

## 이중 탄성지지 주기관 모듈의 MIL-S-901D 중중량 충격시험 수치 시뮬레이션

권정일<sup>†\*</sup>, 이상갑<sup>\*</sup>, 정정훈<sup>\*\*</sup>

한국해양대학교 해양시스템공학부<sup>\*</sup>  
한국기계연구원 e-엔지니어링 센터<sup>\*\*</sup>

### Numerical Simulation of MIL-S-901D Heavy Weight Shock Test of a Double Resiliently Mounted Main Engine Module

Jeong-Il Kwon<sup>\*</sup>, Sang-Gab Lee<sup>\*</sup> and Jung-Hoon Chung<sup>\*\*</sup>

Korea Maritime University, Division of Ocean System Engineering<sup>\*</sup>  
Korea Institute of Machinery & Materials, e-Engineering Research Center<sup>\*\*</sup>

#### Abstract

Underwater explosion shock response analysis of a nonlinear double resiliently mounted equipment on a MIL-S-901D Large Floating Shock Platform(LFSP) was carried out using LS-DYNA3D/USA. As a nonlinear double resiliently mounted equipment, real main engine module of naval ship was considered, where the engine, bearing, and base frame including sound enclosure were treated as rigid bodies with six degrees of freedom. The nonlinear effects of resilient mounts on its shock response characteristics were examined, and the usefulness of our suggested method was also confirmed comparing with calculation results by the equipment maker.

※Keywords: Underwater explosion(수중폭발), Resilient mount(탄성 마운트), MIL-S-901D, Large floating shock platform(대형 중중량 충격시험기), LS-DYNA/USA

#### 1. 서론

함정의 전투 능력과 생존성의 측면에서 수중폭발 충격하중에 대하여 내충격 안전성을 확보하는

것이 필수적이다. 이를 위해서 함정의 전투 및 운항 성능에 필수적인 주요 탑재장비에 대해서는 원칙적으로 미국 해군의 탑재장비에 대한 충격시험 사양인 MIL-S-901D(1989)에서 규정하는 충격시험을 통하여 대상 장비의 내충격 안전성을 검증하여야 한다. 국내의 경우 MIL-S-901D에서 규정하는 중중량(heavy weight) 충격시험기가 없기 때문에 주기관(main engine)과 같은 중중량 장비의 충

접수일: 2005년 6월 27일, 승인일: 2005년 8월 10일

† 주저자, E-mail: jikweon@bada.hhu.ac.kr

Tel: 051-410-4934

격시험은 현재 불가능한 실정이다(정정훈 등 1996).

이러한 충격시험을 수행할 수 없는 장비에 대해서는 미국 해군의 탑재장비 내충격 설계검증을 위한 표준 해석방법인 DDAM(Dynamic Design Analysis Method) 해석을 널리 사용하고 있다. 하지만 DDAM 해석을 이용하여 탄성마운트에 의해 지지된 탑재장비의 내충격 안전성을 평가하기에는 몇 가지 문제점이 있다. 스펙트럴 해석 방법인 DDAM 해석은 대상 장비의 충격응답이 선형이고 탄성 한도 내에 있다는 가정 하에서 개발된 방법이다. 따라서 주기관과 같이 방진/방음/내충격을 위해 비선형 탄성마운트를 채용하는 탑재장비들에 적용하는 것은 원칙적으로 불가능하다. 이 경우 독일, 네덜란드 등의 NATO 회원국에서 주로 사용하는 시간영역에서의 충격응답 해석방법을 적용하는 것이 타당하리라 판단된다.

한편, 시간영역에서의 충격응답 해석을 위해서는 사전에 충격하중의 시간이력을 알아야 하는데, 이는 선진 외국에서는 군사상의 이유로 대부분 비밀로 취급하고 있으며, 한국 해군의 독자적인 하중자료가 현재로서는 없는 상태이기 때문에 이를 수행하는 것 역시 현실적으로 거의 불가능하다.

이러한 문제를 해결하기 위해서 저자들은 MIL-S-901D 중중량 충격시험 수치 시뮬레이션 방법을 제시하고, MIL-S-901D 중중량 충격시험기의 하나인 표준 중중량 충격시험기(Standard Floating Shock Platform, SFSP)에 탑재된 단일 탄성지지 장비시스템에 대한 수치계산을 통해 제시된 방법의 유용성을 검토한 바 있다(권정일 등 2001a, 2001b).

본 연구에서는 전술한 연구의 확장 연구로서 MIL-S-901D 중중량 충격시험기의 또 다른 하나인 LFSP에 탑재된 비선형 탄성마운트에 의해 이중 지지된 실제 함정 주기관 모듈에 대해 MIL-S-901D 중중량 충격시험에서 규정하는 수중 폭발 조건에 대한 충격응답해석을 수행하였다. 해석에 있어서는 수중폭발 충격응답 해석을 위해 현재 가장 널리 사용되고 있는 프로그램의 하나인 LS-DYAN3D/USA(Shin and DeRuntz 1996, 이상갑 등 2003, 정정훈 등 2000)을 사용하였다. 해석

결과를 대상 장비 제작사인 MTU사에서 계산한 결과(MTU 1994)와 비교하였다. MTU사에서는 독일 해군의 함정용 충격사양인 BV043(1985)에서 규정하는 시간영역에서의 충격응답 해석방법을 사용하였으며, 전술한 바와 같이 해석에 사용된 충격하중 시간이력은 비밀로 취급되어 입수할 수가 없기 때문에 해석 결과만을 기준으로 본 연구결과와의 유용성을 간접적으로 검토하였다.

## 2. MIL-S-901D 중중량 충격시험

중중량 충격시험은 시험 대상 장비의 중량이 60,000lb까지는 SFSP를 이용하고, 그 이상부터 400,000lb까지는 LFSP를 사용하여 실제 수중폭발 시험을 실시하도록 되어있다. 이하에는 본 연구의 대상 충격시험기인 LFSP에 대해서 간략히 소개한다. MIL-S-901D만으로는 LFSP에 대한 정확한 제원을 파악하기 어렵기 때문에 본 연구에서는 미국 해군연구소에서 사용한 LFSP를 사용하였다(Clements 1974).

본 연구에서 사용한 LFSP는 현재 MIL-S-901D에서 규정하고 있는 LFSP와는 크기와 보강재 개수가 다소 다르며, 그 크기는 길이 50ft 5in, 폭 30ft 2in이다. LFSP의 가장 큰 구조적 특징은 SFSP의 이중저 구조와는 달리 내저판이 없는 단일 선저구조로 되어 있으며, LFSP를 둘러싼 측판과 선저는 1.5in의 두께를 가진 고장력강(HTS)으로 되어 있다. 또한 시험대상 장비가 설치되는 선체 안쪽은 격자구조의 보강재가 길이 및 폭 방향으로 각각 6개와 11개 배치되어 있으며, 이들 보강재의 웹브와 플랜지의 두께는 각각 1in와 3in로 역시 고장력강으로 되어있다. 상부 높이 방향으로 SFSP와 같이 충격시험 중에 장비의 구성품이 이탈하여 물 속에 빠지지 않게 하고, 각종 기후 조건으로 인한 영향을 줄이기 위하여 캔버스(canvas) 등을 이용하여 반 원통형 구조(canopy)로 상부를 막고 있다.

Fig. 1은 LFSP의 조감도를 보여주고 있다. LFSP의 자체 중량은 약 500,000lb이며 이 경우 약 5ft 2in의 흘수를 갖는다. 시험대상 장비는 실선에 부착하듯이 LFSP에 설치하여 시험을 수행한

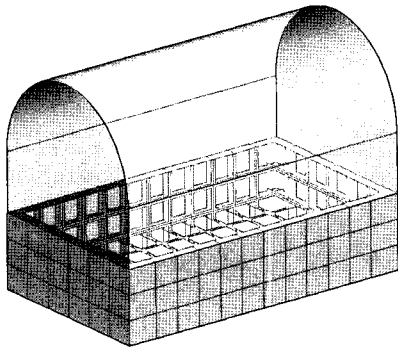


Fig. 1 Bird's eye view of MIL-S-901D LFSP

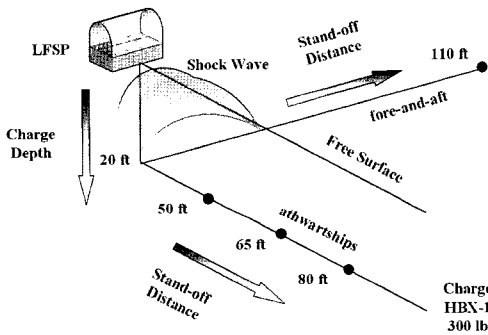


Fig. 2 UNDEX shot geometry of heavy weight shock test using LFSP

다. MIL-S-901D에서 규정하는 LFSP를 이용한 중중량 충격시험 조건 등은 Fig. 2에 나타내었다.

### 3. 충격응답해석 모델 및 방법

본 연구에서 고려중인 대상 장비는 한국 해군 함정에 탑재된 주기관 모듈(module)로써 Fig. 3에 보인 바와 같이 크게 주기관(body 2), Pedestal bearing(body 3)과 이들을 지지하기 위한 Base frame과 공기음을 차단하기 위한 Sound enclosure(body 1)의 3부분으로 구성되어 있으며, 9가지 종류의 총 72개의 비선형 탄성마운트 및 충격버퍼(shock buffer)에 의해 이중 탄성지지 되어 있다. 3개의 body들 간에 연결된 탄성마운트의 개수 및 종류를 Table 1에 정리하였으며, 대표적인 탄성마운트들의 비선형 하중-변위 곡선을

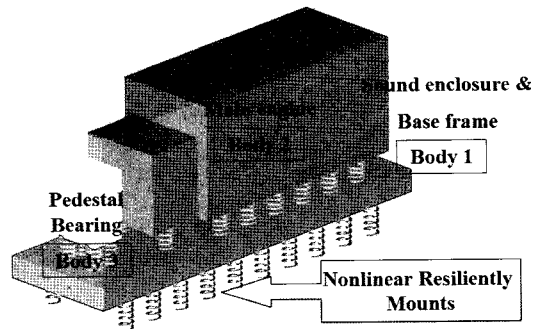


Fig. 3 M/E module for cruise propulsion unit of Korean naval ship

Table 1 List of mounts and connectivity between bodies

Resilient mounts		Connected body	
Number	Type		
20	Spring 1, 2	0	1
38	Spring 4, 5, 6	1	2
1	Spring 7	2	3
13	Spring 8, 9, 10	1	3

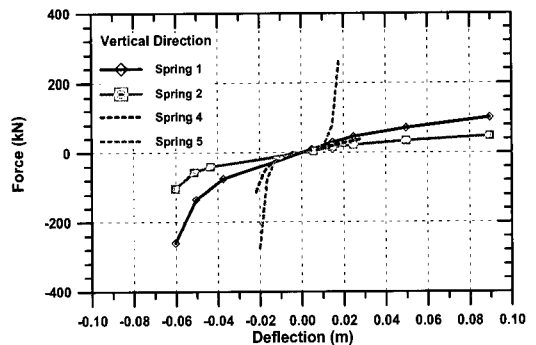


Fig. 4 Force-deflection curves of mounts

Fig. 4에 나타내었다.

LS-DYNA3D를 이용한 이중 탄성지지 장비시스템의 충격응답해석을 위해서 장비의 강성이 탄성마운트에 비해 훨씬 크다는 것을 고려하여 각 body들을 6자유도를 갖는 강체로 가정하였다. 탄

성마운트들의 설치위치를 고려하기 위해 Fig. 5와 같이 3차원 강체 블록으로 모델링 하였다. 대상 장비의 관성 특성치를 Table 2에 정리하였다.

이상의 모델링 방법의 정확도를 검증하기 위해 LS/DYNA3D를 이용한 해석 결과를 한국기계연구원에서 개발한 탄성지지 장비시스템 해석 프로그램인 NLDA-REMSYS(정정훈 등 1996)을 이용한 해석 결과와 비교하였다. 이를 위해 Fig. 6에 나타난 바와 같이 직사각형 펄스가 수직방향(z)으로 지지부(base)에 작용하는 경우를 고려하였다.

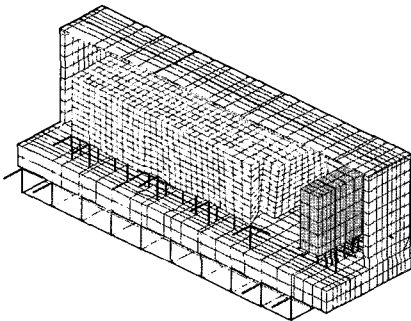


Fig. 5 Finite element model of M/E module

Table 2 Inertia properties of M/E module

body	m(kg)	$J_x(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	$J_y(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	$J_z(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$
1	20,279.00	98,870.00	34,408.00	92,882.00
2	21,680.00	4,1413.00	9,783.00	38,871.00
3	1,063.00	212.00	64.64	202.07

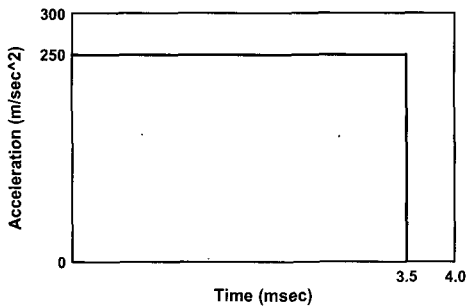
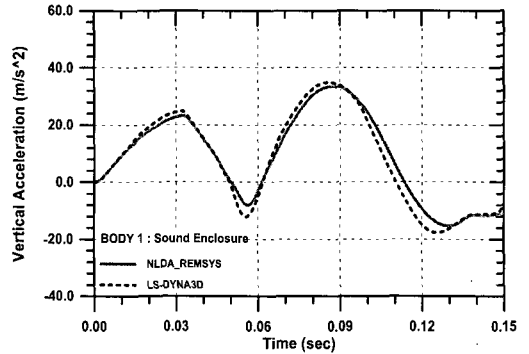
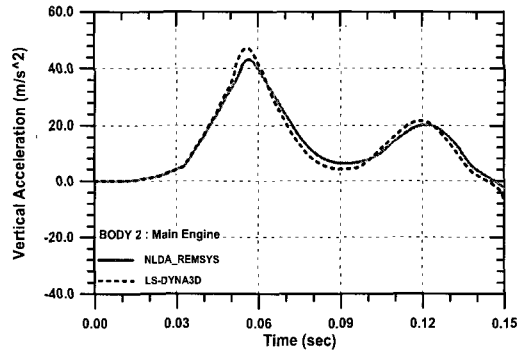


Fig. 6 Time history of base shock

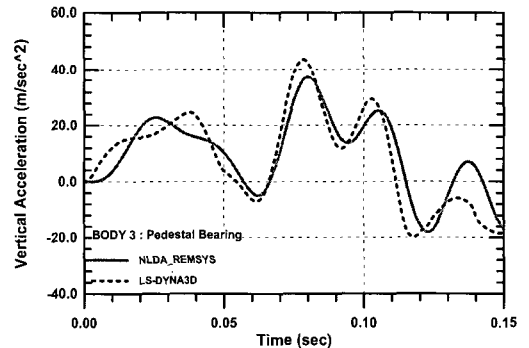
Fig. 7에는 LS/DYNA3D를 이용하여 계산된 body 1~3의 수직방향 절대가속도의 시간이력을 NLDA-REMSYS의 결과와 함께 나타내었다. 이들 그림에서 알 수 있듯이 두 결과의 부합성이 매우 양호하다는 것을 알 수 있다.



(a) body 1



(b) body 2



(c) body 3

Fig. 7 Absolute vertical accelerations of each body's center of gravity

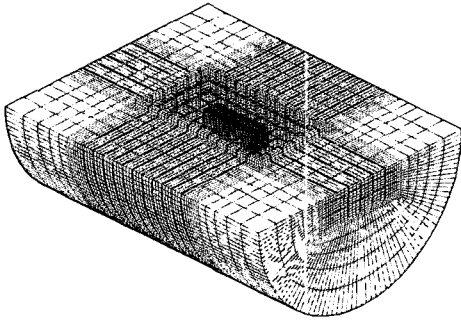


Fig. 8 Finite element model of M/E module, LFSP and surrounding fluids

한편, LFSP와 같은 부유구조물의 수중폭발 충격응답해석에 있어서는 충격파의 전파 시 자유수면과 접수구조표면에서의 인장반사파(rarefaction wave)로 인하여 발생하는 광역 케비테이션(bulk cavitation)과 선각 케비테이션(hull cavitation)의 영향을 고려하여야 한다(이상갑 등 2003). 이를 위해 본 연구에서는 Fig. 8에 보인 바와 같이 LFSP 뿐만 아니라 주변 유체를 포함하여 3차원 유한요소 모델링을 하였다. 3차원 유한요소 모델의 전체 절점수(node)는 73,120개, LFSP의 모델에 판(shell)요소 11,574개, 주변유체의 모델링을 위해 음향(acoustic)체적요소 56,872개, 그리고 유체 모델링에서 제외된 기타 유체영역의 영향을 고려하기 위한 DAA 경계(Doubly Asymptotic Approximation boundary segment)요소 7,628개를 사용하였다. 저자들은 이러한 모델링 방법에 따라 LS-DYNA/USA를 사용한 중중량 충격시험 수치 시뮬레이션의 유용성을 선행연구(권정일 등 2001a, 2001b)를 통해 확인하였다.

4. 충격응답해석 결과 및 고찰

충격응답해석을 위한 수중폭발 조건으로서 Fig. 2와 같이 LFSP 측면 50ft(직하 20ft)에서 폭발하는 것이 탑재장비에 응답이 가장 크게 발생하는 폭발조건이므로 본 연구에서는 이 조건을 선택하였다. 수중폭발에 의한 충격압력 분포의 한 예를 Fig. 9에, LFSP의 선저 중앙에서 계산된 수직방향 속도와 가속도의 시간이력은 Fig. 10에 나타내었

다. Fig. 10(a)의 속도 시간이력은 미국 해군연구소의 시험결과(Clements 1974)와 매우 유사함을 확인하였으며, 최대 충격가속도는 수백 g(중력 가속도)의 상당히 큰 응답을 보여주고 있다는 것을 알 수 있었다.

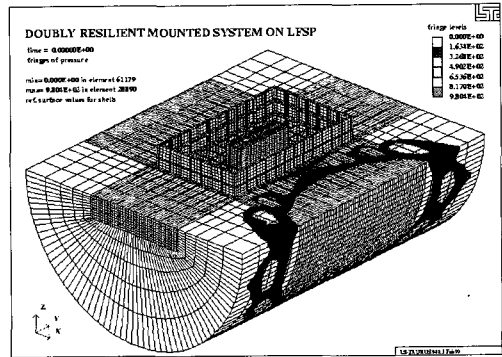
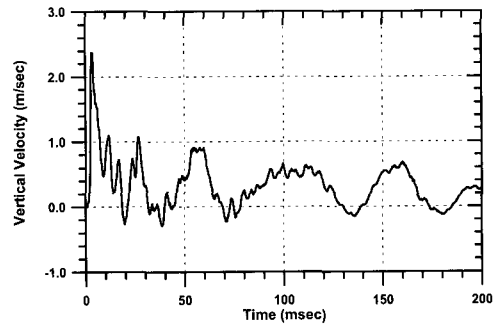
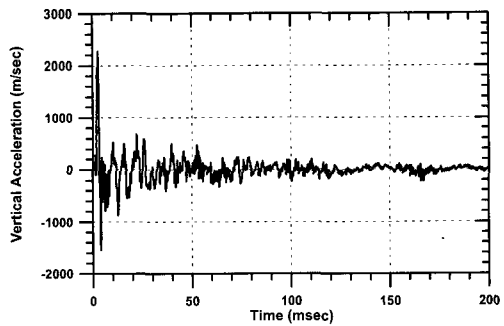


Fig. 9 Propagation of shock wave around LFSP



(a) vertical velocity



(b) vertical acceleration

Fig. 10 Time history of absolute vertical velocity and acceleration of the LFSP

한편, 탄성마운트에 발생하는 수직방향 상대변위와 각 body의 무게중심에 발생하는 수직방향 절대가속도의 시간이력을 Figs. 11과 12에 각각 나타내었다. 이들 그림에서 알 수 있듯이 탄성마운트들에 의해 충격하중의 고주파 성분이 사라지며, 탄성마운트의 에너지 흡수를 통해 장비에 작용하는 충격가속도는 LFSP의 충격가속도의 대략 1/10으로 감소함을 알 수 있었다.

각 body들의 무게중심에 작용하는 최대가속도 값은 MTU(1994)사의 연구 결과와 매우 유사한 값을 가지는 것을 확인 할 수 있었다. 이로부터 본 연구에서 제시한 해석방법을 대상 장비와 같은 탄성지지 장비시스템의 내충격 안전성 평가에 유용하게 활용할 수 있으리라 판단된다.

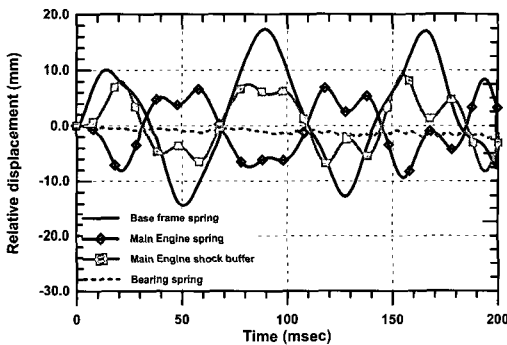


Fig. 11 Relative vertical displacements of the mounts

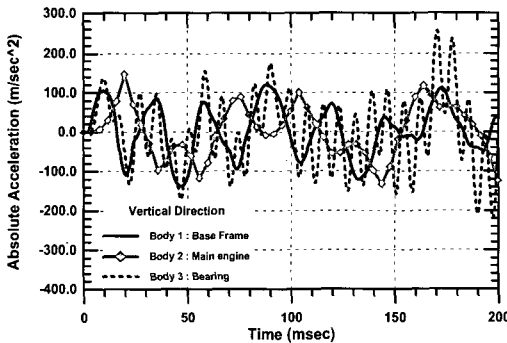


Fig. 12 Absolute vertical accelerations of each body's center of gravity

### 5. 결론

본 연구에서는 LS-DYNA/USA를 사용하여 이중 탄성지지 함정 주기관 모듈의 MIL-S-901D 중중량 충격시험 수치시뮬레이션을 수행하고, 장비 제작사에서 수행한 충격해석 결과와의 비교를 통해 그 유용성을 확인하였다.

본 연구에서 제시한 해석방법은 탄성마운트 지지 장비시스템의 내충격 안전성 평가뿐만 아니라 전선(whole ship) 충격응답 해석에 있어서 선체구조-발침대-장비의 연성효과를 고려할 수 있는 모델링에 폭 넓게 활용될 수 있으리라 판단된다.

### 참 고 문 헌

- 권정일, 이상갑, 정정훈, 2001a, "LS-DYNA3D를 이용한 탄성지지 장비시스템의 충격응답해석," 대한조선학회 선박해양구조연구회 추계학술대회논문집, pp. 1-5.
- 권정일, 이상갑, 정정훈, 2001b, "MIL-S-901D 부유식 충격시험기의 충격응답해석," 한국소음진동학회 추계학술대회논문집, 2권, pp. 761-765.
- 이상갑, 권정일, 정정훈, 2003, "캐비테이션을 고려한 부유구조물의 3차원 수중폭발 충격응답 해석," 대한조선학회 논문집, 제 40권, 제 6호, pp.1-11.
- 정정훈, 김병현, 정태영, 1996, "함정용 탑재 장비의 내충격 성능평가 기술," 대한조선학회지, 제 33권, 제 2호, pp. 41-48.
- 정정훈, 김병현, 조민현 1996, "다물체/비선형 탄성마운트 계의 충격응답해석," 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 408-412.
- 정정훈, 허영철, 김병현, 2000, "LS-DYNA/USA를 이용한 부유구조물의 수중폭발 충격응답 해석," 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 341-344.
- BV043, 1985, "Building Specifications for Ships of the Federal Armed Forces: Shock Resistance," Building Specifications for Ships of the Federal Armed Forces
- Clements, E.W., 1974, Characteristics of the Navy Large Floating Shock Platform, Naval Research Laboratory Report No. 7761.

- MIL-STD-901D, 1989, "Shock Tests, H.I. (High Impact) Shipboard Machinery, Equipment, and Systems, Requirements for", Military Specification.
- MTU Friedrichshafen, 1994, "Caclulation Report for the CPU of the KDX-frigates", Gosemaker.
- Shin, Y.S. and DeRunts, J.A., 1996, USA/LS-DYNA3D Software Training Course, Vol. V.



< 권 정 일 >



< 이 상 갑 >



< 정 정 훈 >