

## 국내 사용후핵연료 현황 분석

### Projection and Burnup Trends of Spent Nuclear Fuel in Korea

조동건, 최종원

한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150

이희환

한국수력원자력(주), 서울특별시 강남구 삼성동 167번지

#### 요 약

처분시스템 설계 시 기초 자료로 사용되는 국내 사용후핵연료의 발생량, 특징 및 연소이력 등의 현재 및 향후 현황을 파악하였다. 2055년까지 PWR 및 CANDU 사용후핵연료 발생량은 각각 20,500 및 14,800MTU로 나타났다. 17×17 핵연료 집합체의 사용후핵연료 발생량 비율은 2003년 기준으로 전체대비 60%를 점유하는 것으로 나타났으며, 2012년 이후부터는 16×16 KSFA 사용후핵연료 발생량이 17×17 핵연료를 능가하기 시작하여 최종시점인 2055년에는 70% 정도를 점유할 것으로 보인다. 사용후핵연료의 평균 연소도는 90년대 후반에는 36GWD/MUT 정도, 2000년대 초반에는 40GWD/MTU를 나타냈으며, 2000년대 중·후반부터는 45GWD/MTU를 초과할 것으로 보인다. 따라서, 현재는 1997년에 선정된 제원을 기준 핵연료 제원으로 사용하되, 2010년을 기점으로 기준핵연료를 16×16 KSFA 4.5w/o, 55GWD/MTU로 반영하는 것이 타당해 보인다.

#### Abstract

Inventories, projections, and characteristics of spent nuclear fuel(SNF) generated from domestic nuclear power plants were updated to support high-level waste disposal system design. The historical and projected inventory by the end 2055 is expected to be 20,500 and 14,800MTU for PWR and CANDU spent nuclear fuel, respectively. The ratio of quantity for 17×17 SNF was shown to be 0.6 as of 2003. The amount of 17×17 SNF, however, will be less than that of 16×16 KSFA after 2012, while the quantity of 16×16 KSFA will reach to 70% of the total spent fuels in the 2055. Average burnup of SNF revealed ~36GWD/MTU and ~40GWD/MTU for the period of 1994-1999 and 2000-2003, respectively. It is expected that the average burnup of SNF will exceed 45GWD/MTU at the end of 2000's. Therefore, it seems reasonable to use the 17×17 4.5w/o, 45GWD/MTU as the Reference SNF at present state. The 16×16 KSFA 4.5w/o, 55GWD/MTU, however, should be Reference SNF after ~2010.

## 1. 서론

한국원자력연구소에서는 고준위폐기물인 사용후핵연료를 안전하게 처분하고자 1997년부터 중·장기 기술개발 프로그램에 따라 우리나라의 실정에 맞는 심지층 처분시스템을 개발하고 있다.

사용후핵연료에는 반감기가 긴 악티늄족 원소들과 악티늄족 원소에 비해 비교적 반감기가 짧은 핵분열생성물이 포함되어 있다. 이러한 방사성 핵종들에 의해 방출되는 붕괴열과 방사선은 처분용기, 완충재 및 주변환경의 온도를 상승시키는 열원과, 처분용기 주변물질에 방사선 분해를 일으켜 처분용기의 부식을 가속시키는 요인으로 각각 작용하여 처분시스템 내에 존재하는 공학적 방벽 및 천연방벽의 성능을 저하시킨다. 따라서, 붕괴열은 공학적 방벽의 성능이 확보되는 온도 제한치 이하로 소산시켜야 하며, 처분용기의 표면선량률은 주변 물질의 방사분해 산화물을 최소화하기 위하여 제한치 이하가 되도록 차폐설계 하여야 한다. 10CFR60.131(h) 항목에서 언급하고 있는 처분장에서의 핵임계 안전성도 매우 중요한 설계인자중의 하나이다.

이처럼 붕괴열, 방사능 및 핵임계는 안전성 측면에서 매우 중요하나, 이 인자들은 사용후핵연료의 연소도에 매우 종속적이므로 이 인자들을 타당성 있게 산출하기 위해서는 국내 사용후핵연료 발생량 및 연소도 분포 등의 현황을 정확히 파악하여야 한다. 처분시스템 개발 시 처분시나리오 및 시설의 용량을 정확히 산정하기 위해서도 현재 및 향후 발생될 사용후핵연료 현황을 정확히 추정하는 것이 필요하다. 1997년도에 국내 사용후핵연료현황을 파악하고 이로부터 대표 값을 갖는 기준사용후핵연료를 선정한 바 있으나[1], 그 이후로 많은 시간이 경과되어 사용후핵연료에 대한 자료가 많이 축적된 상태이므로 이를 보완할 필요성이 있다.

이에, 본 연구에서는 국내 사용후핵연료 현황을 새로이 파악하였으며, 기존에 선정한 기준 사용후핵연료의 타당성 및 향후 개선방안 등을 분석하였다.

## 2. 사용후핵연료 발생량

### 2.1. 국내 원전수급계획

국내에는 현재 가압경수로 14기와 중수로 4기가 운영중이며, 현재까지 정부에서 확정고시한 2015년까지의 제1차 전력수급기본계획[2]을 반영하면, 2008년부터 1,000MW급 원자로가 4기, 1,400MW급 원자로가 4기, 즉, 향후 2015년까지 올린 5,6호기를 포함하여 10기의 원전이 추가 건설될 예정으로 있어, 2013년에 폐로예정인 월성 1호기를 고려하면 2015년에는 총 27기의 원전이 가동될 예정이다.

### 2.2. 국내 사용후핵연료 발생량 추이

앞서 언급한 2015년까지의 전력수급기본계획을 근거로 사용후핵연료 연도별 발생량 및 누적량을 추정하였다. 2003년까지 발생한 사용후핵연료는 실제 발전소에 저장되어 있는 사용후핵연료 자료[3]를 근거로 산출하였으며, 현재 운영중인 원전에서 향후 발생될 사용후핵연료의 예상발생량은 예측을 통해 2055년까지 발생될 사용후핵연료의 추이를 파악하였다. 향후 건설되어 2008년부터 운영될 8기의 원자로는 PWR로 가정하였으며, 고리 1호기는 2018년에, 월성 1호기는 2013년에 폐로됨을 가정하였다. 그 외의 호기에 대해서는 운영기간을 40년으로 가정하였다. 1,000MW급 원전에 적용될 핵연료는 한국표준형연료(Korean Standard Fuel Assembly, KSFA)를 가정하였으며, 1,400MW급 차세대원자로의 사용후핵연료 발생량은 '차세대원자로 설계개발(II)'[4]에서 제시한 값을 사용하였다.

이와 같은 방법으로 산출된 사용후핵연료 발생량 추이는 그림 1 및 2와 같다. 처분시작 시점인 2040년 시점에서의 누적량은 PWR 17,400MTU 및 CANDU 14,800MTU 임을 볼 수 있으며, 다발 기준으로는 PWR 4만, CANDU 78만여 다발 정도임을 볼 수 있다. 총 처분물량인 2055년까지의 사용후핵연료 발생량은 PWR의 경우 20,500MTU, CANDU의 경우는 약 14,800MTU 정도인 것으로 나타났다. 이 값은 1997년에 추정된 값과 큰 차이가 없다.

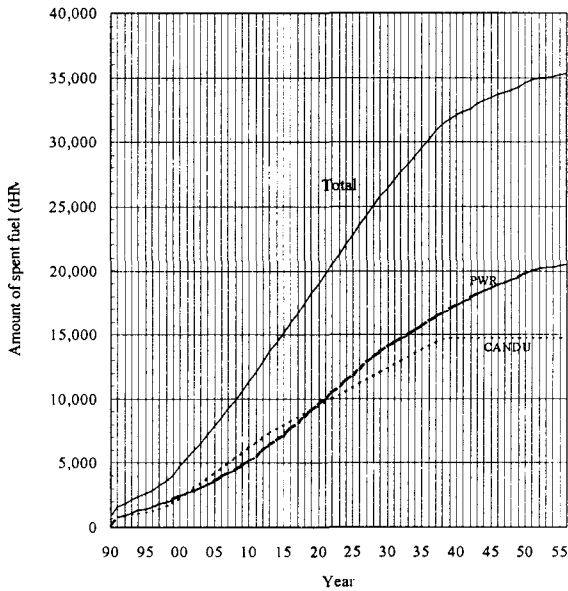


Fig. 1 Spent fuel arising from the existing reactors and the planned by 2015 during 40 years-lifetime, except for Kori #1 and Wolsung #1.

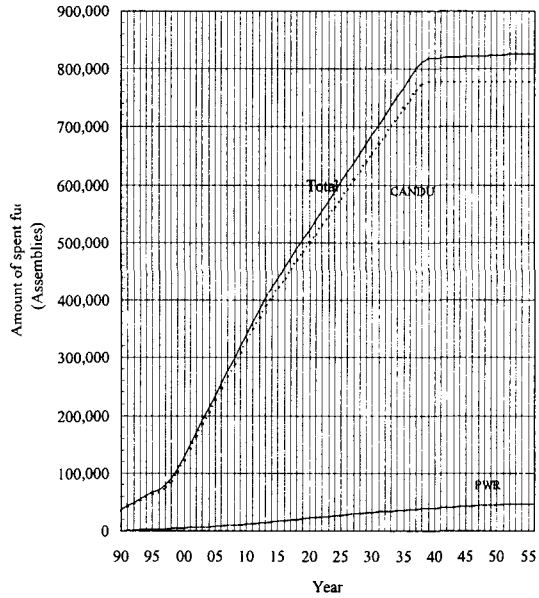


Fig. 2 Spent fuel arising from the existing reactors and the planned by 2015 during 40 years-lifetime, except for Kori #1 and Wolsung #1.

### 3. 사용후핵연료 특성

#### 3.1 국내 사용후핵연료의 물리학적 제원

사용후핵연료의 기하학적 구조, 크기, 무게, 냉각기간, 연소도, 방사선원, 붕괴열량, 방사성물질 농도 등은 심지층 처분시스템의 성능 및 안전성평가에 필요한 기본 입력자료이다. 그런데, 우리나라의 PWR 원전에 사용되는 핵연료의 종류 및 연소이력은 매우 다양하다. 따라서, 처분시스템을 설정하기 위해서는 이 다양한 특성을 갖는 모든 핵연료를 대표하는 기준 사용후핵연료를 타당하게 선정하는 것이 매우 중요하다.

우리나라에서 지금까지 사용된 사용후핵연료 제원을 보면, 14×14, 16×16 및 17×17 등의 세 가지 집합체 형태가 있다. 14×14는 현재 고리 1호기에 웨스팅하우스(이하, WH) 14×14 [19.7cm<sup>2</sup>×405.7cm] OFA(Optimized Fuel Assembly) 핵연료가 사용되고 있다. 16×16은 두 종류의 핵연료집합체가 현재 사용되고 있는데, 하나는, WH 표준형 연료[19.7cm<sup>2</sup>×405.8cm]로서 고리 2호기에 사용되고 있으며, 다른 하나는 한국표준형연료[20.7cm<sup>2</sup>×452.8cm](Korea Standard Fuel Assembly)로서 한국표준형 원전인 울진 3,4,5,6호기 및 영광 3,4,5,6호기에 현재 장전되고 있다. 현재 사용되고 있는 17×17 연료는 Vantage 5H[21.4×21.4cm<sup>2</sup>×405.8cm]로서 고리 3,4호기, 울진 1,2호기, 및 영광 1,2호기에 장전되고 있다. 17×17 연료가 KOFA(Korean Optimized Fuel Assembly)에서 Vantage 5H로 대체되면서 두드러진 변화는 고연소도 정책에 따라 농축도가 3.7~3.8w/o에서 4.1~4.2w/o 정도로 상향조정된 것이다. 지금까지 사용된 핵연료 집합체의 중

류는 10개이며, 캐니스터 바스켓은 모든 핵연료 집합체를 수용해야 하는데, 핵연료 집합체 단면적은 17×17 연료가 21.4×21.4cm<sup>2</sup>로 가장 크며, 축방향 길이는 16×16 KSFA 연료가 453cm로 다른 집합체에 비해 50cm 이상 큰 특징이 있다.

평균 방출연소도 48GWD/MTU를 목표로 개발된 Vantage 5H를 대체할 17×17 개량형핵연료는 평균 방출연소도가 55GWD/MTU 이상으로서 고연소도를 추구하였으며 열적성능은 현재 사용중인 Vantage 5H 연료에 비해 10% 이상 향상되었다. 이 연료는 약 2008년경에 상용원자로의 연료로 쓰일 예정이다. 한국표준형 원전에 사용되는 KSFA 핵연료 집합체를 대체할 16×16 개량형핵연료 역시 평균 방출연소도 55GWD/MTU 이상, 열적성능을 10% 이상 향상시켰으며, 2008년경에 장전될 예정이나 기존 핵연료와 비교하여 농축도 및 방출연소도를 제외한 물리학적 제원의 변화는 거의 없다.

표 1에는 지금까지 발생한 핵연료 종류별 발생량이 기재되어 있는데, 기존에 기준사용후핵연료로 선정한 17×17 핵연료가 약 60%를 차지하고 있으며, KSFA 핵연료가 약 30% 정도를 차지하고 있다. 그림 3에는 향후 발생될 핵연료를 예측한 것인데, KSFA의 다량 방출로 인해 17×17 핵연료가 감소하여 2012년 후부터는 16×16 핵연료가 17×17 핵연료에 비해 더 많이 발생하게 되고 최종적으로는 총 처분물량의 약 70% 정도 차지하게 된다. 따라서, 현재는 기준 사용후핵연료를 17×17 KOFA 핵연료로 선정하여 사용하고 있으나, 지금부터 KSFA의 물리학적 제원, 초기 농축도 및 방출연소도를 단계적으로 반영하면서 처분시스템의 개념을 설정하는 것이 바람직해 보이며, 약 5년 후부터는 기준핵연료로서 KSFA의 제원을 기준핵연료로 선정하는 것이 타당해 보인다. 여기서 각 핵연료 종류별 발생량 예측시 향후 건설될 원자로[4]의 핵연료는 16×16 KSFA 핵연료를 가정하였다.

Table 1. 원전별 방출핵연료의 종류 및 발생량

(단위:집합체)

핵연료 종류		고리1	고리2	고리3	고리4	영광1	영광2	영광3	영광4	울진1	울진2	울진3	울진4	합계
14×14	STD <sup>1)</sup>	386												386
	OFA <sup>2)</sup>	274												274
	KOFA <sup>3)</sup>	189												189
16×16	STD		639											639
	KOFA		292											292
	KSFA <sup>4)</sup>							460	378			242	242	1322
17×17	STD			157	149									306
	OFA			216	155	317	253							941
	FRAMA <sup>5)</sup>									200	153			353
	KOFA			182	223	345	233			284	357			1624
	V5H <sup>6)</sup>			306	221	244	251			205	184			1411
합계		849	931	861	748	906	737	460	378	689	694	242	242	7737

1):Westinghouse Standard, 2):Westinghouse Optimized Fuel Assembly, 3):Korean Optimized Fuel Assembly, 4):Korean Standard Fuel Assembly, 5):Framatome, 6):Vantage 5H

### 3.2 사용후핵연료의 연소도 분포

사용후핵연료 연소도 분포를 정확히 추정하는 것은 핵임계, 방사선차폐, 안전성 평가 측면에서 매우 중요하다. 그림 4는 현재까지의 사용후핵연료 발생량과 발생한 핵연료의 평균연소도를

나타내고 있는데, 그림에서 보듯이 연간 발생하는 사용후핵연료는 가동원자로의 증가와 더불어 꾸준히 증가하여 PWR의 경우 현재 연간 ~200MTU 정도가 발생하고 있다. 방출되는 핵연료의 평균연소도는 1980년대 중반에는 약 30GWD/MTU 정도이었으나, 80년대 말부터 핵연료의 평균농축도를 3.2→3.5→3.8w/o로 순차적으로 늘리면서 90년대 중반부터는 약 37GWD/MTU 정도에 이르다가, 90년대 중·후반부터 초기농축도가 4.1~4.2w/o인 Vantage 5H 핵연료가 장전되면서 2000년대 초반에는 방출되는 핵연료의 평균연소도가 약 40GWD/MTU 정도를 상회하고 있다. 방출핵연료의 최대 연소도 또한 90년대 후반에는 45GWD/MTU 정도이었으나, 2000년대 초반에는 55GWD/MTU 정도인 것으로 나타났다. 이 추세를 바탕으로 볼 때, 초기농축도가 4.5w/o인 KSFA의 핵연료가 본격적으로 방출되는 2000년대 중·후반부터는 평균연소도가 45GWD/MTU를 상회할 것으로 판단되며, 최대 방출연소도는 60GWD/MTU를 상회할 것으로 예측된다. 따라서, 2000년대 중·후반부터는 기준핵연료를 4.0w/o, 45GWD/MTU에서 단계적으로 4.5w/o, 55GWD/MTU에 가중치를 두어 처분시스템의 개념설정에 반영하는 것이 타당할 것으로 보인다.

그림 5에는 국내에서 1996년까지 발생한 자료를 바탕으로 1997년에 추정된 기준핵연료가 저연소도 방출핵연료의 적절하게 대표하고 있는지를 평가하기 위해 1997년 이후부터 발생한 사용후핵연료 전체를 대상으로 초기농축도와 연소도와의 관계를 도식화하였다. 그림에서 보듯이, 지금까지 발생한 사용후핵연료의 대부분은 1997년에 설정한 4.0w/o, 45GWD/MTU 이하 영역에 모두 위치하고 있어 1997년에 추정된 저연소도 사용후핵연료는 고연소도 핵연료가 본격적으로 방출되는 시점까지는 사용하는데 무리가 없어 보인다. 이 그림에는 고연소도인 4.5w/o 핵연료의 방출연소도도 함께 도식화되어 있는데, 이 역시 1997년에 산정한 4.5w/o, 55GWD/MTU 이하의 영역에 모두 포함되는 것으로 나타났다.

그림 5의 자료를 이용하여 1997년에 산정한 기준 사용후핵연료에 대한 예비 핵임계 해석결과[5]를 분석해 보면, 그림의 좌측 하부에 위치한 점선은 처분시스템이 최초 처분형태를 유지하고 감속제인 지하수가 포화되었을 때, 핵임계 안전성이 확보되는 농축도 및 연소도를 나타내는데, 그림에서 보듯이, 지금까지 발생한 사용후핵연료는 모두 이 선 위에 위치하므로 어떠한 핵연료를 처분하더라도 처분상태가 유지되고 물이 포화되는 조건에서의 핵임계 안전성은 확보되는 것으로 분석된다. 이처럼 본 연구를 통해 산출된 사용후핵연료의 현황은 핵임계, 방사선 차폐, 안전성 평가분야에 널리 활용될 것으로 기대된다.

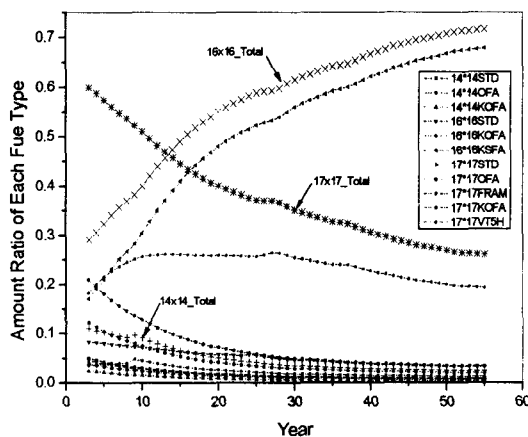


Fig. 3. 향후 사용후핵연료 종류별 발생량

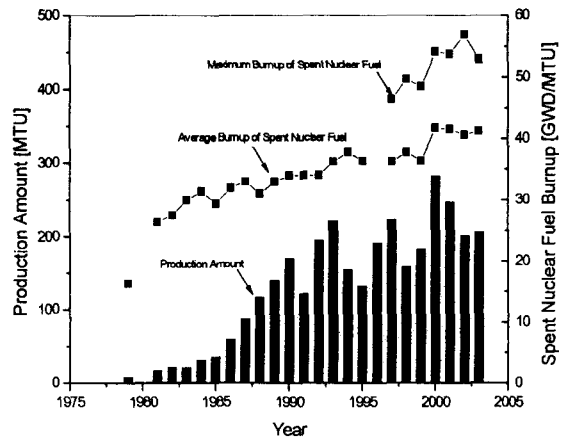


Fig. 4. 사용후핵연료 발생량과 연소도 변화 추이

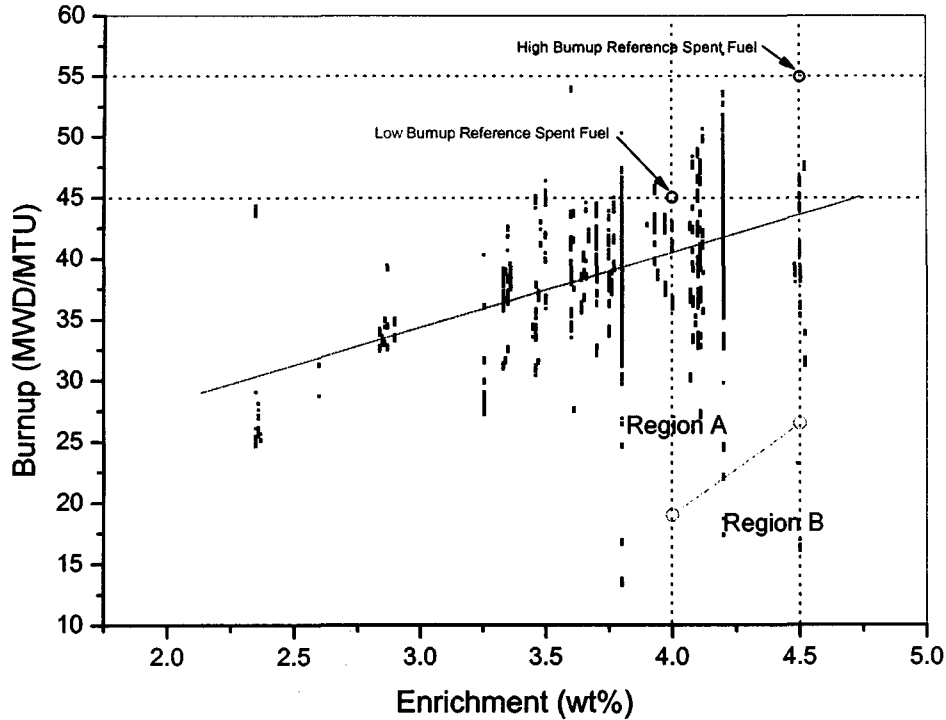


Fig. 5. 2003년까지 발생한 사용후핵연료의 초기농축도와 연소도 분포

#### 4. 결과요약 및 결론

처분시스템 설계를 위한 기초 자료로 사용되는 국내 사용후핵연료의 발생량 및 연소이력 현황을 파악하였다. 2055년까지 PWR 및 CANDU 사용후핵연료 발생량은 각각 20,500 및 14,800MTU로 나타났다. 17×17 핵연료 집합체의 사용후핵연료 발생량 비율은 2003년 기준으로 전체대비 60%를 점유하는 것으로 나타났으며, 2012년 이후부터는 16×16 KSFA 사용후핵연료 발생량이 급격히 증가하여 최종시점에서는 70% 정도를 점유할 것으로 보인다. 사용후핵연료의 평균연소도는 2000년대 초반에는 40GWD/MTU 정도이며, 2000년대 중 후반부터는 45GWD/MTU를 초과할 것으로 보인다. 따라서, 현재는 1997년에 선정한 제원을 기준 사용후핵연료 제원으로 사용하되 향후 5년 후를 기점으로 기준핵연료를 16×16 KSFA 4.5w/o, 55GWD/MTU로 반영하는 것이 타당해 보이며, 본 연구에서 도출된 사용후핵연료 현황은 방사선차폐, 책임계 및 안전성 평가 시 매우 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### Acknowledgements

본 연구는 과학기술부가 지원하는 원자력연구개발 중장기과제 중 “처분시스템개발” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

1. 최종원 외, "심지층 처분시스템 개념설정을 위한 기준 사용후핵연료 선정 및 특성 분석, KAERI/TR-914/97, 한국원자력연구소(1997).
2. "제1차 전력수급기본계획(2002~2015)," 산업자원부 공고 제2002-158호(2002).
3. "2002년도 방사선관리 연보." (주)한국수력원자력(2002).
4. 최영상 외, "차세대원자로 설계개발(II) : 초기노심 설계개발," MOCIE-044/98, 산업자원부 (1998).
5. 조동건 외, "사용후핵연료 처분시스템의 예비 핵임계 안전성 평가," 2004 춘계학술발표회논문집, 경주, 5월27일-5월28일(2004).