

다목적 동시측정 장치 개발에 의한 원자핵 구조 연구(I)*

- ^{76}As 의 감마 전이에 대한 전자기적 특성 -

정원모 · 정갑수 · 주관식* · 나상균** · 황한열***

연세대학교, 명지대학교*,
울산대학교**, 목원대학교***

요 약

홀수 핵종인 ^{76}As 의 핵 구조를 분광학적 방법으로 연구하기 위하여 ^{76}Se 의 전자 포획에 의하여 방출되는 감마선에 대해 단일 감마선 측정과 감마-감마 동시측정 실험을 하였다. 본 실험에서 구한 각 상관관계 계수는 $A_{22} = -0.452 \pm 0.017$, $A_{44} = 0$ 이고 279.5keV 전이 감마선에 대한 혼합비는 $\delta = -0.586 \pm 0.017$ 을 얻었다. 또한 낮은 준위에서의 에너지의 상대 강도를 정확히 측정된 후 이를 이용하여 환산 행렬 요소들을 계산한 후 단일 입자 모형의 관점에서 hindrance factor를 구했다. 그 결과 279.5 keV 감마 전이의 다중극도는 74.44%의 M1 전이와 25.56%의 E2 전이를 포함한 혼합 전이이며 5/2 준위의 밴드구조를 $f_{5/2}$ proton 준위에 바탕을 둔 1/2 [310]으로 결정하였다.

1. 서 론

핵구조에 관한 이론적 연구는 대체로 구형핵과 변형핵의 두 부분으로 나뉘어져 진행되고 있다. 구형핵 전반에 대해서는 이미 Kisslinger와 Sorensen[1]에 의해 잘 확립되어 있으나 변형핵에 있어서는 아직도 많은 난점이 남아 있다. 그리고 홀수 핵종인 경우는 Pairing이 안된 핵자가 핵을 변형시키고 대부분의 경우 core와 나머지 핵자와

의 상호작용이 홀수 핵의 구조에 결정적인 역할을 한다. 따라서 이론적인 면에서 변형핵과 홀수 핵종 사이의 상호 작용에 대해 많은 연구가 있어 왔다.

본 연구에서는 두 대의 HPGe 반도체 검출기를 사용해서 감마-감마 각 상관관계와 단일 감마선 측정 실험을 통해서 홀수 핵종인 ^{76}As 핵의 다중극도와 밴드 구조를 연구 하였다. 이 핵의 낮은 준위들은 실험적으로 잘 확립되어 있지만 279.5 keV의 5/2 준위가 어느 밴드에 속하는지 아직

* 본 연구는 한국학술진흥재단(91.10~92.9)의 연구비 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

명확하지 않기 때문에 단일 입자 모형의 관점에서 5/2 준위의 밴드 구조를 핵분광학적 방법으로 조사하였고, 279.5keV 전이의 전자기적 성질에 대해 연구하였다.

2. 실험

본 실험에서 사용한 시료는 반감기가 118.5일인 ⁷⁶Se이다. 이 방사선원은 한국 표준과학 연구원에서 제작되었고, 시료의 activity는 2.83 μCi이었다. 단일 감마선 측정과 감마-감마 동시 측정에는 ⁶⁰Co의 1.33MeV 감마선에 대해서 에너지 분해능이

각각 1.63keV와 1.75keV인 두 대의 HPGe 검출기를 사용하였다. 감마선의 세기 측정에 대한 검출기의 효율을 보정하기 위해서 ¹⁵²Eu, ¹⁵⁴Eu가 혼합된 calibration source SRM4275C, ¹²⁵Sb-¹²⁵Te, ²²Na, ⁶⁰Co, ¹³⁷Ba, ¹³⁷Cs, ¹⁵⁴Gd, ²¹⁴Pb, ²¹⁴Bi, ²²⁶Ra의 29개 감마선을 사용하였다. 이때 두 검출기의 상대 효율은 ⁶⁰Co의 1.33MeV 감마선에 대해서 10.22%와 10.19%이었다. 감마-감마 동시 측정에 대한 전자 장치 회로도 는 그림 1과 같다. 그림 2는 ⁷⁶Se이 전자 포획에 의해 ⁷⁶As로 감마 전이할때의 붕괴도이다. 검출기와 방사선원 사이의 거리는 5cm에서 25cm까지 변화시키면서 각각 3000초와 4000초씩

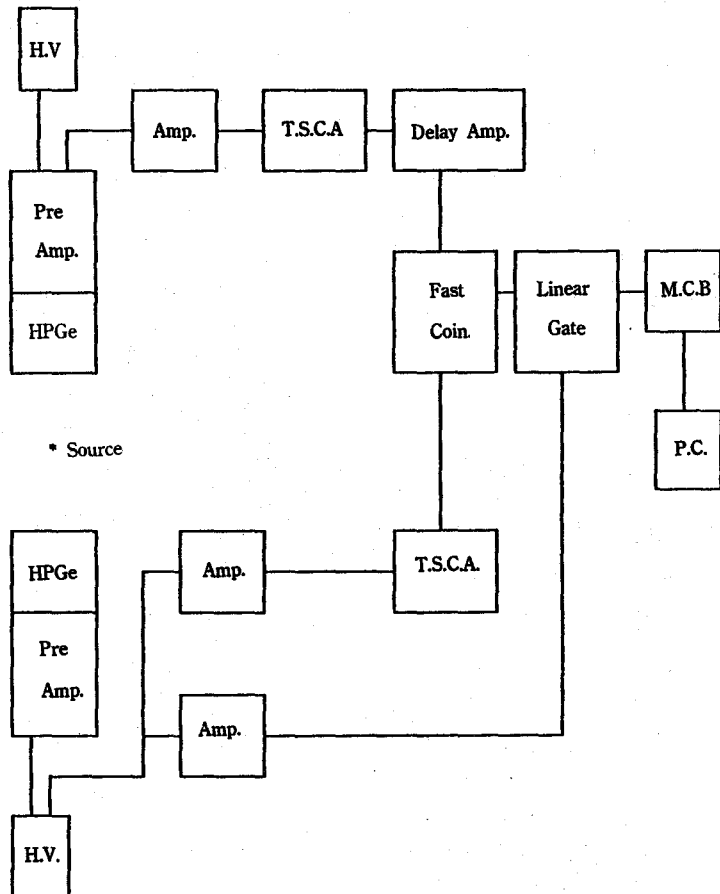


그림 1. 동시 측정 회로도

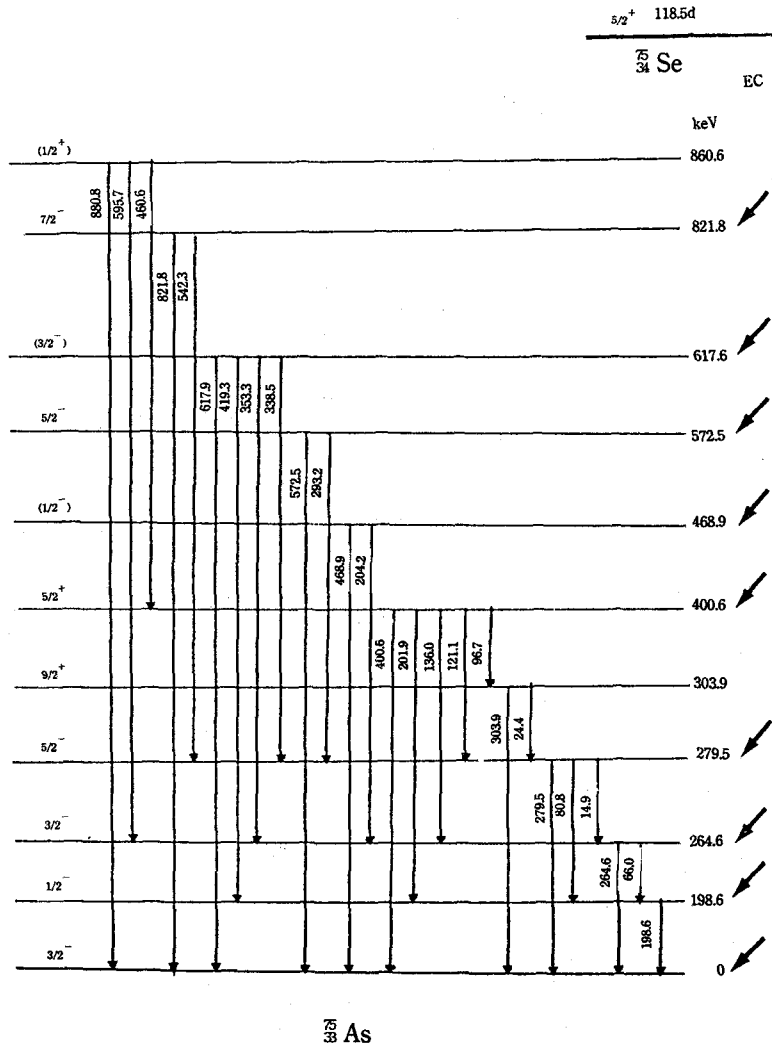


그림 2. ^{75}As 의 붕괴도

측정하였다. 그림 3은 이때 측정된 ^{75}As 의 단일 감마선 스펙트럼으로서 11개의 감마선을 측정 분석하였다. 감마선의 강도를 정확하게 분석하기 위해 Bias Amplifier를 사용하였고 Fast Coincidence와 Linear Gate의 분해시간을 각각 100nsec와 800nsec로 하였다. 279.5keV 감마선을 gate로 하여 121.1keV와 동시 측정되는 감마선을 분석

하였으며 이때 279.5keV 감마선을 측정하는 고정된 검출기에 대해 180° 에서 90° 까지 15° 간격으로 7개의 각도에서 각각 10,000초씩 동시 측정 실험을 하였다. Compton background의 효과는 거의 나타나지 않기 때문에 고려하지 않았으며 그림 4는 180° 에서의 동시 측정 스펙트럼이다.

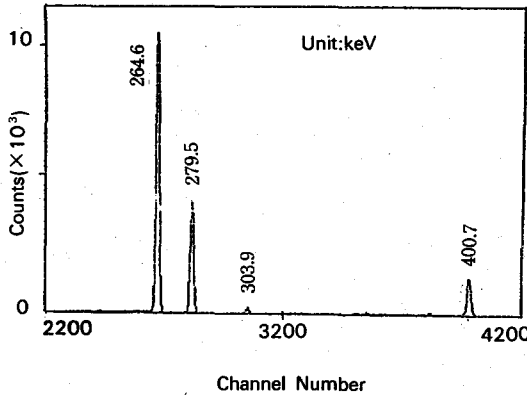
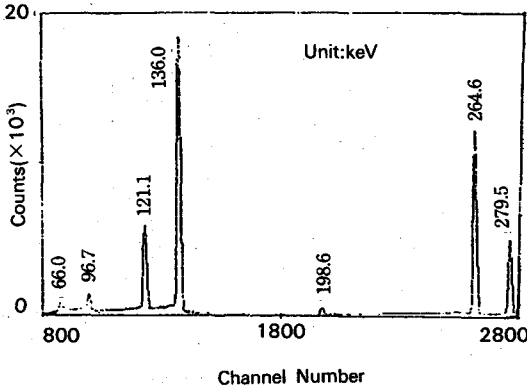


그림 3. ²¹⁵As의 단일 감마선 스펙트럼

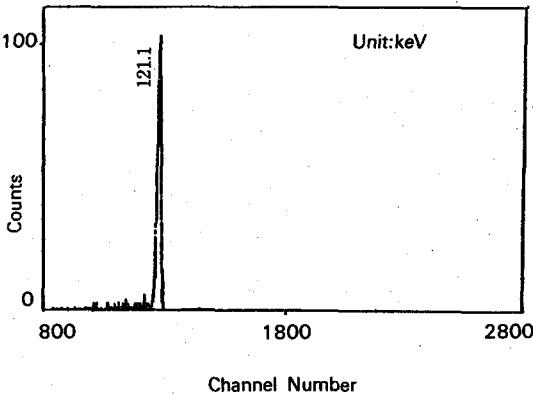


그림 4. 180°에서의 동시 측정 스펙트럼.

3. 결과 및 고찰

스핀 각운동량이 I_1, I_2 인 여기상태에서 두개의 감마선이 θ 의 각도로 동시에 방출될때 각 상관함수 $W(\theta)$ [2]는

$$W(\theta) = \sum_{k=\text{even}} A_{kk} P_k(\cos\theta)$$

이고 각 상관계수는 $A_{kk} = A_k(\gamma_1)A_k(\gamma_2)$ 이 된다. 여기서,

$$A_k(\gamma_1) = \frac{F_k(L_1 L_1' I_1 I_1') + (-1)^{L_1 - L_1'} 2\delta(\gamma_1) F_k(L_1 L_1' I_1 I_1') + \delta^2(\gamma_1) F_k(L_1 L_1' I_1 I_1')}{1 + \delta^2(\gamma_1)} \quad \dots(1)$$

$$A_k(\gamma_2) = \frac{F_k(L_2 L_2' I_2 I_2') + 2\delta(\gamma_2) F_k(L_2 L_2' I_2 I_2') + \delta^2(\gamma_2) F_k(L_2 L_2' I_2 I_2')}{1 + \delta^2(\gamma_2)} \quad \dots(2)$$

이고 첫번째 전이에 대한 phase factor는 $(-1)^{L_1 - L_1'}$ 이 되는데 이것은 [3] δ (Rose-Brink) = $(-1)^{L_1 - L_1'}$ δ (Krane-Steffen)으로서 여기서는 Krane-Steffen의 정의에 따랐으며 기하학적 인자 $F_k(LL' II')$ 는 Ref. 2에 나와 있다. 짝수 k 에 대한 선택율은 $0 < \text{even } k \leq \text{Min}(2I_2, 2L_1, 2L_2)$ 로 주어진다. 이때 혼합비에 대한 정의는

$$\delta = \frac{\langle I_j \parallel L_i' \parallel I_i \rangle}{\langle I_j \parallel L_i \parallel I_i \rangle} \quad \dots\dots\dots(3)$$

이다. 실험적으로 γ_2 가 순수 전이인 경우 γ_1 의 M1전이에 대한 E2 전이의 혼합비를 결정한다. 검출기의 기하학적인 보정 및 감쇠효과를 고려하여 최소 자승법을 이용한 fitting program "GAM"을 사용하여 본 실험에서 구한 각 상관계수는 $A_{22} = -0.452 \pm 0.017$ 이고 A_{44} 는 0이다. 이

것은 감마-감마 각 상관관계 실험을 통해서 얻은 다른 논문들의 A_{zz} 값[4~8] -0.404부터 -0.466 사이에서 잘 일치한다. 121.1keV 전이는 순수한 E2전이이므로 식(1)과 식(2)에서 두번째 전이 279.5 keV에 대한 혼합비 $\delta = -0.586 \pm 0.017$ 를 얻었다. 감마-감마 각 상관관계 실험[7], 내부전환전자 실험[7], 공명 산란 실험[7], 전자-감마 각 상관관계 실험[7], 핵 방위 측정 실험[7]을 통해서 얻은 혼합비들은 각각 -0.74, -0.51, -0.42, -0.51, -0.48로서 본 실험에서 얻은 혼합비와 오차 범위내에서 잘 일치한다.

279.5keV 감마 전이에 대한 다중극도는 본 실험에서 구한 혼합비를 이용하여 74.44%의 M1 전이와 25.56%의 E2 전이를 포함한 multipole admixture를 결정하였다.

단일 감마선 측정 실험을 통해 얻은 스펙트럼에서 264.6keV의 강도를 100으로 하였을 때 각각의 감마선에 대한 상대적인 강도를 표 1에, 그리고 상대 강도와 혼합비를 이용하여 구한 환산 행렬 요소들을 표 2에 각각 나타내었다. 이때 사용된 환산 행렬 요소들은 다음과 같다.

$$B(E1)_{\gamma K} = \frac{4.36 \times 10^{-9}}{E_{\gamma}^3} \frac{1}{T_{1/2}(Ii)} \frac{\lambda_K}{\sum_i (1+ai)\lambda_i} \frac{1}{(\delta_K^2 + 1)} \dots\dots(4)$$

$$B(E2)_{\gamma K} = \frac{56.596}{E_{\gamma}^5} \frac{1}{T_{1/2}(Ii)} \frac{\lambda_K}{\sum_i (1+ai)\lambda_i} \frac{\delta_K^2}{(\delta_K^2 + 1)} \dots\dots(5)$$

$$B(E3)_{\gamma K} = \frac{1.125 \times 10^{12}}{E_{\gamma}^7} \frac{1}{T_{1/2}(Ii)} \frac{\lambda_K}{\sum_i (1+ai)\lambda_i} \frac{\delta_K^2}{(\delta_K^2 + 1)} \dots\dots(6)$$

$$B(M1)_{\gamma K} = \frac{3.943 \times 10^5}{E_{\gamma}^3} \frac{1}{T_{1/2}(Ii)} \frac{\lambda_K}{\sum_i (1+ai)\lambda_i} \frac{1}{(\delta_K^2 + 1)} \dots\dots(7)$$

$$B(M2)_{\gamma K} = \frac{5.117 \times 10^5}{E_{\gamma}^5} \frac{1}{T_{1/2}(Ii)} \frac{\lambda_K}{\sum_i (1+ai)\lambda_i} \frac{\delta_K^2}{(\delta_K^2 + 1)} \dots\dots(8)$$

또한 단일 입자 모형에 의한 환산 전이 확률은

표 1. 감마선들의 에너지와 상대강도

E(keV)		Table of Isotopes [10]			Present work
24.4		0.05	0.04	0.06	0.05
66.0	1.90	1.87	1.72	1.50	1.75
80.8		0.02	0.02	0.01	0.02
96.7	5.40	5.70	5.12	5.44	5.33
121.1	27.40	29.80	27.70	26.70	30.90
136.0	93.10	100	95.00	95.90	96.00
198.6	2.44	2.54	2.38	2.59	2.37
264.6	100	100	100	100	100
279.5	42.90	42.20	42.20	42.10	42.50
303.9	2.27	2.23	2.19	2.19	2.64
400.6	20.00		20.40	18.00	19.50

다음과 같다.

$$B_w(E\lambda; j_1 \rightarrow j_2) = \frac{e^2}{4\pi} (2\lambda+1) \langle j_1, 1/2\lambda 0 | j_2, 1/2 \rangle^2 \langle j_2, 1 r^\lambda | j_1 \rangle^2 \quad \dots\dots(9)$$

Bsp(Mλ ; j₁→j₂)

$$= \left(\frac{eh^2}{2mc}\right) \left(g_+ - \frac{2}{\lambda+1} g_-\right)^2 \lambda^2 \frac{2\lambda+1}{4\pi} \langle j_1, 1/2\lambda 0 | j_2, 1/2 \rangle^2 \langle j_2, 1 r^{\lambda-1} | j_1 \rangle^2 \quad \dots\dots(10)$$

본 연구에서는 hindrance factor F(w)를 구하여 표 3에 비교 분석하였는데 여기서 F_w는[9]

$$F_w = \frac{B_{th}(\sigma L) \uparrow}{B_{exp}(\sigma L) \uparrow} = \frac{B_{th}(\sigma L) \downarrow}{B_{exp}(\sigma L) \downarrow} \quad \dots\dots(11)$$

로 주어진다.

표 3에 의하면 electric dipole 전이에 대해서는

표 2. Reduced Matrix Elements

E(keV)	B(E1) e ² b	B(M1) μ _N ²	B(E2) e ² b ²	B(M2) μ _N ² b	B(E3) e ² b ³
24.4				1.50 × 10 ⁻²	
66.0		9.84 × 10 ⁻²	1.00		
80.8			3.83 × 10 ⁻²		
96.7			1.43 × 10 ⁻¹		
121.1	3.13 × 10 ⁻⁷				
136.0	6.89 × 10 ⁻⁷				
198.6		7.80 × 10 ⁻²	5.53 × 10 ⁻²		
264.6		9.00 × 10 ⁻²			
279.5		8.89 × 10 ⁻³	1.32 × 10 ³		
303.9					6.53 × 10 ⁻⁵
400.6	5.70 × 10 ⁻⁹				

표 3. Hindrance Factor

E(keV)	B(E1)s.p B(E1)exp	B(M1)s.p B(M1)exp	B(E2)s.p B(E2)exp	B(m2)s.p B(M2)exp	B(E3)s.p B(E3)exp
24.4				19.58	
66.0		18.19	1.87 × 10 ⁻³		
80.8			4.90 × 10 ⁻²		
96.7			1.27 × 10 ⁻²		
121.1	3.77 × 10 ⁴				
136.0	1.72 × 10 ⁴				
198.6		229.7	3.40 × 10 ⁻²		
264.6		19.90			
279.5		201.5	1.43		
303.9					5.18
400.6	2.07 × 10 ⁶				

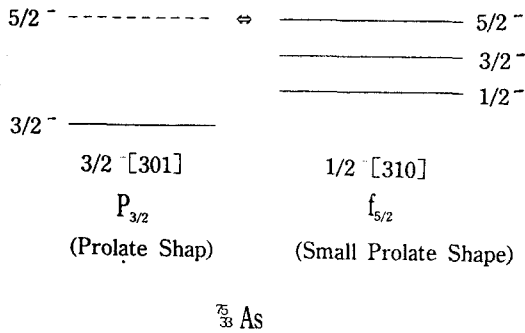


그림 5. 5/2⁻ 준위의 band 구조

$10^{-4} \sim 10^{-6}$ 의 매우 큰 억제된 전이를 보이고, magnetic dipole 전이와 magnetic quadrupole 전이, 그리고 electric octapole 전이에 대해서는 $10 \sim 10^2$ 정도의 비교적 큰 억제된 전이를 보이고 있다. 그러나 electric quadrupole 전이의 경우는 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 의 매우 작은 값을 보인다. 이것으로 볼 때 ^{75}As 의 낮은 준위에서는 E2 전이가 지배적인 것으로 생각된다. 그림 5는 단일 입자 모형으로 계산한 ^{75}As 의 낮은 준위들의 밴드 구조를 나타낸 것인데 그림에서 알 수 있듯이 5/2⁻ 준위가 3/2⁻ [310] 밴드의 준위나 1/2⁻ [301] 밴드의 준위로 전이하는지를 밝히는 것이 매우 중요하다. 표 3에서 279.5keV에 해당하는 hindrance factor는 1.43으로서 비교적 큰 값을 갖는데 이것은 66.0keV 전이는 3/2⁻ → 1/2⁻의 전이이고, 80.8keV 전이는 5/2⁻ → 1/2⁻의 전이인 반면 279.5keV 전이는 5/2⁻에서 ground state 3/2⁻의 전이를 의미한다.

따라서 5/2⁻ 준위는 기저 준위와는 다른 shell property를 갖고 first excited state, second excited state와 같은 밴드 구조를 갖는 것으로 결정하는 것이 타당하다고 생각된다.

4. 결 론

279.5keV 감마선을 gate로 하여 121.1~279.5keV 감마선에 대한 동시측정 실험을하여 각 상관계수 $A_{zz} = -0.452 \pm 0.017$ 과 혼합비 $\delta = -0.586 \pm 0.017$ 을 얻었다. 또한 279.5keV 전이 감마에 대한 다중극도를 74.44% M1+25.56% E2 전이로 결정하였다. 이 값은 다른 실험들과 비교할 때 비슷한 경향을 보이고 있으나, 분해능이 좋은 Ge(Li) 검출기를 이용한 감마-감마 각 상관관계 실험에 의해 보고된 값이 많지 않기 때문에 앞으로 더 많은 연구가 수행되어야 한다고 본다.

한편, ^{76}Se 의 전자 포획후에 감마 전이하는 ^{76}As 에 대해서 단일 감마선 측정 실험을 하여 낮은 준위에서의 에너지의 상대강도를 정확히 측정하였다. 이것을 이용하여 환산 행렬 요소들을 계산한 후 단일 입자 모형의 관점에서 hindrance factor F_w 를 구했다. 여기서 electric quadrupole 전이에 대한 F_w 가 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 정도의 매우 작은 값을 보이므로 ^{76}As 핵의 낮은 준위에서는 E2 전이가 지배적인 것으로 생각된다. 그러나 279.5keV 감마선에 대한 hindrance factor는 1.43으로서 비교적 큰 값을 가지고 있으므로 5/2⁻ 준위는 P_{3/2} proton 준위에 바탕을 둔 3/2⁻ [301] 밴드에 속하는 것이 아니라 f_{5/2} proton 준위에 바탕을 둔 1/2⁻ [310] 밴드 구조를 갖는 것이 타당하다고 생각된다.

참고 문헌

1. L.S. Kisslinger and R. A. Sorensen, Rev. Mod. Phys. **35**, 853 (1963).
2. K. Siegbahn, *Alpha-, Beta-, and Gamma-Ray Spectroscopy* (North Holland, Amsterdam, 1966) Vol. 2.
3. M.E. Rose Phys. Rev. **91**, 610 (1953).
4. A. W. Schardt and J.P. Welker, Phys. Rev. **99**, 810 (1955).

5. W.H. Kelly and M.L. Wiedenbeck, Phys. Rev. **102**, 1130 (1956).
6. K.H. Speidel et al. Nucl. Phys. **A115**, 421 (1968)
7. A.J. Becker and R.M. Steffen, Phys. Rev. **180**, 1043 (1969).
8. D.E. Raeside et al. Nucl. Phys. **A130**, 677 (1969).
9. A. Zilges et al. Z. Phys. **340**, 155 (1991).
10. C. Michael Lederer and Virginia S. Shirley, *Table of Isotopes*, John Wiley & Sone Inc., (1978).

A Study on the Nuclear Structure through the Multipurpose Coincidence Measurement System Development (I)

— The Electromagnetic Properties of the Gamma Transitions in ^{76}As —

Won-mo Chung · Kap-soo Chung · Koan-sik Joo*
Sang-kyun Na** · Han-yull Hwang***

*Yonsei University, Myungji University**
*Ulsan University**, Mokwon University****

ABSTRACT

The gamma-gamma coincidence measurements and angular correlation measurement associated with the electron capture of ^{76}Se have been carried to understand the structure for the odd nuclei ^{76}As with two HPGe detectors. As a result, we could determined the band structure of $5/2^-$ state to be of $1/2^- [310]$ band which is based on $f_{5/2}$ proton state. Also we obtained the multipole admixture in the state of 279.5 keV by using the mixing ratios of 121.1~279.5keV cascade. Subsequently, it is determined that 25.56% electric quadrupole transition is involved in the state of 279.5 keV.