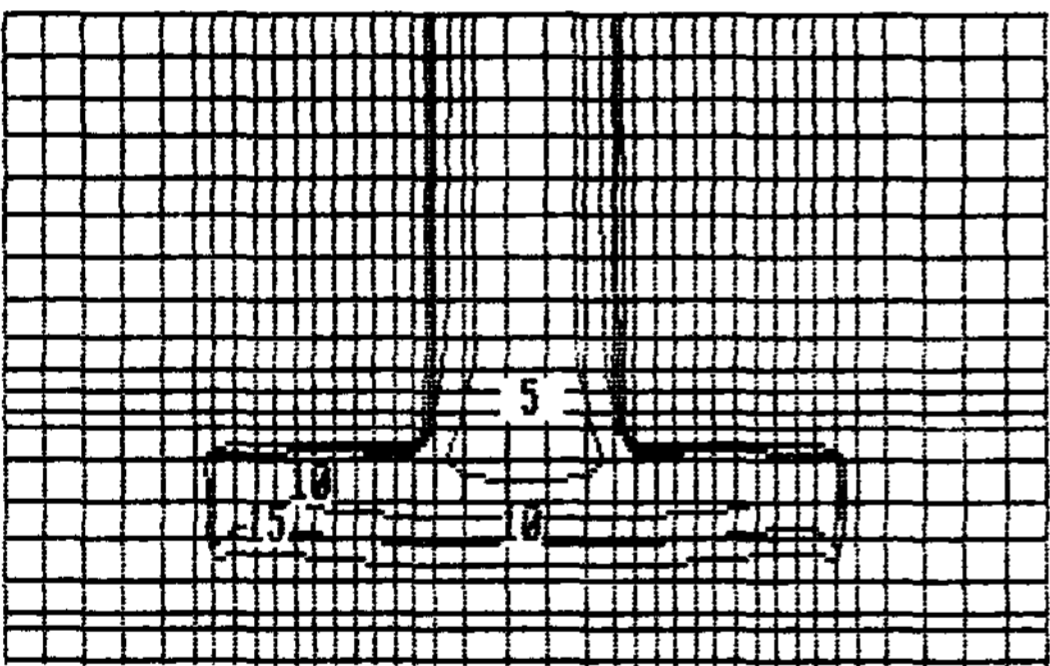
그림 6. 냉각수를 흘리지 않았을 때의 응고시간 등 고선



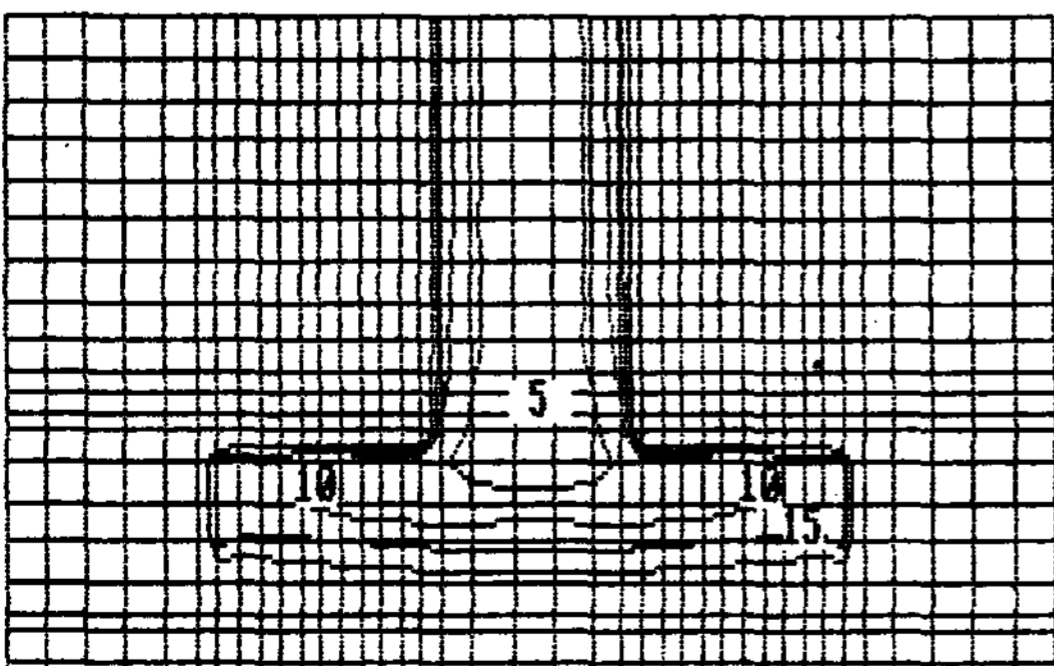
cycle 1



cycle 3



cycle 5



cycle 7

그림 7. 냉각수를 흘리지 않았을 때의 온도구배 등고선

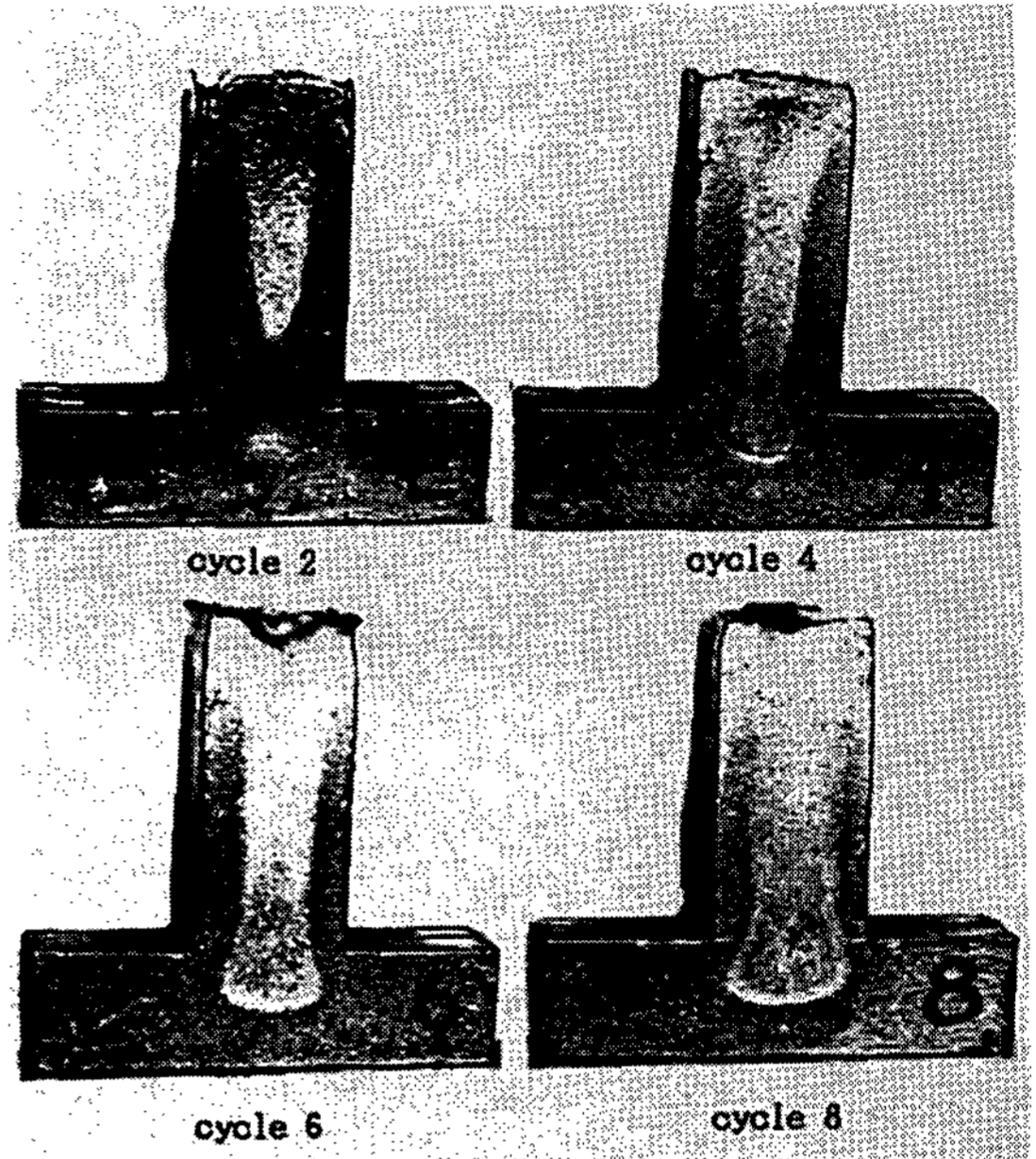
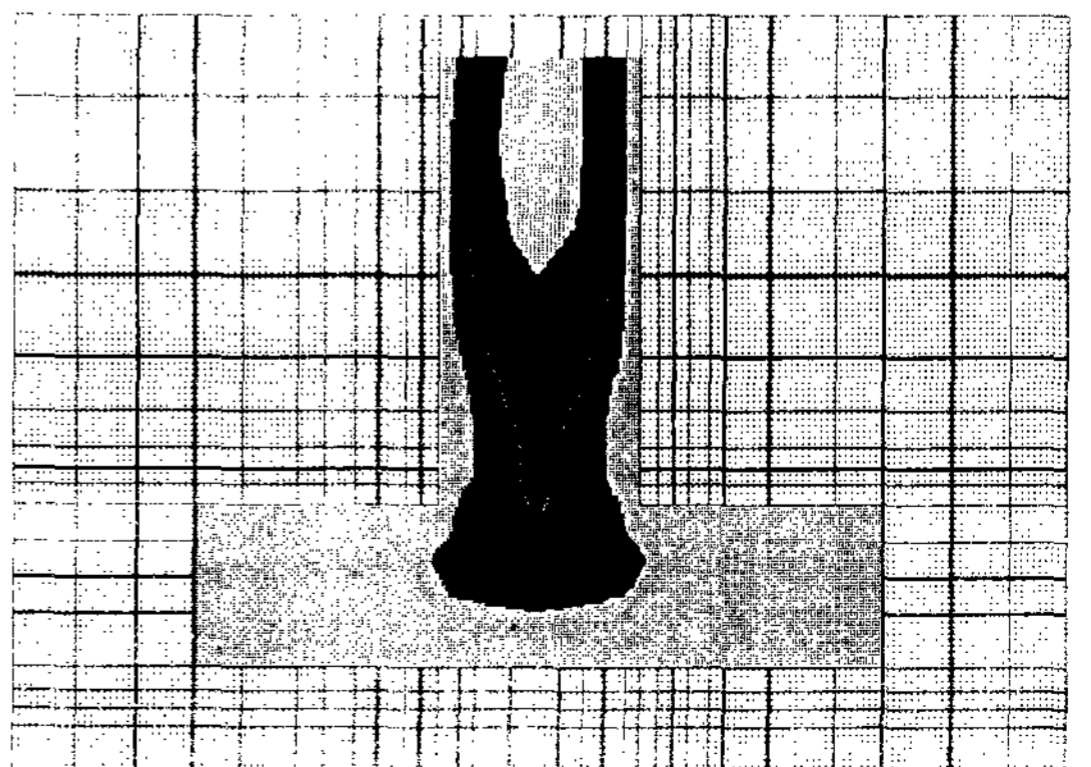
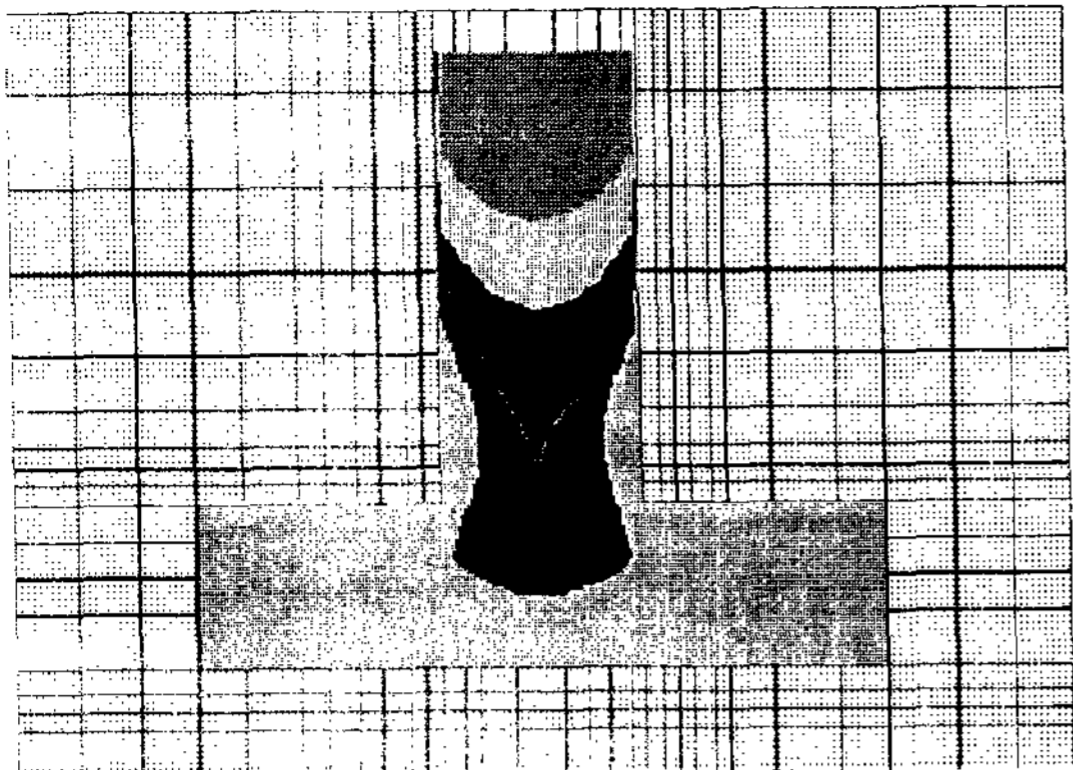


그림 8. 냉각수를 흘리지 않았을 때의 주조시험 결과

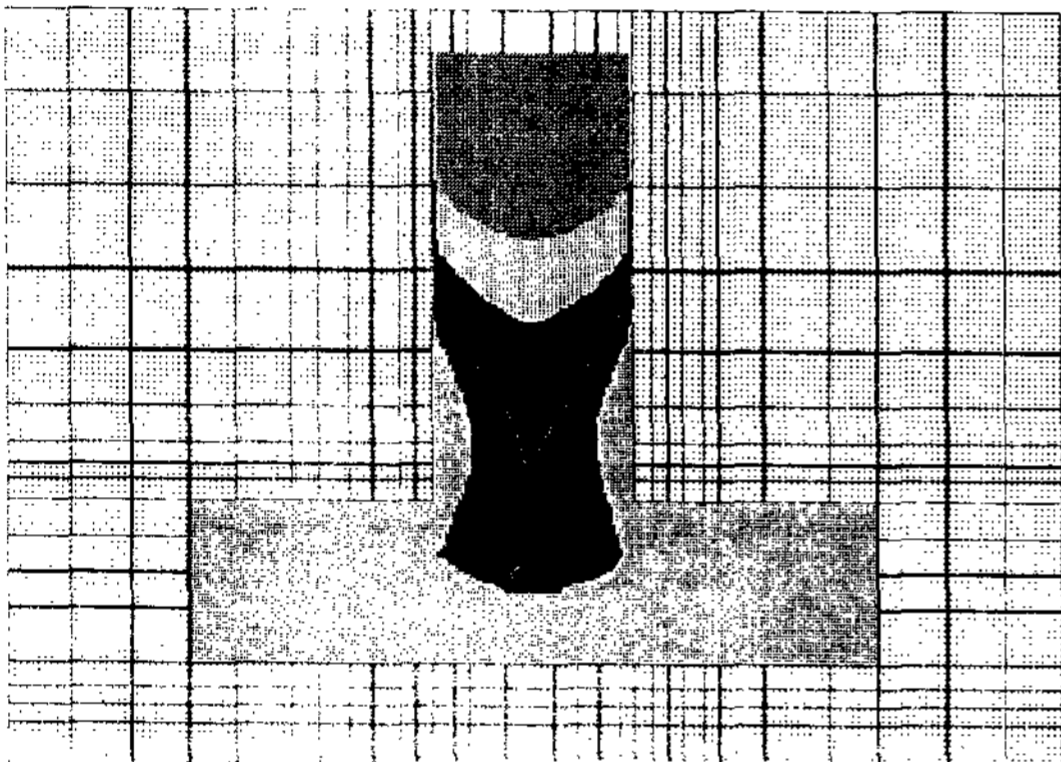
Time
20
40
60
80
100



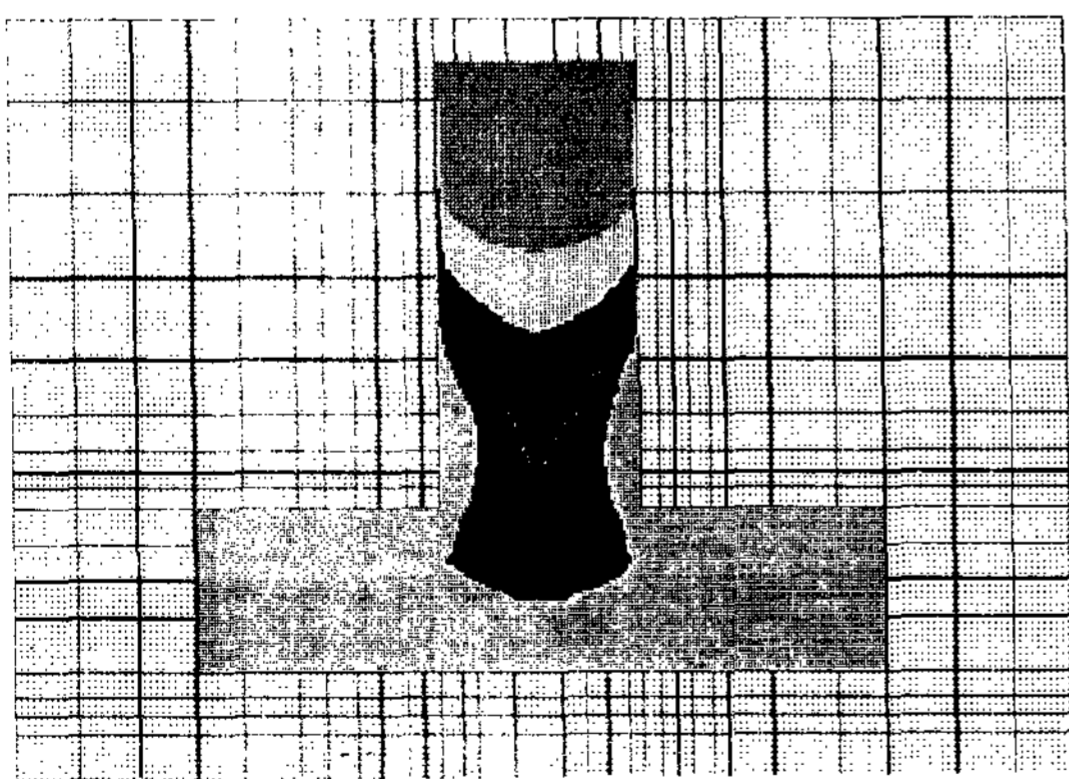
cycle 1



cycle 3



cycle 5



cycle 7

그림 9. 냉각수를 흘렸을 때의 응고시간 등고선

렸을 경우에도 실측치와 계산치가 잘 일치되어 냉각수 효과에 대한 예측이 잘 되고 있음을 나타내고 있다.

그림 14는 준정상상태에 도달했을때 주입후 30초에서의 계산된 금형의 온도분포를 나타내고 있

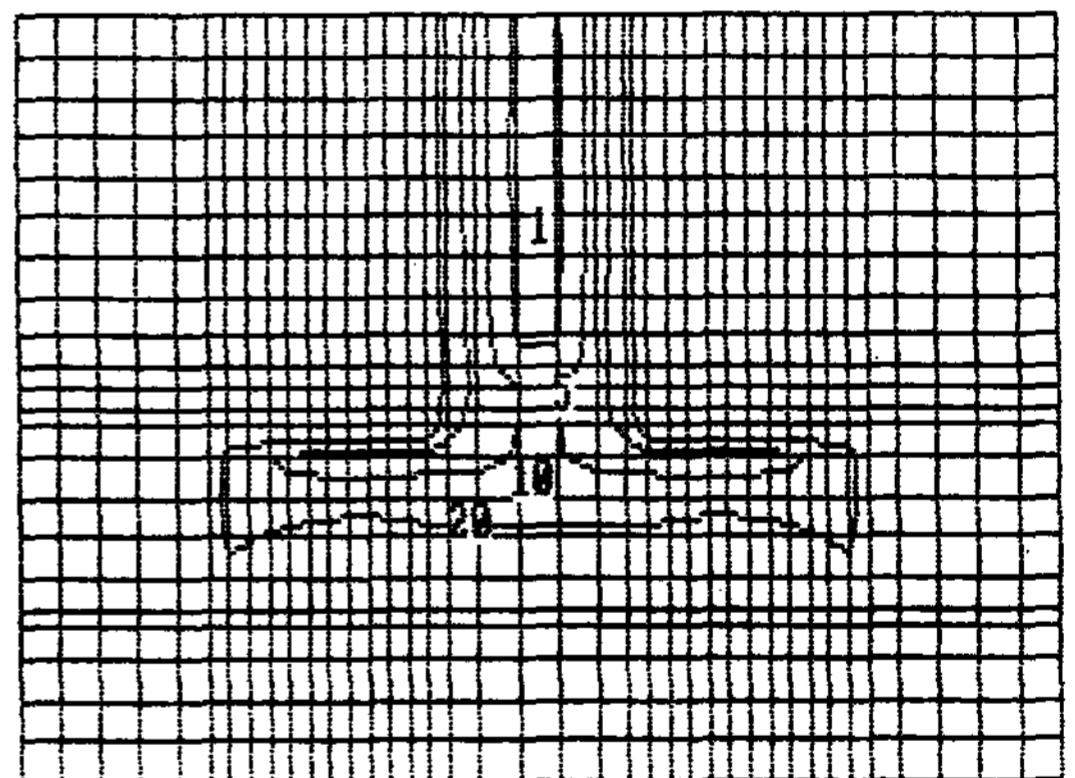
으며 냉각수를 흘리지 않았을 때의 축열부위 (300~400℃)가 냉각수를 흘려 줌으로 인하여 축열이 해소되고 금형의 전체 온도분포를 150~250℃로 안정적인 유지를 해 줄수 있음을 나타내 주고 있다.

이상과 같이 금형주조에서 반복작업에 따른 금형온도의 상승에 있어서 금형의 평형온도의 제어, 수축결합의 방지등을 위하여 냉각수 라인을 사용할 수 있는데 이때에 컴퓨터 해석에 의한 냉각수 효과의 예측은 실제 주조시험결과와 상당히 근접함을 나타내 주고있다.

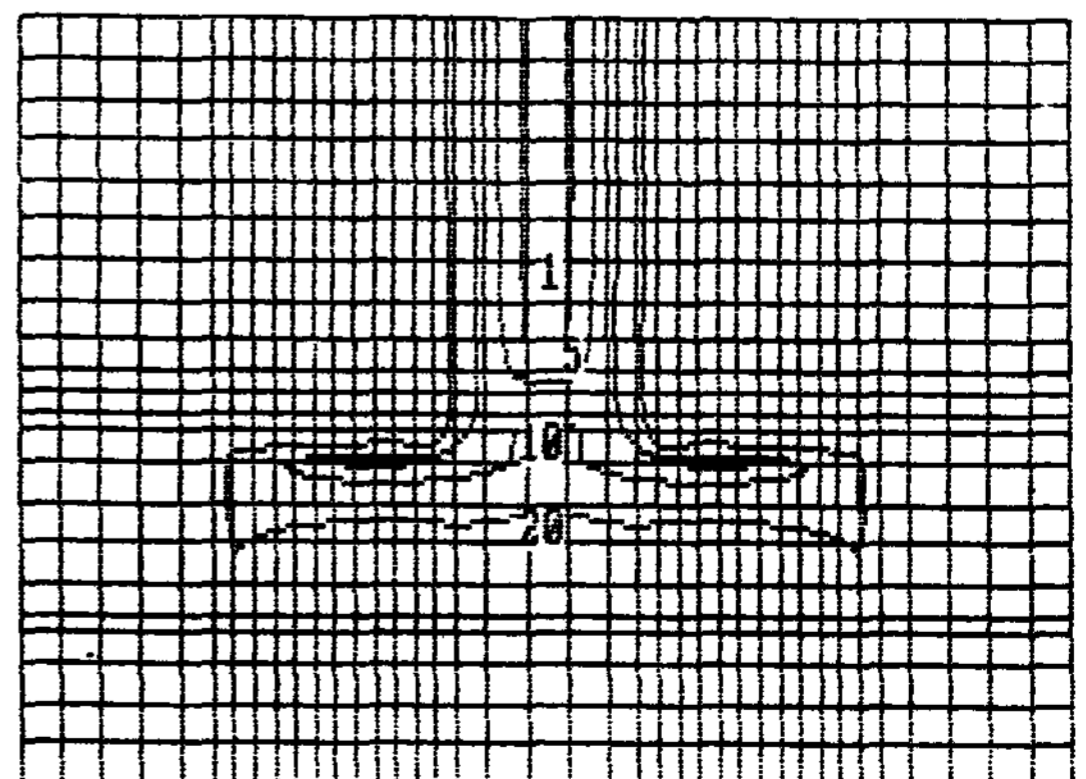
### 3. 냉각수효과에 의한 기계적성질의 제어

열전달해석에 의해서 주물의 각부위의 냉각속도를 예측할 수 있고 기계적성질은 냉각속도와 관계되므로 응고해석에 의하여 주물각부위의 기계적성질도 예측할 수 있는 것이 가능하다.

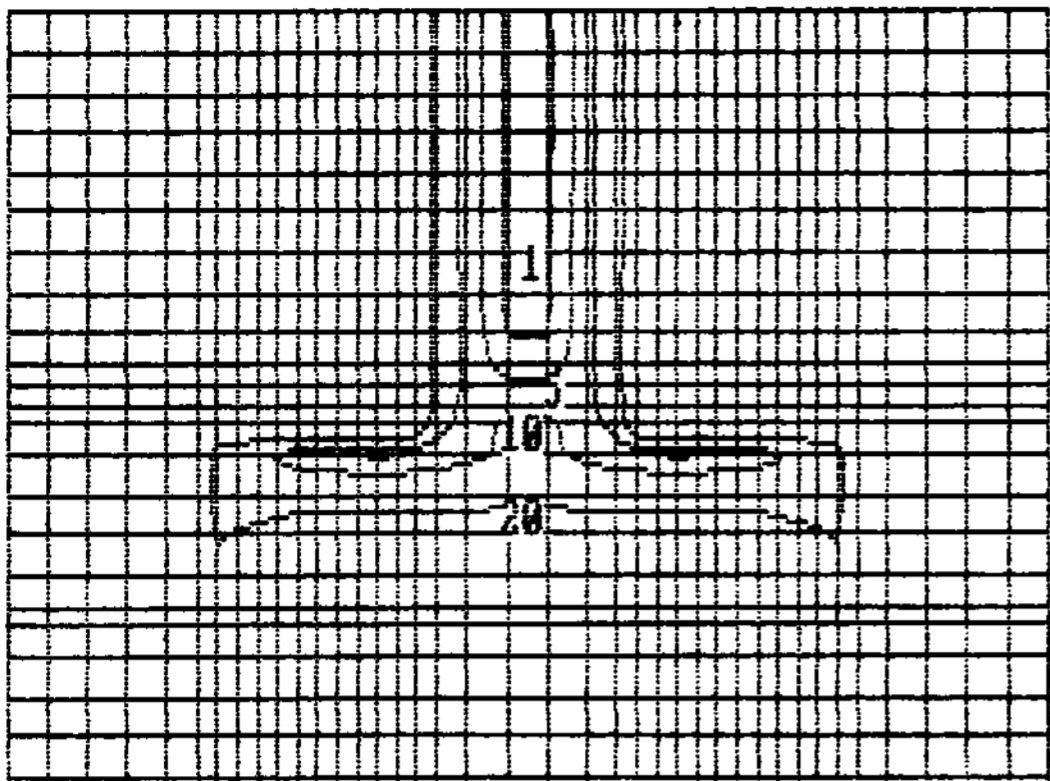
특히 금형주조에 있어서 반복작업에 따른 금형의 과열에 따라 주물의 열집중부위에서 사이클에



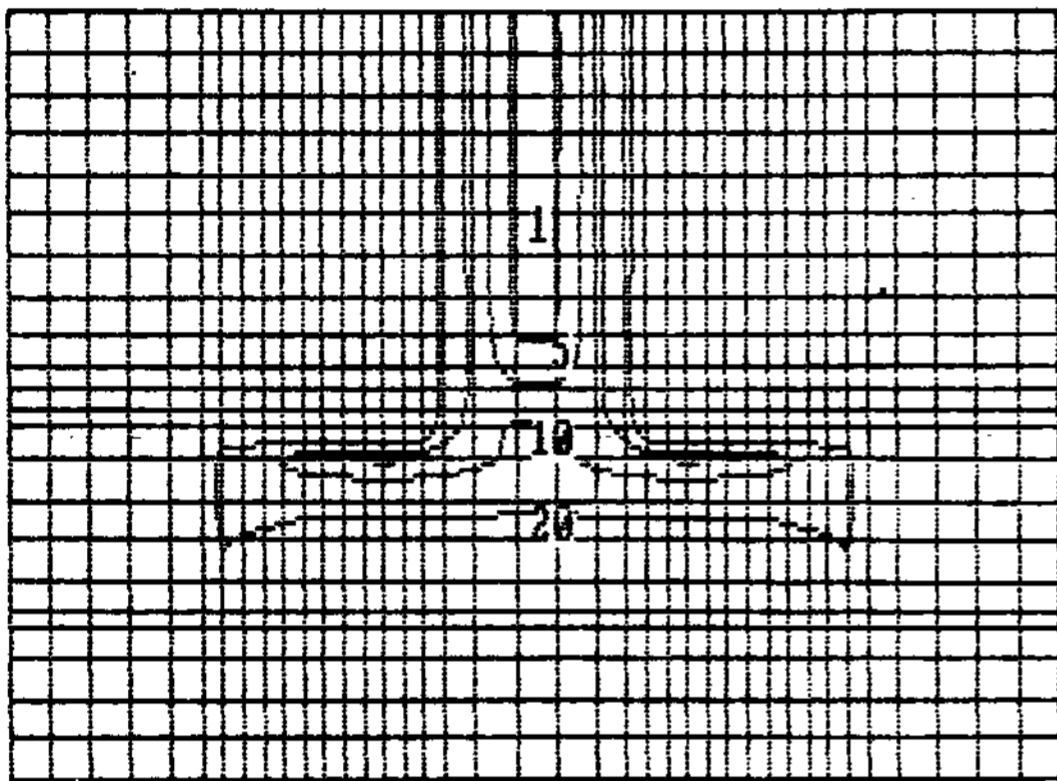
cycle 3



cycle 1



cycle 5



cycle 7

그림 10. 냉각수를 흘렸을 때의 온도구배 등고선

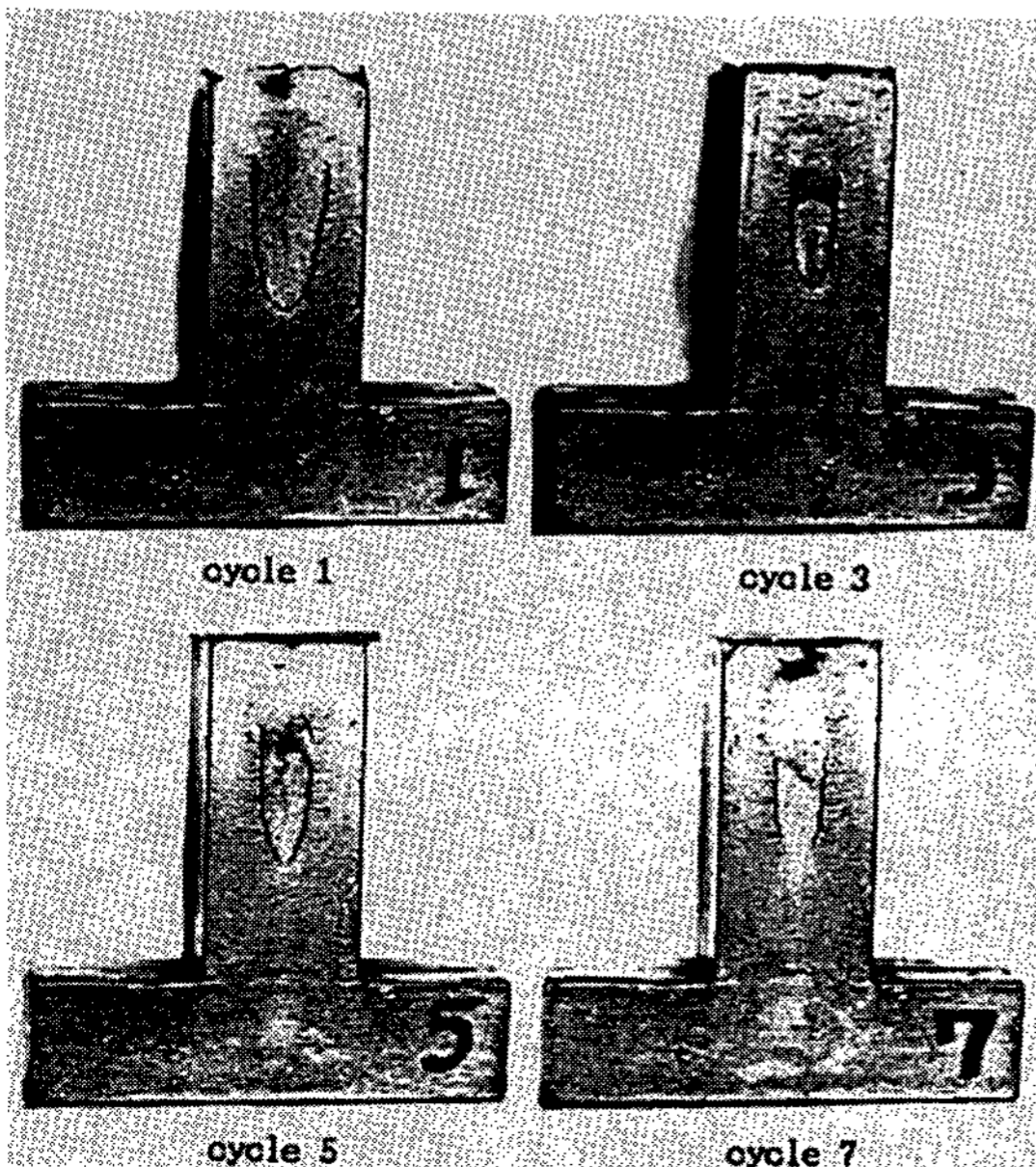


그림 11. 냉각수를 흘렸을 때의 주조시험 결과

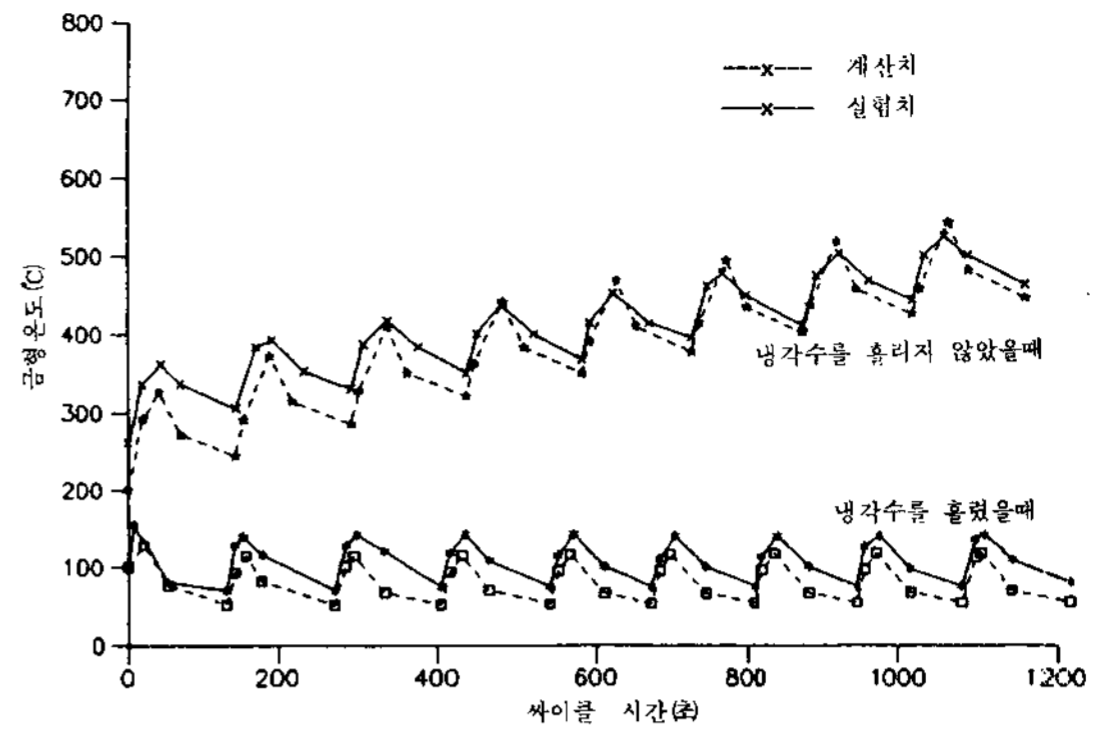


그림 12. 사이클에 따른 금형의 온도변화의 비교

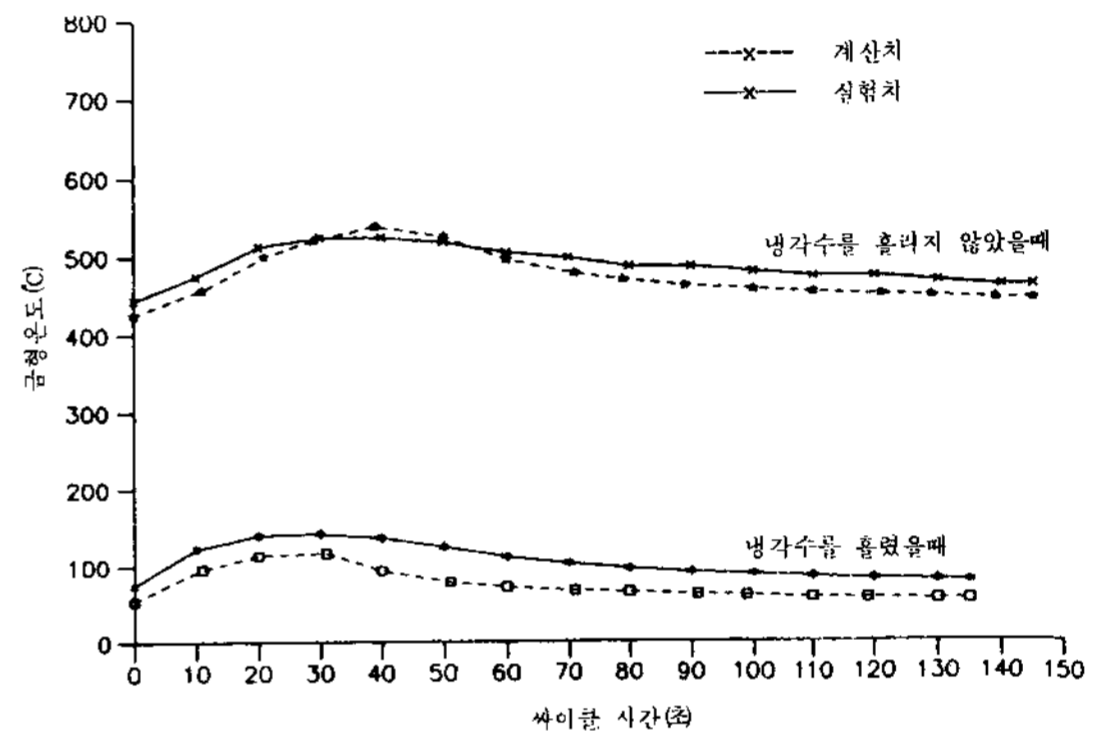
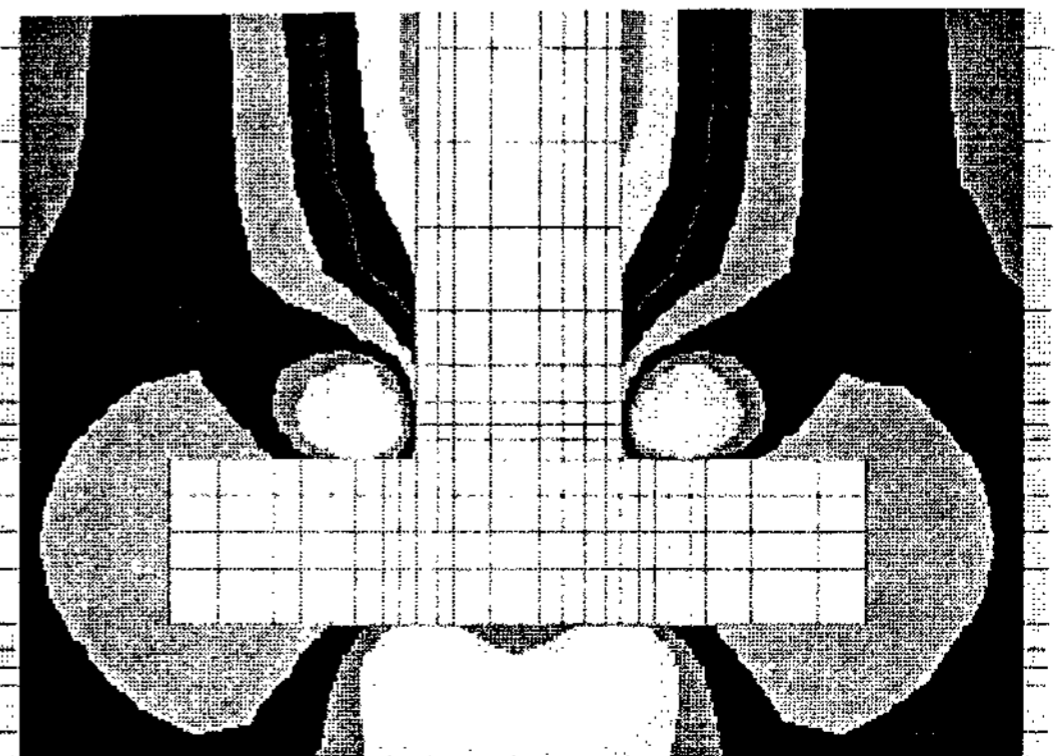
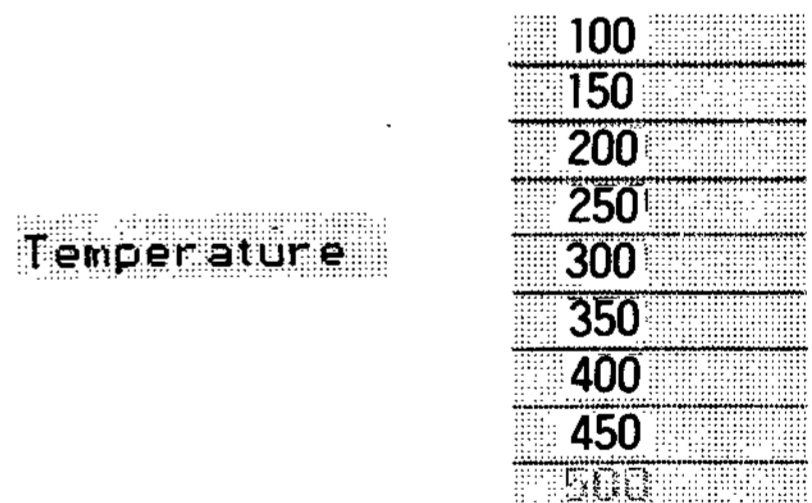
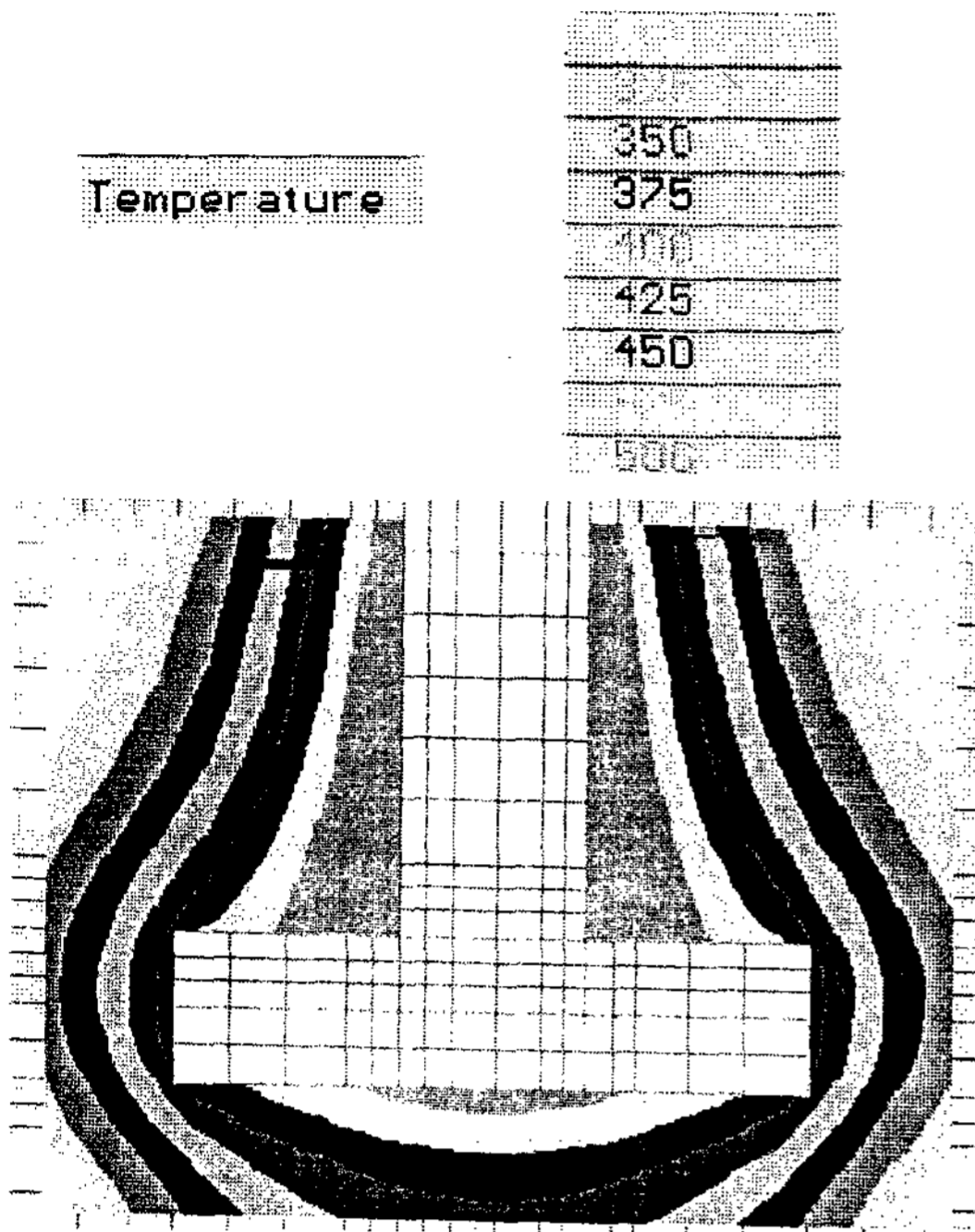


그림 13. 금형의 냉각곡선의 비교



(a) 냉각수를 흘렸을 때



(b) 냉각수를 흘리지 않았을때

그림 14. 금형의 계산된 온도분포

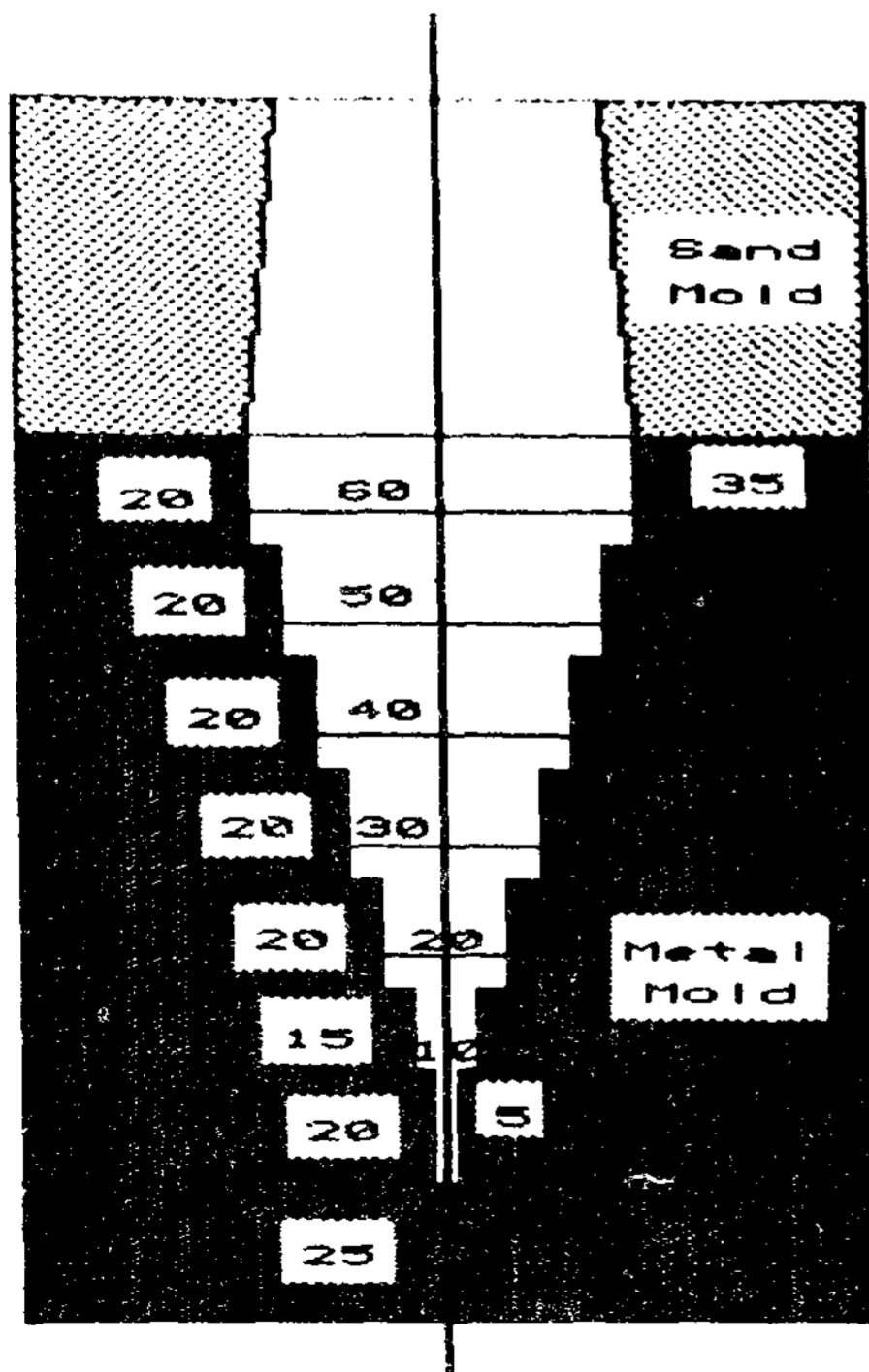


그림 15. 계단상 주조시편

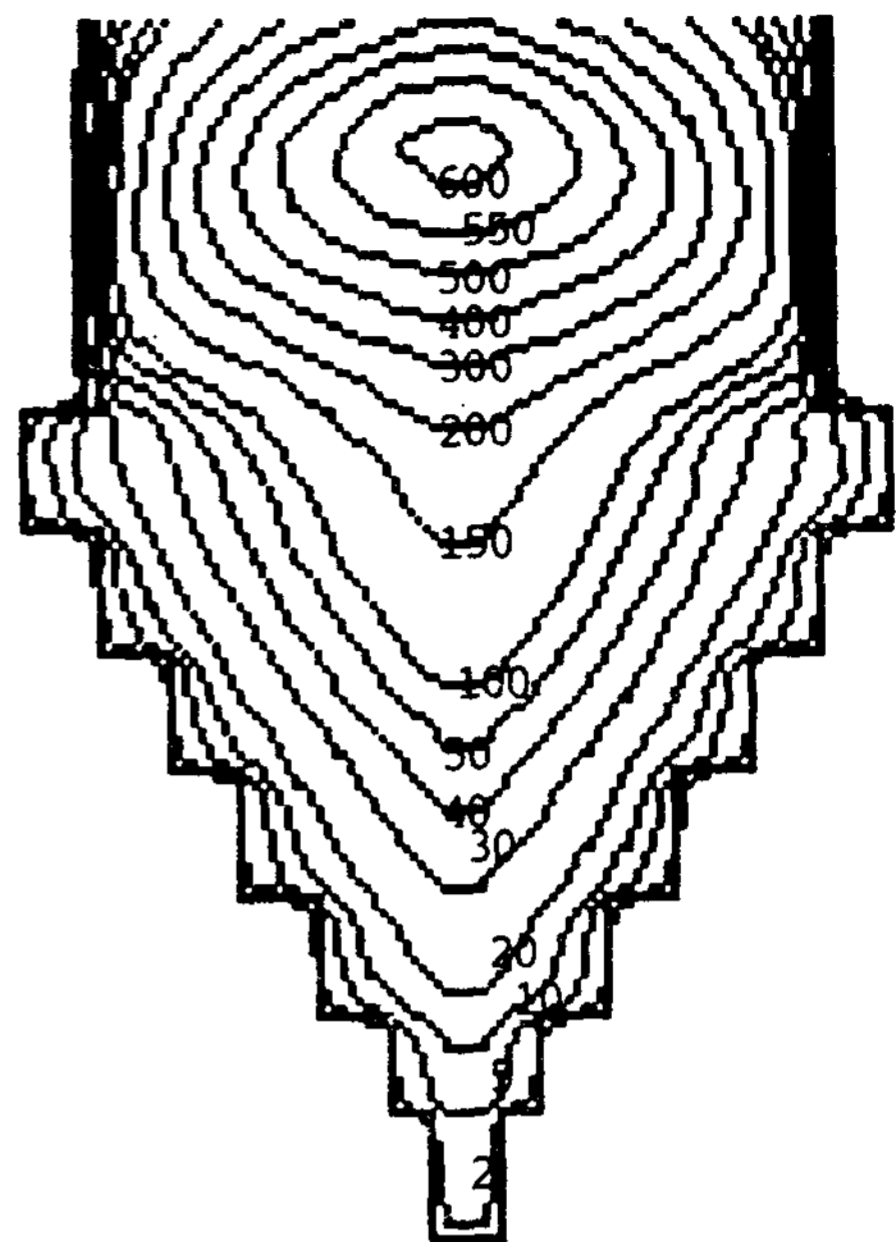
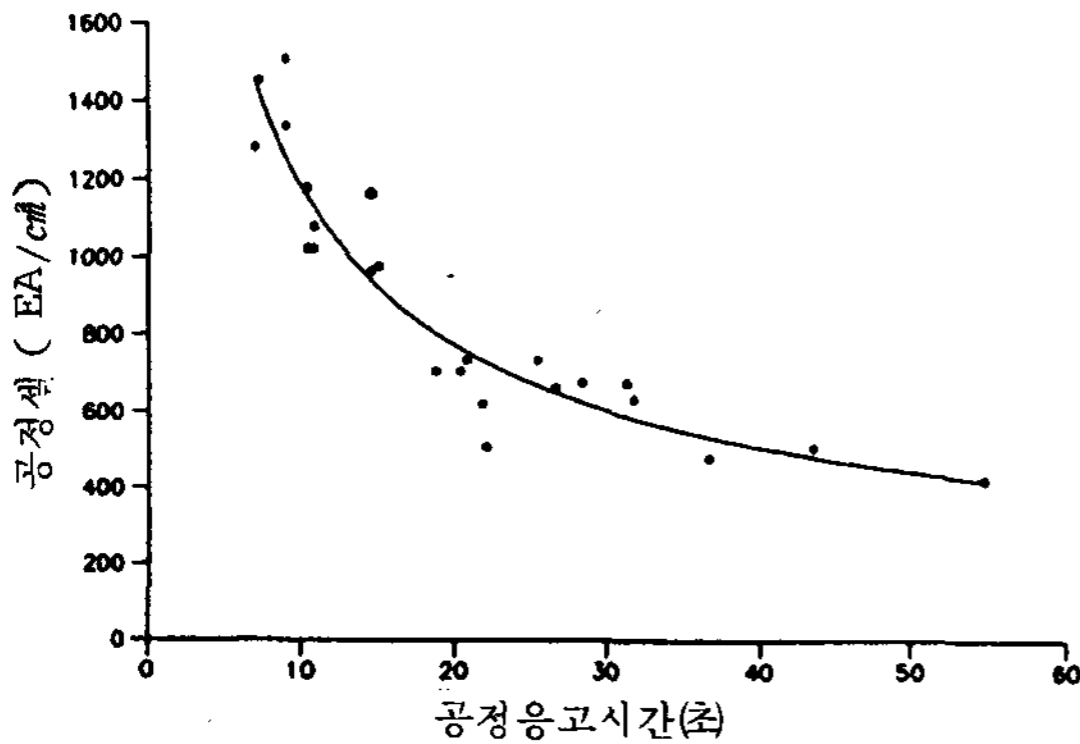


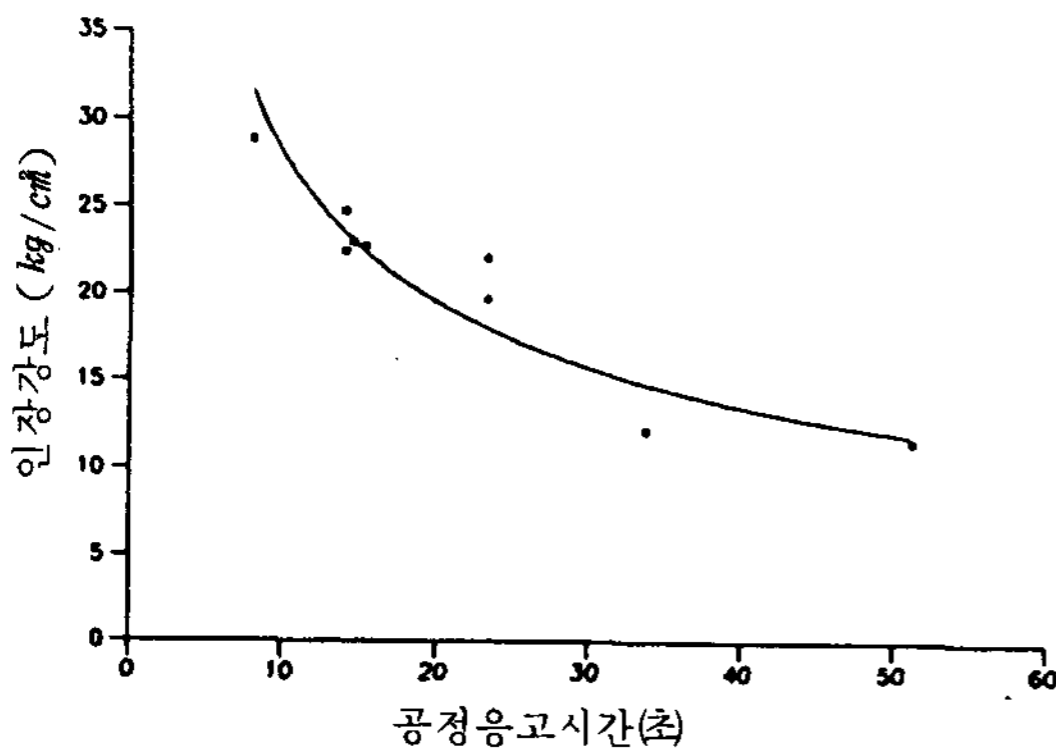
그림 16. 계단상시편의 등응고시간 곡선

따라 냉각속도가 느려지게 되며 따라서 기계적 성질의 변화가 일어나게 된다. 냉각수시스템에 의해서 이러한 금형의 과열이 방지될 수 있으며 이때의 냉각수효과에 따른 기계적성질의 변화에 대하여 열전달해석에 의하여 예측 및 제어가 가능하다. 여기서는 앞에서 설명한 “T”자 금형주조에 있어서 냉각수효과에 따른 기계적성질의 제어에 대하여 설명하고자 한다. 단 재질은 공정주철로 하였다. 먼저 냉각속도에 따른 기계적 성질에 대한 기본데이터가 있어야 하며 이를 기준으로 하여 컴퓨터에 의해 계산된 냉각속도를 역으로 기본데이터에 적용하여 싸이클에 따른 과열부위의 기계적 성질을 예측할 수 있고 이를 이용하여 목적하는 기계적성질을 얻을수 있도록 적절한 냉각수시스템을 설계할 수 있다. 그림 15에 냉각속도에 따른 기계적성질의 기초데이터를 얻기 위한 계단상 주조시편을 나타내었다. 그림 16에는 계단상시편의 각두께에 따른 냉각속도를 계산하기 위하여 응고해석한 결과를 나타내었다. 그림 17의 (a), (b), (c)에는 각각 계산된 냉각속도에 따른 공정셀, 경도, 인장강도와의 관계를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 계산된 냉각속도와 각각의 기계적성질과는 일정한 관계를 갖고 있음을 알 수 있다. 이번에는 “T”자 주물의 축열부위의 반복싸

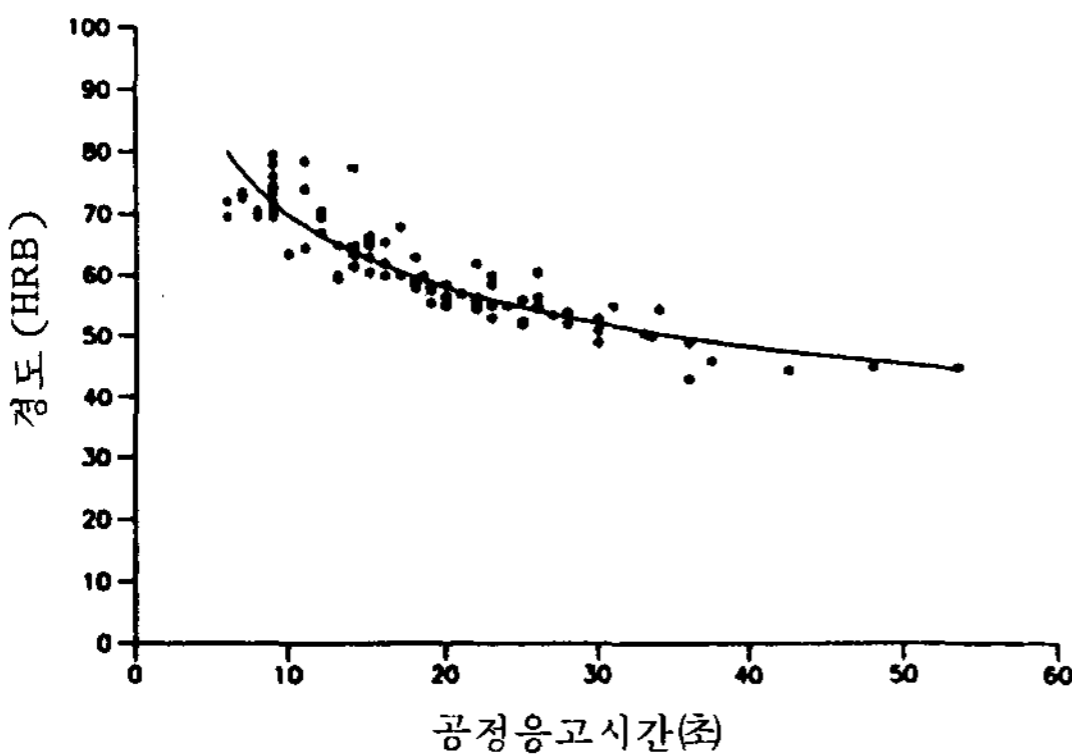




a) 계산된 냉각 속도와 실제 공정결과와의 관계



b) 계산된 냉각 속도와 실제 인장강도와의 관계



c) 계산된 냉각속도와 실제 경도와와의 관계

그림 17. 냉각속도에 따른 제성질의 관계

이클에 따라 계산된 공정응고시간을 냉각수를 흘렸을때와 흘리지 않았을 때를 비교하여 그림 18에 나타내었다. 싸이클의 반복에 따라 냉각수를 흘렸

을때는 공정응고시간이 일정하나 흘리지 않았을 때는 점차로 응고시간이 길어져서 축열이 됨을 알 수 있다. 그림 19에는 앞의 계산상시편의 기초데이터에다 주조싸이클에 따라 계산된 응고시간을 적용하여 얻은 경도값을 실제 과열된 부위에서 경도시험을 하여 얻은 실측치와 비교하여 나타내었다.

그림에서 볼때 냉각수를 흘리지 않았을때보다 흘렸을때 경도값이 보다 높은 경향을 나타내며 이러한 경향은 계산치와 실측치에서 잘 일치 하고

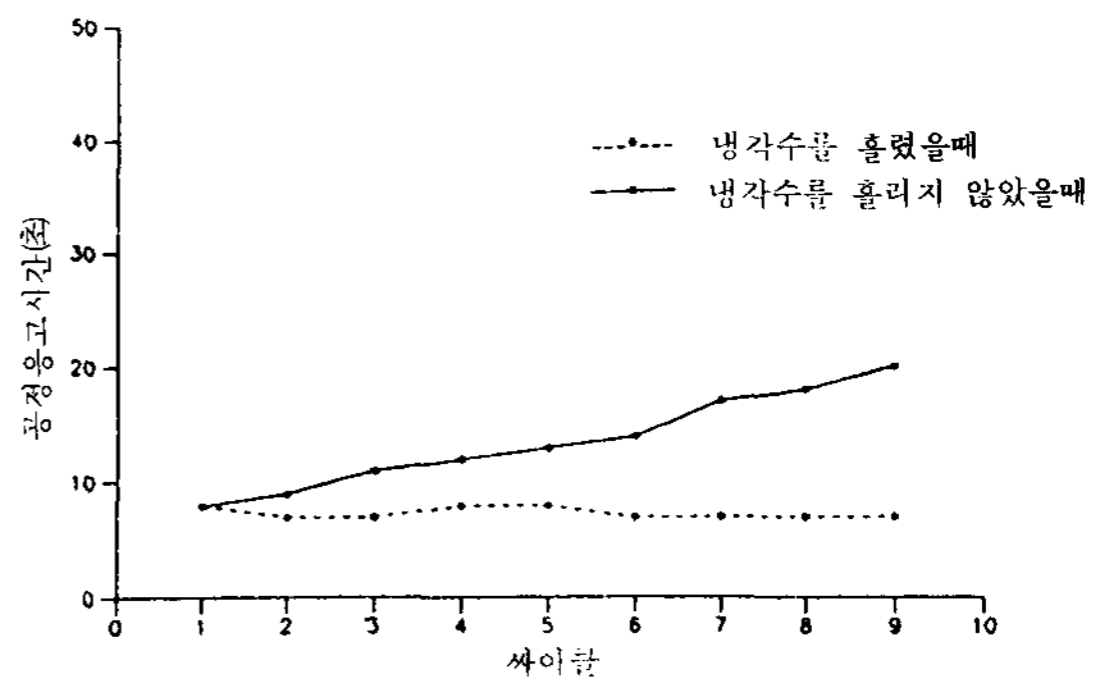


그림 18. 계산된 공정응고시간의 비교

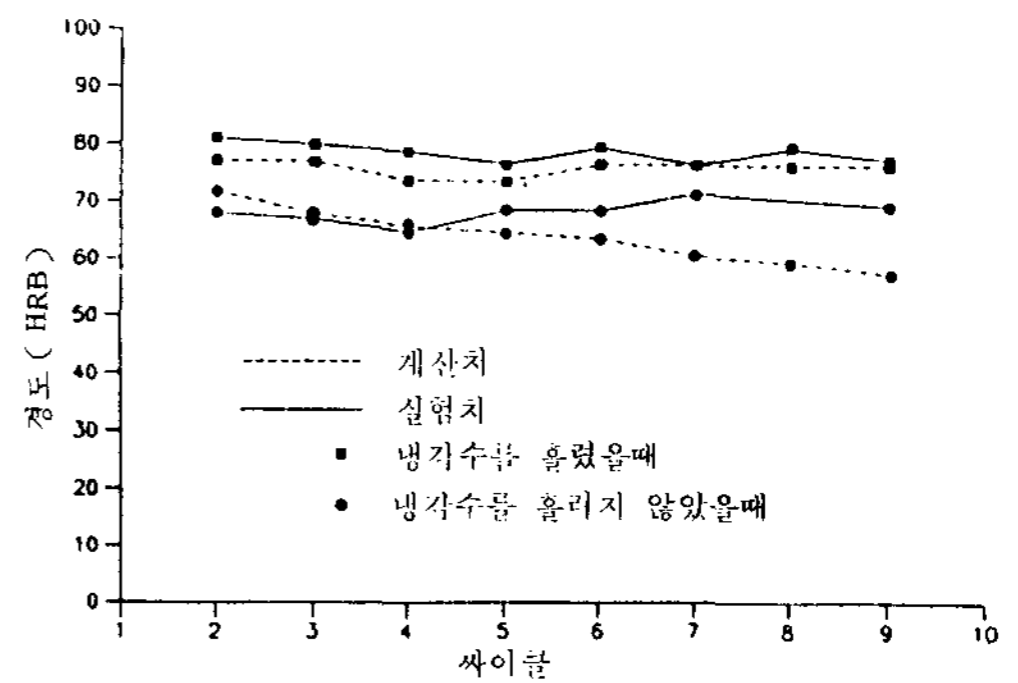


그림 19. 싸이클에 따른 경도변화의 비교

있다. 또한 계산치와 실측치의 각각의 값을 비교 할때 비교적 일치함을 알 수 있다. 그림 20에는 "T"자 주물의 각부위에 따른 경도치를 위치에 따라 실측치와 계산치를 비교하여 나타내었다. 그림 21에는 싸이클에 따른 인장강도에 대하여 비교하였다. 냉각수를 흘리지 않았을 때보다 흘렸을때 인장강도가 현저히 상승되며 이러한 경향은 실측치와 계산치가 비슷하게 나타나고 있다. 그러나 각각의 값을 비교할때는 실측치와 계산치가 다소

차이를 나타내고 있다. 이상에서 나타낸 것과 같이 컴퓨터에 의하여 주물의 각부위의 냉각속도를 계산함으로써 이를 이용하여 주물의 각부위의 기계적성질을 예측할 수 있음을 보여주었다. 특히 금형주조에서 반복사이클에 따른 축열부위의 발생과 이에 따른 조직의 조대화에 의한 기계적 성질의 저하를 컴퓨터에 의한 냉각수 설계에 의하여 과열부위의 냉각속도를 조절하여 방지할 수 있음을 보여주었다.

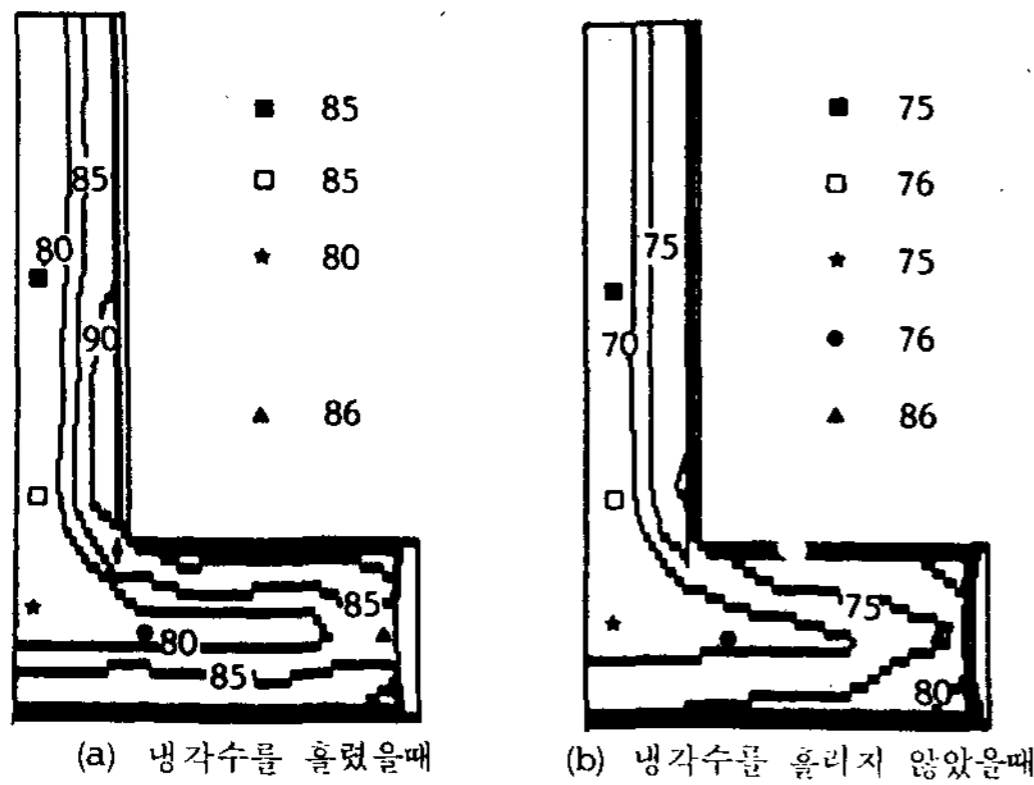


그림 20. "T"자 주물의 위치에 따른 경도의 비교

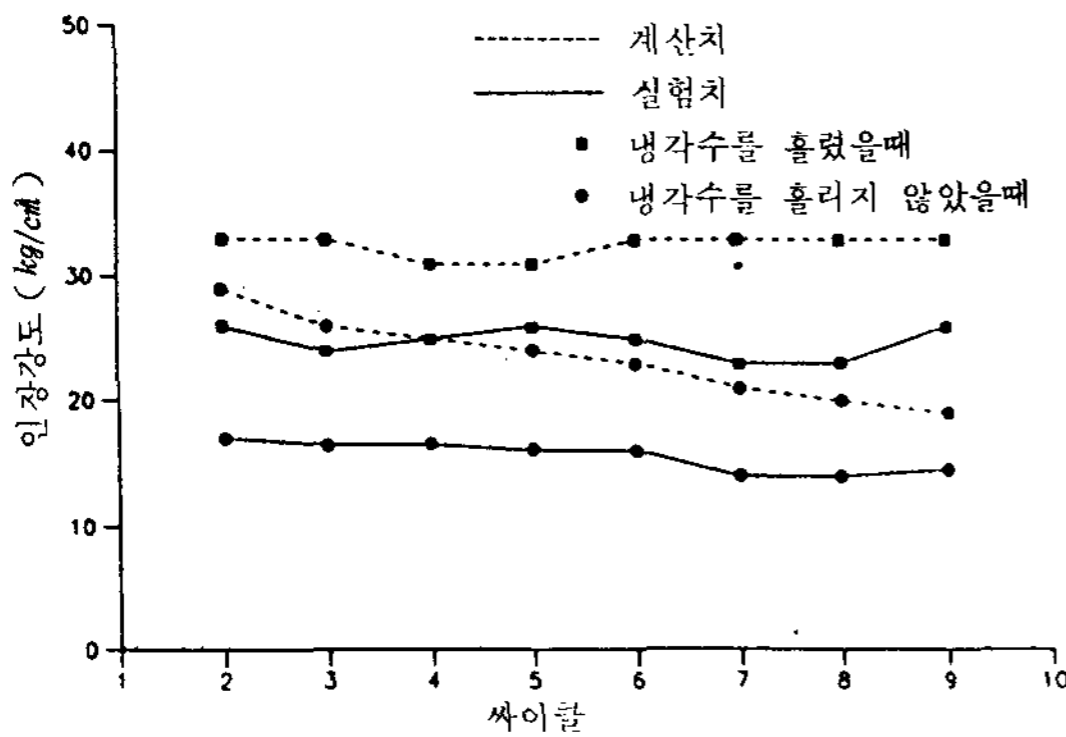


그림 21. 사이클에 따른 인장강도의 비교

### 4. 결 론

지금까지 설명한 차분법에 의한 응고해석 및 냉각수설계 소프트웨어는 T자형 뿐만 아니라 L, X 및 그밖의 여러가지 복잡한 형상 및 주철, 주강, 비철등의 재질에 따라서도 자유롭게 적용될 수 있으며 따라서 현장에서 저압주조, 중력주조, 다이캐스팅등의 실제 주물의 생산에있어서 금형의 평형 온도제어, 수축결함의 방지, 기계적 성질의 제어 등의 목적을 위한 냉각수설계에 폭넓게 활용될 수 있을 것이다.

### 참 고 문 헌

1. 최정길, 김동욱, 홍준표 : Physical Metallurgy of cast iron IV, MRS(1990), p441
2. 최정길, 김동욱, 홍준표 : 제55차 국제주물학회 한국대표논문(1988, 모스크바), 주조 1989 Vo 19, No 1, P 39
3. 최정길, 정운재, 김동욱 : 한국기계연구소 소보 1987
4. 이영철, 김종원, 홍준표 : 주조, 1989, Vol 19, No 1, P 67
5. 최정길, 이영상 : 국책과제 보고서("주조방안 전산화 개발연구(I)-(III)")
6. コンピュータ傳熱・凝固解析入門 : 大中逸雄
7. 素刑材 鐵物學校 "コンピュータによる鑄造技術計算入門" 1982. 大中逸雄