【 기술 노트 20 】

AVR의 내부 SRAM 및 외부 데이터 메모리의 사용 방법

AVR은 프로그램 메모리로 MCU 내부에 플래시 메모리를 가지고 있으며, 사용자가 외부에 프로그램 메모리를 추가로 확장하는 기능이 없다. 그러나, 데이터 메모리는 내부에 SRAM을 가지고 있지만 이것의 용량이 모자라는 경우에는 사용자가 외부에 추가로 데이터 메모리로서 SRAM을 확장할 수 있다.(AVR은 하버드 구조로 되어 있으므로 프로그램 액세스용 버스와 데이터 액세스용 버스를 따로 가지고 있어야 하지만, 이러한 이유로 AVR의 외부에는 데이터 액세스용 버스 1가지만을 가지고 있다.) AVR의 내부 SRAM은 꽤 용량이 큰 편이므로 대부분의 경우 스택이나 웬만한 정도의 메모리 변수는 이것으로 모두 처리하지만, 특별히 큰 용량의 데이터 메모리를 필요로 하는 응용분야에서는 이것만으로는 부족할 수 있기 때문이다. AVR의 내부에는 이밖에도 불휘발성 데이터 메모리로서 소용량의 EEPROM을 내장하고 있다.

AVR-GCC에서는 사용자가 정의한 메모리 변수나 스택을 기본적으로 내부 SRAM에 할당하여 사용하므로 사용자는 이를 별로 의식하지 않고 프로그램을 작성하게 된다. 그러나, 외부에 데이터 메모리를 확장하여 사용하고자 하는 경우에는 사용자가 링커에게 이에 대해 올바르게 지시해야 한다. 그러나, 이와 같이 사용자가 외부 데이터 메모리를 사용하는 방법에 대하여는 잘 알려져 있지 않으므로 여기에서 이를 체계적으로 정리하여 보기로 한다.

◀참고▶ AVR 모델 중에 규모가 작은 대부분의 제품들은 외부 버스 신호선들을 가지고 있지 않으므로 외부에 데이터 메모리를 확장하는 기능이 없다. 그러나, 비교적 규모가 큰 ATmega8515, ATmega161, ATmega162, ATmega64, ATmega128과 같은 모델들은 외부 데이터 메모리 확장 기능을 가지고 있다.

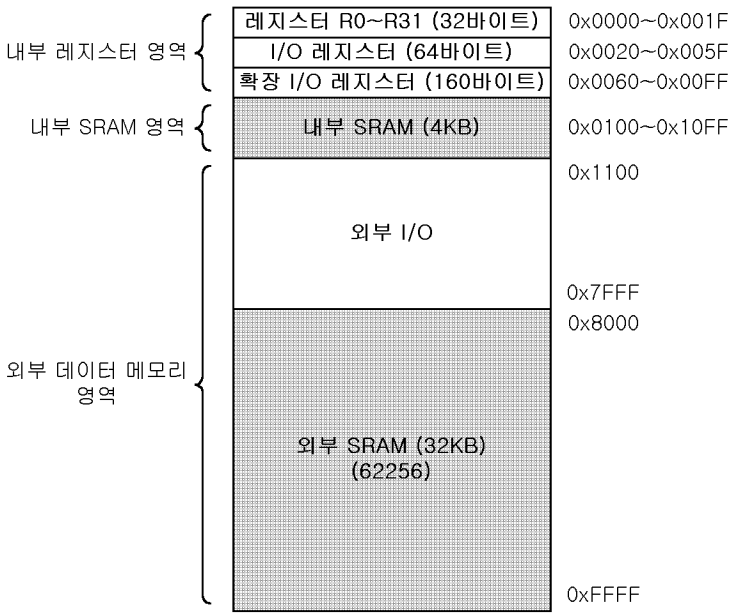
1. ATmega128 및 *OK-128* 키트에서의 내부 SRAM과 외부 데이터 메모리 확장

AVR에서 데이터 메모리는 무조건 0x0000~0xFFFF 번지를 사용하는데, 이중에서 가장 아래쪽은 레지스터 영역이고, 그 위에 내부 SRAM이 위치하며, 다시 그 위는 외부 데이터 메모리 영역이 된다. 그러나, AVR의 모델에 따라 레지스터의 수나 내부 SRAM의 용량이 달라지므로 당연히 모델에 따라 외부에 확장할 수 있는 데이터 메모리의 용량도 달라지게 된다. 그러므로, 여기서는 ATmega128 및 *OK-128* 키트를 중심으로 설명한다. 하지만, 다른 AVR 모델의 경우에도 메모리 번지가 달라지는 것을 제외하면 이와 똑같은 방법으로 적용이 되므로 원리를 이해하고 사용하는데 문제는 없을 것이다.

ATmega128을 사용한 *OK-128* 키트의 데이터 메모리 맵은 <그림 20.1>에 보인 바와 같다. 즉, ATmega128은 0x0100~0x10FF 번지에 4KB의 SRAM을 내장하고 있으므로, 사용자

가 외부 데이터 메모리는 0x1100~0xFFFF 번지에 약 60KB 정도를 확장할 수 있다. 그러나, *OK-128* 키트에서는 0x1100~0x7FFF 번지를 외부 I/O 확장 영역으로 사용하고, 0x8000~0xFFFF 번지에 32KB의 SRAM인 62256을 확장하여 사용한다.

혹자는 내부 SRAM에 이어서 0x1100 번지부터 외부 SRAM을 사용해야만 내부 데이터 메모리와 외부 데이터 메모리가 연속되어 있어서 편리할 것이라고 생각할 수 있지만 이는 그렇지가 않다. AVR-GCC에서는 4KB 내부 SRAM의 처음인 0x0100 번지부터 변수 데이터 영역으로 사용하고 이 영역의 끝 부분을 스택으로 사용하기 때문에 변수 데이터가 많아지더라도 스택 부분을 건너뛰어 외부 메모리를 사용해야 하므로 어차피 메모리 변수는 불연속으로 처리될 수밖에 없다. 스택을 내부 메모리가 아니라 외부 데이터 메모리에 할당하여 사용한다면 이런 문제를 피할 수는 있으나, 스택은 매우 빈번하게 사용하는 데이터 메모리이므로 내부 SRAM을 사용하는 것이 바람직하며 AVR-GCC에서도 이렇게 하도록 강력히 권장하고 있다. 따라서, *OK-128* 키트에서는 어드레스 디코딩이 용이하고 32KB를 손쉽게 접속할 수 있도록 0x8000~0xFFFF 번지를 외부 데이터 메모리로 사용하고, 그 아래의 자투리 영역인 0x1100~0x7FFF 번지를 외부 I/O 확장 영역으로 사용하는 것으로 설계하였다.



<그림 20.1> ATmega128 및 *OK-128* 키트에서의 데이터 메모리 맵

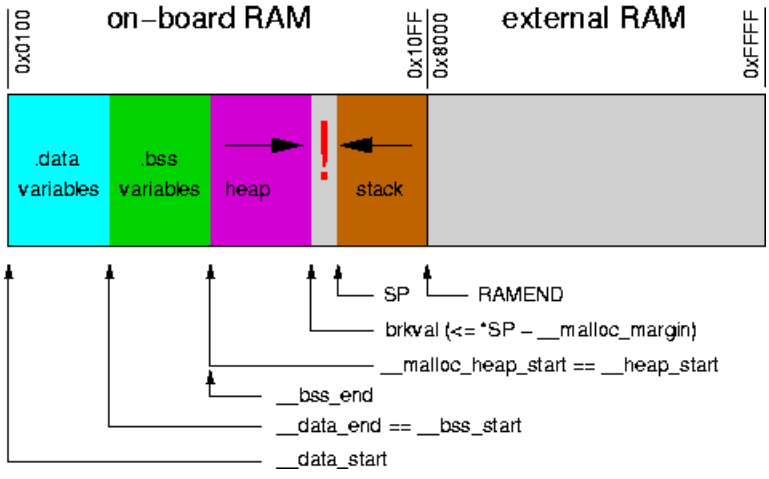
이와 같이 ATmega128의 외부에 데이터 메모리와 I/O를 확장하는 경우에는 반드시 MCUCR 레지스터에서 SRE 비트를 1로 설정하고, MCUCR, XMCRA, XMCRA 레지스터 등을 사용하여 외부 어드레스 영역을 액세스하기 위한 버스 신호들의 동작을 올바르게 초기화해

주어야 한다. *OK-128* 키트에서는 외부 I/O 확장 영역에는 다소 느린 소자가 사용될 수 있는 것을 고려하여 1개의 웨이트 사이클을 부여하고, 외부 데이터 메모리 확장 영역에는 빠른 SRAM을 사용하므로 제로 웨이트로 사용하고 있다.

2. AVR-GCC에서 섹션의 사용

AVR-GCC에서는 C컴파일러가 기본적으로 .text 섹션, .data 섹션, .bss 섹션, .noinit 섹션, .eeprom 섹션 등과 같은 5개의 섹션을 사용한다. 당연히 .text 섹션은 플래시 메모리를 사용하는 실행 코드용의 섹션이고, .eeprom 섹션은 EEPROM을 사용하는 불휘발성 데이터 메모리용의 섹션이며, 나머지 섹션들은 모두 SRAM을 사용하는 데이터용 섹션이다. 이밖에도 SRAM은 malloc() 함수 등을 위한 힙(heap) 메모리로 사용될 수 있다.

AVR-GCC에서 특별히 데이터 메모리의 각 섹션 위치를 지정하지 않으면 기본적으로 내부 SRAM의 낮은 번지에서부터 .data 섹션, .bss 섹션, .noinit 섹션, 힙, 스택의 순서로 배열된다. ATmega128의 경우 이를 그림으로 보이면 <그림 20.2>와 같다.



<그림 20.2> ATmega128에서 기본적인 데이터 메모리 할당

데이터 메모리의 섹션들이 이와 같은 순서로 배열되는 것은 기본적으로 링커 스크립트 파일에서 이렇게 할당되도록 지정되어 있기 때문이다. 즉, WinAvr\avr\lib\ldscripts\avr5.x 파일에는 <파일 1>처럼 지정되어 있는 것을 볼 수 있다.

<파일 1> AVR-GCC의 링커 스크립트 파일 avr5.x

```
/* Default linker script, for normal executables */
OUTPUT_FORMAT("elf32-avr","elf32-avr","elf32-avr")
```

```
OUTPUT ARCH(avr:5)
MEMORY
{
  text   (rx)   : ORIGIN = 0, LENGTH = 128K
  data   (rw!x) : ORIGIN = 0x800060, LENGTH = 0xffa0
  eeprom (rw!x) : ORIGIN = 0x810000, LENGTH = 64K
}
SECTIONS
{
  /* Read-only sections, merged into text segment: */
  .hash          : { *(.hash)          }
  .dynsym        : { *(.dynsym)        }
     .
     .
     .
  /* Internal text space or external memory */
  .text :
  {
    *(.vectors)
      ctors_start = . ;
    *(.ctors)
     __ctors_end = . ;
     .
     .
     .
  }  > text

  .data   : AT (ADDR (.text) + SIZEOF (.text))
  {
     PROVIDE (__data_start = .) ;
    *(.data)
    *(.gnu.linkonce.d*)
    . = ALIGN(2);
      edata = . ;
     PROVIDE (__data_end = .) ;
  }  > data

  .bss  SIZEOF(.data) + ADDR(.data) :
  {
     PROVIDE (__bss_start = .) ;
    *(.bss)
    *(COMMON)
     PROVIDE (__bss_end = .) ;
  }  > data
     data_load_start = LOADADDR(.data);
   __data_load_end = __data_load_start + SIZEOF(.data);

  /* Global data not cleared after reset.  */
  .noinit  SIZEOF(.bss) + ADDR(.bss) :
  {
     PROVIDE (  noinit_start = .) ;
    *(.noinit*)
     PROVIDE (  noinit_end = .) ;
      end = . ;
     PROVIDE (__heap_start = .) ;
  }  > data

  .eeprom  : AT (ADDR (.text) + SIZEOF (.text) + SIZEOF (.data))
  {
    *(.eeprom*)
      eeprom_end = . ;
  }  > eeprom
```

```
        .
        .
        .
}
```

그러나, 사용자가 링커 옵션을 이용하면 이들 섹션의 배열 순서나 각 섹션의 시작번지를 이와 다르게 임의로 지정할 수 있으며, 메모리 변수가 많아져서 내부 SRAM의 용량이 부족할 경우에는 외부에 추가로 확장한 데이터 메모리를 사용할 수도 있다. 단, 이 경우에도 스택은 항상 내부 SRAM의 가장 뒷부분을 사용하도록 그냥 두고 움직이지 않는 것이 좋다. 스택을 외부 SRAM에 할당하면 시스템의 속도가 현저하게 저하되며, 일부 모델에 따라서는 시스템의 동작에 문제를 일으킬 수도 있다.

스택의 용량은 충분히 확보하는 것이 좋으나 내부 SRAM의 용량은 일정하게 한정되어 있으므로 이와 같이 스택의 용량을 크게 확보할수록 사용자 변수용 데이터 메모리의 공간은 줄어들게 되므로 외부에 SRAM을 확장해야 하는 필요성은 증대된다.

데이터 메모리에서 이와 같이 섹션들을 할당할 때 항상 주의할 사항은 힙과 스택이 용량이 커져서 서로 충돌하지 않도록 하는 것이다. 이를 방지하기 위하여 힙과 스택 사이에는 32바이트 이상의 공간(margin)을 두는 것이 바람직하다. 힙과 스택이 충돌할 가능성이 있는 경우에는 힙을 충분한 용량을 가지는 외부 확장 메모리에 옮겨 할당하는 것이 좋다.

(1) .text 섹션

.text 섹션은 프로그램의 실행 코드로 이루어진 섹션으로서, 여기에는 사용자가 작성한 프로그램의 실행 코드는 물론이고 서두 부분에 .initN 섹션과 말미에 .finitN 섹션을 함께 포함하고 있다.

.initN 섹션은 스타트업 코드(startup code)를 정의하는 부분으로서 리셋 후에 main() 함수를 실행하기 전의 사용자 프로그램 준비 동작을 수행한다. 이것은 0~9의 10단계 동작으로 이루어지는데, 주요 기능을 보면 리셋 후에 특정한 번지로 점프하고, 스택을 초기화하며, .data 섹션을 플래시 메모리에서 SRAM으로 복사하여 초기화한 후에 main() 함수로 점프하는 것이다.

.finiN 섹션은 main() 함수에서 리턴한 후에 실행될 탈출 코드(exit code)를 정의하기 위한 부분으로서 사용자 프로그램 종료 후의 동작을 수행한다. 이것은 9~0의 10단계 동작으로 이루어지는데, 주요 기능을 보면 사용자 프로그램을 종료하고 exit() 함수를 실행한 후에 아무 기능도 수행하지 않는 무한 루프로 들어가는 것이다. MCU에서는 이와 같이 하지 않으면 프로그램이 미로에 빠져서 예측할 수 없는 결과를 초래할 수 있기 때문이다.

.text 섹션은 디폴트로 플래시 메모리의 0x0000 번지에서 시작하지만, 사용자는 -Wl,

-Ttext=*address* 옵션을 사용하여 링커에게 .text 섹션의 시작번지를 임의로 지정할 수 있다.

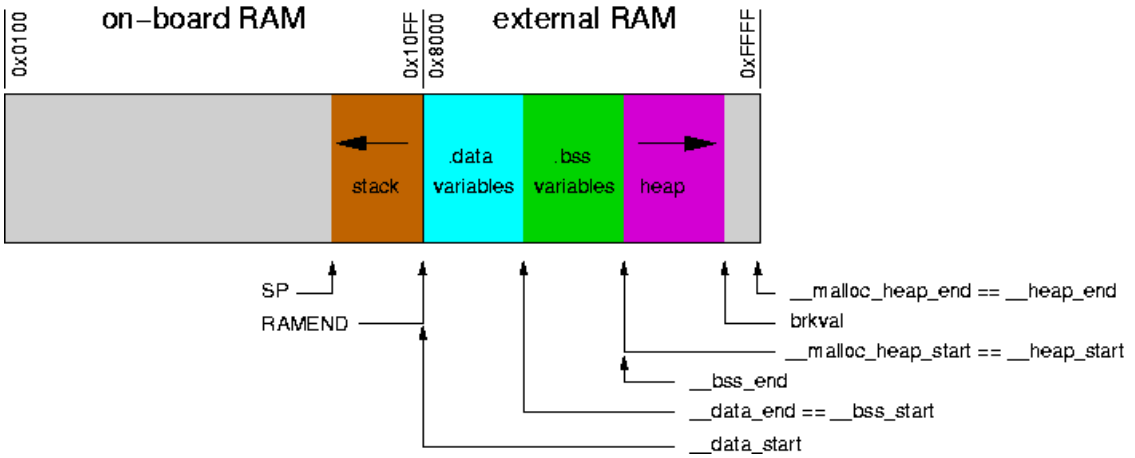
플래시 메모리에 있는 .text 섹션의 맨 뒤에는 이밖에도 .data 섹션을 초기화하기 위한 내용과 .eeprom을 초기화하기 위한 내용을 추가로 가지고 있다. 따라서, 플래시 메모리를 차지하는 용량을 계산할 때는 .data 섹션을 초기회하기 위한 데이터 공간을 고려하여 .text 섹션에 .data 섹션의 크기(와 .eeprom 섹션의 크기)를 합해야 하며, SRAM 용량을 계산할 때는 .data 섹션과 .bss 섹션을 합해야 한다.

(2) .data 섹션

.data 섹션은 초기값이 정의된 전역변수나 함수의 파라미터처럼 정적인 데이터(static data)를 포함하는 섹션으로서 이는 반드시 SRAM 영역에 할당된다.

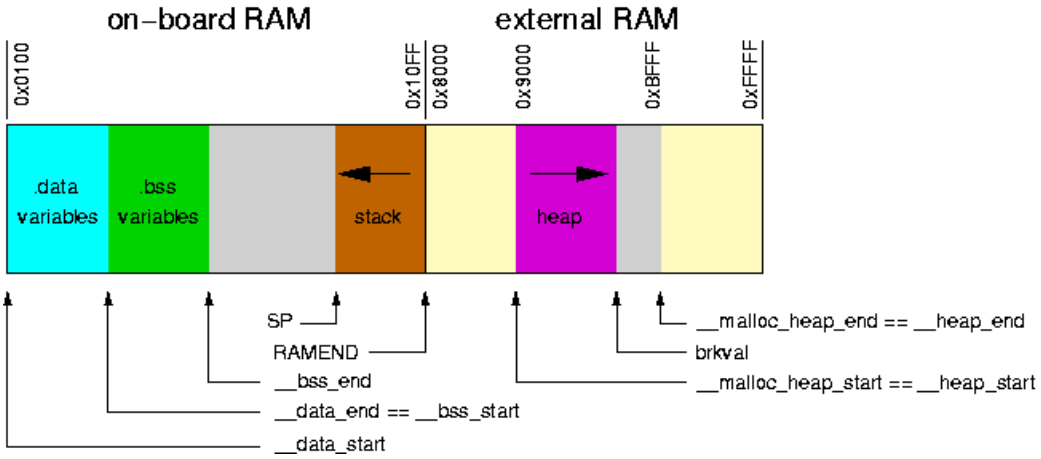
.data 섹션은 기본적으로는 내부 SRAM의 첫 번째 번지부터 시작하도록 할당되지만, 사용자는 -Wl, -Tdata=*address* 옵션을 사용하여 링커에게 .data 섹션의 시작번지를 임의로 지정할 수 있다. 그런데, 여기서 *address*를 지정할 때는 실제의 SRAM 물리번지에 0x800000을 더하여 나타내야 한다. 즉, .data 섹션을 시작할 실제의 SRAM 번지가 0x8000이라면 여기에 SRAM을 나타내는 옵셋값 0x800000을 더하여 -Wl, -Tdata=0x808000으로 옵션을 지정해야 한다는 것이다.

.data 섹션의 뒤에는 기본적으로 .bss 섹션이나 .noinit 섹션이 이어지는데, .data 섹션의 시작번지를 다른 값으로 지정하면 이들 .bss 섹션이나 .noinit 섹션들도 자동적으로 따라서 움직인다. 그러나, 스택은 이와 함께 움직이지 않는다. 예를 들어 ATmega128의 경우 -Wl, -Tdata=0x808000, --defsym=__heap_end=0x80ffff로 옵션을 지정하였다면 각 섹션의 할당 위치는 <그림 20.3>과 같다.



<그림 20.3> ATmega128에서 .data 섹션을 0x8000 번지에 할당한 경우의 메모리 맵

그러나, 이와 같이 스택을 제외한 모든 데이터 영역을 외부 SRAM으로 옮겨서 할당하지 않고 일부 섹션만을 외부 메모리에 할당할 수도 있다. 예를 들어 ATmega128에서 힙만을 0x9000~0xBFFF 번지에 할당하겠다면 -Wl, --defsym=__heap_start=0x809000, --heap_end=0x80bfff로 옵션을 지정해야 하며, 이때 각 섹션의 할당 위치는 <그림 20.4>와 같다.



<그림 20.4> ATmega128에서 힙을 0x9000~0xBFFF 번지에 할당한 경우의 메모리 맵

◀참고▶ .data, .bss, .noinit와 같은 휘발성 데이터 섹션에서는 이를 의미하는 옵셋값으로 0x800000을 사용하는데 비하여 .eeprom 섹션에서는 이를 의미하는 옵셋값으로 0x810000을 사용하도록 되어 있다.

◀참고▶ AVR-GCC에서는 이와 같이 링커 옵션을 사용하여 데이터 섹션을 외부 데이터 메모리에 할당하도록 지정한다고 하여 이들 영역이 외부 메모리에 정상적으로 할당되어 프로그램이 올바르게 동작하는 것이 아니라는데 유의해야 한다. 실제로 AVR-GCC에서 테스트하여 보면 .data 섹션을 외부 데이터 메모리로 옮길 경우 .data 섹션과 그 뒤에 이어지는 나머지 섹션들이 모두 외부 메모리의 지정된 번지에 할당되기는 하지만 프로그램은 올바르게 동작하지 않는 것을 확인할 수 있다.

AVR-GCC에서 .data 섹션이 이와 같이 정상적으로 처리되는 않는 것은 이것의 초기화 과정 때문이다. 즉, .text 섹션 내부에 있는 .initN 섹션은 .text 섹션의 마지막 부분에 저장되어 있던 초기화 데이터를 .data 섹션으로 복사하는 작업을 수행하는데 이때는 아직 ATmega128이 외부 버스를 사용하도록 초기화가 되어 있지 않은 상태이기 때문에 CPU가 외부 메모리로 지정된 .data 섹션을 액세스할 수가 없는 것이다. 외부 메모리를 액세스할 수 있도록 ATmega128의 MCUCR, XMCRA, XMCRB 레지스터를 초기화하는 것은 나중에 사용자 프로그램에 의해서 처리된다. 따라서, 이 .data 섹션 초기화 프로그램이 동작하기 전에 이들 레지스터를 먼저 초기화하여 주지 않으면 .data 섹션에는 초기화 데이터가 복사되지 않으며, 따라서 이 데이터를 사용하는 프로그램은 올바르게 동작하지 않는다. 이를 해결하는 방법에 대하여는 나중에 제6장에서 설명하기로 한다.

그러나, .bss 섹션이나 .noinit 섹션은 이와 같이 프로그램에 의하여 초기화되는 과정이 필요 없기 때문에 이를 외부 데이터 메모리에 할당하여도 아무 문제없이 프로그램이 잘 동작한다. 다시 말하면 특별한 경우가 아니라면 프로그램을 작성할 때 .data 섹션과 스택은 내부 SRAM의 디폴트 위치에서 그냥 사용하고, 외부 데이터 메모리로 옮겨서 사용하는 것은 .bss 섹션이나 .noinit 섹션 및 힙에만 적용하는 것이 쉽고 바람직하다는 것이다.

(3) .bss 섹션

.bss 섹션은 초기값이 정의되지 않은 전역 변수(global variable)나 정적 변수(static variable)를 포함하는 섹션으로서 이는 반드시 SRAM 영역에 할당된다.

.bss 섹션은 기본적으로는 내부 SRAM에서 .data 섹션의 뒤에 이어서 할당되지만, 사용자는 -Wl, -Tbss=*address* 옵션을 사용하여 링커에게 .bss 섹션의 시작번지를 임의로 지정할 수 있다. 그런데, 여기서 *address*를 지정할 때는 실제의 SRAM 물리번지에 0x800000을 더하여 나타내야 한다. 즉, .bss 섹션을 시작할 실제의 SRAM 번지가 0x8000이라면 여기에 SRAM을 나타내는 옵셋 0x800000을 더하여 -Wl, -Tbss=0x808000으로 옵션을 지정해야 한다는 것이다.

그러나, 이와 같이 사용자가 .bss 섹션을 외부 SRAM으로 옮겨 할당하면 그 뒤에 이어지는 나머지 섹션들도 모두 자동으로 따라서 움직이는데 유의해야 한다. 마찬가지로 .bss 섹션은 디폴트로 항상 .data 섹션의 뒤에 이어지므로 .bss 섹션의 시작번지를 따로 지정하지 않고 .data 섹션의 시작번지를 다른 값으로 지정하면 이에 따라 자동적으로 .bss 섹션의 위치도 함께 움직인다.

(4) .noinit 섹션

.noinit 섹션은 .bss 섹션의 일부분으로서 역시 초기값이 정의되지 않은 전역 변수나 정적 변수를 포함하는 섹션으로서 이는 반드시 SRAM 영역에 할당된다.

.noinit 섹션에는 사용자가 프로그램에서 다음과 같이 변수를 이 섹션에 할당한 것들만 포함된다.

```
unsigned char data1 __attribute__ ((section (".noinit")));
```

.noinit 섹션은 기본적으로는 내부 SRAM에서 .bss 섹션의 뒤에 이어서 할당되지만, 사용자는 -Wl, --section-start=.noinit=*address* 옵션을 사용하여 링커에게 .noinit 섹션의 시작번지를 임의로 지정할 수 있다. 그런데, 여기서 *address*를 지정할 때는 실제의 SRAM 물리번지에 0x800000을 더하여 나타내야 한다. 즉, .noinit 섹션을 시작할 실제의 SRAM 번지가 0x8000이라면 여기에 SRAM을 나타내는 옵셋 0x800000을 더하여 -Wl, --section-start=.noinit=0x808000으로 옵션을 지정해야 한다는 것이다.

.bss 섹션의 변수들은 프로그램이 스타트업할 때 0으로 값이 초기화되지만, .noinit 섹션에 할당된 변수들은 0으로 초기화되지 않는다.

이제 이상에서 설명한 섹션들이 실제로 프로그램에서 그와 같이 사용되는지를 예제를 통하여 확인해 보기로 한다. 여러 가지의 섹션들이 사용되는 예를 골고루 확인할 수 있도록

작성된 C언어 프로그램을 <파일 2>에 보였다.

<파일 2> *OK-128* 키트용 예제 프로그램 test1.c의 소스

```
/* ============================================================================ */
/*                    Internal & External SRAM Usage 1                          */
/* ============================================================================ */
/*                         Designed and programmed by Duck-Yong Yoon in 2004.   */

#include <avr/io.h>
#include "c:\AvrEdit\Ok128c\Ok128.h"

unsigned char array1[16] = {0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15}; // .data section
unsigned char array2[16];                                           // .bss section
unsigned char array3[16] __attribute__ ((section (".noinit")));     // .noinit section

int main(void)
{ unsigned char i;

  MCU initialize();                          // initialize MCU
  Delay ms(50);                              // wait for system stabilization
  LCD_initialize();                          // initialize text LCD module

  LCD string(0x80,"array2[00] = 00 ");       // display screen
  LCD_string(0xC0,"array3[00] = 00 ");

  while(1)
    { for(i=0; i <= 15; i++)
        { array2[i] = array1[i];             // display array2
          LCD command(0x87);
          LCD data(i/10 + '0');
          LCD data(i%10 + '0');
          LCD command(0x8D);
          LCD data(array2[i]/10 + '0');
          LCD data(array2[i]%10 + '0');
          array3[i] = array1[i] * 2;         // display array3
          LCD command(0xC7);
          LCD data(i/10 + '0');
          LCD data(i%10 + '0');
          LCD command(0xCD);
          LCD data(array3[i]/10 + '0');
          LCD data(array3[i]%10 + '0');
          Beep();
          Delay_ms(3000);
        }
    }
}
```

이 소스 프로그램을 AvrEdit 3.6에서 모든 데이터 섹션이 내부 SRAM에 할당되도록 디폴트 조건으로 컴파일한 경우의 메모리 맵 파일을 보면 <파일 3>과 같다. 컴파일되고 링크된 후의 메모리 사용 내역은 항상 메모리 맵 파일을 보면 자세하게 알 수 있다.

<파일 3> 모든 데이터 섹션들을 내부 SRAM에 할당한 경우의 메모리 맵 파일 test1.map

```
      .
      .
      .
Memory Configuration

Name             Origin             Length             Attributes
text             0x00000000         0x00020000         xr
data             0x00800060         0x0000ffa0         rw !x
eeprom           0x00810000         0x00010000         rw !x
*default*        0x00000000         0xffffffff

Linker script and memory map

Address of section .data set to 0x800100
LOAD C:\AVREDIT\WINAVR\BIN\..\lib\gcc-lib\avr\3.3.1\..\..\..\..\avr\lib\avr5\crtm128.o
LOAD test1.o
LOAD C:\AVREDIT\WINAVR\BIN\..\lib\gcc-lib\avr\3.3.1\..\..\..\..\avr\lib\avr5\libm.a
LOAD C:\AVREDIT\WINAVR\BIN\..\lib\gcc-lib\avr\3.3.1\avr5\libgcc.a
LOAD C:\AVREDIT\WINAVR\BIN\..\lib\gcc-lib\avr\3.3.1\..\..\..\..\avr\lib\avr5\libc.a
LOAD C:\AVREDIT\WINAVR\BIN\..\lib\gcc-lib\avr\3.3.1\avr5\libgcc.a
      .
      .
      .

.text            0x00000000      0x33c
      .
      .
      .
 .text           0x000000ca      0x25a test1.o
                 0x000000ca                MCU initialize
                 0x000001e2                Key input
                 0x00000190                LCD string
                 0x000001b2                LCD initialize
                 0x0000014a                Beep
                 0x0000010c                Delay_ms
                 0x0000022a                main
                 0x00000174                LCD data
                 0x000000f2                Delay_us
                 0x00000158                LCD command
                 0x00000324                . = ALIGN (0x2)
      .
      .
      .
                 0x0000033c                _etext = .

.data            0x00800100       0x32 load address 0x0000033c
                 0x00800100                PROVIDE (__data_start, .)
 *(.data)
 .data           0x00800100       0x32 test1.o
                 0x00800100                array1
 *(.gnu.linkonce.d*)
                 0x00800132                . = ALIGN (0x2)
                 0x00800132                 _edata = .
                 0x00800132                PROVIDE (__data_end, .)

.bss             0x00800132       0x10
                 0x00800132                PROVIDE (__bss_start, .)
 *(.bss)
 *(COMMON)
```

```
 COMMON          0x00800132        0x10 test1.o
                                    0x0 (size before relaxing)
                 0x00800132                arrav2
                 0x00800142                PROVIDE (  bss end, .)
                 0x0000033c                  data load start = LOADADDR (.data)
                 0x0000036e                __data_load_end = (__data_load_start + SIZEOF (.data))

.noinit          0x00800142        0x10
                 0x00800142                PROVIDE (__noinit_start, .)
 *(.noinit*)
 .noinit         0x00800142        0x10 test1.o
                 0x00800142                arrav3
                 0x00800152                PROVIDE ( _noinit_end, .)
                 0x00800152                 end = .
                 0x00800152                PROVIDE (__heap_start, .)

.eeprom          0x00810000         0x0 load address 0x0000036e
 *(.eeprom*)
                 0x00810000                __eeprom_end = .
      .
      .
      .

Cross Reference Table

Symbol                                            File
Beep                                              test1.o
Delay_ms                                          test1.o
Delay_us                                          test1.o
Key_input                                         test1.o
LCD_command                                       test1.o
LCD_data                                          test1.o
LCD_initialize                                    test1.o
LCD_string                                        test1.o
MCU_initialize                                    test1.o
      .
      .
      .
```

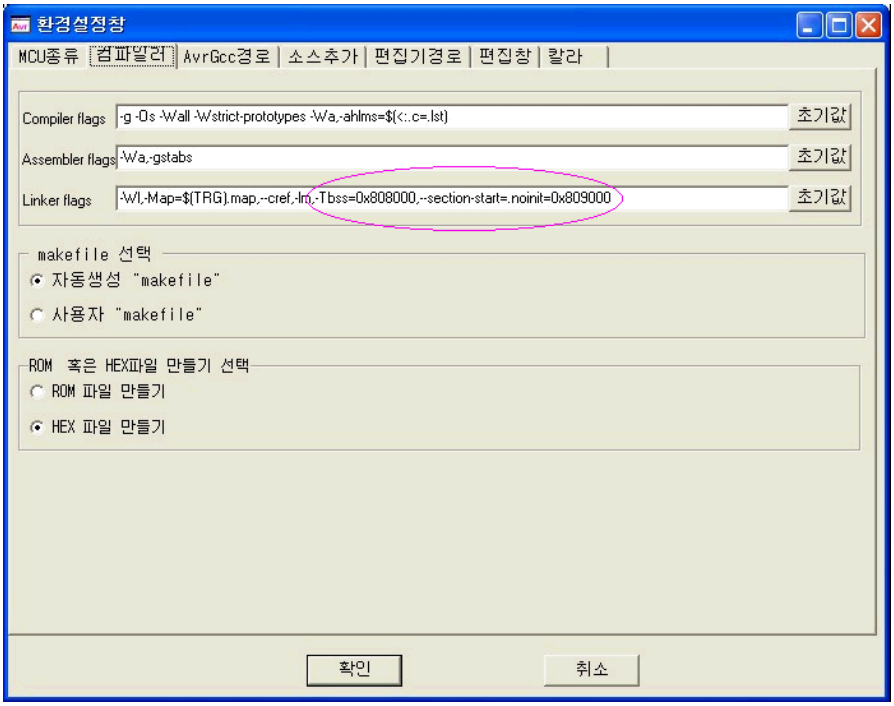
그러나, 이 소스 프로그램을 AvrEdit 3.6에서 컴파일할 때 <그림 20.5>에 보인 바와 같이 링커 옵션을 -Wl, -Tbss=0x808000, --section-start=.noinit=0x809000으로 설정하여 .bss 섹션과 .noinit 섹션이 외부의 확장 SRAM에 할당되도록 처리하였을 경우의 메모리 맵 파일을 보면 <파일 4>와 같다.

<파일 4> .bss와 .noinit 섹션을 외부 SRAM에 할당한 경우의 메모리 맵 파일 test1.map

```
      .
      .
      .
Memory Configuration

Name             Origin             Length             Attributes
text             0x00000000         0x00020000         xr
```

```
data             0x00800060         0x0000ffa0         rw !x
eeprom           0x00810000         0x00010000         rw !x
*default*        0x00000000         0xffffffff

Linker script and memory map

Address of section .data set to 0x800100
LOAD C:\AVREDIT\WINAVR\BIN\..\lib\gcc-lib\avr\3.3.1\..\..\..\..\avr\lib\avr5\crtm128.o
LOAD test1.o
LOAD C:\AVREDIT\WINAVR\BIN\..\lib\gcc-lib\avr\3.3.1\..\..\..\..\avr\lib\avr5\libm.a
Address of section .bss set to 0x808000
Address of section .noinit set to 0x809000
LOAD C:\AVREDIT\WINAVR\BIN\..\lib\gcc-lib\avr\3.3.1\avr5\libgcc.a
LOAD C:\AVREDIT\WINAVR\BIN\..\lib\gcc-lib\avr\3.3.1\..\..\..\..\avr\lib\avr5\libc.a
LOAD C:\AVREDIT\WINAVR\BIN\..\lib\gcc-lib\avr\3.3.1\avr5\libgcc.a
      .
      .
      .
.text            0x00000000      0x33c
      .
      .
      .
 .text           0x000000ca      0x25a test1.o
                 0x000000ca                MCU_initialize
                 0x000001e2                Key_input
                 0x00000190                LCD_string
                 0x000001b2                LCD_initialize
                 0x0000014a                Beep
                 0x0000010c                Delay_ms
                 0x0000022a                main
                 0x00000174                LCD_data
                 0x000000f2                Delay_us
                 0x00000158                LCD_command
                 0x00000324                . = ALIGN (0x2)
      .
      .
      .
                 0x0000033c                _etext = .

.data            0x00800100       0x32 load address 0x0000033c
                 0x00800100                PROVIDE (__data_start, .)
 *(.data)
 .data           0x00800100       0x32 test1.o
                 0x00800100                array1
 *(.gnu.linkonce.d*)
                 0x00800132                . = ALIGN (0x2)
                 0x00800132                 _edata = .
                 0x00800132                PROVIDE (__data_end, .)

.bss             0x00808000       0x10
                 0x00808000                PROVIDE (__bss_start, .)
 *(.bss)
 *(COMMON)
 COMMON          0x00808000       0x10 test1.o
                                   0x0 (size before relaxing)
                 0x00808000                array2
                 0x00808010                PROVIDE (__bss_end, .)
                 0x0000033c                __data_load_start = LOADADDR (.data)
                 0x0000036e                __data_load_end = (__data_load_start + SIZEOF (.data))

.noinit          0x00809010       0x10
                 0x00809010                PROVIDE (__noinit_start, .)
```

```
 *(.noinit*)
 .noinit        0x00809010       0x10 test1.o
                0x00809010                arrav3
                0x00809020                PROVIDE (__noinit_end, .)
                0x00809020                 end = .
                0x00809020                PROVIDE (__heap_start, .)

.eeprom         0x00810000        0x0 load address 0x0000036e
 *(.eeprom*)
                0x00810000                __eeprom_end = .
      .
      .
      .

Cross Reference Table

Symbol                                          File
Beep                                            test1.o
Delay_ms                                        test1.o
Delay_us                                        test1.o
Key_input                                       test1.o
LCD_command                                     test1.o
LCD_data                                        test1.o
LCD_initialize                                  test1.o
LCD_string                                      test1.o
MCU_initialize                                  test1.o
      .
      .
      .
```



<그림 20.5> AvrEdit 3.6에서 링커 옵션을 설정하는 화면

3. 소스 프로그램에서 포인터를 이용하여 외부 데이터 메모리를 사용하는 방법

외부 데이터 메모리에 변수를 할당하고 이를 액세스하는 가장 쉬운 방법은 <파일 5>의 예제에서 보인 바와 같이 포인터를 사용하는 것이다. 즉, 포인터를 사용하여 액세스하고자 하는 외부 메모리의 번지를

```
#define   ext_data1   (*(volatile unsigned char *)0x8000)
```

과 같이 정의하고, 이 번지 ext_data1을 마치 메모리 변수인 것처럼 사용하는 방법이다. 이 때 링커에는 어떤 옵션도 따로 지정하여 주는 것이 없다.

이 방법은 외부 데이터 메모리 번지에도 물론 사용할 수 있지만, 외부에 추가로 확장한 I/O 번지에 더 많이 사용한다. <파일 5>에서도 I/O 번지로 사용한 예를 보였다.

<파일 5> *OK-128* 키트용 예제 프로그램 test2.c의 소스

```
/* ============================================================================ */
/*                    Internal & External SRAM Usage 2                          */
/* ============================================================================ */
/*                        Designed and programmed by Duck-Yong Yoon in 2004.    */

#include <avr/io.h>
#include "c:\AvrEdit\Ok128c\Ok128.h"

#define ext_data1       (*(volatile unsigned char *)0x8000) // external memory
#define ext_data2       (*(volatile unsigned int *)0x9000)

#define LED7_data       (*(volatile unsigned char *)0x2000) // external I/O
#define LED7_digit      (*(volatile unsigned char *)0x2200)

void LCD_2hex(unsigned char number)     /* display 2-digit hex number */
{ unsigned char i;

  i = (number >> 4) & 0x0F;                     // 16^1
  if(i <= 9) LCD_data(i + '0');
  else       LCD_data(i - 10 + 'A');

  i = number & 0x0F;                            // 16^0
  if(i <= 9) LCD_data(i + '0');
  else       LCD_data(i - 10 + 'A');
}

void LCD_4hex(unsigned int number)      /* display 4-digit hex number */
{ unsigned int i;

  i = number >> 12;                             // 16^3
  if(i <= 9) LCD_data(i + '0');
  else       LCD_data(i - 10 + 'A');

  i = (number >> 8) & 0x000F;                   // 16^2
  if(i <= 9) LCD_data(i + '0');
  else       LCD_data(i - 10 + 'A');
```

```
    i = (number >> 4) & 0x000F;                    // 16^1
    if(i <= 9) LCD_data(i + '0');
    else       LCD_data(i - 10 + 'A');

    i = number & 0x000F;                           // 16^0
    if(i <= 9) LCD_data(i + '0');
    else       LCD_data(i - 10 + 'A');
}

int main(void)
{ unsigned char i, x;
  unsigned int j, y;

  MCU_initialize();                                // initialize MCU
  Delay_ms(50);                                    // wait for system stabilization
  LCD_initialize();                                // initialize text LCD module

  LCD_string(0x80," 0x8000 = 0x00  ");             // display screen
  LCD_string(0xC0," 0x9000 = 0x0000");

  while(1)
    { for(i=0,j=0; j<=0xFF00; i++,j+=0x10)
        { LCD_command(0x8C);                       // display 8-bit i
          ext_data1 = i;
          x = ext_data1;
          LCD_2hex(x);
          LCD_command(0xCC);                       // display 16-bit j
          ext_data2 = j;
          y = ext_data2;
          LCD_4hex(y);
          Delay_ms(1000);
          LED7_data = 0xF2;                        // display 7-segment LED
          LED7_digit = 0xFF;
          Delay_ms(500);
          LED7_digit = 0x00;
        }
      Beep();
      Delay_ms(3000);
    }
}
```

그러나, 위의 <파일 5>에서 사용한 방법은 #define으로 하나의 메모리 번지만을 정의하여 사용할 수 있으므로 많은 외부 메모리 번지를 사용하려는 경우에는 이들 번지를 #define으로 하나씩 일일이 정의해야 하기 때문에 상당히 번거롭게 된다. 이러한 이유 때문에 이 방법은 외부 I/O 번지에 더 많이 사용되는 것이다.

이를 해결하는 방법으로는 #define으로 하나의 포인터를 정의하여 두고, 이 기준 포인터에 오프셋 값을 더하여 메모리 번지를 지정하며 필요할 경우에는 이 오프셋 값을 변경하여 다시 기준 포인터에 더하는 것을 생각할 수 있다. 이를 <파일 6>에 예제로 보였다.

<파일 6> *OK-128* 키트용 예제 프로그램 test3.c의 소스

```
/* ========================================================================== */
/*                    Internal & External SRAM Usage 3                        */
/* ========================================================================== */
/*                        Designed and programmed by Duck-Yong Yoon in 2004.  */

#include <avr/io.h>
#include "c:\AvrEdit\Ok128c\Ok128.h"

#define ext_data1       ((volatile unsigned char *)0x8000) // external memory
#define ext_data2       ((volatile unsigned int *)0x9000)

void LCD_2hex(unsigned char number)     /* display 2-digit hex number */
{ unsigned char i;

   (이 함수는 test2.c에서와 동일함.)

}

void LCD_4hex(unsigned int number)      /* display 4-digit hex number */
{ unsigned int i;

   (이 함수는 test2.c에서와 동일함.)

}

int main(void)
{ unsigned char i, x;
  unsigned int j, y, offset;

  MCU_initialize();                             // initialize MCU
  Delay_ms(50);                                 // wait for system stabilization
  LCD_initialize();                             // initialize text LCD module

  LCD_string(0x80," 0x8000 = 0x00  ");          // display screen
  LCD_string(0xC0," 0x9000 = 0x0000");

  while(1)
    { for(i=0,j=0,offset=0; i<=0xFF00; i++,j+=0x10,offset++)
        { LCD_command(0x83);                    // display 8-bit i
          LCD_4hex(0x8000 + offset);
          LCD_command(0x8C);
          *(ext_data1 + offset) = i;
          x = *(ext_data1 + offset);
          LCD_2hex(x);
          LCD_command(0xC3);                    // display 16-bit j
          LCD_4hex(0x9000 + offset*2);
          LCD_command(0xCC);
          *(ext_data2 + offset*2) = j;
          y = *(ext_data2 + offset*2);
          LCD_4hex(y);
          Delay_ms(1000);
        }
      Beep();
      Delay_ms(3000);
    }
}
```

그러나, 이 방법은 아래 <파일 7>에 보인 바와 같이 좀더 간편하게 사용할 수도 있으며, 이를 다시 포인터와 배열을 결합시켜 <파일 8>처럼 사용할 수도 있다.

<파일 7> *OK-128* 키트용 예제 프로그램 test4.c의 소스

```
/* ========================================================================== */
/*                    Internal & External SRAM Usage 4                        */
/* ========================================================================== */
/*                         Designed and programmed by Duck-Yong Yoon in 2004.  */

#include <avr/io.h>
#include "c:\AvrEdit\Ok128c\Ok128.h"

#define read_XRAM(address)         (*(volatile unsigned char *)(0x8000+address))
#define write_XRAM(address,value)  ((*(volatile unsigned char *)(0x8000+address))=value)

void LCD_2hex(unsigned char number)     /* display 2-digit hex number */
{ unsigned char i;

   (이 함수는 test2.c에서와 동일함.)

}

void LCD_4hex(unsigned int number)      /* display 4-digit hex number */
{ unsigned int i;

   (이 함수는 test2.c에서와 동일함.)

}

int main(void)
{ unsigned char i, x, offset;

  MCU_initialize();                              // initialize MCU
  Delay_ms(50);                                  // wait for system stabilization
  LCD_initialize();                              // initialize text LCD module

  LCD_string(0x80," 0x8000 = 0x00  ");           // display screen
  LCD_string(0xC0,"                ");

  while(1)
    { for(i=0,offset=0; i<=0xF0; i++,offset++)
        { LCD_command(0x83);
          LCD_4hex(0x8000 + offset);
          LCD_command(0x8C);
          write_XRAM(offset,i);                  // write external memory
          x = read_XRAM(offset);                 // read external memmory
          LCD_2hex(x);
          Delay_ms(1000);
        }
      Beep();
      Delay_ms(3000);
    }
}
```

<파일 8> *OK-128* 키트용 예제 프로그램 test5.c의 소스

```
/* ========================================================================== */
/*                    Internal & External SRAM Usage 5                        */
/* ========================================================================== */
/*                          Designed and programmed by Duck-Yong Yoon in 2004.  */

#include <avr/io.h>
#include "c:\AvrEdit\Ok128c\Ok128.h"

#define read_XRAM(address)         (((volatile unsigned char *)0x8000)[address])
#define write_XRAM(address,value)  (((volatile unsigned char *)0x8000)[address]=value)

   (이하는 test4.c와 동일함.)
```

이상에서 설명한 바와 같이 포인터를 사용하여 외부 데이터 메모리를 액세스하는 방법은 모든 것을 소스 프로그램에서 처리하고 링커에는 어떤 특별한 옵션도 주지 않는다. 이는 다시 말하면 소스에서 사용하는 외부 데이터 메모리 영역을 링커가 전혀 인식하지 않는다는 의미이다. 그러나, 바로 이러한 이유 때문에 포인터에 의한 방법과 외부 메모리에 데이터 섹션을 할당하는 방법을 혼용하는 경우에는 주의가 필요하다. 즉, 위의 <파일 5>~<파일 8>에서 외부 메모리에 .noinit 섹션을 할당하기 위하여

unsigned char array4[256] __attribute__ ((section (".noinit")));

라고 정의하는 부분을 소스에 추가하고 링커 옵션을 -Wl, --section-start=.noinit=0x808000으로 설정하였다면 메모리 변수 array4[256]이 외부 데이터 메모리의 0x8000~0x80FF 번지에 들어가게 되므로 #define으로 정의하여 사용하는 메모리 번지와 중복되는 결과가 된다. 따라서, 이를 피하려면 링커 옵션을 -Wl, --section-start=.noinit=0x80C000과 같이 설정하여 사용하는 메모리 영역이 서로 중복되지 않도록 해야 한다. 즉, 포인터를 사용하는 방식에서는 외부 데이터 메모리의 번지를 링커가 관리하지 않으며 이는 프로그램을 작성하는 사용자의 몫이라는 것이다.

4. 링커 옵션으로 .bss 또는 .noinit 섹션을 외부 데이터 메모리에 할당하는 방법

이것은 메모리 변수를 특정한 번지에 정의하지 않고 임의의 데이터 메모리 번지에 할당되도록 하는 방법이다. 프로그래머는 다만 초기화된 전역변수는 .data 섹션에 저장되고, 초기화되지 않은 전역 변수는 .bss 섹션에 저장된다는 것을 알면 된다. 그러나, 특별히 초기화되지 않은 변수를 .bss 섹션이 아니라 .noinit 섹션에 저장되도록 지정할 수도 있다.

사용자의 소스 프로그램에서는 이와 같이 데이터 변수의 종류에 따라 이것들이 어떤 섹션에 저장되는지만 알면 되며, 이들 메모리 섹션이 실제 외부 데이터 메모리의 어느 번지에 할당되는지는 나중에 링커 옵션으로 지정한다. 아래의 <파일 9>는 초기화되지 않은 2개의 배열을 각각 .bss 섹션과 .noinit 섹션에 1개씩 정의하고 이것들을 외부 데이터 메모리에 할당하여 사용하는 예제 프로그램이다. 이를 번역할 때 링커 옵션은 -Wl, -Tbss=0x808000, --section-start=.noinit=0x809000으로 설정하기 바란다.

<파일 9> *OK-128* 키트용 예제 프로그램 test6.c의 소스

```
/* ============================================================================ */
/*                    Internal & External SRAM Usage 6                          */
/* ============================================================================ */
/*                         Designed and programmed by Duck-Yong Yoon in 2004.   */

#include <avr/io.h>
#include "c:\AvrEdit\Ok128c\Ok128.h"

unsigned char array1[100];                                      // .bss section
unsigned char array2[100] __attribute__ ((section (".noinit"))); // .noinit section

void LCD_2d(unsigned int number)        /* display 2-digit decimal number */
{
  LCD_data(number / 10 + '0');                  // 10^1
  LCD_data(number % 10 + '0');                  // 10^0
}

int main(void)
{ unsigned char i;

  MCU_initialize();                             // initialize MCU
  Delay_ms(50);                                 // wait for system stabilization
  LCD_initialize();                             // initialize text LCD module

  LCD_string(0x80,"array1[00] = 00 ");          // display screen
  LCD_string(0xC0,"array2[00] = 00 ");

  for(i=0; i<=99; i++)                          // initialize array
    { array1[i] = i;
      array2[i] = i;
    }

  while(1)
    { for(i=0; i<=99; i++)
        { LCD_command(0x87);                    // display array1
          LCD_2d(i);
          LCD_command(0x8D);
          LCD_2d(array1[i]);
          LCD_command(0xC7);                    // display array2
          LCD_2d(i);
          LCD_command(0xCD);
          LCD_2d(array2[i]);
          Delay_ms(1000);
        }
```

```
        Beep();
        Delay_ms(3000);
      }
  }
```

초기화된 전역변수나 배열은 .data 섹션에 저장되는데 이는 작은 용량의 내부 SRAM에 할당되므로 많은 변수나 큰 배열을 처리하는데는 부적합하다. 이와 같은 경우에는 소스 프로그램에서 이 배열을 초기화되지 않은 배열로 정의하여 .bss 섹션이나 .noinit 섹션에 저장되도록 하고 <파일 9>에서 한 것처럼 나중에 프로그램으로 초기값을 부여하는 방법으로 처리하면 된다.

5. 링커 스크립트 파일로 .bss 또는 .noinit 섹션을 외부 데이터 메모리에 할당하는 방법

이것은 링커가 오브젝트 파일들과 라이브러리 파일들을 링크할 때 기본적으로 참조하는 링커 스크립트 파일을 수정하여 .bss 섹션이나 .noinit 섹션을 사용자가 원하는 외부 데이터 메모리에 할당하도록 설정을 변경하는 방법이다. 그러면 사용자는 프로그램을 작성할 때 소스 프로그램에서 변수들이 .bss 섹션이나 .noinit 섹션에 포함되도록 처리하여 주기만 하면 되며 링커 옵션에는 별다른 사항을 지정할 필요가 없다.

링커가 링크를 수행할 때 기본적으로 참조하는 링커 스크립트 파일은 <파일 1>에서 보였던 WinAvr\avr\lib\ldscripts\avr5.x 파일이다. 이를 수정하면 링커는 이에 따라 링크 작업을 수행한다. 그러나, 이 원본 파일을 수정하는 것은 나중에 이를 원상태로 되돌릴 때 어려움을 야기할 수 있으므로 여기서는 이 파일을 avr5xram.x로 복사해서 수정하여 사용하기로 한다. 이렇게 수정한 링크 스크립트 파일을 <파일 10>에 보였는데, 링커가 이렇게 다른 이름의 링크 스크립트 파일을 참조하도록 하려면 링커 옵션에 -Wl, -Tldscripts/avr5xram.x와 같이 링커 스크립트 파일명을 지정하여야 한다.

<파일 10> 링커 스크립트 파일 avr5.x를 수정하여 만든 avr5xram.x 파일

```
/* Default linker script, for normal executables */
OUTPUT_FORMAT("elf32-avr","elf32-avr","elf32-avr")
OUTPUT_ARCH(avr:5)
MEMORY
{
  text   (rx)   : ORIGIN = 0, LENGTH = 128K
  data   (rw!x) : ORIGIN = 0x800060, LENGTH = 0x7fa0
  xram   (rw!x) : ORIGIN = 0x808000, LENGTH = 32K
  eeprom (rw!x) : ORIGIN = 0x810000, LENGTH = 64K
}
SECTIONS
{
```

```
    /* Read-only sections, merged into text segment: */
    .hash          : { *(.hash)          }
    .dynsym        : { *(.dynsym)        }
       .
       .
       .
    /* Internal text space or external memory */
    .text :
    {
      *(.vectors)
       __ctors_start = . ;
      *(.ctors)
       __ctors_end = . ;
       .
       .
       .
    }  > text

    .data    : AT (ADDR (.text) + SIZEOF (.text))
    {
       PROVIDE (__data_start = .) ;
      *(.data)
      *(.gnu.linkonce.d*)
      . = ALIGN(2);
       _edata = . ;
       PROVIDE (__data_end = .) ;
    }  > data

    .bss  /* SIZEOF(.data) + ADDR(.data) */ :
    {
       PROVIDE (__bss_start = .) ;
      *(.bss)
      *(COMMON)
       PROVIDE (__bss_end = .) ;
    }  > xram
       data_load_start = LOADADDR(.data);
     __data_load_end = __data_load_start + SIZEOF(.data);

    /* Global data not cleared after reset.  */
    .noinit  /* SIZEOF(.bss) + ADDR(.bss) */ :
    {
       PROVIDE (  noinit_start = .) ;
      *(.noinit*)
       PROVIDE (  noinit_end = .) ;
       _end = . ;
       PROVIDE (__heap_start = .) ;
    }  > xram

    .eeprom  : AT (ADDR (.text) + SIZEOF (.text) + SIZEOF (.data))
    {
      *(.eeprom*)
       __eeprom_end = . ;
    }  > eeprom
       .
       .
       .
}
```

이렇게 링커 스크립트 파일 avr5.x를 avr5xram.x로 복사하여 수정하고, 링커가 수정된 링크 스크립트 파일을 참조하도록 하려면 링커 옵션을 -Wl, -Tldscripts/avr5xram.x로 지정한 후에 <파일 9>의 예제 test6.c를 컴파일하여 생성된 test6.map 파일을 보면 <파일 11>과 같다. 여기서 보면 배열 array1[100]은 .bss 섹션에 저장되고 배열 array2[100]은 .noinit 섹션에 올바르게 저장되어 있으며, 이들 섹션은 수정된 링커 스크립트 파일에서 지정한 대로 외부 데이터 메모리에 차례로 할당되어 있는 것을 알 수 있다.

<파일 11> 링커 스크립트 파일에 의하여 .bss 및 .noinit 섹션을 외부 SRAM에 할당한 경우의 메모리 맵 파일 test6.map

```
      .
      .
      .
Memory Configuration

Name             Origin             Length             Attributes
text             0x00000000         0x00020000         xr
data             0x00800060         0x00007fa0         rw !x
xram             0x00808000         0x00008000         rw !x
eeprom           0x00810000         0x00010000         rw !x
*default*        0x00000000         0xffffffff

Linker script and memory map

Address of section .data set to 0x800100
LOAD C:\AVREDIT\WINAVR\BIN\..\lib\gcc-lib\avr\3.3.1\..\..\..\..\avr\lib\avr5\crtm128.o
LOAD test6.o
LOAD C:\AVREDIT\WINAVR\BIN\..\lib\gcc-lib\avr\3.3.1\..\..\..\..\avr\lib\avr5\libm.a
      .
      .
      .

.text           0x00000000      0x33a
      .
      .
      .
 .text          0x000000ca      0x248 test6.o
                0x0000022a                LCD_2d
                0x000000ca                MCU_initialize
                0x000001e2                Key_input
                0x00000190                LCD_string
                0x000001b2                LCD_initialize
                0x0000014a                Beep
                0x0000010c                Delay_ms
                0x00000260                main
                0x00000174                LCD_data
                0x000000f2                Delay_us
                0x00000158                LCD_command
                0x00000312                . = ALIGN (0x2)
      .
      .
      .
                0x0000033a                _etext = .
```

```
.data           0x00800100      0x22 load address 0x0000033a
                0x00800100              PROVIDE (__data_start, .)
 *(.data)
 .data          0x00800100      0x22 test6.o
 *(.gnu.linkonce.d*)
                0x00800122              . = ALIGN (0x2)
                0x00800122               edata = .
                0x00800122              PROVIDE (__data_end, .)

.bss            0x00808000      0x64
                0x00808000              PROVIDE (__bss_start, .)
 *(.bss)
 *(COMMON)
 COMMON         0x00808000      0x64 test6.o
                                 0x0 (size before relaxing)
                0x00808000              arrav1
                0x00808064              PROVIDE ( bss end. .)
                0x0000033a                data load start = LOADADDR (.data)
                0x0000035c              __data_load_end = (__data_load_start + SIZEOF (.data))

.noinit         0x00808064      0x64
                0x00808064              PROVIDE (__noinit_start, .)
 *(.noinit*)
 .noinit        0x00808064      0x64 test6.o
                0x00808064              arrav2
                0x008080c8              PROVIDE ( _noinit_end, .)
                0x008080c8               end = .
                0x008080c8              PROVIDE (__heap_start, .)

.eeprom         0x00810000       0x0 load address 0x0000035c
 *(.eeprom*)
                0x00810000              __eeprom_end = .
     .
     .
     .

Cross Reference Table

Symbol                                          File
Beep                                            test1.o
Delay_ms                                        test1.o
Delay_us                                        test1.o
Key_input                                       test1.o
LCD_2d                                          test1.o
LCD_command                                     test1.o
LCD_data                                        test1.o
LCD_initialize                                  test1.o
LCD_string                                      test1.o
MCU_initialize                                  test1.o
     .
     .
     .
```

6. 초기화가 필요한 .data 섹션을 외부 데이터 메모리에 올바르게 할당하는 방법

앞의 제2장에서도 설명하였듯이 데이터 섹션들 중에서 .data 섹션만은 링커 옵션을 사용하여도 외부 데이터 메모리에 올바르게 할당되지 않는다. 이는 AVR-GCC에서 .data 섹션을

초기화하는 과정 때문이다. .text 섹션 내부에서 .initN 섹션은 스타트업 코드를 정의하는 부분으로서 리셋 후에 main() 함수를 실행하기 전의 사용자 프로그램 준비 동작을 수행한다. 이것은 다음과 같이 0~9의 10단계 동작으로 이루어진다.

.init0 - __init()와 관련이 있다. 만약 사용자가 __init() 함수를 정의하면 리셋 후에 즉시 그곳으로 점프된다.

.init1 - 사용되지 않는다. 사용자가 정의하여 사용할 수 있다.

.init2 - C언어 프로그램의 경우에만 사용된다. 스택을 초기화하는 기능과 관련이 있다.

.init3 - 사용되지 않는다. 사용자가 정의하여 사용할 수 있다.

.init4 - 플래시 메모리에서 SRAM으로 .data 섹션의 초기화 데이터를 복사하며, .bss 섹션을 할당하고 초기값을 0으로 클리어한다.

.init5 - 사용되지 않는다. 사용자가 정의하여 사용할 수 있다.

.init6 - C++언어 프로그램의 경우에만 사용된다.

.init7 - 사용되지 않는다. 사용자가 정의하여 사용할 수 있다.

.init8 - 사용되지 않는다. 사용자가 정의하여 사용할 수 있다.

.init9 - main()으로 점프한다.

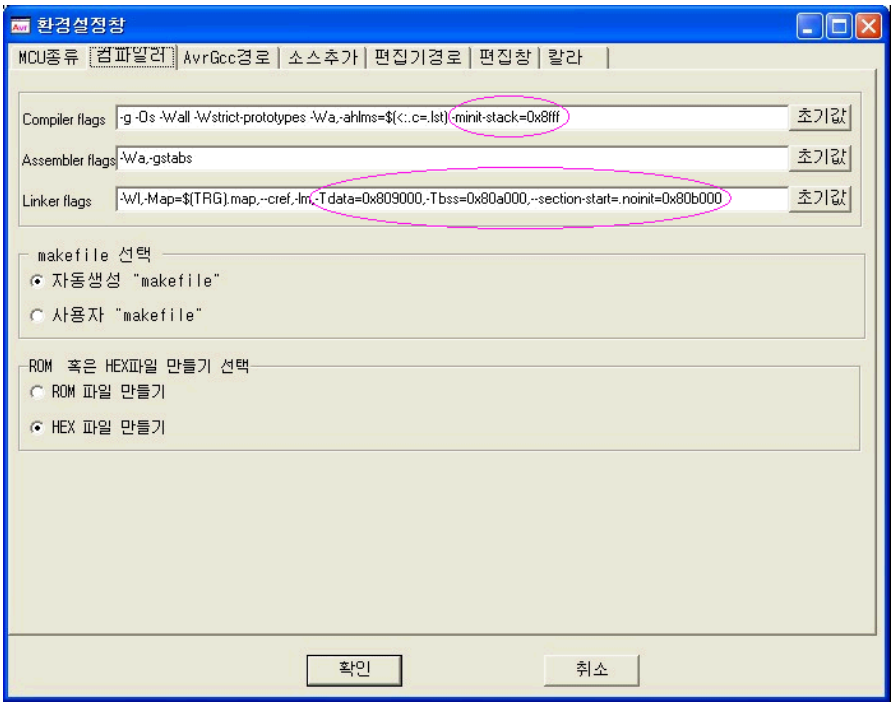
위에서 보듯이 .data 섹션이 초기화되는 것은 .init4의 단계인데, 이때는 아직 사용자 프로그램에서 외부 버스를 사용할 수 있도록 ATmega128의 MCUCR, XMCRA, XMCRA 레지스터를 초기화하기 전이다. 따라서, .data 섹션이 내부 SRAM을 사용하는 경우에는 아무 문제가 없지만, .data 섹션을 외부 데이터 메모리 영역에 할당하고자 하는 경우에는 정상적인 액세스가 수행될 수 없으므로 이 초기화 과정이 올바르게 처리되지 못한다.

따라서, 이 문제를 해결하는 한가지 방법은 사용자가 ATmega128의 MCUCR, XMCRA, XMCRA 레지스터를 초기화하는 루틴을 작성하여 .init4 보다 앞에 있는 단계에 이를 링크해 주는 것이다. 예를 들어 이러한 루틴을 사용자 프로그램에서 함수 XBUS_initialize()로 작성하여 .init1 단계에 링크하려면 아래와 같이 처리하면 된다.

```
void XBUS_initialize(void) __attribute__ ((naked)) __attribute ((section (".init1")));
```

이와 같은 방법으로 .data 섹션을 외부 메모리에 할당하여 사용하는 예제 프로그램을 작성하여 보면 <파일 12>와 같다. 만약 .data 섹션을 0x9000 번지부터 할당하면 이에 이어서 .bss 섹션, .noinit 섹션, 힙 등도 모두 자동으로 외부 SRAM으로 이동되지만, 이 예제에서는 링커 옵션을 -Wl, -Tdata=0x809000, -Tbss=0x80a000, --section-start= .noinit=0x80b000으로 지정하여 각 데이터 섹션들의 위치를 별도로 할당하였다. AvrEdit 3.6에서 이렇게 옵션을 설

정하는 화면은 <그림 20.6>에 보였고, 컴파일한 후에 생성된 메모리 맵 파일은 <파일 13>과 같다.



<그림 20.6> AvrEdit 3.6에서 컴파일 옵션 및 링커 옵션을 설정하는 화면

<파일 12> *OK-128* 키트용 예제 프로그램 test7.c의 소스

```
/* ============================================================================ */
/*                    Internal & External SRAM Usage 7                          */
/* ============================================================================ */
/*                        Designed and programmed by Duck-Yong Yoon in 2004.    */

#include <avr/io.h>
#include "c:\AvrEdit\Ok128c\Ok128.h"

unsigned char array1[16] = {0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15}; // .data section
unsigned char array2[16];                                           // .bss section
unsigned char array3[16] __attribute__ ((section (".noinit")));     // .noinit section

void XBUS_initialize(void) __attribute__ ((naked)) __attribute__ ((section (".init1")));

void XBUS_initialize(void)              /* initialize external bus */
{
  MCUCR = 0x80;                                 // enable external memory & I/O
  XMCRA = 0x44;                                 // 0x1100-0x7FFF=1 wait, 0x8000-0xFFFF=0 wait
  XMCRB = 0x80;                                 // enable bus keeper, use PC0-PC7 as address
}
```

```
void LCD_2d(unsigned char number)       /* display 2-digit decimal number */
{
  LCD_data(number / 10 + '0');                  // 10^1
  LCD_data(number % 10 + '0');                  // 10^0
}

void LCD_4hex(unsigned int number)      /* display 4-digit hex number */
{ unsigned int i;

  i = number >> 12;                             // 16^3
  if(i <= 9) LCD_data(i + '0');
  else       LCD_data(i - 10 + 'A');

  i = (number >> 8) & 0x000F;                   // 16^2
  if(i <= 9) LCD_data(i + '0');
  else       LCD_data(i - 10 + 'A');

  i = (number >> 4) & 0x000F;                   // 16^1
  if(i <= 9) LCD_data(i + '0');
  else       LCD_data(i - 10 + 'A');

  i = number & 0x000F;                          // 16^0
  if(i <= 9) LCD_data(i + '0');
  else       LCD_data(i - 10 + 'A');
}

void Test_SP(void)                      /* test stack pointer */
{
  LCD_string(0xC0,"  SP = 0x0000   ");
  LCD_command(0xC9);
  LCD_4hex(SP);
  Beep();
  Delay_ms(3000);
}

int main(void)
{ unsigned char i;

  MCU_initialize();                             // initialize MCU
  Delay_ms(50);                                 // wait for system stabilization
  LCD_initialize();                             // initialize text LCD module


  while(1)
    { LCD_string(0x80,"array2[00] = 00 ");      // display variable in external memory
      LCD_string(0xC0,"array3[00] = 00 ");
      for(i=0; i<=15; i++)
        { array2[i] = array1[i];                // display array2
          LCD_command(0x87);
          LCD_2d(i);
          LCD_command(0x8D);
          LCD_2d(array2[i]);
          array3[i] = array1[i] * 2;            // display array3
          LCD_command(0xC7);
          LCD_2d(i);
          LCD_command(0xCD);
          LCD_2d(array3[i]);
          Delay_ms(1000);
```

```
        }
      Beep();
      Delay_ms(2000);

      LCD string(0x80,"  SP = 0x0000   ");      // display satck pointer
      LCD string(0xC0,"               ");
      LCD command(0x89);
      LCD 4hex(SP);
      Beep();
      Delay_ms(3000);
      Test_SP();                                // stack pointer in function
    }
}
```

<파일 13> 모든 데이터 섹션을 외부 SRAM에 할당한 경우의 메모리 맵 파일 test7.map

```
      .
      .
      .
Memory Configuration

Name             Origin             Length             Attributes
text             0x00000000         0x00020000         xr
data             0x00800060         0x0000ffa0         rw !x
eeprom           0x00810000         0x00010000         rw !x
*default*        0x00000000         0xffffffff

Linker script and memory map

Address of section .data set to 0x800100
LOAD C:\AVREDIT\WINAVR\BIN\..\lib\gcc-lib\avr\3.3.1\..\..\..\..\avr\lib\avr5\crtm128.o
LOAD test7.o
LOAD C:\AVREDIT\WINAVR\BIN\..\lib\gcc-lib\avr\3.3.1\..\..\..\..\avr\lib\avr5\libm.a
Address of section .data set to 0x809000
Address of section .bss set to 0x80a000
Address of section .noinit set to 0x80b000
LOAD C:\AVREDIT\WINAVR\BIN\..\lib\gcc-lib\avr\3.3.1\avr5\libgcc.a
LOAD C:\AVREDIT\WINAVR\BIN\..\lib\gcc-lib\avr\3.3.1\..\..\..\..\avr\lib\avr5\libc.a
LOAD C:\AVREDIT\WINAVR\BIN\..\lib\gcc-lib\avr\3.3.1\avr5\libgcc.a
      .
      .
      .
.text           0x00000000      0x3ea
      .
      .
      .
 *(.init0)
 *(.init1)
 .init1         0x0000008c        0xe test7.o
                0x0000008c                XBUS_initialize
 *(.init2)
 .init2         0x0000009a        0xc C:\AVREDIT\WINAVR\BIN\.....\avr\lib\avr5\crtm128.o
 *(.init3)
 *(.init4)
 .init4         0x000000a6        0x1a C:\AVREDIT\WINAVR\BIN\.....\avr\lib\avr5\crtm128.o
                0x000000a6                __do_copy_data
```

```
.init4          0x000000c0       0x10 C:\AVREDIT\WINAVR\BIN\....\avr5\libgcc.a(_clear_bss.o)
                0x000000c0                __do_clear_bss
 *(.init5)
 *(.init6)
 *(.init7)
 *(.init8)
 *(.init9)
.init9          0x000000d0        0x4 C:\AVREDIT\WINAVR\BIN\.....\avr\lib\avr5\crtm128.o
 *(.text)
    .
    .
    .
.text           0x000000d8      0x230 test7.o
                0x00000238                LCD 2d
                0x000000d8                MCU initialize
                0x000001f0                Key input
                0x0000019e                LCD string
                0x000001c0                LCD initialize
                0x00000158                Beep
                0x0000011a                Delay_ms
                0x000002fa                main
                0x00000182                LCD data
                0x00000262                LCD 4hex
                0x00000100                Delay_us
                0x00000166                LCD command
                0x000002d4                Test SP
                0x000003d2                . = ALIGN (0x2)
    .
    .
    .
                0x000003ea                _etext = .

.data           0x00809000       0x54 load address 0x000003ea
                0x00809000                PROVIDE (__data_start, .)
 *(.data)
.data           0x00809000       0x54 test7.o
                0x00809000                array1
 *(.gnu.linkonce.d*)
                0x00809054                . = ALIGN (0x2)
                0x00809054                _edata = .
                0x00809054                PROVIDE (__data_end, .)

.bss            0x0080a000       0x10
                0x0080a000                PROVIDE (__bss_start, .)
 *(.bss)
 *(COMMON)
COMMON          0x0080a000       0x10 test7.o
                                      0x0 (size before relaxing)
                0x0080a000                arrav2
                0x0080a010                PROVIDE ( __bss_end, .)
                0x000003ea                  data_load_start = LOADADDR (.data)
                0x0000043e                __data_load_end = (__data_load_start + SIZEOF (.data))

.noinit         0x0080b000       0x10
                0x0080b000                PROVIDE (__noinit_start, .)
 *(.noinit*)
.noinit         0x0080b000       0x10 test7.o
                0x0080b000                arrav3
                0x0080b010                PROVIDE (__noinit_end, .)
                0x0080b010                _end = .
                0x0080b010                PROVIDE (__heap_start, .)
```

```
.eeprom         0x00810000        0x0 load address 0x0000043e
 *(.eeprom*)
                0x00810000                __eeprom_end = .
      .
      .
      .
Cross Reference Table

Symbol                                    File
Beep                                      test7.o
Delay_ms                                  test7.o
Delay_us                                  test7.o
Key_input                                 test7.o
LCD_2d                                    test7.o
LCD_4hex                                  test7.o
LCD_command                               test7.o
LCD_data                                  test7.o
LCD_initialize                            test7.o
LCD_string                                test7.o
MCU_initialize                            test7.o
Test_SP                                   test7.o
XBUS_initialize                           test7.o
      .
      .
      .
```

또한, 위의 <파일 12> 예제에서는 스택을 외부 데이터 메모리에 할당하여 사용하는 방법도 포함하고 있다. 이 예제에서는 스택을 외부 메모리의 0x8000~0x8FFF 영역에 할당하여 사용하는 것으로 가정하였다.

스택을 사용자가 원하는 메모리 영역에 할당하여 사용하려면 스택 포인터 SP의 초기값을 지정하여야 한다. 이는 컴파일러 옵션에서 -minit-stack=0x8fff와 같은 방법으로 지정하거나, 링커 옵션에서 -Wl, --defsym=__stack=0x808fff처럼 지정하면 된다. 이와 같이 컴파일러와 링커에서 스택 포인터의 초기값은 __stack 심볼로 지정되는데, 사용자가 이를 별도로 지정하지 않으면 ATmega128의 경우 이것이 디폴트로 내부 SRAM의 마지막 번지인 0x10FF로 처리된다.

위의 예제에서는 <그림 20.6>에서도 보였듯이 컴파일러 옵션으로 스택 포인터를 지정하는 방법을 사용하였다. 스택을 0x8000~0x8FFF 영역으로 사용하기 위하여 스택 포인터 SP의 초기값으로 0x8FFF를 지정하였으므로 이 프로그램을 실행하면 처음에 표시되는 SP값은 0x8FFF이지만 Test_SP() 함수를 호출하여 그 내부에서 표시되는 SP값은 0x8FFD인 것을 볼 수 있다. C언어에서 함수를 호출하면 이 함수는 어셈블리 언어의 서브루틴에 해당하므로 스택으로 사용되는 메모리의 2개 번지에 16비트의 복귀주소(return address)를 저장하게 되고 따라서 스택 포인터가 2만큼 감소하기 때문이다.

7. 어셈블리 언어 프로그램의 경우

AVR에서 내부 SRAM이나 외부 확장 데이터 메모리를 어셈블리 언어에서 액세스하여 사용하는 방법은 C언어에 비하여 훨씬 더 쉽다. C언어가 사용자 지향적(user-oriented)인 언어인데 비하여 어셈블리 언어는 이 보다 훨씬 기계 지향적(machine-oriented)인 언어이기 때문이다. 어셈블리 언어를 사용한 내부 SRAM 및 외부 데이터 메모리 액세스 사용 예제를 <파일 14>에 보였다.

<파일 14> 어셈블리 언어를 사용한 내부 SRAM 및 외부 SRAM 사용 예제 test8.asm

```
;┌──────────────────────────────────────────────────────────────┐
;│                                                              │
;│            Internal & External SRAM Usage 8                  │
;│                                                              │
;└──────────────────────────────────────────────────────────────┘
;
;               Designed and programmed by Duck-Yong Yoon in 2004.
;
;-----------------------------------------------
;       Include Header File
;-----------------------------------------------
.include "MEGA128.INC"                  ; include ATmega128 definition file
.include "OK128DEF.INC"                 ; include OK-128 I/O definition file

;-----------------------------------------------
;       Define I/O & Data Memory Area
;-----------------------------------------------
.equ    LED7_DATA       = 0x2000        ; external I/O
.equ    LED7_DIGIT      = 0x2200

.equ    XRAM            = 0x8000        ; external memory

.dseg                                   ; data segment
        .org    0x0100                  ; start internal memory
DATA1:  .byte   256
        .org    0x8000                  ; start external memory
DATA2:  .byte   256

;=================================================================
;       Main Program
;=================================================================
.cseg
        .org    0x0000
        LDI     AH,high(RAMEND)         ; initialize SP
        LDI     AL,low(RAMEND)
        OUT     SPH,AH
        OUT     SPL,AL

        CALL    INIT_OK128              ; initialize ATmega128 CPU & OK-128 kit
        CALL    D50MS                   ; wait for system stabilization
        CALL    INIT_LCD                ; initialize text LCD

;-----------------------------------------------
;       Test External I/O (0x2000/0x2200)
```

```
;-----------------------------------------------
LOOP:   CALL    LCD HOME1               ; display screen
        CALL    LCD STRING
        .db     " 7-Segment LED  ",0,0
        CALL    LCD HOME2
        CALL    LCD STRING
        .db     "                ",0,0

        LDI     AL,0b11110010           ; output '3'
        STS     LED7 DATA,AL
        LDI     AL,0b11111111           ; select all digits
        STS     LED7 DIGIT,AL
        CALL    D2SEC
        LDI     AL,0b00000000           ; turn off all digits
        STS     LED7_DIGIT,AL

;-----------------------------------------------
;       Test External SRAM (0x8000)
;-----------------------------------------------
        CALL    LCD HOME1               ; display screen
        CALL    LCD STRING
        .db     " External SRAM  ",0,0
        CALL    LCD HOME2
        CALL    LCD STRING
        .db     " 0x8000 = 0x00  ",0,0

        LDI     CL,0x00
LOOP1:  LDI     LCD BUFFER,0xCC         ; display value
        CALL    LCD COMMAND
        STS     XRAM,CL                 ; write external memory
        LDS     LCD BUFFER,XRAM         ; read external memory
        CALL    LCD 2HEX
        CALL    D1SEC
        INC     CL
        CPI     CL,0x10
        BRNE    LOOP1
        CALL    BEEP
        CALL    D2SEC

;-----------------------------------------------
;       Test Internal SRAM (0x0100-0x01FF)
;-----------------------------------------------
        CALL    LCD HOME1               ; display screen
        CALL    LCD STRING
        .db     " Internal SRAM  ",0,0
        CALL    LCD HOME2
        CALL    LCD STRING
        .db     " 0x0100 = 0x00  ",0,0

        LDI     CL,0x00
        LDI     XH,high(DATA1)
        LDI     XL,low(DATA1)
LOOP2:  LDI     LCD BUFFER,0xC3         ; display address
        CALL    LCD COMMAND
        MOV     AH,XH
        MOV     AL,XL
        CALL    LCD 4HEX
        LDI     LCD BUFFER,0xCC         ; display value
        CALL    LCD COMMAND
        ST      X,CL                    ; write internal memory
        LD      LCD_BUFFER,X+           ; read internal memory
```

```
        CALL    LCD_2HEX
        CALL    D1SEC
        INC     CL
        CPI     CL,0x00
        BRNE    LOOP2
        CALL    BEEP
        CALL    D2SEC

;-----------------------------------------------
;       Test External SRAM (0x8000-0x80FF)
;-----------------------------------------------
        CALL    LCD_HOME1               ; display screen
        CALL    LCD_STRING
        .db     " External SRAM  ",0,0
        CALL    LCD_HOME2
        CALL    LCD_STRING
        .db     " 0x8000 = 0x00  ",0,0

        LDI     CL,0x00
        LDI     XH,high(DATA2)
        LDI     XL,low(DATA2)
LOOP3:  LDI     LCD_BUFFER,0xC3         ; display address
        CALL    LCD_COMMAND
        MOV     AH,XH
        MOV     AL,XL
        CALL    LCD_4HEX
        LDI     LCD_BUFFER,0xCC         ; display value
        CALL    LCD_COMMAND
        ST      X,CL                    ; write external memory
        LD      LCD_BUFFER,X+           ; read external memory
        CALL    LCD_2HEX
        CALL    D1SEC
        INC     CL
        CPI     CL,0x00
        BRNE    LOOP3
        CALL    BEEP
        CALL    D2SEC

        JMP     LOOP

;=================================================================
;       Include User Subroutine File
;=================================================================
.include "OK128SUB.INC"                 ; include OK-128 subroutine file
```

우선 내부 SRAM과 외부 데이터 메모리의 번지를 가장 손쉽게 지정하는 방법은 예제에서 XRAM처럼 .equ 지시어를 사용하여 번지를 상수값으로 정의하는 것이다. 이 번지값은 나중에 LDS 또는 STS 명령에서 데이터 직접 번지 지정으로 사용된다. 이와 같이 .equ 지시어를 사용하여 메모리 번지를 정의하는 방법은 C언어에서 #define을 사용하는 방법과 매우 유사하며, 1개의 .equ 지시어로는 오직 1개의 번지만을 사용할 수 있으므로 많은 메모리 번지를 사용하려는 경우에는 이를 일일이 .equ 지시어로 정의해 주어야 하는 불편이 있다. 또한, 이는 링커에 의하여 데이터 메모리의 번지로 인식되지 않으므로 나중에 .dseg 지시어로 데

이터 세그먼트를 정의할 경우 메모리 번지가 중복될 수 있다는 점에 주의하여야 한다. 따라서, 이 방식은 데이터 메모리 번지에도 사용되지만 외부 I/O 번지를 지정하는데 더 적합하다고 할 수 있다. <파일 14>의 예제에서는 이를 I/O 번지 지정에 사용하여 7세그먼트 LED를 점등하는 예를 보였다.

많은 데이터 메모리 변수를 사용하는 경우에는 .dseg 지시어를 사용하여 이를 데이터 세그먼트의 안에 정의하는 것이 좋다. 이는 C언어에서 .bss 섹션이나 .noinit 섹션에 변수를 정의하는 것에 비유될 수 있으며, 링커에 의하여 이들 메모리 번지가 인식되므로 많은 변수를 정의하면 이것들이 데이터 메모리 영역에 차례로 할당된다. 이 방법에서도 물론 각각의 변수를 LDS 또는 STS 명령으로 액세스할 수 있지만, <파일 14>에서 사용한 것처럼 변수가 데이터 테이블(배열)일 경우에는 X, Y, Z 레지스터에 의하여 데이터 메모리 간접 지정을 사용하는 것이 편리하다.

이 방법은 내부 SRAM이든 외부 데이터 메모리든 상관없이 원하는 시작번지를 .dseg 세그먼트 안에서 .org 지시어로 지정하기만 하면 된다. <파일 14>에서는 내부 SRAM의 시작번지인 0x0100 번지에서부터 256바이트의 테이블을 정의하고, 외부 SRAM의 시작번지인 0x8000 번지에서부터 256바이트의 테이블을 정의하는 예를 보였으며, 이 예제는 AVR Studio V4.10으로 정상으로 동작하는 것을 확인하였다. 그러나, AVR Studio V4.10에는 새로 매크로 어셈블러 V2.0이 추가되었는데 이것은 그 이전의 V1.x에 비하여 많은 사항들이 개선되고 달라졌다. 그래서, 이 예제를 어셈블할 때 Project→AVR Assembler Setup 메뉴에서 Use AVR Assembler 2.0 Beta 항목을 체크하고 어셈블하면 2개의 경고 메시지가 발생된다. 이는 내부 SRAM은 0x0100~0x10FF 번지에만 존재하는데 테이블 DATA2는 0x8000 번지부터 정의되었으므로 링커는 이것이 내부 SRAM 영역을 벗어났다고 판단하기 때문이다. 하지만, 메모리 맵 파일을 보면 어셈블러는 이런 경고 메시지에도 불구하고 이를 올바르게 처리하며, 실제로 이 프로그램을 실행하면 외부 데이터 메모리에 있는 테이블 DATA2의 액세스가 정상적으로 수행된다.

【 참고문헌 】

1. Doxygen, avr-libc Reference Manual 1.0, Sep. 22, 2004
2. 윤덕용, AVR 마스터 시리즈 ① - AVR ATmega128 마스터, Ohm사, 2004
3. 윤덕용, AVR 마스터 시리즈 ② - AVR ATmega162 마스터, Ohm사, 2004
4. 윤덕용, AVR 마스터 시리즈 ③ - AVR ATmega8515 마스터, Ohm사, 2004